

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03656

研究課題名（和文）都市街区LESモデルの改良とその応用

研究課題名（英文）Improvement of city-scale LES model and its applications

研究代表者

日下 博幸（Kusaka, Hiroyuki）

筑波大学・計算科学研究センター・教授

研究者番号：10371478

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、都市街区気象Large-Eddy Simulation(LES)モデルの初期値・境界値作成システムの開発を行った。前者は、都市の表面温度と地中・建物内温度を本計算に先んじて計算するシステムとして開発した。後者は、中立大気用に開発されたRecycle-Rescale (R-R)法を対流境界層用に拡張することで乱流生成を行うシステムとして開発し、これを拡張R-R法と名付けた。さらには、この拡張R-R法を既存の複数の手法と相互比較した。最後に、LESモデルを用いて、都市キャノピー層内の乱れの長さスケールが建物高さや道路幅の組み合わせによって決まることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

都市街区気象シミュレーションモデルの大きな課題の一つとして、流入境界条件作成に必要な乱流生成がある。これまでの乱流生成手法の多くは数値流体力学分野で開発されてきたため、中立大気での利用に制限されていた。本研究で開発した拡張R-R法は、不安定成層にも対応できる点で優れている。また、本研究で得た都市キャノピー層内の乱れの長さスケールの知見は、メソスケールの都市気象モデルの精度向上に資すると期待できる。本研究では、拡張R-R法を搭載することで、都市街区気象LESモデルを改良した。このLESモデルは、自治体等が実施する街路樹やドライミストの設置などの暑さ対策の評価を支援するツールになると期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a system for generating initial and boundary conditions for a Large-Eddy Simulation (LES) model in urban districts. The former was developed as a system to simulate urban surface temperatures and subsurface/building interior temperatures prior to the main simulation. The latter was developed as a system to generate turbulence by extending the Recycle-Rescale (R-R) method, originally designed for neutral atmospheres, to be applicable to convective boundary layers. We named this the extended R-R method. Furthermore, we compared this extended R-R method with several existing methods. Finally, using the LES model, we revealed that the turbulence length scale within the urban canopy layer is determined by the combination of building height and road width.

研究分野：気象学、気候学

キーワード：都市気象 LESモデル 数値モデル開発 境界条件

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

気候変動やヒートアイランドによって、都市の暑熱環境は年々悪化しており、熱中症患者の増加などの社会問題を引き起こしている。これに対して自治体等は街路樹やドライミストといった暑さ対策を講じている。この対策の効果を引き出すための事前・事後の評価や最適な配置の検討をするためのツールの開発や改良は急務である。

(2) 学術的背景

都市境界層には未解明の問題が多く残されている。これらの問題解決の一助として、乱れをある程度解像できる Large-Eddy Simulation (LES)モデルが活用されているが、初期値の作成や流入境界における乱れ成分の付与など、手法的にまだ円熟していない部分も多い。これらの諸問題に対応できる手法を開発することで、都市境界層内の乱れの理解が進むことが期待できる。

2. 研究の目的

都市暑熱環境の緩和の基礎的・実践的な研究のため、これまで都市から都市圏スケールと街区スケールの気象シミュレーション研究は、それぞれ、気象学分野と建築工学分野で個別に行われてきた。

本課題では、筑波大学計算科学研究センターで開発を進めている都市街区気象 LES モデル(通称 City-LES)の初期条件・境界条件部分を改良し、都市スケールから街区スケールまでの気象を詳細に再現するモデリングシステムを開発した。このモデルは、「木も見て森も見る」ことができる都市街区気象 LES モデリングシステムとなる。さらには、この City-LES を用いて、都市キャノピー層内の乱流の特性も把握した。

3. 研究の方法

初年度に、どの時刻からでも都市街区気象シミュレーションを行うことができるような初期値システムを開発した。このシステムは、データを得にくい地表面温度や地中温度の初期値を作成できる。

2年目には、気象モデルから、都市街区気象モデルにダウンスケールするために必要な境界条件作成システムを開発した。

3年目には、2年目に開発した境界条件作成システムの性能評価を行った。さらには、都市キャノピー層内の乱れの基礎的な理解を深めるため、都市キャノピー層内の乱れの長さスケールのモデル化に有用な知見を得るための解析を行った。

4. 研究成果

(1) 初期値作成システムの開発

次のような初期値作成システムを開発した。このシステムでは、地上風速や地上気温を入力データとして用いて、都市街区気象 LES モデルの放射過程と地表面過程のみを先んじて計算させることで、計算コストを抑えながら都市の表面温度と地中・建物内温度を計算できる。これにより、都市街区内の空間的に非均一な表面温度・地中温度の初期値を得ることができる(図1)。

(2) 既存の流入乱れ生成法の相互比較

これまで、流入乱れ生成法の性能に関して、中立大気を対象とした比較は行われてきたが、昼間の熱対流が活発な時間帯ではまだ十分な比較が行われていなかった。そこで、研究実施者らは様々な流入乱れ生成法の相互比較をすることで、より実践的な知見が提供できるのではと着想した。本研究では、研究実施者らが開発してきた都市街区気象 LES モデルに既存の流入乱れ生成手法を実装することで、流入乱れ生成法の性能の相互比較を行なった(Sato and Kusaka, 2023a)。相互比較の結果、いずれの手法も流入乱れ生成法として機能しているものの、気象学分野で開発されたセル摂動法と工学分野で開発された拡張デジタルフィルタ法を比較したところ、拡張デジタルフィルタ法の方が対流境界層上層でより乱れを良好に生成していることがわかった(図2)。ただし、拡張デジタルフィルタ法はある特定の面からの流入しか対応できないという利用上の制限がある。一方、セル摂動法は、乱れ生成の性能がこれらの手法より低い場合があるものの、流入面近くに温位の摂動を置くというシンプルさから、流入風向の時間変化にも対応できる長所がある。このように、両手法には独自の利点や制限があり、それぞれ異なる場面において有用性があることが分かった。

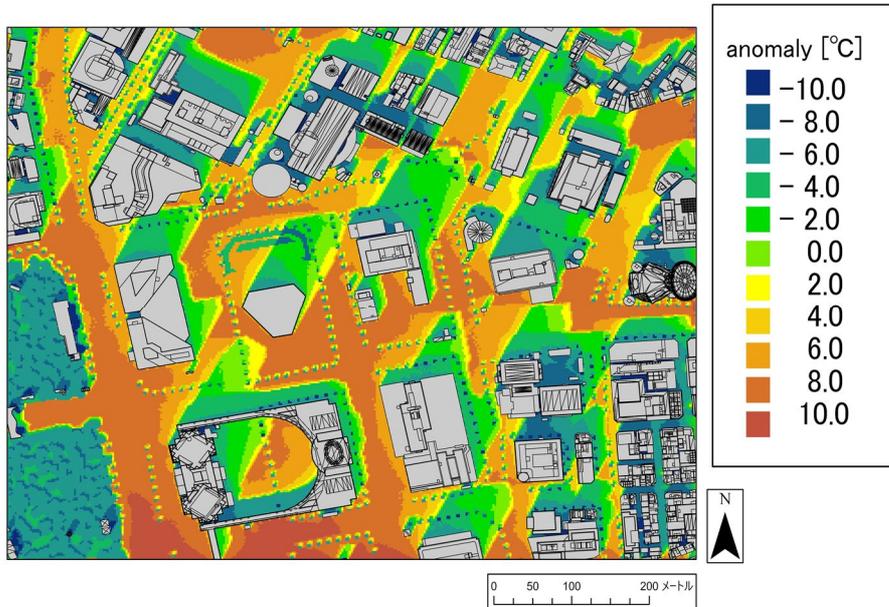


図 1 初期値作成システムによって作成された地表面温度の空間分布の一例. 空間平均からの偏差を示している.

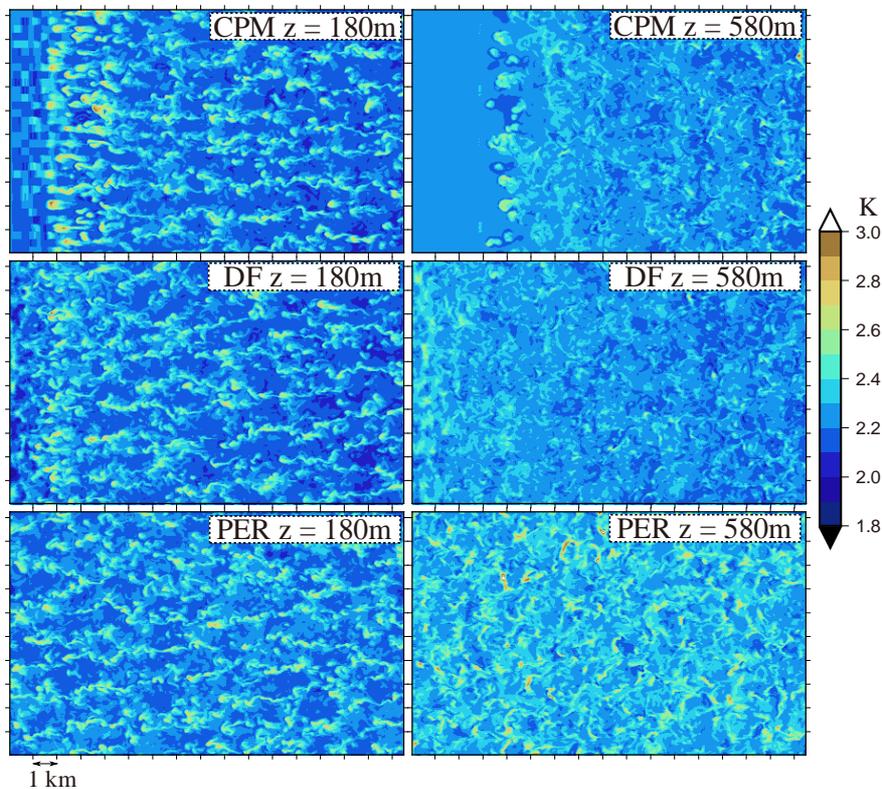


図 2 高度 180m における温位摂動の水平断面. CPM: セル摂動法, DF: 温位摂動を含む拡張デジタルフィルタ法, PER: 周期境界条件(基準実験)をそれぞれ示す. Sato and Kusaka (2023a), Fig. 3 を引用.

(3) 新たな流入乱れ生成法の開発

工学分野で開発された Recycle-Rescale 法は、計算領域内で生成された乱れを再利用することで境界条件に乱流成分を付加する方法である。モデル自身が生成した乱れを利用することから、計算領域内の乱れとの馴染みがよく、フルサイズの乱流生成計算を行うより低い計算コストで乱れが生成できる点に特徴がある。しかしながら、中立大気のみ利用可能であり、昼間の気温が高く熱対流が活発な時間帯を対象とする際には問題があった。そこで、本研究では、熱的な乱れも含めて適切にリサイクルをする拡張 R-R 法を開発した(Sato and Kusaka, 2023b)。この手法は、従来の R-R 法が中立大気中の乱流境界層の速度スケールや、乱流境界層厚さをスケールパラメ

ータとしていたことを踏まえて、対流境界層の速度スケールや、対流境界層深さをスケールパラメータとしたものである。これにより、適切なリスケーリングをしつつ対流境界層内での活発な乱れを再利用できるようにした。提案した拡張 R-R 法は、拡張デジタルフィルタ法と比べて、流入境界付近でよりもっともらしい乱れが生成できるという長所を持つことが分かった(図 3)。以上の結果、風向が一定であるような理想的な状況においては、拡張 R-R 法が最も有効な手法であると結論づけられた。

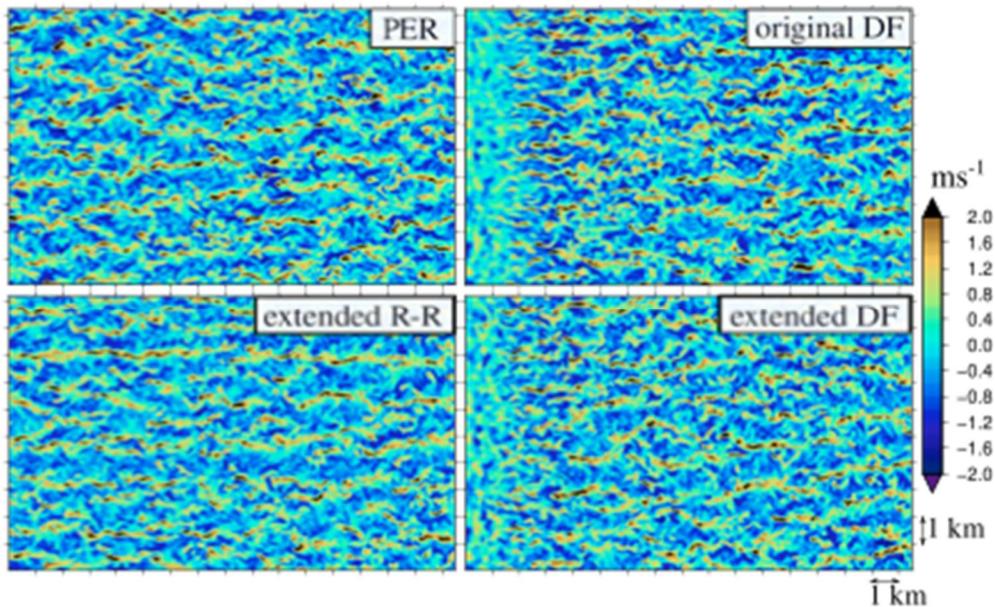


図 3 高度 180m における鉛直風速の水平断面. PER: 周期境界条件(基準実験), original DF: 温位摂動を含まないデジタルフィルタ法, extended R-R: 拡張リサイクル-リスケール法(提案手法), extended DF: 温位摂動を含む拡張デジタルフィルタ法をそれぞれ表す. Sato and Kusaka (2023b) Fig.9 を引用.

(4) 乱流長さスケールの推定

都市キャノピー内の乱流長さスケールは、建物高さや道路幅といった都市内の幾何的パラメータに依存すると予想されていたが、そのモデル化はまだ議論の中にある。City-LES の応用のひとつとして、本課題では、都市キャノピー層内の乱流長さスケールを支配する幾何パラメータの調査を行なった。従来からスケールパラメータとして考えられていた建物高さ、主流方向道路幅で無次元化したところ、都市キャノピー内の乱流長さスケールのプロファイルにはばらつきが見られた(図 4 左, 中)。これは、建物高さや道路幅が単体では長さスケールを説明しきれないことを表す。そこで複数のパラメータの組み合わせを検討したところ、建物高さ、主流方向道路幅、スパン方向道路幅の 3 つのパラメータの相乗平均が、キャノピー内の乱流長さスケールをよく表すパラメータの可能性があることが示された(図 4 右)。さらに、修正した乱流長さスケールを既存の乱流モデルに組み込むことで、いくつかのケースにおいて都市キャノピー層内での乱流輸送の精度向上が確認できた (Sato and Kusaka, 2023c)。

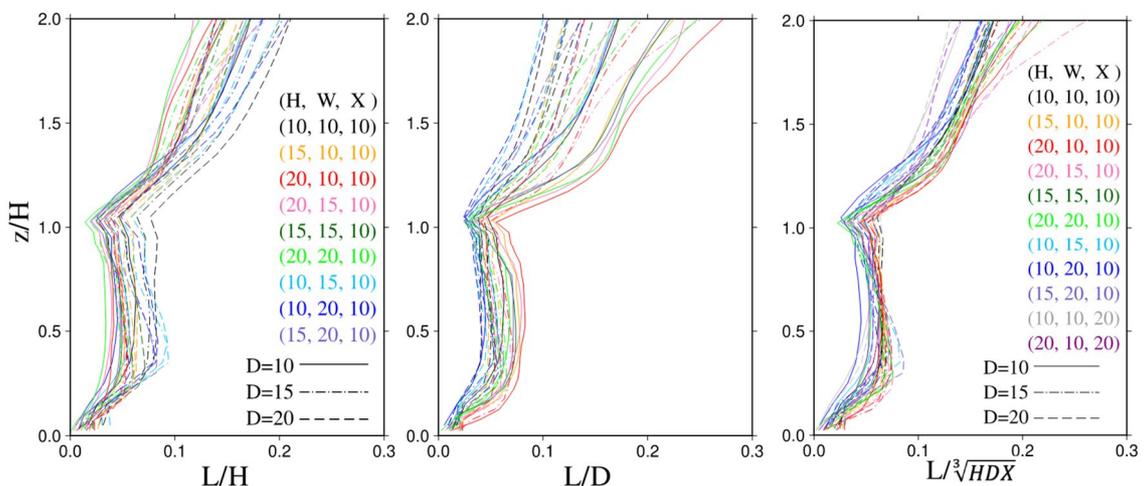


図 4 無次元化した乱流長さスケールの鉛直プロファイル. 左: 建物高さ(H)で無次元化した場合,

中: 主流方向道路幅(D)で無次元化した場合, 右: 提案パラメータで無次元化した場合. そのほか, W は建物幅, X はスパン方向道路幅をそれぞれ表す. 線の色や線種は図中凡例の通り.

(5) まとめ

以上のように, 本課題では, 当初目標であった City-LES の初期値・境界値作成システムの開発という目標を達成できた.

流入乱れ生成法の開発では, 当初の予定であったデジタルフィルタに基づく手法の実装に加えて, 新たに拡張リサイクル-リスケール手法を開発した. さらには, 気象学分野の手法であるセル摂動法を加えて性能の相互比較を行なった. これらの成果により, 本課題の当初目標にはなかつた新たな知見が得られた.

拡張リサイクル-リスケール手法の提案・開発は, 都市街区気象 LES モデルの精度向上や利用拡大に資するものである. また, 流入乱れ生成法の性能の相互比較実験の結果は, 多くのモデル開発者やユーザにとって有益な情報となると期待できる.

また, 都市街区気象 LES モデルを用いて実施して得られた都市キャノピー層内での乱流長さスケールに関する新たな知見は, 学術的背景にあるような都市内の乱れの基礎的な理解に資すると期待できる.

参考文献

- Sato, T. and H. Kusaka (2023a): Intercomparison of synthetic inflow turbulence generation methods for large-eddy simulation models in thermally driven convective boundary layer simulations. *SOLA*, **19**, 165-172.
- Sato, T. and H. Kusaka (2023b): Applicability of methods for inflow turbulence generation developed in a CFD field to the thermally driven convective boundary layer simulations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **62**, 1783-1801.
- Sato, T. and H. Kusaka (2023c): Investigation of a geometric parameter corresponding to the turbulent length scale within an urban canopy layer. *Boundary-Layer Meteorology*, <https://doi.org/10.1007/s10546-023-00832-y>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sato Takuto, Kusaka Hiroyuki	4. 巻 62
2. 論文標題 Applicability of Methods for Inflow Turbulence Generation Developed in a CFD Field to the Thermally Driven Convective Boundary Layer Simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Meteorology and Climatology	6. 最初と最後の頁 1783 ~ 1801
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JAMC-D-23-0053.1	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 Sato Takuto, Kusaka Hiroyuki	4. 巻 189
2. 論文標題 Investigation of a Geometric Parameter Corresponding to the Turbulent Length Scale Within an Urban Canopy Layer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Boundary-Layer Meteorology	6. 最初と最後の頁 215 ~ 233
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10546-023-00832-y	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 Sato Takuto, Kusaka Hiroyuki	4. 巻 19
2. 論文標題 Intercomparison of Synthetic Inflow Turbulence Generation Methods for Large-Eddy Simulation Models in Thermally Driven Convective Boundary Layer Simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SOLA	6. 最初と最後の頁 165 ~ 172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2151/sola.2023-022	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18件（うち招待講演 0件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 日下博幸, 佐藤拓人, 池田亮作, 朴泰祐, 飯塚悟
2. 発表標題 筑波大学で開発した都市街区気象LES(City-LES)の精度検証
3. 学会等名 第1回都市極端気象シンポジウム(第18回台風研究会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤拓人, 日下博幸
2. 発表標題 対流境界層を対象としたLESのための流入境界条件の検討
3. 学会等名 第1回都市極端気象シンポジウム(第18回台風研究会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤拓人, 日下博幸, 中村祐輔
2. 発表標題 建物データの精度がLESモデルによる暑熱環境評価の精度に及ぼす影響の調査
3. 学会等名 CSIS days 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日下博幸, 池田亮作, 佐藤拓人
2. 発表標題 都市気象LESモデル(City-LES)の精度検証
3. 学会等名 第24回非静力学モデルに関するワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤拓人, 日下博幸
2. 発表標題 対流境界層を対象としたLarge-eddy simulationのための流入境界条件の相互比較
3. 学会等名 第24回非静力学モデルに関するワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤拓人, 日下博幸
2. 発表標題 対流境界層内の流れのLESのための流入境界条件の相互比較
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Kusaka, Takuto Sato, Ryosaku Ikeda, Satoru Iizuka, Taisuke Boku
2. 発表標題 City-scale Large Eddy Simulation Model (city-les) to Propose Better Adaptation Strategies for Heat Stress Mitigation in Urban Areas
3. 学会等名 AOGS 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Kusaka, Ryosaku Ikeda, Takuto Sato, Taisuke Boku, Satoru Iizuka
2. 発表標題 Development of the City-Scale Large Eddy Simulation Model (City-LES) for Evaluating Heat Stress mitigation Measures
3. 学会等名 JpGU 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Kusaka, Ryosaku Ikeda, Takuto Sato, Satoru Iizuka, Taisuke Boku
2. 発表標題 New version of the City-scale Large Eddy Simulation Model (City-LES) to propose better adaptation strategies for uncomfortable thermal environment in urban areas
3. 学会等名 UGI-IGU 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤拓人, 日下博幸
2. 発表標題 都市内の流れの乱流長さスケールと建物の代表パラメータとの関係の調査
3. 学会等名 第32回非静力学モデルに関するワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日下博幸, 佐藤拓人, 中村真悟, 中村祐輔, 軽辺凌太
2. 発表標題 都市構造が都市内部の暑熱環境に与える影響の調査(その2)ドライミストの効果
3. 学会等名 CSIS days 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤拓人, 日下博幸
2. 発表標題 都市内の流れの乱流長さスケールを支配する都市パラメータの調査
3. 学会等名 気象学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤拓人, 日下博幸
2. 発表標題 都市内の流れの乱流長さスケールの精度向上に向けた支配パラメータの調査
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 駒崎寛和, 吉川耕司, 日下博幸
2. 発表標題 大気境界層内での長波放射に着目した放射モデルの相互比較
3. 学会等名 気象学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sato Takuto, Kusaka Hiroyuki, Boku Taisuke, Tatebe Osamu
2. 発表標題 Recent Development of City-Scale Large-Eddy Simulation model "City-LES"
3. 学会等名 The 6th International Workshop on Nonhydrostatic Models (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kusaka Hiroyuki, Ikeda Ryosaku, Sato Takuto, Satoru Izuka, Boku Taisuke
2. 発表標題 Development of the state of art city-scale Large Eddy Simulation model (City-LES) based on CFD and meteorological modeling approaches
3. 学会等名 11th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sato Takuto, Kusaka Hiroyuki
2. 発表標題 Development of methods to generate inflow turbulence component applicable to the simulation of convective boundary layer over urban area
3. 学会等名 11th International Conference on Urban Climate (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤拓人, 日下博幸
2. 発表標題 都市気象Large-eddy simulationモデルのための地表面温度スピニアップ手法の考察
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

受賞：
[1] 日下博幸, 佐藤拓人, 中村真悟, 中村祐輔, 軽辺凌太(2021) CSIS DAYS 2021 優秀共同研究発表賞 「都市構造が都市内部の暑熱環境に与える影響の調査（その2）ドライミストの効果」
[2] 佐藤拓人, 日下博幸, 中村祐輔(2022) CSIS DAYS 2022 優秀共同研究発表賞 「建物データの精度がLESモデルによる暑熱環境評価の精度に及ぼす影響の調査」
[3] 佐藤拓人(2022) 第1回都市極端気象シンポジウム(第18回台風研究会) 優秀発表賞 「対流境界層を対象としたLESのための流入境界条件の検討」
研究者情報：
[1] TRIOS https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000001094
[2] Researchmap https://researchmap.jp/7000020562
[3] Google Scholar https://scholar.google.co.jp/citations?user=lzx4_S0AAAAJ&hl=ja

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	Doan Quang Van (Doan Quang Van) (80869264)	筑波大学・計算科学研究センター・准教授 (12102)	

	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
研究協力者	佐藤 拓人 (Sato Takuto)		

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
---------	---------