

様式 I

博士學位論文調査報告書

論文題目

A Study for Improving the Thermal Efficiency of Diesel Engines by Spilt
Injection Strategy
(分割噴射によるディーゼル機関の熱効率向上に関する研究)

申 請 者 BAO, ZHICHAO

最終学歴 令和 2 年 3 月
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻
研究指導認定見込

学識確認 平成 年 月 日（論文博士のみ）

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
(主査) 教 授 石山 拓二

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
教 授 今谷 勝次

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
教 授 川那辺 洋

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	BAO, ZHICHAO
論文題目	A Study for Improving the Thermal Efficiency of Diesel Engines by Spilt Injection Strategy (分割噴射によるディーゼル機関の熱効率向上に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、ディーゼル機関において燃料噴射を分割することによる燃焼制御の方法を提案し、その熱効率向上効果を論じた結果をまとめたもので、6章からなっている。 第1章は序論で、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して要求されてきた NO_x (窒素酸化物) や PM (粒子状物質) などの排気エミッションの低減を持続させながら、CO₂ 排出の低減要求に応える高熱効率化が現在の最重要課題であることを述べ、高効率化の原理を確認し、提案されている様々な技術を概観している。そのうえで、本研究の着眼点を等容度の向上と冷却損失低減の両立とし、そのための手法として、近接ポスト噴射、および PCCI (予混合圧縮自着火) 燃焼と通常ディーゼル燃焼との組み合わせ、という二種類の分割燃料噴射による燃焼制御方法を提案し、その効果を明らかにすることを論文の目的として提示している。 第2章では、これまで黒煙排出抑制の手段として用いられてきたポスト噴射を熱効率向上の方法として活用することを狙い、その効果を確認している。これまでよりも高い噴射圧力 (160→270MPa) と小径多噴孔 (0.091mm、10 噴孔) のノズルを用いたときの性能・排気特性を確認したうえで、これにメイン噴射との間隔を最小にした近接ポスト噴射を加えたときの熱効率向上の効果を検討している。行程容積 550cc の小型単気筒試験機関を用いた実験により、ポスト噴射の付加により冷却損失が低減され、近接噴射により等容度の低下が抑えられて熱効率の大きな向上が図れることを示した。CFD (数値流体力学) 計算による噴霧火炎の発達と壁面熱流束の解析によると、狙いとしたメイン噴射量の減少に伴う壁面熱流束の低下が見られたが、ポスト噴霧火炎による冷却損失が大きく、実験で得られたトータルの冷却損失減少の傾向を再現できないことが判明した。計算における噴霧の初期拡がり角度を大きく設定すると計算結果は実測に近づくが十分でない。ポスト噴射のような少量の噴射により形成される噴霧の特性を明らかにする必要があることを指摘している。 第3章では、第2章で明らかになったポスト噴射の熱効率向上効果をより大きくするとともに、吸気圧力や噴射圧力への依存性を明らかにすることを狙い、小型単気筒試験機関を用いた性能試験、およびボトムビュー可視化機関を用いた噴霧・火炎の高速度撮影を行った。その結果、メイン噴射との間隔がゼロのポスト噴射に対し、1.5°クランク角度程度遅らせたポスト噴射がもっとも大きな冷却損失低減効果を示し、それ以上の遅角は有効でないことを見出した。噴霧・火炎の			

可視化結果から、冷却損失を極小にする噴射間隔は、ポスト噴霧がメイン噴霧火炎のテールに進入しない最も短い間隔であると考察した。また、ポスト噴射量や噴射圧力を変化させた条件においても冷却損失割合を極小とする噴射間隔があること、吸気圧力を大きく高めると噴射間隔に対する冷却損失の変化が小さくなることなどを明らかにした。

第4章では、第2章で指摘した少量噴射の噴霧特性を基礎実験により明らかにしている。RCEM（急速圧縮膨張装置）内の高温高圧（4MPa、850K）窒素雰囲気中に単噴孔ピエゾ駆動ノズル（噴孔径 0.12 および 0.14mm）により燃料噴射を行い、形成された燃料噴霧に高速度シャドウグラフ（影写真）法および Mie 散乱法を適用して、液相および蒸気相到達距離、噴霧後端移動速度、ならびに噴霧拡がり角度など特性値の時間変化を求めた。噴射量 0.25mg から 0.8mg の範囲での実験により、蒸気相先端到達距離の時間変化は、良く知られているように、噴射初期に時刻の約 1 乗、中期に時刻の 1/2 乗に比例することが分かった。噴射量が少ない場合には、噴射終了後は時刻の 1/4 乗に比例した。また、噴射量が少ないと液相が十分発達する前に消滅すること、噴射期間後半の噴射率降下速度が大きいと噴霧後端の移動速度が大きくなること、噴孔近傍（噴孔から 6.5mm 以内）噴霧拡がり角度は噴射開始時に大きく、その後減少し、噴射期間の終わりに再び増加する傾向にあること、噴孔径が大きいと噴射開始時の噴孔近傍拡がり角度が大きいこと、などの知見を得た。

第5章では、PCCI 燃焼とディーゼル燃焼を組み合わせた燃焼の問題点の把握と改善方法について実験的に検討している。この燃焼方法では、投入燃料を早期噴射と上死点付近噴射に分割し、それぞれ PCCI 燃焼と通常のディーゼル噴霧燃焼を行わせる。通常噴霧燃焼に充てる燃料量を減らせることから冷却損失を低減できると期待できるが、高い等容度のために二つの燃焼形態による熱発生を同期させる必要がある。二つの燃料噴射ノズルを搭載した小型単気筒試験機関を用いた実験研究により、この燃焼方法の問題点として、サブ噴射（早期噴射）による燃料のピストンへの付着による黒煙排出の増加、サブ噴霧の過早着火による PCCI と通常ディーゼル燃焼との熱発生率の分離などを明らかにした。これらの問題は、サブ噴射燃料の低沸点・低セタン化により改善された。メイン噴射燃料に通常軽油、サブ噴射燃料に n ヘプタン 17vol%、i オクタン 83vol% の混合燃料を用いて、サブ噴射燃料量を増加させると、PCCI 燃焼による発熱が増えて等容度が上昇し、冷却損失割合が減少する結果、熱効率が向上することが分かった。

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)

本論文は、ディーゼル機関の熱効率向上を目指し、燃料噴射を分割することによる燃焼制御の方法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. 黒煙排出抑制の手段として知られるポスト噴射を熱効率向上のために活用することを狙い、その効果を確認した。単気筒機関を用いた実験により、メイン噴射終了直後に近接ポスト噴射を行うと、等容度を維持しつつ冷却損失を抑制し、熱効率を高めることができた。CFD (数値流体力学) による壁面熱流束の計算結果は、少量噴射の噴霧に関する情報不足から、上記の傾向を十分再現できないことを指摘した。
2. 前項で得たポスト噴射の効果をより大きくするため、単気筒機関による性能試験およびボトムビュー可視化機関を用いた噴霧火炎の高速撮影を行った。その結果、メイン・ポスト噴射間隔が約 1.5°CA で冷却損失割合が極小となることが分かった。可視化の結果から、冷却損失を極小にする噴射間隔は、ポスト噴霧がメイン噴霧火炎のテールに進入しない最も短い間隔であると考察した。
3. RCEM (急速圧縮膨張装置) を用いて、少量噴射 (噴射量 $0.25\sim 0.8\text{mg}$) の噴霧の発達特性を高速撮影写真および Mie 散乱により計測した。蒸気相到達距離は、既知の時間依存性に加え、噴射量が少ない場合には、噴射終了後に時刻の $1/4$ 乗に比例した。また、少噴射量では液相が十分発達する前に消滅すること、噴孔近傍噴霧角度は噴射始めに大きく、その後減少し噴射終わりに再び増加するなどの知見を得た。
4. PCCI 燃焼 (サブ噴射) と通常ディーゼル燃焼 (メイン噴射) を組み合わせた燃焼方法の問題点の把握と改善方法を検討した。二つの燃料噴射ノズルを搭載した単気筒機関を用いた実験により、サブ噴射燃料のピストンへの付着による黒煙排出の増加、サブ噴霧の過早着火による PCCI と通常ディーゼル燃焼との熱発生率の分離などの問題点を明らかにした。これらの問題は、サブ噴射燃料の低沸点・低セタン化により改善された。メイン噴射に通常軽油、サブ噴射に n ヘプタンと i オクタンの混合燃料を使い、サブ噴射燃料量を増加させると、PCCI 燃焼による発熱が増えて等容度が上昇し、冷却損失割合が減少する結果、熱効率が向上することが分かった。

以上、本論文は、燃料噴射を分割する二つの燃焼制御方法を提案し、その熱効率向上効果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、令和 2 年 2 月 28 日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、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を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

