

② 植生群落上における顕熱輸送係数

菅原広史*・近藤純正**

Heat transfer coefficient above forest canopy

Hirofumi Sugawara*, Junsei Kondo**

はじめに

都市内に存在する公園緑地のヒートアイランド緩和効果を議論するには、植生群落の熱収支を知る必要がある。夏季の日中において、植物は蒸散により人工被覆（アスファルトなど）よりは表面温度が低いが、それでも大気を加熱している（大気に対して顕熱が輸送されている）。このため、植生群落の顕熱・潜熱輸送量、放射量、貯熱量のバランスを知ることが、より効果的なヒートアイランド緩和策の創出につながる。

顕熱輸送量 H は次のバルク式を用いてパラメタライズされる。

$$H=c_p\rho C_H U(T_s-T_a) \quad (1)$$

ここで $c_p\rho$ は大気の熱容量、 C_H はバルク輸送係数、 U は風速、 T_s と T_a はそれぞれ植生表面と大気の温度である。 $c_p\rho C_H U$ は対流熱伝達率と呼ばれる。一般には対流熱伝達率は U のべき乗に比例するため、 $C_H U$ をまとめて輸送係数として扱い、 U の関数として表現することもある。 $C_H U$ は熱収支の基本的なパラメータである。本報告では植生群落の $C_H U$ を実測により求めることを目的とする。

測定および計算手法

園中央のタワー（地上 20 m, 樹冠上約 6 m）において乱流計測をおこなった。超音波風速計（ソニック、SAT-540）により風速と音仮温度、オープンパスガス分析計（LICOR, LI-7500）により水蒸気量を、いずれも 10Hz で測定した。また同高度において放射 4 成分（短波・長波、下向き・上向き）を放射計（KIPP&ZONEN CNR-1）により 1 分ごとに測定した。これらは 2009 年より行っている測定であるが、これに加えて 2016 年 4 月より高精度温度計を用いて樹冠上 6 m と 1.6 m において気温測定も行った。高精度温度計は温度センサー（4 線式 1000 オームの白金抵抗温度計）と強制通風式放射シェルターから構成され、特に日射による加熱誤差を従来よりも低減させている。計測は 10 分ごとに行った。

タワーで計測される上向き長波放射は、夏であれば主に樹冠の葉の表面温度に対応していると考えられる。一方、冬の落葉状態では幹や林床の表面温度も含んだものとなる。放射計ではこれらの平均

*防衛大学校, National Defense Academy

**東北大学, Tohoku University

値のみが計測される。この平均的な放射量がどの程度の空間代表性を有するのかを調査するため、放射温度計（日本アビオニクス、TVS-610）による表面温度分布計測を延べ5日間行った。また、2016年4月以降はタワーから斜め下向きに放射温度計を設置し、表面温度の連続測定を行っている。

顕熱輸送量は渦相関法により30分平均値を求めた。その際、音仮温度に対する横風補正、地形性鉛直補正、web補正（空気密度変動の補正）を行っている。林床では下向き短波放射量の測定を行い、タワー上の下向き放射量との比により着葉状態をモニタした。タワーに設置した放射計の長波センサーは黒体カバーを用いて検定し、高精度温度計との器差を補正した。

輸送係数 $C_H U$ の算出は式(1)に計測値 H , T_s , T_a を代入することで行った。 T_s は大気補正を施した上向き長波放射量から算出した。日照率8割以上の晴天日で降水がない時間帯について30分ごとの $C_H U$ を求めた。温度差 $T_s - T_a$ が 0.5°C 未満のケースと顕熱輸送量 H が負のケースは解析から除外した。また Aubenet et al. (2012) が示した乱流フラックスの品質基準に従い、パラメタリゼーション開発に推奨される定常性クラス1かつ総合乱流特性クラス3までの良質なデータを解析用に抽出した。なお熱輸送係数の算出において、気温は風速や顕熱輸送量の測定高度と同じ高度のデータを用いるべきである。しかしながらその高度（樹冠上6m）の気温には5～6月に欠測が生じたため、以下では熱輸送係数の季節変化を検討する際のみ樹冠上1.6mの気温を用いる。

結 果

1. 樹冠の表面温度分布

樹冠の表面温度分布については2016年4月8日、7月29日に測定したデータを使用する。得られた表面温度分布の例を図1に示す。このような画像から樹冠部分の温度のヒストグラムを作成した（図1）。4月は9月と比べて高温側に分布が伸びた形となっている。4月は展葉が完了していないことから、長波放射計は日陰で低温的林床と、日向で高温の樹冠の葉の両方を視野に含み、温度分布の範囲が広がっているものと考えられる。

図2の矢印（global）で示した T_s （上向き長波放射量から算出した表面温度）は、黒丸で示した空間平均値と比べて約 2.5°C ほど小さくなっている。これも、長波放射計の視野に低温的林床が含まれ、その温度に引きずられているためと考えられる。

2. 熱輸送係数

計測した熱輸送係数 $C_H U$ を図3に示す。ここでは $C_H U$ の算出には樹冠上1.6mの気温を用いている。熱輸送係数の絶対値は石丸ら（2014）が単木について計測した値（風速1～5m/sの状態では $0.014 \sim 0.016 \text{ m/s}$ ）と比べて大きい。石丸ら（2014）では自身の計測値がやや過小であるとして、風が吹いて葉が揺れたために放射温度の測定に誤差が生じ熱輸送係数が小さめの値となったと考察している。一方、我々の計測値も図2で示したように表面温度が過小評価されている可能性がある。表面温度の過小評価は熱輸送係数の過大評価を生む。また、近藤・菅原（2016）は同じ自然教育園での観測データ6年分を用い $C_H U$ として $0.020 \sim 0.042 \text{ m/s}$ を算出している。本報告での $C_H U$ はこの値と比べても2倍近く大きい。ただし、近藤（2016）は顕熱輸送量と潜熱輸送量の計算値が観測値と最もよく合うように $C_H U$ を求めており、潜熱輸送量の整合性も考慮している点で本報告での算出方法とは異なる。

季節変化の傾向として、熱輸送係数は春季4～5月と冬季11月に大きく、夏季7～9月に小さい。

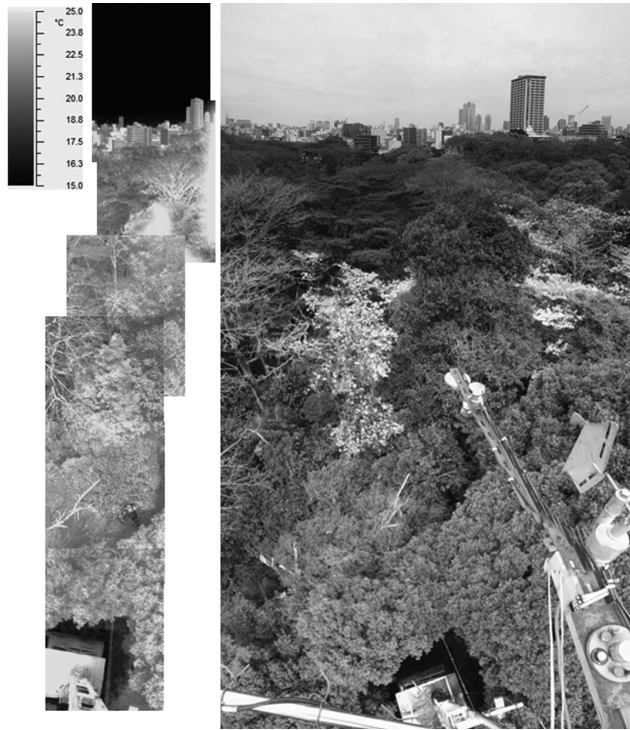


図1 放射温度計で計測した表面温度分布（左）と可視画像（右）。表面温度分布は複数の画像をつなげてある。

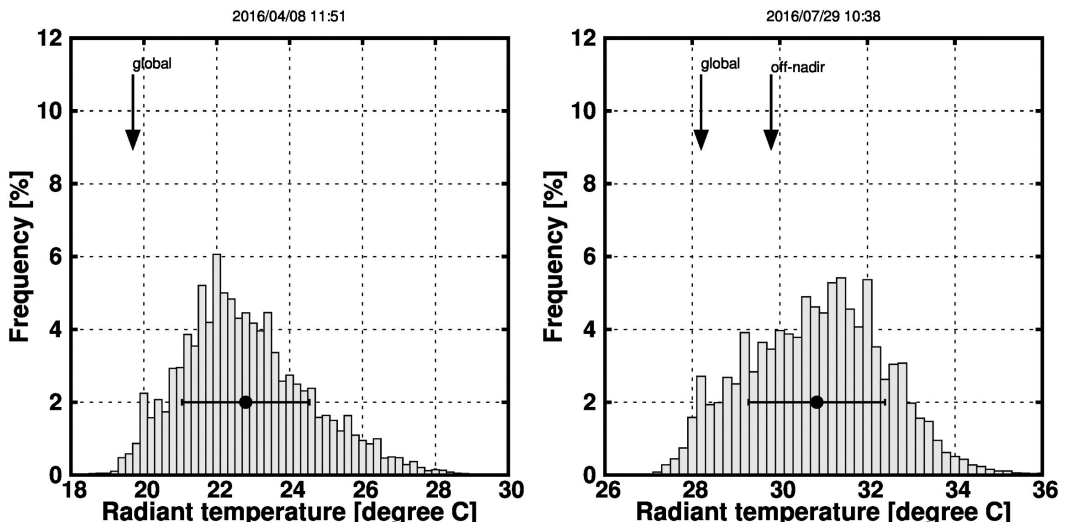


図2 放射温度のヒストグラム。図中丸印と誤差棒はそれぞれ平均と標準偏差。global は上向き長波放射量から算出された放射温度を示す。off-nadir は斜め下向きに設置された放射温度計による計測値（4月は設置前であるため示していない）。

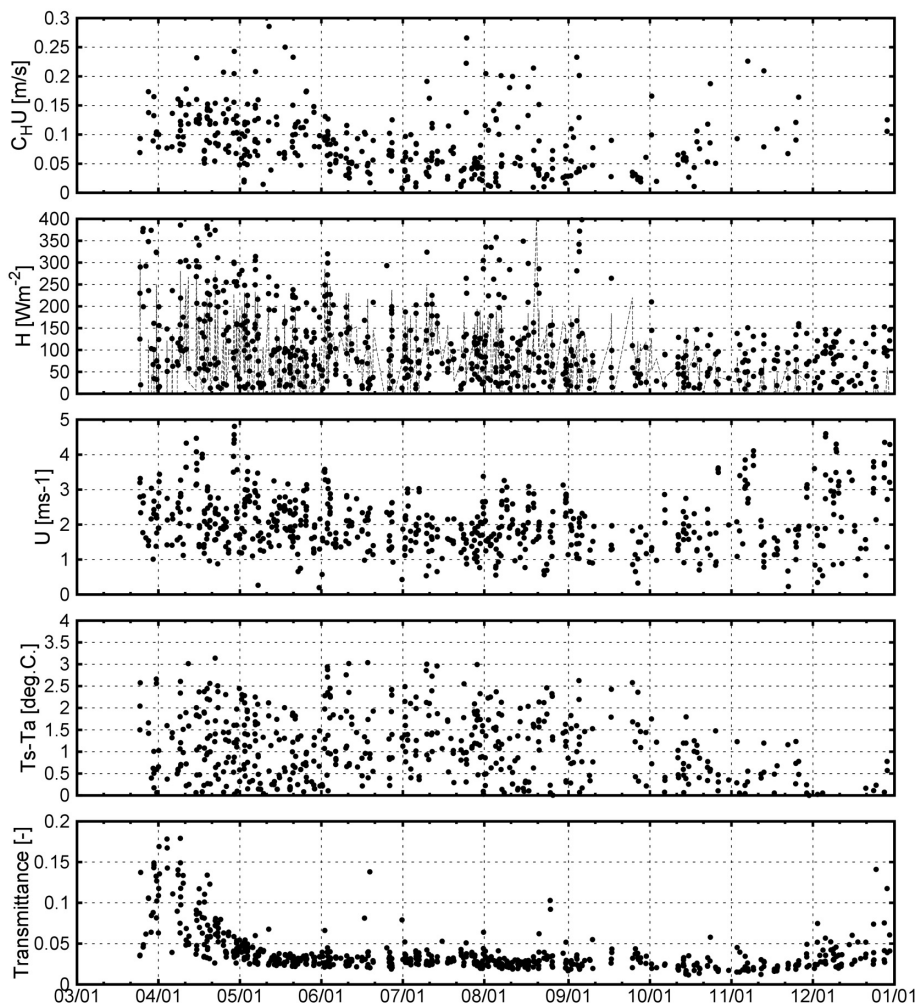


図3 計測値の季節変化. 2016年3月からの30分ごとの値. 図上段より熱輸送係数 $C_H U$, 顕熱輸送量 H , 樹冠上風速 U , 表面温度 T_s と気温 T_a の差, 樹冠の日射透過率. 上から2段目の破線は式 (1) と図4から求められる係数を用いて計算した顕熱輸送量.

この季節変化の原因として考えられるのは樹冠構造の変化である。落葉・展葉にともない、樹冠の幾何学的な形状が変化する。熱輸送係数もこれに伴って変化すると考えられる。冬季の枝・幹だけの状態に比べると、夏季は葉が生い茂り樹冠は平面に近い構造である。一般に平面での熱輸送係数は、凹凸のある複雑な形状でのものよりも小さい。図3で見られる熱輸送係数の季節変化はこれら2原因と整合的である。着葉状態をみるため図3には群落の日射透過率も示した。展葉は3月下旬から始まっており、5月中旬以降は林床に達する日射はほぼ一定割合となっている。一方で熱輸送量も4月から低下が始まっているが、下げ止まるのは6月末であり、日射透過率の季節変化とは時期が少しずれている。これは樹冠層上部では5月以降も展葉が行われているが、林床での日射透過率にはそれが反映されにくいと考えられる。なお、葉面・枝の空間密度が疎な場合は、 $C_H U$ は一般には定義でき

なくなる (Kondo and Watanabe, 1992)。したがって5月中旬以前の $C_H U$ は参考値であることに注意が必要である。

図4には風速と熱輸送係数との関係を示した。図4と図5では樹冠上6mの気温を用いて熱輸送係数を算出している。風速が大きくなるほど熱輸送係数も大きくなる傾向がみられる。なお、この風速

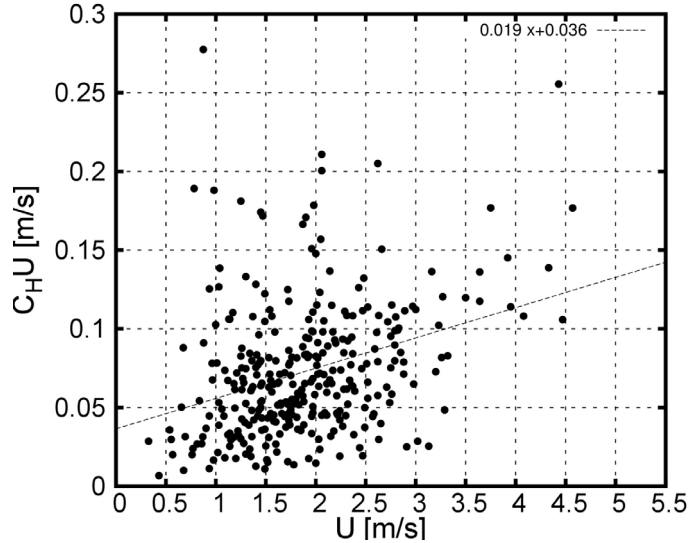


図4 風速と熱輸送係数との関係。全期間のデータ。直線は最小二乗法でフィットさせたもの。

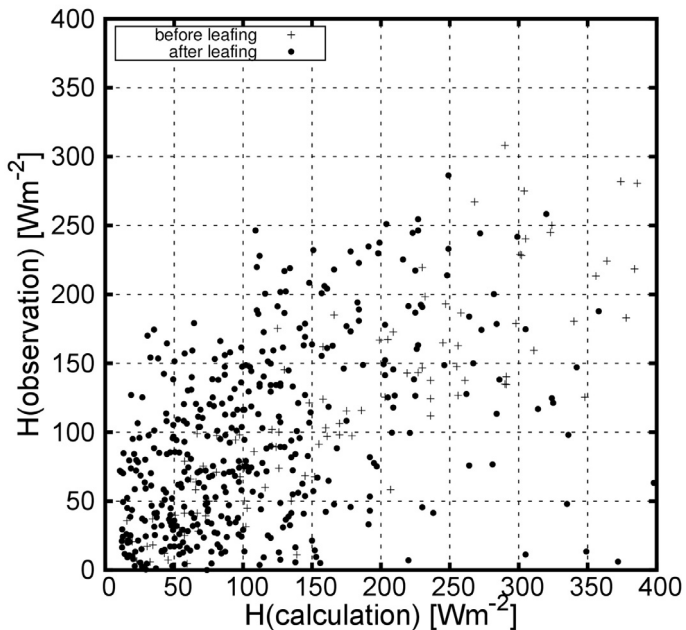


図5 顕熱輸送量の実測値と式(1)による計算値の比較。

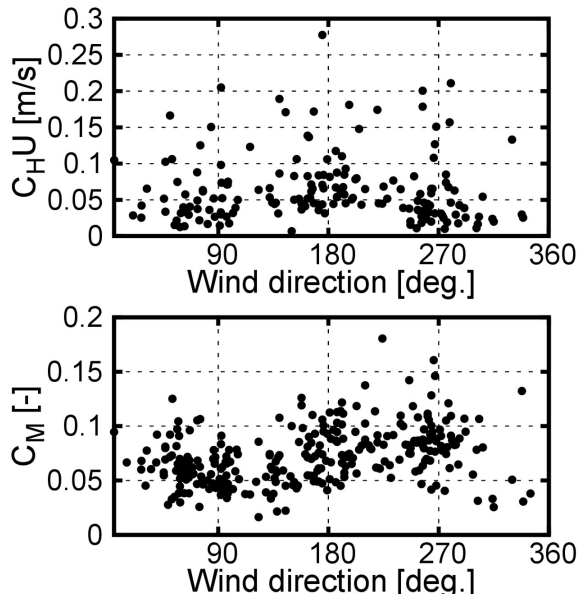


図6 風向と熱輸送係数 C_{HU} および運動量輸送係数 C_M との関係. 7-9月のデータ. ただし, C_M については枠外の $y=0.2 \sim 0.3$ の範囲にプロットが4点ある.

依存性が先の季節変化の原因ではないかとも考えられるが, 図3に示した風速では風速の季節変化はあまり明瞭ではない. 図4には最小二乗法でプロットにフィットさせた回帰直線も示した. なお, 図3の顕熱輸送量 H において破線で示しているのはこの回帰直線を用いて式(1)より求めた顕熱輸送量の計算値である. また図5はこの計算値と実測値とを比較したものである. いずれも実測値をおおむね再現できていることがわかる.

図6は7-9月のデータを用いて熱輸送係数の風向依存性を見たものである. 観測タワーは北落斜面の崖上部に設置されており, タワーから見て西~北東方向は下り斜面, 東南~西方向が平坦となっている. 図6はこの地形と対応しており, タワーから見て南側では熱輸送係数が大きい. 斜面では樹冠上部の凹凸が激しく, 熱交換がより盛んにおこなわれている可能性がある. そこで図6には運動量の輸送係数 C_M も合わせて示した. 運動量 τ は群落による大気への摩擦力を意味し, その輸送係数 C_M は以下の式で表される.

$$\tau = \rho C_M U^2 \tag{2}$$

C_M も C_{HU} と同様の風向依存性を示しており, 斜面では平地よりも乱流輸送が活発に行われていることがわかる.

要 旨

自然教育園の植生群落において, 樹冠上での熱輸送係数を求めた. 熱輸送係数は春から夏にかけて低下しており, これは展葉により樹冠の幾何学的な構造が変化したためと考えられる. 熱輸送係数は風速に依存する他に, 地形に対する依存性もみられた.

Summary

Heat transfer coefficient over plant canopy was evaluated. The coefficient showed seasonal variation where it decreases from spring to summer. The seasonal variation should be owing to change of the geometrical structure in the crown layer. The coefficient also showed dependency on the topography as well as the wind speed.

引用文献

- Aubinet M., Vesala T., Papale D. 2012: Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Springer Science & Business Media. pp.438.
- Kondo, J., Watanabe T., 1992: Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model. J. Atmos. Sci., 49, 2183-2199.
- 石丸智貴, 浅輪貴史, 清野友規, 清水克哉, 2014: 熱画像を用いた樹木の対流熱伝達率の算出手法, 日本ヒートアイランド学会第9回全国大会講演予稿集, A-37.
- 近藤純正, 菅原広史, 2016: 東京都心部の森林(自然教育園)における熱収支解析, <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke123.html>, 2017年3月15日閲覧.

