



加振力放射モードを利用した固体音放射の評価と低減に関する研究

山口, 善三

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2013-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5757

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005757>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 山口 善 三

専 攻 建築学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

加振力放射モードを利用した固体音放射の評価と低減に関する研究

指導教員 阪 上 公 博

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

1. 研究の背景

騒音の伝搬には、音源で発生した音が空气中を伝搬して到来する空気音 (空気伝搬音)、振動源の振動が固体中を伝搬し、振動する構造物から音として放射される固体音 (固体伝搬音) に大別される。本研究において対象とする騒音問題は固体音であり、特に、振動する構造物からの音響放射、すなわち固体音放射に関するものである。

身の回りで発生する固体音問題の 1 つとして、空調設備、給排水設備、受変電設備などといった建築設備の振動に起因するものがある。建築設備においてポンプやファンを駆動するモータや、変圧器の磁歪振動などが、建築構造物などへの加振力となり、加振を受けた部材の振動が固体中を伝搬し、最終的に振動が固体音放射につながるためである。これらの騒音の特徴は、ある特定周波数が卓越していることである。ある特定の周波数の純音が卓越する騒音は、従来の研究において、心理的評価は必ずしも等価騒音レベルと対応せず、等価騒音レベルでは過小評価になることが指摘されている。また、固体音は、振動源の位置、部材の形状、部材間の接続状態、周辺の空間の状態の影響を受けやすく、振動低減が直接的に騒音対策につながらない場合も多いことが従来指摘されている。さらに、低周波においては対策が大規模化し困難になる場合も多く、設計段階から低騒音化を実現するため、固体音の予測対策技術は重要度の高い研究課題である。

2. 固体音放射に関する従来の研究と課題

振動する構造物からの音響放射である固体音放射に関しては、有限要素法や境界要素法などの数値解析手法により計算することが可能である。しかし、その発生メカニズムを解明し対策につなげるためには、数値解析の結果から有益な情報を抽出し、考察する必要がある。

任意形状の音響放射について、数値解析結果から発生メカニズムを検討する指標として、放射モードが Elliott and Johnson により提案されている。この放射モードは、空間の幾何情報のみに依存し、振動する構造物の振動速度分布とは独立したものであるため、任意の形状の構造物の音響放射パワーに対して感度の高い放射モードを特定することで、音へと変換されやすい振動速度分布の考察が可能となる。

しかしながら、騒音の低減対策のために音響放射パワーに変換されにくい振動分布を実現するには、アクチュエータを必要とするアクティブな対策が必要となってしまうという課題を有する。通常アクティブな対策は、コストやメンテナンス面の課題が多く敬遠されがちであり、この点を考慮すると、パッシブ対策や設計変更によって対応できるような指標でなければ、実問題への適用は難しい。

固体音に関して、加振力である振動源の配置は、設計事項として検討が可能である。したがって、音に変換されにくい振動分布では無く、音に変換されにくい加振力分布すなわち振動源の設置場所の特定は固体音放射対策として非常に有効と考えられる。

3. 本論文の目的

本論文の目的は、放射モードに、振動する構造物のモビリティを掛けあわせた行列を固有値分解し得られる固有ベクトルを加振力放射モードと呼び、固体放射音対策の検討手段として提案することである。

加振力放射モードによれば、構造物にどのような加振力分布を与えた場合に音響放射パワーが大きくなるか、小さくなるかを理解することが可能である。したがって、加振源となる振動機器の設置場所を予め音響放射パワーが小さくなる位置に設置したり、そのような構造、空間を事前に設計することが可能になり、対象とする固体音放射をアクチュエータなどを必要とせず効率的に低減できるようになる。

4. 本論文の成果の概要

本論文では、新たに提案する加振力放射モードを用いて固体音放射を評価し、加振力放射モードに基づく固体音放射対策を検討した。以下に、本論文で得られた知見を総括する。

第2章 加振力放射モードの提案と基本的性質に関する考察

本論文で提案する加振力放射モードについて、その導出について示し、加振力放射モードの基本的な性質および放射音低減への利用について、定常加振を受ける弾性体からの音響放射としてもっとも単純な形状と考えられる、バフル中の梁を対象に検討した。また、バフル中の梁を対象とした実験を実施し、解析結果の妥当性および加振力放射モードを固体音低減に利用することへの有効性について検証し、実験による加振力放射モードの同定方法についても示した。これらの結果より、解析または実験で得られる加振力放射モードによって、加振力分布と音響放射パワーを関連付けることができ、固体音対策に有効であることを示した。

第3章 構造物の形状と加振力放射モードの関係

ここでは、振動構造物の形状と加振力放射モードの関係を考察するため、まずは、2章において加振力放射モードの基本的性質を検討したバフル中の両端単純支持梁の板厚、長さが変わった場合に加振力放射モードに与える影響について考察した。その結果、加振力放射モードは、板厚や長さの変化に伴う振動モードの変化に対応し変化することを確認した。

また、実問題で対象となる構造物は、通常、複数部材から構成される場合が多いことを想定し、バフル中の単純支持梁が直接外部加振力を受けるのではなく、外部加振力を受ける他部材と結合した状態を考え、結合部に発生する力と音響放射パワーの関係に加振力放射モードを適用することについて検討した。その結果、結合部に発生する並進力、モーメントに対する加振力放射モードを考えることで、音響放射パワーを最小化する結合点を見いだせることを明らかにした。

第4章 構造物の周囲音場が加振力放射モードに与える影響

本章では、振動する構造物周辺の音場が加振力放射モードに与える影響について検討した。まず、周辺の音場の影響として、無限大の剛な反射面が構造物の近傍に設置された場合について、加振力放射モードへの影響について検討した。次いで、前章まで、問題を単純化し、加振力放射モードの基本的性質を考察しやすくするために設置していたバフルの有無が加振力放射モードに与える影響を検討した。これらの検討の結果、反射面やバフルの影響を明らかにし、反射面の有無、バフルの有無のいずれの場合についても、加振力放射モードによって加振力分布と音響放射パワーの関係を把握でき、2, 3章で検討してきた加振力放射モードの基本的性質は音場が変化しても成り立つことを確認した。

第5章 加振力放射モードに基づいた固体音放射低減対策

前章までの知見を元に、加振力放射モードを適用した固体音放射対策を検討した。まず始めに、騒音対策として従来研究されている音響放射面への錘設置に着目し、錘による音響放射パワーの低減の効果を加振力放射モードの変化から考察した。次いで、本論文では純音が卓越する騒音問題を対象とするため、動吸振器を構造物に設置した際の音響放射パワーの低減効果を加振力放射モードを用いて考察した。その結果、錘や動吸振器を振動する構造物に設置した場合に加振力放射モードが変化することを確認し、モードの節の位置と加振位置が一致することで音響放射パワーが低減することを確認した。また、これらの対策の最適な設置位置は加振力放射モードの形状をもとに検討することが可能であることも示した。

第6章 板を対象にした検討

ここでは、加振力放射モードを実問題で任意の形状に適用していくことを踏まえ、5章まで1次元的に振動が分布する梁を対象にした検討から、2次元的な振動分布をもつ板を解析対象とし加振力放射モードを用いて音響放射について考察した。その結果、板の場合についても、加振力放射モードによって、加振力分布と音響放射パワーの関係を把握することができ、基本的な前章まで梁で検討してきた結果が、板についても成り立つことを示した。

以上のように、本論文では、固体音放射問題を対象として、外部加振力を受け振動する構造物から発生する固体音放射を、新たに提案する加振力放射モードを用いて評価し、その評価に基づいた加振源設置位置の変更で、大幅な騒音低減が可能であることを示した。

本論文では、梁を対象に、加振力放射モードの基本的性質、実験での取得方法、構造物の形状との関係、放射音場との関係、錘や動吸振器による対策との関係を明らかにし、最終的に実問題を考慮して板問題に拡張した場合についても、梁における検討結果が成立す

(氏名：山口 善 三 NO. 4)

ることを示した.

したがって、加振力放射モードは、本論文で対象とした、建築設備等が原因で発生する純音が卓越する固体音放射問題に対して、実問題の対策の検討に適用し、大幅な固体放射音低減が検討できる技術として提案できると考える。

(別紙1)

論文査査の結果の要旨

氏名	山 口 善 三		
論文 題目	加振力放射モードを利用した固体音放射の評価と低減に関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	阪 上 公 博
	副 査	教 授	松 下 敬 幸
	副 査	教 授	藤 谷 秀 雄
	副 査		
	副 査		印

要 旨

建築設備や建設機械など振動物体からの放射音や、外部加振力によって生じる構造物からの固体音放射は、建築物における騒音問題の主たる要因の一つである。しかし、構造物の振動と放射音の関係は複雑であり、低減策の検討は容易ではない。

この問題に対し、本論文では新たな指標として、加振力と放射パワを結びつける物理量である加振力放射モードを提案し、これによる評価手法の有効性と、その評価結果に基づく固体音放射対策を検討した。実問題においては、加振力の周波数が広帯域に及ぶこともあるが、設備機械などの回転系では単一周波数の成分が強く純音性が高いこと、および純音性の高い騒音がより顕著な騒音問題となる事例が多いことを鑑みて、本研究ではまず単一周波数の場合について検討を進めている。以下に概要を示す。

第1章は序論として、固体音放射問題の重要性と、これまで行われてきた評価手法、対策手法とそれらの問題点を指摘し、本研究の位置づけを行っている。

第2章では、新たな評価指標として加振力放射モードを提案し、その基本的性質に関する考察を行っている。まず、従来から用いられている放射モードに、構造物のモビリティを掛けあわせた行列を固有値分解して得られる固有ベクトルを加振力放射モードと定義し、その導出を示している。そして、加振力放射モードの基本的な性質および放射音低減への利用について、定常加振を受ける弾性体からの音響放射としてもっとも単純な問題である、バフル中の梁を対象に検討し、実験によりその妥当性を確認している。

また、これらの結果から固体音低減に利用することへの有効性について検証し、実験による加振力放射モードの同定方法についても示している。これらの結果より、解析または実験で得られる加振力放射モードによって、加振力分布と音響放射パワを関連付けることができ、固体音対策に有効であることを示した。

第3章では、構造物の形状と加振力放射モードの関係を考察している。バフル中の両端単純支持梁の板厚、長さの変化が加振力放射モードに与える影響について考察した結果、加振力放射モードは、板厚や長さの変化に伴う振動モードの変化に対応して変化することを確認している。

また、実問題により近い、複数部材から構成される構造として、バフル中の単純支持梁が、外部加振力を受ける他部材と結合した構造物に対して、結合部に発生する力と音響放射パワの関係に加振力放射モードの適用を検討した。その結果、結合部に発生する並進力、モーメントに対し加振力放射モードを定めることで、音響放射パワを最小化する結合点を見いだせることを明らかにしている。

第4章では、構造物の周囲の音場が加振力放射モードに与える影響を考察している。まず、周辺の音場の影響として、無限大の剛な反射面が構造物の近傍に設置された場合について、加振力放射モードへの影響について検討した。さらに、これまで問題の単純化のため考慮していた構造物周囲のバフルの有無が、加振力放射モードに与える影響を検討した。これらの検討の結果、反射面やバフルの影響を明らかにし、反射面の有無、バフルの有無のいずれの場合についても、加振力放射モードによって加振力分布と音響放射パワの関係を把握でき、第2、3章で検討してきた加振力放射モードの基本的性質が音場が変化しても成り立つことを確認している。

氏名	山 口 善 三
----	---------

第5章では、前章までの知見をもとに、加振力放射モードに基づいた固体音放射低減対策を検討している。騒音対策として従来研究されている音響放射面への錘の設置に着目し、錘による音響放射パワの低減の効果を加振力放射モードの変化から考察した。次いで、動吸振器を構造物に設置した際の音響放射パワの低減効果を、加振力放射モードを用いて考察した。その結果、錘や動吸振器を振動する構造物に設置した場合に、加振力放射モードが変化することを確認し、モードの節の位置と加振位置を一致させることで音響放射パワを低減できることを確認した。

また、これらの対策の最適な設置位置は、加振力放射モードの形状をもとに検討することが可能であることも示している。

第6章では、実問題にさらに近い条件の構造物として、前章までの梁とは異なり、2次元的な振動分布を有する板を対象にした検討を行っている。その結果、板の場合についても、加振力放射モードによって、加振力分布と音響放射パワの関係を把握することができることを確認し、基本的に前章までに梁を対象として検討してきた知見が、板についても成り立つことを示している。

第7章では、本論文で得られた知見を総括している。

以上、本論文では、固体音放射問題に対する新たな評価法として、加振力放射モードを提案し、その有効性を明らかにしており、さらに加振力放射モードを利用した固体音放射問題の対策手法についても有用な知見を得ている。このように、これまで評価や対策が困難とされてきた、これら固体音放射、振動物体からの音響放射の問題解決に対し、新たな方向性を示し、かつ有効な提案と知見を提示したのとして、価値ある集積と認める。よって、学位申請者の山口善三は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。