

内 22-37

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

直接噴射 LPG 燃料における
噴霧・燃焼特性に関する研究

Mixture formation and combustion
characteristics of directly injected LPG spray

申 請 者
李 晟旭

Seang-Wock

Lee

機械工学

内燃機関



2002 年 12 月

自動車は、排出ガスによる都市の大気汚染に加えて、石油の大量消費ひいては地球の温暖化等の環境・エネルギー問題を引き起こしている。その対策として、高効率のディーゼルエンジンの排気浄化を一層促進する一方、排出ガス低減技術が高度化しているガソリン車については低燃費化を図ることが急務であるが、これら現行のエンジンの改善のみでは、課題の解決が困難な状況にある。そこで、その対策の一助として、各種の代替燃料エンジン、電気自動車、ハイブリッドシステムなどの新エネルギー、新動力システムの開発が進められている。

代替燃料のなかで特にタクシー用燃料として広く利用されているLPGは、低公害性やエンジンの静粛性・低振動性に優れており、環境負荷が相対的に低く、化石燃料の中では天然ガスとともにクリーンエネルギーとして位置づけられている。さらに、全国に約2000箇所のLPGスタンドがあり供給面で利便性を持っており、燃料の特性を適切に活用すれば、ディーゼル代替エンジンとして混合気形成の促進やディーゼル微粒子の抑制が可能になるものと期待される。しかしながら、予混合火花点火燃焼方式をとっている現在のLPGエンジン車は、ノックの発生を防ぐため、圧縮比が制限され燃費の改善が難しく、シリンダボアの大径化も制約される傾向がある。

そこで本研究では、経済性、低公害性、運転性の面でディーゼル自動車と比較して同等以上の性能を備えた車両総重量8トン級の筒内直接噴射LPGエンジンを対象とし、蒸発を伴う燃料噴霧の混合気形成と燃焼過程を明確にして、有用な具体的設計指針を得ることを目的とした。研究に当たっては、シリンダ内におけるLPG噴霧と混合気の挙動、燃焼メカニズムをレーザ計測技術と数値流体シミュレーションモデルを用いて究明した。本論文は全6章により構成されており、次にその内容について述べる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べる。すなわち、これまでに開発されてきた燃料噴霧に関する計測法、代替燃料エンジンの開発、シミュレーションモデルの開発の動向について概説する。また、研究の方法と概要について述べ、本論文の意義を明確にする。

第2章では、実験装置と方法について述べる。まず、混合気形成過程に関連する重要因子であるペネトレーションと噴霧広がり角および気相部の分布などに注目し、それらを測定するためのシュリーレン法、シャドウ法、拡大撮影法、レーザ散乱光、LIF法などの計測装置とその原理について説明する。次に、より実機関に近い燃焼条件を再現するため、定容容器内でエチレン混合気の燃焼熱を用いて高温・高圧場を作り出すための予備実験、燃料の噴射量および噴射率測定、LIF計測のための蛍光剤の選定実験、噴射システムなどについて述べる。

第3章では、LPGエンジンにおける噴霧の基本特性を燃料液滴の微粒化、蒸発、混合気形成、着火に至る噴霧形成メカニズムを明らかにした。LPGの非定常噴霧に対し、前述したような各種光学方法を適用して気・液相挙動および噴霧

に及ぼす各種因子について調べ次のような知見が得られた。

常温常圧での噴霧計測結果からLPG燃料はディーゼル燃料と比べて、噴霧広がり角と幅が広く、噴霧のペネトレーションは短くなる傾向となった。また、高温・高圧条件では、蒸発が促進される反面、高圧による貫通力の低下が著しい。実機の燃焼室を模擬した衝突板による衝突噴霧では、LPG混合気が衝突板の底面を沿って移動し、点火プラグまで確実に到達することが確認された。さらに、ブタンとプロパンの2成分燃料であるLPGをそれぞれの成分別に噴霧計測をした結果、密度、沸点、粘度が高いプロパンの運動エネルギーおよび粒径が大きくなり、噴霧ペネトレーションもプロパンより長くなる傾向が認められた。また、燃料の温度の性能に及ぼす影響が大きいことから、その原因を調べた結果、燃料の温度が高くなると噴霧の広がり角と幅が広くなり、噴霧のペネトレーションと速度が落ちることが高負荷における性能低下の原因であることが判明した。

第4章では、直接噴射式LPG成層燃焼において燃焼過程を明らかにするために定容燃焼器内に燃焼が可能な条件を形成し、燃焼生成物であるOHラジカルと輝炎、そして筒内圧力変化からの熱発生率の計測を行った結果について述べる。さらに、燃焼後の排気ガス分析により、雰囲気条件、EGR率、噴射圧などの各種因子が燃焼および排気ガスに及ぼす影響を調べ、次のような結果が得られた。

LPG噴霧燃焼におけるOHラジカルは、点火プラグ付近で生成され、噴霧下流に広がる傾向があり、火炎の温度が高く、当量比1.0付近で多く発生し、点火時期によって燃焼が大きく変わる傾向が確認された。衝突噴霧燃焼ではOHが点火栓から発生し、燃焼室に広がった後、衝突壁の底面から輝炎が多く発生したが、これはキャビティ底面で、噴霧の運動量の減衰による空気導入の低下、燃料の蒸発潜熱による温度低下、燃料の付着などが原因と考えられる。また、排気ガス分析からは、EGRによるNO_x低減効果と噴射圧による燃焼効率の向上が確認された。

第5章では、エンジン内のガス流動を記述する3次元CFDソフトとして広く用いられているKIVA-3コードを用い、高温高圧場に噴射された噴霧を対象に数値計算を行った。推算式により計算したLPGの物性値とディーゼル噴霧の改良モデルであるWAVEモデルを組み込み、実験結果との比較により燃料噴霧の液滴と蒸気挙動、濃度分布など定量的に調べた結果、次のような知見を得た。燃料の物性値が噴霧特性への影響をシミュレートした結果、燃料の密度、表面張力および粘性については、値が小さいほど微粒化が進み、混合気の希薄化を促進する効果がある。燃料の蒸気圧が低いほど微粒化による蒸発が進み、過濃になる傾向があるため、適切な混合気の形成に当たっては、蒸気圧特性を制御する必要があると考えられる。

高速回転低負荷領域での成層燃焼における効率低下は混合気が点火プラグまで届かないことが原因であると判断され、その対策としては、噴射圧力を上げるこ

とにより液滴の蒸発を促進して雰囲気との混合気形成を改善することが最も有効な手段であると考えられる。さらに、ノックを回避するため圧縮比を9.0と低くした燃焼室では筒内温度と圧力が低減したため、性能が低下した。また、混合気形成の改善を狙いとしてキャピティ容積を減らした燃焼室では、当量比3.0以上の濃い領域の増加と潜熱による点火栓周辺での温度が低下したため燃焼悪化をもたらした。そこで、燃焼室形状の代わりに噴霧自信が持つ分散性や貫通力を利用したスリットノズルや噴射方向などの変更による計算も行い、性能改善の可能性を試みた。

直接噴射式エンジンでは、有害排気成分であるHCやNO_xの生成過程についても不明な点が多く、具体的な低減策も講じられていないのが現状である。そこで、上記のシミュレーションモデルにより確実な着火と安定した燃焼を得るための条件を追究するとともに、排出ガス成分の生成メカニズムを理論的に究明することを試みた。具体的には、数値流体モデルにLPGの燃焼反応を含む反応速度論モデルを組み込み、直接噴射LPGの混合気形成、着火・燃焼特性を記述するモデルとした。これにより、エンジンの設計指針を得るとともに、排出物の低減のためのEGRの効果を予測し、NO_x対策の可能性を確認した。

第6章では本研究で得られた結果を総括し、エンジン内に噴射されたLPG噴霧とその燃焼特性について総合的に考察する。この研究により、内燃機関のエンジン燃焼室のみならず、様々な燃焼器具における噴霧燃焼の有益な情報と噴射システムの開発およびLPGエンジン開発に対する有効性が確認された。

以上より、LPG筒内直噴エンジンは小・中型トラック用ディーゼルエンジンの代替となりうる低公害エンジンとしてのポテンシャルを有するものと結論づけられる。また、エンジン内の噴霧や燃焼過程を解明する計測と数値予測に関する手法を確立することができたが、これは新型エンジンの開発において有用な設計情報を提供するものと考えられる。すなわち、本研究により得られた知見は筒内直接噴射火花点火方式LPGエンジンの燃焼・排出ガス改善にとどまらず、各種の代替燃料を用いた低公害・高効率エンジンにおいても広く活用とされるものである。