非軸対称衝突噴霧の蒸発過程の二波長レーザ吸収散乱法による解析*

佐藤 圭峰^{*1}, 田所 正^{*2}, 高 劍^{*3}
松本 有平^{*1}, 西田 恵哉^{*1}, 山川 正尚^{*2}

Analysis of Evaporation Process of Non-Axisymmetric Wall-Impinging Spray by Means of Laser Absorption Scattering Technique

Kiyotaka SATO^{*4}, Tadashi TADOKORO, Jian GAO,
Yuhei MATSUMOTO, Keiya NISHIDA and Masahisa YAMAKAWA^{*4} Department of Mechanical System Engineering, University of Hiroshima,
1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima-shi, Hiroshima, 739-8527 Japan

An evaporation process plays an important role on the combustion and emission formation processes in a direct injection (D.I.) gasoline engines. An experimental study was conducted on the evaporation process of the non-axisymmetric wall-impinging spray injected by the hole type injector for a D.I. gasoline engine. For the quantitative measurement of the vapor of the non-axisymmetric spray, the image processing technique using the Laser Absorption Scattering (LAS) principle was newly developed. The total amount of fuel vapor in the whole spray was obtained from the optical thickness image of the vapor and the Lambert Beer's law. The amount of fuel vapor in the wall-impinging spray is decreased compared with the free spray. In addition, the amount of fuel vapor is decreased as the distance between nozzle tip and the impingement wall is decreased.

Key Words: Gasoline Engine, Fuel Injection, Atomization, Laser-aided Diagnostics

1. 結 言

近年, 低環境負荷化や省エネルギー化が緊急の課題とされている中, ガソリン機関においては, 直噴化による環境性能向上が顕著である。従来, 直噴ガソリンエンジンの燃料供給には, 雰囲気圧力の増加に伴い噴霧角が狭まるスワールインジェクタが用いられてきたが, このような雰囲気密度の変化による噴霧構造の変化が少なく, 燃焼室内での噴霧配置の自由度が高いホールノズルの利用が検討されている^{(1)~(6)}。

直噴ガソリンエンジンの燃焼形態は, 吸気行程に燃料を噴射し均質な混合気を作った後に点火する均質燃焼と, 圧縮行程後半に燃料を噴射し, 点火プラグ周辺に混合気を集めて点火する成層燃焼に分けられる^{(7)~(9)}。成層燃焼の特徴として低負荷時の燃費を向上できる反面, 混合気形成が難しく, エミッションの低減が課題である。また, 狭い燃焼室内に燃料を噴射するため, ピストンやシリンダライナへの燃料噴霧の衝突は避けられないと考えられる。

著者らは, 紫外光と可視光を光源とした二波長レー

ザ吸収散乱 (Laser Absorption Scattering : LAS) 法を用いて, 直噴ガソリン噴霧についての種々の研究を行ってきたが, それらはいずれも軸対称の自由噴霧についての解析であった^{(10)~(12)}。本研究では, 非軸対称噴霧解析を行う LAS 法を新たに開発し, 非軸対称の壁面衝突噴霧に応用した。高温高圧の定容容器内で, 圧縮行程後期における噴射で燃料噴霧がピストン壁面に衝突する様子を模擬した壁面衝突噴霧の LAS 解析を行い, 壁面衝突が燃料の蒸発に与える影響を調べた。

2. LAS 法の原理

2・1 LAS 法の計測原理 LAS 法とは二種類の波長のレーザを燃料噴霧に照射して, 噴霧を通過する際のそれぞれの波長の光の減衰から, 噴霧の蒸気および液相の濃度を求める方法である。

図1は燃料が吸収する波長 λ_L 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 I_0 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(液滴群)の散乱と吸収で減衰し, 強度 I_t の透過光になる。波長 λ_L の透過光減衰率 $\log(I_0/I_{tL})$ は液相の散乱と吸収による透過光減衰率 $\log(I_0/I_{tLscat})$, $\log(I_0/I_{tLabs})$ および蒸気相燃料の吸収による透過光減衰率 $\log(I_0/I_{tLabs})$ 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

* 原稿受付 2007年12月10日。

^{*1} 正員, 広島大学大学院工学研究科(〒739-8527 広島県山1-4-1)。^{*2} マツダ(株)パワートレイン技術開発部(〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地3-1)。^{*3} 広島大学大学院工学研究科。

E-mail: sato-kiyo@hiroshima-u.ac.jp

Fig. 1 Principle of LAS technique

$\log(I_0/I_t)_{\lambda_T}$ は、液相の散乱による透過光減衰率 $\log(I_0/I_t)_{Lsca}$ によって式 (2) のように表すことができる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_A} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{Lsca+\lambda_{abs}} - \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_{abs}} \quad (1)$$

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

式 (1) の右辺第 1 項にある液滴の吸収による透過光減衰率 $\log(I_0/I_t)_{\lambda_{abs}}$ が無視できる程度に小さいこと⁽¹⁰⁾、また両波長の液滴の散乱による透過光減衰率 $\log(I_0/I_t)_{Lsca}$ は同等であることが確認されている⁽¹⁰⁾ため、蒸気相の吸収による透過光減衰率 $\log(I_0/I_t)_{\lambda_{abs}}$ と、液滴の散乱による透過光減衰率 $\log(I_0/I_t)_{Lsca}$ は、それぞれ式 (3) と式 (4) のように表すことができる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_{abs}} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_A} - \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_T} \quad (3)$$

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

軸対称噴霧に対しては玉ねぎの皮むきモデル⁽¹³⁾適用することで、断面内の当量比分布を求めている。

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近いパラキシレンを使用した。図 2 の液相燃料の吸収スペクトルに示すように、パラキシレンは紫外光を強く吸収し、可視光を吸収しないという特性を持っているため⁽¹⁰⁾、Nd:YAG レーザの第四高調波 (波長 266nm の紫外光) を λ_A の光源に、第二高調波 (波長 532nm の可視光) を λ_T の光源に使用した。

2・2 非軸対称噴霧への応用 非軸対称噴霧に対しては玉ねぎの皮むきモデルを適用できず、断面の当量比分布を求めることができない。しかし、蒸気相の吸収による透過光減衰率 $\log(I_0/I_t)_{\lambda_{abs}}$ を光路方向に積分することで、光路中に存在する蒸気相質量を求めることができる。図 3 に示すように、蒸気相濃度 C_v [kg/m³]

Fig. 2 Absorption spectra of liquid phase candidate fuels

Fig. 3 Lambert-Beer's law

の光路長 l の領域に対して、入射強度 I_0 のレーザー光が蒸気相の吸収により減衰され強度 I_t になるとする。この時、光路中の微小長さ dl の領域の蒸気相による透過光減衰率は以下の式 (5) で表すことができる。

$$\log\left(\frac{I}{I+dl}\right)_{\lambda_{abs}} = \frac{\varepsilon}{MW} \cdot C_v \times 10^2 dl \quad (5)$$

C_v : 蒸気相濃度 [kg/m³]

l : 光路長 [m]

ε : モル吸光係数 [liter/(mol·cm)]

MW : 分子量 [kg/kmol]

式 (5) を光路方向に積分することにより、光路の単位断面面積当たりの蒸気相質量の積算値 $\overline{C_v}$ [kg/m²] を式 (6) のように示すことができる。

$$\begin{aligned} \overline{C_v} &= \int_l C_v dl = \frac{MW}{\varepsilon} \int_l \log\left(\frac{I}{I+dl}\right)_{\lambda_{abs}} dl \\ &= \frac{MW \cdot \log(I_0/I_t)_{\lambda_{abs}}}{\varepsilon} \end{aligned} \quad (6)$$

$\overline{C_v}$: 光路の単位断面面積当たりの蒸気相質量の積算値 [kg/m²]

この時、モル吸光係数と分子量は光路長方向において一定であると仮定している。モル吸光係数は図 4 に示すように温度に依存する⁽¹⁰⁾。図 4 は実験により求めた圧力 1.0MPa におけるモル吸光係数で、温度が低下すると増大する。噴霧内での燃料蒸発による噴霧内の温度低下は、これまでの軸対称自由噴霧の LAS 計測結果を参考にすると、最大で約 40℃程度であるので、モ

Fig. 4 Temperature dependency of molar absorption coefficient of p-xylene vapor and N2 mixture (P=1.0MPa)

ル吸光係数の変化は最大で 2%程度となり、蒸気相質量の変化も 2%程度となる。従って、蒸気相質量を求める過程において、モル吸光係数は一定と仮定できると判断した。そして、平均蒸気濃度を噴霧領域全体 S において積分を行うと、式 (7) のように燃料噴霧中の蒸気相質量 M_V [mg]を求めることができる。

$$M_V = \int_S C_V dS = \int_S \frac{MW \cdot \log(I_0/I_t)}{\epsilon} \times 10^{-2} dS \quad (7)$$

M_V : 燃料噴霧中の蒸気相質量 [mg]

3. 実験装置

図 5 に LAS 法の実験装置の概略図を示す。光源に使用した Nd:YAG レーザは、第二高調波 (532nm) の可視光と第四高調波 (266nm) の紫外光を同時に発振させることが可能である。それらの 2 つのビームはダイクロイックミラーによって一度可視光と紫外光に分離され、それぞれデフューザ等によって強度が調整された後、ビームエクスパンダによってビーム径が拡大される。その後、可視光と紫外光のビームは、ハーモニクセパレータによって再び合成され、高温高压容器内に照射される。可視光と紫外光のビームは、それぞれ燃料液滴の散乱と燃料蒸気相の吸収によって減衰を受けながら容器内を通過し、再度ハーモニクセパレータによって可視光と紫外光のビームに分離され、可視光用と紫外光用の CCD カメラに取り込まれ、コンピュータに送られる。

圧力容器内部のガスは容器内部に設置した円筒熱板により高温に、また窒素ポンプを用いて加圧することが可能である。インジェクタには窒素で加圧したアキュムレータを用いて燃料であるパラキシレンを供給し、インジェクタドライバにより噴射を制御した。レーザ、

Fig. 5 Experimental apparatus of LAS

CCD カメラおよび燃料噴射は 2 台のディレイパルスジェネレータから発信する信号を用いて制御した。

4. 実験結果

表 1 に実験条件を示す。雰囲気条件は実際の直噴ガソリン機関における圧縮行程噴射を想定し、温度 $T_a=500K$ 、圧力 $P_a=1.0MPa$ とした。噴射圧力を 15MPa、噴射量を 1.6mg 一定とした。インジェクタはノズル先端にサック室が無い VCO (Valve Covered Orifice) タイプの単噴孔ホールノズルを用いた。図 6 に示すように平板は噴孔軸との角度を $\theta_{imp}=60^\circ$ とし、噴孔軸に沿ったノズル先端から平板までの距離を $D_{imp}=15, 30, 45, 60mm$ と変化した。

Table 1 Experimental conditions

Ambient Gas	
Ambient Gas	Nitrogen
Temperature : T_a [K]	500
Pressure : P_a [MPa]	1.0

Fuel Injection	
Fuel	P-xylene
Injector	Hole Type
Hole Diameter [mm]	0.15
L/D	2
Injection Duration [ms]	1.1
Injection Pressure [MPa]	15
Injection Quantity [mg]	1.6

Impingement Wall	
Distance : D_{imp} [mm]	15, 30, 45, 60
Angle : θ_{imp} [deg.]	60

5. 実験結果および考察

5・1 計測精度 図 7 に単噴孔ホールノズルから噴射した、軸対称と見なせる噴霧を対象とした非軸対称噴霧用 LAS 法による蒸気相質量の結果と、従来の軸対称噴霧用 LAS 法による蒸気相質量の比較を示す。両者の差は最大 13% である。非軸対称噴霧用 LAS 法で

Fig. 6 Spray tip penetration of wall impinging spray

Fig. 7 Difference in total mass of vapor in completely evaporated spray obtained by LAS axisymmetric spray and LAS for non-axisymmetric spray

は噴霧の光路長内の温度は一定であると仮定している。5.4 節で述べたように実際の噴霧内の温度は雰囲気温度より低い。しかし解析では噴霧内温度を雰囲気温度としているため、小さいモル吸光係数が使用されている。その結果、蒸気相質量が過大評価されたと考えられる。また軸対称と見なせる完全蒸発噴霧の LAS 解析の結果から求めた蒸気相質量と噴射量を比較することで、軸対称噴霧用 LAS 法の蒸気相質量の計測精度は約 15% であることが分かっている⁽¹⁰⁾。従って、新たに開発した非軸対称噴霧用 LAS 法は蒸気相質量を解析するのに十分な精度であると言える。

5・2 光路長方向の積算燃料蒸気相質量の分布

図 8 に壁面衝突噴霧（衝突距離 $D_{imp}=15, 30, 45\text{mm}$ ）および自由噴霧（平板無し）の燃料蒸気相質量分布（光路長方向積算・単位面積当たり）を示す。撮影タイミングは、噴射終了時間（EOI: End of Injection）を基準に 0.5ms 刻みで定めた。

衝突噴霧の場合、噴霧が壁面に衝突後、壁面に沿って左右に薄く拡がりながら蒸発し、時間の経過とともに幅の厚い蒸気塊を形成していく様子が分かる。また噴孔軸の左側（衝突角度が大きい側）に蒸気が拡がりやすく、噴霧先端到達距離が長くなっていることが分かる。

自由噴霧および衝突距離 $D_{imp}=45\text{mm}$ の場合、蒸気相質量の光路長方向積算値が最大で $5.0 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2$ 以上あるのに対し、 $D_{imp}=30\text{mm}$ では最大 $4.0 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2$ 程度、 $D_{imp}=15\text{mm}$ では最大 $2.7 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2$ 程度であり、衝突距離が短いほど燃料蒸気相質量の大きい領域が少なくなっている。また壁面近傍の燃料蒸気相質量分布を見ると、壁面に近いほど値が小さくなっている。これは壁面上の燃料液膜の形成により、蒸発が抑えられているものと考えられる。

一方、自由噴霧を見ると、噴霧後端から先端までの中間付近では噴孔軸より左側に蒸気相質量の大きい領域が存在し、噴霧先端では右側に存在している。すなわち噴霧が噴孔軸方向に蛇行した非軸対称の形状をしている。このような分布は、従来の研究^{(9)~(11)}におけるサック室のあるホールノズルでは観察されなかった。本研究で使用した VCO ノズルの特徴として、ニードル上昇中のノズル内噴孔入口付近の流動の非軸対称性が噴霧形状に影響を与えているものと推測される。

5・3 噴霧先端到達距離

図 9 に図 8 の燃料蒸気相質量分布から求めた壁面衝突噴霧および自由噴霧の先端到達距離を示す。噴霧先端到達距離は、図 6 に示すように壁面に衝突する前の自由噴霧の期間（before WI: Wall Impingement, 黒シンボル）と、壁面に衝突した後の壁面に沿って噴霧が発達していく期間（after WI, 白シンボル）に分けて定義した。また LAS 法による Optical 画像や蒸気相および液相質量分布から蒸気相先端到達距離と液相先端到達距離を比較した場合、蒸気相先端到達距離 $\approx$ (or $\geq$) 液相先端到達距離となるため、蒸気相先端到達距離を噴霧先端到達距離とした。自由噴霧の期間は、噴孔軸に沿って噴霧先端の平均蒸気相濃度 $\bar{C}_v > 0.5 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2$ の領域までの距離で定義し、壁面衝突後は衝突距離 D_{imp} と噴孔軸と壁面が交差する位置から壁面に沿って左側の $\bar{C}_v > 0.5 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2$ までの距離 S_{imp} との和で定義した。

衝突距離 $D_{imp}=15, 30\text{mm}$ の結果を見ると、衝突後は、噴霧先端到達距離の勾配すなわち噴霧先端到達速度が

Fig. 8 Vapor phase mass distributions of wall impinging sprays and free spray

小さくなっていることから、壁面衝突後の噴霧先端到達速度は自由噴霧よりも小さくなっていることが分かる。衝突距離 $D_{\text{imp}}=45\text{ mm}$ では、衝突直後の噴霧先端到達距離が不連続に増加する（噴霧の幅が加わる：図 6 の噴霧先端到達距離の定義による）ため、噴霧先端到達速度は同等となっているが、十分な時間経過後は $D_{\text{imp}}=15, 30\text{ mm}$ と同様な傾向になるものと推測される。

5・4 燃料蒸気相質量 図 10 に壁面衝突噴霧および自由噴霧の蒸気相質量の時間的変化を示す。噴射期間中 ($t_{\text{EOI}} < 0$) の噴射量は噴射率一定として求めた。蒸気相質量のグラフは平板に噴霧先端が到達するまで (before WI: Wall Impingement, 黒シンボル) と、衝突した後 (after WI, 白シンボル) に分けてプロットしている。

壁面衝突噴霧と自由噴霧を比較すると、いずれの衝突距離でも衝突噴霧の方が蒸気相質量は小さくなっており、壁面衝突により燃料の蒸発が抑制されている。また衝突距離が短いほど蒸気相質量が小さくなっており、蒸発がより抑えられていることが分かる。

図 11 に $t_{\text{EOI}}=1.0\text{ ms}$ 時の蒸気相質量と衝突距離の関係を示す。衝突距離 $D_{\text{imp}}=60\text{ mm}$ と自由噴霧 ($D_{\text{imp}}=\infty$)

Fig. 11 Effect of impingement distance on total mass of vapor in spray at $t_{\text{EOI}}=1.0\text{ ms}$

では、噴射量の約 80% の燃料が蒸発しているのに対し、 $D_{\text{imp}}=30\text{ mm}$ では約 50%, $D_{\text{imp}}=15\text{ mm}$ では約 25% しか蒸発していないことが分かる。

噴霧中の燃料が蒸発するためには、噴霧への高温の周囲気体の取り込みが必要である。壁面衝突により噴霧先端および壁面側からの周囲気体の流入が抑えられることで、蒸発量が少なくなったのではないかと考えられる。

6. 結 論

新たに開発した非軸対称噴霧用の二波長レーザ吸収散乱 (LAS) 法を用いて、高温高圧下で平板壁面に衝突する燃料噴霧の蒸気相質量の計測を行った。衝突角度（噴孔軸と平板の角度）を 60° 一定、衝突距離（ノズル先端から壁面までの距離）を $15\text{ mm} - 60\text{ mm}$ と変化させた範囲で、以下のことが明らかになった。

(1) 非軸対称噴霧用 LAS 法と軸対称噴霧用 LAS 法を比較して見積もった非軸対称噴霧用 LAS 法の誤差は約 13% である。

(2) 壁面衝突の無い自由噴霧と比べて、同一時刻における壁面衝突噴霧の噴霧先端到達距離が短く、蒸気相質量が小さい。すなわち壁面衝突により燃料の蒸発が抑制される。これは噴霧先端到達距離の減少による噴霧先端からの雰囲気取り込みの減少、また、壁面衝突後の壁面側からの雰囲気導入が無くなることによると推察される。

(3) 衝突距離が小さくなるほど、同一時刻における燃料噴霧内の蒸気相質量は小さくなる。すなわち壁面衝突による燃料の蒸発抑制がより顕著になる。

今後、非軸対称の完全蒸発噴霧を対象として、燃料噴射量と LAS 法により求めた蒸気相質量の比較による非軸対称噴霧用 LAS 法の計測精度を確認、

Fig. 9 Spray tip penetration

Fig. 10 Temporal variations of total mass of vapor in spray

次いで衝突角度の影響について解析を行う予定である。

Spray By Means of An Image Analysis of Shadow Photographs, SAE Paper, 840276 (1984)

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、マツダ（株）から燃料噴射装置の提供を受けた。また実験において、広島大学大学院工学研究科博士課程前期の洲本康樹氏および哈強氏の助力を得たことを記し、謝意を表す。

文 献

- (1) Honda, T., Kawamoto, M., Katashiba, H., Sumida, M., Fukutomi, N., Kawajiri, K., A Study of Mixture Formation and Combustion for Spray Guided DISI, SAE Paper, 2004-01-0046 (2004), pp.1-9.
- (2) Kawamoto, M., Honda, T., Katashiba, H., Sumida, M., Fukutomi, N., Kawajiri, K., A Study of Center and Side Injection in Spray Guided DISI Concept, SAE Paper, 2005-01-0106 (2005), pp.1-10.
- (3) Seto, M., Yamashita, H., Ota, N., Murakami, Y., Yoshida, H., Spray Guided DISI using Multihole Injector, JSAE Transaction, Vol.37 No.4, (2006-7), pp. 101-106
- (4) Steeper, R., Zilwa, S.D., Improving the NOx-CO2 Trade-Off of an HCCI Engine Using a Multi-Hole Injector, SAE Paper, 2007-01-0180 (2007), pp.1-14.
- (5) Stach, T., Schlerfer, J., Vorbach, M., New Generation Multi-hole Fuel Injector for Direct-Injection SI Engines-Optimization of Spray Characteristics by Means of Adapted Injector Layout and Multiple Injection, SAE Paper, 2007-01-1404 (2007), pp.1-15.
- (6) Nouri, J.M., Mitroglou, N., Yan, Y., Arcoumanis, C., Internal Flow and Cavitation in a Multi-Hole Injector for Gasoline Direct-Injection Engines, SAE Paper, 2007-01-1405 (2007), pp.1-19.
- (7) Koike, M., Mixture Formation and Combustion in Direct Injection Gasoline Engines, Technical Journal R&D Review of Toyota CRDL, Vol.33, No.4, (1998-12)
- (8) Chang, W., Kim, Y., Kong, J., Design and Development of a Central Direct Injection Stratified Gasoline Engine, SAE Paper, 2007-01-3531(2007), pp. 1-8.
- (9) Li, T., Nishida, K., Zhang, Y., Hiroyasu, H., Effect of Split Injection on Stratified Charge Formation of Direct Injection Spark Ignition Engines, International Journal of Engine Research, Vol.8, No.2, (2007-4), pp. 205-219.
- (10) Yamakawa, M., Takaki, D., Li, T., Zhang, Y., Nishida, K., Quantitative Measurement of Liquid and Vapor Phase Concentration Distribution in a D.I. Gasoline Spray by the Laser Absorption Scattering (LAS) Technique, SAE Paper, 2002-01-1644 (2002), pp.1-13.
- (11) Kanzaki, J., Sato, K., Yamakawa, M., Nishida, K., Li, T., Zhang, Y., Spray and Mixture Characteristics of Hole Nozzle for D. I. Gasoline Engine, Proceedings of 13th ILASS Japan, 2004, pp. 233-238.
- (12) Sato, K., Kanzaki, J., Yamakawa, M., Nishida, K., Comparison of Mixture Formation Process between Swirl and Hole Nozzles for DISI Engine, Proceedings of 14th ILASS Japan, 2005, pp. 109-114.
- (13) Kamimoto, T., Ahn, S.K., Chang, Y.J., Kobayashi, H., Matsuoka, S., Measurement of Droplet Diameter and Fuel Concentration in a Non-Evaporating Diesel