

学 位 論 文 題 名

筒内直接噴射式火花点火機関の熱効率向上に関する研究

(A study on thermal efficiency improvement in direct injection spark ignition engines)

学位論文内容の要旨

ガソリンエンジンはディーゼルエンジンと比較して熱効率が低い、その要因として火花ノックを回避するために圧縮比を高く取れないことに起因して理論熱効率が低いことが挙げられる。さらに火炎伝播型予混合燃焼を行うことと三元触媒による排気浄化を前提とすることから、量論比燃焼を強いられることも効率向上の妨げになっている。実際の内燃機関の損失には理論熱効率では考慮されない冷却損失およびポンプ損失などが加わるが、量論比燃焼は燃焼温度が高いため冷却損失が大きくなるのみならず、部分負荷では吸気絞りが必要になるためポンプ損失が増加し、ディーゼルエンジンとの熱効率の差異はさらに顕著になる。

本研究は、これらの熱効率低下要因を踏まえ、筒内に直接燃料を噴射する直接噴射式ガソリンエンジン (直噴ガソリンエンジン) による熱効率向上手法の確立を目的とした。直噴ガソリンエンジンは、燃料噴射の時期および回数を最適に設定することで混合気の能動的な形成が可能であることから、これを駆使することで希薄燃焼および高圧縮比化による熱効率向上が期待できる。

最初に均一混合気を用いて希薄燃焼を実現させる圧縮自己着火燃焼を検討した。ガソリンを燃料とした圧縮自己着火燃焼の基本特性を把握するために、自然吸気において吸気温度、空燃比および吸気組成の影響を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 燃焼開始時期は吸気温度により、燃焼期間は空燃比により、それぞれ制御可能である。
- (2) 最大負荷は安定限界線とノッキング限界線の交点で得られ、機関回転速度と圧縮比により一義的に決定される。最大負荷と同一条件で最高熱効率が得られる。

さらに、負のオーバーラップの設定が可能な吸・排気カムを用いて積極的に排気を残留させる大量内部 EGR の効果を検討した結果、以下の知見を得た。

- (3) 自然吸気の結果と同様に、圧縮比が低いほど、機関回転速度が高いほど、大きな負のオーバーラップによる高温化が必要となる。

次に、ガソリン圧縮自己着火燃焼に関し、直噴ガソリンエンジンの燃料噴射時期に対する高い自由度を利用し、以下の三種類の燃料噴射について検討した。

- (a) 燃料の着火性向上効果を期待し、負のオーバーラップ期間中の高温ガス中に噴射を行う負のオーバーラップ期間中噴射
- (b) 均一な混合気を生成するための吸気行程噴射
- (c) 成層混合気を生成し、着火時期制御を目的とした圧縮行程噴射

実験では、噴射の時期や噴射量をパラメータとして検討するとともに、これら燃料噴射を適宜組み合わせることにより圧縮着火燃焼の運転領域拡大を試みた。その結果、以下の知見を得た。

- (4) 負のオーバーラップ期間中の燃料噴射により圧縮自己着火燃焼の希薄限界は大きく拡大する。この際、一般的に混合気の成層化で回避できない NOx の増大は生じない。
- (5) 負のオーバーラップ期間中に全燃料量を噴射する場合と比較し、一部の燃料量を負のオーバーラップ期間中に噴射し、残りを吸気行程に噴射することにより、圧縮自己着火燃焼の希薄限界はさらに拡大するとともに燃費が改善する。

(6) 最良燃費を得るための負のオーバーラップ期間中の噴射量は負荷により異なり、負荷の増加とともに減少する。

直噴ガソリン圧縮自己着火燃焼における諸特性の検討に続き、混合気の成層化による希薄燃焼に関する新しい混合気形成手法を考案し、その燃焼特性の解明を試みた。燃料噴射弁を燃焼室中央に、点火プラグを近くにそれぞれ配置し、従来のウォールガイドコンセプトの特徴である安定領域を広くできる新たな成層燃焼法として循環流コンセプトを考案するとともに、その基本的な特性を検討した結果、以下の知見を得た。

(7) 高圧一流体の燃料噴射弁を用いてピストンキャビティ内に循環流動を励起することで成層混合気を形成する新しいコンセプトを提案した。これにより大量 EGR 下でも安定した燃焼が得られ、NO_x を極めて低いレベルまで低下することができた。

(8) 高い燃料噴射圧力の高圧化により、循環流の形成、気化促進による壁流の防止、および燃焼速度促進による燃焼安定性の確保が可能となる。燃焼安定性確保には 30 MPa 以上の燃圧が必要である。

(9) 燃料消費率は、ピストンキャビティ内およびその上部容積に強い影響を受け、その程度は機関負荷に依存する。

さらに、新たな循環流コンセプト成層燃焼において、ピストンキャビティ容積により良好な燃費が得られる機関負荷が制限される難点を解消するため、大きなキャビティ内に同心円状の小さなキャビティを有するピストンを考案するとともに、その特性を検討した結果、以下の知見を得た。

(10) 低負荷条件で内側キャビティ、高負荷条件で外側キャビティを用いることにより、ひとつのキャビティ形状で、従来の単一キャビティでは実現できなかった広い負荷範囲において低 NO_x で安定した成層燃焼が実現できる。

(11) 内側キャビティにおいても、キャビティ底面および側壁を利用した混合気形成過程が観察されたことから、循環流コンセプトの効果を確認できた。

(12) 内側キャビティを用いた循環流コンセプトにおいても、負荷によって燃費に対する最適な内側キャビティの容積が異なる。

これまでの希薄燃焼に関する燃焼特性の解明に続き、高圧縮比化を行うために高負荷での混合気成層化が耐ノッキング性などの燃焼特性に及ぼす影響を調査した。筒内の混合気成層化を模擬できる一次元ノッキング予測プログラムを開発し、合わせて単気筒エンジンを用いた実験により検証を行うことにより、以下の知見を得た。

(13) 本プログラムにより成層混合気を用いたトレースノック点火時期の進角効果および機関トルク向上効果が予測可能である。

(14) 圧縮比 15 において、燃焼室の中心付近にややリッチな、周辺にやや希薄な成層混合気を形成することにより、1° 程度のトレースノック点火時期の進角効果が得られ、最大トルクが 2~4 パーセント程度向上する。

(15) 圧縮比が低い場合でも、成層混合気の形成は低回転でのブレイグニッション防止に効果がある。

以上本研究により、直噴ガソリンエンジンにおいてサイクル中の燃料噴射時期や噴射回数を自由に設定できる利点を駆使する新たな成層希薄燃焼を提唱し、その燃焼特性を解明するとともに熱効率および全負荷トルクの向上が可能になることを明らかにした。

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	准教授	柴田元

学位論文題名

筒内直接噴射式火花点火機関の熱効率向上に関する研究

(A study on thermal efficiency improvement in direct injection spark ignition engines)

ガソリンエンジンはディーゼルエンジンと比較して熱効率が低い、その要因として火花ノックを回避するために圧縮比を高く取れないことや、三元触媒を前提とした排気浄化のために量論比燃焼を強いられることによるポンプ損失や冷却損失の増大などが挙げられる。本研究は、これらの熱効率低下要因を踏まえ、混合気の能動的な形成が可能な筒内直接噴射式ガソリンエンジン(直噴ガソリンエンジン)による熱効率向上手法の確立を目的としている。

最初に、ガソリンを燃料とした均一圧縮自己着火燃焼の基本特性を検討し、最大負荷および最高熱効率は安定限界線とノッキング限界線の交点で得られることを明らかにしている。さらに、負のオーバーラップの設定が可能な吸・排気カムを用いて大量内部 EGR の効果を検討し、自然吸気と同様に、低圧縮比で高機関回転速度ほど、大きな負のオーバーラップによる高温化が必要となることを示している。

以上の基本特性を踏まえ、直噴化による燃料噴射時期の高い自由度を利用し、負のオーバーラップ期間中噴射、吸気行程噴射、圧縮行程噴射について検討するとともに、これら燃料噴射を適宜組み合わせることにより圧縮着火燃焼の運転領域拡大を試みている。負のオーバーラップ期間中噴射により燃焼の希薄限界は大きく拡大し、一般的に混合気の成層化では回避できない NOx の増大が生じないことを示している。一方、負のオーバーラップ期間中に全燃料量を噴射する場合と比較し、一部の燃料量を負のオーバーラップ期間中に噴射し、残りを吸気行程に噴射することにより、燃焼の希薄限界はさらに拡大するとともに燃費が改善すること、また、最良燃費を得るための負のオーバーラップ期間中の噴射量は負荷の増加とともに減少することを示している。

次に、従来のウォールガイドコンセプトの特徴である安定領域を広くできる新たな成層燃焼法として、高圧一流体の燃料噴射弁を燃焼室中央に配置し、ピストンキャビティ内に循環流動を励起することで成層混合気を形成する循環流コンセプトを考案し、その基本的な特性を検討している。これにより大量 EGR 下でも安定した燃焼が得られ、NOx を極めて低いレベルまで低下するとともに、燃料噴射圧力の高圧化により、循環流の形成、気化促進による壁流の防止、および燃焼速度促進による燃焼安定性の確保が可能となること、および燃焼安定性確保には 30 MPa 以上の燃圧が必要であることを示している。また、燃料消費率はピストンキャビティ内およびその上部容積に強い影響を受け、その程度は機関負荷に依存することを明らかにしている。

さらに、循環流コンセプトにおいて、ピストンキャビティ容積により良好な燃費が得られる機関負荷が制限される難点を解消するため、大きなキャビティ内に同心円状の小さなキャビティを有するピストンを考案し、その特性を検討している。低負荷条件で内側キャビ

ティ、高負荷条件で外側キャビティを用いることにより、ひとつのキャビティ形状で、従来実現できなかった広い負荷範囲において低 NOx で安定した成層燃焼が実現できることを示している。この際、内側キャビティにおいても、キャビティ底面および側壁を利用した混合気形成過程が観察され、循環流コンセプトの効果を確認するとともに、内側キャビティを用いた循環流コンセプトにおいても、負荷によって燃費に対する最適な内側キャビティの容積が異なることを確認している。

これまでの希薄燃焼に関する燃焼特性の解明に続き、筒内の混合気成層化を模擬できる一次元ノッキング予測プログラムを開発し、合わせて単気筒エンジンを用いた実験による検証を行うことにより、高圧縮比化を行うために高負荷での混合気成層化が耐ノッキング性などの燃焼特性に及ぼす影響を調査している。本プログラムにより成層混合気を用いたトレースノック点火時期の進角効果および機関トルク向上効果が予測可能であること、圧縮比 15 において燃焼室の中心付近にややリッチで周辺にやや希薄な成層混合気を形成することにより、1° 程度のトレースノック点火時期の進角効果が得られ、最大トルクが 2~4 パーセント程度向上すること、および圧縮比が低い場合でも、成層混合気の形成は低回転でのブレイグニッション防止に効果があることを明らかにしている。

これを要するに、著者は直噴ガソリンエンジンにおいてサイクル中の燃料噴射時期や噴射回数を自由に設定できる利点を駆使する新たな希薄燃焼法を提唱し、その特性を解明するとともに性能向上が可能になることを明らかにしており、エンジンシステム工学に対して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。