

自然教育園の森林は周辺市街地を どれくらい冷やしているか？

菅原広史¹・清水昭吾²・成田健一³・三上岳彦⁴・萩原信介⁵

How much do greens in Institute for Nature Study cool surrounding town?

Hirofumi Sugawara¹, Shogo Shimizu², Ken-ichi Narita³,
Takehiko Mikami⁴ and Shinsuke Hagiwara⁵

はじめに

夏季の暑熱環境を緩和するヒートアイランド対策として、緑地からの冷気流を活用する方法がある。すでに多くの既往研究（例えば成田ら，2004）においてその効果が議論されている。しかしながら、これまでの研究は気温分布をもとに議論しているため、緑地からの冷気流による「冷却量」を的確に捉えているとはいえない。すなわち、通常気温測定で我々が得るものは、緑地からの冷気流が市街地の地表面や事物と熱交換を行い、すでに熱平衡になった結果である。例えば緑地からの冷気は、アスファルト面上で加熱され市街地の気温になじむ。この遷移過程は通常気温測定では捉えることができないため、気温分布で見るとアスファルト面上は低温ではない。しかしながら、そのアスファルト面上の空気塊も緑地による冷却を受けていることは事実である。このように緑地が市街地に対してどれほどの冷却を行ったのかは、気温分布だけからは必ずしも知ることはできない。

公園緑地内外での気温分布から我々が読み取れることは、冷気存在するエリアがどこか？ということである。歩行者がその低温域に入れば恩恵を受けることができることから、気温分布の把握は価値がある。同時に気温分布は緑地の熱的特徴を表す基本的な項目である。一方で、市街地における緑地の価値を評価することを考えた場合、冷却量の把握も必要である。

本報告では自然教育園において行った気象観測の結果から、夏季の自然教育園による市街地の冷却量の算出を試みる。樹林キャノピーにおける熱収支を解析するが、その定量的な評価は必ずしも容易ではなく、郊外の森林においても様々な研究がなされている。これら森林での既往研究で指摘されている問題点として、森林上端における夜間の鉛直移流量（Lee, 1998）および検査体積側面での水平移流量（Aubinet *et al.*, 2010）の測定精度である。本研究ではこれらの2項目については合算値の推

¹ 防衛大学校, National Defense Academy

² 首都大学東京, Tokyo Metropolitan University

³ 日本工業大学, Nippon Institute of Technology

⁴ 帝京大学, Teikyo 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

定を行うことで問題を回避した。

測定概要

主な測定項目は前報（菅原ら, 2011; 清水ら, 2011）と同様であるので、概略のみを記す。園中央に設置されたタワー上端（地上高 20m, 樹冠から約 6m）に超音波風速計（Kaijo SAT-540）、水蒸気・二酸化炭素変動計（Licor LI-7500）を設置し、10Hz での乱流計測を行った。また、同高度に正味放射計（Kipp&Zonen CNR-1）も設置し、放射フラックスの測定（1分ごと）も行った。また園の外周上の東西南北 4 地点では超音波風速計（GILL windsonic）により風速、および気温（T&D RTR-52A）を測定し、園内の数十地点で気温の測定も行った。測定は 2009 年 7 月より現在も継続中であり、本報では 2009 年および 2010 年夏季の測定結果を使用する。

解析方法

園全体の樹林キャノピーを対象とした検査体積を設け、その熱収支を解析する。園内の地形には起伏があるが、ここでは考慮せず検査体積の上端面も地形に沿って起伏があると考ええる。また、土壌層は検査体積に含めない。図 1 に示す熱フラックスは、検査体積から園外への向きを正とする。検査体積での熱収支は以下の式で書ける。

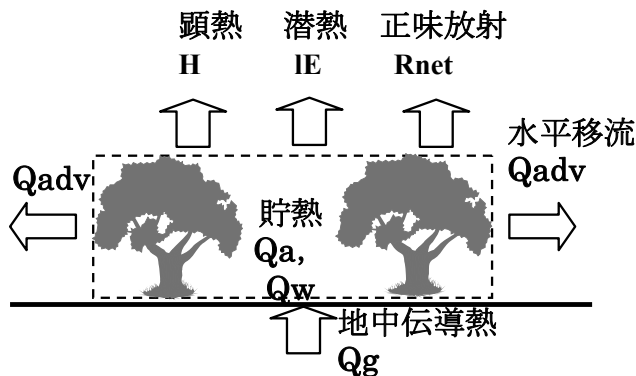


図 1 熱収支の概念図と記号の定義.

$$H + IE + R_{net} + Q_g + Q_{adv} + Q_a + Q_w = 0 \quad (1)$$

この式から残差として検査体積側面での水平方向の熱輸送量（式（1）中では Q_{adv} ）を求め Q_{res} とする（間接評価）。 Q_{adv} は検査体積側面での水平方向の移流フラックスと乱流フラックスの合算値である。樹冠での鉛直方向の熱輸送量 H と蒸発潜熱量 IE は乱流計測データから渦相関法を用いて算出し、正味放射量 R_{net} は樹冠での正味放射計による測定値を用いた。樹林内の空気塊による貯熱 Q_a 、植生（幹と葉）による貯熱 Q_w および林床の地中への貯熱 Q_g は以下の式で算出した。

$$Q_a = c_a \rho_a (1 - R_w) h_w \frac{\delta T_a}{\delta t} \quad (2)$$

$$Q_w = c_w \rho_w R_w h_w \frac{\delta T_w}{\delta t} + c_r \rho_r V_r \frac{\delta T_r}{\delta t} \quad (3)$$

$$Q_g = c_g \rho_g d \frac{\delta T_g}{\delta t} \quad (4)$$

ここで c は比熱, ρ は密度, R_w は単位面積あたりに占める樹木の面積割合, h_w は樹木層の厚さ (検査体積の厚さ) を表す。 $\delta T/\delta t$ は温度の時間変化率である。添え字 a, w, g はそれぞれ大気, 樹木, 地面を表す。 V_r は単位面積当たりの枝葉の体積であり, 日本の森林では 10 ~ 20% であることからここでは 15% とした。 d は地中温度の制動深であり, ここでは夜間の冷却過程を考えるため数時間程度の温度変化が到達する深さ (1cm) とした。自然教育園の樹林は樹冠が発達しており, 林床から空はほとんど見えない。したがって, 樹冠より下の層では夜間であれば幹, 葉, 土壌が放射平衡になっていると考えられる。そこでここでは樹木および地面の温度として園内の平均気温を用いることとした。

また移流量は園内外の気温差と風速を用いた以下の式でも評価し Q_{adv} とする (直接評価)。

$$Q_{adv} = c_p \rho h L (T_{green} - T_{urban}) U / S \quad (5)$$

c, ρ は大気の比熱および密度, h は検査体積の高さ, L は検査体積底面の外周長 (園の外周とした), S は検査体積の底面積である。 T_{green}, T_{urban} は園内外の代表気温で, T_{green} は園内 24 地点での測定値の平均, T_{urban} は東京都の大気汚染常時監視局 (白金) での測定値を用いた。 U は検査体積側面での検査体積に出入りする成分風速である。ここでは地形が南北に傾斜していることと, このエリアでは夏季の主風向が南であることから, U として園の南北端 2 地点で測定された値の平均値を用いた。ここで検査体積上面での移流は陽には扱わなかったが, 質量の収支は閉じることから Q_{adv} には上面での輸送量も含むことになる。例えばにじみ出し時のように, 地上レベルで見たときに発散となっても, 上端 (樹冠上) ではそれを補償する流入 (下降流) が存在する。下降流により流入する空気塊が市街地の代表気温を有していると仮定し, T_{green}, T_{urban} として園内外の代表気温を用いた。以上, 評価はいずれも 30 分平均値を用いて行った。水平方向の熱輸送について, 2 つの独立した推定 (Q_{adv} と Q_{res}) を行い, 両者が一致した時を精度の良い推定として採用する。

にじみだし冷気の厚さ

検査体積の高さとして, 夜間に市街地へにじみ出す冷気の厚さを用いることとする。以下の方法で冷気流れの厚さを求めた。2010 年夏期に園外周の南端地点において気温の鉛直分布を測定した。測定は園内の気温を測定しているものと同種の温度計をロープで木から吊り下げる方法である。16, 14, 12, 10, 8, 6, 4, 2m の 8 高度で 1 分ごとの測定を行った。最上点 (16m) はほぼ樹冠上端である。図 2 は 2010 年 8 月 29 - 30 日の南北端地点での風と気温の時系列である。この日は夕方 18 時ごろから発散風向 (北端地点で南風, 南端地点で北風) となっている。特に午前 0 時ごろから 2 時ごろまで

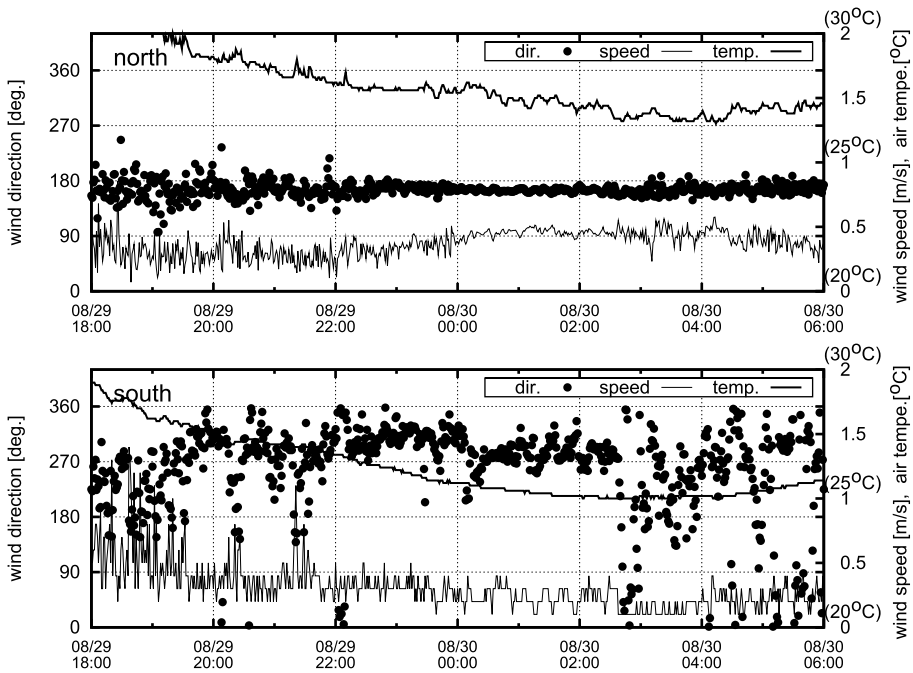


図2 にじみ出し発生夜(2010年8月29～30日)の風向, 風速, 気温. 園の南端および北端での測定値.

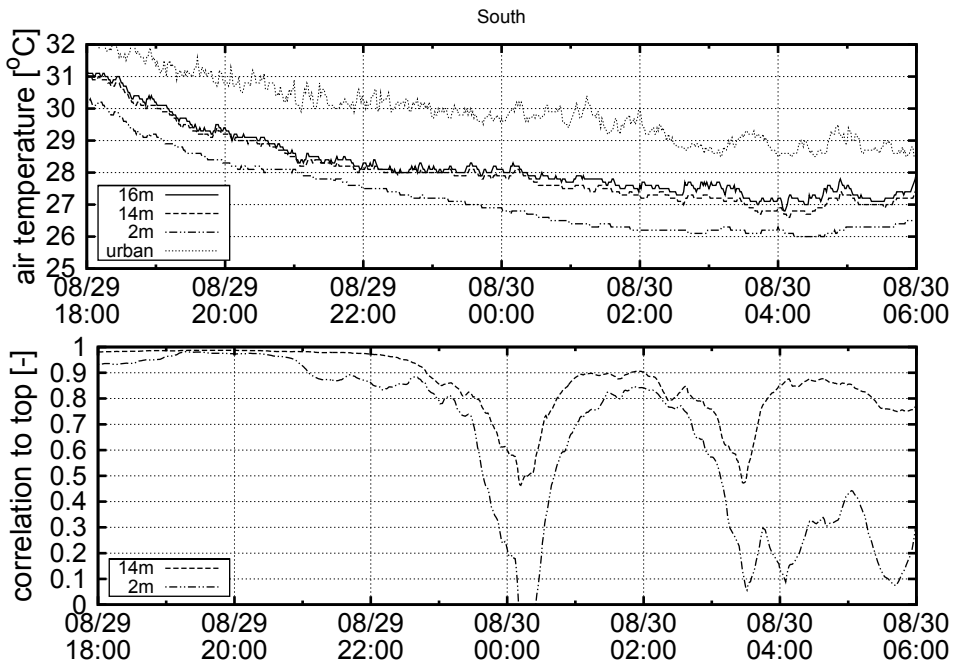


図3 にじみ出し発生夜(2010年8月29～30日)の気温と気温時間変化の相関係数. 園の南端での高度ごとの測定値. 相関係数は高度16mでの気温と各高度の気温について前2時間の変動から求めたもの.

は風向が安定しており、冷気のにじみだしが生じていたと考えられる。なお、清水ら (2011) にはこの日の他の地点の風についても示してある。図 3 にはこの時の南端地点での高度ごとの気温、および最上点 (16m) と各高度の気温の相関係数を示した。相関係数は前 2 時間の温度変動に対して算出したものである。0 時ごろを境に鉛直方向の気温差が特に大きくなっており下層では冷気が存在していた。この時、相関係数も低下しており、樹冠部分と下層は異なった温度変動をしていたことがわかる。すなわち、下層は樹冠の空気塊とは性質の異なった、園内から流れてきた冷気であると考えられる。図 4 には 0 時前後での相関係数の鉛直分布を示した。高度 14m においても相関係数は時間の経過とともに大きく低下しており、下層の冷気はこの高さまで及んでいたと考えられる。以上の結果からにじみ出し冷気の厚さは 14m 以上であると推察される。最上点 (16m) にもにじみ出し冷気が達していた可能性は否定できないため、ここでは冷気の厚さ (検査体積の高さ) を 15m とする。

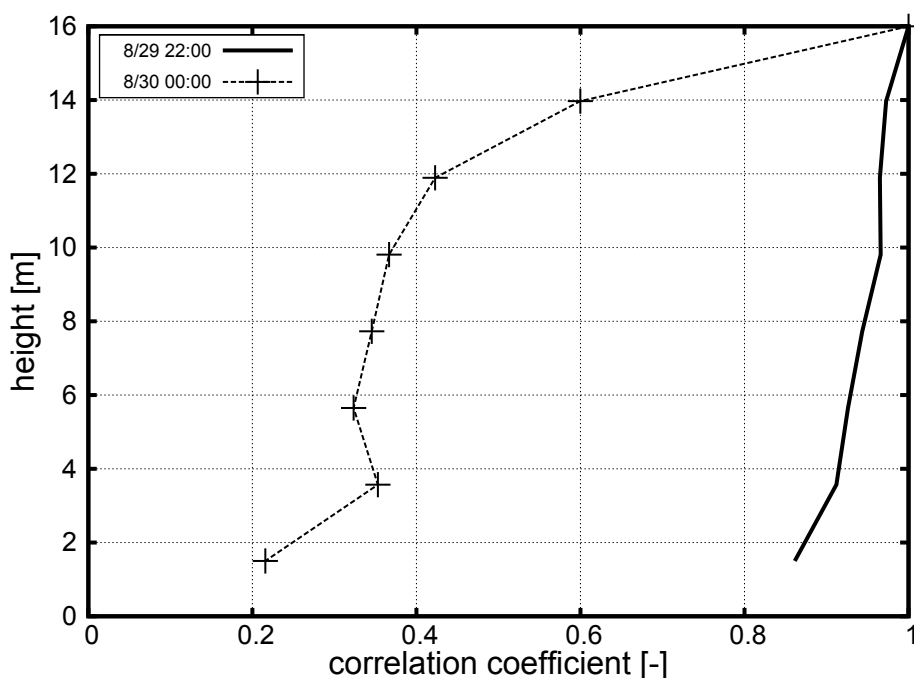


図 4 気温変動の相関係数の鉛直分布 (2010 年 8 月 29 ~ 30 日の夜)。

熱収支解析

図 5 は 2009 年 9 月 10 - 11 日の風と気温の状況である。10 日 23 時ごろに上空の一般風が止むとともに園の南側境界 (地点 S) では風向が変化し、園全体としては発散している。同時に気温の急激な低下も見られ、にじみ出しが発生していることがわかる。図 5 (最下段) はこのときの熱フラックスを示したものである。にじみ出し発生時は 2 つの方法で見積もった移流フラックス (Q_{adv} と Q_{res}) がほぼ一致している。これは風向が安定することで直接評価 (Q_{adv}) の精度が良くなったためと考えられる。またこの時、樹冠上での乱流熱フラックス H はゼロに近く、移流フラックスと正味放射量 R_{net} がほぼ同じ値となっている。すなわち、長波放射の放出で冷えた分の冷熱が、にじみ出しとして

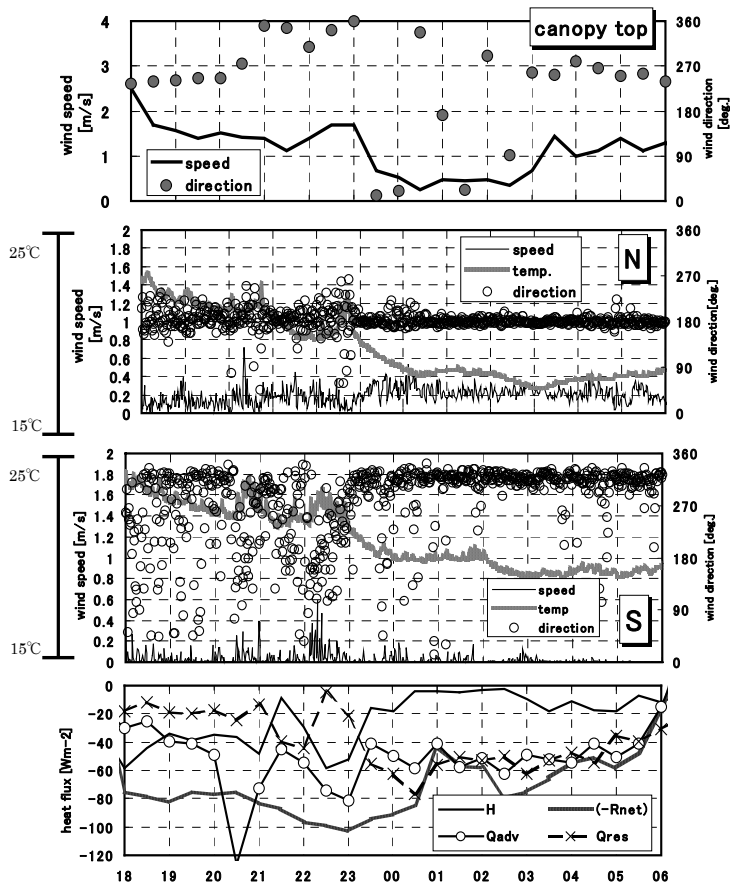


図5 にじみ出し発生夜（2009年9月10～11日）の風向（樹冠上，園の南端，北端）および熱収支各項の時系列。H：樹冠上での顕熱フラックス， R_{net} ：正味放射量， Q_{adv} ：水平熱輸送量（式5）， Q_{res} ：熱収支残差で求めた水平熱輸送量。

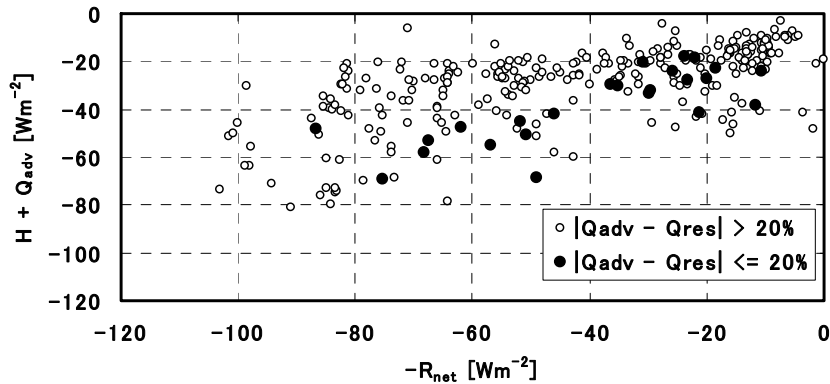


図6 市街地冷却量 ($H + Q_{adv}$) と正味放射量 (R_{net}) の関係。

市街地を冷却している。この時の市街地冷却量 ($H + Q_{adv}$) は最大 60Wm^{-2} であり、これは標準的な家庭用エアコン (冷房能力 3kW) の 4000 台分に相当する。

図 6 は同月の気象条件のよかった 10 夜間について、市街地冷却量と R_{net} の関係を示したものである。黒丸は Q_{adv} と Q_{res} が 20% 以内の差で一致した時のデータである。この黒丸のデータについて平均すると市街地冷却量は正味放射量の約 8 割である。

ま と め

自然教育園の樹林キャノピーに対して熱収支解析を行った。夜間に樹林が市街地を冷却する熱流量は 2009 年 9 月 10 日の事例ではエアコン 4000 台分、期間の平均的な値としては正味放射量の約 8 割であった。

引 用 文 献

- Aubinet, M., Feigenwinter, C., Heinesch, B., Bernhofer, C., Canepa, E., Lindroth, A., Montagnani, L., Rebmann, C., Sedlak, P. & Van Gorsel, E. 2010. Direct advection measurements do not help to solve the night-time CO_2 closure problem: Evidence from three different forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 : 655-664.
- Lee, X. 1998. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91 : 39-49.
- 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 : 403-420.
- 清水昭吾・菅原広史・成田健一・三上岳彦・萩原信介. 2011. 自然教育園における冷気のにじみ出し現象. *自然教育園報告*, 42 : 39-47.
- 菅原広史・清水昭吾・成田健一・三上岳彦・萩原信介. 2011. 自然教育園における熱・水蒸気・二酸化炭素フラックスの季節変化. *自然教育園報告*, 42 : 31-38.