

内合22-74

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文審査報告書

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

2003 年 3 月

自動車は、排出ガスによる大気汚染に加えて、石油の大量消費、ひいては地球の温暖化に関わる CO₂ の排出等の環境・エネルギー問題の主要因とされ、その対策が喫緊の課題とされている。ディーゼル車は燃料経済性に優れている反面、その固有の燃焼特性に起因して、大気汚染の原因となる NO_x と粒子状物質を多く排出する。これらの成分については、燃焼技術のみで大幅に低減することはきわめて難しいのが現状であり、その対策として、各種の代替燃料を用いた新たな燃焼方式の開発・実用化が大いに期待されている。

自動車用代替燃料のなかで、タクシー用燃料として広く利用されている液化石油ガス (LPG) は、天然ガスとともにクリーンな燃料とされている。しかも、わが国では全国に約 2000 箇所ある LPG スタンドの利便性もあり、有力な軽油に代わる低公害燃料となり得る可能性がある。しかしながら、LPG エンジン通常予混合火花点火燃焼方式をとっており、ノック防止の観点から、圧縮比が制限されるため燃費の改善が難しく、エンジンの大型化も制約されているのが実情である。

そこで本論文は、高効率化と低公害化をねらいとして、LPG エンジンに直接噴射方式を適用することを試み、蒸発を伴う LPG 噴霧の成層混合気の形成とその燃焼過程を実験と理論の両面から明らかにし、さらに直接噴射 LPG エンジンの燃焼システムの設計指針を具体的に与えることを目的としている。

本論文は全 7 章により構成されている。

第 1 章では、序論として研究の背景と目的、意義について述べ、これまでに利用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状況および噴霧燃焼の数値シミュレーションモデルの開発動向について概説している。さらに、論文の全体を要約している。

第 2 章では、研究に用いた実験装置と方法について説明している。まず、混合気形成過程の重要因子である噴霧の到達距離やその広がり角、気相部の分布に注目し、それらを測定するためのシュリーレン法、シャドウグラフ法、拡大撮影法、レーザ散乱光法、レーザ誘起蛍光法 (LIF 法) などの計測方法について詳述している。また、定容容器内で希薄なエチレン混合気の燃焼を行ってエンジン内の高温・高圧場を再現する方法について説明し、さらに LPG の噴射システムと噴射率の測定結果について触れている。

第 3 章では、LPG エンジンにおける燃料噴霧の基本特性として、燃料液滴の微粒化、蒸発、混合気形成さらに着火に至るメカニズムを明らかにしている。実験では、LPG の非定常噴霧に対して前章で述べた各種光学方法を適用し、気・液相の挙動と噴霧特性を支配する各種因子について調べた結果、噴射された LPG は、常温・常圧場ではディーゼル軽油と比べて噴霧の広がり角が広く、噴霧の到達距離が短くなる特性があることを見出している。一方、高温・高密度条件では、蒸発が促進される反面、周囲気体の抗力により、到達距離が著しく低下する傾向

があることを明らかにしている。

つぎに、実機の燃焼室壁を模擬した衝突板による衝突噴霧実験を行い、LPG混合気が衝突板の底面を沿って移動しながら可燃混合気を形成し、点火プラグまで確実に到達することを確認している。また、LPGを構成するブタンとプロパンの噴霧を比較した結果、密度、沸点、粘度が高いブタンの方が噴射による運動量が大きく、噴霧の粒径も大きいため、到達距離が長くなる傾向があることを見出している。

さらに、LPGエンジンでは燃料温度がエンジン性能に及ぼす影響が大きいことが経験されていることから、その原因を調べている。その結果、高負荷において燃料温度が高くなる条件では、噴霧の蒸発が促進され、その広がり角と幅が大きくなり、噴霧の速度と到達距離が低下することを確認し、これが高負荷での性能低下の原因であるとしている。

第4章では、直接噴射されたLPG噴霧の成層燃焼過程を明らかにするため、定容燃焼器内において高温・高圧条件を再現し、燃焼生成物であるOHラジカルと輝炎を計測した結果および燃焼圧力に基づいて熱発生率を解析した結果について述べている。さらに、燃焼ガスの分析により、点火時期、雰囲気条件、EGR率、噴射圧などの各種因子が燃焼と排出ガスに及ぼす影響について調べ、次のような結果を得ている。すなわち、LPG噴霧の火花点火燃焼では、OHラジカルは点火プラグ付近でまず生成され、噴霧下流に広がる傾向があること、火炎の温度が高く、当量比1.0付近で多く発生すること、さらに点火時期によって燃焼形態が大きく変わることを確認している。

また、衝突噴霧の燃焼では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することを見出している。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であるとしている。さらに、排気分析から、排気再循環(EGR)によるNO_xの低減効果と噴射圧の高圧化による燃焼効率の向上が同時に達成されることを確認している。

第5章では、エンジン内のガス流動、混合気形成および燃焼過程を記述する3次元数値流体プログラムとして広く利用されているKIVA-3コードにより、高温・高圧場に噴射された各種燃料の噴霧を対象に数値計算を行った結果について述べている。同コードの利用に当たっては、推算式により求めた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、実験結果との比較を通じて燃料噴霧の液滴、蒸気挙動、濃度分布などの定量的な予測を可能にしている。

つぎに、このモデルを用いて燃料の重要な物性値である密度、表面張力および粘性の影響について調べた結果、それらの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ことを明らかにしている。その一方で、燃料の蒸

気圧が低いほど微粒化と蒸発が進み、混合気がかえって過濃になる傾向があるため、蒸気圧特性を適切に制御する必要があるとしている。

第6章では、LPGエンジンを対象に、前章で構築した数値シミュレーションコードにLPG混合気の燃焼反応を含む反応速度論モデルを組み込み、混合気形成と点火・燃焼特性を記述するモデルとし、これにより、確実な着火と安定した燃焼を得るための燃焼系の最適化を行った結果について述べている。具体的には、エンジンの高速低負荷条件で生じる性能低下は、混合気が点火プラグまで到達しないことが原因であることを明らかにし、その対策として、噴射圧力を上げることにより噴霧の貫徹力を高めることが最も有効な手段であるとしている。

また、燃焼室形状の適正化によって、混合気形成を制御してノックを回避するとともに、安定な点火と燃焼を実現してエンジン性能を確保し得ることを見出している。さらに、直接噴射LPGエンジンにおけるHCやNO_xの生成メカニズムを理論的に究明し、EGRがNO_x低減対策として有用であることを確認している。

第7章では、エンジン内に噴射されたLPGの噴霧・燃焼特性について得られた知見を包括的に述べ、それに基づくエンジンの設計指針について具体的に提案し、直接噴射LPG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得る低公害エンジンとして高いポテンシャルを有するとしている。さらに、本研究の成果を踏まえ、今後の研究の発展性について考察している。

以上、本論文は、各種計測法と数値予測モデルを用いて、エンジン内に噴射されたLPG噴霧・燃焼特性を解明するとともに、直接噴射LPGエンジンの開発において有用な設計指針を具体的に提供したものとして高く評価される。また、本研究により得られた知見は、各種の代替燃料を用いた低公害・高効率エンジンの開発に当たっても広く活用し得るものである。よって、エンジン燃焼工学の発展に大きく寄与するばかりでなく、高効率化と低公害化の要請に応える新しい燃焼技術を具体的に提示した点で工業的価値も高く、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2003年3月

審査員 (主査)	早稲田大学教授	大聖 泰弘
	早稲田大学教授 工学博士(早稲田大学)	大田 英輔
	早稲田大学教授	永田 勝也
	早稲田大学教授 工学博士(早稲田大学)	勝田 正文
	早稲田大学助教授 工学博士(早稲田大学)	草鹿 仁