エキサイプレックス蛍光法による燃料噴霧の
液相温度分布測定*

(第2報, 高温・高圧雰囲気中におけるディーゼル噴霧への適用)

吉崎 拓男^{*1}, 竹村 裕二^{*2}, 久枝 季文^{*3}
西田 恵哉^{*1}, 廣安 博之^{*1}Measurements of the Liquid Phase Temperature in Fuel Sprays
via Exciplex Fluorescence Method
(2nd Report, Application to Diesel Sprays Injected into High Pressure
and High Temperature Environments)Takuo YOSHIZAKI, Yuji TAKEMURA, Toshifumi HISAEDA,
Keiichi NISHIDA and Hiroyuki HIROYASU

The two-dimensional distributions of the liquid phase temperatures in diesel sprays injected into high-pressure and high-temperature environments were measured using the laser-induced fluorescence technique. The liquid fuel (*n*-hexadecane) was doped with pyrene ($C_{16}H_{10}$). The fuel spray doped with pyrene was injected under a high-pressure of 3.1 MPa and a high-temperature of 773 K. The evaporating diesel spray was excited by laser radiation at 266 nm, and the resulting fluorescence was imaged by an intensified CCD camera. The fluorescence intensity ratios of the pyrene monomer and excimer emissions have temperature dependence, and were used to determine the liquid phase temperatures in the diesel sprays. The cross-sectional distribution of the liquid phase temperature was estimated from the fluorescence images by the temperature dependence of the intensity ratio. The results demonstrate that the laser-based thermometry technique is available for planar measurements of the liquid phase temperature in evaporating diesel sprays under high-pressure and high-temperature environments.

Key Words: Liquid Fuel, Image Processing, Internal Combustion Engine, Diesel Engine, Spray, Laser Diagnostics, Temperature, Exciplex, Fluorescence

1. 緒 言

ガスタービン, ディーゼル機関, 筒内直接噴射式火花点火機関などの原動機において用いられている噴霧燃焼では, 燃料液滴の温度上昇過程は噴霧燃焼の初期過程であり, その後の蒸発特性, 混合気形成特性, 着火および燃焼特性に多大な影響を及ぼす。したがって, 燃料噴霧内の液相温度分布は噴霧燃焼における重要な解析要因であり, 測定場にじょう乱を与えることなく, 空間的・時間的に高い分解能で計測することが望まれる。

これまでに, 熱電対をはじめとする接触測定法による懸垂液滴の温度測定やレーザを用いた単一液滴の非接触温度測定が行われている^{(1)~(5)}。しかし, 燃料噴霧内液滴群の温度分布を非接触測定した例は, 一例しか見られない⁽⁶⁾。そこで, 本研究では, 第1報⁽⁷⁾で述べたレーザ Exciplex 蛍光法⁽⁸⁾⁽⁹⁾を高温・高圧場に噴射

されるディーゼル噴霧に適用することにより, 蒸発過程にあるディーゼル噴霧の液相温度分布測定を試みた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置の概略 図1に実験装置の概略を

Fig. 1 Schematic diagram of optical arrangement

* 原稿受付 1997年2月14日。

*¹ 正員, 広島大学工学部(☎739-8527 東広島市鏡山1-4-1)。*² (株)クボタエンジン技術第1部(☎590-0823 堺市石津北町64)。*³ 広島大学大学院。

示す。測定手法は既報⁽⁷⁾に述べた手法とまったく同様であり、測定対象を高温・高圧雰囲気中に噴射されるディーゼル噴霧に変更しただけであるので、測定原理および手法に関する詳細な記述は本報では省略する。

2・2 燃料噴射装置および高温高压容器 燃料供給装置として、ディーゼル機関用高圧燃料噴射装置と単孔ホールノズルを用いて、燃料を高温・高圧容器内に噴射した。本実験で用いた燃料噴射装置は、高圧噴射用ポンプ、ポンプ駆動用モータ、噴射制御回路から構成される。高圧噴射ポンプには、直噴式ディーゼル機関用の列形噴射ポンプ(ゼクセル社製:6 HD-TICS)を用い、直流モータ(東芝製:EDM-75)により駆動する。この噴射ポンプの1気筒分の噴射管から圧送される燃料を単孔ノズル(噴孔径0.15 mm)から高温・高圧容器内に噴射した。

噴射量および最高噴射圧は、ポンプ回転数とコントロールラックの押込量により調整した。また、噴射圧は、噴射ノズル直前の噴射管に管内圧センサ(KISTLER社製:6203形)を取付け、オシロスコープにより測定した。図2に、噴射圧の時間履歴を示す。図2に示すように、最高噴射圧は135 MPa、噴射期間は4.2 msで実験を行った。

高温容器内部には、2 kWの電熱線が二つ取付けられており、窒素を圧縮・充てんし、雰囲気温度900 K、雰囲気圧力4.0 MPaまでの雰囲気条件を実現することができる。レーザ光を内部に照射し、その蛍光を面計測するため、視野直径100 mmの合成石英ガラス製光学窓を3方向に設けた。容器底面にはかくはん板を設置し、容器内の雰囲気温度不均一を防ぐために、1回/s程度の速さでかくはんした。

2・3 実験条件 雰囲気の温度条件は、773 Kおよび573 Kの2条件で行った。また、雰囲気圧力は、

Fig. 2 Injection pressure history

773 Kのときに3.1 MPa、573 Kのときには2.3 MPaとし、雰囲気気密度を13.5 kg/m³で揃えた。燃料には、ヘキサデカンを用いた。ヘキサデカンを用いた場合、蛍光剤(ピレン)と燃料の蒸発特性の差異により若干の誤差拡大になることが考えられる⁽⁷⁾が、本報では、実際のディーゼル燃料を意識してヘキサデカンを用いることにした。また、燃料に混入する蛍光剤(ピレン)の濃度は2.0%とした。第1報⁽⁷⁾で述べたように、雰囲気圧力が高圧の場合、ピレン濃度が1.0%では、蛍光強度比の良好な温度依存性が得られないために、ピレン濃度を2.0%とした。噴射される燃料は、噴射ノズルを水冷することにより、ノズル内で温度上昇しないようにした。ノズルホルダ入口部での燃料温度は約300 K、冷却水出口での水温は320 Kであった。以上の実験条件を表1に示す。

3. 実験結果および考察

3・1 校正曲線 図3にピレン濃度2%のヘキサデカン液滴を窒素雰囲気に懸垂し、雰囲気圧力1.1 MPaから3.1 MPaにおける蛍光強度の温度依存性を

Table 1 Experimental condition

Ambient Temperature	T_a	773, 573	K
Ambient Pressure	P_a	3.1, 2.3	MPa
Ambient Density	ρ_a	13.5	kg/m ³
Peak Injection Press.	P_{imax}	135	MPa
Amount of Fuel Injected	m_f	28.0	mg
Injection Duration	t_{inj}	4.2	ms
Impinging Angle	α	30	deg.
Injection Nozzle			
Number of Hole		1	
Nozzle Diameter	d	0.15	mm
l/d		5.3	
Valve Opening Press.	P_o	19.6	MPa
Ambient Gas		Nitrogen

Fig. 3 Temperature dependence of the fluorescence intensity ratios of Pyrene monomer and excimer

調査した結果を示す。

図3に示すように、ピレン濃度が2%の場合、雰囲気圧力が3.1 MPaにおいても良好な温度依存性を示すことがわかる。この結果から、本手法を高圧下における噴霧温度分布測定に適用可能であると考えられる。

3・2 温度分布の算出方法 雰囲気圧力が3.1 MPaの場合には、図3に示される校正曲線を使用し、蛍光強度比から液相温度へ換算する。雰囲気圧力が2.3 MPaの場合には、図3に示された結果を内挿補完して校正曲線を求め、液相温度を求めた。

図4に単量体からの波長400 nmの蛍光強度分布、励起錯体からの波長470 nmの蛍光強度分布、両者の蛍光強度比分布、蛍光強度比から算出した噴霧内温度分布の計測例を示す。単量体からの蛍光強度と励起錯体からの蛍光強度は、バンドパスフィルタを通してインテンシファイヤ付CCDカメラによって撮影された元画像である。

得られた蛍光強度の画像に、あるしきい値を設定しその値以下の蛍光強度は無視した。しきい値は、2波長レーザ吸収・散乱光度法⁽¹⁰⁾により求められた噴霧内液相領域と本手法で計測した励起錯体からの蛍光(470 nm)の領域がほぼ一致するように設定した。本実験においては、最大蛍光強度の3%をしきい値とした。

これらの画像から温度分布を求めるために、蛍光強度比 $I_{470\text{ nm}}/I_{400\text{ nm}}$ を求め、この蛍光強度比から、検量線を用いて温度に換算し、図4中右端に示されるような温度分布が得られる。

3・3 自由噴霧の実験結果

3・3・1 雰囲気温度773 Kの場合 図5に、雰囲気温度773 K、雰囲気圧力3.1 MPaの高温・高圧場に噴射されたディーゼル噴霧の温度分布計測結果を、噴射開始から0.2 msごとに示す。本計測法における測定可能温度範囲は300~550 Kであるため、550 K以上の温度領域はすべて同一の赤色で示されている。

Fig. 4 Example of the resulting image (Ambient temperature: 773 K, Ambient pressure: 3.1 MPa, Timing: 0.6 ms after the start of the injection)

Fig. 5 Liquid phase temperature distributions in diesel sprays (Ambient temperature: 773 K, Ambient pressure: 3.1 MPa)

レーザシート光は、図5中右から照射している。

高圧場における温度分布測定では、ピレン蛍光強度比の良好な温度依存性を得るために、ピレン濃度を2.0%に高めなければならない。しかし、ピレン濃度を高めると、ピレンによるレーザ光の吸収が著しくなり、レーザ光をディーゼル噴霧全体に透過させることが困難になる。本計測においても、レーザシート光は、噴霧中心軸上で著しく減衰し、ディーゼル噴霧の中心軸以降の蛍光を良好に撮影することができなかった。

図5に示されるように、噴射ノズルから噴霧された燃料は、ノズル近傍では約350 K程度であり、噴霧が発達していくに従い550 K以上の高温になっている。ただし、噴射後0.2 msおよび0.4 msの温度分布を見ると、噴霧先端部に400 Kあるいは450 K程度の比較的低い温度領域が存在する。この領域は、時間の経過とともに次第に温度を高めていき、噴射開始から1.0 ms程度時間が経過すると、500 K以上になっている。

噴射ノズル近傍(ノズルから5 mm程度)の噴霧半径方向温度分布の特性としては、噴霧中心軸が比較的低温で、噴霧周辺部になるに従って高温領域となっている。しかし、噴射開始後0.2~0.6 msの実験結果において、ノズル先端から10~30 mmの領域で、550 K以上の高温領域は、噴霧外周部ではなく噴霧外周部と噴霧中心軸の間に存在している。噴射開始後0.8 ms以降で、ノズルからの距離がさらに離れ40 mm以上になると、上述したような半径方向の温度分布は見られず、噴霧中心軸近傍も550 K以上の高温領域となる。

3・3・2 雰囲気温度 573 K の場合 図6に、雰

気温度 573 K、震囲気圧力 2.3 MPa の高温・高圧場に噴射されたディーゼル噴霧の温度分布計測結果を、噴射開始から 0.2 ms ごとに示す。

雰囲気温度が 573 K の場合、3・3・1 項で示した雰囲気温度が 773 K の場合に比べて、噴霧全体の温度レベルが 50~100 K 程度低く計測されており、妥当な結果を示している。また、噴射ノズルから噴霧された燃料はノズル近傍では約 320~350 K 程度であり、噴霧が発達していくに従い 500 K 以上の高温になっている。しかし、雰囲気温度が 773 K の場合に見られたような 550 K 以上の高温領域は存在せず、噴射開始から 1.0 ms の時間範囲では 500 K 以上に温度が上昇しないことがわかる。

噴射直後の 0.2~0.4 ms の温度分布を見ると、雰囲気温度が 773 K の場合にも見られたように、噴霧先端部に 350 K 程度の比較的低い温度領域が存在する。この領域は、時間の経過とともに次第に温度を高めていき、噴射開始から 1.0 ms 程度時間が経過すると、噴霧先端部の比較的低温の領域は 400 K 以上になる。噴霧先端のこのような比較的低温領域の温度上昇率は、雰囲気温度 773 K の場合より小さいが、温度分布のパターンとしては、雰囲気温度によらないことがわかる。

噴射初期に噴霧先端部が比較的低温になる理由としては、噴射初期は噴射圧が十分に上昇していないため噴霧微粒化がその後の噴霧微粒化に比べて十分ではないことにより噴霧先端部の液滴粒径が大きくなっているため、あるいは後続の液滴が先に噴射された液滴を追いつき噴霧先端部に現れるためであると考えられる。

Fig. 6 Liquid phase temperature distributions in diesel sprays
(Ambient temperature: 573 K, Ambient pressure: 2.3 MPa)

噴射ノズル近傍(ノズルから噴霧軸5 mm 程度)の噴霧半径方向温度分布の特性としては、噴霧中心軸が比較的低温で、噴霧周辺部になるに従って高温領域となっている。しかし、噴射後0.2~0.6 msの実験結果において、ノズルからの距離が15 mm 程度以上離れた場所では、500 K 以上の高温領域は、噴霧外周部ではなく噴霧中心軸と噴霧外周部の間に存在するという温度分布を示すようになる。このような温度分布のパターンは、雰囲気温度が773 K の場合も同様であったが、雰囲気温度が573 K の場合、500 K 以上の高温領域の増大率が比較的緩やかである。

噴霧中心軸と噴霧周辺部の間に比較的高温領域のある温度分布を示す理由としては、後続噴霧の噴霧外周部への分散が考えられる。すなわち、初期に噴射された燃料噴霧は、周囲空気を噴霧内に導入しながら発達

し、導入空気からの熱移動により温度上昇する。温度上昇していく過程で蒸発を開始するが、そのときの気化潜熱によって、その周辺のガス温度は低下する。その後に噴射された燃料噴霧は、そのような比較的低温の領域を通過してくるため、初期に噴射された液滴群を追い越し、後続噴霧の噴霧外周部へ分散していく。このようにして、比較的低温の液滴群が噴霧周辺部へ発達していくことが考えられる。

噴霧周辺部においては、蒸気相からの蛍光の混信により、測定領域の温度が高めに計測される可能性があるということについて既報⁽⁷⁾で述べたが、図5および図6に示した噴霧周辺部の温度分布は、周囲に対して比較的低温で測定されていることから、蒸気相からの混信によって、このような温度分布パターンが表れたものではないと考える。

図7に、従来の研究における噴霧内の液滴濃度および蒸気濃度の測定例を示す⁽¹⁰⁾。図7の液滴密度に示されるように、噴霧先端部に比較的高い液滴濃度が計測されている。このような領域が、噴霧先端部の液滴粒径が大きくなっている領域であると考えられ、噴射初期の温度分布パターンが噴霧先端部で比較的低温を示す領域であると考えられる。

以上のように、噴霧内の液相温度分布は液滴が履歴してくる空間の温度条件に影響されるとともに、噴霧の追越しなどにも影響されることが考察される。今後さらに、噴霧内の内部構造を解明するためには、噴霧内の蒸気相温度分布の解明や噴霧液滴群の挙動解析などによる噴霧の追越し現象の解明が必要であろう。

Fig. 7 Fuel drop and vapor concentration in a diesel spray⁽¹⁰⁾

Fig. 8 Liquid phase temperature distributions in the impinging diesel sprays
(Ambient temperature: 773 K, Ambient pressure: 3.1 MPa, Impinging angle: 30 deg.)

Fig. 9 Liquid phase temperature distributions in the impinging diesel sprays
(Ambient temperature: 573K, Ambient pressure: 2.3 MPa, Impinging angle: 30 deg.)

3・4 壁面衝突噴霧の実験結果 本節では、平板に衝突するディーゼル噴霧の温度分布解析結果を示す。雰囲気条件は、自由噴霧の場合と同一で、雰囲気温度 773 K で雰囲気圧 3.1 MPa および雰囲気温度 573 K で雰囲気圧 2.3 MPa の 2 条件である。衝突角度は、平板とノズル中心軸との角度を 30° とした。また、ノズル中心軸の壁面までの距離は 25 mm とした。壁面の冷却は行わず、壁面は十分に雰囲気温度で加熱されているため、壁面の初期温度は雰囲気温度と等しい。

図 8 に壁面衝突ディーゼル噴霧の温度分布測定結果を示す。レーザシートは図の左から照射しており、壁面衝突によりレーザが透過する噴霧厚さが減少したため、この実験では噴霧全体を測定している。図 8 に示されるように、衝突点(噴霧中心軸が壁面と交わる点)近傍の噴霧温度が、0.2~1.0 ms のどの時間においても比較的低い値(430~480 K)を示していることがわかる。

上述のような温度分布の理由としては、噴霧液滴が壁面にスティックし、衝突点壁面上に液滴塊あるいは液状膜を形成しやすくなるのではないかと、また、衝突点近傍の外側で活発な蒸発が起こり、そのために衝突点近傍のガス温度が低下したのではないかと、ということが考えられる。

図 9 に、雰囲気温度 573 K の場合の温度分布を示す。図 9 に示されるように、雰囲気温度すなわち壁面温度が低い場合に、壁面近傍での温度が比較的低い温度を示すという前述した温度分布パターンが顕著に現れている。

以上のように、自由噴霧、壁面衝突噴霧の液相温度分布測定を行った。第 1 報⁽⁷⁾でも述べたが、これらの温度分布測定結果において、蒸気からの蛍光の影響で周辺部で温度が高めに計測される可能性があることには注意が必要であると考えられる。

4. 結 言

レーザ誘起蛍光法による温度分布計測法を用いて、高温高圧場に噴射されるディーゼル噴霧の温度分布計測を行った。壁面に衝突しない自由噴霧と平板に衝突する壁面衝突噴霧を測定対象とすることにより、これらの噴霧内温度分布を明らかにし、以下のような結論が得られた。

- (1) 高温・高圧場に噴射されたディーゼル噴霧液滴は、噴射直後に急激な温度上昇があり、その後、噴霧が発達していくに従って緩やかな温度上昇を示す。
- (2) 噴霧先端部に、噴射初期の比較的大きな粒径の液滴群と考えられる低温度領域が存在する。
- (3) (2)で述べた低温度領域は、時間の経過とともに次第に温度を高めていき、噴射開始から 1.0 ms 程度時間が経過すると、噴霧先端部の低温度領域は存在しなくなる。
- (4) 噴射ノズル近傍の噴霧半径方向温度分布の特性としては、噴霧中心軸が比較的低温で、噴霧周辺部になるに従って高温領域となっている。
- (5) 噴霧中心軸方向の距離がノズルから 20 mm 程度になると、噴霧中心軸と噴霧周辺部の間に比較的高温領域のある温度分布を示す。

(6) 衝突角度 30° の衝突噴霧では、壁面近傍での温度が比較的低い温度分布を示す。

本研究は一部平成8年度文部省科学研究費補助金奨励研究(A)(No. 08750234)の助成を受けて実施したものである。また、実験に際し、本学学生 八木康雄氏に多大のご協力をいただいた。ここに深く感謝する。

文 献

- (1) Hanlon, T. R. and Melton, L. A., Exciplex Fluorescence Thermometry of Falling Hexadecane Droplets, *Trans. ASME, J. Heat Trans.*, **114**(1992), 450-457.
- (2) Wells, M. R. and Melton, L. A., Temperature Measurements of Falling Droplets, *Trans. ASME, J. Heat Trans.*, **112** (1990), 1008-1013.
- (3) Zhang, J. and Melton, L. A., Potential Systematic Errors in Droplet Temperatures Obtained by Fluorescence Methods, *Trans. ASME, J. Heat Trans.*, **115** (1993), 325-331.
- (4) Winter, M. and Melton, L. A., Measurement of Internal Circulation in Droplets Using Laser-Induced Fluorescence, *Appl. Opt.*, **29**-31(1990), 4574-4577.
- (5) 角田敏一・ほか2名, EXCIPLEX 法による燃料液滴温度の非接触測定, 機論, **56**-525, B(1990), 294-299.
- (6) Megahed, M., First Measurements of the Liquid Phase Temperature in Diesel Sprays, *SAE Paper*, No. 930969 (1993), 1-7.
- (7) 吉崎拓男・ほか3名, エキサイプレックス蛍光法による燃料噴霧の液相温度分布測定(第1報, 測定手法の開発と常圧・高温雰囲気中における噴霧への適用), 機論, **64**-623, B(1998), 2132-2140.
- (8) Murray, A. M. and Melton, L. A., Fluorescence Method for Determination of Temperature in Fuel Sprays, *Appl. Opt.*, **24**-17(1985), 2783-2786.
- (9) Gossage, H. E. and Melton, L. A., Fluorescence Thermometers Using Intramolecular Exciplexes, *Appl. Opt.*, **26**-11(1987), 2256-2259.
- (10) Suzuki, M., ほか2名, Simultaneous Concentration Measurement of Vapor and Liquid in an Evaporating Diesel Spray, *SAE Paper*, No. 930863(1993), 1-23.