

博士論文審査報告書

論文題目

高圧ガソリン噴射による乱れの強度と
空間スケールを制御した火花点火エンジンの
火炎伝播と燃焼特性に関する研究
Flame Propagation and Combustion Characteristics of
Spark Ignition Engines with Controlled Turbulence
Intensity and Length Scale by High Pressure
Gasoline Injection

申請者

神長	隆史
Takashi	KAMINAGA

総合機械工学専攻 熱エネルギー反応工学研究

2020年7月

(1) 審査経緯

当該博士論文審査は、以下の通り実施された。

- 2020年5月2日 予備審査会
- 2020年5月4日 教室受理決定
- 2020年5月21日 創造理工学研究科運営委員会受理決定
- 2020年5月23日 博士論文審査 第1回目
- 2020年6月8日 博士論文審査 第2回目
- 2020年6月23日 公聴会
- 2020年7月2日 審査分科会
- 2020年7月16日 創造理工学研究科運営委員会合否判定

(2) 論文の背景、内容および評価

火花点火式ガソリンエンジンは、今後ハイブリッド化が進むなかで車両の総合的なエネルギー変換効率を支配する重要な役割を担っている。ガソリンエンジンの熱効率改善は、高圧縮比化の歴史と言っても過言ではなく、これまで異常燃焼(ノック)の発生が障壁となり、実用的には圧縮比 14 程度が上限とされてきた。さらなる高圧縮比化には、ノックの原因となる未燃混合気の自己着火を回避する必要がある。そのため、点火時期直前の高圧筒内直接噴射により、予混合気が空間に滞在する時間を短縮することが有効、との着想に至った。そこで、本論文では量産ガソリンエンジンの最高圧縮比がおよそ 16 であることから、次世代エンジンとして圧縮比 17 をターゲットとし、部分負荷域においては、自己着火燃焼により高い熱効率を達成しながら、高負荷域で既存の圧縮比 14 と同等の熱効率を実現することを目的とし、ガソリンの高圧噴射を用いた新たな火花点火燃焼方式の提案とその燃焼特性の解明を行なった。

まず、LES(Large Eddy Simulation)による火炎伝播燃焼解析を実施した。IB法に基づく等間隔の直交格子を自動で生成する新たな 3次元圧縮性熱流体計算コードをプラットフォームとして使用し、これに Flamelet 理論に基づき火炎面を追跡する G 方程式モデル、SGS(Sub-grid Scale)乱流燃焼速度モデル、および高温高圧場に対応する層流燃焼速度モデルを実装した。多サイクルの非定常燃焼計算では、実機試験で計測されたサイクル間の燃焼圧力変動を再現できることを示した。また、乱流遷移直後の火炎表面に作用する乱れを強化することで、全燃焼プロセスを加速し得ることを見出した。球状乱流火炎計算では、先行研究で実験的に示されてきた積分スケールが火炎伝播速度に及ぼす影響を計算においても再現するとともに、積分スケールが小さい条件においては燃焼初期の火炎核の小さい時期から早期に火炎面の湾曲化が進み、乱流火炎への遷移が早まることを確認した。以上により、火炎伝播燃焼を効率的に速めるための有効な乱れの供給時期、領域、そして空間スケールの影響を明らかにした。

次に、プロトタイプของガソリンエンジンを用い、高圧噴射による燃焼期間の短縮効果を検証した。数値解析では計算時間の観点から Reynolds 平均モデルを用い、噴霧モデルは、KH-RT(Kelvin Helmholtz-Rayleigh Taylor)モデルを基にし、ガソリン噴霧に対応させるため定容容器を用いて異なる密度と噴射圧力におけるガソリン噴霧を高速度撮影により観測し、それらを再現するようにモデルの改良を施した。また、火炎伝播モデルは、CFM(Coherent Flamelet Model)をベースとし、球状火炎に対する乱れの積分スケールの影響と初期燃焼の乱流火炎への遷移遅れを考慮するため、新たに有効乱れ強さを考慮した補正項及び、乱流遷移前の球

状層流火炎の予測にも対応させるため、熱膨張と火炎核半径に基づく火炎伸長を考慮した火炎面密度の生成項を追加した。これにより、ベースの CFM を、点火直後の層流火炎核から発達した乱流火炎までの幅広い火炎伝播過程に対応するモデルに拡張することができ、LES の球状乱流火炎の計算結果との比較から妥当な挙動を示すことを確認した。エンジン実験では、噴射と点火時期を近接させ、噴射圧力を 100 MPa にまで高め、燃焼期間を従来の吸気流動のみを利用した条件から 1/2 以下にまで大幅に短縮できることを示した。また、予混合ガソリンエンジンと同様に、燃焼質量割合 10%位置と 50%位置および 90%位置の間には比例関係があり、高圧噴射を用いた火花点火燃焼においても初期燃焼速度が全体の燃焼期間の短縮に寄与することを明らかにした。数値解析結果から、噴射圧力が高く、噴射終了時期と点火時期の間隔が短い程、点火プラグ周りには高強度かつ小スケールの乱れが局所的にかつ高速に形成されることを示した。また、点火後の初期燃焼期間で火炎面密度が大きく上昇し、以後も燃料噴射により生成された乱れの分布に沿って火炎が急速に伝播していくことを明らかにした。以上により、ガソリンの高圧噴射を用いることで、全体の火炎伝播プロセスの中でも重要な初期燃焼速度を、高強度かつ小スケールの乱れで効率的に早めることが可能であり、異常燃焼回避のための重要な条件である「既存のガソリンエンジンの 2 倍以上の燃焼速度」を達成した。

最後に、実際に圧縮比 17 のエンジンにおいて高圧ガソリン噴射による急速混合と急速燃焼の機能を満たす燃焼室を検討し、単気筒試作エンジンにおいて性能評価を実施した。本供試エンジンでは、燃焼室の中央に多噴孔の高圧ガソリン直噴インジェクタを備え、ピストンのキャビティで 2 つの燃料噴霧を点火プラグに向けて誘導する壁面衝突噴霧型の燃焼室形状とし、燃料と空気の混合の機能をピストンに集約させるため、シリンダヘッドは多くのディーゼルエンジンに類似したフラット形状とした。また、吸排気バルブ径の縮小による充填効率の低下と高圧縮比エンジンにおいて課題となる冷却損失の低減を目的に、これまでの一般的なガソリンエンジンとは異なる低タンプル比の高流量係数吸気ポートを採用し、乱流燃焼に必要な乱れは高圧噴射により供給するコンセプトとした。さらに、ピストン頂面の液膜形成を起因とした後燃え損失を低減するため、燃料噴霧の衝突距離に注目し、定容容器における衝突噴霧計測結果から、ピストンのキャビティ形状とインジェクタの噴射角度を適正化した燃焼室形状を定めた。その結果、高負荷でも既存の圧縮比 14 のエンジンと同等の熱効率とスモーク性能を実現した。本燃焼コンセプトでは噴霧による高乱流エネルギーにより燃焼室の外縁方向の火炎面密度が高まり、火炎が円周方向に急速に伝播する特徴的な燃焼形態となっていることを数値解析により示した。さらに、ノックの予兆となる冷炎反応によるホルムアルデヒドの生成領域がエンドガス部で確認されたが、燃料噴霧により誘起された高強度の乱流エネルギーも同領域に分布しており、これにより未燃部を火炎が急速に伝播することで熱炎反応に至る前に火炎伝播により未燃部が消費尽くされていることを明らかにした。

以上を要するに、本論文は、低中負荷で自己着火燃焼により高い熱効率を達成する高圧縮比エンジンの高負荷域において、熱効率を犠牲にし、点火遅角で異常燃焼を回避する、というこれまでの手法に代え、新たに、高圧燃料噴射により生成された乱れ強度と適度に小スケール化された乱れを利用することで燃焼速度を増大させる、という新しい燃焼コンセプトを提案したものである。プロトタイプエンジンの試作、高度な実験解析及び詳細な素反応過程を考慮し各種サブモデルを実装した数値熱流体計算により新たな有用な知見を数多く見出している。よって、博士(工学)にふさわしい学位論文であると判断する。

2020年 7月

審査員

(主査) 早稲田大学 教授 博士(工学) 早稲田大学 草鹿 仁

(副査) 早稲田大学 教授 博士(工学) 早稲田大学 中垣 隆雄

(副査) 早稲田大学 教授 博士(理学) 東京工業大学 滝沢 研二

(副査) 早稲田大学 准教授 博士(工学) 名古屋大学 松田 佑