二次元 PIV に基づく速度場・圧力場の三次元再構成に関する基礎研究

Basic Research on Three-Dimensional Reconstruction of Velocity Field and Pressure Field Based on Two-Dimensional PIV.

○学 佐藤 明人 (新潟大院) 正 藤沢 延行 (新潟大工)

Akito Satoh, Graduate school of Niigata university 8050 Ikarashi2, Niigata, 950-2181

Nobuyuki Fujisawa, Niigata University,

Key Words : Flow Visualization, PIV, Measurement, Velocity, Pressure, Three-dimensional Flow

1. 緒言

給湯機や暖房器具などに使われる燃焼装置については、燃焼効率の改善や低騒音化等を目的とした熱流動の解析研究が進められている。しかしながら、缶体内部における燃焼を伴う熱流動現象の計測は、現在のところ極めて困難な課題であるため、その詳細を十分に理解するまで至っていない。このため、燃焼装置の設計開発においては、水模型を用いた流れ場の可視化・速度計測によって流動現象を把握する方法がしばしば採られている。その際、燃焼器内部の流れは、強い3次元性流を伴うため、空間内の速度3成分の分布を計測する必要がある。著者ら⁽¹⁾は、先に、2次元PIVを複数の断面に適用し、さらに連続の式を用いて、時間平均3次元流れ場を明らかにする方法を示した。しかしながら、測定データの空間解像度の制約から内部流の詳細を把握するまでは至っていない。

本研究では、燃焼器内部の流れ場を十分な空間解像度でPIV計測し、3次元平均速度場の詳細を明らかにすることを目的とする。さらに、計測された速度場から圧力場を評価する方法についても検討する。

2. 実験装置及び方法

2.1 燃焼装置の水模型と可視化 図1に内部流動計測に用いた実験装置の概略を示す。これは、実機燃焼装置を水実験用にモデル化したものであり、燃焼容器の寸法は、縦横高さがそれぞれ、200mm、200mm、300mmであり、流入口および流出口内径は75mmとした。実機模型においては、燃焼ガスの組成とその燃焼温度(=1500K)を考慮すると、燃焼時のレイノルズ数 $Re(=UD/\nu)=10^4$ 程度であった。したがって、同一レイノルズ数における模型実験を行うため、流入口における断面平均流速は、 $U=0.11\text{m/s}$ とした。ただし、模型装置への水の供給にはポンプを用い、流量の測定はオリフィス流量計で行った。

流れの可視化には、水流に対し良好な追従性を示すナイロン粒子(平均粒径0.1mm, 比重1.02)を用い、それを装置内に予め供給しておいた。照明にはストロボスコップを用い、そこで発生させた光を光ファイバーを介してシリンドリカルレンズの付いた光学系に導き、シート状(厚さ7mm)に照射できるようにした。撮影にはモノクロCCDカメラ(画像解像度768X494ピクセル、256階調)を用いた。ストロボの発光タイミングは、このCCDカメラから出力される30Hzの垂直同期信号を用いて制御した。この画像は、直接フレームグラブでデジタル化し(640X480ピクセル、256階調)、パ

ーソナルコンピュータ内のフレームメモリに格納した。

2.2 PIVによる2次元速度場解析 以上のようにして得られた画像データの連続する2枚に対して、輝度差累積法を用いて相関計算を行った。計算条件は、画像サイズ640x480、ベクトル数65x49、相関領域23x23、探索領域12x12であった。なお、計測精度を向上させるため、サブピクセル解析も行っている。本実験では高解像度での計測を行うため、300mmx200mmの計測断面を、縦4分割横4分割の計16枚に分割してそれぞれ別に撮影し、速度場解析の後に再び全速度場の合成を行った。このとき、測定位置を高精度で測定するため、カメラは3次元トラバース装置に固定した。

2.3 面外方向速度成分の計算 非圧縮性流体に対する連続の式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\rho = \text{const}) \quad (1)$$

この式から、3次元空間内の速度 u, v が与えられれば、壁面での境界条件として $w=0$ を用いて、 w の分布を決定することが可能である。すなわち $z=0\text{mm}$ 及び 200mm のとき $w=0$ を用いるものとする。これは、本実験で用いた水模型が容器型であるという性質上可能になったものである。これを2次元速度場解析の結果に適用して3次元空間での w を得た。なお、 z 方向の積分に伴う累積誤差の影響を減らすため、適宜補間と平均化の処理⁽²⁾を行った。

2.4 圧力の計算 圧力分布の算出には、差分化したナビエ・ストークス方程式を用いた。まず、各格子点における x 方向の圧力勾配

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho \left\{ \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad (2)$$

ならびに y, z 方向の圧力勾配を同様な式からそれぞれ求め、これを基準となる格子点から順に数値積分した。積分経路は、今市ら⁽³⁾の方法を三次元に拡張して適用した。すなわち、考えられる6通りの経路を全て計算し、その平均値を積分結果とした。

3. 実験結果および考察

図2は、PIVによって計測された x, y 平面内の速度成分 u, v (a)と、測定データと連続の式から解析的に求めた y, z 平面内の速度成分 v, w (b)の一例を示す。この図は、時系列的に得られた300枚の速度場を重ね合わせて得た時間平均速度分布である。この図から、流出口からの噴流がその対向壁面に衝突した後、壁面に沿って流れ、さらに容器内で再循環領域を形成したのち、

流出口に至ることがわかる。また、速度の小さい再循環領域は容器全域に広がっていることがわかる。

図3は、3次元速度場情報から圧力を計算する際に、容器中央と流入口、流出口の3箇所を積分の開始点にとったときの、それぞれの計算結果を比較したものである。ただし、その比較結果は、缶体の中央断面における対向壁面上である。ここで示す圧力値 C_p は、基準圧力として流入口での静圧、代表速度として流入口速度を用いた。本実験結果によると、流入口付近を除く全領域で圧力の計算結果が積分開始点の位置に依存しないことがわかる。

図4は、容器中央の xy 断面(a)と対向壁面近くの yz 断面上における C_p の分布を示す。なお、積分の開始点は噴流の入り口とした。この結果から、噴流が壁面に衝突している場所で圧力が高く、速度の小さい再循環領域に低圧領域が広がっていることがわかる。

4. 結言

燃焼装置内部全域にわたる時間平均3次元速度場を、PIVならびに連続の式を用いて再構成した。さらに、そこで得られた三次元速度場情報をもとに圧力場を算出する方法を示し、これを缶体に適用した。

参考文献

- (1) 佐藤、藤沢、高野、時田、日本機械学会北陸信越部第37期講演会(2000-3), p321-322
- (2) N.Wang; W.Limberg, Exp.Fluids, 27(1998), 351-358.
- (3) 今市、近江、日本機械学会論文集 (B編) 48巻436号(昭57-12), p2449-2459.

Fig1 Experimental Setup

(a) $z=100\text{mm}$ (b) $x=190\text{mm}$
Fig2 Reconstructed Two-Dimensional Velocity Vectors

Fig3 Calculated Pressure Distributions
At $x=200\text{mm}$, $z=100\text{mm}$

(a) $z=100\text{mm}$ (b) $x=190\text{mm}$
Fig4 Distributions of C_p