

歩行安定性と衝撃吸収性能を両立する メカニカルメタマテリアルの数値解析と実験的評価

Numerical analysis and experimental evaluation of mechanical metamaterials achieving both walking stability and shock absorption

松本大河¹⁾西口浩司²⁾下村明司³⁾一木昭洋⁴⁾横井正人⁵⁾伊藤麻由美⁶⁾干場大也⁷⁾
加藤準治⁸⁾

Taiga Matsumoto, Koji Nishiguchi, Hiroshi Shimomura, Akihiro Ikki, Masato Yokoi, Mayumi Ito,
Hiroya Hoshiba and Junji Kato

¹⁾名古屋大学工学研究科 (〒 464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町, E-mail: matsumoto.taiga.w3@s.mail.nagoya-u.ac.jp)

²⁾博士(工学) 名古屋大学工学研究科 准教授, 理化学研究所 計算科学研究センター AI for Science プラットフォーム部門
上級研究員 (〒 103-0027 東京都中央区日本橋 1-4-1 日本橋一丁目三井ビルディング 15 階,
E-mail: nishiguchi.koji.r9@f.mail.nagoya-u.ac.jp)

³⁾株式会社 Magic Shields (〒 430-0933 静岡県浜松市中央区鍛冶町 100-1 ザザシティ浜松中央館 B1F・FUSE,
E-mail: hiroshi.shimomura@magicshields.co.jp)

⁴⁾株式会社 Magic Shields (E-mail: akihiro.ikki@magicshields.co.jp)

⁵⁾株式会社 Magic Shields (E-mail: masato.yokoi@magicshields.co.jp)

⁶⁾株式会社 Magic Shields (E-mail: mayumi.itou@magicshields.co.jp)

⁷⁾博士(工学) 名古屋大学工学研究科 助教 (E-mail: hoshiba.hiroya.y6@f.mail.nagoya-u.ac.jp)

⁸⁾博士(工学) 名古屋大学工学研究科 教授 (E-mail: kato.junji.i5@f.mail.nagoya-u.ac.jp)

Mechanical metamaterials that ensure both walking stability and shock absorption are gaining attention for reducing fracture risk in the elderly. However, conventional materials struggle to achieve both properties simultaneously. This study evaluates a practical-sized shock-absorbing metamaterial using numerical analysis based on a viscoelastic-hyperelastic model. Experimental comparisons assess the existing design's properties, while multiple novel structures are systematically analyzed. Key findings are presented.

Key Words : mechanical metamaterials, walking stability, shock absorption

1. 緒言

高齢化社会の進展に伴い、高齢者の転倒による骨折は深刻な社会問題となっている [1,3]。転倒予防の重要性が広く認識され [4]、転倒時の衝撃を効果的に吸収する技術の開発が求められている。しかし、従来の衝撃吸収材料では、衝撃吸収性能の向上に伴い剛性が低下し、歩行時の安定性が損なわれるという課題がある [5,6]。したがって、歩行時の安定性を維持しながら、転倒時の衝撃を効率的に吸収できる材料の開発が不可欠である。

近年、メカニカルメタマテリアル（以下、「MM」）がこの課題を解決する有望な手段として注目されている。MM は、従来の材料では実現困難な特性を持つ人工的な構造体であり、ユニットセルの幾何学的設計を最適化し周期的に配置することで、高効率なエネルギー吸収特性を実現できる。

MM の特性を活かし、通常荷重下では高い剛性を維持しつつ、転倒時の衝撃荷重を効果的に分散する床材が開発されている。竹内ら [7] は、粘弾性体を用いた衝撃吸収構造の数値解析手法を提案し、シミュレーションによる検証を行っている。しかし、異なる設計の衝撃吸収性能の比較や、実験データとの高精度な対応関係の検証は依然として課題である。

本研究では、MM を用いた衝撃吸収構造に対し数値解析を実施し、実験との比較検証を行う。さらに、複数の構造について力学的性能を多角的に評価する。

2. 衝撃吸収構造の設計

(1) 求められる力学的性能

歩行時の安定性と転倒時の衝撃吸収性を兼ね備えた MM を設計するにあたり、求められる力学的性能について説明する。

まず、歩行時の安定性を確保するには、初期の剛性を高く保つ必要があり、荷重変位曲線において、初期傾斜が大きいことが重要である。

次に、転倒時の衝撃吸収性能は、荷重変位曲線における初期ピーク荷重とその後の平坦領域によって評価する。まず、初期ピーク荷重が小さいことで転倒時の瞬間的な衝撃を緩和することができる。

次に、初期ピーク荷重後に荷重の増加がない、もしくは減少しながら変位のみが急激に増加する領域を、本研究では「平坦領域」とし、平坦領域終了までの荷重変位曲線化の面積を衝撃吸収エネルギーと定義する。平坦領域終了時の変位量が大きいことや、衝撃吸収エネルギーが大きいことも重要である。

(2) 各構造の設計思想

本研究で比較検証する2種類のMM構造を示す。

a) Type A

Type Aは竹内ら[7]がシミュレーションした構造であり、ユニット寸法は縦・横30mm、高さ20mmである。ユニット中央部に円柱部材を配置し、この構造により初期剛性を高める。さらに、内部の空気圧の上昇による衝撃吸収を期待した構造である。

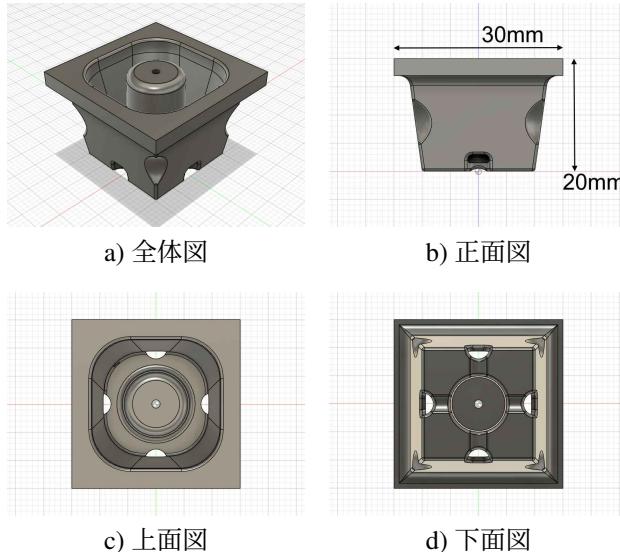


図-1 Type A のイメージ図

b) Type B

Type Bはユニット寸法が縦・横15mm、高さ10mmであり、Type Aと比較し厚さが1/2となった軽量化や床材としての実用化に向けた改良モデルである。ユニット四隅に配置した中央にくぼみがあるL字柱により、座屈制御を行う。また、底面形状により柱部材がユニット中央にずれることで変形することを防ぎ、初期剛性を高めている。

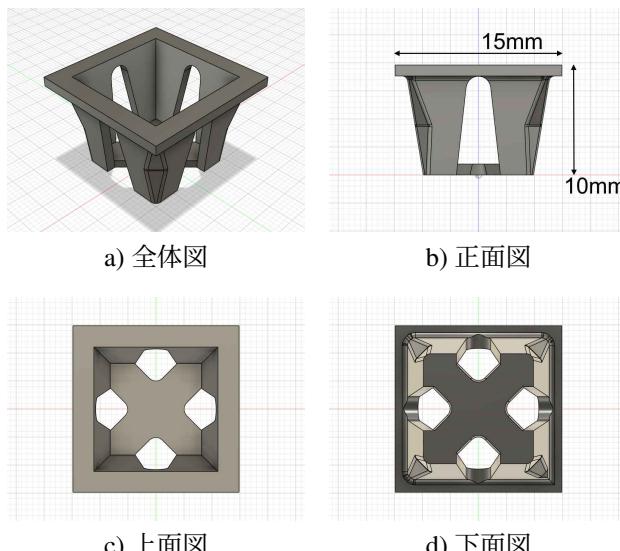


図-2 Type B のイメージ図

3. 検証方法

複雑な大変形が予想されるMMの衝撃吸収性能を検証するにあたり、本研究では竹内ら[7]が提案した、固体部分に粘性・超弾性体を適用したオイラー型構造解析を採用する。オイラー型構造解析は大変形に対する数値的強靭性や、メッシュ生成の容易性、高い並列化効率といった特徴がある。

(1) 基礎方程式

a) 空間平均化方程式

岡澤ら[8]や西口ら[9,10]により提案された空間平均化方程式を用いる。非圧縮性を仮定し、以下に支配方程式を示す。

$$\nabla \cdot v_{\text{mix}} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_{\text{mix}} \left\{ \frac{\partial v_{\text{mix}}}{\partial t} + (v_{\text{mix}} \cdot \nabla) v_{\text{mix}} \right\} = \nabla \cdot \sigma_{\text{mix}} + \rho_{\text{mix}} b \quad (2)$$

ここで、混合物の物理量は体積率 ϕ_i を用いて以下のように定義される。

$$v_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \phi_i \bar{v}_i \quad (3)$$

$$\rho_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \phi_i \bar{\sigma}_i \quad (5)$$

b) 構成方程式

本研究では、固体の構成方程式としてSimoの粘性・超弾性モデル[11]を採用し、Cauchy応力を次のように加算分解する。

$$\sigma = \sigma_{\text{iso}} + \sigma_{\text{vol}} \quad (6)$$

体積変化項 σ_{vol} は非圧縮性条件より決定され、等積変化項 σ_{iso} は次式で定式化される。

$$\sigma_{\text{iso}} = \sigma_{\text{iso}0} - \sum_{i=1}^m Q_i \quad (7)$$

$$\frac{DQ_i}{Dt} + \frac{1}{\tau_i} Q_i = \frac{g_i}{\tau_i} \sigma_{\text{iso}0} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (8)$$

ここで、 $\sigma_{\text{iso}0}$ は超弾性体構成則に従い、 Q_i は粘性・超弾性ユニットの応力であり、 τ_i は緩和時間、 g_i は実験的パラメータである。

流体については、非圧縮性Newton流体の構成方程式を用いる。

$$\sigma = 2\mu D - pI \quad (9)$$

ここで、 μ は粘性係数、 D は変形速度テンソル、 p は圧力、 κ は体積粘性率である。

(2) 実験方法

本研究では、数値解析手法の妥当性を検証する目的で圧縮試験を実施した。本試験では、現行構造であるType Bを試験サンプルとして使用し、押し治具を2.4m/sの速度で圧縮することで、その衝撃吸収性能を評価した。以下に、圧縮試験の詳細を示す。

表-1 荷重ストローク試験における各条件

試験装置	
圧縮装置	津島製作所 高速衝撃試験機 HITS-PX
押し治具	Φ 70 圧盤
試験条件	
サンプル	Type B (150mm × 150mm × 10mm)
試験速度	2.4 m/s
設置方法	
押し治具間	両面テープにより固着条件
圧板間	潤滑油により滑り条件

4. 結果と考察

(1) 実験結果との比較

本節では、Type B を用いて実験結果と計算結果についての比較を行う。数値解析条件は、表-1、表-2 に示し、解析領域は縦・横 204.8mm、高さ 25mm、最小セルサイズは 0.2mm、総セル数約 8500 万とした。時間刻み Δt は 5ns に設定し、計算には理化学研究所のスーパーコンピュータ「富岳」により OpenMP と MPI によるハイブリッド並列計算を実施した。

表-2 解析に用いる物性値

Solid: visco Hyperelastic solid	
Mass density ρ_s [kg/m ³]	1.0×10^3
Young's modulus E [Pa]	5.4957×10^8
Instantaneous shear modulus G_0 [Pa]	1.18×10^3
Fluid: incompressible Newtonian fluid	
Mass density ρ_f [kg/m ³]	1.2
Viscosity μ_f [Pa · s]	1.8×10^{-5}

図-3 に実験と数値解析によって得られた荷重変位曲線を示す。これより、実験結果と計算結果の間で荷重変位曲線が完全には一致していないことが確認された。この相違は、既存研究においても同様の課題として指摘されており [12,13]、特に衝撃試験における高速な変位や大変形時の材料の非線形挙動のモデル化が困難であることが原因として挙げられる。

本研究では、特に初期ピーク荷重において実験結果と計算結果に明確な違いが見られた。この原因として、解析に使用したオイラー型構造解析において、変形体が自己接触する際に完全に固着してしまい、実際の摩擦や滑りが再現されないという課題が存在する。このため、初期ピーク荷重が実際よりも大きく観測されたと考えられる。また、底面では完全滑り条件を適応しているが、変形体の浮き上がりが全く観察できないことから、実際に想定される荷重分散や、変形が抑制されている可能性が考えられる。

しかし、初期ピーク荷重後の荷重低下については、実験結果と数値解析結果で類似した挙動が確認された。また、初期傾斜に関しては高い一致を示しており、初期剛性の性能評価には妥当性があると判断できる。一方で、初期ピーク荷重については、解析結果が実験値より過大に評価される傾向があるため、これを考慮したうえで次節で論じる各構造の比較検証を行う必要がある。

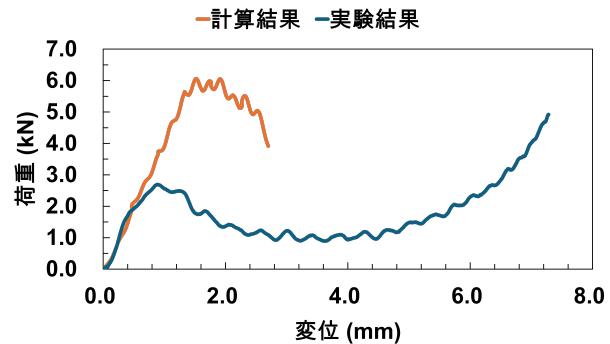


図-3 計算結果と実験結果の比較

(2) 各構造の力学的性能検証

本節では Type A と Type B の力学的性能を数値解析により比較検証する。Type A においては 5×5 、Type B においては 10×10 のユニットを周期的に配置し、縦・横 15cm の MM 構造とした。前節とは異なり、剛体の圧縮速度は 5m/s とする。

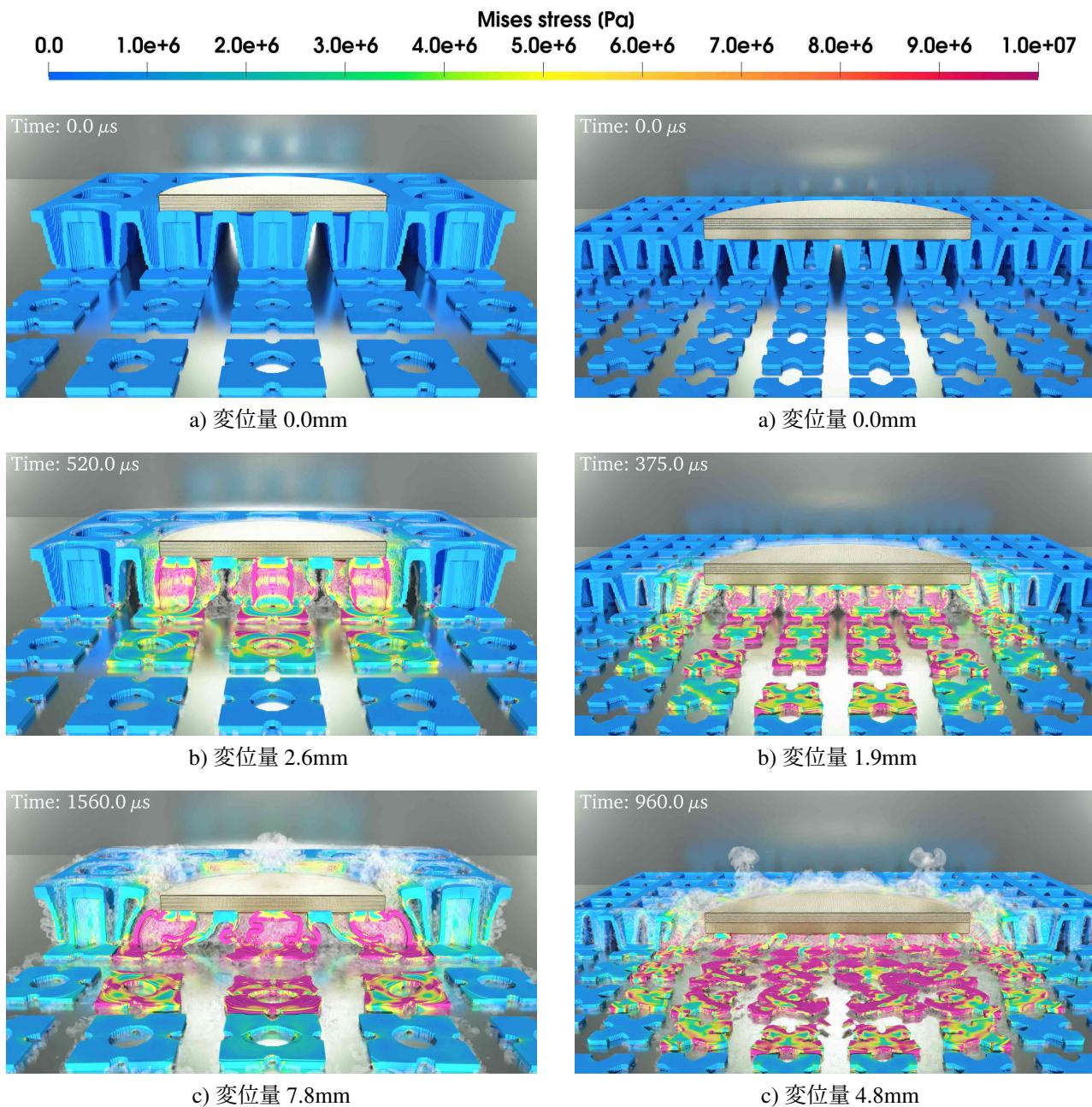
a) 変形挙動の比較

各 MM 構造の断面における変形挙動とミーゼス応力を図-4、図-5 に示す。また、それぞれ変位量 0.0mm、初期ピーク荷重時点、平坦領域終了時点である。

初期ピーク荷重時点では、中心剛体下部に位置する各ユニットの柱部材に応力が集中し、すべての構造において座屈が発生することが確認された。特に、構造形状の違いによって応力集中の分布や座屈の発生箇所が異なり、それが衝撃吸収メカニズムに影響を及ぼしている。このことは、異なる形状を持つメカニカルメタマテリアルの衝撃応答特性を理解する上で重要な知見であり、今後の設計最適化において考慮すべき要素である。

Type A では、ユニット中央部の円柱部材の垂直部分に応力が特に集中し、その周囲の斜材に座屈が生じている。このことから、初期剛性の主要な要因として円柱部材が大きく寄与していると考えられる。円柱部材が高い剛性を持つことで、初期荷重に対して安定した支持が可能となるが、その結果として局所的な応力集中が生じやすくなる点が課題として挙げられる。また、斜材の座屈に伴い荷重伝達が変化し、構造全体が衝撃吸収段階へスムーズに移行する挙動が観察された。この段階では、エネルギーの散逸が円柱部材の塑性変形および斜材の座屈によって進行し、荷重支持能力が徐々に低下することが確認された。これにより、Type A の構造は比較的穏やかな衝撃吸収特性を示し、エネルギーの吸収が局所的な変形に依存することが明らかになった。

Type B では、L 字柱の座屈に加え、底面が大きく移動し始める様子が確認された。特に、底面の変形が顕著であり、これによって構造全体が不安定化し、衝撃吸収に寄与する負の剛性挙動 [14] が発現したと考えられる。負の剛性挙動とは、変形が進行するにつれて荷重が低下する特性を指し、衝撃エネルギーを効果的に吸収するメカニカルメタマテリアルにおいて頻繁に観察される現象である。本研究においても、荷重-変位曲線上でこの特性が確認され、負の剛性領域における荷

**図-4 Type A の断面図****図-5 Type B の断面図**

重減少が衝撃吸収効果に寄与していることが示唆された。特に、Type B の構造では底面の移動によるエネルギー吸収が大きな役割を果たし、局所的な座屈のみならず、全体の変形挙動が衝撃緩和に寄与していることが分かった。このような挙動は、衝撃吸収構造の最適化において重要な指標となりうる。

平坦領域終了時点では、すべての構造において大変形が生じ、内部の空気流動が観察された。特に底面の移動量には構造ごとの差異が見られ、衝撃吸収メカニズムに影響を与えている。Type A では底面の変形が小さく、エネルギー吸収は主に内部の変形と座屈を通じて進行する。そのため、衝撃荷重が局所的に集中する傾向があり、エネルギー散逸の効率は比較的低い。一方、Type B では底面の変形が大きく、負の剛性挙動と連動して衝撃が吸収されることが確認された。これにより、

衝撃エネルギーがより効果的に分散され、全体として高いエネルギー吸収効率を示すことが明らかになった。本研究の結果から、構造の形状と変形メカニズムの関係を詳細に解析することで、さらなる最適化の可能性が示唆される。

次に、断面の圧力分布を可視化した結果を図-6、図-7 に示す。

Type A では、Type B と比較して圧力分布に顕著な違いが見られた。初期ピーク荷重時点では、中央の円柱部材周辺で圧力が特に高くなっている。これは内部の空気圧の増加による衝撃吸収が生じている可能性を示している。特に、空気が急激に圧縮されることで局所的な圧力上昇が発生し、それが構造的な衝撃吸収に附加的に寄与していると考えられる。このような気体圧縮によるメカニズムは、構造の弾塑性変形とは異なる

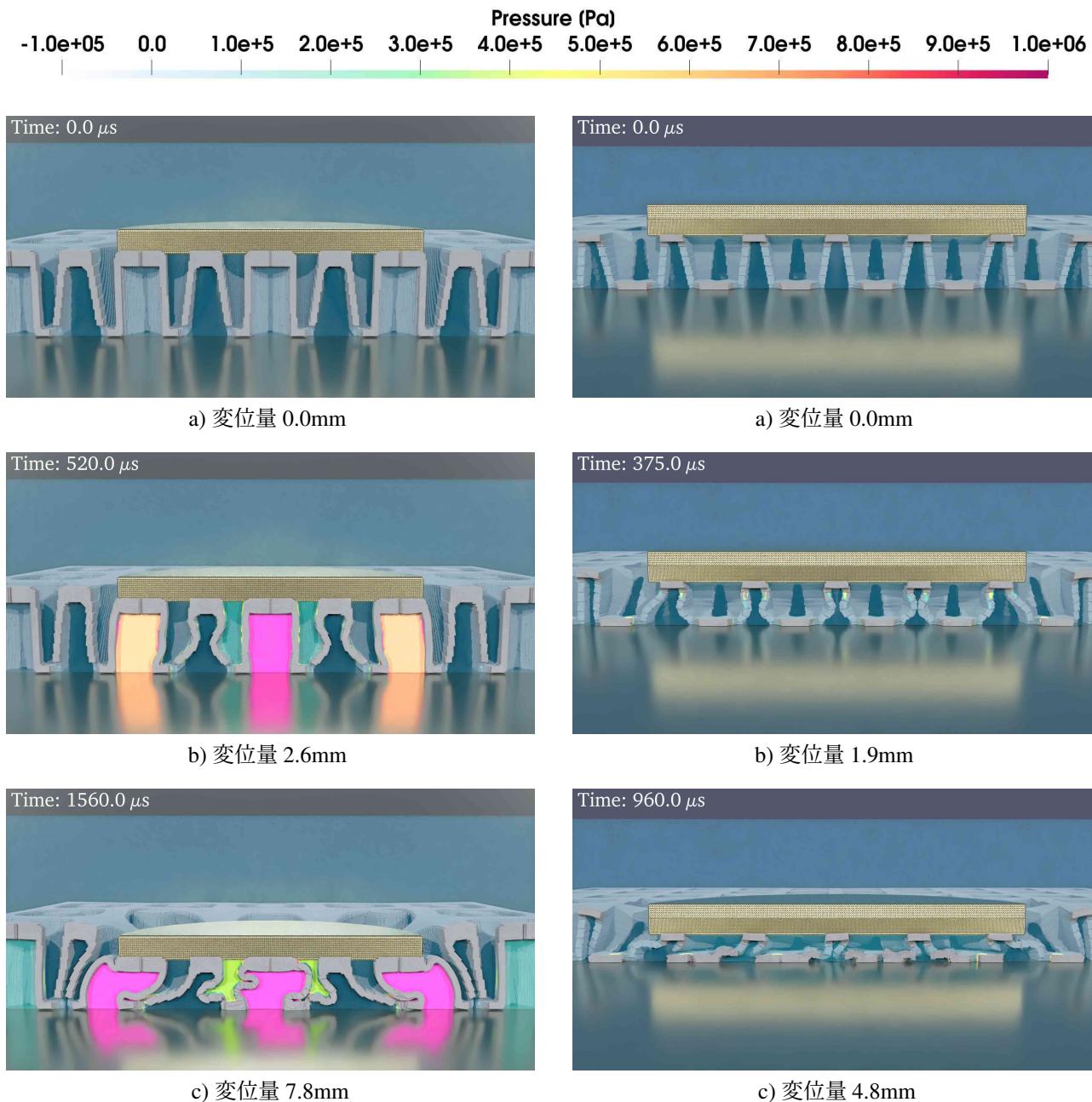


図-6 Type A の圧力場

形でエネルギーを吸収するため、複合的な衝撃吸収機構として注目される。

一方、Type B では圧力の増加はほとんど見られず、構造内の空気流動や圧縮は限定的であることが示された。そのため、衝撃吸収は主に構造の座屈変形によって実現されていることが示唆される。これは、Type A が気体圧縮によるエネルギー吸収の要素を持つのに対し、Type B は構造的な座屈および大変形挙動を利用した衝撃吸収メカニズムを採用しているためと考えられる。

以上の結果から、各構造の衝撃吸収メカニズムには顕著な違いがあることが明らかとなった。特に、Type A は内部の空気圧と構造変形の組み合わせによりエネルギーを吸収するのに対し、Type B は座屈と負の剛性挙動を活用することで衝撃を吸収している。これらの知見は、目的に応じた最適な衝撃吸収構造の設計にお

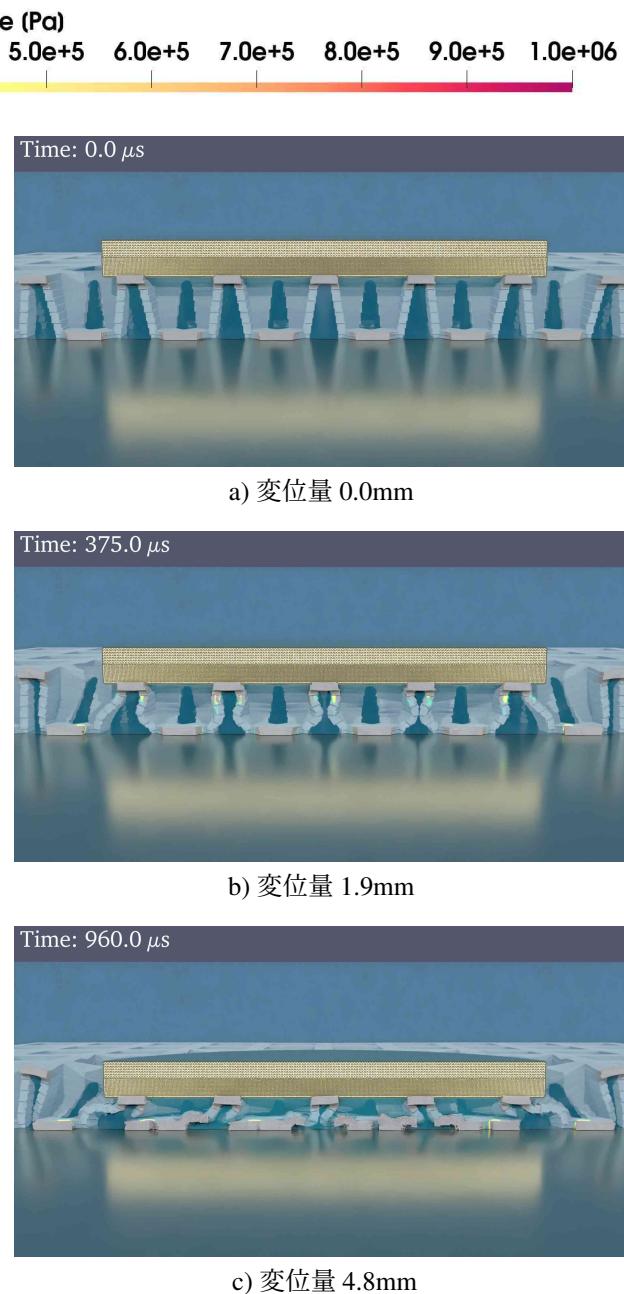


図-7 Type B の圧力場

いて重要な指針を提供すると考えられる。また、今後の研究では、これらの異なるメカニズムを統合したハイブリッド型の構造設計も一つの方向性として有望である。

b) 荷重変位曲線の比較

各 MM 構造の荷重変位曲線結果を図-8、また第 2 章第 1 節で示した力学的性能値を表-3 にまとめる。

初期剛性は、初期ピーク荷重と原点を通る直線の傾きとして定義した。Type B の初期剛性および初期ピーク荷重は、Type A と比較して大きな値を示した。一方で、平坦領域終了時点の変位および衝撃吸収エネルギーは、Type B の方が小さいことが確認された。

この差異の主な要因は各構造の厚みにあると考えられる。Type B は Type A の半分の厚さであるため、剛性が向上し、変位が抑制されたと推測される。しかし、

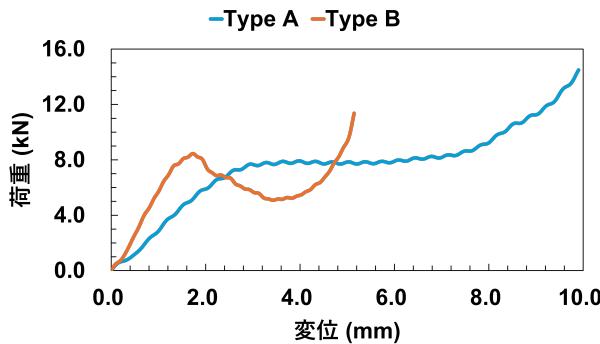


図-8 各構造の荷重変位曲線比較

表-3 荷重変位曲線における力学的性能値

	Type A	Type B
初期剛性 (kN/mm)	2.61	4.90
初期ピーク荷重 (kN)	7.69	8.45
平坦領域終了変位 (mm)	7.30	4.86
衝撃吸収エネルギー (J)	41.88	27.71

厚さが 1/2 であるにもかかわらず、初期ピーク荷重の増加率は 9.88 % にとどまった。また、平坦領域における終了時の変位量の割合は、Type A では 36.5 %、Type B では 48.6 % となり、Type B の方が増加している。このことから、Type B は変形しやすく、衝撃吸収性能が向上したと考えられる。

5. 結論

本研究では、メカニカルメタマテリアル (MM) の衝撃吸収特性を比較・解析し、異なる構造形状による衝撃吸収メカニズムの違いを明らかにした。

実験と数値解析の比較では、初期ピーク荷重において数値解析が過大評価される傾向が確認された。これは、自己接触や摩擦・滑りが適切に再現されないことに起因する。一方、初期ピーク荷重後の荷重低下に関しては、両者の挙動が類似しており、初期剛性の評価には一定の妥当性が認められた。

構造ごとの衝撃吸収メカニズムとして、Type A は内部の空気圧と構造変形の組み合わせにより衝撃を吸収し、Type B は座屈と負の剛性挙動を活用することで吸収することを明らかにした。また、Type B は Type A の半分の厚さでありながら、衝撃吸収性能の向上が期待できることが確認された。

謝辞: 本研究は、HPCI システム利用研究課題(課題番号 : hp240296、課題代表者 : 西口浩司)を通じて、理化学研究所が提供するスーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け、実施した。また、本研究は JSPS 科研費 24K14968 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Tinetti, Mary E. "Preventing falls in elderly persons." NEJM 348.1 (2003): 42-49.
- [2] World Health Organization (WHO). Step safely: strategies for preventing and managing falls across the life-course. Geneva (CH): WHO; 2021. 182 p.
- [3] Moreland, Briana. "Trends in nonfatal falls and fall-related injuries among adults aged ≥ 65 years—United States, 2012–2018." MMWR. Morbidity and mortality weekly report 69 (2020).
- [4] Adler, Robert A. "Treating osteoporosis in patients with atypical femoral fracture." JBMR (2024): zjae150.
- [5] Pighills, Alison, and Lindy Clemson. "Environmental Risk Factors for Falls." Falls in Older People: Risk Factors, Strategies for Prevention and Implications for Practice. Ed. Stephen R. Lord, Catherine Sherrington, and Vasi Naganathan. Cambridge: Cambridge University Press, (2021): 202–210. Print.
- [6] Laing, Andrew C., and Stephen N. Robinovitch. "Low stiffness floors can attenuate fall-related femoral impact forces by up to 50 % without substantially impairing balance in older women." Accident Analysis & Prevention 41.3 (2009): 642-650.
- [7] 竹内秀輔, et al. "マーカー粒子を用いたオイラー型構造解析による粘性-超弾性解析." 計算工学講演会論文集 = Proceedings of the Conference on Computational Engineering and Science/日本計算工学会編. Vol. 27. 東京: 日本計算工学会, 2022.
- [8] 岡澤重信, 中尾賢司, 西口浩司, 田中智行 (2010) : 平均化統一解法による Euler 型固体流体連成解析手法, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.76, No.772, pp.1533-1540
- [9] 西口浩司 (2015) : Euler 型拡張有限要素法による粘性-超弾性体の数値解析手法の研究, 博士論文, 広島大学大学院工学研究科
- [10] 西口浩司, 岡澤重信, 坪倉誠 (2017) : 大規模並列計算に適した階層型直交メッシュ法による完全オイラー型固体-流体連成解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.73, No.2, pp.153-163
- [11] Simo, J.C. (1987) : ON A FULLY THREE-DIMENSIONAL FINITE-STRAIN VISCOELASTIC DAMAGE MODEL: FORMULATION AND COMPUTATIONAL ASPECTS, COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING Vol.60, pp.153-173
- [12] Boruah, Sourabh, et al. "Influence of bone microstructure on the mechanical properties of skull cortical bone—A combined experimental and computational approach." Journal of the mechanical behavior of biomedical materials 65 (2017): 688-704.
- [13] Liu, Tianzhen, et al. "Viscoelastic negative stiffness metamaterial with multistage load bearing and programmable energy absorption ability." IJSNM (2024): 1-23.
- [14] Tan, Xiaojun, et al. "Negative stiffness mechanical metamaterials: a review." SMS (2024).