

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03956

研究課題名（和文）機械力学的視点で連続体を伝播する波動に着目した振動・騒音制御

研究課題名（英文）Vibration and noise control considering waves propagation through continuous bodies from a dynamics perspective

研究代表者

山田 啓介（YAMADA, Keisuke）

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：80456798

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）：本研究では定在波である振動モードを念頭に制御手法を考えるのではなく、定在波になる前の、波動の視点で振動・騒音制御手法を提案した。本研究では、一次元音響管内を伝播する騒音の低減を目的として、二つの制御用スピーカで前進波のみを生成するコンセプトで複数の手法を提案した。制御用スピーカで後退波が生成されないことにより、参照マイクロホンで制御音を検出しなくなるため、この方法ではハウリングを回避できる。また、提案手法のシミュレーションを実施するために、任意のインピーダンスを設置した音場やはりの振動解析手法等も提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の能動騒音制御では参照マイクロホンにおいて騒音だけでなく、制御音も検出し、それが系の安定性の低下につながっていたが、提案手法を用いれば制御音のフィードバックを回避できる。また、空間的・時間的細分を用いた進行波の抽出を提案したが、この方法を用いれば一方向の音波のみを検出できるため、前進波である騒音のみをリアルタイムに取り出せる。これらの成果は従来法にも適用できる、汎用性の高い手法である。また、振動解析手法は振動を定在波で考える場合にも利用することが可能で、こちらも汎用性の高い提案であり、機械力分野に広く貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, instead of considering control methods with vibration modes that are standing waves, vibration and noise control methods that use traveling waves were proposed. In this study, several methods were proposed to reduce noise propagating in a one-dimensional acoustic tube, based on the concept of using two loudspeakers to generate only forward traveling waves. This method avoids feedback because the reference microphone does not detect the controlled sound because the backward traveling waves are not generated by the loudspeakers. To conduct simulations of the proposed methods, we also proposed vibration analysis methods for acoustic tubes and beams with arbitrary impedances.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：波動 能動制御 騒音制御 進行波 コムフィルタ 振動解析 モード解析 無反射境界

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来の振動・騒音制御は、構造物や音場の振動モードの共振を抑える視点で対策を考えることが多く、今でもその方針に基づく研究が行われている。機械力学の分野はほぼ成熟した研究分野であり、これまでに種々の振動・騒音制御手法が提案され、実用もされているが、この状況からさらに一段階、振動や騒音の低減効果を高めようとする、従来法の延長では不十分であり、根本的に発想の異なる革新的な手法が必要であると考えられる。そこで、本研究では振動モードを基準にして対策を講じるのではなく、定在波が生成する前の、波動の視点で対策を考えることにした。なお、たとえば、騒音制御においてはアクティブノイズコントロールのように、波動の視点で考えられた制御手法が存在する。しかし、これらの方法は波動そのものの性質を利用した手法と言うよりは、制御に力点が置かれた手法であり、研究代表者らには波動としての性質を生かす余地はまだ残っているように思われた。そこで、系を伝播する波動の性質を生かした振動・騒音制御手法の研究に着手した。

2. 研究の目的

本研究では、連続体中を伝播する波動に着目して振動・騒音制御手法を考えることにより、振動モードを基準として考えられた制御手法以上の低減効果を得ることを目指した。研究期間中にも新しいアイデアを研究計画に随時組込みながら、複数の研究課題に取組んだ。本報告書では主要な研究成果である以下の四つの研究を取りあげて報告する。

- (1) むだ時間を用いた一方向進行波生成による騒音制御手法の確立
- (2) フィードバック型コムフィルタを用いた一方向進行波による波動相殺の広帯域化
- (3) 空間的・時間的差分を用いた進行波の抽出と生成
- (4) 境界および内部に任意のインピーダンスを持つ連続体の低自由度での振動解析手法

本研究の(1)～(3)に共通の目的は、制御用スピーカから出力される音波の後退波をゼロにして、参照マイクロホンで制御音が検出されないようにする手法の確立である。制御用スピーカから出力される音波の後退波がゼロになることで、参照用マイクロホンでは騒音のみが検出され、制御音圧を容易に生成できる。(1)と(2)では、二つの制御用スピーカに印加する信号間にむだ時間を与えてこれを実現するが、この方法では音波の前進波によって騒音を完全に相殺できる周波数は特定の一つの周波数のみである。そこで、効果が得られる周波数の広帯域化を目指して、(1)では二次のノッチフィルタを、(2)ではフィードバック型コムフィルタを適用する手法に取組んだ。また、(3)は、二つの制御用スピーカを用いる点は(1)や(2)と共通であるが、二つの制御用スピーカに印加する信号間にむだ時間を与えるのではなく、空間的・時間的差分を用いて後退波をゼロにする方法に取組んだ。空間的差分は、実質的に双極子音源の生成に相当し、位相差を持たせた単極子音源も同時に生成することで両者を合わせて後退波がゼロで、前進波のみが生成される手法とした。(3)ではこの手法の確立を目的として研究に取組んだ。また、(3)では同じ発想で、二本の参照マイクロホンを用いて、前進波のみ、あるいは後退波のみの信号をリアルタイムに抽出する方法にも取組んだ。この方法を用いると、音響管内の後退波が完全にゼロにはなっていない場合であっても前進波のみを検出できる。(4)では、(1)～(3)の研究等で連続体が無反射境界を持つ場合のシミュレーションを実施する必要があるが、そのシミュレーションを低自由度で高精度に行う方法が見当たらなかったため、部分構造除去法を用いてこれを実現することを目的として研究を進めた。また、音場の内部にインピーダンスが設置される場合を対象に部分構造除去・結合法を新たに提案し、低自由度で高精度にシミュレーションを行う方法を確立した。また、採用するモードの打切りが原因でシミュレーションの精度が下がる問題に対して、剰余剛性に加えて高次の剰余項を考慮することで精度の低下を低減する方法にも取組んだ。

3. 研究の方法

- (1) むだ時間を用いた一方向進行波生成による騒音制御手法の確立

提案手法では、一つの参照マイクロホン、二つの制御用スピーカを一次元音響管に設置し、参照マイクロホンで得た騒音の信号に基づいて制御用スピーカで音波を生成した。その際、二つの制御用スピーカの信号間にむだ時間を与えることと、一方の信号を他方の信号の逆相にすることで制御音の後退波をゼロにした。なお、むだ時間はスピーカ間の距離を音速で除した時間にすればよい。このとき、制御音の前進波はゼロでは無く、この前進波と騒音とを干渉させることで騒音を低減した。本研究では効果が得られる周波数を広帯域化するため、二次のノッチフィルタを用いる方法を提案し、モード解析を用いて支配方程式を導出した上で、それらを用いてシミュレーションを実施した。また、実験装置を作製して実験でも効果を確認した。

- (2) フィードバック型コムフィルタを用いた一方向進行波による波動相殺の広帯域化

本手法は(1)の研究を発展させたものである。まず、理論的に完全な広帯域化が行えるフィルタの伝達関数を求めた。ここで、完全な広帯域化とは、全周波数で完全に騒音を相殺できる状態

を指す。研究協力者がフィードバック型コムフィルタを用いれば理想の伝達関数を実現できることを見出し、本研究に取組んだ。フィードバック型コムフィルタで理想の伝達関数を実現する条件は、フィルタの安定限界であることが分かったため、安定な範囲で使用する前提で、係数の設定と広帯域化の効果の関係を調べた。また、周波数によっては制御用スピーカの出力が大きくなりすぎる問題も発覚したため、スピーカの出力に制約を設ける前提でフィードバック型コムフィルタの広帯域化の効果調べた。本研究もシミュレーションと実験を通して効果を確認した。

(3) 空間的・時間的差分を用いた進行波の抽出と生成

(1)および(2)の研究を進める過程で、音圧の空間微分と時間微分を用いることができれば、リアルタイムに音圧の前進波と後退波を分離して検出できることを発見した。また、同じ考え方で二つの制御用スピーカを用いて前進波のみ、あるいは後退波のみを生成できることも分かった。この方法は(1)および(2)の方法とは異なり、原理的に周波数を選ぶことがなく、すべての周波数で効果が得られる方法であったため、新たに研究計画に組込んで実施をした。実験では空間微分と時間微分は行えない。そこで、空間微分については、二本のマイクロホンを用いてその差を、時間微分は時間差分で代用することにした。進行波の生成では、二つの制御用スピーカを用いて、両者を逆相で駆動することで空間差分とした。時間微分はコントローラ内で時間差分を計算させることで代用した。マイクロホン間およびスピーカ間の距離が音波の波長よりも十分に短い場合には差分は微分の良い近似になるが、この条件が満たされない場合には代用できない。そこで、音波の波長とそれらの距離の比を用いて、進行波の抽出と生成の真値からの差異を定式化した。また、スピーカはそれ自体に長さがあるため、ある程度以上の周波数では点音源と見なせない。これに関しても波長との関係で理論的にその影響を整理した。最後に実験を行って、これらの定式化の妥当性を確認した。

(4) 境界および内部に任意のインピーダンスを持つ連続体の低自由度での振動解析手法

(1)～(3)の研究と、はりを用いた同様の研究において、騒音や振動の低減効果を確認するために、最初は両端無反射の条件でシミュレーションを実施したが、無反射境界を持つ連続体の振動解析を低自由度で高精度に実施する方法が確立されていなかった。いっぽう、研究代表者らは部分構造除去法を用いた無反射境界の設置を過去に提案していた。本研究では、連続体の除去長さや除去部の諸元の選び方、提案手法で精度が維持される上限の周波数を理論解析とシミュレーションを通して明らかにした。また、部分構造除去法を汎用的に使用できるように、境界条件を拘束条件に基づいて組込む方法を提案した。さらに、音場の内部にインピーダンスが設置された場合のシミュレーションも低自由度で高精度に実施する方法が確立されていなかったため、これに関しては部分構造除去・結合法を新たに提案して対処した。本手法も、除去長さや除去部の諸元の選び方、精度が維持される上限の周波数を理論解析とシミュレーションを通して明らかにした。

採用するモードの打ち切りが原因でシミュレーションの精度が下がる問題に対して、従来は剰余剛性を考慮することで精度の低下を低減する方法が用いられてきたが、本研究ではさらに高次の剰余項を考慮することで精度の低下をより抑えることができる方法を提案した。提案手法の有効性をシミュレーションを通じた確認した。

4. 研究成果

(1) むだ時間を用いた一方向進行波生成による騒音制御手法の確立

一つの参照マイクロホン、二つの制御用スピーカを用いて、むだ時間を活用することによって一方向の進行波を生成することができることを示した。また、この方法では完全な騒音の相殺ができる周波数は特定の周波数のみであるが、二次のノッチフィルタを用いることである程度の広帯域化が行えることを示した。

(2) フィードバック型コムフィルタを用いた一方向進行波による波動相殺の広帯域化

一つの参照マイクロホン、二つの制御用スピーカを用いて、むだ時間を活用することによって一方向の進行波を生成する手法において、フィードバック型コムフィルタを用いれば、理想的な広帯域化が行えることを示すと同時に、それはフィルタの安定限界であることを示した。フィードバック型コムフィルタを安定な範囲で使用したときの広帯域化の効果もシミュレーションと実験で検証した。本手法では、周波数によってはスピーカの出力が大きくなりすぎて、実験では実現できないことがあることも分かった。フィルタを安定な範囲で使用することと、スピーカで音波を出力できる範囲で使用することが必要である。

(3) 空間的・時間的差分を用いた進行波の抽出と生成

二つの参照マイクロホンを用いて進行波をリアルタイムに検出する方法と、二つの制御用スピーカを用いて一方向進行波を生成する方法を提案した。空間微分と時間微分を用いることができる場合には、すべての周波数で進行波の抽出と生成が可能であるが、実験では微分を差分で代用する必要があるため、差分の距離の影響を理論的に定式化した。また、マイクロホンは小さいため、進行波の抽出は実験でも精度よく行えることが分かると同時に、スピーカは大きさがあ

るため、その長さが影響して進行波の生成の性能は低下することが分かった。時間微分を時間差分で代用することの影響も、基本的な考え方は空間差分と同様である。時間差分の時間差が小さいほど、高い周波数まで微分と同等の効果が得られる。実験を行い、提案手法の有効性と理論解析の妥当性を確認した。

(4) 境界および内部に任意のインピーダンスを持つ連続体の低自由度での振動解析手法

提案手法により、音場およびはりが境界に任意のインピーダンスを持つ場合に、モード解析を用いて低自由度で高精度にシミュレーションが実施できるようになった。たとえば、無反射境界を持つ 0.85 m の音響管のシミュレーションでは、15 自由度で 1200 Hz まで高精度な結果が得られるようになった。本手法は有限要素法のように振動系を離散化することが無いため、音場内のすべての座標で音圧や粒子速度などの情報を高精度に得ることができる。また、音場の内部に任意のインピーダンスが設置された場合にも、低自由度で高精度にシミュレーションが実施できるようになった。また、剰余剛性に加えて、高次の剰余項を考慮することで無視した高次モードの影響を小さくする方法も提案した。剰余剛性のみを考慮する場合は、たとえば 1000 Hz まで精度を維持する必要がある場合に、1000 Hz より高い周波数のモードも含めてシミュレーションを実施する必要があったが、この手法を用いれば 1000 Hz より高い周波数のモードを含めなくても精度が維持できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 YAMADA Keisuke, JI Jinchen	4. 巻 10
2. 論文標題 Accuracy enhancement of modal analysis using higher-order residual terms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 23-00222
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.23-00222	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 YAMADA Keisuke, JI Jinchen	4. 巻 10
2. 論文標題 Substructure elimination method for vibration systems governed by a one-dimensional wave equation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 23-00241
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.23-00241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 YAMADA Keisuke, JI Jinchen	4. 巻 10
2. 論文標題 Substructure elimination method for evaluating bending vibration of beams	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 23-00293
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.23-00293	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 YAMADA Keisuke, JI Jinchen	4. 巻 11
2. 論文標題 Substructure elimination and binding method for vibration systems governed by a one-dimensional wave equation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 23-00411
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.23-00411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 茂野裕一、山田啓介
2. 発表標題 フィードバック型コムフィルタを用いた一方向進行波による波動相殺の広帯域化
3. 学会等名 第23回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 茂野裕一、山田啓介
2. 発表標題 一方向進行波生成による波動相殺の広帯域化
3. 学会等名 日本機械学会関西支部第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川瀬佑騎、山田啓介
2. 発表標題 空間的・時間的差分を用いた進行波の抽出と生成
3. 学会等名 第24回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

YAMADA Keisuke's website https://vibration.jp/

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
研究協力者	茂野 裕一 (SHIGENO Yuichi)	関西大学・理工学研究科・大学院生 (34416)	
研究協力者	川瀬 佑騎 (KAWASE Yuki)	関西大学・理工学研究科・大学院生 (34416)	

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