

第3章

LPGの噴霧特性

直接噴射式ディーゼル機関および成層燃焼機関において、噴霧燃焼の研究分野では、高効率化と排気浄化の両立を可能にする燃焼方式の開発が積極的に進められている。そのような燃焼の制御には、燃焼室内における燃料の微粒化、蒸発及び混合気形成過程などを明らかにするのが重要な課題と言える。しかしながら、これらの過程は高速で変動する極めて複雑な現象であり、詳細に調べるのは非常に困難であった。

従来から、各種のレーザパルス光源を用いて燃料噴霧の挙動や液滴と蒸気濃度計測などが数多く行われているが、同一噴射において時々刻々変化する非定常噴霧の計測は、非常に困難を伴うため、不明確な点が多く残されている。そこで本章では、コモンレール噴射装置を用い、室温、高温、高圧の容器内に噴射されたLPG燃料に対して、シュリーレン、レーザ散乱光、レーザ誘起蛍光法(LIF)により詳しく調べた。

3.1 シュリーレン法による噴霧計測

常温常圧では気相状態であるLPGの噴霧到達距離を計測するため、高速度ビデオカメラを用いて、シュリーレン撮影法による燃料の気相部を撮影した。シュリーレン撮影は精度のよいコリメータ系を用い、気体の屈折率のわずかな差でも敏感に感知することができる。この方法により定量的な解析は出来ないが、混合気の挙動や点火プラグまでの到達時間を計測することが可能である。また、同装置を用い、シャドウグラフによるLPG液相の撮影も行い、LPG燃料の液体から気体の変化による噴霧挙動の推移を観察した。さらに、LPGはプロパンとブタンの2成分混合燃料であり、各成分（ブタン+プロパン）による噴霧挙動の違い、そして高負荷での性能低下がLPG燃料の温度上昇によるものと推定され、その影響を調べるため燃料温度を変化させた場合の噴霧挙動をシャドウグラフ法で撮影した。

3.1.1 LPGの自由噴霧計測

定容燃焼器内の雰囲気圧力を0.05, 0.1, 0.4, 0.7 MPaとして窒素を充填し、噴射圧10 MPaでLPG燃料の自由噴霧を計測した。図3.1のシャドウグラフではナイフエッジを完全に外して計測したため背景光法と同じく液相部が対象となっているのに対し、シュリーレン法ではナイフエッジにより主光束を十分に遮ったため液相部とこれを取り巻く気相部が対象になる。これらの計測結果からシャドウグラフ法では背景が白く、液相部は黒くなっているが、シュリーレン法では背景が黒く気相部は白くなっている。雰囲気圧力がもっとも低い0.05 MPaの場合、液相はほとんど残らず、気相が容器の底面まで到達しているのがわかる。それに対し、雰囲気圧力が高くなるにつれて液相の到達距離は短く、かつ濃くなっており、気相部が占める分布面積も低圧条件に比べ狭くなっている。これはLPG燃料の特性上、沸点が低く常温での蒸気圧0.6 MPaより低い雰囲気条件で噴射されると減圧沸騰現象を起こすためである。0.6 MPa以下の雰囲気中に噴射されたLPGは減圧沸騰を起こすため、0.7 MPaと0.4 MPaの間で大きな違いが見られると予想されたが、実際には0.1 MPa（常圧）と0.4 MPaで明らかな違いが見られた。これは、定容燃焼器内に噴射されたLPGが蒸発する際、蒸発潜熱により噴霧周りの熱を奪うことにより雰囲気温度の低下と蒸気圧の低下を招いたためであると考えられる。図3.2にそれぞれの占める面積を時間変化に対してまとめた。これより、液相・気相ともに雰囲気圧力が高くなるほど面積が狭くなっており、燃料の蒸発が抑えられていることがわかる。

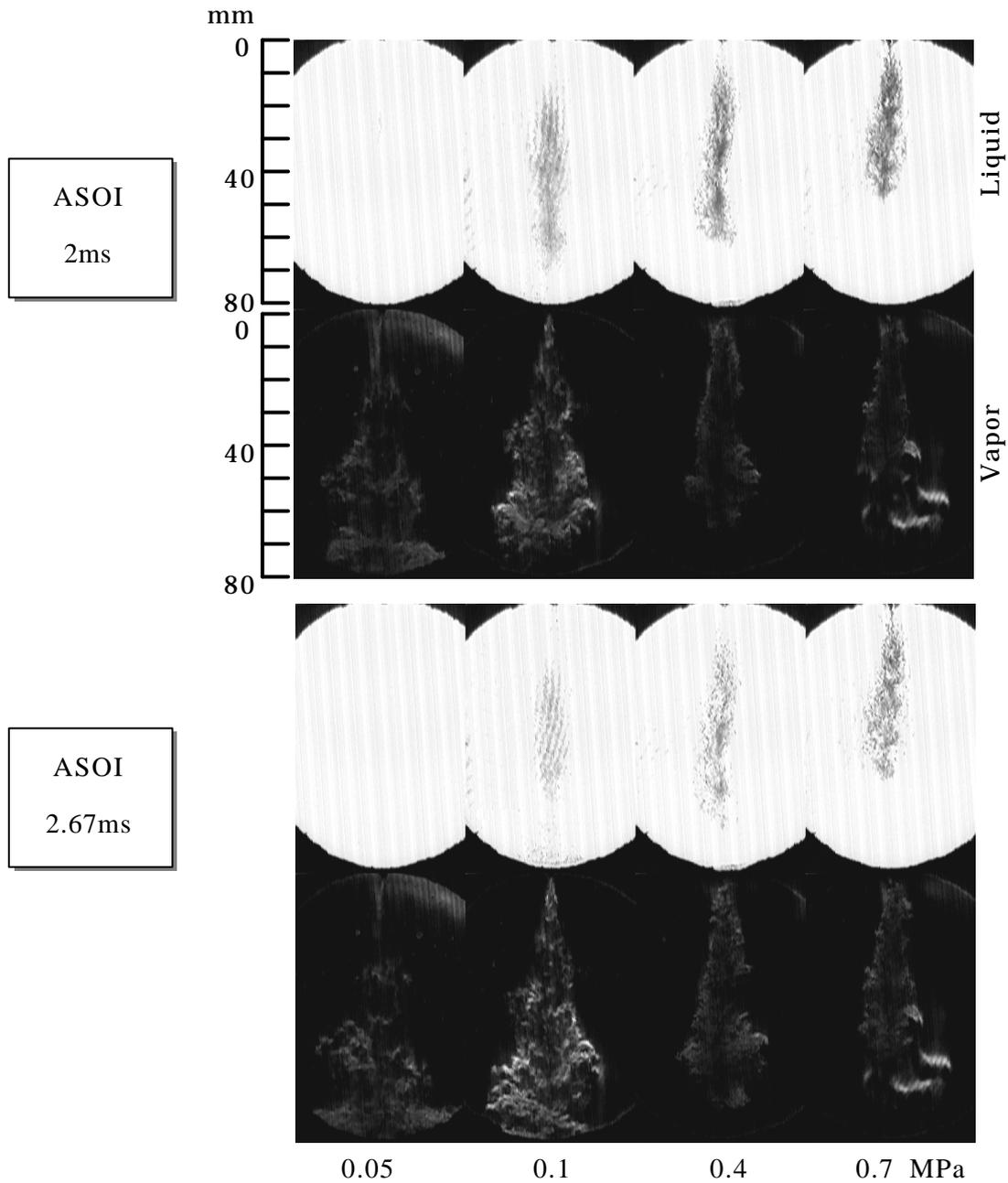


図 3.1 LPGの自由噴霧画像（気・液相画像）

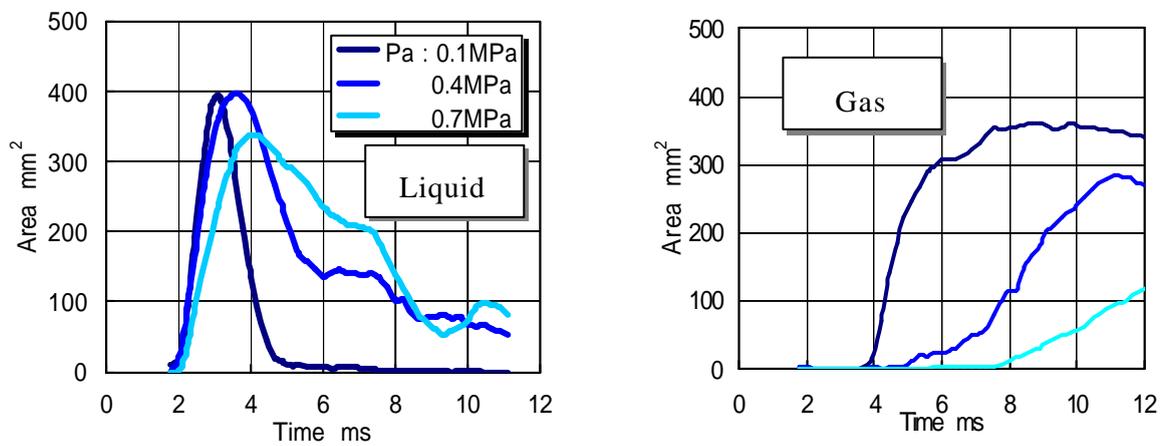


図 3.2 LPG噴霧における気液相分布面積の比較

第3章 LPGの噴霧特性

これらの自由噴霧の到達距離を定量的な式で表すことは困難であるが、燃焼の解析やモデル化するうえでは複雑な式よりも、単純ではあるが噴射の特性を表す式を用いる方が好都合である。これまで和栗らの式、Dentの式、広安式などが用いられてきたが、いずれも、ディーゼル燃料を対象にし、噴霧の到達距離は噴霧の噴射開始からの時間の1/2乗に比例するという式である。そこでLPG燃料に対しても前述の式が適用可能であるかを検証した。まず、広安式を挙げ、ディーゼル燃料における噴霧到達距離は式(3.1)と(3.2)のように表すことができる。ここで、式(3.3)の分裂時間 t_b までは噴霧到達距離は時間に対して比例的に増加するが、それ以後は時間の1/2乗に比例して進む。そして各式での係数は実験による補正係数であり、ノズルおよび燃料によって変わる。前述したLPGの画像から噴霧到達距離を計り、各雰囲気条件別にまとめ、図3.3に広安式による理論値とその式を(3.4)~(3.6)に示す。

$$S = a \sqrt{\frac{2\Delta P}{r_l}} \cdot t \quad (0 < t < t_b) \quad (3.1)$$

$$S = b \left(\frac{\Delta P}{r_a} \right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{d_0 \cdot t} \quad (t > t_b) \quad (3.2)$$

$$\text{ここで, } t_b = c \frac{r_l \cdot d_0}{\sqrt{r_a \cdot \Delta P}} \quad (3.2)$$

Diesel Fuel

$\Delta P = P_{injection} - P_{ambient}$

r_l : 燃料の密度

r_a : 雰囲気気密度

d_0 : 噴孔径

a, b, c : 実験との補正係数

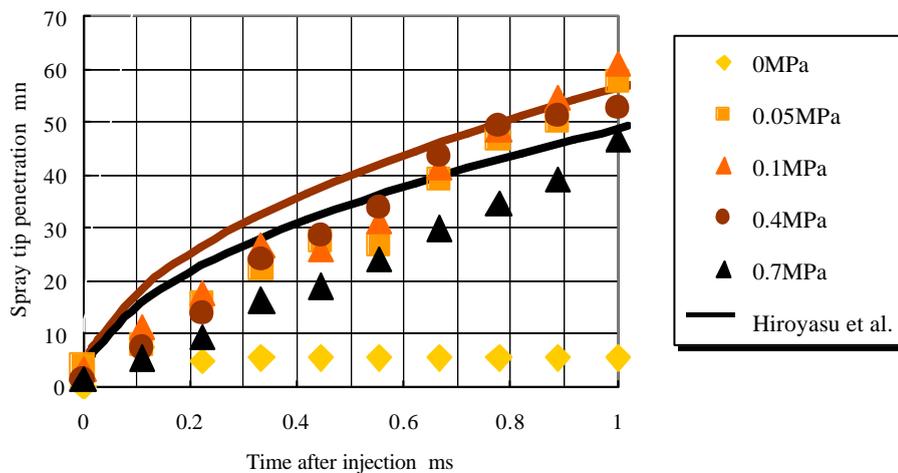


図 3.3 LPG 噴霧における気液相分布面積の比較

$$S = 0.4063 \sqrt{\frac{2\Delta P}{r_l}} \cdot t \quad (0 < t < t_b) \quad (3.4)$$

$$S = 3.254 \left(\frac{\Delta P}{r_a} \right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{d_0 \cdot t} \quad (t > t_b) \quad (3.5)$$

$$\text{ここで, } t_b = 34.28 \frac{r_l \cdot d_0}{\sqrt{r_a \cdot \Delta P}} \quad (3.6)$$

LPG Fuel
$\Delta P = P_{injection} - P_{ambient}$
r_l : 燃料の密度
r_a : 雰囲気密度
d_0 : 噴孔径

減圧沸騰が起こる低圧雰囲気条件では噴射後、すぐ蒸発が活発に行われ、液相を中心とする広安式では実験との差が大きかった。そのため、実験値との比較は雰囲気圧力が高い 0.4 と 0.7 MPa のみとした。その結果、噴霧初期では計算値が若干延びているが、噴霧後半部ではある程度実験値を再現している。広安式によると分裂時間 t_b までは噴霧到達距離は時間に対して比例的に増加するが、LPG 燃料に関しては粘性と表面張力が低いため、その分裂がより早く行われ、計測値より長くなったと推定される。このような低沸点燃料のペネトレーションや噴霧角度については、今後より詳しく調べる必要がある。

3.1.2 衝突噴霧の計測

実機と同じ形状の衝突板を燃焼器内に設置し、その衝突噴霧の挙動を調べた。雰囲気温度は常温、圧力は 0.1, 0.7MPa で計測を行い、その結果を図 3.4 に示す。噴霧が衝突板にあたると同時にほぼ気相流となり、気化された LPG 混合気が方向を変え、点火プラグまで巻き上がる様子から混合気自身もある程度の運動量を持っていることがわかる。また、自由噴霧と同様、雰囲気圧が高圧になるほど、噴霧の拡散が悪くなっていることが確認された。図 3.5 に自由・衝突、両噴霧の面積を比較したグラフを示す。比較した条件は、雰囲気圧力 0.1, 0.7 MPa , 噴射圧 10 MPa , 噴射量 10 mg である。計測結果より両噴霧の液相部面積にはあまり変わりはなく、衝突板噴霧のほうがわずかに拡散が少ないことがわかる。しかし、気相部では、明らかに衝突板噴射の方の気相部面積が大きく、衝突板の影響により噴霧の蒸発が促進されていることがわかる。これは、運動エネルギーをもった燃料が衝突板にぶつかることにより、激しく分裂して蒸発しやすくなることが原因と考えられる。

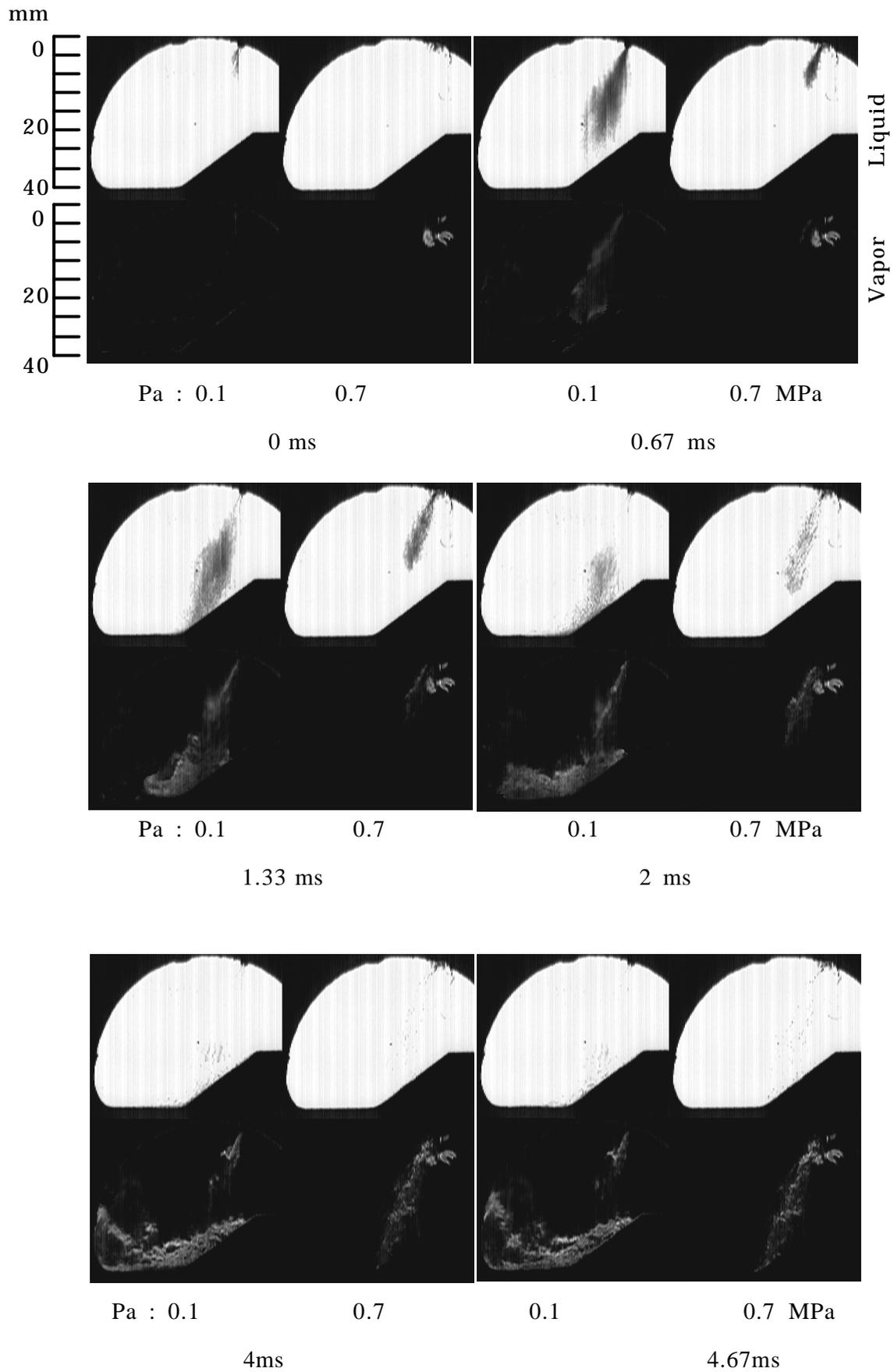


図 3.4 衝突板噴霧 気・液相画像

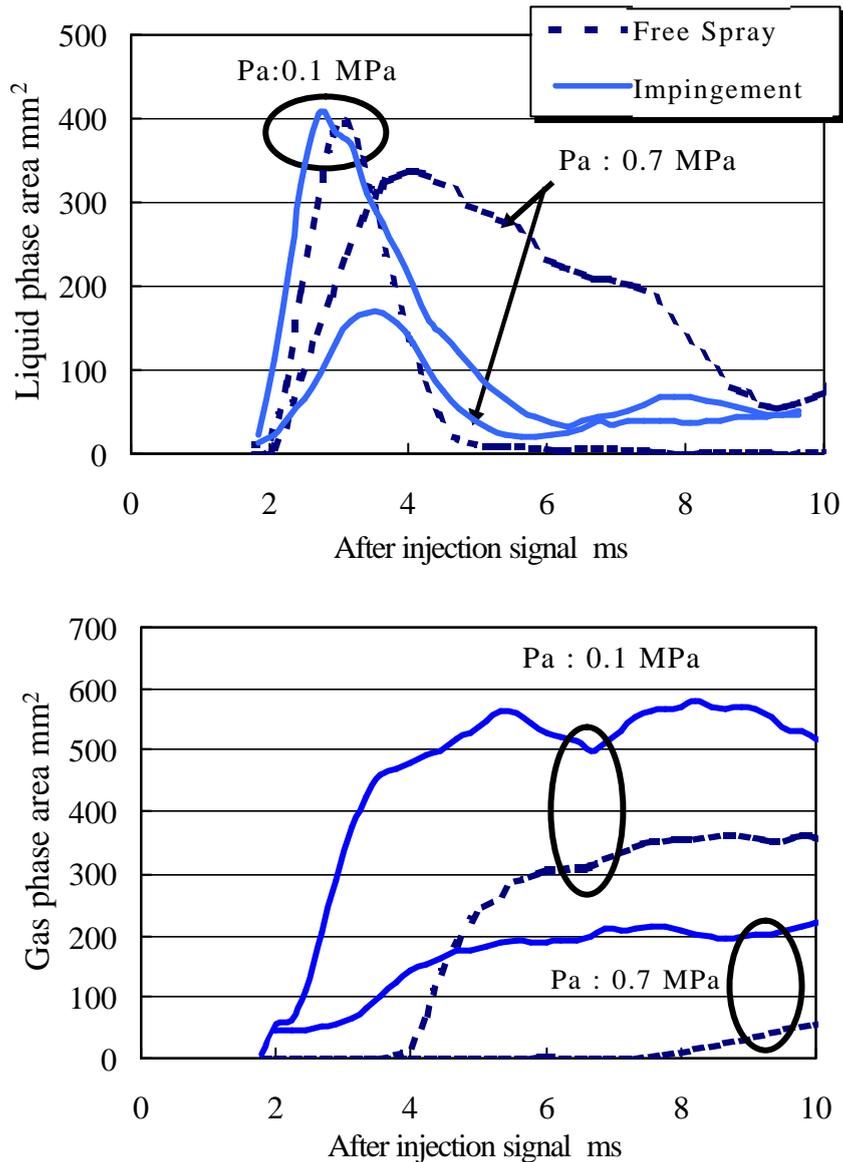


図 3.5 シュリーレンとシャドーグラフによる気液相面積変化

3.1.3 プロパン・ブタン自由噴霧

本実験で使われているLPGの成分はプロパン 30%、ノルマルブタン 70% Vol.と構成されており、その成分は供給する地域や季節により変わる可能性がある。そこで各成分の噴霧特性をシャドーグラフ法により計測を行った。定容燃焼器内の雰囲気気圧力は 0.4、0.7MPaで充填させ、噴射圧 10MPaで実験を行った。

図 3.6は雰囲気気圧力 0.4 MPaでの各燃料の噴霧画像を示す。プロパンよりブタンの方がわずかにペネトレーションが長いことがわかる。これは、ブタン(C₄H₁₀)が、プロパン(C₃H₈)より密度が大きいため燃料が持つ運動量が大きくなったことが要因である。

第3章 LPGの噴霧特性

また、ブタンの沸点がプロパンより約 40 高いことから蒸発がプロパンより遅く、液相分布もブタンの方が濃く、広く分布していることが明らかである。

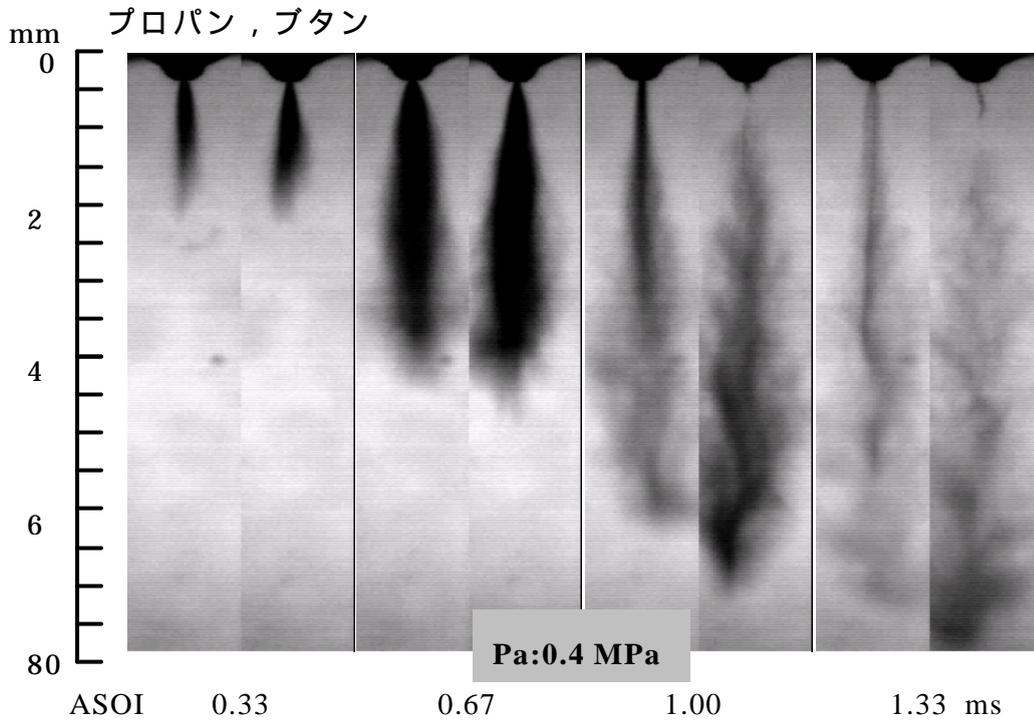


図 3.6 プロパン・ブタンの自由噴霧比較（雰囲気圧力 0.4 MPa）

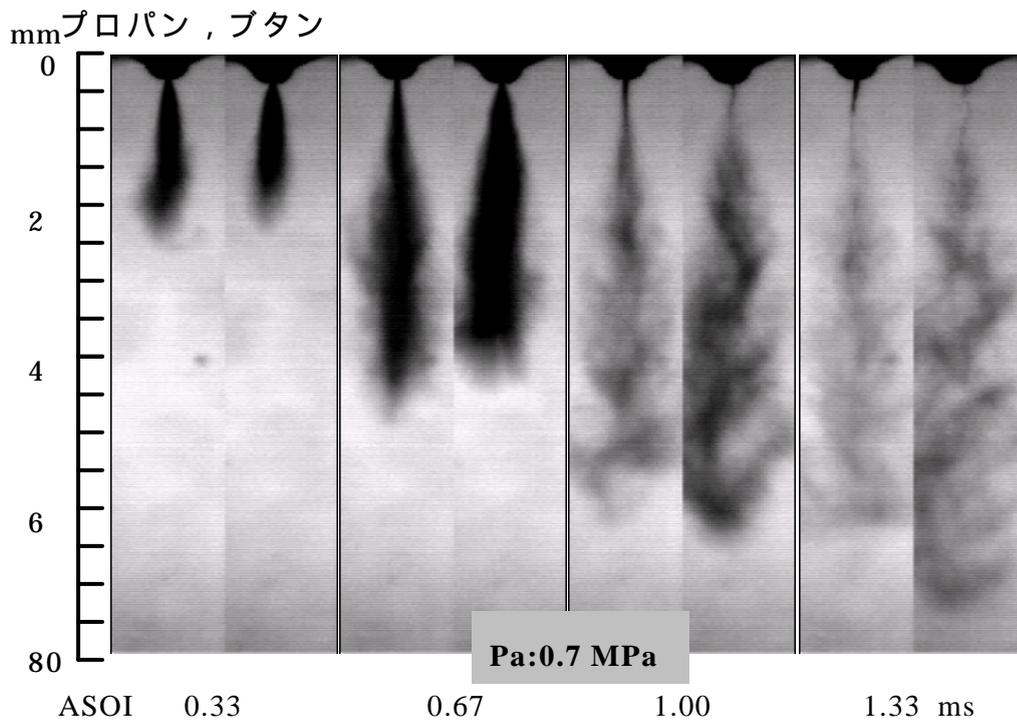


図 3.7 プロパン・ブタンの自由噴霧比較（雰囲気圧力 0.7 MPa）

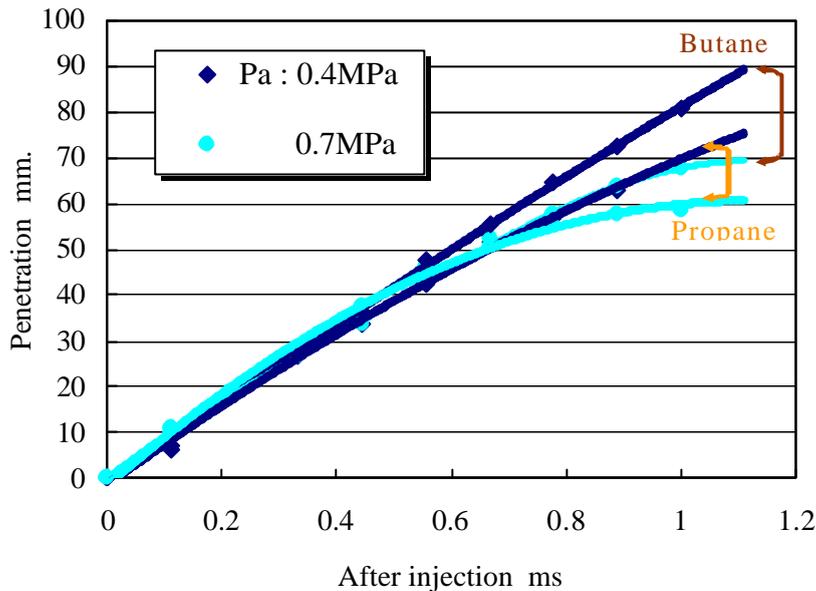


図 3.8 プロパン・ブタン噴霧到達距離比較

また，図 3.7 は雰囲気圧力 0.7MPa での噴霧画像であり，この画像でもブタンのペネトレーションが若干伸びているが，雰囲気圧力 0.4 MPa に比べ噴霧の後半部でのペネトレーションが短くなっている．これは軽油と同じく雰囲気圧力が増すと周りの空気抵抗が増すことによるものである．以上の画像から到達距離を解析して図 3.8 にまとめた．

3.1.4 噴射圧による比較

雰囲気圧力 0.7 MPa として，噴射圧 10，15MPa で同様の計測を行い，噴射圧による噴霧ペネトレーションや気液面積などの違いを調べた．噴射圧が高い 15 MPa の場合，ペネトレーションが長く，蒸発が早いことがわかる．これは高圧噴射することでインジェクタからの噴射速度が高くなり，より多くの雰囲気空気から摩擦を受けるため微粒化が促進されるためと考えられる．また，図 3.10 にそれぞれの気液相が占める面積を時間に対してまとめた．このグラフからも明らかのように，高圧噴射の液相とともに気相の面積が広く分布していることがわかる．液相面積が広がるのは噴射圧を上げることによりペネトレーションが伸びると同時に噴霧角も広がったためである．さらに，LPG 燃料の微粒化が促進されたため，気相部の面積も同時に広がる傾向となった．

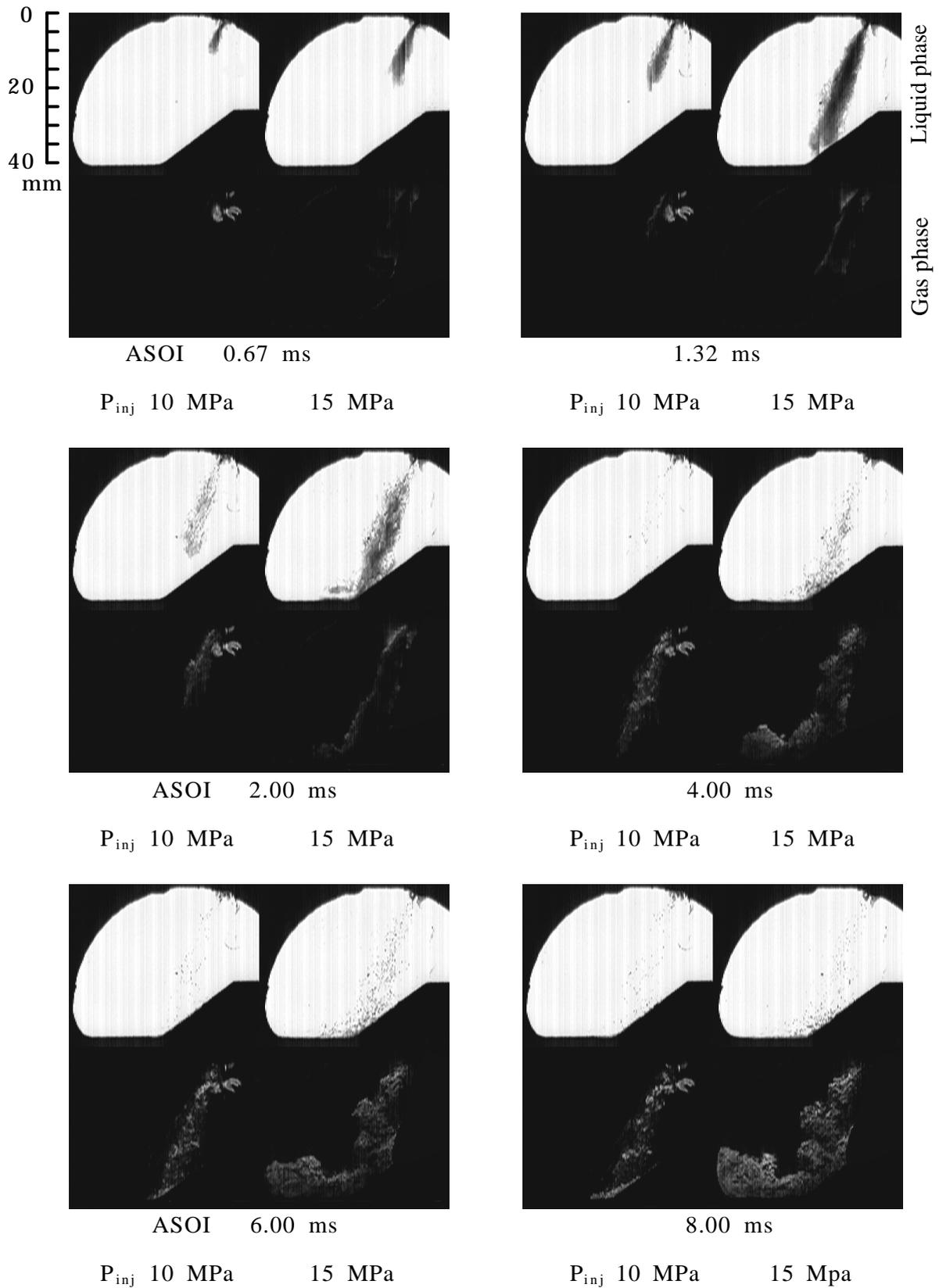


図 3.9 噴射圧力による影響 (雰囲気圧力 0.7 MPa)

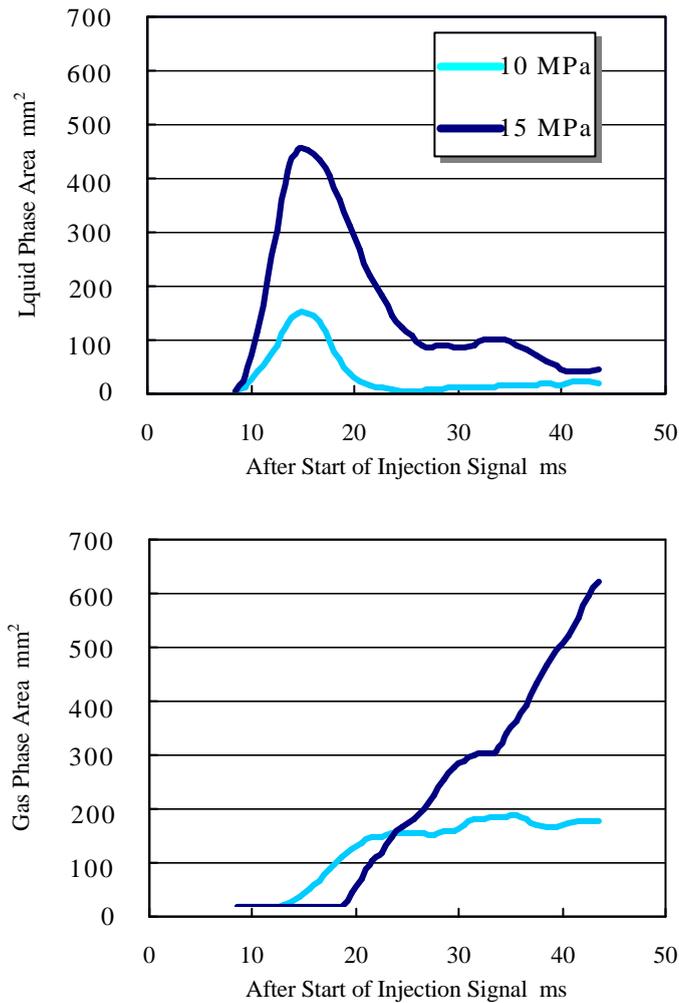


図 3.10 噴射圧力による気液相部の面積比較（雰囲気気圧力 0.7 MPa）

3.1.5 LPG 燃料の温度による噴霧特性

MPI方式のLPGエンジンの場合，LPGを液相状態で噴射すると減圧沸騰により，インジェクタチップ付近では急激に温度が低下するため，アイシング現象がおこる．この現象により燃料噴射の障害が発生し，正確な空燃費制御が困難な状況になる．さらに，本研究で対象にした筒内直接噴射式でも，高負荷領域ではLPGがインジェクタ内部で沸騰してしまい，急激に性能が低下する問題が起こっている．そこで，これらの現象を究明するためにLPG燃料の温度をパラメータとし，シャドウグラフ方を適用し噴霧の計測を行った．

図 3.11 にインジェクタボディ部の温度に対する性能低下率とインジェクタチップの温度測定部の概略図を示す．図より負荷が高くなるにつれ，出力低下率が急激に上昇することがわかる．また，高負荷化による噴射燃料の増分にもなう発熱量の増加で

第3章 LPGの噴霧特性

配管内の燃料の温度が上昇し、負荷 80%では 105 に達する。直接 LPG 燃料の温度を測定するのは困難であるため、噴孔に近いインジェクタチップ部で熱電対を貼付して測定した。これにより、設定温度を-15, 25, 60, 100, 140, 180 として得られた画像とペネトレーション、噴霧角度を図 3.12 に示す。これらの結果から燃料の温度が低いほど短時間で遠くまで噴霧が延びていることがわかる。また、燃料温度が -15~60 の範囲では、時間に対し噴霧到達距離が比例していることがわかる。しかし、燃料温度が 100 を超えると、比例関係がなりたらず、時間に対する噴霧到達距離の増分が小さくなり、ある時期まで一定に落ち着くものの、再び噴霧距離が伸びる傾向にある。これはいくつかの理由が考えられるが、第一にサックボリューム内にある高温の燃料が噴射されたあと、配管内に存在するより冷えた燃料が噴射されたこと、第二に初期噴射された LPG の蒸発潜熱により、周りの大気が冷却されて蒸気圧が低下したことが考えられる。図 3.13 に LPG 噴霧の燃料温度依存性を噴射圧力別にその画像を示す。噴射圧が低い 10 MPa と比べ、15 MPa の方が燃料温度の依存性が低いことが明らかである。これは、高圧化することにより運動エネルギーの上昇やインジェクタ内部の燃料が圧縮され、その蒸気圧が高くなり、温度による影響が少なかったためと考えられる。

以上、LPG 燃料の温度が噴霧形状に及ぼす影響は大きく受けることから、LPG エンジンで安定した性能を得るためには、エンジン開発においてインジェクタ周りの十分な冷却を行って一定の燃料温度を保つ必要があると考えられる。

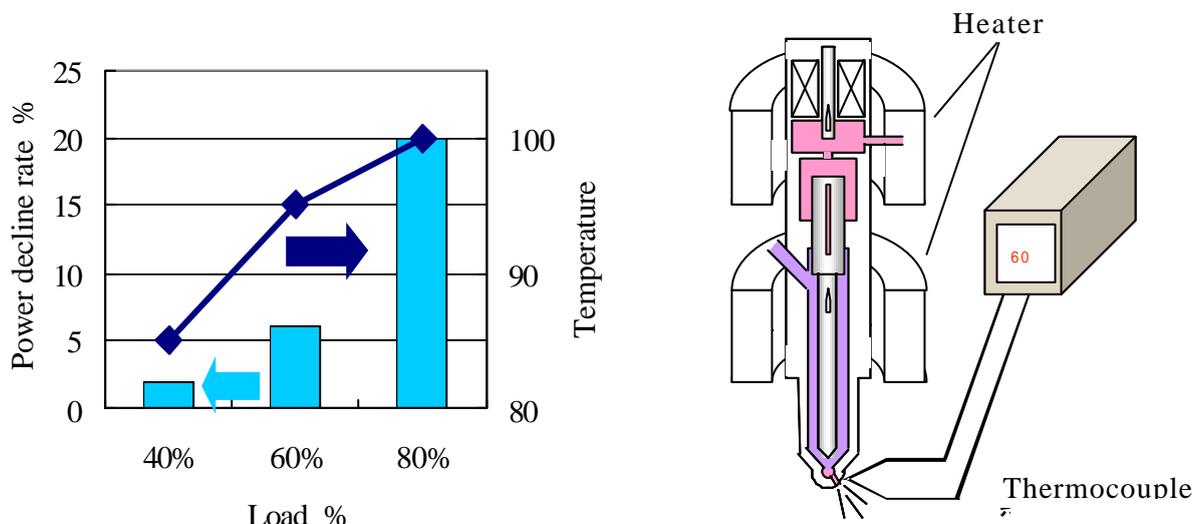


図 3.11 燃料温度による性能低下とインジェクタチップの温度測定部

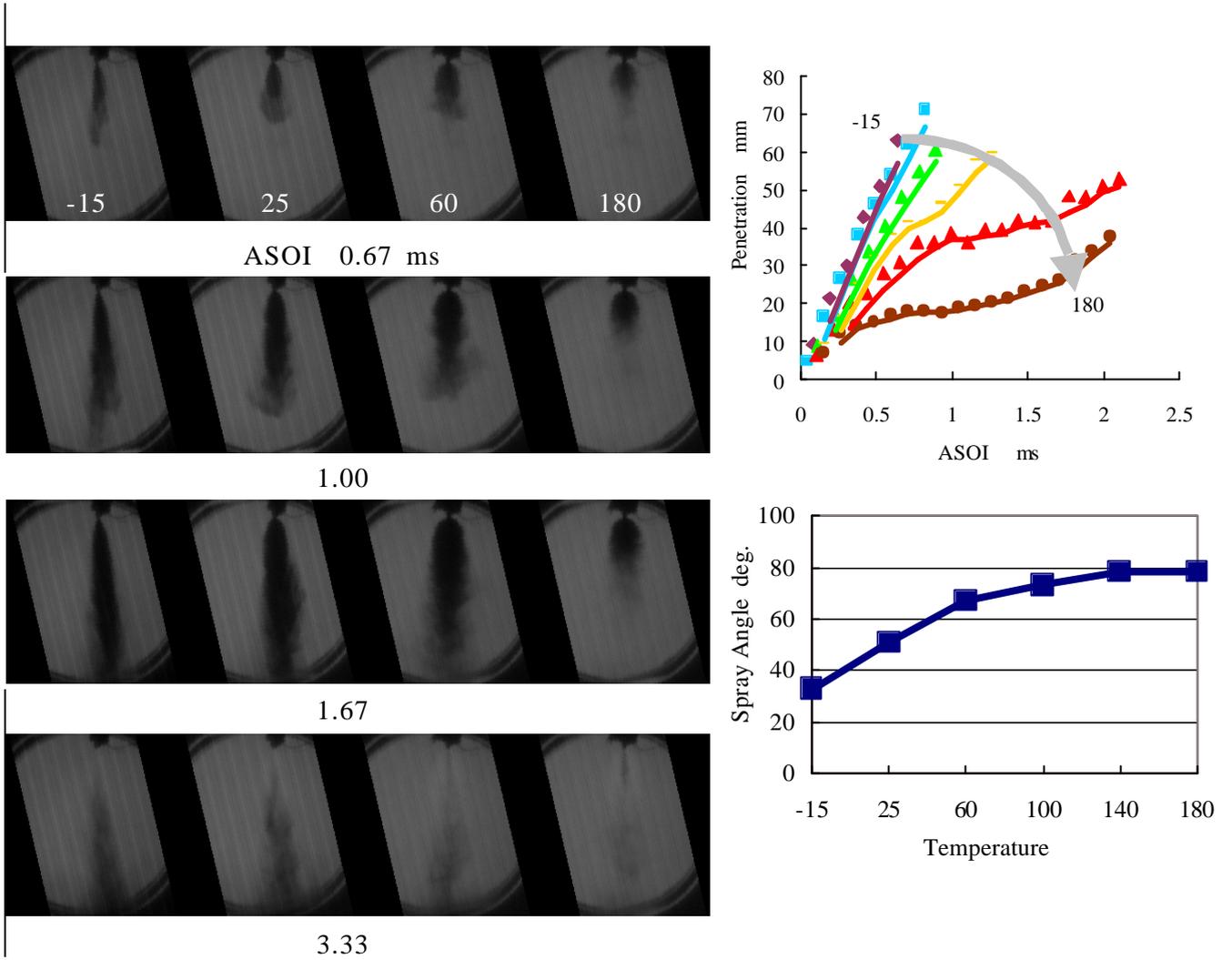


図 3.12 LPG 温度による噴霧特性(噴射圧 15 MPa , 常温常圧)

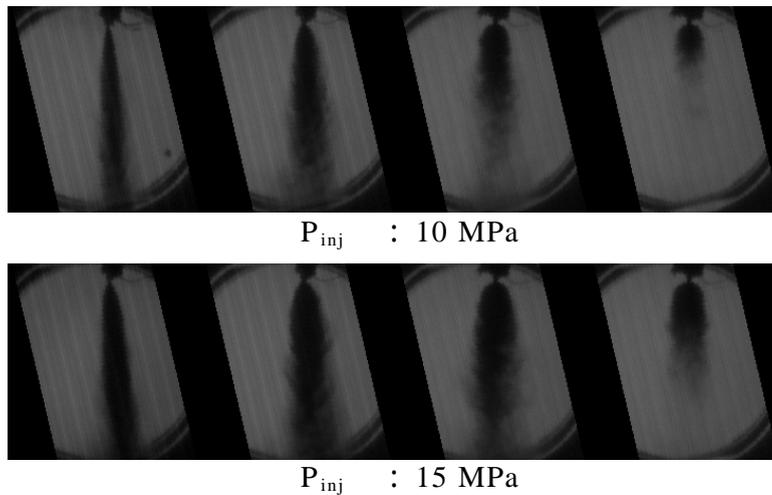
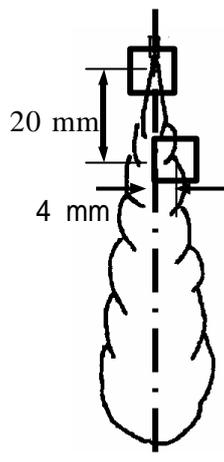


図 3.13 LPG 温度による噴射圧力別噴霧特性(@ ASOI 2.2 ms, 常温常圧)

3.1.6 近接拡大撮影

シュリーレン・シャドウグラフにより噴霧全体の巨視的な計測を行ったが、噴霧の広がり角や粒子挙動の観察のため近接拡大撮影による微視的な計測を試みた。計測方法としては噴霧の後ろから均等な光を当ててその陰を高速カメラにより撮影を行った。撮影位置はLPG自由噴霧のノズル真下と20mm離れたところの2個所であり、その位置を図3.14、撮影結果を図3.15に示す。噴射後、0.22 msの



とき、雰囲気条件 0.7 MPa では周囲空気との抵抗を受け液柱の先端部がつぶれているのに対し、雰囲気圧力が LPG の蒸気圧より低い 0.1 MPa では燃料が出た瞬間から減圧沸騰により蒸発が進み、液柱が細くなっていることがわかる。また、噴霧の下端部での画像から、雰囲気圧力が低くなるほど噴霧の幅が広く、まわりに霧状に広がっている。噴射終了後はノズルチップから液状の燃料が漏れる現象も観測された。

図 3.14 撮影位置

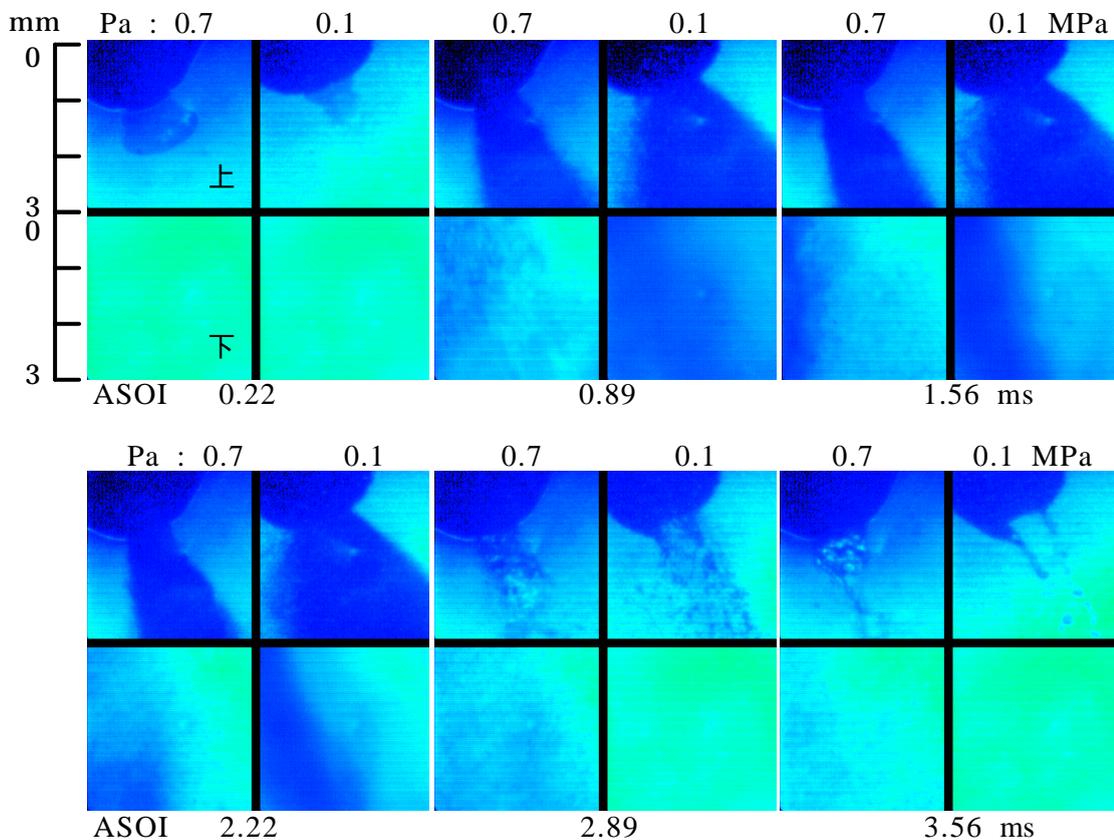


図 3.15 自由噴霧の近接撮影画像

3.2 レーザシート光による噴霧計測

以上、室温を中心にシュリーレン法による気液可視化を行った結果について説明したが、ここではエンジンと近い雰囲気条件での噴霧計測について述べる。エンジン内と同等の高温高圧場はエチレン燃焼により再現し、ディーゼル軽油との比較のため、n-ドデカンの噴霧計測も行った。n-ドデカンは成分として軽油と類似しており、単成分燃料である。

図 3.16~ 18では n-ドデカンと LPG 燃料の時間経過による噴霧画像を示す。n-ドデカン噴霧の発達過程においては、雰囲気密度が増大すると燃料噴霧と周囲の気体とのせん断力が増して、微粒化が促進されて蒸発が活発となり、液相部は細く、かつ短くなる。また、雰囲気密度が同じ場合、燃料噴霧と周囲ガスの質量比が等しいので、噴霧の形状は変わらないが、雰囲気温度が高いほど噴霧の蒸発が促進されるため、噴霧幅、ペネトレーションが短くなる。沸点が低い LPG 噴霧の場合は、同一密度であれば、雰囲気温度の上昇に伴い噴霧の蒸発が活発になる傾向を示すが、雰囲気密度 3.5 kg/m^3 と 8.0 kg/m^3 の常温 300K において、雰囲気密度が高いほど噴霧の広がりが大きく、到達距離が短くなる様子が見られた。これは、前に記述したように LPG の物性特性から燃料の蒸気圧より低い圧力条件では、減圧沸騰の現象により微粒化の促進と蒸発が活発になるものと考えられる。特に噴射初期部分において、その現象が顕著であることが確認された。さらに、高温・高圧になると沸点が低い LPG は n-ドデカンに比べその雰囲気の影響を大きく受ける傾向があることがわかった。

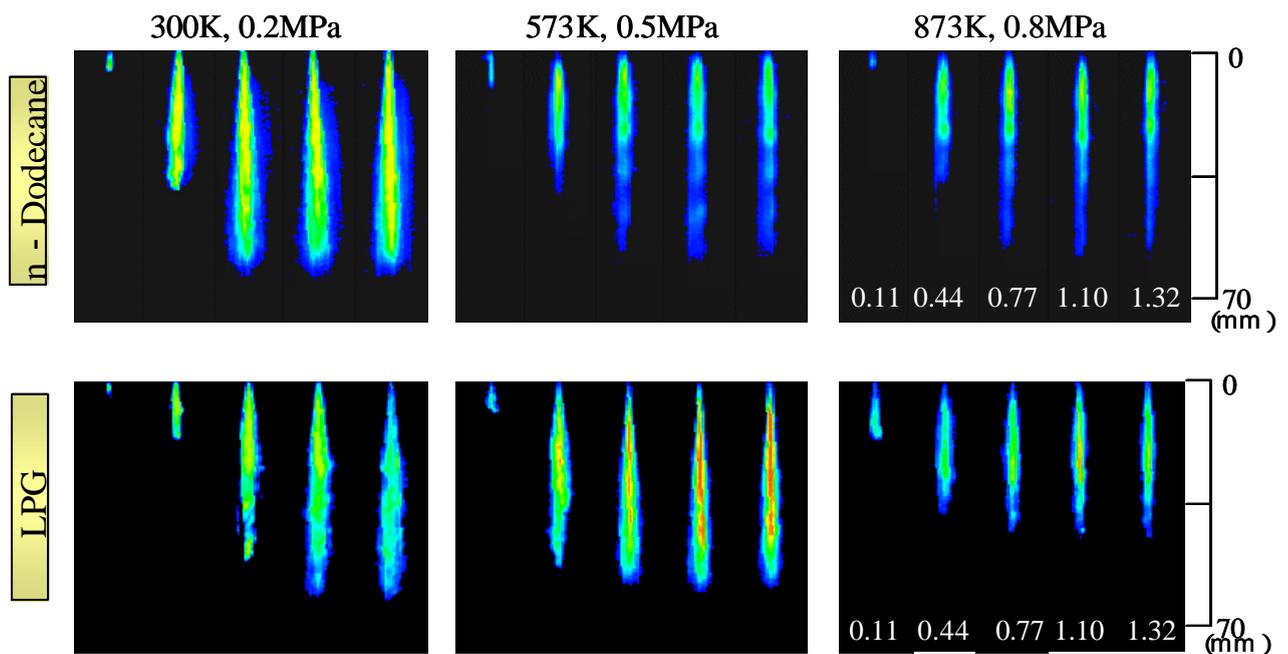


図 3.16 各燃料の噴霧画像(密度: 3.5 kg/m^3)

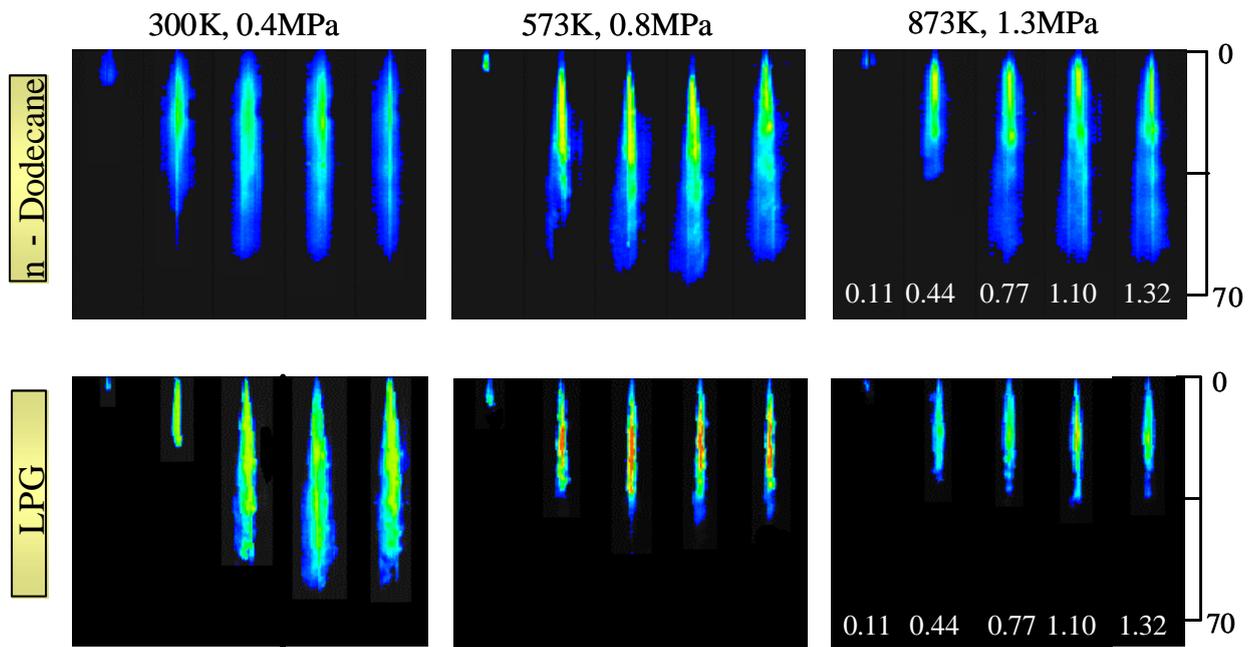


図 3.17 各燃料の噴霧画像(密度: 6.0 kg/m³)

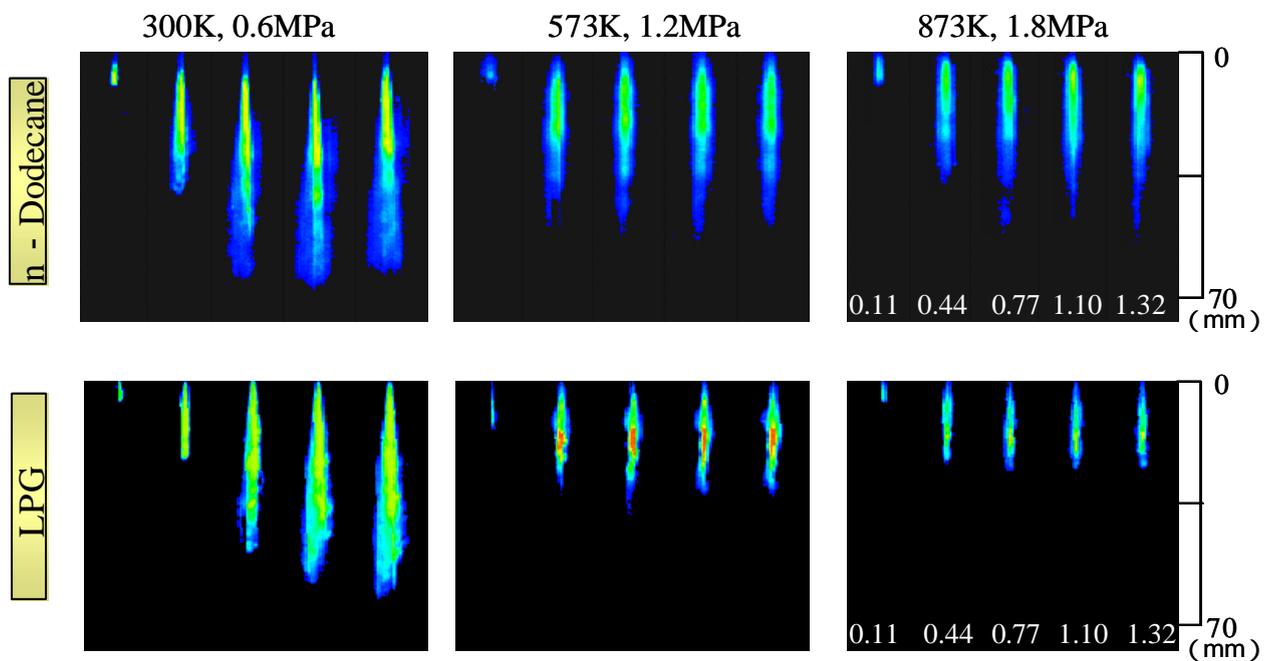


図 3.18 各燃料の噴霧画像(密度: 8.0 kg/m³)

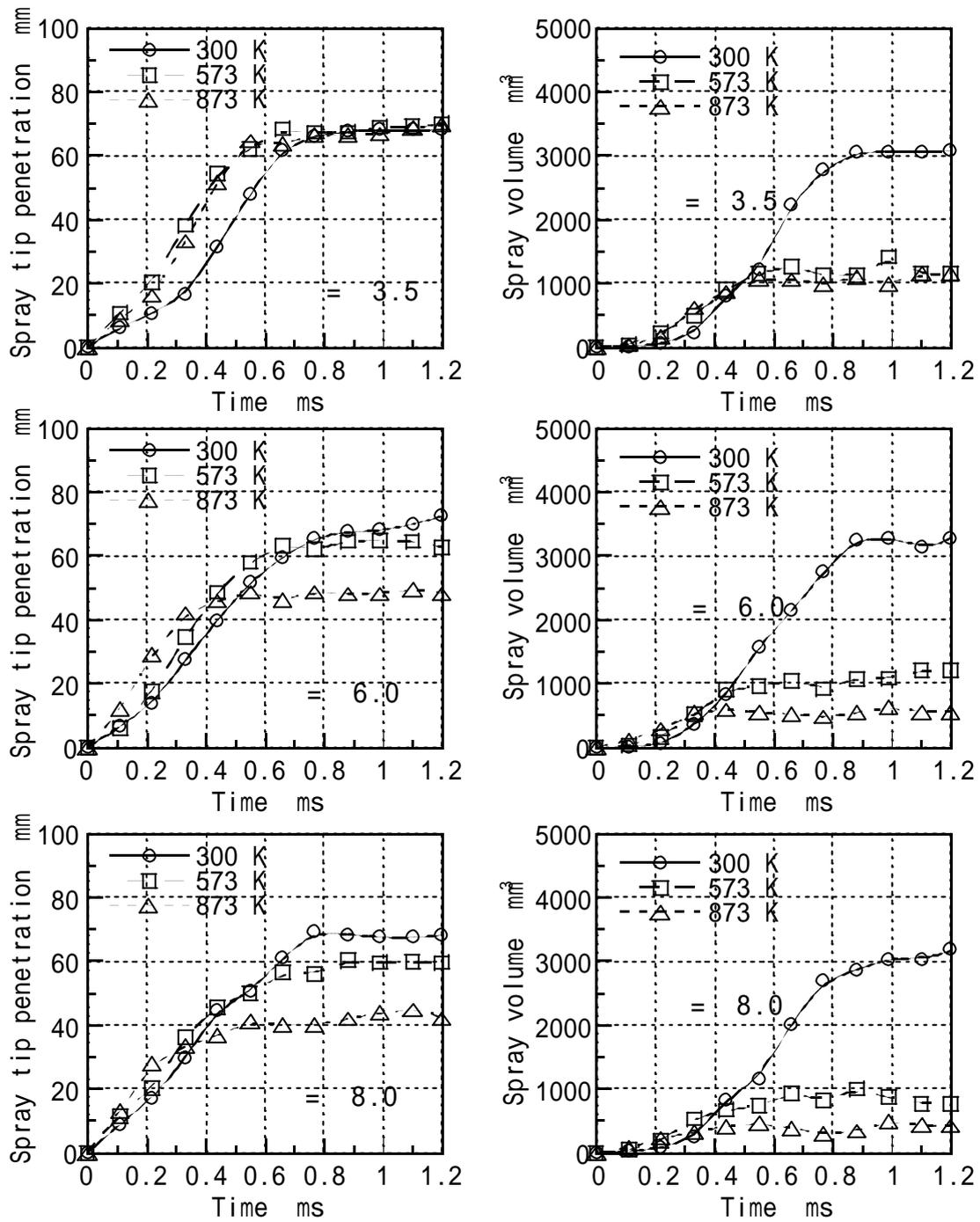


図 3.19 LPG噴霧の到達距離および体積変化

以上の撮影画像から得られたLPG噴霧の到達距離と噴霧体積などを解析し、図 3.19にまとめた。図より、LPGの場合、低密度、低温度において、初期噴霧の到達距離著しく減少する傾向を示すことが明らかである。つまり、噴射初期部 0.33ms までは噴霧到達距離の立ち上がりが他の条件より遅くなっている。これは、いわゆる減圧沸騰に

第3章 LPGの噴霧特性

より迅速な微粒化と蒸発が起こっているものと考えられる。この現象は図 3.20 の LPG 蒸気圧線図および加圧された LPG の圧力変化に示すように、噴射圧 15 もしくは 40 MPa に保たれた LPG を圧力が比較的低い条件(例え $P_a=0.2$ MPa の雰囲気)へ噴射した場合、LPG は噴射中に飽和蒸気圧線を横切るため減圧沸騰を起こすためである。このように沸点が低い燃料を利用することで減圧沸騰による噴霧の微粒化促進が期待できる。一方、高温高圧での初期噴霧は減圧沸騰の現象が雰囲気の影響により抑えられるが、0.22ms 以降では蒸発が活発であることが確認された。エンジン内の圧縮上死点のような高温・高圧場では、LPG 噴霧の特性はディーゼル噴霧のそれと類似しているといえる。

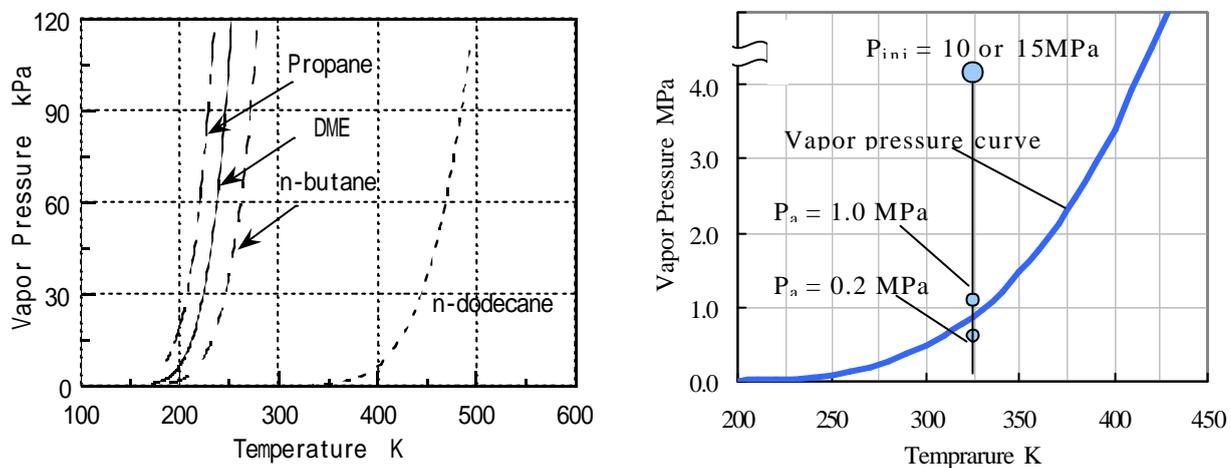


図 3.20 各種燃料の蒸気圧と加圧された燃料の圧力変化

次に、各燃料別に到達距離と体積の時間変化を図 3.21 と 3.22 に示す。これらより、雰囲気温度 300 K、密度 3.5 kg/m^3 、圧力 0.18MPa の場合、LPG 噴霧は n-ドデカン噴霧より噴霧発達が遅く、その体積も小さくなる傾向が見られる。一方、高密度 8.0 kg/m^3 、雰囲気温度 300 K、圧力 0.6MPa になると、減圧沸騰の影響が押さえられ、液体の粒子が多くなって低圧条件より大きくなる傾向が見られる。高温・高圧では n-ドデカンと LPG の到達距離および噴霧容積の差が大きくなるが、これは n-ドデカンの方が密度、沸点、粘性が高いことにより液滴の粒子が大きく液相部が広がったことに起因するものと考えられる。

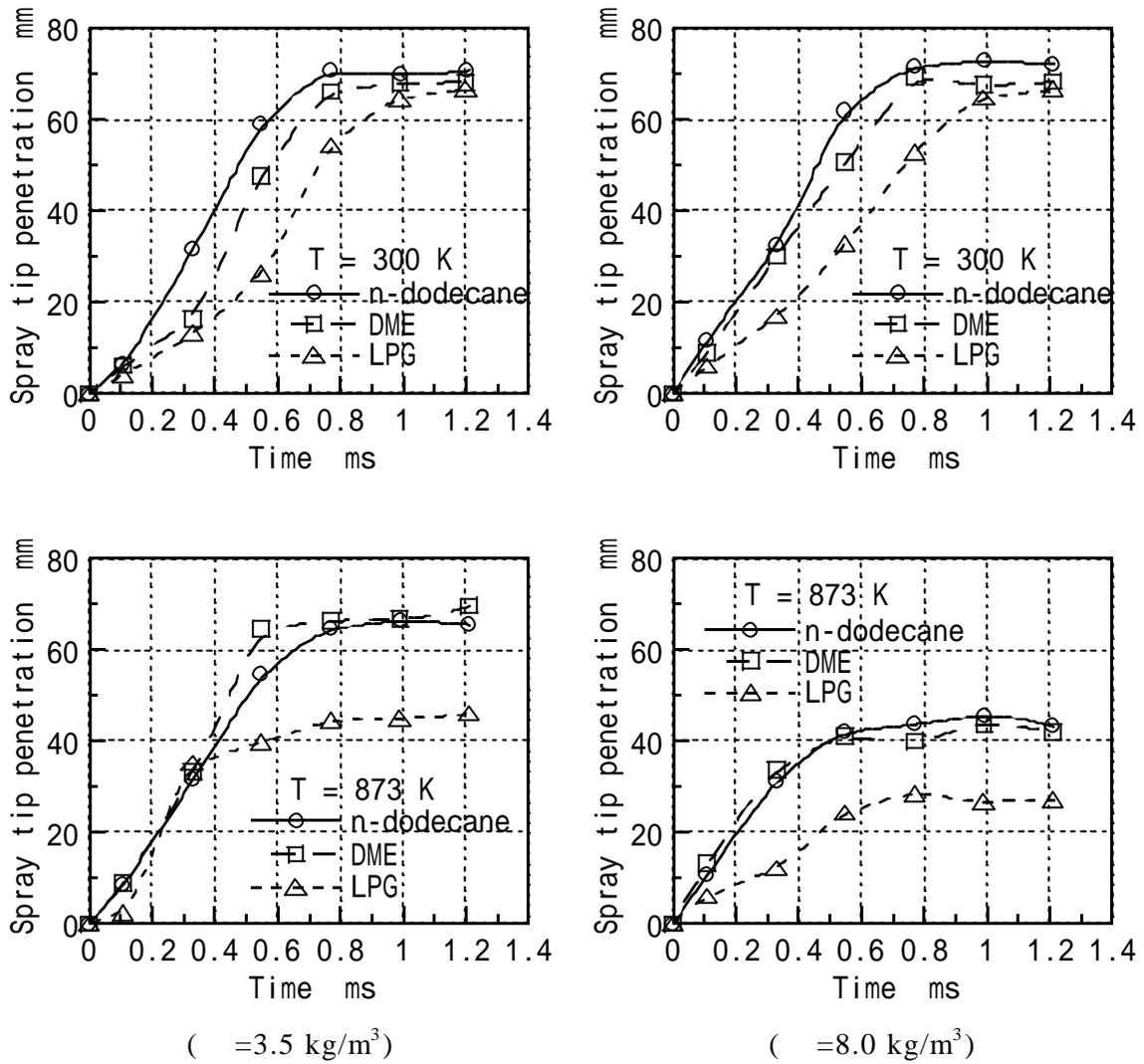


図 3.21 各燃料の噴霧到達距離変化の比較

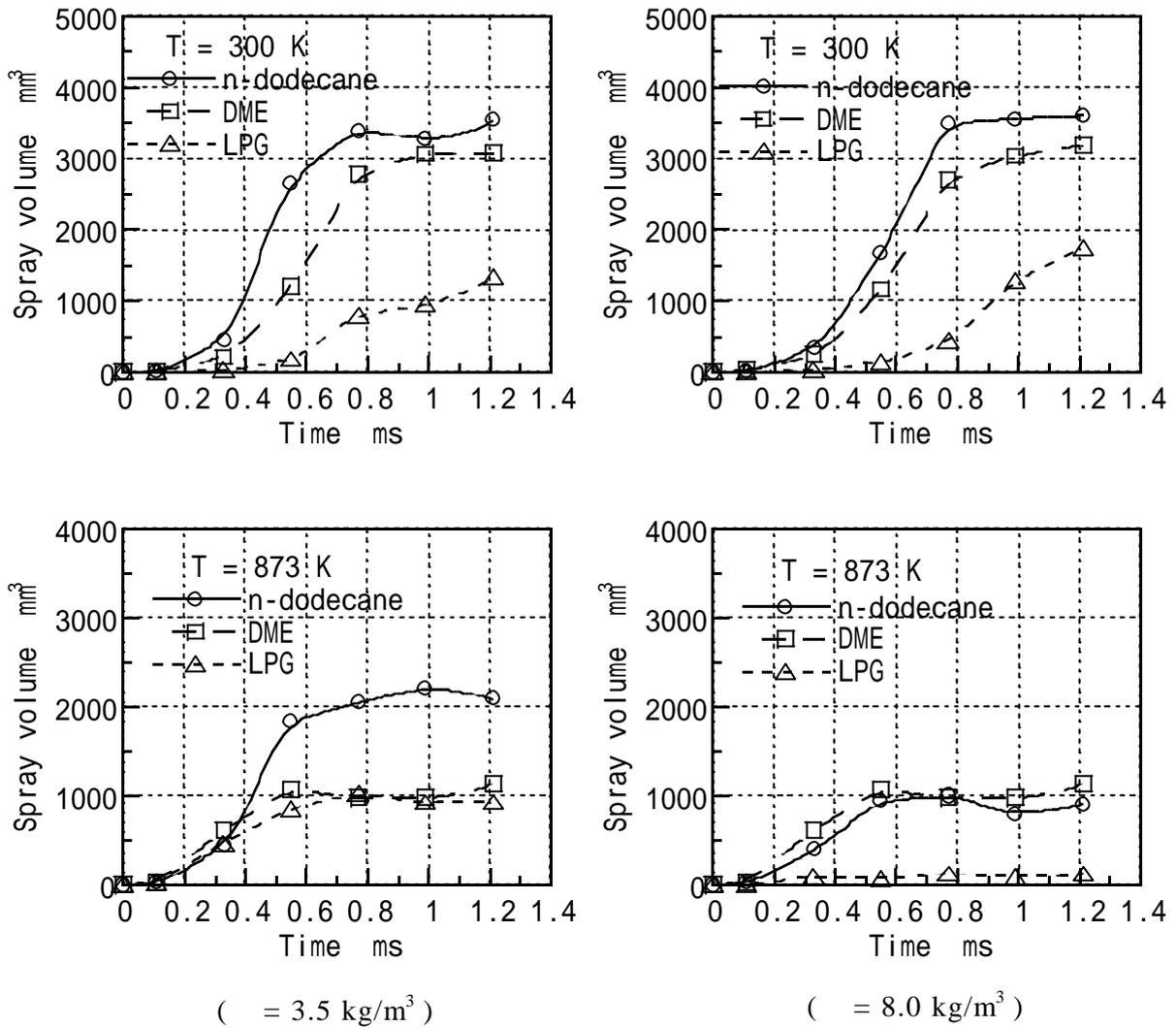


図 3.22 各燃料の噴霧体積変化の比較

蒸気圧曲図から DME と LPG の蒸発特性が類似しているが、高温・高圧の条件では、DME と LPG の最大到達距離と体積がそれぞれ 42, 27 mm と 420.2, 126.6 mm² であり、LPG の方がより蒸発が進んでいる。これは、LPG の 2 成分中により沸点が低いプロパン成分の影響を大きく受けたためと考えられる。

第3章 LPGの噴霧特性

次に，雰囲気密度に対する各燃料の最大到達距離と体積を図 3.23 に示す．各値は噴霧到達距離が最大になる噴射後 1.32 ms における値である．雰囲気温度，密度の上昇に伴い，低沸点燃料である LPG は n-ドデカンより蒸発が活発となり，雰囲気温度と密度の影響をより大きく受けることがわかる．

以上のように，LPG は，噴射する雰囲気の温度と圧力によって噴霧形態と蒸発過程ひいては混合気の形成が大きく左右されるので，エンジン内での混合気形成に当たっては噴射時期，位置，燃焼室形状などが重要な因子となることが示唆される．

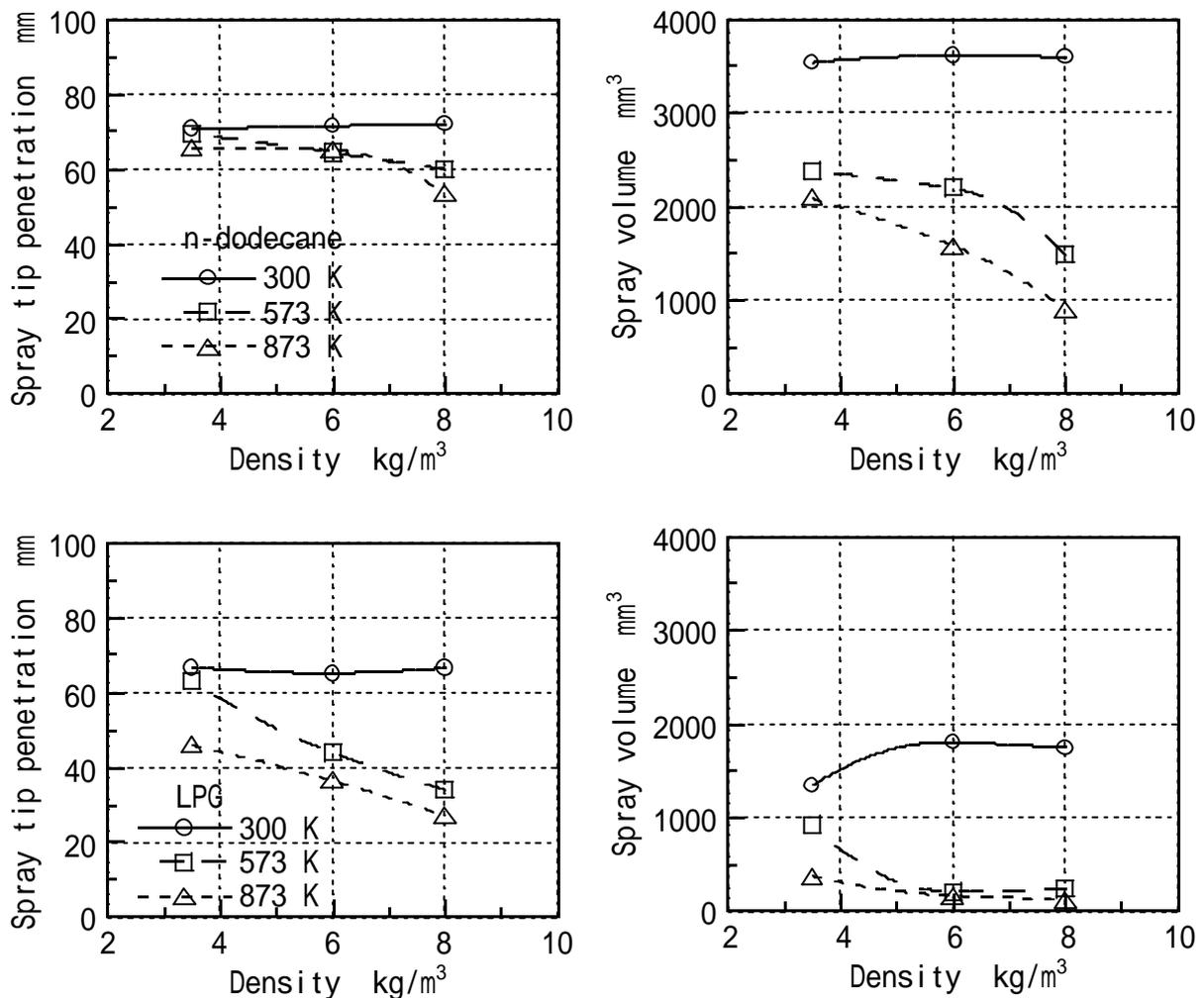


図 3.23 各燃料噴霧の到達距離と体積に及ぼす雰囲気密度の影響

3.3 LIF法による計測

LPGを雰囲気圧力が比較的低圧場へ噴射すると、LPGの飽和蒸気圧より低い圧力場への噴射となり、減圧沸騰を起こし燃料噴霧の微粒化促進が期待できる。このような減圧沸騰による微粒化現象と燃料蒸気の挙動を計測するため、可視光と紫外光の2波長レーザー光を利用して燃料噴霧内の燃料蒸気・液滴の分離計測法を新しく考案した。

第2章に示した蛍光剤選定の分光実験から波長300nm付近に強い蛍光を示すDEMAは比較的沸点がLPGに近く、特に蒸気相において強く蛍光する特性を示す。図3.24のように分光分析結果が得られた。そこで、LPG噴霧の気相部計測には307nmのバンドパスフィルターを用いてLIFの画像を撮影し、液相部はYAGレーザーから266nmと同時に発振される532nmによるMie散乱光をNDフィルター(紫外域をカットする)を用いて撮影した。図3.25にLPG燃料蒸気・液滴の分離計測フローを示す。図から、蛍光撮影による画像は液滴のみの散乱光に比べて大きく広がり、噴霧先端や外周部において蒸気が観測されるものと考えられる。撮影された画像は、画像処理装置に取り込まれ、ノイズおよびバックグラウンドの補正を行った後、LIF法による蛍光象から散乱光の象を輝度として引くことで蒸気相が求められる。

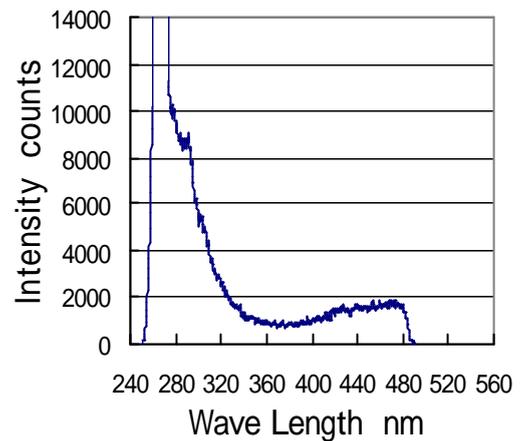


図 3.24 分光分析結果
(LPG+DEMA vol. 10%)

3.3.1 液滴と蒸気の分離可視化

自由噴霧の気相・液相画像を時間別と雰囲気条件別に図3.26に示す。低温・低圧場に噴射されたLPG噴霧の気・液相画像は、特に噴霧初期段階において噴霧角度および幅が広がっているのがわかる。これは常温における雰囲気圧力がLPGの蒸気圧より低いことによって減圧沸騰が現れたものと考えられる。また、噴射後2.3msの画像では気相とともに液相も残っており、常温でもLPG噴霧はある程度蒸発が進んでいるのがわかる。それに対し、高温・高圧場に噴射されたLPG噴霧の場合、低温低圧場より噴霧角および幅が狭くなっていることが明らかである。これは高圧による雰囲気空気との抵抗と高温による蒸発が促進され、ペネトレーションが短く、かつ細くなるものと考えられる。

第3章 LPGの噴霧特性

えられる。高温高圧場における気相部は噴霧外縁部で蒸発が進み、雰囲気圧力、温度が上昇するにしたがい、噴霧中心部の輝度が減少していく傾向がみられる。また、雰囲気条件 2MPa, 800Kでの噴射後 2.3 msの気相画像の輝度がかなり弱くなっているが、これはLPGの蒸発が進み、測定器の検出可能限界を超えて混合気の希薄化が噴霧全体に進んだ結果と考えられる。

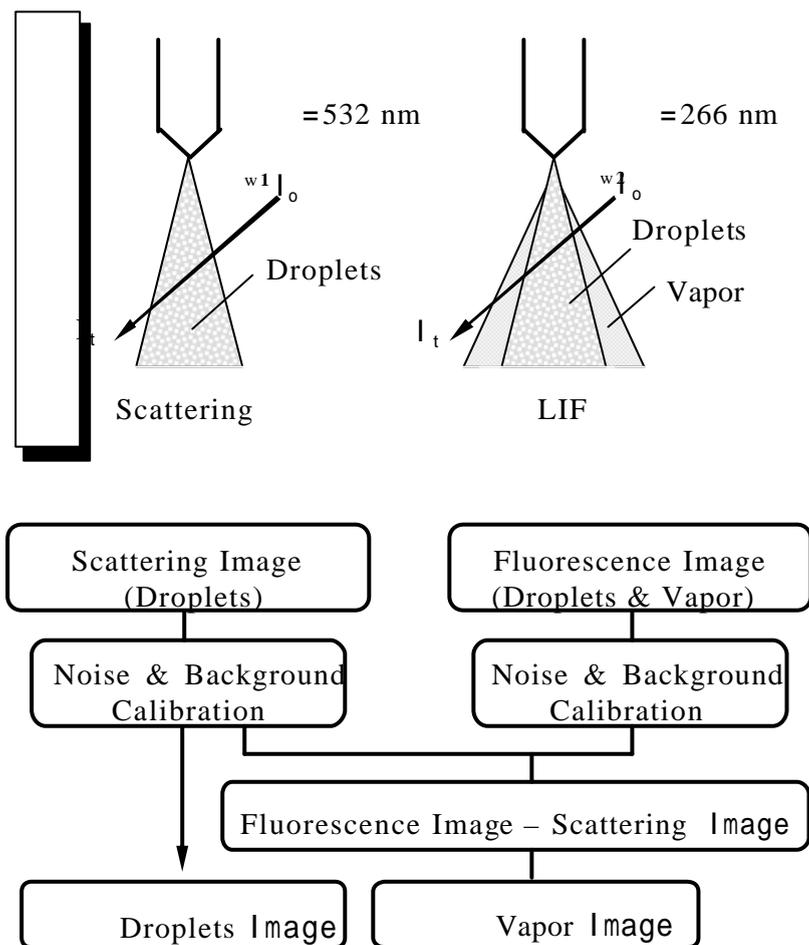
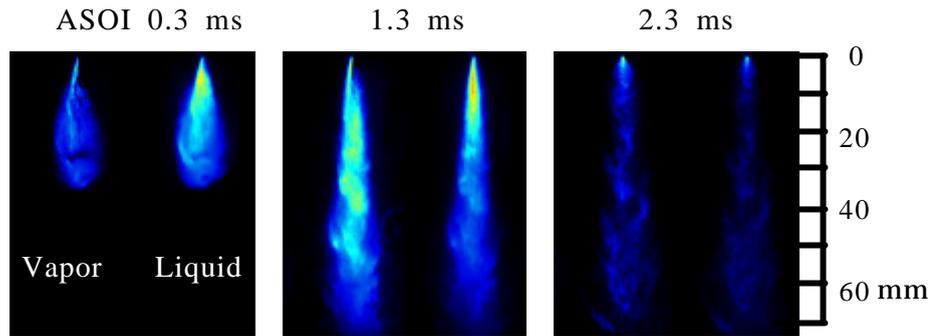
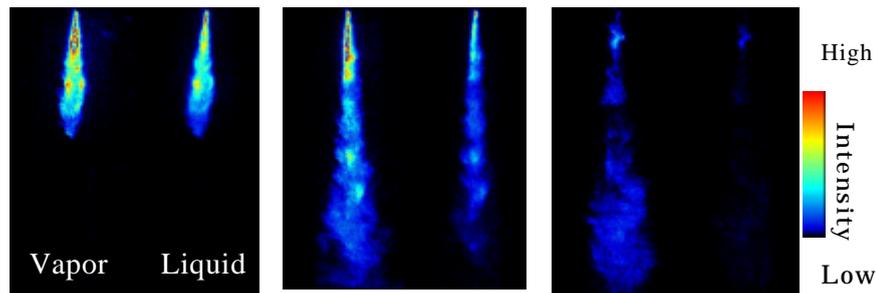


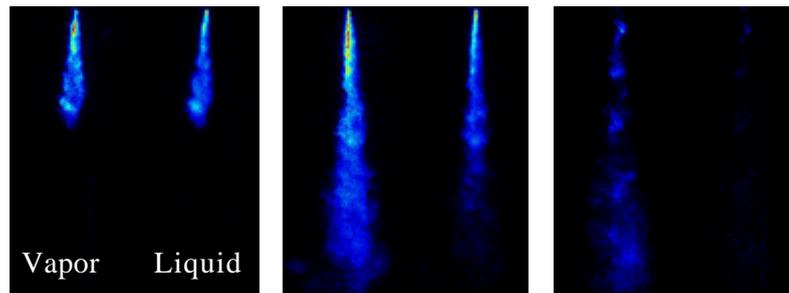
図 3.25 LPG 燃料蒸気・液滴分布の分離計測フロー



$P_a : 0.1 \text{ MPa}, T_a : 300 \text{ K}$



$P_a : 1.5 \text{ MPa}, T_a : 600 \text{ K} \quad a : 8.0 \text{ kg/m}^3$



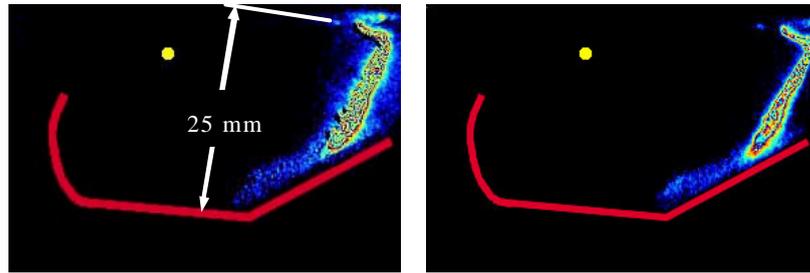
$P_a : 2.0 \text{ MPa}, T_a : 800 \text{ K} \quad a : 8.0 \text{ kg/m}^3$

Fig. 3.26 液相と蒸気相の分離可視化

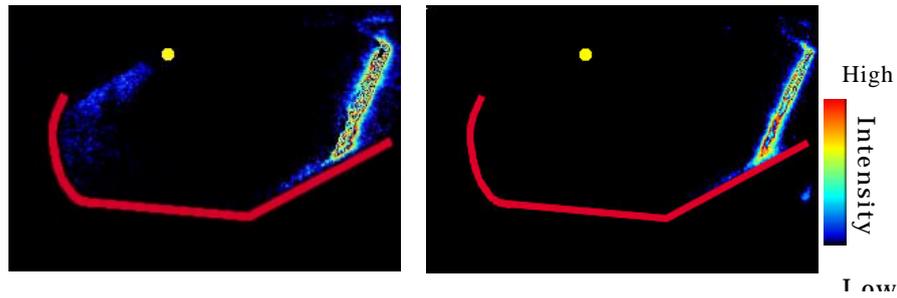
3.3.2 衝突噴霧

LPGエンジンと同じ形状の衝突板を用いて衝突噴霧の分離可視化を自由噴霧と同様の手法で行った結果を図 3.27 に示す。画面上、黄色い点は点火プラグ位置を表す。雰囲気密度 6.0 kg/m^3 、温度 800 K 、圧力 1.5 MPa の条件において、噴射後 1.1 ms ($6.6^\circ @ 1000 \text{ rpm}$) までには気・液相ともに同じ挙動を見せるが、 1.5 ms ($9.0^\circ @ 1000 \text{ rpm}$) 以降では液相はほとんど残らず、気相のみ壁面を沿って巻き上がる様子が確認された。また、噴射後 1.9 ms ($11.4^\circ @ 1000 \text{ rpm}$) から 2.3 ms ($13.8^\circ @ 1000 \text{ rpm}$) の間に衝突板により燃料噴霧が燃焼室底面に沿って移動し、点火プラグ付近に混合気が到達することがわかる。これらの結果から、図 3.26 の自由噴霧の結果と比較すると、気相部の濃度は衝突板の方が高く、混合気を形成する上で本燃焼室の有効性が確認された。

ASOI 0.3 ms (equivalent to 1.8 ° CA at 1000 rpm)



ASOI 1.5 ms (equivalent to 9.0 ° CA at 1000 rpm)



ASOI 2.3 ms (equivalent to 10.35 ° CA at 1000 rpm)

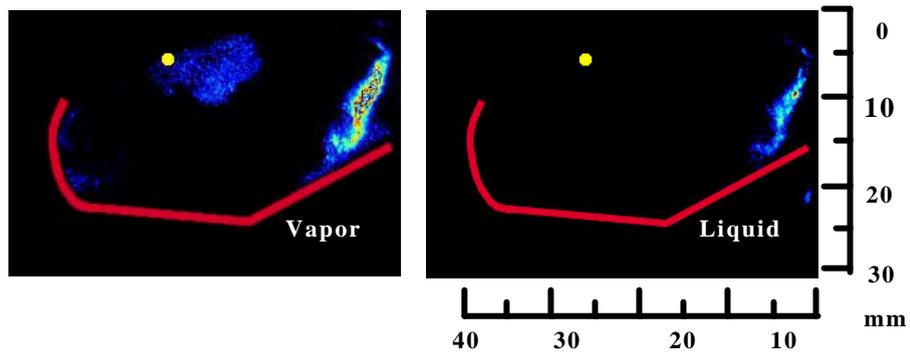


Fig. 3.27 Images of impingement sprays of LPG

(P_a : 1.5 MPa, T_a : 800 K, ρ_a : 6.0 kg/m³)

3.4 まとめ

ディーゼル代替燃料としてLPGを用い、各種計測方法により噴霧の計測を行った。まず、常温・低圧場での条件で、燃料混合の基礎的過程を明らかにするために、シュリーレン法、シャドウグラフ法および近接撮影により噴霧を計測し、そのペネトレーションや気液相部の面積などを調べた。これらの結果から次の結論を得た。

- (1) 蒸気圧線図より低い雰囲気圧力では噴霧角および幅が広がり、蒸気圧線図より高い雰囲気条件ではディーゼル噴霧の挙動と類似するが、LPGの噴霧ペネトレーションはディーゼル軽油のそれより短い。
- (2) 実機の燃焼室を模擬した衝突板による衝突噴霧を行った結果、LPG混合気は衝突板の底面に沿って移動し、点火プラグまで着実に到達するのが確認された。
- (3) n-ブタンはプロパンに比べ、密度、沸点、粘度が高いため、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はプロパンより長くなる。
- (4) 拡大写真の計測結果、LPGの蒸気圧より低い雰囲気条件に噴射されると燃料がノズルを出た瞬間から減圧沸騰を起こし、蒸発が盛んになるが、雰囲気圧力が高くなると周囲空気の抵抗を受けながら分裂する。
- (5) LPG燃料の温度が高くなるにつれて噴霧のペネトレーションは短く、噴霧角および幅は広くなる傾向となり、燃料温度が噴霧形状に及ぼす影響は大きい。

次に、より実機と近い熱力学的条件で成層燃焼を行うために定容燃焼器内をエチレンの燃焼熱を用いて高温高圧化し、その雰囲気中にLPG噴射系により液体状のLPGを噴射し、成層混合気を形成し、その混合気を計測した。その際、混合気の計測はMie散乱法とLIF法によって測定を行い、そのペネトレーションや噴霧体積などを求めた。これらの結果から、次の結論を得た。

- (6) 高温高圧場に噴射されたLPG噴霧のペネトレーションは、高温による蒸発の促進と高圧による貫通力の低下によって常温低圧場より短く幅も狭くなり、既存ディーゼルよりその影響を大きく受ける。
- (7) LIF法によりLPG噴霧の気相、液層を分離可視化が可能となり、LPGエンジンの燃焼室形状を再現した衝突板における噴霧挙動を調べた結果、高温・高圧場における混合気は燃焼室底面に沿って移動し、点火プラグ付近に混合気が到達するこ

とが確認された。

- (8) LIF法と散乱撮影法を適用し、LPG燃料噴霧は減圧沸騰の微粒化現象により雰囲気導入が活発となり、噴霧の外周および先端部では蒸気当量比の高い部分が幅広く存在する。
- (9) LPGをディーゼルの代替燃料として実機に用いた場合、LPG噴霧特性に対応した燃焼室形状、燃料供給系の採用が必要と考えられる。
- (10) 以上、シュリーレンとLIF法による気・液相部の可視化結果は後述する数値シミュレーション解析におけるサブモデルの改造と実験結果との整合性を検証するためのデータとして活用される。さらにLPGエンジン設計において有効な情報を提供するものと考えられる。