蒸発を伴う燃料噴霧特性に関する計測*

(第2報, 燃料蒸気濃度解析)

安 秉 一^{*1}, 大 聖 泰 弘^{*1}

Measurement on Fuel Spray Characteristics with Evaporating (2nd Report, Analysis of Vapor Concentration)

Byeongil AN and Yasuhiro DAISHO^{*2}

^{*2} Waseda University, Dept. of Mechanical Engineering,
3-4-1 Okubo, Shinjuku ku, Tokyo, 169-8555 Japan

In this paper the characteristics of evaporating fuel sprays injected into a high pressure and temperature cylindrical vessel are investigated by means of an electronically controlled common rail injection system. A laser induced fluorescence method was used to separate vapor and liquid phases of the spray. Two methods were conducted to investigate the qualitative and quantitative applicability of the technique in a high pressure and temperature atmosphere during the fuel injection period. Firstly, we calibrated the relationship between fluorescence intensity and vapor concentration of dopants at different temperatures. Secondly, we calculated the spray evaporation processes using the KIVA 3 code, which is commonly used in engine combustion simulations. Then, the distributions of fuel vapor concentration in diesel sprays were analyzed.

Key Words: Spray, Common Rail Injection, Vapor Concentration, Exciplex Method, CFD

1. ま え が き

ディーゼル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行われている。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、蒸発およ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いえる。しかしながら、これらの過程は高速かつ微細であり、詳細な調査が困難であった。従来から、各種のレーザパルス光源を用いて燃料噴霧の計測や液滴と蒸気濃度計測などが数多く行われているが^{(1)~(4)}、ディーゼル噴霧は複雑な構造をもつため不明確な点が残されているのが現状である。そこで本研究では、前報⁽⁵⁾に引き続き、蒸発を伴う燃料噴霧を対象として、燃焼室を模した高温高压の定常流動装置内においてLIF法による液相と気相の分離可視化を行い、非定常噴霧の蒸発特性の把握と蒸気濃度の定量化を試みた。また、KIVA-3コード⁽⁶⁾⁽⁷⁾を用いて噴霧の数値シミュレーションを行い、実験結果との比較検討をし蒸発を伴う非定常燃料噴霧

の特性を明らかにした。

2. 実験装置および方法

本実験に用いた噴射システムを図1に示す。窒素を充てんした可視化容器内に燃料を噴射し、非燃焼状態における燃料噴霧の蒸発過程の可視化を行った。燃料はn-ドデカン90%に蛍光剤としてN,N-ジメチルアニリン(DMA)5%とナフタレン5%の混合を使用し

Fig. 1 Schematic of injection system

* 原稿受付 2000年6月28日。

^{*1} 正員、早稲田大学理工学部(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)。

E-mail: anbi@mn.waseda.ac.jp

Fig. 2 Fluorescence spectra of both phases for the DMA/Naphthalene system

た⁽⁴⁾⁽⁸⁾。噴射系は、高圧単発噴射が可能な電子制御式の蓄圧形噴射装置を用いた。インゼクタには、噴射ドライバの信号によって駆動される二方弁を備えたコモンレールインゼクタを用い、噴射時期と噴射量を自由に制御することが可能になった。ノズルの形状は噴口径が0.25 mmの単噴孔ノズルを使用した。本実験では雰囲気気密度 5.96 kg/m^3 と一定にし、雰囲気温度を常温から 673 K において噴射期間 1.3 ms、噴射圧 40, 80 MPa に設定した。蛍光撮影には YAG レーザの第 4 高調波 (266 nm) の 50 mJ/パルス光源として用いた。このビームは 2 枚のシリンダカルレンズにより、高さ 70 mm、幅 0.3 mm のシート状として、噴霧中心軸を含む噴霧縦断面に入射した。それにより、気相では 340 nm、液相では 400 nm においてピークをもつ蛍光を発するので、それぞれの波長を透過するバンドパスフィルタを装着した 35 mm カメラで同時撮影することにより分離可視化を行った。分光器により測定した結果を図 2 に示す。なお、蒸気相の蛍光強度は液相に比べて弱いため、イメージインテンシファイアを用いて輝度増幅させる方法をとった。得られたイメージ写真は画像解析装置 (解像度 512×480) に取り込み数値処理した。

3. 蒸気濃度の検定

図 3 は蛍光強度から蒸気濃度を求めるための検量線作成に用いた蒸気発生装置の概略を示す。定常流動装置内に噴出した燃料蒸気を直接サンプリングし、濃度を測定する方法を採用した。高圧容器に入れた燃料を窒素で加圧し、フローメータと精密ニードルバルブを用いて流量を制御した。また、流量計から出た燃料を

Fig. 3 Schematic of the vapor calibration system

Fig. 4 Calibration curve between fluorescent intensity and vapor concentration

リボンヒータにより一定の温度に保ちながら、管路の途中で同じ温度に加熱した窒素ガスと混合した。この混合気を噴出口から噴出させ、その中心軸上に採集プローブを設け試験管を採集した。採集した蒸気を含む混合気はドライアイスと融点の低い溶媒としてメタノールを用いて急冷し、燃料を凝縮、凝固し質量を測定した。試験管から出た窒素は湿式ガスメータを用いて質量を求め、燃料蒸気の重量パーセント濃度を算出し

た。また、撮影された画像は上記の画像解析装置に取り込み、バックグランド処理を行った後、蒸気出口の中央部から約1 mm離れた場所の約16画素の平均輝度を求めた。このようにして得られた蒸気濃度と蛍光強度の関係を図4に示す。図4から、雰囲気圧力1.0 MPaにおいて雰囲気温度を変化させた場合、蒸気濃度に対する蛍光強度はあまり変化が見られない。一般に蛍光強度は温度が上昇すると消光作用を受けて減少するが⁽⁹⁾、本実験の温度範囲では、ほとんど影響を受けないと判断される。また、蒸気濃度に対する蛍光強度の増加率は対数的な形を示す。蒸気濃度が薄い場合は蛍光強度が濃度に比例し、検量線は直線的になるが、成分濃度が高くなると試料の中心部より放射された蛍光が自己吸収を生じ、蛍光が弱められて検量線の傾きが減少するものと考えられる。

4. 燃料液滴と蒸気濃度の解析

噴霧の液相と蒸気相の分離可視化に当たり、液相の蛍光領域が広くその蛍光強度も蒸気相に比べ強いいため、蒸気相側のLIF像の中に液相が混入することがわかった。

そこで、常温常圧においては、噴霧中に蒸気がほとんど存在しないと予想されるので、以下の方法を用い、輝度の補正を行った。画面に写った2枚の気・液像から噴霧のまったく同じ位置にある任意の1点に着目

し、液相輝度を I_l 、液相が混入された気相輝度を I_m とする。また、実際に求める液相、気相のそれぞれの輝度を I_{l0} 、 I_{l0} とすると、

$$I_{l0} = I_m - C_l I_{l0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$I_{l0} = I_l - C_v I_{l0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

C_l 、 C_v ：液相、気相のオーバーラップ定数

常温において、液相画像中の最高輝度 $I_{l\max}$ では蒸気が存在しないと考えれば、 $C_v = 0$ となる。 C_l は、

$$C_l = \frac{I_{l\max}}{I_{l\max}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。実際に求める任意の点での気相の輝度 I_{l0} は

$$I_{l0} = I_m - \frac{I_{l\max}}{I_{l\max}} I_l \quad \dots\dots\dots (4)$$

と示される。常温においてオーバーラップ定数 C_l を求め、他の条件に適用した。噴射圧40 MPaと80 MPaの場合の雰囲気温度による燃料噴霧への影響について解析した画像をそれぞれ図5と図6に示す。ここでは、噴霧が発達する噴射開始後1.2 msにおけるノズル中心軸を含む噴霧の二次元断面分布を示した。図5、6から、雰囲気温度が上昇すると燃料の蒸発が進み、噴霧の外周部と先端部において高い濃度となることがわかる。噴射圧80 MPaの場合、噴射速度が増加し、燃料液滴の微粒化が促進するとともに、運動量が大きいため、噴霧外周部および先端部において燃料液滴の蒸発が進む傾向が見られる。さらに、噴霧の外周部において燃料液滴の蒸発が進み蒸気濃度は高い値を示

Fig. 5 LIF images of fuel spray at injection pressure 40 MPa

Fig. 6 LIF images of fuel spray at injection pressure 80 MPa

Fig. 7 Distributions of liquid penetration and volume at injection pressure 40 MPa, 80 MPa

す。特に噴霧先端部においては、微粒化が進んだ液滴が噴霧の外縁で直接高温の雰囲気気に接し、大きな渦によって取り込まれた高温の雰囲気気により蒸発が促進されるため、燃料蒸気が広い範囲に存在し、噴射圧が高くなるほどその影響が大きくなる傾向がある。雰囲気温度による液滴噴霧の到達距離および体積を図7に示す。雰囲気温度が高くなるにつれて蒸発が進み、噴霧の到達距離、体積とともに減少する。噴射圧が高くなると、噴霧の到達距離は少し長くなるが、高温になるほど到達距離、体積とともに同等の傾向を示す。これは、噴射開始後、噴霧が最も発達した1.2 msで解析したことで、噴射圧80 MPa場合、噴射速度が速くなって到達距離は伸びるが、雰囲気温度が高くなると微粒化が促進され、噴霧の外周部や先端部において液滴の蒸発が活発となり、噴霧体積は等しくなる傾向を示した。

また、図6の噴霧の画像からもわかるように、高温になるほど噴霧の先端や外周部において液相の輝度が大幅に減少する傾向を示した。図8は液相の縦断面における蛍光強度分布を示す。各雰囲気条件における燃料噴霧は軸対称でないでノズルの中心軸から縦断面を示し、以下の断面測定精度は約 $\pm 2\%$ 以内の誤差を表した。噴射圧40 MPaの場合、ノズルから噴霧先端までの断面強度を見ると、液相の蛍光強度は温度上昇に対してほぼ同等の高い値を示す。噴霧の中心部において液相濃度の高い部分が多く分布している。一方、噴射圧80 MPaではノズルから下方20 mmの付近まで、液相濃度が高く、さらに下流方向へ行くに従って液滴の蒸発が促進されることで液相濃度が減少する傾向が見られる。噴射圧40 MPaに比べて全体の蛍光強

Fig. 8 Liquid phase intensity of along the spray axis at injection pressure 40 MPa and 80 MPa

Fig. 9 Distributions of Liquid phase intensity at spray cross section ($T = 673 \text{ K}$, $t = 1.2 \text{ ms}$)

度が低下し、特に、噴霧の先端部では大幅な減少が見られ、蒸発が活発であることが確認できた。図9には雰囲気温度673 Kの場合、ノズルからの距離10, 30, 50 mmにおける蛍光強度の噴霧半径方向分布を示す。噴射圧40 MPaの場合、ノズル先端から下流方向に進むにつれて噴霧幅が広がり、また液相強度も高い値を示すことから、この温度範囲では十分な蒸発は進んでいないことと思われる。噴射圧80 MPaでは40 MPaに比べ全体の蛍光強度が低くノズルから50 mmの位置においては、最高強度の約30%減少が認められた。一方、ノズルから50 mmにおける燃料蒸気の当量比の半径方向分布に及ぼす雰囲気温度の影響を図10に示す。図10から、雰囲気温度の上昇に伴い、その最大値および存在範囲ともに大きくなる傾向が認められる。蒸気濃度は、噴霧の半径方向位置において2~3箇所

で極大値が現れ、任意性の高い渦の存在により左右対称にはならないことがわかる。また、噴射圧が80 MPa と高くなると、燃料蒸気存在範囲が広がり、燃

料蒸気が高い濃度となる。これは、噴霧の運動量が低下する噴霧の外周部、先端部では、噴射圧の増加に伴う微粒化の促進効果により、燃料蒸気の当量比が高い値を示したと考えられる。

さらに、図11にはノズル先端からの距離10、30、50 mmにおける燃料蒸気の当量比の噴霧半径方向分布を示す。燃料蒸気の当量比は噴霧の中心軸付近で低い値を示し、その外側において2~3箇所極大値をもつ高濃度の蒸気が存在する。このように、燃料液滴が直接雰囲気と接している部分において液滴の蒸発と雰囲気との混合が促進される。また、噴霧のより下流では燃料液滴の半径方向への分散および蒸発が促進され燃料蒸気存在する範囲が広がる。さらに、下流ほど燃料液滴の蒸発促進により燃料蒸気の当量比も高い値を示すことがわかる。

Fig. 10 Distributions of vapor equivalence ratio at spray cross section ($Z=50$ mm, $t=1.2$ ms)

Fig. 11 Distributions of vapor equivalence ratio at spray cross section ($T=673$ K, $t=1.2$ ms)

Fig. 12 Computational mesh ($15 \times 15 \times 80$ mm)

Fig. 13 Comparison between KIVA calculations and experiments of spray behaviors ($\rho=5.96$ kg/m³)

5. 離散液滴モデル化による液滴と 蒸気挙動解析

5.1 計算方法 噴霧の数値シミュレーションには内燃機関の三次元CFDソフトとして広く用いられているKIVA-3流体コードを使用して実測結果と対比した。計算では、液滴挙動は離散液滴モデル(DDM)に基づき代表粒子の挙動をラグランジュ的に解析した。液滴の分裂機構についてはTABモデル⁽¹⁰⁾を採用し、噴霧粒子と周囲流体との相互作用は、質量、運動量、エネルギー保存則によって計算され、粒子のもつ乱れエネルギーもその中に含まれる。また、液滴同士の衝突、合体なども考慮されている。これらをもとに噴霧の蒸発過程の計算を行った。本計算で利用した空間のサイズは $15 \times 15 \times 80$ mm ($NX \times NY \times NZ$)の半円筒形のシリンダで設定した。図12に示すように、メッシュサイズとしては、半径方向に15個、円周方向に 10° ずつ18個、軸方向に40個に分割した。また、噴霧流動解析に必要な入力パラメータは、噴射燃料、噴射量といった確定値、噴射期間、噴霧角、初期粒径がある。噴射期間、噴霧角は、実験による写真をベースにして設定した。初期粒径は、ノズルの噴孔径(0.25 mm)と等しく与え、噴射パーセル数は16 000とした。計算には、ワークステーションDec Alpha Station 500 MHzを用いた。

5.2 計算結果および考察 燃料液滴、蒸気挙動の計算と実験結果を図13に示す。液滴については、雰囲気温度が増加するに従い、全体的に濃度が低下し、到達距離も短くなる傾向が計算によって表され、実験の傾向をよく記述している。また、噴射圧80 MPaになると微粒化が促進されるため液滴濃度が低くなっている。

一方、蒸気相の場合は、雰囲気温度の上昇によって蒸発が進んで蒸気濃度が高くなり、液滴が多く存在する噴霧の中心部において濃度が低く、噴霧先端部および外周部において濃度の高い部分が広がる傾向が表されている。また、噴射圧が高くなると微粒化が促進されることにより蒸気分布が広がり、濃度の濃い部分が広い範囲に分布している。実験と計算結果を比較してみると、液滴と蒸気ともに傾向的によく一致しており、当量比1.0以下が大部分を占めている。特に、噴霧先端の外周部において蒸気濃度の濃い部分が固まっている傾向を示す。ここで示したのは、噴射終1.2 msにおける解析結果であり、噴霧の先端において微粒化された微小液滴が直接高温の雰囲気と接触して蒸発が活

発となり、濃度の濃い部分が顕著に現れる傾向を示した。

6. 結 論

単発噴射を行う電子制御式噴射装置を用い、LIF法による燃料噴霧の液相と蒸気相の可視化を試みるとともに、KIVA-3コードによる数値シミュレーションを行った結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 定常流動装置内における燃料蒸気の直接サンプリング方法を採用し、蒸気濃度の定量化を可能にした。

(2) 雰囲気温度の上昇に伴い、燃料液滴の蒸発が促進し、燃料蒸気の当量比の高い領域が広い範囲に存在する。

(3) より高い噴射圧では、微粒化と蒸発の促進によって燃料蒸気の存在範囲が広がり、噴霧先端および外周部に濃度の高い部分が顕著に現れる。

(4) KIVA-3コードにより燃料液滴と蒸気挙動について実験の傾向をよく記述することができることを確認した。

文 献

- (1) Melton, L. A. and Verdieck, J. F., Vapor/liquid Visualization in Fuel Sprays, *Proc. 20th Int. Symp. Combust.*, (1984), 1283-1290.
- (2) Bardsley, M. E. A., ほか2名, 2-D Visualization of Liquid and Vapor Fuel in I. C Engine, *SAE Paper*, No. 880521 (1988), 3281-3291.
- (3) 小林正明・ほか3名, 第11回内燃機関シンポジウム講論集, デーゼル噴霧の燃料蒸気濃度分布の可視化と定量化, (1993), 265-270.
- (4) Felton, P. G., Planar Diagnostics of Engine Sprays, *Proc. Int. Symp. Adv. Spray Combust.*, (1994-7), 109-118.
- (5) An, B. and Daisho, Y., Measurement on Evaporating Processes of Sprays Having Different Boiling Points, *JSAE Rev.*, **21**-2(2000), 183-188.
- (6) Amsden, A. A., O'Rourke, P. J. and Butler, T. D., KIVA II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays, LA 11560 MS, *Los Alamos Nat. Lab. Rep.*, (1989).
- (7) Varnavas, C. and Assanis, D. N., A High Temperature and High Pressure Evaporation Model for the KIVA-3 Code, *SAE Paper*, No. 960629(1996).
- (8) Münch, K. U., Krämer, H. and Leipertz, A., Investigation of Fuel Evaporation Inside the Intake of a SI Engine Using Laser Induced Exciplex Fluorescence with a New Seed, *SAE Paper*, No. 961930(1996), 101-107.
- (9) 葉啓南・ほか3名, エキサイプレックス蛍光法によるディーゼル噴霧内の燃料蒸気濃度分布の画像計測, 機論, **60**-569, B(1994), 321-326.
- (10) O'Rourke, P. J. and Amsden, A. A., The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup, *SAE Tech. Paper*, No. 872089(1987).