

横浜市内の水や緑による暑熱環境緩和効果に関する実測調査

—農地・公園における熱放射観測結果—

内藤純一郎、小倉智代、山下理絵（横浜市環境科学研究所）

Research of thermal environmental mitigation effect of water and green in Yokohama city

-Observation of thermal radiation at farmland and park-

Junichiro Naito, Tomoyo Ogura, Rie Yamashita (Yokohama Environmental Science Research Institute)

キーワード：ヒートアイランド、適応策、微気象観測、熱放射、サーモグラフィ

要 旨

横浜市内に存在する水や緑による暑熱緩和効果を明らかにするため、平成25～26年夏季に農地・公園において気温、湿度等のほか熱放射成分の実測調査を行った。その結果、気温は公園の緑陰下において最大2.6℃の差がみられたほか、熱放射は、水田や畑地、公園の芝生上では地表面方向から、緑陰下では上下方向からの放射が大きく低減していることが明らかになった。また、熱放射が低減していた場所においてサーモグラフィで赤外面像を測定したところ、水面や緑被面では、建築物や舗装面上と比較して表面温度が低くなっており、水、緑による赤外放射による熱の低減効果が確認された。さらに、測定結果から体感に係る温熱指標のうち、MRT及びWBGTを算出し比較を行った。

1. はじめに

横浜市は人口370万余の大都市でありながら、市民が身近に感じられる多様な水、緑環境を有している。「横浜市水と緑の基本計画」では、樹林地や農地等、拠点となる緑の保全・創造とともに、河川、海辺などの環境整備による水と緑の回廊を形成し、水と緑が一体となった取組を進めるとしている¹⁾。都市における水と緑は、市民生活を快適にする多くの機能をもつが、そのひとつに、ヒートアイランド現象の緩和効果があるといわれている。国が平成25年度に見直しを行った「ヒートアイランド対策大綱」では、従来からの取組に加え、「人の健康への影響等を軽減する適応策の推進」を追加し、近年の都市熱環境の急激な悪化による避けられない影響に対する各種対策の整備が必要であるとしている²⁾。本調査では、水や緑がもつ局所的な暑熱緩和効果を明らかにするため、気温、相対湿度といった一般的な温熱環境要素に加え、

黒球温度、日射、赤外放射といった熱放射に係る要素の測定も実施した。

2. 調査方法

2-1 調査期間・地点

調査は夏季に実施し、平成25年は青葉区田奈(水田)、戸塚区舞岡(畑地)、平成26年は港北区大倉山(公園)で実施した。また、一回の観測は48時間(二昼夜)連続で行った。調査地点を図1に、各調査地点における測定機器の設置状況を図2、3に示す。なお、それぞれ調査地点に近接した施設の敷地、または道路上を対照区として、比較測定を行った。

2-2 測定項目

測定項目及び調査に用いた機器を表1に示す。気温、相対湿度、風向・風速に加え、熱放射成分として黒球温

表1 測定項目

測定項目	機器	測定高さ	測定間隔
気温	TR-52i(T&D)	1.5m(シェルター内)	5分
相対湿度	TR-72Ui(T&D)	1.5m(シェルター内)	
風向風速	Kestrel 4500(NIELSEN-KELLERMAN Co.)	2m	
黒球温度	黒球:直径15cm銅球(安藤計器製工所) 温度計:TR-52i(T&D)	1.5m	
赤外放射量	IR02(Hukseflux Thermal Sensors B.V.)	地表面0.5m	
日射量	LP02(Hukseflux Thermal Sensors B.V.)	地表面0.5m	
赤外面像	H2630(日本アビオニクス)	—	

度（全方向から受ける熱放射の影響を加味した温度）、赤外放射量（上向き）、日射量（上向き（公園のみ）、及び下向き）を測定した。また、赤外線サーモグラフィを用い、測定地点における赤外面像を測定した。

3. 調査結果

3-1 水田

平成 25 年 8 月 5 日から 7 日まで、青葉区田奈の田奈恵みの里体験水田（水田）及び隣接する JA 田奈（当時）の敷地内道路（対照区）において実測調査を行った。図 4 左に、各項目の測定結果を示す。

気温について水田と対照区を比較すると、晴天時の日中で 1℃程度水田のほうが低くなっていたが、湿度は水田のほうが高い値を示した。これは、調査時に水田には水が十分に張られていたため、高温下では蒸発によってこのような現象が起こったと考えられる。また、熱放射成分についてみると、地表面方向（水面）から受ける赤外放射量は、対照区に比べ、終日晴天であった 5 日の日中に大きく低減しており、約 50W/m²の差がみられた。しかし、曇天であった 6 日の日中には大きな差はみられなかった。以上から、晴天時の日中、道路（対照区）では日射を受けて地表面温度が上昇したが、水田ではそれが起こらないために、地表面方向からの熱放射の増大が生じなかったと考えられる。このことは、図 6 に示した調査地点の赤外面像からも分かる。一方、夜間には、黒球温度は水田のほうが低い値を示したが、赤外放射は逆に、対照区よりも水田上において、わずかではあるが赤外放射量が高値を示した。これは、夜間に水田（水面）の温度が、対照区の地表面温度よりも高くなっていたことを示唆しているが、黒球温度が低減した原因は、それが熱放射の低減によるものではないこと以外、不明である。

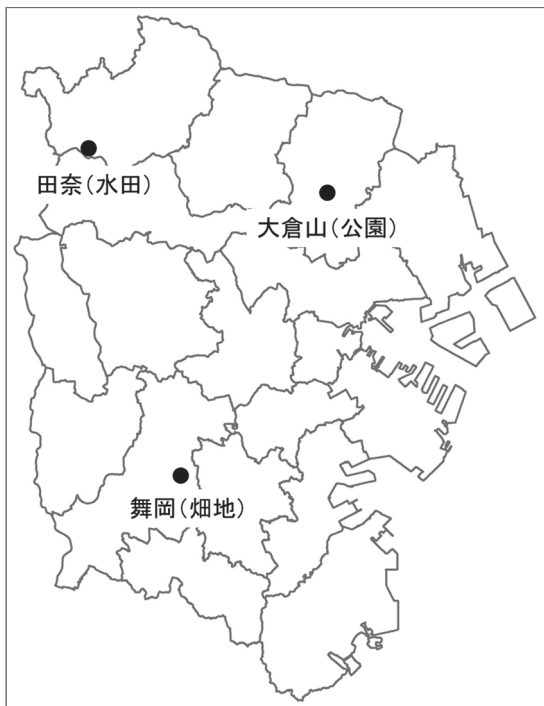


図 1 調査地点

3-2 畑地

平成 25 年 8 月 13 日から 15 日まで、戸塚区舞岡の土地改良区西の台工区にあるさつまいも畑（畑地）、及び隣接する舗装道路（対照区）において観測を実施した。調査時、畑地には葉が密集して繁茂していた。図 4 右に測定結果を示す。

気温及び湿度については、畑地では対照区に比べ気温がわずかに低減していたが、湿度についてみると、畑地上のほうが高い値を示した。このことから、畑を覆う葉面において、蒸散による気温の低下が起こったが、同時に湿度の上昇も生じていたと考えられる。一方、地表面方向からの熱放射については、黒球温度には差がみられなかったものの、赤外放射量は対照区と比較して昼夜通して低くなっており、日中に最大で約 100W/m²と大きく低減していた。これは、畑地で葉面温度の上昇が抑制されていたことによるものと考えられ、図 6 の赤外面像からもそれは明らかである。

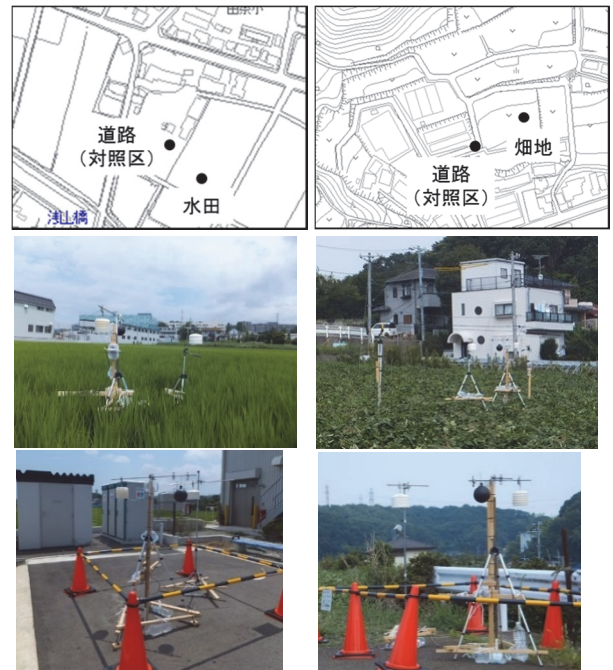


図 2 機器設置状況（左：水田 右：畑地）



図 3 機器設置状況（公園）

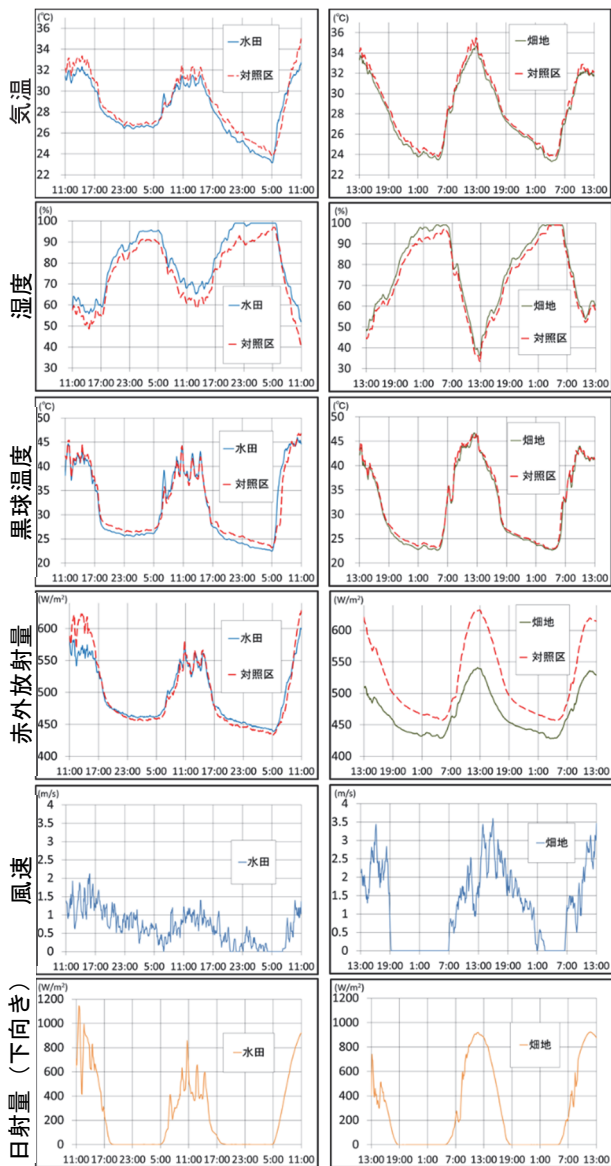


図4 測定結果（左：水田 右：畑地）

3-3 公園

平成26年7月29日から31日まで、港北区大倉山の港北水再生センターの上部利用公園である太尾南公園（緑陰、芝生）及び同センター内施設屋上（対照区）において観測を行った。測定結果を図5に示す。

緑陰下では、機器設置場所において日射が遮られる午前9時以降の日中、対照区と比較して気温が最大で約2.6℃、黒球温度が12.0℃、赤外放射量が140W/m²、反射日射量が150W/m²と、全体的に大きく低減していた。芝生上では、気温については対照区と差がみられなかったが、地表面方向（芝生面）から受ける放射成分は、赤外放射量が最大で約90W/m²低減していた。図6の赤外面像を見ると、公園内の緑被面では対照区と比較して表面温度が低減していたが、緑陰下では、日射が遮られない芝生面に比べ、表面温度がさらに低減していることが分かる。一方、芝生上における反射日射量は日中、対照区と比べ最大で約60W/m²程度高くなっていた。ただし、地表面方向から受ける熱放射量の総量（赤外放射量+反射日射量）としては、対照区よりも芝生のほうが低くなって

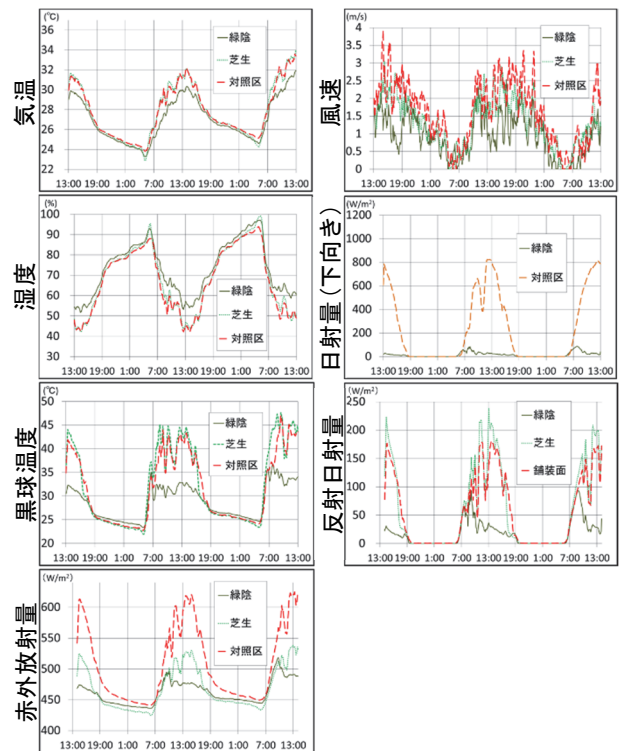


図5 測定結果（公園）

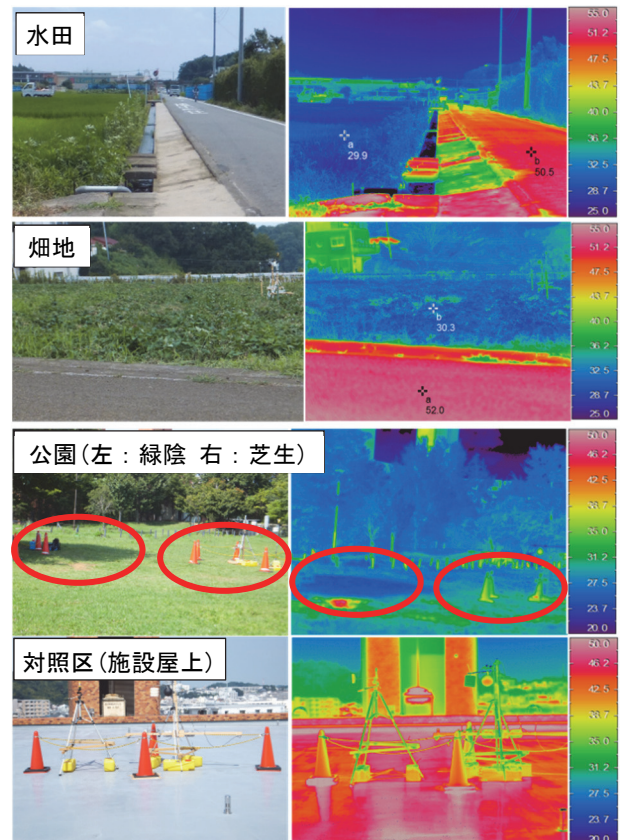


図6 赤外面像

いた。また、夜間については、赤外放射量は対照区に比べ緑陰下及び芝生で低減していたが、芝生のほうがわずかに低い値を示した。黒球温度は、芝生及び対照区がほぼ同値であったのと比較して、緑陰下においてわずかに高い値を示した。これは、緑陰下では他の場所に比べ風

速が弱まっていたためであると考えられる。

4. 温熱指標を用いた体感としての暑さの比較

体感として人が受ける「暑さ」をより総合的に捉えるため、これまでに様々な指標が開発されてきているが、このうち、周囲から受ける熱放射の影響を平均化した指標値である MRT (平均放射温度)、及び増加の一途を辿る熱中症の発生に対する予防指針として一般的に用いられている WBGT (湿球黒球温度) の 2 つについて、測定データから算出、比較を行った。

4-1 MRT

屋外における MRT の算出手法として、黒球温度を用いた方法があり、次式 (1) で表される³⁾。

$$MRT = \left\{ (t_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times V^{0.6} (t_g - t_a) \right\}^{0.25} - 273 \quad \dots (1)$$

t_g : 黒球温度 (°C)
 t_a : 気温 (°C)
 V : 風速 (m/s)

図 7 左に、水田、畑地、公園内の緑陰及び芝生上における MRT の推移を示す。水田 (左上) 及び畑地 (左中) については、夜間に水田で低い値を示した以外は、対照区とほぼ同様の値となっていた。公園についてみると、日中、対照区と比較して緑陰下で MRT が大きく低減していたが、芝生上では差がみられなかった。このことから、緑陰下においては、日射が遮蔽されることによって、他の地点に比べて熱放射による「暑さ」が緩和されていることが分かる。一方、夜間には他の地点と比較して、緑陰下において MRT は高い値を示していたが、これは、日射の影響を受けない夜間、緑陰下では風が弱まっているために、体感として「暑さ」を感じやすくなっている可能性を示唆している。

4-2 WBGT

屋外における WBGT は、一般的に次式 (2) で算出される⁴⁾。

$$WBGT(\text{屋外}) = 0.7t_w + 0.2t_g + 0.1t_a \quad \dots (2)$$

t_w : 湿球温度 (°C)
 t_g : 黒球温度 (°C)
 t_a : 気温 (°C)

また、本報では湿球温度 (t_w) を、気温 (t_a) 及び相対湿度 (RH) の実測値から次のとおり求めた。

まず、気温 t_a における水蒸気圧を、式 (3) 及び式 (4) (tetens の式⁵⁾) から求める。

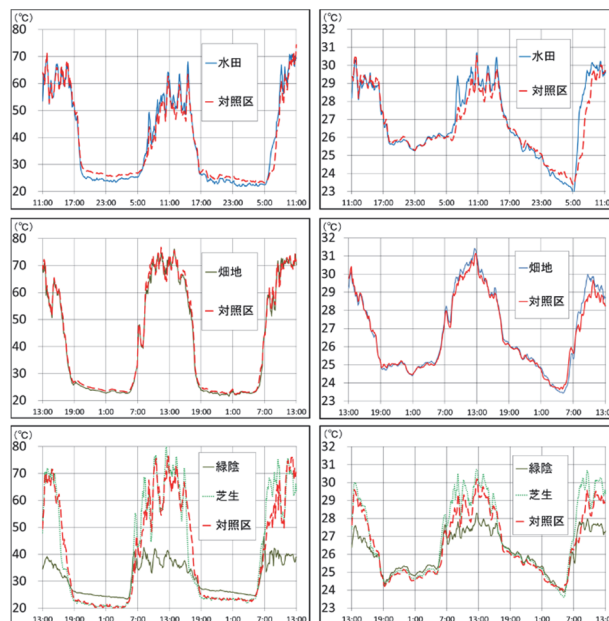


図 7 温熱指標値の推移
MRT (左), WBGT (右)

$$RH = \frac{e}{e_{\text{sat}}(t_a)} \times 100 \quad \dots (3)$$

$$e_{\text{sat}}(t_a) = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5t_a}{237.3+t_a}} \quad \dots (4)$$

e : 水蒸気圧 (hPa)
 $e_{\text{sat}}(t_a)$: t_a のときの飽和水蒸気圧 (hPa)

ここから、常圧一定 ($p=1013\text{hPa}$) として、式 (5) (Sprung の式⁶⁾) を用いて t_w を近似値として求めた。

$$e = e_{\text{sat}}(t_w) - 0.000662p(t_a - t_w) \quad \dots (5)$$

$e_{\text{sat}}(t_w)$: t_w のときの飽和水蒸気圧 (hPa)
 p : 気圧 (hPa)

図 7 右に、水田、畑地、公園内の緑陰及び芝生上における WBGT の推移を示す。水田及び畑地では、期間中を通して大きな差はみられなかったが、日中、一時的に対照区よりも値が高くなる時間がみられた。公園内では、日中に緑陰下で WBGT が大きく低減していた。一方で、芝生上では対照区よりも高い値を示していた。これらは、WBGT が湿度に重きを置いた計算式となっているため、緑陰下や夜間を除いた日射を受ける条件下では、植物による蒸散効果により湿度が上昇し、「蒸し暑さ」を感じやすくなっていた可能性がある。

5. おわりに

平成 18 年に策定された「横浜市ヒートアイランド対策取組方針」では、横浜市におけるヒートアイランド現象の現状や影響、地域特性を踏まえた、効果的な対策を推進するための基本方針や具体的取組を示し、これまで

様々な施策を展開してきた⁷⁾。しかし近年、都市部の高温化に加え、地球温暖化の進行に伴う気候変動の影響を受け、横浜市においても夏季の高温化に伴う熱中症患者数の増大等、人の健康や生活に係る悪影響が顕著となっており、これらの問題に対して早急な対応が求められる。このため、今後は本市においてもヒートアイランド対策に「適応策」の視点を導入し、従来の施策と併せて実施していくことが重要となる。

本調査は、農地や公園といった、都市において人の手により創出された水と緑の空間が、熱環境にどのような影響を及ぼしているかを実測によって明らかにする目的で実施した。調査結果から、水、緑を配した空間においては、都市街区におけるコンクリート造の建築物やアスファルト舗装等の、熱容量の大きい物体に覆われた空間と比較して、緑被面（水面）から受ける熱放射が緩和されていた。これらは、ヒートアイランドに対する「適応策」として市内農地や公園が機能し、局所的ながらも快適な空間を形成していることを示唆している。

また、「場」における人が感じる暑さをより総合的に捉えるため、MRT、WBGT の2つの温熱指標を用いた熱環境の評価を行ったところ、日中、MRT は公園の緑陰下を除いた全ての地点について、対照区と比較して大きな違いは認められなかった。しかし、WBGT は日射が遮られない地点（水田、畑地、芝生）において、対照区よりわずかであるが高値を示していた。これは、日中の体感としての「暑さ」は、日射による熱放射の影響を非常に大きく受ける一方、状況によっては、湿度の上昇により悪化する可能性があることを示唆している。また、夜間は指標によってわずかに違いがみられ、MRT は水田上で対照区より低く、公園では緑陰下において高くなっていたが、WBGT では大きな差はみられなかった。このことから、少なくとも今回の調査においては、夜間における「暑さ」の違いを、MRT のほうがより詳細に捉えていたと考えられる。ただ、重要なことは、様々な体感に係る環境要素から、「場」において支配的なものが何であるかを把握したうえで、適切な指標を用いることであろう。このよう

な、適切な温熱指標の整理、検討については国において進められており⁸⁾、今後は受熱側、たとえば人の着衣や代謝等を考慮した指標についても検討を行っていききたい。

農地や公園は、市民にとって身近な「緑」を感じられる場であり、緑がもつ多面的な機能のひとつとして、熱環境の緩和効果があることを分かりやすく示していくことは、本市における緑化の推進に対する市民の理解を得て、今後さらに推進していくためにも重要である。

謝 辞

本調査を行うにあたり、JA 横浜（調査当時 JA 田奈）及び舞岡土地改良区の皆様、港北土木事務所、港北水生センターの各課に調査場所を御提供いただきました。また、横浜市環境創造局農政推進課（調査当時農地保全課）、北部、南部農政事務所の各課には、調査場所の選定、調整等多大な協力をいただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

文 献

- 1) 横浜市環境創造局：横浜市水と緑の基本計画（2006）
- 2) ヒートアイランド対策会議：ヒートアイランド対策大綱（2013）
- 3) 渡邊慎一、堀越哲美：測定に基づいた屋外における平均放射温度の算出方法、日生気誌、**49**(2)、49-59（2012）
- 4) Yaglou, C.P. and Minard C.D.: Control of heat casualties at military training centers, *Arch Ind. Health*, **16**, 302-316（1957）
- 5) Tetens, O.: über einige meteorologische Begriffe, *Z. Geophys.*, **6**, 297-309（1930）
- 6) JIS Z 8806：湿度－測定方法（2001）
- 7) 横浜市環境創造局：ヒートアイランド対策取組方針（2006）
- 8) 環境省：平成 24 年度 ヒートアイランド現象に対する適応策及び震災後におけるヒートアイランド対策検討調査 業務報告書（2013）