

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (A)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19206022
 研究課題名 (和文) 非線形マイクロ流動評価のためのマイクロ 4 次元 P I V 開発
 研究課題名 (英文) Development of a four dimensional micro-PIV system for a non-linear fluid flow
 研究代表者
 岡本 孝司 (OKAMOTO KOJI)
 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
 研究者番号：80204030

研究成果の概要 (和文)：本研究ではデフォーカス法をベースとしたマイクロ四次元 P I V システムの開発を行った。顕微鏡観察条件下では焦点面から奥行き方向にずれた位置に存在する粒子の像が焦点面からの距離に応じたピンボケ像になる。これを利用し、ピンボケ量の時間変化から奥行き方向の速度を算出するシステムを開発した。また、ピンボケの度合いが異なる粒子像を追跡すれば、奥行き方向に異なる位置における流速を測定可能である。この手法によりマイクロミキサ内の非線形複雑流動を評価した。更にスカラー量の同時計測手法の開発を行った。

研究成果の概要 (英文)：A novel four dimensional micro particle image velocimetry(PIV) method was developed using a defocusing effect. A particle image defocuses dependent on the depth-wise distance from a focal plane in a microscope system. The developed system could measure the depth-wise component of velocity from a temporal variation of the level of defocus. In this research, we also clarified a non-linear fluid flow at different horizontal planes simultaneously in a micro-mixer by tracking particle images with different defocuses. Moreover, a feasibility study of a novel combined four dimensional measurement technique of velocity and a scalar value was performed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	18,200,000	5,460,000	23,660,000
2008 年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2009 年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
総計	37,300,000	11,190,000	48,490,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：マイクロ流体, 流体計測, 粒子画像流速測定法

1. 研究開始当初の背景

生体試料や環境影響物質などを極微量で効率的に分析するために、化学プロセスを小さな基盤上に集積化する μ TAS, Lab-on-chip, BioMEMS などのマイクロ流体デバイスの研究が数多く行われている。高効率なデバイス

の開発にとって、微小スケールの流体の挙動、特に混合・反応・加熱・冷却・抽出・相合流・相分離などを伴う流場の 3 次元動的なダイナミクスを知る必要がある。しかしながら、 $100\mu\text{m}$ 以下の微小スケールにおいては、界面張力や、急峻な濃度勾配、界面の大変形など

の非線形な効果が支配的となり、従来の流場解析手法では十分に解析できない。マイクロ流体デバイス内部の非線形な流動メカニズムを明らかにすることは、マイクロ流体デバイスのブレークスルーを導くために必須である。従来はマイクロ PIV を用いて、マイクロ流体デバイス内部の 2 次元な挙動を把握する技術が数多く開発されてきた。しかし、カオティックミキサなどの例を挙げても無く、マイクロ流体デバイス内部では非線形な 3 次元の流動が重要である。微小流路内流動では、時間変動を加えた 4 次元流動を把握する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロ流体デバイス内部の 3 次元 3 成分流動分布計測手法である新しいマイクロ 3 次元 PIV を開発するとともに、時系列変動を含むマイクロ 4 次元 PIV への拡張を行い、マイクロ流体デバイス内の非線形な 4 次元流動挙動を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) デフォーカス法を利用したマイクロ四次元 PIV 法を開発する。ここでは奥行き方向に粒子が移動し、ピンボケが生じると粒子像が大きくなる点に着目した手法の開発を行う。
- (2) マイクロ流体デバイス内の非線形な 4 次元流動挙動を明らかにするため、マイクロミキサを作成し、内部の複雑流れを解析する手法を開発する。
- (3) マイクロ四次元 PIV 法にスカラー計測機能を付与するため、機能性粒子の合成を行い、スカラー計測に関するフィジビリティスタディを行うとともに、今後の展開について提案する。

4. 研究成果

(1) マイクロチャンネル内の四次元流動場計測のためのマイクロ四次元 PIV システムを開発した。顕微鏡では特定のスライス面のみを照明することができないため、マイクロ PIV では対象とする流れ場全体を照明し、対物レンズの被写界深度内に存在する粒子を撮影する (Fig.1)。この時、焦点位置から奥行き方向にある粒子はピンボケ像となって画像に映り込む。これを利用して奥行き方向の粒子移動量を算出する方法がデフォーカス法である。本研究では Fig.2 に示す様に、焦点面から離れた位置でぼやけて大きくかつ暗く映る粒子を、高速度カメラを用いて高時間分解能で捉える。この粒子像と起点とする時刻の粒子像との相互相関を計算し、相関値の変化から各瞬間における粒子の奥行き方向の速度を求める。ここで個々の粒子についてこれを行うのではなく、検査領域を設定し、微小領域ごとの相互相関を利用する方法

が、本研究で開発した四次元マイクロ PIV システムである。相関係数は Fig.3 に示す様に、焦点面で最大値をとり、粒子の奥行き方向移動速度が速ければ、相関値の時間変化率が大きくなる (図中の赤線)。Fig.3 の実線の勾配から速度を算出するが、ここでは通常の PIV 同様に検査領域内の全粒子が同じ速度成分を持つと仮定し、また、焦点面から離れる方向か近づく方向かの区別はできない。

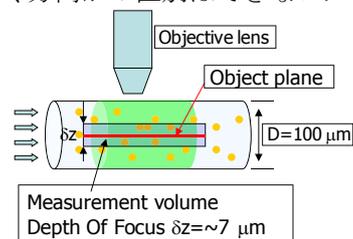


Fig.1 Focal plane and depth of focus in a micro PIV system.

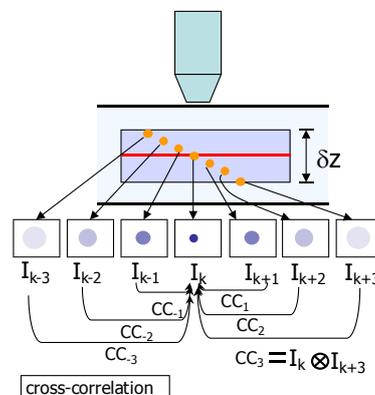


Fig.2 Defocusing particle image

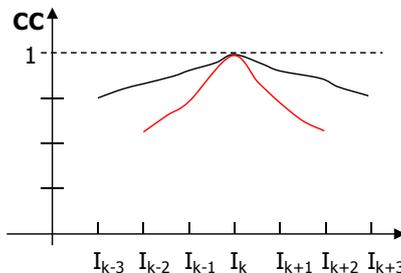


Fig.3 Time series cross-correlation values of particles at different positions

相関値の変化率を利用した提案手法の実現性確認のため、まず、コンピューターで人工的に作成した粒子画像を用いて、焦点面外速度の異なる粒子画像の相関係数を算出した (Fig.4)。その結果、焦点面から大きく離れると相関係数の変化率が小さくなる傾向が見られたものの、想定通りの結果となった。また、相関値の変化率と面外速度との関係をシミュレーションによって算出した (Fig.5) 結果、これらの関係がほぼ線形であり、相関値の時間変化率から速度算出が可能であることが明らかとなった。

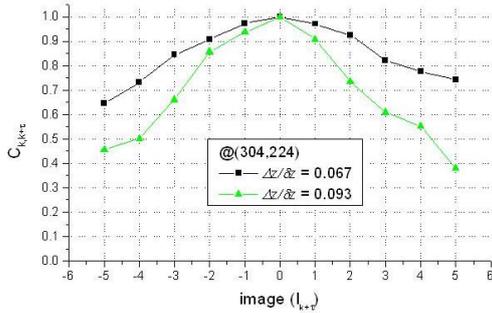


Fig.4 Variation of the cross-correlation value for numerically simulated images with different out-of-plane velocities

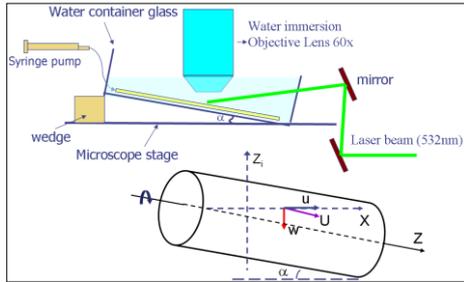


Fig.5 Experimental setup

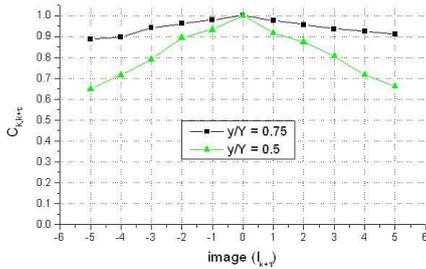


Fig.6 Examples of obtained cross correlation values

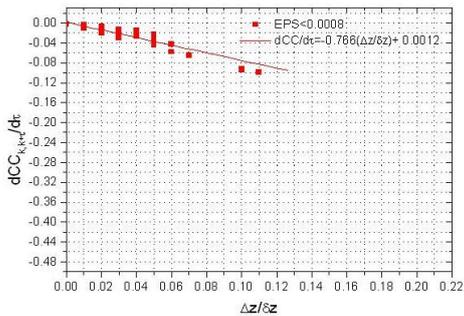


Fig.7 Numerically obtained calibration curve

次に、提案手法について Fig.5 に示す装置を用いた実験を行った。内径 $100\mu\text{m}$ の FEP チューブを傾斜させ、シリンジポンプから一定流量流速で送液する。粒子は平均粒子径 $1\mu\text{m}$ の蛍光粒子を用い、FEP チューブと屈折率がほぼ等しい水中で水浸レンズを用いて撮影を行った。撮影した画像からチューブ中心部 ($y/Y=0.5$) と外周に近い部位 ($y/Y=0.75$) における相関係数の時間変化を算出した (Fig.6)。シミュレーション画像から求めた校正データ

(Fig.7) に基づいて面外方向の速度を算出した結果を Fig.8 にまとめた。Fig.8 では実験で得たデータを赤い三角 (\blacktriangledown)、その時間平均を青い三角 (\blacktriangledown) と青線、ポアズユ流れを仮定して流量とチューブの傾斜角から算出した理論値を紫の菱形と実線で示している。個々の瞬間の画像から算出した値 (\blacktriangledown) はばらつきが大きいですが、時間平均したデータ (\blacktriangledown) では理論値と比較的良く一致している。

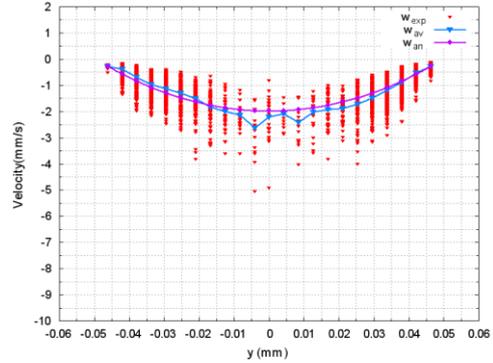


Fig.8 Experimental results and theoretical velocity

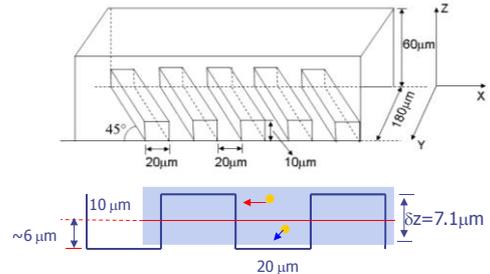


Fig.9 Schematics of a micro mixer

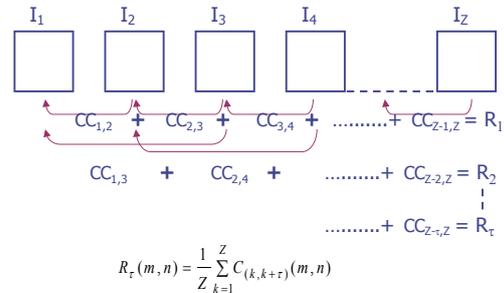


Fig.10 Concept of the ensemble correlation averaging with different time intervals.

(2)次にマイクロ流体デバイス内の非線形な4次元流動挙動を明らかにするため、マイクロミキサを作成し、内部の複雑流れを解析する手法を開発した。用意したマイクロミキサの形状を Fig.9 に示した。流路の底面部のみに、 $20\mu\text{m}$ 間隔で高さ $10\mu\text{m}$ の溝があり、溝は主流方向に対して 45 度ずれた向きにつけられている。被写界深度が $7\mu\text{m}$ の対物レンズを用い、底面から $6\mu\text{m}$ の位置に焦点をあわせて実験を行った。得られた時系列粒子画像について、ある枚数間隔で相互相関係数を算出

し、これをアンサンブル平均する。マイクロPIVではピンボケ粒子像がノイズと成り得るため、定常流れを仮定し、アンサンブル平均によってS/N比を改善しようとする手法があるが、本研究ではこれを異なる時間(画像)間隔で行う。その結果、短い時間間隔で算出した相関係数は速い流れを良く捉え、長い時間間隔で計算した相関係数は遅い流れに対応する粒子移動について値が大きくなる。中間的な時間間隔で計算した相関係数分布はFig.11に示す様に、両者の流れを捉え、画像上の2箇所に関連係数の高い粒子移動先候補を得ることができる。

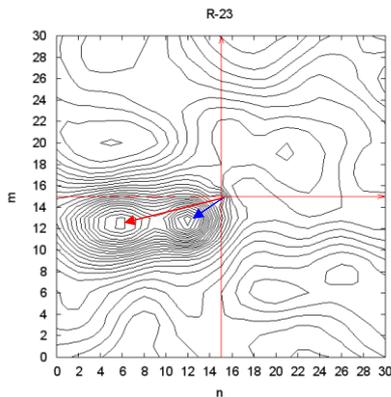


Fig.11 Obtained cross correlation map

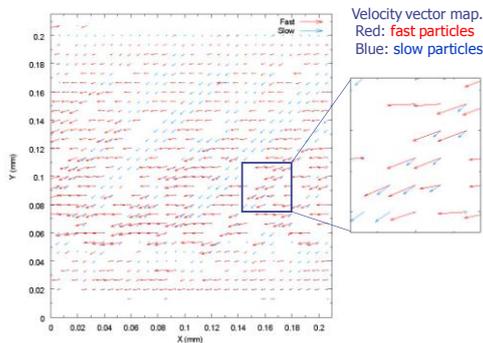


Fig.12 Velocity vectors simultaneously obtained for horizontal planes of different depth.

また、マイクロミキサでは奥行き方向に異なる面で異なる流れをもつ。つまり、底面近くではミキサの溝にそった流れとなり、溝の上ではそれよりも高速で流路にそった流れとなる。以上の特徴を加味すると、Fig.12に示す異なる奥行き方向位置において、異なる速度を持つ流れを解析することが可能である。本手法により計測のダイナミックレンジを向上させ、かつ、異なる断面における流れを同時に分析可能である。Fig.13にはミキサの溝より上側にある速い流れと溝の間を流れる遅い流れについて、本手法によって得られた速度成分をまとめた。溝の間を流れる流体は比較的遅く一様な速度で流れ、溝上部を

流れる高速流れは、直下に溝(凹み)がある部位で遅くなり、溝の無い凸な部位では流れが速くなっていることがわかる。以上のように本研究では、マイクロミキサ、内部の複雑流れを解析する手法を開発し、マイクロ流体デバイス内の非線形な4次元流動挙動の計測に成功した。

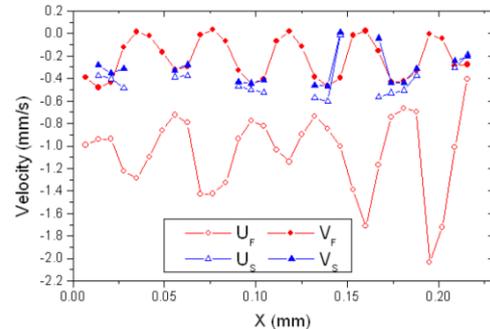


Fig.13 Horizontal velocity components for the fast and slow flow

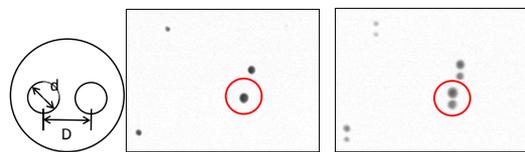


Fig.14 Defocus images with pin-hole

(3)デフォーカス法に基づくマイクロ四次元PIVシステムを開発し、非線形な流れの計測を実現できた。そこで、マイクロ四次元PIV法にスカラー計測機能を付与するため、機能性粒子の合成を行い、スカラー量計測に関するフィジビリティスタディを行った。(1)(2)では対物レンズのみを利用したが、ここではFig.14に示すピンホールを対物レンズに追加したデフォーカス法も検討に含めた。対物レンズに2つまたは3つのピンホールを設置すると、Fig.14のように焦点位置からずれた位置では粒子像が大きくなるだけでなく、像がピンホールの数に分裂する。そこでFig.15に示す複数のスカラー計測法を考案した。①では2つのピンホールに異なる光学フィルタを設置し、分裂した粒子像に対して二色蛍光法を適用する。ピンホールが2つの場合、通常は焦点位置からのズレの方向を特定できないが、分光することによりこれを特定す

--	マスク	計測法	備考
①	2ピンホール	2色LIF	---
②	3ピンホール	寿命法	---
③	3ピンホール	2色LIF	①とほぼ同様
④	3ピンホール	1色強度法	励起光強度が不安定 粒子の輝度に個体差
⑤	マスク無し	寿命法	---
⑥	マスク無し	2色LIF	要カメラ2台 光学系が複雑

Fig.15 Concepts of scalar measurement

ることも可能となる。ピンホールを用いない二色法(⑥)ではカメラが二台必要となる。ピンホールの有無に関わらず分光せずに蛍光強度のみを用いる場合(④)は定量的な計測が困難である。Fig.16 に示すように、デフォーカス時の粒子画像の輝度は指数関数的に減少する。スカラー量とピンボケ量がともに輝度に影響するため、粒子サイズや励起光強度等にムラがあるとスカラー量の評価が不可能である。ピンホールを用いる場合、粒子像の輝度が著しく低下するデメリットがあるが、分裂した粒子像の中心間距離は Fig.17 のように焦点位置からの距離に比例するため、粒子像サイズなどに関わらず、絶対的な粒子位置を特定可能である。光学フィルタを設置すると更に画像が暗くなるものの、二色蛍光法を用いる場合には分光が必須のため、①③はピンホールを最大限に活かす手法とも言える。

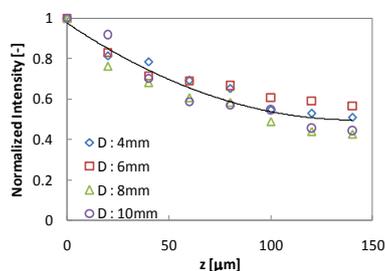


Fig.16 Fluorescent intensity with defocusing

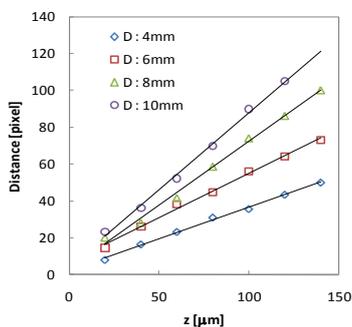


Fig.17 Distance between separated particle images with a 2-pin-hole mask

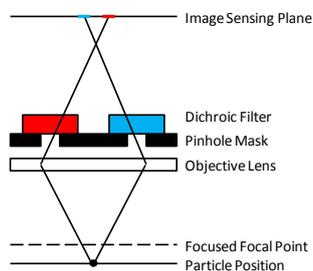


Fig.18 Concept of two color LIF with pinhole

Fig.18 には光学フィルタを追加したピンホール式デフォーカス法の概念を示した。このようにして二色蛍光法を行い、二色の輝度比とスカラー量(ここでは温度)との関係を測定した結果の一例を Fig.19 に示した。このとき

22.5~32.5°C で輝度比が 1.25~0.85 まで変化しており、変化率は-3.2%/°C となった。一般的な LIF 法では最大でも-1.5%/°C であり、本手法は非常に高い感度を示したといえる。なお、ここではルテニウム錯体とクマリンを混合して作成した機能性粒子を用いた。

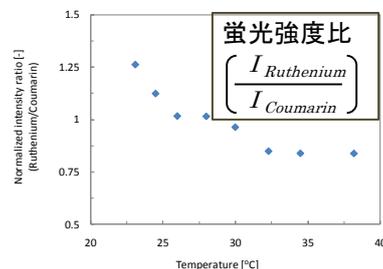


Fig.19 Intensity ratio change by temperature

励起光強度のムラや染料濃度に依存せず定量的にスカラー量を計測できる手法には、二色蛍光法他、寿命法がある。②⑤は寿命法に基づく手法である。ここでは②について実験を行った。Fig.20 にユーロピウム錯体を用いて合成した粒子の燐光強度を高速で捉えた画像を示した。これらの画像の輝度比から燐光の寿命を求め、スカラー量を算出することが可能である。Fig.21 には計算した燐光寿命と温度の関係をまとめた。焦点位置では 10~35°C で-0.4%/°C の感度を示している。焦点位置からズレた場合、高温条件で感度が無くなっている。これは温度上昇による輝度低下と、デフォーカス効果によって画像が暗くなったことの効果により、粒子像の S/N 比が大きく低下したためである。焦点位置からズレた位置でも低温側で十分な輝度を持つ場合は寿命の温度依存性を確認できた。

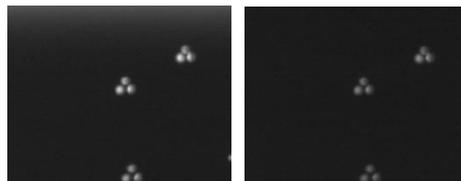


Fig.20 Decaying luminescent intensity

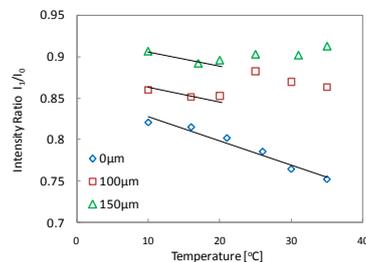


Fig.21 Temperature effect on the lifetime

以上のことから①②③⑤の手法でスカラー量計測を実現できる可能性があることが分かった。ピンホール設置による輝度低下は分光や寿命計測によるスカラー量計測に大き

な障害となる可能性についても否定できない。また、ピンホールを通過する光量が場所に依存する傾向が見られた。これは①③の方法に大きな影響を与える。そのため、ピンホールを併用する場合は二色法よりも寿命を利用するほうが良いと考えられる。

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 2 件)

- ① Erkan Nejdte, Shinohara Kyosuke, Okamoto Koji, (他 2 名), Measurement of Two Overlapped Velocity Vector Fields in Microfluidic Devices Using Time-Resolved PIV, Journal of Visualization, 査読有, Vol. 11, No. 1, 2008, pp. 33-34
- ② Erkan Nejdte, Shinohara Kyosuke, Someya Satoshi, Okamoto Koji, Three-component velocity measurement in microscale flows using time-resolved PIV, 査読有, Measurement Science and Technology, Vol. 19, 2008, No. 057003

[学会発表] (計 1 件)

- ① Erkan Nejdte, Okamoto Koji, Someya Satoshi, Three component velocity extraction method using TR-PIV in a microtube, 60th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (The American Physical Society) (APS-DFD), Paper No. GA00002, Salt Lake City, Utah, U. S. A., 2007. 11. 18-20

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 孝司 (OKAMOTO KOJI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号 : 80204030

(2) 研究分担者

染矢 聡 (SOMEYA SATOSHI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号 : 00357336

(3) 研究協力者

金 炅天 (Kim KyungChun)
釜山国立大学・機械工学部・教授
研究者番号 : なし