B113 O₂-LIPF を用いた高温空気流の2次元温度場の可視化

Visualization of two-dimensional temperature field for hot air flows using O₂-LIPF

○中山 浩 (名大工)、石田 敏彦 (名大工)、児玉 康司 (名大院)、新美 智秀 (名大工)

Hiroshi Nakayama¹, Toshihiko Ishida¹, Yasushi Kodama¹, Tomohide Niimi¹

1. Dept. of Mech. Eng., Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

In this study, a method for two-dimensional temperature measurement based on O₂-LIPF (laser-induced predissociative fluorescence) using a broad band ArF excimer laser is proposed. In this method, temperature is measured by use of temperature dependence of ratios between fluorescence intensities integrated in two spectral region including peaks. To reduce the measurement time and improve the measurement accuracy, we develop a stereo-viewer which can put two images passed through two different filters on a picture frame. This method is applied to heated air jet, and radial temperature profile at $x/D=6$ (x : distance from nozzle; D : nozzle diameter) is compared with that obtained with a thermocouple. Two-dimensional temperature image of the jet is also measured successfully.

Keywords: Laser-induced predissociative fluorescence, Temperature measurement, Air flows

1. 緒言

近年のレーザ技術の発達により、流体解析および燃焼解析の光学的温度計測手法として、レーザ誘起蛍光法 (LIF 法) が利用され、その有効性が示されてきた。特に酸素のレーザ誘起前期解離蛍光法 (O₂-LIPF 法) は、蛍光強度の評価の際に衝突失活の影響を無視できるなどの理由から注目されている。

筆者らはこれまでに、広帯域の ArF レーザを照射し、透過波長域の異なる二枚のフィルターを用いて得られた二枚の蛍光画像を画素単位で比をとることで、蛍光強度の数密度、レーザ強度依存性を除去し、この比から二次元的に温度を計測する方法を提案した⁽²⁾。しかし、その際用いたシステムは二枚のフィルターを取り替えて計測するため、計測時間の間にレーザ強度が変化すると、蛍光強度比をとる際にレーザ強度の依存性が完全に相殺されずに温度誤差の要因になる。またこの手法は同じ実験をフィルターを変えて二回行う必要があることから、原理的に定常流にしか適用できず、一パルス計測は不可能である。

本報告では、一つの画像フレーム内に二枚のフィルターを透過した画像を得られるようにシステムを改良し、大気圧空気流に適用した結果を示す。このシステムでは上記の問題が解決されることから、計測時間の大幅な短縮、計測精度の向上が期待される。熱電対を用いて計測した温度と、O₂-LIPF を用いて求めた温度を比較することにより本計測手法の妥当性を示し、問題点についても検討を行う。

2. O₂-LIPF 法と温度計測手法

本研究では広帯域 ArF レーザを用いて酸素分子の支配的な吸収帯である Schumann-Runge 帯の数多くの吸収線を励起する。励起状態は多くの解離曲線と交差しているため、励起されたほとんどの酸素分子は、蛍光を発することなく前期解離する。この前期解離により分子間衝突が起こる前に蛍光放射が終了するため、蛍光強度への衝突失活の影響 (流れ場の圧力、温度に依存) を考慮する必要がない。

流れ場の温度を決定するときは、何らかの手法で蛍光強度の流れ場の酸素数密度、レーザ強度依存性を除去する必要がある。しかし、蛍光強度は酸素の数密度、レーザ強度に直接比例するので⁽¹⁾、酸素数密度、レーザ強度の増加はスペクトルの絶対強度を増加させるのみで、スペクトルの相対強度の変化はないと考えられる。すなわち蛍光スペクトルの二つの異なる波長域の積分強度比は、温度のみの関数になる。したがって、バンドパスフィルターを二枚用いて、それぞれの波長域の蛍光強度分布を計測し、画素単位で蛍光強度比を求めれば、この比と温度の関係により二次元温度分布を求めることが可能である。

3. 実験装置及び実験方法

本研究で用いた実験装置を図1に示す。蛍光信号は、透過波長域の異なる二枚のフィルターを取り付けたステレオビューアによって二つの異なる経路を経て、紫外域透過レンズを通り、イメージインテンシファイアで増倍、可視変換され、冷却型 CCD カメ

ラで撮像される。本研究で自作したステレオビューアは屈折率変化を受けないように4枚のミラーで構成し、一つの画像フレーム内の上下に同じ二つの蛍光画像が得られる構造となっている。なお、フィルタはFilter1(シグマ光機:UTVAF-34)とFilter2(CVI:F10-230-4)の組み合わせを用い、ステレオビューアの前面に取り付けた。

温度を計測するためには、あらかじめ蛍光強度比と温度の関係を求める必要がある。本研究では大気圧空気電気炉によって加熱された空気を用いて実験的にこの関係を導出した。Filter1を通して見た蛍光強度(S_{filter1})とFilter2を通して見た蛍光強度(S_{filter2})をそれぞれ対応する画素で強度補正を行った後に蛍光強度比($S_{\text{filter1}}/S_{\text{filter2}}$)を求め、クロメルアルメル熱電対を用いて測定した温度と対応させて蛍光強度比と温度の関係を求めた。

次に、計測対象として出口直径 $D=1\text{mm}$ のノズルを取り付けた電気トーチ(真空冶金 038821)で加熱、噴出させた高温空気自由噴流を用いた。ノズル出口付近の流速は約 257m/s で、 Re 数は $1000K$ で約 2076 である。

4. 実験結果

大気圧空気電気炉を用いて求めた蛍光強度比と温度の関係を図2に示す。300K から $1000K$ の範囲で蛍光強度比に対し、温度が一意に決定できることから、Filter1 と Filter2 の二枚のバンドパスフィルタおよびステレオビューアの組み合わせによって二次元温度計測が可能であることがわかる。

本温度計測手法を流れ場に適用し、その有効性を検討するために、高温空気自由噴流の半径方向の温度分布を熱電対によって計測した温度と比較した。図3は $x/D=6$ の位置における噴流中心軸に垂直な温度分布である(ノズル出口を原点として噴流中心軸方向に x 軸, 中心軸に垂直な方向を y 軸とした)。直径 0.25mm のクロメルアルメル熱電対を用いて 0.5mm 間隔で温度を計測し、 O_2 -LIPF を用いて計測した温度と比較した。500K 以上の温度では、両者は $25K$ で一致していることから、本計測手法の有効性が示された。図4は高温空気自由噴流の二次元温度分布画像である。この結果から本手法が二次元温度分布計測手法として有効であることが示される。

O_2 -LIPF を用いて計測した温度のばらつきが比較的大きいのは、図2に示すように蛍光強度比の温度に対する感度があまり良くないことに起因すると考えられる。したがって、 S/N 比の良い検出系を用いるか、温度変化に敏感なフィルタの組み合わせを実験的に、または理論的に求めれば計測精度は更に向上するものと思われる。

5. 結言

本研究では、広帯域 ArF レーザを用いた O_2 -LIPF の蛍光信号を透過波長域の異なる二枚のフィルタを通して一つの画像フレームで計測するシステムを開発し、その蛍光強度比から比較的容易に流れ場の二次元温度分布を計測する手法を提案した。

6. 参考文献

- 1) Lee, M.P.,ほか2名,Opt.Lett.12,75-77 (1987).
- 2) 中山,ほか3名,機論,64-618, 436-441 (1998).

Fig.1 Experimental setup

Fig.2 Relations between fluorescence signal ratio and temperature

Fig.3 Radial temperature profile at $x/D=6$. The solid line is the result from O_2 -LIPF and the data point are thermocouple measurement

Fig.4 Two-dimensional image of a heated free jet