

都市空間における熱中症リスク評価のための建物解像・街区微気象シミュレーション

課題責任者

大西 領 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報基盤センター

著者

大西 領^{*1}、松田景吾^{*1}、後藤浩二^{*2}、佐々木亘^{*3}、平田晃正^{*4}

^{*1}海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報基盤センター, ^{*2}日本電気株式会社, ^{*3}株式会社風力エネルギー研究所, ^{*4}名古屋工業大学大学院工学研究科

海洋研究開発機構で開発されてきたマルチスケール大気・海洋結合モデルMSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment; メッセージと呼ぶ) は、全球から領域さらには都市街区のいずれをも対象とすることが可能であるだけでなく、異なるスケールの現象をシームレスにつなげたシミュレーションを可能とする非常に応用範囲の広いシミュレーションコードである。特に、都市街区スケールに対する超高解像度シミュレーションでは、建物だけでなく街路樹の樹冠が熱・風環境に与える影響までを考慮することが可能である。このような詳細な街区シミュレーション情報の社会応用が期待されている。本研究では、詳細な人体温熱応答モデル計算と組み合わせることを前提として、街区内の詳細な熱中症リスク評価のための街区微気象シミュレーションを実施した。

キーワード：MSSGモデル, 都市街区, 微気象, Large-Eddy Simulation, 人体温熱応答モデル

1. はじめに

現実とデータが高度に連動したデータ駆動型の未来都市の実現のために、都市街区「微気象」に関する気象情報インフラの構築が早急に望まれる(図1)。微気象とは、建物や人間活動などの影響を強く受ける地表から高度100m程度までの気象現象のことである。

海洋研究開発機構・地球情報基盤センターの研究グループでは、数m解像度で建物や樹冠を解像した上で、それらが熱・風環境に与える影響を詳細に考慮できる建物解像・街区微気象シミュレーション法を開発してきた[1-3]。この街区微気象シミュレーションは暑熱対策に活用され始めている[4]。一方で、これまででは、暑さ指数を基準とした、場所ごとに熱中症リスクの高低を評価するという、簡易な熱中症リスクマップ作成に留まっていた。本研究では、詳細な人体温熱応答モデル計算と組み合わせることを前提として、“個人レベル”の詳細な熱中症リスク評価を実現するための街区微気象シミュレーション法を開発することを目的とする。

2. Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG)

海洋研究開発機構・地球情報基盤センターでは、MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment; メッセージと呼ぶ、図2) というマルチスケール大気・海洋結

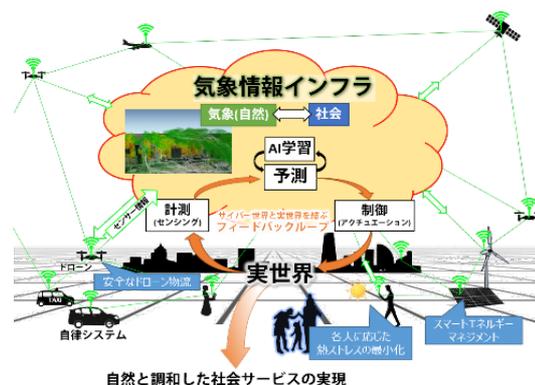


図1：データ駆動型の未来都市で活用される、微気象情報を包含した気象情報インフラ

合モデルを開発してきた[1-3, 5, 6]。MSSGは全球、領域さらには都市街区のいずれをも対象とすることが可能であるだけでなく、異なるスケールの現象をシームレスにつなげることが可能な、応用範囲の広いモデルである。近年では、豪雨予測シミュレーションだけでなく、都市街区の熱・風環境シミュレーションにも応用されている。

都市街区スケールを対象としたシミュレーションの際には、境界層モデルを用いずにLESモデルとして使用する。MSSGの大気コンポーネントの力学過程は非静力学方程式系に基づいており、支配方程式は密度の輸送方程式、運動量の輸送方程式 (Navier-Stokes 方程式)、圧力の輸

送方程式および水物質の輸送方程式である。時間積分には3次精度ルンゲ・クッタ法を用いる。数値解法にはfractional step法を用い、移流項の空間微分には2次精度中心差分を使用し、サブグリッドスケールの乱流拡散には1方程式乱流モデルを用いる。

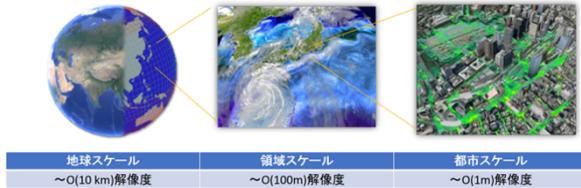


図2： マルチスケール大気海洋結合モデル MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)

3. 街区内での詳細な熱中症リスク評価のための気象と建物解像・微気象の統合シミュレーション

本研究では、気温が35度を超えた猛暑の時間帯を対象として、東京駅を中心として関東域を対象とした3段の2wayネスト気象計算を実施し、得られた気象場を境界条件として、東京駅を中心とした2km四方の領域に対して5m解像度で街区微気象シミュレーションを実施した。図3に計算領域の概略、図4に街区微気象シミュレーションから得られて気温の3次元分布をそれぞれ示す。

コンピュータ上に再現された街区熱環境の中を、人が4km/hの歩行を23分間行うことを想定(図5)し、異なる歩行ルートごとに歩行者が晒される熱環境変数(気温、湿度、風速、日射量)の時間変化を得た。得られた熱環境変数から暑さ指数を算出した結果を図6に示す。日陰側(通りの西側)を歩いた場合、概して暑さ指数は低いが、開けた交差点では直射日光のために急激に高くなる様子がわかる。

得られた熱環境変数を入力値(外部環境値)として、実際に3次元人体温熱応答モデルを実施した結果を図7に示す。日向側を歩いた場合に体表面温度がより高くなる様子がわかる。体内の詳細な熱移動も計算されているため、体表面温度だけでなく、発汗量や深部体温も算出された[8]。これらの結果は名古屋工業大学、JST、JAMSTECの共同成果としてプレスリリースされた[9]。

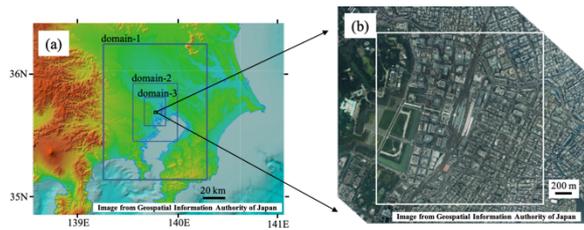


図3： 計算領域の概要。(a)東京駅を中心とした3段2wayネスト気象計算領域。(b)東京駅を中心とした2km四方の街区微気象計算領域。



図4：算出された2015年8月7日14:30の気温の3次元分布。可視化にはVDVGE[7]を用いた。



図5：東京オリンピック2020のマラソンコース沿い(当初案。このシミュレーションの後、札幌での開催に変更された。)の通りを毎時4kmで南下すると想定して、歩行者が晒される熱環境変数(気温、湿度、風速、日射量)の時間変化を算出した。

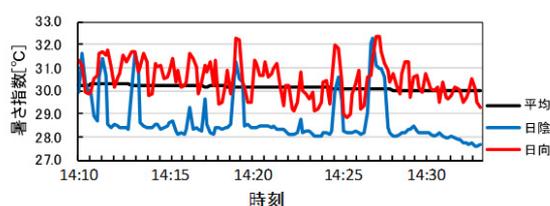


図6：歩行者が晒される暑さ指数の時間変化。時間によって、暑さ指数は28° Cから32° Cまで4° Cも変化する。また、通りの日陰側（西側）と日向側（東側）で、平均値に2° Cの違いがある。なお、暑さ指数が28° C以上の場合には日常生活におけるすべての生活活動において熱中症の危険性が高まる。

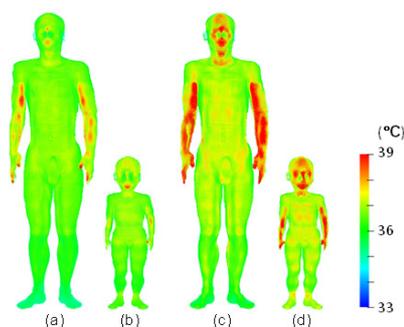


図7：3次元人体温熱応答モデルによって算出された、23分間歩行後の体表面温度分布。(a)成人（日陰）(b)子供（日陰）(c)成人（日向）(d)子供（日向）。

4. まとめ

本研究では、詳細な人体温熱応答モデル計算と組み合わせることを前提として、“個人レベル”の詳細な熱中症リスク評価を実現するための街区微気象シミュレーション法を開発した。東京駅付近の实在街区の熱環境を再現し、そこから歩行者が晒される気温、湿度、風速、日射量などの熱環境変数を時系列で取得することに成功した。実際に、そのデータを熱環境変数を入力値（外部環境値）として、実際に3次元人体温熱応答モデルを実施することにより、個人レベルの詳細な熱中症リスク評価を実現可能であることを示すことに成功した。

本開発技術の対象地域や期間を拡大することで、都市計画規模で各個人の熱中症リスク評価が可能となる。例えば、夏季イベントにおける熱中症リスク評価結果をもとにリスクを低減した計画・対策の立案、より丁寧な注意喚起が可能になるとともに、年代別や活動の負荷別に具体的かつピンポイントに行うことが可能となり、熱中症リスクを軽減した行動を提案するシステム構築などへの応用が期待される。

謝辞

本研究の一部は JST 未来社会創造事業の支援を受けた（課題番号：JPMJMI18B6）。

参考文献

- [1] K. Takahashi et al., “Challenge toward the prediction of typhoon behaviour and down pour”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 454, 012072 (2013)
- [2] R. Onishi and K. Takahashi, “A Warm-Bin-Cold-Bulk Hybrid Cloud Microphysical Model”, *J. Atmos. Sci.*, 69, 1474-1497 (2012)
- [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 & Industrial Aerodynamics*, Vol. 173, pp. 53-66 (2018)
- [4] プレスリリース：最新スパコン技術を駆使して暑さから人々を守る！ 熊谷スポーツ文化公園のヒートアイランド対策にスーパーコンピュータによる予測結果を活用，2018/6/21, <https://www.pref.saitama.lg.jp/a0001/news/page/2018/0621-01.html>
- [5] W. Sasaki, R. Onishi, H. Fuchigami, K. Goto, S. Nishikawa, Y. Ishikawa, and K. Takahashi, MJO simulation in a cloud-system-resolving global ocean-atmosphere coupled model, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 9352–9360.
- [6] R. Onishi, D. Sugiyama and K. Matsuda, Super-Resolution Simulation for Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology”, *SOLA*, 15 (2019) 178-182.
- [7] S. Kawahara, R. Onishi, K. Goto, K. Takahashi, Realistic representation of clouds in Google Earth, *Proceedings of SIGGRAPH ASIA* (2015).
- [8] T. Kamiya, R. Onishi, S. Kodera and A. Hirata, Estimation of Time-Course Core Temperature and Water Loss in Realistic Adult and Child Models with Urban Micrometeorology Prediction, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16 (2019) 5097.
- [9] プレスリリース：都市空間での詳細な熱中症リスク評価技術の開発に成功 ～より安心・安全な行動選択に向けて～, 2019/7/23, http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20190723_2/

Building-resolving Micrometeorology Simulation for Detailed Assessment of Individuals' Risk of Heat-related Illness in Urban Streets

Project Representative

Ryo Onishi Center for Earth Information Science and Technology, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Ryo Onishi^{*1}, Keigo Matsuda^{*1}, Koji Goto^{*2}, Wataru Sasaki^{*3}, Akimasa Hirata^{*4}

^{*1}Center for Earth Information Science and Technology, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*2}NEC corporation, ^{*3}Wind Energy Institute of Tokyo Inc., ^{*4}Nagoya Institute of Technology

The large-eddy simulation (LES) component of the Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG), a multi-scale atmosphere-ocean coupled model developed by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, can be used for the simulation of urban micrometeorology with meter-level spatial resolution. The MSSG LES simulations have been used to provide thermal environmental maps for streets and parks, which have been used for heat mitigation planning. As a next step, this study develops a computational method to obtain time series of ambient heat conditions surrounding pedestrians in urban streets. The time series is used for human thermophysiology simulations to assess the thermal stress on individual pedestrians.

Keywords : urban micrometeorology, building-resolving large-eddy simulation, thermal stress, thermophysiology

1. Introduction

Thermal stress is a serious social problem that will become increasingly serious due to the combination of the heat island effect, global warming and society aging. We have developed a building-resolving computational fluid dynamics model that can simulate the urban micro-meteorology with meter-level spatial resolutions. The simulation model can be used for the assessment and mitigation of the heat environment in urban streets with considering the influence of urban buildings and tree crowns on flows and radiations. For example, our model has provided heat environment maps for streets and parks, which have been actually used for heat mitigation planning by city governments. Heat maps are useful to assess the heat-related illness risk at a point for the person standing there. In more realistic situation, people are to be walking.

This study develops a computational method for obtaining time series of ambient heat conditions for pedestrians in urban streets from the building-resolving micrometeorology simulation with meter-level spatial resolution.

2. Building-resolving micrometeorology simulation

The dynamical processes of the atmospheric component of MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment [1-3]) (Figure 1) are based on the system of the nonhydrostatic equations. The governing equations are the transport equations of density, momentum, pressure and water substances. The third-order Runge-Kutta method is used for time integration, and a fifth-order upwind difference scheme is used for the advection term. The fractional step method is applied to couple velocity and pressure. The one-equation turbulence model is used for the sub-grid scale turbulent

diffusion.

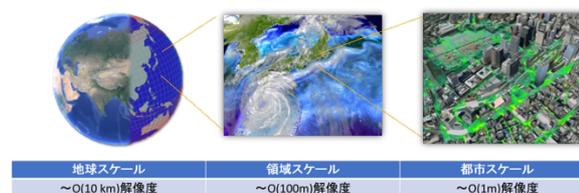


Fig. 1: Multiscale atmosphere-ocean coupled model, MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)

3. Results and Discussion

We performed a MSSG weather simulation with three nesting domains, with 1km, 300m and 100m spatial resolutions, respectively, centering on Tokyo to obtain boundary weather condition for the MSSG micrometeorology simulation [4,5]. The building-resolving micrometeorology simulation targeted Tokyo metropolitan built-up area. The Tokyo domain was centered at 35.680882°N and 139.767019°E and covered a 2 km × 2 km horizontal area with a 5-m horizontal resolution. The domain height was set to 1,500 m and 151 vertical grid points was used. The vertical grid spacing below the height of 500 m was set to 5 m uniformly, while the spacing above was extended continuously.

Figure 2 shows the three-dimensional (3D) distribution of instantaneous air temperature for 14:30 JST on 7 August 2015. Figure 3 shows the wet-bulb globe temperature (WBGT) experienced by pedestrians walking along sunny and shade routes of the Ginza street. The domain averaged WBGT is shown in a black solid line. The thermal environment along

the shade side route is much less severe than the sunny side or domain average.

Figure 4 shows the temperature distributions on the body surfaces of the adult and child models after 23 min of walking along the Ginza street (14:10-14:33 JST on 7 August 2015) [7]. It shows clear differences on which route the pedestrian takes. The pedestrians having taken the sunny side show as high as 39 °C, showing they have been exposed in severe heat environment.

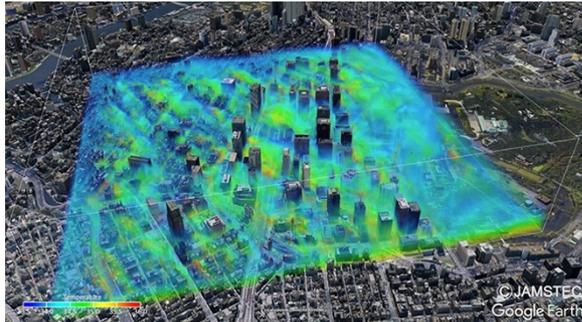


Fig. 2: Three-dimensional (3D) distribution of instantaneous air temperature for 14:30 JST on 7 August 2015. Visualized with the VDVGE [6].

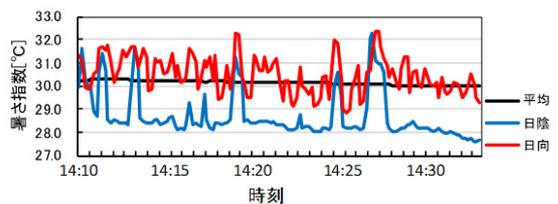


Fig. 3: Time series of wet-bulb globe temperature (WBGT) along the Ginza street in the computational domain. A pedestrian walking speed of 1m/s was assumed. The WBGT experienced when walking in the shade side was much lower than that in the sunny side and also than the domain-averaged one.

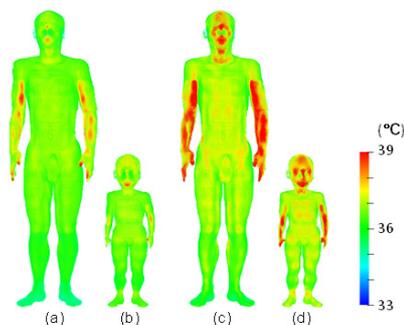


Fig. 4: Distribution of surface temperature of adult and child for shade and sunny side. They were to walk along the Ginza

street for 23 min (14:10-14:33 JST on 7 August 2015).

4. Conclusions

We have developed a computational method for obtaining time series of ambient heat conditions for pedestrians in urban streets based on the building-resolving micrometeorology simulation with meter-level spatial resolution. The time series data has been used for the thermal stress assessment of individual pedestrian.

Acknowledgement

This work was supported by the JST-Mirai Program (grant number JPMJMI18B6), Japan.

References

- [1] K. Takahashi et al., “Challenge toward the prediction of typhoon behaviour and down pour”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 454, 012072 (2013)
- [2] R. Onishi and K. Takahashi, “A Warm-Bin-Cold-Bulk Hybrid Cloud Microphysical Model”, *J. Atmos. Sci.*, 69, 1474-1497 (2012)
- [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 & Industrial Aerodynamics*, Vol. 173, pp. 53-66 (2018)
- [4] W. Sasaki, R. Onishi, H. Fuchigami, K. Goto, S. Nishikawa, Y. Ishikawa, and K. Takahashi, MJO simulation in a cloud-system-resolving global ocean-atmosphere coupled model, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 9352–9360.
- [5] R. Onishi, D. Sugiyama and K. Matsuda, Super-Resolution Simulation for Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology”, *SOLA*, 15 (2019) 178-182.
- [6] S. Kawahara, R. Onishi, K. Goto, K. Takahashi, Realistic representation of clouds in Google Earth, *Proceedings of SIGGRAPH ASIA* (2015).
- [7] T. Kamiya, R. Onishi, S. Kodera and A. Hirata, Estimation of Time-Course Core Temperature and Water Loss in Realistic Adult and Child Models with Urban Micrometeorology Prediction, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16 (2019) 5097.