121 マイクロチューブ内流れ場の速度分布計測

杉井 康彦[○](東京大学), 岡本 孝司(東京大学), 班目 春樹(東京大学)

Investigation of Flow Field in Micro Round Tube by PIV Technique

Yasuhiko SUGII, Koji OKAMOTO and Haruki MADARAME

ABSTRACT

This paper describes PIV measurements, using a microscope, high sensitive CCD camera and double pulse Nd:YAG laser, of the flow field in a micro round tube with an internal diameter of 100 μm in order to examine micro-scale effects. Since the refractive index of the micro tube almost corresponds to that of water, the inner flow in the tube can be observed clearly. Applying the highly accurate PIV technique to the flow, the velocity distributions with spatial resolutions of $2.0 \times 2.0 \mu\text{m}$ were measured even near the wall in the center plane of the round tube. The obtained velocities profile was similar to the theoretical values calculated using Poiseuille's law.

Keywords: Micro PIV, Fluorescent Particle, Round Tube

1. 緒 論

細動脈, 細静脈, 毛細血管からなる微小循環において, 血管壁にかかるせん断応力などを評価するために速度場を計測することは重要であるが, その径が $5-50 \mu\text{m}$ と微小であるため計測が困難であった. 近年, MEMS などの速度場を計測するために, 光学顕微鏡を用いたマイクロ PIV が開発されている¹⁾. これまでに著者らは, 生体顕微鏡と高速度カメラを用いて, 生きたラットの腸間膜の内径 $30 \mu\text{m}$ の細動脈の流れを可視化し, 再帰的相関勾配法²⁾を用いて高解像度で高精度な速度分布を計測し, 2 相流やノンニュートン流体, 脈動などによる複雑なものとなっていることが確認された³⁾⁴⁾. さらに, 微小循環におけるスケール効果を調べるため, 著者らは高速度カメラと連続レーザーを用いてマイクロ PIV システムを構築し, マイクロチューブ内の流れの計測を行った⁵⁾. しかしながら, 計測精度や空間解像度が小さいなどの問題があった.

本論文では, 高感度 CCD カメラとダブルパルスレーザーを用いてマイクロ PIV システムを改良し, 微小循環における流れの基本的なダイナミクスを調べるため, マイクロチューブ内の流れの計測を行った.

2. 実験概要

Fig.1 に実験装置の概要を示す. 微小循環におけるスケール効果や粒子と壁面との干渉を調べるため, 内径 $100 \mu\text{m}$ の断面形状が真円のマイクロチューブ内の流れを対象とした. ガラスなどから作成した円管に作動流体として水を用いる場合, 屈折率の違いのために内部, 特に壁

近傍の流れを観察することは難しい. そこで, 水の屈折率とほぼ同じ値を持つ FEP (Fluorinated Ethylene Polymer) で作成したマイクロチューブ内を水中に沈め, 水浸レンズを用いて屈折の影響を低減させた. さらに, これまでに提案されているマイクロ PIV では, レーザ光をビームエキスパンダーで広げ対物レンズを通す落射照明が用いているが, 対物レンズが焼けるためレーザー強度の制限があり, 対物レンズによって集光するため輝度に空間的な勾配ができるなどの問題があった. 本研究では, ステージ下部から直接照明することなどの光学系を改善して前述の問題の解決を図った.

Fig.1 Experimental Set up

対物レンズが 40 倍の水浸レンズであり, NA は 0.8, 作動距離は 3.3mm である. 蛍光粒子は径が $1.0 \mu\text{m}$ であり, 542nm で励起し 612nm の蛍光を発する. 波長が 532nm , 出力が 25mJ/puls のダブルパルス Nd:YAG レーザで照射し, 光学フィルタによって蛍光だけを観察し

た．得られる蛍光が非常に微弱であるため，ペルチエ素子によって -12°C まで冷却でき，画素数が 1280×1024 画素，12bit 階調，8frame/sec の高感度 CCD カメラを用いた．蛍光粒子を混入した純水を容量 $100\ \mu\text{l}$ のマイクロシリンジを用いて一定流量で流した．

3. 実験結果

Fig.2 にマイクロチューブ内の中央断面に焦点を合わせて得られた蛍光粒子画像を示す．解像度は $0.17\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ ，観察領域は $217 \times 174\ \mu\text{m}$ である．蛍光だけを光学フィルタを用いているため，散乱光などのノイズは比較的少なく，またチューブの屈折の影響が少ないため粒子が壁面近傍まで観察できる．著者らが提案している再帰的相関一勾配法³⁾を適用して求めた 64 枚の速度場の時間平均速度分布を Fig.3 に示す．検査領域を 25×25 画素，50% のオーバーラップ率で速度場を求め，得られた速度場の空間解像度は， $2.0 \times 2.0\ \mu\text{m}$ である．なお，表示のため横方向の速度分布の解像度を落として示している．粒子密度が小さいにも関わらず，過誤ベクトルが見られず，良好な結果が得られている．最大流速は，6.0 画素/frame， $10\text{mm}/\text{sec}$ である．管中央付近で最大値をとり，壁面に近づくにつれて，小さくなる典型的な層流の速度分布となっている．壁極近傍まで速度ベクトルが求められていることが確認できる．また，壁に垂直方向の速度成分がほぼ 0 となっている．Fig.4 に，時間平均速度場の中央縦断面の軸方向速度分布を示す．横軸に示した位置は管の半径で正規化している．断面に沿って 51 点の速度場が， $2.0\ \mu\text{m}$ 間隔で得られている．得られた速度分布は，層流の理論解であるポアズイユ流の分布とよく一致している．著者らはこれまでに，最大流速を $0.5\text{mm}/\text{sec}$ とした計測結果において，壁面希望の速度場の粒子と壁面との干渉によるポアズイユ分布からのずれを観察しているが，本結果では観察されず，粒子と壁面との干渉の影響が流速に比べ十分小さいためと思われる．

4. 結 論

計測精度と空間解像度を改善するため，高感度 CCD カメラとダブルパルスレーザを用いてマイクロ PIV システムを改良した．微小循環における血流場の評価のため，内径 $100\ \mu\text{m}$ のマイクロチューブ内流場を可視化し，再帰的相関一勾配法を用いて速度場を求めた．得られた速度場の空間解像度は， $2.0 \times 2.0\ \mu\text{m}$ である．軸方向の成分の断面速度分布は，理論的な層流解であるポアズイユ流によく一致していることが確認された．

参 考 文 献

- 1) Santiago, J. G., et al.: A particle image velocimetry system for microfluidics, *Exp. Fluids* **25** (1998) 316-319.
- 2) Sugii, Y. et al.: A highly accurate iterative PIV technique using gradient method, *Meas. Sci. Technol.*, **11** (2000) 1666-1673.

- 3) 杉井 康彦他: 高精度画像計測法を用いた微小血管内の速度分布計測, 機論(B 編), 67-662 (2001) 2431-2436.
- 4) Sugii, Y. et al.: *In Vivo* PIV Measurement of Red Blood Cell Velocity Field in Microvessels Considering Mesentery Motion, *Physiol. Meas.* **23** (2002) 403-416.
- 5) Sugii, Y. et al.: Evaluation of Velocity Measurement in Micro Tube by Highly Accurate PIV Technique, *Proc. 4th Int. Symp. Particle Image Velocimetry* (2001)

Fig.2 Visualized images in the center plane of the micro round tube

Fig.3 Averaged velocity distributions in the center plane

Fig.4 Averaged velocity profiles