

# 博士学位論文審査要旨

2010年1月12日

論文題目 : 統計的エネルギー解析法による固体音低減プロセスに関する研究

学位申請者 : 黒田 勝彦

審査委員

主査 : 工学研究科 教授 小泉 孝之

副査 : 生命医科学研究科 教授 辻内 伸好

副査 : 工学研究科 教授 廣垣 俊樹

要 旨 :

本論文は、機械製品から発生する固体伝搬音を低減するため、統計的エネルギー解析法（以下 SEA）を用いて振動騒音源の同定から低減対策に有効な構造変更案の検討まで行うことができる系統的なプロセスの提案と実現を目的としている。本論文は6章から構成され、その内容は以下の3つに大別される。

第一に SEA モデルの構築において、面外振動の SEA モデルにおよぼす面内振動の影響を推定する方法を提案している。これまでに固体音解析において、音への寄与が高い面外振動のみを SEA モデルとして考慮するケースが多く、面内振動が面外振動におよぼす影響については論じられていない。そこで、面内振動の影響が大きいと考えられる直交した平板を対象に、面内および面外振動に関する結合損失率の算出式に基づき、半無限系のエネルギー伝搬特性と面外振動の要素だけで構築した SEA モデルから、面内振動の影響度を推定する方法を考案している。さらに、任意の接続角度を有した二本のはりによって構成される単純な構造物を対象に、直交した場合の提案式を任意の接続角度へ拡張することで面内振動の影響度を推定する方法が有効となることを示している。

続いて固体音低減プロセスの要素技術である、実験 SEA モデルを用いた実験時の入力パワー同定手法を検討している。さらにプロセスで特定した箇所に関する SEA 要素形状の部分だけに着目した FEM モデルを用いて SEA モデルを評価する方法、FEM-SEA を提案し、FEM-SEA と最適化技術を用いた所望の結合損失率を実現する方法、構造適正化手法の提案を行っている。構造適正化手法を簡易構造物を対象に、数値シミュレーションにより検討した結果、対象とする周波数帯域において目的の値を満たす要素構造が得られている。またその要素構造の検証には、適正化後の各要素の板厚分布が物理的に妥当であることを、各要素のエネルギー、解析式による検討および初期状態と適正化後の固有振動数の比較により証明し、構造適正化手法の有効性を示している。

第三に振動騒音源の同定から低減対策に有効な構造変更案が検討できる SEA による系統的なプロセスを提案している。これまで FEM や BEM 等では困難である入力と同

定やモデルの要素数が多く構造変更案の検討が煩雑かつ大規模となっていた点を、SEAを用いること、また特定した箇所に関する SEA 要素形状の部分だけに着目した FEM-SEA を用いることで、低い解析コストで構造変更案を検討することができることを示している。

以上のように本論文では、機械製品から発生する固体伝搬音を低減するため、SEA を用いて振動騒音源の同定から低減対策に有効な構造変更案が検討できる系統的なプロセスを提案し、その有効性を数値シミュレーションと実験により検証している。本論文は、固体伝搬音低減のために空間と周波数平均された SEA を用いており、FEM や BEM 等に比較してモデル構築が容易で実稼動時の各要素の入力パワー同定が可能であること、また感度解析における検討結果がロバストであること、さらに解析コストがかからない等の SEA を用いた利点が示されており、学術的にも工学的にも有用である。

よって本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 学力確認結果の要旨

2010年1月12日

論文題目 : 統計的エネルギー解析法による固体音低減プロセスに関する研究

学位申請者 : 黒田 勝彦

審査委員

主査 : 工学研究科 教授 小泉 孝之

副査 : 生命医科学研究科 教授 辻内 伸好

副査 : 工学研究科 教授 廣垣 俊樹

要 旨 :

本論文提出者は神戸商船大学商船学研究科機関学専攻を1995年3月に修了後、民企業で主として自動車の試作開発を行い、1999年4月より神奈川大学工学部機械工学科の機械力学研究室で構造系の振動・騒音解析法に関する研究業務に携わっている。本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集C編に4編、JSME Journal of Environment and Engineering, 13th Asia Pacific Vibration Control Conference にそれぞれ1編の論文として出版公表されている。また、The 11th International Congress on Sound and Vibration, Internoise2005, 2006, 2007, 2008の国際会議においても、各1件の論文発表を行い、内外の学会において十分な評価を得ている。2009年12月19日午前10時より約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会(博士論文公聴会)が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに講演終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、いずれも十分な学力を有することが確認できた。英語については英文論文、国際会議での発表実績で十分な能力を有すること、また、フランス語についても十分な能力を有すると認定されている。以上のことから、本学位申請者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分なものであると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目：統計的エネルギー解析法による固体音低減プロセスに関する研究

氏名：黒田 勝彦

要旨：

本論文では、機械製品から発生する固体伝搬音を低減するために、統計的エネルギー解析法（以下 SEA）を用いて振動騒音源の同定から低減対策に有効な構造変更案の検討まで行うことができる系統的なプロセスの提案を行った。提案するプロセスは、(1) SEA モデルの構築、(2) 実稼動時の入力同定および振動騒音伝搬経路の解明、(3) 変更すべき損失率の抽出、(4) 構造変更案の検討、からなる。本プロセスを実機械製品に適用した結果、対象とする周波数バンドにおける音圧レベルの低減効果から、本プロセスの有効性とプロセスに関する要素技術を確立した。

本論文は、6章から構成されている。

第1章では、研究の背景と目的を明確に述べ、これまでの研究調査を実施することで、本研究で検討すべき項目を挙げた。その結果、これまでに固体音低減に用いられてきた手法の実験モード解析、有限要素法や境界要素法では、振動騒音源の同定から構造変更の提案まで、プロセスを系統的に完遂することは不可能であるが、SEA を用いることで、プロセスを系統的に完遂する可能性があることを示した。

第2章では、SEA による固体音低減プロセスを提案する上での基礎事項として、SEA 基礎式と、解析、実験、FEM を用いる場合のそれぞれの SEA モデルの構築手法について、総括した。また、固体音低減プロセスにおける構造変更という視点の元、単位振動数当たりのモード数で定義されるモード密度の等しい要素形状の異なる複数の構造物を対象に、SEA パラメータである結合損失率が要素形状によらず等しく、また解析 SEA の結果と一致することを FEM 解析により検証した。

第3章では、SEA モデルの構築において、面外振動の SEA モデルにおよぼす面内振動の影響を検討した。これまでに固体音解析において、音への寄与が高い面外振動のみを SEA モデルとして考慮するケースが多く、面内振動が面外振動におよぼす影響については論じられていない。面内振動が面外振動の SEA モデルにおよぼす影響を、面内振動と面外振動の分離の容易な FEM 解析を用いて検討し、面外振動要素だけで構築した SEA モデルから、面内振動の影響を推定することを試みた。これまでの研究では、直交はりを対象に、解析 SEA により面外振動と面内振動としての縦振動とねじり振動をそれぞれ個別に考慮した場合の面外振動の結合損失率を提示し、実験結果と比較、考察のみが行なわれていた。そこで、面内振動が面外振動の SEA モデルにおよぼす影響を明らかにするため

に、面内振動の影響が大きいと考えられる直交した平板を対象に、SEA モデルにおける面内振動の考慮の有無による違いを検討した。その結果、面内振動を考慮しない場合に面外振動の SEA パラメータが、面内振動の現れる周波数域において、過大に評価されることを示した。そして、面内および面外振動に関する結合損失率の算出式に基づき、半無限系のエネルギー伝搬特性と面外振動の要素だけで構築した SEA モデルから、面内振動の影響度を推定する方法を考案した。上述した平板で得た知見を基に、任意の接続角度を有した場合の二本のはりで構成される単純な構造物を対象に、面内振動の影響を推定する方法を検討した結果、直交した場合について、平板で提案した方法が有効であることを示した。さらに、任意の接続角度を有した場合には、直交した場合の提案式を任意の接続角度へ拡張することで有効となることを示した。

第 4 章では、固体音低減プロセスの要素技術である、実験 SEA モデルを用いた実験動時の入力パワー同定手法を確立するため、入力パワーに与える各損失率と各要素エネルギーの影響を検討する方法を提案した。まず、簡易構造物を対象に、インパルスハンマーによる広帯域に入力がある場合に、実験から求めた SEA パラメータと実験動時の要素エネルギーの積から、周波数バンドにおける要素の入力パワーが同定できることを示した。さらに、提案する評価精度により同定した入力パワーが有効であることを示した。続いて、固体音低減プロセスで、特定した箇所に関する SEA 要素の形状を想定し、その部分だけに着目した FEM モデルを用いて、SEA パラメータを評価する方法、FEM-SEA の提案を行った。最後に、FEM-SEA と最適化技術を用いた所望の結合損失率を実現する方法、構造適正化手法の提案を行った。構造適正化手法を簡易構造物を対象に、数値シミュレーションにより検討した結果、対象とする周波数バンドにおいて目的の値を満たす要素構造が得られた。また、得られた要素構造の検証には、適正化後の各要素の板厚分布が物理的に妥当であることを、各要素のエネルギー、解析式による検討および初期状態と適正化後の固有振動数の比較により証明し、構造適正化手法の有効性を示した。

第 5 章では、振動騒音源の同定から低減対策に有効な構造変更案が検討できる系統的なプロセスである、SEA による固体音低減プロセスを提案した。中・高周波数の振動騒音問題を検討することは、個々の共振ピークを同定する実験モード解析、また FEM や BEM 等の厳密な手法では、機体のばらつきやモデル構築にかかる解析コストの問題から難しい。一方、空間と周波数平均された SEA ではモデル構築がそれらに比べて容易であり、FEM や BEM 等に比較して、空間と周波数平均により解析結果がロバストであり解析コストもかからない。また、厳密な手法では、実験動時の入力力や入力パワーの同定が面倒であるために、振動騒音の同定からその解決法まで一連のプロセスを実行することは難しい。しかし SEA では、精度の良いモデルができれば、SEA 要素の入力パワーを予測す

ることは難しくない。提案しているプロセスは、要素間の振動騒音伝搬経路の解明、構造変更シミュレーションに必要な対象機械の実稼動時の振動入力条件の同定など、SEA の特長を活用しており、また、損失率に関する要素エネルギー感度の算出式を新しく導出することにより、構造変更の効果的な損失率の抽出が容易となった。

本プロセスを実機械製品であるレーザプリンタに適用した結果、固体音を対象とする周波数バンドにおける音圧レベルで 4.3dB 低減する対策を実現した。さらに、対策前後の結合損失率を実験および数値解析により検証した結果、所望の値を満たす要素構造が得られ、本手法の有効性を示した。

第 6 章は、本論文の結論であり、第 2 章から第 5 章で得られた成果を総括し、第 1 章で述べた本研究の目的が達成されたことを示した。