

グランモール公園の再整備による暑熱環境の変化

小田切幸次、榎原正敬（横浜市環境科学研究所）、
内藤純一郎、牧寛、千木良泰彦（横浜市環境創造局）

Change of thermal environment by redevelopment of Grand Mall Park

Koji Otagiri, Masataka Umehara (Yokohama Environmental Science Research Institute),
Junichiro Naito, Hiroshi Maki, Yasuhiko Chigira (Yokohama Environmental Planning Bureau)

キーワード：ヒートアイランド、公園再整備、グリーンインフラ、微気象観測

要旨

横浜市のグランモール公園の再整備にて、保水性舗装や緑陰の増加など自然の力を取り入れたグリーンインフラが導入されたことから、公園の再整備による暑熱環境の変化について調査解析を実施した。公園の各地点での観測データと横浜地方気象台の観測データの差に着目することで、公園の再整備により平均気温や暑さ指数などが改善していることを示すことができた。また視覚的な緑の多さについて緑視率や天空率の指標を用いて調べたところ、公園の再整備により緑量が増加していることを捉えることができた。今回の調査結果から、水や緑の効果によって公園内の暑さが緩和されていることを定量的に示すことができた。

1. はじめに

地球温暖化などの気候変動の影響に加え、都市部で特有のヒートアイランド現象により、横浜市でも長期的に気温は上昇傾向にあり、熱中症に罹る危険が高まるなど、暑さによる生活環境への影響が生じている。

屋外での暑さによる身体へのストレスを低減させるためには、人が感じる暑さや涼しさのメカニズムを理解し、適切な対策を取ることが重要である。環境省では、「まちなかの暑さ対策ガイドライン」（以下、ガイドラインという）を策定し、屋外での暑さを低減させる各種暑さ対策技術や導入時の留意事項などを示している¹⁾。

ガイドラインに示された暑さ対策技術の具体例として、日射の低減（樹木等による緑陰、人工日除け等）、地表面等の高温化抑制・冷却（路面の遮熱化・保水化）などを

紹介している。

一方、横浜市では、「横浜みどりアップ計画」において、多様な機能や役割など緑の質を高めるため、樹林地の保全管理などの取組の進展や緑・花の創出による街の魅力の向上を一つの目標としている²⁾。

また都市における公園は緑や花の創出による街の魅力だけでなく、オープンスペースの確保や緑や水による暑熱緩和の効果を持つなど、良好な都市環境を提供する場の一つとして機能している。

横浜市内西区にあるグランモール公園は、みなとみらい21地区の主要な歩行者軸であり、この地区の憩いや賑わいの空間として活用されている。グランモール公園では、周辺街区の発展による公園の活用や賑わいづくりと「横浜みどりアップ計画」での緑のさらなる創出のため、2015

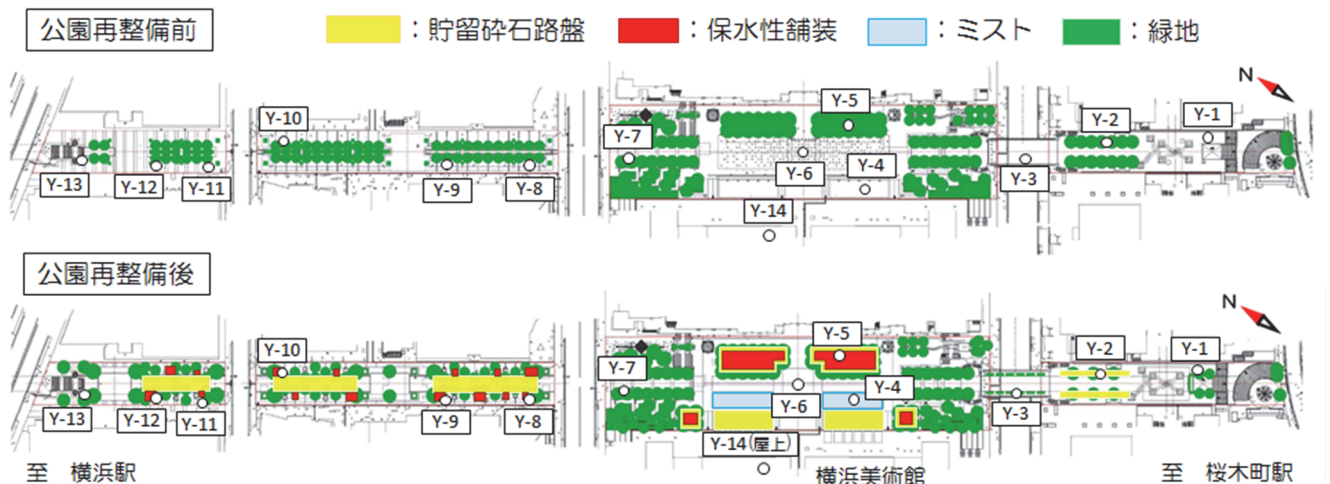


図1 グランモール公園の公園再整備前後の全体図

年度～2017年度に公園の再整備工事が行われた（図1）。

再整備の主な取組の1つであるグリーンインフラは、水や緑などの自然の力を通じ、ヒートアイランド現象の緩和、生物多様性の保全、景観形成など、多様な機能を持たせる新たなインフラ整備である。図2にグリーンインフラのイメージと導入された項目及び暑さの緩和効果の一覧を示す。横浜市公園緑地整備課が外部委託で公園の再整備前（2014年）と再整備後（2018年）に暑熱環境調査を実施し、環境科学研究所で調査結果を解析したので、公園再整備による暑熱環境の変化を報告する。

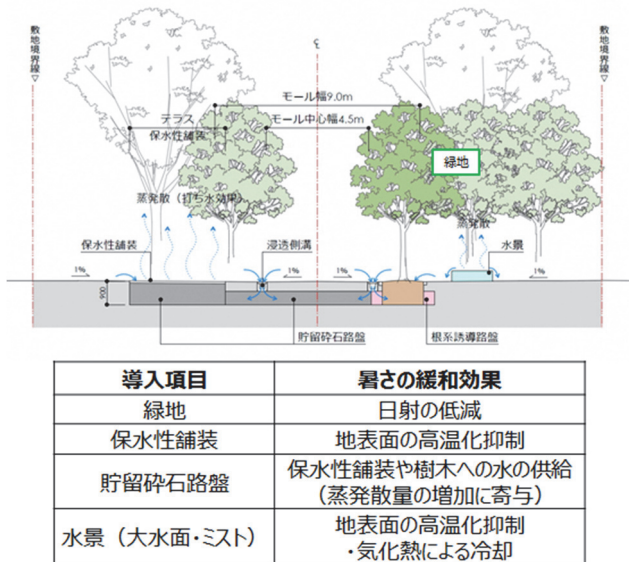


図2 グリーンインフラのイメージ図と導入された項目及び暑さの緩和効果



図3 グランモール公園での調査地点と横浜地方気象台の位置

表1 調査地点毎の観測項目

地点名	気温	相対湿度	黒球温度	暑さ指数	風向風速	日射量	赤外放射量	熱画像	緑視率/天空率
Y-1	○	○			○				
Y-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Y-3	○	○			○				
Y-4	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Y-5	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Y-6	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Y-7	○	○			○				
Y-8	○	○			○				
Y-9	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Y-10	○	○			○				
Y-11	○	○			○				
Y-12	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Y-13	○	○			○				
Y-14 (屋上)						○		○	

2. 方法

2-1 調査地点及び調査期間

グリーンインフラの導入による暑熱緩和効果を調べるため、グランモール公園で調査解析を行った。また公園の各地点で観測したデータを比較検証するため、グランモール公園から直線距離で約 2.5 km 離れた地点にある同市中区山手の横浜地方気象台（以下、気象台）の気象観測データも用いた。

グランモール公園での調査地点と気象台の位置を図 3 に示す（地理院地図（電子国土 Web）³⁾ をもとに作成）。調査期間は、公園の再整備前の調査が 2014 年 8 月 15 日 10 時～8 月 17 日 10 時と 2014 年 8 月 21 日 10 時～8 月 23 日 10 時、公園の再整備後の調査が 2018 年 8 月 10 日 10 時 30 分～8 月 12 日 10 時 30 分と 2018 年 8 月 21 日 10 時～8 月 23 日 10 時である。

2-2 観測地点・項目・期間・方法

本調査での調査地点毎の観測項目を表 1 に、本調査に使用した観測機器の形式、仕様及び測定間隔を表 2 に示す。なお、Y-1～Y-13 は地上で、Y-14 は美術館屋上で観測を実施した。

このうち、気温及び相対湿度は、観測機器の温度・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⁴⁾に準拠して、地表面から高さ約 1.7 m 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 15 cm の黒球（株）安藤計器製工所製 CK-150）の中心に格納し、地表面から高さ約 1.7 m の位置で観測を行った。なお、黒球の表面はほとんど反射しない黒い塗料が塗られているため、黒球温度は直射日光にさらされた状態での球の中の平衡温度となり、弱風時に日なたにおける体感温度と良い相関があると言われて⁵⁾いる。風向風速計は三脚の頭に取り付け、地表面から高さ約 2.0 m の位置で観測を行った。日射計及び赤外放射計は、地表面から高さ約 0.5 m の架台下部に設置して観測を行った。

観測機器の設置状況の一例を図 4 に示す。



図 4 公園内での観測機器の設置状況の一例

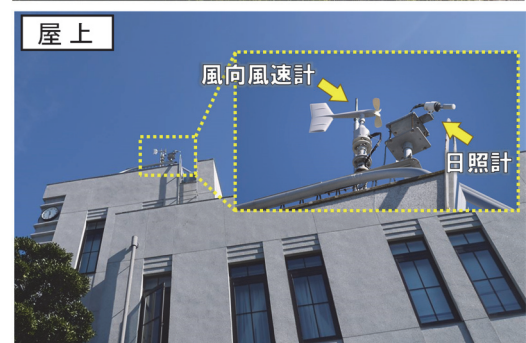


図 5 気象台の観測機器の設置状況
(2019 年 11 月 7 日撮影)

表 2 調査に使用した観測機器の形式・仕様・測定間隔

観測項目	メーカー	形式	測定範囲	測定精度	測定分解能	測定間隔
気温・黒球温度	(株)T&D	TR-51i	-40～80℃	±0.5℃	0.1℃	5分
		TR-52i	-60～155℃	±0.3℃	0.1℃	5分
相対湿度	(株)T&D	TR-72wf	10～95%RH	±5%RH	1%RH	5分
		TR-72U	10～95%RH	±5%RH	1%RH	5分
風向風速	NIELSEN-KELLERMAN	Kestrel 4500	0.4～40m/s	±3%	0.1m/s	5分
	ノースン(株)	KADEC21-KAZE	0～90m/s	±0.2%	0.1m/s	5分
日射量	ノースン(株)	KADEC21-UP-C	0～±10mV	±0.2mV	0.01mV	5分
	Hukseflux	LP-02	0～2000W/m ²	±5%	-	5分
	Kipp&Zonen	CMP-3E	0～2000W/m ²	±5%	-	5分
赤外放射量	Hukseflux	IR-02	-300～300W/m ²	±10%	-	5分
熱画像	日本アビオニクス(株)	H2630	-40～120℃	±2℃	0.03℃	2時間 ※Y-14のみ4時間
		R500S	-40～120℃	±1℃	0.08℃	
緑視率/ 天空率	(株)ニコン	D610	2426万画素	-	-	*緑視率用デジタルカメラ
		Coolpix4300	4.0メガピクセル	-	-	*天空率用デジタルカメラ
		FC-E8	-	-	-	*7インチ液晶モニター
		AF 24mm f/2.8D	-	-	-	*レンズ

また比較対象として引用している気象台の観測機器の設置状況の写真を図5に示す。地上で温度・湿度・雨量などを、建屋屋上で風向風速と日照を計測しており、周囲に日射などを遮るものは確認されない。

2-3 暑さ指数の算出

暑さ指数 (WBGT) は、熱中症を予防することを目的として、1957年に Yaglou と Minard⁶⁾ によって提案された指標である。この指標は人体と外気との熱のやりとり (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。

暑さ指数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いる。日本生気象学会が2013年に「日常生活における熱中症予防指針 (Ver. 3)」⁷⁾ を公表しており、(公財) 日本体育協会が「熱中症予防運動指針」⁸⁾ を運動に関する指針として公表している。両指針で示されている暑さ指数に応じた注意事項を表3に示す。

表3 暑さ指数に応じた注意事項

暑さ指数 (WBGT)	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。
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。	激しい運動や持久走は避ける。
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。	積極的に休息をとり、水分塩分補給。
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。	運動の合間に水分塩分補給。

また、労働環境における暑さ指数 (WBGT) について、国際的には ISO 7243⁹⁾、国内では JIS Z 8504¹⁰⁾ として規格化されている。

暑さ指数 [°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。

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

本調査では、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、暑さ指数を算出した。

また湿球温度 t_w の算出には Sprung の式¹¹⁾ 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¹²⁾ による August-Roche-Magnus の式^{13)、14)} を使用した。

2-4 再整備前後における暑熱環境変化の評価

公園再整備前後における公園内の各地点での観測データそのものの比較では、観測値の増減が公園の再整備による効果なのか、調査日の気象条件が異なることによる影響なのかを区別することができない。そこで、気象台の露場の環境が2014年(公園再整備前)と2018年(公園再整備後)で変化していないことに着目し、公園の各地点で測定した観測データと同日に気象台で測定された観測データとの差を用いて、公園再整備前後での比較を行うこととした。具体的には気温 (t_d)、黒球温度 (t_g)、

暑さ指数 (t_{wbgt}) について、公園内観測地点での観測値から気象台での観測値を引いた値 (Δt_d 、 Δt_g 、 Δt_{wbgt}) について測定期間中の平均値 ($\overline{\Delta t_d}$ 、 $\overline{\Delta t_g}$ 、 $\overline{\Delta t_{wbgt}}$) を求め、それぞれ再整備前後での値を比較し、暑熱環境の変化を評価した。解析例として、2014年における Y-5 地点と気象台での観測値の差の求め方を図6に示す。

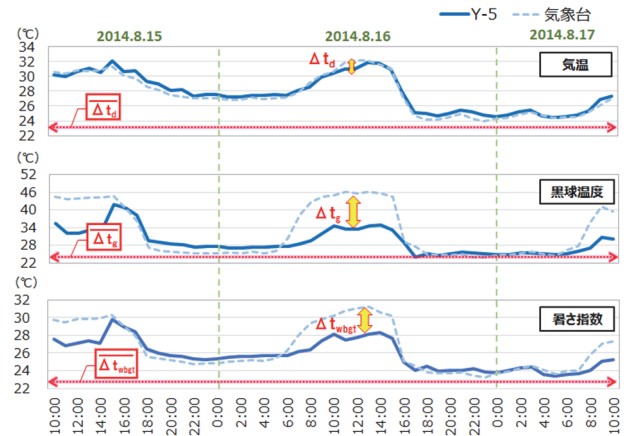


図6 公園内観測地点と気象台での観測値の差の求め方 (例: Y-5 地点)

3. 結果と考察

3-1 調査期間中の気象概況

調査期間中の気象概況を表4に示す。調査期間中に0.5 mm以上の降水が観測されたのは2014年8月16日の16時～17時と2018年8月12日の2時～5時であり、それ以外の時間は晴れ又は曇りの天候であった。

表4 調査期間中の気象概況 (横浜地方気象台)

年月日	日降水量 (mm)	日照時間 (h)	概況[昼] (6時～18時)	概況[夜] (18時～翌6時)
2014年8月15日	0.0	12.4	晴	晴
2014年8月16日	2.5	9.1	晴後時々曇一時雨	曇
2014年8月17日	0.0	7.1	晴時々曇	—
2014年8月21日	0.0	10.6	晴	快晴
2014年8月22日	0.0	11.3	晴	曇時々晴
2014年8月23日	2.0	3.4	曇一時雨	—
2018年8月10日	0.0	12.0	晴後薄曇	晴一時曇
2018年8月11日	0.0	10.2	晴後曇	曇後大雨、雷を伴う
2018年8月12日	31.0	0.8	曇	—
2018年8月21日	0.0	10.3	曇後晴	晴後一時曇
2018年8月22日	0.0	10.6	晴	晴後時々曇
2018年8月23日	0.0	7.7	曇時々晴	—

3-2 気温

公園の各観測地点で測定した気温から同日に気象台で観測された気温を引いた差 (Δt_d) について、その平均値 ($\overline{\Delta t_d}$) を求め、公園再整備前後で比較した結果を図7に示す。再整備前後ともに全地点で公園の方が気温は高かったが、全13地点中10地点において、公園再整備前と比べて公園再整備後の方が気象台との気温差が小さくなっている。気象台の露場の環境は変化していないことが

ら、気象台との気温差が小さくなっていることは、緑陰の増加や保水性舗装の導入などにより、再整備後での公園内の温度環境が改善されたことを示す。

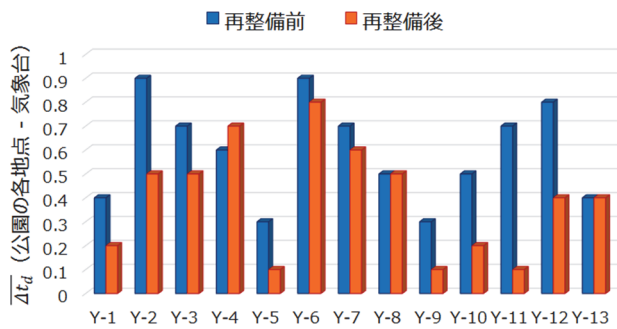


図7 公園内各観測地点における気象台との気温差

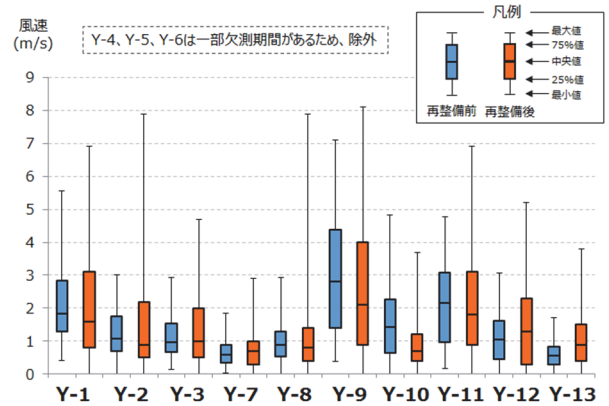


図8 公園内各観測地点での風速

3-3 風況

公園の各観測地点での再整備前後における風況について、風速の比較を箱ひげ図で示したものを図8に、主要地点での風向を風配図にまとめた結果を図9に示す。風速は、比較的強い地点(Y-9など)や弱い地点(Y-7など)の位置が変わりはなく、どの地点とも公園再整備前後で風速に大きな差は見られなかった。風向は公園再整備前後ともに、Y-1、Y-2、Y-10では南東から北西方向に延びる主要な通りに沿って、南東寄りの風が卓越しており、南西から北東方向に走る道路と交差している箇所に近いY-7、Y-8などでは南西寄りの風が卓越していた。この要因としては、公園再整備前後において主要な通りの軸が変わっていない点、主要な通りの両側にある建物の配置や形状に大きな変化がない点が考えられる。

3-4 黒球温度

公園の各観測地点で測定した黒球温度から同日に気象台で観測した結果に基づいて環境省で解析した黒球温度の実況推定値(環境省熱中症予防情報サイトで提供)を引いた差(Δt_g)について、その平均値($\overline{\Delta t_g}$)を求め、公園再整備前後で比較した結果を図10に示す。日中(6~18時)は、公園再整備前後ともに気象台よりも公園の各観測地点での黒球温度の方が低い。これは気象台の露場では雲による日射遮蔽などの天候条件を除き、周辺に日射を遮るものがないのに対し、公園の各観測地点では天候条件以外にも緑やビルによって日射が遮られるためであると推察される。また日中は公園再整備後の方が公園再整備前より $\overline{\Delta t_g}$ は大きくなっており、相対的に黒球温度が下がっている。

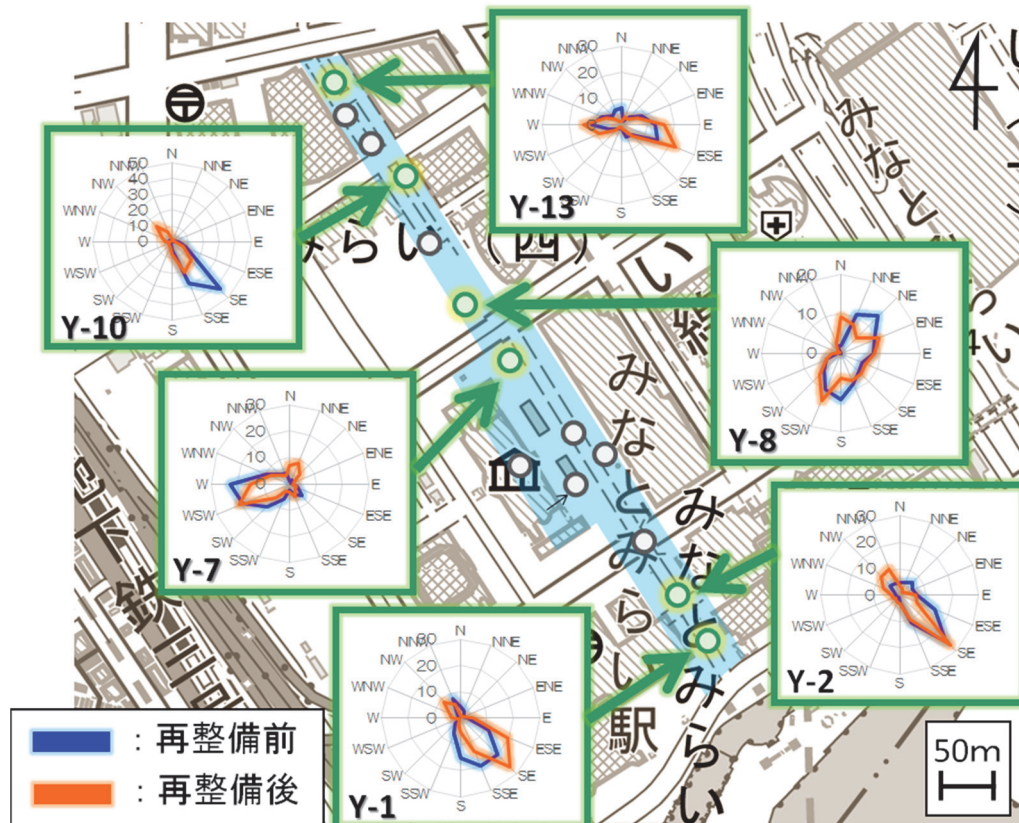


図9 公園再整備前後での風配図

これは公園の再整備により、園内の暑熱環境が改善した結果と考えられる。一方、夜間（18時～翌6時）は、公園再整備前は気象台より公園の各地点での黒球温度の方が高かったが、公園再整備後では気象台より公園の各地点での黒球温度の方が低くなっている。この要因としては、公園内では日中に緑陰の形成や保水性舗装の導入などにより地表面への蓄熱が抑制されたことで、夜間においても地表面から受ける輻射熱が減ったためであると推察される。

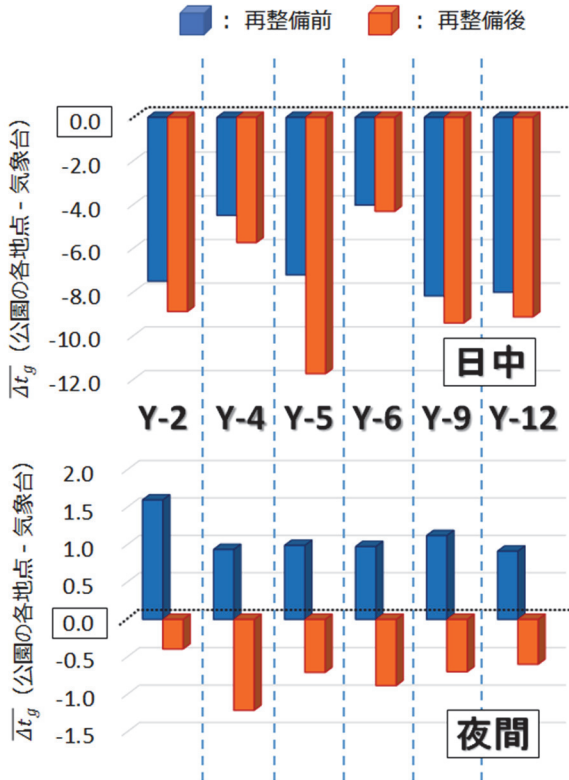


図10 公園内各観測地点における気象台との黒球温度の差

3-5 暑さ指数

公園の各観測地点で測定した観測値から算出した暑さ指数と、同日に気象台で観測した結果に基づいて環境省で解析した暑さ指数の実況推定値を引いた差 (Δt_{wbgt}) について、その平均値 ($\overline{\Delta t_{wbgt}}$) を求めた。公園再整備前後で比較した結果を図11に示す。日中（6時～18時）は、再整備前後ともに気象台よりも公園の各観測地点での暑さ指数の方が低い。これは気象台よりも公園の各観測地点の方が、暑さ指数に大きく影響を及ぼす黒球温度

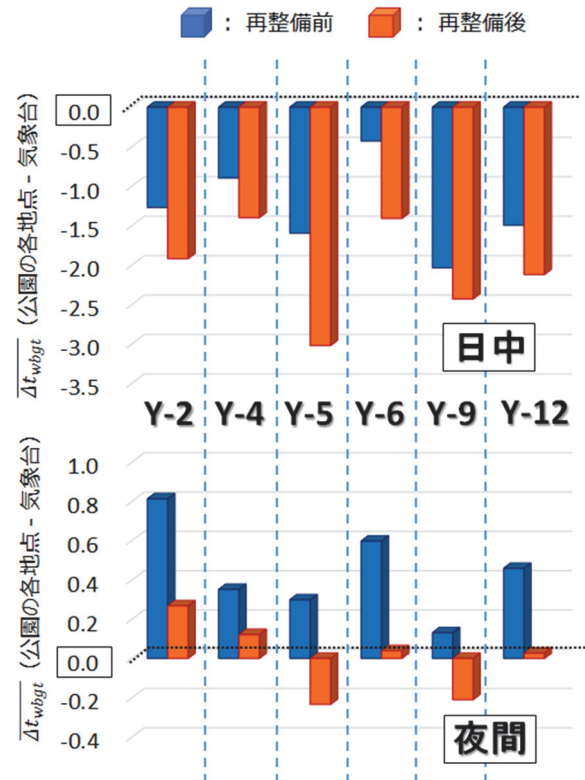


図11 公園内各観測地点における気象台との暑さ指数の差

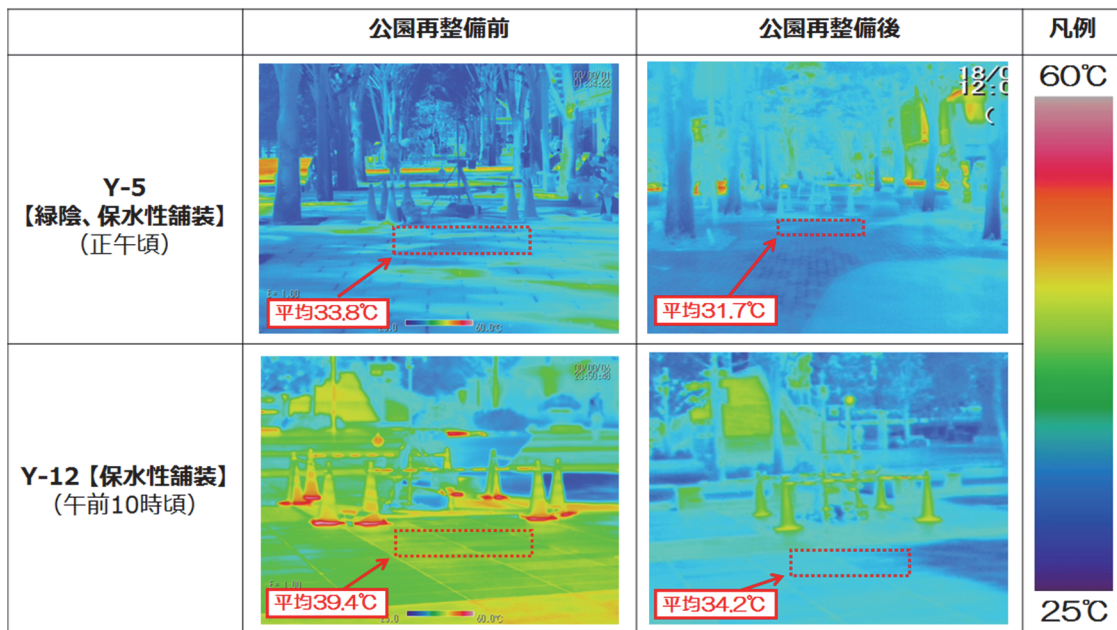


図12 公園再整備前後での熱画像の一例

が低いことによる影響と言える。また日中は公園再整備後の方が公園再整備前より Δt_{wbgt} は大きくなっており、相対的に暑さ指数が下がっている。これは公園の再整備により、園内の暑熱環境が改善した効果と推定される。一方、夜間（18時～翌6時）の暑さ指数は、公園再整備前では全地点で気象台よりも高かった。公園再整備後では6地点中2地点で気象台よりも高く、残り4地点は気象台よりも低かった。この4地点は公園再整備前と比べて公園再整備後の方が暑さ指数は低くなっている。また気象台よりも暑さ指数が高かった2地点についても、再整備前後で比較すると、 Δt_{wbgt} は公園再整備後の方が小さくなっており、暑さ指数は改善していることになる。これは黒球温度と同様、公園内で緑陰の形成や保水性舗装の導入などにより地表面への蓄熱が抑制され、夜間においても暑さ指数が低下したためであると推察される。

3-6 熱画像

グリーンインフラ導入による地表面温度の変化を確認するため、赤外線カメラで撮影した各観測地点の熱画像について、緑陰や保水性舗装が導入された地点での公園再整備前後の状況を図12に示す。Y-5では、公園の再整備に伴い緑陰が増加して日射がより遮られたことや保水性舗装が導入されたことで、地表面温度の上昇が抑制されていた。またY-12では、公園の再整備で保水性舗装が導入されたことで、舗装面上の温度が大幅に低減していることが確認できた。公園の再整備に伴い緑陰の創出や保水性舗装などが導入され、地面への蓄熱が抑えられたことで、地面からの輻射熱が低減した結果と考えられる。

3-7 緑視率

緑視率は人の視界における草木の多さ、すなわち緑量を数値化したものであり、緑視率が25%を超えると、緑が多く、人は安らぎや潤いを感じるとされている¹⁵⁾。グ

リーンインフラ導入による視覚的な緑量の増加を確認するため、各調査地点において、デジタルカメラで20度刻み360度の景観写真を撮影したのち、画像ソフトでパノラマ写真の作成とパノラマ写真中での緑被部分の計算を行った。各調査地点で解析した緑視率の結果を表5に、緑視率を解析した画像の一例(Y-4、Y-5)を図13に示す。Y-2では貯留砕石路盤の導入に伴う樹木の配置の見直し、Y-9では貯留砕石路盤と保水性舗装の導入に伴う樹木の配置の見直しにより緑視率は減少したが、その他の4地点では緑視率は増加した。このうち、Y-4では美術館前広場にあった水面が芝生へと変更されたことにより、Y-5では樹木の並木が2列から3列へと変更されたことにより、緑視率が増加した。公園全体では、再整備によってグリーンインフラが各地点で導入されたため、緑視率が増加する結果となった。

表5 公園再整備前後での緑視率の結果一覧

調査地点	再整備前	再整備後
Y-2	37.9 %	22.4 %
Y-4	9.2 %	48.2 %
Y-5	20.7 %	30.3 %
Y-6	14.9 %	19.0 %
Y-9	26.2 %	20.1 %
Y-12	28.2 %	29.6 %
平均値	22.9 %	28.3 %

3-8 天空率

天空率は魚眼レンズで天空を同心円状に見上げたときに建物を立体的に映した範囲を除いて、空がどれくらい見えているかの割合を数値化したものである。周辺建物に変化がない場合、緑が多くなればなるほど、天空率が下がるため、緑量の変化を示す指標として用いた。各調査地点で解析した天空率の結果を表6に、天空率を解析

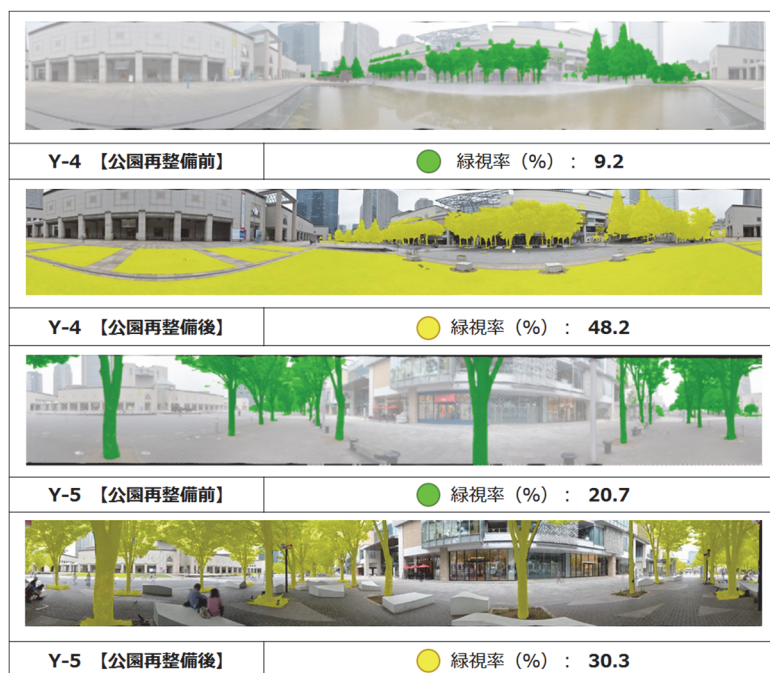


図13 公園再整備前後での緑視率解析画像の一例

した画像の一例（Y-5、Y-12）を図 14 に示す。Y-2 では貯留砕石路盤の導入に伴う樹木の配置の見直しにより天空率は増加したが、その他 5 地点では天空率は減少した。天空率が減少した地点では、周辺建物の状況に大きな変化はなく、樹木の本数の増加や木々の成長によって緑が増加したため、天空率が減少したと考えられる。

表 6 公園再整備前後での天空率の結果一覧

調査地点	再整備前	再整備後
Y-2	8.9 %	12.7 %
Y-4	53.1 %	48.4 %
Y-5	20.0 %	4.3 %
Y-6	53.4 %	48.5 %
Y-9	25.6 %	19.4 %
Y-12	27.5 %	19.6 %
平均値	31.4 %	25.5 %

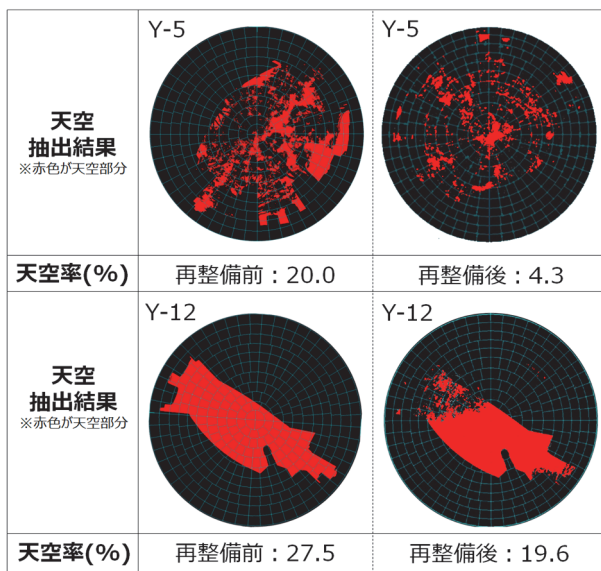


図 14 公園再整備前後での天空率解析画像の一例

4. まとめ

横浜市西区みなとみらいにあるグランモール公園にて、公園の再整備によりグリーンインフラが各所に導入されたため、公園内の暑熱環境の変化について調査解析した。

気温については、公園の再整備前後を比較すると、温度環境に改善が見られた。また公園内の 6 地点で観測した黒球温度や解析により算出した暑さ指数は昼夜ともに改善傾向が見られた。

風況については、公園の再整備前後において、大きな変化が見られなかったが、これは風の通り道に影響を及ぼす周辺の建物状況に大きな変化がなかったためと考えられる。

熱画像については、緑陰の増加や保水性舗装の導入により、地表面温度が低下していることが分かった。緑量の変化については、緑視率と天空率の 2 つの指標で評価を行い、グリーンインフラが導入された主要な地点では緑量の増加を定量的に示すことができた。

今回の調査結果から、グリーンインフラの導入に伴う緑量の増加を捉え、水や緑の効果によって暑さが緩和されていることを定量的に示すことができた。公園の再整備前後で気象条件等が異なるため、本報告では測定環境が変わっていない気象台での値との差を比較対象として評価を行った。今回の公園再整備による暑熱環境の「見える化」の取組が、今後の本市におけるグリーンインフラ導入時への一助となることを期待するとともに、今後のグリーンインフラに関連する調査では、暑熱環境の変化がグリーンインフラの導入による効果なのか、気象条件の違いによる影響なのかを明確にするため、実測調査とシミュレーションの併用による解析などを検討したい。

文 献

- 1) 環境省：まちなかの暑さ対策ガイドライン 改訂版、76pp. (2018)
- 2) 横浜市環境創造局政策課：横浜みどりアップ計画概要版、8pp. (2018)
- 3) 国土地理院：地理院地図（電子国土 Web）、<http://maps.gsi.go.jp/> (2019 年 10 月時点)
- 4) 気象庁：気象観測の手引き、81pp. (1998)
- 5) 環境省：熱中症予防情報サイト、http://www.wbgt.env.go.jp/doc_observation.php (2019 年 10 月時点)
- 6) C. P. Yaglou and D. Minard : Control of heat casualties at military training centers, *A. M. A. Arch. Ind. Health*, **16**, 302-316 (1957)
- 7) 日本生気象学会：日常生活における熱中症予防指針 Ver. 3 確定版、<http://seikishou.jp/pdf/news/shishin.pdf> (2019 年 10 月時点)
- 8) 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)
- 9) 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)
- 10) 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)
- 11) 日本工業規格：JIS Z 8806:2001 湿度—測定方法 (2001)
- 12) O. Tetens:Über einige meteorologische Begriffe, *Z. Geophys.*, **6**, 297-309 (1930)
- 13) O. A. Alduchov and R. E. Eskridge : Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure, *J. Appl. Meteor.*, **35**, 601-609 (1996)
- 14) M. G. Lawrence : The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 225-233 (2005)
- 15) 国土交通省：都市の緑量と心理的効果の相関関係の社会実験調査について～真夏日の不快感を緩和する都市の緑の景観・心理効果について～、9pp. (2005)