夏季の明治神宮・代々木公園およびその周辺地域の表面温度の日変化

The Diurnal Variation of Summer Surface Temperatures in Meiji-shrine/Yoyogi-park and Its Peripheral Area

桐原博人*・三上岳彦*

Hirohito KIRIHARA*, Takehiko MIKAMI*

ABSTRACT; In the beginning of August, 1997 under typical summer pressure patterns, we observed an intensive observation. Using the portable thermal infrared camera, thermal infrared images were taken from Meiji-shrine/Yoyogi-park of Tokyo that was a large-scale green tract, and its peripheral area. The thermal infrared camera was setted by 1 on top of the Tokyo Metropolitan Government building and the roof of Shibuya-ku Office, and thermal infrared images were taken by an interval for ten minutes. Between synchronism, we lifted up a captive balloon from the central part of Yoyogi-park and measured vertical profiles of air temperature. We understood a difference of the thermal quality caused by the green tract and the artificial heat structure with concrete and the asphalt which constituted urban area from the diurnal variation of surface temperatures provided from thermal infrared images had. The difference of surface temperature between the green tract and its peripheral area reached about 7 degrees at the maximum. The surface temperature of multistory buildings became lower than the urban area in the daytime, whereas it was higher than there in the nighttime.

KEYWORDS; heat island, mitigation effect, infrared thermal image, surface temperature, sensible heat flux

1. はじめに

近年、都市が高温となるヒートアイランド現象が問題となっている。ヒートアイランドの原因としては、都心部への人口、交通網の集中化、人工排熱、地表改変に伴う緑地の減少、建物の高層化に伴う熱容量変化などいくつかの要因が複合していると考えられる。ヒートアイランドの緩和は、温暖化防止、エネルギー利用削減、生活環境の改善などの面から検討されてきてはいるが、その実現は必ずしも容易ではない。

都市における緑地の気候の緩和作用についての研究は、いくつかなされてきた。たとえば、丸田（1974）は公園緑地を存在機能効果と利用機能効果とに大別して、その存在機能効果の代表的なものとして、環境機能効果を挙げている。三上（1982）は、都市内部における公園が周囲の気候に与える影響を公園周辺の気温分布から解析を行った。本條ほか（1986）は、ランドサットのデータから公園緑地が都市の熱環境に及ぼす影響について調べている。また宇田川ほか（1991）は、飛行船に熱赤外画像装置を搭載して東京都内の大規模緑地の一つである新宿御苑の熱赤外画像の解析から、緑地公園の気温上昇に対する抑制効果の大きさを定量的に見積もることを試みている。浜田・三上（1994）は、明治神宮・代々木公園を対象に移動観測および代々木公園内から係留気球を上げることによって都市内の大規模緑地によって形成されるクールアイランド

*東京都立大学理学部地理学科 Department of Geography, Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University

現象について気候学的考察を行っている。

本論文では、緑地の気候緩和効果が最も期待できる夏季に、東京都庁屋上および渋谷区役所屋上から大規模緑地である明治神宮・代々木公園を対象に熱赤外面像を撮影し、その表面温度の日変化から、緑地や緑地の周辺市街地を構成するコンクリートやアスファルトのような人工構造物がもつ熱的特性の違いを調べた。

2. 観測場所および方法

集中観測は1997年8月2日～3日に行った。熱赤外面像は日本電子製サーモビューア（視野角25°、測定波長8～13 μm、撮影インターバル10分）を2台使い、それぞれ東京都庁第一本庁舎屋上の鉄塔（地上約245m）および渋谷区総合庁舎屋上（地上約20m）に設置した（図1）。東京都庁からは明治神宮・代々木公園および神宮前・南青山付近の市街地を撮影した。渋谷区総合庁舎からは国立代々木競技場の屋根（6mm厚の鉄板エポキシ樹脂系の灰色の塗料を塗布）およびコンクリート製の外壁（厚さ約60cm）、アスファルト舗装道路、コンクリート製の花壇の土止めを撮影した。

また代々木公園内においてAIR Inc. 製係留気象タワーゾンデシステム（TSB-X型）により、地上高度20mの気温を30秒間隔で連続測定した（図2）。

3. 結果

3. 1 放射率の補正

地表面の長波放射に対する放射率は、杉本・近藤（1994）から、アスファルト $\varepsilon=0.96$ 、コンクリート $\varepsilon=0.96$ として補正した。また谷口（1995）から、樹冠 $\varepsilon=0.98$ 、鉄 $\varepsilon=0.95$ とした。市街地の放射率は、植生およびアスファルト、コンクリートの混在状態と考え $\varepsilon=0.97$ とした。高層ビル群は、コンクリートに近いと考え $\varepsilon=0.96$ とした。

3. 2 撮影角度の補正

東京都庁屋上の鉄塔の高さは地上約245mであり、明治神宮・代々木公園の中心までの距離が約2000mであるので、三角関数を用いて熱赤外カメラの撮影角度を求めると天頂角で約83°となった。また渋谷区総合庁舎屋上の高さは地上約20mであり、アスファルト舗装道路およびコンクリート製の土止めまでの距離が約120mであるので、同じようにして熱赤外カメラの撮影角度を求めると天頂角で約81°となった。同じようにして、国立代々木競技場の屋根は、渋谷区総合庁舎から約220m離れているので、撮影角度は約85°になった。東京都庁と総合庁舎が同じ条件になるよう、谷（1995）にならって天頂角を約0°で撮影したように角度補正をした。

3. 3 環境温度の補正

環境温度は、図4から谷（1995）の換算表によって天空温度を求め（図6）、みかけの表面温度から減ずることで補正した。

$$\varepsilon \sigma T_t^4 = \varepsilon \sigma T_a^4 - (1 - \varepsilon) \sigma T_{sky}^4 \quad (1)$$

ここで、 ε ：地表面の長波放射に対する放射率、 σ ：ステファン・ボルツマン定数、 T_t ：真の表面温度、

T_a ：見かけの表面温度、 T_{sky} ：天空温度

3. 4 水蒸気の補正

タワーゾンデシステムによって測定した結果、水蒸気圧が日中は29.8 hPa、夜間は28.5 hPaであったので、Houghton（1977）の補正式により、森（1995）にならって熱赤外線の水蒸気による吸収を補正した。

$$T_{\tau}^4 = (T_a^4 + \int_0^x T^4 \frac{\partial \tau}{\partial x} dx) \cdot \frac{1}{\tau}$$

$$\tau = \exp\left(-\frac{10^{-5} e^2 x}{RT}\right)$$

(2)

ここで T : 気温, x : 対象物までの距離, e : 水蒸気圧, R : 水蒸気の気体定数
補正式により補正して真の表面温度を求めると、図7および図8のようになった。

図1 観測地の概要

図2 係留気象タワーゾンデシステムによる観測風景

4. 考察

図3は、都庁屋上から撮影した観測対象地の可視画像である。図4は、図3とほぼ同じ画角で撮影した1997年8月2日6時の観測対象地の熱赤外画像である。画面中央は、明治神宮・代々木公園であるが、画角の関係上、明治神宮が大部分である。温度分解能は、 0.5°C で、画像中心温度は 27.0°C に設定した。対象物ごとの放射率補正は行っておらず、画像情報は、放射率 $\epsilon = 1$ である。

表1は、図4のBOX内の表面温度を表したもので、BOX1は緑地中央部の温度、BOX2は緑地周辺部の温度、BOX3は市街地(神宮前・南青山付近)の温度、およびBOX4は地上付近の天空温度である。図6は、この温度を基にして谷(1995)の換算表によって天頂温度に換算したものである。

図3 東京都庁屋上から撮影した観測対象
(可視画像) 明治神宮・代々木公園

図4 都庁屋上から撮影した観測対象
(熱赤外画像)

図5 図4のX-X'断面温度の時間変化

図5は、図4中のX-X'に沿った表面温度の断面図で、1997年8月2日6時から3日3時まで、3時間ごとのグラフである。グラフの縦軸は0.5℃刻みである。グラフ中央の温度が低い部分は、明治神宮・代々木公園の森の樹冠部の表面温度である。またグラフの右側の温度が高い部分は、東京都庁の建物の表面温度、左側の温度が高い部分は、市街地の表面温度である。各時刻とも緑地中央部と周辺部では、それほど大きな違いは見られず、日中最大でも0.5℃ほどである。このことから緑地全体として、緑地の周囲よりも温度が低いクールアイランドの機能を持っていると考えられる。8月3日の3時の低温部を緑地本来の大きさと仮定すれば、8月2日の9時、12時の時間帯は、かなり市街地の方まで温度が下がっていることがわかる。地図上の距離から温度勾配を求めると約0.01℃/mほどになる。これは、日中かなり風があったので緑地からの移流効果と考えられる。

図7は、渋谷区総合庁舎から撮影した表面温度の日変化で、各種補正を施してある。日中、最も表面温度

表1 図4のBOX内の温度

L LEVEL (none)	
BOX1	
Max : 26.3(320.282)	
Min : 25.6(333.280)	
Average : 25.9	
BOX2	
Max : 26.6(083.264)	
Min : 26.0(090.266)	
Average : 26.3	
BOX3	
Max : 27.1(282.196)	
Min : 26.6(297.184)	
Average : 26.8	
BOX4	
Max : 26.8(248.066)	
Min : 26.3(260.064)	
Average : 26.5

図6 天空温度

が高くなる対象物は、国立代々木競技場の鉄製の屋根 (Roof of iron) で、最高温度が約 62.0℃にもなる。次に温度が高くなるのは、アスファルト舗装の道路 (Asphalt pavement) で、約 56.0℃である。同じように次が、コンクリート製の花壇の土止め (Sheeting of concrete) で約 52.0℃、一番低いものが代々木競技場のコンクリート製の壁 (Wall of concrete) で、約 42.5℃ある。代々木競技場の壁が低温なのは、室内に半分位入っているので、室温が反映されている可能性がある。すべての対象物に共通な 11 時 30 分頃の急激な温度低下は、上空を雲が通過したためである。表面温度はアルベドの大小によって決まるという研究報告は多いが (たとえば浅枝・藤野, 1992)、図7のように対象物によって最高温度に達する時間に“ずれ”が生じるのは、材質の持つ熱容量の違いに起因すると考えられ、Nichol (1996) は、これを熱慣性 (Thermal inertia) としている。

図8の表面温度は、新宿の高層ビル群 (Multistory buildings) 以外、東京都庁の屋上から撮影したものである。高層ビル群の表面温度は、ビルの側面上部の温度である。気温 (Air temp.) は、代々木公園から上げたタワーゾンデによるもので、20 m高度の気温は、それよりも高い高度の気温から外挿することで求めた。市街地 (City area) の表面温度は、撮影角度の関係から主に建物の側面上部や屋根面の温度の平均したものであると考えられる。日中高層ビルに日射が当たっているにもかかわらず、高層ビル群の温度が市街地よりも低いのは、先に述べた Nichol (1996) が言うように熱慣性の違いによるものであると考えられ、日中低い分、夜間は市街地よりも約 1℃温度が高く平均して約 34℃で、熱を放出し続けていることがわかった。緑地は、その中央部でも周辺部でも表面温度に違いは、あまり見られず、市街地や高層ビル群に比べて約 6℃低い温度で日変化している。気温は緑地に比べて、日中は約 1.5℃ほど低く推移し、19 時頃少し下がるが、2 時頃、緑地と同じ温度になる時間帯があった。

図9は、各種表面温度から緑地中央部の温度を減じたもので、代々木競技場の屋根以外、ほぼ収束している。競技場の屋根は、19 時よりほぼ緑地表面の温度に等しくなっていることがわかった。鉄製の屋根は、厚さ 6 mm と薄く、熱容量の小さいことに起因すると考えられる。

図10も図9と同様に、緑地中央部の温度を減じたもので、19 時以降、一定値になっている。これは、夜間、緑地と同じ位相で温度変化をするためであると考えられる。

図7 表面温度 (1)

図8 表面温度 (2)

図9 各種表面温度と緑地の温度差 (1)

図10 各種表面温度と緑地の温度差 (2)

謝 辞

本研究は、科学技術振興事業団戦略的基礎研究プロジェクト「都市ヒートアイランドの計測制御システム（研究代表者・久保幸夫 慶応義塾大学教授）」の一環として行った。東京都庁屋上に熱赤外面像カメラを設置するにあたって多大なるご協力を頂いた牛山素行 博士（財）科学技術振興事業団研究員・東京都立大学客員研究員）に深甚なる謝意を表します。赤外線の水蒸気による補正について貴重なコメントを頂きました森 牧人 博士（筑波大学水理実験センター）に深甚なる謝意を表します。熱赤外面像カメラの設置についてご尽力頂いた東京都庁財務局庁舎管理部管理課の方々、および渋谷区役所総務部管財課の方々に感謝致します。また国立代々木競技場の屋根および壁面の材質についてコメントを頂きました国立代々木競技場総務部の方々、および観測を手伝って頂いた東京都立大学理学部地理学科の学生の皆様および観測に携わって頂いた、すべての方に感謝致します。

《参考文献》

- 1) 浅枝隆・藤野毅：舗装面の熱収支と蓄熱特性，水文・水資源学会誌，**5**(4)，pp.3-7，1992.
- 2) 浜田 崇・三上岳彦：都市内緑地のクールアイランド現象－明治神宮・代々木公園を事例として－，地理学評論，**67A-8**，pp. 518-529，1994.
- 3) 本條：リモートセンシングによる都市内緑地の温度分布の解析，造園雑誌，**49**(5)，pp.301-304，1986.
- 4) Houghton, J., T.: The Physics of Atmosphere, Cambridge Univ. Press, London, 31-45, 1977.
- 5) 丸田頼一：市街地の公園緑地の機能効果，気象研究ノート，**119**，65-70，1974.
- 6) 三上岳彦：都市内部における公園緑地の気候，お茶の水女子大学人文科学紀要，pp.21，1982.

- 7) 森 牧人：熱画像式赤外線放射温度計の局地気象観測への応用について，日本農業気象学会，局地気象研究会講演論文集，11，pp. 31-40，1995.
- 8) Nichol, J., E. :High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city, J. Appl. Meteor., 35, pp. 135-146, 1996.
- 9) 杉本莊一・近藤純正：仙台市におけるヒートアイランドと各種地表面温度の日変化の観測，天気，41-9，pp.39-42，1994.
- 10) 谷 宏：赤外放射温度計の測定に対する放射率の影響について，日本農業気象学会，局地気象研究会講演論文集，11，pp. 31-40，1995.
- 11) 谷口龍司：赤外放射温度計「サーモトレーサ」の測定原理と構成，日本農業気象学会，局地気象研究会講演論文集，11，pp. 1-11，1995.
- 12) 宇田川 満・早福正孝・伊藤政志：赤外線映像装置による地表面温度分布－公園緑地周辺－，東京都環境科学研究所年報，2，pp. 46-53，1991.