

令和 5 年 5 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02063

研究課題名（和文）移動センサ群を用いた乱流環境におけるスカラー源探査に関する研究

研究課題名（英文）Estimation of Scalar Source in Turbulent Environment by Using Moving Sensors

研究代表者

長谷川 洋介（HASEGAWA, Yosuke）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：30396783

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：乱流環境において有限の観測情報に基づきスカラー場やその発生源を同定することは、極めて困難な課題である。これまでに、与えられたセンサ配置の下でスカラー場やスカラー源を推定する試みは多数存在する。しかし、熱流動場の推定問題では「いつ、どこで、どの物理量を計測するか」が推定性能の理論的上限を決める。本研究では、機械学習やガウス過程に物理法則を組み込むことにより、効率的にスカラー源を推定するとともに、センサ配置最適化を行うための新しい方法論を提案した。さらに、同手法の推定性能を乱流スカラー場の数値シミュレーションにおいて検証すると共に、移動ロボット群を用いて風洞実験により実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気や海洋中を拡散する汚染物質や有害物質の時空間分布を正確に推定し、その発生源を同定することは、災害やテロ発生時における人々の安全・安心を保証する上で、極めて重要である。学術的には乱流中に放出されたスカラーは、流れによって移流し、引き延ばされることにより複雑なスカラー場を形成し、下流のセンサ信号は極めて複雑なものとなる。このような限られた計測情報からスカラー源を推定することは依然として極めて困難であるため、効果的なスカラー源推定アルゴリズムを開発することは意義が大きい。さらに、開発したアルゴリズムを実験を通じて実証する試みも限られており、本研究で開発する実験システムは学術的な意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：Estimating scalar sources in turbulent environments is a challenging task. So far, a large amount of studies discuss how to estimate scalar sources and flow fields based on given sensor signals. Meanwhile, the estimation performance mostly depends on which physical quantity is measured and at which location. In the present study, we applied Gaussian process and/or machine learning techniques in order to achieve better estimation performances and also optimize sensor arrangements for this purpose. The proposed algorithms were verified through numerical simulation of scalar transfer in complex flow fields, and also validated through wind tunnel experiments and mobile robots equipped with a concentration sensor.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流 スカラー源推定 移動ロボット群

1. 研究開始当初の背景

大気や海洋中を拡散する汚染物質や有害物質の時空間分布を正確に推定し、その発生源を同定することは、災害やテロ発生時における人々の安全・安心を保证する上で、極めて重要である。近年の事例においても、メキシコ湾におけるオイル流出、東日本大震災における福島第一原発からの放射性物質の漏洩、マイクロプラスチックによる海洋汚染など枚挙に暇がない。これらの問題に適切に対応するためには、有限のセンサ群より得られる計測情報に基づき、乱流環境中のスカラー源を迅速かつ高精度に推定する技術が必要不可欠である。

研究開始当初において、提案されていたスカラー源探索手法は、主に、適応型とモデル規範型に大別できる。適応型では、濃度センサを搭載した移動ロボットが、その計測データに応じて、予め定められた行動パターンを繰り返すことによって、最終的にスカラー源へ到達し、その位置を特定する。その多くは、生物の臭覚システムから着想を得ており[1]、近年では、複数のロボットを用いたスカラー源探索システムへ発展している[2]。適応型アプローチは、情報・ロボティクス分野で活発に研究が進められており、流れ場の不確実性が高い中でも比較的ロバストな探索が可能である。

一方、モデル規範型では、流れ場やスカラー場の支配方程式を陽に考慮する。環境科学や地球物理の分野において多くの研究事例があり、多数の順解析を実行して計測データと最も整合するスカラー源を探索する方法[3]、センサ位置で計測データを与えてスカラー場の輸送方程式を時間の逆向きに解く方法[4]、スカラー源の確率密度分布のエントロピーを最小化する方法[5]などが提案されている。しかし、いずれの手法も流れ場やスカラー源の自由度、センサの数の増加に伴い計算負荷が急激に増加し、その適用例は2次元流や定常流に限られている。また、これらの多くのアルゴリズムは数値シミュレーションによって検証されており、実証実験までを行う事例は極めて限られていた。したがって、実証実験までを想定し、移動ロボットの探索経路を最適化し、スカラー源を効率的に探索するアルゴリズムの開発、およびその実証実験が強く必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究では、乱流スカラー輸送の数値シミュレーション、およびスカラー点源を導入した実験風洞を用いることにより、限られた計測情報に基づきセンサを逐次的に配置することにより、効率的かつロバストにスカラー源を推定するアルゴリズムを開発し、その推定性能を風洞実験と濃度センサを搭載した移動ロボットを用いて実証することとする。

3. 研究の方法

本研究では、図1(a)に示すような矩形の計算領域において、局所的なスカラー点源を配置し、限られたセンサ情報からスカラー源位置を推定する問題を考える。計算領域は、図1(b)に示す、東京大学生産技術研究所長谷川研究室が管理する幅2m、横3m、高さ30cmの実験風洞を模擬したものであり、シミュレーションにおいて開発されたアルゴリズムは、最終的に風洞実験において実証することを想定し、計算領域を設定した。

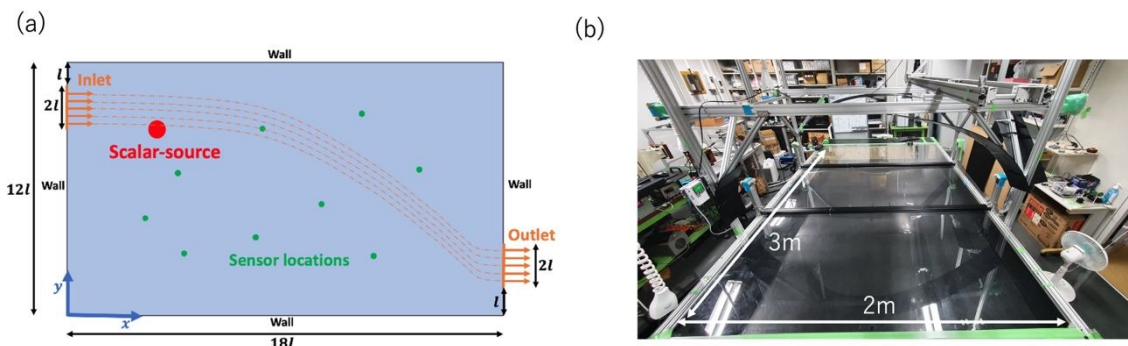


図1 (a) 計算領域 (b) 実験風洞び外観図

本研究では、まずシミュレーションを用いてスカラー源推定アルゴリズムの推定性能を検証し、その後、実験による実証を行う。シミュレーションによる推定アルゴリズムの開発と検証においては、まず直接数値シミュレーションによって計算領域内の流れとスカラー拡散を再現し、これ

を正解場とする。次に、上述のシミュレーションによって得られた正解場において、限られた位置に仮想的なセンサを配置し、その位置での濃度情報のみが利用できると仮定し、センサ位置以外の領域における濃度場、及びそのスカラー源の空間分布を推定することを試みる。事前にシミュレーションにより得られる正解場と推定場を比較することによって、推定性能を評価する。なお、本研究においては、濃度場およびスカラー場の予測に注目し、速度場は全領域において既知とする。これは現実の系においては、予めシミュレーション、または計測によって全空間の速度分布が与えられる状況に対応する。一般に、室内では換気の流入、流出は事前に与えられていることが多いため、流体シミュレーションによって室内の速度分布をある程度予測することは可能であると考えられる。なお本研究の実験においては、風洞内部の流速を PIV で計測する一方、レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式を解くことにより平均流速場を取得し、両者に良い一致が確認されている。

本研究で用いた実験システムの概要を図 2 に示す。スカラーとしてはエタノールを用い、エタノール発生装置を風洞内に配置することによって、スカラー源として用いた。濃度計測に関しては、風洞内部における位置を遠隔から制御することができる移動ロボットに濃度センサを搭載することによって、様々な位置における濃度情報を取得し、これを無線により制御用 PC に送信する。PC では移動ロボットの位置と計測された濃度情報に基づき、濃度とスカラー源の空間分布を推定する。推定結果に基づき、次の計測位置を決定し、移動ロボットをその位置へ移動させるとともに、濃度計測を行う。これを繰り返し行うことによって、最終的に移動ロボットがスカラー源の近傍に到達したとき推定が成功とみなし、一方、移動ロボットがスカラー源遠方に留まる場合に推定は失敗と判断した。

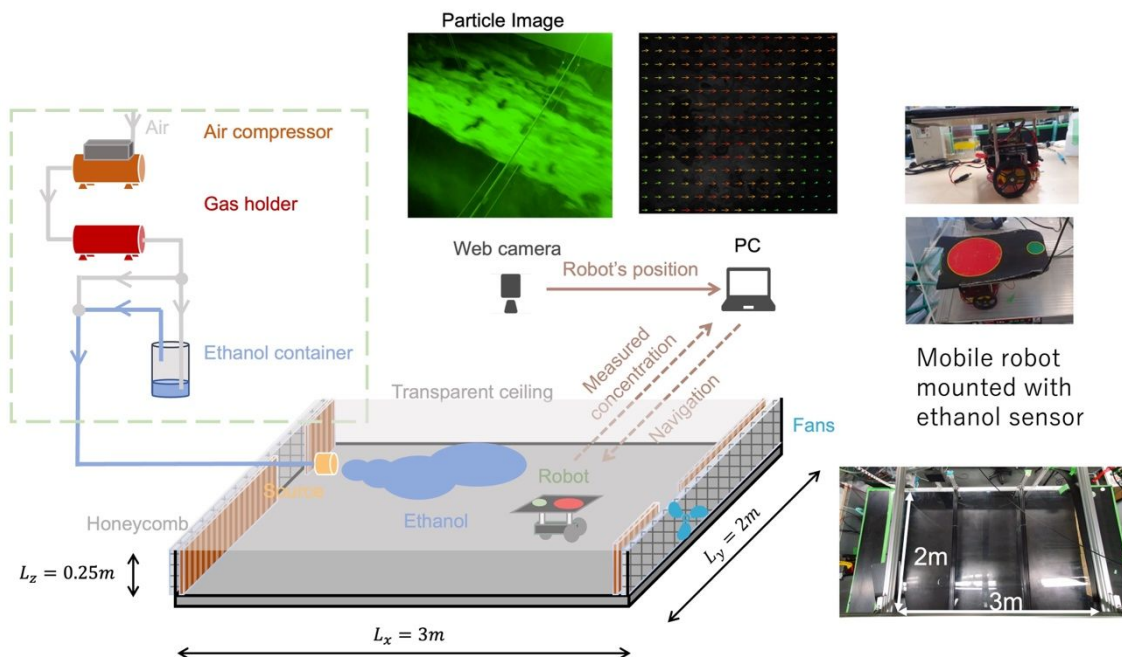


図 2 本研究におけるスカラー源探索実験システムの概略図

限られた計測データに基づく濃度場およびスカラー源推定においては、3つのモデル規範型アルゴリズムを開発、適用した。一つ目は随伴解析に基づくものであり、すでに与えられたセンサ位置におけるスカラー源推定への適用事例があり、その高い推定性能が報告されている。二つ目は新しい手法として、物理法則を考慮した深層学習を採用した。3つ目として、ガウス過程に深層学習とスカラーの輸送方程式を組み込んだ新たな推定手法を提案した。この3つ目の手法の特徴として、先述の2つの手法とは異なり、確率的な推定手法である点が挙げられる。具体的には、平均の推定に加えて、その不確かさの情報も同時に取得することが可能である。本研究では、上記3つの手法においてスカラー源および濃度場の空間分布を推定し、その結果に基づき獲得関数を定義し、この獲得関数が最大となる位置に次のセンサを配置した。これを繰り返し行うことにより、濃度場およびスカラー源探索を実施した。

4. 研究成果

図 3 (a, b) において、シミュレーションによって得られたスカラー源、およびスカラー濃度分布を示す。黄色の中塗りがスカラー源位置を示しており、カラーコンターはスカラー濃度を示す。流線ベクトルで示す流れに乗ってスカラー源が計算領域全体に拡散している様子が確認できる。初期センサ配置として、赤の中塗りの位置に等間隔に初期センサを配置した。センサ位置における濃度情報を用いて、物理法則を考慮した深層学習により推定したスカラー源、およびスカラー濃度分布を図 3 (c, d) に示す。限られた計測データに基づき、精度良く濃度分布が推定されてい

ることが確認できる。なお、ここには示していないが、同様の推定性能が随伴解析、及び物理法則を考慮したガウス過程においても確認された。

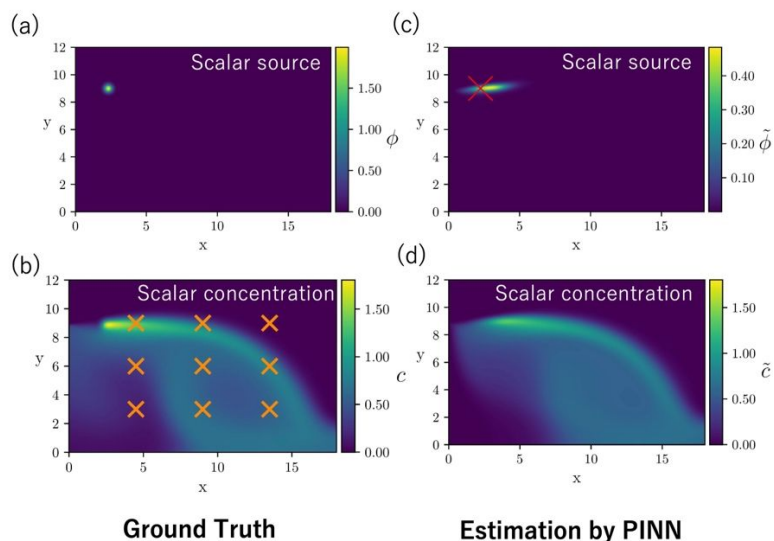


図3 正解場と物理法則を考慮した深層学習(PINN: Physics-informed neural network)による推定結果の比較

(a)正解のスカラー源分布、(b)正解の濃度分布とセンサ配置、
(c)推定されたスカラー源分布、(d)推定された濃度分布

次に、推定結果に基づき、センサを逐次的に追加する能動学習を通じて、最終的にスカラー源位置を同定することを試みた。具体的には、推定した濃度分布において、推定濃度が最大となる場所に次のセンサを配置した。その理由としては、スカラー源近傍において濃度が高くなることが想定されることが挙げられる。また、すでに配置されたセンサの周辺には、排除領域を設定し、その内部には新たなセンサが配置できないものとした。これにより、既存のセンサの近傍に新たなセンサを配置することを防ぎ、異なるセンサにより得られる情報ができるだけ重複しないような工夫を行った。上記の手法によりセンサを逐次的に追加した結果を図4に示す。これにより、センサを繰り返し配置することにより、徐々にセンサがスカラー源に近づいていく様子が確認できる(図4(a)参照)。その結果、スカラー源分布、および濃度分布も正確に推定できていることが図4(b, c)よりわかる。

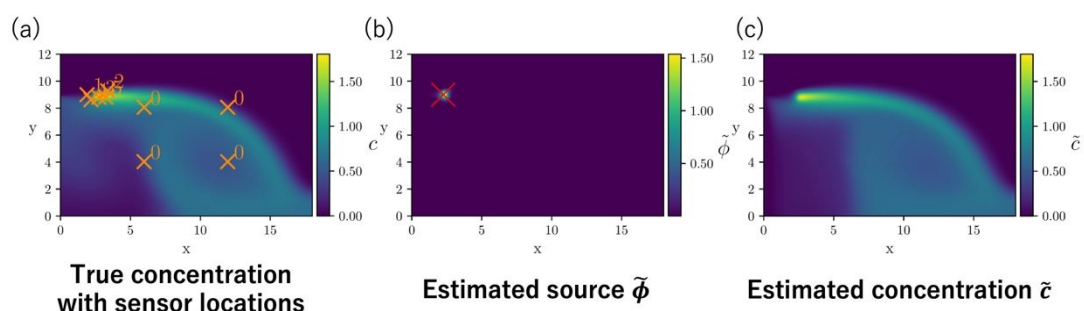


図4 物理法則を考慮した深層学習に能動学習を組み合わせることによりセンサの逐次配置によるスカラー源と濃度場の推定結果

(a) 正解の濃度分布と逐次的に配置されたセンサ位置、(b) スカラー源分布の推定結果、
(c) 濃度分布の推定結果

最後に、上記のシミュレーションにより検証されたスカラー源推定アルゴリズムを実験風洞におけるスカラー源推定に適用した。図5(a)の赤色X印に示すように、スカラー源は右上の流入入口近傍に設置する一方、初期センサは、図5(c)に示すように右下の風洞出口近傍に移動ロボットを配置し、スカラー濃度の計測を行った。風洞出口近傍に初期の計測点を配置した理由は、スカラー源から最も遠い位置に初期センサを配置することにより、スカラー源推定がより困難な状況を再現することに加えて、風洞内のいずれの位置にスカラー源を配置した場合においても、最終的には濃度は出口から排出されるため、出口近傍からスカラー源を推定することは一般的に有効である点が挙げられる。本研究で提案するアルゴリズムを適用することにより、図5(c)に示すように移動ロボットが徐々にスカラー源位置に収束する様子が確認できる。以上より、本研究で提案したスカラー源推定アルゴリズムの有効性を実証することに成功した。

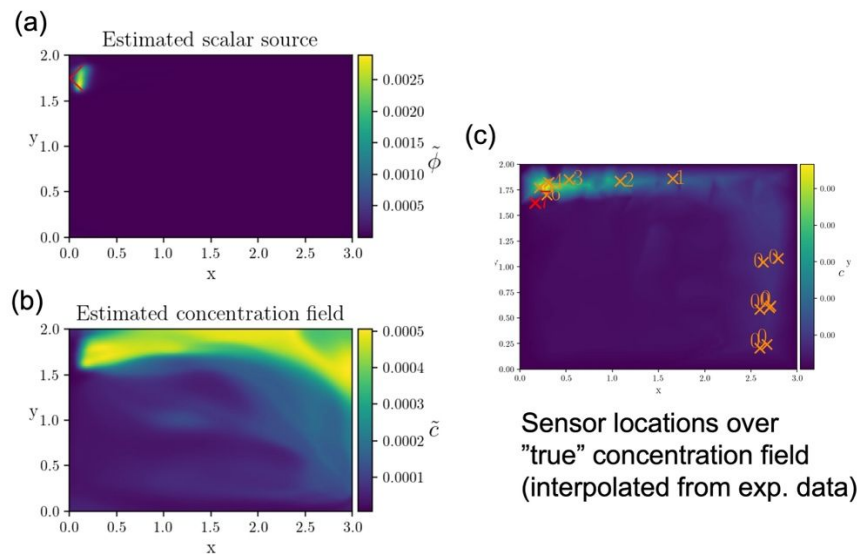


図5 実験風洞を用いたスカラー源探索実験の結果
 (a) 推定されたスカラー源分布と正解のスカラー源位置 (赤 X 印) (b) 濃度場の推定結果、
 (c) 移動ロボット位置の逐次更新による移動経路と計測データに基づく濃度分布

参考文献

[1] Harvey et al. IEEE. T. Robot. 24(2), 307–317 (2008), [2] Ayari and Bouamama, Robotics Biomim, 4 (1), 8 (2017), [3] Mahar and Datta, J. Water Resour. Plann. Manag., 123 (4), 199-207 (1997), [4] Skaggs and Kabala, Water Resour. Res., 31 (11), 2669-2673 (1995), [5] Vergassola et al., Nature, 445, 406-409 (2007)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 伊藤 宗嵩, 長谷川 洋介	4. 巻 74
2. 論文標題 チャンネル乱流の最適制御におけるレイノルズ数の影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 29, 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11188/seisankenkyu.74.29	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 -
1. 著者名 園田 隆博, 劉 竺辰, 伊藤 宗嵩, 長谷川 洋介	4. 巻 74
2. 論文標題 壁乱流制御における強化学習の有効性の検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 35-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11188/seisankenkyu.74.35	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 -
1. 著者名 長谷川洋介	4. 巻 73
2. 論文標題 計測とシミュレーションの融合による熱流動場の推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 機械の研究	6. 最初と最後の頁 911-918
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 F. Mirzapour-shafiyi, Y. Kametani, T. Hikita, Y. Hasegawa, M. Nakayama	4. 巻 accepted
2. 論文標題 Numerical evaluation reveals the effect of branching morphology on vessel transport properties during angiogenesis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 1-28
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 該当する

1. 著者名 A. Blumers, M. Yin, H. Nakajima, Y. Hasegawa, Z. Li, G. E. Karniadakis	4. 巻 2101.08414
2. 論文標題 Multiscale parareal algorithm for long-time mesoscopic simulations of microvascular blood flow in Zebrafish	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1-25
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kaithakkal Arjun J., Kametani Yukinori, Hasegawa Yosuke	4. 巻 164
2. 論文標題 Dissimilar heat transfer enhancement in a fully developed laminar channel flow subjected to a traveling wave-like wall blowing and suction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 120485 ~ 120485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120485	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 Gong Jiaming, Onishi Junya, He An, Kametani Yukinori, Hasegawa Yosuke, Shikazono Naoki	4. 巻 161
2. 論文標題 Heat transfer enhancement and pressure loss in a plate-fin heat exchanger with V-shaped oblique wavy surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 120263 ~ 120263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120263	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 KAMETANI Yukinori, FUKUDA Yutaka, OSAWA Takayuki, HASEGAWA Yosuke	4. 巻 15
2. 論文標題 A new framework for design and validation of complex heat transfer surfaces based on adjoint optimization and rapid prototyping technologies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JTST0016 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jtst.2020jtst0016	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 Sonoda, T., Liu, Z., Itoh, T., Hasegawa, Y.	4. 巻 960
2. 論文標題 Reinforcement Learning of Control Strategies for Reducing Skin Friction Drag in a Fully Developed Channel Flow	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2023.147	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 Wang, H., Hasegawa, Y.	4. 巻 35
2. 論文標題 Multi-objective optimization of actuation waveform for high-precision drop-on-demand inkjet printing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 13318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0122124	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7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 Liu, Z., 長谷川洋介
2. 発表標題 チャンネル乱流における過去と未来の壁面計測データが大規模構造推定に与える影響
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 Yang, L., Henzel., D., Karniadakis, G., 長谷川洋介
2. 発表標題 深層カーネルを用いた物理法則を考慮したガウス過程によるスカラー源と濃度場の推定
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 Henzel, D., Liu, Z., Karniadakis, G., 長谷川洋介
2. 発表標題 物理法則を考慮した深層学習を用いたスカラー源と濃度場推定のためのセンサー配置の能動学習
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 Kumar, V., Cai, S., 中倉満帆, 中嶋洋行, Karniadakis, G., 長谷川洋介
2. 発表標題 人工知能速度測定を用いたゼブラフィッシュ後脳基底動脈の血流推定
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 Z. Liu, 鈴木崇夫, 長谷川洋介
2. 発表標題 複数の面計測情報を用いたチャネル乱流場の状態推定
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Henzel, Z. Liu, G. E. Karniadakis, Y. Hasegawa
2. 発表標題 物理法則を考慮した深層学習を用いた限られた計測データに基づくスカラー源、および それに起因するスカラー濃度場の推定
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高林一貴, HENZEL Dominik, YANG Linghui, 長谷川 洋介
2. 発表標題 随伴解析による複雑流れにおけるスカラー源推定とセンサ配置最適化
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 長谷川洋介, 中山雅敬 (分担執筆)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 8
3. 書名 マイクロ・ナノ熱工学の進展 (第4篇3章(4)「生体内毛細血管網の輸送特性と分岐形態最適化」)	

〔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
---------	---------