

# 第1章

# 序論

---

## 1.1 研究の背景と目的

環境問題は今や世界的な関心事であり，気候変動枠組条約締約国会議（COP）でも温室効果ガスの排出抑制に関して盛んな議論がなされている．日本においては，自動車，特にディーゼル自動車からの排出ガスによる大気汚染が依然として深刻な状況にあり，1978年以来の規制強化となる乗用車を含むガソリン，LPG燃料車について大幅な低減に加えて，ディーゼル自動車の排出ガス低減対策が示された<sup>(1)</sup>．

自動車によるオゾン， $\text{NO}_x$ ，SPM などにかかわる地域・都市型の環境問題，オイルショックへの備え，輸入原油の削減，ガソリン・軽油の節約などの代替燃料・省エネルギー問題および  $\text{CO}_2$  などにかかわる地球温暖化問題など，三つの技術課題の解決が求められている．これらの技術課題に対しては，第一に，ディーゼルエンジンのローエミッション化をいっそう促進し，新長期排出ガス規制値をクリアして，速やかに新型車の導入を図ることが重要であり，第二には，現行ガソリン車の省エネルギー化，ローエミッション化（LEV，ULEV）を図ることが緊要である．しかし，これら現行のディーゼルエンジン，ガソリンエンジンの改善のみでは，三つの技術課題は解決できない．なぜならば，現行のレシプロエンジンは，燃料を石油に依存しており，自動車による大気汚染が進んだ地域・都市における環境問題を速やかに解消できないからである．それらの補完的な対応策として，代替燃料エンジン，電気自動車，ハイブリッドシステムおよびセラミックガスタービンなどの新エネルギー，新エンジンシステムの車社会への開発導入が不可欠の課題となっている<sup>(2)</sup>．

そのうち，タクシー用燃料として広く利用されているLPGは，排出ガスの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小さく，化石エネルギーの中では液化天然ガス（LNG）とともにクリーンエネルギーとしても位置づけ

られるとしている。さらに、全国に約 2000 箇所のスタンドがあるため、供給面で利便性を持っており、このような状況にあって、燃料特性を適切に活用すれば、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<sup>(3)</sup>。

しかし、これまで徐々に普及してきた小型の商用車は予混合火花点火燃焼方式であり、中型以上の商用車に関しては依然としてディーゼル自動車を経済性、運転性に優れていることから代替エネルギー自動車の普及が進展しなかった。そこで LPG の筒内直接噴射方式により、中低負荷域を成層燃焼、高負荷では希薄燃焼による高効率化を図ることが考えられるが、シリンダ内における LPG 噴霧とその混合気の挙動や燃焼過程には不明な点が多く、このことが高効率 LPG エンジンの開発を困難にしているのが現状である。

このような背景から、本研究では、中型以上の商用車のうち、車両総重量 8 トン級の中型商用車について経済性、低公害性、運転性等、ディーゼル自動車に比較して同等以上の性能を備えた LPG 自動車を対象にその噴霧および燃焼を実験および数値解析により定量的に調べ、これらによって高効率 LPG エンジンの開発を支援することを目的とした。この目的を達成するために行った研究項目は次のとおりである。

- 1) 筒内噴射火花点火方式 LPG エンジンにおける噴霧および燃焼の基本特性を各種光学的方法を使って調査する。その結果から、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する。
- 2) 実験から得られたデータをもとに数値解析プログラムにより燃料噴霧をモデル化し、実験との検証を行い、燃料液滴の挙動や蒸発特性、混合気形成などを実験および数値シミュレーションの両面から定量的かつ系統的に調べる。
- 3) 上記の基本的実験および数値計算により得られた知見をもとに、各運転条件での混合気形成および燃焼を最適化するための方法を具体的に提示する。それを実機に適用し熱効率向上と排出ガス低減の効果を明らかにする。

1.2 従来の研究

1.2.1 可視化に関する従来の研究

ディーゼル機関および成層燃焼機関では，燃料噴霧の特性が燃焼や有害排物質の生成に多大な影響を及ぼす因子であり，噴霧特性および混合気形成を最適化するための数多くの研究が行われている．表 1.1 に示すように，レーザによる流体計測技術は幾何光学，散乱・分光学の原理に基づく手法に大別され，それぞれ対象とする測定量に応じて使い分けがなされている．

表 1.1 レーザを利用した各種流体計測法とその特徴<sup>(4)</sup>

原理	手 法	レーザ	測定対象	特 徴		
幾何光学	シャドウグラフ	He-Ne	温度・圧力	調整簡単，密度変化の輪郭の可視化が容易		
	シュリーレン	He-Ne	温度・圧力	衝撃波，境界層など密度こう配の大きな場に効果大		
散乱・分光学	吸収	トモグラフィ	He-Ne,色素	温度・濃度	三次元計測可能，温度と濃度の同時計測可能	
	弾性散乱	ドップラ	局所 LDV	He-Ne, Ar	流速	分解能大，乱流，混和流の測定に有利
			イメージシステム	Ar	流速	流速の二次元分布の測定可能，等速度線の可視化容易
		LDV				
		レーレー散乱法	Ar	温度・圧力	散乱光弱く，ミー散乱の影響あり	
	非弾性散乱	ラマン散乱法	Ar, YAG	温度・濃度	高分解能計測，単波長で多成分系の測定可，散乱光弱い	
蛍光法		色素	温度・濃度	高分解能計測，CARS法に比べ低濃度測定に有効		
非線形効果	コヒーレント反ストークスラマン散乱 CARS 法	YAG+色素	温度・濃度	高分解能計測，レーレー，ラマン散乱に比べ，散乱光強く SN 比大		

(1) レーザシート法

噴霧内部の構造や燃料液滴の挙動を調べるには，レーザシートを噴霧断面に照射したときの散乱光を観測する手法が有効である<sup>(6)~(8)</sup>．これによって噴霧内部の構造や燃料の

空間分布，その時間変化，噴霧周辺の空気流動と噴霧運動の相互作用などを明らかにすることができる．雰囲気圧力と温度に応じて噴霧構造が変化すると知られており，筒内噴射ガソリンエンジンではこの特性を利用して混合制御を行っている．特に，吸気行程噴射に相当する常圧の条件では均一混合を実現する広い分散構造の噴霧が，圧縮行程噴射に対応する条件では層状混合を狙いにするコンパクトな構造の噴霧が形成される<sup>(5)</sup>．

### (2) 透過光減衰法

透過光減衰法は，噴霧内の局所液滴密度と噴霧全体のザウタ平均粒径を求めるために用いられ，高密度域への適用範囲が最も広い手法の 1 つであり<sup>(9)~(13)</sup>，光学系が簡単であるという利点がある．粒径  $D$ ，数密度  $N$  の粒子群の中を平行光が通過するときの減衰率は，ランバート ベーアの法則(Lambert-Beer law)によって次式のように表される．

$$I/I_0 = \exp(-Q_{\text{exp}} \mathbf{p} \cdot D^2 NL/4)$$

ここで， $I_0$ ：入射光強度， $I$ ：透過光強度， $I/I_0$ ：減衰率， $Q_{\text{exp}}$ ：減衰係数， $L$ ：光路長である．この関係は，多重散乱の影響を無視できる条件で成立する．燃料液滴の場合，特定の波長帯以外では吸収による減衰を無視し，散乱だけを考慮すればよく，減衰係数（散乱係数）はミーの理論によって粒径パラメータ $(\mathbf{p} \cdot D/\lambda, \lambda$ ：波長)と屈折率の関数で与えられる．

### (3) 位相ドップラ法 (PDPA)

位相ドップラ法 (PDPA：Phase Doppler Particle Analysis)は，二本のレーザビームの交点を通る粒子の散乱光を干渉させて得られるバースト信号の周波数（ドップラ）が流速に比例することに基づく計測である．ドップラ周波数  $f_d$  は次式によって与えられる．

$$f_d = 2v \sin \theta$$

さらに，ドップラバースト信号を 2 方向から検出したときの位相差から球形仮定によって粒径を算出する．位相という光減衰の影響を受けにくい情報を用いるため比較的高密度域まで適用が可能であるが，計測点に複数の粒子が存在しないことが計測の前提であり，噴霧の根元付近のように液滴密度がきわめて高い領域への適用は困難である．局所の時系列情報を直接求めるため，噴霧内部の空間的，時間的特性を詳細に解析することが可能である．<sup>(14)~(17)</sup>

### (4) シュリーレンとシャドウグラフ

シュリーレン(Schlieren Photography)は，場の密度勾配に伴う屈折率の変化をその中を通過する平行光のずれとしてとらえる撮影法である．透過光の集光部にナイフエッジを

置き，平行光からはずれた光をカットすることによってスクリーン上の画像に場の密度勾配に起因する光の濃淡が与えられる．また，ナイフエッジを取り除けば，画像の濃淡は密度勾配の変化に対応するものになる（シャドウグラフ法）．これらの撮影法は従来から，燃料蒸気の挙動<sup>(18)~(21)</sup>，着火誘導期の火炎核形成，ノッキング発生時の圧力波伝播，火炎面の乱れ具合など<sup>(22)</sup>，直接撮影することが困難な現象を可視化するために活用されてきた．得られる情報が光路上の積算値であること，定量的な解析が困難であることなどの問題もあるが，不可視の現象を定性的，直感的に理解するためには容易で効果的な手法である．蒸発噴霧に対し，シュリーレン・シャドウグラフ法と背景光撮影法による撮影結果を比較することによって噴霧の液相部と気相部を分離してとらえ，その蒸発特性を明らかにすることができる．

### (5) レーザ誘起蛍光法

レーザ誘起蛍光法(以下 LIF 法：Laser Induced Fluorescence Method)は，強力なレーザ光によって電子励起された化学種が不順位に遷移する際に発する蛍光を検出する手法である．レーザの波長を化学種に固有の吸収帯にチューニングすると，この化学種だけを選択的に発光させることができる<sup>(23)</sup>．LIF 法を局所的な混合気濃度の計測に適用する場合，予め燃料に蛍光剤を添加しておき，この燃料を供給した場にレーザシートを照射してこの断面上の燃料濃度分布に対応する蛍光強度分布をとらえるものである．この蛍光は微弱で紫外域にあることも多いため，撮影に際してはイメージインテンシファイアによって光増幅を行うことが必要である．蛍光の放射過程は温度・圧力依存性が高いため，燃焼場において蛍光強度から定量的な情報を得ることは困難である．しかし，予め燃料濃度と蛍光強度の関係に対する温度と圧力の依存性を検定しておけば定量的な燃料濃度を求めることができる．LIF 法による混合気計測の応用として，燃料の気相と液相を分離して検出することができるレーザ誘起エキサイプレクス蛍光法（LIEF 法：Laser Induced Exciplex Fluorescence）がある<sup>(24)</sup>．これは，特定の蛍光剤が気相では単体として励起されるが，分子間の衝突確率が高い液相では他の分子と励起錯体（エキサイプレクス）を形成し，両者の蛍光波長が異なるという特徴を持つことを利用している<sup>(25)</sup>．

### (6) 火炎発光の計測

エンジン燃焼で観測される火炎発光には，  
燃焼生成物  $H_2O$ ， $CO_2$ ， $CO$  などの振動・回転準位の遷移に伴い，赤外域から可視波長域にかけて離散的に放射される熱発光

赤外域から可視域にかけて連続的に存在するすすの固体熱放射

燃焼反応の過程で生成する活性化学種 OH, CH, C<sub>2</sub> などの電子順位の遷移に伴い, 可視短波長域から紫外域にかけて離散的に発せられる化学発光

CO の燃焼過程の CO と O の再結合反応によって, 可視域から紫外域にかけて連続的に発せられる化学発光

などの成分が含まれている<sup>(26)~(30)</sup>. ディーゼル燃焼で観測される揮炎発光の主成分である固体熱放射は直接撮影するのに十分な輝度をもっており, 従来からその観測が行われている. それ以外の発光は低輝度あるいは不可視であるため, 予め光増幅, 波長変換しない限り撮影することは困難である. エンジンの燃焼解析では, 火炎の挙動を明らかにするため火炎発光を利用することが多いが, 特定の化学種の発光を燃焼反応の進行状況と関連づけて燃焼過程を追跡しようというアプローチも見られる. 一方, レーザシートを用いた PLIF 法 (PLIF 法: Planer LIF) によって燃焼反応の過程で生成する種々の化学種を検出し, 火炎内部の燃焼状況を調べる手法が注目されている. しかし, 蛍光収率の温度・圧力依存性が大きいいため, エンジン内の複雑な燃焼場では定性的な計測にとどまっているが, バーナ火炎では CH, OH, NO の定量濃度計測が行えるレベルにある<sup>(31)~(33)</sup>.

### 1.2.2 高効率・低公害エンジンに関する従来の研究

LPG エンジンに適合しうる高効率化技術として最近注目されているガソリン筒内直直接噴射火花点火エンジンと LPG エンジンに関する従来の研究について述べる.

#### (1) 直噴火花点火エンジンに関する研究

高効率を狙いとしてリーンバーンエンジンの研究・開発が行われてきたが, 均質予混合方式では可燃限界の制約により限界の空燃比(A/F) が低く, 大きな熱効率の改善が得られない. そこで点火栓付近に可燃混合気を形成し, オーバーオールでの A/F を高めることを目的とした直噴火花点火機関の研究がなされてきている. つまり, 低負荷では圧縮行程噴射による成層, 高負荷では吸気行程噴射での均質と燃焼形態を切り替えることにより, 燃費と出力の向上を実現している. 近年の研究開発では, 成層燃焼領域の拡大, 排気エミッションの低減など, その完成度を高めるものとなっている. 燃料に関しては, ガソリンのみであり, 他の燃料についての報告例は見られない. 以下に, 直噴火花点火エンジンに関する研究動向をまとめる.

・混合気形成...実用化されている直噴ガソリンエンジンの混合気形成は、噴霧が適度に混合を進行させる時間とスペースを設けるため、ノズルと点火栓を離し、噴霧をピストンキャビティに向かって噴射し、スワールやタンブルなどの比較的強い空気流動を利用して混合気を点火栓方向に導く方法がとられている。ピストンキャビティは、利用する空気流動により様々な形状のものがある。

この他に新しい混合気形成のコンセプトとして強い空気流動を用いず、噴霧の貫徹力とピストンキャビティのみにより混合気を点火栓に導く手法で、冷却損失の低減により従来型直噴ガソリンエンジンに対して燃費を向上させることができる。この方式では、空気導入に優れた扁平で扇形に広がる噴霧を形成するスリットノズルを用いることにより均質な混合気塊を形成し、スワールノズルの欠点である混合気塊の濃度ムラによるすすとHCの排出を抑制している。その他の新たなコンセプトとしては、シリンダ中央に配置したノズルから燃料をシリンダ軸方向に噴射し、スワールに代表される筒内流動の構造の制御によって燃料の分散を制御する方式が検討されている。また、直噴化による混合の自由を利用した、2段混合によるノッキング抑制手法が報告されている。これは、吸気行程中の少量の燃料噴射によりごく薄い混合気を形成し、残りの燃料を圧縮行程後半に噴射することにより、ノッキング前駆反応を抑制するものである<sup>(2)</sup>。

・排出気ガス対策...混合気の成層化により増大したNO<sub>x</sub>の対策は、主に大量EGRとリーンNO<sub>x</sub>触媒の双方により行われ、それらの研究報告が多く見受けられる。直噴火花点火機関におけるEGRは、NO<sub>x</sub>を抑制するだけでなく、オーバーリーンぎみの混合気塊周辺への火炎伝播を高温EGRガスに伴う霧囲気温度の上昇により促進しHCを抑制する効果を持つ。また、予混合方式に比べ低い排気温度を上昇させ、触媒の活性化を促進させる。リーン触媒に関して、三菱自動車工業が採用した選択還元型と、トヨタ自動車採用したNO<sub>x</sub>トラップ型を比較し、耐サルファの点で選択還元が優れ、浄化率の点でNO<sub>x</sub>トラップ型が優れるという報告例がある。LPGへの適応を考えた場合、LPGがサルファ分を含まないことから、NO<sub>x</sub>トラップ型が適していると言える<sup>(1)</sup>。

・エンジン制御...触媒の性能向上のためのエンジン制御技術の研究が継続して進められている。燃料噴射量の制御やアイドル回転、空燃比、点火時期へのニューラルネットワークによるフィードフォワード制御を適用した例など、現代制御理論を用い制御精度の大幅な向上を追求したものが見受けられる。また、触媒の低温活性の向上を目的として、通常の吸気行程噴射による成層燃焼の後、膨張行程に再び燃料を噴射し燃焼させ排

気温度を高めるといふ、2 段燃焼による手法が報告されている。また、運動性を損なうことなく燃費を向上させるために、空気量、EGR 量、燃料噴射量の総合的なトルク制御が提案されている。

### (2) LPG エンジンに関する研究

日本においては、ディーゼル車に代わる低公害の貨物輸送手段として LPGトラックの普及が進んでおり、積載量 1.5~ 2.0 t のトラックを中心として各メーカーから車種が揃えられている。それらのエンジンの多くはタクシーや小型トラック用のガソリンエンジンを LPG 仕様に改造したもので、一部にボア 100mm を越えるディーゼルエンジンベースのものも見られる。燃料供給は、電子制御ミキサー方式であり、空燃比は量論比に制御される。最近では、希薄燃焼方式を採用し、LPG エンジンの適用範囲をさらに拡大した例が見られる。これらの例を図 1.1 に示す。



図 1.1 各種 LPG 車両

平成 11 年 10 月に自動車に対する高圧ガス保安法の一部適用除外が決まり、LPG を加圧した状態での燃料供給が可能となった。これに伴い燃料の昇圧が要求されるマルチポイント噴射(MPI)方式の LPG エンジンへの適用が可能となり、LPG 液状 MPI 方式の乗用車が実用化されている。今後、国内 LPG トラックの燃料供給にも同様な適用が行われるものと予想される<sup>(1)</sup>。

海外においては、数年前より LPG の液状およびガス体 MPI 方式を採用したエンジンの開発例があり、乗用車およびトラック・バスにおいて実用化されている。それに伴い、LPG の液状およびガス状噴射の要素研究が行われている。

LPG 噴射に関する研究では、LPG エンジンの MPI 化および DI 化を考慮し、国内外において LPG 噴射に関する研究が少数ではあるが行われている。ガス状噴射においては



CNG噴射のシミュレーションを応用した研究例がある。同一熱量を供給した際、ガソリンと比較してLPG噴流の到達距離は長く、その短縮には噴口数を増やし、噴口径を小さくすることが有効であることが示されている。また、液状噴射においては、液状ブタンを噴射させた際の噴霧特性を液滴および液膜の分裂過程を考慮したシミュレーションや、ホールノズルにおけるL/Dおよび入口形状、雰囲気圧力が液状ブタン噴霧特性に及ぼす影響を高速度撮影ならびにPDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)による液滴粒径計測により明らかにした研究例が見られる。

### 1.2.3 数値シミュレーションの動向

内燃機関における数値シミュレーションは、その根本的な概念から以下の3つの種類に大別される。

#### (1) 熱力学モデル(zero-dimensional models)

燃焼室内の領域を単一(1領域モデル)、未燃域と既燃域(2領域モデル)、単位クランク角度ごとの微小燃焼量(エレメントモデル)<sup>(34)</sup>などに分割し、熱力学の第一法則に基づき単位クランク角度または単位時間あたりのエネルギーバランスをとり、各燃焼領域(以下エレメントと呼ぶ)の温度とガス組成の時間履歴を得る。燃料の燃焼量の時間履歴、つまり燃焼率形状を予め決定しておくことが前提となる。このため、実機の圧力データから計算した熱発生率形状を利用するか、Wiebe関数などから燃焼率形状を決定する。このモデルでは、単位時間あたりの燃焼率でエレメントを区切ることで、燃焼室内空間の燃焼開始時期の異なる部分の温度勾配をシミュレートすることができる。

#### (2) エントレインメントモデル(quasi-dimensional modes)

0次元モデルには3次元的概念がなく、エレメントの状態は温度、圧力、燃焼ガス組成で一意的に決定され、空間的分布を予測するのはできない。エントレインメントモデルでは、いくつかの物理量から燃焼率形状を予測したり、噴霧形状に則したエレメント分割を行うものである。圧縮点火機関においては、エレメントの分割方法、燃焼前の酸素過剰率分布、エレメント間の混合の点からいくつかモデルが考案されており、Shahedの噴霧モデル<sup>(35)</sup>、廣安の噴霧モデル<sup>(36)</sup>などがある。それぞれのモデルについて細かな修正が加えられ、単純なエレメントモデルに比べ実機との一致性は格段に向上している。

#### (3) 多次元モデル(multi-dimensional models)

多次元モデルにおいては、上記の2つのモデルとは異なりシリンダ内の動作ガスの流

動を流体力学的にディーゼル燃焼の特徴である非定常な乱流拡散燃焼を定式化する。燃焼室空間を有限個の微小領域(セル)に区切り、そこに流入、流出する質量、運動量、エネルギー、個々の化学種の保存式を連立し、これらの基礎微分方程式を差分法や有限要素法などを利用して解を得る。特徴として、固定したセル毎に動作ガスの情報が得られるので、燃焼室内の速度、温度、圧力、密度、化学種分布を知ることができる。また、燃焼室やエンジン構成部品の形状が動作ガス流動や燃焼行程に影響を及ぼすため、エンジンの設計や最適化を行うのにあたり有効な手段となりうる。しかし膨大な計算機速度、記憶容量が要求されるために、燃焼を伴う3次元計算が可能になったのはここ数年のことである。燃焼室内で起こる現象はガス流動や乱流拡散燃焼だけではなく、壁面熱伝達、燃料液滴の蒸発、分裂、合体、壁面衝突に伴う液滴の付着、反射といったことも無視できないものであり、その他インジェクタノズルの噴口数、寸法も微粒子形成、噴霧形状に影響があることがわかっている<sup>(37)</sup>。それらについては個々にサブモデルが考案され、基礎実験や実機を対象にしたサイクルシミュレーションを通して最適化が行われている。現在では、より正確に現象を記述するサブモデルの開発が普遍性の高いコードを開発する鍵になっている。本研究では、内燃機関の研究・開発に多用されている KIVA-3 の流体コードを用いる。このコードは噴霧モデルとして表面の不安定性理論に基づいた Wave 分裂モデルを、燃焼モデルはマグヌッセンらの渦消散モデルが組み込まれ、運動量、分裂、蒸発挙動、燃焼を考慮したサブモデルで構成されている<sup>(7)</sup>。

### 1.3 研究方法

排出ガスの低公害性や供給面で利便性を持つ LPG エンジンは、シリンダ内における LPG 噴霧とその混合気の挙動や燃焼過程に不明な点が多く、さらに、現在開発中の LPG エンジンは高速回転領域で未燃燃料の増加及び熱効率の低下を招くことが指摘され、その原因究明が要求されている。このような問題は、燃料噴射、雰囲気条件、燃焼室レイアウトなどが着火性とその後の燃焼特性、ひいては機関性能と排出ガス特性に大きく影響し、通常のディーゼル機関とは本質的に極めて異なった燃焼特性を呈するものと考えられる。

そこで本研究では、まず、定容燃焼器を用いて、燃焼器内にエチレン燃焼による高温、高圧場を形成し、各種計測方法により噴霧特性を巨視的、微視的な観点から実験により系統的に解明する。その計測方法としてはシュリーレン法により、噴霧の気・液相分離

撮影し、LPG 噴霧の定性的な基礎データから各因子が噴霧特性にどのように影響するかを調べる。レーザシート法により、入射光面上での液滴群による散乱光を撮影し、噴霧内部の構造・微視的な燃料分布を解析する。また、LIF 法により、液相と蒸気相の同時分離可視化を行い、燃料噴霧の挙動と濃度分布の解析を行う。液相と蒸気相の同時分離可視化のため、各燃料に適切な蛍光剤を選定することが重要であり、そのために、分光器システムを構築し、様々な蛍光剤の蛍光特性を調べて、各燃料との相関関係を明らかにする。

燃焼解析に関しては、燃焼の進行度合いを示す重要な因子である OH ラジカルを LIF 法および自発光により計測する。OH ラジカルは紫外域にいくつか吸収スペクトルバンドをもっており、YAGレーザの第4高調波 266 nm を回折格子により狭帯域化し、OH(0, 0) の蛍光を中心波長 307nm の干渉フィルターを介して、CCD カメラによりその波長の強度を選択的に撮影する。

以上の実験データをもとに数値流体コード KIVA-3 のサブモデルを改造し、LPG 燃料の物性値の計算と初期条件などを与え、噴霧の計算を行う。数値シミュレーションにより実験結果の検証とともに、液滴と蒸気の挙動、濃度分布などを解析し、燃料噴霧と燃焼特性を総合的に実験結果との整合性を検証したうえで、各種条件での予測を行う。

また、排気量 4.617 の水冷、4 サイクル、4 シリンダ、直接噴射 LPG エンジンと同じ形状の計算メッシュを用い、基本的な運転条件での燃焼特性を調査する。すなわち、各回転数、負荷率における燃料噴霧と燃焼特性を数値シミュレーションする。特に気化性が強い LPG の場合、蒸発潜熱による噴霧の温度低下により燃焼悪化をもたらすことが考えられる。これを防ぐための各種運転条件が燃焼に与える影響を調べ、その対策も探る。

有害排気成分である HC や NO<sub>x</sub> 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、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目的として、燃焼反応モデルにより LPG の着火・燃焼特性を解明するとともに、エンジン設計の指針を得ることを試みる。

## 1.4 本論文の構成

以上の研究項目に関して，本論文は次の6章より構成される．

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，現在まで開発されて来た計測法，代替燃料エンジンの開発，シミュレーションの動向について概説し，また，研究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．シュリーレン，シャドウグラフ法，拡大撮影，レーザ散乱光，LIF法などの計測装置とその原理について述べる．そして，LPG燃料噴霧と燃焼の計測に先立ち，高温高圧場を再現する予備実験，噴射量測定，蛍光剤の選定実験，本実験に用いた噴射システムについて述べる．

第3章では，LPGの非定常噴霧に対し，微粒化，蒸発，混合気形成に及ぼす雰囲気温度，密度の影響について述べる．そのために，前述したような各種光学方法を適用して常温・常圧および高温・高圧条件での自由噴霧計測，実機の燃焼室を模擬した衝突板による衝突噴霧，ブタンとプロパンの各成分別噴霧特性，燃料の温度変化による噴霧特性などを対象にペネトレーションや噴霧体積などに着目して実験的に調査する．

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可能な条件を形成し，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により点火時期，雰囲気条件，EGR率，噴射圧などが燃焼に与える影響について述べる．さらにLPG燃焼後の排気ガスを分析し，各種因子による排気ガスへの影響も調べ，燃焼反応の進行状況と関連づけて燃焼過程を究明する．

第5章では，エンジン内流動を記述する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，噴霧と燃焼の数値計算について述べる．まず，推算した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，実験結果と比較・検討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る．

第6章では，改良したKIVAコードを用いてLPGエンジンの最適化を行う．すなわち，高速回転低負荷領域での成層燃焼における効率低下の原因およびその対策を究明するとともに，各種燃焼室および運転条件での計算により，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．さらに，排出ガス生成のメカニズムの究明とEGRによるNO<sub>x</sub>対策の可能性を確認する．

第7章では本研究で得られた結果を総括し，内燃機関におけるLPG噴霧および燃焼特性について総合的な考察を行う．