

リアルタイム微気象予測のための深層学習と物理シミュレーションの融合

課題責任者

安田 勇輝

東京科学大学 総合研究院 スーパーコンピューティング研究センター

著者

安田 勇輝*¹, 大西 領*¹, 寺田 崇志*¹, 野津 有礼*¹, 平澤 慧悟*¹, 高瀬 卓也*¹, 本田 昇輝*¹

*¹ 東京科学大学 総合研究院 スーパーコンピューティング研究センター

キーワード: 微気象, MSSG, 深層学習, 超解像, データ同化

本研究課題ではリアルタイム微気象予測の実現に向け、4つのサブ課題を遂行している。令和6年度は、課題遂行の2年度目にあたり、成果が出始めた年と言える。具体的に、査読なし論文1本の出版 [1]、および査読付き論文2本の出版を達成した [2,11]。以下では、4つのサブ課題それぞれに関する成果報告を行う。

1. リアルタイム微気象予測に向けた超解像シミュレーション・データ同化システムの実現

都市における微気象は、人間活動に強く影響し得る。しかし、その小スケール性 (数 m オーダー) から数値計算負荷は高く、リアルタイム予測は難しい。この計算負荷を下げる試みとして、深層学習技術「超解像」と数値流体計算を組み合わせる「超解像シミュレーション法」が提案された [3]。この手法は、低解像度の数値流体計算の結果を、ニューラルネットにより高解像度化 (超解像) することで、高解像度の推論を高速に出力する。先行研究では [3,4]、都市微気象の予測に対し超解像シミュレーション法が有効である可能性が示されていた。本研究は、マルチスケール大気・海洋結合モデル MSSG (Multi Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment) [e.g. 5,6] と深層ニューラルネットによる超解像器 [4] を組み合わせ、超解像シミュレーション法が実際に都市微気象に対し有効であり、総計算時間を約 1/30 に低減できることを示した。本年度は、以上の成果のまとめを行った。この成果は、査読付き国際論文誌 *Urban Climate* において出版した [2]。

未来都市では、ドローンなどの様々な IoT 機器の情報から大気の状態推定が可能と考えられる。このドローンによる観測値をデータ同化することで、微気象の予測精度が向上することを確認した。具体的に、双子実験と呼ばれる手法を利用し、ドローンによる擬似観測値が微気象予測の超解像精度に与える影響を評価した。より現実的なドローンの運航経路を得るため、本研究は、2035年頃のドローンによる宅配配送運航モデル仮説に基づくドローン運航シミュレーション結果 [7] を利用した。ドローンの経路上の高解像度の予測値をサンプリングし、ガウスノイズを加えることで、擬似観測値を作成した。この擬似観測値を超解像器に入力することで、入力しない場合の誤差減少率と比較して、約 20-30%の更なる減少が実現

できる可能性を示した (図 1)。得られた成果をまとめて、来年度 (令和7年度) に査読付き国際論文誌へ投稿する予定である。

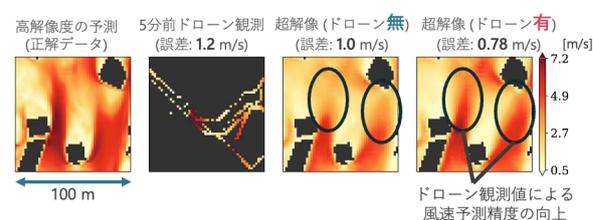


図 1. ドローン擬似観測値の同化により風速の予測精度が向上する様子。

2. 気象予測に基づく微気象場の推論

本サブ課題では、「気象」予測に対し、超解像シミュレーション法を適用する。気象予測は、数 km 以上の大気現象を扱い、日々の天気予報の元となる。もし気象 (数 km スケール) から微気象 (数 m スケール) への超解像が実現できれば、例えば、東京全域の微気象予測が低コストで得られる可能性がある。その実現可能性を調べるため、本年度は MSSG による水平 100 m 解像度の気象計算結果を 5 m 解像度へと超解像した (倍率 20 倍)。本年度は、前年度までの超解像器を改良し、温度の誤差を 35%、3次元速度ベクトルの誤差を 53%も低減させることに成功した。得られた成果をまとめて、来年度 (令和7年度) に査読付き国際論文誌へ投稿する予定である。

3. 教師なし学習による超解像データ同化法の理論

気象予測は、初期条件の不確実性や大気のカオス性などから、時間と共に現実から乖離する。そのため、現行の予報業務では、観測値を予測値に取り込む「データ同化」を行い、予測精度を向上させる。本課題では、リアルタイム微気象予測への応用を見すえ、データ同化と超解像を組み合わせる基礎研究を実施した。先行研究 [8,9] と異なり、教師なし学習に基づく新たな手法を提案し、その妥当性を理論と数値実験の両面から示した。本年度は、得られた成果をまとめ、査読なし論文として出版した [1]。

この理論をさらに発展させて、超解像器によって離れ

た地点の観測値が予測値に取り込まれる様子を理論的に明らかにし、数値実験で実証した (図 2)。この結果は、超解像により背景誤差共分散行列が効率的に推定可能なことを示唆する。得られた成果は既にまとめてあり、本年度中に査読付き国際論文誌 *Physics of Fluids* に投稿する [10]。来年度 (令和 7 年度) の出版を想定している。

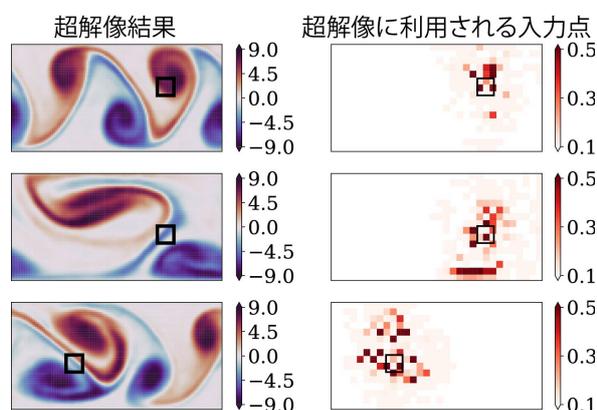


図 2. 超解像の非局所性。黒四角の領域の推論に対し、右に示した色の点の入力が利用される。黒四角内に観測値があれば、これらの色のついた予測値へ同化される。

4.4 次元超解像データ同化 (4D-SRDA) の準地衡システムへの応用

データ同化と深層学習を組み合わせた手法として、4次元超解像データ同化 (4D-SRDA)[9] の 3次元準地衡流系への適用可能性を検討した。本サブ課題では、3次元傾圧ジェット系を対象とし、低解像度の流体モデルと深層学習を組み合わせた 4D-SRDA を開発した。開発したモデルの性能評価として、高解像度の局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) との比較を行った。その結果、4D-SRDA は低解像度の流体モデルを使用しているにもかかわらず、LETKF と同程度の精度で時間発展を再現できることを示した (図 3)。また、計算時間についても LETKF の 1/57 程度に抑えられることを確認し、4D-SRDA が大気の高解像度予測に有効なアプローチとなる可能性が示された。これらの成果をまとめ、査読付き国際論文誌 *SOLA* において出版した [11]。

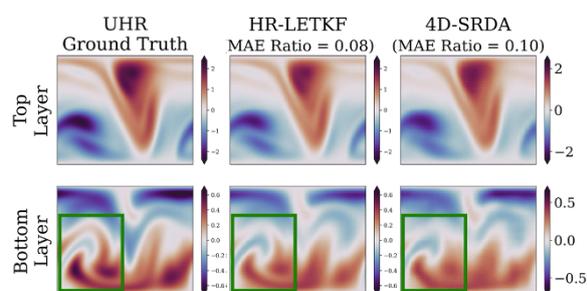


図 3. 4D-SRDA と LETKF の推論の比較。

謝辞

本研究課題は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP22002) の助成を受けている。

文献

- [1] 安田勇輝, “深層生成モデルによるデータ同化理論とその海洋ジェット流への応用,” *システム/制御/情報「気象・災害の予測と制御に向けた取り組み」特集号*, **68**(7), p.278-283, (2024)
- [2] Y. Yasuda and R. Onishi, “Two-Stage Super-Resolution Simulation Method of Three-Dimensional Street-Scale Atmospheric Flows for Real-Time Urban Micrometeorology Prediction,” *Urban Climate*, **59**, 102300 (2025).
- [3] R. Onishi, D. Sugiyama, and K. Matsuda, “Super-resolution simulation for real-time prediction of urban micrometeorology,” *SOLA*, **15**, 178-182, (2019).
- [4] 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,” *Build. Environ.*, **243**, 110613 (2023).
- [5] K. Takahashi, R. Onishi, Y. Baba, S. Kida, K. Matsuda, K. Goto, and H. Fuchigami, “Challenge toward the prediction of typhoon behaviour and down pour,” *J. Phys. Conf. Ser.*, **454**, 012072 (2013).
- [6] K. Matsuda, R. Onishi, and K. Takahashi, “Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **173**, 53-66 (2018).
- [7] A. Oosedo, H. Hattori, I. Yasui, K. Harada, “Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) Simulation of Drone Delivery Models in 2030 Japan,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, **33**(2), 348-362 (2021).
- [8] S. Barthélémy, J. Brajard, L. Bertino, and F. Counillon, “Super-resolution data assimilation,” *Ocean Dyn.*, **72**, 661-678 (2022).
- [9] Y. Yasuda and R. Onishi, “Spatio-Temporal Super-Resolution Data Assimilation (SRDA) Utilizing Deep Neural Networks With Domain Generalization”, *J Adv. Model. Earth Syst.*, **15**, e2023MS003658 (2023).
- [10] Y. Yasuda and R. Onishi, “Theory of Unsupervised Super-Resolution Data Assimilation with Conditional Variational Autoencoders: Estimating Background Covariances via Super-Resolution,” (to be submitted to *Physics of Fluids*).
- [11] A. Notsu, Y. Yasuda, and R. Onishi, “Four-Dimensional Super-Resolution Data Assimilation (4D-SRDA) for Prediction of Three-Dimensional Quasi-Geostrophic Flows,” *SOLA*, **21B** 1-7 (2025).