

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：32629

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14925

研究課題名（和文）集中系モデルを用いた音響構造連成系の能動制御に関する研究

研究課題名（英文）Vibro-acoustic coupled analysis and control using a concentrated mass model

研究代表者

久野 翔太郎（HISANO, Shotaro）

成蹊大学・理工学部・助教

研究者番号：00825945

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、音響構造連成系で発生する騒音・振動の効率的な抑制手法の確立を目的として、集中系モデルを用いた音響構造連成系の解析モデルの構築と制御系の設計を行った。ベクトル型有限要素法の一つであるRaviart-Thomas要素を集中質量化することで、集中系モデルが得られることが分かった。また、音響構造連成系を対象とした数値計算を行い、提案手法が従来の有限要素法よりも効率的に固有値解析できることが分かった。一方、任意形状要素を集中質量化した場合には、固有値の解析精度が低下する問題がある。また、モード座標における状態フィードバック系の制御効果について基礎的な検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

音響構造連成現象の解析は近年でも重要な工学的課題と考えられており、当該現象の解析効率化は機械設計技術の向上に大きく寄与する。本研究では、音響構造連成現象の解析効率化を達成できる新たな解析モデルの開発を行い、数値計算によって有効性を確認することができた。また、解析モデルを使用した音響制御に関する基礎検討を行い、騒音・振動の能動的な抑制手法に関する知見を得た。上記の解析や制御を実用化する際の問題点も確認することができたため、当該分野の今後の研究方針に関する知見を得た。

研究成果の概要（英文）：In this study, the purpose is to establish an efficient suppression method for noise and vibration generated in vibro-acoustic coupled system. We constructed an analysis model using a concentrated mass model and designed a control system using the model. The concentrated mass model can be obtained by mass lumping the Raviart-Thomas element. In addition, numerical calculations were performed for the coupled system of the rectangular parallelepiped space and the flexible plate. The proposed method can analyze eigenvalues more efficiently than the conventional finite element method. However, the analysis accuracy of eigenvalues will decrease when analyzing with arbitrary shape elements. Finally, a basic study was conducted on the control effect of the state feedback system in the mode coordinates.

研究分野：機械力学，音響工学，制御工学

キーワード：集中系モデル 有限要素法 音響構造連成解析 状態フィードバック

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

騒音の低減手法として、音に音を重ね合わせる能動騒音制御は低周波騒音の抑制に適しているが、制御効果が制御対象領域に取り付けたマイク近傍に限られ、制御領域の拡大が課題となっている。剛体壁で囲まれた長方形等の閉空間であれば、空間の固有モード関数を利用することで空間全体を制御することができるが、構造物と連成した閉空間内のモード関数を導出するのは困難であり、実際の閉空間全体に効果のある制御を行うことは難しい。

そこで、音響構造連成系のモデル化を利用することでこの問題を解決することを目指している。本研究では、音響構造連成系の効率的な解析モデルの開発を行い、開発したモデルを用いた制御系の構築を検討する。

2. 研究の目的

本研究では、音響構造連成系の解析に適したモデル化手法の開発を行うことで、連成解析の効率化手法を確立することを目的とする。また、振動・騒音の効率的な抑制手法の構築を目的として、モデル全体に制御効果のあるモデルベースの能動制御手法に関する検討も行う。

3. 研究の方法

(1) 有限要素法を基調とした集中系モデルの開発

集中系モデルの基礎理論は過去に構築されているが、直感的な導出を採用しているため任意の要素形状を用いる際の質量分配が難しいという問題があった。そこで、本研究では、有限要素法を利用した導出方法を開発する。有限要素法は要素内の状態量分布の近似関数（多項式）から一意に質量行列が決定されるため、この行列を基調として質量の集中方法を検討することで、任意の要素形状を用いる際の質量を正しく分配できる可能性があると考えた。

(2) 連成解析効率化のための座標変換手法の開発

集中系モデルの運動方程式は、質量行列、剛性行列がともに対称行列となる。また、集中質量化しているため、質量行列は対角行列となる。しかしながら、音響空間の状態量が要素内の辺上に配置された質点変位で定義されているため、余剰な自由度を持っており固有値解析するとゼロ固有値が発生するという問題がある。そこで、音響空間の状態量をベクトル量の質点変位からスカラ量である音圧へ変換することで、自由度を削減する。この手法も過去に提案されたものは直感的な導出を採用しているため、本研究ではエネルギーの平衡を利用して体系化する。また、座標変換後の方程式の係数行列は疎行列となるため、疎行列用の解析が効率的に適用できるような固有値問題の変換を行う。

(3) モデルベース制御に関する基礎検討

モデルベース制御は、振動分野においては高い制御効果が得られているが、音響空間に対して適用した例は少なく十分な制御効果が得られていない。そこで、本研究では、作成したモデルを使用して、閉空間全体の騒音低減を実現する制御系の設計に関する基礎検討を行う。(1),(2)で開発したモデルの利点を活かすために、固有モードを利用した制御手法について検討する。

4. 研究成果

(1) 有限要素法を基調とした集中系モデルの開発

集中系モデルの理論を体系化することを目的とし、有限要素法を基調として導出する方法を検討した。図1に示すように、直方体の3次元音響空間の1面に平板が取り付けられた系を解析対象とした。なお、平板以外の面は剛体と仮定している。音響空間はベクトル型有限要素法の一つである Raviart-Thomas 要素を用いて、空気粒子の変位を1次関数分布と仮定して形状関数を導出した。平板は、ACM 要素を用いて形状関数を導出した。形状関数と振動エネルギー、音響エネルギーの式を利用して、音響空間と平板の要素行列を導出した。以上により、節点変位を状態量とする連成系モデルを構築した。また、導出したモデルに対して Hinton-Rock-Zienkiewicz lumping method を適用することで、集中質量化を行った。その結果、Raviart-Thomas 要素で導出したモデルを集中質量化することで、過去に提案された集中系モデルと同様の方程式が得られることを確認した。これによって、集中系モデルの導出の体系化を実現することができた。

当初の予定では、Hinton-Rock-Zienkiewicz lumping method による質量集中は、任意形状要素にも適用できるものと推測していた。しかしながら、長方形要素や円筒形要素などのように、音響空間要素の辺上に配置された質点変位が座標系と直交する場合以外では、固有値解析の精度が低下してしまうことが分かった。提案手法は、質量行列の対角性を利用して計算効率を改善しているため、この問題の解決は提案する連成解析手法の実用化に際して重要である。したがって追加の検討が必要であると判断し、当初の予定を変更して連成解析モデル開発に関する検討をより重点的に行った。

Raviart-Thomas 要素を用いた任意形状要素の集中質量化を検討するために、Piola 変換を用いて任意の四辺形系要素を計算する方法を検討した。図2のように、厚さ h の2次元音響空間を仮

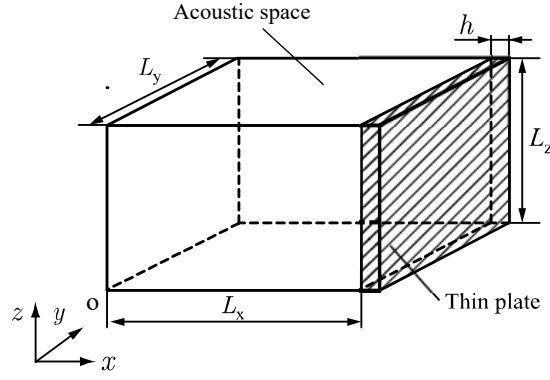


図1 音響構造連成系のモデルケース

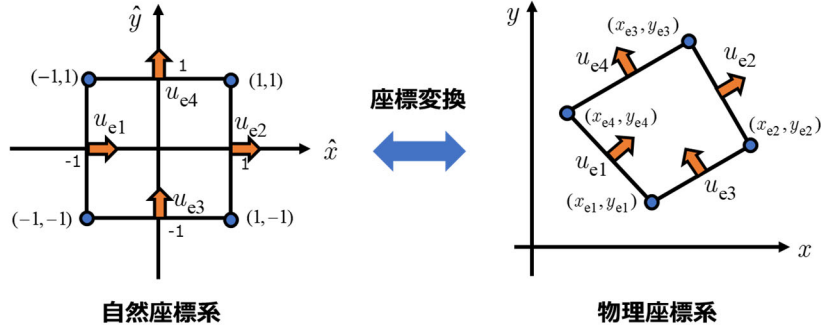


図2 任意の四辺形要素の解析

定して、任意の四辺形要素を物理座標系で定義して、Piola 変換によって自然座標系へと変換する。このとき、物理座標系における要素の各頂点の座標を (x_{ei}, y_{ei}) とすると、物理座標系と自然座標系の対応は、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_e(\hat{x}, \hat{y}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{N}_e(\hat{x}, \hat{y}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_e \\ \mathbf{y}_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表せる。 $\mathbf{x}_e, \mathbf{y}_e$ は 4 つの頂点に対応する x_{ei}, y_{ei} をそれぞれ並べたベクトルであり、形状関数 $\mathbf{N}_e(\hat{x}, \hat{y})$ は次式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{N}_e(\hat{x}, \hat{y}) &= [N_{e1}(\hat{x}, \hat{y}) \quad N_{e2}(\hat{x}, \hat{y}) \quad N_{e3}(\hat{x}, \hat{y}) \quad N_{e4}(\hat{x}, \hat{y})] \\ N_{e1} &= \frac{1}{4}(1-\hat{x})(1-\hat{y}), \quad N_{e2} = \frac{1}{4}(1+\hat{x})(1-\hat{y}), \quad N_{e3} = \frac{1}{4}(1+\hat{x})(1+\hat{y}), \quad N_{e4} = \frac{1}{4}(1-\hat{x})(1+\hat{y}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1)を用いて、次のヤコビアンを計算する。

$$\mathbf{J}(\hat{x}, \hat{y}) = \begin{bmatrix} \partial x / \partial \hat{x} & \partial y / \partial \hat{x} \\ \partial x / \partial \hat{y} & \partial y / \partial \hat{y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、Piola 変換によれば、物理座標系における変位分布 $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ は、自然座標系における変位分布 $\hat{\mathbf{u}}(\hat{\mathbf{x}})$ を用いて次のように表せる。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = |\mathbf{J}(\hat{\mathbf{x}})|^{-1} \mathbf{J}(\hat{\mathbf{x}}) \hat{\mathbf{u}}(\hat{\mathbf{x}}) \quad (4)$$

式(4)を用いれば、物理座標上の要素行列に関する積分演算を自然座標上で行うことが可能であり、要素質量行列は次のように計算できる。

$$\mathbf{M}_e = \rho h \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\mathbf{J} \mathbf{N}_e^R)^T \mathbf{J} \mathbf{N}_e^R |\mathbf{J}|^{-1} d\hat{x} d\hat{y} \quad (5)$$

ここで、 ρ は空気の密度であり、 \mathbf{N}_e^R は自然座標系の変位分布 $\hat{\mathbf{u}}(\hat{\mathbf{x}})$ に対応する形状関数である。 \mathbf{J} は式(1)によって一意に定まるが、この行列が対角行列となるのは、長方形要素のように物理座標系の要素の辺上に配置された質点変位が座標系と直交する場合に限られる。したがって、 \mathbf{J} が対角行列とならないような任意の四辺形要素では、自然座標系の形状関数 \mathbf{N}_e^R を集中質量化するように設定しても \mathbf{M}_e が対角行列にならない。以上より、有限要素法を基調とした考え方では、任意の四辺形要素の集中質量化が難しいことが示唆される。このように、集中系モデルは差分法に近い特性も持っていることが分かったため、今後は、有限体積法に着目した検討を行う予定である。有限体積法は、非構造格子の解析も可能であるため上記課題への有効な対策になる可能性がある。

(2) 連成解析効率化のための座標変換手法の開発

変位座標から音圧座標への座標変換は図 3 に示すような変換で行われる。要素内の質点変位ベクトルの発散が音圧に比例することを利用して座標変換行列を導出する。また、音響ポテンシャルエネルギーを音圧と空気の粒子変位それぞれで表し、これらが平衡することを利用した関係式を導出する。本研究では、座標変換行列とポテンシャルエネルギーの平衡式を利用することで、運動方程式の座標変換が実現できることを発見し、音圧座標への変換手法を体系化することができた。最終的に、集中系モデルにおける固有値問題は次のように表せる。

$$\mathbf{AB}\Phi = \lambda\Phi, \quad (6)$$

ここで、 λ は固有値、 Φ は固有ベクトルである。 \mathbf{A}, \mathbf{B} はそれぞれ連成系の係数行列で構成される行列であり、疎行列かつ対称行列である。ここで、式(6)の左から行列 \mathbf{B} を乗じると、

$$\mathbf{BAB}\Phi = \lambda\mathbf{B}\Phi, \quad (7)$$

を得る。式(7)において、行列 \mathbf{BAB} も疎行列かつ対称行列となるため、固有値を高速に解析することが可能となる。式(7)を用いて、連成系の自由度 2 万から 30 万程度までの条件で固有値解析を行い、解析結果の妥当性を確認することができた。また、提案手法と従来の有限要素法による解析結果を比較した結果、2 倍以上の速度で計算できることを確認できた。以上により、効率的な連成解析手法を開発することができた。

(3) モデルベース制御に関する基礎検討

モデルを用いた制御系に関して、モード座標における状態フィードバック系の制御効果について検討した。基本的な理論を再考するために、1次元音響管内に騒音源と制御音源が点音源として配置された場合を対象とした。音源を含めて集中系モデルで定式化した後、モード座標へ変換した。本研究では、騒音源と制御音源の位置関係によって各モードに与える影響が変化することに着目した。外力点と制御点の位置関係で分類した特定のモード群のみを制御することで、すべてのモードに対して単純な状態フィードバック制御を適用するよりも高い制御効果を得られることを確認した。複数のモード群を同時に制御する場合には、各モード群への入力間の干渉が発生しており、これが制御効果を低下させることを確認した。このとき、各モード群への入力間の干渉が小さくなるように制御点を配置できる場合があることを発見しており、制御音源の配置を最適化することで状態フィードバックの制御効果を改善できる可能性がある。一方で、アクチュエータやオブザーバの影響がある場合、適切な制御点の探索が難しくなる課題も見つかっている。制御系の設計に関しては、上記の結果を踏まえて引き続き研究を続けていく予定である。

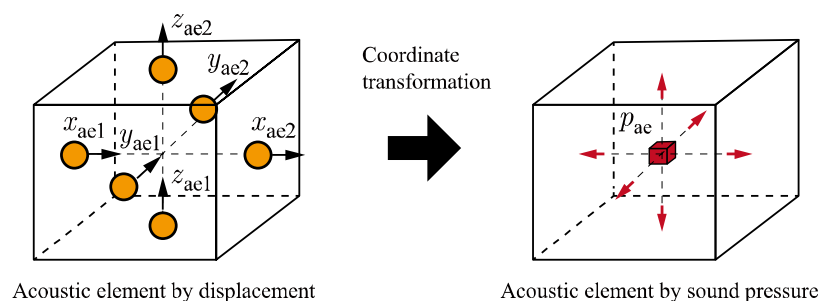


図 3 座標変換のイメージ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 HISANO Shotaro, IWAMOTO Hiroyuki, ISHIKAWA Satoshi	4. 巻 88
2. 論文標題 Audible sound analysis of parametric speaker by concentrated mass model (Steady-state response analysis for cylindrical acoustic space by substructure synthesis method)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00096	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ogasawara Yuta, Iwamoto Hiroyuki, Hisano Shotaro	4. 巻 1
2. 論文標題 Zero Control Power Phenomena in the Minimization of Sound Power Using Multiple Control Sources	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Vibration Engineering for a Sustainable Future	6. 最初と最後の頁 359 ~ 365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-47618-2_45	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hisano S., Ishikawa S., Kijimoto S., Iwamoto H.	4. 巻 3
2. 論文標題 Structural-Acoustic Coupled Analysis by Concentrated Mass Model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Vibration Engineering for a Sustainable Future	6. 最初と最後の頁 9 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-46466-0_2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tanaka Hiroki, Iwamoto Hiroyuki, Hisano Shotaro	4. 巻 1
2. 論文標題 Optimal Control of Acoustic Radiation Power for a Triple-Walled Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Vibration Engineering for a Sustainable Future	6. 最初と最後の頁 37 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-47618-2_5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwamoto Hiroyuki、Hisano Shotaro、Tanaka Nobuo	4. 巻 487
2. 論文標題 Modelling and feedforward control of wave propagation in an orthotropic rectangular panel based on a transfer matrix method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 115639 ~ 115639
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsv.2020.115639	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwamoto Hiroyuki、Hisano Shotaro、Tanaka Nobuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Wave-based approach for dynamical analysis of a coupled rectangular cavity: fundamental properties of eigenpairs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Meccanica	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11012-021-01331-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsuyama Marin、Iwamoto Hiroyuki、Hisano Shotaro、Tanaka Nobuo	4. 巻 1
2. 論文標題 Adaptive Control of a String-Plate Coupled System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Vibration Engineering for a Sustainable Future	6. 最初と最後の頁 185 ~ 192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-47618-2_23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 久野翔太郎, 石川諭, 岩本宏之
2. 発表標題 集中系モデルによる温度勾配のある音響管の解析
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 裕貴, 岩本 宏之, 久野 翔太郎
2. 発表標題 3 重壁構造物における音響放射パワー最適制御
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小笠原 雄太, 岩本 宏之, 久野 翔太郎
2. 発表標題 無限バツフルの平面構造における音響パワーの最小化とゼロパワー現象の条件
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久野翔太郎, 石川諭, 雫本信哉, 岩本宏之
2. 発表標題 集中系モデルによる音響振動連成現象の解析
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中裕貴, 岩本宏之, 久野翔太郎
2. 発表標題 多重壁構造物における音響放射パワー最適制御
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩本 宏之, 久野 翔太郎, 田中 信雄
2. 発表標題 対向型アクティブ波動ダイオードを基調とした一次元集中定数モデルにおける波動トラッピング制御
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久野 翔太郎, 岩本 宏之, 石川 諭
2. 発表標題 集中系モデルを用いた超音波の非線形相互作用に対する定常応答解析手法の開発
3. 学会等名 環境工学総合シンポジウム講演論文集 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 關 龍平, 久野 翔太郎, 岩本 宏之, 石川 諭
2. 発表標題 集中系モデルを用いたインピーダンス境界を有する空間におけるパラメトリックスピーカの解析
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久野 翔太郎, 石川 諭, 岩本 宏之
2. 発表標題 集中系モデルを用いた熱音響自励振動解析手法の検討
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------