

# 高速二段ディーゼル燃焼法による黒煙と NO<sub>x</sub> の同時低減に関する研究

## 学位論文内容の要旨

ディーゼル機関から排出される排気微粒子、および窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）の低減について、年々厳しくなっていく排気ガス規制の達成を目指し、これまで種々の研究が行われてきた。しかし、従来の燃焼制御法を単独に用いただけでは十分に排気改善をするには至っておらず、いくつかの制御法の組合せや新技術の提案が行われている。本論文は、ディーゼル機関から排出される黒煙とNO<sub>x</sub>の同時低減の実現を目指す高速二段ディーゼル燃焼法を提案するとともに、本燃焼制御法の最適化に関する解析、および燃焼過程の可視化観察を行い、その性能予測および実機による排気改善効果の検証を行った。

本研究で提案する高速二段ディーゼル燃焼法とは、NO<sub>x</sub>生成の盛んな当量比近傍での燃焼を避けるため燃焼初期を燃料過濃燃焼とし、燃焼後期に希薄燃焼へ急速移行させるものである。通常このような燃焼状態では、燃焼初期に黒煙が多量に生成し燃費率の悪化を伴うが、本燃焼法では、燃焼後半の適当な時期にシリンダ内に攪乱流を導入して希薄燃焼へ急速に移行させることで、燃焼前半に生成した黒煙を再燃焼させると同時に、NO<sub>x</sub>生成の盛んな当量比領域での滞留時間を極力短くすることで、燃費率の悪化を伴うことなく黒煙とNO<sub>x</sub>の同時低減を達成しようとするものである。通常ボイラーなどの燃焼器で行われている二段燃焼と異なり、エンジン内のようにピストンが高速移動する間欠燃焼では、一連の燃焼が msecオーダーで終了するためその燃焼制御は困難であるが、本研究では燃焼後期に急速混合を行うことでその制御を可能とした点が特徴である。

まず、本論文で新たに高速二段ディーゼル燃焼法を提案し、その原理を明らかにするとともに、NO反応を計算し本燃焼法の排気改善効果の予測を行った。拡大Zeldovich機構に基づくNO生成反応計算の結果、二段燃焼により大幅なNO<sub>x</sub>低減が可能であり、特に混合時間の短縮が重要因子であることを予測した。

次に、急速混合過程における攪乱流形成法について最適条件を求めることを目的として、攪乱流噴出特性の解析を行った。本研究では攪乱流の運動量に着目し、攪乱流の噴射時期や有効クランク角度における重み付けを考慮に入れた混合パラメータを定義し、黒煙低減率との関連について解析した。ここで定義したパラメータには、運動量の積分値、スス粒子の粒径とその酸化速度、およびシリンダ内ガス量が含まれる。解析の結果、黒煙低減には有効クランク角度における攪乱流の形成が重要であり、有効クランク角度範囲の運動量積分値、および主燃料噴射時期と攪乱流噴出時期との相対時間が黒煙低減率と強い相関を示すことがわかった。種々の実験結果の解析より、攪乱流の噴出孔径については、極度に孔径を絞った場合には噴出期間が有効クランク角度期間より長期化するため、ボア径に対し3~4%程度とすることが有効である

ことがわかった。また攪乱流の形成時期については、主燃料噴射後25～30度後とすることが黒煙低減に有効であることがわかった。これは、このクランク角度以前ではすす酸化速度よりもすす生成速度が大きいと考えられ、また遅い時期ではピストン下降による温度低下の影響が強く依存していると言える。

次に、急速混合による黒煙再燃焼過程について、msecオーダーの燃焼場を支配する混合過程の解明を目的として、エンジン実機内の燃焼を模擬し、燃焼場を可視化観察できる定容燃焼器を用い火炎直接撮影および背景散乱光法により観察した。観察の結果、攪乱流と黒煙塊との衝突領域において、黒煙塊に対し衝突面積の小さな攪乱流では効果が小さく、黒煙塊とはほぼ同程度の断面積を持つ攪乱流を形成することが有効であることがわかった。また、燃焼場における混合強度を比較するため、黒煙画像を用いたPIV解析により速度分布解析を行い、渦度分布と混合過程について比較を行った。解析の結果、攪乱流の衝突により渦度には目立った増加は生じていなかったが、黒煙は大幅に低減していた。これは黒煙塊中、特に黒煙濃度の高い噴霧先端および中心軸上の渦は、空気の取り込み効果が少ないと考えられ、この領域に攪乱流を衝突させた場合、黒煙塊と攪乱流の持つ渦塊とは大きな相対速度を持ち、渦内には大きな濃度勾配が生じると考えられる。このことから拡散混合には黒煙塊と攪乱流の相対速度が大きく影響するものと考えられ、黒煙塊中の濃度勾配に垂直方向に流れを誘引することが効果的と言える。

これまでの解析をもとに、実機による高速二段燃焼実験を行った。実機では、過濃混合気領域と余剰空気の相対位置、および過濃混合気の形成法について検証を行った。混合気と余剰空気の相対位置については、初期に燃料過濃混合気を形成する主燃焼室と燃焼後半に急速混合させる二次空気溜まり部を設けるため、いくつかの燃焼室を試作した。また、過濃混合気の形成は、小孔径多噴孔ノズルや噴霧液滴の微粒化促進効果の高い衝突拡散方式を用いて行った。実験の結果、低・中負荷域では黒煙と燃費率をベース機関並に抑えたまま、NO<sub>x</sub>をベース機関の50%までに低減することができた。

この改善効果をもとに、二段燃焼法にEGRおよび吸気予混合法の組合せを行った。まず、EGRの組合せについて、二段燃焼では初期燃焼が燃料過濃となるため、少量のEGRの付加により通常のEGR以上の低NO<sub>x</sub>化が達成されると期待されたが、実験の結果、二段燃焼時のEGR効果については通常のベース機関に対するEGR効果と同程度のNO<sub>x</sub>低減効果であった。この場合、低負荷条件では黒煙排出をゼロとしたままNO<sub>x</sub>を200ppm以下まで低下することができたが、高負荷において黒煙の急激な悪化が生じる結果となった。次に二段燃焼法に吸気予混合法を組合せ、高負荷域での排気改善を試みた。これは二段燃焼では、燃焼後期の急速混合により黒煙再燃焼を促進できるが、吸気予混合により燃焼初期での黒煙生成を抑制することで、さらに高負荷域での性能改善を目指すものである。実験の結果、高負荷での黒煙を低減できたが、吸気への燃料噴射量にはノッキングのため上限があり、ある負荷を超えると急激に黒煙が悪化する結果となった。また、HCや燃費率の悪化が確認されたが、これは吸気行程における燃料供給のためシリンダ壁での冷却が原因と考えられた。

これまで、本燃焼法について実機による検証を行ってきたが、高負荷域では燃焼初期に多量の黒煙が生成されるため、全ての負荷域で排気を改善するには至らなかった。黒煙の悪化を最小限に抑えるには、燃焼室内での過濃混合気の分布と余剰空気の配置が重要となるが、今回試作した燃焼室について数値計算により燃焼室内の燃料分布を解析した結果、未利用空気の残存が確認されたため、燃焼室形状の改良を行うことでさらに高負荷域においても排気改善効果を示すと言える。

以上、本論文では高速二段ディーゼル燃焼法を提案し、本燃焼法を制御する攪乱流形成法の最適化、黒煙再燃焼過程の可視化解析、および実機による検証実験を行った。その結果、低・

中負荷域において黒煙と燃費率をベース機関レベルに保ったまま、NO<sub>x</sub>を1/2～1/3まで低減することができた。ただし、今回高負荷域での性能改善には至らなかったが、燃焼室形状の改良、過濃混合気の均一化、および攪乱流の強化により高負荷域での性能改善を達成できると考えられる。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 菱 沼 孝 夫  
副査 教授 宮 本 登  
副査 教授 福 迫 尚一郎  
副査 教授 伊 藤 献 一  
副査 助教授 近 久 武 美

学位論文題名

## 高速二段ディーゼル燃焼法による黒煙と NO<sub>x</sub> の同時低減に関する研究

ディーゼルエンジンは燃機関の中で熱効率が高いことから、地球温暖化防止の面において、今後、その役割はますます重要になって行くものと考えられる。しかし燃焼の際、排出ガス中に含まれる黒煙とNO<sub>x</sub>の濃度が高いため、一層の削減が必要である。そのため国内外で黒煙、NO<sub>x</sub>低減のための研究が推進されていると共に、一方では、排出ガス規制強化が図られている。特に黒煙とNO<sub>x</sub>との間にはトレードオフの関係があり、同時に低減することは難しいため、依然として解決すべき技術的課題が残されている。最近の研究開発の動向を大きく分類すると高圧噴霧による噴霧液滴の微細化、燃料・空気の混合促進、希薄予混合燃焼、燃料噴射時期調整などの燃焼の改善と触媒等による燃焼ガス中の黒煙の再燃焼、生成NO<sub>x</sub>の還元処理など燃焼後処理に分かれる。

本論文ではディーゼル燃焼排ガス中の黒煙とNO<sub>x</sub>を同時に低減するための研究に関して、燃焼改善の面から新たに高速二段ディーゼル燃焼法を提案し、燃焼を模擬した定容燃焼器およびディーゼルエンジンによる試験結果から、本燃焼制御法の最適化に関する解析、および燃焼過程の可視化観察を行い、その性能予測および実機による排気改善効果の検証を行っている。その主要な成果は以下の点に要約できる。

(1) ディーゼル排出ガス中の黒煙とNO<sub>x</sub>を同時に低減する方法として高速二段ディーゼル燃焼法を提案している。本方式の原理はNO<sub>x</sub>の生成が盛んな燃料と空気の当量比近傍での燃焼を避け、燃焼初期に燃料過濃領域で燃焼させ、NO<sub>x</sub>の生成を抑制し、後期に攪乱流を噴出させることにより、余剰空気との急速混合を促進し、黒煙を低減することにある。拡大 Zeldovich 機構によるNO<sub>x</sub>

生成反応を計算し、排気改善効果を予測し、混合時間の短縮が重要であることを明らかにしている。

(2) 過濃燃焼ガスと余剰空気を急速混合するために、燃焼後期に約全体の10%程度の燃料を予備室に噴霧することにより燃焼させ、燃焼ガスによる攪乱流を燃焼室内に噴出している。攪乱流の運動量に着目して、実験的に混合パラメータを定義し、解析した結果、攪乱流の噴出孔径および主燃料噴射時期に対する攪乱流噴出時期に最適条件があり、黒煙の低減に有効であることを明らかにしている。この結果は定容燃焼器の可視化観察でも確認している。

(3) 基礎検討結果に基づき高速二段ディーゼル燃焼実験を行っている。実験では燃焼初期に燃料過濃領域を形成し、燃焼後半に急速混合させるための二次空気溜りを設けたいくつかの燃焼室を試作し、その効果を明らかにしている。その結果、低、中負荷領域では黒煙と燃料消費率をベース機関並に押さえたままNO<sub>x</sub>濃度を50%以下に出来ることを明らかにしている。高負荷領域においては燃焼室形状などの改良が残されていることを示している。

以上、ディーゼルエンジンの燃焼に関して黒煙とNO<sub>x</sub>を同時低減を可能にする高速二段ディーゼル燃焼法を提案し、定容燃焼器、実機のディーゼルエンジンによる燃焼試験により、その有効性を実証している。

これを要するに、著者はディーゼル燃焼における黒煙とNO<sub>x</sub>の同時低減に関して新しい方式を提案し、その効果を実証しており、将来の排出ガス浄化技術の進歩に大きく貢献するものである。

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があるものと認める。