

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 【一般公開】社会を変えるワイドギャップ半導体の現状と将来

[7p-N101-1~10] 【一般公開】社会を変えるワイドギャップ半導体の現状と将来

[7p-N101-1]

オープニング・開催趣旨説明

○山口 敦史¹ (1.金沢工大)

[7p-N101-2]

サステナブルエレクトロニクス構築のための窒化物半導体社会実装

○天野 浩¹ (1.名大IMaSS)

[7p-N101-3]

AlGaN巨大分極電荷による新規電気伝導制御

○竹内 哲也¹、岩谷 素顕¹、上山 智¹ (1.名城大理工)

[7p-N101-4]

ダイヤモンド量子センサの可能性

○波多野 睦子¹、酒井 忠司¹ (1.科学大工)

[7p-N101-5]

窒化物半導体系光デバイスの最新動向

○向井 孝志¹ (1.日亜化学)

[7p-N101-6]

脱炭素社会実現に貢献するSiC半導体の現在と将来

○木本 恒暢¹、金子 光顕¹ (1.京大工)

[7p-N101-7]

SiC半導体信頼性確保のための欠陥エンジニアリング

○加藤 正史¹、原田 俊太²、坂根 仁³ (1.名工大、2.名大、3.住重アテックス)

[7p-N101-8]

酸化ガリウムデバイスの現状と可能性

○東脇 正高^{1,2} (1.大阪公立大院工、2.情通機構)

[7p-N101-9]

電動車用SiCパワー半導体の開発動向とカーボンニュートラル

○金村 高司¹ (1.ミライズ)

[7p-N101-10]

クロージング

○大島 武¹ (1.量研)

サステイナブルエレクトロニクス構築のための窒化物半導体社会実装

Sustainable Electronics and the Acceleration of Social Implementation of Nitrides

名大 IMaSS ○天野 浩

IMaSS, Nagoya Univ.

E-mail: amano@nagoya-u.jp

窒化ガリウム(GaN)系青色 LED を用いた白色電球の社会実装は、持続可能な照明の普及につながった。GaN の応用は発光デバイスに留まらない。パワーデバイスや RF デバイスへの展開は、消費するエレクトロニクスから持続可能エレクトロニクスへの変革をもたらす。パワーデバイスとして、既に Si 基板上の高電子移動度トランジスタは実用化されており、PC やスマートフォン用小型・軽量 AC アダプタをよく目にするようになった。期待される用途は、このような小電力システムにとどまらない。高チャネル移動度を生かした縦型 GaN デバイスを用いることで、次世代データセンター用高压 DC 電源、EV 用高速充電器やモーター駆動用インバーター、バリアブル再生可能エネルギーと電力網を繋ぐインバーターなど、10KW を超える応用が広がる。現状最も大きな課題はデバイス製造コストである。例えば GaN 基板を用いる場合、その価格は現状では Si 基板に比べて 3 桁も高い。最近、我々は底面からのレーザースライスによる GaN 基板リサイクル技術を確認した。また、デバイス構造のエピタキシャル成長やデバイス作製のプロセスコストの低減も重要である。従来、デバイス構造の成長には有機金属化合物気相成長法が用いられてきた。有機金属化合物原料は金属からの製造過程でコストアップが避けられない。金属を炉内で塩化水素と反応させるハロゲン輸送気相エピタキシャル成長法を確認することで、デバイスエピウェハ製造時のランニングコストを 7 分の 1 以下に低減できる。高耐压パワーデバイスの作製には面内 pn 接合構造が必要になる。従来はエピタキシャル再成長が一般的であり、トータルコストアップの懸念がある。我々は、Si デバイス作製で一般的な Mg イオン注入技術の確立を目指している。GaN はイオン注入によるダメージが大きく、回復は容易でない。従来は 1300℃以上の高温で 1GPa までの超高压高温アニールが行われていた。最近では 1 気圧アニールと Mg メタルコンタクトプロセスの組み合わせで、Si デバイス製造と互換性のあるプロセスでの縦型デバイス製造が出来つつある。GaN ウエハサイズは Si に比べ 40~50 年遅れている。そのため、中古の Si デバイス製造装置を GaN on GaN パワーデバイス製造用に再利用することで、初期投資を抑えコストダウンが可能である。本講演では、GaN on GaN パワーデバイス製造の低コスト化に向けた我々の取り組みを紹介する。

AlGaN 巨大分極電荷による新規電気伝導制御

Novel electrical conductivity control with large polarization charges in AlGaN

名城大理工 ○竹内 哲也、岩谷 素顕、上山 智

Meijo Univ., Dep. Mat. Sci. & Eng., °T. Takeuchi, M. Iwaya, and S. Kamiyama

E-mail: take@meijo-u.ac.jp

1989 年の青色 LED 実現には、低温堆積緩衝層による高品質 GaN 薄膜[1]に、Mg 添加および低速電子線照射処理を行った p-GaN[2]が大きな役割を果たした。30 年以上経過した現在、深紫外発光素子実用化に向けて、再び p 型化という課題が存在する。5 eV 以上のワイドギャップ p-AlGaN が必要であるが、GaN における Mg のイオン化エネルギー (~ 100 meV) に対し、AlN では少なくとも 300 meV 以上とされており[3]、このままでは室温における正孔生成が困難な状況である。

このような状況下、AlGaN で顕著な自発分極を利用した、分極ドーピングという新規手法が 2010 年に提案、実証された[4]。層厚方向組成傾斜による 3 次元分布分極電荷に正孔を蓄積させる手法である。現在では、深紫外 LED やレーザーダイオードに欠かせない技術となっている。分極は室温で電荷を有するため、上述した、不純物ドーピングにおけるイオン化エネルギーの限界を原理的に回避できるはずである。ここで、これまでに分極ドーピングの原理の解釈として、以下の二つが存在すると我々は理解している。

(1) Mg 添加必須：添加された Mg のイオン化を分極「電場」が促進、正孔が生成 [4,5]

(2) Mg 添加不必要：電荷中性条件を満たすために、分極「電荷」に正孔が蓄積 [6]

例えば、AlN 上ワイドギャップ組成傾斜 AlGaN 層を眺めると、Mg 添加を併用した分極ドーピングの場合のみに、ホール測定による正孔実証が報告されるに留まっている。結果として、上記(1)の Mg 添加が必須で、分極「電場」が重要であることをサポートする状況であった。

我々のグループでは、2013 年より、(2)の電荷中性条件、すなわち分極「電荷」が本質であるという立場で検証を継続してきた。その結果、ごく最近、コンタクト層などの最適化もあり、AlN 上ワイドギャップ組成傾斜 AlGaN 層であっても、Mg 添加しない分極ドーピングのみで、 1×10^{18} cm⁻³ を超える正孔濃度がホール測定で得られ始めている。本発表では、ワイドギャップ AlGaN における分極ドーピングの概要を述べた後、我々のグループで得られた結果を紹介する。

謝辞：本研究の一部は、科研費基盤研究 S (23H05460)、環境省「革新的な省 CO2 型環境衛生技術等の実用化加速のための実証事業」の成果です。

参考文献：[1] H. Amano et al., *Appl. Phys. Lett.* 48, 353 (1986). [2] H. Amano et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 28, L2112 (1989). [3] R. Ishii et al., *Phys. Rev. B* 108, 035205 (2023). [4] J. Simon et al., *Science* 327, 30 (2010). [5] S. Rathkanthiwar et al., *Appl. Phys. Lett.* 122, 152105 (2023). [6] T. Yasuda et al., *Appl. Phys. Express* 10, 025502 (2017).

ダイヤモンド量子センサの可能性

Diamond Semiconductors for Quantum Sensing

科学大工¹ ○波多野 睦子¹, 酒井 忠司¹

Science Tokyo¹ ○Mutsuko Hatano¹, Tadashi Sakai¹

E-mail: hatano.m.ea28@m.isct.ac.jp

ダイヤモンド、SiC、hBN などのワイドバンドギャップ半導体中の複合欠陥に起因する電子スピンを量子ビットとして活用する量子センサは、エネルギーエレクトロニクス的高度計測、生体信号の高感度計測、さらには宇宙・深海といった極限環境での応用が期待できる。中でもダイヤモンド中の窒素－空孔(NV)センタは、広い温度領域で安定に量子状態を保持、優れたダイナミックレンジ、温度と磁場などエネルギーと情報のマルチモーダル計測能力、などの特長を有する。このため応用範囲は幅広く、ナノスケールの局所測定からマクロスケールの産業応用に至るまで、磁場・温度・電場・圧力の高精度センシングにおいて、急速に研究開発が進展している。

本講演では、ダイヤモンド量子センサの物理的特徴、性能と安定性の鍵となる材料と量子計測のコア技術について説明する。さらに、ダイヤモンド量子センサの特性を活かした応用として、細胞や生体の計測、電池・パワーエレクトロニクスなどの高精度モニタリング技術を中心に、プロトタイプと共に紹介する (Figure 1) [1-6]。 [1] Y. Hatano *et al.*, Sci. Rep. 12, 13991(2022). [2] A. Arai *et al.*, Commun. Phys. 5, 200 (2022).

[3] T. Iwasaki *et al.*, ACS Nano (2017). [4] B. Yang *et al.*, Phys. Rev. Applied 14, 044049 (2020). [5] R. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. Applied 19 044089 (2023). [6] N. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. Applied 21, 064010 (2024).

[謝辞] 本研究は、(AIST)、(QST)、(NIMS)、京大、東大、日立製作所、信越化学、住友電工、矢崎総業との共同研究の成果です。本研究は文科省 Q-leap プログラム JPMXS0118067395 により行われました。

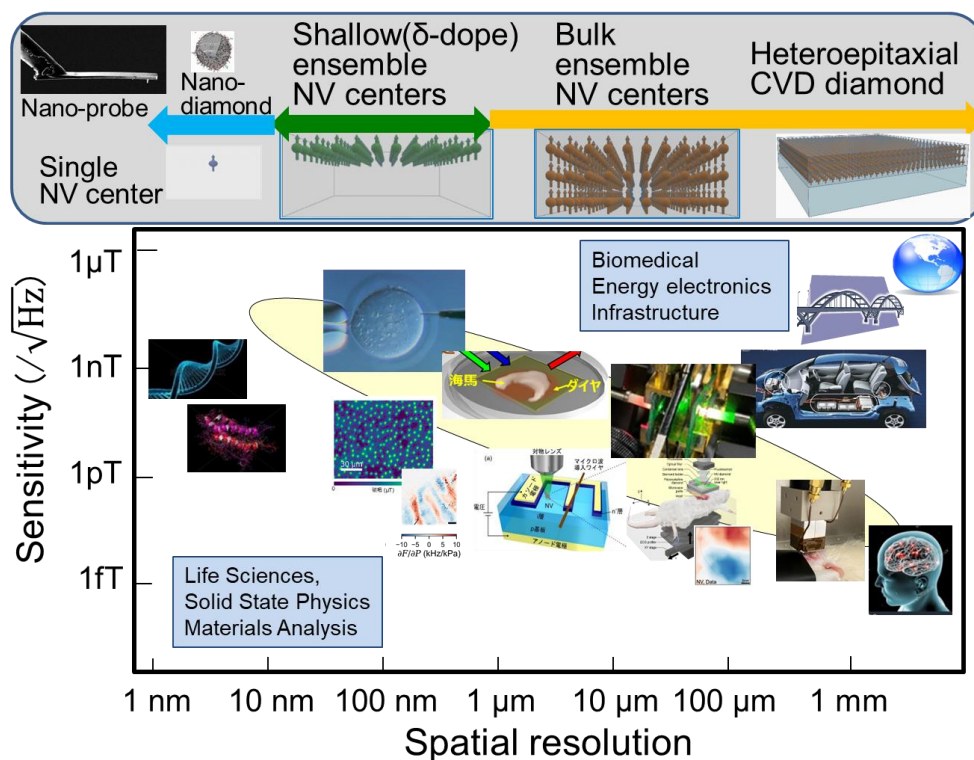


Fig.1 Scalable Applications on Diamond Quantum Sensors

窒化物半導体系光デバイスの最新動向

Recent Progress of Lasers in Nitride-Based Semiconductors

日亜化学工業株式会社 向井 孝志

Nichia Corporation, Takashi Mukai

E-mail: takashi.mukai@nichia.co.jp

1993年に青色LEDが実用化されて以来、Blu-ray用の青紫色レーザーの実現に向けてGaN系半導体レーザーの研究が盛んに行われていた。1995年にGaN系半導体のレーザーダイオードによる電流注入レーザー発振が報告された。当初は、寿命が数秒程度で、出力も数mW程度であった。GaN基板の実現やエピ構造およびデバイスプロセスの進展に伴い、出力と寿命がともに改善され、Blu-ray™の光源として実用化された。

その後、レーザーの研究開発は青紫色から青色、緑色といった可視光の領域へと移っていった。488nm LDを用いたフローサイトメーター用光源や、青および緑色W級LD光源を用いたプロジェクター、青色と蛍光体を組み合わせた高輝度白色光源を用いたレーザーヘッドライトなどが製品化され、これらは現在すでに大きな市場を形成している。可視光半導体レーザー光源と相性の良いHUD、ウェアラブルディスプレイ、加工用特殊照明などのアプリケーション開発が進んでおり、レーザー市場のさらなる拡大が期待されている。

近年では、上記の端面発光型だけでなく面発光型のレーザーダイオードの研究も盛んに行われている。面発光型のレーザーダイオードには主に2種類ある。一つは東京工業大学の伊賀教授によって発明されたVertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)であり、もう一つは京都大学の野田教授によって発明されたPhotonic Crystal Surface Emitting Laser (PCSEL)である。我々は、現在、GaN系半導体によるVCSELおよびPCSELの研究開発に取り組んでいる。VCSELは主にVR/ARなどの小型で低出力の分野、PCSELは加工用途のような大出力レーザーの分野での応用が期待されている。いずれのレーザーも、縦横シングルの高品質なレーザー光の生成が可能であり、GaN系半導体レーザーダイオードの新たな分野への応用が広がるものと期待される。

当日の発表では、端面発光レーザーの開発の歴史について紹介した後、面発光レーザー(VCSEL、PCSEL)に関する我々の最近の研究成果について報告する予定である。

脱炭素社会実現に貢献する SiC 半導体の現在と将来

Progress and Future Perspective of SiC Semiconductor toward the Decarbonized Society

京大工, °木本 恒暢, 金子 光顕

Kyoto Univ., °Tsunenobu Kimoto and Mitsuaki Kaneko

E-mail: kimoto@kuee.kyoto-u.ac.jp

【はじめに】近年の SiC 半導体の結晶およびデバイス技術の進展により, SiC パワーデバイス (MOSFET, ショットキー障壁ダイオード) の実用化が急速に進展し, 各種機器で顕著な省エネ効果が示されている. SiC パワー半導体産業が急激に拡大する一方で, 依然として学術的に重要な課題が山積している. また, SiC 半導体をパワー半導体以外の応用に適用するための基礎研究も活況を呈している. 本講演では, SiC パワーデバイスの進展を概説した後, SiC 半導体の将来展望と課題について述べる.

【SiC 結晶の研究開発】土台となる SiC ウェハは大口径化と高品質化が進み, 200 mm 径の単結晶 SiC(0001)ウェハが広く市販されるようになった. この数年で転位欠陥が大幅に低減され, 200 mm 径ウェハにおいて貫通転位密度の合計が 800 cm^{-2} 以下, 基底面転位密度が 200 cm^{-2} 以下のウェハが標準品として入手できる. また, ガス法が著しい進展を遂げ, 高品質インゴットを高速で成長できることが報告された. ウェハ加工のスループット向上が課題として残っている. エピタキシャル成長についても長足の進歩があり, 成長プロセスの改善やウェハ加工品質の向上により, デバイスの初期不良を引き起こすキラ欠陥密度は標準品でも 1 cm^{-2} を十分下回っており, 100 A 級のデバイスを良好な歩留まりで製造できるようになった. 今後, 6.5~15 kV 級デバイスを 200 mm 径ウェハで製造する際, 低濃度ドーパ厚膜エピウェハの応力制御が課題になると予測される.

【SiC パワーデバイスの研究開発】600~3,300 V 級の SiC パワー MOSFET とショットキー障壁ダイオードの本格的実用化が進んだ. しかしながら SiC パワー MOSFET に関しては, 性能と信頼性の両面で課題が多い. 例えば, 市場の大きい 600~1,200 V 級 MOSFET では, 依然としてチャネル抵抗の影響が大きく, SiC 本来のポテンシャルを発揮できていない. ゲート酸化膜と SiC の界面近傍に存在する高密度の欠陥については, 実験および理論計算により精力的な研究が継続されているものの, ミクロな欠陥構造の同定には至っていない. 近年 SiC の熱酸化によって界面だけでなく SiC バルク側(界面の極近傍)にも高密度欠陥が生成することが示された. これを解決する一つの手法は酸化抑制プロセスであり, 界面欠陥密度の低減と移動度向上が達成されている. また, 反転層中の電子移動度を制限する最大の要因が界面の固定電荷であることが示唆され, この影響を低減するためにフィン FET が提案されて顕著な移動度の向上が達成された. また, ドリフト抵抗をさらに低減するために, SiC においても超接合構造の形成が試みられ, 超高性能パワー MOSFET が報告されている. 一方, 信頼性に関しては, バイポーラ劣化, 負バイアス印加時のしきい値電圧変動, および短絡耐量が課題となり, 様々な改善策が検討されている. バイポーラ劣化に関しては, 積層欠陥拡大の臨界条件が示され, 基底面転位の大幅な低減とドリフト層直下に再結合促進層を導入することにより大幅な改善が達成された. 最近ではプロトン照射によるバイポーラ劣化抑制も報告されている. 負バイアス印加時のしきい値電圧変動と短絡耐量に関しては徐々に改善されているが, 抜本的な解決策は提示されていない. また, 超高耐压デバイスで魅力的な SiC IGBT に関しては, 20~27 kV 級の素子が実証されたものの, 厚膜エピタキシャル成長層の欠陥制御やキャリア寿命, デバイス構造の設計など取り組むべき課題が多い.

【SiC の新規応用】SiC パワーデバイス技術が大きく進展したので, 近年は電力用途以外の分野に適用する動きが活発化している. その代表例が Si では原理的に安定動作や素子寿命に大きな制限がある高温動作集積回路や耐放射線集積回路である. SiC JFET, CMOS を用いた基本回路が 500°C を越える温度での動作が実証されているものの, 電極を含めた信頼性に関する研究はまだ限定的である. 一方, 耐放射線特性については Si 素子に対する明確な優位性が示され, 原子力発電所や宇宙での利用が期待されている. さらに, SiC 結晶中の特定の点欠陥(Si 空孔など)が特異な量子的発光(単一光子源)を示すことが明らかになり, これを活用した高感度磁気センサや量子通信への応用が期待されている.

本研究に貢献いただいた歴代の研究室メンバーの方々, および共同研究者の皆様に感謝いたします.

SiC 半導体信頼性確保のための欠陥エンジニアリング

Defect Engineering for Ensuring Reliability of SiC Semiconductors

名工大¹, 名大², 住重アテックス³ °加藤 正史¹, 原田 俊太², 坂根 仁³

NITech¹, Nagoya Univ.², SHI-ATEX Co., Ltd.³, °Masashi Kato¹, Shunta Harada², Hitoshi Sakane³

E-mail: kato.masashi@nitech.ac.jp

シリコンカーバイド(SiC)の結晶は、新幹線車両の省エネルギー化や電気自動車の航続距離向上などを導く半導体素子となる、比較的新しい材料である。ただし結晶とはいっても、SiC の場合は完全な結晶を得ることは難しく、部分的に原子の整列がずれた転位や積層欠陥という欠陥を含むものが使われている。一方でこの転位や積層欠陥が、半導体としての動作に悪影響を及ぼす。特に積層欠陥は SiC 半導体動作中に徐々に拡張して、累積的な性能劣化を引き起こす。そのため SiC 半導体は、例えば自動車でよく言われるような 10 年 10 万キロというような、長期間動作を保証する信頼性確立が困難であった。ゆえにこれまでの SiC 半導体の技術開発において、この積層欠陥の拡張を防ぐための取り組みが長い間なされてきた。

我々は高エネルギーイオン注入という技術により、SiC 結晶に水素などのイオンをぶつけ、点欠陥という転位や積層欠陥よりも小さい原子サイズの欠陥を導入してきた。そして近年、この点欠陥の存在が積層欠陥の拡張を抑制することを見出した。Fig. 1 に一例としてイオン注入されていないものと、ヘリウムイオンが注入された SiC ダイオードの信頼性試験後のエレクトロルミネッセンス像を示す¹⁾。この像で暗い領域が拡張した積層欠陥 (Expanded 1SSFs) に該当するが、Fig. 1(a)のイオン注入されていないものからは積層欠陥が複数観測される一方、Fig. 1(b)のイオン注入されたものからは観測されない。またイオン注入後の熱処理などにより、導入される点欠陥の密度を制御することで、イオン注入は SiC 半導体の動作にも悪影響を与えないことも見出した。これらの結果は、高エネルギーイオン注入は SiC 半導体の性能を保ちながら、積層欠陥の拡張を抑え、長期間の信頼性を確保できることを示している。この技術は、小さな点欠陥の導入がより大きな欠陥である積層欠陥を抑制するという、新たな欠陥エンジニアリング技術とも言え、今後の SiC 半導体の低コスト化とそれに伴う普及、社会の省エネルギー化につながるものだと考えている。

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (事業番号 JPNP20004) の補助を受けた。

1) T. Li et al., Appl. Phys. Express **17**, 086503 (2024).

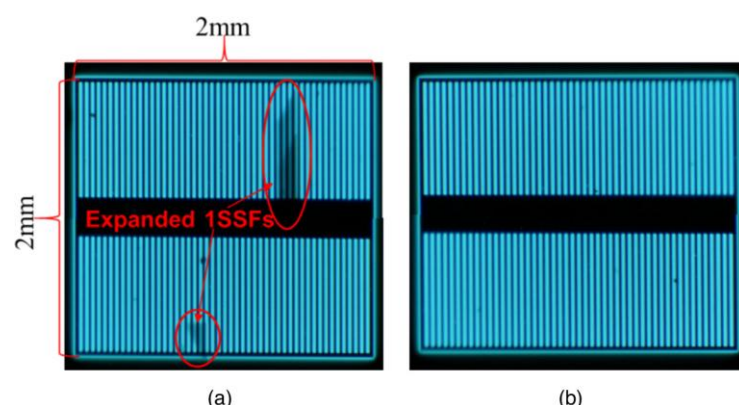


Fig. 1. Electroluminescence images for from SiC diodes (a) without He ion implantation, and (b) with He ion implantation after a reliability test. The dark regions in (a) indicate stacking faults (1SSFs) expanded by the reliability test.¹⁾

酸化ガリウムデバイスの現状と可能性

Current Status and Potential of Gallium Oxide Devices

大阪公立大院工¹, 情通機構² °東脇 正高^{1,2}

Osaka Metropolitan Univ.¹, NICT² °Masataka Higashiwaki^{1,2}

E-mail: higashiwaki@omu.ac.jp

酸化ガリウム (Ga_2O_3) デバイスは、その 4.5 eV 以上と非常に大きなバンドギャップに基づく物性から、Si デバイスは元より、代表的なワイドバンドギャップ半導体である SiC, GaN デバイスをも上回るデバイス性能（高耐圧、低損失、高い環境耐性など）を達成しうるポテンシャルを有する。また、融液成長バルクから大型高品質ウェハを製造可能であることもコスト面での強みである。ただ、半導体材料としての Ga_2O_3 研究は 70 年を超える長い歴史があるにも関わらず、その存在自体が半導体デバイス研究者や技術者から長く注目されてこなかったため、 Ga_2O_3 デバイスは SiC, GaN デバイスに遅れをとっている。しかしながら、世界的な研究開発の盛り上がりにより、この 10 年で Ga_2O_3 デバイス開発は急速に進展してきた。

現状 Ga_2O_3 トランジスタ、ダイオード開発は、主にパワースイッチング用途での実用を目指して実施されている。 Ga_2O_3 基盤要素技術のいくつかは既に確立され、企業への技術移転、そして移転した技術を元にした製品化・実用化に向けたデバイス本格開発に移っていく段階にある。しかしながら、現状は依然として大学や国立研究機関といった学術機関による研究開発が世界的にも主流であり、学術界の活発な状況とは裏腹に、企業における実用化・産業化に向けた本格的な開発はまだ始まっていない。

本シンポジウム講演では、 Ga_2O_3 基礎物性、結晶成長技術、デバイス研究開発に関する過去および最新の成果を紹介する [1]。合わせて、 Ga_2O_3 デバイスに関する国内外の動向についても言及する。

本講演で紹介する研究成果の一部は、総務省 ICT 重点技術の研究開発プロジェクト (JPMI00316) 「次世代省エネ型デバイス関連技術の開発・実証事業（第一期、第二期）（環境省連携事業）」の委託を受け実施したものである。

[1] M. Higashiwaki, IEEE Electron Devices Magazine **2**, 42 (2024).

電動車用 SiC パワー半導体の開発動向とカーボンニュートラル Trends of SiC Power Semiconductor for Electric Vehicles and Carbon Neutrality

(株) ミライズテクノロジーズ °金村 高司

MIRISE Technologies Corporation, °Takashi Kanemura

E-mail: takashi.kanemura.j4y@mirise-techs.com

【要旨】

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、自動車の電動化に対する要望は強く、BEV（電気自動車）、PHEV（プラグインハイブリッド電気自動車）、FCEV（燃料電池自動車）などの電動車の普及が急速に進んでいる。これら電動車の駆動システムは、主にモータ、インバータ、電池から構成されており、その高効率化は、電費、燃費向上に直結する重要な開発項目である。例えば、インバータにおいては、これまで Si パワー半導体がいわれてきたが、より低損失な動作が可能な SiC パワー半導体の適用が期待され、既に一部の電動車で使われ始めている^{[1] [2]}。今後、SiC パワー半導体は、車載分野を中心に年平均 20%を超える成長率で市場拡大すると予測されているが^[3]、残された最大の課題は低コスト化である。SiC 素子コストの半分程度をウエハコストが占めており、歩留まりも低い^[4]ことから、低コスト化には、低コストかつ高品質なウエハ製造技術が不可欠であり、また素子性能向上によるチップサイズ低減も有効である。

講演では、自社における SiC パワー半導体の開発事例、特に、低コスト・高品質なウエハ製造技術である SiC ガス成長法^[5]を中心に、素子性能向上の取り組みなどをカーボンニュートラルの観点も絡めて紹介する。

参考文献

- [1] <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/5725437>
- [2] <https://www.denso.com/jp/ja/news/newsroom/2020/20201210-01/>
- [3] Power SiC 2025-Markets and Applications, Yole Group, May 2025
- [4] Report by SystemPlus Consulting, The Applied Power Electronics Conference(APEC2021)
- [5] T. Okamoto et al., “Development of 150-mm 4H-SiC Substrates Using a High-Temperature Chemical Vapor Deposition Method”, ICSCRM2019, Vol.1004, p.14-19, to be published in Mater. Sci. Forum in 2020.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】才能が芽吹く大学入試へ：日本の科学技術と大学教育のこれから

【8p-N101-1~9】【一般公開】才能が芽吹く大学入試へ：日本の科学技術と大学教育のこれから

[8p-N101-1]

開会挨拶

○木本 恒暢^{1,2} (1.京大工、2.応用物理学会)

[8p-N101-2]

趣旨説明

○玉田 薫¹ (1.九大先導研)

[8p-N101-3]

今後の科学技術人材政策の方向性

○奥 篤史¹ (1.文部科学省)

[8p-N101-4]

VUCA時代の応用物理学会

○波多野 睦子¹ (1.科学大工)

[8p-N101-5]

次世代イノベーション人材育成に向けた名古屋大学の取組

○杉山 直¹ (1.名大)

[8p-N101-6]

多様な才能が開花する入試と教育に向けて

○大野 英男¹ (1.東北大)

[8p-N101-7]

多様性が産む研究と教育の進化：東工大の挑戦と展望

○益 一哉^{1,2} (1.Science Tokyo、2.G-QuAT 産総研)

[8p-N101-8]

質疑応答とパネルディスカッション

○関谷 毅¹ (1.阪大産研)

[8p-N101-9]

閉会挨拶

○安達 千波矢^{1,2} (1.応用物理学会副会長、2.九州大学)

趣旨説明

Symposium Objectives

九大先導研¹ ○玉田 薫¹

IMCE Kyushu Uni. ¹°Kaoru Tamada¹

E-mail: tamada@ms.ifoc.kyushu-u.ac.jp

急速に変化する社会において、次世代の科学技術・イノベーションを牽引する多様な人材の育成は、日本の持続的な発展における最重要課題の一つです。この課題に対し、現在、関係省庁、大学、産業界が一体となりさまざまな施策が検討されています。特に大学では、入試制度や高等教育の在り方を見直す多様な改革が進められています。

日本学術会議 総合工学委員会「未来社会と応用物理分科会」ならびに「応用物理学会」が主催となり開催する本シンポジウムでは、応用物理学会が描く次世代の科学技術・イノベーション人材像と、現在進められている教育・制度改革や政策との「接点」を探るべく、文部科学省・内閣府等関係省庁の関係者、応用物理学会員・日本学術会議会員（連携会員）であり且つ大学学長経験者である講師の先生方、学術講演会開催地である名古屋大学総長をお招きし、それぞれの視点で、改革に込めたビジョンと実現への道のり、残された課題についてお話を伺います。

そして、応用物理学会会長を交えた対話を通じて、半導体技術を軸に、プラズマ、結晶工学、スピントロニクス、有機分子・バイオデバイス、ナノカーボン等、幅広い分野で日本の科学技術を支えるべく活動を進める本学会が目指すべき人材育成とは何かについて掘り下げていきます。シンポジウムを通じて、日本の教育制度の可能性をさらに広げ、未来のイノベーションを支える人材育成の新たな地平を切り拓く場とすることを目指します。

本シンポジウムは公開（無料）で開催され、学会員以外の方の参加も可能です。多くの皆様のご参加を期待しています。

今後の科学技術人材政策の方向性

Policy for Science and Technology Human Resources

文部科学省 奥 篤史

Atsushi Oku, MEXT

Atsushi-oku@mext.go.jp

近年、産業競争力の強化や地球規模の課題解決、総合的な安全保障等の観点から、科学技術やイノベーションに関する国家間の競争が一層激しさを増しています。我が国においても、科学技術・イノベーションこそが国の存立・発展の礎との認識の下、「科学技術・イノベーション基本計画」や、関連する各種の戦略等に基づき、関係府省やアカデミア・産業界と連携・協力しつつ、科学技術・イノベーション政策を強力に推進しています。

同政策には、研究開発や産学連携、国際協力など様々な取組が含まれますが、こうした科学技術・イノベーションに関わる幅広い活動を支える中核的な基盤は「科学技術人材（研究者・技術者のみならず、科学技術に関わる多様な人材を含む）」であり、科学技術・イノベーション政策体系全体を俯瞰した上で、科学技術人材に関する取組を体系的・総合的に検討・推進していくことが重要です。

こうした観点から、文部科学省 科学技術・学術審議会 人材委員会においては、昨年10月以降、今後の科学技術人材政策の在り方について議論を進めており、今般、中間的な取りまとめを行いました。ここでは、基本方針として、①科学技術人材に対する投資の抜本的拡充、②科学技術人材の多様な場・機会での活躍拡大、③科学技術人材を支える組織・機関の役割の重視、の3つを掲げ、これらに基づき、科学技術人材政策を次の3つの柱で整理した上で、具体的な取組・方向性を提示しています。

1. 多様な科学技術人材の育成・活躍促進

- ・ 研究者の育成・活躍促進に向けた研究費の充実や安定ポストの確保、活躍機会拡大や環境整備等
- ・ 技術者や大学等における技術職員、研究開発マネジメント人材をはじめとする高度専門人材の育成・確保等

2. 各教育段階における科学技術人材の育成

- ・ 初等中等教育から高等教育まで、学校教育段階に応じた多様な人材の育成等
- ・ 博士後期課程学生への支援や、理工系に進む児童生徒の拡大、科学技術コミュニケーション活動の展開等

3. 科学技術人材に関わる制度・システム改革の推進

- ・ 科学技術人材の活躍促進に向けた社会制度やシステム・規制等の改革、科学技術人材を支える組織・機関等の機能強化・改革等

今回、「今後の科学技術人材政策の方向性（中間まとめ）」を基に、基本的考え方や、今後の方向性、具体的な取組内容等について、ご紹介をさせていただきます。

VUCA 時代の応用物理学会

The Japan Society of Applied Physics in the Era of VUCA

科学大工¹ ○波多野 睦子¹

Science Tokyo¹ °Mutsuko Hatano¹

E-mail: hatano.m.ea28@m.isct.ac.jp

VUCA(変動性、不確実性、複雑性、曖昧性)が一層強まる現代において、社会課題を見出し、解決へと導くためには、尖った才能、総合知を含む人間的資質、そしてそれらを活かした協創できる環境が不可欠です。特に AI の急速な進展により、2 番手の研究は効率的に再現可能となり、新たな価値を生む「知の創造」こそがイノベーションの核心となっています。また、創造性と Well-being には相関関係があることが明らかになってきており、G7 の中で最下位に位置する日本の幸福度を向上させる鍵も、創造性にあると考えられます。研究力の低下が指摘されてはいますが、個人の強みを活かした異能集団が分野の壁を超えてグローバルにダイナミックに協創することで、新たな価値の創出が可能であり、崇高な目標に向かって成長する国に若返ると信じています。応用物理学会はまさに VUCA 時代のロールモデルです。

私自身、現在、大学統合というショック療法の真ただ中にある「Science Tokyo」に身を置っていますが、「違い」を駆動力として融合研究が加速する手応えを感じています。異なる分野・文化・価値観の癒合が、新たな発見と創発をもたらし、研究力の強化に希望を与えてくれます。

第7期科学技術・イノベーション基本計画の策定に向けて、関係省庁、大学、産業界の多様なステークホルダーによる検討が大詰めを迎えています。本シンポジウムを通じた議論が、応用物理学会、特に若手研究者の関心や期待が反映された未来志向の基本計画に結実することを願っています。

次世代イノベーション人材育成に向けた名古屋大学の取組

Nagoya University's Efforts to Foster the Next-Generation Innovation Talent

名古屋大学¹ ◯杉山 直¹

Nagoya University¹ ◯Naoshi Sugiyama¹

E-mail: sugiyama.naoshi.x2@f.mail.nagoya-u.ac.jp

名古屋大学では、これまで次世代イノベーション人材を育成すべく、主に大学院改革を進めてきました。なかでも6件の博士課程教育リーディングプログラム、4件の卓越大学院プログラムの採択を受け、博士課程教育推進機構を設立、トランスファーラブル・スキルズトレーニングなどを英国の大学を手本に導入し、現在進行中のスプリング事業にも活用するなど、大きな成果を上げてきています。また学生によるスタートアップも格段に増加しています。

これらの取り組みを、学部段階、そして入試段階へと広げつつあります。例えば、スタートアップ創出のために、アントレプレナシップを学ぶことを学部1年生全員に必修科目として整備しました。アントレ教育のための新たな組織も一昨年度立ち上げたところです。同じく学部1年生そして2年生全員に、数理・データ科学科目も必修化しています。このような現代社会を生き抜き、次世代イノベーションを起こす人材となるために必須の科目を、コモン・ベーシックスとして教養教育に組み入れていく試みを進めています。

入試についても、イノベーション人材を念頭に改革を進めてきました。女子学生を理工系に、ということで、令和5年度入試から工学部の2学科について、推薦入試における女子枠を始めました。令和7年度入試はさらに2学科増やし、8年度入試にも2学科増やす予定で、工学部のほぼ全ての学科での導入となります。

理学部では、令和7年度入試より総合型選抜を導入しました。これは理学部らしい「尖がった」人材を獲得するための試みです。従来、理学部は学科を指定せずに入試を行い、1年終了時に分属（進振り）を行ってきましたが、総合型選抜では学科を指定して受験し、合格した学生は優先的にその学科への進学をすることとなります。総合型選抜導入の背景には、高大接続としてグローバル・サイエンス・キャンパスを展開し、優秀な高校生にラボでの実習や海外研修などを行ってきた実績があります。高校から大学へのスムーズな移行が大きなテーマになります。

名古屋大学の一般入試では、文系の学部を含めて全て数学を課す、という特徴があります。文系でもイノベーション人材として社会に出ていくためには数学は必須です。コモン・ベーシックスに含まれる数理・データ科学科目などを履修できる基礎力を要求します。

今後は、大学全体として総合型選抜を取り入れていこうと考えています。その際に参考になるのが、グローバル30国際プログラムでの入試です。英語のみで卒業までできるプログラムですが、入試も世界標準を目指しアドミッション・オフィスを中心に実施しています。

名古屋大学は、学部入試から博士課程教育まで、次世代イノベーション人材育成へ向けてシームレスに取り組んでいます。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】才能が芽吹く大学入試へ：日本の科学技術と大学教育のこれから

[8p-N101-1~9] 【一般公開】才能が芽吹く大学入試へ：日本の科学技術と大学教育のこれから

[8p-N101-7] 多様性が産む研究と教育の進化：東工大の挑戦と展望

○益 一哉^{1,2} (1.Science Tokyo、2.G-QuAT 産総研)

キーワード：人材育成、入試改革

2018年より6年間、東京工業大学長として「多様性と寛容」「協調と挑戦」「決断と実行」を掲げ、前学長の改革を継承しつつ、研究力強化とジェンダーバランス改善に注力。女性限定教員公募や女子枠入試の導入などの実践を通じた成果と今後の展望を紹介する。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】才能が芽吹く大学入試へ：日本の科学技術と大学教育のこれから

[8p-N101-1~9] 【一般公開】才能が芽吹く大学入試へ：日本の科学技術と大学教育のこれから

[8p-N101-8] 質疑応答とパネルディスカッション

○関谷 毅¹ (1.阪大産研)

キーワード：大学教育と入試、イノベーション人材の育成とその環境整備

登壇者による質疑応答とパネルディスカッションを通じて、大学入試の将来像と、未来を創る才能をいかに育てるかを多角的に掘り下げます。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】Z世代に繋ぎたい宇宙x半導体の未来ビジョン ～創造を生むネットワーキングを応物から

[8p-S101-1~12] 【一般公開】Z世代に繋ぎたい宇宙x半導体の未来ビジョン ～創造を生むネットワーキングを応物から

[8p-S101-1]

オープニング 開会のあいさつ、趣旨説明

○吉水 康人¹ (1.キオクシア)

[8p-S101-2]

宇宙ステーションの半導体産業への貢献

○村上 一馬¹ (1.三菱商事株式会社)

[8p-S101-3]

STI for 地方創生2.0 ～経済安全保障から見た我が国の宇宙、半導体デジタルAI戦略とは～

○東 博暢¹ (1.日本総研)

[8p-S101-4]

低軌道衛星のエッジコンピューティング

○坂本 佳史¹ (1.日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所)

[8p-S101-5]

建設業における衛星データ活用と期待

○伊藤 剛¹ (1.株式会社大林組)

[8p-S101-6]

宇宙産業の将来と参入戦略の考え方

○高井 智宏¹ (1.株式会社 宙Lib)

[8p-S101-7]

地球低軌道利用を切り拓くElevationSpaceの取り組み

○宮丸 和成¹ (1.ElevationSpace)

[8p-S101-8]

分散コンピューティングと衛星コンピューティングの可能性

○中村 昌道¹ (1.モルゲンロット)

[8p-S101-9]

パネルディスカッション1 宇宙産業の民営化

○吉水 康人¹、東 博暢²、坂本 佳史³、宮丸 和成⁴、伊藤 剛⁵、高井 智宏⁶、中村 昌道⁷、村上 一馬⁸ (1.キオクシア、2.日本総合研究所、3.日本アイ・ビー・エム、4.ElevationSpace、5.大林組、6.宙Lib、7.モルゲンロット、8.三菱商事)

[8p-S101-10]

パネルディスカッション2 宇宙産業が半導体エレクトロニクスに与えるオポチュニティー

○吉水 康人¹、東 博暢²、坂本 佳史³、宮丸 和成⁴、伊藤 剛⁵、高井 智宏⁶、中村 昌道⁷、村上 一馬⁸ (1.キオクシア、2.日本総合研究所、3.日本アイ・ビー・エム、4.ElevationSpace、5.大林組、6.宙Lib、7.モルゲンロット、8.三菱商事)

[8p-S101-11]

クロージングディスカッション

○吉水 康人¹、東 博暢²、坂本 佳史³、宮丸 和成⁴、伊藤 剛⁵、高井 智宏⁶、中村 昌道⁷、村上一馬⁸ (1.キオクシア、2.日本総合研究所、3.日本アイ・ビー・エム、4.ElevationSpace、5.大林組、6.宙Lib、7.モルゲンロット、8.三菱商事)

[8p-S101-12]

閉会の挨拶

○為近 恵美¹ (1.横浜国大)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】Z世代に繋ぎたい宇宙x半導体の未来ビジョン ～創造を生むネットワーキングを応物から

[8p-S101-1~12] 【一般公開】Z世代に繋ぎたい宇宙x半導体の未来ビジョン ～創造を生むネットワーキングを応物から

[8p-S101-6] 宇宙産業の将来と参入戦略の考え方

○高井 智宏¹ (1.株式会社 宙Lib)

キーワード：宇宙

宇宙産業の現状とその将来を概観したうえで、地上の民間産業が参入を考えたときに持つべき考え方をご説明します。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】Z世代に繋ぎたい宇宙x半導体の未来ビジョン ～創造を生むネットワーキングを応物から

[8p-S101-1~12] 【一般公開】Z世代に繋ぎたい宇宙x半導体の未来ビジョン ～創造を生むネットワーキングを応物から

[8p-S101-8] 分散コンピューティングと衛星コンピューティングの可能性

○中村 昌道¹ (1.モルゲンロット)

キーワード：分散コンピューティング、GPU、AI

近年注目されているGPUを使ったAIなどの分散コンピューティングにおける課題や解決方法の提案、およびその延長としての衛星コンピューティングの可能性について議論する。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】Z世代に繋ぎたい宇宙x半導体の未来ビジョン ～創造を生むネットワーキングを応物から

[8p-S101-1~12] 【一般公開】Z世代に繋ぎたい宇宙x半導体の未来ビジョン ～創造を生むネットワーキングを応物から

[8p-S101-12] 閉会の挨拶

○為近 恵美¹ (1.横浜国大)

キーワード：宇宙、半導体、未来

閉会の挨拶

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 【一般公開】就活生必見! 次世代を担う頭脳 — 半導体産業の最前線

[9a-S101-1~2] 【一般公開】就活生必見! 次世代を担う頭脳 — 半導体産業の最前線

[9a-S101-1]

開会のご挨拶

○江崎 瑞仙¹ (1.東芝 総研)

[9a-S101-2]

半導体産業の利益率はどうして高いのか? 自動車産業と比較してみる

○近藤 誠一¹ (1.株式会社レゾナック)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】就活生必見！次世代を担う頭脳 — 半導体産業の最前線

[9a-S101-1~2] 【一般公開】就活生必見！次世代を担う頭脳 — 半導体産業の最前線

[9a-S101-2] 半導体産業の利益率はどうして高いのか？自動車産業と比較してみる

○近藤 誠一¹ (1.株式会社レゾナック)

キーワード：半導体産業、営業利益率、自動車産業

半導体産業の営業利益率はデバイスメーカーのみならず、装置・材料メーカーも含めて非常に高いことは一般によく知られている。特に半導体前工程に関わっている企業や事業部門では20%以上の営業利益率を達成していることが多く、好景気では30～60%にもなる場合がある。一方、自動車産業は一般的に10%以下であることが多く、部品・材料メーカーに至るまで同様である。これは企業ごとの違いや時期に依存することはあっても、それが主たる理由ではなく、産業構造の違いによるもの、すなわち生産効率の違いによるものであることを指摘し、利益率を上げる本質は何であるかを様々な産業で高利益率を達成している企業や業種を例に議論する。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】就活生必見！次世代を担う頭脳 — 半導体産業の最前線

[9p-S101-1~13] 【一般公開】就活生必見！次世代を担う頭脳 — 半導体産業の最前線

[9p-S101-1]

趣旨説明

○荒木 浩之¹ (1.株式会社SCREENホールディングス)

[9p-S101-2]

半導体を“観る”力 ～次世代イメージセンサの品質&歩留向上を目指して～

○川勝 一斗¹ (1.ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社)

[9p-S101-3]

世界で活躍！半導体製造装置開発の最前線

○森月 政博¹ (1.(株)日立ハイテク)

[9p-S101-4]

道なき道を切り拓く、挑戦の中に潜む楽しさ ～最前線の成膜技術開発～

○照井 祐輔¹ (1.株式会社 KOKUSAI ELECTRIC)

[9p-S101-5]

見えない世界に踏み出して——露光装置と設計の奥深さに触れて

○上林 紗梨¹ (1.株式会社ニコン)

[9p-S101-6]

最先端の半導体薄膜分析に求められる人財とは

○柏木 伸介¹ (1.堀場)

[9p-S101-7]

海外で働くって面白い！顧客に寄り添うソリューションクリエイターへの道

○渡邊 駿介¹ (1.株式会社SCREENセミコンダクターソリューションズ)

[9p-S101-8]

スマホもAIも、この装置から～半導体製造装置の魅力と展望～

○佐々木 健¹ (1.キャノン)

[9p-S101-9]

ディスプレイから半導体へ：塗布技術で切り拓く新たな挑戦

○田中 雄也¹ (1.東レエンジニアリング株式会社)

[9p-S101-10]

専攻を活かす 半導体製造装置業界への挑戦

○山口 雄大¹ (1.アプライド マテリアルズ ジャパン)

[9p-S101-11]

次世代プロセス開発を画像処理で加速 ～メモリメーカーにおけるDX推進～

○山根 伸次郎¹ (1.キオクシア株式会社)

[9p-S101-12]

質疑応答

○為近 恵美¹ (1.横浜国大)

[9p-S101-13]

閉会挨拶

○渡部 潔¹ (1.SEAJ)

見えない世界に踏み出して——露光装置と設計の奥深さに触れて

Stepping into the Invisible World

— Discovering the Depths of Lithography and System Design

上林 紗梨

NIKON Corporation, Sari Kambayashi

Sari.Kambayashi@nikon.com

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：【一般公開】学術会議に適したMICE施設とは？－MICEインフラを考える－

【9a-S202-1~9】【一般公開】学術会議に適したMICE施設とは？－MICEインフラを考える－

[9a-S202-1]

学術会議における会議場選択の新基準－満足度は何が決める？－

○栗村 直¹ (1.物質・材料研究機構)

[9a-S202-2]

現地臨場感をもたらす超現実 Mixed Realityの新展開

○安藤 晃弘^{1,2} (1.株式会社ハシラス、2.エンタテインメントXR協会)

[9a-S202-3]

熊本市－未来をひらく、城と水のまち熊本－

○黒木 三奈子¹ (1.(一財) 熊本国際観光コンベンション協会)

[9a-S202-4]

姫路市－日本初の世界遺産「姫路城」と出会う国際会議の舞台－

○藤原 大靖¹ (1.(公社)姫路観光コンベンションビューロー)

[9a-S202-5]

新潟市－みなとまち新潟のMICE開催環境－

○赤塚 人志¹、高杉 惇¹ (1.(公財) 新潟観光コンベンション協会)

[9a-S202-6]

宇都宮市－歴史と未来が融合するまち宇都宮－

○吉野 信行¹ (1.宇都宮コンベンション)

[9a-S202-7]

浜松市－浜松から、次の時代のコンセンサスを－

○杉浦 紘平¹ (1.公益財団法人 浜松・浜名湖ツーリズムビューロー)

[9a-S202-8]

岐阜市－織田信長公ゆかりの地で交流文化のイノベーション－

○川上 千尋¹ (1.公益財団法人岐阜観光コンベンション協会)

[9a-S202-9]

松江市－歴史あふれる水の都－

○三宅 勇一¹ (1.松江コンベンションビューロー (一財) く にびきメッセ)

学術会議における会議場選択の新基準 –満足度は何が決める?–

New Criteria for Choosing Conference Venues in Academic Meetings

- What Determines Satisfaction? -

栗村 直（物質・材料研究機構 NIMS¹、応用物理学会前理事²）

Sunao KURIMURA[○] NIMS¹, Ex-Director of JSAP²

E-mail: skurimura@nifty.com

学術会議を開催する上で、会場選択が参加者満足度や参加形態の選択に与える影響は大きい。従来、会議施設の評価は収容人数や設備の新しさなどハード面に偏りがちであった。2023 年秋季応用物理学会（熊本開催）委員長として多方面から得られた意見を総合すると、開催地の「日常的利便性」が満足度に影響を与えている。そこで参加者体験の地理的利便性を簡易に可視化する試みとして、本稿では **KM Index**（仮指標：徒歩 15 分圏内の飲食店数）を提案し、**現地での移動・交流・食事**のしやすさといった要素と捉えて定量化を試みる。

図 1 では、同条件で抽出した 4 会場における KM Index を比較している。熊本城ホールは価格帯別に 100 件を超えるレストランが集積しており、他の例に比べて数倍集積度が高い。価格帯の多様性も備えており、短時間で食事・交流・移動が完結できる参加者の実感と整合している。この **KM Index** は会議における利便性を表す指標であり、Google Map 上で誰もが再現可能で、透明性と汎用性を持つ簡易指標である。複雑な統計処理や分析を必要としない会場選択における普遍性・論理性・中立性を満たす**新たな評価軸**として提案しておく。

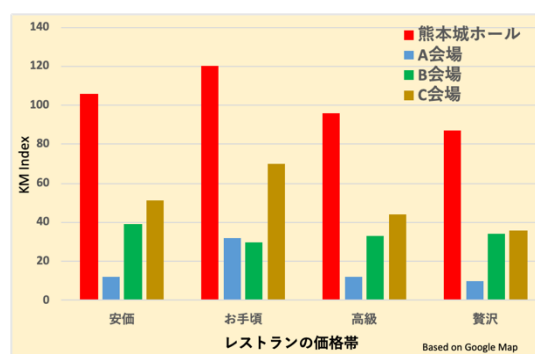


図 1 KM Index による会議場の利便性比較

会場の物理的利便性に加え、ポストコロナ時代の学術会議では、**ハイブリット会議**の利便性と自治体による支援体制も参加者満足に寄与する要素となっている。応物学会の大規模アンケートでは、回答者の約 20%はオンラインでの参加を希望しており、理由として情報収集におけるタイプ、コスパを上げている。コロナ後多くの学会が参加者の減少に悩む中で、応物学会が着実に参加者を増加させている理由のひとつにハイブリッド開催があると見る。オンラインでも高い配信品質が確保でき、ハイブリッド開催の補助金があれば、参加者にとっても魅力的会場といえる。

主催者側の余裕は参加者満足度の上昇につながるため、現地自治体による**ワンストップ支援体制**も鍵を握る。熊本市では MICE 戦略課が中心となり、広報・産業支援など複数部署が連携することで主催者の負担を大幅に軽減した。シンポジウムやイベントの PR が可能になり、地元の参加者も呼び込んで、企業参加者数+19%、非会員参加者数+30%という成果を上げている。

今後の学術会議においては、「距離」「時間」「人」の三要素をいかに勘案するかが会議場選定の新基準となりうる。ハード面の評価軸だけでなく、参加者の行動や利便性に寄り添った視点が求められるようになってきている。

*)学術会議向け MICE リスト



現地臨場感をもたらす超現実 Mixed Reality の新展開

Advancing Mixed Reality for Hyper-Realistic On-Site Presence

株式会社ハシラス ◯安藤 晃弘

◯Hashilus Co., Ltd.

E-mail: ando@hashilus.co.jp

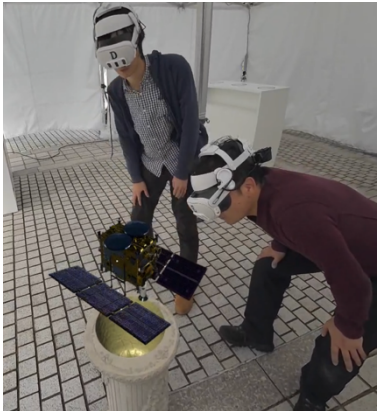
かつて、VR-HMD を用いた観光促進の様々な試みがありましたが、継続して使い続けられているものは少ない状況です。体験内容が素晴らしい一方で、機材の取り扱いが難しく、スタッフの固定費が重く、コンテンツの刷新が無く飽きられてしまう、など、課題も多かったと私は感じています。

近年、Meta Quest3 や Apple Vision Pro などの、品質の高い Mixed Reality デバイスが現れたことで、これらの課題の多くが改善され、MICE 施設に新たな価値を創出できるようになってきました。この発表では、MICE 施設に設置するロケーションベース XR コンテンツ『近隣の観光資源を題材にしたアトラクション体験』を事例として紹介します。事例コンテンツの成り立ちを要素分解することで、MICE 施設で XR を実用的に導入する際に留意すべきポイントを知って頂ければと思います。

体験面・運用面・導入面・ビジネス面で、どのような工夫をしているか、それらは、どのような失敗事例から導かれたものかを解説します。また、VR から Mixed Reality に技術がシフトして行く過程で、提供される没入的な価値がどのように変わって行ったのか、どのような技術・ノウハウが超現実的な MR 体験をもたらしているのかを知って頂き、XR 業界の動向と予想、MICE と XR の関連トピックにまで話を展開して参ります。

この講演を通じて知識として超現実 MR の新展開を知って頂きつつ、**現地参加されている方には実際にデモ体験をして頂けます。**

最新の MR 体験がどこまでできるものになっているか、実用性を評価して頂けると幸いです。



施名	連絡先
安藤晃弘	ando@hashilus.co.jp

熊本市 ―未来をひらく、城と水のまち熊本―

Kumamoto City – Opening the door to the future, the city of castle and water –

一般財団法人 熊本国際観光コンベンション協会¹ ○黒木 三奈子¹

○Kumamoto International Convention and Tourism Bureau¹

E-mail: mice@kumamoto-icb.or.jp

1. “ウォーカブル” MICE 都市「熊本市」

熊本は、九州の中央に位置し、歴史や文化、豊かな自然に恵まれた場所です。中心都市の熊本市は、地域の経済・医療・文化・教育などの近代的な拠点機能を合わせもった都市となっており、熊本城を望む中心市街地には、MICE 施設だけでなく、宿泊施設、飲食店、ショッピングアーケードが徒歩圏内に集約され、参加者は移動の負担なく快適に過ごすことができます。この充実した都市機能により、熊本市が「ウォーカブル MICE」の理想的な開催地であることをご紹介いたします。



2. 熊本が擁する最新鋭の MICE 施設「熊本城ホール」

熊本城ホールは、九州最大級の収容力を誇る 2,304 席を有する 4F メインホールを始め、大中小 19 室を備えた 3F 会議室フロア、2F シビックホール、1F 展示ホールなど、主催者の要望に応じて多種多様な催事・イベントに対応できます。会議場、バスターミナル、ホテル、商業施設、駐車場が一つの施設に集積され、アクセスもスムーズであり、極めて高い機能性と利便性をもっています。近年では、2023 年「第 84 回応用物理学会秋季学術講演会」、2025 年「The 37th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD2025)」などが開催されています。



3. 豊富な観光資源がもたらす“特別な場所”

熊本市内には、「熊本城」や「水前寺成趣園」など、魅力的な観光資源が多くあり、これらを懇親会やツアーで御利用いただくことで、MICE 参加者にとってかけがえのない思い出と満足感を演出することができます。また、エクスカーションツアーでは阿蘇や天草などの県内観光地はもちろん、産業の集積地でもある熊本では、先進技術を学ぶテクニカルビジットのご紹介もしております。



*)学術会議向け MICE リスト



都市名	連絡先	国際会議補助最高金額	国内会議補助最高金額
<u>熊本市*</u>	mice@kumamoto-icb.or.jp	12,000,000 円	12,000,000 円

姫路市 ―日本初の世界遺産「姫路城」と出会う国際会議の舞台―

Himeji City : The stage for international conferences where you encounter

“Himeji Castle”, Japan's First World Heritage Site

公益社団法人姫路観光コンベンションビューロー ◯藤原 大靖

Himeji Convention & Visitors Bureau

E-mail: mice@himeji-kanko.jp

日本初のユネスコ世界文化遺産として登録された姫路城を中心に、400 年以上の歴史と文化を色濃く残す姫路市は、伝統的景観と都市機能が調和するコンパクトシティとして、国内外の研究者や参加者が快適に集い交流できる MICE 開催地として大きな魅力を持ち、徒歩圏内に姫路城や日本庭園・好古園など文化資源が集中し、国際会議・懇親会・文化体験が一体的に実現できる地理的・機能的利便性を備えています。

姫路市の主要な会場であるアクリエひめじ（姫路市文化コンベンションセンター）には、播磨圏域初の 2,010 席の大規模ホールをはじめ、用途や規模に応じて可動間仕切りで柔軟に使える大・中・小あわせて 10 室の会議室、約 4,000 ㎡・高さ約 10m の無柱空間を持つ分割可能な展示場が整備されており、学術講演・展示会・ポスターセッション・式典・レセプションパーティーまで幅広い催事に対応可能です。また、コンベンション開催を支援する「開催補助金」や、ハイブリッド会議に対応したオンライン連携を支援する「ハイブリッド会議補助金」



など、その他の支援制度も用意され、条件を満たせば多様な形でサポートが受けられます（諸条件あり）。詳細は事前にご相談ください。

さらに、先端技術を活用した文化体験として、会場に来られない方には姫路城や周辺文化資源を仮想的に体験できる「姫路城 VR スコープ」や「世界遺産・姫路城 VR」、「好古園バーチャルツアー」などを通じてオンラインでも深い理解と没入体験を提供できます。「姫路城 VR スコープ」は普段見られない臨場感ある映像を体験でき、「世界遺産・姫路城 VR」では 3D CG 再現と 360 度バーチャルツアーで非公開エリアも含め城内を自由に探索可能です。「好古園バーチャルツアー」では御屋敷の庭や茶室内部など、日本庭園をデジタル空間で巡れます。

一方、実際に来場された参加者は世界遺産の風格を肌で感じ、リアルな文化・交流体験を通じてより豊かで記憶に残る MICE の時間を過ごせます。

*)学術会議向け MICE リスト

URL:https://meeting.jsap.or.jp/jsapm/wp-content/uploads/2025/06/MICE_list_AP2025.pdf



都市名	連絡先	国際会議補助最高金額	国内会議補助最高金額
姫路観光コンベンションビューロー	079-222-2310	7,000,000	6,000,000

新潟市 ―みなとまち新潟の MICE 開催環境―

Niigata City - Welcome to Niigata –Japan's Port City Gateway for Exceptional MICE Experiences-

(公財) 新潟観光コンベンション協会 〇赤塚 人志 高杉 惇

Niigata Visitors & Convention Bureau

E-mail: mail@nvcb.or.jp

新潟市は、古くは北前船の寄港地として、また幕末の鎖国から開港された 5 都市の 1 つとして「みなとまち」で栄えてきた歴史があります。現在は、本州日本海側唯一の**政令指定都市**として高速交通網が整備され、東京からは上越新幹線で最短 89 分です。また、国内外様々な都市と空路で結ばれており、中国、韓国、台湾等への直行便もあります。

新潟を代表するコンベンション施設である**朱鷺メッセ**は、信濃川が日本海に注ぐウォーターフロントに位置し、本格的な展示場、大小 13 の会議室、ホテル等が完全に一体化した**国内有数の複合一体型コンベンション施設**です。そのため、会議、パーティー、宿泊を一つの空間でスムーズに開催できます。これまでに、**G7**や**APEC**等の政府系国際会議や国際的な学術会議、また、応用物理学会様をはじめ、数千人規模の国内会議の開催実績があります。

併せて、**朱鷺メッセ**周辺にはユニークベニューもあり、日本夜景遺産に登録された「Befco ばかうけ展望室」、国指定重要文化財/登録有形文化財の「旧新潟税関庁舎/旧第四銀行住吉町支店」、「信濃川ウォーターシャトル」、旬鮮市場「ピア Bandai」などが人気です。

また、新潟ならではの体験やアトラクションも MICE 開催に欠かせない要素の 1 つです。酒蔵数日本一を誇る**新潟自慢の日本酒**を集めた試飲・利き酒コーナーや、日本有数の花街として 200 年以上の伝統を誇る「**新潟古町芸妓**」による踊りなどは、**みなとまち新潟**を代表する文化のひとつとして多くの参加者から大変好評をいただいております。

MICE に新潟の文化や体験を組み込む事で単なるビジネスの場から記憶に残る「特別な時間」へと変わります。みなとまち新潟での MICE 開催を心よりお待ちしております。

*)学術会議向け MICE リスト



都市名・施設名	連絡先	国際会議補助最高金額	国内会議補助最高金額
新潟市	mail@nvcb.or.jp	新潟県：8,500,000	新潟県：7,000,000
朱鷺メッセ		新潟市：3,500,000	新潟市：2,000,000

宇都宮市　—歴史と未来が融合するまち宇都宮—

Utsunomiya City　-A Fusion of History and the Future

宇都宮観光コンベンション協会¹，　　〇吉野　信行¹，

^〇Utsunomiya Convention & Visitors Bureau,¹

E-mail: yoshino@utsunomiya-cvb.org

平安時代から二荒山神社を中心に栄え、源頼朝や徳川家康といった名だたる武将が戦勝祈願に訪れた宇都宮は、江戸時代には日光社参の宿場町として交通の要衝となりました。その地の利は現代にも受け継がれ、東京から新幹線で約 50 分、成田・羽田空港からも高速バスで約 2 時間半と、抜群のアクセスを誇ります。この高い利便性から、過去には期待以上の集客を得られた学会も少なくありません。また、世界遺産「日光の社寺」へも車で約 45 分と、学会前後の観光にも最適です。

2022 年 11 月には、北関東最大級の会議施設「ライトキューブ宇都宮」が JR 宇都宮駅直結で開業しました。最大 2,000 名収容可能な大ホールをはじめ、中ホール、大小 17 の会議室を備え、多様な規模の学会に対応可能です。さらに、地域の再生可能エネルギーを活用し、太陽光発電設備や地中熱利用空調を導入するなど、環境とサステナビリティに配慮した設計が特徴です。各階に設けられた「交流広場」は、屋内と屋外を一体的に利用でき、開放的で特別な交流空間を演出します。周辺ホテルと連携した「エリア MICE」の実績もあり、4,800 名規模の学会開催も成功させています。

宇都宮市は現在、人口減少社会においても持続可能なまちづくりを目指し、「ネットワーク型コンパクトシティ」の形成を推進しています。その象徴が、2023 年 8 月に開業した国内初の全線新設 LRT（次世代型路面電車）「ライトライン」です。地域のゴミ処理発電や太陽光発電で運行電力を賄う「ゼロカーボントランスポート」として、世界に類を見ない先進的な取り組みとして注目を集めています。学会開催時には、ライトラインの貸し切り乗車や車両基地見学といったユニークな視察も可能です。歴史を礎に、未来を見据えた革新を続ける宇都宮で、あなたの MICE を成功に導きませんか。



*)学術会議向け MICE リスト



施名	連絡先	国際会議補助最高金額	国内会議補助最高金額
ライトキューブ宇都宮*	yoshino@utsunomiya-cvb.org	5000000	3000000

浜松市 —浜松から、次の時代のコンセンサスを—

HAMAMATSU City -Next consensus-

公益財団法人 浜松・浜名湖ツーリズムビューロー¹ ○杉浦 紘平¹

○Hamamatsu & Lake Hamana Tourism Bureau¹

E-mail: k_sugiura@hamacon.net

東京・大阪から約 90 分。

駅直結コンベンション施設「アクトシティ浜松」で、理想の MICE を実現します。

浜松市は、東京・大阪の両都市から東海道新幹線で約 90 分という絶好の立地にあり、首都圏・関西圏双方からスムーズなアクセスが可能です。中核施設であるアクトシティ浜松は、JR 浜松駅直結で、**新幹線改札から徒歩わずか 3 分**。参加者にとって移動の負担が少なく、悪天候時も安心して来場できる会議施設です。

最大 2,300 名を収容できる大ホールをはじめ、多様な規模に対応できる中小会議室、展示スペースを備え、学術大会から企業イベントまで幅広く対応可能です。これまでに、約 2000 名規模で開催された人工知能学会全国大会（JSAI）や約 700 名規模で開催された日本教育心理学会など、全国レベルの学術集会在開催された実績もあり、運営体制や施設の信頼性も高く評価されています。

また、駅周辺には宿泊施設も充実しており、参加者の利便性も万全。音楽とものづくりのまち・浜松の文化や、浜名湖・遠州灘の自然、地元グルメも含め、会議参加者に豊かな体験を提供できる都市です。

さらに、スズキ歴史館やヤマハイノベーションロードといった**産業観光施設**を通じて、地域の技術と文化を体感することも可能です。会議後の観光では、美しい浜名湖や癒やしの舘山寺温泉、歴史ある龍潭寺や、雄大な中田島砂丘など、自然と歴史に触れる滞在型 MICE も実現できます。アクセス、設備、環境の三拍子が揃う浜松で、次の MICE 開催をご検討ください。



*)学術会議向け MICE リスト



施名	連絡先	国際会議補助最高金額	国内会議補助最高金額
アクトシティ浜松*	hall@actcity.jp	10000000	2000000

岐阜市 ―織田信長公ゆかりの地で交流文化のイノベーション―

Gifu City – Innovation in Cultural Exchange at the Land Associated with Lord Nobunaga Oda -

公益財団法人 岐阜観光コンベンション協会 〇川上 千尋



Gifu Convention and Visitors Bureau

E-mail: kawakami@gifucvb.or.jp

戦国時代、織田信長公は天下統一のために、既存の常識に捉われず「楽市楽座」の政策によって、人・モノ・情報が集まる城下町を創り上げ、更にポルトガル人教師ルイス・フロイスを迎え、新たなる各国との交流をスタートさせました。岐阜市では、その歴史浪漫が今も息づくまちとして、革新的な「新しい MICE」に挑戦し続けています。

世界的な建築家・安藤忠雄氏が設計の「長良川国際会議場」は、宿泊施設と隣接しており、まちのシンボルである長良川と金華山の自然を取り込み、造形的にもユニークな岐阜県を代表するコンベンション施設です。

メインホールは最大 1,897 人の収容が可能で、舞台や客席の一部が変化する「可動床式システム」を有し、大小会議室などと併せ、多彩なイベント・コンベンションの開催が可能です。（現在、改修工事のため休館中→令和 8 年 4 月にリニューアルオープン）

また本国際会議場、岐阜メモリアルセンター、岐阜県長良川スポーツプラザ、ぎふ清流文化プラザの 4 つの施設群は「世界イベント村ぎふ」と称され、スポーツ、文化、産業のイベント、コンベンションが徒歩圏内エリアで同時に開催可能な、世界でも例のない大型複合 MICE エリアを形成しています。

岐阜市へは東京から約 2 時間 20 分、大阪から約 1 時間 20 分、名古屋からは僅か 20 分、中部国際空港からは約 60 分と、国内・海外からのアクセスも至便であり、日本の真ん中に位置する理想的なコンベンション環境が整っています。近年では ISplasma2023、Sintering2023、DASFAA2024 の国際会議をはじめ、DEIM2023、日本地震工学会などの国内学会が開催されました。

学会開催時の懇親会（ユニークベニュー）としてもご活用いただける、風雅 1,300 年の伝統的漁法「ぎふ長良川の鵜飼」（5 月 11 日～10 月 15 日開催）をはじめ、信長公が居城とした岐阜城（メタバースにより今昔 VR コンテンツとしても閲覧可能）での時空間を越えた没入感溢れる本物体験や、下呂温泉、飛騨高山、世界遺産・白川郷など、「清流の国ぎふ」で未来につながるサステイナブルな MICE 開催をお約束いたします。

◆JSAP EXPO Autumn2025 出展ブース NO.→

*)学術会議向け MICE リスト

URL:https://meeting.jsap.or.jp/jsapm/wp-content/uploads/2025/06/MICE_list_AP2025.pdf



施設名	連絡先	国際会議補助最高金額	国内会議補助最高金額
長良川国際会議場	URL:https://www.g-ncc.jp	4,600,000	3,600,000
(岐阜市)	TEL:058-296-1200		

松江市 ー歴史あふれる水の都ー

Matsue City : historic water city, Matsue

松江コンベンションビューロー (一財)くにびきメッセ 三宅 勇一

Matsue Convention Bureau

E-mail: matsuecb@kunibikimesse.jp

松江市は、「宍道湖」を望む水の都です。また江戸時代に築かれた「松江城」が国宝として今も残っています。毎年多くの国内外のコンベンションが開催されており、特に国際会議については、「国際会議観光都市」にも認定されており、年間20件以上が開催されています。

松江市のコンベンションの中核施設「くにびきメッセ」は、展示場と会議室を備えた複合施設で、様々なコンベンションに対応できます。また当財団が指定管理者として管理・運営をしているため、柔軟な対応が可能です。JR松江駅より徒歩約7分の場所にあり、周辺には多くのホテルが集積しています。

また観光資源についても、「国宝 松江城」、「出雲大社」、「足立美術館」などの観光スポットや、国内で唯一製造を行っている「たたら」を題材としたツアーも提供しています。さらに、「日本庭園 由志園」や「松江フォーゲルパーク」など特徴的な雰囲気の中で、思い出に残る懇親会をご提供します。



くにびきメッセ



松江フォーゲルパーク



日本庭園 由志園



国宝 松江城

加えて、島根県、松江市双方で補助金制度を有し、両方ともご利用いただけます。

*) 学術会議向けMICEリスト

URL: https://meeting.jsap.or.jp/jsapm/wp-content/uploads/2025/06/MICE_list_AP2025.pdf



都市名	連絡先	国際会議補助最高金額	国内会議補助最高金額
松江コンベンションビューロー (一財)くにびきメッセ	matsuecb@kunibikimesse.jp	島根県：7,000,000 円 松江市：3,000,000 円	島根県：3,000,000 円 松江市：1,000,000 円

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：日韓共同応用物理シンポジウム「量子材料・デバイスと先端半導体」

[8p-S102-1~9] 日韓共同応用物理シンポジウム「量子材料・デバイスと先端半導体」

[8p-S102-1]

Growth of Semiconductor type-II Quantum Nanostructures by Droplet Epitaxy

○Jong Su Kim¹, Jin Dong Song², Sang Jun Lee³ (1.Yeungnam Univ., 2.KIST, 3.KRISS)

[8p-S102-2]

GaN-on-diamond HEMTs with suppressed self-heating effects

○Naoteru Shigekawa¹, Jianbo Liang¹, Yutaka Ohno² (1.Osaka Metropolitan Univ., 2.Tohoku Univ.)

[8p-S102-3]

Site- and Density-controlled Single Photon Emitters with Quantum Dots, Defects, and Nanoparticles Coupled with Photonic Structures

○Yong-Hoon Cho¹ (1.KAIST)

[8p-S102-4]

N-polar GaN-Based Heterostructures: Challenges and Opportunities

○Tetsuya Suemitsu¹, Takeshi Kimura¹, Takashi Matsuoka¹ (1.Tohoku Univ.)

[8p-S102-5]

Physical Reservoir Computing Using Artificial Synaptic Devices

○Hongseok Oh¹ (1.Soongsil Univ.)

[8p-S102-6]

Water-Induced Instability and Its Enhancement in Field-Effect Transistors Based on 2D Layered Materials

○Ryo Nouchi¹ (1.Osaka Metro. Univ.)

[8p-S102-7]

Contact Engineering in Atomically Thin 2D Electronics

○Sangyeon Pak¹ (1.Hongik University)

[8p-S102-8]

Fabrication of transfer-free graphene FETs utilizing the catalyst metal agglomeration technique with fine Ni patterns

○Toshiharu Kubo¹, Naoyuki Sasada¹, Makoto Miyoshi¹, Takashi Egawa¹ (1.Nagoya Inst. Tech.)

[8p-S102-9]

2D materials beyond the limit of 3D bulk semiconductors

○Hyesung Park¹ (1.Korea Univ.)

Growth of Semiconductor type-II Quantum Nanostructures by Droplet Epitaxy

Yeungnam Univ.¹, KIST², KRISS³, °Jong Su Kim¹, Jin Dong Song², Sang Jun Lee³

E-mail: jongsukim@ynu.ac.kr

In this study, we fabricated InAs/GaSb type-II quantum nanostructures, including quantum wells (QWs), quantum dots (QDs), and quantum rings (QRs), using molecular beam epitaxy (MBE). The QW structures were grown using a conventional MBE epitaxial growth technique. In contrast, to form InAs QRs and QDs on GaSb substrates, the droplet epitaxy technique was employed. For the formation of QRs, indium droplets were crystallized under an As₂ beam equivalent pressure (BEP) of 1.5×10^{-5} Torr at a substrate temperature (T_s) of 300 °C. Additionally, InAs QDs were fabricated at T_s below 100 °C under the same As₂ BEP conditions.

The optical properties of the InAs/GaSb quantum nanostructures were investigated using photoluminescence (PL) and photoreflectance (PR) spectroscopy.

To improve the optical quality of the low-temperature-grown (LTG) nanostructures, post-growth annealing was performed at temperatures ranging from 650 °C to 750 °C. PL measurements revealed that the PL intensity increased with higher annealing temperatures, indicating enhanced crystal quality.

In the PR spectra, optical transitions corresponding to confined electron and hole states were observed. Additionally, Franz–Keldysh oscillations (FKOs) appeared above the GaSb bandgap, which are attributed to the interface electric field between the InAs and GaSb layers.

These results demonstrate that high-quality InAs/GaSb quantum nanostructures can be successfully fabricated using the droplet epitaxy technique.

Wafer Bonding of Diamond for GaN HEMTs with Advanced Heat Dissipation Characteristics

Naoteru Shigekawa
Department of Physics and Electronics
Osaka Metropolitan University
Sakai, Japan
shigekawa@omu.ac.jp

Jianbo Liang
Department of Physics and Electronics
Osaka Metropolitan University
Sakai, Japan
liang@omu.ac.jp

Yutaka Ohno
Institute for Materials Research
Tohoku University
Oarai, Japan
yutaka.ohno.e6tohoku.ac.jp

Abstract—We transferred a nitride heterostructure to a CVD-grown diamond wafer using the surface activated bonding technologies to fabricate a nitride/diamond junction and GaN-on-diamond HEMTs. The on-diamond HEMTs revealed a lower thermal resistance and a more suppressed negative differential conductance in comparison with those of on-4H-SiC and on-Si HEMTs made of the same heterostructures. We furthermore succeeded in fabricating HEMTs on a 2-inch polycrystalline diamond wafer. These results demonstrate the validity of bonding of nitride heterostructures and diamond wafers to realize nitride devices with advanced heat dissipation characteristics.

Keywords—surface activated bonding, GaN on diamond, HEMT, heat dissipation

I. INTRODUCTION

Nitride-based electron devices such as GaN HEMTs have widely been used in the high-power and high-frequency (sub) systems [1]. The temperature rise due to Joule heating, or the self-heating effects, limits the performance of GaN HEMTs [2]. The structures and methods for efficiently dispersing the heat out of GaN HEMTs, i.e., minimizing their thermal resistance, are, consequently, strongly sought for. Nitride/diamond junctions are likely to provide the most promising solution because of the excellent thermal and electrical properties of diamonds. In this presentation we describe the process for realizing nitride/diamond junction by using the surface-activated bonding (SAB) [3] and discuss the characteristics of fabricated GaN-on-diamond HEMTs.

II. RESULTS AND DISCUSSIONS

We transferred an AlGaIn/GaN/3C-SiC heterostructure grown on a Si (111) wafer to a CVD-grown diamond wafer using the SAB to form a nitride/diamond junction with a 3C-SiC//diamond bonding interface. We annealed the junction at temperatures up to 1100 °C and observed no exfoliation in the junction. We characterized the nanostructure of bonding interface and found that the annealing played an essential role in improving its quality.

We applied the conventional device process steps to the prepared nitride/diamond junction to fabricate GaN-on-diamond HEMTs [4]. The size of junction was 20 mm by 20 mm. Thanks to the thermal stability of junction, the source and drain contacts were normally formed by annealing it at ≈ 800 °C and the on-diamond HEMTs were successfully fabricated. We also fabricated GaN-on-4H-SiC HEMTs by bonding the heterostructure to a 4H-SiC wafer, as well as

GaN-on-Si HEMTs. Note that the on-diamond, on-4H-SiC, and on-Si HEMTs are made of the same heterostructures.

We measured the temperature rise at the gate edge in the area between gate and drain in the channel of biased HEMTs using the micro photoluminescence spectroscopy. The estimated thermal resistance of the on-diamond HEMTs was $\approx 1/4$ and $\approx 1/2$ of those of the on-Si and on-4H-SiC HEMTs with the same geometry, respectively. The magnitude of the negative differential conductance in the electrical characteristics, which provides a measure of the self-heating effects, was the smallest in the on-diamond HEMTs among the three types of devices [4].

We recently succeeded in transferring the heterostructure to a 2-inch polycrystalline diamond (PCD) wafer and fabricated GaN-on-PCD HEMTs. We confirmed that the temperature rise in the on-PCD nitride channels was systematically smaller than that in the on-Si channels made on the epi wafer [5]. These results imply that the wafer-bonding-based nitride/diamond junctions provide a promising platform for improving heat dissipation characteristics hence enhancing performance of nitride devices for high-frequency and high-power applications.

ACKNOWLEDGMENT

The work was supported by the Adaptable and Seamless Technology Transfer Program through Target Driven R&D (A-STEP) from Japan Science and Technology Agency (JST). The heterostructures used in the work were grown and provided by Air Water Inc.

REFERENCES

- [1] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, and Y.-F. Wu, "GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers," *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 2, pp. 287-305, Feb. 2008.
- [2] J. Kuzmík, P. Javorka, A. Alam, M. Marso, M. Heuken, and P. Kordoš, "Determination of Channel Temperature in AlGaIn/GaN HEMTs Grown on Sapphire and Silicon Substrates Using DC Characterization Method," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 49, no. 8, pp. 1496-1498, Aug. 2002.
- [3] T. Suga, "Recent progress in surface activated bonding for 3D and heterogeneous integration," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 64, 050801, May 2025.
- [4] R. Kagawa, et al., "High Thermal Stability and Low Thermal Resistance of Large Area GaN/3C-SiC/Diamond Junctions for Practical Device Processes," *Small*, 2305574, Nov. 2023.
- [5] Y. Sunamoto, et al., "Characteristics of GaN HEMTs on 2-inch polycrystalline diamond substrates fabricated using the surface-activated bonding technologies," to be presented in the 15th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-15), July 2025.

Site- and Density-controlled Single Photon Emitters with Quantum Dots, Defects, and Nanoparticles Coupled with Photonic Structures

Yong-Hoon Cho

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

Republic of Korea

E-mail: yhc@kaist.ac.kr

Precise control over the location and density of semiconductor-based quantum emitters is essential for advancing quantum photonic systems. In this work, we demonstrate site- and density-controlled quantum emitters realized through three different approaches: (i) InGaN quantum dots (QDs) embedded in GaN nanowires,^[1] (ii) defect-based emitters in GaN grown on patterned sapphire substrates,^[2] and (iii) halide perovskite nanoparticles (NPs) integrated with circular Bragg reflectors.^[3] To enhance single-photon purity in high-density QD-in-nanowire and high-density NP systems, we employed a nanoscale quenching method using focused ion beam irradiation,^[4,5] selectively suppressing emissions from surrounding emitters while preserving emission from a single unquenched QD or NP in approaches (i) and (iii). In approach (ii), selective-area GaN growth was carried out on the patterned sapphire substrate by using metal-organic chemical vapor deposition, yielding telecom O-band single-photon emitters that operate at room temperature. Together, these techniques address key limitations of prior methods and offer a robust strategy for integrating site-controlled quantum emitters with photonic architectures.

References:

- [1] "Enhancement of single-photon purity and coherence of III-nitride quantum dot with polarization-controlled quasi-resonant excitation", S. Jun et al., *Small* 19, 2205229 (2022).
- [2] "Spatial distribution control of room-temperature single photon emitters in the telecom range from GaN thin films grown on patterned sapphire substrates", H. Kim et al., *Advanced Quantum Technologies*, <https://doi.org/10.1002/qute.202400177> (2024).
- [3] "Ultrafast and bright quantum emitters from the cavity-coupled single perovskite nanocrystals", S. Jun et al., *ACS Nano*, 2, 1396, (2024).
- [4] "Nanoscale focus pinspot for high-purity quantum emitters via focused-ion-beam induced luminescence quenching", M. Choi et al., *ACS Nano* 15, 11317 (2021).
- [5] "Single quantum dot selection and tailor-made photonic device integration using nanoscale focus pinspot", M. Choi et al., *Advanced Materials* 35, 2210667 (2023).

N-polar GaN-Based Heterostructures: Challenges and Opportunities

Tohoku Univ., °Tetsuya Suemitsu, Takeshi Kimura, and Takashi Matsuoka

E-mail: t.suemitsu@tohoku.ac.jp

GaN-based heterostructures have a unique property that is so called *polarization doping effect*. It makes GaN-based high electron mobility transistors (HEMTs) distinguished power devices for a wide frequency range, from kHz to GHz, because of their two-dimensional electron gas (2DEG) with high mobility ($\sim 2000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) and high sheet carrier concentration ($>10^{13} \text{ cm}^{-2}$). Although almost all of GaN-based devices developed so far are made with a Ga-polar material system, i.e., wurtzite crystals grown in +c direction, N-polar nitride semiconductors grown in -c direction are paid growing attention since high-quality N-polar GaN was successfully realized by metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE) [1]. After that, N-polar GaN HEMTs have been developed intensively for millimeter-wave power devices [2]. Since N-polar GaN HEMTs consist of a GaN channel on the top and a AlGaN back barrier layer, they have an advantage to achieve strong 2DEG confinement in the top GaN channel, which is beneficial to mitigate the short channel effect in sub-0.1- μm gate HEMTs that are commonly used for millimeter-wave transistors.

Growing N-polar crystals with a smooth surface is challenging. Typically, substrates with high off-cut angles ($>2^\circ$) are used while it has a penalty on an anisotropy in carrier transport property [2]. We have achieved a smooth surface of N-polar GaN/AlGaN/GaN HEMT structures on sapphire substrates with very small off-cut angle of 0.8° and confirmed isotropic device characteristics [3].

Some properties are still unknown for N-polar materials. For example, reported Schottky barrier height of N-polar GaN is lower than that of Ga-polar GaN. We proposed a surface polarization charge model to explain the difference in the barrier height between the two polarities [4]. The proposed model also helps calculate the 2DEG concentration of HEMT structures with high accuracy [5].

Direct growth is not the only way to realize N-polar materials. A wafer bonding of Ga-polar surface to a supporting substrate and subsequent backside process is another approach to obtain N-polar surface [6]. In future, an integration of Ga- and N-polar materials on a common substrate will expand the opportunities of GaN devices to, for example, complementary logics and power switches with integrated gate drivers.

This work is partly supported by JSPS KAKENHI 23K17322 and 24H00425.

- [1]. T. Matsuoka, Y. Kobayashi, H. Tanahata, T. Mitate, S. Mizuno, A. Sasaki, M. Yoshimoto, T. Ohnishi, M. Sumiya, *Phys. Status Solidi B* **243**, 1446 (2006).
- [2]. M. H. Wong, S. Keller, S. D. Nidhi, D. J. Denninghoff, S. Kolluri, D. F. Brown, J. Lu, N. A. Fichtenbaum, E. Ahmadi, U. Singisetti, A. Chini, S. Rajan, S. P. DenBaars, J. S. Speck, U. K. Mishra, *Semicond. Sci. Technol.* **28**, 074009 (2013).
- [3]. K. Prasertsuk, T. Tanikawa, T. Kimura, S. Kuboya, T. Suemitsu, T. Matsuoka, *Appl. Phys. Exp.* **11**, 015503 (2018).
- [4]. T. Suemitsu, I. Makabe, *Phys. Status Solidi B* **257**, 1900528 (2020).
- [5]. T. Suemitsu, H. Imabayashi, K. Shiojima, *Compound Semiconductor Week (CSW)*, 273 (2025).
- [6]. S. Toka, J. Liang, T. Suemitsu, N. Shigekawa, *Int. Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D)*, 30P-12 (2024).

Physical Reservoir Computing Using Artificial Synaptic Devices

Soongsil Univ. ¹ Hongseok Oh¹

E-mail: hoh@ssu.ac.kr

Physical reservoir computing (PRC) is a new computing framework, which is developed for energy-efficient machine learning of time-series data. Usually, a recurrent neural network (RNN) is used for learning time-series data, which is powerful but requires high computational cost. Reservoir computing (RC) is developed to address the intensive computational cost. In RC, a reservoir, composed of fixed, randomly connected nodes, is driven by the input signal. Only the connections between so-called readout nodes and output nodes are trained, while most of the connections remain unchanged. By minimizing the number of connections for training, this approach can significantly reduce computational costs. On the other hand, the performance is maintained comparable or even superior compared to RNN. PRC is an approach where the digital reservoir is replaced with a physical system. Here, the energy efficient AI can be implemented since reservoir requires no computational cost. Any physical systems with nonlinearity and fading memory characteristics can serve as a PRC reservoir, including mechanical, electrical, or optical systems. Recently, PRC systems based on one or a few (opto)electronic devices have emerged as practical solutions, thanks to their simplicity and compatibility with existing electronics. In this presentation, we introduce tellurium thin-film-based photonic synapses and their application to PRC. We demonstrate two important examples: a classification task of grayscale handwritten digits, and prediction task of nonlinear dynamical equations. Our research can enable energy-efficient AI for learning and processing dynamic systems in the future.

Water-Induced Instability and Its Enhancement in Field-Effect Transistors Based on 2D Layered Materials

Osaka Metropolitan Univ., °Ryo Nouchi

E-mail: r-nouchi@omu.ac.jp

The instability in the operation of electronic devices is a central issue in the development of feasible applications. Low-dimensional nanomaterials possessing one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) bodies are prone to environmental conditions owing to their high surface-to-volume ratios. Field-effect transistors (FETs) based on 1D materials such as carbon nanotubes and 2D materials such as graphene are known to be significantly affected by the presence of water from ambient air. Water-induced instabilities have been understood by charge-carrier trapping within the channel and the ferroelectric alignment of water dipoles, both of which are ascribed to the effects induced by the application of gate voltage (V_G). In this talk, I will discuss the effects induced by the largely unexplored counterpart, the drain voltage (V_D), by considering FETs with a channel layer of a representative 2D semiconductor, MoS₂, as an example.

Figure 1(a) shows a schematic of the FETs with exfoliated flakes of MoS₂ as the channel. As shown in Fig. 1(b), the MoS₂ FETs exhibit a V_D -induced shift in the threshold voltage (V_{th}) with a magnitude of 3.1 V/V. Drain-induced barrier lowering (DIBL) is a well-known origin of the V_D -induced shift in V_{th} . However, the magnitude of DIBLs is typically less than 1 V/V, indicating the presence of other origins. The V_D -induced shift is enhanced under high-humidity conditions and accompanies rectification behavior in the output (I_D - V_D) characteristics. These findings indicate that the instability is due to the voltage-controlled adsorption of water molecules from the atmosphere, similar to the charge-injection barrier switching observed in organic devices [1–3]. As shown in Fig. 1(c), the magnitude of the shift is considerably enhanced to > 90 V/V by the deposition of F4TCNQ molecules on MoS₂ [4], which is ascribable to the water-capturing ability of the molecular layer.

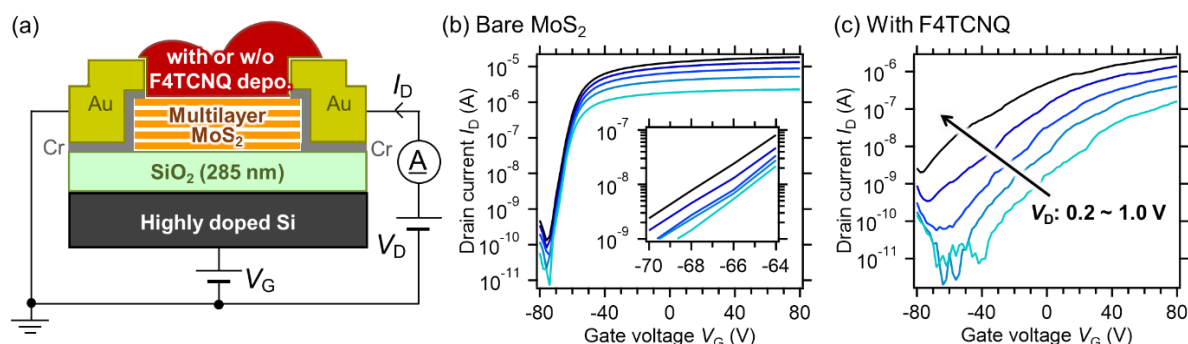


Figure 1. (a) Schematic of the MoS₂ FETs. (b,c) Transfer (I_D - V_G) characteristics of MoS₂ FETs (b) without and (c) with F4TCNQ deposition. These characteristics were measured under high-humidity conditions.

[1] RN: Adv. Mater. Interfaces **5** (2018) 1801261. [2] RN et al.: AIP Adv. **10** (2020) 075312. [3] Hamahiga & RN: Org. Electron. **121** (2023) 106866. [4] Kii & RN: ACS Appl. Electron. Mater. **7** (2025) 5282.

Contact Engineering in Atomically Thin 2D Electronics

Sangyeon Pak¹

E-mail: spak@hongik.ac.kr

Two-dimensional (2D) semiconductors such as monolayer MoS₂ and WSe₂ have rapidly gained attraction as next-generation channel materials for ultra-scaled electronics, owing to their exceptional electrostatic control and atomic-level thickness. Despite their promising characteristics, high contact resistance and Fermi-level pinning (FLP) at the metal–semiconductor interface still pose significant obstacles to achieving optimal device performance and scalability. In this presentation, I will highlight the latest breakthroughs in contact engineering ranging from van der Waals (vdW) metal transfer, semimetallic and edge contacts, and contact doping to strain engineering and self-healing electrodes that collectively improve carrier injection, lower Schottky barrier, and enhance interface stability. These advances provide new insights in designing next-generation devices based on 2D semiconductors.

Fabrication of transfer-free graphene FETs utilizing the catalyst metal agglomeration technique with fine Ni patterns

Toshiharu Kubo*, Naoyuki Sasada, Makoto Miyoshi and Takashi Egawa

Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya city, Aichi 466-8555, Japan

*kubo.toshiharu@nitech.ac.jp

Keywords: graphene, agglomeration technique, field effect transistor

Graphene-based devices have been studied for next-generation high-speed electronic and optical devices. Although there are numerous methods of synthesizing graphene layers, a substrate transfer-free process that can produce graphene layers of good crystalline quality on insulating substrates has yet to be established. We have previously developed the agglomeration technique for a transfer-free process, which exploits the agglomeration of the metal catalyst on insulating substrates [1-4]. Transfer-free graphene field-effect transistors (FETs) fabricated on sapphire substrates by the agglomeration technique showed proper drain current modulations by applied gate voltages [3].

Moreover, we fabricated graphene/Ni patterns directly on sapphire substrates through a self-forming process utilizing the pattern-controlled catalyst metal agglomeration technique, which was accomplished via a thermal annealing process of rectangular Ni patterns preformed on thin amorphous carbon films on sapphire [4]. A few-layer graphene film was observed in specific areas along the periphery of the preformed Ni patterns.

As for the improvement of crystal quality of graphene films, it has been reported that the quality of graphene is improved by the precise control of the precursor exposure on the epitaxially grown Ni(111) thin film in the CVD process [5]. Therefore, we used the epitaxially grown Ni(111) thin film in the catalyst metal agglomeration technique to improve the crystal quality of transfer-free graphene films and the electrical properties of graphene FETs. The quality of graphene formed using the Ni(111) was better than those of previous studies. The quality of graphene became higher with increase of the crystallite size of Ni (111). Furthermore, the field-effect mobilities were estimated to be $1600 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ for holes and $1540 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ for electrons. The mobilities were confirmed to be approximately twice as large as those of previous study [6].

To synthesize graphene films with good crystal quality utilizing the pattern-controlled catalyst metal agglomeration technique, we have tried to reduce the distance between Ni patterns. Ni patterns with submicron-seized line-type spaces were formed by electron beam lithography, and graphene/Ni patterns were directly fabricated on sapphire substrates. As a result, we observed few-layer graphene between the Ni patterns; however, the electrical properties between the Ni pattern showed lower values, which seems due to the fact that the Ni patterns were thin (200 nm) and thus agglomerated into islands. Therefore, we have attempted to fabricate thicker Ni patterns. By using the thick Ni patterns, successful formation of graphene with good crystallinity was achieved and good ohmic characteristics have been obtained.

Acknowledgement

The authors thank Mr I. Kato for his help in conducting the experiments.

References

- [1] K. Banno, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 082112 (2013).
- [2] M. Miyoshi, *et al.*, Mater. Res. Express **2**, 015602 (2015).
- [3] M. Miyoshi, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **107**, 073102 (2015).
- [4] M. Miyoshi, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **110**, 013103 (2017).
- [5] S. Entani, *et al.*, J. Appl. Phys. **111**, 064324 (2012).
- [6] T. Kubo, *et al.*, Appl. Phys. Express **14** 116503 (2021).

2D materials beyond the limit of 3D bulk semiconductors

Hyesung Park ^{1,2}

¹*Department of Integrative Energy Engineering, Korea University*

²*KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University*

E-mail: hyesungpark@korea.ac.kr

2D semiconductors such as transition metal dichalcogenides (TMDs) have attracted considerable interest in the quest to overcome some of the challenges associated with 3D bulk semiconductors.^[1,2] To substitute transistor-based electronics that use 3D bulk semiconductors with 2D semiconductor materials, various aspects of the development processes (e.g., wafer-scale synthesis, dielectric materials suitable for 2D materials, patterning techniques, etc.) should be considered. Here, a facile strategy for synthesizing large-area 2D materials and controlling their properties to achieve high-performance electronic devices based on 2D semiconductors via liquid precursor-mediated chemical vapor deposition (CVD) is presented. We demonstrate the synthesis of various 2D materials, including TMDs, ionic crystals, and high entropy materials, by manipulating the composition of the liquid precursor. Through the incorporation of additives and dopants into the liquid precursor, we successfully achieved both large-area thin-film growth and precise control of doping concentrations. Furthermore, by depositing a liquid-phase transition metal precursor on a pre-patterned Ni/SiO₂ substrate with sacrificial metal layers, patternable TMDs can be grown directly on SiO₂ through intergranular diffusion process, enabling the fabrication of TMDs-based electronic devices with promising functionalities.

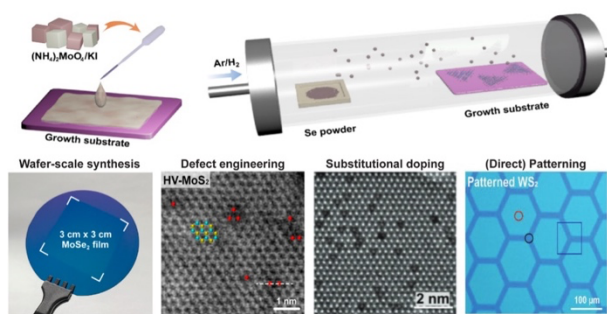


Fig 1. Controlling the growth behavior and properties of 2D semiconductor materials through liquid precursor-mediated CVD.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：脳の情報処理をめぐる数理・材料・生理の融合 ～ニューロモルフィックと神経機能の融合フロンティア～

[8p-N102-1~7] 脳の情報処理をめぐる数理・材料・生理の融合 ～ニューロモルフィックと神経機能の融合フロンティア～

[8p-N102-1]

オープニング：シンポジウム開催の趣旨について

○神吉 輝夫¹ (1.阪大産研)

[8p-N102-2]

抽象と確率に関する脳の情報表現学習をモデル化する

○豊泉 太郎¹ (1.理研CBS)

[8p-N102-3]

脳の動的情報処理とブレインマシンインターフェイス

○夏目 季代久¹ (1.九州工業大学)

[8p-N102-4]

アナログニューロモルフィックハードウェアにおける数理と実装

○酒見 悠介¹ (1.千葉工大)

[8p-N102-5]

自発活動を利用した脳の臨界計算

○高橋 宏知¹ (1.東大情理)

[8p-N102-6]

イオンと電子の時空間ダイナミクスに基づく物理リザーバー計算の構築及びセンシング統合型情報処理デバイスに向けた展開

○西岡 大貴¹、並木 航¹、南 皓輔¹、吉川 元起¹、中西 尚志¹、寺部 一弥¹、土屋 敬志¹ (1.NIMS)

[8p-N102-7]

クロージング

○土屋 敬志¹ (1.物質・材料研究機構)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：脳の情報処理をめぐる数理・材料・生理の融合 ～ニューロモルフィックと神経機能の融合フロンティア～

[8p-N102-1~7] 脳の情報処理をめぐる数理・材料・生理の融合 ～ニューロモルフィックと神経機能の融合フロンティア～

[8p-N102-1] オープニング：シンポジウム開催の趣旨について

○神吉 輝夫¹ (1.阪大産研)

キーワード：ニューロモルフィック、異分野融合、脳情報処理

近年、脳の情報処理に学ぶ数理モデルやニューロモルフィック材料、生理計測の研究が進展しています。本シンポジウムは、これら異分野の融合を通じて「脳に学び、脳をつくる」ための新たな知的基盤を創出することを目的とし、数理・材料・生理の研究者が集い対話する場を提供します。

抽象と確率に関する脳の情報表現学習をモデル化する

Modeling the brain's representation of abstraction and probability

豊泉 太郎

RIKEN Center for Brain Science

E-mail: taro.toyoizumi@riken.jp

Adaptive behavior relies on activity-dependent synaptic plasticity to sculpt internal models of the world. I introduce two complementary frameworks for how the brain encodes abstraction and probability. Regarding abstract representations, we first propose a three-factor plasticity rule for nonlinear dimensionality reduction in a three-layer network inspired by the *Drosophila* olfactory circuit. This rule approximates the t-SNE algorithm and reproduces experimental findings from fly studies. Next, we describe a dual-pathway hippocampal model—featuring a dense, direct input path and a sparse, indirect input path—where modulation of inhibitory tone toggles recall between abstract categories and concrete exemplars. Regarding probabilistic representations, we exploit chaotic fluctuations in a recurrent network to perform Bayesian posterior sampling. Trained with biologically plausible learning on a cue-integration task, the network reliably approximates target distributions despite chaos-induced sensitivity to initial conditions. Together, these models illustrate how synaptic plasticity and neural dynamics could underlie abstract and probabilistic internal representations.

- K. Yoshida and T. Toyoizumi, *Sci. Adv.* 11, eadp9048 (2025). DOI:10.1126/sciadv.adp9048
A biological model of nonlinear dimensionality reduction
- L. Kang and T. Toyoizumi, *Nat. Commun.* 15, 647 (2024). DOI:10.1038/s41467-024-44877-0
Distinguishing examples while building concepts in hippocampal and artificial networks.
- Y. Terada and T. Toyoizumi, *PNAS* 121:18, e2312992121 (2024). DOI:10.1073/pnas.2312992121
Chaotic neural dynamics facilitate probabilistic computations through sampling.

脳の動的情報処理とブレインマシンインターフェイス

Dynamic Information Processing in the Brain and Brain-Machine Interfaces

夏目 季代久

Kyushu Institute of Technology

E-mail: natume@brain.kyutech.ac.jp

外部の物理刺激は、私たちの目、鼻、耳等感覚器において電気信号に変換され、脳に運ばれ、脳はそれらの電気信号を情報処理している。

脳は興奮/抑制性神経から構成される神経回路により動的情報処理を行っている。興奮性神経のリカレント結合と抑制性神経の作用により神経リズムが誘導され脳波として測定される。

脳における感覚情報処理の時定数は異なる。また脳の部位毎で刺激に対する神経細胞活性化時定数も異なる。初期感覚部位では時定数は短く、高次処理脳部位ほど時定数は長くなる。この時定数の違いは各部位で発生する脳波の周波数の違いに反映されると考えられる。脳波には周波数の違いにより、低周波数から高周波数にかけて δ 、 θ 、 α 、 β 、低 γ 、高 γ 波に分類される。

脳の初期感覚処理領域の脳波は、位相リセット、包絡線カップリング等で外部刺激と相互作用している。脳波は、異なる脳部位間で振幅調整、引き込み、位相カップリング、位相/振幅カップリング等で相互作用している。これらの脳部位間脳波相互作用により、脳部位間は動的に結合して、外部刺激に対する情報処理を行っていると考えられている。視覚情報処理ではボトムアップ情報は γ 波が、トップダウン情報は β 波が担っていると考えられている。

脳は単一感覚モダリティの情報処理を行うと共に多感覚モダリティ間での統合も行っている。多感覚モダリティ間での処理においても上記脳波現象を利用して、外部刺激に対する情報分離、異なる感覚モダリティ間情報の統合等の情報の階層的処理がなされている。

聴覚情報処理では、脳は音声信号包絡線処理していると考えられている。例えば、脳波 β 波は音楽信号のビート情報が処理される。一方、言語処理において、文章音声信号にしてヒトに聞かせた時、音声信号包絡線と脳波とのコヒーレンスが高い程、その文章の理解度は高いという報告がある。この事は外部刺激と聞き手脳波とのコヒーレンスが文章の意味処理に関係している事を示している。

私たちは音楽の嗜好性処理に、音楽音声信号と脳波との位相同期が関係するか調べている。その結果、音声信号と脳波との位相同期に関して、音楽の好き/嫌い間で統計的な有意差が見つかった。嫌い曲に対しては δ 、高 γ 波で位相同期指標が高く、好き曲に対しては α 、 β 波で位相同期指標が高かった。従ってこのような位相同期指標を用いて音楽嗜好性が予測出来るかもしれない。

シンポジウムでは、脳の動的情報処理の側面と脳波を用いたブレインマシンインターフェース技術について紹介したい。

アナログニューロモルフィックハードウェアにおける数理と実装

Algorithms and Implementation of Analog Neuromorphic Hardware

千葉工大¹ 酒見 悠介¹

Chiba Institute of Technology¹

E-mail: yusuke.sakemi@p.chibakoudai.jp

近年の人工知能(AI)の発展に伴い、AI 推論は莫大な電力を消費し、将来的にはデータセンター全体の消費電力の大半を占めると予想されている。この電力問題を解決する手段として専用ハードウェアの開発が注目されており、なかでもアナログニューロモルフィックハードウェアは極めて高い電力効率を実現できるため、その実用化が期待されている。このハードウェアは通常のニューラルネットワークではなく、スパイクングニューラルネットワーク (SNN)を動作原理とし、その実装はアナログ回路で構成されている。

SNN はニューロンの出力信号であるスパイク (発火) のタイミングを巧みに利用することで、従来の深層学習とは異なる情報処理様式を実現できる[1]。とくに特徴的なのがテンポラルコーディングであり、スパイクの発生時刻そのものに情報を埋め込む方式である。講演では、テンポラルコーディングを実現する学習アルゴリズムと神経科学におけるエビデンスについて解説する。

アナログニューロモルフィックハードウェアは、SNN をアナログインメモリ計算回路 (AIMC) 上に実装することで、超低消費電力での動作を実現する。AIMC は、プロセッサとメモリ間のデータ移動に起因する電力ボトルネックを解消するアーキテクチャであり、GPU に比べ約 1/1000 の電力で AI 推論が可能である。一方、アナログ回路特有の非理想特性が顕著に現れ、その設計や運用は困難である。講演では、アルゴリズムとハードウェアの協調設計による非理想特性の影響低減手法や、SNN の学習則を応用した物理ニューラルネットワークアプローチ[2]についても解説する。

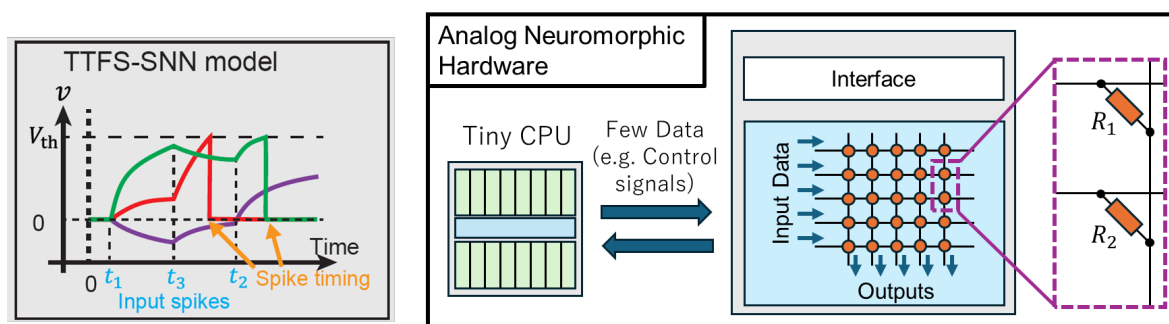


Fig. 1: Spiking Neural Network (left) and analog neuromorphic hardware (right).

[1] 酒見悠介 他「スパイクングニューラルネットワークにおける深層～」生産研究 71, 159 (2019)

[2] Y. Sakemi+, “Harnessing Nonidealities in Analog In-Memory ~”, arXiv:2412.09010 (2024)

自発活動を利用した脳の臨界計算 Critical neurocomputation with spontaneous activity

東大情理¹ ○ 高橋宏知¹

Univ. Tokyo¹, ^oHirokazu Takahashi¹

E-mail: takahashi@i.u-tokyo.ac.jp

Unlike digital computers, the brain exhibits spontaneous activity even during complete rest, despite the evolutionary pressure for energy efficiency. Inspired by the critical brain hypothesis, which proposes that the brain operates optimally near a critical point of phase transition in the dynamics of neural networks to improve computational efficiency, we postulate that spontaneous activity plays a homeostatic role in the development and maintenance of criticality [1]. Criticality in the brain is associated with the balance between excitatory and inhibitory synaptic inputs (EI balance), which is essential for maintaining neural computation performance. Here, we hypothesize that both criticality and EI balance are stabilized by appropriate noise levels and spike-timing-dependent plasticity (STDP) windows [2]. Using spiking neural network (SNN) simulations and in vitro experiments with dissociated neuronal cultures, we demonstrated that while repetitive stimuli transiently disrupt both criticality and EI balance, spontaneous activity can develop and maintain these properties and prolong the fading memory of past stimuli [3]. Our findings suggest that the brain may achieve self-optimization and memory consolidation as emergent functions of noise-driven spontaneous activity. This noise-harnessing mechanism provides insights for designing energy-efficient neural networks, and suggest a potential link between the emergent function of spontaneous activity and sleep function in maintaining homeostasis and consolidating memory.

- [1] A. Yaron, Z. Zhang, D. Akita, T. I. Shiramatsu, Z. Chao, and H. Takahashi: “Dissociated Neuronal Cultures as Model Systems for Self-Organized Prediction.” Frontiers in Neural Circuits, in press (<https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.18772>)
- [2] N. Ikeda, D. Akita, and H. Takahashi: “Noise and spike-time-dependent plasticity drive self-organized criticality in spiking neural network: Toward neuromorphic computing.” Applied Physics Letters 123: 023701 (6 pp.), 2023 (<https://doi.org/10.1063/5.0152633>)
- [3] N. Ikeda, D. Akita and H. Takahashi: “Emergent functions of noise-driven spontaneous activity: Homeostatic maintenance of criticality and memory consolidation.” arXiv: 2502.10946, 2025 (<http://arxiv.org/abs/2502.10946>)

イオンと電子の時空間ダイナミクスに基づく物理リザーバー計算の構築 及びセンシング統合型情報処理デバイスに向けた展開

Physical Reservoir Computing Enabled by Ion–Electron Spatiotemporal Dynamics:

Toward Sensing-Integrated Information Processing Systems

NIMS¹, °西岡 大貴¹, 並木 航¹, 南 皓輔¹, 吉川 元起¹, 中西 尚志¹,

寺部 一弥¹, 土屋 敬志¹

NIMS¹, °Daiki Nishioka¹, Wataru Namiki¹, Kosuke Minami¹, Genki Yoshikawa¹, Takashi Nakanishi¹,

Kazuya Terabe¹, Takashi Tsuchiya¹

E-mail: NISHIOKA.Daiki@nims.go.jp, TSUCHIYA.Takashi@nims.go.jp

近年、ディープラーニングをはじめとする人工知能(AI)は、生体神経回路網に着想を得た大規模な仮想ネットワークの構築と学習により、高度な認知・生成機能を実現している。とりわけ生成 AI は、従来の AI では見られなかった“人間らしさ”すら備えつつあり、社会・産業の多様な分野に革新をもたらしている。一方で、これらの演算には膨大な計算資源と消費電力を要することから、持続可能性の観点に加え、電力リソースの限られるエッジデバイスへの実装という点でも深刻な制約が生じている。このような課題に対する革新的な解決策として、物理リザーバー計算(PRC)が注目されている。PRC は物理系が備える時空間的ダイナミクスを計算資源として活用し、仮想的なニューラルネットワークの機能を物理的に代替することで、従来型 AI に比べて著しく高い演算効率を可能とする情報処理手法である。これまでも様々な物理系による PRC の実証が報告されているが^[1]、高性能と小体積の両立に課題があり、ナノスケールで実装可能な材料ベース PRC は未だ十分な性能に達していないのが現状である。特にエッジ実装を志向する場合には、高効率な演算性能に加えて、広帯域の動作速度特性やデバイスの小型化が必須要件となる。したがって、材料系に内在する非線形性や記憶容量といった情報処理能力を最大限に引き出す新たな PRC の枠組みが強く求められている。

こうした背景のもと、我々は半導体材料に対するイオンゲーティングによる物性変調を計算資源とする新しい PRC の枠組みとして、イオンゲーティングリザーバー(IGR)を開発した^[2-7]。IGR はイオン伝導体と半導体から構成されるトランジスタ型素子であり、材料構成の選定により多様な非線形ダイナミクスを柔軟に情報処理へ活用できる点が大きな特徴である。たとえば、Li 固体電解質とダイヤモンドチャネルによって構成される電気二重層トランジスタ型 IGR においては、ゲート電圧入力に対して時々刻々と変化する複雑な電荷パターンに基づく擬似シナプス応答が観測され、それに起因するカオスの縁状態や高い情報処理能力を実証した^[3]。

本講演では、多様な材料系に基づく IGR の構造・動作原理や情報処理容量の解析について紹介するとともに、各種先端センシングデバイスから得られる時系列データを IGR で処理する、センシング統合型エッジ AI デバイスへの展開について議論する。本研究は JST さきがけ(JPMJPR23H4)および JSPS 科研費(22KJ2799, 24KJ0229, 25KJ17941)の支援を受けて遂行されました。

【参考文献】 [1] G. Tanaka et al., *Neural Netw.* **115** 100 (2019). [2] T. Tsuchiya et al., *Adv. Electron. Mater.* **10** 2400625 (2024). [3] D. Nishioka et al., *Sci. Adv.* **8** eade1156 (2022). [4] D. Nishioka et al., *Neuromorph. Comput. Eng.* **3** 034008 (2023). [5] D. Nishioka et al., *Sci. Adv.* **10** eadk6438 (2024). [6] D. Nishioka et al., *Commun. Eng.* **3** 81 (2024). [7]. D. Nishioka et al., *arXiv* 2501.02813 (2025).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：Lab to Fab：研究開発と量産を最速でつなぐ半導体DX

[8p-S202-1~8] Lab to Fab：研究開発と量産を最速でつなぐ半導体DX

[8p-S202-1]

デジタルツインで加速する研究開発から製品化への道筋

○三津江 敏之¹ (1.デロイトトーマツコンサルティング)

[8p-S202-2]

CMP過程のコンピュータシミュレーション

○島田 敏宏¹、横倉 聖也¹、和泉 廣樹¹ (1.北大工)

[8p-S202-3]

ニューラルネットワークポテンシャルを用いた分子動力学法による化学機械研磨機構の解析

○奥野 好成¹ (1.株式会社レゾナック)

[8p-S202-4]

機械学習と数理最適化の融合(MOAI)による革新

○久保 幹雄^{1,2} (1.東京海洋大学、2.MOAI Lab.)

[8p-S202-5]

100%ドライラボの異分野融合研究

○岩見 真吾¹ (1.名古屋大学)

[8p-S202-6]

マテリアルズインフォマティクスと量子アニーリングによる半導体洗浄プロセス向け新規材料探索

○國枝 省吾¹、塙 洋祐¹、高辻 茂¹、佐々木 悠太¹、室 和希²、羽場 廉一郎²、藤倉 忍² (1.SCREENホールディングス、2.シグマアイ)

[8p-S202-7]

半導体製造装置における機械学習を活用した樹脂耐薬評価の高速化

○仲村 武瑠¹、山家 暢¹、國枝 省吾¹、塙 洋祐¹、上島 仁²、新谷 俊了²、杉山 竣哉²、林 慶浩³、吉田 亮³ (1.SCREENホールディングス、2.システム計画研究所、3.統数研)

[8p-S202-8]

300 mmウェハを見据えた2D/2.5D材料の量産化技術

○吾郷 浩樹^{1,2}、ソリス-フェルナンデス パブロ¹ (1.九大院総理工、2.九大半導体セ)

デジタルツインで加速する研究開発から製品化への道筋

The Path from Research and Development to Commercialization Accelerated by Digital Twins

デロイトトーマツコンサルティング合同会社 三津江 敏之

Deloitte Tohmatsu Consulting LLC

E-mail: tomitsue@tohatsu.co.jp

1. SMART USA について

米国の「SMART USA (Semiconductor Manufacturing Advanced Research and Technology USA)」は、半導体製造におけるデジタルツイン技術や先端製造技術の研究・導入を促進するために設立された産官学連携のコンソーシアムである。アメリカの半導体製造、アドバンスドパッケージ、組立産業にデジタルツインモデルを統合し、イノベーションを早期に適用するための環境を構築し、今後数十年間のアメリカ国内の競争力を向上させることをビジョンとして掲げる。世界初の共用の半導体デジタルツインプロセス検証施設において産業関連の研究プロジェクトやデジタルツインによる労働者のトレーニングを実施するとしている。すでに 30 州以上から、業界、学会、サプライチェーンの設計と製造の全領域を代表する 150 を超えるパートナー組織(企業含)が参加予定であり、10 の国立研究所、5 つの米国製造業研究所、5 つの経済開発機関、4 つの労働組合グループと協働する予定となっている。また、SMART USA の設立および運営に対しては、CHIPS for America がすでに資金提供を表明しており、合計で 10 億ドル程度の予算が確保されている。

2. 日本の半導体業界にとっての懸念点

SMART USA の IP の取り決めに関する状況によると、『本条に基づき資金提供を受けている行政機関の長は、当該資金提供の結果として実施されたマイクロエレクトロニクスの研究開発の結果生じた知的財産 (IP) については、可能な限り国内生産を義務付ける方針を策定し、また、当該知的財産を外国の敵対勢力から保護するための国内管理要件を策定しなければならない』との記載がある。つまり、SMART USA における取組によって生じる IP に関しては、米国内での管理、生産を原則としており、それが現実となると、日本国内の半導体製造、あるいはサプライチェーンの競争力が相対的に低下する懸念がある。それと同時に、日本の製造装置メーカーにとっては不利な仕様や規格になるといった懸念も生じる。

3. あるべき姿の実現に向けて

こういった懸念から、日本においても共用の半導体デジタルツインプロセス検証施設、あるいは米国の取組に関わるための体制が必要である。スタートアップや中堅企業も巻き込み、産官学でいかに連携を進めるべきか、さらには国内半導体業界全体で、デジタルツインをいかに活用し、研究開発から製品化への筋道を加速させるかについて、今後さらなる議論が期待される。

CMP 過程のコンピュータシミュレーション

Computer Simulation of CMP processes

北大院工 ○島田 敏宏, 横倉 聖也, 和泉 廣樹

Hokkaido Univ., °Toshihiro Shimada, Seiya Yokokura, Hiroki Waizumi

E-mail: shimadat@eng.hokudai.ac.jp

【緒言】CMP(Chemical Mechanical Polishing)は半導体プロセスにおいて重要であるが、原子レベルの過程については未知の部分が多い。砥粒の衝撃力、圧力のほかに液中の様々な添加物による化学反応が利用される複雑な状況を考える必要がある。また、研磨パッド・ウェファ表面と砥粒の位置関係や運動は CMP 過程に重要であると考えられるが、限られた数の実験的研究が報告されているのみである。さらに、分子動力学計算による CMP 過程のシミュレーションの報告が増えてきているが、経験的な力場を使っているため、真の姿をとらえているかどうかには議論の余地がある。これらの状況を踏まえ、様々なスケールでのシミュレーションを実際に行って、CMP 過程のシミュレーションで考慮すべき要素について検討した結果を報告する。

【計算】分子動力学計算には LAMMPS と ReaxFF 力場[1]を用いた。第一原理計算には Gaussian16 および VASP を用いた。砥粒の動きについては Elmer FEM を用いた。

【結果・考察】図 1 に、Cu の板状構造を SiO₂ 半球が削っている様子のシミュレーション結果を示す。図 2 は、図 1 と同じ構造に水を導入した結果であり、局所的な水の圧力によって SiO₂ が触れる前に Cu 板状構造の破壊が起こっていることがわかる。ただし、この計算では相互の移動速度は実際の研磨におけるウェファ・研磨パッドの速度よりも数桁高速に設定している。実際の研磨においては砥粒は圧力変動の効果で加速されることが考えられるが、どの程度加速されるかを見積もるため、研磨パッド・ウェファ表面と砥粒に関する弾性体+流体計算を進めている。また、過酸化水素等を添加した場合に起こる化学反応の要素が強い過程について、第一原理計算と ReaxFF を用いた分子動力学計算を比較する。

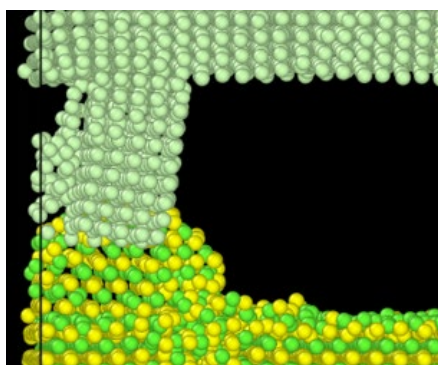


図 1

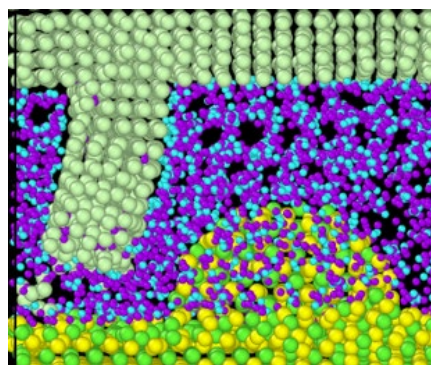


図 2

[1] K.A.Roshan et al., J. Phys.Chem.C 125, 19455(2021).

ニューラルネットワークポテンシャルを用いた
分子動力学法による化学機械研磨機構の解析
Analysis of chemical mechanical polishing mechanism
by molecular dynamics method using neural network potential

株式会社レゾナック、奥野好成

Resonac Corporation、Yoshishige Okuno

E-mail: okuno.yoshishige.xhegn@resonac.com

我々は、半導体製造において重要なセリア砥粒を用いたシリカ基板の研磨用化学機械研磨スラリーの開発を行っている。開発の過程で、Open Catalyst Project 2022 データセットを学習して構築したニューラルネットワークポテンシャルを用いた分子動力学シミュレーションにより解析を行った (Fig.1)。これにより、複雑な化学的・動的挙動を正確かつ効率的にシミュレートすることが可能となった。実際、セリアとシリカが水中でどのように反応するかについての知見が得られ、Ce-O-Si 結合の形成とシリカの加水分解における水酸基濃度の役割が明らかになった The bar chart compares the normalized frequency of Ce-O-Si bond formation (blue bars) and the rate of Si-O bond hydrolysis (red bars) across surfaces (A-D) after ~0.1 ns of contact with ceria (111). We used the values of the activity on the surface (A) as the baseline so that the value of the activity on the surface (A) should be 1. Each bar represents the atomic-scale interactions for the respective surface, as depicted in Fig. 5.。詳細なメカニズムの解析においては、仮想現実技術を導入し、シミュレーション結果を3次的に可視化することが有用であった。さらに、研磨対象基板の形状が研磨速度に及ぼす影響を明らかにすることができた(Fig2)[1]。この手法は、化学機械研磨プロセスへの理解を深め、化学機械研磨スラリーの改良に貢献し、最終的には半導体製造技術の飛躍的な発展につながることが期待される。

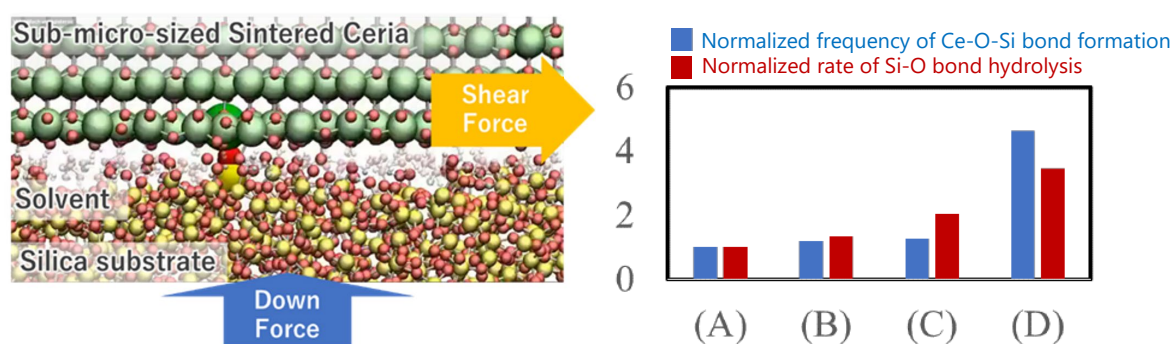


Fig.1: Simulation of silicon wafer surface being polished by Fig2. Abrasive rates of (A) flat surface, (B) doubled CMP slurry. SiOH density surface, (C) rectangular protrusion surface and (D) mountaneous protrusion surface.

[1] Yoshishige Okuno, Teruo Hirakawa; Fukiko Ota; Yuuto Kurata; Akihiro Orita; Satoyuki Nomura, "Advanced Atomic-scale Insights into the Chemical Mechanical Polishing Process with Ceria Abrasives using Molecular Dynamics and Neural Network Potential," 2024 IEEE 74th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Denver, CO, USA, 2024, pp. 1251-1255, doi: 10.1109/ECTC51529.2024.00202.

機械学習と数理最適化の融合 (MOAI) による革新

Revolutionizing through the Synergy of Machine Learning and Mathematical Optimization (MOAI)

東京海洋大学, (株) MOAI Lab. 久保幹雄

Tokyo University of Marine Science and Technology, MOAI Lab., Inc. Mikio Kubo

E-mail: kubo@kaiyodai.ac.jp

ここ数年の間に、人工知能 (AI: より狭くは機械学習、深層学習、大規模言語モデル、Agentic AI) と数理最適化 (MO) の融合研究 (我々はこれを MOAI と名付けた) が急速に進んできている。本講演では、様々な融合手法の中で、実際の最適化問題への応用の観点で有効であると考えられる 2 つを取りあげる。1 つは、NP-hard な実際問題を高速に解くための新しいパラダイムであり、もう 1 つは Agentic AI を用いた最適化コンサルの代替である。

1 つの NP-hard な大規模最適化問題例の高精度な解を高速に算出することは、計算量の理論から (おそらく) 不可能であると考えられる。しかし、実際の現場では、似たような問題例を毎日繰り返し解く場合が多い。このようなオンライン環境で類似の問題例が次々と発生するという仮定の下では、NP-hardness の壁を乗り越えるための様々な工夫が考えられる。過去の問題例と (時間をかけて計算した) 高精度の解の組 (もしくは解の集団) を用いることによって、新たな問題例に対して短時間に高精度の解を算出することが可能になる。我々は、最近の研究を統一したフレームワークを提案し、それを動的・確率的なケースに拡張した。これは、MOAI 技術を用いた動的計画、強化学習、モデル予測制御の一般化と捉えることもできる。

実際問題に対する MO プロジェクトは、クライアントへのヒヤリング、モデルの抽出、最適化アルゴリズムの選択、実装、テストを繰り返すことによって遂行されるが、通常は非常に時間と費用がかかる。我々は、Agentic AI を駆使してこのプロセスを高速に実施するための方法論を提案している。以下のエージェントをプロンプト、ツール、LLM から構築し、プロジェクトの進捗度合いを状態として保管する。1. Hearing Agent (ヒヤリング)、2. Classification Agent (問題分類)、3. Data Processing Agent (データ処理)、4. Data Analyze Agent (データ分析)、5. Solver Selection Agent (ソルバー選択)、6. Modeling Agent (カスタムモデル構築)、7. Data Matching Agent (データマッピング)、8. App-Gen Agent (アプリ生成・デプロイ)、9. Scenario-Gen Agent (シナリオ生成)。さらに、典型的な問題 (配送最適化、スケジューリング最適化、シフト最適化、ネットワーク最適化など) に対しては、専用ソルバーをツールとして準備し、どの範疇にも当てはまらない問題に対しては、準備した知識ベースを用いてモデリング言語 AMPL のモデルを自動生成する。典型問題に対しては、専用の web アプリケーションを準備しておくが、AMPL モデルに対しては、エージェントが自動的に web アプリケーションを生成する。

これらの MOAI 技術を用いることによって、複雑な実際の最適化問題を短時間で解くことが可能となり、従来のアプローチでは達成し得なかったレベルでの問題解決能力と応用範囲の拡大をもたらすことが期待される。

100%ドライラボの異分野融合研究

Interdisciplinary research conducted entirely in a dry-lab setting

名古屋大学 大学院理学研究科 理学専攻 生命理学領域 異分野融合生物学的研究室¹

interdisciplinary Biology Laboratory (iBLab): <https://iblab.bio.nagoya-u.ac.jp>,

Division of Natural Science, Graduate School of Science, Nagoya University¹

E-mail: iwami.iblab@nagoya-u.ac.jp

近年、生命医科学研究は、数理科学および AI 技術の急速な進展により新たな段階へと突入しています。従来のビッグデータ解析に加え、機械学習を基盤とするデータ駆動型手法と、数理モデル・コンピュータシミュレーション・バイオインフォマティクスとの融合が進展しつつあり、疾患の横断的理解や個別化リスク評価、新興感染症の予測・制御、さらには創薬や臨床試験デザインの最適化といった多方面での応用が期待されています。

このような流れの中で、私たち iBLab（異分野融合生物学的研究室）は、日本初の「100%ドライラボ」による異分野融合型の研究拠点として、数理モデルと AI 技術を核に、臨床医や実験研究者と緊密に連携しながら、革新的な研究を展開しています。iBLab では、データの取得・設計段階から関与し、数理モデルと AI を駆使して生命現象のメカニズム解明や治療戦略の最適化を目指しています。また、症状ベースでの疾患理解や、病原体の進化動態の予測など、従来の枠組みを超えたアプローチにより、医学・生物学的研究の加速と深化を図っています。

本講演では、こうした私たちの研究スタイルや異分野融合の実践例、そして今後の展望について紹介し、新時代の生命医科学のあり方を皆様と共有できればと考えています。

マテリアルズインフォマティクスと量子アニーリングによる 半導体洗浄プロセス向け新規材料探索

Accelerated Discovery of Materials for Semiconductor Cleaning through Materials Informatics and Quantum Annealing

株式会社 SCREEN ホールディングス¹, 株式会社シグマアイ²

○國枝 省吾¹, 塙 洋祐¹, 高辻 茂¹, 佐々木 悠太¹, 室 和希², 羽場 廉一郎², 藤倉 忍²

SCREEN Holdings Co., Ltd.¹, Sigma-i Co., Ltd.²,

○Shogo Kunieda¹, Yosuke Hanawa¹, Shigeru Takatsuji¹, Yuta Sasaki¹,

Kazuki Muro², Renichiro Haba², Shinobu Fujikura²,

E-mail: kunieda@screen.co.jp

近年、半導体デバイスの微細化および三次元構造化が進む中、製造プロセスにおける構造安定性の確保が重要な課題となっている。特に洗浄・乾燥工程では、液体の表面張力によるラプラス圧が原因で微細パターンが倒壊し、歩留まりや信頼性に深刻な影響を及ぼす^[1]。この課題に対して有効とされるのが昇華乾燥法であり、液体乾燥時の表面張力を回避することでパターン倒壊を抑制できる。しかし、その効果は使用する昇華材料に大きく依存しており、適切な材料選定が不可欠である。従来の経験則や試行錯誤に基づく探索では限界があるため、より効率的かつ体系的な材料探索手法の導入が求められている（図1）。

本発表では、昇華乾燥法におけるパターン倒壊抑制を目的とした昇華材料の探索に対し、機械学習や最適化計算を活用し、少数の実験データから有望材料を効率的に選定した事例を紹介する。また、材料探索にとどまらず、材料特性の予測やプロセス条件の最適化といった他の応用事例についても言及する。

[1] Y Sasaki, et al., *ACS Appl. Nano Mater.* 2022, 5, 7, 9495–9502

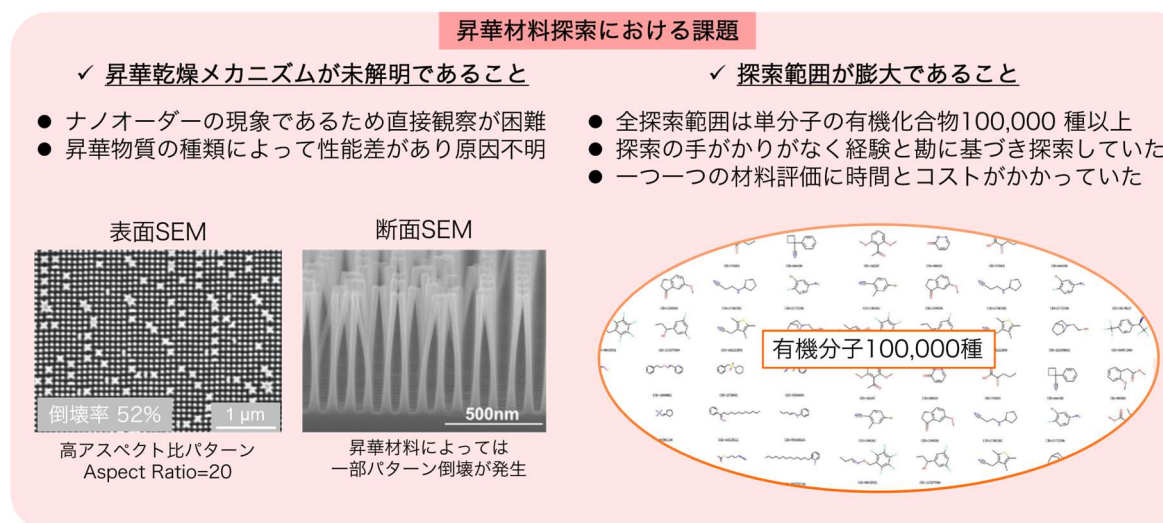


図1. 昇華材料探索における課題

半導体製造装置における機械学習を活用した樹脂耐薬評価の高速化

Accelerating Chemical Resistance Evaluation of Resins Using Machine Learning

for Semiconductor Production Equipment

株式会社 SCREEN ホールディングス¹, 株式会社システム計画研究所², 統計数理研究所³

○仲村 武瑠¹, 山家 暢¹, 國枝 省吾¹, 塙 洋祐¹, 上島 仁², 新谷 俊了², 杉山 竣哉²,
林 慶浩³, 吉田 亮³

SCREEN Holdings Co., Ltd.¹, Research Institute of Systems Planning, Inc.²,

The Institute of Statistical Mathematics³,

○Takeru Nakamura¹, Mitsuru Yambe¹, Shogo Kunieda¹, Yosuke Hanawa¹, Hitoshi Kamijima²,
Toshiaki Shintani², Shunya Sugiyama², Yoshihiro Hayashi³, Ryo Yoshida³

E-mail: take.nakamura@screen.co.jp

半導体製造装置において、新規プロセス採用時には装置材である樹脂の耐薬性試験が必要となる。その試験には、多くの時間・費用がかかり装置開発の課題となっていた。本課題に対し我々は試験コスト削減を目的に、樹脂の耐薬性を予測する機械学習モデルの開発を進めてきた^[1]。既報の通り、耐薬性に関してあり/なしを予測する2値分類モデルを開発してきた一方で、耐薬性は複数の項目をもとに判定するため、2値の分類結果のみでは、判定結果に対する根拠が明確でない問題があった。そこで本発表では、判定結果の明確化に対する取り組みの1つとして、樹脂の薬液浸漬試験における重量の時間変化を予測するモデルの開発について報告する。

学習データに関しては実際に樹脂を一定期間薬液に浸漬試験させ、浸漬前後の樹脂の重量測定を行うことで取得した。樹脂と溶液の記述子を説明変数とし、樹脂の重量変化を予測する回帰モデルを Random Forest (RF) およびサポートベクトル回帰 (SVR) により構築した。記述子は、RDKit による特徴量を使用した。予測精度は一般的な評価を想定し、7 日までの測定結果から 28 日後の膨潤度を予測するモデルを樹脂ごとの Leave One Out Cross Validation (LOOCV) で学習し評価した。

RF と SVR について LOOCV を行った結果について、図 1 に予実プロットおよびスコアを示した。予実プロットをみると、RF では赤丸で示した対角線上から離れているデータ点が、SVR では対角線に近づいた。スコア上でも RF よりも SVR のほうが良いスコアである。このことから SVR では 28 日目の傾向をモデル化し、未知データの予測にもある程度対応可能であると考えられる。今後、上記予測モデルを用い、少ない追加実験で各種溶液に対する寿命を予測することで耐薬評価の高速化、省人・省力化およびテスト材料削減を進める予定である。

参考文献

[1] 仲村 他, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学(野田), 16p-K505-1 (2025).

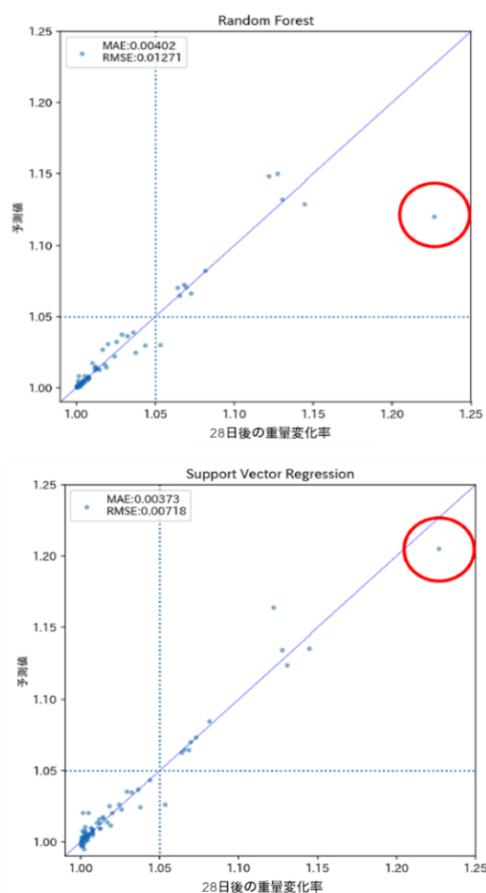


図 1 RF モデルと SVR モデルについて LOOCV を行った結果。

300 mm ウェハを見据えた 2D/2.5D マテリアルの量産化技術

Strategy for 300 mm-scale production of 2D/2.5D materials assisted with AI

九大院総理工¹, 九大半導体セ² ○吾郷 浩樹,^{1,2} Pablo Solís Fernández¹
 Kyushu Univ. ○Hiroki Ago, Pablo Solís Fernández
 E-mail: ago.hiroki.974@m.kyushu-u.ac.jp

近年、2次元材料が次世代エレクトロニクスを担う材料として世界的に大きな注目を集めている。グラフェンは光・磁気・バイオセンサ、および高周波応用といった分野で、遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) は 2030 年以降のチャネル材料の有力な候補として研究が活発に行われている。また、六方晶窒化ホウ素 (hBN) は、多くの 2 次元材料の特性を引き出す絶縁層として有望であるとともに、単一光子発光など新たな応用の可能性が示されている。さらに、これらの材料を組み合わせた 2.5 次元物質も材料科学の新たなプラットフォームとして大変興味深く、今後の発展が強く期待される[1,2]。

このような中、我々は大面积合成が可能な CVD 法を用いて、グラフェン、TMD、hBN の成長とデバイス応用を中心に研究を行ってきた [3-7]。さらに、Cu(111)/サファイア基板を用いたエピタキシャル CVD 法という独自の方法で合成した高品質グラフェン合成技術 [3] に基づく九大発ベンチャーを通じて産業応用を後押ししてきた [8]。今後、2/2.5 次元材料の実用化を推進していくためには、材料の提供にとどまらず、転写、評価、各種プロセスなど多くの検討や研究開発が必要となる。特に、2 次元材料は原子レベルの厚さしかないので、(1) 2 次元物質に特化したハンドリング技術、(2) 電極コンタクトを含めた界面/表面制御技術、(3) 結晶性や欠陥密度などの高速な評価法、などが必要とされる。

我々は、これまで CVD 合成した単層グラフェンについて、機械学習を利用して効果的な転写テープ (UV テープ) を開発してきた (Fig. 1(a)) [9]。他にも、2 層グラフェンの積層角度をラマン分光と機械学習を組み合わせ、大面积に短時間で解析する手法を開発している (Fig. 1(b)) [4]。今後、AI 技術とロボット作業を組み合わせることによって、研究開発がさらに加速するものと期待される。なお、将来的な 300 mm スケールでの量産化を見据えると、2/2.5 次元材料の本質的な理解とともに、科学技術への十分な投資が不可欠であると考える。

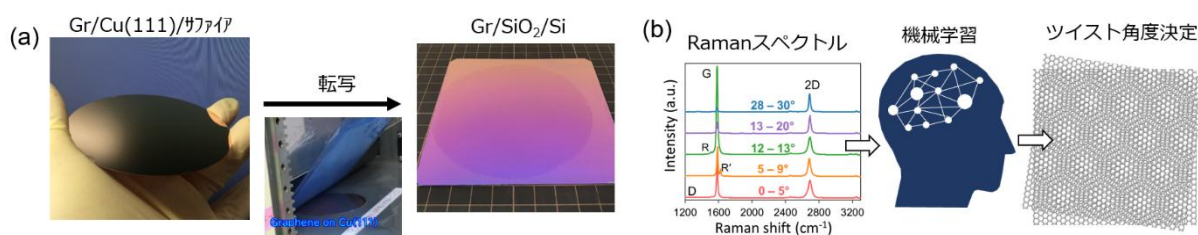


Figure 1. (a) Transfer of 4-inch monolayer graphene from Cu(111)/sapphire to a SiO₂/Si substrate with the aid of the specially designed UV tape [9]. (b) Machine learning-based determination of the twist angle of bilayer graphene [4].

【参考文献】

- [1] H. Ago et al., *NPG Asia Materials*, **16**, 31 (2024)
- [2] H. Ago et al., *Science and Technology of Advanced Materials*, **23**, 275 (2022)
- [3] H. Ago et al., *Applied Physics Express*, **6**, 75101 (2013)
- [4] P. Solís Fernández et al., *ACS Applied Nano Materials*, **5**, 1356 (2022)
- [5] K. Suenaga et al., *ACS Nano*, **12**, 10032 (2018)
- [6] Z. Ma et al., *Science Advances*, **11**, eadr8046 (2025)
- [7] S. Fukamachi et al., *Nature Electronics*, **6**, 126 (2023)
- [8] <https://www.2jigen-zairyo.co.jp/>
- [9] M. Nakatani et al., *Nature Electronics*, **7**, 119 (2024)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：微かな電気の検出が我々の世界を支える

[9a-N104-1~7] 微かな電気の検出が我々の世界を支える

[9a-N104-1]

微かな電気の検出が我々の世界を支える

○廣田 恵¹ (1.艦磁研)

[9a-N104-2]

Radiated Electromagnetic fields from Subsea AC-cables

○Peter Sigray¹, Valentina Caradonna² (1.KTH Royal Institute of Technology, 2.Universita degli Studi della Campania)

[9a-N104-3]

Optimisation of Submarine Platform Corrosion Related Signatures

○Paul Rawlins¹, Sarah Evans¹, Samantha Davidson¹ (1.ESCO)

[9a-N104-4]

陸上・海底の活断層周辺の抵抗率分布の解明と地震発生に対する知見

○後藤 忠徳¹ (1.兵庫県大理)

[9a-N104-5]

海底電磁場計測による巨大地震・津波発生メカニズムの解明

○市原 寛¹ (1.名古屋大)

[9a-N104-6]

電磁誘導による地震発生場と火山の比抵抗構造イメージング

○小川 康雄¹ (1.東科大)

[9a-N104-7]

フリーディスカッション及び名刺交換会

○廣田 恵¹ (1.艦磁研)

微かな電気の検出が我々の世界を支える
**The detection of extremely faint electric field signals
supports our cultural society**

世話人・座長：艦磁研，廣田 恵

Manager/Chairperson: Megumi Hirota, Naval Ship M&UEP R.C.

E-mail: kanjiken@nmurc.com

シンポジウム開会に際して

極く微細な電界を検出する技術は利用される分野によりセンサ、信号処理、電界発生機構に独自の発展を遂げてきた。例えば地中、水中探査、生体内検知等に亘り、それぞれ異なる課題がある一方で共通のサイエンスがある。これらは、相互に発展を補完する内容があるので一堂に会して研究を紹介することで技術の進展が期待できる。

本シンポジウムは 2025 年 3 月開催の電界研究を集約したシンポジウム「地中、水中、生体内、実装した電界感应技術の全員集合が社会を進展」の第 2 回である。

Opening Remark

Technology for detecting extremely faint electric field signals in conducting media has advanced independently in various application areas, developing sensors, signal processing methods, and electric field generation technology. Different challenges exist in application areas such as underground and underwater explorations, and in vivo detections; meanwhile, underlying science is common among them. This symposium is organized to present these challenges together to complement each other's developments and to forward a technological advancement.

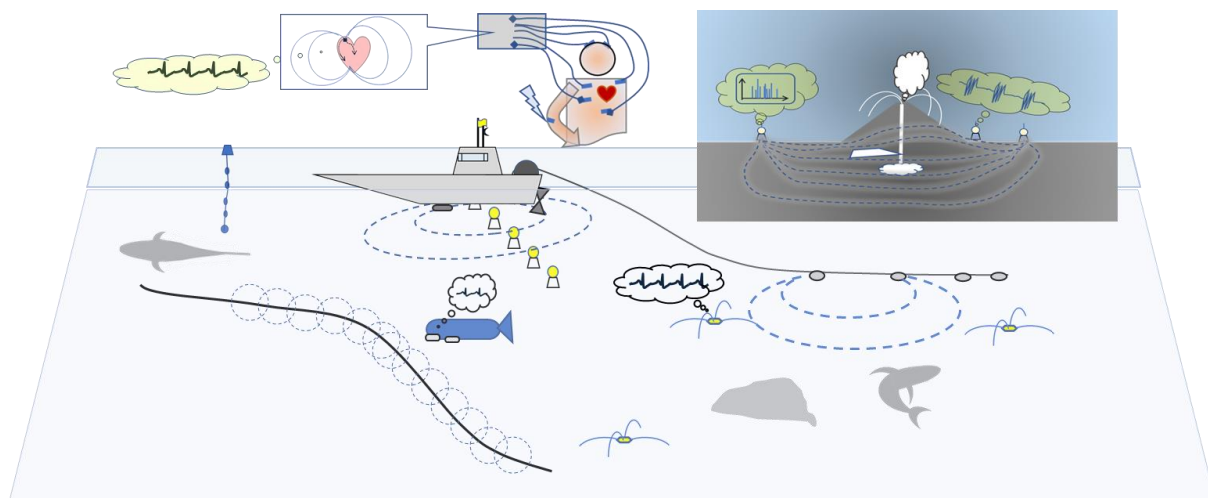


Figure. Applications of Electric Field Technology

Radiated Electromagnetic fields from Subsea AC-cables

Dr. Peter Sigray¹ and Valentina Caradonna²

¹KTH Royal Institute of Technology, Department of Engineering Mechanics, 100 44, Stockholm, Sweden.

²Università degli Studi della Campania “Luigi Vanvitelli”, Department of Engineering, Via Roma 29 - 81031 Aversa, Italy.

E-mail: sigray@kth.se

Interest in electromagnetic fields (EMFs) from subsea power cables is rising alongside the expansion of offshore renewable energy installations. These cables key to transmitting electricity from device arrays to onshore grids are now the dominant anthropogenic EMF source in marine environments, yet uncertainties remain in characterising their emissions and ecological impacts. Alternating-current cables generate both magnetic fields (B-fields) and induced electric fields (i-E fields) that propagate into surrounding waters, potentially affecting the marine environment. Traditional mitigation, cable burial or helical twisting, does not alter biological exposure ranges. Moreover, existing models based on balanced three-phase loads predict an exponential B-field attenuation, but our empirical measurements reveal a longer-range behaviour arising from an unknown component. Here, we present a methodology for estimating subsea cable EMFs, applying three models to high-voltage AC export cables of an offshore wind farm: (1) helical-twist theory (Pettersson & Schönborg), (2) the same with an added $1/r$ term for the unknown source, and (3) the untwisted baseline. Comparison against field observations demonstrates that incorporating the unknown source effects is essential for accurately representing magnetic field propagation and assessing potential exposure volumes for marine species. This approach offers a practical framework for evaluating the environmental impact of cable electromagnetic fields.

Keywords: EMF, AC-cables, propagation, helical twisted cables, unknown source

Optimisation of Submarine Platform Corrosion Related Signatures
ESCO Maritime Solutions¹ P.G. Rawlins¹, S. L. Evans¹ & S Davidson¹
Email: Paul.Rawlins@ultra-pmes.com

Detectability of submarine platforms from corrosion related signatures pose a constant risk to operations throughout a patrol. The corrosion related signatures manifest themselves due to current flow between bare materials, coating loss from the hull, free-flood spaces and the corrosion protection (CP) systems, both active and passive, employed to prevent corrosion.

In order to reduce the risk from detection it is desirable to minimise signatures resulting from the corrosion process as much as is practicable. Minimising the corrosion related signatures requires the ability to control current flow and hence submarines are fitted with advanced CP systems. These advanced systems use actively controlled anodes which allow the current flow to be moderated during a patrol thus reducing these signatures. In order to generate the control signals required to be applied to the CP anodes to minimise the corrosion related signatures, it is necessary to understand the relationships between the applied anode current, the platform's hull voltage potential and the spatial propagation of the electric and magnetic fields.

The purpose of this paper is to describe the methodologies used to obtain minimal corrosion related signatures and the modelling processes that are used to verify and validate that the design solution meets the performance criteria. A description of the numerical modelling process of the platform will be given, detailing how the models are constructed and are employed to calculate the necessary anode and cathode effects to understand the corrosion related signatures. It will be shown how the minimisation of the corrosion related signature can be formulated as a canonical constrained Least Squares problem, and examples using synthetic data will be provided demonstrating the process.

陸上・海底の活断層周辺の抵抗率分布の解明と地震発生に対する知見

Clarification of resistivity distribution in and around land/submarine active faults

and insight into earthquake occurrence

兵庫県大理¹ ○後藤 忠徳¹

Univ. Hyogo¹ ○Tada-nori Goto¹

E-mail: tgoto@earth-univ-hyogo.jp.org

近年、陸上・海底での電磁場の観測・解析技術は著しく進展しており、防災分野などで成果を上げつつある。これまでの野外調査や室内実験によって、亀裂を多く含む岩盤は地下水を多く含み（高含水率）、このために岩盤全体が低い抵抗率（比抵抗）を示すことが知られている。そこで、将来も地震を引き起こすと考えられている活断層近傍や周辺域において電磁場観測・解析を実施して、地下や海底下の比抵抗構造を可視化することができれば、比抵抗から岩盤の破碎度合いが推定でき、さらに活断層の活動度の推定などが可能であると期待されている。

本発表では、最新の陸上・海底での電場・磁場測定装置や電磁場データの解析技術を概説する。例えば陸上については、電磁場測定装置は小型化・軽量化が進んでおり、一部は飛行体（ドローン）に搭載することも可能となっている。またデータサイエンスの発展に伴い、電磁場のノイズ除去性能も飛躍的に向上している。これらの技術紹介に加えて、2016年熊本地震時の地震断層である布田川断層周辺や、南海トラフ（宮崎沖）周辺での3次元地下（海底下）比抵抗構造の解析結果を紹介する。

ここでは例として、南海トラフ宮崎沖での比抵抗構造を紹介する (Fig.1; Nakamura et al. Sci. Rep., 2025)。地震発生域 (Fig.1 の青い線) の周辺は、高比抵抗域として可視化されていることが分かる。すなわち、この部分は含水率が低く、これがプレート境界断層の摩擦強度を増加させ、M7クラスの震源域を構成しているように解釈できる。ただし、電気的構造のみから地震発生要因を決定することは不可能である。今後は電磁場観測と、断層物性評価や岩盤破壊シミュレーションを統合し、地震発生要因に迫る必要がある。

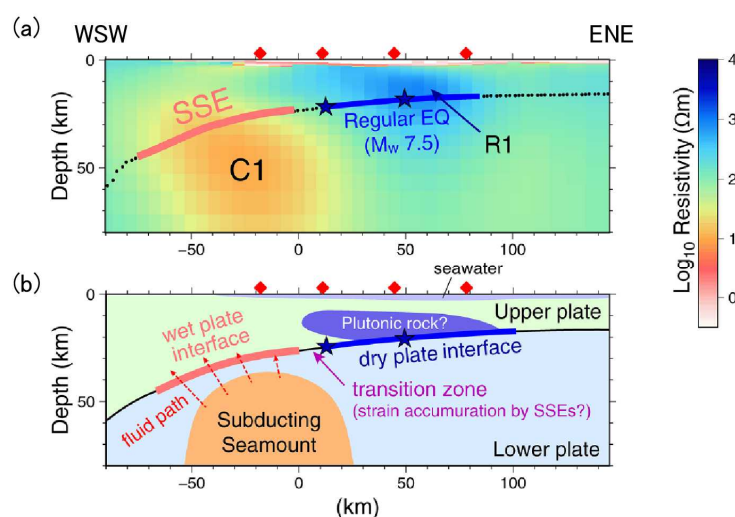


Fig.1 (a) Resistivity structure near the Nankai Trough, off Miyazaki, Japan. (b) Schematic drawing of the interpretation of earthquake occurrence. Modified from Nakamura et al. (2025).

海底電磁場観測による巨大地震・津波発生メカニズムの解明

Understanding of Mechanism of Mega Earthquake and Tsunami by Ocean Bottom

Electromagnetic Survey

名古屋大¹ °市原 寛¹

Nagoya Univ.¹, °Hiroshi Ichihara¹

E-mail: ichihara.hiroshi.i9@f.mail.nagoya-u.ac.jp

地球では、太陽活動と地球磁気圏との相互作用により磁場変動が生じ、これが地中や海中で誘導電流を発生させる。この自然起源の誘導電流は、電位差の時間変動として検出できる。この現象を利用して地下の電気伝導度分布を推定する物理探査手法が Magnetotelluric (MT)法であり、地震発生帯・火山域の地下構造の解明や資源探査等に広く用いられている。

本発表では、海域での調査に焦点を当て、まず MT 法探査を目的とした海底電位差観測について解説する。次に、2011 年東北沖地震発生域や南海トラフ地震発生域などで得られた地下の電気伝導度分布を示し、それらと地震発生との関係性を論じる。

一方、液体金属で構成される地球外核の対流によって、地球では定常的に地球磁場が生じている。その磁場中で良導体である海水が運動すると、ダイナモ効果によって誘導電流が生じる。そのため、海洋潮汐や津波も誘導電流を生じさせることが知られている。実際に MT 法観測中に津波起源の電磁場変動が計測された例が複数報告されている。本発表では、こうしたデータが 2011 年東北沖地震の巨大津波発生メカニズム解明に貢献した研究事例についても紹介する。

電磁誘導による地震発生場と火山の比抵抗構造イメージング

Electromagnetic Imaging of Seismogenic Zones and Volcanoes

東京科学大学¹, 小川康雄¹

Institute of Science Tokyo¹, ^oYasuo Ogawa¹

E-mail: ogawa.y.f4a7@m.isct.ac.jp

地震や火山噴火現象の理解のためには、その周辺の地殻構造を明らかにすることが重要である。近年これらの現象には、流体の存在が深く関わっていることが認識されつつある。地殻の構造は、地震波・電磁波によって、地震波速度構造・比抵抗構造として間接的に知ることができる。地震波速度が岩石を構成するマトリックスの地震波速度に大きく支配されるのに対して、比抵抗構造は岩石中の空隙に存在する少量の流体の存在とその繋がりに支配されるため、流体を探索するには電磁波を用いる電磁探査が有利である。地殻の深部を探索するには、magnetotelluric(MT)法という自然信号を用いる方法が用いられる。本発表では、最近の事例研究について紹介する。

沈み込むプレートによって発生する地震に関しては、沈み込むプレートとその上面のプレートとの間の固着度が場所によって異なることがわかってきた。この原因として、「流体が存在する低比抵抗部は固着度が低く大地震を発生しにくく、流体が存在しない高比抵抗部は固着度が高く大地震を発生する」という仮説を立てて、ニュージーランド国北島のヒ克蘭ギ沈み込み帯の陸域で稠密な電磁探査によって検証した。プレート面上の高比抵抗部分と、GPS から求まる歪み速度の大きな部分が対応することが示された (Heise+ 2019, 2023)。内陸地震に関しては、断層深部の流体リザーバーが存在することによる歪み集中や、流体リザーバーからの流体放出による地震のトリガーがあることがわかってきた。トルコのアナトリア断層は長さ 1600km の巨大活断層で、巨大地震が東から西に向かって移動しながら進行している。1999 年のイズミット地震(M7.6)の次の地震が、首都イスタンブールの南に広がるマルマラ海で想定されているが、断層が海底に入るために構造が不明であった。海底での MT 測定と 3 次元解析を通じて、マルマラ海下の地殻の流体分布が 3 次元的に明らかになり、マルマラ海中央部の断層固着域の存在が解明された (Kaya+, 2022, 2025)。

活火山に関しては、東北日本で稠密な観測データを解析することによって、最上部マントルのメルトが、島弧に沿ってチャンネル状に連続的に存在すること、それが深度 10km から各活火山に分岐することが 3 次元描像として得られた。地震波速度構造と比較することによってそれより浅い部分には流体が存在している部分があることも明らかになった(Masuda+ 2024)。比抵抗構造と地震波速度構造とを入力として、地殻を構成する岩石・マグマ・メルトを定量的に求める研究も進んでいる (Iwamori+ 2025)。日本のような沈み込み帯の火山ではなく、リフト（プレートの裂け目）にある南極のエレバス火山では、雪上での MT 観測によって、マントルから地殻を貫いて地表に至る低比抵抗マグマがイメージされた (Hill+ 2022)。

以上のように、地殻深部流体の 3 次元イメージングが重要な地球科学情報を提供している。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：微かな電気の検出が我々の世界を支える

[9p-N104-1~5] 微かな電気の検出が我々の世界を支える

[9p-N104-1]

有機複合材料が織りなす高感度ウェアラブルセンサとその応用展開

○関根 智仁¹ (1.山形大院有機)

[9p-N104-2]

船舶の水中電界評価技術

○横山 裕¹、向井 洋介¹、田上 直人¹、江川 薫¹、植田 貴彦¹、谷 俊宏¹、木下 祐一¹、田中 敬一郎¹ (1.三菱重工業(株))

[9p-N104-3]

時間領域空中電磁探査法を用いた地下構造の推定

○ブラダン オム¹、結城 洋一¹、宮崎 良¹ (1.応用地質株式会社)

[9p-N104-4]

サメの電界センサ配列モデルによる目標探知

ー海中の背景電界ー

○廣田 恵¹ (1.艦磁研)

[9p-N104-5]

サマリーディスカッション及び名刺交換会

○廣田 恵¹ (1.艦磁研)

有機複合材料が織りなす高感度ウェアラブルセンサとその応用展開

Realization of High-sensitivity Wearable Sensors using Organic Composite Materials

山大院有機, °関根智仁

Grad. School of Organic Materials Science, Yamagata Univ., Tomohito Sekine

E-mail: tomohito@yz.yamagata-u.ac.jp

フレキシブルデバイスは、おもに柔軟で柔らかい材料を使用して作製された電子デバイスを指し、これまで有機 EL やトランジスタ、センサなどさまざまなエレクトロニクスが実現されてきた^[1,2]。これらのデバイスは、曲げや伸縮などの機械的な応力に対応できるため、従来の剛直なデバイスでは難しかった身体にフィットさせたり曲面に貼り付けて使用することができる。また、溶液化可能な有機材料は印刷方式という作製プロセスに適用できるため、プリントドエレクトロニクスという電子デバイスの新展開も模索されている。

これらの応用分野としてとくにヘルスケアに着目した場合、シート型のセンサデバイスはやわらかい生体表面に高密着性を発揮する。このため、高い信号検出性能のみならず装着性・生体安全性の観点からも優位性が高い^[3]。しかし、生体由来の物理的な信号（たとえば脈波や体温など）は、微小応答変化であることが多く、外乱信号の除去やセンサへのアンプ実装など課題が多い。これに対し、我々はこれまで材料自体の信号検出ポテンシャルに着目し、複合材料化によってこれらの感度向上に取り組んできた^[4,5]。

本講演では、有機複合材料におけるマイクロ界面設計とその制御技術を基軸とし、そこから得られるフレキシブルセンサの基礎・応用的なデバイス特性について論ずる。特に、強誘電性高分子や有機エレクトレット材料の優れた起電力を起源とする高性能圧力センサや、導電性高分子を用いた温度センサなどについて紹介する^[6]。また、近年講演者らが取り組んでいる生体組織のさまざまな硬さをウェアラブルで検出できる薄膜センサについても議論する。これらの多様なデバイスの深化によって、ヘルスケア分野をはじめ生体モニタリングやロボティクス、物流など幅広い計測分野に対する将来的な社会実装が期待できる。当日は、作製したフレキシブルセンサをもちいて得られたデータの AI 活用による解析事例についても触れる^[7]。

【謝辞】本研究の一部は、科研費 JP25K01190、文部科学省世界で活躍できる研究者戦略育成事業学際融合グローバル研究者育成東北イニシアティブ (TI-FRIS)、および UBE 学術振興財団の支援を受けています。また、本研究を進めるにあたり ARKEMA 株式会社の宮保淳博士、黄瞳博士、F. D. D. Santos 博士に多大な助言を賜りました。

【参考文献】

[1] K. Liu et al., *npj Flexible Electronics*, **6**, 1, (2022). [2] M. S. Kim et al., *Adv. Mater.*, **36**, 2406424. (2024). [3] S. Choi et al., *Adv. Mater.*, **28**, 4203–4218, 2016. [4] T. Sekine et al., *Sci. Rep.*, **8**, 4442. (2018). [5] T. Sekine et al., *ACS Appl. Electron. Mater.*, **1**, 246 (2019). [6] T. Yasuda et al., *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 2402064 (2024). [7] K. Nara et al., *Chem. Eng. J.*, **511**, 162180 (2025).

時間領域空中電磁探査法を用いた地下構造の推定

Use of Time-domain Airborne Electromagnetic Survey to Estimate Subsurface Structure

応用地質株式会社¹, プラダン オム¹, 結城洋一¹, 宮崎良¹,
OYO Corporation¹, °Om Pradhan¹, Youichi Yuuki¹, Ryo Miyazaki¹
E-mail: pradhan-om@oyonet.oyo.co.jp

土木インフラ建設および地質リスク評価を行ううえで、地下構造の把握は重要である。近年、地下構造の広域探査では、調査地に人が立ち入らないで短時間で広範囲の調査が可能となる空中電磁探査法の適用事例が多くなってきた。測線距離が数十キロメートル範囲では有人ヘリコプターを用いた空中電磁探査を実施するが、数キロメートル範囲ではドローンを用いた空中電磁探査が適用される。本稿では空中電磁探査の一種である時間領域空中電磁探査法を紹介する。

時間領域空中電磁探査方法は、地上送信空中受信型と空中送信空中受信型探査法の二種類がある。これらの探査法の中で、空中送信空中受信型 P-THEM（カナダ国 Sanborn Geophysics 社）システムの実施事例を述べる。P-THEM システムの仕様を表 1、システムの外観を図 1 に示す。P-THEM システムは、ヘリコプターに吊り下げた送信ループから電磁波を送信し、受信機で非接触により測定した地下の誘導磁場を逆解析し深度 300 m～500 m までの 3 次元比抵抗構造を推定することができる。得られた 3 次元比抵抗構造結果は、トンネルルートなど土木分野の地質構造調査において有効な情報となる。なお、空中電磁探査では磁気探査を同時に実施するが、磁気探査結果から三次元磁化構造を求めることができる。比抵抗構造の比較対象として磁化構造結果を活用することで、空中電磁探査結果を補完することが可能となる。今後この P-THEM システムは、地盤調査に加え、自然災害により発生した断層や斜面災害現場における地下構造の把握などへの活用が期待できる。

Table 1. Specification of P-THEM system

Manufacturer	Sanborn Geophysics (Canada) 型
Helicopter	JA 02AH (Airbus AS350B3) (Exclusively modified helicopter)
Base Frequency (Pulse length)	25/30 Hz (4 ms), 75/90 Hz (1.5 ms)
Peak Current	1000 A
Peak dipole moment	220000 NIA
Sampling Rate	75 kHz/ 90 kHz
Loop Diameter	8.6 m
Magnetometer (G823A)	Geometrics, Inc (US)
Mag Operating range	20,000~100,000 nT
Heli Height	70~100 m
Weight	300 Kg [Approximately]

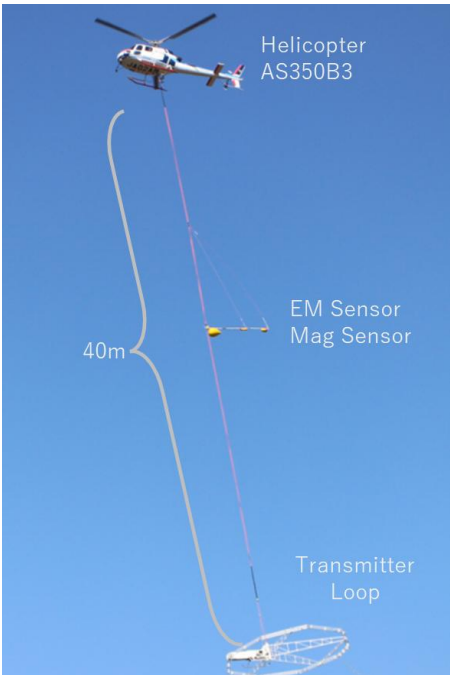


Fig. 1. Overview of P-THEM system

サメの電界センサ配列モデルによる目標探知

—海中の背景電界—

Target-detection signal processing using electric field sensors array of a shark

- Background electric field in the ocean -

艦磁研¹, 廣田 恵¹

Naval Ship M&UEP R.C. Megumi Hirota

E-mail: kanjiken@nmurc.com

ある種のサメの保有する電界センサ配列によって餌である目標を探知するモデル計算を単純な仮定から徐々に複雑な条件を科し実施してきた¹⁾。目標を一樣電界 E_0 中の、周囲媒体と異なる誘電率 ϵ 、半径 a の球として、電界センサ (感度 $2\mu V^2$) はサメ頭部に水平に半径 r_s の円形配列としてサメは目標横を E_0 に角度を持って水平直進する。この時に索敵行動として頭部を進行方向左右に振るとき、適切なセンサ対を選択すると索敵行動による背景ノイズを抑制し、信号の検出が可能と報告した³⁾。この時は条件 $r_s=0.25$ m, 最接近距離: CPA=5.5 m の直線航走について、直交する位置にある 2 対のセンサ出力の処理で目標信号を一樣な背景電界に対する相対値として Fig.1 のとおり検出した。

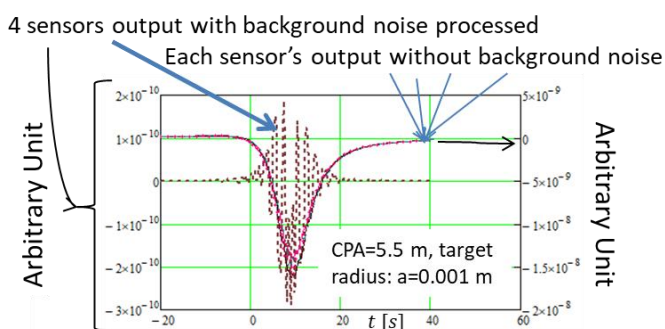


Fig. 1. Target detection after uniform and motion noise processed

今回は海洋における一樣な背景電界の推定値を求め、上記の方式による目標探知が海洋で有効であるか考察した。海洋においては地磁気 ($H = 70\mu T$) 及びこれに直交する潮流速 ($v = 2\text{ kt} = 1\text{ m/s}$) があると電磁誘導 ($E = v \times H$) から電界最大値 ($E = 70\mu V/m$) が発生する。英海峡での海底ケーブルによる実測値⁴⁾ は 15.2 mV/km ($= 15.2\mu V/m$) であり、これらが海岸及び海底の境界条件、潮流速及び地磁気との角度等の条件が混在する中で、上記計算値とオーダーが一致する。この計算電界値を用い、Fig.2 に示す条件で目標信号を求めた。

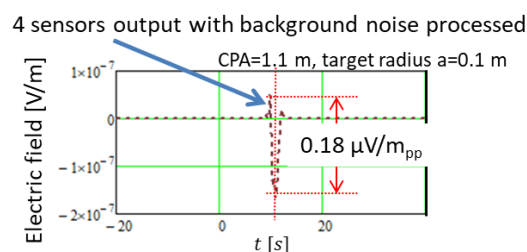


Fig. 2. Target detection after uniform and motion noise processed

Discussion and conclusion 既報告の一樣電界中の目標探知信号処理により、推定される自然環境の電界下での目標信号強度をサメの電界検知可能域の観点から議論する。

Acknowledgement この研究に長年の理解とご支援を賜る艦磁研の会員諸氏に感謝申し上げます。

Reference 1) 廣田 恵 第 72 回応用物理学会春季学術講演会(2025), 15p-k204-4,5.

2) B. Bromm, et al., J. Comparative Physiology (1976) vol. 111, pp 127-36.

3) M. Hirota, Conference of Marine Electromagnetics 2025, April 10, Southampton.

4) M. S. Longuet-Higgins, Monthly Notices Roy. Astr. Soc. Vol. 5, no. 8, 1949 March, pp.285-307.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 水電解および二酸化炭素還元デバイスとシステムの現状

[9p-S202-1~10] 水電解および二酸化炭素還元デバイスとシステムの現状

[9p-S202-1]

オープニング「水電解および二酸化炭素還元デバイスとシステムの現状」

○藤井 克司¹ (1.理研RAP)

[9p-S202-2]

膜DACとの親和性を有するCO₂電解システムの開発○山内 美穂^{1,2} (1.九大IMCE、2.東北大AIMR)

[9p-S202-3]

電気透析を利用した海水からの直接CO₂回収システムの開発○浦 優介¹、矢野 慧一¹、吉田 弘² (1.清水建設、2.JAMSTEC)

[9p-S202-4]

超音波によるアルコール・水混合系からの水素生成と炭素の回収

○河野 智謙¹、長谷川 起也¹、柳川 勝紀¹、藤井 克司²、和田 智之² (1.北九州市大、2.理研)

[9p-S202-5]

固体高分子型水電解用 省イリジウム触媒の開発

○高光 泰之¹、三島 崇禎¹、岡田 拓弥¹、糸稻 凌汰¹ (1.東ソー)

[9p-S202-6]

水素生産のためのPEM型水電解セルの構造とその特徴

○向畠 眞一郎¹、梁田 風人¹、永野 麻衣¹、金原 傳太¹ (1.カーリット)

[9p-S202-7]

PEM/AEM水電解セル部材の分析・解析事例

○熊谷 昌信¹、名取 大樹¹、加藤 雅子¹、西村 淳一¹、中野 陽介¹、中村 貴也¹、箕浦 歩夢¹ (1.JFEテクノロジーリサーチ)

[9p-S202-8]

電気化学手法を利用したCO₂電解還元システム○武田 大¹、松本 純¹、桐生 麻子¹、高畠 萌¹ (1.千代田化工)

[9p-S202-9]

再エネ水素マルチエネルギー供給システムの実証研究

○青野 文昭¹、池田 剛¹、小林 遼平¹、後藤 秀樹²、篠崎 道裕³、杉山 正和⁴ (1.(株)エノア、2.(株)青と緑、3.壱岐市役所、4.東大先端研)

[9p-S202-10]

エネルギーマネジメントシステムにおけるデジタルツイン活用について

○三井 亮¹、福田 光起¹、鬼塚 柊羽¹ (1.トヨタテクニカルディベロップメント株式会社)

オープニング「水電解および二酸化炭素還元デバイスとシステムの現状」

Opening "Current Status of Water Electrolysis and Electrochemical CO₂ Reduction"

理化学研究所 光量子工学研究センター 光量子制御技術開発チーム¹ ○藤井 克司¹

Photonics Control Technology Team, RIKEN RAP¹ °Katsushi Fujii¹

E-mail: katsushi.fujii@riken.jp

エネルギー貯蔵のための水電解水素生成や空気中の二酸化炭素を電気化学的に還元して有用な物質へ変換する技術は、今後のクリーンなエネルギーを活用する技術として期待されている。一方、これらの技術は注目されてから久しいにもかかわらず、なかなか現実には利用されていない。

このギャップは何が原因であるのか、技術的な課題として何があるのか、といったことは今後の水電解と二酸化炭素還元技術を考えて行くうえで重要である。本シンポジウムでは、この問題を考えるため、企業で進めている研究を中心に議論を行う。デバイスの作製・評価から実運用システムについてまで、広い範囲の議論を行う企画としているため、最初に本シンポジウムの目的や課題について紹介する。

膜 DAC との親和性を有する CO₂ 電解システムの開発

Development of CO₂ electrolysis system compatible with membrane DAC

九大 IMCE¹, 東北大 AIMR² ○山内 美穂^{1, 2}

IMCE, Kyushu Univ.¹, AIMR, Tohoku Univ.², ○Miho Yamauchi^{1, 2}

E-mail: yamauchi@ms.ifoc.kyushu-u.ac.jp

H₂O を水素源として CO₂ を CO、炭化水素あるいはアルコールなどの高付加価値物質に変換する電気化学的 CO₂ 還元 (eCO₂R) は、地球上の効率的な炭素循環、さらにはカーボンニュートラルを実現するために欠かせないプロセスとして注目されている。これまで、我々は、合金化による Cu の分散状態の制御 (図 1)¹ や電極界面の局所 pH の制御² および疎水性の付与により C₂₊ 化合物の高選択的合成に成功している。例えば、極薄かつ超疎水性のマクロポーラス Cu 電極からなるガス拡散電極を使うことで、87% の高いファラデー効率で C₂₊ 化合物への変換を行った³。本公演では、本講演では、eCO₂R を促進させるために必要となる環境を説明するとともに、我々が開発してきた触媒および電気化学システムを紹介する。

さらに、カーボンニュートラルの実現のためには CO₂ 源の選択が重要なポイントとなる。九州大学の藤川教授は、効率よく空気中の CO₂ を直接回収 (direct air capture, DAC) することができる膜を使ったシステム (m-DAC) を開発している。現在、我々は共同で m-DAC により空気から回収された CO₂ を利用する eCO₂R システム (m-DAC-U) の構築を計画している。当日は、m-DAC と接続するために求められる eCO₂R システムの性能についても議論する^{4,5}。

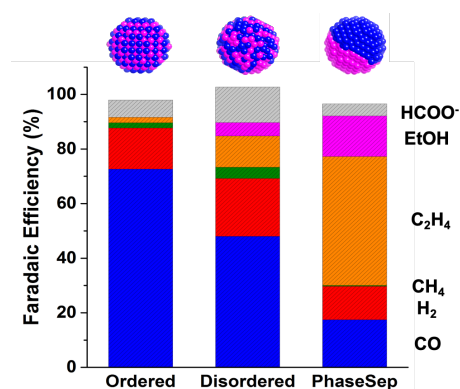


図 1 異なる構造の CuPd ナノ合金上での生成物分布。

- 1) S. Ma, M. Sadakiyo, M. Yamauchi, P. J. Kenis, et al., *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, 139, 47.
- 2) M. Sun, A. Staykov, M. Yamauchi, *ACS Catal.* **2022**, 12, 14856.
- 3) M. Sun, J. Cheng, M. Yamauchi, *Nat. Commun.* **2024**, 15, 491.
- 4) A. Anzai, M. Higashi, M. Yamauchi, *Chem. Comm.* **2023**, 59, 11188.
- 5) A. Yoshizawa, M. Higashi, A. Anzai, M. Yamauchi, *Energy Adv.* **2024**, 3, 778.

電気透析を利用した海水からの直接 CO₂ 回収システムの開発

Development of Electrodialysis-Based Direct CO₂ Capture System from Seawater

清水建設株式会社¹, 国立研究開発法人海洋研究開発機構² °浦 優介¹, 矢野 慧一¹, 吉田 弘²

Shimizu Corp.¹, JAMSTEC², °Yusuke Ura¹, Keiichi Yano¹, Hiroshi Yoshida²

E-mail: y.ura@shimz.co.jp

2050 年カーボンニュートラル実現には排出削減に加えて CO₂回収 (CDR) 技術が不可欠である。海洋には、人為的に大気に放出された CO₂ の約 3 割が吸収されており、単位体積あたりの CO₂ 密度も大気中よりも 100 倍以上高い。これを回収することで海洋の CO₂ 貯蔵機能を増加させる手法を海洋 CDR (mCDR: marine CDR または ocean CDR) と呼ぶ。本講演では、著者らが開発に着手している電気化学式 mCDR について、動作原理と実装システム、および技術課題等について紹介する。

海水中の溶存無機炭素は、pH 条件に応じて CO₂、HCO₃⁻、CO₃²⁻の形態で平衡を形成する。通常の海水 (pH 8.0-8.1) では重炭酸イオンが支配的であるが、pH を 6 程度まで低下させることで CO₂ (ガス) として回収可能となる。著者らが開発したシステムでは、バイポーラ膜電気透析による pH 制御を核心技術とし、酸性化処理後の海水から CO₂ガスを効率的に回収する構成となっている。システムは前処理フィルタ、電気透析装置、気液平衡器、CO₂吸着槽で構成され、海水に対して化学薬品を使用せず pH の一時的変化のみで CO₂を分離回収する、海洋環境に配慮したプロセスを実現している。

コンポーネントモデルを用いた基礎実験において、電流密度 10 mA/cm²、6 層バイポーラ型電気透析装置を用い、処理流量 1 LPM の条件下で性能評価を実施した。運転開始から 20 分ほどで pH は 7 を下回り、CO₂濃度を最大 6,000 ppm 近くまで濃縮した。CO₂吸着材 MXDA に暴露すると濃度の顕著な減少が確認され、システムの基本性能が実証された。課題として、海水中の Ca²⁺、Mg²⁺等の 2 価陽イオンによる膜スケーリングが主要課題として特定された。これらのイオンと OH⁻により水酸化物塩が生成し、膜面付着と電位異常を引き起こし、システム性能を低下させることが分かった。

社会実装に向けては、2050 年までに年間 50 MtCO₂規模の回収を目標とし、海水淡水化施設との併設や発電所冷却水システムとの統合により、インフラ投資の効率化と運転コストの削減を図る方針である。目先では実海域における実証実験を実施し、運転条件の最適化および環境影響評価を計画している。

超音波によるアルコール・水混合系からの水素生成と炭素の回収

Hydrogen production and carbon capture under sonochemical conditions

北九市大¹, 理研², [○]河野 智謙¹, 長谷川起也¹, 柳川勝紀¹, 藤井 克司², 和田 智之²

Univ. Kitakyu¹, Riken², [○]Tomonori Kawano¹, Tatsuya Hasegawa¹, Katsunori Yanagawa¹, Katsushi Fujii², Satoshi Wada²,

E-mail: kawanotom@kitakyu-u.ac.jp

概要：クリーンなエネルギー源として水素（H₂）が注目されているが、一般的な水蒸気改質法による水素生産は「グレー」な水素生産とみなされている。ここでは、水・アルコール混合系に Ca を添加した、常温常圧条件下でのソノケミストリーによる水素生産と大気からの二酸化炭素（CO₂）捕捉の試みを報告する。用いた系は、アモルファス炭酸カルシウムからの方解石粒子の合成条件と類似しており、大気圧下での方解石の成長条件を満たす可能性がある。

実験： モデル実験における水素と CO₂ の定量には、CO₂/H₂O 分析装置（LI-840A、LI-COR、米国）および高感度 H₂ センサー（SMOD701、ルネサス）を利用した。250ml のアルコール（メタノールおよびエタノール）と水の混合系（最適アルコール濃度、3～10% (v/v)）を 500ml フラスコに封入し、空気循環システムと接続し、超音波照射装置（ASU-3D、アズワン）内に配置し 23kHz あるいは 43kHz の超音波印加条件下で H₂ と CO₂ を放出を促した。また、炭酸カルシウムの存在下では、メタノール由来の H₂ 産生が維持されつつ、CO₂ の排出は完全に抑制された。また、Ca 添加系では、排気中の CO₂ 濃度が大気中の CO₂ 濃度よりも大きく低下したことから、このシステムは、DAC のモデルとしても機能の検証が必要である。

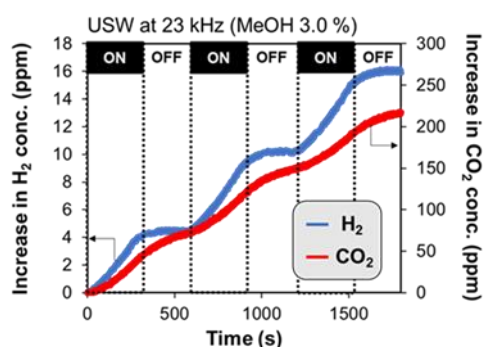


Fig. 1 Sonochemical model for H₂ production from methanol/H₂O mixture with concomitant emission of CO₂.

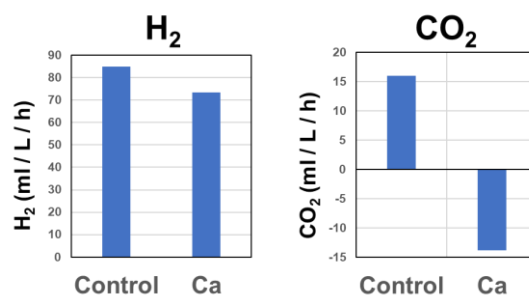


Fig. 2 Effect of calcium (1 mM CaCO₃) on the velocities of gas emission from the MeOH (3%) under 43 kHz USW. Left, production of H₂. Right, production of CO₂.

固体高分子型水電解用 省イリジウム触媒の開発

Low Iridium Catalyst for Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis

東ソー 〇高光 泰之、三島崇禎、岡田拓弥、糸稻凌汰

Tosoh corp., 〇Yasuyuki Takamitsu, Takayoshi Mishima, Takuya Okada, Ryota Itoine

E-mail: yasuyuki-takamitsu-qs@tosoh.co.jp

カーボンニュートラル社会の実現には水素の大量導入が必要とされており、水素の製造方法としては、固体高分子型（PEM 型）の水電解法が有望である。しかし PEM 型水電解では希少なイリジウム（Ir）を触媒として使用するという課題があるため、Ir の使用量を削減した触媒の開発が進められている。

国立研究開発法人理化学研究所では、二酸化マンガン（ MnO_2 ）を用いた省イリジウム触媒を開発しており、我々は電解二酸化マンガンのメーカーとして、その工業化を検討している。 MnO_2 を担体に用いた触媒（ Ir-MnO_2 ）では、Mn が酸化剤として作用し高活性な 6 価 Ir が形成される。実際に水電解反応を行ったところ、高い水電解活性を示すことが確認された。通常、PEM 型水電解においては電解質膜の単位面積あたり $2\text{--}4\text{ mg/cm}^2$ の Ir が必要であるが、 Ir-MnO_2 では 0.1 mg/cm^2 でも実用レベルの活性と高い耐久性を示す（Figure 1）。

また PEM 型水電解セルの運転期間（寿命）には、Ir の溶出速度が強く影響する。 Ir-MnO_2 においては、Mn の共存により Ir 溶出が抑制されていることが観察された。 MnO_2 は Ir を高活性化するだけでなく、溶出を抑制し寿命を伸長することにも作用していると考えられた。

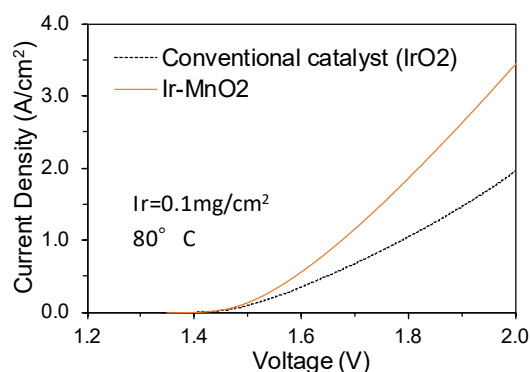


Figure 1 Linear sweep voltammetry (LSV) curves

謝辞

本研究において貴重なご指導を賜りました、国立研究開発法人理化学研究所の中村龍平先生に心より感謝申し上げます。

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20003）の結果を含むものです。

水素生産のための PEM 型水電解セルの構造と特徴

Structure and Characteristics of PEM water electrolysis cell for Hydrogen Production

カーリット 〇向畠 眞一郎, 梁田 風人, 永野 麻衣, 金原 傳太

Carlit Co., Ltd., 〇Shinichirou Mukobata, Kazato Yanada, Mai Nagano, Denta Kimpara

E-mail : mukobata@carlit.co.jp

水素エネルギーは燃焼時に二酸化炭素を排出しないため、脱炭素社会実現に向けた鍵を握る存在として世界的に注目されている。特に、太陽光や風力などの再生可能エネルギー由来の電力を用いて水を電気分解して得られる水素はグリーン水素と呼ばれ、余剰電力を水素に変えて貯留することも可能である。水電解技術は、使用される電解質や運転条件の違いにより、主にアルカリ水電解、PEM（固体高分子電解質）型水電解、固体酸化物型電解、AEM（陰イオン交換膜）型電解の4種類に分類される。その中でも PEM 型水電解は、電解質と電極間の距離が近いこと小型化が図り易く、負荷追従性に優れ変動電力にも迅速に応答することが可能なため、再生可能エネルギーの調整力用途で期待されている電解方式である。その電解セルの構造概略図を Fig.1 に示した。プロトン交換膜（Proton Exchange Membrane）が電極に挟まれた燃料電池と同様の構造で、純水をアノード側に供給して通電することで水の電気分解が生じて陰極側で高純度の水素が生成される。一般に、PEM 膜にはプロトン伝導性と化学的耐久性に優れるパーフルオロスルホン酸系ポリマー膜、アノード触媒には IrO_2 、カソード触媒には Pt が用いられ、セル電圧 2V 以下、電流密度 $1\sim 2\text{A}/\text{cm}^2$ の条件下で運転する。プロトン交換膜の両面に IrO_2 および Pt/C 触媒をスプレーコーティングにより成膜した CCM（Catalyst Coated Membrane）と、 IrO_2 および Pt/C 触媒を同様に PTL（Porous Transport Layer）上に成膜した CCS（Catalyst Coated Substrate）による各 MEA（Membrane Electrode Assembly）を水電解セルに組み込み、LSV（Linear Sweep Voltammetry Curves）測定を行った結果を Fig.2 に示した。どちらの形態においても 2V 印加時には $3\text{A}/\text{cm}^2$ を超える電流値が得られる水電解セルを得ることができる。本発表では、プロトン交換膜の両端に電極を兼ねた触媒層、さらにその外側に PTL を積層した水電解セルの構造と各部材などの特徴について紹介する。

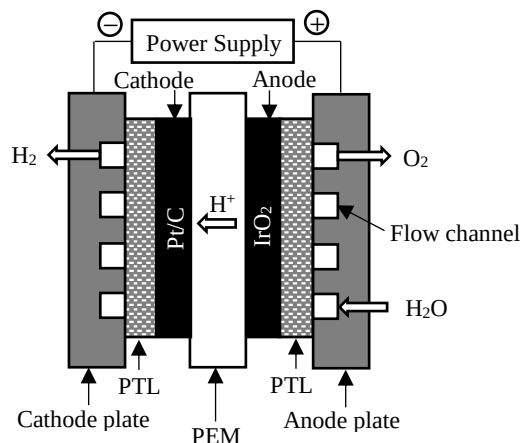


Fig.1 Schematic diagram of PEM water electrolysis cell.

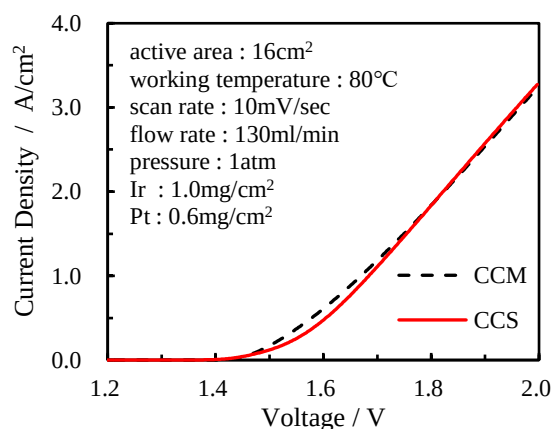


Fig.2 LSV of different MEA production methods.

PEM/AEM 水電解セル部材の分析・解析事例

Examples of analysis of PEM/AEM water electrolysis cell components

JFE テクノリサーチ株式会社¹, ○熊谷 昌信¹, 名取 大樹¹, 加藤 雅子¹, 西村 淳一¹,

中野 陽介¹, 中村 貴也¹, 箕浦 歩夢¹

JFE-TEC¹, ○Masanobu Kumagai¹, Daiki Natori¹, Masako Kato¹, Junichi Nishimura¹,

Yosuke Nakano¹, Takaya Nakamura¹, Ayumu Minoura¹

E-mail: m-kumagai@jfe-tec.co.jp

1. 緒言

カーボンニュートラル実現に向けた取組みの一環として, 再生エネルギーを用いて水を水素および酸素に分解する水電解技術が注目されている. 当社は水電解セル性能評価を目的として, 独自にセル部材性能評価装置を開発し, 水電解セル部材特性を評価できる環境を整備した. 加えて, 構成部材(セパレータ, 多孔質輸送層, 触媒層, 高分子膜)に対する評価手法の開発にも取り組んでいる.

2. 実験内容

部材評価の例として, 実セルによる電解試験および水電解模擬アノード環境中で定電位分極試験を行った後, 試験溶液中に溶出した極微量金属成分を誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)により定量した.

3. 実験結果と考察

プロトン交換膜(PEM)水電解セルの電流(i)-電圧(V)を評価した例を図 1 に示す. 光島らの文献¹⁾を参考に, PEM 水電解セルによる起動停止模擬試験を 10 万サイクル実施した結果, 起動停止の繰り返しによりアノード触媒(IrO_2)は酸化還元サイクルを受け, 試験後の i - V 特性は試験前に比べ, 性能が低下していることが分かる.

アニオン交換膜(AEM)水電解用のステンレス鋼セパレータをアノード模擬環境で評価した例を図 2 に示す. AEM 水電解用セパレータの耐食性評価は, 固体高分子形燃料電池の場合²⁾と異なり, 測定されるアノード電流は酸素発生電流が支配的なため, 電流値からの耐食性評価が困難である. 実際の腐食量(溶出量)を求めるために高感度で多元素同時分析が可能な誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)法が用いられる. 当社では独自の前処理方法とトリプル四重極 ICP-MS を用いることで, 各種干渉を抑制し S/N 比を向上させることに成功し, 定量下限 $10 \mu\text{g L}^{-1}$ を達成できた.

参考文献

1) 光島ら, 電気化学, **90**(2), 136-158 (2022)

2) NEDO PEFC セル評価解析プロトコル 2023 年版 <https://www.nedo.go.jp/content/100963953.pdf>

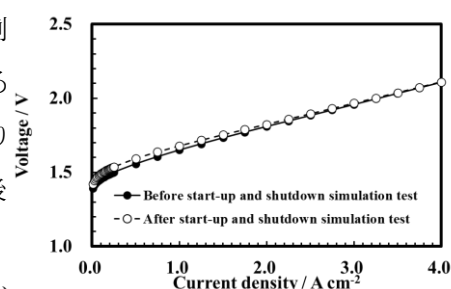


Fig.1 i - V characteristics before and after start-up and shutdown simulation tests.

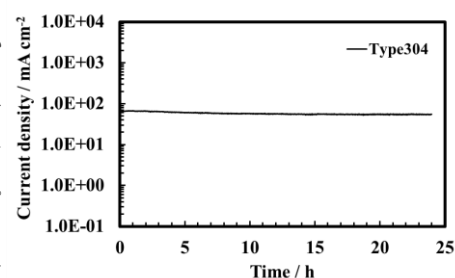


Fig.2 i - t curve of type 304 ss polarized at 1.7 V (RHE) in 1 M KOH at 353 K

電気化学手法を利用した CO₂ 電解還元システム

CO₂ electrolytic reduction system using electrochemical methods

千代田化工¹, °武田 大¹, 松本 純¹, 桐生 麻子¹, 高畠 萌¹,

Chiyoda Corp.¹, °Dai Takeda¹, Jun Matsumoto¹, Asako Kiryu¹, Moe Takabatake¹,

E-mail: takeda.dai@chiyodacorp.com

近年の動向として、CO₂ 排出量削減だけに留まらず、大気中の CO₂ を積極的に回収し、有効利用あるいは貯留する CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) のシステム開発が世界の共通課題として強く認識されてきている。

これらの問題を解決するためには、革新的な技術開発と新しいシステムの導入が必要であり、CO₂ 有効利用の一つの方法として、再生可能エネルギー源などから得られる電力をエネルギー源として、大気中から回収した CO₂ を基礎化学品などの有用物質に変換して再利用することが期待されている。

本報告では、現在、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による ムーンショット型研究開発事業 (目標 4) のプログラムで、弊社が他機関 (9 機関) と共に取組んでいる「電気化学プロセスを主体とする革新的 CO₂ 大量資源化システムの開発」における「電気化学手法を利用した CO₂ 電解還元システム」に関する研究の取り組み状況を紹介する。

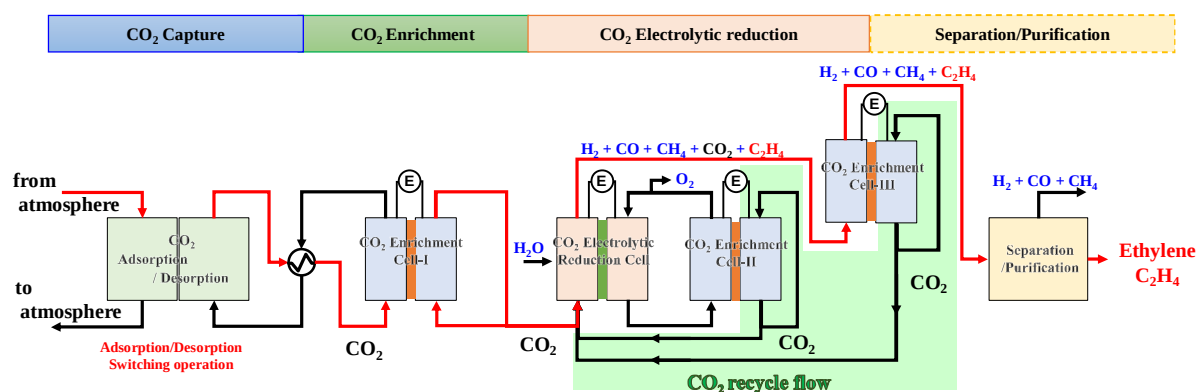


Figure : Design of an integrated system

再エネ水素マルチエネルギー供給システムの実証研究

Demonstration study of a renewable hydrogen multi-energy supply system.

エノア¹, 青と緑², 壱岐市役所³, 東大先端研⁴

○青野 文昭¹, 池田 剛¹, 小林 遼平¹, 後藤 秀樹², 篠崎 道裕³, 杉山 正和⁴

Enoah Inc.¹, Aotomidori Co. Ltd.², IKi City Office³, Univ. Tokyo⁴

°Fumiaki Aono¹, Takeshi Ikeda¹, Ryohei Kobayashi¹, Hideki Goto², Michihiro Shinozaki³,

Masakazu Sugiyama⁴, E-mail: aono@enoah.co.jp

背景＞長崎県壱岐市は島周囲の海水温の上昇により藻場が枯れ、海洋生物の生態系に大きな変化をもたらしている現状を危惧し、国内自治体初「気候非常事態宣言」についての議案を上程した。また市は国から選定された「SDGs 未来都市」、「SDGs モデル事業」の主旨に則り、地球温暖化防止のための脱炭素事業化へ向けて、「再生可能エネルギー100%のしまつくり」に挑むことを決め、20250 年のできるだけ早い時期に RE100 を目指すと目標をしめした島である。

市は再エネ電力を積極的に導入し、現在市内で使用する電力は、内燃力発電所（39MW）を中心に、風力発電（2MW）と太陽光発電（約 9MW）で供給され、再エネ率は約 22%である。しかし、2022 年度時点の本市の年間電力需要量は 119,799MWh/年であり、うち再エネ電力需要量は 15,899MWh/年（13.3%）に留まっている。その理由は余剰となった再エネは出力制限するしかなく、再エネを十分に使い尽くすことができないことが原因である。再エネを使い尽くすには、余剰となった電力を貯め、必要な時に使える電力供給の時間シフト技術が必須であり、市はその取組として単に蓄電池に貯めるだけでなく、余剰電力で水素を作る「Power to Gas」に本格的に取り組むことを決めた。

2022 年 10 月市は再エネ電力から水素を作り、それを貯め、必要な時に水素によって発電する再エネ水素蓄電システムの導入実証を開始した。本システムはトラふぐ陸上養魚場に設置され、水電解で得られた水素を貯めて燃料電池で発電するだけでなく、副産物として得られた酸素を水槽に供給し溶存酸素を高め、水電解と燃料電池から発生する排熱で水槽の温度を上げ魚の成長を速めることにも成功し、更に再エネで育てた「RE ふぐ」として商品価値を上げることに役立っている。単に再エネ利用の時間的オフセットを可能にただけでなく、酸素供給費用の削減、生産性の向上をも可能にした。本来デリーの電力貯蔵だけで比較すると蓄電池の方がコスト的に有利だと言われているが、電力（水素）・熱・酸素を同時に利用できる用途に導入することで、本システムのコスト優位性が見えてくることが分かった。現在、同システムの壱岐病院への導入計画も進めている。

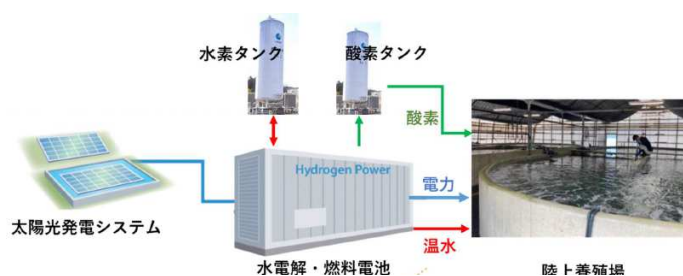


Fig.1 RE hydrogen system

エネルギーマネジメントシステムにおけるデジタルツイン活用について

Utilization of Digital Twins in Energy Management Systems

トヨタテクニカルディベロップメント株式会社¹, °三井 亮¹, 福田 光起¹, 鬼塚 柊羽¹

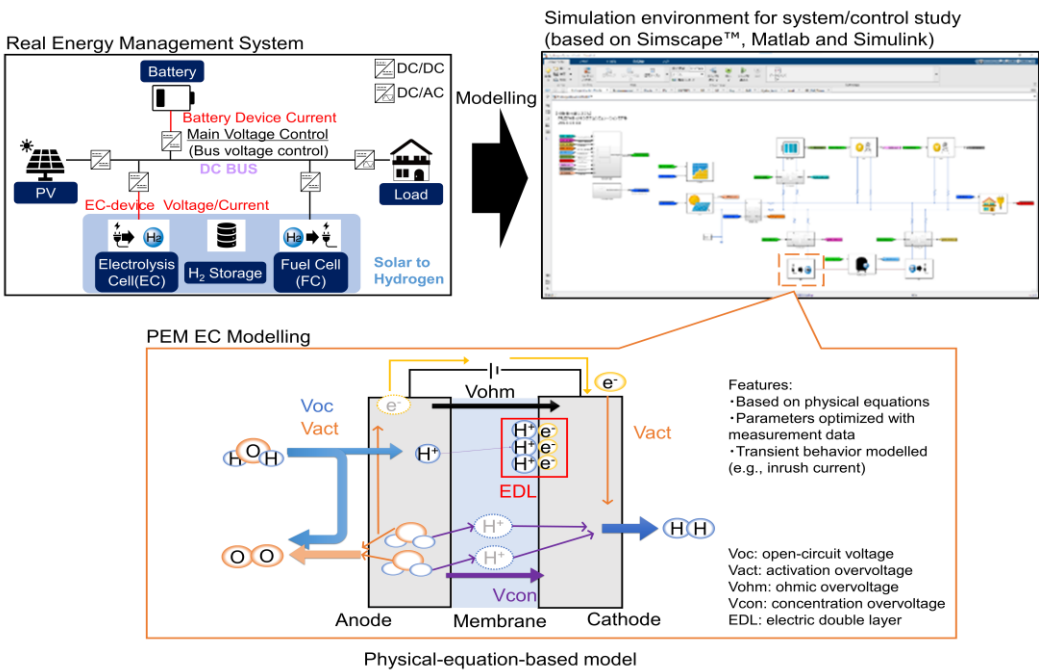
Toyota Technical Development Co.¹, °Ryo Mitsui¹, Kouki Fukuta¹, Shu Onitsuka¹

E-mail: ryo.mitsui@mail.toyota-td.jp

近年、世界的なエネルギー問題と脱炭素社会化の両方の観点から太陽光発電を中心とする再生可能エネルギーの拡大が活発化している。再生可能エネルギーの普及拡大にはエネルギーを貯蔵する必要があるが、中でも水素は大規模・中長期保存に向いており、調整力にもなる水電解セルを用いた分散型水素システム（DHS）が注目されている。DHS は再生可能エネルギーによる余剰電力を水素として蓄えることでエネルギータイムシフトを可能とする。しかし、補器を含む水電解装置コストが高いこと、システム大型化に伴う複数モジュールやスタックの協調制御とそれによる起動停止回数の抑制などの複雑なシステム制御が、導入に向けた課題となっている。

そこで我々は MATLAB/Simulink を用いて、コスト分析や制御検討を可能とするマルチドメイン潮流シミュレータを開発した。また、キー技術となる水電解セルは、過渡特性や温度特性を表現するために周波数特性とキャパシタンス特性を考慮した物理式ベースモデルで表現した。

本講演では DHS を例に、エネルギーシステム自体の企画設計やエネルギーマネジメント制御検討における時系列シミュレーションの有用性を、日本国内の日射量データを用いることで地域特性・季節変動影響を交えて紹介する。



References:
1) D. Yamashita, K. Tsuno, K. Koike, K. Fujii, S. Wada, M. Sugiyama, Int. J. Hydrog. Energy 44 (50), 27542-27552, (2019).
2) K. Fujii, K. Koike, K. Tsuno, S. Wada, Journal of the Japan Institute of Energy, 100, 45-54 (2021)
3) V. Liso, G. Savoia, S.S. Araya, G. Cinti, S.K. Kær, Energies, 11, 3273 (2018).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): ミューオンが拓く科学と技術

[7p-N103-1~6] ミューオンが拓く科学と技術

[7p-N103-1]

科学と応用を切り拓くミューオン加速技術の最前線

○大谷 将士¹ (1.高エネルギー加速器研究施設)

[7p-N103-2]

J-PARCにおけるミューオン冷却技術の開発とその将来展望

○上岡 修星¹ (1.高エネ研 素核研)

[7p-N103-3]

半導体デバイスの宇宙線ミューオン起因ソフトエラー研究の現状と展望

○渡辺 幸信¹ (1.九大院総理工)

[7p-N103-4]

ミュオン顕微鏡の開発計画: 基礎と展望

○永谷 幸則¹、大西 純一²、山崎 高幸¹、中沢 雄河¹、足立 泰平²、足立 利一¹、後藤 彰²、Strasser Patrick¹、大石 裕¹、反保 元伸¹、土居内 翔伍¹、下村 浩一郎¹、三宅 康博¹ (1.高エネ研、2.理研)

[7p-N103-5]

ミューオン特性X線測定による非破壊元素分析法

○二宮 和彦^{1,2} (1.広大N-BARD、2.広大先進理工)

[7p-N103-6]

原子核乾板による宇宙線ミューオンイメージング

○森島 邦博¹ (1.名大理)

科学と応用を切り拓くミューオン加速技術の最前線

Forefront of Muon Acceleration Technology Paving the New Way for Science and Applications

高エネルギー加速器研究機構¹ ○大谷将士¹

KEK¹

E-mail: masashio@post.kek.jp

人類は非常に小さな粒子を光の速さ近くまで加速させる加速器技術を 100 年以上にわたって進歩させてきた。その結果、宇宙創成の謎の解明や日本人がノーベル賞を受賞した小林・益川理論の証明、さらにはがん治療にも使われている量子線治療など、私たちの暮らしや知識を大きく進化させてきた。この流れを加速する、次世代の技術となるのが、「ミューオン」の加速技術である。

「ミューオン」は素粒子の一種で、宇宙から地球に降り注ぐ宇宙線の観測で発見され、物質を透かして見る力が非常に強い。例えるなら、病院で行うレントゲン検査のさらに強力なものをイメージしてもらおうとよいだろう。この特性を活かし、エジプトのピラミッド内部の隠された空間や火山の内部構造を調査したり、港のコンテナに不審な物が隠されていないか調べたりする際にも利用されている。現在では、空から降り注ぐ天然のミューオンを用いられたイメージングが行われているが、これを人工的に生成して加速したミューオンで置き換えることができれば、短時間で高精度のイメージング画像を得ることが出来る革新的な技術を実現することができる。しかし、これまでの技術ではミューオンは自由に操ることが難しく、効率よく加速することは不可能に近かった。私たちは、このミューオンをほとんど静止した状態にし、それを効率的に加速する技術を初めて開発した。この技術によって、ミューオンをピンポイントで狙った場所に送り届けることが可能になった。

次の目標は、ミューオンをほぼ光の速さまで加速することだ。これが達成されれば、私たちが暮らす宇宙を構成する粒子の働きを、今よりさらに精密に調べることができるようになる。特に、ミューオンが持つ「磁石のような性質（異常磁気能率）」を、世界最高レベルの精度で測定できるようになり、現在の物理学では説明できない「暗黒物質」の正体など、宇宙に残る大きな謎を解き明かす重要な手がかりとなるだろう。さらに、加速したミューオンを使った精密なイメージング技術が実現すれば、革新的なインフラ検査方法などとしても広く応用されることが期待されている。

本講演では、ミューオン加速によって可能となる応用を概観したのち、ミューオンをほぼ光速まで加速する加速器の開発状況について報告する。

J-PARC におけるミュオン冷却技術の開発とその将来展望

Current status and prospects of the muon cooling at J-PARC

高エネ研 素核研¹, 上岡 修星¹

KEK IPNS¹, °Shusei Kamioka¹, on behalf of the collaboration

E-mail: kamioka@post.kek.jp

加速ミュオンビームはミュオンの磁気モーメントの精密測定のような基礎物理やミュオン顕微鏡といった物質生命科学実験など様々な応用が期待される新しいビームである。しかしながら J-PARC に代表される従来のミュオンビームの品質は極めて悪く、そのビームのままでは加速器のアクセプタンスに収まらない。そのため効率の良いミュオン加速のためにはビーム品質の向上、つまりビーム冷却が必要不可欠になる。しかし寿命が 2.2 マイクロ秒と非常に短いミュオンの冷却には電子や陽子、原子などのために開発された既存の冷却手法を用いることはできず、新しい冷却手法が必要になる。

世界中で複数の冷却手法の開発が進んでいる中、日本では超低速ミュオンと呼ばれる冷却ミュオン源の開発が進んでいる (図 1)。これは、既存のミュオンビームを標的に打ち込むことで生成できるミュオニウムと呼ばれる電子とミュオンの束縛系のうち、真空中に飛び出したものをレーザーでイオン化することで得られるミュオンのことを指す。標的とミュオニウムが熱平衡になるため、300K 近くまで冷却されたミュオンが得られ、打ち込まれる従来のミュオンビームに対してエネルギーで 8 桁減速させることができる。この手法の鍵となるのは放出効率のよいミュオニウム生成標的と高出力の短波長パルス光源である。前者は特殊な加工を施したシリカエアロゲルの、後者は長期安定性に優れた全固体光源の開発が J-PARC で行われている。

本講演では日本で開発されているミュオン冷却について、その現状と将来展望について、直近のミュオン加速実験の結果も交えながら概説する。

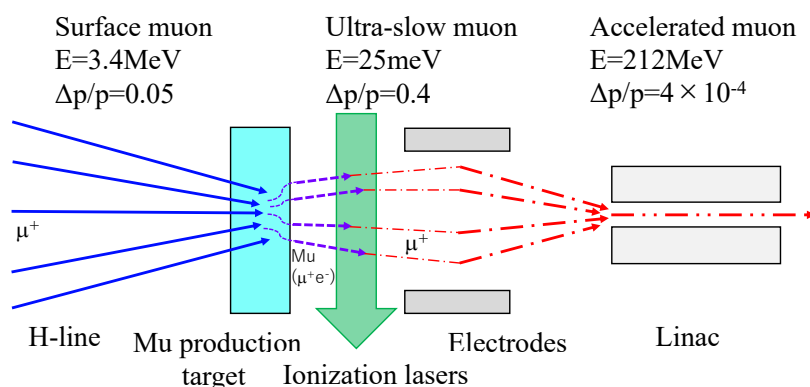


図 1: J-PARC で開発されているミュオン冷却の概念図。

半導体デバイスの宇宙線ミュオン起因ソフトエラー研究の現状と展望

Current status and future prospects of research on soft errors in semiconductor devices caused by cosmic ray muons

九大院総理工¹ ○渡辺 幸信¹

Kyushu Univ. Yukinobu Watanabe

E-mail: watanabe@aees.kyushu-u.ac.jp

今日の高度情報スマート社会は、情報通信技術によって生み出される多くの高性能・多機能なコンピュータや電子機器によって支えられている。これらの機器に誤動作が生じると、甚大な被害が引き起こされるリスクが常に懸念される。そのため、機器の性能向上に加えて、安心・安全の観点から信頼性の確保が重要となる。電子機器に搭載されている半導体デバイスの信頼性における最大の問題の一つは、放射線起因のソフトエラー問題である。ソフトエラーとは半導体デバイスが放射線（宇宙線）に曝された際に生じる一過性の誤動作を指す。原因となる宇宙線は絶えず地上に降り注いでおり、その主要な成分（荷電粒子の約 75%）はミュオンである。半導体デバイスの微細化・低消費電力化が進むにつれ、半導体デバイスの放射線耐性は低下しており、従来から懸念されて対策が進んでいる宇宙線中性子ばかりでなく、ミュオンによるソフトエラー発生の可能性も指摘され、2010 年代以降、実験・シミュレーションによるミュオン起因ソフトエラーの研究が進展している。

著者等は J-PARC MLF の MUSE 施設および阪大 RCNP の MuSIC 施設を活用して、正および負ミュオンビームを用いた半導体デバイスの照射試験を精力的に実施してきた。当初、65-nm SRAM に対して、入射運動量やデバイス動作電圧の関数としてメモリセルのビット反転発生確率を測定した[1-4]。その結果、ミュオンがデバイスの有感領域内に停止する入射運動量領域で、負ミュオンの方が正ミュオンに比べてビット反転発生率が大きくなることを実験的に初めて観測した。粒子・重イオン輸送計算コード PHITS を用いたシミュレーション結果との比較から、両者の差は、負ミュオン原子核捕獲反応で発生する二次陽子・ヘリウム及び反跳核イオンによる局所的な電荷付与が、ミュオン自身の直接電離による電荷付与に比べて十分大きいことに起因していることを明らかにした。その後、より新しい世代の SRAM (28 nm, 12 nm) に対し同様な実験が行われ[5,6]、デバイスの世代や構造依存性についての調査が続いている。

本発表では、特に負ミュオン起因のソフトエラー現象に注目し、これまでの研究の進展および今後の展望について報告する。

【参考文献】

- [1] W. Liao et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., **63**, 1734 (2018). [4] Y. Deng et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., **71**, 912 (2024).
[2] S. Manabe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., **63**, 1742 (2018). [5] W. Liao et al., Proc. of 2019 IEEE IRPS, 5A - SE (2019).
[3] T. Mahara et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., **67**, 1555 (2020). [6] Y. Gomi et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. (2025) in press.

ミュオン顕微鏡の開発計画：基礎と展望

Project of Muon Microscopies

高エネ研¹, 理研²

○永谷 幸則¹, 大西 純一², 山崎 高幸¹, 中沢 雄河¹, 足立 泰平², 足立 利一¹, 後藤 彰¹,
Patrick Strasser¹, 大石 裕¹, 反保 元伸¹, 土居内 翔伍¹, 下村 浩一郎¹, 三宅 康博¹

KEK¹, Riken²

○Yukinori Nagatani¹, Junichi Ohnishi², Takayuki Yamazaki¹, Yuga Nakazawa¹,
Taihei Adachi², Toshikazu Adachi¹, Akira Goto¹, Patrick Strasser¹, Yu Ohishi¹,
Motonobu Tanpo¹, Shogo Doiuchi¹, Koichiro Shimomura¹ and Yasuhiro Miyake¹

E-mail: yukinori.nagatani@kek.jp

KEK が開発を進めているミュオン顕微鏡について、その原理、技術、応用や展望を報告する。ミュオン顕微鏡は電子顕微鏡の電子をミュオンで置き換えたものであり、透過型電子顕微鏡(TEM)の相当として透過型ミュオン顕微鏡($T\mu M$)が、走査型電子顕微鏡(SEM)への相当として走査型正ミュオン顕微鏡($S\mu^+M$)と走査型負ミュオン顕微鏡($S\mu^-M$)が開発中である。高加速のミュオンは物質中をよく透過し、火山・原子炉やピラミッドの透視が行われてきた。この性質を用い、TEM と同等の原理でより厚い試料内部の電磁場分布を観察するのが $T\mu M$ である。サイクロトロンによる 5MeV 加速の $T\mu M$ が開発中であり、さらに 40MeV 加速のミュオンを用いサブミリメートル厚さの試料をナノ分解能で観察する装置も計画されている。収束したスピン偏極正ミュオンのビームで試料表面を走査する $S\mu^+M$ は、試料表面の各点での磁場の強度・向き・時空間ゆらぎ等を示すミュオンスピン回転緩和スペクトラム (μSR) を 3次元でマッピングする。 $S\mu^-M$ はミュオン誘起の特性 X 線を検出し、物質表面の元素・同位体・化学状態の 3次元分布をイメージングする。ミュオン由来の特性 X 線は電子由来のそれよりも約 200 倍高エネルギーであり He や Li を含む軽元素にも高い感度が得られ、ミュオン 1 個の入射につき必ず 1 個以上の X 線粒子が出る非破壊性や、ミュオン軌道が原子核に近く同位体への感度が得られる特徴がある。本講演では、これらミュオン顕微鏡の特徴と開発の現状や将来の展望に関して報告する。

[1] 永谷幸則, 下村浩一郎, 日本結晶学会誌特集 **65** 巻 1 号 220815 (2023) p.33-41.

[2] 永谷幸則, 三宅康博, *Isotope News* **773**, (2021), p.31-36.

[3] 永谷幸則, 固体物理 **55(6)** (2020), p.231-244.

本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(S) 24H00028 (代表: 永谷幸則) により支援されています。

ミュオン特性 X 線測定による非破壊元素分析法

Non-destructive Elemental Analysis Method by Muonic X-ray measurement

広大 N-BARD¹, 広大先進理工² °二宮 和彦^{1,2}

N-BARD, Hiroshima Univ.¹, Grad. Sch. Adv. Sci. Eng., Hiroshima Univ.², °Kazuhiko Ninomiya^{1,2}

E-mail: ninomiya-kazu@hiroshima-u.ac.jp

ミュオン（ミュオン、ミュ粒子ともいう。本稿ではミュオンに統一）は、負電荷を持ち電子の 200 倍の質量を持った素粒子である。近年の加速器技術の進展により、大強度のミュオンビームが得られるようになり、量子ビームの一つとして様々な利用研究が進んでいる。

ミュオンは負電荷をもつために、電子と同じように原子核との束縛状態を作ることができる。このような「原子」はミュオン原子と呼ばれる。ミュオン原子からは、ミュオンの原子軌道間の遷移に伴い、特性 X 線（ミュオン特性 X 線）が放出される。ミュオン特性 X 線のエネルギーは近似的には電子由来の特性 X 線の 200 倍高いエネルギーがあり、物質内の透過能が極めて高い。さらにミュオンの質量が大きいことにより生じる別の性質として、ミュオンを物質に打ち込んだ場合、入射エネルギーに応じた深さに停止させることが可能である。これらの特性を組み合わせ、ミュオンを物質に打ち込み、放出されるミュオン特性 X 線を測定することにより、非破壊でかつ物質内部を位置選択的に元素分析することが可能となる[1]。

ミュオン特性 X 線測定による非破壊元素分析法は、その特性により貴重な試料の分析において強力なツールとなる。また、軽い元素であっても高いエネルギーのミュオン特性 X 線が利用できるという利点もある。このため、小惑星試料の分析[2]や、文化財の分析に利用されている[3,4]。例として、ミュオンが利用な大強度陽子加速器施設（J-PARC）で実施したミュオン特性 X 線分析によって、銅鐸を分析したときに得られたスペクトルを図 1 に示す[4]。銅鐸は出土品であり、表面は錆に覆われているが、ミュオンの入射エネルギーを高くすることで分析深度を調整し、錆由来の酸素が検出されない条件で分析を行うことができる。さらに重要なこととして、錆がある表面と比べ、錆のない内部では、青銅の主成分元素である銅、錫、鉛のミュオン特性 X 線の強度比（元素組成比に対応）が異なることが分かった。

本講演においては、ミュオン元素分析法の原理と実例、また最近の進展について述べる。

【参考文献】

- [1] Kazuhiko Ninomiya, Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, 19, 8-13 (2019). [2] Tomoki Nakamura et al., Science, 379(6634), eabn8671 (2023). [3] Kayoko Shimada-Takaura et al., Journal of Natural Medicines, 75, 532-539 (2021). [4] 齋藤 努 他 文化財科学, 87, 43-46 (2024).

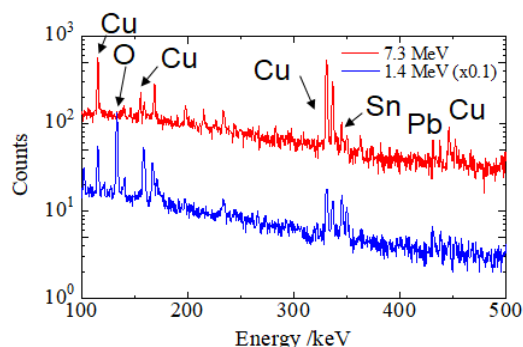


図 1 : ミュオン元素分析法による銅鐸分析より得られた X 線スペクトル

原子核乾板による宇宙線ミュオンイメージング

Cosmic-Ray Muon Imaging with Nuclear Emulsions

名大理 ○森島 邦博

Nagoya Univ., ○Kunihiro Morishima

E-mail: morishima@nagoya-u.jp

宇宙線に含まれる素粒子ミュオンは最大で数 km の物質を貫通する高い透過力を持つ。物質を透過する際に生じるミュオンフラックスの減衰を測定することで、物体内部の密度コントラストを非破壊で可視化する「宇宙線ミュオンイメージング」は、他の放射線では可視化が困難な厚さの人工構造物や自然物の内部構造を一度に把握できる革新的な技術である（図 1）。

この宇宙線ミュオンイメージングにおいて、我々は原子核乾板を検出器として用いている。原子核乾板は、電力を必要とせずミュオンの軌跡を三次元的に記録し、軽量かつコンパクトであるため、さまざまな環境に対応でき、厳しい観測条件下でも理想的な検出器となる。これらの特徴から柔軟な設置が可能となり、多地点同時計測による三次元的イメージングが実現できる。

2015 年より、日本やエジプトを含む 5 か国が参加する国際共同研究「ScanPyramids」では、エジプトのギザの三大ピラミッドなどを対象として宇宙線ミュオンイメージングによる未知構造の探査を進めてきた。これまでに、2017 年にはクフ王のピラミッド内部で未知の巨大空間を発見したほか、2016 年には入口付近に通路状の空間を確認し、2023 年にはファイバースコープによる実証にも成功している。宇宙線ミュオンイメージングの適用対象は、エジプトのピラミッド探査にとどまらず、多岐にわたる。2015 年には、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所 2 号機の炉心溶融の有無を調べるためにミュオンイメージングを実施し、その確認に成功した。近年では、巨木の内部診断、河川堤防や城郭石垣などの土木・石造構造物の健全性評価、道路陥没の原因となる地下空洞の調査、地下の金属鉱床の探査などの研究開発も進めている。

本講演では、原子核乾板を用いた宇宙線ミュオンイメージングによるピラミッド調査に加え、今後の社会実装につながる研究についても紹介する。

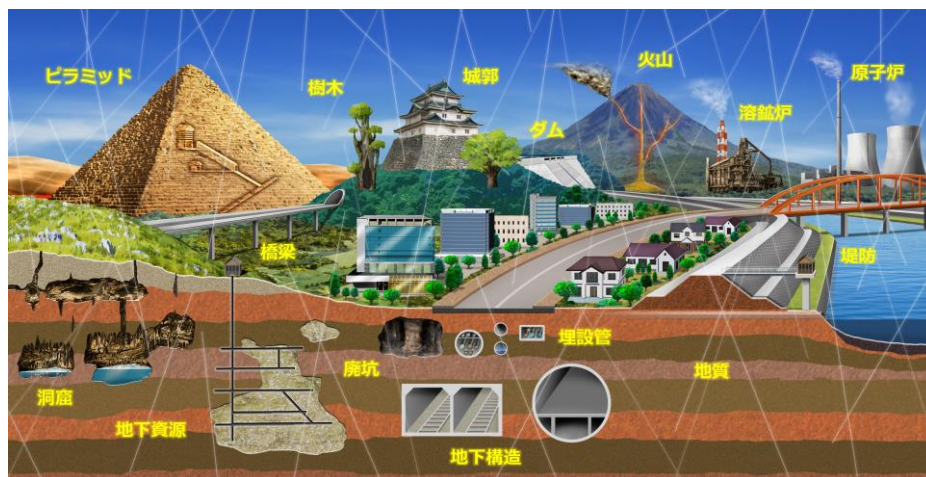


図 1. 宇宙線ミュオンイメージングの対象

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 最先端光科学が拓く地球型系外惑星探査

[7p-S301-1~7] 最先端光科学が拓く地球型系外惑星探査

[7p-S301-1]

オープニング: 最先端光科学が拓く地球型系外惑星探査

○柏木 謙¹、西川 淳^{2,3,4} (1.産総研、2.国立天文台、3.総研大、4.アストロバイオロジーセンター)

[7p-S301-2]

地球型系外惑星探査を目指した高コントラスト観測技術開発

○米田 謙太¹ (1.宇宙研)

[7p-S301-3]

大気ゆらぎを補正する補償光学

○大屋 真¹ (1.国立天文台)

[7p-S301-4]

トランジット法を用いた地球型系外惑星探索の最前線

○福井 暁彦¹ (1.東大先進)

[7p-S301-5]

太陽系外惑星探査のための精密視線速度測定装置と導波路型干渉光学素子の開発について

○小谷 隆行^{1,2,3}、西川 淳^{2,1,3}、田村 元秀^{4,1,2}、芹澤 琢磨^{5,2}、黒川 隆志⁵、田中 洋介^{5,1} (1.ABC、2.国立天文台、3.総合研究大学院大学、4.東京大学、5.東京農工大学)

[7p-S301-6]

すばる望遠鏡に導入された系外惑星探査用近赤外天文コム装置

○芹澤 琢磨^{1,3}、田中 洋介^{1,2}、黒川 隆志¹、西川 淳^{3,4,2}、小谷 隆行^{2,3,4}、田村 元秀^{5,2,3} (1.東京農工大、2.アストロバイオロジーセンター、3.国立天文台、4.総研大、5.東京大学)

[7p-S301-7]

天体視線速度高精度測定のためのErファイバコム型可視域波長標準光源

○大久保 章¹、中村 圭佑¹、柏木 謙¹、泉浦 秀行²、大宮 正士^{3,2}、田實 晃人²、佐藤 文衛⁴、洪 鋒雷⁵、中嶋 善晶⁶、稲場 肇¹ (1.産総研、2.国立天文台、3.アストロバイオロジーセンター、4.科学大、5.横国大、6.東邦大)

オープニング：最先端光科学が拓く地球型系外惑星探査

Opening: State-of-the art optical science opening up the frontier of earth-like exoplanet exploration

産総研¹, 国立天文台², 総研大³, アストロバイオロジーセンター⁴, [○]柏木 謙¹, 西川 淳^{2,3,4}

AIST¹, NAOJ², GUAS³, ABC⁴, [○]Ken Kashiwagi¹, Jun Nishikawa^{2,3,4}

E-mail: ken.kashiwagi@aist.go.jp

恒星から適度な距離である生命居住可能領域(Habitable zone)に位置する地球型惑星の探査は、宇宙望遠鏡と地上望遠鏡の両面から、また相補的に盛んに行われており、検出数が増え続けています。そして、より高性能な次世代の宇宙望遠鏡、地上望遠鏡の国際的な計画が進められており、日本の貢献が期待されます。このような状況の中で、高コントラスト・高解像度撮像技術や視線速度精密観測技術を始めとする地球型系外惑星探査技術は、広範囲の究極的な光科学技術の集合により拓かれています。本シンポジウムでは地球型系外惑星探査を支える光技術に焦点をあて、各分野で活躍している研究者の皆様の招待講演を企画しました。

The Earth-like exoplanets located in the habitable zone of appropriate distance from their host stars have been actively explored using both space telescopes and ground-based telescopes in a complementary manner and the number of detected planets has been continuously increasing. Furthermore, international projects for next-generation high-performance space telescopes and ground-based telescopes are progressing, and Japan's contributions are expected. The technologies for exploring Earth-like exoplanets, including high-contrast and high-resolution imaging and precise radial velocity measurement techniques, have been developed based on a wide range of cutting-edge optical science technologies. This symposium focuses on the optical technologies supporting the Earth-like exoplanets exploration and features invited talks from researchers playing active roles in these fields.

地球型系外惑星探査を目指した高コントラスト観測技術開発

Development of High-Contrast Imaging Techniques to Explore Earth-like Exoplanets

宇宙科学研究所¹ °米田 謙太¹

Institute of Space and Astronautical Science¹, °Kenta Yoneta¹

E-mail: yoneta.kenta@jaxa.jp

太陽以外の恒星を公転する惑星（系外惑星）は、現代の天文学における最も重要な観測ターゲットのひとつである。系外惑星科学における究極目標は、地球型系外惑星を発見し、生命活動の痕跡を検出することである。そのためには、惑星の近傍に存在する極めて明るい恒星光を 10^{-8} から 10^{-10} レベルにまで抑制できる高コントラスト観測技術が必要となる。将来の超大型地上望遠鏡および大型宇宙望遠鏡を用いて究極目標の達成するために、現在、高コントラスト観測技術の開発が進められている。

高コントラスト観測技術は主に、コロナグラフ、波面測定・制御技術、後処理技術の3つから構成される（図1）。高コントラスト観測技術を用いない場合、望遠鏡の瞳によって回折された明るい恒星光によって惑星は隠されてしまう（図2(a)）。コロナグラフとは、望遠鏡の瞳が結像する瞳面や、星が結像する焦点面において、光の振幅や位相を操作し、恒星回折光を抑制する技術である。恒星光が平面波であれば、コロナグラフによって恒星光を非常に強力に抑制できるが、波面に収差があると恒星光は散乱光として残留し、惑星の観測を妨げてしまう（図2(b)）。波面収差の原因には、大気の揺らぎや用いる光学素子の面粗さがある。そこで、科学観測用の検出器を用いて波面を測定し、可変形鏡などを用いて恒星散乱光を抑制するように波面を制御する技術が必要となる。波面測定・制御技術によって恒星散乱光が抑制された領域（ダークホール）において、惑星の観測が可能となる（図2(c)）。しかし、その他のさまざまな要因によって恒星光が残留する可能性がある。例えば、波面測定・制御よりも速い波面の変動があると、波面測定・制御技術では恒星散乱光を抑制しきれない。そこで、複数の観測画像を用いた差分演算などによって、残留恒星光を抑制する後処理技術が用いられる（図2(d)）。

本講演では高コントラスト観測技術について、登壇者が開発を進めている技術を例に報告する。

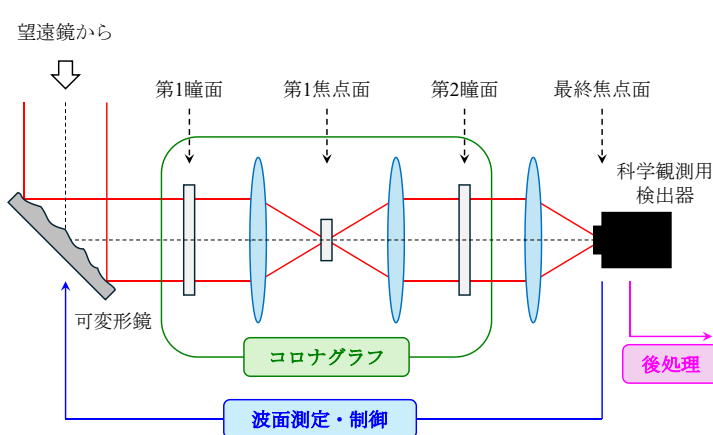


図1 高コントラスト観測技術の光学系概要。

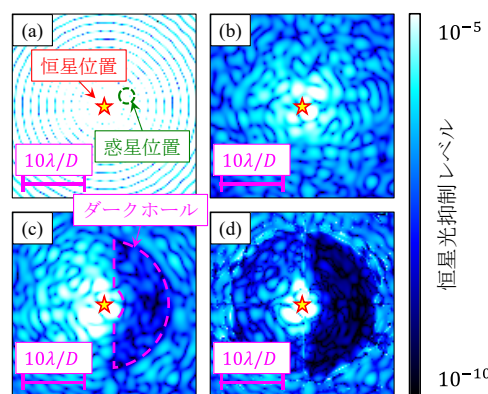


図2 数値シミュレーションによる高コントラスト観測の観測画像。

大気ゆらぎを補正する補償光学

Adaptive optics for atmospheric turbulence correction

国立天文台 °大屋 真

National Astronomical Observatory of Japan, °Shin Oya

E-mail: shin.oya@nao.ac.jp

望遠鏡の開口径が大きくなれば回折限界が小さくなり微細な構造を分解する能力は向上する。しかし、地上から天体を観測する際には大気ゆらぎにより光波面の位相が乱されるために回折限界の分解能を発揮することができない。世界的に優良な天体望遠鏡サイトであっても大気ゆらぎによる像のボケ具合は、稼働中の最大級望遠鏡(口径約 8m)の回折限界に対しては一桁大きい。補償光学(Adaptive Optics; AO)は、この大気ゆらぎの影響を実時間で補正して望遠鏡本来の性能を引き出すことができる技術である。AO を用いることで撮像観測においては解像度が向上するとともに天体からの光が中心集中してピーク値が高くなり検出限界が向上し、分光観測においてはスリット幅を狭めることで波長分解能が向上する。このような理由から 1950 年代に AO システムが提案されて[1]以降進化を遂げており、現代では最先端の観測をする地上望遠鏡では AO が標準的に装備されていて太陽系外惑星の直接撮像観測等の科学的成果を挙げている。

本講演ではシンポジウムのテーマである「最先端光科学が拓く地球型系外惑星探査」の基礎として天文学における補償光学の概要[2,3]について導入を行い、現状や今後の展開について報告する。まず補正対象となる大気ゆらぎを含めて補償光学の原理を概観し、具体的なシステムを構成する要素部品について説明する。要素部品については応用物理学的な知見を活かす余地が大いにあると考えている。その後天文学における補償光学が目指す方向性について紹介した後、最後に補償光学の天文学分野以外への応用についても触れる。補償光学の要点は光波面の位相を正しく制御することであり、この観点からは天文学以外の様々な分野への応用も期待できる。

参考文献

- [1] Babcock, H. W., “The Possibility of Compensating Astronomical Seeing”, Publ. Atron. Sco. Pacific, 65, 229 (1953)
- [2] Hardy, J. W., “Adaptive Optics for Astronomical Telescopes”, Oxford University Press (1998)
- [3] Roddier, F., “Adaptive Optics in Astronomy”, Cambridge University Press (1999)

トランジット法を用いた地球型系外惑星探索の最前線

Frontiers in the Search for Earth-like Exoplanets Using the Transit Method

東京大学先進科学研究機構¹ ○ 福井 暁彦¹

Komaba Institute for Science, University of Tokyo¹, ○ Akihiko Fukui¹

E-mail: afukui@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

今から 30 年前 (1995 年) に初めて太陽以外の恒星をまわる惑星 (以下、系外惑星) が発見され、太陽系は宇宙で孤独な存在ではないことが証明された。それ以降、世界中でさまざまな手法により精力的な系外惑星探索が行われ、これまでに約 6,000 個の系外惑星が発見されるに至っている。

これまでに発見された系外惑星の実に半数以上は、恒星の手前を通過 (トランジット) する際の恒星の減光を捉える「トランジット法」によって発見されている。この手法は、公転周期の短い惑星ほど発見しやすいという強い観測バイアスがあるものの、発見された惑星を詳しく調べることができるという大きな利点がある。例えば、惑星の半径や質量、平均密度、大気組成といった、惑星を特徴づける貴重な情報を追観測を通して得ることができる。2009 年に打ち上げられた NASA のケプラー宇宙望遠鏡は、このトランジット法を使って地球サイズの惑星を含む 2,700 個以上もの系外惑星を発見し、この分野に量的な革命をもたらした。一方、それらの惑星の多くは太陽系から遠く離れた場所に位置しており、主星が暗いために追観測が困難という問題があった。

2018 年に打ち上げられた TESS 宇宙望遠鏡は、全天をくまなく探索することで、ケプラー宇宙望遠鏡では発見が困難であった太陽系近傍の系外惑星の探索を行っている。太陽系に距離が近いと主星が明るいため、発見後に様々な詳細観測を実施して惑星の特徴づけを行うことが可能となる。しかし、TESS の観測で発見が可能なのは系外惑星の「候補」にとどまり、それらの中には高い確率で偽陽性も含まれている。そのため、地上望遠鏡による追観測によってそれらの真偽を確認することが必要不可欠である。

我々の研究チームは、TESS の惑星候補の確認を主な目的の 1 つとして、2m クラスの地上望遠鏡用に多波長カメラ「MuSCAT」シリーズを開発してきた。これまでに日本 (岡山県)、スペイン、ハワイ、オーストラリアの 4 地点の望遠鏡に MuSCAT カメラを開発・設置し、TESS で発見される惑星候補の網羅的な追観測を実施している。これらの観測によって、地球型惑星を含む 30 個以上の小型惑星を太陽系近傍の恒星まわりで発見することができた。なかでも、地球サイズの温暖な惑星である Gliese 12 b は、NASA の最新鋭赤外宇宙望遠鏡であるジェイムズ・ウェッブを用いた地球型惑星の大気観測の重要ターゲットとなっている。

太陽系外惑星探査のための精密視線速度測定装置と導波路型干渉光学素子の開発について

Development of precise radial velocity measurement instruments and the waveguide devices for exoplanet detection and direct imaging-spectroscopy

○小谷隆行^{1,2,3}, 西川 淳^{2, 3, 1}, 田村 元秀^{4,1,2}, 芹澤 琢磨^{5,2}, 黒川 隆志⁵, 田中洋介^{5,1}

Astrobiology Center¹, NAOJ², SOKENDAI³, University of Tokyo⁴, Tokyo Univ. of A & T.⁵

○T. Kotani^{1,2,3}, J. Nishikawa^{2,3,1}, M. Tamura^{4,1,2}, T. Serizawa^{5,2}, T. Kurokawa⁵, Y. Tanaka^{5,1}

E-mail: t.kotani@nao.ac.jp

宇宙に地球に似た惑星はあるのかという問いに答えるべく、様々な天文観測手法や装置の開発が進められている。その中でも視線速度法は、惑星が恒星の周りを公転することにより恒星が揺さぶられることで生じる、恒星光の視線速度変動を検出し、間接的に惑星の存在を明らかにする方法である。恒星の視線速度測定は、恒星スペクトル中に見られる、原子や分子の吸収線の波長を極めて精密に、かつ安定に測定する必要がある。例えば、地球程度の質量の惑星を発見するには、視線速度を数メートル毎秒以上の精度で測定する必要がある。これを実現するには、高い波長分解能の分光器、装置由来の視線速度変動をモニターする安定な波長参照光源と、安定した測定を可能にするための、分光器自体の安定化が必要である。

我々は、ハワイ・マウナケア山頂の国立天文台すばる望遠鏡に、近赤外線 (0.97-1.75 μm) の高分散分光器 IRD (Infrared Doppler) を開発して設置し[1]、2019 年から惑星探査のための大規模なサーベイ観測を続けている。IRD で狙うのは、太陽の半分以下の質量しかない赤色矮星と呼ばれる恒星のまわりを公転する、地球に似た質量を持つ惑星である。IRD は、暗い赤色矮星の視線速度を高精度に測定するために、光学系全体を 180K 以下 (一部光学系と検出器は 80K 以下) に冷却している。波長参照光源としては、東京農工大が開発したレーザー周波数コム[2]を、恒星スペクトルと同時に測定し、装置由来の視線速度変動を抑えている。また年間を通じて装置温度を $\pm 0.05\text{K}$ 以下に抑えたり、モードスクランブラーと呼ばれる装置を用いたりすることで、光学的に安定したスペクトル測定を可能にしている。これらの工夫により、2022 年に Ross 508 と呼ばれる赤色矮星のまわりに、地球質量の約 4 倍の惑星を発見しており[3]、今後も惑星発見が期待される。今後の将来計画として、太陽に似た恒星のまわりを公転する、地球に似た惑星を探索するための視線速度装置の開発も進めており、0.1 メートル毎秒を切る視線速度測定精度を目指している。

将来の口径 30 メートルを超える望遠鏡や宇宙望遠鏡によって、地球型惑星の光を直接検出し分光することで、生命の痕跡を探る計画も進められている。我々は、光の干渉を利用して恒星光を打ち消し、惑星光だけを抽出する、導波路型干渉素子の開発を進めている。暗い惑星光の検出には、極低損失・広帯域・低偏波依存性が重要であり、そのための導波路回路の開発を進めている。

[1] T. Kotani et al., 2018, Proc. SPIE 10702, 1070211, 2018 ; [2] T. Serizawa et al. 2024, JATIS, 10, 025006 ; [3] H. Harakawa et al. 2022, PASJ, 74, 904

すばる望遠鏡に導入された系外惑星探査用近赤外天文コム装置

Near infrared astro-comb system for exoplanet exploration installed in the Subaru Telescope

東京農工大¹, アストロバイオロジーセンター², 国立天文台³, 総研大⁴, 東京大学⁵

○芹澤 琢磨^{1,3}, 田中 洋介^{1,2}, 黒川 隆志¹, 西川 淳^{3,4,2}, 小谷 隆行^{2,3,4}, 田村 元秀^{5,2,3}

Tokyo Univ. of A & T.¹, Astrobiology Center², NAOJ³, SOKENDAI⁴, University of Tokyo⁵

○T. Serizawa^{1,3}, Y. Tanaka^{1,2}, T. Kurokawa^{2,1}, J. Nishikawa^{3,4,2}, T. Kotani^{2,3,4}, M. Tamura^{5,2,3}

E-mail: serizawa@go.tuat.ac.jp

1. はじめに

系外惑星探査を目的とした様々な天文観測装置が開発され、現在 5700 個以上の系外惑星が発見された。著者らのグループも M 型矮星を対象とした系外惑星探査用近赤外ドップラー(Infrared Doppler; IRD)観測装置を開発した[1,2]。この装置はすばる望遠鏡に設置され、2019 年より IRD-すばる戦略計画 (IRD-SSP) の観測枠の中で 6 年間の本格的な観測利用を続けている。本論文では IRD プロジェクトで観測精度の保証を担う天文用近赤外光周波数コム装置について紹介する。

2. IRD 装置の概要

Fig. 1 に IRD 装置の概略図を示す。すばる望遠鏡で取り込まれた星の光と光周波数コム (LFC) 発生部と光学処理部にて生成された LFC 光は、シングルモードまたはマルチモードファイバ (MMF) により分光器へと導かれる。MMF の NFP(Near Field Pattern)はファイバに加わる側圧などにより変動しやすいため、ファイバに周期的な振動やねじりを加えるダイナミックモードスクランブラを用いて NFP の均一化処理を行う。その後、真空チャンバー内に設置され全体が極低温 (光学系: ~180 K and 検出器: 79 K) に保たれた分光器に入射される[3]。2 つの入射光は 2 段の回折格子によって分光され、2 台の赤外線カメラを用いて YJ バンド (970-1366 nm) と H バンド (1420-1760 nm) に分けて撮影される。

3. 広帯域コム発生装置の概要

Fig. 2 に LFC 発生装置の概要を示す。まず周波数安定化半導体レーザー (波長 1549 nm) から射出した CW 光を光パルスシンセサイザに入力し、12.5 GHz 間隔のモードを持つ約 4 ps のポンプ光パルスを発生する。次に高出力 EDFA により平均パワーを 5 W まで増幅した後、ファブリペローフィルタにより ASE 雑音を除去を行う。さらに光パルス圧縮機によってピークパワーを高めたポンプ光パルスを高非線形ファイバへ入射することで広帯域化される。生成した LFC 光はモード間隔 12.5 GHz で帯域 1000-1750 nm をカバーする[4]。また LFC 光の周波数安定度は 0.03 MHz であり、星のドップラーシフトの観測精度約 1.3

MHz (相対速度で 2 m/s)に比べ 2 桁小さい。スペクトル強度低減及び平坦化、非偏光化やインコヒーレント化などの光学処理を行った後に得られた LFC 光と後期 M 矮星(GJ436)のスペクトルを Fig. 3 示す。コムスペクトルは GJ436 のスペクトルが多く吸収線を含む帯域を完全にカバーする。この LFC 装置を利用した観測は既に 6 年間行われており、その間 IRD 装置に要求される視線速度 2~3 m/s の観測精度を保証し、M 矮星発見に貢献している。

【参考文献】

- [1] T. Kokubo et al., Proc. SPIE, 9912, 2016.
- [2] K. Kashiwagi et al., Opt. Exp., 24 (8), 8120-8131, 2016.
- [3] T. Kotani et al., Proc. SPIE 10702, 1070211, 2018
- [4] T. Serizawa et al., IPC, Vancouver, BC, Canada, 1-2, 2021

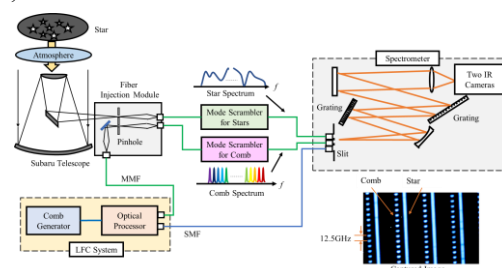


Fig. 1 Schematic of IRD instrument.

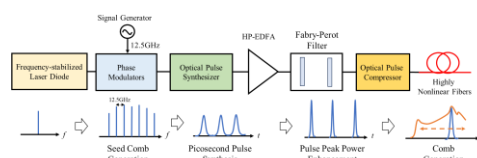


Fig. 2 Procedure for LFC generation

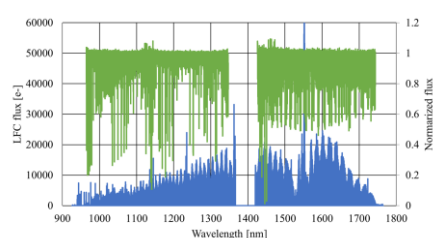


Fig. 3 GJ436 and LFC spectra on a spectrometer.

天体視線速度高精度測定のための Er ファイバコム型可視域波長標準光源

Er-Fiber-Comb-Based Visible-Range Wavelength Standard Source for High-Precision Astronomical Radial Velocity Measurements

○大久保章¹, 中村圭佑^{1*}, 柏木謙¹, 泉浦秀行², 大宮正士^{3,2}, 田實晃人², 佐藤文衛⁴, 洪鋒雷⁵,
中嶋善晶⁶, 稲場肇¹ (¹産総研 ²国立天文台 ³ASTRO・F・センター ⁴科学大, ⁵横国大, ⁶東邦大)

○Sho Okubo¹, Keisuke Nakamura^{1*}, Ken Kashiwagi¹, Hideyuki Izumiura², Masashi Omiya^{3,2},
Akito Tajitsu², Bun'ei Sato⁴, Feng-Lei Hong⁵, Yoshiaki Nakajima⁶, Hajime Inaba¹
(¹NMIJ, AIST ²NAOJ ³ABC ⁴Science Tokyo ⁵YNU ⁶Toho Univ.)

E-mail: sho-ookubo@aist.go.jp

恒星スペクトルのドップラーシフトを利用した視線速度測定法(ドップラー法)は、太陽型の恒星を周回する系外惑星の最初の発見に使われた[1]。より高い精度の視線速度測定は、地球型系外惑星探索や宇宙加速膨張の直接検証を可能にすると期待されている。しかし、例えば地球型系外惑星の発見には数年間にわたって数 cm/s の精度での視線速度測定が必要で、Th-Ar ランプなどの従来の波長標準では、スペクトルが等間隔でない、線幅が広い、本数が少ない、中心波長の不確かさが大きいなどの理由で達成が難しい。そこで、光コムを用いた波長標準「天文コム」が提案され、開発が進められている[2]。

我々は、モード同期 Er ファイバレーザーを基に、3 台の光共振器による光コムモード切り出し技術と、チャープ付き周期分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN)導波路による広帯域可視光コム発生技術を組み合わせ、コムモード間隔 30 GHz、スペクトルコントラスト 40 dB で、可視波長の 62 %を網羅する広帯域天文コムを開発した[3]。この装置の特徴は、高性能な部品が豊富な通信波長帯でモード同期レーザーの周波数制御、光コムモード切り出し、光パルス増幅、高非線形ファイバ(HNLF)を使った広帯域化を行い、チャープ付き PPLN 導波路を用いた 2~4 次高調波発生によって可視広帯域コム(図 1a)を発生させる点である。この方式は、フォトニック結晶ファイバなど可視域から広帯域コムを発生させる方式と比べて光学素子を傷めると言われている短波長の光パワーが小さく、長寿命が期待できる。

開発した天文コムは、国立天文台ハワイ観測所岡山分室 188 cm 望遠鏡ドーム内に設置され、時おり保守改善を繰り返しながら 5 年以上稼働し続けている。天文コムの各部は遠隔制御可能で、普段は茨城県つくば市の産総研から装置の状態を観察したり操作したりしている。モードごとに分解された天文コムのスペクトル(図 1b)は 188 cm 望遠鏡の高分散分光器「HIDES-F」で天体観測に用いられ、視線速度測定精度向上に向けた分光器の改良にも貢献している。本講演では、我々の天文コム装置の詳細と、遠隔制御の様子、HIDES-F で記録したスペクトルの一部を紹介する予定である。

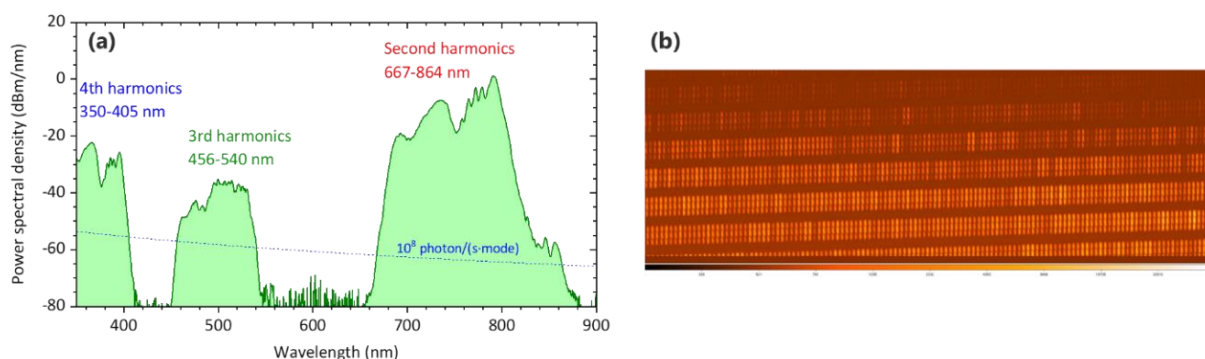


Fig. 1: (a) Comb spectrum in the visible range. (b) 2D-spectrum observed with HIDES-F

- [1] M. Mayor, *et al.*, Nature **378**, 355 (1995).
- [2] M. T. Murphy, *et al.*, Mon. Not. R. Astron. Soc. **380**, 839 (2017).
- [3] K. Nakamura, *et al.*, Opt. Express **31**, 20274 (2023).

* 現所属: 早稲田大学, 理工学術院総合研究所

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): フォトニクスが拓く水の科学

[8p-N104-1~9] フォトニクスが拓く水の科学

[8p-N104-1]

開会の挨拶 ~フォトニクス分科会の紹介~

○小西 邦昭¹ (1.東大院理)

[8p-N104-2]

イントロダクション ~本シンポジウムの趣旨~

○江川 麻里子¹ (1.資生堂みらい研)

[8p-N104-3]

水の異常性の構造的起源

○田中 肇¹ (1.東大先端研)

[8p-N104-4]

水表面の和周波発生分光の実験と計算

○山口 祥一¹ (1.埼玉大院理工)

[8p-N104-5]

無機物表面における水の科学: 振動分光法によるアプローチ

○由井 宏治¹ (1.東京理科大学)

[8p-N104-6]

月極域における水の探究

○仲内 悠祐¹ (1.立命館大学ESEC)

[8p-N104-7]

水分子の水素結合ネットワークに対する重力の影響

○江川 麻里子¹、小泉 高陽¹、武樋 剛¹、岡本 直樹¹、笹本 陸²、竹内 雅人²、浅野 琴美³、石垣 美歌³、ツェンコヴァ ルミアナ⁴、松井 臣央⁵、永松 愛子⁵ (1.資生堂みらい研、2.阪公大院工、3.島大院農生命、4.神大院農、5.JAXA探査ハブ)

[8p-N104-8]

脳内水動態の可視化技術の最先端

○篠塚 崇徳¹、塗谷 睦生¹、安井 正人¹ (1.慶應大医)

[8p-N104-9]

細胞内における水分子ダイナミクス

○白神 慧一郎^{1,2} (1.京大農、2.JSTさきがけ)

水の異常性の構造的起源

Structural Origin of Water's Anomalies

東大先端研 ○田中 肇

Univ. Tokyo, RCAST

E-mail: tanaka@iis.u-tokyo.ac.jp

水は4°Cで密度が最大となるなど、他の液体に見られない特異な異常性を示すが、その起源については現在も議論が続いている [1]。本研究では、これらの異常性を説明するために単純な二状態モデルを提案する [2]。代表的な水モデルを用いたコンピュータシミュレーションにより [3,4]、これらの異常性が、局所的に好んで形成される正四面体構造に起因することを明らかにした。この構造は高い局所的四面体対称性および並進対称性を有し、4本の水素結合により安定化されている。

この局所秩序は、熱力学的性質と動的性質に異なる影響を及ぼすことが示された [4]。すなわち、熱力学的性質は構造秩序により直接的に支配されるのに対し、動的性質はその空間的粗視化構造に依存しており、最近接環境の寄与が重要であることが示唆される。

以上の知見に基づき、階層的な二状態モデルを構築した。このモデルにより、空間的粗視化を通じて関連付けられた2つの構造パラメータが、(i) 熱力学的異常性、ならびに (ii) 冷却による動的緩和の遅れ、圧縮下での拡散係数の極大、フラジャイル-ストロング転移、動的不均一性、ストークス-アインシュタイン-デバイ関係の破れといった動的異常性を定量的に説明できることを示した。これにより、フラジャイル-ストロング転移はガラス転移ではなく、二状態間のクロスオーバーに起因する現象である可能性が高いことが示唆される。

さらに、同様の異常性を示すシリカにおいても、局所的四面体構造の存在を構造因子に直接的に見出した [5]。具体的には、シリカおよび水の両者において、最初の鋭い回折ピーク (FSDP) は、正四面体ユニットに由来する密度波に起因しており、その強度はこれら構造の存在比率に比例することを示した。これらの結果は、水型異常性に対する二状態モデルの有効性を強く支持するものである。

参考文献

1. P. Gallo, et al., Chem. Rev. **116**, 7463–7500 (2016).
2. H. Tanaka, Phys. Rev. Lett. **80**, 5750 (1998); J. Chem. Phys. **112**, 799 (2000); Europhys. Lett. **50**, 340 (2000); J. Phys.: Condens. Matter **15**, L703 (2003); Eur. Phys. J E **35**, 113 (2012).
3. J. Russo, & H. Tanaka, Nat. Commun. **5**, 3556 (2014); PNAS **112**, 6920 (2015).
4. R. Shi, J. Russo and H. Tanaka, PNAS **115**, 9444 (2018); J. Chem. Phys. **149**, 224502 (2018); R. Shi, and H. Tanaka, PNAS **117**, 26591 (2020).
5. R. Shi and H. Tanaka, Sci. Adv. **5**, eaav3194 (2019); J. Amer. Chem. Soc. **142**, 2868 (2020).

水表面の和周波発生分光の実験と計算

Experimental and theoretical SFG spectroscopy of water surface

埼玉大院理工¹ ○山口 祥一¹

Saitama Univ.¹ ○Shoichi Yamaguchi¹

E-mail: shoichi@apc.saitama-u.ac.jp

水と氷の研究には、物理化学だけでも 100 年以上の長い歴史がある。その蓄積は極めて膨大であり、例えば 1930 年代の氷の残余エントロピーの発見が幾何学的フラストレーションの概念の端緒となったように、広く物質科学全般に啓発的な影響を与えている。しかし、実験結果に基づいて“素朴なモデル”を立てるという、特に水について典型的であった昔ながらの研究のあり方は、近年の理論化学・計算化学の飛躍的な発展によって有効性を失いつつある。バルク水の分子動力学シミュレーションの提供する詳細な微視的描像の正しさは、密度、誘電率、融点、拡散係数、動径分布関数などの多数の実測を精密に再現することによって担保され、もはや素朴なモデルに活躍の場をほとんど与えない。計算負荷の低い非分極剛体回転子モデル（以下剛体モデル）に話を限定しても、実測の再現についての進歩には目を見張るものがある。例えば 1983 年に Jorgensen らが報告した TIP3P は相互作用サイトを 3 つ有する水モデルであり、密度を高温高圧まで良く再現する。彼らが同時に報告した TIP4P は 1 つ増えたサイトを利して融点や臨界点などについてさらに高い性能を示す。しかし彼らが 2000 年に報告した TIP5 は、孤立電子対を模してさらにサイトを 1 つ増やしたものの、さほどの向上に恵まれなかった。そのような中で Vega らは TIP4P のパラメータを微調整して、蒸発エンタルピーの再現を犠牲にしつつ他の多くの物性について性能を高めた TIP4P/2005 を開発した。液体水の等温圧縮率などの熱力学量から粘度や回転緩和時間などのダイナミクスを反映する物理量まで幅広く再現する TIP4P/2005 は、現在最もよく使われる剛体モデルの 1 つとなっている。

このような優れた水モデルの開発は、多数の信頼できる実測をその基盤としている。液体水を概ね良く再現する TIP4P/2005 は、結晶相や過冷却水については TIP4P/Ice の後塵を拝する。剛体モデルは近似に過ぎず、適用範囲は（温度や圧力という意味でも物性の種類という意味でも）限定的にならざるを得ないからである。従って、信頼できる実測は状態ごとに多種かつ多数用意する必要があるが、その整備状況が依然として全く不十分なのが水表面である。上述の数多くの実測のうち、表面に関連するものは表面張力のみであり、これらの剛体モデルが与える水表面の描像をどれほど信頼して良いのか、正確に判断できない。そのような中で Skinner らは TIP4P に三体相互作用項を加えた剛体モデル E3B を独自に開発し、2011 年に水表面の和周波発生（SFG）スペクトルの計算に E3B を適用した。彼らは、E3B だけが低波数の正の OH 伸縮バンドを再現し、TIP4P や TIP4P/2005 では再現されないことを根拠として、表面のような不均一系では三体相互作用が本質的に重要であると結論した。しかし 2015 年に我々は低波数の正の OH 伸縮バンドは測定のアर्टیفクトであることを報告し、競合グループとの論争を経て正のバンドは存在しないことを実験的に確定させた。そのため、信頼できる水表面の描像を与える剛体モデルは何なのか（あるいは存在するのかもしれないのか）、再び不明のままである。この現状とそこに至る紆余曲折は、水表面について信頼できる実測を多数揃えることの難しさを示している。現在我々は、水表面での剛体モデルの性能評価を、表面張力と SFG スペクトルによって試みている。後者については、フリー OH バンドの半値全幅、フリー OH と水素結合 OH のバンドの面積比、水素結合 OH バンドのピーク波数と低波数側の半値半幅、の計 4 つを評価項目として採用して実測と比較している。それによると、水素結合 OH のピーク波数は TIP4P、水素結合 OH の半値半幅は TIP4P/Ew、表面張力は TIP4P/2005、フリー OH に関連するものは TIP4P/Ice が、それぞれ最良の結果を与えている。講演ではこれらの評価項目の意味や計算の方法、またそれ以前の実験スペクトルを確定させるまでの長い道のり等を紹介する。

無機物表面における水の科学：振動分光法によるアプローチ

Water Science on Inorganic Surfaces: from Vibrational Spectroscopic Approaches

東理大理 ○由井 宏治

Department of Science, Tokyo University of Science, ○Hiroharu Yui

E-mail:yui@rs.tus.ac.jp

「固体は神が創りたもうたが、表面は悪魔が創った。」というのは、排他原理の発見で1945年のノーベル物理学賞を受賞したWolfgang Pauli博士の言葉である。原子や分子が規則性を持って整然と並ぶ結晶内部に対して、固体表面の構造のあまりの複雑さとそれに起因する物性の取り扱いにくさを表現している。これが真空中であれば、量子ビームを用いた優れた計測・分析手法により取りつく島がまだありそうである。一方我々が生活する大気下、すなわち水蒸気や酸素分子が豊富な世界では、水分子の固体表面への吸着度合が湿度に応じて変わり、さらに酸素分子との反応で表面の化学状態が複雑に変化していることも予想される。しかし固体表面で見られる水の様々な動態や機能、すなわち吸着や濡れの度合、親水・撥水性、潤滑・摩擦特性などを原子・分子レベルから理解・制御しようとする、大気中における吸着水や表面化学状態の解明は欠かせない。しかし大気中、すなわち水の蒸発・散逸を許す解放系においては量子ビームを持ち込むこと自体が困難を伴うことも多い。本講演では大気中における「水蒸気存在下」かつ無機固体「表面選択的」というキーワードのもと、限られた例ではあるが、非線形光学効果と偏光変調法による2つのアプローチを紹介したい。前者では信号自体が反転対称性の崩れた表面・界面のみからしか発生しないヘテロダイン検出振動和周波発生法(HD-VSFG)を用いたシリコン自然酸化膜表面における吸着水の[1,2]、後者では大気中の水蒸気やバルクの吸着水といった等方配向成分をリアルタイムキャンピングする、偏光変調外部反射赤外吸収分光法(PM-ER-IR)を用いた酸化チタンの表面水酸基の検出例を紹介する[3]。また時間が許せば、試料表面の酸化状態を予め知る、ないしは制御するための試料準備の重要性を、小惑星リュウグウ試料の分析例を通じて紹介したい[4]。

[1] Urashima, S., Uchida, T., Yui, H., “Hydrogen-bonding structure in self-formed nanodroplets of water adsorbed on amorphous silica revealed by surface-selective vibrational spectroscopy”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 22 (2020) 27031-27036.

[2] Uchida, T., Urashima, S., Uchino, S., Nagai, S., Suga, K., Hayashi, Y., and Yui, H., “Structural Anomaly of the Adsorbed Water on Al-Doped Silica Revealed by Heterodyne-Detected Vibrational Sum-Frequency Generation Spectroscopy”, *J. Phys. Chem. C*, 127 (2023) 19055-19063.

[3] Takahashi, K., and Yui, H. “Analysis of Surface OH Groups on TiO₂ Single Crystal with Polarization Modulation Infrared External Reflection Spectroscopy”, *J. Phys. Chem. C*, 113 (2009) 20322-20327.

[4] Yui, H. *et al.* “Pyrrhotites in asteroid 162173 Ryugu: Records of the initial changes on their surfaces with aqueous alteration”, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 379 (2024) 172-183.

月極域における水の探究

In Pursuit of Water in the Lunar Polar Region

立命館大学 宇宙地球探査研究センターESEC¹ °仲内 悠祐¹

Ritsumeikan Univ. ESEC¹, °Yusuke Nakauchi¹

E-mail: nakauchi@fc.ritsumei.ac.jp

近年、人類がこれまで行なってきた科学的発見を求める月探査に加え、深宇宙へ飛び出すための宇宙港や新たな経済圏確立を目指して世界各国が月を目指し技術を開発している。現在の月探査の非常に大きな原動力となっているのが、月の水である。月観測データや月サンプル分析から、月極域には水氷が存在することが有力視されている(e.g. 1-4)。しかし、現状の観測結果では月極域の水の垂直・水平方向の空間的分布、その量や存在形態(水酸基 or 水分子、吸着水 or 構造水など)は多くの研究者により議論が続いている(e.g. 5, 6)。

NASA は月での科学的発見に加え、経済的利益、そして次世代探検家(次世代の新宇宙探査)の礎を築くことを目指す Artemis 計画をスタートさせた。Artemis 計画には 51 カ国が参加しており、国際協力のもと進められている。月面において人間が活動拠点を形成するためには、エネルギーなどに利用可能な資源を現地採取できることが望ましく、様々な月探査プロジェクトで最も注目されている資源が“水”である。月面において水が利用可能な状態で、かつまとまった量が手に入れば、人類は月を燃料補給地点として利用可能となり、月居住の可能性や月以遠の天体へのアクセス性などが大きく向上することが期待されている。

日本では、JAXA とインド宇宙研究機関(ISRO) の国際共同で月極域探査機 LUPEX プロジェクトが遂行中である。LUPEX では水の存

在が示唆されている月極域に、ISRO が開発する着陸機で着陸し、その後に JAXA が開発する月面無人ローバで周辺を探査する。無人ローバには複数の観測装置が搭載され、その場観測により着陸地点周辺領域の水を含む揮発性成分の存在有無・存在量・存在形態に関する直接的なデータを取得することを目指している。JAXA は月面無人ローバに加え近赤外画像分光装置(Advanced Lunar Imaging Spectrometer: ALIS)、水資源分析計(Resource Investigation Water Analyzer: REIWA)、掘削ドリルなどを開発する。

上記の中でも、ALIS は月面での反射光を波長領域 750 - 1,650 nm で観測し月面の反射スペクトルを取得する、日本の惑星探査用カメラとしては初めてのハイパースペクトルカメラである。この波長範囲では、1,000 nm 付近の反射スペクトル形状を利用した月面構成鉱物の同定や、1,500 nm 付近の反射スペクトル形状を利用した水氷の同定および定量が可能である。特に 1,500 nm 付近などの反射スペクトル形状を利用した水氷の定量は現在勢力的に研究が進められている[e.g. 7]。本公演では、月面の水と惑星探査における可視近赤外カメラの利用について概説する。

【参考文献】

- 1) Pieters, C. M., 2009, Science, 326 (5952) :568–572.
- 2) Sunshine, J. M. et al., 2009, Science, 326 (5952) :565–568.
- 3) Colaprete, A. et al., 2010, Science 330, 463–468.
- 4) Saal, A. E. et al., 2008, Nature, 454 (7201) :192–195.
- 5) Ohtake M. et al., 2024, The Astrophysical Journal, 963, 124
- 6) Milliken, R. E. and Li, S., 2017, Sci Adv 3, e1701471.
- 7) Ogishima, A and Saiki, K., 2021, Icarus, 357, 114273.

水分子の水素結合ネットワークに対する重力の影響

The effect of gravity on the hydrogen bond network of water molecules

資生堂みらい研¹, 阪公大院工², 島大院農生命³, 神大院農⁴, JAXA 探査ハブ⁵

○江川 麻里子¹, 小泉 高陽¹, 武樋 剛¹, 岡本 直樹¹, (M2)笹本 陸², 竹内 雅人²,

(M1)浅野 零美³, 石垣 美歌³, ツェンコヴァ ルミアナ⁴, 松井 臣央⁵, 永松 愛子⁵

Shiseido Co., Ltd.¹, Osaka Metropolitan Uni.², Shimane Uni.³, Kobe Uni.⁴, JAXA⁵, ○Mariko Egawa¹,

Koyo Koizumi¹, Go Takehi¹, Naoki Okamoto¹, (M2)Riku Sasamoto², Masato Takeuchi²,

(M1)Kotomi Asano³, Mika Ishigaki³, Roumiana Tsenkova⁴, Mio Matsui⁵, Aiko Nagamatsu⁵

E-mail: mariko.egawa@shiseido.com

地球上のすべての生命体は、呼吸・栄養・排出などの生命維持活動のために“水”を必要とする。水分子は最も単純で一般的な分子のひとつであるが、その特異な性質の理由はまだ完全には解明されていない。そして、生体内の水は、常に水分子が単独で存在しているわけではなく、多くはタンパク質や脂質と結合して存在している。昨今の宇宙開発の進展により、人類が宇宙で生活する時代がせまっている。水分子を生体化学反応に必須とする生命体が、水分子の水素結合ネットワークが地球上とは大きく異なる可能性のある低重力環境下で健康な身体機能を維持できるかどうか、考えなければならない時期に来ている。しかしながら、水分子の水素結合ネットワークに対する重力の影響、さらに、細胞機能・代謝などの身体機能との関係については、未だ解明されていない。本研究は、水分子の水素結合ネットワークに対する重力の影響を評価することを目的とした。

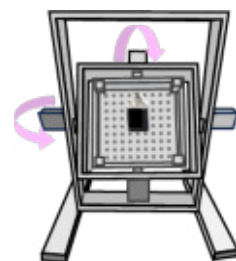


Fig. 1. Schematic diagram of 3D clinostat used to reproduce a low-gravity environment.

低重力環境は、3D クリノスタットを用いて地上で模擬した(Fig. 1)。試料及び計測デバイスをクリノスタット中心部に設置し、3次元的に回転させて重力を均等に分散させることで、15分程度で0.1G環境に到達させた。水分子の水素結合ネットワークは、近赤外分光計(1400~2500 nm, PAL one, trinamiX GmbH, Germany)を用いてリアルタイム計測した。本条件下で、純水及び細孔径が異なる2種のマイクロ細孔含有無機鉱物(ゼオライト・メソポーラスシリカ)の水の吸収バンドを解析することにより(Fig. 2)、水分子の水素結合ネットワークに対する低重力の影響を評価した。その結果、低重力により水分子の水素結合ネットワークが変化し、変化パターンは3種類のサンプルで異なった。低重力の影響は、水分子が存在する周囲の環境により変化することが示唆された。重力の変化が、水分子の存在環境にバリエーションのある我々の身体機能にどのような影響を与えるのか、今後の研究が期待される。

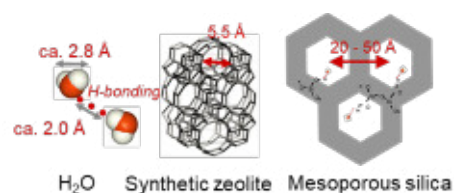


Fig. 2. Molecular size of H₂O and pore size of mesoporous materials.

謝辞：本研究は宇宙航空研究開発機構(JAXA)の助成(RFP10(13)-05)を受けたものである。

脳内水動態の可視化技術の最先端

The forefront of water dynamics imaging in the brain

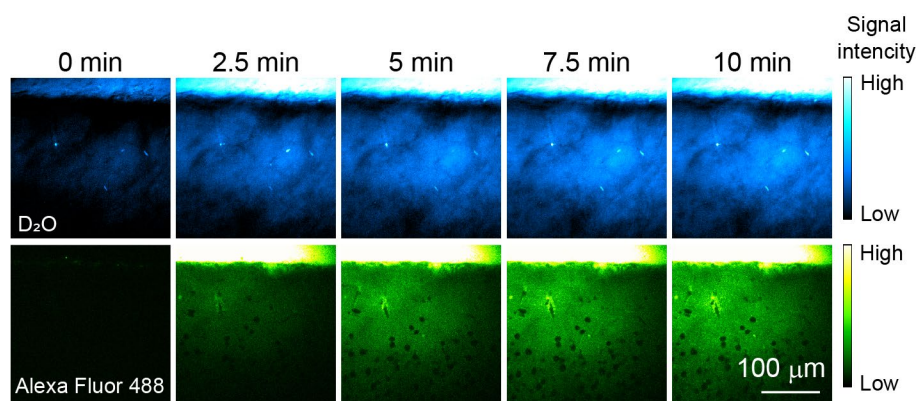
慶應大医¹ °篠塚 崇徳¹, 塗谷 睦生¹, 安井 正人¹

Keio Univ. Sch. Med.¹, °Takanori Shinotsuka¹, Mutsuo Nuriya¹, Masato Yasui¹

E-mail: tshino@keio.jp

水は我々の体を構成する最も主たる分子である。我々は1日に約3Lの水分を食べ物や飲み物から体内に取り入れ、ほぼ同量の水分を尿として体外に排出する。体内に取り込まれた水は栄養分の輸送や細胞老廃物の排出など多岐に渡った役割を担う。近年の研究で、脳には末梢組織と異なる独自の水輸送システムがあり、これによって老廃物が排出されるという「glymphatic system 仮説」が提唱された。この glymphatic system によって排出される老廃物には、アルツハイマー病発症を引き起こすとされるアミロイドβなどが含まれることから、神経変性疾患発症の鍵を握るとされる。しかし、脳内の水動態の実態については水の可視化の困難さから未だ多くの部分が未解明である。

我々はコヒーレントラマンイメージングの一つである誘導ラマン散乱 (SRS) イメージングを利用し、生きた脳組織内における細胞・組織レベルでの水動態の可視化法の開発に取り組んでいる。光源に長短パルスレーザーを用い、近赤外光による SRS イメージングを行うことで、厚みのある脳組織内での SRS イメージングを可能としている。また、焦点面では SRS と共に2光子蛍光励起を起こすことで、これらのシグナルを同時に取得することを実現した。これらのマルチモデルな多光子現象によるイメージングにより、脳組織中を流れる重水と蛍光物質の経時変化を調べ、重水 (D₂O) が蛍光色素よりも速く拡散することを示した。本講演では、これらの脳内水動態による老廃物クリアランス機構とラマン散乱顕微鏡を利用した脳の中の水の流れの可視化について紹介したい。



Representative images of D₂O and Alexa Fluor 488 influx into an ex vivo brain sample.

細胞内における水分子ダイナミクス

Water Dynamics in Cells

京大農¹, JST さきがけ² °白神 慧一郎^{1,2}

Kyoto Univ.¹, JST PRESTO², °Keiichiro Shiraga^{1,2}

E-mail: shiraga.keiichiro.3a@kyoto-u.ac.jp

“Water is life’s matter and matrix, mother and medium. There is no life without water.” – 1937 年にノーベル生理・医学賞を受賞した Dr. Szent-Györgyi がこのように水の重要性を説いた一方で、水分子が細胞内で果たす生物学的な役割や機能は未だ謎に包まれている。これは、従来の生物学的アプローチでは水を可視化することが困難であったことに加え、水はピコ秒 (10^{-12} s) 程度で絶えずダイナミックに揺らぎ続けるバルク水のみならず、生体分子の近傍には動的に束縛された水和水が存在するため、その特性を評価することが困難であったからに他ならない。ここで、テラヘルツ波 (0.1~10 THz) 領域の分光情報はピコ~サブピコ秒オーダーの揺らぎを反映するため、その誘電特性を評価することで細胞内の水分子ダイナミクスを直接的に観察することが可能となる。そこで本研究では、細胞の生命現象に関わる水の役割を理解することを目指し、テラヘルツ波領域の複素誘電スペクトルを測定して培養細胞内の水の状態を定量化する。

シリコン単結晶からなる ATR プリズム上に扁平上皮細胞である HeLa 細胞を接着培養させ、全反射減衰テラヘルツ分光を用いて 0.25~12 THz に及ぶ複素誘電スペクトルを測定した。以下図に示すように、HeLa 細胞単層 (厚さ 7.5 ± 1.0 μm) の複素誘電スペクトルは純水のそれと類似した周波数分散を示している。これは、テラヘルツ波領域では水分子の誘電応答が支配的であり、細胞内に存在するタンパク質などの生体分子に由来する影響が小さいことを表している。そこで、バルク水の誘電緩和ならびに水の分子間振動モードを用いてこの複素誘電スペクトルのフィッティング解析を行い (挿入図)、緩和強度をもとにバルク水と水和水の数密度を見積もったところ、HeLa 細胞内におけるバルク水は $0.0238 \pm 0.0020 \text{ \AA}^{-3}$ であることがわかった。これは水和水の数密度 ($0.0074 \pm 0.0005 \text{ \AA}^{-3}$) の 3 倍程度にも及ぶことから、細胞内に存在する水の約 3/4 はバルク水として存在していることが見出された。

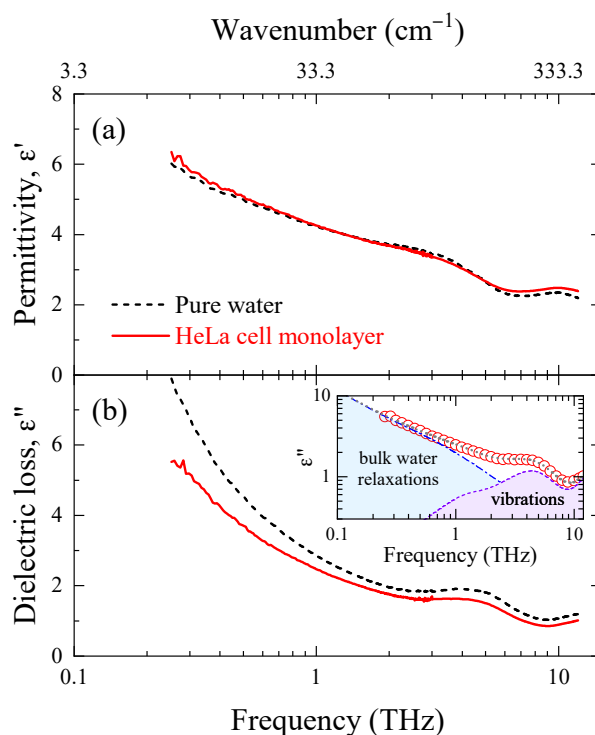


Figure Complex dielectric spectra of the HeLa cell monolayer and pure water at 37.0°C. The inset shows the contributions of bulk water relaxation and intermolecular vibrations to the dielectric loss spectrum.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：ナノスケール計測技術の最前線～プローブ顕微鏡が拓く極微電子計測

[7p-N104-1~8] ナノスケール計測技術の最前線～プローブ顕微鏡が拓く極微電子計測

[7p-N104-1]

オープニング

○一井 崇¹ (1.京大院工)

[7p-N104-2]

時間分解走査型非線形誘電率顕微鏡が拓く半導体物性のナノスケール計測

○山末 耕平¹ (1.東北大通研)

[7p-N104-3]

走査プローブ顕微鏡を用いた超高速ダイナミクス計測の最前線

○吉田 昭二¹ (1.筑大数物)

[7p-N104-4]

静電気力顕微鏡と光誘起力顕微鏡の最近の展開

○菅原 康弘¹、李 艶君¹ (1.阪大院工)

[7p-N104-5]

テラヘルツ電場駆動トンネル電流による単一分子励起状態形成

○木村 謙介^{1,2} (1.理研SISL、2.東大応化)

[7p-N104-6]

ヘテロダイナ法による走査型インピーダンス顕微鏡の広周波数帯測定化と全固体電池解析への応用

○山岸 裕史¹、蒲生 浩忠¹、前田 泰¹、城間 純¹、清林 哲¹、竹市 信彦¹、佐野 光¹ (1.産総研)

[7p-N104-7]

時間分解ケルビンプローブフォース顕微鏡による有機薄膜トランジスタの微視的電気特性評価

○小林 圭¹ (1.京大工)

[7p-N104-8]

静電気力顕微鏡による電荷移動計測

○松本 卓也¹ (1.阪大院理)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：ナノスケール計測技術の最前線～プローブ顕微鏡が拓く極微電子計測

[7p-N104-1~8] ナノスケール計測技術の最前線～プローブ顕微鏡が拓く極微電子計測

[7p-N104-1] オープニング

〇一井 崇¹ (1.京大院工)

キーワード：プローブ顕微鏡、ナノスケール計測

プローブ顕微鏡による電子物性計測技術は急速に発展を遂げ、空間分解能・時間分解能が飛躍的に向上し、半導体を中心とするさまざまな電子材料に応用されています。本シンポジウムでは、その最先端で活躍されている研究者を招き、これまでの技術的な進展から最新の研究動向と将来展望について紹介いただきます。

時間分解走査型非線形誘電率顕微鏡が拓く半導体物性の ナノスケール計測

Time-resolved scanning nonlinear dielectric microscopy for nanoscale characterization of semiconductor properties

東北大通研 °山末 耕平

Tohoku Univ., °Kohei Yamasue

E-mail: yamasue@riec.tohoku.ac.jp

走査型非線形誘電率顕微鏡 (SNDM) は導電性探針下の局所的な静電容量変化を高感度で検出するプローブ顕微鏡である [1]. SNDM を拡張した時間分解 SNDM が山岸, 長らにより開発され, 高速デジタル化技術やポスト信号処理を用いることで, 従来型の SNDM と比較して, 飛躍的な高速化・広帯域化や多重化を実現している [2, 3]. 近年, 時間分解 SNDM による半導体物性のナノスケール評価に関する技術開発が進展しており, 多数キャリア (活性ドーパント) 濃度分布観察のほか, 局所容量-電圧(CV)特性, 半導体-絶縁膜界面の界面欠陥密度分布観察 (局所 DLTS), さらにこれらの同時測定などが可能となっている [3]. これらの手法は, 半導体の微視的電荷状態やデバイス特性に関する理解を可能とする. 本講演では, 近年の時間分解 SNDM に関する最新の進展を述べる. ワイドバンドギャップ半導体, 原子層半導体への応用に関する成果, さらに最近の顕微分光法への発展を目指す研究を紹介する.

謝辞

本研究は東北大学未来科学技術共同研究センター・長康雄教授との共同研究として遂行されています. 常日頃より, 有益な御議論, 御助言を頂き, 心より感謝致します. 本研究の一部は JSPS 科研費 (16H06360, 20H02613, 24H00414) および NEDO SIP の助成を受けています.

参考文献

- [1] Y. Cho, Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy: Investigation of Ferroelectric, Dielectric, and Semiconductor Materials and Devices, Elsevier (2020).
- [2] Y. Yamagishi and Y. Cho, Appl. Phys. Lett. 111, 163103 (2017).
- [3] K. Yamasue and Y. Cho, Microelectron. Reliab. 135, 114588 (2022).

走査プローブ顕微鏡を用いた超高速ダイナミクス計測の最前線

Advances in Ultrafast Dynamics Measurements with Scanning Probe Microscopy

筑大数物¹ ○吉田 昭二¹

Univ. of Tsukuba¹ ○Shoji Yoshida

E-mail: yoshida.shoji.gu@u.tsukuba.ac.jp

次世代光電子デバイスでは、素子サイズがナノメートル (nm) スケール、動作周波数がテラヘルツ (THz) 帯に達しつつあり、素子性能の評価自体が困難になってきている。それに伴い、ナノ構造中の超高速ダイナミクスを高い時空間分解能で観測する手法の開発が進められている。中でも、走査プローブ顕微鏡と光学ポンプ・プローブ法の組み合わせにより、光の回折限界を超える原子〜ナノメートルスケールの空間分解能で、光キャリア^[1]、励起子^[2]、スピン^[3]、フォノン^[4]、分子振動^[5]などの多様な超高速現象の観測が可能となってきた。特にテラヘルツパルスを用いた時間分解走査トンネル顕微鏡 (THz-STM) は、当初は世界でも数グループに限られていたが、現在では 10 を超える研究グループが取り組むまでに発展し近年著しい進展を遂げている^[6,7]。THz-STM は、サブサイクルの THz パルスを STM 探針と試料間に照射し、トンネル電流を瞬間的に駆動することで、試料表面の瞬時の状態密度とその時間変化を捉える手法である。STM 本来の原子スケール空間分解能を維持しつつ超高速現象の観測が可能である。

本講演では、THz-STM の最新の研究動向とともに、我々が進めている 2 次元半導体の励起子ダイナミクス計測について紹介する。実験では、図 1 に示すようにフェムト秒パルス光 (517 nm、約 300 fs) により WSe₂/MoS₂ヘテロ構造中に励起子を生成し、その後照射される THz パルスにより誘起されるトンネル電流を通じて励起子ダイナミクスを計測した。図 1(b)に示すように、励起直後に THz 電流が急増し、続いて指数関数的な減衰が観測された。これは探針先端の強い THz 近接場によって励起子が解離し、生成されたキャリア (電子または正孔) がトンネルすることで生じたものであり、減衰時定数から局所的な励起子寿命が得られる。講演では、励起子ダイナミクスの実空間イメージングについても議論する。

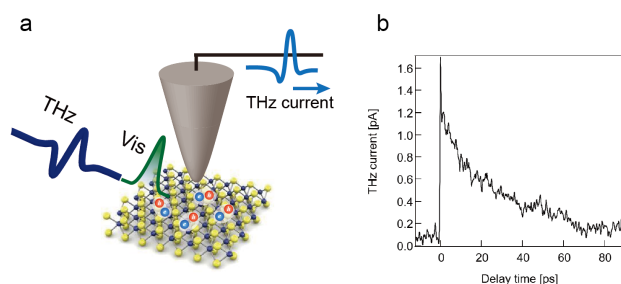


図 1 a. 時間分解テラヘルツ STM 計測の模式図 b. WSe₂/MoS₂ 積層ヘテロ構造上で得られた時間分解計測結果

- [1] Y. Terada *et al.*, Nat. Photonics **4**, 869 (2010). [2] H. Mogi *et al.*, Npj 2D Mater. Appl. **6**, (2022).
 [3] S. Yoshida *et al.*, Nat. Nanotechnol. **9**, 588 (2014). [4] S. Liu *et al.*, Sci Adv **8**, eabq5682 (2022).
 [5] T. L. Cocker *et al.*, Nature **539**, 263 (2016). [6] T. L. Cocker *et al.*, Nat. Photonics **7**, 620 (2013).
 [7] T. L. Cocker *et al.*, Nat. Photonics **15**, 558 (2021).

静電気力顕微鏡と光誘起力顕微鏡の最近の展開

Recent Developments of Electrostatic Force Microscopy and Photo-induced Force Microscopy

阪大院工¹ °菅原 康弘¹, 李 艶君¹

Osaka Univ.¹, °Yasuhiro Sugawara¹, Yan Jun Li¹

E-mail: sugawara@ap.eng.osaka-u.ac.jp

1. 静電気力顕微鏡の展開

ケルビンプローブ力顕微鏡 (KPFM) を用いて半導体試料を測定する場合、その接触電位差 (CPD) は、バルクのフェルミ準位の位置だけでなく、半導体の表面ポテンシャルにも依存する。ここでは、半導体内部の界面状態密度を測定する高周波と低周波の交流バイアス電圧を用いる静電気力分光法について紹介する[1]。この分光法では、半導体中のバルク状態と界面状態間の電荷移動を考慮する。低周波の交流バイアス電圧を用いた場合、半導体内部の静電容量は界面準位に起因する静電容量と空乏層容量の和で与えられる。一方、高周波の交流バイアスを用いると、界面準位による静電容量の寄与は無視でき、空乏層容量が静電力に大きな影響を与える。実際、空乏領域では、低周波交流バイアスを印加した場合の曲線の傾きが、高周波交流バイアスを印加した場合よりもわずかに大きくなり、これらの傾きの差から界面状態密度を測定できる。

2. 光誘起力顕微鏡研究の展開

物質表面に局在する近接場光の強度分布を力として検出する光誘起力顕微鏡 (PiFM) (Fig. 1(A)) が、物質の局所的な光学応答を極めて高い分解能で画像化できる手法として注目されている[2]。PiFM では、AFM の金属探針と試料表面に光を照射し、金属探針に誘起される双極子と試料表面に誘起される双極子との間の静電気力相互作用を光誘起力として測定する。光誘起力は探針・試料間距離の 4 乗に反比例するため、物質の局所的な光学応答を高い空間分解能で可視化できる。

PiFM は、AFM をベースとしているため KPFM

を用いることで、試料の電荷移動(または CPD の変化)を測定することができる。ここでは、超高真空において周波数変調(FM)方式で動作する PiFM を KPFM と組み合わせることにより、電荷移動の影響を受けた単一分子の光電場をサブナノスケールの空間分解能で可視化できることを紹介する (Fig. 1(B)) [3, 4]。

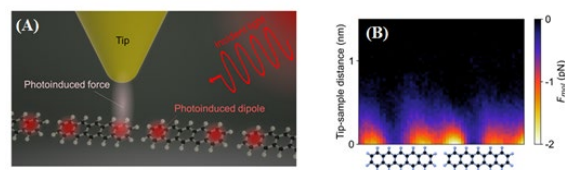


Fig. 1. (A) Configuration of PiFM system and (B) results of 2D mapping of photoinduced force of a pentacene molecule.

[1] R. Izumi, M. Miyazaki, Y. J. Li and Y. Sugawara, Beilstein J. Nanotechnology, **14**, (2023) 175.

[2] J. Yamanishi, Y. J. Li, Y. Sugawara, et al. Nature Commun. **12**, 3865 (2021).

[3] T. Yamamoto, Y. Sugawara, et al. ACS Nano, **18**, 1724 (2024).

[4] M. R. Shcherbakov, Y. Sugawara, et al. Nature Reviews Methods Primers **5**, 34 (2025).

テラヘルツ電場駆動トンネル電流による単一分子励起状態形成

Excited state formation in a single molecule by terahertz-field-driven tunneling current

理研 SISL¹, 東大応化², °木村 謙介^{1,2}

RIKEN SISL¹, Univ. Tokyo², °Kensuke Kimura^{1,2}

E-mail: kensuke.kimura@riken.jp

走査トンネル顕微鏡(STM)と光学測定を組み合わせた STM 発光分光法により、トンネル電流を励起源とした発光測定が可能である。光の回折限界を超えた原子スケールの空間分解能で光学測定を行えることから、様々な表面における局所光学現象が調べられてきた^[1]。一方で、従来の STM 発光分光法はトンネル電流が励起源であるがゆえに時間分解能に限られる。近年、STM の時間分解能を打破する試みとして、超短パルス光と STM を組み合わせた超高速 STM が注目されている^[2-7]。中でも、テラヘルツ(THz)領域の光パルスと STM を組み合わせた THz-STML が注目を集めている。本研究では、STM 発光分光法と THz-STML を融合させた新規な手法を開発し^[6]、THz 電場駆動トンネル電流による単一分子の励起状態形成に取り組んだ^[7]。

Yb ファイバーレーザーを用いて光整流効果により発生させた THz 光パルスを、極低温超高真空 STM に導き、STM 内部に備え付けられたレンズで探針直下に集光した(図 1a)。分子から生じる発光は、STM 内部に備え付けられた別のレンズにより集光され、STM チャンバー外に導かれ、高感度電荷結合素子(CCD)で検出される。試料は、3 から 4 原子層の NaCl 膜が成長した Ag(111)基板上に、Pd フタロシアニン(PdPc)分子を蒸着することで準備した。図 1b は従来の DC-STML と THz-STML により得られた PdPc 分子の STM 像である。THz のキャリアエンベロープ位相(CEP)とサンプル電圧を調整することで、DC 同様に THz-STML でも分子軌道が観測できることを確認した。図 1c は PdPc 分子の THz-STML 発光スペクトルである。THz 光パルスのメインピークが正方向である CEP = 0 のとき発光は現れないが(赤線)、負方向である CEP = π のとき 1.9 eV 付近にいくつかのピークが確認された(青線)。これは PdPc 分子の蛍光由来のピークであり、THz 誘起トンネル電流によって分子の励起状態が形成されたことを意味している。本講演では、図 1c に観られる CEP 依存性に基づき、励起状態形成機構について議論する。

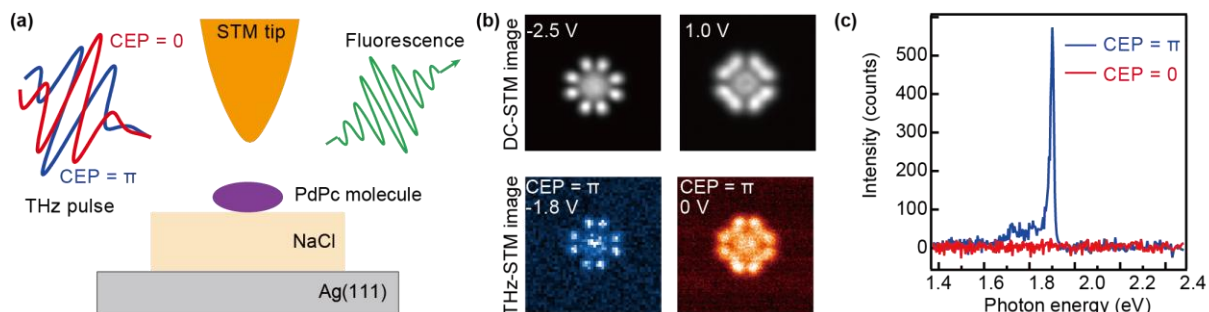


Fig. 1 (a) A schematic illustration of THz-STML measurement. (b) DC- and THz-STML images of a PdPc molecule. (c) THz-STML spectra of PdPc/NaCl/Ag(111). Red : CEP = 0, Blue : CEP = π . $E_{\text{THz}} = \pm 80$ cm/V, 3 min, $V = 0$ V.

[1] Kuhnke *et al.*, *Chem. Rev.* 117, 5174 (2017). [2] Terada *et al.*, *Nat. Photon.* 4, 869 (2010). [3] Cocker *et al.*, *Nat. Photon.* 7, 620 (2013). [4] Yoshioka *et al.*, *Nat. Photon.* 10, 762 (2016). [5] Yoshida *et al.*, *ACS photon.* 8, 315 (2021). [6] Kimura *et al.*, *ACS photon* 8, 982 (2021). [7] Kimura *et al.*, *Science* 387, 6738 (2025).

ヘテロダイン法による走査型インピーダンス顕微鏡の 広周波数帯測定化と全固体電池解析への応用

Wide frequency range measurement of scanning impedance microscopy
using heterodyne method and its application to analysis of all-solid-state batteries

産総研 °山岸 裕史, 蒲生 浩忠, 前田 泰, 城間 純, 清林 哲, 竹市 信彦, 佐野 光

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, °Yuji Yamagishi, Hirotada Gamo,

Yasushi Maeda, Zyun Siroma, Tetsu Kiyobayashi, Nobuhiko Takeichi, Hikaru Sano

E-mail: y.yamagishi@aist.go.jp

走査型インピーダンス顕微鏡 (SIM) は、静電気力顕微鏡やケルビンプローブ力顕微鏡と同様に、静電気力検出に基づく AFM 技術であり、主に半導体材料の解析に用いられてきた。SIM の開発当初は、静電気力の検出に AM 方式が用いられていたが^[1]、その後、FM 方式の SIM が開発され、空間分解能が向上した^[2]。近年では、蓄電材料の評価にも応用されつつある^[3]。しかし、FM 方式の SIM には、電池材料の性能評価において重要な 10kHz ~ 1MHz の周波数帯での測定が困難という課題があり、この点が SIM の電池材料への適用を制限していた。本研究では、静電気力の検出にヘテロダイン法^[4]を導入した SIM を開発し、測定可能な周波数帯を大幅に拡張 (1 Hz ~ 300 kHz) するとともに、本手法を全固体電池に適用して、電極内部のインピーダンス分布を解析した。

開発した計測法を用いて、Fig.1(a)に示す構造の全固体セルの正極断面に対して SIM 測定を実施した。FIB で研磨した断面試料に 3 種類の異なる周波数の交流電圧を印加し、その状態で SIM 像 (交流電圧の振幅と位相の分布) を取得した結果を Fig.1(d)に示す。交流電圧の周波数が高い場合 (100 kHz) には、振幅・位相像ともに電極上で一様な信号が検出された。一方、周波数が 100 Hz、20 Hz と低くなるにつれて、活物質/固体電解質界面における信号変化が顕著になることが分かった。これは、活物質/固体電解質界面のインピーダンス成分の寄与が、低周波領域で相対的に増加することを可視化していると考えられる。

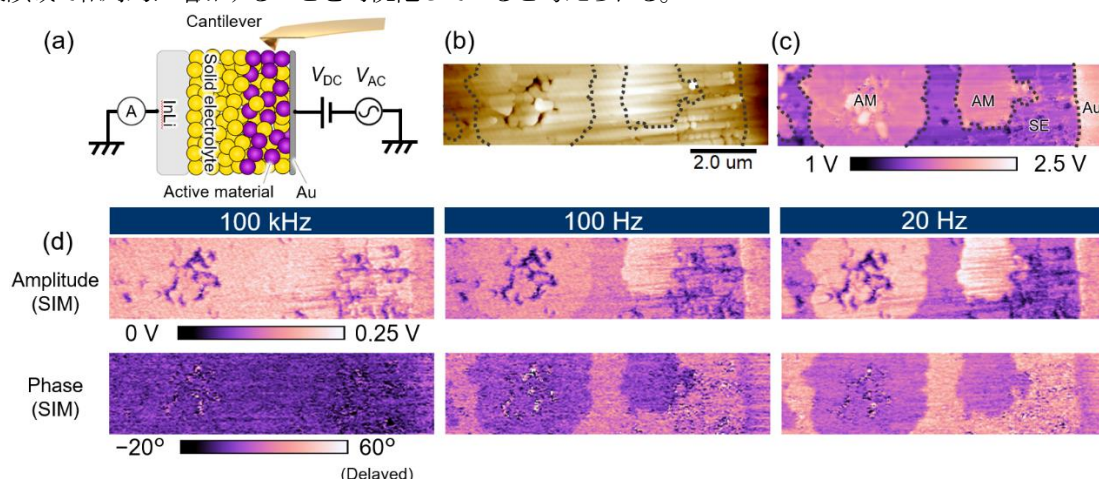


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the SIM measurement. (b) Topography of the positive electrode cross-section. (c) Surface potential image obtained by KPFM. (d) Amplitude and phase images of SIM with 100 kHz, 100 Hz, and 20 Hz of the frequency of the AC voltage.

謝辞 本研究は NEDO 委託事業「次世代全固体蓄電池材料の評価・基盤技術開発 (SOLiD-Next, JPNP23005)」により実施された。

参考文献 [1] S.V. Kalinin et al., Appl. Phys. Lett. 78 (2001) 1306. [2] T. Kimura et al., J. Appl. Phys. 118 (2015). [3] N. Ishida, J. Phys. Chem. C 126 (2022) 17627. [4] Y. Sugawara et al, Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 223104.

時間分解ケルビンプローブフォース顕微鏡による 有機薄膜トランジスタの微視的電気特性評価

Local Electrical Characterization of Organic Thin-Film Transistors

Using Time-Resolved Kelvin-probe Force Microscopy

京大工¹, °小林 圭¹

Kyoto Univ.¹, °Kei Kobayashi¹

E-mail: keicoba@iic.kyoto-u.ac.jp

有機薄膜トランジスタ (OTFT) は、低コストでフレキシブルな電子回路への応用が期待されており、その研究が盛んに行われている。有機薄膜トランジスタの動作速度は、注入、輸送、拡散過程など、数百 ns の時間スケールで起こる有機薄膜中のキャリアダイナミクスと大きく関係しているため、有機薄膜中のキャリアダイナミクスの解明は、OTFT の性能を向上させる上で本質的に重要である。時間分解静電気力顕微鏡 (tr-EFM) および時間分解ケルビンプローブフォース顕微鏡 (tr-KPFM) は、原子間力顕微鏡 (AFM) における静電気力検出の変化を高速に検出することで、デバイス内のキャリア分布の時間変化、すなわちキャリアダイナミクスをナノスケールの空間分解能で可視化する技術であり、OTFT における微視的電気特性評価に有用である[1-3]。

当初、tr-KPFM を用いて、OTFT のキャリアダイナミクスを測定したところ、比較的低速なトラップ電荷の拡散過程のみが測定された[1]。そこで、tr-EFM (時間分解能 1 ms 程度) を用いたところ、電極に接した有機半導体グレイン (結晶粒) へ正孔が注入される様子 (キャリア注入過程) を可視化することができた[2]。また、AFM カンチレバーの振動波形を全て記録し、デジタル信号解析により共振周波数の変化を算出する瞬時周波数法を採用し、tr-EFM の時間分解能を AFM カンチレバーの時定数 (数 μs) を超える 1 μs まで高めることに成功した[3]。

一方、ポンプ・プローブ法 (PP 法) を用いれば、tr-EFM や tr-KPFM の時間分解能を μs オーダまたはそれ以下に高められることが示された[4,5]。われわれは、PP 法を用いた高速かつ定量的な電位分布計測法である PP-KPFM について、その時間・電位分解能をさらに高めるため、ヘテロダイン振幅変調 (HAM) 方式[6]を採用した PP-HAM-KFM を開発し、微視的電気特性評価を行った。

1. Y. Yamagishi, K. Kobayashi, T. Kimura, K. Noda, and H. Yamada, *Org. Electron.* **57**, 118 (2018).
2. T. Kimura, K. Kobayashi, Y. Yamagishi, and H. Yamada, *Appl. Phys. Lett.* **125**, 263301 (2024).
3. Y. Yamagishi, K. Kobayashi, T. Kimura, K. Noda, and H. Yamada, *J. Appl. Phys.* **135**, 125501 (2024).
4. J. Murawski, T. Mönch, P. Milde, M.P. Hein, S. Nicht, U. Zerweck-Trogisch, and L.M. Eng, *J. Appl. Phys.* **118**, 244502 (2015).
5. K. Kajimoto, K. Araki, Y. Usami, H. Ohoyama, and T. Matsumoto, *J. Phys. Chem. A* **124**, 5063 (2020).
6. Y. Sugawara, L. Kou, Z. Ma, T. Kamijo, Y. Naitoh, and Y.J. Li, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 223104 (2012).

静電気力顕微鏡による電荷移動計測

Charge migration probed by electrostatic force microscopy

松本 卓也

Takuya Matsumoto

E-mail: matsumoto-t@chem.sci.osaka-u.ac.jp

【序】静電気力顕微鏡は、高抵抗試料や孤立電荷など、定常的な制御電流が必要な走査トンネル顕微鏡では測定不可能な絶縁体基板上の試料の表面電荷を測定することができる。さらに、時間分解手法を用いることで、移動度に対応する電荷のマイグレーションも直接観測することができるので、有機デバイス、分子デバイスなどの計測に適している。本講演では、特に探針同期型時間分解静電気力顕微鏡、Fowler-Nordheim 分光法により、面内方向と垂直方向の電荷移動の観測例を中心に紹介する。

【探針同期型静電気力顕微鏡】

探針同期型静電気力顕微鏡は、ポンププローブ法に基づく時間分解測定をカンチレバー振動と同期して行う手法である（図1）。電荷の応答とカンチレバーの機械的な運動の相互作用を利用するため、回路的な時定数の影響を受けない計測が可能である。原子間力顕微鏡で用いるカンチレバーの共振周波数は広く、一般的な市販品で数 KHz から 1MHz 程度まで選択可能である。探針同期型静電気力顕微鏡では、試料－探針間の静電気力を検出するので、探針が試料表面に近接したときに検出感度が上昇する。従って、カンチレバーの共振周波数が高いほど、また、カンチレバーの振幅が大きいほど、高い時間分解能がえら得られることになる。

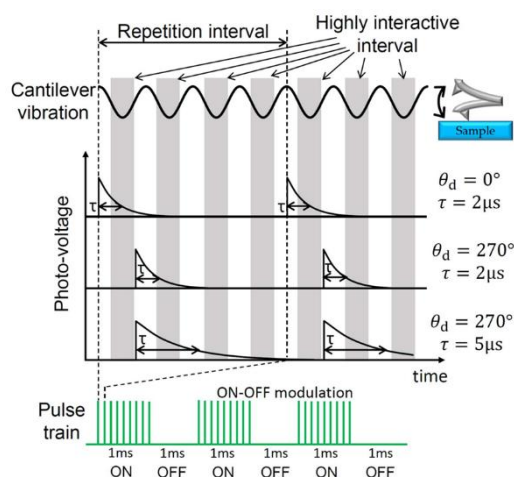


図1 探針同期型時間分解静電気力顕微鏡の原理図

この方法を用いて MDMO-PPV 薄膜（ドナー層）の上に部分的な C60 薄膜（アクセプター層）を有する二層有機太陽電池デバイスを構成し、C60 層のテラスエッジを含む領域の探針同期型時間分解静電気力測定を行った結果を紹介する[1]。

【Fowler-Nordheim 分光法】

電界放出トンネリングにおいて、基板と試料の間にある分子準位が共鳴することを利用して、分子準位の位置を求める方法である。SAM 膜上に形成した Ru 薄膜について行った解析例を紹介する。

[2]参考文献

[1] Communications Physics (2019), [2] ACS Appl. Mater. Interfaces (2023).

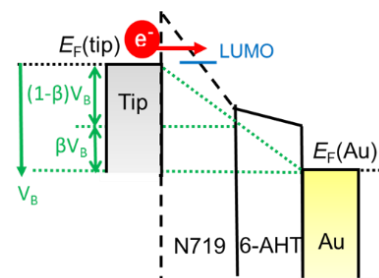


図2 N719/6-AHT/Au エネルギーダイアグラム

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 表面・界面の反応／成長制御による高機能性材料の創製

[8p-S301-1~7] 表面・界面の反応／成長制御による高機能性材料の創製

[8p-S301-1]

マテリアルズインフォマティクスを使った機能性界面の理解と課題

○知京 豊裕¹ (1.NIMS)

[8p-S301-2]

Deep Learningを用いた結晶成長過程の解析

○都甲 薫¹、石山 隆光¹ (1.筑波大数理)

[8p-S301-3]

シリコンをモデルとした多結晶材料情報学の開拓

○宇佐美 徳隆¹ (1.名大院工)

[8p-S301-4]

歪および表面形状制御による三次元自己周期整合型IV族ナノドット成長

○山本 裕司^{1,2}、Wen Wei-Chen¹、Tillack Bernd^{1,3} (1.IHP-Leibniz Institut für innovative Mikroelektronik、2.名古屋大学、3.Technische Universität Berlin)

[8p-S301-5]

Si/Geナノワイヤの界面・物性制御

○深田 直樹^{1,2} (1.物質・材料研究機構、2.筑波大学)

[8p-S301-6]

広範囲にサイズ制御されたシリコンナノ粒子の機能開拓

○杉本 泰¹ (1.神戸大院工)

[8p-S301-7]

熱電応用に向けた表面・界面制御による高性能薄膜の創製

○中村 芳明^{1,2} (1.阪大院基礎工、2.阪大OTRI)

マテリアルズインフォマティクスを使った機能性界面の理解と課題

Understanding and challenges of functional interfaces using materials informatics

NIMS¹, [○]知京豊裕¹

NIMS.¹, [○]Toyohiro Chikyow¹

E-mail: CHIKYO.toyohiro@nims.go.jp

機能性材料、特に半導体材料における界面は、デバイス性能や信頼性を決定づける重要な要素である。近年、第一原理計算や高分解能計測によって界面構造が明らかになる一方、その設計指針の確立にはデータ統合と予測能力が求められている。本発表では、マテリアルズインフォマティクス (MI) を用いて、界面の構造・電子状態・拡散挙動などを体系的に理解・予測する試みについて紹介する。

1. これまでの界面研究と成果

半導体を含む機能性材料の特性は界面で決定される。そのためにこれまで多くの界面研究がなされてきた。これまで界面研究は、2000 年代前半までは HRTEM や XPS といった実験手法に依存しており、個別事例に基づいた構造・状態解析が中心であった。2000 年代後半以降、高速な大規模な第一原理計算 (DFT) の導入により、原子スケールでの界面モデル構築が進展し、絶縁体/金属や酸化物/半導体といった典型的な界面における状態密度や電荷移動のメカニズムが明らかになった。しかし、界面研究は分野や材料毎に分かれており全体を俯瞰する体系はできなかった。

2. マテリアルズインフォマティクスの登場

2010 年代後半からは、マテリアルズインフォマティクス (MI) の応用が本格化し、界面構造・物性に関する大量のデータの整備とともに、データベース (例: JARVIS、Materials Project 拡張) の活用、クラスタリングや回帰モデルによる界面エネルギー予測、教師あり学習による伝導度・仕事関数・ショットキー障壁の推定、さらには酸素欠損や膜厚変化といった界面形成条件と物性の関係解析が進められてきた。特に MI により、「どの結晶面の組み合わせが安定かつ高性能な界面を構成するか」を定量的に導き出すことが可能になりつつある。

3. マテリアルズインフォマティクスの課題と今後の展望

今後の課題としては、界面データをどのような記述するかの問題がある。また異なるスケールの実験・シミュレーション結果の統合といった基礎的インフラの整備が求められる。第二に、MI が得意とする静的構造の解析を超えて、電場・熱・拡散など時間発展を伴う動的界面応答を扱うには、フェーズフィールド法や分子動力学とのハイブリッド手法の活用が不可欠である。今後は強化学習や生成モデルを用いた実用的界面設計が重要となる。さらに膜成長条件やプロセス変数といった実験的要因を取り込むマルチスケール MI の導入が挙げられ、Process Informatics との連携による統合的な設計・制御が期待されている。

Deep Learning を用いた結晶成長過程の解析

Deep Learning-Based Analysis of Crystal Growth Processes

○都甲薫, 石山隆光 (筑波大 数理物質)

Kaoru Toko, Takamitsu Ishiyama (Institute of Applied Physics, University of Tsukuba)

E-mail: toko@bk.tsukuba.ac.jp

半導体材料における結晶成長技術の進展は、電子デバイスの性能向上を支えてきた。従来の材料合成法やプロセス制御に加え、近年ではマテリアルズ・インフォマティクスを活用した新しいアプローチが盛んに研究されており、結晶成長における高度な制御やプロセスの効率化が期待されている。我々はこれまでに、IV 族/III-V 族半導体および金属化合物材料の薄膜合成と評価に機械学習を援用し、「主成分分析を用いた特徴抽出による設計指針の構築[1]」「ベイズ最適化を用いた効率的性能向上[2][3]」「多結晶分析画像からの電気的特性予測と影響因子抽出[4]」等が可能となることを見出してきた。今回、機械学習を用いた結晶化(固相成長)過程の解析について、我々の最新の研究を紹介する。

固相成長法は、非晶質薄膜を熱処理して結晶化を誘起する手法であり、任意の基板上に多結晶半導体薄膜を得る方法として古くから知られてきた。固相成長の系を理解し制御するためには、非晶質相から結晶相への相転移過程を観察することで、結晶ドメインの横方向成長速度と核生成頻度を測定し、活性化エネルギーと頻度因子

を決定することが重要である。従来、これらの物性値は試料の熱処理と観察を繰り返し、取得された顕微鏡像の手動解析を行うことで得られてきた。しかし、この作業は時間と労力がかかる上、測定者依存の系統的な誤差が避けられない。そこで、本プロセスを機械学習で自動解析することを検討した(図 1)。

機械学習を用いた画像解析は盛んに研究されてきたが、材料研究に応用する際の共通の課題として、「訓練データ不足」がある。画像認識の精度を高めるためには大量の実験データを学習させる必要があり、その構築にかかる膨大な労力を考慮すると、結局のところ「人が見た方が早い」という結論に行き着くことも少なくない。我々はこの課題に対し、結晶成長過程の顕微鏡画像に似せた「擬似画像」を自動生成することを提案した[5,6]。その結果、固相成長の基礎物性を人が行うよりも高精度で高速かつ客観的に導出し、さらに不鮮明な顕微鏡像から結晶/非晶質の領域を精緻に判別することにも成功した。講演では本プロセスの詳細に加え、得られた IV 族半導体薄膜の性能についても包括的に紹介する。

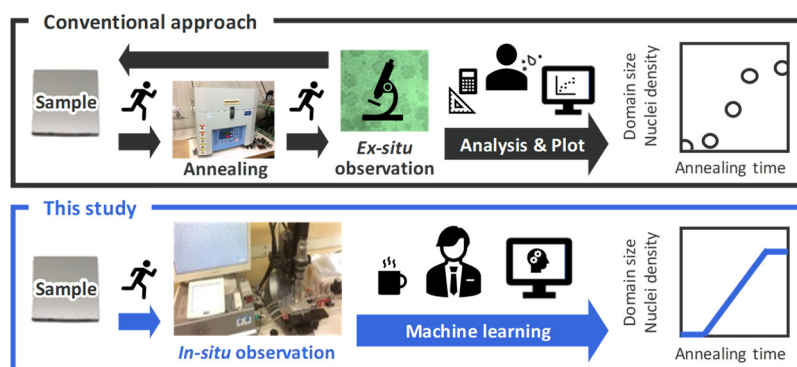


Fig. 1. Schematic of the workflow. Conventionally, humans have repeatedly conducted annealing and image analyses on samples over time. This study proposes automating the process using an *in-situ* annealing observation system and machine learning.

[1] T. Ishiyama *et al.*, APL Materials 12, 021119 (2024)

[3] R. Ito *et al.*, CrystEngComm 27, 3659 (2025)

[5] T. Ishiyama *et al.*, STAM: Methods 2, 213 (2022)

[3] T. Ishiyama *et al.*, NPG Asia Materials 16, 17 (2024)

[4] K. Nozawa *et al.*, Adv. Ele. Mater. 10, 2300875 (2024)

[6] T. Ishiyama *et al.*, Sci. Rep. 14, 19449 (2024).

シリコンをモデルとした多結晶材料情報学の開拓

Pioneering polycrystalline informatics using silicon as a model material

名大院工¹, [○]宇佐美 徳隆¹

Nagoya Univ.¹, [○]Noritaka Usami¹

E-mail: usami.noritaka.i7@f.mail.nagoya-u.ac.jp

我々は、多結晶材料に共通する性能発現の本質的メカニズムを明らかにし、普遍的な高性能化指針の構築を目指し、シリコンをモデル材料として「多結晶材料情報学」という新たな学術領域の開拓に取り組んでいる[1]。これまでに、実験・理論・計算・データ科学を有機的に連携させた多角的な研究基盤を構築し、さらにそれらを統合することで、転位クラスターの発生メカニズムの一端を解明するなど、複雑な多結晶材料中の物理現象の理解を大きく進展させてきた[2]。さらに最近では、生成 AI を活用して、目的とする特性を発現する多結晶組織の逆設計を試みる新たな研究展開も開始しており、データ駆動型材料設計の実現に近づきつつある[3]。本講演では、これまでの研究成果を概説するとともに、多結晶材料情報学の有効性と今後の展望について紹介する。

- [1] N. Usami, K. Kutsukake, T. Kojima, H. Kudo, T. Yokoi, Y. Ohno, Multicrystalline informatics: a methodology to advance materials science by unraveling complex phenomena, *Sci Technol Adv Mater* (2024). <https://doi.org/10.1080/14686996.2024.2396272>.
- [2] K. Yamakoshi, Y. Ohno, K. Kutsukake, T. Kojima, T. Yokoi, H. Yoshida, H. Tanaka, X. Liu, H. Kudo, N. Usami, Multicrystalline Informatics Applied to Multicrystalline Silicon for Unraveling the Microscopic Root Cause of Dislocation Generation, *Advanced Materials* 36 (2024). <https://doi.org/10.1002/adma.202308599>.
- [3] T. Deshimaru, K. Torii, K. Hara, K. Kutsukake, H. Kudo, R. Katsube, T. Kojima, N. Usami, Two-Stage GAN-Based Generation of Virtual 3D Multicrystalline Silicon Reproducing Nucleation and Crystal Growth Processes Using Crystallographic Information from Real Ingots, *Advanced Intelligent Discovery* (2025). <https://doi.org/10.1002/aidi.202500012>.

歪および表面形状制御による三次元自己周期整合型 IV 族ナノドット成長 Three-Dimensional Self-Ordered Group IV 3D Nanodot Fabrication by Strain and Surface Morphology Control

IHP-Leibniz Institut für innovative Mikroelektronik¹, 名古屋大学², Technische Universität Berlin³,
°山本 裕司^{1,2}, Wei-Chen Wen¹, and Bernd Tillack^{1,3}

IHP-Leibniz Institut für innovative Mikroelektronik¹, Nagoya University², Technische Universität
Berlin³, °Yuji Yamamoto^{1,2}, Wei-Chen Wen¹, and Bernd Tillack^{1,3}

E-mail: yamamoto@ihp-microelectronics.com

【序論】最近の IV 族半導体製造プロセスの発展により、ナノドット(ND)や超格子等の新しい物性を持つ材料の製作が可能となり、これらを用いた新機能デバイスの既存の CMOS テクノロジーへの応用が期待される。IV 族 ND を Si 上に形成する場合、核成長を利用するため通常ランダムな分布となる。フォトリソグラフィを用いた周期的構造の形成は可能であるが、高密度化は困難である。本発表では、歪および表面形状を制御する事で三次元周期構造を持つ SiGe ND を CVD 法を用いて自己整合的に製作した結果および形成メカニズムをまとめる。

【実験方法】Si(001)もしくは仮想 SiGe(001)基板上に単結晶 Si(50 nm)および SiGe(~5 nm)を基板加熱型 CVD 装置を用いて交互成長させることにより超格子を作製した。Si スペース成膜には SiH₄もしくは SiH₂Cl₂ (DCS)、SiGe 成膜には SiH₄-GeH₄をそれぞれ用いた。

【結果・考察】Fig. 1 に Si 表面に SiGe/Si 超格子成膜した断面 SEM 像を示す。下部の 10 層は SiH₄、上部 10 層は DCS を用いて Si スペースを成長させた。SiGe 層は Si に対して格子整合している為、Si スペース成膜温度に昇温する際 Stranski-Krastanov (S-K)メカニズムにより SiGe ND 構造が構成される。SiGe/Si 超格子を成膜する事により、横方向、縦方向共に周期構造を持つ SiGe ND 配列が認められる。Si スペースに DCS を用いた場合と SiH₄を用いた場合、それぞれ縦方向配列および千鳥配列の SiGe ND 形成が確認される。Si スペース成膜に DCS を用いた場合、成膜中に Si 表面の凹凸が平坦化されたフラットな表面が形成され、SiH₄を用いた場合、Si スペース表面は埋め込まれた SiGe ND の形状を反映したチェッカーボード構造が形成される事が過去の実験で確認された[1]。Si スペースを DCS ベースで成膜した場合 SiGe による引っ張り歪が、SiH₄ベースで成膜した場合、引っ張り歪よりも表面エネルギー抑制が S-K メカニズムによる SiGe ND 形成の原動力となるため、それぞれ縦方向配列及び千鳥配列となる。横方向の配列は Si(001)面の歪が単調に減少する<010>方向に配列する傾向を示し[2]、横方向の周期は Ge 比率および Si スペースの成膜温度により SiGe の表面マイグレーションを制御することにより制御可能である[3]。

Fig. 2 にリセス形成後、Si_{0.85}Ge_{0.15}成膜および CMP により作製したローカル Si_{0.85}Ge_{0.15} 仮想基板上に Si_{0.7}Ge_{0.3}/Si 超格子を成膜した断面 SEM 像を示す。Si_{0.85}Ge_{0.15} 上には SiGe ND が形成されず二次元超格子構造、Si 上には SiGe ND が千鳥配列で形成されている。SiGe ND は歪による S-K メカニズムで形成されるため、SiGe 仮想基板を用いて SiGe の表面マイグレーションの原動力を変化させる事により SiGe ND 形成のスイッチングが可能である。したがって、ローカル SiGe 仮想基板を用いることにより所望の場所に三次元周期配列 SiGe ND と二次元超格子構造を同一基板上に作製可能である。今回示した知見は、三次元周期配列 SiGe ND を用いた新構造の量子効果デバイス等への応用が期待される。

【参考文献】

- [1] Y. Yamamoto *et al.*, Semicond. Sci. Technol. **33** (2018) 114014.
- [2] M. Meixner *et al.*, Phys. Rev. B **64** (2001) 245307.
- [3] Y. Yamamoto *et al.*, Nanotechnology. **28** (2017) 485303.
- [4] W.-C. Wen *et al.*, EU Patent (Application provisionally registered).

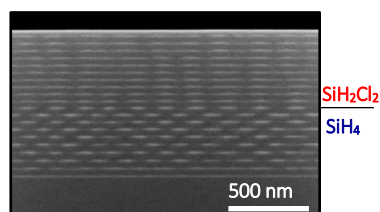


Fig. 1. Cross-section SEM image of Si/Si_{0.7}Ge_{0.3} superlattice. SiH₄ and DCS are used for Si spacer deposition. Si and SiGe growth temperatures are 600 and 700°C, respectively [2].

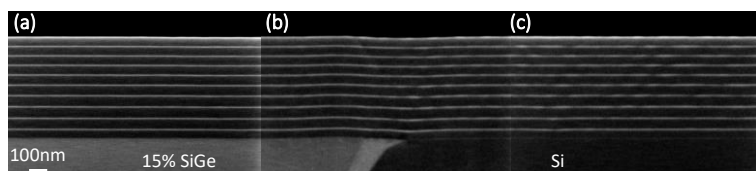


Fig. 2. Cross-section SEM images of a 10-cycle Si_{0.7}Ge_{0.3}/Si superlattice on a patterned Si wafer with local 15% SiGe virtual substrate. (a), (b) and (c) show on 15% SiGe VS region, (b) on boundary region, (c) on Si region, respectively. SiH₄ is used for precursor for Si spacers [4].

Si/Ge ナノワイヤの界面・物性制御

Control of interface and physical properties of Si/Ge nanowires

NIMS¹, 筑波大² ○深田直樹^{1,2}

NIMS¹, Univ. of Tsukuba², °Naoki Fukata^{1,2}

E-mail: FUKATA.Naoki@nims.go.jp

半導体ナノ構造であるナノワイヤは、その次元性とサイズに依存した新しい物性発現の期待から、半導体電子・光素子、熱電素子、化学・バイオセンサー等への様々な応用が期待されており、現在までに様々な研究が報告されている[1]。特に、IV 族半導体であるシリコン (Si) 及びゲルマニウム (Ge) からなるナノワイヤは単元素から構成される単純なナノワイヤであることから、ナノワイヤの成長機構の解明、理論的に予測されるナノ構造に由来した物性発現の検証および新規デバイス応用と基礎から応用まで幅広く研究が実施されている。ここでは、更なる機能化のために、Si および Ge のヘテロ接合をナノワイヤ内部に構築したコアシェルナノワイヤ構造における金属-酸化膜-半導体電界効果型トランジスタ (MOSFET) への応用に関するこれまでの成果を報告する。

ナノワイヤを利用した新規トランジスタでは、微小なナノワイヤ中に不純物ドーピングを行うと、ドーピングした不純物自体の散乱により移動度が低下してしまう。そこで、不純物散乱の問題を解決する構造として、不純物のドーピング領域とキャリアの輸送領域を分離できるコアシェルヘテロ接合をナノワイヤ内部に構築する研究を行っている[2-8]。本構造は、異種化合物半導体のヘテロ接合を利用した高電子移動度トランジスタ (HEMT) の構造をとり、急峻な界面と高い結晶性を実現することで、ホールガス或いは電子ガスを不純物ドーピングされていない領域の界面に形成することができる。これまでに、コアシェルナノワイヤの配列・サイズ制御、Si および Ge 領域への選択ドーピング、Fano 干渉によるホールガス蓄積の実証をできている。以上の成果に関して、当日は最近の成果も取り入れながら紹介する。

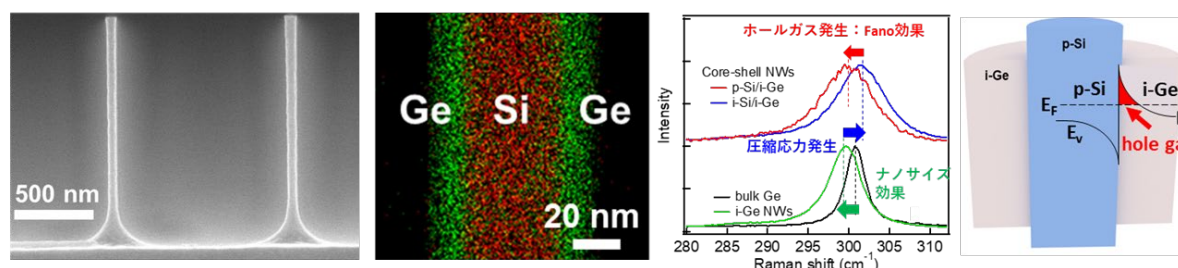


Fig. 1 (a) SEM image of Si nanowire array, (b) EDX image of p-Si/i-Ge core-shell nanowire, (c) Ge optical phonon peaks observed for bulk Ge, i-Ge nanowires, i-Si/i-Ge core-shell nanowires and p-Si/i-Ge core-shell nanowires, (d) a schematic illustration of p-Si/i-Ge core-shell nanowire.

References

[1] Fundamental Properties of Semiconductor Nanowires, Edited by Naoki Fukata and Riccardo Rurali, Springer Nature: Singapore, 2021 [2] Adv. Mater. 21, 2829 (2009). [3] ACS Nano 6, 3278 (2012). [4] ACS Nano 9, 12182 (2015). [5] ACS Nano 13, 13403 (2019). [6] Nanoscale 13, 6798 (2021). [7] Nanotechnology 35, 122001 (2023). [8] ACS Appl. Electro. Mater. 5, 4674 (2023).

広範囲にサイズ制御されたシリコンナノ粒子の機能開拓

Exploring Functionalities of Silicon Nanoparticles with Wide-Ranging Size Control

神戸大院工, [○]杉本 泰

Kobe Univ. Hiroshi Sugimoto

E-mail: sugimoto@eedept.kobe-u.ac.jp

ナノスケールに微細化された Si 結晶はバルクとは異なる光学特性を示し、フォトニクス分野においてその重要性が増している。励起子のボーア半径の倍 (~ 10 nm) 以下のサイズでは、量子サイズ効果により発光再結合レートが増大し、高効率な可視-近赤外発光を示す。そのため、発光デバイスや蛍光センシングへの応用が期待される。100~200 nm のサイズ領域では、可視域に Mie 共鳴に由来する電磁気固有モードを有し、強い光散乱を示す。このような光学応答は Si の高い屈折率に起因し、金属ナノ構造の表面プラズモン共鳴と同様に近接場増強効果を示すため、表面増強センシングや新規光学素子への応用が期待されている。

本研究では、Si リッチシリカ ($\text{SiO}_x, x < 2$) の熱処理による結晶性 Si 粒子形成プロセスを応用し、広範囲 (1~200 nm) にサイズ制御した Si ナノ粒子を作製する。さらに、我々が独自に開発した無機元素による表面改質プロセスにより、Si ナノ粒子が分散したコロイド溶液を実現する。図(a)は成長温度 1150°C で作製した Si ナノ粒子の TEM 像である。5 nm 程度の粒子が密に単層膜を形成しており、高分解能像より単結晶 Si であることがわかる。本材料では、粒径の制御と n 型、 p 型同時ドーピングにより、700~1300 nm の範囲で高効率発光を実現している(図(b))[1-2]。

図(c)はシリコンの融点以上成長温度 1500°C で作製した Si ナノ粒子単層膜の TEM 像であり、平均粒径は 150 nm に達している((a)に比べてスケールバーが 10 倍大きいことに注意されたい)。この Si ナノ粒子は Mie 共鳴により高効率な散乱を示すため、直径 100~200 nm で制御することで、紫~赤色領域まで散乱発色を制御できる[3-4]。そのため、わずか一層ナノ粒子を塗装するだけで、図(d)のような 3 次元構造物にフルカラー着色が可能である。講演では、2 つのサイズ領域のシリコンナノ粒子について、フォトニクス分野における様々な応用可能性を議論する。

[1] H. Sugimoto, *et al.*, *J. Phys. Chem. C*, 117, 11850 (2013)

[2] H. Sugimoto, *et al.*, *Nano Lett.* 18, 7282 (2018)

[3] H. Sugimoto, *et al.*, *Adv. Opt. Mater.* 8, 2000033 (2020)

[4] H. Tanaka, *et al.*, *ACS Appl. Nano Mater.*, 7, 2605 (2024)

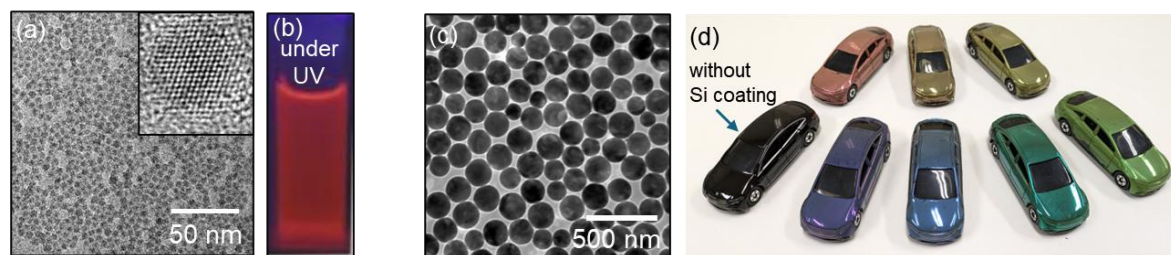


Figure. (a) TEM image of 5-nm-Si nanoparticles (quantum dots). (b) Photo of the dispersion of (a) under UV light, grown at 1200°C. (c) TEM image of 150-nm-Si nanoparticles. (d) Photo of car toys coated with Si nanoparticles with different average diameters from 100-200 nm.

熱電応用に向けた表面・界面制御による高性能薄膜の創製

Innovative films formed by surface and interface control for thermoelectric application

阪大院基礎工¹, 阪大 OTRI²

◦中村 芳明^{1,2}

Eng. Sci., Univ. of Osaka¹, OTRI²

◦Yoshiaki Nakamura^{1,2}

E-mail: nakamura.yoshiaki.es@osaka-u.ac.jp

現在、様々な分野で廃熱等の制御・再利用が喫緊の課題となっている。熱の制御・利用のためには、革新的な材料が必要であり、特にナノ構造・低次元材料に注目した新材料の開発が期待されている。一方、薄膜のエピタキシャル成長技術は成熟しており、電子・光デバイスなど様々な方面に展開されてきた。我々は、これらの薄膜成長技術を発展・応用することで、熱電変換応用に向けて未踏の薄膜材料を創製することに注目した。

熱電変換応用の実現には無次元性能指数 $zT = S^2 \sigma T \kappa^{-1}$ (S : ゼーベック係数、 σ : 電気伝導率、 κ : 熱伝導率、 T : 絶対温度) の大きな材料が求められる。環境調和性の観点や IoT センサーなどへの自立電源応用を考えると、Si 系の熱電薄膜が期待されるが、軽元素のために κ が高くなり、一般に性能は低い。近年では、ナノ構造、低次元材料、歪を導入することで、低い κ や高い出力因子が得られることがわかっている[1、2]。そこで、我々は、エピタキシャル成長技術を駆使して、表面・界面制御を行うことで高熱電性能をもたらす革新的な IV 族元素系薄膜の開発を研究目的とした。

まず、格子不整合歪の制御による熱電性能の向上を示すために、Si 上の GeSn 薄膜を舞台とした。Sn の組成、歪を制御することで伝導帯の縮重度を操作し、出力因子が増大可能であることを実験的に証明した[3]。次に、低次元材料薄膜における界面制御による性能向上の実証を目指して、Ca を層間挿入した 2D のシリセン層状薄膜 (CaSi_2) に注目した。拡散現象を用いることで界面制御し、Si 基板上にバックリング構造を変調した特殊な Ca 挿入シリセン層状薄膜のエピタキシャル成長に成功した。バックリング構造変調により、先行研究の約 3,000 倍、単結晶の約 4 倍の出力因子を得ることに成功した[4]。次に、 κ の劇的な低減に注目して、2D 構造ではなく、1D 螺旋構造をもつ FeGe_γ 結晶薄膜に注目した。1D 螺旋をもつ非整合チムニーラダー構造の FeGe_γ のバルク材料は、2014 年に初めて形成が報告され、その薄膜形成は成功されていない。我々は、ナノ結晶であると比較的簡単に形成できることに注目し[5]、そのナノ結晶を成長核とするシードアシストエピタキシー法を開発し、この FeGe_γ 薄膜の成長に成功した[6]。その結晶構造由来の高い性能が得られている。本講演では、これらの詳細について述べる。

本研究の一部は科研費 基盤研究 A (JP23H00258) の支援により行われた。

[1] Nano Energy **12**, 845 (2015).

[2] Nature Commun. **15**, 322 (2024).

[3] Appl. Phys. Lett. **126**, 231601 (2025)

[4] Adv. Mater. Inter. **9**, 1, 2101752 (2022).

[5] Surf. Sci. **690**, 121470 (2019).

[6] Acta Materialia **236**, 118130 (2022).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): ナノ荷電粒子ビーム技術の最先端

[7p-N102-1~7] ナノ荷電粒子ビーム技術の最先端

[7p-N102-1]

ヘリウムイオン顕微鏡技術の応用: 欠陥形成による薄膜物性制御とそのデバイスへの応用

○小川 真一¹ (1.産総研先端半研セ)

[7p-N102-2]

イオン照射による低温結晶化技術とその応用

○池永 訓昭¹、作道 訓之¹ (1.金沢工大工)

[7p-N102-3]

シリコン量子ビット集積化技術開発における電子線リソグラフィの活用

加藤 公彦¹、○森 貴洋¹ (1.産総研)

[7p-N102-4]

電子線励起プローブを用いた高空間分解能顕微技術とその応用

○益田 有^{1,3}、居波 渉^{1,3}、川田 善正^{2,3} (1.静岡大工、2.静岡大電研、3.JST-CREST)

[7p-N102-5]

電子ビームリソグラフィにおける3次元ドーズ量分布とレジスト断面形状制御への応用

○杉原 達記¹、金子 新² (1.(株)エリオニクス、2.都立大)

[7p-N102-6]

斜入射電子ビーム露光法による微細傾斜回折格子の作製とNIL転写

○柴崎 尚也¹、谷口 淳¹ (1.東理大先進工)

[7p-N102-7]

RIEとNILによる近赤外線反射防止フィルムの作製

○(M1C)平田 圭¹、谷口 淳¹ (1.東理大先工)

-ヘリウムイオン顕微鏡技術の応用- 欠陥形成による薄膜物性制御とそのデバイスへの応用

-Applications of Helium Ion Microscopy-

Defect Engineering for Thin Film Property Control and Device Integration

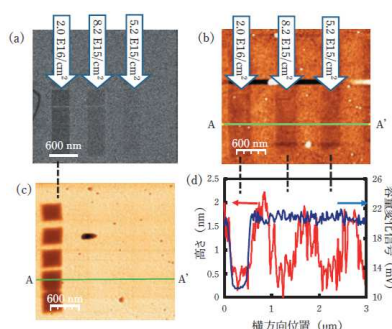
産総研 先端半導体研究センター ○小川 真一

AIST, ○Shinichi Ogawa

E-mail: ogawa.shinichi@aist.go.jp

2006 年、ヘリウムイオン顕微鏡 (HIM) 実験機が米国で商用化された。2010 年産総研に導入し、電子線照射に弱い材料・半導体/電子デバイスの表面観察、ヘリウムイオンビーム照射による薄膜への局所的欠陥形成による物性制御・エッチング、それらのデバイス形成への応用研究を行っている⁽¹⁾。ヘリウムイオンはガリウムイオンと比較して質量が小さいため、材料への照射損傷が少なく、高精度な微細加工と物性制御が実現可能である。薄膜試料へのヘリウムイオンビーム照射においては、比較的低照射領域では原子配列の乱れ、欠陥形成にともなう材料物性の変化が誘起される。一方、高照射領域では原子のスパッタリング、すなわちエッチング現象が発生する。本発表では、グラフェン、h-BN 薄膜、高温超伝導 YBCO 膜、Si 超薄膜を例にとり、nm オーダーの領域へのヘリウムイオンビーム照射による材料の物性制御とエッチング加工、そのデバイス応用に関し概説する。

加速電圧 30kV で $5.2\text{E}15 \sim 2.0\text{E}16 \text{ ions/cm}^2$ のヘリウムイオンビーム (直径約 0.5nm) を照射したグラフェン膜の走査型探針顕微鏡による評価結果を左下図に示す。(a)ではイオン照射された領域が周辺 (灰色部) より若干黒く観察されており、これはグラフェン膜の物性変化とチャージアップの影響と考えられる。(b)は原子間力顕微鏡法で評価した表面凹凸を示し、(d)の赤プロットに示されているように照射部は約 2nm 程度未照射部より低くなっている。容量顕微鏡法では同一構造の同一薄膜を評価した場合、薄膜の導電性領域から絶縁性領域へ探針が移動すると探針と薄膜間の容量が変化するため、薄膜の微細領域での導電性を判定できる。(c)の濃い茶色部は容量顕微鏡法で変化が見られた領域を示し、(d)の青プロットに示すように $2.0\text{E}16 \text{ ions/cm}^2$ 照射領域のみで約 8mV の低下が観察され単層グラフェンが絶縁体化していることがわかる。欠陥密度は入射されたイオンの密度から計算され⁽²⁾、上記照射条件で生成された結晶欠陥の密度は総炭素原子数に対しておおむね 0.1~2%程度であり、 $2.0\text{E}16 \text{ ions/cm}^2$ のヘリウムイオン照射では約 2%の欠陥を形成する。これらの欠陥は単層グラフェン中のキャリアを局在させることにより抵抗を増大させグラフェンを絶縁体へと転移させる。ヘリウムイオンビーム照射領域のグラフェン膜のラマン散乱分光法による結晶性評価では、グラフェン膜へのイオン照射量の増加により D バンド強度の増大が見られるが、G バンド強度は若干変化するものの明瞭に存在が確認され、このイオン照射量範囲ではグラフェン膜にある程度の密度の結晶欠陥が導入されるが、ハニカム骨格結晶構造は十分に維持されていることがわかる。



上記のように HIM を用いたイオンビーム照射により薄膜材料の結晶構造を乱さずに欠陥を導入することが可能である。講演ではグラフェン膜へのトランジスタ描画形成⁽³⁾、h-BN 膜への B 空孔欠陥形成による微小磁場センサー⁽⁴⁾、YBCO 超伝導ブリッジへのジョセフ接合形成⁽⁵⁾、さらにグラフェン膜⁽⁶⁾、Si 超薄膜へのナノポア形成⁽⁷⁾とそのデバイスへの応用などに関し簡単に述べる。

(1)小川真一, ヘリウムイオン顕微鏡を用いた低ダメージ観察・評価と sub-10 nm 微細加工技術, 応用物理 89, p644 (2020), (2) F. Banhart, et al. Structural Defects in Graphene, ACS Nano 5, 26 (2011), (3) S. Nakaharai, S. Ogawa, et al. Conduction Tuning of Graphene Tailored by Accelerated Helium Ion Beam, ACS Nano, 7 5694 (2013), (4) K. Sasaki1, S. Ogawa, et. al. Magnetic field imaging by h-BN quantum sensor nanoarray, Appl. Phys. Lett. 122, 244003 (2023), (5)S. Ogawa et al. Formation of Lateral-Type High-Tc Superconductor Josephson Junction by Helium Ion Microscopy, Proc. of 2024 IITC, DOI: [10.1109/IITC61274.2024.10732494](https://doi.org/10.1109/IITC61274.2024.10732494), (6) Y. Morita, S. Ogawa, et al. Nanoscale Direct Patterning in Ultrathin Silicon Nanosheets Utilizing Helium Ion Microscopy, Jpn. J. Appl. Phys., 64(3) SP57 (2025).

イオン照射による低温結晶化技術とその応用

Low-temperature Crystallization Technology Using Ion Irradiation and Applications

金沢工大工 ○池永 訓昭, 作道 訓之

Kanazawa Institute of Technology, °Noriaki Ikenaga, Noriyuki Sakudo

E-mail: n-ikenaga@neptune.kanazawa-it.ac.jp

【はじめに】薄膜状の機能性材料を基板上に成膜する場合、真空蒸着やスパッタリングが用いられることはすでによく知られている。例えば形状記憶合金 (TiNi) の薄膜を合成する場合、スパッタリングによって TiNi 薄膜を成膜し、その後 500°C で熱処理する、あるいは基板を加熱しながら成膜することで結晶化した TiNi 薄膜を得ることで形状記憶特性を有した薄膜が合成できる。このように機能性薄膜の多くは結晶化して初めてその機能性を発現するが、スパッタリングや真空蒸着などで成膜された TiNi 薄膜は通常非結晶であるため前述の熱処理や基板加熱が必須となっている。この場合の基板材料は熱処理温度に耐えることができる材料に限定されるため、樹脂などの高分子材料上への機能性薄膜の合成は困難であった。一方で、ウェアラブルセンサに代表されるように、人体に直接取り付けるセンサデバイスにもフレキシビリティが求められてきている。すなわち、温度センサや感圧センサなどの機能性薄膜を高分子フィルム上に直接合成したデバイスの実現が期待されている。ここでは高分子材料上に結晶化した機能性薄膜を直接合成できる成膜技術として、イオン照射技術とスパッタ成膜技術を複合化した低温結晶化技術を紹介する。また、TiNi 薄膜 (形状記憶合金) の低温結晶化例についても報告する。

【実験内容・結果】本研究ではイオン照射とスパッタリングを複合化した成膜装置を用いて種々のイオン照射条件で Si 基板上に作製した TiNi 薄膜の低温 (室温) 成膜時の結晶構造および形状記憶動作を評価した。イオン照射のためのイオン供給源はチャンバー内に設置したループアンテナ (ワンターン) で生成した誘導結合型プラズマ (ICP: Inductively Coupled Plasma) である。イオン照射は基板に負パルス電圧を印加することでおこなっている。Fig.1 に示す各種イオン照射条件で成膜した TiNi 薄膜の X 線回折パターンからもイオン照射によって結晶化が確認できる。

【おわりに】

種々のイオン照射条件で作製した TiNi 薄膜において、あるイオン照射条件において結晶化および形状記憶動作が確認された。このことからイオン照射によって高分子フィルム上への結晶性薄膜の直接合成の可能性が期待される。

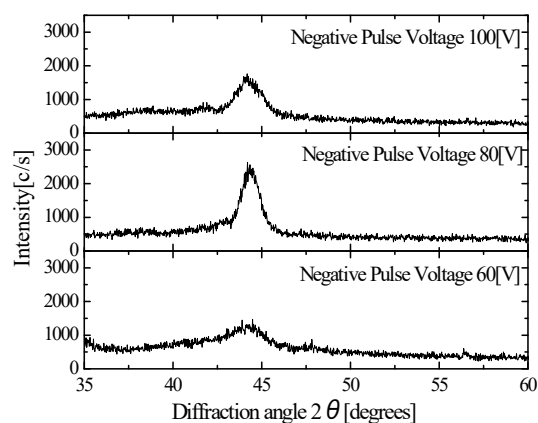


Fig.1 XRD patterns of TiNi thin films prepared under various ion irradiation conditions (Maximum substrate temperature: 85 degrees)

シリコン量子ビット集積化技術開発における電子線リソグラフィの活用

Electron Beam Lithography in the R&D of Silicon Qubit Integration Technology

産総研 加藤 公彦、森 貴洋

AIST, Kimihiko KATO, Takahiro MORI

E-mail: mori-takahiro@aist.go.jp

昨今の量子コンピュータへの期待は論を待たず、また近年ではプロトタイプ機の市販が始まるなど、その研究開発は活況を呈している。基本素子である量子ビットには、超伝導型や冷却原子型など、固体素子に留まらない多数の候補がある。その中でも既存の集積化技術を活用できるシリコン量子ビット素子は、実用に資する規模での大規模集積性という観点で注目を集めている。

シリコン量子ビット素子は、マルチゲートの MOSFET 構造をとることが一般的である。現在一般的な一次元集積構造を考えると、ゲート数は N 素子集積時には $2N+3$ 本となるのが通例で、例えば 10 素子集積のためには 23 本のゲートをソース・ドレイン間に形成する必要がある。その最小特徴サイズは、先端半導体トランジスタと同等の 10-30nm 程度になると考えられる。実際、Intel 社の 12 量子ビット集積チップ Tunnel Falls においては、ゲートピッチが 70nm 程度であることが明らかとなっており、その製造には EUV リソグラフィ技術が用いられている[1]。

研究開発において、EUV リソグラフィ技術を自由に活用できるという恵まれた環境は簡単には得られるものではないため、Intel 社以外の機関では電子線リソグラフィ技術によって素子試作を伴う研究開発が実施されるのが一般的である。例えば imec の場合、300mm 試作ラインに電子線リソグラフィ装置を導入しての研究開発が実施されている。我々産総研も多分に漏れず、シリコン専用の 4 インチラインにおける高加速電子線リソグラフィ装置を用いた研究開発を実施している。

前述のような極めて小さい特徴サイズを持つ稠密なマルチゲート構造を電子線リソグラフィによって描画、集積構造の研究開発を実施する場合、近接効果補正の正当性が重要となる。一般に、近接効果補正においては電子線の前方散乱と後方散乱とを考慮する。しかしながら近年、電子線の高加速化に伴い、それらの中間成分の重要性が指摘されるようになった。現状、中間成分の発因は、レジストの化学変化などの説はあるが、明らかとはなっていない。また、一般的な近接効果補正ソフトウェアでは考慮されないため、実描画への影響も議論が少ない。

我々は、中間成分を考慮した近接効果補正の実施が、シリコン量子ビット集積化技術開発において有用であると考えており、本講演では補正と実描画とを照らし合わせた実験結果を中心に紹介する[2]。シリコン量子ビット集積構造のような微細稠密構造においては、中間成分を考慮することで描画シミュレーションの実験再現度が向上、結果として描画結果の設計再現性を確保できる。これはシリコン量子ビット素子の大規模集積デモンストレーションに向けて、試作実験実施上の鍵を握る技術であると考えている。当日は、産総研が実作した 40 量子ビット素子集積構造についても紹介する。

【謝辞】本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)JPMXS0118069228 の助成を受け行われた。

[1] J. Clarke, American Physical Society Joint March Meeting and April Meeting 2025, MAR-W14.

[2] K. Kato *et al.*, Nanotechnology **32**, 485301 (2021).

電子線励起プローブを用いた高空間分解能顕微技術とその応用

High Spatial Resolution Microscopy Using an Electron-Beam-Excited Probe and Its Applications

静岡大工¹, 静岡大電研², JST-CREST³ ○益田 有^{1, 3}, 居波 渉^{1, 3}, 川田 善正^{2, 3}

Shizuoka Univ., Faculty of Engineering¹, Shizuoka Univ., Research Institute of Electronics²,

JST-CREST³ ○Yu Masuda^{1, 3}, Wataru Inami^{1, 3}, Yoshimasa Kawata^{2, 3}

E-mail: masuda.yuh@shizuoka.ac.jp

私たちは、集束電子線で励起したカソードルミネッセンスを光源に利用する超解像顕微鏡; 電子線励起アシスト光学顕微鏡^[1] (Electron-beam excitation assisted optical microscope; EXA 顕微鏡)を開発している。図1にEXA 顕微鏡の原理を示す。本顕微鏡は電子顕微鏡と光学顕微鏡を組み合わせた顕微鏡で、電子顕微鏡の真空環境と試料の大気圧環境を蛍光薄膜で分離する構成をとる。電子顕微鏡側では蛍光薄膜に収束電子線を照射してカソードルミネッセンスを励起し、光の回折限界よりも小さい数十 nm の微小光源を生成する。

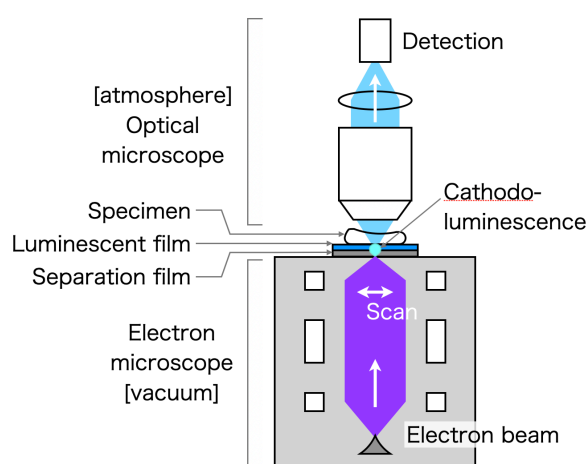


図1 EXA 顕微鏡の原理

この微小光源をプローブとして走査し、試料を透過・散乱した光を検出することで、従来の光学顕微鏡では 200 nm が限界であった空間分解能を 50 nm 以下に向上させた。また、試料は蛍光薄膜上のオープンな大気圧環境に配置しており、生きた生物細胞などのウェットな試料の長時間観察や、試薬注入のようなマニピュレーションも容易である。

本顕微鏡は試料基板や検出器を変更することでマルチモーダルな観察が可能であるという特徴を持つ。例えば、蛍光薄膜を取り除いて真空分離窓のみ残すことで収束電子線を試料に直接照射できるため、試料内の蛍光物質を電子線で直接励起する高空間分解能蛍光顕微鏡^[2]としての利用や、生きた生物試料を電気刺激する極小プローブ^[3]としての応用技術も開発している。他にも、イオン感応膜を持つ半導体センサを蛍光薄膜の代わりに配置することで、試料のイオン濃度分布に応じた電子線誘起電流が測定でき、高空間分解能なイオン濃度分布像が取得できる^[4]。本発表では、EXA 顕微鏡の技術と、それを応用展開した顕微技術について紹介する。

参考文献：[1] Wataru Inami, *et al*, *Optics Express* **18**, 12, pp12897-12902 (2010).

[2] Yasunori Nawa, *et al*, *Optics Express* **20**, 5, pp5629-5635 (2012).

[3] Wataru Inami, *et al*, *Ultramicroscopy* **206**, 112823 (2019).

[4] Satoru Shibano, *et al*, *Physica Status Solidi (a)* **218**, 2100147 (2021).

謝辞：本研究の一部は JST-CREST/JPMJCR2003 のご支援をいただき遂行された。

電子ビームリソグラフィにおける3次元ドーズ量分布と レジスト断面形状制御への応用

Three-dimensional Dose Distribution in Electron Beam Lithography and Its Application to Control of Resist Cross Section Shapes

(株)エリオニクス¹, 東京都立大学² °杉原 達記¹, 金子 新²

ELIONIX INC.¹, Tokyo Metropolitan Univ.², °Tatsuki Sugihara¹, Arata Kaneko²

E-mail: 276-sugihara@elionix.com

1. はじめに

電子ビームリソグラフィ (EBL) は、最小ビーム径 2 nm 程度の電子ビームを走査してレジストを露光し、パターンを形成するリソグラフィ技術の一つである。現代では EBL を含む微細加工の応用先が多様化し、高スループットかつ大面積を加工する要求が増加している。これに対し、EBL で作製したレジストパターンをナノインプリント等の転写プロセスへ応用する研究開発が盛んに行われており、従来とは異なる厚膜レジスト (> 500 nm) への露光や形状に対する要求仕様も異なってきている。そのため EBL で作製するレジストパターンは、線幅やホール径などの 2 次元形状だけでなく、断面形状を含む 3 次元形状の検討が必要である。

そこで本研究では、電子ビームの散乱に影響するとされる各種パラメータ (加速電圧、電流値、ドーズ量、レジストの材料特性等) ならびに現像条件に着目し、それらがレジストパターンの側壁形状に及ぼす影響について調査するとともに、新規的なレジスト断面形状制御手法を確立することを目的とする。

2. 本研究の主要な結果

レジストパターンの側壁形状を制御するため、本研究ではレジスト内の 3 次元ドーズ量分布に着目し、電子ビームの走査位置と回数を変更する新たな露光手法を提案した。提案手法により生成した 3 次元ドーズ量分布によって、図 1 に示すように現像後のレジストパターン側壁の傾斜角度を $90 \pm 5^\circ$ 程度で制御することに成功した。シミュレーションで予測したドーズ量分布と実験結果はほぼ整合し、現像条件をあわせて考慮することで、本手法を活用したレジスト断面形状制御が可能であることを示した。その他、レジスト膜厚と加速電圧によるパターン垂直性への影響やレジストコントラスト γ 、現像液種、現像時間によるレジスト断面形状への影響などについても主要な結果を発表する予定である。

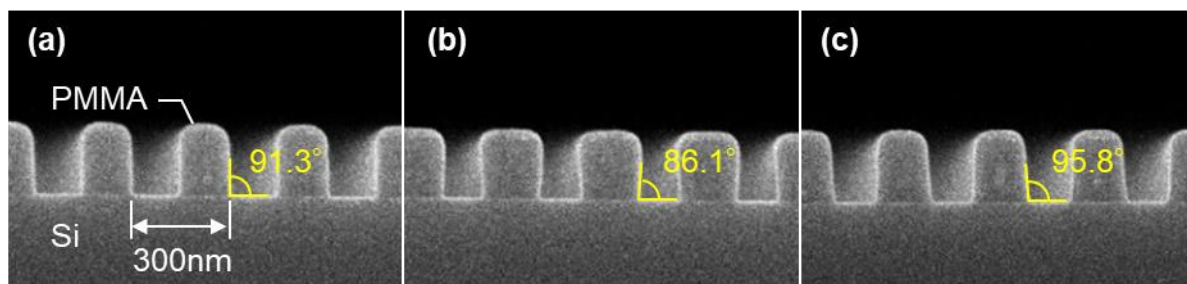


Fig 1. SEM images of resist cross-sectional shapes. PMMA resist was coated 200 nm onto a Si wafer, and pitch 300 nm line patterns were exposed with 3 different 3D dose distributions ((a): Uniform scan, (b): Centralized scan, (c): 3 distributed scan). As a result, the sidewall inclination angle of $90 \pm 5^\circ$ was obtained.

斜入射電子ビーム露光法による微細傾斜回折格子の作製と NIL 転写

Oblique incidence angle electron beam lithography for fabricating slanted diffraction grating and NIL transfer properties

東京理科大学¹ ○(M2)柴崎 尚也¹, 谷口 淳¹

Tokyo University of Science¹, [°]Shibasaki Naoya¹, Jun Taniguchi¹

E-mail: 8124526@ed.tus.ac.jp

1. 緒論

近年 AR グラスなどのヘッドマウントディスプレイは我々の生活に音, 映像, 画像, ナビゲーションシステムなどの情報を与え, より生活を豊かにしている。これらには装着者の目に情報を伝えるため, グラス表面上にスラネッド型回折格子が用いられている[1]. 図 1 に一般的な加工工程を示す[2].

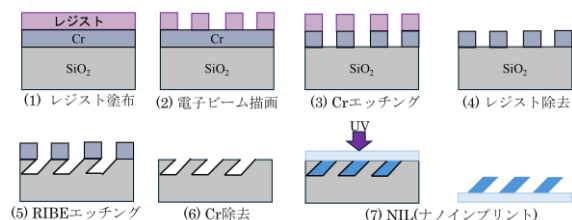


図 1 従来の作製方法

この工程は, 電子ビーム露光 (Electron beam Lithography: EBL) 後に斜め方向からドライエッチングを行うなど多くの工程が必要である。そこで本研究では 2 つの工程をまとめて 1 回の工程で得られるよう試料を 45° 傾けた状態で EBL を行い, 斜め回折格子モールドを作製し, それを金型として UV-NIL により転写をしたので報告する。

2. 実験方法

ポジ型レジストである ZEP520-A (日本ゼオン(株)製) を 3000 rpm, 120 秒でスピコートを行い, 約 400 nm 厚で成膜した。その後, 80 °C で 5 分間ベイクを行い, 続いて 120 °C で 20 分間ベイクした。次に走査型電子顕微鏡 (SEM: ERA-880FE, ELIONIX (株)製) で EBL を行った。また, EBL の際, 試料は 45° の試料台上に乗せて傾けた状態で描画した。露光後, Post exposure bake (PEB) を 120°C で 10 分間行い, ZED-N50 (日本ゼオン(株)製) で 30 秒間現像し, 2-プロパノールでリンスをした。この描画後のレジスト形状をモールドとして用いるため離型処理を行った。このモールドに対して PAK-01CL を 1 滴落とし, コスモシャイン A4300 (東洋紡(株)製) を被せ UV-NIL を行った。最後に試料に対して帯電防止のためプラチナコーティングを行い, 走査型電子顕微鏡 (SEM: ERA-880FE, ELIONIX (株)製) で観察を行った。

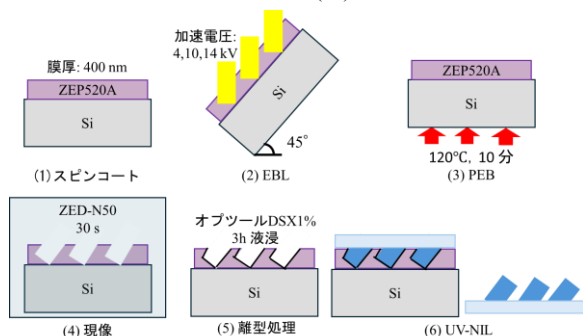


図 2 実験方法

3. 実験結果

4 kV, Dose 量 20 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ の試料, 10 kV, Dose 量 30 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ の試料, 14 kV, Dose 量 60 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ で描画したレジストの断面と UV-NIL により転写されたパターンの SEM 像を図 3 に示す。ここで, 描画形状は線幅 90 nm, 間隔 270 nm で, 線の長さは 90 μm のライン & スペースである。

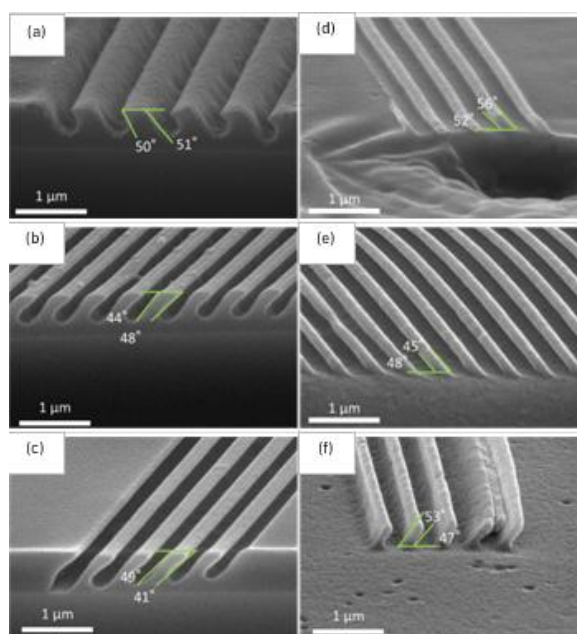


図 3 斜めの描画のモールドと転写の SEM 画像
(a)(b)(c) 4, 10, 14 kV 時のレジスト断面 (モールド)
(d)(e)(f) 4, 10, 14 kV 時の転写パターン

作製したモールドは傾けた角度の 45° に近い角度となっていることが図 3 (a) (b) (c) からわかる。また, (c) の左端の線幅は基板側が膨れている。これは後方散乱電子の影響と考えている。また, 転写した SEM 写真 (図 3 (d) (e) (f) から 45° 近く傾いていることが分かる。しかし, 加速電圧 4 kV のとき, 45° からの大きくずれているので, ここまで低加速電圧で露光を行うと PEB でも前方散乱電子による影響を小さくできないことが分かった。

4. まとめ

EB レジストの ZEP520A を 45° 傾かせた状態で EBL を行うことにより微細傾斜回折格子のモールド作製、およびそれを用いた UV-NIL による転写を行えることがわかった。

参考文献

- [1] Dewen Cheng et al., Light Adv. Manuf. **2**, 1 (2021) 1-20.
- [2] Tapani Levola, Pasi Iakkonen, Optical Society of America, **15** (2007) 2067-2074

RIE と NIL による近赤外線反射防止フィルムの作製

Fabrication of near-infrared anti-reflection films by RIE and NIL

東京理科大学^{1, °}(M1) 平田 圭¹, 谷口 淳¹

Tokyo University of Science^{1, °} Kei Hirata¹, Jun Taniguchi¹

E-mail: 8125530@ed.tus.ac.jp

1. 緒論

近年, LiDAR や光ファイバーが注目されているが, どちらも近赤外線を用いている. そのため, これらを用いた技術の改良には近赤外線の制御が必要である. 本研究室では反応性イオンエッチング (RIE) を用いて, モスアイ構造というナノオーダーの突起が並んだ構造を作製し, これをナノインプリントリソグラフィ (NIL) によって転写することで低反射率と高透過率を実現する光学フィルムを作製している[1]. この光学特性は可視光線の領域において検証されてきたが[2], RIE の加工時間を増やしてモスアイ構造の高さを大きくすることで近赤外線の反射防止を確認できたので報告する.

2. 実験方法

まず, 2 cm×2 cm のグラッシーカーボン (GC) 上に電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 型イオンシャワー装置 (EIG-210 ER, (株) エリオニクス) によって酸素イオンを照射することで, GC 上にモスアイ構造を作製した. また, エッチングの条件は加速電圧を 400 V, 酸素流量を 4.00 sccm, 加工時間を 180 min, 210 min に設定した. 次に, 加工した GC に対して離型処理を行った. このようにして作製した GC モールドに UV 硬化樹脂 (PAK-01-CL, 東洋合成工業 (株)) を用いて UV-NIL をすることで透明なモスアイ構造フィルムを得た. そして, 加工した GC と作製したフィルムを走査型電子顕微鏡 (SEM) (ERA-8800FE, (株) エリオニクス) で上面と断面を観察した. また, 作製したフィルムについて紫外可視近赤外分光光度計 (SolidSpec-3700, (株) 島津製作所) で透過率と反射率の測定を行った. ただし, 透過率に関しては転写パターンが付いていない場合の PET フィルムも測定した.

3. 実験結果

作製した試料を上面から観察した SEM 像を Figure 1 に示し, 断面から観察した SEM 像を Figure 2 に示した. また, 測定した透過率を Figure 3 に示し, 反射率を Figure 4 に示した.

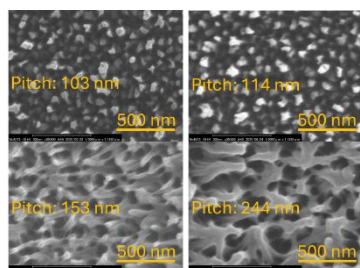


Figure 1. Top view SEM images of the moth-eye structure
Upper: Mold, Lower: Film Left: 180 min Right: 210 min

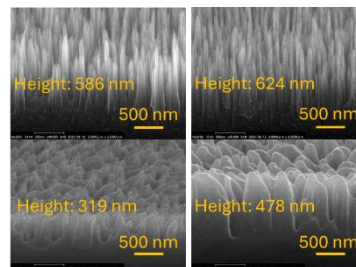


Figure 2. Cross-sectional SEM images of the moth-eye structure
Upper: Mold, Lower: Film Left: 180 min Right: 210 min

Figure 1, 2 より, フィルム上に転写したモスアイ構造は 210 min の場合の方が 180 min よりも元のモールドの高さに対して高さが出ていた.

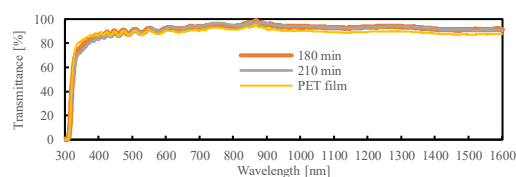


Figure 3. Transmittance of the transferred film

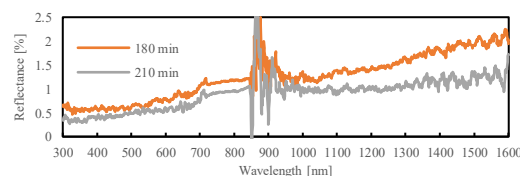


Figure 4. Reflectance of the transferred film

透過率について, Figure 3 より, 可視光線と近赤外線の領域では PET フィルムよりも転写フィルムの透過率の方が高く, 加工時間が 180 min と 210 min の場合での透過率の違いは少なかった. 反射率について, Figure 4 より, 測定範囲内では常に 180 min よりも 210 min の反射率の方が低かった. また, 測定波長が大きくなっていくにつれて, 180 min と 210 min での反射率の差が大きくなっていった.

4. まとめ

RIE で作製したモスアイ構造を NIL で転写して得たフィルムで近赤外線の反射率を 1% 程度に抑えられた.

参考文献

- [1] J. Taniguchi, Y. Kamiya, T. Ohsaki, N. Sakai, *Microelectronic Engineering*, **87** (2010) 859-863.
- [2] T. Yano, H. Sugawara, J. Taniguchi, *Micro and Nano Engineering*, **9** (2020) 100077.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 幅広い波長域の光を駆使する研究の最前線 -X線からテラヘルツまで-

[8p-S302-1~9] 幅広い波長域の光を駆使する研究の最前線 -X線からテラヘルツまで-

[8p-S302-1]

X線自由電子レーザーを用いた非平衡物性研究

○久保田 雄也¹ (1.理研放射光)

[8p-S302-2]

放射光とレーザーを活用した空間分解光電子分光の進展

○岩澤 英明¹ (1.QST)

[8p-S302-3]

電子強誘電分極ドメインの巨大テラヘルツ応答と動的マッピング

○伊藤 弘毅¹ (1.関学大理)

[8p-S302-4]

NanoVNAを活用した安価な強磁性共鳴測定装置の開発と性能評価

○福永 怜央¹、高橋 龍之介¹、上野 哲朗²、庄司 大希³、戸川 欣彦³、和達 大樹^{1,4} (1.兵庫県大理、2.QST、3.大阪公立大工、4.阪大レーザー研)

[8p-S302-5]

高フルエンステラヘルツパルスを用いた物性制御

○永井 正也¹ (1.阪大基礎工)

[8p-S302-6]

電気磁気光学効果を利用した可視光・近赤外光による反強磁性ドメインの可視化

○木村 健太¹、林田 健志²、益田 隆嗣³、木村 剛⁴ (1.阪公大工、2.ラドバウト大、3.東大物性研、4.東大院工)

[8p-S302-7]

テラヘルツ波技術の進展と応用の広がり -分光・イメージングを中心に-

○深澤 亮一¹ (1.スペクトルデザイン)

[8p-S302-8]

α -Fe₂O₃/Pt二層膜におけるスピン流による磁化ダイナミクス変調

○服部 冬馬¹、川喜田 圭祐²、藪下 恭佑²、冨田 圭吾¹、林 兼輔¹、飯浜 賢志¹、石川 裕也²、森山 貴広¹ (1.名古屋大工、2.福井大工)

[8p-S302-9]

FeMn/Pt二層膜における磁気共鳴誘起起電力

○冨田 圭吾¹、服部 冬馬¹、川喜田 圭祐²、藪下 恭佑²、林 兼輔¹、飯浜 賢志¹、石川 裕也²、森山 貴広¹ (1.名大工、2.福井大遠赤セ)

X 線自由電子レーザーを用いた非平衡物性研究

Investigation of Non-Equilibrium States in Solids Using X-ray Free-Electron Lasers

理研放射光 [○]久保田 雄也

RIKEN SPring-8 Center, [○]Yuya Kubota

E-mail: kubota@spring8.or.jp

X 線自由電子レーザー (XFEL) は高い空間コヒーレンスを持った大強度の X 線超短パルス光源である。日本の SACLA を含め、現在世界で 5 つの XFEL 施設が稼働している。SACLA では 3 本のビームラインを同時に運転しており、BL1 では光子エネルギー 40~150 eV の軟 X 線領域の XFEL を、BL2、3 では 4~20 keV の硬 X 線領域の XFEL を提供している[1, 2]。SACLA の XFEL を用いて、物質科学、化学、光学、生物学といった幅広い研究分野で多数の成果が報告されてきた。

本講演では非平衡物性の分野に注目し、SACLA での最近の成果を紹介する。非平衡状態の実現には、試料を光学レーザーで励起する方法が広く用いられている。BL1 では、多くの元素の吸収端をカバーする軟 X 線の特長を利用した、元素選択的な測定が可能である。XFEL のフェムト秒の超短パルス性を活かし、各元素の超高速光励起磁性ダイナミクスが報告されている[3, 4]。

BL2、3 においては、硬 X 線の短波長性を活かし、格子や電子状態秩序の光励起後のダイナミクスを対象とした研究が展開されている。ポンプ・プローブ X 線回折法を用いて、ビスマス[5]、モット絶縁体[6]、極渦結晶[7]などの興味深い非平衡状態が観測されている。可視光近傍の光学レーザーのみならず、テラヘルツ光レーザーと XFEL を組み合わせた測定基盤の整備も進めている[8]。光励起に加え、強磁場パルスを用いて非平衡状態を実現する方法も SACLA で用いられている[9, 10]。最近、ポータブルな 100 T 磁場発生装置を開発し、XFEL と組み合わせることで、強相関磁性物質や固体酸素における磁場誘起格子変化の直接観測に成功している。

講演では、上述した成果の詳細を述べるとともに、現在施設で行っている装置開発も含めた今後の物性研究の展開について議論する。

- [1] T. Ishikawa *et al.*, Nat. Photon. **6**, 540 (2012).
- [2] S. Owada *et al.*, J. Synchrotron Rad. **25**, 282 (2018).
- [3] K. Yamamoto, Y. Kubota *et al.*, Appl. Phys. Lett. **116**, 172406 (2020).
- [4] L. D. Anh, Y. Kubota *et al.*, Adv. Mater. **35**, 2301347 (2023).
- [5] Y. Kubota *et al.*, Appl. Phys. Lett. **122**, 092201 (2023).
- [6] A. Verma, Y. Kubota *et al.*, Nat. Phys. **20**, 807 (2024).
- [7] V. A. Stoica, Y. Kubota *et al.*, Nat. Mater. **23**, 1394 (2024).
- [8] Y. Kubota *et al.*, Appl. Phys. Lett. **126**, 052101 (2025).
- [9] H. Jang, Y. Kubota *et al.*, Sci. Adv. **8**, eabk0832 (2022).
- [10] A. Ikeda, Y. Kubota *et al.*, arXiv:2504.10085.

放射光とレーザーを活用した空間分解光電子分光の進展

Recent Advances in Spatially-Resolved Photoemission Spectroscopy

using Synchrotron Radiation and Laser Light Sources

QST¹ ○岩澤 英明¹

National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)¹, ○Hideaki Iwasawa¹

E-mail: iwasawa.hideaki@qst.go.jp

角度分解光電子分光（ARPES）は、材料に光を照射して放出される光電子のエネルギーや放出角度を測定することで、物質内部の電子がどのようなエネルギーや運動量（波数）をもって分布しているか、すなわち物性の本質に関わる「バンド構造」などを直接調べることができる強力な手法である。近年では、光の微小集光技術の進展により、マイクロメートル～ナノメートルスケールの高い空間分解能をもつ「空間分解 ARPES」の装置開発が、世界各地で活発に進められている[1]。本講演では、こうした装置開発の最近の進展について紹介する。また、近年、我々は、マイクロメートルスケールの空間分解能を有するマイクロ ARPES を活用し、銅酸化物高温超伝導体の電子状態の空間イメージングを行うことで、電子状態の空間不均一性を明らかにしてきた（図1[2]）。本講演では、特に、レーザー光源[2]と放射光光源[3]のそれぞれの特性を活かすことで、波数に応じた空間不均一性の情報を、それぞれの光源の特性を活かして補完的に取得できることを示す。一方、こうした計測の高次元化に伴い、取得されるデータ量が飛躍的に増加しており、従来の手動データ処理・解析では対応が難しくなってきた。本講演では、空間分解 ARPES のデータ解析に、機械学習などの情報科学を導入することで、従来のスペクトル解析手法では得られなかった物理情報の抽出が可能になってきた点についても紹介する。

参考文献

[1] Hideaki Iwasawa, Electron. Struct. **2**, 043001 (2020).

[2] Hideaki Iwasawa et al., Phys. Rev. Res. **5**, 043266 (2023).

[3] Yudai Miyai et al., Science and Technology of Advanced Materials **25**, 2379238 (2024).

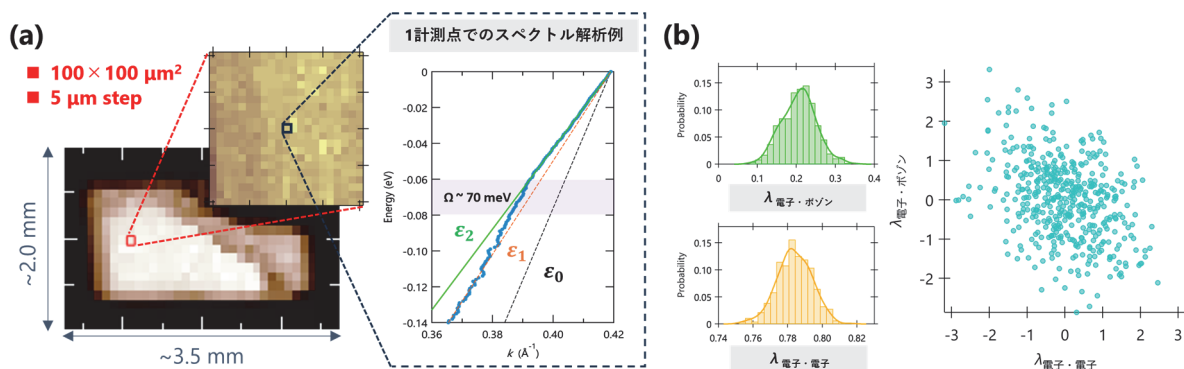


Fig. 1 : 銅酸化物高温超伝導体の電子状態の空間分解データの解析例 : (a) バンド分散・群速度の決定、(b) 多体相互作用の大きさの統計評価と相互作用間の相関分布。

電子強誘電分極ドメインの巨大テラヘルツ応答と動的マッピング

Gigantic terahertz response of electronic-ferroelectric domains and their dynamic mapping

関学大理 伊藤 弘毅

Kwansei Gakuin Univ.

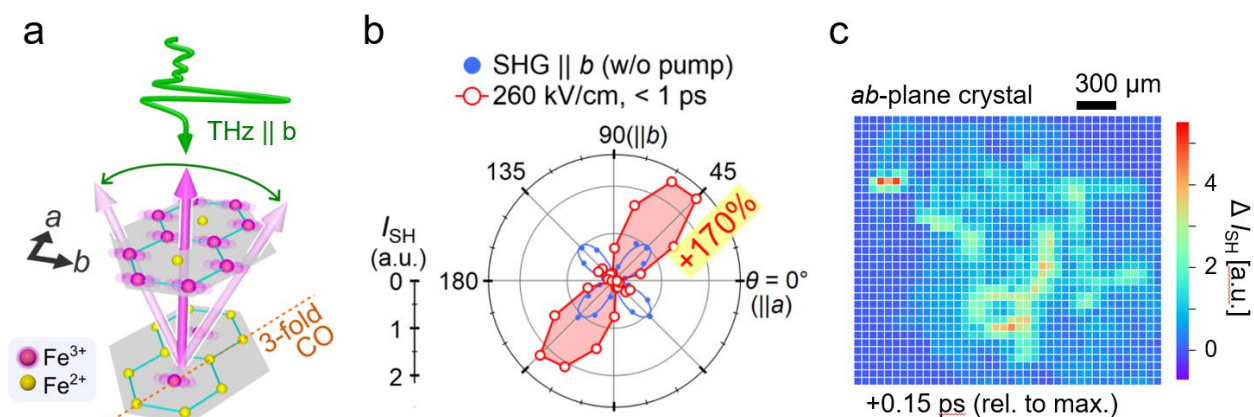
E-mail: hri@kwansei.ac.jp

電子強誘電体は、今世紀に発見された「新種」ともいえるべき強誘電体である[1]。クーロン反発などの電子間相互作用を駆動力として分極が生じていることから[2]、サブピコ秒(一兆分の一秒未満)の高速応答を示し[3]、未来の光エレクトロニクスに有用と期待されている。その候補物質である層状鉄酸化物 $R\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($R = \text{Lu}, \text{Yb}$ など)では、三角格子上の $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ イオン(電荷秩序)により強誘電分極 $\mathbf{P}$ が生じており[4](図 a)、超高速な光応答が第二高調波発生(SHG)によって確かめられてきた[5,6]。その特長は、高効率なテラヘルツ波発生源としても有望視される[7]。本講演では、バルク単結晶試料において最近明らかとなった巨大テラヘルツ(THz)応答[8]について紹介したい。

図 b の極座標プロットは、 $\mathbf{P}$ によって生じる SHG($\parallel b$ 軸)強度の入射光偏光に対する異方性を示している。定常状態(青丸)では $\mathbf{P}$ による対称性(点群 Cm)を反映して 4 回対称だが、260 kV/cm の THz 電場($\parallel b$ 軸)を印加することで全く異なる形をとり(赤丸)、SHG 最大値は 170%以上もの増加を見せた。この値は同等条件のバルク強誘電体として史上最大である。また、その時間変化はサブピコ秒(< 1 ps)周期の THz 電場波形に完全に追従していた。これらのことは、電子強誘電分極が極めて外場に敏感であり(図 a)、柔軟かつ高速に制御できることを示している。

図 c は、同様の測定を結晶表面全領域に対してマッピングした結果のスナップショット(THz 電場ピークの 0.15 ps 後)である。測定位置や時間によっては図 b よりも大きな SHG 増加率や全く異なる異方性が観測されており、強誘電ドメイン(壁)の動的特性を反映していると考えられる。

本研究は、岩井伸一郎(東北大)、沖本洋一(東科大)、池田直(岡山大)、腰原伸也(東科大)らと共同で行われた。



a: Schematics of LuFe_2O_4 (FeO W-layer) exhibiting charge order (CO) and terahertz-pump SHG-probe experiment. b: Polar plot showing the dependence of SHG intensity ($\parallel b$) on the polarization angle of the incident light in the ab -plane. Anisotropy reflecting the steady-state $\mathbf{P}$ (blue) is significantly modulated to show a +170% increase (red) within a picosecond. c: Spatial mapping of SHG ($\theta=45^\circ$) increase 0.15 ps after applying the terahertz electric field.

- [1] Monceau *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 4080 (2001)
- [2] Ishihara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79**, 011010 (2010)
- [3] Itoh, Iwai *et al.*, *Phys. Rev. Res.* **3**, L032043 (2021)
- [4] Ikeda *et al.*, *Nature* **436**, 1136 (2005)
- [5] Fujiwara, Ikeda, Koshihara, Okimoto *et al.*, *Sci. Rep.* **11**, 4277 (2021)
- [6] Yu, Ikeda, Koshihara, Okimoto *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **8**, 064402 (2024)
- [7] Yu, Okimoto, Koshihara, Itoh, Iwai, Ikeda, Fujii *et al.*, *Materials* **16**, 1989 (2023)
- [8] Itoh, Yu, Okimoto, Ikeda, Iwai *et al.*, submitted.

NanoVNA を活用した安価な強磁性共鳴測定装置の開発と性能評価 Development and Performance Evaluation of a Low-Cost Ferromagnetic Resonance Measurement System Using NanoVNA

兵庫県大理¹, QST², 大阪公立大工³, 阪大レーザー研⁴

○(M2) 福永 怜央¹, 高橋 龍之介¹, 上野 哲朗²,

庄司 大希³, 戸川 欣彦³, 和達 大樹^{1,4}

Univ. of Hyogo¹, QST², OMU³, Osaka Univ.⁴

✉R. Fukunaga¹, R. Takahashi¹, T. Ueno², Y. Togawa³, H. Shoji³, H. Wadati^{1,4}

E-mail: fukuosugcto1230@gmail.com

現在我々の生活には、可視光、マイクロ波、X線など様々な電磁波が欠かせない存在となっている。磁性体のマイクロ波吸収現象のひとつに強磁性共鳴 (FMR: Ferromagnetic Resonance) があり、これはスピントロニクスデバイスの設計・開発に不可欠な磁化ダイナミクスの評価手法として重要である。

従来の FMR 測定は、高価な高周波計測器であるベクトルネットワークアナライザ (VNA) 等が必要とされてきた。本研究ではそのコスト的障壁を打破すべく、市販の小型 VNA である NanoVNA (測定範囲は 50kHz-3GHz) を用いた測定系 (NanoVNA-FMR) を構築した。高周波誘電率の測定など NanoVNA の物性測定への応用は始まったばかりであり [1]、本研究では FMR への応用を試みた。測定対象は、 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 基板上にパルスレーザー堆積 (PLD 法) で作製した $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) 薄膜 (膜厚約 2 μm) である。透過係数 (S_{21}) スペクトルの磁場依存性から、図 1 に示すような分散関係が観測された。外部磁場の増加に伴いピークが高周波数側へシフトすることから、FMR であることが明確に示された。さらに、従来型 VNA による測定結果とも比較し、NanoVNA-FMR による結果の再現性と信頼性を確認した。また、測定の磁場掃引・データ取得・解析を Python スクリプトで完全自動化し、測定の効率化と再現性向上を実現した。試料ホルダーは 3D プリンターを用いて自作することで、装置全体のコストを大幅に削減した。講演では、これらの技術的工夫と、NanoVNA を用いた新しい FMR 測定手法の可能性について詳しく報告する。

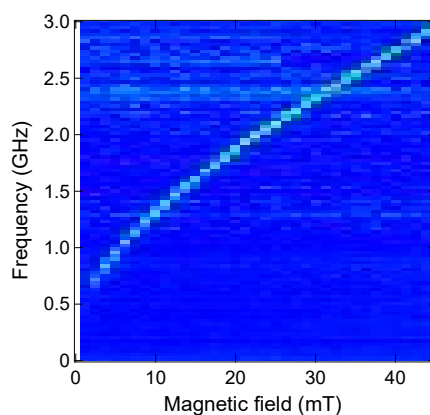


Fig. 1: FMR spectra of a YIG thin film as a function of frequency and magnetic field by NanoVNA-FMR
[1] A. Erkoreka and J. Martinez-Perdiguero, Rev. Sci. Instrum. **95**, 023903 (2024).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：幅広い波長域の光を駆使する研究の最前線 -X線からテラヘルツまで-

[8p-S302-1~9] 幅広い波長域の光を駆使する研究の最前線 -X線からテラヘルツまで-

[8p-S302-5] 高フルエンステラヘルツパルスを用いた物性制御

○永井 正也¹ (1.阪大基礎工)

キーワード：テラヘルツ、自由電子レーザー、非線形フォノンクス

本講演では、高フルエンステラヘルツパルスの物質科学における位置づけを、大阪大学産業科学研究所のテラヘルツ自由電子レーザーを用いた様々な実験を通して紹介する。

電気磁気光学効果を利用した可視光・近赤外光による 反強磁性ドメインの可視化

Visualization of Antiferromagnetic Domains Using Visible and Near-Infrared Light Based on the Magneto-Electric Optical Effect

阪公大工¹, ラドバウト大², 東大物性研³, 東大院工⁴

木村 健太¹, 林田 健志², 益田 隆嗣³, 木村 剛⁴

Osaka Metro. Univ.¹, Radboud Univ.², ISSP, Univ. of Tokyo³, Grad. Sch. of Eng., Univ. of Tokyo⁴,

○Kenta Kimura¹, Takeshi Hayashida², Takatsugu Masuda³, Tsuyoshi Kimura⁴

E-mail: kentakimura@omu.ac.jp

反強磁性体は、電子スピン（磁気モーメント）を互いに反対向きに配列させようとする反強磁性相互作用が支配的な物質群である。ネール温度以上ではスピン配列が無秩序であるが、温度がこれを下回るとスピンは逆向きに整列し、全体の磁化が打ち消し合う秩序状態を形成する。図 1 に示すように、スピンの down-up と並ぶドメイン(磁区) I と, up-down のドメイン II はエネルギー的に縮退しており、試料中にはこれらがランダムに共存する。しかし、外部刺激（電場や磁場、光など）により両社を選択的に制御・識別できれば、反強磁性体を情報記憶素子として利用可能である。また、反強磁性体は自発磁化を持たないため、強磁性体のような漏洩磁場や反磁場の影響を受けにくく、デバイスの高集積化が期待される。このような利点から、反強磁性体は次世代エレクトロニクス材料として近年活発に研究が進められている。

反強磁性体の理解と応用には、反強磁性ドメインの可視化が重要である。従来は放射光や高強度パルスレーザーなどの先端設備が必要とされてきたが、我々は近年、一部の反強磁性体において電気磁気光学効果という特殊な光学現象を利用することで、可視光や近赤外領域の LED やランプ光源といった汎用的な光源でも可視化が可能であることを世界に先駆けて実証した[1,2]。例えば、電気磁気光学効果の一種の顕れである方向二色性を利用すると、異なるドメインが異なる光透過率を示すため、光学顕微鏡下で明暗のコントラストとして反強磁性ドメインを可視化できる。

(図 1)。本講演では、電気磁気光学効果の物理的背景と発現要件を説明し、本手法を適用したドメイン観察事例を紹介する。さらに、従来手法と比較した本手法の利点について議論する。

[図 1]。本講演では、電気磁気光学効果の物理的背景と発現要件を説明し、本手法を適用したドメイン観察事例を紹介する。さらに、従来手法と比較した本手法の利点について議論する。

[1] K. Kimura and T. Kimura, APL Mater. **11**, 100902 (2023).

[2] M. Moromizato, T. Miyake, T. Masuda, T. Kimura, and K. Kimura Phys. Rev. Lett. **133**, 086701 (2024).

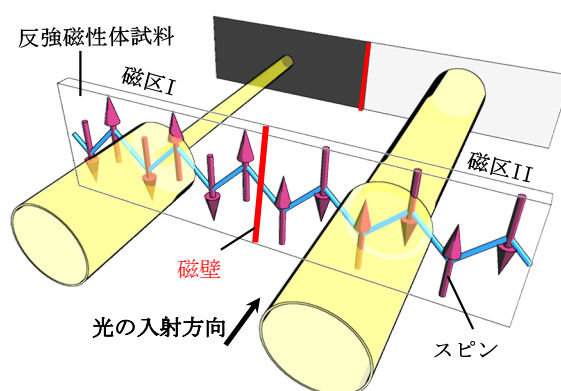


図 1 方向二色性による反強磁性磁区の可視化の概念図。磁壁で隔てられた磁区 I と磁区 II は異なる光透過率をもつため、明暗のコントラストとして可視化できる。

テラヘルツ波技術の進展と応用の広がり
-分光・イメージングを中心に-
Advances THz technology and expanding applications
- focusing on spectroscopy and imaging -

スペクトルデザイン¹ °深澤亮一¹

Spectra Design Ltd.¹, °Ryoichi Fukasawa¹

E-mail: r.fukasawa@spectra-dsn.co.jp

テラヘルツ波は遠赤外からミリ波の電磁波帯域と重なり、およそ 0.1~10THz (1THz=10¹²Hz) の周波数を呼ぶことが多い。波長にして 30 μ m から 3mm の領域になる。このテラヘルツ帯の電磁波の研究開発は立ち遅れており未開拓の電磁波と呼ばれてきた。これまで簡便に使える発生源、検出器、計測システムの開発が困難であったことから用途も限られていた。近年、この帯域の電磁波の発生・検出に関する研究開発が国内外で急速に進展してきている。研究開発の進展に伴いテラヘルツ波の持つ透過性と物性に関連した固有のスペクトルが得られるという特長を生かして基礎科学や産業に応用が広がってきている。その応用の広がりには、半導体、高分子、セラミックスなどの工業材料の評価、医薬品の評価、美術品・文化財の調査、製造ラインにおける品質管理、建築物の診断、危険物の検知、生体分子分光、バイオセンシング、社会インフラの非破壊検査など多岐の分野にわたり今後の発展が期待されている。テラヘルツ技術のさらなる普及のためには、計測スピード、コスト、サイズ、ロバストネスなどの技術課題がある。テラヘルツ波による分光やイメージングはエックス線や赤外線などによる計測と原理的に異なる知見が得られる点において新たなツールとなっている。

本講演では、テラヘルツ波の活発な利用に向けて、テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) 法や他の手法による分光やイメージングの計測法、装置技術の進展、光学コンポーネントについて紹介する。また、分光やイメージングの応用例も紹介したい。さらに、技術の普及のため、課題を解決する研究開発の一例として、基礎科学と技術開発を融合させた (国研) JST-ACCEL プログラム「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」の研究開発の取り組みについて紹介したい。本プログラムではテラヘルツ波発生源、検出器、高速イメージング、テラヘルツ波レーダーなどの研究開発がなされ、ボディスキャナーや非破壊検査のプロトタイプが開発された。また最近我々が取り組んでいる通倍方式や半導体デバイス発生源を用いた小型イメージング装置の開発についても触れたい。今後、次世代通信関連の技術開発により、多種多様なコンポーネントが開発されて普及することが予想される。フォトリソグラフィやエレクトロニクスの融合による革新的な技術が出現し、基礎科学や応用研究へ広がることを期待する。

* 基礎科学や応用に関するレビューや今後の展開は文献[1]、初心者向けの読み物は文献[2]。

[1] A. Leitenstorfer et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 56 (2023) 223001

[2] 深澤亮一、分析・センシングのためのテラヘルツ波技術、日刊工業新聞 (2013)

α -Fe₂O₃/Pt 二層膜におけるスピン流による磁化ダイナミクス変調Magnetization dynamics modulated by spin currents in α -Fe₂O₃/Pt bilayer

名古屋大工¹, 福井大遠赤セ² ○(M2)服部冬馬¹, (M2)川喜田圭祐², (M1)簀下恭佑², (M1)夢田圭吾¹, 林兼輔¹, 飯浜賢志¹, 石川裕也², 森山貴広¹

Dept. of Materials Physics, Nagoya Univ.¹, FIR-Center, Univ. of Fukui², °T. Hattori¹, K. Kawagita²,

K. Yabushita², K. Tada¹, K. Hayashi¹, S. Iihama¹, Y. Ishikawa², T. Moriyama¹

E-mail: hattori.toma.g2@s.mail.nagoya-u.ac.jp

反強磁性体はテラヘルツに及ぶ磁気共鳴周波数を持つことから、高速通信を実現するテラヘルツスピントロニクス材料として期待されている[1]。デバイス実現を据えた際、情報を乗せたテラヘルツ波を発振し、その電磁波を受け取る必要があり、スピントロニクスにおいて、磁化ダイナミクスと伝導電子スピン流の相互変換がこれを担う。伝導電子スピン流により磁化ダイナミクス制御をするトルクを「スピン移行トルク」、逆に、磁化ダイナミクスから伝導電子スピン流への変換現象を「スピンプンピング効果」という。双方ともに強磁性体にて理論・実験的によく理解されている。一方、反強磁性体における「スピンプンピング効果」に関して調査・解明が進んでいるが[2]、一方、反強磁性体における「スピン移行トルク」による磁化ダイナミクスの変調に関しては実験的研究が少なく議論の余地がある。

本研究では、Al₂O₃(0001)基板上に α -Fe₂O₃ 70nm/Pt 4nm を PLD 法によって堆積させた 2 層膜試料について磁気共鳴の電気

的測定を行った。Pt 層に電流を流しつつ、ジャイロトロン[3]にて 172GHz の電磁波を試料に照射しながら外部磁場を掃引した。具体的には、直流電流をスピンホール効果にてスピン流へ変換し、 α -Fe₂O₃ 層へ注入しながら、 α -Fe₂O₃ の磁気共鳴を励起した。 α -Fe₂O₃ の磁気共鳴は、スピンプンピング効果と Pt 層における逆スピンホール効果による電圧として検出した。図 1(a)に本測定の概略図を示す。

α -Fe₂O₃ の共鳴条件[3]にて電圧ピークが観測され、ローレンツ関数にてフィッティングすることで、共鳴線幅と共鳴磁場を算出した。図 1(b, c)にスピン流の注入方向を変化させたときの共鳴線幅・共鳴磁場の変化を示す。本発表では、 α -Fe₂O₃/Pt 多層膜におけるスピン移行トルクのメカニズムについて詳しく議論する。

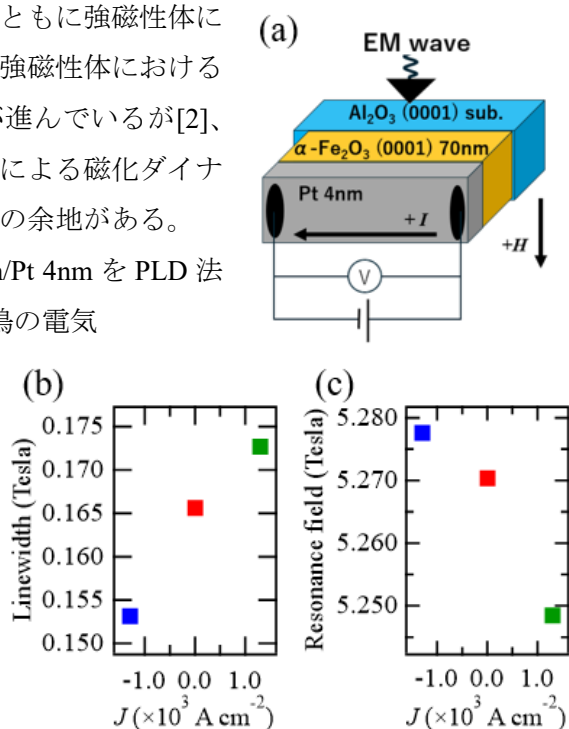


Fig.1 (a)Schematic illustration of the sample and experimental setup. (b)The changes in linewidth due to spin current injection.

[1] V. Baltz et al. *Rev. Mod. Phys.* **90**, 015005 (2018). [2] T. Hattori et al. *Phys. Rev. Lett.* **133**, 256701(2024). [3] S. Funada et al. *Phys. Rev. Appl.* **19**, L031003 (2023).

FeMn/Pt 二層膜における磁気共鳴誘起起電力

Electromotive force induced by magnetic resonance in FeMn/Pt bilayers

名大工¹、福井大遠赤セ², [○](M1) 夢田圭吾¹、(M2) 服部冬馬¹、(M2) 川喜田圭祐²、(M1) 戴下恭佑²、
林兼輔¹、飯浜賢志¹、石川裕也²、森山貴広¹

Nagoya Univ.¹, FIR-center, Univ. of Fukui², [○]K. Tada¹, T. Hattori¹, K. Kawagita², K. Yabushita²,
K. Hayashi¹, S. Iihama¹, Y. Ishikawa², T. Moriyama¹

E-mail: tada.keigo.i0@s.mail.nagoya-u.ac.jp

反強磁性体はテラヘルツに及ぶ共鳴周波数を持つため、次世代テラヘルツスピントロニクス材料として期待されている [1]。しかし、自発磁化がゼロであるため、その磁化ダイナミクスの観測は極めて困難である。これまでいくつかのテラヘルツ測定手法が報告されているが [2, 3]、共鳴吸収や磁気光学ファラデー効果を活用するものがほとんどである。これらはテラヘルツ波の透過性が高い酸化物には適用可能だが、金属反強磁性体では遮蔽・反射の影響で適用が難しい。

本研究では、我々グループが独自開発した高強度連続テラヘルツ波による電気的磁気共鳴計測手法 [4, 5] を使い、金属反強磁性 FeMn 薄膜の磁気共鳴測定を試みた。マグネトロンスパッタ法で Al₂O₃(0001) 基板上に FeMn 10 nm / Pt 5 nm を作製し試料とした。高強度連続テラヘルツ波を発生するジャイロトロンからの電磁波を照射しつつ外部磁場を掃引し、FeMn の磁気共鳴を励起した。試料両端の電圧を測定した結果、172 GHz において 6 テスラ付近に明瞭な電圧ピークが確認された。これは FeMn の磁気共鳴による起電力を示唆するものである。本発表では、この起電力の発生メカニズムについて、スピンポンピング効果 [5] や整流効果 [4] の観点から詳しく議論する。

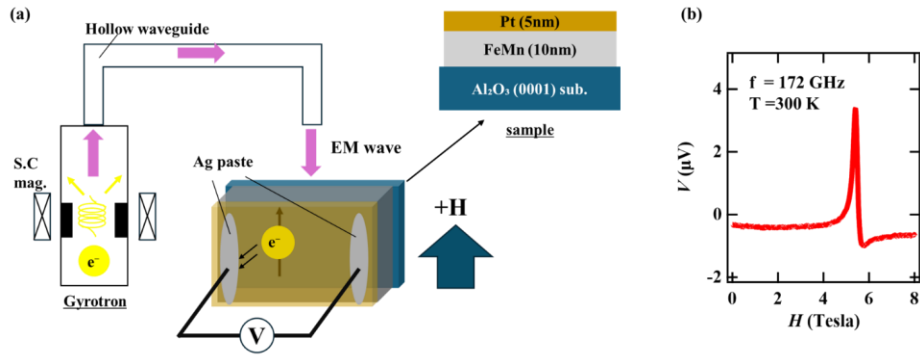


Fig1. (a) Schematic of the measurement setup (b) Field dependence of the detected voltage

[1] V. Baltz *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **90**, 015005 (2018). [2] T. Kampfrath *et al.*, *Nat. Photon.* **5**, 31 (2011). [3] T. Moriyama *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **3**, 51402 (2019). [4] S. Funada *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **19**, L031003 (2023). [5] T. Hattori *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **133**, 256701(2024).

削除: お

削除: f

削除: Layout

削除: this

削除: Dependence of detection voltage on magnetic field

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 軟X線多層膜が拓く短波長Beyond EUVリソグラフィー技術

[9p-N103-1~12] 軟X線多層膜が拓く短波長Beyond EUVリソグラフィー技術

[9p-N103-1]

EUVリソグラフィーと軟X線多層膜

○木下 博雄¹ (1.兵庫県立大学)

[9p-N103-2]

Recent Advance in Development of Efficient and Stable Cr/Sc-based Multilayer Mirrors for Applications in the Water Window Soft X-ray Range

○Evgueni Meltchakov¹, Franck Delmotte¹ (1.Univ. Paris-Saclay)

[9p-N103-3]

その場計測量子エリプソメトリーとイオンスパッタ法によるBEUV反射多層膜鏡開発

○江島 丈雄^{1,2} (1.東北大SRIS、2.東北大多元研)

[9p-N103-4]

NTT-ATにおけるEUV/X線多層膜の開発

○市丸 智¹、畑山 雅俊¹ (1.NTT-AT)

[9p-N103-5]

レーザー生成プラズマEUV光源の高効率化

○東口 武史¹ (1.宇都宮大工)

[9p-N103-6]

レーザー生成B-EUV～水の窓軟X線光源

○東口 武史¹ (1.宇都宮大工)

[9p-N103-7]

液体リチウムシートターゲットによる狭帯域EUV光源の開発

○本田 能之¹、岩本 文男¹、永井 伸治¹、山本 隼也²、早坂 信太郎²、矢澤 隼斗²、杉浦 使²、空本 龍弥²、林崎 規託³、滑川 雅広⁴、作山 弘幸⁴、東口 武史² (1.ギガフォトン、2.宇都宮大学、3.東京科学大学、4.助川電気工業)

[9p-N103-8]

Effect of Thickness graded Mo/Si multilayer Mirror on Pupil Transmission Uniformity of EUV Lithography Optics

○(PC)Maidul Haque Sekh¹, Shun Uji¹, Mitsunori Toyoda¹ (1.Tokyo Polytechnic University, Atsugi, Japan)

[9p-N103-9]

斜入射aplanatic対物系に適した400eV領域用多層膜ミラーの開発

脇 俊太郎¹、原田 哲男²、○豊田 光紀¹ (1.東京工芸大工、2.兵庫県立大高度研)

[9p-N103-10]

ニュースバル放射光施設におけるBEUV評価技術の開発

○原田 哲男¹、棚木 智也¹、早勢 直紀¹、山川 進二¹ (1.兵庫県大)

[9p-N103-11]

BEUV多層膜用のホウ素膜の光学定数測定

○(M1C)棚木 智也¹、早勢 直紀¹、山川 進二¹、原田 哲男¹ (1.兵庫県大工)

[9p-N103-12]

Beyond EUV露光向けMo系多層膜のシミュレーション

○早勢 直紀¹、山川 進二¹、原田 哲男¹ (1.兵庫県立大高度研)

EUV リソグラフィーと軟 X 線多層膜

EUV Lithography and Multilayer mirror for X-ray

兵庫県立大 名誉教授 木下博雄

University of Hyogo, Professor Emeritus

E-mail: Kinoshita.hiroo@eagle.ocn.ne.jp

EUV リソグラフィー研究は 1984 年頃から開始された。X 線等倍露光の失敗から、X 線領域での縮小露光を模索した。当時は g 線露光が用いられており、将来的には i 線が用いられるという状況であった。X 線領域での縮小では光学系に反射面となる多層膜の開発が必須と考えていた。当時の多層膜は宇宙での X 線による監視が検討されていた。また、半導体の高度化に於いても超電導デバイス用多層膜の利用が検討されていた。そんな中で、NTT の茨木通研の超伝導 Device 研究者に W/C 多層膜をシュバルツシルト光学系に形成することを依頼した。当時露光波長については大いに議論された。Resist 的には 4.5nm 等が良い。コンタミの問題もない (MIT Henry Smith)。しかし、多層膜では反射率が低く、半値幅も小さく、光学の合わせも問題となる。一方、Si 吸収端を超えた Mo/Si では反射率も 60%以上とれ、半値幅も 0.6nm と広く取れた。そんなことで、1989 年以降露光波長を Si 吸収端を超えた 13.5nm としてきた。

最近、Beyond EUV という事で、6.8nm などの短波長化が検討されている。ASML 社が開発しているシステムの微細化性能は、NA0.33 機で 13nm、NA0.55 機で 8nm としている。Si 半導体の微細化の方向性を示す IRDS によれば、Logic のメタル部分が最小となり 2037 年 8nm L&S としている。ASML は今後 NA0.75 を開発計画としており、微細化性能は 6nm を可能としている。

新しいアプリケーションとして如何なる Device を目標とするか？波長 6.8nm で NA0.55 の場合の微細化性能は 4nm と予測される。

6.8nm 近辺の多層膜としては La/B4C が検討されている。2011 年に NewSUBARU で評価した La/B4C の反射率 48.9%、半値幅 0.04nm であった。同一バッチでの複数ミラーの多層膜形成では波長の合わせは可能であろうが、Graded な膜厚が必要となるミラー系では異なるバッチでの膜形成となり、合わせが可能かである。以前、我々が製作した非球面 3 枚系では Graded な膜厚で、波長 13.5nm として異なるバッチでの成膜での反射率の合成半値幅として 0.46nm を得ている。

また、光源についても検討が必要だ。かつては高融点金属ターゲットとして Tb、Gd が検討されていたが、発光効率等の評価はなされたが、その後の検討はなされていない。XFEL が唯一の候補と考えられている。

6.8nm でのミラーの加工精度も重要となる。フレアは波長の 2 乗に反比例して大きくなる。ミラーの MSFR と HSFR は単純に波長が半分になった以上の改善が必要となる。

6.8nm 領域で合わせは半値幅が 0.05nm 程と狭いため、反射率を犠牲にし、半値幅を拡げる多層膜形成が必要となるだろう。まずは、簡単なシュバルツシルト光学系で反射率特性、Resist 特性などの評価を進めて頂きたい。

参考文献

Yuriy Platonov, Jim Rodriguez, Michael Kriese, Eric Gullikson, Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, and Hiroo Kinoshita, "Multilayers for next generation EUVL at 6x nm," Proc. SPIE 8076 (2011) pp.80760N.

Recent Advance in Development of Efficient and Stable Cr/Sc-based Multilayer Mirrors for Applications in the Water Window Soft X-ray Range

University Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry

°Evgueni Meltchakov, Franck Delmotte

E-mail: evgueni.meltchakov@institutoptique.fr

Advance in evolution of multilayer optics is achieved by exploring new materials and material combinations, improvement of deposition technology, progress in modeling and optimization methods and use of modern metrology techniques. Expected optical properties of multilayer coatings can be calculated by applying various algorithms based on the theory of x-ray reflectivity.

The development of efficient normal incidence mirrors is a quite challenging task in the water window domain of soft x-rays, a spectral region between absorption edges of carbon (284 eV) and oxygen (543 eV) with potential applications in biology, microscopy and semiconductor industry. Proposed more than 30 years ago, the Cr/Sc multilayer provides theoretical reflectivity near 60% in the vicinity of the Sc $L_{2,3}$ absorption edge (397 eV) [1]. However, the measured reflectance achieved so far was only about 20%. This is mainly because of the formation of rough and/or diffuse interfaces which are generated during the deposition process. The effect of interfacial imperfections becomes extremely significant toward short wavelengths when the multilayer period thickness is approaching characteristic values of the interfacial roughness (typically 0.2 to 0.5 nm). In the water window domain (wavelengths between 2.3 nm and 4.4 nm), the thickness of each individual layer becomes smaller than 1 nm.

A number of techniques and methods have been tried to reduce the interfacial roughness and enhance the multilayer reflectivity. We have shown previously that a high reflectivity of the Cr/Sc-based multilayer can be achieved using a conventional magnetron sputtering process with nitridation of Cr layers and implementation of B_4C barrier layers at only one interface (Sc-on-Cr) [2]. For further optimization of this multilayer system, an original experimental approach was proposed and performed since an accurate reflectivity simulation is hardly possible because of the lack of reliable optical constants of CrN in the spectral range of interest. The experimental study has confirmed the validity of our strategy and allowed us to produce the Cr/Sc-based multilayers with a world record peak reflectance (over 32%) in the vicinity of the Sc edge at near-normal incidence. The measurements reveal also an excellent temporal stability of the optimized CrN/ B_4C /Sc multilayer [3]. These results pave the way for practical applications of the Cr/Sc-based multilayer mirrors in the water window domain of the soft x-ray range.

[1] N. N. Salashchenko et al., Proc. SPIE 111, (1994), 402

[2] C. Burcklen et al., Opt. Lett. 42 (2017), 1927

[3] E. Meltchakov et al., Opt. Lett. 49 (2024), 3420

その場計測量子エリプソメータとイオンスパッタ法による BEUV 反射多層膜鏡開発

Development of BEUV Multilayer Mirrors Using Ion Sputtering with Quantum Ellipsometry Enabled Precise Thickness Control

東北大 SRIS¹ 兼 多元研² ○江島 丈雄^{1,2}

SRIS¹, and IMRAM², Tohoku University, EJIMA, Takeo

E-mail: takeo.ejima.e7@tohoku.ac.jp

現在 EUV (Extreme Ultra-Violet) 波長 13.5 nm で動作する半導体露光装置は、Mo/Si 反射多層膜を用いた反射光学系が用いられている。この EUV 露光機に代わる次世代露光機では、従来の Mo/Si 材料系に代わり、新たに LaN/B などの材料系を用いた反射多層膜鏡による、波長 6.x nm の BEUV (Beyond EUV) 反射光学系が提案されている [1, 2]。

反射多層膜鏡は、次数 m 、動作波長 λ で疑似的に Bragg 条件 $2D \cos \phi_m = m\lambda$ を満たすように設計され、(i) 周期長 D 、(ii) 界面粗さ σ 、(iii) 入射角 ϕ_m のずれが反射多層膜の反射率 R の低下を引き起こす。誤差評価のために、誤差により設計反射率 R_D に対して成膜した反射多層膜の反射率 R_F が 6 割 ($R_F = 0.6R_D$) に減少したとする。この反射率の減少分 $R_F - R_D$ が全ての誤差要因に均等に起因するとして、BEUV 反射光学系の各誤差の大きさを見積もった (図 1)。評価には、波長 6.8 nm、入射角 10° とし、材料系に LaN/B を用いた。その結果、各パラメータは設計値の $\pm 5\%$ 以内の精度で作製する必要があることが判明した。これは概ね従来の Mo/Si 反射多層膜鏡に許容される誤差値の半分から約一桁小さい値を達成する必要を示している。

本研究では、この課題に対処するためイオンスパッタ法を用い、成膜時のイオン加速電圧およびスパッタガスの自由度を高めることで反射多層膜の膜厚と界面粗さの精度向上を目指す。さらに、その場量子エリプソメ

ータを活用して安定した周期長の制御と球面鏡の入射角に合わせた成膜条件の最適化を図る。これらの技術的取り組みにより、BEUV 露光機で要求される高精度の反射多層膜鏡の作製とその応用展開を目指す。

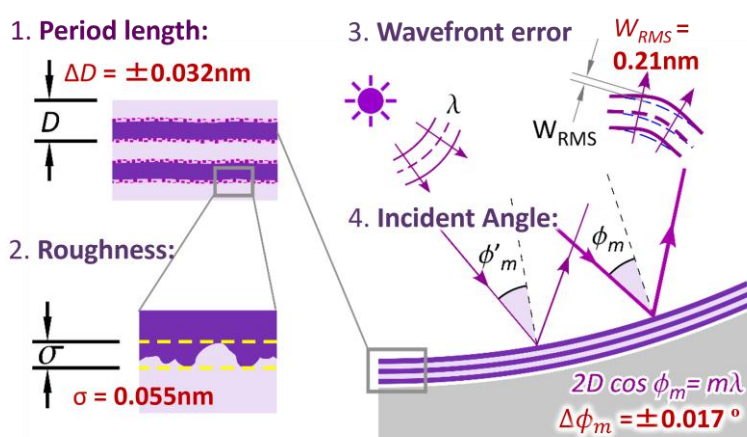


図 1 : 反射多層膜鏡の誤差要因と許容される誤差値 (本文参照)。

References:

- [1] The International Roadmap for Devices and Systems: 2023 update, Lithography & Patterning, IEEE.
- [2] D. S. Kuznetsov, et al., Opt. Lett. **40**, 3778 (2015).

NTT-AT における EUV/X 線多層膜の開発
NTT-AT's development of EUV/X-ray Multilayer
NTT-AT °市丸 智, 畑山 雅俊
NTT-AT, °Satoshi ICHIMARU, Masatoshi HATAYAMA
E-mail: satoshi.ichimaru@ntt-at.co.jp

EUV/X 線多層膜は、放射光物理・レーザー物理・プラズマ物理・天体物理など様々な分野で EUV 光や X 線用の光学素子として光源技術や観測技術の発展と合わせて開発が進められてきた。EUV/X 線多層膜の利用は単純な反射鏡にとどまらず、ビームスプリッタや偏光子、また多層膜回折格子や多層膜断面を利用したラウエレンズなど、多くの光学素子に利用されている。NTT アドバンステクノロジー株式会社 (NTT-AT) は、1995 年の竹中久貴博士 (現トヤマ) の NTT からの転籍を機に EUV/X 線多層膜の開発及び製造販売を開始し、現在においても多層膜開発を継続している。本講演では様々な波長域また用途で利用される NTT-AT の EUV/X 線多層膜を紹介する。

EUV 域での多層膜開発は広い波長域に渡って行われている。高次高調波応用として幅広い応用研究が行われている波長 30 nm から 50 nm (光子エネルギー 40 eV – 25 eV) の EUV 光に対しては、高反射率鏡として SiC/Mg 多層膜を開発してきた¹。磁性体材料の研究などで多くの事例のある波長 20 nm (光子エネルギー 60 eV) 近辺においては、光学定数的に優位だが拡散の影響を強く受ける Al に代わって Al-Si を用いることで高反射率の Zr/Al-Si 多層膜を実現した²。EUV リソグラフィ波長として産業応用が広がる波長 13.5 nm 周辺においては、高反射率のみならず、広帯域化³、狭帯域化、また耐久性向上⁴など、様々な観点での多層膜開発を行っている。

軟 X 線領域においては、反射鏡用途と合わせて偏光子用途での多層膜利用も行われている。波長 1.65 nm (光子エネルギー 750 eV) 用の直入射鏡として多層膜周期長 1 nm 未満の W/B₄C 多層膜を開発し、直入射角 4 度において反射率 0.2% を実現した⁵。また同様に作製された W/B₄C 多層膜の入射角 45 度、波長 1.35 nm (光子エネルギー 920 eV) での反射率は 0.7% であり、周期長 1 nm 未満の多層膜の反射鏡としての有用性を確認した。

1. H. Takenaka et al., J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom. **144-147**, 1047 (2005).
2. M. Hatayama et al., Opt. Express **24**, 14546 (2016).
3. S. Ichimaru et al., Rev. Sci. Instrum. **86**, 093106 (2015).
4. S. Ichimaru et al., X-Ray Lasers 2016. Springer Proc. Phys., **202** 303 (2018).
5. C. Stoeckl et al., Rev. Sci. Instrum. **95**, 073508 (2024)

レーザー生成プラズマ EUV 光源の高効率化

Efficient laser-produced plasma extreme ultraviolet (EUV) source

宇都宮大工¹ ○東口 武史¹

Utsunomiya Univ.¹, ○Takeshi Higashiguchi¹

E-mail: higashi@cc.utsunomiya-u.ac.jp

EUV 露光機の高 NA 化とともに EUV 光源には高出力化と高効率化が求められている。現行の露光用 EUV 光源には CO₂ レーザー（気体レーザー）では消費電力が大きいので、励起レーザーを 2 μm 帯の中赤外固体レーザーに置き換える動きがある [1]。励起レーザーには高繰り返し高パルスエネルギーで数 10 kW から 100 kW 級の出力が必要である。なお、顕微鏡用 EUV 光源も露光用光源と同様に高出力化と高効率化が求められる。しかしながら、固体レーザーでは熱損傷を避けられそうにない。そこで、レーザーを低出力化するためにも EUV 光源を高効率化することが必要である。これまで多くの EUV 光源の高効率化に関する研究が行われてきたが [2]、さらに高効率化するアイデアを出そうとしても出尽くした感は否めない [3]。われわれは、以前、二重パルス照射法で高効率化とデブリの低エネルギー化を実証したが [4]、最近、レーザー照射方法を工夫することで高効率化を図った。本発表では、マルチビーム照射法によるエネルギー変換効率の高効率化（図 1） [5] と斜め入射法によるスペクトル純度（スペクトル効率）の高効率化（図 2） [6] について報告する。

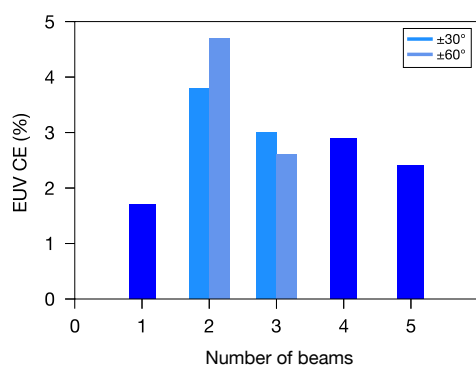


Fig. 1. The number of beams versus the EUV CE.

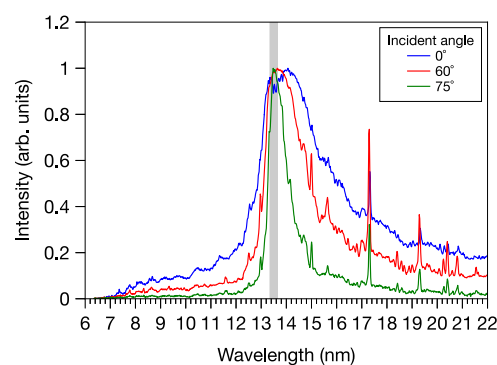


Fig. 2. EUV spectra at different incident angles.

- [1] Y. Mostafa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **123**, 234101 (2023); Y. Mostafa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **126**, 049901 (2025).
- [2] V. Bakshi (ed.), Photon Sources for Lithography and Metrology (SPIE Press, 2023).
- [3] A. Sunahara *et al.*, Opt. Express **31**, 31780 (2023).
- [4] T. Higashiguchi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **88**, 201503 (2006); T. Higashiguchi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **91**, 151503 (2007).
- [5] T. Sugiura *et al.*, Appl. Phys. Lett. **125**, 034103 (2024).
- [6] 矢澤 隼斗ほか, 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 (2025); (to be submitted).

レーザー生成 B-EUV～水の窓軟 X 線光源

Characteristics of laser-produced beyond EUV and water-window soft x-ray sources

宇都宮大工¹ ○東口 武史¹

Utsunomiya Univ.¹, °Takeshi Higashiguchi¹

E-mail: higashi@cc.utsunomiya-u.ac.jp

半導体回路の微細化に伴い、国際デバイスシステムロードマップ (International Roadmap for Devices and Systems) の 2022 年版に 6.x nm 帯の beyond EUV (B-EUV) の可能性が指摘された [1]. B-EUV 光源は 2010 年ごろに提案されたが、ここに来て再検討され始めた. B-EUV では光源の高効率化 [2-4] や多層膜鏡の高反射率化が進められているが、現行の波長が 13.5 nm の EUV リソグラフィを置き換えるには多くの課題がある. 現在は、13.5 nm リソグラフィの高 NA 化の進捗次第であるが、B-EUV 研究も進められている. これに並行し、短波長 EUV 光源として、“Blue-X”と銘打って水の窓軟 X 線領域の光源も検討されはじめた [5]. われわれは、これまで、レーザー生成プラズマ B-EUV 光源や水の窓軟 X 線源の高効率化などを進めてきた [2-4,6]. 本発表では、スペクトル帯域を合わせるためのレーザー生成プラズマ B-EUV 光源のスペクトルの狭帯域化 (図 1) [7] と 4 nm 近傍の水の窓軟 X 線源の 2 時間連続実験について報告する (図 2) [8].

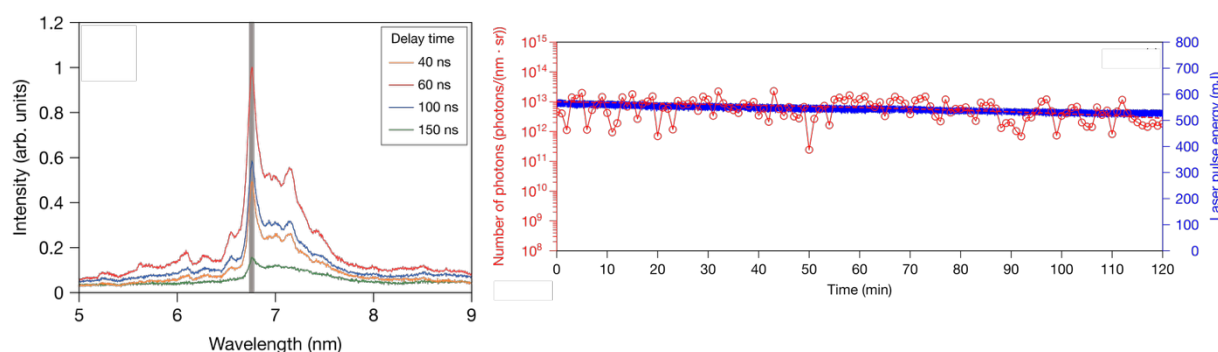


Fig. 1. Narrowed spectrum of the Gd plasma. Fig. 2. Continuous operation of the water-window soft x-ray emission by liquid Bi metal target.

- [1] IEEE, “Executive Summary: 2022 Edition of the International Roadmap for Devices and Systems (IRDS)” (2022).
- [2] T. Higashiguchi *et al.*, Opt. Express **21**, 31837 (2013); and references therein.
- [3] R. Amano *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., Part 1 **57**, 070311 (2018).
- [4] T. Niinuma *et al.*, Appl. Phys. Lett. **124**, 054104 (2024).
- [5] V. Bakshi, “EUV Roadmap Needs Extension,” EE Times (2018).
- [6] G. Arai *et al.*, Opt. Express **26**, 27748 (2018).
- [7] M. Kume *et al.*, Appl. Phys. Lett. **124**, 052107 (2024).
- [8] T. Soramoto *et al.*, Opt. Lett. **49**, 5791 (2024).

液体リチウムシートターゲットによる狭帯域 EUV 光源の開発

Development of narrowband EUV light source by a liquid Lithium sheet target

ギガフォトン株式会社¹, 宇都宮大学², 東京科学大学³, 助川電気工業株式会社⁴

○本田 能之¹, 岩本 文男¹, 永井 伸治¹, 山本 隼也², 早坂 信太郎², 矢澤 隼斗², 杉浦 使²,
空本 龍弥², 林崎 規託³, 滑川 雅広⁴, 作山 弘幸⁴, 東口 武史²

Gigaphoton Inc.¹, Utsunomiya Univ.², Institute of Science Tokyo³, Sukegawa Electric Co., LTD.⁴,

○Yoshiyuki Honda¹, Fumio Iwamoto¹, Shinji Nagai¹, Shunya Yamamoto², Shintaro Hayasaka²,

Hayato Yazawa², Tsukasa Sugiura², Tatsuya Soramoto², Noriyosu Hayashizaki³, Masahiro

Namekawa⁴, Hiroyuki Sakuyama⁴, Takeshi Higashiguchi²

E-mail: yoshiyuki_honda@gigaphoton.com

極端紫外光 (Extreme Ultra Violet: EUV, $\lambda = 13.5$ nm) を用いた露光装置やマスク検査装置が最先端半導体工場で使用されている。ギガフォトンでは液体金属ターゲットにレーザーパルスを照射することによって EUV 光を発生させるレーザー生成プラズマ (Laser Produced Plasma: LPP) 方式の EUV 光源を開発している¹⁾。リチウムをターゲット材料として用いると Li^{2+} イオンから狭帯域の EUV 光が生成される。このため、スズをターゲット材料とする場合よりも高いコントラストが得られ、マスクなどの欠陥検査装置用 EUV 光源としての応用が期待される。本報告では、液体リチウムシートターゲットにレーザーを照射することで発生する EUV 光を計測し、EUV 変換効率 (Conversion Efficiency: CE) を評価した結果について報告する。

図 1 に実験配置を示す。Nd:YAG レーザー ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) を集光し、液体リチウムシートターゲットに照射することで EUV 光を発生させた。レーザー照射強度は $(0.2 - 1.4) \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ の範囲で変化させた。較正された EUV 検出器を真空容器内に取り付けることによって EUV 光のエネルギーを測定した。図 2 に EUV 変換効率のレーザー照射強度依存性を示す。最大で約 1.3% の CE を観測した。講演ではレーザーを照射した際にターゲットより発生するリチウムデブリの評価結果なども報告する。

1) Y. Honda *et al.*, Appl. Phys. Express **13**, 115501 (2020).

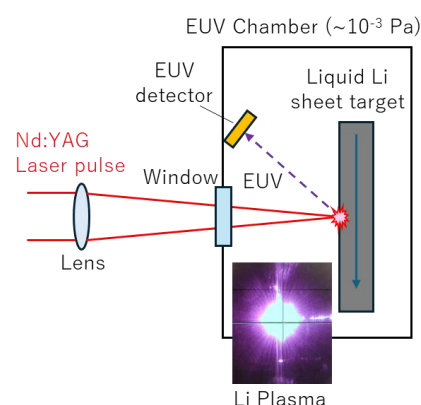


図 1: 液体リチウムシートターゲットを用いた EUV 計測の配置図

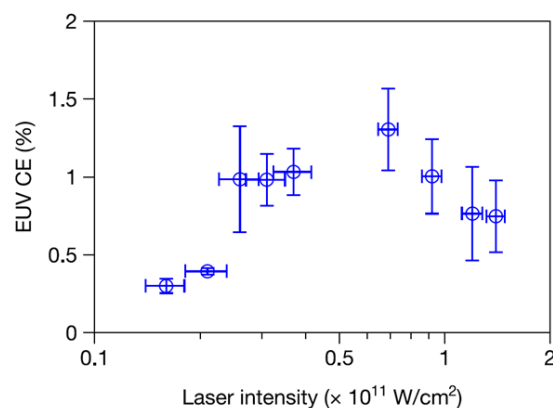


図 2: EUV 変換効率のレーザー照射強度依存性

Effect of Thickness graded Mo/Si multilayer Mirror on Pupil Transmission Uniformity of EUV Lithography Optics

S. Maidul Haque*¹, Shun Uji¹, Mitsunori Toyoda¹

¹Tokyo Polytechnic University, Atsugi, Japan

*E-mail: s.haque@t-kougei.ac.jp

The distribution of mean angle of incidence on all elements of 6-mirror EUV (13.4 nm) projection system¹ (Fig. 1) has been simulated for a fan shaped image with image numerical aperture of 0.26. The mean angle of incidence (Fig. 2) has been calculated considering 10 representative field points of the fan shaped image, by applying the optical design software, Code-V. The lateral variation of mean angle of incidence on reflective surfaces is an important concern in such systems due to limited angular band width of multilayer EUV mirrors. A 41 bi-layer Mo/Si mirror² considering both (i) uniform thickness (Fig. 3) and (ii) graded thickness (Fig. 4), has been applied as reflective surface for surface-5 and the pupil transmission map has been simulated in corresponding cases. The pupil map shows relatively poor transmittance uniformity in the range of 2.1% to 73.0 % for the uniform thickness mirror due to limited peak bandwidth. In contrast, graded thickness mirror exhibits much greater uniformity in the range of 63.2% to 74.7% in predominant area of the pupil. However, the poor transmittance in the rim part of pupil for graded thickness mirror arises due to rotational non-symmetry of the mean angle of incidence near the center (Fig. 3).

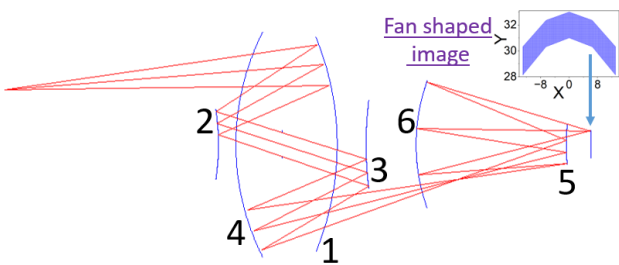


Fig.1: 6-mirror EUV illumination optics

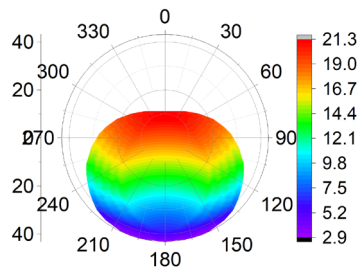


Fig.2: Distribution of angle of incidence on surface-5

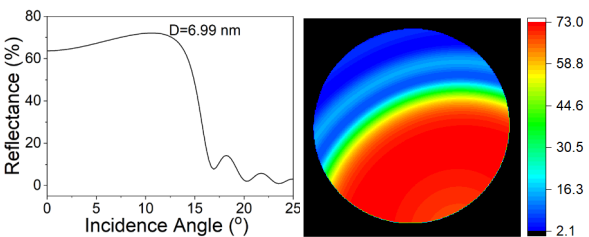


Fig. 3: X-ray reflectivity spectra and pupil transmission map for uniform thickness Mo/Si mirror.

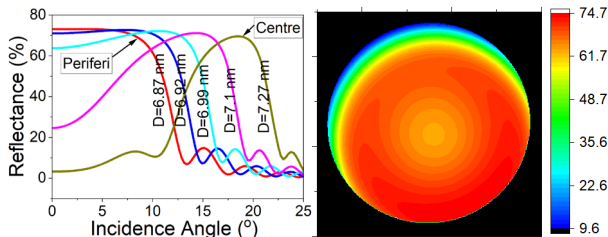


Fig. 4: X-ray reflectivity spectra and pupil transmission map for graded thickness Mo/Si mirror.

Acknowledgement: This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 24H00434.

References:

1. Patent JP2004170869A, by Nikon Corp, Publication date 2004-06-17
2. X. Liu et al., Micromachines 14 (2023) 526.

斜入射 aplanatic 対物系に適した 400eV 領域用多層膜ミラーの開発

Grazing-Incidence Multilayer Mirrors for Imaging Objective in 400 eV Region

東京工芸大工・光学設計研究室 脇俊太郎, °豊田光紀

兵庫県立大・高度研 原田哲男

Optical Design Lab., Faculty of Eng., Tokyo Polytechnic Univ., S. Waki, and °M. Toyoda

LASTI, Univ. of Hyogo, T. Harada

E-mail: m.toyoda@eng.t-kougei.ac.jp

高次高調波や第3世代放射光など、高輝度でコヒーレンスが高い軟X線光源の登場により、光子エネルギー200–700eV程度の軟X線領域で、回折限界結像を実現する結像光学系の需要が高まっている。我々は、4面の該球面ミラーに特定の大チルトを与えた斜入射配置(入射角 $>60\text{deg.}$)において、球面収差とAbbeの正弦条件を満足するaplanatic対物系の新規解を見出した(Fig. 1)[1–2]。新規解は、①基板形状がほぼ球面であり作製が容易で、②斜入射多層膜ミラーによる高い反射率により高スループットと低収差を両立した新しい軟X線光学系として期待できる。

本講演では、提案する斜入射光学系に好適な400eV(波長3.1nm)領域用の多層膜ミラーの検討と試作を行った結果を報告する。初めにPalikによる光学定数データベースに山本の選択則[3]を適用し、光子エネルギー $E=397\text{eV}$ 、および、入射角 $\phi=60\text{deg.}$ の条件で高反射率が期待できる3種の物質対(Sc/Si, Sc/Mg, Sc/Cr)を選択し、現有のマグネトロンスパッタ装置で試作した。小角X線反射率(GIXRR)計測により、3種の試料とも良好の周期性が得られることを確認できた。次に、試作した3種のミラーの反射率スペクトルを放射光施設(NewSUBARU)に設置された軟X線反射率計により実測した。Sc/Cr多層膜ミラーでは、Fig. 2に示すように、波長3.1nmにおいて $R=34\%$ の高い反射率を確認できた。明瞭なサブピークも観測でき、試作した多層膜ミラーが良好な周期性(周期長3nm)を持つことも示唆された。今後は、界面拡散層の制御による、さらなる反射率向上を検討する予定である。

Reference

- [1]2019年応物学会秋季講演 20p-PB2-16.
- [2] Proc. SPIE, 13030, 130200Z (2024).
- [3] Appl. Opt. 31, 1622-1630 (1992).

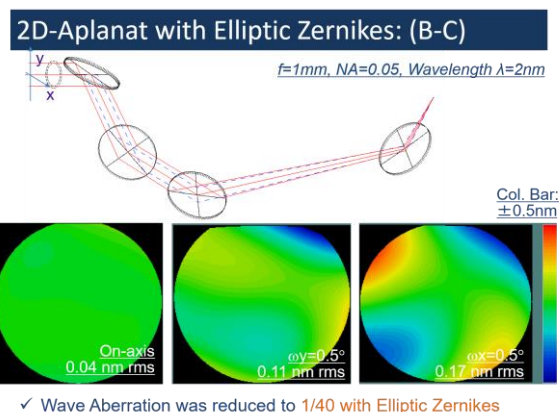


Fig. 1.4 面斜入射多層膜ミラーによる Aplanat 解の設計例.

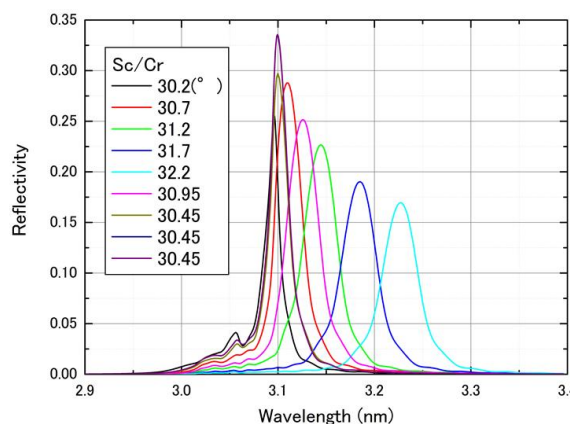


Fig. 2. Sc/Cr 多層膜ミラーの反射率スペクトルの実測値.

ニュースバル放射光施設における BEUV 評価技術の開発

Beyond EUV Measurement Tools at NewSUBARU Synchrotron Light Facility

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 °原田 哲男, 棚木智也, 早勢直紀, 山川進二

LASTI, Univ. of Hyogo, °Tetsuo Harada, Tomoya Tanagi, Naoki Hayase, Shinji Yamakawa

E-mail: harada@lasti.u-hyogo.ac.jp

極端紫外線 (EUV) リソグラフィーは、波長 13.5 nm の光を用いた最先端半導体の量産技術として広く普及している。解像度は光学系の開口数 (NA) の向上により、ハーフピッチ 13 nm (NA: 0.33)、8 nm (NA: 0.55) と進展しており、最終的には NA 0.75 の「Hyper-NA」光学系によって、5 nm までの微細化が期待されている。しかし、NA 0.75 は光学的限界に近い構成であるため、さらなる微細化には、より短波長の光源を用いる必要がある。その候補として、波長 6.7 nm のホウ素吸収端近傍の光が注目されており、これは Beyond EUV (BEUV) と呼ばれている。BEUV リソグラフィーでは、3 nm と半導体の物理限界に迫る極微細パターンニングが可能となる。BEUV リソグラフィーの実現には、実用的な反射多層膜、高性能レジスト、狭帯域な多層膜でも機能する露光光学系、高出力光源、吸収体を含むマスク材料など、多くの技術的課題がある。

ニュースバル放射光施設では、最も重要な反射多層膜の開発をサポートするため、実露光波長 6.7 nm での反射率や光学定数の測定に用いる反射率計の開発を続けてきた。例えば、正確な反射率を測定するために、高次光を除去する機構の開発[1]を進めてきた。さらに、一般的に用いられる La/B 系多層膜に加え、安定性が期待される C/B 系多層膜の開発[2]も行っている。また、フォトリソの BEUV 感度測定装置や BEUV パターンニング装置も同時に開発しており、BEUV 技術開発を支援するための各種測定装置を提供している。

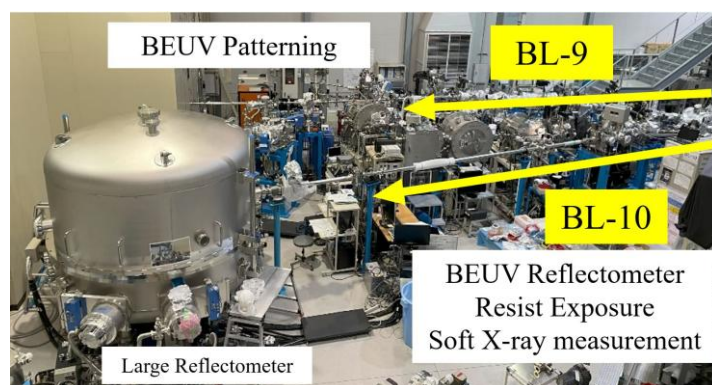


Fig. 1. Photograph of beamlines (BL-9, BL-10) for BEUV evaluation at NewSUBARU.

[1] Takuto Fujii, Shinji Yamakawa, Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, “Beyond EUV measurement at NewSUBARU synchrotron light facility,” Proc. SPIE **11908**, 119080T, 2021.

[2] Umi Fujimoto, Tetsuo Harada, Shinji Yamakawa, Takeo Watanabe, “Carbon/boron multilayer for beyond EUV lithography,” Proc. SPIE **12915** (2023) 129150M.

BEUV 多層膜用のホウ素膜の光学定数測定

Optical Constant of Boron Material for Beyond EUV Lithography Multilayer

棚木 智也, 早勢 直紀, 山川 進二, 原田 哲男

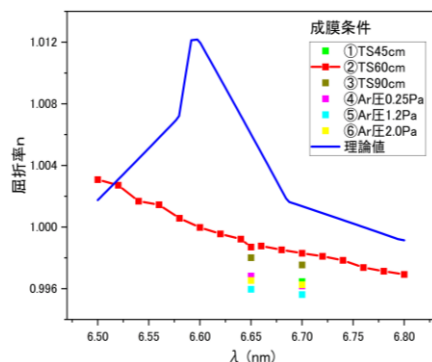
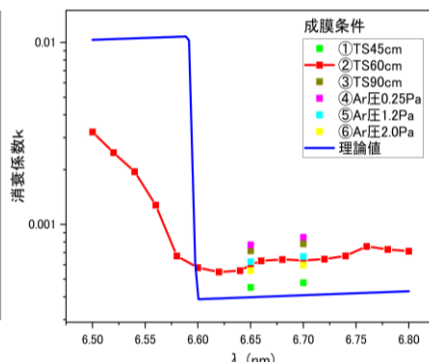
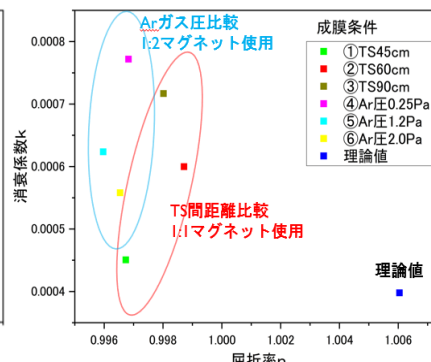
Tomoya Tanagi, Naoki Hayase, Shinji Yamakawa, Tetsuo Harada

E-mail: ep21w062@gmail.com

【背景】集積回路のさらなる微細化に向けて露光波長 6.7 nm 近辺の Beyond EUV リソグラフィ技術の実現が期待されており、そのためには高い反射率を持つ多層膜ミラーの開発が必要となる。多層膜材料の組み合わせとしては屈折率 n の差が大きく、消衰係数 k がともに小さいほど高い反射率を示す。この条件に適した多層膜ミラーとして、先行研究では La/B 系多層膜の研究が進められてきたが、La は化学的に活性であり、安定性に課題がある。そこで同程度のピーク反射率を持ち、安定性の高い C/B 多層膜の開発を進めている。BEUV 多層膜の開発においては B 材料の持つ光学定数 n 、 k が極めて重要な要素となる。本研究では Ar ガス圧やターゲット・基板 (T-S) 間距離を変化させた成膜条件下で B 膜を成膜し、それらのサンプルについて光学定数 n 、 k の測定結果を報告する。

【実験】本研究では誠南工業製アンバランスドマグネトロンスパッタリング成膜装置を使用して成膜を行う。アンバランスドマグネトロンスパッタではターゲット背面に設置した磁石の強度バランスを変化させることで、磁場を基板近傍まで伸ばすことができる。成膜した B 膜の光学定数を評価するために、放射光施設 NewSUBARU の BL-10 に構築された軟 X 線反射率計にて反射率測定を行う。軟 X 線反射率法では軟 X 線を 0° 付近の極低角から薄膜表面に入射し、表面や界面での反射光を干渉させた光の反射強度を測定する。入射角を増加させながら測定を行うことで、反射強度の角度依存性を求める。この反射スペクトルをフィッティングすることにより、B 膜の光学定数を測定する。

【結果】成膜した B 膜の光学定数 (n :屈折率、 k :消衰係数) の波長依存性を Fig. 1,2 に示す。 n 値に関して実測値は理論値と異なる傾向を示しており、長波長側にかけてほぼ一定の傾きで減少している。 k 値に関して 6.58 nm 周辺を境に傾きが急激に変化していることから、成膜した B 膜の吸収端は 6.58 nm 付近に存在していると推定される。また 6.60~6.80 nm において実測値は理論値に近い傾向を示した。その一方で吸収端近傍での挙動は実測値と理論値では大きく異なっており、実測値の方が理論値と比べて緩やかに変化している。Fig. 3 に波長 6.65 nm における全サンプルの光学定数 n 、 k の分布を示す。Ar ガス圧が高く、T-S 間距離が小さいほど消衰係数 k は小さい値を示した。一方で屈折率 n に関しては Ar ガス圧と T-S 間距離の値と相関が見られなかった。今回成膜した B 膜はいずれも理論値と大きく異なる光学定数値を示しており、その要因としては B 膜に窒素や酸素といった不純物が混入し、B の結合が変化することで生じる共鳴吸収が考えられる。

Fig. 1 屈折率 n の波長依存性Fig. 2 消衰係数 k の波長依存性Fig. 3 波長 6.65 nm における光学定数 n 、 k の分布

Beyond EUV 露光向け Mo 系多層膜のシミュレーション

Mo-based multilayer simulation for beyond EUV lithography

兵庫県立大学¹, [○]早勢 直紀¹, 山川 進二¹, 原田 哲男¹

Univ. Hyogo¹, [○]N. Hayase¹, S. Yamakawa¹, T. Harada¹

E-mail: hayase@lasti.u-hyogo.ac.jp

背景: 半導体デバイスのさらなる微細化に対応する次世代技術として、約 6.7 nm の光波長を用いた露光技術である Beyond EUV (BEUV)の実現が期待されている。BEUV フォトマスクとステッパの開発に向けて、要素技術である BEUV 多層膜ミラーの設計は喫緊の課題である。BEUV 多層膜の反射率、光散乱、化学的耐久性を考慮し、最適な材料組み合わせと成膜条件の探索が求められている。

結果: 図 1-(a)に波長 6.7 nm における多層膜候補材料の光学定数の計算値を示す[1]。本報告では、Mo 化合物を用いた多層膜の光学特性を計算より示し、BEUV 反射率および光散乱強度の最適化に向けた成膜条件を推定する。表面成長条件から薄膜粗さを求めるため確率微分方程式である Karder-Parisi-Zhang (KPZ)方程式を導入したところ、図 1-(b)に示すように成膜レートの上昇に伴い粗さが大きくなることが予測された[2]。また、多層膜の結晶性に関して自由エネルギーとして記述することで物理的気相成長法(PVD)の成膜ガス条件が粗さに影響する要因を示す。本シミュレーション結果および EUV 露光向け Mo/Si 多層膜の先行研究より、耐久性および想定される BEUV フォトマスクの設計についても述べる。

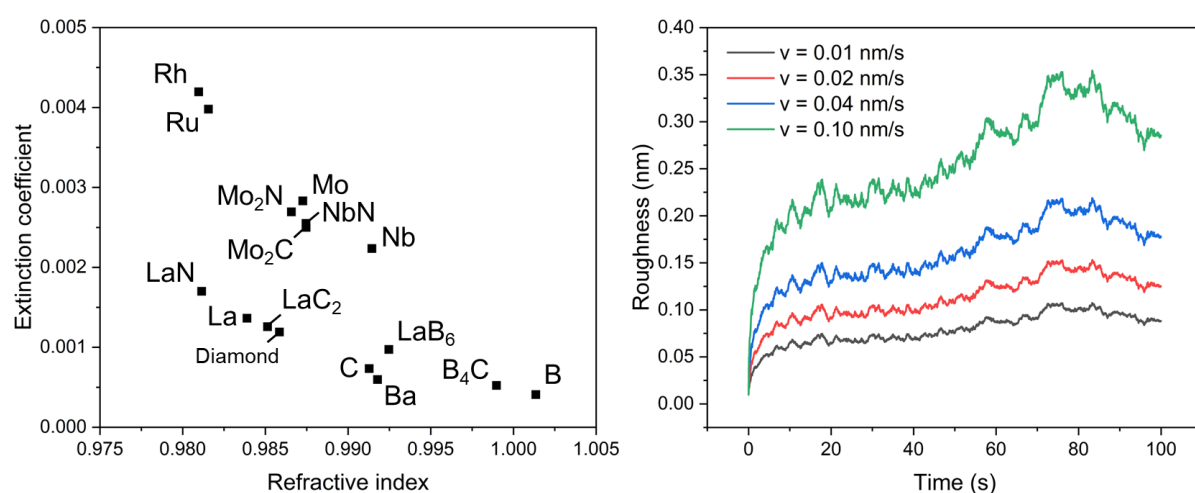


Fig 1 | (a) Simulated optical constants at 6.7 nm wavelength, (b) Relationship between surface roughness and sputtering rate by the KPZ equation

Reference: [1] N. Hayase, T. Harada, Proc. SPIE Vol. 13177 (2024). [2] N. Hayase, T. Harada, Photomask Japan (2025).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): プラズマ触媒反応が拓く革新的物質変換技術

[8p-S103-1~10] プラズマ触媒反応が拓く革新的物質変換技術

[8p-S103-1]

趣旨説明

○長澤 寛規¹ (1.広大院先進理工)

[8p-S103-2]

プラズマ触媒反応の概要とそのメカニズム

○金 賢夏¹ (1.産総研)

[8p-S103-3]

その場計測に基づくプラズマ触媒反応の基礎学理解明

○高草木 達¹、魯 邦¹ (1.北大触媒研)

[8p-S103-4]

通電加熱式の構造体触媒反応システムが拓くCO₂の革新変換○福原 長寿¹、赤間 弘¹、渡部 綾¹ (1.静岡大工)

[8p-S103-5]

電場触媒反応を用いた低温触媒プロセスの開拓

○比護 拓馬¹ (1.早大理工総研)

[8p-S103-6]

プラズマ支援触媒反応を用いたアンモニア合成：窒素原子と振動励起状態窒素分子の比較を中心に

○佐々木 浩一¹ (1.北大工)

[8p-S103-7]

プラズマ触媒によるCO₂転換反応の促進○金 大永¹ (1.科学大工)

[8p-S103-8]

プラズマ触媒作用を用いた化学反応における吸着材ゼオライトの有効な活用法

○都甲 将¹、奥村 賢直²、鎌滝 晋礼²、竹中 弘祐¹、白谷 正治²、古閑 一憲²、節原 裕一¹ (1.阪大接合研、2.九大シス情)

[8p-S103-9]

パネルディスカッション

○長澤 寛規¹、福原 長寿²、金 賢夏⁵、高草木 達³、比護 拓馬⁷、佐々木 浩一³、金 大永⁶、都甲 将⁴ (1.広大、2.静大、3.北大、4.阪大、5.産総研、6.科学大、7.早大)

[8p-S103-10]

クロージング

○新田 魁洲¹ (1.産総研)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：プラズマ触媒反応が拓く革新的物質変換技術

[8p-S103-1~10] プラズマ触媒反応が拓く革新的物質変換技術

[8p-S103-1] 趣旨説明

○長澤 寛規¹ (1.広大院先進理工)

キーワード：プラズマ触媒反応、化学変換

本シンポジウムの趣旨説明

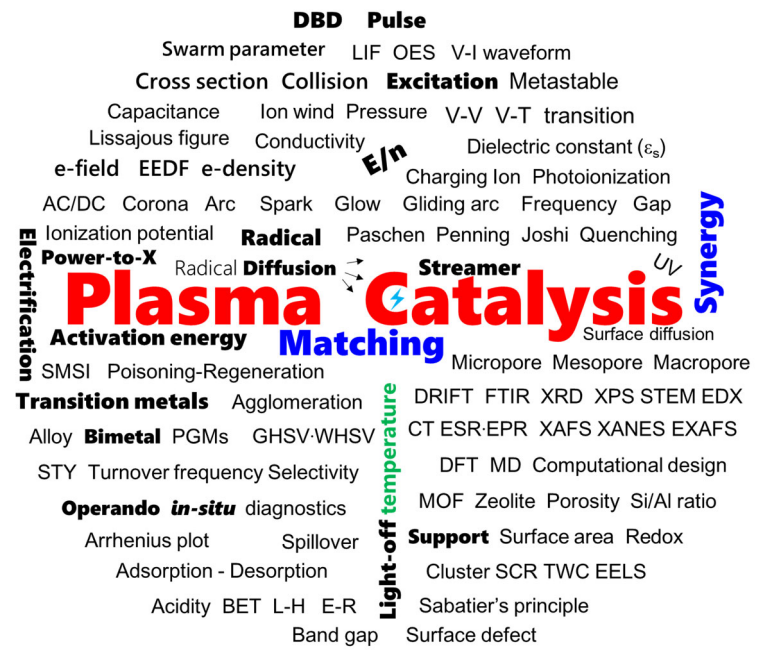
📌 プラズマ触媒反応の概要とそのメカニズム
Overview of Plasma Catalysis and Its Working Mechanism

産総研¹, °金 賢夏¹

AIST.¹, °Hyun-Ha KIM¹

E-mail: hyun-ha.kim@aist.go.jp

カーボンニュートラルの実現に向けて再生可能エネルギーの導入拡大が急速に進められている中、出力が変動する再生可能エネルギーを効率よく利用できる手法も重要性が増している。その中で電気エネルギーを化学物質として変換する Power-to-X (X=水素、アンモニア、ギ酸、メタン、窒素酸化物など)が注目されている。電気を用いる化学反応は（以下電化技術）従来の高温高压プロセスとは一線を画す技術でありながら再生可能エネルギーとの親和性も高く出力変動に調和したオンサイト・オンデマンド化学変換技術として期待されている。プラズマ触媒は電化の代表的な技術として欧米で注目されており、アンモニア合成、CO₂の変換技術（メタネーション、アルコール）などの応用研究が急成長している分野でもある。



両者の複合によるシナジーを引き出すためには、プラズマと触媒それぞれに対する理解・診断と最適化に向けたマッチングが必要となる。特に、プラズマが有するユニークな非平衡性と従来の触媒のベースとなる熱平衡論の融合であるプラズマ触媒プロセスの解析には注意点も存在する。本講演では、プラズマ触媒における基礎として同時に従来の熱駆動触媒との異なる点、動作原理、総合作用のポイント、触媒表面を進展するプラズマ計測と

診断などに焦点を合わせて解説する。

参考文献

[1] 金賢夏、プラズマ・核融合学会誌, Vol.99 (3), pp.83-88 (2023)
[2] HH Kim et al, Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol. 15, e01004 (2021)
[3] A. Abdelaziz et al., Current Opinion Green Sus. Chem., Vol. 50, 100977 (2024)
[4] A. Abdelaziz et al., ACS Sustainable Eng. Chem., 11 (10), 4106–4118 (2023)
[5] A. Abdelaziz et al., Plasma Chem. Plasma Proc., Vol.44, pp. 1493–1512 (2024)

その場計測に基づくプラズマ触媒反応の基礎学理解明

Unveiling plasma catalysis based on *in situ* measurements of the reaction processes

北大触媒研, °高草木 達, 魯 邦

Hokkaido Univ., Institute for Catalysis, °Satoru Takakusagi, Bang Lu

E-mail: takakusa@cat.hokudai.ac.jp

触媒を用いた窒素 (N_2) からのアンモニア合成や二酸化炭素 (CO_2) からの有用分子 (一酸化炭素、メタン、アルコール等) 合成は、化学的に安定な分子の活性化を要するため、通常、高温高压条件が必要である。一方、こうした高難度触媒反応に対し、プラズマによって反応分子を活性化することで、分子変換を低温低圧の穏やかな条件で進行できる例が数多く見出されている。しかし、プラズマ中で発生する電子や分子活性種 (振動励起種、電子励起種、ラジカル、解離種、正・負イオン種など) と触媒表面の相互作用、中間体吸着種の挙動などについては不明な点が多く、プラズマによる反応促進機構が十分解明されているとは言い難い。その理由として、プラズマ中での触媒のキャラクタリゼーション (その場計測) が不足していることが挙げられる。また、構造不均一性の大きい実触媒 (粉体触媒) を用いた研究では、プラズマによって反応ガスの吸着速度がどの程度増加するかなど定量的議論が難しく、表面構造の規定された単結晶モデル触媒表面を用いた研究が不可欠であるが、現状そうした研究は皆無である。我々は実触媒や単結晶モデル触媒表面の放射光利用 X 線吸収微細構造 (XAFS) をプラズマ中でも計測できるよう、新たなセルや装置の開発を行った (図 1)。また、プラズマ照射前後の触媒試料を大気に晒さずに真空搬送して X 線光電子分光法 (XPS) や昇温脱離法 (TPD) を測定できる装置の整備も行った。講演ではこうした装置の概要や適用例について紹介する。

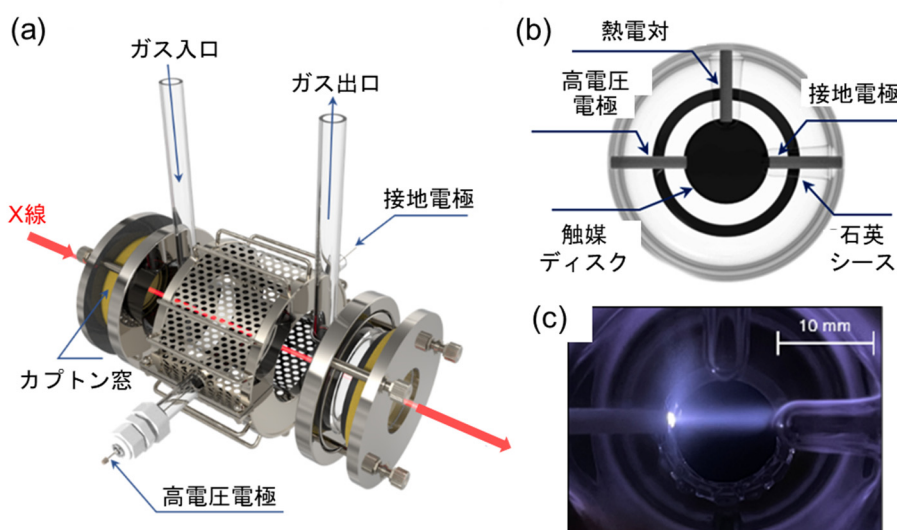


図 1 (a) プラズマ触媒反应用 XAFS セル(石英製). 触媒試料はペレット化し、透過法により XAFS 測定を行う. (b)及び(c)は、セル中央付近断面の模式図と写真. (c)の写真はドライポンプで排気しながら CO_2 (10 mL/min) 、 H_2 (30 mL/min) , Ar (150 mL/min)の混合ガスをセル内に流通し(ガス圧力は 10 kPa)、DBD 条件下で撮影. 図(c)において、左側の高電圧電極は先端金属部位が露出しており、右側の接地電極は石英シースで被覆されている. 試料は 900°C程度まで昇温可能.

通電加熱式の構造体触媒反応システムが拓く CO₂ の革新変換

Innovative CO₂ Transformation by Electrical Heating of Structured Catalyst System

静岡大工 °福原 長寿, 赤間 弘, 渡部 綾

Shizuoka Univ., °Choji Fukuhara, Ryo Watanabe

E-mail: fukuhara.choji@shizuoka.ac.jp

1. 緒言

CO₂ のメタン化反応 ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$, $\Delta H_{298\text{K}}^0 = -165 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) は, CO₂ を CH₄ 資源に変換する CCU 技術の一つである。我々は, 構造体触媒を用いた酸素共存のメタン化反応が水素燃焼による反応場の内部加熱で反応が強力に加速される現象を発見した¹⁾ (Auto-methanation®, AM)。一方, 構造体触媒はその支持体が金属製であることから, 基材に直接通電して発生するジュール熱を内部加熱源として利用することも可能である。

本講演では, スパイラル形構造体触媒を直接通電した CO₂ のメタン化が, 通常の加熱方式よりもかなり効率的な変換特性を示すことを紹介する。

2. 実験方法

スパイラル形 Ru/CeO₂ 触媒は wash-coat 法で調製した。触媒学会の JRC-CEO-2(参照触媒委員会提供)を担体とし, Ru 成分を含浸担持し, 焼成して Ru/CeO₂ 粉末(Ru 担持量は 10 wt%)を得た。この粉末を蒸留水と混合してスラリー化し, ここに幅 11 mm×長さ 180 mm の多孔質なスパイラル基材(720° にひねり加工)を浸漬・乾燥してスパイラル形触媒(触媒塗布量 1.0 g/piece)を得た。

触媒特性は流通式反応器で評価した。両端に銅線を結着したスパイラル形触媒を設置し, 200℃で 60 min の水素還元後, 室温まで温度を下げた。その後, N₂ 雰囲気中通電して触媒温度を昇温させ, 反応ガスを CO₂/H₂/N₂ = 10/40/50 vol% (総流量: 1.0 L/min) の条件で供給した。

3. 結果と考察

Fig. 1 は, スパイラル形 Ru/CeO₂ 触媒に電力(10 W)投入後 10 秒毎の温度変化を赤外線熱画像で調べた結果である(窒素: 100 ml/min)。時間の経過でスパイラル形触媒は徐々に加熱され, 約 100 秒で 250℃に達した。また, 基材のひねり状態に沿った温度分布が得られ, 基材の良好な通電性が判断できる。Fig. 2 は, スパイラル形触媒の各供給電力における平均温度である。供給電力を小さくすると触媒温度は低下するが, 5W でも 200℃以上の反応場温度が確保されていることがわかる。

Fig. 3 は, 通電加熱のスパイラル形触媒でメタン化反応を実施した際の, 各投入電力の CO₂ 転化率と CH₄ 選択率である。電力 10W で触媒層の平均温度は 297℃を示し, CO₂ 転化率は 80%であった。5W では, 触媒層平均温度は 210℃となり 10W 時と比較して約 90℃も低下したが, CO₂ 転化率は 75%と高い値を示した。この場合, CO₂ の電気分解よりも少ない消費電力で高い CO₂ 変換力が得られた。基材の良好な通電による均一な温度とスパイラル形状で発生する旋回流れが, 触媒層下流側での十分な加熱をもたらし, このような省電力条件下でも高いメタン化特性を発揮させている。

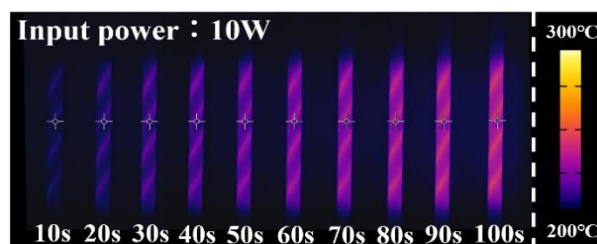


Fig. 1 Temperature change of Ru/CeO₂ catalyst under electrical heating measured by IR thermal camera.

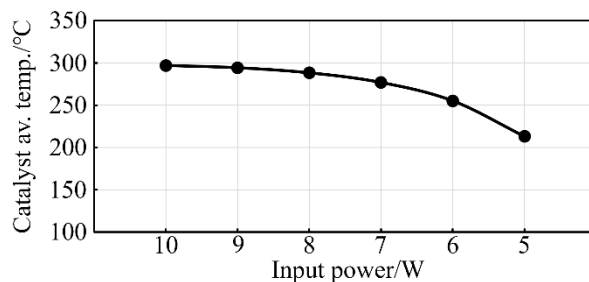


Fig. 2 Average temperature of catalyst by input power.

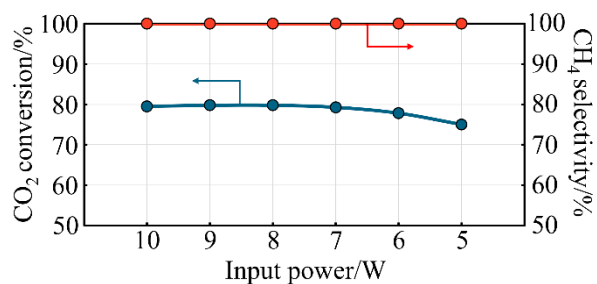


Fig. 3 Effect of input power on CO₂ conversion and CH₄ selectivity over spiral-type Ru/CeO₂ catalyst.

- 1) C. Fukuhara, R. Watanabe *et al.*, *Chemistry Letters*, 48(3) (2019) 196-199.

電場触媒反応を用いた低温触媒プロセスの開拓

Development of low-temperature catalytic processes by electric field-Assisted catalysis

早大理工総研¹, 比護 拓馬

Waseda Univ., ^oTakuma Higo,

E-mail: t-higo@aoni.waseda.jp

我々のグループは、半導体性を有する触媒材料に微弱な電場を印加することで触媒活性が劇的に向上する現象を見出し、これを「電場触媒反応」と名付けて研究を展開してきた。図1に示す固定床流通式反応器をベースとした装置を用い、触媒層に電流密度約 10^3 A m^{-2} の直流電流を通じて 10^5 V m^{-1} オーダーの電界を印加している。この電場触媒反応を炭化水素の水蒸気改質[1][2]、アンモニア合成[3]、メタンの酸化カップリング[4]などの各種反応に適用した結果、従来の熱駆動型触媒に比べて著しく低温で反応が進行することを確認した。*In-situ* 赤外分光、ラマン分光、XAFSなどの各種分光分析手法およびDFT計算を用いたメカニズム解析により、電場印加下では、触媒表面におけるプロトン伝導(表面プロトニクス)[5]や活性な表面酸素種の形成[6]といった現象が誘起され、反応促進に寄与していることを明らかにした。本講演では、これらの成果を基に電場触媒反応プロセスの概要を紹介するとともに、二酸化炭素の還元[7]、メチルシクロヘキサンの脱水素[8]、窒素酸化物の還元[9]などへの応用に関する最近の研究成果についても報告する。

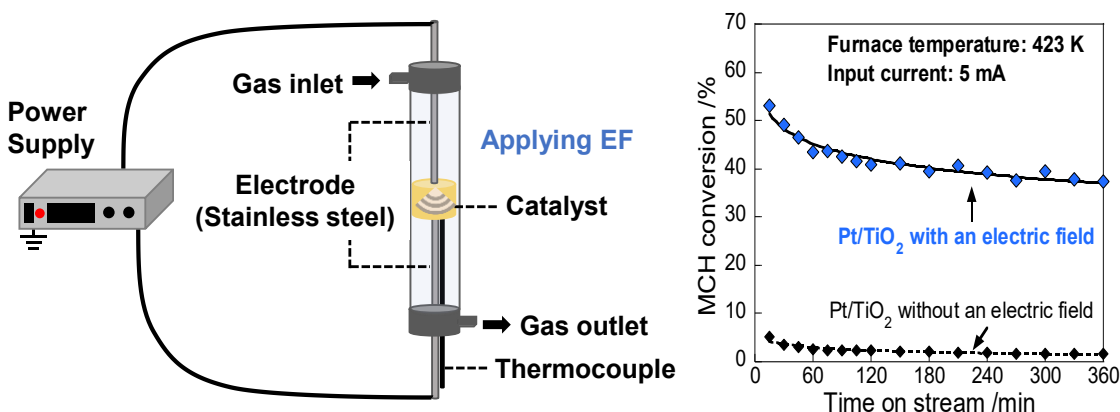


Fig.1 Schematic diagram of the experiment setup for the electric field assisted catalyst and dehydrogenation activity of Methylcyclohexane over Pt/TiO₂ under an electric field.

- [1] Y. Sekine, M. Haraguchi, M. Tomioka *et al.*, *J. Phys. Chem. A*, 114 (11), 3824-3833, 2010.
- [2] R. Manabe, S. Okada, R. Inagaki *et al.*, *Scientific Reports*, 6, 38007, 2016.
- [3] R. Manabe, H. Nakatsubo, A. Gondo, K. Murakami *et al.*, *Chem. Sci.*, 8, 5434 - 5439, 2017.
- [4] K. Sugiura, S. Ogo, K. Iwasaki, T. Yabe, Y. Sekine, *Scientific Reports*, 6, 25154, 2016.
- [5] R. Manabe, S. Stub, T. Norby, Y. Sekine, *Solid State Commun.*, 270, 45-49, 2018.
- [6] S. Ogo, H. Nakatsubo, K. Iwasaki *et al.*, *J. Phys. Chem. C*, 122 (4), 2089-2096, 2018.
- [7] K. Yamada, S. Ogo, R. Yamano, T. Higo, Y. Sekine, *Chemistry Letters*, 49(3), 303-306, 2020.
- [8] M. Kosaka, T. Higo, S. Ogo *et al.*, *Int. J. Hydrogen Energy*, 45(1), 738-743, 2020.
- [9] A. Shigemoto, T. Higo, Y. Narita *et al.*, *Catal. Sci. & Technol.*, 12, 4450-4455, 2022.

プラズマ支援触媒反応を用いたアンモニア合成： 窒素原子と振動励起状態窒素分子の比較を中心に

Plasma-assisted catalytic synthesis of ammonia: Comparison between atomic nitrogen and molecular nitrogen at vibrational excited states

北大工 ○佐々木 浩一

Hokkaido Univ.¹, ○Koichi Sasaki

E-mail: sasaki@qc.eng.hokudai.ac.jp

アンモニアは、ハーバー・ボッシュ法によって工業的に生産され、食料の安定供給を通じて世界人口の増加に貢献してきた。一方、現在においては、次世代のエネルギーキャリアとしてのアンモニアに期待が集まっている。再生可能電源を多数含む小規模分散型の電力網を考えたとき、プラント規模の設備とエネルギーを必要とするハーバーボッシュ法の欠点を補うアンモニア合成技術の必要性が高まり、再生可能電源の余剰電力を有用な化学物質に転換する方法 (Power-to-Chemical) として、プラズマを用いたアンモニアの合成技術に関心が持たれるようになってきている。本講演では、プラズマ支援触媒反応を用いたアンモニア合成に関する筆者らの研究、特に、アンモニア合成反応において重要な活性窒素種に関する研究を紹介させていただく。

窒素と水素からアンモニアを生成する反応は発熱反応であるが、活性化エネルギーが非常に大きい点に困難がある。大きな活性化エネルギーは窒素分子の3重結合を切断するためのエネルギーが大きいことに起因するとされており、ハーバー・ボッシュ法を含む触媒反応では、窒素分子を触媒表面に解離吸着させるステップが最も難しいステップであると考えられている。このような話を聞くと、プラズマ研究者は「しめた」と思うのではないだろうか。安定な分子(窒素分子)をプラズマで解離してラジカル(窒素原子)化し、表面に吸着させて何らかの機能を発現させることがプラズマプロセッシングの王道であるためである。ところが、筆者がこの分野に参入しようと考えていた頃、触媒反応における振動励起状態分子の寄与が取り沙汰されていた。プラズマは振動励起状態分子の生成も得意とするが、従来はそれを活用する場面がなかった。基底状態分子と比較して振動励起状態分子が高い解離吸着確率を持つことを示すデータをいろいろ見せていただき、「振動励起状態分子を活用できれば反応性プラズマ研究の新しい局面になるかも」と思ったが、「ラジカルには勝てないだろう」というのが率直な印象であった。

その後、このテーマに本格的に取り組むことになり、数年を経て得られた成果が本講演の内容となる。結論は、1) 低ガス圧プラズマを用いる場合には窒素原子が主な吸着活性種になる。実験に用いたプラズマでは窒素分子の振動温度が2000 K未満で、振動励起状態窒素分子の密度は窒素原子の密度より3桁程度しか高くなく、この場合は窒素原子が生成レートを支配する[1]。2) 大気圧プラズマの場合には振動励起状態の解離吸着が勝つ場合があるが、それは窒素分子の振動温度が高い(≥ 1800 K) 場合に限られる。この場合、振動励起状態窒素分子の密度は窒素原子の密度より4桁高い[2]。3) 低ガス圧プラズマを用いる場合でも、窒素分子の振動温度が極端に高いと(4500 K)、振動励起状態窒素分子が主役になる兆候がみられる。このことは、振動量子数の大きな窒素分子が低振動励起状態より非常に大きな解離吸着確率を持つことを示唆するが、実験的エビデンスはやや貧弱であり、今後の検証が必要である[3]。

[1] S. Uebayashi and K. Sasaki, Jpn. J. Appl. Phys. **64**, 036001 (2025).

[2] A. Miyake, N. Shira, and K. Sasaki, J. Appl. Phys. **135**, 213301 (2024).

[3] M. Yamazaki and K. Sasaki, submitted.

プラズマ触媒による CO₂ 転換反応の促進

Enhancement of CO₂ conversion by plasma catalysis

科学大工 °金 大永

Science Tokyo, °Dae-Yeong Kim

E-mail: kim.d.as@m.titech.ac.jp

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーを活用した低炭素型の化学プロセスが重要視されており¹、電気化学、光化学に次ぐ非平衡プラズマと固体触媒を組み合わせた「プラズマ触媒」は新たなプロセス電化技術として注目を集めている²。非平衡プラズマは電力で生成され、印加された電気エネルギーは主に電子を加熱する。したがって、高エネルギー電子とガス分子の間に熱的非平衡が達成できる。このようなエネルギー電子の非弾性衝突によって CH₄、CO₂ および N₂ などの強い化学結合を含むガス分子の活性化を誘導し、それらが触媒表面で反応することで、熱力学および/また速度論的制限を打開して低温および低圧のような穏やかな条件で反応を大きく改善できる。非平衡プラズマを利用することで、再生可能エネルギーを活用した電子駆動化学という新たな学術分野を開拓することが可能となり、地球温暖化ガスを有効に転換できる新技術の社会実装を加速できる。

本講演では、CO₂ メタネーションと逆水性ガスシフト反応を対象に、プラズマ触媒 CO₂ 転換反応に関する最新研究成果を基に考察を提示する。特に、プラズマ反応場で生成される振動励起 CO₂ および原子状水素が触媒表面反応に及ぼす影響と、これによる反応経路の変化に注目する。このような反応機構を解明するためのアプローチとして、速度論的解析、活性化パラメーター解析、in situ 分光法を用いた触媒表面反応診断、DFT 計算などを活用した最近の成果も併せて紹介する。また、現在プラズマ触媒が抱えている課題とその解決のための展望を提示する。

謝辞

本研究は、科学技術振興機 (JST) CREST (JPMJCR19R3) および日本学術振興会 (JSPS) 科研費 (24H00199, 24K17036) の支援を受けて行われた。

参考文献

1. M Zeng, W Fang, Y Che, X Zhang, Y Hu, BY Xia: Reaction Environment Regulation for Electrocatalytic CO₂ Reduction in Acids, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 136, 26 (e202404574), 2024.
2. T Nozaki, DY Kim, X Chen: Plasma-enabled electrification of chemical processes toward decarbonization society, *Jpn J Appl Phys*, 63, 030101(12pp), 2024.

プラズマ触媒作用を用いた化学反応における 吸着材ゼオライトの有効な活用法

Effective use of zeolites as adsorbents in chemical reactions with plasma catalysis

阪大接合研¹, 九大シス情², °都甲 将¹, 奥村 賢直²,

鎌滝 晋礼², 竹中 弘祐¹, 古閑 一憲², 白谷 正治², 節原 裕一¹

The University of Osaka¹, Kyusyu Univ.², °Susumu Toko¹, Takamasa Okumura²,

Kunihiro Kamataki², Kosuke Takenaka¹, Kazunori Koga², Masaharu Shiratani², Yuichi Setsuhara¹

E-mail: tokou.susumu.jwri@osaka-u.ac.jp

持続可能な社会を実現するために、CO₂ のメタン化技術は重要な技術の一つと目されている。一般的には、熱触媒作用を用いた反応促進が用いられるが、本反応が発熱反応であるため、過熱による触媒の失活や熱力学平衡的な効率限界が大きな課題となっている[1]。より低温での反応促進を実現するため、近年、プラズマと触媒を組み合わせたプラズマ触媒作用が注目されている。多くの研究で、プラズマ/触媒のさまざまな相互作用によってより低温での反応促進に成功したことが報告されている[2, 3]。ここでは、低圧プラズマ/ゼオライトを併用したシステムにおいて、効果的なゼオライトの種類や使用法について検討を行った結果について報告する。

プラズマは3巻きのコイルアンテナにより外形5.0 cm, 内径4.2 cmのセラミック管内で発生させた。管の上部からH₂とCO₂を導入した。CO₂を1 sccm, H₂を6 sccmで一定流量流した。圧力を1~50 mTorrの範囲で変化させた。触媒として各種モレキュラーシーブスおよび合成ゼオライトHSシリーズ(Fuji Film)を放電管下部に設置し、0~15 cmの間で移動させた。ガス組成の分析には四重極型質量分析計を用いた。ここではCH₄分圧として質量数15の信号を、CO₂分圧として44の信号を参照した。

結果として、ゼオライトの使用によりCH₄収率が大幅に向上した。ゼオライトはしばしばその高い吸着性能から化学反応場としても用いられるが、CO₂やCOを吸着しない細孔径3Åのモレキュラーシーブ使用時にも大きくCH₄収率が増加したことから、気相中の酸化源除去もメタネーション反応促進に貢献していることが明らかになった。また、今回使用した各種ゼオライトは細孔径、Si/Al比、金属カチオン等が異なり、これらの要素がメタネーション効率を変化させることについても示唆された。酸化源の吸着による逆反応の促進とCO₂やCOの吸着による順方向反応の促進のバランスが、より効率的な反応促進の鍵であると考えられる。詳細については講演で述べる。

[1] W. Wang, et al., ACS catalysis **15** (2025) 10868.

[2] R. Debek, et al., Renewable and Sustainable Energy Reviews **116** (2019) 109427.

[3] S. Toko, et al., Results in Surfaces and Interfaces **14** (2024) 100204.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：プラズマ触媒反応が拓く革新的物質変換技術

[8p-S103-1~10] プラズマ触媒反応が拓く革新的物質変換技術

[8p-S103-9] パネルディスカッション

○長澤 寛規¹、福原 長寿²、金 賢夏⁵、高草木 達³、比護 拓馬⁷、佐々木 浩一³、金 大永⁶、都甲 将⁴
(1.広大、2.静大、3.北大、4.阪大、5.産総研、6.科学大、7.早大)

キーワード：プラズマ触媒反応、化学変換

本シンポジウム講師によるパネルディスカッション

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 原子層プロセス (ALP: Atomic Layer Process) の解析技術と応用技術 (2)

[7a-S103-1~7] 原子層プロセス (ALP: Atomic Layer Process) の解析技術と応用技術 (2)

Sponsor



[7a-S103-1]

オープニング

○霜垣 幸浩¹ (1.東大院工)

[7a-S103-2]

20 Years of the Korea ALD Workshop: History and Development

○Hyeongtag Jeon¹ (1.Hanyang University)

[7a-S103-3]

機械学習と数理モデルを用いた半導体成膜プロセスの開発

○京兼 広和¹ (1.東京エレクトロン テクノロジーソリューションズ株式会社)

[7a-S103-4]

Co-ALDにおけるCCTBA吸着立体障害効果の検討

○玉置 直樹¹、山口 潤¹、佐藤 登¹、筑根 敦弘¹、霜垣 幸浩¹ (1.東大院工)

[7a-S103-5]

Investigation of Residual Carbon Concentration in Al₂O₃-ALD

Using Kinetic Monte Carlo Simulation

○(M2)Yichen ZOU¹, Yuxuan Wu¹, Jun Yamaguchi¹, Noboru Sato¹, Atsuhiro Tsukune¹, Yukihiro Shimogaki¹ (1.The Univ. Tokyo)

[7a-S103-6]

SiON膜における酸化源供給後の表面状態に関する検討

○嶋田 章吾¹、袴塚 充寛¹、佐野 敦¹、服部 真也¹、藪 聡志¹、柄澤 元¹ (1.KOKUSAI ELECTRIC)

[7a-S103-7]

アミノ系Siプリカーサのリガンドの相違によるSiO₂成長への影響

○(D)土射津 佑起¹、大塚 照久²、山崎 将嗣²、大堀 大介¹、遠藤 和彦¹ (1.東北大流体研、2.産総研)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：原子層プロセス（ALP：Atomic Layer Process）の解析技術と応用技術（2）

[7a-S103-1~7] 原子層プロセス（ALP：Atomic Layer Process）の解析技術と応用技術（2）

[7a-S103-1] オープニング

○霜垣 幸浩¹ (1.東大院工)

キーワード：原子層成長、原子層エッチング、原子層プロセス

シンポジウム「原子層プロセス（ALP：Atomic Layer Process）の解析技術と応用技術」の開催趣旨や国内外でのALP関連学会・ワークショップの開催状況などを紹介する。

20 Years of the Korea ALD Workshop: History and Development

Hanyang University, Hyeongtag Jeon

E-mail: hjeon@hanyang.ac.kr

The Korea ALD Workshop has been the main venue for sharing the latest developments and technical knowledge in atomic layer deposition (ALD) technology in Korea for the past 20 years. Since its start in 2004—inspired by the AVS ALD Conference—the workshop focused on three key areas: device applications, equipment development, and precursor research. Long-term support from a domestic company has played a very important role in the continuity and success of this Korea ALD workshop.

Throughout its history, the workshop has featured active participation from leading semiconductor companies such as Samsung Electronics and SK hynix, major domestic and global equipment manufacturers including Jusung Engineering, Wonik IPS, Lam Research, Applied Materials, and ASM, as well as precursor companies like UP Chem, DNF and Rasirc. In addition, professors and researchers from universities and national research institutes have played a important role by presenting their original and pioneering research and practical innovations in ALD. Their work—covering fundamental science, novel process development, and innovative applications—have been helpful in shaping the direction of ALD technology in Korea, and their contributions are widely recognized as being just as important as those from industry leaders.

The presentation of the latest findings by these academic and research leaders has made the Korea ALD Workshop a premier forum for top research exchange and collaboration. Their involvement has not only advanced scientific understanding but also promoted strong partnerships between academia, industry, and government research organizations, making it a key platform for ALD technology progress in Korea.

Despite a three-year break during the COVID-19 pandemic (2020–2022), the Korea ALD Workshop has successfully held 17 meetings over the past 20 years as of 2024. The workshop has played a critical role in introducing the latest trends and encouraging collaboration among universities, research institutes, and industry, greatly advancing ALD technology in Korea. As it marks its 20th anniversary, the workshop continues to strengthen Korea's leadership in the global ALD community.

In this presentation, I will summarize the key topics and development presented at the Korea ALD workshop over the past 20 years and highlight the main research trends, notable contributions from both industry and academia, and the overall impact of the workshop on advancing ALD technology in Korea.

機械学習と数理モデルを用いた半導体成膜プロセスの開発

Development of Semiconductor Deposition Processes Using Machine Learning and Mathematical Models

東京エレクトロン テクノロジーソリューションズ株式会社 °京兼 広和

Tokyo electron technology solutions Ltd, °Hirokazu Kyokane

E-mail: hirokazu.kyokane@tel.com

近年、半導体成膜装置にはさらなる微細化と生産性の向上が求められている。それに伴って複雑なプロセス条件最適化が必要となり、経験則に基づくアプローチでは限界がきている。そのため、機械学習などのデータ駆動型アプローチによる最適化が模索されているが、帰納的手法であるため現象の解釈が難しい、あるいは妥当な数式が得られないなどの課題がある。本報告では、機械学習と数理モデルを用いたアプローチを採用し、理論に基づいて成膜プロセスの解釈性のあるモデル化と最適化を行った事例を紹介する。

(1) 枚葉成膜装置のシャワープレートのガス穴分布最適化

シャワープレートのガス穴分布を最適化することにより高均一な成膜を実現できるが、変数である穴数が多く数式化が困難であった。シャワープレートのガス穴から噴出したガスが拡散しウェーハ表面に到達したときの濃度分布がガウス分布になると仮定した。ウェーハ表面でのガス濃度分布に対応した膜厚分布になると仮定して、ガス穴の分布から膜厚分布を予測する数式を作成した。この数式によってガス穴分布を最適化することにより、少数のシャワープレート試作で、今までより膜厚均一性の高いガス穴分布を決定することに成功した。

(2) 基板上成膜初期の核成長過程のモデル化

基板上成膜初期の核成長を理解することはその膜の特性を理解するために重要であるが、詳細に解析するためには、様々な評価と分析が必要となる。そこで初期段階での粒成長をシンプルな数理モデルで表現することで、時間に対する成膜量の挙動から核成長時の特徴量を算出し、定量的指標を得ることに成功した。その結果、特別な評価や分析を行うことなく膜の連続性や核密度、表面粗さなど、初期核成長に関わる指標を用いてデータ解析が可能になった。

(3) トレンチ構造埋め込み成膜のモデリングによる可視化

デバイスの微細化に伴い高アスペクト比のトレンチへの高均一な成膜や埋め込みが求められている。トレンチ構造への成膜やエッチング後の形状を予測するため、適した境界条件や近似を用いて1次元反応拡散方程式から形状を予測する数式を得た。この数式を用いたアプローチにより成膜、エッチング後の形状を可視化できるため、カバレッジ向上のための条件や埋め込みのための成膜-エッチング-成膜プロセスの条件の最適化を少ない実験数で実現できる基盤を構築した。

これらの事例のように数理モデルを用いることで解釈性のある数式化を実現し、効率的な最適化を実現した。今後、複雑化する成膜プロセスをさらに効率的に開発するため、機械学習と数理モデルを活用した解析基盤を構築していく。

Co-ALD における CCTBA 吸着立体障害効果の検討

Investigation of the steric hindrance effect of CCTBA adsorption in Co-ALD

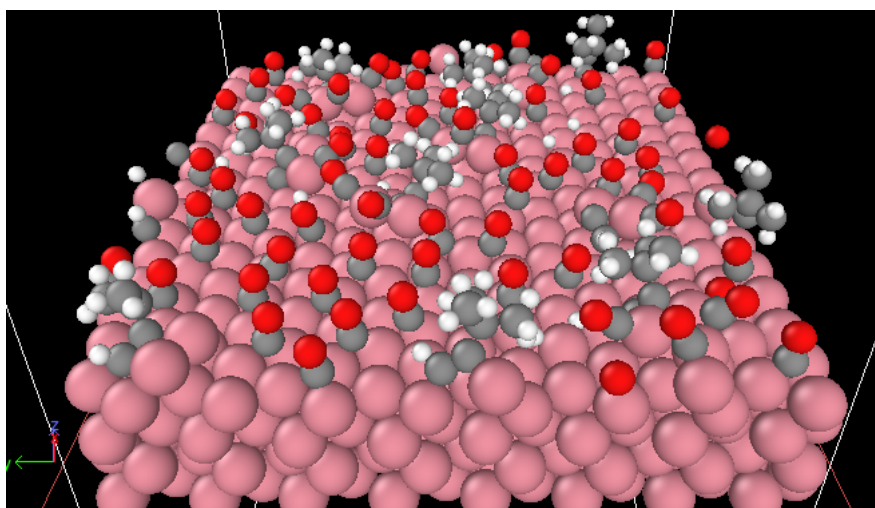
東大院工 [○]玉置 直樹, (P)山口 潤, (P)佐藤 登, 筑根 敦弘, 霜垣 幸浩

The Univ. Tokyo, [○]Naoki Tamaoki, Jun Yamaguchi, Noboru Sato, Atsuhiko Tsukune,

and Yukihiro Shimogaki

E-mail: tamaoki@dpe.mm.t.u-tokyo.ac.jp

金属 Co の ALD (Atomic Layer Deposition) は、Cu 配線を延命する Cap 層形成の手法として期待される他、磁気センサー等への応用も検討されている。原料ガスの飽和吸着と還元ガスによる改質を交互に繰り返すプロセスサイクルにより、原子層レベルの膜厚制御と複雑な三次元構造への高い段差被覆性を実現できる。サイクルあたりの製膜量 GPC (Growth-per-cycle) は原料分子の飽和吸着密度に比例するが、実測の GPC は、原料分子構造の立体障害効果を考慮した理想的な最密充填被覆率を下回ることが多い。CCTBA (Cobalt Carbonyl Tertiary-Butyl Acetylene) 原料を用いた Co-ALD の膜厚計測から求めた GPC は 0.088ML であり、CCTBA 分子の吸着構造から推算した最密充填の被覆率 0.12~0.14ML より低い。これまでは、気相からひとつずつ入射した分子が吸着サイトをランダムに占有することで余分な隙間が発生する RSA (Random Sequential Adsorption)モデルを使って、この差を説明してきた^[1]。しかし、特に遷移金属表面では、原料分子が吸着時点で分解反応を起こす等、より複雑なメカニズムが働いている可能性がある。今回、機械学習ポテンシャル PFP^[2]を用いた分子動力学計算によって、DFT に準じた精度で CCTBA の吸着過程を評価した。CO の解離や表面拡散を伴う複雑な反応を考慮した GPC の計算予測について報告する。



引用文献

- [1] J. Yamaguchi et al., AVS 24th International Conference on Atomic Layer Deposition, AA1-TuM-7 (2024).
- [2] Takamoto, S. et al., Nature Communications, 13, 2991 (2022).

Investigation of Residual Carbon Concentration in Al_2O_3 -ALD Using Kinetic Monte Carlo Simulation

The Univ. Tokyo¹ ○(M1) Y. Zou, (D) Y. Wu, (P) J. Yamaguchi, (P) N. Sato, A. Tsukune, and Y. Shimogaki

E-mail: shimo@dpe.mm.t.u-tokyo.ac.jp

Atomic Layer Deposition (ALD) is widely utilized in semiconductor manufacturing due to its sequential introduction of precursor and reactant gases, based on surface saturation adsorption. This approach ensures excellent thickness uniformity and process control but suffers from a lower growth rate compared with other deposition methods. While experimental studies on ALD growth rate have attracted significant attention, computational approaches offer a cost-effective alternative. Traditional methods like Density Functional Theory (DFT) provide insights into surface reactions but are time-consuming, especially for large metalorganic precursors.

To address this, we employ Kinetic Monte Carlo (KMC), a time-resolved reaction simulation method, and MatlantisTM, a neural network potential (NNP)-based atomic simulator to investigate Trimethylaluminum (TMA) adsorption during Al_2O_3 ALD using H_2O as the co-reactant. NNP enables precise Gibbs free energy calculations, improving the accuracy of rate constants used in KMC. KMC directly simulates time-dependent kinetics in non-equilibrium processes like ALD, accounting for multiple competing events. MatlantisTM rapidly evaluates multi-TMA adsorption and reaction energies, which are fed into KMC to predict the Al_2O_3 growth rate per cycle. Both calculations are completed in minutes.

Our simulations predicted a TMA adsorption-induced mass gain of 36 ng/cm^2 in $\sim 0.3 \text{ s}$, consistent with previous DFT and Quartz Crystal Microbalance (QCM) results. Moreover, KMC simulations revealed that ALD growth proceeds via two distinct surface types, successfully reproducing the alternating A-B layer mechanism. Figure 1 shows the residual carbon concentration in Al_2O_3 at 393 K (120°C) as a function of H_2O dose time, indicating saturation at $>1 \text{ s}$. We also quantified carbon residues under various temperatures and water pulse durations, demonstrating that low temperature and short pulses significantly increase carbon incorporation.

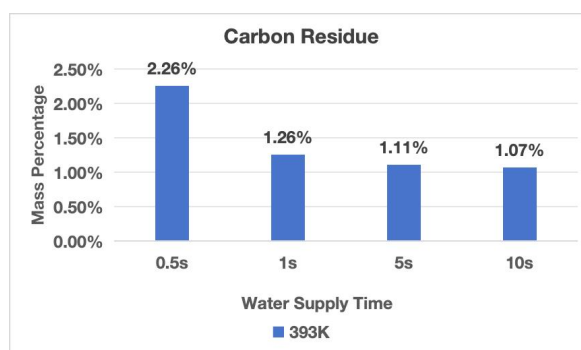


Fig.1 Percentage of residual carbon in the Al_2O_3 film calculated by KMC simulations at 393 K with varying H_2O supply times.

SiON 膜における酸化剤供給後の表面状態に関する検討

Investigation of the Surface State after Oxidant Supply in SiON Films

株式会社 KOKUSAI ELECTRIC¹,

○嶋田 章吾¹, 袴塚 充寛¹, 佐野 敦¹, 藪 聡志¹, 服部 真也¹, 柄澤 元¹

KOKUSAI ELECTRIC CORPORATION¹,

○Shogo Shimada¹, Mitsuhiro Hakamatsuka¹, Atsushi Sano¹, Satoshi Yabu¹,

Shinya Hattori¹, Hajime Karasawa¹

E-mail: shimada.shogo@kokusai-electric.com

シリコン酸窒化(SiON)膜はチャージトラップ型フラッシュメモリにおけるトンネル酸化膜として主に用いられている。近年、高層化・高密度化が進むメモリホール構造において、穴底まで均一に成膜する技術が求められている。成膜プロセス最適化のためにも、SiON 膜についての吸着確率やサイト密度、表面反応性といった反応メカニズムの理解が必要である。SiON 膜は、Si 原料、窒化剤、酸化剤をサイクリックに供給して成膜するプロセスで得られるが、酸化剤供給後の表面状態について Si 原料の吸着サイトがまだ明らかになっていない。そこで本研究では、SiON 膜の成膜プロセスにおいて酸化剤供給後の表面状態を評価することで Si 原料吸着サイトの同定を行い、さらに分子シミュレーションを活用することで反応メカニズムの考察を行った。

今回の実験では、SiON 膜作成の過程で供給する酸化剤の暴露量(Pa・s)を 0、1500、3000、6000、9000、100000 にて調整した 6 種類のサンプルを作成し、酸化剤暴露後の表面状態について表面分析の一種である Static-SIMS 分析を行った。今回は吸着サイトに関連する分子のピークとして、窒化剤由来と考えられる SiNH_2^+ と酸化剤由来と考えられる SiOH^- に着目した。 SiOH^- については酸化剤暴露によって増加せず、ピーク強度が低いため吸着サイトでないことが考えられる。 SiNH_2^+ については、Growth Per Cycle(GPC)と SiNH_2^+ の強度ピークの相関をプロットし大まかな相関関係がみられたことから、Si 原料の吸着サイトであると考えられた。本発表では、吸着サイトに酸化剤が作用する反応について分子シミュレーションを活用した検討結果を交えて、反応メカニズムの考察も報告する。

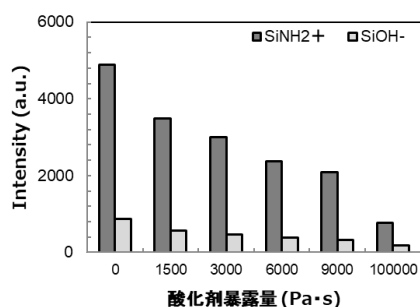


Fig. 1 Static-SIMS Profile

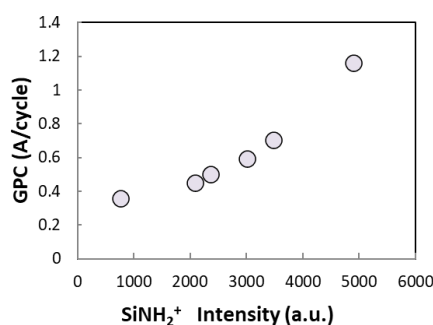


Fig. 2 GPC vs SiNH_2 Intensity plot

アミノ系 Si プリカーサのリガンドの相違による SiO₂ 成長への影響

Effect of Ligands of Amino Silane Precursors on SiO₂ Growth

東北大流体研¹, 産総研²

○(D)土射津 佑起¹, 大塚 照久², 山崎 将嗣², 大堀 大介¹, 有本 宏², 遠藤 和彦¹

Institute of Fluid Science, Tohoku Univ.¹, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology²

○Yuki Tsuchiizu¹, Teruhisa Otsuka², Masashi Yamazaki²,

Daisuke Ohori¹, Hiroshi Arimoto², Kazuhiko Endo¹

E-mail: tsuchiizu.yuuki.p1@dc.tohoku.ac.jp

【はじめに】現在、Si 系デバイスは集積化が進み、デバイスのスペーサーなどに使われる SiO₂ は微細な成膜技術が求められている。そこで、原子層レベルで成長制御が可能な原子層堆積法(ALD)が使用されてきた。デバイス作成のプロセスには BEOL 形成といった 400°C を超えるプロセスを採用できないものがある。そこで、低い成長温度の Si プリカーサが必要であるため、200°C による成長が可能である有望な原料としてアミノ系 Si プリカーサが開発されてきた[1]。しかし、アミノ系プリカーサとして様々なリガンドを持つプリカーサが開発されているが、リガンドの差が成膜特性に与える影響は必ずしも明らかになっていない。リガンドが残留するメカニズムを解明することで、原料開発、選択、および成膜条件の最適化を促進させ、高性能な膜形成が可能である。そこで本研究では、Al₂O₃ 上に3種類のアミノ系 Si プリカーサを供給し、それぞれの供給時間を変化させたときの基板との結合状態の違いから、リガンドの違いと残留不純物との関係を明らかにした。

【実験条件】本実験では、Si 基板上にあらかじめ ALD で成膜した膜厚 12.5 nm の Al₂O₃ 薄膜に、更に Si プリカーサを供給することで SiO₂ を ALD 成膜した。プリカーサは Tris-dimethyl-amino-silane (TDMAS)、Bis-diethyl-amino-silane (BDEAS)、Di-iso-propyl-amino-silane (DIPAS) を採用した。成長温度は 200°C とし、オゾンとの交互供給により SiO₂ を堆積した。Si プリカーサを供給した後、in-situ で X 線光電子分光(XPS)法により結合状態を評価した。XPS 評価では、Si、C、および N それぞれのピークを Al2p ピークで規格化し評価した。

【結果と考察】図1はXPS測定により得られた(a)C1s/Si2p、(b)N1s/Si2pとSiプリカーサの供給時間の関係を示した図である。この結果から、基板表面にはSiプリカーサのリガンドであるCとNの残留が見られた。また、C1s/Si2pはBDEAS>TDMAS>DIPAS、N1s/Si2pはTDMAS>BDEAS>DIPASの順で大きくなった。これはSiプリカーサのC/Si比、N/Si比と同じ順番である。SiO₂の成長時、残留するリガンドは原料のC/Si比やN/Si比に影響されることが考えられる。

【まとめ】本研究ではアミノ系Siプリカーサのリガンドの違いがC、Nといった残留不純物の量に影響を与えることを明らかにした。【謝辞】本研究は、JSPS 科研費 24K0786 及び文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業(課題番号 JPMXP1225AT0193)の支援を受けて実施した。【参考文献】[1] V. Yu. Vasilyev, ECS J. Solid State Sci. Technol. 10, 053004 (2021).

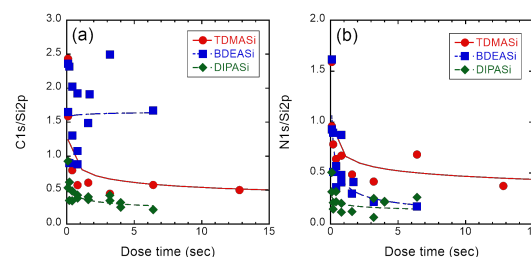


図1 Relationship between Si precursor dose time and (a) C1s/Si2p (b) N1s/Si2p

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 原子層プロセス (ALP: Atomic Layer Process) の解析技術と応用技術 (2)

[7p-S103-1~11] 原子層プロセス (ALP: Atomic Layer Process) の解析技術と応用技術 (2)

Sponsor



[7p-S103-1]

自己組織化単分子膜上での原子層堆積による金属酸化物ナノ構造設計

○(D)小野 赳¹、細見 拓郎¹、斉藤 光²、正井 宏³、池内 みどり²、劉 江洋¹、田中 航¹、高橋 綱己¹、寺尾 潤³、柳田 剛^{1,2} (1.東大院工、2.九大先導研、3.東大院総合文化)

[7p-S103-2]

新規Sn原料を用いたMOALD-SnO₂膜の評価

○(M1)安藤 昌輝¹、大下 祥雄²、沼田 敏典²、Lee Hyunju⁴、町田 英明³、小椋 厚志^{1,4} (1.明治大学理工学、2.豊田工業大学、3.気相成長株式会社、4.MREL)

[7p-S103-3]

in-situ 分光エリプソメーターによる成膜プロセスモニタリング

○高島 隼也¹ (1.ジェー・エー・ウーラム・ジャパン)

[7p-S103-4]

原子層堆積 (ALD) 法による表面量子ドットの被覆

モハンマディ ハニフ¹、ロカ ロネル¹、岩田 直高¹、○神谷 格¹ (1.豊田工業大学)

[7p-S103-5]

原子層堆積 (ALD) 法による表面量子ドットの清浄化とパッシベーション

モハンマディ ハニフ¹、ロカ ロネル¹、岩田 直高¹、○神谷 格¹ (1.豊田工大)

[7p-S103-6]

その場観測 エンドポイント検出法を用いたGaN MISHEMTでのサブナノ精度のエッチングプロセス制御

○富田 勇人¹、Kolja Haberland¹、Macello Binetti¹、Daniel Cornwell¹、Christian Loerchner-Gerdaus¹、Thomas Zettler¹ (1.LayTec AG)

[7p-S103-7]

クラスタービームによる表面改質と原子層プロセスへの応用

○豊田 紀章¹、竹内 雅耶¹ (1.兵庫県立大工)

[7p-S103-8]

窒化チタンの熱サイクル原子層エッチング(Thermal-Cyclic ALE)における塩化プロセスのIn-Situ 表面反応解析によるメカニズム解明

○(M2)平井 俊也¹、篠田 和典²、グエン ティ トゥイ ガー¹、井上 健一¹、堤 隆嘉¹、石川 健治¹ (1.名大、2.日立ハイテク)

[7p-S103-9]

NbCl₅を用いた低温Nb-PEALDプロセス

○山口 潤¹、田中 潤¹、中島 章雅¹、佐藤 登¹、玉置 直樹¹、筑根 敦弘¹、霜垣 幸浩¹ (1.東大院工)

[7p-S103-10]

表面条件を変化させた際のルテニウムALDに関する研究

○奥川 昭悟¹、ラーマン ガギ タウヒドゥル²、横川 凌^{1,2}、雨宮 嘉照²、寺本 章伸^{1,2,3} (1.広大先進理工、2.広大 RISE、3.広大 HiSOR)

[7p-S103-11]

Development of Pd Pretreatment for Fabricating Ultrathin Continuous ALD-Co Films

○(P)Yubin DENG¹, Jun Yamaguchi¹, Yuhei Otaka¹, Souga Nagai¹, Noboru Sato¹, Naoki Tamaoki¹, Atsuhiro Tsukune¹, Yukihiro Shimogaki¹ (1.The Univ. of Tokyo)

自己組織化単分子膜上での原子層堆積による金属酸化物ナノ構造設計

Atomic layer deposition on self-assembled monolayers for designing metal oxide nanostructures

東大院工¹, 九大先導研², 東大院総合文化³, ○(D)小野 赳¹, 細見 拓郎¹, 斉藤 光²,

正井 宏³, 池内 みどり², 劉 江洋¹, 田中 航¹, 高橋 綱己¹, 寺尾 潤³, 柳田 剛^{1,2}

Grad. School of Eng., The Univ. of Tokyo¹, IMCE, Kyushu Univ.², Grad. School of Arts and Sci., The

Univ. of Tokyo³, ○Takeshi Ono¹, Takuro Hosomi¹, Hikaru Saito², Hiroshi Masai³, Midori Ikeuchi²,

Jiangyang Liu¹, Wataru Tanaka¹, Tsunaki Takahashi¹, Jun Terao³, Takeshi Yanagida^{1,2}

E-mail: 7895319924@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

【はじめに】 有機分子を鋳型とした ALD によって形成される、鋳型に応じた空孔を有する金属酸化物構造は、分子選択的な触媒やセンサへの展開が期待されている。しかしながら、ALD プロセスの過酷さゆえに、有機分子が脱離・凝集し、鋳型の一義性が損なわれるという問題があった。本研究では、化学的に安定な自己組織化単分子膜 (SAM) 上での ALD により、鋳型の単分散を保ちつつ、金属酸化物成膜が可能であることを明らかにした (Figure 1)。

【実験】 末端にヒドロキシ基 (OH-PA) あるいはピレン構造 (Py-PA) を有する脂肪族ホスホン酸分子を、トルエン/メタノール混合溶媒に溶解することで SAM 修飾溶液とした。このような SAM 修飾溶液に単結晶 ZnO ナノワイヤ基板を浸漬し、ZnO ナノワイヤ上に SAM を形成した。続けて ALD によって SAM 上に金属酸化物薄膜を成膜した。IR 法、PL 法、QCM 法、STEM 観察等の手法により SAM 上における金属酸化物成長を解析した。

【結果および考察】 OH-PA および Py-PA 含有比率の異なる SAM 上で、トリメチルアルミニウムと H₂O による Al₂O₃-ALD を行い、堆積過程を QCM 法によりその場追跡した。その結果、OH-PA を多く含む混合 SAM ほど直線的な質量増大への移行が早いことが明らかとなった。IR 法も SAM の末端 OH 基とトリメチルアルミニウム間の反応を支持し、SAM の末端 OH 基が核形成起点となって Al₂O₃ が堆積されたと考えられる。Py-PA に対して OH-PA が大過剰に存在する SAM では、末端ピレン構造はモノマー発光を示し、混合 SAM によってピレン鋳型の単分子分散が可能であることが明らかとなった。Al₂O₃ 堆積量が増加すると、ピレン鋳型のモノマー発光は発光強度・量子収率・発光寿命がいずれも向上することを見出した (Figure 2)。この結果は、ピレン構造の近傍に Al₂O₃ が堆積されることで、ピレンの無輻射失活が抑制されたことを示唆している。すなわち、SAM 上での ALD によって鋳型分子の分散性と化学的安定性を保ちつつ、鋳型分子近傍に金属酸化物を成長可能であることを示すものであり、単分散ピレンを鋳型とした ALD を達成したと考えられる[1,2]。

[1] T. Ono *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** [22], 27099 (2023).

[2] T. Ono *et al.*, *Adv. Mater. Technol.* **10** [8], 2401639 (2024)

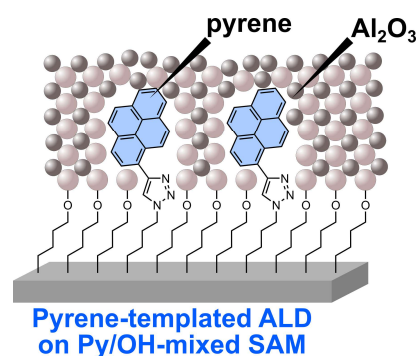


Figure 1. A schematic illustration of ALD on mixed SAMs.

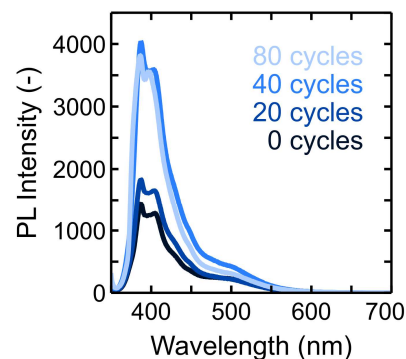


Figure 2. PL spectra of pyrene templates after Al₂O₃-ALD

新規 Sn 原料を用いた MOALD-SnO₂ 膜の評価Evaluation of MOALD-SnO₂ Thin Film using Novel Sn Precursor安藤昌輝¹, 大下祥雄², 沼田敏典², Hyunju Lee^{1,4}, 町田英明³, 小椋厚志^{1,4}

(1. 明治大理工、2. 豊田工業大学、3. 気相成長株式会社、4. 明大 MREL)

Masaki Ando¹, Yoshio Ohshita², Toshinori Numata², Hyunju Lee^{1,4},Hideaki Machida³, and Atsushi Ogura^{1,4}

(1. School of Sci. and Technol., Meiji Univ., 2. Toyota Technological Institute,

3. Gas-Phase Growth Ltd., 4. MREL)

E-mail: ce251032@meiji.ac.jp

[背景] ペロブスカイト／結晶シリコンタンデム太陽電池 (PVSCs) では、表裏面及び中間層に透明導電極 Transparent Conductive Oxide (TCO) が多用される。この TCO には使用される箇所に応じた適切なキャリアの選択伝導性が望まれる場合がある。SnO₂ は Electron Transport Layer (ETL) としての役割も兼ね備えた TCO として知られているが、低温かつプラズマ等によるダメージをもたらさない堆積方法開発が望まれる [1]。本報告では、プラズマを使用せず中温で分解が可能であると予測される新規 MO 原料として [(i-C₃H₇)₂NC(n-C₃H₇)N(i-C₃H₇)₂]₂Sn (DIPRoBA₂Sn) を開発し [2]、SnO₂ の MOALD (Metal-Organic Atomic Layer Deposition) 成膜を試み、MOALD-SnO₂ 膜の評価結果を報告する。

[実験方法] Sn 原料に DIPRoBA₂Sn を使用し、基板温度 240°C でシリコン及びサファイア基板上に約 40 nm の SnO₂ 薄膜を ALD によって成膜した。酸化剤は H₂O→O₃、O₃→H₂O、O₃ のみ、そして O₃ 供給後パージせずに H₂O を供給し成膜した計 4 種の試料を得た。膜中 Sn の化学結合状態を評価すべく、X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) 測定を実施した。SnO₂/Si 基板を用いてホール効果測定を実施し、電気諸特性を測定した。また、サファイア基板上に成膜した SnO₂ 膜を用いて透過率測定を行った。

[実験結果] 図 1 に H₂O→O₃ の順に酸化剤を導入し成膜した SnO₂ 膜の Sn 3d_{5/2} の光電子スペクトルを示す。これらの結果から、SnO₂ 由来の Sn-O 結合が確認できた。表 1 に示す電気特性から、酸化剤 H₂O→O₃ を用いて ALD によって成膜された SnO₂ 膜は高いキャリア濃度、キャリア移動度を示した。高キャリア濃度にも関わらず、近赤外領域 (>800 nm) で 90% 以上、可視光領域 (400–800 nm) でも高い透過率を示した。これにより、本プロセスで得られた SnO₂ 膜は、従来の ETL/TCO 薄膜と同等、またはそれ以上の優れた光学特性を有することが明らかになった。DIPRoBA₂Sn の O₃/H₂O による酸化反応により、プラズマ不要且つ中温 (240°C) における SnO₂ 成膜が可能であることが示された。当日は、酸化剤の導入法が異なる 4 種の SnO₂ 膜についての比較検討を行う。

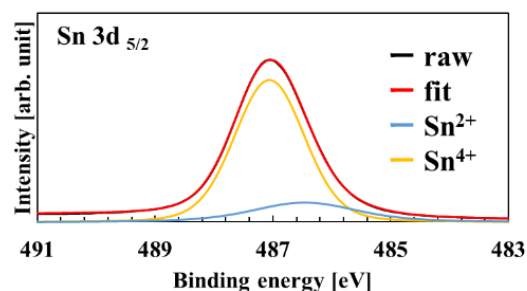


Fig. 1 Photoelectron spectra of Sn 3d_{5/2} obtained from SnO₂/Si sub. deposited by ALD with O₃ and H₂O.

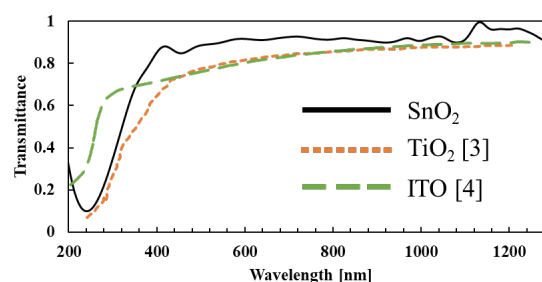


Fig. 2 Transmittance of 40 nm of SnO₂/glass, 10 nm of TiO₂/glass [3], and 50 nm of ITO/glass [4].

Table 1 Electrical properties obtained from SnO₂/Si sub. deposited by ALD with O₃ and H₂O.

carrier concentration [1/cm ³]	sheet resistance [Ω/□]	resistivity [Ω cm]	conductivity [1/Ω cm]	mobility [cm ² /Vs]
6.45 × 10 ²⁰	237	1.02 × 10 ⁻³	983	983

[参考文献]

- [1] Q. Meng *et al.*, J. Mater. Sci.: Mater. Electron., **32**, 12784–12792 (2021).
- [2] Y. Ohshita *et al.*, 41st EU PVSEC, 2CV.3.53 (2024).
- [3] J. H. Jia *et al.*, J. Korean Phys. Soc., **44**, 717-712 (2004).
- [4] W. Wei *et al.*, J. Mater. Sci. Technol., **33**, 1107-1112 (2017).

in-situ 分光エリプソメーターによる成膜プロセスモニタリング

Process monitoring of deposition by in-situ spectroscopic ellipsometer

ジェー・エー・ウーラム・ジャパン株式会社 高島 隼也

J.A.Woollam Japan, Jyunya Takashima

E-mail: j-takashima@jawjapan.com

分光エリプソメトリーは、光の偏光状態を解析することで薄膜の厚さや光学定数を非破壊で高精度に評価できる手法である。この技術では、試料表面からの反射光の偏光状態の変化を測定し、モデル解析を通じて膜厚や屈折率、消衰係数、表面ラフネス、組成比、深さ方向の屈折率分布などを算出する。特に回転補償子型の分光エリプソメーターは、高速かつ高精度に幅広い波長範囲の情報を同時に取得できるメリットがあり、様々な薄膜の特性を詳細に評価することが可能である。

分光エリプソメーターを成膜プロセス中のリアルタイムモニタリングに使用することで、膜厚や光学特性の精密制御を可能にし、材料の最適化や品質向上に寄与する。例えば ALD プロセスでは、前駆体の吸着と反応の繰り返しによって 1 層ずつ膜が形成されるが、この過程を in-situ 分光エリプソメトリーでモニタリングすることで、各サイクルの膜厚変化や成膜速度をリアルタイムで評価できる。¹⁾ また、光学定数を評価することで膜密度や結晶状態に関する情報も得られることから、例えば反応温度、圧力、前駆体供給量などのプロセス条件が膜質に与える影響をリアルタイムで評価できるため、プロセスへのフィードバックが可能となる。

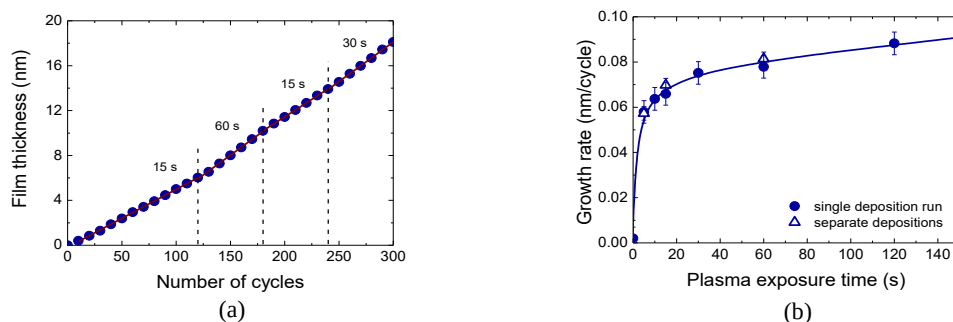


Fig.1 (a)The thickness of a TiN film as a function of number of ALD cycles

(b)The growth rate as a function of plasma exposure time

本講演では、分光エリプソメトリーの基本原理や測定・解析について簡単に説明し、in-situ 分光エリプソメーターを活用した成膜プロセスのモニタリング技術について、リアルタイム測定の利点や応用例について紹介する。

1) Langereis *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 073001 (2009)

原子層堆積 (ALD) 法による表面量子ドットの被覆

Capping of surface quantum dots by Atomic Layer Deposition (ALD)

豊田工大¹ モハンマディ ハニフ^{1*}, ロカ ロネル^{1*}, 岩田 直高¹, [○]神谷 格¹

Toyota Tech. Inst.¹ Hanif Mohammadi^{1*}, Ronel C. Roca¹, Naotaka Iwata¹, [○]Itaru Kamiya¹

E-mail: hanif.mohammadi@uni-kassel.de, kamiya@toyota-ti.ac.jp

[背景] MBE や MOCVD で成長される構造は、防汚・保護のため通常十分に厚く被覆する。素子動作層が表面近傍にあると表面準位の影響も加わり、所望の動作をさせることが困難である。これに対し、硫化アンモニウム処理などによる表面パッシベーションで、表面準位の影響を低減できることが報告された[1]。しかし、この処理法では表面のエッチングを伴うことなどから表面近傍の素子構造には不向きであった。

一方、近年盛んに研究されている GaAs 上の InAs 量子ドット (QD) では、GaAs 被覆に際し、歪み及び熱拡散の影響で、QD からの吸・発光波長が著しく短波長化することが明らかになり、通信波長への対応を困難にしてきた。その様な中、我々は InAs QD を歪みなく被覆し、かつ表面準位の影響を低減する方法として ALD による金属酸化膜被覆が有効であることを見出した。

[方法] 試料は MBE にて作製した。図 1 に示す通りの GaAs (001) 基板上に InAs QD 層を複数含む構造を成長後、一旦大気暴露を経て、ALD にて金属酸化物 AlO_x 膜を異なる膜厚で複数成長し、その時の形状を AFM と TEM で、電子物性を蛍光 (PL) 計測で同定した。

[結果] 表面露呈の QD (SQD) から得られた PL スペクトルを図 2 に示す。SQD からの PL が被覆膜厚の増大と共に強度が増大すると共に、従来 GaAs 被覆では大きくピーク波長が短波長化することが報告されているが、ここでは数十 nm 程度に抑えられている。これは、図 3 の TEM 像に見られるように ALD 層がアモルファス状に形成されているため、SQD への歪印加が抑制されてものと考えられる[2,3]。

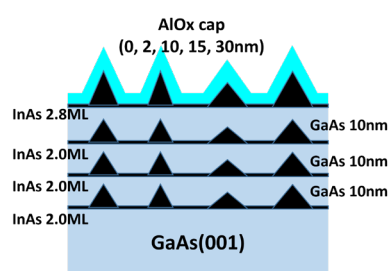


図 1. 試料構造

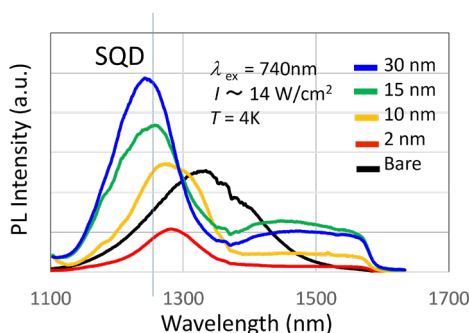


図 2. SQD からの PL

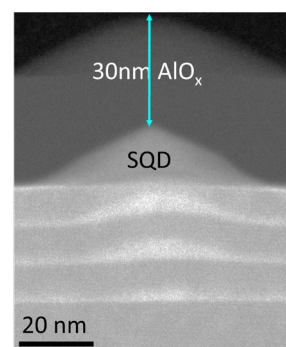


図 3. AlOx 被覆された SQD の TEM

[謝辞] 本研究は文科省の補助下、豊田工大スマートエネルギーセンターの一環として行われた。

[参考文献] [1] C. J. Sandroff, *et al*, Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 33.

[2] H. Mohammadi, *et al.*, J. Appl. Phys. **133** (2023) 185303.

[3] H. Mohammadi, *et al.*, Appl. Surf. Sci. **612** (2023) 155790.

*現. Kassel 大学研究員

原子層堆積 (ALD) 法による表面量子ドットの清浄化とパッシベーション Cleaning and passivation of surface quantum dots by Atomic Layer Deposition (ALD)

豊田工大¹ モハンマディ ハニフ^{1*}, ロカ ロネル^{1*}, 岩田 直高¹, °神谷 格¹

Toyota Tech. Inst.¹ Hanif Mohammadi^{1*}, Ronel C. Roca¹, Naotaka Iwata¹, °Itaru Kamiya¹

E-mail: hanif.mohammadi@uni-kassel.de, kamiya@toyota-ti.ac.jp

[背景] 我々は前の講演で MBE や MOCVD で GaAs 上に成長された InAs 量子ドット (QD) の歪み抑制パッシベーション被覆を報告した[1,2]。この手法では、MBE 成長後一旦大気暴露された表面露出の QD (SQD) が ALD による金属酸化膜形成に伴いパッシベーションされており、従来の硫化アンモニア処理などの液相プロセスと異なり、エッチングすることなく表面の浄化が実現されていることが示唆される。

このことは素子作製に繋げる上で鍵となり得る事実であり、今回、この過程の解明を目指した。

[方法] 試料は MBE にて作製した。図 1 に示す通りの GaAs (001) 基板上に InAs QD 層を複数含む構造を成長後、一旦大気暴露を経て、ALD にて酸化アルミニウムと酸化亜鉛を成長するための各々の金属源であるトリメチルアルミニウム (TMA) とジエチル亜鉛 (DEZ) をパルス状に SQD 表面に照射し (酸素源は非供給)、SQD に与える蛍光 (PL) の変化を追跡した。

[結果] DEZ, TMA のパルス照射に伴う PL スペクトルの変化を各々図 2, 3 に示す。いずれの場合も大きなピーク波長シフトなくパルス照射の繰り返しに伴い、PL 強度が増大していることが見て取れる。この時、1パルスで供給される金属の量は 100 分の数原子層程度であり、しかも上記の通り、酸素源は供給していないため、「成膜」を行っている訳ではなく、金属源と表面との相互作用により何らかの機構で表面の浄化が起こっていることを示唆している[3,4]。DEZ と TMA の効果の違いは、熱力学や立体化学的な考察で理解することが可能である。

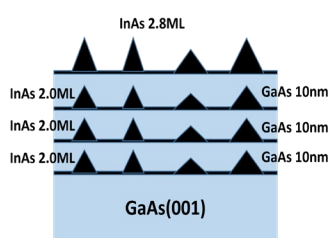


図 1. 試料構造

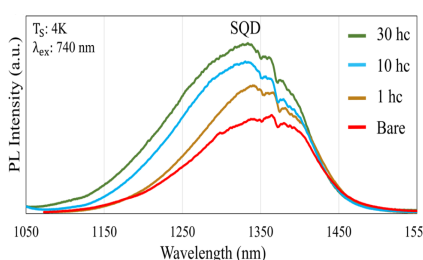


図 2. DEZ 照射時の PL

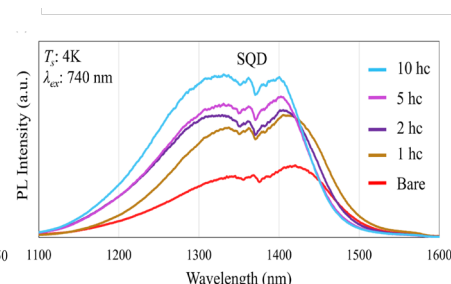


図 3. TMA 照射時の PL

[謝辞] 本研究は文科省の補助下、豊田工大スマートエネルギーセンターの一環として行われた。

[参考文献] [1] H. Mohammadi, *et al.*, J. Appl. Phys. **133** (2023) 185303.

[2] H. Mohammadi, *et al.*, Appl. Surf. Sci. **612** (2023) 155790.

[3] H. Mohammadi, *et al.*, SSRN 4948296 (2024).

[4] H. Mohammadi, *et al.*, SSRN 4948298 (2024).

*現. Kassel 大学研究員

その場観測 エンドポイント検出法を用いた GaN MISHEMT でのサブナノ精度のエッチングプロセス制御

Endpoint detection in Atomic Layer Etching (ALE) for GaN MISHEMT structures - Optical in-situ control with sub-nm precision

Y. Tomita, K. Haberland, M. Binetti, D. Cornwell, C. Lörchner-Gerdaus, J.-T. Zettler

LayTec AG

e-mail: Yuto.Tomita@laytec.de

高い動作信頼性が求められるパワーデバイス向けのデバイスでは、ノーマリーオフ動作を可能とする GaN 高電子移動度トランジスタ (HEMT) が期待されている。従来型 HEMT では、ゲート駆動電圧や耐圧の観点から十分な性能を得ることが難しく、溝状ゲート構造を有する AlGaIn/GaN MISHEMT が有力な選択肢となっている。しかしこの構造では、AlGaIn 層に数 nm の厚みを残してプラズマエッチングを正確に停止させる必要があり、プロセスの精度および再現性が課題とされてきた。

本研究では、Atomic Layer Etching (ALE) プロセス中の反射率をリアルタイムでモニタリングする光学式その場観測エンドポイント検出法を提案する。本手法により、ウェハーごとの層厚ばらつきに起因する過剰エッチングを抑制し、サブナノメートル精度での高精度なエッチング制御を実現した。反射率の変化と TEM 観察による検証により、本手法の高い精度と優れた再現性が確認された(Fig. 1)。

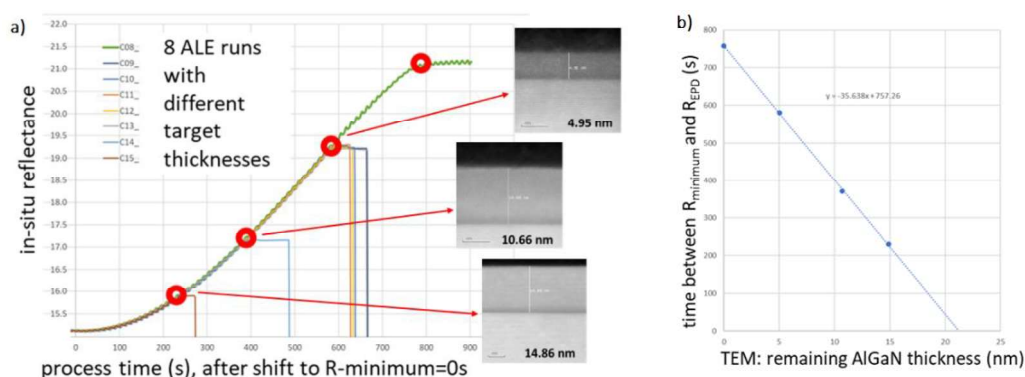


Fig. 1: a) in-situ reflectance measured during etching of the AlGaIn/GaN MISHEMT and TEM verification of the residual thickness in the recessed region. b) Data regression demonstrates both high precision and sub-nm accuracy of the endpointing method.

クラスタービームによる表面改質と原子層プロセスへの応用

Surface modification using cluster beams and their application in atomic layer processes

兵庫県立大工, 豊田 紀章, 竹内 雅耶

Univ. of Hyogo, Noriaki Toyoda, Masaya Takeuchi

E-mail: ntoyoda@eng.u-hyogo.ac.jp

1. はじめに

半導体デバイスの微細化や三次元化の進展に伴い、原子層堆積 (ALD) や原子層エッチング (ALE) といった原子層プロセス技術が注目を集めている。ALE では反応性分子吸着、排気、表面原子層除去等のステップを独立して繰り返すことで、原子層レベルでのエッチングが可能となる。表面改質法としては、基板加熱やイオン照射があるが、我々は数 eV/atom 程度の超低エネルギーを実現するガスクラスターイオンビーム (GCIB) に着目している [1]。GCIB はガス分子の集合体が固体表面に衝突することで、単原子イオンでは困難な低エネルギーかつ高密度のエネルギー付与が可能である。この特長を活かし、表面分析における低ダメージ質量分析や、周波数フィルターの加工など、様々な応用が進んでいる。さらに、GCIB は単に低エネルギーであるだけでなく表面反応を促進する効果もあるため、ALE における新たな表面励起源として期待される。本報告では、GCIB を用いて表面改質および除去ステップを行う擬似的な ALE 法について紹介する。

2. 表面吸着と GCIB 照射を用いたエッチング

図 1 にアセチルアセトン (acac) と Ar-GCIB を用いた Ni エッチングの、ALE 各ステップでの XPS 測定結果を示す。まず、Ni 表面を Ar^+ スパッタで清浄化後、加熱によって Ni 酸化層を形成した。その後 acac 蒸気に曝露し (1×10^{-3} Pa)、Ar-GCIB を加速電圧 5kV、照射量 1×10^{15} ions/cm² で照射した。図 1(a) に示すように、 Ar^+ 照射後は清浄化により金属 Ni が現れ、その表面に酸化膜を形成することにより 861eV 付近に Ni-O 結合に起因するピークが現れる (b)。この NiO 表面に acac 吸着なしで Ar-GCIB 照射した場合 (c) は、照射後も Ni 表面は酸化したままであったが、acac 吸着後に Ar-GCIB を照射すると、NiO 層が除去され Ar^+ クリーニング後と同様の表面が現れる (d)。このように吸着した acac 表面に Ar-GCIB 照射を行うことにより表面の NiO が除去されたと考えられる。講演では、各種金属膜や窒化膜への擬似的原子層エッチングについて報告する。

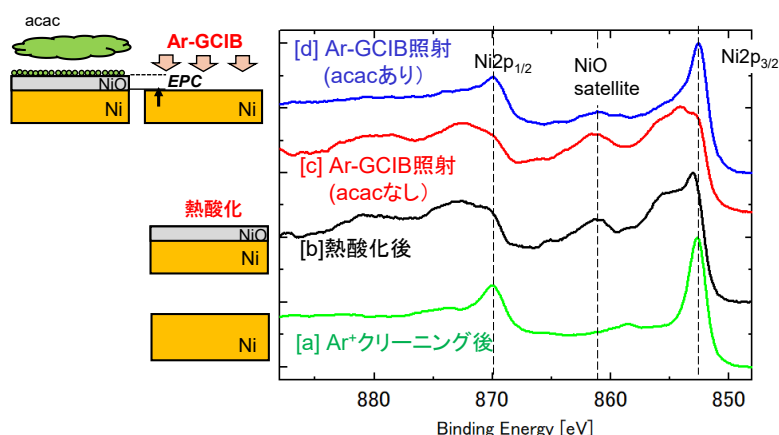


図 1 acac 吸着と Ar-GCIB を用いた Ni エッチングの ALE 各ステップでの XPS 測定結果

[1] 豊田紀章、応用物理, 90 巻 (2021) 4 号, p. 239-243.

窒化チタンの熱サイクル原子層エッチング (Thermal-Cyclic ALE) における塩化プロセスの *In-Situ* 表面反応解析によるメカニズム解明 Mechanism of TiN Chlorination during Thermal-Cyclic Atomic Layer Etching via *In-Situ* Surface Reaction Analysis

名大¹, 日立ハイテク², [○](M2) 平井 俊也¹, 篠田 和典², グエン ティ トウイ ガー¹,
井上 健一¹, 堤 隆嘉¹, 石川 健治¹

Nagoya Univ.¹, Hitachi High-Tech Corp.², [○]Shunya Hirai¹, Kazunori Shinoda²,
Thi-Thuy-Nga Nguyen¹, Kenichi Inoue¹, Takayoshi Tsutsumi¹, and Kenji Ishikawa¹

E-mail: hirai.shunya.v3@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに 次世代ロジック半導体としてナノシート構造半導体が注目されている。その製造工程では、超微細な3次元構造であるゆえに、メタルゲート部分の窒化チタン (TiN) の等方性ドライエッチング技術が求められている[1]。近年、塩素ラジカルと温度制御を組み合わせたTiNの等方性熱サイクルALE技術が報告された[2]。しかし、その詳細な反応メカニズムは未解明である。そこで我々は塩素ラジカルによる表面改質層の形成プロセス、及び加熱による脱離プロセスの解明に取り組んでいる。今回の報告では、塩素ラジカル照射時間を変化させ、照射後のTiN表面を*In-Situ* X線光電子分光法(XPS)を用いて測定し、照射時間依存性を通して塩化メカニズムを明らかにした。

2. 実験方法 サンプルはTiNを原子層堆積によって40 nm成膜したものを使用した。誘導性結合型プラズマ (ICP) を使用し、塩素ガスを0.5 sccm流して放電した。サンプル上部にはファラデーカップを取り付けてイオンを遮断し、ラジカルだけの反応とした。自然酸化膜はAr⁺スパッタによって除去した。その後、サンプル温度を-10 °Cにして塩素ラジカルを0.5分、15分、30分間照射した。その後、高真空下で搬送し、*in-situ* でXPSスペクトルを測定した[3]。

3. 実験結果と考察 Figure 1 に塩素ラジカル

照射時間によるTi 2p軌道XPSスペクトルの変化を示す。0.5分の照射でスペクトルがシフトし、456.5 eV付近にTiN_xCl_yと見られる大きなピークが出現した。その後、15分、30分と照射することで458 eV付近にTiCl₄のピークが増加した。これらから、表面の塩化反応は急速に進む初期反応と比較的遅い完全な塩化反応の2段階に分かれていることが明らかになった。この結果はプロセスのセルフリミッティング性の原因解明に繋がることが期待される。

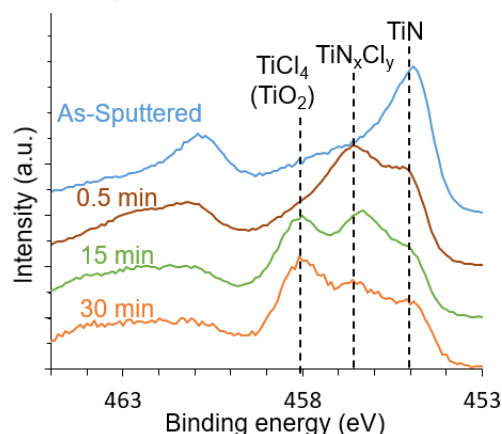


Fig. 1 *In-Situ* XPS spectra for Ti 2p of the TiN surface. Blue line: Ar⁺ sputtered surface. Brown line: after 0.5 minutes Cl radical irradiation at -10 °C. Green line: after 15 minutes. Orange line: after 30 minutes.

参考文献

- [1] Y. Oniki *et al.*, ECS Trans. **92**, 3 (2019).
- [2] N. Miyoshi *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A **40**, 032601 (2022).
- [3] M. Hasegawa *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A **38**, 042602 (2020).

NbCl₅ を用いた低温 Nb-PEALD プロセス

Low-temperature Nb-PEALD process using NbCl₅ precursor

東大院工¹ ○山口 潤¹, 田中 潤¹, 中島 章雅¹, 佐藤 登¹, 玉置 直樹¹, 筑根 敦弘¹, 霜垣 幸浩¹

Univ.Tokyo¹, ○Jun Yamaguchi¹, Jun Tanaka¹, Akimasa Nakashima¹, Noboru Sato¹,

Naoki Tamaoki¹, Atsuhiko Tsukune¹, Yukihiro Shimogaki¹

E-mail: yamaguchi@dpe.mm.t.u-tokyo.ac.jp

ニオブ(Nb)は、半導体集積回路の配線材料や pMOS コンタクト材料、さらに量子コンピュータ向け Cryo-CMOS における超伝導配線材料としての応用が期待されている。一方で、5 族遷移金属である Nb は化合物から金属単体への還元が比較的困難であり、低温 CVD/ALD の報告例はない。そこで本研究では、NbCl₅ を原料とし水素プラズマを用いた低温 PEALD プロセスを検討した。

PEALD 装置には、Oxford Instruments 社の FlexAL を使用した。誘導結合プラズマ(ICP)方式で、基板バイアスが印加可能である。プラズマ条件を最適化し、基板温度 200℃にて熱酸化膜上に製膜した Nb 薄膜の XPS 深さ方向分析結果を図 1 に示す。膜組成は Nb 90%, N 6%, O 4%であった。N や O は、原料ガス中には含まれないため、大気リークによる混入や同一装置での窒化膜形成履歴に起因するコンタミだと考えられる。一方、Cl は XPS 検出下限未満であり、高純度 Nb 膜の合成に成功したと考えられる。Nb 膜の抵抗率は、膜厚 21-27 nm において約 200 μΩ·cm であった。

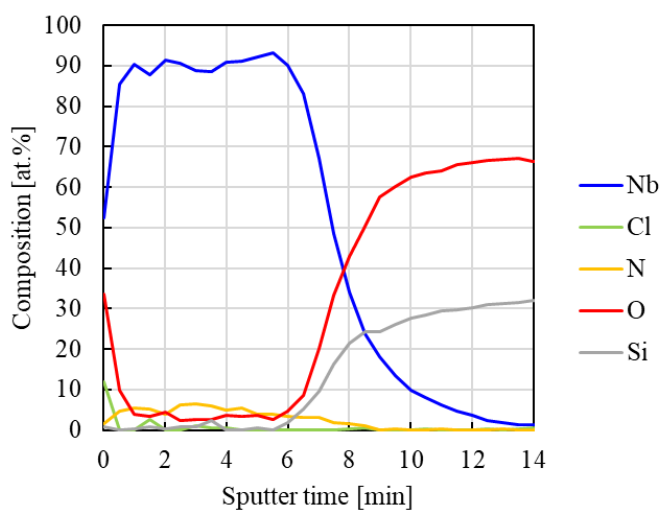


図 1. Nb 膜の XPS 深さ方向分析結果

謝辞 本研究の一部は文科省 ARIM 事業 (JPMXP1224AT0288) の支援を受けた。

表面条件を変化させた際のルテニウム ALD に関する研究

Research on Ru deposition when changing surface conditions

奥川 昭悟¹, Gagi Tauhibur Rahman², 横川 凌^{1,2}, 雨宮 嘉照², 寺本 章伸^{1,2,3}

1. 広大先進理工 2. 広大 RISE 3. 広大 HiSOR

S. Okugawa¹, G. Rahman¹, R. Yokogawa^{1,2}, Y. Amemiya², and A. Teramoto^{1,2,3}

1. Grad. Sch. of Adv. Eng., Hiroshima Univ., 2. RISE, Hiroshima Univ., 3. HiSOR, Hiroshima Univ.

E-mail: syogo-okugawa@hiroshima-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

大規模集積回路(LSI)は、スケーリング技術の発展により性能を向上しており、今後の微細化に向けさらなる技術発展が求められる。現在の半導体集積回路において配線層には銅(Cu)が使用されているが、Cu 配線には拡散防止のため抵抗率の高い材料でバリアメタルが必要である。微細化によりこの割合が増加することで抵抗が増加する[1]。ルテニウム(Ru)はバリアメタルを必要とせず、微細配線でも低抵抗を維持できるため、次世代の配線材料として注目されている。Ru の成膜には ALD(Atomic Layer deposition)が用いられ、特に下地材料に対して選択性を持たせ、所望の領域のみに成膜が可能な ASALD(Area Selective ALD)は、微細配線形成の重要な手法である[2]。ALD は原料プリカーサーの吸着を制御することで成膜の有無が決定する[3]。本研究では、ALD で成膜された Ru が基板表面の状態によってどのように変化するか詳細に検討を行ったので報告する。

2. 実験

(100)Si 基板を SPM($\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 = 3 : 1$)溶液および希釈 HF($50\% : \text{H}_2\text{O} = 1 : 50$)溶液に浸漬させ、Si-O もしくは Si-H 終端させた試料を準備した。また、LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)によって、約 200 nm の SiO_2 もしくは Si_3N_4 を成膜し、計 4 種類を作製した。その後、サイクルを変更させ Ru の ALD を行った。使用したプリカーサーは従来よりも飽和蒸気圧が 100 から 1000 倍であり、比較的低温で成膜が可能で、高い成膜レートと示す $[\text{Ru}(\text{TMM})(\text{CO})_3]$ (TMM = trimethylenemethane)を用いた[1]。XRR(X-ray Reflectivity)による膜厚測定を行い、各試料の成膜レートを算出した。

3. 結果・考察

Fig. 1 に各表面状態における Ru 膜厚の ALD サイクル依存性を示す。一様な Ru 成膜が起きた Si-O 、 SiO_2 、 Si_3N_4 では、成膜レートがほとんど変わらないことが分かった。一方で、Si-H では十分な成膜ができなかった。Fig. 2 に各表面条件における水の接触角の関係を示す。一様な Ru 成膜が起きた表面状態では、水の接触角は 25° 以下の比

較的低い値と親水性なのに対し、Ru 成膜がされなかった Si-H ではおよそ 80° と疎水性になっていた。これは、Si-O、 SiO_2 、 Si_3N_4 が極性を持つ表面であるのに対し、Si-H 極性が小さい表面であることを示しており、プリカーサーの吸着のしやすさに関連があると考えられる。

4. 結論

表面条件を制御することで、 $[\text{Ru}(\text{TMM})(\text{CO})_3]$ の吸着挙動に違いが見られ、特に親水性を有する表面において高い吸着性を示すことが明らかになった。当日は、Ru の ASALD に関しても報告する。

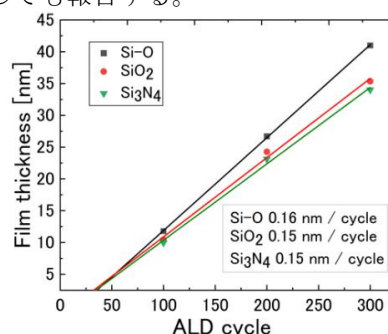


Fig. 1. ALD cycle dependence of film thickness at each surface conditions.

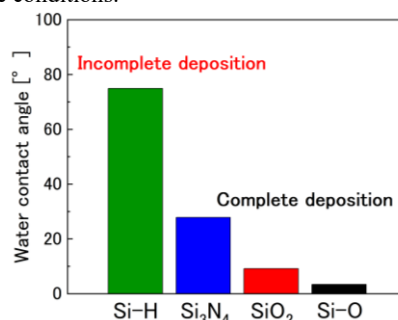


Fig. 2. Water contact angle rate for each surface conditions.

謝辞

本研究の一部は、文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 JP011438 の助成を受けたものです。本研究は、田中貴金属工業株式会社、株式会社堀場エステックにご助言とご協力を賜りました。

参考文献

[1] Y. Kotsugi *et al.*, Chem. Mater. **33**, 5639 (2021). [2] Gregory N. Parsons *et al.*, Chem. Mater. **32**, 4290 (2020). [3] 奥川ら, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会 14p-P10-23 (2025).

極薄連続 ALD-Co 膜作製用 Pd 前処理プロセスの構築

Development of Pd Pretreatment for Fabricating Ultrathin Continuous ALD-Co Films

東大院工 ○(P)鄧 玉斌, (P)山口 潤, (P)大高 雄平, 永井 総雅, (P)佐藤 登, 玉置 直樹,
筑根 敦弘, 霜垣 幸浩

The Univ. of Tokyo, °Y. Deng, J. Yamaguchi, Y. Otaka, S. Nagai, N. Sato, N. Tamaoki, A. Tsukune,
and Y. Shimogaki

E-mail: dybbuas@dpe.mm.t.u-tokyo.ac.jp

Ultrathin Co(W) films are promising candidates for single-layer liner/barrier applications in next-generation ULSI Cu interconnects. To meet the stringent demands of advanced integration, a robust and controllable ALD process for fabricating 1-nm-thick Co(W) films is essential. While some studies have explored the combination of ALD and ALE to achieve ultrathin film formation [1], such approaches often involve complex procedures, potential impurity incorporation, and initial growth defects. Given that the formation of continuous ultrathin films requires a high nucleation density, Pd has attracted attention as an effective nucleation enhancer due to its strong catalytic activity in enhancing precursor adsorption and surface reactions. Prior studies have shown that ALD-Co deposited on SiO₂ substrates pretreated with Pd results in smaller and more densely distributed nuclei than untreated samples due to catalytic effects of Pd [2]. In this study, the Pd deposition process was further investigated to optimize Co nucleation behavior and enhance film continuity.

All samples were prepared on Si substrates with a 100-nm-thick thermally grown SiO₂ layer, followed by cleaning with ethanol and APM. Pd was deposited using either ALD or sputtering. Subsequent Co film deposition was carried out via ALD at 150 °C for 500 cycles. As shown in Fig. 1(a–b), ALD-Pd with a loading of 4.1×10^{-8} mol/cm² achieved smaller and more densely distributed Co nuclei (~ 9 nm, $\sim 1.1 \times 10^{12}$ cm⁻²) compared to the sample with a lower ALD-Pd loading of 5.2×10^{-9} mol/cm² (~ 17 nm, $\sim 3.0 \times 10^{11}$ cm⁻²). Notably, as shown in Fig. 1(c), sputtered-Pd with an even lower loading (1.8×10^{-9} mol/cm²) resulted in the formation of much smaller and denser Co nuclei (~ 5 nm, $\sim 4.0 \times 10^{12}$ cm⁻²).

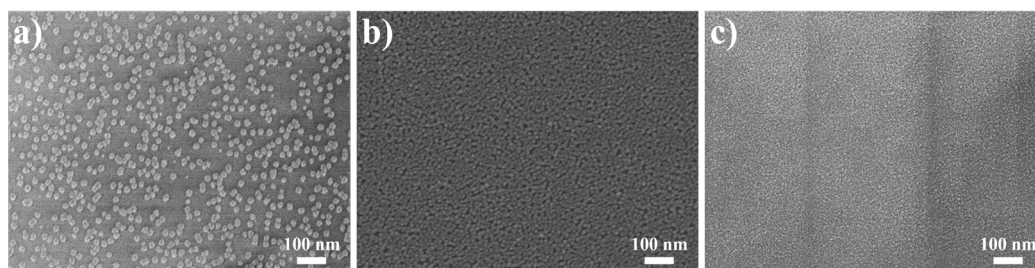


Fig. 1. Surface morphology of ALD-Co films on SiO₂ substrates pretreated with varying Pd loadings: (a) 5.2×10^{-9} mol/cm² by ALD, (b) 4.1×10^{-8} mol/cm² by ALD and (c) 1.8×10^{-9} mol/cm² by sputtering.

References

- [1] J. C. Gertsch, et al., Vac. Sci. Technol. A, 2021, 39(6): 062602.
- [2] Y. Deng, et al., JSAP spring (2025).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：熱流れの中で発電する新しい熱エネルギー変換について語る

[9p-S103-1~7] 熱流れの中で発電する新しい熱エネルギー変換について語る

[9p-S103-1]

オープニング

○松下 祥子^{1,2} (1.東京科学大、2.(株) elleThermo)

[9p-S103-2]

CT界面を用いた有機積層熱電素子

○安達 千波矢^{1,2}、亀山 真奈¹、藤原 隆³、八尋 正幸⁴、Mathevet Fabrice⁵ (1.九大 OPERA、2.九大 WPI-I2CNER、3.GCE Institute、4.ISIT、5.ソルボンヌ大)

[9p-S103-3]

温度変化で充電できる三次電池とその展望

○守友 浩^{1,2} (1.筑波大数理、2.筑波大TREMS)

[9p-S103-4]

メタマテリアル熱電変換と非放射冷却

○久保 若奈¹ (1.東京農工大)

[9p-S103-5]

自動的に温度差が発生するPN接合型CNT熱電発電デバイス

○高尻 雅之¹、玉井 涼太¹、浅野 結太¹ (1.東海大学工)

[9p-S103-6]

半導体増感型熱利用発電(STC)の熱力学：二つの情報熱機関による描像

○齋藤 仁志¹、松下 祥子^{1,2} (1.株式会社elleThermo、2.Science Tokyo)

[9p-S103-7]

パネルディスカッション：熱流を電気に変えるとはどういうことか？

○松下 祥子¹、久保 若奈³、柴田 恭幸⁴、高尻 雅之²、藤原 隆⁵ (1.Science Tokyo / elleThermo、2.東海大、3.東京農工大、4.海洋大、5.GCE Institute)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：熱流れの中で発電する新しい熱エネルギー変換について語る

[9p-S103-1~7] 熱流れの中で発電する新しい熱エネルギー変換について語る

[9p-S103-1] オープニング

○松下 祥子^{1,2} (1.東京科学大、2.(株) elleThermo)

キーワード：再生可能エネルギー、熱エネルギー、カーボンニュートラル

近年、環境温度の時間変化によりエネルギーを取り出す系、熱勾配を自発的に生成させる系、分子や半導体内の熱励起電荷により化学反応を起こさせる系など、新しい熱の使い方が提唱され始めています。これら新しい熱の使い方に共通するのは比較的低温の熱利用であり、熱エネルギーの流れの中で環境温度が一定でも発電することにあります。本シンポジウムでは、これら新しい技術を研究する科学者を一堂に集め新しい熱エネルギー変換の学理を構築を目指します。

CT 界面を用いた有機積層熱電素子

Organic multi-layer thermoelectric device utilizing charge transfer interface

九大 OPERA¹, 九大 WPI-I²CNER², GCE Institute³, ISIT⁴, Sorbonne Université⁵,

°安達 千波矢^{1,2}, 亀山 真奈¹, 藤原 隆³, 八尋 正幸⁴, Fabrice Mathevet⁵,

OPERA, Kyushu Univ.¹, I²-CNER, Kyushu Univ.², GCE Institute³, ISIT⁴, Sorbonne Univ.⁵,

°Chihaya Adachi^{1,2}, Mana Kameyama¹, Takashi Fujihara³, Masayuki Yahiro⁴, and Fabrice Mathevet⁵

現在、有機半導体デバイスは、OLED（有機 EL）の実用化によって半導体デバイスとして重要な一角を占めるようになった。発光効率、耐久特性など、様々な課題を分子設計、デバイス設計、プロセス制御によって突破することで製品化に至っている。現在では、OLED を中核デバイスに、有機太陽電池、有機 FET をはじめ、多彩な研究展開が進められている。有機デバイスの特徴を俯瞰して見ると、無機半導体の原理と同じように、p 型と n 型性材料の巧みな組み合わせによってその機能発現が得られている。電子ドナー（D）性材料と電子アクセプター（A）性材料の積層構造や一分子中に D-A 構造を組み込むことで、電荷移動から発光機能まで多彩な機能が得られている。特に、熱活性化遅延蛍光分子は、励起一重項と励起三重項エネルギーを<200meV 以下に形成することで、室温程度の熱エネルギーを吸熱することで励起子アップコンバージョンを発現させ、電気励起下においてほぼ 100% の効率で電流を光に変換することができるようになった⁽¹⁾。我々の研究グループは、これらの研究成果を着想の起点とし、CT 界面において、浅い HOMO を有する D 分子と深い LUMO を有する A 分子を積層させることで、界面での熱による CT 状態の電荷分離が可能であると着想した。本デバイスでは室温程度の環境に存在する熱エネルギーによる CT 錯体の電荷分離を実現し、さらに、生成した電荷の拡散力を用いた新しい有機熱電素子である⁽²⁾。

ITO 基板上に CT 錯体を形成する組み合わせとして、D 材料に CuPc（Copper(II) phthalocyanine）、A 材料として F₁₆CuPc（Copper(II) 1,2,3,4,8,9,10,11,15,16,17,18,22,23, 24,25-hexadecafluoro-29H,31H-phthalocyanine）を用いた。さらに電子輸送層として C₆₀（Fullerene）と BCP（2,9-Dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline）を挿入した素子において熱電特性の大幅な向上が得られた。この起電力が熱エネルギーに由来することを検証するために、短絡電流密度の温度特性や表面電位物性を解析した。短絡電流密度の温度特性のアレニウスプロットから、活性化エネルギーは~20 meV 程度の値が得られ、発電メカニズムに室温程度の熱エネルギーが寄与していることが確認された。また、表面電位解析から、電荷が CT 錯体から電極まで輸送されているという発電メカニズムの過程が裏付けられた。本研究における新型熱電素子は、利用の難しい室温程度の熱エネルギーから、設置環境に制限されずに恒常的に電気エネルギーを取り出すことができ、グリーンエネルギーを用いた新たな発電方法としての応用が期待される。

Ref. [1] H. Uoyama, et al., *Nature*, **492**, 234 (2012) [2] S. Kondo, et al., *Nat. Commun*, **15**, 8115 (2024)

温度変化で充電できる三次電池とその展望

Thermo-rechargeable Tertiary batteries and their prospects

筑波大数理¹, 筑波大 TREMS², 守友 浩^{1,2}

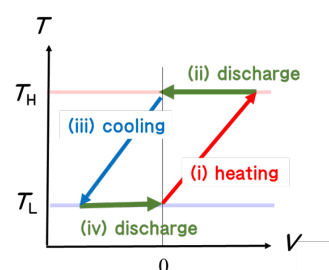
Institute of Pure & Applied Science and TREMS, Univ. of Tsukuba, Yutaka Moritomo^{1,2}

E-mail: moritomo.yutaka.gf@u.tsukuba.ac.jp

持続可能な開発目標 (SDG's) を実現するには、クリーンな自然エネルギーを電気エネルギーに変換する必要がある。特に、実温付近の熱エネルギーがほとんど利用されておらず、これを低コストで電気エネルギーに変換できれば SDG に大きく貢献できる。

「三次電池」は、正極と負極の酸化還元電位の温度係数 (α_+ , α_-) の差を利用して、温度変化で起電力が発生する電池である。我々は、電力で再充電できる二次電池にちなんで、温度変化で充電できる電池を三次電池と呼んでいる。三次電池の起電力は $V_{TB} = \Delta T (\alpha_+ - \alpha_-)$ 、放電容量は、 $Q_{TB} = V_{TB} / (m_+ + m_-) (\beta_+ / m_+ + \beta_- / m_-)$ と表せる。 ΔT , m と β は、それぞれ、温度変化、各電極の活物質の重量および電位の容量係数である。三次電池の素子構造は、二次電池と同じである。しかしながら、三次電池では、正極電位と負極電位が(1)同じであり、かつ、(2) Q_{TB} が最大になるように調整されている。そのため、三次電池の製造には“電気化学的な電位調整”という余計な工程が含まれる。

なお、三次電池は熱機関の一種である。左図に、温度 T —電圧 V 平面を示す。最初、電池の状態を $T = T_L$ かつ $V = 0V$ とする。電池を T_L から T_H まで昇温すると、 V_{TB} の起電力が発生する。 T_H で V_{TB} から $0V$ まで電力を消費する。電池を T_H から T_L まで降温すると、 $-V_{TB}$ の起電力が発生する。 T_H で $-V_{cell}$ から $0V$ まで電力を消費する。



講演では、典型的な Co-PBA/Ni-PBA 三次電池、「三次電池」の性能指標、三次電池活物質としてのプルシャンブルー類似体、“電気化学的な電位調整”の省略、高性能三次電池の開発、等について紹介する。なお、本講演内容は、柴田恭幸先生、小林航先生、丹羽秀治先生、長井一郎研究員、筑波大学物理学学位プログラムの大学院生との共同研究として進めたものである。

1. T. Shibata, Y. Fukuzumi, W. Kobayashi, and Y. Moritomo, Thermal power generation during heat cycle near room temperature, Appl. Phys. Express, 2018, 11, 017101.
2. Y. Shimaura, T. Shibata, and Y. Moritomo, Interrelation between discharge capacity and charge coefficient of redox potential in tertiary batteries made of transition metal hexacyanoferrate, Jpn. J. Appl. Phys., 2021, 61, 044004.
3. Y. Taniguchi, T. Aiba, T. Kubo, and Y. Moritomo, Thermorechargeable battery composed of mixed electrodes, Future Battery, 2024, 3, 1000004e.
4. Y. Sakamoto and Y. Moritomo, Enhanced discharge capacity of thermorechargeable batteries composed of Cd-PBA and a potential-matched PBA, Sustain. Energy Fuels, 2025, 9, 2025.

メタマテリアル熱電変換と非放射冷却

Metamaterial Thermoelectric Conversion and Nonradiative Cooling

東京農工大, °久保 若奈

Tokyo Univ. of Agriculture and Technology (TUAT), °Wakana KUBO

E-mail: w-kubo@cc.tuat.ac.jp

一次エネルギーの約 7 割は未利用熱として失われており, 未利用熱の再利用はエネルギー利用効率向上の点において重要な課題といえる. ゼーベック効果に基づき駆動する熱電変換は, 未利用熱の再利用においてポテンシャルのある技術の一つであるが, 均一な熱輻射環境では熱電変換は駆動しないことから, 現状, 既存の熱電素子では均一な熱輻射環境に存在する未利用熱を回収し再利用することはできない. それを解決するために我々は, 空間中の熱を回収するメタマテリアルを利用し, 均一な熱輻射環境でも発電するメタマテリアル熱電変換を提案・実証した.¹⁻⁴

赤外吸収メタマテリアル (MA) を熱電変換素子の一端のみに装着すると (Fig. 1(a-c)), MA は周囲環境が発する熱輻射を吸収し, 局所的な熱を発生する. この局所的な熱は伝導伝搬によって, MA 基板と接触した熱電素子の一端に伝搬し, 熱電素子上に温度勾配を形成する. これにより均一な熱輻射環境においても熱電発電を駆動することができる. 環境温度の上昇に伴い, MA 素子の出力電圧が向上する一方, 熱電素子の両端に比較電極を装着した比較素子では顕著な発電特性は確認できなかった (Fig. 1(d)).

このメタマテリアル熱電変換では, 高温環境に MA 素子が設置されているのに対し, 電力消費を行う外部抵抗は低温環境に設置されている. 従ってメタマテリアル熱電変換機構では, 高温部と低温部の熱交換が実施されていると見ることもできる. これは, MA 素子が設置された空間を冷却できることを示唆する. MA が吸収体に囲まれた空間内の熱を回収し, 熱電変換によってその熱を電流として空間外に輸送するため, 空間内の環境温度が低下するためである. 吸収体に囲われた空間の冷却は放射冷却では実現できないことで, 高集積デバイスパッケージ内の冷却などへの展開が期待できる. そこで我々はこの機構を非放射冷却と名付け, 実証を試みた. その結果, メタマテリアル熱電変換によって, 吸収体に囲われた空間の冷却が可能であることを実証した (Fig. 1(e)).⁵

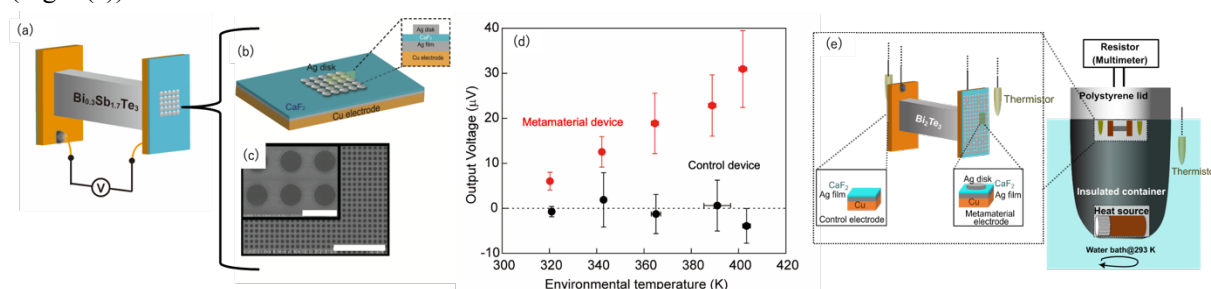


Figure 1 Schematics of (a) the metamaterial thermoelectric device and (b) metamaterial electrode. (c) Top-view SEM images of the metamaterial electrode. The inset is a magnified image, and the scale bars are 3 μm and 30 μm , respectively. (d) Dependence of the output voltages generated by the metamaterial device (red) and a control device (black) on the measured environment temperatures. (e) Experimental setup for nonradiative cooling.

References

1. Katsumata, S., Tanaka, T. & **Kubo, W***. *Opt. Express* **29**, 16396-16405 (2021).
2. Nakayama, R., Saito, S., Tanaka, T. & **Kubo, W***. *Nanophotonics* **13**, 1361-1368 (2024).
3. Saito, S., Yamamoto, A., Lu, Y.-J., Tanaka, T. & Kubo, **W. Kubo***, *Discover Nano* **20**, 44 (2025).
4. K. Hamada, Hui-Hsin Hsiao, and **W. Kubo***, *Sci. Rep.*, **14**, 31842 (2024).
5. Kawamura, N., Tanaka, T. & **Kubo, W***. *ACS Photonics* **11**, 1221-1227 (2024).

自動的に温度差が発生する PN 接合型 CNT 熱電発電デバイス

PN junction CNT thermoelectric devices with self-generated temperature difference

東海大工¹,[○]高尻 雅之¹, 玉井 涼太¹, 浅野 結太¹

School of Engineering, Tokai Univ¹,

[○]Masayuki Takashiri¹, Ryota Tamai¹, Yuta Asano¹

E-mail: takashiri@tokai.ac.jp

1. 緒言

熱電発電技術は熱エネルギーを電気エネルギーに直接変換できるため、環境発電技術として非常に優れている。しかし、熱電発電技術には大きな課題がある。それは熱電発電デバイス中に温度差を発生させるために熱源と冷源の2つが必要なことである。本研究では、この課題を克服すべく、環境負荷の小さい単層カーボンナノチューブ (CNT) を使用した熱源に貼り付けるだけで自動的に温度差が発生する PN 接合型熱電発電デバイスを開発した。

2. 実験方法

図 1 に PN 接合型 CNT 熱電発電デバイスの作製手順を示す。

- ① CNT 分散液の作製：単層 CNT 粉末 (SG-CNT：日本ゼオン) を用いて、P 型、N 型、I 型 (中性) の 3 種類の CNT 分散液を作製した。特に N 型 CNT 分散液には、これまでの研究で長期安定性が確認されているものを使用した[1]。
- ② CNT 膜の形成：真空ろ過法を用いて CNT 膜を作製した。直径 90 mm のろ過用フィルターを縦方向に 3 分割し、中央に I 型分散液、その両側に P 型と N 型分散液を塗布した。
- ③ 熱処理と切り出し：作製した CNT 膜を熱処理した後、中央の部分 (長さ 40 mm、幅 10 mm) を切り出した。
- ④ 基板への貼り付け：切り出した CNT 膜をポリイミド基板に貼り付け、デバイスを完成させた。

3. 実験結果

図 2 に PN 接合型 CNT 熱電発電デバイスの発生電圧とヒーター温度の関係を示す。約 370 K で均一に加熱したところ、約 0.7 mV の安定した出力電圧が得られた。さらに PN 接合 CNT 膜の積層数を 1 枚から 3 枚に増やすことで、出力電圧は 3 倍を超える約 2.3 mV まで向上した。

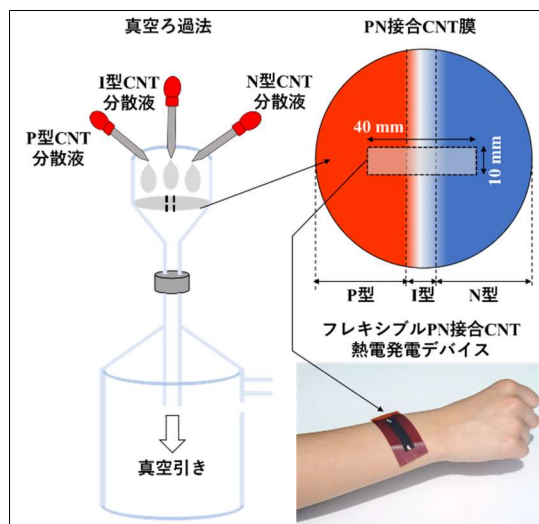


Fig. 1. Schematic diagram of device fabrication.

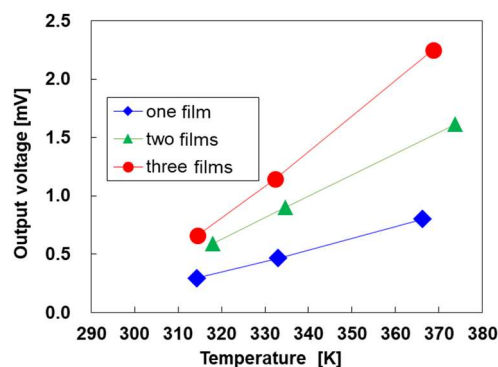


Fig. 2. Output voltage of thermoelectric device as a function of heater temperature.

4. 結言

本研究では、PN 接合型 CNT 熱電発電デバイスを均一加熱した状態でも出力電圧が発生した。これはデバイス内に自動的に温度差が発生したためであると考えられる。シンポジウムではそのメカニズムについて言及する。

参考文献

- [1] Y. Amma *et al.* Sci. Rep. 14, 21603 (2022).

半導体増感型熱利用発電(STC)の熱力学：二つの情報熱機関による描像

Thermodynamics of Semiconductor-Sensitized Thermal Cells (STC):

A Description in Terms of Two Information Heat Engines

株式会社 elleThermo¹, Science Tokyo², [○]齋藤 仁志¹, 松下 祥子^{1,2}

elleThermo Ltd.¹, Science Tokyo², [○]Hitoshi Saito¹, Sachiko Matsushita^{1,2}

E-mail: saitou.h@ellethermo.com

熱を直接電力へ変換する新しい手法として我々が開発している半導体増感型熱利用発電 (Semiconductor-Sensitized Thermal Cell: STC)は、発電セルを等温系に埋め込んでも、時間を置いて回路接続を適切に ON/OFF するだけで、放電と発電性能の回復を繰り返すことができる。この稼働温度は 100℃以下の低温熱源中でよく、さらには室温での放電/回復挙動も確認されている。

STC は、色素増感型太陽電池の光励起を半導体の熱励起に置き換えることを着想元としており、その構成は電解液が作用極である半導体と対極に挟まれた構造をしている[1]。半導体である作用極と対極間には電位差があり、回路を接続すると、半導体/電解液界面では酸化反応が、対極/電解液界面では還元反応が優位になり、平衡状態に至るまで電流が取り出せる。ここでいう平衡状態とは、半導体電極のフェルミ準位と、対極での酸化還元準位が一致する状態である。特筆すべき点として、この電極間の電位が揃った平衡状態において、電解液中には異なる価数の電解質に由来する濃度勾配が内部に形成されていることである。したがって、開回路状態にして時間を置くと濃度勾配が解消され、最初の電位差を形成している状態に極めて近くなる。すなわち STC の動作では回路の ON/OFF 操作によって行き着く平衡状態が異なり、その 2 つの平衡状態間を行き来する間で電力が取り出される。そこで STC の熱力学描写として、2 つの情報熱機関[2]によるモデルを試みた。情報熱機関(1)は、半導体内の熱励起電荷を粒子系とし、電極/電解質界面での Cu(I) / Cu(II)イオン電解質の配置をメモリとする。情報熱機関(2)は、Cu(I) / Cu(II)イオン電解質のバルクでの濃度勾配を粒子系とし、電極間の電位差をメモリとする。2 つの情報熱機関が互いの機能を一部共有しながら、もう一方のメモリコスト (記録または消去) を支払うことで動作している状態として見る。すなわち、スイッチ ON では情報熱機関(1)が優位に働いて電流仕事を作りつつ、その仕事を利用して情報熱機関(2)のメモリが書き込まれる。スイッチ OFF では情報熱機関(2)の粒子系である電解液の拡散を経て情報熱機関(1)のメモリが修復される(Fig. 1)。

[引用文献] 1) S. Matsushita, *Chem. Commun.*, 2025, **61**, 5556.

2) J. M. R. Parrondo, J. M. Horowitz, T. Sagawa, *Nat. Phys.*, 2015, **11**, 131.

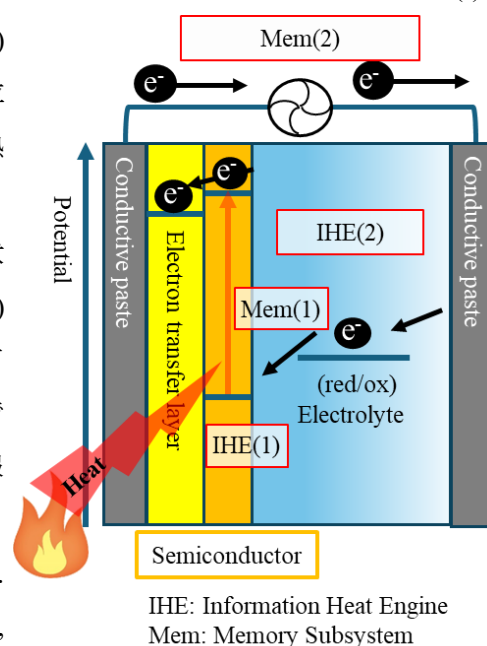


Fig. 1 Schematic image of the STC.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：熱流れの中で発電する新しい熱エネルギー変換について語る

[9p-S103-1~7] 熱流れの中で発電する新しい熱エネルギー変換について語る

[9p-S103-7] パネルディスカッション：熱流を電気に変えるとはどういうことか？

○松下 祥子¹、久保 若奈³、柴田 恭幸⁴、高尻 雅之²、藤原 隆⁵ (1.Science Tokyo / elleThermo、2.東海大、3.東京農工大、4.海洋大、5.GCE Institute)

キーワード：再生可能エネルギー、熱エネルギー、カーボンニュートラル

本シンポジウムで紹介された「熱の流れを利用して発電する技術」に取り組む研究者の方々をパネリストとしてお迎えし、「それって永久機関なの？」といった一般の方から寄せられる疑問にお答えします。誤解されがちなこの分野の原理や仕組みについて、わかりやすく解説します。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 構造が誘起するスピントロニクス新物理現象

[9p-N102-1~8] 構造が誘起するスピントロニクス新物理現象

[9p-N102-1]

らせん磁性体における磁気キラリティの制御と検出

○小野瀬 佳文¹ (1.東北大金研)

[9p-N102-2]

マルチフェロイック材料によるテラヘルツ光応答

○高橋 陽太郎^{1,2} (1.東大工、2.理研)

[9p-N102-3]

カイラル構造誘起スピントロニクス

○戸川 欣彦^{1,2} (1.大阪公立大、2.QuaRC)

[9p-N102-4]

熱誘起カイラルフォノンおよびホッピング伝導によるカイラリティ誘起スピン選択性の理論

○加藤 岳生¹ (1.東大物性研)

[9p-N102-5]

Hybridization of Spin Waves and Surface Acoustic Waves

○Jorge Puebla^{1,2} (1.Kyoto Univ., 2.RIKEN Inst.)

[9p-N102-6]

高強度テラヘルツ磁場パルスによる高速スピン制御

○廣理 英基¹ (1.京大化研)

[9p-N102-7]

非エルミート光系における新しい光カイラル現象

○森竹 勇斗¹、納富 雅也^{1,2,3} (1.科学大理、2.NTT BRL、3.NTT NPC)

[9p-N102-8]

動的テラヘルツメタマテリアルの新潮流

○中田 陽介¹、中西 俊博²、高野 恵介³、宮丸 文章³ (1.阪大基礎工、2.京大工、3.信大理)

らせん磁性体における磁気キラリティの制御と検出

Control and detection of magnetic chirality in helimagnets

東北大金研 ○小野瀬 佳文

Institute for Materials Research, Tohoku University ○Yoshinori Onose

E-mail: yoshinori.onose.b4@tohoku.ac.jp

近年、強磁性メモリの漏れ磁場などの問題により反強磁性を用いたスピントロニクスが精力的に研究されているが、反強磁性の内部自由度は強磁性の磁化に比べて制御・検出が難しいことが課題の一つとなっている。本講演では、反強磁性の一種であるらせん磁性体における巻き方の自由度の制御・検出に関する我々の最近の研究内容を紹介する。

らせん磁性体は文字通り磁気モーメントがらせん状に整列する磁性体である。結晶構造が空間反転対称な場合には、らせん磁気状態にはらせんの巻き方（磁気キラリティ）に関する縮退があり、これが内部自由度として働く。絶縁体のらせん磁性体はマルチフェロイクスとして働き、電磁場印加により磁気キラリティを制御する手法は知られていた。一方で、スピントロニクスに応用可能な金属では、強い電場が印加できないためらせん磁気構造の磁気キラリティを制御する手法は分かっていなかった。最近、我々は電流と磁場を同時に印加することにより、スピン移行トルクの働きによって、図1のように磁気キラリティが制御出来ることを報告した[1,2]。また、制御したキラリティをスピン蓄積によって検出できることも明らかにした[2]。講演では、これらの結果に加えてらせん磁気構造におけるスライディング現象やスピン運動量ロッキングによる非相反伝導なども紹介する[3,4]。

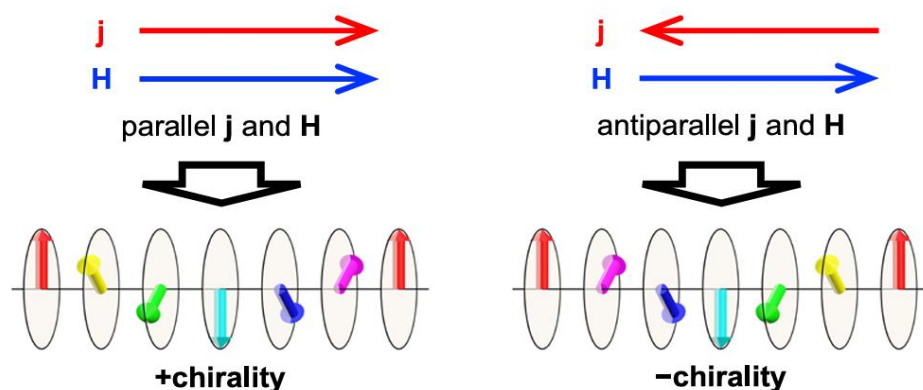


図1：らせん磁性体における電流磁場によるキラリティ制御[2].

[1] N. Jiang, Y. Nii, H. Arisawa, E. Saitoh, Y. Onose, Nat. Commun. 11, 1601 (2020).

[2] H. Masuda, T. Seki, Y. Onose *et al.*, Nat. Commun. 15, 1999 (2024).

[3] Y. Kimoto, H. Masuda, T. Seki, Y. Nii, Y. Onose, Phys. Rev. Lett. 134, 056702 (2025).

[4] A. H. Mayo, Y. Onose *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. 122, e2405839122 (2025).

マルチフェロイック材料によるテラヘルツ光応答

Terahertz optical responses of multiferroics

東大工, 理研 高橋陽太郎

Univ. of Tokyo, Riken Youtarou Takahashi

E-mail: youtarou-takahashi@ap.t.u-tokyo.ac.jp

スピンの秩序によって空間反転対称性が破れ、強誘電性が生じる物質はマルチフェロイクスと呼ばれ、磁性と誘電応答が結合した様々な物質機能が現れる。例えば、磁場による自発分極の制御や電場による磁化の制御がその代表例であるが、光学応答においても様々な現象が報告されている。その一例がテラヘルツ帯で観測されているエレクトロマグノンと呼ばれる光の電場に応答する磁気励起である。スピン秩序に由来した強誘電性が存在すると、スピン秩序のゆらぎであるマグノンは必然的に誘電応答を示し電場活性なエレクトロマグノンとなる。エレクトロマグノンは様々な光学現象を引き起こすことが知られており、その代表例は非相反光学応答である。実際に光吸収の非相反応答であるトロイダル型方向 2 色性や磁気カイラル効果、また偏光回転の非相反応答である旋光性複屈折がエレクトロマグノンの共鳴で著しく増強されることが知られている[1]。これらは線形の光学現象であるが、非線形光学効果にも興味深い現象が現れる。本講演では 2 次の非線形光学効果であるエレクトロマグノン生成による光起電力効果について紹介する。

光起電力効果は光子を電流に変換する非相反な物質機能のひとつである。近年、シフト電流と呼ばれる電子のバンドの量子幾何学的量に由来したバルク光起電力効果が注目を集めている。通常このシフト電流はバンド間遷移における光起電力効果の起源として知られており、極めて高い欠陥耐性を持つことも確認されている[2]。これに対し、光キャリアを生成しないフォノンやエレクトロマグノンなどの準粒子励起であっても、電子系との何らかのカップリングがあれば光電流を生成することが可能であることが理論的に示唆された[3]。我々はらせん磁性マルチフェロイクスを用いて、テラヘルツ光起電力効果の観測を行った[4]。ペロブスカイトマンガン酸化物はサイクロイド型らせん磁性相で磁性由来強誘電性を示す。らせん磁性相ではテラヘルツ帯にエレクトロマグノンの共鳴が現れる。このエレクトロマグノンをテラヘルツパルス光で共鳴励起し、試料の両端につけた電極で光電流を測定した。その結果、空間反転対称性が破れるらせん磁性相でのみテラヘルツ光電流を観測した。また、エレクトロマグノンが直接の電子励起であるバンド間遷移よりも大きな変換効率を持つことが明らかになった。

[1] Youtarou Takahashi and Yoshinori Tokura, J. Phys. Soc. Jpn. 94, 052001 (2025).

[2] H. Hatada, et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA 117, 20411–20415 (2020).

[3] T. Morimoto, & N. Nagaosa, Phys. Rev. B 100, 235138 (2019). T. Morimoto, S. Kitamura, & S. Okumura, Phys. Rev. B 104, 075139 (2021).

[4] Makiko Ogino, et al., Nature Communications 15: 4699 (2024).

カイラル構造誘起スピントロニクス

Spin Electronics with Chiral Materials

大阪公立大¹, QuaRC² ○ 戸川 欣彦^{1,2}

Osaka Metropolitan Univ.¹, QuaRC², ○Yoshihiko Togawa^{1,2}

E-mail: ytogawa@omu.ac.jp

物質中の電子やスピンや格子の協奏がもたらす巨視的応答の発現は物質科学の醍醐味の一つである。その鍵となる概念の一つとして物質が示すカイラリティ[1]が挙げられる。

カイラリティとは、鏡像異性体に見て取れるように、自身とその鏡像が鏡映操作や空間反転操作によって互いに関係づけられるが、回転操作と並進操作では重ならない形態を示す。カイラリティが関連する現象は分子から生体系まで自然界の様々な階層に見出される。よく観察してみると、カイラリティとは単に幾何学的な関係を意味するだけではなく、動的な特性を併せ持つことに気が付く。らせん構造に見出される回転と並進の結合はその代表例である。このような動的な特性を理解するにはローレンス・バロンが与えた再定義「カイラリティとは時間反転操作に対して不変な擬スカラー量によって特徴づけられる [2, 3]」が有用である。この対称性を持つ相互作用は微視的なカイラル項として機能してダイナミクスを誘起しうる。

最近、カイラル物質においてスピン角運動量 [4-13] やフォノンが持つ角運動量 [14] が巨大に偏極して [4, 5] 長距離に達すること [7-14] が見出された。その発現機構は謎であり、関心を集めている。講演ではカイラリティ誘起スピン選択性 (Chirality-Induced Spin Selectivity : CISS) やカイラルフォノン [15-17] など動的な偏極現象を題材として物質中におけるカイラリティの意義を論じる [18-21]。

[1] 固体物理<物質科学におけるカイラリティ>特集号, 用語集 **59**, 565-571 (2024). [2] L. D. Barron, Chem. Phys. Lett. **123**, 423 (1986). [3] L. D. Barron, *Molecular Light Scattering and Optical Activity* (2nd ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., 2004). [4] B. Göhler *et al.*, Science **331**, 894 (2011). [5] Z. Xie *et al.*, Nano Lett. **11**, 4652 (2011). [6] A. K. Mondal *et al.*, ACS Nano **14**, 16624 (2020). [7] A. Inui *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 166602 (2020). [8] K. Shiota *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 126602 (2021). [9] R. Nakajima *et al.*, Nature **613**, 479 (2023). [10] H. Shishido *et al.*, Appl. Phys. Lett. **119**, 182403 (2021). [11] H. Shishido *et al.*, J. Chem. Phys. **159**, 064502 (2023). [12] 戸川欣彦, 穴戸寛明, 山本浩史, 特許第 7291345 号. [13] Y. Kousaka *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, 015506 (2023). [14] K. Ohe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **132**, 056302 (2024). [15] K. Ishito *et al.*, Nat. Phys. **19**, 35 (2023). [16] K. Ishito *et al.*, Chirality **35**, 338 (2023). [17] E. Oishi *et al.*, Phys. Rev. B **109**, 104306 (2024). [18] 戸川欣彦, 数理科学 **693**, 9-15 (2021). [19] 戸川欣彦, 日本物理学会誌 **76**, 646-651 (2021). [20] Y. Togawa *et al.*, JPSJ **92**, 081006 (2023). [21] 固体物理<物質科学におけるカイラリティ>特集号 **59**, 565-760 (2024).

熱誘起カイラルフォノンおよびホッピング伝導による カイラリティ誘起スピン選択性の理論

Theory of Chirality-Induced Spin Selectivity via Thermally Induced Chiral Phonons and Hopping Conduction

東大物性研 加藤 岳生

ISSP, Univ. to Tokyo E-mail: kato@issp.u-tokyo.ac.jp

物質のカイラリティを利用した電子のスピン依存伝導現象であるカイラリティ誘起スピン選択性 (CISS)が注目を集めている。しかしながら、数多くの理論的および実験的研究にもかかわらず、その微視的機構は未解明のままである。本講演では、電子スピンと剛体回転の間の角運動量変換現象である磁気回転効果[1]に着目し、カイラルフォノンと電子スピンの変換を基にした CISS の理論を紹介する[2,3]。この理論では、カイラルフォノンの存在下で生じる「微小回転」に着目して界面でのスピン - 微小回転結合を導く。この結合はスピン - 軌道相互作用を必要とせず、特に軽元素における CISS 効果をよく記述すると期待される。

本講演では2つの異なる系におけるカイラルフォノン-スピンの変換理論を紹介する。まず、常伝導金属(NM)とカイラル絶縁体(CI)(図1)からなる接合系を考え、界面での磁気回転効果によるスピン-フォノン結合を摂動的に扱うことにより、温度バイアス下で常磁性金属に注入される界面スピン電流を考察する[2]。この系では、温度勾配によって誘起されたカイラルフォノンモード間の非平衡分布によって、常磁性金属とカイラル絶縁体の界面にスピン流が生成される。本研究結果は α -クォーツを用いた最近の実験結果とよく整合する[4]。次にらせん構造をもつDNAにおけるホッピング伝導を考察する[3]。電圧印加による電子の伝導によって界面付近にスピン蓄積が生じることを示し、実際の実験結果との比較も行う。

【参考文献】

[1] S. Chikazumi, Physics of Ferromagnetism, Oxford University Press, Oxford, 2009. [2] T. Funato, M. Matsuo, and T. Kato, Phys. Rev. Lett. **132**, 236201 (2024). [3] R. Sano and T. Kato, preprint (arXiv: 2404.19000). [4] K. Ohe, et al., Phys. Rev. Lett. **132**, 056302 (2024).

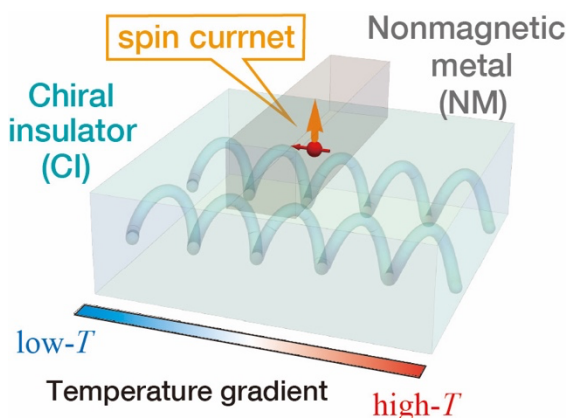


図 1. 本研究で考察する常磁性金属
とカイラル絶縁体の接合系

Hybridization of Spin Waves and Surface Acoustic Waves

Jorge Puebla^{1,2}

¹ Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University, Kyoto 615-8510, Japan

² Center for Emergent Matter Science, RIKEN, Wako-shi, Saitama 351-0198, Japan

E-mail: puebla.jorge.8m@kyoto-u.ac.jp

The interaction between surface acoustic waves (SAWs) and spin waves is attracting growing interest in spintronics and magnetism [1]. While spin waves in ferromagnets are typically excited by microwave photons, they can also be driven by phonons, as predicted by Kittel [2]. When SAWs and spin waves strongly couple, hybrid quasiparticles emerge, blending phononic and magnonic characteristics. Our recent experiments demonstrate such hybridization at room temperature in an on-chip SAW device [3]. Using acoustic reflectors to form a low-loss cavity [4, 5] and CoFeB layers with low damping, we observed avoided crossing in the dispersion curves, a hallmark of strong coupling. SAW transmission data revealed bending in the phonon dispersion near magnon resonance. With a 10 nm CoFeB layer, energy absorption at ~30 mT was evident, but the dispersion remained linear. At 20 nm, both absorption and bending occurred, confirming strong coupling. This indicates that phonons acquire magnon-like properties and respond to magnetic fields, and vice versa, opening paths for hybrid-wave-based information and communication devices.

Furthermore, in the thin-film regime where the acoustic wavelength exceeds the magnetic layer thickness, we observed a monotonic increase in coupling strength with CoFeB thickness, suggesting a pathway toward ultra-strong coupling.

In this talk, I will present these findings and discuss their potential impact on future hybrid magnon-phonon devices, especially as improved experimental techniques enable deeper insight into their spatial, temporal, and phase dynamics.

References

- [1] J. Puebla, Y. Hwang, S. Maekawa, Y. Otani, Perspectives on spintronics with surface acoustic waves, Appl. Phys. Lett. 120, 220502 (2022)
- [2] C. Kittel, Interaction of Spin Waves and Ultrasonic Waves in Ferromagnetic Crystals, Phys. Rev. 110, 836 (1958)
- [3] Y. Hwang, J. Puebla, K. Kondou, C. Gonzalez-Ballester, H. Isshiki, C. Sanchez Munoz, L. Liao, F. Chen, W. Luo, S. Maekawa and Y. Otani, Strongly Coupled Spin Waves and Surface Acoustic Waves at Room Temperature, Phys. Rev. Lett. 132, 056704 (2024)
- [4] Y. Hwang, J. Puebla, M. Xu, A. Lagarrigue, K. Kondou, Y. Otani, Enhancement of acoustic spin pumping by acoustic distributed Bragg reflector cavity, Applied Physics Letters 116, 252404 (2020)
- [5] D. Hatanaka, M. Asano, H. Okamoto, Y. Kunihashi, H. Sanada, and H. Yamaguchi, On-Chip Coherent Transduction between Magnons and Acoustic Phonons in Cavity Magnomechanics, Phys. Rev. Applied 17, 034024 (2022)

高強度テラヘルツ磁場パルスによる高速スピン制御

Ultrafast Spin Control by Strong Terahertz Magnetic Field Pulses

京大化研 廣理英基

ICR, Kyoto Univ. Hideki Hirori

E-mail: hirori@scl.kyoto-u.ac.jp

反強磁性体は、スピンの反平行またはほぼ反平行に整列することにより、全体としてゼロまたは非常に小さい磁化を示す物質である。この反強磁性秩序は、ルイ・ネールによって発見され、1970年にはノーベル物理学賞が授与された。このスピン配列の起源は、スピンサブ格子という概念を用いることで説明できる。異なるスピンサブ格子のスピンは、特定の交換相互作用によって結びつき、その相互作用が正であれば反平行で安定化し反強磁性秩序が生じる。特に反強磁性体では、交換相互作用が強いため、スピン歳差運動の共鳴周波数はテラヘルツ(THz)領域に達する。さらに、反強磁性体は磁氣的な漏れ磁場を小さいため、高密度に配置してもサイト間で干渉せず、小型化が可能である。このため、近年、テラヘルツ (THz) 周波数帯における反強磁性体のスピンドायナミクスが精力的に研究されており、高速なスピndeバイスへの応用が期待されている。

希土類オルソフェライト($R\text{FeO}_3$, R :希土類元素)は、テラヘルツ (THz) 周波数帯の反強磁性 (AFM) モードを持つが、従来の可視光パルスを用いた励起法ではサンプルの加熱効果によりスピン運動が線形領域に制限されていた。本研究では、螺旋状の金属マイクロ共振器を用いて、1 T を超える高強度 THz 磁場パルスを試料内部に発生させ [1,2]、 HoFeO_3 結晶における非線形スピン運動を観測した [3]。生成された THz 磁場パルスは、鉄イオンのスピンのゼーマントルクとして作用し、直接的にスピン歳差運動を誘起する。観測されたスピン運動は、磁化変化による可視光偏光楕円率角の変化として検出され、時間分解スペクトルにおいて第三高調波成分が観測された。また、THz 磁場強度の増加に伴い、AFM モードの共鳴周波数がレッドシフトすることを確認し、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式に基づく解析から、この非線形応答の起源が磁気ポテンシャルの非調和性にあることを示した。さらに、希土類オルソフェライトは内部の希土類電子系の状態に応じた磁気異方性の変化により、特定の温度範囲でスピン再配列転移を示す。本研究では、室温付近でスピン再配列転移を示す $\text{Sm}_{0.7}\text{Er}_{0.3}\text{FeO}_3$ を対象として、多周期の高強度 THz 磁場パルスを印加し、閾値的なスピンスイッチングを観測した[4]。測定結果から、AFM モードと強磁性 (FM) モードの結合効果、および THz 磁場パルスによる磁気ポテンシャルの周期的変調がスピンスイッチング現象の要因であることを明らかにした。

[1] H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, K. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **98**, 091106 (2011). [2] K. Maruyama, Y. Knemitsu, H. Hirori *et al.*, Appl. Phys. Express **17**, 022004 (2024). [3] Z. Zhang, Y. Knemitsu, H. Hirori *et al.*, Nat. Commun. **14**, 1795 (2023). [4] Z. Zhang, Y. Knemitsu, H. Hirori *et al.*, Nat. Mater. **24**, 219 (2025).

非エルミート光系における新しい光カイラル現象

Non-Hermitian Chirality in Nanophotonic Structures

科学大¹, NTT NPC², NTT BRL³ °森竹 勇斗¹, 納富 雅也^{1,2,3}

Science Tokyo¹, NTT NPC², NTT BRL², °Yuto Moritake¹, Masaya Notomi^{1,2,3}

E-mail: moritake@phys.titech.ac.jp

空間的な鏡映対称性が破れたカイラル構造は、光学活性（旋光性や円偏光二色性）を示す。ナノフォトニクスでは、人工構造を用いることで自然界の材料では得られないような巨大な光学活性を実現できるため、盛んに研究が行われている。カイラルな人工構造として 3 次元的ならせん状構造が用いられことが多いが、このような構造は作製の難しさや動的な制御の困難さといった課題も抱えている。

我々は最近、光学系における非エルミート性に起因する、新しいタイプの光カイラル応答（厳密にはカイラルのような応答）に注目している [1,2]。この非エルミートカイラリティは、従来の 3 次元カイラル系と異なり、本質的に 2 次元構造において発現する。3 次元系では、系の垂直方向に円偏光放射が可能だが、対称性の制約により 2 次元系ではそれが許されない。一方、非エルミートな 2 次元系では、垂直方向への円偏光放射が可能となる。ただし、上下方向に異なるヘリシティの円偏光が放射される点が、3 次元カイラル系との大きな違いである。また、非エルミート系では、このような応答が屈折率の虚部（損失）によって制御が可能であり、応答の動的制御において 3 次元カイラル系よりも優位性をもつ可能性がある。

このような非エルミートカイラリティをもつ系は、例えば図 1(b), (c) のような構造で実現できる [3]。この構造では、Si フォトニック結晶の上に、大きな吸収（屈折率虚部）をもつグラフェンを特定の場所のみに装荷している。このように屈折率虚部の分布をデザインすることで、非エルミートカイラリティを実現することができる。特にこの系では、例外点 (Exceptional point) と呼ばれる、非エルミート系特有の特異点を用いることで、基板垂直方向の波数をもつ円偏光状態が実現されている。

この系に加えて我々は、異方的な損失を有するメタマテリアルにおいて、非エルミート・スキン効果 (NHSE) による光軌道角運動量 (OAM) の生成を提案している [4,5]。本講演では、このような非エルミートカイラリティをもつナノフォトニック構造に関する、我々の最近の研究について紹介する。

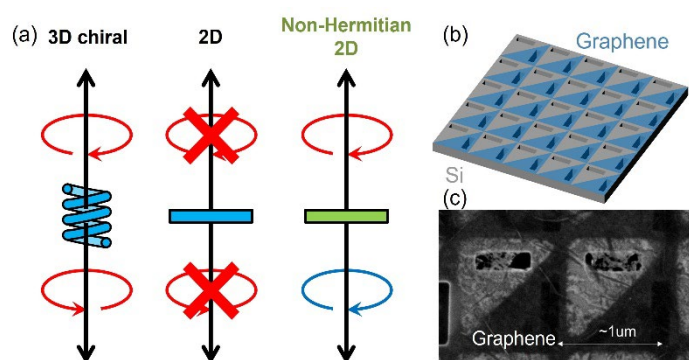


Fig. 1 (a) Circularly polarized emission from 3D, 2D, and non-Hermitian 2D structures. (b) Schematic and SEM image of the graphene-loaded photonic crystal.

参考文献：[1] V. A. Fedotov et al. PRL, 97, 167401 (2006). [2] M. Lawrence et al. PRL 113, 093901 (2014). [3] S. Suzuki et al., “Non-Hermitian Chirality and Topological Properties of Graphene-Loaded Photonic Crystals,” CLEO2023, 2023. [4] T. Yoda, et al. arXiv:2303.05185. [5] I. Takeda et al., arXiv:2505.01417.

謝辞：本研究は、科学研究費補助金 (20H05641, 21K14551, 23K26581, 24K01377, 24H02232, 24H00400)の援助の下に行われた。

動的テラヘルツメタマテリアルの新潮流

Current Trends in Dynamic Terahertz Metamaterials

阪大基礎工¹, 京大工², 信大理³ ○中田 陽介¹, 中西 俊博², 高野 恵介³, 宮丸 文章³

Osaka Univ.¹, Kyoto Univ.², Shinshu Univ.³, ○Yosuke Nakata¹, Toshihiro Nakanishi², Keisuke Takano³, Fumiaki Miyamaru³

E-mail: y.nakata.es@osaka-u.ac.jp

テラヘルツ周波数帯は、電波と赤外領域の中間に位置し、バイオセンシングや次世代通信技術への応用が期待されている。人工的に設計された構造体であるメタマテリアルは、テラヘルツ波を操作する上で中心的な役割を果たす。中でも、外部刺激によって構造を変化できる動的メタマテリアルはテラヘルツ波の変調を可能にし、センシングや通信システムにとって重要である。加えて、動的メタマテリアルは時空間に渡る構造を有し、その特有の人工スケールを介して従来は結合が難しかった準粒子間に結合を誘起しうる。このため、動的メタマテリアルを準粒子反応のリアクタとみだてることができ、キメラ準粒子科学への展開も期待されている。本講演ではこうした動的テラヘルツメタマテリアルの研究動向を、決定論的設計論と時変現象への展開という2つのパラダイムに着目して紹介したい。

金属構造のトポロジを変えることで、電磁応答特性は劇的に変化する。この性質を動的メタマテリアルに応用することで、機能性を切り替え可能なデバイスを実現できる。二酸化バナジウム (VO_2) は、絶縁体から金属への転移により電気伝導度の劇的な変化を引き起こすため、金属構造変化を実現する最も有力な材料候補の1つである。動的メタマテリアルの設計の主な課題は、構造変形の前後で最適動作の条件を保ちながら設計を行なう必要がある点にある。近年、メタマテリアルを可能な限り決定論的に設計しようという新たなパラダイムが生まれてきており、特に複数の状態を同時に最適化する必要がある動的メタマテリアル設計に有効である。決定論的アプローチの一環として、我々は金属と VO_2 を用いたメタマテリアルの共振を精密に制御することで、高効率かつ広帯域のヘリシティスイッチングを実現する動的 $1/4$ 波長メタ表面を実現している [1]。

動的テラヘルツメタマテリアルの適用可能性は機能性のスイッチングにとどまらない。電磁波の伝搬中に金属トポロジを瞬間的に変化させると、周波数変換に代表される時間的現象を引き起こすことができる。近年こうした時変系のメタマテリアルに大きな注目が集まっている。非線形光学結晶を用いた場合に比べ、時変系を用いた周波数変換は、極めて高い変換効率が得られる点で優れている。フェムト秒レーザーを用いて半導体を光励起することで、サブピコ秒のスケールで変化する金属構造を実現でき、これにより光励起導波路におけるテラヘルツ波の周波数アップコンバージョンおよびダウンコンバージョンが実証されてきている [2, 3]。また、理論的な研究により、このような系にゼロモードが出現し、テラヘルツ波のトラッピングが可能であることも理論的に示唆されている [4]。本講演では、これらの時変現象の展望についても包括的に論じたい。

[1] A. Inokuma *et al.*, Appl. Phys. Lett. **125**, 081703 (2024).

[2] F. Miyamaru *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 053902 (2021).

[3] K. Takano *et al.*, Nanophotonics **13**, 3077-3089 (2024).

[4] Y. Nakata *et al.*, Phys. Rev. Research **5**, L042027 (2023).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスのフロンティア2

[8a-S201-1~4] フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスのフロンティア2

[8a-S201-1]

オープニング

○横田 知之¹ (1.東大工)

[8a-S201-2]

血管内空間に展開するストレッチャブルエレクトロニクス: 極低侵襲BMIの実現と医療応用

○関谷 毅¹ (1.阪大産研)

[8a-S201-3]

単層カーボンナノチューブの熱電応用

○野々口 斐之¹ (1.京都工繊大)

[8a-S201-4]

大規模言語モデルの背後に蝶

○中嶋 浩平¹ (1.東大情理)

血管内空間に展開するストレッチャブルエレクトロニクス： 極低侵襲 BMI の実現と医療応用

Intravascular Stretchable Electronics for Minimally Invasive BMI

阪大産研 °関谷 毅

SANKEN, Univ. of Osaka, °Tsuyoshi Sekitani

E-mail: sekitani@sanken.osaka-u.ac.jp

本研究では、ストレッチャブル構造と柔軟・抗血栓性ポリマー材料を融合させた血管内脳波計測デバイス（BMI）を開発している。血管内デバイスは、ヘリカル構造を有する極薄膜の電極を中核とし、脳の静脈血管内に安全かつ安定的に留置できる柔軟性と生体適合性を兼ね備える。血流下での長期安定動作を実現するために、導電性と抗血栓性を両立させた材料設計と成膜プロセスの最適化を行った。大型動物を用いた実験では、49 日間にわたって高品質な皮質脳波信号を連続的に取得することに成功している。従来の頭皮や皮質直上からの脳波計測と比較しても高い信号忠実度を示しており、本技術が極低侵襲型の神経インターフェースとして有望であることを示す。本講演では、デバイス構造、材料特性、信号取得性能、今後の医療応用展開について詳述する。

本研究の一部は、JST ムーンショット目標 1（JPMJMS2012）の支援を受けて進められた。

単層カーボンナノチューブの熱電応用

CNT-based Thermoelectrics

京工繊大¹, °野々口 斐之¹Kyoto Inst. Tech.¹, °Yoshiyuki Nonoguchi¹

E-mail: nonoguchi@kit.ac.jp

熱電材料を用いたエネルギーハーベスティング技術は、近年、環境中に存在する未利用エネルギーを回収し、センサー駆動やワイヤレス通信などの分散型電子デバイスに電力を供給する手段として注目を集めている。特に、単層カーボンナノチューブ (CNT) は、狭いバンドギャップ、高いキャリア移動度、柔軟な構造といった特性を併せ持つことから、次世代の柔軟・薄型熱電材料として大きな可能性を秘めている。CNT を用いた熱電材料は、低温から中温域のあらゆる廃熱を効率的に電力に変換できる柔軟な発電モジュールへの応用が期待されている。

本研究分野においては、熱電性能を向上させるための化学的ドーピング手法の開発や、熱電

特性とナノ構造との相関解明を目的とした高精度な構造選別および成膜技術の確立が重要な課題となっている。これらの課題に取り組むには、電子物性物理のみならず、熱伝導の制御を扱う熱工学、さらに材料調製においては分子認識や自己組織化などの化学的知見の融合が求められる。

本講演では、単層カーボンナノチューブを基盤とした熱電材料開発に関する我々の研究成果を紹介する(Fig. 1)。特に、n 型ドーピングのコンセプト構築¹、その体系化による汎用的指針の提案²、さらにこの概念を p 型ドーピングへと展開した試み³について述べる。また、半導体性 CNTs における構造と熱電特性の関係に関する系統的な検討^{4,5,6}、およびこれらの材料を応用した熱電デバイスやジェネレータへの実装事例^{7,8}についても取り上げ、材料化学とデバイス工学を横断するアプローチの有効性を議論する。

1) Y. Nonoguchi *et al.* *Adv. Funct. Mater.* **2016**, 26, 3021–3028; 2) Y. Nonoguchi *et al.* *J. Mater. Chem. A* **2018**, 6, 21896–21900; 3) M. Nakano *et al.* *Small* **2017**, 13, 1700804; 4) J. Komoto *et al.* *Appl. Phys. Lett.* **2021**, 118, 261904; 5) Y. Nonoguchi *et al.* *Sci. Technol. Adv. Mater.* **2018**, 19, 581–587; 6) T. Yagi *et al.* *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, 146, 20913–20918; 7) M. Ishimaru *et al.* *MRS Advances* **2019**, 4, 147–153; 8) D. Suzuki *et al.* *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15, 9873–9882.

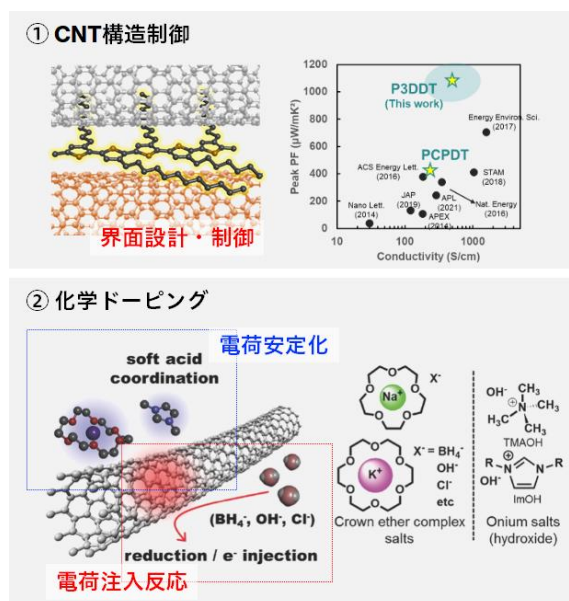


Fig. 1 CNT 構造制御と化学ドーピングに基づく熱電変換材料の開発

大規模言語モデルの背後に蝶

Butterfly behind LLM

中嶋浩平¹

Univ. Tokyo¹

E-mail: k-nakajima@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp

ChatGPT などに代表される大規模言語モデル (LLM) は、現在、社会的に広く実装されており、もはや、一度も使ったことがない人を探すことは難しいほどである。我々のチームでは、これまでに、LLM の中身で何が起きているのかに興味を持ち、解析を進めてきている。これは、現存する膨大な言語データを使って、あらゆる言語的営みを封緘した巨大なネットワークを準備し、それを使用に合わせて調整するという発想が、まさにリザーバー計算と親和的であるからだ[1]。我々は”LLM as a reservoir”を標語とし、様々なタイプの LLM を対象に、ネットワーク内部の系列データを解析した。本講演では、我々が共同研究者とともに、これまで明らかにしてきた結果を紹介する。単的にいうと、LLM の背後には、非常に複雑なダイナミクスが走っている。例えば、ALBERT と呼ばれる LLM の内部ダイナミクスが過渡カオスを示すことを発見した[2]。この性質は学習前には現れず、学習後に初めて現れる性質なので、言語の性質が少なからず反映したものと考えられる。この結果に inspire され、カオス力学系を深層学習機として活用するスキームを考案することにも成功した[3]。また、ALBERT のみならず、GPT-2, Llama-3.1 などの複数の LLM の複雑な内部系列と人間の脳のダイナミクスを比較することを試みた。そうすると、エネルギー地形解析を行った結果の傾向を見るに、LLM はウェルニッケ失語症のダイナミクスに似ていることを発見した[4]。こういった一連の結果は何を意味するのであろうか？最後に、この結果の含意について、議論したい。

[1] Nakajima, K. (2020). Physical reservoir computing—an introductory perspective. *Japanese Journal of Applied Physics*, 59(6), 060501.

[2] Inoue, K., Ohara, S., Kuniyoshi, Y., & Nakajima, K. (2022). Transient chaos in bidirectional encoder representations from transformers. *Physical Review Research*, 4(1), 013204.

[3] Liu, S., Akashi, N., Huang, Q., Kuniyoshi, Y., & Nakajima, K. (2024). Exploiting Chaotic Dynamics as Deep Neural Networks. *arXiv preprint* arXiv:2406.02580.

[4] Watanabe, T., Inoue, K., Kuniyoshi, Y., Nakajima, K., & Aihara, K. (2025). Comparison of Large Language Model with Aphasia. *Advanced Science*, 2414016.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスのフロンティア2

[8p-S201-1~11] フレキシブル・ストレッチャブルエレクトロニクスのフロンティア2

[8p-S201-1]

有機半導体結晶薄膜とフレキシブルデバイス

○竹谷 純^{1,2} (1.東大新領域、2.パイクリスタル)

[8p-S201-2]

分子集合体からなるヒドロゲル材料

○池田 将¹ (1.岐阜大工)

[8p-S201-3]

裏表で接着力の異なるエラストマーヤヌスシートの開発と評価

○堀井 辰衛¹、石岡 将史²、小寺 賢²、藤枝 俊宣¹ (1.科学大生命理工、2. (株) MORESCO)

[8p-S201-4]

集積化と分離が容易なフレキシブルデバイス実現に向けた可逆的な直接接合技術の検討

○高桑 聖仁¹、Liu Hao¹、伊藤 寿浩¹、染谷 隆夫¹、横田 知之¹ (1.東大工)

[8p-S201-5]

デジタルスキンデバイスによる高性能触覚検出の基礎と応用

○関根 智仁¹ (1.山形大院有機)

[8p-S201-6]

折り紙・切り紙・切り折り紙構造を用いた伸縮電子デバイス

○岩瀬 英治¹ (1.早大)

[8p-S201-7]

多点顔面電気信号計測のための見えない皮膚電極

○劉 怡君¹、伊藤 健太郎^{1,2}、加藤 健郎²、王 立人^{1,2}、朱 逸成¹、S  verine De Mulatier¹、荒生 弘史³、諏訪園 秀吾⁴、浅野 裕俊⁵、周 元元^{1,2}、三友 陽向^{1,2}、龔 慧敏¹、野村 旺雅²、香川 学斗²、渡部 夏海⁵、Mohammad H. Behfar⁶、菅野 裕介¹、高橋 英俊²、浅井 誠⁷、Jiheong Kang⁸、松久 直司^{1,2} (1.東大先端研、2.慶大理工、3.正大人間、4.沖縄病院、5.工学院情報、6.VTT、7.KGRI、8.ソウル大)

[8p-S201-8]

物体の柔らかさ検知を可能にするe-skinの開発

○新田 敦之¹、近藤 芳樹¹、中村 悠希¹、清宮 徳人¹、竹井 邦晴¹ (1.北大情)

[8p-S201-9]

ナノメッシュを用いた摩擦帯電型ウェアラブル咽喉マイクの開発

○(M1)立花 卓遠¹、海老原 祐輔¹、山岸 健人¹、横田 知之¹、染谷 隆夫¹ (1.東大院工)

[8p-S201-10]

腹部表面上自己接着性電極によるサイボーグ昆虫の運動制御

○片山 俊平^{1,2}、安藤 圭吾^{1,2}、李 成薫¹、Jiang Zhi³、Chen Xiaodong³、横田 知之⁴、佐藤 裕崇³、梅津 信二郎²、福田 憲二郎¹、染谷 隆夫^{1,4} (1.理研、2.早大、3.南洋理工大、4.東大)

[8p-S201-11]

クロージング

○松久 直司¹ (1.東大先端研、生研)

有機半導体結晶薄膜とフレキシブルデバイス

Organic Thin-film Semiconductor Crystals for Flexible Electronic Devices

東大新領域¹, パイクリスタル² °竹谷 純一^{1,2}

Univ. of Tpkyo¹, Pi-Crystal Inc.², °Jun Takeya¹

E-mail: takeya@k.u-tokyo.ac.jp

本講演では、有機半導体分子を二次元配列させた結晶薄膜をベースとして、AC-DC 集積回路と高感度歪・振動センサーとへの展開について紹介する。半導体性能と構造安定性を両立する有機分子の例として、パイ共役有機分子アルキルジナフトベンゾジチオフェン(Cn-DNBDT)有機分子を設計・合成し、さらに、溶液のメニスカスを一方向に掃引することによって自発的に二次元単結晶に自己組織化させる手法を見出した[1]。このように自己集合した分子層有機単結晶膜は、単分子層かつサイズ無制限の究極の二次元性に加えて、半導体デバイス性能を決める電子移動度においても他の有機半導体材料を凌駕する [2]。また、電子フォノンカップリングが強いことが、フレキシブルな有機半導体の特徴であり、その結果、巨大な歪応答を示すことが明らかとなった。この結果は高感度の歪・振動センサーの開発に直結している[3]。

2000 年以前には、移動度が $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以下の有機半導体しか報告されておらず、有機半導体中では分子間の電子移動によって位相情報を失うホッピング伝導のみが可能であると理解されていた。これに対して、2003 年以降、 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える移動度の有機単結晶トランジスタが報告され、ホール効果測定によって、位相情報を保持するコヒーレントなキャリアが、室温では分子をまたいで広がって非局在化しているバンド伝導が実現していることを明らかにした[4,5]。また、ごく最近になってイオン液体の電気二重層を用いて、量子井戸構造を有する有機半導体結晶に強い電界を加えることによって、 10^{14} cm^{-2} 級の高密度のキャリアが導入された二次元電子系も得られ、10 K 以下の低温に冷却した場合も、電気抵抗が減少する金属状態に転移していることが明らかになった[6]。このように、コヒーレントに広がった電子状態は、高いキャリア伝導性ととともに、半導体材料を実用に供するために、不可欠な安定性を保証する極めて有利な特性である。クリーンなコヒーレント電子系では、キャリア注入の際に生じる分子の酸化還元に対する不安定性を、多くの分子に分配することが可能となるからである。現在、1980 年代のシリコン半導体レベルの集積回路応用が有機単結晶半導体によって可能となり、フィルム型センサーのデータ処理回路や、プラスチックコンピュータのイノベーションが迫っている。

[1] J. Soeda, J. Takeya et al., Appl. Phys. Exp. 6, 076503 (2013).

[2] A. Yamamura, S. Watanabe, J. Takeya et al., Science Adv. 4, eaao5758 (2018).

[3] T. Kubo, J. Takeya et al., Nature Commun. 7, 11156 (2016).

[4] J. Takeya et. al., Jpn. J. Appl. Phys. 44, L1393 (2005).

[5] J. Takeya et. al., Phys. Rev. Lett. 98, 196804 (2007).

[6] N. Kasuya, S. Watanabe, J. Takeya et al., Nature Mater. 20, 1401 (2021).

分子集合体からなるハイドロゲル材料

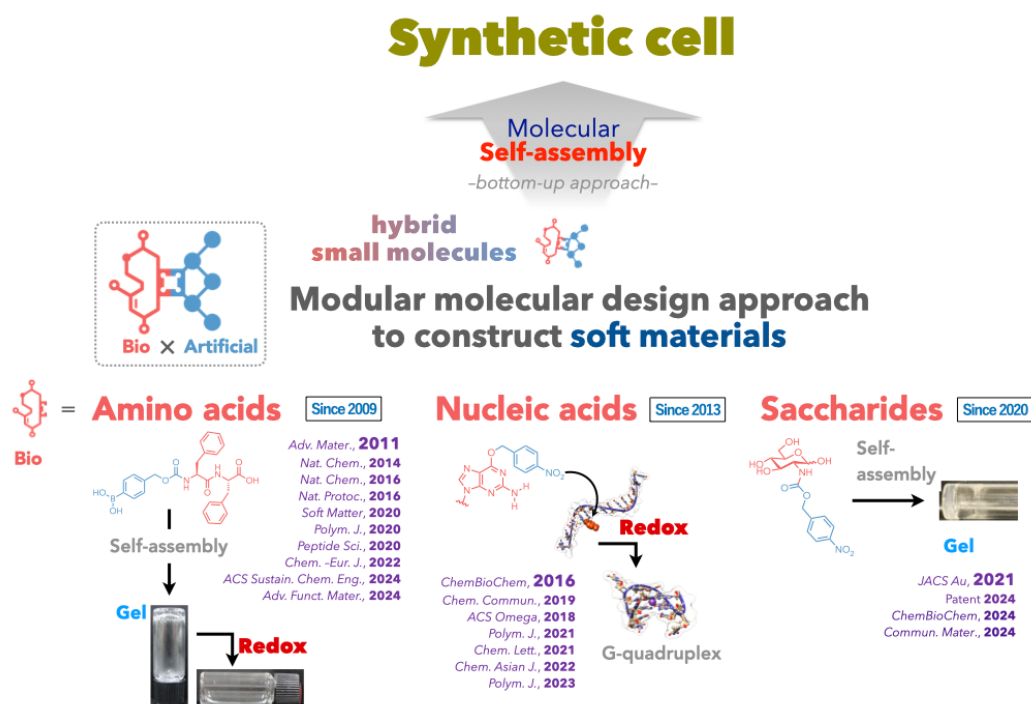
Hydrogel materials composed of molecular assemblies

岐阜大工 ○池田 将

Gifu Univ.

E-mail: ikeda.masato.n3@f.gifu-u.ac.jp

分子集合体は、構成分子間の分子間相互作用に基づいた自発的な分子集合によって構築されます。構成分子の分子集合力や、分子集合後の機能を調節できる分子パーツをモジュールとして扱い、複数の分子モジュールを論理的に組み合わせるハイブリッド型分子設計¹は、分子集合体からなる材料の合理的な開発と進化を可能にします。本発表では、生体分子であるペプチド²・核酸³・糖⁴を基本モジュールとして、化学反応性の人工分子モジュールをハイブリッドさせた分子が、分子集合することで得られるソフトマテリアルの刺激応答機能を紹介します。とりわけ水中で分子が繊維状に分子集合することで得られるヒドロゲル材料を中心に、複数の分子集合体の複合化によって人工細胞への進化を目指して進めている研究成果⁵を紹介します。



- (a) Ikeda M. *Polym. J.* **2019**, 51: 371–380. (b) Higashi SL, Shintani Y, Ikeda M. *Chem. Eur. J.* **2022**, 28: e202201103.
- (a) Ikeda M, Tanida T, Yoshii T, Hamachi I. *Adv. Mater.* **2011**, 23: 2819–2822. (b) Ikeda M, Tanida T, Yoshii T, Kurotani K, Onogi S, Urayama K, Hamachi I. *Nat. Chem.* **2014**, 6: 511–518. (c) Shigemitsu H, Fujisaku T, Onogi S, Yoshii T, Ikeda M, Hamachi I. *Nat. Protoc.* **2016**, 11: 1744–1756. (d) Shintani Y, Ohtomi T, Shibata A, Kitamura Y, Hirose KM, Suzuki KGN, Ikeda M. *Chem. Eur. J.* **2022**, 28: e202104421. (e) Shintani Y, Katagiri H, Ikeda M. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, 34: e2312999.
- (a) Ikeda M, Kamimura M, Hayakawa Y, Shibata A, Kitade Y. *ChemBioChem* **2016**, 17: 1304–1307. (b) Banno A, Higashi S, Shibata A, Ikeda M. *Chem. Commun.* **2019**, 55: 1959–1962.
- (a) Higashi SL, Ikeda M. *JACS Au* **2021**, 1: 1639–1646. (b) Ali O, Okumura B, Shintani Y, Sugiura S, Shibata A, Higashi SL, Ikeda M. *ChemBioChem* **2024**, 25: e202400459. (c) Okumura B, Yamaguchi E, Komura N, Ohtomi T, Kawano S-i, Sato H, Katagiri H, Ando H, Ikeda M. *Commun. Mater.* **2024**, 5: 182.
- (a) Onogi S, Shigemitsu H, Yoshii T, Tanida T, Ikeda M, Kubota R, Hamachi I. *Nat. Chem.* **2016**, 8: 743–752. (b) Higashi SL, Shibata A, Kitamura Y, Hirose KM, Suzuki KGN, Matsuura K, Ikeda M. *Chem. Eur. J.* **2019**, 25: 11955–11962. (c) Higashi SL, Hirose KM, Suzuki KGN, Matsuura K, Ikeda M. *ACS Appl. Bio Mater.* **2020**, 3: 9082–9092. (d) Sugiura S, Shintani Y, Mori D, Higashi SL, Shibata A, Kitamura Y, Kawano S-i, Hirose KM, Suzuki KGN, Ikeda M. *Nanoscale* **2023**, 15: 1024–1031.

裏表で接着力の異なるエラストマーヤヌスシートの開発と評価

Development of Elastomer Janus Thin Sheets with Different Adhesiveness on the Front and Back Sides

科学大生命理工¹、(株) MORESCO² [○]堀井 辰衛¹、石岡 将史²、小寺 賢²、藤枝 俊宣¹

Sci. Tokyo¹、 MORESCO Corp.² [○]Tatsuhiko Horii¹, Masashi Ishioka², Masaru Kotera², Toshinori Fujie¹

E-mail: t_fujie@life.isct.ac.jp

【緒言】

近年、高分子薄膜から成る皮膚貼付型電子デバイスは、ヘルスケアや医療診断における長期的かつリアルタイムの生体信号モニタリングへの応用に関して大きな注目を集めている^[1,2]。膜厚が数百ナノメートル以下のポリマー超薄膜は、膜厚の三乗に比例する曲げ剛性が表皮よりも小さいため皮膚凹凸に追従しやすく、分子間力で皮膚に密着できる^[3]。このように、皮膚／フィルム界面における接着に関して数多く報告されてきたが、皮膚と接していない側、すなわち衣類等との接触が皮膚からの離れを引き起こす可能性についてはほとんど検討されていない。そこで我々は、高分子薄膜表面に微細な凹凸構造を導入し、接触対象物（例：衣類、身体）との接触面積を低減することで薄膜の裏表の密着性に差異を与えられると考えた。本研究では、ポリ（スチレン-ブタジエン-スチレン）エラストマー薄膜（SBS TF）に対し、エレクトロスピンニング（ES）法でSBS ナノファイバー不織布（SBS NT）を積層することで、片面に凹凸構造を持つSBS ヤヌスシート（SBS JS）を作製し、TF と JS の密着性をタックセパレーション試験により評価した。

【実験】

JS の TF、NT にはそれぞれ $M_w \sim 140,000$ 、 $M_w \sim 120,000$ の SBS を用いた。 $M_w \sim 140,000$ の SBS をテトラヒドロフランへ溶解させることで 7 wt% の SBS 溶液を調製し、グラビアコート法を用いて SBS TF を作製した。この薄膜上に、ES 法にて $M_w \sim 120,000$ の SBS 溶液を用いて 1 時間紡糸し、NT 層を積層することで JS を作製した。5 N ロードセルを搭載した引張試験機（EZ-SX, 島津製作所）を用いてタックセパレーション試験を行い、面積 1 cm^2 の皮膚モデル（BIOSKIN Plate P002-001#10, Beaulax Co., Ltd.）に TF や JS を約 10 mN の荷重で 30 min 接触させた後、歪み速度 10 mm s^{-1} で引き揚げたときの力 - 変位曲線を測定した。

【結果考察】

得られた SBS TF は無色透明なのに対し、JS は NT 層が積層されているため白くみえる（Fig. 1a, b）。また、触診式段差計を用いて算出した TF、JS の平均膜厚はそれぞれ $1.16 \mu\text{m}$ 、 $3.31 \mu\text{m}$ であった。タックセパレーション試験（Fig. 1c）より、初期の変位量において JS_TF side（JS の TF 側を皮膚モデルに接触）の力は TF only よりも大きく、約 27 mm でそれぞれ最大 162 、 111 mN cm^{-2} を示した。その後、皮膚モデルからの剥離が徐々に進行するとともに力は減少した。JS_NT side（NT 側を接触）は皮膚モデルへの密着性に乏しく、最大力は JS_TF side の約 $1/8$ であった。これは、NT 層の凹凸構造により皮膚モデルへの接触面積が減少したためと考えられる。興味深いことに、このときの曲線で囲われた面積から算出したエネルギー値において、JS_TF side（約 3.97 mJ cm^{-2} ）は TF only（約 2.60 mJ cm^{-2} ）の約 1.5 倍大きなエネルギー値を示した。さらに、TF の片面に導入したナノファイバー構造により、JS_NT side の皮膚モデルからの剥離に要したエネルギーは約 0.02 mJ cm^{-2} と JS_TF side の約 $1/200$ であった。当日は、分子量の異なる SBS TF の力学特性が密着性に与える影響についても議論する予定である。

【参考文献】

- [1] D.-H. Kim *et al.*, *Science*, vol. 333, no. 6044, pp. 838–843, Aug. 2011.
- [2] T. Sekitani *et al.*, *Nat. Commun.*, vol. 7, p. 11425, Apr. 2016.
- [3] N. Sato *et al.*, *Soft Matter*, vol. 12, no. 45, pp. 9202–9209, Nov. 2016.

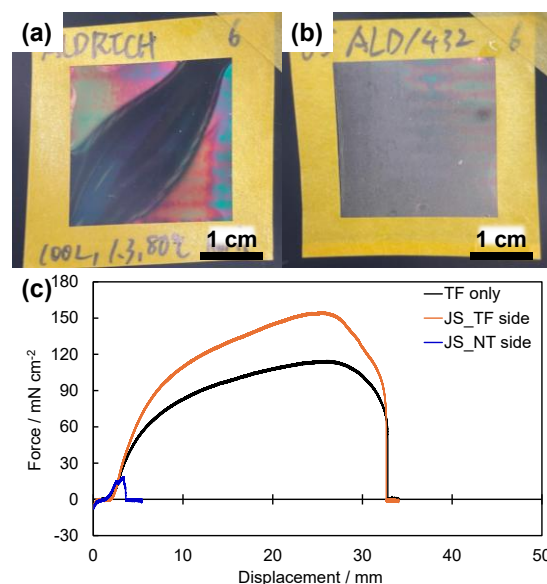


Figure 1. Photographs of (a) the SBS TF and (b) JS. (c) Force-Displacement curves of the SBS TF and JS during detachment from skin-model surface.

集積化と分離が容易なフレキシブルデバイス実現に向けた可逆的な直接接合技術の検討

Development of Reversible Direct Bonding Techniques for Flexible Devices Enabling Easy Integration and Separation

東京大学¹, [○]高桑 聖仁¹, Liu Hao¹, 伊藤 寿浩¹, 染谷 隆夫¹, 横田 知之¹

The University of Tokyo¹, [○]Masahito Takakuwa¹, Hao Liu¹, Toshihiro Ito¹, Takao Someya¹,
Tomoyuki Yokota¹

E-mail: takakuwa@ntech.t.u-tokyo.ac.jp

電子素子の膜厚を数ミクロンに抑える事で、皮膚の凹凸にも追従可能な柔軟性をもつ超薄型電子素子が開発されている。センサやディスプレイ、太陽電池等それらの柔軟な素子を集積化し、システムを構築する事で皮膚貼付け型の長期ヘルスケアモニタリングデバイス等の実現が期待されている。継続的な研究により素子単体性能は堅甲な電子素子に匹敵し、それに合わせ柔軟性を損なわない導電性接着剤フリーの直接接合技術などが開発されている。しかし薄型素子に使われる有機半導体材料や柔軟性向上のための封止層の薄膜化戦略は、素子の種類違いで有効寿命がばらつく現象を引き起こす。素子寿命が異なる複数素子の集積化デバイスの動作可能時間は、最も短い素子寿命の電子素子ユニットの動作可能時間と同値である。一方他の電子素子は動作可能なため、故障した電子素子を交換できれば、システムデバイスの動作寿命を延ばすことができ、環境負荷の観点や継続測定の観点から大きな利点となる。しかしながら、導電性接着剤や直接接合法など従来の柔軟素子用の集積化/接続技術は、一度接合すれば剥がれない不可逆的な接合で行われる。そのためシステムデバイスの一部の素子を交換する事はできず、構成素子の1つが壊れた瞬間システムデバイス全体を廃棄する必要があった。

本研究では、水蒸気プラズマ処理による化学結合と水滴下による化学結合の分断により、任意に接合/分離を制御できる新たな直接接合手法を開発した。電極間に接着層が無い場合、250 μm の突起に追従変形できる優れた柔軟性を保ちつつ、水滴下による瞬時の剥離が可能な新たな機能的な接続手法である。接合時には、水蒸気プラズマ処理をパリレン表面に施し表面改質する事で、大気中で活性化面を接触させ数秒以内に直接接合が発現する。また分離時には水を滴下する事で

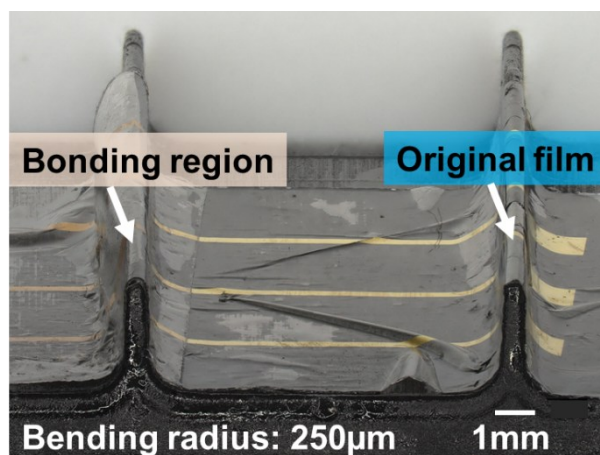


Figure 1. Conformability test of bonding region and original film region.

ポリマー間の化学結合が切断され剥離される。接合したサンプルに対し一定の引張力を印加した状態で接合部に水を滴下すると、急峻な接合力低下を示しサンプルは剥離した。その応答速度は1秒未満であり、迅速なサンプルの分離機能を達成した。一方、水を滴下しない条件ではパリレン薄膜の母材破壊が生じた。

この柔軟かつ可逆的な接合は、素子交換可能な柔軟デバイスに向けた実用的な集積化手法として期待される。

デジタルスキンデバイスによる高性能触覚検出の基礎と応用

Development of High-performance Tactile Sensing System with Digital Skin Devices

山大院有機, °関根智仁

Grad. School of Organic Materials Science, Yamagata Univ., Tomohito Sekine

E-mail: tomohito@yz.yamagata-u.ac.jp

ヒトの触覚機能を凌駕できるソフトでやわらかい高性能有機触覚センサは、触感覚を正確にデジタルデータ化できる。講演者は、これまでヒトと同等のソフト性をもつセンサデバイス（例えば圧力や温度など）の要素技術構築に欠かせない機能性材料群の開発について、物理化学的知見に基づいた特性評価を幅広く行ってきた（Fig. 1）^[1,2]。これにより、塗布／印刷プロセスを利活用した成膜性に優れる触覚センシングデバイスを実現し、ソフトロボットや義手などに展開可能なデジタルスキンデバイスの作製に成功している^[3,4]。さらに、近年の AI 技術の発展を背景に、申請者の有するセンシングデバイスと触覚ビッグデータ解析のための IT 融合も推進しており、ロボットが自動で触覚を判別し力覚制御できるシステムの構築にも取り組んでいる^[5,6]。

本講演では、高感度なソフトセンシングデバイスによるシステム形成を企図した有機複合材料の制御技術と、センサデバイスの特性について基礎・応用の両面から論ずる。特に、独自の誘電性複合材料や導電性高分子によるセンサの感度や信頼性について紹介する^[6]。これらの多様なデバイスの深化によって、触覚計測分野をはじめ生体モニタリングやロボティクス、物流など幅広い計測分野に対する将来的な社会実装が期待できる。当日は、作製したデジタルスキンデバイスをソフトロボットやウェアラブルセンサに応用し得られたデータについて、機械学習を活用して解析した実例についても議論する。

【謝辞】本研究の一部は、科研費 JP25K01190、文部科学省世界で活躍できる研究者戦略育成事業学際融合グローバル研究者育成東北イニシアティブ（TI-FRIS）、および UBE 学術振興財団の支援を受けています。また、本研究を進めるにあたり ARKEMA 株式会社の宮保淳博士、黄瞳博士、F. D. D. Santos 博士に多大な助言を賜りました。

【参考文献】

[1] Y. Watanabe et al., *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2107434 (2022). [2] T. Sekine et al., *Appl. Mater. Today*, **33**, 101877 (2023). [3] T. Sekine et al., *Small. Sci.*, **1**, 2100002 (2021). [4] T. Sekine et al., *Sci. Rep.*, **8**, 4442. (2018). [5] K. Nara et al., *Chem. Eng. J.*, **511**, 162180 (2025). [6] T. Yasuda et al., *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 2402064 (2024).

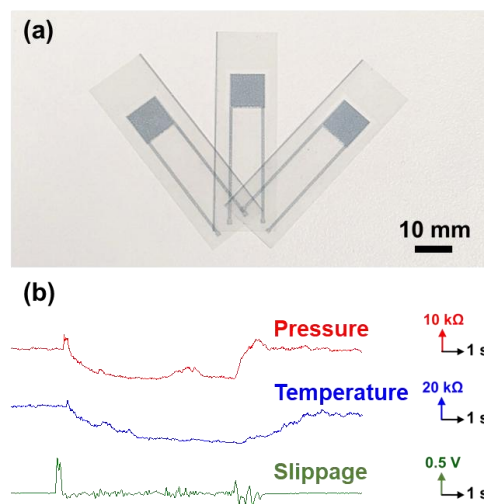


Fig.1 (a) Developed soft and flexible sensors. (b) Real-time signals detection of pressure, temperature, and slippage.

折り紙・切り紙・切り折り紙構造を用いた伸縮電子デバイス Stretchable electronic devices using origami/kirigami/kiri-origami structure

早大理工 ○岩瀬 英治

Waseda Univ. °Eiji Iwase

E-mail: iwase@waseda.jp

電子デバイスを曲げ伸ばし可能とする方法論として、「伸縮耐性を有する材料の開発」と「材料に伸縮耐性を求めない構造の工夫」の2つのアプローチがある。従来の硬い電子素子は、折り曲げたり引き延ばしたりすると破損しやすい一方で、有機材料などの伸縮耐性を有する材料より性能や安定性の面では良い場合が多くある。そのため、近年、折り紙・切り紙の構造を応用したフレキシブル電子デバイスが注目されている。折り目や切れ込みを活かして、材料や電子素子そのものは硬く壊れやすくても、構造によって全体を変形可能にするアプローチである。我々はこのような観点から、折り紙構造や切り紙構造を用いることで、金属や半導体など、曲げ耐性・伸縮耐性を有しないが良い電気的特性をもつ高性能な材料や素子を用いて、Fig. 1 に示すような伸縮変形可能な電子デバイスの研究を行っている^{[1]-[7]}。

一方で、折り紙構造や切り紙構造にも長所・短所が存在する。折り紙構造は、変形しない平板部を有するため硬くて壊れやすい電子部品を実装しやすい一方、自己折り畳みのような技術を用いても多数のユニットを折り上げるが困難な側面がある。また、切り紙構造は、構造全体の引っ張りにより多数のユニットを一括して展開するのは比較的容易である反面、平板部がないため硬くて壊れやすい電子部品の実装には向かないという側面がある。これに対し、我々は、切り紙構造に折り線を設けた「切り折り紙構造」と命名した構造により、電子部品を載せる平板部を持ちながら、構造全体を引き伸ばすことで多数のユニットの折り線を一括した折り上げが実現できる構造も提案している^[8]。

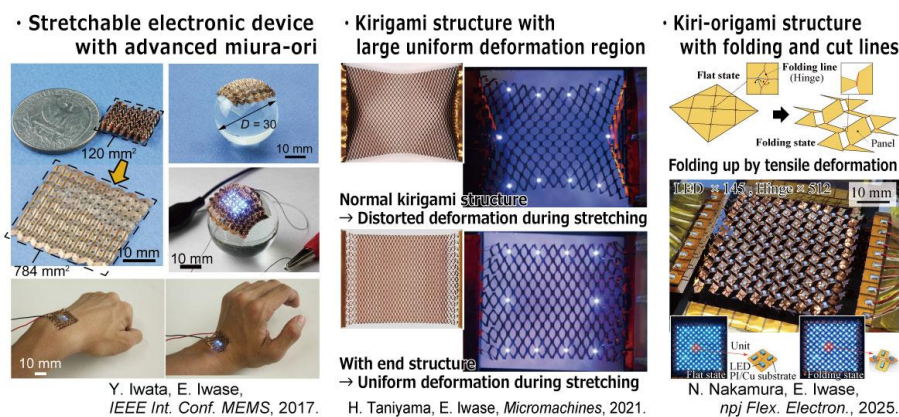


Fig. 1 Stretchable electronic devices using origami/kirigami/kiri-origami structure

- [1] Y. Iwata, E. Iwase, *Proc. of IEEE Int. Conf. on MEMS (MEMS2017)*, pp. 231-234 (2017).
- [2] K. Fukuie *et al.*, *Micromachines*, **9**, 315 (2018).
- [3] H. Taniyama, E. Iwase, *Micromachines*, **12**, 76 (2021).
- [4] A. Eda *et al.*, *Micromachines*, **13**, 907 (2022).
- [5] S. Terashima, E. Iwase, *Proc. of IEEE Int. Conf. on MEMS (MEMS2022)*, pp. 612-615 (2022).
- [6] Y. Sato *et al.*, *Micromachines*, **14**, 218 (2023).
- [7] Y. Sato, E. Iwase, *Advanced Intelligent Systems*, **5**, 2200445, (2023).
- [8] N. Nakamura, E. Iwase, *npj Flexible Electronics*, **9**, 51, (2025).

多点顔面電気信号計測のための見えない皮膚電極 Fully invisible skin electrodes for facial electrophysiological monitoring

東大先端研¹, 慶大理工², 正大人間³, 沖縄病院⁴, 工学院情報⁵, VTT⁶, KGRI⁷, ソウル大⁸
 ○劉 怡君¹, 伊藤 健太郎^{1,2}, 加藤 健郎², 王 立人^{1,2}, 朱 逸成¹, Séverine De Mulatier¹,
 荒生 弘史³, 諏訪園 秀吾⁴, 浅野 裕俊⁵, 周 元元^{1,2}, 三友 陽向^{1,2}, 龔 慧敏¹, 野村
 旺雅², 香川 学斗², 渡部 夏海⁵, Mohammad H. Behfar⁶, 菅野 裕介¹, 高橋 英俊²,
 浅井 誠⁷, Jiheong Kang⁸, 松久 直司^{1,2*}
 RCAST UTokyo¹, Keio Univ.³, Taisho Univ.⁵, Okinawa hosp.⁶, Kogakuin Univ., VTT⁷, KGRI⁸,
 Seoul National Univ.⁹, ○Yijun Liu¹, Soutaro Ito^{1,2}, Takeo Kato², Liren Wang^{1,2}, Yicheng Zhu¹,
 Séverine De Mulatier¹, Hiroshi Arao³, Shugo Suwazono⁴, Hirotoshi Asano⁵, Yuanyuan Zhou^{1,2},
 Hinata Mitomo^{1,2}, Huimin Gong¹, Ohga Nomura², Gakuto Kagawa², Natsumi Watanabe⁵,
 Mohammad H. Behfar⁶, Yusuke Sugano¹, Hidetoshi Takahashi², Makoto Asai⁷, Jiheong Kang⁸,
 Naoji Matsuhisa^{1,2*}
 E-mail: liu-yijun@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

顔面は脳波、眼電図などのヘルスケアやヒューマンコンピュータインターフェースを実現する上で重要な生体電気信号を様々に計測できる。これらの取得のためにゲル電極や、長期測定を可能にする伸縮性のドライ電極などが実現されてきた。しかし、現在報告されている生体電極は装着者の外見に大きな影響を与えてしまう。装着の事実が周囲にわかってしまうプライバシーの問題や、電極の装着を恥ずかしいと思ってしまう日常生活の中で電極を装着してもらえなくなってしまう問題がある。

そこで本研究では、装着しても視認が難しい皮膚電極を開発した(Fig. 1)。本電極は光拡散基材と伸縮性透明電極からなる。光拡散基材は伸縮性高分子の SEBS と酸化チタンナノ粒子を混合して作製した。酸化チタンなしの透明フィルムでは、皮膚表面で高いグロス(正反射)があるが、酸化チタンありでは皮膚本来の低い光沢度に加え、触感を再現することに成功した。さらに 200 nm の厚さのため、経皮の水蒸気蒸散を妨げないので、長時間装着しても不快感を引き起こさない。伸縮性透明電極には高透明度、高生体適合性、高伸縮性などの特性を有する銀ナノワイヤを使用した。作製された見えない皮膚電極は、官能試験により視認性・触感などがほとんどないことを確かめた。さらに、脳波計測を組み合わせた心理実験を行い、本電極の装着が被験者の心理に影響を与えないことを確認した。最後に開発した電極で眼電位、筋電位や脳電位などの生体信号を測定することに成功した。この見えない皮膚電極は装着者が他人に気づかれることなく、また自身も装着していることを意識することなく、日常生活における連続的な生体信号のモニタリングを可能にする。

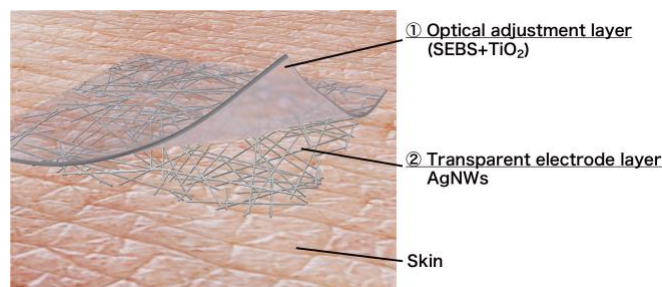


Fig.1: The structure of the invisible electrode

物体の柔らかさ検知を可能にする e-skin の開発

Softness-perceptive e-skin

北大情¹ ○新田敦之¹, 近藤芳樹¹, 中村悠希¹, 清宮徳人¹, 竹井邦晴¹

Hokkaido Univ.¹, ○Atsushi Nitta¹, Yoshiki Kondo¹, Haruki Nakamura¹, Naruhito Seimiya¹,

Kuniharu Takei¹

E-mail: nitsuta.atsushi.f0@elms.hokudai.ac.jp

【はじめに】近年フレキシブル基板上に様々なセンサを集積した電子皮膚 (e-skin) デバイスが注目され、ロボットの皮膚やウェアラブルデバイスへの応用が期待されている。その e-skin では、特に触覚圧力や温度といった人の皮膚機能を疑似する開発が盛んに行われている。一方、人の指先が感じる物体の柔らかさを検知するセンサ開発はあまり進んでいない。そこで柔らかさを検知する e-skin デバイスの実現に向け、本研究では圧力センサを集積した e-skin に、時系列変化の解析を得意とするリザーバーコンピューティング(RC)を導入することで、柔らかさ検知システムの開発を行ったので報告する。

【計測原理】デバイスは6つの圧力センサを一列に集積した構造を採用した。センサは、凹凸構造を有したカーボンブラック電極が、もう一方の電極に接触した際の接触抵抗から圧力値を計測する。e-skin は曲面上に設置し、接触する物体の柔らかさに応じて、6つの圧力センサの出力結果が異なることで、その圧力値と分布から柔らかさを抽出する。

【結果】まず圧力センサは、閾値以上の圧力印加において大きく抵抗が減少し、以降圧力値に応じて徐々に抵抗が減少することがわかった。また、本構造ではヒステリシスが小さいことも確認した。次に、異なる柔らかさ及び圧力を変化させた際の抵抗変化を計測した。本実験から物体の柔らかさに応じて物体の変形の仕方が

変化し、結果的にデバイス上の圧力分布が異なることを確認した。本結果をもとに、複数の実験を行うことで機械学習用のデータを収集し、RC 解析アルゴリズムの開発を行った。その結果、接触、柔らかさ検知でほぼ 0.9 を超える正答率、圧力検知で NMSE 平均 0.0564 の精度を実現した。次に e-skin を実際にロボットアームに装着し、掴んだ物体の柔らかさとセンサに加わる圧力を検知するデモを実施した(Fig.1)。結果、柔らかさ検知で 0.987 の正答率、圧力検知で NMSE 0.00371 の高精度検知に成功した。

【まとめ】柔らかさ検知のための RC 搭載 e-skin の開発を行った。センサの構造を工夫することで対象物の柔らかさと印加圧力を同時計測できることがわかった。さらに実際にロボットに適用した場合であっても高精度に検出可能であることがわかった。

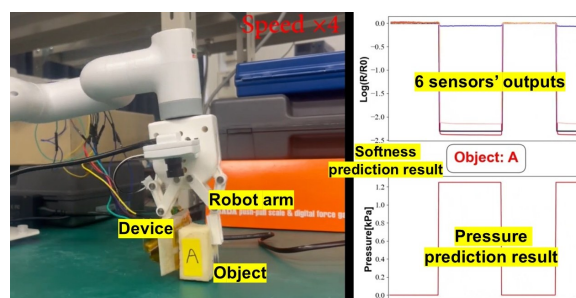


Fig. 1. Demonstration of sensor system on the robot arm.

The system detected applied pressure successfully.

【謝辞】本研究は基盤研究 A、JST ALCA NEXT、JST ASPIRE for Rising Scientists、村田学術振興財団の助成を受けたものである。

ナノメッシュを用いた摩擦帯電型ウェアラブル咽喉マイクの開発

Development of a Wearable Triboelectric Throat Microphone Using Nanomesh

東大院工¹, ○(M1) 立花 卓遠¹, 海老原 祐輔¹, 山岸 健人¹, 横田 知之¹, 染谷 隆夫¹

The Univ. of Tokyo¹, ○Takuo Tachibana¹, Yusuke Ebihara¹, Kento Yamagishi¹,

Tomoyuki Yokota¹, Takao Someya¹

E-mail: t-tachibana@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

エレクトロスピンニング法によって作製される直径数百 nm のファイバーからなるナノメッシュは、近年、フレキシブルデバイスの素材として注目を集めている。我々の研究グループでは、ナノメッシュを積層することで、低周波数帯域において高感度なナノメッシュマイクを開発し、心音等の生体音響センシングにおいてその有効性を示してきた [1]。一方で、生体音響の代表例である音声のセンシングには、より広い周波数帯域での応答が求められる。従来のナノメッシュマイクでは、共振周波数である 250 Hz 付近以外の感度が低く、音声センシングへの応用に課題があった。

本研究では、共振周波数を音声の基本周波数帯域である 150 Hz~250 Hz に調整することで、音声ピッチを選択的に検出可能な咽喉マイクを開発した。共振周波数の調整には、受音部の面積変更とナノメッシュ振動膜のファイバー密度制御という二つの手法が有効であることを明らかにした。開発したマイクは、ポリウレタン (PU) ナノメッシュ振動膜を、金 (Au) を真空蒸着した PU ナノメッシュ電極で挟んだ三層構造を有する (Fig. 1)。従来は圧電性を持つポリフッ化ビニリデン (PVDF) ナノメッシュを振動膜として使用していたが、本研究では振動膜にも PU ナノメッシュを採用することで、デバイス全体の高い柔軟性と伸縮性を実現した。

さらに、音響インピーダンスが人肌に近いシリコン材料の表面に本マイクを装着し、内部に伝播した音声信号をマイクで録音することに成功した (Fig. 2)。これは声帯で発せられた音が咽喉を通じて皮膚表面に伝わる状況を模したものであり、咽喉マイクとしての有効性を示している。加えて、COMSOL Multiphysics を用いて構築した、機械振動から電気信号への変換過程の物理モデルについても、当日紹介する予定である。

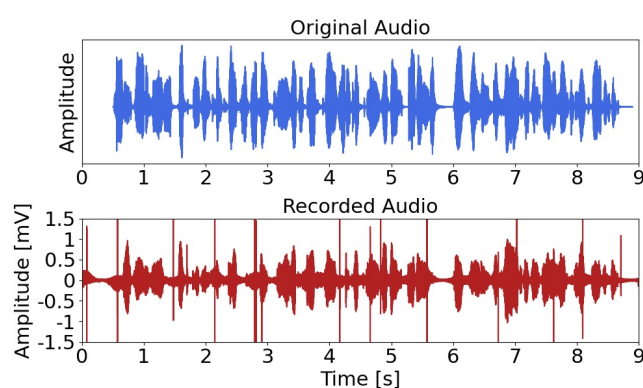
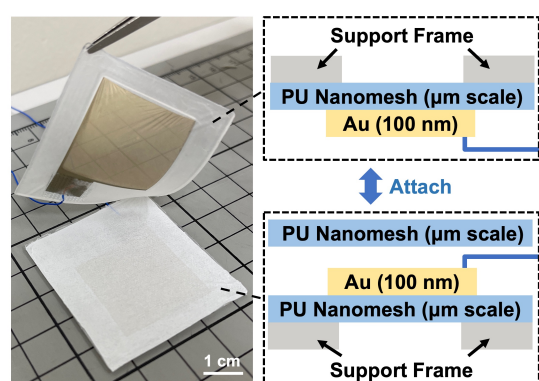


Fig. 1: Nanofiber-based microphone structure Fig. 2: Comparison of original and recorded waveforms

[1] M. O. G. Nayeem *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **117**, 7063 (2020).

腹部表面上自己接着性電極によるサイボーグ昆虫の運動制御

Self-Adhesive Electrodes on Abdominal Surface for Cyborg Insect Locomotion Control

理研¹, 早大², 南洋理工大³, 東大⁴ ○片山 俊平^{1,2}, 安藤 圭吾^{1,2}, 李 成薫¹, Jiang Zhi³,

Chen Xiaodong³, 横田 知之⁴, 佐藤 裕崇³, 梅津 信二郎², 福田 憲二郎¹, 染谷 隆夫^{1,4}

RIKEN¹, Waseda Univ.², NTU³, UTokyo⁴, [○]Shumpei Katayama^{1,2}, Keigo Ando^{1,2}, Sunghoon Lee¹, Zhi Jiang³, Xiaodong Chen³,

Tomoyuki Yokota⁴, Hiroataka Sato³, Shinjiro Umezur², Kenjiro Fukuda¹, Takao Someya^{1,4}

E-mail: shumpei.katayama@riken.jp

概要: サイボーグ昆虫は、環境モニタリングや災害救助など、広範な応用が期待される生物と機械が融合したシステムである。しかし従来の制御手法は昆虫の主要な感覚器官への刺激に依存するため、生理機能や運動能力への影響が懸念されていた。本研究では、超薄型で自己接着性を持つ電極を開発し、昆虫の腹部に直接かつ安定して装着する技術を確認した。また、腹部表面への電気刺激によって昆虫の運動を効果的に制御できる最適な刺激条件を明らかにした。これにより、主要な感覚器官に負荷をかけることなく、昆虫が持つ本来の優れた運動能力を有効に活用することができるサイボーグ昆虫システムを実現した(Fig. 1a)[1]。

実験方法及び結果: 本研究では、体長 4.5 cm 以上の成体のマダガスカルゴキブリ (*Gromphadorhina portentosa*)を用いた。運動制御のため、腹部に密着する最大約 4 μm 厚の体表面刺激コンポーネントを構築した。生体と上部の接着を担うスチレン-エチレン-ブチレン-スチレン (SEBS)接着フィルム(1 μm 厚)、金/パリレン配線フィルム(約 2 μm 厚)、生体との電気的なコンタクトを担う金/SEBS 電極フィルム(約 1 μm 厚)の 3 層で構成される。金/SEBS フィルムは、ポリマー表面から部分的に露出した金属粒子により自己接着性導電界面を形成する[2]。

コンポーネントの昆虫表面への接着は、エタノールの揮発プロセスを活用した手法で行った。この手法と電極フィルムの自己接着性により、接着された電極は市販電極と比較し約 160 倍の接着エネルギーと高い電気的耐久性を持つ。また、SEBS 接着フィルムで昆虫表面上に形成された飛び石構造(昆虫腹部の可動性を維持するため、接着部と非接着部を交互に形成する)[3]は、従来のレジンベース接着剤使用時の導電性保持率約 33%と比較し、約 78%と高い安定性を達成した(Fig. 1b)。

昆虫の体表面刺激による運動制御性を検証するため、1~8 V、42 Hz、デューティ比 50%のバイポーラ矩形波を 2 秒間印加した。2 V 以下の電圧では誘起される旋回運動は平均 20° 未満であった。一方で 3 V 以上では有意な旋回が確認され、6 V では各方向へ平均 70° の旋回が誘起され、標準偏差が許容範囲内であることから最適な電圧であることが示唆される(Fig. 1c)。また、直進方向への加速運動も実証され、刺激なしでは障害物乗り越えるに 5.0 秒以上かかったのに対し、刺激時には 1.5 秒と効率的な乗り越えが達成された。

[1] *npj Flex. Electron.* **9**, 25 (2025). [2] *Nature* **614**, 456–462 (2023). [3] *npj Flex. Electron.* **6**, 78 (2022).

【謝辞】 JSPS 科研費(JP22K21343, JP23K26077), JST 未来社会創造事業(JPMJMI21I1), 理研大学院生リサーチ・アソシエイト

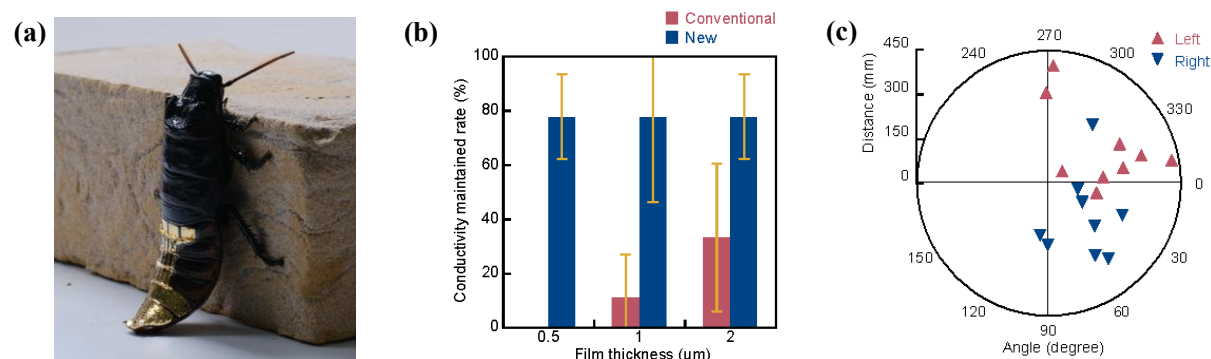


Fig. 1. Photograph of a cyborg insect with a body surface stimulation component. (b) Conductivity maintained rate by adhesive layer of wiring film attached to insect surface (Conventional: resin based, New: SEBS). (c) Polar graph of position transition from pre-stimulus to post-stimulus in 6V stimulation.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): ナノバイオテクノロジー分野における実験と分子シミュレーションの
インタープレイ

[8p-S203-1~11] ナノバイオテクノロジー分野における実験と分子シミュレーションのインタープレイ

[8p-S203-1]

有機薄膜太陽電池の電荷分離シミュレーション

○藤田 貴敏¹ (1.量研)

[8p-S203-2]

種々のシミュレーション技術を用いた自己組織化・電気現象の解明

○奥脇 弘次¹ (1.(株)JSOL)

[8p-S203-3]

軟X線吸収分光法による液体と固液界面のオペランド計測

○長坂 将成¹ (1.分子研)

[8p-S203-4]

脂質二重膜-イオン配位構造の塩濃度応答に対する水中XASと物性評価

○金城 ゆう¹、長坂 将成²、奥脇 弘次^{3,4}、望月 祐志^{4,5}、手老 龍吾¹ (1.豊橋技科大、2.分子研、3.JSOL、4.立教大、5.東大(生産研))

[8p-S203-5]

ホール加工基板を用いた脂質二分子膜の物理的評価

○大嶋 梓¹ (1.NTT物性基礎研・BMC)

[8p-S203-6]

イオン透過に伴う膜電位形成とベシクル融合

○井上 友莉香¹、大嶋 梓²、湊元 幹太³、田中 あや²、部家 彰¹、住友 弘二¹ (1.兵庫県立大、2.NTT物性基礎研・BMC、3.三重大)

[8p-S203-7]

分子間相互作用予測における機械学習:課題と展望

渡邊 泰成¹、大塚 秋紀¹、○土居 英男¹ (1.立教大理)

[8p-S203-8]

タンパク質のFMO計算結果の解析における残基帰属の自動化の取り組み

○芳根 僚平¹、土居 英男¹、奥脇 弘次^{1,2}、望月 祐志^{1,3} (1.立教大理、2.(株)JSOL、3.東大生産研)

[8p-S203-9]

神経回路研究における実験とシミュレーションのインタープレイ

○山本 英明^{1,2,3}、門間 信明^{1,2}、平野 愛弓^{1,2,3}、佐藤 茂雄^{1,2} (1.東北大通研、2.東北大院工、3.東北大AIMR)

[8p-S203-10]

分子シミュレーションで探るナノバイオの分子機構

○山本 詠士¹ (1.慶應大理工)

[8p-S203-11]

自己組織化ペプチドを用いたグラフェン界面修飾とそのセンサ応用

○早水 裕平¹ (1.東京科学大)

有機薄膜太陽電池の電荷分離シミュレーション

Simulating Charge-Separation Dynamics in Organic Thin-Film Solar Cells

量研¹, ○藤田 貴敏¹

QST¹, °Takatoshi Fujita¹

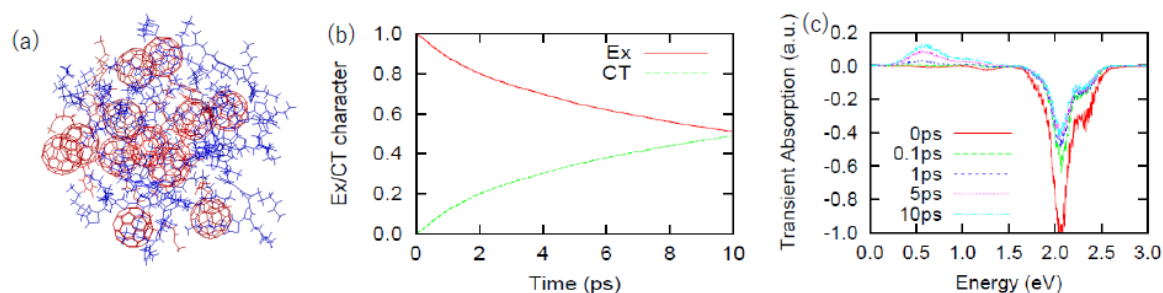
E-mail: fujita.takatoshi@qst.go.jp

有機薄膜太陽電池における光電変換過程は、光吸収による励起子生成、ドナー/アクセプター界面の励起子解離と界面電荷移動(CT)状態の形成、さらに CT 状態からの自由キャリア生成という複数の素過程から構成される。これらの過渡的な励起状態ダイナミクスは、ポンプ・プローブ分光や二次元電子分光法などの様々な時間分解分光法によって研究されてきたが、励起状態の過渡種と分光シグナルとの対応関係を明確に理解することは容易ではない。そのため、光電変換過程全体の素過程を記述しつつ、分光シグナルとの関係を解析可能な理論・計算手法の構築が求められている。

我々はこれまでに、第一原理励起状態計算と量子ダイナミクス法を統合することで、有機分子集合体における励起状態の実時間シミュレーションを可能とする計算手法を開発してきた。さらに最近では、励起状態波動関数の時間発展から分光応答を直接計算可能な枠組みも構築している。本発表では、P3HT/PCBM ブレンドを対象にして、励起子解離および電荷分離のダイナミクスを解析した結果を報告する。特に、過渡吸収スペクトルを直接計算することにより、励起子やキャリアのダイナミクスが分光シグナルにどのように反映されるかを明らかにした。また、ポンプ・プローブ分光における励起状態吸収の異方性ダイナミクスが、電荷分離ダイナミクスとよく相関することを解明した。さらに、励起子解離の時間スケールを再現するための最近試みとして、熱補正を導入した波束ダイナミクス法と Marcus-Levich-Jortner 理論を併用した解析も行った。その結果、高エネルギーの CT 状態が励起子解離を促進する経路として重要な役割を担うことが明らかになった。

[参考文献]

T.F., T. Hoshi, J. Phys. Chem. B, 127 (2023) 7616.; T.F., M. Nozaki, submitted.



図(a)P3HT(青)/PCBM(赤)ブレンドの構造. (b)光励起($t=0$)後の励起子(Ex)状態とCT状態の population dynamics. (c)過渡吸収スペクトル.

種々のシミュレーション技術を用いた自己組織化・電気現象の解明

Understanding Self-Organization and Electrostatic Phenomena

Using Various Simulation Techniques

(株) JSOL¹ °奥脇 弘次¹

JSOL Corp.¹, °Koji Okuwaki¹

E-mail: okuwaki.koji@jsol.co.jp

有機分子・バイオエレクトロニクス分野において、分子レベルでの自己組織化や電場応答挙動の理解はデバイス性能の向上や設計に直結する重要な課題である。実験的にも様々な分析技術が用いられているが、研究開発を加速するためのシミュレーション技術の活用が期待されており、一部解析の代替のほか、実験では得られない微細情報の可視化や理解のためのツールの役割も担っている。

原子・分子レベルの分解能を持つシミュレーションで代表的なものが、ニュートンの運動方程式に従って分子運動の時間発展を計算する分子動力学 (MD) である。原子単位で運動を解析する全原子 MD のほか、 μ 秒を超える長時間の現象や、数十 nm を超える分子集団の相分離の予測には、原子団を粒子として表現する粗視化 MD や相分離計算に優れた散逸粒子動力学が使用される。より微細な領域に着目した場合は、第一原理計算を利用して電子輸送を直接解析することも可能であり、目的に応じて適切なシミュレーション手法を使い分けることが重要である。本講演では、上記技術の適用例として、脂質二重膜への電場印加による細孔形成に関する相分離解析 (図 1)、有機 EL を対象とした蒸着膜の原子レベルの配向計算 (図 2) [1] を中心に紹介予定である。

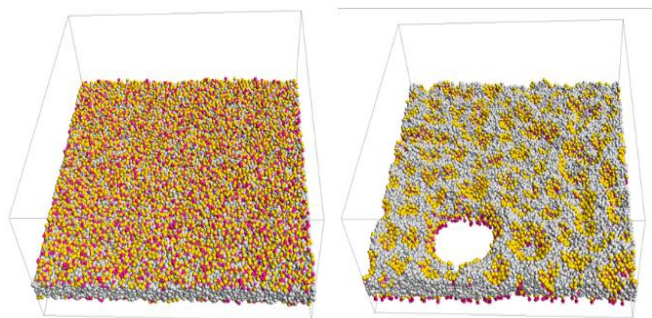


図 1. 電場印加による脂質の細孔形成

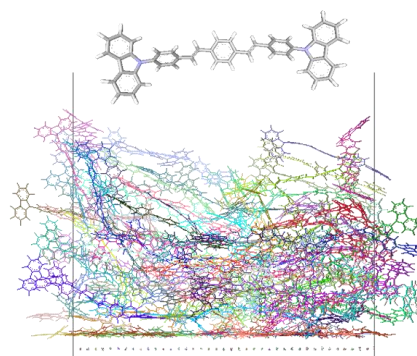


図 2. Ag 基板への蒸着シミュレーション

[1] <https://www.jsol-cae.com/product/material/jocta/cases/caseA49/>

軟 X 線吸収分光法による液体と固液界面のオペランド計測

Operando Observations of Liquids and Solid-Liquid Interfaces Using Soft X-ray

Absorption Spectroscopy

分子研¹ ○長坂 将成¹

IMS¹, °Masanari Nagasaka¹

E-mail: nagasaka@ims.ac.jp

2 keV 以下の軟 X 線領域には、軽元素(Li, B, C, N, O, F など)の K 殻や遷移金属(Ti, Mn, Fe, Co, Ni など)の L 殻が存在するため、軟 X 線の透過吸収を計測する軟 X 線吸収分光(XAS)法は、軽元素を中心に構成する液体や、金属と配位子が協奏的に機能する金属錯体の元素選択的な電子状態解析を行える特長がある。しかしながら、軟 X 線が大気や水に強く吸収されるため、液体の XAS 測定はこれまで困難であった。我々は、液体層を 2 枚の Si₃N₄ 膜(100 nm 厚)で挟む液体セルを開発すると共に、液体層の精密厚さ制御法(20 nm ~ 40 μm)を独自に考案することで、液体の XAS 測定を実現した。これにより、様々な液体の分子間相互作用を調べると共に、溶液中の触媒反応や電気化学反応のオペランド XAS 計測を推進してきた[総説 1, 2]。

本講演では、XAS 測定により水溶液中のポルフィリン金属錯体の電子状態や配位構造を調べた研究成果を報告する[3]。N K 吸収端を用いて金属錯体の配位子の電子状態を調べると、金属-配位子間の非局在化の中心金属依存性を直接調べることができる。更に、金属錯体への溶媒分子の配位構造に関する知見が得られることが分かった。また、XAS のバイオ研究への展開として、ミオグロビン水溶液中のヘム鉄の N K 吸収端 XAS 測定を行い、タンパク質に存在する多数の窒素原子から分離して、ヘム鉄の電子状態やスピン状態が調べられることを見出した。

また、我々は分子動力学計算と内殻励起計算を組み合わせることで、液体の XAS スペクトルから、液中の分子間相互作用を詳細に調べている。本講演では、アセトニトリル水溶液の O K 吸収端 XAS スペクトルでみられるシャープなピーク構造が、アセトニトリル中の孤立水に由来することを明らかにした研究成果を報告する[4]。そして、高分子科学への適用として、O K 吸収端 XAS 測定により、メタノールと水には可溶であるポリイソプロピルアクリルアミドが、メタノール水溶液には不溶となる共貧性溶媒効果を調べた[5]。高分子鎖の一部を切り出す内殻励起計算法の確立により、高分子溶液の XAS スペクトルとの直接比較も可能になった[6]。以上の内殻励起計算法を用いて、固液界面に形成する脂質二重膜のりん酸基の水和構造を調べた研究成果も報告する。

[1] M. Nagasaka et al., *Anal. Sci.* **36**, 95 (2020).

[2] M. Nagasaka and N. Kosugi, *Chem. Lett.* **50**, 956 (2021).

[3] M. Nagasaka et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26**, 23636 (2024).

[4] M. Nagasaka, *J. Phys. Chem. Lett.* **15**, 5165 (2024).

[5] M. Nagasaka et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26**, 13634 (2024).

[6] M. Nagasaka et al., *J. Chem. Phys.* **162**, 054901 (2025).

脂質二重膜-イオン配位構造の塩濃度応答に対する水中 XAS と物性評価 XAS in Water and Property Analysis of Ion-Responsive Coordination in Lipid Bilayers

豊橋技科大¹, 分子研², JSOL³, 立教大⁴, 東大(生産研)⁵

○金城 ゆう¹, 長坂 将成², 奥脇 弘次^{3,4}, 望月 祐志^{4,5}, 手老 龍吾¹

Toyohashi Univ. Tech.¹, Inst. Mol. Sci.², JSOL³, Rikkyo Univ.⁴, Univ. Tokyo⁵

○Yu Kinjo¹, Masanari Nagasaka², Koji Okuwaki^{3,4}, Yuji Mochizuki^{4,5}, Ryugo Tero¹

E-mail: kinjo.yu.nx@tut.jp, tero@tut.jp

細胞膜は脂質二重膜を基本骨格とし、物質輸送・シグナル伝達の反応場として機能する。両親媒性分子が自己組織化して形成する脂質二重膜は膜タンパク質マトリクスとしての役割を持ち、イオンが配位することで膜の流動性や相分離などの性質・構造が変化することが知られている。しかし、流動的な膜におけるイオン配位の実験的指標は少なく、その相互作用の扱いは確立されていない。本研究では、水中 X 線吸収分光法(XAS)^[1]を用いて脂質二重膜へのイオン配位構造の解明を目指した。得られた水中 XAS スペクトルの傾向を第一原理的手法で求めた内殻励起スペクトルと比較し検証した。塩濃度に依存したイオン配位の変化が巨視的な膜物性に与える影響を、光退色後蛍光回復(FRAP)法により拡散係数から評価した。

1,2-dipalmitoyl-sn-glycero-3-phosphocholine (DOPC)の乾燥脂質フィルムに緩衝液(100 mM NaCl, 25 mM HEPES/ pH 7.4 [NaOH])を加え、攪拌と超音波処理を行いベシクル懸濁液を調製した。水中 XAS 計測用セル中に懸濁液と緩衝液を流通させ、ベシクル融合法によりセル内壁の Si₃N₄ 上に単層の支持脂質二重膜 (supported lipid bilayer: SLB) を作製した。XAS 測定は分子科学研究所 UVSOR-III の BL-3U で行い、液体層の厚さを 100 nm 以下に保ち 527 - 535 eV の範囲で、分子配向の影響を受けにくい X 線入射角度 35°で、O-K 吸収端 XAS 計測を行った。

DOPC-SLB の XAS スペクトル測定から、531 - 533 eV に脂質由来の吸収が得られ、これらを PC 分子内のリン酸基由来の 2 成分とカルボニル基由来の 1 成分に帰属した(図 1)。Na⁺濃度[Na⁺] = 2 - 510 mM の範囲で測定を行い、各ピークの位置・強度の塩濃度に依存した変化を観察できた。FMO-DPD 法で Na⁺および Cl⁻を含む水中での DOPC 膜を構造最適化し、リバースマッピングにより得た原子配置^[2]をもとに計算したリン酸基の酸素の内殻励起スペクトルの傾向は、実験結果とよく一致した。K⁺存在下で取得した XAS スペクトルでも、[K⁺]に依存したピークのシフトが観察されたが、Na⁺に比べて変化は小さかった。これらの結果より、水中 XAS に基づいて脂質分子へのイオン配位状態を評価できることを示した。XAS スペクトルでの塩濃度依存性と、膜物性評価の関連についても報告する。

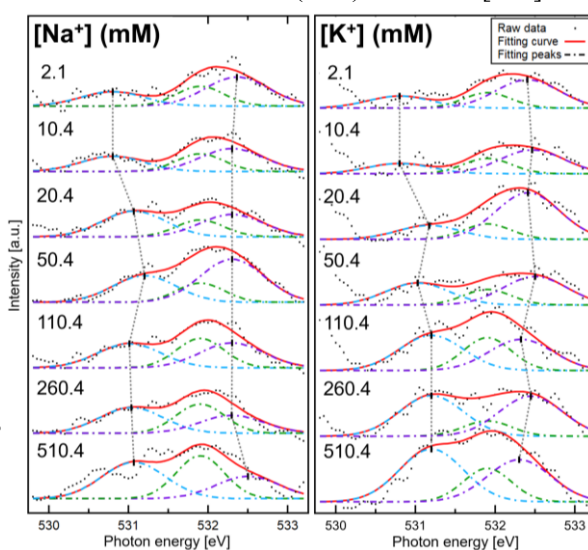


Fig. 1. O K-edge XAS spectra of DOPC bilayers in various [Na⁺] (left), and [K⁺] (right).

[1] M. Nagasaka et al., *Anal. Sci.* **36**, 95 (2020). [2] H. Doi et al., *Appl. Phys. Express.* **17**, 055001 (2024).

ホール加工基板を用いた脂質二分子膜の物理的評価

Physical Evaluation of Bilayer Lipid Membrane Using Microwell Substrate

NTT 物性基礎研・BMC 大嶋 梓

NTT Basic Res. Labs., BMC Azusa Oshima

E-mail: azusa.oshima@ntt.com

細胞膜では生命現象に関わるさまざまな反応が生じているが、これらを直接観察することは困難であり、各生体分子の役割を定量的に評価することが大きな課題となっている。人工脂質二分子膜再構成系（人工膜）は脂質や膜タンパク質など目的の生体分子から構成され、化学・物理環境の制御が可能な簡易な細胞モデルである。細胞内では観察が難しい現象を可視化し、物理現象として議論をすることができる。

本研究では、井戸型ホール構造を施した基板と人工膜を組み合わせることで、膜形状を安定に維持できる系を構築し、蛍光観察による経時変化の評価を行っている (Fig.1)。人工膜は井戸の淵の基板によって支えられ、人工膜と基板は物理的に吸着しておらず厚さ数 nm の水層を介して存在している。人工膜を構成する脂質分子 1 つ 1 つは膜面内を側方拡散しており、井戸部と基板部を脂質は連続して動いている。この脂質分子の側方拡散を評価することで人工膜の状態を推定し、これまでに人工膜へ基板構造の影響やウイルスの融合能について検討してきた^{1,2}。細胞膜表面反応では脂質ラフトのモデルとして飽和脂質とコレステロールからなる秩序液体相 (Lo 相) と不飽和脂質からなる無秩序液体相 (Ld 相) の異なる流動性を持つ脂質相分離膜の評価も行っている。井戸型ホール基板に形成した相分離膜は、井戸部は流動性の高い Ld 相が安定に存在した。しかし、井戸部の人工膜の形状を浸透圧差によって変化させたところ、井戸部のほとんどが Lo 相に変化した後、1 時間以上にわたって井戸部に Lo 相を維持することに成功した³。浸透圧差による形状変化だけでなく、基板の加工⁴や脂質の組成によって人工膜面内の脂質の拡散が変化し、井戸部における Lo/Ld 相の安定性に影響を及ぼすことが明らかとなっており、これらの知見は人工膜の構造制御技術としての応用可能性を示している。

今後、脂質二分子膜の評価手法がさらに進化し、多様な膜現象の理解が深まることで、生体内の複雑な伝達経路をボトムアッププロセスで紐解く脂質二分子膜再構成系の新たな展開が期待できる。

1. A. Oshima, H. Nakashima, and K. Sumitomo, *Langmuir* 35, 11725 (2019).
2. A. Oshima et al., *Langmuir* 38, 5464 (2022).
3. A. Oshima, H. Nakashima, and K. Sumitomo, *Jpn. J. Appl. Phys.* 59, 027001 (2020).
4. 大嶋梓他 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 16p-Z21-4.

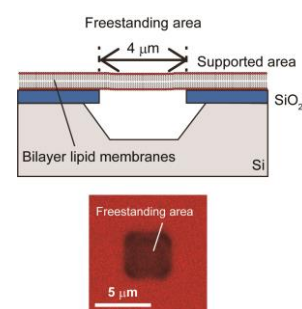


Fig.1 ホール加工基板上的の人工膜
模式図と蛍光像。

イオン透過に伴う膜電位形成とベシクル融合

Vesicle fusion induced by membrane potential formed by proton permeation

兵庫県立大¹, NTT 物性基礎研・BMC², 三重大³

井上 友莉香¹, 大嶋 梓², 湊元 幹太³, 田中 あや², 部家 彰¹, 住友 弘二¹

Univ. of Hyogo¹, NTT Basic Res. Labs., BMC², Mie Univ.³

Yurika Inoue¹, Azusa Oshima², Kanta Tsumoto³, Aya Tanaka², Akira Heya¹, Koji Sumitomo¹

E-mail: sumitomo@eng.u-hyogo.ac.jp

膜融合は生体内で物質輸送や情報伝達を担う重要な過程であり、融合メカニズムの解明や薬物送達システムへの応用など幅広く研究されている。生体反応の理解に向けて細胞再構成系を構築するには、膜融合を制御し物質輸送機構モデルを確立することが不可欠である。本研究では、ベシクル周辺の pH を制御することで、小胞(LUV)に内包した DNA を膜融合によって巨大ベシクル(GUV)内部に取り込み、その DNA を検出することを試みた。

キャリアとなる LUV は酸性リン脂質を含む DOPC : DOPS = 6 : 4 で構成し、DNA(~100 bp)を封入した。DNA を受け取る GUV (POPC : cholesterol = 8 : 2) には DNA 染色試薬 FluoroVue を封入した。LUV と GUV の内包液はいずれも pH 7.4 に調製し、その後、外液の pH を酸性に変化させた (Fig. 1)。pH7.4 の溶液中で GUV と LUV を混合した場合、融合は起こらずに GUV 内に FluoroVue の蛍光は見られなかった (Fig. 2a)。一方、外液を pH4.0 に変化させると、GUV 内部で DNA と結合した FluoroVue の蛍光が確認された (Fig. 2b)。これは LUV と GUV が融合し、LUV に封入されていた DNA が GUV 内に取り込まれて FluoroVue と反応したことを示す。GUV の外液の酸性化により、プロトンが膜を透過して GUV 内に流入し GUV 膜表面が正に帯電することで、負電荷を帯びた脂質を持つ LUV との膜融合が促進されたと考えられる。

ベシクル外液の pH 変化によって膜融合を制御できる可能性が示された。今後、融合効率や制御性を向上させることで小胞輸送モデルの確立を目指す。

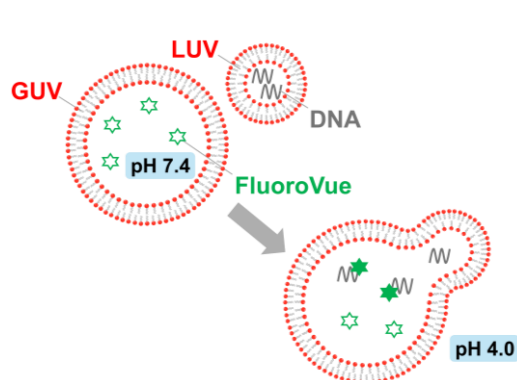


Fig. 1 Schematic of DNA transport from LUV to GUV by membrane fusion.

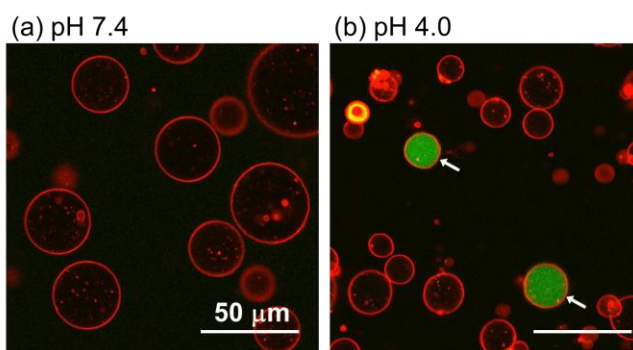


Fig. 2 Confocal microscopy images of GUVs mixed with LUVs that encapsulate DNA at (a) pH 7.4 and (b) pH 4.0. GUVs were labeled with rhodamine (red) and DNA was stained by FluoroVue (green). GUVs received DNAs by vesicle fusion were indicated by white arrows.

分子間相互作用予測における機械学習:課題と展望

Machine learning in molecular interaction prediction: challenges and outlook

(B)渡邊 泰成¹, (B)大塚 秋紀¹, [○]土居 英男¹

Rikkyo Univ.¹, Taisei Watanabe, Syuki Otsuka, [○]Hideo Doi¹

E-mail: hideo-doi@rikkyo.ac.jp

【序】 分子間相互作用の予測は、多くの分野で問題である。例えば、創薬、材料科学、環境科学の分野である。これらの分野では個々に、分子間相互作用予測が試みられている。例えば、創薬、環境科学では QSAR（定量的構造活性相関）が用いられ、タンパク質 - リガンド間相互作用で薬効の高さの予測や、土壌分子への分子の吸着挙動から化学物質の環境リスクを評価が試みられている。材料科学では分子力場開発や分子動力学シミュレーションによって材料の性質の予測や現象の解明、機能の向上などが行われている。これら相互作用の強さは、実験や量子化学計算などを使って解明される場合が多いが、いずれの方法もかなり労力がかかるため、コストの低い代替手段として QSAR や分子力場での計算が必要である。

近年、機械学習や深層学習が発達し、データ駆動アプローチが成熟してきており、それ自体は素晴らしいことである。しかし、どちらも何をデータとして表現すれば予測精度が上がるのか？ということは依然として難しい問題のままである。これら、分子の性質を数値的に表現するものを記述子と呼び、各記述子は分子や分子間の相互作用を説明する構造、距離、電荷分布などの情報を数値的に表現している。これらの記述子は数多く開発されており、表現する情報もまちまちで、何を表現するのか、予測精度の向上に寄与するのは何か、ある性質を表現するための記述子としてどのようなものが存在するのかははっきりしない。

そこで、本発表では、分子間相互作用予測における分子間の記述子に焦点を当てる。様々な記述子の収集を行い、予測精度向上に寄与した記述子や記述する物理量などの評価を行う。

【方法】 分子間相互作用の予測に関連する記述子に関する論文を収集し、数百種類程度の記述子を収集した。それらの記述子の表現する物理量や用途、その後の使用例などを追跡した。

Table 1. Descriptor description

Name	Description	Purpose
WHIM [1]	3D structure, symmetry	Classification of 3D structures
GETAWAY [2]	Molecular width, 3D structure	Structure prediction
RDF	Radial distribution function	Structure similarity evaluation

【結果】 収集した記述子の中の一部は Table 1 に記載している。開発された記述子は偏っており、分子相互作用の記述子に適した記述子が少ないことがわかった。また、相互作用の中で、 π - π 相互作用などの原子-原子相互作用ではない相互作用に対する記述子が少ないことがわかった。

【参考文献】 [1] Todeschini, R.; Gramatica, P. The Whim Theory, *SAR QSAR Environ. Res.* 1997, 7 (1-4), 89-115. [2] Consonni, V.; Todeschini, R.; Pavan, M., *J. Chem. Inf. Comput. Sci.* **2002**, 42 (3), 682-692.

タンパク質の FMO 計算結果の解析における残基帰属の自動化の取り組み

Initiatives to automate the assignment of residues in the analysis of FMO

calculation results for proteins

立教大理¹, (株)JSOL², 東大生産研³

○芳根僚平¹, 土居英男¹, 奥脇弘次^{1,2}, 望月祐志^{1,3},

Rikkyo Univ.¹, JSOL Corp.², Univ. Tokyo.³

○Ryohei Yoshine¹, Hideo Doi¹, Koji Okuwaki^{1,2}, Yuji Mochizuki^{1,3}

E-mail: fullmoon@rikkyo.ac.jp

【序】近年、相互作用ダイナミクスを理解するために、古典分子動力学(MM-MD)とフラグメント分子軌道法(FMO)[1]を連携し、構造の揺らぎを考慮した動的・統計的な相互作用解析が行われています。FMO 法では計算精度の観点から、ペプチド結合を避けてカルボニル炭素と α 炭素の間でフラグメント分割を行います。そのため、相互作用エネルギー(IFIE)の解析が生化学的な直感と一致しない場合があります(図 1)。本研究では、原因となるフラグメント境界のカルボニル酸素の相互作用を自動判定するツールを開発し、FMO 解析の効率化と属人性の低減を目指しました。

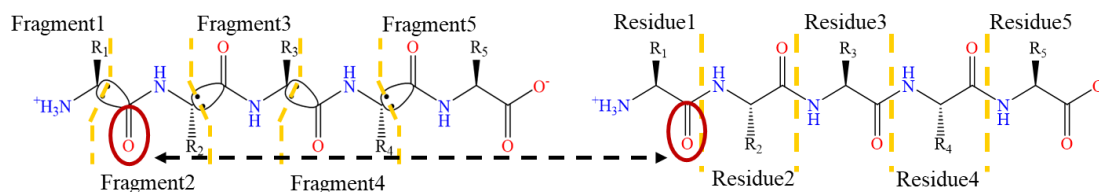


図 1. FMO 法でのフラグメント分割(左)とアミノ酸残基単位(右)の比較

【手法】カルボニル酸素が相互作用に関与している可能性を、エネルギー・距離・持続性の 3 要素に基づいてスコアリングしました。使用した構造は、GROMACS[2]で 100ns の MM-MD シミュレーションを行い、1ns ごとに切り出した全 101 構造です。エネルギー評価には、ABINIT-MP[3]による FMO 計算で得られた静電相互作用エネルギーと電荷移動エネルギーの平均値を、距離および持続性の評価には、カルボニル酸素と電子受容体間の距離の平均値と標準偏差を用いました。

【結果】今回は、Chignolin および Betrixaban-FXa 複合体の 2 系を対象にテスト解析を実施しました。本ツールの妥当性を検証するため、MOE[4]を用いた目視確認と本ツールによる解析結果を比較したところ、MOE でカルボニル酸素の相互作用が示唆されたすべてのフラグメントペアにおいて、本ツールのスコアが高いことが確認されました。

【謝辞】本研究は JHPCN (jh240001, jh250002)、「富岳」(hp240030, hp250014)、および立教 SFR の支援を受けました。また、ドイツ・ヘルムホルツ研究センターの津島悟氏には、データ提供のご協力を賜りました。

【文献】[1] Y. Mochizuki, et al., *Recent Advances of the Fragment Molecular Orbital Method - Enhanced Performance and Applicability*, Springer, (2021). [2] <<https://www.gromacs.org/>>. [3] S. Tanaka, et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16**, 10310 (2014). [4] *Molecular Operating Environment (MOE)*, 2024.0601 Chemical Computing Group ULC, 910-1010 Sherbrooke St. W., Montreal, QC H3A 2R7, 2025.

神経回路研究における実験とシミュレーションのインタープレイ

Interplay between Experimental and Computational Approaches in Neural Network Research

東北大通研¹, 東北大院工², 東北大 AIMR³

○山本 英明¹⁻³, 門間 信明^{1,2}, 平野 愛弓¹⁻³, 佐藤 茂雄^{1,2}

RIEC¹, Grad. Sch. Eng.², AIMR³, Tohoku Univ.

○Hideaki Yamamoto¹⁻³, Nobuaki Monma^{1,2}, Ayumi Hirano-Iwata¹⁻³, Shigeo Sato^{1,2}

E-mail: hideaki.yamamoto.e3@tohoku.ac.jp

脳科学における理論研究の重要性はかねてより認識されており, Hodgkin-Huxley によるイオンチャネルの予測や, Marr-Albus-伊藤による小脳の運動学習理論の構築をはじめとして, 数多くの知見がもたらされてきた. 近年においても, リカレントニューラルネットワークを用いた大脳皮質の情報処理・適応機構のモデル化など[1], シミュレーションを含む理論研究と実験研究とのインタープレイはますます緊密になりつつある. しかし実際には, 多種多様なバイオ素子が複雑ネットワークを形成して動作する生物の脳神経回路を数理モデルとして記述することは容易ではない場合も多い.

神経回路研究におけるこのようなギャップを埋める試みとして, 我々は, 数理モデルと一対一に対応する神経回路構造を培養細胞を用いてオーダーメイド的に構築する技術の開発に取り組んできた(図 1)[2,3]. 具体的には, マイクロコンタクトプリンティングやマイクロ流体デバイスを活用して培養細胞を操作し, 生物の脳神経系を特徴付けるモジュール構造を有する神経回路を再構成できることや, これらの自発活動や刺激応答パターンがスパイクングニューラルネットワーク(SNN)モデルで記述できることなどを示してきた[2,4]. また最近, マイクロ流体デバイスを用いて培養神経回路の接続指向性を制御する技術を開発し, SNN やマルコフ連鎖モデルを使ったモデリングと併せて, モジュール性と指向性を同時に制御することが活動パターンを多様化させる重要な要素であることを明らかにした[5]. このような培養神経回路と生体工学技術の融合研究は, 他のグループの動向を見ても国際的に一層活発化しており, 神経回路研究における実験とシミュレーションをつなぐ新たな架け橋になるポテンシャルを有していると考えている.

本研究は, 藤原直哉准教授(東北大), 守谷 哲博士(同), Jordi Soriano 准教授(バルセロナ大)らとともに進めました. 本稿の内容の一部は, 学術変革領域研究(A)「脳神経マルチセルラバイオ計算の理解とバイオ超越への挑戦」, 科研費, JST-CREST, 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究の成果に基づくものです.

- [1] J. Pemberton et al., Nat. Commun. 15, 10913 (2024).
- [2] H. Yamamoto et al., Sci. Adv. 4, eaau4914 (2018).
- [3] H. Murota et al., Adv. Mater. Technol. 10, 2400894 (2025).
- [4] H. Yamamoto et al., Sci. Adv. 9, eade1755 (2023).
- [5] N. Monma et al., Neural Netw. 184, 106967 (2025).

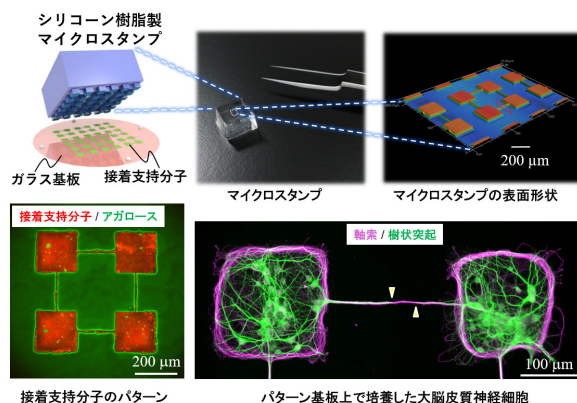


図 1. 培養神経回路の操作技術の開発 [2]

分子シミュレーションで探るナノバイオの分子機構

Molecular Mechanisms in Nanobioscience Explored by Molecular Simulations

慶應大理工¹ ○山本 詠士¹

Keio Univ.¹, °Eiji Yamamoto¹

E-mail: eiji.yamamoto@sd.keio.ac.jp

近年、分子動力学 (MD) シミュレーションは、生体分子のダイナミクスや相互作用を分子レベルで解析する有力な手法として広く用いられるようになってきた。実験結果を補完する分子スケールの知見を与えることで、階層的な理解につながる。一方で、実験とシミュレーションの間には、空間的・時間的なスケールギャップが依然として存在し、両者の橋渡しを行うための手法開発が重要な課題となっている。

本発表では、生体膜やタンパク質の液-液相分離現象、脂質プローブ、生体分子模倣のナノシステムなど様々な対象に対して、原子モデルから粗視化モデル、メソスケールにわたる多階層的な MD シミュレーションの結果と課題について発表する。特に、実験とのインタープレイに焦点を当てながら、分子シミュレーションがナノバイオ系の理解に果たす役割について議論したい。

自己組織化ペプチドを用いたグラフェン界面修飾とそのセンサ応用 Self-Assembled Peptide-Based Functionalization of Graphene Interfaces for Sensing

東京科学大¹ ○早水 裕平¹

Institute of Science Tokyo¹, °Yuhei Hayamizu

E-mail: hayamizu@mct.isct.ac.jp

近年、グラフェンや遷移金属カルコゲナイド (TMDs) といった二次元(2D)ナノ材料は、その特異な電気・光・機械特性から、エレクトロニクスやナノバイオテクノロジーにおける次世代プラットフォームとして注目を集めている。特に、ポストコロナ時代におけるセンシング技術の需要の高まりとともに、これら 2D 材料と生体分子との界面における相互作用の精密な理解と制御が重要性を増している。

本講演では、自己組織化ペプチドを用いた 2D 材料表面でのバイオナノ界面設計に関する近年の進展を紹介する。これらのペプチドは、分子設計により 2D 材料表面で秩序立った単分子層へと自己組織化し[1-3]、界面の電気化学ポテンシャルや溶液環境 (pH、溶媒) に応じて集合構造や電子状態を動的に変化させる能力を持つ[4]。我々は、こうしたペプチドと補因子ヘミンとの階層的自己組織化を利用し[5]、グラファイト表面における電気化学触媒系を構築したほか[6]、嗅覚受容体を模倣したペプチドを用いたグラフェン匂いセンサの開発に成功し、高選択性・高感度なセンシングを達成した[7,8]。特に、匂い分子の光学異性体を電気的信号として識別することに成功しており、これは従来型センサの限界を超える性能である。

本研究は、エレクトロニクス、分子設計、界面科学、電気化学測定に加え、分子動力学シミュレーションによる界面構造の解析も含めて展開されており、実験と理論のインタープレイが本分野の進展に不可欠であることを示している。本講演では、これらの多角的アプローチを通じたナノ界面制御の具体例を通じて、エレクトロニクスとナノバイオの融合領域における新たな展望を議論したい。

【参考文献】

1. C. R. So, et.al., ACS Nano, 6 (2) 1648-1656 (2012).
2. P. Li, et.al., ACS Applied Materials & Interfaces 11, 20670 (2019).
3. Y. Hayamizu, et.al., Scientific Reports 6, 33778 (2016).
4. R. Ccorahua, et.al. *The Journal of Physical Chemistry B* 125.39 10893-10899 (2021).
5. W. Luo, et al. *Nanoscale* 14.23 8326-8331 (2022).
6. M. Sugiyama, et al. ACS Nano 19, 14, 13760–13767 (2025).
7. C. Homma, et.al., Biosensors and Bioelectronics, 224, 115047 (2023).
8. Y. Yamazaki, et.al., ACS Appl. Mater. Interfaces 16, 18564–18573 (2024).

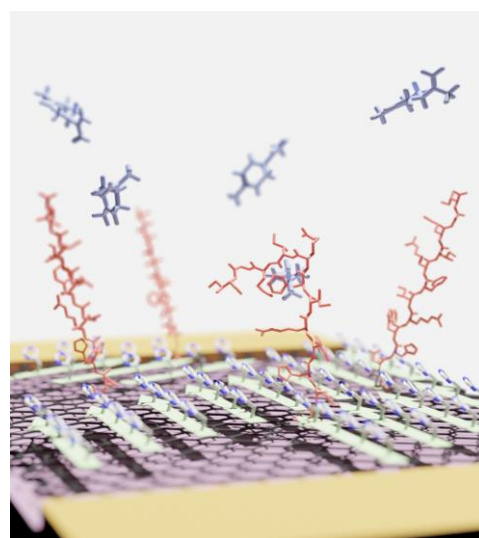


Fig. 1. Schematic illustration of a peptide-functionalized surface of a graphene biosensor.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 最先端デバイスへつなぐ有機作製技術と構造制御

[9p-S201-1~9] 最先端デバイスへつなぐ有機作製技術と構造制御

[9p-S201-1]

オープニング

○丸山 伸伍¹、廣芝 伸哉²、横倉 聖也^{3,4} (1.東北大院工、2.大阪工大、3.北大院総化、4.北大院工)

[9p-S201-2]

印刷法による複合薄膜の構造制御と実践的なフレキシブルセンサへの応用

○時任 静士¹ (1.山形大工)

[9p-S201-3]

静電スプレーを用いた有機デバイス開発

○小野島 紀夫¹ (1.山梨大)

[9p-S201-4]

有極性分子膜の構造制御と機能発現

○石田 謙司¹、河野 真也¹、日高 芳樹¹、合志 憲一¹ (1.九大院工)

[9p-S201-5]

機能性高分子ブレンドを用いた電気化学トランジスタ素子の作製技術

○山本 俊介^{1,2}、金田一 修平²、松原 亮介³、久保野 敦史³、Giridharagopal Rajiv⁴、Ginger David S.⁴、三ツ石 方也² (1.京大院工、2.東北大院工、3.静岡大工、4.ワシントン大)

[9p-S201-6]

有機半導体結晶薄膜と有機CMOS集積回路

○竹谷 純一^{1,2} (1.東大新領域、2.パイクリスタル)

[9p-S201-7]

有機導体を用いた一次元分子集合体の作製と物性評価

○帯刀 陽子¹ (1.農工大院)

[9p-S201-8]

ナノ電解法による新規有機ナノ材料の開発と電子機能

○織部 太智^{1,2}、長谷川 裕之^{1,2}、山田 俊樹²、大友 明²、芥川 智行³、原田 潤⁴、松田 真生⁵ (1.島根大院自然、2.情報通信研究機構、3.東北大多元研、4.北大院理、5.熊大院先端)

[9p-S201-9]

中間凝集状態を経た π 共役系高分子の高度配向

○尾崎 雅則¹、藤井 彰彦² (1.阪大院工、2.大阪工大院工)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：最先端デバイスへつなぐ有機作製技術と構造制御

[9p-S201-1~9] 最先端デバイスへつなぐ有機作製技術と構造制御

[9p-S201-1] オープニング

○丸山 伸伍¹、廣芝 伸哉²、横倉 聖也^{3,4} (1.東北大院工、2.大阪工大、3.北大院総化、4.北大院工)
キーワード：有機作製技術、構造制御

デバイス応用を目指した有機作製技術は近年飛躍的に発展している。本シンポジウムでは、多彩な作製技術の原理や技術的な工夫、構造制御からその応用までを扱い、革新的なデバイス実現に不可欠な技術の最新動向と今後の展望を議論する。

印刷法による複合薄膜の構造制御と 実践的なフレキシブルセンサへの応用

Morphology Control of Composite Thin Films via Printing Processes and Practical Applications in Flexible Sensors

山形大工 時任 静士

Yamagata Univ.

E-mail: tokito@yz.yamagata-u.ac.jp

近年、IoT 社会を支えるセンサの重要性は益々高まっている。高感度、高速応答、高信頼性、低コスト、それに加えて、採用する材料や製造プロセスが低環境負荷であることが強く求められるようになってきた。本講演では、環境負荷が低い印刷法、具体的には、ステンシルあるいはスクリーン印刷法を用い、溶液（インク）からのマイクロ構造を制御した複合薄膜（導電性薄膜）の形成とそれらを用いた実践的なフレキシブルセンサの作製、およびその応用について紹介する。センサのタイプとしては、抵抗変化で信号を検出する圧力センサ、歪みセンサ、および湿度センサである。

複合薄膜は、ホスト材料とゲストとなる導電材料を溶媒に溶解した高粘度溶液から作製した。代表的なホスト材料は、PDMS、SBS、セルロースナノファイバー、導電性材料にはカーボンブラック、グラファイト等を用いている。材料の組み合わせや組成、溶媒の種類、薄膜作製プロセスを工夫することで、薄膜の内部および表面のマイクロ構造を制御する。また、電極も銀インクを用いた同様な印刷法でフレキシブル基板に形成するため、オール印刷の作製プロセスとなっている。また、センサ構造において複合薄膜を2層構造とすることで、さらなる高性能化が可能となる。複合薄膜の代表的な構造は、200 ミクロンスケールの細孔が無数に形成された多孔質構造、薄膜の表面に 250 ミクロン周期のピラミッド状の突起が形成された 3D 表面、ナノファイバーと導電粒子が均一に複合された微細な多孔質構造などである。その観察写真とフレキシブルセンサを Fig.1 に示す。また、これらの有効性を検証するためのセンサ応用として、ロボットのグリッパーに実装した例を紹介する。

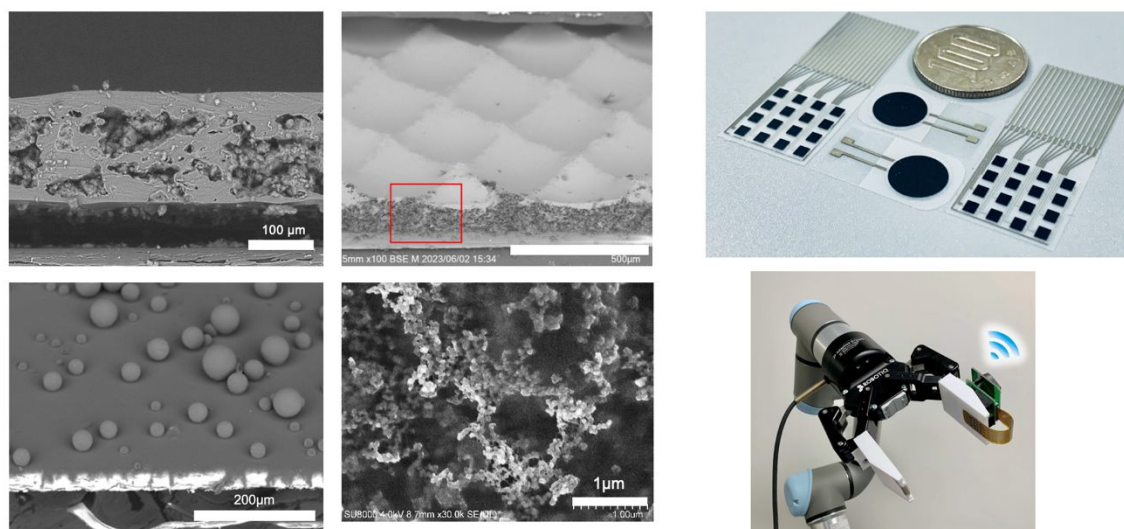


Figure 1 Morphologies of conductive composite thin films and their robotics application

参考文献: J. Jpn. Soc. Colour Mater. 94(8)(2021). Adv. Mater. Technol. 6, 210073(2022), ACS Appl. Mater. Inter. 14, 4, 5721(2022), Adv. Eng. Mater. 2302031(2024)

静電スプレーを用いた有機デバイス開発**Development of organic devices by using electrostatic spray method****小野島 紀夫 (山梨大)****Norio Onojima (Univ. of Yamanashi)****E-mail: nonojima@yamanashi.ac.jp**

本講演では、室温・大気下での静電スプレーを用いた有機デバイス開発について、これまでに得られた成果およびこれからの展望を述べる。静電スプレー法は、シリンジ針に高電圧を印加して溶液を微細な液滴にして基板上に堆積させる静電噴霧法である。有機デバイスの開発には2つのアプローチが考えられる。1つはシリコンなど従来の半導体では実現不可能な有機ならではの印刷ならではのアプローチであり、もう1つはシリコンデバイスプロセスに倣うアプローチである。前者について、有機半導体薄膜、絶縁膜、および低分子/ポリマーブレンド膜の静電スプレー堆積 (Electrostatic Spray Deposition: ESD) および OFET の作製プロセスに応用した結果を紹介する。ここでは、大面積に成膜するためにマルチジェットモードの ESD を用いている。また後者では、パッシベーション、エッチング、および不純物ドーピングについて述べる。現時点では、静電スプレー法を用いたドーピングは行えておらず、真空蒸着法を用いている。静電スプレーを用いた直接描画印刷についても紹介する。直接描画では、シリンジ針の真下に着滴するようにコーンジェットモードの ESD を用いている。おもにシリンジ針に印加する電圧を調整してスプレーモードを制御している。オンデマンドな直接描画は、アクティブマトリクス回路の大面積・低コストな印刷による軽量・フレキシブルな大画面ディスプレイへの応用が期待される。

有極性分子膜の構造制御と機能発現

Enhancement of Functional Properties in Polar Molecular Thin Films through Structural Control

九大院工, [○]石田謙司、河野真也、日高芳樹、合志憲一

Kyushu Univ., [○]Kenji Ishida, Shinya Kawano, Yoshiki Hidaka, Kenichi Goushi

E-mail: ishida.kenji.383@m.kyushu-u.ac.jp

近年の量子化学計算や有機合成法の技術進歩により、多様な量子構造をもつ有機分子の設計・合成が可能となってきた。閉じた電子系からなる個々の有機分子を機能素子と見なし、それら集合体の2次元/3次元的な構造化・組織化により有機分子デバイスとして機能させることが期待されている。翻って考えると、複素原子が多様な結合様式にて化学結合する有機分子においては、化学構造由来の1次構造のみならず、分子内回転自由度（2次構造）、凝集構造/分子配向（3次構造）により多くの構造多形を示すため、有機分子の機能発現・高効率化には、その1～3次構造の緻密な制御が重要となる。本講演では、分子内に大きな双極子モーメントをもつ有極性分子の薄膜構造、分子配向、分極制御による機能発現について紹介させて頂きたい。

有極性分子の1つであるポリフッ化ビニリデン (Poly(vinylidene Fluoride); PVDF) は、 $-\text{CH}_2\text{CF}_2-$ を構成ユニットとする1次元高分子量体であり、ユニット内に存在するF原子とH原子の電気陰性度の差により分子鎖に対して垂直方向に双極子モーメントを生じる。また、1分子が発現する双極子モーメントは、F/H原子が対向して一列に並んだオールトランス (TT) コンフォメーションで最大となる。PVDFは図1に示すように、そのコンフォメーションとパッキング様式によって幾つかの結晶相を示すが、中でもI型結晶は分子主鎖がオールトランス且つユニットセル内の各双極子モーメントが1方向に揃うため、PVDFの強誘電特性を担う重要な結晶相である。つまりPVDFにて強誘電特性を発現させるためには、(1) 分子内コンフォメーションを制御し、(2) 強誘電性I型結晶相を発現させる必要がある。また、電気物性評価/薄膜デバイス化のためには、上部電極 / 分子膜 / 下部電極のサンドイッチ構造にて双極子モーメント（分極）が応答するように、(3) 分子軸を基板表面に対して平行配向する必要がある。総じて有極性分子材料の機能化には分子膜の構造・分子配向制御が不可欠となる。

有極性分子の応用例として強誘電キャパシタが想定されるが、上記(1)～(3)の構造・配向制御のみならず、分極方向制御により強誘電キャパシタに蓄積される残留分極量(Pr)を最大化する必要がある。Prが大きい程、強誘電体メモリ、圧電/焦電センサーとしての機能性は高まる傾向にある（図2）。講演時には、筆者らが従来取り組んできた有極性分子の薄膜構造・分極制御と強誘電性、圧電/焦電センサー特性、誘電特性等との相関について紹介する。

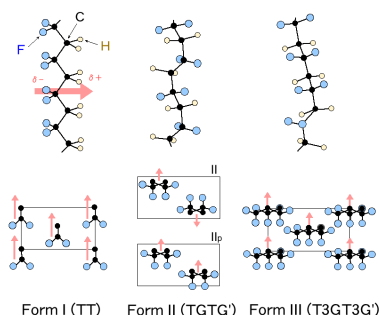


図1 PVDFの化学構造、コンフォメーション、単位胞内での分子配座

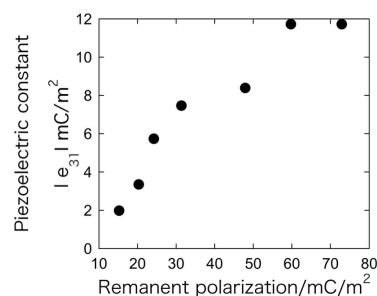


図2 分極制御の指標となる残留分極量 Pr と圧電定数との関係

機能性高分子ブレンドを用いた電気化学トランジスタ素子の作製技術

Fabrication of Organic Electrochemical Transistors Based on Polymer Blends

京大院工¹, 東北大院工², 静岡大工³, ワシントン大⁴ ○山本 俊介^{1,2}, 金田一 修平², 松原 亮介³, 久保野 敦史³, Rajiv Giridharagopal⁴, David S. Ginger⁴, 三ツ石 方也²

Kyoto Univ.¹, Tohoku Univ.², Shizuoka Univ.³, Univ. of Washington⁴,

°Shunsuke Yamamoto^{1,2}, Shuhei Kindaichi², Ryosuke Matsubara³, Atsushi Kubono³,

Rajiv Giridharagopal⁴, David S. Ginger⁴, Masaya Mitsuishi²

E-mail: syama@photo.polym.kyoto-u.ac.jp

【緒言】電子とイオンの両方を輸送する有機系混合伝導体は有機電気化学トランジスタ(OECT)の活性層等として用いられている。素子にセンシング等の機能性を賦与するためにはチャネル層に複数材料の集積が求められ、複雑な多段階塗布が課題となっていた。本研究では、代表的な導電性高分子である poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)に、温度応答性ポリマーpoly(*N*-isopropylacrylamide) (PNIPAM)をブレンドした単一プロセスでの作製方法を提案し、簡便なプロセスで温度応答機能を付与することを試みた。

【実験】PEDOT:PSS 水分散液に PNIPAM を混合した水溶液に対し、架橋剤を添加し、1 回のスピコートで混合伝導体膜を成膜した。この膜について各種構造評価と電気特性評価を行った。

【結果と考察】X 線光電子分光(XPS)深さプロファイル測定を実施し、膜の表面から基板に向かって元素・化学組成の分布を解析した。その結果、表面領域には PNIPAM 由来の窒素成分が顕著に検出され、基板側に向かうにつれて PEDOT:PSS 由来の硫黄成分が支配的となることが明らかとなった。すなわち、PNIPAM が表層に、PEDOT:PSS が下層（基板側）に偏在する二層構造が自発的に形成されることが示された。

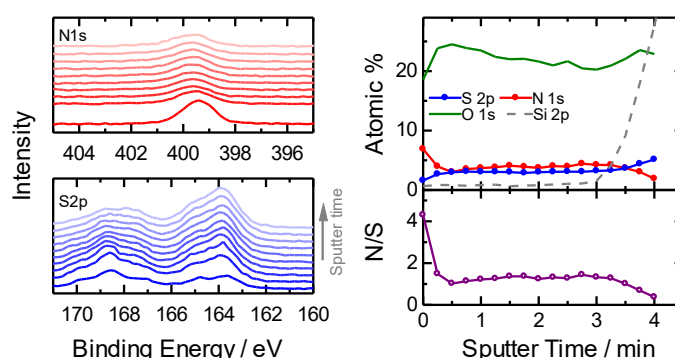


Fig. 1 Depth profile of XPS: (Left) N1s and S2p XPS spectra and (Right) analyzed XPS depth profiles, ratio of nitrogen and sulfur (N/S) of 1:2 blend films crosslinked with PEGDE + GOPS.

さらに、赤外顕微イメージング(PiFM)を用いたナノスケール構造解析により、膜表面近傍における各成分の空間分布を可視化したところ、面内での凝集はなく、比較的均一組成であることが分かった。OECT デバイスとしての評価では、PNIPAM 添加下でもソース・ドレイン間の正孔伝導経路は保持されており、これに加えて温度サイクル下でも高い安定性と可逆な温度応答($\pm 4\%/10^\circ\text{C}$)が実現した。これらの結果は、OECT 素子の高機能化と簡便な作製プロセスを両立しており、今後の応用に向けて有望な基盤技術となる。

【文献】 Shunsuke Yamamoto, Shuhei Kindaichi, Ryosuke Matsubara, Atsushi Kubono, Rajiv Giridharagopal, David S. Ginger, Masaya Mitsuishi, *Small* **2025**, 2501927 (2025).

有機半導体結晶薄膜と有機 CMOS 集積回路

Growth of Organic Semiconductor Thin Films and Organic CMOS Integrated Circuits

東大新領域¹, パイクリスタル² °竹谷 純一^{1,2}

Univ. of Tokyo¹, Pi-Crystal Inc.², °Jun Takeya¹

E-mail: takeya@k.u-tokyo.ac.jp

新しいデバイスを開発し、普及させる際に、最新の物質科学がデバイスの実装を加速し、社会実装の課題は新たな物質科学の発見を産みだす相補性がある。新物質の半導体デバイスの実用化に必要なのは、性能と安定性とコストである。本講演では、有機半導体分子を二次元配列させた結晶薄膜を例にして、集積回路への展開について紹介する。

半導体性能と構造安定性を両立する有機分子の例として、パイ共役有機分子アルキルジナフトベンゾジチオフェン(Cn-DNBDT)有機分子を設計・合成し、さらに、溶液のメニスカスを一方向に掃引することによって自発的に二次元単結晶に自己組織化させる手法を見出した[1]。具体的に、溶液から有機半導体の分子固体を析出する際に、塗布用のブレードに対して、基板を移動させながら、溶液を供給するスピードを溶媒が気化するスピードと同等になるように調整して、ブレード端のメニスカスから連続的に分子厚さ程度の極薄有機半導体の結晶薄膜を成長させる。このように自己集合した分子層有機単結晶膜は、単分子層かつサイズ無制限の究極の二次元性に加えて、半導体デバイス性能を決める電子移動度においても他の有機半導体材料を凌駕するため、実用的有機半導体材料として知られる[2]。

Cn-DNBDT 分子は、最高占有準位(HOMO)と最低非占有準位(LUMO)の間のギャップが大きいアルキル鎖が、より HOMO-LUMO ギャップが小さいパイ共役分子ユニットの両端に結合した、量子井戸構造を単分子に内包している。さらに、アルキル鎖の層とパイ共役分子ユニットの層のヘテロ界面構造となる二次元結晶を容易に成長して、自発的に得られる量子井戸構造を形成するため、パイ共役分子ユニット層が二次元面にコヒーレントな電子が閉じ込められた、クリーンな二次元電子系を得られることが、 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える高移動度のキャリア伝導を有するトランジスタ開発に結び付いている [3]。

現在、30 cm 角の有機半導体単結晶ウェーハから、CMOS 集積回路を構成するプロセスが確立されており、1000 トランジスタ級の集積回路がフィルム基板上に形成されている。本集積回路と同様の有機半導体結晶を用いた歪・振動センサーを組み合わせた、フィルム状センサーデバイスの開発が進められており、すでに設備管理用途や医療用途への展開が始まっている。

[1] J. Soeda, J. Takeya et al., Appl. Phys. Exp. 6, 076503 (2013).

[2] A. Yamamura, S. Watanabe, J. Takeya et al., Science Adv. 4, eaao5758 (2018).

[3] S. Kumagai, S. Watanabe, and J. Takeya et al., Sci. Rep. 9, 15897 (2019).

有機導体を用いた一次元分子集合体の作製と物性評価

Preparation and Physical Properties of One-dimensional Molecular Assemblies

Composed of Organic Conductors.

東京農工大学

帯刀 陽子

Tokyo University of Agriculture and Technology

Yoko Tatewaki

E-mail: ytatewa@cc.tuat.ac.jp

【緒言】

分子エレクトロニクス分野において高次集合体はキーマテリアルと位置づけられ、多機能デバイスへ向けた素子構造の複合化が期待されている。電荷移動錯体をはじめとする電気や磁気特性を有する分子を集積することで、単一分子では実現し得ない特異な機能性や物性を達成することが可能となる。TTFやTCNQに代表される電荷移動錯体は、単結晶状態で高導電性を示すことが報告されており、これら誘導体の低次元化に関する研究も活発に行われている。さらに、構造有機化学の観点からも低次元材料に多様な機能性を付与する試みが数多くなされている。一方、再生医工学分野では、必要な細胞を効果的に機能させるスキャホールド材料の開発が求められている。スキャホールドが細胞培養を補助するには、多孔質性・大表面積といった構造的特徴が必須となる。加えて、電気や磁気等の外部刺激が細胞の増殖を促進することが既に報告されている。

【結果】

本研究では、はじめにキラル部位を有する新規有機導電体を合成し、アクセプタ分子と混合することで螺旋状高次集合体を作成した。有機導電性分子の中心ユニットには tetrathiafulvalene(TTF)を用い、分子末端に水素結合部位とキラル部位を導入した。この TTF 誘導体を用いて作製した分子性コイルの配向性の発現には基板の形状も重要であり、基板表面に特定方向の凹凸パターンを形成することが、集合体の配列に大きく寄与することを確認した。また、これらの分子性コイルは交流磁場を印加することで誘導起電力を生じるため、構造と電磁特性の相関について明らかにした。電磁物性の測定は、ギャップ 50 μm の金電極を蒸着したマイカ基板上に分子性ナノコイルを作製し、交流磁場を印加することで起電力を測定した。周波数 23 Hz、磁場 0.4 T の条件下で 1.4 mV 程度の起電力が得られることが明らかとなった。応用として、本研究で得られた分子性ナノコイルをスキャホールドに応用し、得られた誘導起電力が細胞増殖過程に与える影響についても検討した。ナノコイルスキャホールド上に骨芽細胞を播種し、18 時間交流磁場を印加しながら培養したところ、生細胞数が約 2 倍に増殖することが明らかになった。以上の結果から、分子性ナノコイルは発電を可能とする新規エレクトロニクス・バイオデバイス素子になる。

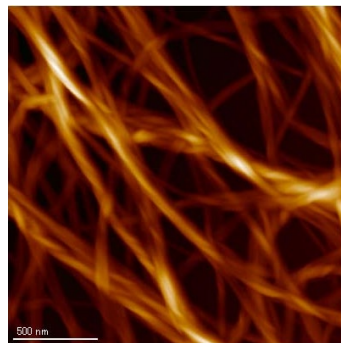


Figure 1 AFM image of nanocoil structures on mica substrate.

ナノ電解法による新規有機ナノ材料の開発と電子機能

Development of novel organic nanomaterials using nanoscale electrocrystallization and their electronic functions

島根大院自然¹, 情報通信研究機構², 東北大多元研³, 北大院理⁴, 熊大院先端⁵

○(D1)織部 太智^{1,2}, 長谷川 裕之^{1,2}, 山田 俊樹², 大友 明², 芥川 智行³, 原田 潤⁴, 松田 真生⁵

Shimane Univ.¹, NICT², Tohoku Univ.³, Hokkaido Univ.⁴, Kumamoto Univ.⁵

○Taichi Oribe^{1,2}, Hiroyuki Hasegawa^{1,2}, Toshiki Yamada², Akira Otomo²,

Tomoyuki Akutagawa³, Jun Harada⁴, Masaki Matsuda⁵

E-mail: n24d202@matsu.shimane-u.ac.jp

環境への負荷を最小限に抑えつつ、持続可能な化学プロセスを実現することを目指すグリーンケミストリーの理念は、機能性材料の作製技術においてもますます重要となっている。とりわけ半導体製造においては、製造プロセスに伴う高エネルギー消費や廃棄物の削減が課題とされている。我々が開発した、室温・大気中でナノスケール有機結晶を位置選択的に形成できるナノ電解法は、課題解決の1つの手段を提供し得る^[1]。本手法では、原料溶液に浸した基板上の2つの電極間に交流電場を印加することで、ギャップ部分での局所結晶成長を可能とする。成長するのは結晶性材料であり、秩序立った分子配列が期待される。高温・真空プロセスを必要としない本手法は新たなグリーンナノファブリケーションとして有望である。

近年、我々はナノ電解法へのMagnesium(II) Phthalocyanine (Mg(Pc)) の適用可能性を検討してきた^[2]。Mg(Pc)は、電気伝導性の低下の一因である分子修飾なしで一定の溶解性を示すことから、溶液プロセスに適用可能なMg(Pc)を用いた新規ナノ結晶材料の開発を試みた。

ナノ電解法によるMg(Pc)を用いた新規ナノ結晶材料の作製には、溶媒として高い溶解性を示すDimethyl Sulfoxide (DMSO) とTetrahydrofuran (THF) を用い、支持電解質として各種Tetrabutylammonium (TBA) 塩を選択した。電解の結果、DMSOを用いた条件では支持電解質の種類によらず結晶は得られなかった。一方、THFを用いた条件では、TBA·BF₄, TBA·ClO₄, TBA·NO₃のいずれを用いた場合でも微小結晶の形成に成功した (Fig. 1)。特にTBA·BF₄を用いた場合には、ギャップ部分に幅700 nm～4 μm程度の微小結晶が得られ、位置選択的な結晶成長が可能であることが示された。また、アニオン種によって結晶の形状や形成位置の制御性に差異が見られたことから、結晶成長機構においてアニオン種が関与していることが示唆された。

得られた微小結晶の電気特性評価のため、基板上に酸化膜付きシリコン基板を用い、基板上の2電極をソース・ドレイン電極としてバックゲート型構造で電界効果特性の測定を行った。その結果、TBA·ClO₄を用いた微小結晶では伝導性にゲート電圧依存性は見られなかったが、TBA·BF₄およびTBA·NO₃を用いた微小結晶では伝導性がわずかにゲート電圧に依存し、それぞれp型およびn型の特性を示した。これらの電気特性の違いは、Mg(Pc)系結晶の電子状態の違いに起因すると考えられる。

当日は、電気化学的条件と結晶成長挙動の関係性も交えてこれら微小結晶の作製条件や詳細な電気特性について議論する予定である。

[1] H. Hasegawa, *21st Century Nanoscience – A Handbook*, Vol. 2, Chapt. 19, CRC Press, 2019.

[2] 織部 太智 他, 第85回応用物理学会秋季学術講演会(2024), 第72回同春季学術講演会(2025).

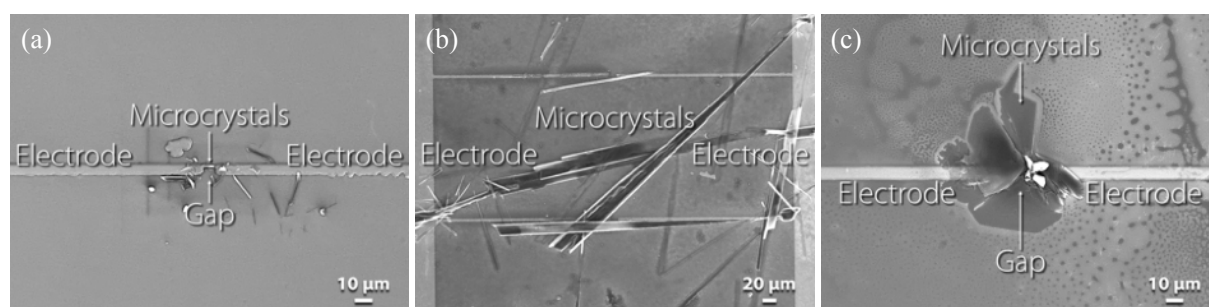


Fig. 1. SEM images of Mg(Pc)-based microcrystals obtained using (a) TBA·BF₄, (b) TBA·ClO₄, and (c) TBA·NO₃ as supporting electrolytes.

中間凝集状態を経た π 共役系高分子の高度配向

Highly Oriented π -conjugated Polymers via Intermediate Aggregation State

阪大院工¹, 大阪工大院工² 尾崎 雅則¹, 藤井 彰彦²

Univ. Osaka¹, Osaka Inst. Technol.², Masanori Ozaki¹, Akihiko Fujii²

E-mail: ozaki@eei.eng.osaka-u.ac.jp

π 共役系が発達した有機分子はフレキシブルな置換基が導入されていない場合、分子間の強い相互作用の結果、有機溶剤に不溶であり、加熱しても融解しないことが多い。しかし、これらの分子構造に適切な長さやサイズの柔軟な置換基を導入することで、溶解性と融解性が付与され、印刷可能な電子材料として応用されている[1-5]。このような柔軟な側鎖や大きな置換基の導入による溶解性と融解性は、固体と液体の中間状態の出現に類似しており、中間状態の分子は自己組織化された配置を示すことが多い[6-8]。さらに、塗布成膜過程において中間凝集状態を制御することで、高度に配向した電子材料を実現できる。すなわち、等方的な液体状態のように個々分子が孤立している場合には、流れ場による配向効果をほとんど受けないが、メゾスコピックな凝集状態は、流れ場、特に不均一な流れ場の影響を受けて配列する。

本講演では、液晶状態における分子配向プロセスと同様の視点から、塗布成膜過程における π 共役ポリマーの分子配向プロセスについて議論する。例として、高分子間凝集力を持つドナー-アクセプター型 π 共役ポリマー、poly[2,5-(2-octyldodecyl)-3,6-diketopyrrolopyrrole-alt-5,5-(2,5-di(thien-2-yl) thieno [3,2-b] thiophene)] (PDPP-DTT) の薄膜を、さまざまな掃引速度でコーティング法により堆積させた場合を紹介する[9-11]。

- [1] R. Sugimoto, S. Takeda, H. B. Gu, and K. Yoshino, *Chem. Express*, **1**, 635-635, 1986.
- [2] M. Sato, S. Tanaka, and K. Kaeriyama, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, **11**, 873-874, 1986.
- [3] R. L. Elsenbaumer, K. Y. Jen, and R. Oboodi, *Synthetic Metals*, **15**, 169-174, 1986.
- [4] K. Yoshino, S. Nakajima, and R. Sugimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, L1038-L1040, 1987.
- [5] K. Yoshino, S. Nakajima, M. Fujii, and R. Sugimoto, *Polymer Commun.*, **28**, 309-310, 1987.
- [6] M. Hamaguchi and K. Yoshino, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, L1478-L1481, 1994.
- [7] M. Hamaguchi and K. Yoshino, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, L1689-L1692, 1994.
- [8] M. Ozaki, T. Fujisawa, A. Fujii, L. Tong, K. Yoshino, M. Kijima, I. Kinoshita, and H. Shirakawa, *Adv. Mater.*, **12**, 587-589, 2000.
- [9] Y. Yabuuchi, Y. Minowa, H. Kajii, S. Nagano, A. Fujii, and M. Ozaki, *Adv. Electron. Mater.*, **7**, 2100313, 2021.
- [10] Y. Yabuuchi, Y. Minowa, S. Nagamatsu, A. Fujii, and M. Ozaki, *ACS Mater. Lett.*, **44**, 205-211, 2022.
- [11] Y. Minowa, Y. Yabuuchi, S. Nagano, S. Nagamatsu, A. Fujii, and M. Ozaki, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14**, 50112-50119, 2022.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：宇宙開発を支えるバイオデバイス科学の最前線

[9p-S203-1~8] 宇宙開発を支えるバイオデバイス科学の最前線

[9p-S203-1]

宇宙への挑戦と期待

○谷口 正輝¹ (1.阪大産研)

[9p-S203-2]

～メガバンク出身のJAXA職員がご案内する～
応用物理学会ご関係者のための「宇宙ビジネスのABC」

○松岡 一郎¹ (1.宇宙航空研究開発機構 (JAXA))

[9p-S203-3]

宇宙ビジネスのリアル：STARSPHEREプロジェクトと宇宙放射線リスク

○梅田 哲士¹ (1.ソニーグループ株式会社)

[9p-S203-4]

太陽系物質科学への期待と共創点

○高野 淑識¹ (1.海洋研究開発機構)

[9p-S203-5]

シリコンカーバイド半導体集積回路による宇宙開発へのアプローチ

○黒木 伸一郎¹ (1.広島大RISE)

[9p-S203-6]

宇宙で生命を探る -生命システムのイベント・ホライズンを超えて-

○高萩 航¹ (1.東京科学大)

[9p-S203-7]

宇宙環境で適用可能なバイオセンサー開発を目指した単分子生体分子検出手法の開発

○小本 祐貴¹ (1.阪大産研)

[9p-S203-8]

放射線生物学からの宇宙における健康・医療へのアプローチ

○松本 義久¹ (1.東京科学大)

宇宙への挑戦と期待

The Final Frontier: Confronting Challenges and Embracing the Future of Space

阪大産研 谷口 正輝

Univ. Osaka

E-mail: taniguti@sanken.osaka-u.ac.jp

映画やアニメで描かれる宇宙への憧憬は、もはや遠い夢ではない。日々の研究やビジネスとは無縁と思われた宇宙が、今、現実のフロンティアとして我々の目の前に広がっている。

NASA の PICASSO プロジェクト¹では、2017 年の開始以来、地球外生命体の痕跡を探索するため、1 分子計測装置の火星輸送と現地での実証を目指してきた。当初は半信半疑であったこの挑戦も、無重力環境下での 1 分子計測を実証するまでに至った^{2,3}。そして 2025 年、阪大産研に月面都市開発研究センターが開設され、宇宙における産業科学の本格的な展開が始まった。

月面都市、特に「生きる」を月でデザインすることは、多岐にわたる研究を必要とする。インフラ、衣料、食料といった基盤に加え、月面での健康管理など、その研究開発は宇宙だけでなく、地球上の新たな産業開拓にも繋がる。例えば、多くの研究者が利用する真空チャンバーは、改造次第で月面環境を再現する実験空間となる。このように、宇宙はすでに身近な存在である。本シンポジウムでは、科学から産業に至る宇宙への挑戦と期待を、「探査」に焦点を当てて紹介する。



図 月面都市のイメージ

参考文献

1. <https://astrobiology.nasa.gov/research/astrobiology-at-nasa/picasso-and-matisse/>
2. C. E. Carr, J. L. Ramírez-Colón, D. Duzdevich, S. Lee, M. Taniguchi, T. Ohshiro, Y. Komoto, J. M. Soderblom, M.T. Zuber, *Astrobiology*, 23 (2023) 10.1089/ast.2022.0119
3. J. L. Ramírez-Colón, E. Johnson, D. Duzdevich, S. Lee, J. Soderblom, M. T. Zuber, M. Taniguchi, T. Ohshiro, Y. Komoto, C. E. Carr, *IEEE Aerospace Conf.* 1 (2024) 10.1109/aero58975.2024.10521175.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：宇宙開発を支えるバイオデバイス科学の最前線

[9p-S203-1~8] 宇宙開発を支えるバイオデバイス科学の最前線

[9p-S203-2] ～メガバンク出身のJAXA職員がご案内する～
応用物理学会ご関係者のための「宇宙ビジネスのABC」

○松岡 一郎¹ (1.宇宙航空研究開発機構 (JAXA))

キーワード：宇宙ビジネス

アカデミア・企業・自治体などと全国各地で年間200件以上の対話を重ねているJAXA職員が、大きな発展が期待される宇宙ビジネスについて、同ビジネス未経験の方向けに全体感やトレンド、具体例などを交えてわかり易く解説いたします。ワクワク感あふれる宇宙ビジネスの一端を是非ご一緒に実感いただき、みなさまの宇宙ビジネスへのご参加を検討いただく契機としていただければ幸甚です。<!--ScriptorEndFragment-->

宇宙ビジネスのリアル：STAR SPHERE プロジェクトと宇宙放射線リスク

The Reality of Space Business: The STARSPHERE Project and Space Radiation Risks

ソニーグループ株式会社, 梅田 哲士

Sony Group Corporation, Tetsuo Umeda (E-mail: Tetsuo.Umeda@sony.com)

1. はじめに

ソニーグループ株式会社が提供する STAR SPHERE プロジェクト^[1]では、「宇宙の視点を開放する」をコンセプトに新たな宇宙利用の形を提案した。本稿では、本プロジェクトにおける超小型人工衛星「EYE」とユーザーインターフェース「EYE コネクト^[2]」を使用した「宇宙撮影体験」サービスを紹介するとともに、宇宙放射線に起因する課題とその対策について述べる。

2. EYE と EYE コネクト

東京大学と共同で開発した EYE は 6U サイズの超小型人工衛星であり、ソニー製の民生用カメラおよびレンズを搭載し、高精細な静止画撮影が可能である。2023 年 1 月に打ち上げられ、約 2 年間の運用を経て 2025 年 2 月に大気圏に再突入した。本プロジェクトの最大の特徴は、ユーザーが「EYE コネクト」を使用して、地上から撮影対象や構図、タイミングを自由に指定できる「宇宙撮影体験」の提供にある。(図 1)。

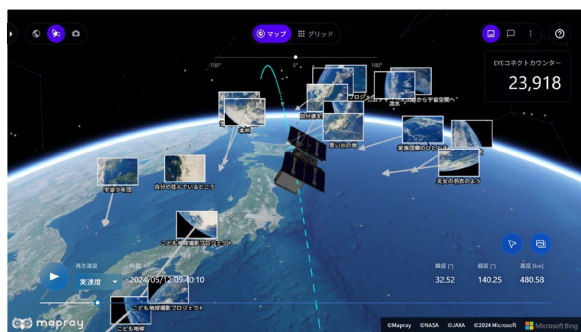


図 1 EYE コネクト

3. 宇宙撮影体験の価値検証

約 300 組に宇宙撮影体験を提供し、ユーザー調査の結果、撮影画像そのものの以上に、「宇宙空間

にある人工衛星を自ら操作して撮影する」という能動的な参加体験に高い価値が見出された。

4. 宇宙放射線による影響とその対策

一方で、高度約 500km の地球低軌道において運用される EYE は宇宙放射線の影響を強く受ける。とくに CMOS イメージセンサにおいては、画素が損傷を受け「白傷」が発生し、画像品質を低下させる(図 2)。本プロジェクトでは、撮影時に黒画を定期取得し、白傷を特定・補正するアルゴリズムを開発・適用した。これにより、補正後の画質が向上し、ユーザー満足度の維持に寄与した。

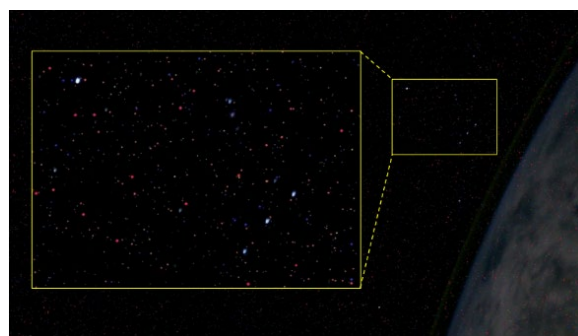


図 2 EYE で撮影した補正前の実画像

5. おわりに

STAR SPHERE プロジェクトは、超小型人工衛星による宇宙撮影体験を通じて、一般ユーザーが宇宙を身近に感じる新たな価値を提示した。一方、宇宙放射線などの課題には、ソフトウェア補正など多面的な対応が求められる。本稿の知見は、今後の宇宙ビジネスを考える上で有用な示唆を与えるものである。

[1] <https://starsphere.sony.com/ja/>

[2] <https://starsphere.sony.com/eyeconnect/>

太陽系物質科学への期待と共創点

On the perspectives of material science in Solar System

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 ○高野 淑識

JAMSTEC, Yoshinori Takano

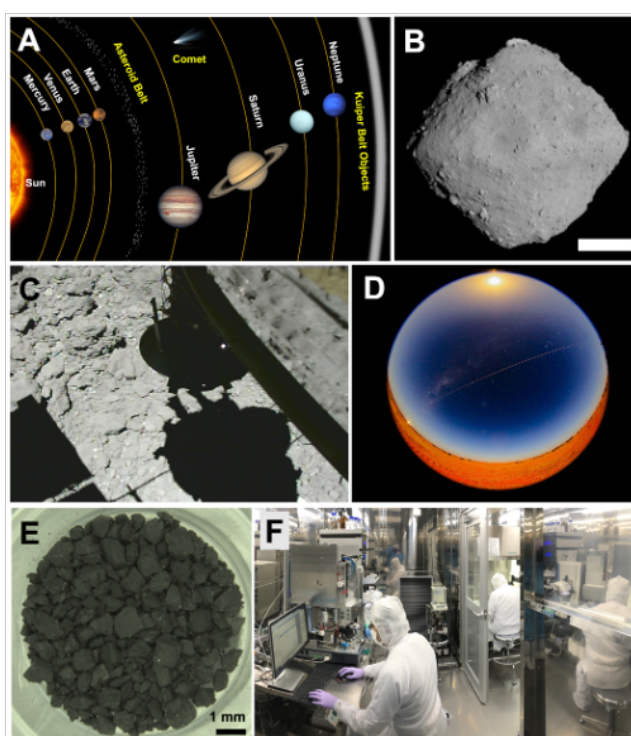
E-mail: takano_(a)_jamstec.go.jp

2020 年に炭素質小惑星リュウグウ (Ryugu) から地球帰還した試料は、太陽系物質科学の理解に大きな前進をもたらした。初生的な物質性状[1]ならびに水—有機物—鉱物の相互作用とともに 46 億年の時間積分された有機分子の化学進化[e.g., 2-4]を記録している。炭素質小惑星は、分子進化を観測できる天然の実験室である。リュウグウとともに、2023 年に帰還した NASA 主導のオシリス・レックスによる炭素質小惑星ベンヌ (Bennu) との比較考察は、重要なマイルストーンになるだろう[5,6]。ここでは、太陽系物質科学の中長期的な展望と併せて、国際コミュニティで目指す共創点を議論したい。

The samples returned to Earth from the carbonaceous asteroid Ryugu had an important advance in our understanding of Solar System science. The pristine samples record the chemical evolutionary history of the past 4.6 billion years for the interactions between water, organic matter, and minerals. Ryugu provides a natural laboratory for observing molecular evolution, therefore, the comparative studies of the carbonaceous asteroid Bennu will have a scientific significance. Here, we would like to discuss the perspectives for Solar System science from the scope of international community.

References: [1] Tachibana et al. (2022) *Science* **375**, 1011–1016.; Yada et al. (2022) *Nature Astron.* **6**, 214–220. [2] Naraoka et al. (2023) *Science* **379**, abn9033. [3] Takano et al. (2024) *Nature Commun.* **15**: 5708. [4] Oba et al. (2023) *Nature Commun.* **14**: 3107. [5] Lauretta et al. (2024) *Meteoritics & Planet. Sci.* **59**, 2453–2486. [6] Glavin et al. (2025) *Nature Astron.* **9**, 199–210.

Figure 1 The carbonaceous asteroid Ryugu in the Solar system and exploration for chemical evolution of prebiotic organic molecules by the Hayabusa2 sample return mission. (A) Location of the asteroid belt in the inner Solar system. **(B)** Global photograph of Ryugu with the ONC-T from 20 km (Credit: JAXA, Univ. Tokyo & Project team). The white scale bar indicates 200 m. **(C)** 1st touchdown operations on Ryugu with CAM-H imaging on 22-Feb-2019, The capture image was just before touchdown during the descent at the altitude of approximately 4.1m. (Credit: JAXA). **(D)** Hayabusa2 sample capsule entering the Earth's atmosphere on 6-Dec-2020 (Credit: JAXA, photo taken in Australia). **(E)** Ryugu sample under a microscope for A0106. **(F)** Precise organic chemical analysis and molecular surveys in a clean room [2-4].



シリコンカーバイド半導体集積回路による宇宙開発へのアプローチ

Silicon Carbide CMOS Integrated Circuits, An Approach to Space Development

広島大 RISE, 黒木伸一郎

Hiroshima Univ., Shin-Ichiro Kuroki

E-mail: skuroki@hiroshima-u.ac.jp

シリコンカーバイド (SiC) 半導体はパワー半導体デバイスとして実用化され、社会実装が着々と進んでいるが、ワイドバンドギャップ半導体でありかつ原子間結合が強い性質から、高温や高放射線環境下でのデバイス駆動が可能である。この特徴をより生かして SiC CMOS 集積回路やイメージセンサの研究開発を進めている。この研究開発は福島第一原子力発電所での廃炉作業や、宇宙開発などへの応用を目指したものである。Fig.1 にその応用範囲を示す。高温領域応用に EV などの自動車などがあり、より高放射線環境応用として宇宙開発や原子炉への応用がある。それぞれの応用はニッチであるが、共通化したエレクトロニクス・プラットフォームをつくることで、社会実装することを目指している。他方 CMOS 集積回路は、ロジック及びアナログ回路として汎用性が高く、回路大規模化をしやすい。以上から SiC CMOS 集積回路はこの新しいエレクトロニクス・プラットフォーム (最大駆動温度 $> 500^{\circ}\text{C}$ 、耐放射線性 $> 2 \text{ MGy}$) を担えると考えている。

SiC による極限環境エレクトロニクス・プラットフォーム実現に向けて、プロセス・デバイス・集積回路の研究開発を総合的に進め、更に社会実装に向けた取り組みを進めている。プロセス・デバイスの各要素技術の研究を進めながら、同時にこれらを組み合わせることで回路化を進め、これまでに SiC 増幅回路の 500°C までの動作実証[1]や、ロジック回路として SiC CMOS 回路およびメモリの動作実証[2]などを行った。また原子炉廃炉などでの高放射線下作業用に SiC イメージセンサの研究開発を進め、SiC CMOS イメージセンサ[4,5]と、Si SOI 基板と SiC 基板を貼り合わせ受光部のみを Si 層で形成したハイブリッド型 SiC CMOS イメージセンサ[6]を提案した。これまでに画素レベルで 2 MGy のガンマ線照射後動作と、 64 画素アレイのリアルタイム動作を示した。

SiC CMOS 集積回路の社会実装を進めるためには、これを担うファウンドリの立ち上げが急務である。そのためには量産ラインでの SiC 集積回路製造プロセスの整備と試作デバイスからのデバイスパラメータ抽出が必要である。このような社会実装に向けた取り組みも紹介する[6]。

【謝辞】本研究の一部は JSPS 科研費(S) JP24H00035、F-REI 福島国際研究教育機構「廃炉向け遠隔技術高度化及び宇宙分野への応用事業」、および文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業「集積 Green-niX 研究・人材育成拠点」の助成を受けたものです。

[1] V. V. Cuong, T. Meguro, S. Ishikawa, T. Maeda, H. Sezaki, S.-I. Kuroki, IEEE TED, 69(8), 4194 (2022).

[2] S.-I. Kuroki, T. Kai, T. Ozaki, K. Kojima, A. Takeyama, T. Ohshima, and Y. Tanaka, IEEE EDL, 45(12), 2280 (2024).

[3] T. Meguro, A. Takeyama, T. Ohshima, Y. Tanaka, S.-I. Kuroki, IEEE EDL, 43(10), 1713 (2022).

[4] M. Tsutsumi, T. Meguro, A. Takeyama, T. Ohshima, Y. Tanaka, and S.-I. Kuroki, IEEE EDL, 44(1), 100 (2023).

[5] T. Meguro, M. Tsutsumi, A. Takeyama, T. Ohshima, Y. Tanaka and S.-I. Kuroki, APEX, 17, 081005 (2024).

[6] プレスリリース https://www.hiroshima-u.ac.jp/system/files/259036/h3_handoutai.pdf

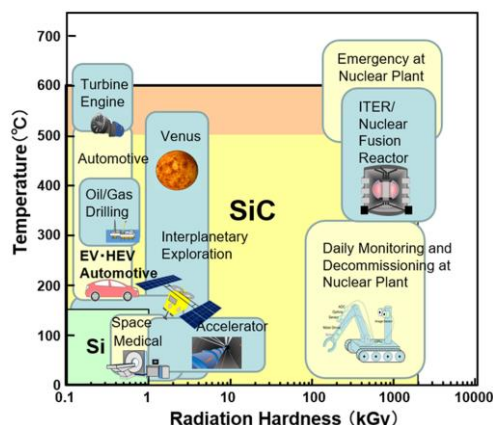


Fig 1. Applications of SiC Extreme Environment Electronics.

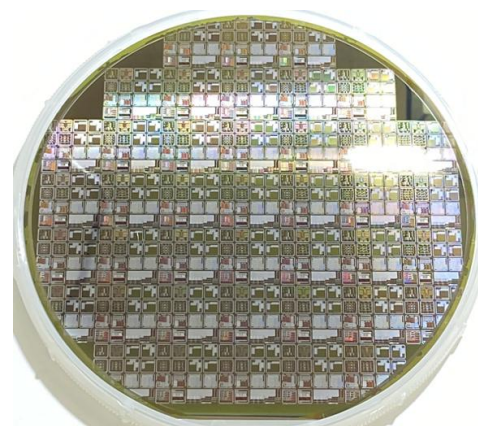


Fig 2. 4H-SiC CMOS-ICs on 6-inch SiC wafer [6].

宇宙で生命を探る –生命システムのイベント・ホライズンを超えて–

Beyond Terran Biology: Probing 'Lyfe' Across the Cosmos

東京科学大¹ ^{○(P)}高萩 航¹

Institute of Science Tokyo¹ ^{○(P)}Wataru Takahagi¹

E-mail: watarut@elsi.jp

現代の最先端技術を駆使した生命探査において、ターゲットとすべき生体指標はその生命現象の側面に応じて異なる。たとえば、代謝活性に着目する場合にはクエン酸回路を中心とした中間代謝物群、情報伝達や自己複製系に注目する場合には RNA や DNA といった核酸、また構造的観点からは脂質二重層に代表される細胞膜構造が対象となる。しかし、これらはすべて、長い地球環境下での自然選択と適応進化の結果として形成・洗練されてきた「地球型生命」の特徴的構成要素である。ゆえに、それらは生命の存在を示唆する有力なバイオシグネチャー（生命存在指標）として機能し得る一方で、それが地球生命に特有の適応的進化産物である点を踏まえると、真に普遍的な生命検出枠組みを構築するためには慎重な解釈が求められる。

このような地球生命に依存した生命指標は、太陽系内外の天体環境における生命探査において強力なツールである一方で、あくまで地球型生命の生化学的枠組みに基づいたものであり、非地球型生命や異なる起源を持つ潜在的生命形態の検出には限界がある。そのため、生命の本質をより抽象化し、普遍的な指標に基づく探査手法の開発が求められている。たとえば、非標準アミノ酸（non-canonical amino acids, ncAAs）を組み込んだペプチドや、高度に化学修飾された核酸構造（e.g., メチル化修飾塩基、環状 RNA、非標準塩基対）などから構成される生命様分子システムは、既存の生物学的枠組みでは「生命」として認識されない可能性がある[1]。なぜなら、現在の生命活動の検出は、地球型生命の構成分子（20 種類の標準アミノ酸、A/T/G/C/U 塩基）に強く依存した検出系が主流であり、それ以外の化学空間、つまりは地球生物学的イベント・ホライズンの外側に対して極めて感度が低いためである。

近年、既存の生命システムの枠組みをより抽象化し、特定の化学セットに縛られない普遍的生命像である"Lyfe"という概念が提唱されている [2]。このような地球生物学的イベント・ホライズンの外側を観測するには、ナノギャップを用いた一分子検出技術のような [3]、既存の生命システムの枠組みにとらわれない多様な化学空間をカバーする分析技術の発展が必要不可欠である。Lyfe を対象とする生命探査、あるいは非地球型生命体が存在する可能性を念頭に置いたアストロバイオロジー（宇宙生物学）研究において、ncAAs 残基や修飾塩基を含む高分子を標識・増幅なしに識別可能な一分子検出技術は、従来法では見落とされる非標準的化学構造を捉える上で極めて有効なツールとなる可能性がある。本講演では、これらの原理を踏まえ、従来の地球生命モデルを超えた視点から、物理学的・化学的に実装可能な生命検出基準の再定義を試みるとともに、具体的な検出戦略として非標準分子や遺伝物質を対象とした生命探査の可能性について議論する。

【文献】 [1] Davies, *et al.*, *Astrobiology*, **9**(2), 241-249 (2009). [2] Bartlett and Wong, *Life*, **10**(4), 42 (2020). [3] Ventra and Taniguchi, *Nat. Nanotechnol.*, **11**(2), 117-126 (2016).

宇宙環境で適用可能なバイオセンサー開発を目指した単分子生体分子 検出手法の開発

Single-molecule biomolecular detection methods for biosensors applicable in space environments

¹阪大産研 ○小本 祐貴

Osaka Univ. SANKEN, °Yuki Komoto

E-mail: komoto@sanken.osaka-u.ac.jp

近年、宇宙研究が学術、産業の両面から高い注目を集めている。多岐にわたる分野の研究が行われる中でも宇宙におけるバイオセンシング研究は、基礎的な生命の起源の理解や将来的な宇宙における医療応用のために、高い期待をもって研究が行われている。宇宙空間で用いるバイオセンサーには、サイズ、消費エネルギーや耐久性などの様々な制約のもとで、微量試料の高選択的な分析が要求される。我々の研究グループは宇宙環境で適用可能なバイオセンサーとして、単分子計測手法に着目し、新規の生体分子検出技術を開発している。単分子計測は、微細加工技術を用いて作製された金属細線を破断させることにより形成するナノギャップ電極間にある分子を介したトンネル電流を計測する手法である。単分子計測は微小のセンシング部位を有する上に、有機分子プローブなどを用いずに多様な分子を直接計測することができるために、宇宙における厳しい制約も満たすことができると期待され、また、単一の分子の伝導度を検出可能であることから微量試料の分析に対する利点を有する。単分子計測は、接合構造の多様性に起因する伝導度のばらつきから分子選択性に課題があった。本講演では、主に単分子計測の選択性向上に対する取り組みを紹介し[1]、核酸[2-4]、アミノ酸[5,6]の識別、夾雑環境中における単分子検出手法[7]を報告する。また、実際の宇宙空間における計測のための探査機への搭載に関する取り組みに関しても報告する。

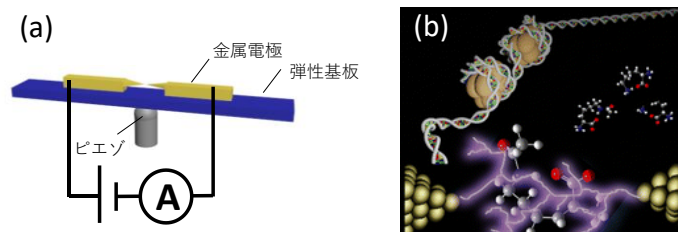


図1 (a)単分子計測セットアップの概念図

(b) 単分子生体分子検出のイメージ

参考文献

- [1] Y. Komoto *et al. Chem. Commun.*, 59, 6796-6810 (2023).
- [2] M. Taniguchi *et al. J. Phys. Chem. C*, 123, 15867-15873 (2019).
- [3] Y. Takashima *et al. J. Am. Chem. Soc.*, 123, 15867-15873 (2019).
- [4] T. Ohshiro *et al. Sci. Rep.*, 11, 1-10 (2021).
- [5] C.E. Carr *et al. Astrobiology*, 23, 1056-1070 (2023)
- [6] Y. Komoto *et al. RSC. adv.*, 14, 31740-31744 (2024).
- [7] Y. Komoto *et al. Sci. Rep.*, 10, 1-7 (2020).

放射線生物学からの宇宙における健康・医療へのアプローチ

An Approach for Healthcare and Medicine in Space

from the Aspect of Radiation Biology

東京科学大 °松本 義久

Science Tokyo °Yoshihisa Matsumoto¹

E-mail: yoshim@zc.iir.isct.ac.jp

地上に生きてきた私たち生物にとって、宇宙は経験したことのない特殊な環境である。宇宙環境の特殊性の代表的なものとして、無重力、日周性の変化などとともに高放射線が挙げられる。原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）の2008年報告によると、私たちは地上における生活で世界平均として年間2.4 mSvの自然放射線を被ばくしている。この中で0.39 mSvが宇宙からの放射線である。宇宙からの放射線は地球の大気や磁気で減弱されているため、宇宙空間に行けばこれより高くなる。宇宙航空研究開発機構（JAXA）によると、国際宇宙ステーション（ISS）では1日あたり0.5-1.0 mSvの放射線を被ばくする。半年滞在すると100-200 mSvとなり、男性一時不妊、奇形などのしきい線量に匹敵する計算となる。火星へのミッションとなるとさらに多くの放射線を被ばくすることになると考えられる。また、地上に比べ、荷電粒子（陽子、ヘリウム原子核＝ α 粒子、リチウム以上の重粒子）で高エネルギーのものが多くとされる。一方で、同じ線量であっても一度に短時間で被ばくした場合に比べ、長期にわたって少しずつ被ばくした場合には、一般に影響が小さくなること（線量率効果）が知られている。現在のところ、宇宙飛行士での放射線による健康影響は確認されていない。

放射線の生体への影響は主にDNA損傷によって引き起こされると考えられている。一方、生体はDNA損傷が生じた際に、それを修復するしくみを持っている。また、状況によっては、あえて細胞が自ら死ぬことによって、がん化や子孫への影響を防ぐしくみも持っている。私たちは、DNA損傷、その中でも最も重篤とされるDNA二重鎖切断の認識と修復の分子機構を明らかにし、その成果をがん治療、放射線防護に活かすことを目的として研究を行っている。放射線は生体を構成する全ての分子に作用するにもかかわらず、なぜDNAへの作用がとりたてて問題となるのか（すなわち、DNAの何が放射線の特別な標的たらしめているのか）という根源的な問いから始まり、生体はどのようにDNA損傷に応答するのかを概観し、そして、宇宙での高放射線環境にどれくらい適応できるのかを共に考察したい。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：外界からの刺激作用による細胞制御：刺激作用の伝達から制御効果の発現までを理解する

[9a-S302-1~9] 外界からの刺激作用による細胞制御：刺激作用の伝達から制御効果の発現までを理解する

[9a-S302-1]

オープニング

ー外界からの刺激作用による細胞制御：刺激作用の伝達から制御効果の発現までを理解するー

○熊谷 慎也¹ (1.名城大学)

[9a-S302-2]

選択的電荷照射によるたんぱく凝集

○清水 鉄司¹ (1.産総研)

[9a-S302-3]

大気圧プラズマ照射型細胞成長促進マイクロ灌流培養システム

沖野 隼大¹、○熊谷 慎也¹ (1.名城大学)

[9a-S302-4]

マイクロ流路デバイスを用いたヒトiPSC由来感覚ニューロン軸索における熱応答性評価

○酒井 洸児^{1,2}、田中 雄次郎^{2,3}、高橋 陸^{1,2}、後藤 東一郎^{1,2}、水野 陽介^{1,2}、大友 泰輝^{1,2}、田中 あや^{1,2} (1.NTT 物性研、2.NTT BMC、3.NTT 先デ研)

[9a-S302-5]

高速イオン伝導顕微鏡を用いた細胞表面の刺激応答ライブイメージング

○渡邊 信嗣¹ (1.金沢大学ナノ生命)

[9a-S302-6]

抗VEGF薬を超えて：黄斑浮腫治療における網膜グリア細胞と水輸送調節

○喜田 照代¹ (1.大阪医薬大眼科)

[9a-S302-7]

酸化ストレス化における過剰なミトコンドリア分裂の制御：阻害剤開発とマルチモーダルイメージング法の開発

○若槻 壮市^{1,2}、ポクレル スマン¹、ヘオ グワンボム¹、マシューズ イリンパン²、横井 俊^{1,3}、松井 勉²、光武 亜代理³、ダウラッチャハイ ダラ^{1,2}、ナイト ロウズ^{1,2}、サマーズ ジエイコブ^{1,2}、ケブセオグル アブダラ^{1,2}、モンダル サムスゾハ^{1,2}、ボウマン アダム⁴、カセヴィッチ マーク¹、モクリーローゼン ダリア¹ (1.スタンフォード大学、2.SLAC、3.明治大理工、4.ソーグ研究所)

[9a-S302-8]

多能性幹細胞を用いたタンパク質翻訳開始制御機構の解明

○友田 紀一郎^{1,2} (1.グラッドストーン研、2.京大iPS研)

[9a-S302-9]

クロージング

○熊谷 慎也¹ (1.名城大学)

オープニング

ー外界からの刺激作用による細胞制御：

刺激作用の伝達から制御効果の発現までを理解するー

Opening

-Cellular control by external stimulations:

From stimulation transfer to expression of regulatory effects-

名城大¹, °熊谷 慎也¹

Meijo Univ.¹, °Shinya Kumagai¹

E-mail: skumagai@meijo-u.ac.jp

細胞が外界からの刺激作用に対して応答することは古くから知られています。科学者は、細胞に対して独自の刺激作用を与えて、細胞の活動を制御することを試みてきました。応用物理学会でもライフサイエンス関連の研究発表が増えてきていますが、応用物理学の研究者としては、先の刺激作用が細胞にどのように伝わって、細胞の内部でどのような変化を引き起こして、我々の目で分かる細胞の活動の制御に至るのか、これら一連の物理に興味を持つのではないのでしょうか？

本シンポジウムでは、外界からの刺激作用が細胞に伝わっていく過程を階層的に捉え、細胞の外側、細胞表面、細胞内部における物理現象に焦点をあて、最終的な細胞の活動の制御に至るメカニズムを議論します。ライフサイエンス、医学、構造生物学、ナノバイオサイエンス、プラズマ科学、バイオ MEMS などの分野の研究者を招き、外界からの作用が細胞の活動に及ぼすまでメカニズムを多角的にかつ統括的に議論したいと思います。

選択的電荷照射によるたんぱく凝集

Protein Aggregation by Selective Charge Deposition

産総研¹ °清水 鉄司¹

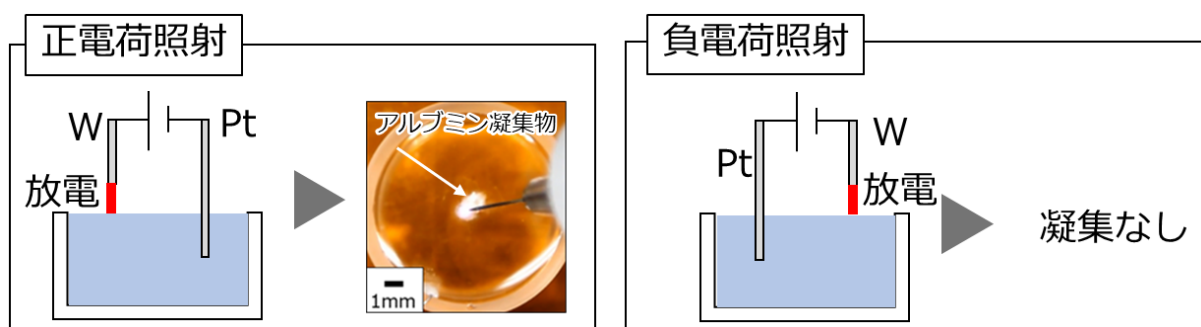
AIST¹, °Tetsuji Shimizu¹

E-mail: tetsuji.shimizu@aist.go.jp

生体に対する外部刺激として大気圧低温プラズマを用い、これまでに様々な医療応用研究が行われてきた。低温大気圧プラズマ照射による創傷治癒はその一例で、創傷表面の殺菌や治癒促進が達成される[1]。大気圧プラズマにより生成する荷電粒子や活性種などが創傷表面へ輸送され、細胞・生体との作用により生化学反応が起こるためである。多くのプラズマ医療研究では、活性種を生化学反応の起源と考えている。そのため、活性種の寿命が生化学反応の範囲を決定する。

近年、プラズマによる帯電および電荷の関与が示唆される反応が観察されている[2]。電荷が関与する反応は、活性種による生化学反応と比べて、空間的な反応範囲が異なる可能性がある。本講演では、選択的電荷照射によるたんぱく凝集を取り上げる。

プラズマによるたんぱく（アルブミン）凝集は、大気圧低温プラズマによる止血作用機序の一つである[3]。図に示すように、アルブミン濃度 50 mg/ml の溶液を石英製シャーレ内に準備し、その液面から 1 mm 離れたところに針電極を設置した。アルブミン溶液中に白金製のワイヤを挿入し、針電極・ワイヤ間に直流高電圧を印加することによって直流放電プラズマを生成し、アルブミン溶液の液面へプラズマ処理を行った。正の高電圧を印加した場合、正の電荷がアルブミン溶液液面に照射され、図に示すように液面上でアルブミンの凝集を観察した。負の電荷を照射する条件では、凝集を観察しなかった。これは、選択的な電荷供与により、たんぱくの凝集制御ができることを示しており、生化学反応の制御に展開できるのではないかと考えている。



図：選択的電荷照射によるアルブミン凝集。

参考文献

- [1] T. Shimizu and Y. Ikehara: J. Phys. D: Appl. Phys. **50**, 503001(2017).
- [2] T. Shimizu et al. Jpn. J. Appl. Phys. **61** (2022) SI1016.
- [3] H. Sakakita et al. Jpn. J. Appl. Phys. **60** (2021) 020502.

大気圧プラズマ照射型細胞成長促進マイクロ灌流培養システム

A microperfusion cell culture system for promoted growth

using non-thermal atmospheric pressure plasma

名城大¹, 沖野 隼大¹, °熊谷 慎也¹

Meijo Univ.¹, °Hayata Okino¹, Shinya Kumagai¹

E-mail: skumagai@meijo-u.ac.jp

【はじめに】近年、ライフサイエンス分野の進展が著しい。細胞培養技術の進展は、再生医療をはじめとする様々な応用分野で、求められている。より高度な細胞培養に向けて、マイクロデバイス分野では、マイクロ流路を用いた灌流デバイスが研究され、生体内環境を模擬する培養法として注目されている[1]。一方で、大気圧プラズマを用いた細胞制御の研究があり、大気圧プラズマで生成される様々な活性種（活性酸素、活性窒素等）を用いることで、細胞の増殖や分化を促進できることが報告されている[2]。我々はこれらの手法の特徴に着目し、プラズマ照射型マイクロ灌流細胞培養システムを開発してきた[3]。今回、このマイクロシステムを用いて、灌流培養下の細胞に対する、大気圧プラズマに由来する刺激効果の伝播過程を可視化したので、報告する。

【原理】マイクロ灌流システムの流路部の底面に微小ギャップを設ける。本システムに液体培地を注入すると、微小ギャップ部では液体培地の表面長力によって気液界面ができる。そのため、流路を流れる液体は微小ギャップから漏れ出ることなく、流路内を流れてゆく。微小ギャップの下部で大気圧プラズマを発生すると、プラズマによって大気から生成された活性酸素、活性窒素等の活性種が、気液界面越しにマイクロ流路内に供給され、細胞の成長を促進する。

【実験】灌流培養している細胞に対して、カルシウム指示薬 Fluo-4 を供給し、プラズマを照射した後の蛍光強度変化をモニタリングした。細胞の蛍光画像から、画像解析によって、プラズマ照射刺激による蛍光強度の変化を抽出した。

【結果および考察】蛍光画像を解析した結果、プラズマ刺激は、微小ギャップから流路内部に向かって、1,2 分で 1000 μm 程度の領域まで伝播した。本灌流培養システムでは、複数の細胞に対する外部からの刺激効果をモニタリングしながら増殖や分化を促進でき、再生医療等の多量の細胞を必要とする用途にも適するものになっている。

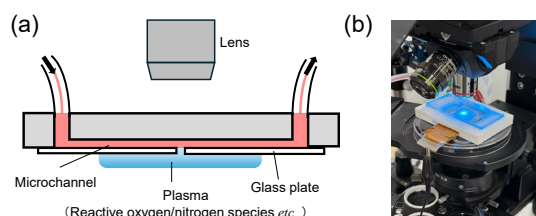


Fig.1 Microperfusion cell culture for promoted growth using atmospheric pressure plasma. (a) Schematic drawing and (b) actual setup.

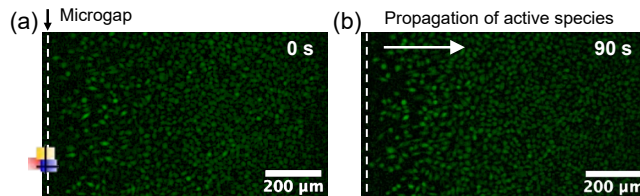


Fig.2 Ca^{2+} imaging of C2C12 cells cultured in the microperfusion system. (a) 0 s and (b) 90 s after plasma exposure.

[1] M.L. Coluccio et al., Microelectronic Eng., **208**, (2019) 14-28. [2] M. Kobayashi et al., Heliyon, **8**, (2022) e12009. [3] H. Okino et al., Jpn. J. Appl. Phys., **62**, (2023) SG1043.

マイクロ流路デバイスを用いた ヒト iPSC 由来感覚ニューロン軸索における熱応答性評価 Characterization of Thermosensitivity in Human iPSC-derived Sensory Axons Using Microfluidic Culture Device

NTT 物性研¹, NTT BMC², NTT 先デ研³

○酒井 洸児^{1,2}, 田中 雄次郎^{2,3}, 高橋 陸^{1,2}, 後藤 東一郎^{1,2}, 水野 陽介^{1,2}, 大友 泰輝^{1,2}, 田中 あや^{1,2}

NTT BRL¹, NTT BMC², NTT DTL³

○Koji Sakai^{1,2}, Yujiro Tanaka^{2,3}, Riku Takahashi^{1,2}, Toichiro Goto^{1,2}, Yosuke Mizuno^{1,2}, Taiki Otomo^{1,2}, Aya Tanaka^{1,2}

E-mail: ko.sakai@ntt.com

【緒言】ヒト iPS 細胞由来感覚神経細胞(hSN; human iPS cell-derived sensory neurons)は痛みや感覚の処理機構を調べるためのモデルとして注目されており，とりわけ実験動物の削減や種差の観点から創薬と生物学の分野で期待されている．例えば，痛みや熱の受容を担うイオンチャネルである TRPV1 (Transient receptor potential vanilloid 1)を開く薬剤を添加することで，hSN の応答性を評価した研究が報告されている⁽¹⁾．しかし，生体内で起きるような軸索末端での局所的な感覚受容を培養系に再現することは技術的に難しく，ヒトの感覚情報処理を調べるための分子・細胞レベルのツールは不足している．そこで我々は，培養軸索に局所熱刺激を加えるマイクロ流路デバイスを構築してきた⁽²⁾．本研究では，hSN に本デバイスを適用してその熱応答性を評価した．

【実験・考察】マイクロ流路デバイスは，PDMS 製マイクロ流路，グラフェンフレーク製の発熱素子および計測電極により構成される．マイクロ流路内に発熱素子および計測電極を設置し，波長 785nm のレーザーにより発熱素子を加熱することで，マイクロ流路内に誘導した軸索へ温度刺激を印加し，その発火応答を計測電極から記録することができる．hSN 前駆細胞をデバイスに播種したところ，培養 4 週間で 3.6 mm の流路長を伸長する様子が見られた(図 1)．発熱素子にレーザーを印加し，TRPV1 の開口閾値である約 43°C になるように加熱したところ，図 2 で示すように発火頻度の上昇する様子が見られた．刺激印加時の発火頻度や応答速度はラット胎児の細胞よりも低く，チャネル発現量の種差や成熟の違いを示唆する結果が得られた．以上より，本デバイスが hSN に適用可能であり，その機能的な成熟過程を評価できる可能性が示された．

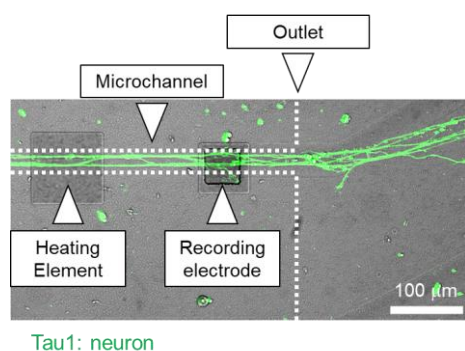


Fig.1 Immunochemical image of hSN axons growing in a microchannel

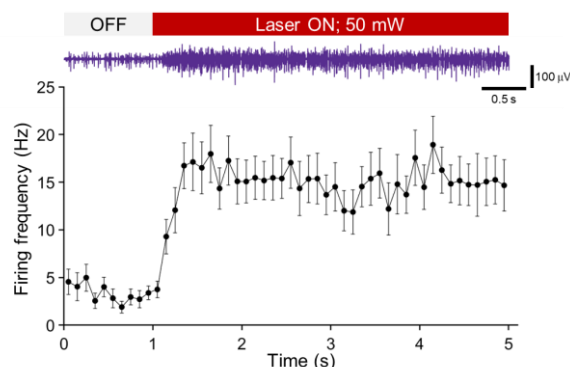


Fig.2 Representative waveform and plots of firing frequency before and after heating. Mean±SE (n = 22).

(1) A. Odawara et al., *Toxicol. Sci.*, **188**, 2022 (2) K.Sakai et al., *JSAP Spring Meeting 2025*, 15a-P05-1, 2025

高速イオン伝導顕微鏡を用いた細胞表面の刺激応答ライブイメージング

Live-Cell Imaging of Cell Surface Responses to External Stimuli Using High-Speed

Scanning Ion Conductance Microscopy

金沢大ナノ生命¹, °渡邊 信嗣¹

WPI-NanoLSI, Kanazawa Univ.¹

E-mail: wshinji@se.kanazawa-u.ac.jp

細胞表面は細胞内外を隔てる物理的な境界であると同時に、生命活動における必須の情報処理の場としても機能している。外部環境からの刺激は細胞表面を介して入力され、細胞間の情報伝達も細胞表面を通じて出力される。真核細胞の細胞膜には、厚さ 5 nm 程度の脂質二重膜に様々な膜タンパク質が埋め込まれ、その内側（細胞内側）では細胞骨格がナノファイバーネットワーク構造を形成して細胞膜を支持している。また、細胞骨格は、膜付近への生体分子の供給、配置にも関与し、細胞膜の動態制御を通じて効率的な情報処理を可能にしている。さらに、細胞膜表層には糖鎖をはじめとするナノスケール構造が存在し、情報処理の機能範囲を拡張している。

このような細胞膜に由来する微細構造の全容を明らかにするには、高い空間分解能を持つ観察手法が不可欠であるが、一般的な光学・蛍光顕微鏡の空間分解能では不十分であった。このため、電子顕微鏡により構造学的研究が進んできたが、固定化などの前処理が必要なため、生細胞のイメージングや細胞膜の動態観察には適さないという課題もあった。

走査型プローブ顕微鏡（SPM）は、光学顕微鏡を超える空間分解能を有し、かつ固定化前処理を必要としない点で、細胞膜の構造・動態を観察するための有力な手法である。中でも、走査型イオン伝導顕微鏡（SICM）は、ガラスナノピペット電極探針を用いた電気伝導計測を動作原理とする SPM で、探針と試料が直接接触しないため、他の SPM 手法と比較して細胞膜へのダメージが少なく、生細胞表面の長時間観察に適している。近年、我々を含む複数の研究グループによって、SICM の時間分解能の向上が進められており[1]、高速走査が可能な SICM（高速 SICM）によって、細胞膜の動的な変化をより詳細に捉えることが可能になってきた。本講演では、我々の最近の報告[2]を中心に、高速 SICM により実現された細胞膜動態の観察研究を紹介する。また、我々の研究室で取り組んでいる、低温プラズマ刺激に対する細胞膜の応答をライブイメージングで解析する試みについても併せて紹介する。

[参考文献]

- [1] S. Simeonov & T. E. Schäffer, *Nanoscale*, 17(11), 8579 (2019), S. Watanabe *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, 12(90), 123704 (2019), S. M. Leitao *et al.*, *ACS Nano* 11(15), 17613 (2021). F. Iwata *et al.*, *Ultramicroscopy* 273, 114149 (2025).
- [2] D. Wang *et al.*, *Anal. Chem.* 97(22) 11856 (2025), M. Yamazaki *et al.*, *Nanoscale* 17(22) 13869 (2025), W. Phairuang *et al.*, *ES & T* 58(28) 12368 (2024). D. Wang *et al.*, *Small* 2206213 (2022), Kenry *et al.*, *Small* 2203285 (2022). D. Wang *et al.*, *Biomaterials*. 280 12256 (2022).

抗 VEGF 薬を超えて：黄斑浮腫治療における網膜グリア細胞と水輸送調節

Beyond anti-VEGF drugs: Retinal glial cells and water transport regulation for the treatment of macular edema

大阪医科薬科大学医学部眼科学教室 喜田照代

Teruyo Kida, M.D., Ph.D., Department of Ophthalmology, Osaka Medical and Pharmaceutical University

網膜・黄斑疾患に対する世界的な標準的治療として、血管内皮増殖因子(VEGF)阻害薬の硝子体内注射が行われ、視力改善の可能性や quality of vision が格段に向上しました。しかしながら、実臨床において抗 VEGF 療法は反復投与が必要であり、また抗 VEGF 療法だけで治癒することが困難な症例も少なからず存在します。たとえば糖尿病網膜症の黄斑浮腫においても VEGF 以外の関与が予想され、エコファーマを視野に入れた抗 VEGF 療法以外の新しい治療法の可能性について考えています。アクアポリン(AQP)は水チャネルとして発見され、さらにバリア機能維持などの機能についても関心がもたれています。AQP4 は中枢神経系に発現する主要な水チャネルで、脳浮腫の発症や治癒に関与し、視神経や網膜にも発現しています。本シンポジウムでは、眼科臨床における話題を中心に、網膜グリアにターゲットを置き、網膜内の VEGF や網膜ミュラー細胞における酸化ストレスの変化など、当教室で行った基礎研究結果を含めお話させて頂きたいと思います。

Intravitreal injection of vascular endothelial growth factor (VEGF) inhibitors has become the global standard treatment for retinal macular diseases, significantly contributing the quality of vision (QOV). However, in clinical practice, anti-VEGF therapy requires repeated injections, and there are also cases that complete recovery is difficult with anti-VEGF therapy alone. For example, in diabetic macular edema, factors other than VEGF are also suspected to be involved, and we are considering the possibility of new treatment methods beyond anti-VEGF therapy, including eco pharma.

Aquaporins (AQP) were discovered as water channels and have their functions in maintaining barrier functions. AQP4 is a major water channel expressed in the central nervous system, involved in the onset and healing of cerebral edema. Interestingly, it is also expressed in the optic nerve and retina. In this symposium, I would like to focus on topics related to clinical ophthalmology and discuss the results of basic research conducted by our laboratory, including changes in VEGF and oxidative stress in retinal glia, Müller cells.

キーワード：黄斑、VEGF、アクアポリン

Keywords: macula; VEGF; aquaporin

酸化ストレス化における過剰なミトコンドリア分裂の制御：

阻害剤開発とマルチモーダルイメージング法の開発

Control of excessive mitochondria fission under oxidative stress: development of inhibitors and multimodal imaging systems

スタンフォード大学¹, 国立 SLAC 加速器研究所², 明治大学³, Salk Inst.⁴ ○若槻 壮市^{1,2}

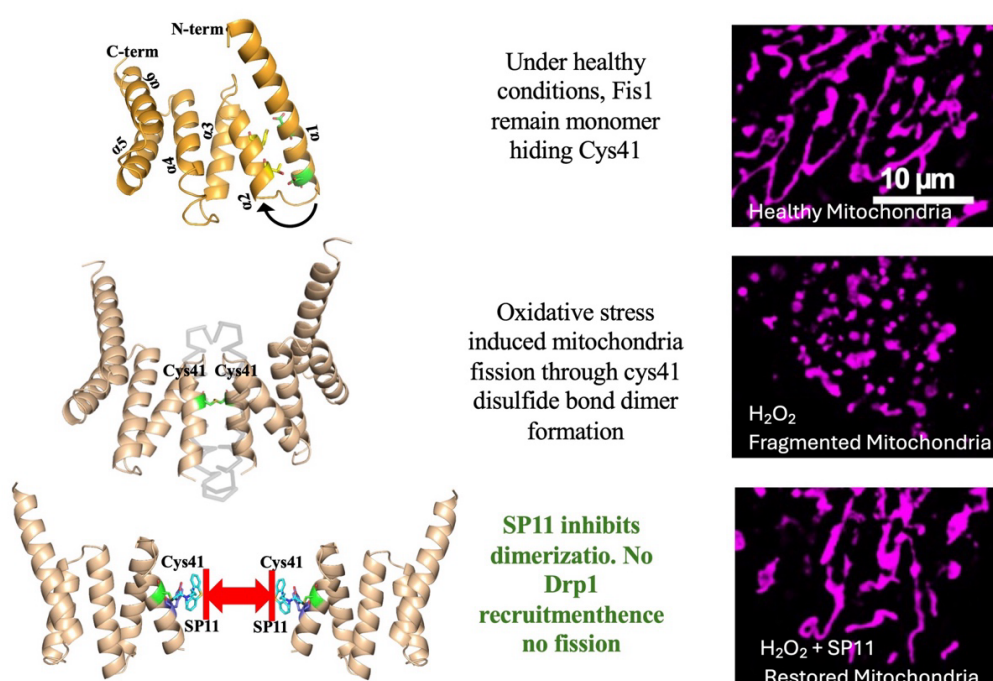
Stanford Univ.¹, SLAC National Accelerator Lab.², Meiji U.³, Salk Institute⁴

○Soichi Wakatsuki^{1,2}, Suman Pokhrel¹, Gwangbeom Heo¹, Irimpan Mathews², Shun Yokoi^{1,3}, Tsutomu Matsui², Ayori Mitsutake³, Dara Dowlathshahi^{1,2}, Rose Knight^{1,2}, Jacob Summers^{1,2}, Abdullah Kepceoglu^{1,2}, Samsuzzoha Mondal^{1,2}, Adam Bowman⁴, Mark Kasevich¹, Daria Mochly-Rosen¹

E-mail: soichi.wakatsuki@stanford.edu

Mitochondria are dynamic organelles, and fusion and fission maintain mitochondrial size, morphology and function. Fusion enables replenishment of damaged mitochondrial machinery and maintenance of mitochondrial network whereas fission increases mitochondrial number and enables the removal of damaged mitochondria as a mitochondrial quality control measure. A mitochondrial outer membrane protein, fission protein 1 (Fis1), mediates mitochondrial fission by recruiting large cytosolic GTPase, Drp1, to the mitochondrial outer membrane. Fis1-mediated mitochondrial localization of Drp1 and excessive mitochondrial fission occur in human pathologies associated with oxidative stress. However, it is not known how Fis1 detects oxidative stress and what structural changes in Fis1 enable mitochondrial recruitment of Drp1. Using synchrotron X-ray crystallography, small angle X-ray scattering and molecular dynamics, we find that conformational change involving $\alpha 1$ helix in Fis1 exposes its only cysteine, Cys41. In the presence of oxidative stress, the exposed Cys41 in activated Fis1 forms a disulfide bridge and the Fis1 covalent homodimers cause increased mitochondrial fission through increased Drp1 recruitment to mitochondria. Our discovery of a small molecule, SP11, that binds only to activated Fis1 by engaging Cys41, and data from genetically engineered cell lines lacking Cys41 strongly suggest a role of Fis1 homodimerization in Drp1 recruitment to mitochondria and excessive mitochondrial fission. The X-ray crystal structure of activated Fis1-SP11 complex further confirms these insights related to Cys41 being the sensor for oxidative stress. Importantly, SP11 preserves mitochondrial integrity and function in cells during oxidative stress and thus may serve as a candidate molecule for the development of treatment for diseases with underlying Fis1-mediated mitochondrial fragmentation and dysfunction.

In order to visualize mitochondria and other biological dynamics in response to external stimuli in various cells, we are developing multimodal imaging systems including electro-optical fluorescence lifetime imaging microscopy (EO-FLIM) and cryo-ET, and novel molecular markers to correlate them. We will report the current progress of the development project with future perspectives.



Elucidating the Molecular Mechanisms Governing Protein Translation Initiation in Pluripotent Stem Cells

グラッドストーン研¹, 京大 iPS 研² °友田 紀一郎^{1,2}

Gladstone Inst¹, Kyoto Univ CiRA², °Kiichiro Tomoda^{1,2}

E-mail: kiichiro.tomoda@gladstone.ucsf.edu

Our lives depend on protein expression, which is tightly regulated at multiple steps, including transcription and translation. Remarkably, some studies have revealed a poor correlation between protein and mRNA expression and that cellular protein abundance is predominantly controlled at the translation level.

Previous studies highlight the importance of translation regulation in stem cells. Pluripotent stem cells (PSCs) and adult stem cells tightly regulate global translation at low levels to maintain their stemness while increasing protein production during differentiation.

The rate-limiting step in translation is its initiation. The conventional view of translation initiation is that a single translational initiation complex, centered on eIF4G1, binds to the cap structure at the 5' end of mRNA and scans toward the 3' direction until it finds the start codon. Therefore, most protein translation is thought to begin this way. However, the process may be more intricate, as eIF4G1 has two homologous family members: eIF4G2 and eIF4G3. Growing evidence also suggests the widespread translation regulation by eIF4G2, although eIF4G2 does not efficiently bind to 5' caps.

We have investigated the functions of eIF4G2 in pluripotent stem cells and identified target proteins whose protein translation appears to be controlled by eIF4G2. Inhibiting eIF4G2 function is detrimental to pluripotent stem cells, leading to differentiation and cell death. In this session, I will discuss the eIF4G2 functions in pluripotent stem cells.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): ペロブスカイト・化合物・シリコン ～タンデム型太陽電池の現状と将来展望～

[7a-S102-1~4] ペロブスカイト・化合物・シリコン ～タンデム型太陽電池の現状と将来展望～

[7a-S102-1]

オープニング

○石塚 尚吾¹ (1.産総研)

[7a-S102-2]

ペロブスカイト/Siタンデム型太陽電池モジュールの研究開発

○山本 憲治¹、岡本 紳平¹、三島 良太¹、宇津 恒¹、足立 大輔¹ (1.カネカ)

[7a-S102-3]

ペロブスカイト/無機半導体系タンデム太陽電池の研究

○石川 亮佑¹ (1.東京都市大学)

[7a-S102-4]

ペロブスカイト/CIGSタンデム型太陽電池における電子輸送層のバンドアライメント評価

○桐原 芳治¹、水嶋 千尋¹、石塚 尚吾²、石川 亮佑¹、野平 博司¹ (1.東京都市大、2.産総研)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：ペロブスカイト・化合物・シリコン～タンデム型太陽電池の現状と将来展望～

[7a-S102-1~4] ペロブスカイト・化合物・シリコン～タンデム型太陽電池の現状と将来展望～

[7a-S102-1] オープニング

○石塚 尚吾¹ (1.産総研)

キーワード：太陽電池、ペロブスカイト、化合物半導体

ショックレー・クワイサー限界を超える高効率を可能にする太陽電池として、タンデム型（多接合型）太陽電池が期待されています。これまでのタンデム型太陽電池は、コストよりも性能が優先される用途に限られてきました。最近では、ペロブスカイトやシリコン、CIS系など、様々な材料の組み合わせによる安価で高性能な民生用タンデム型太陽電池の研究開発が注目されています。本シンポジウムでは、多岐にわたるタンデム型太陽電池の研究開発に取り組まれている専門家をお招きして、タンデム型太陽電池の高効率化や低コスト化に向けた研究開発の現状と将来展望について議論し、分野の垣根を越えた課題共有の機会を提供します。タンデム型太陽電池に興味をお持ちの皆様のご参加をお待ちしています。

ペロブスカイト/Siタンデム型太陽電池モジュールの研究開発

Development of Perovskite/Crystalline Silicon Tandem Solar Module

カネカ¹ °山本 憲治, 岡本 紳平, 三島 良太, 宇津 恒, 足立 大輔

Kaneka Corporation,

°Kenji Yamamoto, Shimpei Okamoto, Ryota Mishima, Hisashi Uzu, Daisuke Adachi

E-mail: Kenji.Yamamoto@kaneka.co.jp

ペロブスカイト/結晶シリコンタンデム型太陽電池は、世界の太陽電池市場の大部分を占める結晶シリコン太陽電池の理論限界を大きく超える変換効率が報告され、次世代太陽電池として注目を集めている。

当社では、その実用化に向けた技術開発を進めており、ボトムセルにヘテロ接合結晶シリコン太陽電池を用いた二端子構造(図Aに一例を示す)の小サイズセルにおいて、セル変換効率32.6%(第三者機関測定)等の結果を得ている(図B)。また、実用サイズセルを用いたモジュール技術開発では、これまでに、ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池セルを用いた当社現行製品との比較で1.2倍以上の出力(自社測定)を瓦一体型太陽電池モジュール(モジュールサイズ：約100cm×30cm, 外観イメージ：図C)の試作品にて確認している。

本講演では、これらの結果に加え、モジュールの高出力化で不可欠となる光閉じ込め技術等のセル・モジュール設計に関する当社のこれまでの取り組みや3D曲面を有するモジュールへの適用例(図D)等を紹介するとともに、実用化に向けた開発課題¹⁾について議論する。

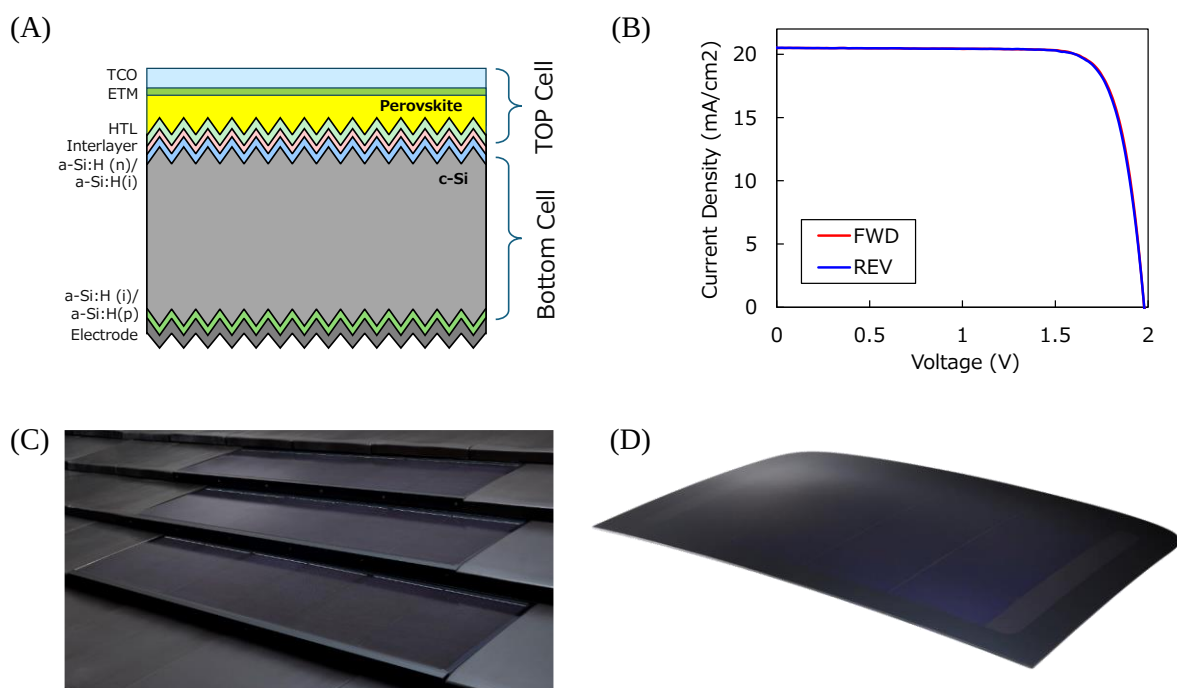


図 ペロブスカイト/ヘテロ接合結晶シリコンタンデム型太陽電池における (a) 断面セル構造, (b) 小サイズセルの第三者機関(ESTI)での電圧-電流特性の測定結果(面積:1.0cm², MPPT保持後セル変換効率32.6%)の一例, (C) 瓦一体型太陽電池モジュールの外観(モジュールサイズ：約100cm×30cm), (D) 3D曲面を有するモジュール(サイズ：約80cm×65cm)

謝辞 これらの成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)との共同研究の結果、得られたものです。

参考文献

- 1) K. Yamamoto, R. Mishima, H. Uzu, and D. Adachi, Jpn. J. Appl. Phys. **62** SK1021 (2023).

ペロブスカイト/無機半導体系タンデム太陽電池の研究

Perovskite/inorganic semiconductor tandem solar cells

東京都市大学 総合研究所 °石川 亮佑

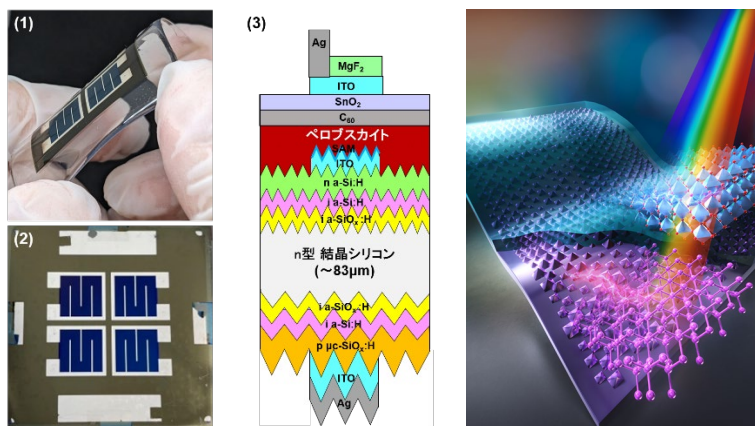
Tokyo City Univ. °Ryousuke Ishikawa

E-mail: rishikaw@tcu.ac.jp

ペロブスカイト太陽電池は、軽量・フレキシブルで高効率な次世代太陽電池として注目されている。さらに、バンドギャップの可変性や比較的低温での製膜が可能であることから、異種太陽電池とのタンデム構造への応用が期待されている。特にペロブスカイトとシリコンの組み合わせでは、変換効率 35% に迫る報告がなされている。しかしながら、従来のシリコンウエハー（厚さ約 200 μm ）をボトムセルとして用いる構造では、ペロブスカイト太陽電池の特徴である軽量・フレキシブル性を十分に活かすことができない。

我々はボトムセルに薄型シリコンヘテロ接合太陽電池を用いることで、フレキシブル性と軽量化を両立させたペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池の開発を進めている。これまでに、厚さ 80 μm のシリコンヘテロ接合太陽電池を用いたタンデム構造で、変換効率 26.8% を達成している[1]。さらに、軽量・フレキシブル化が可能なカルコパイライト系薄膜太陽電池との 2 端子モノリシックタンデム構造についても検討を進めている[2]。キャリア再結合層の改善により開放電圧は 1.91 V まで向上し、変換効率 22.7% を達成している。

本講演では、これらペロブスカイトと無機半導体系材料とのタンデム太陽電池に関する取り組みと今後の展望について報告する。



[1] H. Shishido, M. Konagai, R. Ishikawa et al., Solar RRL, 202400899, 2025.

[2] T. Nishimura, R. Ishikawa et al., Energy Technology, 2500020, 2025.

謝辞：本成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業および東京都市大学重点推進研究の支援を受けて得られたものです。また、CIGS ボトムセルについては産業技術総合研究所および東京科学大学から提供いただきました。ここに謝意を表します。

ペロブスカイト/CIGS タンデム型太陽電池における 電子輸送層のバンドアライメント評価

Evaluation of band alignment of electron transport layers in perovskite/CIGS tandem solar cells

東京都市大学¹, 産業技術総合研究所²

°桐原 芳治¹, 水嶋 千尋¹, 石塚 尚吾², 石川 亮佑¹, 野平 博司¹

°Yoshiharu Kirihara¹, Chihiro Mizushima¹, Shogo Ishizuka², Ryousuke Ishikawa¹, and Hiroshi Nohira¹
Tokyo City Univ.¹, AIST², E-mail: g2391202@tcu.ac.jp

はじめに ペロブスカイトおよびカルコパイライトを用いたタンデム型太陽電池は、いずれも多結晶薄膜材料に分類され、軽量かつフレキシブルな高効率太陽電池の実現が期待されている。我々は、これまでに取り組んできたペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池に関する知見と技術を応用し[1]、ペロブスカイト/CIGS タンデム太陽電池の高効率化を目指している。特に、ペロブスカイト層は下地層の影響により結晶性や膜質が大きく左右されるため、トップセルとして用いる際にはキャリア再結合層の設計が重要な要素となる。今回、我々はボトムセル (CIGS 太陽電池) の電子輸送層 (ETL) として SnO_x または TiO_x を用いたサンプルを用意し、①変換効率の比較、②バンドアライメントについて検討を行った。

実験方法 Fig. 1(a)に、測定サンプルの構造を示す。30 mm 角のガラス基板上に形成された CIGS ボトムセルは産業技術総合研究所より提供を受けた。ITO は RF スパッタリング装置を用いて 5 nm 成膜した。 TiO_2 および SnO_2 は原子層堆積法 (ALD) を用いて 5 nm 成膜した。酸化剤は H_2O 、プリカーサーは TDMATi および TDMASn である。このサンプルを、SPRING-8 BL09XU [2]で AR-HAXPES 測定をした。入射光のエネルギーは $h\nu=7.93$ keV、光電子放出角度(TOA)は 10–70°、測定光電子は In 3d, Sn 3d, O 1s, Zn 2p, Si 1s, Ti 1s, VB である。

結果および検討 Fig. 1(b)に ETL に TiO_2 を用いたサンプルの価電子帯 (VB) を示す。Fig. 1(c)に VB の立ち上がりから求めたバンドアライメントを示す。ITO/ TiO_2 /i-ZnO の伝導帯 (CB)の下端を見ると、CIGS 太陽電池から発生したキャリア (電子) が i-ZnO 層からペロブスカイト層まで移動するときの障壁が存在せず、ETL として適していることが明らかになった。ETL に SnO_2 を用いた場合のバンドアライメントや、変換効率の比較を含め、詳細な解析結果は当日報告する。

謝辞 本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業の委託業務により実施されたものである。放射光実験は、大型放射光施設 SPRING-8 の BL09XU を用いて、高輝度光科学研究センターの承認(JASRI, Proposal Nos. 2024B2106, 2024B2125, 2025A1803, 2025A1824)によって実行された。

参考文献 [1] H. Shishido et al., Sol. RRL **9**, 2400899 (2025). [2] A. Yasui et al., J. Synchrotron Radiat. **30**, 1013 (2023).

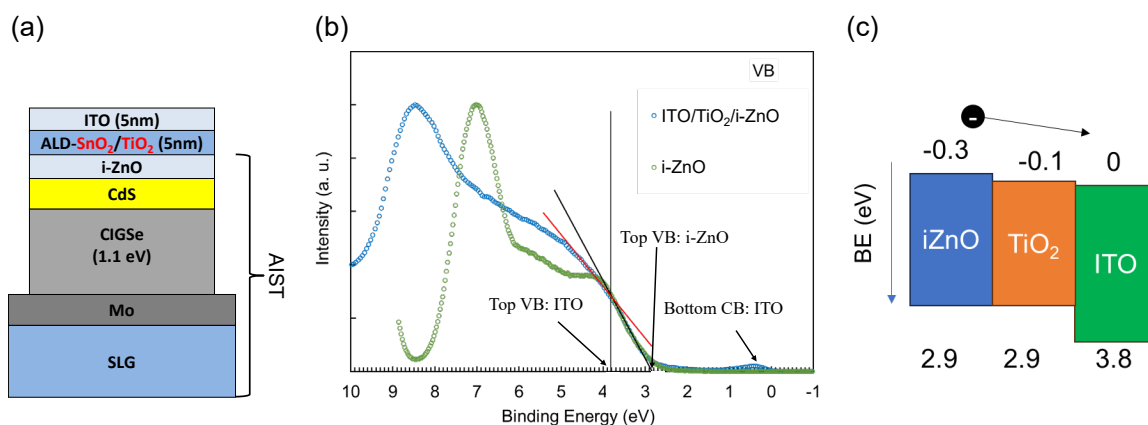


Fig. 1 (a) Prepared sample. (b) XPS measurement results of valence band (VB), (c) band alignment estimated from VB.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：ペロブスカイト・化合物・シリコン～タンデム型太陽電池の現状と将来展望～

[7p-S102-1~6] ペロブスカイト・化合物・シリコン～タンデム型太陽電池の現状と将来展望～

[7p-S102-1]

ペロブスカイト/カルコパイライト軽量タンデム太陽電池の開発

○杉本 広紀¹、中村 元志¹、林 京璋¹ (1.株式会社PXP)

[7p-S102-2]

Cu₂O/Siタンデム型太陽電池

○芝崎 聡一郎¹、山本 孝¹、吉尾 紗良¹、杉本 寛太¹、和田 淳¹、保西 祐弥¹、中川 直之¹、水野 幸民¹、豊田 基博¹、佐野 準治¹、西田 靖孝¹、山本 和重¹ (1.株式会社 東芝)

[7p-S102-3]

III-V族薄膜多接合型太陽電池

○高本 達也¹ (1.宮大GX)

[7p-S102-4]

スマートスタックによる異種材料タンデム型太陽電池の開発

○牧田 紀久夫¹ (1.産総研)

[7p-S102-5]

独自の界面構造修飾（双極子戦略）によるオールペロブスカイトタンデム型太陽電池の高性能化

○若宮 淳志¹ (1.京大化研)

[7p-S102-6]

タンデム型ペロブスカイト太陽電池の評価技術

○飛田 博美¹ (1.電気安全環境研究所)

ペロブスカイト/カルコパイライト軽量タンデム太陽電池の開発

Development of Ultralight Perovskite/Chalcopyrite Tandem Solar Panels

株式会社 PXP, [○]杉本 広紀, 中村 元志, 林 京璋

PXP Corporation, [○]Hiroki Sugimoto, Motoshi Nakamura, Ching Chang Lin

E-mail: Hiroki.Sugimoto@pxpco.jp

従来型の太陽電池の設置できない新領域において軽量型太陽電池のニーズが高まっており、国内外の様々なタイプの軽量型太陽電池が国内新領域市場に投入されつつある。そのような中で、高い変換効率を持つタンデム型は、将来高いコスト競争力を持つソリューションと期待されており、ペロブスカイト/シリコン型や、ペロブスカイト/ペロブスカイト型、ペロブスカイト/カルコパイライト型がしのぎを削っている。中でもペロブスカイト/カルコパイライト型は世界でも開発人口が少なく、他の太陽電池よりも開発が遅れているが、研究開発の余地が大きい太陽電池となっている。特に、タンデム型でありながら、軽量で曲げることができ、割れずに、燃えにくい特徴を持つ点は、新領域市場にとってアドバンテージとなると考えられ、また、ペロブスカイト、カルコパイライト共に国産の原材料を用いる事ができることから、国産軽量タンデム太陽電池を実現し得る数少ない選択肢として期待されている。実用化に向けた課題は変換効率の改善に加え、耐久性の改善、大面積化、量産技術の開発と多岐に渡るが、本発表では PXP における最新の開発状況と今後の展望について報告する。

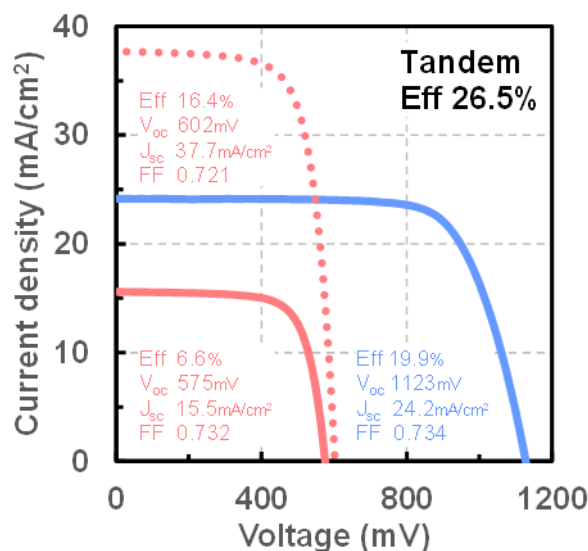


Figure 1: Current-voltage characteristics of 4 terminal perovskite/chalcopyrite tandem solar cell.

(Blue : Perovskite top cell, Red : Chalcopyrite bottom cell, Dashed : Non-filtered chalcopyrite cell)

Cu₂O/Si タンデム型太陽電池

Cu₂O/Si Tandem Solar cells

株式会社 東芝 総合研究所 ○芝崎 聡一郎, 山本 孝, 吉尾 紗良, 杉本 寛太, 和田 淳,
保西 祐弥, 中川 直之, 水野 幸民, 豊田 基博, 佐野 準治, 西田 靖孝, 山本 和重
Toshiba Corp. Corporate Laboratory, °Soichiro Shibasaki, Takashi Yamamoto, Sara Yoshio, Kanta
Sugimoto, Atsushi Wada, Yuya Honishi, Naoyuki Nakagawa, Yukitami Mizuno, Motohiro Toyota,
Junji Sano, Yasutaka Nishida, Kazushige Yamamoto
E-mail: soichiro.shibasaki@toshiba.co.jp

限られた設置面積で高出力を必要とする電気自動車などの電動モビリティ向けに、30%以上の高効率と高信頼性を兼ね備えた4端子Cu₂O/Siタンデム太陽電池を開発している。Cu₂Oは、地球上に豊富に存在する銅と酸素で構成され、環境・資源リスクが低く、酸化物であるため高い耐久性が期待される。更にCu₂Oはワイドバンドギャップ($E_g \sim 2.17$ eV)材料で高い透明性を持ち、Siボトムセル($E_g \sim 1.1$ eV)を高効率に発電させることができる。小型Cu₂Oセル($3 \times 10 \text{ mm}^2$)で、10.5%[1]の効率を報告しており、その技術を実用化サイズ($125 \times 42 \text{ mm}^2$)に転用するとともに、セル間抵抗に起因する直列抵抗増大による形状因子低下などの課題にも取り組むことで、効率9.3%を実証した。更にトップセルを125mm角のSiボトムセル上に配置し、Cu₂O/Siタンデム太陽電池として効率26.1%を実証[2]したが、目標とするタンデム効率30%には、まだ改善が必要である。以下に、Cu₂Oトップセル、Siボトムセルの取り組み中の効率改善方針を示す。

Cu₂Oトップセル効率については、最大理論効率20%の半分以下の9.3%であり、改善の余地が大きい。効率低下要因の1つに、デバイスシミュレーションによりCu₂O表層のp⁺層の存在が挙げられる[3]。このp⁺層形成の要因を解明するため、第一原理計算によるCu₂O表層の電子状態の解析を行い、主要な結晶欠陥はアクセプタとなるCu空孔であること、Cu空孔は成膜プロセスにより発生濃度や分布形状が変化して、Cu₂O表層に高密度な欠陥層が形成され得ることを見出した。この結果に基づき、Cu₂O表層の改善手法の開発及びトップセルの効率改善に取り組んでいる。Siボトムセル効率については、光学シミュレーションによりCu₂Oトップセルの透過率スペクトルを最適化する層構成を設計し、実測で16.8%を確認している。これは用いたSiボトムセルの最大理論効率(17.5%)に迫る値であり、光学設計の観点のみでは効率改善が困難である。今回のSiセルは赤外域の量子効率が低く、更なる改善には赤外域を効率よく発電できるSiセルが必要であり、新規セルに適した光学設計を進めている。これらを組合わせて効率30%の実現を目指している。

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)との共同研究事業の結果として得られたものです。

[1] 芝崎聡一郎ら、第71回応用物理学会春季学術講演会 25p-22C-1 (2024).

[2] 山本孝、NEDO 再生可能エネルギー分野成果報告会 2025 (submitted).

[3] 杉本寛太ら、第69回応用物理学会春季学術講演会 23p-E106-7 (2022).

III-V 族薄膜多接合型太陽電池

III-V Thin-Film Multijunction Solar Cells

宮崎大学¹, °高本 達也¹

Univ. of Miyazaki¹, °Tatsuya Takamoto

E-mail: takamoto.tatsuya@cc.miyazaki-u.ac.jp

III-V 族薄膜多接合型太陽電池とは、GaInAsP 材料などの III-V 化合物半導体で、異なるバンドギャップを有する複数の太陽電池がトンネル接合により接続された多接合型で、GaAs や Ge などの単結晶基板上にエピタキシャル成長された単結晶薄膜の太陽電池層を、金属フィルムや樹脂フィルムなどで支持して単結晶基板より分離させた薄膜単結晶太陽電池のことであり、以下のような特徴を有する。

- 高品質な単結晶であるため高い長期信頼性を有する。(宇宙環境での使用実績)
- 多接合型であるため高い変換効率を有する。(3 接合型では AM1.5G 基準光下 37.9%)
- 数 μm の薄膜がフィルムで支持された構造で軽量フレキシブルである。

太陽電池の課題である更なる高効率化については、接合数の増加で可能となり、低コスト化については、太陽電池層のさらなる薄膜化や基板材料の再利用もしくは再生により将来可能となる。

現在、実用化されている III-V 族薄膜多接合型太陽電池は、IMM3J (Inverted Metamorphic Triple-junction) と呼ばれる InGaP トップセル/GaAs ミドルセル/InGaAs ボトムセルからなる 3 接合型太陽電池である。国内では小型月着陸実証機 SLIM を始めとして、国内の人工衛星に搭載されている。また、海外では Zephyr を始めとした成層圏無人飛行機用に軽量フレキシブル太陽電池が搭載されている。本講演では IMM3J 太陽電池およびその応用先についてレビューし、将来の III-V 族薄膜多接合型太陽電池の技術開発の方向性について述べる。

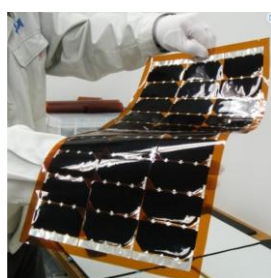


図1 小型月着陸実証機 SLIM および搭載された IMM3J 太陽電池シート (総出力 540W) ^{*1}

図2 成層圏無人飛行機 Zephyr および搭載された IMM3J 太陽電池シート (総出力 3.0kW) ^{*2}

*1: <https://corporate.jp.sharp/news/240129-b.html>

*2: <https://www.airforce-technology.com/news/microlink-solar-sheets-zephyr-s-uav/>

スマートスタックによる異種材料タンデム型太陽電池の開発

Development of Heterogeneous Tandem Solar Cells using Smart Stack

産総研, °牧田 紀久夫

AIST, °Kikuo Makita,

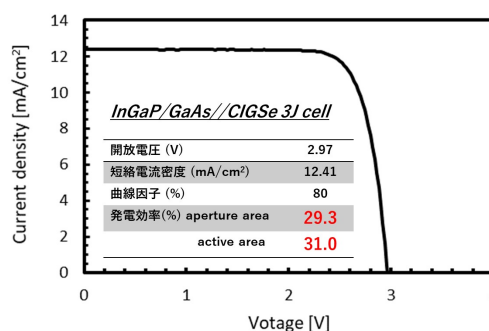
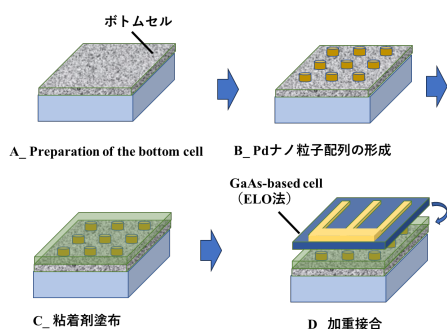
E-mail: kikuo-makita@aist.go.jp

タンデム型太陽電池は、波長感度の異なる複数セルを直列にスタックすることにより高効率を得られる。その製法としては、結晶成長技術による一貫形成（モノリシック型）、接合技術による形成（メカニカルスタック型）などがある。このような背景において、当グループではパラジウム（Pd）ナノ粒子を接合界面に介在したスマートスタック技術（Smart stack）[1]の開発を行ってきた。本技術は、ナノメートルオーダーの Pd ナノ粒子を接合面に自己配列で形成し、適切な加重圧力のもと構成セルを接合するものである。このため、接合界面では接合抵抗および光損失の低減が図られ、タンデム太陽電池として有用な製法である。これまで、GaAs//InP タンデム構造において効率 34.9%を達成、また異種材料からなるタンデム型太陽電池として GaAs//Si[2]あるいは GaAs//CuInGaSe₂ (以下 CIGSe と表記)[3]などを実証してきた。

本報告では、特に高効率/放射線耐性等により次世代宇宙用太陽電池として期待されている GaAs//CIGSe タンデム太陽電池を事例として、Smart stack の進展について述べる。CIGSe セルでは、粒界結晶に起因した表面ラフネス（～100nm）が存在するため、接合上課題となる。我々は、Smart stack の進化形態として、接合界面にシリコーン系の希釈粘着剤と Pd ナノ粒子を介在させた接合技術（Modified smart stack）を開発し、接合品質と接合強度の両立に成功した。これより、GaAs//CIGSe 3 接合セルとして世界最高の発電効率 29.3%を実証した[3]。講演では、実用化の上で重要となる大面積化技術の進展についても述べる。

【謝辞】本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「移動体用太陽電池の研究開発（超高効率モジュール技術開発/低コストエビ・接合技術開発）」の委託の下で行われた。

【文献】[1] H. Mizuno, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 101, 191111 (2012). [2] K. Makita, et al, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, 28, 16 (2020). [3] K. Makita, et al, *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, 31, 71 (2023).



Modified smart stack の製法と GaAs//CIGSe 3 接合セルの特性（効率 29.3%） [3]

独自の界面構造修飾（双極子戦略）による オールペロブスカイトタンデム型太陽電池の高性能化

Efficient All-Perovskite Tandem Solar Cells Realized by Unique Surface Treatment Methods (Dipole Strategy)

京大化研¹ °若宮 淳志¹

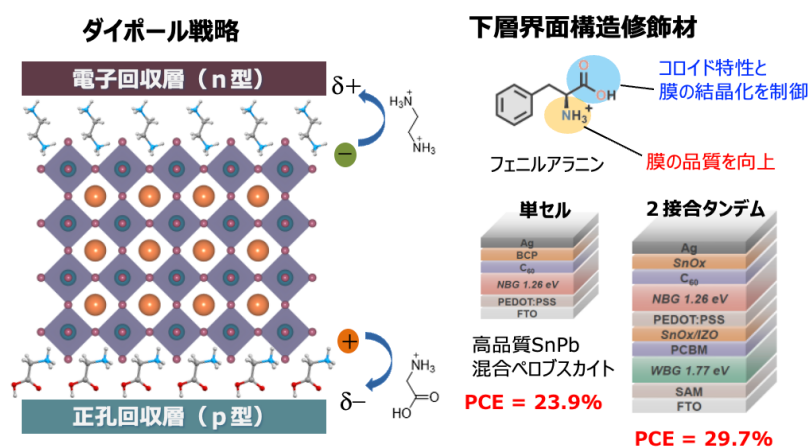
ICR, Kyoto Univ.¹, °Atsushi Wakamiya¹

E-mail: wakamiya@scl.kyoto-u.ac.jp

ABX₃型の金属ハライドペロブスカイト半導体は塗って作製でき、そのバンドギャップ（光電変換領域）は、前駆体溶液に用いる各イオンの組成により比較的容易に制御できる。この特徴を活かし手して、異なるバンドギャップをもつ複数のペロブスカイト層を組み合わせたオールペロブスカイトのタンデム型が高性能な次々世代の太陽電池として注目されている。タンデム型太陽電池の高効率化にも、まずは、組み合わせる各太陽電池セルの光電変換特性の向上が重要となる。

我々は、ペロブスカイト層の上下表面に、各電荷の取り出しに有利な双極子をもたせる「双極子戦略」を提唱し、独自の界面構造修飾法を開発してきた（図）¹⁻⁷。これによりバンドギャップからの電圧ロスを低減でき、ペロブスカイト太陽電池の開放電圧が最大化できる¹。本手法は、高い一般性を持ち、トップセルからボトムセルまで、様々なバンドギャップをもつペロブスカイト層に対しても顕著な高電圧化効果が得られることを見出している²。この独自手法を用いて、2~4

接合型までのオールペロブスカイトタンデム型セルを作製した。2接合タンデムセルでは、29.7%（認証値 29.26%）、1 cm²サイズの3接合型でも28.4%（認証値 27.28%）の光電変換効率を達成した（図）⁷。本発表では、界面修飾材料の分子設計の考え方を中心に、最新の我々の成果について紹介する。



References

- 1) S. Hu, R. Murdey, A. Wakamiya, et al. *Energy Environ. Sci.* **2022**, 15, 2096.
- 2) S. Hu, J. Pascual, A. Wakamiya, et al. *ACS Appl. Interfaces* **2022**, 14, 56290.
- 3) S. Hu, H. J. Snaith, A. Wakamiya, et al. *Adv. Mater.* **2023**, 35, 2208320.
- 4) S. Hu, J. A. Smith, H. J. Snaith, *Precis. Chem.* **2023**, 1, 69.
- 5) T. Nakamura, A. Wakamiya, et al. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2024**, 97, uoad025.
- 6) S. Hu, A. Wakamiya, H. J. Snaith, et al. *Chem. Rev.* **2024**, 124, 4079.
- 7) S. Hu, M. A. Truong, A. Wakamiya, H. J. Snaith, et al. *Nature* **2025**, 639, 93.

タンデム型ペロブスカイト太陽電池の評価技術

Characterization Procedures of Perovskite Tandem Solar Cells

電気安全環境研究所 ○飛田博美

JET, °Hiromi Tobita

E-mail: tobita@jet.or.jp

太陽電池の電気的な特性を知るために基準状態(AM1.5G, 1000W/m², 25°C)における変換効率を評価することは重要である。JET は 2017 年に Progress in photovoltaics に掲載の Solar cell efficiency tables の登録機関として認定された。また、2020 年にはオールペロブスカイト太陽電池の測定結果が世界で初めて Solar cell efficiency tables ver.56¹⁾に掲載された。タンデム型太陽電池の評価方法は単接合太陽電池やシリコン系の太陽電池の評価より工程が多く、正しい性能を評価するために太陽電池の種類に合った要素技術の開発が行われてきた。ペロブスカイト太陽電池の IV 特性はヒステリシスが現れることが知られており、定常状態の出力を確認するために mppt や電圧一定の条件によって長時間かけた測定をすることもある。本発表では、タンデム型ペロブスカイト太陽電池の変換効率を決定するまでの評価手法と国内で一般的に使われている設備に適用できるような内容を含めて紹介したい。

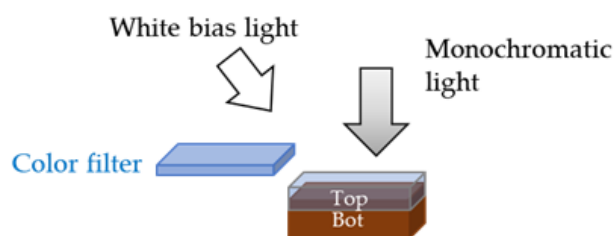


Fig1. EQE measurement conditions

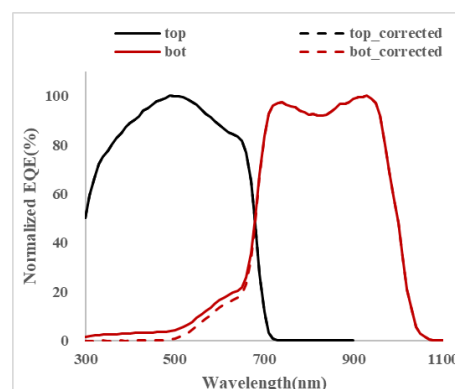


Fig2. Example of corrected EQE

1) M.A. Green et al., Solar cell efficiency tables (version 56), Progress in Photovoltaics: Research and Applications 28 7 (2020) 627-735.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 【一般公開】先端ロジック半導体とその周辺技術

[9p-N101-1~10] 【一般公開】先端ロジック半導体とその周辺技術

[9p-N101-1]

オープニング

○中塚 理¹ (1.名古屋大学)

[9p-N101-2]

GAA-NS-FET および3DSFET (CFET) 技術の最新動向

○若林 整¹ (1.東京科学大学)

[9p-N101-3]

ゲートスタックの最新動向

○右田 真司^{1,2} (1.産総研、2.LSTC)

[9p-N101-4]

ポストCu配線技術の動向と裏面配線対応の展望

○井上 史大¹ (1.横浜国大)

[9p-N101-5]

Beyond 2nm世代向けのエピ成長およびシリコン基板の最新動向

○小椋 厚志^{1,2}、臼田 宏治² (1.明治大学 理工、2.明治大学 MREL)

[9p-N101-6]

半導体製造プロセス開発を加速するAI技術

○沓掛 健太郎¹、宇治原 徹¹、関 翔太²、高石 将輝²、永倉 大樹³、谷川 公一³、永井 勇太⁴ (1.名大、2.アイクリスタル、3.ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング、4.グローバルウェーハズ・ジャパン)

[9p-N101-7]

HZO強誘電体メモリと新原理コンピューティングへの展開

○トープラサートポン カシディット¹、劉 振泓¹、伊藤 広恭¹、高畑 赫東¹、趙 成謹¹、蔡 作成¹、名幸 瑛心¹、関 信義¹、鈴木 陸央¹、中根 了昌¹、竹中 充¹、高木 信一^{1,2} (1.東大院工、2.帝京大先端研)

[9p-N101-8]

3D半導体チップの熱マネージメントを支える放熱デバイスと計測技術

○長野 方星¹ (1.名古屋大学)

[9p-N101-9]

クロージング 1

○角村 貴昭¹ (1.東京エレクトロン)

[9p-N101-10]

クロージング 2

○齊藤 丈靖¹ (1.大阪公立大)

GAA-NS-FET および 3DSFET (CFET) 技術の最新動向

The Latest activities on GAA-NS-FET and 3DSFET (CFET) technologies

若林 整, 東京科学大学および技術研究組合最先端半導体技術センター (LSTC)

Hitoshi Wakabayashi, Institute of Science Tokyo (Science Tokyo) and Leading-edge

Semiconductor Technology Center (LSTC), E-mail: wakabayashi.h.b3e4[at]m.isct.ac.jp

チップレットモジュール向けの半導体デバイス技術では、電力と遅延、コスト、面積 (Power, Delay, Cost and Area: PDCA) を同時に抑制するために 2 次元微細化が進められている [1–4]。特に先端ロジック LSI 向けにはまず、電子と正孔の移動度向上には 110 方向の引張と圧縮応力がそれぞれ必要であり、シリコンゲルマニウム (SiGe) ソース/ドレインや、エッチングストップ層 (Etch stop layer: ESL) および配線からシリコン基板への Single diffusion break (SDB) としてシリコン窒化物 (SiN) 膜から歪みが印加され、さらにゲートラストプロセスで増強されている。次にしきい値電圧 (V_{th}) 変動を低減するために、ゲートラストメタル/High-k スタックによってゲート容量を増加させ、さらに FinFET と Gate-All-Around Nano-Sheet (GAA-NS) FET により S/D 領域からの横方向空乏層広がりを抑制することでノンドープチャネルが採用されている。しかも双極子と仕事関数の制御により n/p それぞれ 6 値のしきい値電圧が実現されている [5–8]。さらに 3D-stacked FET (3DSFET) または Complementary FET (CFET, monolithic CFET (mCFET)) [9–13] は裏面配線 (Backside interconnects: BSI) との相性が良く、加えてトランジスタ温度の上昇を抑え、移動度を高く維持できると考えられる [12–16]。しかし、FinFET 以降の 3D 化技術は面積あたりの電力密度を増加させるため [17, 18]、低電圧化が必須であり、高移動度化と Subthreshold slope 低減が求められる [17]。そこで、原子レベル結晶構造を持つ層状遷移金属ダイカルコゲナイド (Transition-metal di-chalcogenide: TMDC) 膜である ZrS_2 膜において、 $1,250 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ の高い移動度を実証している、また Carbon-nanotube (CNT) FET の高移動度化も進められている [19–26]。しかし課題

は多く研究開発の加速が必要である [27–31]。

【謝辞】本研究の一部は文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 JPJ011438 の助成を受けたもので、また一部は NEDO 「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」 (JPNP20017) の委託を受けたものである。

参考文献

- [1] Gordon E. Moore, *Electronics*, 38, n8, p114, 1965.
- [2] Robert H. Dennard, *et al.*, *IEEE J. Solid-State Circuits*, **SC-9**, p. 256, (1974).
- [3] Hitoshi Wakabayashi, *et al.*, *IEEE T-ED*, Vol. 53, Issue 9, pp. 1961-1970, (2006).
- [4] H. Wakabayashi, *IEEE/IWJT*, pp. 98-103, 2013.
- [5] Shien-Yang Wu, *et al.*, *IEEE/IEDM*, 27.5, 2022.
- [6] E.-J. Yoon, *et al.*, in *IEEE/IEDM*, 27.1, (2004).
- [7] J. Jeong, *et al.*, *Symp. VLSI Tech/Cirs*, T1.2, 2023.
- [8] Geoffrey Yeap, *et al.*, *IEEE/IEDM*, 2.1, (2024).
- [9] Eisuke Anju *et al.*, *IEEE/J-EDS*, p.1239, **6**, 2018.
- [10] S. Liao, *et al.*, in *IEEE/IEDM*, 29-6, (2023).
- [11] H. Wu, *et al.*, *Symp. VLSI Tech/Cirs*, T10.3, 2025.
- [12] M. Radosavljević, *et al.*, *IEEE/IEDM*, 29.2, 2023.
- [13] J.H. Park, *et al.*, *Symp. VLSI Tech/Cirs*, T1.2, 2024.
- [14] Yuh-Jier Mii in *IEEE/IEDM*, 1.1, (2024).
- [15] K. Fischer, *et al.*, *Symp. VLSI Tech/Cirs*, T1.1, 2025.
- [16] N. Horiguchi, *Symp. VLSI Tech/Cirs*, SC1.5, 2023.
- [17] H. Wakabayashi, *et al.*, *IEEE/EDTM*, 4D-1, 2024.
- [18] T. Hiramoto and H. Wakabayashi, 1.1, 2024 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop.
- [19] B. Radisavljevic, *et al.*, *Nature Nanotech*, **6**, pp. 147-150, (2011).
- [20] Sujay B Desai, *et al.*, *Science*, Vol. 354, Issue 6308, pp. 99-102, (2016).
- [21] Mingrui Ao, *et al.*, *Nature*, v640, p654, 2025.
- [22] M. Hamada, *et al.*, *IEEE/J-EDS*, 7, 1258, 2019.
- [23] Masaya Hamada and Hitoshi Wakabayashi, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 60, SBBH05, (2021).
- [24] M. Hamada *et al.*, *JSAP/IWJT*, S9-1, 2021.
- [25] Kentaro Matsuura and Hitoshi Wakabayashi, *et al.*, *JSAP/JJAP*, 59, 080906, (2020).
- [26] Dongil Lee, *et al.*, *IEEE iedm*, 5.2, 2016.
- [27] Hao-Yu Lan, *et al.*, in *IEEE/IEDM*, 7-7, (2022).
- [28] Takumi Ohashi and Hitoshi Wakabayashi, *et al.*, *JJAP*, 54, 04DN08, (2015).
- [29] Takuya Hamada and H. Wakabayashi, *et al.*, in *IEEE, J-EDS*, Vol. 9, pp. 1117-1124, (2021).
- [30] N. Matsunaga, *et al.*, *IEEE/EDTM*, 2J-4, 2024.
- [31] I. Asselberghs, *et al.*, *IEEE/IEDM*, 40.2, (2020).

ゲートスタックの最新動向

Recent trends of gate stack technology

産総研 先端半導体研究センター¹, 技術研究組合 最先端半導体技術センター² °右田 真司^{1,2}

AIST SFRC¹, LSTC², °Shinji Migita^{1,2}

E-mail: s-migita@aist.go.jp

本講演ではゲートスタックの最新動向を紹介する。ゲートスタックはシリコン結晶基板の上に製造された大規模集積回路 (VLSI) の中の数百億個に及ぶ Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) の一つ一つを構成する重要なパーツで、ゲート電極に印加した電圧を通してチャネルのポテンシャルを制御することで、ソース・ドレイン間を流れるトランジスタ電流を6桁以上にわたって変調することを可能にする。Poly-Si/SiO₂ の組み合わせの時代を経て、Metal/High-k という新材料の組み合わせが採用されて以来今日まで、ゲートスタックは VLSI の集積度と性能の向上に大きく貢献している。

まず、SiO₂ よりも比誘電率が大きい High-k 膜をゲート絶縁膜に導入することで、SiO₂ 単体では到達不可能な薄さの SiO₂ 換算膜厚が実現され、チャネルに対する静電支配力が著しく向上した。このことはトランジスタ電流の制御能力を向上したと同時に、VLSI の中の多数の MOSFET の性能ばらつきを抑制するという重要な効果ももたらし、MOSFET のサイズ縮小化 (Dimensional Scaling) を推進する大きな力となった。次に MOSFET のしきい値電圧 (V_{th}) の調整能力が、High-k/SiO₂ 界面に生じるダイポール現象と金属材料の仕事関数を合わせて活用することで、格段に向上したことである。ダイポールを利用した V_{th} シフトは、挿入する High-k 材料の種類と原子層レベルでの膜厚調整によって繊細な調整が可能になった。ナノメートル厚さの電極膜を複数の金属から成る化合物で形成することで、仕事関数を調整する技術も構築されている。これらを組み合わせることで、N⁺ poly-Si と P⁺ poly-Si しか選択肢がなかった頃には困難であった繊細な V_{th} 設定が実現され、今日では 1 V 以下の動作電圧の MOSFET が最先端 VLSI に採用されている。

さらに Metal/High-k が採用されたことの大きな貢献は、ALD 技術でゲートスタック構造が製作できるようになったことで半導体製造プロセスに大きな変化がもたらされて自由度が増大したことである。その結果、FinFET が先端 VLSI の基本構造となり、さらにこれからは Gate-All-Around FET (GAA-FET) が到来する。ゲートスタック技術の進化は、これからも MOSFET の密度向上 (Density Scaling) を継続するために欠かせない。

ポスト Cu 配線技術の動向と裏面配線対応の展望

Emerging Trends in Post-Cu BEOL and Future Perspectives on Backside Interconnect

横浜国大¹, °井上 史大¹

Yokohama Nat. Univ.¹, °Fumihiro Inoue¹,

E-mail: inoue-fumihiro-ty@ynu.ac.jp

先端ロジックデバイスにおいて、2nm ノードではデバイス構造が FinFET から GAA へと移行することが盛んに報じられているが、同ノードは BEOL においても大きな転換点となると予想される。これまで BEOL 配線は、Al から Cu への材料転換以降、デュアルダマシン構造、Low-k 膜、Co ライナー／キャップの導入などにより微細化の限界を突破してきたが、構造上の劇的な変化は過去 25 年以上にわたって見られなかった。しかし、微細化に伴う Cu 配線の有効断面積の縮小による RC 遅延の増大や信頼性の低下に加え、配線層数が 15 層を超え、20 層に迫る中で IR ドロップの増加が深刻な課題となっている。

こうした背景から、微細領域におけるバリアレス Ru 配線およびエアギャップ構造の導入、さらに貼り合わせと薄化技術を活用した裏面給電配線ネットワークの実用化が本格的に検討されている。Ru はバルク抵抗こそ Cu より高いものの、ナノスケールにおいては界面散乱や粒界散乱の影響が小さく、極細配線幅において Cu よりも低抵抗を示す場合がある。また、自己拡散性が低いいためバリアレス化による信頼性確保も期待され、配線断面積の拡大により RC 遅延の抑制が可能となる。加えて、エレクトロマイグレーション耐性に優れることから、長寿命・高信頼性の配線材料として注目されている。さらに、サブトラクティブプロセスによる形成が可能な点でエアギャップ構造との親和性も高く、RC 特性の改善にも資する。

一方、ロジックデバイスにおける省エネルギー化も重要課題であり、極度な多層配線化に伴う IR ドロップの深刻化への対処が求められている。これに対し、片面にシグナル配線のみを集約し、Si 基板の裏面に複数層の電源配線を配置することで IR ドロップを軽減する裏面給電構造の導入が検討されている。

バリアレス Ru 配線+エアギャップ構造においては信頼性評価手法の確立、裏面配線においてはウエハ貼り合わせに起因する歪み（ディストーション）と、それに対するリソグラフィ補正技術等がそれぞれ課題となっている。

本発表では、これら次世代配線技術の開発動向を概観するとともに、残された課題とその解決に向けた取り組みについて議論する。

Beyond 2nm 世代向けのエピ成長およびシリコン基板の最新動向

Latest Trends in Epitaxial Growth and Silicon Substrates for Beyond 2nm Technology Node

明治大学 理工¹, 明治大学 MREL² °小椋 厚志^{1,2}, 臼田 宏治²

School of Sci.&Tech., Meiji Univ.¹, MREL, Meiji Univ.², °Atsushi Ogura^{1,2}, Koji Usuda²

E-mail: a_ogura@meiji.ac.jp

最先端 LSI では、メモリー・ロジックともに、スケーリングの延長としての性能向上のトレンド維持のため 3 次元積層構造の導入が加速している。なかでもロジックでは、我が国が半導体復興の象徴として世界のキャッチアップを目指している 2 nm (技術) ノード以降で、ナノシート状のチャンネルを積層した GAA (Gate-all-around) 構造の実用化が予定されている。この GAA を適用する次世代 3 次元デバイスの実現には、EUV リソグラフィ技術や、高アスペクトトレンチ加工のためのドライエッチング技術、良好な被覆を実現する ALD (Atomic Layer Deposition) 技術に加えて、新たに高度なエピタキシャル成長技術を多方面に適用する事が必須である。

さらに、FinFET で側面の(110)面をチャンネルとして利用したのに対して、GAA では当初(100)を採用するため、特に pMOS の特性劣化が問題となる。これは、pMOS と nMOS を 3 次元に積層する CFET (Complementary Field-Effect Transistor) で、さらに大きな課題となる。したがって、Beyond 2nm を見据えた場合、(110)基板を用いた GAA-pMOS の開発が不可欠である。(110)基板にはその垂直方向に欠陥伝搬面となる {111} 面が存在するため、結晶欠陥の制御が(100)基板に比べて飛躍的に困難となり、エピ成長及びシリコン基板製造の双方に広範な研究開発課題が存在する。本報告では、本学が LSTC と共同で取り組む NEDO プロジェクトより、Beyond 2nm 世代のエピ成長及びシリコン基板の最新の課題と研究開発動向について紹介する。

【謝辞】本発表の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「ポスト 5 G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」(JPNP 20017. 委託先：技術研究組合最先端半導体技術センター (LSTC)) の委託事業の結果得られたものです。

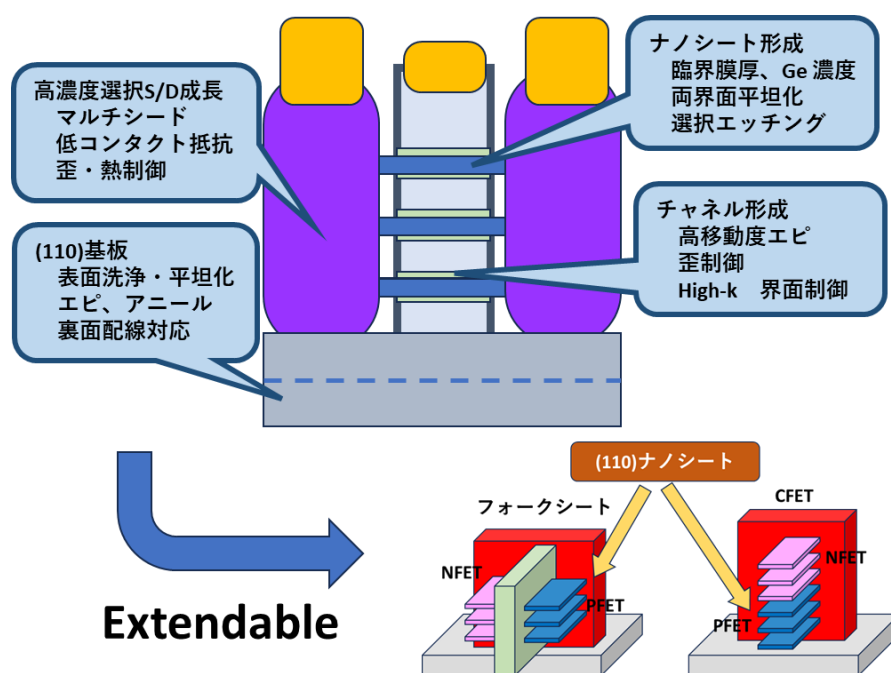


Fig.1 Research targets of LSTC as part of NEDO project.

半導体製造プロセス開発を加速する AI 技術

AI technology to accelerate semiconductor manufacturing process development

名古屋大学¹, アイクリスタル²,

ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング³, グローバルウェーハズ・ジャパン⁴

°沓掛 健太郎¹, 宇治原 徹¹, 関 翔太², 高石 将輝², 永倉 大樹³, 谷川 公一³, 永井 勇太⁴

Nagoya Univ.¹, Aixtal², Sony Semiconductor Manufacturing Corporation³, GlobalWafers Japan⁴

°Kentaro Kutsukake¹, Toru Ujihara¹, Shota Seki², Masaki Takaishi²,

Hiroki Nagakura³, Koichi Tanigawa³, Yuta Nagai⁴

E-mail: kutsukake.kentaro.c3@f.mail.nagoya-u.ac.jp

先端半導体デバイス開発では、短期間で性能向上が求められるが、従来型の個々の工程の最適化では向上に限界がある。特に近年、Si ウェーハ内部の不純物濃度分布や欠陥密度分布をデバイス構造に合わせて適切に作りこむ必要が判明し、Si ウェーハまで遡ったプロセス全体での最適化が重要となっている。しかし、ウェーハ製造とデバイス製造とが一体となって機密性の高い情報を共有したうえで、膨大なプロセスパラメータの最適化を短時間で行うことは困難であった。

本研究では、Si ウェーハ製造プロセスから CMOS イメージセンサー製造プロセスまでのデジタルツインを仮想空間上に構築して最適化することで、プロセス全体での最適化を実現した (図 1)。これにより従来のシミュレーションを用いた最適化と比較して、要する時間を約 1/1000 に短縮した。本成果は、企業横断での最適化の必要性を実証するものであり、また CMOS イメージセンサーのみならず様々な半導体材料・デバイスに共通して展開可能な方法である。

【謝辞】本研究は NEDO 先導研究プログラム (JP14004) より支援を受けた。

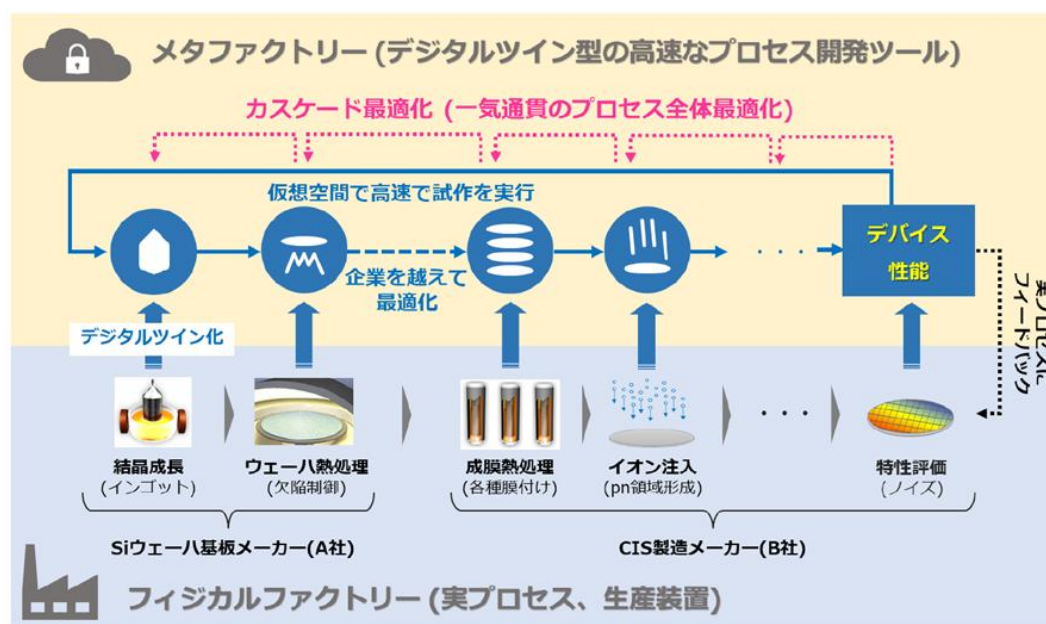


図1 メタファクトリーの模式図。仮想空間上に構築したデジタルツインを接続して、企業を超えた全体最適化を行う。

HZO 強誘電体メモリと新原理コンピューティングへの展開

HZO ferroelectric memory and its implications for novel computing technologies

¹東大院工, ²帝京大先端研, [○]トープラサートポン カシディット¹, 劉振泓¹, 伊藤広恭¹,
高垣赫東¹, 趙成謹¹, 蔡作成¹, 名幸瑛心¹, 関信義¹, 鈴木陸央¹,
中根了昌¹, 竹中 充¹, 高木 信一^{1,2}

¹Univ. Tokyo, ²Teikyo Univ., [○]K. Toprasertpong¹, Z. Liu¹, K. Ito¹, X. Gao¹, E. Nako¹, S.-Y. Min¹,
R. Suzuki¹, S.-K. Cho¹, Z. Cai¹, R. Nakane¹, M. Takenaka¹, S. Takagi²

E-mail: topprasertpong@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

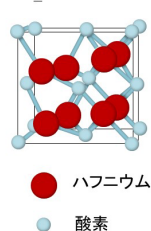
Hf_{1-x}Zr_xO₂ (HZO) を代表とする HfO₂ 系強誘電体は CMOS プラットフォーム上で集積できる強誘電体材料であり、低消費電力・微細加工可能という特徴をもったロジック混載不揮発性メモリとして注目を集めている。また、電界効果トランジスタのゲート絶縁膜に強誘電体 HZO を採用した強誘電体トランジスタ (FeFET) は超高集積・低消費電力の 1T 型不揮発性メモリとして研究開発が進められている。本講演では、強誘電体 HZO デバイスに関する研究動向と我々の研究成果を紹介する (図 1)。我々は強誘電体 HZO の極薄膜化技術を確立することで膜厚 4 nm の HZO 強誘電体を実現し、1.2 V 動作、10¹⁴ 回以上の書き換え耐性 (Endurance)、10 年以上の保持特性 (Retention) の強誘電体キャパシタを実証した^[1]。極薄膜 HZO の強誘電体メモリを広く実用化するためには、ウェークアップやインプリントといった信頼性課題に克服する必要があり、これらの課題に対する我々の取り組みを紹介する^[2-3]。トランジスタ構造の FeFET に関しては、低動作電圧のデバイスを実証できた一方で^[4]、メモリ応用において解決すべき信頼性課題がまだ残っている^[5-6]。

HZO 強誘電体デバイスはメモリ応用だけでなく、自発分極の特徴的な性質を活用して、ノイマン型コンピューティングにとらわれない新原理コンピューティングへの期待も高まる。我々は分極の非線形ダイナミクスを活かした物理リザバーコンピューティングを提唱し、低消費電力で学習可能な AI システムに取り組んでいる^[7]。材料、入力手法、リザバー構成を工夫することで様々な時系列データの演算処理タスクを実証した^[8-10]。また、パルスタイミングを検出できる FeFET を用いた新たな AI 手法も紹介する^[11]。

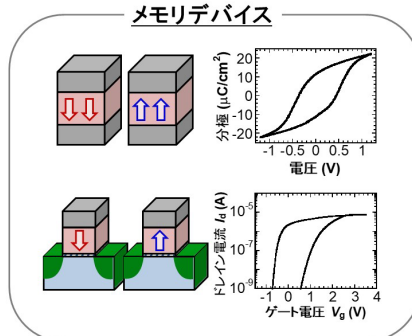
【謝辞】本研究は科学研究費(23K20951)、JST-CREST(JPMJCR20C3)、TSMC 受託研究の支援により実施した。

【参考文献】[1] K. Toprasertpong *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14**, 51137-51148 (2022). [2] K. Ito *et al.*, *VLSI Symp.*, T11-1 (2025). [3] Z. Liu *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **125**, 072904 (2024). [4] Z. Liu *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **125**, 072904 (2024). [5] Z. Cai *et al.*, *IEEE Trans. Electron Devices* **71**, 3633-3639, (2024). [6] K. Toprasertpong *et al.*, *Appl. Phys. A* **128**, 1114 (2022). [7] S.-K. Cho *et al.*, *IEDM*, 4-7 (2024). [8] K. Toprasertpong *et al.*, *Commun. Eng.* **1**, 21 (2022). [9] E. Nako *et al.*, *IEEE Trans. Electron Devices* **70**, 5657-5664 (2023). [10] R. Suzuki *et al.*, *IEEE Electron Device Lett.* **45**, 1768-1771 (2024). [11] S.-Y. Min *et al.*, *APL Machine Learning* **3**, 016120 (2025). [12] H. J.-Y. Chen *et al.*, *IEDM*, 5-1 (2023).

HfO₂系強誘電体



メモリデバイス



新コンピューティング技術

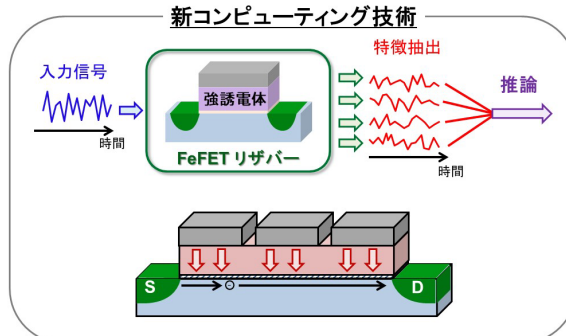


図 1 HfO₂ 系強誘電体のメモリデバイスと新コンピューティング技術

3D 半導体チップの熱マネジメントを支える放熱デバイスと計測技術

Advanced Thermal Management Devices and Characterization Methods for 3D

Semiconductor Chips

名古屋大工¹, ○長野 方星¹

Nagoya Univ.¹, ○Hosei Nagano¹

E-mail: nagano.hosei.e4@f.mail.nagoya-u.ac.jp

近年、電子機器の小型化・高性能化が急速に進み、半導体素子を積層する三次元集積回路 (3DIC) への期待が高まっている。演算チップを多層に重ねる構造により、厚み方向に複数のホットスポットが発生し、熱の放出が性能ボトルネックとなることが課題である。

このような熱問題に対し、材料の高熱伝導化によって熱を拡散させる研究が進められているものの、ナノ・マイクロスケールでのサイズ効果により、熱伝導率はおよそ 30~200 W/mK 程度にとどまり、将来的な高発熱密度への対応としては十分とはいえない。一方、チップ内にマイクロチャネルを構築し、冷却流体を流して冷却する方式も検討されているが、チップ内部から機器外部までの熱輸送を含む複雑なシステム構成が必要となり、取り扱いや設計自由度の面で制約が大きいという課題がある。

こうした背景を踏まえ、本研究では、新たなチップ冷却技術として「三次元マイクロループヒートパイプ」による冷却手法を提案する。ループヒートパイプ (Loop Heat Pipe, LHP) は、マイクロスケールの多孔体内に発生する数 kPa~100kPa 程度の毛細管力をポンプ駆動源とする次世代の受動型熱輸送デバイスであり、無電力動作、高熱流束、高実効熱伝導率 (1,000~数万 W/mK) といった優れた特徴を有する。従来は、金属配管と多孔体を組み合わせた比較的大型の冷却モジュールとして研究開発が進められてきたが、本研究では、シリコン深堀エッチング技術により毛細管力を発現するマイクロピラー構造と冷媒流路を一体成型し、半導体チップ内への組み込みが可能な LHP の実現を目指している。

本講演では、現在進めているシリコン LHP の設計・製作および性能評価の進捗について紹介する。また、半導体冷却の熱的性能を定量評価するために不可欠な、熱物性の空間分布を可視化する評価手法についてもあわせて報告する。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：光と熱の融合が拓く機能制御の最前線

[8p-N103-1~10] 光と熱の融合が拓く機能制御の最前線

[8p-N103-1]

オープニング

○小島 一信¹ (1.大阪大学)

[8p-N103-2]

カーボンナノ材料の量子熱光物性

○宮内 雄平¹ (1.京都大学)

[8p-N103-3]

表面フォノンポラリトンで拓くサーマルマネジメント技術

○野村 政宏¹ (1.東大生研)

[8p-N103-4]

半導体アンチストークス光学冷却

○山田 泰裕¹ (1.千葉大院理)

[8p-N103-5]

半導体光学冷却に向けた CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 結晶における試料形状変化による光学特性の制御○(M1)田中 大地¹、福田 光希¹、登尾 尚紀¹、市川 修平^{1,2}、田畑 博史¹、山田 泰裕³、小島 一信¹ (1.阪大院工、2.阪大電顕センター、3.千葉大院理)

[8p-N103-6]

ペロブスカイト型サーモフォトンクス発電の理論解析：低グレード排熱回収への応用に向けて

○櫻井 篤¹ (1.新潟大工)

[8p-N103-7]

フォトサーマルフルイデイクスによる次世代バイオ産業の共通基盤創成

○飯田 琢也^{1,2} (1.大阪公立大理、2.大阪公立大LAC-SYS研)

[8p-N103-8]

光濃縮質量分析法による細胞外小胞の高感度検出

○叶田 雅俊^{1,2,3}、豊内 秀一^{1,2}、林 康太^{1,2,3}、高木 裕美子²、田村 守^{2,4}、谷内 宥紀⁵、渡辺 真⁵、床波 志保^{2,3}、飯田 琢也^{1,2} (1.大阪公大院理、2.大阪公大LAC-SYS研、3.大阪公大院工、4.関西学理、5.株式会社島津製作所)

[8p-N103-9]

細胞内温度の計測と制御

○岡部 弘基¹ (1.東大)

[8p-N103-10]

クロージング

○山田 泰裕¹ (1.千葉大学)

カーボンナノ材料の量子熱光物性

Quantum thermal optical properties of carbon nanomaterials

京大エネ研¹ °宮内 雄平¹

Kyoto Univ.¹, °Yuhei Miyauchi¹

E-mail: miyauchi@iae.kyoto-u.ac.jp

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) には、その構造 (カイラリティ) により金属型と半導体型が存在する。特に半導体型の CNT は 1 eV オーダーの比較的小さいバンドギャップと数百 meV オーダーの巨大な励起子束縛エネルギーを持ち、室温 ($k_B T \sim 26$ meV) はもとより、1000 K 以上の高温下でも励起子は熱解離しないと期待される。我々は、この高温安定な SWCNT の励起子物性に着目し、SWCNT 上の量子欠陥にトラップされた局在励起子が熱エネルギーで脱捕獲する現象[1]を利用した、吸収光より高エネルギーの光を放つアップコンバージョン発光を実証した[2]。さらに 1000 K 以上の SWCNT から励起子に由来する狭帯域な近赤外熱放射を観測し、SWCNT では熱エネルギーで励起子を生成できることを見出している[3]。このような励起子熱光物性は、高解像光温度計測や、優れた波長選択性を持つ熱放射体を要する熱光起電力発電、高効率太陽熱収集といったエネルギー変換技術への応用可能性を期待させる。ただし、工学応用には単一 SWCNT ではなくマクロスケールの集積材料が必要であり、構成原子全てが表面に存在する SWCNT では、集積により物性が大きく変わりうるため、その理解が不可欠である。そこで我々は、単一構造の高純度 SWCNT 膜を新たなマテリアルと捉え、その広帯域複素屈折率[4]や複屈折特性[5]といった基礎光学特性を報告してきた。本講演では、この集積膜における励起子熱放射[6]、集積に由来する励起子状態の変化[7]、SWCNT 間の固体化学反応[8]、高効率な太陽熱収集技術への応用[9]などに関する最新の成果を紹介する。また、高温条件のもとで、準熱平衡状態の励起子発光 (ルミネッセンス) と純粋な熱放射を、各状況での光子化学ポテンシャルを通じてシームレスに捉える量子熱光物性の新たな研究手法[10]について議論する。

[1] Y. Miyauchi *et al.*, *Nat. Photonics* **7**, 715 (2013).

[2] N. Akizuki, S. Aota, S. Mouri, K. Matsuda, and Y. Miyauchi, *Nat. Commun.* **6**, 8920 (2015).

[3] T. Nishihara, A. Takakura, Y. Miyauchi, and K. Itami, *Nat. Commun.* **9**, 3144 (2018).

[4] T. Nishihara, Y. Miyauchi *et al.*, *Nanophotonics* **11**, 1011 (2022).

[5] H. Wu, T. Nishihara, Y. Miyauchi *et al.*, *Carbon*, **218**, 118720 (2024).

[6] A. Takahashi, Y. Miyauchi *et al.*, *The 67th FNTG General Symposium*, Sep. 3, 2024.

[7] Z. Liu, T. Nishihara, and Y. Miyauchi, *The 66th FNTG General Symposium*, Mar. 7, 2024.

[8] A. Takakura, T. Nishihara, T. Tanaka, H. Kataura, and Y. Miyauchi, *Nat. Commun.* **16**, 1093 (2025).

[9] H. Wu, Y. Miyauchi *et al.*, *The 67th FNTG General Symposium*, Sep. 1, 2024.

[10] T. Nishihara, A. Takakura, S. Konabe, and Y. Miyauchi, *Commun. Mater.* **6**, 89 (2025).

表面フォノンポラリトンで拓くサーマルマネジメント技術

Thermal Management Technology Pioneered by Surface Phonon Polaritons

東大生研 ○野村政宏

IIS, The Univ. of Tokyo¹

E-mail: nomura@iis.u-tokyo.ac.jp

表面フォノンポラリトン (SPhPs) は、光学フォノンとフォトンの連成によって生成されるエバネッセント電磁波である。従来の熱伝達メカニズムを超える可能性があることから、熱工学および光学分野において大きな関心を集めている。固体においては、極性膜の熱伝導率の向上が報告され、放射においては、最近の実験研究で黒体限界を超える放射熱伝達が報告されている。本講演では、SPhPs による熱伝導および放射制御について議論する。

我々は、SiN ナノ膜の面内熱伝導率を測定することで、SPhPs による熱エネルギー輸送を理論、実験的に評価した。図 1(a)は、4 つの SiN ナノ膜 (厚さ: 30-200 nm) の 300 K から 800 K における熱伝導率の温度依存性を示している。厚い膜では、温度上昇とともに熱伝導率が減少しますが、50 nm 未満の薄い膜では、SPhP の寄与により増加する挙動が観測された。SPhPs はフォノンと比較して著しく長い平均自由行程を実現し、熱フォノンの平均自由行程をはるかに超えた距離での効率的な熱輸送を可能にする[1]。

二つの物体間の放射熱伝達も、近視野および遠視野の両方について多くの研究がなされている。近年、SiN 膜を用いた遠視野放射熱伝達の大幅な向上が報告され始めた。我々は、10 μm 厚の Si-Si および 2 つの SiO₂/Si/SiO₂ 間の 10 μm ギャップを通じた熱伝達を計測した。図 1(b)に示すように本系では、Si-Si 系よりも大きなギャップ熱コンダクタンスが得られた。Si 膜上の SiO₂ 層で熱励起された SPhP が Si 薄膜の導波モードに結合して面内方向に導波され、端面から放射されることでコンダクタンスが増加したと理解できる [2]。また、理論計算の結果、この熱放射は黒体放射を超えており、Si-Si 系と比べて約 2 倍に増強されている。

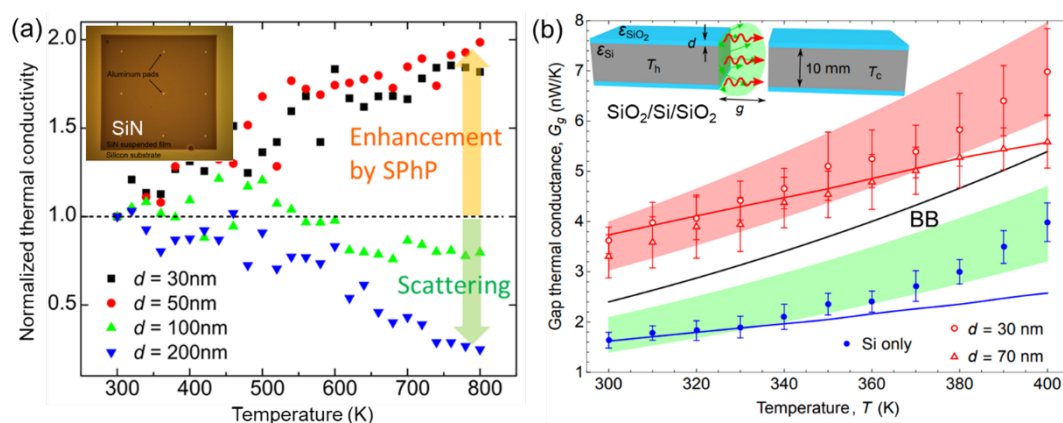


図 1. (a) 異なる厚さ d の SiN 膜における熱伝導率の温度依存性。 (b) Si/Si (青) および SiO₂/Si/SiO₂ (赤) 構造におけるギャップ (10 μm) 熱コンダクタンスの温度依存性: 点 (実験) および線 (計算)。黒線は黒体放射を示す。

謝辞: 本研究は、東京大学の Drs. Y. Wu, S. Tachikawa, J. Ordóñez-Miranda, R. Anufriev, L. Jalabert, and S. Volz との協働により遂行された。

参考文献: [1] Y. Wu, et al., Sci. Adv. 6, eabb4461 (2020). [2] Phys. Rev. Lett. 132, 186904 (2024).

半導体アンチストークス光学冷却

Semiconductor Anti-Stokes Optical Cooling

千葉大院理¹ ○山田 泰裕¹

Chiba Univ.¹ ○Yasuhiro Yamada¹

E-mail: yasuyamada@chiba-u.jp

光学冷却とは、文字通り光照射によって物体の温度を低下させることを指す。原子系のドップラー冷却がよく知られているが、この手法は固体には適用できない。代わりに、固体光学冷却にはアンチストークス (AS) 発光を用いた方法が提案されている。AS 発光とは励起光よりも高エネルギーの発光であり、発光効率が 100% であれば、光吸収と AS 発光の過程で系はエネルギーを失い、冷却される。この手法では、熱を光に変換して外部に放出することができるため、物理的な孤立した環境でも冷却できるという従来にない冷却手法になりうる。これまで希土類イオンをドープした結晶で盛んに研究が行われ、90 K 程度までの冷却が実現されている[1]。しかし、希土類イオンは光吸収が弱いので冷却温度・パワーには原理的な限界が存在する。そこで光吸収の強い半導体での光学冷却が期待されてきたが、光学冷却に必要な 100% 近い外部発光量子効率を半導体で実現するのは極めて困難であった。

我々は、電子-フォノン相互作用が強く[2,3]、大きな冷却ゲインが期待できるハロゲン化金属ペロブスカイトを対象に半導体光学冷却の研究を進めてきた[4]。特にペロブスカイト量子ドットはほぼ 100% の発光量子効率可以实现することから有望な候補物質である。我々は最近、ペロブスカイト量子ドットをホスト結晶に閉じ込めた dot-in-crystal 構造で光照射によって約 8 K の冷却を観測し、AS 光学冷却に成功した[5,6]。さらに、高密度励起下では Auger 再結合（多体効果による無輻射再結合）による光加熱が支配的になり、励起光強度を変えると光冷却から光加熱へのクロスオーバーが生じることも見出した。このように、冷却ゲインの原理的な限界は Auger 再結合が決定していることから、Auger 再結合レートを定量的に評価することで、本研究で用いた試料における冷却限界が室温から約 10 K 程度であることも明らかにした。

講演では、半導体光学冷却の原理、電子-フォノン相互作用やナノ構造の役割について述べた後、Auger 再結合過程と非接触での温度評価手法を含む実験の詳細について述べる。また、現状での原理的な冷却限界とこれを克服するための戦略について議論する。

本研究は、JST-CREST(JPMJCR21B4)、科研費 (25K01649)、キヤノン財団および千葉大学総合知研究支援プログラムの支援による。

[1] S. D. Melgaard, et al., *Sci. Rep.* **6**, 20380 (2016). [2] Y. Yamada, et al., *Phys. Rev. Lett.* **126**, 237401 (2021). [3] Y. Yamada, Y. Kanemitsu, *NPG Asia Mater.* **14**, 48 (2022). [4] Y. Kajino, et al., *Phys. Rev. Mater.* **6**, L043001 (2022). [5] Y. Yamada, et al., *Nano Lett.* **24**, 11255 (2024). [6] Y. Yamada and Y. Kanemitsu, *J. Phys. Chem. Lett.* **16**, 4496 (2025).

半導体光学冷却に向けた CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 結晶における
試料形状変化による光学特性の制御

Impacts of sample shape and size on optical properties

in CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ crystals for optical cooling

阪大院工¹, 阪大電顕センター², 千葉大院理³

○田中 大地¹, 福田 光希¹, 登尾 尚紀¹, 市川 修平^{1,2}, 田畑 博史¹, 山田 泰裕³, 小島 一信¹

The Univ. of Osaka¹, Research Center for UHVEM, The Univ. of Osaka², Chiba Univ.³

○Daichi Tanaka¹, Mitsuki Fukuda¹, Naoki Noborio¹,

Shuhei Ichikawa^{1,2}, Hiroshi Tabata¹, Yasuhiro Yamada³, and Kazunobu Kojima¹

E-mail: daichi.tanaka@sfm.eei.eng.osaka-u.ac.jp

【研究背景】CsPbBr₃ ナノ結晶が Cs₄PbBr₆ 結晶内部に埋め込まれた CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 結晶は高効率な緑色発光を示し、空気や湿気に対しての安定性も高い。さらに励起光よりも高いエネルギーでの発光(アンチストークス発光)が確認されており、半導体光学冷却への応用が期待される[1]。これまでに我々は、結晶を大型化すると励起光の吸収率が上昇する一方で、自己吸収(SA)効果に伴い外部量子効率(EQE) が低下しフォトルミネッセンス(PL)スペクトルのピーク波長がレッドシフトすることを明らかにした[2,3]。本研究では、三次元的に成長させたバルク結晶と透明基板上的のエピタキシャル成長により形状を制御した結晶を想定し、PL 過程をシミュレーションした。両者の比較を行い、形状の違いが SA 効果に及ぼす影響を明らかにしたので報告する。

【実験条件・結果】まずは立方体の結晶を想定し、モンテカルロ法を用いて光子の挙動に関して3次元のシミュレーションを行った[Fig. 1(c)]。試料サイズが大きくなるにつれて取り出されるまでの光路長が長くなるため再吸収が容易に生じ、EQE が低下すると共に、 PL ピーク波長はレッドシフトする。次に同一の計算モデルを用いて針状結晶[Fig. 1(a)]および板状結晶 [Fig. 1(b)]を想定して計算を行った。励起光の照射方向を結晶の長手方向とすることで、形状変化による励起光吸収率に差異が生じないようにする。短手方向から光子が取り出される確率は試料サイズ依存性が小さいため、低次元形状の結晶は再吸収による EQE の低下が抑えられることが明らかになった。このことは、結晶の品質が同一であっても、結晶の形状を変化させることにより SA 効果を制御し、意図的に光学冷却能を上昇させられることを確認した。詳細は当日報告する。

【謝辞】本研究の一部は、光科学技術研究振興財団および科研費 No.25K01649 の支援を受けたものです。

[1] Y. Yamada *et al.*, *Nano Lett.* **6**, L043001 (2024). [2] N. Noborio *et al.*, 2024 *MRS Fall Meeting*, EL04.13.09 (2024). [3] 福田 他, 第 85 回秋季応用物理学会, 17a-C302-2 (2024).

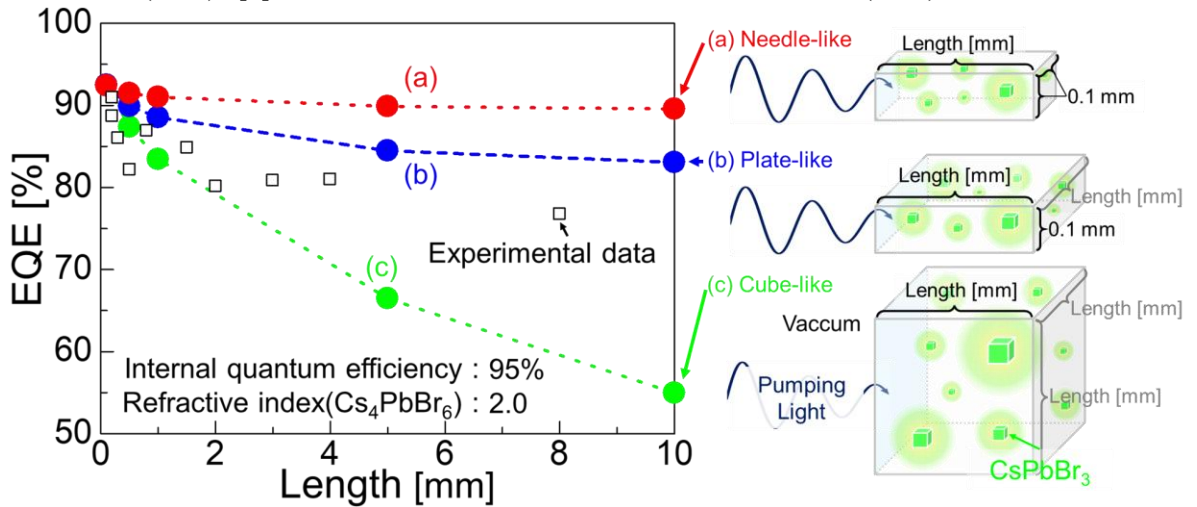


Fig. 1 Dependence of EQE on crystal lengths and schematic of sample shape used in simulation.

ペロブスカイト型サーモフォトニクス発電の理論解析： 低グレード排熱回収への応用に向けて

Theoretical Analysis of Perovskite-Based Thermophotonic Power Generation: Toward Application to Low-Grade Waste Heat Recovery

新潟大工, 櫻井 篤

Niigata Univ., °Atsushi Sakurai

E-mail: sakurai@eng.niigata-u.ac.jp

低温（200℃以下）の排熱は産業分野において大量に存在するものの、その多くが未利用のまま廃棄されている。本研究では、こうした低グレード排熱の電力回収を目的とした新しい発電方式として、ペロブスカイト半導体を用いたサーモフォトニクス発電（TPX）システムの理論解析を行った。

本システムは、非平衡ふく射を利用し、遠方場でも動作可能な点が従来の熱光起電力（TPV）とは大きく異なる特長である。ふく射輸送の解析には、揺動電磁気学理論に基づく数値モデルを構築し、層構造間の光エネルギー伝達を定量的に評価した。

特に、ITO/TiO₂/CsPbI₃/CFTS/Au からなる多層構造において、各層の厚さを最適化することで、バンドギャップに対応した光干渉効果を誘起し、発電効率が理想的なカルノー効率の 80%以上に達することを示した。また、ギャップ距離が 1 mm 以上に広がってもエネルギーフラックスが維持される設計により、現実的な熱源配置でも有効な発電が可能であることを示した。

今後は、非放射再結合など実用上の損失を考慮した解析および実験との比較検証を通じて、さらなる実用化に向けた研究を展開する予定である。

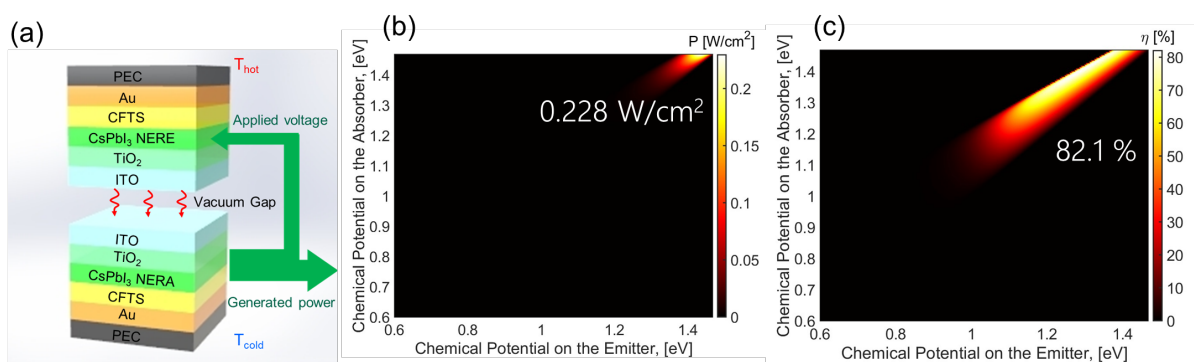


Figure 1. (a) Schematic illustration of the perovskite-based thermophotonic power generation (TPX) system comprising multilayer structures of Au/CFTS/CsPbI₃/TiO₂/ITO. The upper structure acts as a non-equilibrium radiation emitter (NERE), while the lower structure functions as a non-equilibrium radiation absorber (NERA). The applied voltage enables power extraction across a far-field vacuum gap. (b) Power density distribution as a function of chemical potentials of the emitter and absorber. The maximum power output reaches 0.228 W/cm². (c) Corresponding energy conversion efficiency normalized by the Carnot limit, exhibiting a peak efficiency of 82.1%.

フォトサーマルフルイディクスによる次世代バイオ産業の共通基盤創成

Creation of Common Platform for Next-generation Bioindustries with Photothermal Fluidics

大阪公立大院理¹, 大阪公立大 LAC-SYS 研², ○飯田 琢也^{1,2*}

Grad. Sch. Sci.¹, RILACS² in Osaka Met. Univ., Takuya Iida^{1,2*}

*E-mail: t-iida@omu.ac.jp

近年、ナノ領域での高精度な温度計測[1]や分子濃縮や分子認識制御[2,3]に関する先駆的研究に影響を受け、ナノ領域での光熱効果に関する研究が盛んに行われている。また、金属ナノ構造の加工技術の進展により光発熱効果の高度な制御と積極的な利用に関するサーモプラズモニクスの研究が国際的にも活発である[4]。特に、微小空間での光発熱効果による流体効果の基礎・応用研究に関するフォトサーマルフルイディクスに関する研究も活発に推進されている。たとえば、光ピンセットなどで用いられる光と物質の電磁気学的作用による光誘起力と、熱流体力学的相互作用による光誘起対流を相乗的に利用した「光濃縮」はナノ物質やマイクロ物質を狙った場所で局所濃縮して衝突頻度を高めることができ、多様な生化学反応を加速する「光誘導加速システム (LAC-SYS)」の駆動原理として幅広い分野での応用が期待されている[5,6]。たとえば、マイクロ流路中の狭小空間でレーザー光による光誘起力と圧力駆動流の相乗作用により抗原抗体反応を加速して、従来法よりも1~2桁高感度かつ数分程度の高速での計測を可能とするマイクロフロー光濃縮 LAC-SYS が開発され、細胞外小胞やがんマーカータンパク質の高感度計測にも成功している[7,8,9]。また、光誘起対流を高効率に発生できる多細孔型の低ダメージ光濃縮用バイオチップも開発され、細菌の高生存率集積やウイルスの超高速・高感度計測も可能となった[10,11]。さらに、異種プローブ粒子を混合して光濃縮を行う「ヘテロプローブ光濃縮法」が開発され、デジタル PCR を超える超高感度な DNA 計測が小型ウェルで実現できることも示された[12]。本講演ではこれらの一連の成果を紹介し、産学医連携で未来の医療・ヘルスケア技術を開発する「光濃縮医工計測エコシステム」の取り組みや、創薬プロセスでの薬効試験、食品検査、環境・エネルギーなど幅広い次世代バイオ産業におけるフォトサーマルフルイディクスの可能性について議論する。

【謝辞】本研究は床波志保氏、中瀬生彦氏、田口歩氏、長島優氏、伊都将司氏、藤原正澄氏、井村考平氏、大塚電子株式会社ならびに協力企業の皆様、研究室メンバーを含む多くの皆様との共同研究の成果の一部である。研究推進に当たり、JST 未来社会創造事業、AMED ムーンショット型研究開発事業、科研費基盤研究(S)、NEDO 若サポなどの事業からご支援を頂いた。

- [1] S. Ito, T. Sugiyama, N. Toitani, G. Katayama, H. Miyasaka, *J. Phys. Chem. B* **111**, 2365 (2007).
- [2] Y Nishimura, K Nishida, Y Yamamoto, S Ito, S Tokonami, T Iida *J. Phys. Chem. C* **118**, 18799 (2014).
- [3] T Iida, Y Nishimura, M Tamura, K Nishida, S Ito, S Tokonami, *Sci. Rep.* **6**, 1 (2016).
- [4] G. Baffou, F. Cichos, R. Quidant, *Nature Mater.* **19**, 946 (2020).
- [5] T. Iida, *Readout HORIBA Technical Report.*, **55**, 11 (2021).
- [6] 飯田琢也, 応用物理学会<最近の展望>, **94 (5)**, 244 (2025).
- [7] T. Iida, S. Hamatani, S. Tokonami et al., *Commun. Biol.* **5**, 1053 (2022).
- [8] K. Fujiwara, Y. Takagi, I. Nakase, S. Tokonami, T. Iida, et al., *Nanoscale Horizons*, **8**, 1034 (2023).
- [9] T. Iida, S. Tokonami, Y. Takagi, I. Nakase, A. Taguchi, 国際特許 **PCT/JP2023/018633**, (2023)
- [10] S. Tokonami, T. Iida et al., *Sci. Adv.*, **6**, eaaz5757 (2020).
- [11] M. Kanoda, S. Tokonami, T. Iida, *npj Biosensing* **1**, 1 (2024)
- [12] S. Toyouchi, S. Tokonami, T. Iida et al., *ACS Sensors*, **10**, 751 (2025).

光濃縮質量分析法による細胞外小胞の高感度検出

High-Sensitivity Detection of Extracellular Vesicles

by Optical Condensation-Assisted Mass Spectrometry

大阪公大院理¹, 大阪公大 LAG-SYS 研², 大阪公大院工³, 関西学理⁴, 株式会社島津製作所⁵

○叶田 雅俊^{1,2,3}, 豊内 秀一^{1,2}, 林 康太^{1,2,3}, 高木 裕美子², 田村 守^{2,4},

谷内 宥紀⁵, 渡辺 真⁵, 床波 志保^{2,3}, 飯田 琢也^{1,2,*}

Grad. Sch. Sci.¹, RILACS², Grad. Sch. Eng.³ in Osaka Metro. Univ.,

Sch. Sci. Kwansei Gakuin Univ.⁴, Shimadzu Corporation⁵

○Masatoshi Kanoda^{1,2,3}, Shuichi Toyouchi^{1,2}, Kota Hayashi^{1,2,3}, Yumiko Takagi²,

Mamoru Tamura^{2,4}, Yuki Taniuchi⁵, Makoto Watanabe⁵, Shiho Tokonami^{2,3}, Takuya Iida^{1,2*}

E-mail: t-iida@omu.ac.jp

がんや感染症の早期診断に向けて、生体分子の高感度な定量技術が重要視されている。質量分析 (Mass Spectrometry) は、多様な分子の網羅的解析を可能とし、医療・分析分野での応用が進展している [1]。一方で、生体試料は目的成分が極めて微量であり、マトリックスの影響を受けやすいため、さらなる感度向上が課題となっている。これに対して、前処理による濃縮や選択的抽出を組み合わせることで、質量分析の性能を最大限に引き出すアプローチが有効である。「光濃縮」は、光圧や光誘起対流によってタンパク質などの生体分子を効率的に集積させることで、迅速かつ高感度な分析を可能にする手法である [2]。これまでに、mW レベルの低出力レーザーで光誘起対流を生じさせ、光濃縮を実現するナノボウル基板が開発されており、イムノアッセイの迅速化などへの応用が報告されている [3]。

本研究では、ヒト乳がん細胞株 MCF-7 (Michigan Cancer Foundation-7) 由来の細胞外小胞 (EVs) を対象とし、ナノボウル基板を用いた光濃縮と質量分析を組み合わせた迅速・高感度な検出手法の構築を試みた。Fig.1 のように、抗体修飾ナノ粒子 (Ab-NPs)、EVs、抗体修飾金属ナノ粒子 (Ab-MNPs) の順に、各 5 μ L をナノボウル基板上に滴下し、3 回に分けて合計 10 分間、3 mW のレーザーを照射して光濃縮を行った。その後、基板に付着した金属プローブ粒子を王水で溶解し、誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) により測定した。従来のサンドイッチ型イムノアッセイ ICP-MS の検出限界と比較して、光濃縮を用いる本手法では 100 分の 1 以下の濃度においても Ab-MNPs 由来の明瞭なシグナルが観測された。シグナル強度には EV 濃度に応じた依存性が確認され、このような低濃度領域でも定量評価の可能性が示唆された。本研究の成果は、生体ナノ粒子の高感度かつ選択的な検出を可能とする「光濃縮質量分析法」の基盤となるものであり、将来的に血中 EV を用いたがんや多様な疾病の検査、健康モニタリングなどへの応用が期待される。

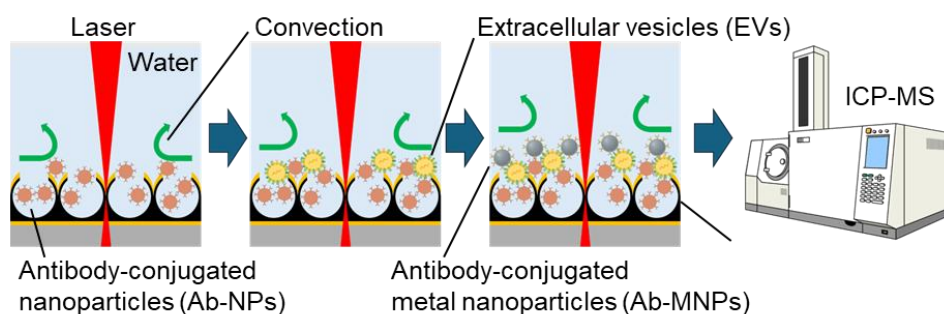


Fig.1 Schematic diagram of optical condensation-assisted mass spectrometry by nanobowl substrate.

[1] Ruedi Aebersold and Matthias Mann, *Nature*, **537**, 347 (2016).

[2] T. Iida, Readout : *Horiba technical reports*, **55**, 11 (2021).

[3] M.Kanoda et al., *npj Biosensing*, **1**, 1 (2024).

細胞内温度の計測と制御

Measurement and control of intracellular temperature

東大薬¹ °岡部 弘基¹

The Univ. Tokyo¹, °Kohki Okabe¹

E-mail: okabe@mol.f.u-tokyo.ac.jp

近年、温度は生命を担う細胞機能と関連する物理因子として注目されている。生命と温度の関係を深く理解するには、細胞レベルの熱応答や自発的な温度変動の観察が必須である。演者はこれまでに、単一生細胞に適応可能な高感度分子温度計として、蛍光性ポリマー温度センサー (FPT) を開発した。FPT と蛍光寿命イメージング顕微鏡法 (FLIM) を用いた定常状態の培養細胞内の温度イメージングの結果、刺激依存的な細胞内温度の変化に加えて、細胞内の場所による温度の差が観察された。特徴的な温度分布としては、核や中心体、ミトコンドリアといった発熱オルガネラの温度が周囲の細胞質と比較して高温である様子が観察され、細胞内温度変化が細胞機能と密接に関連していることを示唆した (Okabe K, *Nat. Commun.* 2012)。

細胞内で自発的に生じる時間や空間的な温度変動の絶対値は 1-2°C 程度であった。これは、近年開発された異なる原理に基づいた温度センサーによる多数の細胞内温度計測の合致により妥当性が裏付けられている一方で、この細胞内温度変化を熱の移動から考えると大きな謎がある。つまり、熱伝導を過程して単純に計算される単一細胞の発熱時の温度変動は実際に計測された温度変化より著しく小さい (10^5 倍の乖離)。演者は、この計算と実験値の乖離の原因を探るため、人工熱源として赤外 (IR) レーザー照射による定量的かつ一過的な局所領域の加熱法を導入し、細胞内の熱移動を実験的に検証した。この結果、単一細胞の平均温度の緩和は、同程度の大きさのリボソームよりも著しく遅く、細胞内構造や分子の影響を受けていた。さらに、熱伝導だけに依存しない細胞内温度緩和の存在を明らかにし、熱伝導では解明されていない細胞内の温度変化のメカニズムを説明できる可能性が示された (Takarada M, *bioRxiv* 2024)。

次に、細胞内局所の大きな温度変化はそこに存在する生体分子の状態や活性に影響することで細胞機能に貢献していると考えた。これは化学反応による従来の細胞内情報伝達機構とは大きく異なる現象である。演者はこれを温度シグナリングと呼び、その実証と機構の解明に取り組んでいる (Okabe K, *Commun. Biol.* 2021)。生理機能における細胞内温度シグナリングの関与を検証するために、神経分化に着目した。神経幹細胞は、種々の刺激により神経細胞へと分化し、劇的な形態や機能の変化を示す。神経モデル PC12 細胞やマウス脳ニューロンにおける細胞内温度分布の操作と観察のアプローチを駆使することで、細胞内局所の微細な温度変化が神経分化に及ぼす影響や、神経分化における細胞内の温度分布変化を解明し、細胞内温度シグナリングによる新規の神経分化機構を発見した (Chuma S, *Nat. Commun.* 2024)。この温度シグナリングは転写や翻訳といった細胞内の主要な反応を司っていることから、温度シグナリング現象は、種々の細胞機能や階層を超えた普遍的な現象として、複雑かつ巧妙な生命の維持を担っていると考えられる。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：不規則・不均質材料の力学における材料横断的融合とその最前線

[10a-N103-1~6] 不規則・不均質材料の力学における材料横断的融合とその最前線

[10a-N103-1]

オープニング

○篠崎 健二¹ (1.産総研)

[10a-N103-2]

アモルファス固体に潜む階層的構造と力学応答の相関

○南谷 英美¹ (1.阪大産研)

[10a-N103-3]

シリカガラスのボゾンピークとジャミング転移の物理

○水野 英如¹、南谷 英美² (1.東大院総合文化、2.阪大産研)

[10a-N103-4]

金属ガラスの変形素子としてのアナンケオンの特定

○椎原 良典¹ (1.豊田工大)

[10a-N103-5]

液体の粘度と局所構造緩和

○岩下 拓哉¹ (1.大分大理工)

[10a-N103-6]

力学的不均質性を利用したガラスの強靱化指針

○篠崎 健二¹ (1.産総研)

アモルファス固体に潜む階層的構造と力学応答の相関

Hidden hierarchical structures in amorphous solids

correlating with mechanical response

阪大産研 南谷英美

SANKEN, Univ. Osaka, Emi Minamitani

E-mail: eminamitani@sanken.osaka-u.ac.jp

アモルファス材料において、原子レベルの構造が力学特性をどのように支配するかを理解することは、固体物理学における本質的な課題である。ひずみを印加した場合、アモルファス材料はひずみに沿った均一なアフィン変形と、空間的に不均一な非アフィン変形の両方を示し、それぞれが Born 項（アフィン項）および非アフィン項として弾性率に寄与する。弾性率は、Born 項から非アフィン項を引いたものとして定義されるため、「ソフトな」領域とは Born 項が小さい、あるいは非アフィン変形が大きい局所構造であると考えられる。しかし、この2つの意味でソフトな構造が共通しているのか、それとも大きな違いを有するのかは、いまだ十分に解明されていない。特に、共有結合性アモルファス材料であるシリコンのような系では、中距離秩序（MRO）がネットワーク構造において重要な役割を果たすため、状況はより複雑である。

本研究では、分子動力学シミュレーションとパーシステントホモロジー解析[1]を組み合わせ、上記の課題に取り組んだ。パーシステントホモロジー解析の結果、Born 項が小さい局所構造は短距離の特徴によって支配される一方、非アフィン変形が大きい局所構造は、短距離での乱れが中距離秩序の中に埋め込まれた階層的構造を有することが明らかとなった。さらに、これらの階層的構造は、低エネルギーの局在振動励起とも強く関連していた[2]。

以上の結果は、共有結合性アモルファス材料の力学応答および動的特性が中距離秩序と本質的に結びついていることを示しており、これらの材料の特性を理解し、制御するための新たな枠組みを提供するものである。

本研究は、中村壮伸（産総研）、大林一平（岡山大学）、水野英如（東京大学）との共同研究成果である。

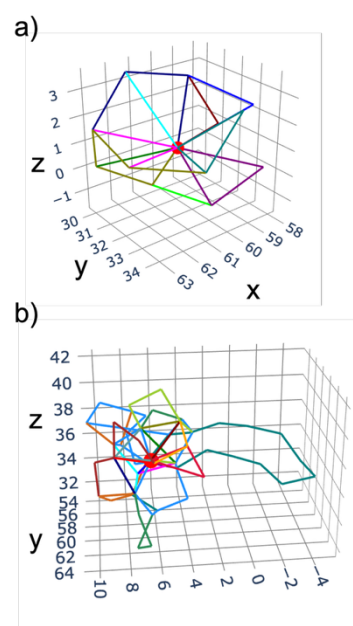


図1 a) Born 項が大きい、
b) 非アフィン変形が大きい
局所構造

参考文献

- [1] H. Edelsbrunner and J. Harer, *Computational Topology : An Introduction* (American Mathematical Society, Providence, R.I., 2010).
- [2] E. Minamitani, T. Nakamura, I. Obayashi, and H. Mizuno, <http://arxiv.org/abs/2407.17707>.

シリカガラスのボゾンピークとジャミング転移の物理

Boson peak in silica glass and physics of jamming transition

○東大院総合文化¹, 阪大産研², ○水野 英如¹, 南谷 英美²

Univ. of Tokyo¹, Osaka Univ.², ○Hideyuki Mizuno¹, Emi Minamitani²

E-mail: hideyuki.mizuno@phys.c.u-tokyo.ac.jp

不規則な固体であるガラスには、規則的な結晶で観察されるフォノン励起に加えて、局在振動などの非フォノン励起が観測される。フォノンに加えて余剰に存在する振動励起現象はボゾンピークと呼ばれ、さまざまな種類のガラスにおいて普遍的に観測されてきた[1]。例えば、共有結合性ガラスでは、中性子散乱実験や非弾性 X 線散乱実験が盛んに行われ、ボゾンピークが観測されてきた。ボゾンピークは、余剰比熱、低熱伝導率、非アフィン弾性、局所塑性など、熱物性から力学物性まで多岐にわたるガラス特有の性質と深く関連しており、ガラスにおいてボゾンピークの理解は本質的に重要となる。

これまでに、ガラスのボゾンピークを理解するために、さまざまな理論やアイデアが提案されてきた。その中でも代表的なものの一つがイソスタティック性 (isostaticity) である[2]。これは、ガラスを構成する原子・分子の自由度に対して、それを制約する拘束数をカウントし、剛性や振動状態を説明する考え方である。イソスタティック性はネットワークモデルとの相性が良いため、共有結合性ガラスを超えて、粉体のジャミング転移の物理へと応用された[3]。これにより、剛性パーコレーション理論や不規則系の限界安定性といった新しい理論や概念が創出されてきた。

本研究は、ジャミング転移の物理において発展してきたイソスタティック性や、その過程で提案された限界安定性の概念を用いて、共有結合性ガラスの理解を深めることを目的とする。特に、ガラスの代表例であるシリカガラスに焦点を当て、イソスタティック性と限界安定性の二つの概念を用いて理解することを試みる[4]。また、散乱実験で観測される動的構造因子において、これらの概念がどのように反映され、観測可能であるかを明らかにする。

参考文献

- [1] T. Nakayama, “Boson peak and terahertz frequency dynamics of vitreous silica”, *Reports on Progress in Physics* **65**, 1195 (2002).
- [2] M. F. Thorpe, “Continuous deformations in random networks”, *Journal of Non-Crystalline Solids* **57**, 355 (1983).
- [3] M. Wyart, “On the rigidity of amorphous solids”, *Annales De Physique* **30**, 1 (2005).
- [4] H. Mizuno and E. Minamitani, “Boson peak in silica glass: Isostaticity and marginal stability”, in preparation.

金属ガラスの変形素子としてのアナンケオンの特定

Identification of Anancheons as Deformation Units in Metallic Glasses

豊田工業大学, [○]椎原 良典

Toyota Technological Institute

E-mail: shiihara@toyota-ti.ac.jp

金属ガラスは長距離の結晶秩序を欠くため、その変形メカニズムの理解は難しい。特に、転位や粒界が存在しないため、塑性変形を担う素子を特定することが困難である。著者を含む研究グループはこの素子をアナンケオンと呼称し、分子動力学によるその解明を目指した。研究の独自性は、アナンケオンを原子の協調運動として捉えて、その抽出を可能とする「凍結原子解析」という手法を提案したところにある[1]。

具体的には、CuZr 金属ガラスにせん断を加えた際に、局所的な塑性変形イベントを引き起こす原子群を原子レベルで特定することを試みた。従来の手法では、非アファイン変位 ($D^2_{\min}$) や局所的な応力低下などを基準に変形を担う素子、いわゆる Shear Transformation Zone (STZ) を定義してきた。しかし、これらの方法では変形を引き起こす原子とそれに追従する原子とを区別する閾値が必要であり、原子群を一義的に決定できない。凍結原子解析では、イベントの直前に 1 個の原子を凍結し、そのことで系全体の協調運動がどの程度妨げられるかを観察する。凍結によってイベントが抑制される場合、その原子は変形を引き起こす変形素子、アナンケオンに属するとみなす。この操作を系に存在する全原子に適用することである塑性変形イベントを引き起こす素子、アナンケオンを特定できる。

凍結原子解析を 10° K/s で急冷された Cu₅₀Zr₅₀金属ガラス試料に適用した。その結果、変形イベントはおおよそ 40 個程度の原子からなる小さな原子群によって協調的に引き起こされることが明らかとなった。注目すべき点として、これらの原子は、ボロノイ体積、面数、局所弾性といった一般的な構造指標からは他の原子と区別できない。この結果は、変形が「ソフトスポット」と呼ばれる特徴的な構造部位で優先的に生じるという広く受け入れられてきた仮説に疑義を呈する。また、アナンケオンが示す協調的運動がトリガーとなってその周囲に変形を伝播させ、別のアナンケオンを励起することがわかった。この描像に基づく STZ の定義は、静的な構造ではなくアナンケオン自体の協調性、また、アナンケオン同士の動的な協調性を重視する点で新規なものであると言える。

本研究の結果は、金属ガラスの塑性変形が既存の構造欠陥によってではなく、自発的に形成される協調的な原子群、アナンケオンによって担われることを示唆するものである。本研究は不規則構造における変形素子の同定に物理的に裏付けられた枠組みを提供し、より靱性に優れた金属ガラスの設計に寄与する可能性がある。

[1] Y. Shiihara, T. Iwashita, N. Adachi, Y. Todaka, and T. Egami, arXiv preprint arXiv:2503.14903 (2025).

液体の粘度と局所構造緩和

Viscosity and Local Structural Relaxation in Liquids

大分大理工 岩下 拓哉

Oita Univ.

E-mail: tiwashita@oita-u.ac.jp

液体はその流動性により、外部からの力に応じて容易に形を変えることができる。液体の流れる振る舞いはしばしば粘度によって特徴づけられるが、その微視的起源は未だ明確には理解されていない。単純液体の代表である液体金属に関する分子動力学計算を用いた先行研究では、高温領域において、原子間結合の生成および消滅によって定義される素過程が、マクスウェル緩和時間、すなわち粘度を高周波せん断弾性率で割った量を決定することが示された [1]。これは応力緩和過程が結合ダイナミクスと密接な関係にあることを示唆している。ガラスにおける力学変形も、こうした素過程の積み重ねとして捉えることが可能であり、その基本的性質を明らかにすることは、構造不規則系の構造緩和やレオロジー特性の理解において重要な意義を持つ。

本講演では、この概念をより複雑な分子性液体、つまり複数の原子から構成される分子が構成単位となる液体へと拡張し、シリカ、水、シリコン、イオン液体といった系を対象として、単純液体と分子性液体の間に見られる共通性および相違点を議論する。

[1] T. Iwashita, D.M. Nicholson, T. Egami, "Elementary excitations and crossover phenomenon in liquids", Physical Review Letters 110 205504 (2013).

力学的不均質性を利用したガラスの強靱化指針

Design Strategy for Toughening Glass via Mechanical Heterogeneity

産総研, ○ 篠崎 健二

AIST

E-mail: k-shinozaki@aist.go.jp

ガラスは透明性や耐薬品性などに優れる一方、本質的に脆く、破損が問題となる。理論的には表面にキズのない理想的なシリカガラスの破壊強度は約 20 GPa であり非常に高強度であるが、現実のガラス製品は微小な表面キズへの応力集中のため、実用的な強度はこれより 2~3 桁も低くなる。

異相分散や結晶化を利用し、板状結晶や針状結晶、繊維状フィラーを分散させ、き裂を架橋することでその開口を抑制するき裂後方へのアプローチも知られている。しかし、実用的な破壊靱性の改善には多量の分散が必要となり、透明性や鏡面研磨加工が難しいなど成形加工性の低下などももたらすためトレードオフである。有力な用途も存在するが、微小サイズ・微量の添加で破壊靱性向上が実現すれば応用はより広がるだろう。我々はガラスの脆さを克服するため、き裂進展を防ぐ従来の方法ではなく、き裂前方に作用する新たな戦略として、力学的に異なる性質をもつナノ構造をガラス中に分散させることで、破壊靱性向上を図ってきた¹⁻³⁾。

ガラス中に力学特性の異なるガラス相や金属ナノ粒子を 1 vol%以下の微量で添加することで、破壊靱性が従来比で最大 3 倍に向上し、き裂進展も抑制されることが確認された(図 1)¹⁾。粒子の塑性変形によってき裂先端の応力集中が緩和されるためと考えられる。また、粒径依存性も顕著であり、ニッケル粒子では 100 nm 前後が最適であることが分かった。粒径が大きすぎるとき裂と相互作用しにくく、小さすぎると塑性が発現しにくくなる。適度なサイズ・物性の異相が、き裂先端での塑性散逸の発現を促し、従来の脆性材料にはない性質を引き出す。

ガラス材料の長年の課題である脆さの問題に対し、力学的に異なる物性のナノ構造を導入するアプローチを実施し、微量の金属ナノ粒子添加など新たなガラス材料設計の可能性を提示した。詳細な機構解析や観察、シミュレーションなど基礎的理解を深化したい。

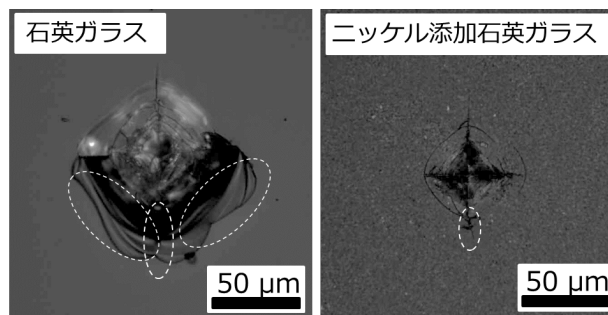


図 2 無添加及びニッケルナノ粒子を微量添加した石英ガラスのビッカース圧痕とその周辺のき裂

1) L. Liu, K. Shinozaki, J. Alloys Compd., 940, 168874 (2023). 2) L. Liu, K. Shinozaki, Mater. Sci. Eng. A, 817, 141372 (2021). 3) 篠崎健二、赤井智子、「ガラスおよびその製造方法」、特許 7389508

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): 不規則・不均質材料の力学における材料横断的融合とその最前線

[10p-N103-1~6] 不規則・不均質材料の力学における材料横断的融合とその最前線

[10p-N103-1]

高圧ねじり加工により構造若返りした金属ガラスの力学特性と組織

○足立 望¹、鈴木 隆之¹、榎園 知弥¹、石井 裕樹¹、安部 洋平¹、戸高 義一¹ (1.豊橋技科大工)

[10p-N103-2]

ゴムの亀裂進展における速度ジャンプと亀裂先端の尖りのメカニズム

○作道 直幸^{1,2} (1.ZEN大、2.東京大工)

[10p-N103-3]

強靱なダブルネットワークゲルの破壊機構

○中島 祐¹ (1.北大院先端生命)

[10p-N103-4]

ガラス状インターロック超分子樹脂の構造と物性

○加藤 和明¹ (1.京工織大)

[10p-N103-5]

結晶粒径の不均質制御による多機能金属材料の創製

○菊池 将一¹ (1.静大工)

[10p-N103-6]

金属材料の高温クリープ損傷を対象としたマルチスケールモデリング

○柴沼 一樹¹ (1.東大工)

高圧ねじり加工により構造若返りした金属ガラスの力学特性と組織

Mechanical property and microstructure of rejuvenated metallic glass using high pressure torsion process

豊橋技科大工¹ ○足立 望¹, (M2)鈴木 隆之¹, (M2)榎園 知弥¹, 石井 裕樹¹, 安部 洋平¹,
戸高 義一¹

Toyohashi Univ. of Tech.¹, °Nozomu Adachi¹, Takayuki Suzuki¹, Tomoya Enokizono¹, Yuki Ishii¹,
Yohei Abe¹, Yoshikazu Todaka¹,

E-mail: n-adachi@me.tut.ac.jp

【緒言】

構造不規則系材料の一つである金属ガラス(BMG)は、転位運動によるすべり変形機構が働かないことにより、せん断の形成に伴い脆性的に破壊する。我々は、巨大ひずみ加工法の一つである高圧下ねじり(HPT)加工を用いて予ひずみを導入することで、引張応力下においても塑性変形を示すことを報告している。この延性発現には、加工によって生じる構造若返り等によるアモルファス組織の変化に起因していると考えられる。一般に、金属ガラス中に存在する自由体積(FV)は、Shear transformation zone (STZ)の形成に寄与すると考えられており、塑性変形の発現に重要な因子であるとの報告が多数ある。しかしながら、密度測定により評価した HPT 加工材の FV 量は、延性を示さない鑄造材のそれと比較して同等であり、FV では延性発現を説明することは難しい。本発表では、HPT 加工によって生じる金属ガラスの力学特性について報告するとともに、構造緩和挙動を通して調査した組織について紹介する。

【実験方法・結果】

傾角鑄造法により作製した $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}(\text{at}\%)$ を供試材とし、HPT 加工により、予ひずみを付与することで構造若返りを生じさせた。各試料における構造緩和挙動の評価には、示差走査熱量測定(DSC)およびアルキメデス法による密度測定を用いた。力学特性の評価には、引張試験（初期ひずみ速度: $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ）を主に用いた。HPT 加工材において認められた密度低下および緩和エンタルピーから、HPT 加工材は、鑄造材と比較して多量の FV および anti-FV を有することが明らかとなった。さらに、HPT 材の緩和エンタルピーは、熱処理による構造緩和の進行に伴って単調に増加する一方で、密度は不連続に変化する特異な挙動を示すことが明らかになった。

【謝辞】

本研究は、JSPS 科研費 学術変革領域研究 B（22H05039, 22H05042）の助成を受けて実施された。

ゴムの亀裂進展における速度ジャンプと亀裂先端の尖りのメカニズム

Mechanism of Velocity Jump and Crack Tip Sharpening in Crack Propagation of Rubbers

ZEN 大学知能情報社会学部¹, 東京大学工学系研究科² °作道 直幸^{1,2}

ZEN Univ.¹, Univ. of Tokyo², °Naoyuki Sakumichi^{1,2}

E-mail: sakumichi@gel.t.u-tokyo.ac.jp

ゴムやゲルなどの柔らかい粘弾性高分子材料は、産業、医療機器、食品分野で広く使用されており、これらの破壊特性の理解には、科学的関心と実用的重要性がある。これらの材料における亀裂進展では、亀裂進展速度が低速から高速へと急激に加速する「速度ジャンプ」現象が生じ、一気に破壊が進行する [1-4]。このとき、亀裂先端の形状に注目すると、低速では亀裂先端が丸い放物線状を示すが、高速では亀裂先端が鋭化することが知られている [2]。また、ゲルでは、亀裂進展速度の上昇とともに先端形状が放物線から大きく逸脱することが観察されている [5]。線形弾性破壊力学によれば静的な亀裂形状は放物線状となることが知られており、低速の破壊の結果と一致する。しかし、高速で亀裂先端の鋭化が生じるメカニズムは明らかにされていない。

本研究 [6] では、亀裂進展速度に応じた粘弾性体の亀裂形状の変化について、理論的な解析を行った。具体的には、ゲルやゴムを単純化した線形粘弾性の標準線形固体モデル（三要素 Zener モデル）で粘弾性を与えたシート材料における定常的な亀裂進展において、亀裂形状を数学的に導出した。図 1 より、従来、非線形弾性に起因するとされていた [5] 亀裂先端の鋭化は、線形粘弾性のみで生じうることを示すことに成功した。また、得られた亀裂形状の解析解から、亀裂形状が、異なるべき指数で特徴づけられる 3 つの領域に分かれることを示した。この結果は de Gennes がエネルギーバランスとスケーリングから提唱した「粘弾性トランペット」[7] と一致した。

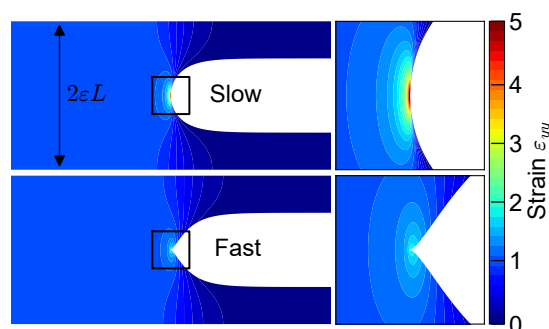


図 1 一定速度での定常的な亀裂伝播中のひずみ場と亀裂形状。(上) 低速破壊では、亀裂先端の形状はおおよそ放物線形である。(下) 高速破壊では、プロファイルは放物線形から大きく逸脱する。速度が増加するにつれて形状は徐々に鋭くなる。

- [1] A. Kadir and A. G. Thomas, *Rubber Chem. Technol.* **54**, 15 (1981).
- [2] Y. Morishita, K. Tsunoda, and K. Urayama, *Phys. Rev. E* **93**, 043001 (2016).
- [3] N. Sakumichi and K. Okumura, *Sci. Rep.* **7**, 8065 (2017).
- [4] A. Kubo, N. Sakumichi, Y. Morishita, *et al.*, *Phys. Rev. Materials* **5**, 073608 (2021).
- [5] A. Livne, E. Bouchbinder, and J. Fineberg, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 264301 (2008).
- [6] H. Nagatakiya, N. Sakumichi, S. Kobayashi, and R. Tarumi, *under revision*. arXiv:2312.07916
- [7] P. G. de Gennes, *Soft adhesives*, *Langmuir* **12**, 4497 (1996); “Soft Interfaces: The 1994 Dirac Memorial Lecture” (Cambridge Univ. Press, 1997).

強靱なダブルネットワークゲルの破壊機構

Fracture Behavior of Tough Double-Network Gels

北大院先端生命・北大 WPI-ICReDD¹ ○中島 祐¹

Hokkaido Univ.¹, °Tasuku Nakajima¹

E-mail: tasuku@sci.hokudai.ac.jp

ダブルネットワーク (DN) ゲルは、2 種の高分子網目の相互侵入により得られる強靱ゲルである¹⁾。DN ゲルは約 90wt% という高い含溶媒率 (すなわち、含ポリマー率はたった 10wt%) を持ちつつも、トラックで踏んでも壊れないほどの丈夫さを示し、DN ゲルの開発は「ゲルは壊れやすい」という概念を過去のものとした。強靱な DN ゲルを構成する 2 種の網目は、どんなものでも良いのではなく、以下の 2 条件を満たす必要がある。

A. 第 1 網目は極めて脆く (最大延伸度が小さく)、第 2 網目は極めて高伸長性である。

B. 第 1 網目は、第 2 網目に対して十分に弱い (破断強度が小さい)。

上記 2 条件が満たされれば、DN ゲルは多様な高分子種・溶媒種から (化学種によらず) 合成可能である^{2,3)}。また溶媒を含まない DN エラストマーも作成可能である。DN ゲルの優れた力学特性およびその発現原理の解明は、柔軟高分子材料の強靱化の観点から学問的・産業的に重要であり、多くの研究者の興味を引き付けてきた。DN ゲルが開発されてから四半世紀が経過した今でも分かっていないことが多く、その研究は尽きない。

DN ゲルの強靱化メカニズムは、大まかには犠牲結合原理で説明される。脆と柔の DN ゲルにき裂を進展させるためには、最終的には高伸長性の第 2 網目にき裂を進展させる必要がある。第 2 網目にき裂を進めるには、ゲルを極めて大きく変形させなければならない。この大変形過程で、き裂周辺 (Figure 中の damage zone) にある脆い第 1 網目が大量に破壊され、大量のエネルギーが熱として散逸することにより破壊に要するエネルギーが大きくなる。き裂進展に要するエネルギーは、第 1 網目単体が 1 J m^{-2} 、第 2 網目単体が 10 J m^{-2} のオーダーであるのに対し、DN ゲルでは 1000 J m^{-2} ものオーダーに達する⁴⁾。

当日は、DN ゲルの強靱化メカニズムを概説するほか、近年の研究によって分かってきたミクロな破壊の様子や、環境効果などについて紹介する。

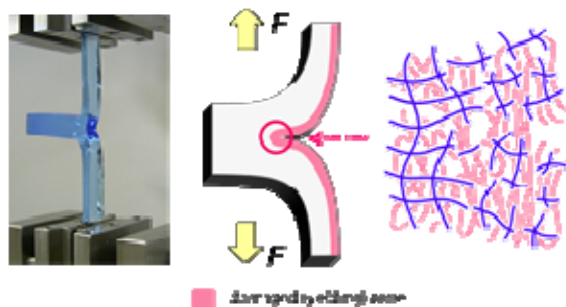


Figure: Damaged zone formation around the crack tip of a double-network gel

【参考文献】

- 1) J. P. Gong *et al.*, *Adv. Mater.* **2003**, *15*, 1155.
- 2) T. Nakajima *et al.*, *Adv. Funct. Mater.* **2012**, *22*, 4426.
- 3) T. Nakajima *et al.*, *ACS Macro Lett.* **2019**, *8*, 1407.
- 4) Y. Tanaka *et al.* *J. Phys. Chem. B* **2005**, *109*, 11559.

ガラス状インターロック超分子樹脂の構造と物性

Structure and Properties of Mechanically Interlocked Supramolecular Glassy Resins

京都工繊大 °加藤 和明

Kyoto Institute of Technology, °Kazuaki Kato

E-mail: kato@kit.ac.jp

ひも状の長い分子（高分子）がからみ合っできる高分子樹脂に対して、環状分子と高分子がネックレス状にインターロックした超分子からも同様に樹脂が得られる（図1）。主成分は質量の80%以上を占める環状分子であり、環状分子が形成する非晶状の材料骨格のすき間に高分子が収納された構造をしている。環状分子と高分子の間に強い相互作用はなく機械的に噛み合っているだけなので、材料骨格と高分子の運動性の間には非常に高い自由度がある。ただし高分子の末端は嵩高くなっていて環を滑り抜けることはできないため、環と高分子は完全に自由ではなく緩やかに拘束され合っており、この緩やかな拘束の効果はガラス転移ダイナミクスに表れることも分かっている。

この特殊な構造をした材料の変形に対する応答は特異的である。室温のガラス状態では既存の高分子樹脂ガラスと同等の1~2 GPa程度のヤング率を示すが、降伏して100%以上の破断伸びを示す材料である。放射光X線散乱を用いて延伸下での構造解析を行うことで、図2に示すように降伏とともに特異な相分離構造を形成することがわかる。変形前の環状分子の配向は等方的であり、隣接する環状分子間の距離にも大きなばらつきがない均質材料であるが、降伏後にネッキングが起こった部分で特異的に環状分子と高分子の相分離が起こり、環状分子の開口面は延伸と垂直な方向に配向する。さらに、このひずみ誘起変態によって環状分子間の距離は短くなり、変態前は環に覆われて結晶化できなかった高分子が結晶化できるようになる。こうして相分離構造は変形前の均質状態よりも変形しにくくなった結果、ひずみは非局在化して隣接部分にネックが伝播して高い延性を示したものと考えられる。変形前の均質構造では環状分子が材料骨格の弾性を担っていたため、そのすき間に存在する高分子は弾性に寄与していなかったが、降伏が起こるとひずみは高分子に移り、高い延性を実現する相分離を引き起こす。このように弾性と延性を担う異なる相を互いに緩やかに拘束させることが、トレードオフの関係にある特性を両立する効果的な戦略の一つになると考えられる。

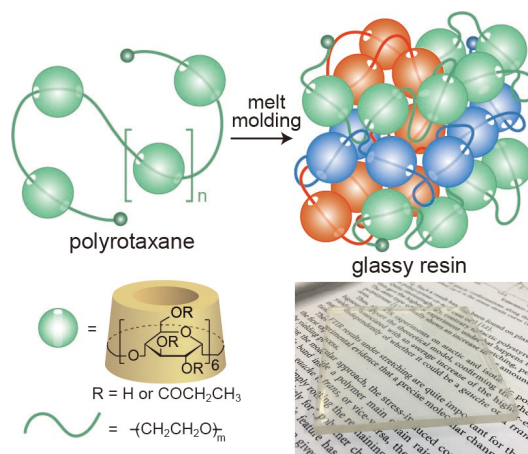


Figure 1. Structure of a mechanically interlocked supramolecule (polyrotaxane) and the glassy material obtained by melt-molding it.

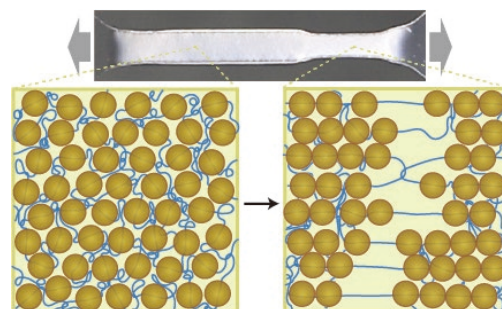


Figure 2 Strain-induced phase separation of cyclic molecules (sphere) and threading polymer (chain) observed in polyrotaxane resins.

結晶粒径の不均質制御による多機能金属材料の創製

Fabrication of Multifunctional Metallic Materials by Controlling Grain Size

Heterogeneity

静大工¹ ○菊池 将一¹

Shizuoka Univ.¹, °Shoichi Kikuchi¹

E-mail: kikuchi.shoichi@shizuoka.ac.jp

金属材料の力学特性はミクロ構造に依存する．とくに多結晶な構造用金属材料の場合，結晶粒を小さくすることにより金属は高強度化するため，これまで「均質・微細な結晶粒を作る」研究が進められてきた．しかし，結晶粒を小さくすると，金属の延性は失われ，力学特性はトレードオフの関係となる．

このような力学的トレードオフを解消するため，立命館大学の研究グループによってネットワーク状の微細結晶粒が粗大結晶粒を取り囲む不均質構造金属が開発された．出発材料を金属粉末とし，強加工プロセスによって表面のみの結晶粒を微細化した粉末を焼結することにより，このような不均質構造を創製することができる (Fig.1)．著者は，主に不均質構造金属の動的な力学特性（疲労特性）について，系統的な検討を加えてきた．これまでに，結晶粒の大きさに起因するミクロ力学特性差が応力・ひずみ分配を引き起こし，それが金属材料の多機能化にとって重要因子であることが明らかになりつつある．本講演では，結晶粒径の不均質制御による金属材料の多機能化発現機構解明に関する実験的・解析的取り組みについて紹介する．

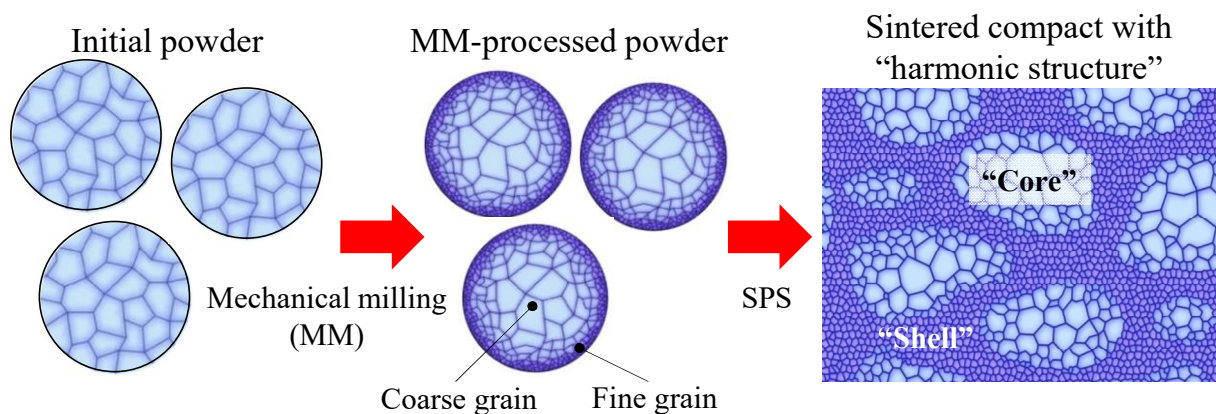


Fig.1 Schematics of metallic materials having heterogeneous grain size distribution fabricating using severe plastic deformation and powder metallurgy processes.

金属材料の高温クリープ損傷を対象としたマルチスケールモデリング

Multiscale modeling of high temperature creep damage in metallic materials

東京大学, °柴沼 一樹

The University of Tokyo, °Kazuki Shibanuma

E-mail: shibanuma@struct.t.u-tokyo.ac.jp

本研究では、金属材料の高温クリープ損傷という支配因子やメカニズムが多岐にわたる複雑な現象を定量的に説明・予測することを目的として、ナノスケールの分子動力学解析とマクロスケールの有限要素解析を接続するためのミクロスケールモデルを構築した。

本モデルは、微視組織モデル、粒成長モデル、ボイド生成・成長モデルの3つのサブモデルを連成した統合化モデルとして構築した。微視組織モデルでは、4段階のデータ構造（結晶粒、粒界ファセット、三重線、四重点）で幾何情報を記述し、3次元多結晶体を自動生成するアルゴリズムを構築した。粒成長モデルでは、粒界移動および粒界拡散の2つのメカニズムを考慮することで、微視的変形や巨視的ひずみ速度を再現した。ボイド生成・成長モデルでは、粒界の相対運動に基づいてボイド生成を定式化し、その成長挙動は粒界およびボイド表面での拡散流束に基づいて評価した。これらのサブモデルを統合することで、高温クリープ損傷の進展挙動を多結晶レベルで再現可能なモデリングの枠組みを確立した。

モデルの妥当性を検証するために、まずその変形挙動について、粒径や応力がひずみ速度に及ぼす影響が理論式と一致することを確認した。ボイドの生成・成長については、純ニッケルを用いた実験との比較により、粒界上での生成位置や成長形状を高精度で再現できることを示した。

さらに、構築したモデルを用いて各種因子の影響を評価した結果、多軸応力状態下では相当応力を用いることで変形挙動を一元的に整理でき、また応力三軸度が高まるとボイド進展が加速する傾向が明らかとなった。加えて、粒径の分散が大きいほど損傷抵抗性が低下することを示した。これにより、本モデルが耐熱金属材料の外力・材料設計に有効なツールであることを示した。

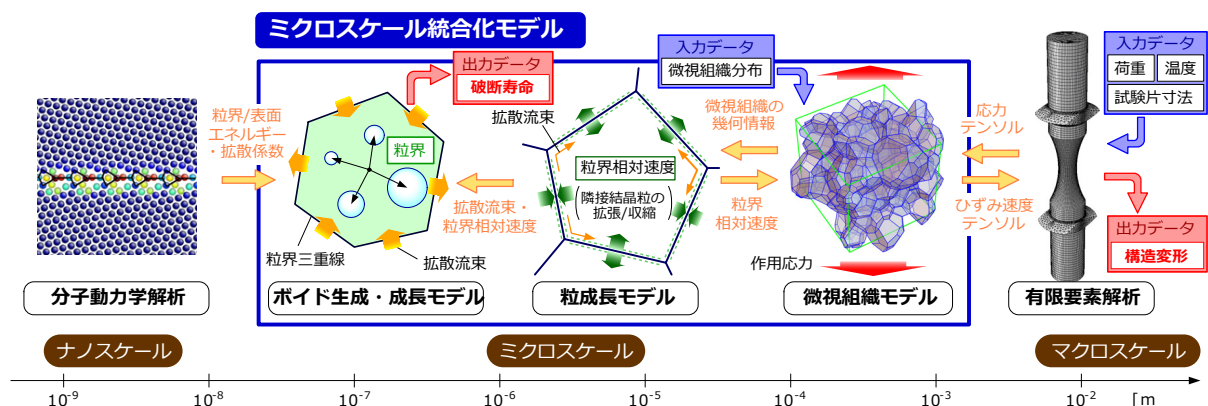


図1 金属材料の高温クリープ損傷を記述するマルチスケールモデリング

参考文献: K. Shibanuma et al., Materials & Design 244 (2024), 113198.
K. Sagara et al., Materials & Design 244 (2024), 113197.

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：二次元物質量子エレクトロニクス

[9p-S102-1~9] 二次元物質量子エレクトロニクス

[9p-S102-1]

シンポジウム開会挨拶

○守谷 頼¹ (1.東大生研)

[9p-S102-2]

2次元物質における非相反輸送

○岩佐 義宏¹ (1.理研CEMS)

[9p-S102-3]

滑り強誘電体の物理と応用

○安田 憲司¹ (1.コーネル応物)

[9p-S102-4]

ツイストグラフェンの超流動スティッフネス測定と量子幾何効果

○田中 未羽子^{1,2}、Joel Wang²、Thao Dinh²、Daniel Rodan-Legrain²、Sameia Zaman²、Max Hays²、渡辺 賢司³、谷口 尚³、Pablo Jarillo-Herrero²、William Oliver² (1.東大物性研、2.マサチューセッツ工科大学、3.物質材料研究機構)

[9p-S102-5]

テラヘルツエレクトロニクスによるグラフェンプラズモンのオンチップ転送

○吉岡 克将¹ (1.NTT物性研)

[9p-S102-6]

複数層遷移金属ダイカルコゲナイドを用いた量子井戸エレクトロニクス

○木下 圭¹、守谷 頼¹、岡崎 尚太²、小野寺 桃子¹、張 奕勁^{1,3}、渡邊 賢司⁴、谷口 尚⁴、笹川 崇男²、町田 友樹¹ (1.東大生研、2.科学大フロンティア研、3.東大理、4.NIMS)

[9p-S102-7]

動的歪みによる遷移金属ダイカルコゲナイドの超高速界面エンジニアリング

○藤井 瞬¹ (1.慶大理工)

[9p-S102-8]

モアレ物質のメゾスコピック物理と量子ねじれ顕微鏡

○岩切 秀一¹ (1.物材機構)

[9p-S102-9]

シンポジウム閉会挨拶

○守谷 頼¹ (1.東大生研)

2次元物質における非相反輸送

Unidirectional transport in 2D materials

岩佐 義宏、理研 CEMS

RIKEN CEMS, Yoshihiro Iwasa

E-mail: iwasay@riken.jp

今世紀の物質科学の特徴は、ナノサイズへのスケールダウン、あるいはデバイス加工によって、様々な物質から、バルクでは予想もしなかった多様な物理現象や機能性が見出されていることである。2次元物質は言うまでもなく、トポロジカル物質もその代表例と言えるであろう。

近年、空間反転対称性の破れた系における様々な非相反応答が注目されるようになってきているが、それは、種々の応答が、物質のバンド構造や幾何学的性質によって理論的に決定されていることが明らかになっているためである（表、文献[1]をもとに作成）。例えば、常伝導状態での輸送現象では、極性半導体の非相反輸送現象から Rashba 分裂を直接求められること[2]、非線形ホール効果が量子幾何テンソルと結びついていること[3]などが挙げられる。また超伝導では、超伝導ダイード効果が近年大きな注目を集めている[4]。一方、光電応答としては、反転対称性の破れた系でのバルク光電流が、ベリール接続に起因するシフト電流機構で理解できるとして、数多く報告されるようになっている[5]。

非相反輸送現象は、このように広い意味でのバンドパラメータ、あるいはバンドの幾何学的性質で支配されるだけでなく、物質のトポロジカルな性質も反映する。本講演では、このような非相反応答によって検出される特異な表面伝導について、①面内反強磁性体 2 層 CrSBr、②ワイル半金属 TaAs を例に説明する。

① 空間反転対称性と時間反転性が破れているが、その組み合わせ操作に対しては対称性が保たれている系は PT 対称性を有すると言われる。理論的には、このような系では磁場中のバルク光電流は純粋に量子計量で記述される

磁気インジェクション電流(MIC)に支配されると予想されている。これはシフト電流がベリール接続によって記述されるのと対照的で、実験的検証が求められていたが、候補物質の少なさのためいまだに実現されていない。我々は PT 対称性を有する CrSBr の 2 層系で PT 対称性が保たれていることに着目し、光電流の観測を行った結果、反強磁性層において MIC と解釈できる明確な信号を見出した。しかも驚くべきことに、面内磁場印加により誘起される強制強磁性相において、2 層試料の上側の層に流れる光電流と下側の層に流れる光電流が逆方向であることを見出した。

② ワイル半金属はその表面状態が Fermi-arc と呼ばれる特異なトポロジカル表面状態を有する。Fermi-arc の存在は ARPES 実験によって明らかにされているが、その輸送現象を明確にとらえた例は少ない。本研究では TaAs に着目し、収束イオンビーム(FIB)加工によって裏と表の伝導性が独立に測定できるデバイスを作製した。これを用いて磁場中非相反輸送を測定したところ、非相反性の符号が表裏で反転することを見出した。しかも通常の磁場 B に比例するのみならず B^3 以上の高次の非線形性が強い非相反伝導であることが明らかになった。この結果は、ワイル半金属試料の表面では裏と表の整流性が逆になっていることを示し、非相反測定はバルクの高い電導性の中で整流性のある表面伝導を敏感に取り出せていることがわかる。

[1] Y. Tokura & N. Nagaosa, Nat. Comm. (2018), [2] T. Ideue et al., Nat. Phys. (2017). {3} Q. Ma et al., Nat. Rev. Phys (2023). {4} F. Ando et al., Nature (2019). [5] Y. J. Zhang et al., Nature (2019).

時間反転対称性	非線形応答
あり	PN接合（並進対称性なし） シフト電流 非線形ホール効果
なし	非相反輸送現象 磁気インジェクション電流 超伝導ダイード効果

滑り強誘電体の物理と応用

Physics and Applications of Sliding Ferroelectricity

コーネル大学応用物理工学科¹ 安田憲司¹

Cornell University, Applied and Engineering Physics, Kenji Yasuda

E-mail: kenji.yasuda@cornell.edu

原子層レベルの強誘電体材料は、不揮発性メモリとして極めて重要な応用可能性を持つが、原子スケール厚みにおいては脱分極効果によって、通常は不安定となる。この課題を克服するために、我々はファンデルワールスヘテロ構造を用いて人工的に強誘電体を設計する新たな手法を開発した。本手法では、二層ホウ素窒化物[1]や二層遷移金属ダイカルコゲナイド[2]といった非強誘電性材料を用い、これらの積層角を調整することで強誘電性を誘起することができる。このアプローチにより、室温で動作可能な原子層レベルの強誘電体を実現し、不揮発性メモリとして機能させることが可能となった。

スライディング強誘電体を用いた強誘電体電界効果トランジスタ (FeFET) は、極めて高速かつ高耐久のスイッチング動作を示し、従来の強誘電体の限界を超える性能を発揮する[3]。この優れた性能は、ファンデルワールス層間の滑り運動によって分極が反転するという、滑り強誘電性と呼ばれる特異な機構に起因する。

さらに、二層ホウ素窒化物に捻り角を導入することで、モアレ強誘電体と呼ばれる新たな強誘電状態が得られる。これは、面内で交互に分極が変化する周期構造を持つ状態であり、モアレ強誘電体を基板として用いることで、2次元物質のバンド構造を運動量空間において変調する新たな手法についても議論する[4]。

- [1] K. Yasuda *et al.*, Science **372**, 1458–1462 (2021).
- [2] X. Wang, K. Yasuda *et al.*, Nat. Nanotech. **17**, 367–371 (2022).
- [3] K. Yasuda *et al.*, Science **385**, 53–56 (2024).
- [4] X. Wang ... K. Yasuda *et al.*, Nat. Commun. **16**, 178 (2025).

ツイストグラフェンの超流動スティッフネス測定と量子幾何効果

Superfluid Stiffness in Twisted Graphene and its Quantum Geometric Effect

田中未羽子^{A,B}, Joel I-J. Wang^A, Thao Dinh^A, Daniel Rodan-Legrain^A, Sameia Zaman^A,
Max Hays^A, Kenji Watanabe^C, Takashi Taniguchi^C, Pablo Jarillo-Herrero^A, William D.
Oliver^A

^AResearch Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology,

^BInstitute for Solid State Physics, the University of Tokyo,

^CResearch Center for Functional Materials, National Institute for Materials Science

E-mail: miukot@issp.u-tokyo.ac.jp

超伝導体の性質を特徴づける最も重要な物理量の一つが位相勾配と電流の比例係数である超流動スティッフネスである。バルク超伝導体ではトンネルダイオード共振器、3次元マイクロ波キャビティなどの測定手法が確立されているが原子層超伝導体での測定は困難であった。

我々は2次元マイクロ波共振器に原子層超伝導体を結合することで魔法角ツイスト2層グラフェンの超流動スティッフネスを測定した[1]。

魔法角ツイスト2層グラフェンの超伝導相は、磁性相に近接した超伝導相、大きい TC/TF、V字型の状態密度[2-5]など非従来型超伝導を示唆するデータが報告されており注目を集めている。加えてバンド分散から決まる超流動スティッフネスを仮定した転移温度や臨界電流に対して、実際の転移温度や臨界電流が有意に大きいことが指摘されてきた[6]。この理由として、従来議論されてきたバンド分散で決まる超流動スティッフネス項に加えて量子計量で決まる超流動スティッフネス項が存在し[7]、ツイストグラフェンでこれが支配的になり得ることが理論的に指摘されてきた[8-10]。

我々は超流動スティッフネスを直接測定することで、その値が予想される従来項より10倍程度大きいことを見出した。また、超流動スティッフネスの温度依存性、バイアス電流依存性などを調べ、超伝導ギャップが異方的であることを示唆する結果を得た。

[1] M. Tanaka, et al. Nature 638, 99 (2025). [2] Y. Cao, et al. Nature 556, 43 (2018). [3] L. Balents, et al. Nat. Phys. 16, 725 (2020). [4] E. Andrei, et al. Nat. Mat. 19, 1265 (2020). [5] M. Oh, et al. Nature 600, 240 (2021). [6] H. Tian, et al. Nature 614, 440 (2023). [7] S. Peotta, et al. Nat. Comm. 6, 8944 (2015). [8] X. Hu, et al. PRL 123, 237002 (2019). [9] A. Julku, et al. PEB 101, 060505 (2020). [10] F. Xie, et al. PRL 124, 167002 (2020)

テラヘルツエレクトロニクスによる グラフェンプラズモンのオンチップ転送

On-chip Transfer of Graphene Plasmon Using Terahertz Electronics

NTT 物性科学基礎研究所, 吉岡 克将

NTT Basic Research Laboratories, Katsumasa Yoshioka

E-mail: katsumasa.yoshioka@ntt.com

グラフェンプラズモンは、テラヘルツ (THz) 以上の電磁場に対して強い閉じ込め効果を有し、かつ電荷密度の変調による制御性の高さと低損失性を併せ持っていることから、次世代の情報担体として有力視され積極的に研究されている[1]。実際にグラフェンプラズモンを使って情報を伝送するには、動的に制御された信号を発生させ、伝搬した信号を遠隔地で測定し振幅と位相を読み出す必要がある。しかし、光を使った既存の実験手法は遠方場の吸収測定もしくは近接場の干渉測定に限られており、情報伝送に必要な要請を満たすことができない。そこで我々は、オンチップ THz 分光法[2,3]を応用し、電気的にグラフェンプラズモンを発生・伝搬制御・実時間計測することに成功した[4]のでここに報告する。

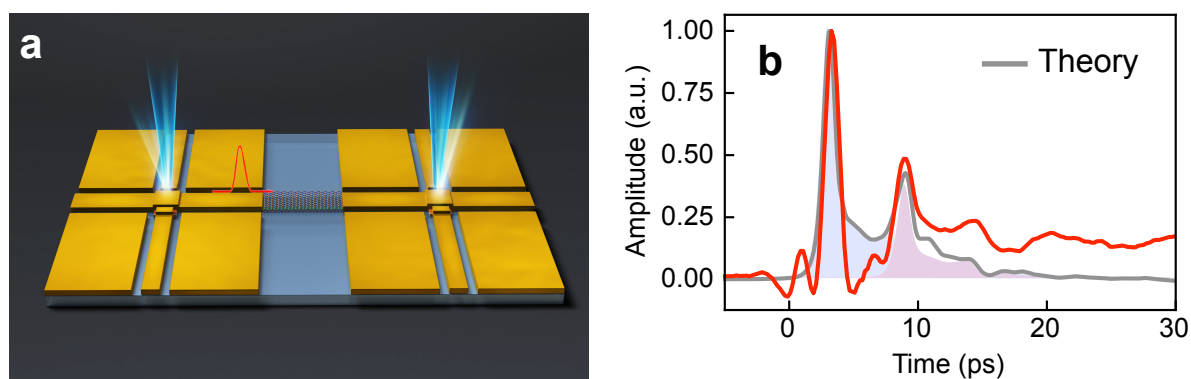


Fig. 1. (a): Schematic of experimental setup. **(b):** Time-domain waveform of graphene plasmon wave packet. Red trace shows the experimental waveform, while gray trace shows the theoretical waveform.

図 1 (a)に実験の概略図を示す。hBN 封止グラフェンをコプレーナ導波路に挿入することで光伝導スイッチにより発生した約 1 ピコ秒の電気パルスをグラフェンに印加し、反対側の電極からその波形をサブピコ秒の時間分解能で読み出せる構成となっている。さらに、グラフェンに対して金属のトップゲートを作製することで電荷密度を制御できるようにした。測定温度は 4 K である。図 1 (b)に 12 μm の距離伝搬した音響グラフェンプラズモンの実時間波形を示す。この波束のパルス幅は 1.2 ピコ秒であり、電気的に発生されたプラズモン波束としてはこれまでで最短である。さらに、Telegrapher 方程式[5]に基づいた理論を用いてプラズモン波形の再現にも成功した。この結果、伝搬モード、速度、波束サイズといったプラズモン波束の詳細を理解することに成功した。推定される伝搬長は 21 μm 、波束のサイズは 4.0 μm であり、5 つ分の波束をコヒーレントに転送できることになる。さらに、ゲート電圧によって波束の速度と振幅を制御することに成功した。

THz エレクトロニクスを用いた本手法は、グラフェンに限らず、さまざまなファンデルワールスヘテロ構造におけるポラリトン研究の進展を加速し、オンチップでの超高速信号制御の新しい可能性を切り拓くものと期待できる。

[1] D. N. Basov *et al.*, *Science* **354**, aag1992 (2016). [2] K. Yoshioka *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **117**, 161103 (2020). [3] K. Yoshioka *et al.*, *Nat. Photonics* **16**, 718 (2022). [4] K. Yoshioka *et al.*, *Nat. Electronics* **7**, 537 (2024). [5] K. Sasaki and N. Kumada, *Phys. Rev. B* **90**, 035449 (2014).

本研究は JSPS 科研費 JP24H00828 の助成を受けたものです。

複数層遷移金属ダイカルコゲナイドを用いた量子井戸エレクトロニクス

Subband electronics based on few-layer transition metal dichalcogenides

東大生研¹, 科学大フロンティア研², 東大理³, NIMS⁴, [○]木下 圭¹, 守谷 頼¹, 岡崎 尚太²,

小野寺 桃子¹, 張 奕勁^{1,3}, 渡邊 賢司⁴, 谷口 尚⁴, 笹川 崇男², 町田 友樹¹

IIS Univ. Tokyo¹, MSL Science Tokyo², Dep. Phys., Univ. Tokyo³, NIMS⁴,

[○]Kei Kinoshita¹, Rai Moriya¹, Shota Okazaki², Momoko Onodera¹, Yijin Zhang¹,

Kenji Watanabe³, Takashi Taniguchi³, Takao Sasagawa², and Tomoki Machida¹

E-mail: kkino@iis.u-tokyo.ac.jp

複数層の遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) は、積層方向の量子閉じ込めに起因するサブバンドが価電子帯・伝導帯の両方で形成され、天然の量子井戸と見なされる (図 1a)。本研究ではこのサブバンド特性に注目し、数層 TMD と h -BN によるファンデルワールス (vdW) 二重量子井戸デバイスを実現した (図 1b) [1]。本デバイスでは量子井戸間に電圧を印加するとサブバンド間の共鳴トンネルが生じ、電流-電圧特性に負性微分抵抗 (NDR) を伴う電流ピークが現れる。NDR は高周波発振回路等などへの応用が可能であり、性能評価指標としてピーク・バレー電流比 (PVR) が用いられる (図 1c)。本研究で得られた $PVR=64$ は vdW 共鳴トンネルデバイスとして最大であり、数層 TMD の量子井戸としての高いポテンシャルを示せた[2]。さらに、本デバイスは vdW 積層構造に基づくため層間のツイスト角を設計自由度として導入可能であり、「ツイスト量子井戸」としての展開を期待できる。実際に、ツイスト角の制御によって電流ピーク位置が変調できることも示した (図 1d) [3-5]。本発表では、三重量子井戸デバイスを含む最新の結果も報告する。

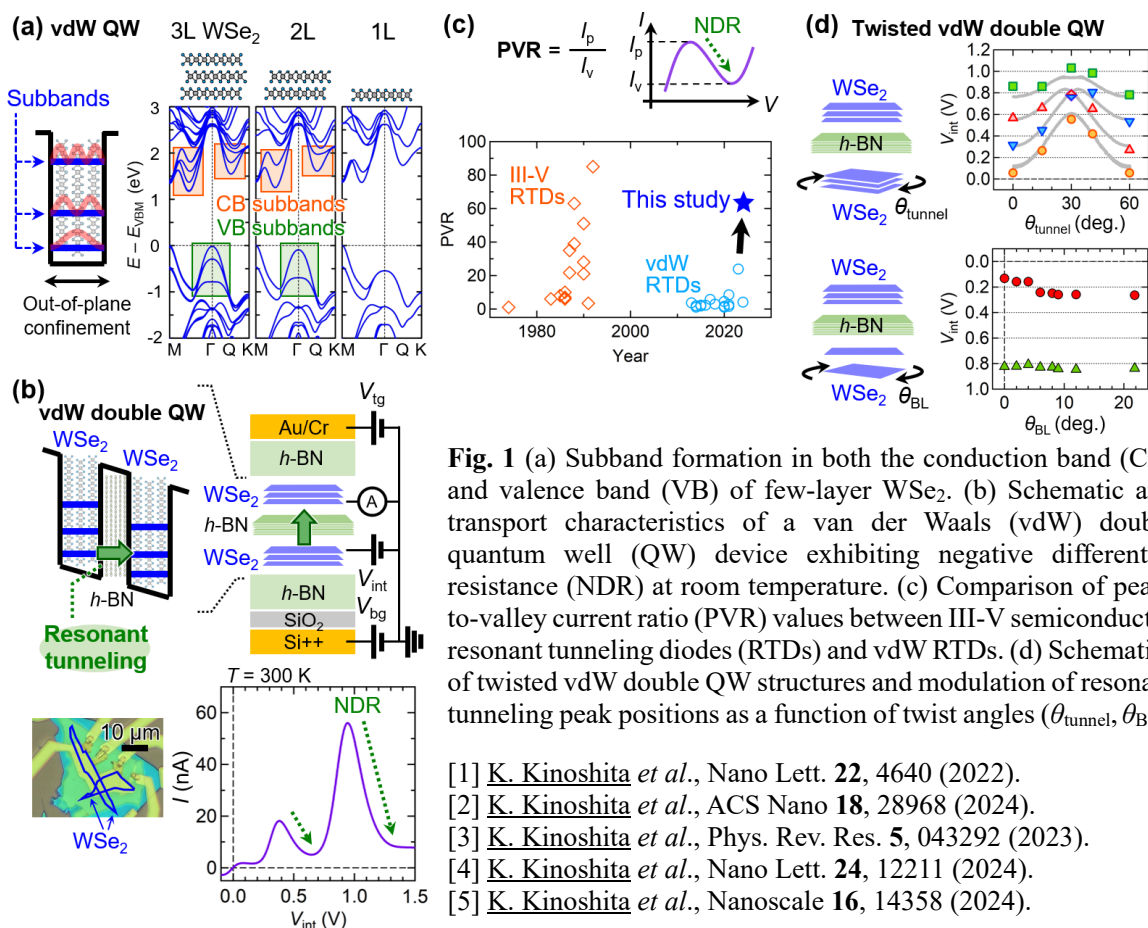


Fig. 1 (a) Subband formation in both the conduction band (CB) and valence band (VB) of few-layer WSe_2 . (b) Schematic and transport characteristics of a van der Waals (vdW) double quantum well (QW) device exhibiting negative differential resistance (NDR) at room temperature. (c) Comparison of peak-to-valley current ratio (PVR) values between III-V semiconductor resonant tunneling diodes (RTDs) and vdW RTDs. (d) Schematics of twisted vdW double QW structures and modulation of resonant tunneling peak positions as a function of twist angles (θ_{tunnel} , θ_{BL}).

- [1] K. Kinoshita *et al.*, Nano Lett. **22**, 4640 (2022).
- [2] K. Kinoshita *et al.*, ACS Nano **18**, 28968 (2024).
- [3] K. Kinoshita *et al.*, Phys. Rev. Res. **5**, 043292 (2023).
- [4] K. Kinoshita *et al.*, Nano Lett. **24**, 12211 (2024).
- [5] K. Kinoshita *et al.*, Nanoscale **16**, 14358 (2024).

動的歪みによる遷移金属ダイカルコゲナイドの超高速界面エンジニアリング

Ultrafast interface engineering of transition metal dichalcogenides by dynamic strain

(慶大理工) °藤井 瞬

Keio Univ. Phys. °Shun Fujii¹,

E-mail: shun.fujii@phys.keio.ac.jp

遷移金属ダイカルコゲナイド(Transition metal dichalcogenide: TMDC)は、単層になると ~ 2 eV 程度のバンドギャップを有する原子層二次元材料であり、室温で強い励起子発光を示すことから近年盛んに研究されている。またその構造は単層で反転対称性が破れており、それに起因したバレー自由度の活用や巨大な非線形光学効果の発現など、次世代の量子エレクトロニクス応用における有望な材料といえる。

TMDC はその究極的な薄さゆえに周囲の環境に敏感にその物性が変化する。その中でも近年、歪みを用いた光物性の制御と活用に注目が集まっている[1,2]。曲げたり、歪みをかけたりすることで六回対称の結晶構造が変化することで様々な物性にも変化が顕れることが知られており、新奇物性の発現や電気・光応答の高度な利用が可能になる。

我々は、歪み制御の手法として表面弾性波 (Surface acoustic wave: SAW) に着目し、TMDC の界面を高速かつ動的に制御する新たなプラットフォームとして研究を行ってきた。SAW は圧電基板に楕型電極を作製することで励起可能な音響波の一種で、数百 MHz から GHz までの高周波かつ数 pm から数百 pm の振幅を有する。また、その伝搬は物体表面に集中するため、二次元材料を人工的かつ動的、高速に変調することができる魅力的な手法となる。一方で、SAW による歪みは高速な進行波であるため、その効果は従来の測定では時間的・空間的に平均化された信号となり、精密な分光は困難であった。

本発表ではそれらの問題点を克服する新たな光計測手法を紹介し、動的歪みを用いた TMDC の励起子物性の可視化に関する最近の実験結果を示す。励起子発光のダイナミクスを時間・空間・スペクトルの多次元的に分解した光計測手法を確立することで、表面弾性波を用いた TMDC の界面エンジニアリングの可能性を拓く。

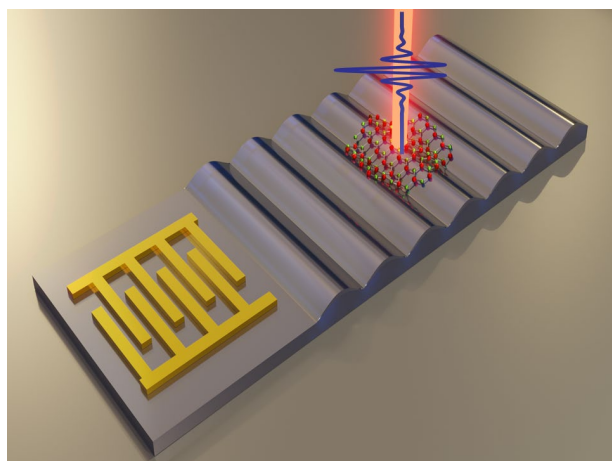


Fig. 1. Schematic illustration of interface engineering of TMDCs by SAWs.

References

1. K. Datta, Z. Lyu, Z. Li, T. Taniguchi, K. Watanabe, and P. B. Deotare, Spatiotemporally controlled room-temperature exciton transport under dynamic strain, *Nat. Photonics* 16, 242 (2022).
2. J. M. Kim, K.-Y. Jeong, S. Kwon, J.-P. So, M. C. Wang, P. Snapp, H.-G. Park, and S. Nam, Strained two-dimensional tungsten diselenide for mechanically tunable exciton transport, *Nat. Commun.* 15, 10847 (2024).

モアレ物質のメソスコピック物理と量子ねじれ顕微鏡

Mesoscopic Physics and Quantum Twisting Microscope in Moire materials

物材機構 岩切秀一

NIMS, Shuichi Iwakiri

E-mail: iwakiri.shuichi@nims.go.jp

魔法角ねじれ二層グラフェン(magic angle twisted bilayer graphene, MATBG)は、フラットバンド構造を有し、超伝導や絶縁相など多彩な強相関量子相を示す。それらの量子相はゲート電圧を通じてキャリア密度を制御することによって切り替え可能であることから、ゲート定義型のジョセフソン接合や SQUID など新奇超伝導デバイスが実現されてきた。一方で、Little-Parks 振動や Aharonov-Bohm 振動など、量子干渉効果については、現在まで十分な研究が行われていない。こうした干渉効果は、超伝導ペア対称性やフラットバンド電子のダイナミクスを実験的に明らかにする上でも重要な手段となる。

本講演では、まず、MATBG を用いたリング型デバイスの作製および、そこで観測された量子干渉効果について報告する。本デバイスは、MATBG 上に複数の微細ゲート電極をパターンニングすることで、静電的にリング構造を誘導するもの（電界効果リング[1]）である。リング型のゲート電極によりリング直下のキャリア密度を調整し、超伝導リングにおける Little-Parks 振動および、常伝導リングにおける Aharonov-Bohm 振動が観測され、それぞれにおける電子のコヒーレンス長から散乱機構を議論することができた[2,3]。

さらに本講演の後半では、空間分解能とねじれ角分解能を兼ね備えた新たな計測手法である「量子ねじれ顕微鏡」について紹介する[4]。これは、二次元デバイスを取り付けたプローブ顕微鏡探針を用い、局所的なねじれ角の変調とそれに伴う輸送応答を同時に測定するものである。これにより、従来の輸送測定では見えなかった、モアレ超格子のポテンシャル構造やバンド構造・準粒子スペクトルの精密測定が可能となる。

[1] S. Iwakiri et al., Nano Lett. (2022).

[2] S. Iwakiri et al., Nat. Commun. (2024).

[3] E. Portoles and S. Iwakiri et al., Nat. Nano. (2023).

[4] A. Inbar et al., Nature 614, 682–687 (2023).

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演): インフォマティクス応用の未来を切り拓くー世界動向、分野間連携、そして新たな挑戦ー

[10p-S101-1~6] インフォマティクス応用の未来を切り拓くー世界動向、分野間連携、そして新たな挑戦ー

[10p-S101-1]

マテリアルズインフォマティクスの世界動向

○大淵 真理¹ (1.JST-CRDS)

[10p-S101-2]

r2SCANのエネルギー曲面を学習した汎用機械学習ポテンシャルの作成とその適用事例

○高本 聡¹ (1.PFN)

[10p-S101-3]

日本は自動・自律実験で世界をリードしている: 自信を持って前へ!
～データ・ロボット駆動科学の世界的動向と展望～

○一杉 太郎^{1,2} (1.東京大学理学系研究科、2.東京科学大学物質理工学院)

[10p-S101-4]

計測インフォマティクスの進展と将来展望

○富谷 茂隆¹ (1.奈良先端大)

[10p-S101-5]

応用物理学会のインフォマティクス応用の歩みと分析

○室賀 駿¹ (1.産総研)

[10p-S101-6]

パネルディスカッション

大淵 真理¹、一杉 太郎²、富谷 茂隆³、高本 聡⁴、室賀 駿⁵、○沓掛 健太郎⁶、知京 豊裕⁷、小嗣 真人⁸
(1.JST、2.東大、3.奈良先端大、4.PreferredNetworks、5.産総研、6.名大、7.物材機構、8.理科大)

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：インフォマティクス応用の未来を切り拓くー世界動向、分野間連携、そして新たな挑戦ー

[10p-S101-1~6] インフォマティクス応用の未来を切り拓くー世界動向、分野間連携、そして新たな挑戦ー

[10p-S101-1] マテリアルズインフォマティクスの世界動向

○大淵 真理¹ (1.JST-CRDS)

キーワード：マテリアルズインフォマティクス

国内外の材料研究開発におけるインフォマティクス（AI）技術に関する政策・技術動向を紹介する。

**r2SCANのエネルギー曲面を学習した
汎用機械学習ポテンシャルの作成とその適用事例**
**Development of r2SCAN level machine learning interatomic
potential and its applications**

Title of Extended Abstract of the Japan Society of Applied Physics

株式会社 Preferred Networks¹ ○高本 聡¹

Preferred Networks, Inc.¹, °So Takamoto¹

E-mail: takamoto@preferred.jp

機械学習の活用による汎用原子間ポテンシャルの概念に注目が集まっており[1], 様々な系に適用できる汎用性を維持しつつ第一原理計算よりスケールの大きい分子動力学計算を行うことのできる技術として近年多くの研究機関で開発が進められている. 著者らが開発しているニューラルネットワークポテンシャルPFP [2,3]は, 個別の解析対象ごとにファインチューニングを行うことなく, 単一のモデルで任意の元素の組み合わせを扱うことのできる汎用性を特徴としている. 直近のバージョンであるPFP v7はHからCmまでの96元素の任意の組み合わせを扱うことができ, 分子, 結晶, 表面などの系で精度が検証されている.

機械学習モデルの回帰精度が向上するにつれ, さらなる精度向上のためにはデータセットの作成に使われるDFT計算自体の精度がより重要となってきた. PFPはv7までは広く使われているGGAレベルの汎関数であるPBEにより主要なデータセットを構築してきたが, 物性値の再現性においてPBEでの再現性に依存する課題が明らかになってきた. そこで我々は次バージョンのPFPに向けて, より分子の結合エネルギーや結晶の形成エネルギーを正確に再現することのできるmeta-GGAレベルの汎関数であるr2SCANによるデータセットの構築を開始した.

r2SCANはPBEと比べて計算コストが大幅に高くなるため, 一定の計算時間の中でPBEと全く同じ規模のデータセットを構築することは難しい. そこで, 既存の大規模なPBEデータセットと新しく計算したr2SCANデータセットの両方を使って学習する方針とした. これは機械学習ポテンシャルにおいて複数のDFT計算のデータセットを同時に扱うタスクとなる. 我々は初期のPFPの開発で孤立基底と平面波基底のDFT計算のデータセットの両立が必要となり, 類似の課題に取り組んできた[2]. このとき, それぞれのデータセットに独立なラベルを割り当てて学習を行うことで, 個別のDFT計算の特徴を保持しつつ, 特定のデータセットに含まれていない元素についても異なるデータセットの情報を受け継いで破綻せずに推論を行うといった柔軟なエネルギー曲面の再現が実現した. 今回も類似の方針で複数のデータセットを統合することにより, PBEデータセットで広範囲なエネルギー曲面を学習しつつ, r2SCANデータセットに対応する領域で高い精度を再現することが可能となった.

r2SCANに対応したPFPの初期の成果として, HからBiまでの70の元素のr2SCANのデータセットを学習したPFPを作成した. 得られたモデルは, 物質ごとのファインチューニングなしで結晶形成エネルギーや融点, 液体の密度といった物性を再現することが示された.

References

[1] Ryan Jacobs, et al., Current Opinion in Solid State and Materials Science 35, 101214 (2025).

[2] S. Takamoto, et al., Nat Commun 13, 2991 (2022).

[3] S. Takamoto, et al., Journal of Materiomics 9, 3, 447-454 (2023).

日本は自動・自律実験で世界をリードしている: 自信を持って前へ!

～データ・ロボット駆動科学の世界的動向と展望～

東大理, Science Tokyo 物質理工 一杉 太郎

E-mail: hitosugi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

近年、マテリアル研究(化学、材料、物性研究)において、機械学習およびロボット技術を活用した手法が世界的に急速に発展している[1]。これにより、膨大な実験データの収集・利活用や、人間には困難な実験への挑戦が可能となっている。**研究者が創造性を発揮できる研究環境の構築を進めるとともに、次世代への技術継承や研究人材不足の課題解決が強く望まれている。**

本講演では以下について議論する。

1. 英国、カナダ、米国、中国、韓国などは、巨額を投資している。Microsoft や Google も研究に参画し、生成 AI を活用した材料設計も活発化している。
2. 私自身、この数年間に世界の拠点を複数、訪問した。その結論は、**自動・自律実験(図1の小さなループ)では、日本が世界をリードしている**ということである。日本における理化学機器産業の強さ、ハードウェア構築力の強さが背景にある。今後、**より低コスト化して、だれもが自動・自律実験に取り組めるよう、民主化**が望まれる。
3. しかし、図1の大きなループでは、日本は遅れはじめていると危機感を感じている。この**二つのループを組み合わせていることが重要**である。
4. 日本のマテリアル産業とアカデミアを強化するには、理化学機器企業と研究者が win-win になる→素晴らしい実験装置・システムが生まれる→研究者を刺激→研究が活発化→産業とアカデミアが隆盛、という道筋が考えられる。

2026 年度からはじまる第7期科学技術・イノベーション基本計画に向けて「**マテリアル革新力強化戦略**」が改訂された[2]。そこでも、機械学習とロボットの活用による研究開発手法の革新について力強くうたわれている。政府の支援が今後も続くのは確実である。また、企業の投資も活発化している。それらを踏まえ、科学の発展に貢献するために何をすべきか考えたい。

[1] 一杉太郎編、"マテリアル×機械学習×ロボット" 東京化学同人 (2024)。

[2] 内閣府ホームページ <https://www8.cao.go.jp/cstp/material/material.html>

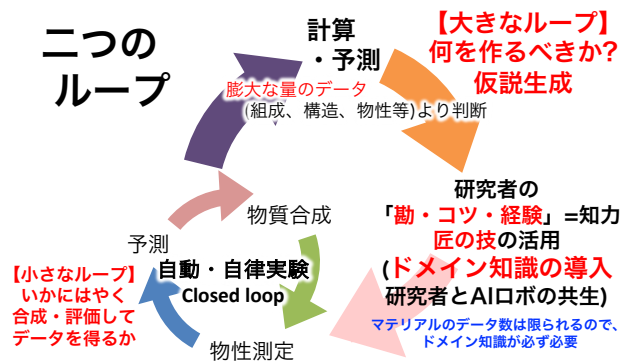


図1 小さなループ(自動・自律実験)と大きなループ (仮説生成と研究者の勘・コツ・経験の融合)

計測インフォマティクスの進展と将来展望

Progress and Outlook of Metrology Informatics

奈良先端大¹, 科学大², ○富谷 茂隆^{1,2}

NAIST.¹, Science Tokyo², °Shigetaka Tomiya^{1,2}

E-mail: s.tomiya@dsc.naist.jp, tomiya.s.952f@m.isct.ac.jp

半導体、クリーンエネルギー、創薬といった分野は、持続可能な社会の構築、人々の生活の質の向上、そして経済的成長を支える基盤である。これらの分野における革新的な機能材料・デバイスへのニーズはかつてないほど高まっており、その開発には、従来の労働集約的・経験依存型の研究スタイルから、自律的かつデータ駆動型の研究パラダイムへの転換が求められている。

この研究パラダイムの転換には、材料・デバイス設計、合成・プロセス、特性評価、データ解析、意志決定といった研究サイクルの各段階を密接に連携させる必要がある。その中でも、評価・計測とそのデータ処理技術は、サイクル全体を回す中核的役割を担っている。

近年、X線回折、フーリエ変換赤外分光、ラマン分光、核磁気共鳴、質量分析などの分光技術や、走査電子顕微鏡、透過電子顕微鏡、原子間力顕微鏡などの顕微鏡技術の発展により、取得される計測データは指数関数的に増加している。これに伴い、以下のような課題が顕在化している：

- 1) 複雑かつ大規模なデータの解析に多大な時間を要し、迅速な処理技術が求められている。
- 2) 人的介入を最小化しつつ、高精度な解析を実現する信頼性の高い自動解析手法が必要である。
- 3) 大量データから科学的に意味のある情報を抽出する技術の確立が急務である。
- 4) 異なる計測手法を統合し、相互に補完するマルチモーダル解析の導入が必要である。
- 5) 計測・分析データのシステムティックな蓄積とそれを活用するための基盤整備が必要である。

これらの課題解決には、データ科学の導入が不可欠であり、計測・分析分野とデータ科学の融合が急速に進みつつある。その端緒ともいえるのが、1970年代にスウェーデンの Wold 教授が提唱した「ケモメトリクス」である。これは、スペクトルデータの多変量解析に端を発し、近年の計算機能力と機械学習技術の進展とともに応用範囲を広げ、「計測インフォマティクス」として大きく発展している。

本講演では、材料・デバイス研究開発を支える「計測インフォマティクス」のこれまでの歩みを振り返るとともに、今後の展望とその可能性について議論する。

シンポジウム | シンポジウム(口頭講演)：インフォマティクス応用の未来を切り拓くー世界動向、分野間連携、そして新たな挑戦ー

[10p-S101-1~6] インフォマティクス応用の未来を切り拓くー世界動向、分野間連携、そして新たな挑戦ー

[10p-S101-5] 応用物理学会のインフォマティクス応用の歩みと分析

○室賀 駿¹ (1.産総研)

キーワード：インフォマティクス、機械学習

データ科学を駆使した材料、プロセス、計測分野の変革は凄まじい勢いを見せている。応用物理学会におけるインフォマティクス応用における発表も活発化している中で、本発表ではその歩みの振り返るとともに、研究トレンドと今後の課題について議論する。データ科学を駆使した材料、プロセス、計測分野の変革は凄まじい勢いを見せている。応用物理学会におけるインフォマティクス応用における発表も活発化している中で、本発表ではその歩みの振り返るとともに、研究トレンドと今後の課題について議論する。