

屋上芝生植栽の熱水分特性に関する実験的研究：土壌パラメータの同定および蒸発散量の予測

香川, 治美
九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

林, 徹夫
九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻

谷本, 潤
九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻

片山, 忠久
九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17466>

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 20 (2), pp.163-168, 1998-09-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン：
権利関係：

屋上芝生植栽の熱水分特性に関する実験的研究 — 土壌パラメータの同定および蒸発散量の予測 —

香川 治美*・林 徹夫**
谷本 潤**・片山 忠久**

(平成10年5月29日 受理)

An experimental study of hygrothermal characteristics of rooftop lawn — Identification of soil parameter and estimation of the evapotranspiration rate from lawn surface —

Harumi KAGAWA, Tetsuo HAYASHI, Jun TANIMOTO
and Tadahisa KATAYAMA

This paper presents the dynamic model for estimation of evapotranspiration rate from rooftop lawn surface. In the dynamic model, not only meteorological conditions but also volumetric water contents of soil under the lawn are taken into consideration. The procedure for estimating eight parameters of soil by the inverse solution technique is also presented. Parameter identifications were performed using sum of squares of the differences between measured values of evapotranspiration rate and simulated ones. Regarding to surface temperatures, volumetric water contents of the soil and latent heat, numerical calculation results by the dynamic model using optimized parameters obtained from unsteady experiments results agreed well with measurement results.

1. はじめに

都市のヒートアイランド現象やその他の熱環境問題が深刻化するにつれ、都市における緑の熱環境調整効果が注目されている。都市に存在する未利用の膨大な面積の陸屋根を考えると、建物屋上の緑化が建築外部空間や高温化の深刻な都市熱環境に及ぼす熱的影響は小さくないといえよう。屋上芝生植栽は、都市内の緑被面積を確保し、アスファルトやコンクリート等人工被覆面には生じない蒸発冷却効果を得ようとするパッシブな技術である。

植物としての芝生の熱的効果を考えるとき重要なのはその持つ蒸発散特性である。筆者らは、これまでの長期にわたる屋上暴露実験の測定データをもとに、芝生植栽の表面熱収支特性および蒸発散特性の解析を行った。その結果、芝生葉群層下の土壌含水状態が芝生植栽からの蒸発散量に影響を与えることを確認し、葉群層下土壌の湿り程度を考慮に入れて蒸発散量を精度よく推定する基礎資料、芝生植栽の蒸発散特性を示す図(以下蒸発散特性図)を提示した¹⁾。

本研究では、実際に筆者らの提示した蒸発散特性図を用いて芝生植栽からの蒸発散量を予測し、実験結果との比較を行う。

ところで、筆者らは芝生葉群層下の土壌の含水状態は解析可能であることを前提にこれまで一連の研究を進めてきた。芝生植栽の蒸発散特性図は土壌のみの地盤からの蒸発量および体積含水率を既知として用いる図である。しかし、土壌中の水分移動の解析は簡易的あるいは精密な方法等多々提案されているものの、現在においても様々な問題点が残されている段階である。特に、多数の土壌種について土中水分移動に関する基礎資料が少ないことはいずれの解析法にもいえる問題点である。現時点において、筆者らの提示した蒸発散特性図により芝生植栽からの蒸発散量を推定する方法には、如何に土壌中の水分移動の解析を行うか、ひいては如何に土中水分移動を表すパラメータを同定するかが課題となる。

土中水分移動を表す値は、現象の解析結果に大きく影響するにもかかわらず、すべての値について適切な測定法が確立されている訳ではない。定常実験によって直接的に得ることが非常に困難であることは中村ら²⁾も指摘するところである。土中水分移動を表す値に関するパラメータを逆解析によって間接的に推定する方法は以前から知られる数学的な方法であるが、計算機の発達速度を考えると今後注目すべき手法であるといえよう。

本研究では、芝生植栽からの蒸発散量を予測するために、葉群層下に在る土壌の熱水分同時移動解析に用

*熱エネルギーシステム工学専攻・博士後期課程
**環境エネルギー工学専攻

いる、複数の土壌パラメータを非定常実験をもとに同時に同定することを試みる。

2. 土壌パラメータの同定

筆者らはこれまでの実験解析により、土壌の蒸発特性に関して、含水状態に応じて土壌表面のみでなく深奥からも生じる蒸発を考慮する必要性を確認した¹⁾。本研究では、この現象を表現できる熱水分同時移動解析モデルとして近藤らによる5層モデル³⁾を用いて土壌解析を行う。5層モデルでは土壌の水分移動解析について液体水輸送のみ⁴⁾でなく土壌内蒸発および水蒸気輸送が考慮されている。液体水輸送には Richards の理論、土壌中の水蒸気輸送の取り扱いに関しては小空隙抵抗値を用いて、土壌内で生じる蒸発および水蒸気拡散を簡単に扱う方法である。

5層モデルの熱水分同時移動解析に不可欠となる水分移動特性を表す値は、土壌水分特性曲線⁵⁾、不飽和透水係数⁶⁾および小空隙抵抗³⁾である。式(1)～(3)は既往の研究による実験式であり、各式内のパラメータはそれぞれ土壌種類に依存する。本研究ではこれらの実験式((1)～(3))によって水蒸気輸送も含めた土壌水分特性が表されると仮定する。そして逆解析のための非定常実験を行い、8つのパラメータ Ψ_{SAT} , a , b , K_{SAT} , c , f_A , f_B , f_C を同時に推定する。

*水分特性曲線⁵⁾

$$\Psi = \Psi_{01} \exp(-a\theta) + \frac{\Psi_{02}}{1 + \frac{\Psi_{02}}{X}} \quad (\theta < \theta_{SAT}) \quad (1a)$$

$$\Psi = 0 \quad (\theta \geq \theta_{SAT}) \quad (1b)$$

ただし

$$X = \Psi_{SAT} \left(\frac{\theta}{\theta_{SAT}} \right)^{-b}, \quad \Psi_{01} = -4 \times 10^{-4} [\text{m}], \quad \Psi_{02} = -10^2 [\text{m}]$$

*不飽和透水係数⁶⁾

$$K = K_{SAT} \left(\frac{\theta}{\theta_{SAT}} \right)^c \quad (2)$$

*小空隙抵抗³⁾

$$F = f_A \exp(-f_B \theta^3) + f_C \left\{ \cos \left[\left(\frac{\pi}{2} \right) \left(\frac{\theta}{\theta_{SAT}} \right) \right] \right\}^{0.5} \quad (3)$$

2.1 実験方法

実験は屋上暴露実験で用いたものと同じ土壌のみの試験体(軽量人工土壌)である¹⁾。その大きさは、表面積 $280 \times 400 [\text{mm}^2]$ 、深さ $220 [\text{mm}]$ である。この試験体を気温 $20 [^\circ\text{C}]$ 、相対湿度 $45 [\%]$ に設定した人工気候室内に設置し、土壌の表面および地中温度を測定する。蒸発量は屋上暴露実験と同様、試験体重量の測定値より求め、土壌体積含水率は土壌水分計(ヒートプロー

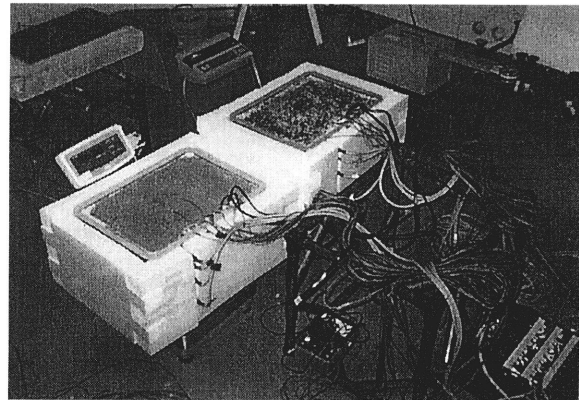


Fig. 1 Outline of experiment

ブ法)により測定した。実験の概要を Fig. 1 に示す。

試験体を人工気候室内に放置し試験体土壌を充分乾燥させ、ほぼ定常に達した20日後 $4.0 [\text{kg}]$ (降雨量 $35.7 [\text{mm}]$ に相当) 撒水、その後の非定常現象も連続測定した。測定は10分間隔で行い、データはさらに1時間移動平均した。

2.2 計算方法

土壌内の水分移動は、撒水した直後の表面含水率が大きいときには重力透水等の液体水移動現象が、その後含水率が小さくなると水蒸気移動現象が支配的となる。逆解析には、液、気相を含めて土壌中の水分移動が顕著な期間のデータを用いるべきであり、ここでは撒水後44時間の過渡状態における測定値を用いた。パラメータ同定に用いた測定値を Fig. 2 に示す。

パラメータ同定の際の誤差を最小限に抑えることと、同定するパラメータは水分移動に関するデータであることを考慮し、逆解析では熱移動を解かず、温度に対しては表面および土中ともに測定値を与えた。目的関数は8つの未知パラメータを変数とした蒸発量の計算値と実測値との誤差2乗和とした。なお、蒸発量は土壌表面および深奥も含めた試験体全体からのものである。逆解析には不等号制約条件付き NLSSQP 法⁷⁾(非線型最小2乗問題逐次2次計画法)を用いた。計算の際必要となる軽量人工土壌の飽和体積含水率 ($\theta_{SAT} = 0.74 [\text{m}^3/\text{m}^3]$) は、予め炉乾法により測定した。

以上の計算方法により水蒸気輸送に関する値も含めた8つのパラメータが同時に同定される。

2.3. 同定結果

各パラメータに与えた不等号制約関数、初期値および同定結果を Table に示す。また逆解析結果の精度を確認するため、同定パラメータを用いて計算された蒸発潜熱量をトレースし、実験値と比較した結果を Fig. 2 に併せて示す。

同定されたパラメータによって、蒸発量の実験値の

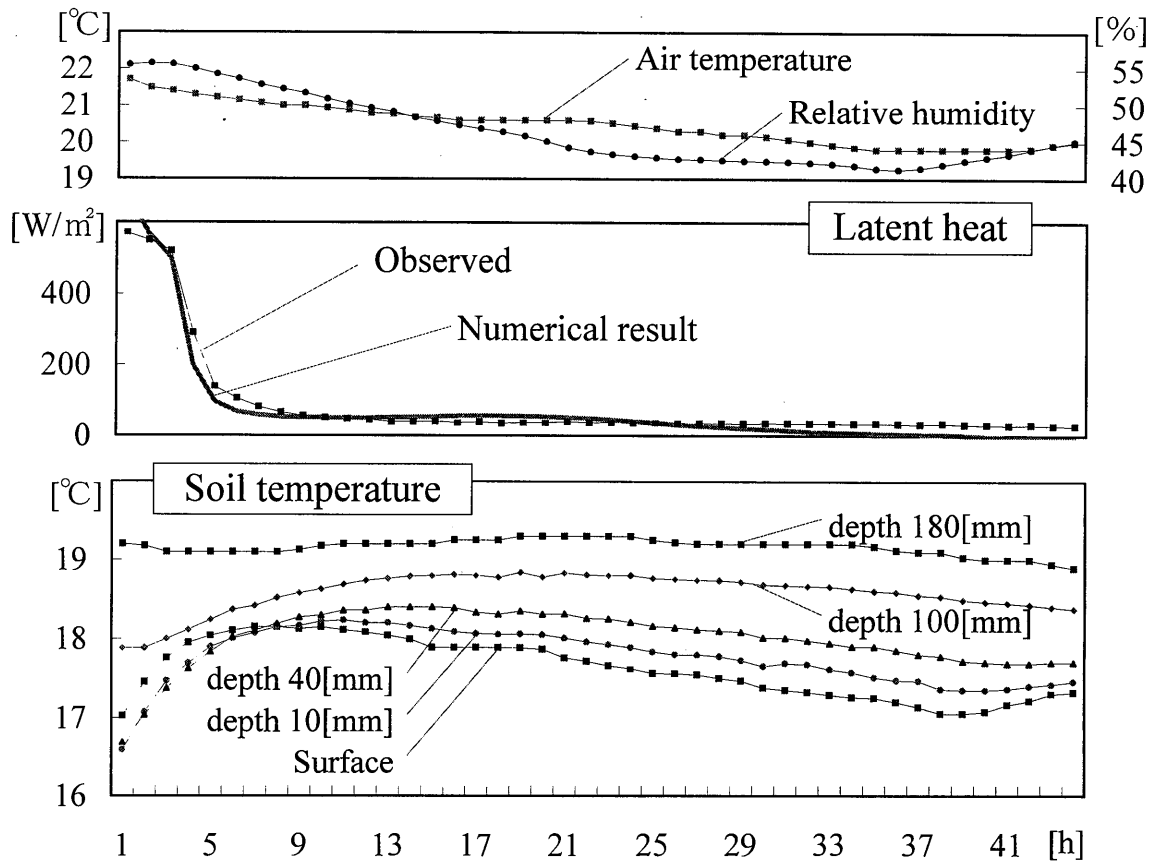


Fig. 2 Comparison of numerical result heat with observed ones

Table Parameter Identification

Parameter	Initial value	Conditional function	Optimized value
ψ_{SAT} [m]	-0.04	$-0.001 < \psi_{SAT} < -0.5$	-0.062
a	80	$10 < a < 600$	20.8
b	4	$1 < b < 20$	9.9
K_{SAT} [m/s]	0.5	$0 < K_{SAT} < 50$	0.12
c	4.5	$1 < c < 20$	15.2
f_A [m]	0.034	$0 < f_A < 0.1$	0.00191
f_B [m]	360	$0 < f_B$	333.7
f_C [m]	0.00005	$0 < f_C < 0.01$	0.000055

非定常現象を再現できている。これはパラメータ同定が精度良く行われたことを示しているといえよう。しかし、本研究で示した同定結果には以下のような疑問点が考えられる。

①目的関数は蒸発量の計算値と実測値との誤差2乗和としたがそれは適切であったのか、目的関数に土壤含水率を加える必要はないのか。

②人工気候室の温湿度設定が違う場合でも同様の結果が得られるのか、また撒水のタイミングや量によって同定結果は変わらないのか。

③試験体の深さは、単位表面積当りの土壤の含水量に影響を及ぼす。したがって、試験体の深さを変化さ

せることによって同定結果は変わらないのか。

また、本報では上記3つの実験式((1)~(3))によって土壤水分移動が表現されていると仮定して同定を行ったが、その仮定に対する確認も必要であろう。

これら様々な考えられる疑問点は、同定方法および結果の信頼性の問題であり、今後さらに検討していく必要がある。しかし、本研究で明らかにされた内容は、この同定方法の可能性を示すには十分な結果であるといえよう。

3. 芝生植栽からの蒸発散量の予測

2章で同定された土壤パラメータを用いて熱水分同

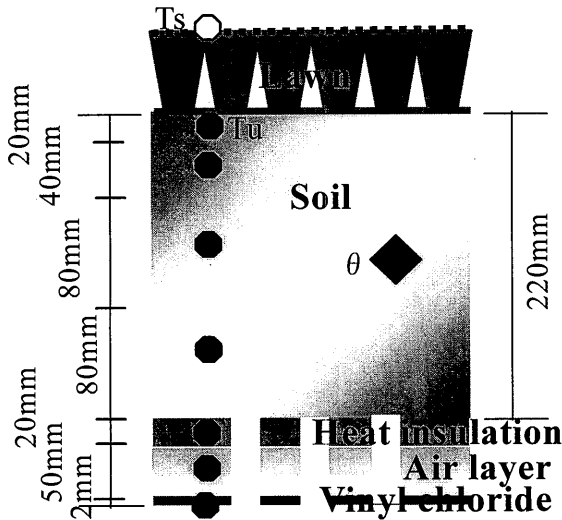


Fig. 3 An illustration of the test piece of lawn

時移動解析を行う。その結果得られた土壌からの蒸発量および体積含水率を用いて、蒸発散特性図から芝生植栽からの蒸発散量を求め、葉群層表面と地盤内温度および土壌体積含水率の変動を計算する。

3.1 計算方法および条件

平坦で周囲に遮蔽物のない、芝生植栽化された地盤を対象とし、地盤内は一般的な土壌(実験で用いた軽量人工土壌)と仮定する。モデル図を Fig. 3 に示す。

芝生植栽表面の熱収支を(4)式で与える。芝生葉群層表面は梅干野らによる伝熱モデルの考え方⁹⁾に基づき、熱容量を持たない熱抵抗のみを持つ層とする。地盤内の熱伝導は土壌の熱伝導率および容積比熱の含水率依存性を考慮し、(5)式で与えられる。芝生葉群層下の地盤内の水分移動については、土壌厚0.22[m]の地盤を一点集中定数化し、水分収支を(6)式で与える。なお、(6a)式は試験体下端から重力透水として流出する水量である。

* 芝生植栽表面の熱収支

$$SR + LR + CD + CV - EV = 0 \quad (4)$$

ただし

$$SR = (1.0 - \rho) \cdot TH \quad (4a)$$

$$LR = \varepsilon \cdot (AH - \sigma \cdot T_s^4) \quad (4b)$$

$$CD = \frac{1}{ETR} \cdot (T_u - T_s) \quad (4c)$$

$$CV = \alpha_c(v) \cdot (T_a - T_s) \quad (4d)$$

$$EV = E \cdot (694.4 - 0.678 \cdot T_s) \quad (4e)$$

* 地盤内の熱伝導

$$\frac{\partial C_p(\theta) T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

* 地盤内の水分移動

$$dz \rho_w \frac{\partial \theta}{\partial t} = P - E - Q \quad (6)$$

ただし

$$Q = \rho_w \cdot K(\theta) \quad (6a)$$

鉛直方向のみの一次元解析であり、時間離散化は後退差分とする。その他の計算条件を以下に列記する。

①計算時間間隔は10分間、計算期間は10/1/1995から9/30/1996の1年間である。葉群層表面と地盤内温度および土壌体積含水率の初期値には9/30/1995、23:50の測定値を与える。

②地中境界0.22[m]では断熱とし、土壌体積含水率の飽和値($\theta_{SAT} = 0.74 [m^3/m^3]$, 測定値)を越える余分な水分は重力透水として流出する (Fig. 3)。一方、過剰な降雨は土壌表面で排水されるものとする。

③葉群層表面の非線形方程式(4)式は Newton-Raphson 法、水分収支式を含めた全体の非線形連立方程式は TDMA 法により収束計算を行う。

④葉群層表面への入力気象データは実験試験体を設置している棟のペントハウス屋上(地上24[m])で自動計測されている値を用いる。

⑤芝生植栽の各熱物性値について、日射反射率 ρ は0.27 (測定値)、長波放射率 ε は0.93 (測定値) である。等価的熱抵抗 ETR は屋上実験による測定値をもとに月平均した値である。対流熱伝達率 α_c は実験試験体の近傍風速 v に対する一次関数で与えられる。(各値の詳細は文献⁹⁾を参照。)

⑥蒸発散量 E は、土壌のみの地盤からの蒸発量および土壌体積含水率と蒸発散特性図より求める。なお、2章で得た土壌パラメータを用いた熱水分同時移動解析(5層モデル)により、土壌のみの地盤からの蒸発量および土壌体積含水率が求められる。

⑦土壌(軽量人工土壌)の各物性値について、熱伝導率 λ および容積比熱 C_p は体積含水率 θ に対する一次式(7)~(8) (測定値) で与えられる。透水係数 K は実験式(2)を用い、2つのパラメータは2章で求められた値である。

* 熱伝導率

$$\lambda(\theta) = 0.17\theta + 0.04 \quad (\theta \leq 0.45) \quad (7a)$$

$$\lambda(\theta) = 1.67\theta - 0.68 \quad (\theta > 0.45) \quad (7b)$$

* 容積比熱

$$C_p(\theta) = (1.0 - \theta_{sat}) C_{p_s} + \theta \cdot C_{p_w} \quad (8)$$

ただし

$$C_{p_s} = 2.2 \times 10^6 [J/m^3K], C_{p_w} = 4.2 \times 10^6 [J/m^3K]$$

3.2 結果および考察

Fig. 4 は8/16~8/23/1996の日射量および各モデルの計算結果と実測値の時系列変化の比較を示したもの

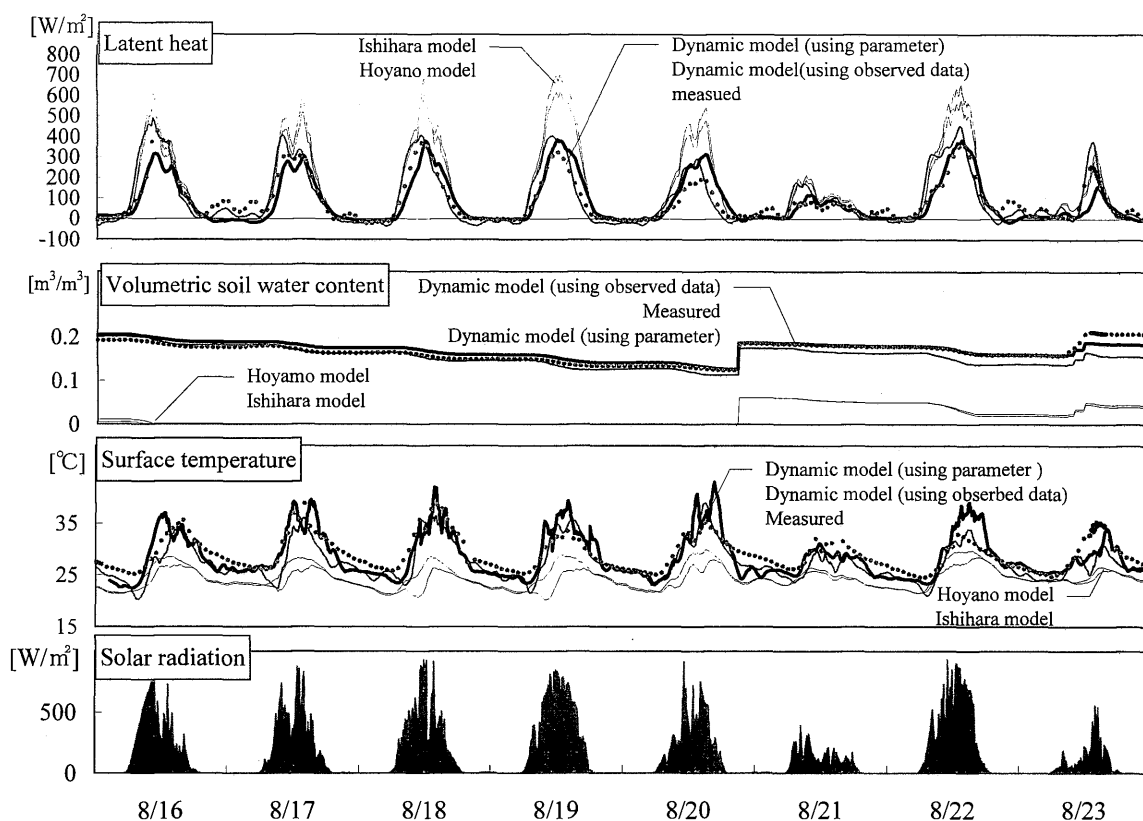


Fig. 4 Comparison of fluctuations of calculated results and measured ones

である。計算時間間隔は10分で行ったが、図には1時間間隔に移動平均した値を示す。なお、8/15は日積算で35 [mm]、8/23は6.5 [mm]の降雨があり、8/20の20:00は5.0 [kg]の撒水(撒水1.0 [kg]は降雨量8.9 [mm]に相当)を行った。

筆者らの提案した芝生植栽の蒸発散特性図を用いる方法(以下動的モデル)は、葉群層下土壤の含水状態に応じて芝生植栽からの蒸発散量を推定できることを特徴としている。一方、梅干野ら⁸⁾や石原ら⁹⁾によるモデルは気象条件等のみを考慮に入れて蒸発散量を推定する方法であり、土壤の湿り程度に対し静的なモデル(以下静的モデル)である。Fig. 4にはこれらの推定方法による計算結果とも比較して示している。また、動的モデルに関して、土壤のみの地盤からの蒸発量と体積含水率に、熱水分同時移動解析による結果のみではなく実際に屋上実験で得られた測定値も用いて計算を行い、結果を比較している。

蒸発散特性図を用いた動的モデルの計算結果は実測値から大きく外れることはなく、実際の変動と一致している。熱水分同時移動解析による結果を用いた場合と実際の屋上実験で得られた測定値を用いた場合との差もほとんど見られない。動的モデルでは土壤含水状態に応じて蒸発散量を予測するため、乾燥が進み土壤水分量が少なくなるにつれ蒸発散量は減少し、表面温度は上昇する定性的な現象をよく再現できている。動

的モデルの計算結果は、蒸発散特性図の精度のみならず2章で同定された土壤パラメータの推定精度も含み、本報で行ったシミュレーション結果は土壤パラメータがほぼ正しく推定されていることを示している。

静的モデルでは、土壤体積含水率の値が実測値から大きく外れて実測値より非常に低く、根が水分を吸収できなくなり植物が枯れるしおれ点³⁾よりも小さい値を示している。また、動的モデルでは再現された定性的現象を表現できない結果となった。降雨直後の8/16と晴天が続いた後の8/19の蒸発潜熱量を比較すると、土壤含水量の多い8/16では実測値を推定できているが、晴天が続き土壤含水量が減少しつつある8/17~8/19を見ると、静的モデルは安定した日射量の影響を受けて蒸発潜熱量を約40 [%]も過大に推定する。過大な蒸発潜熱量を示す傾向にある静的モデルでは表面温度が低くなり、土壤の乾燥は著しく進行する。その結果、8/20の含水量がほとんどなくなっている状態(含水率約0 [%])でも多量の蒸発散量が生じるといった物理的に矛盾した現象を予測している。

シミュレーション結果によって、芝生植栽からの蒸発散量を推定する際には、葉群層下土壤の湿り状態を考慮に入れる必要があることが再確認された。また、2章に示された方法により同定された土壤パラメータもほぼ正確な値であることも確認できた。

4. む す び

本研究では、複数の土壌パラメータを数値解析によって同時に推定した。同定されたパラメータを用いて土壌の熱水分同時移動解析を行い、解析結果と蒸発散特性図により、芝生植栽からの蒸発散量を予測した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 非線形最適化問題を解いて逆解析することにより、土壌水分特性曲線、不飽和透水係数および小空隙抵抗を表すモデル式内の複数パラメータを同時に推定することができた。さらに、本研究で用いた手法によるパラメータ同定方法の有意性が示された。

(2) 蒸発散特性図を用いて、葉群層下土壌の湿り状態に対して動的に蒸発散量を推定する方法では、土壌含水状態に対して静的なモデルよりも、芝生植栽の地表面の熱収支、伝熱現象および水分移動の日変動を精度よく再現できた。また芝生植栽からの蒸発散量予測の際、葉群層下土壌の湿り状態を考慮することの必要性を再度確認した。

今後は、芝生植栽からの蒸発散量をより精度を上げて予測するために、本研究で示された土壌パラメータの同定方法についてさらに検討していくことが課題である。

記 号

AH：大気放射量 [W/m^2]，CD：伝導熱流量 [W/m^2]，CV：対流熱伝達量 [W/m^2]， C_p ：土壌の容積比熱 [J/m^3K]， C_{p_s} ：絶乾土壌の容積比熱 [J/m^3K]， C_{p_w} ：水の容積比熱 [J/m^3K]，E：蒸発散量 [kg/m^2h]，ETR：芝生の等価的熱抵抗 [m^2/WK]，EV：蒸発潜熱量 [W/m^2]，F：小空隙間抵抗 [m]，K：透水係数 [m/s]， K_{SAT} ：飽和透水係数 [m/s]，LR：長波放射収支量 [W/m^2]，P：降水量 [$kg/m^2 h$]，Q：流出量 [$kg/m^2 h$]，SR：短波放射量 [W/m^2]，T：土壌温度 [K]， T_a ：外気温度 [K]， T_s ：芝生植栽の表面温度 [K]， T_u ：芝生葉群層下温度 [K]，TH：水平面全天日射量，t：時間 [h]，v：近傍風速 [m/s]，z：距離 [m]， α_c ：対流熱伝達率 [$W/m^2 K$]， ϵ ：長波放射率 [ND]， σ ：黒体放射定

数 [$=5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$]， θ ：土壌の体積含水率 [m^3/m^3]， θ_{SAT} ：飽和体積含水率 [m^3/m^3]， λ ：熱伝導率 [$W/m^2 K$]， ρ ：日射反射率 [ND]， ρ_w ：液体水の密度 [$=10^3 kg/m^3$]， Ψ ：水分化学ポテンシャル [m]， Ψ_{SAT} ：飽和水分化学ポテンシャル [m]

本稿に関連する発表論文

本論文は以下示す発表論文[1]～[2]に新たな研究結果を加えて修正したものである。

- 1) 香川治美・林徹夫・谷本潤・片山忠久：屋上芝生植栽の熱水分特製に関する実験的研究（その3）芝生植栽のモデルと検証，日本建築学会研究報告，九州支部環境系，225-228，第37号・2，1998年3月
- 2) 香川治美・林徹夫・谷本潤・片山忠久：芝生植栽から蒸発散量予測に用いる土壌パラメータ同定，空気調和・衛生工学会学術講演論文集，1998年8月

参 考 文 献

- 1) 香川治美・林徹夫・谷本潤・片山忠久：芝生植栽が都市熱環境に及ぼす影響に関する実験的研究，第一報 土壌の含水状態を考慮した芝生植栽の蒸発散特性の定量的特定，日本建築学会計画系論文集 第507号 1998年5月
- 2) 中村公人・堀野治彦・三野徹：排水試験による不飽和透水係数の推定，水文水資源学会誌，175-179，Vol.11，No.2，1998年
- 3) 近藤純正：裸地面蒸発の季節変化(1)モデル，水文水資源学会誌，378-385，Vol.7，No.5，1994年
- 4) 林徹夫・片山忠久・塩月義隆・津々見信広・北山弘樹・堤純一郎：水分移動を考慮した地盤内の伝熱シミュレーション，九州大学総合理工学研究科報告，第12巻，第1号，47-52，1990年6月
- 5) 近藤純正・徐健青：中国の乾燥・半乾燥域の裸地面熱収支の計算，(1)気候と土壌パラメータと計算方法，水文水資源学会誌，162-174，Vol.9，No.2，1996年
- 6) 近藤純正・徐健青：火山灰土壌及び砂丘砂裸地からの蒸発量の計算，農業気象，219-228，Vol.51(3)，1995年
- 7) 非線形最適化問題のためのアプリケーション・システム ASNOP3 利用の手引，東京大学大型計算機センター，1992年10月
- 8) 堀口剛・梅干野晃・何江：芝生植栽の水収支特性に関する実験研究，屋上芝生植栽の熱環境調整効果第2報，日本建築学会計画系論文集，第483号，73-79，1996年5月
- 9) 石原修・張晴原・下山和美：屋上芝生植栽の熱特性と水分収支に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文集，第484号，17-24，1996年6月