

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630058

研究課題名(和文)計測深さ可変な3次元マイクロ流速測定法の開発

研究課題名(英文)Development of microfluidic velocimetry with variable measurement depth

研究代表者

元祐 昌廣 (Motosuke, Masahiro)

東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号：80434033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：微小流路内の3次元流動計測に対するニーズは高まる一方、計測厚さがレンズによって固定されるため、計測体積を自由に設定することは極めて難しい。本研究では、計測厚さが調整可能な単視野3次元マイクロ流速測定法の開発を行った。結像収差の異方性を光学的に制御することで、微小空間内の3次元3成分の流速測定が可能な方法を開発し、その結像特性を理論的・実験的に評価し、粒子の3次元位置の計測を可能にした。そして、マイクロ流路内流動の3次元計測を行い、さらにマクロ流れへの適用として壁面せん断応力の計測を実施し、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：There is a strong demand for three-dimensional quantification of fluid flow in a microchannel. In this study, a three-dimensional microfluidic velocimetry by single view with variable measurement depth was developed. An optical control of astigmatism for particle image enables three-dimensional and three-component velocity measurement. An evaluation of the astigmatic imaging was performed. As a proof-of-concept, three-dimensional flow in a microchannel was quantified and the validity was confirmed. Moreover, wall shear stress was measured as an application of the boundary layer evaluation in macroscale flow.

研究分野：マイクロナノ熱流体工学

キーワード：マイクロ流体 計測技術 収差 異方性結像

1. 研究開始当初の背景

生化学や医療診断、環境分析の小型化を実現するマイクロ流体デバイスは、基礎的な要素技術研究から応用開発の段階へと移行しつつあり、デバイス内部の速度場計測に対する要求も高度化している。現在、微細流路内部の流動場の計測法としてはマイクロ PIV が主流だが、対物レンズの被写界深度内領域を計測断面とする原理上、2次元2成分の速度場計測に限定される。これを克服するべく、近年、3次元化・3成分化へと拡張する試みが研究されており、それらは下記のように大別される。

- ・共焦点スキャナによる3次元再構成
- ・ステレオ観察による3成分化
- ・ホログラムを用いた3次元化
- ・非焦点ボケを用いた3次元化

しかし、これまで開発されてきた手法は、使用に制限があるなど、一般的な手法が確立されているとは言い難い状況にある。

2. 研究の目的

微小流路内の3次元流動計測に対するニーズは高まる一方、計測厚さがレンズによって固定されるため、計測体積を自由に設定することは極めて難しい。本研究では、上述した3次元計測手法のうち「非焦点ボケを用いた手法」を進展させ、計測厚さが調整可能な単視野3次元マイクロ流速測定法を新たに提案する。結像収差の異方性を光学的に制御することで、微小空間内の3次元3成分の流速測定が可能な方法を開発するとともに、計測対象に合わせて計測厚さが調節可能な光学系を開発し、対象とする流動場に応じた分解能・精度を設定することができる流速測定法を確立する。

3. 研究の方法

まずは、その基礎となる異方性焦点面の形成とその結像特性の評価、ならびに粒子位置の3次元計測手法の検討を重点的に行い、特に粒子高さ位置の決定方法に関しては、理論解析を行って新たな解析方法を提案した。その後、マイクロ流れの3次元測定とマクロ流れへの適用として壁面せん断応力の測定へと取り組み、本手法の有効性を示した。

4. 研究成果

以下に「3. 研究の方法」に記載した、各実施事項の内容と成果について簡潔に示す。

・異方性焦点面の形成とその結像特性の評価

ファイバーレーザ光源を照明とし、無限共役光学系の結像レンズにシリンドリカルレンズを用いた異方結像顕微光学システムを設計・製作し(図1)、その結像特性の評価を行った。ガラス基板上に直径1 μm の蛍光ポリスチレン粒子を固定化して奥行き方向にトラバースして、撮影された粒子像を計測し、奥行き位置に依存して楕円状に粒子像が変

形する様子が確認された(図2)。この歪み特性と位置の関係について検討した結果、粒子サイズとそのアスペクト比を含んだ評価関数を用いることで、観察深度の全域において粒子の奥行き位置を同定可能であることを解析的に示し、3次元粒子測定が可能になることを見出した(図3)。また、シリンドリカルレンズや対物レンズの光学パラメータと計測深度、および歪み特性の関係性を明らかにした。

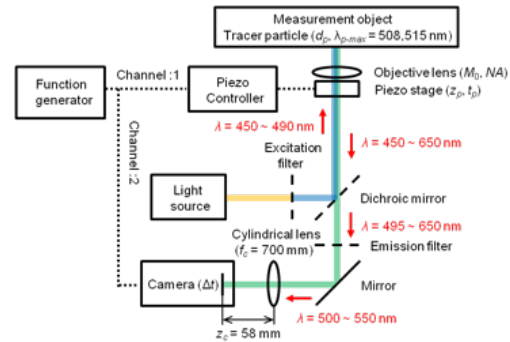


図1 開発した測定システム概要

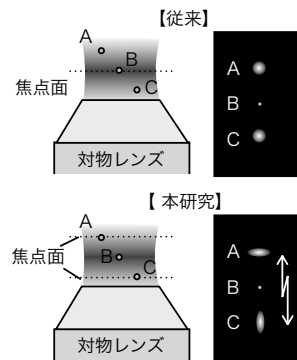


図2 通常の顕微鏡と本顕微システムでの粒子像の様子

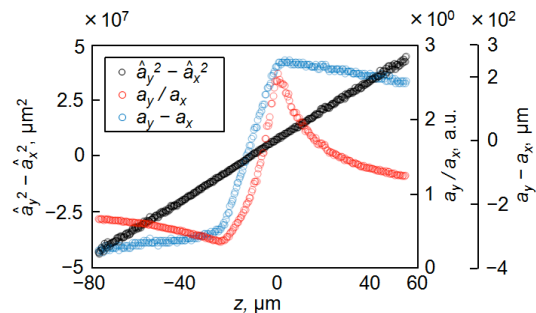


図3 粒子の歪みと評価関数の関係

・粒子位置の3次元計測手法の検討

上述した評価関数を用いた、3次元計測の適用性に関する検討を行った。ガラス基板上に多数の同種粒子を分散したテンプレートを作製し、その奥行き位置を変化させて、各粒子の評価関数を統計的に評価し、各種レンズにおける代表的な光学パラメータ下における、歪み度と計測不確かさの関係を定量化した。その結果、計測深度の1/20程度まで分解可能であることを明らかにした。

・高さ位置の校正法の理論的解析と改善

様々なシリンダカルレンズを用いて、その光学パラメータと粒子結像特性から、計測深度を求め、その依存性を明らかにした。また、結像特性の歪みと高さ位置との関係について、理論的検証を重ね、各結像軸ごりに逆双曲線型の結像モデルを導入し、これを变形して線形化させることで、より安定した計測が可能であることを理論的に示し、実験でも証明した。粒子像の認識方法に関して、従来の2値化法から楕円近似法へと改良し、結果として、認識精度が数倍向上し、サブピクセル精度での解析が可能であることを確認した。

・マイクロ流れの3次元測定とマクロ流れへの適用

3次元3成分の流速測定の実証試験として、後方ステップを有するマイクロ流路において3次元計測を実施し、水平方向ならびに高さ方向の粒子速度をPTVによって求めた(図4)。計測結果は、流れ・高さ方向成分速度ともにシミュレーションと良い一致を示し、本手法によって3次元流速測定が可能であることを確認した。そして、昨年実施したステップ流路に加えて、透明導電膜アレイを配置したマイクロ流路を用いて、電場誘起流の挙動を計測した。結果として、適切に3次元計測が実現できていることを確認し、開発した3次元計測の有効性を示すことができた。また、マクロ流れ、特に壁面流計測へ適用するために、高さ2mmのミニチャネルを用いて、壁面近傍20μm領域の流速を3次元計測し、壁面せん断応力の定量化が可能であることも確認した(図5)。

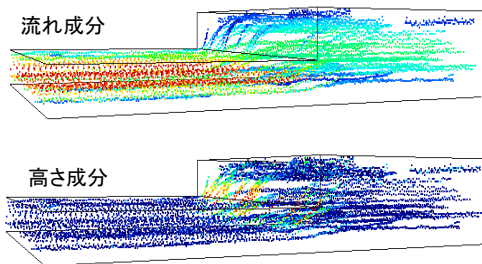


図3 マイクロ流路内の3次元速度計測結果

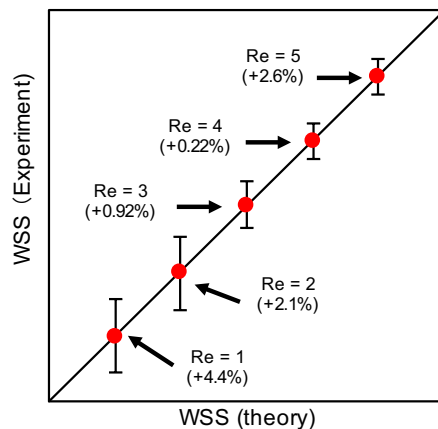


図4 壁面せん断応力の測定結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① H. Kotari, M. Motosuke, Simple applications of microparticle transportation by tender optical scattering force, *Microfluidics and Nanofluidics*, 査読有, Vol. 18, pp. 549-558 (2015) DOI:10.1007/s10404-014-1459-y

[学会発表] (計 12 件)

- ① 市川賀康, 山本誠, 元祐昌麿, 単視野マイクロ 3DPTV による壁面せん断応力分布の計測, 第53回日本伝熱シンポジウム, 2016.5.24, グランキューブ大阪 (大阪)
- ② 市川千尋, 神谷薫, 亀谷雄樹, 高尾洋之, 村山雄一, 元祐昌麿, 3次元速度場からの壁面せん断応力の導出, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2015.11.7, 東京理科大学 (東京)
- ③ 吉田佳広, 亀谷雄樹, 元祐昌麿, 白血球の回転挙動計測, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2015.11.7, 東京理科大学 (東京)
- ④ 元祐昌麿, マイクロ流路での界面流れ制御の可能性, 第5回CSJ化学フェスタ, 2015.10.14, タワーホール船堀 (東京)
- ⑤ C. Ichikawa, K. Tsuda, S. Asakura, K. Kamiya, Y. Kameya, H. Takao, Y. Murayama, M. Motosuke, 3D wall estimation of patient-specific cerebral aneurysm model for hemodynamic evaluation, *11th International Symposium on Particle Image Velocimetry (PIV)*, 2015.9.16, Santa Barbara (USA)
- ⑥ Y. Yoshida, Y. Kameya, M. Motosuke, Evaluation for rolling behavior of cell-sized particle by lateral observation in microchannel, *11th International Symposium on Particle Image Velocimetry (PIV)*, 2015.9.15, Santa Barbara (USA)
- ⑦ Y. Ichikawa, K. Nishiwake, H. Wakayama, Y. Kameya, M. Yamamoto, M. Motosuke, Three-dimensional measurement of near-wall velocity in millimeter channel by a single view imaging, *ASME InterPACK & ICNMM*, 2015.7.9, San Francisco (USA).
- ⑧ M. Motosuke, Efficient particle focusing by AC electrokinetic approach, *AnalytiX-2015*, 2015.4.27, Nanjing (China)
- ⑨ M. Motosuke, H. Kotari, Fuss-free

microfluidic particle transportation by optical scattering force, *4th European Conference on Microfluidics (μ Flu)*, 2014.12.11, Limerick (Ireland).

- ⑩ 市村大亮, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 表面反応促進のためのエレクトロサーマル効果とフォトサーマル効果の複合利用, *日本機械学会熱工学コンファレンス*, 2014.11.9, 芝浦工業大学 (東京)
- ⑪ 西分康次郎, 若山寛武, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 結像異方性を利用したマイクロ3D3C流速測定法の校正関数に関する検討, *日本流体力学会年会*, 2014.9.15, 東北大学 (仙台)
- ⑫ K. Nishiwake, H. Wakayama, M. Motosuke, A simple 3D3C velocimetry in microscale using single camera based on anisotropic defocus method, *16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16)*, 2014.6.26, Okinawa Convention Center (Okinawa, Japan)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

元祐研究室ホームページ

<http://www.rs.tus.ac.jp/motlab/jp/html/achievement.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

元祐 昌廣 (MOTOSUKE, Masahiro)

東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号: 80434033

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし