

福岡市都心部の対照的な広場における 熱環境の同時観測

田 中 憲 一*

1. はじめに

最近、都市におけるヒートアイランド現象に関連し、各種の熱環境観測が各地で実施されている。ヒートアイランド対策の一つである地表面被覆の改善に関しても、効果把握を目的とする緑地内の熱環境観測が、多くの研究者により実施されている^{1)~6)}。

しかし、これらの事例の多くは、現存する街に対する今後のヒートアイランド対策としては、新規整備が事実上困難な大規模緑地を観測対象としており、ヒートアイランド対策としての今後の緑地整備の在り方を検討する際の基礎データとしては必ずしも適切ではない。また、現存の人工被覆面を緑地化したときの効果を過不足なく把握しようとするれば、たとえば緑地と同規模で地理的に近接し、周辺建物の立地状況も類似な人工被覆広場というような、地表面被覆以外の条件が揃った空間を対照区とする同時観測が望まれるが、そのような理想的な対照区を設定できた観測例は少なく、さらに放射や熱フラックスの成分別観測まで実施された例はほとんどない。

本研究は、福岡市の都心にあつて地理的に近接し、地表面被覆が異なる同規模の公園広場において、熱環境の現地観測を行い、放射環境や地表面熱収支を成分別に比較することにより、都心における公園整備が気温低減に果たす役割を検討したものである。

2. 調査地域の概要

調査を実施した福岡市は、福岡県の西部に位置する面積約 341km²、推計人口約 144 万人（2009 年 1 月現在）の九州一の都市である（図 1）。市の北側は

日本海に面し、西側および南西側は脊振山地の一角を成すが、市域の多くは福岡平野内にある。観測を実施した福岡市中央区天神は、福岡市における商業の中心地区であり、約 2km 東にビジネスの中心である博多駅地区が近接する。

2003 年に福岡市が市内で実施した気温観測において、天神・博多駅地区の気温が他の地域よりも高いという、いわゆるヒートアイランド現象が確認されており⁷⁾、現在、主に天神・博多駅地区を対象とする熱環境改善施策の検討が、福岡市により進められているところである。

3. 調査内容

3.1 調査時期および地点

現地観測は、2006 年 8 月 2 日から同年 8 月 6 日までの 5 日間にわたり実施した。調査地点は、福岡市中央区天神一丁目にある福岡市役所本庁舎の東西にある特徴的な 2 地点である（図 2）。1 地点は、外周部に緑陰を有する芝生広場の天神中央公園である。公園の北側には大規模な屋上緑化ステップガーデンを有するアクロス福岡が、西側には 15 階建ての福岡市役所本庁舎があり、東側には二級河川那珂川の支川である薬院新川が流れているが、その東側を除く 3 方向は 14 ~ 15 階の高層ビルに囲まれている。もう 1 地点は、福岡市役所本庁舎の西側に位置する福岡市役所ふれあい広場である。四方を 8 ~ 15 階の高層ビルに囲まれた白色擬石張りの人工被覆広場であり、天神中央公園とは福岡市役所本庁舎を間に挟んだ隣接関係にある。

*（財）九州環境管理協会 環境部 主任研究員



図1 調査地域



図2 調査地点

3.2 調査内容

測定項目、測定機器および測定時間間隔の概略を表1に示す。なお、調査に用いた温湿度センサと熱電対については、現地測定の前後に、標準棒状温度計とアスマン式通風乾湿計を用いて校正を行い、得られた校正式を用いて現地測定値を補正した。

3.3 調査期間の気象概況等

観測地点から西に約2.5kmの位置にある福岡管区気象台の気象観測値によれば、現地観測期間である2006年8月2日～6日の5日間は、昼夜ともに概ね晴天の真夏日であった。1mm/日以上 of 降雨は、7月24日に38.5mm/日、翌25日に8.5mm/日が観測された後は、現地観測終了まで全く観測されていない。

観測対象とした芝生公園は、7月末日まで芝生の張替工事とともなう養生期間にあり、現地観測は養生期間の終了直後に実施した。公園利用者の踏圧による芝生の損傷等はほとんどなかったが、所々に土壌の露出がみられるなど、生育状況は必ずしも十分ではなかった。また、公園管理者によれば、7月25日の降雨から現地観測終了までの間、芝生への散水は実施されていない。

4. 観測結果

観測は、両地点とも広場の中心で実施したが、天空率は芝生広場と白色擬石広場でそれぞれ65%と42%であり、周辺の建物立地状況が異なるために、両地点で日照条件が異なる時間帯が存在する。芝

表1 測定項目、測定機器および測定時間間隔

地点名	測定項目	使用機器 (センサ名)	間隔
芝生広場 白色擬石広場	気温・湿度 (地上1.2m)	温湿度センサ+自作強制通風式シエルター (T&D おんどとり TR-3110)	1分
	グローブ温度 (地上1.2m)	温度センサ+グローブ温度球 (T&D おんどとり TR-0106)	1分
	地表面温度	T熱電対	30秒
	放射収支 (地上0.3m)	長短波放射計 (英弘精機 MR-40)	30秒
	地中伝導熱量	熱流計 (英弘精機 MF-180M, MF-200)	30秒
	顕熱輸送量 (地上0.6m)	超音波風速温度計 (KALJO DA-600)	0.1秒
	天空率	魚眼レンズ装着デジタルカメラ	—
市役所屋上	風向・風速	超音波風速計 (KALJO SAT-530)	30秒

生広場上の観測地点は、16:30以降は福岡市役所本庁舎の日陰に入る。白色擬石広場上の観測地点は、10:00までは福岡市役所本庁舎の日陰に入り、16:00以降は広場西側のビルの日陰に入る。以降に示す観測結果のうち、特に日照条件の影響を強く受ける項目(地表面温度、放射収支等)について、上記の時間帯にみられる地点間の差は、主に日照条件の違いによるものである点に注意されたい。

4.1 風向・風速

周辺建物の影響を受けにくい福岡市役所本庁舎の屋上(地上約60m)における8月5日の風向・風速の観測値を図3に例示する。昼夜の海陸風の傾向が顕著に現れており、日中は海風(北風)、夜間は陸風(南風)が卓越していた。

4.2 気温・湿度・グローブ温度・地表面温度

芝生広場と白色擬石広場における8月5日の気温、相対湿度、グローブ温度および地表面温度を図4に例示する。

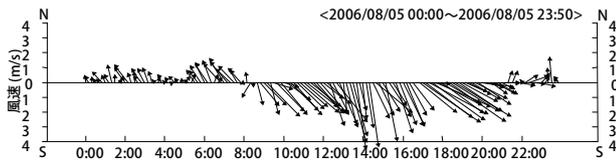


図3 風向・風速の観測値（市役所本庁舎屋上）

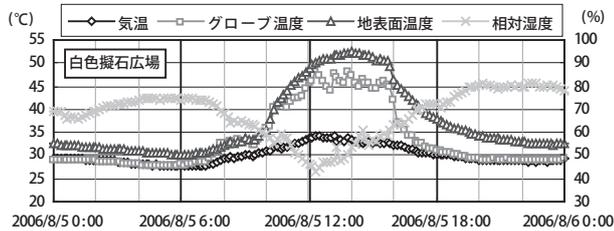
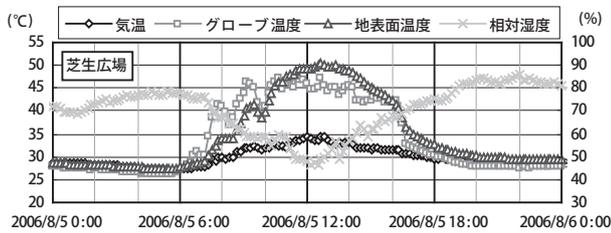


図4 気温・グローブ温度・地表面温度・相対湿度の観測値

気温と相対湿度は昼夜ともに、芝生広場と白色擬石広場とでほとんど差が認められなかった。芝生広場の東側は河川（薬院新川）に面しているため、河川上の“風の道”を通じて海から芝生広場に冷気が流入することが期待されたが、芝生広場の外周部や河川の橋上で同時に観測した気温の測定値によれば、効果は芝生広場内にはほとんど及んでいなかった。

グローブ温度は、昼間の最大値は両地点で大差はなかった。夜間は、白色擬石広場では気温とほぼ同じ値で推移するのに対し、芝生広場では気温よりも2～3℃低くなっており、夜間の放射冷却が白色擬石広場よりも強くはたらいっていることが推察された。

地表面温度は、両観測地点とも4本の熱電対を設置して測定を行っており、図4に示した結果はその平均値である。日差しが強くなる正午頃の最大値は両地点とも同程度であったが、雲により日が陰った直後や観測地点が周辺建物の日陰に入った直後の表面温度低下は芝生広場の方が速やかであった。また、夜間は全般的に、芝生広場の方が2～4℃低かった。

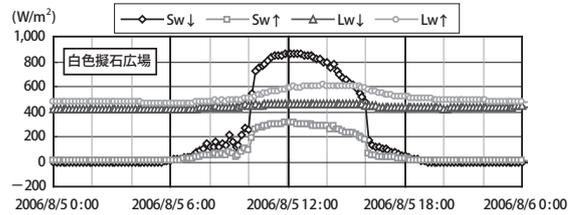
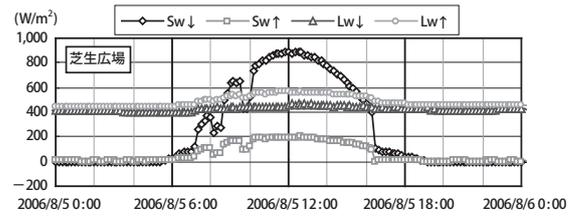


図5 放射収支の観測値

4.3 放射収支

芝生広場と白色擬石広場における8月5日の放射量4成分（日射量，反射日射量，大気放射量，地表面放射量）を図5に例示する。

日射量 $Sw \downarrow$ は、両地点とも日向になる時間帯（10:00～16:00）は地点間の差はほとんどなく、大気放射量 $Lw \downarrow$ も概ね同程度であった。反射日射量 $Sw \uparrow$ は白色擬石広場の方が大きく、観測値より求めた日射反射率は、芝生広場と白色擬石広場でそれぞれ0.23と0.35であった。地表面放射量 $Lw \uparrow$ は、観測地点の地表面温度と同様の挙動を示しており、 $Lw \uparrow$ と地表面温度の観測値より求めた射出率は、芝生広場と白色擬石広場でそれぞれ0.95と0.97であった。

4.4 地表面熱収支

芝生広場と白色擬石広場における8月5日の地表面熱収支の各成分（正味放射量，地中伝導熱量，顕熱輸送量，潜熱輸送量）を図6に例示する。

芝生広場における潜熱輸送量 $IE \uparrow$ は、正味放射量 $Rn \downarrow$ ，地中伝導熱量 $G \downarrow$ ，顕熱輸送量 $H \uparrow$ という3項目の観測値の差分により求めた。白色擬石広場では、潜熱輸送量 $IE \uparrow$ をゼロと仮定し、正味放射量 $Rn \downarrow$ と顕熱輸送量 $H \uparrow$ の観測値の差分を地中伝導熱量 $G \downarrow$ とした。 $G \downarrow$ は白色擬石広場上でも観測しているが、 $H \uparrow$ と $G \downarrow$ の観測値の誤差評価を行った結果、 $H \uparrow$ の方が信頼性が高いと判断し、 $G \downarrow$ は観

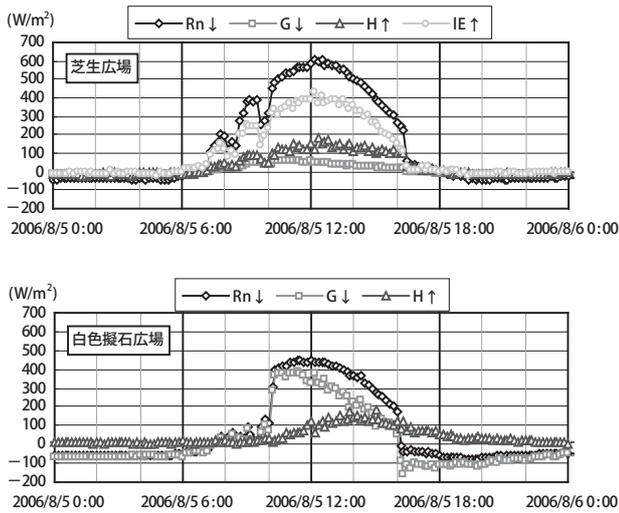


図6 地表面熱収支の観測値

測定の代わりに $Rn \downarrow$ と $H \uparrow$ の差分値を用いることとした。

正味放射量 $Rn \downarrow$ の日最大値は、芝生広場で約 600 W/m^2 、白色擬石広場で約 450 W/m^2 と、芝生広場の方が大きかった。これは、昼間の上向き放射量（反射日射量，地表面放射量）がともに、芝生広場の方が小さいためである。顕熱輸送量 $H \uparrow$ の日最大値は約 200 W/m^2 であり、芝生広場と白色擬石広場で概ね同程度であった。地中伝導熱量 $G \downarrow$ の日最大値は、白色擬石広場では約 400 W/m^2 と大きく、それに対して芝生広場では約 100 W/m^2 と小さかった。

顕熱輸送量，気温および地表面温度の測定値より，対流熱伝達係数を求めた。両地点とも，地上 0.6m で測定したスカラー風速が最大でも 2.5 m/s 未満と小さかったこともあり，対流熱伝達係数に有意な風速依存性は認められず，芝生広場上では $10 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ 程度，白色擬石広場上では $7.5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ 程度であった。これらは，顕熱輸送の交換係数 $C_H U$ に換算すると，それぞれ $8.5 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$ ， $6.4 \times 10^{-3} \text{ (m/s)}$ となる。また，芝生広場上における顕熱輸送の交換係数，潜熱輸送量，気温，相対湿度，地表面温度から求めた蒸発効率，は，約 0.26 であった。

5. 地表面における熱輸送機構の比較

芝生広場と白色擬石広場における熱収支特性の違いをみるために，横軸に正味放射量を，縦軸に顕熱

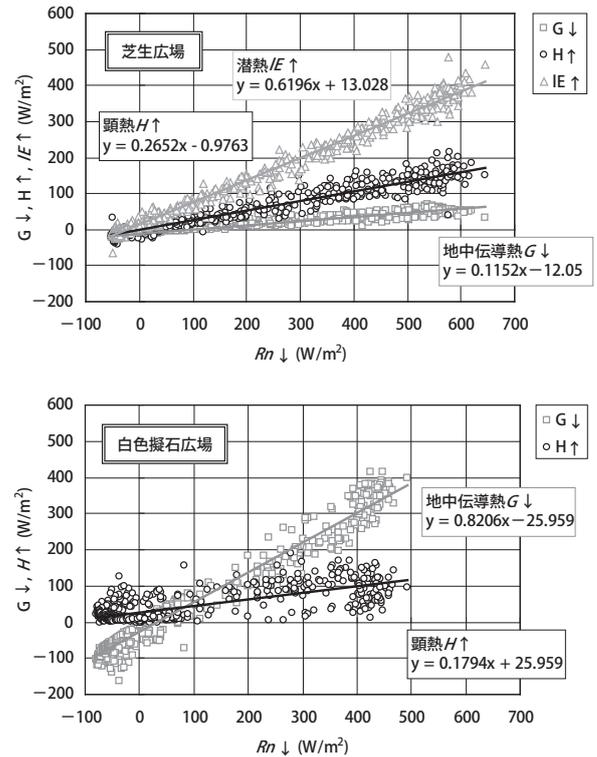


図7 純放射量 $Rn \downarrow$ と他の熱収支成分の比較
(上：芝生広場，下：白色擬石広場)

輸送量，地中伝導熱量および潜熱輸送量をとった散布図を作成した（図7）。

芝生広場では，回帰直線の傾きは， $IE \uparrow$ ， $H \uparrow$ ， $G \downarrow$ に対し，それぞれ約 0.62，約 0.27，約 0.12 である。つまり，正味放射量 $Rn \downarrow$ の約 62% が潜熱 $IE \uparrow$ に，約 27% が顕熱 $H \uparrow$ に，残りの約 12% が地中伝導熱 $G \downarrow$ へと転化しており，放射により地表面が受けた熱の約 6 割が気化熱として消費され，約 3 割が大気を加熱し，約 1 割が地中に蓄積される。顕熱 $H \uparrow$ の回帰直線の切片はゼロに近く，正味放射量 $Rn \downarrow$ と顕熱 $H \uparrow$ の回帰直線は原点を通る右上がりの直線とみなせるため，芝生広場上では $Rn \downarrow$ と $H \uparrow$ が常に同符号という関係が概ね成立する。これは，正味放射 $Rn \downarrow$ と常に逆向きの顕熱 $H \uparrow$ が生じていることを意味している。すなわち，昼間の受熱時には顕熱により大気が加熱されるが，夕方に $Rn \downarrow$ の向きが変わって地表面が放射冷却状態になると，顕熱も速やかに向きが変わって大気の冷却が生じるようになる。このことは，地中伝導熱量 $G \downarrow$ の回帰直線からも裏付けられる。 $Rn \downarrow$ の最小値付近では， $Rn \downarrow$ が -50 W/m^2 程度であるのに対し， $G \downarrow$ は -20 W/m^2

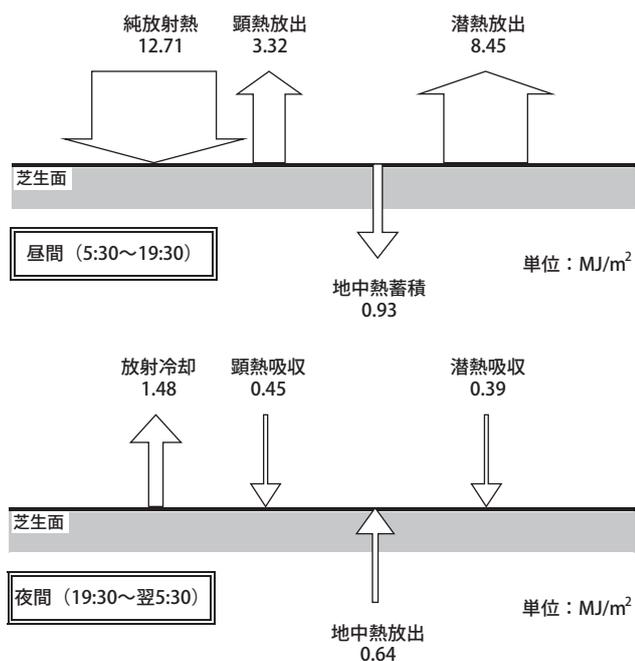


図8 昼夜の熱輸送量の積算値（芝生広場）

程度である。符号を逆転させて鉛直上向きを正の向きとすれば、 $Rn \uparrow = 50W/m^2$ に対して $G \uparrow = 20W/m^2$ と、上向きの Rn が上向きの G よりも大きい。芝生面では昼間の地中への蓄熱が少ないために、夜間の地表面の放射冷却が地中から大気への放熱を上回り、地表面温度が速やかに気温以下になって、大気の熱が顕熱として地表面に吸収されていると考えることができる。

白色擬石広場では、回帰直線の傾きは、 $H \uparrow$ および $G \downarrow$ に対し、それぞれ約 0.18 および約 0.82 である。つまり、正味放射量 $Rn \downarrow$ の約 18% が顕熱 $H \uparrow$ に、約 82% が地中伝導熱 $G \downarrow$ へと転化しており、放射により地表面が受けた熱の約 2 割が大気を加熱し、残りの約 8 割が地中に蓄積される。顕熱 $H \uparrow$ の回帰直線の傾向が芝生広場と異なるのは、回帰直線が原点を通らず、 $Rn \downarrow < 0$ でもなお $H \uparrow > 0$ となっていることである。これは、夜間に地表面が放射冷却状態にある中でも、鉛直上向きの顕熱輸送すなわち地表面による大気の加熱が続くことを示すものである。また、地中伝導熱量 $G \downarrow$ の回帰直線で、 $Rn \downarrow$ の最小値付近をみると、 $G \downarrow$ の最小値が $-100W/m^2$ 程度であるのに対し、 $Rn \downarrow$ の最小値は $-90W/m^2$ 程度である。符号を逆転させて鉛直上向きを正とみれ

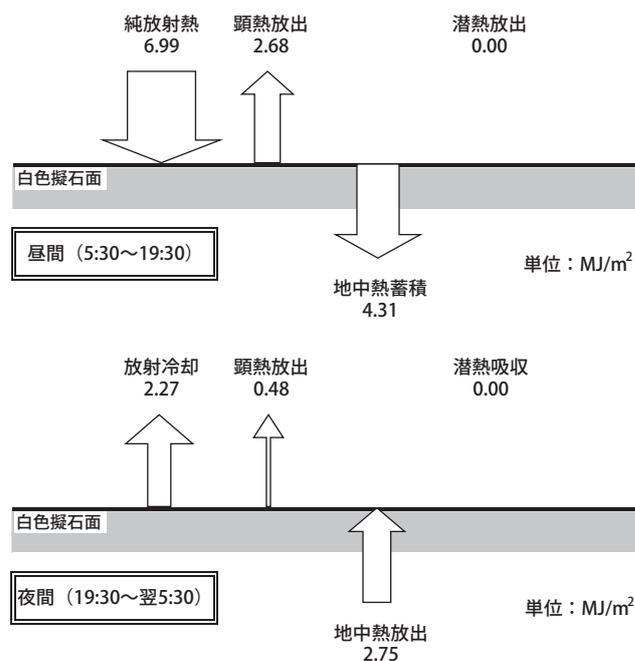


図9 昼夜の熱輸送量の積算値（白色擬石広場）

ば、 $G \uparrow = 100W/m^2$ に対して $Rn \uparrow = 90W/m^2$ 、すなわち夜間には放射冷却を上回る地中蓄熱の放出が生じている。夜間には、放射冷却だけでは昼間の地中の蓄熱が放熱できず、その差が夜間においても顕熱として大気を加熱していると考えられることができる。

地表面での熱輸送機構の違いを、上記とは異なる視点で視覚化するために、芝生広場と白色擬石広場における地表面熱収支の各成分を昼夜別に積算した。昼夜の区分は便宜的に日射の有無で行うこととし、昼間を 5:30 ~ 19:30、夜間を 19:30 ~ 翌 5:30 とした。

昼夜の熱移動量を観測日毎に積算し、その 5 日間の平均値をもとに模式図を描くと、図 8 および図 9 のようになる。芝生広場上では、昼間の正味放射熱 $12.71MJ/m^2$ のうち、顕熱として $3.32MJ/m^2$ が、潜熱として $8.45MJ/m^2$ が大気中に放出され、地中への蓄熱は $0.93MJ/m^2$ と少ない。白色擬石広場上では、昼間の正味放射熱 $6.99MJ/m^2$ のうち、半分以上の $4.31MJ/m^2$ が地中に蓄熱されるとともに、 $2.68MJ/m^2$ という芝生上と同程度の顕熱放出が生じている。夜間になると、白色擬石広場上では地中から地表面に $2.75MJ/m^2$ の熱が伝導し、そのうち $2.27MJ/m^2$ は放射によって冷却されるが、残りの $0.48MJ/m^2$ は顕熱として大気を加熱してい

る。芝生広場上では地中から地表面への熱移動量は 0.64MJ/m^2 と小さく、地表面では放射冷却でそれより大きな 1.48MJ/m^2 が放熱されるため、大気から 0.45MJ/m^2 の顕熱が吸収されるとともに、潜熱として 0.39MJ/m^2 が吸収される。また、夜間に地表面から放出された放射熱の一部は、周囲の物体の表面を加熱するはたらきを示すこととなるが、芝生広場上の放射量 1.48MJ/m^2 は、白色擬石広場上の放射量 2.27MJ/m^2 より小さい。

今回の観測条件では、昼間には芝生広場と白色擬石広場で同程度の顕熱が生じており、昼間の気温の低減に対して、芝生広場の効果はあまり大きくなかったものと考えられる。しかし、夜間には、白色擬石広場上では顕熱による大気加熱が続く中、芝生広場上では顕熱輸送の向きが逆転して大気冷却が生じることや、地表面から周囲物体に向かって放出される放射熱が小さくなることなどにより、夜間の気温低減に一定の効果を及ぼしていたものと考えられる。

6. まとめ

都心部で互いに近接し、地表面被覆が異なる2種類の同規模の公園広場（芝生広場、白色擬石広場）を対象に、熱環境の現地観測を実施することにより、以下の知見を得た。

・芝生広場と白色擬石広場では、昼間の気温と地表面温度は同程度まで上昇し、芝生による昼間の気温低減効果は認められなかったが、芝生広場では地中への蓄熱が大幅に低減されていた。

・夜間の芝生広場では、昼間の地中蓄熱が速やかに放熱されることにより、地表面温度が速やかに気温を下回り、低温の地表面が大気を冷却するという気温低減効果が確認された。

謝辞

本研究の実施にあたり、環境省委託事業「平成18年度都市内の緑による熱環境改善効果調査検討委託業務」および福岡市が実施した「平成18年度福岡市ヒートアイランド対策検討調査委託」の成果の一部

を利用した。

現地観測の実施にあたり、福岡市環境局温暖化対策課をはじめ、福岡市役所の方々に様々な便宜をはかっていただいた。また、九州大学大井研究室、東和大学塩月研究室および福岡県保健環境研究所より測定機器の貸与をいただいた。

調査計画の策定から現地観測を経て結果のとりまとめに至るまで、九州大学の萩島理准教授、九州産業大学の北山広樹教授、および近畿大学の依田浩敏教授に、様々なアドバイスをいただいた。

ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 萩島 理 ほか3名：草地における対流熱伝達率と熱収支に関する長期実測，日本建築学会技術報告集，No. 11，pp. 155-160，2000.12
- 2) 成田健一 ほか3名：新宿御苑における蒸発効率と温熱環境の実測，環境情報科学論文集，Vol. 18，pp. 253-258，2004.11
- 3) 高野武将 ほか5名：新宿御苑におけるクールアイランド現象の実測（その2）－芝生地・樹林地の温熱環境比較と市街地熱収支の把握－，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1，pp. 679-680，2002.8
- 4) 成田健一 ほか5名：新宿御苑におけるクールアイランド現象の実測（その3）－芝生面の熱収支－，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1，pp. 681-682，2002.8
- 5) 佐々木啓行 ほか4名：保水性舗装及び大規模緑地のヒートアイランド緩和機能について（都立日比谷公園における調査），東京都環境科学研究所年報，pp. 3-11，2007
- 6) 横山 仁 ほか5名：緑を活用した都市の熱環境改善に関する研究－皇居，大丸有および日本橋・銀座地区における温熱環境の実態－，東京都環境科学研究所年報，pp. 79-82，2008
- 7) 福岡市ヒートアイランド現象調査報告書，福岡市環境局，2004.3