

# 西新宿街区における WBGT に基づく熱ストレスの定量評価に向けた CFD シミュレーションモデルの構築と精度検証

## Development and Validation of a CFD Simulation Model for Quantitative Assessment of WBGT-Based Heat Stress in the Nishi-Shinjuku District

西村 香純\*<sup>1</sup> 三坂 育正\*<sup>2</sup> 加藤 太朗\*<sup>1</sup> 宮田 聡\*<sup>1</sup> 新居 久朋\*<sup>1</sup> 上園 慎哉\*<sup>1</sup> 高野 了成\*<sup>1</sup>  
Kazumi Nishimura, Ikusei Misaka, Taro Kato, Satoshi Miyata, Hisatomo Arai, Shinya Uezono, and Ryousei Takano

\*<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 インテリジェントプラットフォーム研究部門 未来コアデジタル技術連携研究室  
Future Core Digital Technology Cooperative Research Laboratory, Intelligent Platforms Research Institute, National Institute of  
Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

\*<sup>2</sup> 武蔵野大学 工学部 サステナビリティ学科 Department of Sustainability Studies, Faculty of Engineering, Musashino  
University

Corresponding author: Kazumi NISHIMURA, kazumi.nishimura@aist.go.jp

### ABSTRACT

This study developed and validated a CFD simulation model for assessing heat stress in an urban environment, focusing on the Nishi-Shinjuku district of Tokyo. A high-resolution simulation was conducted by setting up a computational domain based on the PLATEAU 3D urban model and applying observed meteorological and radiative conditions. In parallel, field measurements were carried out on the same day and at the same time to obtain Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) and its components—dry-bulb temperature, wet-bulb temperature, and globe temperature—for detailed comparison with the simulation results. The analysis revealed that prediction errors varied depending on location and time, with a tendency toward overestimation during peak solar radiation periods. A component-wise error analysis showed that globe temperature contributed most significantly to WBGT prediction errors, followed by wet-bulb temperature, which exhibited high sensitivity. These errors were attributed to multiple factors, including the representation of solar shading, surface radiative properties, and wind fields, and were influenced by simplifications in the modeling process. The findings highlight the importance of accurately modeling radiative environments and applying high-resolution meteorological boundary conditions to improve WBGT prediction accuracy in urban areas.

キーワード: 都市暑熱環境, CFD シミュレーション, WBGT (暑さ指数), 野外環境測定, 西新宿街区

**Key Words**: Urban Heat Environment, CFD simulation, Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT), Outdoor environmental measurement, Nishi-Shinjuku district

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

近年、日本の夏季は地球温暖化と都市化の相乗効果で酷暑が進み、熱中症による救急搬送者は高止まりしている。総務省消防庁の確定値によれば、2024年7月だけで全国43,195人が搬送され、7月としては統計開始(2008年)以来2番目に多かった<sup>(1)</sup>。週次速報でも、2024年7月22-28日の1週間で12,666人が搬送され、前年比約20%増となっている<sup>(2)</sup>。搬送者の約6割が高齢者であり、居住空間での発症が最多など、都市生活に起因するリスクが顕在化している。

このような背景を受け、政府は2024年4月より「熱中症警戒アラート」を強化した「熱中症特別警戒アラート」の運用を開始し、WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) が35°C以上と予測される場合に広域的な注意喚起を行っている<sup>(3)(4)</sup>。WBGTは気温・湿度・風速・日射・放射など複数の要素を統合的に反映する指標であり、熱中症リスク評価における有効性が広く認識されている。

都市暑熱リスクの空間的な実態を把握するため、移動観測によってWBGTを測定する取り組みも行われている。たとえば三坂ら<sup>(5)</sup>は、東京都千代田区の観光ルートにおいて歩行者移動に伴うWBGTの分布を可視化し、局所的な暑熱リスクの存在とその評価手法の有効性を示した。このよう

な観測ベースの手法は実態の把握に優れているが、将来予測や対策効果の事前評価といった異なる用途には、補完的なアプローチの導入が有用となる場合がある。

補完する手法の一つとして、CFD (Computational Fluid Dynamics) シミュレーションを用いた WBGT 解析が注目されている。東京都環境科学研究所は、公共空地の緑化前後の WBGT を CFD により再現し、緑化規模と体感温度の低減効果との関係を定量的に評価した<sup>(6)</sup>。さらに山崎ら<sup>(7)</sup>は、名古屋市中区錦二丁目地区において PLATEAU の 3D 都市モデルを活用した CFD シミュレーションにより、直達日射の遮蔽によって街区内に快適な空間が形成され得ることを示すとともに、都市モデル整備における課題を指摘した。このように、CFD シミュレーションは観測では捉えきれない空間的特徴の把握や、将来的な暑熱環境の評価において有望な手段である。

そのため、近年は観測とシミュレーションの両面から都市の暑熱リスクの空間的把握が進んでおり、リスクの可視化と対策評価に向けた定量的手法の整備が重要性を増している。したがって、都市スケールで WBGT を高精度に再現し、高リスク地点を定量的に抽出できる CFD シミュレーションモデルの構築と妥当性検証は、熱中症予防対策の実効性を高める上で極めて重要である。

## 1.2 研究の目的

本研究の目的は、都市スケールの CFD 解析に基づいて、WBGT を都市空間の構成要素ごとに再現するモデルを構築し、西新宿街区における観測データとの比較によりその妥当性を検証することである。特に、黒球温度・湿球温度などの各温度成分の再現性を定量的に評価し、それらが WBGT 誤差に与える影響の分析を通じて、都市環境における暑熱リスク評価の高精度化に向けた知見を得ることを目的とする。

本論文は以上の目的に沿って構成されている。第2章では、解析対象となる西新宿街区と CFD モデル構築の手順について説明する。第3章では、CFD による WBGT 構成要素の再現精度を観測データと比較して検証し、誤差要因を考察する。第4章では、得られた解析結果の応用可能性と今後の展望について述べる。

## 2. 解析設定とシミュレーション実行

### 2.1 解析対象と地理的条件

(1) 解析対象の概要 本研究の解析対象である西新宿街区は、東を新宿駅西口、北を青梅街道、南を甲州街道、西を新宿中央公園で囲まれた扇状の市街地である。行政区分としては新宿区西新宿一丁目～三丁目、六丁目を中心とし、東京都庁舎を含む超高層オフィスビル群と複数の高層ホテルが集積する地区である。地区中央の東京都庁第一本庁舎付近を基準点とし、概略の外形長は東西約 1.2 km、南北約 1.4 km、面積は約 1.5 km<sup>2</sup>と算定される。図1に解析対象領域

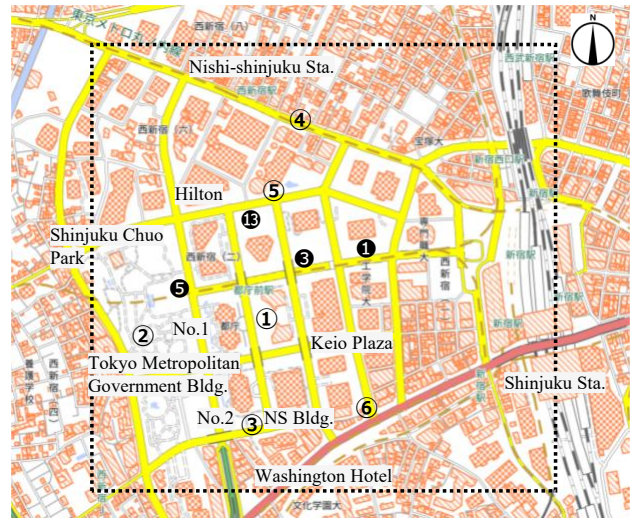


図1 西新宿の解析対象領域（点線で囲んだエリアを高解像度で解析した。図中の番号は環境データの測定地点を示す。国土地理院「地理院地図 Vector」<sup>(8)</sup>を加工して作成）

表1 環境データ測定地点（記号は図1に対応）

#	測定方法	名称	緯度	経度
①	野外測定	東京都庁都民広場	35.6896	139.6926
②	野外測定	新宿中央公園	35.6887	139.6895
③	野外測定	東京都庁第二庁舎南口	35.6875	139.6922
④	野外測定	青梅街道沿い歩道	35.6940	139.6936
⑤	野外測定	北通り沿い歩道	35.6924	139.6926
⑥	野外測定	甲州街道沿い歩道	35.6876	139.6955
①	Smart pole	新宿センタービル南	35.6911	139.6955
③	Smart pole	新宿三井ビル南	35.6908	139.6938
⑤	Smart pole	新宿中央公園東	35.6903	139.6905
⑬	Smart pole	新宿住友ビル北	35.6921	139.6924

域を示す。点線で囲まれた部分を高解像度 CFD メッシュで解析する。また、図中に付与した番号①～⑥および①③⑤⑬は環境データの測定位置を示している（データ測定についての詳細は3.1節で述べる）。各測定点の名称と WGS84 座標を表1にまとめた。

当該地区は昼間人口が多く、地表は広幅員道路と高密度な高層建築物に覆われるため風通しが悪く、夏期の日射・蓄熱による暑熱環境リスクが高いことが指摘されている。東京都は2005年に「ヒートアイランド対策推進エリア」を設定し、新宿副都心（西新宿を含む）を重点的な対策地域に指定した<sup>(9)</sup>。さらに、東京都デジタルサービス局が西新宿に設置したスマートポール<sup>(10)</sup>（次世代の都市インフラとして通信、環境センサー、人流計測、デジタルサイネージなど様々な機能を持つ多目的ポールであり、2024年現在で29基設置されている）では、気温・湿度・日射から算出した WBGT に基づき熱中症警戒アラートを発信する実証が西新宿で行われており、2023年6月29日13時には WBGT が 31.7 °C 相当の「危険」レベルが表示された事例が報告されている<sup>(11)</sup>。これらの調査・実証結果は、本地区

が都市ヒートアイランドのホットスポットであり、熱ストレス評価のケーススタディとして適切であることを示している。

**(2) 地理的・都市構造的特徴** 対象地区は、旧淀橋浄水場跡地の再開発によって形成された平坦な台地上に位置する。浄水場が閉鎖された 1965 年以降に副都心計画が進み、1971 年の京王プラザホテル竣工を皮切りに超高層ビルが集積した。標高はおおむね 33~41 m で、武蔵野台地の一部である淀橋台に属し、大きな起伏はない。

建物密度と高さ分布は東京 23 区内でも際立っている。最高層は東京都庁第一本庁舎 (243 m) で、新宿パークタワー (235 m)、東京オペラシティ (234 m) など 200 m 級が複数存在し、高さ 150 m 以上のビルが半径 700 m 内に 15 棟以上立地する。これにより日射・放射の遮蔽/反射が局所的に複雑化し、風通しもビル風に左右されやすい。

本地区は、青梅街道や甲州街道など、中心市街地から東西方向に延びる幹線道路により区画されている。北縁の青梅街道は起点の新宿大ガード西交差点で片側 3 車線 (実幅員約 30 m)、南縁の甲州街道 (国道 20 号) は新宿駅南口付近から片側 3~4 車線の広幅員道路として続く。こうした幅員 30-40 m 級の幹線道路が高層ビル街を縁取り、内部は 6~8m 幅の区画道路と公開空地が入り組む。

緑地・公園としては地区西端に新宿中央公園 (約 8.8 ha) が広がり、四季折々の高木が都心のヒートアイランド緩和に寄与している。また、新宿区の「みどりの基本計画」において、西新宿は「七つの都市の森」に位置づけられ、区道 4 号線沿いに「風のみち (みどりの回廊)」が計画されている<sup>(12)(13)</sup>。路地沿いの街路樹はイチョウやケヤキが主体で、公開空地には人工地盤上の植栽も多い。

地表面材質は、ビル外装の大部分がガラスカーテンウォールまたはコンクリートパネルで高い日射反射率を持つ一方、車道はアスファルト舗装が主体で夏季には路面温度が 50 °C 近くまで上昇する例が報告されている<sup>(14)</sup>。こうした高蓄熱性の舗装材と反射性の外装材の組み合わせが、昼夜を通じて顕著な都市ヒートアイランドを形成する要因となっていると考えられる。

以上のように、本地区は平坦地形×高層集積×幹線広幅員道路×緑地スポット的配置という都市構造を特徴とし、夏期の熱ストレスリスクを評価する上で複合的な熱環境要因が働く代表的なエリアである。

## 2.2 CFD シミュレーションモデルの構築手順

CFD 解析には、アドバンスドナレッジ研究所が開発したソフトウェア FlowDesigner を使用した。以降に示す解析手順は、基本的にすべて同ソフトウェア上で実施している。

**(1) 解析領域の定義** 本研究では、都市構造物の形状を CFD モデルで正確に再現するために、国土交通省プロジェクト PLATEAU<sup>(15)</sup> 2022 年度版 3D 都市モデルを使用した。図 2 は PLATEAU の 3D 都市モデルを PLATEAU VIEW 4.0<sup>(16)</sup> 上で表示したものである。

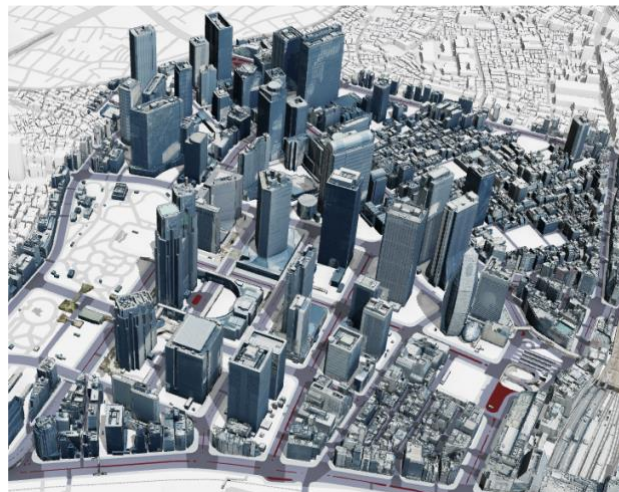


図 2 CFD 解析に用いた西新宿 3D 都市モデル

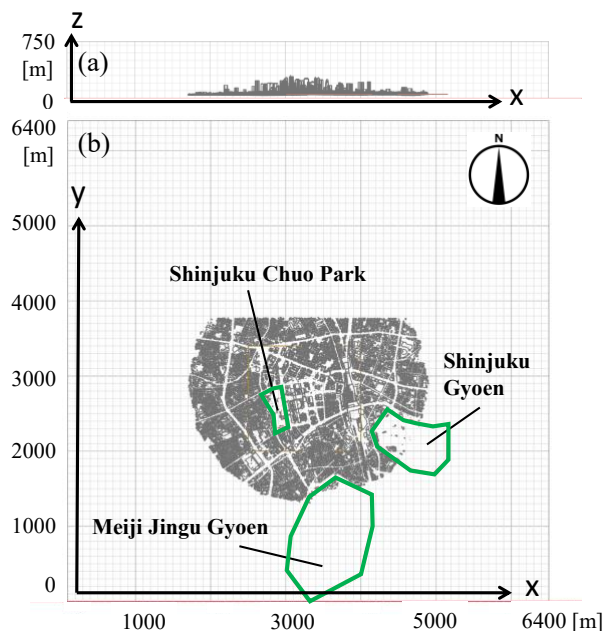


図 3 CFD 解析領域と都市モデルの配置

G 空間情報センター<sup>(17)</sup>から、東京都新宿区の対象域を含む 3 次メッシュモデル (53394525, 53394535) を FBX 形式でダウンロードした。取得したレイヤは建物形状 (bldg, LOD2)、橋梁形状 (brid)、地形メッシュ (dem) である。これにより、建物外形・地形起伏・橋梁下面空間を忠実に解析領域へ反映できる。PLATEAU の FBX 形式 3D 都市モデルをそのまま CFD 解析ソフトウェアに読み込むと、超高層ビルの詳細メッシュが原因でメモリ使用量と前処理時間が大幅に増大する。そこでまず、都市モデルの FBX 形式ファイルを 3D CAD モデリングツール Rhinoceros (Robert McNeel & Associates 社製) にインポートし、ビル外装のポリゴンを頂点結合やメッシュ削減により間引いた。修正後のモデルは 3DS 形式ファイルでエクスポートし、FlowDesigner へインポートしている。

解析領域は幅 6,400m×奥行き 6,400m×高さ 750m の直方体とし、その中心に西新宿街区を（東京都庁第一本庁舎付近を中心にして）配置した。こうすることで、街区上空 750m までの都市境界層を十分に含みつつ、周辺の風上側・風下側に各 3 km 以上の緩衝域を確保できる。方位は北が+Y 軸となるよう回転している。図 3 (a)は解析領域の側面図、図 3 (b) は平面図である。灰色が建築物形状、緑線は新宿中央公園・明治神宮御苑・新宿御苑の主要緑地輪郭を示す。地形は視認性のため、図 3 では非表示にしている。

(2) 計算メッシュの作成 解析領域内の流れ場は、等間隔の正方格子（Structured Cartesian Grid）で離散化した。Cartesian 格子は座標変換を要さないため計算効率に優れるが、曲面を持つ建築物を階段状に近似する点が課題となる。そこで本研究では、西新宿街区における都市中心部では細かい格子を、周辺部では粗い格子を用いる多段階メッシュを採用し、形状再現性と計算コストのバランスを図った。

格子サイズは段階的に変化させ、隣接セルサイズ比が 3 未満となるよう制御した。結果として、高さ方向 750m を最小セル幅 1m として 65 層に分割しつつ、地上付近の複雑な建物外形を水平方向の最小セル幅 5m で近似している。表 2 に計算メッシュの品質指標をまとめる。

表 2 計算メッシュ仕様

Parameter	Value
Minimum grid spacing -Horizontal (urban core)	5 m
Minimum grid spacing -Vertical (near the ground)	1 m
Maximum grid spacing (outer buffer)	50 m
Maximum adjacent-cell size ratio	2.994
Maximum aspect ratio	10
Number of cells (X, Y, Z)	(475, 425, 65)
Total cell count	13,121,875

図 4 に、(a)メッシュ分割前の建物形状（PLATEAU 元モデル）と (b)分割後のセル表現を示す。Cartesian メッシュで空間を離散化することで建築物の細部は簡略化されるものの、超高層ビル群のスカイラインや街路幅が概ね保持されており、流体抵抗となる主要輪郭が再現されていることがわかる。

(3) 境界条件の設定 本解析では、CFD 解析領域の外部から流入する気象条件と、地表面および建築物外皮の熱特性・表面条件を境界条件として設定している。以下に、それぞれの設定内容を示す。

a. 気象条件 流入境界に与える気象条件（風向・風速・気温・相対湿度）は、解析対象エリアに最も近い国設測定局である国設東京新宿（新宿区内藤町 新宿御苑内、風速計高さ 11 m）での観測データを使用する。観測データは、環境省の大気汚染物質広域監視システムから取得した<sup>(18)</sup>。対象日時は 2024 年 8 月 13 日であり、10 時～17 時までの 1 時間ごとの値を用いて時間変化を再現している。これにより、日中の熱ストレスが顕著となる時間帯を中心に、風環境および熱環境の変化を反映させた解析が可能となる。

時刻ごとの設定値を表 3 に示す。

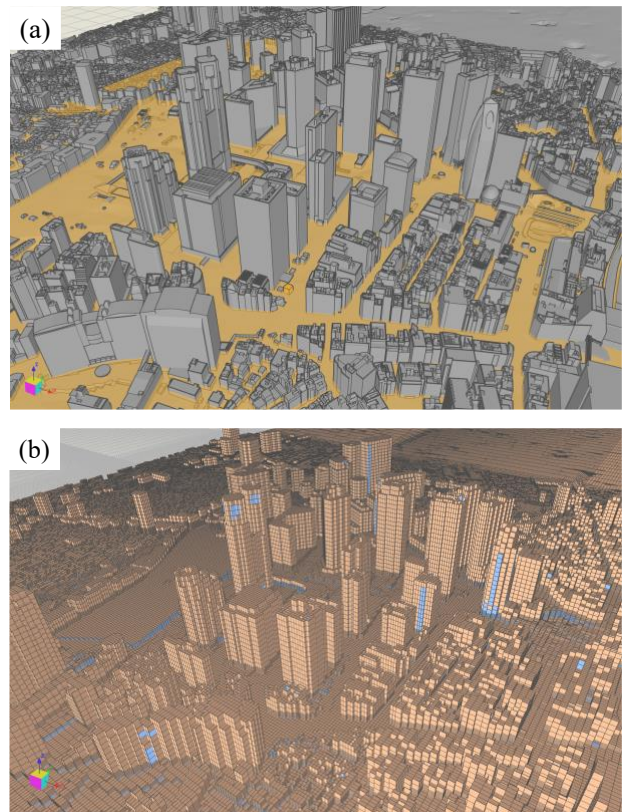


図 4 建築物形状の比較。(a)分割前と(b)メッシュ分割後

表 3 時刻ごとの外気条件の設定値

Time	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind direction	Wind speed (m/s)
10	31.2	71.2	WSW	1.1
11	34.1	52.3	SW	1.9
12	34.4	51.1	SW	1.9
13	34.8	56.4	SSE	0.9
14	35.6	52.7	SSW	1.2
15	34.9	52.1	WSW	1.0
16	34.5	49.3	SSE	1.2
17	34.0	46.9	WSW	1.6

b. 地表・建物条件 都市地表面および建物外壁の熱的境界条件は、以下のように設定した。まず、日射による表面温度の変化を計算するため、地表面を「建築物」「道路」「緑地」の 3 区分に分類し、それぞれにおいて表面-内部間の伝熱を模擬可能な条件を与えた。具体的には、材質、擬似厚み、内部温度を定義し、内部温度は一定と仮定した。

表 4 地表・建物条件の設定値

Surface category	Assumed material	Pseudo-thickness	Fixed surface temperature
Building	Concrete	0.15 m	28 °C
Pavement	Asphalt	0.30 m	24 °C
Green area	Vegetation	0.10 m	27 °C

各区分の設定値は表 4 に示す。建築物は材質をコンクリート、擬似厚みを一般的な鉄筋コンクリート造の壁厚に基

づき 0.15 m とし、建物内部温度は 28 °C に固定した<sup>(19)</sup>。道路は材質をアスファルト、厚みを 0.3 m、下層土壌温度を 24 °C とした<sup>(20)</sup><sup>(21)</sup>。

新宿中央公園、新宿御苑、明治神宮御苑の 3 箇所においては、大規模緑地として特別な地表条件を設定した。これらの緑地では、地面に擬似厚み 0.1 m の土壌層を定義し、層の内部温度は 27 °C とした<sup>(22)</sup>。さらに、地表から高さ 5 m までの領域を「緑地上空」と区分し、植物や芝生からの蒸発散を模擬するため、発湿度 0.167 g/(h m<sup>3</sup>) の定常的な水分供給を与えた<sup>(23)</sup>。

また、日射遮蔽効果を簡易的に再現する目的で、「緑地上空」には開口率 100% の圧損パネルを配置し、樹木による平均的な日射遮蔽 (吸収率 100%) を表現した。特に新宿御苑および明治神宮御苑では、風に対する樹木の空気抵抗も考慮し、ケヤキを想定した群集抵抗モデルを導入した。葉面積密度 0.57、抵抗係数 0.2、モデル定数 1.8 を用い、地上から高さ 15 m の領域に同様の開口圧損パネルを配置して日射遮蔽の影響を模擬した。

これらの設定は、各地表構成要素の蓄熱・放熱特性を反映しつつ、日射応答の差異を適切に表現することを目的としている。特に、舗装と緑地は同一水平面上であっても温熱特性に大きな違いが生じるため、これらの境界条件の設定精度は WBGT 分布の再現性に大きく影響を与える。

**(4) 計算条件の設定** 日射の取り扱いと数値解法・ソルバー設定について述べる。FlowDesigner の日射解析機能を用い、放射と流体熱輸送を連成させて WBGT 算出に必要な気温・湿度・放射量などの値を算出する。これらの設定により、高層ビル群が生む乱流と日射加熱を同時に考慮した熱流動場を効率的に解析できる。

**a. 日射条件** 日射解析の対象日は 2024 年 8 月 13 日とした。対象日時における太陽軌道を計算し、建物陰の有無は輸送方程式を用いて判定している。これは、形態係数法に比べて陰影表現の精度が高く、計算負荷を抑えられることから採用したものである。輸送方程式は有限体積法に基づき、全セルに対して日射強度を計算し、直達・散乱成分の反射も拡散反射として扱うため、複雑な都市地形における熱負荷評価に適している。

日射解析は、太陽軌道の計算に基づいて各オブジェクトへの照射を判定し、照射面に発熱量を付与する機能であることから、解析モデル内の建物外壁および地表面には、事前に材質に基づく吸収率および反射率を割り当てている。

なお、太陽定数に基づく理論値のみを使用した場合、晴天を前提とした過大評価につながる可能性があるため、本研究では西新宿に設置されたスマートポールにおける全天日射量の実測値 (図 5) をもとに、直達日射量・散乱日射量・天空放射量を直接指定している。図 5 に示したスマートポール⑤は新宿中央公園東に位置し (緯度経度は表 1 を参照のこと)、終日日向とみなせるが、一部の時刻で遮蔽の影響が懸念されるため、欠測値は前後時刻から補間し、10 時から 17 時までの 1 時間間隔の全天日射量とした。

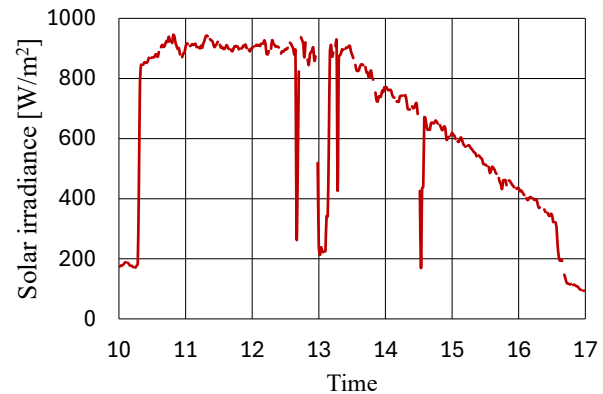


図 5 スマートポール⑤における日射量の観測結果 (2024 年 8 月 13 日)

表 5 日射解析のための放射量設定値

Time	Global Horizontal Irradiance [W/m <sup>2</sup> ]	Direct Normal Irradiance [W/m <sup>2</sup> ]	Diffuse Horizontal Irradiance [W/m <sup>2</sup> ]	Longwave Radiation [W/m <sup>2</sup> ]
10	701	590	111	450
11	812	685	127	450
12	863	740	123	450
13	841	720	121	450
14	768	653	115	450
15	652	545	107	450
16	511	412	99	450
17	368	277	91	450

表 6 空気の物性値

Property	Value
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.145
Kinematic viscosity (m <sup>2</sup> /s)	1.983 × 10 <sup>-5</sup>
Specific heat at constant pressure (J/kg/K)	1,005
Thermal conductivity (W/m/K)	0.02624

直達・散乱成分の分離には、Erbs モデル<sup>(24)</sup>に基づく日射直散分離手法を用い、Python ライブラリ pvlib (バージョン 0.10) の irradiance.erbs 関数<sup>(25)</sup>により算出した。また、長波放射量に相当する大気放射量はスマートポールでは測定されていないため、2024 年 7 月 31 日に武蔵野大学屋上で計測された値を参考に 450 W/m<sup>2</sup> と仮定した (この値に基づく大気温度は概ね 26~28 °C となる)。

入力した時刻別の放射量は表 5 に示す通りであり、本設定により時間帯ごとの短波 (直達・散乱) 放射と、一定値の長波放射を同時に考慮した熱収支計算が可能となっている。

**b. 数値解法とソルバー** 計算は定常解析とし、空気を理想気体と仮定して表 6 のパラメータで実行した。流速と温度の支配方程式は一次精度風上差分で離散化し、速度-圧力連成は SIMPLEC 法で解いた。線形方程式系は ILU\_BiCGSTAB (速度・温度) と ILU\_CG (圧力) を用い、残差が 10<sup>-4</sup> 未満になるまで反復した。最大反復回数は、そ

れぞれ、流速 100、圧力 2000、温度 500 としている。非線形系の収束判定条件は  $10^{-3.5}$ 、最大反復回数を 300 とした。これら主要設定を表 7 にまとめる。

表 7 数値解法の主要設定

Item	Setting
Analysis type	Steady-state, single precision solver
Turbulence model	High-Reynolds k- $\epsilon$ model
Spatial discretization	First-order upwind
Pressure-velocity coupling	SIMPLEC
Convergence criterion	Residuals $< 10^{-3.5}$ max. 300 iterations
Linear solver	Velocity: ILU_BiCGSTAB Pressure: ILU_CG Temperature: ILU_BiCGSTAB
Convergence criterion	Residuals $< 10^{-4}$ max. iterations: Velocity 100, Pressure 200, Temperature 500

### 2.3 シミュレーション実行

本解析は FlowDesigner バージョン 2024 を使用し、Windows 11 を搭載したラップトップ PC (CPU: Intel Core i9-13900K 5.8 GHz, RAM 64 GB) で実施した。並列計算は行わず、シリアルモードで実行した。

対象日は 2024 年 8 月 13 日とし、10 時～17 時の各正時に設定した外気境界条件 (風向・風速・気温・相対湿度) を更新して全 8 ケースの定常解析を行った。各ケースの平均計算時間は約 7.5 時間であった。最大メモリ使用量は 18.7 GB で、ハードウェアリソースに対して余裕を持って実行できている。

## 3. CFD シミュレーションモデル精度の検証

### 3.1 実測データの取得

本研究のシミュレーション精度を検証するために、西新宿地区で観測された 1 分間隔の高解像度データを 2024 年 8 月 13 日 10 時から 17 時まで取得した。比較に用いた観測系列は、東京都が常設するスマートポールの自動観測値と、同日にわれわれが実施した野外実測値の二種類である。

スマートポールは区内に 29 基設置されているが、大気温度・相対湿度に加えて風速と照度を計測でき、WBGT 算出に必要な四要素がそろった 4 基が中央通り沿いに集中していることから、この 4 基のデータを用いた。各ポールには小型気象観測システム MaxiMet GMX551 (温度精度  $\pm 0.3$  °C, 相対湿度  $\pm 2\%$ , 風速  $\pm 0.1$  m/s, 照度  $\pm 5\%$ ) が搭載されており、センサー高さは路面上 2.72 m である。取得した温度、湿度、風速、照度から観測 WBGT を再計算する。対象日は終日ほぼ快晴で、一部地点では薄曇りの時間帯が見られたものの、強い日射条件下であった。

スマートポールがカバーしない地点の検証データを補完するため、同日 10 時から 17 時まで 6 地点で野外実測を行った。計測には TANITA TC-310 無線黒球式熱中症指数計

(温度精度  $\pm 1$  °C, 相対湿度  $\pm 3\%$ , WBGT  $\pm 2$  °C) を用い、センサーを路面上 1.2 m に固定して温度、湿度、黒球温度、WBGT を 1 分間隔で記録した。

スマートポール 4 基 (①③⑤⑬) と野外実測 6 地点 (①～⑥) の名称および WGS84 座標を表 1 に、両者の地図上での位置を図 1 に示す。

### 3.2 WBGT 算出方法

本研究では、スマートポール観測、野外実測、および CFD 出力の三つのデータ系列から WBGT を導出し、指標間の整合性を確保したうえで比較を行った。各系列に適用した算出式を以下に示す。

(1) スマートポールデータ スマートポールでは気温  $T_d$  (°C), 相対湿度  $RH$  (%), 全天空日射量  $SR$  (kW/m<sup>2</sup>), 風速  $WS$  (m/s) を計測している。これらから WBGT を推定するため、小野ら<sup>(26)</sup>が提案した多変量回帰式 (3) を用いた。

$$WBGT = 0.735 T_d + 0.0374 RH + 0.00292 T_d RH + 7.619 SR - 4.557 SR^2 - 0.0572 WS - 4.064 \quad (3)$$

(2) 野外実測データ 野外実測では  $T_d$  (°C), 相対湿度, 黒球温度  $T_g$  (°C) ( $\phi 33$  mm), および WBGT が 1 分間隔で直接得られる。TANITA TC-310 は JIS Z 8504 (ISO 7243) に準拠し、屋外日射条件の式(4)

$$WBGT = 0.7 T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_d \quad (4)$$

を内部演算で用いる (曇天時は  $0.7 T_w + 0.3 T_g$ )。ここで  $T_w$  は湿球温度である。その値は、センサーで測定した相対湿度と乾球温度より演算して求めているということだが、TANITA 社は具体的な演算式を公開していない。黒球温度については、TC-310 に搭載された補正係数により、 $\phi 33$  mm 黒球温度を標準の  $\phi 150$  mm 相当に換算している。

(3) シミュレーション出力 シミュレーションから得られる気温  $T_d$  (°C), 相対湿度  $RH$  (%), 平均輻射温度  $MRT$  (°C), および風速  $WS$  (m/s) を用いて WBGT を算出した。まず Stull<sup>(27)</sup>の経験式(5)により湿球温度を推定し、

$$T_w = T_d * \operatorname{atan}\left(0.151977 * (RH + 8.313659)^{\frac{1}{2}}\right) + \operatorname{atan}(T_d + RH) - \operatorname{atan}(RH - 1.676331) + 0.00391838 * RH^{\frac{3}{2}} * \operatorname{atan}(0.023101 * RH) - 4.686035 \quad (5)$$

次いで、黒球温度  $T_g$  の推定には、Bedford and Warner<sup>(28)</sup>が導出した黒球温度計の熱収支式(6)を用いた。

$$T_g = (MRT + 2.37\sqrt{WS} * T_d) / (1 + 2.37\sqrt{WS}) \quad (6)$$

最後に、屋外日射条件を想定し、式 (4)と同じ重み付けで

WBGT を求めている。

式(6)の MRT は、解析空間を構成する各計算格子(セル)の 6 面に入射する放射フラックス $q_i$ から、ステファン=ボルツマンの法則 $q_i = \sigma T_i^4$ に基づいて換算温度を求め、面積加重平均により算出した。式で表すと式(7)のとおりである。

$$MRT = \frac{1}{\sum_{j=1}^6 S_j} \sum_{i=1}^6 (q_i / \sigma)^{1/4} \quad (7)$$

ここで、 $S_j$ は各面の面積、 $\sigma$ はステファン=ボルツマン定数である。放射フラックスは直達日射および長波放射を対象としており、散乱日射、反射日射、大気放射の寄与は演算簡略化のため考慮していない。したがって、本解析で得られる MRT は、主として直達日射および周囲表面からの長波放射を反映したものである。

以上の手順により、三系列で一貫した WBGT 指標を導出した。

### 3.3 実測結果との比較による CFD モデル検証

モデル検証は、CFD シミュレーションによって得られた水平面  $z = 52$  m 断面の熱環境分布を、スマートポールおよび野外実測の WBGT 系列と照合するかたちで行った。ここで  $z$  は高さ方向の座標を表し、 $z = 0$  の位置はシミュレーションモデル作成時に PLATEAU 地形メッシュデータを配置した際の地盤面に対応する。したがって、 $z$  の値は絶対標高ではなく、相対的な高さを示す。断面高さを 52 m としたのは、⑤北通りと④青梅街道側の路面標高が  $z = 48$  m であるのに対し、①都民広場では  $z = 44$  m、②中央公園や③東京都庁第二本庁舎周辺では  $z = 50$  m と起伏があるため、地形最高点より 2 m 上空を選ぶことで街区全体の分布を一枚の等値線図として可視化できるからである。

(1)シミュレーション結果の可視化 図 6 にシミュレーション結果の等値線図を示す。表示時刻は、(すでに暑さが顕著となる)11 時、(暑さが最も厳しくなる)13 時、(暑さが徐々に和らぎ始める)15 時の 3 時刻に絞り、(a)直達日射量 (DNI) と (b)WBGT のほか、WBGT を構成する (c)乾球温度、(d)黒球温度、(e)湿球温度、(f)相対湿度をそれぞれ可視化した。DNI は日向・日陰分布を即座に判別できるため、遮蔽効果が WBGT にどの程度影響しているかを読み解く手掛かりとなる。また、各温度成分を個別に描出したのは、式 (4)に示す重み付け係数 0.7:0.2:0.1 の寄与度を空間的に確認し、どの成分が WBGT の高値領域を支配しているかを把握できるからである。

まず、(a)DNI 分布では 11 時から 13 時にかけて、都市空間における直射日光の照射範囲が拡大し、青梅街道や北通りなどの広い通りでは最大値  $770 \text{ W/m}^2$  に達するなど、高い日射量が観測された。一方、15 時には太陽高度の低下に伴い、建物陰の領域が広がり、直達日射量は大きく減少した。

特に東西方向の道路では相対的に高い日射量が残っているが、全体的には建物陰が支配的になる。

次に(b)WBGT 分布においては、13 時に最も高い値が観測され、 $35^\circ\text{C}$  近い WBGT が広場や沿道部を中心に分布している。特に建物に囲まれた空間や道路上では高温域が集中しており、日射の照射と周囲の蓄熱・通風条件が複合的に影響していることが示唆される。一方、11 時および 15 時では WBGT がやや低く、特に 15 時では日射の遮蔽が進むことで広範囲にわたり  $28\sim 30^\circ\text{C}$  程度の低値域が広がった。

これらの結果を(a)DNI 分布と比較すると、WBGT の高値域は直達日射量の分布と大まかに対応しつつも、完全には一致せず、建物配置による通風遮断や熱の蓄積・滞留といった都市特有の要因が WBGT に影響を与えていることが分かる。すなわち、直達日射が WBGT の主因である一方で、WBGT はより総合的な熱環境指標であり、局所的な熱ストレスの評価には DNI に加えて WBGT の分布を重視する必要がある。

次に、WBGT を構成する温度成分のひとつである(c)乾球温度の分布を確認する。日射ピークにあたる 13 時では、広域にわたって  $34\sim 37^\circ\text{C}$  の高温域が分布しており、特に舗装面やビルの壁面近傍で局所的に  $40^\circ\text{C}$  以上に達するホットスポットが形成されている。一方、11 時および 15 時では高温域のエリアが減少し、日射による気温上昇の時間依存性が明瞭に現れている。乾球温度は気象的背景値としての基準温度であるが、都市空間内では局所的な加熱・放熱の影響により顕著な空間的ばらつきがみられる。特に舗装や建物表面の蓄熱効果、風通しの悪い場所での熱の滞留が、高温域の形成に寄与していると考えられる。

黒球温度は、輻射・対流・日射の影響を複合的に受ける指標であり、屋外熱環境の体感温度評価において重要な役割を果たす。(d)に示すように、13 時では広域にわたり  $44\sim 50^\circ\text{C}$  の高温域が分布し、舗装面や建物南側の壁面周辺、特に日射の当たりやすい開放空間において顕著な高温が確認できる。11 時および 15 時においても、直射日光の当たる領域では  $40^\circ\text{C}$  前後の黒球温度が分布しており、時刻による変動と空間的偏在が明確に視認される。(a)DNI との比較では、高い黒球温度域が高 DNI 域とよく一致しており、両者には空間的相関が認められる。特に 15 時の分布においては、東西をつなぐ道路で、DNI と黒球温度がともに高い値を示していることから、日射が黒球温度上昇の主因であることが理解できる。一方で、(c)乾球温度は空間的に比較的均質であり、黒球温度のような急激な局所高温域は見られない。また、(b)WBGT と比較すると、WBGT の高値分布は黒球温度の分布と類似しており、WBGT の局所高値は、乾球温度よりも黒球温度の影響を強く受けていると考えられる。

(e)湿球温度は、気温と湿度の双方に影響される熱環境指標であり、人体の放熱効率に直結する重要な指標である。

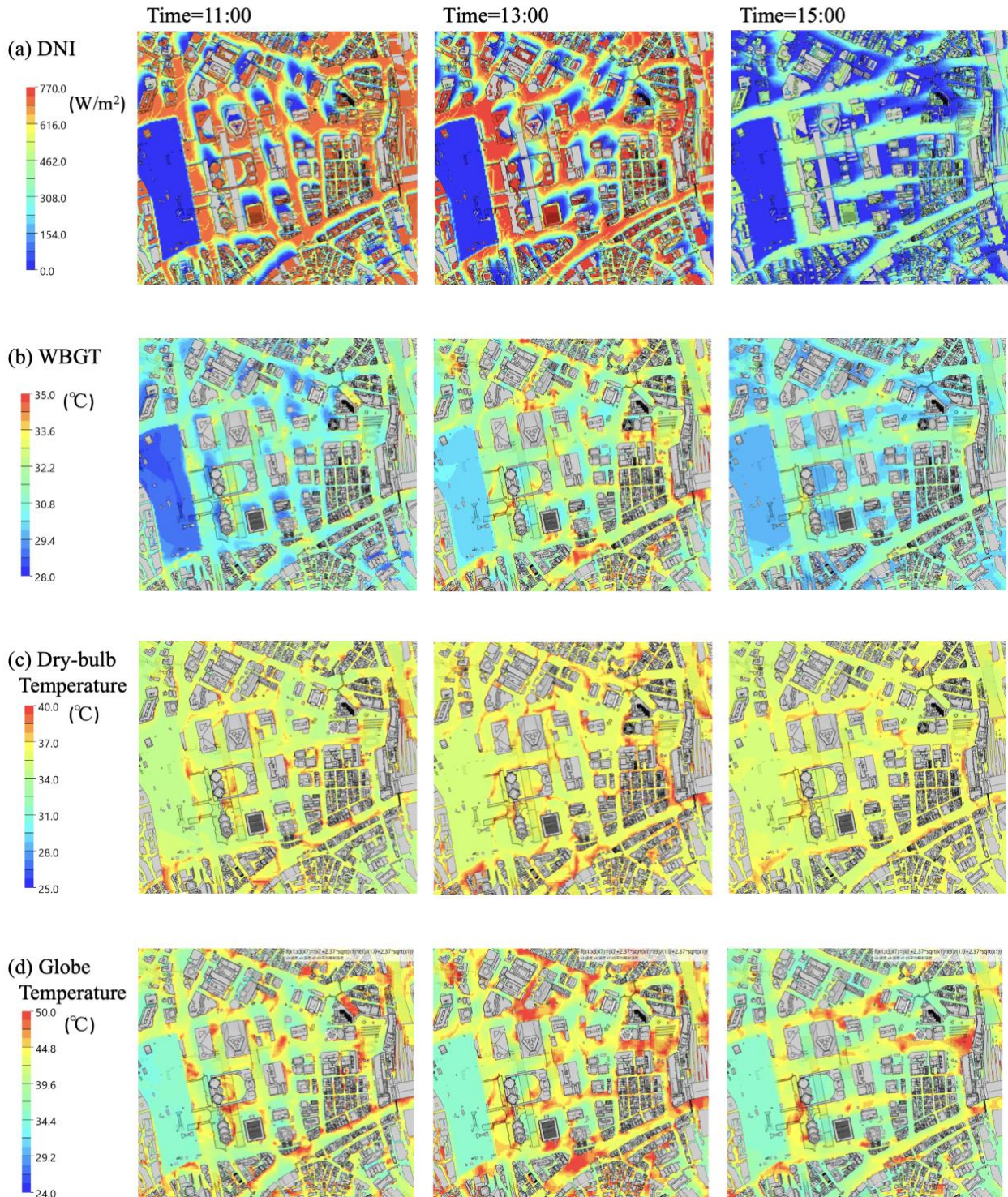


図6 (図は次ページに続く)

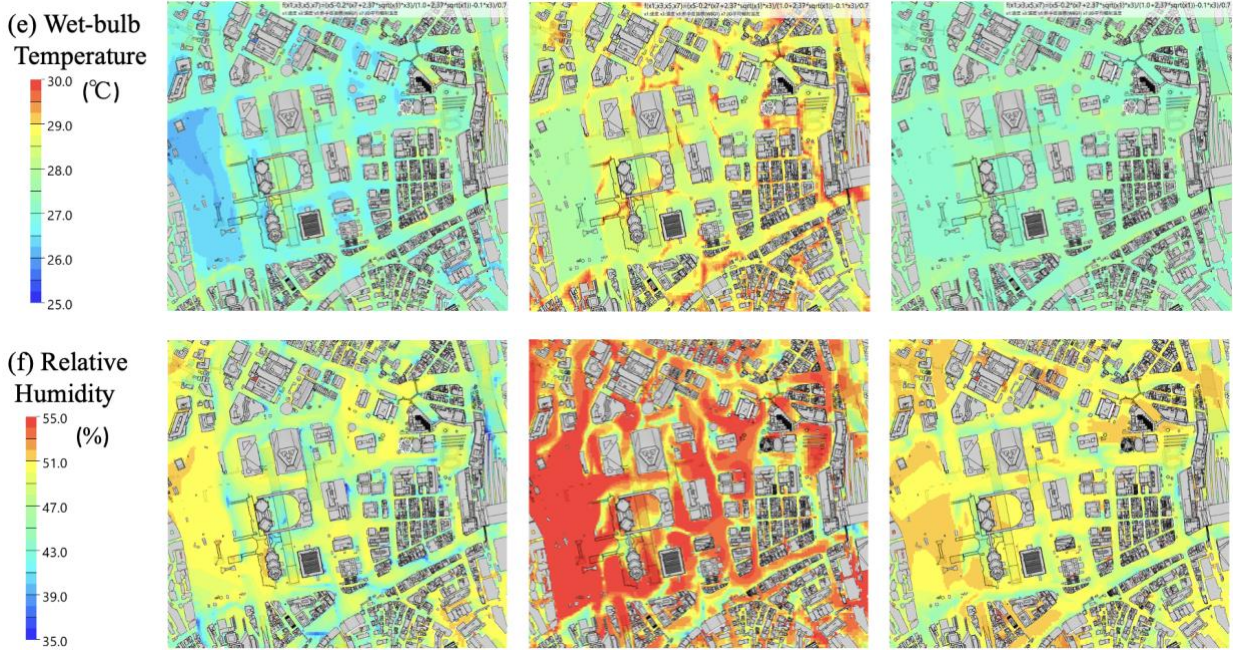


図6 CFD解析による熱環境指標の空間分布。表示範囲は図1の点線内。11時（左列）、13時（中央列）、15時（右列）での結果を示す。各行は順に（a）直達日射量（DNI）、（b）暑さ指数（WBGT）、（c）乾球温度、（d）黒球温度、（e）湿球温度、（f）相対湿度の分布を示す。

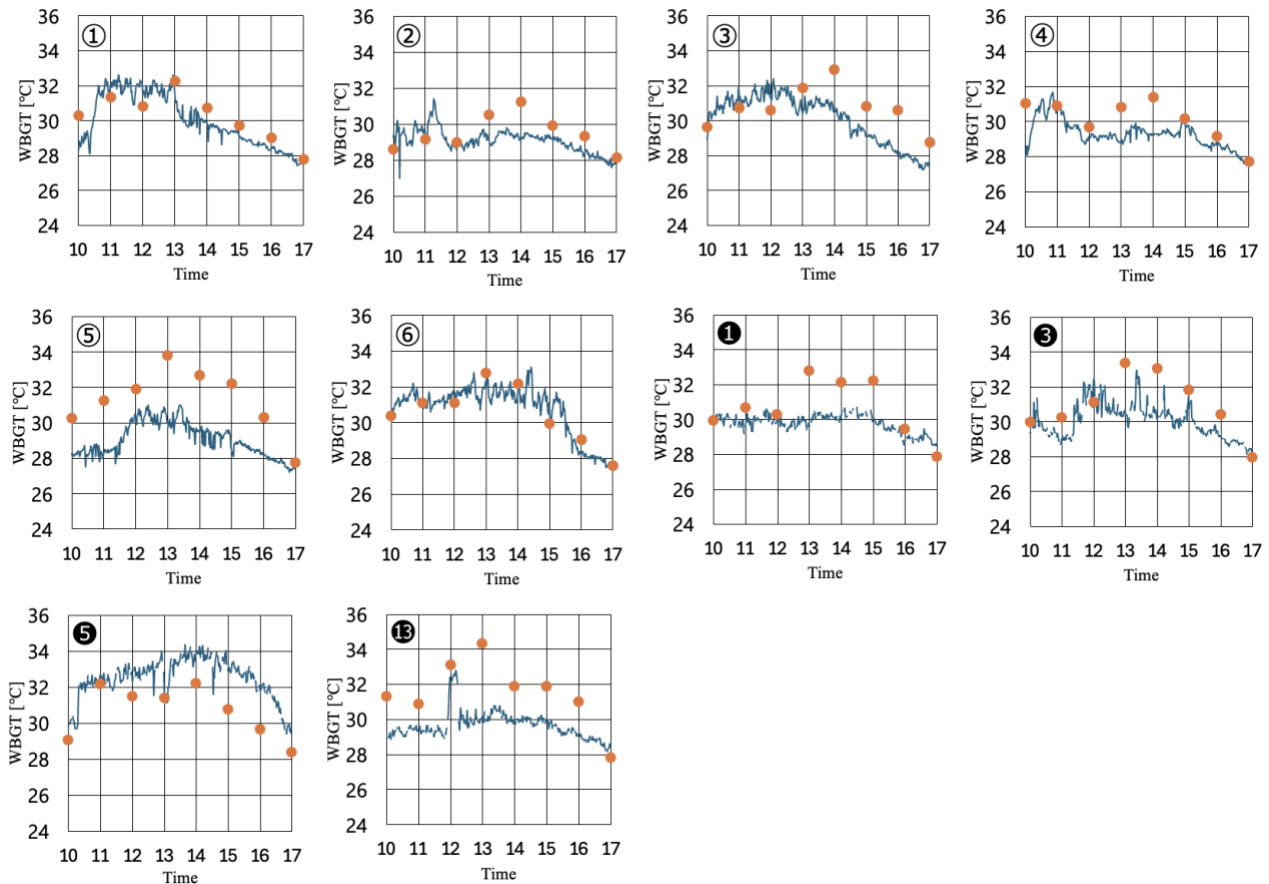


図7 CFD解析結果と実測値に基づくWBGTの比較（各測定点における時系列変化）。図1および表1に示す測定点（野外測定点またはスマートポール設置点）に対応する位置におけるWBGTの時間変化を示す。青線は1分間隔の実測値、橙色の点はCFD解析により10時から17時までの各時刻で得られた結果である。

図に示す 13 時の分布では、都市域の多くで 28~30℃ の高い湿球温度が観測され、とくに舗装面や閉鎖的空間において顕著な高値が現れている。一方、11 時および 15 時では、分布の中心値が 26~28℃ に留まっており、全体的にやや低い傾向にある。このような 13 時の高値傾向は、乾球温度の上昇に加え、外気条件として与えた相対湿度が他時刻と比べて高く設定されていたことに起因すると考えられる。実際、(f)相対湿度の分布を見ると、通常、気温の上昇に伴い相対湿度は低下する傾向があるが、13 時においては例外的に広範囲で 50%以上の相対湿度が維持されている。これは、外気条件としての湿度設定が他の時刻より高かったためであり、日射や蓄熱により気温が上昇していても、大気中の水蒸気量が相対的に多く保持されていたことを示している。これにより、飽和水蒸気に近い空気状態が模擬され、湿球温度も相対的に高くなった。その影響が、13 時の WBGT 分布におけるピーク形成に寄与していると考えられる。

以上の結果から、都市空間における熱環境の評価には、単一の気象指標ではなく、放射・気温・湿度を組み合わせた複合的な解析が不可欠であることが示された。また、CFD 解析を用いることで、実測では困難な空間的・時間的な熱環境の不均一性を高解像度で把握でき、暑熱リスクの局所評価や都市設計への応用可能性が高い手法であることが確認できた。

(2) シミュレーションと実測の比較 シミュレーション結果から、野外の測定点およびスマートポール設置点における値を抽出し、実測値と比較することで、CFD の精度評価を行った。

#### a. WBGT の時系列再現性と誤差傾向

まず、CFD により算出された WBGT が日内変動をどの程度再現できているかを評価する。図 7 には、各測定点における 10 時から 17 時までの WBGT の時系列変化を示しており、青線が 1 分間隔の実測値、オレンジ点が各正時におけるシミュレーション結果である。これにより、ピーク時刻や全体的な変動傾向、過大・過小の偏りを視覚的に把握することができる。野外測定点 (①~⑥) の結果を見ると、①および⑥においては、シミュレーション結果が実測値とよく一致し、日内変化の傾向および値の水準においても高い再現性が確認された。一方で、②~④では 13 時および 14 時に顕著な過大評価が見られ、特に③では 14 時以降の全時刻で実測値を継続的に上回っており、午後の WBGT 上昇傾向を過剰に評価していることが示される。⑤については、変動パターンは実測と類似しているが、17 時を除くすべての時刻で CFD が実測値を上回っており、水準の一貫した過大評価が認められる。スマートポール設置点 (①, ③, ⑤, ⑬) との比較では、①および③で 13 時~15 時にかけての過大評価が顕著であり、⑤では全体的に実測値を下回る傾向を示す。⑬では、終日を通じて変動パターンに大きな差は見られないものの、CFD は実測値よりも高い傾向を示しており、通風条件や周辺環境の違いが影響している可能性

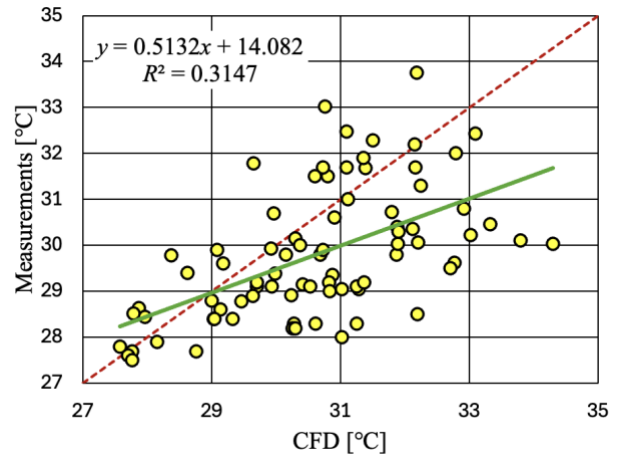


図 8 WBGT の CFD 値と実測値の散布図。横軸は CFD による WBGT、縦軸は対応する実測値を示す。黄色の点は各正時・各測定点におけるペアデータ、緑の実線は回帰直線、赤の破線は完全一致線を示す。

がある。これらの結果から、CFD モデルは場所や時間帯によって精度にばらつきがあり、特に日射ピーク時の過大評価傾向が複数の地点で共通して確認される。このことは、WBGT 構成要素のいずれか、特に黒球温度や湿球温度のモデルに起因している可能性がある。

図 8 は、CFD により算出された WBGT と実測値との対応関係を示した散布図である。各点は測定点および時刻ごとのデータペアを表しており、緑の実線は最小二乗法による回帰直線、赤の破線は完全一致 ( $y=x$ ) を示す。図中の回帰直線は傾きが 0.51 と 1 を大きく下回っており、決定係数 ( $R^2$ ) も 0.31 と低い値を示している。これは、CFD によって算出された WBGT 値が実測値と比較して広い変動幅を持つ一方、実測値は 30℃ 前後に集中して分布していることに起因する (実際に、CFD 結果は平均値 30.25℃、分散 13.79 であり、実測値は平均 29.80℃、分散 1.99 と、実測値の方が値のばらつきが小さい)。特に CFD 値が高温度にある場合でも、対応する実測値はそれほど高くなり、CFD の過大予測傾向が読み取れる。一方、実測値は急激な上昇や極端な高値を示すことが少ない。そのため、CFD 値が広範囲な分布を示すのに対し、実測値はより限定的な範囲にとどまっており、両者の間に明確な直線関係を見出すことが難しくなっている。

一方で、CFD 予測値と実測値の乖離について、平均絶対誤差 (MAE) = 1.28℃、平均平方二乗誤差 (RMSE) = 1.61℃ といった絶対誤差の観点からは、個々の予測値と実測値の差は比較的小さく、全体として良好な精度を示している。これらの誤差水準は、WBGT という指標において実用上許容可能な範囲であると考えられ、CFD モデルによる WBGT 予測は、少なくとも平均的な水準では一定の再現性を有していると評価できる。

	①	②	③	④	⑤	⑥	①	③	⑤	⑬
10	2.0	-0.8	0.7	3.0	2.1	0.4	0.0	0.6	-0.8	2.2
11	-0.5	-0.4	-1.0	0.3	3.0	0.1	0.9	1.3	0.0	1.5
12	-0.7	0.2	-0.9	0.5	1.6	-0.6	0.2	-1.4	-0.8	0.7
13	0.9	1.4	1.5	1.8	3.7	0.8	3.2	2.9	-0.3	4.3
14	0.8	2.2	2.1	2.2	3.2	0.5	1.8	2.8	-1.6	2.1
15	0.6	0.8	1.6	0.3	3.7	-0.7	2.1	1.1	-2.3	1.9
16	0.6	0.9	2.3	0.5	2.1	0.6	0.7	1.3	-2.1	2.0
17	0.1	0.3	1.1	0.1	0.3	-0.2	-0.8	-0.5	-1.4	-0.7

図9 各測定点における WBGT の時刻別誤差分布 (10 時～17 時). 各セルは, 表 1 に示す測定点に対応する位置において, 指定時刻における WBGT の誤差 (CFD 値-実測値) を示す. 数値は[°C]で表され, 誤差の符号と大きさに応じて色分けしている. 赤系は過大評価 (正の誤差), 青系は過小評価 (負の誤差) を示す.

図9は, 各測定地点における WBGT の CFD 値と実測値との差 (CFD 値-実測値) を, 10 時から 17 時の正時ごとに示したものである. セルの色は誤差の符号と大きさに応じて着色されており, 空間的および時間的な誤差傾向の可視化を目的としている.

時刻別に見ると, 13 時から 15 時にかけて正の誤差が顕著に表れ, 特に⑤①⑬の各地点では+3°C を超える過大評価が継続的に観察される. 一方, 午前中および 17 時以降には負の誤差が卓越しており, 日中のピーク時間帯を中心に誤差が系統的に変動している様子が確認できる. このような時間帯ごとの誤差傾向は, 直達日射や風通しといった外部環境条件が時間的に変化する中で, CFD モデルがそれらの変化をどの程度正確に再現できているかを示唆するものである.

また空間的には, ⑤⑤⑬地点において終日を通じて比較的大きな誤差が見られ, とくに⑬地点では 13 時に最大 +4.3°C の誤差が生じている. これらの地点における系統的な過大評価は, モデルにおける植栽・建築物・舗装状態などの地物表現が実際の観測環境と乖離していることに起因している可能性がある.

以上の分析結果から, CFD による WBGT 予測の精度向上に向けては, 特定の時間帯 (特に午後的高温時間帯) における放射・対流条件の再現精度向上と, 空間的に再現性の低い地点のモデル整備 (特に地表面特性の高精度化) が重要な課題であると考えられる.

ここまでの WBGT に関してシミュレーション結果と実測値の比較を通じて, 時間的・空間的な再現性と誤差傾向を示した. 次に, これらの傾向を定量的に整理するため, 時刻ごとの平均誤差および測定点ごとの平均誤差を算出し, 図 10 に示す. 上段のグラフ(a)は, 各時刻における全測定点の平均誤差を示している. これによると, 13 時および 14 時において顕著な過大評価 (それぞれ +2.02°C, +1.60°C) が見られ, 日射ピーク時における WBGT の過大推定傾向が数値的に裏付けられた. これは, 図 7 および図 9 で確認された通り, 午後の時間帯において複数の測定点で誤差が集

中していたことと一致する. 下段のグラフ(b)は, 各測定点における時刻平均誤差を示すものである. ⑤においては +2.45°C と比較的大きな正の誤差を示し, CFD モデルが WBGT を過大に評価していることがわかる. 一方, ⑤では -1.17°C の負の誤差となっており, 現地特有の環境条件が CFD で十分に再現されていない可能性がある. 全体として, 地点による誤差の偏りも明確であり, WBGT の精度は測定環境に依存することが予想できる.

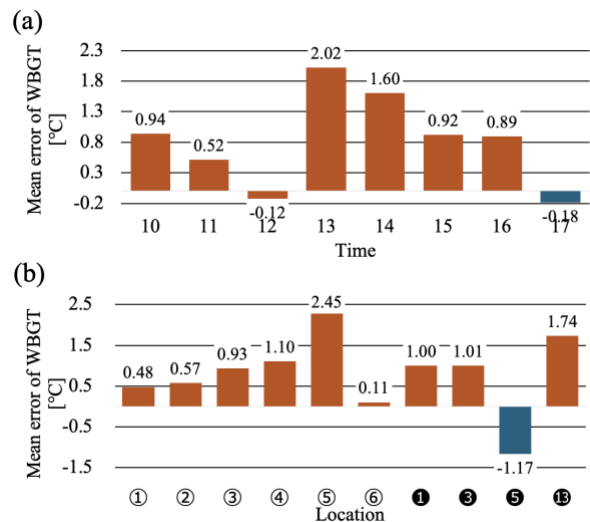


図 10 WBGT における平均誤差の統計分布. (a) 各時刻における全測定点平均の WBGT 誤差 (CFD 値-実測値). (b) 各測定点における全時刻平均の WBGT 誤差. 測定点の記号は表 1 に対応している.

#### b. WBGT 構成要素に基づく誤差要因の分析

WBGT の CFD 予測値と実測値の間には, 地点ごとの数値的再現性は一定程度確保されているが, 相関係数や時間帯・地点別の評価において再現性にばらつきが見られた. 特に午後的高温時間帯における過大予測や, 特定地点における系統的な誤差が確認されている. こうした傾向の要因を明らかにするため, 本節では WBGT の構成要素である乾球温度, 湿球温度, 黒球温度の CFD 再現性を個別に評価すること, 誤差の根本要因を明確化し, モデル改良に向けた知見を得ることを目的とする.

図 11 は, 各測定点における乾球温度・湿球温度・黒球温度の時系列変化を示している. 全体として, 乾球温度および湿球温度は比較的滑らかな変動を示しており, 日中を通じて緩やかに上昇し, その後に減少する一般的な日変化傾向が観察される. 一方, 黒球温度は場所によって大きな変動が見られ, 直射日射の影響を強く受ける時間帯に急激に上昇する傾向がある.

特に, ①③⑥といった日射曝露の大きい開放的な場所では, 黒球温度が正午前後に 40°C を大きく超えてピークを示しており, 放射負荷が高いことが確認できる. 一方で, ②の新宿中央公園のような終日木陰の場所, また①⑬の

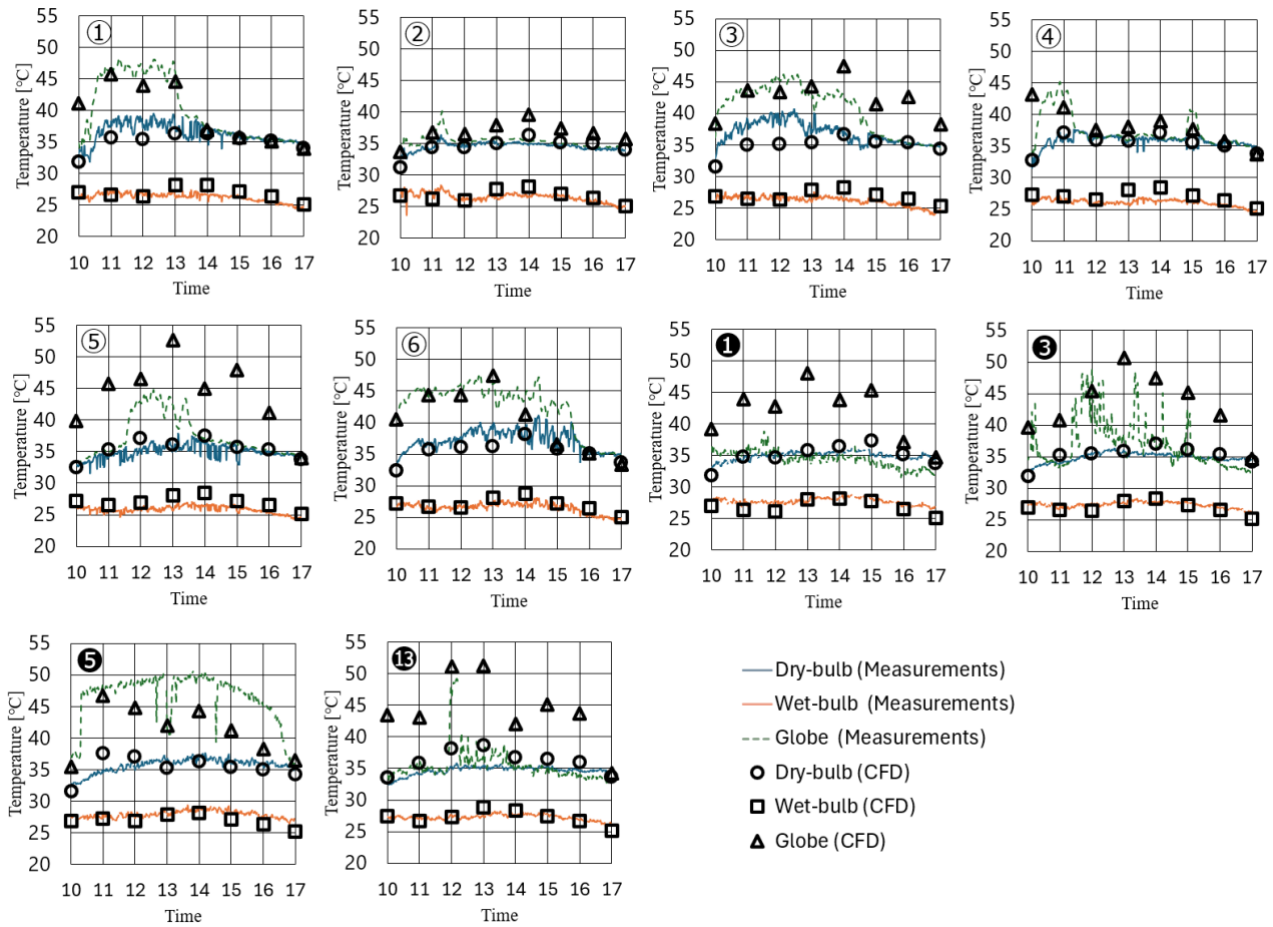


図 11 実測値による温度成分の時系列変化と CFD 結果との比較. 各グラフは、表 1 に示す野外測定点またはスマートポール設置点に対応する位置での、乾球温度（青実線）、湿球温度（橙実線）、黒球温度（緑点線）の実測値と、対応する CFD シミュレーション結果（マーカー）を示す. マーカーはそれぞれ、乾球温度（○）、湿球温度（□）、黒球温度（△）を表す.

ように建物の影に近いスマートポール設置地点では、黒球温度の振幅が小さく、環境遮蔽の影響が顕著であることが分かる. また、湿球温度は全測定点において 30 °C 以下で安定しており、大きな局所変動は見られなかった. これは、周囲の蒸発散環境に大きな違いがなかったこと、また相対湿度の変動が比較的緩やかであったことに起因する可能性がある. 乾球温度と黒球温度の差が大きい地点では、放射による熱負荷が WBGT の上昇に強く寄与していると考えられ、都市空間における日射遮蔽の有無が熱ストレス評価において重要な因子であることは明らかである.

同図には、各温度成分について CFD 結果（マーカー）も重ねて示しており、実測値（線）との比較が可能である. CFD 結果と実測値を比較すると、乾球温度と湿球温度はおおむね現実の傾向を再現しており、日変化の緩やかな上昇・下降パターンも概ね一致している. 一方、黒球温度ではいくつかの測定点において CFD が実測と乖離する傾向が見られ、日射遮蔽条件の違いや放射モデルの単純化が影響している可能性がある. たとえば、⑤⑪⑬では CFD 値が全体的に高く、過剰な直達日射が与えられていることが考え

られる.

この点をより定量的に検証するために、各温度成分の誤差と WBGT 誤差の関係を散布図で整理し、寄与の度合いを回帰分析によって評価する. 図 12 に、各成分（乾球温度、湿球温度、黒球温度）における CFD 誤差と WBGT の CFD 誤差の散布図を示す. CFD 誤差の定義は、(CFD 値-実測値) である. 図中には、各成分の誤差と WBGT 誤差の関係を示す回帰直線および決定係数 ( $R^2$ ) を併記している. これにより、各温度成分の再現誤差が WBGT 再現誤差に与える影響の大きさと特性を定量的に評価した.

乾球温度誤差に対する WBGT 誤差の決定係数は  $R^2 = 0.32$  (図 12(a))、湿球温度では  $R^2 = 0.43$  (図 12(b))、黒球温度では  $R^2 = 0.76$  (図 12(c)) となり、黒球温度誤差が WBGT 誤差のばらつきを最もよく説明する結果となった. これは、CFD により算出された黒球温度の再現性が、WBGT の空間的・時間的な変動における誤差構造に対して支配的な寄与を有していることを示唆する. 一方、湿球温度誤差に対する回帰係数は 0.91 と最も高く、WBGT 誤差との間に強い線形関係が認められた. このことは、湿球温度の小さな誤

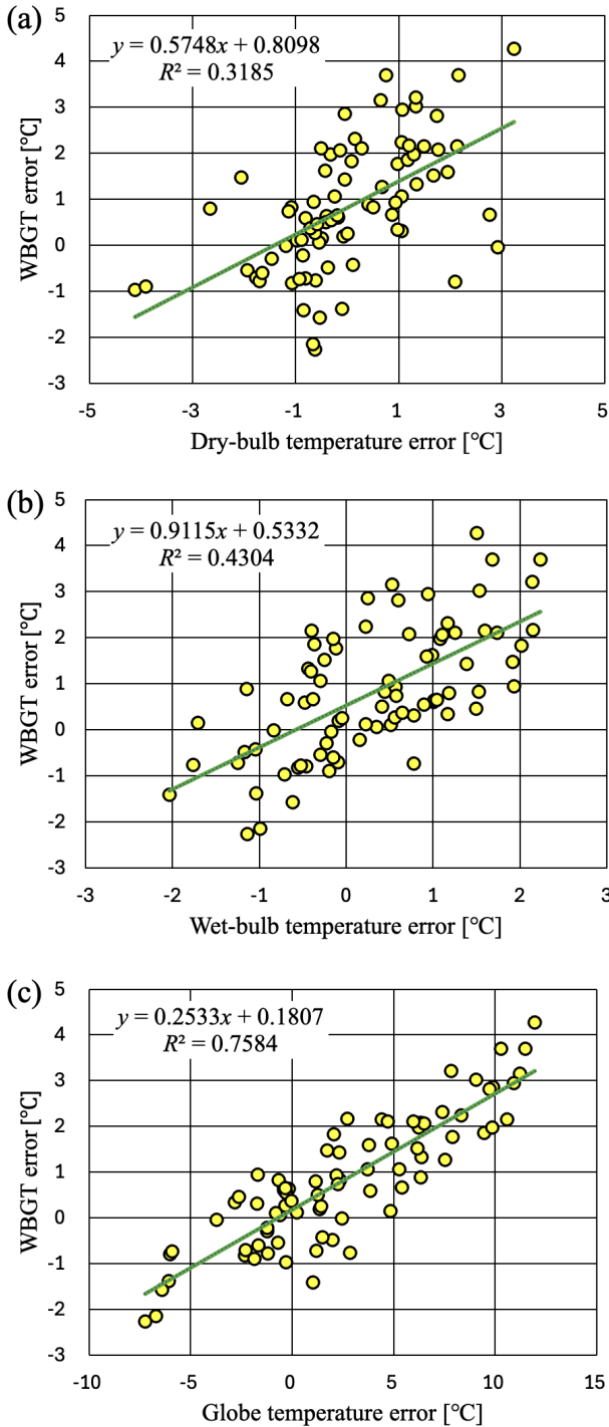


図 12 各温度成分の誤差と WBGT の誤差の関係. (a)乾球温度, (b)湿球温度, (c)黒球温度について, WBGT の誤差との関係を示した散布図である. 各点は 1 測定点・1 時刻に対応し, 横軸は温度成分の誤差 (CFD 値-実測値), 縦軸は WBGT の誤差を示す. 緑の実線は回帰直線である.

差が WBGT の値に敏感に影響することを意味しており, WBGT の再現性に対して重要な感度因子であることを示す. 以上を踏まえると, WBGT の再現精度向上には, ばらつき全体を抑える観点からは黒球温度の精度向上が最優先であり, 感度の高い湿球温度の誤差低減も並行して重要な

要素となる.

図 12 においては, WBGT 誤差と各温度成分 (乾球・湿球・黒球温度) の誤差との相関関係を散布図として示し, 回帰係数および決定係数に基づいて各成分の影響度を定量的に評価した. これに対し図 13 では, 各温度成分 (乾球温度・湿球温度・黒球温度) における WBGT 誤差への寄与量の箱ひげ図を示す. 寄与量は各成分の CFD 値と実測値の差分から得られる誤差に WBGT 構成式(3)の係数を乗じて算出した. 箱は四分位範囲 (IQR) を, 上下の線 (ひげ) は最小値および最大値を示す. ×印は平均値, 箱中央の線は中央値を示す. 各温度成分の寄与量の統計指標を表 8 にまとめる.

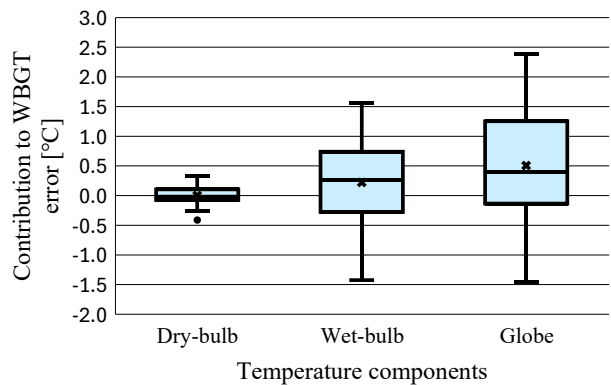


図 13 WBGT 誤差に対する各温度成分の寄与量の分布

表 8 WBGT 誤差に対する各温度成分の寄与量の統計指標. WBGT 誤差への寄与量の最大値・最小値・中央値・平均値・四分位数 (Q1, Q3) および四分位範囲 (IQR)を示す. これらの統計量は図 13 の補足情報である.

	Dry-bulb	Wet-bulb	Globe
Maximum	0.325	1.564	2.391
Q3	0.106	0.74	1.253
Median	-0.016	0.266	0.404
Q1	-0.073	-0.277	-0.135
Minimum	-0.266	-1.425	-1.449
Mean	0.002	0.222	0.507
IQR	0.179	1.017	1.388

この表の値から, 黒球温度は中央値(0.404)および平均値(0.507)が他の成分より高く, WBGT 誤差への影響が大きいことが分かる. その結果, CFD における放射環境の再現が WBGT 誤差の主因であることが再度裏付けられた. 湿球温度の寄与も平均値 0.222 と一定の影響を持ち, 気温・湿度・風速といった外気境界条件の不確実性が再現誤差に波及していることが読み取れる. 一方で, 乾球温度の寄与は平均値 0.002 と非常に小さく, WBGT 誤差に与える影響は限定的であった.

このように, 図 12 では実測誤差に基づく相関分析, 図 13 では構成式に基づく理論的寄与評価という異なるアプローチを用いたが, 両者の結果は整合的であり, 黒球温度が

WBGT 誤差の主要因であることが示された。また、湿球温度は相関・寄与の両面で一定の重要性を示しており、境界条件の設定や気象場の精度がモデル全体の性能に影響することが明らかとなった。

以上の結果より、WBGT 予測精度の向上に向けては、放射伝達モデルの精緻化による黒球温度の再現性向上と、外気条件（特に相対湿度および風速）の高解像度かつ高精度な入力在今后の優先課題であると考えられる。これらの課題については、モデル構築上の仮定や設定に起因する可能性があり、次節にてそれぞれの要因を整理し、改善に向けた考察を行う。

### 3.4 再現誤差の要因とその改善に向けた考察

本節では、実測データとの比較により明らかとなった WBGT 予測誤差の要因について考察し、今後の精度向上に向けた改善の方向性を述べる。誤差の主要因としては、日射遮蔽の再現性、地表近傍の風速の再現性、湿球温度の外気境界条件が挙げられる。

(1) 日射遮蔽の再現性 黒球温度は気温・風速・放射環境の複合的な影響を受ける指標であり、その再現には日射遮蔽の表現が重要である。CFD シミュレーションでは黒球温度を式(6)により推定しており、特に都市空間における日射の遮蔽や建物・地面の放射特性を精緻に取り扱う必要がある。

本研究では、モデルの簡略化のため街路樹や植栽などの遮蔽物を大きな公園を除き明示的に取り込んでおらず、さらに地物ごとの放射率・反射率も一律に設定している。また、大気放射量についても全天を通じて一定値を与えている。これにより、特に日中の直達日射が強い時間帯において黒球温度が過大に推定される傾向が生じ、WBGT 再現における大きな誤差要因となっている可能性がある。今後は、詳細な放射特性の反映や遮蔽条件（街路樹・植栽を含む）の導入が求められる。

さらに、本研究で用いた MRT 算出では、CFD ソルバーの仕様に基づき直達日射および長波放射を対象としており、散乱日射や大気放射の寄与は演算簡略化のため考慮していない。これにより、MRT が相対的に過小評価され、黒球温度が低く見積もられる可能性がある。ただし、本研究の実測との比較結果では、CFD の黒球温度はむしろ過大傾向を示しており、これらの放射成分の省略が主要な誤差要因であるとは言い難い。今後は、放射成分をより厳密に扱い、日射・放射条件の再現精度向上を図ることが望まれる。

(2) 地表近傍の風速の再現性 黒球温度の再現には風速の影響も大きく、地表面近傍における風速分布の精度が重要となる。CFD では粗度区分とメッシュ分解能に基づいて風速場を算出しているが、現状では粗度設定の単純化や格子サイズの制約により、特に建物周辺や地表面近傍の流れ場が十分に表現されていない可能性がある。

さらに、前節で述べたように街路樹や植栽などの流れ抵抗となりうる遮蔽物をモデル化していない点も、局所的な

風速分布の不正確さに寄与していることも考えられる。都市構造物の細かな配置や複雑な街区形状が流れに与える影響を精緻に再現するには、より高解像度なメッシュおよび LES（大規模渦乱流モデル）などの詳細な乱流モデルによる解析が必要である。ただし、本研究のような広域解析では計算コストとのバランスも考慮する必要があり、今後は解析目的に応じたモデルの使い分けが求められる。

(3) 温湿度に関する外気境界条件 湿球温度は、特に相対湿度の影響を強く受けるため、外気境界条件として与える温湿度情報の精度が全体の予測精度に大きく影響する。本研究では、気象観測データを境界条件として与えているが、その空間的分布は考慮できず、局所的な湿度条件の再現には限界がある。

湿球温度の推定には式(5)を用いており、その精度は気温や相対湿度の初期値に依存する。今後の精度向上には、気象データの空間分布や時間変動の精緻化に加え、観測データとのリアルタイム連携やリモートセンシングの活用が有効と考えられる。特にリモートセンシングを活用することで、広域かつ高密度な地表面温度や植生情報などを取得でき、これを初期・境界条件の空間補間やモデル妥当性の検証に反映させることで、WBGT 予測の局所的精度向上が期待できる。

(4) 定常解析の限界 本解析は、代表時刻における熱環境分布を評価することを目的として定常解析を採用した。したがって、地表面および建物表面の温度は時間的に一定とし、材料の熱容量や日射・放射条件の変化に伴う蓄熱・放熱過程は考慮していない。実際の都市環境では、表面温度は日射の入射角や気温変動、放射収支の変化に応じて日中に数°C 規模で変化する。このため、放射環境を強く反映する黒球温度や MRT の再現には、こうした時間変動の影響を無視できない。特に午後の高温時間帯では、前時刻までの蓄熱効果により地表や外壁温度が上昇し、それが周囲の放射温度を高める方向に作用する可能性がある。定常解析ではこの動的過程を再現できないため、黒球温度および WBGT の過大推定につながったことが考えられる。今後は、日射・放射条件の時間変化を反映できる非定常解析を導入し、蓄熱効果を含む熱環境の再現性を定量的に評価することが望まれる。

## 4. 結論と今後の展望

### 4.1 研究成果のまとめ

本研究では、西新宿エリアを対象として、都市空間における暑熱環境の高解像度評価を目的とした CFD モデルを構築し、日中の気象場および WBGT の空間分布の再現を試みた。

WBGT の推定誤差には、黒球温度および湿球温度の再現に関わる要因が影響している可能性があり、特に観測条件によって各成分の偏りが WBGT に異なる寄与をもたらすことが示唆された。

さらに、放射環境の簡略化、相対湿度や風速の境界条件設定、粗度区分の適用方法など、モデル構築上の仮定が精度に及ぼす影響を整理し、今後の改善に向けた課題を明確化した。これらの知見は、都市スケールでの WBGT 評価における CFD モデル活用の有効性と、現状のモデル構築および入力条件に起因する精度的な制約を示すものである。

#### 4.2 応用展開の方向性

本研究で確立した WBGT 再現手法は、定点的な熱環境評価にとどまらず、歩行者の移動情報と連携させることで、移動経路上の熱ストレス曝露評価へと展開できる。たとえば、人流シミュレーションや GPS・カメラ観測により得られる動線データと CFD 出力を組み合わせることで、個人が経路上で受ける WBGT の積算量やピーク値を把握することが可能となる。このようなアプローチに関連して、根井らは、歩行者の移動経路と滞在時間を考慮した「平均ばく露 WBGT」を指標として提案しており、空間的な WBGT 分布に加え、動的なばく露評価の必要性和有効性を示している<sup>(29)</sup>。本研究においても、この指標を応用することで、都市空間内の実態に即した熱リスク評価が可能となると考えられる。

また、近年整備が進む PLATEAU 等の 3D 都市モデルと組み合わせることで、他地域・他時期への迅速な適用も可能である。気象データの変更により、季節や気候条件の異なるシナリオでの WBGT 評価が実現でき、都市計画やイベント安全管理など多様な場面での活用が想定される。

#### 4.3 社会実装に向けた展望

今後の展開としては、黒球温度の再現精度向上のための放射モデルの改良、湿球温度推定に関わる外気境界条件の高精度化、および風速分布の空間的解像度向上が挙げられる。さらに、構成要素ごとの感度分析や、蒸発・蒸散の簡易モデルの導入も有効であると考えられる。

技術的な発展としては、CFD を代替・補完する AI ベースのサロゲートモデルによる高速化や、リアルタイム観測データと連携した「暑熱環境デジタルツイン」の構築が挙げられる。実際、最近では屋外作業者の安全管理や都市インフラ設計支援など、熱ストレス評価の実装例も報告されており<sup>(30)</sup>、本研究成果の実装に向けた展開可能性は高い。今後は、これらの応用に向けたツール開発や制度設計との連携を視野に、都市の暑熱レジリエンス向上に資する基盤技術として本手法の社会実装を進めていく予定である。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、多大なるご協力を賜りました皆様に深く感謝申し上げます。株式会社アドバンスドナレッジ研究所の柑谷大佑様には、シミュレーションモデルの構築において多大なご助力をいただきました。スマートポールによる測定データは、西新宿スマートシティ協議会を通じて、東京電力パワーグリッド株式会社様、東日本電信電

話株式会社様、および株式会社 JTOWER 様よりご提供いただきました。野外測定の実施にあたっては、武蔵野大学の学生の皆様に監視業務へのご協力をいただき、安全かつ円滑に観測を行うことができました。測定機器の設置に際しては、東京都デジタルサービス局ならびに新宿区みどり公園課の皆様よりご理解とご支援を賜りました。なお、道路上での測定に関しては、新宿警察署より道路使用許可を取得しております。

#### 参考文献

- (1) 総務省消防庁, 令和 6 年 7 月の熱中症による救急搬送状況 (確定値), 2024 年 8 月 20 日, [https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/items/r6/heatstroke\\_geppou\\_202407.pdf](https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/items/r6/heatstroke_geppou_202407.pdf), (参照日: 2025 年 5 月 30 日).
- (2) 総務省消防庁, 熱中症による救急搬送状況 (速報値) 令和 6 年 7 月 22 日~7 月 28 日, 2024 年 7 月 30 日, [https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/items/r6/heatstroke\\_sokuhouti\\_20240722.pdf](https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/items/r6/heatstroke_sokuhouti_20240722.pdf), (参照日: 2025 年 5 月 30 日).
- (3) 環境省, 「熱中症特別警戒アラート」等の運用を開始します, 2024 年 4 月 16 日, [https://www.env.go.jp/press/press\\_03083.html](https://www.env.go.jp/press/press_03083.html), (参照日: 2025 年 5 月 30 日).
- (4) 環境省熱中症予防情報サイト, 熱中症特別警戒情報とは, 2025 年 5 月 29 日, [https://www.wbgt.env.go.jp/about\\_special\\_alert.php](https://www.wbgt.env.go.jp/about_special_alert.php), (参照日: 2025 年 5 月 30 日).
- (5) 常松展充・瀬戸芳一, 都市再開発による公開空地の緑地創出前後の暑熱環境変化に関する調査研究, 東京都環境科学研究所年報, (2022), pp.52-59.
- (6) 山崎潤也・増淵正博・飯塚悟・吉田崇紘・似内遼一・真鍋陸太郎・村山顕人, Project PLATEAU の 3D 都市モデルを利用した都心市街地の温熱環境シミュレーション -地区スケールの暑熱適応まちづくりに向けて-, 環境情報科学論文集, 36 (2022), pp.238-243.
- (7) 三坂育正・高橋希, 暑熱環境に適応したまちづくりに向けた歩行空間の温熱環境に関する研究 東京都千代田区の観光ルートにおける歩行空間の熱中症リスクの実測調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東京), (2024 年 8 月), pp. 1875-1878.
- (8) 国土地理院, 地理院地図 Vector, <https://maps.gsi.go.jp/vector/>, (参照日: 2025 年 10 月 23 日).
- (9) 東京都都市整備局, 『ヒートアイランド対策』緑化推進エリア 参考図 (新宿エリア), 2016, [https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/seisaku/new\\_ctiy/katsuyo\\_hoshin/pdf/katuyou\\_housin\\_sz01.pdf](https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/seisaku/new_ctiy/katsuyo_hoshin/pdf/katuyou_housin_sz01.pdf), (参照日: 2025 年 5 月 30 日).
- (10) 東京都デジタルサービス局, スマートポールの設置, TOKYO Data Highway, 更新日 2025 年 6 月 26 日, <https://www.digitalservice.metro.tokyo.lg.jp/business/tokyo-data-highway/smart-pole>, (参照日: 2025 年 7 月 10 日).

- (11) 東京都デジタルサービス局, 西新宿スマートポールの熱中症アラート機能の取組をご紹介します, *Love Walker*, 2024年4月10日, <https://lovewalker.jp/elem/000/004/193/4193203/>, (参照日: 2025年5月30日).
- (12) 新宿区都市整備部都市計画課, 「II 基本計画・都市マスタープラン」, 2006, <https://www.city.shinjuku.lg.jp/content/000053293.pdf>, (参照日: 2025年5月30日).
- (13) 新宿区環境清掃部みどり公園課, 新宿区みどりの基本計画(改定)概要版, 2009, [https://www.city.shinjuku.lg.jp/seikatsu/file14\\_04\\_00001.html](https://www.city.shinjuku.lg.jp/seikatsu/file14_04_00001.html), (参照日: 2025年5月30日).
- (14) 橋本喜正・峰岸順一, 遮熱性舗装及び保水性舗装の路面温度追跡調査結果, 平30都土木技術支援・人材育成センター年報, (2018), pp.15-24.
- (15) 国土交通省, Project PLATEAU (都市デジタルツイン実現プロジェクト), <https://www.mlit.go.jp/plateau/>, (参照日: 2025年5月30日).
- (16) 国土交通省, PLATEAU VIEW 4.0 (Webアプリケーション), <https://plateauview.mlit.go.jp/>, (参照日: 2025年5月30日).
- (17) G空間情報センター, 3D都市モデル(Project PLATEAU)東京都23区(FBX4次メッシュ2020年度), <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/plateau-tokyo23ku-fbx4-2020>, (参照日: 2025年5月30日).
- (18) 環境省, 大気汚染物質広域監視システム「そらまめくん」, <https://soramame.env.go.jp/>, (参照日: 2025年5月30日).
- (19) 環境省, 「適正な室温『28℃(目安)』としていた背景」, COOL BIZ 特集(2020), [https://ondankataisaku.env.go.jp/decokatsu/coolbiz/article/2020\\_action\\_detail\\_004.html](https://ondankataisaku.env.go.jp/decokatsu/coolbiz/article/2020_action_detail_004.html) (参照日: 2025年5月30日).
- (20) 東京都建設局: 舗装設計施工要領(令和4年4月), <https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/kensetsu/00050133> (参照日: 2025年5月30日).
- (21) 三浦昌生・尾島俊雄, 95地点の実測による都心と郊外の地中温度差について -東京における地中温度分布に関する実測調査研究 その2-, 日本建築学会計画系論文報告集, 454(1993), pp.35-44.
- (22) 垣鏑直・溝口忠・雨海清一郎・石橋龍吉, 薄層屋上緑化ユニットの熱的性能に関する実験的研究. 日本建築学会環境系論文集 578(2004), pp.79-84.
- (23) 手代木純, ライシメーター法による実大高木樹木等の蒸発散量の把握, 環境情報科学論文集, 28(2014), pp.143-148.
- (24) Erbs, D. G., Klein, S. A. & Duffie, J. A., Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation, *Solar Energy*, 28-4(1982), pp.293-302.
- (25) Holmgren, W. F., Hansen, C. W. & Mikofski, M. A., pvlib python: a Python package for modeling solar energy systems, *Journal of Open Source Software*, 3-29(2018), 884.
- (26) 小野雅司・室内道彦, 通常観測気象要素を用いた WBGT(湿球黒球温度)の推定, 日本生気象学会雑誌, 50-4(2014), pp.147-157.
- (27) Stull, R., Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50(2011), pp.2267-2269.
- (28) Bedford, T. & Warner, C.G., The Globe Thermometer in Studies of Heating and Ventilation, *J. Hyg (Lond)*. 34-4(1934), pp.458-473.
- (29) 根井勇太・三坂育正・石丸泰・奥津ノンナパット・山口竜・瀧澤恒太, 平均ばく露 WBGTの導入による適切な熱中症予防の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), (2021年9月), pp.2113-2114.
- (30) Ashie, Y., Kumakura, E. & Ueno, T., Assessing pedestrian exposure to heat via the wet-bulb globe temperature using mobile phone location data and urban thermal simulations, *Buildings*, 15-5(2025), 676.

(Received August 4, 2025, Accepted December 12, 2025)