

熱赤外線画像による大規模公園緑地 からの放散熱量の推定

桐原啓真¹・三上岳彦²

¹工修・教修 神奈川県立川崎工業高等学校(〒 211-0013 神奈川県川崎市中原区上平間 1700 番地の 7)

²理博 東京都立大学教授 理学部地理学科(〒 192-0364 東京都八王子市南大沢 1-1)

ヒートアイランドの緩和効果に関する研究の一環として、ポータブル熱赤外線画像カメラを用いて大規模緑地である明治神宮・代々木公園及びその周辺地域の熱赤外線画像を 10 分間隔で撮影した。熱赤外線画像から得られる表面温度の日変化から、都市部を構成するアスファルトやコンクリートのような人工的熱構造物と緑地との熱慣性の違いがわかった。緑地とその周辺地域の表面温度差は、日中で約 8℃に達した。表面温度は日中では緑地が一番低く、以下コンクリートの敷石、アスファルト舗装、鉄製の屋根の順に高くなっている。日中、公園周辺市街地の地上高度 50m の平均気温から緑地の表面温度を基にして、放散熱量を計算すると日中、最大で -7 W/m^2 となり、夜間では -10 W/m^2 となった。放散熱量の値から大規模緑地は気温上昇に対して抑制効果があることが明らかとなった。

Key Words: heat island, mitigation effect, infrared thermal image, surface temperature, heat radiation

1. はじめに

都市では建築物の高密度化や高層化、道路の舗装化、内燃機関の増加による廃熱量の増大などによってヒートアイランドが形成されている。三上⁷⁾および浜田, 三上⁸⁾は、ヒートアイランドが生じている都市に存在する緑地は、相対的に低温域(クールアイランド)を形成することを報告している。近年、夏季にこのような緑地が都市のヒートアイランドを緩和する効果が注目されている。すでに桐原, 三上⁹⁾は東京都庁第一本庁舎屋上から熱赤外線画像撮影装置を用いて夏季の明治神宮・代々木公園およびその周辺地域の表面温度の日変化を測定している。それによれば緑地の樹冠部平均温度と緑地近隣の市街地の建物および道路の平均温度は日中最大で約 8℃、夜間でも約 6℃の温度差があることがわかった。また桐原, 三上⁹⁾および桐原, 三上⁶⁾は、1997 年の夏季に代々木公園およびその近隣の渋谷区役所屋上で繫留気象タワーゾンデシステムを浮揚させ、気温、温位、相対湿度および風向・風速の鉛直構造を調べ大規模緑地上に形成されるクールアイランドの鉛直構造を明らかにした。宇田川ほか¹⁰⁾は、飛行船に熱赤外線画像撮影装置を搭載して東京都内の大規模緑地の一つである

新宿御苑の熱赤外線画像の解析から、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。

本研究では繫留気象タワーゾンデシステムおよび熱赤外線画像撮影装置を用いて気温、表面温度を観測し、緑地が大气に与える放散熱量を求め、緑地の気温上昇に対する緩和効果を調べた。

2. 観測場所および方法

(1) 観測日時

1997 年 8 月 2 日～3 日

(2) 観測場所

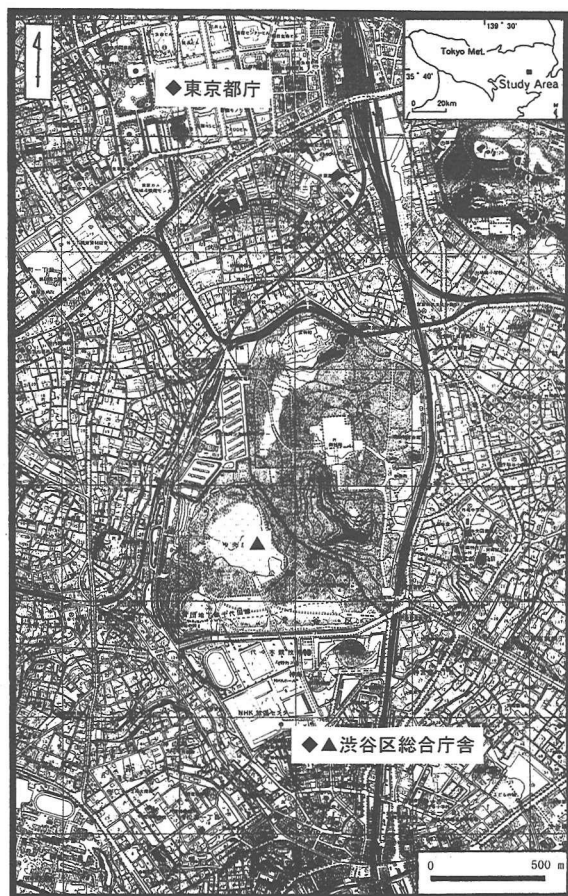
東京都の代々木公園(地上高度 50m の気温)、渋谷区総合庁舎屋上〔地上高度 20m〕(地上高度 50m の気温、熱赤外線画像)および東京都庁第一本庁舎屋上の鉄塔〔地上高度約 245m〕(熱赤外線画像)

(図 1)。

(3) 熱赤外線画像撮影装置

日本電子製サーモビューア(視野角 25°、測定波長 8～13 μm 、最小温度分解能 0.1℃、撮影インター

バル 10 分)



◆：熱赤外線画像撮影装置の設置場所

▲：タワーゾンデの繫留場所

図1 観測地域の概要

(4) 繫留気象タワーゾンデシステム

AIR Inc. 製繫留気象タワーゾンデシステム

(TSB-X 型) 地上高度 50m の気温

(5) 明治神宮・代々木公園の概要

明治神宮・代々木公園は、副都心から約 1000m 南方に位置し、東西に約 1000m、南北に約 1800m に広がる。総面積は約 $1.24 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ に及び、都内最大級の規模の緑地を形成している。

代々木公園は面積の 3 分の 1 を占める広い芝生と平均樹高が 10 ~ 20m 程度の高木から成る森林公園であり、明治神宮は北側の一部に広がる芝生地を除いて、そのほとんどが平均樹高 10 ~ 20m の常緑広葉樹林で覆われている。

各々の占める面積は以下のとおりである。

樹林面積 $8.27 \cdot 10^5 \text{ m}^2$

芝生面積 $4.13 \cdot 10^5 \text{ m}^2$

3. 結果および考察

観測日は、一般風の弱い、ほぼ快晴に近い夏型の天候であった。渋谷区総合庁舎は代々木公園から南に約 500m、東京都庁第一本庁舎は北に約 1000m 離れた位置にある。熱赤外線画像撮影装置は 2 台用い、東京都庁第一本庁舎からは明治神宮・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)、アスファルト舗装道路、コンクリート製の敷石を撮影した。

写真 1 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 2 は、写真 1 とほぼ同じ画角で撮影した熱赤外線画像である。熱赤外線画像撮影装置によりインターバル 10 分で連続撮影した。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 $\varepsilon = 1$ である。

(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¹⁰⁾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¹²⁾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。



写真1 東京都庁屋上から撮影した観測対象
(可視画像)

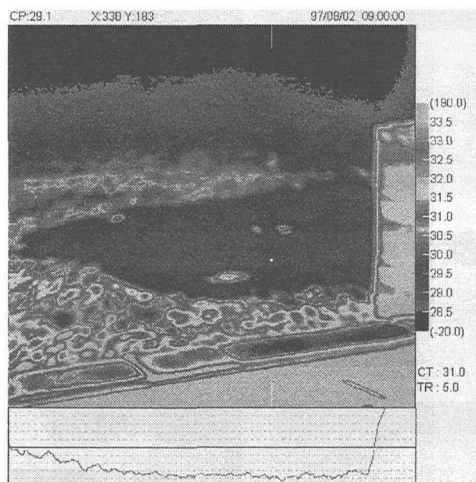


図2 東京都庁屋上から撮影した観測対象
(熱赤外線画像)



写真2 繫留気象タワーゾンデシステム
による観測風景

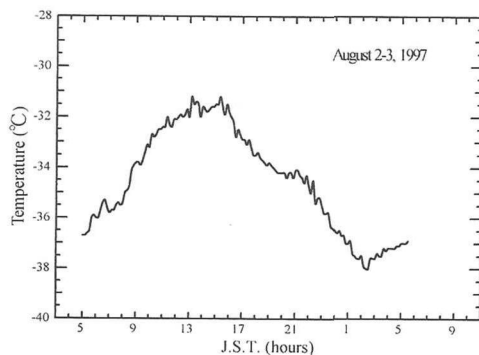


図3 天空温度

(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線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敷石までの距離が約 120m であるので、同じようにして熱赤外線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¹¹⁾ 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) 環境温度の補正

環境温度は、図 2 から谷¹¹⁾ の換算表によって天空温度を求め (図 3)、みかけの表面温度から減ずることによって補正した。

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

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 $5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/m²・K⁴)、 T_e : 真の表面温度 (K)、 T_a : 見かけの表面温度 (K)、 T_{sky} : 天空温度 (K)

(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、

Houghton²⁾ の補正式により、森⁸⁾ にならって熱赤外線の水蒸気による吸収を補正した。

$$T_e^4 = (T_a^4 + \int_0^x T^4 \frac{\partial x}{\partial x} dx) \cdot \frac{1}{\tau} \quad (2)$$

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

ここで T_e : 真の表面温度 (K)、 T_a : 見かけの表面温度 (K)、 x : 対象物までの距離 (m)、 T : 気温 (K)、 e : 水蒸気圧 (hPa)、 R : 水蒸気の気体定数 (J・kg⁻¹・K⁻¹)

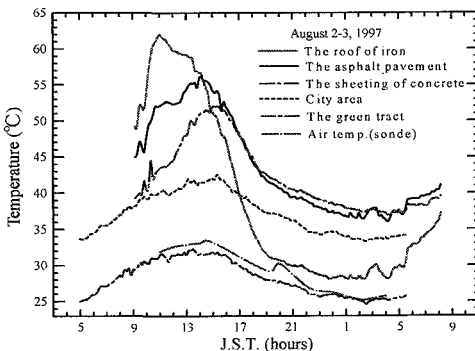


図 4 各種表面温度および気温の日変化

図 4 は、熱赤外線画像撮影装置によりインターバル 10 分で連続撮影した測定対象物の表面温度である。得られた熱赤外線画像は放射率の補正、撮影角度の補正、環境温度の補正、水蒸気の補正を行い表面温度データとして抽出した。測定対象物は影にならない平坦な場所を選定した。日中、代々木競技場の鉄製の屋根で太陽が天頂に達する前の 11 時付近に温度のピークが来ているのは、桐原、三上⁹⁾ の結果から 12:00 ~ 14:00 の時間帯は、その前後に比べ比較的风が強く風による冷却効果のためと考えられる。

最も表面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で最高温度が約 62.0 °C になった。次に温度が高くなるのはアスファルト舗装の道路で約 56.0 °C であった。同じように、コンクリート製の花壇の敷石で約 52.0 °C であった。

地上高度 50m の気温は、代々木公園内において繫留気象タワーゾンデシステムにより 30 秒間隔で連続測定した (写真 2)。測定されたデータは 30 秒ごとにパーソナル・コンピュータに送られ、解析にはデータを 10 分平均したものを用いた。データは風によって繫留気球が流されることで高度が変化した場合は除外して高度が一定になるようにした後、10 分平均したものを地上高度 50m の気温とした。

緑地の表面温度と 50m 高度の気温の日変化を比べると、日中 11:00 より夜間 0:00 までの時間で緑地の表面温度の方が気温よりも約 0.4 ~ 1.5 °C 低くなっていることがわかった。

また図 4 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、Nichol⁹⁾ は、これを熱慣性 (Thermal inertia) としている。

(5) 放散熱量計算

宇田川¹³⁾ にならって放散熱量計算を行うと次のようになった。

a) 物体表面から大気中に放散される熱量 q_1 は次のように表される。

$$q_1 = \sigma \cdot \varepsilon (T_0^4 - T_a^4) \quad (3)$$

ここで q_1 : 単位面積あたりの放散熱量 (W/m²)、 ε : 地表面の長波放射に対する放射率 (樹冠 0.98)、 T_0 : 物体表面の絶対温度 (K)、 T_a : 物体から離れた大気の温度 (K)、 σ : ステファン-ボルツマン定数 $5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/m²・K⁴)、

b) 大気其自然対流により物体表面から持ち去られる自然対流伝達熱量 q_2 は次のように表される。

$$q_2 = Hm(t_0 - t_a) \quad (4)$$

ここで q_2 : 単位面積から持ち出される熱量 (W/m^2)、 Hm : 平均自然対流熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) t_0 : 物体表面の温度 ($^\circ C$)、 t_a : 物体から離れた大気温度 ($^\circ C$)

c) 平均自然対流熱伝達率 Hm は次のように表される。

$$Hm = hm(t_0 - t_a)^{1/3} \\ = 1.364(t_0 - t_a)^{1/3} \quad (5)$$

ここで Hm : 平均自然対流熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)、 hm : 熱伝達率 $1.364 (W/m^2 \cdot ^\circ C^{1/3})$ 、 t_0 : 物体表面の温度 ($^\circ C$)、 t_a : 物体から離れた大気温度 ($^\circ C$)

d) 放散熱量 q_0 は次のように表される。

$$q_0 = q_1 + q_2 \\ = \sigma \cdot \varepsilon (T_0^4 - T_a^4) + 1.364(t_0 - t_a)^{1/3}(t_0 - t_a) \\ = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \{ (t_0 + 273)^4 - (t_a + 273)^4 \} + 1.364(t_0 - t_a)^{1/3}(t_0 - t_a) \quad (6)$$

ここで

$$\alpha_c = 1.364(t_0 - t_a)^{1/3}$$

$$\alpha_r = [5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \{ (t_0 + 273)^4 - (t_a + 273)^4 \}] / (t_0 - t_a)$$

とくと放散熱量 q_0 は次のようになる。

$$q_0 = (\alpha_r + \alpha_c) \cdot (t_0 - t_a) \quad (7)$$

(7) 式の結果をグラフにしたものが図5である。

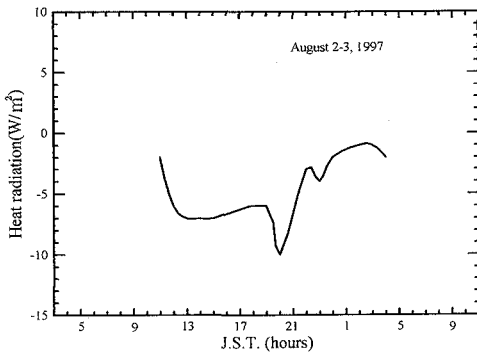


図5 緑地から高度 50m の大気への放散熱量の日変化

日中、緑地から 50m 高度の大気へ放散する熱量は平均すると約 $-7 W/m^2$ 、日没後に放散熱量は増大し、

20 時で最大 $-10 W/m^2$ であった。夜間は平均すると約 $-3.5 W/m^2$ の放散熱量があり、これらから緑地は大気の気温上昇に対する抑制効果があることがわかった。

4. 結論

最も表面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で最高温度が約 $62.0 ^\circ C$ 、ピークは 11:00 であった。次に温度が高くなるのはアスファルト舗装の道路で約 $56.0 ^\circ C$ 、ピークは 14:00 であった。同じようにコンクリート製の花壇の敷石で約 $52.0 ^\circ C$ 、ピークは 15:00 であった。

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熱慣性によるものである。

緑地の表面温度と 50m 高度の気温の日変化を比べると、日中 11:00 より夜間 0:00 までの時間で緑地の表面温度の方が気温よりも約 $0.4 \sim 1.5 ^\circ C$ 低くなっていた。

日中、緑地から 50m 高度の大気へ放散する熱量は平均すると約 $-7 W/m^2$ 、日没後に放散熱量は増大し、20 時で最大 $-10 W/m^2$ であった。夜間は平均すると約 $-3.5 W/m^2$ の放散熱量があった。放散熱量が負の値をとることから緑地は昼夜とも 50m 上空大気を冷却することがわかった。

これらから、あまり大きくはないが、都市内の大規模緑地による大気の気温抑制効果が期待できる。

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。代々木公園内の風向・風速計および自記温度・湿度計の設置において多大なるご協力を頂いた牛山素行博士（京都大学防災研究所）に深甚なる謝意を表します。タワーゾンデシステムの設営にあたりご協力を頂いた渋谷区役所総務部管財課の方々および代々木公園内での集中観測にあたりお世話になりました東京都立代々木公園管理事務所の市川則彦氏および川勝 修氏に感謝致します。また観測を手伝って頂いた国立環境研究所の一ノ瀬俊明博士はじめ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) 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, 67 卷 A-8 号, pp. 518-529, 1994.
- 2) Houghton, J., T.: *The Physics of Atmosphere*, Cambridge Univ. Press, London, pp.31-45, 1977.
- 3) Kiriara, H. and Mikami, T.: Diurnal variation of potential temperatures in a large urban green tract, *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, Vol.33, pp.33-43, 1998.
- 4) 桐原博人, 三上岳彦: 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, 環境システム研究, Vol.26, pp.493-499, 1998 年 10 月.
- 5) 桐原博人, 三上岳彦: 夏季の都市内大規模緑地が形成するクールアイランドの鉛直構造—明治神宮・代々木公園を事例として—, 環境システム研究, Vol.27, pp.707-714, 1999 年 10 月.
- 6) 桐原啓真, 三上岳彦: 夏季の都市内大規模緑地が形成するクールアイランドの温位構造, 環境システム研究, Vol.28, pp.323-328, 2000 年 10 月.
- 7) 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.
- 8) 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, Vol.11, pp. 31-40, 1995.
- 9) Nichol, J., E.: High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city, *J. Appl. Meteor.*, Vol.35, pp. 135-146, 1996.
- 10) 杉本荘一, 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 巻 9 号, pp.39-42, 1994.
- 11) 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, Vol.11, pp. 31-40, 1995.
- 12) 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, Vol.11, pp. 1-11, 1995.
- 13) 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, Vol. 2, pp. 46-53, 1991.

THE ESTIMATION OF THE AMOUNT OF HEAT RADIATION FROM LARGE-SCALE GREEN TRACT BY THERMAL INFRARED IMAGES

Hiromasa KIRIHARA and Takehiko MIKAMI

Using the portable thermal infrared camera, thermal infrared images were taken by an interval for ten minutes from Meiji-shrine/Yoyogi-park that was a large-scale green tract, and its peripheral area. We recognized a difference of the thermal inertia caused by the green tract and the artificial heat structure with the 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 8 °C at the maximum in the daytime. The green tract is the lowest in the daytime, and the surface temperature becomes high in the sheeting of concrete, the asphalt pavement, order of the iron roof as follows. The amount of heat radiation in the daytime became -7 W/m^2 by a maximum when we calculated it from average temperature of the ground altitude of 50m in the town area and the surface temperature of the green tract. And it became -10 W/m^2 by maximum in the nighttime. From these things, it became clear that mitigation effect for air temperature rise of the large-scale green tract was big.