

令和 4 年 5 月 6 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04037

研究課題名(和文)部分構造変更法・除去法による連続体の振動解析

研究課題名(英文)Vibration analysis of continua using substructure change and elimination methods

研究代表者

山田 啓介(Yamada, Keisuke)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：80456798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、連続体を離散化せずに連続体のままで解析し、かつ必要な自由度が抑制される方法として、部分構造除去法を提案した。この方法では全体構造から部分構造を除去するという、いわば減算的な発想で所望の構造を得る。また、部分構造を除去するのではなく、部分構造の特性を変更して解析する方法も提案した。これらの方法は、連続体のモード解析に分類され、本研究ではこれをさらに発展させて、連続体を伝わる進行波を解析的に抽出する方法、音場内に構造が設置された場合の連成振動解析、音場に減衰を有するサイドブランチまたはヘルムホルツ消音器が設置された場合の最適調整の研究も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、連続体のモード解析を発展させることにより、連続体を空間的に離散化することなく、その振動解析を行うことができる手法を確立した。これにより、任意の座標で振動変位等の情報を得ることができる。モード解析では固有モードの重ねあわせを用いるが、これは言い換えれば定在波の重ねあわせである。この定在波の重ねあわせで進行波である前進波と後退波を抽出することができることも示した。この方法を用いて連続体内部の波動の伝播を可視化することにより、新たな視点で振動を抑制するための対策を立てることができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed the substructure elimination method as a method to analyze vibration of a continuum without discretization. This method has the advantage of requiring fewer degrees of freedom. In this method, the desired structure is obtained by eliminating substructures from the whole structure, which is a subtractive concept. We also proposed a method to analyze vibration of a continuum by changing the characteristics of the substructures instead of eliminating them. These proposed methods are categorized into modal analysis of a continuum, and in this study, we further proposed several methods: extraction of traveling waves using modal analysis, coupled vibration analysis of acoustic field including continuous structure, and optimal tuning of damped side-branch silencer and damped Helmholtz silencer.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：モード解析 連続体 波動 連成振動 振動解析 消音器 開口端補正

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

振動や騒音の問題と無縁の機械は存在せず、いつの時代においても機械はさらなる軽量化や精度向上が求められており、振動や騒音に対する要求の水準は高まり続けている。このような状況において、開発期間を短縮するためには数値シミュレーションによる振動の評価が不可欠である。このような背景とコンピュータの発展によって、数値シミュレーションの研究が盛んに行われている。現在の数値シミュレーションでは部分構造合成法と有限要素法が主に用いられている。部分構造合成法では複数の部分構造が組み合わさって全系が構成されていると考えて定式化が行われている。また、有限要素法では部分構造を空間的に離散化する。部分構造合成法では、部分構造を加算的な発想で組み合わせるため、部分構造の数が増すと必要な自由度が増える問題がある。また、有限要素法で連続体を空間的に離散化すると、任意の座標で必要な物理量が得られない。本研究では、これらの問題を解決するため、全体の一つの構造から部分構造を除去するという、いわば減算的な発想で所望の構造を得る方法を考案し、また、全体構造の連続体としての固有モードの重ねあわせで所望の構造の振動の状態を表すことで、空間的な離散化を行わず、連続体のままで振動を解析する方法を提案した。部分構造合成法と有限要素法はどちらも強力な手法であり、現在の振動の数値シミュレーションを支えているが、どちらにも前述の本質的な短所があり、これを解決するには根本的に発想の異なる振動解析手法が必要であると考えて、本研究に着手した。

2. 研究の目的

本研究では、従来とは発想の異なる振動解析手法として部分構造除去法と部分構造変更法を提案したが、これらの手法は連続体のモード解析に分類される手法である。本研究ではモード解析の持つポテンシャルを最大限に引き出し、振動解析に役立てるために、研究期間中にも新しいアイデアを随時研究計画に組み込みながら、複数の研究課題に取り組んだ。取り組んだ研究課題の中には、別の研究課題に取り組む中で問題が発生し、その問題を解決するために設定したものもあり、内容が多岐に渡るため、本報告書では主要な以下の6つの研究を取りあげて説明する。

- (1) 多次元での部分構造除去法・変更法の確立と、境界に無反射境界を設置する方法の研究
- (2) モード解析を用いた進行波の抽出
- (3) 干渉の効果をいれたはりの曲げ波の伝播量低減による振動絶縁
- (4) ヒステリシス減衰を有する振動系の自由振動解析
- (5) 内部に連続体構造物が設置された音場の連成振動解析
- (6) 減衰を有するサイドブランチおよびヘルムホルツ消音器の最適調整

(1)と(2)は関連しており、どちらも連続体を伝播する波動を解析的に求めるための研究である。連続体を伝播する波動を知ることができれば、定在波が形成されるまでの振動の成長の過程を知ることができ、波動の視点で振動の低減方法を考えることができると期待できる。本研究ではこの波動の視点を生かして(3)の研究に組み込み、振動の低減に(1)と(2)の方法が役立つことを確認した。また、(1)と(2)の研究を通して、振動系がヒステリシス減衰を有する場合には、自由振動解が従来の解析方法では得られないことが分かった。振動系が粘性減衰を有する場合には、同次形の微分方程式の一般解として自由振動解が得られるが、振動系がヒステリシス減衰を有する場合には同様の手順で自由振動解を求めると、その自由振動解は発散する。減衰がヒステリシス減衰でモデル化される場合も現実には振動系が自励発振することは無いため、発散せずに収束する自由振動解を簡便に得る方法があれば、工学的に有用である。先行研究として、フーリエ変換とフーリエ逆変換を用いてこの問題を解決する方法が提案されていたが、本研究のように多自由度の連続体の自由振動解析に用いるには計算コストが高すぎる問題があり、本研究では(4)の研究に取り組んだ。(5)の研究では、部分構造変更法の一つとして、音場内に構造系の連続体が存在する場合の連成振動解析に取り組んだ。(6)の研究では、本研究を通して行ってきた連続体のモード解析を生かして、減衰を有するサイドブランチおよびヘルムホルツ消音器の最適調整方法を確立することを目的として研究に取り組んだ。

3. 研究の方法

- (1) 多次元での部分構造除去法・変更法の確立と、境界に無反射境界を設置する方法の研究

本研究では部分構造除去法を用いて全体構造の周辺を除去し、その新たな境界に任意のインピーダンスを設置する方法を確立した。また、境界に設置する任意のインピーダンスをその連続体の特性インピーダンスと一致させることにより、無反射境界として機能させることができることを示した。

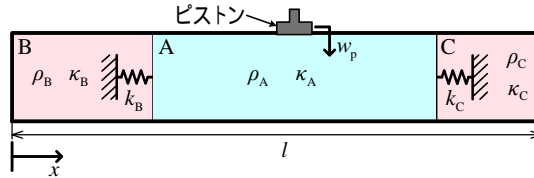


図1 音場の両端に無反射境界を設置するためのモデルの例

(2) モード解析を用いた進行波の抽出

モード解析では固有モードの重ねあわせで振動の状態を表す．この固有モードは定在波であり，定在波の重ねあわせからは進行波の情報は取り出せないという先入観が研究代表者らにもあった．これは定在波という一つの情報からは前進波と後退波という二つの進行波の情報は取り出せないだろうと考えたためである．しかし，一つの振動モードに着目すれば，前進波と後退波に分けることは容易いことに改めて気付いたことをきっかけに，音場であれば音圧と粒子変位の二つを，はりや平板の曲げ振動であればたわみとたわみ角，曲げモーメント，せん断力の四つを方程式にして連立することで前進波と後退波を抽出できることを見出した．なお，はりや平板の曲げ振動では前進波と後退波に加えて，二つの境界近傍波も同時に得られる．

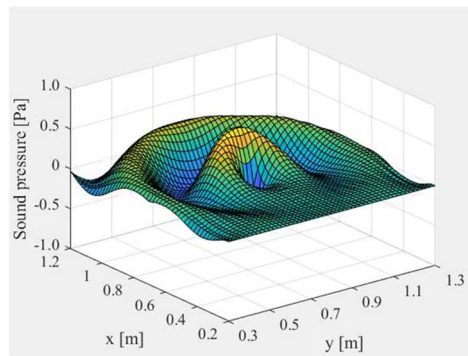


図2 二次元音場中を x 方向の正の向きに進む音波を抽出した例

(3) 干渉の効果を用いたはりの曲げ波の伝播量低減による振動絶縁

連続体を伝播する波動に着目して振動を低減する方法として，拡張型消音器の考え方をはりの曲げ振動に適用した方法を提案した．本研究は，はりの一部を分厚くすることで拡張型消音器と同様の干渉の効果が得られることを狙った方法であるが，厚さの比が小さいと低減効果が小さいことが分かったため，はりの一部を分厚くするのではなく，はり上の二点に質量体を付加する方法についても検討した．理論解析とシミュレーションを(1)と(2)の方法を用いて実施し，最後に実験で有効性を実証した．

(4) ヒステリシス減衰を有する振動系の自由振動解析

ヒステリシス減衰を有する振動系の場合，前述のように粘性減衰の場合と同様の手順で同次形の微分方程式の一般解で自由振動解を求めると解が発散する．また，ヒステリシス減衰を有する振動系であっても強制振動解は発散せず，現実的な解が得られる．この二つの事実を考えあわせることによって，本研究では強制振動解の延長で自由振動解を得る方法を提案した．たとえば，初速度を与えた場合の自由振動はインパルス加振を行った場合と同様であり，このインパルス加振を周期的に加えることにすると自由振動の問題が強制振動の問題に置きかわる．インパルス加振の周期を十分に長くして，次のインパルス加振が与えられる前にその前の加振による自由振動が収束すれば，所望の自由振動解を実質的に得ることができる．この方法では周期的なインパルス加振をフーリエ級数で展開するため，種々の加振振動数による強制振動解の重ねあわせで解を得るが，先行研究のようにフーリエ変換とフーリエ逆変換は必要ない．

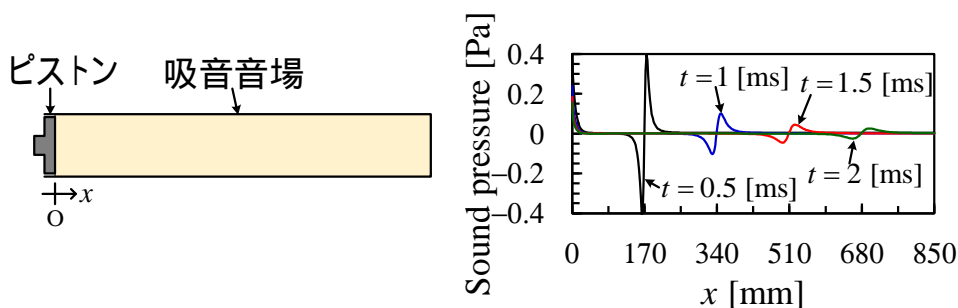


図3 一次元吸音音場にピストンでインパルスを与えた場合の自由振動のシミュレーション例

(5) 内部に連続体構造物が設置された音場の連成振動解析

本研究は部分構造変更法を発展させることで連成振動の解析を可能にした。音場の微小部分の運動方程式に、内部に設置された連続体構造物の運動方程式も組込むことで、最終的には音場の波動方程式に連続体構造物の運動方程式が含まれるようにした。

(6) 減衰を有するサイドブランチおよびヘルムホルツ消音器の最適調整

連続体のモード解析を用いて、音響モードをマスばね系で表現し、制振対象以外の音響モードの影響はその固有振動数に応じて付加質量または付加剛性として働くことを示し、この付加質量と付加剛性の総和によって開口端補正の長さを定式化した。また、制振対象の音響モードのみを振動系として扱うことで2自由度振動系に低自由度化し、定点理論を適用することで消音器の最適固有振動数比と最適損失係数を求めた。

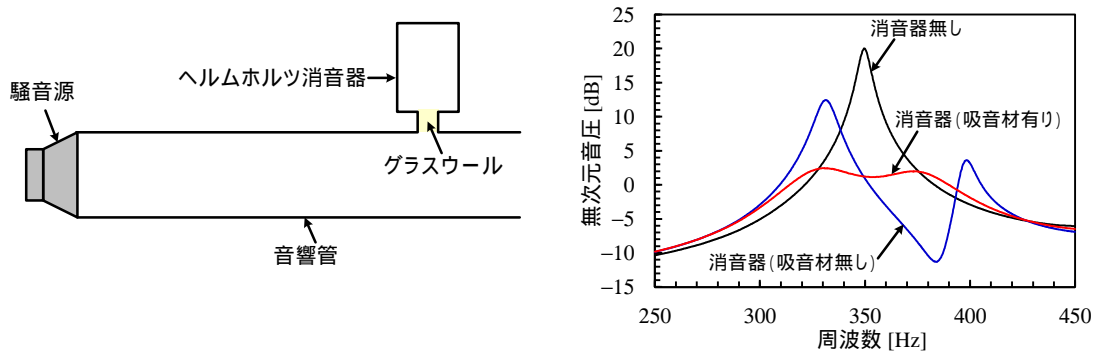


図4 音響管に減衰を有するヘルムホルツ消音器を設置した場合の実験結果の例

4. 研究成果

(1) 多次元での部分構造除去法・変更法の確立と、境界に無反射境界を設置する方法の研究

連続体の境界に無反射境界を設置することができる方法を確立したことにより、境界からの反射波が存在しない状態で振動解析が行えるようになった。

(2) モード解析を用いた進行波の抽出

モード解析で定在波だけではなく、進行波の情報が得られることを示した。これによって連続体を伝播する波動を可視化できるようになり、たとえば、(3)の研究のように、波動の視点で振動対策を行うことができるようになった。

(3) 干渉の効果をいれたはりの曲げ波の伝播量低減による振動絶縁

はりの一部を分厚くする方法は、実用を想定すると質量増の問題があることが分かったが、はりに二つの質量体を付加する方法の研究を通じて、質量体の慣性モーメントが曲げ波の反射率の向上に大きく寄与することが分かった。質量体の慣性モーメントは、質量を増やさなくても形状を工夫することで増やすことができるため、質量体の慣性モーメントを大きくすることで反射率を向上させて、曲げ波をより干渉させる方法は実用上有利である。

(4) ヒステリシス減衰を有する振動系の自由振動解析

本研究により、フーリエ変換とフーリエ逆変換は必要なく、複数の振動数で強制振動を行った場合の強制振動解の重ねあわせでヒステリシス減衰を有する振動系の自由振動解析が行えるようになった。これにより、減衰がヒステリシス減衰でモデル化される連続体の自由振動も解析できるようになった。これは、たとえば、吸音材が設置された音場や、制振材が貼付された平板のインパルス応答がヒステリシス減衰のままで行えるようになったということである。

(5) 内部に連続体構造物が設置された音場の連成振動解析

研究課題名の通り、本研究によって内部に構造を持つ音場の連成振動解析に新たな選択肢を与えることができた。特に一次元音場内に1自由度振動系や質点、ばねが設置された場合は、部分構造合成法に基づいて定式化するよりもこちらの方が簡便であり、有用性がある。

(6) 減衰を有するサイドブランチおよびヘルムホルツ消音器の最適調整

本研究により、減衰を有するサイドブランチおよびヘルムホルツ消音器の最適な長さとな必要な吸音材の量が解析的に求められるようになった。また、本研究によって閉空間に設置された消音器の開口端補正の長さを高精度に求める方法が確立された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 YAMADA Keisuke, UTSUNO Hideo	4. 巻 7
2. 論文標題 Modal analysis of continuous systems by replacing displacement excitation with equivalent excitation force and fixed boundary	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	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/mej.20-00003	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 -

1. 著者名 YAMADA Keisuke, SHIMIZU Tatsuya, UTSUNO Hideo, KURATA Junichi, MURAKAMI Yoshihiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Optimum tuning of damped side-branch silencer using equivalent discrete model and considering open-end correction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	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/mej.20-00417	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 -

1. 著者名 YAMADA Keisuke, SHIMIZU Tatsuya, UTSUNO Hideo, KURATA Junichi, MURAKAMI Yoshihiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Optimum tuning of damped Helmholtz silencer using an equivalent discrete model and considering open-end correction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	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/mej.21-00139	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Keisuke YAMADA
2. 発表標題 Coupled vibration analysis of acoustic field including flexible structures
3. 学会等名 The 15th International Conference on MOTION AND VIBRATION CONTROL（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田啓介
2. 発表標題 ヒステリシス減衰を有する振動系の自由振動解析
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keisuke Yamada
2. 発表標題 Consideration of Traveling Waves Using Superposition of Vibration Modes
3. 学会等名 The 18th Asia-Pacific Vibration Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑原大知, 山田啓介
2. 発表標題 干渉の効果をを用いたはりの曲げ波の伝播量低減による振動絶縁
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田啓介
2. 発表標題 内部に連続体構造物が設置された音場の連成振動解析
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑原大知, 山田啓介
2. 発表標題 質量付加による干渉の効果を用いたはりの曲げ波の伝播量低減
3. 学会等名 第20回システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamada Keisuke
2. 発表標題 VIBRATION ANALYSIS USING SUBSTRUCTURE CHANGE AND ELIMINATION METHODS
3. 学会等名 The 25th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田啓介
2. 発表標題 モード合成を用いた定在波および進行波に関する考察
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 力石滉大, 山田啓介
2. 発表標題 ヘルムホルツ消音器の形状と開口端補正の関係
3. 学会等名 第17回「運動と振動の制御」シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

山田のHP
<http://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	志水 達也 (Shimizu Tatsuya)		
研究協力者	桑原 大知 (Kawahara Taichi)		
研究協力者	力石 滉大 (Chikaraishi Kota)		

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
---------	---------