実測に基づく街路樹の植生蒸散モデルに関する研究

THE STUDY ON THE VEGETATION TRANSPIRATION MODELS OF A ROADSIDE TREE BY A FIELD EXPERIMENT

黄 柔 嫻*, 大岡 龍三**
Jouman HUANG and Ryoza OOKA

In this study, the details of the existing physiological models of plant transpiration, Jarvis and Kosugi models, were reviewed and field experiments were also conducted to investigate the influence of environmental factors on the transpiration of trees, particularly roadside trees. Data were collected by measuring the environmental factors and the factors influencing stomatal transpiration. The following results were obtained: (1) The transpiration of trees during the daytime was most significantly influenced by solar radiation or photosynthetically active radiation, followed by the leaf or air temperature. (2) The influence of the relative humidity of air on the total amount of transpiration of trees during the daytime was not significant. (3) On the prediction precision of the two models on plant transpiration, Jarvis and Kosugi models were almost the same.

Keywords : *Environmental factors, Transpiration, Stomatal conductance, Roadside trees, Vegetation transpiration model, Street blocks*
環境因子, 蒸散, 気孔コンダクタンス, 街路樹, 植生蒸散モデル, 街区

1. 序

近年、ヒートアイランド現象による都市熱環境の悪化に対して樹木は日射遮蔽により地表面の温度上昇を抑制したり、蒸散に伴い日射熱を地表面や他の固体物体よりもより多く潜熱に変換することにより周囲の空気温度上昇を抑制させる等の熱環境調節機能があるため、都市熱環境改善効果が期待されている。しかし、一方で蒸散による周囲の湿度上昇や樹冠の抵抗による風速低下等によって、屋外熱環境を悪化させる可能性もあるため、樹木の各熱環境調節機能を総合的に評価することが必要となる。

コンピュータを用いた数値解析手法による樹木周囲の熱環境評価は、実測では困難である総合的な検討を可能にするため、コンピュータを利用した数値予測手法による樹木の各効果のモデル化に関して多くの研究が行われている¹⁾⁷⁾。しかし、その多くは樹木の潜熱発生に関する蒸散作用として植物の生理特性を殆ど考えておらず、蒸発効率等のパラメータを変化させるのみで取り扱う場合が多い¹⁾⁻⁵⁾。

植生からの蒸散は植物生理作用による葉の気孔開度等の影響を強く受ける。このような植生生理に基づく蒸散モデルを利用すると、日射量や温度の変化等の環境因子の影響を組み込むことが可能であり、時間的に変化する環境条件に応じた気孔開度の変化による植生の実際の蒸散の変動を考慮することが可能である。農学分野や建築分野では、生理的な蒸散モデルはいくつか提案されているものの

⁸⁾⁻¹⁰⁾、公園⁶⁾や住宅敷地内⁷⁾に応用したものが主であり、街路樹の蒸散効果を組み込んだ数値予測を行っている例は少ない。

また、樹木の蒸散量と環境条件に関する実測については、成田ら¹¹⁾が都市における樹木のオアシス効果に対して野外実験を行っている。配置密度の違いによりサザンカの蒸散量には顕著的な差異が現れるが、このような差異は樹木周囲の環境条件の日射や風との関連性がみられなかったことを報告している。一方、梅田ら¹²⁾は重回帰分析により環境因子(日射量、気温、絶対湿度、風速)を説明変量にし、ケヤキの蒸散量を目的変量にした重回帰式を算出した。決定係数は0.75以上であり、その重回帰式の有効性を確認した。

したがって、コンピュータを利用した数値予測手法による樹木モデルの予測精度を向上させ、既成の植生蒸散モデル⁸⁾⁹⁾を街区の温熱数値解析手法に組み込むために、本研究では実測により各環境因子が樹木、特に街路樹の蒸散量に与える影響を解明し、既存の植物生理モデルの予測精度を検討する。

2. 検討した植生蒸散モデルの概要

ここでは代表的な植生蒸散モデルとして Jarvis モデル⁸⁾、小杉モデル⁹⁾を取り上げる。

2.1 Jarvis モデル⁸⁾

植生蒸散モデルで最もよく使われているのは Jarvis モデルである。このモデルは 1976 年提案され、蒸散量の計算には Monteith

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 大学院生

** 東京大学生産技術研究所 教授・博士(工学)

Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Eng., The Univ. of Tokyo
Prof., I.I.S., the Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

により修正された Penman 方程式を用い、飽差や気孔コンダクタンス、葉面境界層コンダクタンスとともに、葉面に吸収された日射量等も考慮する因子として含まれている。Jarvis モデルでは電気回路式のアナロジーより表 1 (2)式に示す方程式により、蒸散速度 E_j (mole/m²・s)を評価している。更に、気孔コンダクタンスの計算については、Jarvis モデルは土壌の水ポテンシャルと大気の大気炭素の濃度の影響も配慮しているが、本研究ではそれらの因子は実験期間を適してほぼ一定であり、その影響は殆ど無視し得ると考え、光合成有効放射、温度及び飽差のみが因子として考慮されたモデルを検討対象とした((3)-(6)式に示す)。

2.2 小杉モデル⁹⁾

小杉のモデルは上に述べた Jarvis モデルを基に飽差に関する関係係を S 型曲線に修正したものである((7)式)。

3. 測定概要

3.1 測定期間及び測定場所

実測は 2009 年 9 月 14 日から 22 日までの 9 日間行った。時間は午前 9 時から午後 5 時までである。設置場所は周囲の建物の日影にならないように、東京大学生産技術研究所千葉実験所内の周囲に建物の少ない、比較的開けた敷地を選定した。

3.2 測定対象

測定対象は街路樹で多く使用される常緑広葉樹のシラカシ(図 1 に示す)を選定した。秤で蒸散量を計測するために、ポットに植えたシラカシ(高さ 2.4m、樹冠の幅 0.44m)測定対象とした(図 2 に示す注 1)。

3.3 測定項目

環境因子には気温、相対湿度、風速、及び光合成有効放射(PAR)がある。蒸散に関する因子には、気孔コンダクタンス、葉面温度、葉面周囲の湿度、樹木の蒸散量がある。測定項目、サンプル時間、使用した機器の一覧を表 2 に示し、機器設置の概要を図 3 に示す。

3.4 測定方法

3.4.1 環境因子

風速は超音波風速計(株式会社ソニック、DA-600 TR61A)を用いサンプリング間隔 10Hz で測定した。気温、相対湿度、全天日射量については、気象観測ステーション(Grant Instruments(株)、Mini-Met 03)を用い 5 分毎に測定した。光合成有効日射量(PAR)は光合成量子センサー(E.M.J(株)、MIJ-14PAR)を用い 5 分毎に測定した。

3.4.2 気孔蒸散に関する因子

気孔蒸散に関する因子はポロメーター(Decagon Devices(株)、SC-1)を利用し、1.5M 高さの樹木の各方位の外辺に位置する葉{a(南面)、b(西面)、c(北面)、d(東面)}と樹冠内部に位置する葉{e(中心)}(図 5)を 1 枚ずつ測定サンプルと選定し、30 分毎にそれぞれの気孔コンダクタンス、葉面温度及び葉面周囲の湿度を測定した。

3.4.3 樹木の蒸散量

樹木全体の蒸散量測定は樹木の植えたポットを秤の上に載せ、その重量を 30 分毎に測定しその減少量を樹木全体の蒸散量とした。

また、土壌からの蒸発と雨の影響を最低限にするためにポットの上に防水素材を設置し、樹木やポットの隙間も接着剤や粘着テープで密着させた(図 4(b)に示す)。

3.4.4 葉面積

葉面積は測定対象より 100 枚の葉をサンプルとしてそれぞれの写真を撮り(図 6 に示す)、画素面積を算出できるソフトウェアを利用し個々の葉の面積を求めた。それらの平均値を求めて樹木の全葉枚数に掛け合わせ全葉面積とした。

4. 実測結果と考察

4.1 実測期間中の気象状況

表 1 各モデルの内容の一覧

Jarvis と小杉モデル ⁸⁾⁹⁾	
$E = 18 \times E_j$	(1)
$E_j = \frac{(g_s \times g_a)}{(g_s + g_a)} (W_i - W_a)$	(2)
$g_s = g_{smax} \times f_Q(Q) \times f_T(T_a) \times f_D(D)$	(3)
$f_Q(Q) = \frac{Q}{Q + \left(\frac{g_{smax}}{a}\right)}$	(4)
$f_T(T_a) = \left(\frac{T_a - T_l}{T_o - T_l}\right) \left\{ \left(\frac{T_h - T_a}{T_h - T_o}\right)^{\left(\frac{T_h - T_o}{T_o - T_l}\right)} \right\}$	(5)
$f_D(D) = 1 - b_1 \times D$	(6)
$f_D(D) = \frac{1}{1 + \left(\frac{D}{b_2}\right)^{b_2}}$	(7)

図 1 測定対象シラカシ

図 2 樹木設置状況

表 2 測定項目一覧

測定項目 (機器の精度)		サンプル時間	設置高度	測定機器
環境因子	1 温湿度 (±0.4℃、±2%)	5分	1.5M	超音波風速計(A)、気象観測ステーション(B)
	2 風速 (±1%)	0.1秒		
	3 全天日射量 (±3%)	5分		
	4 PAR (±3%)	5分	1.5M	PAR センサー(C)
気孔蒸散	5 気孔コンダクタンス (±10%)	30分	-	ポロメーター
	6 葉面温度 (-)	30分		
	7 葉面周囲湿度 (-)	30分		
	8 樹木蒸散量 (±10 g)	30分	1.5M	電子秤(D)

(a) 設置の位置

(b) 設置の風景

図 3 機器設置の概要

実測期間中の気象状況を表 3 に示す。実測期間中は晴天 5 日間、曇天 4 日間であった。

4.2 環境因子間の関係

4.2.1 全天空放射と PAR の関係

PAR は植物の光合成作用に有効な日射量でありこの波長の範囲は 400-700nm であり、全天空放射とは線形関係がある。図 7(a)に示すように結果は理論と一致し相関係数も 0.994 であり非常に顕著な線形関係が見られる。

4.2.2 気温と葉温の関係

測定期間中の気温と葉温の日平均値の変化を図 7(b)に示す。葉温は気温より高くその差が 2-4℃程度であると見られた。これらの測定結果は、既往の文献¹³⁾とも一致する。

4.2.3 PAR と葉温の関係

PAR と葉温の関係は図 7(c)に示すように PAR の増加につれ葉温も増加し、相関係数も 0.853 であり線形関係が顕著となった。

4.2.4 葉温と飽差の関係

葉温と飽差の関係については図 7(d)に示すように葉温の増加につれ飽差も増加し、相関係数も 0.900 であり非常に強い線形関係が見られる。ここで飽差(VPD, Vapor Pressure Difference)は表 1 式(2)中の $W_i - W_a$ を表わし、水蒸気分圧[mb/mb]を単位として表した。

4.3 環境因子と蒸散量の関係

X-Y 分布図と回帰分析を用い日蒸散量と各環境因子の日平均値をそれぞれ比較しそれらの関係を分析した。

4.3.1 蒸散作用の基礎式

蒸散とは気孔により植物内の水蒸気が外に散逸する過程である。その原理は図 8 に示すように電気回路の法則と似ており、外と植物内における水蒸気量の差、すなわち飽差に比例し、気孔内から外への輸送経路における抵抗に反比例する。この輸送経路における抵抗は気孔抵抗と葉面境界層抵抗であり、蒸散速度は式(8)になる。

$$E_j = \frac{W_i - W_a}{(r_a + r_s)} \quad (8)$$

これより、植物生理特性である気孔開度は気孔抵抗の逆数である気孔コンダクタンスで表現でき蒸散速度は式(9)に変換できる。

$$E_j = \frac{W_i - W_a}{\left(\frac{1}{g_a} + \frac{1}{g_s}\right)} \quad (9)$$

(a) 蒸散量測定状況

(b) 防水施設

図 4 樹木の蒸散量を測るための設置

図 5 ポロメータで測定した葉の位置

図 6 撮った葉の写真例

図 8 気孔蒸散の原理¹⁹⁾

(a) 全天空放射と PAR の関係

(b) 気温と葉温の関係

(c) PAR と葉温の関係

(d) 葉温と飽差の関係

図 7 各環境因子間の関係

表 3 実測期間中の気象状況一覧 (表示数値は 9 : 00-17 : 00 の平均値)

各環境因子		9/14	9/15	9/16	9/17	9/18	9/19	9/20	9/21	9/22	全期間平均
全天空放射	W/m²	513	133	512	468	134	267	542	269	440	364
PAR	W/m²	236	67	251	221	68	125	255	129	197	172
葉温	℃	28.6	24.5	29.5	28.6	23.1	24.2	27.8	26.0	28.7	26.8
気温	℃	25.1	22.3	26.0	24.7	21.1	22.1	24.5	22.8	25.4	23.8
相対湿度	%	71.3	73.5	73.9	71.1	71.3	72.1	67.9	68.5	66.7	70.7
飽差	mb/mb	0.019	0.008	0.020	0.021	0.007	0.010	0.021	0.014	0.018	0.015
風速	m/s	1.12	0.74	1.10	1.13	1.22	1.40	1.40	0.80	0.91	1.10

図 9(a) PAR と日蒸散量の関係

図 9(b) PAR と気孔コンダクタンスの関係

図 9(c) PAR と飽差の関係

図 10(a) 風速と日蒸散量の関係

図 10(b) 風速と気孔コンダクタンスの関係

図 10(c) 風速と飽差の関係

図 11(a) 葉温と日蒸散量の関係

図 11(b) 葉温と気孔コンダクタンスの関係

図 11(c) 葉温と飽差の関係

図 12(a) 気温と日蒸散量の関係

図 12(b) 気温と気孔コンダクタンスの関係

図 12(c) 気温と飽差の関係

図 13(a) 相対湿度と日蒸散量の関係

図 13(b) 相対湿度と気孔コンダクタンスの関係

図 13(c) 相対湿度と飽差の関係

4.3.2 PAR(光合成有効放射)との関係

蒸散量と PAR の関係は図 9(a) に示すように、PAR の増加と共に増加する傾向が見られ、決定係数も 0.922 であり、正の相関は非常に高い。

主な原因は葉が日射を受け光合成作用によって気孔を開放したと考える。しかし、図 9(b) に示すように日射が気孔に与える影響は、式(15)に示すように蒸散量は気孔開度に影響を受けるだけでなく飽差の影響もある。PAR と飽差の関係図 9(c)が示すように、PAR の増加とともに飽差も増加し、それにより蒸散量も増加したものと考えられる。

4.3.3 風速との関係

図 10(a) に示すように蒸散量は風速の増加と共に増加する傾向が見られたが、決定係数は僅か 0.173 と小さい。

葉面境界層の理論により、樹木の周囲の風速が増加すると葉面付

近の境界層の厚さは薄くなり、境界層抵抗が小さくなるため、蒸散量は増加する。また風速が増加するに従い、気孔を閉じ気孔コンダクタンスが低下することが予想されたが、実際には風速が気孔開度や飽差に与える影響も小さい(図 10(b)、図 10(c))。

4.3.4 葉温及び気温との関係

葉温については図 11(a) に示すように葉温の増加により蒸散量も増加した。決定係数は 0.699 であり比較的高い。

植物生理により、温度が上昇すると光合成作用に参与する酵素の活性を促進させ、間接的に気孔を広げるが、図 11(b) に示すように葉温と気孔の関係にはある最大値に達すると減少する傾向もある。しかし、葉温の増加による飽差の上昇効果が強いために(図 11(c))、蒸散量は葉温の上昇に伴い増加するという傾向が見られた。気温についても葉温とほぼ同じ結果が見られ、原因も同じと考えられる(図 12(a)- 12(c))。

4.3.5 相対湿度との関係

蒸散量と相対湿度の関係は図 13(a) に示すように、相対湿度の増加につれ蒸散量はやや減少する傾向が見られた。しかし決定係数は 0.096 であり、この傾向は非常に弱い。

考えられる原因は空気中の相対湿度が増加すると、水蒸気量が増え(同温度の条件で)、葉の中における水蒸気量との差、すなわち飽差は減少し蒸散量も減少する(式(9))。しかしその効果は弱い(図 13(c))ため、この減少傾向も小さいと考えられる。

5 各蒸散モデルの予測精度の検討

第 2 章に述べた植生蒸散モデルの予測精度の検討については二つの段階に分けて検討した。一つめは各モデルにおけるパラメータを同定する。次に、日積蒸散量の推定と予測精度を検討する。

5.1 各モデルのパラメータの同定結果

Jarvis と小杉モデルにおけるパラメータの同定は 9/14-22 日の間に、実測より得た気孔コンダクタンスと環境因子の値を用い非線形回帰最小二乗分析を行い、最適値を決定した。既往研究⁹⁾を参考にして T_l は 5℃ と固定し、 T_h は 45 から 50℃ の範囲で最適値を同定した。なお、初期値は小杉より同定されたアラカシの値(表 4)を参考として、モデルの適合度を表す指標は R^2 を用いた。

同定した結果は表 4 に示すように、小杉の R^2 は 45% となり Jarvis の 42% より高いことが見られる。このため全期間のデータに対して飽差関係式を S 型曲線に修正した小杉モデルは確かにわずかながら g_s に対しての予測精度を向上した。

更に、同定して得たパラメータを(3)-(7)式に代入し、各日の g_s を求め、日毎に各モデルの推定値と実測値の比較を図 14 に示す。平均的に言うと同定値は実測値とほぼ一致し、Jarvis と小杉による推定値は全期間の平均で 0.0388, 0.0390 mole/m²・s となり、実測値の 0.0391 mole/m²・s との差は 0.0003 mole/m²・s 以下であった。測定期間中の変動を見ると、実測値に比べて両モデルともその変動は小さい。このことは両モデルの環境因子に対する変動の振幅が小さいことが推測される。

5.2 各蒸散モデルによる日積蒸散量の予測精度の検討

Jarvis と小杉モデルによる日積蒸散量の推定については 5.1 節で

表 4 Jarvis と小杉モデルの同定した結果

		g_{smax}	a	b_1	b_2	T_l	T_o	T_h	R^2
Jarvis	初期値	0.1	0.00479	0.122	-	-	44	45	-
	同定値	0.091	0.00171	0.248	-	5.0	36.4	50.0	0.42
小杉	初期値	0.45	0.0045	4.58	4.1	-	44	45	-
	同定値	0.099	0.00203	2.23	2.86	5.0	41.9	46.3	0.45

図 14 g_s の Jarvis と小杉モデルによる推定値と実測値の比較

同定して得たパラメータを代入し、式(1)―(7)を用い各変数の 30 分毎で測定した値を代入し、葉面境界層コンダクタンスは定数(1.13 mole/m²・s)で仮定し計算を行った。次に、求めた蒸散速度に 30 分の時間間隔と実測より得たシラカシの葉面積 1.87m²をかけ、30 分毎の積蒸散量を求めた。最後に朝 9 時から午後 5 時までの量を合計した。

二つのモデルの推定結果を図 15 に示す。Jarvis と小杉モデルとも平均的に実測値より大きくなる傾向が見られたが、全体的な変動傾向は実測値とほぼ一致している。また Jarvis と小杉モデルの結果は殆ど一致しており、各日の平均誤差の絶対値は Jarvis と小杉の方は両者とも 25% である。

5.3 g_a の蒸散量に対する影響についての考察

今回、日積算蒸散量の予測において、蒸散モデルと実測値に差が生じたことにいくつかの原因が考えられる。各蒸散モデルは実測された気孔コンダクタンスを元にモデル定数の同定をしているため、前節で示したように平均的には推定値と実測値は一致する。したがって、実測された蒸散量と推定された蒸散量の不一致については、測定された蒸散量と気孔コンダクタンスの測定精度の問題も要因の一つと考えられる。それ以外にも葉面境界層コンダクタンスのモデル化についての問題も考えられうる。 g_a は一般に 0.4 から 3.2 mole/m²・s までの範囲¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾と言われており、前節で利用した g_a の 1.13 mole/m²・s という値は其中で更に一般的な数値を採用したものである。もし実際の g_a の値が 1.13 mole/m²・s よりもずっと小さいとすれば、境界層抵抗が大きくなり推定された蒸散量は実測のそれに近くなることになる。例えば Meinzer ら¹⁷⁾によれば、Anacardium excelsum に対して g_a は 0.3~0.4 mole/m²・s 程度であるという報告もある。

そこで g_a に対し表 5 に示す既存の三つモデル⁶⁾¹⁸⁾¹⁹⁾ g_{a_A} 、 g_{a_B} と g_{a_C} モデルに対して検討した。その結果を図 16 に示す。推定した蒸散量の結果はほぼ一致し、各モデル間の差はほとんどないことが確認された。 g_{a_A} 、 g_{a_B} と g_{a_C} モデルにより推定した g_a は平均でそれぞれ、2.63、1.04、1.94 mole/m²・s であり、既存のモデルでは期待したような小さな g_a の値は得られなかった。

6. 結論

夏季における実測により、各種環境因子が樹木の蒸散量に与える影響について分析を行い Jarvis 及び小杉の植物生理モデルの予測精度を検討した。

図 15 日積蒸散量の二つのモデルによる推定値と実測値の比較

実測期間の各環境因子の間の関係を分析すると、ある環境因子の間に強い関係があることが分かった。PAR は全天空放射量及び葉温と強い線形関係があり、葉温の方は飽差に与える影響も強く線型増加の関係があった。気温と葉温の関係は昼に葉温は気温より高くそれらの差は 2-4℃であった。

実測期間の環境因子と蒸散量の関係を分析すると、実測より測定した環境因子の中で日蒸散量に最も影響を与えたものは PAR(光合成有効放射)で、その次に温度であったが、相対湿度は日蒸散量に与える影響が殆ど見られなかった。

日積蒸散量に対する予測精度を検討した結果は Jarvis と小杉のモデルとも実測した蒸散量より若干大きめの値を示し、両者の結果は殆ど一致している結果となった。

次に、Jarvis と小杉モデルに対する検討について、既往研究で提案された葉面境界層コンダクタンスモデルを組み込んで検討すると、推定した蒸散量の結果はほぼ一致し、これらのモデル間の差異は得られなかった。

表 5 ga に関するモデル詳細の一覧

モデル	方程式
$g_{a_A}^{(6)}$	$= ch \times u$ (10)
$g_{a_B}^{(18)}$	$= 0.147 \times \sqrt{\frac{u}{d}}$ (11)
$g_{a_C}^{(19)}$	$= \rho \times k \times \frac{u^{0.55}}{W^{0.2} \times L^{0.35}}$ (12)

表 6 ga に関するモデルにおける変数の設定

ga に関するモデルにおける変数の設定値	
W_{max}	0.03 [m]
ρ	1.293 [kg/m ³]
k	5.55×10^{-3} [-]
W	0.025 [m]
L	0.1 [m]

図 16 ga に関するモデルを組み込んだ蒸散量推定値と実測値の比較

謝辞

本研究の遂行にあたり、東京大学大学院農学研究科 鈴木雅一教授より植物蒸散量測定に関し、有益な御助言をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

注

注 1) 本報では、今回の一本樹木の実測結果から、シラカシの定量的かつ一般的な特性が得られることは困難であるとは考えている。しかしながら、シラカシの環境因子に対する定性的な応答はある程度把握できると考え、また既往の測定結果^{20) 21)}とも類似した値を得たため、それなりに信頼できるデータであると判断した。更に、今後シラカシの一般的な特性を同定するために、このようなデータ蓄積を行う上での事例の一部としての価値は

十分にあるものと考えている。今回使用した樹木は蒸散量を測定するための秤の制限上、成年木を利用することはできず幼木を対象としました。幼木を利用することによる主な影響は gs の測定値に与えると考えられるが、久野²⁰⁾と近藤²¹⁾の研究による測定した成年のシラカシの gs 平均値は 0.03-0.05mole/m² s であり、今度の実測値とはほぼ一致になっており、ある程度信頼できると判断した。

本論文に関する既発表論文

- a) 黄柔嫻, 大岡龍三: 環境因子が街路樹の蒸散量に与える影響の実測, 日本建築学会関東支部研究報告集 II(環境工学), 80, pp.189-192, 2010.3
- b) 渡辺晃, 黄柔嫻, 大岡龍三: 植生蒸散モデルの屋外温熱環境解析手法への組み込みに関する研究 その 1—環境因子が街路樹の蒸散量に与える影響の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.883-884, 2010.9
- c) 黄柔嫻, 大岡龍三: 植生蒸散モデルの屋外温熱環境解析手法への組み込みに関する研究 その 2— Jarvis, 小杉及び神田の植生蒸散モデルの予測精度に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.885-886, 2010.9

参考文献

- 1) 吉田伸治, 連成数値解析による屋外温熱環境の評価と最適設計法に関する研究, 東京大学博士論文, 2001.3
- 2) 平岡久司, 丸山敬, 中村泰人, 桂順治: 植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究(その 1)乱流モデルの作成, 日本建築学会計画系論文報告集, 406, pp.1-9, 1989.12
- 3) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯: 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, 2000.8
- 4) 佐々木澄, 岩田達明, 持田灯, 渡辺浩文, 吉野博: 街路樹がストリートキャニオン内の温熱空気環境に及ぼす影響に関する数値解析, 日本建築学会環境系論文集, 605, pp.139-146, 2006.7
- 5) 坂本雄三, 小島悦史, 足永靖信, 今野雅: CFD を利用した樹木のクールスポット効果の数値解析 その 1 樹木における放射と蒸散に関する計算モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.689-690, 2005.9
- 6) 神田学, 森脇 亮, 横山 仁: 明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価: (2) 森林環境気象モデルによるシミュレーション, 天気 44,10, pp.713-731, 1997.10
- 7) 佐藤愛, 吉田治典, 伊藤麻美子, 村上大輔: 温熱環境改善のための樹木の蒸散作用モデルに関する基礎的研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集(環境系), 44, pp.393-396, 2004.6
- 8) Jarvis, P.J.: The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance in canopies in the field, Phil. Trans. R. Soc. Lond., 273, pp.593-610, 1976
- 9) 小杉緑子, 小橋澄治, 柴田昌三: 数種常緑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, pp.158-167, 1995
- 10) 神田学, 日野幹雄: 大気・植生・土壌モデルによる数値シミュレーション その 1 植生効果のモデリ, 水文・水資源学会誌, 3, 3, pp.37-46, 1990
- 11) 成田健一, 萩島理, 谷本潤, 高野武将: 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, 608, pp.59-66, 2006.10
- 12) 梅田和彦, 深尾仁, 田村明宏: 熱環境の評価における樹木の夏蒸散量に関する基礎的検討, 日本建築学会環境系論文集, 601, pp.15-20, 2006.3
- 13) 萩島理, 片山忠久, 林徹夫, 谷本潤: 樹木の放射温度分布に関する実測その 1—街路樹のある街路の温熱環境予測, 日本建築学会計画系論文集, 516, pp.79-85, 1999.2
- 14) Larcher, L.(佐伯敏郎・館野正樹 監訳): 植物生態生理学(第 2 版), シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社, p.176, 2004
- 15) Robers, J., O.M.R. Cabral and L.F. DeAguiar: stomatal and boundary-layer conductance in an Amazonian Terra firme rain forest, J. Appl. Ecol., 27, pp336-353, 1990.
- 16) Martin, T. A., Hinckley, T. M., Meinzer, F. C., Sprugel, D. G.: Boundary layer conductance, leaf temperature and transpiration of Abies amabilis branches, Tree Physiol., 19(7), pp435-443, 1999.
- 17) Meinzer, F. C., G. Goldstein, N.M. Holbrook, P. Jackson and J. Cavellier.: Stomatal and environmental control of transpiration in a lowland tropical forest tree, Plant Cell Environ., 16, pp429-436, 1993.
- 18) Campbell, G.S., Norman, J.M.: 生物環境物理学の基礎 (第 2 版), 森

- 北出版, p.113, 2003
- 19) 坂本雄三, 壽浦光晴, 工藤善: 都市緑化植物としての常緑低木植栽からの蒸散量に関する研究 その1—蒸散量推定モデルと造園パターンに関するケーススタディ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.283-286, 2001.9
- 20) 久野春子, 新井一司: 温度・湿度条件が5樹種の純光合成・蒸散速度・気孔コンダクタンスにおよぼす影響, 日本緑工学会誌, 28, 1, pp.20-25, 2002
- 21) 近藤隆之, 神保高之, 大西勝典: 樹木の大气汚染物質吸収能力の個体差と季節変化, 富山県環境科学センタ・年報研究報告, 31, 2, pp.9-13, 2003

附表1 : 記号

E: 蒸散速度[$\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}$] E_j : 蒸散速度[$\text{mole}/\text{m}^2\cdot\text{s}$] W_i : 葉面上での飽和水蒸気分圧[mb/mb] W_a : 大気の水蒸気分圧[mb/mb] g_s : 気孔コンダクタンス[$\text{mole}/\text{m}^2\cdot\text{s}$] g_a : 葉面境界層コンダクタンス[$\text{mole}/\text{m}^2\cdot\text{s}$] $g_{s\text{max}}$: 最大気孔コンダクタンス[$\text{mole}/\text{m}^2\cdot\text{s}$] Q : 光合成有効放射[$\mu\text{mole}/\text{m}^2\cdot\text{s}$] T_a : 気温[$^{\circ}\text{C}$] D : 飽差[kPa] T_o : 最適温度[$^{\circ}\text{C}$] T_l : 最低限界温度[$^{\circ}\text{C}$] T_h : 最高限界温度[$^{\circ}\text{C}$] a : 光によって気孔が開く反応の効率[-] b_1 : 気孔コンダクタンスが1/2になる飽差の値[kPa] b_2 : 曲率[-] r_a : 葉面境界層抵抗[$\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{mole}$] r_s : 気孔抵抗[$\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{mole}$] g_{a_A} : 葉面境界層コンダクタンス[$\text{mole}/\text{m}^2\cdot\text{s}$] g_{a_B} : 葉面境界層コンダクタンス[cm/s] g_{a_C} : 葉面境界層コンダクタンス[$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$] d : 特性長[$=0.72 \times W_{\text{max}}$] [m] (W_{max} : 葉の幅の最大値) ch : 0.06[-] u : 風速[m/s] ρ : 空気密度[kg/m^3] k : 坂本らの定数¹⁹⁾ ($4.8\text{-}6.3 \times 10^{-3}$) W : 葉の幅 [m] L : 葉の長さ[m]

(2010年6月10日原稿受理, 2010年10月27日採用決定)