

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：学術変革領域研究(B)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H05751

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Harmonic prediction of micro-meteorology by means of the integrated technology of AI and physics simulations

研究代表者

大西 領 (Onishi, Ryo)

東京工業大学・学術国際情報センター・准教授

研究者番号：30414361

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 52,300,000円

研究成果の概要（和文）：微気象（人工物や人間活動の影響を強く受ける地表付近の詳細気象）予測情報を活用した未来社会サービスを実現するためには、現実気象とサイバー気象を融合することが必要不可欠である。その融合を実現するために、刻々と変化する社会と環境に適合しつつ、即時性（リアルタイム性）も兼ね備えた調和的予測シミュレーション技術を開発した。具体的には、超高密度観測による大量の環境センサー情報をシミュレーションに同化する技術を開発した。さらに、AI技術と予測シミュレーション技術を融合することにより超高速に微気象予測情報を創出できる超解像シミュレーション技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、微気象の調和的予測の基盤技術が開発された。これにより、微気象情報を包含した気象情報インフラの基盤の一つが確立されたことになる。さらなる発展により、ヒトやモノの意思決定および制御に直結する時空間スケールの情報基盤が構築され、新たなサービスや既存サービスの革新的な価値拡大の創出基盤が得られる。特に、ヒト・モノが集中し、社会経済活動が活発に行われる都市街区などの建物密集区域内の微気象に関するリアルタイム情報と予測情報は、様々な社会サービス（ドローン物流、熱中症リスク低減、スマートインダストリーなど）を通じて大きな社会・経済的価値を創出する。

研究成果の概要（英文）：In order to realize future societal services utilizing prediction information on micro-weather (detailed meteorological data near the surface, heavily affected by buildings and human activities), it is essential to fuse real-world meteorology and cyber meteorology. To achieve this fusion, we have developed harmonious prediction technology that can adapt to constantly changing human societies and environments while maintaining real-time nature. Specifically, we have developed a technology to assimilate a large amount of environmental sensor information into the simulation. Furthermore, by integrating AI technology and prediction simulation technology, we have developed super-resolution simulation technology capable of generating micro-weather prediction information at ultra-high speed.

研究分野：環境流体工学

キーワード：微気象制御学 超解像 微気象シミュレーション 深層学習

1. 研究開始当初の背景

現実とデータが高度に連動し、人々が安心して創造的に暮らすことができる自然と調和した自律制御社会を実現するためには現実とデータ(サイバー空間)の融合が必要不可欠である。気象現象に関してはその融合がある程度実現しており、天気予報という身近なサービスが提供されている。しかし、人の生活や安全に直結し、様々な社会課題に関係する微気象(人工物や人間活動の影響を強く受ける地表付近の詳細気象)に関しては、そもそも“微気象予測が可能なのか?”、“予測可能な「時空間スケールと精度」の限界はどれだけなのか?”自明ではない。自然現象由来の不確実性だけでなく、社会経済活動由来の不確実性も加わるので、特に微気象スケールにおけるその問いは学術的に興味深いものである。

2. 研究の目的

上記の学術的問いへの答えの糸口をつかみ、さらには微気象スケールの現実気象とデータの融合を実現するために、刻々と変化する環境と社会に適合した予測情報をリアルタイムに提供する微気象の調和的予測技術を開発する。

3. 研究の方法

リアルタイム微気象予測を実現するにあたっての一つのボトルネックは、数 m メッシュでの建物解像・微気象シミュレーションの計算コストが非常に大きいことである。リアルタイム性(30分先までの予測を1分毎に更新)を確保するためには数100~1,000倍程度の高速化が必要であった。それに対して、代表者らは、「機械学習の本質は内挿である」と見極めた上で、時間発展(時間外挿)には物理シミュレーションを用い、空間内挿(超解像)に深層学習を用いるという独創的な超解像シミュレーション手法を開発している。本研究では、この超解像シミュレーション手法を都市街区の微気象に応用し、かつ、超解像器に物理を学習させることにより、システム性能を向上させる。

4. 研究成果

超解像シミュレーション予測システム

数メートル解像度での微気象シミュレーションには、スーパーコンピュータを使った膨大な計算が必要である。実際の社会サービスへの適用を考える際には、計算時間の劇的な削減が必要となる。近年、著者らは深層学習を活用した AI 融合シミュレーションによる計算時間の劇的な削減に成功した⁽¹⁾。具体的には深層ニューラルネットワークを用いた超解像(Super Resolution, SR)技術を活用した。なお、超解像とは、低解像度(low resolution, LR)画像から高解像度(high resolution, HR)画像を生成する技術である。

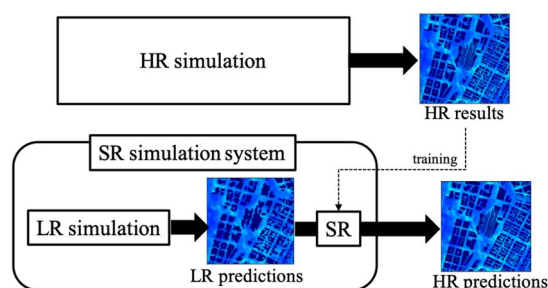


図1：超解像シミュレーションシステム。

図1に、超解像シミュレーション法を図解する。予め大量のHRシミュレーション結果とLRシミュレーション結果から成る学習データセットを作成し、そのデータセットを学習させた超解像器を用意する。都市街区を対象とした微気象予測の場合、例えば、HRは5m解像度、LRは20m解像度程度である。LRシミュレーションはHRシミュレーションに比べて計算コストが非常に小さく、例えば30分先までの街区微気象の予測を1分程度で更新できる。LRシミュレ-

ションから得られる LR 予測結果を超解像器によって HR 予測結果に変換することで、HR 予測結果をリアルタイムに更新することが可能となる。

都市街区の微気象シミュレーション

都市建物の影響を考慮した風況シミュレーションのために様々な LES (Large-Eddy Simulation) モデルが開発されてきた。しかし、風況は微気象の一部を切り取ったものである。微気象予測のためには、風だけでなく、水蒸気や人工排熱の移流拡散、3 次元的な熱放射、地面だけでなく建物の伝熱、などの多くの物理過程を扱う必要がある。

そのような複雑な物理過程を網羅して、都市街区の微気象を予測できるモデルとして、MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment) ^(2,3) というマルチスケールモデルが東工大、海洋研究開発機構、早稲田大を中心として開発されている。MSSG は全球規模から、領域規模、さらには都市街区規模に至る気象現象の全てのスケールを扱えるマルチスケールモデルである。都市街区スケールの計算では、LES として乱流計算を実施するだけでなく、水蒸気の移流拡散を含む雲微物理過程、建物による日射の遮りや、日射によって暖められた表面からの熱放射などの 3 次元熱放射過程を精緻に計算することができる。具体的には、ラジオシティ法と呼ばれる、形態係数データを用いた 3 次元放射計算を行うと同時に、樹冠内部での多重散乱も考慮した放射熱フラックスを算出できる。つまり、街路樹が通りの熱風環境に及ぼす影響も考慮できるモデルである。

図 2 に、MSSG を用いて東京駅周辺の 5m 解像度の微気象予測を実施する際の計算設定を例示する。3 段ネストを用いた気象スケールの計算領域 (a) の中に、5m 解像度の微気象計算領域 (b) が設定されている。微気象予測計算には建物分布データ (c) や土地利用データ (d) などの詳細な入力データが必要となる。図 3 に、シミュレーションにより得られた東京駅近傍の気温の 3 次元分布を示す。この図右下円には、銀座通りに立った人の目線での気温分布の可視化画像が示されている。ビルの日陰側 (右側) に比べ、日向側 (左側) の気温が高い様子が見られる。高々 30m 程度の幅しかない通りであっても、その両端で熱環境が大きく異なることがわかる。

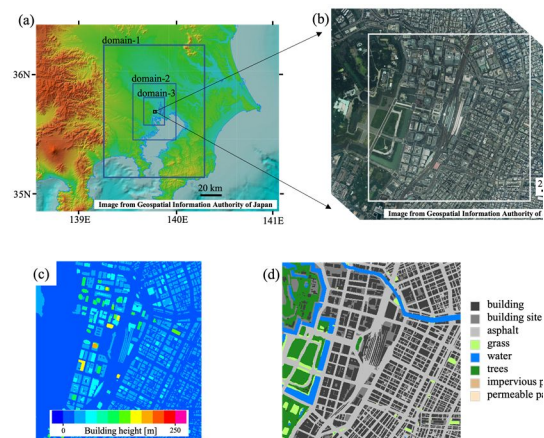


図 2：東京駅付近の微気象シミュレーション

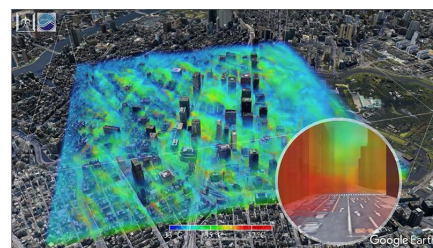


図 3：2015 年 8 月 7 日 14:30 の東京駅付

都市街区における熱環境の 2 次元超解像

図 4 に、開発した超解像器を用いて、2m 高さ気温分布の超解像結果例を示す⁽⁴⁾。左が参照解としての HR (5m 解像度) 結果を示す。左 2 番目が LR (20m 解像度) 結果であり、Bicubic 補間およびイメージ超解像、超解像結果がその横に示されている。超解像器に物理法則を学習させるこ

とにより⁽⁵⁾、Bicubic 法などの代数補間法に比べ、誤差がほぼ半減する。街区熱環境を定量化する際、気温の予測誤差が 0.2K 程度以下であることが求められており、本超解像シミュレーション法はその要求を満たす。

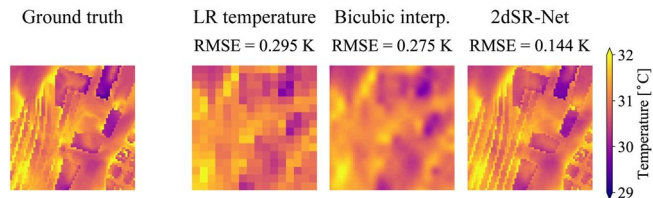


図 4：東京駅付近の 2m 高さ気温分布の補間結果例

都市街区における風環境の 3 次元超解像

従来、超解像は 2 次元画像の高解像度化に用いられてきた。近年、著者らは 3 次元の微気象予測結果に適用することに成功した（論文投稿中）。図 5 に、3 次元超解像器を用いて、LR 風況場を HR 風況場に補間した結果を示す。上段 (a) が地上高さ 5m における東西風の水平分布、下段 (b) が地上高さ 25m における東西風の水平分布である。左が参照解である HR 結果、中央が LR 結果、右が SR（超解像）結果である。白抜き部分は建物内部で風速が定義されない領域（欠損領域）を示す。LR 結果では、建物分布が平均化されることで、通りの多くが判別されなくなり、欠損領域が拡大する。多くの欠損領域を抱えた LR 結果を元にしても、著者らが開発した 3 次元超解像器は、通り内の詳細な風分布を再現できる様子がわかる。

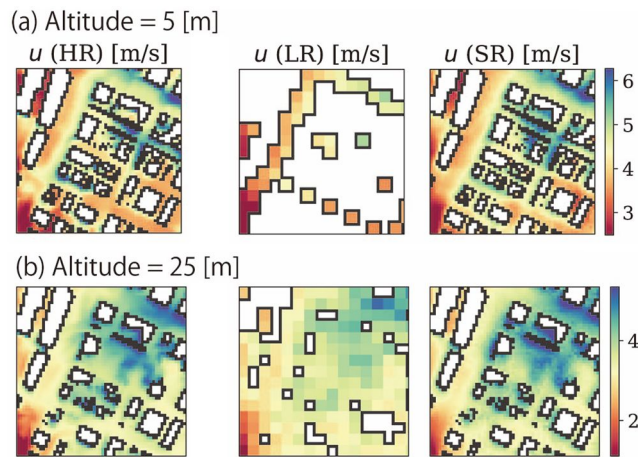


図 5：東京駅付近の東西風分布の 3 次元超解像例

結言

人やモノが集まる都市部の街区微気象のリアルタイム予測情報があれば、様々な未来都市サービスが実現される。例えば、安全で効率的なドローン物流サービス、個人単位の熱中症リスクを最小化する人流制御サービス、環境性能も運転性能も良いスマートプラントサービスなどが考えられる。しかし、街区微気象シミュレーションの計算コストは甚大であり、シミュレーション科学の力だけに頼っていたのでは、そのリアルタイム予測の実現には数十年かかるだろう。しかし、深層学習と物理シミュレーションを融合した超解像シミュレーション法を用いれば、数 m メッシュで街区建物を解像した 30 分程度先までの詳細な予測情報を 1 分程度のサイクルでリアルタイム更新することが可能となった。

さらに、時空間同時超解像データ同化法も開発した（論文投稿中）。これにより、超解像とデータ同化を同時に実施することが可能になった。ビルの影響を受けた風速データや、人口排熱の影響を受けた気温データなど、これまでの気象計算では取り込むことができなかった種類の観測データを数値シミュレーションに取り込むことができる。

参考文献

- 1) R. Onishi, D. Sugiyama and K. Matsuda, Super-Resolution Simulation for Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology, SOLA, Vol. 15, 178–182 (2019).
- 2) K. Takahashi, R. Onishi, Y. Baba, S. Kida, K. Matsuda, K. Goto and H. Fuchigami, Challenge toward the prediction of typhoon behavior and down pour, Journal of Physics: Conf. Ser., 454, 012072 (2013).
- 3) K. Matsuda, R. Onishi and K. Takahashi, Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 173, pp.53-66 (2018).
- 4) 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).
- 5) 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)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yasuda Yuki, Onishi Ryo, Hirokawa Yuichi, Kolomenskiy Dmitry, Sugiyama Daisuke	4. 巻 209
2. 論文標題 Super-resolution of near-surface temperature utilizing physical quantities for real-time prediction of urban micrometeorology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 108597 ~ 108597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2021.108597	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 大西領、安田勇輝	4. 巻 60
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 伝熱	6. 最初と最後の頁 30-35
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 大西領	4. 巻 60
2. 論文標題 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~	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 499-503
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 Yasuda Yuki, Onishi Ryo	4. 巻 1
2. 論文標題 Rotationally equivariant super-resolution of velocity fields in two-dimensional flows using convolutional neural networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 APL Machine Learning	6. 最初と最後の頁 026107 ~ 026107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0132326	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15件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大西領
2. 発表標題 微気象制御学と気象制御
3. 学会等名 ムーンショットセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西領、Dmitry Kolomenskiy、廣川雄一、杉山大祐、松田景吾
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本機械学会2021年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安田勇輝、大西領、廣川雄一、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣川 雄一、大西領、安田勇輝、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第 35 回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西領、安田勇輝、小野寺孔明、松田景吾
2. 発表標題 微気象 x 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~
3. 学会等名 機械学会熱工学部門（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大西領
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第2回「微気象制御学」領域シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田勇輝
2. 発表標題 都市街区における熱物質拡散に対する3次元超解像
3. 学会等名 第2回「微気象制御学」領域シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Onishi, Y. Yasuda
2. 発表標題 Super-resolution simulation of urban micro-meteorology for sustainable future society
3. 学会等名 AI Super-Resolution Simulation Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Yasuda
2. 発表標題 Roto-Translation Equivariant Super Resolution of Two Dimensional Fluids Using Convolutional Neural Networks
3. 学会等名 AI Super-Resolution Simulation Workshop
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大西領、廣川雄一、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大西領、廣川雄一、Dmitry Kolomenskiy、杉山大祐、松田景吾
2. 発表標題 AI技術を活用した都市街区微気象のリアルタイム予測
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西領
2. 発表標題 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～
3. 学会等名 第5回千葉大学CAIVセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大西領
2. 発表標題 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
3. 学会等名 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)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Onishi
2. 発表標題 Physics-informed super-resolution for real-time prediction of urban micro-meteorology
3. 学会等名 PiAI Seminar Series: Physics informed AI in Plasma Science (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大西領、Dmitry Kolomenskiy、松田景吾、廣川雄一、杉山大祐
2. 発表標題 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
3. 学会等名 「微気象制御学」領域シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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
<https://www.turb.gsic.titech.ac.jp/mmc/index.php>

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
研究分担者	杉山 大祐 (Sugiyama Daisuke) (00816184)	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 (82706)	
研究分担者	廣川 雄一 (Yuichi Hirokawa) (30419147)	足利大学・工学部・准教授 (32201)	
研究分担者	松田 景吾 (Keigo Matsuda) (50633880)	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 (82706)	
研究分担者	小森 悟 (Satoru Komori) (60127082)	同志社大学・研究開発推進機構・嘱託研究員 (34310)	
研究分担者	K o l o m e n s k D m i t r y (Dmitry Kolomenskiy) (00813924)	東京工業大学・学術国際情報センター・特任准教授 (12608)	

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		
ロシア連邦	Skolkovo Institute of Sci. and Tech.		