

自然教育園におけるクールアイランド

三上岳彦¹・菅原広史²・成田健一³・清水昭吾⁴・萩原信介⁵

Cool island phenomena in the Institute for Nature Study

Takehiko Mikamiⁱ・Ken-ichi Naritaⁱⁱ・Hirofumi Sugawaraⁱⁱⁱ・
Syogo Shimizu^{iv} and Shinsuke Hagiwara^v

はじめに

都市温暖化は地球温暖化よりも早いペースで進んでおり（気象庁, 2001）, 熱帯夜による健康被害などについての研究も進められている（Genchi and Ihara, 2009）. 一方, 都市内に存在する公園等の比較的大規模な緑地では, 周辺市街地よりも低温となるクールアイランド現象が存在する（丸田, 1972）. このため都市内緑地に対して都市温暖化への緩和効果が期待されている. クールアイランド現象についてはこれまでの研究により, 夏季における緑地内外での気温差（三上, 1982）やその季節変化（菅原ら, 2006）, 緑地から周辺市街地への冷気にじみ出し現象（成田ら, 2004）が明らかとなっている. 都市温暖化対策という視点で都市緑地の重要性をとらえた場合, 今後は次の点からの研究が必要であろう. すなわち, 冷気にじみ出し現象の緑地規模への依存性（どれくらいの広さの緑地であればにじみ出しが発生するか?）や熱収支的な評価（市街地を冷却する能力はどれくらいか?）である. これらを規模の異なる複数の緑地について調査・比較することで, 今後の都市緑化政策に必要な知見を蓄積することができる. また個々の緑地の特性を考えた場合, 規模のみならず植生種や地形などとクールアイランド現象との関連性についても検討を行う必要がある.

以上の背景から自然教育園内においてクールアイランド調査を 2007 年より行っている. 本報告では 2009 年夏季（7~9 月）に行った集中観測の結果を報告する.

¹ 帝京大学, Teikyo University

² 防衛大学校, National Defense Academy of Japan

³ 日本工業大学, Nippon Institute of Technology

⁴ 首都大学東京, Tokyo Metropolitan University

⁵ 国立科学博物館附属自然教育園, Institute for Nature Study, National Museum of Nature and Science, Tokyo

調査概要

1. 自然教育園内および周辺市街地における気温分布調査

図 1 に示す地点において気温の測定を行った。自然通風型放射シェルターをつけた自記温度計(T&D RTR-52)を用い 1 分ごとの気温を測定した。放射シェルターを用いることで日射によるセンサー加熱の誤差を最小限に抑えている。測定高度は地上 2.5m を基準としたが、樹木の繁茂などの周辺環境や盗難防止のため地点ごとに多少のばらつきがある。また自然教育園内のタワーにおいて気温鉛直分布の測定も行った。測定高度は地上 0.5m から 17.6m までの間でおおよそ 2m ごとに計 11 高度である。

2. にじみ出し冷気の調査

自然教育園から周辺市街地へにじみ出す冷気をとらえるため、自然教育園の南端および北端の境界付近 2 箇所風向・風速の測定を行った(図 1 の◎印)。同地点では前述の気温測定も行っている。測定高度は地上 1.5m とし、超音波風速計 (Gill windsonic) により 1 秒ごとの測定値の 1 分平均値を記録した。にじみ出しのような微風(おおよそ 1m/s 以下)を捉えるため、音波の伝播時間により風速を測定する超音波風速計を用いた。

3. 樹冠上における熱流測定

自然教育園内のタワー上端において、上空大気と樹林層との熱交換量を測定した。超音波風速計(Kaijo SAT-550)および水蒸気変動計(Licor LI750)により乱流変動の測定を行い、顕熱輸送量、潜熱輸送量、二酸化炭素輸送量を 30 分ごとに算出した。輸送量の算出においては地形による気流変形の補正 (McMillen, 1988) および WPL 補正 (Webb, 1980) を行っている。また正味放射計(Kipp&Zonen CNR-1)により上下それぞれの方向の長・短波放射量も測定した。

4. 航空機観測 (ヘリコプター) による表面温度測定

ヘリコプターに搭載した放射温度計 (NEC 三栄 TS7302) により自然教育園および周辺市街地の熱画像 (赤外画像) を撮影した。撮影日時は 8 月 12 日の 13 時 20~25 分である。ヘリコプターは地上約 900m を飛行したので、赤外画像の地上解像度は 3m である。地上とヘリコプターの間で二酸化炭素・水蒸気による赤外線吸収の影響により熱画像の温度値には誤差が含まれる。ここでは LOWTRAN7(Kneizys, 1988)によりその効果を補正している。

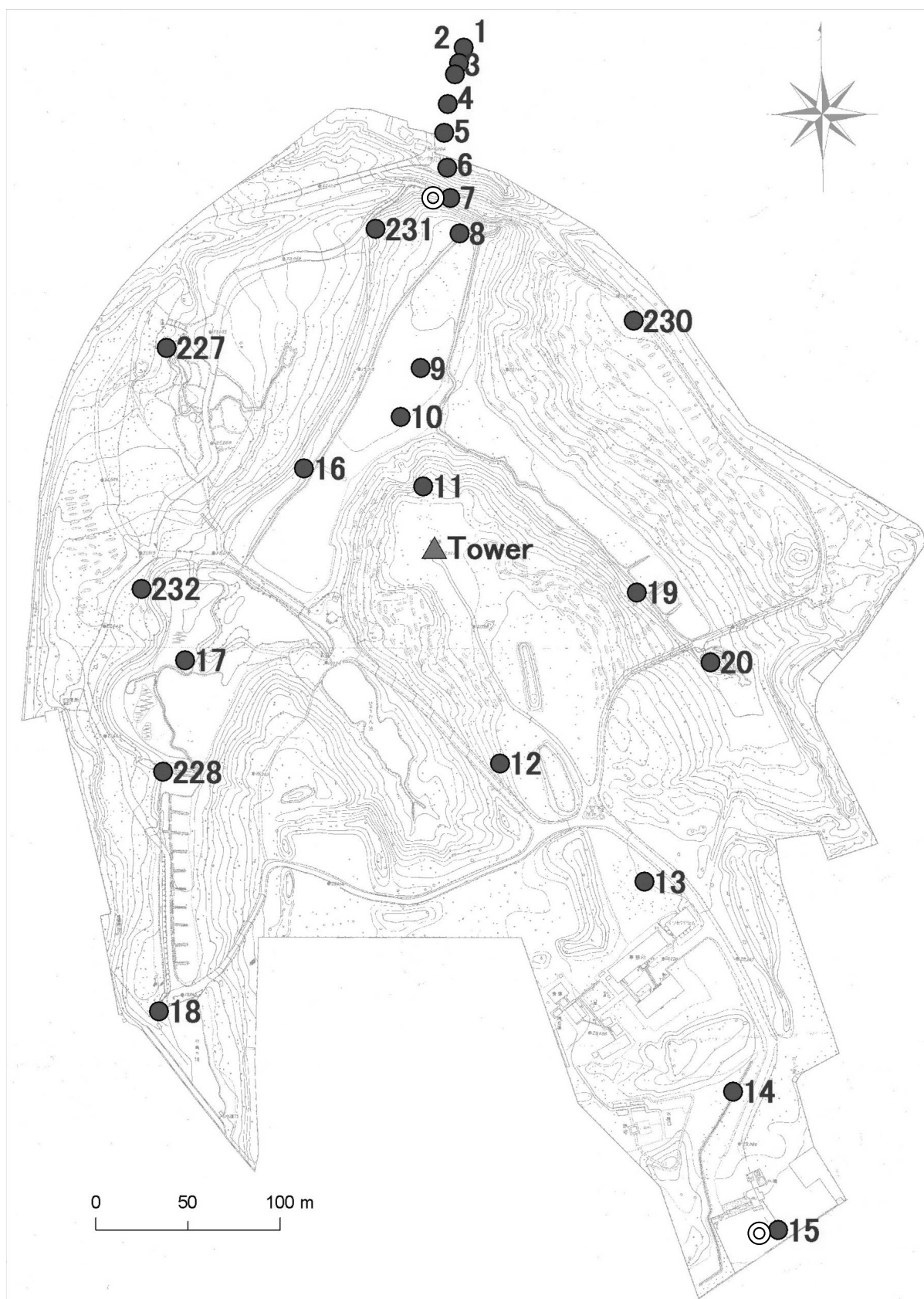


図 1 気温調査地点. ●印が地上気温観測地点. ▲印は鉛直分布および熱流測定を行ったタワー.
一. ◎印はにじみ出し風速の測定地点(南地点:Sと北地点:N).

気温分布にみるヒートアイランド緩和効果 (クールアイランド)

本節では自然教育園内および北側市街地で行った気温の観測結果について述べる。図 2～5 は、2009 年 8 月に大手町で最高気温を記録した 8 月 16 日の自然教育園内外の気温分布である。ここでは日中から夜間にかけての気温分布の事例として、12 時から翌日 0 時まで 4 時間おきに分布を示した。なお、図 1 における観測点 1 は欠測であった。

12 時の分布をみると (図 2) , 北側市街地および南側の地点 15 において高温となっている。地点 15 は市街地との境界付近であることと、樹林から外れ日中には直射日光が地地面に当たることが高温となっている理由であろう。園内では日当たりの良い水生植物園 (地点 17) 付近で気温が高くなっているが、最大で 4°C 程度市街地と比べて低温となっている。これは、樹木による日射の遮蔽や蒸発散作用によるものであると考えられる。日中の自然教育園内の気温分布に関しては、菅原 (1979) が移動観測による結果を示しているが、今回の結果はそれと同じような特徴を持つ気温分布であった。

16 時になると (図 3) , 市街地では依然として気温が高いものの、園内では周囲より標高の低い湿地 (地点 10) 付近に低温域がみられるようになり、北側の土手を境に市街地と大きな気温差が生じている。20 時には (図 4) , 市街地側でも気温が下がることで気温差は小さくなるが、自然教育園に近づくほど気温が低くなるという気温分布になっている。また自然教育園全体でみると、南側で気温が高く、谷沿いで気温が低くなっている。この日は晴天で風も弱かったため、夕方以降は放射冷却による園内での冷気の生成と低地への冷気の堆積が進んだものと考えられる。0 時になると (図 5) , 湿地付近を中心として西側の谷沿いに低温域が広がる様子をはっきりと現れている。また園内と市街地との気温差が日中と比べるとかなり小さくなっており、園内の冷気が市街地側へにじみ出すことで市街地の気温を下げていることが示唆される。低地への冷気蓄積とにじみ出しに関しては次節で詳しく述べる。



図 2 2009 年 8 月 16 日 12 時の気温分布

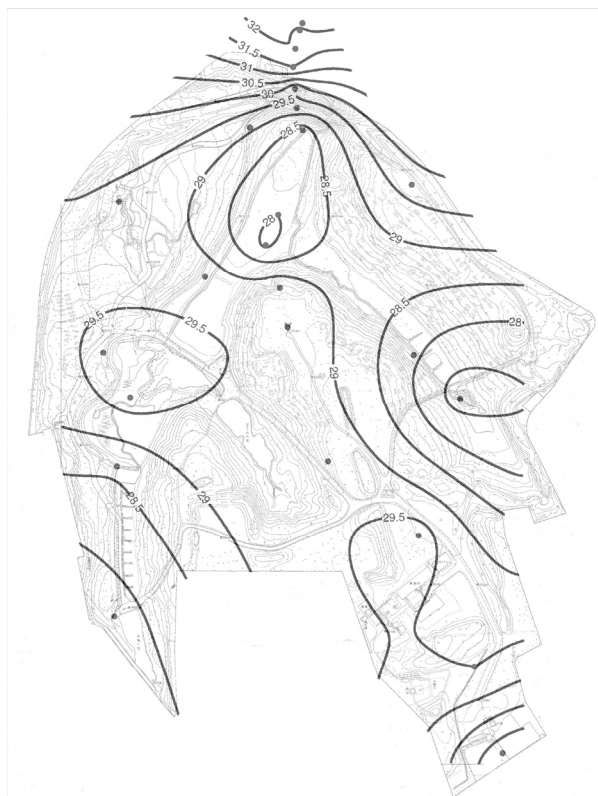


図 3 2009 年 8 月 16 日 16 時の気温分布



図 4 2009 年 8 月 16 日 20 時の気温分布



図 5 2009 年 8 月 17 日 0 時の気温分布

夜間の冷気にじみ出し現象

前節において自然教育園が周辺市街地よりも低温であることが明らかとなった。次に自然教育園内の冷気が周辺へ流出する（にじみ出す）様子について述べる。この冷気にじみ出しが最も明確に観測されたのは 9 月 10 日～11 日の夜間である。図 6 に自然教育園の南北端 2 箇所で測定した風向風速と気温を示す。南地点では 10 日 23 時ごろを境に、それまで大きくばらついていた風向が北西となった。北西の風向は自然教育園から市街地へ向かう風である。それと同時に気温も 1 時間でおおよそ 2°C という急激な低下を示している。これは自然教育園内からの低温な空気が観測地点を通過したことを表しており、冷気が周辺市街地へ流出していることがわかる。ただし風速は 0.1m/s 以下と非常に弱く、人間の感覚で言えばゆっくりと「にじみ出す」程度の流れである。このとき、上空（タワー上端）での風速も 1m/s 以下と非常に弱風であった。北地点でも同時刻に同様の現象（南風）がみられていることから、この現象は、一般風が自然教育園を通り抜けているわけではなく、自然教育園から周囲へ発散する流れであることがわかる。

市街地との境界部分で見られたこの冷気は、自然教育園内のどこで発生しているのだろうか？図 7 はタワー上端での気温を基準とした各観測点の相対的な気温分布について、その時間変化を見たものである。図 7A は横軸が時刻（時）で、縦軸は南北方向の位置である。自然教育園内のタワーから北方向に市街地（境界から約 50m ）までの気温分布を表している。図下端がタワー、上端が市街地にあたり、図中央は園内でも地形的に最も低い場所となっている。夕方、まずこの低地に低温域が発生し、徐々に周囲へひろがってゆく様子がみられる。冷気がにじみ出した 23 時以降は、温度の急変域（等温線の集中帯）が自然教育園から市街地側へ移動し、観測範囲外にまで達している。これは、まず低地に冷気が蓄積し、谷を埋め、市街地へ流出していることを表している。図 7B は縦軸が相対高度で 12m 以上はタワーで測定された気温、 12m 以下は斜面を利用して測定したものである。図 7A と同様にタワー上端での気温を基準とした温度差を示しており、冷気が低地から徐々に厚みを増している様子がわかる。冷気がにじみ出した 23 時以降はタワー上端にまで冷気層が達している。

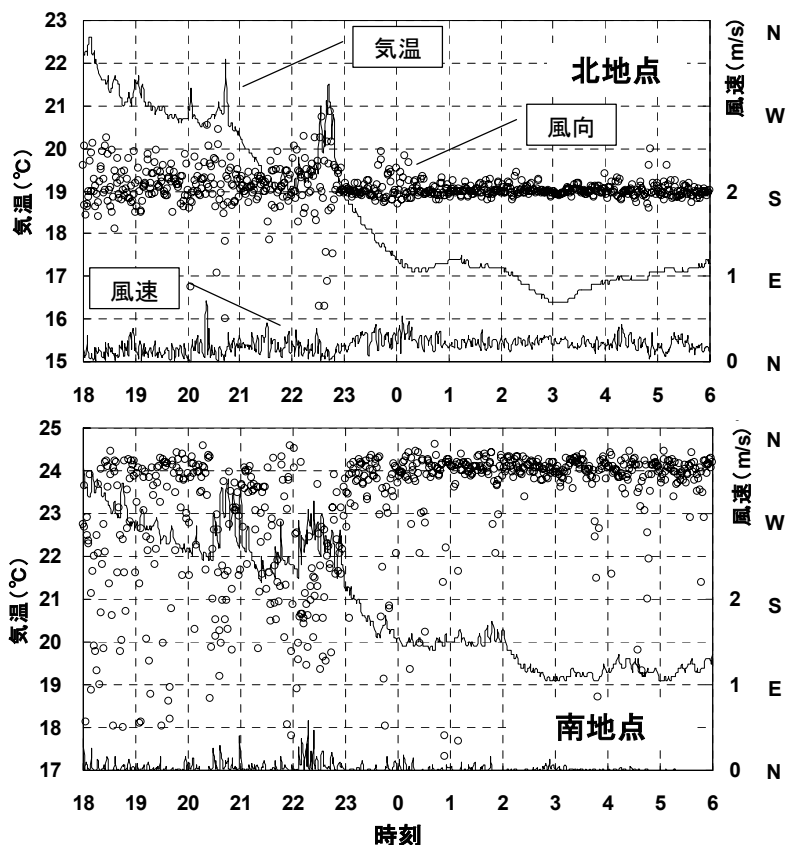


図 6 自然教育園の南北端(図1の◎印)で測定された気温と風向風速. 2009年9月10日18時~11日6時.

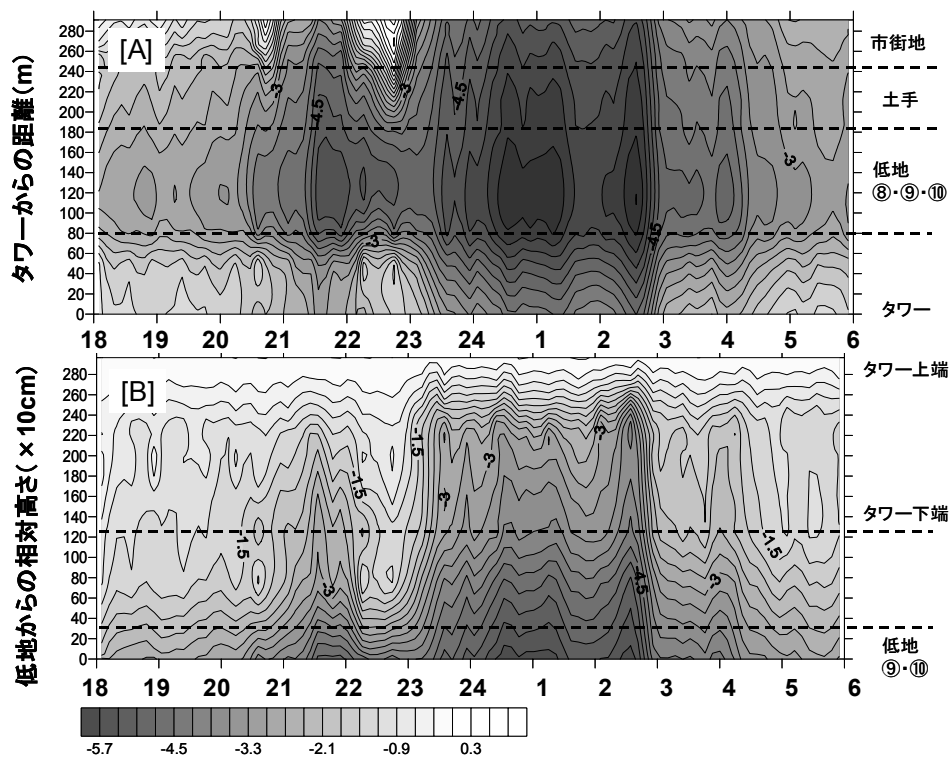


図 7 気温分布(A:南北方向, B:鉛直方向)の時間変化. タワー上端の気温を基準とした相対値で示す. 図右の番号は図1に示した気温測定地点の番号と対応する. 2009年9月10日18時~11日6時.

日中の表面温度分布と熱収支

前節では夜間に、市街地への冷気にじみ出しが発生していることを述べた。では昼間はどうか？冷気にじみ出しは上空風が弱風の際に出現しており、一般的に風の強くなる昼間については、にじみ出しを検出することが困難である。また、夜間は長波放射の発散により冷却（放射冷却）が生じているが、昼間は顕熱・潜熱による放熱が主となるため、冷気形成のメカニズムも異なる。前々節で見たように昼間も自然教育園内の方が市街地よりも低温であるので、冷気の流出は存在すると考えられるが、それを夜間と同じ「冷気にじみ出し」というターミノロジーで表現してよいかどうか、慎重に検討する必要がある。

ここでは冷気にじみ出しではなく、日中の自然教育園内外の温度差について、熱収支の観点から述べる。図 8 はヘリコプターから撮影した熱画像で表面温度を示している。市街地のビルは 40°C 以上がほとんどであるが、自然教育園の植生は 30°C 以下である。

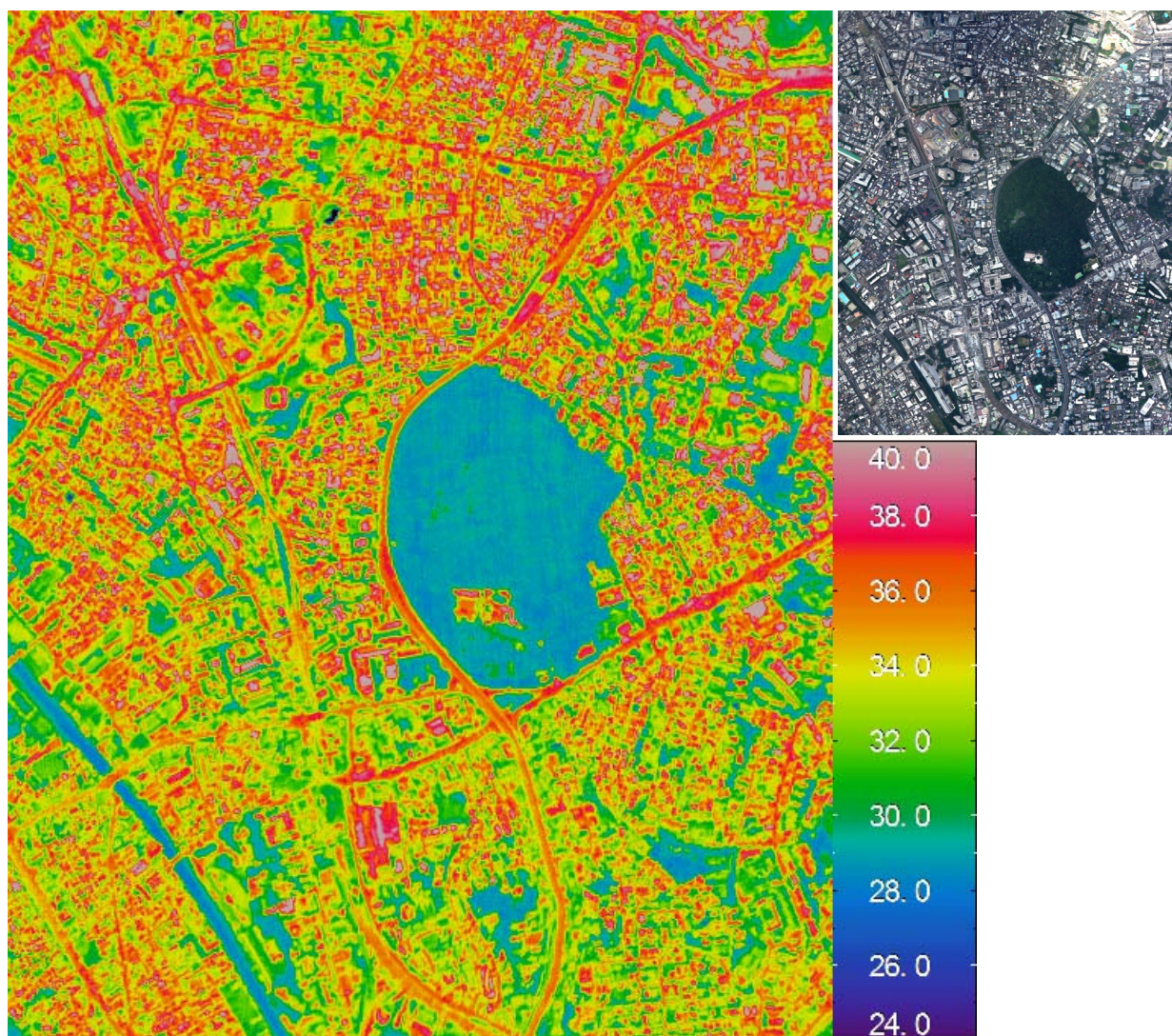


図 8 ヘリコプターから撮影した熱画像と可視画像(右上), 2009 年 8 月 12 日 13 時 23 分.

図 9A にはタワーの樹冠上で測定された気温、および樹冠表面温度を示す。樹冠表面温度は上向き長波放射から算出した値と図 8 の熱画像から読み取った値の 2 種類を示す。熱画像から読み取った値は、マークの大きさが標準偏差（自然教育園内のばらつき）に対応している。2 種類の方法で得られた樹冠表面温度はほぼ一致している。午前中は気温と樹冠表面温度がほぼ同じであるが、午後になると気温の方が高温となり大気を冷却していることがわかる。図 9B には樹冠上で計測された顕熱(H)・潜熱輸送量(LE)、正味放射量(R_{net})を図 9C には二酸化炭素輸送量を示す。潜熱輸送量は少なくとも顕熱輸送量の 2 倍以上（日平均のボーエン比 $H / LE = 0.36$ ）ある。植生層は太陽および上空大気からの放射を受け、その幾らかを反射日射や長波放射と放出する。植生層が正味で受け取る放射エネルギーが正味放射量であり、このエネルギーは顕熱・潜熱輸送あるいは植生層への貯熱に分配される。自然教育園では正味放射量のおよそ 4 割が潜熱輸送量に分配されており、（蒸発のない市街地と比較して）蒸発潜熱が大きいことが日中低温となる原因であることがわかる。ただし、この正味放射に占める潜熱輸送量の割合は、明治神宮の森（神田ら、1997）での 7 割、名古屋市内の 2 次林（小栗、檜山、2002）での 6 割と比較すると小さめの値である。その理由についてはさらなる調査検討が必要であるが、土壌水分の違いや計測手法の技術的な問題（インバランス問題、Moore et al., 1996）などが原因として考えられる。

なお、図 9C に示した二酸化炭素輸送量では、日中に吸収（マイナスの値）が見られる。ピークの値は $-1.65 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と前述の名古屋の 2 次林と同程度の吸収量である。しかし夜間の放出が大きく、日平均の輸送量にするとプラス（放出）となる。これは集中期間中のほとんどの日がそうであった。放出となる理由は土壌呼吸に加えて、市街地からの高二酸化炭素気塊の流入など人為影響も考えられる。植生による二酸化炭素吸収は地球温暖化防止の一策として考えられているが、その場合重要なのは年間トータルでの吸収量である。したがって二酸化炭素吸収については今後データを蓄積し改めて検討したい。

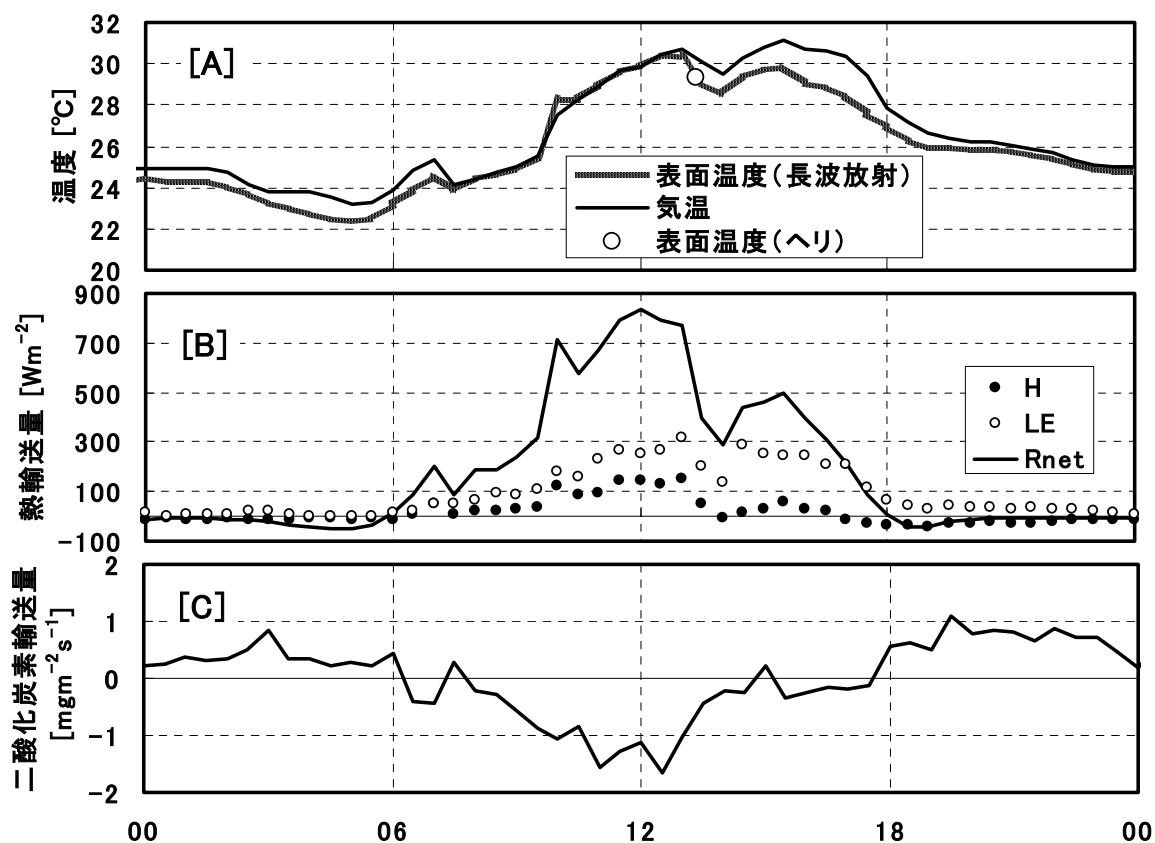


図 9 樹冠上での[A]温度, [B]熱輸送量, [C]二酸化炭素輸送量. 2009年8月12日. [A]の丸印は熱画像から読み取った値. [B]には顕熱輸送量(H), 潜熱輸送量(LE), 正味放射量(R_{net})を示した. 熱輸送量と二酸化炭素輸送量は樹冠から上空へ輸送される場合をプラスとしている.

まとめ

都市温暖化に対する緩和策として自然教育園がもつクールアイランド効果を明らかにするため調査を実施した. 気温観測の結果から, 日中は自然教育園の内外で最大 4°C程度の気温差が見られ, 気温分布は特に夜間に標高の低い部分で低温となる傾向を示した. 夜間には冷気のにじみ出しがみられ, 冷気は市街地側の観測範囲外まで達していた. ヘリコプターから撮影した熱画像では市街地と自然教育園との間に 10°C以上の表面温度差が見られた. この低温な樹冠は蒸発潜熱の影響で形成されていた. 自然教育園では正味放射量の約 4 割が蒸発潜熱として消費されていた.

本報告では 2009 年夏季に行った集中観測の結果を示した. 計測の一部は継続して実施しており, 今後, データの蓄積とともにクールアイランドの季節変化等の解析を行う予定である.

参考文献

小栗秀之, 檜山哲哉, 2002: 都市二次林における CO₂・熱フラックスの季節変化, 水文・水資源学会誌, **15**, 264-278.

Genchi, Y. and T. Ihara, 2009: Environmental impact assessment of urban air temperature increase based on endpoint-type life cycle impact (Part 1) - Its framework. *Proc. 7th Int. Conf. Urban Climatology, Yokohama Japan*. B18-4.

神田学, 森脇亮, 高柳百合子, 横山仁, 浜田崇, 1997: 明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価 (1) 1996 年夏期集中観測, 天気, **44**, 713-722.

気象庁, 2001: 20 世紀の日本の気候, 気象庁, 116pp.

Kneizys, F. X., E. P. Shettle, L. W. Abreu, J. H. Chetwynd, Jr., G. P. Anderson, W. O. Gallery, J. E. A. Selby, and S. A. Clough, 1988: User's guide to LOWTRAN 7. Air Force Geophysics Laboratory Report, No.AFGL-TR-88-0177.

丸田頼一, 1972: 公園緑地の都市自然環境におよぼす影響, 都市計画, **69・70**, 49-77.

McMillen, R.T., 1988: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain, *Bound.-Layer Meteor.*, **43**, 231-245.

三上岳彦, 1982: 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 **35**, 21-36.

Moore, K.E., Fitzjarrald, D.R., Sakai, R.K., Goulden, M.L., Munger J.W. and Wofsy, S.C., 1996: Seasonal variation in radiative and turbulent exchange at a deciduous forest in central Massachusetts, *J. Appl. Meteorol.* **35**, 122-134.

成田健一, 三上岳彦, 菅原広史, 本條毅, 木村圭司, 桑田直也, 2004: 新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみ出し現象, 地理学評論, **77(6)**, 403-420.

菅原広史, 成田健一, 三上岳彦, 本條毅, 石井康一郎, 2006: 都市内緑地におけるクールアイランド強度の季節変化と気象条件への依存性, 天気, **53**, 393-404.

菅原十一, 1979: 自然教育園の微気象 (4) 日中の気温および湿度分布, 自然教育園報告 **9**, 33-42.

Webb, E. K., G. I. Pearman and R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, *Quart. J. R. Met. Soc* **106**, 86-100.