

博士論文概要

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5月

火花点火式ガソリンエンジンは、今日の乗用車の主要な動力源であり、将来的にハイブリッド化が進むことを仮定しても車両の総合的な効率を支配する重要な役割を担っている。そのため、ガソリンエンジンの熱効率改善は短期的な CO₂ 排出量削減のみに限定されず、中長期的な観点からも運輸部門に留まらない総合的な環境負荷低減に貢献し、持続的な社会を実現する上では極めて重要な基盤課題であると言える。

ガソリンエンジンの熱効率改善は、高圧縮比化の歴史でもあり、希薄燃焼までを考慮すると圧縮比 17 以上が理想値となることがこれまでの研究により示されている。しかしながら、高負荷域の量論空燃比運転におけるノックを代表とした異常燃焼の発生が障壁となるため、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向けては、異常燃焼の原因となる未燃混合気の自己着火を強制的に回避する必要がある。そのためには、燃料の筒内直接噴射技術を用いた点火時期直前の遅延噴射による予混合気の滞在時間短縮が有効であると考えられるが、本手法についての研究例は少なく実用的な性能を示した例も見られない。そこで本研究では、圧縮比 17 において異常燃焼を回避しつつ、既存の圧縮比 14 と同等の高負荷熱効率を実現することを目的として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特性調査を実施している。先行研究例において示された異常燃焼回避のための条件のうち、特に検証例が少なく現象の不明な燃料噴霧により誘起された乱れを利用した火炎伝播燃焼の高速化について重点的に調査を進め、支配的な現象を考慮した数値解析モデルの構築とそれらを用いた筒内の詳細な燃焼解析を行った。本論文は、以下に記述する全 5 章から構成される。

第 1 章は序論であり、研究と目的、先行研究例について述べている。背景として乗用車の CO₂ 規制の動向や LCA (Life Cycle Assessment) に基づく各種動力源の CO₂ 排出量の比較から、ガソリンエンジンの熱効率改善の重要性を示している。先行研究としては、高圧縮比化において課題となる異常燃焼の対策技術から、本研究で対象とするガソリンの筒内直接噴射技術、火炎伝播燃焼の急速化技術について現象面から整理し、それらの課題と本研究での対策手法について述べている。

第 2 章では、基礎的な予混合ガソリンエンジンを対象として、格子幅以上の非定常的な乱れを解像可能な LES (Large Eddy Simulation) による火炎伝播燃焼解析を実施し、全体の燃焼を支配するプロセスとその際に火炎の成長に寄与する乱れの条件を調査している。高精度な LES による火炎伝播燃焼計算を行う上では、複雑な形状の移動境界を有するガソリンエンジンを高い品質の計算格子で再現する必要があるため、IB (Immersed Boundary) 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の使用が試みられた。本計算コードに Flamelet 理論に基づき火炎面を追跡する G 方程式モデルと SGS (Sub-grid Scale) 乱流燃焼速度モデル、および層流燃焼速度モデルを組み込むことで、多サイクルの非定常燃焼計算が可能となり、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が示された。その上で、各サイクルにおける燃焼重心位置と火炎面に作用する乱れ強さの関係を統計的に分析した結果、常用回転域である 2000 rpm においては、点火後 4 deg.CA (火炎半径約 2 mm) における乱流遷移直後の火炎面に作用する乱れと燃焼重心位置に強い相関があることが明らかとなった。これは、点火プラグ近傍の乱れを局所的に強化することで、全体の燃焼プロセスを速めることが可能であることを示唆する。さらに、任意の乱れ場を初期条件として与

えることの可能な定容容器モデルにおいて、LES による球状乱流火炎の計算を行い、積分スケールが火炎伝播速度に及ぼす影響を調査した。その結果、先行研究で実験的に唱えられてきた特性を計算においても再現でき、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半径の小さい時期から早期に表面の湾曲が進み、乱流火炎への遷移が早まることを示した。以上により、ガソリンエンジンの火炎伝播燃焼を効率的に速めるために有効な乱れの供給時期、空間領域、そして積分スケールの影響について明らかにした。

第 3 章では、高圧ガソリン噴射が可能な単噴孔の直噴インジェクタを備えたガソリンエンジンを用い、実験により高圧噴射による燃焼期間の短縮効果を検証した。また、数値解析を行うことで噴霧により誘起される筒内の乱れ場の特徴や、それが火炎伝播速度に及ぼす影響を調査した。数値解析にあたっては、火炎伝播以外の様々な現象の予測に計算時間を短縮しつつ対応するため、RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) ベースの 3 次元非圧縮性熱流体計算コードを用いた。その上で、高圧ガソリン噴射を用いた火炎伝播燃焼の予測に対応するべく、重要な現象となる燃料噴霧と火炎伝播のモデルの改良を進めた。噴霧モデルは、高密度場のディーゼル噴霧の計算において実績のある KH-RT (Kelvin Helmholtz-Rayleigh Taylor) モデルを基にしつつ、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察し、それらを再現するように KH 分裂と RT 分裂を切り替える分裂長さ式に動的な密度補正項を追加した。これにより、非定常的に筒内圧力が変化する圧縮行程中の高圧ガソリン噴霧の再現が可能となった。火炎伝播モデルについては、輸送方程式の取り扱いが容易で RANS における火炎伝播計算において多くの実績のある CFM (Coherent Flamelet Model) を基にしつつ、第 2 章の LES 計算で示した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火炎面密度生成の補正項を追加した。さらに、CFM を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。これらの改良により、CFM で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形態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。

高圧ガソリン噴射を用いたエンジン実験では、燃料の噴射時期と噴射圧力を変更した際の筒内圧力と熱発生率の変化を観察した。実験の結果、噴射と点火時期を近接させ、噴射圧力を 100 MPa まで高めることにより、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が示された。この時の筒内の乱れの分布と時間的な変化、そして火炎伝播の挙動を改良した数値計算モデルを用いて解析した結果、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形成されていることを示した。また火炎伝播計算では、本研究で構築した CFM により実機の燃料噴射圧力違いの熱発生率を適切に再現可能であることを確認した上で、筒内の火炎伝播の挙動を解析し、高圧噴射条件では点火後の初期燃焼期間中において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。この時の火炎面に作用する乱れの積分スケールと改良された CFM 中の有効乱れ強度補正項の時間履歴を比較した結果、高圧噴射条件では吸気流動のみの条件と比較し

て早期に有効乱れ強さが上昇し、完全発達した乱流火炎へと遷移していることが分かった。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を高強度かつ小スケールの乱れで効率的に速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倍以上の燃焼速度が得られることを示した。

第4章では、実際に圧縮比17のガソリン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に特化した燃焼室を検討し、単気筒エンジンにおいて性能評価を実施した。実験は回転速度2000 rpmの全負荷条件について実施し、燃料噴射圧力を120 MPaまでに高めることにより、圧縮比17において異常燃焼を回避しつつ圧縮比14と同等以上の等容度にて燃焼可能なことを確認した。しかしながら、熱効率については既存の圧縮比14のエンジンより2.8%(point)低い結果となり、熱勘定解析と筒内の燃焼観察から、ピストン表面への液膜形成を起因とした未燃損失が発生していることが判明した。この改善のため、燃料噴霧の衝突距離に注目し、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検討した。改良された燃焼室についてエンジン性能評価を実施した結果、未燃損失の低減が確認され、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が実現できていることが明らかとなり、本燃焼コンセプトの有効性と実用的な性能を実証した。

このような高圧ガソリン噴射に特化した供試エンジンの燃焼メカニズムを分析するため、さらに第3章で構築した噴霧および火炎伝播モデルを用いた数値解析を実施した。筒内の火炎伝播挙動を解析した結果、本燃焼コンセプトでは円環状に形成された高乱流エネルギー分布に沿って燃焼室の外縁方向の火炎面密度が高くなり、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が分かった。さらに、詳細反応動力学計算との連成による異常燃焼の発生領域についての解析を実施した結果、本燃焼コンセプトでは燃焼室の前後方向においてノック発生時の冷炎反応中に蓄積されるホルムアルデヒドが高濃度に分布していることが確認されたが、同時に燃料噴霧により誘起された高強度の乱流エネルギーも分布しており、火炎が未燃部に向けて急速に伝播することで自己着火に至る前に燃焼が正常に完了していることが明らかとなった。

第5章では、各章で得られた知見を総括しつつ、今後の研究の展望として、高圧縮比化の本来の目的である部分負荷域の希薄燃焼による熱効率の改善や、最終的な乗用車用エンジンに本燃焼技術を適用するためのアプローチ方法について述べている。

以上を要するに、本論文ではガソリンエンジンの高圧縮比化を進める上で問題となる高負荷域の異常燃焼回避を目的に、高圧ガソリン噴射を用いた新たな火花点火燃焼方式を開発し、その中でも重要な要素のひとつである急速燃焼に注目した分析と特性解明を実験と数値解析により進めた。これにより得られた知見は、ガソリンエンジンの高圧縮比化の課題となる異常燃焼の回避のみに限定されず、従来の吸気流動に依存してきた火炎伝播燃焼の自由度を拡張し、ガソリンエンジンのさらなる進化の可能性を示唆するものである。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 神長 隆史 印

(2020年 5月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文 (査読付)	<p>○神長 隆史, 長津 和弘, 養祖 隆, 藤川 竜也, 長野 高皓, 山川 正尚, “ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術（第2報）－単気筒エンジンによるコンセプト検証－”, 自動車技術会論文集, 49巻, 4号, p. 751-757, 2018年7月</p> <p>○神長 隆史, 喜久里 陽, 周 蓓霓, 森井 雄飛, 山田 健人, 高林 徹, 草鹿 仁, 安田 章悟, 八百 寛樹, 菱田 学, 南部 太介, 溝渕 泰寛, 松尾 裕一, “火花点火ガソリンエンジンにおける燃焼のサイクル間変動のLES解析”, 自動車技術会論文集, 50巻, 1号, p. 19-24, 2019年1月</p> <p>○Takashi Kaminaga, Kyohei Yamaguchi, Sok Ratnak, Jin Kusaka, Takashi Youso, Tatsuya Fujikawa and Masahisa Yamakawa, “A Study on Combustion Characteristics of a High Compression Ratio SI Engine with High Pressure Gasoline Injection”, SAE Technical Paper 2019-24-0106, September 2019</p>
論文・講演	<p>喜久里 陽, 神長 隆史, 周 蓓霓, 山田 健人, 高林 徹, 草鹿 仁, 安田 章悟, 八百 寛樹, 菱田 学, 南部 太介, 森井 雄飛, 溝渕 泰寛, 松尾 裕一, “自動車用エンジンにおける火炎伝播の数値解析”, 第49回流体力学講演会/第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 1C08 (JSASS-2017-2043-A), 2017年6月</p> <p>喜久里 陽, 神長 隆史 (代理発表), 周 蓓霓, 山田 健人, 高林 徹, 草鹿 仁, 安田 章悟, 八百 寛樹, 菱田 学, 南部 太介, 森井 雄飛, 溝渕 泰寛, 松尾 裕一, “火花点火ガソリンエンジンにおける火炎面の分布特性に関するLES解析”, 自動車技術会 2017年秋季学術講演会, No. 139-17, 20176142, 2017年10月</p> <p>○神長 隆史, 長津 和弘, 養祖 隆, 藤川 竜也, 長野 高皓, 山川 正尚, “ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術（第2報）－単気筒エンジンによるコンセプト検証－”, 第28回内燃機関シンポジウム, 64-20178068, 2017年12月</p> <p>○神長 隆史, 喜久里 陽, 周 蓓霓, 森井 雄飛, 山田 健人, 高林 徹, 草鹿 仁, 安田 章悟, 八百 寛樹, 菱田 学, 南部 太介, 溝渕 泰寛, 松尾 裕一, “火花点火ガソリンエンジンにおける燃焼のサイクル間変動のLES解析”, 自動車技術会 2018年春季学術講演会, No. 37-18, 20185159, 2018年5月</p> <p>養祖 隆, 神長 隆史, 長野 高皓, 藤川 竜也, 山川 正尚, “ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術（第3報）－混合気制御による熱効率改善の検討－”, 自動車技術会 2018年春季学術講演会, No. 63-18, 20185291, 2018年5月</p> <p>○神長 隆史, “ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術”, 自動車技術会 第5回ガソリン機関部門員会, 2018年11月</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
著 書	<p>○神長 隆史，“HINOCA によるガソリンエンジンの火炎伝播計算とサイクル間燃焼変動の解析”，SIP 革新的燃焼技術 Research Report 2019.1, p. 17, 2019 年 1 月</p> <p>○神長 隆史，“火炎伝播モデル：「入門と最新手法の紹介」”，自動車技術会 2019 年春季大会フォーラム，2019 年 5 月</p> <p>○Takashi Kaminaga, Kyohei Yamaguchi, Sok Ratnak, Jin Kusaka, Takashi Youso, Tatsuya Fujikawa and Masahisa Yamakawa, “A Study on Combustion Characteristics of a High Compression Ratio SI Engine with High Pressure Gasoline Injection”, SAE 14th International Conference on Engines & Vehicles, September 2019</p> <p>金子 成彦, 草鹿 仁, 高林 徹, 溝渕 泰寛, 南部 太介, 尾形 陽一, 高木 正英, 川内 智詞, 小橋 好充, 周 蓓霓, 堀 司, 神長 隆史, 森井 雄飛, 橋本 淳, “基礎からわかる自動車エンジンのシミュレーション “, コロナ社, 2019 年 7 月</p>
その他 (論文)	<p>Takashi Kaminaga and Jin Kusaka, “Improvement of combustion and exhaust gas emissions in a passenger car diesel engine by modification of combustion chamber design”, SAE Technical Paper 2006-01-3435, November 2006</p> <p>Takashi Kaminaga, Jin Kusaka and Yoshinori Ishii, “A three-dimensional numerical study on exhaust gas emissions from a medium-duty diesel engine using a phenomenological soot particle formation model combined with detailed chemistry”, International Journal of Engine Research, Vol. 9, No. 4, p. 283-296, August 2008</p> <p>Takashi Kaminaga, Takashi Youso, Masahisa Yamakawa, Satoshi Ito, Akira Hozumi and Jin Kusaka, “Study on auto-ignition characteristics of ethanol and ETBE blended fuels in a gasoline HCCI engine”, 8th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems, p. 416-421, July 2012</p> <p>神長 隆史, 養祖 隆, 長津 和弘, 藤川 竜也, 長野 高皓, 山川 正尚, “ガソリン高圧噴射を用いた高圧縮比エンジンの燃焼技術（第 4 報） 一部分負荷運転時の燃費性能の検討一”, 自動車技術会論文集, 49 巻, 6 号, p. 1156-1161, 2018 年 11 月</p>
その他 (特許)	<p>早田 光則, 山本 剛, 中原 康志, 養祖 隆, 阿部 博聰, 長野 高皓, 井上 淳, 長津 和弘, 神長 隆史, 藤川 竜也, “内燃機関の燃焼室構造”, 公開特許, 特開 2017-106385</p> <p>長野 高皓, 山川 正尚, 養祖 隆, 長津 和弘, 藤川 竜也, 張 武, 神長 隆史, 宮本 亨, 岡田 晋太郎, 久留 裕貴, “エンジンの燃焼室構造”, 公開特許, 特開 2016-128668</p>