

# 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<sup>\*1</sup>, 大西 領<sup>\*2,1</sup>, 佐々木 亘<sup>\*3</sup>, 後藤 浩二<sup>\*4</sup>, 松本 圭太<sup>\*5</sup>

<sup>\*1</sup> 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, <sup>\*2</sup> 東京工業大学 学術国際情報センター,

<sup>\*3</sup> 株式会社風力エネルギー研究所, <sup>\*4</sup> 日本電気株式会社, <sup>\*5</sup> NEC ソリューションイノベーター株式会社

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、領域さらには都市街区域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。本課題では、実在街区でのミスト散布の効果に関する基礎特性を明らかにするため、MSSG を用いた建物解像微気象シミュレーションを実施し、ミストを模したトレーサーの街区内での移流拡散特性の定量評価を行った。その結果、周囲の建物等の環境による違いにより、トレーサー濃度の半減期に大きな違いが生じることが確認された。

キーワード：微気象，LES，暑熱環境，ミスト，移流拡散

## 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域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域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など、大規模な工事を伴う方法もある一方、アドホックに噴霧器を設置することでも実現できるミスト散布も広く導入されるようになってきている。本研究では、実在街区でのミスト散布の効果に関する基礎特性を明らかにするため、MSSG を用いた建物解像微気象シミュレーションを実施し、ミストを模したトレーサーの街区内での移流拡散特性の定量評価を行った。

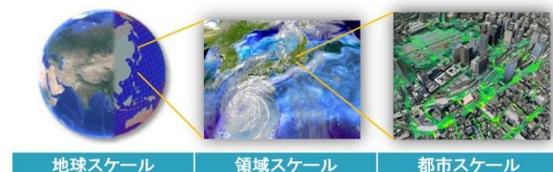


図 1 大気海洋結合モデル Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG) によるマルチスケール計算。

## 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]。ただし、本解析では暑熱環境の評価ではなく風による移流拡散に着目するため 3 次元放射過程を考慮しなかった。

## 3. 解析条件

本研究では解析対象地域として様々なタイプの街区が隣接している東京駅周辺を設定し、5 m 解像度と 2 m 解像度の 2 種類のシミュレーションを実施した。5 m 解像度の計算領域は、北緯 35.680848°、東経 139.766990°を中心とする 2 km 四方とした。水平格子数は 400×400 である。鉛直格子数は 151 とし、100 層目以下では格子幅

5 m の等間隔格子とし、101 層目以上では不等間隔格子とした。計算領域の上端高さは約 1566 m である。2 m 解像度の計算領域範囲は、5 m 解像度の計算領域と同一である。水平解像度が 2 m であるため、水平格子数は 1000×1000 である。鉛直格子数は 151 とし、100 層目以下では格子幅 2 m の等間隔とし、101 層目以上では不等間隔とした。計算領域内の標高・建物高さ、土地利用、人工排熱データについては、文献[5]に従った。なお本計算では、5 m 解像度計算用のデータに基づいて 2 m 解像度用のデータを作成した。

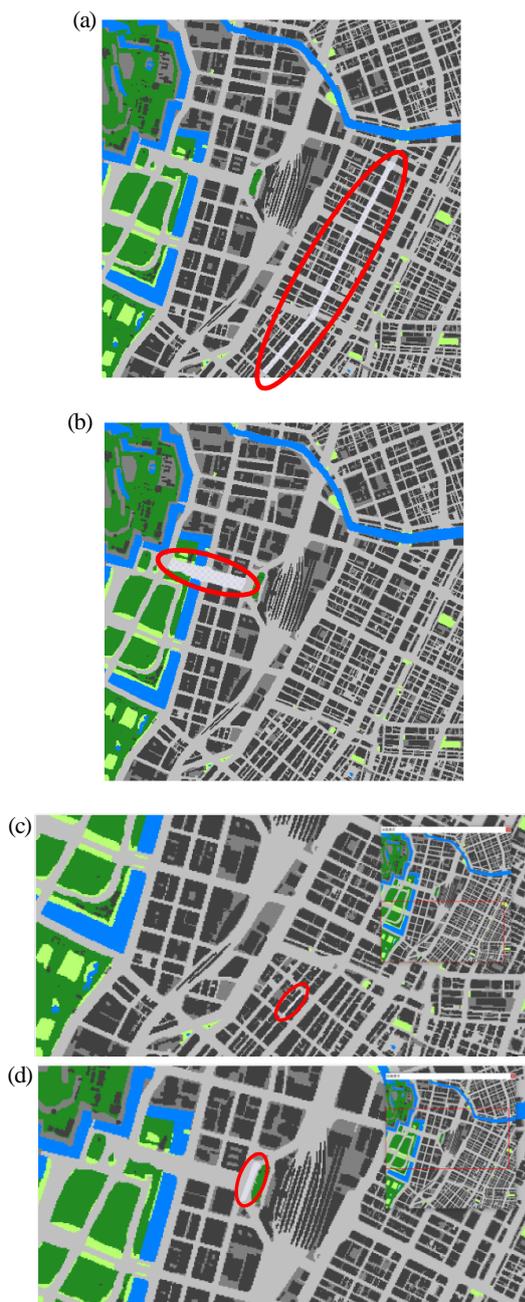


図2 トレーサー移流拡散特性の評価対象エリア；(a)銀座通り、(b)行幸通り、(c)細い路地、(d)東京駅丸の内駅前広場。

解析対象日時には、関東地方が高気圧に覆われて東京で猛暑日を記録した 2015 年 8 月 7 日の 14 時 (JST) を設定した。東京管区気象台における当該時刻の気象観測値では、気温は 35.3°C、湿度は 50 %、南の風、風速は 3.1 m/s であった。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での気象計算の結果を使用した。

本研究では、街区内に散布したミストの効果が移流拡散によって低下するのに要する時間を調べることを目的としている。ミストの状態に依らない時間スケールを計測するため、熱力学的作用を伴わないトレーサーのスカラ濃度輸送を計算することとした。MSSG には領域スケールの気象計算のために海塩粒子濃度の輸送をオイラー的に計算する機能が実装されている [6]。本研究では、この機能を都市街区スケールのトレーサー追跡にも適用できるように改良することで、熱力学作用を伴わないミストの移流拡散計算を行った。

トレーサーの移流拡散特性を評価するエリアとして、東京駅周辺の 4 か所を設定した。5 m 解像度では、図 2 の(a) エリア 1・銀座通り、(b) エリア 2・行幸通り、(c) エリア 3・細い路地を評価対象エリアとし、2 m 解像度では(a)、(b)、(c)に加えて(d) エリア 4・東京駅丸の内駅前広場を評価対象エリアとした。これらの評価対象エリア内の標高 15 m に濃度 1 のトレーサーを設定し、トレーサー濃度が半減するまでの時間 (半減期) を算出した。予備計算を行った結果、初期値 1 のトレーサー濃度は 1 分間でほぼ 0 になると見積もられた。そこで、14 時 (JST) を初期時刻として、10 分間のスピニング計算を行い、その後、トレーサーを配置して 1 分間の計算を行った。

#### 4. 解析結果

図 3 に 5 m 解像度の微気象シミュレーションにおいて評価対象エリア 1 (銀座通り) にトレーサーを配置してから 1 秒後、5 秒後、および 1 分後のトレーサー濃度の水平分布を示す。銀座通りに配置されたトレーサーの濃度が 5 秒後には初期値の半分近くまで減少し、周囲に拡散する様子が見取れる。1 分後にはほとんどのトレーサーが拡散していた。これらの傾向は評価対象エリア 2、3 についても同様であった。

トレーサー濃度が半減するまでの時間 (半減期) を算出するために、各エリアでの領域平均のトレーサー濃度の時間変化を調べた。図 4 にトレーサー濃度の時間変化を示す。エリア 2 の濃度減少が最も速く、エリア 3 の濃度減少が最も遅いことがわかった。本研究では得られた濃度の時間変化 ( $t = 0 \sim 18$  s) に対して、3 次多項式のフィッティングを行い、濃度が 0.5 となる半減期を求めた。算出された半減期は、エリア 1 で 9.2 s、エリア 2 で 7.5 s、エリア 3 で 14.5 s であり、最大で 2 倍程度の違いがあることがわかった。エリア 2 では他の領域に比べて周囲に建物がないため拡散しやすく、エリア 3 では細い路地のために拡散しにくいことが、半

減期の違いの要因と考えられる。そこで、計算開始後 10 秒間の時間平均・領域平均の風速を調べた。その結果、エリア 1 では平均風速では 1.36 m/s であった。エリア 2 では平均風速が 3 つの領域の中で最も大きく、2.98 m/s であった。エリア 3 では風速が最も小さく、0.50 m/s であった。このことから、エリア 3 で半減期が最も長く、エリア 2 で半減期が最も短かったのは、建物配置等による風速の違いが要因であったと考えられる。このことから、建物の影響などを考慮していない広域平均の風速等を用いた半減期の見積もりでは大きな誤差が生じるうことが示唆された。

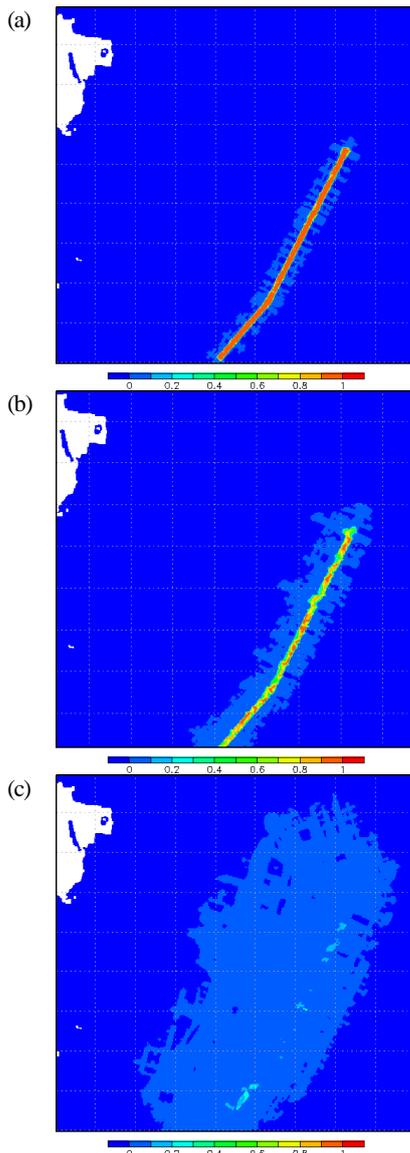


図 3 評価対象エリア 1 に設定したトレーサー濃度の水平分布 (5 m 解像度) ; (a) 1 秒後, (b) 5 秒後, (c) 1 分後。

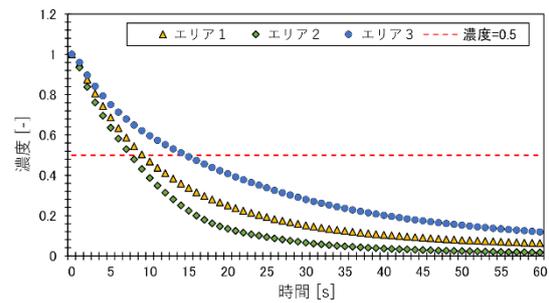


図 4 トレーサー濃度の時間変化 (5 m 解像度)。

本研究では、2 m 解像度においても、5 m 解像度と同様の微気象シミュレーションを実行し、トレーサー濃度の時間変化に基づいて半減期を算出した。図 5 に領域平均したトレーサー濃度の時間変化を示す。エリア 4 での濃度の減少が最も速く、エリア 3 での濃度減少が最も遅かった。この結果は、周囲に建物がない場所に配置したトレーサーの拡散が速く、細い路地に配置したトレーサーの拡散が遅いことを示しており、5 m 解像度での計算結果と同様である。一方、エリア 1 とエリア 2 で濃度減少の速さに大差がない点は 5 m 解像度計算の結果と異なる。

5 m 解像度の場合と同様に、濃度の時間変化 ( $t = 0 \sim 18$  s) に対して、3 次多項式のフィッティングを行い、濃度が 0.5 となる半減期を求めた。その結果、エリア 1 ~ 4 での濃度の半減期は、それぞれ 5.6, 5.7, 8.8, 4.2 s であった。2 m 解像度計算の半減期は、5 m 解像度計算の半減期に比べて全体的に短い傾向が見られる。これは、トレーサー濃度の初期設定範囲の鉛直厚さの違いに起因していると考えられる。つまり、どちらの解像度でも地表近くの 1 格子内に濃度 1 を設定したため、5 m 解像度では厚さ 5 m、2 m 解像度では厚さ 2 m の範囲に濃度が設定されている。

各領域での計算開始後 10 秒間の平均風速を調べた結果、エリア 1 では平均風速が 1.86 m/s であった。エリア 2 は、平均風速が 3 つの領域の中で最も大きく、2.10 m/s であった。エリア 3 は風速が最も小さく、0.55 m/s であった。エリア 4 はエリア 2 と同程度の風速 2.05 m/s であった。2 m 解像度計算では風速の大小と半減期の大小に明確な関連は見いだせないものの、エリア 3 で半減期が最も長い要因は建物配置等によって風が弱まっていることにあると考えられる。また、2 m 解像度計算での風速は、5 m 解像度計算と比較して、エリア 1 では 0.5 m/s 大きく、エリア 2 では約 0.9 m/s 減少していた。5 m 解像度計算と比較して 2 m 解像度計算においてエリア 1 とエリア 2 の半減期に大きな差が見られなかった要因として、二つの領域の風速差が小さくなったことと考えられる。このことは、解像度による風速場の再現性の違いが移流拡散の時間スケールに影響を及ぼしていることを示しており、微気象シミュレーションの定量的信頼性を議論する上で重要な知見が得られた。

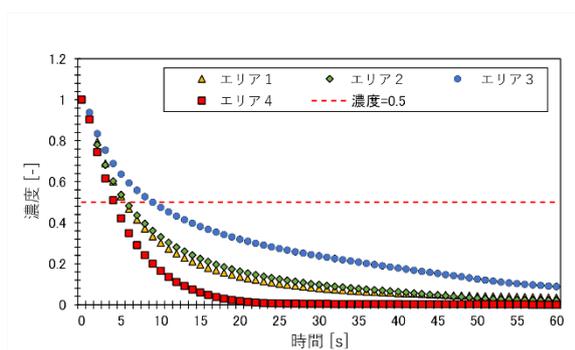


図5 トレーサー濃度の時間変化 (2m 解像度)。

## 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を実行することにより、東京駅周辺を対象としたミストの移流拡散挙動解析を行った。ミストの基礎的な移流拡散特性を明らかにするため、熱力学的作用を伴わないトレーサーの移流拡散を計算し、トレーサー濃度の半減期を算出した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本計算の気象条件 (風速の弱い暑熱時) では、トレーサー濃度は 4~15 秒程度で半減し、1 分後にはほとんどが拡散した。
- (2) 5m 解像度計算では、銀座通り (エリア1)、行幸通り (エリア2)、細い路地 (エリア3) の3か所に粒子を配置して計算を行った結果、周囲に建物がないエリア2では風速が強く、トレーサー濃度の半減期が最短であった。一方、細い路地のエリア3では風速が弱く、半減期が最長であった。
- (3) 2m 解像度計算では5m 解像度計算でトレーサーを配置した場所に加え、東京駅丸の内駅前広場 (エリア4) にトレーサーを配置した計算を行った。その結果、エリア4での半減期が最短であり、5m 解像度計算と同様にエリア3 (細い路地) における半減期が最長であった。
- (4) 2m 解像度計算では5m 解像度計算とは異なり、エリア1と2で半減期に大差がなかった。これは、2m 解像度計算では5m 解像度計算ほどエリア1と2の風速の差が小さかったためと考えられる。
- (5) 周囲の建物等の環境による違いにより、トレーサー濃度の半減期に倍近い違いがあることが確認された。この結果は、広域平均の風速等を用いた半減期の見積もりには大きな誤差が生じることを示唆しており、建物の影響などを考慮した詳細な風況の情報が必要であることを示唆している。

## 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).

[6] 大西 領, 松田景吾, 須藤 仁, 服部康男, 平口博丸, 松波成行, 柳生進二郎, 篠原 正, 片山英樹, "マルチスケール気象シミュレーション法による飛来海塩量の高精細予測", 材料と環境 69, 169-174 (2020).

# 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<sup>\*1</sup>, Ryo Onishi<sup>\*2,1</sup>, Wataru Sasaki<sup>\*3</sup>, Koji Goto<sup>\*4</sup>, Keita Matsumoto<sup>\*5</sup>

\*1 Center for Earth Information Science and Technology, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*2 Global Scientific Information and Computing Center, Tokyo Institute of Technology, \*3 Wind Energy Institute of Tokyo, Inc., \*4 NEC Corporation, \*5 NEC Solution Innovators, Ltd.

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 project, we conduct building-resolving micro-meteorological simulations using MSSG to quantitatively evaluate the advection-diffusion characteristics of tracer scalar to clarify the basic characteristics of the effects of mist spraying in real city blocks. The results confirms that the half-life of the tracer concentration strongly depends on the surrounding environment such as building geometry.

**Keywords :** MSSG, micro-meteorology, LES, heat environment, mist spraying

## 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 (Fig. 1). Using MSSG, we have achieved micro-meteorological simulations, which resolve building geometry and tree crown distribution. MSSG has been applied to analyses of summer heat environments in actual urban areas and evaluation of measures for heat environment improvement. Some measures to improve the heat environment involve construction work, such as replacing pavement surfaces or planting trees. Mist spraying has been also widely introduced because it can be installed relatively easily. In this study, to clarify the basic characteristics of the effects of mist spraying in real city blocks, building-resolving micro-meteorological simulations is conducted to quantitatively evaluate the advection-diffusion characteristics of tracer concentration.

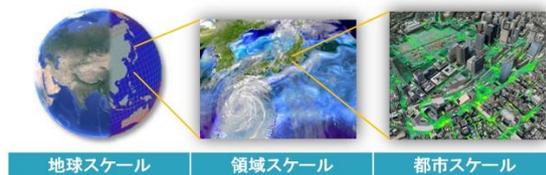


Fig. 1 Multi-scale simulations using the Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG)

## 2. Micro-meteorological simulation using MSSG

The MSSG is an atmosphere-ocean coupled model developed at the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) and is designed to perform global, regional, and urban-scale simulations for atmosphere and ocean seamlessly.

The governing equations for the atmospheric component of MSSG are the transport equations for density, momentum, pressure, and water substances. At global and mesoscales, MSSG can perform meteorological simulations using a boundary layer model, whereas at urban scales with a grid size of  $O(1\text{ m})$ , it 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 [4]. 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. In addition, 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. Note that, in this work, we did not consider the 3D radiation process because we focused on the transport of tracer concentration rather than the evaluation of the heat environment.

## 3. Computational conditions

The tracer transport analysis has been performed for a 2 km square domain around Tokyo Station, where various types of city blocks are adjacent to each other. The spatial resolution was set to 2 m. The elevation, building height, land use, and anthropogenic heat emission data in the domain were in

accordance with the reference [5].

The analysis was conducted under the meteorological condition at 14:00 (JST) on August 7, 2015, when the Kanto region was covered by a high-pressure system and an extremely hot day was recorded in Tokyo. Meteorological observations at the Tokyo District Meteorological Observatory showed temperature of 35.3°C, humidity of 50 %, south wind, and wind speed of 3.1 m/s. The initial and boundary data are based on a mesoscale meteorological simulation using MSSG.

The scalar concentration of tracers was transported to quantify mist behavior independently of thermodynamic effects. The tracer transport was computed by the scalar transport module for seasalt particles in mesoscale simulations of MSSG [6]. The time until the tracer concentration was halved (i.e., half-life) was measured as the advection-diffusion characteristics. Four locations were selected as the areas for evaluating the advection-diffusion characteristics of tracers as shown in Fig. 2: (a) Ginza Street (Area 1), (b) Gyoko Street (Area 2), (c) Narrow alley (Area 3), and (d) the Tokyo Marunouchi Station Plaza (Area 4).

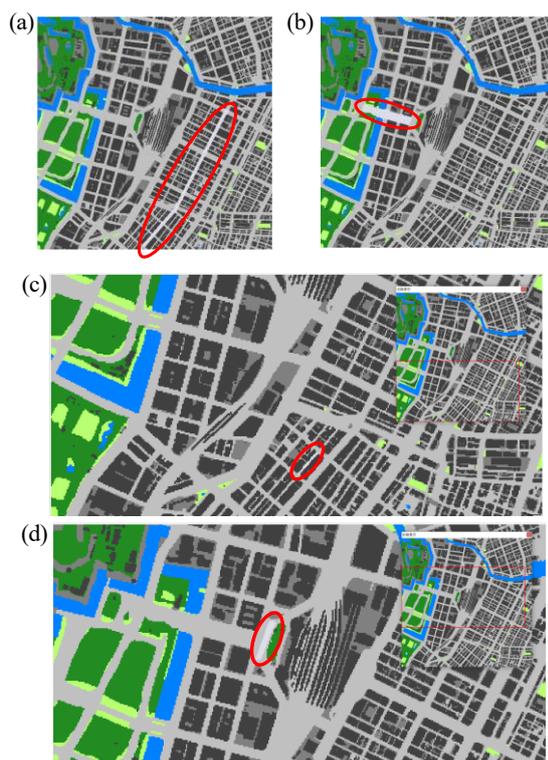


Fig. 2 Evaluation areas for tracer advection-diffusion characteristics; (a) Ginza Street, (b) Gyoko Street, (c) narrow alley, and (d) the Tokyo Marunouchi Station Plaza.

#### 4. Results and discussion

Figure 3 shows the time variation of the spatially averaged tracer concentration. The rapidest decrease in concentration is observed in Area 4 and the slowest in area 3. The half-lives of the tracer concentrations in Areas 1, 2, 3, and 4 are 5.6, 5.7, 8.8, and 4.2 s, respectively. The area-averaged wind speed for the first 10 seconds in each area were also examined. Area 1 had an average

wind speed of 1.86 m/s. Area 2 had the largest average wind speed of 2.10 m/s among the three areas. Area 3 had the smallest wind speed of 0.55 m/s. Area 4 had a wind speed of 2.05 m/s, which was close to that of Area 2. These results suggest that the reason why the half-life was longest in Area 3 was due to the smallest wind speed caused by the dense layout of surrounding buildings. Therefore, detailed information on wind conditions considering the influence of building geometry is necessary to quantify the duration of mist in actual city blocks.

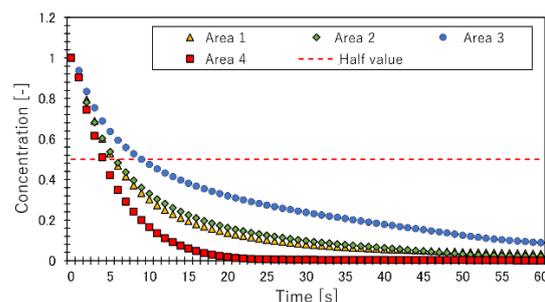


Fig. 3 Time variation of area-averaged tracer concentration.

#### References

- [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).
- [6] R. Onishi, K. Matsuda, H. Suto, Y. Hattori, H. Hirakuchi, S. Matsunami, S. Yagyū, T. Shinohara, H. Katayama, "High-Resolution Prediction of Seasalt Transportation by Multi-Scale Weather Simulation", *Zairyo-to-Kankyo* 69, 169-174 (2020), in Japanese.