

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02067

研究課題名(和文)局在力場における単一ナノ粒子運動の実験と数理

研究課題名(英文) Experimental and theoretical studies on the motion of single nanoparticles under localized external forces

研究代表者

辻 徹郎 (Tsuji, Tetsuro)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：00708670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年の実験技術の発展により、光や熱の局在化にともなうマイクロ・ナノスケールの局在力場の形成が可能である。前者は光圧、後者は熱泳動力であり、これらの力場は微小物質操作に応用できる。本研究では、集光レーザーによる光圧とその光熱変換による加熱をもちいた熱泳動力を利用して、微小粒子の運動制御や、力が働くメカニズムの解明に向けた実験をおこなった。具体的には、熱対流による流体力と熱泳動力のバランスを変化させることで粒子の集積・枯渇を切り替える手法や、熱泳動力の起源となる流れの評価方法を提案した。並行して、気体の場合における単一微小粒子に働く力を数理的な手法で調べ、実験との比較に向けた整備をすすめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

【学術的意義】真空中を除いて微小粒子は常に流体と接しているため、粒子に働く種々の力の起源を実験的に調べる上で熱流体力学的な力の理解は重要であり、分野を超えた学術的意義をもつ。本研究では、粒子表面近傍に誘起される流れの評価手法を提案し、この流れが粒子に力を及ぼすことを実験的に示すことで、手法の有用性を確かめた。【社会的意義】微小粒子に働く力の起源が分かれば、それを制御できる可能性が拓ける。空気中であればウイルスを含んだ飛沫、液体中であれば血液中の腫瘍マーカー等、識別と抽出が重要と考えられているさまざまな微小粒子に対して、本研究は新しい基盤分離技術の原理提案に繋がる基礎研究である。

研究成果の概要(英文)：Recent advances in experiments have enabled the formation of micro- and nanoscale localized force fields using the localization of light and heat: the former and the latter are called optical pressure and thermophoretic force, respectively. These forces can be applied to the control of tiny objects. In this project, using the optical pressure of a focused laser and its conversion to heat, we realized the manipulation of tiny particles' movement and proposed a method to clarify the origin of force. To be more specific, we developed a method for switching the accumulation and depletion of particles via the change of balance between thermal-convection-induced drag force and thermophoretic force. Furthermore, we proposed a technique to evaluate microflows that trigger thermophoresis. In the case of a gas, we also investigated the forces acting on a single tiny rotating particle using analytical and numerical approaches, preparing a setup for comparisons with experimental observations.

研究分野：分子流体力学

キーワード：分子流体力学 ナノ粒子 光熱効果 光圧 熱泳動

### 1. 研究開始当初の背景

近年、実験技術の発展により、光の電磁場や流体温度場を局在化させ、マイクロ・ナノスケールの分布を有する局在力場の形成が可能となっている。図1に示すように、前者は光圧、後者は熱泳動力と呼ばれ、微小物質の操作に応用できる。微小物質とは、有効径が10 nm ~ 1 μm 程度の粒子を指し、小さいもので生体分子やウイルス、大きいもので細胞やPM2.5が挙げられる。Ashkinらによる光ピンセットは、対物レンズで集光したレーザーの光圧を細胞捕捉に応用した最初の例である (A. Ashkin, et al., Nature 421 (1987))。また、局在化した熱泳動力は生体分子間相互作用を定量化する新しい計測手法に応用されている (C. Wienken, et al., Nat. Commun. 1 (2010))。このように、局在力場の生命科学への展開が盛んである一方、流体力学の基礎問題への適用例は少なく、局在力場の利点が学理として体系化されていない現状がある。

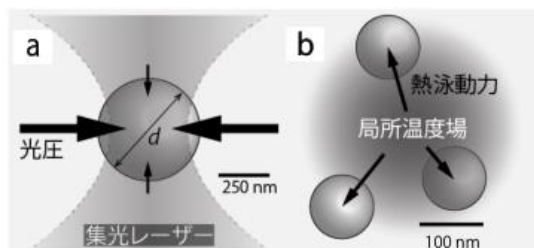


図1：(a) 光圧および(b) 熱泳動力の模式図

局在力場による微小粒子の拘束は、流体力学の文脈では、流体中に固定された粒子周りの流れの解析に適用することができる。この問題は、Stokesの抵抗則に見られるように流体力学の古典問題であるが、微小粒子に対しては、非平衡効果が現れること、熱揺動が無視できないこと、および周囲流体の流速場計測の難しさが、現象の理解のうえで障壁となる。つまり、この古典的問題でさえ、微小スケールの熱流体力学の実験的観点からは挑戦的な研究領域であると言える。実際、空気中や水中で微小粒子(直径3 μm程度)を局在力場で捕捉し、高い時空間解像度でその運動が解析されたのは比較的最近である(例えばT. Li, et al., Science 328 (2011))。すなわち、従来技術では解析が難しかった流体力学の基礎的な問題に対して、局在力場を応用した新しい実験的アプローチが考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、気体もしくは液体中の微小粒子の運動を局在力場で制御する実験系を新たに構築し、分子流体力学の基礎問題の計測とその解析を行う。ここで、分子流体力学とは、従来の流体力学における連続体的描像とは異なり、流体が分子集団で構成される事実を考慮に入れた学問体系を指す。流体の分子性が顕著となる微小系(1. 研究の背景参照)や、低圧環境などの希薄な気体では、分子流体力学に基づく解析が重要となる。実験と並行して、単一微小粒子の運動に関する数理解析を進めることで、実験および理論の両面から微小粒子に働く力を調べるのが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

実験系については、倒立顕微鏡を観察系とした光学実験システムを開発した(図2, 図3参照)。これらの系では、対物レンズで集光したレーザーをマイクロ流路に照射し、集光点およびその近傍に光や熱に起因する局在力場を発生させることができる。レーザー照射にともなう分散粒子の運動を可視化観察することで、局在力場に対する粒子や流体の応答を調べる。数理解析については、周囲流体が気体の場合は、ボルツマン方程式あるいはそのモデル方程式の数値解析をおこなう。とくに、希薄度(系の代表長と気体分子の平均自由行程の比)が小さいとき、希薄度に関する漸近理論(Y. Sone, Molecular Gas Dynamics: Theory, Techniques, and Applications, Birkhäuser (2007))をもちいることで、解析的に近似解を求めることができる。

### 4. 研究成果

主要な結果および今後の課題と展開の概要を下記に示す。

- 1) 突発的な球の自転運動にともなう希薄流れの解析 (S. Taguchi, T. Tsuji, and M. Kotera, J. Fluid. Mech., 909, A6 (2021)) : 初期に静止していた球が、ある時刻に突発的に等角速度の自転運動を始める。この場合に誘起される気体の流れを、低希薄度領域に対しては漸近理論を、中希薄度については特性曲線法に基づく数値解析を適用することで系統的に調べた。流れ場や抗力のみならず、熱流の発生や流体場の長時間的な発展の様子を明らかにした。当該論文は、Journal of Fluid MechanicsのFocus on Fluidsで特集され、国際的に注目された。なお、常圧環境下を想定すると、この論文が対象としたのは、直径が数 μm から数 nm 程度の微小粒子であることに注意する。

この論文に対応する実験をおこなうために、気体中にて微小粒子を光圧で捕捉し自転させる系の構築に取り組んだ。気体中では液体中に比べて外乱の影響が強いため、観察領域および集光点への微小粒子のシーディングが困難である。そこで、先行研究などを参考に、以下の2つの方法を試した。(a) まず、微小粒子を含む分散液を超音波によって微粒化し、微

小粒子よりサイズが大きく光捕捉し易い液滴を光捕捉する。液滴が蒸発するまで待つことで、最終的に、液滴内に分散していた微小粒子を捕捉することができる。(b) まず、基板に微小粒子を固着させておく。この基板を超音波振動子で叩くことで、粒子-基板間の固着を瞬間的に引きはがし、浮いた粒子を光捕捉する。(a)の方法では、水の微粒化と油の微粒化を試した。どちらの場合においても、集光点に微小液滴が落ちてくる確率が低く、微小粒子の光捕捉はできなかった。集光点へのガイドとなる流路の設計や液滴系の制御が必要であることが分かった。(b)の方法では、微小粒子を基板からはがすことができず、光捕捉できなかった。原因としては、振動子の出力不足、基板の前処理方法の検討不足、振動子固定方法の問題が挙げられ、実験面での今後の課題として残った。

- 2) 微小粒子に働く熱泳動力と熱対流による抵抗の拮抗を利用した粒子分布制御方法の創出 (T. Tsuji, S. Taguchi, H. Takamatsu, *Electrophoresis*, 42, 2401-2409 (2021)) : 流路高さが可変であるマイクロ流路を作製した。この流路を微小粒子分散液で満たし、図 2 (左上) のように集光レーザーを照射すると、光熱効果により流体が加熱され、熱対流 (流体の運動) と熱泳動 (分散粒子の運動) が生じる。分散粒子には熱対流による抵抗と熱泳動力が働くが、前者の方が後者に比べて流路高さの影響を受けやすい。つまり、流路高さを変化させることで、水中に分散する微小粒子 (直径 500 nm) に働く力の分布を定性的なレベルで変化させることができる。この力場の変化により微小粒子の空間分布を制御する方法を考案した。

実験の結果を図 2 下段に示す。図では、加熱用の集光レーザーが各画像中央に紙面奥行方向に照射されている。流路高さが 50  $\mu\text{m}$  の場合は熱対流と熱泳動の影響が拮抗するような場所に分散粒子が集まり (図 2 下段・上列)、流路高さが 40  $\mu\text{m}$  の場合は熱泳動が卓越し粒子が加熱部から枯渇する (図 2 下段・下列) ことが分かった。本成果は、論文誌 *Electrophoresis* の Inside Front Cover に選出された (図 2 右上)。

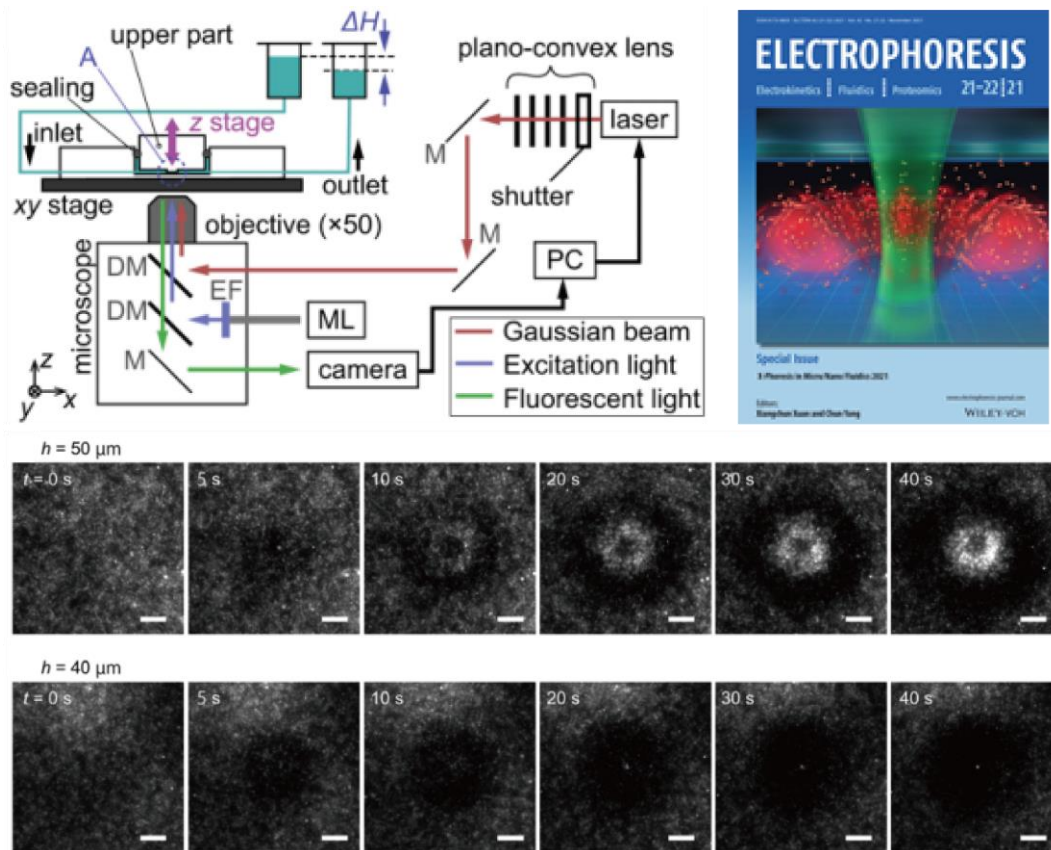


図 2: (左上) 実験装置の模式図。流体を加熱するためのレーザーを高さが可変のマイクロ流路へ照射する。(右上) 研究成果 Tsuji, Taguchi, Takamatsu (2021) が、*Electrophoresis* Vol. 42, Issue 21-22 にて Inside Front Cover に選出された。(下段) 実験結果の一例。(上列) 流路高さ  $h = 50 \mu\text{m}$ 、(下列)  $h = 40 \mu\text{m}$ 。Copyright 2021, Wiley-VCH GmbH. Reprint with permission from Wiley.

- 3) 熱泳動力の理解に向けた熱浸透流れの可視化 (T. Tsuji, S. Mei, S. Taguchi, in preparation) : 微小粒子の熱泳動のメカニズムは以下のように知られている。まず、流体中の温度勾配に起因して、粒子表面には熱すべり流れが生じる。これは、液体中であれば熱浸透流、気体中であれば熱遷移流と呼ばれている。この流れは流体に運動量を与えるため、その反作用として粒子は流体から運動量を受け取り、流体と逆方向に運動する。一般的に、流体は低温側から高温側へ流れるので、粒子は低温側へ熱泳動することになる。

しかし、表面近傍のマイクロ流れの可視化の困難さに起因して、この描像を直接確認し、

熱泳動の理解と設計に繋げることは難しい。本研究では、光圧により流れのプロープとなるトレーサー（直径 500 nm の微小粒子）を観察領域にとどめることで、流れの評価をおこなう手法を提案した。図 3 (a) は実験系の概要である。光圧（トレーサーを光捕捉するための局在力場）と熱泳動力（局所加熱に起因する局在力場）を発生させる 2 つのレーザーを導入し、倒立顕微鏡に入射している。(b) はレーザー誘起蛍光法による温度計測結果である。マイクロスケールの場合に数十 K の大きな温度差を形成できていることが分かる。

図 3 (c) に結果の一例を示す。カルボキシル基で修飾されたマイクロ粒子（点線、直径 7  $\mu\text{m}$ ）の周りに、集光レーザー（波長 1064 nm）の局在力場で光捕捉されたトレーサー群が、初期に円状に存在している（図 3 (c) 左）。別の集光レーザー（波長 1480 nm）を使って粒子から 18  $\mu\text{m}$  図面上右側に離れた地点を局所加熱すると、トレーサー群は円周上を動き、加熱側に集まる（図 3 (c) 右）。これは粒子まわりに低温部から高温部に向けて流れが発生していることを示唆している。

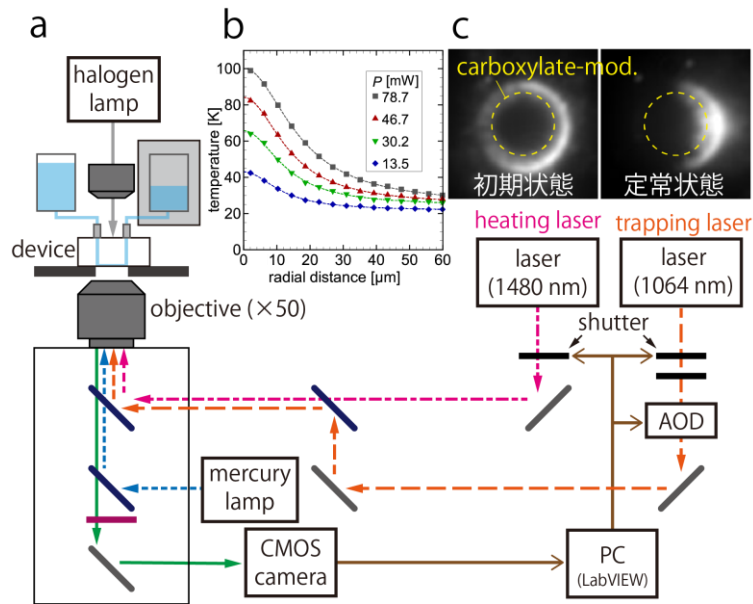


図 3: (a) 実験装置の模式図. (b) 温度分布. (c) 結果の一例. カルボキシル基で修飾されたマイクロ粒子（点線、直径 7  $\mu\text{m}$ ）の周りに、集光レーザー（波長 1064 nm）の局在力場で光捕捉されたトレーサー群が、初期に円状に存在している（左）。別の集光レーザー（波長 1480 nm）で粒子から 18  $\mu\text{m}$  離れた地点を局所加熱すると、トレーサー群は円周上を動き、加熱側に集まる（右）。

上記の研究成果の他にも、当該研究課題の一連の成果の発信の一環として、レビュー論文を出版した。T. Tsuji, K. Doi, and S. Kawano, “Optical trapping in micro- and nanoconfinement systems: role of thermo-fluid dynamics and applications,” *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.* 52, 100533 (2022)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 富田卓磨, 田口智清, 辻徹郎	4. 巻 -
2. 論文標題 円板を過ぎる希薄流の数値解析: 特性線法による運動論的方程式へのアプローチ	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 京都大学工学研究科高等研究院・第5回先端流体理工学研究部門公開セミナー講演要旨集	6. 最初と最後の頁 58~65
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 無
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 辻徹郎	4. 巻 2023-1
2. 論文標題 特性線法を用いた分子気体流れの解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本計算数理工学会・計算数理工学レビュー	6. 最初と最後の頁 9~18
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 無
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 Shun Saito, Tetsuro Tsuji, Satoshi Taguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 A simple model for laser-induced thermal convection in a microchannel	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 in press
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 無
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 Satoshi Taguchi and Tetsuro Tsuji	4. 巻 -
2. 論文標題 Inverse Magnus effect in a rarefied gas	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Springer Proceedings	6. 最初と最後の頁 in press
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 Tsuji Tetsuro, Doi Kentaro, Kawano Satoyuki	4. 巻 52
2. 論文標題 Optical trapping in micro- and nanoconfinement systems: Role of thermo-fluid dynamics and applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews	6. 最初と最後の頁 100533 ~ 100533
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jphotochemrev.2022.100533	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 Taguchi Satoshi, Tsuji Tetsuro	4. 巻 12
2. 論文標題 One-way flow over uniformly heated U-shaped bodies driven by thermal edge effects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-05534-y	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 Taguchi Satoshi, Tsuji Tetsuro	4. 巻 933
2. 論文標題 Inversion of the transverse force on a spinning sphere moving in a rarefied gas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.1048	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 Tsuji Tetsuro, Taguchi Satoshi, Takamatsu Hiroki	4. 巻 42
2. 論文標題 Switching between laser induced thermophoresis and thermal convection of liquid suspension in a microgap with variable dimension	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electrophoresis	6. 最初と最後の頁 2401 ~ 2409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/elps.202100118	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 Tsuji Tetsuro, Hosokawa Chie, Kishimoto Tatsunori, Okubo Takumi, Kudoh Suguru N., Kawano Satoyuki	4. 巻 11926
2. 論文標題 Fluid convection driven by suspended particles in optical trapping	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	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) 10.1117/12.2616108	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 Taguchi Satoshi, Tsuji Tetsuro	4. 巻 897
2. 論文標題 On the motion of slightly rarefied gas induced by a discontinuous surface temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	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) 10.1017/jfm.2020.332	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 Taguchi Satoshi, Tsuji Tetsuro, Kotera Masashi	4. 巻 909
2. 論文標題 Transient behaviour of a rarefied gas around a sphere caused by impulsive rotation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	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) 10.1017/jfm.2020.907	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 Taguchi Satoshi, Tsuji Tetsuro	4. 巻 -
2. 論文標題 A Generalized Slip-Flow Theory for a Slightly Rarefied Gas Flow Induced by Discontinuous Wall Temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Recent Advances in Kinetic Equations and Applications	6. 最初と最後の頁 327 ~ 344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-82946-9_14	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 Nakajima Kichitaro, Nakatsuka Ryoji, Tsuji Tetsuro, Doi Kentaro, Kawano Satoyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Synchronized resistive-pulse analysis with flow visualization for single micro- and nanoscale objects driven by optical vortex in double orifice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-021-87822-7	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 -

[学会発表] 計49件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 T. Tsuji, S. Taguchi, and M. Kotera
2. 発表標題 Numerical analysis of unsteady rarefied gas flows around a sphere induced by impulsive rotation
3. 学会等名 The 32th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tsuji
2. 発表標題 Optothermal manipulation of particles in microfluidic systems
3. 学会等名 Japan-France Joint Workshop "Interacting Particle Systems and Fluid Mechanics: Theory and Applications" (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻徹郎, 田口智清, 高松宏基
2. 発表標題 光熱効果により誘起される熱泳動と熱対流の共存状態における流路高さの影響
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 熱泳動を用いた微小粒子輸送に関する実験および数理的研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 Modeling and experiments on thermophoresis in microfluidic systems
3. 学会等名 日本航空宇宙学会関西支部分科会「非平衡流体への運動学的アプローチ」(第9回)(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 光圧の分子流体科学への展開
3. 学会等名 新学術領域研究「光圧ナノ物質操作」若手領域会議(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 光と熱を用いた微小物質操作に関する実験とモデル化
3. 学会等名 生物とソフトマターに関する理論とシミュレーションについての研究会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 光熱変換の分子流体力学への展開
3. 学会等名 第 70 回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 特性線法を用いた分子気体流れの解析
3. 学会等名 第 43 回計算数理工学フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Taguchi and T. Tsuji
2. 発表標題 Source-sink-type condition for slightly rarefied gas flow driven by a discontinuous wall temperature
3. 学会等名 The 32th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tomita, S. Taguchi, and T. Tsuji
2. 発表標題 Numerical analysis of slow uniform flow past a circular disk by using the method of characteristics
3. 学会等名 The 32th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tomita, S. Taguchi, T. Tsuji
2. 発表標題 Numerical Analysis of a Slow Rarefied Gas Flow past a Circular Disk
3. 学会等名 The 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 熱尖端効果と U 字型物体列を利用した一方向流れ
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富田卓磨, 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 円板を過ぎる希薄流の数値解析: 特性線法による運動論的方程式へのアプローチ
3. 学会等名 第 5 回先端流体力工学研究部門公開セミナー
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅世哲, 辻徹郎, 田口智清
2. 発表標題 温度勾配によって生じるマイクロ粒子周りの流れの可視化手法の検討
3. 学会等名 第 13 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅世哲, 辻徹郎, 田口智清
2. 発表標題 光ピンセットされたトレーサーによるマイクロ流れの可視化
3. 学会等名 第 17 回 ICT イノベーション
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清瀬遼, 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 希薄気体流の剛体球分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 シンポジウム：先端数理科学の目指すもの 現象にかかわる「理」を理解する
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 龍溪優希, 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 気体中の微粒子まわりの流れにおける非線形効果
3. 学会等名 シンポジウム：先端数理科学の目指すもの 現象にかかわる「理」を理解する
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齊藤駿, 辻徹郎, 田口智清
2. 発表標題 集光レーザーによるマイクロ流路内の熱対流の解析
3. 学会等名 シンポジウム：先端数理科学の目指すもの 現象にかかわる「理」を理解する
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Tsuji, C. Hosokawa, T. Kishimoto, T. Okubo, S.N. Kudoh, and S. Kawano
2. 発表標題 Fluid convection driven by suspended particles in optical trapping
3. 学会等名 The 8th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tsuji
2. 発表標題 Role of fluid dynamics in optical trapping
3. 学会等名 The 2nd Joint Meeting of The European Society for Clinical Hemorheology and Microcirculation, The International Society for Clinical Hemorheology, and The International Society of Biorheology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tsuji
2. 発表標題 Numerical analysis of a rarefied gas flow around a sphere caused by impulsive rotation
3. 学会等名 International Workshop: Recent Advances in Kinetic Theory and Non-Equilibrium Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 温度差が駆動する微小物質の輸送
3. 学会等名 第3回先進的ながれ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 マイクロ・ナノ粒子の熱泳動現象の理解と応用に向けたいくつかの試み
3. 学会等名 日本伝熱学会関西支部第 28 期第 2 回講演討論会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻徹郎，細川千絵，岸本龍典，大久保匠，工藤卓，川野聡恭
2. 発表標題 微小粒子の光捕捉過程にともなう流れ場の解析
3. 学会等名 日本機械学会年次大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 局所的な光と熱の効果を利用した微小粒子の操作について
3. 学会等名 第49回可視化情報シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻徹郎，田口智清，高松宏基
2. 発表標題 集光レーザーにより誘起される熱泳動と熱対流の共存状態に対する流路高さの影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 光を用いた物質操作における熱と流れの役割
3. 学会等名 物質・デバイス領域共同研究セミナー「光駆動物質輸送の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 物質の光圧操作における周囲流体の影響について
3. 学会等名 第 8 回光マニピュレーション研究会(第 18 回光圧コロキウム)(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富田卓磨, 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 円板を過ぎる中程度に希薄な流れ: モデル Boltzmann 方程式の数値解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田口智清, 辻徹郎, 小寺雅司
2. 発表標題 球の突発的な回転が引き起こす気体の非定常応答
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 希薄気体中の球に働くマグナス力とその反転
3. 学会等名 第4回先端流体理工学研究部門公開セミナー
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清瀬遼, 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 ボルツマン方程式における分子無秩序の仮定の数値的検証
3. 学会等名 第16回ICTイノベーション
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富田卓磨, 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 円板を過ぎるマイクロ気体流
3. 学会等名 第16回ICTイノベーション
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tsuji
2. 発表標題 Transient rarefied gas flow around a sphere induced by an abrupt onset of self-rotation
3. 学会等名 Analysis Seminar in Institute of Mathematics, Academia Sinica (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 S. Taguchi
2. 発表標題 Slip-flow theory for a slightly rarefied gas with a discontinuous boundary data
3. 学会等名 Analysis Seminar in Institute of Mathematics, Academia Sinica (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Taguchi
2. 発表標題 Slip flow theory for a rarefied gas flow driven by a discontinuous wall temperature
3. 学会等名 International Workshop: Recent Advances in Kinetic Theory and Non-Equilibrium Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Taguchi
2. 発表標題 Magnus effect in rarefied gas
3. 学会等名 JSPS/SAC SEMINAR on Gas Kinetic/dynamics and Life Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Tsuji and S. Kawano
2. 発表標題 Numerical simulation of micro- and nanoparticles orbital motion driven by an optical vortex
3. 学会等名 The 7th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻徹郎, 細川千絵, 岸本龍典, 大久保匠, 工藤卓, 川野聡恭
2. 発表標題 微小粒子の光捕捉過程における周囲流体の大規模流れ
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻徹郎, 中塚遼治, 中島吉太郎, 土井謙太郎, 川野聡恭
2. 発表標題 光渦を用いたナノ粒子操作における流体力学的粒子間相互作用の影響
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻徹郎, 中塚遼治, 中島吉太郎, 土井謙太郎, 川野聡恭
2. 発表標題 微小粒子の集団的公転運動における流体力学的相互作用の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 流体中の温度勾配に駆動されるマイクロ・ナノ粒子の運動
3. 学会等名 第3回先端流体理工学研究部門公開セミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻徹郎
2. 発表標題 温度差が駆動する微小物質の輸送
3. 学会等名 シンポジウム：先端数理科学の目指すもの 現象にかかわる「理」ことわりを理解する
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎悠斗, 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 希薄気体中の球に対する非線形熱伝達問題
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松原湧汰, 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 弱希薄気体中の球状液滴に働く抵抗：液滴の内部流動の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 俣賀幹夫, 田口智清, 辻徹郎
2. 発表標題 弱希薄気体の低 Reynolds 数領域における数値解析
3. 学会等名 第 34 回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 気体中のマイクロスケール球状液滴に働く抵抗
2. 発表標題 松原湧汰, 田口智清, 辻徹郎
3. 学会等名 第 15 回 ICT イノベーション
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tsuji
2. 発表標題 Numerical analysis of a rarefied gas flow around a sphere induced by an abrupt onset of self-rotation
3. 学会等名 JSPS/SAC meeting
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究代表者ホームページ  <a href="https://sites.google.com/view/tsujitetsuro/about">https://sites.google.com/view/tsujitetsuro/about</a></p>
---

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
研究分担者	田口 智清  (Taguchi Satoshi)  (90448168)	京都大学・情報学研究科・教授    (14301)	

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
---------	---------