

# 効果的な暑熱適応を実現するための街区ダウンスケーリング シミュレーション

課題責任者

渡辺 真吾

海洋研究開発機構 気候変動適応技術開発プロジェクトチーム

著者

大西 領<sup>\*1</sup>、松田 景吾<sup>\*1</sup>、杉山 徹<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター

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域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。近年は、この機能により、植樹の熱環境改善効果を定量評価できることに注目が集まっており、その社会応用が期待されている。本年度は、実際に、建物だけでなく樹冠の効果までを考慮した超大規模シミュレーションを埼玉県熊谷スポーツ文化公園に適用し、社会実装に成功した。この成果は今後の社会への展開や実装をさらに加速させていくと考えられる。

キーワード：MSSG モデル、都市街区、微気象、Large-Eddy Simulation、樹冠モデル

## 1. はじめに

日本では、熱中症による死亡者は年平均約 900 名 (2007 年～2011 年の平均値[1]) に及んでいる。これは台風・大雨による死者不明者年平均約 60 名 (2004 年～2009 年の平均値) に比べ桁違いに大きく、地震・津波による死者不明者年平均約 1000 名 (1995 年～2016 年の平均値) に匹敵する。今後、温暖化やヒートアイランドがさらに進行すれば、この熱中症リスクはさらに大きな脅威になると考えられる。このリスクを低減するための対策が必要であり、その効果を定量評価する手段が必要である。有望な手段として、数値シミュレーションによる暑熱環境評価が考えられる。

海洋研究開発機構では、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) [2-4] を開発してきた。この MSSG は全球スケールの現象から都市街区スケールまでのマルチスケールを対象とした計算を実行できる。都市街区スケールの計算では、境界層モデルを用いずにサブグリッドスケール乱流モデルを用いた、計算格子サイズ 0(1m) による建物解像 LES (Large-Eddy Simulation) として実行できる。都市街区における暑熱環境シミュレーションは、従来、RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) モデルによる解析などが主であったが、近年では LES モデルも用いられるようになってきた。LES は障害物周りの熱流体解析において RANS よりも信頼性が高いため、都市街区の詳細計算に適すると考えられる。実際、街区の熱流体解析だけでなく、汚染物質の拡散計算でも良好な精度が確認されている。都市街区スケールを扱う際、MSSG はその

ような LES モデルの一つであり、特に樹冠を考慮した大規模計算の実績の多さに強みを持つ。

本年度、この MSSG を実際の都市街区スケールの暑熱環境予測に用い、社会実装に成功した例を概説する。具体的には、埼玉県熊谷スポーツ文化公園を対象とした。詳細 3 次元熱放射計算を行うことで、気温、湿度や風速だけでなく、暑さ指数 (WBGT; Wet-Bulb Globe Temperature) を直接算出し、植樹の効果を定量化することで、効率的な暑熱対策を実現することに貢献した。

## 2. マルチスケール大気海洋結合モデル MSSG

海洋研究開発機構・地球情報基盤センターでは、MSSG (図 1) というマルチスケール大気海洋結合モデルを開発してきた。MSSG は全球、領域さらには都市街区域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。移流項の空間微分には 5 次精度風上差分を使用する。数値解法には fractional step 法を用い、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。

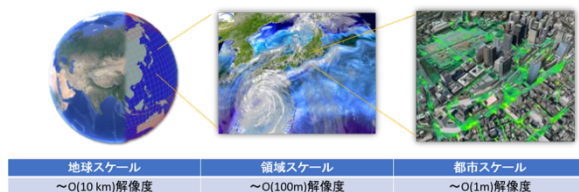


図 1：マルチスケール大気海洋結合モデル MSSG  
(Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)

### 3. 3次元乱流・熱放射プロセスと樹木モデル

都市部の気温上昇による暑熱環境を緩和するための対策のひとつとして、緑地の整備が注目されている。そこで、緑地が気温を低下させる効果を定量的に明らかにするために、樹木の物理的作用を精緻に取り扱った高解像度数値シミュレーションモデルの開発を行った（図 2）。樹冠内部に多数の計算点を配置して、風の抵抗と葉表面温度や蒸散量などの樹冠内部での分布までも計算する樹木モデル、および 3 次元的に入射・散乱する日射や熱放射による熱伝達を計算する都市 3 次元放射モデルを MSSG に組み込むことにより、時々刻々の風速・気温・水蒸気量に応じて樹冠内部や地表面の温度・日当たりを考慮したシミュレーションを可能にした[4]。建物による日射の遮蔽や、樹冠に吸収される放射フラックスを精度よく評価するために、ラジオシティ法に基づいた 3 次元放射モデルが実装されている。ラジオシティ法では形態係数データを用いて放射フラックスを時々刻々算出する。その際、地表面や建物表面については計算格子に沿って面積要素に分割する一方、樹冠については体積要素に分割し、樹冠内部での多重散乱も考慮した放射熱フラックスを算出する。対象とする放射の波長は光合成有効放射、近赤外放射および長波の 3 波長帯である。

散乱計算では、面積要素・体積要素ごとに散乱強度を計算する。計算格子に合わせて直方体形状の体積要素を用いた場合には、特に直方体の角をかすめて通る光子による散乱計算などで誤差が生じる。この誤差は体積要素の平均光学的厚さに伴い大きくなる。その誤差を評価したところ、標準的な葉面積密度  $1\text{m}^{-1}$ 、計算格子幅 5m の場合に、地表面付近の WBGT に関して RMSE が約 0.2K 程度であった。例えば、黒球温度を計測することなく標準的な気象要素のみから WBGT を見積もる手法が盛んに提案されている。このような簡易手法は約 2K の RMSE を持つと報告されている。MSSG 数値計算による WBGT の誤差はこれに比べて一桁小さく、数値計算による WBGT の直接計算の優位性がわかる。

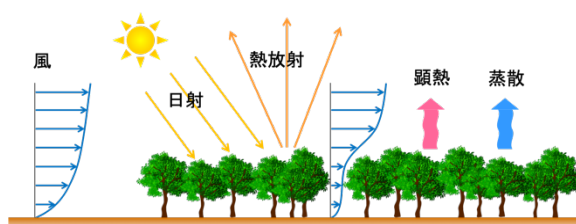


図 2：樹冠は、風、熱放射、熱フラックスに影響を与える。MSSG モデルはこれら全ての影響を考慮することが可能である。

### 4. 熊谷スポーツ文化公園を対象とした街区暑熱環境シミュレーション

埼玉県では、熊谷スポーツ文化公園の暑熱環境を改善するため、平成 28 年度から「県有施設暑熱対策推進事業」や「熊谷スポーツ文化公園木かげ創出事業」を展開し、樹木植栽による木かげの道の整備や、環境性能舗装等の暑熱環境対策を開始した（図 3）。

それを受け、海洋研究開発機構（JAMSTEC）は埼玉県環境科学国際センターと協働し、暑熱環境に対する適応策の最適化を目指し、熊谷スポーツ文化公園を対象に、詳細な熱環境シミュレーションを実施するとともに、シミュレーション結果の検証のための気象観測などを行った（図 4）。この結果を利用して、ヒートアイランド対策の具体的な効果を事前に予測し、対策の効果を最大化することに成功したとして、2018 年 6 月 21 日に埼玉県からプレスリリースが行われた[5]。この成果は多くのメディアに取上げられたほか、埼玉県上田知事（当時）のブログにも取上げられるなど、最新シミュレーションの社会実装成功例として広く紹介された。



図 3：埼玉県公園スタジアム課による暑熱対策設計案

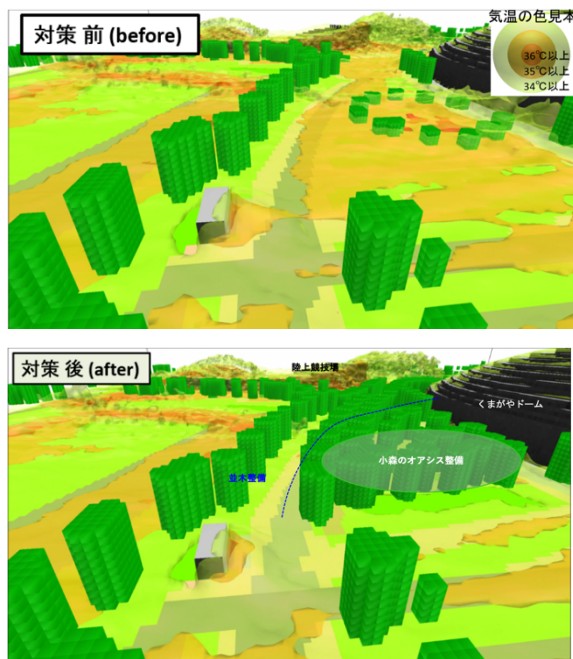


図4: シミュレーションから得られた気温の3次元分布。  
(上) 対策前、(右) 対策後。対策により、暖色で示される高温域が減少する様子がわかる。

## 5. まとめ

本研究では、マルチスケール大気・海洋結合モデルMSSGを用いて、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を実施した。その際、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した。これにより、植樹の熱環境改善効果を定量評価できた。埼玉県熊谷スポーツ文化公園に対する暑熱対策案を定量的に評価した結果は、実際に対策案の決定に活かされ、社会実装に成功することができた。この成果は今後の社会への展開や実装をさらに加速させていくと考えられる。

## 謝辞

本研究は気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)の支援を受けた。

## 参考文献

- [1] 藤部文昭, 暑熱(熱中症)による国内死者数と夏季気温の長期変動, 天気, 408 (2013), pp. 371-381.
- [2] K. Takahashi et al., "Challenge toward the prediction of typhoon behaviour and down pour", J. Phys.: Conf. Ser., 454, 012072 (2013)
- [3] R. Onishi and K. Takahashi, "A Warm-Bin-Cold-Bulk Hybrid Cloud Microphysical Model", J. Atmos. Sci., 69, 1474-1497 (2012)
- [4] K. Matsuda, R. Onishi and K. Takahashi,

"Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 173, 53-66 (2018)

[5] 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>

# City-block Scale Downscaling Simulations for Realizing Effective Heat Adaptation

## Project Representative

Shingo Watanabe      Project Team for Climate Change Adaptation Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

## Authors

Ryo Onishi<sup>\*1</sup>, Keigo Matsuda<sup>\*1</sup>, and Toru Sugiyama<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup>Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

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 global, regional, and urban areas. It enables simulations that seamlessly connect phenomena of different scales. In the ultra-high-resolution simulation for the city-block scale, it is possible to consider the influences of buildings and street tree crowns on the thermal and wind environment. This model enables the quantitative evaluation of the thermal environment improvement effect of tree planting and is gaining attentions for social implementations. This fiscal year, a large-scale simulation was performed for *Kumagaya Sports & Culture Park*, Saitama Prefecture. This result would accelerate further social implementation.

**Keywords** : MSSG, urban city blocks, micrometeorology, large-eddy simulation, tree-crown model

## 1. Introduction

Improvement of summer heat environments is a significant issue in Japan. The risk of heat stroke is becoming greater as global warming and heat islands progress further. To implement effective measures to reduce the risk, quantitative evaluation of the thermal environment by numerical simulation will be a promising method.

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) has developed a multiscale atmosphere-ocean coupled model, MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment) [1-3]. MSSG is a multiscale model that can be used global, meso- and city-block scales, and for seamlessly connecting phenomena in different scales (Fig. 1). In the city-block scale, MSSG can work as a building-resolving large-eddy simulation (LES). This fiscal year, MSSG has been used to predict the heat environment in an actual urban area, and we have succeeded in social implementation. The heat environment in *Kumagaya Sports & Culture Park*, Saitama Prefecture has been simulated using three-dimensional radiative transfer and tree-crown models. Then the WBGT (wet-bulb globe temperature) has been analyzed as well as the air temperature, humidity and wind speed. It contributed to the planning of effective measures against the heat environment.

## 2. MSSG

The dynamical processes of the atmospheric component of MSSG 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.

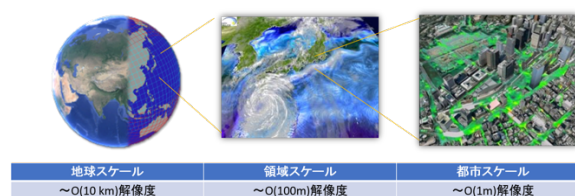


Fig. 1: Multiscale atmosphere-ocean coupled model, MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment)

## 3. Tree-crown and radiation processes

Construction of green spaces is gaining attentions as a measure to mitigate urban heat environments. To quantitatively clarify the effects of green spaces, we have implemented tree-crown and radiative transfer models into MSSG so that a high-resolution numerical simulation precisely handles the physical effects of trees (Fig. 2).

The tree-crown model considers a number of computation points inside the crowns and calculate the distribution of wind resistance, leaf surface temperature, transpiration, etc. By implementing the tree-crown and radiative transfer models, which considers three-dimensional transmission, absorption and scattering of solar and thermal radiations, MSSG can calculate the temperature and radiation flux at the tree crowns and the ground surfaces, considering the instantaneous wind speed, temperature and humidity [3].

The three-dimensional radiative transfer model is based on the radiosity method. The ground and building surface are divided into surface elements along the computation grid, while the tree crowns are divided into volume elements. The



radiation flux is calculated considering multiple scattering inside tree crowns using the view factor data. Three wavelength bands are considered; photosynthetically active radiation, near-infrared radiation and long-wave radiation.

The accuracy of the radiation flux decreases as the mean optical thickness of a volume element increases because the radiation flux is assumed constant inside an element. However, we have confirmed that the RMSE of the WBGT near the ground surface is about 0.2 K when the mean optical thickness is 2.5 that corresponds to standard leaf area density of  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$  in the grid spacing of 5 m [3]. This error level indicates superiority of direct computation of WBGT.

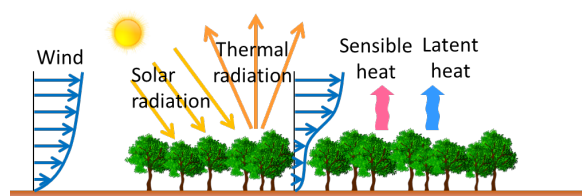


Fig. 2: Physical processes relevant to trees: MSSG considers wind resistance, three-dimensional radiative transfer, and sensible and latent heat fluxes at tree crowns.

#### 4. City-block scale heat environment simulation for Kumagaya Sports Culture Park

In order to improve the heat environment of *Kumagaya Sports & Cultural Park*, in 2016, the local government of Saitama Prefecture started planning the heat mitigation measures such as pavement replacement and tree planting. To optimize the measures, JAMSTEC conducted an ultra-high-resolution simulation of the thermal environment at the park (Fig. 3) in collaboration with Center for Environmental Science in Saitama (CESS). At the same time, micro-meteorological observations were conducted to validate the simulation model. Saitama Prefecture determined the heat mitigation measures taking into account the simulation results for maximizing the effects of the measures. This achievement was publicly released on June 21, 2018 [4] and featured in many media.

#### 5. Summary

The multiscale atmosphere-ocean coupled model, MSSG, has been used to perform an ultra-high-resolution simulation in a city block scale. The effects of tree crowns and buildings on the heat and wind environments were considered so that thermal environment improvement effect of tree planting was quantitatively evaluated. We have achieved the social implementation of the simulation technology: The model was applied to the heat environment analyses of *Kumagaya Sports & Cultural Park* in Saitama Prefecture, and the results were used in the decision of the actual measures. This result would accelerate further social implementation.

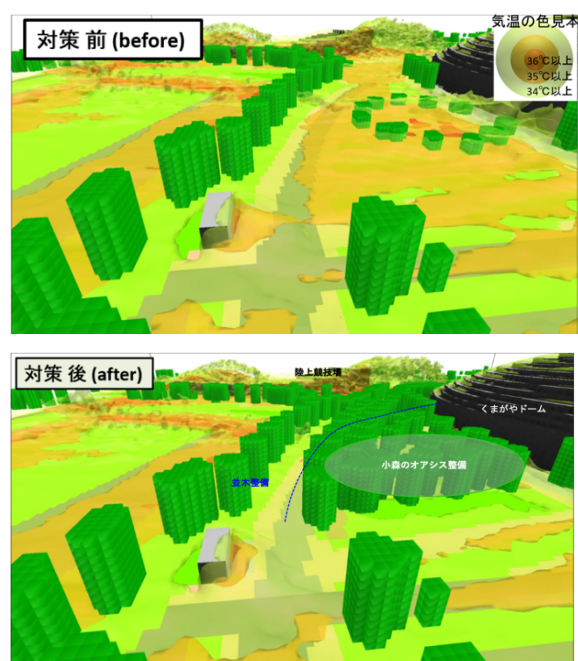


Fig. 3: Three-dimensional air temperature distribution under the conditions before and after implementing the heat mitigation measures. The green boxes indicate the tree crowns. The yellow, orange and red transparent isosurfaces indicate the temperature of 34, 35 and 36 °C. High temperature air (orange) decreases due to the implementation of measures.

#### Acknowledgement

This project was supported by the Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology (SI-CAT) of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology (MEXT), 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", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 173, 53-66 (2018)
- [4] Saitama Prefecture, "Save people from summer heat using advanced supercomputer technology! Prediction by a supercomputer has been used for heat island measures in Kumagaya Sports & Culture Park", June 21, 2018, <https://www.pref.saitama.lg.jp/a0001/news/page/2018/0621-01.html> (in Japanese)