都市緑化樹木を対象とした大型重量計による単木蒸散量の計測と
樹木の形態的・生理的特徴に基づく分析WEIGHING WHOLE TREE TRANSPIRATION RATE OF URBAN TREES
AND ANALYSIS OF TREE'S MORPHO-PHYSIOLOGICAL EFFECTS

清野 友規*, 浅輪 貴史**, 梅干野 晃***, 清水 克哉****

Tomoki KIYONO, Takashi ASAWA, Akira HOYANO
and Katsuya SHIMIZU

The purpose of this study is to grasp the variation of whole tree transpiration rates and capacities of container-grown isolated trees and to analyze tree's morpho-physiological effects. We developed hanging-type gravimeter and weighed 11 species ($h=3\sim6.7\text{m}$). We found (1)Daily water use in summer irrigation days were $10\sim30\text{kg}$, equivalent to 0.62 ± 0.36 times of water evaporation from the same size of crown projection area, (2)Maximum latent heat was 2.3 kW/tree , (3)Same tree's capacity can change threefold due to physiological change, (4)Ring-porous species tend to use much water, which suggest the significance of hydraulic capacity under volume-restricted soil condition.

Keywords: Greening, Thermal environment, Transpiration, Gravimetric measurement, Tree form, Stomatal movement

緑化, 温熱環境, 蒸散, 重量測定, 樹形, 気孔開閉

1. はじめに

1-1. 研究背景

アスファルト舗装やコンクリート建造物によって悪化した都市の温熱環境の改善策として, 都市緑化樹木の蒸散による気温上昇抑制効果が期待されている。しかしながら, 都市空間への熱的影響の評価や, それに基づく緑化空間設計, 灌水計画等を行う上で不可欠な, 都市緑化樹木の単木スケールでの蒸散量の定量的な実態は明らかでない。この原因として, (1)信頼性の高い単木蒸散量の実測データが不足している問題と, (2)蒸散が測定環境(日射量, 土壌水分等)と対象樹木の特性の双方に強く依存するために, 実測のみによる一般化が困難であるという問題が挙げられる。

(1)について, 表1に単木蒸散量の計測・推定手法を示す。既往の手法として, 樹液流法, ポロメーター等によって計測した個葉の蒸散速度に別途計測した葉面積を乗じる手法, ライシメーター(重量計測)法がある。樹液流法¹⁻²⁾は森林水文学分野で最も一般的な手法であるが, 樹種(木部構造)毎の較正抜きには2倍以上の系統誤差を生じうる³⁾他, 樹木サイズによって樹液流速と蒸散速度に最大で2時間以上の時間差が生じうる⁴⁾ことも知られ, また中でもGranier法¹⁾はセンサー温度差から樹液流速を推定する原理上, 夏季の都市空間のような日射・気温変化の大きな環境での精度にも課題がある⁵⁾。個葉の計測値から単木蒸散量を推定する手法は, 葉面積分布の測定誤差, 樹冠内における個葉特性の違い, 樹冠内の微気象の再現性が全て影響するために精度は高くなく, 別の計測手法の検証抜きに単

Table 1 Comparison of measurement methods in previous studies

計測方法	単木スケール での精度	樹種の比較	時間応答性	孤立樹木の 既往研究
樹液流法	△	△較正必須	サイズ依存 ～2時間	文献 ⁹⁻¹¹⁾
ポロメーター等の個葉 計測 (&葉面積計測)	×	個葉スケール では○	数分	文献 ¹¹⁻¹³⁾
ライシメーター法	○	○	数10分～	文献 ⁷⁻⁸⁾

独で用いることは困難である⁶⁾ 注1)。ライシメーター法は最も精度が高い計測手法であるが, 大規模な設備を要するため報告事例が限られている。そこで筆者らは, 熱環境の予測評価への応用を目的とした蒸散データには, 配置や樹種の検討への応用が容易な単木スケールでの算出と熱環境の日変化に対応した1時間以下の時間分解能が求められるとの認識に立ち, 長期的なケヤキの重量計測を行ってきた⁷⁻⁸⁾。

一方, (2)について, 実測によって得られた知見を一般化し蒸散量の予測に応用するためには, 数値モデルを用いて測定環境の影響と樹木の影響を分離し, 樹木の蒸散能力をパラメータとして表すことが有効と考えられる。水文学分野では気孔コンダクタンスや可能蒸発量比(Potential evaporation ratio)といったパラメータが算定され, 更に, 葉齢や樹形等の樹木の特徴に基づいたパラメータの比較分類も行われている¹⁴⁻¹⁵⁾。熱環境評価や灌水計画のための蒸散予測でも樹木の特徴による分類は有用な可能性があるが, 都市緑化樹木に対しては(信頼性の高いデータが少ないという(1)の問題とも関連

本論文は既報(45-46)に加筆修正を加えたものである。

* 東京工業大学 大学院生・修士(工学)

** 東京工業大学 准教授・博士(工学)

*** 放送大学 教授・工博

**** トヨタ自動車バイオ・緑化研究所

Grad. Stud., Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

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

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

TOYOTA Motor Corporation, Biotechnology & Afforestation Business Div.

Table 2 Measurement period & morpho-physiological characteristics of sample trees

樹種	略記	重量計測期間 (分析対象期間)	樹冠投影面積 (8点推定) [m ²]	樹高 [m]	基部直径 [cm]	生枝下直径 [cm]	葉齢 [月]	道管種	耐陰性 ²⁴⁾ **	耐乾性 ²⁴⁾ **	街路樹数 ²⁰⁾
ケヤキ	<i>Z. s.</i>	(2010/08/1-31) * (2012/08/1-31) *	5.5 (葉面積15.4m ²) 9.2 (葉面積28.9m ²)	6.4 6.4	— —	10 11	落葉樹	環孔材	2.1	3.4	3位
シラカシ	<i>Q. m.</i>	2012/07/29-08/09 2013/08/18-21	3.3 —	5.5 —	12 12	10 10	常緑樹(36)	散孔材	2.3	4	13位
エゴノキ	<i>S. j.</i>	2012/07/29-08/09	6.6	4.4	11	9	落葉樹	散孔材	2.5	2.5	66位
ソメイヨシノ	<i>C. × y.</i>	2012/08/01-08	7.8	5.5	14	10	落葉樹	散孔材	—	—	2位
イチョウ	<i>G. b.</i>	2012/08/10-22	4.5	5.4	13	10	落葉樹	仮道管	1.3	4	1位
コナラ	<i>Q. s.</i>	2012/08/10-22	7.3	5.8	14	9	落葉樹	環孔材	3	3	79位
クスノキ	<i>C. c.</i>	2012/08/12-23	3.6	4.7	13	9	常緑樹(12)	散孔材	3.5	2.8	6位
ヤマボウシ	<i>B. j.</i>	2012/08/24-09/05	6.9	4.5	12	9	落葉樹	散孔材	—	—	—
シデコブシ	<i>M. s.</i>	2012/08/24-09/05	1.5	3.0	6	5	落葉樹	散孔材	3	1.8	—
クヌギ	<i>Q. a.</i>	2012/08/24-09/05	7.5	6.7	11	8	落葉樹	環孔材	2.3	4	98位
コブシ	<i>M. k.</i>	2012/09/05-09/26	6.1	4.1	13	8	落葉樹	散孔材	3	2.9	19位

* 2010年8月～2013年まで連続計測

** 温帯806樹種中の5段階相対評価

して), 単木スケールでの蒸散能力の算定・比較は殆ど行われてこなかった。近年, 孤立環境にある都市緑化樹木が森林に比べより多くの蒸散を行う可能性が指摘されている¹⁶⁻¹⁷⁾ ように, 都市と森林では気象条件や根系の状態が大きく異なるために, 森林で得られた知見(樹種によって蒸散量がどれだけ変わるか, 既存の分類基準が予測に有用であるか等)が適用可能か否かは明らかでない。

1-2. 研究目的と研究対象の位置づけ

本研究では, 孤立環境にあるコンテナ植栽の樹木を対象として, 1時間単位での蒸散速度と蒸散能力の樹種または個体による差異を把握することを目的とし, 可能蒸発量比を用いて, 樹木の形態的・生理的特徴との関係および既往研究¹⁵⁾の温帯広葉樹林の値との比較分析を行う。そのために, 前記の長期計測を目的とした重量計測手法に加え, 短期間での複数個体の計測を可能とする吊り下げ式重量計測法を新たに開発し, 11樹種を対象に実験圃場において単木蒸散量の計測を行った。本研究では土壌容積を0.5m³で統一した供試木(幹径約10cm)を対象としている^{注2)}が, 一般に地上部(葉面積・幹径)と根の成長には相関がある¹⁸⁾ため, 本研究の結果はこのサイズの都市緑化樹木の蒸散能力の目安になり得るものと考えられ, この条件内においては数値シミュレーション¹⁹⁾やCASBEE-HI¹³⁾等による屋外熱環境評価の検証にも応用できるものと考えられる。

本研究では夏季晴天・灌水日の計測結果を報告する。ここでは, (1)舗装や植栽升によって土壌容積が制限された条件, (2)街路樹や庭木のような孤立環境にあり風や日射の影響を受けやすい条件, (3)十分に灌水された条件にある都市緑化樹木を想定対象としているが, この結果は実際の都市において既に灌水されている樹木だけでなく, 現状で水不足の状態にある樹木を適切に管理した場合に期待される効果を検討する上でも有用な知見を提供するものである。

2. 研究対象と方法

2-1. 測定環境と供試木

実測は2012年夏季を中心に, 愛知県みよし市内にあるトヨタ自動車パイオ・緑化研究所(35°8'N, 137°6'E)の実験圃場で行った。図1に圃場内と実測の様子を, 図2に供試木の配置を示す。本研究では孤立環境と土壌容積の制限を想定し, 平均樹高5.2mのコンテナ植栽を供試木として, 隣接樹木の樹影が被らないように4m以上の間隔を取って配置した。土壌容積は面積1m², 深さ50cm(排水層10cm), 土壌種はローム土70%, 真珠岩パーライト20%, 腐植土10%とした。

Fig. 1 Farm field (left), weighing *B.j.* with load cells (right)

Fig. 2 Plot plan of farm field (summer 2012)

表2に供試木の形態的・生理的特徴と計測期間を示す。ケヤキ(*Zelkova serrata*), シラカシ(*Quercus myrsinifolia*), エゴノキ(*Styrax japonica*), ソメイヨシノ(*Cerasus × yedoensis*), イチョウ(*Ginkgo biloba*), コナラ(*Quercus serrata*), クスノキ(*Cinnamomum camphora*), ヤマボウシ(*Benthamidia japonica*), シデコブシ(*Magnolia stellata*), クヌギ(*Quercus acutissima*), コブシ(*Magnolia kobus*)の11種, 各1本を対象とした。樹種を選択は, 緑化樹種としての一般性²⁰⁾を考慮した上で, 既往研究で蒸散特性への影響が報告されている, 葉への水供給能力を決める道管種²¹⁾, 光合成速度・気孔開度と相関のある葉齢(常緑・落葉)²²⁻²³⁾の影響を検討するために決定した。なお供試木は計測開始前に各樹種2本ずつ用意して圃場内で養生させた後, 生育の良かったものを選んだ。

土壌が乾燥状態にある個体は樹種に関わらず蒸散が抑制されることが知られている²³⁾ため, 供試木ごとの蒸散能力の把握という本研究の目的から, 途中灌水停止実験を行っていた期間以外では圃場水量まで毎日灌水した状態で養生を行った。

大半の供試木は2011年から図2中の位置に配置していたが, シラカシだけは2012年の実測前まで圃場中央部の植栽群内にあった。ま

た、ケヤキの2010年夏季の実測結果は浅輪ら(2012, 2014)で既に報告している^{1,2)}が、当時のケヤキはコンテナに移植する際に樹木への負担を軽減させる目的から枝打ちを行っていたために自然状態より葉面積が減少しており、その後の2年間で葉面積の増大が見られた(表2)。この2樹種は蒸散特性にも変化が確認されたため、特性変化後のケヤキ2012年とシラカシ2013年も本研究の分析対象とした。

2-2. 計測機器と手順

表3に計測項目と機器の概要を示す。ケヤキの重量は2010~2013年まで台秤上で連続的に、気象条件は圃場内の代表点(図2, 機器設置高さは全て地上5m)で計測し、データロガー(Campbell, C-CR1000)に記録した。圃場内には、樹木群の南側10mの位置に温室(高さ4m)がある他は周辺40m以内に建物・樹木等は存在しない。計測機器・データ処理の詳細は浅輪ら(2012, 2014)⁷⁻⁸⁾を参照されたい。各供試木の投影面積やケヤキの葉面積等の樹木形状の計測には地上型レーザースキャナーを用い、投影面積は計測した点群データを基に樹冠外周上から45°間隔で8点選び計算した。ケヤキの葉面積の推定手法の詳細はAsawa et al. (2014)²⁵⁾を参照されたい。本研究の供試木と同サイズのケヤキを用いてレーザー計測と刈取りによる検証を行い、誤差20%以下で推定可能であることを確認している。

図3に本研究で開発した吊り下げ式重量計の模式図を示す。ケヤキ以外の10種の試験体重量は、鉄骨製の支持フレーム上の3点からS字ビーム型ロードセル(ミネベア, U3S1-500K-NS, 秤量500kg, 表示分解能0.1g)3台とコンテナを設置した台座を連結し、レバーブロックを操作して吊り上げることで計測を行った。従来の台秤方式と比較して、着脱・持ち運びが容易なロードセル(本体重量2.6kg)と手動操作のレバーブロックを用いることで、各試験体を移動させることなく計測が可能なのが特徴である。試験体重量が500kgを超える本研究の場合、台秤式では試験体の移動に重機が必要となるために複数個体を計測する上での本方式の利点は大きい。一方で欠点として風による計測値の振動が大きくなる点がある。重量計は計3台作成して、同時に3個体ずつ、2012年夏季を中心に各10日程度計測し(表2)、1秒または5秒間隔で記録した。

供試木ごとの最大蒸散能力の把握という目的から、灌水は全て管理し、根への酸素供給を確保しつつ雨の侵入と土壌面からの蒸発を防ぐためコンテナ上部を天板で覆った。ケヤキ以外の試験体の排水量は計測していないが、排水が日中の蒸散速度推定に影響しないように、ケヤキの実測結果⁷⁾より灌水開始から約4時間で排水が終わることを確認した上で、主に深夜に灌水を行うことで対処した。図4に試験体重量と土壌含水率の計測結果を示す。灌水日では、供試木ごとに概ね一定した日重量変化や灌水直後の急激な重量の減少が見られ、圃場容量まで十分に灌水されていることが分かる。なお乾燥ストレス応答を調べる目的から計測期間中に灌水停止実験を行っているが、本研究では灌水日のみを評価対象とし、雨天日(2012年8月3, 6, 11, 14, 18, 30日, 9月1, 2, 11, 15, 19, 20日)も対象外とした。

3. 蒸散速度の推定方法と誤差評価

3-1. 重量の推定と正規性の検討

屋外での重量計測から蒸散速度を求める場合は風の影響を評価する必要があるが、吊り下げ計測では特に重要な問題となる。表4に吊り下げ式重量計による、晴天日における樹種・風速別の30分間の標準

Table 3 Measurement equipment

計測項目	機器	記録間隔
試験体重量	ロードセル(ミネベア, U3S1-500K-NS)各3台	1 or 5 [sec]
樹冠投影面積	地上型レーザースキャナー (RIEGL, VZ-400)	全樹種2012年
葉面積(ケヤキのみ)		2010, 2012年
排水量(ケヤキのみ)	転倒式雨量計 (Campbell, TE525-L25)	10 [min]
気温	強制通風筒 (Young, YG-43520) 白金抵抗温度計 (4線式Pt100Ω)	1 [min]
相対湿度	静電容量式高分子湿度センサー	1 [min]
水平面全天日射量	サーモパイル式日射計 (英弘精機, MS-402)	1 [min]
風向・風速	三次元超音波風向風速計 (Young, YG-81000)	1 [sec]
樹冠放射温度	赤外線放射カメラ (NEC Avio, ThermoGEAR)	1 [hour]

Fig. 3 Design of hanging-type gravimeter

Fig. 4 10-min avg. sample weight, scale of x-axis indicate midnight

偏差の平均値を示す。データの分析には統計解析環境R ver.3.12²⁶⁾を用いた。供試木の日中の蒸散速度は約1~3 kg/tree/hと想定されたが、風速2m/s以下の条件においても多くの供試木で標準偏差が1kg/tree/hを超える振動が見られた。そこで本研究では相対誤差(95%信頼区間)の許容値を20%と定め^{注3)}、重量を秒単位の高分解能で記録することで重量の推定精度の向上を図った。重量計による蒸散計測では往々に移動平均による平滑化が行われる²⁷⁾が、測定誤差が定量化されない他、長すぎる平均化時間は定常性の仮定を崩すために誤差を生じやすい問題がある。本研究では1時間単位の蒸散速度を議論するため、既往研究の樹液流の計測結果から30分間は蒸散速度が定常と判断して、各時刻の重量を前後15分間(n=1801 or 361)の直線回帰から求めた。表4に直線回帰の残差から求めた樹種・風速別の高次モーメントの平均値を示す。風速2m/s以下では歪度の絶対値は殆どの供試木で1以下、尖度はソメイヨシノ、ヤマボウシ、クス

Table 4 Descriptive statistics of sample weight (half hourly basis)

平均風速 [m/s]	標準偏差			歪度			尖度		
	~.5	.5~2.	2.~	~.5	.5~2.	2.~	~.5	.5~2.	2.~
シラカシ	0.22	0.37	0.72	0.06	0.20	2.11	2.01	4.00	48.7
エゴノキ	0.17	0.82	0.62	0.05	0.54	1.43	2.14	4.97	7.40
ソメイヨシノ	0.07	0.28	0.47	0.21	1.05	1.12	3.81	9.24	9.80
イチョウ	0.67	0.78	1.78	0.25	0.44	0.51	4.20	5.34	7.24
コナラ	0.65	1.28	3.45	0.14	0.36	0.22	2.60	4.93	4.84
クスノキ	0.62	0.88	1.56	0.41	0.59	0.47	4.08	5.82	6.72
ヤマボウシ	0.42	0.44	0.41	0.18	0.73	1.10	3.24	7.46	8.84
シデコブシ	0.21	0.51	0.27	0.07	0.16	0.33	2.10	3.10	5.22
クヌギ	0.43	0.48	1.32	0.62	0.67	2.00	5.00	6.27	31.2
コブシ	0.14	0.35	0.87	0.37	1.04	1.24	4.64	7.27	7.84

Fig. 5 Weight change of M.k., example of autocorrelation

ギ、コブシ以外では6以下であり正規分布からのずれは顕著ではないが、風速2m/s以上では殆どの供試木で大幅な値の増加が見られた。特に歪度の増大は平均値を代表値として扱う上で大きな問題となるため、本研究では日中の平均風速が2m/sを超える強風日(2012年8月1, 15, 31日, 9月14, 17, 18日)を評価対象外とした。

3-2. 独立性の検討と信頼区間の推定

エルゴード過程では標本数を増やすことで標準誤差を減らせるが、一般に時系列データの多くは自己相関を持つために疑似反復を犯しやすい。本研究でも図5に示すように、重量データが10秒程度の間隔で大きく振動しており、各値が独立でないことが確認された。1秒という計測間隔がコンテナの振り子運動周期より短いために、慣性の影響で直前の計測値に近い値が表れているものと考えられる。従って、ここでは実効的に独立な標本間の時間(Time between effectively independent observation)²⁸⁻²⁹⁾を推定することで、各時刻の重量推定値の信頼区間を補正した。

自己相関のある標本系列の自由度(有効標本数 N_{eff})は実効的に独立な標本間の時間 T_0 で標本数 N を割ることで得られ、平均に関する T_0 は不偏推定のアナロジーから(2)式で表せる²⁸⁻²⁹⁾。

$$N_{eff} = \frac{N}{T_0} \quad (1)$$

$$T_0 = \sum_{L=1}^N \left(1 - \frac{|L|}{N}\right) r_L = 1 + 2 \sum_{L=1}^N \left(1 - \frac{L}{N}\right) r_L \quad (2)$$

ここで、 N_{eff} : 有効標本数、 N : 標本数、 T_0 : 実効的に独立な標本間の時間、 L : ラグ次数、 r_L : L 次ラグの自己相関係数である。1次のマルコフ過程は自己回帰(AR)モデル(3)式で表現され、 N が十分大きい時には(2)式第2項以降を1次の自己相関係数 r_1 を公比とする等比級数とみなせることから(4)式の近似が成り立つ。

$$x(t) = r_1 x(t-1) + \varepsilon(t) \quad (3)$$

$$T_0 = 1 + 2 \sum_{L=1}^N \left(1 - \frac{L}{N}\right) r_1^L \approx \frac{1+r_1}{1-r_1} \quad (4)$$

ここで、 $x(t)$: 任意の時系列データ、 r_1 : 1次ラグの自己相関係数、 $\varepsilon(t)$: 時刻 t の誤差項である。本研究では直線回帰の残差系列に誤差の正規性を仮定した1次のARモデルをあてはめ、Yule-Walker法によって r_1 を決定して各時刻の N_{eff} と蒸散速度の信頼区間を求めた。

シラカシ2012年は最も蒸散量が少なく相対誤差が大きな個体であったため、ここではシラカシ2012年の誤差評価結果を示す。計測間隔1秒のデータから求めた1時間ごとの重量変化(蒸散速度)とその2標準誤差($\approx 95\%$ 信頼区間)、 N_{eff} と気象条件を図6に示す。試験体の振動が激しくなるにつれて自己相関が弱まるため、 N_{eff} は概ね風速に対応していた。1日の大半が風速2m/s以下である7月29~31日、8月2~4日では N_{eff} は元の標本数1801の3分の1以下に減少しており、自己相関の考慮によって信頼区間が約1.7~3倍まで増大する結果となった。強風日である8月1日、日射変化の大きな8月5日はいずれも重量が激しく変化しているが、誤差範囲から両者を明確に区別できることが分かる。7月29~31日、8月2, 4日の日中の蒸散速度の相対誤差(2標準誤差の比)は平均19.8%(最大49.2%)となり、目標の許容値を満たしていることを確認した。他の供試木の風速2m/s以下の相対誤差は4.6~13.9%、全10種の平均値は9.2%であった。

Fig. 6 (a) Half hourly effective sample size of Q.m. (circles) & wind velocity (line)

(b) hourly weight change (black line) & short wave radiation R_s (gray line) in 2012 (bars: ± 2 S.E.)

4. 晴天・灌水日における蒸散量の実測結果

4-1. 蒸散速度と水蒸気拡散コンダクタンスの日変化

葉から大気への水蒸気拡散過程は、気孔と境界層を直列抵抗とみなすと次のように表せる³⁰⁻³¹⁾。

$$E_{tree} = G_v(e_l - e_a) \quad (5)$$

$$G_v = G_a \cdot G_s / (G_a + G_s) \quad (6)$$

ここで、 E_{tree} ：単木蒸散速度[kg/tree/h]、 G_v ：単木のバルク水蒸気拡散コンダクタンス[kg/tree/h]、 e_l & e_a ：葉内平均・大気の水蒸気分圧[kPa/kPa]、 G_a & G_s ：水蒸気に対する単木のバルク境界層・気孔コンダクタンス[kg/tree/h]である。一般に樹木では G_a は G_s の5倍以上、特に本研究のように風を受けやすい孤立環境にある樹木の場合は10倍以上の値を取る³⁰⁾。 e_l は葉温の関数であるが、 G_a が大きい（即ち対流熱伝達率が大きい）樹木では樹冠平均温度は気温に近づくため、 $E_{tree} \approx G_v D$ （ D ：大気の水蒸気分圧と飽和水蒸気分圧の差）と近似できる³¹⁾。2012年の計測期間中に赤外線放射カメラの計測を行い、供試木の樹冠平均温度が最大でも気温+1~2℃であることを確認した上で、 $E_{tree} \approx G_v D$ と仮定して G_v を計算した^{注4)}。

図7に比較的風速の安定した、典型的な晴天・灌水日における各樹種の E_{tree} と G_v の日変化を示す。なお、重量データが|歪度|>1または尖度>6となった条件については E_{tree} を白抜きのプロットで表す。全供試木での E_{tree} の最大値はケヤキ2010年、コナラの約3.5kg/tree/hとなった。これは潜熱量2.3kW、家庭用エアコン1台分の冷房能力に相当する値である。一般に蒸散速度は蒸発の駆動力である D およびその要因となる気温の変化に連動することが知られ、本研究でも E_{tree} のピークは多くの個体で13~14時頃に表れていた。しかし、ソメイヨシノ、イチヨウ、ヤマボウシは午前中にピークを持ち日中横ばいに近い変化を示していた。これらの供試木では水ポテンシャル低下による通水制限^{21) 32)}が起きていた可能性が考えられる。蒸散流（樹液流）速度は土壌～葉の水ポテンシャル勾配に比例するが、葉の側で低下可能な水ポテンシャルには一定の限界（温帯広葉樹では約-1.5~-2.5MPa）があるため、通水制限下では G_s は水ポテンシャルが限界値以下に下がらないよう（即ち蒸散速度が一定以上にならないよう）に制御される。通水性は葉と根の面積比で決まる³²⁾ため、ソメイヨシノ、イチヨウ、ヤマボウシはコンテナによって根の生長が阻害され葉と根のバランスが崩れていた可能性が考えられる。

G_v はケヤキ2010年以外の全ての供試木において朝6~8時頃に明確なピークを持ち、 E_{tree} の増大に応じるように日中低下（Midday depression, 昼寝現象）していた。 G_v の日中低下は孔辺細胞が蒸散速度の増大を感知することによる G_s のフィードバック的応答³³⁾、または昼の強い日射による強光阻害・高温による酵素不活性化を要因とする光合成速度低下による G_s のフィードフォワード的応答³⁴⁾によって引き起こされる。従って日中低下が明確でないケヤキ2010年、シラカシ2013年、コナラの3個体は乾燥・光・熱ストレスを比較的受けておらず、そのために E_{tree} の値も他の個体より大きくなったものと考えられる。

日積算蒸散量はケヤキ2010年、コナラ、クスノキが約30kg/tree/dと最も多く、次いでケヤキ2012年、シラカシ2013年、クスノキが約25kg/tree/dとなった。一方、少ないものではシラカシ2012年、エゴノキが10kg/tree/d程度となり、ケヤキとシラカシでは蒸散特性に大きな経年変化が生じていた。

Fig. 7 Diurnal change of whole tree transpiration rate E_{tree} (black line) & vapor diffusion conductance G_v (gray line) in sunny irrigation day (white circles indicate absolute value of skewness > 1 or kurtosis > 6, bars: ± 2 S.E.)

シラカシは外形に目立った変化が見られなかったにも関わらず2012~2013年にかけて日蒸散量は約3倍に増大していた。この特性変化の原因として、2012年に図2中央部の植栽群内から図に示した孤立環境に移動させたことで光環境が改善し、光合成能力が増大した可能性が挙げられる。2012年の実測前に配置を変えていたにも関わらず当時は E_{tree} が小さかった理由として、シラカシの葉の寿命が36か月あるために光合成能力の増大（新たな環境下での着葉）に時間がかかったことが考えられる^{注5)}。また根の生長には一般的には数週~数か月程度かかる³²⁾ため、日射環境の変化に対して通水性の変化が追いついていなかった可能性もある。

ケヤキの葉面積は2010~2012年にかけて15.4m²から28.9m²に倍増していたにも関わらず G_v は約2/3に減少し、葉面積あたりの蒸散速度は1/2~1/3まで減少する結果となった。これは単木の通水性が変化しなかったことの影響と考えられる。即ち、蒸散速度は土壌から葉までの通水コンダクタンスに比例する^{21) 32)}ために、0.5m³の土壌容積や約10 cmの生枝下直径という条件では30kg/tree/d程度の蒸散量が限界であり、葉面積の増大が蒸散速度の増大に繋がらなかったものと考えられる。2章で述べたように2010年当時は枝打ちによって葉面積が減少していたために単位葉面積当たりの通水性が過剰であったと考えられ、ケヤキ2010年の G_v が日中に横ばいとなる（気孔閉鎖が不明瞭な）変化パターンはこの仮説を支持するものである。類似した現象として、既往研究ではOren et al. (1999)が竜巻被害を受けた針葉樹林において、葉面積が55%に減少したものの樹液流は80%

Fig. 8 Diurnal change of latent heat λE_{cr} (black line) & short wave radiation R_s (gray line) in sunny irrigation day, based on crown projection area (white circles indicate absolute value of skewness > 1 or kurtosis > 6, bars: ± 2 S.E.)

程度の値を維持していたことを報告している⁵⁾。

4-2. 樹冠投影面積あたりの潜熱量

図8に供試木の樹冠投影面積あたりの潜熱量 λE_{cr} と水平面全天日射量 R_s の日変化を示す。なお、シラカシ2013年は幹直径に変化が見られなかったことから2012年と同サイズと仮定して計算した³⁵⁾。イチョウやクスノキでは λE_{cr} が R_s の短時間変化に連動している様子が見られ、本研究の提案する吊り下げ法が1時間単位での蒸散速度変化を正確に捉えていることがわかる。 λE_{cr} の大きなものとして、投影面積の小さなシラカシ2013年、クスノキ、シデコブシの3個体は最大 500 W/m^2 を超えていた。ただしシデコブシについては単木蒸散速度(E_{tree})は他と比べて小さい部類であった(図7)。シラカシ2013年とクスノキの λE_{cr} は一日を通して R_s とほぼ同等の値を取っており、葉面積密度(LAD)や個葉単位での蒸散速度、またはその双方が他の供試木より大きいものと判断できる。一方で λE_{cr} が小さなエゴノキとソメイヨシノは最大約 100 W/m^2 であり、ピーク値には約5倍の個体差が見られた。

既往研究では孤立環境にある樹木が群落より多く蒸散する可能性が指摘されている¹⁶⁻¹⁷⁾が、本研究の結果では過半数の供試木の潜熱ピーク値が 300 W/m^2 以下と、標準的な温帯広葉樹林並みの値であった。孤立樹木は側面から受ける日射量も大きいため、実際の吸収日射量と潜熱量の比はさらに小さくなるものと考えられる。図7・8は典型的な夏季晴天日かつ十分な灌水条件の結果であるため、蒸散速度の制限要因としてはコンテナに限定された土壌容積による根系の発達阻害がボトルネックとなっていた可能性がある。乾燥ストレスの影響が顕著でないケヤキ2010年の潜熱量は日射量の50%以上に達し、単位片面葉面積あたりでは最大 153 W/m^2 (0.23 mm/h)、日中平均 91 W/m^2 (0.13 mm/h)となった。葉面積の増大後のケヤキ2012年の潜熱量は単位片面葉面積あたり最大 62 W/m^2 (0.09 mm/h)、日中平均 44 W/m^2 (0.07 mm/h)であった。

本研究の供試木の投影面積あたり日蒸散量の範囲は $4.3 \pm 2.5 \text{ mm/d}$ (Mean $\pm$ S.D., 以下同様)となった。コンテナ植栽の既往研究²⁷⁾

と比較して妥当な範囲と考えられるが、建築環境工学分野でしばしば参考とされるCASBEE-HIの作成時において参考値とされた¹²⁾、イチョウとプラタナスの切断葉の重量変化(蒸散速度)計測に基づく推定値 $14.9 \pm 6.4 \text{ mm/d}$ およびケヤキが芝生の12倍以上蒸散するという野島(1998)の計算結果¹³⁾と比較して小さな値である。文献¹²⁾の参考値との差異について、まず、切断葉から蒸散速度を推定する手法に関しては、切断葉と自然状態そのままである計測では放射環境が異なり、葉温と気孔開度はいずれも数分で容易に変化するために蒸散速度も変わる可能性が高いことから、この手法による推定精度の問題が一因として挙げられる^{注6)}。次に、野島(1998)との差異について、野島(1998)は供試木のケヤキの葉面積指数(LAI)を8.8と推定しポロメーター計測に基づく個葉の蒸散量予測式から単木蒸散量を求めて芝生と比較している。しかし、LAI 8.8という値は夏季の一般的な落葉広葉樹の2倍近い値であり¹⁴⁻¹⁵⁾、更に野島(1998)はMonsi & Saeki式³⁶⁾ ($I = I_0 \exp(-kF)$: 葉群層内の水平面日射量, I_0 : キヤノビー上の水平面日射量, k : 吸光係数, F : 積算葉面積指数)から計算した各葉群層内の水平面日射量 I の値を葉の吸収日射量とみなして蒸散速度を計算している。しかし、吸光係数は主に葉の傾きを表すパラメータであり、実際に葉が吸収する日射量は $-dI/dF = kI_0 \exp(-kF) = kI$ となるため、水平面日射量 I よりも小さな値を取る。つまり、野島(1998)では標準的な広葉樹に比べて大きな葉面積と多大な日射吸収量を想定した計算が行われていたために、本研究より大きな値を取ったものと考えられる。

本研究に類似したサイズ、環境条件(日積算日射量約 20 MJ/d 、孤立環境、湿潤土壌)の地植えの樹木を対象に樹液流計測を行った既往研究として、Green(1993)、Green et al.(2002)がある¹⁰⁻¹¹⁾。日積算値では樹液流速と蒸散速度の時間差の影響が無視できるため、ここでは1日以上の単位で議論する^{注7)}。Green(1993)はニュージーランドの圃場($40^\circ 2' \text{S}$, $175^\circ 4' \text{E}$)において、孤立環境にある地植えのクルミ(樹高 3.5 m 、葉面積 26.4 m^2)を対象に夏季の単木の正味放射量の直接計測と樹液流計測を行い、晴天日における日蒸散量が 40 kg/tree/d

(投影面積あたり約4.9mm/d)であったこと、日中の潜熱量が正味放射量の約2/3であったことを報告している¹¹⁾。またGreen et al.(2002)は実験圃場(41°30'S, 173°52'E)において、5m×6m間隔で列植されたオリーブ(樹高約4m, 葉面積13.5m²)を対象に樹液流計測を行い、夏季における蒸散量が最大175kg/tree/wkであったことを報告している¹⁰⁾。対象樹種や詳細条件は異なるが、本研究において蒸散量が多く見られた供試木(ケヤキ、コナラ等)は地植えの樹木を対象としたGreen (1993), Green et al. (2002)の報告と近い値を取っていたことから、これらの供試木では土壌容積の制限による影響が(ソメイヨシノ、イチョウ等と比較して)小さかったことが推測される。

4-3. 日蒸散量と形態的・生理的特徴の関係

本節では蒸散の気象条件への依存性を考慮して、小水面の日蒸発量を表すMakkink式³⁷⁻³⁸⁾による可能蒸発量(E_{pot})を用いて日中($R_s > 0$)の積算蒸散量を無次元化した上で分析を行った。

$$E_{pot} = a \frac{s}{s + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} + b \quad (7)$$

ここで、 E_{pot} :可能蒸発量[mm/d]、 s :気温での飽和水蒸気圧曲線の傾き、 γ :乾湿計定数、 λ :蒸発潜熱、 a & b :地域ごとの経験的定数である(ここでは温帯の標準値³⁸⁾ $a = 0.97$, $b = -0.29$ を用いる)。

Penman式の簡易版である(7)式は気温と日射量だけを入力条件とするためにより多くの過去のデータが利用可能であり、多くの標本数を必要とする比較分析を行う際の利点が多い。本研究では森林の既往研究との比較のために(7)式を用いる。また水文気象学分野では土地(樹冠投影)面積基準で蒸散量を求めることが多いが、本研究ではそれに加えて対象が孤立樹木であることを鑑みて、単木単位の蒸散能力を表すための1m²で基準化した値も算定した(コンテナ占有面積での基準化ともみなせる値である)。ここではそれぞれの可能蒸散量比を E_{cr}/E_{pot} 、 E_{tree}/E_{pot} と表す。

図9に夏季晴天・灌水日における供試木の蒸散量計測値から得た E_{cr}/E_{pot} 、 E_{tree}/E_{pot} の値を示す。蒸散特性に大きな変化があったケヤキ(2010年と2012年)とシラカシ(2012年と2013年)を別個体とみなすと、 E_{cr}/E_{pot} の平均値と標準偏差は 0.62 ± 0.36 ($n=13$, Range: 0.19–1.25)となった。この結果は供試木の平均蒸散量が樹冠投影面積と等しい広さの水面からの蒸発量の6割程度であること、投影面積基準では個体によって約6倍の蒸散能力の差があることを意味する。水面より小さい値を取るのは気孔制御のためであり、一般に夏季の植生の蒸散が水面蒸発量を超えることは稀であるが、本研究ではシラカシ2013年とクスノキがそれぞれ1.25、1.20という値を示した。これはLADの大きさと、孤立樹木であることによる側面からの日射と移流効果¹⁷⁾が影響したものと考えられる。

Komatsu (2005)は成長期かつ湿潤期の森林における日中の蒸発散量の文献値を森林の特徴ごとにまとめている¹⁵⁾。この文献値を基に(7)式から温帯広葉樹林の E_{cr}/E_{pot} を計算すると、 0.65 ± 0.13 ($n=14$, Range: 0.46–0.84)であった。平均値は本研究と有意な差があるとは言えないが、標準偏差は本研究の方が大きく最大・最小値も本研究の方が広い範囲を取っていた。Komatsu (2005)に引用されている広葉樹林の特徴は幅広く偏りは見られない(例えばLAI範囲は3.3–7である)ため、本研究で得られた結果との比較から、(1)孤立環境(強い日射と小さな境界層抵抗)とコンテナ植栽(根系の生長阻害)という条件が樹種あるいは個体に固有の特性を際立たせること、

Fig. 9 Standardized daily transpiration rate E_{cr}/E_{pot} & E_{tree}/E_{pot} , dashed lines indicate mean values

Fig. 10 Relationships between E_{tree}/E_{pot} & morpho-physiological characteristics of sample trees

(2)樹種あるいは個体ごとの乾燥ストレス耐性には大きな差があること、(3)都市緑化樹木の単木スケールの蒸散量を予測するには森林以上に詳細なモデル・パラメータが要求されることが示唆される。

図10に供試木の形態的・生理的特徴と E_{tree}/E_{pot} の関係を示す。 E_{tree}/E_{pot} の平均値と標準偏差は 3.00 ± 1.26 ($n=13$, Range: 1.09–4.91)となった。単木蒸散量は葉面積と、葉面積は幹の太さと³⁵⁾それぞれ相関があるために、樹冠投影面積や幹直径に伴う蒸散量の増大が期待されたが、本研究では有意な影響は確認されなかった。本研究の供試木程度のサイズ差では投影面積・幹直径の蒸散量への影響は小さく、樹木形状を基に蒸散量を予測するためには、LAIやLADのような、より高精度な形態情報が必要と考えられる。また個葉計測の既往研究では夏季において落葉樹が常緑樹より蒸散速度が大きい傾向が報告されている²³⁾が、これも本研究の結果からは確認されなかった。

通水性に影響する道管種の違いに着目すると、太い道管を持つ環孔材樹種であるケヤキ2010年・2012年、コナラ、クヌギは蒸散量が多い傾向が見られた(環孔材平均3.94, その他2.57, $p=0.045$ in Welch's t-test)。本研究と類似した傾向を示した既往研究として、Saito et al. (2003)は山梨県内の実験圃場において落葉広葉樹8種(うち3種はケヤキ、コナラ、コブシ)の個葉の蒸散速度を計測し、ケヤキとコナラの値が最も大きかったことを報告している³⁹⁾。ただし本研究の結果から環孔材樹種は一般的に蒸散量が大きいとは断言で

きない。都市緑化樹木を対象に道管種別の樹液流速を調べたLitvak et al. (2012)は、環孔材樹種は他に比べ乾燥ストレスに敏感な傾向を報告している⁹⁾。本研究の供試木は毎日灌水された条件下で生育しており、都市の樹木に比べて乾燥に鈍感な特性を持っていた可能性がある。しかし同時に、十分に灌水されていれば水供給能力に優れる環孔材樹種がより多く蒸散する可能性も考えられる。

5. 結論

大型重量計による単木スケールの蒸散量の計測手法を提案し、孤立環境にあるコンテナ植栽（土壌容積0.5m³）の樹木11種の夏季晴天・灌水日における蒸散量の計測を行い、以下を明らかにした。

- 1) 提案した吊り下げ式計測法が蒸散速度の1時間単位の日射応答および気孔の日中低下を確認できる精度を持っていることを示した。高分解能の記録と自己相関を考慮した分析によって、風速2m/s以下の条件では、最も蒸散量の少ないシラカシ(2012年)の日中の蒸散速度を相対誤差(2標準誤差)19.8%で、全10種の平均では9.2%で推定できることを示した。
- 2) 供試木の蒸散量の日積算値は約10~30kg/treeとなり、3倍以上の個体差が見られた。単木あたりでの最大蒸散速度はケヤキ(2010年)とコナラの3.5kg/tree/h、潜熱量2.3kW/treeであった。また水蒸気拡散コンダクタンスの変化傾向から、この2個体は乾燥・光・熱ストレスを比較的受けていなかった可能性が高いことを示した。
- 3) 樹冠投影面積あたりの潜熱のピーク値は過半数の供試木では300W/m²以下、樹冠投影面積の小さなシラカシ(2013年)、クスノキ、シデコブシでは500W/m²以上となり、5倍以上の個体差が見られた。
- 4) ケヤキは2010年から2012年で葉面積が15.4m²から28.9m²に倍増したが、単位片面葉面積あたりの潜熱量は日中平均91W/m²から44W/m²と1/2以下に減少していた。コンテナ植栽では通水性が単木の蒸散速度の支配的要因である可能性を示した。
- 5) シラカシは2012年から2013年で3倍以上の蒸散量の変化が確認された。要因として、2012年の計測前の配置移動による日射環境の変化の影響が推測された。
- 6) 経年変化後のケヤキとシラカシを別個体とみなした場合、樹冠投影面積あたりの日蒸散量の可能蒸発量との比は0.62±0.36 (Mean± S.D., n=13)となった。また、既往研究の温帯広葉樹林の値は0.65±0.13 (n=14)となり、平均値に有意な差はみられなかったが、標準偏差および最大・最小値は本研究の方がより広い範囲を取っていた。
- 7) 可能蒸発量比と樹木の形態的・生理的特徴の相関からは、樹冠投影面積、生枝下直径、葉齢については有意な影響は確認されなかった。道管種については環孔材樹種の蒸散量が多い可能性が示唆された(p=0.045 in Welch's t-test)。

1時間単位での蒸散速度の予測や、樹木サイズ・形状の影響を分析するためには、計測した単木の蒸散速度から単位葉面積あたりのコンダクタンスを算定し、更に気孔の環境応答を定量化することが必要である。本研究の供試木に対しては2012年にレーザースキャナー

による3次元形態情報の計測を行っており、今後はLAI・LADを用いた単位葉面積あたりの潜熱量の算出と、気孔コンダクタンスパラメータの定量化に取り組んでいく予定である。ただし、本研究中でも示されたように、葉面積の増大が蒸散量の増大に直結しないことは土壌容積が制限された都市緑化樹木の大きな特徴と考えられるため、樹木サイズの外挿には慎重な検討が必要である。

ヒートアイランド化の進んだ都市環境にある樹木は、大気乾燥、土壌容積の制限、土壌乾燥等の水分不足に陥りやすい条件に置かれていると考えられるため、気孔コンダクタンスの乾燥ストレスに対する知見を深めることは特に重要な課題である。本研究の灌水停止実験結果についても、今後分析を進めていく。

注

- 注1) 例えばLeverenz et al. (1982)は、トウヒ林の水蒸気拡散コンダクタンスを個葉計測から相対誤差(95%信頼区間)10%以下で求めるためには、少なくとも155以上の標本数が必要であることを示している⁹⁾。
- 注2) 国土交通省土木工事積算基準⁴⁰⁾では、幹直径8~9.5cmの樹木に対する土壌容積は0.65m³が目安とされている。土壌深さについては、森林・都市いずれの環境においても樹木の根は80~90%が土壌深さ40cmまでの表層部に集中している⁴¹⁾ため、一般的な条件と大きく変わらないものと考えられる。なお、本研究の供試木の土壌容積は造園の専門家の助言に従って決定している。
- 注3) ここで相対誤差の許容値を20%と定めたのは、一般的な植生のフラックスインバランス率⁴²⁾や、針葉樹閉鎖林における樹液流法を用いた林分蒸散量推定の際の個体差による変動係数⁴³⁾が2割程度であることから、本研究の実験環境の影響や供試木間の特性の違いを比較する上で最低限必要な精度と考えられるためである。
- 注4) 葉温の上昇しやすい（葉が大きく蒸散速度の小さい）供試木では、 G_v の日中低下が図7の計算値より急激であった可能性がある。気温33℃、水蒸気圧2.4kPaの環境（葉温と気温の差が最大となる昼過ぎの条件）において葉温が35℃の場合、葉温を気温相当とみなすことによる水蒸気拡散コンダクタンスの推定誤差は約22%となる。なお、単木スケールの正味放射量と対流熱伝達率の正確な計測が困難な現状では、第一次近似として葉温を気温相当とみなすことは森林水文学等の分野でも一般的である。
- 注5) 成熟した葉であっても光環境の改善に対応して数日程度で光合成能力は増大（光順化）するが、初めから良好な光環境で着葉したものに比べると劣る場合が多いことが知られる。
- 注6) 熱帯樹木10種の切断葉のガス交換速度変化を調べたSantiago & Mulkey (2003)は、切断後3分で40%に低下したものの1時間後も86.5%を維持していたものまで大きな差があったことを報告しており⁴⁴⁾、樹種の違いについても自然状態とは異なる可能性がある。
- 注7) Green (1993), Green et al. (2002)は樹液流法によって蒸散量を推定しているが、以下の理由からデータの信頼性は高いと考えられる。(1)日単位の推定では樹液流速と蒸散速度の時間差による誤差が無視できる。(2)Green et al. (2002)の供試木であるオリーブについては、重量計による蒸散量計測値を基にセンサーの較正が行われている。(3)Green (1993)では一本の供試木に対して高さ3点・長さ0.5~4.8cmのセンサー4種（計12箇所）で計測を行っており、幹内の流速分布が考慮されている。(4)センサー設置のために幹に付けた傷の影響の補正²⁾が行われている。(5)Green (1993), Green et al. (2002)で用いられているヒートパルス法は（基準温度との差を測るGranier法と異なり）パルスの移流速度を測る方式であるため日射等の影響を受けにくい。

参考文献

- 1) Granier A.: Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements, *Tree Physiol.*, Vol.3, Issue 4, pp.309-320, 1987
- 2) Swanson R.H., Whitfield D.W.A.: A numerical analysis of heat pulse velocity and theory and practice, *J. Exp. Bot.*, Vol.32, No.126, pp.221-239, 1981.2
- 3) Steppe K., De Pauw D.J.W., Doody T.M., Teskey R.O.: A comparison of

- sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods, *Agric. For. Met.*, Vol.150, Issue 7-8, 2010.7
- 4) Saugier B., Granier A., Pontailleur J.Y., Dufrene E., Baldocchi D.D.: Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and micrometeorological methods, *Tree Physiol.*, Vol.17, Issue 8-9, pp.511-519, 1997
- 5) Oren R., Phillips N., Ewers B.E., Pataki D.E., Megonigal J.P.: Sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest, *Tree Physiol.*, Vol.19, Issue 6, pp.337-347, 1999
- 6) Leverenz J., Deans J.D., Ford E.D., Jarvis P.D., Milne R., Whitehead D.: Systematic spatial variation of stomatal conductance in a *sitka spruce* plantation, *J. Appl. Ecol.*, Vol.19, No.3, pp.835-851, 1982.12
- 7) 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, 第38巻1号, pp.67-72, 2012.8
- 8) 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, 第39巻4号, pp.534-541, 2014.5
- 9) Litvak E., McCarthy H.R., Pataki D.: Transpiration sensitivity of urban trees in a semi-arid climate is constrained by xylem vulnerability to cavitation, *Tree Physiol.*, Vol.32, Issue 4, pp.373-388, 2012
- 10) Green S., Clothier B., Caspari H., Neal S.: Root-zone processes, tree water use and equitable allocation of irrigation water to olives, *Am. Geophys. Union*, 129, pp.337-345, 2002
- 11) Green S.R.: Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree, *Agric. For. Met.*, Vol.64, Issue 3-4, pp.201-221, 1993.5
- 12) 手代木純, 奥水肇: CASBEE-HI作成過程における緑の環境改善効果をめぐる論点, ランドスケープ研究, 第74巻5号, pp.721-726, 2011
- 13) 野島義照: 都市における植生からの蒸散による夏季の温熱環境改善力に関する研究, 京都大学博士論文, pp.145, 1998
- 14) 近藤純正: 種々の植生地における蒸発散量の降水量および葉面積指数への依存性, 水文・水資源学会誌, 第11巻7号, pp.679-693, 1998
- 15) Komatsu H.: Forest categorization according to dry-canopy evaporation rates in the growing season: comparison of the Priestley-Taylor coefficient values from various observation sites, *Hydrol. Process*, Vol.19, Issue 19, pp.3873-3896, 2005.11
- 16) 森脇亮, 神田学: 都市接地層における放射・熱・水・CO₂フラックスの長期連続観測, 水文・水資源学会誌, 第16巻5号, pp.477-490, 2003
- 17) 成田健一, 萩島理, 谷本潤, 高野武: 都市域における樹木の蒸散特性: オアシス効果に関する野外実験, 日本建築学会環境系論文集, 第608号, pp.59-66, 2006.10
- 18) Niklas K.J.: Modelling below- and above-ground biomass for non-woody and woody plants, *Ann. Bot.*, 95(2), pp.315-521, 2005
- 19) 山村真司, 梅干野晃, 浅輪貴史: 建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱収支・気流連成シミュレーション手法開発の基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集, 第560号, pp.73-80, 2002.10
- 20) 国土技術政策総合研究所 緑化生態研究室: わが国の街路樹VI, 国総研資料, Vol.506, 2009.1
- 21) Tyree M., Zimmermann M. (著), 内海泰弘, 古賀信也, 梅林利弘 (訳): 植物の木部構造と水移動様式, 丸善出版, 2007
- 22) Wright I.J., Reich P.B. et al.: The worldwide leaf economics spectrum, *Nature*, Vol.428, pp.821-827, 2004.4
- 23) Kosugi Y., Shibata S., Matsui K., Kobashi S.: Differences between deciduous and evergreen broad-leaved trees in the pattern of seasonal change of leaf-scale photosynthetic net assimilation rate and transpiration rate, *J. Jap. Soc. Reveget. Tech.*, Vol.22, No.4, pp.205-215, 1997.2
- 24) Niinemets U., Valladares F.: Tolerance to shade, drought, and water logging of temperate northern hemisphere trees and shrubs, *Ecol. Monogr.*, Vol.76, Issue 4, pp.521-547, 2006.11
- 25) 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)
- 26) R Development Core Team: R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014.10, URL <http://www.R-project.org>, 2015.4.3参照
- 27) 吉田弘, 瑞野道夫: 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, 第43巻, pp.67-72, 1999.2
- 28) Trenberth K.E.: Some effects of finite sample size and persistence on meteorological statistics Part I: autocorrelations, *Mon. Weather Rev.*, Vol.112, Issue 12, pp.2359-2368, 1984.12
- 29) 伊藤久徳, 見延庄士郎 (著), 気象研究ノート編集委員会 (編): 気象研究ノート第221号 気象学と海洋物理学で用いられるデータ解析法, 日本気象学会, 2010
- 30) Jones H.G.: Plants and Microclimate 2nd ed., Cambridge University Press, 1992
- 31) Oke T.R.: Boundary Layer Climates 2nd ed., Routledge, 1987
- 32) 谷享 (著): 植物の水利用: 明るい環境では根を増やすわけ, 種生物学会 (編): 光と水と植物のかたち 植物生理生態学入門, 文一総合出版, pp.141-161, 2003
- 33) Mott K.A., Parkhurst D.F.: Stomatal responses to humidity in air and helox, *Plant, Cell & Environ.*, Vol.14, Issue 5, pp.509-515, 1991.6
- 34) Duursma R.A., Barton C.V.M., Lin Y-S., Medlyn B.E., Derek E., Tissue D.T., Ellsworth D.S., McMurtrie R.E.: The peaked response of transpiration rate to vapour pressure deficit in field conditions can be explained by the temperature optimum of photosynthesis, *Agric. For. Met.*, Vol.189-190, pp.2-10, 2014.6
- 35) Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T.: A quantitative analysis of plant form—The pipe model theory 1. Basic analysis, *J. Jour. Ecol.*, Vol.14, No.3, pp.97-105, 1964.6
- 36) Monsi M., Saeki T.: Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion, *Jap. J. Bot.*, Vol.14, pp.22-52, 1953
- 37) Makkink G.F.: Ekzamen de la formula de Penman, *Netherl. J. Agric. Sci.*, Vol.5, pp.290-305, 1957
- 38) 諸泉利嗣, 小村拓也, 三浦武志: Makkink式による可能蒸発量の推定精度, 水文・水資源学会誌, 第22巻6号, pp.479-483, 2009
- 39) Saito T., Tanaka T., Tanabe H., Matsumoto Y., Morikawa Y.: Variations in transpiration rate and leaf cell turgor maintenance in saplings of deciduous broad-leaved tree species common in cool temperate forests in Japan, *Tree Physiol.*, Vol.23, Issue 1, pp.59-66, 2003
- 40) 国土交通省大臣官房技術調査課: 国土交通省土木工事積算基準 平成17年度版, p.891, 建設物価調査会, 2005.4
- 41) Jackson R.B., Canadell J., Ehleringer J.R., Mooney H.A., Sala O.E., Schulze E.D.: A global analysis of root distribution for terrestrial biomes, *Oecologia*, Volume 108, Issue 3, pp.389-411, 1996.11
- 42) Wilson K., Goldstein A., Falge E., Aubinet M., Baldocchi D. et al.: Energy balance closure at FLUXNET sites, *Agric. For. Met.*, Vol.113, Issue 1-4, pp.223-243, 2002.12
- 43) Kume T., Tsuruta K., Komatsu H., Kumagai T., Higashi N., Shinohara Y., Otsuki K.: Effects of sample size on sap flux-based stand-scale transpiration estimates, *Tree Physiol.*, Vol.30, Issue 1, pp.129-138, 2010
- 44) Santiago L.S., Mulkey S.S.: A test for gas exchange measurements on excised canopy branches of ten tropical tree species, *Photosynthetica*, Vol.41, No.3, pp.343-347, 2003.8
- 45) 清野友規, 浅輪貴史, 梅干野晃, 清水克哉: 重量計測に基づく単木蒸散量の種間差の分析, 日本ヒートアイランド学会全国大会予稿集, pp.120-121, 2014.7
- 46) 浅輪貴史, 清野友規, 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10 樹種別の蒸散量の比較分析とデータベース化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.873-874, 2014.9

WEIGHING WHOLE TREE TRANSPIRATION RATE OF URBAN TREES AND ANALYSIS OF TREE'S MORPHO-PHYSIOLOGICAL EFFECTS

Tomoki KIYONO *, Takashi ASAWA **, Akira HOYANO ***
and Katsuya SHIMIZU ****

* Grad. Stud., Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

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

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

**** TOYOTA Motor Corporation, Biotechnology & Afforestation Business Div.

Transpiration effect is expected to mitigate urban thermal environment but efforts to predict urban trees' transpiration are complicated by our limited knowledge of how much and different whole tree's water use is. The difficulty in understanding urban trees' transpiration is mainly caused by the limitation of measurement method, so we newly developed hanging-type gravimeter method using container grown trees and beam-type load cells, which is convenient to weigh a number of samples in a short period.

The purpose of this study is to grasp the variation of whole tree transpiration rate of container-grown tree under isolated and irrigated condition which assuming urban environment and to analyze the relationship between trees' morpho-physiological characteristics and potential evaporation ratio. We weighed 11 popular urban tree species, *Zelkova serrata*, *Quercus myrsinifolia*, *Styrax japonica*, *Cerasus × yedoensis*, *Ginkgo biloba*, *Quercus serrata*, *Cinnamomum camphora*, *Benthamidia japonica*, *Magnolia stellata*, *Quercus acutissima*, *Magnolia kobus* at farm field, Aichi prefecture (35°8'N, 137°6'E) in summer 2010, 2012 and 2013. Samples' soil volume were 0.5m³, ranged 3~6.7m in height, 1.5~9.2m² in crown projection area, deciduous/evergreen, and diffuse-porous/ring-porous/tracheid in xylem porosity.

We verified our new gravimeter accuracy using high time resolution recordings and autoregressive model and showed the mean value of relative error (± 2 standard error) of all samples was 9.2% and the error of *Quercus myrsinifolia* in 2012, which use least water and have largest error, was 19.8% when wind velocity is under 2m/s. We compared samples' transpiration rate of summer irrigation days and found (1) Daily water use of samples were 10~30kg, equivalent to 0.62 ± 0.36 times of water evaporation from the same size of crown projection area, (2) Maximum latent heat was 2.3 kW/tree of *Zelkova serrata* in 2010 and *Quercus serrata*, (3) *Zelkova serrata* and *Quercus myrsinifolia* changed transpiration capacity per unit leaf area threefold, appeared due to physiological change, (4) Ring-porous species tend to use much water ($p=0.045$), which suggest the significance of hydraulic capacity under volume-restricted soil condition.

(2014年10月10日原稿受理, 2015年4月2日採用決定)