

ハナブサ ヒロシ

氏名	英 寿
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博第1178号
学位授与の日付	2020年3月31日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	均質希薄火花点火機関の希薄限界の考察と窒素酸化物生成抑制の検討 (Study on Lean Limit and Nitrogen Oxides Emission Reduction of Homogeneous Lean charge Spark Ignition Engine)

論文審査委員	主査	教授	古谷 正広
		教授	田川 正人
		教授	石野 洋二郎

論文内容の要旨

内燃機関の熱効率向上が求められ希薄燃焼は高い熱効率を有する一方で三元触媒による窒素酸化物の浄化ができないことが課題となっている。また、窒素酸化物の生成を抑制できる領域では失火や燃焼変動などに対するロバスト性の高い燃焼技術の確立が必要となる。本論文では従来の筒内の混合気の成層化による希薄燃焼の課題である窒素酸化物生成と均質希薄自着火 (HCCI) 燃焼の燃焼制御性の課題を解決する手段として均質希薄火花点火 (HLSI) 燃焼の研究成果をまとめたものであり、以下の各章から構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景と過去の研究事例について述べた。

第2章では HLSI 燃焼の空気過剰率の増加に伴って低下する火炎伝播速度と着火性を補うために筒内乱流強度と火花点火エネルギーの影響について述べた。吸気ポート形状による乱流強度の増加と火花点火エネルギーの増加は希薄限界の拡大と窒素酸化物の生成抑制に有効であることを示した。乱流強度の大きくすることによって、燃焼期間が短くなるため火花点火タイミングがより圧縮上死点に近くなることでより高い温度での着火が可能になり、燃焼安定性が高まることをカルロピッツ数の算出と乱流燃焼ダイアグラムと燃焼形態について整理した。また、HLSI 燃焼と EGR 燃焼の差異についても熱効率の差とその要因を述べた。

第3章では希薄燃焼の課題である窒素酸化物 (NO_x) 生成について、HLSI 燃焼から生成される NO_x 生成要因について検討した。サイクリックに変動する燃焼とサイクル毎に変動する NO_x 濃度の関係について排気バルブ直後の NO_x 濃度を高速で計測して解析した。燃焼が生成する NO_x と燃焼速度や燃焼位相の関係やスパークプラグギャップ間の放電プラズマが生成する NO_x 濃度が放電プラズマ伸長と相関性が高いことを述べた。

第4章では空気過剰率の増加に伴って低下する火炎伝播速度の要因である、層流燃焼速度を解析するために層流燃焼速度予測式の構築を検討した。層流燃焼速度は反応スキームを用いた化学反応計算によって算出することができるが、実験で得られた筒内圧力、筒内温度、混合気組成からクランク角毎の層流燃焼速度を算出し解析するには膨大な時間が必要となるため、当量比（空気過剰率の逆数）・EGR率・圧力・温度から算出することが可能な層流燃焼速度予測式の構築をし、その構築手法と構築した予測式の精度を乱流強度が同一となる環境で当量比、EGR率を変更し、乱流火炎速度が同一となる熱発生率を探索し、その当量比、EGR率の層流燃焼速度を解析することで精度を確認した。

第5章では希薄燃焼の課題である燃焼変動の要因について層流燃焼速度の観点から考察した。サイクリックに変動するプラグ近傍の空気過剰率を計測し、その局所的な空気過剰率の変動が層流燃焼速度ばらつきに与える影響について第4章で構築した層流燃焼速度予測式を用いて考察した。吸気ポート形状による乱流強度の影響や燃料供給システム（筒内直接噴射、吸気ポート噴射、上流噴射）の影響について実験的に差異を計測し燃焼変動に与える影響を述べた。空気過剰率の上昇と共に増加する燃焼変動はプラグ近傍の空気過剰率のばらつきは空気過剰率の増加に寄与しないものの、層流燃焼速度が低下することでプラグ近傍の空気過剰率のばらつきの寄与度が高くなることを述べた。

第6章ではHLSI燃焼の空気過剰率と火花点火タイミングを高効率かつ低NO_x濃度に制御するためのフィードバック制御手法について述べる。HLSI燃焼ではできるだけNO_x濃度の低い空気過剰率で燃焼させられることを求められる。一方で制御される空気過剰率は過渡運転も含めばらつきを持つ。現在量産されているガソリンエンジンの空気過剰率を制御するのに用いられている酸素センサーや全域空燃比センサーは量論近傍の排気ガス酸素濃度の低い領域で精度が高い特性を持っているため、排気ガス中の酸素濃度の高い希薄燃焼では空気過剰率の制御精度が低下する。そこで空気過剰率の制御精度が窒素酸化物排出に与える影響をHLSI燃焼のNO_x生成特性と合わせて実験的に考察した。また窒素酸化物濃度を計測するNO_xセンサーの搭載およびその制御ロジックについても述べる。

第7章では本研究で得られた結果をまとめると共にHLSI燃焼の更なる性能向上および実用化に向けた展望を述べて研究の結論とする。

論文審査結果の要旨

往復動内燃機関には今日に至るまで常に高い熱効率と排気の清浄性が求められ続けている。このような要求に答えるべく提案された均質希薄火花点火 HLSI 機関を実用機関とするために、運転が可能な希薄限界空気過剰率を決める要因と窒素酸化物生成抑制に関する研究成果を本論文では述べている。

第 1 章は本研究の背景と過去に行われてきた希薄燃焼機関の研究事例について述べている。第 2 章では均質希薄火花点火 HLSI 運転における排気再循環 EGR と筒内乱流強度との関係について調べている。吸気ポート形状を変更することで筒内乱流強度を変えている。筒内乱流を強化すれば運転可能な空気過剰率は高くなり、かつ高い EGR 率でも運転でき、結果として排気中の窒素酸化物濃度は低くなるとしている。EGR 率と空気過剰率とを同時に変更することで、ほぼ同じ熱発生率のままで量論運転から HLSI 運転に移行できることを示しており HLSI 機関の実用化に向けた有益な情報をもたらしている。点火時期が圧縮上死点に近づくために大きな放電エネルギーが必要になることも指摘した。第 3 章では燃焼位相のサイクルごとの変動と排気バルブ直後の NO_x 濃度との相関が高いことを実験的に示している。HLSI 運転では強力な放電装置を用いるが、希薄限界付近では放電電弧の伸長の度合いが排気 NO_x 濃度に影響する可能性を指摘している。第 4 章では HLSI 運転範囲まで適用できる層流燃焼速度の予測式を詳細化学反応計算結果から導き出した。この予測式の精度は実機での実験によって検討された。その手順はまず、筒内流動状態が同じにして運転すれば熱発生率は層流燃焼速度が支配すると考えて、筒内流動は同じ状態で熱発生率は等しいが EGR 率と空気過剰率は異なる組み合わせを見付け出す。つぎにそれぞれの条件で分光計測によって得られた筒内温度と混合気組成を予測式に用いて層流燃焼速度を算出する。これらの算出された層流燃焼速度の値は EGR 率と空気過剰率は異なっても熱発生と同様にほぼ一致しており、これらによって予測式の精度は確認されたとしている。第 5 章では混合気の均質性が層流燃焼速度および燃焼変動に及ぼす影響を調べている。数種類の吸気ポート形状や燃料供給システムを用いることで混合気の均質性を変更している。プラグ近傍の局所的な空気過剰率の変動は分光測定によって計測している。その結果、空気過剰率が高くなるに従って層流燃焼速度が低下することが希薄限界での燃焼変動の増加を招いていることを示している。第 6 章では HLSI 運転を実現するために制御ロジックを提示している。まずは空燃比センサーの精度が火花点火時期と排気中の窒素酸化物濃度との関係を調べて、空燃比センサーに加えてディーゼルエンジンと同様に窒素酸化物センサーと筒内圧センサーが必要であることを導き出しおり、これらのセンサーを搭載した場合での制御ロジックを提示している。第 7 章では本研究のまとめとして HLSI 運転の実用化に向けた展望が述べられている。

本研究の成果としては本学大学院博士後期課程在学中において、査読付き論文 3 編と国内特許 1 件として公開している。これらの研究成果は機能工学専攻の学位審査基準を満足することを確認した。本論文では実用のために HLSI 機関のみならず往復式内燃機関を燃料希薄混合気での運転を試みようとする直面する困難が何に起因するのかを明らかにして、さらにはその解決策を提案していることから、工学的、工業的に高く評価できる。よって本論文は博士（工学）に十分値すると判断する。