

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 7 月 27 日現在

機関番号：24405

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14450

研究課題名（和文）高分子流体系におけるテイラー渦流の異常輸送現象の解明と速度論構築

研究課題名（英文）Elucidation and kinetics construction of anomalous transport phenomena in Taylor vortex flow with polymeric fluids

研究代表者

増田 勇人（Masuda, Hayato）

大阪公立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：90781815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非平衡・不均一な場におけるテイラー渦流の熱・物質移動特性を検討した。円錐系テイラー渦流や温度分布を伴う円筒系テイラー渦流を対象とし、実験による流動観察、温度計測、および数値解析を行った。なお、流体には高分子流体を用いた。円錐系テイラー渦流において、Meridional flow による渦セルの上昇速度は高分子流体のレオロジー特性の影響を受けることがわかった。また、温度不均一場における円筒系テイラー渦流では、テイラー渦流と自然対流の相互作用によって多様な流動モードが観測され、テイラー渦流と自然対流が交互に出現するモードでは伝熱が促進された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プロセス強化技術の創出において、流体運動を介した熱・物質移動の促進が求められている。本研究では、非平衡・不均一な場において熱・物質移動が促進されることを実証した。特に、温度分布を伴う円筒系テイラー渦流において、安定したテイラー渦流が形成される領域よりも低レイノルズ数域の方が、平均ヌッセルト数が大きくなることがわかった。これはテイラー渦流と熱対流の相互作用によるものであるが、非平衡・不均場では低レイノルズ数、すなわち、機械的なエネルギー投入（ここでは内円筒の回転）を抑えた状態で熱・物質移動強化が可能であることを示した先進的な成果であり、省エネルギーに向けた新規技術への転換が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, heat and mass transfer characteristics of Taylor vortex flows in non-equilibrium and inhomogeneous fields were investigated. Experimental flow observation, temperature measurement, and numerical analysis were conducted for conical Taylor vortex flow and cylindrical Taylor vortex flow with temperature distribution. Polymeric fluid was used as the fluid. In the conical Taylor vortex flow, it was found that the upward velocity of vortex cells due to meridional flow was affected by the rheological properties of the polymeric fluid. In the cylindrical Taylor vortex flow under a non-uniform temperature field, various flow modes were observed due to the interaction between the Taylor vortex flow and natural convection, and heat transfer was enhanced in the mode in which the Taylor vortex flow and natural convection appeared alternately.

研究分野：化学工学，流体工学，伝熱工学

キーワード：熱・物質移動 テイラー渦流 異常輸送 非平衡 数値流体力学 非ニュートン流体 伝熱促進 熱対流

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

化学プラントをはじめとした様々な製造プロセスでは、流体流動を介した熱・物質移動が多く見られるが、これらの移動速度を強化することはプロセスの高効率化・高機能化に直結する。昨今、生体細胞やプラズマをはじめとした非平衡プロセスにおいて、熱・物質が高速に輸送される、異常輸送と呼ばれる現象が報告されている。現時点では安定した構造と様々な時空間スケールの揺らぎの非線形相互作用の効果と認識されており、カオスや複雑系といった非線形現象の一つといえる。これを工学的に解釈すれば、安定構造と揺らぎの相互作用を応用することで熱・物質の高速輸送が実現可能となり、革新的なプロセス創出が見えてくる。異常輸送という言葉が浸透する以前から、共軸二重回転円筒間に生じるテイラー渦流系において、何らかの摂動が加わった際に渦流の外周部を物質が高速で拡散する現象が観測されている(図1)。あるいは、申請者は温度不均一場におけるテイラー渦流系のある層流条件下で、熱・物質が急速に輸送される現象を発見した(図2)。これらの現象は、層流テイラー渦流のような熱力学的に安定した散逸構造に摂動を加えた時に異常輸送が発現することを示唆しており、まさしく安定構造と揺らぎの非線形相互作用によるものである。このような装置スケールで見られる異常輸送現象の詳細な機構が解明できれば、化学工学分野における異常輸送現象工学という新しい学問の枠組みの創出が期待できる。さらに高速熱・物質輸送によるプロセス強化技術の創出、医療・環境分野への展開も期待でき、工学的基礎研究としての学術的意義を有する。つまり、どのような物理的な背景のもと異常輸送が起こるのかをより幅広い条件で探査すれば、異常輸送現象工学の確立、そして新たなプロセス強化技術の創出が期待できる。

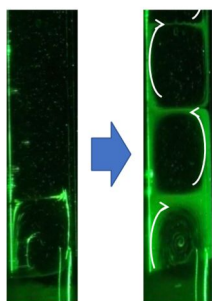


図1 テイラー渦流系における高速物質移動

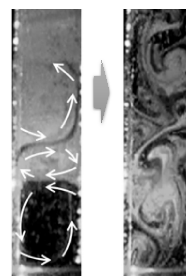


図2 温度不均一テイラー渦流系における高速物質移動

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、安定的な散逸構造の形成が容易なテイラー渦流をモデル流動場として、装置スケールにおける熱・物質の異常輸送現象の発現メカニズム解明および数理モデルの構築、そして積極的に異常輸送を応用した新規プロセスへの展開を目的とした。そのために、様々な時空間スケールの揺らぎによる非線形効果を検討する必要があるが、ここでは、装置形状に起因する遠心力分布、系外部から与える温度分布、および非ニュートン流体が有する複雑なレオロジー特性に着目した。

## 3. 研究の方法

本研究では主に2つの装置を対象とした。1つ目は通常円筒系テイラー渦流ではなく、加點式内円錐および固定式外円錐からなる円錐系テイラー渦流である(図3)。この流れ系では、円錐最上部に近づくほど遠心力が大きく、軸方向に遠心力分布が形成される。そのため Meridional Flow と呼ばれる、装置を循環する流れが基本流となり、この Meridional flow がテイラー渦セルにある種の揺らぎを与え、多様な流れモードが起こる。特に、渦セルが自発的に情報する upward motion がしばしば観測されるが、このときの熱・物質移動特性は未解明である。そこで本研究では、主に数値解析を用いて円錐系テイラー渦流における熱・物質移動特性を検討した。

2つ目の装置は通常円筒系テイラー渦流(内円筒のみ回転)であり、外部ジャケットを2分割してそれぞれに異なる温度の水を循環させることで、軸方向に温度分布を与えた。流動観察および温度計測データに基づく周波数特性評価などによって、熱・物質移動特性を検討した。また、現象をより詳細に検討するために、同じジオメトリを対象として数値解析も行なった。

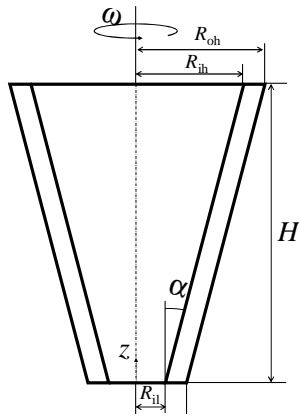


図3 円錐系テイラー渦流の計算対象

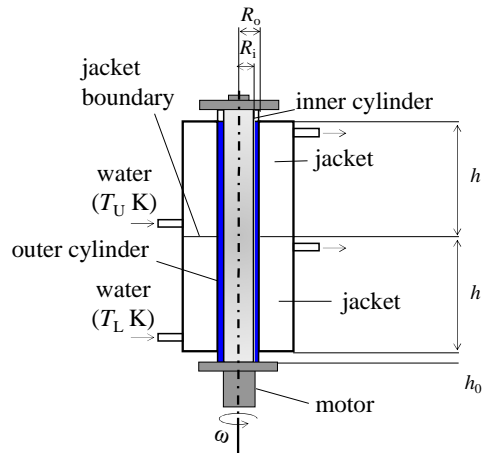


図4 外部ジャケットを有するテイラー渦流装置

#### 4. 研究成果

##### 4.1 円錐系テイラー渦流における熱・物質移動特性

図5に、円錐系テイラー渦流の速度分布における円錐傾斜角の影響を示す。なお、比較のためニュートン流体および shear-thinning 流体の結果を併記する。ここで、円錐最上部の半径に基づくレイノルズ数 ( $Re$ ) は 140 であり、shear-thinning 流体系ではせん断速度を最上部における周方向速度を代表速度、円錐間のギャップ幅を代表長さとして、代表せん断速度を見積もり、対応する粘度を代表粘度としてレイノルズ数を定義した。図5より、同じ傾斜角で比較すると両流体間の差異はほとんど見られず、上記のレイノルズ数の定義方法によって shear-thinning 流体系における流動状態も整理可能であることがわかった。また、傾斜角が大きくなるにつれ、全体にテイラー渦流が発達するレイノルズ数は大きくなる傾向にあることが確認できた。

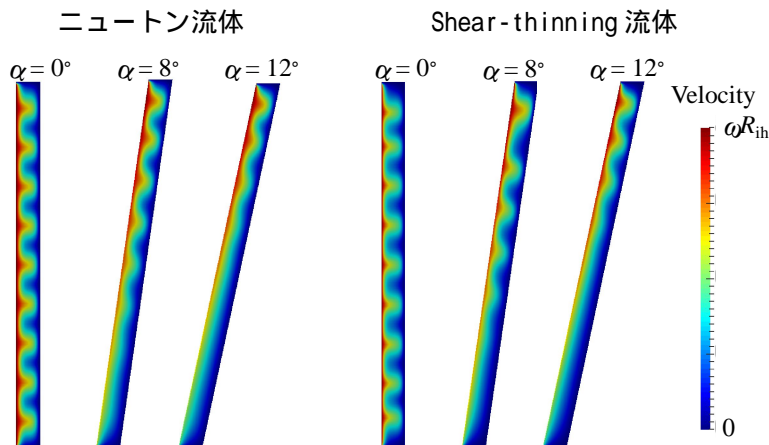


図5 円錐系テイラー渦流の速度分布における円錐傾斜角の影響

今回の解析では、いずれの条件においても渦セルが自発的に上昇する upward motion が見られた。そこで、その際の渦セルの上昇速度(縦軸)とレオロジー特性(横軸)の関係を図6に示す。ここで、横軸の  $n$  値は shear-thinning 性の強さを表すレオロジーモデルパラメータで、1 より小さくなるにつれ shear-thinning 性は強くなる。 $n = 1$  はニュートン流体に対応する。同じ  $Re$  で比較すると、shear-thinning 性が強くなるほど渦セル上昇速度は大きくなることがわかった。これは shear-thinning 性が強いほど軸方向レイノルズ数の分布が大きくなり、渦セルを固定化させる力が弱くなるためと考えられる。また、shear-thinning 流体系ではレイノルズ数の増加に伴い渦セル上昇速度が小さくなる傾向が顕著であったが、これは回転速度の増加に伴う遠心力増加によって渦セルが固定化されたためと考えられる。

Shear-thinning 流体系における渦セル上昇速度の増加によって、渦セルが装置内を循環するのに必要な時間短縮が可能になり、渦セル内で起こるミクロスケールの良混合性は保ちながらも装置全体のマクロスケール混合の強化が期待できる。そこでトレーサーを装置下半分に設置し、拡散過程を解析することで混合特性を検討した。拡散中の様子を図7に示す。回転速度で無次元化した時間に基づいて比較を行うと、shear-thinning 性が強くなるほどトレーサーの拡散・混合は促進されることがわかった。

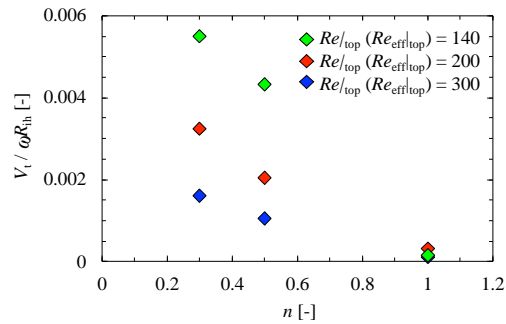


図6 渦セル上昇速度とレオロジー特性の関係

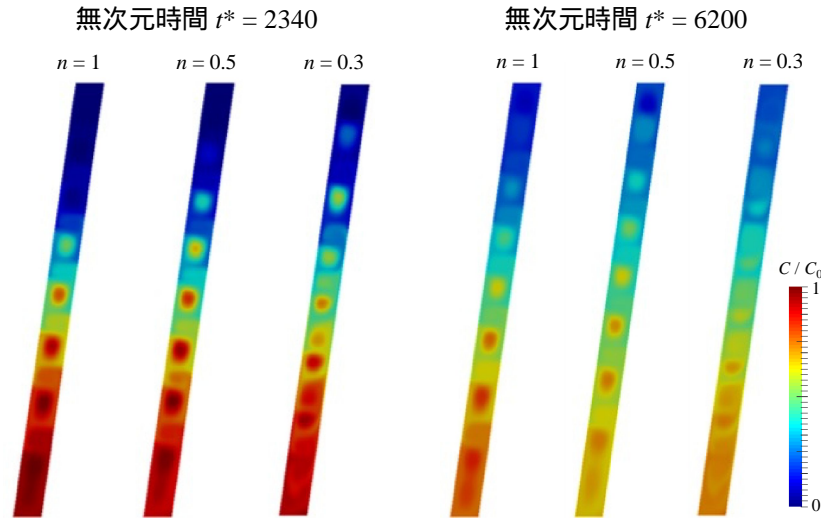


図7 トレーサー拡散の様子

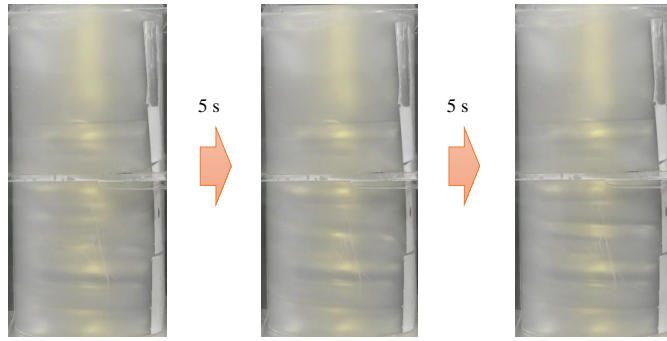
#### 4.2 温度不均一場における円筒系テイラー渦流

図4に示す装置において、下部のジャケット温度を上部のジャケット温度より高温にすることで軸方向の温度不均一場を作り、浮力を発生させた状態で流動ダイナミクスの検討を行った。このとき、ジャケットの温度差と内円筒の回転速度のバランスによって、(i)自然対流が支配的なモード、(ii)自然対流とテイラー渦流が交互に現れるモード、(iii)テイラー渦流が安定して形成されるモードの三つが観測されることを研究代表者はすでに報告している。しかし、先行研究では40wt%グリセリン水溶液のみを用いており、流体の種類の影響は不明であった。そこで本研究ではグリセリン水溶液の濃度を変化させ、流動ダイナミクスを検討した。80wt%グリセリン水溶液において観測された流動パターンを図8に示す。 $Re$ の違いはわずかであるが、 $Re = 47.5$ ではクエット流とテイラー渦流が共存した流れ、 $Re = 55.4$ ではテイラー渦セルが自発的に上昇する流れが見られた。このようにグリセリン濃度によって多様な流動パターンが見られることがわかった。

$Re = 516.4$ 、 $Gr = 21126.5$ において、数値解析で得られた熱流動パターンを図9に示す。ここで、 $Gr$ はグラスホフ数であり、青色の等値面は軸方向速度  $-0.014$  m/s、黄色の等値面は軸方向速度  $0.014$  m/sを表す。 $t = 430$  sにおいては、比較的テイラー渦流が安定しているが温度分布の発達に伴い  $t = 480$  sではテイラー渦流が崩壊し、熱対流が支配的となった。つまり、この条件は上述の流動モード(ii)に該当する。温度分布に着目すると、テイラー渦流が崩壊した際に伝熱が急速に進行していることがわかる。図10に平均ヌセルト数( $Nu_{av}$ )の経時変化を示す。 $Re = 387.3$ 、 $516.4$ 、 $645.5$ は流動モード(ii)、 $Re = 774.5$ は流動モード(iii)に対応する。図10より、 $Re$ が大きいくほど  $Nu_{av}$ が大きくなるも限らず、浮力流による揺らぎを伴う流動モード(ii)では伝熱促進が期待できることがわかった。以上より、円錐系を含め時空間的な揺らぎを伴うことで、熱物質移動強化技術が創出可能と考えられる。



$Re = 47.5$



$Re = 55.4$

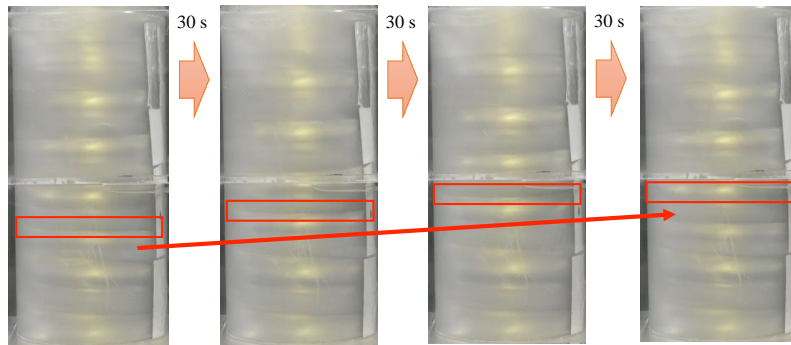


図8 温度不均一場における 80wt%グリセリン水溶液の流動パターン

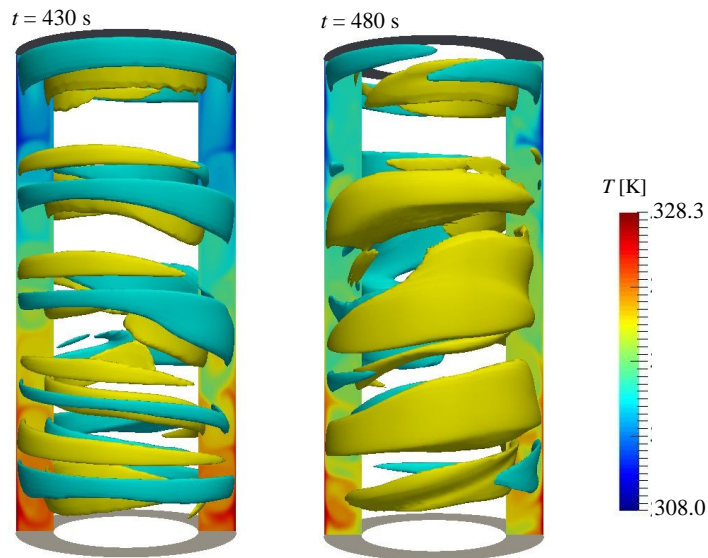


図9  $Re = 516.4$  ,  $Gr = 21126.5$  における熱流動場

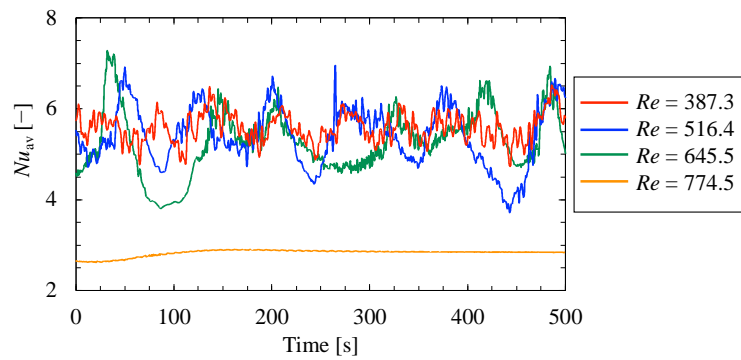


図10 平均ヌッセルト数の経時変化 ( $Gr = 21126.5$ )

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Masuda Hayato, Iyota Hiroyuki, Ohmura Naoto	4. 巻 44
2. 論文標題 Global Convection Characteristics of Conical Taylor Couette Flow with Shear Thinning Fluids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Engineering & Technology	6. 最初と最後の頁 2049 ~ 2055
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ceat.202100236	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hayato Masuda, Takafumi Horie, Hiroyuki Iyota, Naoto Ohmura	4. 巻 19
2. 論文標題 Chemical process intensification from the viewpoint of vortex dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Trends in Chemical Engineering	6. 最初と最後の頁 111 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masuda Hayato, Ryuzaki Tomohiro, Iyota Hiroyuki	4. 巻 330
2. 論文標題 Role of agitation in the freezing process of liquid foods using sucrose aqueous solution as a model liquid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Food Engineering	6. 最初と最後の頁 111100 ~ 111100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jfoodeng.2022.111100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Masuda Hayato, Nakagawa Kanta, Iyota Hiroyuki, Wang Steven, Ohmura Naoto	4. 巻 381
2. 論文標題 Thermo-fluid dynamics and synergistic enhancement of heat transfer by interaction between Taylor-Couette flow and heat convection	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20220116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2022.0116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Masuda Hayato, Iyota Hiroyuki, Ohta Mitsuhiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Representative Velocity Scale of Rayleigh-B?nard Convection with Shear-Thinning Fluids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SSRN Electronic Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2139/ssrn.4149414	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Kanta Nakagawa, Hayato Masuda, Hiroyuki Iyota
2. 発表標題 Effect of rheological properties on Couette-Taylor flow with axial temperature distribution
3. 学会等名 21st International Couette Taylor Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田 勇人, 中川 幹太, 藤永 大輝, 伊與田 浩志, 大村 直人
2. 発表標題 温度分布を有するテイラー渦流のダイナミクスに流体物性が与える影響
3. 学会等名 化学工学会第52回秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 増田 勇人, 伊與田 浩志, 太田 光浩
2. 発表標題 非ニュートン流体系におけるレイリー・ベナル対流の代表速度スケールに関する考察
3. 学会等名 化学工学会第87年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田 勇人, 中川 幹太, 伊與田 浩志, 大村 直人
2. 発表標題 浮力を伴うテイラー・クエット流の流動パターンにおけるレオロジー特性の影響
3. 学会等名 第58回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hayato Masuda, Masahiro Matsumoto, Makoto Shimoyamada, Robert Hubacz, Naoto Ohmura
2. 発表標題 Mixing enhancement of Taylor - Couette flow reactor with ribbed inner cylinder in continuous starch hydrolysis process
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Mixing in Industrial Processes (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川幹太, 増田勇人, 伊與田浩志
2. 発表標題 軸方向温度勾配を有するTaylor-Couette-Poiseuille流の流動ダイナミクス
3. 学会等名 化学工学会第53回秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田勇人, 中川幹太, 伊與田浩志, 大村直人
2. 発表標題 径方向温度勾配を伴う円錐型テイラー・クエット流の流動ダイナミクス
3. 学会等名 化学工学会第53回秋季大会
4. 発表年 2022年



〔図書〕 計2件

1. 著者名 Hatato Masuda	4. 発行年 2021年
2. 出版社 InTech Open	5. 総ページ数 21
3. 書名 Enhancement of Heat Transfer Using Taylor Vortices in Thermal Processing for Food Process Intensification	

1. 著者名 Naoto Ohmura, Hayato Masuda, Steven Wang	4. 発行年 2021年
2. 出版社 InTech Open	5. 総ページ数 11
3. 書名 Vortex dynamics in complex fluids	

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ポーランド	Warsaw University of Technology			
香港	City University of Hong Kong			