

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	LONG LIU
論文題目	Study on Combustion Modeling for Diesel Engines with Multi-Stage Injection Strategies		
（論文内容の要旨） 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多段燃料噴射を含み様々な手法による燃焼制御の高度化が求められており、研究・開発を支援する数値シミュレーションの重要性が高まっている。このことから、本論文は、多段噴射による燃焼過程の変化について理解を深めるとともに、その燃焼過程を精度良く予測するモデルの提案と検証を行っており、以下の6つの章から構成されている。 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。クリーンな排気のもとで、高い出力と熱効率を要求される現在のディーゼル機関においては、排気ガス中の有害物質を除去する後処理装置の普及が進んでいるが、なお、黒煙や窒素酸化物（NOx）の低減を図るため、シリンダ内の燃焼を改善することが重要としている。昨今、燃料噴射装置の制御自由度の高さを利用し、多段燃料噴射が多用されているが、噴射時期や噴射量などの噴射条件と燃焼過程との関連について、なお理解を深める必要があることを指摘している。また、これらの噴射条件に加え、過給、排気再循環、スワールなど他の制御パラメータと合わせると、設定すべきパラメータの数が膨大となり、実験による最適な噴射条件の探索が容易でなくなっていることを示し、熱発生過程および排出物質の高精度な予測が可能な数値シミュレーション、とりわけ燃焼過程のモデリングが重要となることを指摘している。 第2章では、エンジンの中・高負荷において、通常の噴射（メイン噴射）に、先立ち噴射（パイロット噴射）および後噴射（ポスト噴射）を加えた三段噴射を適用した場合の、ポスト噴射の黒煙排出低減効果について考察を加えている。単気筒試験機関を用いて、さまざまなパイロット噴射の条件におけるポスト噴射の量および時期と排気中黒煙濃度との関係を実験的に調べた。その結果、ポスト噴射量を少なくして噴射時期を早めると黒煙低減の効果が得られること、パイロット噴射量を増やすと黒煙排出は多くなるが、ポスト噴射を加えることによる黒煙低減効果が大きくなること、噴射圧力を高めた場合には、ポスト噴射の効果が弱まることなどを明らかにした。これらの傾向は、燃焼室くぼみ側壁に衝突した後燃焼室中央部の空間へ流動して来るメイン噴霧火炎とそこへ噴射されるポスト噴霧との干渉を考慮することによって、ある程度説明できることを示した。			

第3章では、本研究で提案する多段燃料噴射対応の確率過程論燃焼モデルのもととなったオリジナルモデルを説明するとともに、多段燃料噴射をとまなう燃焼過程のモデリングの方法を詳細に説明している。多段噴射に対応するため、一次元噴霧モデルの考え方をもとにして、噴射期間中のみならず噴射終了後の噴霧到達距離と空気導入速度を求めるゼロ次元噴霧モデルを新たに構築するとともに、連続する二回の噴射により形成される燃料噴霧同士の干渉（空気導入速度の変化）の取り扱い方法を提案している。

第4章では、パイロット・メイン二段噴射を用いた燃焼を対象に、第3章で提案した燃焼モデルの問題点の把握と、改良について述べている。まず、パイロット噴霧の熱発生率を計算し、単気筒試験機関による実測結果との比較を行い、パイロット噴射時期を早めるとメイン噴射開始までの発生熱量が減少するという実測の傾向が計算により再現できないことを見出した。このことについて、早い時期の噴射では、パイロット噴霧から生じる混合気の一部がスキッシュエリアに進入し、その温度上昇が遅れることを組み込んだサブモデルを追加することによって、実測の傾向を再現できることを示した。また、メイン噴射後期の熱発生率が実測よりも低い傾向が見られたため、燃焼室くぼみ側壁に到達した後のメイン噴霧の空気導入量の増加を考慮に入れることによって、実測に近い熱発生率が得られることを示した。

第5章では、前章で改良を施した燃焼モデルに NO_x およびすすの生成モデルを組み込み、パイロット・メインの二段噴射における熱発生過程と排出物質の予測を試みた。まず、 NO_x の計算精度を向上させるため、スワール流れがパイロットおよびメイン噴霧の干渉を軽減する効果をサブモデルとして組み込み、その効果を確認した。続いて、すすの生成・酸化モデルとして **Patterson**、および **Moss** による二種類のモデルを組み込み、計算結果を実測結果と比較した。その結果、**Patterson** モデルでは、特にパイロット噴射量が多い時に、パイロット噴射時期に対するすす排出量の変化が実測と逆の傾向になることが分かった。これはすすの酸化速度が過大評価されていることが原因と推測した。一方、**Moss** モデルでは、より実測に近いすす排出量の傾向が得られた。ただし、シリンダ内のすす量の時間変化について検証が必要であると示唆している。

第6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)

本論文では、最近のディーゼル機関において高効率でクリーンな排気を得るため多用されるようになった多段燃料噴射による燃焼過程の変化について理解を深めるとともに、その燃焼過程を精度良く予測することを狙ったシミュレーションモデルの提案と検証を行っており、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 単気筒試験機関を用いた実験により、パイロット・メイン・ポストの三段噴射を適用した場合のポスト噴射による黒煙（すす）排出低減効果について検討した。少量早期のポスト噴射が黒煙低減に有利で、パイロット噴射量が多い時にポスト噴射による黒煙低減効果が大きくなることを示し、メイン噴霧火炎とポスト噴霧との干渉を考慮すれば、上述の傾向が説明できることを示した。
2. 多段燃料噴射による燃焼過程を予測するため、複数燃料噴霧の燃焼を記述できるゼロ次元噴霧発達・空気導入モデル、ならびに燃料噴霧同士の干渉モデルを考案した。この噴霧モデルは、噴射中のみならず噴射終了後の噴霧発達も扱える新しいモデルであり、計算された噴霧到達距離や空気導入量は一次元モデルの結果に一致した。これらのモデルを確率過程論燃焼モデルに組み込み、燃焼過程の予測を可能とした。
3. パイロット・メイン二段噴射を用いた燃焼を対象に、提案した燃焼モデルの検証と改良を行った。パイロット噴霧の熱発生率、およびメイン噴射後期の熱発生率に実測との乖離が見られたが、パイロット噴霧のスキッシュエリア内への進入、ならびに燃焼室くぼみ側壁に到達した後のメイン噴霧の空気導入量の増加をモデル化することにより、実測に近い熱発生率を得た。
4. 改良を施した燃焼モデルに NO_x およびすすの生成モデルを組み込み、パイロット・メイン二段噴射における熱発生過程と排出物質の予測を試みた。スワール流れがパイロットおよびメイン噴霧の干渉を軽減する効果をサブモデルとして組み込み、 NO_x の計算精度を向上させるとともに、すすの生成・酸化モデルを追加することにより、単気筒試験機関による実測に近いすす排出量の傾向が得られた。

以上、本論文は、多段燃料噴射を用いるディーゼル機関の燃焼過程の理解と予測ツールの提案について論じたもので、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25年8月27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。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

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