

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	エンジン燃焼起因振動の伝達・減衰特性 (Transmission and Decay Characteristics of Combustion-Induced Vibration in Engines)
氏名(Name)	小口 瞳史 (Hitoshi Oguchi)
<p>ディーゼルエンジンの排気エミッション低減手法としても着目される予混合圧縮着火方式は負荷の上昇に伴い筒内圧力上昇率が急激になることが一般に知られ、筒内圧力上昇率と密接な関りを持つ燃焼騒音が従来エンジンに比べ大きくなる。自動車等の商品性向上、そして、環境問題としての騒音公害の観点からもディーゼルエンジンの燃焼騒音低減が求められており、その解決の糸口として、またエンジンのモデルベース開発のためのシミュレーション精度の向上のため、燃焼騒音発生メカニズムを解明することが重要である。</p> <p>一般に燃焼騒音スペクトルは筒内圧力スペクトルと線形関係を持つとされるが、三上ら、Nguyen らは燃焼による騒音発生機構について、次のような時間・周波数依存燃焼騒音発生モデルを提唱した。まず、①筒内で生じた燃焼衝撃パワー W_{ci} が振動伝達効率 η_{vc} によって振動エネルギー E_v として蓄積・伝達される。②蓄積された振動エネルギーは減衰率 c によって時間に伴い減衰され、③エンジン外壁面に到達した振動エネルギーは音響放射率 b によって騒音パワー W_{en} として放射される。本研究では、同モデルにおいて重要な地位を占める振動伝達効率 η_{vc} と減衰率 c の特性について調査した。</p> <p>減衰率 c について、その関係因子と思われる①パーツ内部減衰特性(パーツ単体の減衰)、②パーツ結合部減衰特性(金属面接触部等における減衰)および③パーツ間接触部減衰・伝達特性(軸受における粗さ接触・粘性抵抗)について調査し、最後にこれら減衰要素を実稼働シミュレーションモデルに実装できるかについて検討した。</p> <p>パーツ内部減衰は分解したエンジンパーツ単体についてハンマリング加振試験を行い、モード減衰比を求めた。パーツ結合部減衰についても、エンジンブロックの主要部品であるアッパーブロックとロアブロックを結合させた状態でハンマリング加振試験を行った。結合ブロックで加振試験を行うと、一部のモードで、モード減衰比が単体パーツのそれより大きくなった。このように、結合ブロックの一部のモード減衰比が大きくなるのは、上下ブロックの結合面ですべりが生じ、それによる摩擦であることが実固有値解析やエンジン発火運転試験における上下ブロックの加速度位相差解析によって判明した。</p> <p>パーツ間接触部減衰について調査するため、エンジンオイルをパラメータとしてシミュレーションを実施し、軸受の摩擦損失について解析を行った。シミュレーションで主軸受における摩擦損失の時間歴を確認すると、粘度の小さいオイルを用いたときは燃焼 TDC 付近で粗さ接触による摩擦損失が、粘度の大きいオイルを用いたときは定常的な油膜摩擦損失が発生することがわかった。またこれらの周波数解析から、粗さ接触摩擦損失は 1 kHz 以上の高周波における減衰を増大させ、油膜摩擦損失は 10 Hz 以下の極低周波における減衰を増大させることがわかった。</p> <p>最後にこれら減衰要素を実稼働シミュレーションに実装する試みを行った。</p> <p>パーツ間接触部減衰に関する調査の中で、粗さ接触が振動伝達効率にも大きく寄与することがわかったため、エンジンオイルおよび軸受形状をパラメータとして、軸受粗さ接触が振動伝達効率におよぼす影響について調査した。エンジンオイル粘度を大きくすると油膜のくさび効果によって、また軸受にテーパ形状を施すとクランク軸の弾性変形によるメタル片当たりを防ぐことによって、それぞれ軸受粗さ接触が減少することを確認した。これにより振動伝達効率が低下することがわかった。</p> <p>また、コンロッド形状を変化すると振動特性が変化することが先行研究によって判明しているが、これについて振動伝</p>	

様式7号（第12条，第31条関係）

（様式7号）(Format No.7) 英語版

達成率の観点から調査した。肉抜き部が長いオリジナルコンロッド（OISコンロッド）を用いた場合と肉抜き部が短いコンロッド（SISコンロッド）を用いた場合のエンジン表面振動は、OISコンロッドでは2.5 Hz付近が大きく、SISコンロッドでは2.8 kHz付近が大きいという違いが生じた。これはピストンの並進運動とコンロッドの縦振動とが連成したピストン-コンロッド連成振動によるということがわかっている。振動伝達効率 η_{vc} に比例する値を確認すると、ピストン-コンロッド連成振動数と振動伝達効率の極大値が一致していることがわかった。この振動伝達効率の上昇を解明するためシミュレーションを実施し、軸受を解析すると、両コンロッドで軸受粗さ接触が発生していることが判明した。このことから、軸受の粗さ接触領域では特にピストン-コンロッド連成振動数での接触が大きくなり、その結果として振動伝達効率が大きくなったと推察される。

ここまでの調査で、実稼働シミュレーションはエンジン実機の発火運転による振動を十分に再現できておらず、減衰率に大きな課題を持つことが明らかになった。本研究の最後では、調査により明らかになった減衰要素を実稼働シミュレーションに適用する試みを行った。

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

<h2>学 位 論 文 要 旨</h2> <p>(Summary of the Doctoral Dissertation)</p>	
学位論文題目 (Dissertation Title)	エンジン燃焼起因振動の伝達・減衰特性 (Transmission and Decay Characteristics of Combustion-Induced Vibration in Engines)
氏 名 (Name)	小口 瞳史 (Hitoshi Oguchi)
<p>Engine noise and vibration become significant if rapid combustion occurs such as premixed-charge compression ignition to achieve high thermal efficiency. In order to solve this problem, an improvement of understanding of the mechanism of engine noise is required. Although simulation of the engine vibration is accurate at relatively low frequencies, the simulation accuracy at high frequency, especially more than 1 kHz, is still low. Thus, we need to understand the mechanism of combustion-induced vibration to improve simulation accuracy.</p> <p>Mikami et al. and Nguyen et al. proposed a time-frequency dependent combustion-noise generation model. In this model, the vibration energy, E_v, of each frequency component is assumed to accumulate in the engine structure excited by the combustion impact power, W_{ci}, with the vibration transmission efficiency, η_{vc}, during the combustion period t_b in a cycle. After the end of combustion, E_v decays over time with the decay rate, c. The combustion noise is assumed to radiate from the engine outer surface with the acoustic conversion coefficient, b. This vibration-transmission and decaying are the main processes of the combustion-induced vibration mechanism. This study experimentally and numerically studied them.</p> <p>This study considered four factors of the vibration decay processes: internal damping of each engine part, slip friction between the contact surfaces of assembled parts, oil viscous friction on joint parts, and asperity friction on joint parts.</p> <p>I conducted hammering tests on each engine part to investigate the internal damping and calculated the modal damping ratio.</p> <p>I also conducted hammering tests on the assembled block which consists of the upper block and the lower block to investigate the influence of the slip friction between the contact surface on damping ratio compared with that of single blocks. These blocks sandwich the crankshaft when assembled as finished state. As a result, modal damping ratios of some modes are similar to that of the single blocks. On the other hand, those of some modes are much bigger than that of the single blocks. To understand the reason for this difference, I conducted modal analysis of the assembled block. In the modes whose modal damping ratios are much bigger than that of single blocks, the assembled block moves like bending motion. Because of this movement, it seems that the slip friction occurs on the contact surface. This friction might make the modal damping ratio large. In the modes whose modal damping ratios are similar to that of single blocks, portions of the upper and lower block near the contact surface rotate together, thus preventing the occurrence of the slip friction. Therefore, the modal damping ratio values are similar to that of the single block and its decay would</p>	

come only from the internal damping. In order to verify this hypothesis that the slip friction occurring on the contact surface of the assembled block makes the modal damping ratio large, I experimentally investigated the phase difference between the upper block and the lower block. As a result, the phase difference occurred, so the hypothesis is correct.

There is oil in joint parts such as the piston-liner contact and bearings. Viscous friction loss must occur and therefore, decaying occurs in such joint parts. I investigated the influence of oil viscosity on the decay rate of the engine vibration energy. I conducted an engine firing experiment with three different viscosity oils. In many frequency bands, especially in high frequency, the decay rates for higher viscosity oil became lower even though higher oil viscosity creates higher oil viscous resistance. In order to investigate the cause for it, I conducted simulation with two different viscosity oils and investigated the difference on a main bearing. With high viscosity oil, stationary hydrodynamic friction power loss became bigger and local asperity friction power loss near the top dead center became lower. In order to investigate the influence of this change in the frequency domain, I conducted a frequency analysis. With high viscosity oil, the friction power loss in the wide frequency range became lower but in a very low frequency range, under 10 Hz, became bigger. Therefore, the decay rates with higher viscosity oil became lower.

From previous researches, it is revealed that by shortening the I-beam section of the connecting-rod, the natural frequency of the piston-connecting-rod-coupled vibration became around 2800 Hz from 2500 Hz. In this study, I investigated the cause for it from the view of the vibration-transmission efficiency. From the result of firing experiment, it is found that the frequency for the maximum value of the vibration-transmission efficiency was almost same as the piston-connecting-rod-coupled vibration frequency. In order to examine it, I conducted the simulation and investigated the main bearing. The main bearing analysis shows that the asperity contact makes the vibration-transmission efficiency greater especially the frequency of the piston-connecting-rod-coupled vibration.

From above experiments and simulations, it is obvious that the accuracy of simulation has a problem especially in the decay process. Finally, I tried to apply the decay factors on the simulation.

(様式9号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏名	小口 瞳史
審査委員	主査： 三上 真人
	副査： 望月 信介
	副査： 田之上 健一郎
	副査： 蔣 飛
	副査： 白石 僚也
論文題目	エンジン燃焼起因振動の伝達・減衰特性 (Transmission and Decay Characteristics of Combustion-Induced Vibration in Engines)

【論文審査の結果及び最終試験の結果】

自動車のエンジン騒音の低減を図るうえで、エンジン騒音と強く関係する燃焼起因振動を正しく把握することは重要である。本研究では、単気筒ディーゼルエンジンを対象に実験とシミュレーションを行い、燃焼起因振動について燃焼による衝撃の構造内伝達特性と減衰特性の観点から考察を行った。構造内減衰について、パーツ内部減衰、パーツ結合部減衰、オイルを介したジョイント部の減衰について調査が行われた。この調査を通して、減衰特性だけでなく振動伝達特性の重要性も示された。特に、エンジンオイル粘度を変化させた実験および弾性流体潤滑を考慮したシミュレーションにより、オイル粘度の影響はジョイント部の粗さ接触の度合いを通して高周波成分の減衰特性に現れること、また、粗さ接触は振動伝達効率を増大させることが示された。

本論文は6章から構成されている。

第1章においては、今後のカーボンニュートラル時代に向けたディーゼルエンジン搭載輸送機器の位置づけをまとめたうえで、商品性としての低騒音性の重要性を述べ、中でもエンジン騒音低減の必要性を示している。エンジン騒音研究について、燃焼に起因する騒音に関する研究を中心にこれまでの動向をまとめたうえで、本研究に特に深く関係するエンジン騒音発生時間・周波数依存モデルにおける未解明な点を明確にしている。そして、時間・周波数依存燃焼騒音発生モデルにおける振動伝達効率と減衰率がどのような構成要素に依存して変化するかについて、実験とシミュレーションにより調査し、またそれを実稼働シミュレーションモデルに実装する方法を検討・提案することで、燃焼起因振動予測精度向上に寄与し、エンジン燃焼騒音の低減・最適化に貢献することを目指すという目的を述べている。

第2章においては、エンジン実験、パーツ加振実験において用いる装置およびデータ取得法について述べるとともに、シミュレーション手法についても述べている。

第3章においては、解析手法の高速フーリエ変換、ウェーブレット変換、時間・周波数依

(様式 9 号)

存モデルにおける振動伝達効率および減衰率の算出方法、モード減衰比算出方法について述べている。

第 4 章においては、振動エネルギーのエンジン構造内減衰について多面的に調査を行い、考察を行っている。まず、時間・周波数依存モデルにおける減衰率をエンジン実験により求め、運転パラメータに依存して最大燃焼衝撃エネルギーが変化しても、減衰率は変化しないこと、高周波ほど大きいことを示した。そして、減衰を生じさせる因子として、①パーツ内部減衰特性(パーツ単体の減衰)、②パーツ結合部減衰特性(金属面接触部等における減衰)、③パーツ間接触部減衰・伝達特性(軸受における粗さ接触・粘性抵抗)を挙げ、単体パーツおよび結合パーツ加振実験、FEM によるモード解析、弾性流体ジョイントを考慮した 3D シミュレーションにより検討を行っている。これにより、パーツ内部減衰はその他の減衰と比べ小さいこと、パーツ結合部においては、振動モードに依存して滑り摩擦による減衰が生じること、ベアリングなど油膜を介するジョイント部においては、オイルの粘性による減衰は極低周波に限られ、粗さ接触による摩擦減衰が高周波において作用すること、を明らかにした。また、これらの減衰をエンジン 3D シミュレーションに考慮することによる精度向上についても検討を行った。

第 5 章においては、燃焼衝撃エネルギーからエンジン表面振動への伝達効率について調査を行っている。振動伝達効率はピストン-コンロッド連成振動数において最大となることを見出し、主軸受の粗さ接触が振動伝達効率の増大に寄与していることを明らかにした。オイル粘度が高いほどエンジン振動加速度が低下することも、主軸受における粗さ接触の低下によるものであることも示している。また、主軸受形状を変更することで粗さ接触を抑制し、振動加速度を低減する手法についても提案がなされている。さらに、振動伝達の観点から、エンジン 3D シミュレーションの今後の改良指針についても示している。

第 6 章においては以上により得られた知見をまとめている。

公聴会はオンライン併用で開催し、学内外から 42 名が参加した。公聴会における主な質問内容は、油膜圧力と油膜摩擦のオイル粘度依存性に関するもの、シミュレーションにおける感度解析の意味と解釈に関するもの、3D シミュレーションのモデルおよび計算時間に関するものなどであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。

論文内容および審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計 7 編、参考論文 計 0 編)

- 1) Oguchi, H., Minato, K., Seo, T., Mikami, M., The Influence of Connecting-Rod Specifications on the Combustion-Noise Generation from a Diesel Engine, SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, Vol. 1, Issue 4, pp. 1817-1822, 2019.
- 2) 小口瞳史, 三上真人, 西川智博, コンロッド肉抜き部形状がディーゼルエンジンの燃焼起因振動に与える影響, 自動車技術会論文集, 53 巻 1 号 145-150 頁, 2022 年.
- 3) 小口瞳史, 荻山彪吾, 三上真人, 主軸受粗さ接触がディーゼルエンジンの燃焼起因振動に与える影響, 自動車技術会論文集, 53 巻 2 号 314-319 頁, 2022 年.