

# 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

大西 領 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

大西 領<sup>\*1</sup>, 安田 勇輝<sup>\*2</sup>, 平澤 慧悟<sup>\*1</sup>, 高瀬 卓也<sup>\*1</sup>, 岩島 昌也<sup>\*1</sup>, 富永 健斗<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 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

<sup>\*2</sup> 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

**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、3つのサブ課題を遂行している。主な成果として、査読付き論文3本を国際論文誌に令和7年度中に出版した<sup>[1-3]</sup>。以下では各サブ課題の内容をまとめる。

## 1. 3次元超解像データ同化による微気象シミュレーション

本課題では、深層学習モデル<sup>[4,5]</sup>とMSSG微気象シミュレーション<sup>[6,7]</sup>を統合した3次元超解像データ同化システムの基盤技術開発を進めた<sup>[1,2]</sup>。特に、都市微気象の高解像度推定を確率的に行う手法として、Schrödinger Bridgeに基づく確率的超解像モデルを構築し、低解像度シミュレーション結果から高解像度微気象場を直接生成できることを示した<sup>[2]</sup>。本手法は、従来の拡散モデルと比較して同等の推定精度を維持しつつ（次ページの図1参照）、必要な推論ステップ数を大幅に削減でき、リアルタイム予測に適した計算効率を実現した。

さらに、本手法により生成された高解像度微気象場のアンサンブル解析を行い、不確実性評価の妥当性を定量的に検証した<sup>[2]</sup>。その結果、拡散モデルと比較してより適切な分散特性を持つアンサンブルが得られることを確認し、リアルタイム・アンサンブル微気象予測の実現可能性を初めて示した。これらの成果は、査読付き国際誌に掲載され<sup>[1,2]</sup>、想定していた研究計画に沿った進捗を達成した。

## 2. 微気象場のゼロショット超解像

本課題では、深層学習モデルの訓練時と異なる解像度や格子構造を持つ入力データに対しても、安定した超解像推論を行うための基礎研究を実施した<sup>[3]</sup>。具体的には、TransformerベースのNeural Operatorを用い、訓練時には用いていない高解像度（ゼロショット条件）への超解像が可能であることを示した。この手法は、従来の畳み込みニューラルネットワークと異なり、空間を連続的な場として扱うため、解像度や格子配置に対する依存性が低いという特徴を持つ。

数値実験の結果、未学習解像度への超解像においても誤差を有意に低減できることを確認し、さらに非構造格

子データに対しても同様の推論精度が得られることを示した（次ページの図2参照）。これにより、将来的な観測点配置の変化や異種データ統合を想定した実運用環境においても有効な超解像手法の基盤を確立した。本成果は査読付き国際誌に掲載され<sup>[3]</sup>、計画通りの成果創出に至った。

## 3. ライダー観測値をデータ同化した微気象解析データセットの構築

本課題では、次世代空モビリティの社会実装に向けた実現プロジェクト（ReAMOプロジェクト）により取得されたライダー観測値を微気象シミュレーションに取り込み、高解像度な微気象解析データセットを構築するための研究開発を進めた。特に、疎で不規則な観測情報を高解像度の3次元微気象場へと反映させるため、超解像手法を用いたデータ同化<sup>[1,9-11]</sup>の可能性について検討を行った。ドローン疑似観測値<sup>[8]</sup>を用いた数値実験を通じて、観測情報が街路スケールの微気象構造に与える影響を評価し、超解像とデータ同化を組み合わせた解析の有効性を示した。

本年度は、これらの成果を国内学会において発表するとともに、招待講演を通じて超解像技術を用いたデータ同化の枠組みを整理した。課題①および②で開発した超解像および確率的推論手法は、本課題における観測データ統合の基盤技術として位置づけられており、今後、実観測データを用いた高解像度微気象解析データセットの本格的な構築へと発展させる計画である。

## 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（ReAMOプロジェクト）。また、本研究課題は、科学研究費補助金・基盤研究(A)「4次元超解像データ同化法による都市街区微気象予測の実現」の助成も受けている。

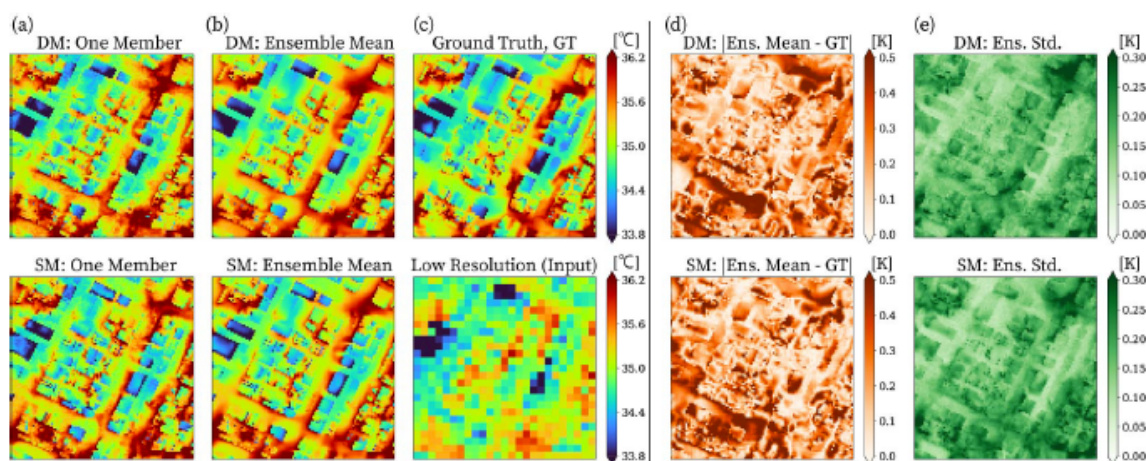


図1: 2020年8月15日14:46(日本時間)における東京・八重洲地区の  $500\text{ m} \times 500\text{ m}$  領域を対象とした、地上 2 m 気温の超解像 (SR) 結果。(a) アンサンブルの一メンバー、(b) アンサンブル平均、(c) 真値データ (すなわち高解像度 (HR) データ)、(d) アンサンブル平均と真値との差の絶対誤差、(e) アンサンブル分散 (標準偏差) を示す。上段は拡散モデル (DM) による結果、下段は Schrödinger Bridge モデル (SM) による結果である。中央列 (c) では、下段に入力として用いた低解像度 (LR) の地上 2 m 気温を示している。地上 2 m 気温は、建物が存在する場合には建物表面から 2 m 上方、建物が存在しない場合には地表面から 2 m 上方で評価している。本図は原著論文[2]より転載したものであり、Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) に基づき、原著論文の著者および出典を明記した上で利用している。

## 文献

- [1] Y. Yasuda and R. Onishi, "Unsupervised Super-Resolution Data Assimilation Using Conditional Variational Autoencoders with Estimating Background Covariances via Super-Resolution," *Physics of Fluids*, **37**, 047149 (2025).
- [2] Y. Yasuda and R. Onishi, "Probabilistic Super-Resolution for Urban Micrometeorology via a Schrödinger Bridge," *Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)*, **22**, 8 (2026).
- [3] Y. Yasuda and R. Onishi, "Zero-Shot Super-Resolution from Unstructured Data Using a Transformer-Based Neural Operator for Urban Micrometeorology," *Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)*, **21**, 355-361 (2025).
- [4] R. Onishi, D. Sugiyama, and K. Matsuda, "Super-resolution simulation for real-time prediction of urban micrometeorology," *SOLA*, **15**, 178-182 (2019).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] S. Barthélémy, J. Brajard, L. Bertino, and F. Counillon,

"Super-resolution data assimilation." *Ocean Dyn.*, **72**, 661-678 (2022).

[10] 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).

[11] A. Notsu, Y. Yasuda, and R. Onishi, "Four-Dimensional Super-Resolution Data Assimilation (4D-SRDA) for Prediction of Three-Dimensional Quasi-Geostrophic Flows," *Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)*, **21B**, 1-7 (2025).

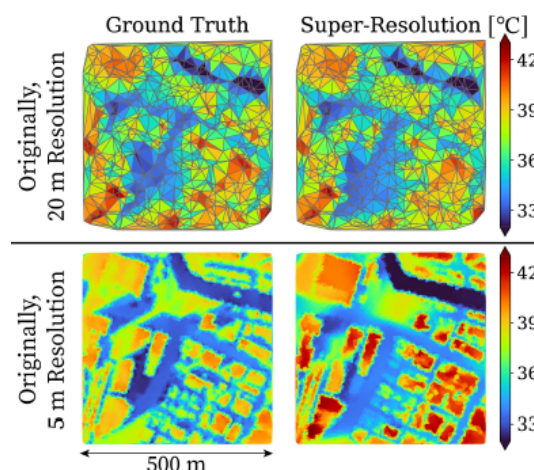


図2: 非構造格子データを用いて学習した Transformer-based Neural Operator (TNO) によるテスト結果の例。本パネルでは、20 m 解像度の真値データから生成した非構造三角格子を用いた場合の結果を示しており、格子配置は灰色の線で明示されている。下段の結果は、上段と同様の手順により、20 m 解像度の代わりに 5 m 解像度データを用いて得られた真値に基づくものである。本図は原著論文[3]より転載したものであり、Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) に基づき、原著論文の著者および出典を明記した上で利用している。