

筑波大学で開発した都市気象 LES モデル (City-LES) の精度検証
Accuracy verification of the urban meteorological LES model (City-LES)
developed at the University of Tsukuba

日下博幸*¹, 佐藤拓人*¹
Hiroyuki KUSAKA, Takuto SATO

In this presentation, the performance of the urban meteorological LES model "City-LES" developed by Hiroyuki Kusaka Laboratory, Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, in cooperation with Taisuke Park Laboratory, Tsukuba University, and Satoru Iizuka Laboratory, Nagoya University, is verified. The validation focuses on how well the distribution of thermal indices calculated by the model reproduces observations. City-LES was found to be able to represent the severe heat environment within the built-up area of central Tokyo that emerges during the hottest days of summer in Tokyo, with an error margin of approximately 0.5°C in WBGT.

1. はじめに

大気現象の時空間スケールは、伝統的に Global-scale, Meso-scale, Micro-scale に区分され、それぞれの現象に対して適切な数値気象モデルが開発され、利用されてきた。都市気象の場合、ヒートアイランドや海陸風循環などの再現に対してはメソスケールモデル、街区内の暑熱環境やビル風の再現に対してはマイクロスケールモデルが用いられてきた。メソスケールモデルでは、都市キャノピーモデルを導入することで都市の建物効果をモデル内で表現してきた。いわゆるパラメタリゼーションに相当する。マイクロスケールモデルの場合、建物を解像することで建物効果を表現してきた。

都市街区内の風や熱環境を再現するモデルは、数値流体力学 (CFD) モデルという形で、主として工学分野で開発されてきた。CFD モデルは、気象モデル同様に境界層乱流を全てパラメタリゼーションする RANS モデルと、大規模な乱流を直接解像しメッシュサイズ以下の小さな乱流のみモデル化する Large Eddy Simulation (LES) に大別される。LES モデルの方が一般的に流れ場の再現精度が高いが、境界条件の取り扱いの難しさや計算コストの面から、現時点では、RANS モデルの方が広く利用されている。CFD モデルは、建物周りのメッシュサイズを $O(0.01\sim 0.1\text{m})$ に設定するこ

とでビルからの剥離やビル風などを再現できるという特徴を持つ。また、モデルによっては、街区内の 3 次元放射を計算することで、WBGT や SET*などの温熱指標の詳細な空間分布を計算できるものもある。このタイプの代表的なモデルに ENVI-met モデル⁽¹⁾がある。CFD モデルは、工学分野だけでなく、環境学分野、生気象学分野、気象学分野でも利用されており、非常に有用なソフトウェアであるが、また、大気の物理過程 (大気放射や雲物理) や大気成層が考慮されていない、街区内の放射計算の際に大気を透明と仮定して大気の放射加熱冷却を考慮しないなどの課題もある。また、一般的に、都市街区内の暑熱環境の再現精度が十分ではないと考えられている。実際、暑熱環境研究で最も多く使われている ENVI-met に対しても、温熱指標の空間分布の再現性が十分ではないなどの問題点が指摘されている。

気象学分野では、1970 年代から LES モデルが開発されており、熱対流の研究などに用いられてきた⁽²⁾。現在では、霧や、層雲、積雲などの雲を対象としたシミュレーションが活発に行われている⁽³⁾。これらのシミュレーションは、広い平野や海の上のできる雲を対象としているため、下部境界には通常建物は存在しない。

気象モデルの中でも建物解像のモデルは少ない

*1 筑波大学計算科学研究センター kusaka @ccs.tsukuba.ac.jp
Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

ながらあり、ドイツのハノーバ大学が開発した PALM⁽⁴⁾は、その先駆けのモデルである。PALM は、通常の CFD モデルとは異なり、大気成層や物理過程（短波放射・長波放射・雲など）を考慮した気象学の LES モデルであり、いわば建物解像 CFD モデルと気象モデルのハイブリッドモデルである。PALM は、都市街区内の乱流構造の研究などの大気境界層の基礎研究から街区内の熱ストレス緩和といった応用研究まで広く利用されている。日本でも、PALM と同様のモデルが筑波大学⁽⁵⁾や JAMSTEC⁽⁶⁾で開発されている。これらのモデルは、様々な応用研究に利用されているが、実のところ、その精度検証は未だ十分とは言えない。

本講演では、筑波大学計算科学研究センターの 日下博幸研究室が、同センターの 朴泰祐研究室および名古屋大学飯塚悟研究室の協力のもと開発した、都市気象 LES モデル「City-LES」の性能を検証する。検証では、モデルで計算された都市内の温熱指標の分布がどの程度観測を再現できているかという点に重きを置いて行う。

2. モデルの概要

City-LES モデルは、都市境界層内の大気現象や暑熱環境の再現と予測を目的とする数値モデルである。したがって、力学モデルには非静力ブジネスク近似方程式の LES を採用している。大気物理過程を表現するために、2 種類の短波放射モデル、2 種類の長波放射モデル、1 種類の雲物理モデルを搭載している。座標系は直交座標であり、スタッガード格子を採用している。建物は解像される。また、計算負荷を軽減するため、ネスティング機能が搭載されている。コードは、Fortran95 で記述されており、MPI+OpenMP で 3 次元並列化が行われている。また、この CPU 版とは別に GPU 版も開発されている⁽⁷⁾。

City-LES では、都市内の暑熱環境を空間詳細に再現するために、日射が作り出す建物の影や建物間・建物道路間の多重反射が 3 次元的に計算される。長波放射も同様に、建物間・建物道路間のやりとりを考慮した上で計算される。これらの 3 次元放射計算には、ラジオシティ法を用いた。放射計算の後、建物表面や、道路路面、地面における熱収支が計算され、大気に輸送される顕熱・潜熱・放射フラックスや建物内部・地中への熱フラックスが計算される。

都市内には、建物のほかに街路樹や公園内の樹

木が存在する。したがって、これらの熱的・力学的効果も反映させる必要がある。気象モデルでは、一般的に植生群落を対象とした植生キャノピーモデルが導入されているが、City-LES モデルでは、建築工学分野で用いられているような樹木単体のモデルを搭載している。樹木モデルでは、樹木は枝や幹はなく葉のみで構成されていると仮定して、樹木を格子に分割する。樹木の葉による放射の遮蔽・透過・反射の効果を考慮した上で、樹木表面の熱収支が計算され、大気への顕熱・潜熱・放射フラックスが計算される。また、樹木による影も計算される。

近年、暑熱環境緩和のために、屋上緑化、壁面緑化、遮熱性舗装、ドライミストなどが都市内に導入されている。City-LES 内にもこれらを導入することができる。

City-LES を用いたシミュレーションには、入力データとして土地利用・建物・街路樹・人工排熱に関する様々な情報（位置・大きさ・種類など）が必要である。また、大気と地表面（建物面・道路面）の初期条件・境界条件も必要である。モデルの出力は、温位や湿度、風、気圧などの 3 次元分布、建物・道路・地面・樹木の各表面での温度・顕熱・潜熱フラックス、上向き・下向き放射、および、これらの値から計算される気温、湿球温度、黒球温度である。また、不快指数、WBGT、MRT、PMV、UTCI などの温熱指標を内部で計算し出力することもできる。雲を計算する場合は、雲水混合比も出力できる。

3. モデルの精度検証

3.1 表面温度の検証

City-LES を用いて、東京駅周辺の暑熱環境シミュレーションを実施し、ヘリコプター観測から得られた 2013 年 8 月 19 日 12 時の熱画像データを用いて、モデルの精度検証を行った。モデルの空間分解能は 4m である。大気の初期値は MSM-GPV と大手町アメダスデータの値を参考に設定した。図 1 は、モデルと観測によって得られた地表面温度を比較した図である。二つを見比べると、モデルがおおよそ観測をよく再現しているように見える。例えば、東京駅西側（丸の内側）中央口前の広場に注目すると、熱画像とモデルの両方とも、広場の大部分で表面温度が 50°C を超えている一方で、広場の南端付近だけは 40°C 程度と低くなっている。

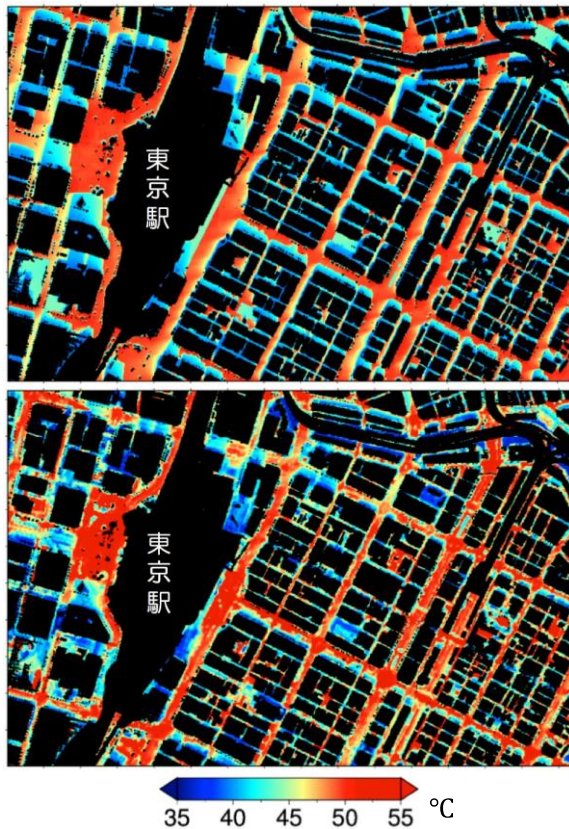


図1 2013年8月19日12時の地表面温度. 上図はモデルの結果, 下図は観測値(東京都環境科学研究所より提供).

同様に, 東京駅東側(八重洲側)中央口から東北東方向に続く大きな道路(行幸通り)を見ると, モデルは道路内の温度の違いを良好に表現していることが分かる. これは, モデル内ではビル影の計算も含めた放射計算や熱収支計算が精度よく行われており, その結果として現実に近い地表面温度の空間分布が得られたことを示唆している.

3.2 気温と風の検証

2020年8月25日午後に, 東京駅丸の内周辺で暑熱環境観測を実施し, 14時20~30分に観測した地上気温と地上風データを用いて, City-LESモデルの精度検証を行った. モデルの空間分解能は2.5mで, 大気の初期値はMSM-GPVと大手町アメダスデータの値を参考に設定した. 土地利用と建物データには, ゼンリンのデータを用いた.

図2は, モデルで再現した地上気温分布を観測結果と比較した図である. 観測した気温とモデルから得られた気温を見比べると, 観測とモデルのいずれも, 気温が高い場所は高く, 低い場所は低くなっている. 例えば, 南南西から北北東に伸びる一番西側の大きな道路(日比谷通り)で観測し

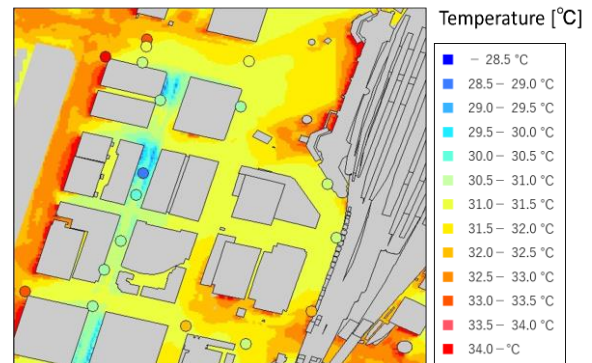


図2 2020年8月25日14時30分の前10分平均気温. 背景の色はモデルの結果で, 丸は観測値. 灰色は構造物.

た気温はおおよそ34°C程度であり, 観測地点の中で最も高く, モデルも同様の傾向を生み出している. 一方で, 日比谷通りの一つ東側の道路(丸の内仲通り)で観測した気温は, 全ての道路で最も低く, 28.5~31°Cとなっており, モデルも同様の結果となっている. 最も気温が低い地点の場所とその値もほぼ一致している. なお, この最も気温が低い地点の周辺にはドライミストが連続して設置してあった. その他の地点も, 誤差0.5°C~1.0°C程度となっている. 最後に, 東南東から西北西に伸びる一番北側の大きな道路(行幸通り)に注目されたい. 行幸通りから日比谷通りに出る直前の3つの観測地点は非常に隣接しているにもかかわらず, 0.5°C~1.0°C程度の気温差が認められる. 気温が低い場所はビル影内にありほぼ無風で, 気温が高い場所は日向にあり風も吹いていた. モデルはこれらの特徴を良く再現していたため, 最終的な気温分布の再現性も高くなったと考えられる. 紙面の都合上割愛するが, 観測された風の分布も, おおよそモデルで再現された.

3.3 WBGTの検証

図3は, モデルで計算されたWBGT分布と観測結果を比較した図である. 気温分布と同様に, 全体的に, モデルは観測したWBGT分布を誤差0.5°C程度で良く再現していると言える. 特に, 行幸通りと日比谷通りの交差点近くに隣接する2つの観測地点の違いを, モデルは非常に明瞭に表現している. ビル影の影響が大きいことが, 行幸通り全体のWBGT分布の形からよく分かる. 一方で, 東南東から西北西に伸びる一番南側の道路(馬場先通り)上の中央2地点のモデル値は, 1.0~1.5°C程度高くなっている. この理由は不明である.

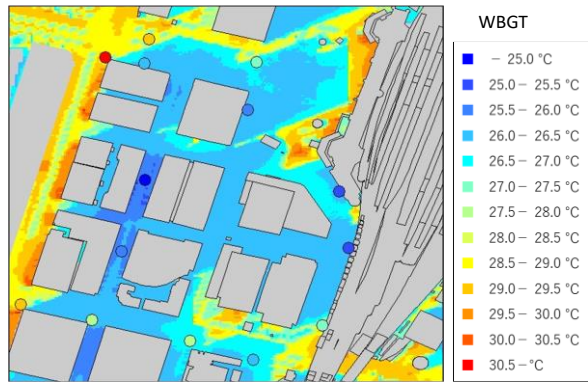


図3 2020年8月25日14時30分の前10分平均WBGT. 背景の色はモデルの結果で、丸は観測値. 灰色は構造物.

4. 結論

本研究では、筑波大学計算科学研究センターで開発した City-LES モデルの精度をヘリコプターによる熱画像観測データと現地観測による温熱指標データの結果を用いて実施した。その結果、City-LES は、東京の夏の猛暑日の日中に出現する都市街区内の厳しい暑熱環境をおおむね表現でき、その誤差は WBGT でおおよそ 0.5°C 以内であることも分かった。City-LES は、気温や WBGT が高い場所、低い場所をそれぞれきちんと表現できており、現在世界中で利用されている ENVI-met よりも高精度である可能性がある。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (JP21K03656, 代表 日下博幸) の助成を受けたものです。また、本研究成果の一部は筑波大学計算科学研究センターの学際共同利用プログラム (Oakforest-PACS, Cygnus) を利用して得られたものです。City-LES のコードの多くは、池田亮作氏 (ウエザーニューズ) を中心とする日下研究室モデル班の学生・研究員たちが、大学在籍時に名古屋大学飯塚悟教授や筑波大学朴泰祐教授の協力の下で作成したものです。入力データは、筑波大学アイソトープ環境動態研究センターの中村祐輔助教によって作成されました。東京駅周辺での暑さ指数観測は、NHK 水戸の内田めぐみ氏や浅野裕樹氏をはじめとする日下研究室メンバーの多大なる協力を得て行われました。東京駅周辺の熱画像データは、東京都環境科学研究所から提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) Bruse, M., and H. Fler, “Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model”, *Environ. Modell. Software*, **13**, 373-384, (1998)
- (2) Deardorff, J. W., “Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers”, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 91-115, (1972)
- (3) Sato, Y., S. Shima, and H. Tomita, “Numerical convergence of shallow convection cloud field simulations: Comparison between double-moment Eulerian and particle-based Lagrangian microphysics coupled to the same dynamical core”, *J. Adv. Model. Earth Systems*, 10.1028/2018MS001285, (2018)
- (4) Maronga, B., et al., “Overview of the PALM model system 6.0”, *Geosci. Model Dev.*, **13**, 1335-1372, (2020a)
- (5) Ikeda, R., Kusaka, H., Iizuka, S., Boku, T., “Development of urban meteorological LES model for thermal environment at city scale”, 9th International Conference on Urban climate, (2015)
- (6) Matsuda, K., R. Onishi, K. Takahashi, “Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with tree-dimensional radiative transfer model”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **173**, 53-66, (2018)
- (7) Watanabe, K., K. Kikuchi, T. Boku, T. Sato, H. Kusaka, “High Resolution of City-Level Climate Simulation by GPU with Multi-Physical Phenomena”, 18th Annual IFIP International Conference on Network and Parallel Computing (IFIP NPC), (2021)