



研究論文

直噴ガソリン機関用ホールタイプインジェクタから噴射した 噴霧の混合気形成過程 (噴孔径と噴孔L/Dの影響)

Mixture Formation Process of Spray Injected by Hole Type Injectors for D. I. Gasoline Engines
(Effects of Diameter and L/D of Injector Hole)

佐藤 圭峰 (Kiyotaka SATO) 神崎 淳 (Jun KANZAKI) 山川 正尚 (Masahisa YAMAKAWA) 西田 恵哉 (Keiya NISHIDA)
広島大学 (Univ. of Hiroshima) マツダ株式会社 (MAZDA Motor Corp.) マツダ株式会社 (MAZDA Motor Corp.) 広島大学 (Univ. of Hiroshima)

An experimental study was conducted on the spray and mixture properties of the hole-type injectors for D.I. gasoline engines. The Laser Absorption Scattering (LAS) technique was adopted to simultaneously measure the spatial concentration distributions of the liquid and vapor phases in the fuel spray injected into a high-pressure and high-temperature constant volume vessel. Effects of diameter and length-to-diameter ratio L/D of the nozzle hole on the spray and mixture properties were examined. The smaller hole diameter and L/D produce the shorter tip penetration, the wider vapor phase dispersion of the spray, and the larger mass of vapor phase fuel with the stoichiometric equivalence ratio in the entire spray.

Keywords: Fuel Spray, Internal Combustion Engine, Gasoline Engine, Mixture Formation, Laser Diagnostics

1. 緒言

直噴ガソリン機関における燃料消費率向上、排気低減のため、現在実用化されている燃焼システムであるウォールガイドからエアガイド、スプレーガイドへの移行のための研究が行われている⁽¹⁾⁽²⁾。さらにガソリンHCCI^{(3)~(5)}など新たな燃焼コンセプトにとっても、混合気形成の自由度が高い直噴燃焼システムは有利であると考えられる。従来から直噴ガソリンエンジンに使用されてきたスワールインジェクタは雰囲気圧力の増加に伴い噴霧角が狭まるが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、このような噴霧角の変化が少なく、燃焼室における噴霧配置の自由度が高く、空気密度の高い場でも噴霧構造が変わらない利点を持つホールインジェクタの採用が検討されている⁽⁸⁾。そのため、高温および高圧雰囲気中における噴霧特性や混合気特性の把握が必須である。

著者の1人は、高温高圧雰囲気中へ直噴ディーゼル機関用ホールインジェクタから噴射した燃料噴霧中の蒸気相および液相の濃度分布を定量的に計測する2波長レーザ吸収散乱(Laser Absorption Scattering: LAS)法を開発^{(9)~(11)}し、LAS法を直噴ガソリン機関用スワールインジェクタやホールインジェクタから噴射した噴霧と混合気特性の解析に適用してきた^{(12)~(14)}。本研究では、LAS法を直噴ガソリン機関用ホールインジェクタから噴射した燃料噴霧に適用し、噴孔径と噴孔L/Dが蒸気相到達距離や混合気形成過程に及ぼす影響について解析した。

2. 実験装置および方法

2.1 高温高圧容器、LAS光学系および実験条件

図1に実験装置の概略図を示す。インジェクタをLAS法試験燃料が入ったアキュムレータに接続し、高温高圧容器を窒素で加圧した。LAS法試験燃料として、動粘度、表面張力、

沸点などの物性値がガソリンに沸点近く、紫外光を強く吸収し、可視光を吸収しない特性を持つパラキシレン⁽¹¹⁾を使用した。ディレイパルスジェネレータから噴射制御信号をインジェクタドライバに送り、インジェクタから燃料を高温高圧容器中に噴射した。この噴霧を波長266nmの紫外光と波長532nmの可視光の2波長レーザ光で照明、噴霧中でレーザ光が減衰することによる透過光減衰画像を、紫外光と可視光ごとにCCDカメラに取り込む。本実験では計測誤差を極力少なくするため、すべての撮影でレーザ入射光度および均一性におけるばらつきを10%以内とした条件下で実施している。

表1に実験条件を示す。高温高圧容器内に圧力1.0MPaの窒素を充填し、電気ヒーターで500Kに加圧した。この雰囲気圧力、温度は実際の直噴ガソリン機関の圧縮行程噴射を想定したものである。噴孔径がD=φ0.135mm, D=φ0.155mm, L/Dが1, 2の組み合わせのホールインジェクタ4本を用い、噴射圧を20MPa, 噴射量を3.47mg一定とした。

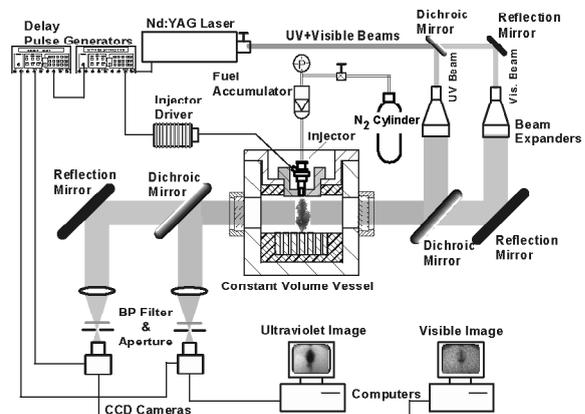


Fig. 1 Experimental Apparatus

原稿受付：2007年1月16日

Table 1 Experimental Conditions

Ambient Condition				
Ambient Gas	Nitrogen			
Temperature: T _a [K]	500			
Pressure: P _a [MPa]	1			
Injection Condition				
Fuel	P-xylene			
Injector	Hole Type			
Number of Holes	1			
Hole Diameter [mm]	0.135	0.155	0.135	0.155
L/D	1.0	2.0	1.0	2.0
Injection Duration [ms]	1.86	1.81	1.42	1.5
Injection Pressure [MPa]	20			
Injection Quantity [mg]	3.47			

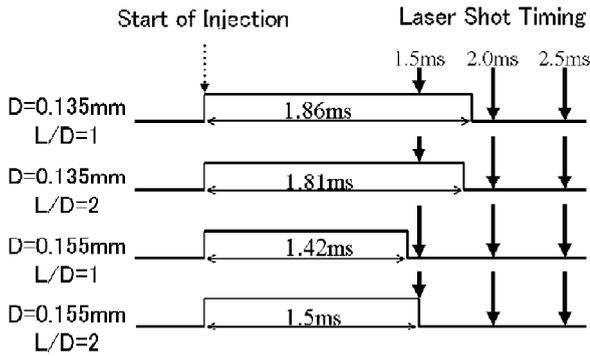


Fig. 2 Relationship between Injection Duration and Laser Shot Timing

図2に噴射期間とLAS法による噴霧画像の撮影時刻のタイミングチャートを示す。本実験では噴射開始時刻(Start of Injection)を揃えた測定を行い、測定結果について噴孔径およびL/Dの違いによる噴射期間の影響も含めて考察した。

2.2 LAS法の測定原理

図3はLAS法試験燃料が吸収する波長λ_aおよび吸収しない波長λ_tの入射光が蒸発噴霧を通過する際に減衰される過程を示している。強度I₀の入射光は噴霧を通過する際に、蒸気相の吸収および液相の散乱と吸収で減衰し、強度I_tの透過光になる。波長λ_aの透過光減衰率log(I₀/I_t)_{λ_a}は液相の散乱と吸収による透過光減衰率log(I₀/I_t)_{Lsca}、log(I₀/I_t)_{Lsbs}および蒸気相燃料の吸収による透過光減衰率log(I₀/I_t)_{Vabs}によって式(1)のように表すことができる。また、波長λ_tの透過光減衰率log(I₀/I_t)_{λ_t}は、液相の散乱による透過光減衰率log(I₀/I_t)_{Lsca}によって式(2)のように表すことができる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_a} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{Lsca} + \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{Lsbs} + \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{Vabs} \quad (1)$$

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_t} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{Lsca} \quad (2)$$

式(1)の右辺第2項にある液滴の吸収による透過光減衰率log(I₀/I_t)_{Lsbs}が無視できる程度に小さいこと⁽¹²⁾、また両波長の液滴の散乱による透過光減衰率log(I₀/I_t)_{Lsca}はほぼ同等であることが確認されている⁽¹²⁾ため、蒸気相の吸収による透過光減衰率log(I₀/I_t)_{Vabs}と、液滴の散乱による透過光減衰率log(I₀/I_t)_{Lsca}は、それぞれ式(3)と式(4)のように表すことができる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{Vabs} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_a} - \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_t} \quad (3)$$

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{Lsca} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_t} \quad (4)$$

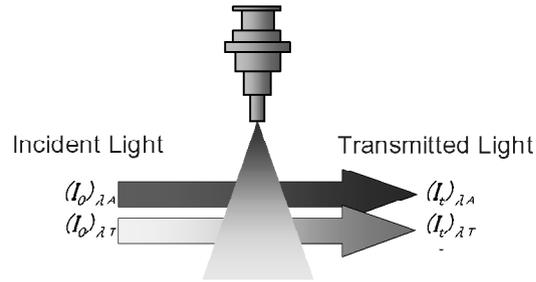


Fig. 3 Extinction of Incident Light through Evaporating Spray at Wavelengths λ_a and λ_t

蒸気相の吸収による透過光減衰率log(I₀/I_t)_{Vabs}に対しては Lambert-Beer の法則を、また液相の散乱による透過光減衰率log(I₀/I_t)_{Lsca}に対しては Bouguer-Lambert-Beer の法則を適用、軸対称を仮定した Onion Peeling Model により、噴霧断面内の蒸気相濃度と液相濃度を求めた⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾。Nd:YAG レーザの第4高調波(波長266nmの紫外光)を波長λ_aの光に、第2高調波(波長532nmの可視光)を波長λ_tの光に使用した。

LAS 法による蒸気相濃度計測の精度を調べるため、完全に蒸発した噴霧の濃度分布から算出した噴霧全体の蒸気相燃料質量と、別の実験で求めておいた噴射量を比較した結果、両者の差すなわち蒸気相濃度計測の誤差は15%以内であることがわかっている⁽¹²⁾。

3. 実験結果および考察

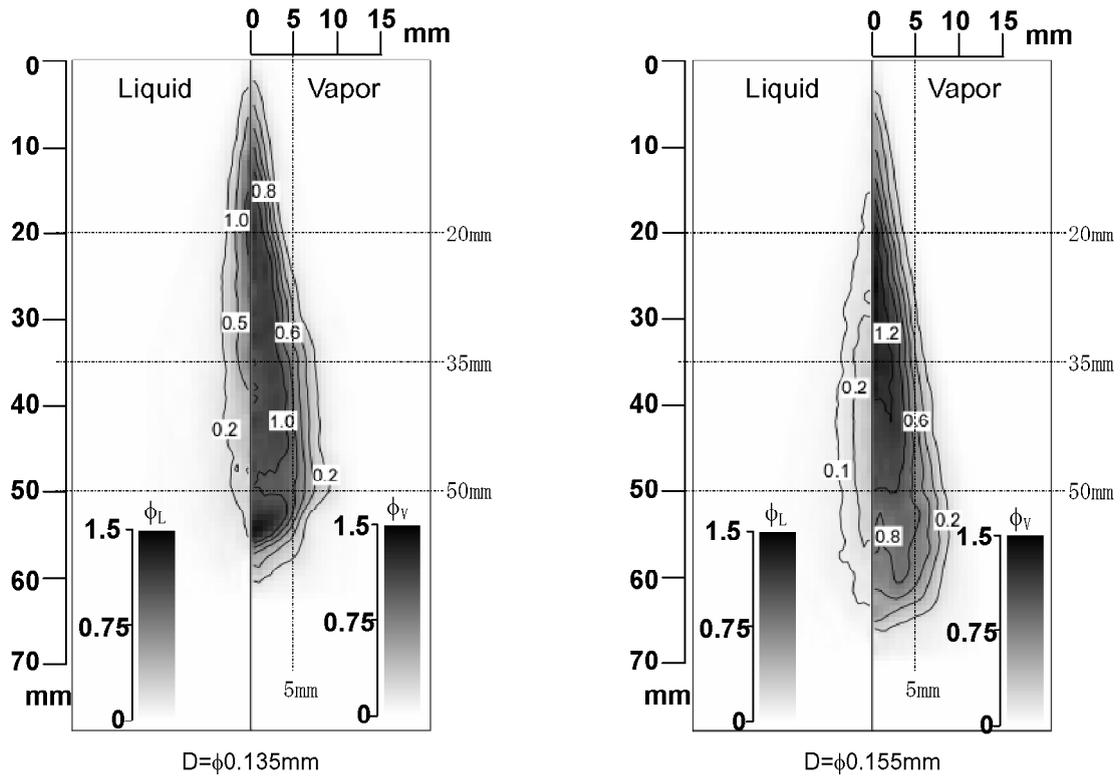
3.1 液相および蒸気相の当量比分布

図4に噴霧の液相および蒸気相の当量比分布を示す。これらは1撮影時刻につき4回の画像の平均値をLAS法による解析から求めたものである。1回噴射と平均値の液相および蒸気相到達距離や噴霧形状を比較しても、それらはほぼ同等であり、再現性があることを確認している。図4の撮影時刻はいずれのインジェクタの噴射が終了している噴射開始後(ASOI:After Start of Injection)t_{ASOI}=2.0msである。図2に示すようにインジェクタによって噴射終了後(AEOI:After End of Injection)からの時間が異なる。噴孔径が小さいD=φ0.135mmは噴射終了からの時間がL/D=1,2それぞれt_{AEOI}=0.14ms, t_{AEOI}=0.19ms 噴孔径が大きいD=φ0.155mmはL/D=1,2それぞれt_{AEOI}=0.58ms, t_{AEOI}=0.5msとなる。

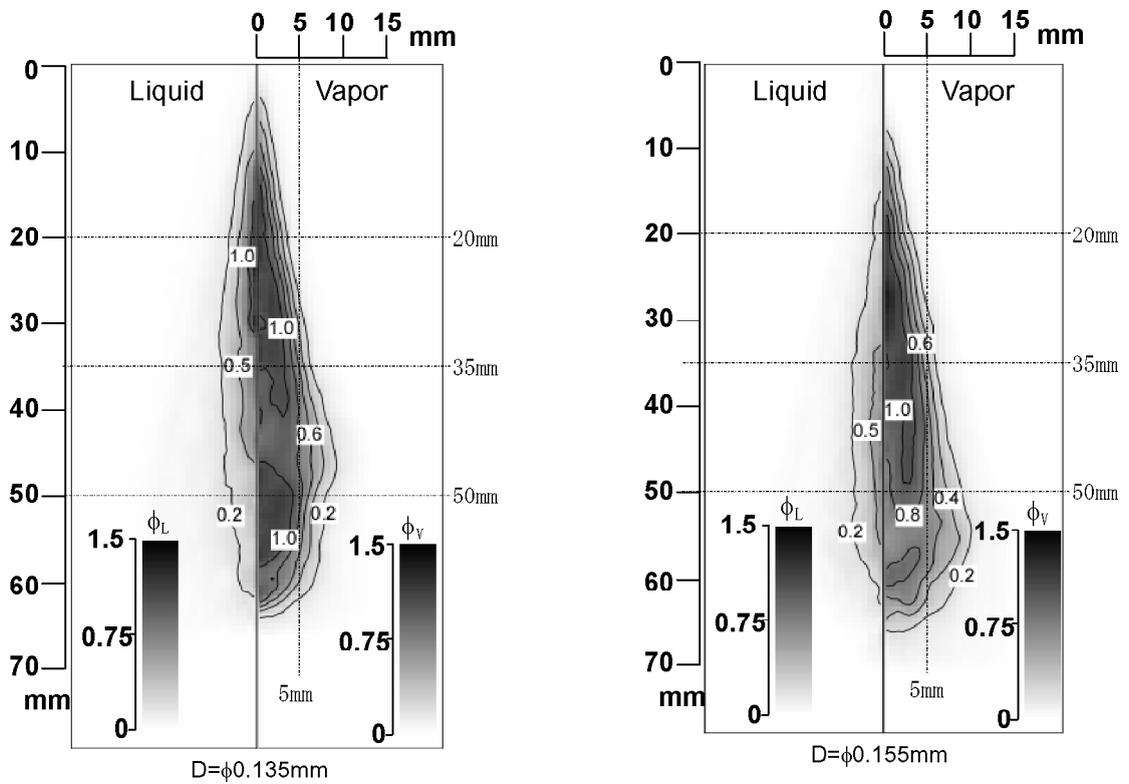
図4(a)のL/D=1の液相当量比分布を比較するとD=φ0.135mmはインジェクタ近傍に高い液相当量比の領域が見られるが、D=φ0.155mmでは見られない。この傾向は図4(b)のL/D=2でも言える。これは図2で示すようにD=φ0.135mmの場合は噴射終了から撮影時刻までの時間が短く、蒸発が進んでいないためと考えられる。

一方、蒸気相当量比分布を見ると、いずれのL/Dの場合も、D=φ0.135mmの方がインジェクタ先端から噴霧軸方向に噴霧先端付近まで蒸気相当量比φ_v=1.0の領域が存在している。これに対し、D=φ0.155mmは噴霧先端付近で蒸気相当量比が低下している。そして噴霧軸方向の中央付近からインジェクタ先端に近い側ではφ_v≥1.2の高い蒸気相当量比の領域が存在する。特にL/D=1でその傾向が見られる。従って、D=φ0.135mmの方が、噴霧全体で蒸気相当量比φ_v=1.0付近の領域が多く、均質な分布に近づいていると言える。しかし、L/Dが蒸気相当量比分布に及ぼす影響は顕著ではない。

図5に蒸気相到達距離の時間変化を示す。図4の蒸気相当量



(a) $L/D=1$



(b) $L/D=2$

Fig. 4 Liquid and Vapor Phase Equivalence Ratio Distributions in Evaporating Gasoline Spray at $t_{ASOI}=2.0ms$
 $P_{in}=20MPa$, $P_a=1.0MPa$, $T_a=500K$

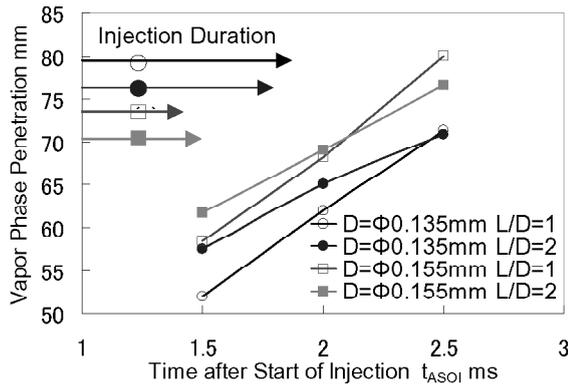


Fig. 5 Temporal Variations of Vapor Phase Penetration

比分布と紫外光の透過光減衰画像を照らし合わせ、透過光減衰画像で目視確認できる噴霧領域が蒸気相当量比分布の蒸気相当量比 $\phi_v \geq 0.2$ の領域であることを確認した。従って、本報告では $\phi_v \geq 0.2$ の領域の到達距離を蒸気相到達距離とした。図中の矢印は各インジェクタの噴射期間を表している。噴射開始後 $t_{ASOI}=1.5ms \sim 2.5ms$ で同一L/Dにおける蒸気相到達距離を比較するとD=φ0.135mmの方が短い。同一噴孔径で蒸気相到達距離を比較すると $t_{ASOI}=1.5ms \sim 2.0ms$ ではL/D=1の方が短い。すべてのインジェクタにてほぼ蒸発が完了している $t_{ASOI}=2.5ms$ では長くなっている。

次に $t_{ASOI}=1.5ms \sim 2.5ms$ での各蒸気相到達距離の勾配すなわち到達速度は噴孔径に関わらず、L/D=1の方が大きく、到達速度の減衰が少ないことがわかる。このような蒸気相到達距離および到達速度は噴孔径、噴孔L/Dの違いによるインジェクタ内部の流動抵抗の違い、キャビテーション発生や気泡の崩壊の違いによるものではないかと推測されるが、詳細説明は今後の課題である。

3.2 蒸気相および液相当量比の噴霧軸方向分布

3.2.1 噴孔径の影響

図6, 7に蒸気相と液相当量比の噴霧軸方向分布に及ぼす噴孔径の影響を示す。各図の噴射期間は噴孔径が小さいD=φ0.135mmの方がD=φ0.155mmよりも長い。噴射終了からの時間はD=φ0.135mmの方が短い。

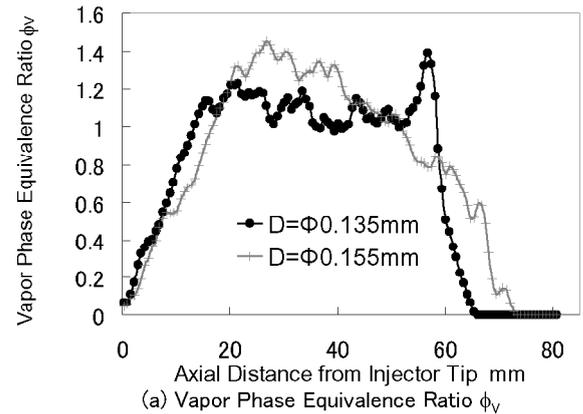
図6(a), 7(a)の蒸気相当量比を比較すると、L/Dに関わらず、D=φ0.135mmはインジェクタ先端からの距離50mmから60mm付近で蒸気相当量比の極大値を持つ分布となっているが、D=φ0.155mmは30mm付近で極大値を持つ。またD=φ0.135mmは噴霧軸方向に沿って、インジェクタ先端からの距離15mmから60mmにかけて蒸気相当量比が $\phi_v=1.0$ 付近の値を保った分布を示している。しかし、D=φ0.155mmはインジェクタ先端からの距離30mm付近から長いところにかけて、蒸気相当量比が小さくなるという傾向を示している。

一方、液相当量比の比較を図6(b), 7(b)に示す。D=φ0.135mmはL/Dの大きさに関わらずD=φ0.155mmに比べてインジェクタ先端からの距離が短い20mm付近では液相当量比は高く、長いところでは低くなっている。これはD=φ0.135mmの方が噴射終了からの時間が短いため、インジェクタ先端からの距離が短いところに液相が多く残っていると思われる。

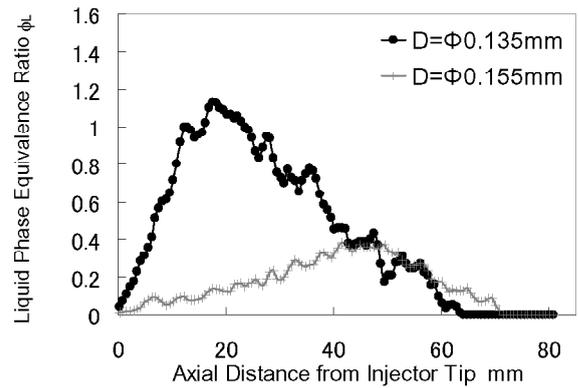
3.2.2 L/Dの影響

図8, 9に図6, 7のデータを同一噴孔径でL/Dをパラメータとしてまとめ直した結果を示す。噴孔径が同一の場合、噴射期間はほぼ一定である。すなわち撮影時刻における噴射終了からの時間はL/Dに寄らずほぼ同じである。図8(a)は蒸気相当量比が $\phi_v=1.0$ 付近の値を保った分布を示し、図9(a)は蒸気相当量比がインジェクタ先端からの距離30mm付近で極大値を持ち、距離が長いところにかけて減少する分布となっている。

図8(a), 9(a)からは噴孔径に関わらず、L/D=1の方がイン

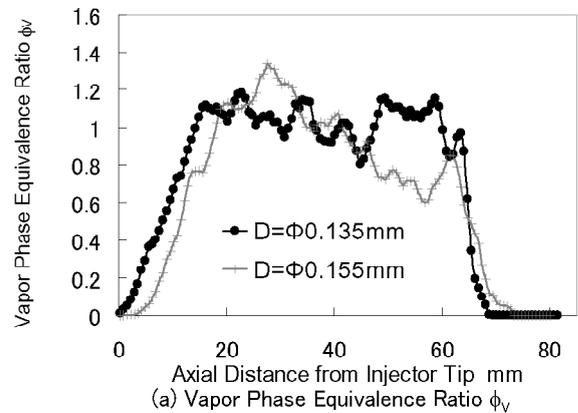


(a) Vapor Phase Equivalence Ratio ϕ_v

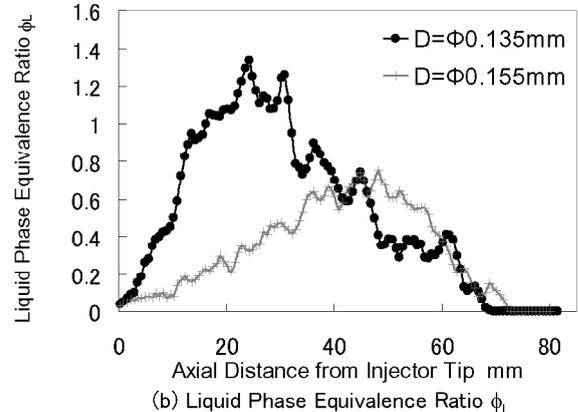


(b) Liquid Phase Equivalence Ratio ϕ_L

Fig. 6 Effect of Hole Diameter on Axial Distributions of Vapor and Liquid Phase Equivalence Ratios (L/D=1, $t_{ASOI}=2.0ms$)



(a) Vapor Phase Equivalence Ratio ϕ_v



(b) Liquid Phase Equivalence Ratio ϕ_L

Fig. 7 Effect of Hole Diameter on Axial Distributions of Vapor and Liquid Phase Equivalence Ratios (L/D=2, $t_{ASOI}=2.0ms$)

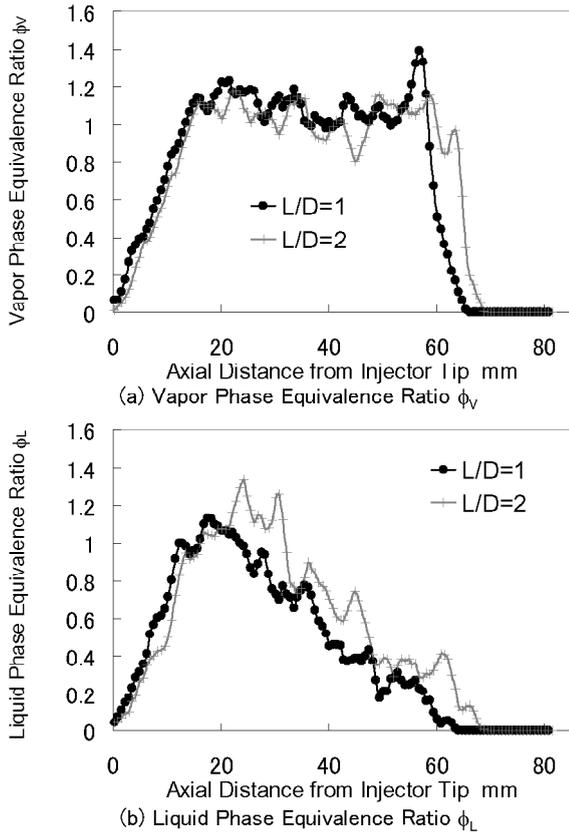


Fig. 8 Effect of L/D on Axial Distributions of Vapor and Liquid Phase Equivalence Ratios ($D=\phi 0.135\text{mm}$, $t_{ASOI}=2.0\text{ms}$)

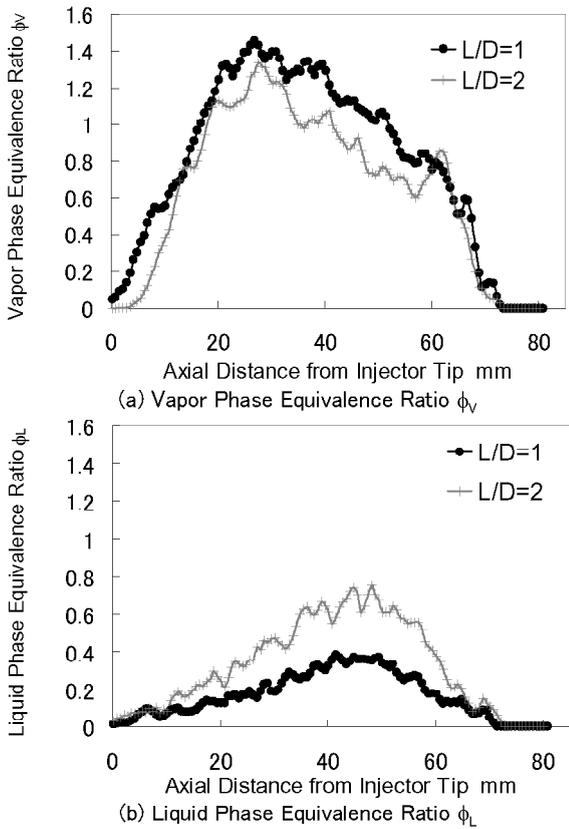


Fig. 9 Effect of L/D on Axial Distributions of Vapor and Liquid Phase Equivalence Ratios ($D=\phi 0.155\text{mm}$, $t_{ASOI}=2.0\text{ms}$)

ジェクタ先端からの距離 20mm から 60mm にかけて蒸気相当量比が高くなっていることが分かる。これは、図 9(a) $D=\phi 0.155\text{mm}$ の場合の方が顕著に現れている。

図 8(b), 9(b) に液相当量比の噴霧軸方向分布を示す。噴孔径に関わらず、 $L/D=1$ が $L/D=2$ に比べて噴霧全体で液相当量比が低くなっていることが分かる。

3.3 蒸気相当量比の噴霧半径方向分布

図10に $t_{ASOI}=2.0\text{ms}$ における蒸気相当量比の噴霧半径方向分布を示す。図10(a), (b), (c)はそれぞれ図4に示すようなインジェクタ先端から噴霧軸方向の距離20mm, 35mm, 50mmにおける蒸気相当量比の比較を示す。

図10(a)に示すようにインジェクタ先端から20mmと近い場合には、いずれのインジェクタにおいても噴孔軸からの半径距離5mmより内側の領域にのみ蒸気が存在する。これは図

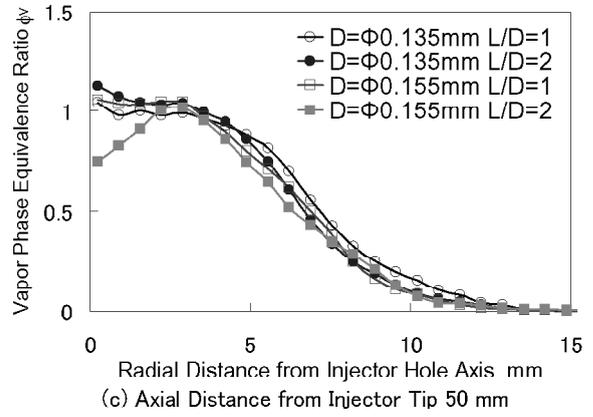
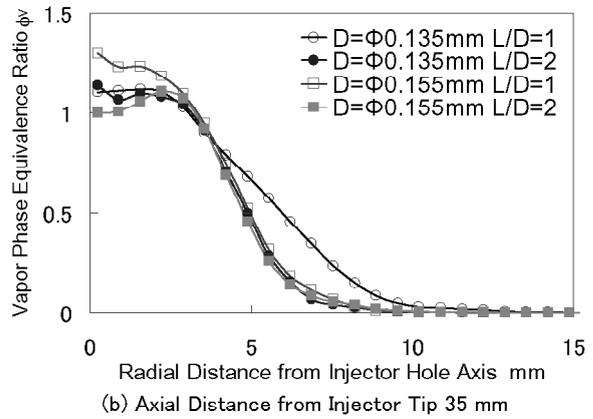
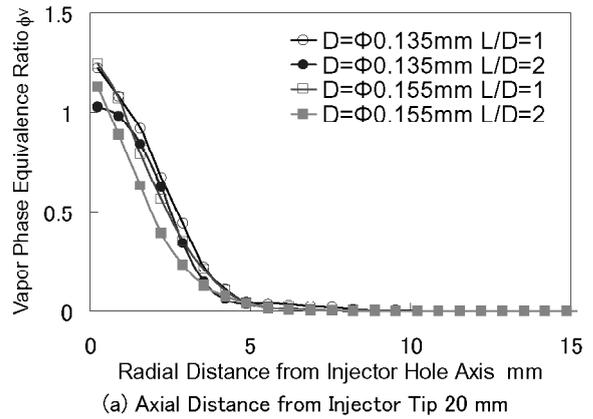


Fig.10 Radial Distributions of Vapor Phase Equivalence Ratio ($t_{ASOI}=2.0\text{ms}$)

4(a)(b)で示したように、噴霧の尻尾は細長い先細り形状であることから確認できる。中でも噴孔径とL/Dが共に小さい $D=\phi 0.135\text{mm}$, $L/D=1$ のインジェクタがわずかながら高い蒸気相当量比分布を示す。

図10(b)に示すように、噴霧中央付近のインジェクタ先端からの距離35mmの場合、蒸気相が噴霧半径距離10mm付近まで拡散していることがすべてのインジェクタで確認できる。噴孔軸から5mmの領域では $D=\phi 0.155\text{mm}$, $L/D=1$ が高い蒸気量当量比を示している。図4右上の(a) $L/D=1$, $D=\phi 0.155\text{mm}$ を見ると、該当領域の蒸気相当量比が高くなっていることがわかる。また、噴孔軸からの距離5mmから10mmの領域では $D=\phi 0.135\text{mm}$, $L/D=1$ が特に高い蒸気量当量比を示している。これは図4左上の(a) $L/D=1$, $D=\phi 0.135\text{mm}$ にて、他のインジェクタよりも半径方向に蒸気相がより拡散していることから確認できる。

図10(c)に示すように、インジェクタ先端からの距離50mmでは、噴霧半径方向に蒸気相がさらに拡散している。この位置でも $D=\phi 0.135\text{mm}$, $L/D=1$ のインジェクタの蒸気相当量比が噴孔軸からの距離5mmから13mmの領域でやや高い蒸気相当量比を示している。

以上のように、噴孔径とL/Dが共に小さい $D=\phi 0.135\text{mm}$, $L/D=1$ のインジェクタが他のどのインジェクタよりも噴霧半径方向により広がった高い蒸気相分布となっていると言える。

3.4 点火プラグ位置の蒸気相当量比の時間的变化

図11に図4に示すようなインジェクタ先端からの噴霧軸方向距離35mm, そして噴孔軸から半径方向距離5mmの位置での蒸気当量比の時間変化を示す。この位置はエンジン筒内への噴射を想定した場合の点火プラグの位置に相当する。また、図中の矢印は各インジェクタの噴射期間を示している。噴孔径とL/Dが共に小さい $D=\phi 0.135\text{mm}$, $L/D=1$ のインジェクタが他のインジェクタに比べて、噴射期間中である $t_{ASOI}=1.5\text{ms}$ からすべてのインジェクタの噴射が終了した $t_{ASOI}=2.5\text{ms}$ まで、高い蒸気相当量比を維持している。これは図4左上の当量比分布でも示されるように、この位置において他のインジェクタよりも高い蒸気相当量比が存在していることから言える。

そのほか、 $t_{ASOI}=1.5\text{ms}$ における噴孔径 $D=\phi 0.135\text{mm}$, $L/D=2$ の蒸気相当量比が小さいことがわかる。これは、本報告では載せていないが、蒸気相当量比分布(図4の $t_{ASOI}=1.5\text{ms}$ のもの)を見ると、他のインジェクタよりも噴霧角が小さい、すなわち、蒸気相の半径方向への拡がり小さくなり、蒸気当量比が小さくなっているためである。

また、 $D=\phi 0.135\text{mm}$ のインジェクタでは $L/D=1$ と $L/D=2$ の蒸気相当量比が大きく異なっていることがわかる。これは噴孔径およびL/Dの違いによるインジェクタ内部の複雑な流れによるキャビテーションの影響が大きいと推測される。 $L/D=2$ の噴孔出口では $L/D=1$ に比べ、気泡崩壊による乱れの減衰が大きく、微粒化力が低下している。そして、 $D=\phi 0.135\text{mm}$ の方が $D=\phi 0.155\text{mm}$ に比べ、全体の液流に対して噴孔壁に沿って生じるキャビテーションの発生領域の割合が大きいことが原因の一つではないかと考えている。

3.5 蒸気相および液相質量の時間変化

3.5.1 噴孔径の影響

図12, 図13にそれぞれ $L/D=1$, 2 の場合で噴孔径が異なるインジェクタの噴霧における液相および蒸気相質量の時間変化を示す。各図とも噴射終了以前は液相と蒸気相の質量を合わせた総燃料質量が時間とともに増加、噴射終了後は噴射量と同一値となる。また、各図中、上から液相、蒸気相で過濃($1.3 < \phi_v$)、量論当量比付近($0.7 < \phi_v < 1.3$)、希薄($\phi_v < 0.7$)の質量となっている。

図12(a)(b)の $L/D=1$ の場合、噴射開始からの時間が十分経過した $t_{ASOI}=2.50\text{ms}$ において、噴孔径が小さい $D=\phi 0.135\text{mm}$ は

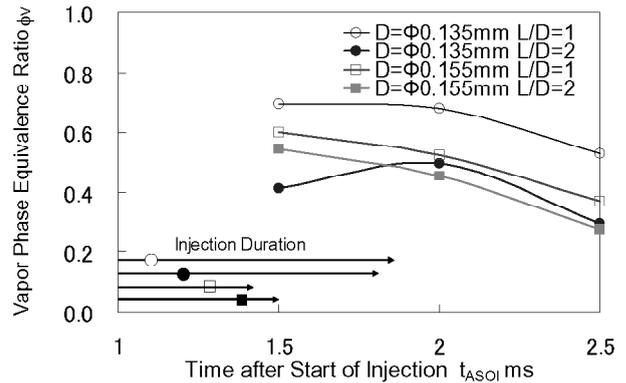


Fig.11 Temporal Variations of Vapor Phase Equivalence Ratio at Radius R=5.0mm for Axial Distance Z=35mm

噴射期間が長く、噴射終了からの時間が短いにも関わらず、噴孔径が大きい $D=\phi 0.155\text{mm}$ より $\phi_v < 0.7$ の範囲の燃料質量は少なく、 $0.7 < \phi_v < 1.3$ の燃料質量が多くなっている。また噴射終了から同時刻 $t_{ABOI}=0.64\text{ms}$ と比較した場合、すなわち図12(a)では $t_{ASOI}=2.50\text{ms}$, 図12(b)では $t_{ASOI}=2.06\text{ms}$ において $D=\phi 0.135\text{mm}$ はほぼ蒸発しているが $D=\phi 0.155\text{mm}$ は液相が残っている。

図13(a), (b)の $L/D=2$ の場合、図12の $L/D=1$ の傾向すなわち $D=\phi 0.135\text{mm}$ が $D=\phi 0.155\text{mm}$ より蒸発が進んでいるという傾向は顕著ではない。しかし、噴射終了から同時刻 $t_{ABOI}=0.64\text{ms}$ と比較した場合には、 $D=\phi 0.135\text{mm}$ の方が $D=\phi 0.155\text{mm}$ よりも $0.7 < \phi_v < 1.3$ の燃料質量は若干多く、液相は少ないことがわかる。従って、 L/D が一定の時、噴射開始からの時間 $t_{ASOI}=2.50\text{ms}$ 一定および噴射終了からの時間 $t_{ABOI}=0.64\text{ms}$ 一定で比較した場合、 $D=\phi 0.135\text{mm}$ の方が $D=\phi 0.155\text{mm}$ よりも噴霧内に量論当量比付近にある燃料質量が多い。

3.5.2 L/Dの影響

図12(a), 図13(a)の噴孔径 $D=\phi 0.135\text{mm}$ で L/D が異なる場合、インジェクタの噴霧における液相および蒸気相質量の時間変化を比較すると、 $t_{ASOI}=2.50\text{ms}$ において、 L/D が小さい $L/D=1$ は大きい $L/D=2$ より希薄な当量比 $\phi_v < 0.7$ の範囲の燃料質量は少ない。また量論当量比付近 $0.7 < \phi_v < 1.3$ の燃料質量は多くなっている。この傾向は噴射終了から同時刻 $t_{ABOI}=0.64\text{ms}$ と比較した場合、すなわち図12(a)では $t_{ASOI}=2.50\text{ms}$, 図13(a)では約 $t_{ASOI}=2.45\text{ms}$ においても同様である。さらにこの傾向は図12(b), 図13(b)に示す噴孔径が大きい $D=\phi 0.155\text{mm}$ の条件でも同様であった。従って、噴孔径が一定の時、噴射開始からの時間 $t_{ASOI}=2.50\text{ms}$ 一定および噴射終了からの時間 $t_{ABOI}=0.64\text{ms}$ 一定で比較しても、 $L/D=1$ の方が噴霧内で量論当量比付近にある燃料質量が多い。

3.6 蒸気当量比の質量頻度分布

3.6.1 噴孔径の影響

図14(a)(b)に噴射開始後 $t_{ASOI}=2.0\text{ms}$ における蒸気当量比の質量頻度分布に及ぼす噴孔径の影響を示す。これは3.1節で述べたように、4回の画像の平均値から求めた蒸気当量比分布をまとめ直したものである。図14(a)に L/D が小さい $L/D=1$ の結果を示す。噴孔径が小さい $D=\phi 0.135\text{mm}$ は大きい $D=\phi 0.155\text{mm}$ に比べて量論当量比 $\phi_v=1.0$ 付近で蒸気相質量の極大値を持つ。3.5.1項で述べたように $D=\phi 0.135\text{mm}$ が $0.7 < \phi_v < 1.3$ の範囲の蒸気相質量が多いことを示したが、この図からも $\phi_v=1.0$ 付近の蒸気相質量が多く存在していることが分かる。 $D=\phi 0.155\text{mm}$ は $\phi_v=1.0$ よりも低い $\phi_v=0.75$ 付近に最大値を持つ。図14(b)に示すように、 L/D が大きい $L/D=2$ の条件でも同様の傾向を示した。従って、 L/D が一定の時、 $D=\phi 0.135\text{mm}$ が $\phi_v=1.0$ 付近の蒸気相質量が多く存在している。

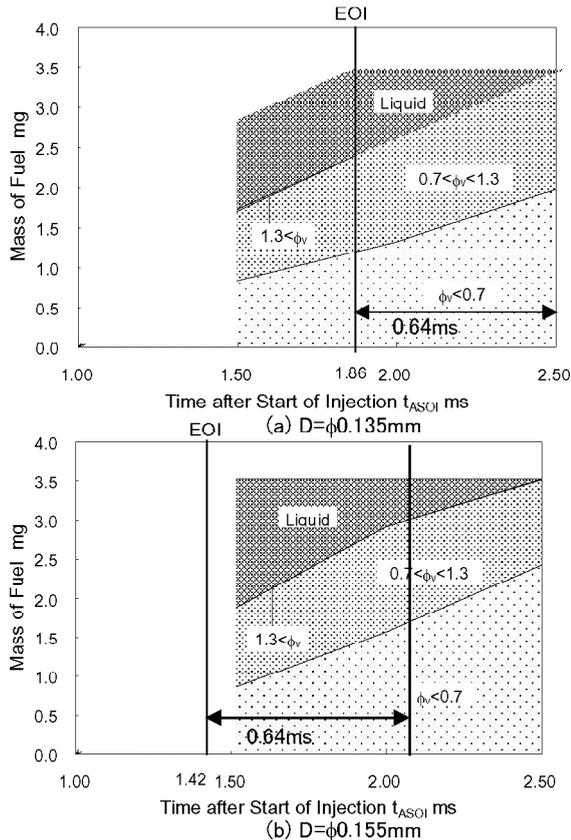


Fig.12 Temporal Variations of Mass of Vapor for Lean($\phi_v < 0.7$), Around Stoichiometric($0.7 < \phi_v < 1.3$), Rich($1.3 < \phi_v$) Mixture and Mass of Liquid in Spray ($L/D=1$)

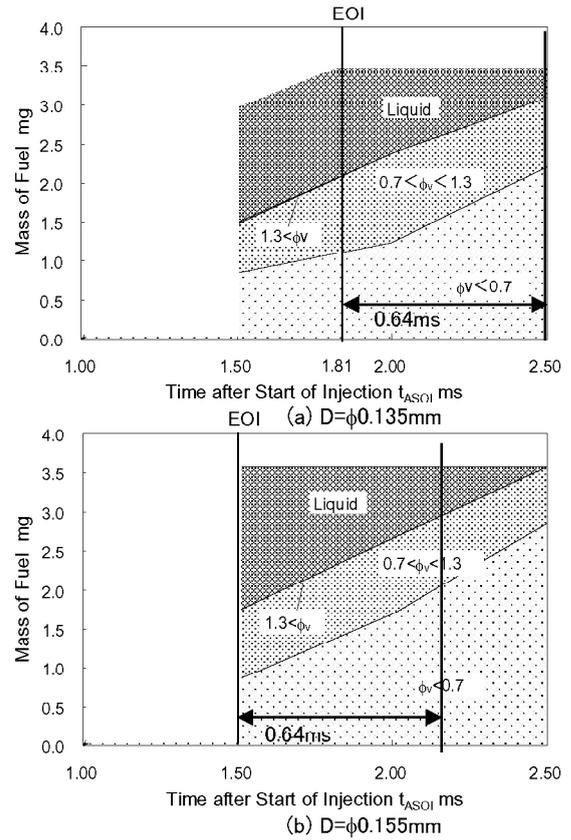


Fig.13 Temporal Variations of Mass of Vapor for Lean($\phi_v < 0.7$), Around Stoichiometric($0.7 < \phi_v < 1.3$), Rich($1.3 < \phi_v$) Mixture and Mass of Liquid in Spray ($L/D=2$)

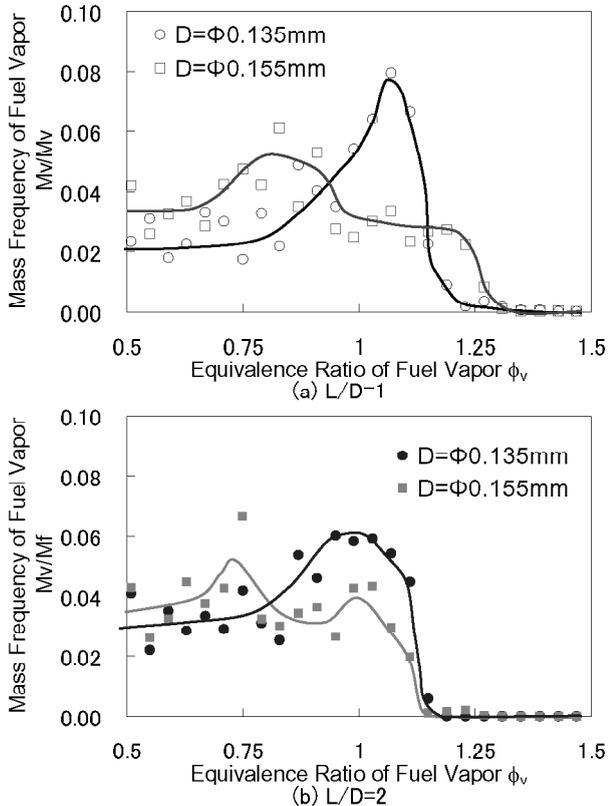


Fig.14 Effect of Hole Diameter on Mass Frequency of Vapor Phase Equivalence Ratio ($t_{ASOI}=2.0$ ms)

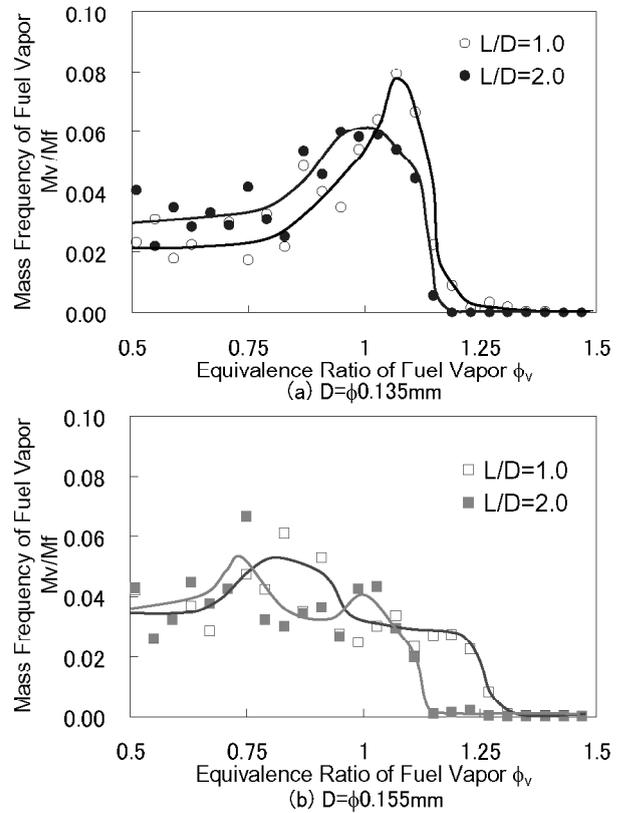


Fig.15 Effect of L/D on Mass Frequency of Vapor Phase Equivalence Ratio ($t_{ASOI}=2.0$ ms)

3.6.2 L/Dの影響 図15(a)(b)に図14のデータを同一噴孔径でL/Dの影響にまとめ直した噴射開始後 $t_{ASOI}=2.0ms$ における蒸気相当量比の質量頻度分布を示す。図15(a)に噴孔径 $D=\phi 0.135mm$ の結果を示す。3.6.1の噴孔径の影響による質量頻度分布の比較では極大値を持つ蒸気相当量比の値に違いが見られたが、L/Dの影響による質量頻度分布の比較ではほぼ同様な値で極大値を持っている。すなわちL/D=1およびL/D=2はいずれも量論当量比 $\phi_v=1.0$ よりやや高いところで蒸気相質量の極大値を持つ。しかし、L/D=1の方が $\phi_v=1.0$ より高い蒸気相質量が分布している。図15(b)に噴孔径 $D=\phi 0.155mm$ のものを示す。図15(a)とやや傾向は違いますが、L/D=1の方がL/D=2に比べて、 $\phi_v=1.0$ より高い蒸気相質量が多い。従って、噴孔径が一定の時、L/D=1の方が $\phi_v=1.0$ より高い蒸気相質量が多く存在していると言える。

4. 結言

直噴ガソリン機関の圧縮行程噴射を想定した温度500K、圧力1MPaの高温高压の窒素雰囲気中に噴孔径が $D=\phi 0.135mm$, $D=\phi 0.155mm$, 噴孔L/Dが1, 2の組み合わせのホールインジェクタから、噴射圧および噴射量一定で噴射した燃料噴霧を対象として2波長レーザー吸収散乱(LAS)法で計測した。蒸気相到達距離や混合気形成過程に及ぼす噴射期間を考慮した噴孔径と噴孔L/Dの影響について解析した。結果をまとめると、以下のようである。

- (1) 噴孔径 $D=\phi 0.135mm$ の方が、 $D=\phi 0.155mm$ よりも
 - ・ 蒸気相到達距離が短い。
 - ・ 蒸気相当量比分布がインジェクタ先端からの距離15mmから60mmにかけて量論当量比 $\phi_v=1.0$ の付近の値を保った分布になる。
 - ・ 噴霧内において、量論当量比 $\phi_v=1.0$ 付近の燃料質量が多く存在する。
- (2) L/D=1の方が、L/D=2よりも
 - ・ 蒸気相到達距離が $t_{ASOI}=1.5ms\sim 2.0ms$ では短い、 $t_{ASOI}=2.5ms$ では長い。
 - ・ 噴霧軸方向の蒸気相当量比が噴霧全体で高くなる。
 - ・ 噴霧内において、量論当量比 $\phi_v=1.0$ 以上の燃料質量が多く存在する。
- (3) 噴孔径、L/Dが共に小さい $D=\phi 0.135mm$, L/D=1のインジェクタは、蒸気相の噴霧半径方向の拡がり大きい。特に点火プラグ位置に相当するインジェクタ先端から噴霧軸方向へ35mm、噴孔軸から噴霧半径方向へ5mmの位置において高い蒸気相当量比が噴射終了後 $t_{ASOI}=1.5\sim 2.5ms$ の間保たれる。

以上のような噴霧と混合気の特性は、噴孔径やL/Dの違いによる噴孔内の流動特性、すなわち、噴孔内での流れの剥離と再付着、噴孔内でのキャビテーションの発生と気泡の崩壊、これらによる噴孔内での乱れの発生などと関連があると考えられる。これらを明らかにすることが今後の課題である。

文 献

- (1) Ortmann, R., Arndt, S., Raimann, J., Grzeszik, R. and Würfel, G., Methods and Analysis of Fuel Injection, Mixture Preparation and Charge Stratification in Different Direct Injected SI Engines, SAE Paper 2001-01-0970, (2001), 1-7.
- (2) Kawamoto, M., Honda, T., Katashiba, H., Sumida, M., Fukutomi, N. and Kawajiri, K., A Study of Center and Side Injection in Spray Guided DI/ST Concept, SAE Paper, 2005-01-0106, (2005), 1-10.

- (3) Thring, R. H., Homogeneous-Charge Compression-Ignition (HCCI) Engines, SAE Paper 892068, (1989)
- (4) Hiraya, K., Hasegawa, K., Urushihara, T., Iiyama, A., and Itoh, T., A Study on Gasoline Fueled Compression Ignition Engine -A Trial of Operation Region Expansion, SAE Paper, 2002-01-0416, (2002)
- (5) 平谷康治, 角方章彦, 漆原友則, 伊東輝行: ガソリン圧縮自己着火エンジンの研究 -負のオーバーラップ期間中の燃料噴射による自己着火促進-, 自動車技術, Vol. 35, No. 2(2004), 21-26.
- (6) De Corso, S. M., et al., Trans., ASME, (1957), 607
- (7) 小池誠: 直噴ガソリンエンジンの現状と将来, ENGINE TECHNOLOGY, Vol. 4, No. 4, (2002), 14-20.
- (8) M. Skogsberg, et al., Effects of Injector Parameters on Mixture Formation for Multi-Hole Nozzles in A Spray-Guided Gasoline DI Engine, SAE Paper, 2005-01-0097, (2005)
- (9) Suzuki, M., Nishida, K. and Hiroyasu, H., Simultaneous Concentration Measurement of Vapor and Liquid in an Evaporating Diesel Spray, SAE Paper, No930863, (1993), 1-23.
- (10) Zhang, Y., Yoshizaki, T. and Nishida, K., Imaging of Droplets and Vapor Distributions in a Diesel Fuel Spray by Means of a Laser Absorption-Scattering Technique, Applied Optics, SAE Paper, Vol. 39, No. 33 (2000), 6221-6229.
- (11) Zhang, Y., Yoshizaki, T. and Nishida, K., Quantitative Measurement of Droplet and Vapor Concentration Distributions in Diesel Spray by Processing UV and Visible Images, SAE Paper, 2001-01-1294, (2001), 1-14.
- (12) Yamakawa, M., Takaki, D., Li, T., Zhang, Y., Nishida, K., Quantitative Measurement of Liquid and Vapor Phase Concentration Distributions in a D. I. Gasoline Spray by the Laser Absorption Scattering (LAS) Technique, SAE Paper, 2002-01-1644(2002), 1-13.
- (13) Li, T., Zhang, Y., Nishida, K. and Hiroyasu, H., Characterization of Mixture Formation Processes in DI Gasoline Engine Sprays with Split Injection Strategy via Laser Absorption and Scattering (LAS) Technique, SAE Trans. J. Fuels Lubricants, Vol. 112, No. 4 (2003), 2296-2306.
- (14) 西田恵哉, 李鉄, 山川正尚, 野村真輔, 神崎淳: ホールノズルからの噴霧と混合気の特性, 第12回微粒化シンポジウム(2003), 227-232.
- (15) D. C. Hammond, Jr., Deconvolution Technique for Line-of-Sight Optical Scattering Measurements in Axisymmetric Sprays, Appl. Opt. 20(1981), 493-499.



佐藤 圭峰
マツダ株式会社
パワートレイン技術開発部
PT 解析グループ
〒730-8670
広島県安芸郡府中町新地 3-1
電話：082-287-4182
FAX：082-287-5134
Mail：sato.ki@mazda.co.jp

略歴：2000年 芝浦工業大学大学院工学研究科修士課程修了，同年マツダ株式会社入社，広島大学大学院工学研究科機械システム工学専攻博士課程に在学中。主としてガソリン噴霧に関する開発に従事。



山川 正尚
マツダ株式会社
パワートレイン技術開発部
PT 要素技術開発グループ 主幹
〒730-8670
広島県安芸郡府中町新地 3-1
電話：082-565-1224
FAX：082-287-5134
Mail：yamakawa.m@mazda.co.jp

略歴：1986年 東北大学工学部精密工学科卒業，同年マツダ株式会社入社，2001年 広島大学大学院工学研究科移動現象工学専攻博士課程修了，博士(工学)，主として自動車用エンジンの燃焼に関する研究開発に従事。



神崎 淳
マツダ株式会社
パワートレイン技術開発部
PT 要素技術開発グループ
〒730-8670
広島県安芸郡府中町新地 3-1
電話：082-287-4210
FAX：082-287-5134
Mail：kanzaki.j@mazda.co.jp

略歴：2005年 広島大学大学院工学研究科修士課程修了，主としてディーゼル機関に関する開発に従事。



西田 恵哉
広島大学 大学院工学研究科
准教授
〒739-8527
広島県東広島市鏡山 1-4-1
電話：082-424-7562
FAX：082-424-2401
Mail：nishida@mec.hiroshima-u.ac.jp

略歴：1980年 広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了，同年株式会社クボタ入社，1982年 広島大学工学部助手，1989年 博士(工学)，主として自動車用エンジンの噴霧・燃焼に関する研究開発に従事。