

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02308

研究課題名（和文）スパースなセンサーネットワークに基づく都市風況推定手法の開発

研究課題名（英文）Development of urban wind estimation method based on sparse sensor network

研究代表者

菊本 英紀（Kikumoto, Hideki）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：80708082

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、市街地および都市スケールにおける風況（風速・風向）を対象に、スパース（疎）に配置されたセンサーの計測データを入力値とする空間解像度およびリアルタイム性の高い分布推定手法の開発を行った。本研究の成果は、機械学習を活用したモデルとセンサーデータを組み合わせることにより、風速や風向の変化を高い精度で捉えることを可能とし、安全で快適な都市環境の構築に貢献することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、安全で快適なスマートな都市空間を創造することを目指し、市街地や都市における風況をリアルタイムで把握する新しい技術を開発した。限られた数のセンサーから得られる情報を利用して都市の風速と風向の分布を高精度に推定する手法や、風速センサーのデータ駆動型校正に基づく精度向上手法、センサー配置の最適化手法などを開発した。これら技術は、風による影響を受けやすい市街地での災害リスク管理や建物運用の効率向上に寄与する。

研究成果の概要（英文）：This study developed a high spatial resolution and real-time distribution estimation method for wind conditions (wind speed and direction) in urban and city scales, using measurement data from sparsely placed sensors as input values. The results of this study are expected to contribute to the creation of a safe and comfortable urban environment by enabling the accurate capture of changes in wind speed and direction through the combination of machine learning models and sensor data.

研究分野：建築環境工学

キーワード：建築環境・設備 都市防災 風工学 流体工学 シミュレーション工学 スパースセンシング 機械学習 データ駆動型手法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

安全かつ快適な風況およびそのデータは、都市に住む人々の重要な生活基盤であり、低環境負荷・スマートな都市空間の創出においても必要不可欠である。近年は、気候変動に伴う台風の強化、あるいは竜巻やダウンバーストなど局地的強風現象による被害の増加が懸念されている。より日常的にも、高層建物周辺での風害は例に事欠かない。また、自然換気を始めとする建物設備システムの高効率な運用、都市内風力発電の促進、さらにはドローン等の小型飛行機の活用を見据え、高解像度かつリアルタイム性の高い風況データの整備が求められている。

ヒトとモノが集積し高密度に形成された都市空間では、地形や建築物などの偏在によって局所的な強い風況が生じる。また、気象学的には、水平方向数 km 程度までの市街地、および 100 km 程度までの都市スケールは、それぞれマイクロ、メソスケールと呼ばれ、それぞれに特徴ある風況が形成される。市街地スケールでは、上空風からの運動量の供給を受けながらも個々の建物の影響により空間 3 次元性および乱れの強い気流場が形成される。一方、都市スケールでは、より広範な気象スケールの影響を受けると同時に、市街地上空風として地形や建築物の集積効果を受け気流場が形成される。つまり、都市風況は、多層のスケールで構成されるとともに、各層間の強い相互作用の下で局所的流れが形成される点に特徴がある。

従来の気象観測網は、10 km 程度に 1 点程度の空間解像度しかなく、都市内の風況分布特性を把握するには十分ではない。IoT (Internet of Things) 機器等の普及によって様々な場所にセンサーが設置され、今後これまでに無い量の環境データが計測されるようになる可能性がある。しかし、センサーネットワークは、あくまで点の集合体であり、数値予測に比べればその配置はスパース(疎)である。また、その配置の偏り、個々のセンサーの計測精度・バイアスによって様々な誤差が混入しうる。

一方で、市街地スケールにおいては数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) モデルを、都市スケールにおいては数値気象モデルを主な手法として、都市の風やその他気象現象の予測が行われている。計算機資源の充実とともに、これらの数値予測モデルで実施できる解析の精度と規模は向上を続けているが、流体現象を解く問題の性質上、計算負荷が極めて大きく解析のリアルタイム性に限界を抱えている。

2. 研究の目的

安全・快適かつスマートな都市空間の創出に資するため、本研究は市街地 (マイクロ) および都市 (メソ) スケールにおける風況 (風速・風向) を対象に、スパース (疎) に配置されたセンサーの計測データを入力値とする空間解像度およびリアルタイム性の高い分布推定手法を開発することを目的とした。そのため、まず、数値流体力学および数値気象モデルによる市街地および都市スケールでの風況データベースを構築し、それらの風況を構成する特徴的な空間分布構造を抽出した。さらに、それぞれの分布構造とセンサーネットワーク計測値との関係を明らかにした。そして、センサーネットワーク計測値を入力として各特徴的分布構造の強度を推定し、その重ね合わせとして風況を推定するような方法論を構築した。また、センサーの計測精度やそれから得られる情報を最大化するため、データ駆動型手法に基づくセンサーの精度向上手法や、センサー配置の最適化手法などを開発した。

3. 研究の方法

都市風況 (風速・風向) の瞬時分布は、主にその乱流的特性によって複雑な様相を見せる。しかし、都市気流は一定の条件においては、流れの空間・時間的な相関性・周期性から有限の代表的なパターンを示すと考えられ、センサーから得た有限な観測情報からこれらのパターンの強度を特定できれば、都市風況の空間解像度およびリアルタイム性の高い分布推定を実現できる可能性がある。このような基本的な考え方の下、本研究では、主に以下の 3 つの観点から研究を行った。

(1) 市街地スケールにおけるスパースなセンサーデータに基づく風況分布推定手法の開発

(2) 都市スケールにおけるスパースなセンサーデータに基づく風況分布推定手法の開発

(3) 風速センサーのデータ駆動型校正手法と配置最適化手法の開発

これらについて得られた主な成果を次節で説明する。

4. 研究成果

(1) 市街地スケールにおけるスパースなセンサーデータに基づく風況分布推定手法の開発

市街地気流は強い乱流としての特性を持ち、その分布は時間とともに大きく変化する。市街地気流の分布はセンサーで測定したり CFD 解析を用いてシミュレーションしたりすることが可能である。しかし、CFD 解析は非定常気流分布の迅速な計算において高コストであり、センサーの計測値は空間解像度の点で劣る。そこで本研究では、固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition: POD) と線形確率推定 (Linear Stochastic Estimation: LSE) を組み合わせ (以降、POD-LSE) 限られたセンサーでの気流計測データから市街地空間における高空間解像度の

気流分布を迅速に推定する手法を開発した。

まず、市街地空間を模擬した立方体建物群モデル（図 1）での気流を対象に、非定常乱流解析モデル Large-Eddy Simulation (LES) によって瞬時速度場分布のデータベースを構築した。このデータベースをもとに、POD-LSE による瞬時気流推定を行い、同手法の有効性の検証を行った。その結果、立方体建物群モデルにおける気流分布は POD-LSE によって一定の精度で再構築および予測可能であることを明らかにした。また、センサーの数や POD を行う空間範囲の推定精度への影響などを調べた。しかし、特に建物の下流側の気流に関して推定精度が必ずしも十分に高くなかった。そこで、センサーデータとして複数の時点での値を入力とする Multi-time-delay POD-LSE を適用し、それにより気流分布の推定精度が向上させられることを明らかにした。また、POD-LSE では、気流速度の変動強度をやや小さく評価する課題があったため、Generative Adversarial Networks (GANs) などの機械学習手法に基づく瞬時気流場の推定手法も導入し、その有効性を検証した（図 2）。

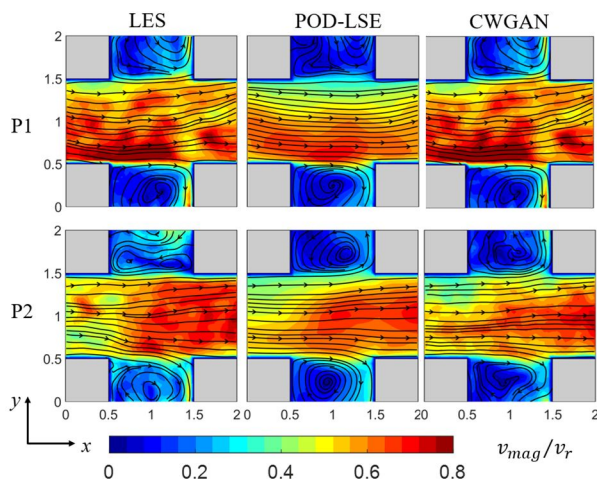
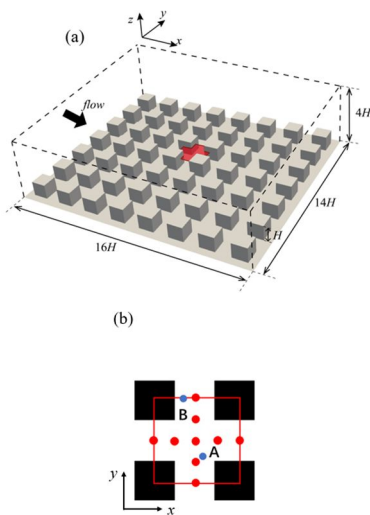


図 2. 対象領域での代表時点における瞬時気流速度の大きさの分布と流線（LES のデータ（真値）と POD-LSE, GAN による推定値）

図 1. (a)市街地モデルと推定対象(赤色の水平面)と(b)センサーなどの配置

(2) 都市スケールにおけるスパースなセンサーデータに基づく風況分布推定手法の開発

近年、高空間解像度かつ高精度の気象再解析データが様々に開発され、一般に利用可能なデータとしても提供されるようになってきている。しかし、計算資源の制約などから、最先端の高精度で高解像度な再解析データほど提供される期間が限られる傾向にある。一方で、気象観測データは、低い空間解像度ながらも数十年にわたり継続的に記録されている。そこで本研究では、都市スケールにおいても POD-LSE を活用し、気象観測データと高空間解像度の局地的客観解析 (LA) データを融合し、長期間に渡る高解像度な都市風況データを迅速に生成する手法を開発した（図 3）。

まず、LA データの精度を観測気象データと比較して検証し、東京地域における風況の統計的な特徴を 5 km 毎の高解像度で分析するなどした（図 4）。次に、開発した方法によって生成されたデータの精度を、ドップラーライダーによる観測データなどと比較して、観測とよく一致した風況データが生成できることを明らかにした。

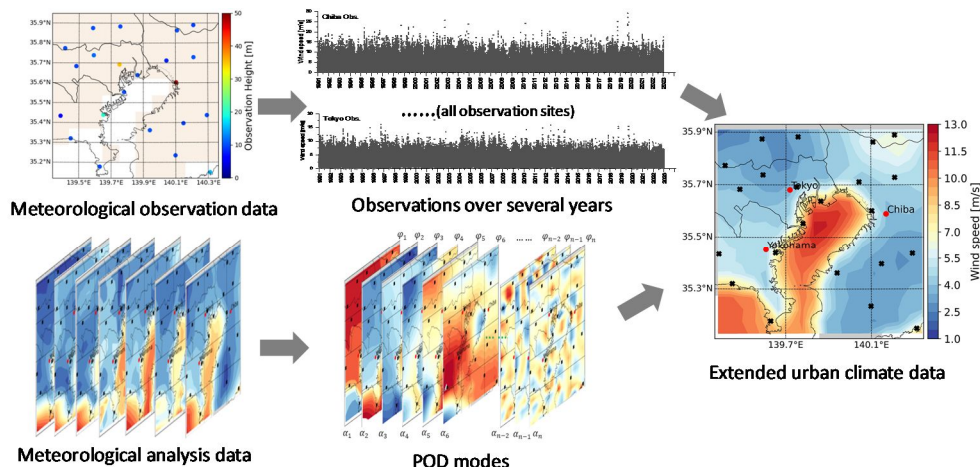


図 3. POD-LSE による気象観測と局地的客観解析 (LA) データの融合

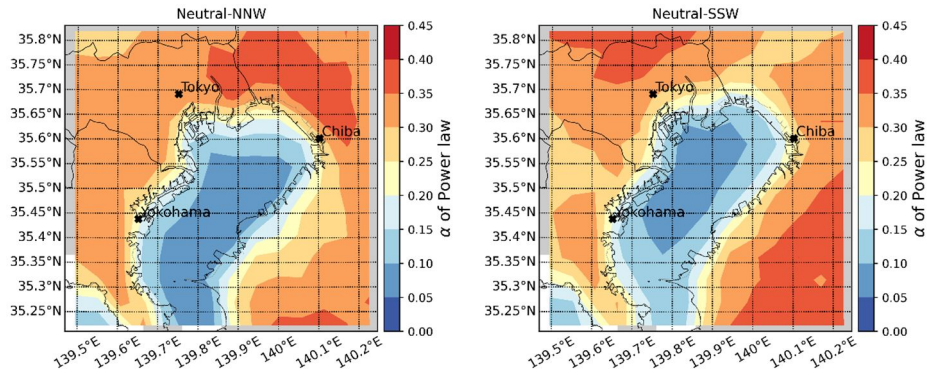


図 4. 東京地域における風速鉛直プロファイルのべき指数の分布
(大気中立時の NNW・SSW 風向)

(3) 風速センサーのデータ駆動型校正手法と配置最適化手法の開発

本研究で開発する手法において、センサー計測値は一次情報として極めて重要である。都市における複雑な風況を推定するには、できる限り多くの風速センサーを設置することが望ましい。しかし、そのためには比較的低コストなセンサーを採用する必要があり、その結果、計測精度という点で制約が生じる。そこで本研究では、超音波風速計 (Ultrasonic Anemometer, UA) に比べ、コスト面では優位にあるが風速の測定精度で劣る風杯型風速計 (Cup Anemometer, CA) に関して、これを UA での計測精度に近づける校正手法を開発した。建物周辺での乱流特性もより精度高く計測できるよう、機械学習手法などを活用したデータ駆動型校正手法を提案し、その有効性を実地計測などから明らかにした (図 5)。

また、有限個のセンサーからできる限り多くの有効な情報を得るためには、風速センサーを適切に配置する必要がある。そこで本研究では、QR 分解に基づいたセンサー配置最適化手法を導入し、市街地モデルにおける気流を観測するための最適なセンサー配置を検討した。用いた最適化手法は POD モードを通じて気流場の特性を把握できるため、速度変動が強い場所にセンサーを配置することを提案した。その結果、最適なセンサー配置では推定領域全体の誤差を軽減し、特に建物周りの剝離流と後流の推定精度を大幅に改善できることを明らかにした。

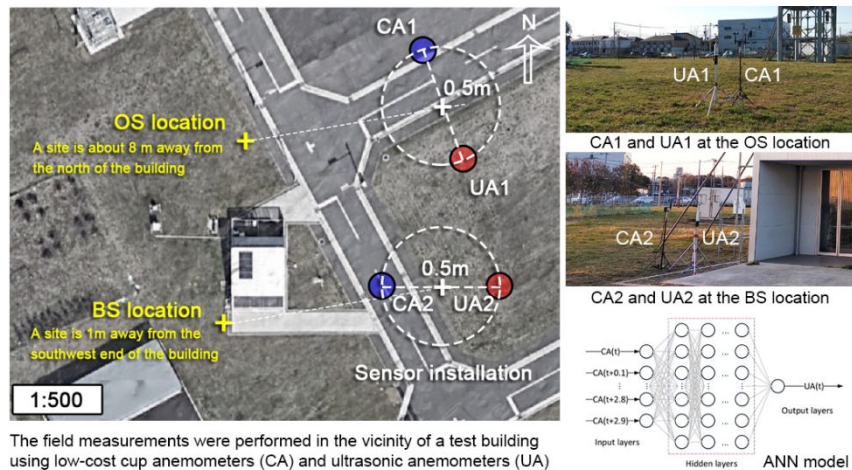


図 5. 風杯型風速計のデータ駆動型校正手法の概要

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10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 Hu Chaoyi, Jia Hongyuan, Kikumoto Hideki	4. 巻 221
2. 論文標題 Estimation of airflow distribution in cubic building group model using POD-LSE and limited sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 109324 ~ 109324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2022.109324	査読の有無 有
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 李 荣茂、菊本 英紀、賈 鴻源	4. 巻 27
2. 論文標題 ドメイン適応に基づく転移学習による異なる観測期間でのデータ駆動型風速計校正	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 風工学研究論文集	6. 最初と最後の頁 227 ~ 236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14887/windengresearch.27.0_227	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 -
1. 著者名 Li Rongmao, Kikumoto Hideki	4. 巻 231
2. 論文標題 Data-driven calibration of cup anemometer based on field measurements and artificial neural network for wind measurement around buildings	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 105239 ~ 105239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jweia.2022.105239	査読の有無 有
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 Zhang Bingchao, Ooka Ryoza, Kikumoto Hideki, Hu Chaoyi, Tse Tim K.T.	4. 巻 231
2. 論文標題 Towards real-time prediction of velocity field around a building using generative adversarial networks based on the surface pressure from sparse sensor networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 105243 ~ 105243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jweia.2022.105243	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Li Rongmao, Kikumoto Hideki, Jia Hongyuan, Okaze Tsubasa	4. 巻 241
2. 論文標題 Transfer learning strategy for data-driven correction of wind measurement around buildings using cup anemometers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 110499 ~ 110499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2023.110499	査読の有無 有
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 Wang Xiang, Kikumoto Hideki, Jia Hongyuan, Lin Chao, Nakao Keisuke	4. 巻 240
2. 論文標題 Investigation of spatial variability in power law index of wind profiles above the urban area around Tokyo Bay based on local objective analysis data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 105471 ~ 105471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jweia.2023.105471	査読の有無 有
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 Hu Chaoyi, Jia Hongyuan, Kikumoto Hideki	4. 巻 243
2. 論文標題 Estimation of instantaneous airflow distribution in cubic building group model using multi-time-delay LSE-POD	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 110642 ~ 110642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2023.110642	査読の有無 有
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 Jia Hongyuan, Hu Chaoyi, Kikumoto Hideki	4. 巻 98
2. 論文標題 Effects of sensor configuration optimization on airflow estimation in urban environment: A case study with a building group model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sustainable Cities and Society	6. 最初と最後の頁 104840 ~ 104840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scs.2023.104840	査読の有無 有
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 Hu Chaoyi、Kikumoto Hideki、Zhang Bingchao、Jia Hongyuan	4. 巻 249
2. 論文標題 Fast estimation of airflow distribution in an urban model using generative adversarial networks with limited sensing data	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 111120 ~ 111120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2023.111120	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 胡超億, 菊本英紀, 賈鴻源
2. 発表標題 センサーネットワークを用いた市街地気流の分布推定に関する研究 (その3) 複数時点を考慮したLSE-PODの立方体建物群モデル内気流への応用
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李栄茂, 菊本英紀
2. 発表標題 機械学習による建物周辺気流計測の高精度化に関する研究 (第1報) ANNを用いた風杯型風速計による瞬間風速計測の校正
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊本英紀, 胡超億, 賈鴻源
2. 発表標題 センサーネットワークを用いた市街地気流の分布推定に関する研究 (その1) POD-LSEを用いた推定手法の概要と1次元拡散問題への適用
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 胡 超億, 菊本 英紀, 賈 鴻源
2. 発表標題 センサーネットワークを用いた市街地気流の分布推定に関する研究 (その2) POD-LSEを用いた立方体建物群モデル内の気流推定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 胡 超億, 菊本 英紀, 賈 鴻源
2. 発表標題 POD-LSEを用いた立方体建物群モデル内の瞬時気流分布推定に関する研究
3. 学会等名 風工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 胡 超億, 菊本 英紀, 賈 鴻源
2. 発表標題 POD-LSEによる市街地瞬時気流分布推定に関する研究: 立方体建物群モデル内の乱流への適用
3. 学会等名 第36回生研TSFDシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李栄茂, 菊本英紀, 大風翼
2. 発表標題 機械学習による建物周辺気流計測の高精度化に関する研究 (その2) ドメイン適応に基づく転移学習による異なる場所でのデータ駆動型風速計校正
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 胡超億, 菊本英紀, 賈鴻源
2. 発表標題 センサーネットワークを用いた市街地気流の分布推定に関する研究 (その4) 人工ニューラルネットワークによる市街地モデル内の気流分布の推定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xiang Wang, Hideki Kikumoto
2. 発表標題 Study on utilization of local objective analysis data for microclimate prediction (Part 1) Comparison of local objective analysis and near-surface meteorological observation data
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 胡超億, 菊本英紀, 張秉超, 賈鴻源
2. 発表標題 Generative Adversarial Network による市街地モデル内の瞬時気流分布推定
3. 学会等名 風工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 賈鴻源, 菊本英紀, 胡超億
2. 発表標題 センサーネットワークを用いた市街地気流の分布推定に関する研究 (その5) QR分解に基づくセンサー配置最適化による推定精度の改善
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 胡超億, 菊本英紀, 賈鴻源, 張秉超
2. 発表標題 センサーネットワークを用いた市街地気流の分布推定に関する研究 (その6) CWGANによる市街地モデル内の気流分布の推定
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 李栄茂, 菊本英紀, 賈鴻源
2. 発表標題 機械学習による建物周辺気流計測の高精度化に関する研究 (その3) 経験的モード分解に基づく前処理を用いた複数の風速計校正
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xiang Wang, Hideki Kikumoto, Chaoyi Hu, Hongyuan Jia, Keisuke Nakao
2. 発表標題 Study on utilization of local objective analysis data for microclimate prediction (Part 2) Reproduction of long-term highresolution data in urban areas by POD-LSE method
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xiang Wang, Hideki Kikumoto, Chaoyi Hu, Hongyuan Jia, Keisuke Nakao, Ryoza Ooka
2. 発表標題 Extension and analysis of high-resolution wind velocity data by fusing meteorological observations and local objective analysis data in the Tokyo Bay area using POD-LSE
3. 学会等名 第39回生研TSFDシンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Chaoyi Hu, Hideki Kikumoto, Bingchao Zhang, Hongyuan Jia
2. 発表標題 Fast estimation of airflow distribution in the urban model using generative adversarial network and limited sensors
3. 学会等名 IAQVEC 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Rongmao Li, Hideki Kikumoto, Hongyuan Jia
2. 発表標題 Data-driven calibration for cup anemometer at different measurement locations around buildings using transfer learning based on domain adaptation
3. 学会等名 IAQVEC 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Xiang Wang, Hideki Kikumoto, Chaoyi Hu, Hongyuan Jia, Keisuke Nakao
2. 発表標題 Estimation of near-ground wind velocity and temperature in the urban area around Tokyo Bay using local objective analysis data and the POD-LSE method
3. 学会等名 16th International Conference on Wind Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	大岡 龍三 (Ooka Ryozo) (90251470)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	崔 元準 (Choi Wonjun) (30817458)	東京大学・生産技術研究所・助教 (12601)	削除：2021年8月17日

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			
中国	香港科技大学			