

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420612

研究課題名(和文)植物葉群の大気熱交換機能を応用した屋外熱環境改善ユニットの開発

研究課題名(英文)Development of outdoor heat environment improvement unit applied heat exchange function of plant foliage

研究代表者

木下 進一(Kinoshita, Shinichi)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70263209

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)：都市部で深刻化するヒートアイランド現象を緩和するために樹木の利用が考えられるが、植物個体を熱交換ユニットと見なし、個葉ならびに葉群熱及び水分伝達特性を定量的に評価し、その支配要因を抽出するとともに、植物葉群の熱収支シミュレーションを行い熱交換ユニット開発のための基礎的特性について明らかにする。樹冠の形状等の異なる樹種について、個葉の蒸散量を測定し、葉面での潜熱輸送量評価に関わる基礎データを収集するとともに、樹種ごとの蒸散モデルのパラメータを同定した。一方葉群データを樹木生育モデルにより生成し、孤立樹木の熱収支を、葉面配向等の詳細構造を考慮した数値解析により評価した。

研究成果の概要(英文)：Planting trees is one of the countermeasures to urban heat island because of the cooling effect or the sunlight cover effect. The heat budget related to the performance of tree cannot be directly measured in detail. In this study, heat budget of isolated plant unit is numerically evaluated with thermal plant model including radiation transfer model for net radiation and transpiration model for latent heat transfer. Latent heat transfer related to transpiration on leaf surface can be evaluated by Jarvis model. In the prediction of net radiation of foliage, CG model with software AMAP is applied to decision of structure parameters which are included in Ross's equations. Leaf temperature which is essential to evaluate the thermal radiation from leaf surfaces and transpiration rate is evaluated as satisfying the heat budget on leaf surface. Parameters of Jarvis model is decided by measurement of transpiration rate of actual leaves of several kinds of trees.

研究分野：熱工学

キーワード：熱環境 屋外熱環境制御 ヒートアイランド 植物熱収支 ふく射伝熱解析 水分輸送モデル 熱環境改善ユニット

1. 研究開始当初の背景

近年ヒートアイランド現象に由来する都市域の夏季の高温化は、屋外環境の快適性の悪化、熱中症に代表される健康被害、空調負荷の増大に伴う二酸化炭素排出量の増加を招いており、その対策のひとつとして植樹等による緑化が考えられている。これには日射エネルギーを植物葉群での蒸散作用により吸収させ、大気への顕熱輸送量を削減することを意図した対策法であるが、都市表面の大部分を植生で覆うことは現実的に不可能であり、より少ない植樹でより効果的に快適な屋外空間を創出することが求められる。このための基礎的データを集める目的で、これまで孤立樹木の熱収支が評価されてきているが、蒸散作用に伴う潜熱吸収効果だけでなく、葉面と大気との間の顕熱交換もかなりの割合を占めていること、ならびにこの現象が植物の構造に起因した葉面の熱伝達率の高さによるものであることが明らかとなってきた。この結果から植物は生きた優れた熱交換ユニットとしても捉えることができる。その特性を応用した製品として、現状では例えば木の葉を模した日除け、蒸散作用を模した大気冷却システムの開発などがあげられる。これらはヒートアイランド対策の一環として行われてきた植物自体を使用した緑化とは異なる視点から解決策を模索したものであり、将来ヒートアイランド対策の一つの主力として十分機能し得るものになると期待できる。また、植物を優れた熱交換機関の集合体と捉え、その優れた効能を抽出し、前述でも述べた葉の構造を模擬した熱交換部品、蒸散作用を用いた水冷システムなどの既存の製品に組み合わせて高性能化をはかる熱交換ツールとしても利用できる可能性を秘めている。

2. 研究の目的

植物個体を熱交換ユニットとみなした場合に、植物葉群が機構的に有していると思われる高効率でかつ環境変化に対して自律的に対応が可能である特徴に着目し、その要素を抽出し屋外の熱環境改善のための人工ユニットの開発を目標とし、そこに繋がる植物の個々の葉面および葉群での熱収支特性を明らかにすることを目的とする。具体的には種々の植物の蒸散特性を測定することにより、熱伝達および水分伝達機能に対する支配要因を明らかにする。また屋外空間における植物葉群を対象とした熱収支シミュレーション技術を確認し、熱交換ユニットの作成のためのツールとして利用する。

3. 研究の方法

前述の目的のために、「孤立樹木の熱収支評価」、ならびに「植物形状データに基づく植物熱収支評価数値シミュレーション」を行う。具体的には次のとおりである。

(1) 典型的な複数種類の街路樹を対象とし

て、気象各要素ならびに樹液流速、個葉の蒸散量を測定し、それらの結果から樹木が吸収する正味ふく射量、大気への潜熱および顕熱輸送量を評価する。個葉の蒸散量はリーフポロメーターにより測定し、葉の付き方、方向などが蒸散量に与える影響について系統的に評価する。

(2) 造園分野において利用されている、植物の成長を含めた植物の詳細形状を再現できるシミュレーター (AMAP) を用いて、孤立樹木のポリゴンデータを生成し、このデータを応用した数値解析を行い、孤立樹木の熱および水分伝達特性を詳細に明らかにする。特に (a) 個葉における日射の吸収・反射・透過ならびに蒸散量、熱伝達量を計算し、その熱収支から葉面温度を評価する。その際個葉間のふく射伝達特性も考慮する。(b) 数百枚程度の葉群を想定し、(a) の解析手法を拡張し、ふく射吸収および大気との熱および水分伝達特性を評価する。(c) 最終的に孤立樹木全体の熱収支について評価することを試みる。

4. 研究成果

(1) 植物形状データに基づく植物熱収支評価数値シミュレーション

① はじめに

近年、都市部でのヒートアイランド現象が深刻化してきており、その対策として都市緑化が知られている。都市緑化の効果としては蒸散作用による冷却効果や日射遮蔽効果等が期待される。緑化による熱的快適空間を構築する際、一般に植えることができる樹木の数に制限されるため、個々の樹木の熱的な特徴を考慮して効果的に配置することが望ましい。街区の熱的設計を行う際には、樹木と周辺空間との間での熱・エネルギーの授受を評価できる樹木モデルが必要である。物理的に妥当なモデルを構築するうえで、樹冠の葉群での熱収支を構成する正味ふく射、蒸散による潜熱輸送、大気への顕熱輸送について詳細に評価することは重要である。

本研究では孤立樹木の植物葉群における熱収支を、樹形や葉面の配向等の詳細構造を考慮に入れ、数値解析により評価する。

② 樹冠の熱収支

熱収支のバランスは、正味ふく射、葉面大気間の顕熱輸送および潜熱輸送および葉群等への伝導熱輸送で表現できる。葉面の表裏の温度差は小さいと考え伝導熱輸送を無視し、正味ふく射と顕熱輸送・潜熱輸送がバランスすると考える。葉面の蒸散に関わる潜熱輸送は Jarvis モデル^[1]により評価することとする。正味ふく射は次節の Ross の放射輸送方程式^[2]により評価することができ、顕熱輸送はそれらの差から評価するものとする。潜熱輸送の予測において葉温 T_L が必要であり、葉面からの赤外放射も葉温の関数である。本研

究では葉面での熱収支が満足されるように、反復解法によって葉温を決定する。

③ Ross の放射輸送方程式とパラメータの決定

樹形や葉形、葉のつき方などの樹種特性まで CG モデルで描写可能なソフトウェアである AMAP を用い、生成される植物モデルのポリゴンデータから葉面積密度などの構造パラメータを求め、Ross の植物群落内放射輸送方程式に適用することで樹木の正味ふく射を予測する。正味ふく射を評価するためには、短波成分については直達日射、散乱日射および樹冠内での散乱光を、長波成分については大気放射を含む周囲からの熱放射および葉面からの熱放射を考慮する必要がある。短波

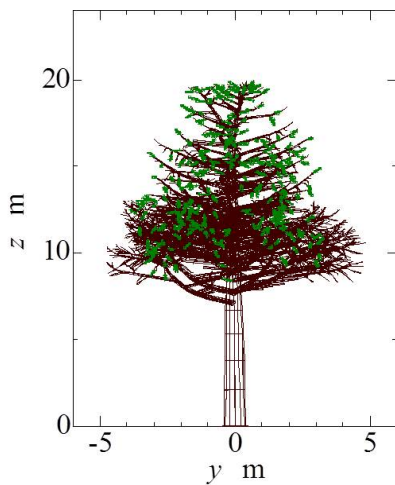


図1 イチョウの樹冠形状

表1 Jarvis パラメータ (イチョウ)

		イチョウ
$g_{s,max}$	cm/s	0.34
a		0.014
b		0.011
T_0	deg.C	29.3

$$g_s = g_{s,max} f_1(Q) f_2(D) f_3(T_i)$$

$$f_1(Q) = \frac{Q}{Q + g_{s,max}/a} \quad f_2(D) = 1 - bD$$

$$f_3(T_i) = \left(\frac{T_i - T_L}{T_0 - T_L} \right) \left(\frac{T_H - T_i}{T_H - T_0} \right)^{(T_H - T_0)/(T_0 - T_L)}$$

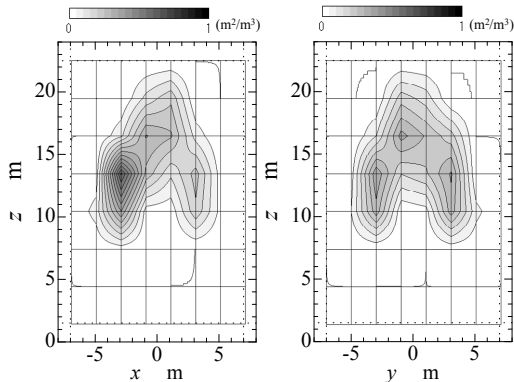


図2 イチョウの葉面積密度

放射については光合成有効放射域と近赤外域の2領域に分けて解析を行う。基礎式は次の通りである。

$$r_j \frac{\partial i_d(x,r)}{\partial x_j} = -a(x)G(x,r)i_d(x,r) \quad (1)$$

$$r_j \frac{\partial I(x,r)}{\partial x_j} = a(x) \left\{ -G(x,r)I(x,r) + \int_{\omega'=4\pi} \Gamma(x,r,r') i_{ir}(x,r') + I(x,r') \right\} d\omega' \quad (2)$$

$$r_j \frac{\partial i_{ir}(x,r)}{\partial x_j} = a(x) \left\{ -G(x,r)i_{ir}(x,r) + \frac{\varepsilon}{\pi} G(x,r)\sigma(T_L + T_A)^4 + \frac{1-\varepsilon}{\pi} \int_{\omega'=4\pi} \Gamma_R(x,r,r') i_{ir}(x,r') d\omega' \right\} \quad (3)$$

$$G(x,r) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega=2\pi} g(x,r_L) |(r \cdot r_L)| d\omega' \quad (4)$$

$$\Gamma(x,r,r') = \frac{T}{\pi} \Gamma_T(x,r,r') + \frac{R}{\pi} \Gamma_R(x,r,r') \quad (5)$$

$$\Gamma_T(x,r,r') = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(x,r_L) H[(r \cdot r_L)(r' \cdot r_L)] d\omega_L \quad (6)$$

$$\Gamma_R(x,r,r') = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_L=2\pi} g(x,r_L) H[-(r \cdot r_L)(r' \cdot r_L)] d\omega_L \quad (7)$$

$$H[f] = f \quad \text{if } f \geq 0 \quad H[f] = -f \quad \text{if } f < 0 \quad (8)$$

ここで x は位置、 r はふく射光線の方向ベクトル、 r_L は葉面の法線ベクトル、 i_d および I はそれぞれ短波放射の直達成分と散乱成分、 i_{ir} は長波放射、 $a(x)$ は葉面積密度、 $g(x,r_L)$ は葉群の配置関数、 G は葉群の減衰係数、 Γ は葉群の散乱関数、 T および R はそれぞれ短波放射に対する単一葉面の透過率および反射率である。葉面での反射および透過はそれぞれ半球方向に一様であるとする。 ε は葉面の赤外放射率、 ω は立体角、 T_A は 0°C に対する絶対温度である。

計算領域について、AMAP にて生成した樹木の幹根元の中心を原点とし、水平方向に x 軸、 y 軸を、鉛直方向に z 軸を置く。樹木全体が収まる程度に配置し、それぞれの軸方向に等間隔のボクセルに空間を分割する。各ボクセルに含まれる葉面要素データからそのセルにおける葉面積密度 a ならびに配置関数 g を算出し、 G 関数、 Γ 関数も併せて算出する。ふく射光線は各ボクセルの中央から全球方向に離散的に放射されるものとする。ただし短波放射の直達成分は計算領域境界の面要素中央からのみ放射されるものとする。式(1)～式(3)の放射輸送方程式はふく射要素法^[3]に基づいて解くものとし、葉面での反射、透過ならびに放射による樹冠内部でのふく射エネルギーに授受についても考慮して解析する。

④ CAD データに基づく孤立樹木の熱収支解析

CAD データに基づくイチョウについて、数値解析を行った。図1に樹木モデルの概略を示す。樹高は19.7m、地表面投影面積は170m²、LAIは4.6である。葉面ポリゴン数は約985000である。葉面蒸散速度に関する気孔コンダクタンス g_s の Jarvis パラメータは別途学内の樹木を対象として行った蒸散測定の結果より表1の通り同定した。計算領域は樹木根元を原点に取り、南北方向 (x 軸)・東西方向 (y 軸) にそれぞれ16m、鉛直方向 (z 軸) に24mの矩形領域とする。計算領域を x 、 y および z

表 2 サンプル解析の条件

天頂角	deg.	16.9
方位角	deg.	3.49
全天日射	W/m ²	559
大気放射	W/m ²	467
気温	deg.C	33.0
地表面温度	deg.C	51.7
相対湿度	%	50.2
風速	m/s	1.7

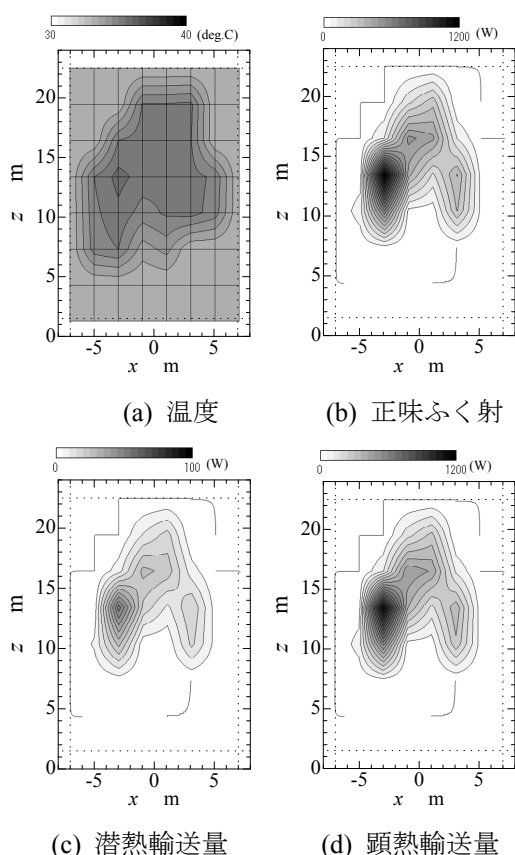


図 3 数値解析結果

方向にそれぞれ 8 分割し、512 個の 2m × 2m × 3m のボクセルを配置する。図 2 に原点を通り南北および東西断面における葉面積密度分布を示す。z 軸付近の樹幹近傍の密度が低く、それに比べ周辺部の値が大きくなっており、最大で 0.6m²/m³ 程度である。

サンプル計算として表 2 の環境条件の解析を行う。葉面の反射率、透過率は光合成有効放射域および近赤外域においてそれぞれ 0.1, 0.1 および 0.4, 0.5 とし、赤外放射率は 0.90 とする。葉面熱伝達率は風速の関数とし、Daudet らの測定による関数^[4]を用いる。

図 3 に計算結果のうち、葉温分布、正味ふく射、潜熱輸送、顕熱輸送の南北断面における分布を示す。葉温は直達光が照射される南側 (x 座標の負の領域) において高くなり、その反対側で低くなる傾向がある。この領域の葉面積密度は他よりも高く、正味ふく射も

大きい値となっており、この点において定性的に妥当な結果が得られていると考える。ただし、潜熱輸送が正味ふく射および顕熱輸送に比べ、極めて小さいことから、蒸散速度に関する解析方法について検討の必要がある。

今後は解析方法の詳細を検討しつつ、正味ふく射に関する詳細なふく射伝熱の評価、樹種または樹冠の構造の違いが熱収支に及ぼす影響の評価などを行う。また相対的に無視できる現象を特定し、解析モデルの簡略化と計算負荷の低減を図る予定である。

(2) 異なる樹種の蒸散量測定

① 蒸散量測定

大阪府立大学中百舌鳥キャンパスにあるアラカシ、イチョウ、エノキ、カワヅザクラ、クスノキ、ケヤキ、トウカエデ、ハナミズキ、ポプラ、モミジバフウ、マテバシイの 11 種の樹木の蒸散量測定を行った。測定は拡散型ポロメータ (LI1600, Li-Cor 社) を用いて行った。本装置は、葉一枚の蒸散量を非破壊で求めることができ、気温、葉温、湿度、光量子量も直接測定することができる。一般に植物は葉温が高くなったり、受ける光量子量が多くなったり、飽差が大きくなったりすると、蒸散速度が大きくなる傾向がある。実際に上記の装置を用いて、蒸散量を測定したところ、トウカエデのように光量子量と蒸散速度の間にある程度相関が見られたものがあつた一方で、ハナミズキのように相関のほとんど見られないものもあつた。トウカエデを例として図 4 に示す。

② 蒸散量予測モデルの妥当性の評価

Jarvis モデルとは、葉温 T_l 、光量子量 Q 、飽差 D という周囲の気象要素をパラメータに用いて蒸散量を予測するモデルである。また Jarvis のモデルを元に小杉が新たな飽差のモデルを提案した。本研究では予測性の比較のために Jarvis モデルと小杉モデル^[5]の両方を試した。実際に実測した蒸散量を元に Jarvis モデル、小杉モデルに含まれる未知パラメータを同定した。そのパラメータを用いて、Jarvis モデル、小杉モデルで予測した蒸散速度の値と蒸散量の実測値を比較し、モデルの妥当性を調べた。比較した図の例としてカワヅザクラの場合を図 5 に示す。◆が Jarvis,

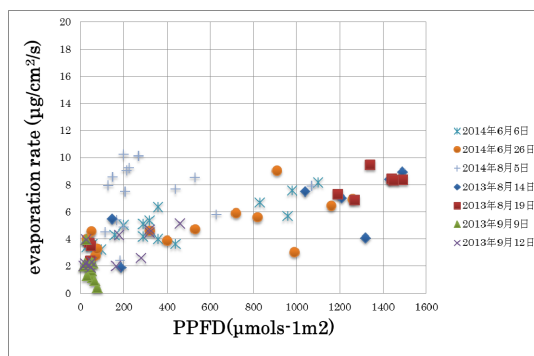


図 4 光量子量と蒸散速度の関係 (トウカエデ)

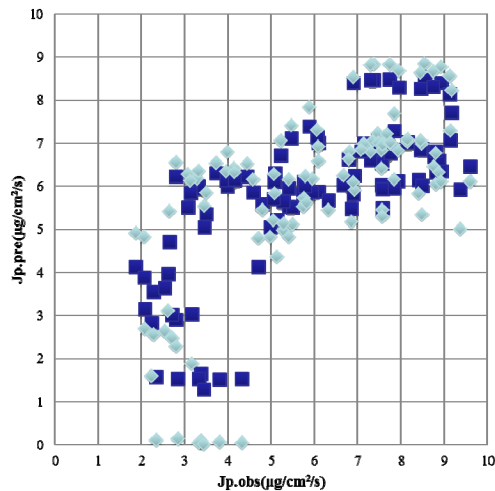


図5 実測値と予測値の比較 (カワズザクラ)

■が小杉の値になっている。Jarvis の相関係数は 0.65, 小杉のモデルの相関係数は 0.72 である。他の樹種でも, 小杉のモデルの方が相関係数が高い。よって予測性は小杉のモデルの方が高いといえる。また 0.72 という相関係数から, 小杉のモデルで蒸散量を予測できるとする。

参考文献

- [1] Jarvis, P.G., The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field, Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. 273 (1976), pp.593-610.
- [2] Ross, J., Nilson, T., Radiation Exchange in Plant Canopies, Heat and Mass Transfer in the Biosphere Part 1 Transfer Processes in the Plant Environment, (1975), pp.327-336.
- [3] Maruyama, S. Radiative heat transfer in anisotropic scattering media with specular boundary subjected to collimated irradiation, Int'l J. Heat and Mass Transfer, Vol.41 (1998), pp.2847-2856.
- [4] Daudet F.A., et al., Leaf boundary layer conductance in a vineyard in Portugal, Agricultural and Forest Meteorology, Vol.89 (1998), pp.255-267.
- [5] 小杉緑子, 小橋澄治, 柴田昌三, “数種常緑種広葉樹における気孔コンダクタンスのモデル化”, 日本緑化工学会誌 20-3 (1995), pp.158-167.

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計4件)

- Shinichi Kinoshita, Atsumasa Yoshida, Shoko Hashida, “Numerical Analysis of Energy Budget for an Isolated Tree Crown Considering the Detailed Foliage Structure”, The 1st Pacific-Rim Thermal Engineering Conference, PRTEC-15217 (5pages), Hawaii's Big Island, USA, (2016-3).

- 木下進一, 吉田篤正, 橋田祥子, 葉群の詳細構造を考慮した孤立樹木の熱収支評価, 日本ヒートアイランド学会第10回全国大会, 日本工業大学宮代キャンパス (埼玉県南埼玉郡宮代町), pp.52-53, (2015-8).
- Shinichi Kinoshita, Atsumasa Yoshida, Shoko Hashida, “Numerical Evaluation of Heat Budget in Tree Crown Considering the Detailed Structure”, The 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), USB-Flash (4pages), Toulouse, France, (2015-7).
- 木下進一, 吉田篤正, 詳細構造を考慮した植物葉群の熱収支評価に関する数値解析, 2013年度日本建築学会大会, 北海道大学 (北海道札幌市), 講演梗概集, pp.7-8, (2013-8).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木下 進一 (KINOSHITA, Shinichi)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号：70263209

(2) 研究分担者

吉田 篤正 (YOSHIDA, Atsumasa)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号：60174918