

第 2 章

実験装置および方法

定容燃焼器は燃焼に及ぼす雰囲気条件のパラメータを独立に変化させることができ、実際の機関や急速圧縮膨張装置では困難な単一パラメータの燃焼に及ぼす影響を各種燃焼計測法により調べることが可能である。また、燃料噴霧の挙動と燃焼の観察には、実機のエンジンや急速圧縮装置に比べて光学系、測定器などの配置がはるかに容易であるなどの長所を持つ。このような観点から、本研究で用いた定容燃焼器は内燃機関の上死点付近での燃焼室をモデル化して可視化構造としている。

実験に際しては、まず、燃焼器内を常温・常圧の初期雰囲気条件で設定してシュリーレン計測を行う。その理由は、噴射燃料と空気の混合過程を測定しやすい点と微小な密度ムラに対して敏感に反応するためである。すなわち、直接噴射式成層燃焼においては、まず、燃料混合気の混合過程を基礎的に把握することが最も重要である。そのために、本研究ではシュリーレン方法により噴霧の気液相分離撮影するとともに、この測定を基礎データとし混合気の流動・混合特性を解析することによって、それらの因子が噴霧特性にどのように影響するかなどを調べる。

次に、実機への応用の観点からより実機に近い熱力学的条件を再現するためには高温・高圧場で噴霧と成層燃焼を行う必要がある。つまり、常温・常圧の雰囲気条件での実験は燃料混合気の混合過程を基礎的に調べるため、測定の容易さの面から最も有効であるが、実機のような高温・高圧の雰囲気条件における燃料と空気の混合と燃焼過程の基礎的現象などを把握するには、実機に相当する実験装置を用いた実験を行わなければならない。そこで、本研究では $C_2H_4 - N_2 - O_2$ 混合気の燃焼熱を加熱源にして燃焼器内を高温・高圧状態にし、その雰囲気中に噴射系により液体状の LPG 燃料を噴射して成層混合気を形成し、散乱光による液相部の可視化および LIF 法を適用し、気液分離可視化について述べる。

2.1 実験装置

2.1.1 定容燃焼器

実験装置は図 2.1 に示すように、定容燃焼器、燃料噴射系、光学系、制御計測系の 4 つの系統で構成されている。定容燃焼器は両端面に石英ガラスを装着し、レーザ光源による燃料噴霧や火炎伝播の可視化が可能な構造となっている。燃焼器周囲には給排気バルブ、燃料噴射ノズル、容器内圧力測定用の圧力変換器、容器内攪拌用ファン、混合気点火プラグ、レーザシートを反射するためのプリズムが取り付けられている。定容燃焼器は図 2.2 に示すように燃焼器の内径は 115mm、厚さ 70mm 容積 727cm^3 である。

噴射系には、高圧噴射が可能な電子制御の蓄圧式噴射装置を用い、インジェクタは、噴射ドライバにより駆動し、その噴射時期と噴射量の制御はパルス発生装置を利用して任意に設定できるようにした。

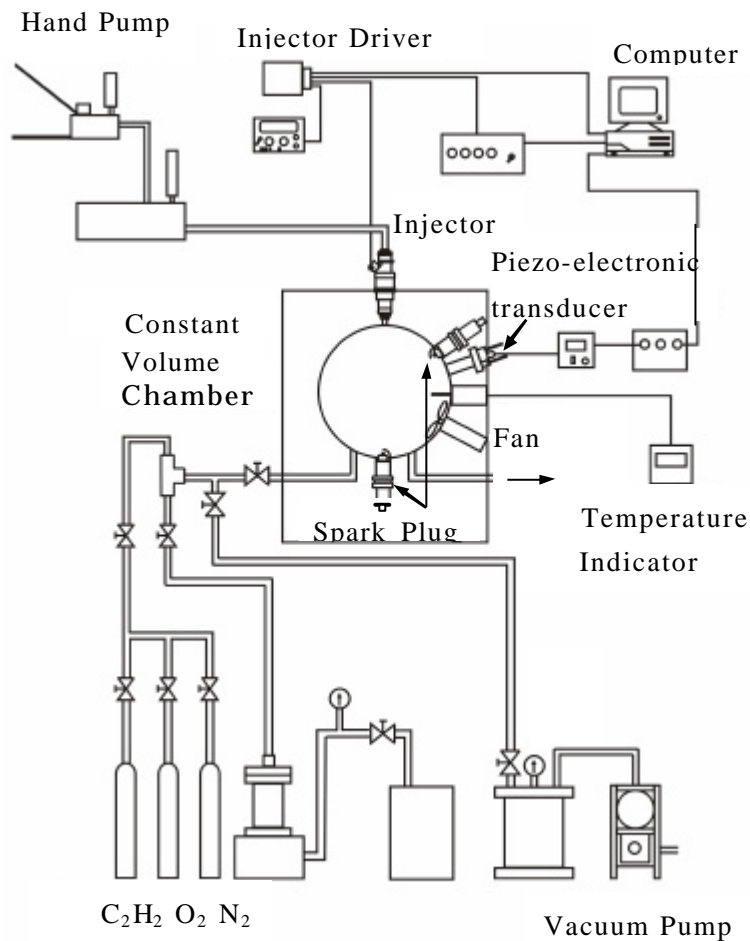


図 2.1 実験装置の全体図

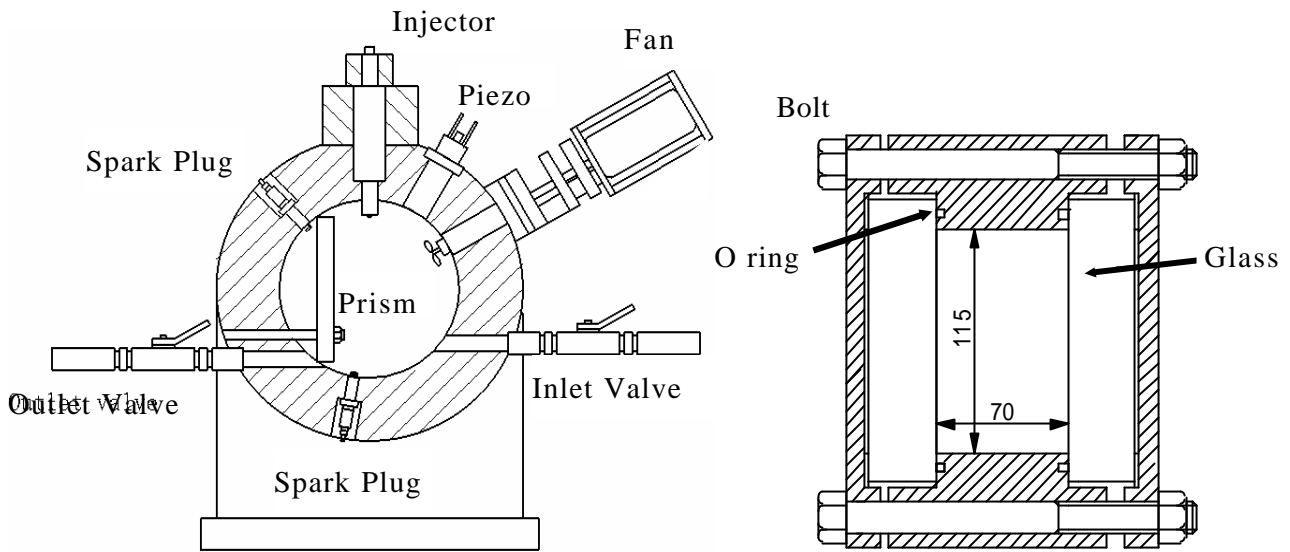


図 2.2 定容燃焼器

2.1.2 燃料噴射系

高圧噴射を可能とするため、蓄圧式の噴射方式を使用した。図 2.3 に噴射システムの概略図を示す。燃料の蓄圧には油圧ブースタを用い、その駆動は複動シリンダ用の電動ポンプを使用した。高圧油圧ブースタは、1次側の標準圧力媒体をポンプで加圧することによって、2次側の燃料を加圧する。ピストン1次側の受圧面積は、2次側の受圧面積よりも大きくなっており、2次側の圧力は1次側よりも高くなる。すなわち、1次側と2次側の圧力比は受圧面積比の逆数となる。

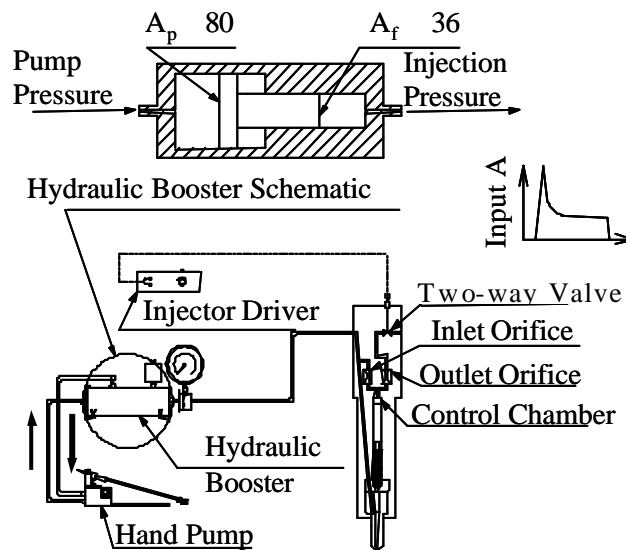


図 2.3 蓄圧式コモンレール噴射装置

第2章 実験装置および方法

1次側に関して、ピストンに加わる力を F_p 、2次側に加わる圧力を F_f とすると、それぞれの圧力とピストンに加わる力の関係は以下ようになる。

$$F_p = P_p \cdot A_p \quad (2.1)$$

$$F_f = P_f \cdot A_f \quad (2.2)$$

P_p, P_f : 1次側, 2次側圧力 [MPa]

A_p, A_f : 1次側, 2次側ピストン受圧部面積 [m²]

ここで、 $F_p = F_f$ であるから式(2.1)、式(2.2)より、

$$P_f = (A_p / A_f) \cdot P_p \quad (2.3)$$

となる。また、本実験に用いる油圧ブースタ 1次側受圧部面積約 5027 mm²、2次側約 1018 mm² であるため、1次側圧力約 61 MPa で 2次側圧力 300 MPa となる。また、噴射期間、噴射時期の制御は、外部のタイミング制御回路から噴射ドライバに入力する時間をコントロールすることで行った。

インジェクタには、噴射ドライバによって駆動される二方弁を備えたコモンレール式インジェクタを用い、噴射時期、噴射期間を自由に制御することが可能である。そのインジェクタでは、パルス電流により電磁弁を制御しリーク側の流路を開くことによりオリフィス側のスプールを押し、高圧アキュムレータとノズルを結ぶ流路が開かれ、加圧された燃料がノズル方に圧送される⁽³⁸⁾。

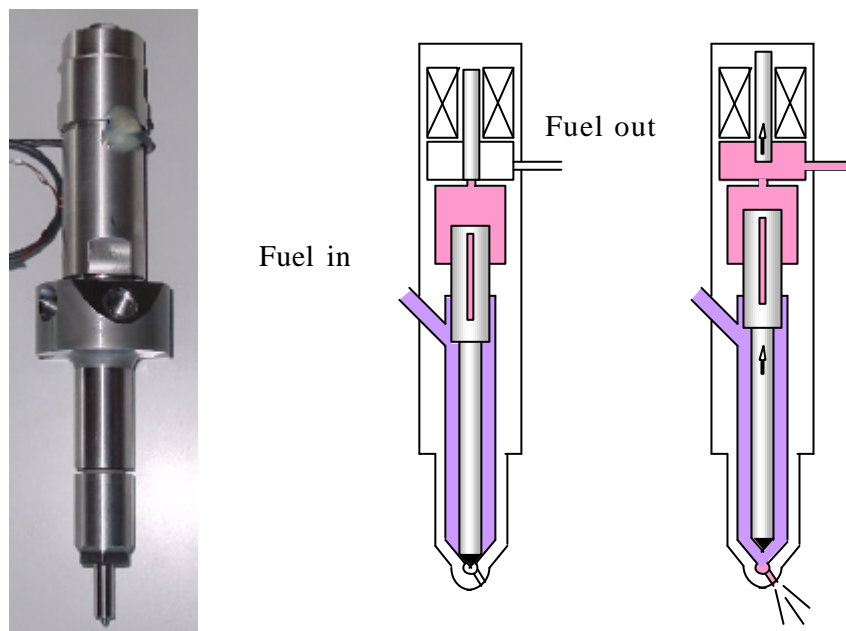


図 2.4 LPG インジェクタ

2.1.3 光学系

(1) シュリーレン光学系

シュリーレン法は、アルゴンレーザー、プリズム、反射鏡、エキスパンダー、凹面鏡 2 枚（焦点 2000mm ）、ナイフエッジ、高速度ビデオカメラで構成されている。アルゴンレーザーを光源として、エキスパンダー・凹面鏡を用いて平行光を作り出し、容器内を通過させ凹面鏡で再び焦点 1 点に集光させ、ナイフエッジでその主光束を遮る。その原理は容器内の気体の運動・密度差により屈折が生じ、凹面鏡の焦点から外れた光だけがナイフエッジを通過するため、気相だけの撮影が可能となる。この光学系は、気体同士のわずかな密度差による屈折を感知するため、凹面鏡、エキスパンダー等を慎重に微調整する必要がある。特にナイフエッジは、凹面鏡で収束したレーザー光の主光束をカットする役割であり、調整を怠ると、可視化結果に大きく影響が出てしまう恐れがある。その光学系のレイアウトとアルゴンレーザーの諸元を図 2.5 と表 2.1 に示す。

また、同装置で、ナイフエッジを外して、シャドウグラフによる LPG 液相の撮影も行った。シャドウグラフでは、シュリーレン画像とは逆に、全体が明るくなり、液相部は暗くなる。

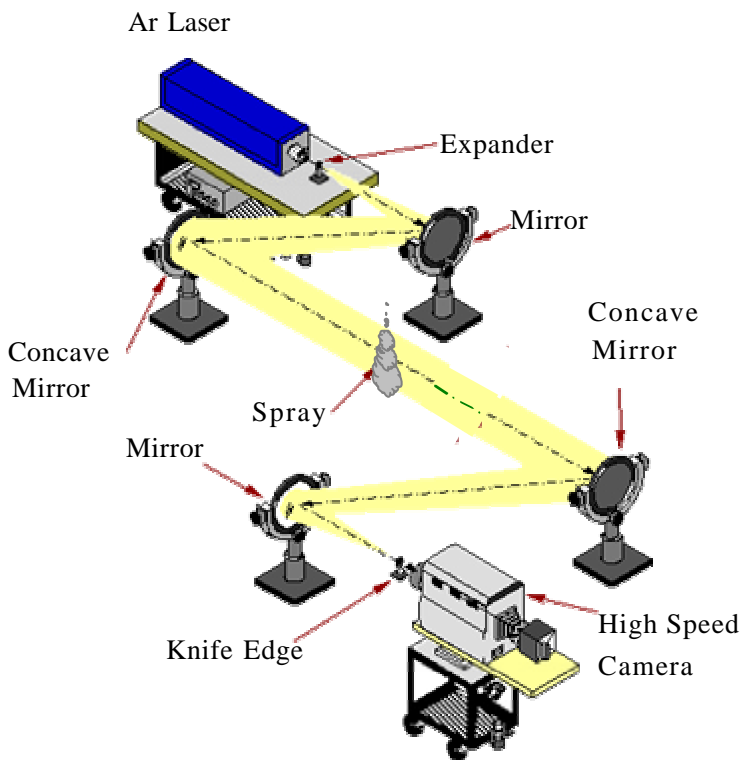


表 2.1 Ar Laser の諸元

型式	INNOVA 70A	
製造会社	Coherent Laser Group	
品番	PS7365 HD0202	
使用電源	3相 208 ± 10% VAC 50 or 60 Hz, 50 A	
冷却水温度	10 ~ 35	
冷却水量	8.5 L/min	
出力	LO	0.1 ~ 2.0 W
	MED	0.1 ~ 4.0 W
	HI	0.1 ~ 10.0 W
重量	ヘッド部：43 kg 電源部：34 kg	

図 2.5 シュリーレン光学系⁽³⁹⁾

(2) レーザシート法光学系

シュリーレン法では、わずかな密度差に敏感に感知するようにするため高温領域での計測は困難である。そこで、高温高圧雰囲気中において噴霧の挙動を計測するため、銅蒸気レーザによる液滴群の Mie 散乱光を撮影した。定容燃焼器と光学系の概略図を図 2.6 に、銅蒸気レーザおよびカメラの諸元を表 2.2 と 2.3 に示す。レーザシート法では銅蒸気レーザ(LS20-10, Oxford Laser 社, 緑色 511 nm/黄色 578 nm)を光源とし、2枚のシリンドリカルレンズにより高さ 70 mm, 幅 0.8 mm にシート化し、容器正面に置かれた高速度ビデオカメラ (FASTCAM-ultima-UV1, PHOTRON) により撮影した。その際、ビデオカメラで発生するパルス信号に同期させて銅蒸気レーザを発光させるとともに、その信号をもとに点火装置、インジェクタドライバー、計測用 AD ボードを制御し、容器内圧力の測定データは AD ボードを通してコンピュータに取り組みようにした。高速度ビデオカメラの速度は 9000 frames/s とし、撮影された画像は画像解析装置に入力し、液滴の分布を解析した。

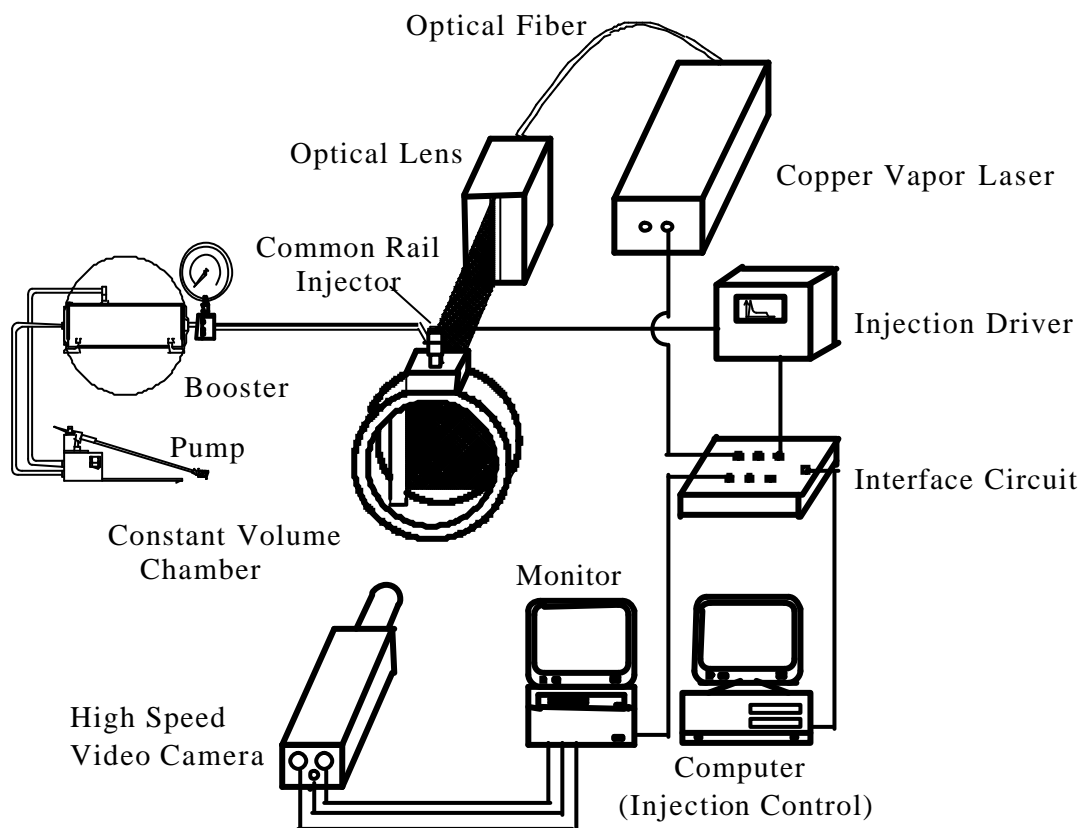


図 2.6 レーザシート光学系

表 2.2 銅蒸気レーザの諸元

項目	仕様
型名	LS20-1-10
製造元	Oxford Lasers Ltd.
波長	510.6 nm/578.2 nm (緑/黄)
平均出力	20 W
最大出力	30 W
パルス幅	20 ~ 30 ns
パルス繰り返し	最適 10kHz, 2 ~ 10kHz
ビーム直径	25 mm

表 2.3 高速度ビデオカメラ及びイメージンテンシファイアの諸元

項目	仕様
型名	FASTCAM-ultima-UV1
製造元	PHOTRON
パルス幅	100ns ~ 連続(パルス入力モード) 100ns ~ 1 μ s(トリガ入力モード)
繰り返し	45kHz max. (制御回路内蔵)
ゲート時間	パルス入力: 100ns ~ 連続(DC) トリガ入力: 100ns, 200ns, 500ns 1 μ s, 10 μ s, 100 μ s
遅延時間	100ns \pm 5ns(パルス入力モード) 130ns \pm 5ns(トリガ入力モード)
遅延時間ジッタ	1ns max.

(3) 分光試験装置

LIF 法を適用する際の各種蛍光剤の蛍光波長と燃焼時の発光波長域を測定するため分光器装置を用いた。同装置と仕様を図 2.7 と表 2.4 に示すように Nd:YAG レーザ(266 nm)およびデジタル遅延パルス発生器，蛍光検知システム，温度制御装置，サンプリング容器などに構成されている。レーザの入射と蛍光を分光器に導くため光ファイバを互いに垂直となるようにした。レーザ入射窓と蛍光波長観測窓には石英ガラスを用い，また入射窓の反対側には，入射したレーザの反射を防ぐため吸収レンズを取り付ける。また，容器下部より K 型熱電対を挿入し，容器にバンドヒータを取り付けることによって容器中の温度を調節する。

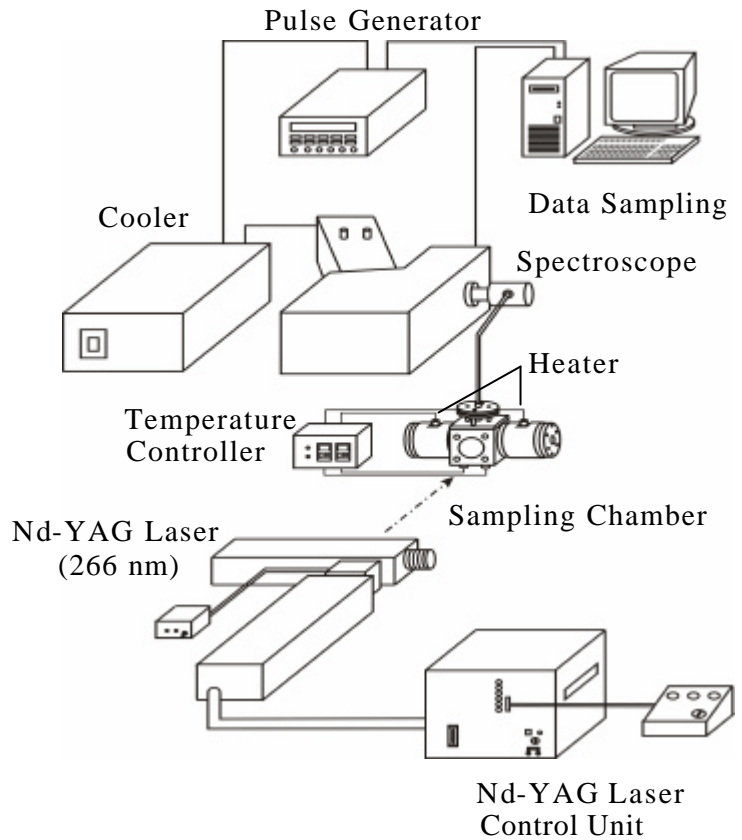


図 2.7 分光器の概略図

表 2.4 分光器仕様

項目	仕様
製造会社	オリエル
型式と構造	MS 257, 非対称ツェルニターナ
使用可能波長範囲	170 nm ~ 24 μm
入・出射焦点距離	220 nm, 257.4 nm
入射角	23.66°
イメージ倍率	1.5×10^{-5} 633 nm から 20 nm 離れた所
回折格子取付枚数	1 枚, 2 枚, 3 枚または 4 枚
回折格子の大きさ	50 × 50 × 6 nm
波長分解能	0.1 nm (通常), <0.15 nm (最大)
波長精度	± 0.1 nm (通常), ± 0.15 nm (最大)

(4) LIF 法光学系

LIF 法の光学系と諸元を図 2.8 と表 2.5~ 2.8 に示す。燃料噴霧の液相と気相の分離可視化を目的とし、光源には Nd:YAG レーザ (Spectra-Physics 社製: GCR150) の第 4 高調波長(266nm)を用いた。レーザから照射された直径 10 mm レーザ光は高エネルギーレーザ用のミラーを通過した後、2枚のシリンドリカルレンズにより高さ 70 mm、厚さ 0.3 mm にシート化され、プリズムを通して直角に曲げ、定容燃焼器内の噴霧に照射する。CCD カメラにはステレオスコープが装着されており、噴霧の気・液相および燃焼の輝炎と OH ラジカルを選択的に通過させるバンドパスフィルターを付け、それぞれの同時撮影が可能である。

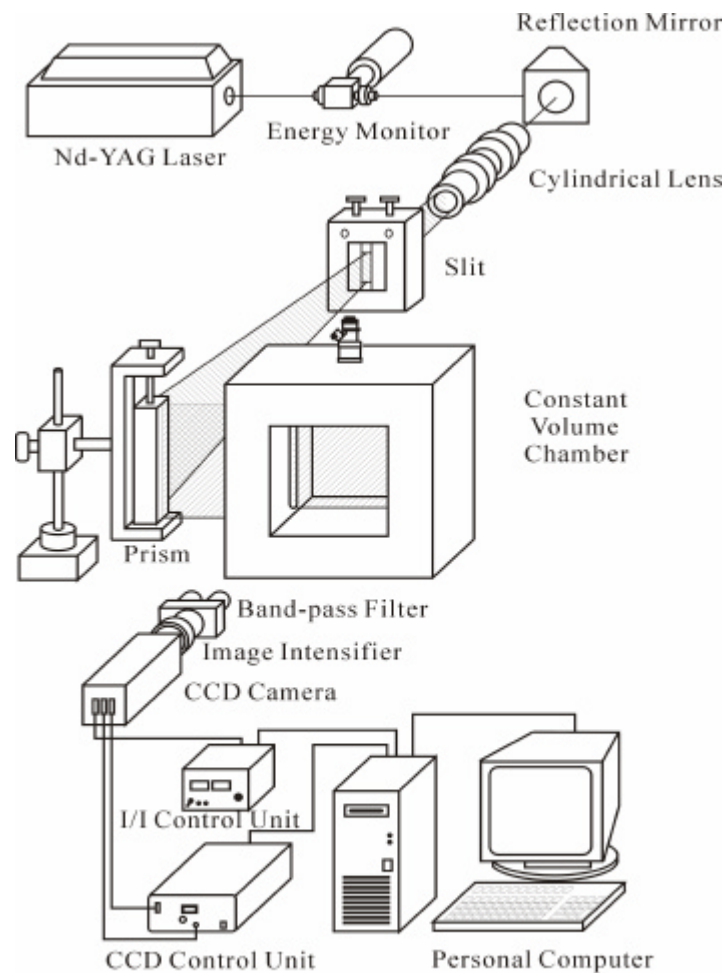


図 2.8 LIF 法光学系

第2章 実験装置および方法

表 2.5 Nd-YAG レーザ(エタロン付)

型 式	GCR-150 (10Hz)				
製造会社	Spectra Physics INC.				
パルス繰り返し	最適：10 Hz , 可変範囲：1 ~ 14 Hz				
ビーム径	10 mm				
出力パルス時間ジッタ	<0.5 ns				
線 幅	標準時： <10 mm ⁻¹				
直線偏光度	>95%				
平均出力安定度	99% / 1 時間				
ビーム拡がり角	<0.5 mrad				
ビーム位置安定度	<100 mrad				
入力電源	190 ~ 250 V \pm 5% , 30 A , 50/60 Hz				
仕 様	出力波長 nm	1064	532	355	266
	パルス出力 mJ	650	300	150	70
	パルス幅 nsec	8 ~ 9	6 ~ 7	5 ~ 6	4 ~ 5
	エネルギー安定度	<2%	<3%	<4%	<8%
	パルス出力変動	<3%	<5%	<6%	<10%

表 2.6 LIF用 ICCD カメラ

製造会社	La Vision	
カメラモデル	Flame Star 2F	
CCD モデル	TH 7883	
I/I タイプ	Gen	
I/I 品番	PD9942170	
I/I 口径	18 mm	
ファイバカップリング	1.27 : 1	
スペクトル対応	190 ~ 900 nm	
フォスファ	P43	
空間分解能	CCDチップサイズ	576 × 384
	CCDピクセルサイズ	23 μ m ²
読み出し速度	1.8 MHz	
感度	100 counts/photoelectron (max)	
ゲート速度	5 nsec	
冷却方式	水冷	
CCD暗電流	>8 pixel/sec	
ダイナミックレンジ	14 bit	

第 2 章 実験装置および方法

表 2.7 ICCD カメラ用 UV カメラレンズ

型式	UV-Nikkor
製造会社	株式会社 ニコン
F 値	105 mm F / 4.5

(5) 遠距離拡大撮影

以上，噴霧のマクロな計測について述べたが，よりミクロな計測を行うために遠距離顕微鏡を用いて，噴霧先端などの微細部の撮影を行った．従来のビデオカメラでは焦点が短く，接近撮影はできないが，図 2.9 に示すように遠距離顕微鏡の装置と原理により遠い距離でも拡大計測を可能とした．液体噴霧を形成する液体微粒子や粒径およびその分布の計測技術は，液体の微粒化を応用したエンジンの性能解析，効率向上のために非常に重要である．ここでは，噴射された噴霧の各位置における拡大計測により，減圧沸騰の現象や噴霧粒径，噴霧広がり角などを計測した．

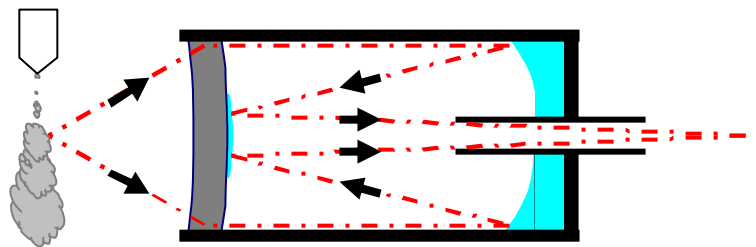


図 2.9 遠距離顕微鏡による近接撮影

(6) 燃焼計測光学系

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した．OH ラジカルは紫外域にいくつかの吸収スペクトルバンドをもっており，色素レーザ，エキシマレーザなどが用いられることが多い．燃焼計測では，図 2.8 の光学系を用いる

が，YAG レーザの第 4 高調波 266nm を回折格子により狭帯域化し，OH 吸収バンドの一つである 266.13nm に合わせて入射し，OH (0, 0) の蛍光を中心波長 307 nm の干渉フィルターを介して，I/I 付き CCD カメラにより選択的に撮影した．さらに，イメージintensファイア付き高速度カメラにより，OH 自発光と輝炎の連続撮影も行った．

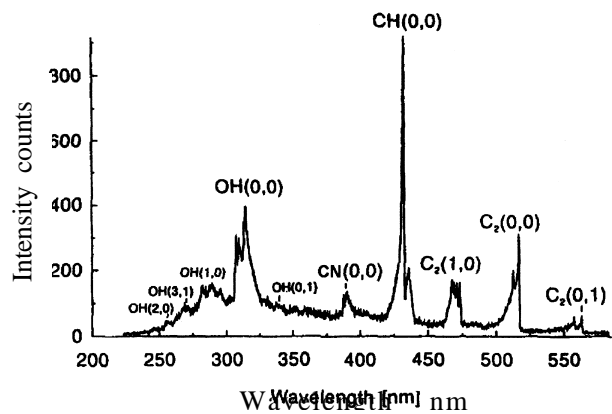


図 2.10 各種燃焼生成物の発光スペクトル

2.1.4 供試燃料

表 2.9 に本研究で使用した LPG 燃料と比較のために軽油に近い単組成燃料である n-ドデカンの物性値を示す。LPG は n-ブタンとプロパンが 70:30 で混合させた燃料であり、n-ドデカンに比べ、沸点、粘度、密度が低い反面、低発熱量は高いのが特徴である。また、LPG には硫黄分がほとんど含まれていないため、環境負荷が小さく、LNG とともに優れたクリーンエネルギーとして位置付けられている。

図 2.11 に LPG の蒸気圧線図を示す。ポンプにより 10 MPa 以上に加圧されると液体状になるが、大気圧に噴射されると蒸気圧線図の下に置かれ直ちに気体状態になる減圧沸騰現象を起こす。常温常圧条件ではこのような減圧沸騰を起こす条件を中心に実験を行った。

表 2.9 LPG 燃料の成分および物性値⁽⁴⁰⁾

物性値	n-ドデカン	LPG	
		n-ブタン (70%)	プロパン (30%)
分子式	$C_{12}H_{26}$	C_4H_{10}	C_3H_8
モル数	170.34	58.12	44.1
沸点	216.5	- 0.45	- 42.05
臨界点	358.15	152.01	96.67
密度 (液滴) g/ml	0.75	0.50	0.67
低発熱量 MJ/kg	42.5	45.76	46.4
蒸発潜熱 kJ/g	256.19	385.52	426.0
表面張力 mN/m	28.5	18.4	9.22
動粘度 mm^2/s	3.5	-	-
セタン価	38~43	-	-
オクタン価	-	94	112

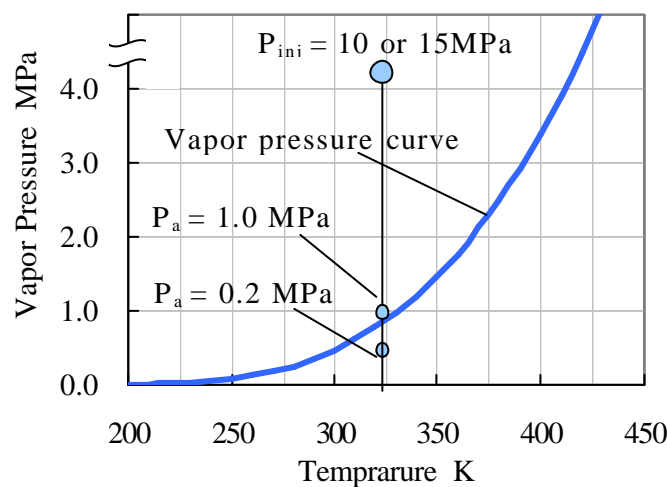


図 2.11 LPG 燃料の蒸気圧線図

2.2 各種予備実験

2.2.1 エチレンによる予備燃焼実験

定容燃焼器にエチレン，酸素，窒素からなる希薄混合気を充填し，これを着火・燃焼させることで実現される高温・高圧場に供給燃料を噴射，点火して非定常噴霧，燃焼を計測する．希薄混合気の初期酸素濃度を变化させることで，高温・高圧場の（残留）酸素濃度を变化させる．この酸素濃度はエチレン，酸素，窒素の化学平衡計算により求めた．エチレン燃焼により形成する手法は，雰囲気ガスを充填し電気ヒータで加熱する従来の方法に比べ観測視野を広くとることができ，安全面にもメリットがある．各条件における各ガスの充填濃度を以下のように設定した．

・可燃焼雰囲気

エチレン，酸素，窒素の混合割合はエチレン燃焼後のガス組成が大気に近い状態（酸素：窒素+その他 = 21：79)になる条件 (酸素濃度 21 %)

・非燃焼雰囲気

燃料噴霧が自己着火しないようエチレン燃焼後，無酸素に近い条件

(酸素：窒素+その他 0：100)になる条件 (酸素濃度 3 %)

各気体を容器内に連成計を用いて圧力比で充填し，電動ファンで攪拌後スパーク点火により燃焼させた．

エチレンの燃焼反応式を式(2.4)に示す．



エチレンの量は，希薄可燃限界 2.7% 付近での燃焼が望ましいと考えられ，エチレン濃度は 3% に設定した．式(2.4)より，酸素分圧は，エチレンが完全燃焼するのに必要な酸素量(3O₂)に，エチレン燃焼後に残したい酸素量(aO₂')を加えればよく，窒素は酸素量との比で求まる．以上より，燃焼の最大圧力が 5 MPa 以下となり測定条件を満たすような初期充填圧力を実験的に求め，可燃焼および非燃焼雰囲気で雰囲気密度 3.5, 6.0, 8.0 kg/m³, 各 3 種類を設定した．表 2.10 に各気体の封入割合とエチレンの物性値を表 2.11 に示す．

表 2.10 各気体の封入圧力比

	C ₂ H ₄ %	O ₂ %	N ₂ %
可燃焼雰囲気	4	33	63
非可燃焼雰囲気	4	15	81

表 2.11 エチレンの物性値⁽⁴⁰⁾

化学式	C ₂ H ₄
分子量	28.054
低発熱量 MJ /Kg	47.17
希薄可燃限界 % (vol./vol.)	2.7

雰囲気密度 3.5, 6.0, 8.0 [kg/m³]の各条件でエチレン燃焼実験を 5 回行い, その平均値として圧力と温度線図を図 2.12 に示す. エチレン燃焼による燃焼器内の圧力履歴はピエゾ圧力変換器により測定し A/D ボードを介して PC に取り込み, 状態方程式により温度を計算した. ここで, 噴射時期はエチレンを点火してから目標とする雰囲気温度および圧力を選び, 決定する.

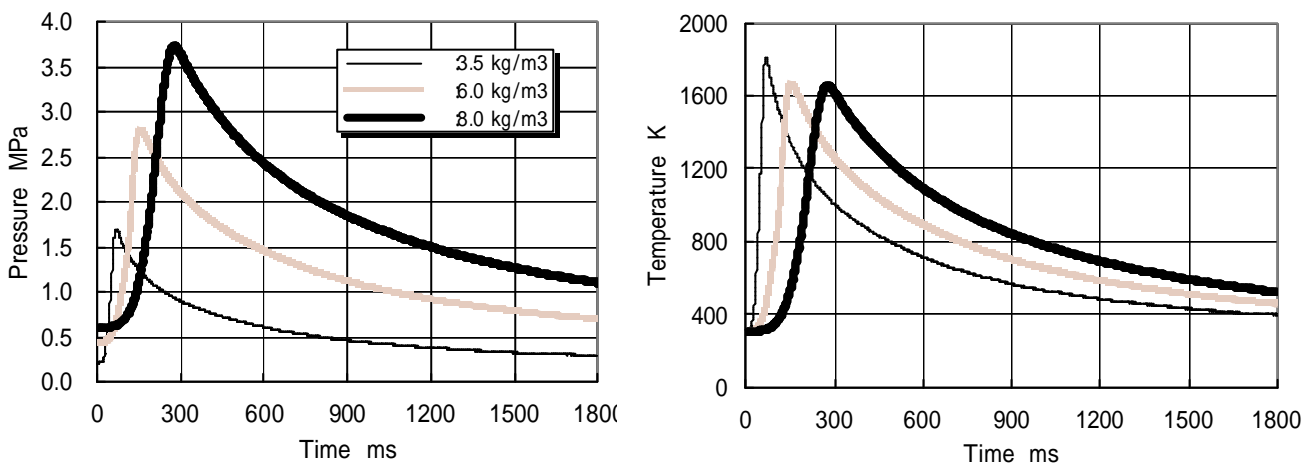


図 2.12 エチレン燃焼による圧力と温度履歴

2.2.2 噴射量および噴射率測定

LPG は沸点が低いことから噴射量および噴射率の測定が非常に困難であるとされている. 本研究では噴射量測定を各噴射信号幅で重量法により 20 回平均で求めた. その結果を図 2.13 に示す. 噴射ドライバへの入力パルス信号幅に線形的に増加しているのがわかる. この噴射期間と噴射量の関係式から入力パルスを変えながら対象とする噴霧および噴射量の調整を行った.

第 2 章 実験装置および方法

また、ピエゾ圧力変換器を用いた噴射率測定を試みた。噴射率測定は図 2.14 に示すように、ノズルからの燃料をピエゾ素子に対して垂直に衝突するようにし、式 (2.5) と (2.6) の運動量の変化と力積の式から求めた。ここでノズルとピエゾ間の距離は、分裂長さ (液柱長さ) より短い 10 mm に設定して行った。

図 2.15 に噴射信号の幅による噴射率測定結果を示す。図により 5 V の噴射信号が入ってから燃料がピエゾに衝突するまでには約 1.3 ms の遅れが確認された。これは信号自体の電気的な遅れ、インジェクタの針弁作動の遅れ、そしてノズルとピエゾの間の距離によるものと LPG 燃料の粘性及び圧縮性などの物性に起因すると考えられるが、これらを考慮すればここで得られた噴射率は十分有用である。

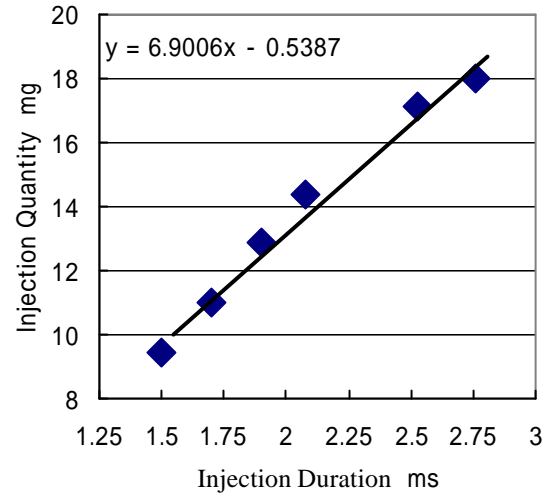


図 2.13 噴射量測定結果 (重量法)

$$F \cdot \Delta t = (\dot{m} \cdot \Delta t) \cdot v \quad (2.5)$$

$$\dot{m} = \left(\frac{M}{\int \sqrt{V} \cdot dt} \right) \cdot \sqrt{V} \quad (2.6)$$

t : 噴射期間 v : 噴霧速度
 \dot{m} : 噴射率 V : 出力電圧
 M : 噴射量

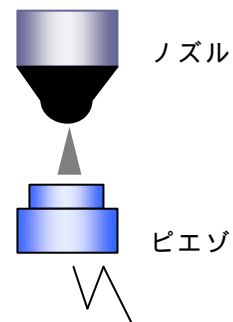


図 2.14 噴射率測定方法

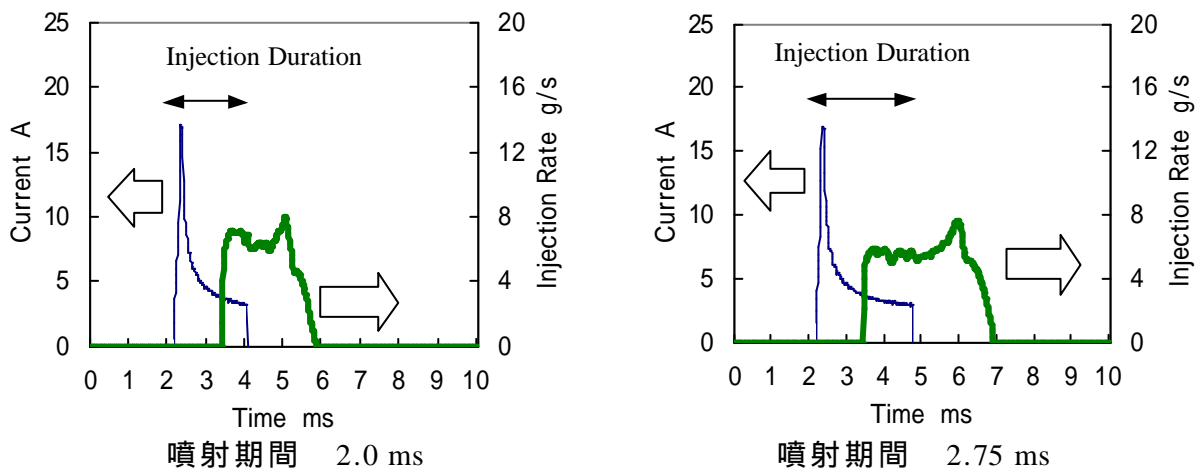


図 2.15 噴射率測定結果

2.2.3 蛍光剤選定実験

ある紫外光を吸収し、特定の波長領域で蛍光発光を示す物質を蛍光剤と呼ぶ。蛍光はレーザ入射光より必ず長波長側で観測され、また、その蛍光寿命（10～100ns）、蛍光強度、蛍光波長は、蛍光物質、溶媒（ここでは燃料）、雰囲気条件によって変化するものである。測定するのは燃料ではなく、燃料によって運ばれた蛍光剤であることに注意しなければならない。分子構造に C=O の二重結合、C=C 結合、カルボニル基などの発色団をもつと蛍光し、蛍光剤と燃料の組み合わせによって強度やピーク波長は変化するが、この結合により蛍光波長が決まる。カルボニル基は蛍光のほか寿命の長い燐光を発することから温度依存性が高く、画像が不鮮明となり、噴霧撮影には向かない。C=O、C=C 結合を持つ有機系の蛍光剤は一般的に酸素に強くクエンチされ雰囲気ガスを窒素とすることが望ましいとされる。

LPG 噴霧の気相部を計測する際、LPG 自体は蛍光を発しないため、噴霧の可視化実験に先立ち、各燃料に対し最適な蛍光剤を添加する必要がある。既存燃料噴霧の LIF 法では様々な蛍光剤が使用されてきたが、その蛍光特性はベース燃料や混合濃度、照射するレーザ波長によって変わる^(41~43)。

そこで、分光器と YAG レーザを利用して蛍光測定を行い、LPG 燃料と蛍光剤の混合特性を調べ、それぞれの燃料に最適な蛍光剤を選定した。光源として Nd-YAG レーザの第 4 光調波 266nm を利用し、対象燃料である LPG の気相・液相を、蛍光剤 DEMA、アセトアルデヒド、アセトン、フルオロベンゼンなどの蛍光スペクトルを分光器により測定した。表 2.12 に各蛍光剤とそれぞれの沸点を、図 2.16、17 に測定した分光結果を示す。分光試験の結果、蛍光剤を含まない LPG のみの液相に波長 400nm を中心に広く蛍光が確認された。これは着臭剤に蛍光物質であるケトンが含まれていることや LPG 自体の不純物によるものと考えるが、混合気の可視化に与える影響は少ない。また、LPG とアセトンを容積割合 9:1 で混ぜたときは 400～500nm の範囲で、アセトアルデヒドを混ぜたときは、360～480nm の範囲で微弱な蛍光がそれぞれ確認された。そして LPG に DEMA を混ぜた結果、波長 300nm 付近に強い蛍光を示すことがわかる。輝度の弱い気相を可視化するには蛍光強度が強いことが望ましく、以上の結果から DEMA を蛍光剤として採用した。レーザ波長 266nm とともに 532nm が同時に発振していることから、気相は 307nm のフィルターを用いて LIF の画像を撮影し、液相撮影には紫外カットの ND フィルターを用いて散乱光を撮影した。

表 2.12 蛍光剤の物性値⁽⁴⁰⁾

項目	Acetone	Acetaldehyde	DEMA
化学式	C_3H_6O	CH_3CHO	$(C_2H_5)_2NCH_3$
分子量	58.08	44.05	87.17
沸点 K	369.5	293.6	338.0
密度 g/ml	0.790	0.778	0.720

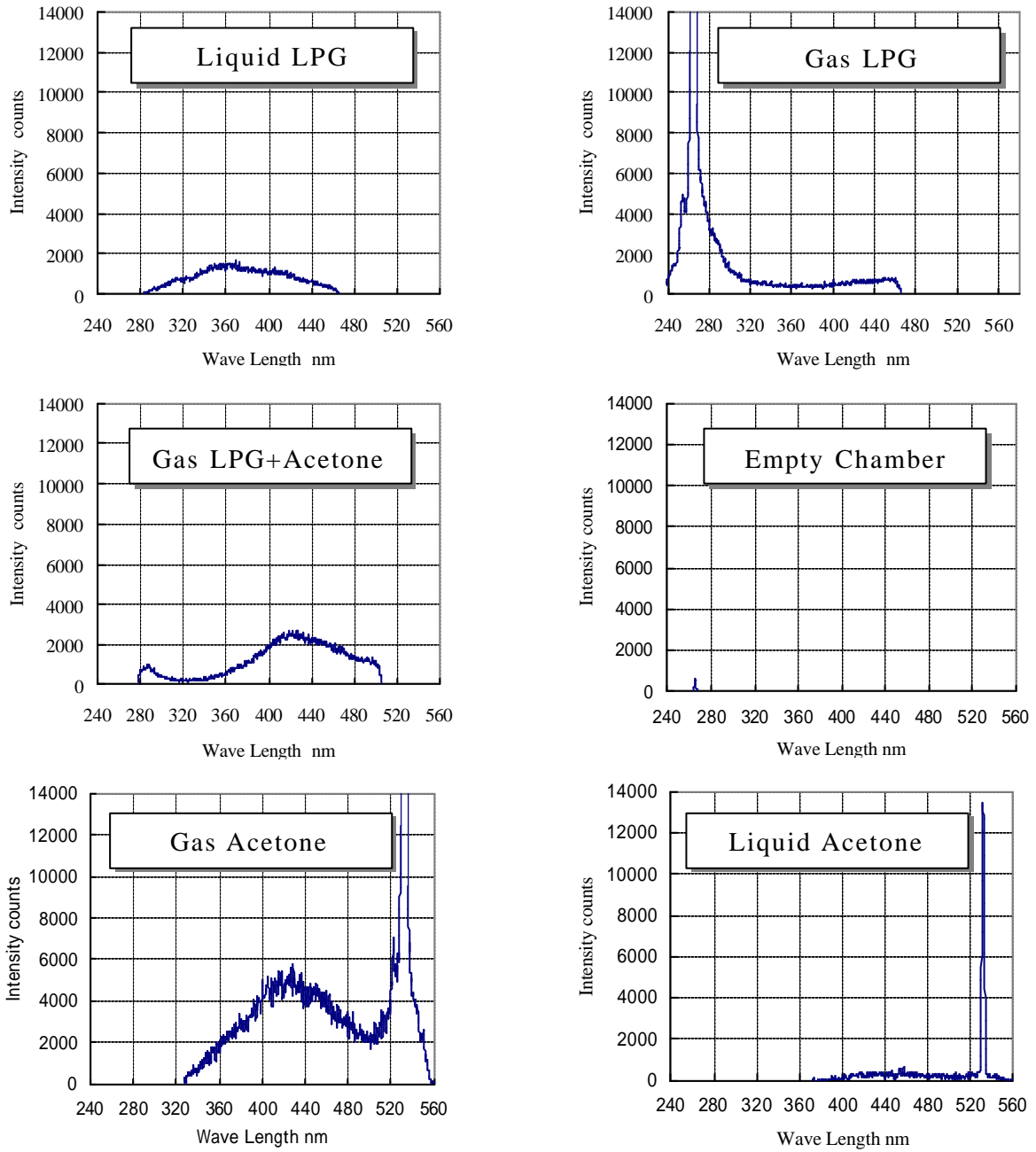


図 2.16 分光試験結果

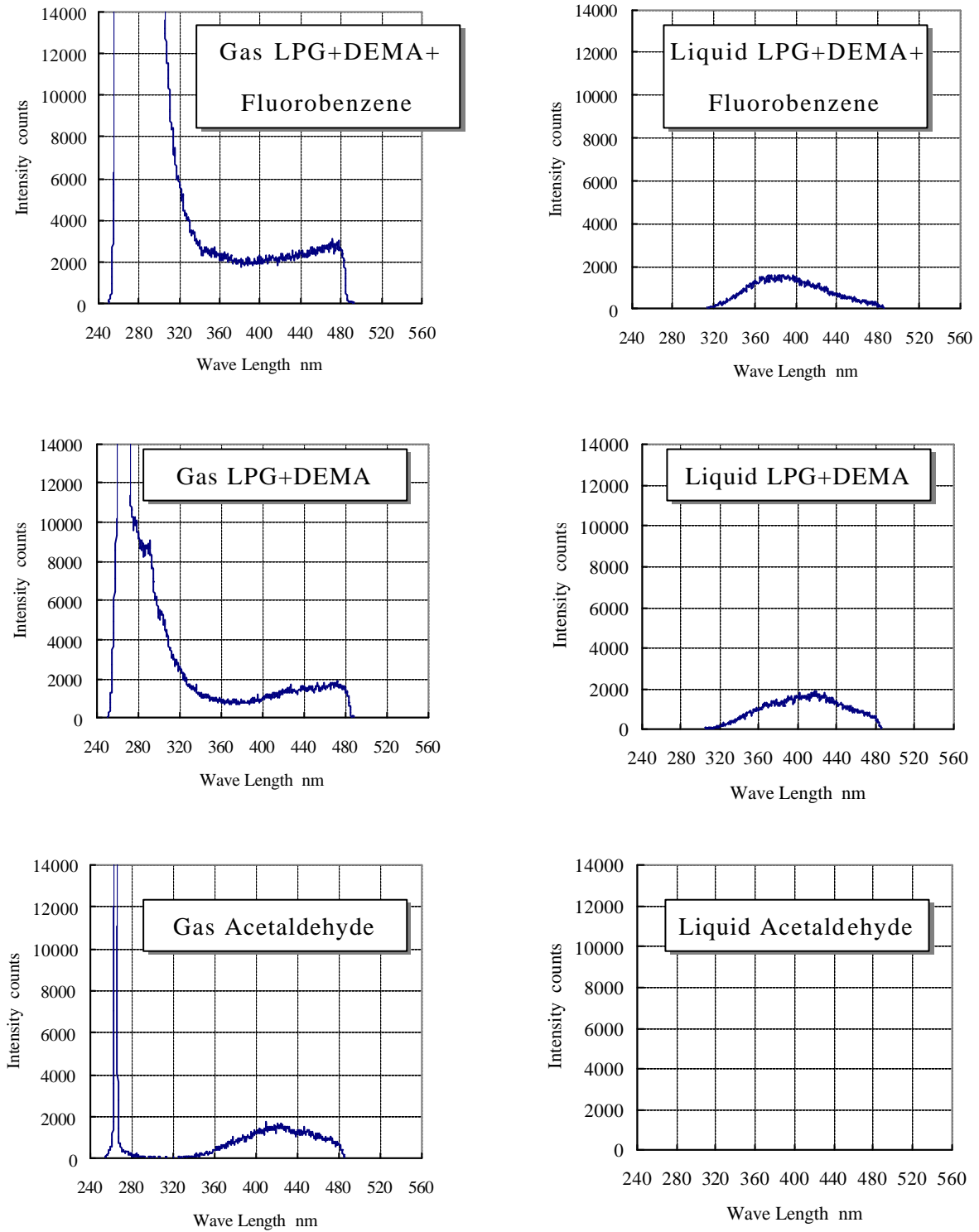


図 2.17 分光試験結果