

10. 夏季静穏夜間における都市緑地の気温鉛直分布の調査 および緑地樹林帯の顕熱放熱量の推定

三島 浩敬¹・東海林 孝幸^{2*}・松浦 伸哉³

¹玉野総合コンサルタント（株）（〒461-0005名古屋市東区東桜）

²豊橋技術科学大学 環境・生命工学系（〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1）

³防衛省 航空自衛隊

* E-mail: tokairin@ens.tut.ac.jp

異なる地表面被覆で構成された緑地における気温の鉛直構造の実態把握および緑地樹林帯の放熱量の推定を目的として夏季静穏夜間を対象に愛知県豊橋市内の緑地（高師緑地：24.2 ha）の芝地・樹林帯にて気温の鉛直同時観測を行った。観測データより樹林帯については樹林帯気層および樹木の顕熱フラックスの時間変化から緑地樹林帯全域における放熱量を推定した。結果、1) 芝地および樹林帯上層に放射冷却による安定層が形成され、その厚さは約 15m であり、日の出時刻付近（午前 5 時）まで維持された。2) 緑地樹林帯気層からの顕熱フラックスの絶対値は日没から明け方まで $0\sim 5\text{ Wm}^{-2}$ の間で推移した。一方、樹木体からのそれはほぼ一定であり約 5 Wm^{-2} であった。3) 緑地における日没後から日の出近くまでの樹林帯（約 15 ha）からの総放熱量は約 10MJ であった。

Key Words : urban green area, urban heat island, vertical temperature, meteorological observation, stable layer

1. はじめに

都市緑地の気候緩和効果について、特に緑地近傍の市街地に対する高温化抑制効果が明らかになりつつある。近年、都市緑地内外においてについて詳細な気象観測が行われ、静穏な夜間では「冷気にじみ出し」と呼ばれる現象が発現することが知られている（たとえば成田ら¹⁾、永谷ら²⁾、三上ら³⁾、竹林・森山⁴⁾）。筆者らは愛知県豊橋市内の中規模緑地（高師緑地：24ha）に焦点を当て、緑地内外に温度計を設置することで緑地冷氣による周辺域の冷却効果を調べ、静穏な夜間は中規模緑地においても「冷気にじみ出し」が生じることを確認した（東海林ら⁵⁾）。同時に緑地に生成される冷気の厚さ、およびにじみ出しの発生は緑地内樹木の高さ・立木密度などの物理的な要因と関連があることも2010年に行った観測結果より示唆されたが樹林帯における詳細な気温観測を行わなかったため明確な関連性は明らかにできなかった。

緑地の市街地に対する冷却効果を定量的に評価するためには市街地および緑地における大気の鉛直構造を把握する必要があるが、市街地での調査は様々な制約があり研究例が少ないのが現状である。そのなかで菅原ら⁶⁾は新宿御苑内および御苑付近の市街地にて気温の鉛直分布の観測を行い、大気の鉛直構

造の把握および市街地と緑地の気温差から緑地に形成された冷氣層の冷熱エネルギー量を求めている。このように、緑地による冷却効果についての知見を得るためには大気の鉛直構造の把握が不可欠であるが、一般的に都市緑地は様々な要素（芝地、樹林、駐車場、グラウンド等）で構成されており、同じ緑地内でも地表面被覆の違いによる「温度ムラ」が現れ、緑地内大気の鉛直構造に影響を与えていると考えられる。また、McCaughey and Saxton⁷⁾、原藺ら⁸⁾らが指摘するように、林地においては気温の日変化に伴って林内の気層や樹木へ貯留される熱量が存在することから、短時間の熱収支を考慮する場合は樹林帯に特有な熱的效果を考慮する必要がある。しかしながら、樹林帯における熱特性に関する研究については主に森林を対象に行われた例が多く、都市緑地でのそれは少ない。

そこで本研究では都市緑地内の異なる地表面被覆（芝地・樹林帯）にて鉛直気温の同時観測を行い、それぞれの被覆における夏季静穏夜間の気温鉛直構造の把握と樹林帯気層および樹木への蓄放熱特性を調べた。

2. 研究方法

(1) 気象観測

a) 観測対象緑地

観測は愛知県豊橋市南部にある緑地（高師緑地 24.2 ha）とした。緑地は主にクロマツ群落で占められており、その中に芝生広場、野球場、馬場が存在している。また、緑地東側には工場敷地があり、その他の方向はおおむね低層住宅街となっている。緑地の西側を豊橋鉄道渥美線と国道 259 号線（4 車線）が縦断し、緑地東側境界には県道（2 車線）、南側境界には市道（1 車線）が通っている。平成 17 年度における緑地付近の国道 259 号の平日 12 時間交通量は約 2 万台である（国土交通省⁹⁾）。図 1 に緑地およびその周辺市街地の写真を示す。

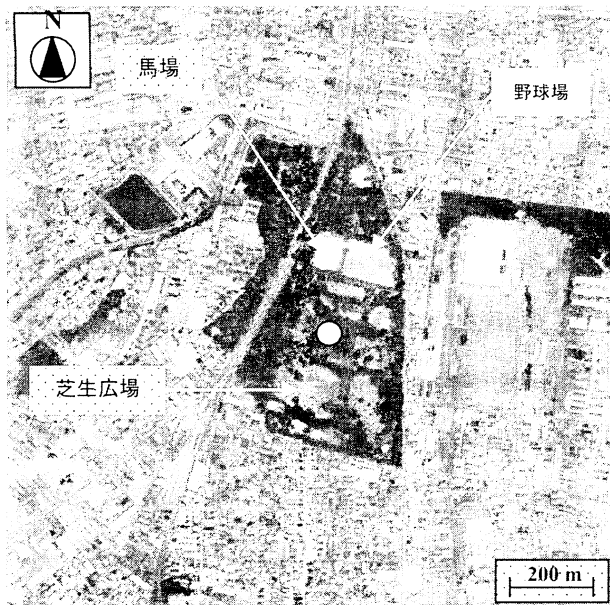


図1 緑地および周辺域の状況

b) 観測方法および観測期間

鉛直気温分布の観測はバルーンを用い、バルーンから下ろされた紐にサーミスタ温度計（おんどとり Jr. RTR-52 ; T&D 社）を 10 個結び付け、上空 50m までの気温を計測した。観測地点は図 1 に示されている芝生広場内及び樹林帯（白丸）とした。気温のサンプリング間隔は 1 分で解析には 1 時間平均値を用いた。

観測は 2012 年 8 月 23 日 18:00 より翌 24 日 6:00 まで行った。観測時の天候は晴れときどき曇り、緑地内はほぼ無風であった。また、平均相対湿度は約 93% であり、芝生に夜露が認められた。

樹体温度は胸高直径（高さ 1.2m における樹木の直径）0.22m のクロマツの地上 2.0m、表皮下 1.0cm に上述の温度センサーを埋め込み測定した。

(2) 樹林帯における顕熱フラックスの算出方法

本研究では先述の原菌ら⁸⁾、Oliphant *et al*¹⁰⁾ の手法を用い、樹林内における鉛直気温および樹体温度の時間変化から鉛直観測期間中における高師緑地全域の樹林帯の顕熱フラックスを求めた。以下に算出方法を示す。

地表面におけるエネルギーバランスを考慮する際、正味放射エネルギーフラックスは顕熱、潜熱、地中伝導熱の各フラックスとして分配されるが、樹林帯が存在する場合、林内の気層や樹木へ分配される項も付加される。いま、単位時間当たりの樹林帯への蓄熱フラックスを Q [Wm^{-2}] とすると、

$$Q = Q_a + Q_w + Q_v + Q_p \quad (1)$$

ここで Q_a , Q_w , Q_v はそれぞれ樹林帯気層の顕熱蓄熱、潜熱蓄熱および樹体への蓄熱フラックスを表す。また、 Q_p は光合成として利用される熱量を表しているが他の項に比べ小さいので通常は無視される。それぞれの項は以下のように与えられる。

$$Q_a = \int_0^z \rho_a C_a \frac{dT_a}{dt} dz \quad (2)$$

$$Q_w = \int_0^z \rho_a l \frac{dq}{dt} dz \quad (3)$$

$$Q_v = \int_0^z \rho_v C_v \frac{dT_v}{dt} dz \quad (4)$$

$$= m_v C_v \frac{\Delta T_v}{\Delta t}$$

ここで、 ρ_a , ρ_v は大気および樹木体の密度、 C_a , C_v , l はそれぞれ大気、樹木体の比熱、蒸発潜熱を表す。表 1 に各種物理量の値を示す。ここで樹木に関する物性値はアカマツのそれを使用した。(2) 式で樹林帯気層における顕熱フラックス (Q_a) の算出に必要な気温 (T_a) は平均樹高 (15m) までの平均値を用いた。

潜熱について本研究では相対湿度の鉛直分布は計測していないため除外した。

樹木による放熱を算出する際に必要となる単位面積当たりの植生質量 m_v ($kg m^{-2}$) は樹木体の密度 ($kg m^{-3}$)、立木密度 (本 ha^{-1}) および平均樹高 (m) から求められる。本研究では樹林帯における鉛直分布測定地点 (図 1 白丸) を取り囲む園内道路を境界とした領域内 (面積約 8000 m^2) の植生から m_v を求めた。表 2 に樹林帯観測地点周辺の植生形態を示す。これら樹林帯の形態に関する量は研究対象緑地の代表値と仮定した。

表 1 計算に使用した各種物理量

大気密度 ρ_a	1.2	kg m^{-3}
樹体密度 ρ_v	52	kg m^{-3}
大気比熱 C_a	1006	$\text{J kg}^{-1} \text{K}$
樹体比熱 C_v	1900	$\text{J kg}^{-1} \text{K}$
蒸発潜熱 l	2.45	kJ g^{-1}

表 2 観測地点付近の緑地形態

植生密度	190	本 ha^{-1}
平均樹高	15.0	m
平均 DBH	0.51	m
植生質量	31.2	kg m^{-2}

3. 結果及び考察

(1) 鉛直気温分布

図 3 に緑地樹林帯における気温の鉛直分布を示す。樹林帯の観測地点周囲におけるクロマツの枝葉部は概ね高度 5~15m であり、図 3 ではその範囲を点線で示している。

図より樹林帯では日没とともに日中に形成された中立層が変化し、樹冠上部 (15~30m) に放射冷却による安定層が形成され明け方まで維持されている。安定層の強度は $0.03^{\circ}\text{Cm}^{-1}$ であった。ここで地表面付近での気温が枝葉部と比べ高くなっているが、これは樹林帯では天空率が小さいため放射冷却が弱まり、樹林からの下向きの長波放射の影響で地表面付近の気温は下がりにくくなったためと考えられる (林ら¹¹⁾)。

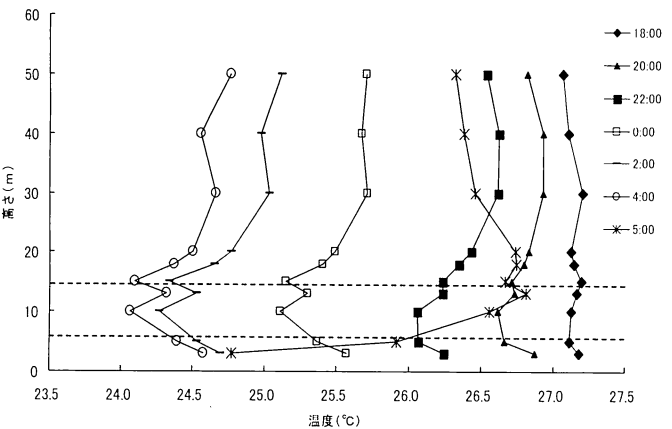


図 3 緑地樹林帯における鉛直気温分布

図 4 に芝地における鉛直気温分布を示す。図より芝上では樹林帯と同様に 18 時には大気の状態は中立であるが 20 時頃から安定層が形成され翌 6 時まで維持されている。安定層の厚さは 22 時に約 15m であり、明け方までほぼ同じ厚さで推移した。ここで、20 時以降にお

いて 20m 高さでの気温がその下の観測点 (18m 高さ) より約 0.3°C 下がっている。この原因は明らかではないが、芝地を取り囲む樹林の高さとこの気温ギャップの高さが同程度であることから樹林が冷気の厚さに何らかの影響を及ぼしていると考えられる。

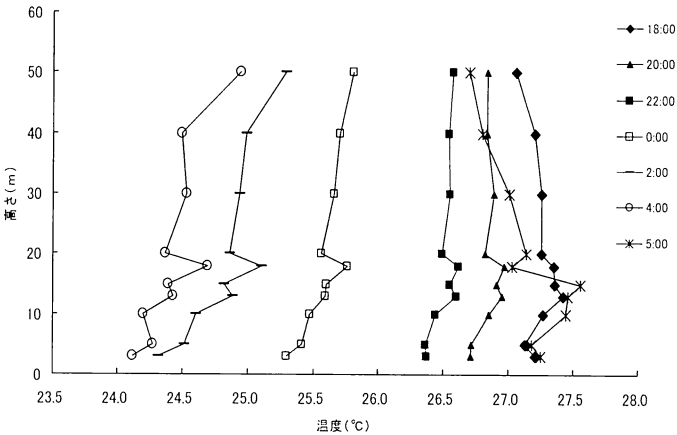


図 4 緑地樹林帯における鉛直気温分布

(2) 樹林帯気層および樹体からの顕熱フラックス

前節の式 (2)、(4) を用いて樹林帯における顕熱フラックスの時間変化を求めた (図 5)。ここで、正值は蓄熱、負値は放熱を表す。図 5 より、5 時を除き値は全て負となっており、夜間は常に顕熱放出であることが分かる。放熱の最大値 (合計) は午前 0 時の約 10 Wm^{-2} であった。また、樹林帯気層 (Q_a) の顕熱フラックスの絶対値は $0 \sim 5 \text{ Wm}^{-2}$ の間で推移しているが、樹体 (Q_v) のそれは明け方までほぼ一定値であり、気温の変動に伴う樹体からの顕熱放出量の変化は小さいといえる。既往研究では日没後における Q_a と Q_v を比較するといずれも 2 倍ほど Q_a の方が大きい本研究では逆の結果となった。この原因として本観測では観測開始から終了まで相対湿度が高く (約 93%)、日没後 (19 時) から翌朝 6 時までの気温低下が約 3°C であり気温の時間変化が小さかったこと (平均 $-0.3 [^{\circ}\text{C h}^{-1}]$) が挙げられる。

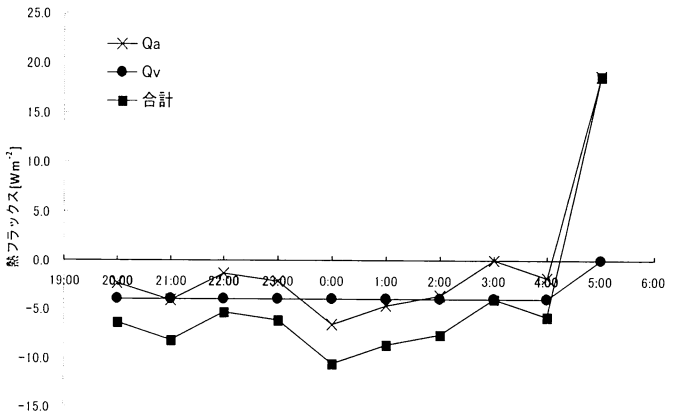


図 5 緑地樹林帯気層および樹体からの顕熱フラックス

図6、図7に樹林帯及び樹木からの夜間放熱量の積算値[MJ]を示す。ここで、樹林帯面積(約14.8[ha])は緑地面積より芝地、グラウンド等の裸地面積を引くことにより求めた。両図より、4時までの積算放熱量は直線的に減少傾向にあり、各時間において一定割合(樹林帯気層:0.41[MJ/h]、樹林帯0.59[MJ/h])で放熱されている。これは観測時に概ね晴天であり、雲の影響が小さく一定の放射冷却強度であったこと、鉛直観測期間を通して無風に近かったため、移流による周辺市街地からの熱の流入が無かったためと考えられる。また、明け方5時から6時にかけては日射の影響を受けたため、蓄熱した。ただし、樹林帯の放熱量については先述のように、樹林帯の形態は緑地内で一様という仮定の元に求めた値である。無論、緑地内では植生密度、樹種、樹高はばらつきがあり、今後詳細な調査が必要になる。本観測より日没後から日の出近くまでに樹林帯気層から約4MJ、樹木から約6MJの放熱があった。

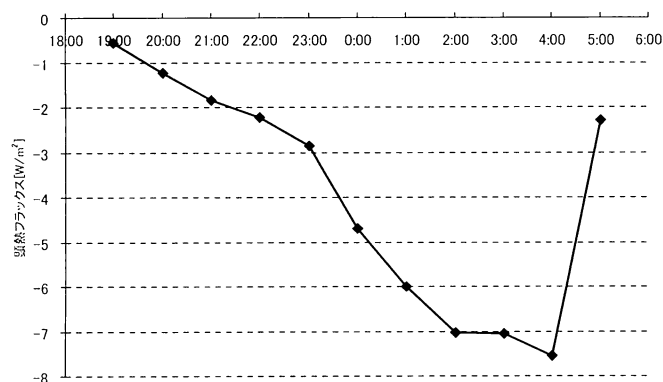


図6 緑地樹林帯気層からの顕熱フラックス

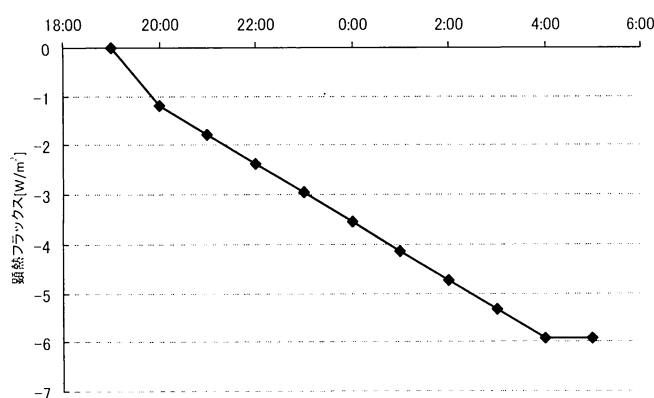


図7 緑地樹木体からの顕熱フラックス

4. 結論

都市緑地内の異なる地表面被覆(芝地・樹林帯)にて鉛直気温の同時観測を行い、それぞれの被覆に

おける夏季静穏夜間の気温鉛直構造の把握と樹林帯気層および樹体への蓄放熱特性を調べた。その結果、1) 芝地および樹林帯上層に放射冷却による安定層が形成され、樹冠上に生成された冷気が樹林枝葉部上層まで下降することが認められた。2) 安定層は日の出時刻付近(午前6時)まで維持され、層の最大厚さは30mを超える可能性があることが示唆された。3) 緑地樹林帯気層からの顕熱フラックスの絶対値は日没から明け方まで0~5 Wm²の間で推移した。一方、樹木体からのそれはほぼ一定であり約5 Wm²の放熱であった。4) 高師緑地における日没後から日の出近くまでの樹林帯(約15 ha)からの総放熱量は約10MJであった。

参考文献

- 1) 成田健一・菅原広史・横山 仁・三坂育正・松島 大：皇居の冷気生成機能と周辺市街地への熱的影響に関する実測研究，日本建築学会環境系論文集，No. 666，705-713，2011. 8.
- 2) 永谷 結・梅木 清・本條 毅・菅原広史・成田健一・三上岳彦：長期観測による新宿御苑のにじみ出し現象の解析 環境情報科学論文集，Vol. 21，507-512，2007. 11.
- 3) 三上岳彦・菅原広史・清水昭吾・成田健一・萩原信介：自然教育園と周辺市街地における夏季の気温移動観測，自然教育園報告 第42号：25-29，2011.
- 4) 竹林 英樹・森山 正和：実測調査による市街地内公園からの冷気のにじみ出し現象の解析 日本ヒートアイランド学会論文集 Vol. 3，pp. 34-39，2008.
- 5) 東海林孝幸・高野啓太・北田敏廣：豊橋市内の中規模緑地におけるクールアイランド現象の調査と周辺市街地に対する冷却効果，日本ヒートアイランド学会論文集 Vol. 5，pp. 33-39，2010.
- 6) 菅原広史，田中博春，成田健一，中野智子，三上岳彦：都市内緑地におけるクールアイランドの鉛直構造，地学雑誌 120 (2)，pp. 426-432，2011.
- 7) McCaughey and Saxton: Energy balance storage terms in a mixed forest, Agricultural and Forest Meteorology, 44, pp. 1-18, 1988.
- 8) 原蘭芳信、清田 信、矢吹萬壽：林地と造成された芝地の熱環境および水収支の特徴、農業気象 48 (2)，pp. 147-155，1992.
- 9) 平成 17 年度道路交通センサス、国土交通省中部地方整備局
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/data/koutu/index05.html>

- 10) A.J. Oliphant, C.S.B. Grimmond, H.N. Zutter, H.P. Schmid, H.-B. Su, S.L. Scott, B. Offerle, J.C. Randolph, J. Ehman: Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest, *Agricultural and Forest Meteorology* 126, 185-201, 2004.
- 11) 林陽生、原園芳信、那須野正明、鳥谷均（1989）：群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答 1. 赤松群落内外の温度場の特徴. 筑波大学陸域環境研究センター報告, No. 13, p. 97-103

INVESTIGATION OF VERTICAL STRUCTURE OF ATMOSPHERE AND ESTIMATION OF HEAT STORAGE/RELEASE AT FOREST CANOPY IN URBAN GREEN PARK

Takahiro MISHIMA¹, Takayuki TOKAIRIN² and Shin'ya MATSUURA³

¹Dept. of Environmental and Life Sciences, Toyohashi University of Technology

²Tamano Consultants Co., Ltd.

³Japan Air Self-Defence Force, Ministry of Defence

Simultaneous observations for vertical profiles of air temperature were carried out under calm condition in summer night to understand the vertical structures of atmosphere on both lawn and forest areas in an urban green park (Takashi Ryokuchi: 24.2 ha, located in Toyohashi City in Japan). Obtained results show that 1) stable layer formed by radiative cooling was observed above lawn and forest canopy, and cold air on the canopy moved downward until an upper layer in the canopy. 2) the stable layer remained until the next morning (5 a.m.) and the maximum thickness of the layer was approximately 15m above the top of the canopy and ground surface. 3) the amount of released heat flux from the canopy air and biomass (pine trees) was between 0 to 5 Wm⁻² and 5 Wm⁻² (nearly constant), respectively. 4) the total amount of released heat from the forest area (about 15 ha) in Takashi Ryokuchi was approximately 10 MJ.