塩崎孝壽[○]、川橋正昭、平原裕行 (埼玉大工)

PIV measurement of flow in a micro-channel

Koujyu SHIOZAKI, Masaaki KAWAHASHI and Hiroyuki HIRAHARA

Faculty of Engineering, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Urawa, saitama

Abstract

Microfluidics and micro-flow-measurement are recent topics relating to different fields of engineering and science, such as micro-circulation in living body, flow through micro-channel for medical use, micro-flow mixing, micro-jet, flow in porous media, flow around electronic device, flow around micro-machine, chemical reaction and molecular design. In micro-flow analysis, physical characteristics, which are particular to the micro-flow, must be considered. And also experimental method is different from it for general flow problems. Micro-PIV is useful to velocity field measurements of micro-flow phenomena, however, practical technique of it has not been established in detail. Velocity distribution of flow through a micro-channel is measured by using micro-PIV system, and fundamental characteristics of the tracer image obtained by using macro lens and CCD camera are investigated in this report.

Keywords: micro-PIV, micro-flow, micro-channel

1・まえがき

微小空間スケールの流れの解析や計測は、生体内⁽¹⁾⁽²⁾や医療用素子、多孔質内部の流れ、あるいは分析、化学反応、分子設計などにおいて重要なテーマである。最近では小型化の著しい電子デバイスの製造時の流れや製品周りの流れ、マイクロマシン内部の流れの問題などにも関連して、注目されている。

微小スケールの流れ現象は表面張力や粘性の影響が大きく、通常スケールの空間内の流れとは大きく異なり独特のふるまいをする。また、計測においても空間解像度を上げることが難しいなど特有の問題がある。流路内の奥行き方向の解像度に関しては被写界深度や、粒子像の輝度パターンから分解する方法などが提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

本報告では、微小空間内流れの PIV 計測に伴うさまざまな問題点のうち、得られる像に及ぼす照明方法の影響や、使用したマクロレンズの被写界深度の影響について検討した。さらに作成したガラス製モデル微小流路内流

れにおける流速分布を PIV により計測し、微小流路内流れの特性について検討した。

2・実験装置および方法

本実験における装置および照明光学系、計測システムの概略が、Fig.1 に示されている。モデル流路形状は、幅 $500\mu\text{m}$ 、奥行き $100\mu\text{m}$ の断面を有する流路およびその急拡大部とした。流路は、顕微鏡観察で使用されるカバーガラス(厚さ $100\mu\text{m}$)を、厚さ 10mm のフローとガラスで挟み作成した。試験流体には、流動パラフィン(粘性係数 $0.013\text{Pa}\cdot\text{s}$)を使用した。レイノルズ数は、生体内微小循環系における値⁽¹⁾と同程度とした。トレーサ粒子には、粒径 $10\mu\text{m}$ の中空ガラスビーズ(比重約 1.06)を用いた。計測システムは、高倍率のズームレンズ(KEYENCE VQ-Z50)と CCD カメラ(Kodak ES-1.0)を使用し、フレームレート 15Hz で画像記録を行った。なお、速度ベクトル回復には、輝度差累積法を用いた。

Fig. 1 Experimental setup.

微小流路内の PIV 計測においては、光の屈折や回折の影響が大きく現れ、実際の粒子の移動と、得られた像の移動量との間に比例関係が成り立たないことなどが考えられる。本報告では微小空間内の PIV 計測に伴うさまざまな問題点のうち、照明方法における像の違いと被写界深度の影響について検討した。照明は、流路前方（カメラ側）斜め 45 度の方向と斜め 45 度後方および流路真後ろの 3 種類を検討した。光源はすべて 150W ハロゲンランプである。

上述の 3 方向の照明で得られた画像を、Fig. 2 に示す。得られた結果より、斜め 45 度後方からの照明で、もっとも品質の高い画像が得られた。そこで、本実験ではこの照明方法を用いることとした。

Fig. 2 The images obtained by different lighting directions.

高倍率の撮影においては、被写界深度が浅くなり粒子像にボケが生じ、測定結果に影響することが考えられる。正確なピンポイント位置における像と、それからずれた場合の像を Fig. 3 に示す。ここで、中央が最良ピンポイント位置であり、左右はそれぞれ 100 μm 後方および前方

にピンポイントを合わせたものである。

(a) Lighting direction B

(b) Lighting direction C

Fig. 3 The images obtained in different defocus length(lighting direction B and C) .

Fig. 4 Increase of particles image diameter with defocus distance.

この結果は、照明方向によりその現れ方に特徴があり後方からの照明では、粒子像が暗い場合はピンとのずれ量が大きくなるとともに、粒子像は小さく薄くなる。これは明るい部分からの光が暗い部分に回り込むことの影響が大きいためである。一方、斜め後方からの照明では、粒子像が背景に対して明るい場合はピンとのずれ量の増加とともに粒子象も大きくなる。その関係を Fig.4 に示す。いずれにしてもこの結果は、本報告で用いた流路の奥行き 100 μm と撮影倍率 (331 ピクセル/mm) では大きなボケにはならないことが確認できた。しかし、一方ではこのままでは流路奥行き方向の分解が出来ないことを示しており今後検討していく必要がある。また、今後さらに微小な流路の計測に発展させた場合は問題となると考えられる。

3・測定精度の見積もり.

流速測定精度には、前項で述べた被写界深度の影響や装置のアライメントなど種々の影響があるため、装置全体の精度を見積もるためのテストを行った。ガラス板に供試流体とガラスビーズを懸濁させたものを挟み、それを微動装置に取り付け $50\mu\text{m}$ づつ移動させた画像を 6 枚作成し、それを流速計測に用いた PIV プログラムにより解析した。このときの撮影倍率は試験流路内流速測定時と同じ 16.5 ピクセル/ $50\mu\text{m}$ である。また、フォーカスのずれの影響を見るために最良のピント位置から $100\mu\text{m}$ づつ前後にずれた位置で同様の撮影を行い解析を行った。その結果を Fig.5 に示す。

Fig. 5 Histogram of displacement measured by PIV.

最適ピント位置における移動量 $50\mu\text{m}$ のテスト画像に対して、平均値 $50.03\mu\text{m}$ 、標準偏差 $0.52\mu\text{m}$ の結果が得られた。また、最良ピント位置から $100\mu\text{m}$ づつ前後にずれた位置での結果は、それぞれ平均値 $50.9\mu\text{m}$ 、標準偏差 $0.60\mu\text{m}$ 、平均値 $49.80\mu\text{m}$ 、標準偏差 $0.78\mu\text{m}$ となった。この結果は、本実験における流路の大きさと撮影倍率の範囲では、ピント位置のずれによる影響は小さいことを示している。しかし逆に奥行き方向の空間解像度は不十分で、今後適切な手法を開発する必要がある。

4・測定結果.

最も良い画像が得られた斜め後方からの照明を用いて、

試験流路内の流速計測を行った。実験条件は試験流路急拡大部から供給容器液面までの高さを 55mm とし、自然流下させて行った。

得られた可視化画像の例を Fig.6 に示す。可視化範囲はおおよそ $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ であり、コントラストが良くノイズの少ない画像が得られている。なお、左上の白い四角は速度ベクトルを回復した際の相関領域（比較領域）の大きさを示している。

Fig. 6 Visualized image of flow.

計測結果を Fig.7 にベクトルと等速度線を重ねて示し、速度の絶対値の 3 次元表示を Fig.8 に示す。座標系は急拡大部中心を原点とし、流れの下流部に向かって正方向に x 、それに垂直に y 軸を取る。計算に用いた相関領域の大きさは、 31×31 ピクセル、探索領域は 20 ピクセルであり、相関領域内の粒子数は $8 \sim 12$ 個程度である。これらの図に示されている結果は、 30 枚の可視化画像から 29 組のベクトルを得て時間平均値を求め、さらに平均値から大きくずれたものを過誤と見なして除外し、改めて平均値を求めたものである。なお、全体で過誤ベクトルと判定されたものは 0.2% 程である。結果は平行流路部分においては中心部で流速値が最も大きくなり、その値は 0.66mm/s ($=14.5$ ピクセル/フレーム)であり壁面に向かって 0 に近づいている。代表長さを流路の奥行き ($100\mu\text{m}$)、代表流速を最大流速 (0.66mm/s) としたときのレイノルズ数は約 0.05 で、生体内の微小循環系のそれと同程度である⁽¹⁾。

Fig. 7 Velocity vector and contour map
in the test section.

急拡大部においては急速に流れが扇形に広がるとともに速度が小さくなり、視野の境界付近の流速は 0.035mm/s ($=0.8$ ピクセル/フレーム)となる。

計測誤差の発生にはさまざまな要因があり、現在までのところ評価が困難であるが、流体中の粒子の移動変位についてはテスト画像による検証から見積もることができる。

Fig. 8 Contour map of absolute value of velocity
in the test section.

5・まとめ

既知の移動量を持つテスト画像と、ガラス製の2次元モデル微小流路内の流れをPIVにより測定し、計測における問題点と、微小流路内流れの特性について検討し、以下のような結果が得られた。

- ① 微小粒子を高倍率で撮影した場合、照明の方向により、粒子像とアウトフォーカスによるボケ像の現れ方は大きく異なる
- ② 斜め後方からの照明が良好なコントラストの画像が得られる。この場合、移動量既知のテスト画像を用いた解析では良好な結果が得られた
- ③ アウトフォーカスの影響は多少存在するが、本報告で用いた程度の流路の大きさと撮影倍率では影響が少ない。

参 考 文 献

- (1) 梶谷、可視化情報学会誌、Vol. 20, No. 76, (2000. 1) pp.2-12
- (2) 西田、可視化情報学会誌、Vol. 20, No. 76, (2000. 1) pp.25-30
- (3) S. T. Wereley, C. D. Meinhart and M. H. B. Gray: Proc. 3rd Int. Workshop on PIV (PIV'99, Santa Barbara), (1999) pp.545-550.
- (4) B. Ovrzyn: Proc. 3rd Int. Workshop on PIV (PIV'99, Santa Barbara), (1999) pp.385-393.