

令和元年6月17日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06155

研究課題名(和文) 周期構造型メタマテリアルの最適化に基づくパネル放射音の広帯域低減

研究課題名(英文) Broad-band reduction of the noise radiation from a panel based on the optimization of periodic metamaterials

研究代表者

松村 雄一 (Matsumura, Yuichi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20315922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：メタマテリアルを利用し、放射音を広帯域に低減するようにパネルの複数の固有モードを同時に最適化する設計法の確立を目指した。パネルの固有モードは、各々、パネル上を伝播する特定の角度の波動で構成され、複数の固有振動でほぼ同じ角度を持つ。そこで、この角度の波動に効果的な周期構造を取り付けることで、複数の固有モードを形成する角度の波動がパネル上を伝播しにくくする方法を示した。これにより、複数の固有モードの振動を同時に低減でき、音響放射効率も制御できた。また、この効果は、日光東照宮の泣き竜で知られる「むくり」の効果を取り入れることで、より強調されることも明確にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

騒音が問題となる機械の代表である自動車の開発では、自動運転技術や電動化の進展に伴い、車内の静粛性への要求が今後益々高まると予想されている。車内音は、ルーフやフロアなどのパネルからの放射音が原因とされるが、従来技術の延長線上では、静粛性を格段に向上させるのが難しく、音を逆相の音で打ち消すアクティブ制御が解決策の一つとされる。しかしながら、アクティブ制御には、追加の制御装置の搭載が必要で、駆動のために電力も必要とする。提案法によれば、コストをかけずに、パネルの形状を変化させておくだけで、車内音を広帯域に低減できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：We aimed to establish a design method that optimizes multiple eigenmodes of a panel by using metamaterials to realize the broad-band reduction of the noise radiation from the panel. The eigenmodes of the panel are each composed of only the wave propagating on the panel at a specific angle, which is almost the same angle with multiple natural vibrations. Therefore, by attaching an effective periodic structure only to waves of this angle, we showed how to make it difficult for waves of angles forming multiple eigenmodes to propagate on the panel. As a result, the vibrations of multiple eigenmodes can be simultaneously reduced, and the acoustic radiation efficiency can also be controlled. Moreover, it was clarified that this effect is more emphasized by incorporating the effect of "Mukuri" which is known by the roaring dragon of Nikko Toshogu.

研究分野：機械力学

キーワード：パネル放射音 周期構造 振動制御

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) メタマテリアルの性質の一つに、その内部を広帯域の波動が伝播できなくなるという特性が知られている。本特性により、機械構造物上の波動伝播を広帯域に操作できる可能性がある。

(2) 機械構造物が発する騒音の源は、パネル放射音であることが多い。自動車では、車内外への騒音の抑制が商品価値向上、環境騒音低減に重要であるが、その騒音源は、ルーフやフロアなどのパネル面である。パネル放射音を低減できれば、様々な騒音問題が解決する。しかしながら、従来技術による対策は飽和状態にあり、どちらかと言えば、単一周波数での騒音対策が主である。

(3) パネル放射音は、パネルの面外振動によって、パネル近傍の空気の音圧が変動することで発生する。振動は、パネルの面外共振周波数近傍の周波数で大きくなり、連れて放射音も増大する。共振周波数近傍の帯域では、共振周波数に対応する振動モード形でパネルが振動する。振動モード形に依存して音響放射効率が異なることから、パネル放射音の低減には、振動の大きさを低減する以外に、振動モード形を変化させることも有用である。振動モード形は、パネル面を伝播する波動が重畳し、定在波となることで定まる。そこで、音響放射効率低減のために波動の伝播を操作し、パネルの振動の大きさを低減したり、振動モード形を変更したりする技術が有用と考えられる。さらに、従来技術では困難であった広帯域での対策を実現できる設計法を盛り込めれば、実用的なパネル放射音の低減対策を実現できると考えられる。

### 2. 研究の目的

パネルのメタマテリアル化による波動伝播の制御と、振動モードからの音響放射効率低減技術を紡ぎ、広帯域にパネル放射音を低減する方法を開発する。メタマテリアルの研究の多くは、波動伝播の操作に着目していたが、本研究は、波動が重畳して形成される振動モード形の操作までをメタマテリアルの最適化で実現し、最終的には放射音を低減する設計法として確立する点で、波動に関する基礎研究を工学に応用発展させるものである。

### 3. 研究の方法

(1) パネル面における振動モードの形成は、波動が Phase Closure の原理に基づく共振形成条件を満たし、特定の角度に伝播する平面波が、互いに打ち消しあうことなく重畳して、定在波を形成することに起因する。そこで、この特定の角度の近傍の角度で伝播する波動の一部を、メタマテリアル内での干渉によって相殺させる方法を考案した。

(2) 特定の角度で伝播する平面波がメタマテリアル内を伝播する際に、円筒波として平面波から漏れ出す成分が存在し、メタマテリアル内での相殺が不十分になる。そこで、メタマテリアル内での干渉を促進するため、日光東照宮の鳴き竜で知られる「むくり構造」を付与し、平面波からの漏れ出しを低減することで、メタマテリアルでの波動の相殺を促進する技術も考案した。

### 4. 研究成果

#### (1) 本研究の達成目標

パネルに面外振動が生じた場合、その表面積が大きいことから放射音も大きくなる。騒音低減には、音響放射効率が大きい振動モードを把握して対策する。例えば、ビート形状や曲率などの構造変更を検討し、固有値の再配置や、放射効率の低い振動モードへの変更を行うこととなる。しかし、構造変更の案出には、明確な理論や規則がなく、設計者の経験、勘、そしてコツに依存する。さらに、モード密度が高くなると、対策すべきモードが増え、広帯域での騒音低減に有効な構造変更を案出し難くなる。本研究では、複数の振動モードに同時に寄与する構造変更案をメタマテリアルの視点から導き出し、広帯域でパネル放射音を低減する方法を提案する。

#### (2) 単純支持矩形板の固有振動と波動伝播の関係

$xy$ 面内の単純支持矩形板の固有角振動数 $\omega_{mn}$ と振動モード形 $W_{mn}(x, y)$ は、 $m, n$ をそれぞれ $x, y$ 方向の腹の数として次式で表せる。

$$\omega_{mn} = \pi^2 \left( \frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (m, n = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

$$W_{mn}(x, y) = \sin \frac{m\pi x}{L_x} \sin \frac{n\pi y}{L_y} \quad (2)$$

この $(m, n)$ 次モードの固有振動を形成する波動の波数ベクトルの角度 $\theta_{mn}$ は、次式で算出できる。

$$\theta_{mn} = \tan^{-1} \frac{nL_x}{mL_y} \quad (3)$$

### (3) 振動モードを形成する波動の角度による振動モードの分類

同じ角度の波動で形成されるモードをまとめ、モード群と呼んで分別する。図 1 は、ある単純支持矩形板に存在する 800 Hz までの固有モードを、横軸を波数ベクトルの角度、縦軸を固有振動数として図示したものである。本図より、単純支持矩形板には同じ角度を有する波数ベクトルで形成されるモードが多数存在することがわかる。例えば、角度  $25.3^\circ$ 、 $43.3^\circ$ 、 $62.1^\circ$  には、同じ角度の波動で形成される複数のモードが存在することがわかる。また、完全に角度が一致しなくとも、比較的近い角度の波動で形成されるモードも多数存在し、これらもほぼ同一角のモード群として、同時に制御できる可能性がある。

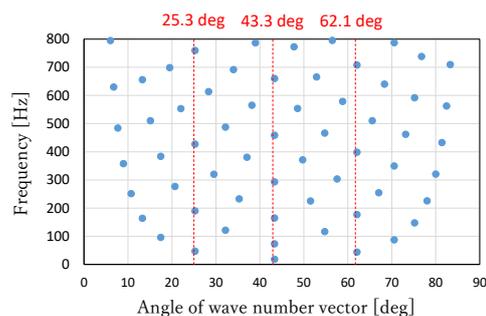


図 1 波動の角度に基づく固有モードの分類

### (4) 任意の角度の波動を干渉により低減させるメタマテリアル構造の提案

任意の角度の波動を制御するため、Phase closure の原理に着目する。平面波がある区間を往復するような構造では、その区間で波動が重畳して強め合う場合と、弱めあう場合が存在し、これらの条件を波数と区間の長さにより、位相の関係としてまとめたものが Phase closure の原理である。例えば、両端を単純支持されたはりでは、波動の干渉による共振形成と完全打消しの条件を次式で表現できる。

$$2kL + \phi_L + \phi_R = \begin{cases} 2(d+1)\pi, & d = 1, 2, \dots, \quad (\text{Resonance}) \\ (2d+1)\pi, & d = 1, 2, \dots, \quad (\text{Cancellation}) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、波数を  $k$ 、往復区間の長さを  $L$ 、左端と右端における反射の位相変化をそれぞれ  $\phi_L$ 、 $\phi_R$  とした。

パネル上の一部の区間で、上記の Phase closure の原理に基づく完全打消しを実現するため、パネル端部に図 2 のようなペアの切り欠きを設けて、平面波が切り欠き間を往復するような構造を提案した。この構造における切り欠きの角度は、対象とするモード群のモードを形成する波動の角度に一致させる。一方、切り欠き間距離  $L$  は、式(4)に従い、制御対象とするモード群に含まれるモードのうち、なるべく多くのモードの形成に関する波動の波数に関して打消しあいが発生するように設計するか、特にターゲットとしたい単一、または少数のモードを打ち消すことを優先して、これらのモードを形成する波動の波数において、打消しあいが発生するように設計する。これにより、対象とするモード群を形成する波動の一部が切り欠き間で打ち消しあい、モードを形成する波動の一部が存在しなくなることで、パネル振動の振幅が低減する効果が期待される。また、切り欠き間での波動の打ち消しあいにより、この区間は振動モードの節になることから、振動モードの形状を変更し、音響放射効率を操作するのにも有用であると考えられる。

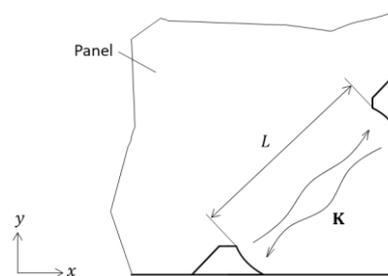


図 2 ペアの切り欠きを利用して任意の角度の波動を打ち消し合わせる構造とむくり構造の併用

### (5) むくり効果の導入

むくり構造をペアの切り欠きの両側に導入して、切り欠き間での波動の打ち消しあい効果を強調する方法を示す。式(4)に従って波動が打ち消しあうには、この切り欠き間に波動が取り込まれ、切り欠き間を往復し、切り欠き間から漏れ出さないことが必要である。そこで、日光東照宮の鳴き竜で知られるむくり構造をペアの切り欠きの両側に導入することを提案した。図 2 に示すように、切り欠き部には湾曲を設けると、波動が切り欠き間に取り込まれやすく、また、切り欠き間に留まり易くなり、提案する打ち消し効果がより増すことが期待される。

(6) 数値例での検証

有限要素モデルを用いて、提案法に基づく設計の有用性を検証する。解析対象は、図 3(a)に示す  $500 \times 500 \times 1.0$  mm, ヤング率 206 GPa, ポアソン比 0.3, 密度  $7.9 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>, 構造減衰係数 0.01 N/m の単純支持矩形板である。対象とする固有モード群を  $43.3^\circ$  の角度を持つ群とし、特に低次の (2, 2), (4, 4), (6, 6) モードの振動を同時に低減することを目指す。それぞれの固有振動数は, 74.3 Hz, 297.0 Hz, 668.6 Hz で, モード形は図 4 に Initial と記した列に示す。

次に, 対象のモード群に対して, 提案法により構造変更案を導く。ペアの切り欠きの角度は, モード群を形成する波動の角度である  $43.3^\circ$  とする。また, 切り欠き間の距離は, 式(4)に従い, 対象とする 3 つのモードのいずれもが打ち消しあい条件に近い位相となるように 320 mm とした。この結果を元に, 4カ所で波動の打ち消しあいを実現させる構造変更案として図 3(b)を得た。さらに, 図 3(c)はむくりの効果を導入した構造変更案である。

構造変更前後の固有振動特性の比較を図 4 に示す。振動モード形では, 切り欠き間の振動が低減して節のようになっていること, むくりによってその効果が強調されていることがわかる。

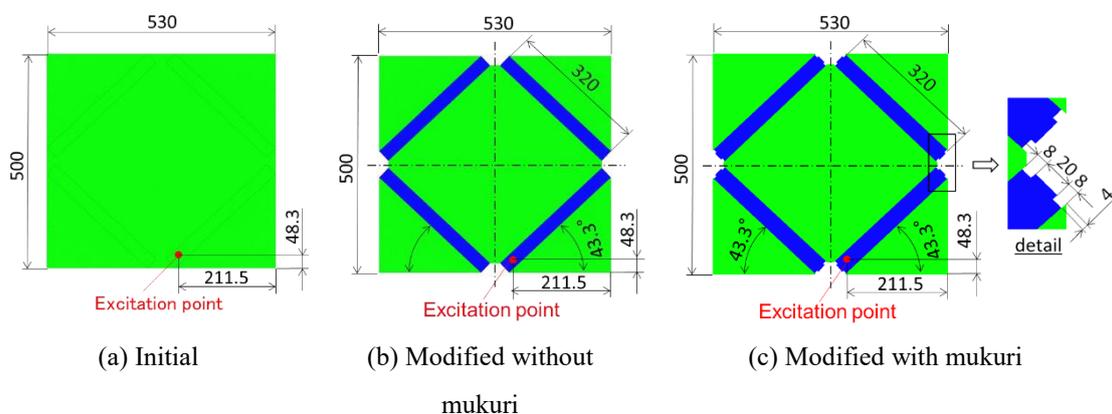


図 3 設計対象の初期構造と提案法により導かれた構造変更案

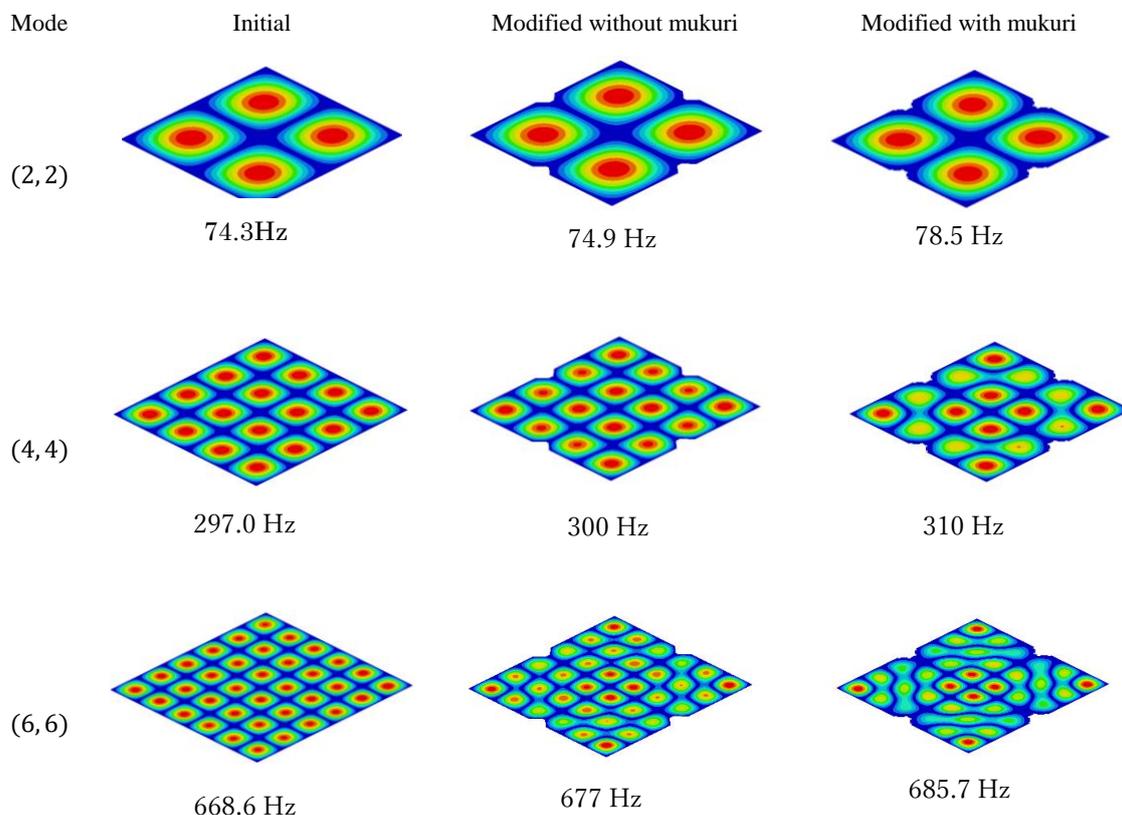
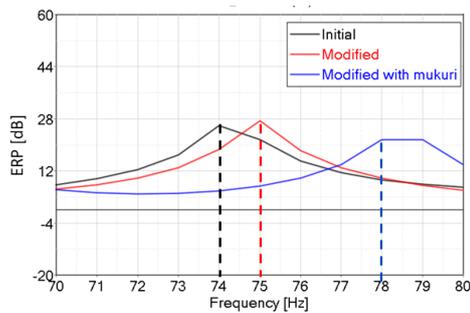


図 4 構造変更前後の固有振動特性の比較

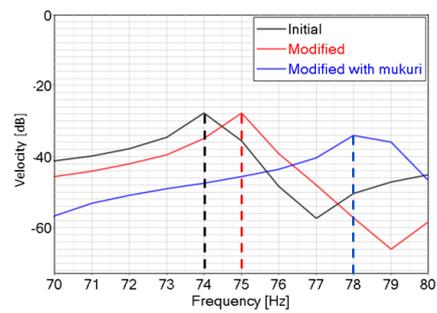
図5には、対象モードの共振周波数付近におけるパネル全体のERP（等価放射パワー）と、加振点での応答速度振幅の周波数依存性を比較して示す。これらを同時に評価する理由は、加振点での速度振幅は、構造変更前後で変化するモード形の節に近いか腹に近いかで大きく振幅が変化するため、必ずしも適切な評価指標ではなく、一方のERPもパネル全体からの音響放射パワーの概算を得るために利用される指標であり、音響放射の大きさを検討する上で、必ずしも正確な指標ではないことから、これらを合わせて確認することで、パネルの振動だけから、少しでも正しく音響放射の低減の有無を確認するためである。図5の縦の破線は、構造変更前後での無減衰固有振動数を表す。数値例では、パネルに小減衰しか与えておらず、無減衰固有振動数が共振周波数にほぼ対応し、この周波数でパネル振動の低減や等価放射パワーを評価する。

はじめに、むくりを用いない場合の結果を確認する。図5の黒実線で示した構造変更前の結果と、赤実線で示したむくりなしの構造変更後の結果を比較すると、(2,2)モードにおいてのみ、構造変更後にERPのわずかな増加がみられたが、その他のモードではERPも、応答速度振幅も減少した。基本的には、提案法でパネル振動は低下するものの、パネルに切り欠きを設けることで、モード形も変化することから、モードによってはわずかに応答が増加する結果となった。

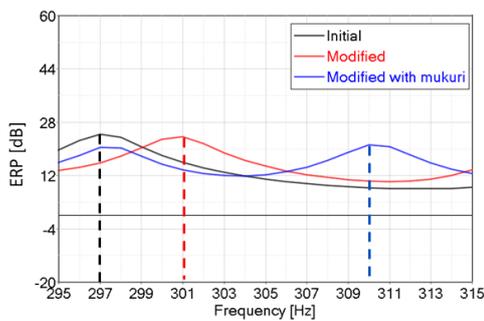
次に、むくりを用いた場合の結果を確認する。図5に青実線で示したむくりありの構造変更後の結果より、すべてのモードにおいて、ERPも応答速度振幅も低下した。むくりを利用することで、切り欠き間での任意の角度の波動の打消しあい強調されたことがわかる。



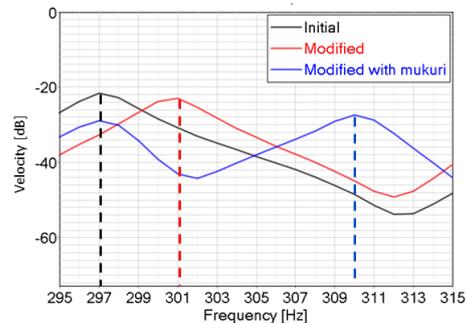
(a) ERP at mode (2, 2)



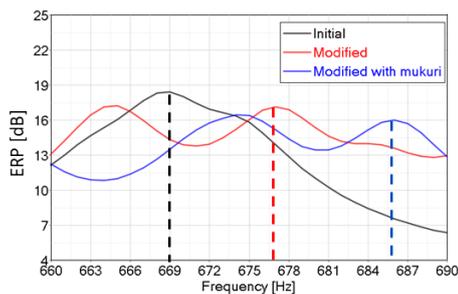
(b) FRF at mode (2, 2)



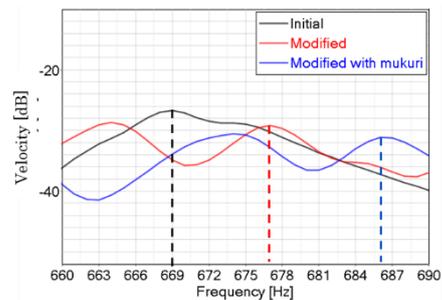
(c) ERP at mode (4, 4)



(d) FRF at mode (4, 4)



(e) ERP at mode (6, 6)



(f) FRF at mode (6, 6)

図5 構造変更前後でのERPと加振点速度応答振幅の比較

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① 森 厚夫, 松村 雄一, 和泉谷 日冴, Neutralizer による波動伝播のパッシブ制御を利用した振動低減, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 85, No. 873, p. 18-00437, <https://doi.org/10.1299/transjsme.18-00437>

[学会発表] (計6件)

- ① Yuuta Shimizu, Yuichi Matsumura, Kohei Furuya, Ryouichi Ishikawa, Vibration Reduction of a panel structure by controlling a modal group having the same direction of wave number vector, Proceedings of Tnternoise 2019.
- ② 清水 祐太, 松村 雄一, 古屋 耕平, 山田 朋, 國井 翔太, 骨組み構造における断面変形を伴う波動モード間の反射/透過係数の算出法, 日本騒音制御工学会平成 30(2018)年秋季研究発表会講演論文集.
- ③ 清水 祐太, 松村 雄一, 古屋 耕平, 波動伝播の可視化を利用したフレームからパネルへの振動伝達の低減法, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 2018 講演論文集.
- ④ 尾崎 広典, 駒田 匡史, 松村 雄一, 古屋 耕平, 複数の共振周波数の同時配置に供する結合剛性の設計法, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 2018 講演論文集.
- ⑤ 黒木 駿, 駒田 匡史, 松村 雄一, 古屋 耕平, 強制振動の周波数特性を平滑化するための連続体型動吸振器の最適設計, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 2018 講演論文集.
- ⑥ 渡辺 翔, 松村 雄一, 古屋 耕平, 周期構造を利用した機能性モード形の設計, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 2017 講演論文集.

[その他]

ホームページ等

[http:// https://www1.gifu-u.ac.jp/~dyn/index.html](http://https://www1.gifu-u.ac.jp/~dyn/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：古屋 耕平

ローマ字氏名：(FURUYA, Kohei)

所属研究機関名：岐阜大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：40580056

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。