

# 博士学位論文審査要旨

2009年2月17日

論文題目： 内燃機関を搭載したエンクロージャー構造物の騒音低減に関する研究

学位申請者： 上原 洋志

審査委員：

主査	同志社大学大学院工学研究科	教授	小泉 孝之
副査	同志社大学大学院工学研究科	教授	青山 栄一
副査	同志社大学大学院生命医科学研究科	教授	辻内 伸好

要 旨：

ディーゼル機関，ガス機関等に代表される内燃機関は，産業用機械の動力として幅広く利用されている。これらレシプロ機関は燃焼エネルギーによってピストン運動を発生させ，クランク機構により回転運動に変換して動力を発生させる。同時に燃焼圧力や部品の運動，衝撃などにより振動騒音が発生する。したがって，動力源として内燃機関を搭載した産業機械は，宿命的に騒音を放射するといった問題を内在している。近年環境問題への意識の高まりとともに，騒音低減に対する要求が強まりつつある。騒音低減手段としてはエンクロージャー構造の剛性強化，吸音材料の貼付け面積拡大，消音器容積拡大が多用されている。これらの騒音低減手段を採用することは原材料費の増加を伴う。また騒音低減方策を決定する際，試行錯誤に頼っている部分があり，開発期間・コストの増加を招いているのが実情である。さらには近年の原材料費高騰がメーカーの収益を圧迫している。よって開発・材料コスト低減を実現するために商品開発の効率向上が求められている。以上の理由から，実験技術の向上や数値シミュレーションによる騒音予測技術の製品設計への展開が求められている。

本論文は6章で構成されている。第1章では内燃機関を搭載した産業機械に対する騒音低減要求に関する状況と産業機械の音源別寄与度を示し，本研究の必要性について述べた後，本研究の目的と論文の構成を示している。

第2章では2マイクロフォン法を応用した音響伝達関数推定手法を導出している。エンクロージャー放射音の音源分離に用いる伝達関数計測において体積速度を音響伝達関数の参照信号に用いることの優位性を示し，スピーカ，チューブとマイクロフォンで構成される体積速度音源を製作している。次いで開空間における体積速度音源の性能を計測し，音響解析結果と同等の結果が得られることを確認し，伝達関数算出方法が正しいことを確認している。この音源を用いて鋼製簡易構造物の音源分離を行った結果，従来手法よりも高い音源分離精度を得たことを示している。続いてコージェネレーションシステムエンクロージャーの音源分離に適用した結果，振動伝播音と空気伝播音を精度良く分離している。以上のことから導出した手法の有効性を示している。

第3章では騒音源の同定を目的とした逆音響解析を実施する際に，振動同定精度に影響を与える伝達関数の特異値採用基準である Tolerance に着目し，その選定手法を提案している。要素試験として半無響室床面に設置した平板を加振した際の放射音を計測して，Tolerance，マイクロフォン間隔と同定精度の関係を調査している。次に実測の振動加速度を用いて音響解析を行い算出した音圧にガウス雑音を加えて音源を同定し，その際の Tolerance と同定精度の関係を調査している。その結果実測音圧を用いて同定したときの Tolerance と同定精度の傾向に類似した傾向が得られることが判明した。これらの知見から同定対象と同外寸のダミーモデルとガウス雑音を

用いた Tolerance 選定手法を提案している。この手法をコージェネレーションシステムのエンクロージャーの振動分布同定に適用した結果、従来の手法と比べて適正な Tolerance を選定できたことから、提案手法が妥当であることを確認している。

第4章ではエンクロージャー放射音の低減を目的とした設計変更において、統計的エネルギー解析法を用いた騒音予測に必要な損失係数、放射効率、入力パワーの推定手法を提案している。

設計変更部品の音場要素と構造要素間の損失係数は、有限要素法による振動解析と境界要素法による音響解析を行い、放射効率を算出することにより求めている。同じく設計変更部品のみを対象とした振動解析により駆動点モビリティの予測を行い、振動入力パワーを求めている。解析による予測ができない高周波帯域では、低周波帯域の値より損失係数を推定している。これらの手法を用いて騒音予測をした結果、予測結果と良好に一致する騒音低減効果が得られたことを述べている。

第5章では排気音低減ならびに消音器設計効率化を目的として、多目的最適化を用いた設計手法を提案している。1次元流体解析と音響解析を用いることにより、低周波脈動音と消音器圧力損失の精度の高い予測が可能であることを示している。この低周波脈動音・圧力損失予測手法と多目的最適化を組み合わせることで低周波脈動音と圧力損失の双方を低減する形状を見出している。高周波音に関しては、パンチメタル部寸法との関係を重回帰分析により調査した結果に基づいて、パンチメタル部の設計指針を提示している。これらの手法と知見を用いて、改良型消音器を設計試作した結果、圧力損失を低減しつつ排気音を低減し、提案手法ならびに提示した設計指針が有効であることを示している。

第6章では各章で得られた実験手法、数値解析手法、騒音低減などの研究成果を総括している。空気伝播音と振動伝播音を対象とした音源分離技術に始まり、騒音源となる振動を同定する手法、エンクロージャー放射音予測手法、排気音予測・低減手法で構成される騒音低減フローを構築している。このフローを用いることにより、試行錯誤に要する時間の少ない効率的な設計変更時の騒音低減が可能になると期待される。以上の事から、本論文は工学的に極めて価値のあるものと評価できる。したがって、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。

## 総合試験結果の要旨

2009年2月17日

論文題目： 内燃機関を搭載したエンクロージャー構造物の騒音低減に関する研究

学位申請者： 上原 洋志

審査委員：

主査	同志社大学大学院工学研究科	教授	小泉 孝之
副査	同志社大学大学院工学研究科	教授	青山 栄一
副査	同志社大学大学院生命医科学研究科	教授	辻内 伸好

要 旨：

本論文の提出者は、大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学専攻博士前期課程を1998年3月に修了し、2006年に同志社大学大学院工学研究科博士課程（後期課程）に入学し現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集C編08-0455, SAE2007-01-2210, SAE2007-32-0104, SAE2008-32-0057, APVC2007に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

本年1月10日午前10時より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により、論文に関連する諸問題につき口答試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、英語に関しては同志社大学大学院工学研究科博士課程（後期課程）入学時に合格しており、また、ドイツ語に関しては大阪大学工学部在学中に単位認定されており、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士学位論文要旨

論文題目：内燃機関を搭載したエンクロージャー構造物の騒音低減に関する研究

氏名：上原 洋志

## 要旨：

ディーゼル機関、ガス機関等に代表される内燃機関は、産業用機械の動力として幅広く利用されている。これらレシプロ機関は燃焼エネルギーによってピストン運動を発生させ、クランク機構により回転運動に変換して動力を発生させる。同時に燃焼圧力や部品の運動、衝撃などにより振動騒音が発生する。したがって、動力源として内燃機関を搭載した産業機械は、宿命的に騒音を放射するといった問題を内在している。近年環境問題への意識の高まりとともに、騒音低減に対する要求が強まりつつある。騒音低減手段としてはエンクロージャー構造の剛性強化、吸音材料の貼付け面積拡大、消音器容積拡大が多用されている。これらの騒音低減手段を採用することは原材料費の増加を伴う。また騒音低減方策を決定する際、試行錯誤に頼っている部分があり、開発期間・コストの増加を招いているのが実情である。さらには近年の原材料費高騰がメーカーの収益を圧迫している。よって開発・材料コスト低減を実現するために商品開発の効率向上が求められている。以上の理由から、実験技術の向上や数値シミュレーションによる騒音予測技術の商品設計への展開が求められている。

本論文は6章で構成されている。第1章では内燃機関を搭載した産業機械に対する騒音低減要求に関する状況と産業機械の音源別寄与度を示し、本研究の必要性について述べた後、本研究の目的と論文の構成を示した。

第2章では2マイクロホン法を応用した音響伝達関数推定手法を導出した。エンクロージャー放射音の音源分離に用いる伝達関数計測において体積速度を音響伝達関数の参照信号に用いることの優位性を示し、スピーカ、チューブとマイクロフォンで構成される体積速度音源を製作した。伝達関数推定精度を高くするために、境界要素法を用いた音響解析により音源内部の粒子速度分布を予測し、適切なマイクロフォン設置箇所を決定した。次いで開空間における体積速度音源の性能を計測し、音響解析結果と同等の結果が得られることを確認し、伝達関数算出方法が正しいことを確認した。この音源を用いて鋼製簡易構造物の音源分離を行った結果、従来手法よりも高い音源分離精度を得た。続いてコージェネレーションシステムエンクロージャーの音源分離に適用した結果、振動伝播音と空気伝播音を精度良く分離することができた。以上のことから導出した手法が有効であることを確認した。

第3章では騒音源の同定を目的とした逆音響解析を実施する際に、振動同定精度に影響

を与える伝達関数の特異値採用基準である *Tolerance* に着目し、その選定手法を提案した。*Tolerance* とは伝達関数の擬似逆行列を近似する際に、特異値の採用範囲を決定する指標で、採用する特異値の最小値と最大値の比率を表し、条件数の逆数に相当するものである。要素試験として半無響室床面に設置した平板を加振した際の放射音を計測して、*Tolerance*、マイクロフォン間隔と同定精度の関係を調査した。その結果、マイクロフォン間隔が 50mm の場合、*Tolerance* が小さくなると同定誤差が増加する傾向が確認できた。逆にマイクロフォン間隔を広くした場合、*Tolerance* を小さくしても同定誤差の増加が見られなかった。次に実測加速度を境界条件として音響解析により算出した音圧を用いて音源同定をしたところ、*Tolerance* を小さくしても同定誤差の増加が見られなかった。実測の振動加速度を用いて音響解析を行い算出した音圧にガウス雑音を加えて音源を同定し、その際の *Tolerance* と同定精度の関係を調査した。その結果実測音圧を用いて同定したときの *Tolerance* と同定精度の関数に類似した傾向が得られることが判明した。これらの知見から同定対象と同外寸のダミーモデルとガウス雑音を用いた *Tolerance* 選定手法を提案した。有限要素法によりダミーモデルの振動モードを求め、その振動モードを用いて 1 点単位入力加振をした際の音圧を音響解析により算出し、音圧にガウス雑音を加えて逆音響解析を行う。このときの *Tolerance* と同定精度の関係を求め、*Tolerance* を選定する。コージェネレーションシステムのエンクロージャの振動分布同定に適用した。その結果、従来の手法より、適正な *Tolerance* を選定できたことから、提案手法の妥当性を確認した。

第 4 章ではエンクロージャ放射音の低減を目的とした設計変更において、統計的エネルギー解析法を用いた騒音予測に必要な損失係数、放射効率の推定手法を提案した。設計変更前の現状騒音を予測するために、パワー注入法による構造要素の損失係数同定、残響時間計測による音場要素の内部損失係数推定、放射効率計測による音場要素構造要素間の結合損失推定などの手法を用いて SEA パラメータを求めた。エンクロージャへの入力パワーは、振動入力パワーは駆動点モビリティと逆マトリクス法による加振力同定から、音響入力パワーは機関周囲音圧計測結果より求めた。求めた SEA パラメータと入力パワーを用いてコージェネレーションシステムの放射音響パワーを算出した結果、各帯域で 5dB 程度の予測誤差に収めることができ、騒音予測に適用可能であることを確認した。続いて構造変更時の騒音予測のため、設計変更時の損失係数を求めた。設計変更部品の音場要素構造要素間損失係数は、有限要素法による振動解析と境界要素法による音響解析を行い、放射効率を算出することにより求めた。同じく設計変更部品のみを対象とした振動解析により駆動点モビリティの予測を行い、振動入力パワーを求めた。解析による予測ができない高周波帯域では、低周波帯域の値より損失係数を推定した。これらの手法を用いて騒音予測をした結果、予測結果と良好に一致する騒音低減効果が得られた。

第 5 章では排気音低減ならびに消音器設計効率化を目的として、多目的最適化を用いた設計手法を提案した。1 次元流体解析と音響解析を用いて低周波脈動音と消音器圧力損失を予測した。実測結果と予測結果を比較した結果、250Hz 以下の排気脈動音、圧力損失ともに

決定係数が 0.9 を超える良好な一致を得た。同手法を用いて吸気脈動音を予測できることを確認した。低周波脈動音・圧力損失予測手法と多目的最適化を組み合わせることで低周波脈動音と圧力損失の双方を低減する形状を見出した。高周波音に関しては、尾管における気柱共鳴の存在を示した。実験により尾管パンチメタル孔径の縮小が気柱共鳴の抑制に効果があることを示した。続いて高周波音とパンチメタル部寸法の関係を重回帰分析により調査し、パンチメタル部の設計指針を提示した。これらの手法と知見を用いて、改良型消音器を設計試作した。その結果、圧力損失を低減しつつ排気音を A 補正オーバーオール値で 3.2dB 低減し、提案手法ならびに提示した設計指針が有効であることを確認した。

第 6 章では各章で得られた実験手法、数値解析手法、騒音低減などの研究成果を総括した。空気伝播音と振動伝播音を対象とした音源分離技術に始まり、騒音源となる振動を同定する手法、エンクロージャー放射音予測手法、排気音予測・低減手法で構成される騒音低減フローを構築した。このフローを用いることにより、試行錯誤に要する時間の少ない効率的な設計変更時の騒音低減が可能になる。また、確立した手法の一部は研究で適用した騒音源以外にも適用可能である。

最後に、本研究において確立した技術に関する問題点と未着手の技術課題を示し、今後の展開について述べた。