

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

KURONITA Tokuji

氏名 黒仁田 徳士
学位の種類 博士 (工学)
学位記番号 博 甲 第 68 号
学位授与 令和 7 年 3 月 23 日
学位授与条件 学位規程第 3 条第 3 項該当
論文題目 ディーゼルエンジンの高効率化に向けた高圧噴射噴霧と燃焼に関する研究

A Study of High-Pressure Fuel Injection and Combustion towards High Efficiency in Diesel Engine

論文審査委員 (主査) 教授 西島 義明¹
(審査委員) 教授 江上 泰広¹ 教授 日比野 良一¹

論文内容の要旨

ディーゼルエンジンの高効率化に向けた高圧噴射噴霧と燃焼に関する研究 (A Study of High-Pressure Fuel Injection and Combustion towards High Efficiency in Diesel Engine)

本研究は、ディーゼルエンジンの高効率化に向けて高圧燃料噴射の噴霧および燃焼特性の未解明な現象の解析に取り組んだものである。2050年のカーボンニュートラル目標達成に向けて自動車業界全体で車両の電動化が促進されている。同時に完全移行までの期間を支えるディーゼルエンジンの燃焼改善や排出ガス低減が社会ニーズとして強く求められている。

本研究では、高圧燃料噴射に着眼した。高圧燃料噴射は均質な混合気を形成可能と予測されるが、その噴霧特性には未解明の領域がある。また、エンジン筒内への単位時間当たりの燃料供給量が増加し燃焼が急峻になり排出ガスや騒音悪化が懸念される。そこで本研究では、高圧燃料噴射を用いて排気性能改善可能な領域を拡大することを目的とし、エンジン燃焼において等 NO_x で Smoke 排出を低減することを目標に定めた。

具体的な課題として、以下が挙げられる。

- 本研究で対象とする高圧燃料噴射で噴霧の噴射速度が増大することを明らかにする。これまで 200 [MPa]までの噴射速度の計測知見はあったが、それ以上の噴射圧力領域では未知であった。高圧燃料噴射による均質化した混合気の形成に必要な条件として、噴霧の運動量が増大し噴霧の噴射速度が一樣に増大することを示す。
- 噴霧の運動量増大によって噴霧特性の変化として現れる噴霧到達距離が一樣に伸長することを明らかにする。混合気の均質化に寄与する噴霧到達距離に着眼すると 350 [MPa]までの計測知見はあったが、その実験式は高圧ほど実測値に対して乖離するという事象があった。本研究で対象とする高圧噴射領域まで適用可能な噴霧到達距離の実験式を新たに提示することで均質化した混合気を供給できる可能性を示す。
- 高圧燃料噴射をエンジン燃焼に適用し、等 NO_x で Smoke 排出を低減できることを明らかにする。これまで燃料噴射圧力 350 [MPa]までの噴霧解析から排出ガス低減の可能性が推定されていたが、実機での検証は未知だった。高圧燃料噴射で混合気を均質化し排出ガスを低減できる可能性を実機にて

¹ 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

示す。

本論文は、上述した3つの課題の解明に取組んだ成果をまとめたものであり、全6章で構成される。

まず第1章では、社会的背景や課題についてまとめ、本研究の目的を示した。

第2章では、高圧燃料噴射のエンジン燃焼への適用について従来研究と課題について検討し、研究の実施項目を提案した。

第3章では、400[MPa]までの高圧燃料噴射において噴霧の噴射速度が増大することを明らかにした。400[MPa]までの高圧燃料噴射に適用可能な噴射装置と観察装置を新たに構築し、計測と解析を実施した。次に、高圧燃料噴射の噴霧の圧力エネルギーを直接計測する方法を考案した。センサ受圧部に噴霧を衝突させることで液相部の運動量を直接計測する手法を考案し、噴霧のエネルギーを表す力波形モデルを提案した。本力波形モデルは、和栗が定めた噴霧が持つ運動量の理論式との運動量が誤差<10 [%]で一致することを確認した。さらに、噴霧の噴射速度増加によるエネルギー量の増加と運動量との関係から噴射速度の式を導出し、構築した噴射速度計測装置によって噴霧の液相の噴射速度を計測した。高圧燃料噴射において運動量が増大し噴射速度が一様に増大し、400[MPa]噴射では856[m/s]に到達することを実験的に検証した。

第4章では、燃料噴射の高圧化に伴って増大した噴霧の運動量によって噴霧到達距離が一様に伸長することを明らかにした。また、混合気の均質化に寄与する噴霧到達距離に着目し、400[MPa]まで適用可能な噴霧到達距離の実験式を新たに導出した。従来研究にて提唱されている実験式からの計算値と実測値の間に乖離が認められ、実測値が計算値を上回っていることを特定した。その要因として噴射期間中に後続噴霧から供給されるエネルギーによる噴霧追い越しが考えられることから、この現象に着目し新たに実験式を導出した。導出課程において実際の液滴径が粒度分布を持った粒径であることを考慮して実験式を補正するために実験定数を再検討し、実験式からの計算値と実測値が一致することを計測結果から確認した。加えて、低圧噴射領域にも適用可能であることも実験的に検証した。以上より、400[MPa]までの高圧噴

射においても混合気を均質化できる可能性を見出した。

第5章では、400[MPa]までの高圧燃料噴射をエンジン燃焼に適用し、Smoke排出量の低減を実証した。400[MPa]までの高圧燃料噴射装置を排気量558[cc]の単気筒エンジンに新たに適用し、400[MPa]高圧噴射での燃焼試験を実現した。その結果、等 NO_x 条件下でSmoke排出量を低減できることを実験的に検証した。特に高EGR率条件下でのSmoke低減効果が大きいことは混合気が均質化した効果と考えられる。さらに、混合気の均質化を模擬するため燃料噴射を2段に時間分割した条件でエンジン試験を行い、同様に NO_x -Smokeのトレードオフが改善することを実験的に示した。以上より、400[MPa]高圧燃料噴射による混合気の均質化を用いてSmoke排出量を低減できる可能性を示した。

第6章で本論文の総論を記述し、本研究で得られた主要な知見をまとめた。

さらに今後の展望として、Supplementでエンジン筒内への燃料供給量を制御する燃焼指標の適用領域拡大の可能性を示した。熱発生履歴モデルから算出された指標に従い燃料噴射を分割することで高圧噴射時に増大する燃料供給量を時間分散し適用した。その結果、400[MPa]噴射時の燃料供給を複数段に分割し、狙い通り筒内圧力上昇速度を抑制する方向へ制御できることを実験的に示した。また NO_x -Smokeトレードオフが改善することも実験的に示した。

以上より、この理論を適用し燃焼の良し悪しを制御できる指針を作ったことで、本燃焼指標の400[MPa]噴射までの運転条件への適用可能性を示した。

論文審査の結果の要旨

本研究は、ディーゼルエンジンの高効率化に向けて高圧燃料噴射の噴霧および燃焼特性の未解明な現象の解析に取組んだものである。2050年のカーボンニュートラル目標達成に向けて自動車業界全体で車両の電動化が促進されている。同時に完全移行までの期間を支えるディーゼルエンジンの燃焼改善や排出ガス低減が社会ニーズとして強く求められている。

本研究では、高圧燃料噴射に着目した。高圧燃料噴射は均質な混合気を形成可能と予測されるが、その噴霧特

性には未解明の領域がある。また、エンジン筒内への単位時間当たりの燃料供給量が増加し燃焼が急峻になり排出ガスや騒音悪化が懸念される。そこで本研究では、高圧燃料噴射を用いて排気性能改善可能な領域を拡大することを目的とし、エンジン燃焼において等 NO_x で Smoke 排出を低減することを目標に定めた。

具体的な課題として、以下が挙げられる。

1. 本研究で対象とする高圧燃料噴射で噴霧の噴射速度が増大することを明らかにする。これまで 200 MPa までの噴射速度の計測知見はあったが、それ以上の噴射圧力領域では未知であった。高圧燃料噴射による均質化した混合気の形成には、噴霧の運動量が増大し噴霧の噴射速度が一様に増大することを示す。
2. 噴霧の運動量増大によって噴霧特性の変化として現れる噴霧到達距離が一様に伸長することを明らかにする。混合気の均質化に寄与する噴霧到達距離に着目すると 350 MPa までの計測知見はあったが、その実験式は高圧ほど実測値に対して乖離するという事象があった。本研究で対象とする高圧噴射領域まで適用可能な噴霧到達距離の実験式を新たに提示することで均質化した混合気を供給できる可能性を示す。
3. 高圧燃料噴射をエンジン燃焼に適用し、等 NO_x で Smoke 排出を低減できることを明らかにする。これまで燃料噴射圧力 350 MPa までの噴霧解析から排出ガス低減の可能性が推定されていたが、実機での検証は未知だった。高圧燃料噴射で混合気を均質化し排出ガスを低減できる可能性を実機にて示す。

本論文は、上述した3つの課題の解明に取組んだ成果をまとめたものであり、全6章で構成される。

まず第1章では、社会的背景や課題についてまとめ、本研究の目的を示した。

第2章では、高圧燃料噴射のエンジン燃焼への適用について従来研究と課題について検討し、研究の実施項目を提案した。

第3章では、400 MPa までの高圧燃料噴射において噴

霧の噴射速度が増大することを明らかにした。400 MPa までの高圧燃料噴射に適用可能な噴射装置と観察装置を新たに構築し、計測と解析を実施した。次に、高圧燃料噴射の噴霧の圧力エネルギーを直接計測する方法を考案した。センサ受圧部に噴霧を衝突させることで液相部の運動量を直接計測する手法を考案し、噴霧のエネルギーを表す力波形モデルを提案した。本力波形モデルは、和栗が定めた噴霧が持つ運動量の理論式との運動量が誤差 < 10 % で一致することを確認した。さらに、噴霧の噴射速度増加によるエネルギー量の増加と運動量との関係から噴射速度の式を導出し、構築した噴射速度計測装置によって噴霧の液相の噴射速度を計測した。高圧燃料噴射において運動量が増大し噴射速度が一様に増大し、400 MPa 噴射では 856 m/s に到達することを実験的に検証した。

第4章では、燃料噴射の高圧化に伴って増大した噴霧の運動量によって噴霧到達距離が一様に伸長することを明らかにした。また、混合気の均質化に寄与する噴霧到達距離に着目し、400 MPa まで適用可能な噴霧到達距離の実験式を新たに導出した。従来研究にて提唱されている実験式からの計算値と実測値の間に乖離が認められ、実測値が計算値を上回っていることを特定した。その要因として噴射期間中に後続噴霧から供給されるエネルギーによる噴霧追い越しが考えられることから、この現象に着目し新たに実験式を導出した。導出課程において実際の液滴径が粒度分布を持った粒径であることを考慮して実験式を補正するために実験定数を再検討し、実験式からの計算値と実測値が一致することを計測結果から確認した。加えて、低圧噴射領域にも適用可能であることも実験的に検証した。以上より、400 MPa までの高圧噴射においても混合気を均質化できる可能性を見出した。

第5章では、400 MPa までの高圧燃料噴射をエンジン燃焼に適用し、Smoke 排出量の低減を実証した。400 MPa までの高圧燃料噴射装置を排気量 558 cc の単気筒エンジンに新たに適用し、400 MPa 高圧噴射での燃焼試験を実現した。その結果、等 NO_x 条件下で Smoke 排出量を低減できることを実験的に検証した。特に高 EGR 率条件下での Smoke 低減効果が大きいことは混合気が均質化した効

果と考えられる。さらに、混合気の均質化を模擬するため燃料噴射を2段に時間分割した条件でエンジン試験を行い、同様に NO_x -Smokeのトレードオフが改善することを実験的に示した。以上より、400 MPa 高圧燃料噴射による混合気の均質化を用いてSmoke排出量を低減できる可能性を示した。

6章で本論文の総論を記述し、本研究で得られた主要な知見をまとめた。

さらに今後の展望として、Supplementでエンジン筒内への燃料供給量を制御する燃焼指標の適用領域拡大の可能性を示した。熱発生履歴モデルから算出された指標に従い燃料噴射を分割することで高圧噴射時に増大する燃料供給量を時間分散し適用した。その結果、400 MPa 噴射時の燃料供給を複数段に分割し、狙い通り筒内圧力上昇速度を抑制する方向へ制御できることを実験的に示した。また NO_x -Smokeトレードオフが改善することも実験的に示した。この理論を適用し燃焼の良し悪しを制御できる指針を作ったことで、本燃焼指標の400 MPa 噴射までの運転条件への適用可能性を示した。

以上より、本論文は熱効率や排ガスに関して今後より一層の改善が求められるエンジンの開発や変革における工学的な寄与が高く、博士(工学)の学位に値するものと判定した。