

# 都市緑地が周辺市街地の気温，水蒸気圧，WBGT に及ぼす影響

飯田彩夏<sup>1</sup>・矢崎友嗣<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>明治大学 大学院農学研究科, <sup>2</sup>明治大学 農学部  
(2024年12月15日受付；2025年3月26日受理)

**Effects of urban green spaces on air temperature, water-vapor pressure, and wet-bulb globe temperature in surrounding urban area. Miscellaneous Reports of the Institute for Nature Study (57): 1–16, 2025.**

Ayaka Iida<sup>1</sup>, Tomotsugu Yazaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Agriculture, Meiji University, <sup>2</sup>School of Agriculture, Meiji University  
(Received December 15, 2024; Accepted March 26, 2025)

## Abstract

To mitigate urban heat islands, the cooling effects of green spaces should be analyzed with consideration of their specific conditions, including variations in terrain, structures, and vegetation. This study investigated how cool air from green spaces affects surrounding urban areas using a combination of mobile and fixed-point meteorological observations and numerical simulations. The results revealed that strong southerly winds, driven by sea breezes, reduce temperatures in urban areas located northeast and downwind of the green spaces. However, despite this cooling effect, the Wet-Bulb Globe Temperature (WBGT) did not decrease, likely due to compensatory effects from increased humidity. Numerical simulations further demonstrated that terrain and structures influence wind flow patterns, shifting low-temperature zones to the leeward side of the downwind urban area. These findings underscore the significant role of wind in transporting cool air from green spaces to downwind urban areas during the summer daytime.

**Key words:** mitigation of urban heat island, cool island intensity, advection by wind, mobile meteorological observation, ENVI-met, topography, structure, sea breeze

---

\*E-mail: yazakitm@meiji.ac.jp

## 背景と目的

都市においては、周辺の農村地域よりも気温が高くなるヒートアイランド現象が起こることが知られている (Oke, 1995)。都市の高温化のメカニズムは、(1) 自動車や室外機などからの人工排熱、(2) コンクリート・アスファルト化などの人工被覆による地表面熱収支の変化、(3) 中高層建造物の密集化などの都市構造の変化による熱の挙動の変化であり、これらが複合的に起こることで発生すると考えられている (三上, 2006)。特に、2000年までの過去100年間で地球の平均気温は約0.6℃の上昇に比べ、都心の平均気温は約3℃の昇温であり (三上, 2006)、地球温暖化の昇温に加え、都市化によるヒートアイランド現象の昇温の影響が顕著に表れているといえる。このような都市の高温化によって、熱中症等の健康被害やエネルギー消費の増加 (Chang *et al.*, 2007) 等が懸念されており、その対策が必要である。

ヒートアイランド現象の緩和策として都市内の植生や公園、森林による冷却効果が期待されている。特に都市緑地は、周辺市街地よりも気温が低い「クールアイランド」として認識されており (Spronken-Smith & Oke, 1998)、クールアイランドの形成メカニズムとして緑地内の樹木による日射の遮蔽 (Oke, 1989) や蒸散作用による冷却 (Taha *et al.*, 1988) などが知られている。一方でクールアイランドは都市緑地の範囲を越えて、周辺市街地にも冷却効果を与えることが報告されている (丸田, 1972; 成田ほか, 2004)。特に晴れた静穏な夜間には、緑地内の冷気が周辺市街地へ流出する「冷気のにじみだし現象」が確認されている (成田ほか, 2004)。緑地から市街地への冷気の移流は夏の都市の温暖化、特に夜の気温低下が期待されている (菅原・成田, 2003)。都市におけるクールアイランドによる周辺市街地の冷却効果に関する研究は、「冷気のにじみだし現象」を中心に晴れた静穏な夜間を対象に多く行われたが、日中についての研究は多くない (三上ほか, 2011; 成田ほか, 2011)。ヒートアイランド現象が人間生活に与える影響、例えばエネルギー消費量の増大や熱中症患者数の増加は夏季の日中にも深刻となり社会問題となってきたため (日下ほか, 2012)、夏季日中におけるクールアイランドを形成する都市緑地が周辺市街地に与える効果の解明が重要視されるべきと考えられる。

人間の温熱感覚は、気温だけでなく湿度や放射熱等の他の気象条件の影響も強く受ける (大橋, 2010)。しかし、これまでのクールアイランドの冷却効果に関する研

究は気温や地表面温度、風速の測定が多く、クールアイランドの更なる効果を解明できていない。近年、暑さの指標として WBGT (Wet Bulb Globe Temperature, 湿球黒球温度) が使われているが、これは熱中症リスクの有効な温度指標のひとつであるといえる (小野・登内, 2014)。

これは気温のほかに湿度や日射といった気象要素を取り入れた指標である。都市の高温化や緑地による暑熱化緩和効果を、気温だけでなく、WBGT など人間の温熱感覚に基づいて評価しようとした例は多くない。

都市緑地が周辺市街地へもたらす冷却効果については、これまで多くの研究がなされてきた。しかし、都市空間は人工建築物が入り組んだ複雑な空間であり、個々の事例によってそのプロセスが異なる可能性があり、事例の積み重ねが必要である。

三次元数値シミュレーション「ENVI-met」(GmbH, Germany) は、都市空間の複雑な微気候プロセスをシミュレートする高解像度3Dモデリングソフトウェアであり、特に建物による加熱あるいは冷却や人間の温熱快適性の観点から、都市部内の微気候条件の詳細な分析が可能である (ENVI-met GmbH, 2023)。また、ENVI-metでは地表面と植物と大気の相互作用が考慮されており (Bruse & Fleer, 1998)、植生を放射や風況に対する物理的障害物と認識するのではなく、植物体による熱や水蒸気の伝達や交換の影響も考慮できることが特徴である。多くは都市の再開発や道路・屋上の緑化などの小規模な変化において、都市計画や都市管理プロセスにおける様々な計画シナリオを想定する際に使用される (Bruse, 1999)。ENVI-metを使用した都市緑地によるクールアイランド効果の検討例として、Soudoudi *et al.* (2018) は緑地の空間構成と冷却効果の関係を ENVI-met を用いて評価し、多くのシナリオでのシミュレーションを通して最適な空間構成を解明した。また、Wu *et al.* (2022) はフィールド調査と ENVI-met によるシミュレーションを併用し、樹木被覆率や微地形、風況の変化が緑地内外の温熱環境に対する冷却効果に影響を及ぼすことを明らかにした。

本研究では、都心部緑地におけるクールアイランドの形成と、周辺市街地への冷却効果を明らかにするため、東京都港区に位置する国立科学博物館附属自然教育園 (以下、自然教育園とする) 及びその周辺を対象に、気温に加えて大気中に含まれる水蒸気量の分布を明らかにした。さらに、WBGT の分布を、緑地の周辺市街地での移動観測や緑地内3地点での定点観測によって評価し、

夏季日中におけるヒートアイランド緩和効果の実態を詳細に解明した。また、都市緑地による冷却効果は風況や地形にも大きく左右されることが示されたため、Envi-metによるシミュレーションを用いて夏に多い南よりの海風時における自然教育園から周辺市街地への冷却効果のプロセスや原因を解明した。

## 方 法

本研究は東京都港区に位置する国立科学博物館附属自然教育園とその周辺市街地で実施した。自然教育園の敷地内は起伏があり、標高は15～30mとなっている。自然教育園内南西部から北東市街地に向けて谷地形となっている。また、自然教育園の周辺の建物は、南西側を除いて低層建築物と中層建築物が多い。さらに西側には、自然教育園敷地の縁に沿って側壁を有する首都高速道路2号線が緑地と市街地を分断するように通っている。

観測は2021年8月に定点観測と移動観測、2022・2023年の8～9月の間に定点観測を実施した。

### 1. 2021年の定点観測と移動観測

定点観測は自然教育園中央部IC地点の林床で実施した。強制通風筒内の気温・相対湿度を白金抵抗温度計と静電容量式湿度計(HMP45, Vaisala)で、黒球温度をピンポン球にT型熱電対を挿入した自作センサで、それぞれ1分間隔で測定・記録をした。さらに地上20mの気象観測塔上(菅原ほか, 2013)で測定された風向・風速(Windmaster, Gill)データ(10Hz測定, 1分平均値の提供を受け、解析に利用した。

移動観測では、気温(T型熱電対)、相対湿度(静電容量式湿度計:HMP 45, Vaisala)、黒球温度(ピンポン球にT型熱電対を挿入)、緯度経度をGPS(GPS16x-HVS, GARMIN)で測定し、データロガー(CR300, Campbell Scientific Inc.)で記録しながら、電動アシスト自転車で自然教育園の周り約4.5kmのルート(図1)を平均13km/h(所要時間約25分)で走行した。気温と相対湿度は同様の通風筒に入れて強制通風を行った。なお、気温、相対湿度、黒球温度は地上1.0mの高さで測定した。さらに移動観測による熱電対の応答のずれを解消を検討し、本研究で使用した被覆熱電対(露出型)φ0.32mmは、気体中での温度変化量90%の値を示すのに要する時間は(応答時間)は14.1秒であるため(林電工株式会社, 2012)、ある地点から14.1秒後の値がその

地点の気温とした(飯田・矢崎, 2022; 荒井・矢崎, 印刷中)。移動観測は2021年8月の8日間、計14週、晴天日の12時から15時の間に実施した(表1)。なお、晴天日とは、東京(北の丸公園)の12時から15時の間の日照率が40%以上の日とした。

本研究では教育園が周辺市街地の気温分布に及ぼす影響を検討するため、日中の南風の風上側である教育園の南に位置する「南側市街地」(以下、南側)と、風下であり教育園に隣接した「北東市街地」(以下、北東側)、及び風下であるが高速道路によって教育園と分断された「北西市街地」(以下、北西側)の微気象を比較した。なお南側は、片道140mの経路の往復の平均値、北東側は140mの範囲の平均値、北西側は130mの範囲の平均値を示す。

### 2. 2022・2023年における定点観測

2021年の移動観測の結果(後述)から南寄りの海風の条件では自然教育園を通過した冷涼な空気が北東側市街地を冷却する可能性が示されたため、2022・2023年の測定では、自然教育園から市街地への北東方向への冷気の動きを検討した。そのため、教育園敷地南端の市街地に隣接したIS地点、自然教育園の中央林床に位置するIC地点、市街地に隣接しかつ風下であるIN地点の3か所に定点観測機器を設置した(図1)。また自然教育園西側の建物屋上(高さ約10m, IW地点)において風速測定点を設けた。これらの観測では、強制通風筒内でサーミスタ温度計(TR-52i, T&D社)と静電容量式湿度計(HMP110, Vaisala, またはTR-74Ui, T&D社)を用いて、気温、相対湿度を測定し、さらに黒球温度(黒体スプレーで黒く塗ったピンポン球にT型熱電対を挿入した自作センサ)を測定した。測定高さはIS地点とIC地点で地上1.2m, IN地点では約2.0mの側壁が隣接していたため、地上4.0mで測定を行った。測定期間は2022年・2023年8月から9月、日中の11時30分から15時に5分間隔で測定し、1.と同様、晴天日のデータを抽出した。なお、ここでの晴天日の条件は、観測時間における、平均全天日射量が $200 \text{ W/m}^2$ 以上かつ降水量が0mmとする。また、3地点の日射の条件を統一するため、測定は日陰で行った。

さらにIC地点では2.1節と同様、地上20mの気象観測塔で風向・風速を10Hzで測定し、1分平均値を記録した。また、IW地点において10mの建物上で1.2m高さで風向・風速(windsonic, GILL)を測定し、ENVI-metの風況解析に対する検証データとして使用した。

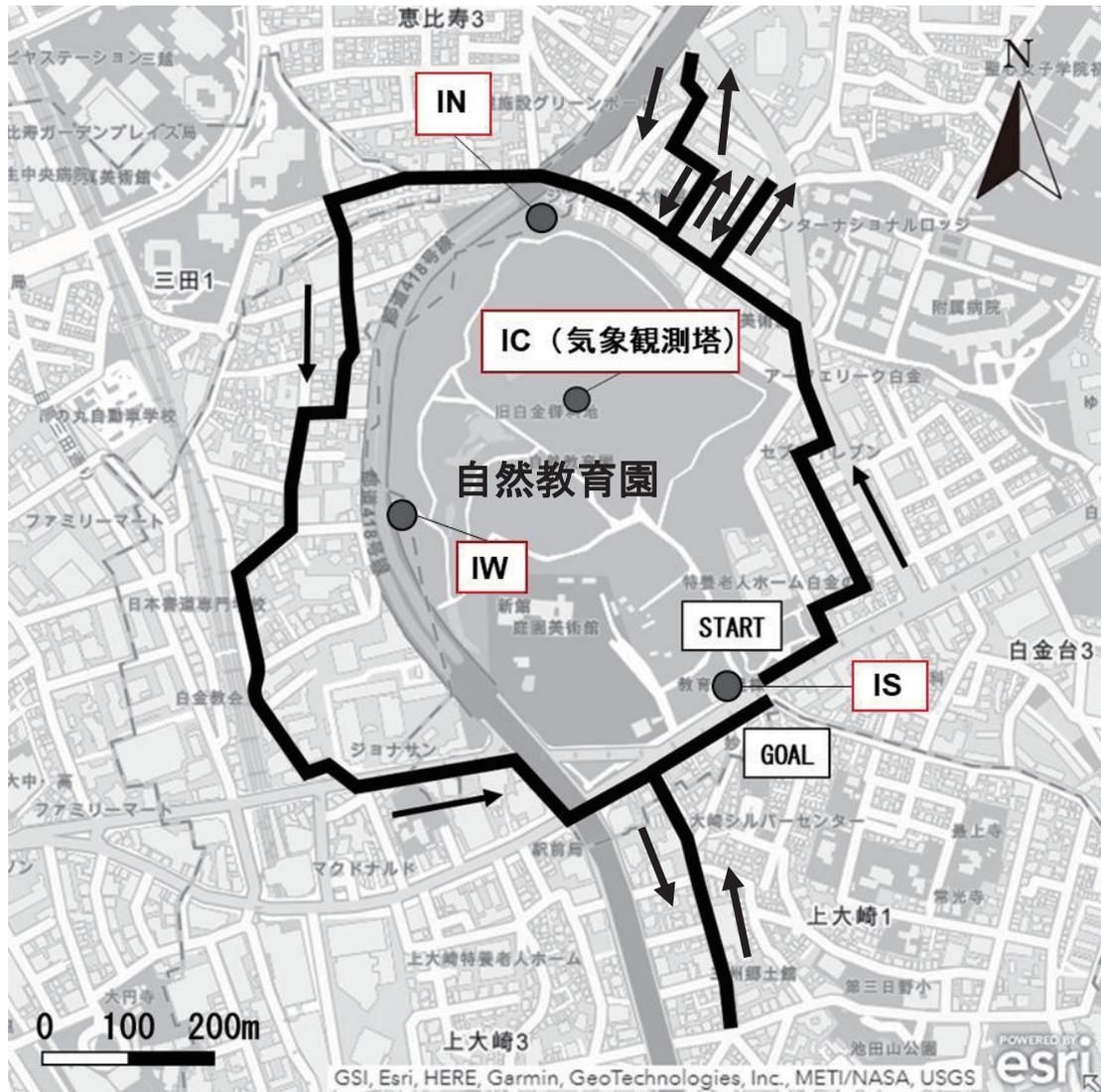


図1. 定点観測位置と移動観測経路。  
●は定点観測位置、実線は移動観測経路を表す（道路路線図・幅員マップを加工して作成）。

### 3. 水蒸気圧とWBGTの計算

水蒸気圧  $e$  (hPa) は、気温  $T_d$  (°C) と相対湿度 RH (%) を用い以下の式によって計算した：

$$e = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 \times T_d}{T_d + 237.3}} \times RH \times \frac{1}{100} \dots (1)$$

WBGT (°C) は、以下の式によって計算した。

$$WBGT = 0.7 \times T_w + 0.2 \times T_g + 0.1 \times T_d \dots (2)$$

$T_w$  は湿球温度 (°C) であり、気温 (乾球温度,  $T_d$ ) と相対湿度から算出した。 $T_g$  は黒球温度 (°C) である。

### 4. クールアイランド強度

都市緑地がもたらすクールアイランド効果を強度として示すため、クールアイランド強度 (CII: Cool Island

Intensity) を指標として用いた。クールアイランド強度は緑地内の気温から周辺市街地の気温を減じた値であり、この値が負を示した時がクールアイランド効果が発現し、絶対値が大きいほど、クールアイランド効果が強く明瞭に現れていることを示す (浜田・三上, 1994)。本研究では、IS 地点を風上市街地として IC 地点と IN 地点の2地点のクールアイランド強度を算出した。

### 5. シミュレーション設定

自然教育園における周辺市街地への冷却効果と風の影響を検証するため、数値モデル ENVI-met (Version 5.6.1) を使用し、気温と風向風速を推定した。対象サイトのモデル領域を作成するため、オープンソースの地理情報システム QGIS 内の ENVI-met のプラグイン

表 1. 移動観測実施日の天候及び風況. 天候は気象庁 (2021) のデータを利用した.

日付	時間	気象庁北の丸公園 (風向風速は地上 35.3 m) (気温は地上 1.5 m)				自然教育園 気象観測塔 (地上 20 m)	
		気温 (°C)	日照率 (%)	風向	風速 (m/s)	風向	風速 (m/s)
8/1	12:58-13:22	33.4	100	SSE	5.3	SSE	2.4
8/4	14:22-14:49	33.3	100	SSE	3.8	ESE	1.7
8/11①	13:05-13:29	32.0	100	SE	4.8	E	1.9
8/11②	13:30-13:52	32.0	100	SE	4.8	ENE	1.6
8/20①	12:38-13:04	32.7	100	SE	6.0	SSE	3.1
8/20②	13:04-13:28	32.6	100	SSE	5.1	SE	3.7
8/20③	13:28-13:52	32.6	100	SSE	5.1	SE	2.8
8/22①	13:10-13:38	32.6	67	S	2.1	SSW	2.1
8/22②	13:38-14:02	32.6	93	S	2.1	S	2.2
8/26	13:49-14:15	35.0	87	SSE	3.5	SSW	1.9
8/27①	12:20-12:44	32.7	33	NE	2.6	E	2.2
8/27②	12:45-13:11	34.0	23	SE	2.4	E	2.2
8/28①	12:09-12:31	33.9	100	SSE	3.6	ESE	1.8
8/28②	12:32-12:56	33.9	100	SSE	3.6	E	2.3

表 2. シミュレーション設定の詳細.

X-Y-Z 分解能 (m)	10×10×5
グリッド数	358×276×18
モデルの高さ (m)	90
解析時間	11 時間(4:30 から 15:30)
解析対象日	2023 年 8 月 19 日
設定風向/卓越風向(°)	136
風速 (m s <sup>-1</sup> )	3.8
粗度 (m)	0.01(デフォルト)

(Geodata ENVI-met Ver5.6.1) を使用した。各レイヤの作成には各公共機関等が公開するオープンデータを用いた。数値シミュレーションにおける初期条件や計算条件は表 2 の通りに設定した。解析領域は流入境界付近の結果が乱れることが予想されたため、自然教育園の約 5 倍の大きさに設定した。

気温の計算結果を検証するため IS 地点・IC 地点・IN 地点における気温の実測値と ENVI-met による予測値 (高度 1.2m) を比較した (図 2)。ENVI-met の鉛直分解能 (5m) を考慮すれば、両者は概ね一致していると言える。

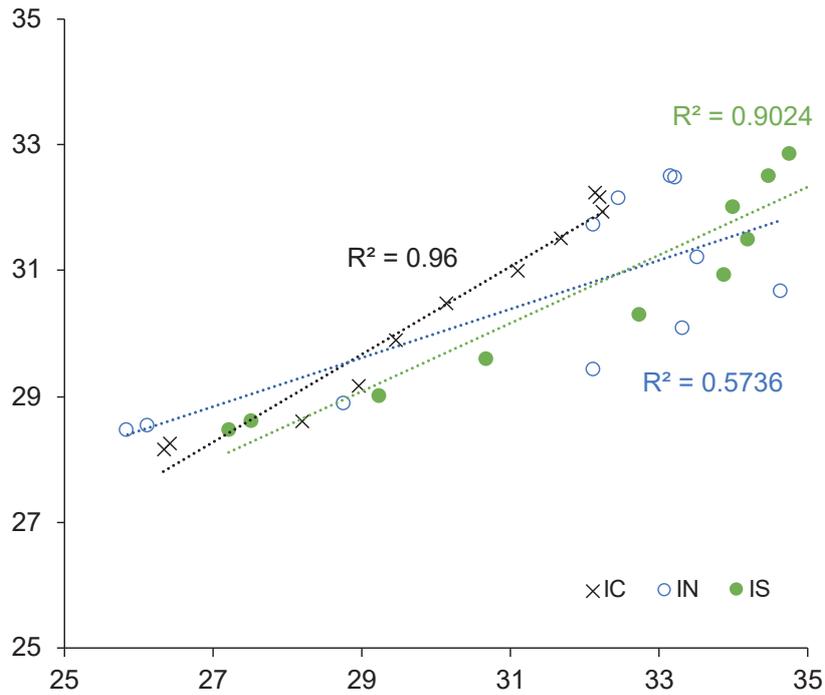


図 2. 3 地点における実測値と ENVI-met による予測値の比較.

## 結果および考察

### 1. 自然教育園内外の微気象分布

2021 年に実施した自然教育園内での定点観測と周辺市街地での移動観測の結果を比較したところ、自然教育園内と周辺市街地の気温差（平均値 ± 標準偏差）は  $-4.4 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$  ( $n = 10$ ), 水蒸気圧差は  $+ 3.0 \pm 1.4 \text{ hPa}$ , ( $n = 10$ ), WBGT 差は  $-4.2 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$  ( $n = 8$ ) となった。自然教育園内の林床は日向も含む周辺市街地よりも低温で湿潤であり、暑さ指数も低く、明瞭なクールアイランドとなっていたと示された。

移動観測の結果、自然教育園から周辺市街地への冷涼な空気の影響がみられた日は、気象観測塔で強い南風が観測された日（8月1日, 8月20日）であった。一例として8月20日における周辺市街地の気温、水蒸気圧の分布を図3に示す。気温は北西、南側に比べて北東側の方が最大で  $1.5^{\circ}\text{C}$  低かった。水蒸気圧は、北西、南側に比べて北東側の方が最大で  $2.0 \text{ hPa}$  低く、風下である北西側ではなく、自然教育園内の谷地形が到達した北東側に低温で湿潤な空気が移動した可能性が示された。

自然教育園から周辺市街地への空気の移流には南寄りの強い海風の他に2つの要因が考えられる。1つ目は、自然教育園内から北東方向に延びる谷地形である。Shimizu (2012) は、夜間の冷気のにじみ出し現象は、

谷底に蓄積した冷気が谷に沿って流出して発生したと報告している。日中は地表面が放射加熱をしているため密度の重い冷気の輸送は考えにくい、地形により谷に沿って北東方向に風が流れたと考えられる。2つ目は、自然教育園の西側の縁に沿って通る首都高速道路の存在である。Shimizu (2012) は夜間の冷気のにじみ出し現象において、上空に首都高速道路の通った4車線道路が冷気の移動を妨げているとの報告をしている。よって日中においても、風による自然教育園内の冷気の運搬が阻害され、本来風下である北西側に緑地の空気が届いておらず、自然教育園の低温、湿潤な空気の影響を受けなかったと考えられる。

一方、WBGT は気温や水蒸気圧の分布とは異なり、北東、北西、南側の3地点での地点間差がほとんどみられなかった（図4）。これは WBGT は気温と湿度の両方影響を受け、北東側では他の2地点に比べ気温は低い水蒸気圧が高いことから、湿度上昇が、気温低下による WBGT 低下を相殺したためといえる。さらに、「日常生活における熱中症予防指針」（日本生気象学会, 2022）に基づいた暑さ指数の分布（図5）では、ほとんどの場所で「嚴重警戒」レベルとなっており、どの場所でも熱中症の危険性が十分に高いことが示された。

ケース1とは異なり東寄りの風（8月11日, 8月27日）が観測された場合は気温分布が異なった。8月11日のケ

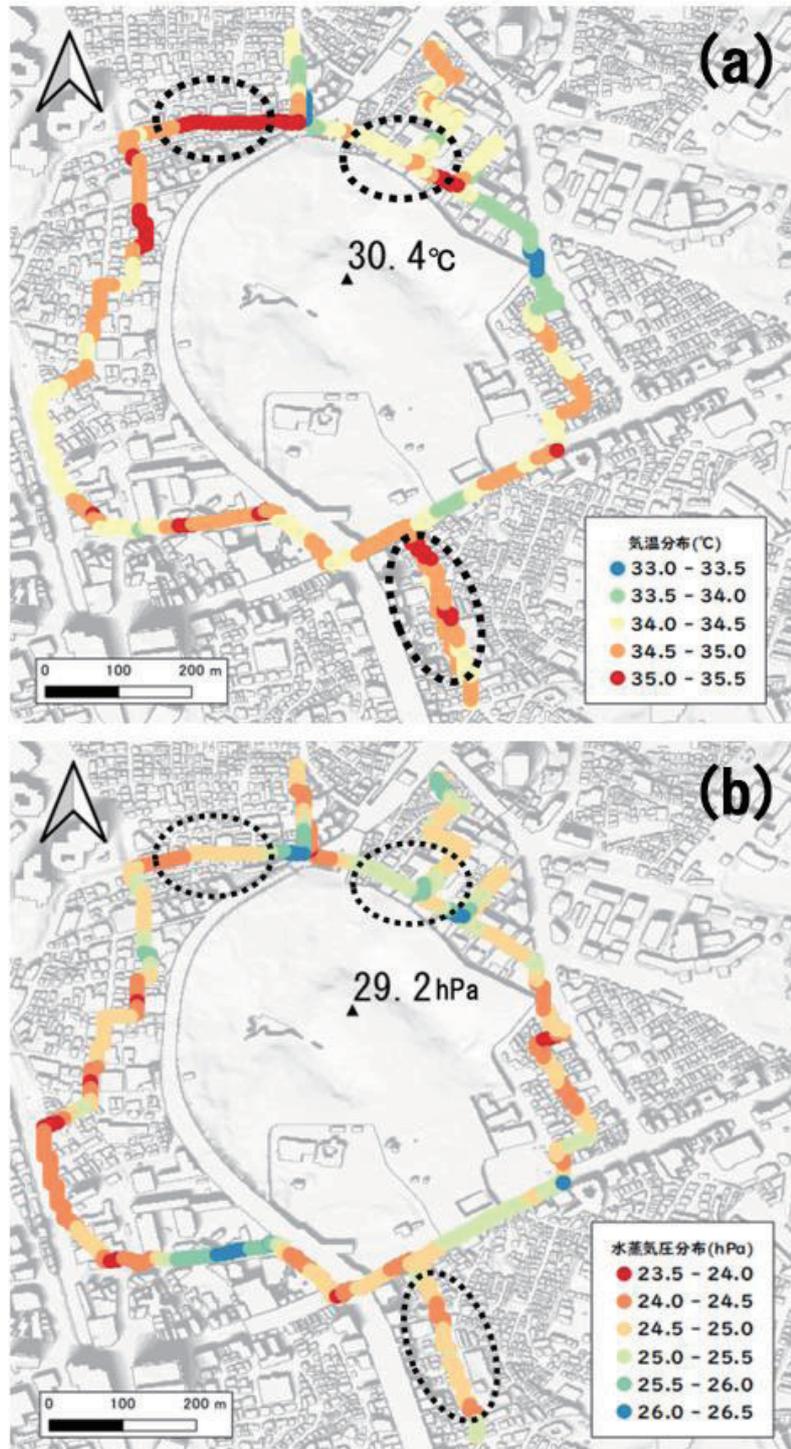


図3. 8月20日 12:38～13:04における (a) 気温 (b) 水蒸気圧の移動観測の結果.

ースでは、平均気温は北東側が29.2℃、北西側が34.0℃、南側が34.7℃であった（図6、表1、なお、8月11日は、水蒸気圧データの欠損があったので気温分布のみを図6に提示した）。8月1日と8月20日の結果と比べると両日で南側は気温が高かったが、北西側より北東側で気温が低い傾向はみられず、むしろ北東側の方が高い箇所もみられた。8月27日のケースも同様の結果が得られた

（図7）一方、水蒸気圧は8月1日と8月20日と同様に、南側と北西側と比べて北東側の方が高かった。このように北東風が観測された日は、気温と水蒸気圧の分布に南寄りの海風の日のような特徴がみられず、前述のような風と地形、構造物による空気塊の輸送が起りにくかったと推察される。8月27日における WBGT の分布（図8）は南風が吹いた日と同様に、3地点でほとんど同じにな

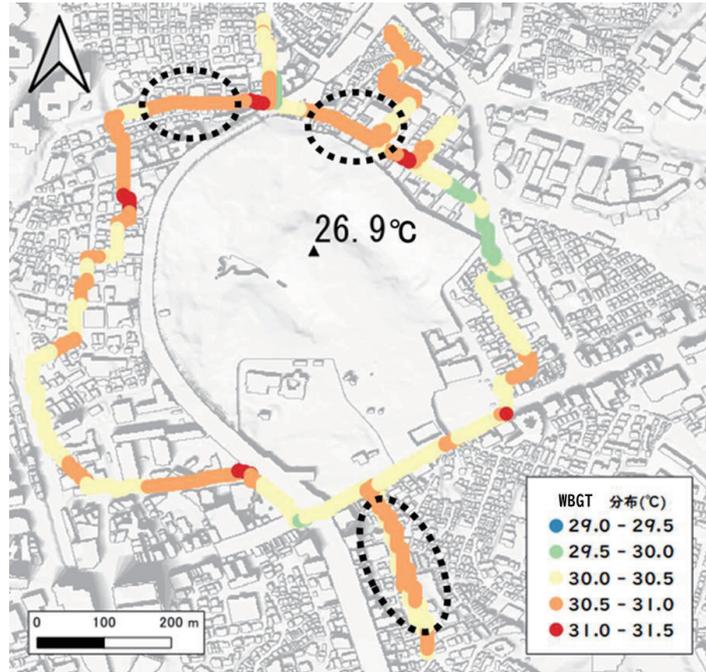


図4. 8月20日 12:38～13:04のWBGTの移動観測の結果.

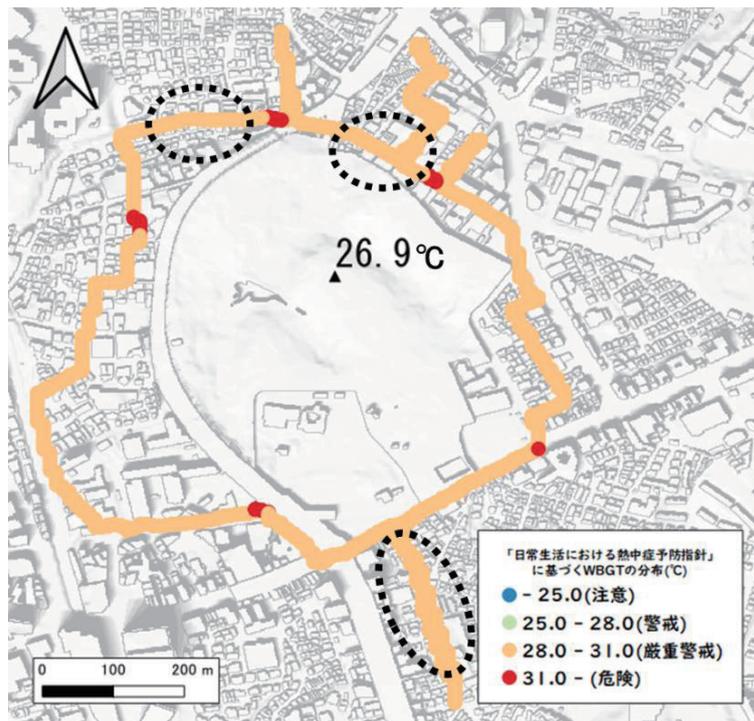


図5. 8月20日 12:38～13:04における「日常生活における熱中症予防指針」に基づくWBGTの分布.

り、「日常生活における熱中症予防指針」（日本生気象学会）においてもすべての地点で「危険」レベルとなっていた（図9）。

2. 2022・2023年の自然教育園内の微気象の地点間差  
晴天日日中におけるIS地点を基準としたIC地点と

IN地点の平均気温と平均水蒸気圧、及び平均WBGTの差を図10に示す。平均気温はIC地点、IN地点ともにIS地点よりも有意に低く、その差は2～3℃であった。一方、IC地点とIN地点では、平均気温の差がほとんどなかった。市街地に隣接し影響を受けた地点より緑地中央や北端で気温が低かったことは、自然教育園がクール

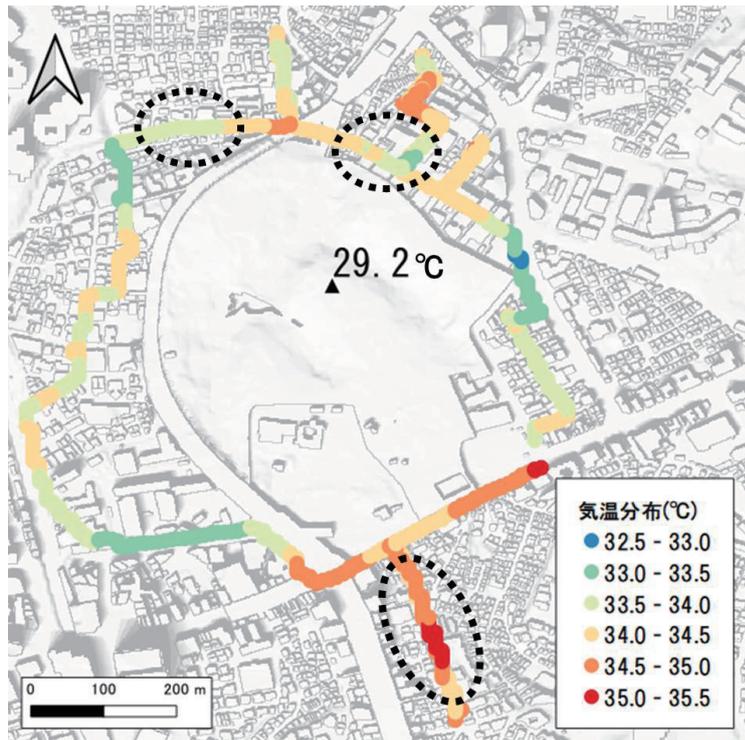


図 6. 8月11日 13:05～13:29における気温の移動観測の結果。

アイランドの機能を持ちその影響が北側に及びやすいことを示す。この結果は、菅原（1979）が自然教育園内で移動観測によって気温や相対湿度を測定した研究と分布が類似しており、自然教育園の風下側への冷気の移流が示唆された。また、自然教育園の外周では北東側市街地の気温が低かったことから、夏季日中においても自然教育園内から風下への冷気の移流が存在し、その影響が自然教育園外に影響することが考えられた。

水蒸気圧はIS地点で最も低く、IC地点、IN地点と高くなり、この順で湿潤であったことがわかった。水蒸気圧は植生の蒸散や地表面からの蒸発、大気の混合など、植生や地形の影響を受けたためと考えられる。

平均WBGTは、IS地点28.8℃、IC地点で28.3℃、IN地点で28.5℃であり、その差はほとんどみられなかった（図11）。WBGT値は湿球温度の占める割合が7割と大きいため、気温が低下しても水蒸気圧の増加により気温の低下分を相殺し地点間差が小さかったと考えられる。また、「日常生活における熱中症予防指針 Ver.4」（日本生気象学会、2022）によると、すべての地点で「嚴重警戒」レベルの温度基準域となっており、夏季日中の日陰における自然教育園と市街地の人間の快適性はあまり差がないことがわかった。

### 3. 風速とクールアイランド強度の関係

既往の研究では気温におけるクールアイランド強度（CII, Cool Island Intensity, ある地点と市街地の影響を受けた地点の気温の差）は風速に依存することが報告されている（菅原ほか、2006）ことから、2022年、2023年の夏季日中（計29日）におけるIC地点の樹冠上で測定した風速のクールアイランド強度との関連を調査した。

IC地点のCII（IC地点とIS地点の気温差）は3℃程度であり風速とは相関関係が認められなかった。一方IN地点のCII（IN地点とIS地点の気温差）は風速と負の相関関係があり（図12）、強風ほどクールアイランド強度が大きくなった。菅原ほか（2006）の研究によると、調査サイトの植物に葉がついている季節は、日中の市街地と緑地の気温差は風速が大きいかほど小さくなることを示している。また、Lu *et al.* (2017) は数値シミュレーションを用いて異なる風速における気温の空間分布を解析し、風速が大きいかほどクールアイランド強度が小さくなる（市街地と緑地の気温差が小さくなる）ことを示した。これらの既往研究では強風ほど緑地と市街地の大気がよく混合し気温差（クールアイランド強度）が小さくなったと考えられる。本研究でICのCIIが風速に依存しなかったのはICは密な森林の林床にありキャノピー外の風の影響がほとんどなかったためと推察される。一方、INは木が密生し

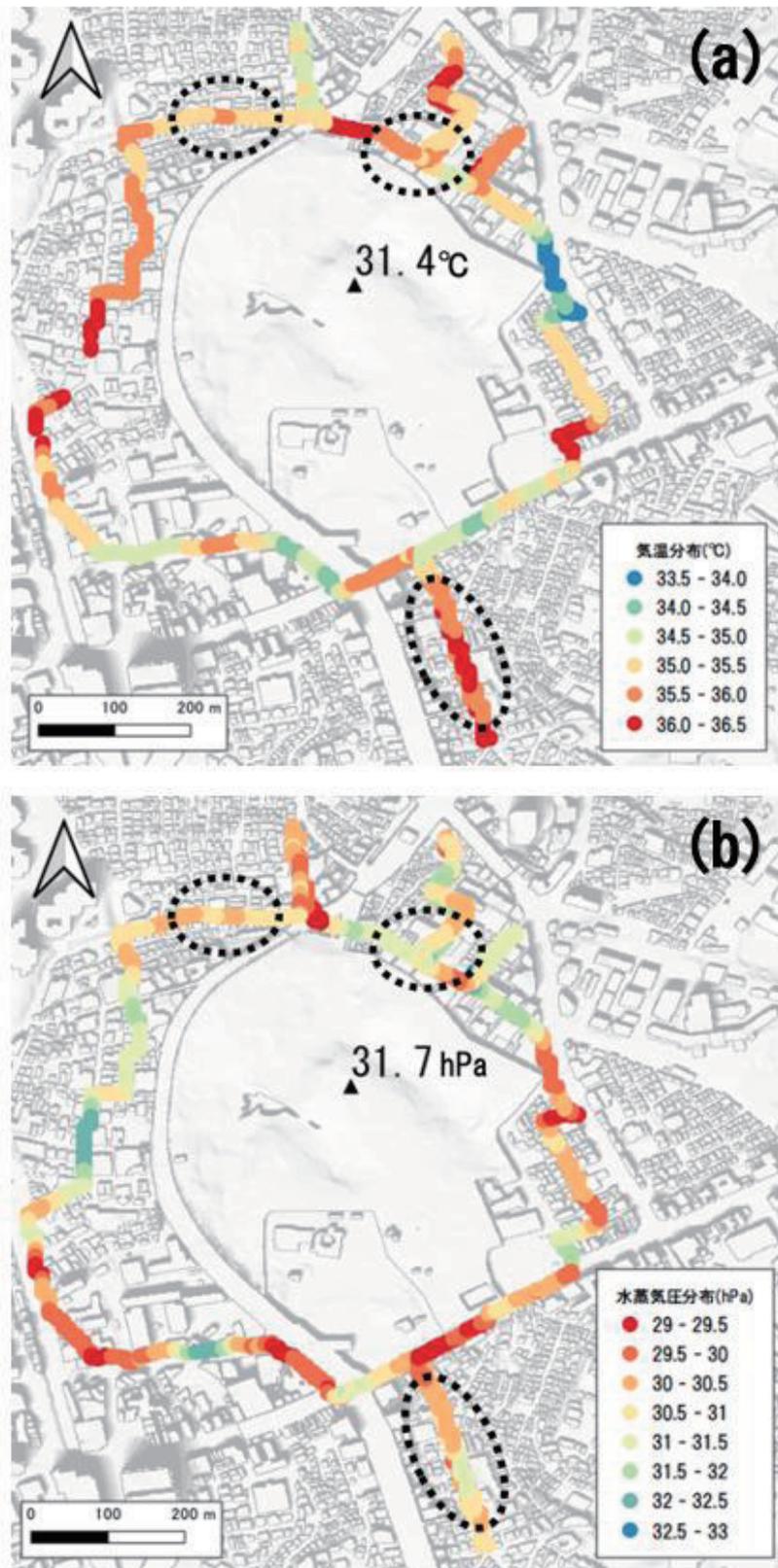


図7. 8月27日 12:20～12:44における (a) 気温と (b) 水蒸気圧の移動観測の結果.

た森林の縁にあり風速が小さく、キャノピー外の風速が大きいときのほうが緑地の冷却された空気塊が到達しやすかったと考えられる(浜田・三上, 1994; 成田, 2009)。

#### 4. シミュレーションによる微気象解析

##### 1. 気温分布

ENVI-met を用いた自然教育園とその周辺市街地の気

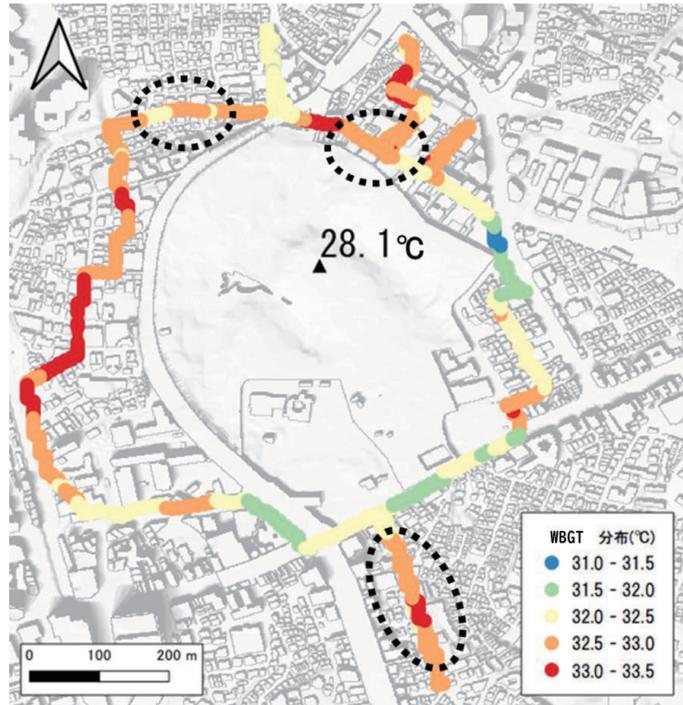


図8. 8月27日 12:20～12:44のWBGTの移動観測の結果.

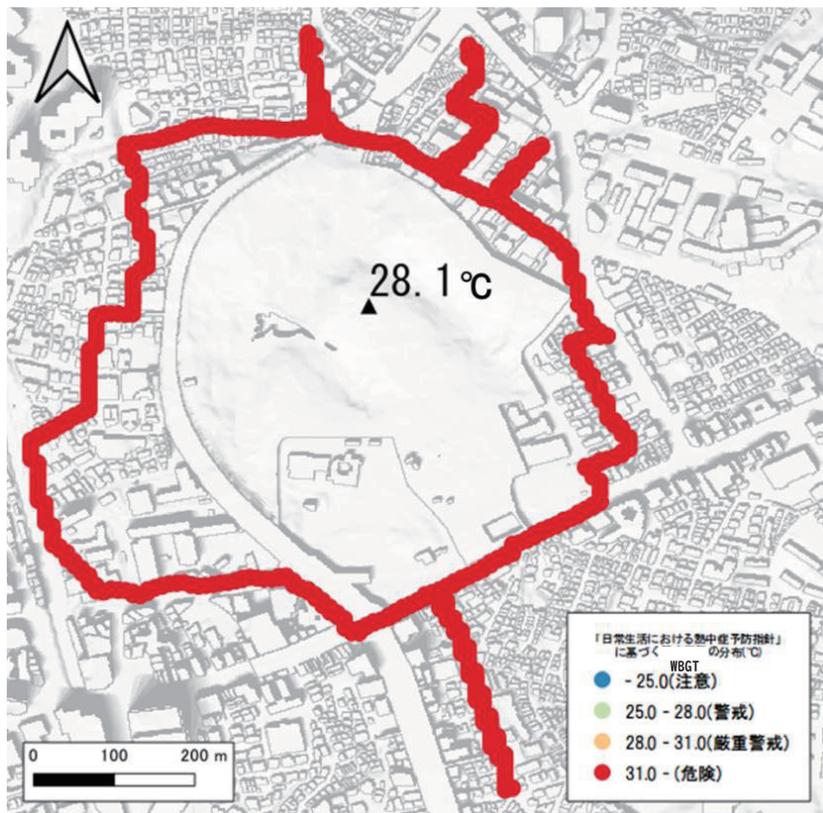
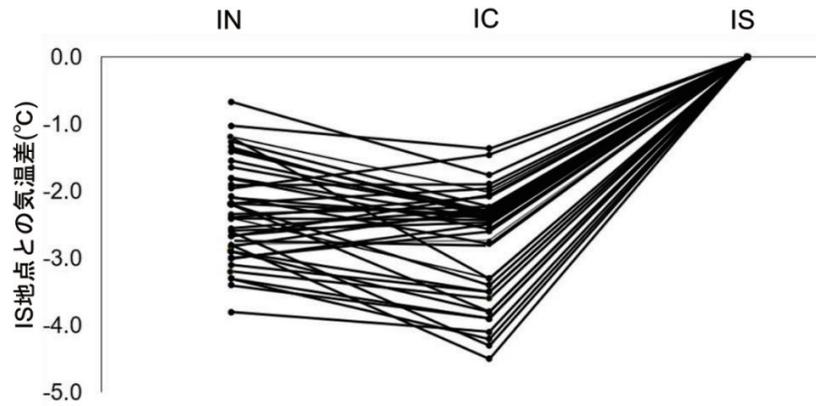


図9. 8月27日 12:20～12:44における「日常生活における熱中症予防指針」に基づくWBGTの分布.

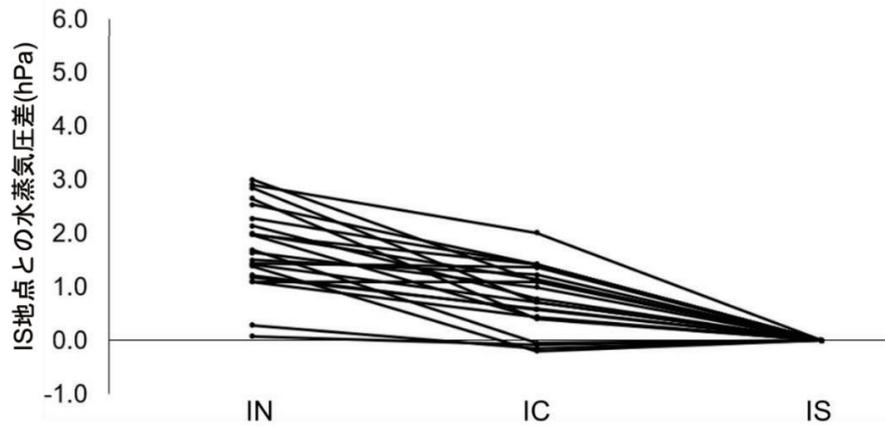
温予測の結果を図13に示す。この結果から自然教育園が周辺市街地よりも気温が低いことがみられた。また、南東風をシミュレーションによって吹かせた場合、自然

教育園内の相対的な低温領域が風下側である北東側にずれることが示された。ENVI-metを用いて都市公園の冷却効果を検証した既往の研究においても、東西南北の4

(a) 平均気温



(b) 平均水蒸気



(c) 平均 WBGT

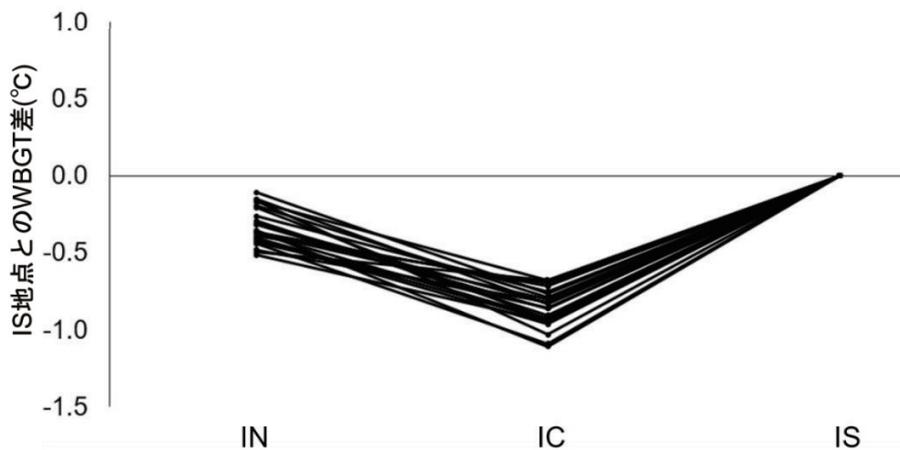


図 10. 各日ごとの夏季日中における (a) 気温, (b) 水蒸気圧, (c) WBGT の地点間差.

方向すべての風向において都市公園内の低温域が風下側にずれていること示された (Lu *et al.*, 2017)。本研究において、緑地内の冷気が IN 地点を超え、北東側市街地まで及ぶことが示されたが、シミュレーションの結果はそれを裏付ける結果であった。さらに気温分布の結果か

ら自然教育園に隣接する西から北西市街地は本来南東の海風の風下であるものの、相対的な高温域となることが示された。これは首都高速道路により冷気の移流が妨げられたためと考えられる。

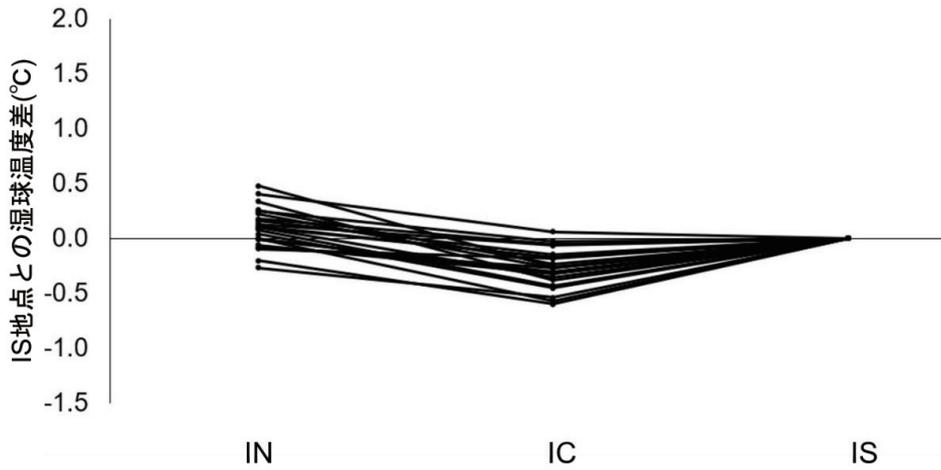


図 11. 各日ごとの夏季日中における湿球温度の地点間差.

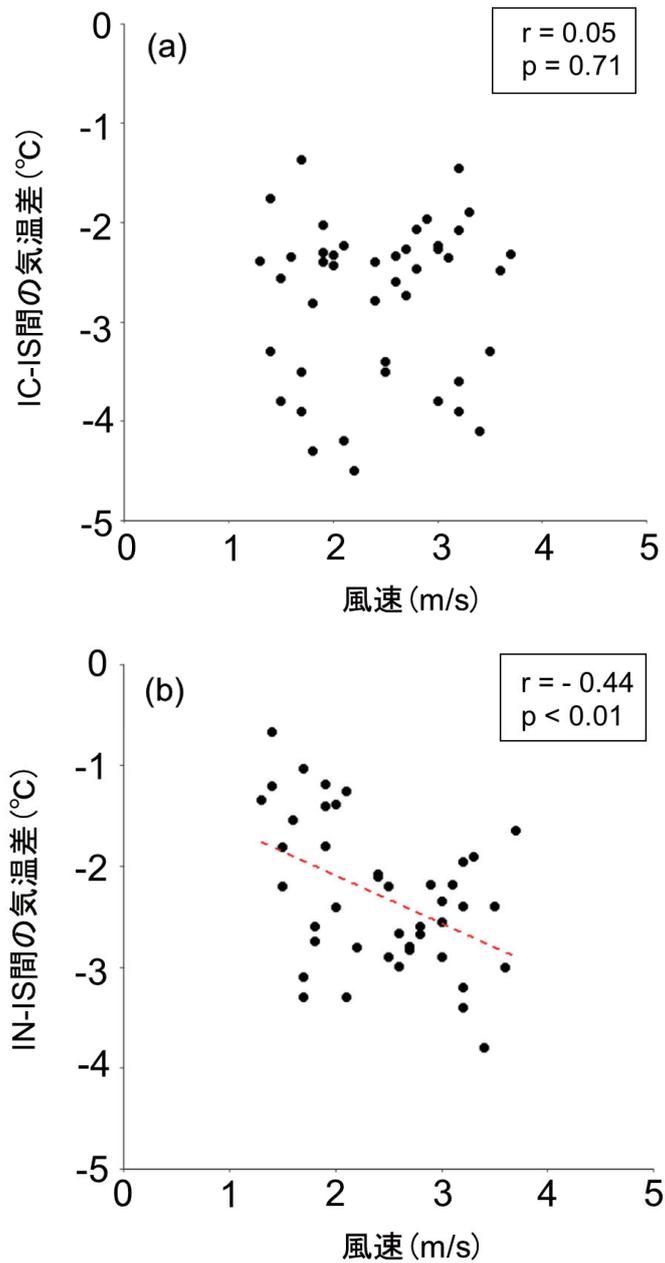


図 12. IC における風速と (a) IC-IS 間と (b) IN-IS 間の温度差の関係 ( $n = 43$ ).

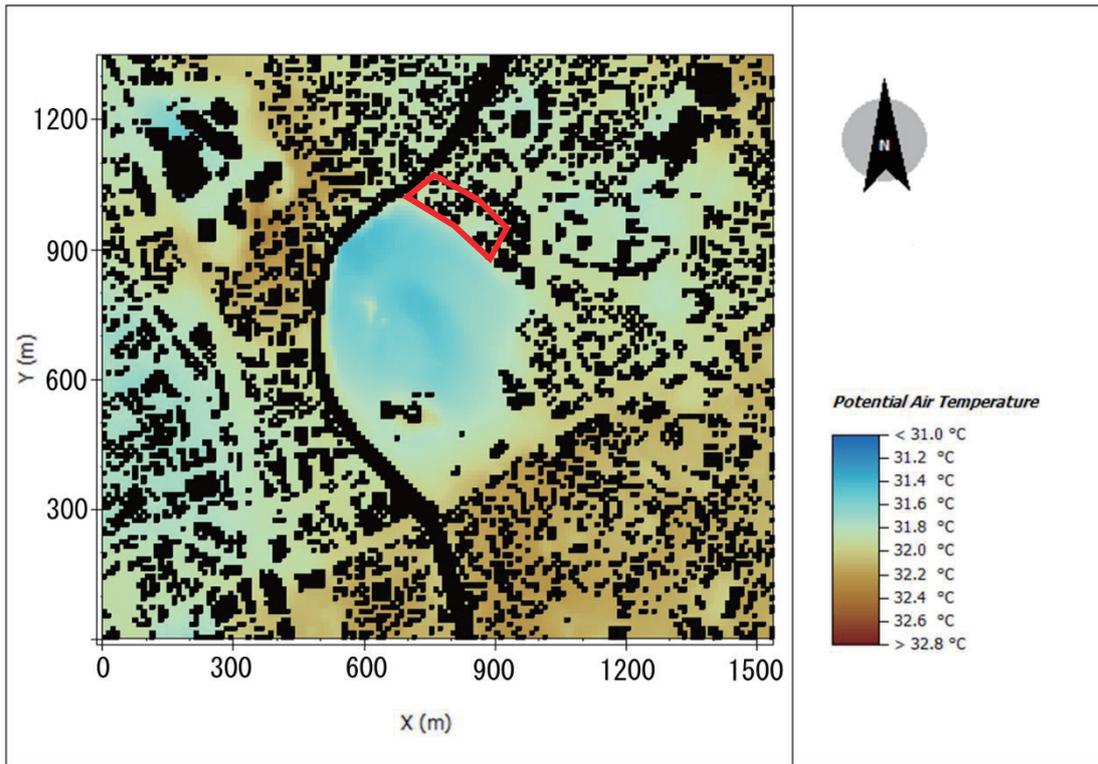


図 13. 数値シミュレーションによる気温予測の結果 (12 : 30).

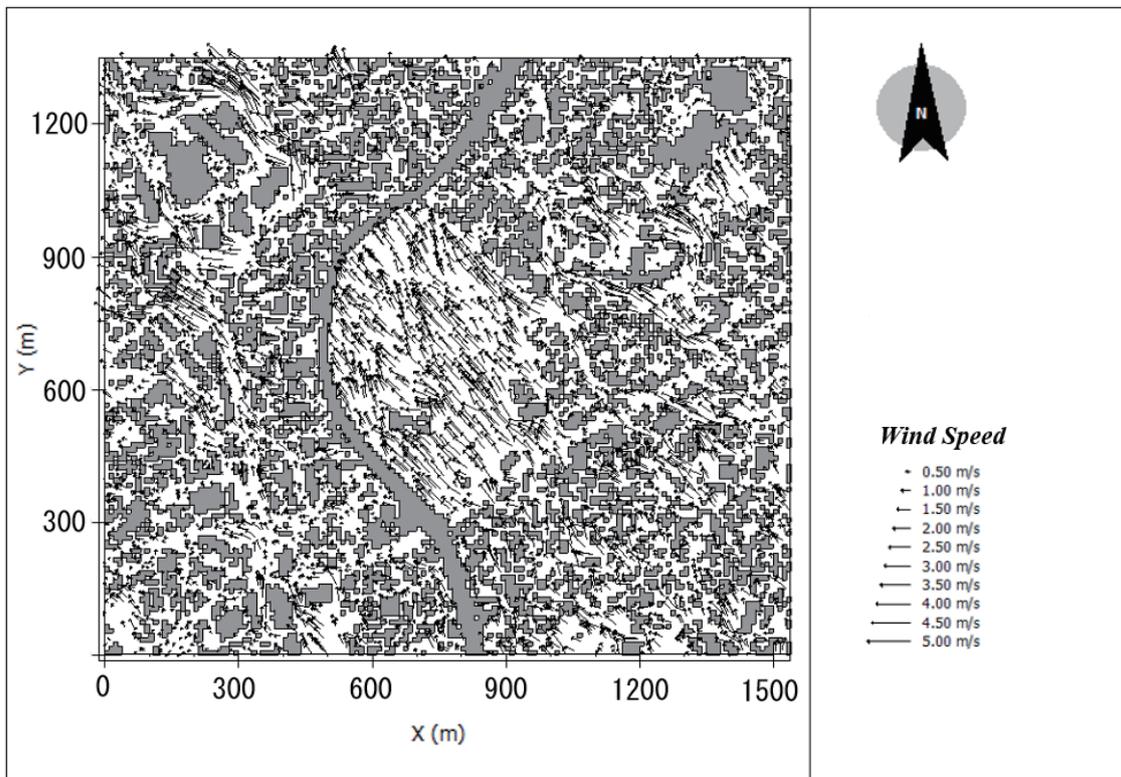


図 14. 数値シミュレーションによる風況予測の結果.

## 2. 風況

本研究の対象期間である 2023 年 8 月 19 日の 12 時 30 分における地表面または植生面から 1.0m 高さの予測結

果を図 14 に示す。シミュレーションの結果から、自然教育園西側の首都高速道路により、風の遮断や北寄りへの風向の変化が示された。自然教育園の周囲の移動

気象観測の結果、本来風下である西～北西市街地が他の地点に比べ、高温・乾燥していたが、これは緑地内の低温・湿潤な空気が到達しなかったためと考えられる。Shimizu (2012) の自然教育園での夜間における冷気のにじみだし現象の研究でも首都高速道路による西側市街地への冷気の移流の妨害があることを示した。本研究の風況予測より首都高速道路による風向変化や風の遮断の現象が確認できたことから、構造物もまた、緑地の低温湿潤な空気の移動に影響を及ぼすことが示された。

## まとめ

本研究では2021年の夏季日中における自然教育園の周囲の移動観測と2022年から2023年の夏季日中における自然教育園における定点観測の結果に基づき、自然教育園が周辺市街地へもたらすヒートアイランド緩和効果やそのプロセスについて検討した。

移動観測の結果からは以下のことが明らかになった。

- (1) 都市緑地内の冷気は南風により周辺市街地へと運搬され、気温を低下させ、水蒸気圧を上昇させる。
- (2) 緑地周囲の暑さ指数 WBGT は、移動観測ルート内での地点間差は小さく、人間の暑熱環境において都市緑地による緩和効果は大きくなかった。

さらに上記の結果に基づき実施した定点観測から以下のことが明らかになった。

- (1) 市街地の影響を受けた IS 地点、自然教育園の中央部林床に IC 地点、緑地の風下で市街地に隣接した IN 地点の3地点では気温や水蒸気圧の地点間差が大きかった。一方で人間の快適性の指標である WBGT は地点間による差が小さかった。
- (2) IS 地点との気温差で示されるクールアイランド強度 (CII) は IN 地点で強風ほど大きくなり、緑地からの周辺市街地への冷気の移流が風によって促進され、それが風下の緑地縁まで及ぶことがわかった。
- (3) シミュレーションの解析より、南東～南の風が吹く場合、北東方向に伸びる谷地形や西側の首都高速道路の側壁に沿った風向の変化が生じ、それが緑地の風下に及び気温を低下させることがわかった。

本研究によって、比較的規模が大きい都心部緑地である自然教育園内の低温かつ湿潤な空気が風下の市街地側までに及ぶことが示され、ヒートアイランド現象の緩和

が期待できることがわかった。一方で、WBGT は差異がみられず、人間の暑熱環境の点では市街地・緑地のどの地点においても注意が必要であるといえる。

本研究では様々な課題も見つかった。本研究の対象であった都市は、緑地だけでなく、ビルや住宅地、道路などの熱的特性の異なる土地利用形態が存在 (浜田・三上, 1994) し、都市での気象観測はこのような局所的な変化を考慮する必要がある。本研究では2021年から2023年の夏季の約1か月のみでの結果となったが、より多くの日の観測事例の解析により、都市緑地が周辺市街地へ及ぼす影響についての理解が進むと期待される。

## 謝辞

本論文の実施にあたり、国立科学博物館附属自然教育園の遠藤拓洋様には観測器材の設置や調査のご同行を賜りました。防衛大学の菅原広史教授には気象観測塔の気象データのご提供を賜りました。明治大学農学部倉本宣教授、服部俊宏准教授には結果の取りまとめに際しご助言を賜りました。明治大学農学部環境気象学研究室の皆様にはフィールド調査にご協力賜りました。ここに心からお礼申し上げます。

なお、本論文は研究報告等編集委員会を通じ、査読者による査読を受けました。

## 引用文献

- 荒井祐美・矢崎友嗣, 多摩川下流部における河川と河川敷緑地が隣接市街地の気象に及ぼす影響, 湿地研究 (2024年10月受理, 印刷中).
- Bruse, M. & Fleer, H. 1998. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13 : 373-384.
- Bruse, M. 1999. Modelling and strategies for improved urban climates. *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millenium*, Sydney, 8-12.
- Chang, C.R., Li, M.H., & Chang, S.D. 2007. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 80 : 386-395.
- ENVI-met GmbH. 2023. ENVI-met v. 5.6.1 <http://>

- www.envi-met.com (2023年10月1日閲覧).
- 浜田崇・三上岳彦. 1994. 都市内緑地のクールアイランド現象 明治神宮・代々木公園を事例として, 地理学評論, 67: 518-529.
- 林電工株式会社. 2012. 「測温抵抗体・熱電対の応答速度について」<https://hayashidenko.co.jp/faq/159> (2024年10月1日閲覧).
- 飯田彩夏・矢崎友嗣. 2022. 風や地形が自然教育園の周辺市街地における気温分布に及ぼす影響 —自転車による移動観測調査—. 自然教育園報告, 54: 41-46.
- 日下博幸・高根雄也・阿部紫織・高木美彩・重田祥範・大橋唯太・布和宝音. 2012. オープンスペースで実施した定点観測によって捉えられた夏季晴天日におけるつくば市のヒートアイランド: 都市内外の気温差に関する不確実性の評価. 日本ヒートアイランド学会論文集, 7: 1-9.
- Lu, J., Li, Q., Zeng, L., Chen, J., Liu, G., Li, Y., Li, W., & Huang, K. 2017. A micro-climatic study on cooling effect of an urban park in a hot and humid climate. *Sustainable Cities and Society*, 32: 513-522.
- 丸田頼一. 1972. 公園緑地の都市自然環境におよぼす影響. 都市計画 69・70: 49-77.
- 三上岳彦. 2006. 都市ヒートアイランド研究の最新動向 —東京の事例を中心に—. *E-journal GEO*, 1: 79-88.
- 三上岳彦・菅原広史・清水昭吾・成田健一・萩原信介. 2011. 自然教育園と周辺市街地における夏季の気温移動観測. 自然教育園報告, 42: 25-29.
- 成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條毅・木村圭司・桑田直也. 2004. 新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみ出し現象. 地理学評論, 77: 403-420.
- 成田健一. 2009. 新宿御苑のクールアイランド. *空気調和・衛生工学*, 83: 663-668.
- 成田健一・菅原広史・横山仁・三坂育正・松島大. 2011. 皇居の冷気生成機能と周辺市街地への熱的影響に関する実測研究. 日本建築学会環境系論文集, 76: 705-713.
- 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」<https://seikishou.jp/cms/wp-content/uploads/20220523-v4.pdf> (2024年3月3日閲覧).
- Oke, T.R. 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects, *Wind climate in cities*, 81-107.
- Oke, T.R. 1989. The micrometeorology of the urban forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 324: 335-349.
- 小野雅司・登内道彦. 2014. 通常観測気象要素を用いた WBGT (湿球黒球温度) の推定. *日生気誌*, 50, 147-157.
- 大橋唯太. 2010. 新用語解説 温熱指標. *天気*, 57: 57-59.
- Shimizu, S. 2012. Mobile observations of temperature and wind at night in the vicinity of an urban green space. *Geographical reports of Tokyo Metropolitan University*, 47: 51-58.
- Soudoudi, S., Zhang, H., Chi, X., Müller, F., & Li, H. 2018. The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34: 85-96.
- Spronken-Smith, R. A. & Oke, T. R. 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 2085-2104.
- 菅原広史・成田健一・三上岳彦・本條毅・石井康一郎. 2006. 都市内緑地におけるクールアイランド強度の季節変化と気候条件への依存性. *天気*, 53: 393-404.
- 菅原広史・成田健一. 2003. クールアイランドの形成. *日本風工学会誌*, 97: 23-27.
- 菅原広史・清水昭吾・成田健一・三上岳彦・萩原信介. 2013. 自然教育園における日中の熱輸送 —市街地との比較—. 自然教育園報告, 44: 9-13.
- 菅原十一. 1979. 自然教育園の微気象 (4): 日中の気温および湿度分布, 自然教育園報告, 9: 33-42.
- Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A. & Huang, J. 1988. Residential cooling loads and the urban heat island - the effects of albedo. *Building and Environment*, 23: 271-283.
- Wu, Z., Man, W., & Ren, Y. 2022. Influence of tree coverage and micro-topography on the thermal environment within and beyond a green space. *Agricultural and Forest Meteorology*, 316: 108846.