

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289039

研究課題名(和文)液膜内流れの3次元4成分温度速度同時計測法開発による濃度温度差表面張力対流の解明

研究課題名(英文) Simultaneous temperature and velocity visualization of a concentration or temperature driven convection

研究代表者

染矢 聡 (SOMEYA, SATOSHI)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・省エネルギー研究部門・研究グループ長

研究者番号：00357336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：熱の有効利用の観点から近年、マイクロチャネルや液膜など1mm以下の小さな熱流動システムが増えている。これらの研究では流れの可視化が多用される。ここでは微小スケール流れの可視化に適用可能で、市販の安価なLEDを利用できる高出力パルスLED光源を開発した。また、温度が変化する微小スケール流れとして、T字型合流部を有するマイクロミキサーを開発した。ペルチェモジュールによる加熱冷却に起因する粘度勾配を利用して、微細加工等の必要なく流れを合流部で成層させ、旋回しながら流出する新しいミキサーである。ペルチェの通電時、停止時にはこれまでに報告例のない電気浸透力による急激な速度変化がみられた。

研究成果の概要(英文)：For the efficient utilization of thermal energy, small scale thermal systems such as a micro channel heat exchanger have been focused recently. A flow visualization is useful for researches on the micro-scale fluidics. We developed a high-power pulsed LED system with commercial LEDs which can be applied to the micro scale flow visualization without unexpected thermal effects on a flow field. We developed a T-shaped micromixer by using two Peltier modules. Vertical temperature (viscosity) gradients might be formed by Peltier modules. The flow stratification was generated in the junction resulting in a strong spiral mixing flow in the downstream. A velocity change had occurred instantly after the Peltier modules were turned on or off. It was conceivably caused by an electroosmotic flow due to the Peltier modules. These phenomena, the stratified and spiral flow in a micromixer and the sudden velocity change due to the electroosmotic flow, were firstly found in this study.

研究分野：流体力学，熱工学

キーワード：温度 可視化 LED 速度 熱工学 流体力学

1. 研究開始当初の背景

エネルギー機器の総合効率を高めるため、熱の有効利用が重要であり、車の空調用に吸収式冷凍機が検討されている。吸収式冷凍機では吸収剤水溶液中の冷媒の潜熱を利用する際、薄い液膜中で溶液の濃度と温度が局所的に大きく変化する。ここでは吸収器内の液膜流れ、特に溶液へのガス吸収時の流れの理解が小型高出力化にとって重要である。液膜部では吸収による作動媒体の濃度差、界面活性剤の濃度分布、吸収熱などによるマランゴニ対流が生じ、この流れが吸収を促進すると考えられる。この例に限らず、近年はマイクロチャネル熱交換器など、0.1~1mm程度のサブミリスケールの流れを有する機器が多くみられる。

サブミリスケール以下のシステムでは、流体の構造物と接する面積が大きく、流路構造物側の熱容量が微量の流体より大きいことから、微小スケール熱流動システムでは、これまで流体の温度を一様に保ちやすいことをアドバンテージの一つとしてきた。そのためレイノルズ数の小さいサブミリスケールの流れでは熱駆動のマイクロミキサーが存在しないなど、表面・界面張力駆動のシステムに比べ、熱対流に関する研究やアプリケーションが必ずしも多くない。しかし温度は界面張力や流体粘度に大きく影響する因子であり、微小スケール流れでは重要なパラメータである。前述の液膜流れにおいても温度は流れに強く影響する。

従来から微小スケール流れの3次元速度分布を測るマイクロPTV(粒子追跡法)、PIVの研究が行われているなど、速度分布計測手法は発達している。一方、微小スケール流れの温度計測手法は、水溶液に溶解した蛍光染料を用いるレーザ誘起蛍光法(LIF)や偏光法はあるが、これらはpHや溶媒成分の影響を受けるため吸収液など濃度変化を伴う流れには適用が難しい。水溶液以外の液体にも適用困難である。

2. 研究の目的

本研究では機能性中空マイクロカプセルを利用し、濃度変化を伴う作動流体に適用可能な、微小スケール流れの温度と速度を計測する手法を開発する。ここで、レーザ等を用いると、マイクロチャネル内の少量の流体に大きな熱を与えて場を乱すことが危惧されるため、低入熱高輝度で出力の安定した高出力パルス光源を開発する。また、温度+速度3成分の3次元4成分を同時計測する手法について、強度法、二色法や寿命法による温度計測と断面スキャン法及びデフォーカス法等による3次元速度計測を組合せた手法について検討する。

更に、温度に起因する粘度差が流れに大きく影響する、熱駆動のマイクロミキサーを開発し、ミキサー内の流れの温度、速度について評価する。

3. 研究の方法

(1)高出力パルスLED/LD光源の開発と発光特性評価: 1WクラスのLEDに極短時間のみ大電流を通電するシステムを作成する。通常は300mA程の電流で動作させるLEDに、1μ秒の極短い時間のみ10Aほどの大電流を流し、低発熱で高出力を得る強力なパルス光源を開発する。発光強度の時間的な安定性や応答速度など基本性能について、フォトダイオード等を用いて評価する。

(2)三次元温度速度同時計測法開発: 断面スライス法による温度速度同時計測法を試行する。ピエゾアクチュエータで対物レンズ位置を視線方向に移動させながら、二次元的な温度速度同時計測を行う。また、ピンホールがない状態でのピンボケ効果を利用した三次元三成分の速度計測法、ピンホールを用いたデフォーカス法についてもそれぞれ温度計測への適用可否を考慮しながら試行する。

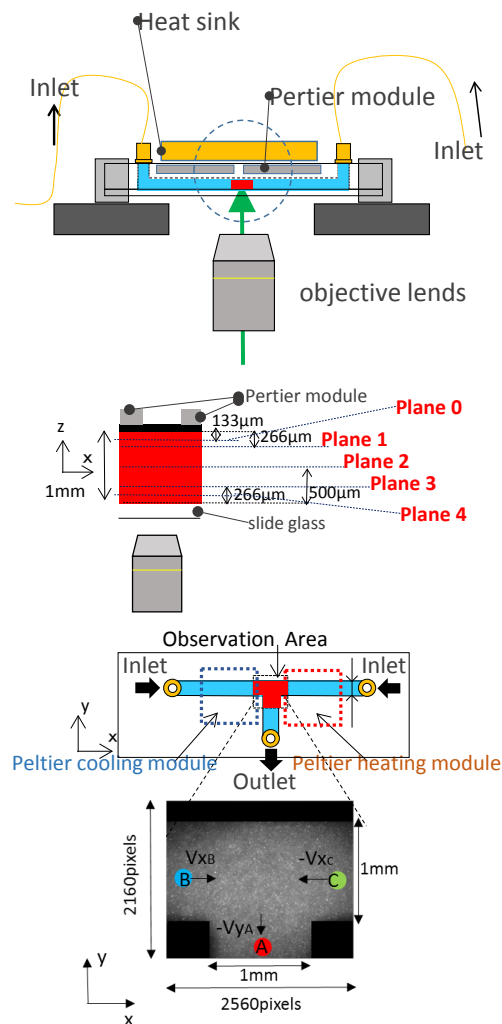


Fig.1 Experimental apparatus

(3)温度濃度などスカラー量が変化する流れの計測と現象解明: 実験では、Fig.1に示すT字合流部をもつマイクロミキサーの流入口

二箇所それぞれペルチェモジュール(定格20W)を設置したチャンネルを用いた。ペルチェモジュールの幅は20mmであり、合流部から1mm離れた位置に設置した。ペルチェモジュールは一方を加熱、一方を冷却に利用する。チャンネルの冷却に利用するペルチェモジュールの放熱面側については、銅製小型熱交換器を設置し、恒温水(20°C)を循環させて一定温度に保った。印加電圧を4~8Vの間で系統立てて変化させた。

チャンネルはアルマイト処理を施したアルミ製で、観察面には硼珪酸ガラス製スライドガラスを設置した。作動流体は精製水とし、二連のシリンジポンプで一定流量の水をチャンネルに供給した。流路幅と深さは系統立てて変化させ、その影響を調べた。以下ではそれぞれ1.0mmとした場合について記載する。

合流部を中心として幅約2 x 1.6 mm (2560 pixel x 2160pixel)の面を倒立顕微鏡で観察し、対物レンズ(x10倍)の高さを変化させることで観察面の深さ方向の位置を制御した。

実験では、1回の計測につき60秒間とし、計測開始10秒の時点でペルチェモジュールに通電を行い、50秒の時点で遮断した。シリンジポンプの流量流速を、1.5, 3, 4.5, 6 μ l/min (平均流入流速25, 50, 75, 100 μ m/sec)の4条件で変化させ、初期温度22°Cとした。PIVの粒子移動量及び温度計測用の蛍光染料強度計測はそれぞれ10Hzでサンプリングした。なお、ここでは速度計測にPIV、温度の評価にはLIFを用いた。蛍光染料はRhodaminB (0.5 $\times 10^{-4}$ mol/l)を用いた。

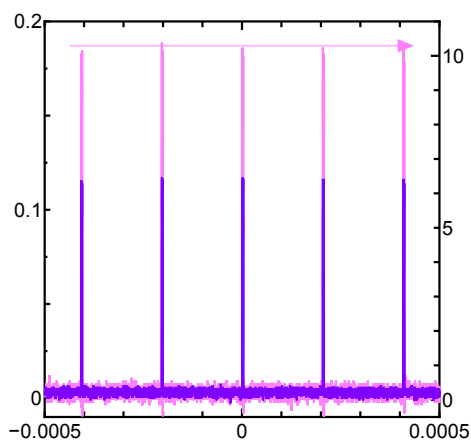


Fig.2 Time response of a developed power supply and LED

4. 研究成果

(1)高出力パルス LED/LD 光源の開発と発光特性評価: 1WクラスのLEDに極短時間のみ大電流を通電するシステムを作成した。通常は300mA程の電流で動作させるLEDに、1 μ 秒の極短い時間のみ10Aほどの大電流を流し、かつ、これをパルス間隔を1 μ 秒あけ、もう一度1 μ 秒の間大電流を流すダブルパルス駆動可能な電源と光源を作成した。このダブルパルスモードでの繰り返し周波数は、

10kHzまで可能であり、その場合においても定格の1/50の熱量しか流れに与えることがない。この低発熱で高出力を得る強力なパルス光源を開発し、発光強度の時間的な安定性や応答速度など基本性能について、フォトダイオード等を用いて評価した (Fig.2)。

(2) 三次元温度速度同時計測法開発: 複数の蛍光・燐光分子を殻に内包する機能性中空マイクロカプセル(Fig.3)を作成し、これを用いた流れの計測法の開発を行った。

ピエゾアクチュエータで対物レンズ位置を視線方向に移動させながら、二次元的な温度速度同時計測を行い、断面スライス法について検討した。また、デフォーカス法や寿命法、二色法についても簡易試験を実施した。その結果、デフォーカス法を用いる場合、ピンホールの無い場合も、ピンホールを用いる場合も、いずれの場合もデフォーカス法では、検出可能な蛍光強度が非常に小さくなり、画像中のノイズが大きく、信号強度の変動幅が大きな画像しか取得できなかった。そのためデフォーカス画像を用いた寿命法や二色法については、流体実験への適用が困難であった。単波長の強度法を用い、かつ、デフォーカスさせない場合は、比較的S/N比の高い画像を取得できた。また、断面スライス法については、低速な流れには対応できる可能性があるものの、後述する本研究で対象とした流れ場は、ペルチェモジュールへの通電の際に大きな速度で流れが逆流するなど速度変動が大きく、対物レンズ用スキャナの対応可能な速度では不十分であった。そのため以下では発見した特長的な流れの現象解明に焦点をあて、三次元計測については深さ方向に観察断面を変化させながら、断面別に温度や速度を計測した。

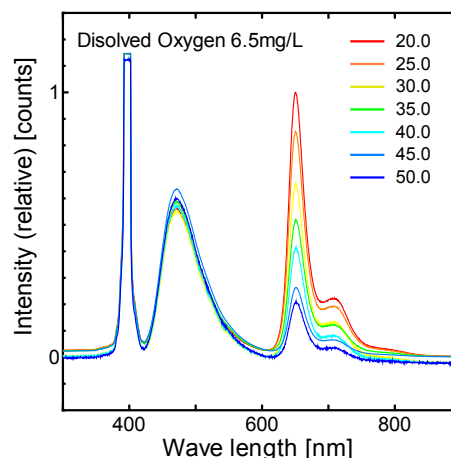


Fig.3 Emission spectra of temperature sensitive particles at 20 ~ 50 degrees.

(3) 温度濃度などスカラー量が変化する流れの計測と現象解明: Fig.4はFig.1下図の点A,B,Cにおける速度(-Vya),(Vxb),(-Vxc)を解析した結果を示している。流量流速は3 μ l/min (50 μ m/s)深さ方向に中央の断面

(Plane2)で、ペルチェモジュールへの印加電圧は加熱冷却とも 6V である。平均流速から算出した点 B,C におけるレイノルズ数は 0.08, A では 0.16 である。図からペルチェモジュールに通電した瞬間及び、停止した瞬間に、T 字型チャンネル全域で大きな速度変動が生じていることがわかる。通電時には B, C のいずれの点においても瞬時に速度がゼロあるいは逆流する現象が見られ、ペルチェ停止時には、それとほぼ同じ変位で瞬間的に流れが加速する現象が見られた。合流後の点 A では点 B,C の速度変動の重ね合わさった変化が見られた。

この現象の発生は流速条件には依存せず、いずれの流速条件でもほぼ同程度の速度変動が見られた。また、ペルチェへの印加電圧が大きいほど速度の変化が大きいこと、流路の深さ方向 5 つの断面で速度変動がほぼ同じであることを複数回の実験を行い確認した。

また、この現象では、ペルチェ通電時の大きな速度変動の後、ペルチェへの印加電圧が定常状態である際に、深さ方向中央の断面以外では 2 つの流入口からの水平方向流入流速が異なる値となった。流量はポンプで制御しており、断面を通じての平均的な速度は同じであるため、各流入流路内の速度分布が異なることを意味する。ペルチェモジュールで加熱される側(点 C 側)では流路の鉛直上側で速度が速く、冷却されながら流入する流れ(点 B 側)は流路鉛直下側のガラスおよび対物レンズに近い側の断面で水平方向の速度が速かった。このように、深さ方向の各断面で異なる速度分布となる結果、T 字合流部では強い剪断が生じ、合流部では加熱されて流入した流れが、冷却されて流入した流れの上に成層しつつ、下流に向けて両流入流れが旋回しながら流出する現象が見られた。

ここで、平均流量流速は $4.5\mu\text{l}/\text{min}$ ($75\mu\text{m}/\text{s}$) の場合の、ペルチェ通電時、停止時の速度、温度(蛍光染料の相対輝度)を Fig.5, Fig.6 にまとめた。これらの図から、ペルチェ通電開始直後に急激に速度が減少し、温度が上がる(蛍光が暗くなる)ことが分かる。図に示す合流部の位置では、冷却側のペルチェによる冷却に比べて加熱側のペルチェの影響が大きく、6V 印加する場合は全体として温度が上がり、冷却ペルチェ側の液温はやや温度上昇幅が小さかった。Fig.5 における温度変化はおよそ 10.5 秒程度から始まっており、急激な速度変化のほうが先に生じていることがわかる。つまり、この速度変化は温度や温度によって変化した粘度に起因するものではないと考えられる。Fig.6 に示したペルチェ停止時の応答からも、ペルチェを停止した瞬間に速度上昇が生じ、その後、送れて相対輝度の上昇(温度低下)が生じたことが分かる。

これらはペルチェモジュールに電圧を印加すると同時に、ペルチェモジュールの左右に電位差が生じ、アルマイトで絶縁されたチャ

ネル内流体に電気浸透力が作用したものと考えている。

また、Fig.5, Fig.6 の温度変化とそれに続いて生じた T 字合流部での成層と流出流れの旋回は各ペルチェモジュールの下部の流体に、鉛直方向の温度勾配が生じ、これに起因する粘度勾配によって鉛直方向の速度分布に差異が生じたものと考えている。加熱側のペルチェモジュール下部では、ペルチェに近い側が高温、低粘度、高速となり、冷却側ではペルチェに近い側が低温、高粘度、低速となり、結果的に成層と旋回を発生せしめたものと考えている。電気浸透力による急激な速度変動は、成層・旋回流れの形成に必須ではないが、ペルチェ通電時に流速がほぼゼロになることが、流路深さ方向の温度分布形成やそれによる粘度勾配流れの形成と旋回流の発達を助長していると考えられる。

この二つの現象は過去に報告例が無く、また、安価で外付け可能なペルチェモジュールを用いて、熱的な駆動力によって、流れのスイッチングを実現したり、流路の微細構造等を使わなくても流れを激しく混合させることが出来る点で、マイクロミキサーとしての活用が期待できる。今後、この現象の解明に更に取り組むことが重要である。

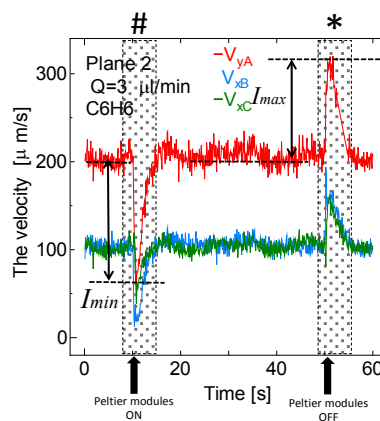


Fig.4 Velocities at points A, B and C shown in the figure 1 (at a center plane)

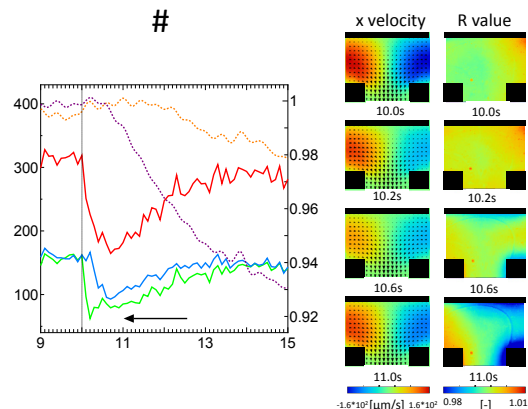


Fig.5 Velocity and normalized fluorescence intensity at turning the Peltier modules on

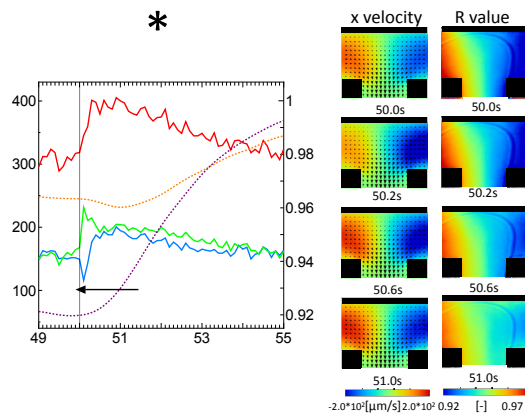


Fig.6 Velocity and normalized fluorescence intensity at turning the Peltier modules off

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 5 件)

① Ouchi Y., Someya S., Munakata T., Ito H., Visualization of the phase change behavior of sodium acetate trihydrate for latent heat storage, Applied Thermal Engineering, Vol.91, 2015, 547-555

[学会発表] (計 32 件)

① Someya S., Takemura F. and Munakata T., Fabrication of temperature sensitive hollow micro capsule for the flow visualization, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, G29.00006, Nov. 23-25(24), 2014, San Francisco, U.S.A.

② Ouchi Y., Someya S. and Munakata T., Natural convection during a phase change of sodium acetate trihydrate, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, A19.00005, Nov. 23-25(23), 2014, San Francisco, U.S.A.

③ Ishii K., Someya S. and Munakata T., Combined measurements of temperature and velocity in a microscopic flow, The 25th International Symposium on Transport Phenomena, Paper No. 109, Nov. 5-7(6), 2014, Krabi, Thailand

[その他]

ホームページ等

<http://lcs.k.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

染矢 聡 (SOMEYA, Satoshi)

産業技術総合研究所・省エネルギー研究部門・研究グループ長

研究者番号：00357336