

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	小島 宏一
論文題目	ディーゼル噴霧における混合気形成および着火燃焼過程に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>近年の厳しい排出ガス規制と CO₂ 低減要求のもと、ディーゼル機関において燃焼制御の高度化が求められている。このことから、本論文はディーゼル噴霧の混合気形成および燃焼過程を対象とし、レーザ計測技術の応用による詳細な解析と、数値予測手法の考案と検証を行った結果をまとめたもので、7つの章から構成されている。</p> <p>第 1 章は緒論であり、本研究の背景と目的について述べている。最初に、近年のディーゼル機関に対する環境負荷低減の厳しい要求と、これに応えるべく実施されている燃焼改善および排気後処理の技術とその問題点について述べ、エンジン筒内における燃焼改善技術をさらに高度化することの重要性を指摘している。そのうえで、技術の高度化に伴う燃焼制御の複雑化やエンジン開発に要するコスト・時間の増大を防ぐことを目指し、定量的計測によりディーゼル燃焼過程をこれまで以上に詳細に解析理解すること、その結果にもとづいて、数値流体力学 (CFD) による燃焼過程の予測手法を考案することを論文の目的として提示している。</p> <p>第 2 章では、ディーゼル噴霧への適用において、これまで定性的な計測に留まっていたレーザ誘起蛍光 (PLIF) 法の定量化手法を考案し、燃料濃度の平均、変動 (分散)、確率密度関数 (PDF) などの統計量の計測に成功している。すなわち、高温高圧雰囲気中に作成した単一成分 (ヘプタン) の燃料噴霧にレーザシートを照射し、得られた蛍光画像から、蛍光強度に対する温度の影響を考慮して噴霧内混合気の燃料濃度および温度の瞬時分布を得た。さらに、噴射圧力やノズル径、噴射量を変化させ、瞬時濃度分布や PDF の時間推移を得た。ノズル径が小さいと濃度の平均および変動が小さくなること、噴射終了後に上流で急速に希薄化が進むこと、平均分布に変動を考慮した方法により瞬時の PDF 分布を近似できることなどを見出した。</p> <p>第 3 章では、これまでの噴霧内混合気計測のほとんどが単一成分燃料を用いていたのに対し、多くの炭化水素成分からなる実用燃料においては、成分ごとの蒸発性の違いが混合気の組成、ひいては着火・燃焼過程に影響する可能性があることから、前章で確立した定量 PLIF 法をヘプタン/セタン二成分燃料噴霧に適用する方法を検討した。二つの燃料成分に近い沸点を持つ蛍光剤をそれぞれ選定し、蛍光強度と濃度の関係に温度依存性を考慮するとともに、酸素クエンチングの効果も織り込んだ濃度・温度導出法を考案し、それぞれの燃料成分の噴霧内濃度分布を分離して得るのに成功した。噴霧先端に蒸発性の低いセタンがやや多く分布するなど蒸発性の影響が表れている可能性があるが、十分に高い雰囲気圧力・温度のもとでは、混合気</p>			

の組成は燃料組成と大きくは異なることなどを明らかにした。

第 4 章では、予混合圧縮自着火 (PCCI) 燃焼などの、混合と化学反応の特性時間が近い場合における着火燃焼過程を予測するために、比較的計算機負荷が小さく、エンジン燃焼系の開発への活用が期待されるレイノルズ平均 (RANS) 型 3 次元数値流体力学 (CFD) 計算をベースとし、これに不均一自着火燃焼モデルを組み合わせた手法により定容容器内の噴霧燃焼を解析した。この手法では、混合気中の燃料濃度の分散と、分散の大小による着火遅れと温度上昇速度の変化が計算される。計算により求められた濃度分散の分布を第 2 章で計測した結果と比較し、混合気形成について計算の妥当性を検証するとともに、雰囲気圧力および温度を変更した際の、着火形態や高温領域の広がり、総括的な熱発生率などの変化が概ね良く予測できることを明らかにした。

第 5 章では、計算機負荷が大きい問題があるものの、適切なサブモデルと組み合わせれば、非定常な乱流挙動を再現し、これと着火・燃焼との関連を詳細に検討できるラーゼエディシミュレーション (LES) にもとづく数値計算法の構築と検証を行った。まず、到達距離など実測された噴霧の巨視的情報をもとに調整した噴霧サブモデルと準総括化学反応モデルを組み込んだコードを作成し、これまで検証例が乏しかった高温高圧雰囲気中の燃料噴霧について計算を行った。第 2 章で得た実測値との比較結果より、濃度平均値の空間分布や濃度 PDF のスケール依存性などの詳細な混合特性が概ね再現できることを示した。また、着火・燃焼過程の計算結果により、実測に近い熱発生率が再現できることを示し、噴霧火炎内の主要な発熱領域、パイロット噴霧火炎とメイン噴霧との干渉の様子などを明らかにした。

第 6 章では、近年のディーゼル機関で利用が進んでいる多段燃料噴射の燃焼機構を明らかにするための可視化実験について述べている。エンジン燃焼を模擬するため、単発燃焼の可視化を可能とした急速圧縮膨張装置と制御・計測システムを構築し、パイロットまたはアフター噴射を伴う二段噴射の燃焼における自発光画像を取得した。パイロット噴射は量が少なくても貫徹力が小さいため、高温の混合気が滞留してメイン噴霧の着火源になることや、メイン噴霧火炎の干渉を受けにくくすす低減に有効なアフター噴射時期があることなどを見出した。

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。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年の厳しい排出ガス規制と CO₂ 低減要求のもと、ディーゼル機関において燃焼制御の高度化が求められている。このことから、本論文は、ディーゼル噴霧の混合気形成・燃焼過程を対象にし、レーザ計測による詳細な解析と数値予測法の考案について研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. ディーゼル噴霧への適用において、これまで定性的な計測に留まっていたレーザ誘起蛍光 (PLIF) 法の定量化手法を考案し、単一成分噴霧中の燃料濃度の平均、変動、確率密度関数 (PDF) などの統計量の計測に成功した。さらに、噴射圧力やノズル径、噴射量を変化させ、小径ノズルでは濃度の平均および変動が小さくなること、噴射終了後に上流で急速に希薄化が進むことなどを見出した。
2. 燃料成分の蒸発性の違いが混合気の組成に与える影響を調査するため、前章で確立した定量 PLIF 法を拡張し、成分ごとの濃度を分離計測する方法を考案してヘプタン/セタン二成分燃料噴霧に適用した。その結果、2MPa、900K の雰囲気のもとでは、蒸発性の違いが混合気の組成に与える影響は強くないことなどを示した。
3. 計算機負荷が比較的小さいレイノルズ平均型 3 次元数値流体力学コードに不均一自着火燃焼モデルを組み込み、定容容器内の噴霧燃焼を解析した。PLIF 法による計測結果を用いて計算の妥当性を検証するとともに、幅広い温度・圧力において着火形態や高温領域の広がり、熱発生率などが概ね良く予測できることを示した。
4. 計算機負荷は大きいものの、非定常な乱流挙動を再現できるラージエディシミュレーションにもとづく数値解析法をベースに、噴霧および化学反応モデルを組み込んだコードを作成し、これまで検証例が乏しかった高温高压雰囲気中の噴霧について計算を行った。実測値との比較により、濃度の空間分布や PDF などの詳細な混合特性が再現できることを示した。また、噴霧火炎内の主要な発熱領域、二段噴射における火炎と噴霧との干渉の様子などを明らかにした。
5. 近年利用が進んでいる多段燃料噴射の燃焼機構を解明するため、急速圧縮膨張装置のシステムを構築し、二段噴射の燃焼における自発光画像を取得した。パイロット噴射による高温の混合気は滞留してメイン噴霧の着火源になること、メイン噴霧火炎の干渉を避け得るアフター噴射時期があることなどを見出した。

以上、本論文は、今後のディーゼル機関における燃焼制御の高度化に必要な、噴霧燃焼過程のより深い理解に役立つ計測手法を確立し、詳細な解析結果を提供するとともに、燃焼システム開発への適用につながる数値予測法を提案したもので、得られた成果は、学術上、実際上寄与するところが少なくない。

以上より、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らる。また、平成 24 年 8 月 22 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。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降