

第4章

LPGの燃焼特性

前章では定容燃焼器内に非燃焼場を形成し，LPG燃料が空気との混合過程を計測した．本章ではこれらの噴霧実験データをもとに定容燃焼器内を燃焼が可能な条件を形成し，各種因子がLPG成層燃焼に与える影響について述べる．燃焼特性を可視化するため，燃焼生成物であるOHラジカルを中心にLIF法と自発光の連続撮影を行った．OHラジカルは燃焼の進行度合いを示す指標となり，各種有害ガス生成に重要な影響を与える．その発光スペクト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，色素レーザー，エキシマレーザーなどを利用するLIF法と熱的に励起されるときにある程度発生するOH自発光計測方法が多い．自発光でも同じ307nmの干渉フィルターを利用し，I/I付き高速ビデオカメラにより撮影を行う．その際，OHと同時に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である輝炎も計測した．

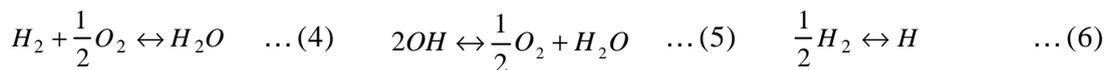
実験条件として，当量比，点火時期，雰囲気条件，衝突燃焼などによる燃焼過程を調べた．さらに，筒内圧力，熱発生率，排気ガス濃度なども計測し，ここで得られたデータは第5章で述べる燃焼過程の数値予測の検証に用いられる．

4.1 化学平衡と状態変化計算によるOH特性

実際の燃焼ガスでは各種の化学反応が起こっており，それによって組成が時間的に変化するものと考えられるが，これらの反応経路や反応速度に関するデータは現在のところ必ずしも十分ではない上，これらを考慮するには，各化学成分の速度式ならびにエネルギー式から誘導されるガス温度の微分方程式とからなる連立微分方程式を解く必要がある．OH および各燃焼成分の計算では化学成分としては燃焼ガス温度範囲を配慮して次のような11種を考える．



これらの成分からなる化学平衡式としては，次に示すような7つの式が独立に成り立つ．



従って， N_i ：各成分 I のモル数， K_{pj} ：反応 J の定圧平衡定数， $N_t = \sum n_i$ ， $r = N_t/P_t$ (P_t ：全圧)として，反応する平衡式は，

$$\begin{aligned} Nno^2/(No_2 \cdot Nn_2) &= Kp_1 & No^2/No_2 &= Kp_2 \cdot r = K_2 \\ Nco^2 \cdot No_2/Nco_2 &= Kp_3 \cdot r = K_3 & Nh_2^2 \cdot No_2/Nh_2o^2 &= Kp_4 \cdot r = K_4 \\ Noh^4/(Nh_2o \cdot No_2) &= Kp_5 \cdot r = K_5 & Nh^2/Nh_2 &= Kp_6 \cdot r = K_6 \\ Nn^2/Nn_2 &= Kp_7 \cdot r = K_7 & & \end{aligned}$$

となる．また，各元素 N，O，C，H の質量保存式は次式で表される．

$$\begin{aligned} n &= 2Nn_2 + Nno + Nn, & o &= 2(NO_2 + Nco_2) + Nh_2o + Nco + Nno + No + Noh, \\ c &= Nco_2 + Nco, & h &= 2(Nh_2o + Nh_2) + Nh + Noh \end{aligned}$$

ここで， N_i と N_t を未知数とする非線形の12元連立方程式を解くことになる．以上の方程式から当量比と初期温度に対する燃焼生成物 OH, NO, CO の結果を図4.1に示す．まず，OH と NO は当量比 1.0 より若干低い領域で最大値を示しており，その前後では下がっているのがわかる．CO は当量比 1.0 以上になると不完全燃焼により急激に増加している．初期雰囲気温度による結果ではいずれも高温になるほどほぼ線形的に増加している．

以上の結果から、燃焼中の中間生成物であるOHは高温領域、当量比1.0より若干希薄な領域で多量に発生し、NOと類似した挙動を示すことがわかる。

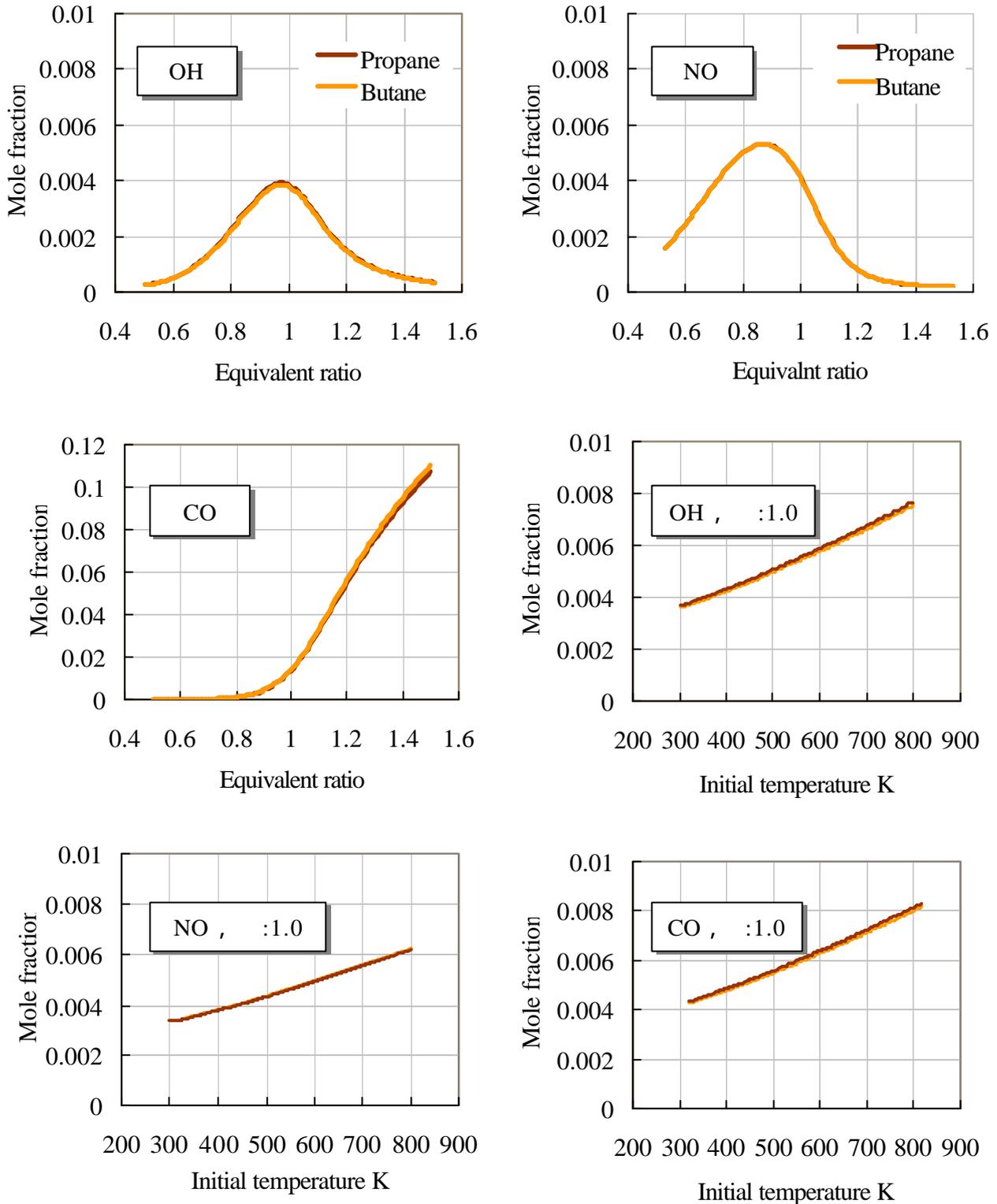


図 4.1 当量比および温度による各種生成物の特性

4.2 LIF法によるLPGの燃焼可視化

火炎の反応帯では一般に多くの中間生成物質が形成され励起された状態にあるものが多い。これらの励起状態にある分子，原子，ラジカルは近紫外から可視波長域にかけてバンドスペクトルを出しており（化学発光），その中でも OH ラジカル（以下 OH）は燃焼反応において重要な役割を果たし，近紫外の波長 280nm，310nm 付近に強い発光を示す。また，炭化水素を含む火炎は C₂ ラジカル，CH ラジカルを含み 390nm～560nm 付近にいくつかの強いバンドスペクトルを出すので火炎が青色ないし青緑色を呈する。一方，水素火炎はこれらのラジカルを含まないため無色に近く，OH のみを計測したい場合に適している。炭化水素火炎においては炭化水素の初期分解過程において C₂ が生成し，続いて



になる反応により CH が少量生成し，さらに



なる反応により OH が生成される。OH の吸収帯は 266.13nm に存在する X² (v''=0) A² (v'=2)準位間の振動エネルギー遷移を，発光(蛍光)波長は A² (v'=2) X² (v''=1,2,3)準位間のエネルギー遷移を用いた。また，CO の酸化反応過程や，NO_x の生成・分解過程でも生成する。図 4.2 に LPG ブンゼンバーナーから発生する中間生成物の発光スペクトルを示す。307nm 付近に発光する OH と他にも 430nm での CH，516nm での C₂ ラジカルの発光が存在しているのが観測された。

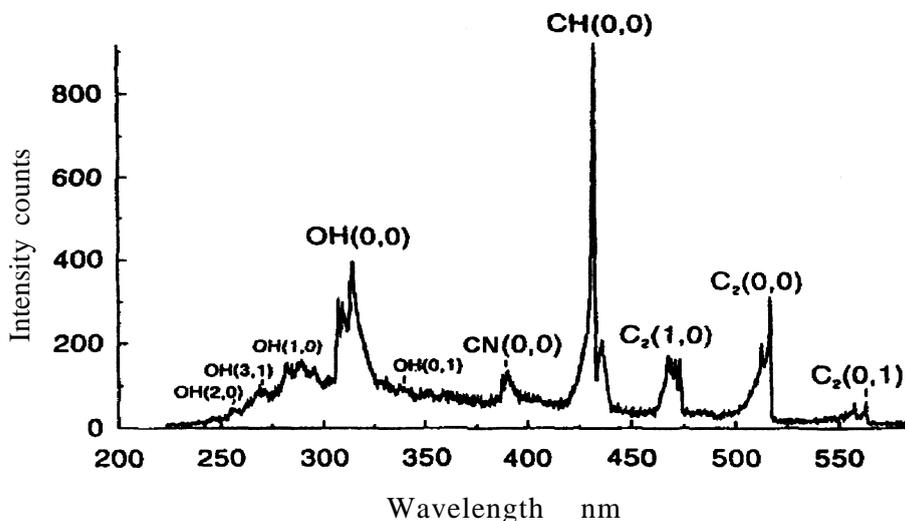


図 4.2 燃焼生成物質の発光スペクトル

OH ラジカルを励起するための光源として、Nd-YAG レーザ (Spectra Physics 社製) を使用した。Nd-YAG レーザの第四光調波は 266nm を中心波長としたスペクトルの広がり (ガウス分布) をもって発振されており、通常の第四光調波では吸収帯が非常に狭い OH を励起させることはできない。そこでエタロンをレーザの共振器中に挿入し、スペクトルを狭帯域化させることで OH 吸収波長 266.13nm に合わせ OH の 2次元計測を行った。レーザビームは、2枚のシリンドリカルレンズによってシート化されバーナー火炎の中心に垂直に入射させる。火炎中の励起 OH ラジカルからの蛍光像は透過中心波長 307 nm、半値幅 5nm、最大透過率 40% のバンドパスフィルターを介してイメージンテンシファイア式 CCD カメラ (Photometrics 社製、STAR I) によって選択的に撮影した。ブンゼンバーナーからの OH ラジカルを図 4.3 に示す。



図 4.3 ブンゼンバーナーによる OH 計測

まず、当量比による OH の輝度の変化を調べるため、LPG の予混合燃焼計測を行った。LPG の濃度が低い当量比 1.0 以下では着火ができず、燃焼が可能な当量比 1.24 以上のみで行った。雰囲気初期温度は 300K、圧力 0.25 MPa の下、点火信号からレーザ照射時期を遅延することで各時間別に撮影し、図 4.4 にその結果を示す。実験結果から、当量比が 1.0 に近づくと OH が多く生成されることがわかる。

次に LPG の噴霧燃焼画像を図 4.5 に示す。点火時期および位置を変化させると安定した着火が得られず、スパーク点火時期を噴射後 3.0ms、点火位置をインジェクタから垂直 4.5 mm 一定とし、点火時期からのレーザ遅れをパラメータとして OH の時間変化を観察した。画面の左が散乱光であり、噴霧やすすの散乱を表している。その右側は 307 nm のバンドパスフィルターで撮影した散乱光を含む OH ラジカルを表している。つまり、右側の画像から左側の散乱光領域を引いて考えると右側の画像の点火栓付近に写っているのが OH であると考えられる。OH は点火プラグを中心に火炎全体に広く分布していることがわかる。しかしながら、その強度は弱いため、蛍光強度の勾配まで観察するのができず、さらに、高温高圧場を再現する際にエチレン燃焼によって発生する水蒸気や燃焼生成物によって LIF による OH 計測は困難であると判断されたので、以後、自発光による計測を中心に述べる。

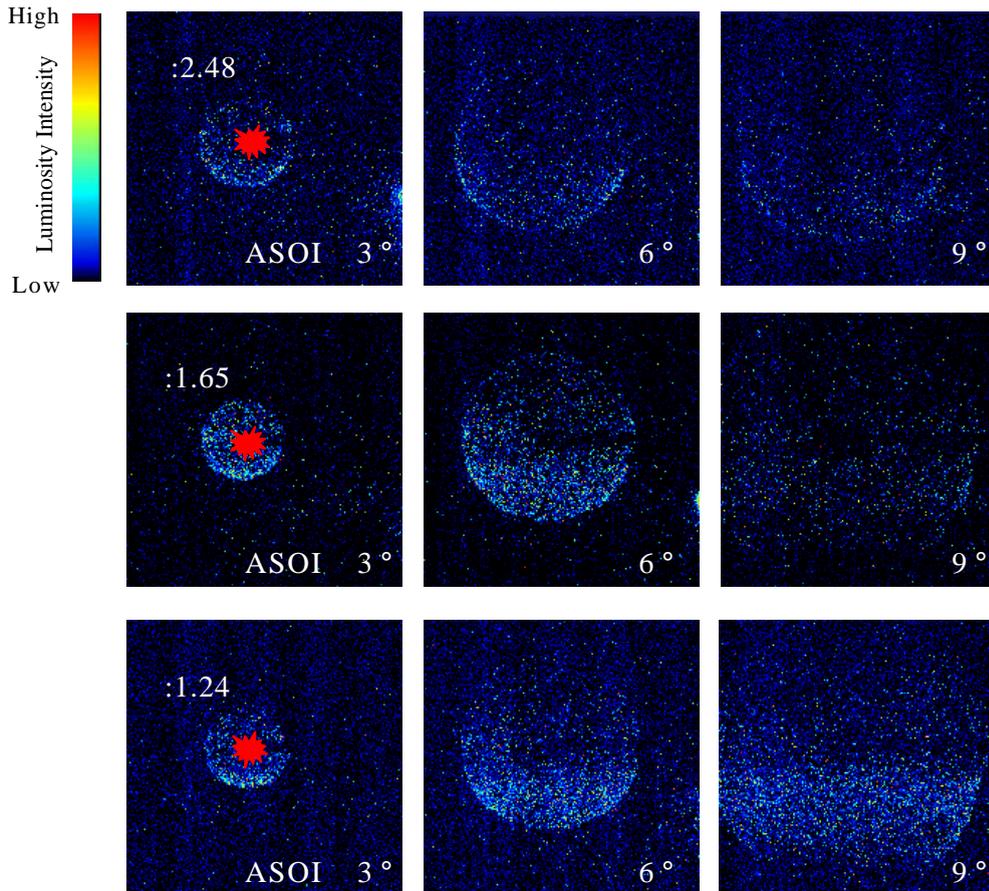


図 4.4 LPG 予混合燃焼による OH ラジカル画像 (クランク角度は 1000 rpm 相当)

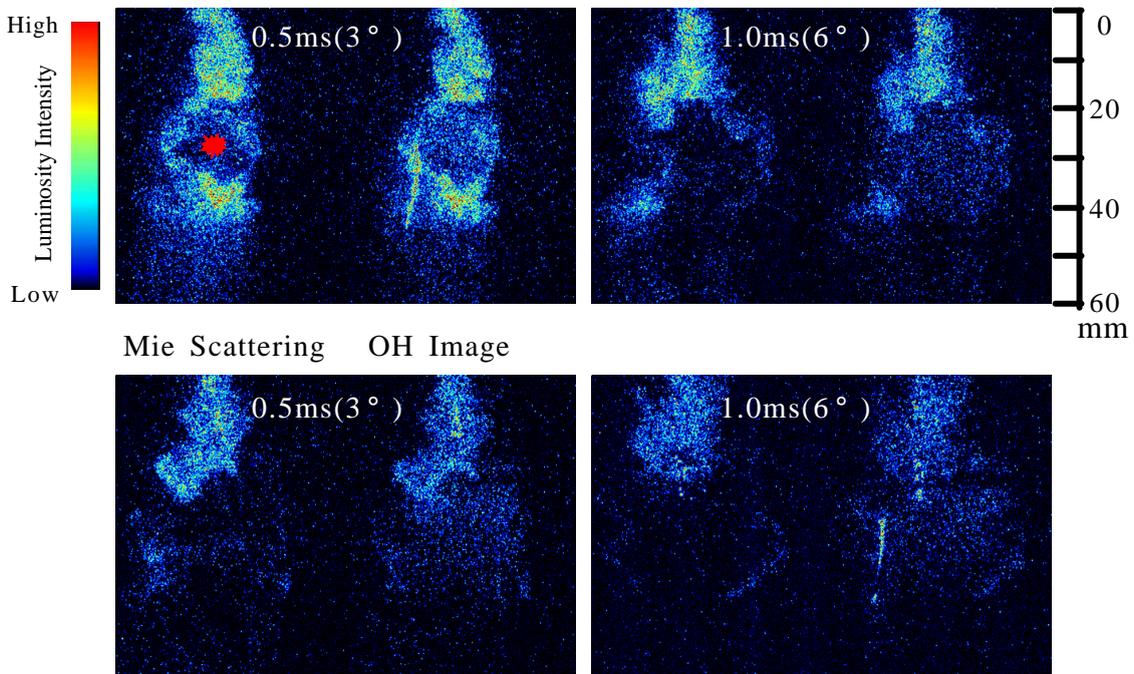


図 4.5 LPG 拡散燃焼による OH ラジカル画像

(画像内の数字はスパーク点火後の時期-クランク角度は 1000 rpm 相当)

4.3 自発光によるLPGの燃焼可視化

LIF法によるOH計測は火炎の断面撮影が可能である利点があるが、前述したように解析するのに十分な強度を持たない。そこでここではOHラジカルの自発光計測について述べる。OH自発光は熱的に励起されたり、平衡状態における可逆反応により生成されたりして、燃焼反応(4.1)、(4.2)によらなくともある程度生じる。

LPGのOH計測に先立ち、まずバーナーの自発光スペクトルを分光器により測定した。火炎とファイバー測定部の間に石英ガラスを設置した。その計測方法の概略図を図4.6、結果を図4.2に示す。

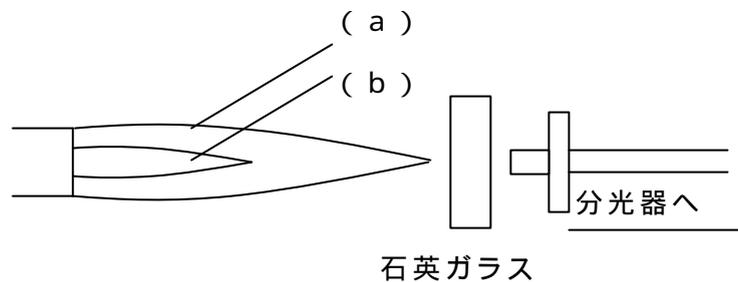


図 4.6 LPG 拡散燃焼による OH ラジカル画像

計測方法としては、I/I 付高速度カメラ(9000fps)にステレオスコープを装着し、輝炎とOHを同時に撮影した。OH側は波長307nm付近に存在するOH(0,0)を計測し、輝炎側では紫外光カット・可視光用NDフィルターをそれぞれ装着した。表4.1に実験条件を、表4.2にNDフィルターの諸元を示す。

表 4.1 噴霧燃焼の実験条件

容器容積 ℓ	1.45
雰囲気温度 K	300, 800K
雰囲気密度 kg/m^3	4.0
雰囲気酸素濃度 vol%	21, 28, 41, 58
噴射圧力 MPa	40
噴孔直径 mm	0.35
噴射量 mg	20
点火時期 (噴射後) ms	2.2, 2.7

表 4.2 ND フィルタ

型式	PRO ND フィルター ND2, ND4, ND8
製造会社	KENKO
口径	62mm
透過範囲	可視光域

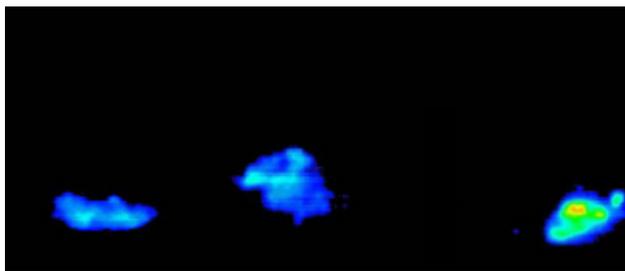
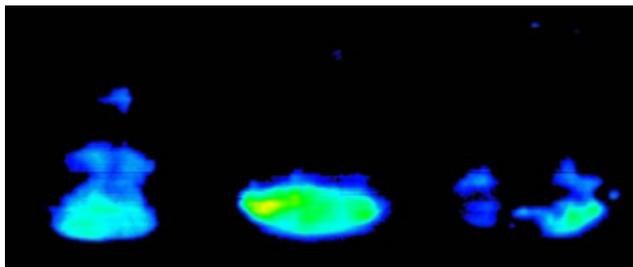
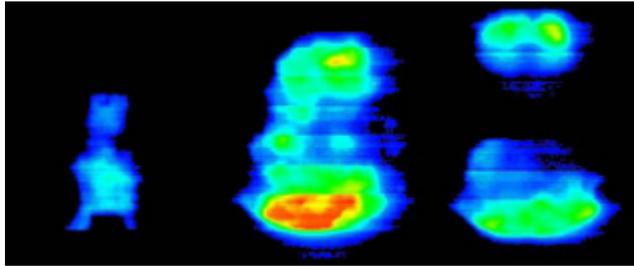
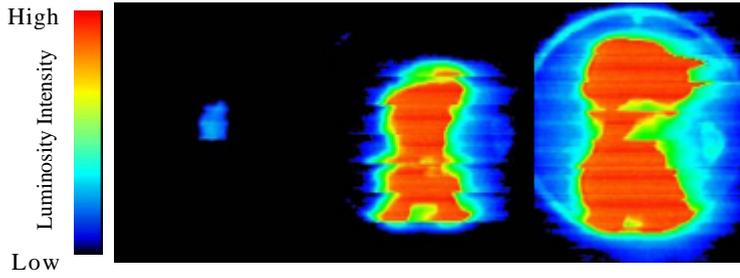
定容容器内でLPG自由噴霧に着火させたときのOH自発光と輝炎画像を図4.7~9に示す。図4.7の雰囲気酸素濃度による結果から、雰囲気酸素量が多い方がOHの発生が多く、その消滅時間も早い傾向が認められる。一方、雰囲気酸素濃度28%の場合、OHの輝度および分布が少なく、OHが消滅した後でも輝炎が存在しているのが観測された。このことから、燃焼が活発に行われると燃焼中のOHラジカルが輝炎と同時に多量発生し、その生成と消滅が早くなる。図4.8にこれらの画像から時間別にOHの平均輝度を表した。雰囲気酸素濃度が高い54%の場合、OHの発生が急激な増加と消滅の挙動を見せるに対し、雰囲気酸素濃度が低くなるほど最大輝度の値も低く、中心位置も遅延されているのがわかる。

図4.9に点火時期による結果を示す。輝炎とOHの挙動が明らかに異なり、OHが生成された後、輝炎が発生する様子が観察される。噴射後、点火時期が早い2.2msの場合は点火時期2.7msの結果よりもOHが多く生成されており、燃焼が活発に行われていることがわかる。これは噴射期間が2.0msであるため、噴射後点火時期が2.7msの場合は既に燃料噴射が終り、希薄化により燃焼がしにくくなったためと考えられる。また、点火時期が2.2msより早い点火時期では噴霧内部の濃い混合気と蒸発線熱潜熱による温度低下が原因で失火するケースが多かった。

図4.10にOHと輝炎の平均輝度を時間履歴で示す。噴射後点火時期が2.2msの場合、燃焼が活発に行われているため、燃焼初期におけるOHと輝炎が多く発生するが、燃焼後期になると発生されたすすがOHによって酸化され、ほぼ同時に消滅して行く。しかしながら、噴射後点火時期が2.7msの場合はOHとすすによる輝炎の輝度が微弱であるが、燃焼後半になるとOHの発生は少ないのに対し、すすが大量に発生するのが明らかである。

図4.11に雰囲気条件による結果を示す。高温高圧場内での燃焼が常温に比べて噴霧の蒸発が進み周囲空気との混合が活発になり、燃焼状態が大きく改善されている。図4.12にOHと輝炎の平均輝度を時間履歴で示したが、これより、高温高圧でのOHと輝炎が急激に増加した後、消滅するのに対し、低温低圧場では微弱なOHの発生と燃焼後半におけるすすが多量発生することが明らかである。これらの結果から、OHは燃焼の進行度合いを表す重要な因子であることがわかる。

以上、LPG自由噴霧燃焼は、雰囲気条件、点火時期特性によって大きく影響されるため、エンジン内での混合気形成に当たっては点火の時期と位置が重要な因子となることが示唆される。



(O₂ %) : 15.62(28%) 22.87(41%) 32.35(54%)

図 4.7 雰囲気酸素濃度による OH ラジカル
(クランク角度 : 1000 rpm 相当 ,
点火位置 : ノズル下 45mm)

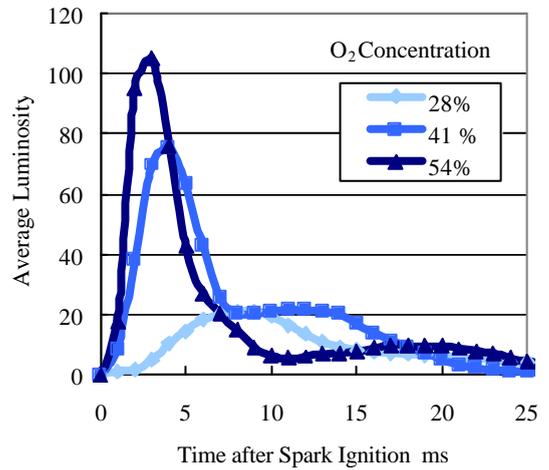
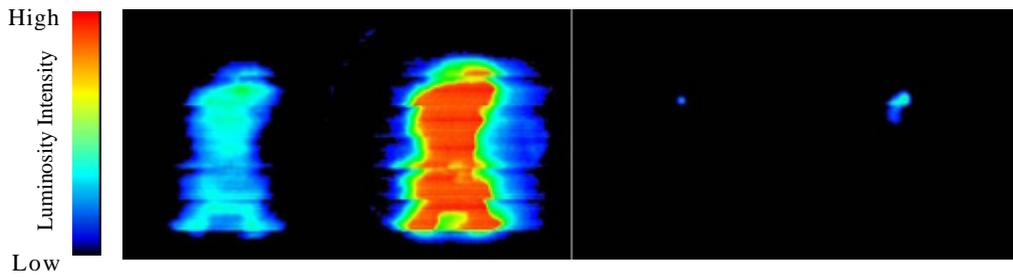
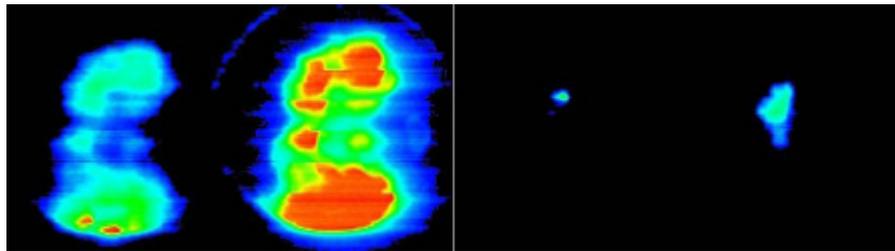


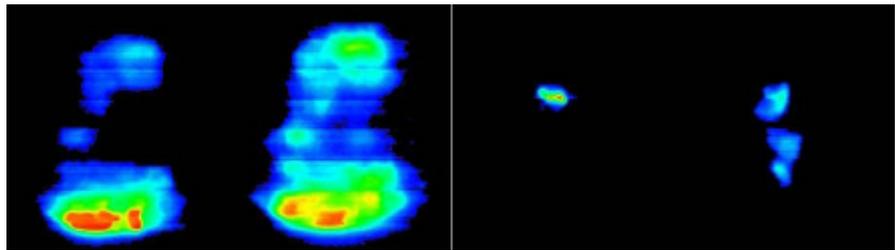
図 4.8 OH 輝度の変化



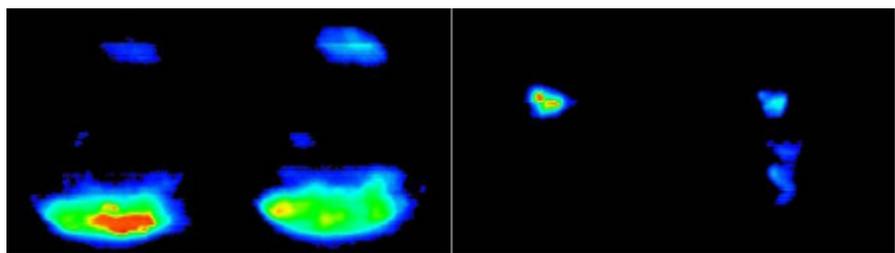
ASOIgnition 0.88ms (5.3 °)



ASOIgnition 1.55ms (9.3 °)



ASOIgnition 2.22ms (13.3 °)



ASOIgnition 2.88ms (17.3 °)

Flame

OH

Flame

OH

点火時期：燃料噴射後 2.2ms

点火時期：燃料噴射後 2.7ms

図 4.9 点火時期の違いによる輝炎及び OH ラジカル比較
(クランク角度：1000 rpm 相当，点火位置：ノズル下 45mm)

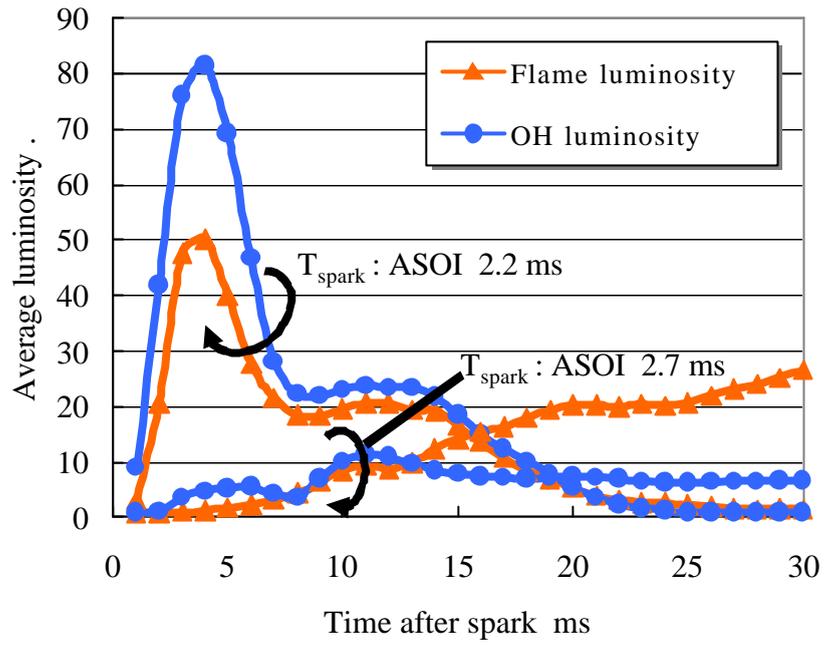
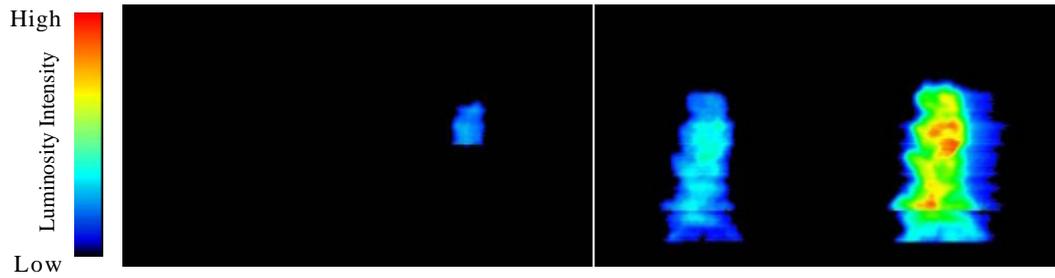
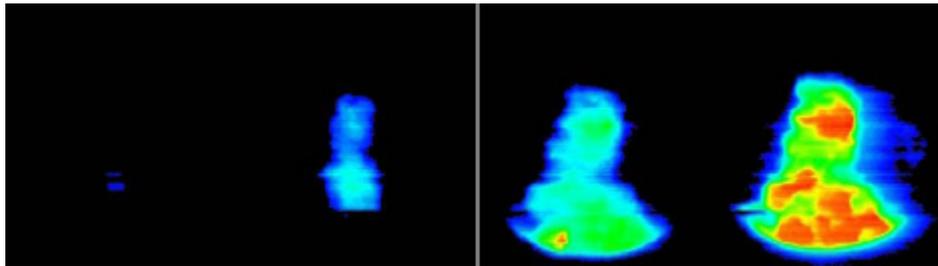


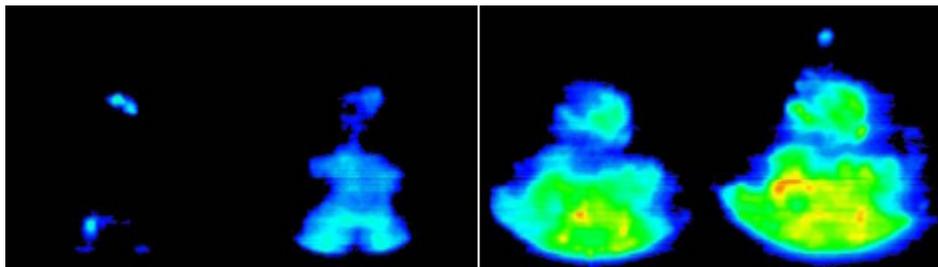
図 4.10 点火時期の違いによる輝炎と OH ラジカルの比較



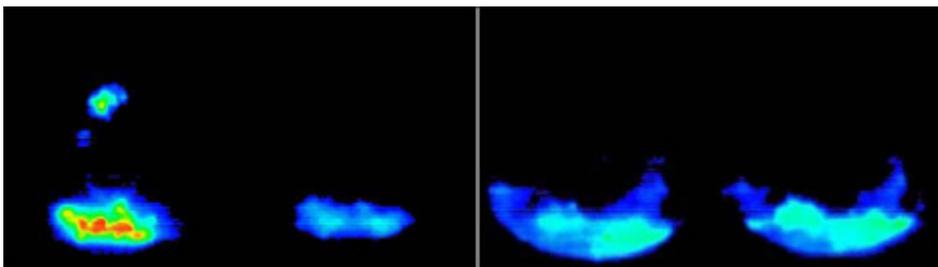
ASOIgnition 0.88ms (5.3°)



ASOIgnition 1.55ms (9.3°)



ASOIgnition 2.88ms (17.3°)



ASOIgnition 7.55 ms (45.3°)

輝 炎 OH 輝 炎 OH
0.25 MPa , 300K 1.5MPa , 800K

図 4.11 雰囲気条件の違いによる輝炎及び OH ラジカル比較

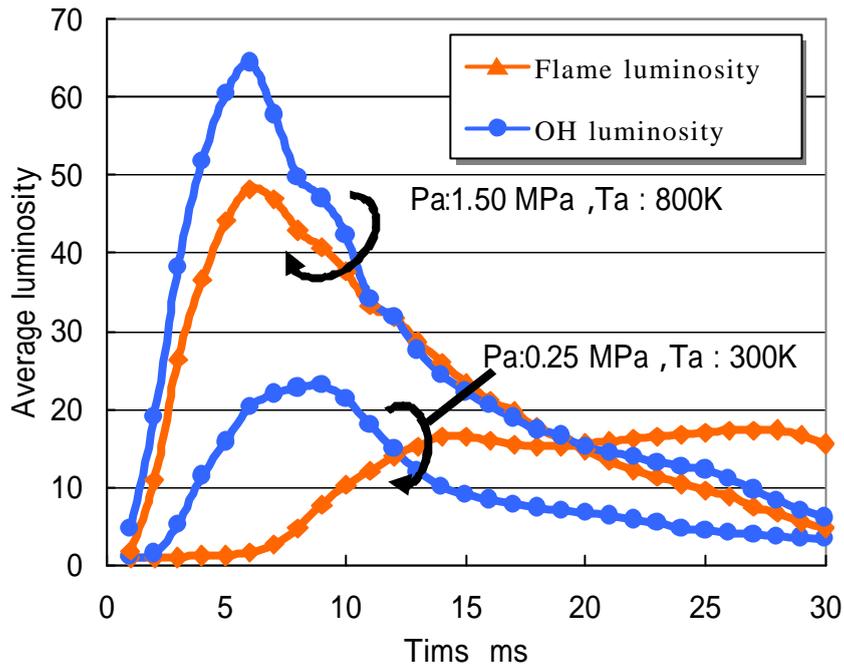


図 4.12 雰囲気条件による輝炎と OH ラジカルの比較

次は実機と同じ燃焼室形状を模擬した衝突板燃焼を雰囲気温度 400K、密度 6.0 kg/m^3 の条件で、同じく OH 自発光と輝炎を計測した結果を図 4.13 に示す。いずれの条件においても OH がプラグを中心に発生しており、輝炎は OH がある程度発生し終わった後、衝突板付近から多く発生しているのがわかる。LPG 燃焼で発生したすすは燃焼中にほぼ燃えてなくなるということが知られているが、実際のエンジンの燃焼室キャビティ壁面にすすが噴霧の形に多く付着していること（図 4.15 参照）と併せて考えると、キャビティ壁面付近では噴霧の運動量の減衰による空気導入の低下と燃料の蒸発潜熱による温度低下、そして燃料の付着などが原因でキャビティ付近においてすすが多く発生すると考えられる。

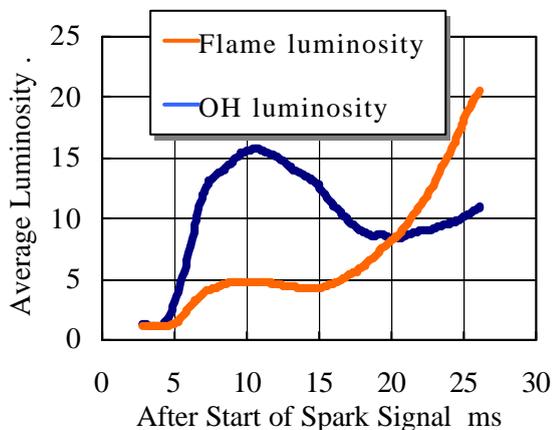


図 4.14 衝突噴霧燃焼による輝炎と OH の発光強度比較



図 4.15 実際のエンジンのキャビティ
日産ディーゼル(株)提供

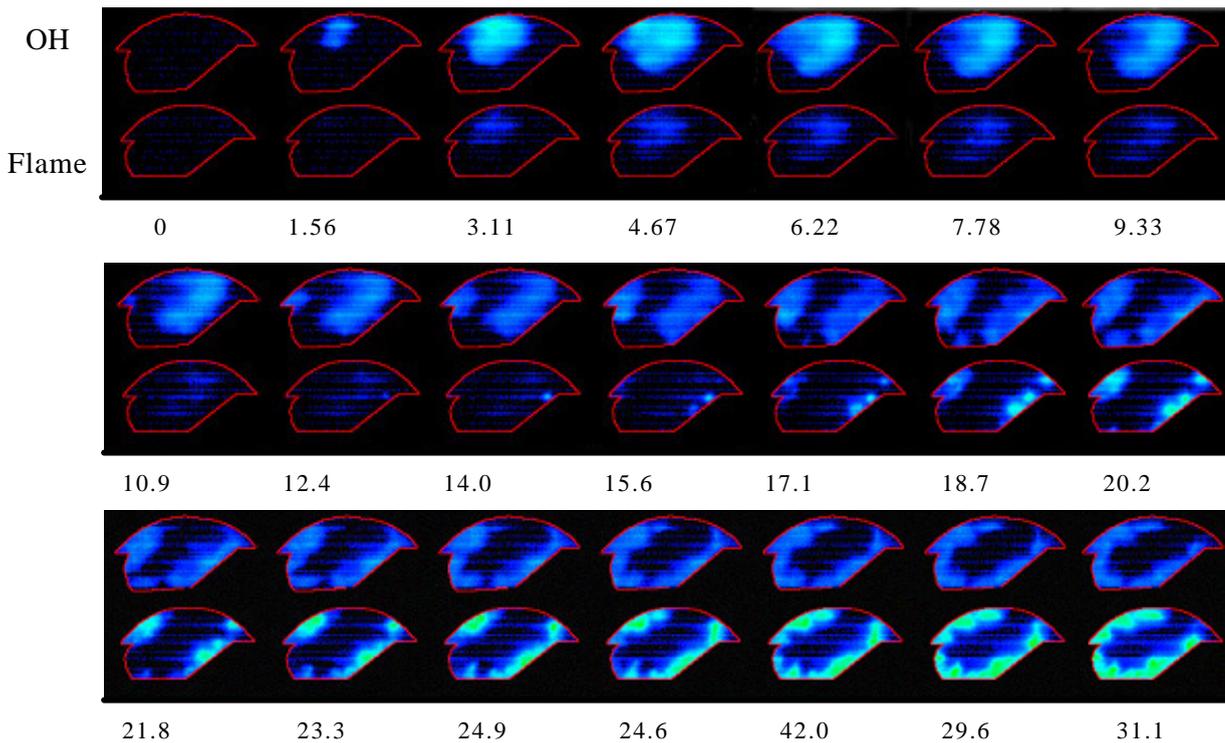


図 4.13 衝突噴霧燃焼による輝炎と OH の比較

(T_a : 300 K, P_a : 0.1Mpa, 点火時期:噴射後 6.0 ms)

4.4 LPGの燃焼と排出ガス特性

LPG 燃焼の排気ガス分析を行うため、自動車排気ガス測定装置(MEXA-1500DEGR)を用いた。MEXA-1500DEGRでは、非分散赤外線分析法に基づく赤外線分析器により CO , CO_2 を、化学発光法に基づく窒素酸化物分析計により NO_x を、また、水素炎イオン化検出法により THC を、磁気圧力式全炭化水素酸素分析計により O_2 をそれぞれ測定する。排気ガス分析計の全景と仕様を図 4.16 と表 4.3 に示す。

定容燃焼器で LPG 燃焼を行った後、容器内のガスをテドラバッグに採集し排気ガス分析装置に吸入して、分析した。



図 4.16 排気ガス分析装置 MEXA-1500DEGR

表 4.3 自動車排気ガス測定装置(MEXA - 1500DEGR)仕様

項目	仕様				
測定成分	CO	CO ₂	NO/NO _x	O ₂	THC
測定方式	NDIR 除湿	NDIR 除湿	CLD 常圧 除湿 NO _x コンバータ (効率 95%)まで 加熱サンプル	磁気圧式	FID 加熱 ベースガス (N ₂ /AIR)選択可
レンジ数	2	2	4	2	4
測定範囲	0~1 / 16	0~8 / 16	0~100 - 1000	0~10 / 25	0~500 - 5000
	or 0~0.1 / 1	or 0~10 / 20	or 0~500 - 5000		
単位	vol%		ppm	vol%	ppmc
再現性	フルスケ - ルに対して ± 1 % 以内				
直線性	± 1 % FS	± 1 % FS	± 1 % FS	± 1 % FS	± 1 % FS
	精度 10 %		精度 4000ppm		
T90 応答	2 秒以内				
ZERO/SPAN	フルスケ - ルに対して ± 1 % 以内				
ドリフト	8 時間 周囲温度変化 ± 5 以内にて				

4.4.1 EGR の影響

EGR は NO_x 低減の重要な手段の一つであり，本研究においてもその影響を調べるため，直接噴射式 LPG エンジンを想定して定容燃焼器で排気分析実験を行った．このため，ガス組成を空気，EGR 率 10%，20% に設定して，各条件下における OH と輝炎発生の比較を同時に行った．図 4.17 に定容燃焼器における EGR 率と酸素濃度の関係を示した．排気ガスは CO，NO_x，THC を中心に計測したが，インジェクタからのリークがあり THC は測定範囲を超えたため本実験では CO と NO_x のみを対象とした．

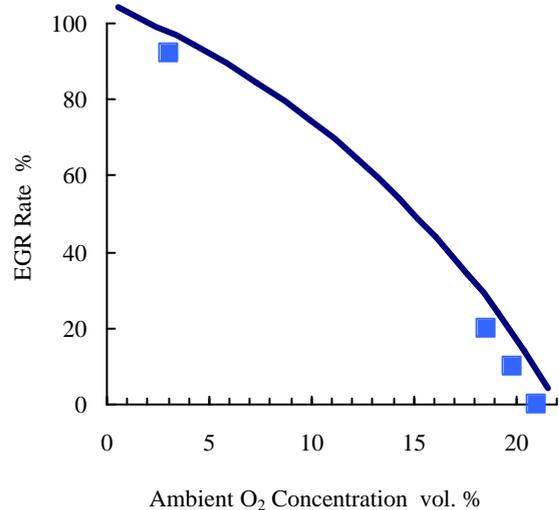


図 4.17 酸素濃度と EGR 率

撮影された OH と輝炎の画像は静止画としてパソコンに取込まれ，256 段階にグレースケール画像を 256 色にカラー化し，以下に示す．

図 18, 19 に EGR 率による OH と輝炎，筒内圧力・熱発生率と排気ガス分析結果を示す．図より OH と輝炎の画像からは EGR 率が高くなるにつれ，その強度が弱まって行くことがわかる．筒内圧力と熱発生率からも圧力のピーク値と熱発生の中心が遅延されており，EGR による燃焼抑制が確認された．一方，排気ガス結果からは燃焼の抑制効果により NO_x は低減しているが，逆に不完全燃焼により CO は増加している．

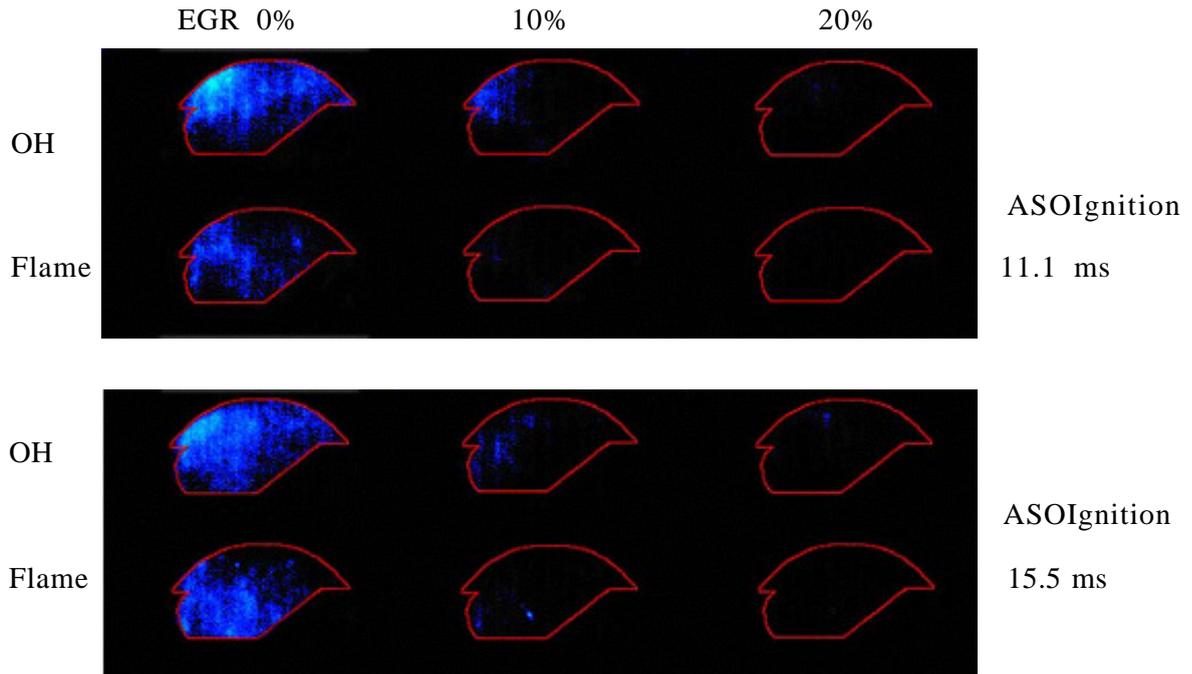


図 4.18 EGR 率による OH と輝炎の比較

(点火時:期噴射後 8.3 ms 雰囲気温度 80 ，密度 8.0 kg/m³)

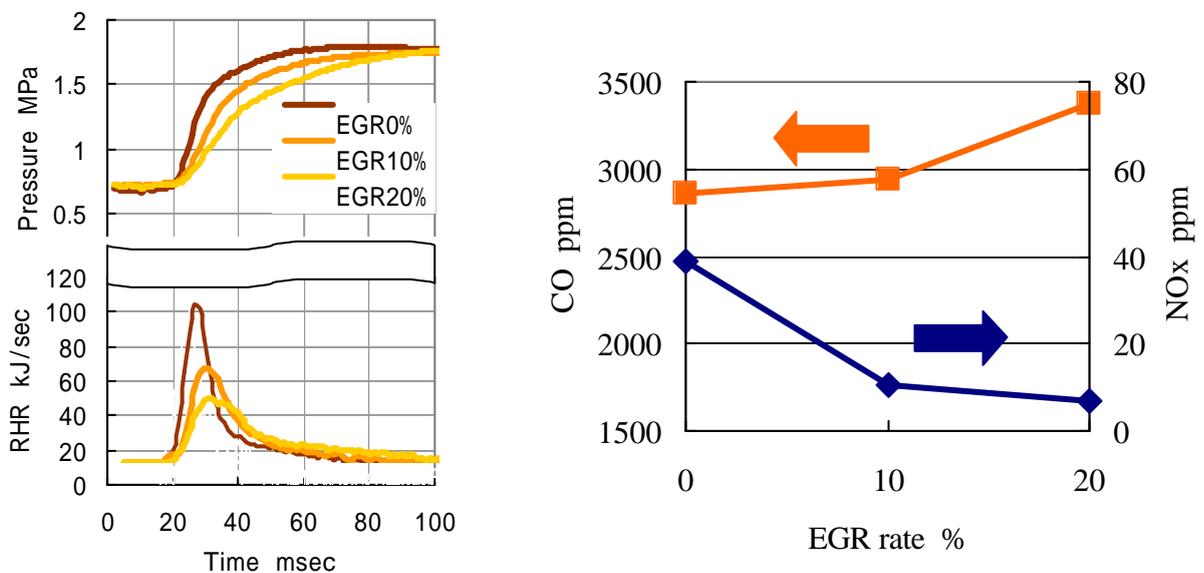


図 4.19 EGR 率による燃焼および排気ガス特性

4.4.2 射圧による影響

図 4.20, 21 に噴射圧による OH と輝炎, 筒内圧力・熱発生率と排気ガス分析結果を示す。OH と輝炎の画像から明らかなように, 噴射圧 15 MPa での燃焼が 10 MPa に比べ明らかに改善されている。これは, 第 3 章で述べたように高圧化することにより噴霧の微粒化が進んでおり, 壁面衝突時における雰囲気気の導入も促進されたためである。図 4.21 の筒内圧力と熱発生率では噴射圧 15 MPa の方が燃焼の改善により圧力の最大値が高く, その立ち上がりも早い。一方, 排気ガスの計測結果では, 噴射圧が高い 15 MPa の方が NO_x とともに CO も増加している。ここでも, CO の濃度が異常に高いが, これは LPG が燃えた後, 燃焼器内の酸素濃度が低い条件で, 燃料のリークによる不完全燃焼が原因であると考えられる。なお, CO については通常エンジンで用いられる触媒で浄化されるので, 問題とはならない。

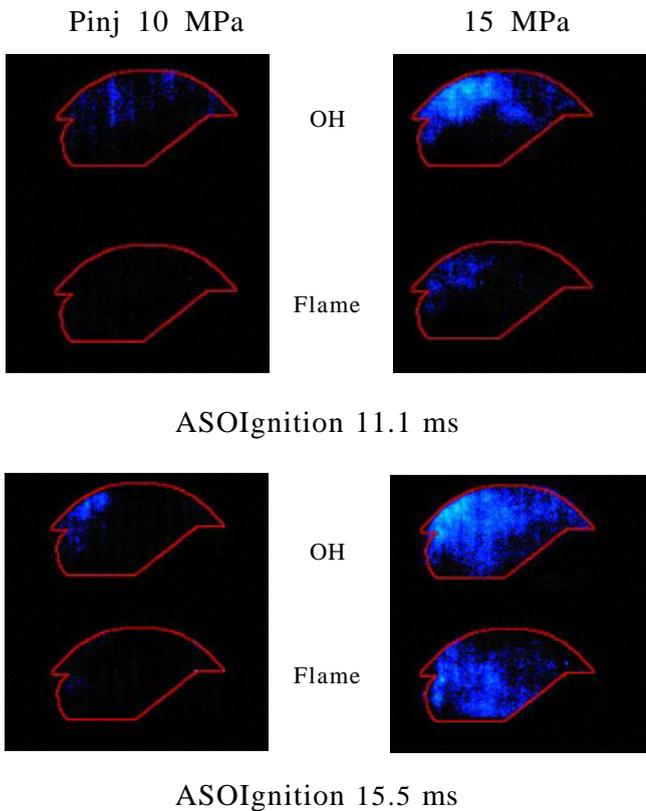


図 4.20 噴射圧力による OH および輝炎の比較

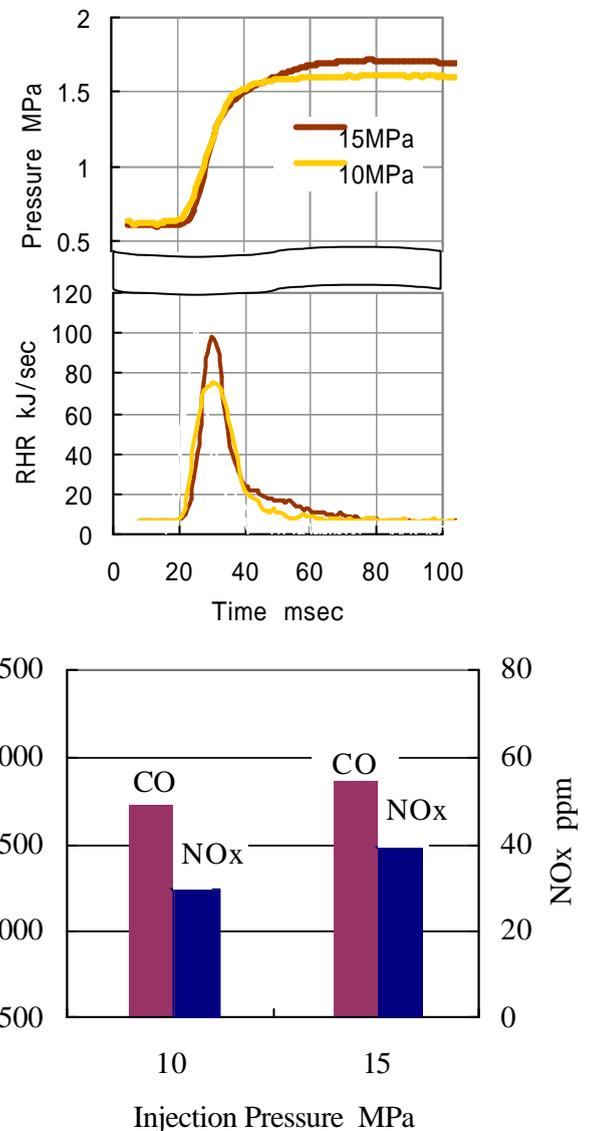


図 4.21 噴射圧力による燃焼および排気ガス特性

4.5 まとめ

直接噴射式 LPG の成層燃焼において燃焼過程を明らかにするため、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 ラジカルと輝炎の計測により点火条件、EGR 率、噴射圧などが LPG 燃焼に与える影響について述べた。さらに LPG 燃焼後の排気ガスを分析し、各種因子が排気ガスに及ぼす影響も調べ、次のような結果を得た。

- (1) LPG の自由噴霧燃焼における 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観察された。
- (2) OH ラジカルは火炎の温度が高く、当量比 1.0 付近で多く発生し、燃焼特性の指標として有用であり、その計測から点火時期や雰囲気条件によって燃焼の具合が大きく変わる傾向が確認された。
- (3) 衝突噴霧燃焼では混合気が衝突面によって巻き上げられ点火栓に到達した後、点火プラグによって燃焼が始まると OH が先に発生し、燃焼室全体に広がる傾向となった。一方、輝炎は衝突壁の底面から多く発生したが、これは噴霧の運動量の減衰による空気導入の低下と燃料の蒸発潜熱による温度低下、そして燃料の付着などが原因ですすが多く発生したためと考えられる。
- (4) LPG の噴霧燃焼における EGR の影響を調べるため、燃焼可視化および排気ガス分析を行った結果、燃焼の抑制による NO_x 低減効果が確認された。
- (5) LPG の噴射圧による燃焼可視化および排気ガス分析を行った結果、微粒化促進により燃焼が改善されたが、NO_x は増加する傾向となった。