

都市の建物と樹冠を解像した微気象シミュレーション技術の 開発と社会実装

松田景吾 ((国研) 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター)

1. はじめに

夏季の暑熱環境は深刻な気象災害のひとつとなっている。近年 (2016~2021 年) では熱中症による死亡者数は平均約 1000 人/年 (厚生労働省人口動態統計 (2021) に基づく)、熱中症搬送者数は平均約 6.4 万人/年 (総務省消防庁報道発表 (2022) に基づく) に及んでおり、気候変動と都市ヒートアイランドの進行に伴う被害のさらなる深刻化が懸念されている。

多くの人々が生活する都市部では、暑熱環境を緩和するために緑化や保水性舗装の導入など、様々な対策が講じられてきているが、その効果の定量的な把握は困難であった。通常、暑熱対策の導入が検討されるのは個々の建物等の形状を露わに見とることのできる街区スケールである。街区スケールでは複雑な都市構造のために、風・気温・日射等に応じて数 m スケールで暑熱環境が変化する。このような地表面や建物などの影響を強く受ける地上高さ 100 m 程度までの気象ことを微気象 (micrometeorology) という。効果的な暑熱環境対策を講じるためには、都市の建物や樹木、土地被覆、人工排熱などを精緻に考慮した微気象シミュレーションによって暑熱環境を把握することが重要となる。

暑熱環境の評価指標には暑さ指数 (湿球黒球温度, Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT) (Asayama, 2009; 日本生気象学会, 2022) を用いることができる。暑さ指数は熱中症搬送者数と強い相関を示すことが知られている。屋外の日向の暑さ指数は次式によって与えられる。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a$$

ここで、 T_w 、 T_g 、および T_a はそれぞれ湿球温度、黒球温度、および乾球温度 (気温) である。黒球温度は黒く塗装した中空の金属球で計測される温度であり、風速と放射の影響も加味される。そのため、暑さ指数には人の熱中症リスクに関わる気温、湿度、風速、放射といった物理要素が反映されていることになる。つまり、街区スケールの暑熱環境の定量的評価のためには、これらの物理量を街区スケールで解析することのできる微気象シミュレーションモデルが必要である。本講義では、街区スケールで建物

形状や樹冠分布を解像した微気象シミュレーションの技術開発と、実在街区を対象とした暑熱環境の解析事例について紹介する。

2. 微気象シミュレーションモデル

2.1 モデル概要

微気象シミュレーションには (国研) 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) において開発されてきた Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG, 「メッセージ」という) (Takahashi et al., 2013; Sasaki et al., 2016; Matsuda et al., 2018) を用いる。MSSG はマルチスケール大気海洋結合モデルであり、全球スケールからメソスケールおよび都市街区スケールまでを取り扱うことで、マルチスケールの大気現象および海洋現象を明らかにすることを目的に開発されたモデルである。大気海洋結合モデルとしてだけでなく、大気コンポーネント (MSSG-A) および海洋コンポーネント (MSSG-O) の単体モデルとしても使用できる。

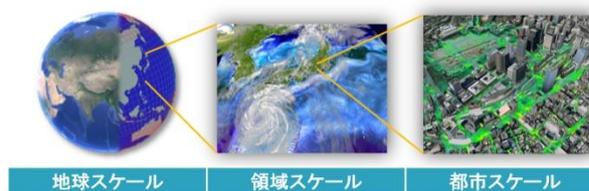


図1 マルチスケール大気海洋結合モデル MSSG.

2.2 街区スケールの微気象計算

微気象シミュレーションには MSSG-A を用いる。MSSG-A 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、運動量、圧力、および水物質の輸送方程式である。都市街区スケールでは、数 m の計算格子サイズで建物や樹冠を解像した微気象 LES (Large-Eddy Simulation) として実行できる。数値解法には、非圧縮流体の数値計算に用いられる部分段階法が採用されている。具体的には、3 次精度ルンゲ・クッタ法を用いて各輸送方程式の時間積分を行い、音波による圧力輸送に関するヘルムホルツ方程式を解くことで圧力と速度を補正している。

暑熱環境を評価するためには、暑熱環境に関わる物理量である風速、気温、湿度および放射に及ぼす都市構造物や人工排熱、樹木等の影響が考慮された微気象シミュレーションモデルが必要である。そこで、開発した微気象モデルの特徴について、特に建物、樹木、および放射プロセスに着目して解説する。

2.3 建物

通常の気象シミュレーションとは異なり、数 m 解像度の微気象シミュレーションでは個々の建物形状を陽的に表現する。MSSG ではボクセル法によって建物を解像している。建物の屋上や壁面では、地表温度と同様に屋上面や壁面の表面温度を計算している。壁面に入射する正味放射熱フラックスと建物内部への熱伝導、大気への顕熱および潜熱フラックスの熱収支式に基づいて表面温度を決定する。

2.4 樹木モデル

開発した微気象モデルでは、建物と同様に樹冠(樹木の枝葉等の茂っている部分)の3次元的な分布の影響を考慮するための樹木モデルを実装した(Matsuda et al., 2018)。樹冠については、葉の茂り具合を表す葉面積密度の空間分布に基づいて、(1)大気の流れに対する流体力学的プロセス、(2)放射の遮蔽・散乱プロセス、および(3)大気との熱・水蒸気の交換プロセスといった物理プロセス(図2)を考慮する。

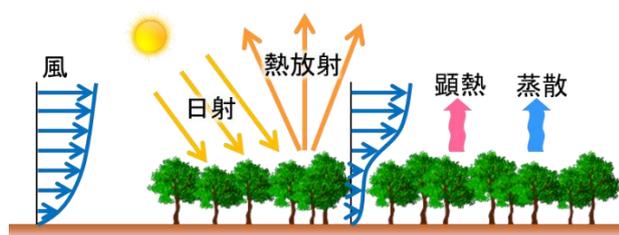


図2 樹冠に関わる主な物理プロセス。

(1) 流体力学プロセス: 樹冠では、建物とは異なり、風が枝葉の間を通り抜ける。そのため、樹冠は風の流れを弱める働きをするものとして、葉面積密度に比例した抗力(Kanda and Hino, 1994)が大気の流れに働くものとした。

(2) 放射プロセス: 放射は樹冠において部分的に透過し、部分的に散乱・吸収される。その際の放射

の遮蔽率は葉面積密度により与えられる。

(3) 熱・水蒸気の交換プロセス: 大気との熱・水蒸気の交換量と葉表面温度は、葉面での顕熱フラックス、潜熱フラックス、および放射熱フラックスに関する熱収支式により与えられる。ただし、樹冠の場合には葉表面の気孔からの蒸散を考慮しなければならない。そこでMSSGでは、気孔の応答が日射量、葉面温度、湿度、二酸化炭素濃度に依存する植物生理学モデル式(Collatz et al., 1991)を採用した。

2.5 3次元放射モデル

全球~メソスケールの気象シミュレーションでは、放射熱輸送は大気の駆動力を生む重要な物理プロセスであり、鉛直方向1次元の放射伝達計算が行われる。一方、微気象シミュレーションでは建物壁面に斜めに差し込む日射や、その背後にできる日陰、壁面からの熱放射による放射冷却などを考慮しなくてはならない。さらに、日射や熱放射は建物壁面や地表面で反射を繰り返すことでトータルの吸収量が増えるため、多重反射の効果も考慮しなくてはならない。そのため、微気象シミュレーションでは3次元の放射伝達計算が必要となる(図3)。

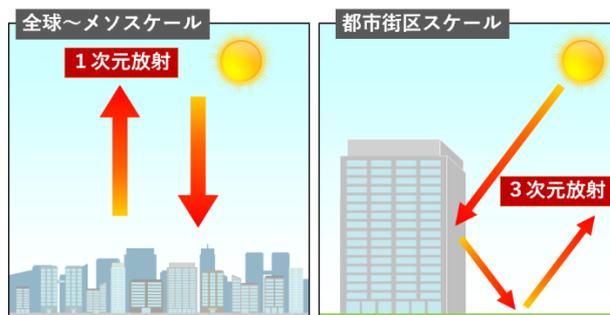


図3 全球・メソスケールと都市街区スケールでの放射計算手法の違い。全球・メソスケールでは鉛直方向の1次元で放射伝達を計算するが、都市街区スケールでは3次元的な放射伝達を計算する。

3次元放射モデルでは1次元放射モデルに比べて一般的に計算量が膨大になる。MSSGでは、効率よく放射計算を行うために、ラジオシティ法に基づく3次元放射モデルを導入した。ラジオシティ法では建物表面や地表面をメッシュに沿って多数の面要素に分割し、任意の二つの面要素間の幾何学的な位置関係を表す形態係数というパラメータを用いる。形態係数を用いて、各面要素が他の面要素から受け取

る放射と面要素から射出される放射の関係を表したラジオシティ方程式を解くことで、放射フラックスの分布を得ることができる。MSSG では、樹冠についてもメッシュに沿って体積要素に分割し、葉面積密度に応じた透過性を与えて形態係数を定義することにより、地表面・建物表面の放射フラックスと樹冠での放射フラックスの一体的な計算を実現した (Matsuda et al., 2018)。さらに、形態係数を事前計算することで 3 次元放射計算を効率よく繰り返すことを可能にし、微気象 LES の時間進展の計算と同時に 3 次元放射計算を繰り返し実行することが可能になった (Matsuda et al., 2018)。この 3 次元放射モデルによる放射フラックスは暑さ指数の計算を行う際の黒球温度の計算にも使用される。

3. 実在街区での暑熱環境解析事例

開発した MSSG 微気象モデルについては、これまでに様々な実在街区の解析に適用した実績がある。例えば、JAMSTEC、株式会社三菱地所設計および株式会社竹中工務店の三者の共同研究では、東京都心の大手町・丸の内・有楽町地区に位置する「丸の内パークビル」の中庭緑地を対象に、建物の壁面素材や中庭内の樹木の配置や樹高等の詳細なデータに基づいて解像度 1 m での微気象シミュレーションを実施した。その結果、この中庭緑地の現地観測で確認された夜間の低温化現象について、その一要因を樹木が担っていることを示した (JAMSTEC, 2015)。

また、環境省委託先検討会である「東京都市圏における環境対策のモデル分析検討会」と連携する形で実施した、東京湾臨海部の暑熱環境解析では、東西 12.5 km、南北 14.0 km の計算領域に対し解像度 5 m での大規模シミュレーションを実施し、猛暑日の気象条件下での日中の暑熱環境を解析した (環境省, 2016)。2020 年東京オリンピック・パラリンピック競技大会の会場計画に基づいて競技会場へのアクセスルート上の暑さ指数を評価した結果、暑さ指数が 28℃未満となる地点 (暑さ指数が 28℃以上の場合には「厳重警戒」または「危険」とされ、すべての生活活動で熱中症がおこる危険性がある (日本気象学会, 2022)) が、既存緑地があることによって 3.4 倍に増加していることが明らかになった。この結果から、緑地があることによって歩行者の避暑スポットが確保されることが示された。

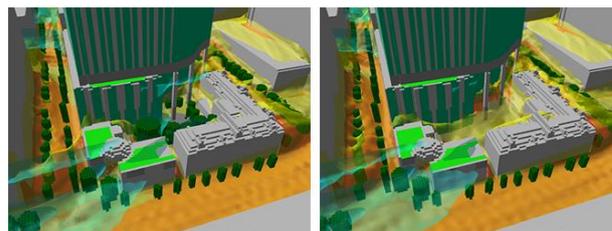


図 4 丸の内パークビル中庭周辺の気温分布 (JAMSTEC, 2015)。(左) 中庭に樹木があるケース、(右) 中庭に樹木がないケース。午前 2:30 の気温の等値面を半透明曲面 (青、黄、赤の順に気温が高くなる) で可視化。

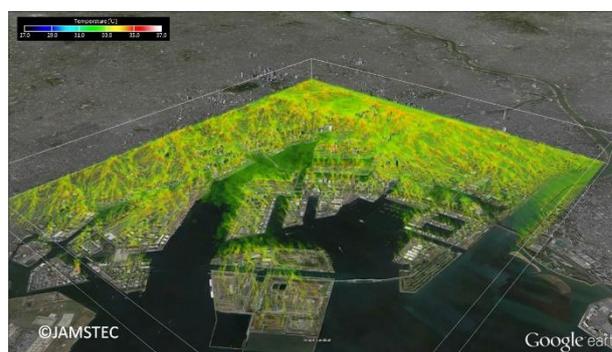


図 5 東京湾臨海部の三次元の気温分布 (環境省, 2016)。南東 (東京湾方面) から北西方向 (都心方面) に海風が流入している。

文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) では、JAMSTEC と埼玉県環境科学国際センターが共同で熊谷スポーツ文化公園の暑熱環境解析を実施した (埼玉県, 2018; 松田ら, 2019)。2019 年のラグビーワールドカップ開催を控え、公園内の暑熱対策が検討されている中で、暑熱対策の効果を事前に把握するための微気象シミュレーションを実施した。暑熱対策としては、バス停や駐車場からラグビー場に向かう公園来場者の想定ルートに沿った高木の並木の植栽、その並木道に隣接する小森のオアシスの整備、および並木道の遮熱舗装など、実際の回収計画に即した条件を設定し、対策の効果を定量的に解析した (図 6)。公園を中心とした 5 km 四方のエリアを 5 m 解像度、その内側の 3 km 四方のエリアを 2 m 解像度で解像するように計算領域を配置し、夏季の典型的な気圧配置の下で熊谷が猛暑日となった 2010 年 8 月 26 日を対象に解析を実施した。その結果、対策領域の周辺で地表面温度が顕著に低下することが確認された。これは、遮熱性舗装の設

置と樹木による日陰の増加によると考えられる。実際、高木の並木を植えることで、並木道周辺に新たに40%の木陰を創出でき、さらに、その並木を並行配置で植えるよりも千鳥配置で植えた方が、木陰の面積が相対的に5%増えることが明らかになった。対策領域の気温は対策前より0.7℃低下することが確認された。特に多くの樹木を植栽する小森のオアシス付近では、0.9℃低下しうることが示された。対策領域の暑さ指数のヒストグラムを見ると、熱中症について「嚴重警戒」または「危険」となる地点（暑さ指数が28℃以上の地点）が20%減少することも明らかになった（図7）。埼玉県では、この微気象シミュレーション結果を加味したうえで、暑熱対策の計画が決定され、改修工事が行われた。

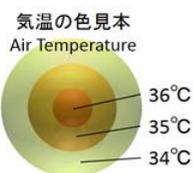
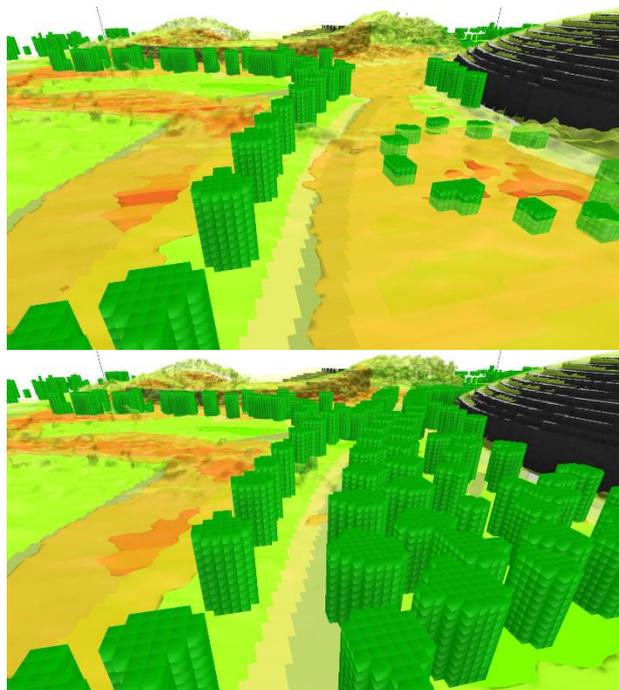


図6 熊谷スポーツ文化公園の対策領域周辺の対策前（上）と対策後（下）の気温の等値面を半透明曲面で可視化（松田ら, 2019）。

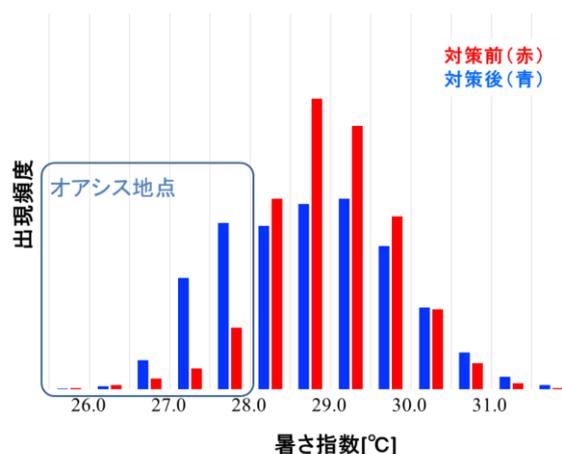


図7 熊谷スポーツ文化公園の対策領域内での暑さ指数のヒストグラム。対策後では暑さ指数が28℃以上の地点が減少することが確認された。

4. おわりに

建物だけでなく樹木の効果を考慮した微気象シミュレーション技術の開発について解説し、実在街区の暑熱環境解析への適用事例を紹介した。特に、熊谷スポーツ文化公園の事例では、暑熱対策の検討に役立つこと、社会への展開や実装ができる段階に達したことを実証するに至った。今後、気候変動や都市ヒートアイランドに対する適応策を街づくりのスケール感で考える際に、微気象解析技術の需要はさらに増すと考えられる。また、最近ではMSSG微気象シミュレーションに基づいて、AI技術を活用した微気象のリアルタイム予測技術の開発も進められており（Onishi et al., 2019; Yasuda et al., 2022; Yasuda et al., 2023）、微気象シミュレーション技術の活用範囲は今後さらに拡大するものと期待される。

参考文献

Asayama, M., 2009: Guideline for the Prevention of Heat Disorder in Japan, *Global Environ. Res.*, 13, 19-25.
 Collatz, G., J. T. Ball, C. Grivet, J. A. Berry, 1991: Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agricult. Forest Meteorol.*, 54, 107-136.
 Kanda, M. and M. Hino, 1994: Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using a large eddy simulation. *Boundary-Layer Meteorol.*, 68, 237-257.

- Onishi, R., D. Sugiyama and K. Matsuda, 2019: Super-Resolution Simulation for Real-Time Prediction of Urban Micrometeorology, *SOLA*, 15, 178-182.
- Matsuda, K., R. Onishi and K. Takahashi, 2018: Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 173, 53-66
- Sasaki, W., R. Onishi, H. Fuchigami, K. Goto, S. Nishikawa, Y. Ishikawa and K. Takahashi, 2016: MJO simulation in a cloud-system-resolving ocean-atmosphere coupled model. *Geophys. Res. Lett.*, 43 (17), 9352-9360.
- Takahashi, K., R. Onishi, Y. Baba, S. Kida, K. Matsuda, K. Goto and H. Fuchigami, 2013: Challenge toward the prediction of typhoon behavior and down pour, *J. Phys.: Conf Ser.*, 454, 012072.
- Yasuda, Y., R. Onishi, Y. Hirokawa, D. Kolomenskiy and D. Sugiyama, 2022: Super-resolution of near-surface temperature utilizing physical quantities for real-time prediction of urban micrometeorology. *Build. Environ.*, 209, 108597.
- Yasuda, Y., R. Onishi and K. Matsuda, 2023 : Super-resolution of three-dimensional temperature and velocity for building-resolving urban micrometeorology using physics-guided convolutional neural networks with image inpainting techniques. *Build. Environ.*, 243, 110613.
- 環境省, 2016: 「東京都市圏における環境対策のモデル分析 最終とりまとめ報告書」(2016年3月)
- 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 2015: 報道発表「高層ビルに囲まれたオアシス緑地の低温化現象と樹木の効果 — 3次元連続観測と街区解像シミュレーションにより解明—」(2015年3月19日)
- 厚生労働省, 2021: 令和3年(2021)人口動態統計(確定数) .
- 松田景吾, 大西 領, 杉山 徹, 高橋桂子, 2019: 高解像度気象 Large-Eddy Simulation を用いた街区スケール暑熱環境解析. *シミュレーション*, 38 (3), 138-144.
- 日本生気象学会, 2022: 『「日常生活における熱中症予防指針」Ver.4』 .
- 埼玉県, 2018: 報道発表「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年6月21日)
- 総務省消防庁, 2022: 報道発表「令和4年(5月から9月)の熱中症による救急搬送状況」(2022年10月28日) .