

令和 7 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2024

課題番号：20K21035

研究課題名（和文）アンサンブルシミュレーションを用いた確率論的都市気候解析システムの構築

研究課題名（英文）Development of stochastic urban climate analysis system using ensemble simulation

研究代表者

川本 陽一（Kawamoto, Yoichi）

九州大学・芸術工学研究院・助教

研究者番号：70569730

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、メソスケール気象モデルを用いた都市上空の流れ場の再現計算において、これまでの単一の結果を評価する決定論的評価に対して、複数のアンサンブルシミュレーションを行い、その結果を統計的に評価する確率論的評価を行った。アンサンブルシミュレーションの手法としては、簡易な Lagged Average Forecasting (LAF) 法を用いた。初期値・境界値に起因する不確実性を低減する事により、LAF 法の再現結果は観測結果と良い対応を示す場合も見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動とヒートアイランド現象との二重の温暖化に晒されている都市環境の将来計画のためには、シミュレーションによる予測が欠かせない。特に風環境は都市の温熱環境や大気汚染にも関連し、その正確な予測は重要となる。一方でこれまで都市環境のシミュレーションでは、計算機資源の制約などにより、単一のシミュレーション結果による決定論的評価が主流であった。本研究では都市環境のシミュレーションにおける初期値・境界値の取り扱い、更にはアンサンブルシミュレーションによる確率論的評価が欠かせないことを示したことに意義がある。

研究成果の概要（英文）：Mesoscale numerical weather prediction models are employed to analyze flow fields in urban areas. Conventionally, deterministic evaluations have been utilized to assess individual results. In this study, a series of ensemble simulations were conducted, and a probabilistic evaluation was performed to statistically analyze the results. The Lagged Average Forecasting (LAF) method was employed as the ensemble simulation technique. The LAF method reduced the uncertainties caused by initial and boundary conditions, resulting in good agreement with observational data in some cases.

研究分野：建築・都市環境工学

キーワード：都市気候 メソスケール気象モデル アンサンブルシミュレーション 不確実性

## 1. 研究開始当初の背景

都市に固有の気候現象である都市気候の諸問題の研究手法として、メソスケール気象モデルを用いた数値解析が広く用いられている。メソは中間を意味し、気象学では2-2,000 kmのスケールをメソスケールと呼ぶ。都市気候が対象とするスケールと合致するため、都市の熱環境、風環境等の評価の為にメソスケール気象モデルが援用されている。しかし国内外を問わず、都市気候研究では数値解析の結果を決定論的に評価している現状がある。即ち、数値解析の不確実性は考慮されず、それぞれ単一の数値解析の結果を以て評価している。一方、気候/気象の数値解析では、1) 初期値の不確実性(初期値鋭敏性)、2) モデルの不確実性、の2つの不確実性が誤差の原因となる事が知られている。

1963年から始まる気象学者 E. Lorenz の一連の研究により気象の数値予測は初期値鋭敏性を持つことが示され、「バタフライ効果」として知られる。初期値の僅かな誤差が数値予測の過程で成長する為に予測可能性には時間的な限界があり、これは第1種予測可能性と呼ばれる。気象の数値解析では、離散的な観測値から気象要素の3次元分布を格子点上に補間する客観解析データから初期値を作成するが、観測誤差や補間過程における誤差により、初期値に含まれる誤差を排除出来ない。一方、数値予測が長期間となれば、初期値の影響よりも海面や陸面の状態による下面境界値や外力の影響により予測可能性が規定され、これは第2種予測可能性と呼ばれる。また、メソスケール気象モデルでは日本域等の領域内を解析するモデルであり、解析期間に合わせて解析領域外の大気の状態を側面境界値として逐次更新する必要がある。側面境界値の作成に用いられる解析領域外の大気の状態は、地球全体を解析する全球モデル等の予測値等を用いる為、側面境界値についても誤差を排除出来ない。斯様に、メソスケール気象モデルを用いた数値解析では初期値・境界値に起因する誤差により、結果は不確実性を含む。

建築環境工学分野や都市気候分野でメソスケール気象モデルを用いた数値計算を行う目的は予測ではなく、多くの場合は過去の事象の再現計算と、そこから土地利用等の条件を変更した場合のケーススタディである。気象予報では、リアルタイムの予報 (forecast) に対し、過去の事象を再度予測することは再予報 (re-forecast) やハインドキャスト (hindcast) と呼ばれる。本研究ではメソスケール気象モデルを用いた再予報やハインドキャストを実行するが、これらを再現計算と記載する。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまでの単一の結果を評価する決定論的評価に対して、複数のアンサンブルシミュレーションの結果を統計的に評価する確率論的評価を行い、初期値・境界値に起因する不確実性を低減する事により信頼性の高い都市気候数値解析システムを構築する。

気象予報を目的として開発された気象モデルでは、初期値を作成するため、前の時刻の初期値から数値予報モデルを用いて計算された予報値を第一推定値として、点在する観測地点から得られた観測データを用いて第一推定値を修正するデータ同化を行い、物理量の3次元の空間分布を作成する。作成された物理量の分布は解析値と呼ばれ、データ同化は客観解析とも呼ばれる。メソスケール気象モデルの初期値・境界値を作成するために用いる客観解析データは世界中の気象機関が提供しており、異なる客観解析データを用いた、即ち誤差の特性が異なる初期値・境界値を用いた再現計算の精度について検討を行う必要がある。

初期値・境界値の差異だけでなく、気象モデルは初期値鋭敏性を有するため、計算期間が長くなるほど誤差が拡大すると考えられる。その一方、メソスケール気象モデルの助走計算 (spin-up) はどの程度が適切かという議論がある。気象を対象とした先行研究では、自由大気(対流圏のうち境界層より上部)の運動エネルギーのスペクトルの比較により少なくとも6時間から12時間の助走計算が必要と述べている論文、また気候を対象とした計算では、地上2mの気温と降水量の比較により1週間程度の助走計算でも十分であるが、土壌温度や土壌水分を重視するのであれば6ヶ月程度の助走計算が必要と述べている論文がある。しかしいずれも境界層内、特に接地層の流れ場に注目した助走計算の検討はなされていない。そして助走計算の長さを変えることは異なる初期値から計算を始めることであり、助走計算の長さのみの問題では無く初期値の不確実性の問題ともなる。

またメソスケール気象モデルでは計算期間が長期となれば境界値を更新する必要性が生じるが、その影響についても検討が必要となる。先述したように境界値を適宜更新することにより領域外の現象を計算領域に取り込むことができれば、長期間の再現計算も可能となると考えられる。メソスケールの予報であれば境界値はより大きな全球モデルの予報値から作成することとなるが、本研究で行う再現計算では境界値は客観解析データより作成するため全球モデルの予報値よりも現実の大気との誤差が小さいと考えられる。

以上を踏まえ本研究では、初期値・境界値に用いる客観解析データと、助走計算の長さを変更することにより、初期値・境界値が都市上空の風環境の再現精度に及ぼす影響を検討することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では初期値・境界値がメソスケール気象モデルの再現精度に及ぼす影響を検証するため、リモートセンシングによる都市上空の風速の観測値とメソスケール気象モデルによる再現計算の計算値との比較を行った。それぞれの概要を以下に示す。

#### (1) Doppler LIDAR を用いた上空の流れ場の観測

既往研究により実施した、Doppler LIDAR を用いた都市上空の流れ場の観測結果を検証に用いた。2015年8月9日から9月30日にかけて九州大学大橋キャンパスに設置した Doppler LIDAR LEOSPHERE WINDCUBE v2 を用いて福岡市上空の流れ場を観測した。機器は地上8mに設置し、上空48mから268mまで20m間隔で12高度の風向・風速を測定した。観測地点を図1中に示す。当該観測地点は博多湾より約6km南東に位置する。

#### (2) メソスケール気象モデル WRF を用いた再現計算

再現計算にはアメリカ National Center for Atmospheric Research により提供されているメソスケール気象モデルである Weather Research and Forecasting model (WRF) ver. 3.6.1 を用いた。

解析領域は図1に示す Domain 1 (東西3000km×南北2500km、水平方向解像度25km、タイムステップ75秒)・2 (同750km×750km、5km、15秒)・3 (同240km×180km、1km、3秒)とした。鉛直方向は Domain 1 から3まで共通で45メッシュに分割した。再現計算の精度検証には Domain 3 の結果を用いた。

#### (3) 再現計算対象日

福岡市は博多湾に面し、海面と陸面の温度差による海陸風循環の影響が風環境に大きな影響を及ぼす。図1に示す福岡管区気象台は博多湾より約1km南に位置する。この海陸風循環による風環境の時間変化の再現を目的とし、再現計算の対象日を選定した。

海面と陸面での放射による加熱の特性が異なるために海面と陸面での温度差が生じ海陸風循環が起こることから、Doppler LIDAR 観測期間のうち、無降水日が評価対象日を含め連続14日と最長であった2015年8月11日、日積算全天日射量が25.64MJと最大であった2015年8月23日、雲量が通日1オクタ未満で日照時間が12時間と最長であった2015年9月11日を選択した。また、海陸風循環は小規模の気圧差を駆動力とするため、広域の気圧傾度が小さい場合に海陸風循環が明瞭に現れると考えられることから、北部九州の気象台での気圧差が最小であった2015年8月15日も選択した。以上、4日を選択し再現計算を行った。

#### (4) 初期値・境界値

メソスケール気象モデルの初期値・境界値の選定が予測結果の精度に影響を及ぼす。本研究では初期値・境界値が再現計算の再現精度に及ぼす影響を検討するため、異なる客観解析データから作成した初期値・境界値を用いて再現計算を行った。使用した客観解析データは、アメリカ国立環境予測センター (National Centers for Environmental Prediction; NCEP) FNL 現業全球解析、ヨーロッパ中期予報センター (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF) ERA-Interim、気象庁メソ客観解析 GPV の3種類である。NCEP FNL は時期により複数の空間解像度があるが、本研究では2015年7月8日00:00 (UTC) より提供が開始された緯度経度ともに解像度0.25° (日本付近では南北方向約27.8km、東西方向約22.6km) と最も高解像度のものを用いた。ECMWF ERA-Interim は全球の再解析データであり、空間解像度は約80kmである。現業数値予報では、ある時刻の解析値を初期値として数値予報モデルを実行して予報値を得、それを次の初期時刻の解析の第一推定値に用いて観測データとデータ同化を行って解析値を作成し、その解析値を初期値として数値予報モデルを実行する、という解析予報サイクルが行われている。この際、データ同化に用いることが可能な観測データはその取得に掛かる時間的な制約がある。一方で再解析は過去の気象を可能な限り多くの観測データを用いてデータ同化を行うものである。気象庁メソ客観解析 GPV は現業数値予報に用いられ、空間解像度は5kmであり、範囲は日本周辺域のみである。時間間隔はNCEP FNL と ECMWF ERA-Interim は6時間毎、気象庁メソ客観解析 GPV は3時間毎である。これらの客観解析データより初期値を作成した。ただし、気象庁メソ客観解析 GPV は大気のみであるため、土壌温度などはNCEP FNL を組み合わせ用いた。以降、それぞれの客観解析データを FNL、ERA、GPV と略記する。

先述したように、メソスケール気象モデルでは計算を実行するためには境界条件の設定が必要となる。WRF では、最も外側のドメインではナッジングと呼ばれる手法が用いられる。本研究では、側面境界値は初期値作成に用いた客観解析データから作成し、6時間毎に側面境界のナッジングを実行した。

#### (5) 計算期間

本研究では、助走計算の長さが都市上空の流れ場の再現計算に与える影響についても検討し

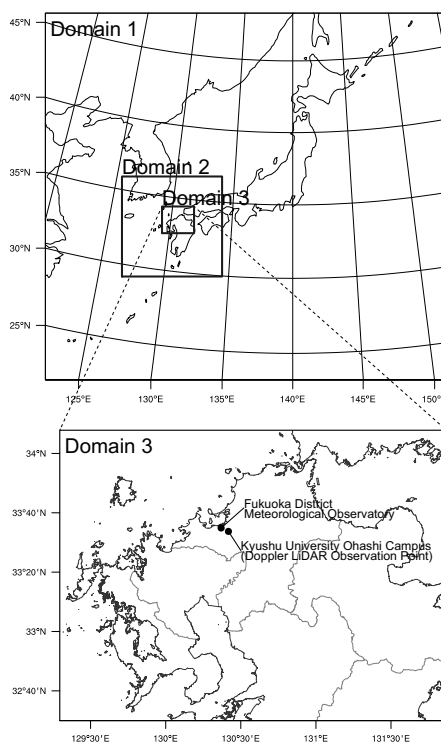


図1 解析領域及び観測地点

た。各計算は協定世界時 00:00（日本標準時 09:00、以降は時刻を日本標準時で表す）より計算を始め、4日の対象日に対して、再現計算対象日も含めて1日15時間（15時間の助走計算と1日の再現計算対象）、2日15時間（1日15時間の助走計算と1日の再現計算対象、以下同様）、3日15時間、5日15時間、7日15時間、10日15時間、20日15時間、30日15時間と変更して再現計算を行い、最後の1日分の計算結果を評価対象とした。0.25°NCEP FNLの提供開始が2015年7月8日のため、2015年9月11日のみ60日15時間の計算も行った。以降、それぞれの計算期間を01d15h等と略記する。

#### 4. 研究成果

WRFによる再現計算の精度検証結果の一部について述べる。以降、各計算結果について使用した客観解析データと計算期間の組み合わせにより“FNL\_01d15h”のように略記する。

地上観測との比較で再現精度が最も悪かった9月11日と、最も良かった8月23日について、Doppler LIDARによる風速の観測値との比較を行った。大気境界層下部の接地層の高さは一般に50 mや100 m程度とされていることから、Doppler LIDARによる観測高度のうちで100 m以下、かつWRFによる再現計算の高度と最も近くなる条件として、地上高さ88 mの観測値と計算値の比較を行った。

図2に2015年8月23日の地上高さ88 mでの風速の観測値とWRFの計算値の日変化を示す。WRFの計算値の高度の平均値は85.0 mであった。Doppler LIDARによる観測値は、12:00以降は風速が4.0 m/s以上となり、18:40までその傾向が持続した。WRFによる再現計算では、午前中の時間帯では客観解析データ、計算期間によりそれぞれ傾向に違いはあるものの、風速は多くの再現計算で過大評価する結果となった。一方で海風の進入が始まると、風速の再現結果に関しては客観解析データ、計算期間によりばらつきが見られた。客観解析データ毎の大まかな傾向としては、FNL（グラフ中、赤系統の線）とGPV（グラフ中、緑系統の線）が海風進入後の風速を過小評価する傾向が見られた。

初期値の不確実性を減じるためのアンサンブル予報のうち簡易な手法として Lagged Average Forecasting (LAF) 法がある。これは異なる時刻の客観解析データからそれぞれ初期値を作成して計算を実行し、対象とする評価期間のアンサンブルメンバーとして統計的に取り扱う手法である。一般的にはLAF法では客観解析データの時間間隔や日数など規則的に計算開始時間をずらす。一方本研究では、計算開始時刻の間隔は不規則であり、また短期、中期、長期が混在している状況であり、アンサンブルメンバーとしての妥当性についての検証は十分に行われていないが、異なる計算期間の再現計算結果を元に平均値及び標準偏差を求め評価を試みた。図3に8月23日の地上高さ88 mでの風速の観測値とWRFの再現計算結果を平均した風速を示す。平均は客観解析データ毎に行った。計算値については、実線は客観解析データ毎に計算期間の異なる8ケースの平均値を、色つきの範囲は各時刻での標準偏差を示す。8月23日は、個々の再現結果が持つ短時間での風速変動が平均化によって相殺され、風速の日変化の傾向が明瞭となった。観測で海風進入と考えられるタイミングでは、11:50から12:00で風速が1.47 m/s増加しており、10分間での風速変化としては日最大であった。同様に再現計算の平均値で10分間での風速変化の日最大となるのは、FNLでは10:40、ERAでは11:00、GPVでは11:30となり、これらがアンサンブル平均した再現計算での海風進入のタイミングと考えられる。同様に個々の再現計算の10分間での風速変化の日最大を見ると、未明や午後に出現するケースも見られた。

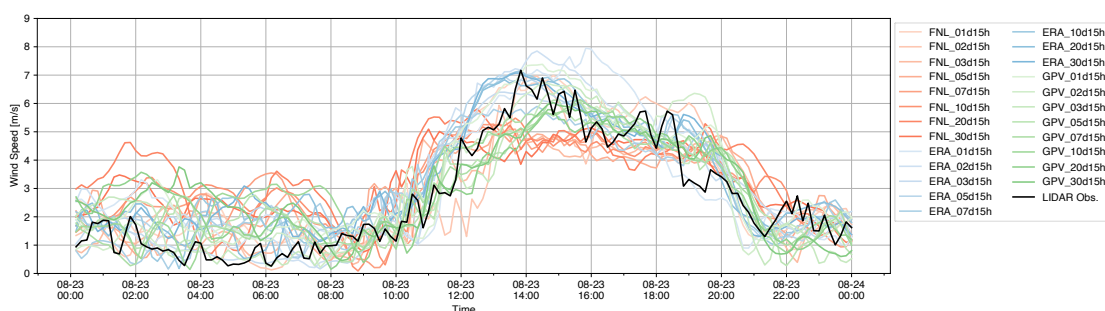


図2 再現計算と観測による風速の比較（2015年8月23日、地上88m）

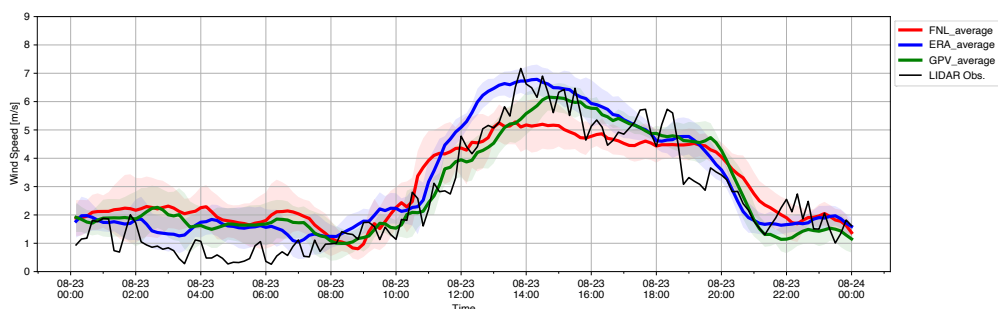


図3 LAF法による再現計算と観測による風速の比較（2015年8月23日、地上88m）

同様に、図4に2015年9月11日の地上高さ88mでの風速の観測値とWRFの計算値の日変化を示す。WRFの計算値の高度の平均値は83.6mであった。当該日は計算期間が05d15hを超えると再現精度が悪化した対象日である。ほぼ全ての再現結果が風速を過大評価する結果となった。特に最も再現精度が低下した05d15hでは誤差が10m/sを超える場合も多く見られ、中でもGPV\_05d15hは誤差が最大で16.85m/sとなった。観測では11:00以降は風向は北西で安定し風速2.5m/s以上となり海風の進入と判断でき、その傾向は19:10まで継続した。再現計算では海風進入後の風向は概ね再現されたが、風速に関してほぼ全ての再現計算で過大評価となった。

図5に2015年9月11日の地上高さ88mでの風速の観測値とWRFの再現計算結果を平均した風速を示す。9月11日については、05d15h以降の再現精度が著しく低下しており、また05d15h以降の再現計算の方が多いため、海風進入前の風速の平均値は改善が見られず、また標準偏差も大きい結果となった。また海風進入が観測された時刻以前より平均風速が速いため、いずれの客観解析データを用いた結果でも海風進入のタイミングを捉えることは出来ていない。一方で、いずれの客観解析データを用いた結果でも海風進入後は標準偏差が小さくなっていることが確認できた。

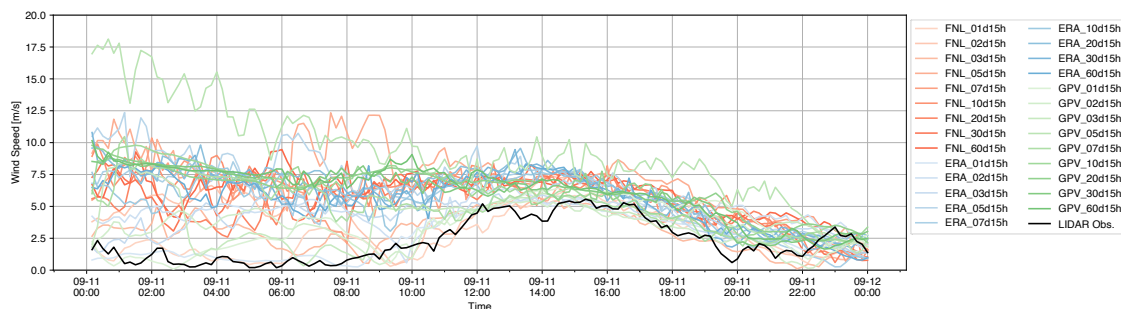


図4 再現計算と観測による風速の比較 (2015年9月11日、地上88m)

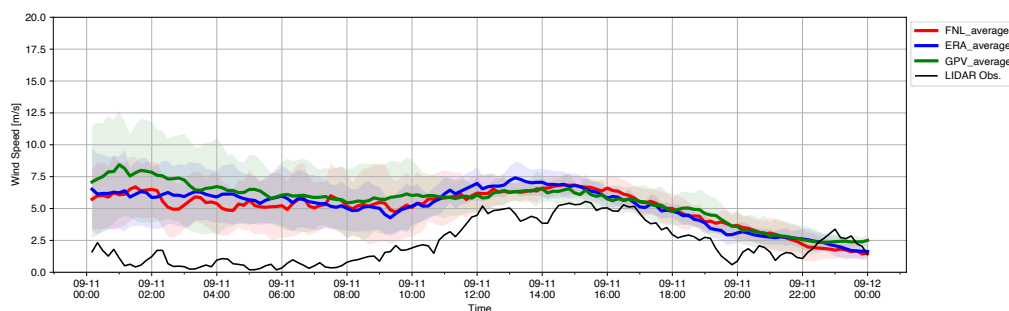


図5 LAF法による再現計算と観測による風速の比較 (2015年9月11日、地上88m)

本研究では、メソスケール気象モデルを用いた都市上空の流れ場の再現計算において、初期値・境界値の設定が再現精度に及ぼす影響を検討した。検討の方法として、異なる客観解析データより作成した初期値・境界値の適用と、評価対象日までの助走計算の長さを変更し、それらの組み合わせによって2015年8月11日、2015年8月15日、2015年8月23日、2015年9月11日の4日を対象に再現計算を行い、福岡地方気象台による地上観測及び九州大学大橋キャンパスで実施したDoppler LIDARによる上空の流れ場の観測と比較した。地上観測との海面気圧、風速の比較では、助走計算の差異が再現精度に与える影響が見られ、これは初期値の気圧場に起因すると考えられる。特に初期値に台風や発達する低気圧を含む場合、計算期間が数日と短い場合には気圧場の再現精度が流れ場の再現精度に大きく影響し、評価対象日の再現精度が著しく低下したと考えられる。また、助走計算が長くなるにつれて精度が低下する可能性を懸念したが、一概にそのような傾向とはならなかった。

地上観測との比較で再現精度が最も悪かった9月11日と、最も良かった8月23日について、Doppler LIDARによる風向・風速の観測値との比較を行った。9月11日は風向・風速共に再現精度は低く、特に初期値に九州北部を通過する低気圧を含むケースや台風を含むケースでは再現精度が著しく低下した。しかし海風進入後の時間帯の風向は概ね再現された。8月23日は、観測では風向が安定せず風速が小さい海風進入前の時間帯では風向の再現精度は低かったが、海風進入後の風向・風速は共に概ね再現された。

以上の検討から、単一の計算結果を以てその精度を論じる決定論的な取り扱いには限界があると考え、計算開始時刻をずらすことにより初期値の不確実さを低減させるLagged Average Forecasting法を試みた。本研究では、計算開始時刻の間隔は不規則であり、また短期、中期、長期が混在している状況であり、アンサンブルメンバーとしての妥当性についての検証は十分に行われていない。それにも関わらず、助走計算の長さによる再現精度のばらつきが少ない対象日においては、アンサンブル平均された再現結果は観測結果と良い対応を示す場合も見られた。研究期間内に論文としての公表まで進められなかったが、より適切な条件でのLAF法を実行した検討を進めており、研究期間終了後も引き続き本研究の内容を発展させる予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kawamoto Yoichi	4. 巻 5
2. 論文標題 Investigation of the uncertainty of initial and boundary conditions in the hindcasts of flow fields over urban areas using a mesoscale numerical weather prediction model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW	6. 最初と最後の頁 517 ~ 529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12282	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 川本 陽一	4. 巻 87
2. 論文標題 メソスケール気象モデルを用いた都市上空の流れ場の再現計算における初期値・境界値の不確実性に関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 460-471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.87.460	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川本 陽一
2. 発表標題 メソスケール気象モデルを用いた海風の再現計算へのLagged Average Forecasting法の適用 その2 乱流運動エネルギーの比較
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川本 陽一
2. 発表標題 メソスケール気象モデルを用いた海風の再現計算へのLagged Average Forecasting法の適用
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川本 陽一
2. 発表標題 メソスケール解析における初期値・境界値の不確実性に関する検討(その3) ドップラーライダーによる観測値との比較
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川本 陽一
2. 発表標題 都市形態解析に基づく都市キャノピー層内の不均一性に関する考察(その2) Frontal Area Indexによる都市形態の不均一性の検討
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会
4. 発表年 2020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

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