

持続的な安全社会の構築に資する先端的マルチスケール環境予測シミュレーション法と周辺技術の開発

課題責任者

松田 景吾

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

松田 景吾^{*1}, 杉山 徹^{*2}

*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 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 情報エンジニアリングプログラム

マルチスケール大気・海洋結合モデル MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment) は、全球スケール、領域スケールさらには都市街区スケールのいずれのスケールをも対象とすることが可能であり、多様なプラットフォーム上での実行実績を持つ、応用範囲の広いモデルある。本年度は、これまでの実績が特に多い暑熱環境の評価に関して、微気象シミュレーションの精度向上を目的に MSSG 微気象モデルに内在する各種モデルパラメータや設定値に対する感度実験を行い、微気象シミュレーションの精度に顕著な影響を及ぼしうる因子について検討した。その結果、初期・境界値の気温や水蒸気量だけでなく、地表面からの熱フラックスに影響を及ぼす対流熱輸送係数や地表面温度等も、暑熱環境に一定程度の影響を及ぼしていることが確認された。

キーワード：MSSG, 微気象, large-eddy simulation, 暑熱環境

1. 緒言

マルチスケール大気・海洋結合モデル MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment) [1, 2, 3] は、全球～領域さらには都市街区のいずれのスケールをも対象とすることが可能であり、多様なプラットフォーム上での実行実績を持つ、応用範囲の広いモデルある (図 1)。これまでに、MSSG を用いることによる都市街区の建物や樹冠を解像した微気象シミュレーションを実現し、街区内の夏季暑熱環境の解析や、暑熱環境改善策の評価等への活用を進めてきた。暑熱環境改善策には、舗装面の改変により地表面温度を下げる対策や、樹木を植えることによる日陰創出、噴霧器を設置することによるミスト散布などの方法が提案されている。今後の気候変動による暑熱環境のリスク増大に対する適応策の検討においては、このような暑熱環境改善策をどのように実装すれば効果的であるのかを微気象シミュレーションに基づいて明らかにすることが重要である。本課題では、暑熱環境の評価に対する微気象シミュレーションの精度向上を目的に、MSSG 微気象モデルに内在する各種モデルパラメータや設定値に対する感度実験を行い、微気象シミュレーションの精度向上のための課題について検討した。



図 1 大気海洋結合モデル Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) によるマルチスケール計算。

2. MSSG 微気象シミュレーション

MSSG は海洋研究開発機構で開発された大気・海洋結

合モデルであり、全球、領域、および都市スケールの大気海洋シミュレーションをシームレスに実行できるように設計されている。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。全球および領域スケールでは、境界層モデルを用いた気象計算が可能である一方、都市街区スケールでは、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 $O(1\text{ m})$ による建物解像 LES (Large-Eddy Simulation) を実行することができる。建物解像 LES では数値解法に fractional step 法を用いる。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、圧力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する。乱流拡散には 1 方程式乱流モデル[4]を用いる。建物については voxel 表現法により解像する。MSSG の建物解像 LES では街区内の樹冠を葉面積密度の空間分布により表現し、大気力学過程に及ぼす影響、放射過程に及ぼす影響、熱・水蒸気輸送過程に及ぼす影響を考慮することができる。また、建物による日射の遮蔽や、樹冠に吸収される放射熱フラックスを評価するための 3 次元放射モデルが実装されており、LES の時間進展計算と同時に 3 次元放射計算を効率よく繰り返し実行することができる[3]。

3. 解析条件

今回、対象地域には横浜市関内地区にあるみなと大通りを中心とした地域を設定した。計算領域は、北緯 35.44552222° 、東経 139.6401361° を中心とする 2 km 四方とし、解像度を 2 m に設定した。水平格子数は 1000×1000 である。なお、みなと大通りに沿って計算格子が並ぶように、緯度経度に沿った座標から東に 32.6° 回転させた座標系に設定した。鉛直格子数は 200 とし上端高さ 400 m ま

で格子幅 2 m の等間隔格子とした。計算領域内の標高・建物高さ、土地利用、樹冠分布データについては、文献[5] の手法に従って作成した。図 2 に 2 m 解像度の計算領域の土地利用分布を示す。

解析対象日時は、みなと大通りにおいて、横浜市環境科学研究所による現地観測が行われた 2021 年 8 月 26 日とした。この日は、高気圧に覆われた東日本太平洋側では概ね晴天となり、横浜では最高気温 34.8°C の真夏日となった。対象時刻は、観測が行われた時間帯のうち、風向が比較的一定であった 11:00 JST から 13:00 JST とした。大気場の初期値および境界値には、MSSG を用いた領域スケール気象計算および 5 m 解像度微気象計算により気象庁メソ数値予報モデルデータに対するマルチスケールダウンスケールを行った結果を使用した。なお、5 m 解像度の微気象計算は、2 m 解像度の計算領域を包含する 5 km 四方を対象とし、10:00 JST から 1 時間の spin-up 計算を行ったうえで、11:00 JST 以降の結果を境界条件に用いた。

本課題では、上記のベースケースに加えて、感度実験として、初期・境界値の気温、水蒸気量、対流輸送係数、地表面蒸発効率、初期地表面温度、地表面アルベド、葉面積密度等を変えた実験を実施した。本稿では、それらのうち、初期・境界値の気温 T_b 、初期・境界値の水蒸気量 $\rho_{v,b}$ 、対流熱輸送係数 α_h 、および初期地表面温度 T_s を変えたケースについて報告する。各感度実験の設定は以下の通りである。

- Case 1: 初期・境界値の気温 T_b を一律に+1.0°C上昇させる。
- Case 2: 初期・境界値の水蒸気密度 $\rho_{v,b}$ を一律に+0.01 kg/m³増加させる。
- Case 3: 対流熱輸送係数 α_h を 2 倍にする。なお、標準ケースでは顕熱フラックスの係数 α_h に対して Jurges モデルを用いた。潜熱フラックスの係数は、相似性の仮定に基づいて α_h に比例するものとした。
- Case 4: 初期地表面温度 T_s を+6.0°C上昇させる。対象の土地利用分類は建物、建物敷地、およびアスファルトとした。

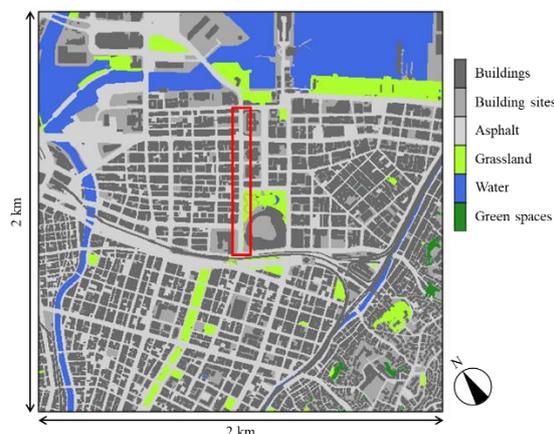


図2 計算領域 (2 m 解像度) の土地利用分布。赤枠で囲まれた通りが評価対象地域であるみなと大通りである。

4. 解析結果

図 3 に感度実験の結果得られたみなと大通りの気温の変化量を示す。凡例の A~H, E-T, SH1, SR1, および SR2 は対象日に設置された観測点を表し、実際の観測点と同じ位置での気温の時系列データに対して表示時刻前 30 分での時間平均を施した数値を示した。

初期・境界値の気温を上昇させた Case 1 では、みなと大通りで気温も約 1°C 上昇しており、初期・境界値が大きな影響を及ぼすことが確認できる。一方、初期・境界値の水蒸気密度を増加させた Case 2 では、みなと大通りの気温のばらつき方が変化しているものの、目立った変化は見られない。対流熱輸送係数を 2 倍にした Case 3 では、地点によっては 1°C 程度の気温の上昇が見られることから、対流熱輸送係数が気温分布に顕著な影響を及ぼすことが明らかになった。また、地表面温度を増加させた Case 4 では、全体的に気温がやや上昇する傾向は見られるが、Case 3 での変化量に比べると小さい。計算領域内の平均気温と平均地表面温度の差は約 12°C であり、Case 4 での地表面温度の上昇量がおおよそ半分であることから、顕熱フラックスは平均的には 1.5 倍程度に増えたと見積もられる。したがって、Case 3 で係数を 2 倍にした影響よりもインパクトが小さくなるのは当然である。しかし、Case 4 での気温の変化量が Case 3 での変化量の半分以下であることから、対流熱輸送係数の方が気温に強く影響を及ぼしやすいことが示唆される。これは、対流熱輸送係数を増加させると、地表面温度が高い地点での顕熱フラックスがより大きくなることに起因していると考えられる。

図 4 には、感度実験によるみなと大通りの湿球黒球温度 (Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT; 暑さ指数) の変化量を示す。凡例および時間平均操作は図 3 と同様である。Case 1 では、1°C 程度の気温の上昇に伴って暑さ指数が 0.5°C 前後増加していることが確認できる。Case 2 では、気温には目立った変化が見られなかったものの、WBGT の方は大きく増加している。これは、初期・境界値の水蒸気量を増加させたことで、みなと大通りでの水蒸気量も増加し、湿球温度が上昇したためである。Case 3 と Case 4 では、気温の変化量の場合と同様に、Case 3 での WBGT の方がやや大きな増加を示しており、対流熱輸送係数が WBGT にも一定程度の影響を及ぼすことがわかる。

以上の結果から、初期・境界値の気温や水蒸気量が計算領域内の暑熱環境に直接的に大きな影響を及ぼすことがあらためて確認された。今回の結果では、さらに、地表面からの熱フラックスに影響を及ぼす対流熱輸送係数と地表面温度に対して、気温が一定程度の感度を持ち、特に、対流熱輸送係数によって気温分布が大きく変化しうることが示唆された。今後、地点ごとの気温の差異などについて観測データとの比較を行い、微気象シミュレーションによる暑熱環境解析の高精度化のための課題抽出とモデルの信頼性向上を進める予定である。

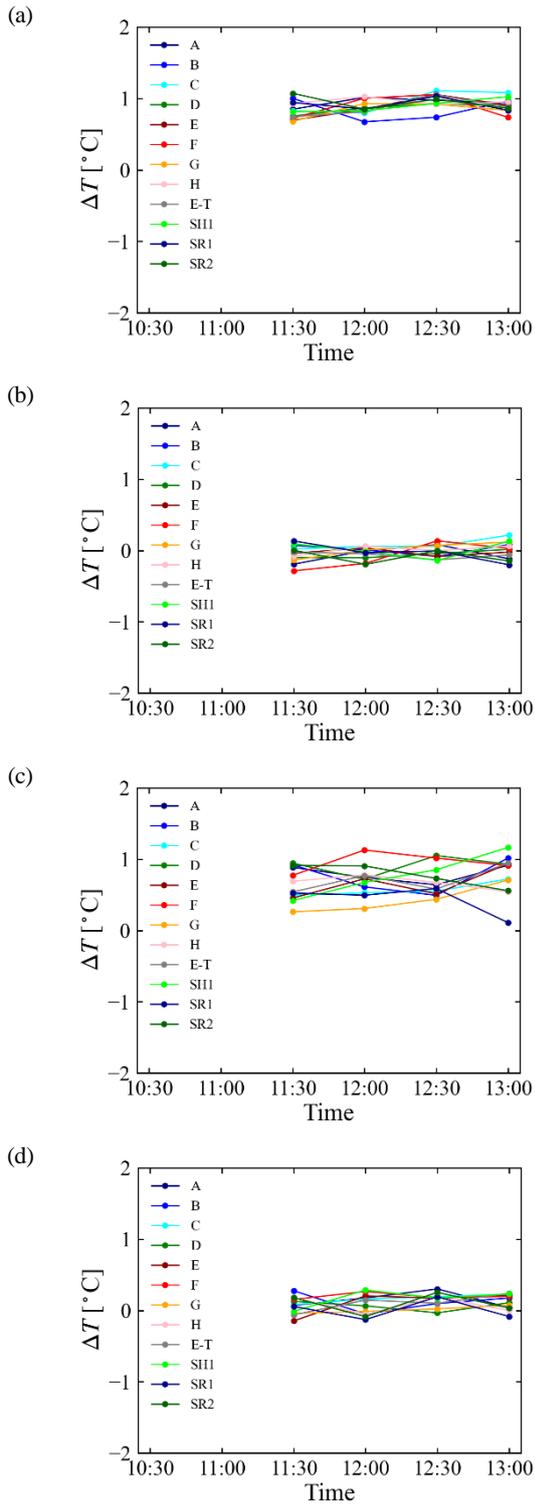


図 3 感度実験ケースとベースケースでの気温差. 表示時刻前 30 分の時間平均値. (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, および(d) Case 4.

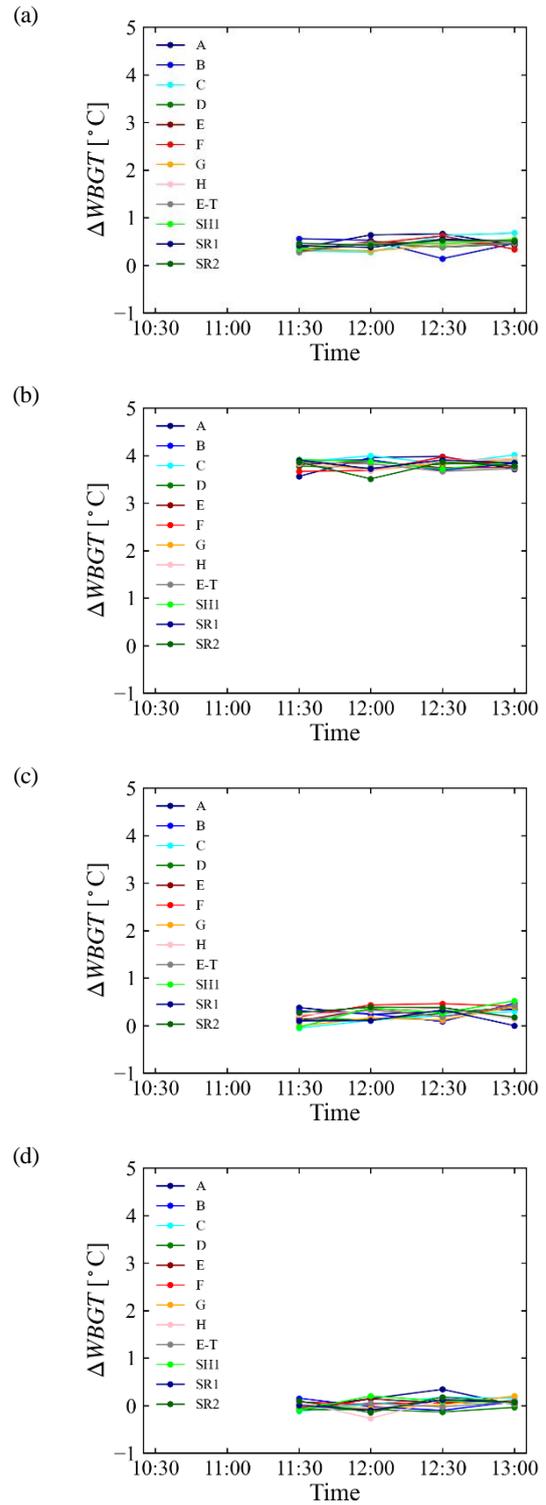


図 4 感度実験ケースとベースケースでの WBGT 差. 表示時刻前 30 分の時間平均値. (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, および(d) Case 4.

5. 結言

マルチスケール大気海洋結合モデル MSSG を用いた建物解像微気象シミュレーションの精度向上のための検討として、MSSG 微気象モデルに内在する各種モデルパラメータや設定値に対する感度実験を行った。その結果、初期・境界値の気温や水蒸気量だけでなく、地表面からの熱フラックスに影響を及ぼす対流熱輸送係数と地表面温度に対しても、気温が一定程度の感度を持ち、特に、対流熱輸送係数によって気温分布が大きく変化しうることが示唆された。今後、観測データとの比較をより詳細に行い、微気象シミュレーションによる暑熱環境解析の高精度化のための課題抽出とモデルの信頼性向上を進める予定である。

謝辞

土地利用データの作成には、横浜市建築局より提供いただいた都市計画基礎調査データを使用した。

文献

- [1] K. Takahashi, R. Onishi, Y. Baba, S. Kida, K. Matsuda, K. Goto, and H. Fuchigami, “Challenge toward the prediction of typhoon behavior and down pour”, *J. Physics* 454, 012072 (2013).
- [2] 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”, *Geophys. Res. Lett.* 43, 9352-9360 (2016).
- [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] J. W. Deardorff, “Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model”, *Boundary-Layer Meteor.* 18, 495-527 (1980).
- [5] R. Onishi, D. Sugiyama, and K. Matsuda, “Super-resolution simulation for real-time prediction of urban micrometeorology”, *SOLA* 15, 178-182 (2019).

Multi-Scale Environmental Simulations for Sustainable and Safe Living

Project Representative

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

Authors

Keigo Matsuda^{*1}, Toru Sugiyama^{*2}

^{*1} Center for Earth Information Science and Technology, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*2} Information Engineering Program, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) is a multi-scale atmosphere-ocean coupled model that can be applied to global, regional, and urban scale simulations. This model has been implemented on various platforms and has been performed for a wide range of applications. In this fiscal year, we conduct building-resolving micrometeorology simulations using MSSG to obtain reference data for improving the accuracy of the micrometeorology simulation. Sensitivity experiments to various model parameters and settings in the MSSG micrometeorology model are conducted. The results confirms that the heat transfer coefficient as well as the initial and boundary temperature have an impact on the air temperature at a street.

Keywords : MSSG, micrometeorology, large-eddy simulation, heat environment

1. Introduction

The Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) [1, 2, 3] is a multi-scale atmosphere-ocean coupled model that can be applied to global, regional, and urban scale simulations. MSSG is capable of running micrometeorology simulations, which resolve building geometry and tree crown distribution. MSSG has been applied to analyses of summer heat environments in actual urban areas to evaluate measures for heat mitigation. Several measures have been proposed to mitigate the heat environment, e.g., replacing pavement surfaces, planting trees, and installing mist sprayers. To consider adaptation measures to the increased risk of urban heat environments due to climate change, it is important to clarify effective way of implementing measures based on micrometeorology simulations. Thus, the reliability of the simulation is crucial. In this study, sensitivity experiments to various model parameters and settings in the MSSG micrometeorology model are conducted to obtain reference data for improving the accuracy of the micrometeorology simulation.

2. Micrometeorology simulation using MSSG

The governing equations for the atmospheric component of MSSG are the transport equations for density, momentum, pressure, and water substances. At urban scales with a grid size of $O(1\text{ m})$, MSSG can perform building-resolving large-eddy simulation (LES) using a subgrid-scale turbulence model. For the building-resolving LES, the fractional step method is adopted: The third-order Runge-Kutta method is used for time integration, and the Helmholtz equation is solved to correct pressure and velocity. A transport equation of subgrid-scale turbulent kinetic energy is solved to calculate turbulent viscosity and diffusion. Building geometry is represented by voxel method, and tree crowns are represented by a spatial distribution of leaf area

density. The effects of tree crowns on wind resistance, radiation, and heat and water exchange processes can be considered. A three-dimensional (3D) radiation model is implemented to evaluate radiative heat budget on ground and building surfaces and tree crowns in complex urban geometry [3]. It is capable of efficiently computing 3D radiative transfer repeatedly during the time evolution of the LES.

3. Computational conditions

The computational domain was set to 2-km square around Minato-odori St. in Yokohama. The horizontal grid spacing was 2 m, and the number of horizontal grid points was 1000×1000 . The number of vertical grids was set to 200, and the grid points were equidistantly located with a grid spacing of 2 m. Elevation, building height, land use, and tree-crown distribution data were prepared according to the method in Ref. [4]. Figure 1 shows the land use distribution for the 2-m resolution computational domain.

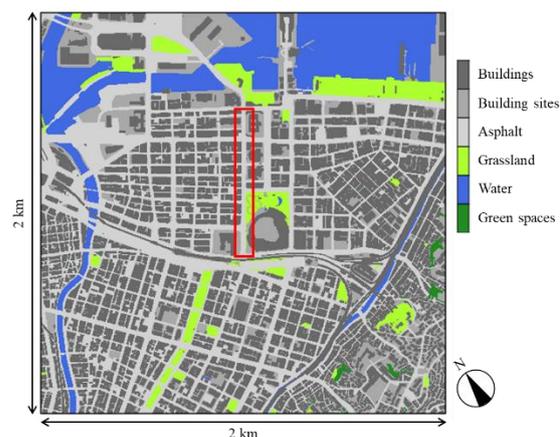


Fig. 1 Land-use distribution in the computational domain. The red frame indicates the location of Minato-odori St.

The simulation was conducted for 11:00-13:00 JST on August 26, 2021, when field observations were conducted at Minato-odori St. The weather was generally clear, and the maximum temperature was 34.8°C in Yokohama. The initial and boundary values of the atmosphere were obtained by multiscale downscaling using mesoscale and 5-m micrometeorology simulations based on the JMA GPV data.

In addition to the base case, following sensitivity experiments were conducted: (Case 1) the initial and boundary temperature T_b is increased uniformly by +1.0°C; (Case 2) the initial and boundary water vapor density $\rho_{v,b}$ is increased uniformly by +0.01 kg/m³; (Case 3) the heat transfer coefficient α_h is doubled; and (Case 4) the initial surface temperature T_s is increased by +6.0°C for the land use categories of buildings, building sites, and asphalt.

4. Results and discussion

Figure 2 shows the change in air temperature at Minato-odori St. obtained from the sensitivity experiments. The legend labels represent observation points, which were located on August 26. The temperature at the same locations as the actual observation points was averaged over 30 minutes before the indicated time. In Case 1, the temperature at Minato-odori St. increased by approximately 1°C, meaning that the initial and boundary values have a significant influence. In Case 2, the temperature change is not significant. In Case 3, the temperature increased by about 1°C at some locations, indicating that the heat transfer coefficient has a significant effect on the temperature distribution. In Case 4, a slight increase in air temperature is observed, but the amount of change is smaller than that in Case 3. These results suggest that the heat transfer coefficient has a significant impact on air temperature. This may be attributed to the fact that increasing the heat transfer coefficient results in a larger increase in the sensible heat flux at locations with higher surface temperatures. In this project, we will compare the temperature distribution with observed data to identify issues for improving the accuracy of heat environment analysis using micrometeorology simulations.

Acknowledgement

The authors thank the Housing and Architecture Bureau of Yokohama City for providing the basic survey data for city planning.

References

- [1] K. Takahashi et al., “Challenge toward the prediction of typhoon behavior and down pour”, *J. Physics* 454, 012072 (2013).
- [2] W. Sasaki et al., “MJO simulation in a cloud-system-resolving global ocean-atmosphere coupled model”, *Geophys. Res. Lett.* 43, 9352-9360 (2016).
- [3] K. Matsuda et al., “Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer

model”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 173, 53-66 (2018).

- [4] R. Onishi et al., “Super-resolution simulation for real-time prediction of urban micrometeorology”, *SOLA* 15, 178-182 (2019).

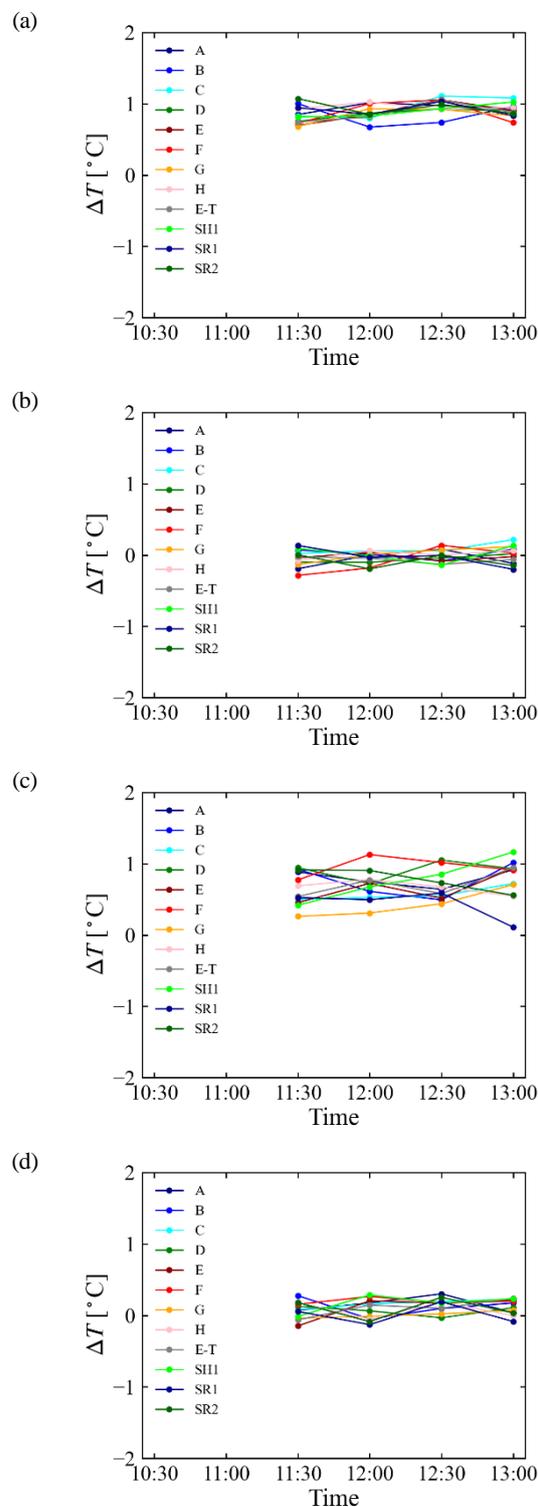


Fig. 2 Air temperature change obtained by the sensitivity experiments for (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, and (d) Case 4.