

# 論文題目：小型コージェネレーション用天然ガス予混合圧縮自着火機関に関する研究

著者：大坪 弘幸

研究科、専攻名：工学研究科 機械システム工学専攻

学位記番号：工課 第八号

博士号授与年月日：2009年3月19日

論文の要旨（以下文字サイズ10.5Pで、4000字以内）

石炭、石油と比較してクリーンな燃料であり、一次エネルギーの中東依存度を大幅に低減できる天然ガスの利用を促進すること、CO<sub>2</sub>排出割合の大きい、エネルギー転換部門(発電部門)における大規模火力発電への依存度を低減し、エネルギー利用効率の高い分散型発電設備の普及を図ることが地球温暖化ガスであるCO<sub>2</sub>の排出量削減に有効である。潜在需要の大きい民生部門へのコージェネレーションシステム普及促進には、熱電比の低い(発電効率の高い)、小型の天然ガスコージェネレーションシステム開発が必要である。

HCCI(予混合圧縮自着火)燃焼は高効率、低エミッションを極めて高いレベルで実現可能な燃焼方式であり、世界中の多くのエンジンメーカーや学術機関において研究・開発がなされている。実用化の障害となっているのが、混合気の着火制御の難しさ、着火後の燃焼反応が急激であることに起因する高出力化対応の難しさである。非常に着火性の良い、軽油を燃料とした HCCI 燃焼においては、空気と燃料との混合時間を十分に確保するため、いかにして着火を抑制するかが HCCI 燃焼実現のキーポイントとなっているが、ガソリン HCCI 燃焼においては、オクタン価の高い、つまり自着火性の悪い燃料の着火性をいかに確保するかがポイントとなる。天然ガスにおいては、その主成分がメタンであることから、ガソリンと比較してさらに自着火温度が高く、電気ヒータによる吸気加熱等によって着火性を確保しているのが研究開発の現状であり、このことが実用化へのハードルをさらに高いものとしている。加えて、従来研究においては、試験用の単気筒機関によるものがほとんどであり、市場において多く用いられる多気筒機関において適用を検討された例は少ない。また、コージェネレーションのようなシステムへの HCCI 燃焼機関の搭載を想定した検討はなく、未だに実用化へ向けた提案はなされていない。

そこで、本研究では、小型の天然ガスコージェネレーションシステムへのHCCI燃焼適用について、機関回転速度や吸気温度、圧縮比を系統的に変更し、燃焼成立条件と運転上の課題を明確化し、対応策として、EGRや火花点火を適用し、自着火性確保や気筒間偏差低減による機関性能・排ガスエミッション排出特性の改善効果を検証した。また、得られた知見を元に、システムの運転パターンを模擬した、機関の始動や負荷変更への対応について検討をおこなった。本論文の内容を要約すると以下のとおりである。

第1章では、CO<sub>2</sub>排出量に関し、その推移や、部門別の排出割合、一次エネルギー需要やエネルギー種別の特徴を示した。また、コージェネレーションシステムの特徴や導入状況、課題について示した。従来燃焼と比較してHCCI燃焼の得失を述べ、これまでの研究動向について紹介し、本研究の目的と本論文の構成について示した。

第2章では、天然ガスを燃料とする小型のHCCI燃焼機関を対象とし、吸気温度、圧縮比、機関回転速度が機関性能および排ガスエミッション排出特性におよぼす影響を調べ、各条件における運転可能範囲を明らかにした。機関回転速度の影響については、高空気過剰率での運転では機関回転速度の増加にともなって図示熱効率は低下するが、運転上限に近い低空気過剰率の条件では、機関回転速度増加による図示熱効率の低下は見られないこと、同一空気過剰率であれば、機関回転速度が高いほどNOx排出濃度が低減できることを示した。圧縮比については、圧縮比を高めることにより、運転成立に必要な吸気温度が低減でき、熱効率向上と低NOxを両立可能なこと、吸気温度が同じであれば、高圧縮比ほど、ノッキング発生のために図示出力の最大値は小さくなること、吸気温度および空気過剰率低減により機関の比出力を増加し効率向上を図る際、運転制限の設定により圧縮比の設定値に最適値が存在することを示した。さらに、多気筒機関によるHCCI燃焼運転時に課題となる気筒間の着火時期バラツキは運転時の空気過剰率が小さいほど増加すること、またそれは圧縮比の増加によって低減可能であることを示した。

第3章では、天然ガス予混合気の自着火性確保手段として、排気ガス再循環(EGR)と火花点火の適用について検討をおこなった。EGRについては、開弁期間が連続可変な動弁装置を組み合わせ、EGR適用による混合気の着火特性や機関性能の改善について調査をおこない、EGR手法の得失を明らかにした。その結果、EGR率を高めることで、低い吸気温度においても出力を確保することが可能となるが、図示平均有効圧力や熱効率、NOx、COおよびTHC排出濃度の観点からEGR率には運転条件によって最適値が存在することを示した。EGR手法の違いについても着目し、先立ち吸気開弁をおこなうと、吸気管内には予混合気と燃焼ガスが成層化状態で分布し、EGR率が高いほど吸気弁近傍の燃焼ガス濃度は高く、より上流にまで燃焼ガスが到達するが、吸気管内ガス濃度分布の不均一が機関性能および排気に及ぼす影響は小さいことを示した。外部EGRについては、燃焼反応促進および抑制効果は予混合気温度によって影響を受けることを示した。吸気行程中の排気再開弁についても調査をおこない、図示平均有効圧力が同じであれば、排気再開弁によるEGRを用いたほうが、先立ち吸気開弁に比べて図示熱効率は高く、排気エンタルピーを燃焼改善に効率よく活用でき、安定な着火のために必要な吸気加熱量を低減できることを明らかにした。

また、火花点火を天然ガスHCCI燃焼に組み合わせ、火花点火による自着火誘発を利用した機関の比出力・熱効率の向上、排ガスエミッション低減と同時に、気筒間偏差の低減について検討を実施した。従来火花点火燃焼、火花点火のないHCCI燃焼とあわせて燃焼現象を観察し、火花点火による初期火炎核形成と伝播による火炎の成長が周囲未燃混合気の自着火を促すことを確かめた。火花点火の時期を気筒別に制御することで、運転時吸気温度や、課題である気筒間の着火時期バラツキを大幅に低減でき、比出力や熱効率の向上、排ガスエミッション改善に有効であることを示した。

第4章では、HCCI燃焼機関のコージェネレーションシステムへの適用を想定し、機関の始動、機関回転速度一定の条件での負荷の投入・遮断への対応について検討をおこなった。その結果、電気ヒータによる吸気加熱によっても、無負荷から定格出力までの負荷変更に対応可能であるが、吸気系の熱容量に起因する応答遅れが課題となることを示した。第2

章, 第 3 章で得られた知見を元に, 運転時吸気温度の大幅低減が可能となったことから, 機関冷却水を利用した吸気温調システムを適用することで, 燃焼形態を切り替えながら, 大きな負荷の変更に素早く対応でき, 機関の始動も含め, エンジンシステムとして自立して運転可能であることを実証した. また, ヒートバランスの比較から, 高い空気過剰率での運転が可能となることで燃焼温度が低減し, 排気ガスや機関冷却水への熱損失が従来火花点火燃焼と比較して大幅に低減できることが HCCI 燃焼機関が高い熱効率を有する理由の一つであることを確認した.

本論文において, 電気ヒータのような付随装置に頼ることなく, 低い吸気温度において自着火性を確保すること, 多気筒機関適用の際の気筒間偏差を低減することが天然ガス HCCI 燃焼の実機適用へのポイントであることが明らかとなった.

第 5 章は, 本研究のまとめとし結論を示した.