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*葉 啓 南^{*1}, 神 本 武 征^{*2}
小 堀 繁 治^{*2}, 小 酒 英 範^{*2}2-D Measurement of Fuel Vapor Concentration
in Diesel Spray via Exciplex-Based Fluorescence TechniqueChi-Nan YEH, Takeyuki KAMIMOTO,
Shigeharu KOBORI and Hidenori KOSAKA

To measure the fuel vapor concentration in an unsteady evaporating spray, the exciplex-forming method, which produces spectrally separated fluorescence from the liquid and vapor phase, was applied in this study. Two experiments were conducted to investigate the qualitative and quantitative applicability of the technique in a high-temperature and high-pressure atmosphere during the fuel injection period. In one experiment, we examined the thermal decomposition of TMPD (NNN'-N'-tetramethyl-P-phenylene-diamine) dopant in a high-temperature and high-pressure atmosphere during a period of time shorter than 10 ms. In the other, we calibrated the relationship between fluorescence intensity and vapor concentration of TMPD at different temperatures. Then, the distributions of fuel vapor concentration in diesel sprays were measured.

Key Words: Diesel Engine, Fuel Injection, Evaporation, Exciplex, Fluorescence, 2-D Measurement

1. まえがき

ディーゼル機関の通常の運転条件下では、シリンダ内に噴射された燃料噴霧が蒸発した後、周囲の高温気体と混合しながら燃焼する。従って、燃焼過程を理解するには蒸発噴霧中の蒸気濃度分布を知ることが重要である。これまでシュリーレン写真法⁽¹⁾、ホログラフ法⁽²⁾等による測定が行われてきたが、これらの方法では光路積算の情報しか得られない。

1983年、Meltonらはレーザシート光を入射光として、エキサイプレックス蛍光法により蒸発噴霧断面内の2次元的な液相と気相の燃料濃度分布を画像計測する方法を提案した^(3,4,5)。その後、この方法を応用して、エンジンシリンダ内蒸気濃度分布と噴霧の挙動が調べられている^(6,7)。Meltonはこの手法により定量化測定を行う際の問題点を検討した⁽⁸⁾。Rotunnoらは定容容器を用いて、323K~423Kの雰囲気温度の範囲でTMPDの蒸気濃度と蛍光強度の関係について

検定を行い、この結果を用いて噴霧内の燃料蒸気濃度の定量測定を試みた⁽⁹⁾。Feltonらはエンジンシリンダ内に噴射される燃料がシリンダ内に一様に分布すると仮定し、TMPDを用いたエキサイプレックス蛍光法によりシリンダ内全体の燃料量の時間変化を測定した。彼らは燃料量が時間とともに増加するとの不合理な結果を得、その理由をTMPD吸光度が温度の上昇によって増加すると推論している⁽¹⁰⁾。しかし、これらの研究は次の2点の検討がなされておらず、定性的にも定量的にも検討が不十分と考えられる。すなわち、1)高温、高圧のエンジンシリンダ内に蛍光を含む燃料を噴射した場合、燃料中に溶解していた蛍光物質が熱分解しないか、2)雰囲気温度や圧力が変化した場合に蛍光物質濃度(TMPD蒸気濃度)と蛍光強度は比例するかの2点が不明である。

本研究では蛍光物質の熱分解の影響を実験的に調べるとともに、実機レベルの温度と圧力の雰囲気中で蛍光強度と蛍光物質濃度の検定を行い、エキサイプレックス蛍光法の定量測定の可能性を検討した。さらに、エキサイプレックスの手法を用いて急速圧縮膨張装置内に実現した単発蒸発噴霧の2次元的な燃料蒸気濃度分布の定性的画像計測を行った。

* 原稿受付 平成5年4月13日。

^{*1} 正員、東京工業大学大学院。^{*2} 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

図1 TMPDの構造式

図2 蛍光検定用燃焼器の正面と側面図

2. 検 定

本研究はMeltonらにならい蛍光物質にはナフタレンとNNN'-N'-テトラメチル-P-フェニレンジアミン (TMPD) 系を用いた。エキサイプレックス蛍光法の測定理論によると、蒸気相ではTMPD* (*は電子準位の励起状態を表す。)からの蛍光を放つ確率が(ナフタレン/TMPD)*のエキサイプレックスからの蛍光を放つ確率よりも高く、燃料蒸気濃度の測定にはこの蛍光に着目するので、今回の検定はTMPDについて行った。TMPDは常温では固体状態であり、これをn-デカンに溶解する。図1にTMPDの構造式を示す。なお、TMPDは酸素によるクエンチングを起こし易いので、実験はすべて窒素の雰囲気中で行った。

2・1 検定装置 高温高压の雰囲気を得るために図2に示すような燃焼室を有する急速圧縮膨張装置を用いた。燃焼室の直径は50mm、上死点における厚さは8.5mmである。圧縮比は圧縮行程の長さを最大92mmからそれ以下に変えることによって調整した。シリンダライナ、シリンダヘッド及びピストンヘッドを電気ヒータによって加熱し、内壁温度を423K一定になるようにした。シリンダ内圧力はインジケータ(共和PGM-100KD)を用いて測定した。

図3 蛍光検定系

蛍光強度検定のための光学系を図3に示す。励起光としてNd:YAGレーザの第3高調波355nm(パルス幅8ns、出力50mJ/パルス)を用い、ビーム光はプリズムによって燃焼室の中心軸に対し45°の方向で窒素に希釈された蛍光物質TMPDに入射される。TMPDからの蛍光は焦点距離 $f=400\text{mm}$ と $f=75\text{mm}$ のレンズにより集光されてポリクロメータ(相馬光学2200シリーズ^{*}, 焦点距離:120mm, 回折格子:300本/mm)に入射される。焦点は燃焼室の中心部に合わせた。分光された蛍光信号はイメージインテンシファイア(浜松ホトニクス,C4078,以下、I.I.と略記する。)により増幅され、CCDカメラ(NEC, TI-22A II 画素数:378×485, ポリクロメータと組み合わせた時の分解能:1.25nm/ビクセル)により撮像され、画像データは画像メモリへ転送された後、コンピュータ(HP9000, モデル310)で処理される。

2・2 熱分解の影響 実機におけるディーゼル噴霧の噴射期間は数ms程度である。まず、この短時間の間にTMPDが高温によって熱分解するかどうかを調べた。この場合、図3の分光器は使用せず、TMPDから発せられた蛍光をバンドパスフィルタ(日本真空光学, 中心波長398nm, 半値幅20nm, 最大透過率39.5%)を通して、I.I.(浜松ホトニクス,C2925)で増幅後、CCDカメラで撮像する。画像濃度を面で積分し、蛍光強度とした。まず圧力0.1MPa、雰囲気温度が423Kのピストン下死点における雰囲気中にTMPDを溶かした燃料溶液を瞬時に注入する。蒸発した燃料溶液が燃焼室内で均一となるようピストンを0.33

図4 ピストンの変位，筒内圧力，雰囲気温度の時間変化

3 Hzの速度で10回ほど圧縮膨張を繰り返した後，20 Hzの速度で圧縮膨張を行う。図4にピストンの変位，筒内圧力，雰囲気温度の時間経過を示す。ピストンは圧縮行程の後，TDCの位置で10 ms程度止まってから膨張行程になる。ピストンがTDCの位置に停止している間，レーザの発光時期を変えて蛍光強度を測定する。1ショットの実験を終了したら，使用した燃料蒸気を排出し，次の実験には新しい燃料溶液を使用した。図5に圧縮が終了し，ピストン停止後の時間に対する蛍光強度の変化を示す。レーザの出力がショット毎に変動するので，398 nmの検出蛍光強度を355 nmの積分値で無次元化した。図によると0～10 msの間，蛍光強度はほぼ一定値であることがわかる。これより，エンジン内と同じ高温高圧雰囲気中でも蛍光物質TMPDは数ms程度では熱分解の影響を殆ど受けないことが分かった。

2・3 温度と濃度の影響 次に雰囲気温度を変化させて，TMPD蒸気濃度と蛍光強度の関係の検定を行った。423 Kの一定温度の雰囲気中にマイクロシリンジで計量したTMPDの1%デカン溶液を注入し，雰囲気とよく混合した後，急速圧縮する。ピストンがTDCに達したとき，レーザを燃焼室に入射し，図3の検出系で蛍光を検出する。レーザの入射時期はピストンがTDC到達後0～3 msの間とし，パラメータとなる

図5 TDCにおける蛍光強度の時間変化

図6 TMPDの温度に対する蛍光特性

圧縮雰囲気温度は圧縮比を5.4から11.0まで変えることによって調整した。雰囲気温度はシリンダ内圧力の測定値からガスの状態方程式を用いて求めた。図6に蛍光強度を最大値で無次元化した蛍光強度の雰囲気温度に対する相対スペクトルを示す。スペクトルの形が温度によらず変わらないことがわかる。図7は雰囲気温度を550 K，680 K，800 Kの3つの条件に変化させたときのスペクトルのピーク値を蛍光強度としてTMPD蒸気濃度に対して最小2乗法により求めた結果である。雰囲気を窒素の代わりに空気と仮定して当量比を考えると，例えば図7のTMPD蒸気濃度 $3.0 \times 10^{-3} \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3})$ は雰囲気温度550 K，680 K，800 Kに対してそれぞれ $\phi 4.4$ ， $\phi 4.0$ ， $\phi 2.8$ となる。図によると蛍光強度とTMPD蒸気濃度の関係は，雰囲気温度が一定ならば通常の当量比の範囲で直線となる。蛍光強度は雰囲気温度の上昇と共に蛍光強度が小さくなる傾向があり，温度が550から800 Kに

上昇すると約20%蛍光強度が低下する。

なお、以上の実験ではレーザ発光強度がショット毎に変動するが、その影響は毎回の355nm蛍光強度をレーザ発光強度で正規化することにより除いた。

3. 蒸発噴霧の可視化

エキサイプレックス蛍光法をディーゼル噴霧へ適用し、蒸発噴霧の液相部と気相部の蒸発過程の2次元可視化を行った。著者の1人が以前行った一様噴霧モデルによる蒸発シミュレーション計算によれば、蒸発噴霧内の温度は蒸発による熱吸収により雰囲気温度より低下する⁽¹¹⁾。例えば雰囲気温度が800Kの場合、噴霧内の平均温度は噴射開始後1.5msで150K近く雰囲気温度より低くなる。Janson⁽¹²⁾も軸対称蒸発噴霧の数値シミュレーションを行い、雰囲気温度773K、噴射開始後0~0.3msにおける蒸発噴霧内の温度分布を計算している。これによると、噴霧中心領域では蒸発が活発になるため、ガス温度は雰囲気温度よりも最大200K程度低下している。このように蒸発噴霧内には温度分布が存在するため、蒸気濃度の測定にエキサイプレックス蛍光法を適用すると今回の検定結果に示されるように最大+10%程度の誤差が含まれる可能性がある。

3・1 実験装置および実験方法 燃料には基準燃料の0号ソルベン(C₁₂H₂₆:22%, C₁₃H₂₈:54%, C₁₄H₃₀:24%)に蛍光物質ナフタリンとTMPDを混合したものをを用いた。混合燃料の混合割合と物性値を表1に示す。この時の蛍光特性を図9に実線で示す。液相部の蛍光特性は298Kの状態に測定したものである。実験には直径200mm、行程560mm、圧縮比14.7の大型急速圧縮装置⁽¹³⁾を用いた。TMPDの酸素によるクエンチングを避けるために検定実験と同様に雰囲気には窒素を使用した。燃料噴射時の雰囲気温度は630K、圧力は3.0MPaである。

噴射系には30から135MPaの範囲で一定噴射率の噴射が可能な電子油圧制御式ユニット噴射装置⁽¹⁴⁾を用いた。噴射ノズルは噴口径0.15mmの単孔ホールノズルで噴口長さ/噴口径=4のものをを用いた。

図8に蒸発噴霧の可視化用の光学装置を示す。光源には前出と同様、Nd:YAGレーザ第3高調波の355nmを用いた。レーザビームを3枚のシリンドリカルレンズにより高さ40mm、厚さ0.2mmのシート光へ変換した。蛍光は入射光と直角を成す方向からガラス窓を通して撮影した。エキサイプレックス蛍光法で

図7 TMPD蒸気の検定曲線

表1 混合燃料の混合割合と物性値

mixture	kind	Mass fraction (%)	Boiling point (K)	Density (kg·m ⁻³)	Viscosity (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
n-tridecane (C ₁₃ H ₂₈)		94.5	508	760	1.6×10 ⁻³
Naphthalene (C ₁₀ H ₈)		5.0	491	1150	
TMPD (C ₁₀ H ₁₆ N ₂)		0.5	533	931

図8 蒸発噴霧の2次元可視化用の光学系

は、図9に示すように液相部からは波長490nm、気相部からは波長390nmをピーク波長とする2種類の蛍光を検出する。液相部と気相部の画像を同一画面にとるために2重プリズムを使い、それぞれに対し図8に示すようなフィルタ1（東芝,C39A,透過帯:350~470nm,最大透過率波長:390nm,とNikon,L-39紫外カットフィルタとを組み合わせたもの）とフィルタ2（東芝,V-Y46紫外カットフィルタ）を設置した。混合燃料から発せられた蛍光はこれらの光学フィルタを通過し、I.I.（浜松ホトニクス,C2925）で増幅され、CCDカメラで撮像された後に画像メモリに転送、処理される。

パラメータとして噴射圧力を選び、55, 85, 134 MPaの3通りの場合について実験を行った。撮影位置には噴口からの距離がそれぞれ0~40mm, 30~70mm, 60~100mm3箇所を選んだ。各噴射圧に対して、噴射量が一定になる時刻でレーザを発光させて撮影を行った。

3・2 実験結果と考察 図10に噴射圧力

図9 液相部と気相部の蛍光特性および光学フィルタの透過率特性

図10 蒸発噴霧の等蛍光強度線図（ δI : 等蛍光強度間隔）

を変化させた場合の液相と蒸気相噴霧の等蛍光強度線図を共に示す。上述の検定結果より、この等蛍光強度分布は等燃料蒸気濃度分布を表していることになる。

まず、0～40 mmの位置における結果を見ると、液相部の長さは従来、背景散乱光写真により観察された結果と同様に、噴射圧によらずほぼ一定となっている⁽¹⁵⁾。気相部の等蛍光強度を見ると噴口から5 mm付近で初めて蛍光強度がみられ、下流へゆくにつれて強くなる。10～15 mmの間で極大値をとり、その後は噴口から遠ざかるにつれて弱くなる。噴射圧力を高めるほど蒸気の存在領域が噴口から離れる傾向がみられる。これは輸送速度の増加が蒸発速度の増加を上回った結果と考えられる。噴射圧が高くなるに伴い、蛍光強度が強くなり蒸発領域も広がる。これは噴射圧を高くすると微粒化が促進されて蒸発速度が増加するためと考えられる。また、中心軸付近の蛍光強度は周辺部よりも強くなっており、中心軸付近で蒸発した蒸気の濃度が周辺部に比べて高いことを示している。

次に、30～70 mmの位置における結果をみると、噴射圧力の増加に伴い、蒸気相の蛍光強度が弱くなってしまいが、これは蒸発速度と拡散速度が増加し蒸気濃度が均一化、希薄化したためと思われる。

更に、60～100 mmの位置における噴霧先端領域における蒸気濃度分布の結果を見ると、この領域では噴射圧力によらず蒸気濃度分布の形が似ており、蛍光強度のレベルもほぼ等しい。

4. まとめ

急速圧縮膨張装置を用い、TMPDの蛍光強度に及ぼす熱分解の影響を調べ、あわせて高温下での蛍光強度と燃料蒸気濃度の関係について検定を行い、以下のような結果を得た。

(1) 圧力2.0 MPa、温度750 Kの雰囲気中では、10 ms以下の短時間では蛍光強度に及ぼす蛍光物質TMPDの熱分解の影響はない。

(2) 雰囲気圧力2.0 MPa、温度500 K～800 Kの範囲で、温度が一定ならばTMPD蛍光強度は濃度にほぼ比例する。雰囲気温度が500 Kから800 K上昇すると蛍光強度は約20%低下する。従ってTMPDを用いた蛍光法により蒸気濃度の定量測定を行うため

には蒸気噴霧内の温度分布を知る必要がある。

さらに、エキサイプレックス蛍光法を用いて急速圧縮装置における蒸発噴霧の可視化を行い、以下のような結果を得た。

(3) 液相部の長さは噴射圧力によらずほぼ一定である。一方、気相部の蛍光は噴口から5 mm付近の位置から観察され始め、蛍光強度は下流方向に向けて高くなり、極大値をとった後、弱くなる。

(4) 噴射圧力が高くなると、噴口から0～40 mmの位置では蒸発速度が増加し、燃料蒸気濃度が全般に高くなると同時に蒸発領域が広がる。

本研究は文部省科研費補助金重点領域研究「燃焼機構の解明と制御に関する基礎研究」の一部として実施されたことを記す。また画像解析には東京工業大学機械系の知能化機械設備を用いた。

文 献

- (1) 近久 他3名, 機論55-517B, (1989), 2931
- (2) 西田 他2名, 機論53-488B, (1987), 1487
- (3) Melton, L.A., et al., Applied Optics, 22-14, (1983), 2224
- (4) Melton, L.A., et al., Combust. Sci. and Tech., 22, (1985), 217
- (5) Melton, L.A., et al., 12th Symposium on Combustion, (1984), 1283
- (6) Bardsley, M.E.A., et al., SAE paper, No 880521, (1988)
- (7) Senda, J., et al., SAE paper, No 920578, (1992)
- (8) Melton, L.A., et al., Final Report, Army Research Office Contract DAAL03-86-K-0082, NTIS Order #ADA191649, (1988)
- (9) Rotunno, A.A., et al., Combust. Sci. and Tech. 71, (1990), 247
- (10) Felton, P.G., et al., SAE paper, No 930870, (1993)
- (11) 神本 他1名, 機論41-343, (1975), 951
- (12) Janson, G., 博士論文, Kaiserslautern, D386, 1990
- (13) Kamimoto, T., et al., SAE paper, No 811004, (1981)
- (14) 神本 他2名, 機論54-487B, (1987), 1117
- (15) 小酒 他2名, 機論55-5190B, (1989), 3587