

微気象制御学：微気象の調和的予測と能動的観測の融合による自律制御型社会基盤の創成

領域番号：20B207

令和2年度～令和4年度

科学研究費補助金 学術変革領域(B) 研究成果報告書

令和5年6月

領域代表者 大西 領

東京工業大学・学術国際情報センター



## 1. はしがき

微気象（建物や人間活動などの影響を強く受ける地表から高度 100m 程度までの気象）は社会が抱える様々な課題に関係しているが、学術的にはほとんど手が付けられていない。本領域は、その予測を世界に先駆けて実現し、その予測情報に立脚した新たな社会サービスの実現可能性を示すことで、自然科学と社会に新たな変革をもたらす。単なる現象の理解と予測では、最終的に新しい社会的価値を生み出すことはできない。各々の社会的課題の解決に有効となる社会基盤の構築が不可欠であり、そこで重要となるのは、各々の課題解決に必要な「時空間スケールと精度」を的確に捉えた観測・予測・制御の連携技術である。

本領域では、まずは観測と予測の融合に焦点を当てて新学術創成の端緒を開く。単に最先端の観測と予測を連携するのではなく、最終目的に応じた適切な「時空間スケールと精度」を共有しながら、価値を生み出す真の融合を実現する。

## 2. 研究組織

計画研究

領域代表者 大西 領（東京工業大学・学術国際情報センター・准教授）

### 総括班「微気象制御学創生のための戦略的連携推進」

研究代表者 大西 領（東京工業大学・学術国際情報センター・准教授）

研究分担者 椿野 大輔（名古屋大学・工学研究科・准教授）

研究分担者 小森 悟（同志社大学・研究開発推進機構・研究員）

研究分担者 渡邊 智昭（名古屋大学・工学研究科・准教授）

研究分担者 鈴木 智（千葉大学・大学院工学研究院・准教授）

### A01 班「AI 融合シミュレーションによる微気象の調和的予測技術の創出」

研究代表者 大西 領（東京工業大学・学術国際情報センター・准教授）

研究分担者 杉山 大祐（国立研究開発法人海洋研究開発機構・付 加価値情報

創生部門(地球情報科学技術センター)・准研究副主任)

研究分担者 廣川 雄一（足利大学・工学部・准教授）

研究分担者 松田 景吾（国立研究開発法人海洋研究開発機構・付 加価値情報

創生部門(地球情報科学技術センター)・副主任研究員)

研究分担者 小森 悟（同志社大学・研究開発推進機構・研究員）

#### A02 班「ドローンを用いた微気象の能動的観測技術の創出」

研究代表者 鈴木 智（千葉大学・大学院工学研究院・准教授）

研究分担者 椿野 大輔（名古屋大学・工学研究科・准教授）

研究分担者 野田 龍介（東京工科大学・工学部・講師）

研究分担者 劉 浩（千葉大学・大学院工学研究院・教授）

#### A03 班「人体温熱生理応答への微気象の影響解明とモデル化」

研究代表者 平田 晃正（名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授）

研究分担者 小寺 紗千子（名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授）

研究分担者 Rashed Essam（兵庫県立大学・情報科学研究科・教授）

#### A04 班「大型プラント内の異常高温排熱塊の発生要因解明とモデル化」

研究代表者 渡邊 智昭（名古屋大学・工学研究科・准教授）

研究分担者 長田 孝二（名古屋大学・工学研究科・教授）

### 3. 交付決定額（配分額）

	合計	直接経費	間接経費
令和2年度	5,525万円	4,250万円	1,275万円
令和3年度	5,005万円	3,850万円	1,155万円
令和4年度	5,057万円	3,890万円	1,167万円
総計	15,587万円	11,990万円	3,597万円

### 4. 研究発表

#### a. 学術論文

1. （査読付き） Y. Yasuda, R. Onishi, Y. Hirokawa, D. Kolomenskiy, D. Sugiyama,  
Super-Resolution of Near-Surface Temperature Utilizing Physical Quantities for  
Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology, Building and Environment,

209, 108597 (2022).

2. (査読付き) Y. Yasuda, and R. Onishi, Rotationally Equivariant Super-Resolution of Velocity Fields in Two-Dimensional Flows Using Convolutional Neural Networks, *APL Machine Learning* (accepted on March 2013)
3. (査読付き) Haneda K, Matsudaira K, Noda R, Nakata T, Suzuki S, Liu H, Takahashi H. Compact Sphere-Shaped Airflow Vector Sensor Based on MEMS Differential Pressure Sensors. *Sensors*. 2022; 22(3):1087. <https://doi.org/10.3390/s22031087>
4. (査読付き) 嶋村 涼介, 鈴木 智, スーパーツイスティングスライディングモード制御を用いたマルチロータ UAV のロバスト姿勢・角速度制御, 日本ロボット学会誌, 2022, 40 巻, 1 号, p. 62-70, 公開日 2022/01/17, Online ISSN 1884-7145, Print ISSN 0289-1824, <https://doi.org/10.7210/jrsj.40.62>
5. (査読付き) Noda Ryusuke, Ikeda Teruaki, Nakata Toshiyuki, Liu Hao, "Characterization of the low-noise drone propeller with serrated Gurney flap", *Frontiers in Aerospace Engineering*, 1, 2022,

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpace.2022.1004828>

6. (査読付き) A. Asignacion, S. Suzuki, R. Noda, T. Nakata and H. Liu, "Frequency-Based Wind Gust Estimation for Quadrotors Using a Nonlinear Disturbance Observer," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 4, pp. 9224-9231, Oct. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3190073.
7. (査読付き) 片岡 佐京, 鈴木 智, 風リスクを考慮した自律ドローンの軌道計画に関する研究, 日本ロボット学会誌, 2022, 40 巻, 10 号, p. 915-923, 公開日 2022/12/24, Online ISSN 1884-7145, Print ISSN 0289-1824, <https://doi.org/10.7210/jrsj.40.915>
8. (査読付き) Taku Nishimura, Essam A. Rashed, Sachiko Koderu, Hidenobu Shirakami, Ryotetsu Kawaguchi, Kazuhiro Watanabe, Mio Nemoto, Akimasa Hirata, Social implementation and intervention with estimated morbidity of heat-related illnesses from weather data: A case study from Nagoya City, Japan, *Sustainable Cities and Society*, Volume 74, 2021, 103203, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103203>.
9. (査読付き) A. Takada et al., "Computed and Measured Core Temperature of



Patients With Heatstroke Transported From Their Homes via Ambulance," in IEEE Access, vol. 10, pp. 41839-41851, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3167520.

10. (査読付き) Takada Akito, Kodera Sachiko, Suzuki Koji, Nemoto Mio, Egawa Ryusuke, Takizawa Hiroyuki, Hirata Akimasa, "Estimation of the number of heat illness patients in eight metropolitan prefectures of Japan: Correlation with ambient temperature and computed thermophysiological responses", Frontiers in Public Health, 11, 2023, URL=<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2023.1061135>
11. (査読付き) T. Katagiri, T. Watanabe, and K. Nagata , Statistical properties of a model of a turbulent patch arising from a breaking internal wave, Physics of Fluids, Vol. 33 055107 (2021), <https://doi.org/10.1063/5.0046832>
12. (査読付き) M. Hayashi, T. Watanabe, and K. Nagata, The relation between shearing motions and the turbulent/non-turbulent interface in a turbulent planar jet, Physics of Fluids, Vol. 33 055126 (2021),

<https://doi.org/10.1063/5.0045376>

13. (査読付き) M. Hayashi, T. Watanabe, and K. Nagata, Characteristics of small-scale shear layers in a temporally evolving turbulent planar jet, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 920 A38 (2021), <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.459>
14. (査読付き) T. Watanabe and K. Nagata, Large-scale characteristics of a stably stratified turbulent shear layer, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 927 A27 (2021), <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.773>
15. (査読付き) T. Akao, T. Watanabe, and K. Nagata, Vertical confinement effects on a fully developed turbulent shear layer, *Physics of Fluids*, Vol. 34 055129 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0090686>
16. (査読付き) K. Nakamura, T. Matsushima, Y. Zheng, K. Nagata, and T. Watanabe, Large- and small-scale characteristics in a temporally developing shearless turbulent mixing layer, *Physics of Fluids*, Vol. 34 115117 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0121047>
17. (査読付き) T. Watanabe and K. Nagata, Energetics and vortex structures near small-scale shear layers in turbulence *Physics of Fluids*, Vol. 34 095114 (2022),

<https://doi.org/10.1063/5.0099959>

18. (査読付き) T. Watanabe, Y. Zheng, and K. Nagata, The decay of stably stratified grid turbulence in a viscosity-affected stratified flow regime, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 946 A29 (2022), <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.617>
19. (投稿中) Y. Yasuda, R. Onishi and K. Matsuda, Super-Resolution of Three-Dimensional Temperature and Velocity for Building-Resolving Urban Micrometeorology Using Physics-Guided Convolutional Neural Networks with Image Inpainting Techniques, <http://arxiv.org/abs/2303.16684>
20. (投稿中) Y. Yasuda and R. Onishi, Spatio-Temporal Super-Resolution Data Assimilation (SRDA) Utilizing Deep Neural Networks with Domain Generalization Technique Toward Four-Dimensional SRDA, <https://arxiv.org/abs/2212.03656>
21. (査読なし) 大西領、安田勇輝、深層学習を活用した超解像シミュレーションによる都市街区熱環境のリアルタイム予測、*伝熱*、60, 2021, 30-35
22. (査読なし) 大西領、生活世界に溶け込む微気象予測 ~環境予測システムと

社会サービスシステムをつなぐ～、計測と制御、60, 2021, 499-503

23. (査読なし) 安田勇輝、大西領、廣川雄一、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐、  
畳み込みニューラルネットによる都市微気象シミュレーションの物理超解  
像、ながれ 注目研究 in CFD35、41 (2022) 85-88
24. (査読なし) 大西領、安田勇輝、環境と調和したスマート社会を実現するた  
めの都市微気象リアルタイム予測技術、化学工学会誌、2022

b. 学会発表

1. 大西領、廣川雄一、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐、物理超解像シミュレー  
ションによる都市街区微気象のリアルタイム予測、第34回数値流体力学シ  
ンポジウム、2020
2. 大西領、廣川雄一、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐、松田景吾、AI 技術を活  
用した都市街区微気象のリアルタイム予測、電子情報通信学会総合大会、  
2021
3. 大西領、未来社会サービス実現のための微気象予測基盤の創生 ～ドローン  
技術と微気象予測技術の融合～、第5回千葉大学 CAIV セミナー(招待講演)、

2020

4. 大西領、AI 融合シミュレーションによる微気象予測の実現と未来社会サービスの創出、JST-CRDS 科学技術未来戦略ワークショップ「複雑な流れ現象の解明と統合的制御」(招待講演)、2021
5. Ryo Onishi、Physics-informed super-resolution for real-time prediction of urban micro-meteorology、PiAI Seminar Series: Physics informed AI in Plasma Science(招待講演)(国際学会)、2021
6. 大西領、Dmitry Kolomenskiy、松田景吾、廣川雄一、杉山大祐、AI 融合シミュレーションによる微気象の調和的予測技術の創出、「微気象制御学」領域シンポジウム、2021
7. 原 将太、中田 敏是、劉 浩、昆虫規範型デュアルコプターの創製、日本機械学会 第 31 回バイオフィロントニア講演会、2020
8. 藤田 健人、椿野 大輔、階層化最適制御則における情報集約が生じる条件について、第 8 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム、2021
9. 上松涼太、平田晃正、データ同化による簡易体温推定手法のパーソナライゼ

- ーション、電子情報通信学会総合大会、2021
10. 平田晃正, 小寺紗千子, Essam Rashed、名古屋市における熱中症搬送者予測—ニューラルネットワークと非線形回帰によるアプローチ—、電子情報通信学会総合大会(招待講演)、2021
  11. T. Katagiri, T. Watanabe, K. Nagata, Turbulent/non-turbulent interface in a turbulent patch arising from a breaking internal wave, The 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics(国際学会), 2020
  12. M. Hayashi, T. Watanabe, K. Nagata, Analysis of velocity gradient tensor in a turbulent planar jet with triple decomposition, The 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics(国際学会), 2020
  13. 渡邊智昭、大型プラント内の異常高温排熱塊の発生要因解明とモデル化、「微気象制御学」領域シンポジウム(招待講演)、2021
  14. 林雅人, 渡邊智昭, 長田孝二、乱流平面噴流における内部せん断層の解析、第18回日本流体力学中部支部講演会、2020
  15. 大西領、微気象制御学と気象制御、ムーンショットセミナー(招待講演)、2021
  16. 大西領、Dmitry Kolomenskiy、廣川雄一、杉山大祐、松田景吾、機械学習技

- 術を活用した都市街区微気象のリアルタイム予測、日本機械学会 2021 年次大会、2021
17. 安田勇輝、大西領、廣川雄一、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐、ニューラルネットワークによる都市微気象シミュレーションの物理超解像、第 35 回数値流体力学シンポジウム、2021
  18. 廣川 雄一、大西領、安田勇輝、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐、微気象シミュレーション超解像の浮動小数点精度に関する検討、第 35 回数値流体力学シンポジウム、2021
  19. 大西領、安田勇輝、小野寺孔明、松田景吾、微気象×機械学習~機械学習技術を活用した都市街区微気象のリアルタイム予測~、機械学会熱工学部門(招待講演)、2022
  20. 大西領、AI 融合シミュレーションによる微気象の調和的予測技術の創出、第 2 回「微気象制御学」領域シンポジウム、2022
  21. 安田勇輝、都市街区における熱物質拡散に対する 3 次元超解像、第 2 回「微気象制御学」領域シンポジウム、2022
  22. R. Onishi, Y. Yasuda, Super-resolution simulation of urban micro-meteorology

for sustainable future society, AI Super-Resolution Simulation Workshop(招待講演)(国際学会), 2022

23. Y. Yasuda, Roto-Translation Equivariant Super Resolution of Two Dimensional Fluids Using Convolutional Neural Networks, AI Super-Resolution Simulation Workshop, 2022

24. 藤田 健人, 椿野 大輔、階層化最適制御則における情報集約が生じる条件について、第 8 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (MSCS2021)、2021

25. 藤田 健人, 椿野 大輔、エージェント数が異なる複数グループからなるシステムに対する階層化最適制御、第 65 回システム制御情報学会研究発表講演会、2021

26. 原将太, 前沢優斗, 中田 敏是, 劉 浩、飛翔昆虫を規範としたデュアルコプターのモデリングと姿勢制御、Robomech 2021、2021

27. Ryosuke Shimamura, Satoshi Suzuki, Robust Altitude Control of Multi-rotor UAV using Super Twisting Sliding Mode Control, The 21st International Conference



on Control, Automation and Systems (ICCAS 2021)(国際学会), 2021

28. 竹内 颯太, 椿野 大輔、同一ノイズ環境下の複数線形システムに対する Kalman フィルタによる協調状態推定、第 64 回自動制御連合講演会、2021
29. 高田旭登, 江川隆輔, 滝沢寛之, 平田晃正、8 都道府県における熱中症搬送人員数予測、電子情報通信学会総合大会、2022
30. 上松涼太, 平田晃正, 宮澤太機、データ同化によるリアルタイム熱中症リスク評価に関する検討、電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会、2021
31. 高田旭登, 小寺紗千子, 平田晃正、複合物理解析と救急搬送データに基づく高齢者熱中症リスク評価、電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会、2021
32. 渡邊智昭、安定密度成層下のせん断乱流の乱流構造と拡散現象に関する研究、The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows(国際学会)、2022
33. 渡邊智昭, 長田孝二、大型プラント内の異常高温排熱塊の発生要因解明とモ

- デル化、第2回「微気象制御学」領域シンポジウム(招待講演)、2021
34. 古田作, 渡邊智昭, 長田孝二、主流に直交する旋回噴流の数値解析、第2回「微気象制御学」領域シンポジウム(招待講演)、2022
35. T. Watanabe, K. Nagata, Characteristics of small-scale shear layers in isotropic turbulence, JSPS Bilateral Workshop 2021(招待講演)(国際学会), 2022
36. Yuki Yasuda, Ryo Onishi, Keigo Matsuda, Three-Dimensional Super-Resolution of Passive-Scalar and Velocity Distributions Using Neural Networks for Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology, WCCM2022(国際学会), 2022
37. Yuki Yasuda, Ryo Onishi, Yuichi Hirokawa, Dmitry Kolomenskiy, Daisuke Sugiyama, Physics Super-Resolution of Near-Surface Temperature for Urban Micrometeorology Using Convolutional Neural Networks, JpGU(国際学会), 2022
38. 小野寺孔明、大西領、安田勇輝、注意機構付き深層学習による都市街区熱環境マップの物理超解像、日本気象学会 2022 年度春季大会、2022
39. 小野寺孔明、大西領、安田勇輝、都市街区熱環境マップに対する注意機構付

き物理超解像、日本機械学会 2022 年度大会、2022

40. 安田勇輝、大西領、松田景吾、畳込ニューラルネットによる都市微気象の 3 次元物理超解像、秋季気象学会、2022
41. 安田勇輝、大西領、回転同変な畳込ニューラルネットによる 2 次元流体の超解像、春季気象学会、2022
42. 大西領、安田勇輝、微気象予測と未来社会サービスの同時実現を目指す超解像シミュレーション法、自動車技術会第 2 回 CFD 部門委員会(招待講演)、2022
43. 大西領、安田勇輝、ドローンの観測データを用いた微気象予測、JAXA ワークショップ「ドローン統合情報利用プラットフォームの可能性を探る」(招待講演)、2023
44. 大西領、MSSG モデルの応用と発展、MSSG ワークショップ、2023
45. 大西領、安田勇輝、シミュレーション科学とデータ科学の融合技術で挑む”微気象”予測、京大情報工学シンポジウム(招待講演)、2023
46. 大西領、安田勇輝、ドローンの観測データを用いた微気象予測、JUTM(招待

講演)、2023

47. Yuki Yasuda and R. Onishi, Four-Dimensional Super-Resolution Data Assimilation (4D-SRDA), AGU fall meeting(国際学会), 2022
48. 安田勇輝、大西領、4D 超解像データ同化:時空間超解像を用いたデータ同化法の開発、秋季気象学会、2022
49. Xidong Hu, Takashi Terada, Tsukuru Furuta, Keigo Matsuda, Kouji Nagata, Shaoxiang Qian, Tomoaki Watanabe, Ryo Onishi, Model Intercomparison Study of Jet in Cross Flow for Prediction of Hot Air Recirculation, 第 36 回数値流体力学会, 2022
50. 安田勇輝、大西領、4D 超解像データ同化:時空間超解像を用いたデータ同化法の提案と順圧不安定流への適用、第 36 回数値流体力学会、2022
51. Kento Fujita, Hierarchical optimal control with information aggregation for groups with different numbers of agents, ACC2022(国際学会), 2022
52. Ryusuke Noda, The Aerodynamics in Multiple Flight Modes of a Dragonfly, WCC-XV(国際学会), 2022
53. 野田 龍介、トンボの自由飛翔時におけるスパン効率、日本機械学会 第 34

回バイオエンジニアリング講演会、2022

54. Sota Takeuchi, Performance improvement in Kalman filters Due to Cooperation for multi-agent systems under identical noise, CDC2022(国際学会), 2022
55. A. Takada, S. Koderu, R. Egawa, H. Takizawa, A. Hirata, Estimation of Number of Heat-Related Illness Patients Transported in Eight Prefectures, BioEM 2022(国際学会), 2022
56. 高田旭登, 平田 晃正、8 都道府県における熱中症搬送者数予測、日本生気象学会、2022
57. 榎亮, 渡邊智昭, 長田孝二、速度こう配テンソルの三成分分解による乱流噴流のエネルギー輸送解析、WCCM-APCOM 2022(国際学会)、2022
58. S. Qian, X. Hu, T. Furuta, K. Matsuda, K. Nagata, R. Onishi, T. Watanabe, Sensitivity study of turbulence models and mesh size for CFD simulations of jet in cross flow for prediction of hot air recirculation, WCCM-APCOM 2022(国際学会), 2022
59. T. Akao, T. Watanabe, K. Nagata, The characteristics of elongated large-scale structures in a wall-confined shear layer, The 19th International Conference on

Flow Dynamics(国際学会)、2022

60. 中村浩太郎, 渡邊智昭, 長田孝二、無せん断乱流混合層における乱流・乱流界面の特性、日本機械学会第 100 期流体力学部門講演会、2022
61. 古田作, 渡邊智昭, 長田孝二, 胡希東, 松田景吾, 大西領, 錢紹祥、主流と直交する旋回噴流群による乱流熱拡散の数値解析、日本機械学会第 100 期流体力学部門講演会、2022
62. 赤尾拓海, 渡邊智昭, 長田孝二、鉛直方向運動の束縛を受ける乱流混合層の発達に関する数値解析、第 20 回日本流体力学会中部支部講演会、2022
63. 古田作, 渡邊智昭, 長田孝二、主流と直交する旋回噴流群による熱拡散の数値解析、第 3 回「微気象制御学」領域シンポジウム(招待講演)、2023
64. 渡邊智昭, 長田孝二、大型プラント内の異常高温排熱塊の発生要因解明とモデル化 3.学会等名 第 3 回「微気象制御学」領域シンポジウム(招待講演)、2023

c. 図書等

1. 大西領、「15-1. 気象・微気象情報インフラ」担当、テクノロジー・ロードマ

## 5. 産業財産権

### 出願

1. 予測技術に関する特許出願（特願 2022-155991）

## 6. その他

### a. 受賞

1. （メンバーの受賞）松田景吾，【竜門賞(2020 年度)】日本流体力学会
2. （メンバーの受賞）渡邊智昭，【竜門賞(2020 年度)】日本流体力学会
3. （成果受賞）藤田健人，椿野大輔，【制御部門マルチシンポジウム優秀ポスター発表賞】第 8 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. （成果受賞）赤尾拓海，渡邊智昭，長田孝二，【中部支部講演会優秀賞】第 20 回日本流体力学会中部支部講演会

b. 報道

1. NHK WORLD JAPAN, BOSAI: SCIENCE THAT CAN SAVE YOUR LIFE #8  
HEATSTROKE,  
  
<https://www3.nhk.or.jp/nhkworld/en/ondemand/video/2090004/>
2. 読売新聞,【都会の「微気象」を数メートル単位で予測し、安全で快適な生活を】,  
2023/2/8

## 7. 研究成果

a. A01班「AI融合シミュレーションによる微気象の調和的予測技術の創出」

AI 融合シミュレーションによる超高速・微気象予測技術の開発により、微気象の調和的予測の基盤技術を開発した。数 m メッシュという超高解像度で建物や樹冠を解像する微気象シミュレーションモデルは計算コストが甚大である。計算コストの軽減を図り、超高速なリアルタイム予測を実現するために、物理シミュレーションと深層学習・超解像(空間解像度を人工的に向上させる補間技術)を融合した超解像シミュレーション法を発展させ、物理を考慮した超解像・深層



学習器を開発した。具体的には、超解像対象の変数以外の変数も同時に超解像することにより複数変数間の物理的関係性を考慮した超解像器、回転対称性を考慮した超解像器、質量保存則も考慮した超解像器の開発に成功した。この成功により、さらなる信頼性と汎用性を獲得した超解像器を得た。

オペレーショナルな予測を行うためには、シミュレーション結果と観測値から解析プロダクトを得るためのデータ同化が必要となる。微気象スケールでのデータ同化を実現するために、時空間を同時に超解像しつつデータ同化までも同時に行う4次元超解像データ同化法を開発し、その信頼性を理想的な2次元流れに対して確かめた。また、実際に現実気象とサイバー気象を融合するために、微気象スケールの観測データと予測シミュレーションを同化することを想定し、ドローンから得られることを想定した低高度観測データが微気象予測に有用であることを明らかにした。さらには、微気象予測情報がドローン物流の効率化に有用であることを確かめるために、ドローン観測班(A02班)に対して横浜みなとみらい21地区を対象とした建物解像微気象予測情報を提供した。この連携により、都市微気象予測情報によってドローン物流の効率化が可能であることが確かめられた。

以上の成果により、都市街区微気象の調和的予測を実現するための基盤技術を構築することができた。

b. A02 班「ドローンを用いた微気象の能動的観測技術の創出」

ドローンを用いた微気象の能動的観測技術を創出するために、(i)生物規範型ナノドローンの開発、(ii)マイクロドローンの情報機能化、(iii)多階層制御技術、(iv)外乱オブザーバを用いた風外乱推定、の各研究項目を実施した。

まず、(i)に関しては、羽ばたき飛行に着想を得たデュアルロータ型ドローンの開発を行った。さらに、構築した制御システムに基づいた飛行シミュレーションを行い、デュアルロータ型ドローンの冗長性を活かした自由姿勢での飛行や斜面への安定した着陸などが可能であることを確認した。次に、(ii)に関しては、小型ドローンに搭載可能な MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems ; 微小電気機械システム) 風速センサを新たに開発した。風速センサの精度検証のために、名古屋大学に設置されている飛行性能評価風洞を用いた風速測定実験を行った。超音波風速計による風速測定結果との比較の結果、開発した MEMS 風速センサーは超音波風速測定データと誤差 1%以内の精度で風速を計測可能であ

ることを確認した。(iii)に関しては、多階層最適制御技術と協調推定技術をベースに、複数ドローンによる協調風外乱推定技術について考察を行い、将来的な外乱オブザーバを用いた風外乱推定技術との統合を視野に入れた検討を行った。

具体的には、ドローンの個別の運動制御と相対距離などの協調的な運動制御の2階層最適制御から得られる考え方を用いて、定常的な外乱の推定則を導出し、数値シミュレーションデータを用いてその有効性を確認した。(iv)に関しては、外乱オブザーバによる外乱推定と非線形制御手法の1種である STSM (Super Twisting Sliding Mode ; スーパーツイスティングスライディングモード) 制御を統合したロバスト制御系を提案し、その有効性を検証した。以上に加えて、(ii)~(iv)の成果統合を目的として、名古屋大学の飛行性能評価風洞で千葉大学と名古屋大学の合同実験を実施し、複数ドローンを用いた風速計測、外乱オブザーバによる外乱推定、協調風外乱推定に関して初期的な結果を得ることができた。

以上、ドローンを用いた微気象の能動的観測を実現するための基盤技術を構築することができた。

c. A03 班「人体温熱生理応答への微気象の影響解明とモデル化」

人体温熱整理応答への微気象の影響を解明し、モデル化することを目的とした。研究期間の間に、機械学習を活用し、微気象が人体の温熱生理応答に及ぼす影響を分析し、その過程で得られたパラメータ群からなる縮約モデルを開発した。模した微気象の時空間データを用いて、現実に即した大規模人体温熱モデル計算を多数実行し、教師データを取得した。ここで用いた計算モデルは、人体の熱物理計算だけではなく、温熱整理応答を考慮したものである。また、その妥当性評価を検証とするために、2022年5-9月には被検者による運動実験を実施、外部環境、運動レベルを変化させた場合の有効性について確認した。その計算結果データを用いて、低次元・人体温熱応答予測モデルを構築した。具体的には、ニューラルネットワーク、長・短期記憶(LSTM)ネットワークの2つのアプローチから、外気温、湿度などを入力とし、深部温度上昇を出力とする予測モデルを構築した。開発した低次元・人体温熱応答予測モデルは、汎用PCにおいてミリ秒程度の計算時間で、 $0.1^{\circ}\text{C}$ 程度の誤差で深部体温変化を予測可能できることを確認した。さらに、微気象予測情報と連携したリアルタイム情報提供システムの概念について検討した。調和的予測班と能動的予測班が開発する微気象予測

システムを利用、これまで開発した縮約モデルと連携可能であることを確認、各歩行者と群衆の熱中症リスクを同時に最小化するリアルタイム情報提供システムについて検討した。その研究成果の一部は、NHK WORLD で放映されるに至った。得られた結果、またその概念に基づき、社会サービスを見据えた微気象予測システムに要求する情報提供であると考えられ、地方自治体などを対象とした利活用方法など意見交換を行った。

以上、スパコンを使って 3 時間程度かかる微気象に対する人体の温熱生理応答の評価を、汎用パソコンを使ってミリ秒単位で評価できる縮約モデルを開発することに成功した。これにより、群衆と歩行者とが受ける熱ストレスをリアルタイムに最小化する未来社会サービスシステムの概念実証を行う準備ができた。

d. A04 班「大型プラント内の異常高温排熱塊の発生要因解明とモデル化」

大型プラントにおいて想定外の高温排熱気塊が風下側の装置に吸い込まれる事により装置の性能低下を引き起こす Hot Air Recirculation (HAR) 現象の発生メカニズムと支配パラメータを明らかにし、さらに、その発生を予測するシステムを開発するための基盤技術を開発する。

大型プラント内の列をなした熱交換器において、高温排熱気塊が風下側の熱交換器や各種装置に吸い込まれる事により装置の性能低下を引き起こす Hot Air Recirculation(HAR)と呼ばれる現象が問題になっている。微気象情報を基に HAR 現象を予測し各プラント運用を最適化することにより、HAR 現象に起因するプラント運用効率の低下を防ぐことができると期待される。HAR 発生メカニズムを解明することを目的として、排熱源をモデル化した流れの直接数値計算(DNS)およびラージエディシミュレーション(LES)を実施した。研究期間の中で、排熱流の中の旋回成分が HAR 現象に大きな影響を与える可能性が示唆された。その新たな知見を元に、旋回を伴う高温噴流群が気流中に噴出する流れを対象とした数値シミュレーションを実施した。その結果を解析したところ、旋回噴流群によって横風が遮蔽されることで大規模渦が噴流下流域に生成され、この大スケール渦運動によって高温流体が地表付近に引き込まれ、HAR の要因となる大規模高温流体塊が地表付近に生成されることが示された。数値シミュレーションに加え、熱交換器模型を用いた室内実験も行った。速度計測実験により調査することで、実プラントで使用される HAR 抑制機器の効果を明らかにした。加えて、HAR との関連が予想される非等方的な大規模高温流体塊の発生要因を

解明するため、せん断乱流中の熱拡散の数値シミュレーションを実施した。乱流の鉛直方向スケールの成長が外的な要因で抑制される場合、平均速度せん断により一方向に引き伸ばされた非等方な乱流構造が生成されることが明らかとなった。理想的な排熱現象を対象とするだけでなく、現実プラントを対象とした観測と数値シミュレーションも実施した。観測実験を実施した熱交換器排熱について、A01 班と協力し、同日・同時刻の MSSG 微気象シミュレーションを用いた比較計算を行った。その結果、観測結果が微気象シミュレーションによりよく再現されることが確認された。さらに、上述した排熱源をモデル化した流れの数値シミュレーション結果が MSSG 微気象シミュレーションとよく一致し、実プラントにおけるリアルタイム HAR 予測が実現可能であることが示された。

以上、HAR 現象の一部解明に成功しただけでなく、HAR の発生を予測するシステムを構築するための基盤技術を開発することに成功した。

e. 総括班「微気象制御学創生のための戦略的連携推進」

毎年度末、計 3 回の領域シンポジウム開催を通して、領域の活動と成果を発信した。さらに、毎年度末に自己評価委員会を開催し、領域活動の振り返りと今後の

発展方針についての議論を重ねてきた。最終年度の自己評価報告書の抜粋を、本領域活動の総括として、以下に示す。

これまで気象学の分野では重視されてこなかった微気象に着目して研究を実施し、実質的には2年半弱という短い期間であったにもかかわらず多くの査読付き研究論文（20報（投稿中も含む））を著名国際学術誌に発表しており、また、若手賞をはじめとする学会賞も複数受賞していることは高く評価される。さらに、特許出願実績もあり、社会応用への道筋もいよいよ見えてきている。熱中症、産業応用、ドローンの安全飛行、など班間の連携も目に見える成果になっている。今後の発展がさらに期待され、想定以上の成果が得られたと判断される。

この研究活動が研究心旺盛な若手及び中堅の研究者で今後も継続されれば、基礎学術面でも社会応用面でも更なる大きな成果を得られることが期待される。

微気象の研究をどのように活かすか、つまり、社会にとっての微気象の研究の必要性と有用性とを社会に十分に伝えることに留意して更なる研究を進めていくことを期待する。



