

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：55101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05814

研究課題名(和文)テイラー・ディーン流れカオス混合の速度・濃度同時計測による混合促進メカニズム解明

研究課題名(英文) Investigation of Chaotic Mixing Mechanism of Taylor-Dean Flow Using Combined PIV/LIF Measurement System

研究代表者

早水 庸隆 (HAYAMIZU, Yasutaka)

米子工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：90413822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者らは、曲がり流路内流であるディーン流れと同軸回転二重円筒内流であるテイラー流れを組み合わせたテイラー・ディーン流れを利用したカオス混合によって混合の促進を図るマイクロミキサを開発している。本研究では、12種類のマイクロミキサモデル機の可視化実験による時系列PIV/LIF同時計測とCFDによる数値解析により、テイラー・ディーン流れの流れ場と混合場の時間発展を調査した。そして、曲がり流路断面のアスペクト比および壁面の移動が混合に及ぼす影響を明らかにし、テイラー・ディーン流れによる混合促進メカニズムを検討した。

研究成果の概要(英文)：Chaotic mixing in twelve types of curved-rectangular channel flows has been studied experimentally and numerically. The wall of channel rotates around the center of curvature and a pressure gradient is imposed in the direction toward the exit of the channel. This flow is a kind of Taylor-Dean flow. We have investigated the effects of four different types of moving walls: inner and top walls (B.C.1); an inner wall (B.C.2); a top wall (B.C.3); and inner, top, and bottom walls (B.C.4) on chaotic mixing. The non-dimensional parameters concerned are the Dean number De and the Taylor number Tr . The secondary flow is measured using PIV and LIF methods to examine flow characteristics. Also we performed three-dimensional numerical simulations for the exactly same configuration as the experimental system to study the mechanism of chaotic mixing. It is found that good mixing process is obtained in the case of $De < 0.1Tr$. This tendency appears more strongly if the aspect ratio is large and B.C.1.

研究分野：流体工学

キーワード：テイラー・ディーン流れ カオス混合 二次流れ マイクロミキサ PIV LIF

1. 研究開始当初の背景

近年、化学やバイオの分野において μ TAS (Micro Total Analysis Systems) と呼ばれる超小型・化学分析装置の開発が注目されている。この装置はさまざまなマイクロ流体デバイスやセンサなどからなり、混合、反応、分離や抽出などの一連の操作を行う。しかし、流路はマイクロサイズであるため、その流れは低レイノルズ数の層流となり乱流による物理的混合が期待できない。そのため、低レイノルズ数流れにおいて効率よく混合促進可能なマイクロミキサが必要とされており、これまでに、様々な方法のマイクロミキサが提案されている。

例えば、混合部の流路形状により二次流れを生じさせる方法は、比較的シンプルな形状のマイクロミキサとなるため、この方法のマイクロミキサの研究は μ TAS 実用化において重要である。Stroock ら [Science, 295, 647-651, 2002] や Sato ら [Sens. Actuators A, 119, 365-371, 2005] は、流路壁面に溝をつけることにより流路内に二次流れを発生させるマイクロミキサを報告した。これらの方法は、比較的レイノルズ数が高い場合に有効であることが示されている。そのため、低レイノルズ数流れでの混合には二次流れの利用に工夫が必要であり、研究代表者らは二次流れのカオス化が有効であると着想に至り、テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサを研究している。

テイラー・ディーン流れとは、流路軸方向に圧力勾配のある正方形断面あるいは矩形断面の曲がり流路において、内壁およびそれに垂直な壁面が回転し、外壁のみが静止している場合の流れである。テイラー・ディーン流れの流動パラメータは圧力勾配と移動壁面の角速度であり、それらの関係によって二次流れのカオス化が可能である。

また、層流の混合には、与えられた速度場を移動する流体粒子の振る舞いをカオス化するラグランジアン・カオスを利用したカオス混合が用いられる。このラグランジアン・カオスはカオスの解が初期値に対する敏感な依存性を示すことを利用し、混合する流体境界面のすみやかな引き伸ばし、折り畳みにより短時間で混合を達成するものである [Funakoshi, Fluid Dyn. Res., 40, 1-33, 2008]。そして、ラグランジアン・カオスを利用したカオス混合によるマイクロミキサの研究がいくつか報告されている。Niu ら [J. Micromech. Microeng., 13, 454-462, 2003] や Tabeling ら [Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 362, 987-1000, 2004] は流入する流体に周期的な攪乱を与えるラグランジアン・カオスを利用したマイクロミキサを報告し、二次流れを利用した方法に比べて、短い流路距離で混合できることを示

している。しかし、流入させる流量と攪乱の関係や装置が比較的複雑となるため、実機実用化においては、装置構成や運転条件をシンプルにさせる必要がある。一方、テイラー・ディーン流れの場合には、特別に攪乱を与える必要はなく、流動パラメータである圧力勾配と移動壁面の角速度の関係によってラグランジアン・カオスを利用したカオス混合も可能となる。ラグランジアン・カオスを利用したカオス混合だけでは流体全体を完全に均一にすることはできず、不均一性を残してしまう。そのため、研究代表者らはテイラー・ディーン流れとすることで、二次流れとラグランジアン・カオスを利用したカオス混合により、混合率の高いマイクロミキサの開発を目指している。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロミキサモデル機の可視化実験による時系列 PIV (Particle Image Velocimetry) / LIF (Laser Induced Fluorescence) 同時計測と CFD (Computational Fluid Dynamics) による数値解析により、テイラー・ディーン流れの流れ場と混合場の時間発展を調査した。そして、高い混合率が得られる条件での流れ場と混合場の関係を調べることで、テイラー・ディーン流れによるカオス混合の混合促進メカニズムの解明を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、以下に示す項目で研究を実施した。

(1) テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサモデル機の製作

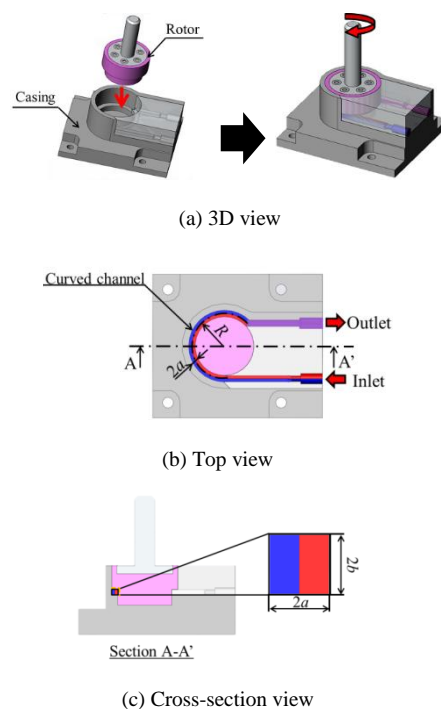


図1 テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサ

図1に本研究で製作したマイクロミキサモデル機を示す。図のようにケーシングとロータを組み合わせることで曲がり流路が形成され、ロータの回転によりテイラー流れを、圧力勾配と流路の曲がりによってディーン流れを発生させる。ここで、 $2a$ は流路幅[m]、 $2b$ は流路高さ[m]、 R は流路の曲率半径[m]、 $\delta=a/R$ は流路の無次元曲率、 $\gamma=b/a$ は流路断面のアスペクト比、 l は流路全長[m]である。ロータの回転による壁面の移動は、内壁面と上壁面の場合を B.C.1、内壁面の場合を B.C.2、上壁面の場合を B.C.3、内壁面、上壁面および下壁面の場合を B.C.4 として、それぞれの条件の結果を比較することで移動壁面の影響を調査した。

また、本研究では流路を流れる流量 Q [m³/s]、ロータの角速度 Ω [rad/s]を測定し、レイノルズ数 Re 、テイラー数 Tr を求めた。ここで、 d_h を水力直径[m]、 q を流路内平均流速[m/s]、 ν を動粘度[m²/s]とすると、これらの無次元数はそれぞれ以下の式で表される。

$$Re = \frac{qd_h}{\nu} \quad (1)$$

$$Tr = \frac{2\sqrt{2}\delta\Omega a^2}{\delta\nu} \quad (2)$$

また、曲がり流路の δ に対する流量の違いを考慮するため、以下の式で表されるディーン数 De を用いた。

$$De = Re\sqrt{\delta} \quad (3)$$

本研究では、高い混合率が得られる条件である $De \leq 0.1Tr$ における混合促進メカニズムを調査した。

(2) テイラー・ディーン流れの時系列 PIV / LIF 同時計測システムの製作

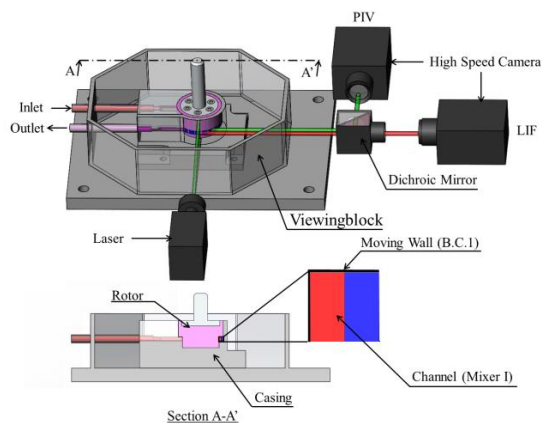


図2 テイラー・ディーン流れの時系列 PIV / LIF 同時計測システム

テイラー・ディーン流れの流れ場と混合場の時間発展が同時に調査できる時系列 PIV / LIF 同時計測システムを製作した。その概略図を図2に示す。

(3) テイラー・ディーン流れの時系列 PIV / LIF 同時計測の実施

テイラー・ディーン流れの時系列 PIV / LIF 同時計測を実施した。二次流れを計測する場合は図2のように、曲がり流路入口から各流路断面を波長 532 nm の CW レーザシート (LaVision 社 : CW-532-3W) で照らし、波長 570 nm 以上の光を透過するダイクロイックミラーを介して流路断面をハイスピードカメラ (LaVision 社 : HSS4G) 2 台を使用し同時撮影した。PIV および LIF には Davis8.1.6 (LaVision 社) を用い、PIV 用のトレーサには比重 1.1 の中空ガラス粒子 (粒子径 9~13μm) を用いた。

PIV を行う場合は、ダイクロイックミラーが反射した波長 532 nm のガラス粒子のみの像を取得し速度分布を算出した。LIF を行う場合は、ダイクロイックミラーが透過した波長 580 nm のローダミン B の蛍光のみを取得し濃度分布を算出した。

また主流を計測する場合は、計測面の各流路高さにおいて、二次流れと同様に LIF および PIV 計測を行った。

(4) CFD 結果との比較

PIV / LIF 同時計測結果と CFD 解析結果の比較により、混合促進メカニズムの解明を目指した。表1~4に PIV / LIF 同時計測結果と CFD 結果の比較の一例を示す。

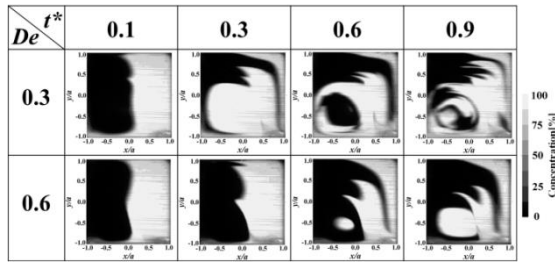
表1は B.C.1 の Tr を 0 から 3 に変化させた場合の曲り流路入口から 180° ($\theta = 180^\circ$) 断面の LIF と CFD 結果である。界面の形状の類似や、無次元時間 $t^* = tq/l$ (t : 経過時間[s]) の経過にともなう界面の変形速度や変形範囲が De によって異なってくる傾向の一致も確認することができる。

表1と同条件における PIV 結果の無次元二次流れ速度のベクトル線図を表2に、PIV および CFD 結果による時間平均無次元軸流速の等値線図を表3に示す。これらを見ると、表2に示す二次流れの PIV 結果において、外壁面から内壁面へ向かう二次流れが発生している範囲では、表3において逆流が発生していることが確認できる。そして、 $De = 0.3$ の方が逆流の速度と発生範囲が大きいことがわかる。

以上の結果から、混合過程における混合促進には逆流の速度と発生範囲の大きさが関係しており、逆流による二次流れと主流による二次流れが組み合わせられることで混合は促進されると考えられる。

表1 B.C.1の $\theta = 180^\circ$ における2液の混合過程

(a) LIF



(b) CFD

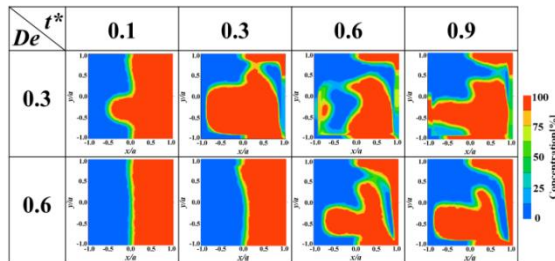


表2 表1の無次元二次流れ速度

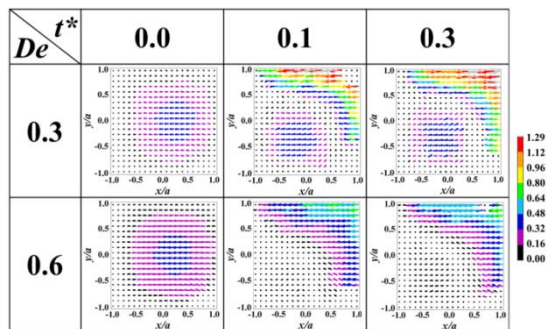


表3 表1の時間平均無次元軸流速度

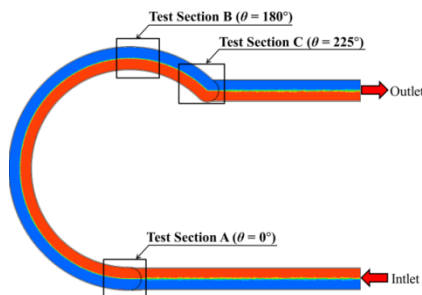
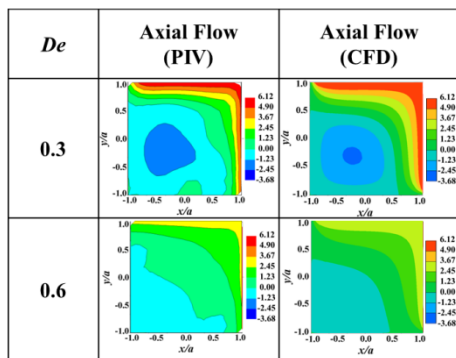


図3 流路中心高さ ($y/a = 0$) における測定面

次に、図3に示す測定面における混合過程の比較を行う。流路中心高さである $y/a = 0$ における測定面のLIFおよびCFDによる混合過程を表4に示す。

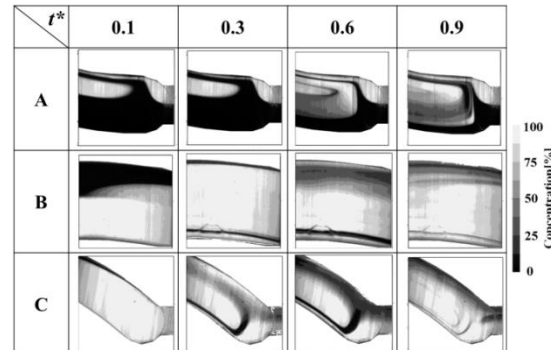
$t^* = 0.1$ では、流路出口付近 (C) において内壁面側の濃度 100% の液体 (LIF: 白色, CFD: 赤色) が外壁面側へ折り返して曲がり流路入口へ逆流している。この逆流した濃度 100% の液体は、曲がり流路 180° 付近 (B) においても、入口へ向かい逆流しているのが確認できる。

また、曲がり流路入口 (A) では、外壁面側の濃度 0% の液体 (LIF: 黒色, CFD: 青色) が内壁面側へ流れ込み、内壁面に引きずられて曲がり流路出口へ向かうのが確認できる。この内壁面に引きずられ出口へ向かう濃度 0% の液体は、曲がり流路 180° 付近 (B) においても、出口へ向かい流れているのが確認できる。この出口へ向かう濃度 0% の液体は、曲がり流路出口 (C) における $t^* = 0.3$ で、外壁面側へ折り返して曲がり流路入口へ逆流しているのが確認できる。 $t^* = 0.6$ 以降もこれらの流れを確認することができる。

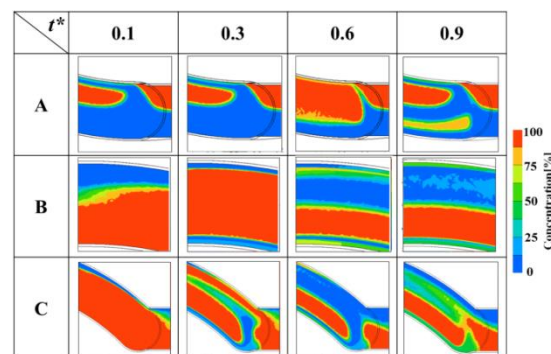
以上の結果から、曲がり流路出口からの逆流が循環流となることで混合は促進されると考えられる。

表4 B.C.1の $y/a = 0$ における混合過程

(a) LIF



(b) CFD



4. 研究成果

本研究で得られた成果を要約すると、以下の通りである。

- [1] テイラー・ディーン流れの時系列 PIV / LIF 同時計測システムを開発した。
- [2] 主流の逆流が発生し、その逆流による二次流れと主流による二次流れが組み合わせられることで混合は促進される。
- [3] 曲がり流路出口からの主流の逆流が循環流となることで混合は促進される。
- [4] 流路断面のアスペクト比が増加すると、逆流の速度と発生範囲も増加するため混合は促進される。
- [5] 流路断面の内壁面と上壁面を移動壁面とする場合 (B.C.1), 混合過程において 2 液界面の変形が複雑になり混合は促進される。

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 4 件)

- ① Anup Kumer Datta, Yasutaka Hayamizu, Toshinori Kouchi, Yasunori Nagata, Kyoji Yamamoto and Shinichiro Yanase, Numerical Study of Turbulent Helical Pipe Flow With Comparison to the Experimental Results, *Journal of Fluids Engineering*, 139 (9), 091204 (2017) (13pages). 査読有 [doi: 10.1115/1.4036477]
- ② Anup Kumer Datta, Shinichiro Yanase, Yasutaka Hayamizu, Toshinori Kouchi, Yasunori Nagata, and Kyoji Yamamoto, Effect of Torsion on the Friction Factor of Helical Pipe Flow, *Journal of the Physical Society of Japan*, 86 (6), 064403 (2017) (7pages). 査読有 [doi: 10.7566/JPSJ.86.064403]
- ③ Toshihiko KAWABE, Yasutaka HAYAMIZU, Shinichiro YANASE, Takeshi GONDA, Shinichi MORITA, Shigeru OHTSUKA and Kyoji YAMAMOTO, A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow: Rotation Effect of Channel Walls on the Mixing, *Advanced Experimental Mechanics*, 1, 47-51 (2016). 査読有 [doi: 10.11395/aem.1.0_47]
- ④ Yasutaka HAYAMIZU, Toshihiko KAWABE, Shinichiro YANASE, Takeshi GONDA, Shinichi MORITA, Shigeru OHTSUKA and Kyoji YAMAMOTO, A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow: Effects of Aspect Ratio and Inflow Condition on the Mixing, *Open Journal of Fluid Dynamics*, 5 (3),

256-264 (2015). 査読有

[doi: 10.4236/ojfd.2015.53027]

[学会発表] (計 20 件)

- ① 濱田竜生, 早水庸隆, 川邊俊彦, 権田岳, 森田慎一, 大塚茂, 柳瀬眞一郎, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの研究 (混合過程に及ぼすアスペクト比と移動壁面の影響), 日本機械学会中国四国支部第 56 期総会・講演会, 徳島, 2018 年 3 月.
- ② Tatsuki HAMADA, Yasutaka HAYAMIZU, Shinichiro YANASE, Toshihiko KAWABE, Takeshi GONDA, Shinichi MORITA, Shigeru OHTSUKA and Kyoji YAMAMOTO, A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow: Effect of Aspect Ratio on the Mixing Process, *The 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics*, Kanazawa, Japan, Nov. 2017.
- ③ 濱田竜生, 早水庸隆, 柳瀬眞一郎, 川邊俊彦, 権田岳, 森田慎一, 大塚茂, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの研究 (混合過程に及ぼすアスペクト比の影響), 日本流体力学会年会 2017, 東京, 2017 年 8 月.
- ④ Anup Kumer DATTA, Yasutaka HAYAMIZU, Toshinori KOUCHI, Yasunori NAGATA, Kyoji YAMAMOTO and Shinichiro YANASE, Influence of torsion on the friction factor of helical pipe flow, *The 13th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows*, Okinawa, Japan, May 2017.
- ⑤ 細田駿介, 早水庸隆, 川邊俊彦, 権田岳, 森田慎一, 大塚茂, 柳瀬眞一郎, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの研究 (混合過程に及ぼす移動壁面の効果), 日本機械学会中国四国支部第 55 期総会・講演会, 広島, 2017 年 3 月.
- ⑥ 細田駿介, 早水庸隆, 権田岳, 大塚茂, 柳瀬眞一郎, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサ (混合に及ぼす流路壁面の回転効果), 第 18 回日本流体力学会中四国・九州支部総会・講演会, 岡山, 2016 年 11 月.
- ⑦ 上根直也, 早水庸隆, 柳瀬眞一郎, 権田岳, 森田慎一, 大塚茂, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの実験的研究 (流路の曲率の効果), 日本機械学会第 94 期流体工部門講演会, 宇部, 2016 年 11 月.
- ⑧ 細田駿介, 早水庸隆, 柳瀬眞一郎, 権田岳, 森田慎一, 大塚茂, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの研究 (混合に及ぼす流路壁面の回転効果), 日本機械学会第 94 期流体工部門講演会, 宇部, 2016 年 11 月.

- ⑨ 細田駿介, 早水庸隆, 柳瀬眞一郎, 川邊俊彦, 権田岳, 森田慎一, 大塚茂, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの研究(流路のアスペクト比の効果), 日本流体力学会年会 2016, 名古屋, 2016年9月.
- ⑩ Datta Anup Kumer, 早水庸隆, 河内俊憲, 永田靖典, 山本恭二, 柳瀬眞一郎, ヘリカル管内乱流の数値計算, 日本流体力学会年会 2016, 名古屋, 2016年9月.
- ⑪ Yasutaka HAYAMIZU, Toshihiko KAWABE, Shinichiro YANASE, Takeshi GONDA, Shinichi MORITA, Shigeru OHTSUKA and Kyoji YAMAMOTO, A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow: Effects of Aspect Ratio and Moving Wall on the Mixing, *The 6th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science 2016*, Guilin, China, Sept. 2016.
- ⑫ Shunsuke HOSODA, Yasutaka HAYAMIZU, Takeshi GONDA and Shinichiro YANASE, A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow: Effect of Secondary Flow on the Mixing Process, *The 11th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics*, Higashi-Osaka, Japan, Sept. 2016.
- ⑬ Anup Kumer Datta, Yasutaka Hayamizu, Toshinori Kouchi, Yasunori Nagata, Kyoji Yamamoto, Shinichiro Yanase, Numerical and experimental study of turbulent helical pipe flows, *International Symposium on Near-Wall Flows: Transition and Turbulence*, Kyoto, Japan, June 2016.
- ⑭ 川邊俊彦, 早水庸隆, 柳瀬眞一郎, 権田岳, 森田慎一, 大塚茂, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの数値的研究(カオス混合の可視化), 日本機械学会中国四国支部第54期総会・講演会, 松山, 2016年3月.
- ⑮ 細田駿介, 早水庸隆, 柳瀬眞一郎, 権田岳, 森田慎一, 大塚茂, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの実験的研究(混合過程に及ぼす二次流れの影響), 日本機械学会中国四国支部第54期総会・講演会, 松山, 2016年3月.
- ⑯ 名倉裕輝, 権田岳, 早水庸隆, 柳瀬眞一郎, 川邊俊彦, 大塚茂, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの粒子法解析(混合に及ぼす流路の回転効果), 日本機械学会中国四国支部第54期総会・講演会, 松山, 2016年3月.
- ⑰ 川邊俊彦, 早水庸隆, 柳瀬眞一郎, 権田岳, 森田慎一, 大塚茂, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの数値的研究(流路のアスペクト比の効果), 日本機械学会第93期流体工部門講演会, 東京, 2015年11月.
- ⑱ 細田駿介, 早水庸隆, 柳瀬眞一郎, 権田

岳, 森田慎一, 大塚茂, 山本恭二, テイラー・ディーン流れを利用したマイクロミキサの実験的研究(混合に及ぼす二次流れの影響), 日本機械学会第93期流体工部門講演会, 東京, 2015年11月.

- ⑲ Toshihiko KAWABE, Yasutaka HAYAMIZU, Shinichiro YANASE, Takeshi GONDA, Shinichi MORITA, Shigeru OHTSUKA and Kyoji YAMAMOTO, A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow: Rotation Effect of Channel on the Mixing, *The 10th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics*, Matsue, Japan, Nov. 2015.
- ⑳ Yasutaka HAYAMIZU, Toshihiko KAWABE, Shinichiro YANASE, Takeshi GONDA, Shinichi MORITA, Shigeru OHTSUKA and Kyoji YAMAMOTO, A Micromixer Using the Taylor-Dean Flow: Effects of Aspect Ratio and Inflow Condition on the Mixing, *The 12th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows*, Lercici, Italy, July 2015.

[図書] (計0件)

なし

[産業財産権]

なし

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早水庸隆 (HAYAMIZU, Yasutaka)

米子工業高等専門学校・その他部局等・
准教授

研究者番号: 90413822

(2) 研究分担者

柳瀬眞一郎 (YANASE, Shinichiro)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号: 20135958

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

山本恭二 (YAMAMOTO, Kyoji)

岡山大学・名誉教授