

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450368

研究課題名(和文)植物による都市冷却機構の解明と応用

研究課題名(英文)Analysis and application of cooling mechanism of urban vegetation

研究代表者

本條 毅 (Honjo, Tsuyoshi)

千葉大学・園芸学研究科・教授

研究者番号：60173655

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、樹木と大気との熱交換メカニズムを定量的に示し、葉のスケールや三次元構造の影響について、緑地を都市の微気象制御に応用するための基礎的知見を得ることである。顕熱伝達の特性は、植物の葉の熱伝達係数の影響が大きいいため、樹木全体の熱交換を推定するため、個葉の測定を行った。熱画像データから得られた、地表面と樹冠の昼夜の表面温度差分布から、樹木は昼に低温を示し、夜高温を示す。この現象は、樹木の熱伝達係数が高いことが原因である可能性が高いため、シミュレーションモデルにより、その現象を再現した。本研究の結果は、樹木と大気との熱交換の特性解明や、温熱環境予測にも使用できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, energy exchange between air and leaves were measured and simulated. The reasons of the low temperature of vegetation is considered as not only the evaporation from the vegetation. Another important reason is high heat exchange between air and the vegetation. The temperature of leaves shows similar variation with air temperature. Heat transfer coefficients of different size of leaves were measured and the mechanism of low temperature of vegetation was simulated by using the model, Envi-met. In the measurement of heat transfer coefficients, smaller leaves show higher values although there were varieties of values. In the urban surface temperature image, tree area shows lower temperature in day time than lawn but shows higher temperature at night. This phenomena can be simulated by using the model which can calculate the energy budget of vegetative environment. These results can be used to clarify the cooling mechanism of urban vegetation.

研究分野：農業情報工学

キーワード：熱伝達率 パッシブ冷却 ヒートアイランド 壁面緑化 屋上緑化 植物モデル 熱収支 都市モデル

1. 研究開始当初の背景

都市の緑は蒸発散により都市を冷やすと考えられているが、緑地が冷えるのは、蒸発散の効果だけでは必ずしも説明出来ない場合がある。その原因としては、小さい葉の集合体である植物と大気との顕熱交換が大きく気温に近い温度になるため、見かけ上冷却されているように見えることが考えられる。葉の集合体としての樹木と大気との熱交換の特性や、樹木の三次元構造が熱収支に及ぼす影響の解明は、これまで行われてこなかった。ミクロからマクロのレベルで、植物と大気間の顕熱測定とシミュレーションによる解析により、植物と大気との顕熱交換についての知見を得ることが必要と考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、葉の集合体としての樹木と大気の熱交換がどの程度かを定量的に示し、これまでの気象、工学的な理論では扱われてこなかった、空中にある葉群の構造や分布と顕熱交換係数との関係などについて解析することである。また、葉の集合体と大気との熱交換の特性や、葉のスケールや三次元構造の影響についてモデル化し、樹木の集合体である緑地を都市の微気象制御に応用するための基礎的知見を得ることも目的である。

3. 研究の方法

顕熱伝達の特性は、第一に植物の葉の熱伝達係数の影響が大きいいため、その測定値をもとに、樹木全体の熱交換を推定するため、測定を行った。リモートセンシング熱画像データから得られた、地表面と樹冠の昼夜の表面温度差分布から、樹木は昼に低温を示し、夜高温を示すことが知られている。このような現象は、樹木個体の熱伝達係数が高いことが原因である可能性が高いため、シミュレーションモデルにより、その現象を再現した。また、このようなモデルは、樹木と大気との熱交換の特性解明や、温熱環境予測にも使用できると考えられる。

(1) 個葉の熱伝達係数の算出

図1に葉の熱収支の模式図を示す。樹木の葉の表面においては以下のような熱収支式が成り立つと考えられる。

$$S_{\downarrow} + S_{\uparrow} + L_{\downarrow} = IE + H + \epsilon\sigma T_l^4 \quad (1)$$

$$H = \alpha_c (T_l - T_a) \quad (2)$$

ただし、 S_{\downarrow} : 下向きの短波放射 (Wm^{-2})、 S_{\uparrow} : 上向きの短波放射 (Wm^{-2})、 L_{\downarrow} : 下向きの長波放射 (Wm^{-2})、 IE : 潜熱輸送量 (Wm^{-2})、 H : 顕熱輸送量 (Wm^{-2})、 ϵ_c : 対流熱伝達係数 ($Wm^{-2}K^{-1}$)、 T_l : 葉温 (K)、 T_a : 気温 (K)、 ϵ : 放射率、 σ : ステファン・ボルツマン定数 ($Wm^{-2}K^{-1}$) である

熱伝達係数の算出に当たっては、2 個体の

熱収支式を連立することで、熱伝達係数の算出を行った。

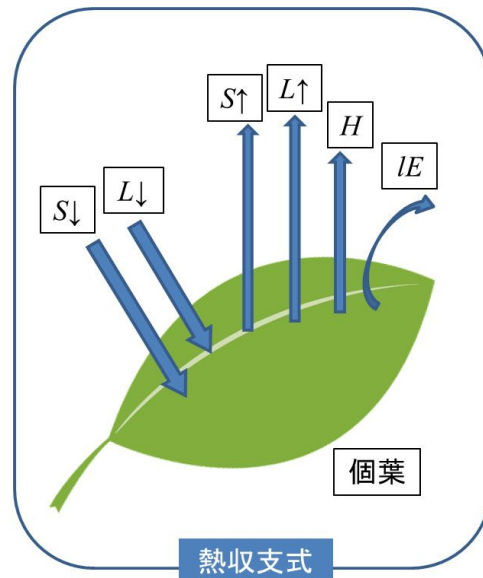


図1 葉の熱収支模式図

(1)、(2)の熱収支式を給水個体 A と非給水個体 B での、熱収支式を連立して解き、以下の熱伝達係数の式を得る。以下の式から、水分蒸発量 (潜熱) と表面温度の差により、熱伝達係数が求められることがわかる。

$$\alpha_c = \frac{-(IE_A - IE_B) - \epsilon\sigma(T_{lA}^4 - T_{lB}^4)}{T_{lA} - T_{lB}} \quad (3)$$

実験は2013年9月、10月、2014年9月、10月に計16日間、千葉大学園芸学部松戸キャンパスE棟屋上(2013年)、C棟屋上(2014年)で行った。実験の様子を図2に示す。



図2 葉の熱伝達係数測定の様子

(2) 都市緑地の熱環境シミュレーション

上空よりヘリコプターから撮影した都市緑地の表面温度と、シミュレーションで求めた表面温度の結果を比較した。都市緑地の表面温度のデータは東京都環境研究所により取得された熱画像を使用した。新宿御苑をシミュレーションの対象とした。新宿御苑は東

京都新宿区，渋谷区にまたがる公園で，広さは 58.3 ha である。3 次元の環境シミュレータである Envi-met を使用して計算を行った。Envi-met では，流体の計算には，ナビエ・ストークス方程式，連続の式，移流拡散方程式，1.5 次クロージャモデルが用いられている。植物は熱収支式を基に，葉と大気との熱交換が計算されている。

シミュレーションでは，図 3 の赤枠で示す新宿御苑の樹木や芝生を含む部分を，計算対象とした。スケールは，横 300m x 縦 200m である。GIS 上で新宿御苑の地形図，植生データを読み込み，樹木の位置，樹高情報を取得し，Envi-met で使用した。対象地の航空写真を図 4 に示す。

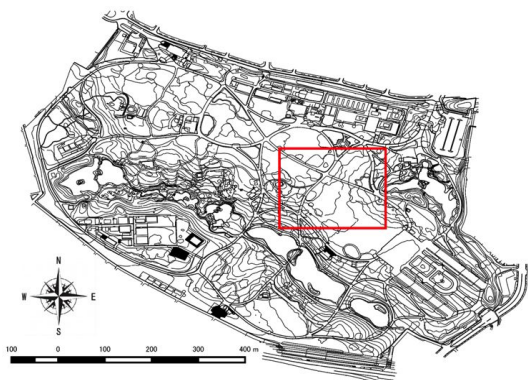


図 3 新宿御苑とモデル範囲(赤枠)

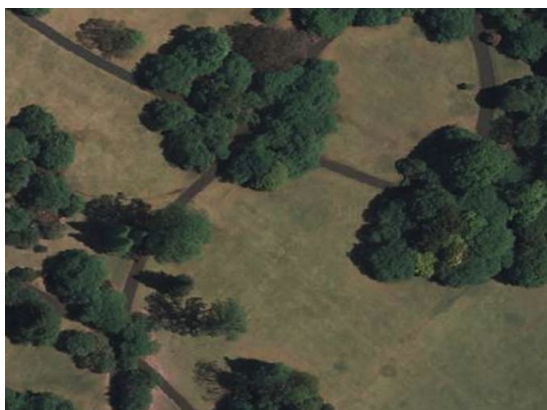


図 4 対象地の航空写真

4. 研究成果

(1) 個葉の熱伝達係数の算出

対象樹種は，アオキ，ヤブツバキ，イヌツゲの 3 種を用いた。葉温の測定にはサーモグラフィを用い，熱画像から葉温を求めた。図 5 はアオキの葉温を測定するために撮影した熱画像の例である。

測定によって得られた葉温，蒸発量をもとに，式 (3) により熱伝達係数を算出した結果を図 6 に示す。

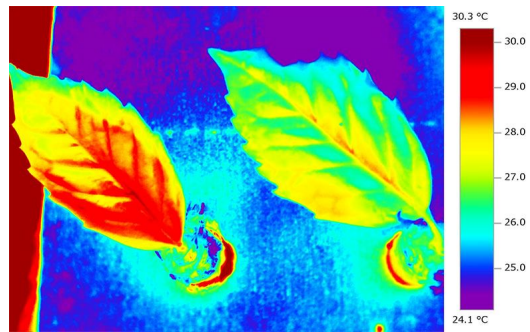


図 5 測定中の葉の熱画像

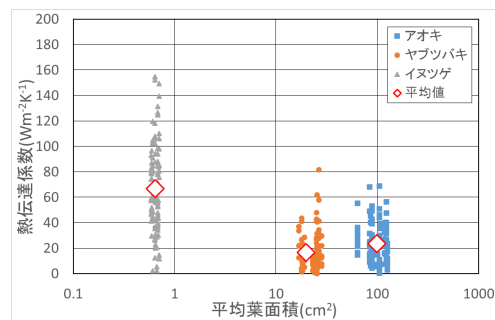


図 6 各樹種の熱伝達係数

イヌツゲは非常に葉面積が小さいため，平均的な熱伝達係数は高い値を示した。アオキ，ヤブツバキは，葉面積には差があるが，熱伝達係数に差はなかった。しかし，熱伝達係数の値としては，コンクリートなどの都市表面を構成する物体よりも高い値を示した。



図 7 芝生，樹木の配置(Envi-met)

(2) 都市緑地の熱環境シミュレーション

Envi-met で作成したエリアを図 7 に示す。樹木を，実際の状況に近くなるように配置した。シミュレーションの条件設定では，熱画像の測定日である 2014 年 8 月 19 日を対象日として計算を行った。計算のための条件として風速，風向，気温，絶対湿度，相対湿度については気象庁のデータを用いた。

図 8 に昼 12 時の表面温度測定結果とシミュレーション結果を比較したものを示す。樹林と芝生の表面温度は芝生のほうが高温となった。通路は，コンクリート表面であるた

め高温である。図9に、夜20時の表面温度測定結果とシミュレーション結果を比較したものを示す。樹林と芝生の表面温度を比較すると、昼の結果と逆転し、樹林のほうが高温となった。

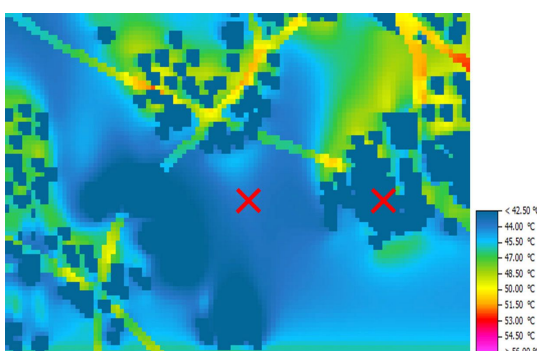
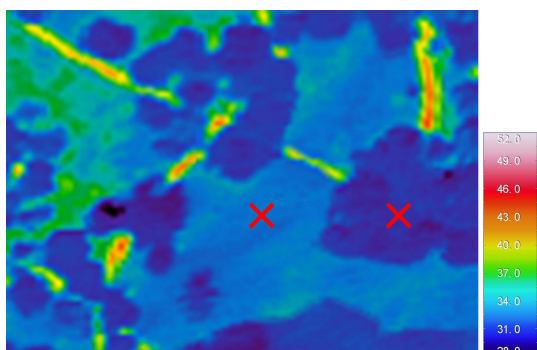


図8 昼(12時)の表面温度分布
測定(上)シミュレーション結果(下)

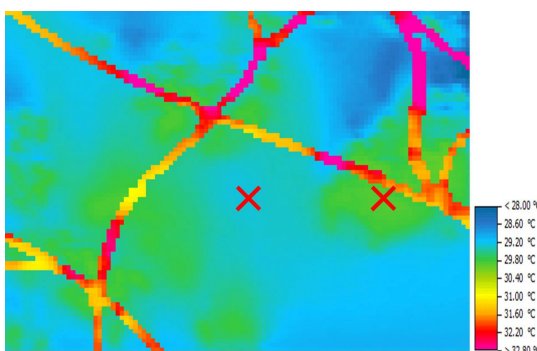
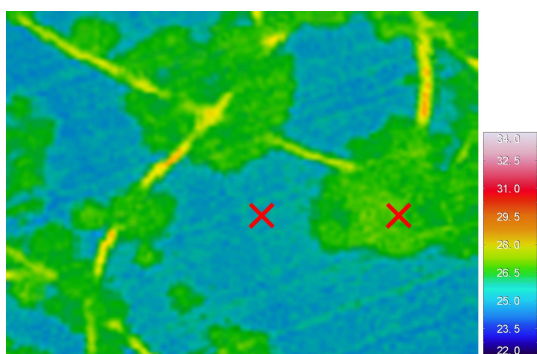


図9 夜(20時)の表面温度分布
測定(上)シミュレーション結果(下)

図8, 図9では、シミュレーションの結果

の傾向は、ほぼ測定の結果と一致している。

以上のように本研究では都市緑地の温度形成のメカニズムを解析し、植物の熱伝達係数が、建物壁面と比較して高い値であることや、シミュレーションにより、昼は芝生の表面温度が高く、夜は樹林の表面温度が高くなるという現象を再現した。その結果、緑地を都市の微気象制御に応用するための基礎的知見を得ることができた。今後このような知見を、都市緑地の設計に応用できると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

Honjo, T., Yamato, H., Mikami, T., & Grimmond, C. S. B. (2015). Network optimization for enhanced resilience of urban heat island measurements. *Sustainable Cities and Society*, 19, 319–330. doi.org/10.1016/j.scs.2015.02.004, 査読有り

Lindberg, F., Jonsson, P., Honjo, T., & Wästberg, D. (2015). Solar energy on building envelopes - 3D modelling in a 2D environment. *Solar Energy*, 115, 369–378. doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.001, 査読有り

加藤顕, 沖津優麻, 常松展充, 本條毅, 小林達明, & 市橋新. (2015). 森林の樹冠構造がヒートアイランド現象緩和機能に及ぼす影響. *日本緑化工学会誌*, 41(1), 169-174, 査読有り.

〔学会発表〕(計9件)

Tsuyoshi Honjo, Kiyoshi Umeki (2016) Application of Bayesian statistics on interpolation of meteorological data, ISAM2016 International Symposium on Agricultural Meteorology in Okayama 14-17 March 2016 岡山大学(岡山県・岡山市). 小島 倫直, 本條 毅, 成田 健一, 三坂育正, 菅原 広史, 吉田 篤正, 橋田 祥子, 土屋 直也(2015)緑地における夜間生成冷気の定量化に関する研究: その1 樹木モデルを用いた大気放射と自然対流による冷気生成量計算方法, 学術講演梗概集 2015(環境工学 I), 735-736, 一般社団法人日本建築学会, 東海大学, 2015年9月4日~6日, (神奈川県・平塚市)

本條毅, 梅木清(2015)空間自己相関を考慮した条件付自己回帰モデルによる気象データの補間, 第10回日本ヒートアイランド学会全国大会, 2015年8月28日~30日, 日本工業大学(埼玉県・宮代町) Honjo, Tsuyoshi (2015) Measurement and

Mitigation of Urban Heat Island, International Conference 2015 on Spatial Planning and Sustainable Development, Aug. 7-9, 2015, TAIPEI (Taiwan).

Honjo, Tsuyoshi; Umeki, Kiyoshi; Yamato, Hiroaki; Mikami, Takehiko; Grimmond, C.S.B. (2015) Network optimization of urban heat island measurements -Effect of reduction of observation points-, 9th International Conference on Urban Climate, July 20-24, 2015, Toulouse (France).

Honjo, Tsuyoshi; Umeki, Kiyoshi; Kurosawa, Shunsuke (2015) Cooling mechanism of leaves of urban vegetation, 9th International Conference on Urban Climate, July 20-24, 2015, Toulouse (France).

Tsunematsu, Nobumitsu; Yokoyama, Hitoshi; Honjo, Tsuyoshi; Ichihashi, Arata; Ando, Haruo; Matsumoto, Futoshi; Seto, Yoshihito; Shigyo, Nobuhiko (2015) Impacts of urban heat island mitigation strategies on surface temperatures in downtown Tokyo, 9th International Conference on Urban Climate, July 20-24, 2015, Toulouse (France).

Tsuyoshi Honjo, Kiyoshi Umeki (2015) Interpolation of meteorological data by conditional autoregressive models with spatial autocorrelation, ISAM2015, International Symposium on Agricultural Meteorology in Tsukuba 16-20 March 2015 文科省研究交流センター（茨城県・つくば市）.

Tsuyoshi Honjo, Kiyoshi Umeki, Shunsuke Kurosawa (2015) Cooling mechanism of urban vegetation and heat transfer of leaves, ISAM2015, International Symposium on Agricultural Meteorology in Tsukuba 16-20 March 2015 文科省研究交流センター（茨城県・つくば市）.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本條 毅 (HONJO TSUYOSHI)

千葉大学・大学院園芸学研究科・教授

研究者番号：60173655