

中速ディーゼル機関における熱効率・NO_x の 同時改善と実用化開発

学位論文内容の要旨

近年、定置型原動機においては排気ガス規制が厳しくなる等、環境問題への対応が強く求められている。本論文は、発電用や船用の動力源として広く使われている中速ディーゼル機関における熱効率と NO_x の同時改善を目的として、燃料性状を含めた燃焼特性の解明と高度化研究、および実用化に向けた機関要素技術の研究開発の結果について取りまとめたものである。

すなわち、中速ディーゼル機関における低 NO_x 化対応の最大課題である熱効率低下に対して系統的な究明と検討を行い、高効率化と低 NO_x 化を同時に達成するための技術指針を提唱すると共に、その実用化に向けて主要要素の構造解析研究を遂行することによって、高効率・低 NO_x 中速ディーゼル機関の実用化開発に成功し、併せてその技術指針の妥当性を実証した。

第 1 章においては、本研究の社会的背景と目的、ならびに国内外の中速ディーゼル機関に関わる排気ガス規制の状況と研究動向について述べた。

第 2 章では、ディーゼル機関の各種低 NO_x 化技術とその特性について検討し、運転条件が過酷な中速ディーゼル機関においては、基本的に機関本体での燃焼改善策が肝要であること、また船用機関ではプロペラ特性に基づく機関負荷率と NO_x 排出特性との関連にも考慮して低 NO_x 化技術を検討する必要があること等を示した。

第 3 章では、燃焼および NO_x 生成のシミュレーション手法を構築し、その妥当性を検証すると共に、低 NO_x 化に対する各種燃焼関連因子の影響度合を明らかにした。すなわち、各因子の NO_x 低減効果は、上死点前から上死点直後のシリンダ内燃焼ガスの温度推移に大きく依存し、シリンダ内最高圧力、特に爆発度によって概ね記述・集約されること、また燃料噴射時期、給気圧力および圧縮比などの影響を包括したシリンダ内最高圧力あるいは爆発度の最適化によって、NO_x と熱効率の同時改善が可能であること等を示唆した。

第 4 章においては、実機における低 NO_x 化手法について評価すると同時に、その効果を総合的に検討した。低 NO_x 化手法として燃料噴射時期の遅延が最も効果

的であるが、その際の機関性能悪化に対しては、燃料噴射特性や過給機マッチングの向上に基づく給気圧力上昇に起因するシリンダ内最高圧力の高圧維持が極めて有効であること、圧縮比の増加と燃料噴射時期の最適化により、爆発度を抑えたシリンダ内最高圧力の上昇により熱効率を悪化させずに低 NO_x 化が可能となることを実証し、併せて前章のシミュレーションの妥当性を明らかにした。

第 5 章では、シミュレーションと実機試験を基に、特に高効率化の手法およびその関連因子に注目し、最も重要な燃焼技術では主燃焼期間の熱発生率増大と燃焼期間短縮のための燃焼系改善が不可欠であることを論述した。燃焼期間の短縮は、燃料噴射系と燃焼室形状とのマッチングおよび燃焼系と過給機とのマッチングの最適化によって容易に達成し得ることを実証した。またシリンダ内最高圧力を抑えたいとする従来の設計コンセプトとは逆に、ある程度のシリンダ内最高圧力上昇を許容して圧縮比・給気圧力・爆発度の最適化を行えば、より一層の高効率化が期待できると共に NO_x の改善も可能であることを提唱した。

第 6 章では、燃料の経済性から高粘度低質重油の使用に着目し、その燃焼では、主燃焼熱発生率の減少と燃焼期間の増加に起因して、燃料消費率、煙濃度および Fuel NO_x が悪化の傾向を示すが、Thermal NO_x は増加せずむしろ低減する場合があることを検証した。この燃焼悪化傾向は、燃料が高粘度になるほどまた低負荷運転ほど顕著に現れるが、特に低負荷時の燃焼悪化に対しては給気温度の上昇が効果的であることを示した。また天然ガス燃焼においては、NO_x 低減の点から希薄燃焼が有利であること、その場合に問題となる燃焼変動は予燃焼室の採用によって安定すると同時に短期燃焼も確保し得ること、更に点火時期や給気温度の最適化併用によって高効率且つ低 NO_x 燃焼を達成し得ることを実証した。

第 7 章においては、熱効率と NO_x の同時改善を目途に、シリンダ内最高圧力として従来レベル対比 20% 上昇の 18MPa を想定し、最も重要な燃焼・出力系要素であるピストン、シリンダヘッドおよび連接棒における機械的負荷増大に対応する応力低減構造、ならびに熱的負荷との重畳を避けて応力振幅を低減するための構造等をそれぞれ開発し、併せて高シリンダ内最高圧力機関に対する強度設計指針を明らかにした。

第 8 章では、以上の研究結果を基に実用化開発した低 NO_x・高効率化中速ディーゼル機関 46HX 形の性能概要について記述した。この機関は、シリンダ径 460 mm を有する国産初の単機出力 10,000kW 級中速大形ディーゼル機関であり、同出力級従来機関対比約 30% 増のシリンダ内最高圧力 18MPa において、燃料消費率約 6%、NO_x 値約 20% の同時改善に成功した。また、前章までに述べた低爆発度・高シリンダ内最高圧力を指向する燃焼コンセプトが、高効率化と低 NO_x 化の同時達成を目指す基本設計指針になり得ることを実証した。

第 9 章は結論であって、本研究の結果を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 宮 本 登
副 査 教 授 池 川 昌 弘
副 査 教 授 近 久 武 美
副 査 教 授 野 口 徹

学 位 論 文 題 名

中速ディーゼル機関における熱効率・NO_x の 同時改善と実用化開発

近年、定置型原動機においては排気ガス規制が厳しくなる等、環境問題への対応が強く求められている。本論文では、発電用や船用の動力源として広く使われている中速ディーゼル機関における熱効率とNO_xの同時改善を目的として、その燃焼現象の解明と改善技術の検討、および実用化に向けた機関要素技術の研究開発の結果について取りまとめている。

すなわち、中速ディーゼル機関における低NO_x化対応の最大課題である熱効率低下に対して系統的な解明と検討を行い、高効率化と低NO_x化を同時達成するための技術指針を提唱すると共に、その実用化に向けて主要要素の構造解析研究を行なうことによって、高効率・低NO_x中速ディーゼル機関の実用化開発に成功し、併せてその技術指針の妥当性を実証している。

第1章においては、本研究の社会的背景と目的、ならびに国内外の中速ディーゼル機関に関わる排気ガス規制の状況と研究動向について述べている。

第2章では、ディーゼル機関の各種低NO_x化技術とその特性について検討し、運転条件が過酷な中速ディーゼル機関では、基本的に機関本体での燃焼改善策が肝要であること、また船用機関ではプロペラ特性に基づく機関負荷率とNO_x排出特性との関連にも考慮して低NO_x化技術を検討する必要があること等を示している。

第3章では、燃焼およびNO_x生成のシミュレーション手法を構築し、その妥当性を検討すると共に、低NO_x化に対する各種燃焼関連因子の影響度合について明らかにしている。すなわち、各因子のNO_x低減効果は、上死点前から上死点直後のシリンダ内燃焼ガスの温度推移に大きく依存し、シリンダ内最高圧力、特に爆発度によって概ね記述・集約されること、また燃料噴射時期、給気圧力

および圧縮比などの影響を包括したシリンダ内最高圧力あるいは爆発度の最適化によって、NO_x と熱効率の同時改善が可能であること等を示唆している。

第 4 章においては、実用上の各種低 NO_x 化手法について評価すると同時に、その効果を総合的に検討している。低 NO_x 化手法として燃料噴射時期の遅延が最も効果的であるが、その際の性能悪化に対しては、若干の圧縮比上昇あるいは過給による給気圧力上昇等によるシリンダ内最高圧力の高圧維持が有効であることを実証し、併せてシミュレーション結果の妥当性を明らかにしている。

第 5 章では、特に高効率化に注目し、そのためには主燃焼期間の熱発生率増大と燃焼期間短縮のための燃焼系改善が不可欠であることを論述している。燃焼期間の短縮は、燃料噴射系と燃焼室形状のマッチングおよび過給の最適化によって達成し得るが、その場合、シリンダ内最高圧力を抑えたいとする従来の設計コンセプトとは逆に、ある程度のシリンダ内最高圧力上昇を許容すれば、より一層の高効率化と低 NO_x 化が可能であることを提唱している。

第 6 章では、経済性の高い高粘度低質重油に着目し、その使用時の問題である低負荷時の燃焼悪化に対して、給気温度の上昇が最も効果的であることを示している。また天然ガスについては、NO_x 低減の点から希薄燃焼が有利であること、その際の問題である燃焼変動は予燃焼室の採用によって改善できると同時に燃焼の短期化も確保し得ること等を実証している。

第 7 章においては、熱効率と NO_x の同時改善を目途に、シリンダ内最高圧力として従来レベル対比 20% 上昇の高圧力 18MPa を想定して、最も重要な出力系要素であるピストン、シリンダヘッドおよび連接棒における機械的負荷増大に対応する応力低減構造、ならびに熱的負荷との重畳を避けて応力振幅を低減するための構造等について検討し、その技術を確立している。

第 8 章では、以上の研究結果を基に実用化開発した低 NO_x・高効率化中速ディーゼル機関 46HX 形の性能について確認し、単機出力 10,000kW 級中速大形ディーゼル機関として従来の同級機関対比で燃料消費率約 6%、NO_x 値約 20% の同時改善に成功している。

第 9 章は結論であって、本研究の結果を総括している。

これを要するに、著者は、中速ディーゼル機関における高効率化と低 NO_x 化を同時達成するための燃焼技術について新知見を得ると共に、それに基づいた実用化開発にも成功しており、内燃機関工学および燃焼工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。