A302 マイクロ流の PIV 計測と圧力場評価に関する研究

中村 雄樹[○](新潟大院), 藤澤 延行(新潟大工), 中村 功一(新潟大学院)PIV measurement of micro-channel flow
and the evaluation of pressure field

Yuki Nakamura, Nobuyuki Fujisawa, Koichi Nakamura

ABSTRACT

The evaluation method of pressure distribution using the velocity field measured by micro PIV is studied in a straight micro-channel flow with square cross section. In this method, the three-dimensional velocity field is assumed parabolic except for the experimental cross-sectional velocity distribution measured by micro PIV. The comparison between the evaluated pressure drop and the numerical result by Navier-Stokes equation indicates good agreement with each other, which suggests the validity of this method for evaluate the pressure drop in the micro channel.

Keywords: PIV, Pressure, Velocity, Micro channel

1. 緒言

マイクロ流は、工学、医学等のさまざまな分野での利用が予期されるため、最近急速に研究開発が進められている。その代表例として、マイクロ流体デバイスが考えられるが、その内部流動はデバイス性能に強く関わることから、その速度計測法としてマイクロ PIV (Micro Particle Image Velocimetry) による速度場計測技術の研究が盛んに行われている。一方、マイクロデバイスの設計上、流れ場の情報と同時にマイクロデバイス内部の圧力を知ることがしばしば要求される。しかしながら、このようなマイクロデバイスでは圧力計測に必要なプローブなどの挿入が困難であり、非接触での圧力評価技術の開発が特に重要である。

本研究では、圧力ポアソン方程式を用いて、マイクロ PIV 計測から求められる速度場から圧力場を推定する方法について検討する。

2. 圧力場の評価方法

定常非圧縮性流体に対する圧力ポアソン方程式は、以下のとおり書き表される。

$$\nabla^2 p = -\rho \nabla \cdot (V \cdot \nabla V) \quad (1)$$

ここに、 p : 圧力、 V : 速度ベクトル、 ρ : 流体の密度である。一方、境界条件は、次式に示す N.S 方程式で表される。

$$\nabla p = -\rho V \cdot \nabla V + \mu \nabla^2 V \quad (2)$$

ポアソン方程式を用いた圧力推定の数値解析手法として、有限差分法による離散化を行い、SOR 法による反復

Fig.1 Micro PIV experimental system.

計算を行うことで解を求めることができる。その際、速度場については、別途与える必要があるが、これは PIV による流れ計測から与える。

3. 実験

Fig.1 に本計測システムの概略図を示す。Fig 1(a) に示したマイクロ PIV システムは顕微鏡、高解像度 CCD カメラ (1008x1018・8bit)、照明系からなる。光源には白色ストロボ光を用い、ステージ下方からミラーを介して検査領域を照明した。対物レンズは x20 のものを用い、鏡筒中に組み込まれた結像レンズを通して流れ場の観測がされる。このとき、カメラのダブルシャッター機能によって微小時間間隔の 2 画像が取得される。なお、本実験では、画像の時間間隔を 1ms とした。

Fig.1(b) に実験で使用したテスト流路の構造を示す。

本実験で使用したマイクロ PIV システムで得られる実視野はおよそ $300\mu\text{m}$ の領域で、図の正方形で示した領域を撮影対象とした。実験に使用した直線流路は、 $25\times 25\text{mm}$ の透明アクリル板に $300\times 300\mu\text{m}$ の矩形溝を設け、上方アクリル板で締め付ける構造になっている。作動流体は蒸留水に平均粒径 $1\mu\text{m}$ のトレーサ粒子を混入したものを用いた。また、流路入り口と出口にフローコントロールバルブを取り付け、これにより流量制御を行い、測定部では、レイノルズ数 $\text{Re}=0.2$ 程度とした。ただし、流量は、ピペットで測定した。

PIV 解析は、直接相互相関法にサブピクセル解析を導入して行った。このとき、相関領域は 37×37 、探索領域は 11×11 である。

(c) Velocity distribution.
Fig.2 Experimental result.

Fig.3 Pressure distribution.

4. 実験結果および考察

4.1 速度分布の計測結果

Fig.2 に、本実験で得られた可視化画像 (Fig.2(a))、瞬時速度分布 (Fig.2(b)) ならびに時間平均速度分布 (Fig.2(c)) を示す。ただし、時間平均速度分布は 150 の瞬時速度を時間平均して得られた結果である。また、Fig.2(c)には、比較のため、二次元ポワズイユ流れの速度分布ならびに正方形断面流路に対する数値シミュレーション結果も示した。ただし、数値シミュレーション結果では、Navier-Stokes 方程式を 3 次元格子 ($41\times 25\times 25$) で計算した結果である。本実験結果は、流路中央断面に対する数値シミュレーション結果と良好な一致を示しており、実験データの健全性を示す。これらの結果に対し、二次元ポワズイユ流れの速度分布よりわずかに膨らんだ分布形状をしているが、これは 3 次元流路の影響である。

4.2 圧力分布の評価

圧力ポアソン方程式から圧力場を評価するには、全流れ場の速度分布情報が必要である。このため、マイクロ PIV によって計測された速度分布を基に、計測断面に垂直方向の速度分布を放物線で近似することで、3 次元流れ場を構築した。ただし、放物線近似の際にわずかに流量の変化が生じるため、流量に対する補正を行って 3 次元流れ場を構築した。このような速度場を用いて圧力場を評価した結果を Fig.3 に示す。図には、比較のため、数値シミュレーションから求まる圧力分布も示した。図の横軸は主流方向距離、縦軸は圧力係数 $C_p (= p/1/2 \cdot \rho U^2)$ である。ただし、 U は断面平均速度である。本実験結果は、数値シミュレーション結果と良い一致を示しており、本圧力評価法が妥当な結果を示すことが分かる。

5. 結論

マイクロ流の圧力分布評価法として、圧力ポアソン方程式とマイクロ PIV による速度分布計測結果を用いた方法を提案し、数値シミュレーションとの比較から本手法の妥当性を示した。

参考文献

- 1) 中村功一, 藤沢延行: 速度場計測に基づくマイクロ流の圧力場推定に関する研究, 富山機会学会, 2003. 67-68
- 2) Fujisawa, N and Sato, A., Evaluation of Three-dimensional Flow and Pressure Field in a Cold Model of Combustion Chamber by Plane PIV Measurements, Proc.4th International Symposium on Particle Image velocimetry, 2001, Pa. 1072
- 3) R. Gurka, A. Liberzon, D. Hefetz, D. Rubinstein, U. Shavit, 3rd International Symposium on Particle Image Velocimetry, 1999, Santa Barbara, pp. 671-676
- 4) C.D. Meinhart, S.T. Wereley, J.G. Santiago, PIV measurements of a microchannel flow, Experiments in Fluids, 27(1999), 414-419