

## 戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)

日本－米国共同研究

終了報告書 概要

1. 研究課題名：「乱流中におけるスカラー源探索アルゴリズム最適化のためのビッグデータ数値実験室」
2. 研究期間：2015年4月～2018年3月
3. 主な参加研究者名：  
日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	長谷川洋介	准教授	東京大学生産技術研究所	全体総括
研究参加者	Daide Cerizza	博士課程学生	東京大学・生産技術研究所	固定センサ群の最適配置
研究参加者	Constantinos Panagiotou	特任研究員	東京大学・生産技術研究所	移動センサを用いたスカラー源探索アルゴリズム開発
研究参加者	巻俊宏	准教授	東京大学・生産技術研究所	スカラー源探素水中ロボットの開発、探索性能の評価
研究参加者	佐藤芳紀	特任研究員	東京大学・生産技術研究所	スカラー源探素水中ロボットの開発、探索性能評価
研究参加者	松田匠未	特任研究員	東京大学・生産技術研究所	スカラー源探素水中ロボットの開発、探索性能評価
研究期間中の全参加研究者数			6名	

## 米国側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Tamer Zaki	准教授	Johns Hopkins大学	全体総括
研究参加者	Charlese Meneveau	教授	Johns Hopkins大学	乱流データベースの構築
研究参加者	Qi Wang	博士課程学生	Johns Hopkins大学	乱流拡散シミュレーション
研究参加者	Vincent Mons	特任研究員	Johns Hopkins大学	スカラー源探索アルゴリズムの開発
研究期間中の全参加研究者数			4名	

#### 4. 共同研究の概要

本研究では、乱流状態の環境中に物質放出源（以下、スカラー源と呼ぶ）が存在する場合を想定し、有限かつノイズを有するセンサ情報を用いて、放出源の位置や強度を効率良く推定するためのアルゴリズム構築を行った。

そのために、標準的な乱流場の直接数値シミュレーションを実施し、流れ場の全時空間データを保存し、これをデータベースとして一般公開した。更に、構築したデータベース内の乱流場に仮想的なスカラー源を配置し、移流拡散方程式を数値的に解くことによって、乱流物質拡散を忠実に再現した。

上述の数値的に再現された濃度場に対して、固定センサおよび移動センサを自由に配置し、様々なスカラー源探索アルゴリズムを評価するための環境を構築すると共に、これを利用して、随伴解析に基づく革新的スカラー源探索アルゴリズムを開発した。本研究で開発されたアルゴリズムを上述の数値実験に適用し、その高い推定性能を確認すると共に、鹿児島湾熱水鉱床域における自律型海中ロボットを用いたスカラー源探索に応用し、アルゴリズムの検証を行った。

#### 5. 共同研究の成果

##### 5-1 共同研究の学術成果

世界最大規模の標準的な乱流場の直接数値シミュレーションを実施し、乱流場の時空間データベースを構築し、一般公開した。構築された数値乱流場において、仮想的なスカラー源とセンサ群を配置することにより、センサ情報に基づく革新的なスカラー源探索アルゴリズムを開発し、その推定性能を検証した。また、複数の固定センサの最適配置や移動センサの最適経路の問題を数学的に定式化し、最適化されたセンサ配置や経路における推定性能を評価すると共に、最適なセンサ配置に関する一般的な指針を抽出した。開発したアルゴリズムの実証を目的として、センサ計測システムおよびスカラー源発生装置を開発し、大型回流水槽において検証した。また、開発したセンサ計測システムを自律型水中ロボットに搭載し、鹿児島湾熱水鉱床域における熱水源探査に応用し、本研究で開発したスカラー源探索アルゴリズムの高い推定性能を実証した。

##### 5-2 国際連携による相乗効果

本共同研究では、米国側の構築した乱流場の大規模データベースと日本側が開発してきた最適化理論、ロボット技術を融合することで、研究分野を横断したユニークな研究グループを構成できた。毎週実施したスカイプ会議や双方の研究機関への研究者の派遣を通じて、両機関の研究者、大学院生が有機的に連携し、単独の研究では得られない顕著な研究成果が得られた。また、両機関の間での研究者や学生の派遣を通じて、両国の他の研究者を巻き込んだ新たな共同研究への展開も見えつつあり、両国間の共同研究の発展に大きく貢献できた。

##### 5-3 共同研究成果から期待される波及効果

本研究で構築した乱流データベースは、従来限られた研究者のみがアクセス可能であった、流れ場の詳細な時系列データを一般公開するものであり、これまでの研究及び教育活動の在り方を一新する可能性がある。また、本共同研究で構築したスカラー源探索アルゴリズム、及び最適センサ配置や最適センサ経路のアルゴリズムは、環境中から得られる多種多様なセンサ情報を融合することによって、大気、都市、建物、農地などの人間環境の新しいモニタリングシステムの構築に広く応用可能であり、大きな波及効果が見込まれる。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)  
Japan – US Joint Research Program  
Executive Summary of Final Report

1. Project Title : 「A big-data computational laboratory for the optimization of olfactory search algorithms in turbulent environment」
2. Project Period : Apr. 2015 ~ Mar. 2018
3. Main Participants :  
Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role
PI	Yosuke Hasegawa	Associate Professor	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo	Team leader on Japanese side
Collaborator	Davide Cerizza	Ph.D. student	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo	Optimal arrangement of stationary sensors
Collaborator	Constantions Panagiotou	Postdoc	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo	Optimal trajectory of a moving sensor
Collaborator	Toshihiro Maki	Associate Professor	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo	Development of olfactory search AUV system
Collaborator	Yoshiki Sato	Postdoc	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo	Olfactory search experiments
Collaborator	Takumi Matsuda	Postdoc	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo	Olfactory search experiments
Total number of participating researchers in the project:				6

## US-side

	Name	Title	Affiliation	Role
PI	Tamer Zaki	Associate Professor	Johns Hopkins University	Team leader on US side
Collaborator	Charlese Meneveau	Professor	Johns Hopkins University	Establishment of DNS databases
Collaborator	Qi Wang	Ph.D. student	Johns Hopkins University	DNS of turbulent scalar transfer
Collaborator	Vincent Mons	Postdoc	Johns Hopkins University	Development of olfactory search algorithms
Total number of participating researchers in the project:				4

#### 4. Summary of the joint project

We developed new algorithms to reconstruct the location and intensity of the scalar source based on limited and noisy sensor signals in turbulent environments. To achieve this goal, we first conducted direct numerical simulations of canonical turbulent flows, and established the databases of their entire spatio-temporal evolutions. Then, we introduced artificial scalar sources in the simulated turbulent flows, and reproduced scalar diffusion by directly solving the scalar transport equation. We also introduced stationary or moving sensors, and establish a numerical environment to assess different olfactory search algorithms through numerical experiments. By utilizing the numerical environment, we develop innovative scalar source estimation algorithms based on adjoint analysis. The developed algorithms were evaluated in the numerical simulations. In addition, it was also installed in autonomous underwater vehicle and successfully applied to estimation of hydrothermal deposits in Kagoshima Bay.

#### 5. Outcomes of the joint project

##### 5-1 Intellectual Merit

We conducted one of the largest direct numerical simulations of canonical turbulent flows and established the databases of their entire spatio-temporal evolutions. By utilizing the databases, we developed innovative scalar source estimation algorithms based on limited sensor signals, and assess their performances. We also formulated optimal arrangement of stationary sensor and optimal trajectory of moving sensors for reconstructing a scalar source. In addition, based on the obtained results, we extracted general knowledge on optimal sensor arrangement for better estimation of scalar source. Finally, we installed the developed algorithm to an autonomous underwater vehicle, and applied it to estimation of hydrothermal deposits in Kagoshima Bay in order to validate its high estimation performance.

##### 5-2 Synergy through the Collaboration

In this project, we combined the world's largest turbulence databases established by Johns Hopkins University, and advanced optimal control theory and robotics technologies developed in the University of Tokyo in order to yield innovative olfactory search algorithms in turbulent environments. Regular remote meetings between the two institutes accelerated collaborations and led to distinguished achievements. In addition, mutual exchanges of researchers and students between the two institutes contributed to the development of young researchers and promoting future collaborations between the two countries.

##### 5-3 Potential Impacts on Society

The turbulence databases established in the present project allow researchers, students and even non-academic people to freely access the entire data on spatio-temporal evolutions of turbulent flows, and therefore have significant impacts on the future approaches in both research and education activities. The olfactory search algorithms developed in this project have wide possible applications for developing innovative monitoring systems of human environments such as atmosphere, urban city, buildings and farms by incorporating various sensor signals.

共同研究における主要な研究成果リスト

1. 論文発表等

\* 原著論文 (相手側研究チームとの共著論文)

\* 査読有り

1. Davide Cerizza, Wataru Sekiguchi, Takahiro Tsukahara, Tamer Zaki, Yosuke Hasegawa, "Reconstruction of Scalar Source Intensity Based on Sensor Signal in Turbulent Channel Flow" *Flow, Turbulence and Combustion*, Volume 97, Issue 4, pp 1211–1233 (2016)

\* 査読無し

2. Constantinos Panagiotou, Davide Cerizza, Tamer Zaki, Yosuke Hasegawa, "Optimization of a moving sensor trajectory for reconstructing scalar source intensity in a turbulent environment" *Seisan-Kenkyu*, Volume 70, No. 1, pp. 33-35 (2018)

\* 原著論文 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文)

1. Takao Suzuki, Yosuke Hasegawa, "Estimation of Turbulent Channel Flow at  $Re = 100$  based on Wall Measurement Using a Simple Sequential Approach", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 830, pp. 760-796 (2017).

\* その他の著作物 (相手側研究チームとの共著のみ) (総説、書籍など)

無し

\* その他の著作物 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの総説、書籍など)

1. 鈴木崇夫, 長谷川洋介, 「逐次法を用いた壁計測に基づく平行平板完全発達流の推定」, *ながれ* Vol. 36, (2017)

2. 学会発表

\* 口頭発表 (相手側研究チームとの連名発表)

発表件数 : 計 4 件 (うち招待講演 : 計 0 件)

1. Davide Cerizza, Tamer Zaki, Yosuke Hasegawa, "Effects of Velocity and Measurement Uncertainties on Estimation of Scalar Source Intensity in Turbulent Channel Flow", The First Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC), Mar. 13-17, 2016, Hawaii's Big Island, US.
2. Qi Wang, Yosuke Hasegawa, Charles Meneveau, Tamer Zaki, "Adjoint-optimization algorithm for spatial reconstruction of a scalar source" 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Portland, Oregon, USA, Nov. 20-22 (2016)
3. Constantinos Panagiotou, Davide Cerizza, Tamer Zaki, Yosuke Hasegawa, "Evaluation of Olfactory Search Algorithms Through Direct Numerical Simulation of Turbulent Scalar Transfer" Tenth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP10), July 6-9, 2017, Swissotel, Chicago, USA
4. Panagiotou, K., Zaki, T., Hasegawa, Y., "Optimization of sensor's trajectory for monitoring a point scalar source in turbulent environment", The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluid Engineering Conference (TFEC9), October 28-30, 2017, Okinawa, Japan

\* 口頭発表 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数 : 計 9 件 (うち招待講演 : 計 5 件)

1. Wataru Sekiguchi, Davide Cerizza, Takahiro Tsukahara, Yosuke Hasegawa,

- "Estimation of Scalar Source Strength Based on Sensor Information by Adjoint Analysis in Turbulence", the Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT015), Busan, Korea, Nov. 22-25 (2015)
2. Davide Cerizza, Wataru Sekiguchi, Takahiro Tsukahara, Yosuke Hasegawa, "Reconstruction of time-varying scalar source intensity based on sensing signal in turbulent channel flow", 8th International Symposium on Turbulent Heat and Mass Transfer 8 (THMT15), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Sept. 15-18 (2015)
  3. 関口航, Davide Cerizza, 塚原隆裕, 長谷川洋介 「随伴解析を用いたセンサー情報に基づくスカラー源強度推定」日本伝熱シンポジウム, 福岡, 平成 27 年 6 月 3 日 ~6 月 5 日
  4. Yosuke Hasegawa, Takao Suzuki, "Estimation of turbulent channel flow based on the wall measurement with a statistical approach" 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Portland, Oregon, USA, Nov. 20-22 (2016)
  5. Toshihiro Maki, Autonomous platform systems for detailed seafloor observation, The 3rd UTokyo-SJTU-KAIST Joint Academic Symposium, Tokyo, Sept. 10 (2016), 招待講演
  6. Toshihiro Maki, Autonomous Underwater Platform Systems, International Workshop on Aqua Vision 2016, Kyoto, Sept. 26-27 (2016), 招待講演
  7. 卷俊宏, 自律型海中観測システム, 平成 29 年度 第 6 回 学融合セミナー, 東京大学 柏キャンパス, 平成 29 年 11 月 22 日, 招待講演
  8. Toshihiro Maki, Recent Developments on our AUV Fleet: Tri-TON 2 and HATTORI, The Eighth Symposium on Polar Science, Tokyo, Dec. 7 (2017), 招待講演
  9. Yosuke Hasegawa, Estimation of Scalar Source in Turbulent Environments, US-Japan Workshop on Bridging Fluid Mechanics and Data Science, Mar 26-28 (2018) , 招待講演

\*ポスター発表 (相手側研究チームとの連名発表)

発表件数 : 計 0 件

\*ポスター発表 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数 : 計 1 件

1. 卷俊宏, 佐藤芳紀, 水島隼人, 松田匠未, 増田殊大, 岡田宣義, 坂巻隆, 海底ステーションを基地とするホバリング型 AUV の展開手法 -海底環境の長期モニタリングに向けて-, ロボティクス・メカトロニクス講演会' 16, 1A1-17b4, 横浜, 平成 28 年 6 月 8-11 日, 招待講演

### 3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

1. 平成 29 年度第 1 回乱流制御研究会セミナー, 講演者 : Tamer Zaki 准教授 (Johns Hopkins 大学・准教授), 主催者 : 長谷川洋介 (東大生研・准教授), 東京大学生産技術研究所, 東京, 日本, 2017 年 6 月 9 日、参加人数 50 名程
2. TSFD セミナー, 講演者 : Charles Meneveau (Johns Hopkins 大学・教授), 主催者 : 長谷川洋介 (東大生研・准教授), 東京大学生産技術研究所, 東京, 日本, 2016 年 6 月 24 日

### 4. 研究交流の実績

#### 【合同ミーティング】

- ・ 2015 年 8 月 11-16 日 : キックオフ合同ミーティング、Johns Hopkins 大学
- ・ 2016 年 6 月 24 日 : 合同ミーティング、東大生研
- ・ 上記に加えて、両国のチームメンバーを交えて、定期的に skype ミーティングを毎月 3 回

開催（原則毎週 1 回、但し、3 週毎に 1 週休み）。

【学生・研究者の派遣、受入】

- ・ 2015 年 8 月 11 日～8 月 16 日（6 日間）：  
東大生研の長谷川洋介が Johns Hopkins 大学に滞在
- ・ 2016 年 5 月 9 日～6 月 14 日（37 日間）：  
Johns Hopkins 大学の Tamer Zaki 准教授を東大生研へ受入
- ・ 2016 年 5 月 9 日～5 月 28 日（20 日間）：  
Johns Hopkins 大学の博士学生(Qi Wang 氏)を東大生研へ受入
- ・ 2016 年 6 月 24 日（1 日間）：  
Johns Hopkins 大学の Charlse Meneveau 教授を東大生研へ受入、セミナー開催
- ・ 2017 年 5 月 8 日～7 月 5 日（59 日間）：  
Johns Hopkins 大学の Tamer Zaki 准教授を東大生研へ受入
- ・ 2017 年 5 月 8 日～5 月 22 日（15 日間）：  
Johns Hopkins 大学の博士学生(Qi Wang 氏)を東大生研へ受入
- ・ 2017 年 5 月 26 日～6 月 11 日（17 日間）：  
Johns Hopkins 大学の研究員(Vincent Mons 氏)を東大生研へ受入

5. 特許出願

研究期間累積出願件数：0 件

6. 受賞・新聞報道等

特に無し

7. その他

米国側と共著で発表した論文(Cerrizza et al. Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 97 (4), pp. 1211-1233, 2016)は、学術論文の Web やソーシャルメディアへ与える影響力の定量評価指標である Altmetric Ranking において、2016 年に同ジャーナルから発行された論文の中で第 2 位にランクされた。