

横浜における都市の熱環境の改善に向けた研究
成果報告書

2023年3月

横浜市環境創造局環境科学研究所

国立研究開発法人海洋研究開発機構

目次

第1章 はじめに

- 1.1 取組の背景P.1
- 1.2 取組の目的P.1
- 1.3 取組の実施期間P.1

第2章 共同研究の取組内容と体系.....P.2

第3章 JAMSTEC のシミュレーションについて

- 3.1 地球シミュレータ.....P.3
- 3.2 シミュレーションモデル.....P.3

第4章 実測調査に用いた観測機器及び WBGT の算出について

- 4.1 実測調査に用いた観測機器の観測項目及び方法.....P.6
- 4.2 WBGT の算出.....P.8

第5章 各取組内容について

- 5.1 地表面等の保水化及び緑化の効果検証P.10
- 5.2 微細ミストの効果検証.....P.16
- 5.3 街路樹の剪定方法の違いによる暑熱環境の差の検証.....P.27
- 5.4 みなと大通り及び横浜文化体育館へのアクセス動線での現況の暑熱環境について.....P.44
- 5.5 市内気温の将来予測(2℃上昇及び 4℃上昇の事例).....P.54
- 5.6 成果の発信・活用状況.....P.67

第6章 総括.....P.68

第1章 はじめに

1.1 共同研究の背景

横浜市と国立研究開発法人海洋研究開発機構（以下、JAMSTEC）は海洋に関する産業・研究・教育などの活動について連携を強化することにより、横浜経済の活性化や教育、市民生活の向上などに資することを目的として、平成 29 年9月に「地域活性化に関する包括連携協定（以下「協定）」を締結している。

この協定の対象分野の1つとして「都市環境の課題解決に関すること」が掲げられており、都市を対象とした気象シミュレーションなどを通じて、研究成果のまちづくりへの活用を推進していくとある。

横浜市環境創造局環境科学研究所（以下、環境科学研究所）では、都市の熱環境の把握と改善のため、市内 36 地点での気温観測や、公園及び公共施設などでの暑さ対策の効果検証などを実施している。一方で、暑さ対策の効果検証については実測調査の実績はありつつも、検証は局所的かつ事例ごとにとどまり、異なる気象条件下での影響など様々な観点からの検証が困難であった。このため、市域の他施設や地域での事前予測をもとにした事業推進などの水平展開につなげることが課題となっていた。

JAMSTEC は数値シミュレーションや解析技術に関する豊富な実績を有しているが、技術の活用機会を拡充していくため、数値シミュレーション結果と実際の現場での調査結果との比較検討など、活用事例を増やしていく機会を模索していた。

環境科学研究所と JAMSTEC が相互に連携することにより、それぞれのノウハウを活かし、市内の熱環境の改善に向けた取り組みを進めることができると考え、協定に基づき、2019 年 8 月に「横浜における都市の熱環境の改善に向けた研究」に関する覚書を締結し、以後 2023 年 3 月までの期間、共同研究を実施した。

1.2 共同研究の目的

暑さ対策の効果検証、検証結果の可視化、事業実施の際に活用できる暑さ対策効果の事前予測手法の確立など、横浜における都市の熱環境の改善に向けた研究を実施することを目的とする。

1.3 共同研究の実施期間

2019 年8月 15 日から 2023 年3月 31 日まで

第2章 共同研究の取組内容と体系

「熱環境調査及び数値シミュレーション解析による暑さ対策の効果検証」については、主に3つの取組を進めてきた。「暑さ対策技術の効果検証」と「樹木による緑陰の効果検証」は、各暑さ対策技術の効果に関する調査とシミュレーション解析に取り組んだものである。また「関内地区の暑熱環境の把握と改善に向けた取組」は、再整備を機にまずは現況の暑熱環境の把握をするため取り組んだものである。

「市内気温観測」に関連する取組としては、脱炭素化社会に向けた施策や気候変動への適応策（暑さ対策等）への活用を見据え、2℃上昇及び4℃上昇の事例で、数値シミュレーションによる市内気温の将来予測を実施したものである。

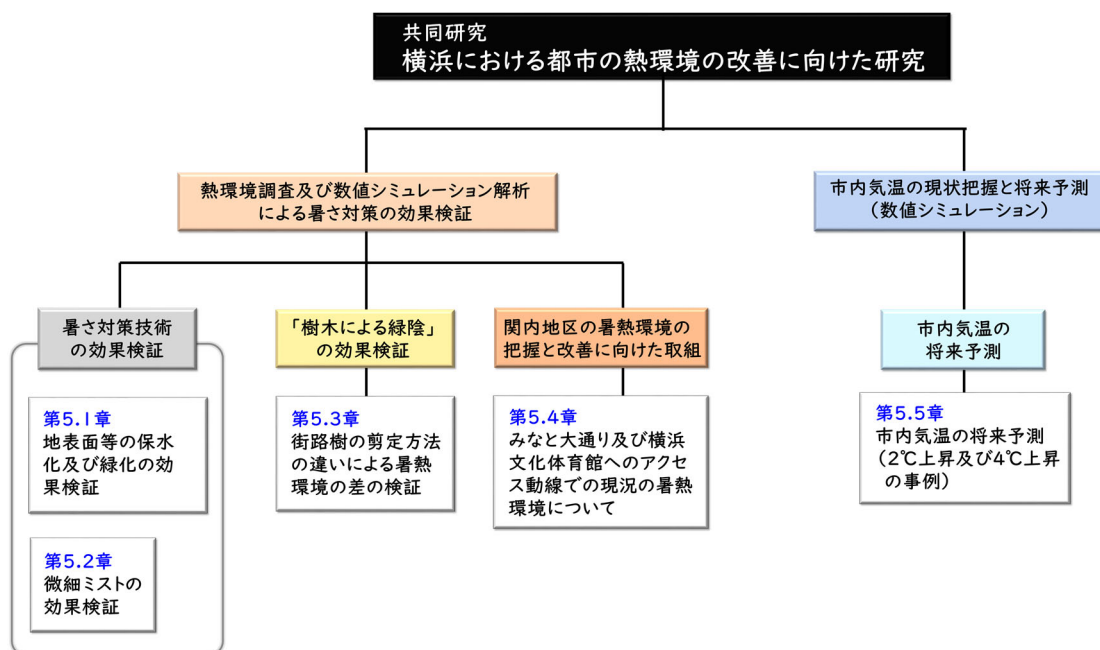


図 2 - 1 共同研究の体系と各取組の位置付け

第3章 JAMSTEC のシミュレーションについて

3.1 地球シミュレータ

地球シミュレータは、2002年3月に、地球温暖化を始めとする気候変動の解析・将来予測、地震や地球内部変動の解明等、世界に類を見ない「人類的課題に挑戦できる世界最速のスーパーコンピュータ」として運用を開始した。特に気候変動研究分野では、温暖化予測実験に広く利用され、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の報告書作成に大きく貢献した。また、その高い計算能力は、材料開発、輸送機器改良、デバイス開発、医薬品開発など、最先端の産業分野にまで広がり、従来のシミュレーション研究では到達できなかったレベルの成果が発表された。

その後、2009年3月、2015年3月、2021年3月に更新を行っており、現在は第4世代になる。これにより、従来では難しかった複雑なパラメータを扱うシミュレーションや、より大規模なシミュレーションを高速に行うことが可能となり、地球環境問題の解決や地殻変動、地震発生機構の解明や津波被害の予測などへの更なる貢献が期待される。



図3-1 地球シミュレータの外観 (JAMSTEC ホームページより引用)

3.2 シミュレーションモデルについて

共同研究では、JAMSTEC で開発されたマルチスケール大気・海洋結合モデル MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment、略称は“メッセージ”)を用いた^{1)~4)}。MSSGは全球スケール、メソスケール(特定の地域)、及び都市街区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、密度、運動量、圧力及び水物質の輸送方程式を逐次的に解くことで時間的に変化する大気場を計算する。全球～都市街区の各スケールでは、計算領域サイズに応じて異なる計算メッシュサイズ(解像度)が用いられ、高解像度の場合には、全球スケールで数km、メソスケールで数百m、都市街区スケールで数mの計算メッシュでのシミュレーションが可能である。全球及びメソスケールでは、個々の建物などの都市構造物は計算メッシュサイズよりも小さいため、建物群としての影響を都市キャノピーモデルにより考慮する。一方、都市街区スケールでは、建物などの形状が陽に解像されたシミュレーションを実行することができる。ここでは、便

宜的に全球・メソスケールでのシミュレーションを気象シミュレーション、都市スケールでの建物解像計算を微気象シミュレーションとして区別する。

気象シミュレーションでは、都市の影響以外にも様々な物理プロセスの影響を考慮するために、境界層モデル、雲物理モデル、放射モデル、地表面フラックスモデルなどの要素物理モデルを用いた計算を行う。地形に沿った計算格子を用い、メッシュごとの土地利用種別等の情報を入力することで、対象地域の特性を反映したシミュレーションを実行することができる。

微気象シミュレーションでは、微細なスケールの物理プロセスに適した要素物理モデルとして、建物や樹冠（樹木の葉の茂っている部分）の三次元的な分布に応じた三次元放射モデルや樹冠モデル、乱流輸送モデルなどを用いた計算を行う^{3),4)}。建物についてはボクセル法により表現し、建物が風の流れに及ぼす影響や、屋上や壁面での熱収支の効果などを計算することができる。樹冠については、葉面積密度の空間分布により表現し、風の流れを遮る効果、熱放射の効果及び樹冠と大気との熱・水蒸気の交換に及ぼす効果を計算することができる。なお、都市街区内の暑熱環境においては、気温と湿度だけでなく、太陽から差し込む日射や熱を持つ壁面から射出される熱放射等の放射熱も重要な要素である。そこで、複雑な三次元形状を持つ都市空間内での放射熱輸送を精緻に考慮するために、MSSG による微気象シミュレーションでは、建物や地面による日射の遮蔽・反射、樹冠による日射の透過・吸収・散乱及び建物・樹冠・地面などからの熱放射などの効果を考慮した三次元の放射計算を行うことができる^{3),4)}。

MSSG による微気象シミュレーションはこれまでも実在街区の暑熱環境評価に活用されてきた。2014年には、新国立競技場（旧設計案）周辺の暑熱環境評価を行い、そのシミュレーション結果が日本学術会議による提言の中で引用された⁵⁾。三菱地所設計と竹中工務店との共同研究では、丸の内パークビルの中庭の熱環境に及ぼす樹木の効果を解像度 1 m の微気象シミュレーションによって明らかにした⁶⁾。その後、環境省及び文部科学省からの協力要請に基づいて、2020 年東京オリンピック・パラリンピックを契機とした効果的な環境対策の在り方の検討の参考とするため、東京湾臨海部の緑地の効果の解析を実施した⁷⁾。その際には、東京湾臨海部をカバーする 12.5 km × 14.0 km を計算領域とした大規模シミュレーションを実施した。横浜みなとみらい 21 地区を対象とした暑熱環境解析では、冷涼な海風や緑陰による暑熱緩和効果の再現に成功した⁸⁾。2019年には、埼玉県の熊谷スポーツ文化公園を対象に集中観測と MSSG 建物解像計算を実施した結果が、暑熱対策のための公園改修計画に活用された実績がある⁹⁾。

参考文献：

- 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) 松田景吾、大西領、杉山徹、高橋桂子: 高解像度気象 Large-Eddy Simulation を用いた街区スケール暑熱環境解析、シミュレーション、38-3、138-144 (2019)
- 5) 日本学術会議環境学委員会・都市と自然と環境分科会による提言: 神宮外苑の環境と新国立競技場の調和と向上に関する提言、<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/division-15.html> (2023年3月時点)
- 6) 国立研究開発法人海洋研究開発機構、株式会社三菱地所設計、株式会社竹中工務店: 高層ビルに囲まれたオアシス緑地の低温化現象と樹木の効果 — 3次元連続観測と街区解像シミュレーションにより解明— https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20150319/ (2023年3月時点)

- 7) 国立研究開発法人海洋研究開発機構:超高解像度数値シミュレーションにより東京湾臨海部の緑地の効果を解析 ~2020 年東京オリンピック・パラリンピック競技大会を契機とした暑熱環境対策の検討に貢献、https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20160331_2/ (2023年3月時点)
- 8) 国立研究開発法人海洋研究開発機構:「海洋都市横浜」を海風利用で涼くさせるまちづくりへ —みなとみらい21 地区をフィールドとした数値シミュレーションと観測から解析—、https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20170519/ (2023年3月時点)
- 9) 埼玉県:スパコン技術を活用したヒートアイランド対策を検証!熊谷スポーツ文化公園で集中気象観測を実施、<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0001/news/page/2019/0725-07.html> (2023年3月時点)

第4章 実測調査に用いた観測機器及び WBGT の算出について

4.1 実測調査に用いた観測機器の観測項目及び方法

5.1～5.4章の実測調査では、気温、相対湿度、黒球温度、風向風速、日射量、赤外放射量、地表面温度、熱画像について観測または撮影するとともに、気温、相対湿度、黒球温度の各値を用いて、WBGT(暑さ指数)を算出した。

使用した観測機器の型番、仕様及び測定間隔等を表4-1-1に示す。

このうち、気温及び相対湿度は、温度・湿度センサーを自作の自然通風式シェルターに格納し、気象庁での温度計設置の基準¹⁾に準拠して、地表面から高さ約1.5mの位置で観測を行った。黒球温度は、温度センサーを直径約15cmの黒球の中心に格納し、地表面から高さ約1.5mの位置で観測を行った。

風向風速については、高さの規定はないが、周辺の地物の影響を受けないことが望ましいとある¹⁾。このため、風向風速計は観測機器の近傍にある自然通風式シェルターの影響を受けないよう、三脚に取り付けたものを、地表面から高さ約1.6mの位置に設定した。日射量及びの赤外放射量は、地表面からの影響を観測することが主であるため、日射計及び赤外放射計を地表面から高さ約0.3mに設置し、観測を行った。観測機器の設置状況の一例を図4-1-1に示す。

また5.2章の実測調査では環境科学研究所が所有する観測機器のほかに、JAMSTECが所有する観測機器(気温、相対湿度、風向風速、黒球温度、日射量)も併せて使用した。JAMSTECが所有する観測機器の型番、仕様及び測定間隔等を表4-1-2に、設置状況を図4-1-2に示す。

なお、5.3章及び5.4章のうち、街路樹に観測機器を括り付けて観測した場合のみ、歩行者の通行に支障をきたさないよう、地表面から高さ約2.5mの位置で観測を行った。

表4-1-1 環境科学研究所で使用した観測機器の型番・仕様・測定間隔

観測項目	メーカー	型番	測定範囲	測定精度	測定分解能
気温・黒球温度	(株)T&D	TR-52i	-60～155℃	±0.3℃	0.1℃
相対湿度	(株)T&D	TR-72wf	10～95%RH	±5%RH	1%RH
風向風速	NIELSEN-	Kestrel	0.4～40 m/s	±3%	0.1 m/s
	KELLERMAN	4500			
日射量	Hukseflux	LP-02	0～2000 W/m ²	±5%	—
	Kipp&Zonen	CMP-3E	0～2000 W/m ²	±5%	—
赤外放射量	Hukseflux	IR-02	-300～300 W/m ²	±10%	—
地表面温度	A&D(株)	H2630	-40～120℃	±2℃	0.03℃
熱画像	日本アビオクス(株)	R500S	-40～120℃	±2℃	0.03℃



図 4-1-1 環境科学研究所で使用した観測機器の設置状況 (5.1 章での観測より)

表 4-1-2 JAMSTEC で使用した観測機器の型番・仕様・測定間隔

観測項目	メーカー	型番	測定範囲	測定精度	測定分解能
気温	(株)フィールドプロ	複合気象センサー WXT520	-60~155℃	±0.3℃	0.1℃
相対湿度	(株)フィールドプロ	複合気象センサー WXT520	10~95%RH	±5%RH	1%RH
風向風速	(株)フィールドプロ	複合気象センサー WXT520	0.4~40 m/s	±3%	0.1 m/s
黒球温度	(株)フィールドプロ	温度センサー TPT100	-40~100℃	クラス A	—
日射量	(株)フィールドプロ	日射計 FMP3	0~2000 W/m ²	±5%	—

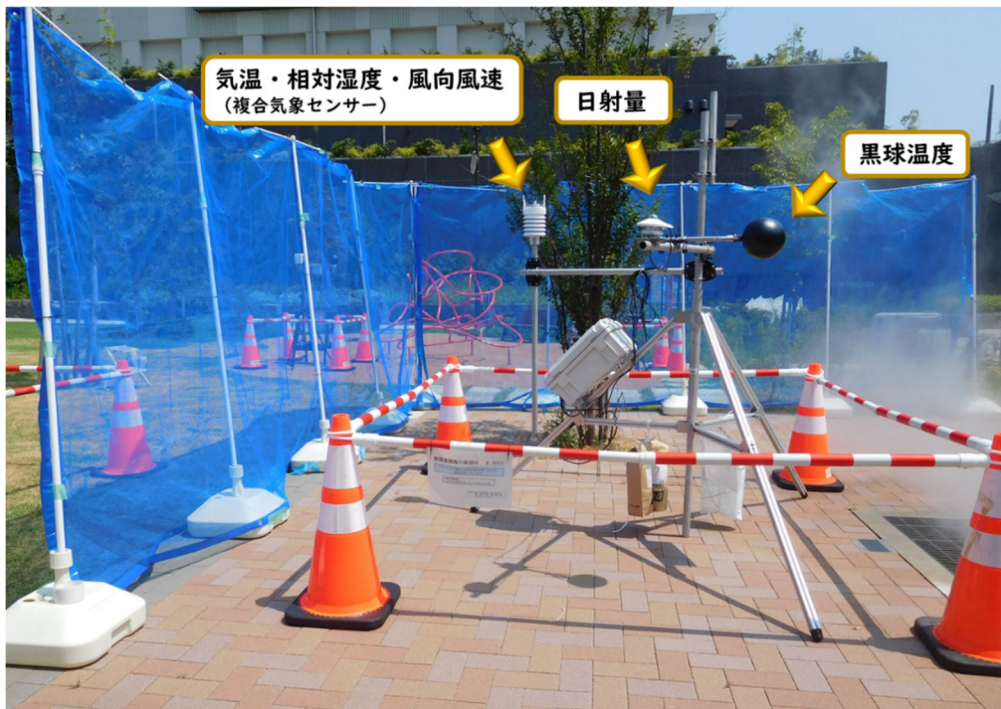


図 4-1-2 JAMSTEC で使用した観測機器の設置状況 (5.1 章での観測より)

参考文献:

- 1) 気象庁: 気象観測の手引き, 81pp. (1998)

4.2 WBGT の算出について

WBGT (暑さ指数: Wet-Bulb Globe Temperature) は熱中症予防を目的として、1957 年に Yaglou¹⁾らによって提案された指標である。これは人体と外気との熱収支に着目した指標で、人体の熱収支に与える影響の大きい湿度、日射・放射などの周辺の熱環境、温度の 3 つを取り入れたものである。WBGT は労働環境や運動環境の指針として有効であると考えられており、熱中症予防指針は日本生気象学会が日常生活について、(公財)日本体育協会が運動時について、それぞれ公表している^{2),3)}。両指針で示されている WBGT に応じた注意事項を表 4-2-1 に示す。

また、労働環境における WBGT について、国際的には ISO 7243⁴⁾、国内では JIS Z 8504⁵⁾として規格化されている。WBGT [°C]は、湿球温度を t_w [°C]、黒球温度を t_g [°C]、乾球温度を t_d [°C]とすると、式 (1)で与えられる。

$$\text{WBGT} = 0.7 t_w + 0.2 t_g + 0.1 t_d \quad (1)$$

実測調査では、乾球温度 t_d 及び黒球温度 t_g については実測値、湿球温度 t_w については乾球温度及び相対湿度から算出した計算値を用いて、WBGT を算出した。

なお、湿球温度 t_w の算出には Sprung の式⁶⁾を使用し、水の飽和蒸気圧の近似式には Tetens のパラメータ値⁷⁾による August-Roche-Magnus の式^{8),9)}を使用した。

表 4-2-1 WBGT のレベルと対応すべき注意事項

WBGT (暑さ指数)	日常生活における注意事項	熱中症予防の ための運動指針
31℃以上 【危険】	外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。	特別の場合以外は運動を中止する。 特に子どもの場合には中止すべき。
28～31℃ 【嚴重警戒】	外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。	熱中症の危険性が高いので、激しい運動や持久走など 体温が上昇しやすい運動は避ける。
25～28℃ 【警戒】	運動や激しい作業をする際は定期的に充分 に休息を取り入れる。	熱中症の危険が増すので、積極的に休憩をとり適宜、 水分・塩分を補給する。
21～25℃ 【注意】	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。	熱中症の兆候に注意するとともに、運動の合間に積極 的に水分・塩分を補給する。
21℃未満 【ほぼ安全】		通常は熱中症の危険は小さいが、適宜水分・塩分の補 給は必要である。

参考文献：

- 1) C. P. Yaglou and D. Minard : Control of heat casualties at military training centers, A.M.A. Arch. Ind. Health, 16, 302-316 (1957)
- 2) 日本気象学会：日常生活における熱中症予防指針 Ver.4 確定版、<https://seikishou.jp/cms/wp-content/uploads/20220523-v4.pdf> (2023年3月時点)
- 3) 公益財団法人日本体育協会：スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック(平成25年度改定版)、52pp. (2013)
- 4) International Organization for Standardization : ISO 7243:1989 Hot environments—Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature) (1989)
- 5) 日本工業規格：JIS Z 8504:1999 人間工学—WBGT (湿球黒球温度) 指数に基づく作業者の熱ストレスの評価—暑熱環境 (1999)
- 6) 日本工業規格：JIS Z 8806:2001 湿度—測定方法(2001)
- 7) O. Tetens: Über einige meteorologische Begriffe, Z. Geophys., 6, 297-309 (1930)
- 8) O. A. Alduchov and R. E. Eskridge : Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure, J. Appl. Meteor., 35, 601-609 (1996)
- 9) M. G. Lawrence : The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air, Bull. Amer. Meteor. Soc., 86, 225-233 (2005)

第5章 各取組内容について

5.1 地表面等の保水化及び緑化の効果検証

(1) 概要

横浜市金沢区にある泥亀公園にて再整備工事が行われ、芝生、雨水貯留浸透基盤などのグリーンインフラ（以下、GI）が導入されたことから、GI 導入による暑熱緩和の効果を検証するため、2019 年夏季に実測調査と数値シミュレーションを実施した。実測調査では、WBGT28℃以上の時間割合や地表面温度の結果から、芝生や日よけの地点で暑さが抑えられていたことが分かったほか、数値シミュレーションでは、公園全体の面的な暑熱環境の把握や舗装面の保水状況の違いに伴う暑熱環境の変化を検証できた。

(2) 背景と目的

グリーンインフラ（以下、GI と定義）とは社会資本整備、土地利用等のハード・ソフト両面において、自然環境が有する多様な機能（生物の生息・生育の場の提供、良好な景観形成、気温上昇の抑制等）を活用し、持続可能で魅力ある国土づくりや地域づくりを進める取組である¹⁾。横浜市においても、都市化の進展に伴う浸水被害解消や暑熱緩和のため、GI が持つ多様な機能に着目し、公園、旧河道など様々な場所で GI を導入している²⁾。今回、横浜市内にある公園で再整備工事が行われ、GI が導入されたことから、GI 導入エリアと非導入エリアの暑熱環境の比較や、GI 自体が持つ暑熱緩和効果を把握するため、2019 年夏季に実測調査と数値シミュレーションを実施した。

(3) 方法

ア 実測調査

(ア) 調査場所・日時

調査は横浜市金沢区役所南側に隣接する泥亀公園にて、2019 年 8 月 21 日の 10:00～15:00 に実施した。公園内での調査地点を図5-1-1 に示す。なお、横浜地方気象台（中区山手）での観測では、調査当日は午前中を中心に晴れており、日中の最高気温は33.1℃を記録する天候であった。

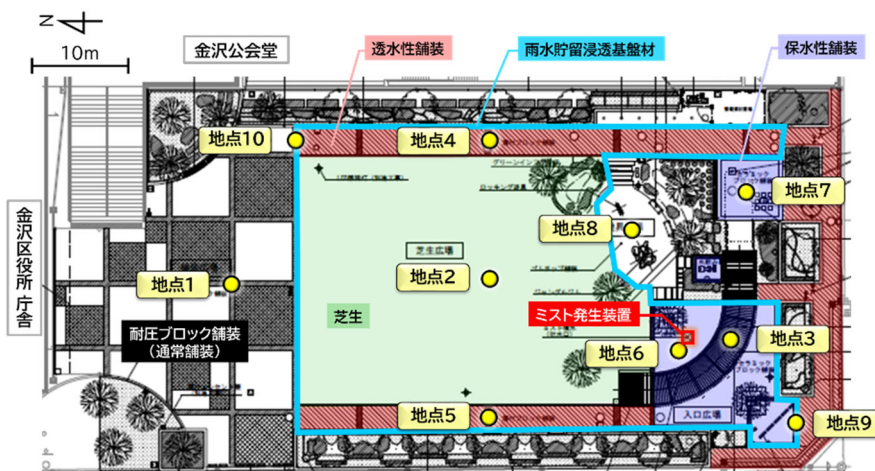


図5-1-1 泥亀公園内での調査地点

(1) 調査場所・日時

各地点での測定項目・地表面の性状について表5-1-1 に示す。測定項目のうち、地表面温度以外は1分間隔の自動測定で行った。

表5-1-1 地点別の測定項目・地表面性状・周辺環境の一覧

地点名	気温	黒球温度	相対湿度	WBGT	日射量	赤外放射量	地表面温度	風向	風速	地表面性状	周辺環境
地点1	●	●	●		●	●	●			耐圧ブロック舗装(通常舗装)	遮蔽物が少ない
地点2	●	●	●		●	●	●	●	●	芝生+貯留浸透基盤	遮蔽物が少ない
地点3	●	●	●		●	●	●	●	●	保水性舗装+貯留浸透基盤	日除けがあり、近くにミスト装置
地点4	●	●	●				●			透水性舗装+貯留浸透基盤	昼前までは日陰
地点5	●	●	●				●			透水性舗装+貯留浸透基盤	道路近傍で、長時間日射がある
地点6	●	●	●				●			保水性舗装+貯留浸透基盤	ミスト装置の近傍
地点7	●	●	●				●	●	●	保水性舗装	比較的長時間、日射がある
地点8	●	●	●				●			ゴムチップ舗装	比較的長時間、日射がある
地点9							●			地点3と透水性舗装の境	道路近傍で長時間、日射がある
地点10							●			地点1と4の境	昼前までは日陰

イ 数値シミュレーションの計算設定

観測日の気象条件に合わせたメソスケールでの気象シミュレーションと微気象シミュレーションを行った。外部境界条件は、気象庁のメソ数値予報モデル GPV (MSM) と海面水温データ SST (MGDSST) を用いた。ECMWF オゾン量、NCEP 土壌などの気候値を使用し、気象シミュレーションを双方向ネストにより 3300m、1000m、320m、100m まで力学的ダウンスケーリングにより高解像度化した。その後、100m 解像度の計算結果から微気象シミュレーションを単方向ネストにより 20m、5m、1m 解像度まで高解像度化を行った。微気象シミュレーションでは、水平方向と鉛直方向の解像度はそれぞれ同じである。また微気象シミュレーションを実行する際には、横浜市建築局による都市計画基礎調査 (GIS データ) を用いて建物構造や土地利用種別のデータを作成した。なお、今回の微気象シミュレーションでは、空調機からの排熱、交通量に応じた自動車排熱などの人工排熱は取り入れていない。

(4) 結果と考察

ア 実測調査

(ア) 気温・黒球温度・相対湿度

各地点での気温・黒球温度・相対湿度の結果を表5-1-2 に示す。気温や黒球温度の平均値は地点2の芝生で低く、これは芝生の蒸散効果により植物の葉が熱くならず、地面からの熱が低減されたためと考えられる。また地点6は近傍でミストが噴霧されていたが、地上の開口部から上に向かって噴霧するタイプであったため、地上高1.5mに設置した測定器にまでは影響しなかったものと推測される。

表5-1-2 気温・黒球温度・相対湿度の結果一覧

	気温 [°C]			黒球温度 [°C]			相対湿度 [%]		
	最低値	平均値	最高値	最低値	平均値	最高値	最低値	平均値	最高値
地点1	29.4	31.3	33.1	31.5	39.8	50.0	49	57	64
地点2	29.0	30.8	33.1	31.2	39.1	48.9	50	59	64
地点3	30.2	31.6	34.0	31.7	39.1	47.6	47	54	61
地点4	29.5	31.4	34.0	31.8	39.4	48.8	48	57	64
地点5	29.4	31.2	33.5	31.7	40.3	51.2	50	59	63
地点6	29.5	31.4	33.9	31.2	41.0	51.4	48	57	65
地点7	29.6	31.5	34.2	31.9	39.9	48.7	49	56	63
地点8	29.2	31.3	33.8	31.6	39.5	48.7	47	54	60

※ 各測定項目の平均値について、最も高い値を赤色、最も低い値を青色で表記

(イ) WBGT

対照区である地点 1 と WBGT が類似傾向にあった地点 4 を除く、各地点での WBGT の推移と全観測時間に占める WBGT28℃以上の時間の割合を算出した結果を図5-1-2 に示す。全体の傾向としては、11 時過ぎ及び 13 時過ぎに黒球温度の上昇に伴い、WBGT も上昇し、13 時台後半からは黒球温度の低下に伴い、WBGT も低下していた。また地点間の WBGT の値そのものについては顕著な差はみられなかったものの、観測時間中の WBGT28℃以上の時間割合は地点 2 や地点 3 で小さく、地点 5~7 では大きかった。この原因としては、地点 2 では芝生、地点 3 では日陰の影響が考えられるほか、地点 5~7 は車道に近いので、自動車排熱や幹線道路からの輻射熱の影響などが想定される。なお、地点 8 でも WBGT28℃以上の時間割合が低い。これは WBGT を構成する気温・相対湿度・黒球温度の 3 要素のうち、影響度合いの大きい相対湿度や黒球温度が相対的に低いこと(表 5-1-2 の地点 8 参照)に由来するが、この原因については不明である。

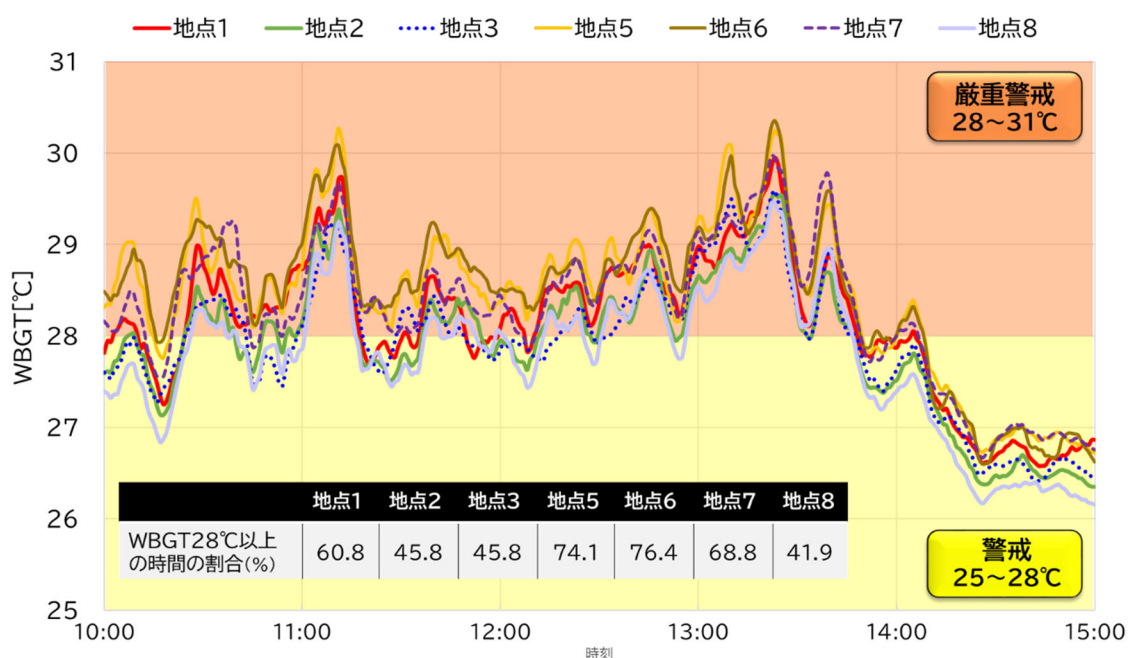


図 5-1-2 各地点での WBGT の推移と WBGT28℃以上の時間割合

(ウ) 地表面温度

各地点での地表面温度の結果概要を表5-1-3 に示す。地点 1 (対照区)と比べて、地点 2 では顕著に低く、地点 8 では高かった。これは地表面性状が地点 2 では芝生、地点 8 ではゴムチップ舗装であったことに起因する。

表 5-1-3 地表面温度の結果

	地点1	地点2	地点3	地点4	地点5	地点6	地点7	地点8	地点9	地点10
地表面温度の 平均値 [°C]	40.7	30.1	37.0	38.9	39.9	38.1	41.7	51.3	42.4	40.0

※ 地表面温度が最も高い値を赤色、最も低い値を青色で表記

イ 数値シミュレーション

(ア) 実測調査当日の暑熱環境について

実測調査当日 10:00~11:30 における微気象シミュレーションの結果の一例として、高さ0.5mにおける WBGT の空間分布について、日射量が特に強かった11:40~11:50の平均値を示す(図5-1-3)。園内のWBGTの特徴として、金沢公会堂の建物に近い通常舗装の日なたで相対的に高く、中央部にある芝生エリアで相対的に低くなっていた。また細かく見ると、公園の西側外縁部に植えられた樹木付近では WBGT が低く、芝生エリアの南側にあるゴムチップ舗装では WBGT が高い状況にあった。また、同じ芝生エリアであっても、金沢公会堂に近い側では、WBGT が高くなっていた。これらの要因としては、地表面温度の違いが大きく影響しており、地表面温度が高い場所のWBGTは高くなる傾向にある。これに加えて、園内に吹く風が、金沢公会堂南側の車道から園内中央に流れ込む向きであり、金沢公会堂南側の車道に在る暑い空気が園内に広がる影響が見られている。一方、公園内西側は観測とは異なり、WBGTが低くなっている。公園外の西側の車道(国道16号)に人工排熱を設定していないことも理由として考えられるが、主として、公園内に国道側から風が流れ込まないこと、すなわち、高温の空気が流れ込まないことが理由として挙げられる。

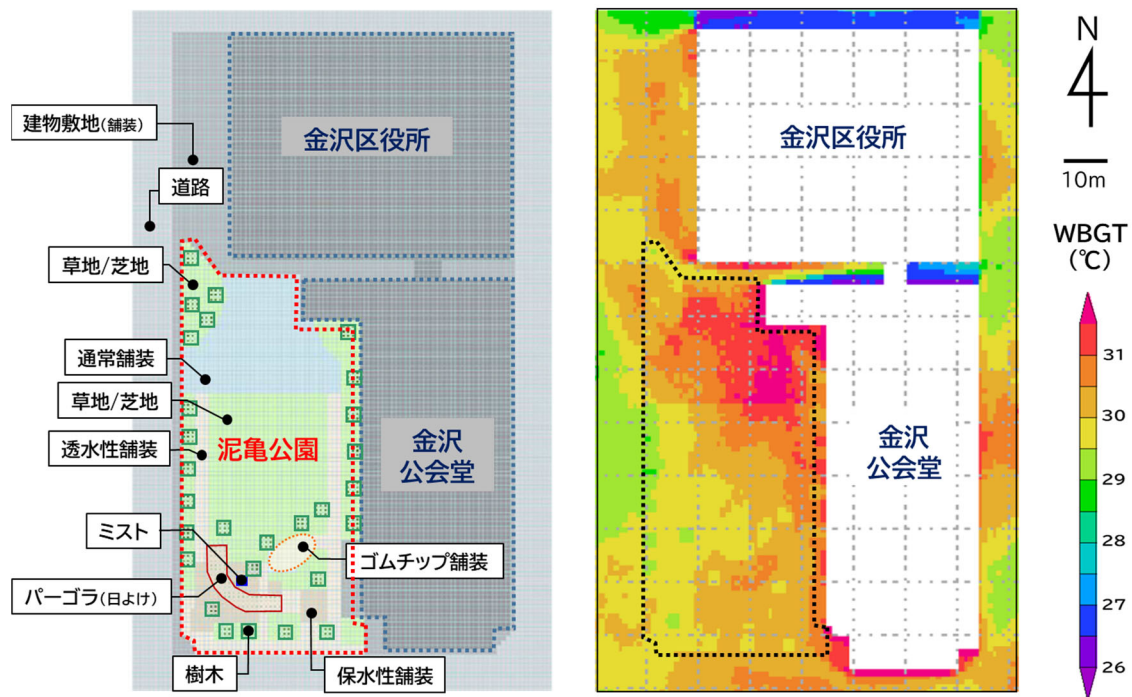


図5-1-3 公園内の設定条件(左)とWBGTのシミュレーション結果(右)

(イ) 舗装の保水状況の違いによる暑熱環境の差

園内には保水性舗装や透水性舗装などの特殊舗装が導入されており(図5-1-4(a)上図)、特殊舗装面からの蒸発潜熱を利用した暑熱環境の改善が図られている。しかし、夏季の天候によって、特殊舗装の保水率等が変わることから、特殊舗装面からの蒸発効率も日々変化する。このことから、特殊舗装面の保水状況の違いによる暑熱環境への影響を舗装面の蒸発効率を変化させることで、微気象シミュレーションにより考察した。設定した蒸発効率は、乾燥時(蒸発効率5%)、通常時(蒸発効率10~30%)、湿潤時(蒸発効率50~60%)の3ケースである(図5-1-4の(a)下表)。

蒸発効率の違いにより、地面からの熱フラックス量が変わるため、地表面温度が大きく変化する。そ

の変化量を通常時と比較した結果を図5-1-4(b)、(c)に示す。保水性舗装や透水性舗装の場所では、通常時と比較すると、乾燥時の地表面温度は2~8℃高く、湿潤時の地表面温度は4~8℃低い結果となった。

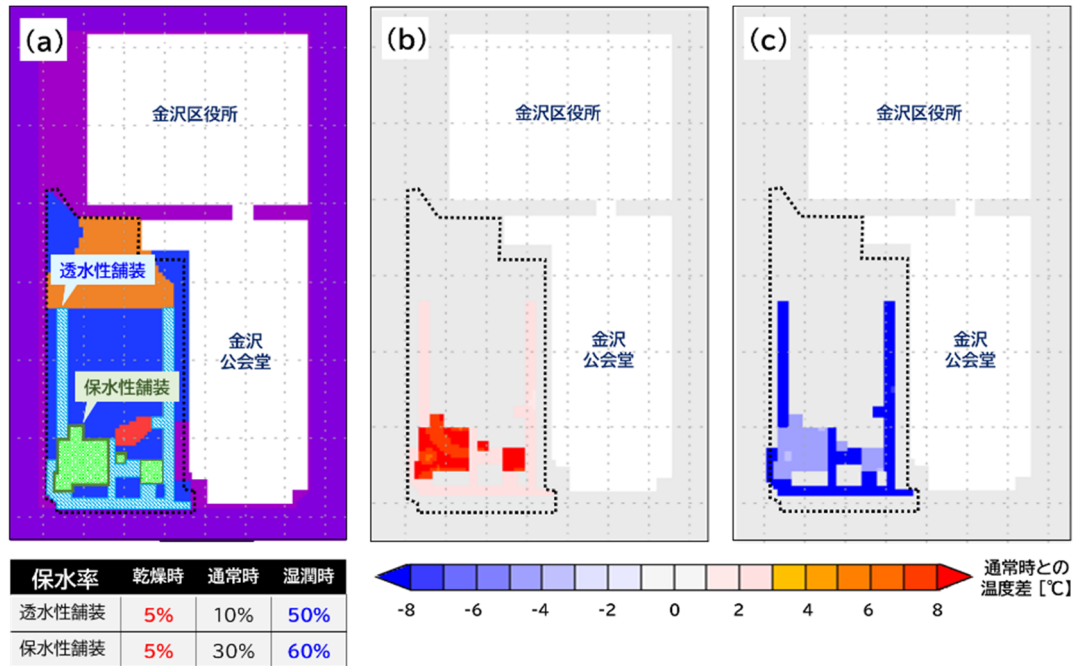


図5-1-4 舗装の保水状況の違いによる地表面温度の差

(a) 設定条件 (b) 乾燥時 - 通常時 (c) 湿潤時 - 通常時

高さ 0.5m における気温((a)~(c))と差分((d)、(e))を図 5-1-5 に示す。乾燥時の地表面温度が高くなったことにより、乾燥時の気温は通常時と比較すると、公園南側の保水性舗装の辺りで最大 0.3~0.4℃高くなっているが、公園全体での気温差は小さかった。

一方、乾燥時とは逆に湿潤時は保水性舗装や透水性舗装のエリアを中心に、地表面温度が下がったことにより、湿潤時の気温は通常時と比較すると、保水性舗装や透水性舗装のエリアに沿って最大で約 0.7℃の気温低下がみられ、公園内全体での気温の低下も確認できた。金沢公会堂に沿った透水性舗装付近で生成された気温の低い空気塊が、風とともに園内に広がったためと考えられる。

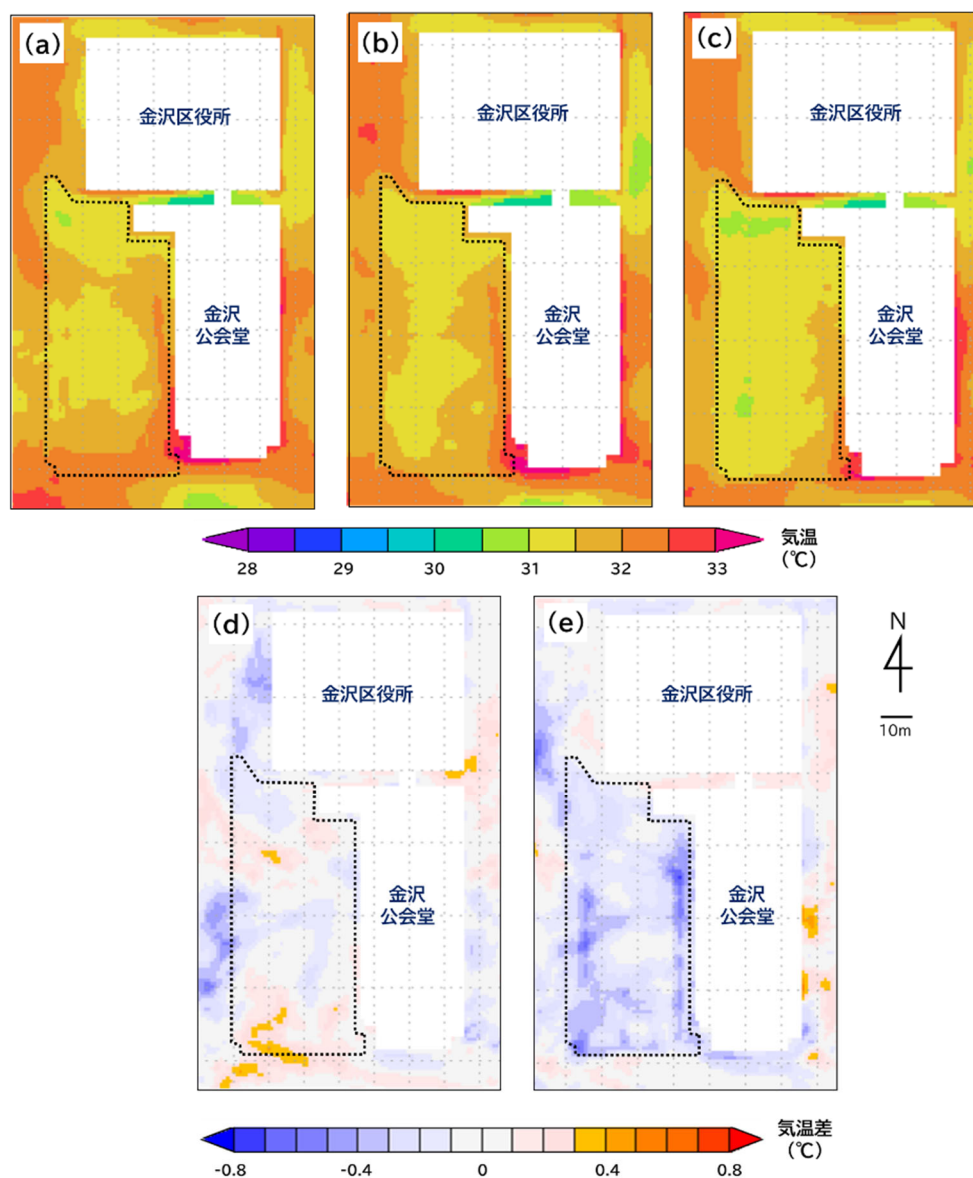


図 5-1-5 舗装の保水状況の違いによる気温の違い

(a) 乾燥時 (b) 通常時 (c) 湿潤時 (d) (a) - (b) (e) (c) - (b)

(5) まとめ

GIを導入した公園の暑熱環境について、実測調査と数値シミュレーションの2つの手法による解析を実施した。実測調査ではWBGTが28°C以上を占める時間の割合や地表面温度から、芝生や日よけの地点では比較的暑さが抑えられている傾向にあった。また数値シミュレーションでは、実測調査だけでは分からない公園全体の面的な暑熱環境を把握できたほか、舗装面の保水状態を変えた場合、気温などの温度指標がどのように変化するかなどについて検証することで、特殊舗装の有効性を示すことにつながった。

(6) 参考文献

- 1) 国土交通省:国土形成計画(全国計画)(2015)、173pp
- 2) 横浜市環境創造局政策課:気候変動に適応したグリーンインフラの活用、https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/machizukuri-kankyo/kasen-gesuido/gesuido/bousai/green_infrastructure.html (2023年3月時点)

5.2 微細ミストの効果検証

(1) 概要

泥亀公園南側に設置されたミストについて、事前シミュレーションでは風下側に仕切り(防風壁)を設けることで、冷却効果を高められることが確認できた。この結果を検証するため、実際に仕切りを設けた条件での実測調査と実測日時に対する数値シミュレーションで実証を試みた。

その結果、実測調査からも仕切りを設けミストを滞留させることで、冷却効果を高められることが分かった。また実際に仕切りを導入する場合は、仕切りによって風を完全に遮断してミストの拡散を抑制する必要はなく、風速を6~8割に減衰させる程度で良いことが分かった。

(2) 背景と目的

5.1章の取組では、泥亀公園南側に設置されたミストは、潜熱による冷却効果によってミスト直近では涼しさが感じられるものの、風が吹くと風下側に拡散して流され、冷却効果が弱まっていることが推察された。このことから、風下側に仕切り(防風壁)を設け、ミストによって冷やされた空気を滞留させることで、ミスト周辺の涼しさを保ち、クールスポットとしての活用ができないかを検討した。

JAMSTEC が実施したシミュレーションにより、フィージビリティスタディ(以下、FS:計画された事業やサービスなどが、実現可能かどうかを事前に調査し、検証すること)を行った結果、仕切りを設けることで、冷却効果を高められることが確認できた。この結果を検証するため、実際に仕切りを設けた条件での実測調査と実測日時に対する数値シミュレーションで実証を試みた。

(3) 方法

ア シミュレーションによる FS

夏季は海陸風の影響により、泥亀公園周辺における卓越風向が南西寄りのため、ミスト噴霧位置の風下側にあたる北側及び東側に仕切り(防風壁)を設けて風通しを遮り、噴霧されたミストの拡散を抑制するように設定した。この条件下において、仕切り周りの暑熱環境についてシミュレーションにより試行実験を行った。実際の運用では、仕切りは移動可能な植栽(プランター等が植えられた背丈2m程度の植物)を想定しているため、風通しの度合いを設定するシミュレーション上でのパラメータとして、植栽の葉面積密度(LAD)を採用した。LADとは単位体積当たりの葉面積を示し、この葉面積密度は値が大きいほど(葉が良く茂っているほど)、ミストの拡散を抑制することを示す。なお、風通しの効果のみを確認するために、仕切りは植栽ではあるが、蒸散作用は無いものとして設定しているほか、植栽の大きさは、厚さ1m、幅7m、高さ2mとした(後述の計算では、幅6m)。

イ 仕切りの防風性能の事前確認

実測調査をするにあたり、仕切りとして設ける植栽の代用として、網目のサイズが4mmからなる農業用防風ネットを使用し、防風性能(風速の減衰率)を事前に屋内で計測した。

ウ 実測調査

(ア) 調査場所・日時

調査は横浜市金沢区役所南側に隣接する泥亀公園のうち、公園南側にあるミストを中心としたエリアに6か所の調査地点を設けて、2020年8月25日の11:00~15:00に実測調査を行った。公園内での調査地点と測定項目を図5-2-1に示す。

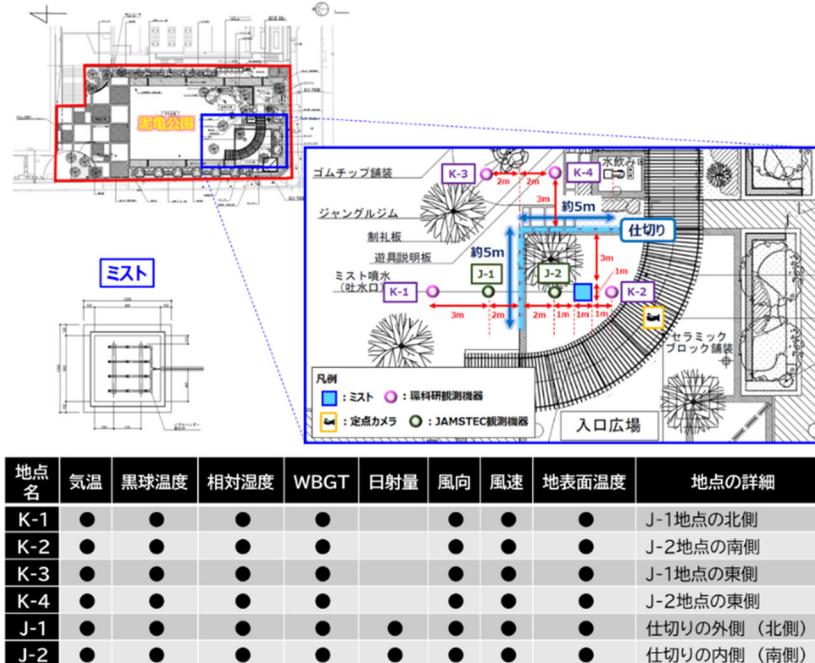


図 5-2-1 泥亀公園ミスト追加調査での調査地点と測定項目

(イ) ミスト装置の概要

泥亀公園南側に設置されているミストの稼働及び非稼働時の状況の写真を図5-2-2に示す。ミストは噴霧量が1.2L/min、全体のサイズはおよそ1m×1mの大きさであり、ミストが噴霧されるノズルは、1列に3か所ずつ、計4列の12カ所となっている。ミストのノズルの直上は、網目構造のグレーチングで覆われており、稼働時は地上からミストが噴出される。またミストは風速が強いと拡散してしまうため、風速計を連動させ、一定以上の風速が観測された場合、ミストが停止するよう設計されている。なお今回は調査のため、ミストの噴霧を手動切替で制御することとした。

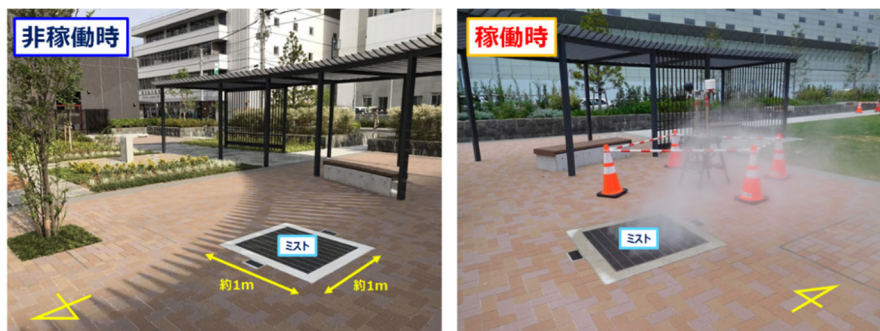


図 5-2-2 ミスト非稼働時（左）及び稼働時（右）の写真

(ウ) 実測調査時の仕切りの運用方法

実測調査当日は、ミスト装置の北側及び東側に1辺の長さが5m、高さが2m、網目のサイズが4mmからなる農業用防風ネット(仕切り)を仮設置し、観測機器はこの仕切りを境に線対称になるように設けた。また仕切りは30分毎に1回、表5-2-1のスケジュールのとおり仕切りの形態を変更させ、仕切りの有無や仕切りの風通しにより、暑熱環境に違いがみられるかどうかを検証した。現地での仕切りの設置状況の様子を図5-2-3に示す。

表 5-2-1 実測調査時の仕切り(防風ネット)の運用スケジュール

防風ネットの重ね具合	11:00 ~11:25	11:30 ~11:55	12:00 ~12:25	12:30 ~12:55	13:00 ~13:25	13:30 ~13:55	14:00 ~14:25	14:30 ~14:55
無し			●			●		
一重	●			●			●	
二重		●			●			
四重								●



図 5-2-3 実測調査時の仕切り(防風ネット)の設置状況の様子

(I) 実測調査との比較のためのシミュレーション

シミュレーションは5.1章と同じ設定とし、気象条件は実測調査日(2020年8月25日)に変更して行った。

(4) 結果と考察

ア シミュレーションによるFS

2019年8月21日11:40~11:50における、気温の空間分布を図5-2-4に、WBGTを図5-2-5に示す。各パネルは、LADの値を変えた4つのケースに対応しており、(a)仕切り無(現状)、(b)LAD=2.0、(c)LAD=4.0、(d)LAD=∞(隙間無)となっている。また分布の色調は、ミスト噴霧を行った場合の気温やWBGTが、噴霧を行わない場合からどの程度変化したかを示しており、青色はミスト噴霧により気温やWBGTが下がったことを示す。

(a) 仕切り無（現状）では、南西寄りの風が吹いていることに対応して、ミスト装置を起点に北東方向に向かって気温が低下している領域が広がっている。すなわち、ミスト噴霧により気温が下がった空気塊が、拡散していることが分かる。一方、WBGTの場合は、その変化はわずかであった。(b) LAD=2.0 に相当する仕切りを設けた場合は、仕切りはあるものの風がある程度通り抜けるため、冷やされた空気はミスト近傍にはあまり留まらず、仕切りの隙間を通じて北東方向に抜けている様子が確認できる。WBGTの場合は、仕切りの内側（南及び西側）で値がやや低いエリアが広がっていることが分かった。なお、仕切りのすぐ外側（北及び東側）は、仕切り自体の陰にあたるため、WBGT が低くなっている。(c) LAI=4.0 に相当する仕切りを設けた場合は、(b)と比べて仕切りによる風通しが悪くなるため、仕切りの外側への涼しい空気の拡散が(b)よりも抑制されている。WBGTの場合は、(b)と同程度の変化が仕切りの内側で観測される一方で、外側では、仕切り自体の陰が届かない領域では、高くなっている。(d)は仕切りを植栽ではなく隙間の無い壁にした場合であるが、ミストで冷やされた空気は、仕切りを透過せず、仕切りの内側に効率よく留まるため、仕切り内部での気温は低くなる。一方、外側には冷気が届かず、気温変化が見られていない。WBGT の場合は、仕切りの外側で上がり、かつ仕切りの内側では、湿度が上がることで、WBGT が上がっている。

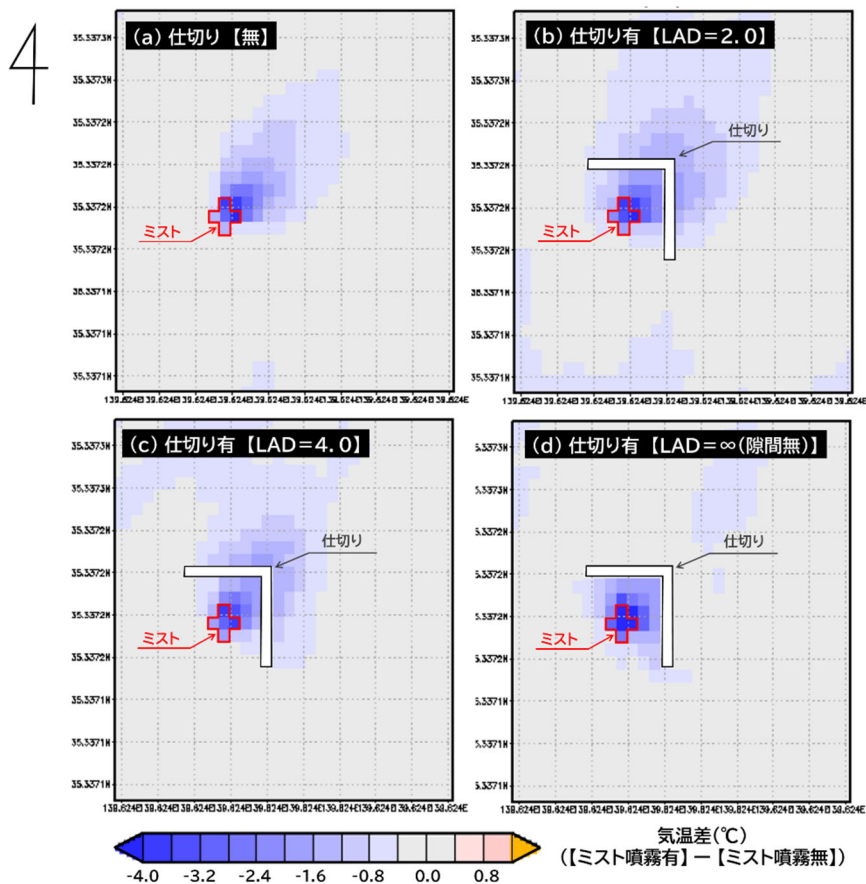


図 5-2-4 ミスト近傍に仕切りを設けた場合の気温の変化

4

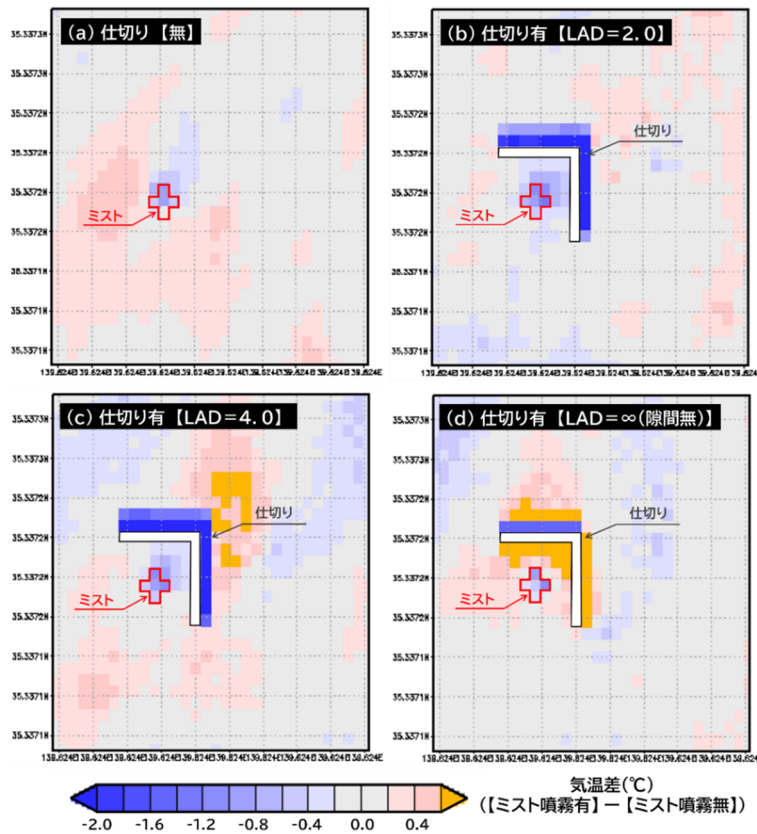


図 5-2-5 ミスト近傍に仕切りを設けた場合の WBGT の変化

また仕切りを境に仕切りの内側(風上側)と外側(風下側)で、どの程度風速が弱まるかを、LAD=2.0として仕切りを境に風上から風下に直交して風が吹いた場合について解析した結果を、図 5-2-6 の左に示す。グラフでは時々刻々変わるシミュレーション計算時間中の各時刻において、風上と風下の風速変化を赤点で示しており、減衰率を計算すると、およそ71%(図中の緑色の線)という結果が得られた。同様に、LAD=0~20の間の5つの葉面積密度(LAD)に対して減衰率を求めたところ、図 5-2-6 の右に示すように LAD の値に対し、風速が単調減少する結果が得られた。

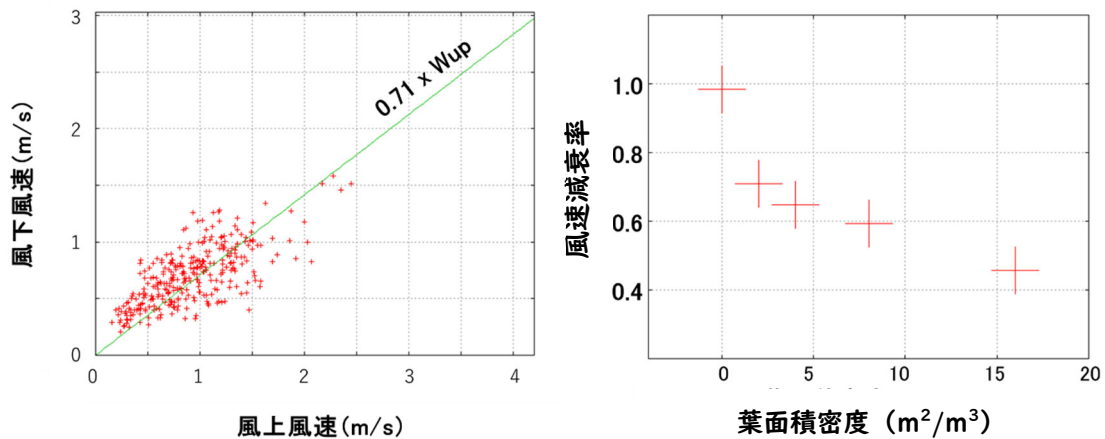


図 5-2-6 LAD=2.0 における仕切り前後での風速の変化 (左) と 葉面積密度を変化させた場合の風速減衰率の変化 (右)

イ 防風ネットによる風速減衰率の確認について

実測調査に用いた防風ネットについては、仕切りとして使用した場合、仕切りを境に風上から風下に向かって直交して風が吹く際に、風速がどの程度の減衰率になるのかを予め、屋内で実験した(図 5-2-7)。実験の結果、防風ネットを一重にした場合の風速の減衰率の実測値は、図 5-2-6 の左図で示した計算上の風速の減衰率(7~8割)と概ね一致していたことが確認できた。



図 5-2-7 防風ネットを用いた風速の減衰率の実験の様子

ウ 実測調査時の気温の変化

仕切りは、南寄りの風が吹いた場合を想定してミストの北側及び東側に設置しているため、その条件に合致していた 11:00~12:30 を解析対象時間とした。各地点での気温の変化を図 5-2-8 に示す。どの時間帯においても仕切りの内側にあたる J-2 地点で最も気温が低く、これは 4 地点の中で最もミストに近いとめと考えられる。また仕切りの外側(J-1 地点)と比較して、内側(J-2 地点)の気温は「ネット無し」では約 0.2℃、「ネット一重」では約 0.4℃、「ネット二重」では約 0.6℃低く、「ネット二重」の状態でも最も仕切りの内側の気温を下げる効果があったことが分かった。

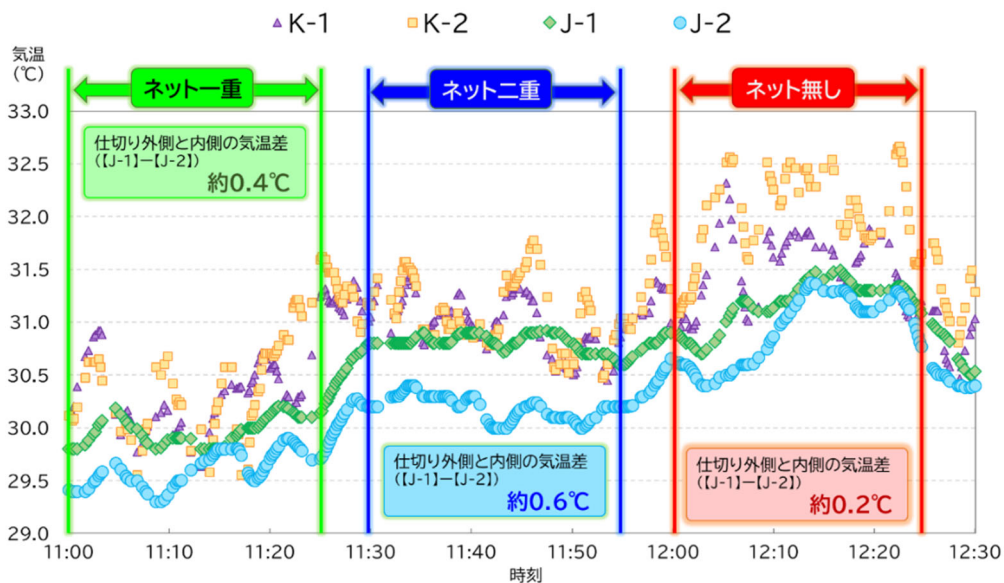


図 5-2-8 気温の時間変化

次に仕切りの外側のうち仕切りから遠い位置にある K-1 地点を基準に、その他の地点との気温差を仕切りの形態別にみた結果を、図 5-2-9 に示す。J-1 地点（仕切りの直近の外側）では、「ネット一重」及び「ネット無し」と比較して、「ネット二重」の方が K-1 地点との気温差が小さく、気温が少し高い。これは、本来ならば仕切りの内側から外側に向かって流れてくるミスト粒子が、ネット二重の仕切りによって動きが止められ、仕切りの外側にまで流れにくいためと考えられる。これは J-2 地点（仕切りの直近の内側）では、「ネット二重」の場合で最も K-1 地点との気温差が大きく、気温が低いことと対応している。また K-2 地点（仕切りの内側のうち仕切りから遠い位置）では、「ネット無し」と比較して、「ネット一重」及び「ネット二重」の場合の方が気温は低く、仕切りがあることによる影響を受けているものと考えられる。

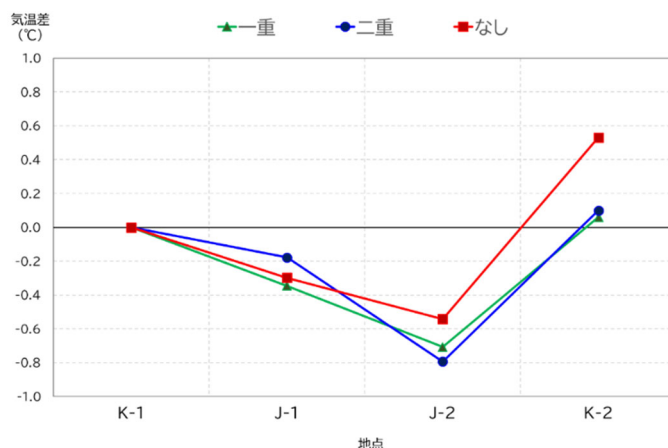


図 5-2-9 K-1 地点を基準とした仕切りの形態別の各地点との気温差

エ 実測調査時の WBGT の変化

図 5-2-9 と同様の方法で、WBGT について比較した結果を図 5-2-10 に示す。J-1 地点（仕切りの直近の外側）では、「ネットなし」「ネット一重」「ネット二重」の順で、WBGT が高くなっており、これは仕切りによってミストの動きが止められ、仕切りの外側にまで流れにくいことと、風が通り抜けにくくなることによる影響などが考えられる。また J-2 地点（仕切りの直近の内側）では、「ネットなし」「ネット一重」「ネット二重」の順で、WBGT が低くなっており、これは仕切りによって、仕切りの内側でミストが滞留して冷やされたことによるものと考えられる。

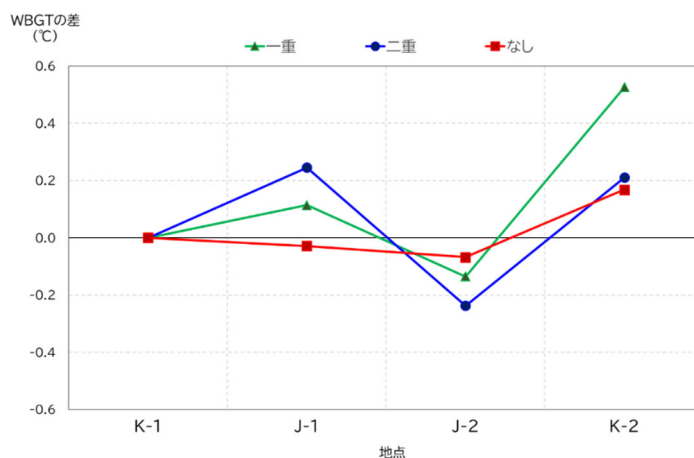


図 5-2-10 K-1 地点を基準とした仕切りの形態別の各地点との WBGT の差

オ シミュレーションによる気温差の事後検証

シミュレーションで解析した実測調査日(2020年8月25日)の11:00~12:30の各地点での平均気温を図5-2-11に示す。実測調査の図5-2-10と比較すると、K-1地点(仕切りの外側のうち仕切りから遠い位置)を基準にした場合、J-1地点(仕切りの直近の外側)でやや気温が下がり、J-2地点(仕切りの直近の内側)で大きく気温が下がっている傾向は、実測調査と一致していた。仕切りが無くともミストの冷却効果により気温は低下するものの、J-2地点での気温の下がり方は、仕切りを壁(LAD=∞)にした場合で最も大きい。また他のLADの設定値(LAD=0.5、1、2、4、16)の場合でも、仕切り無し(LAD=0)よりも気温が下がっていることから、仕切りの風通しの度合い(葉面積密度の大小)によらず、仕切りそのものが存在することによって、仕切りの内側で気温が下がることが分かる。以上のことから、事前シミュレーション(FS)と同じ結果がシミュレーションによる事後検証でも得られていた。

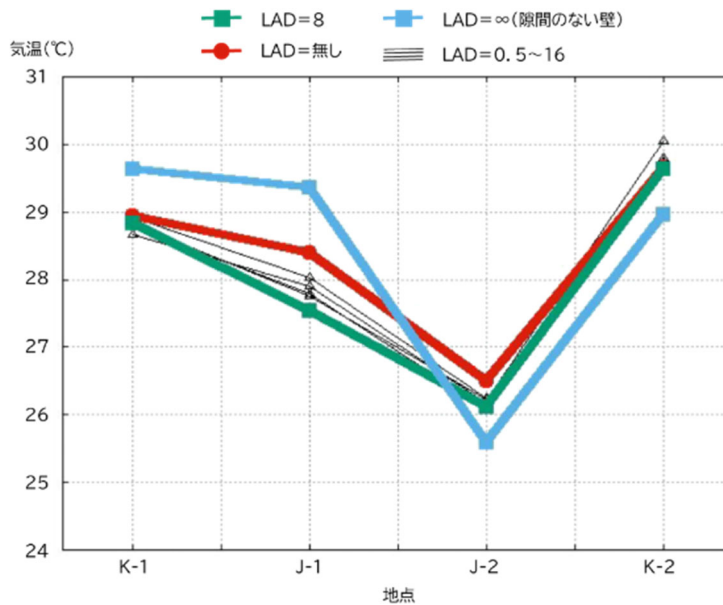


図5-2-11 仕切りの形態別における各地点の気温

カ 実測調査及び事後のシミュレーション解析による風速の状況

仕切りの形態を変えた場合に、風上(仕切り内側)と風下(仕切り外側)で、どの程度風速が異なるのか(すなわち、仕切りによってどの程度風速が減衰されるのか)について、実測調査とシミュレーションとで解析を行った。図5-2-12のうち、(a)~(c)は実測調査、(d)はシミュレーションにおいてそれぞれ、J-2地点(仕切りの直近の内側)からJ-1地点(仕切りの直近の外側)に向かって風が吹く時間帯(対象とした風向は真南から±30°の範囲)のみを抽出し、算出した結果である。

J-2地点での風速が1.5~2.0m/sの範囲(図5-2-12の黄色の枠の部分)に着目すると、(a)~(c)の実測調査では、防風ネットを一重、二重と変えていくと、風速比が下がっていくことが分かる(「ネット無し」では、風速比1.0前後、「ネット一重」では風速比0.8~0.85、「ネット二重」では風速比0.6~0.8)。またシミュレーションの(d) LAD=8では、J-2地点での風速が1.5~2.0m/sの範囲の場合、風速比は0.6~0.8になっていることから、シミュレーションにおいても、仕切りによる風速の減衰を確認することができた。また、シミュレーション上のLAD=8は、実測調査時の「ネット二重」の場合の風速比に、相当することが分かった。なお、低風速域では、J-1とJ-2地点の間に有限の距離があり、同時刻の不確実性が増すため、比の値の分散が大きくなっている。

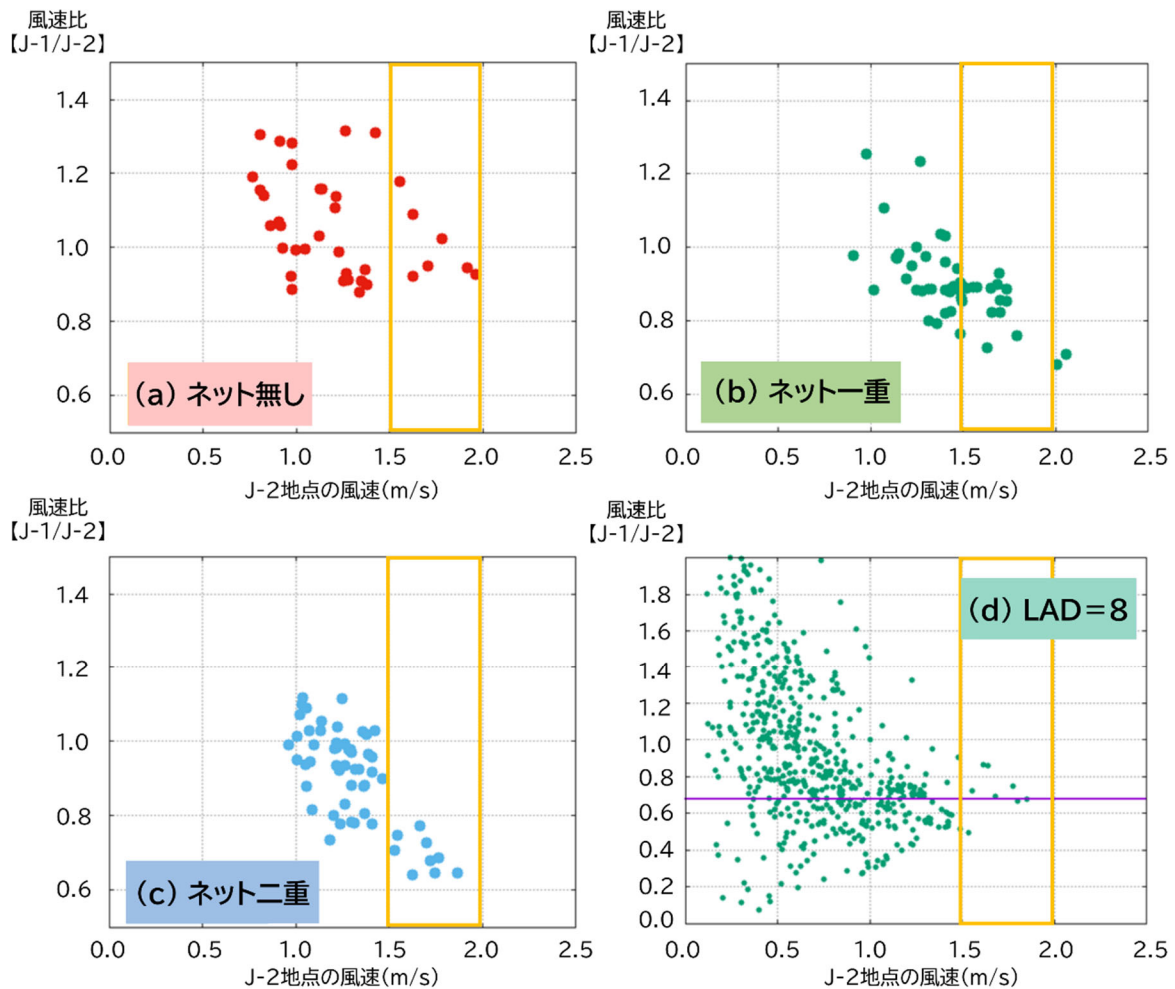


図 5-2-12 J-2 地点の風速と風速比 (J-1/J-2) との関係

次に仕切りの形態別 (仕切り無、・LAD=8、壁 (隙間無) の3パターン) に、K-1 地点、J-1 地点、J-2 地点、K-2 地点の 4 地点で気温と WBGT の値を出現頻度として算出した結果を図 5-2-13 及び図 5-2-14 に示す。

気温 (図 5-2-13) については、仕切りの内側にあたる K-2 地点と J-2 地点では、LAD が大きくなるほど、気温の出現頻度の範囲は低い方にシフトしていて、ミスの拡散抑制に伴う気温低下の効果が確認できた。一方、WBGT (図 5-2-14) については、LAD の値を変化させても、WBGT の出現頻度の範囲に気温ほどの大きな違いは見られない。これは仕切りとして設定した LAD の値が大きくなり、風が抜けにくくなる (風速が弱まる) ことで、黒球温度の低下が抑えられてしまうことと、ミス粒子が仕切りの内側に留まることによって湿度の上昇が起きることの 2 点が原因として考えられる。

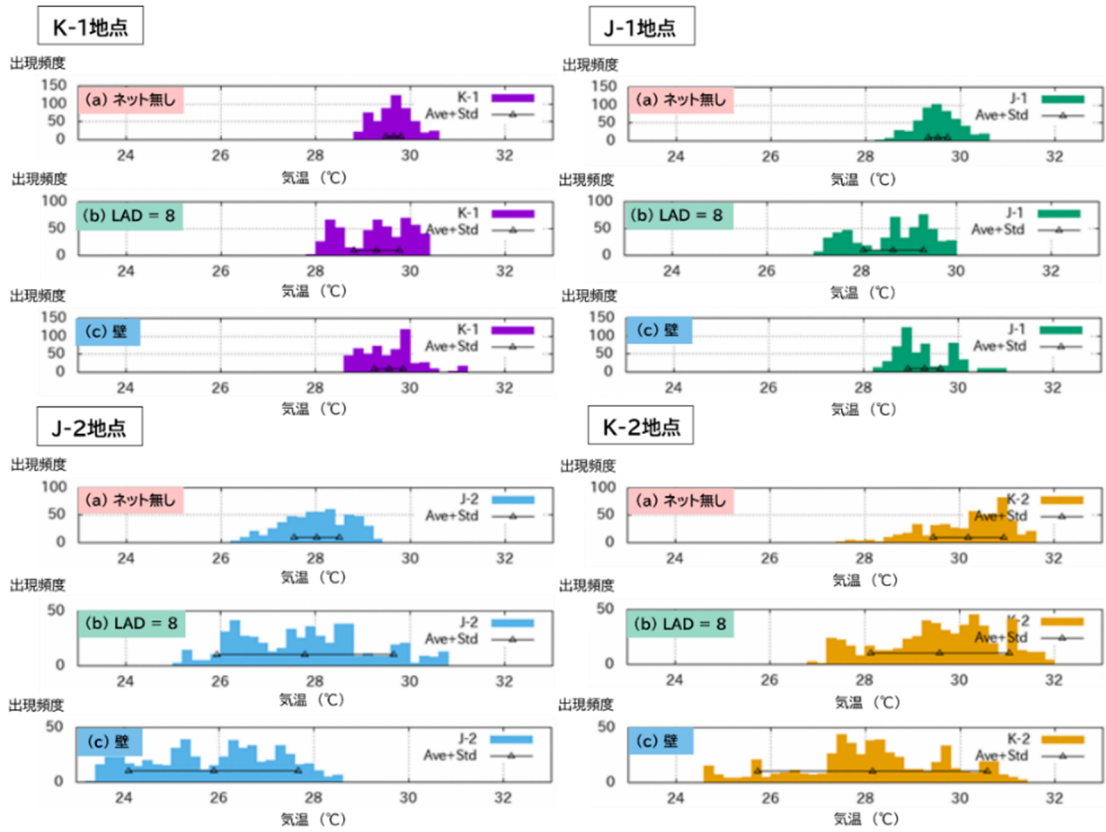


図 5-2-13 仕切りの形態別の各地点での気温の出現頻度

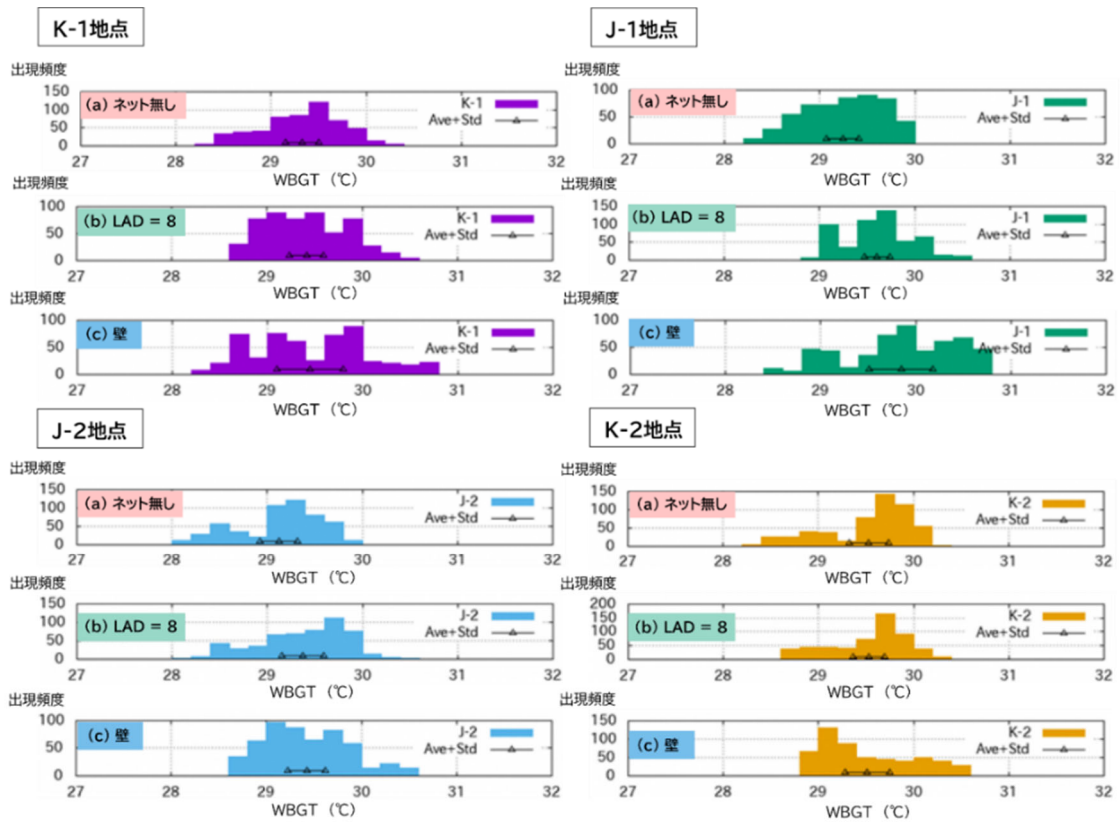


図 5-2-14 仕切りの形態別の各地点での WBGT の出現頻度

(5) まとめ

実測調査とシミュレーションによる解析結果から、ミスト噴霧による気温低減効果をより効果的に発揮させるためには、仕切りを設けて風上側（仕切りの内側）でミストを滞留させることが有効であることが分かった。実測調査では仕切りとして防風ネットを用いたが、実際に導入を検討する場合は、プランター栽培された垣根やフェンスなど、景観も考慮した部材を検討する必要があると考える。また仕切りの拡散抑制の効率としては、風を完全に遮断してミストの拡散を抑制する必要はなく、風上側（仕切りの内側）と比較して、風下側（仕切りの外側）で風速を6～8割程度に減衰できる程度で、クールスポットを形成することができることが分かった。

5.3 街路樹の剪定方法の違いによる暑熱環境の差の検証

(1) 概要

街路樹の剪定方法(いきいき剪定(各樹種の持つ樹形を生かしつつ、一定の大きさに維持する剪定)と強剪定(落ち葉を減らすために、幹や太い枝を切り払い樹形を小さくする剪定))の違いによる暑熱緩和効果の差を確認することを目的として、実測調査を行った結果、いきいき剪定の緑陰の方が、暑熱環境が緩和されていたことを確認した。また、剪定方法の違いによる暑熱緩和効果の差に加えて、樹高、樹冠体積、緑の密度の濃さを変化させた場合の緑陰の濃さや大きさ、WBGT の変化について数値シミュレーションで検証した結果、地面に達する日射強度に依存することがわかった。

(2) 背景と目的

横浜市内には、現在13万本を超える街路樹(歩道並木やその他の高木)がある。街路樹には様々な役割があり、例えば、木陰を作って夏の暑い日差しを遮ったり、葉の蒸散作用によって気温を涼しくしたり、植物の呼吸や、大気汚染物質の葉への吸着によって空気を浄化したりする。さらに、季節の移り変わりを感じさせたり、街並みに彩りを添えて、街に統一感をもたらしたりする。このような良い面がある一方で、秋になると落ち葉を落とすため、市民からの陳情を受けることがある。そのため、落ち葉対策として、幹や太い枝を切り払い樹形を小さくする剪定(以下、「強剪定」という。)を行うことがある。強剪定により、落葉期の落ち葉が減るため、落ち葉清掃などの負担は軽減されるが、樹冠が小さくなる分、緑陰も小さくなるため、歩行者環境の暑さは増大する。また、太く育った枝を切るため、樹木が傷ついて弱ってしまうことがある。さらに、見苦しい樹形や景観になる。

一方で、各樹種のもつ樹形を生かしつつ、一定の大きさに維持する剪定(以下、「いきいき剪定」という。)は、落ち葉清掃などの負担は増大するが、樹冠が大きくなる分、緑陰も大きくなる。このため、日陰の創出により、歩行者環境の暑さを緩和する効果が期待される。そして、建築限界等を考慮する必要はあるが、樹木は健全で良好な育成が可能であり、美しく整えた樹形と並木として統一した景観により、街並みの美観が向上する(図5-3-1)。

	いきいき剪定	強剪定(ぶつ切り)
剪定方法	各樹種の持つ樹形を生かしつつ、一定の大きさに維持する	落ち葉を減らすために、幹や太い枝を切り払い、樹形を小さくする
樹木への影響	建築限界等を考慮する必要があるが、樹木は健全で良好な育成が可能	太く育った枝を切るため樹木が傷ついて弱ってしまうことがある。
景観	美しく整えた樹形と並木として統一した景観により、街並みの美観が向上する	枝葉のバランスが悪く、景観がよくない
写真	 <p>↓ 領家 中田さちが丘線 ↑ 上永谷 環状2号線</p>	 <p>※街路樹維持管理技術研修、参考資料「落ち葉陳情も改善に向けて」より</p>

図5-3-1 いきいき剪定と強剪定の特徴

今回、横浜市内のいきいき剪定と強剪定がされている通りでの暑熱環境の違いを把握するため、実測調査(2020年度と2021年度の2回)と数値シミュレーションを実施した。

(3) 実測調査1回目(2020年度実施)

ア 調査場所の概要・日時

調査は、横浜市青葉区の桜台公園から中恩田橋にかけて全長 1.4km 弱のケヤキからなる路線を対象路線とし、2020年8月12日(水)の11:00~15:00に実施した。調査対象路線のうち、桜台公園から桂台遊水池の西側までは、道路の両側に住宅や商業施設が立ち並んでいる一方、桂台遊水池の西側から中恩田橋にかけては、住宅のほかに農地も点在している。調査対象路線を図5-3-2に示す。



図5-3-2 調査対象路線

イ 調査地点

街路樹の緑陰による暑熱緩和効果を検証するため、調査対象路線内で、いきいき剪定と強剪定の場所のそれぞれに気象観測地点を図5-3-3のとおり設定した。観測地点①、②、⑤は歩道上の1.5m又は0.3mの高さに観測機器を設置したが、観測地点③、④は測定機器を街路樹の2.5m高さに括りつけて設置した。また、日なたと日陰の暑熱環境の違いを確認するため、日なたでの観測地点⑤として、中恩田橋交差点から南南東方向に約500m離れた場所にも観測機器を設置した。各地点での調査項目を表5-3-1に示す。

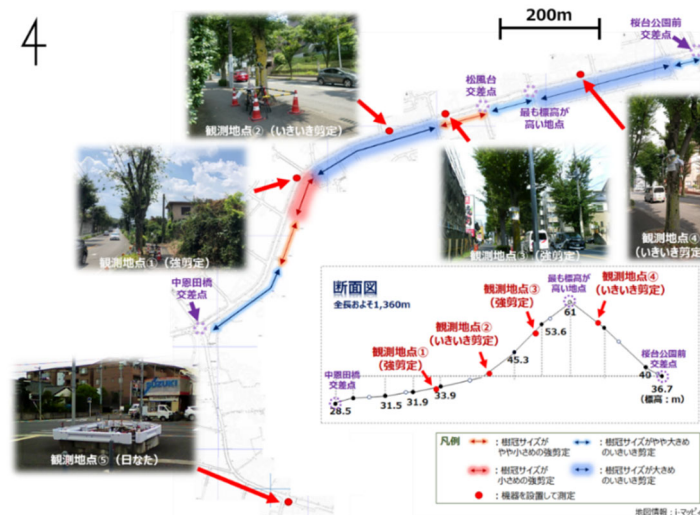


図5-3-3 調査対象路線内の観測地点

表5-3-1 各調査地点における調査項目等

	調査項目と観測機器の設置場所等		
	木に括りつけて設置	歩道上に設置	地表面
観測地点 ①、②、⑤	-	気温、湿度、黒球温度、風向風速、WBGT(暑さ指数)、日射量、赤外放射量	熱(赤外)画像 地表面温度
観測地点 ③、④	気温、湿度、黒球温度、WBGT(暑さ指数)	-	熱(赤外)画像 地表面温度

ウ 結果の概要と考察

観測地点①、②、⑤での気温・黒球温度・WBGT・上からの日射量の結果の概要を表5-3-2 に示す。日射の影響を強く受ける黒球温度は、日射量の違いにより、いきいき剪定の緑陰内の方が、強剪定の緑陰内より平均で3℃程度低く、人が日射から受ける熱は和らいでいた。また、気温・湿度・黒球温度から算出される WBGT は、いきいき剪定の緑陰内の方が強剪定よりも平均で 0.4℃低かった。そして、強剪定の緑陰内と比較して、いきいき剪定の緑陰内では、上からの日射量が平均で 45%程度減っており、緑陰の大きさや葉の密度の違いが影響したと考えられる。ただし、既往文献¹⁾や環境科学研究所が調査した他事例(藤棚の日陰下と日なた(2019 年度の別調査での事例)では、晴天時に平均で黒球温度は約 10℃、WBGT は約 2℃の差が見られた。また、日なたでの上からの日射量は、平均で 855W/m²であった。)などと照らし合わせると、今回調査した結果では、剪定方法の違いによる暑熱環境の差はあまり大きくなかった。この原因として、調査日当日は雲が多く雨の降った時間もあるなど、晴れた時間が少なかったためと考えられる(図5-3-4)。

表5-3-2 調査結果の概要

	気温(℃)	黒球温度(℃)	WBGT(℃)	上からの日射量(W/m ²)
いきいき剪定の緑陰内(観測地点②)	36.2	39.3	30.5	112
強剪定の緑陰内(観測地点①)	36.7	42.3	30.9	205
日なた(観測地点⑤)	36.6	46.1	31.6	446

※1:11:00~12:16までの平均値(12:16~15:00は天候不良や緑陰が車道側に移動した影響などにより解析対象から除いた)
 ※2:当日の横浜地方気象台の状況(11、12時の平均値):気温 34.2℃、湿度 63.5%、WBGT 32.8℃(WBGTは実況推定値)
 ※3:気温・黒球温度・WBGTは地上から高さ1.5mで測定・算出した値、日射量は地上から高さ0.3mで測定した値

	11:00	11:20	11:40	12:00	12:20	12:40	13:00	13:20	13:40	14:00	14:20	14:40	15:00
観測地点①(強剪定)													
観測地点②(いきいき剪定)													
観測地点⑤(日なた)		-	-		-	-		-	-		-	-	

図5-3-4 各観測地点での調査当日の天候状況

なお、観測機器を木に括りつけて地上 2.5mの高さで観測を行った、観測地点③、④、⑤での気温・黒球温度・WBGT の結果を表 5-3-3 に示す。

表5-3-3 観測結果の概要

	気温(°C)	黒球温度(°C)	WBGT(°C)
いきいき剪定の緑陰内(観測地点④)	36.5	38.3	30.3
強剪定の緑陰内(観測地点③)	36.6	38.8	30.4
日なた(観測地点⑤)	36.6	46.1	31.6

観測の結果、いきいき剪定と強剪定におけるWBGT等の暑熱環境には、ほとんど差がみられなかった。これは、いきいき剪定と強剪定で樹冠の葉の密度が同程度であったためと考えている(図5-3-5)。



図5-3-5 観測地点③、④の木の写真

エ 2021年度の調査に向けて

2020年度の調査の結果、街路樹の剪定方法の違いによる暑熱環境の差について、強剪定の緑陰内と比べ、いきいき剪定の緑陰内の方がWBGT(暑さ指数)などの体感指標が低く、暑熱が緩和されていたことを確認した。しかしながら、時間変化に伴う影の車道への移動により、測定結果に欠測が生じたうえに、調査日当日の天候不順により、暑熱環境の差が小さくなった可能性があるなどの問題が生じた。そこで、2021年度に以下の事等に注意して調査地点を再選定し、再度、調査を実施し、その調査結果を踏まえたシミュレーションを実施することにした。

(ア) 強剪定といきいき剪定の調査地点の道路の方向を統一する

調査地点①(強剪定)のみ、道路の方向が他の観測地点と異なっており、午後から緑陰が車道方向に延びてしまい、結果を使用できなかった。そのため、強剪定といきいき剪定の条件を同じにして比較できるようにするため、両者が同じ方向にある地点を選定することにした。

(イ) 調査日を複数日設ける

2020年度の調査時には通り雨を観測し、その時間帯を中心に、温度などが一時的に低下した。天候が安定した日に測定をするため、予備日を複数日設けて調査を実施することにした。

(4) 実測調査2回目(2021年度実施)

ア 調査場所の概要・日時

調査は、中田さちが丘線(泉区中田東1丁目～旭区善部町)のうち、戸塚区鳥が丘9付近から泉区領家2丁目付近までの概ね南北方向に約700m弱のケヤキからなる路線を対象路線とし、2021年8月11日(水)の10:00～15:00に実施した。対象路線のうち、戸塚区鳥が丘9～13付近までの通りの両側は戸建て住宅を中心に、戸塚斎場や中層住宅も存在する一方、泉区領家2丁目～4丁目にかけては、商業施設や中層住宅が多くなっている。調査対象路線を図5-3-6に示す。



図5-3-6 調査対象路線

イ 調査地点

調査対象路線内で、いきいき剪定と強剪定の街路樹が同じ樹種及び同じ方角でかつ比較的近くにある地点を選び、それぞれの気象観測地点を図5-3-7のとおり設定した。また、日なたと日陰の暑熱環境の違いを確認するため、日なたでの観測地点として、観測地点⑤と⑩に観測機器を設置した。各地点での調査項目を表5-3-4に示す。なお、今回調査を実施した強剪定の木は、剪定後4.5年程度経過したもので、剪定直後に比べれば樹冠は大きく、葉の密度が高い状態であった。さらに、調査地点は南北道路沿いにあり、午前・午後で緑陰が形成される方向が異なるため、観測地点を午前と午後で変えた。



	剪定方法	観測機器設置状況	観測時間
観測地点①	強剪定	歩道上に設置 (日陰)	AM
観測地点②			PM
観測地点③		街路樹に 括りつけて設置	AM
観測地点④			PM
観測地点⑤	いきいき 剪定	日なたの 歩道上に設置	AM&PM
観測地点⑥		歩道上に設置 (日陰)	AM
観測地点⑦	PM		
観測地点⑧	いきいき 剪定	街路樹に 括りつけて設置	AM
観測地点⑨			PM
観測地点⑩		日なたの 歩道上に設置	AM&PM

図5-3-7 調査対象路線内の調査地点

表5-3-4 各調査地点における調査項目

	設置状況	観測項目
観測地点①、②、⑥、⑦	歩道上、日陰に設置	気温、相対湿度、黒球温度、日射量(上から)、赤外放射量(下から)、風向風速、地表面温度、熱(赤外)画像、WBGT(暑さ指数)
観測地点③、④、⑧、⑨	街路樹に括りつけ設置	気温、相対湿度、黒球温度、WBGT(暑さ指数)
観測地点⑤	日なた(強剪定付近)に設置	気温、相対湿度、黒球温度、日射量(上・下から)、風向風速、地表面温度、熱(赤外)画像、WBGT(暑さ指数)
観測地点⑩	日なた(いきいき剪定付近)に設置	気温、相対湿度、黒球温度、日射量(上・下から)、赤外放射量(上・下から)、風向風速、地表面温度、熱(赤外)画像、WBGT(暑さ指数)

ウ 結果の概要と考察

調査当日は 13:30頃までは継続して晴れていたが、それ以降は晴れと曇りを繰り返し、雲の影と歩道上の緑陰が判別できない時間も見られていた。参考までに、調査日当日の横浜地方気象台による気象データを図 5-3-8 に示す。

	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時
天気							
気温(°C)	30.1	30.9	31.7	32.3	33.1	31.8	31.6
湿度(%)	59	52	52	50	46	51	55
日照時間(h)	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.6
風向	東南東	東南東	南南西	南南東	南南東	南南東	南南東

※横浜地方気象台のデータ

図 5-3-8 調査日当日の天気の推移

横浜地方気象台のデータでは 14:00 から曇となっているが、現地では 13:00 過ぎから雲が出始め、13:30 頃には曇で影が見えなくなった。その後は、雲が多いものの、陽が出る時間もあったが、午前中ほど強い日差しにはならなかった。そのため、午前中(10:00~12:00)のデータを対象に暑熱環境の差を検証した。観測地点①、⑤、⑥での気温・黒球温度・WBGT・上からの日射量の結果の概要を表5-3-5に示す。

表 5-3-5 調査結果の概要(観測地点①、⑤、⑥)

	観測地点	気温(°C)	黒球温度(°C)	WBGT(°C)	上からの日射量(W/m2)
いきいき剪定の緑陰	⑥	32.3	34.5	26.3	81.6
強剪定の緑陰	①	32.8	36.8	26.9	137.0
日なた	⑤	33.8	43.2	28.3	759.8

※1:10:00~12:00までの平均値

※2:当日の横浜地方気象台の状況(10~12時の平均値):気温31.6°C、湿度51%、WBGT28.9°C(WBGTは実況推定値)

※3:気温・黒球温度・WBGTは地上から高さ1.5mで測定・算出した値、日射量は地上から高さ0.3mで測定した値

なお、観測地点⑩では、機器設置場所の直近にある木の緑陰や上部の電線などの影の影響を受けた可能性があるため、参考値扱いとした。そのため、日なたの観測結果は、強剪定付近の日なたに設置した観測地点⑤の結果のみを用いた。また、街路樹の 2.5m の高さに観測機器を括りつけた観測地点③(強剪定の木)と観測地点⑧(いきいき剪定の木)では、WBGT の値等に差はほとんど見られなかった(表 5-3-6)。

表 5-3-6 調査結果の概要(観測地点③、⑤、⑧)

	観測地点	観測高さ(m)	気温(°C)	相対湿度(%)	黒球温度(°C)	WBGT(°C)
いきいき剪定の緑陰	⑧	2.5	32.6	45	34.4	26.4
強剪定の緑陰	③	2.5	32.2	45	35.1	26.3
日なた	⑤	1.5	33.8	41	43.2	28.3

※1:10:00~12:00までの平均値

※2:街路樹に括りつけた観測機器は、10時~12時に5回、目視で緑陰内にあることを確認した。その結果、午前中を通して緑陰内にあると推定した。

この理由としては、観測機器を括りつけた観測地点③の強剪定の木が、観測地点⑧のいきいき剪定の木より樹冠や樹高が小さいものの、強剪定としては枝葉が伸び、葉密度はやや高い状態であったためであると考えている。また、観測地点①の強剪定の木(1.5m高さで観測)と比べて、樹冠・樹高は同程度であったが、葉密度はより高い状態にあったことも原因の一つと考えている。すなわち、いきいき剪定と強剪定の葉密度が同程度で、緑陰の濃さが同じ場合は、緑陰の大きさにかかわらず、緑陰内に観測機器が入っている場合は、木に括りつけた場所の暑熱環境に差はほとんどみられない結果となった。

今回の調査では、剪定方法の違いによって、形成する緑陰の大きさや葉の密度に由来する緑陰の濃さに違いが生じていた。図 5-3-9 に示すように、10:30 頃には強剪定・いきいき剪定のどちらも、歩道幅(幅員約 4m)全体に緑陰が生じていた。しかし、11:30 頃には、強剪定は道幅の半分程度の陰で、歩道にかかる緑陰全体の大きさも小さくなっており、葉密度の薄い部分で形成された緑陰の薄い部分も目立つようになってきた。一方で、同時刻でのいきいき剪定の緑陰は、継続して道幅全体に濃い緑陰を形成していた。



図 5-3-9 緑陰の大きさの経時変化

以上の調査結果より、2021 年度の実測調査では、強剪定の緑陰に比べ、いきいき剪定の緑陰の方が、暑熱環境が緩和されていたことを確認した。いきいき剪定の方が木全体での緑の濃さが濃く、枝葉がより日射を遮るため、暑熱緩和効果が大きく、また、大きな緑陰を形成するため、涼しさを感じられる面積(範囲)が大きくなったと考えられる。

(5) 2021 年度の実測調査に関する数値シミュレーション

ア 数値シミュレーションの計算設定

5.1 章(3)イと同様の方法で、計算を行った。

イ シミュレーションでの樹木の設定方法

街路樹 1 本 1 本の樹高、枝下高、葉面積密度(緑の濃さ)を示すデータは、GIS データには含まれていないことから、実測調査で取得した樹木の基礎情報を基に、次に示す方法でシミュレーションに必要な樹木の配置作業を行った(ア)。本作業には、SI-CAT(気候変動適応技術社会実装プログラム)の技術開発において開発されたツールを使用した。一方、大規模緑地など GIS データで山林と定義されている場所に対しては、(ア)の作業を行わず、典型的な樹木形状として固定値を用いた。

(ア) 樹木の配置作業

a 樹冠の水平位置の設定(図 5-3-10)

- ① 微気象シミュレーションを行う格子位置(原点)を決定し、航空写真から、樹木(樹冠)の輪郭(真上から見た大きさ)を縁取る
- ② ①で定義した 1m 格子の各セル内において、半分以上が樹木(樹冠)である場合、そのセルには、樹冠(緑)があると定義する
- ③ 1 本の樹木として定義する



図 5-3-10 樹冠の大きさの設定作業

b 樹冠の鉛直位置・見た目の緑の濃さの設定(図 5-3-11)

a で定義された水平方向セルにおいて、写真や現地での調査記録から、1m 格子の鉛直方向セル(ボクセル)毎に「樹高」「枝下高」「見た目の緑の濃さ(3段階:濃い・普通・薄い)」を設定する。



図 5-3-11 樹高・枝下高・緑の濃さの設定作業

ウ 中田さちが丘線での樹木の設定方法

実測調査を行った地点のうち、いきいき剪定の調査を行った街路樹を対象としたシミュレーションを実施した。対象エリアのうち、特に注目している地点における土地利用状況と、街路樹の位置を図 5-3-12 に示す。土地利用と色の関係は以下の通りである。紫色：建物、青色：建物敷地、白色：道路。また、緑の位置が、道路の両脇に植樹されている街路樹の位置である。また図中の赤い格子の9点は、後述の日射強度に関する解析に用いた地点である。

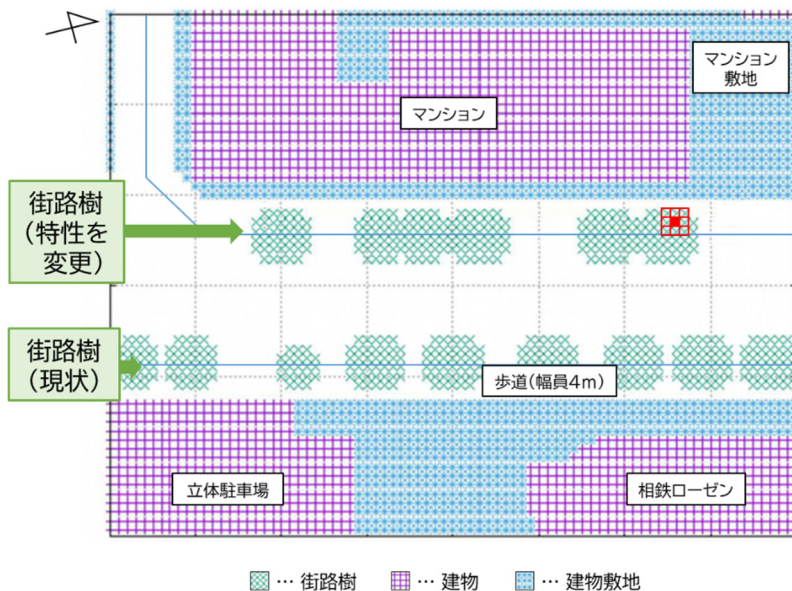


図 5-3-12 土地利用と樹木配置

いきいき剪定と強剪定がなされている通りでの暑熱環境の違いを把握することが、本章での目的である。その把握のために、同じ場所、同じ時刻、同じ気象条件下において、剪定方法を変えることにより、どの程度、暑熱環境に違いが生じるかを、シミュレーションで解析した。具体的には、図 5-3-12 に示されてい

る街路樹のうち、西側に南北に並ぶ6本の街路樹の特性を変え、その結果生じる暑熱環境を解析した。街路樹の特性を表すパラメータとしては、樹冠体積、樹冠の葉の緑の濃さ、樹冠の位置（高さ）がある。本章の目的である剪定方法の差による暑熱環境の違いを把握するためには、樹冠体積と樹冠位置に対する依存を主に解析すれば良い。ここでは、横浜市の街路樹の維持管理を行っている部署（道路局）に相談した上で、現実的な6つの樹冠形状を設置し、各ケースのパラメータをイメージ図とともに図 5-3-13 に示す。シミュレーションの解像度が1mのため、樹冠形状は1辺1mのブロックで表現される。この6ケースでは、葉の緑の濃さ（葉面積密度により設定：詳細は後述）は一定値の $1.93\text{m}^2/\text{m}^3$ である。



図 5-3-13 樹冠体積・樹冠位置依存性解析のための樹冠パラメータ

次に、緑の濃さの依存を解析するために、Case1の樹冠形状に対し、葉面積密度を6種類設定した。各ケースの葉面積密度の値を、相当する葉の写真とともに図 5-3-14 に示す。写真から分かるように、樹種は異なるものの（Case1～3は中田さちが丘線のケヤキに対して、みなと大通りのホルトノキ）、実際の街路樹における葉面積密度の変化の範囲を想定している。

	Case7	Case8	Case9	Case10	Case11	Case12
写真						
葉面積密度	$0.67\text{m}^2/\text{m}^3$	$0.92\text{m}^2/\text{m}^3$	$1.16\text{m}^2/\text{m}^3$	$1.29\text{m}^2/\text{m}^3$	$1.68\text{m}^2/\text{m}^3$	$2.17\text{m}^2/\text{m}^3$
樹高	9 m	9 m	9 m	9 m	9 m	9 m
枝張り	7 m	7 m	7 m	7 m	7 m	7 m
樹冠体積	122m^3	122m^3	122m^3	122m^3	122m^3	122m^3

図 5-3-14 葉の濃さの依存性を解析するための樹冠パラメータ

Case 1~6の樹冠形状のまま、葉面積指数 (LAI、下記「樹木画像に基づく葉面積指数の推定手法」項を参照) を一定としたケースをそれぞれ Case 13~18として6種類設定した(表 5-3-7)。よって、樹冠パラメータを変えた計18種類の樹木に対して、暑熱環境の違いを解析した。

表 5-3-7 LAI を一定としたケース

	Case 13	Case 14	Case 15	Case 16	Case 17	Case 18
葉面積密度(m ² /m ³)	0.67	0.92	1.16	1.29	1.68	2.17
葉面積指数(m ² /m ²)	6.20					
街路樹の形	Case 1と同じ(樹高9m、枝張り7m、樹冠体積122m ³)					

エ 樹木画像に基づく葉面積指数の推定手法

MSSG の微気象シミュレーションでは、建物形状を格子点に沿ったボクセルにより表現し、樹冠については、葉の茂り具合を表す葉面積密度(単位体積あたりに含まれる葉の総面積)の3次元空間分布により表現する。樹冠の風の流れを遮る効果、日射を遮蔽・散乱する効果、熱放射の効果、及び樹冠と大気との熱・水蒸気の交換に及ぼす効果等の計算では、葉面積密度がそれらの効果の大きさに関わる重要なパラメータとなる。例えば、樹冠体積内で葉が一様に分布していると仮定すると、樹冠を透過する放射(日射や熱放射)の透過率 $T[-]$ (直達透過率)は、葉面積密度 $a[m^2/m^3]$ 、樹冠体積内の通過距離 $l[m]$ 、及び樹冠内の消散係数 $k_{ext}[-]$ を用いて、 $T=\exp(-k_{ext}al)$ により求められる(Beer-Lambert 則)。MSSG では樹冠の各格子においてこの Beer-Lambert 則が成立していると仮定している。その際、葉の向いている方向がランダムであることを仮定し、 $k_{ext}=0.5$ としている。そこで、この関係式を利用して、樹木の画像から葉面積指数(Leaf Area Index, LAI)の推定を行った。

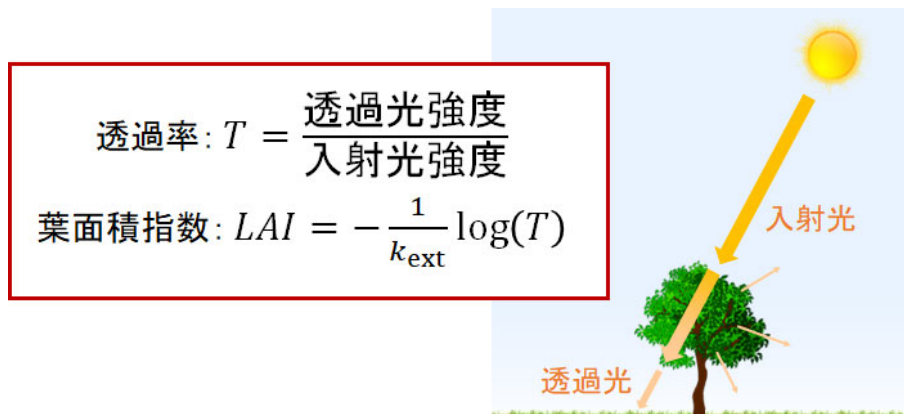


図 5-3-15 樹冠の透過率と LAI の推定式

LAI は葉面積密度を鉛直方向に積分した無次元量として定義される。つまり、樹冠高さを $H[m]$ とすると、 $LAI = \int_0^H a dz$ である。樹冠全体で葉面積密度が一様であれば、樹冠の鉛直幅 $h[m]$ ($=H - H_{bottom}$ 、ただし、 H_{bottom} は樹冠の枝下高さ[m])を用いて、 $LAI = ah$ と表すことができる。したがって、樹冠の鉛直方向の透過率 T が分かれば、 $LAI = -\log(T)/k_{ext}$ により LAI を推定することができ、また、 $a = LAI/h$ により葉面積密度を得ることができる(図 5-3-15)。一般的には、鉛直方向を向いた魚眼レ

レンズによる撮影画像などを用いて同様の手法による LAI の画像推定が行われるが、ここでは画角の狭い通常のデジタルカメラを使い、樹冠下から見上げるように撮影した樹冠画像を用いて簡易的な LAI 推定を行った。

具体的には、まず、樹冠画像を RGB の 3 成分に分解し、晴天日に撮影された樹冠画像において青空が最も明るくなる Blue 成分のみを抽出し、200 を閾値として二値化した(図 5-3-16)。また、画像中の樹冠位置の偏りや他構造物の映り込みを避け、可能な限り樹冠と空だけの判定となるようにマスク処理を施した(図 5-3-17)。その後、空の光が樹木で遮蔽されない割合を画像から算出し、これを透過率 T として上記の数式に基づいた LAI 及び葉面積密度 a の推定を行った。画像処理には、Python3 を用い、jupyter-notebook 上で処理を行った。画像の読み込みには scikit-image、画像の変換、マスク処理、及び解析には Pillow (PIL) 及び NumPy 等のライブラリを利用した。なお、本手法では、あくまで簡易的な LAI の推定を目的としており、精密な計測には全く及ばないものの、目視で確認した葉の「濃さ」とは一定の相関がみられた。一方で、画像のピントが合っていない場合や画像の解像度が著しく低い場合には、異常に大きな LAI が算出されることなども確認されており、高精細な樹冠画像を均一なクオリティで撮影することの重要性も示唆された。

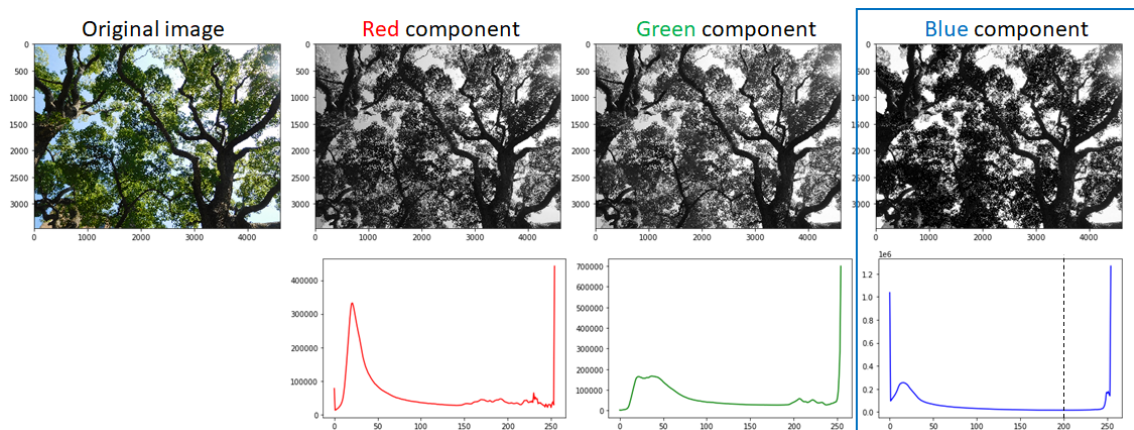


図 5-3-16 樹冠画像の RGB 成分

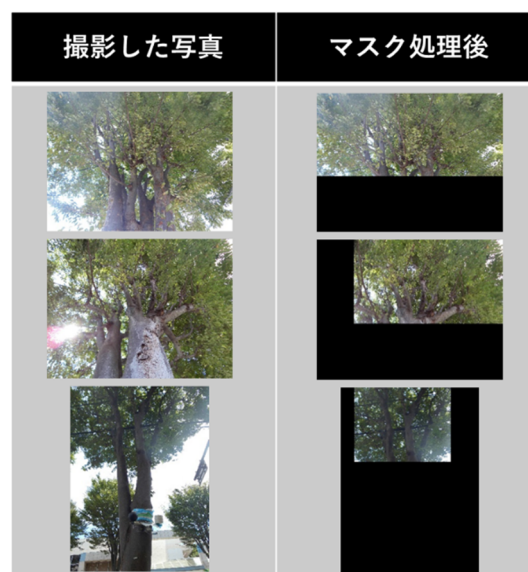


図 5-3-17 マスク処理の例

今回、いきいき剪定領域で撮影した可視画像14枚を用いて LAI を算出した結果、平均値として6.20 m^2/m^2 が得られ、平均葉面積密度に換算し 1.93 m^2/m^3 が得られた。これらの値を以下のシミュレーションの基本値とした。

ウ 結果と考察

(ア) 実測調査当日の暑熱環境について

実測調査当日 11:00~12:00 における微気象シミュレーションの結果の一例として、高さ1.5mにおける WBGT の空間分布について、11:00~11:05の平均値を示す(図 5-3-18)。マンションと立体駐車場の間に、ほぼ南北に延びる道路があり、その両脇に街路樹が植樹されている(図 5-3-12)。この時間帯、日光は図の右下方向から射している。街路樹のある場所では、周囲に比べてWBGTが低くなっていることがわかる。また、マンションなど、建物の影の場所においてもWBGTが低くなっている。

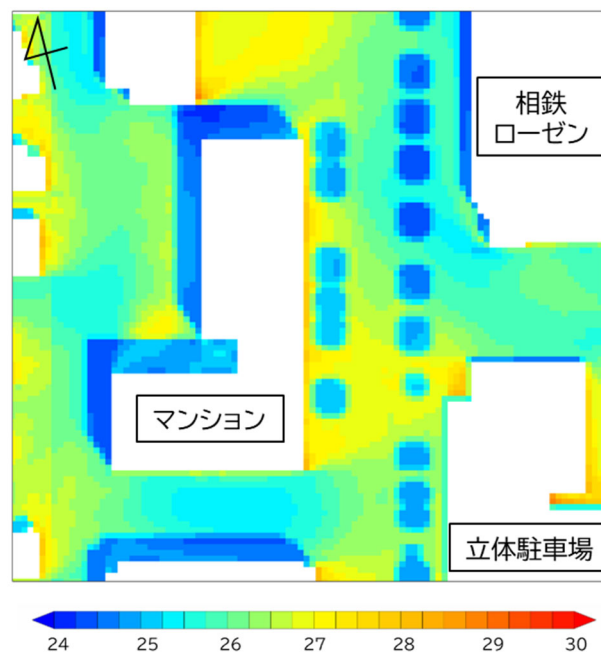


図 5-3-18 シミュレーションの結果例(WBGT)

次に、測定値とシミュレーション結果を比較した図を示す(図 5-3-19)。いきいき剪定の緑陰と日なたにおける 1.5m高さのWBGTの差を比較した。日なたは実測調査を行った観測地点⑩、緑陰は観測地点⑥(図 5-3-7 参照)を選んだ。シミュレーションでは、各測定地点に相当する格子を中心とした9地点の平均値を用いた。測定値においてもシミュレーション結果においても、日なたと木陰のWBGTの差は良い一致を示しており、約1.5~2°Cの差が得られた。

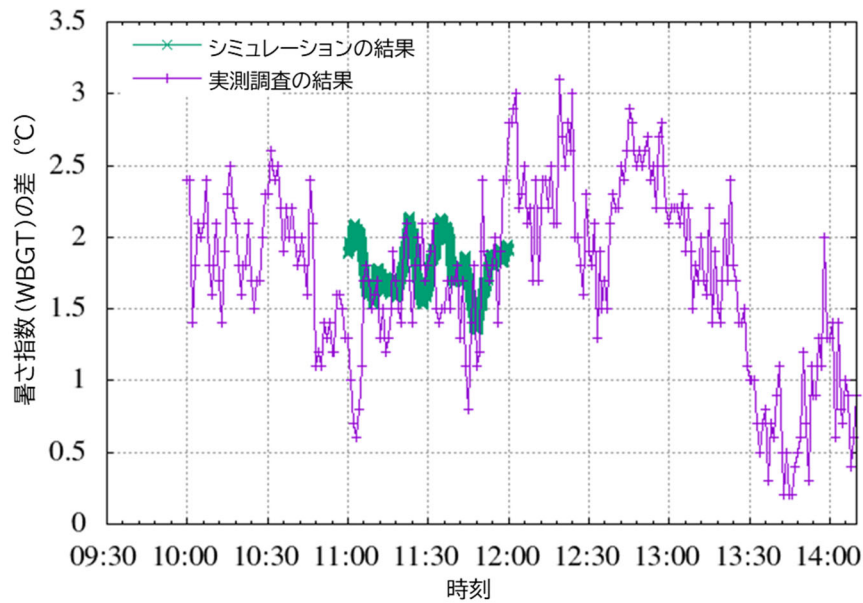


図 5-3-19 測定値とシミュレーションの比較 (WBGT)

強剪定といきいき剪定のWBGTの差の分布図を図5-3-20 に示す。具体的には、Case1とCase2における高さ1.5mでのWBGTである。また、図 5-3-19 と異なり、それぞれシミュレーション結果の値の差を比較しているため、空間分布として表示しており、11:00~11:05の平均値を示す。左の図は、図 5-3-18 と同じである。真ん中の図は強剪定の樹形を、対象とする6本の樹冠の位置に設定した場合の結果である。WBGTが低くなっている場所が狭い領域でのみ確認され、街路樹によってWBGTを下げる効果は限定的である。右の図に、両者の差を示す。より赤く示されている領域において、強剪定といきいき剪定の差が大きく生じており、最大で約1.8°Cの差が見られている。

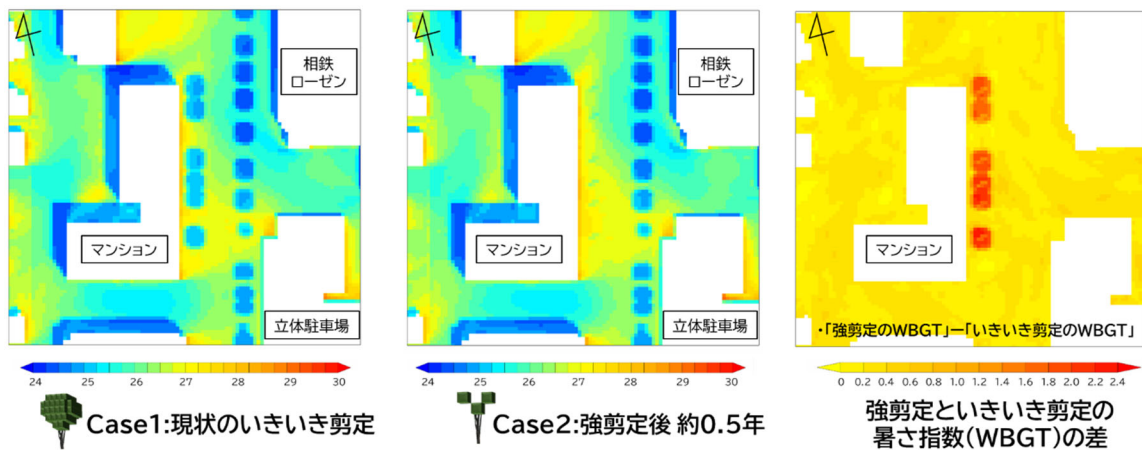


図 5-3-20 測定値とシミュレーションの比較 (WBGT)

次に、WBGT の出現頻度分布を図5-3-21 に示す。具体的には、図 5-3-12 の赤い格子9点において WBGT の5分平均値を求め、11:00~12:00 についてヒストグラムを Case1~3に対してプロットした。いきいき剪定 (Case1) に比べ強剪定後約 0.5 年 (Case2) では、WBGT の分布が高くなっていることから、暑熱環境が明らかに悪化している。平均値として約1.5°Cの差があり、WBGT の5段

階のランクの幅が概ね3°Cであることから、ランク幅の半分程度の暑熱環境の差が生じることが分かる。その後、4年経過した Case3においても、暑熱環境が十分に回復していないことが分かる。

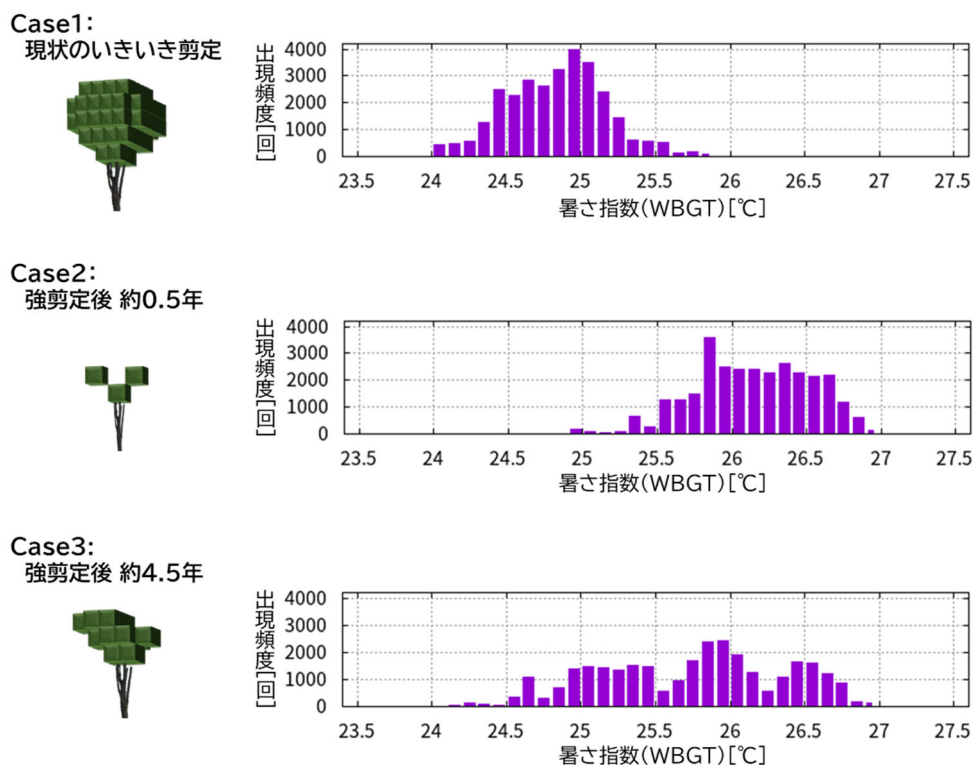


図5-3-21 WBGT の出現頻度分布

(1) WBGTと地表面での日射強度

今回のシミュレーションでは、同じ気象条件においてWBGTを比較した。そこで、WBGTに与える影響を、気象以外の他の物理変数で評価することを試みた。乾球温度、湿球温度、黒球温度が関与することから、12:00 における地表面での日射強度を取り上げた。各樹冠パラメータを考慮した18のケースにおいて、樹冠下の地面に届く日射強度(9格子データの平均値、図 5-3-12 参照)との関係を図 5-3-22 に示す。ケースにより、樹冠に関する各パラメータ値は異なるが、WBGT は、日射強度と良い相関を示した。図の中では2つのデータセットをプロットしている。主に考察した日にちの2021年8月11日を紫色で示す。また、赤色にて2022年6月30日(6月に横浜地方気象台で猛暑日と観測された日)の同時刻における計算結果を示す。太陽高度や気象条件が異なるため WBGT や日射強度が異なるが、どちらの日においても、WBGT は、地表面での日射強度と良い相関を示した。

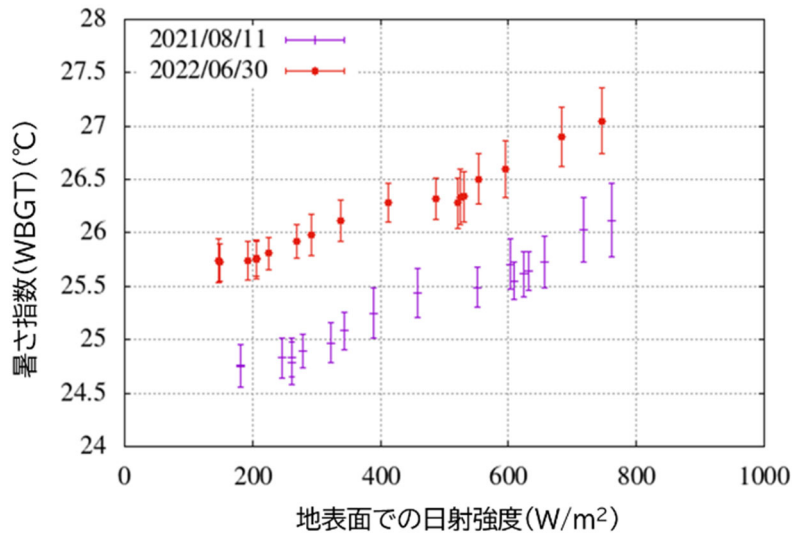


図5-3-22 地表面での日射強度に対するWBGT

これら18ケースを、個々のケースに分けて解析した結果を示す。具体的には、図 5-3-22 を Case 1～6と Case7～12の樹冠に対するプロットに分ける。図 5-3-23 左に Case1～6を、図 5-3-23 右に Case7～12を示す。左図においては、概して、樹冠体積が増加するとWBGTが下がる。まず、Case 1～3のいきいき剪定と強剪定の違いに注目すると、図 5-3-21 のヒストグラムに見られたように、WBGT の差が明らかであり、平均値として約1.5°Cの差が生じている。次に、Case1と4の比較から、樹冠位置を上下に2m変更した場合、WBGT に差はほとんど生じないことが分かる。葉面積密度を変更させた Case7～12 の右図の傾向から、街路樹で想定される葉面積密度の変化の範囲においては、約0.5°Cの差が生じている。ただし、強剪定といきいき剪定との剪定方法の差によって生じる WBGT の差に比べて変動幅は小さい。

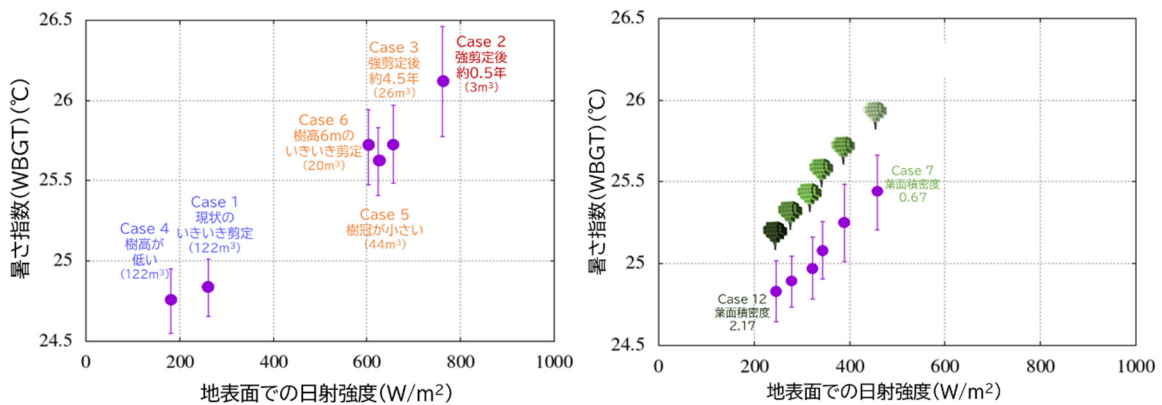


図 5-3-23 地表面での日射強度に対するWBGT (Case1～6(左)、Case7～12(右))

(6) まとめ

実測調査においても、シミュレーションの解析においても、地面に到達する日射の有無や強度がその場の暑熱環境に大きく影響していることが示された。結果に関する樹冠特性と暑さ指数との関係の概念図を図 5-3-24 に示す。樹冠体積を横軸、緑の濃さを縦軸にとると、本章の結果から相対的な WBGT 及びこれに対応する地面に届く日射強度は、左下が高く右上が低くなること分かる(赤線から青線)。緑を薄くせ

ざるをえない場合には、樹冠を広く設けること（横軸の値を大きくすること）で、樹冠体積を大きくできない場合には、緑を濃くすること（縦軸の値を大きくすること）で、それぞれ WBGT が下がる。すなわち、暑熱環境の改善を図ることができる。このように WBGT を考慮しながら実際の剪定を行う事が今後、期待される。

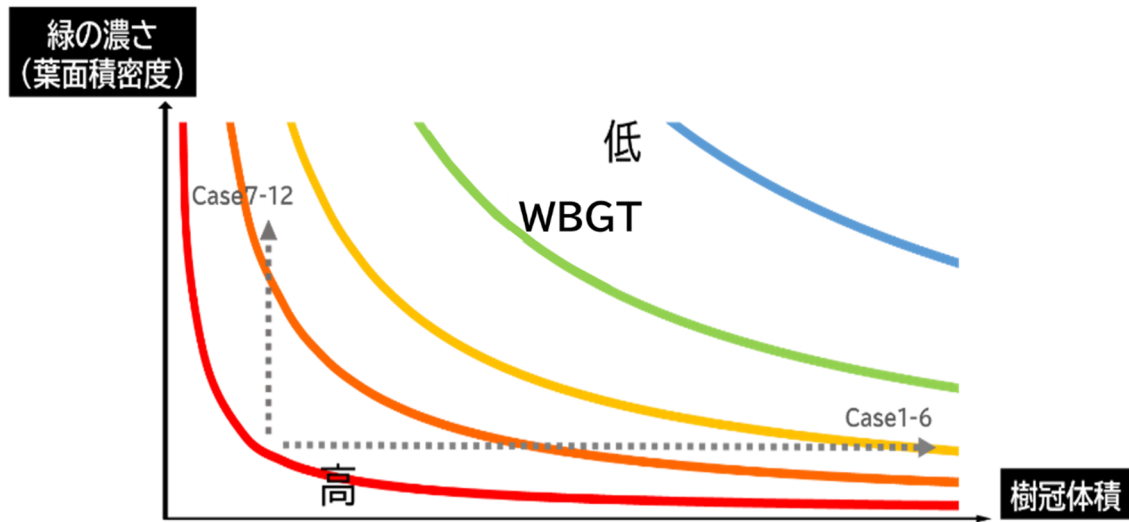


図 5-3-24 樹冠特性と暑さ指数の関係（概念図）

本共同研究の相乗効果として以下の点が挙げられる。実測調査では、いきいき剪定と強剪定の2種類の樹冠特性に対して、地表面での日射の強度が異なり、暑熱環境に差が生じる事を示した。このことは図5-3-22 のシミュレーション結果内で、各剪定に相当する2点において、その差を示したことに対応する。しかし正確には、実測調査では全く同じ場所で、剪定方法の違いによる差を比較することはできない。一方、実測調査の結果や樹冠特性の情報を加味したシミュレーションを実施することにより、種々な樹冠特性に対して WBGT の違いを検証した。実測調査を行った Case1 のいきいき剪定と Case3 の強剪定後約 4.5 年後の 2 点間の内挿のみならず、その外側での WBGT の分布を明らかにし、図 5-3-24 の全体像を得た。局所的な検証からより一般的な検証につながったと考えられる。

(7) 参考文献

- 1) 岡野通明・萩野裕章・高梨聡・鈴木順, 暑熱シェルターとしての緑陰の有効性, 関東森林研究, 66-1(2015),97

5.4 みなと大通り及び横浜文化体育館へのアクセス動線での現況の暑熱環境について

(1) 概要

横浜市中区にある、みなと大通り～横浜文化体育館へのアクセス動線では、車道幅を狭めて歩行者空間を拡充するなどの道路空間の再整備を予定している¹⁾。これを契機として緑や風を活かした環境づくりに貢献するため、まずは現況の暑熱環境について実測調査と数値シミュレーションによる検証を行った。現況の暑熱環境については、街路樹の緑陰やビル陰の場所では暑熱が緩和されていたことが分かった。今後は、再整備後の暑熱環境についても数値シミュレーションを検討し、計画案に対し評価ができるシミュレーションの特性を生かした再整備前後の暑熱環境の差をより深く議論していく。

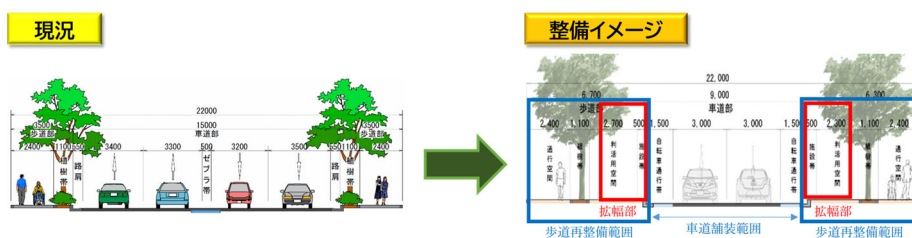
(2) 背景と目的

関内地区の「みなと大通り」及び関外地区の「横浜文化体育館へのアクセス動線」は、連続する1つの路線であり、各施設間の回遊性を向上させるとともに、大通り公園や日本大通りをつなぐ緑の軸線などと合わせて、関内側と関外側との一体性を向上させる重要な動線である。

一方、現状は車道が広く路上駐車が目立つとともに、既設の自転車歩行者歩道は狭く、将来の来街者の増大を見据えると、歩行者溜まりなども十分とは言えない状況にある。

このため、車道幅を狭めて歩行者・自転車通行空間を拡充する等、既存道路空間の再整備を行い、安全で快適な歩行者ネットワークの拡充を図り、沿道の連続的な賑わい創出を目指すとしている(図 5-4-1)。道路空間の再整備には、街路樹の樹種や位置の変更などが含まれていることから、これを契機として、みなと大通り～横浜文化体育館へのアクセス動線での現状の暑熱環境の把握と、再整備後の状況に合わせて街路樹を設定した上で、樹木の成長に伴う暑熱緩和効果を可視化することで、暑熱緩和だけでなく、通りの回遊性や賑わい創出に貢献することを目指すこととした。

【 みなと大通り 】



【 横浜文化体育館へのアクセス動線 】

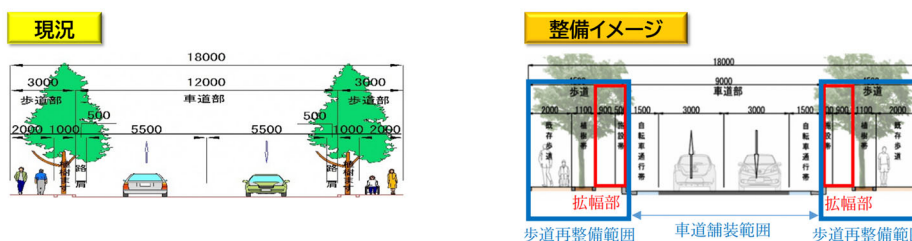


図 5-4-1 みなと大通り（横浜税関前～旧市庁舎前）及び横浜文化体育館へのアクセス動線での整備イメージ¹⁾

(3) 方法

ア 実測調査

(ア) みなと大通り

みなと大通り(横浜税関前交差点～ハマスタ入口交差点)にあるホルトノキ 65 本について、樹高や枝張などの樹木の基礎情報を調べるため、2021 年 8 月 19 日 9:00～16:00 に事前調査を実施した。その後、同区間での現況の暑熱環境を調べるため、2021 年 8 月 25～26 日に本調査を実施した。調査地点の位置を図 5-4-2 に、調査項目を表 5-4-1 に示す。

なお、本調査のうち、地点 A～H の 8 か所では観測機器を木に括り付けて 8 月 25 日 17:00～26 日 15:00 の間測定し、日なた・緑陰下①・②では地上部(歩道上)に観測機器を設置して、8 月 26 日 10:00～15:00 の間に測定した。



出典:国土地理院撮影の全国最新写真(シームレス)を加工して作成

図 5-4-2 みなと大通りでの調査地点の位置

表 5-4-1 本調査での各地点での測定項目

測定項目	日なた	緑陰下①	緑陰下②	地点A	地点B	地点C	地点D	地点E	地点F	地点G	地点H
気温	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
相対湿度	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
黒球温度	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
日射量	● (上下)	● (上下)	● (上下)	—	—	—	—	—	—	—	—
赤外放射量	● (上下)	● (下)	● (下)	—	—	—	—	—	—	—	—
風向風速	●	●	●	—	—	—	—	—	—	—	—
熱画像	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
地表面温度	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
WBGT	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SET*	●	●	●	—	—	—	—	—	—	—	—

(イ) 横浜文化体育館へのアクセス動線

横浜文化体育館へのアクセス動線(不老町交差点～不老町 3 丁目交差点)については、夏季の実測調査は実施できなかったため、シミュレーションのみによる解析を実施することとした。シミュレーションの際に、樹高や枝張などの樹木の基礎情報が必要であったことから、この区間にあるプラタナス45 本について、樹高や枝張などの樹木の基礎情報の調査を 2021 年 11 月 16 日に実施した。調査地点の位置を図 5-4-3 に示す。



出典：国土地理院撮影の全国最新写真(シームレス)を加工して作成

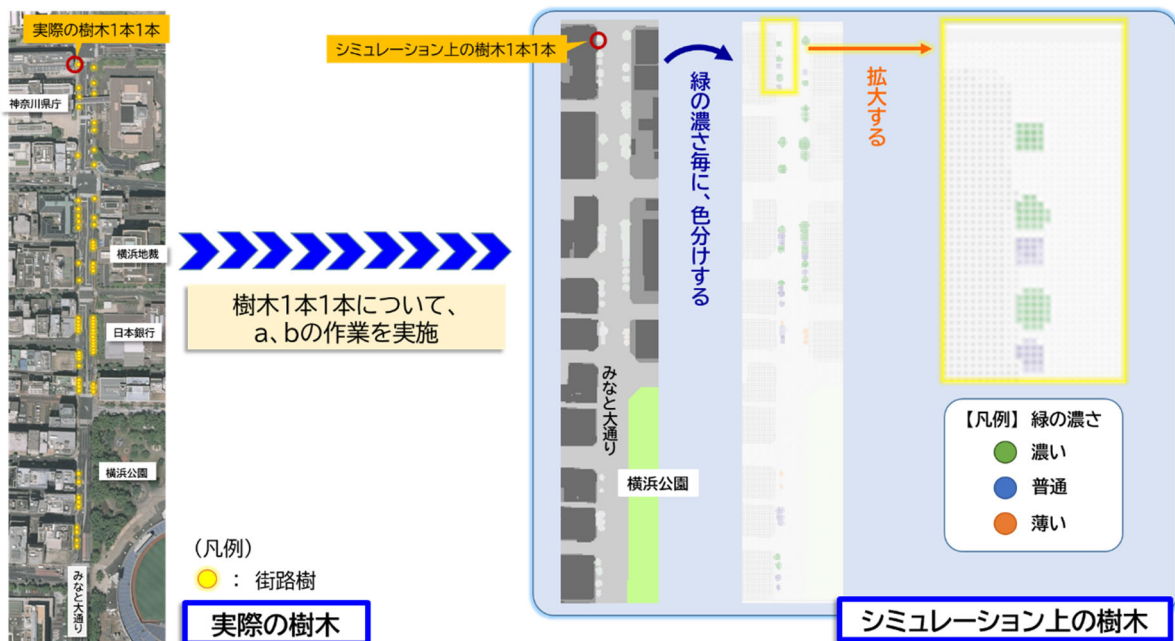
図 5-4-3 横浜文化体育館へのアクセス動線での調査地点の位置

イ 数値シミュレーションの計算設定

5.1章(3)イと同様の方法で、計算を行った。

ウ シミュレーションでの樹木の設定方法

5.2章(5)イと同様の方法で、みなと大通り 65 本、横浜文化体育館へのアクセス動線 45 本の樹木について設定を行った。みなと大通りでの作業状況を図 5-4-4 に示す。



出典：国土地理院撮影の全国最新写真(シームレス)を加工して作成

図 5-4-4 みなと大通りを対象にした作業の状況

エ 樹木画像に基づく葉面積指数の推定手法

5.2 章(5)エと同様の方法で、みなと大通りの街路樹65本の葉面積指数を算出し、葉面積密度に変換した。

(4) 結果と考察

ア みなと大通りでの実測調査

(ア) 気温

夜間(8月25日19:00~26日5:00)における地点 A~H での平均気温と、平均気温が最も高かった地点 B と最も低かった地点 E の気温の時間変化を図 5-4-5 に示す。地点 B と地点 E との平均気温の差は 0.3°C であり、地点間の差は小さかった。また地点 B と地点 E の気温の時間変化から、25日 21:30 頃から気温に差が出始め、以後明け方にかけて地点 E の方が 0.3°C 程度低い状態が続いていた。

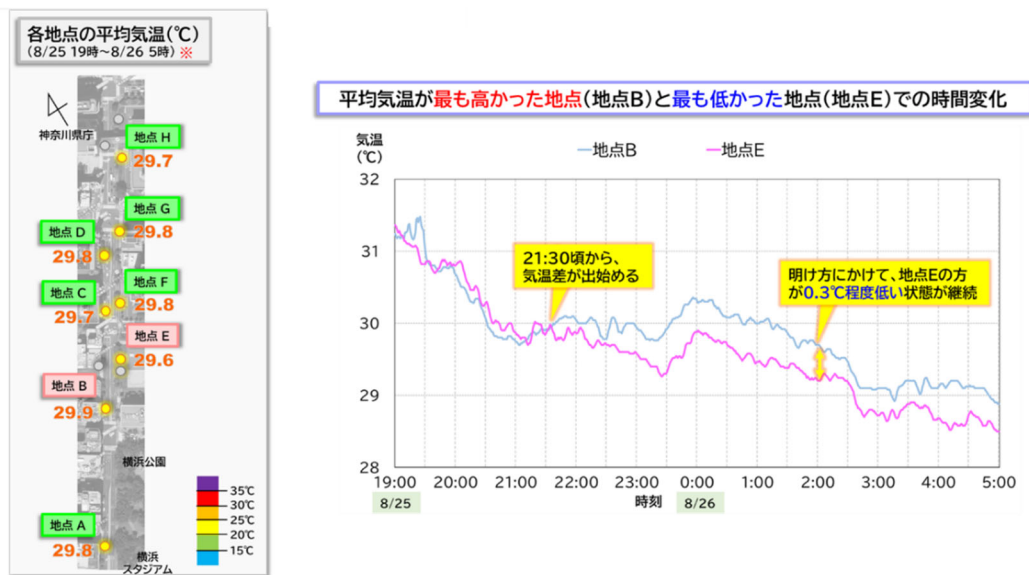
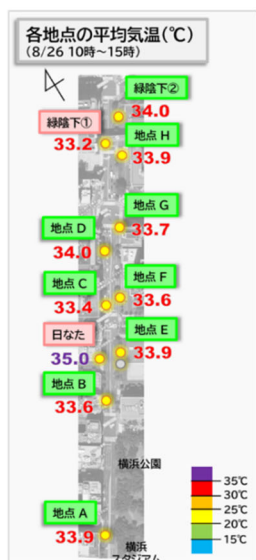


図 5-4-5 みなと大通りでの夜間の気温の状況

日中(8月26日10:00~15:00)における地点 A~H、緑陰下①、②及び日なたでの平均気温と、平均気温が最も高かった日なたと最も低かった緑陰下①の気温の時間変化を図 5-4-6 に示す。日なたと緑陰下①との平均気温の差は 1.8°C であり、夜間と比べると地点間の差は大きかった。また日なたと緑陰下①との平均気温の差は、10~12時で 2.1°C 、13~15 時で 1.6°C で、午前中の時間帯の方が、差が大きくなった。午前中は、緑陰下①では横浜港方面からの海風(北風)が吹いており、この影響を受けている可能性が考えられる。



平均気温が最も高かった地点(日なた)と最も低かった地点(緑陰下①)での時間変化

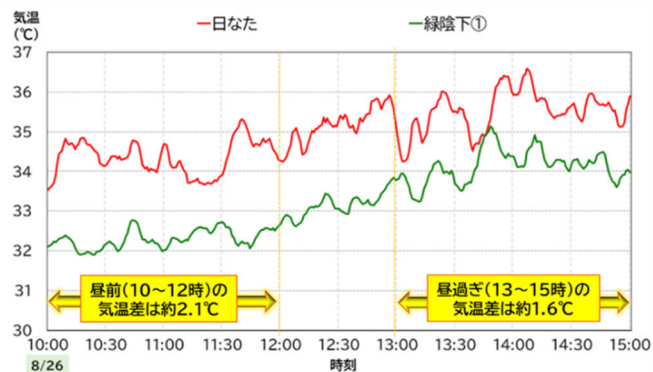


図 5-4-6 みなと大通りでの日中の気温の状況

(1) WBGT

夜間(8月25日19:00~26日5:00)における地点 A~H での WBGT の平均値と、WBGT の平均値が最も高かった地点 F と最も低かった地点 G の WBGT の時間変化を図 5-4-7 に示す。地点 F と地点 G との WBGT の平均値の差は 0.4°C であり、地点間の差は小さかった。また地点 F と地点 G の WBGT の時間変化から、夜間は常に地点 G の方が 0.4°C 程度低い状態が続いていた。



WBGTの平均値が最も高かった地点(地点F)と最も低かった地点(地点G)での時間変化

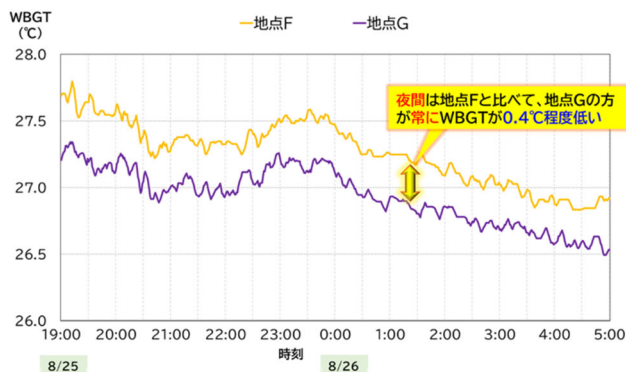


図 5-4-7 みなと大通りでの夜間の WBGT の状況

日中(8月26日10:00~15:00)における地点 A~H、緑陰下①、②及び日なたでの WBGT の平均値と、WBGT の平均値が最も高かった日なたと最も低かった地点 B・C・緑陰下①の WBGT の時間変化を図 5-4-8 に示す。日なたと地点 B・C・緑陰下①との WBGT の平均値の差は 2.6°C であり、夜間と比べると地点間の差は大きかった。また午前(10:00~12:00)と午後(13:00~15:00)でほぼ変わらず、地点 B・C・緑陰下①の方が常に 2.6~2.7°C 低い状態が続いていた。これは、地点 B・C・緑陰下①は緑陰や建物の陰にあるため、日中は WBGT の変化が小さかったものと考えられる。

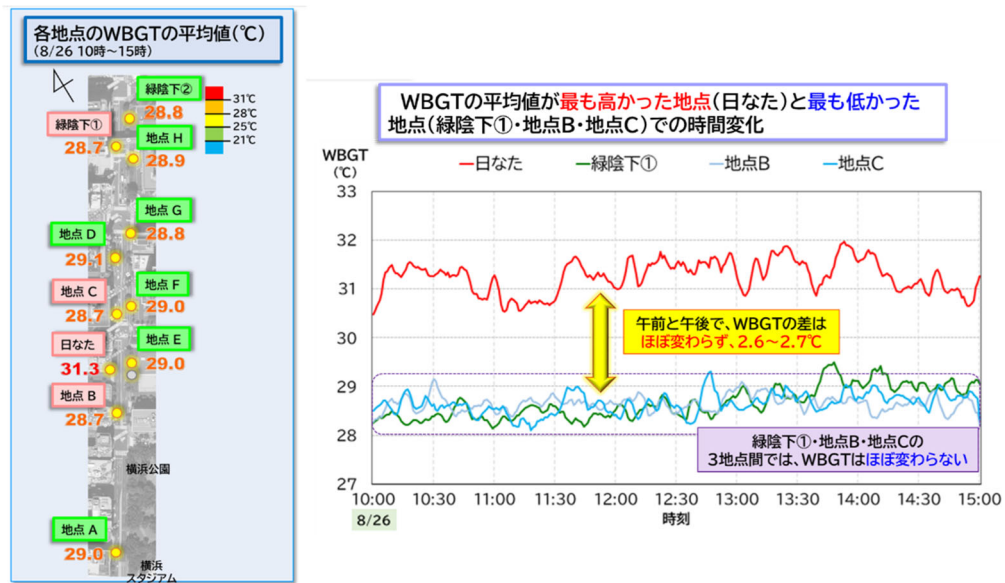


図 5-4-8 みなと大通りでの日中の WBGT の状況

みなと大通りの WBGT の状況について、熱中症による救急搬送人員数と対応させた結果を図 5-4-9 に示す。夜間、日中の緑陰、日中の日なたでは、夜間が最も熱中症リスクが低く、次いで、日中の緑陰、日中の日なたという順となった。日中に関しては、緑陰と比較すると日なたでは熱中症リスクが約 2.3 倍高くなることが分かった。

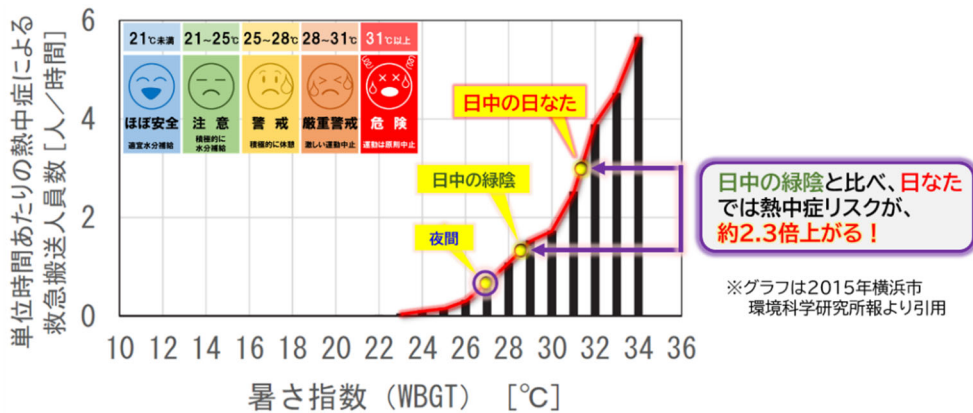


図 5-4-9 みなと大通りでの WBGT と熱中症による救急搬送人員数との関係

(ウ) 風況

日中(8月26日11:00~15:00)における緑陰下①、②、日なたと、横浜山手にある横浜地方気象台(みなと大通りから直線で約 1.3km)での風況の結果を図 5-4-10 に示す。横浜地方気象台では、13 時頃までは横浜港方面から北東寄りの風、14 時以降は南東寄りの風へと変化していた。一方、みなと大通りの北側に位置する緑陰下①及び②では、12 時頃までは横浜港方面から北寄りの風、13 時以降は南西寄りの風へと変化していた。日なたの地点では、終日東寄りの弱い風が吹いていた。緑陰下①、②及び横浜地方気象台では初めは横浜港を含む東京湾からの海風が吹き、次第に相模湾方向からの海風に変わったものと推測される。一方、日なたの地点では風向が変わらなかったのは、み

など大通りから若干路地に入った地点であり、みなと大通り方向からの風が流れやすかったためと思われる。

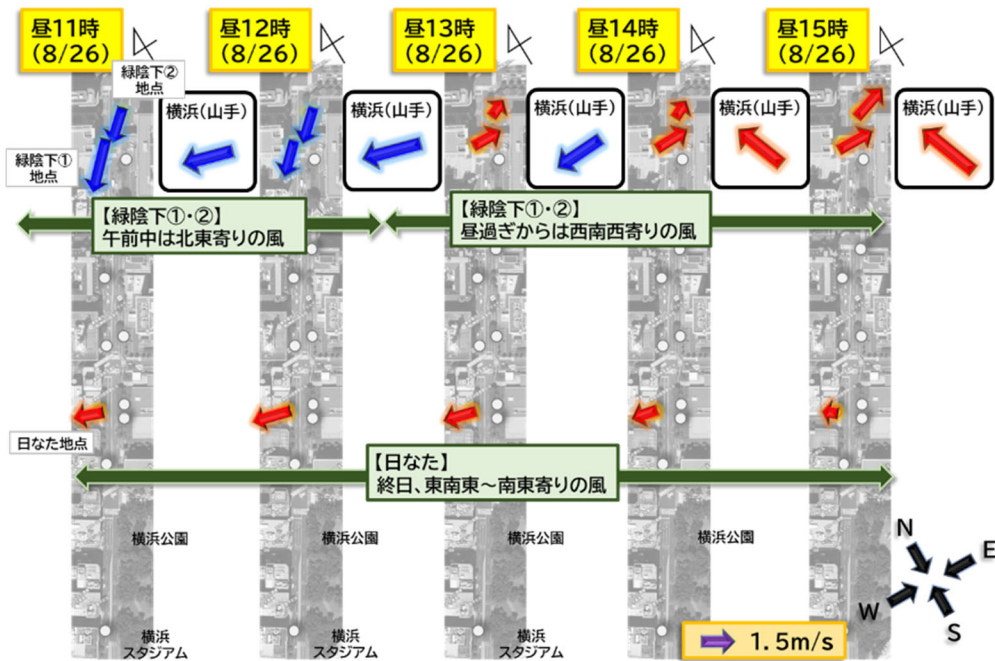


図 5-4-10 みなと大通りでの風況 (8月26日 11:00~15:00)

(I) 日射量

日中(8月26日 10:20~15:00)における緑陰下①、②及び日なたでの、上からの日射量の時間変化を図 5-4-11 に示す。日なたの地点での日射量は平均で 711 W/m^2 であったのに対し、緑陰下①・②では $45 \sim 55 \text{ W/m}^2$ であり、日なたと比べると上からの日射量は $92 \sim 94\%$ 低減していた。

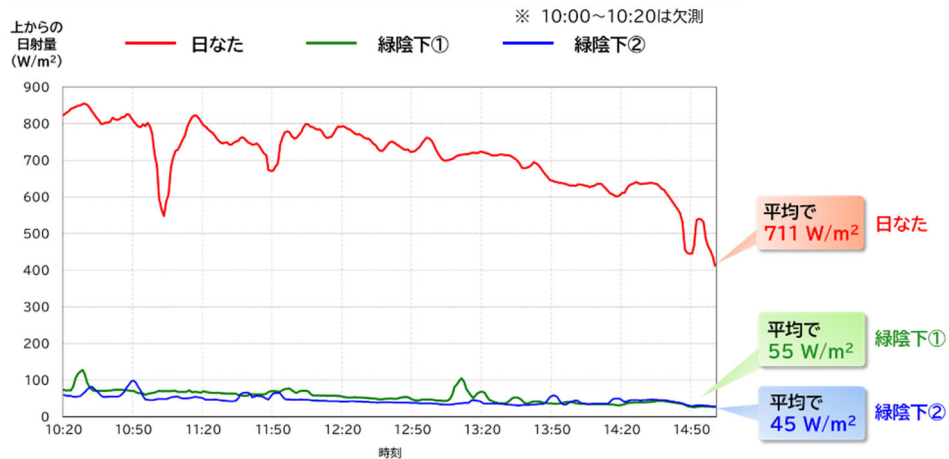


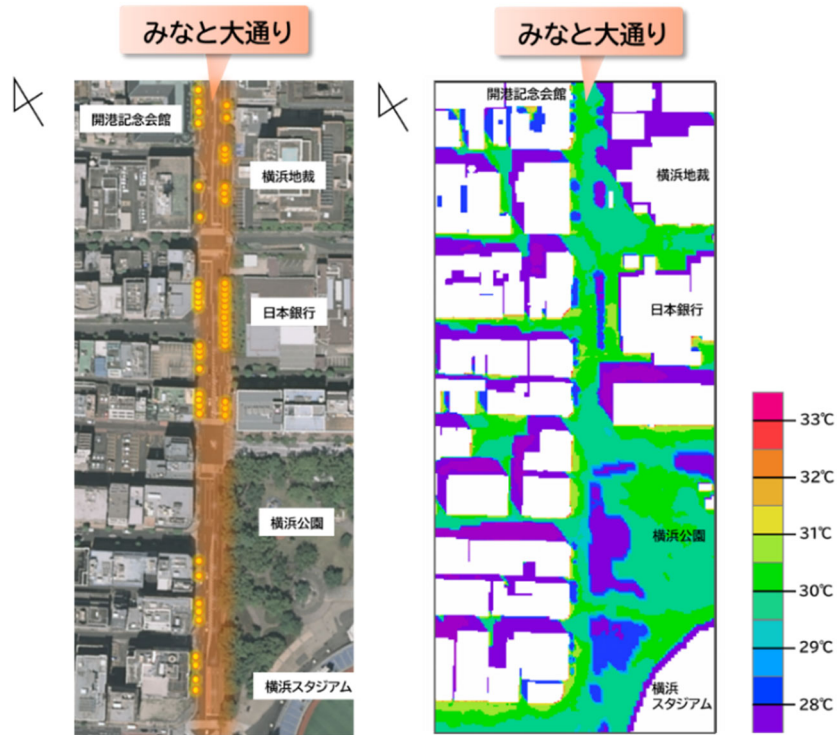
図 5-4-11 みなと大通りでの上からの日射量 (8月26日 10:20~15:00)

イ 現況の暑熱環境に関するシミュレーション

(ア) みなと大通り

みなと大通り全体の暑熱環境を可視化するため、2021年8月26日 10:00~11:30における微気象シミュレーションの結果の中から、例として、高さ1.5mにおけるWBGTの空間分布について、11:

00～11:10の平均値を示す(図 5-4-12)。なお、図中の白抜き部分は建物である。みなと大通りのうち、歩道上に街路樹がある場所では WBGT が低いほか、建物の西側でもビル陰の影響で WBGT が低くなっている。一方、みなと大通りのうち、歩道西側でかつ街路樹がない場所や、建物の南側では WBGT が高くなっている。また横浜公園でも、地表面が草地であっても日なたの場所では WBGT がやや高くなっている。シミュレーションからも、日射の有無によってWBGTの状況に違いがあることが確認できる。



出典:国土地理院撮影の全国最新写真(シームレス)を加工して作成

図 5-4-12 みなと大通りでの WBGT の分布
(2021 年 8 月 26 日 11:00～11:10 の平均値)

また、WBGT の地上からの高さの依存を調べるため、高さ 0.5m～2.0m における WBGT を算出した(図 5-4-13)。日なたのエリアでは、地面に近いほど WBGT は高くなる傾向がみられる。これは、高温となった地面からの赤外放射(輻射)により黒球温度が上昇した結果、WBGT が高くなったためである。一方、日陰のエリアでは、ビルによる日陰と緑陰(街路樹により日陰)に差がみられる。ビルによる日陰のエリアでは、各高さにおいて大きな違いはみられない一方、緑陰では、樹冠に近づくほど(高さが高くなるほど)WBGT が低くなっている。これは樹冠に近づくことで回折光(周りからの日射)が少なくなり、日射の影響が弱まることで、黒球温度が下がるためと考えられる。

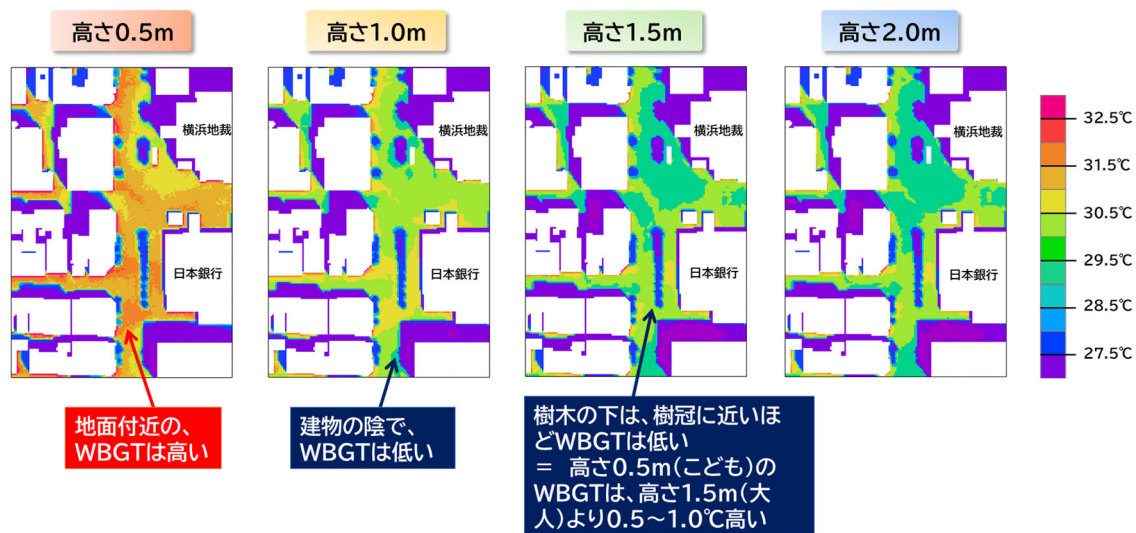


図 5-4-13 地上からの高さ別の WBGT の分布
(2021 年 8 月 26 日 11:00~11:10 の平均値)

図 5-4-14 に、高さ 1.0m における気温と風向(細矢印)を示す。この時間帯では、図右下から太陽光が入射しているため、建物北側(上側)に陰が生じている。陰が落ちているみなど大通り東側の建物付近では気温が低くなっている(図中の黄色点線部分)。この気温が低い部分を起点としてみなど大通り方面に風が吹く場合、相対的に涼しい空気が通りに広がっていく。この空気塊の気温は、徐々に暖まっているものの、街路樹が位置している場所では、緑陰の影響によって昇温が抑制されて流れている。この傾向から、ビル陰に溜まりやすい涼しい空気を活用するように、樹木を適切に配置するなどの考慮が、適応策の1つとして挙げられる。

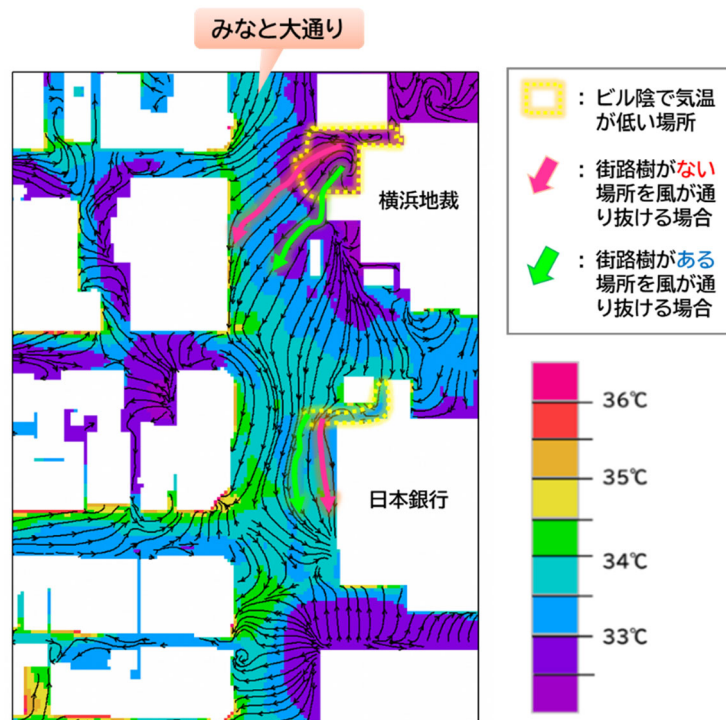


図 5-4-14 みなと大通りでの気温と風の状況
(2021 年 8 月 26 日 11:00~11:10 の平均値)

(1) 横浜文化体育館へのアクセス動線

JR 根岸線を対称にみなと大通りとは反対側（関内駅より南側）にある、横浜文化体育館へのアクセス動線についても、2022年8月26日11:00～11:10におけるWBGTの分布状況について、シミュレーション結果より算出した（図5-4-15）。a みなと大通りのシミュレーションにおいて見られた結果と同様に、日差しを遮るものがない場所では、WBGTが高く、陰のある部分やその周辺ではWBGTが低い傾向にある。アクセス動線は、通りが南西～北東方向にあるため、昼前の日陰は通りの両側にある街路樹の緑陰のほかに、東側の歩道では建物からの陰が伸びるような形となっている。そのため、アクセス動線における建物からの陰の出来方を考慮しつつ、それを補う形で街路樹による緑陰を作るようにすれば、歩行中の積算WBGTの値を抑制することが可能となり、適応策の1つとなり得るであろう。

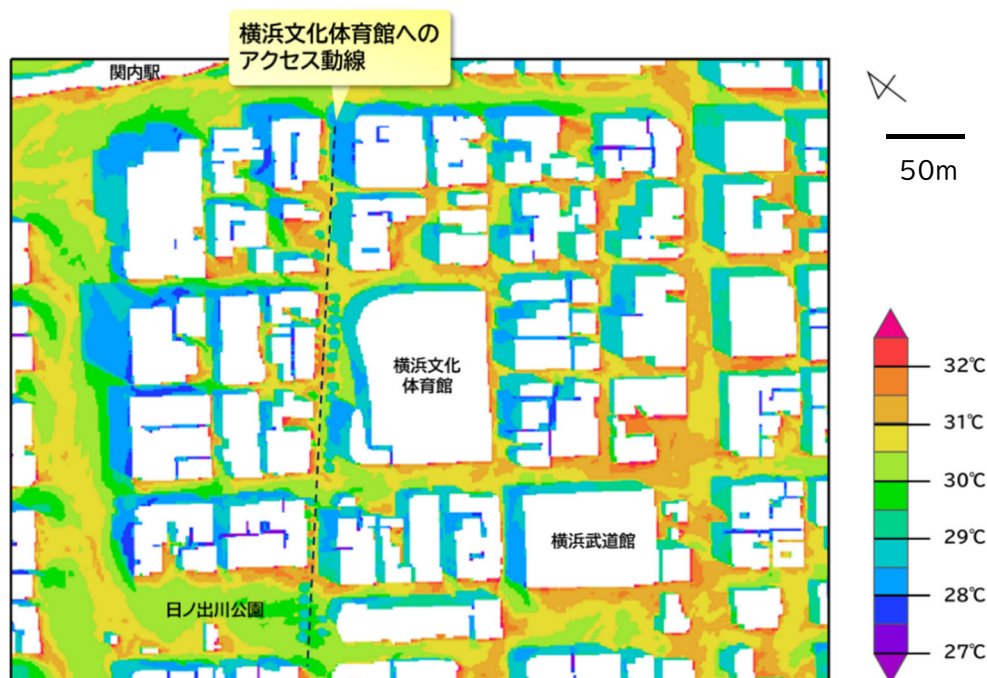


図5-4-15 横浜文化体育館へのアクセス動線でのWBGTの分布
(2021年8月26日11:00～11:10の平均値)

(5) まとめ

みなと大通りの現況の暑熱環境について、実測及びシミュレーションの結果から、日中の日なたでは熱中症リスクが高いものの、街路樹の緑陰やビル陰のある場所などでは暑熱が緩和されていた。

また、みなと大通りには、樹高より高い建物が多く、それらの建物が作り出す日陰は街路樹による緑陰面積よりも広い。日なたに比べて、これらの日陰では気温が低くなるのみならず、WBGTも低くなることが分かった。今後は、再整備後の暑熱環境について数値シミュレーションを行い、再整備前後の暑熱環境の差をより深く議論していくことで、実測調査結果をシミュレーションに活かしていくことも検討する。

(6) 参考文献

- 1) 横浜市:みなと大通り及び横浜文化体育館周辺道路の再整備について、https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/machizukuri-kankyo/doro/jigyo_kikaku/mina-bun.html (2023年3月時点)

5.5 市内気温の将来予測(2°C上昇及び4°C上昇の事例)

(1) 概要

地球温暖化など気候変動に起因する気象・気候現象に向けた対策に取り組んでいくためには、地域の特性を踏まえた詳細な情報が必要となる。そこで、本章では、解像度 320m まで高めた数値シミュレーションにより得られた横浜市内の気温について、現在気候時と将来気候時の比較解析を行った結果を述べる。

その結果、現在・将来の気温及び現在から将来への気温上昇量は、海風と緑地による影響により市内でも地域差があり、海風と緑地による影響を強く受ける地域は、弱い地域より「将来の気温」が高温となりにくく、「現在から将来への気温上昇量」は小さくなっており、温暖化した将来でも海風や緑地が引き続き重要となることが分かった。

(2) 背景と目的

18 世紀中頃の産業革命以降、人間活動による温室効果ガス濃度の増加に伴い、現在の世界の年平均気温は産業革命以前に比べて上昇傾向にあるとされており、IPCC の第6次評価報告書には「1850～1900 年から 2010～2019 年までの人為的な世界平均気温上昇の可能性が高い範囲は 0.8°C～1.3°Cであり、最良推定値は 1.07°Cである。」と記載されている¹⁾。

今後さらに地球温暖化が進行した場合、将来の 21 世紀末の世界平均気温の上昇値は、今後の地球温暖化対策の取組状況に大きく依存し、IPCC 報告書には複数のシナリオに対応する状態があると報告されている。^{1,2)}

さらにその気温上昇量に関しては、「世界中で均一に上昇するわけではなく、地域性をもって上昇する」³⁾とされているため、今後の気候変動影響に向けた対策に取り組むには、地域の特性を踏まえたきめ細やかな情報が必要と考えられる。

そこで、横浜を含む神奈川県東部を対象領域として、解像度 320m まで高めた類を見ない詳細な数値シミュレーションを現在気候と将来気候に対し実施し気温等の解析情報を得ることと、その得られた解析情報を市民・事業者の皆様に発信することにより、地球温暖化対策への普及啓発につなげる事を目的として、本課題を実施した。

(3) 方法

ア 将来予測の概要

地球温暖化により、産業革命以前に比べて世界平均気温が2°C上昇又は4°C上昇した場合(以下、「2°C上昇した場合」「4°C上昇した場合」)において、横浜市内の現在の夏季の平均気温がどの程度上昇するかを数値シミュレーションから求め、地域の特性を定量的に評価した。概念図について図5-5-1に示す。

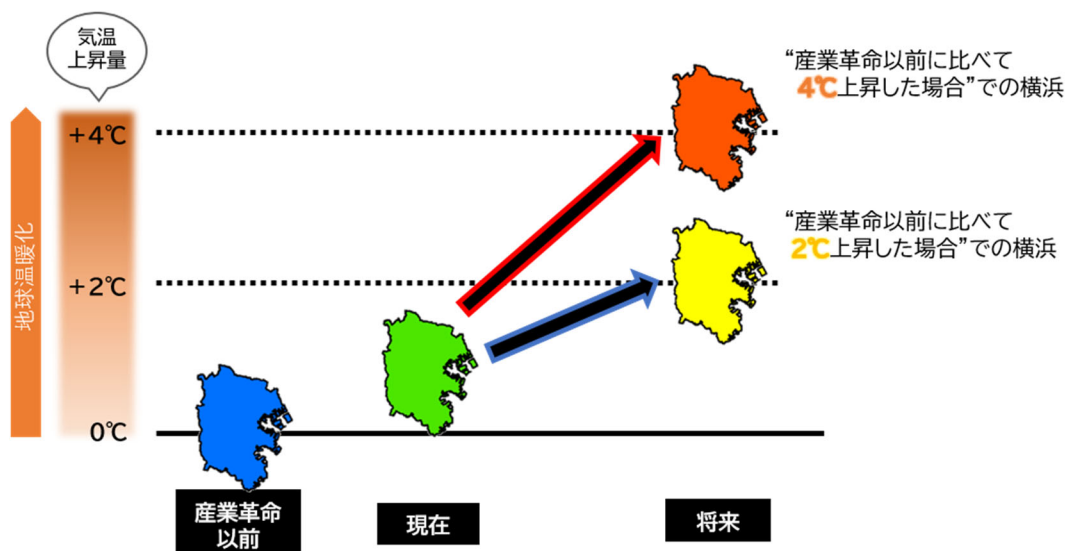


図 5-5-1 将来予測テーマの概念図

ここで、各用語の説明は以下の通りである。

(ア) 地球温暖化における気温上昇量

産業革命以前（世界的な観測が行われるようになった 1850 年から 1900 年を基準とする）と比べた世界平均気温の上昇量のことを指す。

(イ) 産業革命以前に比べて4°C上昇した場合

追加的な緩和策（温室効果ガスの排出削減など）を取らなかった世界で起こりうる気候の状態に相当し、産業革命以前と比べて、世界の平均気温の上昇量が約4°Cに達する状態に相当するが、具体的には、RCP8.5 シナリオにおける21世紀末（2090 年の外部強制因子）の状態である。

(ウ) 産業革命以前に比べて2°C上昇した場合

パリ協定^{※1}の「2°C目標」^{※2}の状況に達した世界で起こりうる気候の状態に相当するが、具体的には、RCP8.5 シナリオにおいて世界の平均気温の上昇量が約2°Cに達する時期（2040 年の外部強制因子）の状態である。

イ 数値シミュレーションの計算手法

現在気候と将来気候の数値シミュレーションを実施した。

(ア) 現在気候

対象年月は 2010 年～2019 年の 10 年間の各年8月とした（スピニアップは7月15日より開始）。対象地域を神奈川県東部を主とし、多段階のネスト手法を用いた力学的ダウンスケーリングにより実施した。3.2章の数値計算モデルのうち、気象シミュレーションを使用した。初期・境界条件は、気象庁のメソ数値予報モデル GPV (MSM) と海面水温データ SST (MGDSST) を用い、ECMWF オゾン量、NCEP 土壌などの気候値、地理院土地利用データを用いた。

(イ) 将来気候

将来気候は、擬似温暖化実験手法を用いて計算した。擬似温暖化データの作成（擬似温暖化実験手法）手順のイメージについて図5-5-2 に、シミュレーション全体像のイメージについて図5-5-3 に示す。温暖化差分量の算出には、文部科学省「気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT)」で

作成されたデータセット「大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ（東北から九州）（SI-CAT DDS5TK）」を用いた。

DDS5TK データセットは、現在気候（過去実験とも呼ばれる）と、将来気候（2℃または4℃上昇実験とも呼ばれる）のそれぞれに対し、372年分のデータより構成されている。これら3つのデータセットの8月の平均気温差を温暖化差分量とした。例えば、2℃上昇実験と過去実験の平均気温差が2℃上昇した場合の温暖化差分量である。

この温暖化差分量を現在気候の GPV データ、SST データに加算することで、初期・境界条件とし、現在気候と同じく、多段階のネスト手法を用いた力学的ダウンスケーリングにより実施した。

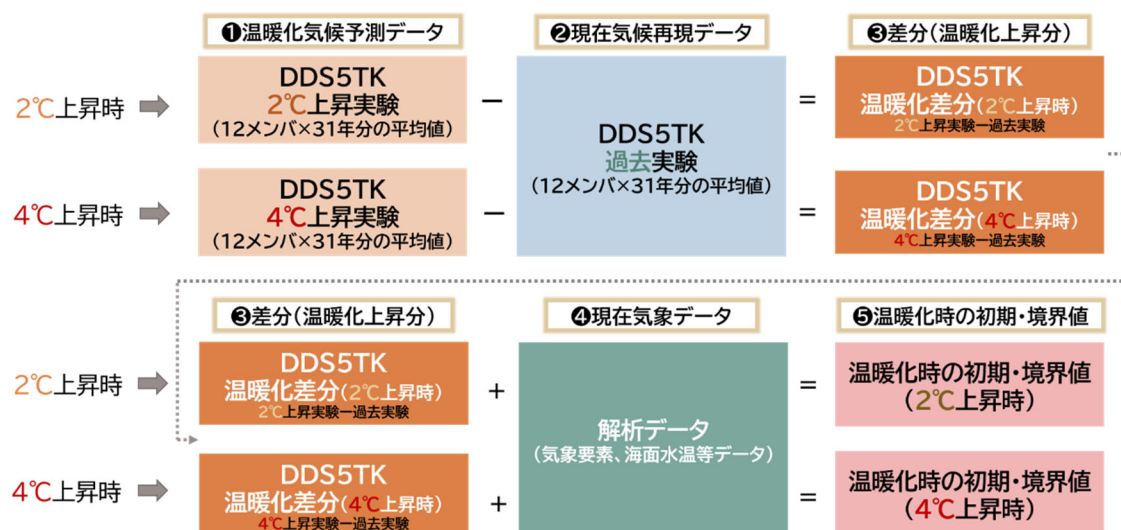


図5-5-2 擬似温暖化データの作成(擬似温暖化実験手法)手順のイメージ

温暖化気候予測データ(2℃または4℃上昇実験・①)と現在気候再現データ(過去実験・②)との差分(温暖化上昇分)(温暖化差分・③)を算出し、それに現在気象データ(解析データ・④)を加え、温暖化時の初期・境界値(⑤)をそれぞれ作成した。

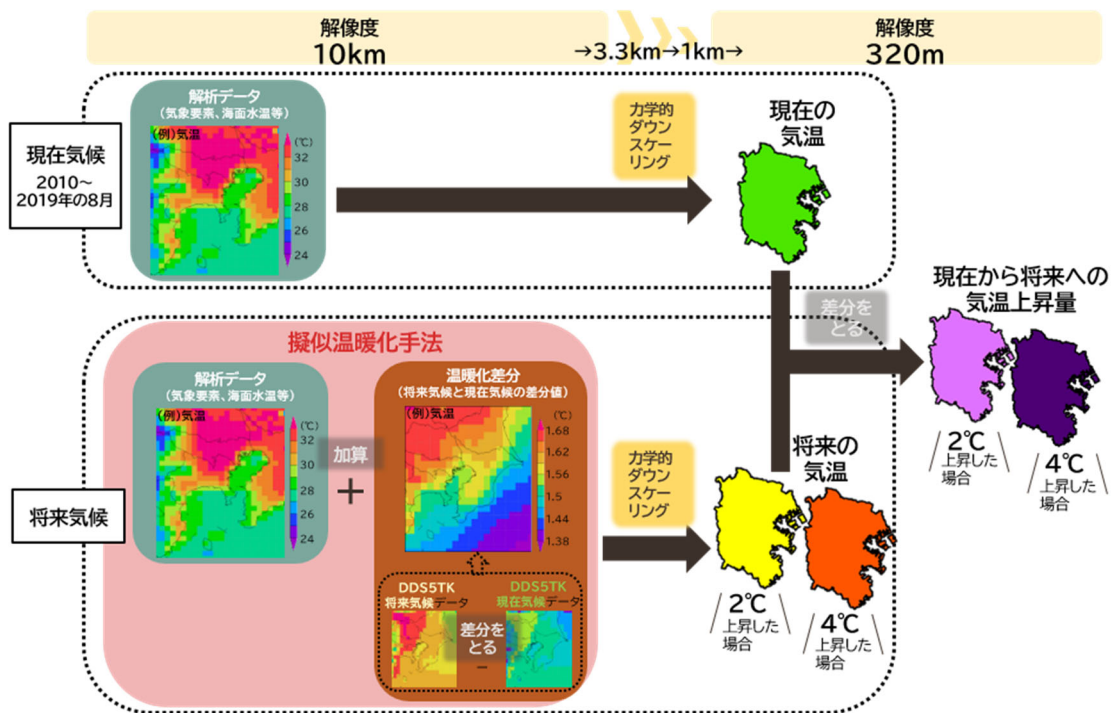


図5-5-3 シミュレーション全体像のイメージ

(4) 結果

解析結果を示すにあたり、現在とは「現在気候」を指し、将来とは「将来気候」を指す。また、気温とは、主に「地上2m高さ気温」を指す。

また、解析に用いた日は、8月のうち、横浜市内において降水がなかった日（日降水量が1.0mm未満の日）のみを用いた。これは、降水による気温低下を除外するためである。農業への影響など低温日を考察する場合は、別途解析が必要であるが、ここでは述べない。

ア 平均気温分布

現在と将来における横浜市内の平均気温を図5-5-4に示す。また、将来の平均気温から現在の平均気温を差し引いたものが、現在から将来への気温上昇量である。

左から順に「現在の気温」、「現在から将来への気温上昇量」、「将来の気温」になっており、上段は「4°C上昇した場合」、下段は「2°C上昇した場合」である。現在・将来の気温、現在から将来への気温上昇量のいずれも、市内で地域差が見られた。この結果は、320mという高解像度計算によるところが大きい。

「2℃上昇した場合」「4℃上昇した場合」での、横浜市内の8月の平均気温*

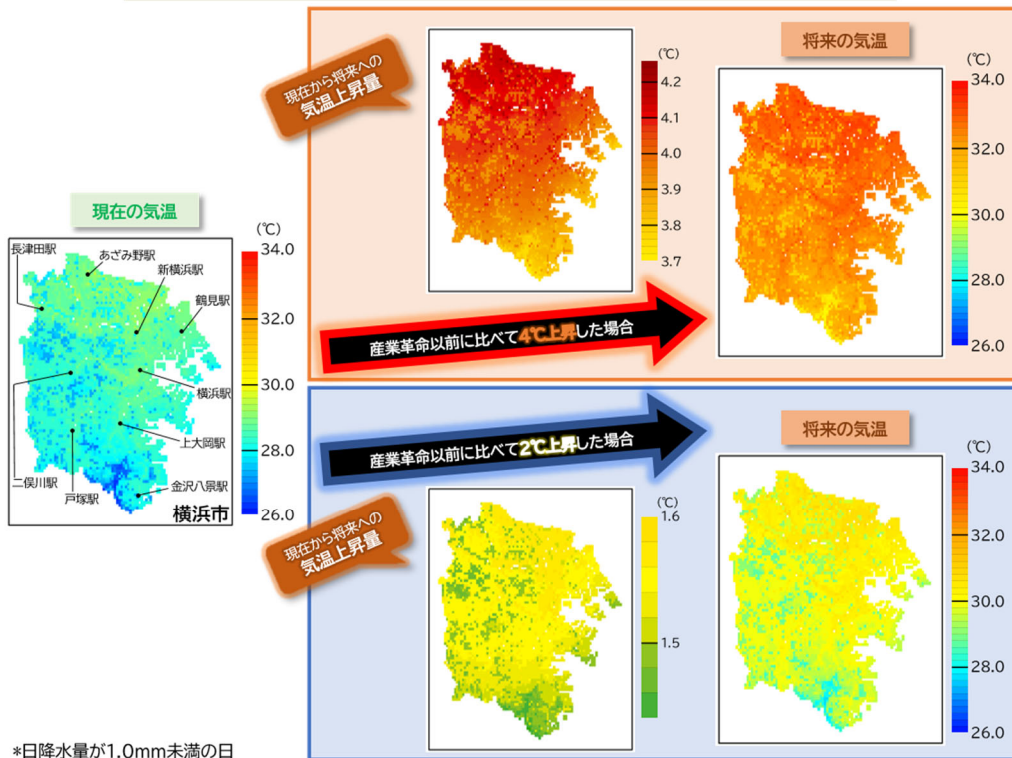


図5-5-4 横浜市内の8月の無降水日における現在・将来の平均気温及び
現在から将来への気温上昇量

将来の平均気温に関して、「2℃上昇した場合」と「4℃上昇した場合」のいずれも次の傾向が共通していた。

- ・高温傾向となったのは、市内の東部（東京湾沿岸部を除く）や北部であった。
- ・海風（海方向から吹く風）の影響を強く受ける地域（市内の南部や東京湾沿岸部等）では、高温となりにくい傾向であった。
- ・緑地（主に市内の南部や西部に位置）では、周囲と比べて高温となりにくい傾向であった。

現在から将来への気温上昇量に関して、以下の結果が得られた。

- ・市内における現在から将来への気温上昇量は、「2℃上昇した場合」は約 1.4～1.6℃、「4℃上昇した場合」は約 3.7～4.3℃と、地域によって差があった。
- ・海風と緑地による影響を強く受ける地域では、弱い地域と比べて、現在から将来への気温上昇量が小さくなっていた。

なお、ここで述べる海風については以下となる。

横浜市内に夏季に海方向から吹く風の発生機構は様々あり、例えば太平洋側から日本海側へ吹き渡るような広域的な風や、晴れた日の日中に生じる局地的な海から陸へ吹く海風などがある。前者は気圧配置に依存する一方で、後者は明瞭な海風前線^{※3}が形成されやすく海風の効果を確認しやすい特徴を有する。また、「日中に局地的に吹く海風^{※4}」の場合、横浜市は、南側に相模湾が近く、東側には東京湾

に面しているため、その2つの湾からの海風が市内へ進入しやすい傾向がある。進入イメージについては図5-5-5に示す。



図5-5-5 海風の進入イメージ

さらに市内へと2方向から進入した海風は、時間経過により徐々に内陸へ進行していく。その結果、市内全域に海風は進入するが、地域によって海風の進入状況には違い^{※5}が生まれる。その原因には、海風の到達時間が海岸線からの距離に依存することのほかにも、東京湾からの海風と相模湾からの海風の性質が異なるため到達範囲に差異があることなどが挙げられる。

また、シミュレーションにおける市内の緑地分布を図5-5-6に示す。

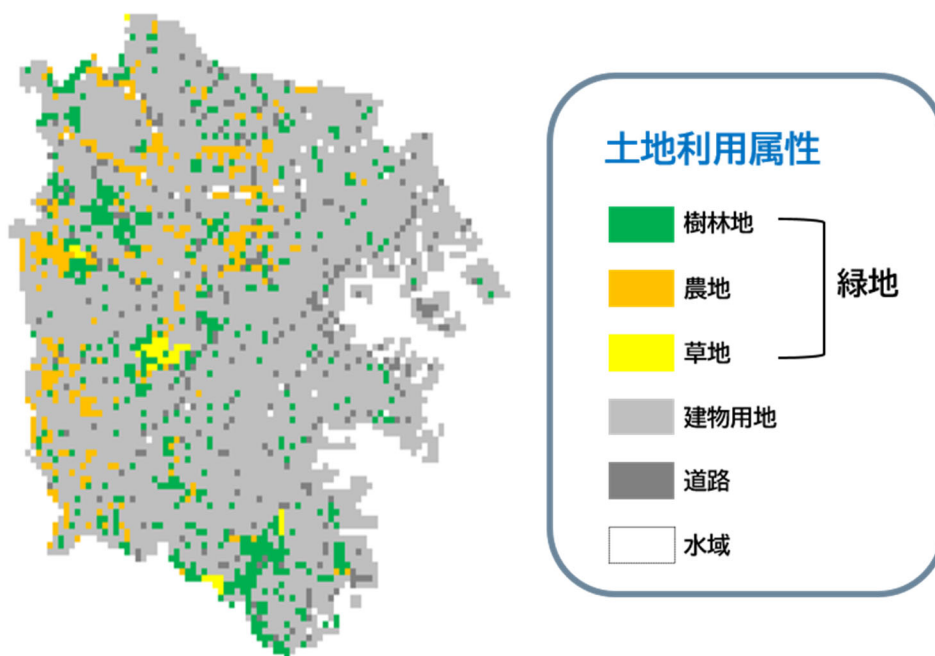


図5-5-6 シミュレーションにおける市内の緑地分布

イ 海風の効果(相模湾方向からの海風における「海風が到達している地域」と「海風が到達していない地域」との比較結果)について

上記(4)アのとおり、現在・将来の気温及び現在から将来への気温上昇量には、海風と緑地による効果があることが確認された。その影響範囲に関して、緑地による効果は緑地がある場所に見られているのに対して、海風による効果は市内の広い範囲に影響が現れていることが図5-5-4より確認された。そこで、海風の進入により暑さを和らげる効果について詳細に解析した結果を述べる。

(ア) 解析条件について

上記(4)アを踏まえ、本解析では「日中に局地的に吹く海風」が吹いている日を対象に、現在・将来の気温、現在から将来への気温上昇量について、特に相模湾からの海風における海風前線を境にして、「海風が到達している地域」と「到達していない地域」間で比較した。

10年分の現在気候と将来気候シミュレーション結果から、市内において相模湾からと東京湾からの2方向から局地的な海風が吹く日(日中に局地的に海風が吹く日)を全て抽出した。さらに、東京湾からの海風の影響範囲を確認して、東京湾からの海風が到達しない経度を解析対象とした。その解析対象地域について、図5-5-7に示す。なお、解析対象の経度(黒線位置)における横浜市域は海岸線からの距離が5~28kmに相当する。

黒線上に沿った地域について、海岸線から内陸への距離が10kmの位置に相模湾からの海風前線が到達した時刻の気温分布を並べ、その平均気温を海岸線からの距離に対して求めた。

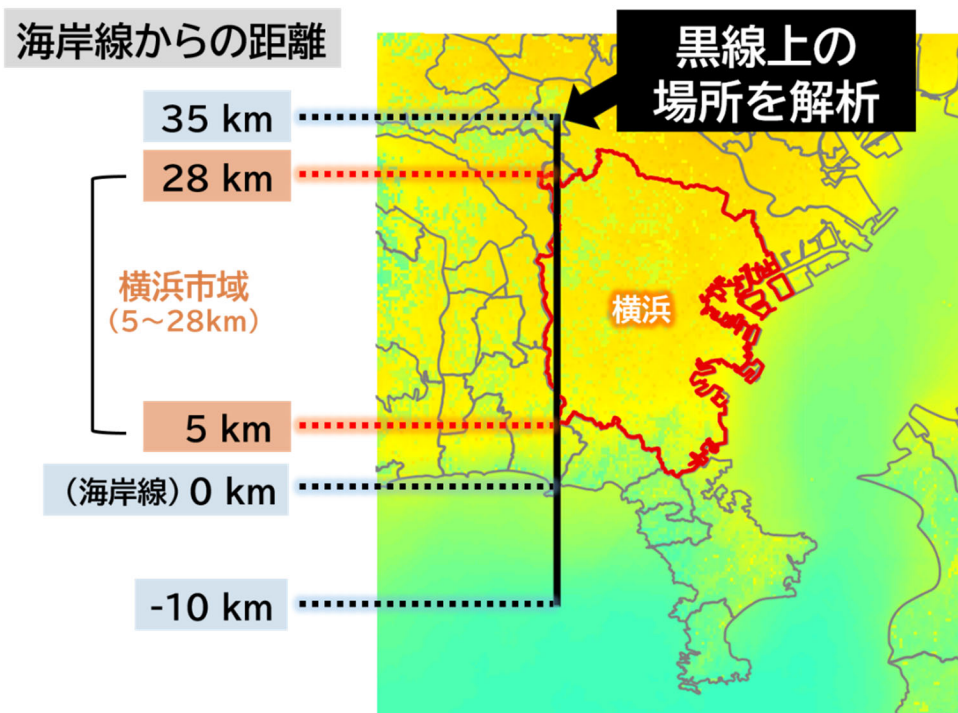


図5-5-7 解析対象地域

(1) 解析結果について

現在と将来の気温について、海風が到達している地域と到達していない地域を比較した結果を図5-5-8に示す。

海風が到達している地域(海岸線からの距離が10kmよりも沿岸側)は、海風が到達していない

地域（海岸線からの距離が10 kmよりも内陸側）よりも気温が低くなっている。この現象は現在と将来で共通しており、海風には日中の気温上昇を抑制する効果があり暑さを和らげていることが確認できる。

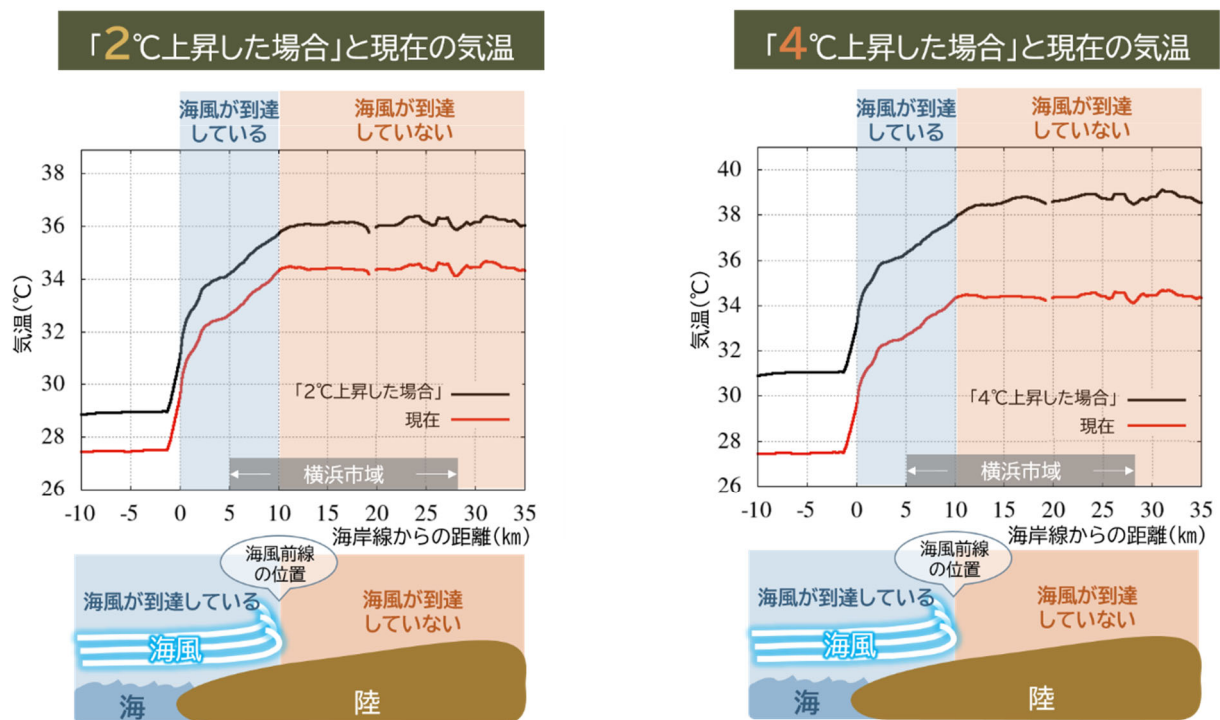


図5-5-8 日中の気温上昇抑制効果における海風が到達している地域と到達していない地域との比較

次に、現在から将来への気温上昇量について、海風が到達している地域と到達していない地域の平均値を比較した結果を図5-5-9に示す。海風が到達している地域（海岸線からの距離が1～9km）は、海風が到達していない地域（海岸線からの距離が15～23 km）よりも現在から将来への気温上昇量は小さく、この傾向は「2°C上昇した場合」と「4°C上昇した場合」で共通している。

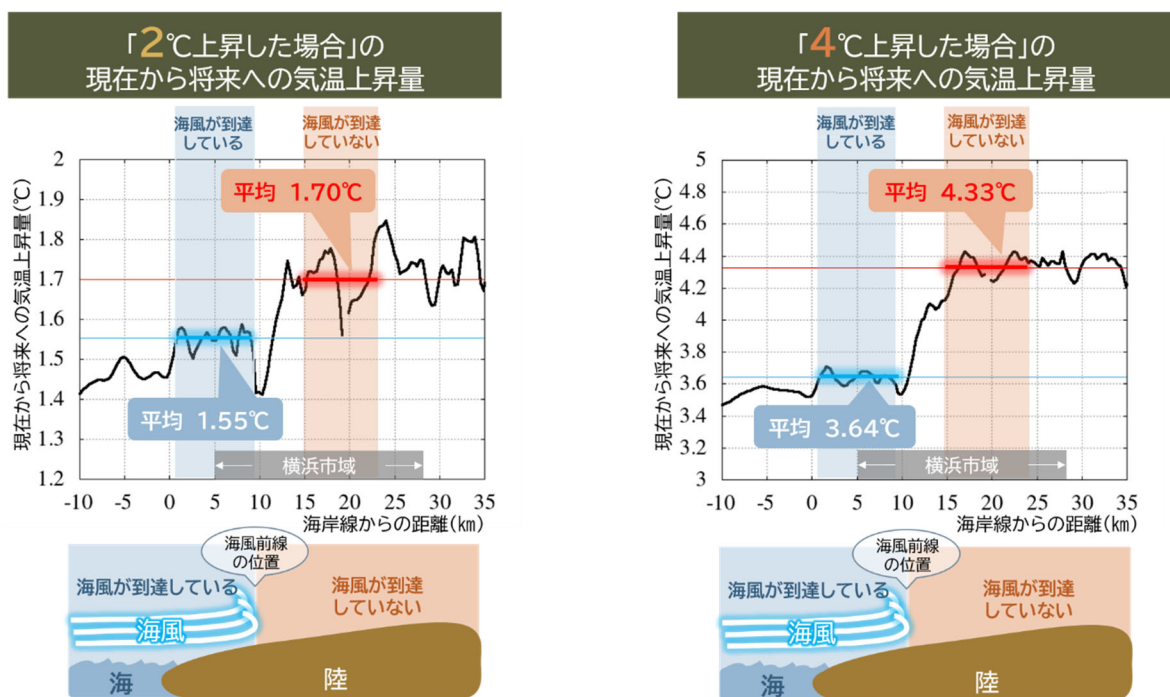


図5-5-9 現在から将来への気温上昇量における海風が到達している地域と到達していない地域との比較①

次に、現在から将来への気温上昇量についての発生頻度分布について、海風が到達した地域と到達していない地域との比較結果を図5-5-10に示す。海風が到達している地域（海岸線からの距離1～9 km）と、到達していない地域（海岸線からの距離15～23 km）の気温上昇量分布には、統計的に有意な差（有意水準 $P < 0.05$ ）が確認された。さらに、海風が到達している地域の対象範囲を横浜市域（海岸線からの距離5～9 km）に限定して、到達していない地域（海岸線からの距離15～23 km）と比較した場合にも統計的に有意な差が確認された。以上の傾向は、「2°C上昇した場合」と「4°C上昇した場合」で共通していた。さらに、「4°C上昇した場合」は、頻度分布の最頻階級値の差が広がっていることから、「2°C上昇した場合」と同じ傾向がより顕著に現れていたことが分かった。

したがって、横浜市域では、温暖化した将来では現在以上に、海風が吹くことでもたらされる暑さを和らげる効果が増していたこと（温暖化時の気温上昇抑制効果）が確認できた。

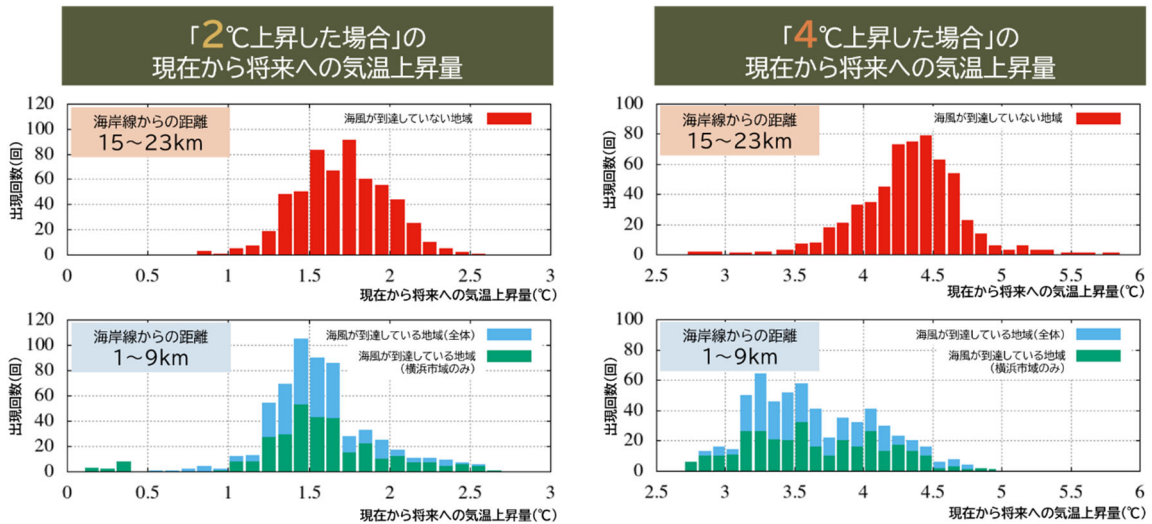


図5-5-10 現在から将来への気温上昇量における海風が到達している地域と到達していない地域との比較②

上記の温暖化時の気温上昇抑制効果が増す結果は、地球温暖化に伴う海面水温 (SST) の上昇量が、大気の気温上昇量より小さいことから生じている。つまり、海上気温は、現在から将来への気温上昇量が陸上気温より小さい(図5-5-11)ため、現在から将来への気温上昇量が小さい海上の大気が海風として入りこみ、陸上の気温に影響することで、海風の影響を強く受ける地域では、現在から将来への気温上昇量も小さくなる結果につながっている。

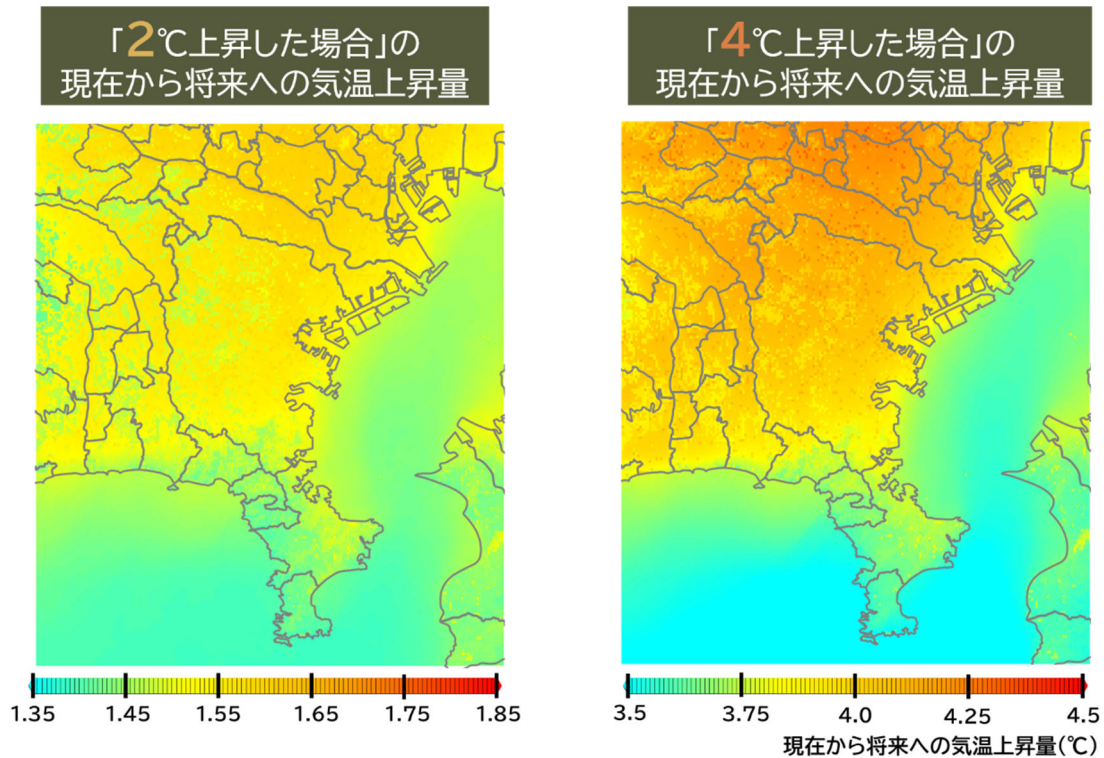


図5-5-11 現在から将来への気温上昇量についての陸上と海上の差

ウ 平均気温の時刻別気温分布と海風と緑地の影響の状況について

この項では、気温は全て「海面高度補正気温」を用いた解析結果を示す。海面高度補正気温とは、地上2m高さ気温を標高の差異による影響を除き、海面高度へ補正した気温である。

またこの項は今後の詳細な解析を必要とするため、参考結果である。また、定量的評価ではなく、視覚的評価であることに注意されたい。

現在と将来の8月の無降水日における平均気温において、毎時間の平均気温（例えば、9時の気温は、8時 10分～9時までの10分値の気温を平均したものを）を算出し、3時間ごとに並べて示した結果を図5-5-12に示す。図の上段から、現在、「2℃上昇した場合」、「4℃上昇した場合」である。また、評価対象は横浜市域（図5-5-12の各分布図内の太枠部）とした。

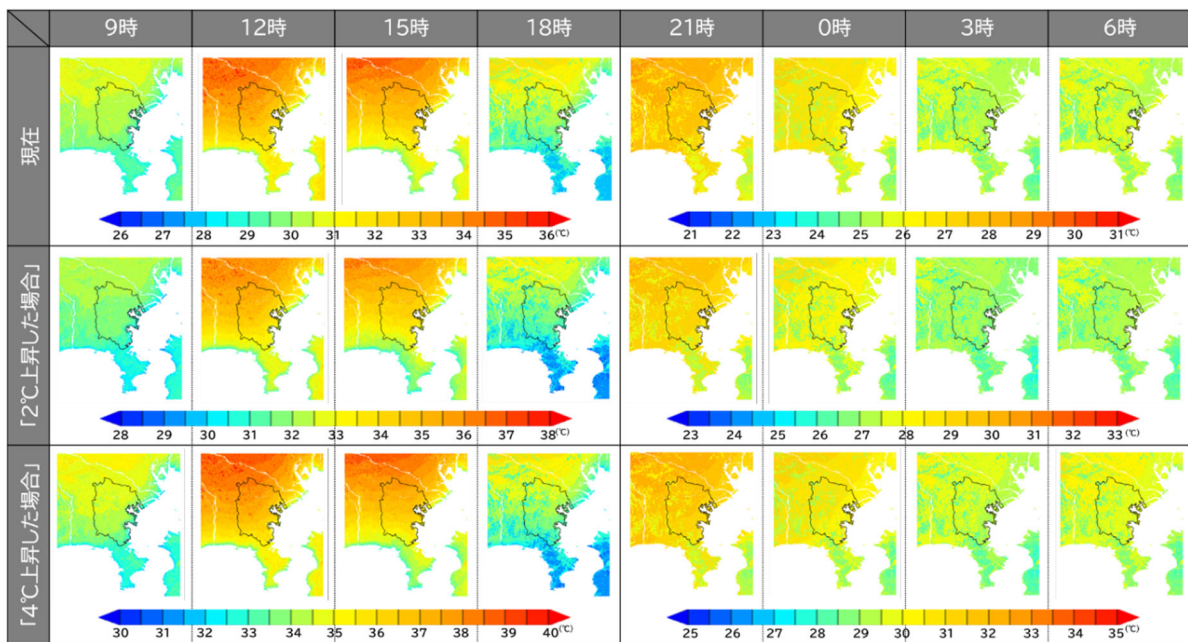


図 5-5-12 時刻別気温分布（1時間平均値）

現在と将来（「2℃上昇した場合」、「4℃上昇した場合」）では、多少の時間のずれはあるが、概ね以下のとおりの共通の傾向があることが確認できた。

深夜0時～朝6時ごろでは、南北の差が弱くなっているが、緑地の部分の気温が下がっている様子が見られる。一方、日中の9時～15時では、相模湾方向からの海風が吹くことで南北の差がはっきりと現れている。日没後しばらくの間（18時～21時）では、両方の特徴が見られている。

この解析は8月の全ての対象日を含むため、(4)イ(1)で解析対象とした「日中に局地的に吹く海風」のような卓越した海風以外にも様々な要因により海方向から陸へ向かって吹く風の影響も含まれているが、卓越した海風が時間の経過にしたがって内陸に進入すると同様の時空間分布（JAMSTEC-BASE⁴⁾の図1とその説明参照）が時刻別気温分布に現れている。

以上により、日中に局地的に吹く海風以外にも、日中に海方向から吹く風には、海風が到達している地域の日中の気温上昇を抑制する効果があると考えられる。

さらに、先述の(4)アの平均気温分布の項で述べたように、内陸に向かって徐々に気温が高くなる様子から東京湾からの海風についても、相模湾からの海風と同様に日中の気温上昇抑制効果をもたらしている

ことが、図5-5-12で確認できる。

また緑地のある場所では、周囲よりも気温が低くなる現象については、日中よりも夜間のほうが明瞭に見える傾向があることが確認できる。

(5) まとめ

本取組では、現在と将来についての数値シミュレーションを実施し、横浜市内の気温分布を、市域の詳細な地域差が確認できるほどの高解像度で得ることができた。

平均気温分布の結果から、現在及び「2℃上昇した場合」と「4℃上昇した場合」のいずれも、次の傾向が共通していたことが分かった。

- ・市内でも「現在・将来の気温」と「現在から将来への気温上昇量」には地域差が見られ、その地域差には海風や緑地による影響が見られた。
- ・海風や緑地の影響を強く受ける地域では、弱い地域と比べて、現在・将来の気温は高温となりにくく、現在から将来への気温上昇量は小さくなっていった。
- ・緑地については、緑地のある場所では、周囲と比べて、気温が高温となりにくく、現在から将来への気温上昇量が小さくなっていることが視覚的に確認できた。

さらに解析の結果、「2℃上昇した場合」と「4℃上昇した場合」のいずれも、次の傾向が共通していたことが分かった。

- ・海風については、市内へ進入することで日中の気温上昇を抑制する効果があり、将来はその効果がさらに増すことが分かった。
- ・緑地のある場所では、周囲よりも気温が低くなる現象については、日中よりも夜間のほうが明瞭に見える傾向があることが視覚的に確認できた。

これまでの取組⁵⁾のなかで、現在でも「海風は日中の気温上昇を抑える効果があり、緑地は夜間の気温を低減する効果がある」ことが分かっているが、今回の取組において、温暖化した将来でも、海風や緑地が引き続き重要であることが分かった。

※1：パリ協定とは、国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)で合意された気候変動問題に関する国際的な枠組み

※2：「2℃目標」とは、産業革命以前に比べて世界の平均気温上昇を2℃より十分低く保つこと

※3：海風が陸上へ進入する先端部分では、異なる性質の空気が接し、前線が形成される。その前線を海風前線と呼び、気温、湿度、風速、風向などの急激な変化が見られる。

※4：一般の海陸風の海風のことである。海陸風とは、夏の晴れた日に起きやすく、陸上と海上の気圧差によって発生する局地的な風の循環のことである。日中に海から陸へ向かって吹く海風と、夜間に陸から海へ向かって吹く陸風により構成される。

※5：例えば、これまでの取組（「都市環境気候図を活用した暑さをしのぐ環境づくりの手引き」（横浜市環境創造局政策課作成））では、現在の夏の風の吹き方の違いについて市内を5つのゾーンに分けている⁶⁾。

(6) 参考文献

- 1) 気象庁:IPCC 第6次評価報告書第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 暫定訳(文部科学省及び気象庁)より引用,<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/index.html> (2023年3月時点)
- 2) 気象庁:IPCC 第5次評価報告書, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/index.html> (2023年3月時点)
- 3) 文部科学省及び気象庁「日本の気候変動 2020—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—」より引用,<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html> (2023年3月時点)
- 4) JAMSTEC:JAMSTECBASE「市町村スケールでの気候変動予測情報創生の試み」,<https://www.jamstec.go.jp/j/pr/topics/column-20221226/> (2023年3月時点)
- 5) 横浜市環境創造局政策課:ヒートアイランド対策「都市環境気候図を活用した暑さをしのぐ環境づくりの手引き」,<https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/machizukuri-kankyo/ondanka/etc/heat.html> (2023年3月時点)

5.6 成果の発信・活用状況

これまでの取組に関する成果の発表・発信及び活用状況について、表5-6-1に示す。

表 5-6-1 成果の発信及び活用状況

取組名	成果の発表・発信及び活用状況
5.1 地表面等の保水化及び緑化の効果検証	<ul style="list-style-type: none"> ・市内の関係部署に成果を共有 ・第17回日本ヒートアイランド学会全国大会で発表
5.2 微細ミストの効果検証	<ul style="list-style-type: none"> ・市内の関係部署に成果を共有 ・第16回日本ヒートアイランド学会全国大会で発表
5.3 街路樹の剪定方法の違いによる暑熱環境の差の検証	<ul style="list-style-type: none"> ・市内の関係部署に成果を共有
5.4 みなと大通り及び横浜文化体育館へのアクセス線での現況の暑熱環境について	<ul style="list-style-type: none"> ・市内の関係部署に成果を共有
5.5 市内気温の将来予測(2℃上昇及び4℃上昇の事例)	<ul style="list-style-type: none"> ・市内の関係部署に成果を共有 ・結果の概要を横浜市記者発表にて発信 ・2022年度日本地球惑星連合(JpGU)で発表 ・JAMSTECのホームページ(JAMSTEC BASE)にて、本取組を含めた専門的なコラムを掲載 ・横浜市地球温暖化対策実行計画改定版のコラムページに本取組の結果を掲載 ・2022年版横浜市環境管理計画年次報告書のコラムページに本取組の結果を掲載

第6章 総括

共同研究期間の前期の主成果である泥亀公園でのGI導入の効果に関する暑熱調査では、環境科学研究所による実測調査とJAMSTECによるシミュレーションにより、点的(測定地点)な観測と面的(公園全体)な解析による、より深い結果を示すことができた。すなわち、測定機器を設置した場所のみならず、公園全体の暑熱環境分布を把握することができたほか、仮想環境下におけるシミュレーションを行うことにより、観測のみでは得られない暑熱環境を考察することができた。さらに発展的な研究として、ミストの効果をより高める手法の提案をJAMSTECから行い、その実証に関する実測調査とシミュレーションを行い、相乗効果を生み出すという共同研究の意義が深まった。

これら前期の成果をもって、共同研究期間の後期では、行政課題のニーズと共同研究の取組内容を合わせることを目標に、環境創造局の枠を超えた課題に取り組んだ。具体的には道路局が課題としている街路樹の剪定に暑熱緩和の観点を取り入れた取組や、横浜市地球温暖化実行計画の改定と絡めた課題である市内気温の将来予測の取組をJAMSTECのシミュレーション技術とスーパーコンピュータ(地球シミュレータ)を活用して、実施することができた。

環境科学研究所の実測調査のみでは成し得なかった課題、JAMSTECのシミュレーション技術と解析技術のみでは発信できなかった課題に対し、相乗効果を生み出すことで、一定の成果に繋げることができたといえる。