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)吉崎 拓男^{*1}, 船橋 剛^{*2}
西田 恵哉^{*1}, 廣安 博之^{*1}Measurements of the Liquid Phase Temperature in Fuel Sprays
via Exciplex Fluorescence Method
(1st Report, Development of the Measuring Technique and Application to Fuel
Sprays injected into Atmospheric Pressure and High Temperature Environments)Takuo YOSHIKAZI, Takeshi FUNAHASHI,
Keiya NISHIDA and Hiroyuki HIROYASU

A measuring method based on the exciplex fluorescence technique has been developed for planar measurements of the liquid phase temperature distribution in fuel sprays. The liquid fuel (*n*-hexadecane or squalane) was doped with pyrene ($C_{16}H_{10}$). The fluorescence intensity ratios of the pyrene monomer and excimer emissions has temperature dependence, and were used to determine the liquid phase temperatures in the fuel sprays. The spray was excited by laser radiation at 266 nm, and the resulting fluorescence was imaged by an intensified CCD camera. The cross-sectional distribution of the liquid phase temperature was estimated from the fluorescence image by the temperature dependence of the intensity ratio. The results demonstrate that this laser-based thermometry technique is available for 2-D measurements of the liquid phase temperature in fuel sprays.

Key Words: Liquid Fuel, Image Processing, Internal Combustion Engine, Spray, Droplet, 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素であり, 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, レーザ Exciplex 蛍光法⁽⁷⁾⁽⁸⁾を適用することにより, 蒸発過程にある燃料噴霧の液相温度分布測定を試みた。

本報では, まず, 測定原理と計測システムの概要,

校正曲線, 誤差の推定について述べるとともに, 常圧・高温雰囲気中に噴射された燃料噴霧へ本計測手法を適用した場合の実験結果について報告する。

2. 測定原理

本研究では, Exciplex 蛍光を発する蛍光剤として Pyrene を用いた。図1にピレンのエキサイプレックス蛍光過程を示す。ピレンは紫外光により励起され, 励起分子 Pyren* を形成する。励起されたピレンの単量体が基底状態に戻るとき, 波長 390 nm 近辺にピークをもつ蛍光を発する。一方, 励起されたピレンは, 他のピレン分子と励起錯体(Pyrene+Pyrene)* を形

Fig. 1 Schematic diagram of the pyrene exciplex process

* 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} プラットホーム(株)(☎152-0023 東京都目黒区八雲5-15-14)。

成する場合があります, この励起錯体が基底状態に戻るときに波長 470 nm 近辺にピークをもつ蛍光を発する。これらの過程における各波長の蛍光強度比は, 式(1)のように表現される⁽⁹⁾。

$$I_E/I_M \propto [P] \cdot T \cdot K/\eta \quad \text{..... (1)}$$

ここで,

I_M : 単量体の蛍光強度

I_E : 励起錯体の蛍光強度

$[P]$: ピレン濃度

T : 温度

η : 粘度

K : 定数

を表す。

式(1)に示されるように, 単量体と励起錯体との蛍光強度比は, 温度および粘度の関数となる。粘度は, 温度の関数として表される⁽¹⁰⁾ から, 結局, 蛍光強度比は, ピレン濃度および温度の関数となる。溶媒内のピレン濃度が一定であると考えられる条件では, この蛍光強度比は, 温度のみの関数となり, 蛍光強度比を測定することで, 溶媒の温度が一義的に決定できる。

図にピレンの吸収スペクトル⁽¹¹⁾を示す。本研究では, 液滴からのミー散乱の波長を, 観測する蛍光の波長(400, 470 nm)から分離するために, 吸収効率は高くないが励起光源の波長を 266 nm とした。また, 図

Fig. 2 Absorption spectrum of pyrene⁽¹⁰⁾

Fig. 3 Fluorescence delay of pyrene⁽¹¹⁾

3は, ピレンの単量体および励起錯体の蛍光遅延を表したものである⁽¹²⁾。図3に示されるように, ピレンの蛍光遅延はμs オーダの測定には問題がないと考える。

予備実験としてピレンの蛍光スペクトルを分光器を用いて測定した結果を図4に示す。縦軸は, 波長 400 nm の蛍光強度に対する各波長の蛍光強度比である。溶媒中のピレン濃度は質量割合で 1%, 雰囲気は窒素, 圧力は大気圧, 雰囲気温度は 293~453 K まで変化させた。図4に示されるように, ピレンの蛍光強度比は, この温度範囲において良好な温度依存性を示し, 温度測定に十分利用できることがわかる。

3. 実験装置および方法

3・1 計測システム 図5に計測システムの概略を示す。液体燃料にあらかじめ一定濃度のピレンを混入させておき, この試料を測定場に液滴として懸垂, あるいは噴霧として噴射した。この試料の励起光源と

Fig. 4 Temperature dependence of the fluorescence intensity ratios of pyrene monomer and excimer emissions

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental apparatus

してはNd:YAGレーザ(Continuum社製, NY 81 CS, 120 mJ/pulse@266 nm)の第4高調波266 nmを用い, 3枚のシリンドリカルレンズによってシート光にして, シングルショットで試料に照射した。

試料からの蛍光は, イメージインテンシファイヤ付きCCDカメラ(Photometrics社製, Stara 1)によって撮影し, コンピュータに転送して画像処理を行った。シングルショットのレーザ光とCCDカメラとのタイミングコントロールは, デジタルディレイ/パルスジェネレータ(Stanford Research社製, DG-535)で行った。本実験におけるセッティングでは, CCDカメラの1ピクセルが測定場において $500 \times 500 \mu\text{m}$ に相当することを確認した。

2波長の画像を同時に取り込むために, カメラの前にルーフプリズムを設置して画像を2分割し, プリズムの前面に中心波長が400 nmおよび470 nmのバンドパスフィルタをセットした。本実験で使用した光学フィルタの透過率特性を図6に示す。

3.2 供試燃料 液体燃料として, ヘキサデカンをおもに用いた。蒸発場における液滴温度計測では, 溶媒と溶質との沸点などの物性値の違いにより, 液滴内の溶質濃度に変化し, 誤差を増大させる可能性がある。そこで, 溶媒としてヘキサデカンよりも沸点が高いスクアレンも用いて, 両者の単一液滴の温度測定結果から誤差の推定を行った。表1におおのの試料の物性値を示す。スクアレンの沸点はヘキサデカンの沸点より高く, 溶質であるピレンの沸点により近い。したがって, スクアレンのほうが蒸発過程における溶媒中のピレン濃度変化が少ないと考えられる。

3.3 高温容器および燃料供給装置 液相温度の測定は, 高温容器内で行った。この容器内部には, 2 kWの電熱線が二つ取り付けられており, 窒素または空気を圧縮・充てんすることによって, 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

Fig. 6 Transmissivity of the applied optical filters

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方向に設けている。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する。

校正曲線を作成するため, 常圧下および高圧下において, 単一液滴からの蛍光強度比の測定と熱電対による温度測定を行った。供試燃料は, 実験前に常温・常圧場において雰囲気と同一の気体で30 minのパブリングを行った後, 測定部へ挿入した。

常圧下での液滴実験では, 加熱したガスを液滴の上方から流出させて周囲雰囲気を形成すると同時に液滴を加熱した。高圧下での液滴実験では, 図7に示すようなねじ込み式のシリンジにより, 高圧・高温雰囲気中に液滴をさらした。シリンジ先端には熱電対付きのワイヤリングを設置し, シリンジから噴出される燃料を懸垂するとともに熱電対による液滴温度の測定を行った。このような測定は, 熱電対で測定した液滴温度が雰囲気温度とほぼ等しくなるタイミングを見計って行った。このときの液滴の直径は約2 mmであった。液滴温度は線径0.3 mmのK形熱電対により測定し, CCDカメラにより測定した400 nmと470 nmの蛍光強度比と温度の校正を行った。

噴霧実験では, スワールノズル(Monarch社製, F-80)を用いた定常噴霧による実験とガソリンインゼクタ(Denso社製, Type-HF)を用いた非定常噴霧による実験を行った。

3.4 計測フロー 手動操作による噴射開始信号

Table 1 Physical properties of the fuel and the dopant

	n-Hexadecane $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$	Squalane $\text{C}_{30}\text{H}_{62}$	Pyrene $\text{C}_{16}\text{H}_{10}$
Melting Point (K)	291	182	429
Boiling Point (K)	560	623	653
Viscosity (Pa·s) @ 293K	3.0×10^{-3}	37.6×10^{-3}	
Density (kg/m^3) @ 293K	0.774	0.810

Fig. 7 Screw-type syringe for fuel drop experiments

に、デジタルパルスジェネレータにより任意の遅延をかけた信号をトリガ信号として、Nd:YAG レーザを発振させた。また、CCD カメラには作動の立上り遅れがあるため、噴射前の燃料噴射制御回路からの信号をカメラのコントロールユニットに送ることで、画像取込みタイミングの調整を行った。この際、イメージンシファイヤのゲート幅は 200 ns, CCD カメラの露光時間は 1.0 s に設定した。

3.5 実験条件 表 2 に校正実験および噴霧内液相温度計測の実験条件を示す。校正実験では、雰囲気圧力は大気圧から 3.1 MPa まで、雰囲気温度は常温から 550 K まで変化させた。雰囲気の種類は、窒素および空気を用いた。ピレンの濃度は、燃料に対する質量割合で 1% および 2% の場合について実験を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 単一液滴による実験

4.1.1 溶媒の影響 図 8 に溶媒としてヘキサデカンを用いた場合の蛍光強度比の温度依存性を示す。また、図 9 に溶媒としてスクアレンを用いた場合の蛍光強度比の温度依存性を示す。図 8, 9 中、RUN 1~3 は繰返し回数を示す。どちらの場合も雰囲気として窒素ガスを用い、蛍光剤(ピレン)の濃度は質量割合で 1% の場合である。図 8, 9 に示されるように、溶媒と

してヘキサデカンおよびスクアレンを用いた場合、どちらの場合も良好な温度依存性があり、液滴の温度測定が可能であることがわかる。ただし、溶媒としてスクアレンを用いた場合は、スクアレンの粘度がヘキサデカンよりも高いため、励起錯体を生成しにくくなっていると考えられ、蛍光強度比の最大値はスクアレンを用いた場合のほうが低くなっている。したがって、高粘度液体燃料を試料として用いる場合には、温度計測に対する感度が鈍くなる恐れがある。

4.1.2 雰囲気の影響 図 10 の溶媒としてヘキサデカンを用いた場合における、雰囲気の種類が蛍光強度の温度依存性に及ぼす影響を示す。雰囲気の種類は、窒素ガスおよび空気の 2 種類を用いた。液体燃料は、実験前に雰囲気と同一のガスで 30 min のバブリングを行った後、測定部へ挿入した。図 10 から、雰囲気を空気にすると雰囲気が窒素の場合に比べて蛍光強度比が低下していることがわかる。これは、空気中の酸素分子が溶媒に溶け込み、その酸素分子による衝突

Table 2 Experimental conditions

Ambient Temperature	300 ~ 550 K
Ambient Pressure	0.1 ~ 3.1 MPa
Ambient Gas	Nitrogen or Air
Dopant	Pyrene (C ₁₆ H ₁₀)
Pyrene Concentration	1.0 % wt. or 2.0 % wt.
Solvent	n-Hexadecane (C ₁₆ H ₃₄), Squalane (C ₃₀ H ₆₂)
Injector	Swirl Nozzle (Monarch, Type F-80), Gasoline Injector (Denso, Type HF)

Fig. 8 Temperature dependence of the fluorescence intensity ratios of pyrene monomer and excimer emissions

Fig. 9 Temperature dependence of the fluorescence intensity ratios of pyrene monomer and excimer emissions

Fig. 10 Effects of ambient gas on fluorescence intensity ratio

失活⁽¹³⁾のために蛍光強度が弱くなったものであると考える。

図10によると、空気中における蛍光強度比は、温度計測に十分な温度依存性を示している。しかし、空気中での測定では、溶存酸素濃度が非正常に変化すると考えられるため、図10中の空気の場合と窒素の場合の値の差分が、誤差に現れてくると考えられる。溶媒がヘキサデカンの場合、両者の差の最大値は蛍光強度比で2.0程度であり、これを温度換算すると、約20 K程度になる。したがって、空気雰囲気中の場合には、液相中の溶存酸素濃度が変化するため、最大約±10 K程度の測定誤差を生じる可能性がある。

4・1・3 雰囲気圧力の影響 図11に雰囲気圧力が蛍光強度の温度依存性に及ぼす影響を示す。溶媒はヘキサデカン、蛍光剤(ピレン)濃度は質量割合で1%である。雰囲気圧力は、大気圧から3.1 MPaまで変化させている。図11から、大気圧から2.1 MPaまでの圧力範囲においては、蛍光強度比は良好な温度依存性を示し、蛍光強度比から液滴温度を決定できると考えられる。しかし、雰囲気圧力が3.1 MPaの場合には、蛍光強度比がほとんど温度依存性を示さないため、本手法による温度計測は困難である。これは、雰囲気圧力の増加に伴う液体粘度の増加⁽¹⁴⁾により、式(1)に示した関係から蛍光強度比が低下した結果であると考ええる。

大気圧下においては、温度320 K程度のあたりにピークをもっているため、一義的に温度が決定されない領域が存在する。したがって、大気圧下における液滴温度測定では、初期温度を320 K以上に高めておくなどの対策が必要で、測定可能温度範囲は320~500 K程度であると考えられる。雰囲気圧力が1.1 MPaおよび2.1 MPaの場合については、大気圧下での結果

のような一義的に温度が決定されない領域は存在せず、測定可能温度範囲は300~500 K程度であると考えられる。

4・1・4 ピレン濃度の影響 図11に示したように、ピレン濃度1%の場合には、ディーゼル機関燃焼室内のような高圧下での液滴温度測定は困難であることがわかった。そこで、式(1)から示唆されるように、ピレン濃度を増加させ、蛍光強度比を高めることを試みた。すなわち、ピレン濃度を2%にして、窒素雰囲気において、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調査した。その結果を図12に示す。

図12に示すように、ピレン濃度を2%にした場合、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。このような結果から、ピレン濃度を2%にすることで、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。また図12から、3.1 MPaの高圧下における本手法の計測可能温度範囲は、300~550 K程度であることがわかる。

4・2 測定誤差の推定

4・2・1 誤差要因 本計測手法におけるおもな誤差要因として、以下の項目が考えられる。

- (1) レーザおよび光学系
 - ・レーザ光強度の測定ごとのばらつき
 - ・シート面内での光量不均一
- (2) 受光系
 - ・各 CCD 素子の波長感度特性のばらつき
 - ・各 CCD 素子の感度ばらつき
 - ・CCD チップ上の暗電流などのノイズ
- (3) 検量線上の誤差
- (4) 溶媒内の溶存酸素による蛍光の衝突失活
- (5) 蒸発過程における溶媒中のピレン濃度の変化

Fig. 11 Effects of ambient pressure on fluorescence intensity ratio (Solvent: *n*-hexadecane, pyrene conc.: 1.0%)

Fig. 12 Effects of ambient pressure on fluorescence intensity ratio (Solvent: *n*-hexadecane, pyrene conc.: 2.0%)

(6) 蒸気相からの蛍光と液相からの蛍光の混信

(7) 液滴径の影響

4・2・2 誤差の推定 本項では、4・2項で述べた誤差要因について、それぞれ具体的に計測精度に及ぼす影響を考察する。

(1) レーザおよび光学系 本計測手法では、蛍光強度の絶対値を用いた計測ではなく、400 nm と 470 nm の蛍光の蛍光強度比を用いた計測であるので、レーザ光強度の回数によるばらつき、シート面内での光量不均一といった誤差要因は相殺される。したがって、測定原理上、これらの誤差要因が計測精度に及ぼす影響はないと考えられる。

(2) 受光系 CCD チップの波長感度特性が測定面内でばらつく場合、測定面内の場所によって蛍光強度比と温度の関係にずれが生じる。しかし、各 CCD チップの波長感度特性のばらつきは皆無に等しく、性能表より $\pm 0.01\%$ 以内である。したがって、この誤差要因は無視できる。

各 CCD チップの感度のばらつきおよび暗電流などのノイズは、本計測法が蛍光強度の絶対値を用いた計測ではなく、蛍光強度比を用いた計測であるので相殺される。また、各 CCD チップの感度のばらつきは、性能表より $\pm 0.005\%$ 以内であり、実験装置としても無視できる範囲である。さらに、暗電流などのノイズは、毎回の計測においてスレッシュホールドを最大蛍光強度の 1% 程度設けているため、まったく問題にならないと考える。

(3) 検量線上の誤差 検量線上の誤差は、図 8~12 に示した蛍光強度の温度依存性の図から、計測可能温度範囲 300~550 K において、およそ ± 5 K であると考えられる。ただし、大気圧下における温度計測では、蛍光強度比から温度が一義的に決定できない領域があるため、この領域では計測誤差が増大する。

(4) 衝突失活 溶液中の溶存酸素分子による衝突失活は、空気中での計測についてのみ問題で、その計測誤差は、3・1・2 項で述べたように約 20 K 程度、すなわち約 ± 10 K 程度であると思積もることができる。雰囲気ガスが窒素の場合、酸素分子の溶液中への溶存はなく、十分な脱気を行えば、この誤差要因による計測精度への影響は無視できる。

(5) 濃度変化 蒸発場における液滴温度計測では、溶媒と溶質との沸点などの物性値の違いにより、液滴内の溶質濃度が変化し、温度測定の誤差を増大させる可能性がある。そこで、この誤差要因の影響を調べるため、溶媒として、ヘキサデカンを用いた場合とヘキサデカンよりも沸点の高いスクアレンを用いた場

合の、液滴温度の時間変化を測定した。液滴温度の時間変化の測定は、本手法および熱電対の両方で行い、両者の温度変化の特性を比較することで誤差の推定を行った。

図 13 に、エキサイプレックス法で計測した液滴温度と熱電対で計測した液滴温度の時間履歴の比較を示す。雰囲気気圧力は 3.1 MPa で、ピレン濃度は 2% である。図 13(a) は、溶媒としてヘキサデカンを用いた場合で、図 13(b) は、溶媒としてスクアレンを用いた場合である。

図 13 から、まず、熱電対による測定温度とエキサイプレックス法による測定温度を比較すると、熱電対の測定温度のほうが若干低めに計測されている。予備実験で、熱電対の時間応答遅れを測定した結果、およそ 0.5 s の遅れがあることがわかっている。熱電対の測定温度を 0.5 s 進めてやると、両者の測定結果はほぼ一致することがわかる。ただし、図 13 に示すヘキサデカンにおける結果は、前半部分と後半部分で熱電対による測定結果とエキサイプレックス法による測定結果の大小関係の傾向が異なっており、熱電対の応答遅れが原因ではない。すなわち、ヘキサデカンがピレンよりも早く蒸発開始し、ピレン濃度が高くなったことが考えられる。ピレン濃度が高くなる場合、蛍光強度比が大きくなり、この蛍光強度比を用いて検量線から温度を求めると、その温度は実際の温度よりも低めに見積もられる。このような影響が、図 13(a) の後半部に現れていると考える。一方、図 13(b) に示すように、沸点が比較的ピレンに近いスクアレンを溶媒として用いた場合には、ヘキサデカンで見られたような傾向はなく、上述の推察を裏付けることができる。

以上のようなことから、図 13 に示される熱電対による測定温度とエキサイプレックス法による測定温度

(a) Solvent: *n*-hexadecane (b) Solvent: Squalene

Fig. 13 Temperature changes of a single fuel drop (pyrene conc.: 2.0%, Amb. press.: 3.1 MPa)

の差が、蒸発過程におけるピレン濃度変化の温度計測精度に及ぼす影響であると考えられる。したがって、単一液滴の場合、この要因による計測誤差は、約 ± 10 K 程度であると推定する。供試燃料としてヘキサデカンを用いた場合の測定誤差は、大雑把な見積りであるが以上のように推定された。ただし、蛍光剤であるピレンと蒸発特性の著しく異なる燃料を溶媒として用いる場合には、さらに誤差拡大の恐れがある。

(6) 蛍光の混信 ピレン単量体からの 400 nm の蛍光および励起錯体からの 470 nm の蛍光は、蒸気相からまったく発しないわけではなく、蒸気相からの蛍光と液相からの蛍光の混信が考えられる。しかし、蒸気相からの蛍光強度は、液相からの蛍光強度に比べて非常に弱く、インテンシファイヤ付き CCD カメラの同一測定レンジにおいて、同時に計測することのほうが困難である。したがって、測定領域内の液滴数密度が比較的高い場合には、蒸気相からの蛍光は無視できると考えられる。

一方、測定領域内の液滴数密度が比較的低く、なおかつ液滴径が数 μm 以下という条件では、液滴からの蛍光強度が小さくなり、蒸気相からの蛍光の混信が考えられる。この場合、蒸気相では励起錯体が形成されにくいいため、単量体からの蛍光 400 nm のほうが強く計測される。すなわち、蛍光強度比が低めに見積もられることにより、測定領域の温度が高めに計測される可能性がある。液滴数密度が比較的低く、なおかつ液滴径が数 μm 以下という条件は、ディーゼル噴霧内においては、噴霧周辺部のような条件であると考えられる。したがって、噴霧周辺部における温度分布特性は、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本測定手法の問題点を十分に認識して、解析を行わなければならない。

(7) 液滴径の影響 本実験で設置した光学系においては、測定場での一辺 500 μm 四方の正方形面積が CCD カメラの 1 ピクセルに相当する。したがって、噴霧内の温度分布を測定する場合、1 ピクセルの中には複数の液滴が存在すると考えられる。この場合、本手法で測定している液相温度は、1 ピクセル内の液滴の領域平均温度であるといえる。しかし、1 ピクセルの測定領域内において粒径がばらついている場合、液滴径が大きい粒子からの蛍光強度はその絶対値が大きく、領域平均温度は、大きな液滴径の温度により大きく依存されることになる。噴霧内の液相温度分布の解析を行うときには、このような点も十分認識して解析する必要があると考える。また、噴霧内の粒径分布や温度分布を適当に仮定して、数値計算によって噴霧内

の粒径分布が測定結果に及ぼす影響を補正・解析することも可能であると考えられるが、本論文ではこのような補正・解析手法の検討は行っておらず今後の課題と考える。ただし、単一液滴の場合には、液滴径を 1~2 mm 程度まで変化させて蛍光強度比の温度依存性を測定した結果、温度依存性に及ぼす液滴径の影響は無視できることを確認している。

4.3 高温気流を受けるソリッドコーン噴霧の液相温度分布測定 図 14 に燃料の初期温度 330 K でスワールノズル (Monarch 社製, F-80) から噴射された噴霧が高温の空気流を受けた場合の液相温度分布の測定結果を示す。空気流のダクト出口での温度は約 570 K で、平均流速は 1.7 m/s であった。左側に示された結果は、噴霧中心軸に対して 15° の角度で空気流を吹き付けた場合で、右側の結果は、 45° で吹き付けた場合の結果である。

吹付け角度が 15° の場合には、高温空気は噴霧の右半分しかあたっておらず、高温空気にさらされた部分のみの温度上昇が読取れる。一方、吹付け角度が 45° の場合には、高温空気はほぼ噴霧全体にあたっており、噴霧全体に占める高温領域が吹付け角度 15° の場合に比べて拡大されていることがわかる。

三次元的な噴霧を対象として本測定手法を用いた場合、レーザシート面と垂直方向 (計測方向) に存在する噴霧粒子の光吸収が計測誤差に影響することが考えられる。そこで、図 14 に示した同様の噴霧に対して、レーザシート面を噴霧中心軸から計測方向に移動させ、上述の影響を実験的に把握することを試みた。その結果、噴霧中心軸から計測方向に手前側と奥側の温度分布測定結果にほとんど差異がないことが確認された。ただし、さらに液滴密度が高いような噴霧に対しては確認を行っておらず、その測定誤差に及ぼす影響は不

Fig. 14 Liquid phase temperature distributions in fuel sprays exposed to hot air flow

明である。

4・4 常圧・高温雰囲気中のホローコーン噴霧の液相温度分布測定 図15に初期温度330 Kでガソリンインゼクタ(Denso社製, Type-HF)から高温雰囲気中(773 K)に噴射された間欠噴霧内の液相温度分布測定結果を示す。噴射圧は0.3 MPa, 噴射期間は10 msで実験した。また, 図15中では, 測定限界により500 K以上の温度はすべて同一のスケールで示されている。

図15によると, 噴射期間中では, 噴孔直下に350~380 K程度の低温度領域が存在し, 噴霧が発達していくにしたがって500 K以上の高温になっている。噴霧内部の温度分布パターンの変化としては, 噴霧内側の周囲気体との境界領域から高温になっていき, その後, 他の噴霧周辺部, 噴霧全体へと高温領域が広がっていく。噴射開始後16~18 msでは, 噴霧内部に500 K以下の領域が非常に小さい領域で存在しているが, 20 msになると噴霧領域はすべて500 K以上になる。

5. 結 言

本研究では, 蛍光剤としてピレン($C_{16}H_{10}$)を用いてエキサイプレックス蛍光法による噴霧内温度分布計測法を開発した。また, 本エキサイプレックス蛍光法における溶媒の影響, 雰囲気の影響, 雰囲気圧力の影響, ピレン濃度の影響を調べ, 本測定手法の計測精度について考察した。その結果, 以下のようなことが明らかになった。

(1) ピレンを用いたエキサイプレックス法により, 大気圧から3.1 MPaの雰囲気圧力において, 300~550 K程度までの液滴温度測定が可能である。ただし, 大気圧下における測定では, 低温度側で温度が一義的に決定できない温度領域が存在する。

(2) 雰囲気圧力が高くなるにしたがい, 蛍光強度比の温度依存性は鈍くなる。

(3) 雰囲気圧力が3.1 MPaの高圧の場合には, ピレン濃度を2.0%程度にまで高めなければ, 温度計測に十分な蛍光強度比の温度依存性がない。

(4) 溶媒中の酸素濃度が非定常に変化する場合には, 約 ± 10 K程度の測定誤差を生じる可能性がある。

(5) 検量線作成上の計測誤差は, 約 ± 5 K程度である。

(6) 蒸発過程にある液滴温度計測において, 液滴中のピレン濃度変化が温度計測精度に及ぼす影響は, 約 ± 10 K程度と推定できる。

(7) 測定領域内の液滴数密度が比較的低く, なお

Fig. 15 Liquid phase temperature distributions in a fuel spray injected from gasoline injector

かつ液滴径が数 μm 以下という条件では, 蒸気相からの蛍光の影響のため蛍光強度比が低めに見積もられることにより, 測定領域の液相温度が高めに計測される可能性がある。

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, 当時本学学生竹村裕二氏[現:(株)クボタ]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 Transf.*, **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) Murray, A. M. and Melton, L. A., Fluorescence Method for Determination of Temperature in Fuel Sprays, *Appl. Opt.*, **24**-17(1985), 2783-2786.
- (8) Gossage, H. E. and Melton, L. A., Fluorescence Thermometers Using Interamolecular Exciplexes, *Appl. Opt.*, **26**-11(1987), 2256-2259.
- (9) Souter, A. K., ほか3名, Phase Transitions in Bilamellar Vesicles. Measurements by Pyrene Excimer Fluorescence and Effect on Transacylation by Lectin: Cholesterol Acyltransferase, *Biochemistry*, **13**-14(1974), 2828-2836.

(10) 平田光穂監訳, 気体・液体の物性推算ハンドブック (1977), 387, マグロウヒル.	(12) 徳丸克己, 光化学の世界(1993), 128, 大日本図書.
(11) Berlman, I. B., <i>Handbook of Fluorescence Spectra of Aromatic Molecules</i> (1965), 173, Academic Press.	(13) 西川泰治・ほか2名, 蛍光・りん光分析法(1984), 38, 共立出版.
-