

学位論文題名

予混合圧縮自着火燃焼の基本特性と 2 ストローク直噴エンジンへの適用に関する研究

学位論文内容の要旨

石油資源の枯渇や地球温暖化の進行が懸念される現代において、内燃機関の燃焼研究における重要な目的は、(1) 比出力の向上、(2) エミッションの改善、(3) 熱効率の向上の三点に集約されると言え、今後の内燃機関にはこれをいっそう高い次元でバランスさせることが求められている。そこで、高い圧縮比で希薄な予混合気を自着火燃焼させることで、高い熱効率の実現とともに煤や NO_x 排出を抑制できる HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) 燃焼が注目されているが、これまでのところ自動車用内燃機関として広く普及できる技術レベルに達していない。

そこで、本研究では、単筒エンジンと詳細な化学反応シミュレーションを用いて HCCI 燃焼の基本的な特性を明らかにし、その上で、HCCI 燃焼を自動車用内燃機関に適用可能で実用的なコンセプトを提案し、以下の項目を達成することを目標とした。

- ・ HCCI 燃焼により、既存の自動車用内燃機関レベルの最大トルクを実現
- ・ その際、エンジンから排出される煤および NO_x はほぼゼロ
- ・ 熱効率は既存の自動車用ガソリン機関以上
- ・ 上記目標を市販燃料(本研究ではレギュラーガソリン)で実現

HCCI 燃焼の実用化を検討する上で、その基本特性を理解することは重要であるため、試験用 4 ストローク単筒エンジンを用いて、圧縮比、回転速度、当量比、燃料性状が HCCI 燃焼の自着火時期、エミッションなどに及ぼす影響を検討した。これより、HCCI 燃焼の実用化に向けての課題は、次のように集約された。

課題 1: 自着火時期の制御技術の確立

課題 2: 高負荷でのノッキング抑制

課題 3: エミッション低減(全域での THC, CO と、高負荷での NO_x)

上記の三つの課題を解決する手法を検討するために、詳細な化学反応モデルを用いた single zone model の HCCI 燃焼シミュレーションを構築し、HCCI 燃焼の基本的なメカニズムと自着火制御手法の検討を試みた。その結果、課題 1 の HCCI 燃焼の自着火時期制御に対しては、EGR(排気ガス再循環)や混合気の温度を積極的に制御することで自着火時期の制御ができることを確認した。しかし、課題 2 のノッキングの抑制に対する有効な手段は見当たらず、とくに高負荷条件でのノッキング発生は自着火時の圧力上昇率の観点から本質的に解決が困難な現象である可能性が示唆された。また、課題 3 の高負荷での NO_x 低減に対しては、EGR 割合を増やすだけでは効果が小さいことが示された。

さらに、詳細な化学反応を用いたシミュレーションと、単筒エンジン実験の結果を用いて、HCCI 燃焼の自着火時期に対する低温酸化反応の影響を検討した。その結果、HCCI 燃焼エンジンのシリンダ内の温度・圧力条件は、圧縮行程の後期に低温酸化反応の影響が顕著な条件に達するため、低温酸化反応機構を有する paraffin などの燃料を HCCI 燃焼に用いた場合の自着火時期は、低回転ではその影響を強く受け、高回転ではその影響をほとんど受けないことが示唆された。このことは、HCCI 燃焼が燃料性状にきわめて敏感であることを示すもので、エンジンシステムが具備すべき自着火時期制御手法には、地域や季節による燃料性状の差異にも対応可能な高い制御性が要求されると考えられる。

これらの基礎的な検討をもとに、本研究では、HCCI 燃焼に関する三つの課題を解決するコンセプトとして、2 ストローク・ガソリン直噴 HCCI 燃焼を提案した。2 ストローク機関は 4 ストローク機関に比べて燃焼回数が二倍であることから平均有効圧力に対する軸トルクも二倍となり、ノッキングや NOx が問題とならない希薄な混合気による HCCI 燃焼だけで高負荷に対応できる可能性がある。また、2 ストローク機関における残留ガスは、サイクルの性質により本質的に低負荷で多く高負荷では少ない。そのため、着火性の低いガソリンを低負荷で自着火させる際には高温の残留ガスを大量に導入でき、失火抑制の効果が期待できる。一方、出力を高める必要がある高負荷では、残留ガスを減少させることで自着火時期を遅らせノッキングを回避する効果が期待できる。本研究では、単筒エンジンにより 2 ストローク・ガソリン直噴 HCCI 燃焼を実現し、以下の結果を得た。

(1) 外部掃気ポンプとして用いた機械式過給機の回転速度により残留ガス割合を変化させることで、負荷 (図示平均有効圧力で約 0.13~0.55MPa) や回転速度 (1000~2000rpm) に関わらず最適な自着火時期が容易に実現できる。

(2) 図示平均有効圧力の最高条件は 4 ストローク機関に換算すれば約 1.1MPa となり、この条件でもノッキングは発生しない。

(3) 図示熱効率の最高値は回転速度に関わらず 46% 以上を実現できる。

(4) 試験条件全域で NOx は 10ppm 以下となり、NOx 浄化のための後処理装置を有することなく排気規制をクリアできる可能性がある。また、スモークはほぼゼロ ($FSN \leq 0.02$) である。

(5) THC は 2000ppmC 以上、CO は 0.1% 以上排出され、実用化には酸化触媒が必要となる。

(6) 始動直後を模擬した条件でも、エミッションや熱効率の悪化以外に大きな問題は見られない。

これらの結果より、本研究で提案した 2 ストローク・ガソリン直噴 HCCI 燃焼エンジンは、HCCI 燃焼の実用化に対する三つの重要な課題をほぼ解決でき、また本研究の目標を実現するための HCCI 燃焼エンジンコンセプトとして優れた特性を有することが確認された。

さらに、実用化に向けた制御システムにおいて検出または制御すべき物理量の特定を目指し、自着火促進効果における以下の二つの因子の寄与を詳細な化学反応モデルを用いることで検討した。

- ・高温の既燃ガスによる混合気温度の上昇

- ・残留ガス中に含まれる反応性の高い反応中間生成物による酸化反応の促進

その結果、2 ストローク・ガソリン直噴 HCCI 燃焼エンジンのように残留ガスによる自着火促進効果を利用する HCCI 燃焼においては、実用化に向けた制御システムで検出または制御すべき物理量は混合気の温度であり、成分としては O_2 および CO の濃度が重要であることが明らかになった。また、反応性の高い反応中間生成物は、残留ガス中の濃度がきわめて低いために自着火時期にほとんど影響しないことが示された。

以上のように、本研究で提案した 2 ストローク・ガソリン直噴 HCCI 燃焼エンジンは、HCCI 燃焼の実用化に対する三つの重要な課題をほぼ解決でき、また本研究の目標の実現に向けて優れた基本特性を有することが確認された。

しかしながら、フリクションおよび掃気ポンプ駆動損失が正味熱効率と正味平均有効圧力に及ぼす影響が課題であり、エンジン機構や流体解析の側面からの検討が必要である。また、THC、CO の浄化に対して触媒の適合を検討することも必要で、とくに排気温度が低い運転条件での酸化能力が課題となる可能性がある。さらに、高回転域での精密な自着火時期制御や、列型エンジンにおける自着火時期の気筒間差の抑制も必要になると考えられる。

今後は、本研究で得られた知見をもとに、上記の残された課題を解決し、理想的な自動車用内燃機関としての実用化を目指して研究を進めることが望まれる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 川 英 之

副 査 教 授 近 久 武 美

副 査 教 授 永 田 晴 紀

副 査 教 授 藤 田 修

学 位 論 文 題 名

予混合圧縮自着火燃焼の基本特性と

2 ストローク直噴エンジンへの適用に関する研究

石油資源枯渇や地球温暖化の懸念から、内燃機関の燃焼研究における課題は、(1) 比出力の向上、(2) エミッションの改善、(3) 熱効率の向上の三点に集約される。そのため、希薄予混合気を高圧縮比で自着火燃焼させることで高い熱効率を実現すると同時に煤や NO_x 排出を抑制できる HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) 燃焼が注目されているが、自動車用内燃機関として普及できる技術レベルに達していない。

本論文は、単筒エンジンと詳細な化学反応シミュレーションを用いて HCCI 燃焼の基本的な特性を明らかにし、その上で HCCI 燃焼を自動車用内燃機関に適用可能な実用的コンセプトを提案することを目的としたものである。

筆者は、まず HCCI 燃焼の基本特性を明らかにするために、試験用 4 ストローク単筒エンジンを用いて、圧縮比、回転速度、当量比、燃料性状が自着火時期、エミッションなどに及ぼす影響を検討し、実用化に対する課題を以下の三点に集約した。

課題 1: 自着火時期の制御技術の確立

課題 2: 高負荷でのノッキング抑制

課題 3: エミッション低減 (全域での THC、CO と、高負荷での NO_x)

次に、これら三つの課題を解決する手法を検討するために、詳細な化学反応モデルを用いた single zone model の HCCI 燃焼シミュレーションを構築し、基本的な燃焼メカニズムと自着火制御手法を検討した。その結果、課題 1 の自着火時期制御に対しては、EGR (排気ガス再循環) や混合気の温度を制御することの有効性を確認した。しかし、課題 2 については、ノッキングが自着火時の圧力上昇率に依存するために、高負荷運転でのノッキングの抑制は本質的に解決困難であることを明らかにした。また、課題 3 に対しても、NO_x 生成と混合気温度の関係から、高負荷での NO_x 抑制が困難であることを示した。

さらに、上記のエンジン実験とシミュレーションを用いて、HCCI 燃焼の自着火時期に対する燃料性状の影響について、反応過程に着目した検討を行った。その結果、paraffin などの低温酸化反応機構を有する成分の特異な挙動が明らかになった。これより、HCCI 燃焼は燃料性状にきわめて敏感であ

り、実用化に際しては地域や季節による燃料性状の差異に対応できる自着火時期制御手法が必要であることを示した。

これらの基礎的な検討をもとに、筆者は、HCCI 燃焼に関する三つの課題を解決するコンセプトとして、2 ストローク・ガソリン直噴 HCCI 燃焼を提案した。このコンセプトは、2 ストローク機関の燃焼回数が 4 ストローク機関に比べて二倍であることと、残留ガスをガソリンの自着火促進に応用することに着眼して、ノッキングや NOx が問題とならない希薄な混合気による HCCI 燃焼だけで高負荷まで運転することを目指したものである。この独創的コンセプトを単筒エンジンとして実現し、以下の結果を得た。

(1) 外部掃気ポンプとして用いた機械式過給機の回転速度によって最適な自着火時期が容易に実現できる。

(2) 最大図示平均有効圧力は約 0.55MPa であり、ノッキングを発生することなく 4 ストロークガソリン機関並のトルクを実現できる。

(3) 図示熱効率の最高値は回転速度に関わらず 46% 以上を実現できる。

(4) NOx 排出濃度は 10ppm 以下であり触媒なしで排気規制をクリアできるレベルである。また、スモークはほぼゼロ ($FSN \leq 0.02$) である。但し、THC は 2000ppmC 以上、CO は 0.1% 以上排出され、実用化には酸化触媒が必要となる。

(5) 始動直後を模擬した条件でも、エミッションや熱効率の悪化以外に大きな問題は見られない。

(6) 上記のエンジン性能を、市販のレギュラーガソリンで達成できる。

さらに、残留ガスの自着火促進効果について詳細な化学反応モデルを用いて検討した結果、残留ガスによる自着火促進効果を利用する HCCI 燃焼において制御すべき物理量は混合気の温度であり、成分としては酸素および CO の濃度が重要であることを明らかにした。また、反応性の高い反応中間生成物は、残留ガス中の濃度がきわめて低いために自着火時期にほとんど影響しないことも明らかにした。

これを要するに、筆者は HCCI 燃焼の本質的な特性を実験と理論解析から明らかにし、その課題と対策を明確にした上で、独創的な 2 ストローク・ガソリン直噴 HCCI 燃焼エンジンを提案し、その性能評価を単筒エンジンにて実施した結果、自動車用内燃機関として優れた特性を有することを証明したものである。このように、筆者は HCCI 燃焼の実用化に向けた新たな知見を得たものであり、内燃機関の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。