

令和 3 年 5 月 19 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04004

研究課題名（和文）振動モードの音への寄与を考慮した能動遮音制御

研究課題名（英文）Structural modal acoustic potential energy and active control of sound transmission

研究代表者

貝塚 勉（Kaizuka, Tsutomu）

工学院大学・先進工学部・准教授

研究者番号：50756369

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：小型軽量のセンサとアクチュエータを構造物に取り付け、構造物の振動を計測・制御することで、構造物から放射される騒音を減らしたい。こうした問題設定のもと、騒音への寄与の大きい振動モードを特定し、それを選択的に計測・制御するという、効果的かつ効率的な制御系の設計論を提案した。振動モード同士が連成するため、ひとつの振動モードを抑制するだけで、自己のみならず他の振動モードの共振ピークも芽づる式に抑制しうる。提案する制御系の有効性を計算機シミュレーションと実験の両面から示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

騒音の低減は、様々な工業製品で要求される。従来の騒音対策は、制振材や吸音材を構造物に貼付する受動的な対策だが、原理的に低周波音には効きにくい。大量の材料を貼付すれば低周波音も十分減らしうるが、それでは軽量性が損なわれる。本研究は能動的な対策であり、軽量性と静粛性を両立しうる。この種の技術（振動の計測・制御による騒音の低減）に関する研究は世界中で行われているが、振動と騒音の大小が比例しないため、闇雲に振動を小さくしても騒音は小さくならない等の課題があり、実用的に普及するには至っていない。本研究の成果は、そのひとつの解決策になりうる。

研究成果の概要（英文）：This study deals with active control of sound radiation by using structural sensors and structural actuators. Structural modal contributions to the sound radiation are calculated, and the most contributive structural mode is identified. The identified structural mode is selectively measured and actuated by using a structural modal filter, i.e., modal sensor and modal actuator. Because structural modes couple with each other in the acoustic field, suppressing one structural mode can reduce resonant peaks of not only itself but also other structural modes. Such feature improves effectiveness and efficiency of the control system. The proposed control system is validated through computer simulation as well as experiment.

研究分野：音響学

キーワード：騒音制御 遮音制御 振動制御 放射音

## 1. 研究開始当初の背景

騒音の低減は、自動車や航空機など、様々な工業製品で要求される。従来の騒音対策とは、制振材や吸音材を構造物に貼付する受動的な対策である。この対策は、数千 Hz 程度の高い周波数では効きやすいものの、数百 Hz 以下の低い周波数では効きにくい。大量の材料を貼付すれば低周波音も十分減らしうるが、それでは軽量性が損なわれ、現実的ではない。軽量性と静粛性の両立をかなえる技術として期待されているのが、小型軽量のセンサとアクチュエータを構造物に取り付け、構造物の振動を計測・制御する能動的な対策である。この種の技術に関する研究は世界中で行われているが、実用的に普及するには至っていない。振動と騒音の大小は比例しないため、闇雲に振動を小さくしても騒音が小さくなるとは限らないことが、実用化を難しくしている。

平板が波を打って振動している様子を想像すれば分かるように、波の打ち方は多様である。振動学の理論によれば、波の打ち方には型(振動モードと呼ばれる)があり、多数の振動モードが重なり合ってひとつの振動現象が形成される。振動とは波動現象だから、波の打ち方とは定在波の形状である。つまり、個々の振動モードは、個々の波長の定在波である(個々の波長に応じて、個々の共振周波数が存在する)。振動と騒音の大小が比例しないため、騒音への寄与の大きい振動モードを特定し、その振動モードを選択的に計測・制御することが、効果的かつ効率的な静粛化に繋がる。しかし、個々の振動モードの騒音への寄与解析は、一筋縄にはいかない。なぜなら、振動モード同士が互いに連成して騒音に寄与するからである。

## 2. 研究の目的

個々の振動モードの騒音への寄与解析を行い、騒音への寄与の大きい振動モードを特定する。狙いの振動モードを選択的に計測・制御する制御系を構築し、効果的かつ効率的に騒音を減らす。本研究では、屋内の騒音を研究対象とする。部屋の壁が振動して屋内に騒音が放射される問題を考える。センサとアクチュエータを壁に設置し、壁の振動を計測・制御することで、屋内の騒音の低減を目指す。壁の振動モードのほか、屋内空間の音響モード(屋内空間における音の定在波)が音響特性を支配する問題である。

## 3. 研究の方法

他の振動モードとの連成を考慮に含めつつ、個々の振動モードの騒音への寄与(より正確には、個々の振動モードの音響ポテンシャルエネルギーであり、これを振動モーダル音響ポテンシャルエネルギーと呼ぶ)を便宜的に計算する。振動モーダル音響ポテンシャルエネルギーの周波数特性を計算することで、騒音への寄与の大きい振動モードを特定する。ある振動モードの振動モーダル音響ポテンシャルエネルギーの周波数特性には、自己の共振周波数のみならず、他の振動モードや音響モードの共振周波数でもピークが現れる。振動モード同士の連成が生じるゆえ、こうした周波数特性となる。このことは、ひとつの振動モードを計測・制御するだけで、自己の共振周波数のみならず、他の振動モードや音響モードの共振周波数でもピークを芽づる式に抑えられる可能性を示唆する。つまり、振動モード同士の連成が振動モード毎の騒音への寄与解析を難しくするわけだが、振動モーダル音響ポテンシャルエネルギーの計算により寄与解析を達成してしまえば、振動モード同士の連成が制御系の効果と効率にむしろ有利に働く。

上記の手順で狙いの振動モードを定めたら、それに対応するモードフィルタを設計し、その振動モードを選択的に計測・制御する。モードフィルタとは、複数のセンサを並べたセンサアレイ、複数のアクチュエータを並べたアクチュエータアレイである。各々のセンサとアクチュエータの振幅・位相は、その振動モードの形状(モード関数という)に基づき設定する。

以上の制御系を考案し、その有効性を計算機シミュレーションと実験の両面から検証した。

## 4. 研究成果

図1のような直方体の閉空間を例題として、提案する制御系の有効性を検証した。直方体の上面のみが弾性体(平板)であり、その他の面は剛体となっている。外乱によって平板が振動し、閉空間に騒音が放射される。計測点と制御力を平板に複数設置し、上記の制御を行った。

図2は、振動モーダル音響ポテンシャルエネルギーの周波数特性である。上述のとおり、振動モーダル音響ポテンシャルエネルギーの周波数特性には、自己の共振周波数のみならず、他の振動モードや音響モードの共振周波数でもピークが現れている。(1,1)振動モードが広い周波数帯にわたり大きく騒音に寄与している。そこで、この振動モードを選択的に計測・制御する。

図3は、平板全体の運動エネルギー(振動の大きさ)の周波数特性を示し、図4は、閉空間全体の音響ポテンシャルエネルギー(騒音の大きさ)の周波数特性を示す。いずれの図も、細線が制御前の特性を表し、太線が制御後の特性を表す。期待どおり、(1,1)振動モードを抑制するだけで(図3) 複数のピークを芽づる式に低減できた(図4)。

以上はシミュレーション結果だが、同様の実験結果も得られた。

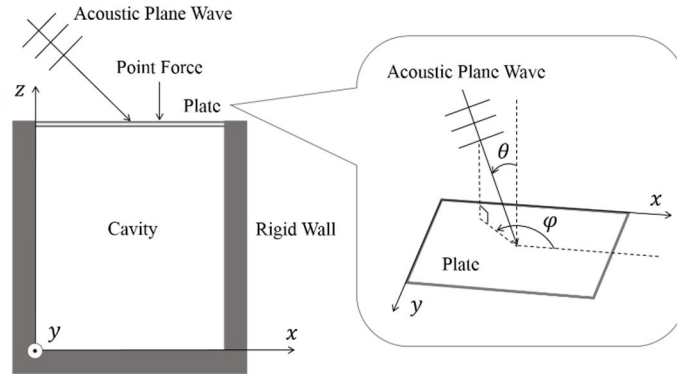


図1 計算機シミュレーションの例題：矩形平板と直方体空間の連成モデルの概念図

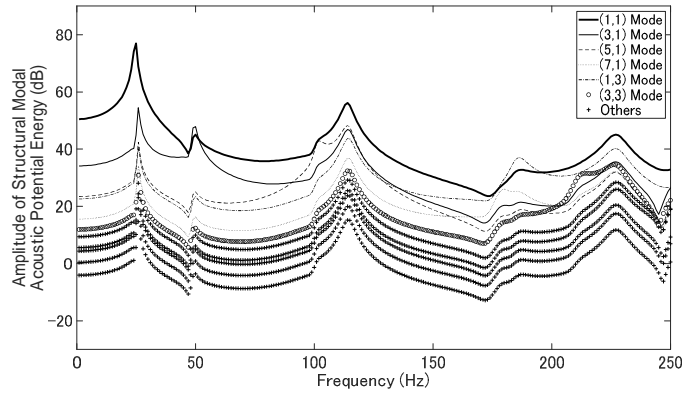


図2 振動モーダル音響ポテンシャルエネルギーの周波数特性

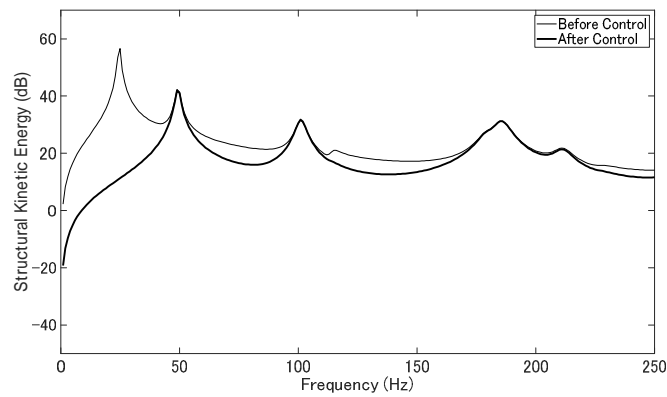


図3 平板全体の運動エネルギーの周波数特性

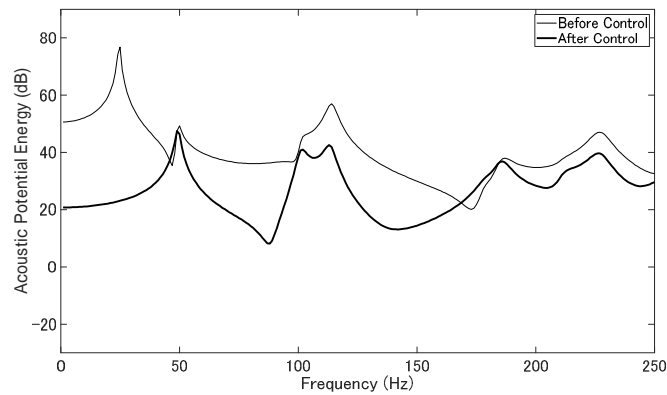


図4 閉空間全体の音響ポテンシャルエネルギーの周波数特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Kaizuka Tsutomu, Iwamoto Hiroyuki, Nakano Kimihiko	4. 巻 178
2. 論文標題 Active structural modal control for sound reduction in an enclosure: Experimental verification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Acoustics	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） 10.1016/j.apacoust.2021.107965	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 T. Kaizuka, K. Nakano	4. 巻 431
2. 論文標題 Active control of sound transmission into an enclosure using structural modal filters	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 328-345
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jsv.2018.06.012	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 貝塚勉、中野公彦
2. 発表標題 閉空間において振動または騒音を能動的に最小化したときの振動モードの挙動
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019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
---------	---------