

# 博士論文概要

## 論文題目

LPG-SI エンジンの燃焼特性の把握に基づく  
高効率化に関する研究

A Study on High Efficiency of an LPG-SI Engine  
Based on Understanding of Its Combustion Characteristics

申請者	
みず 水	のり 嶋
Norifumi	Mizushima

--

液化石油ガス(LPG: Liquefied Petroleum Gas)は同一発熱量燃焼時の二酸化炭素排出量がガソリンと比較して10~12%低く、オクタン価が高いことから火花点火(SI: Spark Ignition)エンジンの高効率運転に適している。このため、SIエンジンの燃料として主流であるガソリンの代替としてLPGを使用することは、地球温暖化対策として有効な手段といえる。また、LPGは天然ガス田の随伴ガスから精製される割合が高いため、エネルギーセキュリティの観点からも注目されている。

以上の背景から、近年では液体噴射式のLPG-SIエンジンの技術開発が進み、LPG自動車が諸外国で徐々に普及し始めている。しかしながら、LPG-SIエンジンに関しては、その燃焼特性に基づいた体系的なエンジン性能向上技術に関する報告例はなく、LPGの有するポテンシャルを最大限に活かしたエンジン燃焼制御がなされていないのが現状である。また、日本国内における自動車用LPGの組成に関しては、従来のミキサシステムを前提としたガイドラインが提示されているのみで、液体噴射システムに対して適当とはいえない。

そこで本研究では、排気量 $1997\text{cm}^3$ 、直列4気筒マルチポイントインジェクション(MPI: Multi Point Injection)式ガソリンエンジンの燃料供給系のみをLPG液体噴射システムに変更したLPG-SIエンジンに対して、耐ノック性、燃焼速度、および排出ガス特性といった燃焼特性をレギュラーガソリン(以下、Gasoline)運転時と比較することで明らかにするとともに、その燃焼特性を活かした高効率化手段に関する指針を得た。特に、燃焼速度に関しては定容燃焼器による火炎伝播実験、および詳細な素反応過程を考慮した1次元予混合火炎シミュレーションを実施することで有用な知見を得た。また、組成の異なる各種LPGに対して同時にこれらを検討することで、LPG-SIエンジンの高効率化に適したLPGの組成に関する指針を得た。

本論文は8章から構成されている。

第1章では、本研究の背景としてLPG自動車の現状および問題点について述べた。また、LPG自動車の燃料供給システム、および日本国内におけるLPGの組成についての概要を解説した。さらに、従来の研究およびその問題点について述べた後、本研究の目的および方法を示した。

第2章では、エンジン実験装置、定容燃焼実験装置および実験方法について解説し、実験と併せて実施した数値シミュレーションによる解析方法を示した。

第3章では、エンジン実験にてLPGの耐ノック性、燃焼速度、および排出ガス特性をGasolineと比較することで把握した。耐ノック性についてはGasolineに対して優れ、特に、 $\text{C}_3\text{H}_8$ の質量含有率が約100%のLPG100Pでは、ベースエンジンで適用されている圧縮比10において、エンジンに深刻な損傷を与えるノッキングが発生しないことを明らかにした。また、 $\text{C}_3\text{H}_8$ の質量含有率が約20%のLPG20Pでは、LPG100Pと比較してノック余裕度は小さいが、同条件でMBT(Minimum spark advance for Best Torque)近傍での運転が可能となることを示した。燃焼速度につい

ては、低速低負荷運転の理論空燃比条件においてGasolineの燃焼速度と比較して速いことを確認した。さらに、その効果はLPG100Pの方がLPG20Pよりも大きいことが示された。排出ガス特性については、LPGの優れた気化特性によりTHC排出量を、そして、LPGの高H/C比がもたらす燃焼温度低下の効果によりNO<sub>x</sub>排出量をGasolineに対して低減できることを明らかにした。

第4章では、第3章で確認された燃焼速度向上要因を詳細に把握するため、LPGの主成分であるC<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、*n*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>、および*i*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>とGasolineに対して、定容燃焼器を用いた層流燃焼速度の計測、および1次元予混合火炎シミュレーションによるこれらの燃焼機構の解析を実施し、さらに、層流燃焼速度の差異がSIエンジンの燃焼速度に及ぼす影響を調査した。この結果、理論空燃比でのGasoline火炎においては、以下の～に述べる要因によりC<sub>3</sub>H<sub>8</sub>および*n*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>火炎と比較してH<sub>2</sub>濃度が低くなることを見出した。

- H<sub>2</sub>Oの生成に繋がる*i*-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>分子に対するOHラジカルのアタックによるH引き抜き反応の占める割合が比較的高い
- H<sub>2</sub>生成の起点となる*i*-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>のモル濃度が燃料中の一部である
- i*-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>の燃料の分子量がC<sub>3</sub>H<sub>8</sub>および*n*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>と比べて大きいため、同一温度、圧力、および当量比条件における*i*-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>のモル濃度がC<sub>3</sub>H<sub>8</sub>および*n*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>のモル濃度と比べて低くなる

これにより、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>および*n*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>火炎ではGasoline火炎と比較してH<sub>2</sub>+O → H+OHの素反応が活発化し、H、OHラジカル、そして、連鎖分岐反応により続いて生成されるOラジカル等の活性基が増大することが示された。このため、その他の連鎖反応が活発化し、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>および*n*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>では燃焼速度が速くなることを明確にした。一方、*i*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>においてはその分子の構造上、連鎖反応を活発化させるC<sub>2</sub>系ラジカルの生成に繋がるC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>の生成経路が少ないため、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>および*n*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>と比較して燃焼速度が遅くなることを示した。また、2成分および3成分が混合したLPGの燃焼速度は、各成分単一での燃焼速度がその質量分率に応じて比例的に変化することを実験的に確認した。さらに、これらの燃焼速度の差異は、SIエンジンの低速域における燃焼速度に同等の差異を生じさせることを明らかにした。

第5章では、第3章で確認されたLPGの耐ノック性を活かしたエンジンの高負荷運転における高効率化について述べた。通常、ガソリンエンジンでは高負荷運転領域において出力・トルク性能の向上を最重視しているため、空燃比のリッチ化(エンリッチ制御)により耐ノック性および体積効率の向上を図っている場合がある。これは同時に、触媒の熱劣化抑制のための排気温度の低下も可能となるが、熱効率が悪化する。一方で、LPG-SIエンジンの高負荷運転においては、優れた耐ノック性を活かすことでGasoline運転に対して点火時期を進角することができ、MBT近傍での運転が可能となることを示した。これにより、トルク性能の向上および排気温度の低下が可能となるため、過度なエンリッチ制御を抑制することが

できるとした。この結果、LPG 運転では Gasoline 運転に対して高効率化、および CO、THC 排出量の同時改善が可能であることを明らかにした。

第 6 章では、実用条件下である低速低負荷運転領域において高効率化と低 NO<sub>x</sub> 化を狙い、第 3 章および第 4 章で確認された LPG の高燃焼速度の特性を活かして、EGR 限界の拡大を図った。この結果、LPG 運転では EGR ガス導入時においても第 3 章の結果と同様に燃焼速度が向上するため、燃焼安定性が改善し、Gasoline 運転に対して 3 ~ 5% の EGR 限界の拡大を実現できることを示した。これにより、EGR による 5 ~ 6% の BSEC 改善効果を維持しつつ、NO<sub>x</sub> 排出量は、LPG の高 H/C 比がもたらす燃焼温度低下の効果と併せて、Gasoline 運転に対して約半減できることを見出した。

第 7 章では、低速低負荷運転領域において更なる高効率化を達成するため、エンジンの高圧縮比化による熱効率の向上を図った。通常の SI エンジンにおいてはノッキングが制約となり、圧縮比を高めることが困難であるが、LPG は耐ノック性に優れているため、SI エンジンとしては極めて高い圧縮比が選定可能とる。この結果、LPG20P に対しては圧縮比 (CR : Compression Ratio) 12 まで圧縮比を向上することで、ベースエンジンに対するトルク性能の向上、排出ガス性能の維持、および部分負荷熱効率の向上が可能となり、部分負荷において図示熱効率が約 7% 改善することが示された。また、LPG100P に対しては CR13 まで圧縮比を上げることで、ベースエンジンに対するトルク性能の向上、排出ガス性能の維持、および部分負荷、全負荷ともに熱効率の向上が可能となることが示された。特に、図示熱効率に関しては部分負荷で約 7%、全負荷で約 6 ~ 7% 改善することが確認された。さらに、本研究で使用した試作ピストンに対して燃焼室設計を見直すことで、冷却損失および未燃燃料排出の抑制による更なる高効率化が期待できることを述べた。

第 8 章では第 7 章までの成果を総括し、LPG のような代替燃料を SI エンジンに使用する際には、耐ノック性、燃焼速度、および排出ガス特性といった燃焼特性がガソリンエンジンに対してどのように変化するかを把握した上で、エンジン性能開発を行うことが有効であることを述べた。また、燃焼速度および耐ノック性の両方の観点から、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 含有率の高い燃料を使用するほど、EGR 率の拡大および高圧縮比化を図った際の効果がより大きく得られるため、使用する燃料の自由度が高い液体噴射式 LPG-SI エンジンに対しては、LPG100P が高効率運転に最も適した燃料であると結論づけた。以上より、使用する燃料の物理・化学特性に基づいたエンジンの性能開発が重要となることを述べ、今後は、SI エンジンはもとより CI エンジンも含めた幅広いパワーソースの研究開発にも応用し得る可能性を示した。また、燃料固有の物理特性と燃焼時における化学特性を把握した上で性能開発を計画することで、効率的にその燃料が有するポテンシャルを引き出すことが可能であるとした。