

市街地における屋外温熱環境解析に関する研究

気象現象を考慮した都市域の暑熱環境評価

新井 舞子^{*1}・田村 哲郎^{*2}・河合 英徳^{*3}

Keywords : hot environment, WBGT, LES, thermal environment actual urban district

暑熱環境, WBGT, LES, 熱放射, 実市街地

1. はじめに

近年、夏季の酷暑が社会問題となっており、特に都市部において熱中症防止に向けた暑熱リスク評価が重要なテーマとなっている。気象庁によると 2018 年 7 月には関東・東海を中心に記録的猛暑が観測され、埼玉県熊谷市で日本観測史上最高となる 41.1℃を観測した。また、東京都青梅市でも都内観測史上初の 40℃超えを観測し、東京管区气象台（北の丸）では 39.0℃、他にも都内の計 4 地点で 39℃以上となった。また、環境省では熱中症への警戒を呼び掛けるため、2024 年 4 月から熱中症特別警戒アラート¹⁾の運用を開始する等、熱中症の危険性への関心が高まっている。

このような高温発生要因の一つとしては、山を越えて吹く乾燥した暖かい風によるフェーン現象等が考えられる。既往の研究では過去の関東平野内陸部における高温発生について調査されており、フェーン現象の影響を示唆している^{2~4)}。その中で 2018 年 7 月の熊谷での高温発生について、メソ気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF) による解析等から北陸地方からの北西風によるフェーン現象がその一因として考えられると述べてられている⁴⁾。一方で、熱中症危険性を考える上では、人口が集中している東京都市域での温熱環境を明らかにすることも必要となる。同日の東京都市域では、熊谷での高温発生要因の一つであるフェーン現象による移流特性によって温度が上昇し、その後、海風が南東側から侵入し温度が低下したと考えられるが、既往研究⁴⁾では東京都市域での高温発生状況についてあまり考察されていない。また、東京都市域では建物が密集しており複雑な乱流場が形成

されるため、メソ気象スケールよりも詳細な乱流構造を再現できる市街地スケールでの予測が求められる。

市街地の温熱環境の予測において数値流体力学 (CFD) に基づくシミュレーション技術が活用されている。これまでの温熱快適性評価において、RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) モデルを用いた事例がある⁵⁾。一方で、熱中症危険性評価における暑熱リスクの予測には、市街地スケールでの乱流場と放射場の影響や局所的な高温の発生頻度等、非定常な非等温現象の予測も重要だと考えられる。さらに近年では計算機能力の向上等により、LES (Large Eddy Simulation) を用いた研究も行われている^{6,7)}。筆者らは東京都市域の市街地スケールにおける地表面近傍の非等温現象の予測に、熱放射を考慮した LES を利用した計算を行ってきた⁸⁾。

2018 年猛暑日のように、地表近傍が高温となり熱対流による影響が強く大気が不安定な場では、フェーン現象や海風流入等、メソ気象スケールでの風速・温度変動が都市キャノピー内の温熱環境に与える影響も大きいと考えられる。そこで、従来の流体力学的な境界層のプロファイルを仮定するのではなく、実際の気象擾乱を考慮した流入変動風を生成する必要がある。そこで筆者らは既報⁹⁾にて WRF-LES の解に基づく気象擾乱と大気安定度を考慮した流入変動風の作成手法を提案している。

本研究では、記録的な猛暑日(2018 年 7 月 23 日)における東京都市域での高温発生に着目し、その高温発生状況や乱流場・温度場の再現を目的として、北の丸地区・神田地区周辺市街地の乱流場・放射場の連成解析を実施する。さらに市街地内の乱流場における暑熱リ

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 空間研究室

* 2 横浜国立大学

* 3 お茶の水女子大学

スク評価を試み、今後の熱中症危険性予測・対策に寄与することを目指す。

2. 解析手法と猛暑日の気象擾乱を考慮した流入境界条件の作成

2.1 実市街地における乱流場・放射場の連成解析手法

本研究では、都市における乱流場・放射場の連成解析手法として、既報¹⁰⁾にて提案した熱放射を考慮した LES 解析手法を使用した。非構造格子に基づく有限体積法 (FVM) のソルバーとして、FrontFlow/Red を使用した。熱放射解析において大気放射量を含む長波長放射は放射強度の輸送式を有限体積法に基づいて解くことで算出した。直達日射、天空日射は図-1 に示す方法で算出した。地面・建物壁面については各面に対して断面を分割し 1 次元非定常熱伝導方程式を解いている。LES の速度場の輸送方程式の境界条件として Spalding 則を使用した。建物・地表面の熱伝達モデルは格子解像度と計算負荷の観点から、本研究では Jurges の式を用いた。LES の基礎方程式等は既報⁸⁾を参照されたい。

2.2 都市気象擾乱に基づく温度不安定性を考慮した流入変動風作成手法

本報で対象とした 2018 年 7 月 23 日の東京における猛暑日について、既報¹⁰⁾でのメソ気象モデル WRF-LES の解析で気温分布の水平断面に熱対流による網目状構造が見られた。このように特に熱的な影響が強く地表近傍の大気が局所的に不安定となっている場では、気象場由来の速度・温度変動の影響も大きいと考えられるため、メソ気象モデルの解に基づく気象擾乱を考慮した流入変動風を生成する必要がある。そこで本研究では猛暑日のような不安定な温熱場予測のための都市気象擾乱を考慮した流入変動風を作成する手法⁹⁾を適用した。生成手順は、(1)WRF-LES による大気境界層の時空間データの生成、(2)空間フィルタリング・リスケーリング手法¹¹⁾による高周波変動成分の付加 (region1)、(3)WRF-LES から得られた対象時間帯の温度の鉛直分布を流入面に与えた非等温 LES 解析 (region2) の 3 段階で構成される。ここでは、WRF-LES の温位分布が一定 (中立条件) となる部分を境界層高さとして計算を行う。Region2 での温度の流入条件は、境界層厚での温度 (境界層内で一様になった温度) θ_m と下面の温度 θ_{bot} の温度差によって、式(1)のように無次元化して設定した。下面の温度境界条件は、夏季日中の日射により地面が暖められている不安

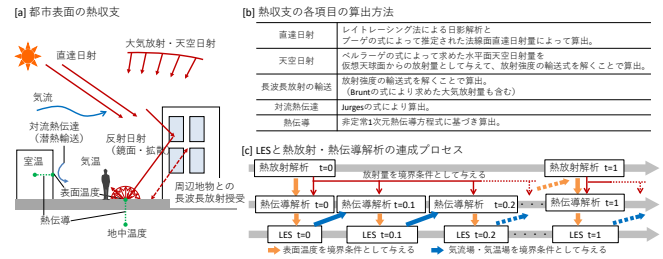


図-1 乱流場・放射場の連成解析手法

Fig.1 Coupled analysis method for turbulent flow and thermal radiation fields

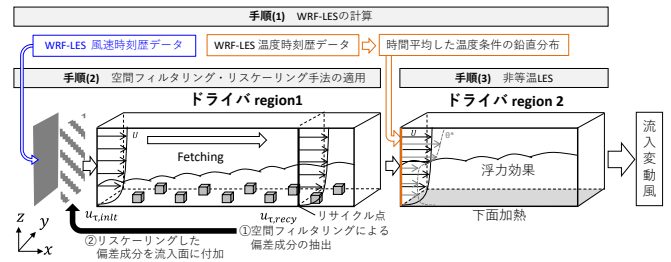


図-2 流入変動風の作成手法の概念図

Fig.2 Outline of generation method of inflow turbulence

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_m}{\theta_{bot} - \theta_m} \quad (1)$$

$$Ri = g\beta \frac{\Delta\theta\delta}{U^2} \quad (2)$$

定条件を想定し、 $\theta^* = 1$ としてディリクレ条件を課した。また、大気安定度の指標の一つであるリチャードソン数 Ri (式(2)) を浮力項のパラメータとした。ここで、 g は重力加速度、 $\beta (= 1/\theta_0)$ は体積膨張率、 θ_0 は基準温度、 $\Delta\theta$ は代表温度差、 δ は境界層高さとし、ここでは代表風速 $U = u_\tau$ (摩擦速度) とした。流入変動風の作成手順を図-2 に示す。詳細は既報⁹⁾を参照されたい。本手法により、メソ気象モデルの解に基づく温度条件を考慮した流入変動風の作成が可能となる。

市街地の温熱場・乱流場の解析において、乱流統計量等の普遍的な特性を確認する上で速度場・温度場の物理量の時間変化が小さい流入変動風データを得ることが望ましいと考えられる。そこで本研究では境界層内部、特に地表面近傍の乱流場・温度場予測のための流入変動風の作成を目的とし、境界層内部では WRF-LES の温度分布を用いて、境界層高さ付近に逆転層を設けることで境界層内部について時間変化が抑制された流入変動風の作成を試みた。また、安部ら¹²⁾による対流境界層の計算を参考にして、境界層より上空では弱安定条件を与えた。速度場は一般的な対流境界層の

特性を想定し、境界層より上空の速度変動が 0 になるように時間平均プロファイルを入力条件とした。

2.3 猛暑日の気象擾乱を考慮した流入変動風の作成

既報¹⁰⁾の WRF-LES の結果をもとに、2.2 節の手法により気象擾乱と大気安定度を考慮した流入変動風を作成した。解析対象は北の丸・神田地区を解析対象とした。まず WRF 及び WRF-LES によって、大気境界層の時空間データを生成した。また、無次元化時間 t^* ($=tu_\tau/\delta$)、7 月 23 日 11 時を $t^*=0$ として結果を整理した。統計処理期間は WRF-LES の結果より最高気温に到達するまでの温度上昇過程だと考えられる $t^* = 0.28 \sim 0.56$ (7 月 23 日 11 時 30 分～12 時) とした。WRF-LES から得られた風速、温位分布は高さ 1700m 付近まで温位がほぼ一定であった^{注1)}。

次に region1 にて、WRF-LES の結果に空間フィルタリング・リスケージング手法を適用した。解析条件を表-1 に示す。region1 の流入境界に接続する際の境界層厚は $\delta=1700[\text{m}]$ と仮定し、摩擦速度はレイノルズ応力 $-\langle u'w' \rangle$ より $u_\tau=0.266[\text{m/s}]$ とし、無次元化した上で流入境界に接続した。ここで、物理量の瞬時値 A に対する時間平均成分を $\langle A \rangle$ 、時間平均からの差 (変動成分) を $A' = A - \langle A \rangle$ とする。

最後に、WRF-LES の $t^*=0.28 \sim 0.56$ の平均温度の鉛直分布を region2 の流入面に与え、非等温 LES 解析に基づき、流速・温度の流入変動風を生成した。Region2 の解析条件を表-2 に示す。温度の流入境界条件は、 θ_m と θ_{bot} の温度差によって、式(1)のように無次元化した温度 θ^* として設定した。流入条件は、境界層内部での温度条件は下面近傍が不安定条件でそれ以外の範囲は中立条件、速度条件は region1 の時系列データを流入条件とした。また、境界層高さ ($z = \delta$) 付近に逆転層を設けて、境界層上空では 2.2 節に記載したように、弱安定条件で速度変動が 0 となるように region1 の時間平均プロファイルを設定した。下面の温度境界条件は $\theta^* = 1$ としてディリクレ条件を課した。図-3 に region2 の風速と温度場の yz 断面を示す。region1 で生成した乱れと下面からの加熱の影響を受けて、温度の変動を含む流入変動風が作成されたことが確認できた。

図-4 に WRF-LES, region1, region2 の平均風速、乱れの強さ、平均温度の鉛直分布を示す。平均風速 U_{mean} は境界層内ではほぼ一様となる流速 U_m で無次元化して比較した。平均風速は WRF-LES, region1, 2 で境界層高さ付近までほぼ一様となるような分布の傾向が示されている。平均温度分布についても境界層下部で温度が微増しているものの境界層高さ ($z/\delta = 1$) まで中立条件、地表面近傍で不安定条件となり、WRF-LES と同じ

傾向となっている。乱れの強さを見ると、 $z/\delta \leq 0.01$ において WRF-LES, region1, region2 の順で増加している。これは region1 において風速の高周波変動成分と温度条件を考慮したことにより、地表近傍での変動が増加したと考えられる。

表-1 region1 の解析条件

Table 1 Analysis conditions of region1	
乱流モデル	Smagorinsky モデル ($C_s=0.1$) (減衰関数: Van Driest 関数)
空間離散化	4 次精度中心差分
時間発展	2 次精度 Adams-Bashforth
圧力解法	SOR 法
解析領域の大きさ	$(X, Y, Z) = (4.0\delta, 2.0\delta, 2.0\delta)$
格子数	$(N_x, N_y, N_z) = (200, 150, 150)$
格子解像度	$(dx^+, dy^+, dz^+) = (16, 10.7, 0.7 - 24)$
時間刻み	$\Delta t u_\tau / \delta = 0.00002$
レイノルズ数	$U_\tau \cdot \delta / \nu = 800$

表-2 region2 の解析条件

Table 2 Analysis conditions of region2	
乱流モデル	Smagorinsky モデル ($C_s=0.1$) (減衰関数: Van Driest 関数)
空間離散化	4 次精度中心差分
時間発展	2 次精度 Adams-Bashforth
圧力解法	SOR 法
解析領域の大きさ	$(X, Y, Z) = (8.0\delta, 2.0\delta, 2.0\delta)$
格子数	$(N_x, N_y, N_z) = (400, 150, 150)$
格子解像度	$(dx^+, dy^+, dz^+) = (16, 10.7, 0.7 - 24)$
時間刻み	$\Delta t u_\tau / \delta = 0.00002$
レイノルズ数	$U_\tau \cdot \delta / \nu = 800$
Ri	-1595.67
Pr, PrSGS	0.71, 0.5
流入境界条件	風速: region1 の結果を接続 温度: 図-4 参照

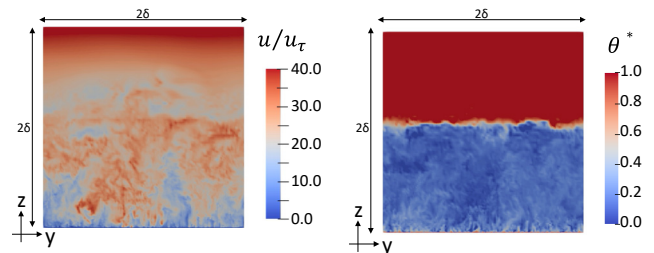


図-3 Region2 での風速、温度の瞬間場 ($x/\delta=7, t^*=0.42$)

Fig.3 Instantaneous fields of velocity and temperature in region 2 ($x/\delta = 7, t^* = 0.42$)

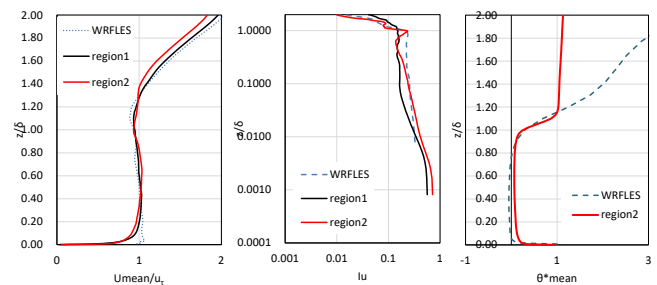


図-4 平均風速、乱れの強さ、平均温度の鉛直分布

Fig.4 Vertical distributions of time-averaged velocity, turbulence intensity, and time-averaged temperature

以上より、本研究では 2018 年猛暑日を対象として、メソ気象モデルの解に基づく空間フィルタリング・リスケーリング手法と WRF-LES の温度条件を考慮した流入変動風を生成した。

3. 猛暑日の都市域における暑熱リスクの評価

3.1 解析概要と気象擾乱を考慮した猛暑時の乱流場・温熱場の確認

本章では 2018 年 7 月 23 日の 11 時 32 分～12 時頃を対象に、市街地の乱流場・放射場の連成解析を実施した。対象時刻の主風向は北北西であった。解析領域は東京管区気象台と神田地区の市街地を含む領域とした。解析領域を図-5 に示す。建物形状は AW3D を元に作成し、地形は国土地理院のデータに基づき作成した。建物・地表面の境界条件は建物および道路・芝面・コンクリート面等に分類し、それぞれ熱物性値を与えた。その他の解析条件、境界条件を表-3、表-4 に示す^{注 2)}。また、流入境界条件は 2.2 節の手法によって作成した 2.3 節の流入変動風を市街地解析領域に接続した。流入条件の平均風速と平均温度の分布は前章の図-4 の region2 の結果を参照されたい。

図-6 に 12 時頃の表面温度分布を示す。北の丸公園は芝面を想定しているため、周辺の地面よりも表面温度が低くなっている様子が解析でも再現されている。また、市街地内の日向の主要道路で表面温度が約 60～65℃、建物の日陰に位置する部分は周囲よりも低い温度となった。

表-3 解析条件

Table 3 Analysis conditions

解析対象時刻	約 28 分間 (2018/7/23 11:32～12:00) ※助走計算(熱放射・熱伝導解析): 2018/7/22 11:00～7/23 11:32 (約 24.5 時間)
天候・流入風向	晴天日・NNW
時間刻み	LES・熱伝導: 0.1 秒, 放射・日射 (太陽位置の移動): 5 分
計算格子	総格子数: 約 6 千万, テトラメッシュ(節点中心) 最小格子サイズ: 表面 1m, 境界層 0.2m×3 層
解析領域	2.4km(主流)×2.6km(直交)×1.2km(鉛直) (市街地再現範囲: 1.4km(主流)×2km(直交))
計算方法	SMAC 法
時間積分	Euler 陰解法
空間離散化	2 次精度中心差分 + 1 次精度風上差分(5%)
乱流モデル	標準 Smagorinsky Model (Cs=0.1)

表-4 境界条件

Table 4 Boundary conditions

	速度	温度
流入面	WRF-LES の結果から空間フィルタリング・リスケーリング手法によって作成した流入変動風 (2.4 節参照)	
流出面	自由流出	
上部, 側面	Free-slip	Dirichlet 条件
建物, 地面	Spalding 則	Jurges の式

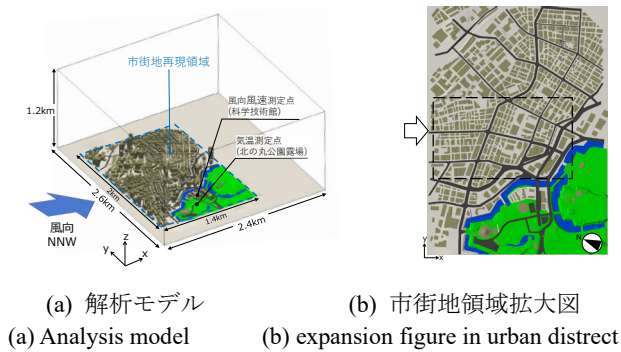


図-5 解析領域, 解析モデル
Fig.5 Analysis area and model



図-6 表面温度分布 (12:00 頃)
Fig.6 Surface temperature distribution (around 12:00)

表-5 WBGT の日常生活に関する指針 (環境省 HP¹³⁾より)

Table 5 Guidelines for WBGT in daily life
(from the Ministry of the Environment website¹³⁾)

暑さ指数 (WBGT)	注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 (31 以上)	すべての生活活動における危険性	高齢者においては安静状態でも発生する危険性が高い。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
厳重警戒 (28 以上 31 未満)		外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒 (25 以上 28 未満)	中等度以上の生活活動で起こる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に十分に休息を取り入れる。
注意 (25 未満)	強い生活活動で起こる危険性	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には発生する危険性がある。

3.2 都市域の乱流場における暑熱リスク評価

市街地における暑熱リスク評価指標として、湿球黒球温度 (Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT) が挙げられる^{注 3)}。WBGT は屋外での実測値を元にした重みづけ平均値で簡易に取得できる。WBGT は気温よりも熱中症による救急搬送者数との相関が高いとされ¹⁴⁾、環境省の熱中症予防情報サイト¹⁵⁾でも活用されている。既往研究では東京都の街区スケールにおいて実際に歩行者が受ける暑熱ストレスを把握するため、WBGT 等の暑熱環境評価を 0.1 秒～1 秒程度の細かい測定間隔での移動測定が行われている事例^{15, 16)}が見られ、街区内部における暑熱環境の詳細な時空間変化の把握が求められていると考えられる。WBGT は人体側の条件 (着衣量

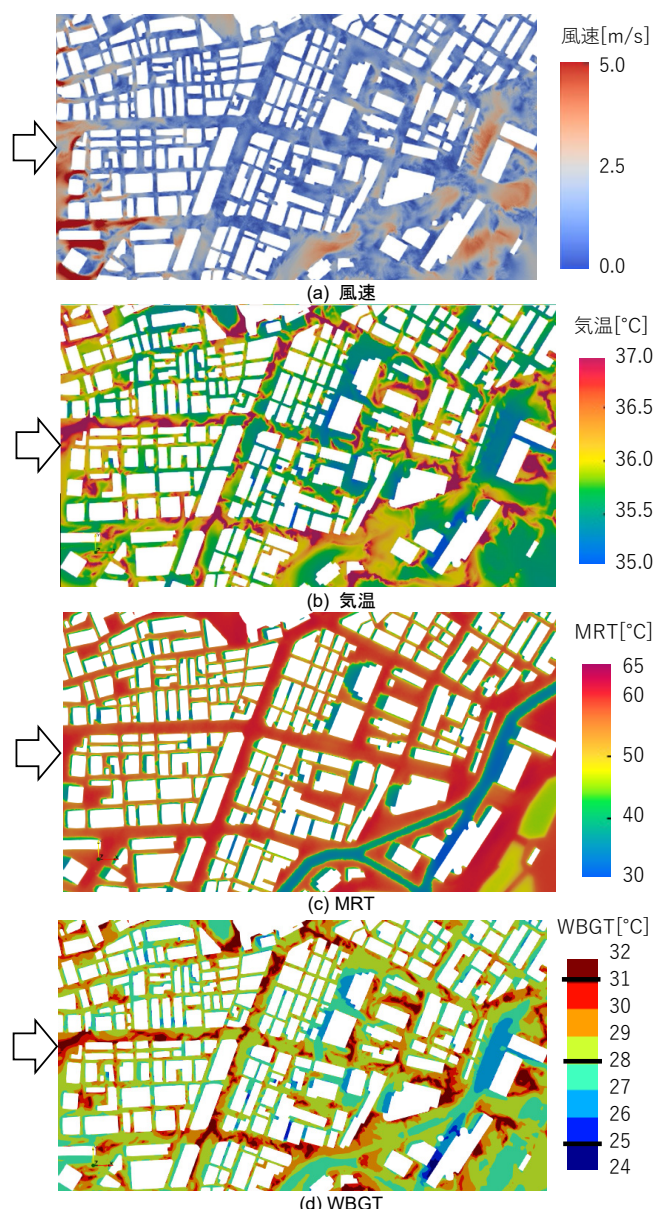


図-7 市街地内の風速，気温，MRT，WBGT の水平分布図
($z=1.5\text{m}$ ，11:47 頃の瞬間場)

Fig.7 Horizontal distributions of velocity, temperature, MRT, and WBGT in the urban district
($z=1.5\text{ m}$, instantaneous fields at around 11:47)

・代謝量等)の影響に関して検討の余地はあるものの、猛暑時の温熱 4 要素を総合的に評価できる指標と考え、環境省の熱中症予防情報サイト¹⁾等で広く用いられていることから、本研究では WBGT を用いて非定常な暑熱環境の評価を試みた。

猛暑時の都市域における暑熱環境を確認するため、 $z=1.5\text{m}$ (解析領域中央の市街地内 $GL+1.5\text{m}$) における風速，気温，周囲から受ける熱放射を平均化した指標である平均放射温度 MRT と WBGT (非定常 WBGT)^{注 4)}の瞬間場の例を図-7(a)～(d)に示す。図示した範囲は図-5(b)の点線枠内とする。図-7(a)の風速分布より、市街地内は全体的に弱風域であることが分かる。中高層建

物周辺や開けた場所では風速が高い場所も見られる。気温分布 (図-7(b)) を見ると、主要道路や高層建物後流域の低風速域で網目状に高温が分布している様子が見られる。これは弱風域において地面近傍で加熱された空気が浮力によって上昇していると考えられる。MRT 分布 (図-7(c)) は直達日射の影響を強く受けており、主要道路や高層建物付近の開けた場所で日向の部分は $60\sim 65^{\circ}\text{C}$ 、図中央部の高層建物の日陰部分や図左側～中央の低層市街地の建物の陰となる部分、図右側の高架道路下は低い値となっている。一方、WBGT (図-7(d)) は日本生気象学会が定める日常生活に関する指針 (表-5) の中で「厳重警戒： 28°C 以上 31°C 未満」や「危険： 31°C 以上」の領域が、主要道路沿いや高層建物後流域のような弱風域で気温が高く MRT が高い場所 (日向) に見られる。MRT の値が高いエリアの中でも WBGT の分布に差が見られ、WBGT は気温と同じような網目状の分布となっていることから、WBGT は MRT 分布よりも気温分布の影響を強く受けていることが分かる。これは WBGT の算出式で気温、黒球温度、湿球温度から重み付け平均して求める際に湿球温度の寄与率が高いこと、また、湿球温度は気温を関数としたモデル式を今回使用しているためと考えられる。

次に WBGT について気温や風速等の瞬間値から求めた場合と時間平均値から求めた場合の市街地内における空間分布の差を確認するため、図-8 にて $z=1.5\text{m}$ における 12:00 の瞬間場と 11:50～12:00 の 10 分間の時間平均場を比較した。図上点線枠内の主要道路の交差点や道路沿い、中高層建物の後流域において、平均値では WBGT が $28\sim 31^{\circ}\text{C}$ (「厳重警戒」評価) であっても瞬間的に WBGT が 31°C 以上 (「危険」評価) となる領域が見られる。このことから、特に WBGT の変動が大きい場所では、WBGT の時間平均値だけではなく局所的に発生するピーク値や人体が暴露される暑熱ストレスの蓄積等の非定常特性を考慮することで、暑熱リスクを適切に評価するように注意が必要だと考えられる。

ここで、市街地内の日向における $z=1.5\text{m}$ の計 3 点 (主要道路の交差点付近の歩道 (A 点)、高層建物の風上側 (B 点) と後流域 (C 点)) について、MRT と WBGT の時系列データを比較した (図-9)。ここでは、20 秒おきの瞬間値を用いた。参考として、図-9(b)に WBGT の前 5 分間の時間平均値を示す。各地点で 11 時 35 分～11 時 55 分の 5 分平均値はほぼ一定であった。図-9(a)や(b)を見ると、MRT は時間経過に伴って上昇傾向を示しているが WBGT と比較して変化量は小さく瞬間的に値が著しく変動する様子は見られなかった。

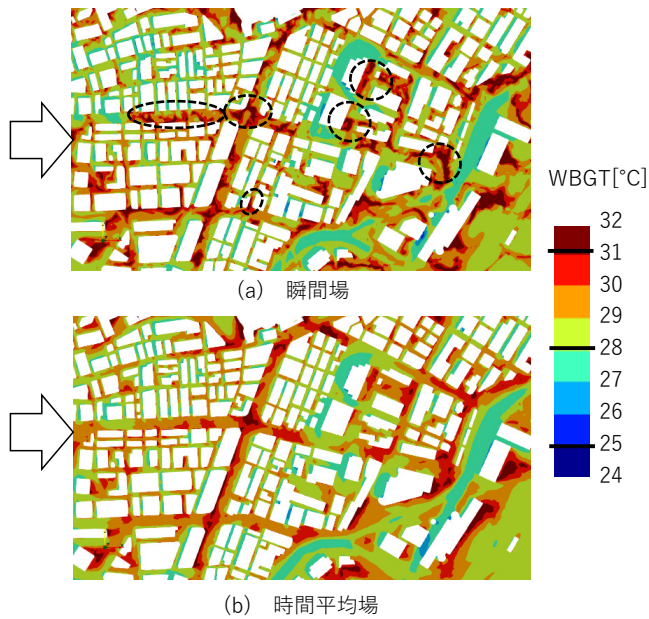


図-8 市街地内の WBGT 瞬間場と 10 分間時間平均場の比較
($z=1.5\text{m}$, 瞬間場: 12:00, 時間平均場: 11:50~12:00)
Fig.8 Comparison of WBGT instantaneous field and 10-minute
time-averaged field in urban district
($z = 1.5\text{ m}$, instantaneous: 12:00, time-averaged: 11:50 to 12:00)

WBGT は細かな変動が見られ, 例えば A 点では 11 時 47 分や 11 時 58~59 分頃に瞬間的なピークが発生している。前者のピークが含まれる 11 時 46 分~11 時 50 分の平均値は約 30.6°C に対し, 最大で瞬間的に約 37.5°C となった。先ほど WBGT との相関が高いことを確認した気温の時系列データ (図-9(c)) と比較すると, 気温と WBGT で同じ時間帯にピークが見られる。一方で, MRT は時間方向の変化が緩やかであった。以上より時系列データからも WBGT が MRT よりも気温の影響を強く受けていることが確認された。次に風速 (図-9(d)) と WBGT の関係性に着目すると, A 点と C 点では WBGT

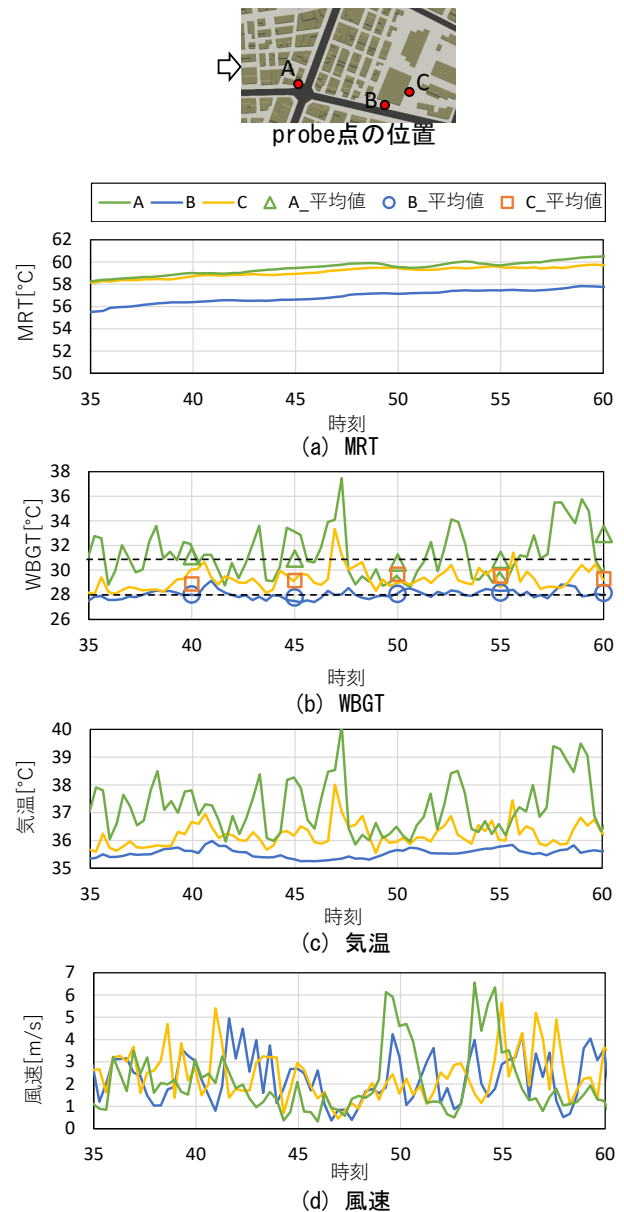


図-9 各点位置と MRT, WBGT, 気温, 風速の時系列データ
Fig.9 The positions of each point and time series data of
MRT, WBGT, air temperature, and velocity

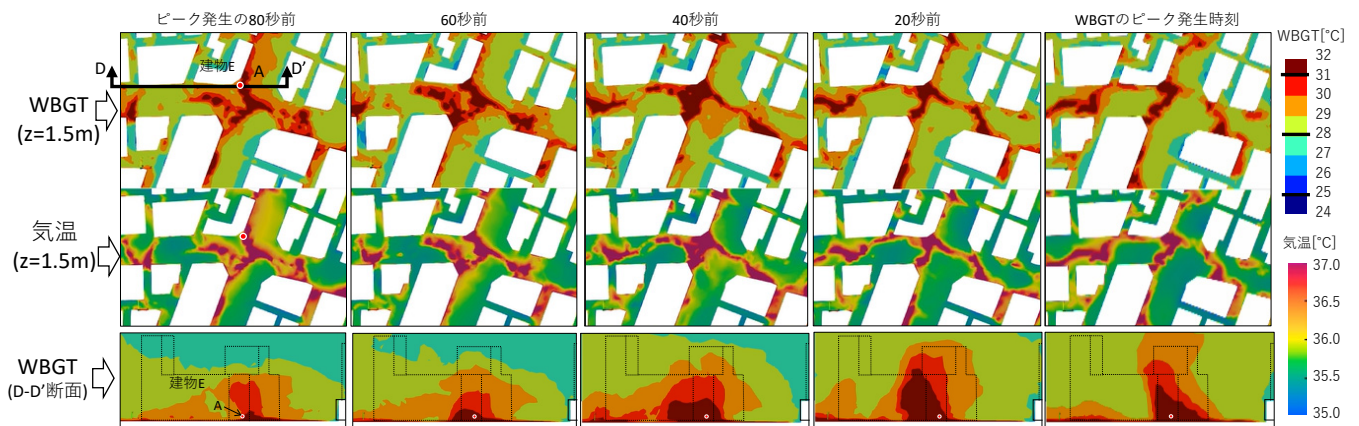


図-10 A 点近傍における気温, WBGT の時間変化
Fig.10 Time variation of temperature and WBGT near point A

T のピーク時間帯は風速が弱まり、風速が強い時間帯には WBGT は小さくなる傾向がみられる。

A 点における WBGT の変化の過程や街区内の流れ場を詳細に確認するため、図-10 に A 点における WBGT ピーク発生時間まで気温、WBGT 分布の時間変化を示す。ここでは A 点を通る水平断面 ($z=1.5\text{m}$)、鉛直断面 (D-D'断面) を図示した。気温分布の変化を見ると、A 点近傍の建物壁面に沿って高温域が移動して交差点の角部、つまり建物 E (図-10 に図示) の角丸部に集まっていく様子が見られる。鉛直断面では WBGT の高い領域が下面近傍から建物壁面に沿って移動しながら A 点付近の建物角丸面近傍で鉛直上向きに広がり上空へ昇っていく様子が確認できた。表面温度の高い道路面近傍で加熱された高温空気が市街地内の乱流場や浮力の影響を受けて非定常に変化しながら市街地内の交差点の角部近傍で WBGT が高くなる傾向が確認された。このように解析によって得られた周辺の詳細な流れ場から暑熱リスクの高い場所の発生状況を確認することが可能となる。

以上より、市街地内における WBGT の非定常特性について考察し、複雑な乱流場が形成されている場所ではその時の時空間構造に応じて数値計算より求めた WBGT (非定常 WBGT) の値の変動を確認できた。将来、気候変動により街区内の暑熱環境悪化が懸念される中、今後は代表地点における WBGT の時空間平均値だけではなく、WBGT の空間分布や人体が暴露される暑熱リスクの変動特性に配慮した詳細な熱環境データに基づく熱中症危険性評価手法の検討が必要となる。

4. 結論

本研究では、過去の 2018 年猛暑日の東京都市域を対象として、気象擾乱と大気安定度を考慮した流入変動風を用いて、市街地内の乱流場・温度場の連成解析を行った。今後の高精度な熱中症危険性予測・評価手法の構築への貢献を目的として、市街地内の複雑な乱流場における非定常な MRT や WBGT (非定常 WBGT) による暑熱リスク評価を試みた。以下のような結果が得られた。

- ・2018 年 7 月 23 日の猛暑日におけるメソ気象モデル WRF-LES の結果から気象擾乱と大気安定度を考慮した流入変動風を作成した。
- ・建物密集域を対象として、乱流場と放射場の連成解析により、気温、風速、MRT、WBGT 等の時空間データを示し、複雑な乱流場における人体が暴露され

る暑熱リスクの評価を試みた。市街地内の暑熱環境の分布を見ると、低層建物が密集する市街地内では全体的に低風速域となっており、中でも MRT が高い主要道路や高層建物後流域にて気温や WBGT が局所的に高い値となった。気温と WBGT は網目状の分布となっていることから、弱風域における地面近傍から高温な空気が浮力によって上昇している影響を受けていると考えられる。

- ・気温や WBGT が局所的に高い地点について気温、風速、MRT、WBGT の時系列データを比較した。気温、風速、WBGT は時々刻々と変動しており、市街地内の乱流場の変動特性は気温や風速、WBGT への影響が大きいことが確認できた。また、計算結果から換算した WBGT の変動に着目すると、主要道路沿いの交差点角部では WBGT が 5 分間の時間平均値で約 30.6°C 、ピーク値で約 37.5°C と「危険 (31°C 以上)」評価を大きく上回る値をとる場所も見られた。

以上より、本研究によって市街地暑熱環境の乱流場・温熱場の詳細な空間分布や時刻歴変動を予測できるようになった。今後は本研究により得られた暑熱環境の時刻歴変化に基づき、夏季屋外環境での高精度な熱中症危険性評価手法の構築に貢献することを目指す。

謝辞

本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム『富岳』が拓く Society 5.0 時代のスマートデザインの一環としてスーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け(課題番号: hp210262)、また都市・建築 CFD コンソーシアムの研究活動で実施したものである。

注

- 注1) 風速分布では地面から 2000m 付近までほぼ一定値で地表面近傍の風速低下がほとんどみられなかったが、これはサンプリング点の風上側の連続した谷地形の影響だと考えられる。
- 注2) 建物・地表面の境界条件及び熱物性値は下記の値を用いた。なお、芝面の表面熱収支式において大気中の水蒸気分圧 f_a は一様と仮定し、人工排熱は考慮していない。各種熱物性値は文献 17 を参考に表-6 のように設定した。
- 注3) 熱環境評価指標としては WBGT の他に、建築分野では着衣量・代謝量等を考慮できる指標である SET* (標準新有効温度) が広く用いられており、都市の屋外温熱環境評価に用いられることも多い^{18~20)}。しかし、SET* は室内のような熱的に中立な状況を想定してモデル化された 2 ノードモデルを用いていることから、屋外の暑熱環境評価への適用には検討の余地がある。WBGT は人体側の条件に関する課題はあるものの猛暑時の温熱 4 要素を総合的に評価できる指標と考え、環境省の熱中症予防

情報サイト¹⁾等で広く用いられていることから、本研究では WBGT を用いて非定常な暑熱環境の評価を試みた。

注4) MRT は次式から求めた。

$$T_{MRT} = \sqrt[4]{(\alpha S_p + \varepsilon R_p) / \sigma \varepsilon} \quad (3)$$

R_p, S_p : 微小球の長波受熱量[W/m²], 短波受熱量[W/m²]

ε : 放射率(=0.95²¹⁾) (グローブ球を想定)

α_g : 短波吸収率=0.95 (グローブ球の黒色を想定)

σ : ステファンボルツマン定数[W/(m² K⁴)] (=5.67×10⁻⁸)

屋外の日射がある場合, WBGT は湿球温度 T_w [°C], 黒球温度 T_g [°C], 気温 T_a [°C]の関数として次式で示される¹³⁾。

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

本報では数値解析結果から得られた気温 T_a , 風速 V , MRT T_{MRT} と, 気象観測値の相対湿度より, T_g と T_w を求めた。ここでは, 解析領域内の湿度一定と仮定し, 東京管区気象台の観測値(10 分値)を参照し, 解析対象時間帯の平均値として相対湿度39%とした。湿度の輸送を考慮した解析は今後の課題である。また, WBGT を求める際, 空気の水蒸気圧や気温から求めた湿球温度 T_w ²²⁾, MRT や風速, 気温から求めた黒球温度 T_g ²³⁾を用いた。なお, 本報における WBGT (非定常 WBGT) の瞬時値は解析より得られた瞬時の風速, 気温等を用いて上記の式より換算した値であり, 実測における黒球温度や湿球温度の測定器の熱容量等を考慮した値ではない点に注意されたい。

表-6 主な建物・地表面の熱物性値

Table 6 Thermal properties of building and ground surfaces

種類	日射反射率	日射透過率	長波放射率	蒸発効率
高層建物/屋根, 壁面	0.20	0.00	0.90	
低層建物				
道路(アスファルト)	0.10	0.00	0.90	
コンクリート面	0.20	0.00	0.90	
芝面	0.30	0.00	0.95	0.10

種類	熱伝導率 [W/m K]	容積比熱 [kJ/(m ³ K)]	材料名 (厚さ[mm])
高層建物/屋根	0.27	1670	コンクリート[230], アスファルトルーフィング[10], 断熱材[30], 石膏ボード[10]
高層建物/壁面	0.15	1410	コンクリート[150], 断熱材[50], 石膏ボード[10]
低層建物			
道路(アスファルト)	0.61	1660	アスファルト[100], 砂[40], 土[400]
コンクリート面	0.67	1640	コンクリート[100], 砂[40], 土[400]
芝面	0.55	1590	芝[100], 砂[40], 土[400]

参考文献

- 環境省：熱中症予防情報サイト，熱中症特別警戒アラート・熱中症警戒アラート，https://www.wbgt.env.go.jp/about_special_alert.php
- 桜井美菜子，篠原善行，眞下国寛，須永次雄：関東地方で日最高気温が40°Cを超えた2007年夏の高温，その1，2007年8月15日と16日の事例解析，天気，56，pp.248-253，2009。
- Takane, Y., and H. Kusaka: Formation mechanisms of the extreme high surface air temperature of 40.9°C observed in the Tokyo metropolitan area: Considerations of dynamic Föhn and Föhnlike wind. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50, pp.1827-1841, 2011.
- Nishi, A. and Kusaka, H.: Effect of Föhn Wind on Record-Breaking High Temperature Event (41.1°C) at Kumagaya on 23 July 2018, SOLA, Vol.15, pp.17-21, 2019.
- 高田真人，梅干野晃，浅輪貴史：屋外熱収支シミュレーションとCFDによる熱と気流の全時刻連成解析手法の開発，日本建築学会技術報告集，第24巻，第57号，pp.715-719，2018。
- 河西昌隆，大風翼，石田泰之，山本ミゲイル，持田灯：WRFとLESを結合したメソ・マイクロ気象一貫解析手法の開発と実市街地における温熱環境の将来予測，第25回風工学シンポジウム，pp.223-228，2018。
- K. Matsuda, R. Onishi, K. Takahashi: Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 173, pp.53-66, 2018.
- 新井舞子，田村哲郎，河合英徳：熱放射を考慮した都市乱流場のLESの検証と実市街地への適用性，日本建築学会環境系論文集，第89巻，第819号，258-269，2024。
- 新井舞子，田村哲郎，河合英徳：都市気象擾乱に基づく温度不安定性を考慮した流入変動風に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第90巻，第827号，pp.45-51，2025。
- 新井舞子，河合英徳，田村哲郎：市街地における屋外温熱環境解析に関する研究，2018年猛暑日における東京都市域を対象とした局地気象解析，大成建設技術センター報第55号，pp.04-1-04-5，2022。
- 河合英徳，田村哲郎：メソ気象モデルにより再現された風速場への高周波変動成分付加方法の提案 空間フィルタリング・リスケーリング手法の適用，日本建築学会構造計論文集，85，767，pp.19-27，2020。
- 安部論，田村哲郎，中山浩成：逆転層を有する対流境界層中の乱流構造と拡散挙動に関するLES解析，日本風工学会論文集，第33巻，第4号，pp.131-148，2008。
- 環境省ホームページ，熱中症予防情報サイト，暑さ指数(WBGT)について，<https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt.php>
- 環境省：夏季のイベントにおける熱中症対策ガイドライン2020，p.8，2020。
- 河野恭佑，植田弥月，稲垣厚士，小田僚子：移動観測手法に基づく東京都市街地の暑熱環境評価，環境情報科学術研究論文集，31，pp.143-148，2017。
- 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，pp.1875-1878，2024。
- 田中俊六，他5名：最新 建築環境工学[改訂4版]，井上書院，2017。
- 楊光，玄英麗，持田灯：建物配置と周辺の風環境と温熱環境の関係の分析，-広州，武漢と仙台における緯度の相違による建物周辺環境の変化-，第23回風工学シンポジウム，pp.67-72，2014。
- 高田真人：隣接街区の影響を考慮したアーケード内外の夏季温熱環境の評価，熊本市中心市街地の連続する3つのショッピングアーケードを事例として，日本建築学会環境系論文集，第5巻，第778号，pp.965-975，2020。
- 吉田伸治：CFD 連成数値解析による夏季屋外暑熱環境の評価指標の比較，暑熱環境曝露時間とSET*, WBGTの比較，第47回人間-生活環境系シンポジウム報告集，pp.97-100，2023。
- ISO7726: Ergonomics of the thermal environment, 1998.
- 小林壽太郎：アスマン通風乾湿計の乾湿計公式について，天気，47-10(2000-10)，pp.747-752，2000。
- 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧，第14版，基礎編，p.221，2000。