

機関番号：32629

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760208

研究課題名(和文)多重壁構造におけるモードの局在化現象とその制御応用

研究課題名(英文) Mode localization phenomena of a multiple-wall structure and its application to active control

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) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、多重壁構造にモードの局在化現象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抑制する手法の提案を目的とする。まず、モードカップリングによるモデリングを基調として、多重壁構造の状態マトリクス方程式を導出する。次に、平板間のエネルギー伝達を担う連成項の存在を明らかにし、これを最小化することで局在化制御が可能となることを明らかにする。また、多重壁構造の精緻なモデリングについて、伝達マトリクス法を用いることで、平板の振動速度入力を陽に記述し、かつ、連成面の粒子速度がゼロにならない手法の提案も行う。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to present a method for suppressing sound radiation from a multiple-walled cavity based on the mode localization phenomenon in which the low-frequency vibration and/or sound is trapped in the intermediate layer. First, based on the modal coupling method, a state matrix equation of a multi-walled cavity is derived. Next, the existence of the coupling term which plays an important role in energy transfer between flexible panels is clarified, numerically demonstrating that the localization control is achieved by minimizing the coupling term. Finally, in respect of the precise modeling of the multi-walled cavity, by introducing the transfer matrix approach, a novel modeling method is presented in which vibrational input to the acoustical field is explicitly described and particle velocity does not become zero at a coupling plane.

研究分野：機械力学・制御

科研費の分科・細目：振動制御

キーワード：連成現象 波動制御 遮音制御

### 1. 研究開始当初の背景

近年、環境問題への関心が高まり、機械システムの設計における高効率化・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(準)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。

二重壁にかぎらず、複数の柔軟壁からなる多重壁構造は、同様な構成部分の集合から成る構造物の典型であり、これを繰り返し構造物と呼ぶ。しかし、一様とされる構成要素からなる繰り返し構造物においては、誤差分散はその多少に関わらず必ず存在する。このとき、系全体にわたって分布するはずのモード形状が、その誤差分散の程度に応じて、一部の領域に集中する場合がある。これをモードの局在化現象という。一般に、当該現象は応力集中や疲労破壊などの観点より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ていると考え、振動・騒音抑制問題への応用が可能である。研究代表者らはこの点に着目し、当該現象を基調とする能動振動絶縁法を提案し、その有用性を数値解析および実験により明らかにしている。しかし、本研究課題の申請時点で提案された局在化制御手法を総括すると、多重壁構造における能動遮音制御に関する研究は存在しなかった。

### 2. 研究の目的

本研究は、多重壁構造にモードの局在化現象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目的とする。これにより、能動遮音制御問題において、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。これが達成されれば、構造システムの省エネルギー化が期待できる。一般に遮音性能を高めるためには壁の質量を大きくする必要はあるが、当該手法は振動・音響エネルギーのある領域に封じ込めるので、多重壁構造を構成する柔軟壁は薄くてもかまわず、構造の軽量化につながる。また、多重壁構造は空気の間隔層を持つため、断熱効果が高く、屋内の保温効果が期待できる。したがって、当該手法は低炭素化社会の実現にも寄与するものと考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究課題の研究手法としては、主に(1)多重壁構造のモデリング、(2)制御理論の構築とその検証に分類される。モデリングにおいては、従来のモーダルカップリングを基調とした手法と、柔軟壁における音場境界条

件を厳密に与えることによる手法の両面から研究を行った。また、制御理論の構築においては、空間層が薄い場合にも対応可能なように、柔軟壁にのみセンサ・アクチュエータを設置できる前提の元に研究を行った。

図1に多重壁構造物の概要図を示す。柔軟壁の境界条件は周辺単純支持とし、外乱としては外側の平板の外側に外部から平面波が斜入射したものを考える。

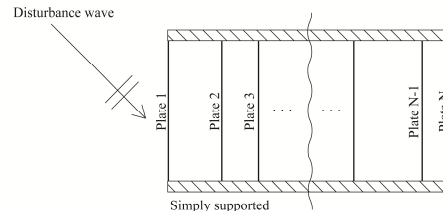


図1 多重壁構造物の概要図

### 4. 研究成果

本研究で得られた成果を要約すると以下のようになる。

#### (1) 多重壁構造物の局在化制御

モーダルカップリングによるモデリングを基調として、平板間の連成を抑制する手法を提案する。平板のモード係数ベクトルに関する状態マトリクス方程式は以下のように記述される。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Q}^1 & \mathbf{R}^1 & & \dots & & \mathbf{0} \\ \mathbf{P}^2 & \mathbf{Q}^2 & \mathbf{R}^2 & & & \\ & & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & & \mathbf{P}^j & \mathbf{Q}^j & \mathbf{R}^j \\ & & & & \ddots & \\ \mathbf{0} & \dots & & & & \mathbf{P}^N & \mathbf{Q}^N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_j \\ \vdots \\ \mathbf{v}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{q}_d \\ \mathbf{f}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{f}_j \\ \vdots \\ \mathbf{f}_N \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{v}_j$  は  $j$  番目の平板における速度モード係数ベクトル、 $\mathbf{q}_d$  は平面波の影響を示す外乱ベクトル、 $\mathbf{f}_j$  は 2 枚目以降の平板に作用する制御力ベクトル、はそれぞれ  $j$  番目の平板のダイナミクスを規定する行列である。ここで、振動伝播に起因する非対角成分である連成項  $\mathbf{P}_j, \mathbf{R}_j$  を抑制すれば平板間の連成関係が抑制される。したがって本研究では制御により連成項の抑制を目指す。

1 番目の平板から 2 番目の平板にエネルギーが伝達することを防ぐために、平板 1 の情報を基に平板 2 に以下のようなフィードバック制御を講じることを考える。

$$\mathbf{f}_2 = -\mathbf{G}\mathbf{v}_1 \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{G}$  は制御ゲインマトリクスである。次に、上式を式(1)に代入し、その他の制御力をゼロとすると状態マトリクス方程式は以下のように書き換えられる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Q}^1 & \mathbf{R}^1 & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{P}^2 + \mathbf{G} & \mathbf{Q}^2 & \mathbf{R}^2 & \vdots \\ \vdots & \mathbf{P}^j & \mathbf{Q}^j & \mathbf{R}^j \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{P}^N & \mathbf{Q}^N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_j \\ \vdots \\ \mathbf{v}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{q}_d \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

したがって、連成項  $\mathbf{P}^2 + \mathbf{G}$  を抑制するように適切な  $\mathbf{G}$  を与えることによって、エネルギー伝達の絶縁を図ることが出来る。

図2に三重壁モデルにおけるシミュレーション結果を示す。上から平板1, 2, 3の運動エネルギーを示す。これより、平板1の運動エネルギーが保たれたまま、それ以降の運動エネルギーの抑制効果が確認できる。つまり、連成項の抑制により平板2以降への振動絶縁が達成されているのである。これは、極所的な制御により平板2以降のグローバルな制御が実現されたといえる。

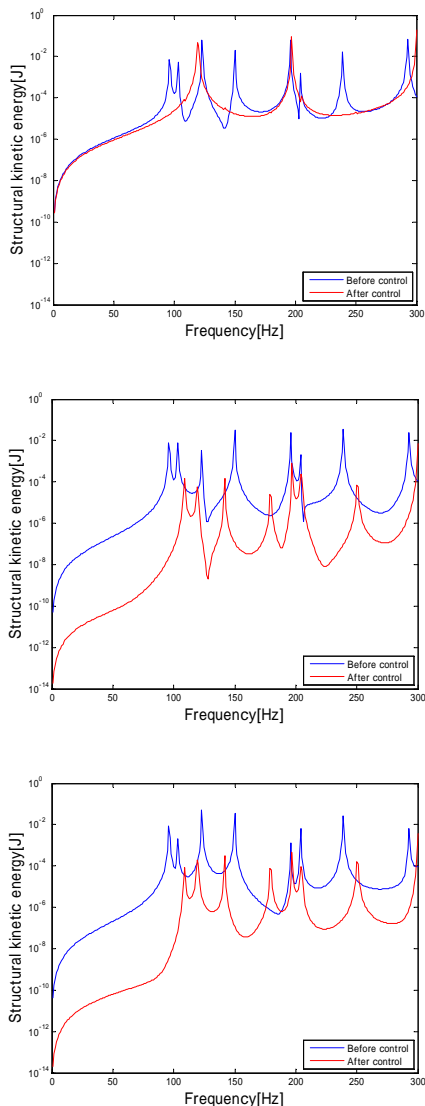


図2 平板1, 2, 3の運動エネルギー

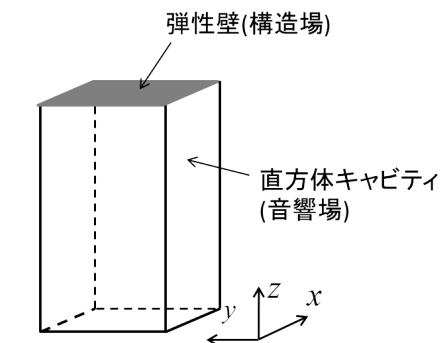
(2) 振動・音響連成系の厳密なモデリング  
多重壁構造物の振動・音響制御を指向した場合、エネルギー伝達が陽な形で記述できることは重要である。モーダルカップリング法はこれを可能とするが、連成面において空気の粒子速度がゼロになるという瑕疵を有する。そこで、本研究課題においては、伝達マトリクス法の導入によりその問題の解決を図る。

議論の簡素化のため、図3に示すような一面弾性キャビティを考える。この場合、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。

$${}_2\mathbf{z}_{z,lm} = {}_{20}\mathbf{T}_{lm} {}_0\mathbf{z}_{z,lm} + \mathbf{v}_{lm} \quad (4)$$

ただし、 ${}_0\mathbf{z}_{z,lm}$  はキャビティ底面の状態ベクトル、 ${}_2\mathbf{z}_{z,lm}$  は連成面における状態ベクトル、 ${}_{20}\mathbf{T}_{lm}$  は底面・連成面間の伝達マトリクス、 $\mathbf{v}_{lm}$  は平板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 8mm の鉄板を連成させたモデルについて数値解析を行った。図4は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、空間内部の音圧分布が実指数関数の形状となっているのが分かる。これはエバネセントモードと呼ばれるもので、研究代表者らが以前に提案した解析法の結果と合致するものである。また、連成面において音圧の勾配が見られることから、当該面における粒子速度がゼロであることが分かる。したがって、提案したモデリング法は、式(4)にあるように平板の振動速度の影響を陽に表しつつ、従来のモーダルカップリング法の問題を克服したものとなっている。



音響・構造連成場

図3 一面弾性キャビティの概要図

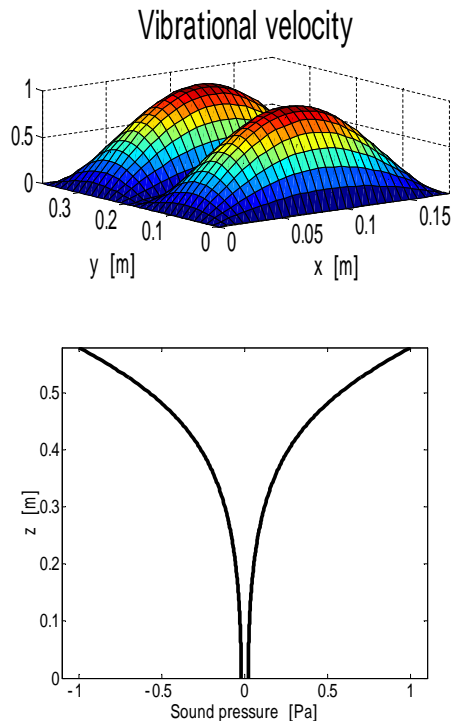


図4 2次連成モードの固有関数

#### 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7件)

1. 石森章純, 田中信雄, 岩本宏之, 遅延駆動パラメトリックスピーカによる広域能動騒音制御, 日本機械学会論文集C編, 79巻, 2013, pp.604-616.
2. 岩本宏之, 田中信雄, Simon G. Hill, Feedback control of wave propagation in a rectangular panel, part 1: Theoretical investigation of fundamental properties, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.39, 2013, pp.3-19.
3. 田中信雄, 多嘉良佑介, 岩本宏之, Eigenpairs of a coupled rectangular cavity and its fundamental properties, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.131, No.3, 2012, pp.1910-1921.
4. Simon G. Hill, 田中信雄, 岩本宏之, A generalised approach for active control of structural-interior global noise: Practical implementation, Journal of Sound and Vibration, Vol.331, 2012, pp.3227-3239.
5. 岩本宏之, 田中信雄, Simon G. Hill, Feedback control of wave propagation in a rectangular panel, part 1: Experimental realization using clustered velocity and displacement

feedback, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.32, 2012, pp.216-231.

6. 岩本宏之, 田中信雄, 多嘉良佑介, Active feedforward wave control of a rectangular panel using a wave filter constructed with smart mode sensors, Journal of System Design and Dynamics, Vol.5, No.6, 2011, pp.1347-1360.
7. 岩本宏之, 田中信雄, 多嘉良佑介, スマートモードセンサによる波動フィルタを基調とした薄肉矩形平板のフィードフォワード型波動制御, 日本機械学会論文集C編, 77巻776号, 2011, pp.1223-1237.

〔学会発表〕(計19件)

1. 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, 日本機械学科 2013年度年度年次大会, 平成25年9月11日, 岡山大学
2. 岩本宏之, 田中信雄, 構造・音響連成系の固有値問題における一考察, Dynamics and Design Conference 2013, 平成25年8月26日, 九州大学
3. 岩本宏之, 田中信雄, 眞田明, Experiment on the generation of a quiet space in a rectangular cavity using active wave control -updated results-, 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), 平成25年07月08日, Bangkok, Kingdom of Thailand
4. 西郷宗玄, 岩本宏之, Dong-Ho Nam, Wave absorption control of beam based on finite difference approach, Asia-Pacific Vibration Conference 2013 (APVC2013), Jeju, Republic of Korea
5. 西郷宗玄, 岩本宏之, はりの差分波動制御則における差分幅の制御性に及ぼす影響, 日本機械学会関東支部第19期総会講演会, 平成25年3月15日, 首都大学東京
6. 岩本宏之, 田中信雄, 眞田明, 波動制御法を基調とした直方閉空間内における静粛場生成実験, 日本機械学会関東支部第19期総会講演会, 平成25年3月15日, 首都大学東京
7. 功刀公太, 岩本宏之, 小島広久, スマートフィルムセンサ・アクチュエータを用いたテープテザーの振動制御, 日本機械学会関東支部第19期総会講演会, 平成25年3月15日, 首都大学東京
8. 岩本宏之, 田中信雄, 多嘉良佑介, 構造・音響連成系における固有値問題, Dynamics and Design Conference 2012, 平成24年9月20日, 慶應義塾大学
9. 岩本宏之, 田中信雄, 薄肉矩形平板におけるフィードバック方波動制御(実験的検証), 日本機械学会 2012年度年度年次大会,

- 平成 24 年 9 月 10 日, 金沢大学
10. 岩本宏之, 田中信雄, 眞田明, Experiment on the generation of a quiet space in a rectangular cavity using active wave control, 19th International Congress on Sound and Vibration (ICSV19), 平成 24 年 7 月 9 日, Vilnius, Lithuania
  11. 岩本宏之, 田中信雄, 眞田明, Active boundary control of a rectangular cavity, Euronoise 2012, 平成 24 年 6 月 11 日, Prague, Czech Republic
  12. 西郷宗玄・岩本宏之, 片持ちはりの自由端モーメント波動制御, 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 平成 24 年 3 月 9 日, 日本大学
  13. 岩本宏之, 田中信雄, Generation of a quiet space in a rectangular cavity using wave-filter-based active wave control, Asia Pacific Vibration Conference2009, 平成 23 年 12 月 7 日, Hong Kong, China
  14. 菅野秀, 田中信雄, 岩本宏之, Sound confinement control of a multiple-wall structure, Asia Pacific Vibration Conference2009, 平成 23 年 12 月 7 日, Hong Kong, China
  15. 目坂和也, 田中信雄, 岩本宏之, Cluster control of the acoustic power radiated from a rectangular panel with asymmetric boundary conditions, Asia Pacific Vibration Conference2009, 平成 23 年 12 月 7 日, Hong Kong, China
  16. 石川美里, 蛭間貴博, 江波戸明彦, 高橋正樹・岩本宏之, 田中信雄, 用紙音発生メカニズムに関する研究(用紙衝突音の改善), 日本機械学会 2011 年度年次大会, 平成 23 年 9 月 14 日, 東京工業大学
  17. 岩本宏之, 田中信雄, 薄肉矩形平板構造物におけるフィードバック型波動制御に関する研究, Dynamics and Design Conference 2011, 平成 23 年 9 月 6 日, 高知工科大学
  18. 菅野秀, 田中信雄, 岩本宏之, 多重壁構造物による遮音制御に関する研究, Dynamics and Design Conference 2011, 平成 23 年 9 月 9 日, 高知工科大学
  19. 目坂和也, 田中信雄, 岩本宏之, クラスタ制御を用いた非対称境界条件平板における音響放射パワーの抑制, Dynamics and Design Conference 2011, 平成 23 年 9 月 9 日, 高知工科大学

## 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