

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	田中 大樹
論文題目	ガスエンジンにおける自着火過程に対する燃料性状の影響と着火制御に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、産業用天然ガスエンジンについて、燃料性状が多様化する中でさらに熱効率を高めるため、シリンダ内の自己着火現象を支配する因子を明らかにし、燃料性状の影響を緩和する方策を論じた結果をまとめたもので、6章からなっている。</p> <p>第1章では、エネルギー・環境問題の動向、天然ガス資源の利用状況および発電用ガスエンジンの技術動向と課題について整理し、本論文で取り組んだ技術的課題と研究の目的を示した。</p> <p>第2章では、予混合吸気火花点火燃焼における、単体燃料 (H_2, C_2H_6, C_3H_8, $n-C_4H_{10}$, $i-C_4H_{10}$) のノッキングの発生傾向、ならびに天然ガスの主成分である CH_4 をベースとした燃料中の各成分が耐ノック性に及ぼす影響について、試験機関による実験および詳細化学反応動力学計算により考察した。その結果、上記単体燃料の中では、同一初期温度における着火遅れ時間が長い H_2 がもっともノッキングを発生しやすく、その要因として、H_2 の高い比熱比および燃焼速度によって、未燃混合気の温度が上昇しやすいことを明らかにした。また、CH_4 を主成分、H_2, C_2H_6, C_3H_8, $n-C_4H_{10}$, $i-C_4H_{10}$ のいずれかを副成分とする二成分 CH_4 ベース燃料については、副成分の体積割合が小さいときは、CH_4/H_2 がもっともノッキングを起こしにくいことがわかった。H_2 の体積割合が高まると、比熱比の増大、着火遅れ時間の短期化、層流燃焼速度の増大が急速に進み、未燃混合気温度が他の燃料と比べ上昇する。その結果、CH_4/C_2H_6 と比べると早期にエンドガスが自着火しノッキングに至る。以上のように、燃料の化学反応と熱物性を考慮することにより、CH_4 ベース燃料の成分に対する耐ノック性の変化を定性的に説明することができた。</p> <p>第3章では、第2章で得られた知見を活用し、燃料性状が変化したとき、火花点火式ガスエンジンのノッキングを抑制する方法について検討した。H_2, CO_2 を含んだ CH_4 ベース燃料の組成の変化に対する燃焼特性および耐ノック性の変化を試験機関による実験および数値計算により調査し、CH_4 に対し H_2 および CO_2 を同体積割合で添加すると、副成分 ($H_2 + CO_2$) の体積割合に対し燃焼期間およびノッキング強度が変化しないことを示した。その理由として、H_2 および CO_2 の添加による層流燃焼速度の増減効果が打ち消しあうこと、H_2 の着火遅れ時間を短縮する効果と、CO_2 添加が比熱比を低下させ未燃混合気温度の上昇を抑制する効果が、エンドガス自着火に対して正逆に作用することを明らかにした。</p> <p>この知見をもとに、天然ガスの水蒸気改質について化学平衡計算を用いて検討し、低温での水蒸気改質により得られた $CH_4/ H_2/ CO_2$ の三成分燃料は、原料ガスと比</p>			

べてメタン価が増大するとともに、燃料間の変動が大幅に小さくなることを示した。このことにより、天然ガス中の非メタン炭化水素に対する低温での選択的水蒸気改質が、燃料性状が変化したときのノッキングの発生を抑制するために有効であることを示した。

第 4 章では、HCCI（予混合圧縮自着火）燃焼に対する燃料組成の影響に関し、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ 、 $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ の着火過程を詳細化学反応計算により解析した。その結果、 C_2H_6 が以下の特異な着火特性を示すことを明らかにした。

- (1) 初期温度と着火遅れ時間の関係における見かけの活性化エネルギーが高い。
- (2) 着火過程における熱発生率が着火過程の終盤に高くなる。
- (3) 着火遅れ時間の O_2 濃度依存性がきわめて弱い。

コントリビューションマトリックス法を用いた詳細化学反応解析の結果によると、上記(1)と(3)は、着火過程における OH 生成が幅広い温度域で H_2O_2 の分解反応によって支配されているためであること、(2)については、燃料系反応が支配的な比較的低温度域では HO_2 を経由して H_2O_2 が蓄積され、ある程度温度が上昇すると蓄積された H_2O_2 の分解反応によって OH 生成が進むためであることを明らかにした。さらに、 CH_4 を主成分、 H_2 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ および $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ のいずれかを副成分とする二成分 CH_4 ベース燃料の着火特性についても調査し、この場合も、上述の C_2H_6 単体の着火特性が反映されることを示した。

第 5 章では、燃料性状が HCCI エンジンの燃焼変動に及ぼす影響を調査するとともに、第 4 章で明らかになった C_2H_6 の着火特性を活用し、 C_2H_6 を CH_4 に添加することで HCCI エンジンの運転成立範囲の拡大を試みた。試験機関を用いた実験の結果、 CH_4 を主成分、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ 、 $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ のいずれかを副成分とする二成分 CH_4 ベース燃料の中で $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ は、着火時期が変化した際に燃焼変動およびノッキングが発生しにくく、吸気温度または EGR 率により着火時期を制御した場合、もっとも広い範囲で運転が成立することを明らかにした。

第 6 章は結論であり、本論文で得られた結論を整理するとともに、今後の課題について述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、産業用天然ガスエンジンについて、燃料性状が多様化する中でさらに熱効率を高めるため、シリンダ内の自己着火現象を支配する因子を明らかにし、燃料性状の影響を緩和する方策を見出す研究をまとめたもので、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 火花点火機関における燃料性状と耐ノック性との関係について、単体燃料 (H_2 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10}) およびこれらを副成分とした CH_4 ベース燃料を用いた実機試験を行い、化学反応動力学計算により考察を加えた。単体燃料の中では、同一初期温度での着火遅れが長い H_2 が最もノッキングを発生しやすく、高い比熱比と燃焼速度がその原因であることを示した。 CH_4 ベース燃料では、 H_2 のこの性質が、 H_2 の混合割合に依存して耐ノック性を変化させる。
2. CH_4 を主成分、 H_2 と CO_2 を副成分とする燃料を用いた実機試験を行い、 H_2 と CO_2 を同一体積割合で添加すると、副成分 ($H_2 + CO_2$) の体積割合を変えても燃焼期間とノッキング強度が変化しないことを示した。その理由として、 H_2 と CO_2 の層流燃焼速度の増減効果が打ち消し合うこと、 H_2 の着火遅れ短縮効果と CO_2 の未燃混合気温度抑制効果が、エンドガス自着火に対し正逆に作用することを明らかにした。さらに化学平衡計算による検討を行い、ノックに対する燃料性状の影響を軽減する方法として水蒸気改質の有効性を示した。
3. 詳細化学反応動力学計算により、 CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} と空気との混合気の自着火特性を調べ、特に、 C_2H_6 について着火遅れの酸素濃度依存性が弱い、着火過程終盤の熱発生が速い、などの特異な特性を明らかにした。その理由として、 OH 生成が広い温度域で H_2O_2 の分解反応によって支配されること、温度上昇とともに、蓄積された H_2O_2 が分解されることを明らかにした。
4. CH_4 を主成分、 C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} を副成分とする燃料を用い、 $HCCI$ (予混合圧縮自着火) 燃焼による実機運転を行い、前項で示した C_2H_6 の特性が、熱発生時期が遅い場合や EGR (排気再循環) 率を高めた場合の燃焼変動の抑制につながり、 $HCCI$ 機関の運転成立範囲拡大に役立つことを実証した。

以上、本論文は、天然ガスエンジンにおいて燃料性状の影響を明らかにし、高効率な運転を可能とする方法について論じたもので、得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 8 月 19 日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降