

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：32629

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420192

研究課題名(和文)多重スマートフィルム構造による革新的遮音制御法

研究課題名(英文)Novel sound transmission control using multiple smart films

研究代表者

岩本 宏之(Iwamoto, Hiroyuki)

成蹊大学・理工学部・准教授

研究者番号：90404938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、多重壁構造における柔軟壁をスマートフィルムに替えて、これに能動制御を導入することにより、軽量かつ高性能な遮音システムを構築することを目的とした。まず、フィルムは音場の影響を強く受けることに鑑み、中間層に制御音源を導入することで、能動振動制御と能動騒音制御を併用するハイブリッド制御を提案した。さらに、1面弾性キャビティのみにおいて明らかになっていた振動・音響連成系の精緻な理論モデリング(伝達マトリクス法を使用)を、2面弾性の場合に拡張した。その結果、ある条件下においては、音場が双曲線関数に支配されるハイパボリックモードが発現することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to present a light and efficient sound transmission control system by introducing active control technologies to a multiple smart films structure. First, in consideration of the fact that thin films are strongly affected by sound fields, hybrid control that simultaneously utilizes active vibration control and active noise control was proposed. Furthermore, the precise modelling method for a vibro-acoustic coupling system using a transfer matrix method, which had specified for a coupling system containing one flexible structure, was expanded to the case of a drum-like coupling structure. As a result, it was clarified that hyperbolic modes that are governed by cosh and sinh functions appear under certain conditions.

研究分野：機械力学・計測制御

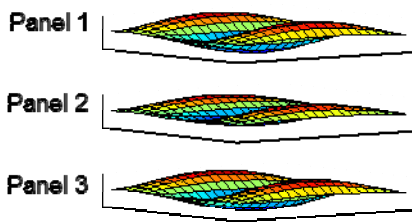
キーワード：能動振動制御 能動騒音制御 遮音制御 スマートフィルム

1. 研究開始当初の背景

我が国において騒音問題は典型七公害の一つに数えられ、その苦情件数は多い、特に近年においては、苦情件数は増加傾向にある。このような状況を背景に、機械システムの設計においては、高効率化・高性能化・低コスト化に加えて低騒音化が重要な課題となっている。中でも遮音制御は主要課題の一つであり、受動あるいは能動制御の観点から遮音制御問題を論じた報告は多い。さらに近年においては、高周波数領域において有効な二重壁構造に、低周波数領域において有効な能動制御を適用することで、広帯域にわたる遮音性能を実現するハイブリッド手法に関する研究も行われてきている。

筆者らは、多重壁構造が同様な構成部分の集合から成る繰り返し構造物となる点に着目し、モードの局在化現象を遮音制御に応用することを提案してきた。当該現象は、繰り返し構造物に何らかの誤差分散が存在する場合に、系全体にわたって分布するはずのモード形状が、一部の領域に集中する現象を指す。応力集中や疲労破壊などの観点からすると当該現象は忌避すべきものではあるが、外乱エネルギーの封じ込めが自然な状態で達成できることから、その制御応用は非常に効果的であると考えられる。一例として、三重壁構造に局在化制御を適用した場合の平板振動の様子を図1に示す。非制御時の場合、多重壁構造の振動モード形状は、システム全体に分布しているのがわかる。これに対し、局在化制御によって隣接する平板間の連成効果を弱めた場合、一つの平板のみが大きく振動するような局在化現象が発現し、その結果、透過波が劇的に抑制される。しかし、一連の研究過程の中で、当該抑制効果を得るためには、非常に数多くのポイントセンサ・アクチ

●非制御時



●局在化制御時

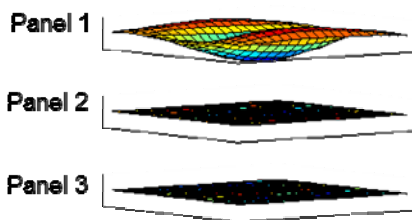


図1 多重壁構造における局在化制御

ュエータが必要となることが明らかになった。したがって、当該制御手法は遮音システムの複雑化・重量化に帰結してしまう。

2. 研究の目的

本研究課題では、多重壁構造を構成する遮音壁を軽量なフィルムに替え、これにスマートセンサ・アクチュエータを統合することで、多重スマートフィルム構造を構築することを考える。さらに、当該構造内にモードの局在化現象の生成メカニズムに踏み込み、これを積極的に惹起させることによって、壁を透過しやすい低周波音を指定された中間層に局在化させ、結果として放射音をキャンセルする手法の提案を最終的な目的とする。これにより、非常に軽量で簡素な構成によって、受音空間側における騒音レベルの劇的な抑制が可能になる。

3. 研究の方法

多重壁構造において遮音壁をフィルムに替えた場合、従来の多重壁構造とは異なり、構造は空気層の影響を大きく受ける。そこで、本研究期間においては、最も簡単な2重壁構造(図2)を例にとり、以下の点について検討を行った。

能動振動制御および能動騒音制御によるハイブリッド遮音制御

多重壁構造の遮音壁を PVDF に代表されるスマートフィルムに替えた場合、場合によっては制御パワーが不足する事が考えられる。また、フィルムのダイナミクスが空気層の影響に大きく影響されるであろう事に鑑みると、能動騒音制御の併用は効果的であると考えられる。

伝達マトリクス法を基調とした振動音響連成系の精密な理論モデリング

フィルムの柔軟性・軽量性を考慮すると、剛壁の境界条件を基調とするモーダルカップリング法の適用には限界があることが予想される。そこで、伝達マトリクス法によって、波動論の立場から音場を記述し、その結

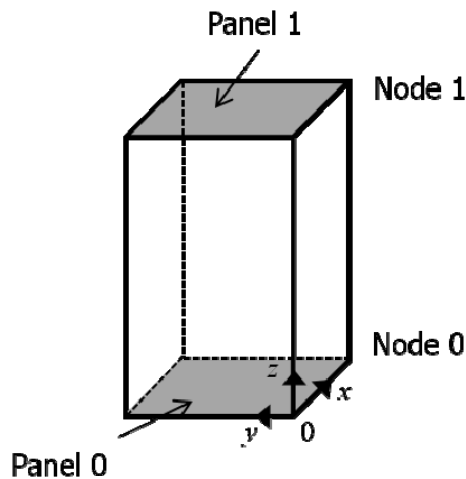


図2 2重壁モデル

果をモーダルカップリング法に導入することで問題の解決を図る。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 能動振動制御および能動騒音制御によるハイブリッド遮音制御

図2に示す2重壁モデルにおいて、平板0に外乱力が印加し、平板1から騒音が放射される場合を考える。空間のサイズは0.18m×0.38m×0.58mとし、柔軟壁は厚さ0.8mmの鉄板とする。議論の簡素化のために、当該モデルのダイナミクスは従来のモーダルカップリング法によって記述するものとする。評価指標となる平板1の音響放射パワーは以下のように記述される。

$$P_w = \mathbf{b}_1^H \mathbf{A} \mathbf{b}_1 \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{b}_1$ は平板1のモード係数ベクトル、 $\mathbf{A}$ はパワーマトリクスを表す。ここで、モード係数は平板0に作用する外乱力、平板1に作用する制御力、制御音源の体積速度の関数となる。したがって、制御力と体積速度からなる制御入力ベクトルを作成し、音響放射パワーを当該ベクトルの二次形式に変換することで、最適なフィードフォワード制御入力を導出することができる。理論の詳細は非常に煩雑となるので、ここでは割愛する。

図3は制御時および非制御時における平板1の音響放射パワーを示している。図より明らかなように、特に低周波領域において、音

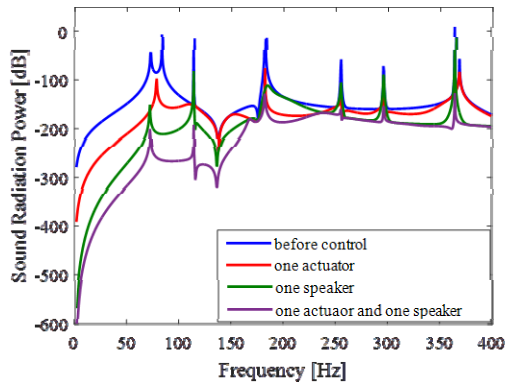


図3 制御前後の音響放射パワー

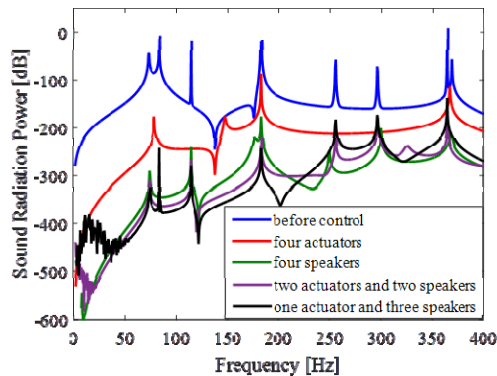


図4 制御前後の音響放射パワー（制御入力の本数を4つに固定した場合）

響放射パワーの大幅な低減が確認できる。また、1つの制御力を用いた場合と1つの制御音源を用いた場合を比較すると、制御音源を用いた場合の方が高い制御効果を示している。さらに、能動振動制御と能動騒音制御を組み合わせた場合は、相乗効果により、さらなる音響パワーの低減が達成されている。

図4は制御入力の本数を4つに固定した場合に制御効果を比較したものである。図より明らかなように、4つの制御力を用いた場合よりも4つの制御音源による制御の方が高い効果を示している。さらに、能動振動制御と能動騒音制御を併用した場合には、より高い低減効果が得られる。以上のことから、制御入力の本数が2つ以上使用可能なのであれば、能動振動制御あるいは能動騒音制御を単独で適用するのではなく、両者を併用した方が高い制御効果が望めることが明らかになった。

##### 4.2 伝達マトリクス法を基調とした振動音響連成系の精密な理論モデリング

多重壁構造物のモデリングにはモーダルカップリング法を用いるのが一般的である。しかし、当該手法は連成面において空気の粒子速度がゼロになるという瑕疵を有することは既に述べた。そこで、本研究課題においては、伝達マトリクス法の導入によりその問題の解決を図る。当該手法は音場の粒子速度と音源からの速度入力を等価に扱えるので、モーダルカップリング法との親和性が高い。

伝達マトリクス法を用いると、音場の $(l,m)$ モード群における状態方程式は以下のように記述できる。

$${}_1\mathbf{z}_{z,lm} = {}_{10}\mathbf{T}_{lm} \{ {}_0\mathbf{z}_{z,lm} - \mathbf{v}_{1,lm} \} + \mathbf{v}_{2,lm} \quad (2)$$

ただし、 ${}_0\mathbf{z}_{z,lm}$ はキャビティ底面の状態ベクトル、 ${}_1\mathbf{z}_{z,lm}$ は連成面における状態ベクトル、 ${}_{10}\mathbf{T}_{lm}$ は底面・連成面間の伝達マトリクス、 $\mathbf{v}_{1,lm}$ は平板1の音響場に対する速度入力ベクトル、 $\mathbf{v}_{2,lm}$ は平板2の音響場に対する速度入力ベクトルである。この式と、内部音圧を外力項に持つ平板の運動方程式の解を連立させることで固有値問題が定式化できる。

0.18m×0.38m×0.58mの閉空間に厚さ0.8mmの鉄板2枚を連成させたモデルについて数値解析を行った。表1は連成前後の固有振動数を示している。表より明らかなように、連成後の固有振動数は僅かではあるが連成前の固有振動数と異なることが分かる。さら

表1 連成前後の固有振動数

Mode number	Uncoupled		Coupled
	Modal indices $(l,m,n)$ or $(i,j)$	Frequency Hz	Frequency Hz
1	(0,0,0)	0	72.9
2	(1,1) - panels 1 and 2	73.145	74.34
3	(1,2) - panels 1 and 2	113.36	113.09
4	(1,3) - panels 1 and 2	180.38	113.1

に、連成前の同じ固有振動数のペアが、連成には異なる値にシフトしているのが分かる。図5は1次と2次の連成モードの固有関数を示している。図より明らかなように、平板のモード形状は(1,1)モードとなっているが、1次が同相モードで2次が逆相モードになっている。これは、2自由度系のバネマス系の固有ベクトルと同類の様態であると考えられる。また、音圧分布に着目すると、平板近傍で傾きを有しているのが分かる。音圧の傾斜角はその方向の粒子速度に対応することから、この結果は連成面における粒子速度がゼロになってしまう従来手法の問題点が解決されていることを示している。

図6は3次と4次の連成モードの固有関数

を示している。平板のモード形状は(1,2)モードのそれとなっており、また、1次と2次の連成モードと同様に低い固有振動数に対応する固有関数が同相モード、高い固有振動数に対応するのが逆相モードとなっている。さらに、音場のモード形状に着目すると、空間の中心を原点とする双曲線関数の形になっているのが分かる。これは、1面弾性キャビティにおいてエバネセントモードと呼ばれていたものに対応する。すなわち、振動場の(1,2)モードと連成する空間のモード群(例えば(0,1)モード群など)は、3次及び4次の固有振動数より高い帯域に cut-on 周波数と持つので、当該振動数においては、音場は実指数関数に支配されることになる。

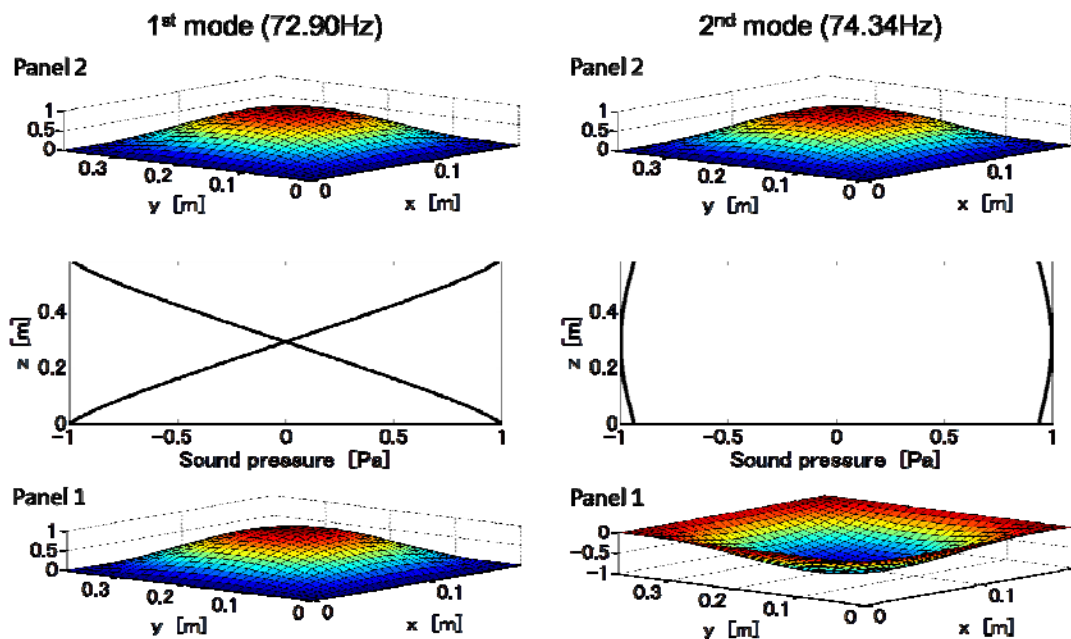


図5 1次及び2次の正規化連成固有関数

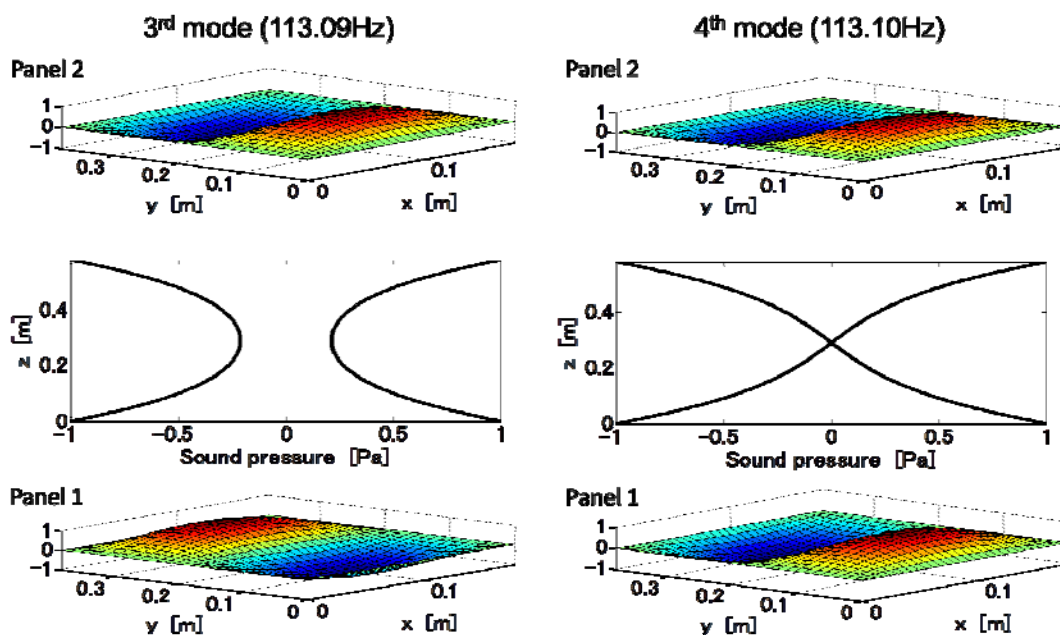


図6 3次及び4次の正規化連成固有関数

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

1. Xiaolan Zheng, Muneharu Saigo and Hiroyuki Iwamoto, Control of a crane rope-and-mass system by wave absorption with support feedback control, Mechanical Engineering Journal 4(1), 16-00397-16-00397, 2017
2. 眞田明, 東山孝治, 田中信雄, 岩本宏之, 閉空間からの透過音のアクティブ制御, 日本機械学会論文集, 80-812, TRANS0066-TRANS0066, 2014

[学会発表](計18件)

1. Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka, Wave absorption of an orthotropic rectangular panel based on direct feedback, MOVIC & RASD2016, USB Memory
2. Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka, [Invited lecture] Active control of bending waves propagating in an orthotropic rectangular panel, 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan
3. 岡田健太郎, 岩本宏之, 田中信雄, 能動騒音制御および能動振動制御による二重壁放射音の抑制, D&D2016 講演論文集(USB-Memory) 山口大学宇部キャンパス 2016年8月
4. 鄭小蘭, 西郷宗玄, 岩本宏之, クレーンの波動制御とフィードバック制御の統合振れ止め制御特性, D&D2016 講演論文集(USB-Memory) 山口大学宇部キャンパス 2016年8月
5. Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka, Feedback control of bending waves propagating in an orthotropic rectangular panel, The 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22), CD-ROM
6. Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka, Transfer-matrix-based approach for an eigenvalue problem of a drum-like rectangular cavity, Asia-Pacific Vibration Conference 2015 (APVC2015), CD-ROM
7. Motoya Watanabe, Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka, Active wave control of a coupled rectangular cavity, Asia-Pacific Vibration Conference 2015 (APVC2015), CD-ROM
8. 岩本宏之, 田中信雄, [招待講演]直交異方性矩形平板のフィードフォワード型波動制御, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会 成蹊大学吉祥寺キャンパス 2015年9月

9. 渡邊元哉, 岩本宏之, 田中信雄, 波動制御を基調とした振動音響連成系における静粛化制御-数値解析と基礎実験-, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会 成蹊大学吉祥寺キャンパス 2015年9月
10. Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka, Transfer-matrix-based approach for an eigenvalue problem of a coupled rectangular cavity, Inter.noise 2014, USB memory
11. Kigen Fukaya, Hiroyuki Iwamoto, Akira Sanada and Nobuo Tanaka, Generation of localized sound using speaker array, Inter.noise 2014, USB memory
12. Motoya Watanabe, Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka, Active noise reduction of a coupled rectangular cavity using active wave control, Inter.noise 2014, USB memory
13. 渡邊元哉, 岩本宏之, 田中信雄, 波動制御法を基調とした振動音響連成系の静粛化制御, D&D2014 講演論文集(USB-Memory) 上智大学四谷キャンパス 2014年8月
14. 深谷紀元, 岩本宏之, 眞田明, 田中信雄, スピーカアレイによる局所音場の生成, D&D2014 講演論文集(USB-Memory) 上智大学四谷キャンパス 2014年8月
15. Hiroyuki Iwamoto, Nobuo Tanaka and Akira Sanada, Experiment on the generation of a quiet space in a rectangular cavity using active wave control -updated results-, The 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), CD-ROM
16. Muneharu Saigo, Hiroyuki Iwamoto and Dong-Ho Nam, Wave absorption control of beam based on finite difference approach, Asia-Pacific Vibration Conference 2013 (APVC2013), CD-ROM
17. 岩本宏之, 田中信雄, 構造・音響連成系の固有値問題に関する一考察, D&D2013 講演論文集(USB-Memory) 九州産業大学 2013年8月
18. 岩本宏之, 田中信雄, 眞田明, 波動フィルタを用いた直方閉空間における静粛場生成実験, 日本機械学会年次大会 岡山大学津島キャンパス 2013年9月

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

岩本宏之 (IWAMOTO, HIROYUKI)  
成蹊大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 90404938

### (2)研究分担者

田中信雄 (TANAKA, NOBUO)  
首都大学東京・システムデザイン学部・名誉教授  
研究者番号: 70305423