B 3 1 0

PIV-PSP hybrid system による 空間の酸素濃度分布と速度分布の同時可視化計測

安部 真吉、班目 春樹、岡本 孝司[○](東京大学)

Development of PIV-PSP hybrid system

Shinkichi ABE, Haruki MADARAME and Koji OKAMOTO

ABSTRACT

A method for visualizing the spatial distribution of oxygen using particles coated with pressure-sensitive dye is presented. The proposed technique is a hybrid system combining the technologies of pressure-sensitive paint (PSP) and particle image velocimetry (PIV). It allows the particle velocity and oxygen distribution to be measured simultaneously. As intensity-based imaging is not applicable in this system, a luminescence lifetime-based imaging technique involving double frame imaging is introduced. The system is calibrated and demonstrated in application to an air jet, showing the simultaneous measurement to be effective.

Keywords: PSP, PIV, Hybrid, Double Frame Imaging, PSParticle, Lifetime Imaging

1. 緒 論

酸素は大気中に約 21vol% 存在し、生物にとっては生命維持に必要不可欠なものである。また、可燃性ガスとして燃焼現象には欠くことのできない大きな要素のひとつである。したがって、人間の活動に深く影響を及ぼしている。酸素の定量的な測定は大変重要である。現在のところ酸素濃度を測定する酸素センサにはさまざまな種類のもので開発されているが、いずれも点計測である。ここ 10 年ほどの間に表面の酸素濃度分布を計測する手法として PSP(感圧塗料)とよばれる技術が大きく発展し、物体表面の酸素濃度分布の面計測が可能となった。これは、PSP に含まれる色素の光化学的性質を利用して酸素濃度によって変化するルミネセンスの輝度値から、物体表面の酸素濃度分布を得る手法である。

一方、空間の速度分布を得る方法のひとつに PIV(画像粒子流速計測法)と呼ばれる流体計測法がある。これは、流体の流れの中にトレーサー粒子を混入し、粒子を CCD カメラ等によって画像イメージ上に取り込みその粒子画像の動きから流れの速度分布を得るという手法である。本研究では、物体表面に塗付して使用する PSP を粒子にコーティングして、PSP の性質をもった粒子(感圧色素粒子)を開発した。そこで、これを流体の流れの中に混入することで、空間の酸素濃度分布を可視化計測すると同時に、PIV におけるトレーサー粒子として使用することにより、速度分布と空間の酸素濃度分布を同時可視化計測する手法も開発した。ところで、粒子は空間内を自由に動き、空間内の粒子密度は常に変化するので、粒子濃度

による影響から従来の PSP 手法をそのまま適用することができない。本研究ではこれを解決するために Double Frame Imaging を開発することで可能にした¹⁾。

2. PSP の特徴

PSP の測定原理は、ある特定の波長の光で励起された三重項状態にある感圧色素の発するルミネセンスが、酸素によって消光される現象を利用したものである。酸素分子が色素の周りに多く存在すれば消光作用は大きくなる。Fig.1 は PSP にパルスレーザーを照射したときのルミネセンスの減衰の挙動を PSP の周りの酸素濃度を変化させることにより取得したものを示す。パルスレーザーにより励起された色素の出すルミネセンスの輝度値は、すぐさまピークに達し、その後、酸素によって消光される。酸素濃度が低ければその消光時間は長く、逆に酸素濃度が高ければその消光時間は短くなっている。

Fig.1 Decay profiles of PSP

ルミネセンスの酸素消光による輝度値の変化は以下に示す式のように、初期ピーク値 I_0 と酸素濃度の関数によって表される。 I_0 は、感圧塗料の場合、色素濃度の関数であるが、塗料として物体表面に塗布して使用するので色素濃度は一定にできるために定数となる。ところが、感圧色素粒子の場合、 I_0 は、粒子濃度と時間の関数であり、粒子濃度自身も位置の関数であるため、塗料の場合の PSP 手法はそのまま適用できない。

感圧塗料の場合

$$I_{dye} = I_0 C_{dye} \cdot f(O_2) \quad (1)$$

感圧色素粒子の場合

$$I_{particle} = I_0 C_{particle}(x, y, t) \cdot f(O_2) \quad (2)$$

3. Double Frame Imaging

Fig. 2 は、PSP から発せられるルミネセンスの酸素消光による減衰の挙動を概念的に表わしたものである。そこで、パルスレーザにより励起された色素の出すルミネセンスがピーク値 I_0 に達し、酸素によって消光されるまでの前半区間と、酸素によって消光される後半区間に分割する。そして、これらは連続的な Image A、Image B の 2 つの画像として得られるものとする、それぞれの画像での輝度の積分値は以下の式 (3) および (4) で表される。 I_A は Image A の輝度の積分値であり酸素の影響を受けないので定数関数である。また、 I_B は Image B の輝度の積分値であり酸素の影響を受けるので、酸素濃度の関数である。ここで、 I_A と I_B の比をとると、式(5)に示されるように、粒子濃度による影響はキャンセルされ酸素濃度の関数のみとなる。この式から 2 つの画像イメージの輝度比が得られれば、酸素濃度の分布が得られる。本手法は I_A と I_B の 2 フレームの輝度情報の比を用いて画像解析を行うことから Double Frame Imaging と呼ぶ。

$$I_A = \int_A I dt = \alpha I_0 \quad (3)$$

$$I_B = \int_B I dt = \beta I_0 g(O_2) \quad (4)$$

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{\beta I_0 g(O_2)}{\alpha I_0} = \gamma \cdot g(O_2) \quad (5)$$

4. 感圧色素粒子 (PSParticle)

感圧色素粒子にマイクロカプセル、鈴木油脂工業製 God Ball (B-25) を使用した。これは粒径が $0.5 \sim 25 \mu\text{m}$ で平均粒径は $12 \sim 14 \mu\text{m}$ 、真密度は 2.1 g/m^3 、材質は SiO_2 、形状は球形、構造は中空多孔質である。この構造は感圧色素を粒子に固着させるためにバインダーを必要とせず、また色素が直接酸素にさらされるので酸素感受性は感圧塗料に比べて高いと考えられる。

Fig. 2 Schematic Image of Double Frame Imaging

感圧色素としてルテニウム錯体 $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ を用いた。 $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ とエタノールの溶液にマイクロカプセルを入れてよくかき混ぜた後、十分乾燥させることにより作成した。この色素の発光波長は 600 nm である。

5. 校正曲線

Double Frame Imaging によって酸素濃度分布を求めるために、透明なガラスプレート上に感圧色素粒子を付着させたものを、密封された箱の中で直接、粒子にパルスレーザを照射して感圧色素を励起し、各酸素濃度に対する輝度比の変化を求めた。輝度イメージを得るために 12bit CCD カメラ、PCO-Sensicam (PCO Computer Optics GmbH 製) を用いた。この CCD カメラにはダブルシャッターモードという機能があり、連続する 2 つの画像を 200 ns のデッドタイムを挟んで撮影するというものである。レーザは Nd:YAG の 2 倍波 532 nm のパルスレーザを用いた。Fig. 3 に実験システムを示す。

Fig. 3 Schematic Image of acquisition system for Calibration curve

Fig. 4 に各酸素濃度に対して、校正実験によって得られた輝度値データから式(5)で計算した輝度比 I_B/I_A の値をプロットしたグラフを示す。輝度比の計算は、バックグラウンドの輝度を差し引いておこなった。図中に示した曲線は近似曲線である。これを校正曲線として使用する。しかしながら、酸素濃度が高くなると S/N 比の影響で誤差が大きくなるので、実用的に適用できる酸素濃度範囲は 0 から 3% 程度までの範囲であると考えらる。

Fig. 4 Calibration curve Intensity ratio vs. Oxygen concentration

Fig. 5 The arrangements of two side camera PIV-PSP hybrid system

Fig. 6 The timing diagram of two side camera PIV-PSP hybrid system

6. PIV-PSP ハイブリッドシステム

CCD カメラ PCO-Sensicam を二台使用したツーサイドカメラ PIV-PSP ハイブリッドシステムについて述べる. Fig. 5 にシステムの構成図を示す. Fig. 6 にタイミングダイアグラムを示す. このシステムでは, 一台のカメラで PIV をおこない, 別のもう一台のカメラで Double Frame Imaging を行う. 2 台のカメラ共にダブルフレーム機能を用いる. PIV の画像取得のために, 2 台のレーザー発生装置を使用する. そして, PIV 用カメラの 1 フレーム目に一発目のレーザーフラッシュのタイミングをとり, PIV 用のカメラの 2 フレーム目と PSP 用カメラの 1 フレーム目に同じ二発目のレーザーフラッシュのタイミングをとる. 本システムでは, レーザーフラッシュの間隔を PIV のトレーサ粒子の移動時間として任意に設定することができる. 二発目のレーザーフラッシュによって, 感圧色素粒子を励起させて, PSP 用カメラによりダブルフレームイメージングを行う. こうする事により, 流れ場の速度分布と, 空間の酸素濃度分布の同時可視化ができる. 各カメラ間の同期はパルスジェネレータを用いて行い, レーザー発振のタイミングはディレイジェネレータを用いた. PCO-Sensicam のフレームレートは 4Hz であるので PIV によって得られる速度分布は二台のレーザータイミング間の瞬時速度分布である.

PIV 用カメラと PSP 用カメラは対面させて同じ面を撮影するために, 取得する画像は鏡像となるので, どちらかを画像処理のテクニックをもちいて左右反転させた後, 解析をおこなう. また, 取得するカメラの画像を一致させるために, PIV と PSP の画像の位置とサイズを完全に一致させる必要がある.

7. 窒素噴流の同時可視化実験

ツーサイドカメラ PIV-PSP ハイブリッドシステムを用いて, 窒素噴流の速度分布と酸素濃度分布の同時可視化実験を行った. 直径 7.5mm のノズルから空气中に窒素を噴出させたときのジェットの周りの酸素濃度分布とジェットの速度分布を同時可視化する実験を行なった. 感圧色素粒子はジェット中に混入させるために出口近くに粒子溜めを設けてその中にあらかじめ封入しておき, ジェット流とともに噴出させた. 窒素の平均供給流速は 7.55m/s で行なった. レーザーは Nd:YAG レーザーの 2 倍波 (532nm) を使用し, シリンドリカルレンズで加工したシート光の面内で計測を行なった.

Fig. 7 の (a) および (b) はそれぞれ PIV 画像の一枚目と 99μs 後の二枚目の画像である. PSP 結果と合わせるために, 生画像から画像処理で鏡像処理を施してある. Fig. 8 (a) および (b) はそれぞれ PSP 画像の一枚目と 200ns 後の二枚目の画像である. 酸素消光により二枚目の画像は酸素に多く接触する部分はより暗くなっている.

これらの得られた画像を基に, それぞれ PIV および Double Frame Imaging 処理をおこなった. Fig. 9 に得ら

れた結果を示す. 図中カラーバーで示すように酸素濃度が 0 から 1.2% の範囲でノズル出口から下流域に向かって濃くなっていく様子が観察される. ジェット以外の白い部分は粒子が存在しないので情報が無い部分である. 流速分布は赤い矢印によりベクトルで表わしている. 本実験手法ではジェットの周りには粒子は存在しないので, ジェット以外のベクトルはエラーベクトルである. Fig.11 は Fig.10 の一部を拡大して示した. 以上で速度分布と空間の酸素濃度の同時可視化計測ができることが確認できた.

8. 結 論

本研究では, 感圧色素粒子によって空間の速度分布と酸素濃度分布を同時計測する手法の開発を行った. 得られた結果として,

- (1) 感圧色素粒子(PSParticle)を開発した. 感圧色素粒子はトレーサー粒子に感圧色素を組み込んだものである.
- (2) Double Frame Imaging を開発した. 空間を移動する粒子の, 粒子濃度による影響をキャンセルして, 空間での輝度比と酸素濃度の関係を得るものである.
- (3) Double Frame Imaging を実証する実験をおこない, 輝度比と酸素濃度の校正曲線を得た.
- (4) 空間の二次元平面内の酸素濃度分布の可視化を可能にした.
- (5) PIV と PSP を同時に行うことで, 速度分布と空間の酸素濃度分布の同時可視化計測手法を開発した.

(a) The first image (b) The second image
Fig.7 The images of PIV

(a) IA (b) IB
Fig.8 The images of PSP

Fig.9 The result of simultaneous measurement by PIV-PSP hybrid system

Fig.10 The magnification of Fig.9

参考文献

1) Abe, S., Okamoto, K., Madarame, H.: The development of PIV-PSP hybrid system using pressure sensitive particles, Meas. Sci. Technol., Vol.15 (2004) 1153-1157.