土壌水分ストレスを考慮した気孔コンダクタンスモデルに関する研究

A STUDY ON STOMATAL CONDUCTANCE MODEL WITH SOIL MOISTURE STRESS

花平 愛*, 吉田 治典**
Ai KADAIRA and Harunori YOSHIDA

The purpose of this study is 1) to clarify variations in moisture of soil around a tree, 2) to determine parameters of soil moisture stress function by measuring diurnal variations in stomatal conductance of wet soil and dry soil.

The results show that :1)the determined parameters are applicable to estimation of decline in stomatal conductance by soil moisture stress. 2)stomatal conductance declines to around a half of wet soil on fifteen days in a month.

Keywords : *Stomatal conductance, Jarvis type model, Soil moisture stress, Soil moisture characteristics*

気孔コンダクタンス, Jarvis 型モデル, 土壌水分ストレス, 土壌水分特性曲線

1. 序

既報¹⁾では, 樹木の気温低減効果は降雨後に大きくなるが, 以後晴天が続くと徐々に小さくなる, というように降雨との関係が強いことを示した。これは晴天が続くと土壌体積含水率が減少し, その結果, 樹木の蒸散に影響を与えるためと考えられる。従って, 著者らはこれまで先行雨量から考えて土壌が湿潤である場合の樹木の気候緩和効果の実態を把握し, その効果の定量化を行ってきた⁵⁾が, 土壌の水分状態が既に提案した樹木の蒸散モデルにどの程度影響を及ぼすのか検討することは重要である。

気孔の開閉度合いを表す Jarvis 型モデルは, 光合成有効放射, 気温, 飽差, 葉内水ポテンシャル, 大気二酸化炭素濃度の関数 (気孔の開鎖の要因となるストレス関数) として表されている²⁾。しかし, このモデルの提案後, ストレス関数の修正や他の環境因子が加えられるなど多くの研究者により改良され, 近年, 農学分野や水文学分野では, 環境因子として土壌水分ポテンシャルを加える研究もみられる^{3), 4)}。これらの分野では, 長期にわたるマクロスケールでの気候予測や水循環予測を対象としているため, 土壌の水分不足 (土壌水分ポテンシャルで表す) が気孔の開鎖を誘導し, 蒸散を制御するというメカニズムを無視できないからである。例えば, Davies and Zhang⁴⁾は, 日

変化レベルでの気孔コンダクタンスの変動は飽差により大きな影響を受け, 季節変化レベルの変動は土壌水分量により大きな影響を受けることを報告している³⁾。

さて, 建築分野で考えると, 建物周辺の樹木は一般に狭い土地に植えられることが多く, 樹木の蒸散を活発に行うための水分を持続的に保持できる環境では必ずしもない。しかしながら, 建築周辺の樹木は完全な自然の状態下に置かれるものではなく, 非常に乾燥すれば, 適当な散水管理がなされるものである。よって, 土壌の水分不足で樹木の気温低減効果がどれ程減少するのかを定量的に把握したり, 蒸散による気温低減効果を持続的に得るための給水管理を行う指標とするために, 土壌水分ポテンシャルを気孔コンダクタンスモデルの環境因子に加えて検討する。そこで, 土壌が湿潤時のモデル⁵⁾をもとに, 土壌の水分不足による水分ストレス (土壌が乾燥し始めると, ABA が根から放出され気孔の開鎖を誘導する⁶⁾) の関数の変数として加えることを考える。

本研究では, 実際の常緑樹を対象に, 1) 土壌の水分状態がどのように変化するかという実態の把握, 2) 土壌の乾燥時と湿潤時における気孔コンダクタンスの日変化を実測し, 土壌が湿潤である時のモデルに土壌の水分状態 (土壌水分ポテンシ

本研究の一部は, 2006年度日本建築学会大会(関東)⁸⁾において発表した。

* 元 京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻
博士(工学)

** 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Global Environment Eng., Faculty of Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Urban and Environmental Eng., Faculty of Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

写真1 対象樹

写真2 土壌体積含水率の測定

図1 実測位置(平面)

図2 実測位置(A-A' 断面)

表1 測定項目並びに使用した測定機器

測定項目	記号	点数	測定機器	測定高さ[m]	測定間隔[分]
気温	T	1	携帯型温湿度計	1	1
絶対湿度	X	1	携帯型温湿度計	1	1
気孔コンダクタンス	g_s	3	ポロメータ(Delta-T社)	1.5	-
光合成有効放射	Q	-	光子センサー	1.5	1
土壌体積含水率	θ	2	シータープローブ	-0.1, -0.3	5

ル)を環境因子に加え、このストレス関数のパラメーターの決定、3)このストレス関数と土壌の水分ストレスのないものの関数とを比較し、土壌水分ポテンシャルを導入する必要性の検討を目的とする。

2. 実測概要

京都市左京区に立地する大学内の常緑樹(モッコク;ツバキ科)を実測対象とした。実測地は4階建て研究棟の南側壁面から約5m離れた位置に植えられたモッコクの周辺である^{註1)}。垣根で囲まれた4m幅の裸地に樹木が植えられ、定期的に手入れされており、集合住宅の緑地に近い環境と考えて選定した。また、モッコクは住宅によく用いられるといわれる樹種である。実測地の南側はアスファルトで被覆され、前方の建物は15m以上離れて、日射を遮蔽することはない。樹高は4.0mで主幹0.2m、半径1.2mの枝張りである。対象樹を写真1に示す。

気孔コンダクタンスは2005年8月29日、9月9日、12日、土壌体積含水率は2005年8月19日～9月20日に実測し、また、8:30～18:00に定点で光合成有効放射、気温、絶対湿度を1分間隔で連続測定し、移動実測では気孔コンダクタンスを1時間ごとに測定した。土壌体積含水率は5分間隔で、30日間連続測定した。なお、ポロメータは、湿度センサーを葉面に密着させて葉からの蒸散によってキュベット内空気が設定した相対湿度に達する時間を測定して気孔コンダクタンスに換算する。飽差は携帯型温湿度計により測定した絶対湿度と気温または、葉面に密着する部分に設置されたポロメータの温度センサーにより測定した葉温を用いて求めた。

光合成有効放射の計測面は気孔コンダクタンスを測定する葉と同じ傾きとした。以上まとめて、測定項目を表1に、測定位置を図1、2に示す。ただし、降雨量は大学構内の屋上で測定した。

気孔コンダクタンスはポロメータを用いて測定し、測定葉は

(a) Q の経時変化 (b) T の経時変化(c) X の経時変化図3 Q, T, X の経時変化(8/29, 9/9, 9/12)

南面にあるGL+1.5m付近の葉面の傾きが同じとなる3枚を選んだ。土壌体積含水率のセンサーはGL-0.1m、-0.3mに埋設した(写真2)。これは、一般に水分や養分を吸収する細い根(吸収根)は表層土に多く、地表から-0.3～-0.6m付近で吸収根は特によく分布するといわれるからである⁷⁾。実測地においても、-0.3m附近に細い根がみられた。GL-0.3mのセンサーは実測の9ヶ月前に、GL-0.1mのセンサーは8月16日(測定の12日前)に埋設した。

(a) 8/29

(b) 9/9

(c) 9/12

図4 g_s の経時変化(8/29, 9/9, 9/12)

図5 日積算降雨量と θ の経時変化 (8/19～9/20) () は g_s の実測日を示す

3. 気象条件と気孔コンダクタンスの経時変化

8月29日の前10日間の積算降雨量は27mmと少ないが、9月9日には71mm、9月12日には102mmと多量の降雨があった。図3に8月29日、9月9日、12日の光合成有効放射 Q 、気温 T 、絶対湿度 X の経時変化を示す。図の値は、5分間平均値の T, X, Q である。図より、 T は25～36℃、 X は9～18g/kgの範囲にあり、8月29日の T は3日間で最も低く、 X も他の2日間より2g/kg小さい。 Q は3日間ともピーク時には約1,800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ と大きい。

図4に8月29日、9月9日、9月12日の3日間の g_s の経時変化を示す。 g_s は測定葉3枚をプロットする。

図4(a)より、8月29日の g_s は、日中にはほぼ0 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ となり、日中に低下し特異である。9月9日は16時以降に夕立があり、実測値の欠損があるが、8月29日より g_s は大きいことが判る(図4(b))。9月12日の g_s は午前中に約0.3 $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ と大きく、 g_s の日変化は午後に向かって単調に減少する(図4(c))。

8月29日の g_s が他の日と比べて小さい原因は2つ考えられる。1) X が低いために飽差が増大し気孔が閉じたため、2) 土壌の乾燥による水分ストレスが要因となって気孔が閉じたため。2)の場合、 g_s は徐々に低下し、土壌が乾燥すればする程、日中の低下は大きくなるといわれている⁶⁾(appendix1 参照)。この点については5、7節で検討を行う。

4. 土壌体積含水率の経時変化

降雨量と土壌体積含水率 θ との関係を検討する。以後、-0.3mの θ を $\theta_{0.3}$ 、-0.1mの θ を $\theta_{0.1}$ と表す。図5に日積算降雨量 H と1時間積算降雨量 h 、 $\theta_{0.1}$ と $\theta_{0.3}$ の経時変化を示す。 θ の値は各時刻の前後30分の1時間平均である。図より、以下のことが判る。

- 1) 降雨の少ない日が続いた8月29日は $\theta_{0.3}$ (0.13 m^3/m^3) > $\theta_{0.1}$ (0.06 m^3/m^3) となるが、降雨後の9月12日には $\theta_{0.1}$ と $\theta_{0.3}$ はほぼ同じとなる。
- 2) 降雨時には $\theta_{0.3}$ が急激に大きくなる。降雨後の減少率は $\theta_{0.3}$ より $\theta_{0.1}$ の方が大きい。つまり、地表面に近い-0.1mの方が乾燥状態になりやすいといえる。
- 3) 日積算降雨量が10mm/day程度では、 θ は-0.3m、-0.1mともに変化が確認できない。
- 4) 8月29日における $\theta_{0.3}$ と $\theta_{0.1}$ は約0.1 m^3/m^3 、約0.05 m^3/m^3 程度で、降雨後の θ と比べてかなり小さく、乾燥している。

5. 常緑樹のパラメータを用いた推定結果

g_s の日中の低下が土壌の乾燥によるのではなく、 X が低く飽差が増大したためであれば、 Q, T 、飽差 D [kPa]の3つを環境因子とする気孔コンダクタンスモデルで g_s が推定できるはずである。そこで、推定した g_{s_sim} と実測値 g_{s_real} の日変化を比較検討する。

既報⁶⁾では、同じ樹木に対して土壌の水分ストレスがないとして、(1)～(4)式に示す気孔コンダクタンスモデルに含まれる5つのパラメータ $g_{s_max}, a, T_0, b_1, b_2$ を観測値を用いて同定した。それを再録する。

$$g_s = g_{s_max} f_q(Q) f_t(T) f_d(D) \quad (1)$$

$$g_{s_max} f_q(Q) = \frac{g_{s_max} Q}{Q + g_{s_max}/a} \quad (2)$$

$$f_t(T) = \left(\frac{T - T_l}{T_o - T_l} \right) \left\{ \left(\frac{T_h - T}{T_h - T_o} \right) \left(\frac{T_h - T_o}{T_o - T_l} \right) \right\} \quad (3)$$

(a) 8/29

(b) 9/9

(c) 9/12

図6 g_{s_sim} と g_{s_real} の経時変化 (8/29, 9/9, 9/12)

表2 モッコクのパラメータ

g_{s_max}	a	T_l	T_0	T_h	b_1	b_2
0.30	0.0057	5	39.0	42	3.93	2.09

$$f_d(D) = \frac{1}{1 + (D/b_1)^{b_2}} \quad (4)$$

ここで, g_{s_max} : 最大気孔コンダクタンス [$\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$], a : 光によって気孔が開く反応の効率[-], T_0 : 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[$^{\circ}\text{C}$], b_1 : 気孔コンダクタンスが半分になる飽差の値[-], b_2 : 曲率[-]

このパラメータ (表2) を用いて, 8月29日, 9月9日, 12日の g_s を推定した。なお, 著者らはこれまで, 気温と葉温の差は小さいとして, 葉温ではなく, 気温で葉面の飽和水蒸気圧を推定してきた (g_{s_sim})。しかし, 8月29日には気温より葉温が最大で6 K高い

(a) 8/29

(b) 9/9

(c) 9/12

図8 Δg_s , $\Delta \hat{g}_s$, $\theta_{0.3}$ との関係 (8/29, 9/9, 9/12)

(a) 8/29

(b) 9/9

(c) 9/12

図7 $\hat{g}_{s_sim}$ と g_{s_real} の経時変化 (8/29, 9/9, 9/12)

ため, 本報では, (3) 式の T は葉温, (4) 式の飽差は葉温を用いて求めたもの ($\hat{g}_{s_sim}$) も比較検討する。各実測日の気温の飽和水蒸気圧を用いた g_{s_sim} と g_{s_real} を図6に, 葉温の飽和水蒸気圧を用いた $\hat{g}_{s_sim}$ と g_{s_real} を図7に示す。図8に g_{s_real} と g_{s_sim} の差 (Δg_s), g_{s_real} と $\hat{g}_{s_sim}$ の差 ($\Delta \hat{g}_s$), $\theta_{0.3}$ との関係を示す。

気温を用いた場合も葉温を用いた場合も, 9月12日の実測値と推定結果はほぼ一致するが, 8月29日の一致度は悪い。図8より, 8月29日の Δg_s と $\Delta \hat{g}_s$ はともに9月12日より大きく, $\theta_{0.3}$ の減少と関係が強いことが判る。よって, この不一致は飽差の増大ではなく, 土壌の水分減少による気孔閉鎖 (ストレス) に起因すると考えざるを得ない。また, 8月29日と9月9日の11~14時頃における g_{s_sim} は g_{s_real} より大きくなるが, 9月12日の g_{s_sim} および $\hat{g}_{s_sim}$ は g_{s_real} と差がほとんどない。これは, 8月29日の $f_d(D)$ が $\hat{f}_d(D)$ より大きいためである。

6. 土壌水分特性曲線の定式化

気孔コンダクタンスモデルに土壌の水分状態を考慮するために、 θ を土壌の水分ポテンシャル ψ に変換し、Jarvis型モデルに組み込んだモデルが提案されている。 θ と ψ の関係（土壌水分特性曲線）を表す関数型には次の van Genuchten(1980)の式⁹⁾が用いられる。

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha \psi)^n \right]^{-m} \quad (5)$$

ここで、 ψ : 水分ポテンシャル[cmH₂O], θ_r : 残留体積含水率[m³/m³], θ_s : 最大体積含水率[m³/m³], α, n : 土壌に固有のパラメータ, $m = 1 - \frac{1}{n}$

θ と ψ の関係は土壌の構造によって異なるため、実測地の土壌を採土して、実験で ψ を変化させた時の θ を測定し、(5)式にパラメータ α, n, θ_r (0.3mのみ)を同定した^{10), 11)}。本研究では、対象樹の幹から0.7m離れた地点の深さ0.1m, 0.3mで土壌体積含水率を測定したため、各深さで100cm³の土壌サンプルを3つ採土した。このサンプルに土柱法、吸引法、遠心法、蒸気圧法の4つの方法を適用し、 θ と ψ の関係を求めた（図9及びappendix2参照）。

各深さとも土壌サンプルを飽和状態にした時に、体積が減少しない密度で採土できたのは、2つのサンプルのみであったのでこの2つの θ を平均し、非線形最小二乗法を用いてパラメータを同定した¹²⁾。同定に際し、初期値は既往研究¹²⁾を参考にして定めた。同定した結果を表3に示す。なお、 θ_s および0.1mの θ_r は実験で求めた（表4参照）。

7. 土壌の水分ストレスを考慮したJarvis型気孔コンダクタンスモデル

5節の推定結果の差が、土壌水分状態を考慮した場合にどのように影響するのか検討を行う。

ここで用いる気孔コンダクタンスモデルは、(1)式に土壌水分に関するストレス関数 $f_\psi(\psi)$ を乗じた(6)式である¹³⁾。

「気孔の開鎖には、飽差の増大により蒸散が活発になって葉内水分が減少する、あるいは土壌水分の減少により葉内水分が減少してこれらが信号となって気孔が開鎖するfeedback反応があるが、飽差の増大および土壌水分ポテンシャルの低下が直接信号となって気孔が開鎖するfeedforward反応も知られている¹⁴⁾」。本研究では、気孔開閉に関する植物生理学的知見を踏まえて提示されたモデル^{13), 14)}を用いる。

$$g_{sp} = g_{smax} f_q(Q) f_t(T) f_d(D) f_\psi(\psi) \quad (6)$$

ここで、 $f_\psi(\psi)$: 土壌の水分ポテンシャルに関するストレス関数

$f_\psi(\psi)$ は、Hanan and Prince(1997)¹⁵⁾が提示している次式を用いる。なお、 $f_\psi(\psi)$ は0～1の値をとる。

$$f_\psi(\psi) = 1 - \frac{\psi_{max} - \psi}{\psi_{max} - c} \quad (7)$$

(a) -0.3m

(b) -0.1m

図9 土壌水分特性曲線の推定結果

表3 パラメータの同定結果

	θ_r	α	n	m
$\theta_{0.1}$	-	0.134	1.78	0.1474
$\theta_{0.3}$	0.083	0.145	2.89	0.1431

表4 実験で求めた値

	θ_r	θ_s
$\theta_{0.1}$	0.038	0.37
$\theta_{0.3}$	-	0.334

ここで、 ψ : 土壌水分ポテンシャル [cmH₂O], ψ_{max} : 圃場容量時¹⁶⁾の土壌水分ポテンシャル[cmH₂O], c : 常数

$\psi_{max} > \psi > c$ という条件を満たすことが必要とされており、既往研究³⁾にならい、 ψ_{max} は-39 cmH₂Oとする。 ψ は $\theta_{0.3}$ を ψ に変換した値を用いる。なお、常数 c は気孔が開鎖の際の土壌水分ポテンシャルである。 $f_q(Q)$, $f_t(T)$, $f_d(D)$ の関数のパラメータは5節で用いたものとし、 $f_\psi(\psi)$ のパラメータのみ同定する。また、既往研究³⁾を参考にして、 $c = -2000$ cmH₂Oを初期値として同定した。8月29日の3枚の各葉の実測値を一つのデータセットとして、 T は葉温、 D は葉温の飽和水蒸気圧を用いて(g_{sp_sim})、パラメータ c の同定を行った。同定した結果、 c の値は-1578 cmH₂Oとなった。Hananらの報告¹⁵⁾によれば、 c の値は-1192～-3514 cmH₂Oとされていることから妥当な値と考えられる。

同定したパラメータを用いて推定した g_{sp_sim} と g_{s_real} の比較、ならびに $f_\psi(\psi)$, $f_d(D)$ のストレス係数(8月29日, 9月9日, 9月12日)を図10に示す。 g_{s_real} と g_{s_sim} , g_{s_real} と g_{sp_sim} の関係(8月29日, 9月9日)を図11に示す。

図10(a), 図11より、 g_{sp_sim} は $f_\psi(\psi)$ を考慮しない場合より g_{s_real} と一致することが判る。8月29日の g_{s_real} の低下は、土壌水分ポテンシャルに関するストレス関数を掛けたモデルで推定するとおおむね再現できるといえる。

8月19日～9月20日の c を用いて推定したストレス係数 $f_\psi(\psi)$

の経時変化の検討を行う。図12に $f_{\psi}(\psi)$ の経時変化を示す。

図より、今回の実測によれば、土壌の乾燥によるストレス係数 $f_{\psi}(\psi)$ が0.5以下となる日は15日であった。晴天で $\hat{f}_i(T)$ が約0.8~1.0、 $\hat{f}_d(D)$ が約0.6~0.9の範囲と仮定すれば、気孔コンダクタンスは $f_{\psi}(\psi)$ と比例するので、蒸散が1/2以下に抑制されるのは15日といえる。

8. 結論

本報では、常緑樹を対象に、1) 樹木周辺の土壌の水分状態がどのように変化するか実態を把握すること、2) 土壌が乾燥状態の時と湿潤状態の時での気孔コンダクタンスの日変化の実測を行い、土壌の水分状態を環境因子に加えて、土壌水分に関するストレス関数のパラメータを決定することを目的とした。得られた結論を以下に示す。

- 1) 実測地の土壌体積含水率とマトリックポテンシャルとの関数関係を表した土壌水分特性曲線を求めて定式化した。
- 2) 気孔コンダクタンスモデルに土壌の水分ストレス関数を加え、ストレス関数のパラメータを決定し、このパラメータを用いて推定した結果、土壌の水分ストレスによる気孔コンダクタンスの低下がおおむね再現できた。
- 3) 今回の実測結果をもとに土壌水分ストレスを推定した場合、土壌が乾燥すれば気孔コンダクタンスが1/2程度に減ずるのは比較的乾燥した真夏1ヶ月（8月19日～9月20日）のうち15日であった。

本報で、乾燥時には土壌水分に関するストレス関数 $f_{\psi}(\psi)$ をモデルに組み込まなければ精度の良い乾燥時のモデルは得られないことを示した。このことは樹木の蒸散を期待するために乾燥時の散水が不可欠であることを意味している。つまり、給水管理を行うことを前提とした建物周辺の植栽計画を行い、乾燥時を考慮しないで検討するのが緑化設計の立場と考える。なお、 $f_{\psi}(\psi)$ をモデルに組み入れるためには、葉温と土壌水分ポテンシャルを推定するモデルの開発が必要である。これは、今後の課題としたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、京都大学農学研究科・中村公人講師

図10 g_{sf_sim} と g_{s_real} , ストレス係数の経時変化 (8/29, 9/9, 9/12)

図11 g_{s_real} と $\hat{g}_{s_sim}$, g_{s_real} と g_{sf_sim} の関係 (8/29, 9/9)

図12 $f_{\psi}(\psi)$ の経時変化 (8/19～9/20)

に土壌水分特性の実験方法等の指導を受け、京都大学農学研究科・小杉緑子助手には気孔コンダクタンスに関して助言を受けた。また、本研究の一部は、平成15年度財団法人みずほ学術振興財団（代表研究者：佐藤愛）の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

注

注1) 実測地の土壌の物性値を表Ⅰに示す。含水比は含水比試験、土粒子の密度は密度試験、飽和透水係数は変水位法による測定、粒度分布は粒度試験をそれぞれ行い求めた。粒度分布は礫39%、砂48%、シルト10%、粘土3%であった。粒径が広い範囲にわたって分布し、締固め特性の良い土といえる¹¹⁾。

注2) パラメータ同定には、U.S.Environmental Protection agencyが開発したソフトを使用した。

注3) 圃場含水量時とは、多量の降雨もしくはかん水し、重力による水の下降運動が小さくなった時をさす。ただ、重力による水の下降運動が小さくなる時点を決めにくいので、一般に、降雨後やかん水ののち24時間後とする。

本論文に関する既発表論文

a) 花平愛、吉田治典：土壌水分ストレスを考慮した気孔コンダクタンスモデルに関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1, pp. 639-640, 2006.9.

参考文献

- 1) 佐藤愛、吉田治典、伊藤麻美子、村上大輔：集合住宅の住棟間における樹木の気候緩和効果に関する研究、日本建築学会環境系論文集、No. 587, pp. 79-85, 2005.1
- 2) P.G.Jarvis：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, pp.593-610, 1976
- 3) 檜山哲哉、高橋厚裕、橋本哲、福島義宏：落葉・常緑広葉樹から構成される二次林の気孔コンダクタンスの日変化と季節変化、水文・水資源学会誌、Vol.16, No. 2, pp. 113-130, 2003
- 4) Davies,W.J. and Zhang,J.H.: Roots signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil, Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 42, pp.55-76, 1991
- 5) 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、日本建築学会環境系論文集、No. 598, pp. 71-77, 2005.12
- 6) W. Larcher 著：植物生態生理学、シュプリンガー・フェアラーク東京、2004
- 7) 新田伸三著：環境緑地②—植栽の理論と技術、鹿島出版会、1999
- 8) 花平愛、吉田治典：常緑広葉樹と落葉広葉樹の気孔コンダクタンスモデルに関する研究、建築学会環境系論文集、No. 608, pp. 105-111, 2006.10
- 9) ダニエル・ヒレル著：環境土壌物理学、農林統計協会、2001
- 10) 中野政詩、宮崎毅、塩沢昌、西村拓著：土壌物理環境測定法、東京大学出版会、1995
- 11) 安川郁夫編：土質試験—基本と手引き、社団法人地盤工学会、2005
- 12) 諸泉利嗣、堀野治彦、丸山利輔、佐藤裕一、佐藤幸一：野外における不飽和土壌帯中の熱・水分移動特性、水文・水

資源学会誌、Vol. 10, No. 1, pp. 20-31, 1997

13) Stewart, J.B.:Modelling surface conductance of pine forest, Agri. For. Meteorol., 43, pp.19-35, 1988

14) 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、日本緑化化学会誌、Vol. 20, No. 3, pp. 158-167, 1995

15) Hanan, N.P. and Prince,S.D.:Stomatal conductance of West-Central Supersite vegetation in HAPEX-Sahel:measurements and empirical models, J.of Hydrology, 188-189, pp.536-562, 1997

appendix1

土壌の乾燥による水分ストレスが要因となって気孔が閉じた場合の測定例を図Ⅰに示す。

appendix2

θ と ψ の関係を求める実験は、 pF の値によって実験方法が異なる（表Ⅱ参照）。今回の実験では、 pF は 0 ～ 6 までのうち 14 点とした。①土柱法は、細砂を充填した土壌カラムの上に試料をおき、はじめ飽和状態にした後、所定の地下水位（地下水面から供試土壌の中心までの距離 h ）になるように排水してやり、24 時間後に、供試体の含水比を測定する方法である（図Ⅱ参照）。②吸引法は、「一定の負圧の蒸留水を土中水に接触させ、間隙水の負圧が平衡するまで（24 時間）排水させ、供試体の含水比を測定する方法である¹⁰⁾」。③遠心法は、「供試体を回転ドラムの中に入れて一定の回転数で回し、一定の重力を試料に与えて脱水平衡させ、その重力に対応したポテンシャルと試料の含水比を求める¹⁰⁾」。④蒸気圧法は「一定温度の密閉容器内に一定濃度の溶液と試料を 1 ヶ月ほど置き、試料の質量と含水比を測定する¹⁰⁾」。

(a) 土壌が湿潤の場合 (b) 土壌が乾燥の場合
+ は実測値、--- は推定値、
— はストレスがないとして推定した値

図Ⅰ 土壌の乾燥によって気孔閉鎖が生じた例¹³⁾

表Ⅱ pF と実験方法

pF 試験法	pF 値	土の状態	
		農学上の用語	工学上の用語
サイクロメーター法 吸引法 土柱法	6.5	永久しおれ点	飽和
	6.2	永久しおれ点	飽和
	5.5	永久しおれ点	飽和
	4.5	永久しおれ点	飽和
	4.2	永久しおれ点	飽和
	4.0	永久しおれ点	飽和
	3.5	初期しおれ点	飽和
	3.0	半ば飽和水分点	飽和
	2.5	圃場含水量	飽和
	2.0	圃場含水量	飽和
土柱法	1.5	圃場含水量	飽和
	1.0	圃場含水量	飽和

(2) ③ 遠心法

(3) ④ 蒸気圧法

図Ⅱ 試験の模式図と写真

表Ⅰ 土壌の物性値

	-10cm	-30cm
飽和透水係数 [cm/s]	3.2×10^{-3}	2.4×10^{-2}
間隙率 [cm ³ /cm ³]	0.37	0.334
乾燥密度 [g/cm ³]	1.36	1.44
含水比 [%]	-	16.4
粒子の密度 [g/cm ³]	-	2.61

(2006年9月10日原稿受理、2007年2月14日採用決定)