

メタマテリアル関連技術の研究動向と鉄道への応用に関する調査

【2020年度 KR-079】

秋田県立大学システム科学技術学部 機械工学科
教授 富岡 隆弘

1. はじめに

メタマテリアルは「波長よりも十分小さな構成要素を工夫して組み合わせて天然物質では困難な機能を実現する人工構造物質」とされる¹⁾。負の屈折率によるクローキング（透明マント）などの実現技術としてややセンセーショナルに取り上げられることが多いが、産業応用としても注目されている。もともと電磁気学の分野で提唱された概念であるため、通信、レーダーなどの電磁波関連研究が先行しているが、ここ数年、機械工学関連の学会講演などにおいて、構造体の音響特性や騒音対策、構造物や地盤の振動など固体中の波動伝搬に関する研究発表もみられるようになってきている。また、文献²⁾では鉄道車両走行に起因する地盤振動の低減対策としてメタマテリアルを扱っている。

本調査研究では、メタマテリアル関連技術の固体力学に関する研究動向を調査し、鉄道の振動・音響問題への応用の可能性を調べることを目的とする。

2. 調査結果の概要

今回の調査研究では、Elsevier社の書誌・引用文献データベースScopusを利用してメタマテリアル関連研究を調査し、鉄道への応用の観点から参考となる資料として取りまとめることを目指した。まずScopusにより「metamaterial」をタイトルもしくはキーワードに含む条件で検索してヒットした文献から、固体力学系の工学論文誌掲載の272件の論文をレビューし、鉄道を含む工学応用として現実的と思われる研究を整理した。その結果、メタマテリアルとして扱われているものを大別すると、格子構造による材料の変形挙動に関するもの（負のPoisson比を示すauxetic挙動や多段階変形など）と、局所共

振器の構成とその配置に関するものがあることが分かった（表1）。詳細は本調査研究の最終報告書掲載の文献情報をもとに原論文を参照願いたい。一部（表1で網掛けしたもの）を以下に紹介する。

格子構造の工夫による変形挙動に着目したものとして、文献³⁾では、図1に示すような複数の立体的な格子構造をAM（Additive Manufacturing 付加製造：いわゆる3Dプリンタ）技術を用いて実現し、その組み合わせの配置による変形時の吸収エネルギー増大について検討している。また文献⁴⁾では、立体格子構造をAMで作成し、auxetic挙動とともに履歴特性についても調べている（図2）。これらは鉄道車両の衝撃吸収構造や減衰要素に応用できる可能性がある。

音響・弾性波伝搬に着目したものうち、粘弾性体等でコーティングするタイプの局所共振器構成に関する研究の例として、文献⁵⁾では図3のような、ウレタンゴムとシリコンゴムで囲まれた金属球をエポキシ立方体に収めた局所共振器を提案し、それを多数配置した場合の振動伝達特性を調べている。

音響メタマテリアルについては、文献⁶⁾ではハニカム構造の一部に局所共振器を配置することによる伝達関数の広帯域にわたる振動伝達抑制効果を示している（図4）。また、文献⁷⁾ではハニカム状に仕切った空気層を膜を介して多層化することによる音響透過損失増大効果について調べている（図5）。ハニカム構造は鉄道車両の床や内装の部材に使われていることから、それらをメタマテリアル化することにより車内騒音の低減に活用できる可能性がある。

鉄道への活用を明示的に挙げているものとしては、地震動や地盤振動対策を目的とした耐震メタマテリアル²⁾¹⁰⁾のほか、防音壁を想定した音響メタマテリアル¹¹⁾があった。鉄道に限定しない耐震メタマテリ

表 1 固体力学に関するメタマテリアル研究の例とその分類

大分類	構成・方式	目的等	実験	特徴
変形挙動に着目	格子構造	変形エネルギー吸収	あり	立体格子構造, AM (Additive Manufacturing 付加製造: いわゆる3Dプリント技術), 多段階変形
	格子構造	変形エネルギー吸収	あり	平面格子構造, AM, 多段階変形
	格子構造	変形エネルギー吸収, 破壊挙動	あり	サンドイッチ材, 立体・平面格子構造コア, AM, 格子構造の違いによる特性比較
	格子構造	変形エネルギー吸収, 振動減衰要素, アクチュエータ	あり	立体格子構造, AM, auxetic挙動, 履歴曲線
	格子構造	auxetic挙動(負のPoisson比)	あり	平面格子構造, AM
	格子構造	auxetic挙動(負のPoisson比)	あり	立体格子構造, AM, auxetic挙動, 2種類の材料の併用
	格子構造と隔壁構造	隔壁面外方向と面内方向で異なる力学特性	なし	Pentamode格子構造と平板からなる構造の挙動解折, 圧縮に強くせん断方向に柔軟な構造
	格子構造	圧縮方向には強くせん断方向には柔軟	なし(試作のみ)	Pentamode格子構造の最適設計, 流体のような固体, AM
	格子構造	変形エネルギー吸収	あり	立体格子構造, AM, トラス状・シェル状格子構造
	格子構造	圧縮に対する力学特性	なし	立体格子構造, octet-truss(スペースフレーム構造), 建築材料への応用
	格子構造	変形エネルギー吸収	あり	異なるパターンによる格子による強度と靱性を兼ね備えた材料, ステンレス材, AM
	格子構造	大変形可能な材料の力学挙動	あり	非線形変形が大きく靱性が高い飛び移り微視構造の切欠き感受性, AM
音響・弾性波伝搬に着目, 粘弾性体等でコーティングされた質量を分散配置	局所共振器	音響メタマテリアル, 高減衰能と高剛性	なし	mass-in-massモデルによる解析
	局所共振器	音響メタマテリアル	なし	シリコンゴムでコーティングされた金属球を多数配置した音響メタマテリアル
	局所共振器	音響メタマテリアル, 遮断周波数帯域の極大化	なし	ゴムでコーティングされた質量構成の最適化, 質量形状・配置・サイズを変化
	局所共振器	音響メタマテリアル, 遮断周波数帯域の極大化	なし	ゴムでコーティングされた質量構成のトポロジー最適化, 質量支持部形状の変化
	局所共振器	弾性波減衰	あり	ウレタンゴムとシリコンゴムで囲まれた金属球をエポキシ立方体に収めた局所共振器
	局所共振器	振動遮断周波数拡大	あり	共振周波数が異なる局所共振器の組み合わせによる遮断周波数帯域拡大
	局所共振器	音響メタマテリアル	なし	ゴムでコーティングされた円柱状固体を共振器とする音響メタマテリアル
	局所共振器	音響メタマテリアル	なし	立体配置された階層構造を持つ局所共振器の特性
	局所共振器	メタコンクリート, 振動伝搬抑制	なし	セメント骨材を柔軟体でコーティングされた金属で置き換えたメタコンクリートの提案
	局所共振器	メタコンクリート, 振動伝搬抑制	なし	局所共振器の形状やサイズと固有振動数, メタコンクリートの振動応答特性
	局所共振器	水中での音響伝搬抑制	あり	多重共振音響メタマテリアル
	局所共振器	音響メタマテリアル	あり	シリコンゴムを挟んだ金属片をシリコンゴムで支持してはりの上に配列
音響・弾性波伝搬に着目, 格子構造の一部が局所共振器を構成	局所共振器	振動伝搬抑制	なし	カイラル構造(掌性)をもつ局所共振器を2次元配列した格子構造による振動遮断
	局所共振器	振動伝搬抑制	あり	カイラル構造(掌性)をもつ局所共振器を2次元配列した格子構造による振動遮断
	局所共振器	音響メタマテリアル, 遮断周波数範囲拡大	あり	ハニカム構造の一部に階層構造を持つ局所共振器を配置することによる広帯域制振
	局所共振器	平板の多モード制振	あり	粘弾性体の膜と質量からなる局所共振器を配置したメタマテリアルによる平板の多モード制振
音響・弾性波伝搬に着目, 上記以外の構成による局所共振器	局所共振器	はり状構造の波動伝搬	あり	円柱状のアルミの両端に鉛の円柱を取り付けたメタマテリアルセルの配置による伝送波動選択
	局所共振器	ハニカム平板の振動と音響	あり	ハニカム平板の面にゴムで支持された鉛からなる局所共振器を配列
	局所共振器	平板の音響透過損失	あり	局所共振器を多数配置した平板の振動伝搬特性と音響放射特性
	局所共振器	平板の振動伝搬特性	なし	平板に埋め込んだ局所共振器の形状とによる広帯域振動伝搬抑制
	局所共振器	はりの振動伝搬特性	なし	2種類の別材料の周期構造を持つ複合はり(積層ではなく長手方向に材料が変化)の振動伝搬
	局所共振器	はりの振動遮断	あり	片持ちはり状の局所共振器を配置したはりの振動特性
格子状空気層と薄板または膜からなる音響メタマテリアル	局所共振器	平板セル型音響メタマテリアル	あり	薄板セルを配置した平板の音響透過損失, 薄板セルに質量付加することによる音響遮断帯域拡大
	局所共振器	平板セル型音響メタマテリアル	あり	内部tonnaum共振器(ヘルムホルツ共振器の一種)を組み込んだ前後壁からなる音響モジュールの配列によるパネルの音響透過損失の調整
	局所共振器	膜型音響メタマテリアル	あり	正方形に張った膜に種々の形状(切れ目のある円環状や円形, 中央集中)の質量を配置した音響メタマテリアルの音響透過損失
	局所共振器	膜型音響メタマテリアル	あり	多層ハニカム形膜型音響メタマテリアルの音響透過損失
地震動・地盤振動に着目した耐震メタマテリアル	局所共振器	耐震メタマテリアル, 柱列配置	なし	柱列の共振による地盤表面の振動伝搬抑制
	局所共振器と多層構造	耐震メタマテリアル, 柱列配置	あり	性質の異なる土の層に埋め込まれたコンクリート柱による振動伝搬抑制効果
	局所共振器	耐震メタマテリアル, メタ基礎	なし	予圧縮された上下ばねと左右ばねの連成による負性ばねと非線形効果を利用したメタ基礎による大規模タンクの耐震性向上
	局所共振器	耐震メタマテリアル, メタ基礎とメタバリア	なし	多方向に振動する局所共振器を用いたメタ基礎(上部構造物を支持)とメタバリア(構造物周囲の地中に配置)
	局所共振器	耐震メタマテリアル, 柱列配置	なし	円柱状のコンクリートパイプ配列, 鉄道車両走行による地盤振動抑制
	局所共振器	耐震メタマテリアル, 柱列配置	あり	樹木によるメタマテリアル効果
その他	トレンチ(溝)バリア	耐震メタマテリアル, トレンチ配列	なし	トレンチ列の配置による地盤振動抑制, 列車走行による地盤振動対策
	局所共振器	管状構造の多モード制振	あり	パイプの入り口と出口に埋め込まれた局所共振器による多モード制振
	多孔質	音響メタマテリアル	あり	プロレートを埋め込んだ多孔質材料(ポリウレタンスポンジ)を用いた音響メタマテリアル
	異種共振器	音響メタマテリアル	あり	立方体形の1/4波長とヘルムホルツ共振器を組み合わせて配置することによる音響損失向上, 鉄道防音壁への適用
	換気口付き共振器	音響特性と換気特性を両立する音響メタマテリアル	あり	ヘルムホルツ共振器と換気口をもつユニット, 高い音響透過損失と換気効率の両立
	局所共振器	非線形効果による音響メタマテリアル	あり	非線形ばねを持つ局所共振器を配置したはりの多モード制振, カオス挙動の活用
	局所共振器とビエゾ素子	音響メタマテリアル, 金属棒を埋め込んだゴム円柱を配置したコンクリート防音壁, エネルギーハーベスト	あり	ビエゾ素子をゴムに埋め込みエネルギーハーベストも同時実現
	局所共振器とビエゾ素子	音響メタマテリアル, 非線形局所共振系とビエゾ素子, エネルギーハーベスト	なし	非線形ばねで接続された質量系とビエゾ素子を持つ電氣的共振系の連成
局所共振器	音響メタマテリアル	なし	ユニットセル共振器の形状最適化	
和文論文の例(再掲)	反射特性の異なる部材配置	音響メタマテリアル, 反射音制御	あり	反射特性の異なる部材を配列することで反射角度を制御
	局所共振器	音響メタマテリアル	なし	ユニットセル共振器の形状最適化
	反射特性の異なる部材配置	音響メタマテリアル, 反射音制御	あり	反射特性の異なる部材を配列することで反射角度を制御
格子構造	大変形可能な材料の力学挙動	あり	非線形変形が大きく靱性が高い飛び移り微視構造の切欠き感受性, AM	

アル関連では、柱列による地盤表面の振動伝搬抑制効果を扱った研究⁸⁾のほか、関連して立木(森林)によるメタマテリアル効果を論じた文献⁹⁾もあった。

3. おわりに

以上述べたように、「メタマテリアル」といっても特異な物理現象実現を目指すものではなく、格子の順次破壊による多段階変形や共振現象の帯域拡大といった現実的な取り組みが多いことがわかった。ま

た、AM技術(3Dプリンタの活用)との親和性が高いことも確認できた。「構造部材や局所共振器を周期的に配置することで特徴的な特性を発揮できればなんでもあり」という印象も受けるが、前広な着眼も必要なかもしれない。そのような観点からは「周期構造の集合体」といえる鉄道システムは、メタマテリアル技術の好適な適用対象だと感じた。

なお、文献の大部分は米国と中国が占め、今回レビューした272件の文献に関しては、中98、米73、

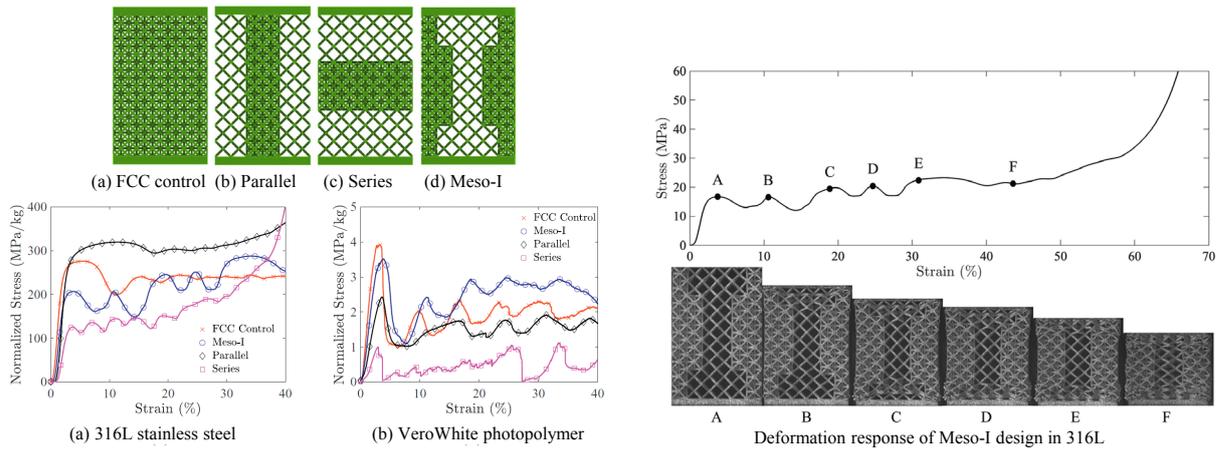


図1 格子構造と配置の工夫による変形エネルギー制御³⁾

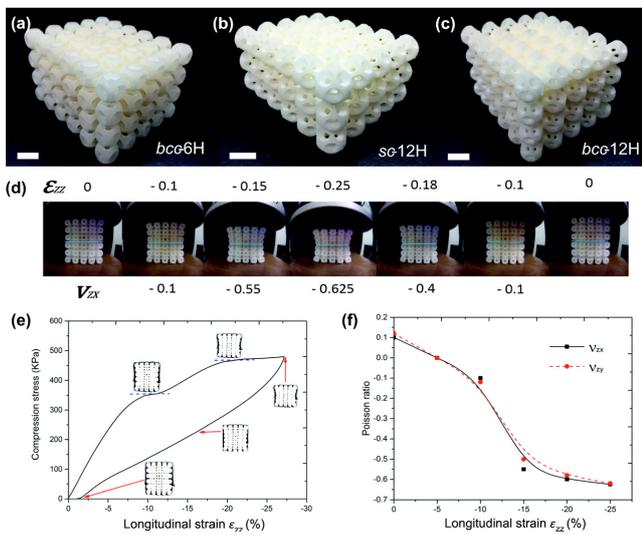


図2 auxetic 挙動を示す格子構造とその履歴特性⁴⁾

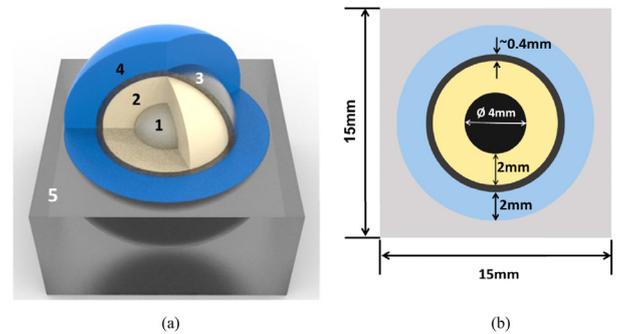


図3 ウレタンゴムとシリコンゴムで囲まれた金属球をエポキシ立方体に収めた局所共振器⁵⁾

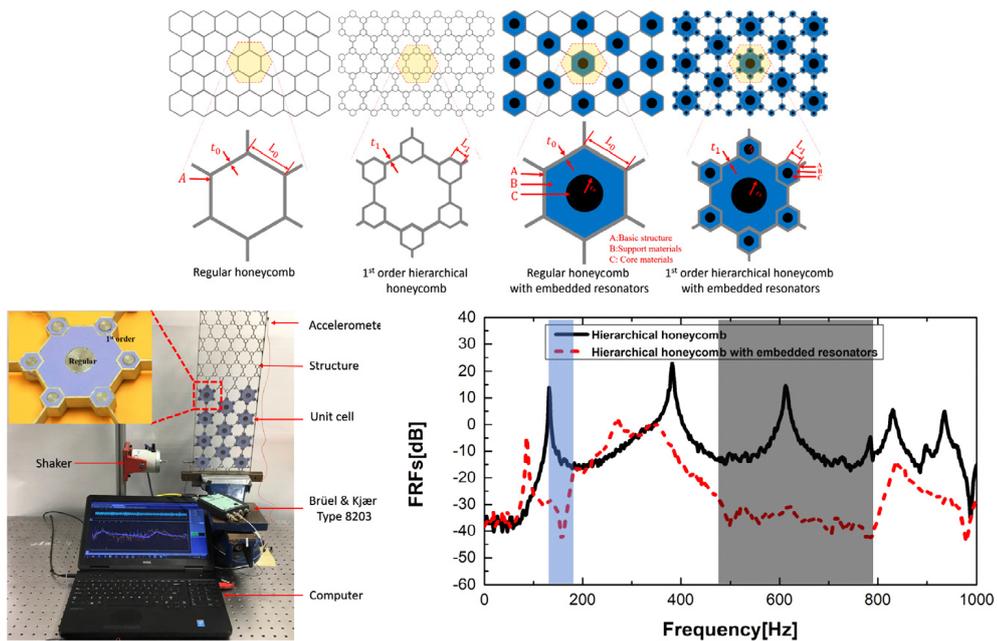


図4 ハニカム構造の一部に粘弾性体と質量からなる局所共振器を配置した音響メタマテリアル⁶⁾

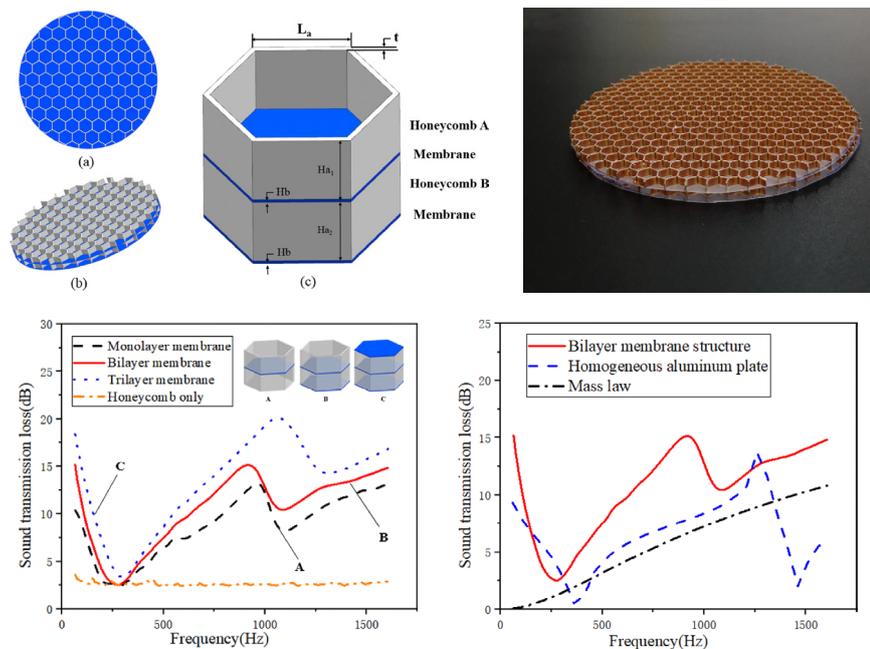


図5 ハニカム状に仕切った空気層を膜を介して多層化した音響メタマテリアル⁷⁾

英 30、仏 21、伊 19、独 16 などに対し日本は 2 件であり、和文論文のうち日本機械学会論文集でヒットしたのは 3 件のみであった。□

参考文献

- 1) 富田知志、メタマテリアルの物理、電気学会誌、137 巻 6 号、(2017)、pp.346-349.
- 2) Ting Li, Qian Su, Sakdirat Kaewunruen, Seismic metamaterial barriers for ground vibration mitigation in railways considering the train-track-soil dynamic interactions, *Construction and Building Materials*, 260, (2020), 119936
- 3) Alberdi R., Dingreville R., Robbins J., Walsh T., White B.C., Jared B., Boyce B.L., Multi-morphology lattices lead to improved plastic energy absorption, *Materials and Design*, 194, (2020), 108883
- 4) Yuan S., Shen F., Bai J., Chua C.K., Wei J., Zhou K., 3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization, *Materials and Design*, 120, (2017), pp.317-327
- 5) Barnhart M.V., Xu X., Chen Y., Zhang S., Song J., Huang G., Experimental demonstration of a dissipative multi-resonator metamaterial for broadband elastic wave attenuation, *Journal of Sound and Vibration*, 438, (2019), pp.1-12
- 6) Xu X., Barnhart M.V., Li X., Chen Y., Huang G., Tailoring vibration suppression bands with hierarchical metamaterials containing local resonators, *Journal of Sound and Vibration*, 442, (2019), pp.237-248
- 7) Li Y., Zhang Y., Xie S., A lightweight multilayer honeycomb membrane-type acoustic metamaterial, *Applied Acoustics*, 168, (2020), 107427
- 8) Colquitt D.J., Colombi A., Craster R.V., Roux P., Guenneau S.R.L., Seismic metasurfaces: Sub-wavelength resonators and Rayleigh wave interaction, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 99, (2017), pp.379-393
- 9) Andrea Colombi, Philippe Roux, Sebastien Guenneau, Philippe Gueguen, Richard V. Craster, Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances, *Scientific Report*, 6, 19238; doi: 10.1038/srep19238 (2016).
- 10) Pu X., Shi Z., Broadband surface wave attenuation in periodic trench barriers, *Journal of Sound and Vibration*, 468, (2020), 115130
- 11) Cavalieri T., Cebrecos A., Groby J.-P., Chaufour C., Romero-García V., Three-dimensional multiresonant lossy sonic crystal for broadband acoustic attenuation: Application to train noise reduction, *Applied Acoustics*, 146, (2019), pp.1-8