

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

田中 大樹

本論文は、多様化する天然ガスの発電用ガスエンジンへの有効利用を目的とし、火花点火式ガスエンジンのノッキングの発生および予混合圧縮自己着火(HCCI)エンジンの運転成立範囲に対する燃料性状の影響を明らかにするとともに、火花点火式ガスエンジンのノッキング抑制と HCCI エンジンの運転成立範囲拡大につながる着火制御に関する研究の成果をまとめたもので、6つの章から構成されている。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的について述べている。エネルギー・環境問題に関する動向、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するとともに、本研究で取り組む技術的課題と研究の目的を示した。

第2章では、水素(H_2)、エタン(C_2H_6)、プロパン(C_3H_8)、ノルマルブタン($n-C_4H_{10}$)、イソブタン($i-C_4H_{10}$)の単体燃料のノッキングの発生傾向について調査し、天然ガスに代表されるメタン(CH_4)ベース燃料中の各組成が耐ノック性に及ぼす影響とその要因について実験および詳細化学反応計算により考察した。その結果、 H_2 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 $n-C_4H_{10}$ 、 $i-C_4H_{10}$ 燃料の中では、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 の高い比熱比と燃焼速度によって、ピストンおよび火炎面により圧縮される未燃ガスの温度が他の燃料よりも上昇しやすいことを示した。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 ベース燃料の耐ノック性について調査し、副燃料の体積割合が小さいと、 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。一方で CH_4/H_2 の場合、体積割合がある程度高まると、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、伝播火炎によって圧縮される未燃ガス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てノッキングに至る。以上の通り、燃料の化学反応と熱物性を考慮することで、 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る。

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の火花点火式ガスエンジンのノッキングの発生を抑制する方法について検討した。まず、 H_2 、二酸化炭素(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実験および数値計算により調査した。その結果、 CH_4 に対し H_2 および CO_2 を同体積割合で添加した場合、副燃料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。その要因として 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ガス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。得られた知見をもとに、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 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{CO}_2$ の三成分燃料は、原料ガスと比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。これは、天然ガス中の重質分の改質により生成された H_2 および CO_2 が副燃料成分として共存することで耐ノック性への影響が相殺されること、改質により燃料間の組成の差異が小さくなることによる。これにより、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明らかにした。

第4章では、 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、着火過程を支配する化学反応機構を調査した。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小さい。

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により、 C_2H_6 の着火過程における OH 生成が幅広い初期温度域で H_2O_2 の分解反応 $\text{H}_2\text{O}_2 + (\text{M}) = \text{OH} + \text{OH} + (\text{M})$ によって支配されており、それが着火特性(1)と(3)の要因であることを明らかにした。着火特性(2)の要因として、 C_2H_6 の着火過程では、比較的低温度域で H_2O_2 が高濃度に蓄積され、ある程度温度が上昇すると H_2O_2 の分解反応による OH 生成が急速に進む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、上述の C_2H_6 単体の着火特性が二成分 CH_4 ベース燃料の着火特性にも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。その結果、 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、吸気温度または排ガス再循環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、残された課題について述べている。