

# 博士学位論文審査要旨

2016年 1月12日

論文題目：産業用ディーゼルエンジンの音響・振動入力モデルの構築と車体開発への  
適用に関する研究

学位申請者：明井 政博

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：同志社大学 名誉教授 小泉 孝之

要 旨：

ディーゼルエンジンを搭載した建設機械，農業機械の低騒音化，低振動化を目指すためには，エンジンの音響・振動入力特性とエンジンが搭載される車体の伝達特性の双方を考慮し，車体の開発を進めていくことが必要となる．本論文は，建設機械や農業機械に搭載されるディーゼルエンジンの音響・振動入力モデルを構築し，構築した入力モデルを用いて，車体の低騒音化，低振動化に活用する技術の確立を目的としている．

本論文は全6章で構成されている．第1章では，本研究の背景および目的について述べている．第2章では，逆音響解析を用いたディーゼルエンジンの音響入力モデルの構築手法について述べている．第3章では，構築した音響入力モデルと境界要素法を用いて，エンジンエンクロージャの周囲の騒音を予測し，反射や回折，吸音材のある音場での音響入力モデルの有効性を示した．第4章では，構築した音響入力モデルと実測した音響伝達関数を用いた騒音伝達経路解析手法を提案し，農業機械（普通型コンバイン）を用いて提案手法の有効性を示している．第5章では，エンジンの機構解析により求めた振動伝達力と実験により得られた伝達関数を用いたハイブリッド振動伝達経路解析を提案し，従来法であるマウント剛性法と比較し，提案手法の有効性を示している．第6章では，産業用ディーゼルエンジンの音響・振動入力モデルの構築手法と車体開発への適用手法について得られた知見をまとめている．エンジンの開発段階で構築した音響・振動入力モデルを用いて，車体の低騒音，低振動化の検討を可能にする手法を確立しており，本論文は工学的に極めて価値のあるものと評価できる．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．

## 総合試験結果の要旨

2016年 1月12日

論文題目：産業用ディーゼルエンジンの音響・振動入力モデルの構築と車体開発への  
適用に関する研究

学位申請者：明井 政博

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：同志社大学 名誉教授 小泉 孝之

要 旨：

本論文提出者は、2013年4月に同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（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、SAE International Journal of Commercial Vehicles, Vol.7, No.2, pp.392-398, SAE Technical Paper 2014-01-2316, 農業食料工学会誌 Vol.77 No.3, pp.186-196, SAE Technical Paper 2015-01-2250 に掲載され十分な評価を受けている。

2015年12月12日15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。さらに公聴会終了後、審査委員により、論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、提出者は、英語による論文発表や語学試験にも合格しており、十分な語学能力を有すると認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力並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。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 産業用ディーゼルエンジンの音響・振動入力モデルの構築と車体開発への適用に関する研究

氏名： 明井 政博

## 要旨：

ディーゼルエンジンは、今日に至るまで船舶、陸用、鉄道車両、商用車などのさまざまな機械の動力源として広く使用されている。ディーゼルエンジンでは、シリンダ内で圧縮され高温高压となった空気に対し燃料を噴射し自然着火させる。その燃焼時の圧力上昇によって動力を得る。ディーゼルエンジンは、圧縮比を高くすることができるため、内燃機関の中で最も熱効率が高く、経済性に優れている。また、低回転速度域で高トルクを得ることができるため、低回転速度域で最大トルクを得ることができ、農業機械や建設機械の動力源に適している。そのような長所がある反面、ディーゼルエンジンは、燃焼圧力の変動が大きく振動や騒音が大きいためなどの短所を持ち合わせている。燃料の多段噴射などにより燃焼に起因する騒音は、低減が可能となったものの、燃焼性能はエンジンの動力、燃料消費および排気ガス性能に直結するものであり、騒音低減と両立することが困難であることが多い。また、振動に関しても、近年のエンジンの高過給、高出力化によりシリンダ内の最高圧力が上昇する傾向にあり、低減することは困難である。一方、ディーゼルエンジンが搭載される農業機械および建設機械の振動騒音において、周囲環境への騒音やオペレータの健康や快適性の観点から、機械の振動、騒音低減の要求が高まっている。建設機械では、環境騒音の観点から各国で車両の音響パワーレベルが規制されている。また、農業機械では、オペレータの曝露される騒音が問題となる。オペレータの聴力保護の観点から、曝露される騒音レベルと許容曝露時間が提案されている。農業機械のオペレータの耳位置での騒音レベルは、年々低下傾向にあるもののオペレータの聴力保護の観点から現在の騒音レベルが十分であるとは言い難い。農業機械および建設機械のオペレータに影響を与える振動には、座席の振動などの全身振動とステアリングやレバー部の振動のような手腕振動があり、騒音と同様にオペレータの健康の観点から振動レベルと許容曝露時間が提案されている。このように、車体の低騒音化および低振動化は、周囲環境への騒音、オペレータの健康保護や顧客からの要求、法令順守の観点から機械メーカーの重要な開発課題である。

これらの機械の振動・騒音に関しては、エンジンからの音響・振動入力の寄与が大きい。そのため、機械の低騒音化、低振動化を目指すためには、エンジンからの入力に対して対策をおこなうのが効果的である。しかしながら、エンジンの性能とエンジンの低騒音化、低振動化を両立するには限界がある。そこで、エンジンの振動騒音入力の特性とエンジンが搭載される車体の伝達特性の双方を考慮し、車体の開発を進めていくことが必要となる。これらの理由から、建設機械や農業機械の低騒音化、低振動化には、エンジンの開発と車体の開発の連携が重要であり、その両者を受け渡す技術の確立が必要である。

本論文は、6章で構成されている。第1章では、ディーゼルエンジンが搭載される建設機械、農業機械の振動騒音に関する状況、先行研究の事例について述べた。建設機械や農業機械の開発におけるディーゼルエンジンからの音響入力、振動入力モデルの構築の必要性を示し、研究の目的を示した。

第2章では、逆音響解析を用いたディーゼルエンジンの音響入力モデルの構築手法について論じた。逆音響解析は、音源の周囲に配置した観測点における音圧と境界要素法で求めた音源の表面と観測点間の音響伝達関数を用いて、音源の表面振動を同定する手法である。表面振動を同定

する逆解析の過程で特異値分解を用いる。特異値分解を用いた逆解析では、解の不安定性が問題となる。本研究では、同定解の誤差の拡大につながる小さな特異値を無視した近似疑似逆行列を用いることにより解の不安定性を抑制した。特異値を打ち切る許容値をLカーブ手法により選択し、同定解の発散と観測点の情報量の低下を抑制して、逆音響解析をおこなった。その結果、ディーゼルエンジンの表面振動を1/3オクターブバンドのオーバーオールレベルで5 dB 以内の精度で同定することができることを確認した。また、エンジンの表面振動分布を音響入力モデルで表現することができ、エンジンの構成部品の中で表面振動の大きな部品を特定できることを示した。

3章では、2章において構築したディーゼルエンジンの音響入力モデルと境界要素法を用いて、エンジンエンクロージャの周囲の騒音を予測した。車体開発において、エンクロージャを設計する際には、放射される音の周波数と放射面の位置を把握した上で使用する吸音材の特性を検討する。また、エンジンルーム内部のヒートバランスと防音性能を両立させることが重要となる。エンクロージャ内部の冷却を考えると開口面積は大きく、内部から外部へ騒音のことを考えると開口面積は小さくする必要がある。開口部の位置と開口面積は、重要な設計検討のパラメータとなる。そこで、エンクロージャの設計パラメータである吸音材の特性、開口部の位置を変更した場合の騒音の予測精度を確認し、エンクロージャ設計への音響入力モデルの有効性を確認した。その結果、400 Hz以上の周波数帯域では、エンクロージャ周囲の騒音を実測に対し3 dB以内で予測できることを確認した。吸音材の特性に関しては、吸音材のノーマル音響インピーダンスを境界条件として定義することにより、吸音材の特性を予測モデルで表現した。また、開口部の位置の影響を予測モデルで表現できることを明らかにした。これらの結果により、実際のエンジンエンクロージャのような反射や回折、吸音材のある音場での音響入力モデルの有効性を示した。

4章では、2章において構築したディーゼルエンジンの音響入力モデルと実測した音響伝達関数を用いた騒音伝達経路解析手法を提案し、その有効性を確認した。有効性の検証のために実際の農業機械（普通型コンバイン）を用いた。機械のオペレータ位置に代表される評価位置での騒音を効率よく低減するためには、騒音源から評価位置までの伝達経路の中で、寄与の高い経路に対し改善をおこなう必要がある。騒音の伝達経路の把握のために騒音伝達経路解析が広く用いられているが、騒音伝達経路解析では、音響入力を同定する必要がある。そこで、逆音響解析により半自由音場で構築した音響入力と実機において計測されたエンジン表面から騒音の評価点（オペレータ耳位置、車体周囲）までの音響伝達関数を用いた騒音伝達経路解析をおこなった。実機において計測された音響伝達関数は、音源であるエンジンを囲むエンクロージャやカバーなどの影響を含めた入力位置から評価位置までの伝達特性を示す。騒音伝達経路解析の結果、評価点における騒音に対し寄与の高いエンジン部品の放射面を特定した。また、騒音伝達経路解析の結果に基づきオペレータ耳位置における騒音の改善をおこない、提案手法の有効性を示した。

5章では、エンジンの機構解析により求めた振動伝達力と実験により得られた伝達関数を用いたハイブリッド振動伝達経路解析を提案した。マウント剛性法に代表される従来の振動伝達経路解析手法は、実験的な手法であるため、評価点の振動に対する入力側のパラメータスタディをすることができない。本研究で提案したハイブリッド手法は、エンジンから車体への入力となる振動伝達力を機構解析で求めるため入力側のパラメータスタディが可能である。提案手法を普通型コンバインのオペレータ位置の振動評価に適用し、従来法であるマウント剛性法と比較した。提案手法によって求められたオペレータ位置の振動に対する各経路の寄与は、従来法であるマウント剛性法と同様の傾向を示した。また、提案手法とマウント剛性法において、各経路の振幅と位相がよく一致する結果を得た。さらに、提案手法を用いて、オペレータ位置の振動レベルを予測した結果、実測値と予測値の差は概ね3 dB以内であった。オペレータ位置の振動レベルに対して入力側のパラメータの検討が可能であることを示した。

第6章では、産業用ディーゼルエンジンの音響・振動入力モデルの構築手法と車体開発への適

用手法について得られた知見をまとめている。

本研究の成果より、エンジンの開発段階で構築した音響・振動入力モデルを車体の低騒音、低振動化の検討のために有効活用することが可能となった。これらの技術は、車体の低振動、低騒音化のための設計検討の効率化に貢献できる。