

音響メタサーフェスの有限要素解析

Finite-element analysis of acoustic metasurface

橋口 真宜¹⁾, 米 大海²⁾

Masanori Hashiguchi, Dahai Mi

1) 技術士(機械部門) 計測エンジニアリングシステム株式会社 主席研究員 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: hashiguchi@kesco.co.jp)

2) 工博 計測エンジニアリングシステム株式会社 技術部 部長 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-9-5 SF内神田ビル5F, E-mail: midahai@kesco.co.jp)

Smart society requires high-level sound field control. Since the sound field is determined by the shape of the object, research on acoustic metasurfaces using the concept of metamaterials is important for sound field control. In this study, we examined how the sound field is formed in the space by controlling the phase of the sound field on the wall using finite element analysis.

Key Words: Sound Field Control, Metasurface, Finite-element analysis

1. はじめに

超スマート社会(Society 5.0)では, IoT (Internet of Things) ですべての人とモノがつながり, 社会の変革を通じて希望の持てる社会, 一人一人が快適で活躍できる社会を目指す. しかし人の活動の急速なグローバル化の副産物としてコロナ禍の世界的大流行が生じ, 個々人の活動範囲が強く制限され, テレワークへの移行が余儀なくされることも経験した. それに伴って家庭での業務会議への参加の機会が増え, 遮音がクローズアップされてきた. 全自動型のEV (Electric Vehicle) では運転しないで済むので車室内はリビングルーム的利用が促進され, 風景を眺めながら映像や音楽を楽しむといったことが急速に進むであろう. 大勢が集まる場所では個々人の嗜好を満たすための音情報が, ビームフォーミングや音響ホログラムで多重伝達されることも予想される. 宇宙での室内活動では機械駆動よりは故障のリスクが少ない音場制御による物体搬送も重要な技術となる. 従って, 音の分野では静粛性も確保しつつ自由に音場を制御する技術開発が望まれていると言えよう. 一方で既存の空間デザイン的大幅変更は難しいことから空間の境界壁に工夫を施すことのできる音響メタサーフェスが有効と考えられる.

そこで本稿では, 音場の自由な制御を求める目的で, 音響メタサーフェスの理論を概観し, その中で有効と考えられる理論に基づいて音場の制御について検討したので報告する. 音場を自由に制御するには音の理解, 音の制御理論, 音の設計と音場の確認が必須であり, そのためのツールとして, 仮想空間での音場の可視化と定量化が可能な有限要素解析を選択し, 市販ソフトウェアCOMSOL Multiphysics[1]を利用した.

2. 音響メタサーフェス

メタサーフェス (metasurface) はメタマテリアル

(metamaterial) の一種である. メタ (meta) とは「変化」「超越」といった意味であり, 自然界の物質にはない振る舞いをするように変化させたという意味合いを持たせている.

メタマテリアルは電磁波の分野でV. G. Veselagoが1967年に負の屈折率をもつ物質を予言したことに始まる. D.R. SmithとJ.B. Pendryが2002年にGHzの周波数域で負の屈折率をもつ実物を制作したことでメタマテリアルの研究がスタートした. 電磁波は波動現象であり波動の伝播速度, 周波数と波長が関係する. 波長以下のサイズをもつ微細構造をたくさん並べることで波長よりも大きな物体を制作すると観測される波動現象にはそれらの微細構造から決まる空間平均的な物性が, 負の屈折率といった, 自然界にない特性を持つようにできる. 電磁波は縦波と横波が共に含まれるベクトル波のある波動系である.

音は縦波のみをもつスカラー波であるが, 波動系であるので, 電磁波で考案されたメタマテリアルの特徴のいくつかを利用できる. 近年, メタマテリアルの考え方を利用して音波の向きを制御できるメタサーフェスが提唱されてきている. メタサーフェスの厚みはサブ波長をもつ. 総説[2]によればメタサーフェスに使われるサブ波長構造は,

- ① 空間巻き上げ構造 (Coiling-up space structure)
- ② ヘルムホルツ共鳴構造 (Helmholtz-resonator-like structure)
- ③ 膜構造 (Membrane-type structure)

の三種類に分類される. 各々の構造をFig.1に示す.

しかしながらこれらの構造は通常, 複数個並べるので有限要素解析で音場の検討をするには個々の形状を描画する必要があり, 細かなメッシュもその周囲に作成する必要があることから研究開発の早期段階では適用しづらい.

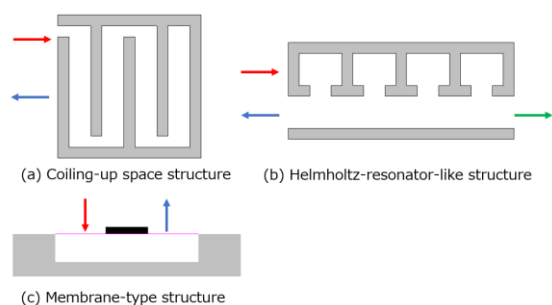


Fig.1 Typical three-types of acoustic metasurface.

Fig.2 に、空間巻き上げ ① の一種である簡単構造による音圧の時間変化の計算例[3]を示す。これは境界を通過する音波の制御の例であるが、サブ波長のメタサーフェス構造によって境界面に沿って波の位相が制御されていることがわかる。従って、メタサーフェスの本質は界面に沿う位相の制御ということになる。

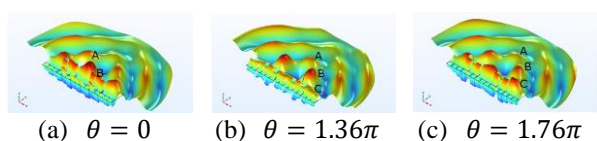


Fig.2 Wave motions with different phases along metasurface.

最近、電磁波メタサーフェスの研究で一般化スネル則 (GSL, Generalized Snell's Law) が見い出され[4]、音場への応用もすでになされている。さらに一般化スネル則をインピーダンス条件と関係づけることができれば、個々の微細なサブ波長構造を描画しなくてもインピーダンス境界条件を境界面に設定すれば計算解析を行うことができる。

基礎検討の段階では、まずは平面波を入射させ、それが所望の角度で反射する条件の検討が考えられる。Fig.3に示す2次元系を考え、平面 $y=0$ にメタサーフェスを設定する。音波は周波数領域で検討を行う（過渡状態は扱わず音場が確立した状態に注目する）ものとする。音圧 $p(\mathbf{x}, t)$ を一定基準圧 p_0 からのずれ ($p(\mathbf{x}, t) \ll p_0$) としたとき、音波を周波数 f Hz で調和振動する正弦波（音圧 $p(\mathbf{x}, t) = \hat{p}(\mathbf{x})e^{j\omega t}$, $\omega = 2\pi f$ ）と考えることができる。音波が伝搬する媒質は空気（密度 $\rho_0 : 1.2\text{kg/m}^3$ 、音速 $c_0 : 343\text{m/s}$ ）とする。音波は断熱変化をすると仮定すると、支配方程式はヘルムホルツ方程式となり、次の式で表される。

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (1)$$

ここで、波数 $k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$ 、波長 $\lambda = \frac{c_0}{f}$ の関係がある。

一般化スネル則 (GSL) は、境界面での位相の変化を考慮できるよう通常のスネル則を拡張したものであり、入射波と反射波のなす音響経路（経路長=波数×伝搬距離）上に生じる位相差と境界面での位相不連続との総和が最小となる条件（フェルマーの原理）から得られる。ヘルムホルツ方程式を、何らかの方法で求めたインピーダンス

境界条件を境界面に課して数値的に解けば、メタサーフェスによって創出される音場を求めることができる。

数値解は有限要素法によって求めた。実際には市販ソフトウェアCOMSOL Multiphysicsの音響モジュール[1]を利用して有限要素解を求めた。

3. 音響メタサーフェスの有限要素解の例

(1) 計算条件

周波数1kHzの平面波をFig3の下方に設置した水平境界 ($y=0$) へ向けて下向きに入射させる。境界に生じる反射波の可視化のために、音場を背景場（平面波）と散乱波に分解して解析をした。メッシュは2次要素を使い、空間には波長の6分の1以下のサイズのメッシュを、境界には微細構造の解像ができる細かさをもつメッシュを配置した。下方の水平境界を除く上部と左右の3か所の境界は仮想領域 PML (Perfectly Matched Layer) を設置した。

(2) 計算例

Fig.3に示すように平面波を真上から境界面に入射させ、反射波を中央部に集めることができている。

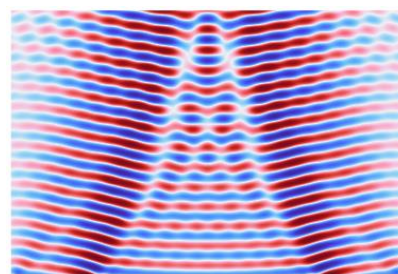


Fig.3 Converging reflected acoustic pressure waves scattered from metasurface.

4. まとめ

本稿では、音の静粛化と空間音場の制御を音響メタサーフェスに求めるべく、既往の研究をレビューした。その中で有効と考えられる一般化スネル則に基づいて、周波数領域での有限要素解を試行した。インピーダンス境界を使うことで、構造の詳細が固まっていない研究開発の初期段階での検討がしやすくなると考えられる。今後、解析の詳細部分を検討していく。

参考文献

- [1] COMSOL Multiphysics: <https://www.comsol.jp/> (参照日2023年4月3日)
- [2] Assouar, B. et al.: Acoustic metasurfaces, Nature Reviews Materials (2018).
- [3] 橋口真宜, 米大海: 音響メタマテリアル解析動向とアプリの開発, 日本機械学会第35回計算力学講演会 (CMD2022) (2022).
- [4] Yu, N. et al.: Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction, Science 334 (2011).