

氏名	きたむらやすたか 北村泰隆
学位(専攻分野)	博士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 158 号
学位授与の日付	平成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻
学位論文題目	混合制御による直接噴射式ディーゼル機関の低エミッション化に関する研究
論文調査委員	(主査) 教授 石山 拓二 教授 塩路 昌宏 教授 吉田 英生

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、自動車用ディーゼル機関において、将来、中核的燃焼技術となることが期待されている高過給ディーゼル燃焼ならびに予混合圧縮自着火 (PCCI) 燃焼について、燃料と空気の混合過程の制御を通じた燃焼改善の方針について論じた結果をまとめたもので、7つの章からなっている。

第1章は緒論で、本研究の背景と目的について述べている。まず、ディーゼル機関に対する環境負荷低減の厳しい要求と、これに対応して従来から実施されてきた燃焼改善技術について述べ、ディーゼル燃焼における混合と燃焼過程の原理的特性から、窒素酸化物 (NO_x) と粒子状物質 (PM) の排出量同時低減が困難であることを説明している。この問題を改善するためには、高過給ディーゼル燃焼と PCCI 燃焼を、在来ディーゼル燃焼と組み合わせることが有効であるとし、これら新規燃焼法について、混合過程に重点を置いて解析し、燃焼制御の方針を検討することを論文の目的として提示している。

第2章では、高過給ディーゼル燃焼における熱発生と NO_x 生成の特性に及ぼす燃料噴射条件の影響について、定容燃焼装置と全量ガスサンプリング装置を用いて検討した結果を述べている。定容のもとで拡散的燃焼が支配的となる燃焼形態を再現し、単位発生熱量当りの NO_x 生成質量が、噴射圧力の上昇とともに減少することや、雰囲気中の酸素モル分率の低下により最終 NO_x 質量が大幅に低減することなどを見出している。一方で、定容下での本実験の結果が、実機関での傾向と異なることから、混合と NO_x 生成の関係に対する容積変化の作用について解析が必要であることを指摘している。

第3章においては、第2章の実験結果を考察するために、確率過程論的手法にもとづく着火・燃焼モデルを用いて数値解析を行っている。まず、定容条件の下で噴射条件および酸素モル分率が NO 生成に及ぼす影響について検討し、噴射圧力を高くすると混合気の希薄化が進み、NO が多く生成する量論比を速く通過するため最終 NO 質量が低くなることなどを明らかにしている。次にこのモデルを、容積変化を伴うエンジン条件に適用し、ピストン下降に伴う燃焼室容積増大により NO 生成が凍結される前に、混合気を十分希薄化することができれば、NO 生成の抑制が可能であること、しかし一方で、総括当量比が高くなると、混合気が NO 生成領域に滞留するのを防ぎにくくなるため、噴射条件の選択によって NO 生成を抑えることが難しくなることを示している。これらの実験結果を、噴射条件から算出できる希薄化速度と均質化速度により整理し、高過給ディーゼル燃焼において、混合気の希薄化・均質化を促進することで NO_x の低減が可能であるが、この効果を得るには非常に高い噴射圧力が求められるので、スワール等の空気流動による混合促進や排気再循環 (EGR) を組み合わせることが重要であることなどを提案している。

第4章では、定容燃焼装置および全量ガスサンプリング装置により、定容の下で DI (直接噴射式) -PCCI 燃焼を模擬して NO_x 生成に及ぼす噴射条件の影響について検討を行っている。その結果、噴射量が少ない条件では、高圧噴射と小噴孔径による混合の促進と雰囲気酸素モル分率の低下の組み合わせによって混合期間を確保すると、NO_x 生成を抑えることができ、等しい混合期間でも混合が速く進む条件の方が NO_x 生成量が少ないことを明らかにしている。一方、噴射量が多い場合には、本研究の噴射条件の範囲内では混合の促進による混合期間の確保が必ずしも NO_x 抑制にはつながらない。ただ

し、この場合でも、酸素モル分率の低下により NO_x 生成量が減少することなどを明らかにしている。

第5章においては、第4章の実験結果を考察するために、第3章で用いた着火・燃焼モデルに修正を加えたうえで、DI-PCCI 燃焼において噴射条件が NO_x 生成に及ぼす影響について数値解析を行っている。混合気の当量比、温度および NO 生成速度の関係の解析から、NO の生成は着火時において当量比が1以上の混合気の種類によって決定されることを示している。また、噴射量が少ない条件では、小さい噴孔を用いて混合を促進することで、着火時に NO 生成領域よりも希薄側に混合気を移行させることができるので、効果的に NO 生成を抑制することができるが、噴射量が多くなると、噴孔を小径化して混合を促進しても、NO 生成領域に混合気の一部滞留するので、NO 抑制効果が弱まることなどを明らかにしている。これらの知見から、DI-PCCI 燃焼において低 NO_x 燃焼を実現するためには、高噴射圧や小噴孔径の採用による混合促進だけでなく、EGR や有効圧縮比の低下を併せて行うことで、混合期間の長期化と NO_x 生成速度自体の低下を同時に図ることが重要であることを指摘している。

第6章では、噴射圧力の制約下において、噴霧構造の改良により、微粒化と微視混合の促進、ならびに燃焼室内空気の有効な利用を両立させることを狙いとした近接噴孔ノズルの混合・燃焼特性を明らかにしている。定容燃焼装置を用いて、まず高温・高圧雰囲気中で非燃焼噴霧の高速度撮影を行い、二つの小噴孔からの噴霧の干渉度合いによって、噴霧到達距離が調整できることを示している。ディーゼル燃焼および DI-PCCI 燃焼の雰囲気気を模擬した条件で燃焼実験を行った結果からは、ディーゼル条件では、初期の熱発生率を高める効果があることや、二噴孔からの噴霧干渉が弱いノズルでは、燃焼室壁面の作用が強く現れることなどを見出している。DI-PCCI 条件では、噴霧干渉の度合いによって熱炎発生時期が変化し、特に噴霧挾角が開いたノズルでは噴霧間に濃い混合気が残るので熱炎発生時期が早くなることなどを見出している。また、模擬壁を設置すると、ノズルによる熱発生率経過の差が小さくなることなどを明らかにしている。これらの知見から、近接噴孔ノズルの噴孔アレンジメントの最適化には、壁面形状や空気流動等の周辺条件を合わせた検討が必要であることを指摘している。

第7章は結論であり、本論文で得られた結論を整理するとともに、今後の課題について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、自動車用ディーゼル機関において、将来、中核的燃焼技術となることが期待されている高過給ディーゼル燃焼ならびに予混合圧縮着火 (PCCI) 燃焼について、燃料と空気の混合過程の制御を通じた燃焼改善について研究した成果をまとめたものである。広範囲の雰囲気および燃料噴射条件を設定できる定容燃焼装置、ならびに燃焼中の任意の時期に燃焼ガスの反応を凍結・採取し、成分を分析できる全量ガスサンプリング装置を構築するとともに、燃料・空気の混合過程と熱発生および環境影響物質生成との関連を解析できる着火・燃焼モデルを作成し、これらを研究手段として以下の成果を得ている。

- (1) 定容のもとで、高過給条件に相当する高い雰囲気圧力を与えると、燃焼過程が混合律速となり、最終的な総括窒素酸化物 (NO) 質量がほぼ熱発生期間により決まることを見出した。単位発生熱量あたりの NO 生成質量は、燃料噴射圧力の増加および雰囲気中酸素濃度の低下とともに減少することなどを実験的に明らかにした。
- (2) 着火・燃焼モデルを用いた解析により、定容下とエンジン条件下での NO 生成特性を比較し、高過給条件では、ピストン下降に伴う燃焼室容積増大により NO 生成が凍結される前に混合気を十分希薄化できれば、NO 生成を抑制できることを明らかにした。しかし、総括当量比が高くなると、混合気濃度の早期低下が難しく、噴射条件の選択による NO 生成抑制が困難になるので、空気流動の活用が必要になることを明らかにした。
- (3) 直接噴射による PCCI 燃焼においては、混合気の均一・希薄化を速めると、通常のディーゼル燃焼とは逆に着火時期が遅れ、NO 生成量が減少することなどを実験的に明らかにした。さらに、数値解析により、上述の効果が見られる燃料噴射量には限度があり、それを超えると、空気導入と混合の速度を非常に大きくしない限り NO 生成量を減少させることができず、効果的な抑制には空気質制御の併用が必須となることを指摘した。
- (4) 小さな噴孔を近接配置したノズル (近接噴孔ノズル) を用いると、燃料噴霧到達距離と燃焼室内の混合気分布の操作がある程度可能となることを実験的に明らかにした。噴孔仕様の選択により、ディーゼル燃焼相当の雰囲気条件では、

初期の熱発生を促進し、PCCI 燃焼条件では、熱炎発生時期を制御できることなどを明らかにした。

以上、本論文は、今後のディーゼル機関の環境性能向上の重要な手段とされながら、未だ開発途上にある高過給ディーゼル燃焼ならびに予混合圧縮着火（PCCI）燃焼について、燃焼と窒素酸化物生成過程の基本的理解を得て、混合制御による燃焼改善の基本的な方針を提示したもので、得られた成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年2月20日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。