

## ケヤキ樹冠の対流熱伝達率

CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF CROWN OF *ZELKOVA SERRATA*

浅輪 貴史\*, 藤原 邦彦\*\*, 梅干野 晃\*\*\*, 清水 克哉\*\*\*\*

Takashi ASAWA, Kunihiko FUJIWARA, Akira HOYANO  
and Katsuya SHIMIZU

This study quantifies the convective heat transfer coefficient (CHTC) of the entire crown of *Zelkova serrata* under outdoor conditions. The CHTC is determined from whole-tree heat balances for two individual trees which differ in their transpiration rate. The whole-tree transpiration rate of the irrigated tree was measured by a highly accurate, large weighing lysimeter, while the leaf temperatures were measured by infrared thermography. The estimated CHTC was  $h_c = 7.9U + 17.2$  ( $R^2 = 0.56$ ,  $U$ : representative wind speed for the site) for the entire crown and  $h_c = 8.3u + 18.2$  ( $R^2 = 0.77$ ,  $u$ : wind speed near the leaf) for the individual leaf. The CHTCs were identified as being double the value given by the Jürges formula, due to the size and amount of flutter of the leaves.

**Keywords :** Convective heat transfer coefficient, Tree, Heat balance, Transpiration, Sensible heat flux, Outdoor experiment

対流熱伝達率, 樹木, 熱収支, 蒸散, 顕熱輸送, 屋外実験

## 1. はじめに

都市における樹木の熱環境緩和効果の一つとして、蒸散作用に伴う葉面と周辺大気との温度上昇抑制が挙げられる。蒸散は、葉内と大気との水ポテンシャル勾配により駆動される気孔を介しての水蒸気拡散現象であり、熱輸送は潜熱に基づく。この蒸散速度と潜熱輸送は、ポロメータ法<sup>1)</sup>や樹液流法 (Granier 法)<sup>2)</sup>、ライシメータ法 (重量計測法)<sup>3)</sup>などの測定方法が開発されている。単木あたりの蒸散速度はライシメータ法により直接求めることが可能であり、筆者らも、大型重量計を用いることでコンテナ植栽された樹高数 m の都市緑化用樹木の蒸散速度と潜熱輸送量を定量化する方法を開発し、その特性を明らかにしてきている<sup>4)</sup>。一方、樹木が周辺大気に及ぼす熱的影響を厳密に評価するには、潜熱輸送とともに、大気を直接暖める要因である顕熱輸送の特性を明らかにしなければならない。すなわち、樹冠部の葉群における正味吸収放射量が主に潜熱輸送量と顕熱輸送量に分配されるため、潜熱輸送量のみでは大気熱負荷の評価は不十分と言える。しかしながら、樹冠から大気への顕熱輸送量は蒸散速度のように直接計測できないうえに間接的な推定も困難であるため、森林等の面的に広がる条件すなわち鉛直一次元方向のフラックス観測が可能な条件以外では、その特性は未だ十分明らかにされてきていない。

個葉に着目すると、葉面から大気への熱や物質のスカラー輸送量は、葉面と周辺大気とのスカラー濃度差 (温度差、物質濃度差)、及び葉面境界層コンダクタンス (Leaf boundary layer conductance;

$g_a$ ) によって記述できる (蒸散の場合は、これに加えて気孔コンダクタンスが関与する)。これまで、主に農業気象学の分野において、光合成に伴う植物の物質生産の観点から二酸化炭素の吸収効率や水利用効率を把握する目的で、 $g_a$  に関する理論的考察や数多くの実験が行われてきた<sup>5)</sup>。

顕熱輸送の観点から  $g_a$  を表す指標として、対流熱伝達率 (Convective Heat Transfer Coefficient; CHTC) がある。この CHTC は、葉の形状や寸法とともに葉面近傍の流れ場によって支配されるが、屋外の自然風条件下においては枝葉の揺れを伴うため、伝熱理論に基づく無次元数を用いた統一的な定式化は困難であることが予想される<sup>6)</sup>。さらには、樹木の樹冠は建築壁面のように面的に広がりを持ったものではなく、個葉の集合体である葉群で構成されており、葉群としての樹冠全体の特性を知る必要が生じる。以上の背景にもとづき本研究では、単木の樹冠から大気への顕熱輸送量を定量化するための主要なパラメータである樹冠部の対流熱伝達率 (CHTC) を屋外実測に基づき明らかにすることを目的とする。対象とする樹木は、我が国で街路樹や都市緑化などに多く使われているケヤキとする。

## 2. 対流熱伝達率の算定方法

## 2.1 対流熱伝達率に関する既往研究

葉面の  $g_a$  や CHTC に関する既往研究は多く、本研究で導入する CHTC の算定方法について詳細に検討するため、1)  $g_a$  に関する既往

本論文は既報 55) に加筆修正を加えたものである。

\* 東京工業大学大学院 准教授・博士 (工学)

\*\* 竹中工務店技術研究所 修士 (工学)

(元東京工業大学 大学院生)

\*\*\* 放送大学 教授・工博

\*\*\*\* トヨタ自動車バイオ・緑化研究所

Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.  
Takenaka Research & Development Institute, M.Eng.Prof., The Open University of Japan, Dr.Eng.  
TOYOTA Motor Corporation, Biotechnology & Afforestation Division

研究、2) 葉面の CHTC の測定法に関する既往研究、3) CHTC の応用研究に関するレビューを行う。

#### 1) 葉面境界層コンダクタンス $g_a$

葉面の  $g_a$  に関して農業気象学の分野では、物質輸送と熱輸送の両者に関するコンダクタンスが調べられてきており、伝熱工学の無次元数の理論に基づく葉の寸法や近傍気流の影響に基づくもの<sup>9)</sup>から、自然風の乱れ<sup>10)</sup>と風に伴う葉の揺らぎがもたらす影響<sup>11)</sup>まで非常に多くの研究がなされてきている<sup>7,8)</sup>。特に、自然風に葉がそよぐことで葉面境界層が薄くなり  $g_a$  が増加することが、様々な実験結果より示されている<sup>11) 注 1)</sup>。これらは、自然風の条件下における CHTC 同定の重要性を示すものである。

#### 2) CHTC の測定法

まず、スカラー輸送の中で物質輸送に着目すると、個葉および単木の蒸散速度は前記の通り計測可能なため、水蒸気拡散コンダクタンス (Vapor diffusion conductance,  $g_v$ ) も同定されてきている。特に、ライシメータ法により重量計測を行えば、単木 (植物) あたりの蒸散速度と  $g_v$  が精度良く同定可能である<sup>12)13)14)</sup>。小規模なポット植栽を対象としたものが殆どであるが、筆者らは、実大樹木への適用を可能としている<sup>4)</sup>。ここで、 $g_v$  は  $g_a$  と気孔コンダクタンス (Stomatal conductance,  $g_s$ ) により決定されるため、 $g_a$  を求めるには  $g_v$  から  $g_s$  を分離する必要があるが生じる。人工的に模擬した小規模な樹木を対象にして、葉を湿潤させることで重量計測により葉面境界層抵抗 ( $g_a$  の逆数) を直接同定した研究も見られる<sup>15)</sup>。建築環境工学の分野においては、壁面等を対象に、湿潤濾紙等を用いた水分蒸発による物質伝達率 ( $g_v$ ) からルイス則を適用して CHTC を推定する方法が用いられてきている<sup>16)</sup>。CHTC に関しては、上記のような物質伝達との相似性を利用するほかに、次に示す熱収支を利用する方法が採用されている。

個葉や樹木の熱収支を用いる方法も多くの研究事例があり、代表的な方法として正味放射量、蒸散速度等を計測し、残差として得られる顕熱輸送量を葉温と気温の差で除することで CHTC を求める方法 (熱収支法) がある<sup>12)17)18)</sup>。この方法は、実際の葉と、人工葉の両方に適用されている。主に人工葉の場合には、ヒーター等で加熱することで、気温との温度差を付け、CHTC の算出精度を向上させる方法も見られる<sup>19)20)</sup>。

熱収支法を応用し、放射吸収量が同等と見なせる 2 枚の葉に蒸散速度などの条件差を強制的に与え、放射吸収量等の計測が困難な項目を連立式により消去する方法も用いられてきている (以下、熱収支連立法)。葉面の蒸散速度に差をつける方法としては、片方の葉にワセリンを塗布し蒸散を物理的に抑制したり<sup>21)</sup>、蒸散抑制剤 (アブジン酸) により生理的に気孔を閉鎖させるなどの方法が採用されている<sup>13)</sup>。これらの方法は、前記の通り両者の放射吸収量が等しいと仮定できることが前提条件である。式 1)、2) に蒸散がある場合と無い場合の個葉 (両面) の熱収支式を示す。これらを連立させることで式 3) により CHTC が求まる。

$$aS_i + \varepsilon L_i = I_E + 2h_c(T_{l1} - T_a) + 2\sigma\varepsilon T_{l1}^4 \quad (\text{葉 1: 蒸散あり}) \quad \text{式 1)}$$

$$aS_i + \varepsilon L_i = 2h_c(T_{l2} - T_a) + 2\sigma\varepsilon T_{l2}^4 \quad (\text{葉 2: 蒸散なし}) \quad \text{式 2)}$$

$$h_c = \frac{0.5IE - \sigma\varepsilon(T_{l2}^4 - T_{l1}^4)}{T_{l2} - T_{l1}} \quad \text{式 3)}$$

ここで、 $a$ :葉の日射 (短波長放射) 吸収率[-]、 $S_i$ :入射短波長放射量[W/m<sup>2</sup>]、 $\varepsilon$ :長波長放射率[-]、 $L_i$ :入射長波長放射量[W/m<sup>2</sup>]、 $I$ :蒸発潜熱[J/g]、 $E$ :蒸散速度[g/(m<sup>2</sup>s)]、 $h_c$ :対流熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>K)]、 $T_l$ :葉温[K]、 $T_a$ :気温[K]、 $\sigma$ :ステファン・ボルツマン定数(=5.67×10<sup>-8</sup>)[W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)]、1,2(下付き文字):葉 1 と葉 2

後者の蒸散抑制剤を用いる方法<sup>13)</sup>は、植物 (キュウリ、レタス) の個体全体にも適用されており、蒸散速度を重量計測により明らかにすることで、植物全体の平均境界層コンダクタンス ( $g_a$ ) が同定されている。本手法では、蒸散速度差が葉温に明確な差を与えることが連立の必要条件となるが、樹木の水ストレスを葉温から検出する試みも数多く行われているなど、蒸散速度と葉温が連動して変化することは原理的にも妥当な仮定と言える<sup>22)23)24)</sup>。また人工葉の場合には、蒸散速度差の代わりに片方の葉をヒーター等で加熱することで、温度差を付けることも行われている<sup>25)26)</sup>。

熱収支法、熱収支連立法とも、小規模な植物を対象とした幾つかの研究<sup>12)13)</sup>を除いては、個葉を対象とした研究が殆どであり、葉群で構成される樹冠の総合的な CHTC を求めたものは散見されない。一方、両手法は日射や自然風などの屋外暴露環境における建築外表面の CHTC 算定<sup>27)28)29)30)31)</sup>においても適用されている方法であり、応用性は高い。計測項目が増えれば、その分だけ最終誤差が積み上がる点に留意する必要があるが、その点で、熱収支連立法は式 3) に示す通り、放射吸収量が同等と見なせれば両葉面の温度差と、計測可能な蒸散速度か、あるいは既知であるヒーターの発熱量のみで CHTC が定式化される点で有利な方法である<sup>注 2)</sup>。

#### 3) CHTC の応用研究

葉群で構成される樹木全体を対象とし周辺環境との熱・水収支をモデル化する研究も盛んに行われており、本研究も最終的にはモデルへの適用を目指しているため、前述のような基礎研究に基づき CHTC がどのように設定されているかを概観する。大別すると、風洞や屋外での実測に基づくもの、流体力学の観点から無次元数を用い定式化を行うもの、建築環境工学の分野で用いられる CHTC を用いるものなどが挙げられる。葉群は葉面積密度に応じたポーラス体として取り扱われることが多い。平岡 (2002)<sup>32)</sup>、Hiraoka (2005)<sup>33)</sup>は、葉群内の熱収支計算において、Daudet et al. (1998)<sup>34)</sup>による葉型の金属板における実験式を適用している。これは風洞実験において得られた実験式であり、枝葉の揺れの影響等は考慮されていない。尚、Daudet et al. (1998)<sup>34)</sup>は同様の葉型を用いて屋外での植生キャノピーを対象に自然風下での実験も行っている。また、温室内の植物を対象とした Kichah et al. (2012)<sup>14)</sup>や Nebbali et al. (2012)<sup>35)</sup>の研究では、Montero et al. (2001)<sup>36)</sup>や Boulard et al. (2002)<sup>37)</sup>に基づき流体の無次元数 ( $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$ ,  $Re$  数) を用いて CHTC を同定している。神田ら (1990)<sup>38)</sup>らは流体力学の観点から植生の物理モデルを構築しており、その中の CHTC にはやはり流体の  $Re$  数との関係に基づく式を用いている。尚、自然対流の取り扱いには研究毎に差異がみられる。

建築外部空間の熱環境予測において、Robitu et al. (2006)<sup>39)</sup>は Dauzat et al. (2001)<sup>40)</sup>に基づき CHTC に風速と葉の代表長さから求める実験式を適用している。建築・都市環境工学分野に着目すると、建築壁面等の CHTC として慣用的に用いられる式として、風洞内に設置された 50 cm 四方の銅板を対象に同定された Jürges の式<sup>41)</sup>がある。街区スケールの熱環境予測における樹木の熱収支モデルにおいて、このような建築壁面と同等の CHTC の値を用いている研究も見られる<sup>42)</sup>。

以上に整理した多くの研究においても、樹木-大気間の熱収支解明において重要な情報の一つである樹冠部全体の CHTC を屋外条件下において直接求めたものは見られず、シミュレーションモデル上での取り扱いも様々である。これは、これまで CHTC の有効な同定法が個葉レベルに留まっていたためであり、樹冠部を対象とし同定する意義は大きい。

## 2. 2 対流熱伝達率算定方法の提案

### 1) 既往研究から反映できる知見の整理

以上に記載した既往研究における CHTC の算定方法を整理すると、樹冠部に適用するうえで重要な知見は次の 6 点と考えられる。①自然風条件下において、枝葉が風にそよいでいる状態での算定が重要である。②2 対の試験体の熱収支を連立させることは、測定誤差の積み重ねや伝播を減らすのに効果的である。③計測可能なフラックス差と葉温差を用いることが有効である。④蒸散速度は葉温に明確な差を生じ得るため有効に利用可能なフラックス成分である。⑤単木の蒸発速度と潜熱輸送量はライシメータ法により精度の高い計測が可能となってきた。⑥機差等の系統誤差が生じ得るため、機材と測定項目は最小限にとどめる必要がある。これらを踏まえ、本研究では熱収支連立法を樹冠部に適用し、蒸散速度の異なる 2 本の樹木の熱収支を連立させることで、CHTC を算定する方法を提案する。

### 2) 樹冠の CHTC の算定方法

本研究で定義する樹冠の CHTC とは、樹冠を構成する葉群全体と、樹冠外部（樹冠の影響が及ぶ範囲外）の大気との間の対流による熱コンダクタンスとする。葉群の単位葉面積当たりの値として求める。このとき、樹冠内の CHTC に分布は無いと仮定する。

まず、同一の屋外環境下に置かれ、灌水条件を調整することで蒸散速度に差異を付けた 2 本の樹木 A、A' の熱収支を考える（図 1）。ここで、熱収支は、樹冠を葉群として捉えた場合の葉群全体の正味の熱収支であり、値は単位葉面積あたりで統一する。樹木 A、A' は樹齢、葉面積の等しい同樹種の樹木とする。同一環境下にあり、樹形と葉面積密度が類似していれば、入射する長短波放射量と CHTC が等しいと見なすことが出来るため、式 1)、2) に基づき A、A' の熱収支は式 4)、5) で表される。

$$a_T S_{IT} + \varepsilon_T L_{IT} = lE_T + 2h_{CT}(T_{IT} - T_a) + 2\sigma\varepsilon_T T_{IT}^4 \quad \text{式 4)}$$

$$a_T S_{IT'} + \varepsilon_T L_{IT'} = lE_{T'} + 2h_{CT}(T_{IT'} - T_a) + 2\sigma\varepsilon_T T_{IT'}^4 \quad \text{式 5)}$$

ここで、 $T$ (下付き文字)は樹冠部を表しており、葉群全体の平均値である。 $T_a$ は、樹冠外部の代表気温とする。

さらに蒸散速度に大きな差が生じれば葉温も異なることが想定されるため、両者の蒸散速度と樹冠の平均葉温が同定できれば、式 4)

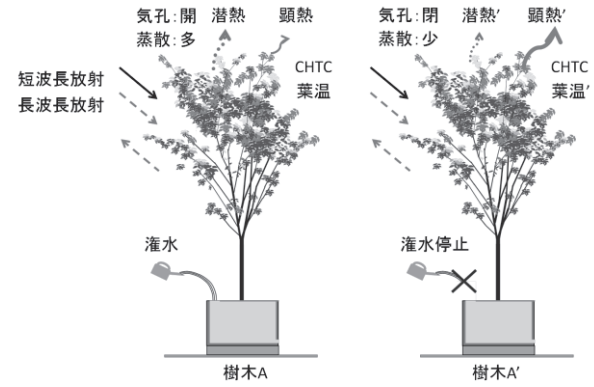


Fig.1 Heat balances of trees under different irrigation conditions

と 5) を連立させることで CHTC の算出式 6) が導出される。

$$h_{CT} = \frac{0.5(lE_{T'} - lE_T) - \sigma\varepsilon(T_{IT'}^4 - T_{IT}^4)}{T_{IT'} - T_{IT}} \quad \text{式 6)}$$

両樹木で樹形や葉面積密度分布は完全に一致することはないが、葉温の平均値の樹間差が CHTC の算出結果に影響を及ぼす主要因であり、多少の差異は他の誤差に吸収され問題にはならない。

### 3) 個葉の CHTC の算定方法

個葉の CHTC についても算出し、樹冠全体の値と比較を行う。これは樹冠の CHTC を算出するうえで樹冠内に CHTC の分布が無いことを仮定しているため、両者の一致性を確認することが、その妥当性を確認する第一の条件と見なせるためである。

個葉についても同様に熱収支式を連立させることで CHTC を算定する。熱収支を連立させるために、樹冠全体の場合には蒸散速度に差異を付けた条件を設けたが、個葉の場合には一枚の葉での時系列での短波長放射量の増減と、風速の増減に注目する。これは、蒸散速度差を利用しようとするとポロメータによる個葉の蒸散速度測定が必要となるが、同装置は測定原理上、誤差が無視しえないためである。

まず、一定時間風速 ( $u$ ) が安定し、短波長放射が顕著に増減するときの熱収支を考える（図 2）。このとき、二つの時点を B、B' とする。概ね数分の時点間を想定すると、短波長放射量の変化に伴う蒸散速度の応答変動は十分小さいと考えられるため、 $lE$  は一定と仮定でき、また  $u$  の変化も小さいため CHTC は一定であると見なせる。周囲からの長波長放射量も短時間では等しいと考えられるが、これは計測より確認する。B、B' の  $u$  と CHTC が同値であるため、式 1) の熱収支式を両時点て連立することにより式 7) が導出される。これを、＜連立条件 B＞と呼ぶこととする。

$$h_c = \frac{0.5a(S_{IT'} - S_{IT}) - \sigma\varepsilon(T_{IT'}^4 - T_{IT}^4)}{T_{IT'} - T_{IT}} \quad \text{式 7)}$$

吸収短波長放射量と葉温を計測することで、式 7) より CHTC が算出される。ここで、風速が安定している条件のデータが多数得られれば CHTC の傾向を見出すことが可能であるが、一般的に風速は変動が大きいため一定時間風速が安定しつつ短波長放射量の変化が顕著であるデータを十分数得ることは困難な場合が多い。そこで、



より多くの算定用データを確保するため、一定時間短波長放射量が安定し、風速増減が顕著なときの熱収支も考える（図 3）。この間、前述のように蒸散速度の変動は小さいと考えられるため  $LE$  は一定であると見なすことが出来る。この条件を満たす C、C' の 2 時点を考えてとき、吸収放射量と  $LE$  が同値である一方、 $u$  が変化するため CHTC は異なる。そのため、式 1) の熱収支式を両時点で連立することにより 2 時点の CHTC の関係式が式 8) の通り導出される。これを、＜連立条件 C＞と呼ぶこととする。

$$h_c' = \frac{h_c(T_l - T_a) + \sigma \varepsilon (T_l^4 - T_a'^4)}{T_l' - T_a'} \quad \text{式 8)}$$

ここで、C の時点の風速  $u$  が式 7) の算出時の平均風速と同値であれば、式 7) で求まる CHTC を式 8) に代入することで、C' の時点の CHTC ( $h_c'$ ) を算出できる。

### 3. 供試木と測定方法

#### 3. 1 供試木

供試木として、前記の通りケヤキを用いる。ケヤキは扇形の樹形で枝の先端に向けて多く着葉し、葉も良く風にそよぐことから、CHTC が比較的大きい樹種であることが想定される。図 4 に対象ケヤキを示す。樹冠部の熱収支を連立させるため、同一の圃場で接木によって生産された樹齢が等しく樹高が類似した 7 本のケヤキ（コンテナ移植後も同一環境で生育、13 年生）の中から、さらに類似性を確保するため、樹形、葉面積密度のもっとも近い 2 本を用いた。樹高と幹径（生枝下直径）は、2010 年の実測の時点で樹木 A は 6.4m、11cm であり、樹木 A' は 6.3m、10cm であった。葉面積については、測定方法を含めて後述する。

#### 3. 2 樹冠の熱収支測定

式 6) より樹冠の CHTC を算出するには、樹木 A、A' の蒸散速度  $LE_T$ 、 $LE_{T'}$ 、樹冠の平均温度  $T_{lr}$ 、 $T_{lr'}$  を用いるが、蒸散速度  $LE_T$ 、 $LE_{T'}$  に十分な差が生じており、それに応じて  $T_{lr}$ 、 $T_{lr'}$  にも差が生じることが、精度高く CHTC を求める必要条件となる。既往研究<sup>4)</sup>にて、上記の樹木 A をコンテナ植栽によって大型重量計により重量計測し、1 時間オーダーでの蒸散速度を十分な精度 ( $\pm 100g$ ) で計量できることを確認した。樹木 A の蒸散速度計測には、この方法を適用する。樹木 A は毎日十分な灌水を行い、最大限の蒸散速度が得られる条件とする。樹木 A' は灌水を数日間停止し、気孔閉鎖により蒸散が限りなく小さくなる条件とした。この蒸散速度の低下の度合いを、樹液流量計測（Granier 法）<sup>2)</sup>により確認した<sup>3)</sup>。

CHTC を単位葉面積あたりに換算するため、総葉面積も使用する。総葉面積は、刈り取り法が最も正確に求められるが、供試木の場合にはその後の実測にも用いるため困難である。そこでそれ以外で最も精度よく推定できる方法として、地上型 3 次元レーザースキャナを用いた<sup>43)</sup>。同一圃場で生育された別ケヤキを対象に行った刈り取り法との比較により、6% の誤差で総葉面積が推定可能であることを確認している<sup>4)</sup>。樹木 A の総葉面積は 13.2m<sup>2</sup>、樹木 A' は 11.9m<sup>2</sup> との推定結果が得られ、ほぼ同等であると見なすことができる。

樹冠の平均温度は、赤外線放射カメラによる熱画像を用いることとし、CHTC の算定精度を確保するために、次の 3 点に配慮した。

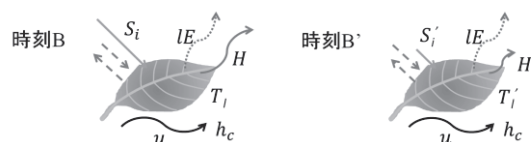


Fig.2 Heat balances of leaves under different irradiance conditions

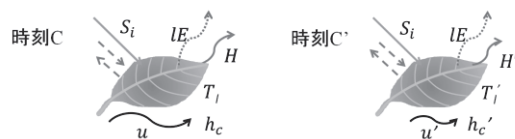


Fig.3 Heat balances of leaves under different wind conditions

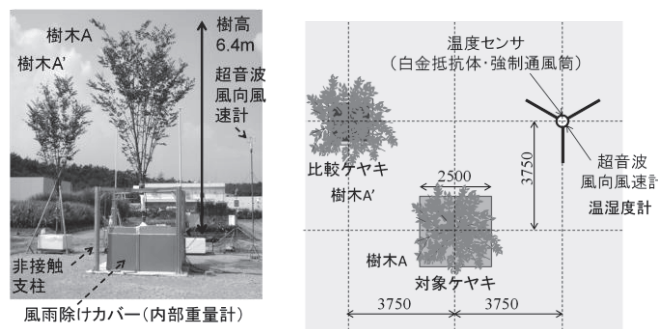


Fig.4 Trees for the experiment and their layout

①まず、2.2.1)で論じたように、使用する機材は最小限にとどめることが肝要である。すなわち、2 本の樹木を異なる赤外線放射カメラで撮影すれば機差の影響により系統誤差を生む要因となるため、1 台で撮影し、一枚の熱画像内に 2 本が入り込むようにする<sup>5)</sup>。

②樹冠の平均温度は、正確には葉群の平均温度となり、全ての葉群を撮影することが出来ない熱画像からでは厳密な取得は困難である。しかしながら、供試木は若木であり葉面積密度もそれほど大きくないこと（LAI=2 程度）、本算定方法で用いるのは、入射する長波放射量が等しいと見なせる 2 本の樹冠温度の差であること、及び 4 方位別の熱画像から抽出した平均葉温の差が 0.7℃以内に収まっていたことから、本研究では 1 方位から連続撮影した熱画像の値を用いた。特に、 $T_{lr}$ と $T_{lr'}$ に大きな差が生じるよう、日射の当たり易い南側からの撮影を行った。

③熱画像からの葉温の抽出には、背景との温度差が必要となる。そこで、樹冠（中心高さは GL から 5.3m）に対して正面からの撮影を確保しつつも温度の低い天空が映り込むように現場で調整を行った。具体的には赤外線放射カメラを 3.7m の高さに設置し（観測専用車の屋根上の作業スペースに三脚を設置しカメラを固定）、10m の距離から仰角約 4 度で撮影を行った。赤外線放射カメラ（1.25mrad）は広角レンズを使用したため瞬時視野角は 2.5mrad であり、10m の距離の対象分解能は 25mm である<sup>6)</sup>。葉や葉群を識別できる分解能であるが、葉と空との境界部はミクセルとなる（図 5）。そこで、隣接する画素との温度差を評価するため式 9) に基づき温度微分値  $D_0$  を定義し、閾値を設定することでミクセルを判別した。すなわち、 $D_0$  が大きい画素はミクセルであり除去した。

$$D_0 = \sum_{i=1}^N |T_0 - T_i| \quad (N = 8) \quad \text{式 9)}$$

対象樹木付近の代表気象として、気温、相対湿度、三次元風向・風速、水平面全天日射量（下向き短波長放射量）、大気放射量（下向き長波長放射量）を計測した。表 1 に測定機器を示す。気温、相対湿度、風向・風速の測定位置は、対象樹木から約 4.3m 離れた地点であり（図 4）、三次元超音波風向風速計の設置高さは 4m（樹冠のほぼ中央の高さ）である。実測対象日は夏季晴天日とし、2010 年夏季に実施した。8 月上旬から 9 月上旬に掛けて 10 日間程度のデータ計測を行った中で、データ使用対象日は樹木 A の灌水停止に伴う蒸散抑制が十分に見られ、晴天日であった 8 月 30 日とした。蒸散抑制は、過剰に継続すると萎れや落葉の危険があるため、樹木の様子を注意深く観察しながら実験を行った。8 月 30 日の時点で、灌水停止後 7 日目であったが、葉等に顕著な変化は見られなかった。

### 3. 3 個葉の熱収支測定

式 7) 8) より個葉の CHTC を求めるには、葉の吸収放射量と近傍の風速、気温、および葉温が必要となる。図 6 に対象個葉の測定の様子を、表 2 に機器を示す。葉面の吸収放射量は、長短波放射計により葉面に入射する下向き、上向きの短波長放射量  $R_{s,down}$ ,  $R_{s,up}$ 、長波長放射量  $R_{l,down}$ ,  $R_{l,up}$  を測定する。このとき長短波放射計は、葉の熱収支に影響を与えないように 0.2m 程度離し、葉の傾斜角と方位角にあわせて設置を行っている。葉と長短波放射計に上部の葉による被陰があると測定値にばらつきが生じてしまうため、陰になりにくい南側周縁部（樹冠下部）に位置する葉を選定した。葉の近傍風速はプローブ熱式風速計により計測を行い、気温は強制通風二重円筒を用いて  $\phi 0.1\text{mm}$  T 熱電対により測定した。測定距離は個葉より 0.3m の距離であり、測定間隔はいずれも 1 秒間である（長短波放射計は、そこまでの時間応答性はないが、1 秒スケールでの短波長放射変化等は対象としていないため問題ない）。吸収短波長放射量を求めるには、その波長域における葉の吸収率が必要となる。そこで、分光放射計 FieldSpec4 により、対象個葉の分光放射率を計測し、日射のスペクトル分布（Bird モデル）<sup>44)</sup> を適用することで吸収率を求めた。

葉温を測定する方法として、熱電対による接触測定と熱画像による非接触測定が考えられる。ここで、葉の表面温度は一枚の中でも一様ではなく、数℃の範囲で分布することがあるため、熱電対による接触測定では葉面の平均温度を取得するのは難しく、また熱電対による短波長放射の直接吸収の影響（裏面においては透過分の影響）も受けるため、代表値としての精度を確保することは困難である。そこで、本研究では赤外線放射カメラによる熱画像から個葉の平均葉温を抽出する。赤外線放射カメラは、対象葉面の南南東側 1m の位置に設置し、葉の表面がすべて映り込むように撮影を行った。葉は風にそよいで動くため、熱画像からの葉面の抽出は手動で行った。測定間隔は 5 秒間である。測定は夏季晴天日を対象とし、2012 年 8 月 28 日～30 日、および 9 月 12 日、13 日に実施した。

### 4. 葉温変化に見る樹冠と個葉の熱収支特性

樹冠と個葉において定式化した各式により CHTC が実際に算出可能か否かは、その前提となる葉温変化と熱収支の特徴が実測データより確認できるのか否かに依存する。そこで、葉温変化と熱収支との関係を、樹冠と個葉の実測データより調べる。

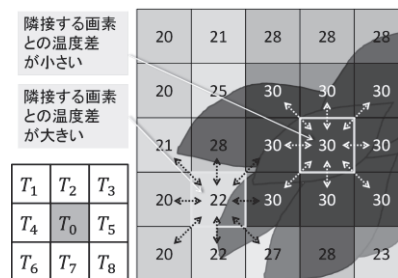


Fig.5 Extraction of leaf temperature from a thermal image

Table1 Measurement item and device for the whole tree

重量 (樹木 A)	ロードセル式重量計 (台秤) CAPS4-1500LL-I (Zartorius AG 社)
樹液流量	TDP 樹液流量センサー
樹冠温度	赤外線放射カメラ 1.25mrad TH9100MR (NEC-Avio 社) 0.5 倍広角レンズ使用 42×32°
土壌体積含水率	ADR センサー (誘電率測定法) シータプローブ ML2x (デルタ T 社)
気温	強制通風筒 YG-43520 (R.M.ヤング社) 白金抵抗温度計 (4 線式 Pt100Ω)
水平面全天 日射量	サーモパイル式日射計 (ネオ日射計) MS-402 (英弘精機) 0.3~2.8μm
風向・風速	三次元超音波風向風速計 CYG-81000 (R.M.ヤング社)

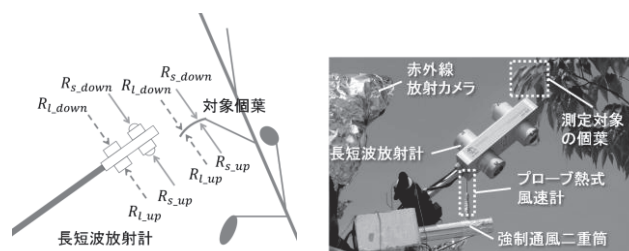


Fig.6 Measurement of heat balance of the leaf

Table2 Measurement item and device for the leaf

葉面温度	赤外線放射カメラ 1.25mrad TH9100MR (NEC-Avio 社) 標準レンズ使用 21×16°
近傍気温	強制通風二重筒 (自作) T 熱電対 $\phi 0.1\text{mm}$
上下方向長短波 放射量	長短波放射計 MR-50 (英弘精機) 0.28~3.0μm, 3.0~50μm
近傍風速	プローブ熱式風速計 クリモマスター MODEL6501 無指向性プローブ 6542-21 (日本カノマックス社) 応答性 約 1 秒
葉の分光反射率	フィールド携帯型分光放射計 FieldSpec4 (ASD 社) 3.5~2.5μm

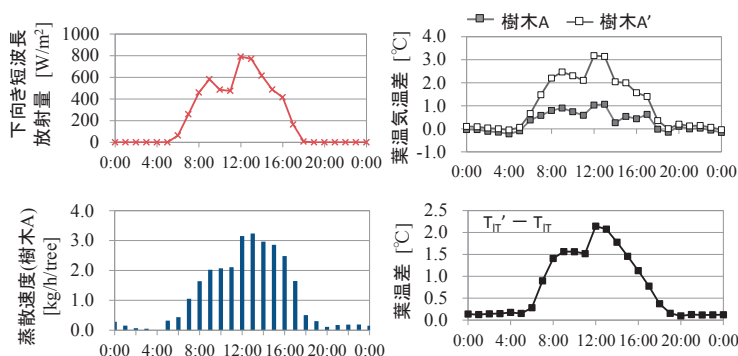


Fig.7 Measurement results for the whole trees (Tree A and Tree A')

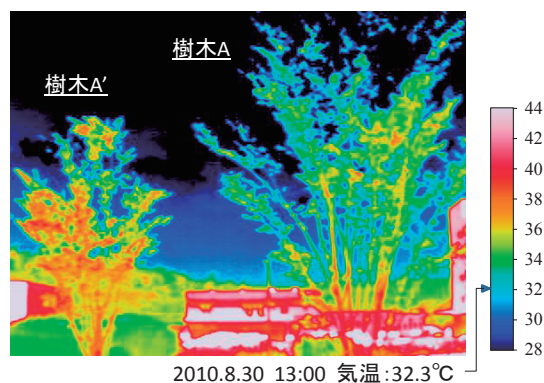


Fig.8 Thermal image of Tree A and Tree A'

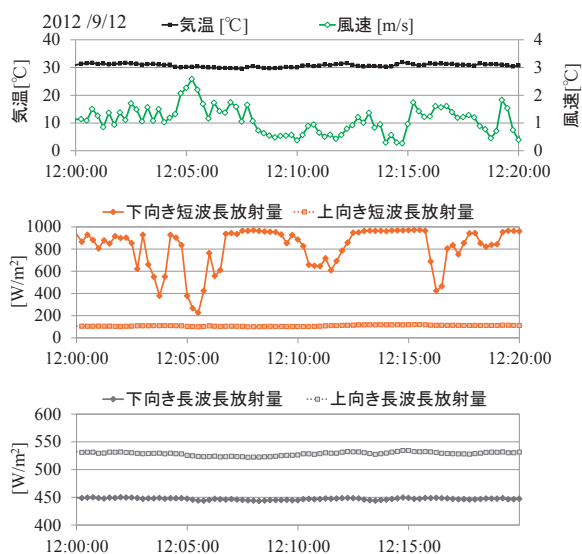


Fig.9 Microclimate and heat balance on the leaf

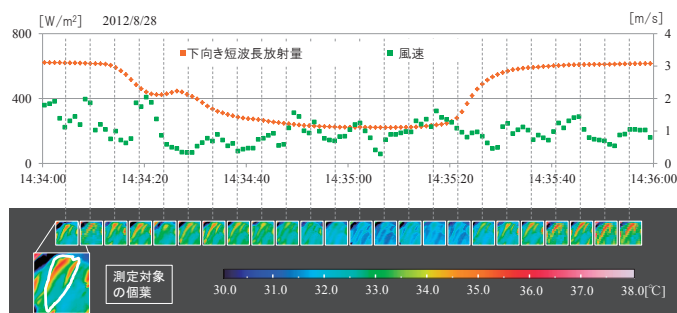


Fig.10 Change in the leaf temperature by irradiance

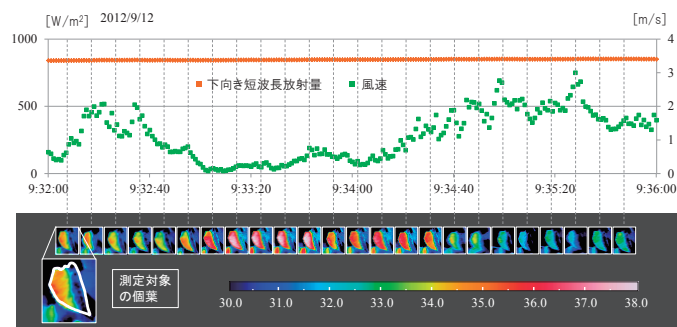


Fig.11 Change in the leaf temperature by wind speed

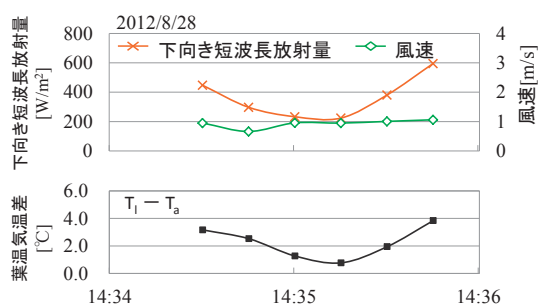


Fig.12 Change in  $(T_l - T_a)$  by irradiance

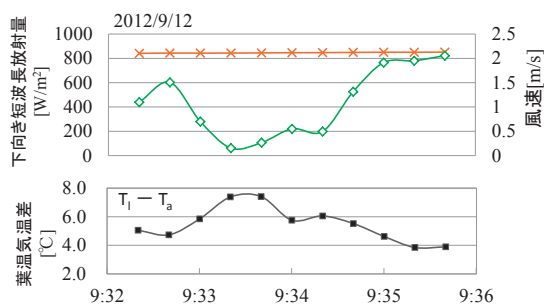


Fig.13 Change in  $(T_l - T_a)$  by wind speed

#### 4. 1 樹冠の熱収支

図 7 に、2010 年 8 月 30 日における、下向き短波長放射量、樹木 A の蒸散速度、各樹木 (A、A') の平均葉温 ( $T_{lr}$ 、 $T_{lr}'$ ) と気温との差 (葉温気温差)、両樹木間の葉温差 ( $T_{lr}' - T_{lr}$ ) の測定結果を示す。また、同日の 13 時における両樹木の熱画像を図 8 に示す。この日は、前記の通り CHTC 算定に適した晴天日であるのと同時に、灌水停止 (7 日目) に伴う樹木 A' の蒸散抑制が十分確認できた日である。

図 7 より葉温気温差の日変化を見ると、灌水を停止している樹木 A' の平均葉温が、灌水を行っている樹木 A の葉温よりも最大で 2°C 程度高い。図 8 の熱画像でも分かるように、日射を受けた背景の建物や舗装面等では表面温度が気温より 20°C 以上上昇しているが、蓄熱もほぼ無く乾燥した樹木 A' の葉温は気温 + 3°C 程度に収まっている。この要因として、大きな CHTC による周辺大気への積極的な顕熱放散が示唆される結果である。図 7 より葉温気温差の変化特性に



着目すると、樹木 A、樹木 A'ともに下向き短波長放射量との対応が非常に良く、短波長放射の吸収とともに葉温が上昇していることが分かる。特に、9 時～10 時にかけての一時的な短波長放射量の減少と 11 時～12 時にかけての増加の傾向が、葉温気温差でも表れている。また樹木 A と A'の葉温差を見ると、夜間はほぼ差は無く、日中の変化傾向は蒸散速度と良く対応していることが分かる。これは、本研究の CHTC の算出方法で前提とする、葉温差と蒸散速度差で CHTC が算出可能であるという考え方を支持する結果である。

## 4. 2 個葉の熱収支

### 1) 個葉近傍の微気象

個葉の CHTC の算定においては、下向き短波長放射量と風速に対する葉温変化に着目しているが、まずは 2012 年 9 月 12 日 12:00～12:20 の測定結果を例に、個葉近傍で得られた微気象の測定結果の特徴を確認する。図 9 は、1 秒間隔の測定データから 15 秒間の移動平均を行ったものである。移動平均時間は、葉温の応答特性との関係を議論するために設定した。10 分程度の時間スケールで微気象要素の変化を見ると、同時帯は晴天日でありながら雲の影響により下向き短波長放射量の変化が大きく(<連立条件 B>に該当)、また、風速も大幅に変化している(<連立条件 C>に該当)ことが分かる。一方、気温や長波長放射量等の変化は小さい。すなわち、式 7) 8) に示した個葉の CHTC の算定において必要となる、<連立条件 B><連立条件 C>のデータを選定することが可能であると言える。

### 2) <連立条件 B>に該当するデータ

風速が比較的安定し、下向き短波長放射量の変化が顕著なデータとして、2012 年 8 月 28 日 14:34～14:36 分のデータを例に、その間の葉温変化を調べる。図 10 に、同時刻の下向き短波長放射量、風速、葉温の測定結果を示す。同図は 1 秒間隔(葉温は赤外線放射カメラによる 5 秒間隔)の測定データであるが、葉の熱容量を考慮し 15 秒間移動平均化したものを図 12 に示す。同図では、葉温気温差を算出している。前記の通り、風速変化は小さい中、下向き短波長放射量の変化と葉温気温差の変化が良く対応していることが分かる。これは、吸収放射量が増えることで葉温が上昇する現象を反映しており、式 1) に示した個葉の熱収支式とも対応する結果であり、式 7) に基づき CHTC が算定できる可能性を示すものである。より詳細に図 12 の変化特性を調べると、14:34:45 付近での下向き短波長放射量の変化が下に凸の傾向であるのに対して、葉温気温差の変化は僅かではあるが上に凸となっている。これは、この時刻が他の時刻と比較して風速が 0.4m/s 程度小さく、CHTC も僅かに小さくなるためであり、このオーダーの葉温応答も捉えられていると見なすことができる。

### 3) <連立条件 C>に該当するデータ

下向き短波長放射量が安定し、風速の変化が顕著な条件として、2012 年 9 月 12 日 9:32-9:36 を例に葉温変化を調べる。図 11 に、同時刻の下向き短波長放射量、風速、葉温の測定結果を示す。15 秒間移動平均化し、葉温気温差を算出した結果を図 13 に示す。風速が増加すると葉温気温差は減少する傾向が見られており、風速と葉温気温差が良く対応している。図 11 の 1 秒間隔の測定データでは、数秒オーダーでの風速の変動も見られるが、葉の熱容量の影響により葉温変化にはその時間オーダーの変動は見られない。一方、図 13 の 15 秒移動平均で見られる風速と葉温気温差の変化は熱収支式に

対応するものであり、特に 9:34 付近の 0.3m/s 程度の風速増加と葉温気温差の減少もデータから読み取れるなど、式 8) に基づき CHTC が算定できることを支持する結果である。

以上で示したように、下向き短波長放射量と風速の変化にそれぞれ着目することで、個葉の CHTC を算定するためのデータが本測定より得られていることを確認した。

## 4. 3 誤差要因の分析

樹冠及び個葉の CHTC の算定法においては、式を連立するうえで幾つかの仮定をおいている。それらの仮定は誤差要因となり得るため、最終結果の CHTC に対する影響分析を行う。誤差要因となり得る仮定として挙げられるのは、①式 6) において樹木 A'の蒸散速度を十分小さいと見なして無視している点、②葉の蓄熱量と樹液流に伴う熱移動を無視している点、③式 7) において下向き短波長放射量と葉温変化に伴う蒸散速度の変化を無視している点、④式 8) において、風速変化に伴う蒸散速度の変化を無視している点である。尚、蒸散速度は、水蒸気拡散コンダクタンスと葉面飽差の積として表すことが出来る。

①に関しては、灌水停止により蒸散速度が無視できる条件を作り出すとしたが、これが実現しているか否かは次のように確認を行った。樹木 A'の土壌において測定した土壌 pF 値(ADR センサによる土壌含水率と pF 水分曲線により算出)より、pF 値は一日を通して永久萎れ点の 4.2 に非常に近い値であった(つまり蒸散が起こるには植物生理的にも限界の乾燥状態である)こと、また、Granier 法により測定した樹液流量が樹木 A の 1/10 以下であったことにより、Granier センサの測定精度を考慮しても、無視して問題ないことを確認した。土壌含水率の変化からも、同様の結果が得られた。

②の蓄熱量に関しては、葉の重量から求めた比熱と単位時間当たりの葉温変化より確認した。また、樹液流に伴う熱移動量は、蒸散速度より求めた葉面への樹液流量とその比熱、葉温と樹液流の温度(枝部温度と等しいと仮定)差により確認した。いずれの因子を過大に見積もった場合でも、CHTC 算定に用いる熱収支項と比べ  $10^1 \sim 10^2$  のオーダーであることを確認した。

③に関しては、一般に葉面飽差は葉温上昇(飽和水蒸気圧上昇)に対して単調増加する一方、気孔コンダクタンスは単調減少する(例えば Oren et al.(1999)の式<sup>45)</sup>)。ここで、下向き短波長放射量の変化に伴う葉温変化が  $2 \sim 3^\circ\text{C}$  程度であることも踏まえると、潜熱輸送量への影響は他の熱収支項と比べ 1/10 以下となる。また、光合成有効放射量の変化に伴う気孔コンダクタンスの応答も、この程度の時間範囲内(数十秒～1 分程度)であれば、ほぼ無視できる範囲である<sup>46)</sup>。

④に関しては、風速が蒸散速度に対して大きな影響要因とならないことは、様々な既往の実測結果より明らかにされており<sup>47)</sup>、森林水文学の分野でも知られている知見である。すなわち、風速の増大は、(a)葉面境界層コンダクタンス  $g_a$  の増大と、(b)葉温低下による葉面飽差の減少という形で蒸散速度に影響する。ここで、(a)と(b)は相殺する方向に働くため、一般に蒸散速度は風速に対して鈍感な傾向を持つ。本計測データにおいても、風速が大きく変化した 9:33～9:35 の約 2 分間の潜熱量の差は熱収支項の 1/10 のオーダーである<sup>注 7)</sup>。

以上により、CHTC の算定条件に見合う測定データを適切に抽出することで、各誤差要因の影響は十分小さくなることを確認した。

## 5. 対流熱伝達率の算定

### 5. 1 算定結果

図 14 に、樹冠部の CHTC の結果を示す。樹木 A より 4.3m の距離で測定された代表風速との関係でプロットする。風速は、3 次元超音波風速計で得られた各時刻の各風速成分をベクトル合成し、時間平均したものである。4.1 において適用の妥当性を確認した、2010 年 8 月 30 日の測定データをもとに算定を行った。尚式 6) において、樹木 A の潜熱輸送量と両樹木の葉温差が小さいと CHTC の算出値の誤差が過大となるため、それぞれ  $50\text{W/m}^2$  以上、 $1^\circ\text{C}$  以上の条件を課して適用データを抽出したうえで算出を行った。 $1\text{m/s}$  と  $2.5\text{m/s}$  以上の風速域でのプロットは得られていないが、その間の風速域では概ね風速に対して単調増加の傾向が見られ、決定係数も  $0.56$  と一定の相関が確認できる。

次に、図 15 に個葉の CHTC の結果を示す。ここで示す風速は、個葉より  $0.3\text{m}$  で測定された近傍のデータ（15 秒間の平均値）である。熱収支の測定データより、式 7) に見合うデータとして 4.2 にて適用の妥当性を確認した 2012 年 8 月 28 日 14:34~14:36 のデータと、式 8) に見合うデータとして、同様に 4.2 にて検討した 2012 年 9 月 12 日 9:32~9:36 のデータに加えて、同日 9:00~14:00 から 4 区間のデータ（9:55~9:59、10:15~10:18、12:57~12:59、13:12~13:15）を抽出して算定に用いた。図 15 より、樹冠の CHTC の結果と同様、風速に対して単調増加の傾向が見られ、決定係数も  $0.77$  と相関が得られた。

### 5. 2 考察

樹冠と個葉でそれぞれ独立に算定された CHTC を比較し、結果の特徴について考察するため、図 16 に両算定結果をプロットする。尚、横軸の風速は前記の通り、樹冠では代表風速であり、個葉では近傍風速であることに留意する。また比較のために、建築環境工学の分野で慣用的に用いられる Jürges の式( $h_c = 3.9u + 5.6$ )<sup>41)</sup>と、伝熱理論により定式化された葉と同等スケールの楕円板での強制対流による CHTC<sup>48)</sup>を記載する。後者の方法は、式 10) に示す熱の境界層コンダクタンスにおいて、葉幅を  $40\text{mm}$  とし、主流方向はその葉幅の方向と一致するとした場合の算出値である(式 11)。

$$g_{ha} = \frac{0.664\hat{\rho}D_{ha}Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}}{d} = 0.135\sqrt{\frac{u}{d}} \quad \text{式 10)}$$

$$h_c = 0.135C_p\beta\sqrt{\frac{u}{d}} = 32.6\sqrt{u} \quad \text{式 11)}$$

ここで、 $g_{ha}$ : 熱の境界層コンダクタンス [ $\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ ]、 $\hat{\rho}$ : 空気の実モル密度 [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ]、 $D_{ha}$ : 熱拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]、 $d$ : 葉幅 ( $=0.04$ ) [ $\text{m}$ ]、 $C_p$ : 空気の実モル比熱 [ $\text{J}/(\text{molK})$ ]、 $\beta$ : 屋外乱流の補正係数 ( $=1.4$ ) [-]、 $l$ : 葉幅の補正係数 ( $=0.72$ 、楕円板の場合) [-]である<sup>注 8)</sup>。

樹冠と個葉のプロットは、ほぼ同一の直線上に乗り、樹冠の値が個葉よりも若干、高風速域側にプロットされている。これは、近傍風速と代表風速の風速差によるものである。両者のプロットがほぼ同一の直線上にあるということは、樹冠内部の CHTC に大きな分布は無いという仮定に矛盾が見られないこと、および本研究で得られた関係式が樹冠部全体を代表可能であることを強く示唆するものである。これらを鑑みると、同様の葉密度のケヤキであれば、本式は

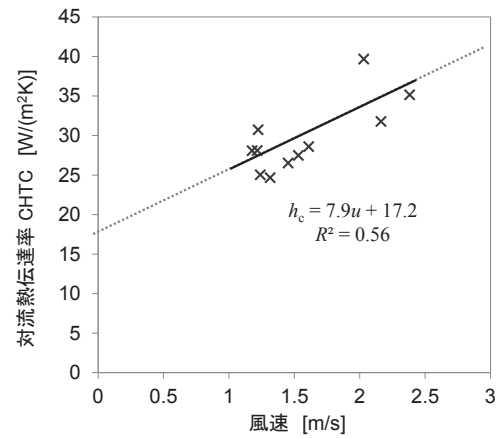


Fig.14 CHTC of the tree crown

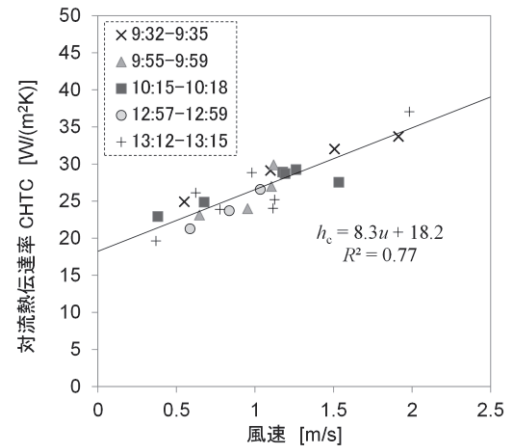


Fig.15 CHTC of the leaf

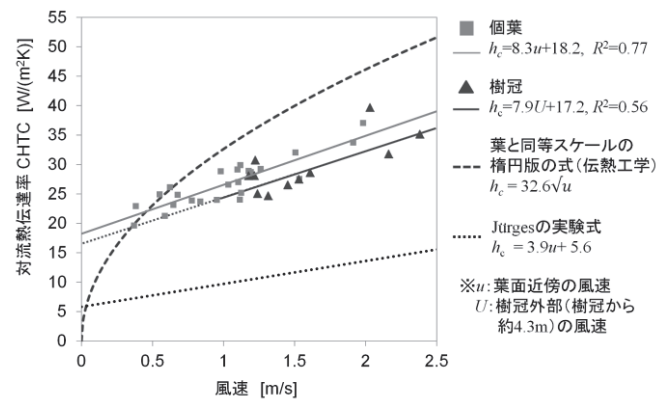


Fig.16 Comparison between CHTCs

適用可能であると考えられる。Jürges の式と比較すると、本研究の算定値は全風速域において 2 倍以上の値を示している。これは、 $0.5\text{m}$  四方の銅板を用いて定式化を行った Jürges の式とのスケールの違いに起因するもの（いわゆるスケール効果）と見なすことができる。楕円板の理論式は  $1/2$  乗の非線形の関係である一方、本研究での算出プロットは線形的である。すなわち、CHTC の絶対値のみならず、その次元にも差異が生じている。伝熱理論から導かれる楕円板の式は完全な静止状態に基づくものであり、弱風域は対流熱伝達が起こりにくい状態にある。一方、屋外の自然風下における本研究の測定では、風速が小さくとも乱流に基づく気流の乱れが生じて



いることに加え、葉が風に揺らぐことで対流放熱を促進していることが想定される<sup>注9)</sup>。筆者らも、2mmの空間精度で計測可能な3次元レーザースキャナによる葉面積の計測において<sup>43)</sup>、0.5m/s以下の弱風時においても、数mm～数cmのオーダーで葉が揺れていることを確認している。

風速が0.5m/sを超えると、逆に本研究の算出プロットは楕円板の式よりも過小評価となる。これは前記の弱風条件と一見矛盾するようではあるが、自然風に対する枝葉のそよぎ方を観察しても分かるように、ある程度の風が吹くと枝葉が風の流れに沿って変位し(風になびき)、流体力学的抵抗が減少することが原因ではないかと推察される。このように枝葉が風にそよぎ易い樹木では、風速の増加により抵抗係数が減少することは既往研究でも明らかとなっている<sup>49)50)</sup>。つまり抵抗係数が減少するということは、運動量輸送と熱伝達の相似性よりCHTCも減少するということが類推でき、原理に鑑みて矛盾のない解釈が可能である。また、枝葉が変位することによって、葉面の相対風速が減少することも考えられる。その他、既往研究において、気流の方向や葉の迎え角(気流方向に対する葉面の傾き)によって葉面境界層抵抗が異なるとの報告もあるため<sup>51)</sup>、それらが樹冠のCHTCにどのように影響を及ぼすかは今後詳細な検討が必要であるが、自然風条件下において得られた本研究のCHTCは、そのような影響が複合的に合わさった結果として位置付けることができ、工学的利用上、有効な実験式であろうと考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、ケヤキ単木の樹冠と個葉のCHTCを屋外実験により算定した。樹冠部のCHTCに関しては、蒸散速度に差をつけた2本の樹木の熱収支を連立させることで求めた。個葉に関しては、下向き短波長放射量と風速に対する葉温変化に着目し、同一個葉での複数時点の熱収支を連立させることでCHTCを求めた。

その結果、樹冠部のCHTCは代表風速 $U$ との関係で記述すると、 $h_c = 7.9U + 17.2$  ( $R^2 = 0.56$ )となり、個葉のCHTCは近傍風速 $u$ との関係で記述すると、 $h_c = 8.3u + 18.2$  ( $R^2 = 0.77$ )と求まった。両算定値はほぼ同一線上にプロットされることから、樹冠内のCHTCに分布が無いと仮定したことに矛盾が無いこと、及び得られた樹冠部のCHTCの代表性を確認し、同程度の葉密度のケヤキであれば適用可能であることを示唆した。

いずれのCHTCもJürgesの式と比較すると2倍以上の値を示した。葉と同等スケールの楕円板の理論式( $h_c = 32.6\sqrt{u}$ )と比較した結果、理論式は風速に対して1/2乗の関係式である一方、本研究の算定値は線形関係となった。この原因として、屋外の自然風条件下において得られた本研究の値は、0.5m/s以下の弱風域においては葉の揺れと乱流に伴う境界層コンダクタンスの増大によるCHTCの増加が考えられ、0.5m/s以上の風速域においては、枝葉が風になびいて変位することで、葉面の流体力学的抵抗とCHTCが理論式よりも減少することが考えられた。

ここで得られた実験式は、実際には乱流と葉(葉群)の挙動の複雑な相互作用が関与するものであり、その複合的影響の結果として得られたものであるが、工学的利用上は有効であろうと考えられる。

本研究の実験方法は、大型重量計という大規模な装置を必要とし、2本の樹木の熱収支を用いるため多くの樹種への適用は実用的では

ない。そこで、今後は、本研究のCHTCを基準とし、より実用的に多樹種のCHTCを同定する方法についても検討してゆく。

## 注

注1)揺れの影響は限定的であるという研究結果も見られており<sup>19)</sup>、複雑な乱流場の影響を受けることが推量される。

注2)人工葉の場合は、素材や表面性状も実際の葉とは異なる点や、ヒーターの加熱量が強いと温度差に基づき自然対流の条件に差異が生じてしまうため、表面の熱境界条件が異なるという課題が挙げられる。

注3)Granier法は、孤立環境下の樹木では短波長放射や外気温の影響を受けるため、単木蒸散速度の時間変化の測定には向いていないが、ここではあくまで蒸散速度がゼロに漸近することの確認のために使用した。

注4)この推定誤差は対象ケヤキと樹高等が同等のケヤキにおいて得られた値であるため適用できるが、樹種や樹高が変わった場合の精度の検討は継続研究で実施中である。

注5)当初、樹木AとA'に対して、2台の赤外線放射カメラでそれぞれ熱画像を撮影していたが、機差の影響により2本の樹冠の温度差を精度よく抽出することが困難であったため、分解能を多少犠牲にして2本の樹木を1台の放射カメラで撮影することとした。

注6)枝も熱画像には映り込むが、面積割合が小さいことと、2本の樹木で同程度に映り込んでいることが仮定できるため(その温度差を利用するため)、除外しなかった。

注7)式8)の導出に用いたデータ(図11)の範囲内で、葉温差が最大( $\Delta T_l = 3^\circ\text{C}$ )となる9:33:30と9:35:30の2時刻を例に、蒸散速度の差についての具体的な計算を以下に示す。

個葉の蒸散速度は、飽差を駆動力、気孔・葉面境界層を直列抵抗とみなした拡散現象として表わすことができる。気孔の環境応答速度は植物種によって異なり、早いものであれば2~3分程度で応答し始めるが、樹木の場合は応答しきる(定常状態に達する)までには通常30分以上かかることが知られているため<sup>52)</sup>、9:33~9:35の約2分間、 $g_s$ を一定と仮定することは十分に妥当と考えられる。本研究での単木蒸散量およびレーザースキャニングによる葉面積計測から算出したケヤキの $g_s$ は、2012年の晴天日、朝9時の平均的な値で0.1~0.15 [mol/m<sup>2</sup>/s]程度となる。

この時の気象条件に基づき潜熱輸送量を計算すると、結果は以下のようになり、2時刻の潜熱量の差は20[W/m<sup>2</sup>]程度であることがわかる。

9:33:30 葉面飽差 2.96 [kPa]、 $g_a = 0.56$  [mol/m<sup>2</sup>/s]

9:35:30 葉面飽差 2.15 [kPa]、 $g_a = 1.58$  [mol/m<sup>2</sup>/s]

$g_s = 0.1$  の時、 $\Delta E = 21$  [W/m<sup>2</sup>] ( $\Delta E = 4.8e - 04$  [mol/m<sup>2</sup>/s])

また、同様の計算例は文献<sup>53)</sup>においても行われている。

注8)屋外の自然風の条件下において人工葉を用いたPearman et al.(1971)<sup>54)</sup>の実験では、同様の理論式に従う関係が得られており、 $\beta$ の値は1.5程度と求められている。この $\beta$ の値は研究(実験条件)により異なるが、概ね1.5を中心として分布しているようである<sup>7)</sup>。

注9)個葉を対象とした研究や建築壁面を対象とした既往研究においても、CHTCが風速に対して線形的になる測定結果と、 $n$ 乗(概ね $n=1/2\sim 4/5$ )となる結果とが見られており、葉の揺らぎのみではなく弱風時の自然風の変動や自然対流<sup>54)47)</sup>が影響を及ぼしていることが考えられる。

## 参考文献

- 1)DeRocher, T. R., Walker, R. F., Tausch, R. J.: Estimating whole-tree transpiration of Pinus monophylla using a steady-state porometer, *J. Sustainable For.* 3(1), pp.85-99, 1995
- 2)Köstner, B., Granier, A., Germák, J.: Sapflow measurement in forest stands: methods and uncertainties, *Ann. Sci. For.*, 55, pp.13-27, 1998
- 3)吉田弘, 端野道夫: 大型ウェイングライシメータによる林木蒸散量計測の試み, 水工学論文集, 43, pp.67-72, 1999
- 4)浅輪貴史, 梅干野晃, 清水克哉, 久保田光政: 大型重量計を用いた単木樹木の蒸散量の計測法とその精度確認, 日本緑化工学会誌, 38(1), pp.67-72, 2012.8
- 5)浅輪貴史, 梅干野晃, 清水克哉, 久保田光政: 大型重量計を用いた夏季におけるケヤキ単木の蒸散特性の分析, 日本緑化工学会誌, 39(4), pp.534-541, 2014.5
- 6)矢吹萬壽: 風と光合成 葉面境界層と植物の環境対応, 農文協, 1990.2
- 7)Defraeye, T., Verboven, P., Ho, Q. T., Nicolai, B.: Convective heat and mass exchange predictions at leaf surfaces: Applications, methods and

- perspectives, *Comput. Electron. Agric.*, 96, pp.180-201, 2013
- 8)長谷場徹也: 植物の葉面境界層輸送係数, 農業気象, 40(1), pp.63-72, 1984
  - 9)Balding, F.R., Cunningham, G.L.: A comparison of heat transfer characteristics of simple and pinnate leaf models, *Bot. Gaz.*, 137, pp.65-74, 1976
  - 10)Schuepp, P.H.: Heat and moisture transfer from flat surfaces in intermittent flow: a laboratory study, *Agric. Meteorol.*, 22(2-4), pp.351-366, 1980
  - 11)Schuepp, P.H.: Studies of forced-convection heat and mass transfer of fluttering realistic leaf models, *Bound.-Layer Meteor.*, 2, pp.263-274, 1972
  - 12)Kumar, A., Barthakur, N.: Convective heat transfer measurements of plants in a wind tunnel, *Bound.-Layer Meteorol.*, 2(2), pp.218-227, 1971
  - 13)Kitano, M., Tateishi, J., Eguchi, H.: Evaluation of leaf boundary layer conductance of a whole plant by application of abscisic acid inhibiting transpiration. *Biotronics*, 24, pp.51-58, 1995
  - 14)Kichah, A., Bournet, P.E., Migeon, C., Boulard, T.: Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an impatiens pot plant crop in a greenhouse, *Biosys. eng.*, 112, pp.22-34, 2012
  - 15)Landsberg, J.J., Powell, D.B.B.: Surface exchange characteristics of leaves subject to mutual interference, *Agric. Meteorol.*, 12, pp.169-184, 1973
  - 16)成田健一, 野々村喜民, 小笠頭: 自然風下における窓面対流物質伝達率の実測, 日本建築学会計画系論文集, 491, pp.49-56, 1997.4
  - 17)Parlange, J.-Y., Waggoner, P.E.: Boundary layer resistance and temperature distribution on still and flapping leaves II. Field experiments, *Plant Physiol.*, 50(1), pp.60-63, 1972
  - 18)Martin, T.A., et. al.: Boundary layer conductance, leaf temperature and transpiration of *Abies amabilis* branches, *Tree Physiol.*, 19(7), pp.435-443, 1999
  - 19)Parkhurst, D.F., et. al.: Wind-tunnel modelling of convection of heat between air and broad leaves of plants, *Agric. Meteorol.*, 5(1), pp.33-47, 1968
  - 20)Murphy, C.E., Knoerr, K.R.: Simultaneous determination of the sensible and latent heat transfer coefficients for tree leaves, *Bound.-layer Meteorol.*, 11, pp.223-241, 1977
  - 21)Thrope, M.R., Butler, D.R.: Heat transfer coefficients for leaves on orchard apple trees, *Bound.-Layer Meteorol.*, 12(1), pp.61-73, 1977
  - 22)Jones, H.G.: Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology, *Adv. Botan. Res.*, 41, pp.107-163, 2004
  - 23)Blonquist Jr. J.M., Norman, J.M., Bugbee, B.: Automated measurement of canopy stomatal conductance based on infrared temperature, *Agric. For. Meteorol.*, 149, pp.2183-2197, 2009
  - 24)森本幸裕, 武居二郎, 南裕志, 花山秀文, 三輪賢志: 街路樹ケヤキの活性度診断, 日本緑化工学会誌, 17(1), pp.9-15, 1991
  - 25)Brenner, A. J., Jarvis, P.G.: A heated leaf replica technique for determination of leaf boundary layer conductance in the field, *Agric. For. Meteorol.*, 72, pp.261-275, 1995
  - 26)Leuning R., Foster I.J.: Estimation of transpiration by single trees: Comparison of a ventilated chamber, leaf energy budgets and a combination equation, *Agric. For. Meteorol.*, 51, pp.63-86, 1990
  - 27)浦野良美, 渡辺俊行: 水平屋根スラブの外表面顕熱収支測定と伝熱応答解析, 日本建築学会論文報告集, 325, pp.93-103, 1983.3
  - 28)Hagishima, A., Tanimono, J.: Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces, *Build. Environ.*, 38, pp.873-881, 2003
  - 29)小林定教, 森川和祥: 屋上面の下向き熱流における対流熱伝達率に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, 536, pp.21-27, 2000.10
  - 30)佐藤鑑, 後藤滋, 他 9 名: 環境工学における市街地風の変動とその影響に関する総合的研究-7, 日本建築学会論文報告集, 191, pp.27-36, 1972.1
  - 31) Sharples, S.: Full-scale Measurements of Convective Energy Losses from Exterior Building Surface, *Build. Environ.*, 19, pp.31-39, 1984
  - 32)平岡久司: 植栽内熱・水分収支モデルの検証, 日本建築学会計画系論文集, 558, pp.31-36, 2002.8
  - 33)Hiraoka, H.: An investigation of the effect of environmental factors on the budgets of heat, water vapor, and carbon dioxide within a tree, *Energy*, 30, pp.281-298, 2005
  - 34)Daudet, F.A., Silvestreb, J., Ferreirac, M.I., Valancogned, C., Pradellea, F.: Leaf boundary layer conductance in a vineyard in Portugal, *Agric. For. Meteorol.*, 89, pp.255-267, 1998
  - 35)Nebbali, R., Roy, J.C., Boulard, T.: Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse, *Renew. Energy*, 43, pp.111-129, 2012
  - 36)Montero, J.I., Antón, A., Muñoz, P., Lorenzo, P.: Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in green houses, *Agric. For. Meteorol.*, 107, pp.323-332, 2001
  - 37)Boulard, T., Mermier, M., Fargues, J., Smits, N., Rougier, M., Roy, J.C.: Tomato leaf boundary layer climate: implications for microbiological whitefly control in green houses, *Agric. For. Meteorol.*, 110, pp.159-176, 2002
  - 38)神田学, 日野幹雄: 大気・植生・土壌系モデル(NEO-SPAM)による数値シミュレーション (1)植生効果のモデリング, 水文・水資源学会誌, 3, pp.37-46, 1990
  - 39)Robitu, M., Marjorie, M., Inard, C., Groleau, D.: Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate, *Sol. Energy*, 80, pp.435-447, 2006
  - 40)Dauzat, J., Rapidel, B., Berger, A.: Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: model description and application to a coffee plantation in Costa Rica, *Agric. For. Meteorol.*, 109, pp.143-160, 2001
  - 41)Jürges, W.: Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand, *BEIHEFTE ZUM GESUNDHEITSINGENIEUR*, 19, 1924
  - 42)吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三: 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, 536, pp.87-94, 2000.10
  - 43)Asawa T., Hoyano A., Oshio H., Honda Y., Shimizu K., Kubota M.: Terrestrial LiDAR-based estimation of the leaf area density distribution of an individual tree and verification of its accuracy, *Int. Symp. on Remote Sens.*, 2014 (電子プロシーディングス)
  - 44)Bird, R.E.: A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance, *Sol. Energy*, 32, pp.461-471, 1984
  - 45)Oren R., Sperry J. S., Katul G. G., Pataki D. E., Ewers B. E., Phillips N. & Schäfer K.V. R.: Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit, *Plant, Cell & Environ.*, 22, pp.1515-1526, 1999
  - 46)Vico, G., Manzoni, S., Palmroth, S., Katul, G.: Effects of stomatal delays on the economics of leaf gas exchange under intermittent light regimes, *New Phytol.*, 192, pp.640-652, 2011
  - 47)Daudet, F.A., Roux, X. L., Sinoquet, H., Adam, B.: Wind speed and leaf boundary layer conductance variation within tree crown: Consequences on leaf-to-atmosphere coupling and tree functions, *Agric. For. Meteorol.*, 97, pp.171-185, 1999
  - 48)Campbell, G.S., Norman, J.M.: 生物環境物理学の基礎 第二版, 2010.11
  - 49)神山健二, 大橋征幹, 成田健一: 葉面積密度を代表面積とした樹木の抵抗係数に関する風洞実験, 日本建築学会環境系論文集, 578, pp.71-77, 2004.4
  - 50)石川仁: 樹木の流体力学特性の実験的解明, ながれ, 24, pp.483-490, 2005
  - 51)原園芳信, 矢吹万寿: 葉面境界層と作物の物質生産に関する研究 (1) 気流方向, 葉の迎え角がカンショの葉面境界層抵抗値に及ぼす影響, 農業気象, 37(2), pp.103-110, 1981
  - 52)Drake P.L., Froend R.H., Franks P.J.: Smaller, faster stomata: scaling of stomatal size, rate of response, and stomatal conductance, *Jour. Exp. Bot.*, doi: 10.1093/jxb/ers347, 2012
  - 53)Campbell G.S., Norman J.M.: An Introduction to Environmental Biophysics Second Edition, Springer-Verlag, New York, 1998
  - 54)Pearman, G.I., Weaver H.L., Tanner C.B.: Boundary layer heat transfer coefficients under field conditions, *Agric. Meteorol.*, 10, pp.83-92, 1971
  - 55)藤原邦彦, 浅輪貴史, 梅干野晃, 清水克哉: 都市緑化を対象とした単木樹の熱・水収支特性の計量化と数値モデル化 その8 ケヤキ樹冠の対流熱伝達率と周辺大気への顕熱輸送量, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-1, pp.919-920, 2013.8

# CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF CROWN OF *ZELKOVA SERRATA*

*Takashi ASAWA* \*, *Kunihiko FUJIWARA* \*\*, *Akira HOYANO* \*\*\*  
and *Katsuya SHIMIZU* \*\*\*\*

\* Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

\*\* Takenaka Research & Development Institute, M.Eng.

\*\*\* Prof., The Open University of Japan, Dr.Eng.

\*\*\*\* TOYOTA Motor Corporation, Biotechnology & Afforestation Division

To understand the cooling effects of a tree in an urban space, it is important to be able to quantify the sensible heat flux for the entire tree crown, as well as the latent heat flux caused by transpiration. Although the convective heat transfer coefficient (CHTC), which is a measure of the leaf boundary layer conductance, is an essential factor for determining sensible heat flux, the CHTC for the entire crown has not yet been clarified due to the lack of appropriate measuring methods. Therefore, this study proposes a method of quantifying the CHTC for the entire crown of *Zelkova serrata* under outdoor conditions.

In previous studies, methods of CHTC estimation were developed for individual leaves by using the data measured for leaf heat balance. The leaf heat balance is determined for two states, namely, with and without transpiration, and short-wave radiation is eliminated in their heat balance equations, as it is difficult to accurately measure in the field. This study applies this heat balance method to the entire crown and quantifies the CHTC by examining two individual trees which differ in their irrigation conditions and whole-tree transpiration rate. The whole-tree transpiration rate of the irrigated tree was measured by a highly accurate, large weighing lysimeter, while the leaf temperatures were measured by infrared thermography. In addition, the CHTC of an individual leaf was estimated from the heat balance and leaf temperature change, to enable a comparison with the CHTC of the entire crown.

The measured heat balances and leaf temperatures were analyzed based on the fundamental concept of the heat balance method and, as a result, it was clarified that the CHTCs could be correctly estimated by applying the measured data to the heat balance method. The effects of the error factors included in the measurements, and assumptions made for the method, on the CHTCs were analyzed, and it was concluded that the effects of these errors were limited.

The estimated CHTC was  $h_c = 7.9U + 17.2$  ( $R^2 = 0.56$ ,  $U$ : representative wind speed for the site) for the entire crown and  $h_c = 8.3u + 18.2$  ( $R^2 = 0.77$ ,  $u$ : wind speed near the leaf) for the individual leaf. These CHTCs almost overlap, implying that there is no distribution of the CHTC within the crown, and that these CHTCs can be applied to the crowns of other *Zelkova* trees which have the same leaf area density. The CHTCs were identified as being double the value given by the Jürges formula, due to the size and amount of flutter of the leaves. Although the relationship between the CHTC and wind speed near the surface is non-linear, and squared in general, for the forced-convection of heat-transfer theory, the estimated relationships were linear for the CHTCs in this study. It is thought that this difference also depends on the flutter of the leaves and turbulence of the wind in the outdoor environment. There are many factors which influence the leaf and whole-tree CHTCs and the related mechanisms are complex; however the estimated CHTCs take these influences into account and are considered to be appropriate for engineering applications in outdoor environments.

(2015 年 6 月 10 日原稿受理, 2015 年 10 月 29 日採用決定)