

学 位 論 文 題 名

ディーゼル機関における排気微粒子および
窒素酸化物の同時低減に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、ディーゼル機関から排出される微粒子および窒素酸化物を、熱効率の悪化を伴わずに低減するための指針を得ることを目的として行なった、一連の研究の成果について論述したものである。

論文は、8章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の目的および得られた結果の概要について述べるとともに、研究の背景、ならびにディーゼル機関から排出される汚染物質の低減に関連する研究の動向についてとりまとめた。また、熱効率の悪化を伴うことなしに、微粒子と NO_x とを同時に低減する上でのコンセプトについて論述した。

第2章では、供試エンジンおよび実験に用いた装置、ならびに測定方法について記述した。そして、燃焼過程を制御する手法として、主室とは別に小さな副室と副噴射系を設け、ここに燃焼後半の適当な時期に少量の燃料を噴射して、連絡孔を通して主室へ噴出する燃焼ガスにより燃焼場を攪乱する、燃焼後期攪乱方式（CCD方式）を提示した。

第3章では、CCD方式における排気微粒子の低減特性に関して、熱力学的な解析を行った結果について記述した。すなわち、主燃焼室圧力経過と攪乱流生成室への投入熱量とから、攪乱流生成室から噴出する燃焼ガスの運動量を求め、それが攪乱流生成室の容積、燃料噴射割合、燃料噴射時期、あるいは連絡孔径などの設計変数によって、どのように変化するかについて調べた。その結果、連絡孔径がガス運動量に対する重要な設計因子であり、攪乱流生成室に投入した熱量が同じであっても、連絡孔径によってガスの運動量が大きく変化することが分かった。そして、孔径が小さくなるに従ってガス運動量は増大するが、ある孔径以下では、とくに軽負荷においてチョーキングを生じるために、運動量が減少することを明らかにした。さらに、攪乱室内空気量に当量の燃料噴射割合を設定したときにガスの運動量が最大となること、また高負荷になるほど攪乱流の運動量が低下する傾向にあるので、高負荷運転条件に対応して各設計変数の最適化を図るべきであること、などを明らかにすることができた。

第4章においては、実験によってCCD方式の機関性能および排気特性を明らかにするとともに、筒内微粒子の直接サンプリングや高速度写真による燃焼過程の可視化観察などを行い、指圧線図の解析と併せて、燃焼および排気に対する攪乱流の効果について検討した。その結果、本燃焼方式は、広範な機関運転条件において、排気微粒子の低減に対してきわめて有効であり、しかも、熱効率および NO_x に対しては何ら悪影響を与えないので、 NO_x 、排気微粒子、および熱効率のトレードオフ関係を改善できることを示した。

そして、このような微粒子の低減は、攪乱流による酸化促進と、主室内への燃料の初期噴射量の減少に伴う生成量の低減の二つの効果によって得られることを明らかにした。さらに攪乱流生成室の容積は、微粒子の低減効果が減少しない範囲内で極力小さくすることが、熱効率との兼ね合い上好ましいこと、連絡孔径に関して最適値が存在すること、また、攪乱流生成室への燃料噴射量が多すぎる場合には、攪乱流生成室が微粒子生成源となって、かえって排出量が増加することなどが明らかになり、第3章における計算結果の妥当性を確認した。

第5章では、低 NO_x 燃焼の実現に重点をおいて、微粒子の低減に対して効果的なCCD方式と、 NO_x 低減のための排気再循環および水噴射との併用を試みた。その結果、CCD方式の微粒子低減効果は、排気再循環や水噴射を併用しても損なわれないことが明らかになった。ただし、排気再循環によれば、中・低負荷域において他の性能を犠牲にすることなしに NO_x を低減できるが、高負荷域では、体積効率の低下によって、燃費、出力および微粒子が悪化し、CCD方式と組み合わせたとしても、それらの回復を図ることは困難なこと、また水噴射は、 NO_x 低減に対してきわめて有効であり、CCD方式と併用することによって燃費の悪化を伴わずに排気微粒子および NO_x をベース機関の約1/2に低減できるが、機関の耐久性への影響を考慮すると高負荷域以外の使用は避けるべきであることなどを示した。すなわち、CCD方式に対して、低・中負荷域で排気再循環を、また、高負荷では水噴射を併用することが、 NO_x と黒煙の大幅な同時低減に対して効果的であることを明らかにした。

第6章では、燃料噴射系および燃焼室形状の変更による混合気の当量比制御と、CCD方式の優れた燃焼促進特性とを併用することによって、ディーゼル機関に対する二段燃焼の適用を試みた。また、 NO に関する反応動力学的計算を行って、当量比制御と攪乱による効果的な NO 低減の条件についても検討を加えた。その結果、燃焼初期において過濃混合気が形成される場合には、初期燃焼割合が大きくても NO_x が大幅に低減し、CCD方式と組み合わせることによって、高い等容度と低吐煙を保ったまま、 NO_x を低減し得ることを明らかにした。また、攪乱による燃焼促進効果は、小噴孔径ノズルを用いた場合に著しいこと明らかにした。さらに NO に関する計算結果から、燃焼初期を過濃とする二段燃焼では、希釈過程において量論空気過剰率を通過する際に NO の生成が活発となるが、攪乱などによって混合時間を短縮した場合には、 NO 生成量を低減し得ることを示した。

第7章では、銅ゼオライト系触媒を実際のディーゼル排気に適用して、 NO_x 浄化率の温度ならびに空間速度依存性、各種共存成分の影響、あるいは還元剤としての排気中の炭化水素の影響などについて実験的に調べ、同触媒実用化の可能性と問題点について検討した。その結果、銅ゼオライト触媒は、ディーゼル排気中の NO_x 低減に対して有効であって、少なくとも空間速度 $20,000\text{h}^{-1}$ まで活性が低下しないこと、 400°C の最大活性温度において、排気中の未燃炭化水素のみで約25%の NO_x 低減を期待することができ、さらに外部から炭化水素を供給するか、あるいはCCDの制御によって未燃炭化水素濃度を増加させた場合には、約80%まで浄化率を向上させ得ることを明らかにした。また、共存成分の影響に関しては、酸素濃度の影響は小さいが、水分は触媒活性を低下させることが明らかとなり、耐水性の向上が実用化に向けての大きな課題であることを示した。

第8章は、本研究の結論であり、得られた成果の概要を記述した。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	村 山	正
副 査	教 授	宮 本	登
副 査	教 授	伊 藤	献 一
副 査	教 授	岩 本	正 和

学 位 論 文 題 名

ディーゼル機関における排気微粒子および 窒素酸化物の同時低減に関する研究

本論文は、ディーゼル機関から排出される微粒子および NO_x を、熱効率の悪化を伴わずに低減するための指針を得ることを目的として行った、一連の研究成果について論述したものである。論文は、燃焼制御による排出物の生成抑制に関するものと、触媒による後処理に関するものから構成されている。

はじめに、ディーゼルエンジンにおける微粒子および NO_x の生成過程について考察し、熱効率の悪化を伴うことなしに、微粒子と NO_x とを同時に低減するためには、燃焼初期をできるだけ穏やかに反応を進行させ、後期に攪乱を利用して急速に燃焼を促進するのが有効であることを示している。そして、このような燃焼過程を実現する手法として、主燃焼室とは別に攪乱流を生成するための小さな副室（攪乱流生成室）と副噴射系とを備える燃焼後期攪乱方式（CCD方式）を提示している。

実験に先立ち、熱力学的手法によりCCD方式の微粒子低減特性に関する解析を行って、主室と副室との連絡孔の直径が噴出ガス運動量に対する重要な設計因子であること、攪乱流生成室内の空気量に当量の燃料噴射割合を設定したときにガスの運動量が最大となること、また高負荷になるほど噴出ガスの運動量が低下する傾向にあるので、高負荷運転条件に対応して各設計変数の最適化を図るべきであること、などを明らかにしている。

つぎに、実験によってCCD方式の機関性能および排気特性を明らかにするとともに、筒内微粒子の直接サンプリングや高速度写真による燃焼過程の可視化観察などを行い、指圧線図の解析と併せて、燃焼改善の要因について検討を行っている。すなわち、本燃焼方式は、広範な機関運転条件において、排気微粒子の低減に対してきわめて有効であり、し

かも、熱効率および NO_x に対しては何ら悪影響を与えないので、 NO_x 、排気微粒子、および熱効率のトレードオフ関係を改善できることを示している。そして、このような微粒子の低減は、攪乱流による酸化促進と、主室内への燃料の初期噴射量の減少に伴う生成量の低減の二つの要因によって得られることを明らかにしている。

NO_x の低減に関しては、排気再循環や吸気管内水噴射などの不活性物質の投入、および混合気濃度の時間位相制御を試みている。その結果、CCD方式に対して、低・中負荷域で排気再循環を、一方、高負荷では水噴射を併用することが、 NO_x と黒煙の大幅な同時低減に対して効果的であることを示している。また、燃料噴射系および燃焼室形状の変更などにより、燃焼初期において高濃度混合気を形成した場合には、初期燃焼割合が大きくても NO_x が大幅に低減し、CCD方式の優れた燃焼促進特性と併用することによって、高い等容度と低吐煙を保ったまま、 NO_x を低減し得ることを明らかにしている。その際、 NO に関する反応動力学的計算を行って、燃焼初期を高濃度とする二段燃焼では、希釈過程において量論空気過剰率を通過する際に NO の生成が活発となるが、攪乱などによって混合時間を短縮した場合には、 NO 生成量を低減し得ることを示している。

後処理による排気改善法に関しては、酸素共存下で NO_x の還元が可能な銅ゼオライト触媒を実際のエンジン排気に適用して、同触媒実用化の可能性と問題点について検討している。その結果、銅ゼオライト触媒は、酸素濃度の高いディーゼル排気中の NO_x 低減に対しても有効であって、少なくとも空間速度 $20,000\text{h}^{-1}$ まで活性が低下しないことを明らかにしている。また、ガスクロマトグラフィによりディーゼル排気中の炭化水素組成の分析を行い、 NO_x 還元には有効なエチレンなどの炭化水素種が比較的多量に含まれていることを確認している。さらに、 400°C の最大活性温度において、排気中の未燃炭化水素のみで約25%の NO_x 低減が得られること、さらに外部から炭化水素を供給するか、あるいはCCDの制御によって未燃炭化水素濃度を増加させた場合には、約80%まで浄化率を向上させ得ることを示している。共存成分の影響に関しては、酸素濃度の影響は小さいが、水分は触媒活性を低下させることが明らかとなり、耐水性の向上が実用化に向けての大きな課題であることを指摘している。

これを要するに、著者は、ディーゼル機関における排気清浄化に関して、有益な新知見を得たものであり、内燃機関工学および燃焼工学の進歩に寄与するところが大きい。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。