

学 位 論 文 題 名

水および水溶液噴射による

ディーゼル燃焼の低エミッション化に関する研究

学位論文内容の要旨

ディーゼル機関はその優れた動力特性のため各種熱システムの動力源として広範に利用されているが、近年、それから排出される NO_x 及び微粒子状物質等のエミッションが環境保全上の大きな問題となり、その改善が社会的な急務となっている。特に NO_x については、交通が過密な大都市圏を中心としてその環境基準が未達成な地域が多いことから、 NO_x 排出規制が更に厳しくなっている。

ディーゼル機関の NO_x 低減手法として、これまで燃料噴射時期遅延および排ガス再循環などの手段が挙げられているが、これらのみによって NO_x の大幅低減を図る場合には、微粒子と NO_x とのトレードオフ関係の制約ならびに熱効率の悪化などの問題が懸念されており、機関出力性能と他の排気特性の悪化を伴わない NO_x 低減技術の確立が十分にされているとは言い難い現状である。

本論文は、このような背景を踏まえて、 NO_x レベルが一般に低い副室ディーゼル機関において、熱効率および他の排気エミッションなどを損なうことなく NO_x を大幅に低減することを目標とし、燃焼室内への水あるいは還元性水溶液の直接導入がディーゼル燃焼の低 NO_x 化に及ぼす影響について系統的な解明を行うと同時に、その際の NO_x 低減機構についても検討を行ったものであり、全6章から構成されている。

第1章は、序論であって、本研究の目的と得られた結果の概要について述べると共に、ディーゼル機関のエミッション低減に係わる社会的背景、各種対応技術および研究動向について記述した。

第2章では、供試機関、実験に用いた装置ならびに測定方法について記述した。特に水および各種水溶液噴射時における燃焼特性および NO_x 低減機構などを解明するための、燃焼可視化法、画像二色法による温度分布測定法、ガスサンプリング法、ならびに金属塩を含む排気微粒子の分析法などについて言及した。

第3章においては、燃焼室への水導入が低 NO_x 化燃焼に及ぼす影響を検討すると共に、 NO_x 低減に対する各種燃焼関連因子の最適値ならびに水導入に伴う NO_x 低減の機構について解明した結果を論述した。

すなわち、まず実験に先立ち、拡大Zeldovich機構に基づく NO_x 素反応計算によって、燃焼場への水導入にともなう NO_x 生成の基礎特性について検討し、水導入による NO_x

低減の可能性と度合を理論上明らかにした。

一方、副室式ディーゼル機関において、その燃焼室内への直接水噴射による NO_x 低減効果について検討し、 NO_x の大幅な低減に対しては、主室内ではなく副室内への水噴射が、その場合ガス温度が高い副室中心部への水噴射が、また、燃料噴射の直前における水噴射がそれぞれ著しく有効であることを実証した。その場合、燃料質量の半分程度の水を噴射することにより、熱効率、排出黒煙および微粒子状物質などの悪化を伴うことなく、60%程度もの NO_x 低減が可能であること、燃料質量の80%を越える水を噴射したとしても、燃料噴射の直前における水噴射では燃料噴霧の着火・燃焼はほとんど阻害されることなく、安定した着火燃焼が可能であること等を併せて明らかにした。

なお、火炎の高速度撮影、それを基礎とした画像二色法による火炎温度分布の測定、ならびにガスサンプリングによる燃焼室内 NO_x 濃度の推移測定等の結果から、水噴射によって、燃焼室内の平均ガス温度は殆ど変化しないが、副室内、とくに中央部ガス温度が大幅に低下すること、それにともなう NO 生成速度が低下すること、更に水噴射を行った場合、燃焼室内でとくに燃焼初期での黒煙生成速度は減少するが、燃焼後期での黒煙酸化速度が低下するため、最終的な排出黒煙濃度は大きく変化しないこと等も明らかにした。

第4章では、金属塩水溶液導入による NO_x の抑制、つまりディーゼル機関の燃焼室内火炎領域へアルカリ金属塩水溶液を導入することによる NO_x 低減の効果と機構について解明した結果を論述した。

アルカリあるいはアルカリ土族金属塩の中でも、特にナトリウム塩水溶液を副室内に直接噴射することによって、水のみを噴射した際の NO_x 低減効果を上回る NO_x 低減と黒煙の大幅な改善とが可能であることを実証した。このナトリウムによる NO_x 低減効果については、水溶液としてではなく、燃料添加剤としてナトリウムを燃焼系へ導入した場合であっても、基本的には同様な NO_x と黒煙の低減効果が得られることも確認した。

ナトリウム導入による黒煙の低減は、ナトリウムの触媒作用による黒煙酸化促進効果に起因するものであり、一方、ナトリウム導入にともなう NO 低減については、燃焼室内において、硝酸ナトリウムなどの硝酸化物生成による NO_x の固定化が行われていないこと、またこの金属導入によって NO_x 生成過程の後期における NO_x 抑制が著しいこと等の点から、この場合の NO_x 還元に対してナトリウムが何らかの触媒的作用を及ぼしている可能性を示唆した。

なお、ナトリウム塩水溶液の噴射にともなう排出微粒子状物質は、その大半が水溶性の硫酸ナトリウムであることから、水洗などの排気処理によるナトリウムの回収あるいは除去が可能であることを提示した。

第5章においては、アンモニア系還元剤による酸素共存無触媒下での NO 還元反応に着目し、そのディーゼル機関における可能性について検討した結果を論述した。

すなわち、アンモニア系化合物水溶液の導入による NO_x 低減効果とその場合の各種最適条件を解明し、特に無触媒下で燃焼後期の膨張行程に尿素水溶液を燃焼室内へ直接噴射することにより、排気黒煙濃度及び熱効率を悪化させずに最大60%程度の NO_x 低減が可能であることを明らかにした。

また、ディーゼル燃焼室内における尿素導入時の NO 濃度については、尿素・ NO 反応

系の素反応モデルによって、その還元過程あるいは低減特性を記述し得ることも明らかにした。

第6章は、本研究の結論であって、得られた結果を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 宮 本 登

副 査 教 授 村 山 正

副 査 教 授 伊 藤 献 一

副 査 教 授 岩 本 正 和

学 位 論 文 題 名

水および水溶液噴射による

ディーゼル燃焼の低エミッション化に関する研究

ディーゼル機関はその優れた動力特性のため各種熱システムの動力源として広範に利用されているが、近年、それから排出される NO_x 及び微粒子状物質等のエミッションが環境保全上の大きな問題となり、その改善が社会的な急務となっている。特に NO_x については、交通が過密な大都市圏を中心としてその環境基準が未達成な地域が多いことから、 NO_x 排出規制が更に厳しくなっている。

本論文は、このような背景を踏まえて、 NO_x レベルが一般に低い副室ディーゼル機関において、熱効率および他の排気エミッションなどを損なうことなく NO_x を大幅に低減することを目標とし、燃焼室内への水あるいは還元性水溶液の直接導入がディーゼル燃焼の低 NO_x 化に及ぼす影響について系統的な解明を行うと同時に、その際の NO_x 低減機構についても検討を行っている。

第1章は序論であって、本研究の目的、得られた結果の概要、ディーゼルエミッション低減に係わる社会的背景と対応技術研究の動向等について記述している。

第2章では、供試機関、実験に用いた装置ならびに測定方法について記述している。

第3章においては、燃焼室への水導入が低 NO_x 化燃焼に及ぼす影響について検討すると共に、 NO_x 低減に対する各種燃焼関連因子の最適値ならびに水導入に伴う NO_x 低減の機構について解明した結果を論述している。

すなわち、まず拡大Zeldovich機構に基づく NO_x 素反応計算によって、燃焼場への水導入にともなう NO_x 生成の基礎特性について検討し、水導入による NO_x 低減の可能性と度合を理論上明らかにしている。

一方、副室式ディーゼル機関において、その燃焼室内への直接水噴射による NO_x 低減効果について検討し、 NO_x の大幅な低減に対しては、主室内ではなく副室内への水噴射が、その場合ガス温度が高い副室中心部への水噴射が、また、燃料噴射の直前における水噴射がそれぞれ著しく有効であることを実証している。その場合、燃料質量の半分程度の

水を噴射することにより、熱効率、排出黒煙および微粒子状物質などの悪化を伴うことなく、60%程度もの NO_x 低減が可能であること、燃料質量の80%を超える水を噴射したとしても、燃料噴射の直前における水噴射では燃料噴霧の着火・燃焼はほとんど阻害されることなく、安定した着火燃焼が可能であること等を併せて明らかにしている。

第4章では、金属塩水溶液導入による NO_x の抑制、つまりディーゼル機関の燃焼室内火炎領域へアルカリ金属塩水溶液を導入することによる NO_x 低減の効果と機構について解明した結果を論述している。

すなわち、アルカリあるいはアルカリ土族金属塩の中でも、特にナトリウム塩水溶液を副室内に直接噴射することによって、水のみを噴射した際の NO_x 低減効果を上回る NO_x 低減と黒煙の大幅な改善とが可能であることを実証している。

ナトリウム導入による黒煙の低減は、ナトリウムの触媒作用による黒煙酸化促進効果に起因するものであり、一方、ナトリウム導入にともなう NO 低減については、燃焼室内において、硝酸ナトリウムなどの硝酸化物質生成による NO_x の固定化が行われていないこと、またこの金属導入によって NO_x 生成過程の後期における NO_x 抑制が著しいこと等の点から、ナトリウムが NO_x 還元に対して何らかの触媒作用を及ぼしている可能性を示唆している。

第5章においては、アンモニア系還元剤による酸素共存無触媒下での NO 還元反応に着目し、そのディーゼル機関における可能性について検討した結果を論述している。

アンモニア系化合物水溶液の導入による NO_x 低減効果とその場合の各種最適条件を解明し、特に無触媒下で燃焼後期の膨張行程に尿素水溶液を燃焼室内へ直接噴射することにより、排気黒煙濃度及び熱効率を悪化させずに最大60%程度の NO_x 低減が可能であることを明らかにしている。

また、ディーゼル燃焼室内における尿素導入時の NO 濃度については、尿素・ NO 反応系の素反応モデルによって、その還元過程あるいは低減特性を記述し得ることも明らかにしている。

第6章は、本研究の結論であって、得られた結果を総括している。

これを要すると、著者は、燃焼室への水および水溶液導入によるディーゼル燃焼の低 NO_x 化とその機構について系統的な新知見を得ており、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者と認める。