

最表層土の水分変動を考慮したバルク法による蒸発量推定手法の改良

Improvement for the estimation method of evaporation using bulk method concerning water content variation of the uppermost soil layer

里見知昭*・酒匂一成**・吉留花江***・深川良一****

Tomoaki SATOMI, Kazunari SAKO, Hanae YOSHIDOME and Ryoichi FUKAGAWA

*正会員 工博 東北大学大学院助教 環境科学研究科環境科学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

**正会員 工博 立命館大学准教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8755 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

***学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科創造型理工学専攻 博士課程前期課程 (〒525-8755 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

****フェロー会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8755 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Real-time risk evaluation for slopes subjected to rainfall has been focused on setting evacuation order, thus, it is necessary to consider deciding on the timing of the all clear after evacuation. As a result, it is also important to focus attention on the variation of evaporation. In this paper, the effectiveness of bulk method to estimate evaporation for the soil tank test is discussed. First, the estimation method of exchange speed and surface moisture availability used for bulk method are examined, and then improvement for the estimation method of them is attempted. Secondly, the validity of calculation result of evaporation based on the above modified method is evaluated. It was shown that the calculation result was in good agreement with the experiment data.

Key Words: evaporation, bare soil surface, water content, volumetric heat capacity

1. はじめに

降雨に対する斜面災害は日常生活の一部としてイメージできるほどの影響を与え、斜面災害から生命や財産を守るための対策を講じる必要がある。その対策は、ハード対策（土砂災害防止整備など）とソフト対策（警戒避難体制の整備など）に大別される。しかし、ハード対策を全ての危険箇所を実施すると膨大な時間と費用を要するため、ソフト対策の充実が望まれる。

ソフト対策の警戒避難体制の整備では、従来、降雨量に基づいて斜面の崩壊危険度を評価することに重点が置かれてきた。この方法は広域の斜面を対象とする場合は有効であるものの、斜面ごとの地形や地質を考慮しきれないため¹⁾、危険度判断に空振りが生じる可能性がある。そこで、警戒避難勧告のタイミングをより具体的に設定するためには、地盤内の水分変動（間隙水圧や体積含水率など）を現地計測から直接把握することが望ましい。筆者らは降雨に対する斜面防災システムの構築を目指すため、2004年7月から京都市の重要文化財後背斜面にテンシオメータ（間隙水圧）と転倒ます型雨量計（10分間雨量）を設置し、計測結果を用いて崩壊危険度をリアルタイムに評価する方法について検討している^{2,3)}。

降雨に対する斜面防災システムは、避難勧告や交通規制の発令から解除という流れで構成される。従来は警戒避難の基準設定に重点が置かれてきたが、発令解除には

明確な基準はなく、解除のタイミングは避難勧告よりも難しいといわれている。つまり、解除の基準設定に関する検討が必要であり、避難に伴う精神的苦痛や経済的損害の緩和に貢献できると期待される。そこで、降雨後の地盤内の水分変動（地盤の水収支）に注目することが望ましく、蒸発量の変動を把握することも重要である。蒸発量は降雨量と同様、飽和・不飽和浸透解析やタンクモデルの境界条件として用いることで地盤の水収支がより具体的になるため、水分変動に伴う斜面の安定性と併せて諸基準の設定も詳しく検討できると考えられる。

蒸発量の測定方法には、ライシメータ法（ウェィングライシメータ）⁴⁾、傾度法⁵⁾、バルク法⁶⁾などが挙げられる。ライシメータ法は蒸発量を直接求める方法で、対象の土層を不攪乱でコンテナ内に再現することが重要である。傾度法は2高度の気象観測データが必要で、大気の安定度を考慮する必要がある。バルク法は蒸発量を求める際の係数（交換速度と蒸発効率）を事前に既知にする必要があるものの、1高度の気象観測データと地表面温度で蒸発量を求めることができる。

本論文では、最表層（0～2cm）の土（以下、最表層土）を対象にバルク法による蒸発量の推定手法に関して室内土槽試験で議論する。はじめに、バルク法の未知パラメータである交換速度と蒸発効率の算定について近藤らの方法⁷⁾で検討し、算定方法の改良を試みる。次に、この改良法をもとに蒸発量測定方法の将来展望を示し、未知

パラメータが既知となった際のバルク法の有効性に関して蒸発量の計測結果と計算結果を用いて考察する。

2. バルク法の概要

バルク法より蒸発量を求める式（バルク式）は式(1)のように表される⁸⁾。

$$E = \rho C_H U (q_s - q_a) = \rho g_a (q_s - q_a) \quad (1)$$

ここで、 E は水蒸気の鉛直輸送量（蒸発量）[kg/(m²sec)], ρ は湿潤空気の密度 [kg/m³], C_H は顕熱輸送に対するバルク輸送係数 [-], U は風速 [m/sec], q_s は地表面の比湿 [kg/kg], q_a はある高度の大気の比湿（水蒸気の密度 ρ_w と湿潤空気の密度 ρ の比）[kg/kg]である。また、 $g_a (= C_H U)$ は交換速度（空気塊が交換される速さ）[m/sec]である。

土が十分に湿っていると、地表面の比湿 q_s は地表面温度 T_s に対する飽和比湿に等しく($q_s = q_{SAT}(T_s)$)、土が乾燥してくると地表面の比湿は飽和比湿より小さくなる($q_s < q_{SAT}(T_s)$)。つまり、時々刻々と変化する地盤内の水分量を考慮すると、地表面の比湿 q_s を直接把握することは容易ではない。そこで、地表面の湿潤度を表すパラメータ β （蒸発効率、0~1の範囲で飽和の場合は $\beta=1$ ）を導入したバルク式の β 法を式(2)に示す^{8),9)}。

$$E = \rho g_a \beta [q_{SAT}(T_s) - q_a] \quad (2)$$

表-1より、空気密度 ρ 、飽和比湿 $q_{SAT}(T_s)$ 、比湿 q_a は気象観測データから得られる¹⁰⁾。しかし、交換速度 g_a と蒸発効率 β は気象観測から直接得られないため、現地計測などから事前に関係式を求める必要がある。各物理量の関係例を表-2、表-3、図-1に示す。表-2より、交換速度 g_a は風速 U や地表面温度 T_s と気温 T_a の差(式(3)を参照¹²⁾、以下、温度差)と関係があり、表-3と図-1より、蒸発効率 β は水分量と正の相関関係を持つことが確認される。

$$g_a \propto \frac{\kappa}{h} R_a^{1/3} \propto \frac{\kappa}{h} \left[\frac{g \beta_v h^3 (T_s - T_a)}{\kappa \nu} \right]^{1/3} = b (T_s - T_a)^{1/3} \quad (3)$$

ここで、 κ は温度伝導率 [m²/sec], h は代表長さ [m], R_a はレイノルズ数 [-], ν は動粘性係数 [m²/sec], g は重力加速度 [m/sec²], β_v は体積冗長係数 [1/°C], T_s は地表面温度 [°C], T_a は気温 [°C], b は係数(表-2を参照)である。

3. 室内土槽試験による交換速度と蒸発効率の算定

3.1 算定方法

図-2に交換速度 g_a と蒸発効率 β を算定するフロー図を示し、この算定フロー図について説明する。なお、図-2は近藤らの方法⁷⁾に基づいている。

はじめに、図-2の「事前試験」に該当する飽和度100%の土（蒸発効率 $\beta=1$ ）を対象に、時々刻々と変化する温度差($T_s - T_a$)と交換速度 g_a を取得し、温度差と交換速

表-1 各変数の計算に必要な気象観測データ

変数	気象観測データ
空気密度 ρ [kg/m ³]	p : 気圧 [hPa]
	T_a : 気温 [°C]
	T_s : 地表面温度 [°C]
	H_u : 相対湿度 [%]
飽和比湿 q_{SAT} [kg/kg]	p : 気圧 [hPa]
	T_s : 地表面温度 [°C]
比湿 q_a [kg/kg]	p : 気圧 [hPa]
	T_a : 気温 [°C]
	H_u : 相対湿度 [%]
交換速度 g_a [m/sec]	気象観測から直接算定することができない。
蒸発効率 β [-]	

表-2 代表的な地表面の交換速度の目安¹¹⁾

	地表面	交換速度 g_a [m/sec]
(a)	裸地面	$0.0027 + 0.0031 U_{1m}$
	草丈0.1mの草地	$0.002 + 0.0045 U_{1.5m}$
	草丈1mの水田	$0.006 U_{10m}$
(b)	裸地面	$0.0012 (T_s - T_a)^{1/3}$
	草丈0.1mの草地	$0.0065 (T_s - T_a)^{1/3}$
	草丈1mの水田	$0.016 (T_s - T_a)^{1/3}$

- (a) 風速 U の添え字は風速計の地上高度を表す。
 (b) 自然対流の状態（地表面温度 $T_s >$ 気温 T_a ）を指す。

表-3 任意の水分量に対する蒸発効率の関係式（一例）

Deardorff (1978) ¹³⁾	$\beta = \min \left(1, \frac{\theta}{\theta_{fc}} \right)$ (θ_{fc} : 圃場容量)
Lee and Pielke (1992) ¹⁴⁾	$\beta = \begin{cases} \frac{1}{4} \left[1 - \cos \left(\frac{\theta}{\theta_{fc}} \pi \right) \right]^2 & \theta < \theta_{fc} \\ 1 & \theta \geq \theta_{fc} \end{cases}$ (θ_{fc} : 圃場容量)
Kondo, et al. (1990) ⁷⁾	$\beta = \frac{1}{1 + g_a F(\theta) / D_{atm}}$ (図-1を参照) $\left. \begin{array}{l} g_a : \text{交換速度 [m/sec]} \\ F(\theta) : \text{水蒸気拡散距離 [m]} \\ D_{atm} : \text{水蒸気の分子拡散係数 [m}^2\text{/sec]} \end{array} \right\}$

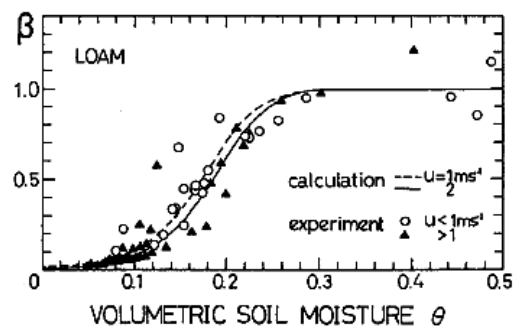


図-1 体積含水率と蒸発効率の関係（ローム）⁷⁾
 （風速 U の違いによる計算結果と試験結果）

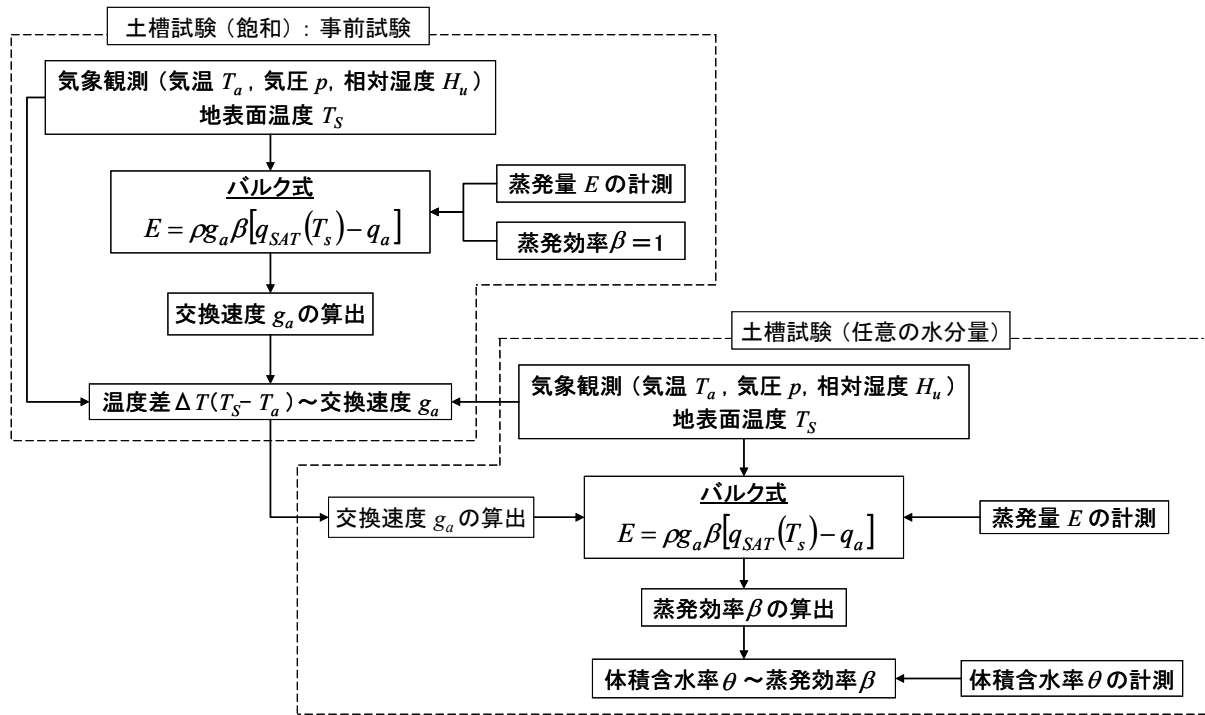


図-2 交換速度と蒸発効率の算定フロー図

度との関係式を求める。次に、この関係式を用いて任意の水分量に対する蒸発効率 β を算定する。このとき、表-3で示したように蒸発効率 β は水分量のみではない関係式⁷⁾が提案されているものの、蒸発効率 β は地表面の湿潤度を表すパラメータであることを考慮して、本論文では蒸発効率 β は水分量のみの変数として定義する。

以上の手順より、式(2)のバルク式の未知パラメータである交換速度 g_a と蒸発効率 β が既知となるため、気象観測などにより蒸発量を求めることができる。

3.2 室内土槽試験

本試験の目的は、気象観測や土の水分量などの計測によって交換速度 g_a と蒸発効率 β を算定することである。試料は豊浦砂で、基本物性値と水分特性関係（水頭法、排水過程）をそれぞれ表-4、図-3に示す。図-3に示す圃場容水量 θ_c は「体積含水率 θ ~蒸発効率 β 」関係の試験結果と既往の成果（表-3を参照）を比較するために用いる値である。圃場容水量 θ_c は一般に土中水のポテンシャルが-6.19kPa（pF=1.8）の水分量に相当する¹⁵⁾。本論文では、保水性試験結果から圃場容水量 θ_c を推定するため、ニューラルネットワークの誤差逆伝播法^{16),17)}を採用する。誤差逆伝播法は、式(4)の出力値 z_p と教師値（真値） t_p の差 E_p が小さくなるように式(5)の各ニューロン間の結合係数 w を逐次修正して最適な結合係数を構築する方法で、容易に定式化できない問題を解く場合に有効である。

$$E_t = \sum_p E_p = \sum_p (z_p - t_p)^2 \quad (4)$$

$$w(t+1) = w(t) - \varepsilon \frac{\partial E_p}{\partial w(t)} + \alpha w(t-1) \quad (5)$$

表-4 試料の基本物性値

土粒子密度	ρ_s	[g/cm ³]	2.652
最小密度	$\rho_{d \min}$	[g/cm ³]	1.332
最大密度	$\rho_{d \max}$	[g/cm ³]	1.639
最小間隙比	e_{\min}		0.618
最大間隙比	e_{\max}		0.991
均等係数	U_c		1.348
曲率係数	U_c'		0.992

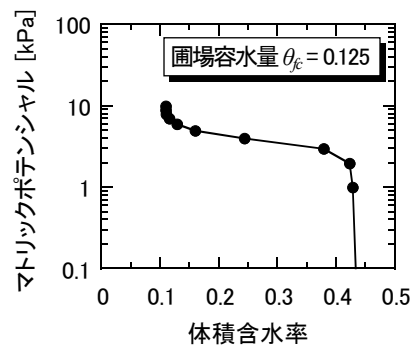


図-3 水分特性関係（水頭法、排水過程）

ここで、 E_t は全学習データ（11個の試験データ）に対する誤差、 E_p は p 番目の学習データに対する誤差、 z_p は p 番目の学習データの出力層ニューロンの出力値、 t_p はその教師値、 w は各ニューロン間の結合係数、 t は学習ステップ、 ε は学習率、 α は慣性係数（ $0 < \alpha < 1$ ）である。表-5に学習条件を示す。

本試験の概要（計測機器の設置位置）を図-4に示す。モデル土槽はアクリル製の円筒カラムを使用し、試料が

表-5 誤差逆伝播法の学習条件

目標誤差 E_t	0.0011
教師値と出力値の差 E_p	0.0001 (1%)
中間層のニューロン数	2
学習率 ε	0.1
慣性係数 α	0.9

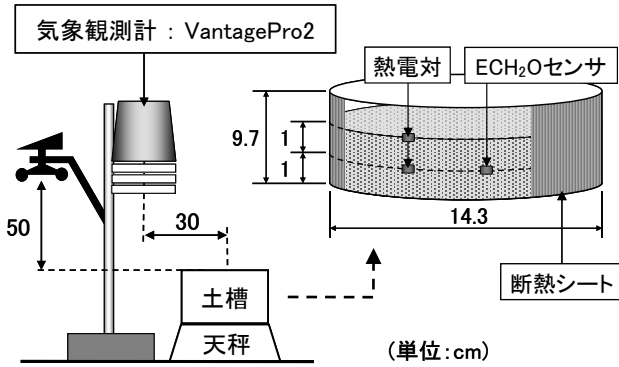


図-4 土槽試験の概要

表-6 試験条件

土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	2.652
乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	1.470
間隙比 e	0.805
相対密度 D_r	50
飽和度 S_r [%]	10, 20, 40 60, 80, 100
体積含水率 θ	0.045, 0.089, 0.178 0.267, 0.357, 0.446

均一になるよう 1cm ごとに締固めて作製する。本論文では最表層土からの蒸発量を推定することが目的であり、試験条件に対して沈下の影響を受けないようにするために土槽高を 2cm とした⁷⁾。そして、地表面のみからの熱伝導とするために円筒カラムの周りに断熱シートを巻いた。なお、底面は非排水条件で、断熱シートで覆っていない。図-4 より、土槽からの蒸発量を計測するために電子天秤 (最小表示 0.01g) を使用し、地中温度を計測するために熱電対 (深さ 0, 1cm)、体積含水率を計測するために ECH₂O センサ (Decagon 社製、深さ 1cm) を用いる。気温、気圧、相対湿度を計測するための気象観測計の高さは地表面から 50cm とする⁷⁾。計測間隔は 10 分とし、任意の水分量における蒸発効率 β を求めるため、蒸発量より算出した飽和度が 5% 低下したときを試験終了とする。表-6 に試験条件 (水分量は 6 ケース) を示す。表-6 の体積含水率 0.446 (飽和度 100%) より、温度差 ($T_s - T_a$) と交換速度 g_a の関係式 (図-2, 式(3)を参照) を求め、残りの体積含水率より蒸発効率 β を算定する。

計測結果例として、図-5 に初期体積含水率 0.267 (飽和度 60%) の蒸発量、体積含水率 (深さ 1cm)、温度 (気

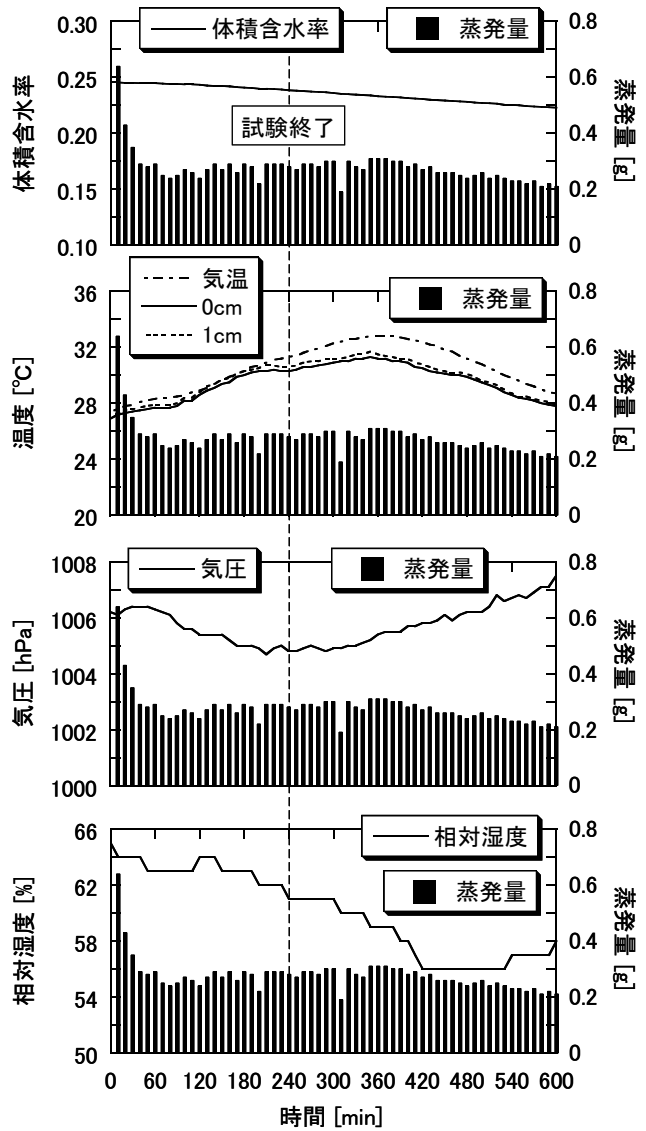


図-5 計測結果 (体積含水率 0.267 (飽和度 60%))

温、地温 (深さ 0, 1cm)、気圧、相対湿度の時系列変化を示す。試験終了後の計測結果は参考データである。体積含水率の値は供試体作製時の影響を受けたと考えられ、初期値は条件値と異なっていることを断った上で整理する。図-5 より、土中水の蒸発によって体積含水率は減少し、地表面温度の影響を受けて蒸発量が変動していることが確認される。しかし、試験開始から 60 分までの蒸発量と体積含水率の相関関係はほとんど見られない。このような結果が得られたのは、地表面のみからの蒸発によって供試体の水分分布が不均一になったためと考えられる。つまり、蒸発量と体積含水率の相関性は蒸発過程と供試体層厚の影響を受けた可能性がある。次に、式(2)のバルク式に注目して、計測結果に基づく温度差 ($T_s - T_a$) と水蒸気密度差 ($\rho_{qsat}(T_s) - \rho_{qa}$) の算定結果を図-6 に示す。図-6 より、蒸発量は温度差と明確な関係が見られないことが確認される。一方、水蒸気密度差は試験終了の 240 分まで増加しているにもかかわらず蒸発量は減少またはほぼ一定という結果より、蒸発量は蒸発効率 β (地表面

の湿度)の影響を受けたと解釈される。

3.3 交換速度と蒸発効率の算定結果と考察

はじめに、図-2の「事前試験」である飽和度100%の土を用いた試験結果から得られた温度差($T_s - T_a$)と交換速度 g_a の関係を式(6)に示す。なお、式(6)は式(3)の関係に基づいて算定しており、式(6)の定数0.0131は温度差と交換速度の関係の精度向上に寄与している。

$$g_a = 0.0107(T_s - T_a)^{1/3} + 0.0131 \quad (R^2 = 0.828) \quad (6)$$

次に、式(6)の関係を用いて任意の水分量に対する蒸発効率 β の算定結果を図-7に示す。図-7の体積含水率 θ と蒸発効率 β は試験終了までの平均値として整理し、同じ水分量による試験結果を比べるため、体積含水率0.178と0.267(飽和度40%と60%)はそれぞれ3回、2回実施した。なお、体積含水率は蒸発量からの算出ではなく土壌水分計による計測結果を採用した。それは、バルク式を用いて蒸発量を推定する際に「体積含水率 θ ~蒸発効率 β 」関係を利用する必要があり、体積含水率の変化を把握するためには土壌水分計の使用が前提になるからである。試験結果と既往の成果を比較するため、図-7にLee and Pielkeの式¹⁴⁾(表-3を参照)を示す。

図-7より、体積含水率 θ が増えると蒸発効率 β が大きくなる傾向にあるものの、結果[2]ではこの関係を満たしていない。そこで、式(6)の温度差から算出した交換速度の影響を受けた可能性があると考え、各試験の温度差と交換速度に注目した試験結果と文献をもとに考察する。はじめに、飽和度40%と60%から得られた温度差と交換速度の最小値と最大値を図-8に示す。なお、図-8には飽和度100%で得られた範囲を色付けしている。図-8より、

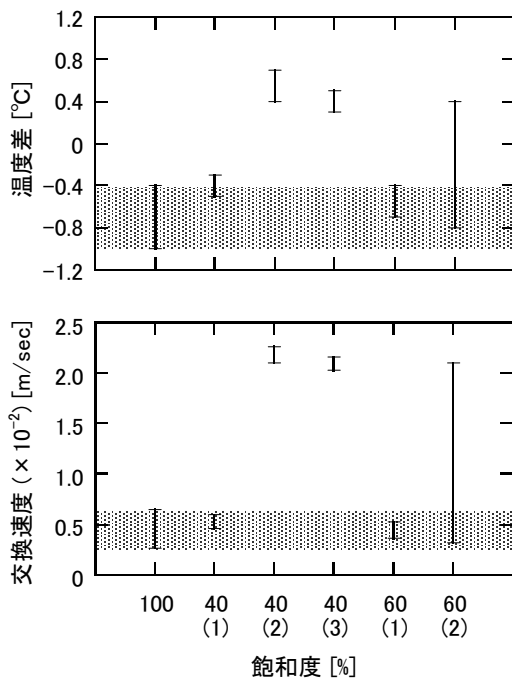


図-8 各試験に対する温度差と交換速度の最小値と最大値

図-7で比較的良好な値を示した結果[1]の飽和度40(1)と60(1)は飽和度100%のほぼ範囲内にあり、妥当でない判断した結果[2]の交換速度は0.02m/sec以上ある。次に、有効エネルギー、気温、相対湿度を一定とした場合の温度差と交換速度の関係例¹⁸⁾を図-9に示す。図-9の矢印は飽和度100%の蒸発試験で得られた温度差と交換速度の範囲(以下、飽和範囲)であり、点線の囲みは任意

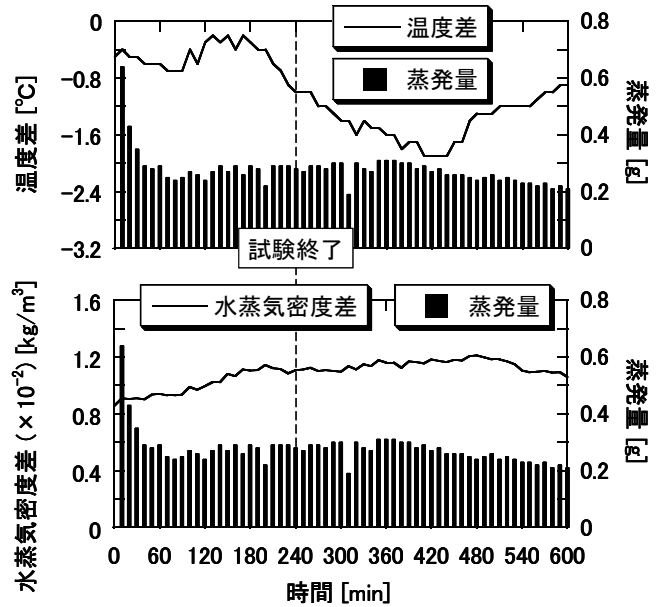


図-6 温度差と水蒸気密度差の時系列変化

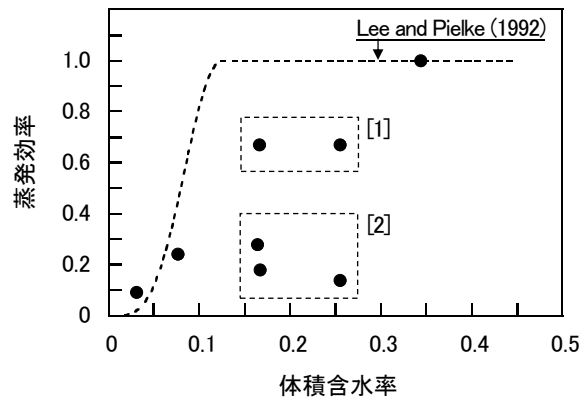


図-7 体積含水率と蒸発効率の関係

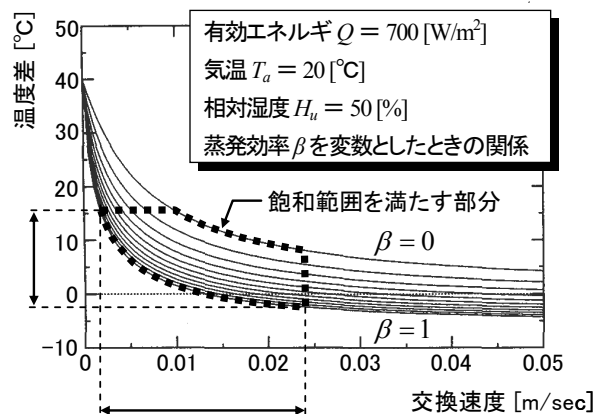


図-9 交換速度と温度差の関係(加筆修正)¹⁸⁾

の蒸発効率 β に対して飽和範囲を満たす部分である。この囲み部分より、**図-7**の結果[2]で得られた交換速度は想定される値よりも大きくなったため、蒸発効率 β は小さくなったと推測される。つまり、任意の水分量に対する蒸発試験の条件として飽和範囲を満たさないと期待する蒸発効率 β は得られにくいと解釈される。

このように、交換速度 g_a を温度差のみで表すことは容易ではなく、**図-9**の関係からも蒸発効率 β （地表面の湿潤度を表現）の影響も受けているため、交換速度の算定方法に対する改良と検討が必要であると考えられる。

4. 交換速度と蒸発効率の算定方法の改良と検証

4.1 改良法の概要

前章では、交換速度 g_a を温度差のみで表すのは容易ではないことを示した。本章ではこの課題を改善することを目的に、**図-10**に示す水槽を併用した方法を新たに提案する。この方法は**図-2**のように飽和度100%の土で事前に温度差と交換速度の関係を求める必要はなく、同じ気象条件の中で交換速度と蒸発効率を同時に求めることができる。つまり、**図-7**のような結果のばらつきを抑制できる可能性がある。しかし、交換速度 g_a は表面の種類

によって異なるため（**表-2**を参照）、水槽試験から得られた交換速度を土槽試験の交換速度に置換するための補正が必要である。以下、交換速度の補正方法を説明する。

はじめに、物体の持つ熱エネルギーに注目する。熱量 Q [kJ]は式(7)より体積熱容量 C [kJ/m³・K]と温度変化 ΔT [K]で表され、同じ熱量が与えられると体積熱容量が大きいほど温度変化は小さい。そして、式(8)に示す土の体積熱容量 C_{soil} （各物性値は**表-7**を参照）は湿潤土のほうが乾燥土よりも大きいため、熱量が同じ場合は湿潤土のほうが温度は変化しにくくなる¹⁹⁾（**図-11**のStep1に対応）。

$$Q = C\Delta T = \rho c\Delta T \quad (7)$$

$$C_{soil} = \frac{V_s}{V} \rho_s c_s + \frac{V_w}{V} \rho_w c_w + \frac{V_a}{V} \rho_a c_a \quad (8)$$

$$= \left\{ \rho_d c_s + \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \rho_a c_a \right\} + (\rho_w c_w - \rho_a c_a) \theta$$

ここで、 V は体積 [m³]、 ρ は密度 [kg/m³]、 c は質量比熱 [kJ/(kg・K)]で、添え字 s, w, a はそれぞれ土粒子、水、空気を意味しており、 ρ_d は乾燥密度 [kg/m³]、 θ は体積含水率である。

次に、気温 T_a が一定の場合では地表面温度 T_s と気温 T_a の差（温度差）は湿潤土のほうが乾燥土よりも大き

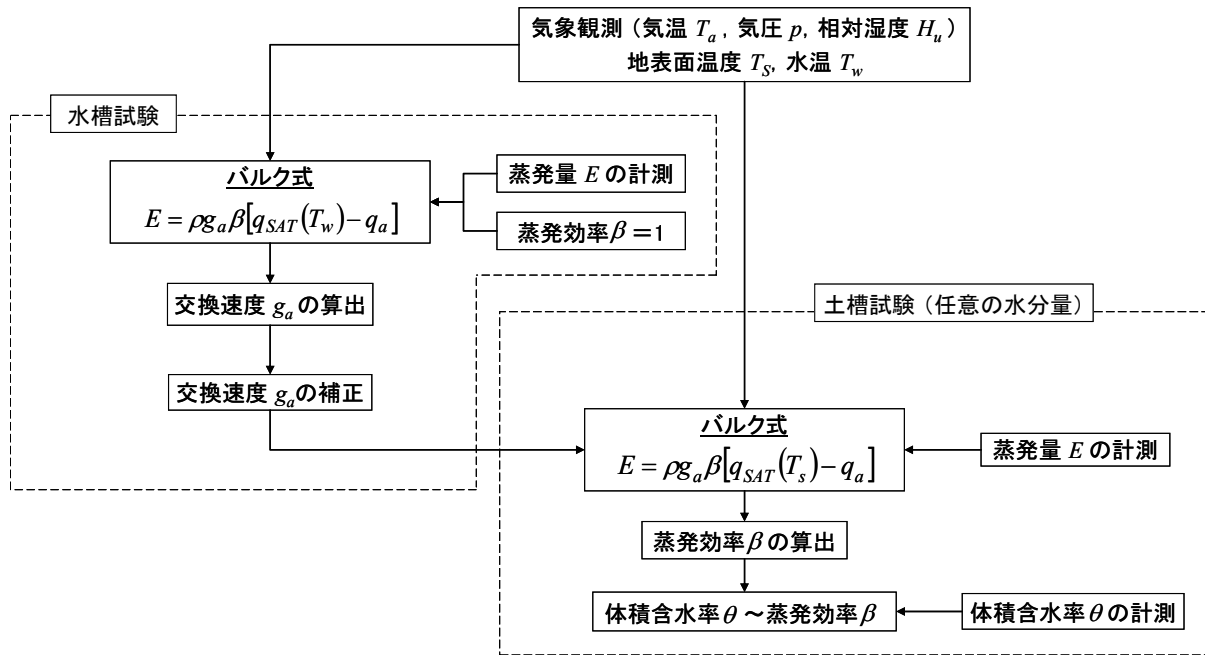


図-10 交換速度と蒸発効率の算定フロー図（改良法）

表-7 各相の密度と質量比熱

	密度 ρ [kg/m ³]	質量比熱 c [kJ/(kg・K)]
土粒子	2652	0.84
水	1000	4.18
空気	1.293	1.00

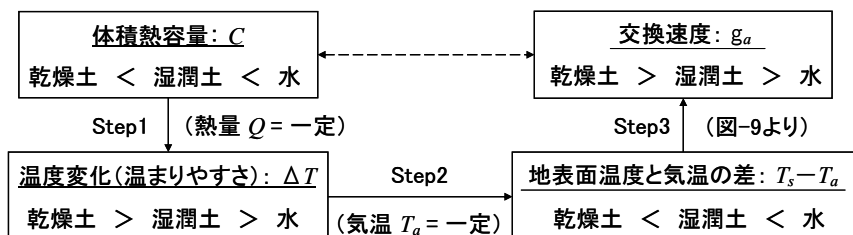


図-11 体積熱容量，温度変化（温度差），交換速度の関係

くなり(図-11のStep2に対応), 図-9の温度差と交換速度の関係に注目すると交換速度は乾燥土のほうが湿潤土よりも大きくなる(図-11のStep3に対応).

以上の関係をまとめると図-11のように示される. この関係を利用して, 本論文では簡単のために体積熱容量 C と交換速度 g_a が反比例関係であると定義すると, 土槽試験で用いる交換速度 $g_{a,soil}$ は式(9)のように表される.

$$g_{a,soil} = \frac{C_{water}}{C_{soil}} g_{a,water} \quad (9)$$

ここで, C は体積熱容量, g_a は交換速度であり, 添え字 $soil, water$ はそれぞれ土槽と水槽を意味する.

4.2 室内土槽試験

図-10の改良法と式(9)の妥当性を検証するため, 前章の試験条件(表-6を参照)に合わせた試験を実施する. 今回は図-4の土槽の隣に水槽(土槽と同じ容器)を置いて, 水面に熱電対を設置して水温を計測する. なお, 水深は土槽高と同じ2cmとする.

計測結果例として, 図-12に初期体積含水率0.089(飽和度20%)の蒸発量(水槽, 土槽), 体積含水率(深さ1cm), 温度(気温, 地温(深さ0,1cm), 水温), 気圧, 相対湿度の時系列変化を示す. 体積含水率は供試体作製時の影響を受けたと考えられ, 初期値は条件値と異なっていることを断った上で整理する. 図-12の蒸発量と体積含水率の相関性が高くない理由は3.2節でも述べている. 一方, 地温(深さ0,1cm)と水温が気温に漸近する傾向にある. この結果より, 試験開始直後から土槽では地表面から大気に向かって顕熱が輸送され, 水槽では大気から水面に向かって顕熱が輸送されていると解釈できる.

次に, 式(2)のバルク式に注目して, 水槽と土槽の温度差($T_w - T_a, T_s - T_a$)と水蒸気密度差($\rho q_{sat}(T_w) - \rho q_a, \rho q_{sat}(T_s) - \rho q_a$)の算定結果をそれぞれ図-13と図-14に示す.

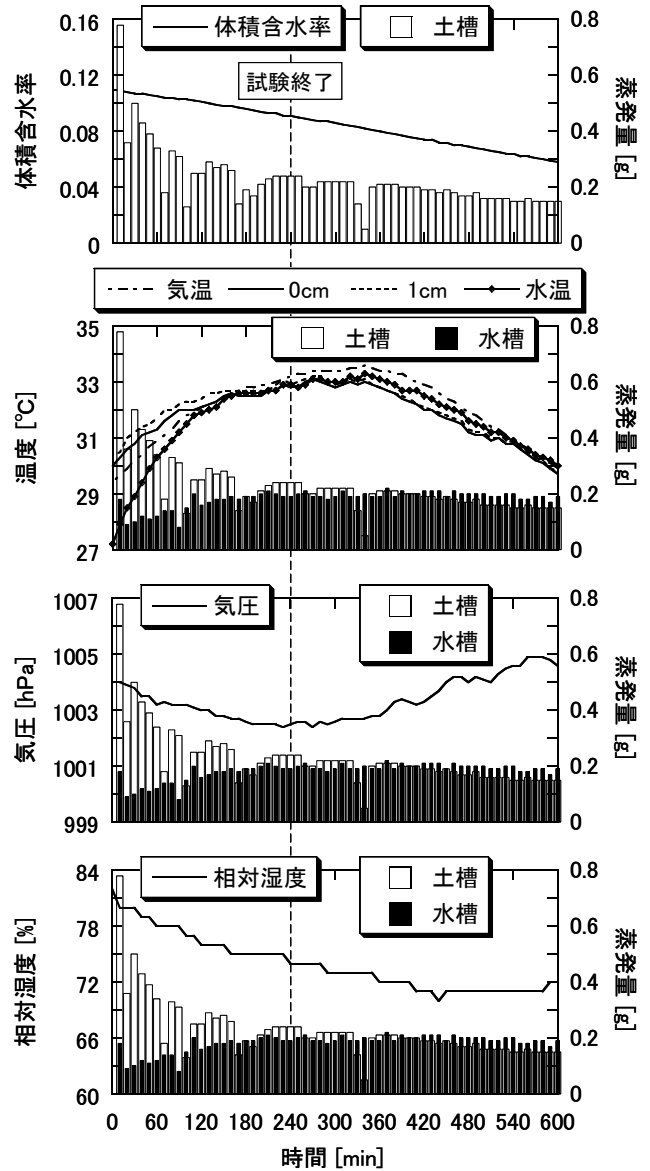


図-12 計測結果(体積含水率0.089(飽和度20%))

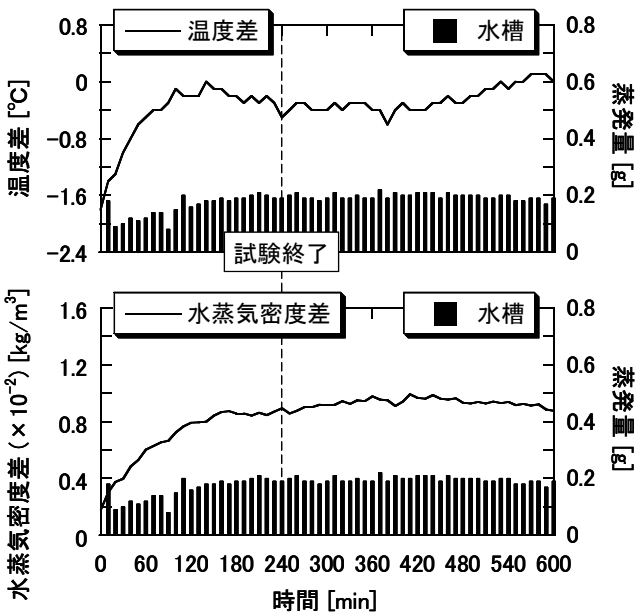


図-13 温度差と水蒸気密度差の時系列変化(水槽)

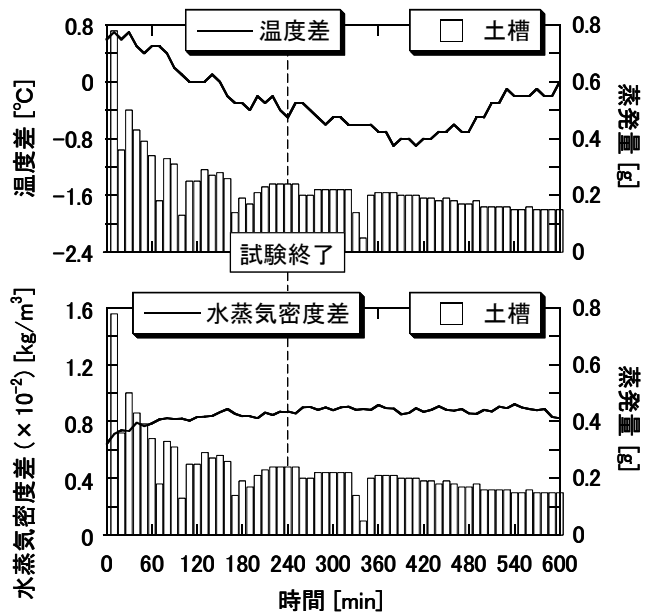


図-14 温度差と水蒸気密度差の時系列変化(土槽)

はじめに、図-13の水槽の結果を考察する。試験開始より水温と気温の差($T_w - T_a$)が負値から正値へと推移していることから、図-9に基づくと蒸発効率 $\beta=1$ (水面のため)に該当する曲線より交換速度 g_a は小さくなると推察される。また、該当する時間帯では蒸発量の増加とともに水蒸気密度差は大きくなっている。以上より、式(2)のバルク式は良好に満たしていると解釈される。次に、図-14の土槽の結果について検討する。試験開始より温度差($T_s - T_a$)は正値から負値へと推移し、蒸発量は減少している。一方、水蒸気密度差は微増しているにもかかわらず蒸発量は減少しているため、蒸発量は蒸発効率 β (地表面の湿潤度)の影響を受けたと推測される。

4.3 蒸発効率の算定結果と考察

図-15に任意の水分量に対する蒸発効率 β の算定結果を示す。なお、従来法とは近藤らの方法⁷⁾をもとに交換速度 g_a を式(6)の温度差(地表面温度 T_s と気温 T_a)の関係式から求めて蒸発効率 β を算定する方法(図-2を参照)であり、改良法とは水槽を用いて式(9)から交換速度 g_a を求めて蒸発効率 β を算出する方法(図-10を参照)である。また、体積含水率 θ と蒸発効率 β は試験終了(3.2節の条件と同等)までの平均値として整理し、3.3節でも述べたように体積含水率は蒸発量からの算出ではなく土壌水分計による計測結果を採用する。同じ水分量の試験結果と比較するために体積含水率0.045, 0.089, 0.178はそれぞれ4回, 4回, 2回実施する。

図-15より、改良法のほうが従来法よりもばらつきは小さく、改良法は既往の成果と同様、体積含水率 θ の増加に伴い蒸発効率 β も増えていることが認められる。ここで、結果のばらつきに関して考察するために3.3節でも述べた交換速度 g_a の変動に注目する。図-16に従来法と改良法から算出した交換速度の時系列変化を示す。図-16より、改良法から算出した交換速度のほうが従来法よりも安定している。つまり、交換速度の変動が任意の水分量に対する蒸発効率 β の算定精度に寄与していると解釈される。このように、交換速度 g_a は従来法のように温度差の関係のみで表すのではなく、水と土の体積熱容量 C に注目した改良法を用いることが望ましいと考えられる。

4.4 改良法に基づく蒸発量の測定方法の将来展望

図-10に示した改良法は蒸発量の測定方法として新たに提案できる可能性がある。水槽を用いることで式(2)のバルク式における未知パラメータの一つである交換速度 g_a を直接求めることができ、未知パラメータは蒸発効率 β のみとなる。ここで、図-15の「体積含水率 θ ～蒸発効率 β 」関係を具体的に表すためにニューラルネットワークの誤差逆伝播法^{17),18)}(詳細は3.2節, 学習条件は表-8を参照)を用いると、図-17の学習結果のように推定できる。以上より、未知パラメータの交換速度 g_a と蒸発効率 β が既知となったため、式(2)のバルク式より蒸発量を求めること

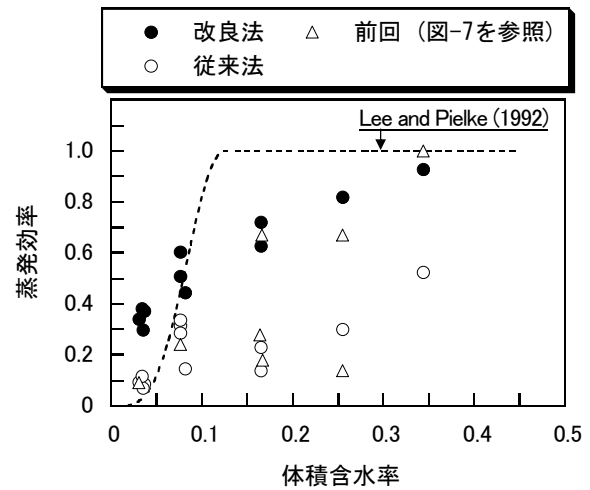


図-15 体積含水率と蒸発効率の関係

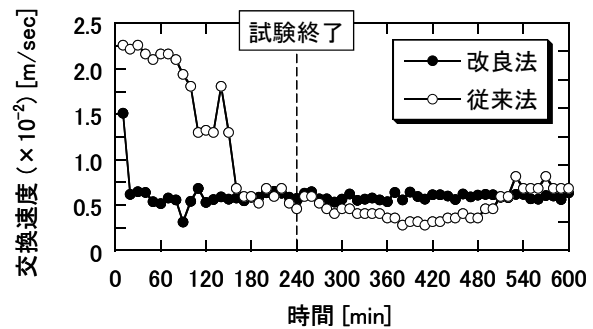


図-16 従来法と改良法から算出した交換速度の時系列変化(図-12の計測結果: 体積含水率0.089)

表-8 誤差逆伝播法の学習条件

目標誤差 E_t	0.0007
教師値と出力値の差 E_p	0.0001 (1%)
中間層のニューロン数	2
学習率 ϵ	0.1
慣性係数 α	0.9

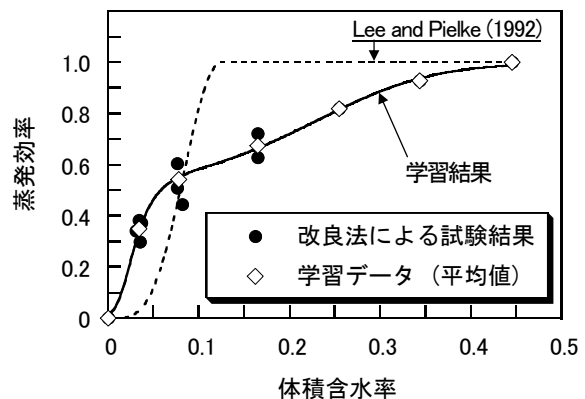


図-17 体積含水率と蒸発効率の関係(学習結果)

ができる。つまり、改良法に基づく蒸発量の測定方法は水の蒸発量を直接測定するライシメータ法と気象観測データや地温などから推定するバルク法の併用型モニ

タリングシステムとして位置付けられ、蒸発量の測定方法として新たに展開できる可能性がある。

次章では、本システムの妥当性を検討するため、4.2節で検討した改良法をもとにモデル土槽による蒸発量の計測結果と計算結果について比較・検討する。

5. 室内土槽試験による蒸発量の推定評価

本章では、初期飽和度を 80% (体積含水率 0.357) と設定したモデル土槽 (前章までの試験と同じ形状・条件) を対象に蒸発量を計算して測定結果と比較する。図-18 に蒸発量 (水槽, 土槽), 土槽の体積含水率 (深さ 1cm), 温度 (気温, 水温, 地表面温度), 気圧, 相対湿度の時系列変化を示す。なお、計測間隔は 10 分、計測終了は 4 日後とした。図-18 より、水槽と土槽からの蒸発量の変動は温度変化の影響を受けていることが確認される。

図-19 に蒸発量の計算結果の時系列変化を、図-20 に計測結果と計算結果の関係を示す。ここで、蒸発量の計算に用いる交換速度 g_a の算定方法の違いについて検討するため、地表面温度 T_s と気温 T_a の差で表した従来法 (図-2 を参照) を case-1、水と土の体積熱容量 C に基づいた改良法 (図-10 を参照) を case-2 と定義する。図-19 と図-20 より、case-2 (改良法) のほうが case-1 (従来法) よりも推定精度は良好であることが分かる。このような結果が得られた理由を case-1 と case-2 の交換速度 g_a の変動に注目して、図-21 にそれぞれの交換速度の時系列変化を示す。図-21 より、case-1 (従来法) は飽和度 100% の土による試験結果から得られた関係式 (式(6)を参照) を用いているために交換速度 g_a は過大となり、結果として蒸発量の計算結果が計測結果よりも大幅に多くなったと推測される。つまり、水と土の体積熱容量 C に注目した改良法に基づいた蒸発量の測定方法 (ライシメータ法

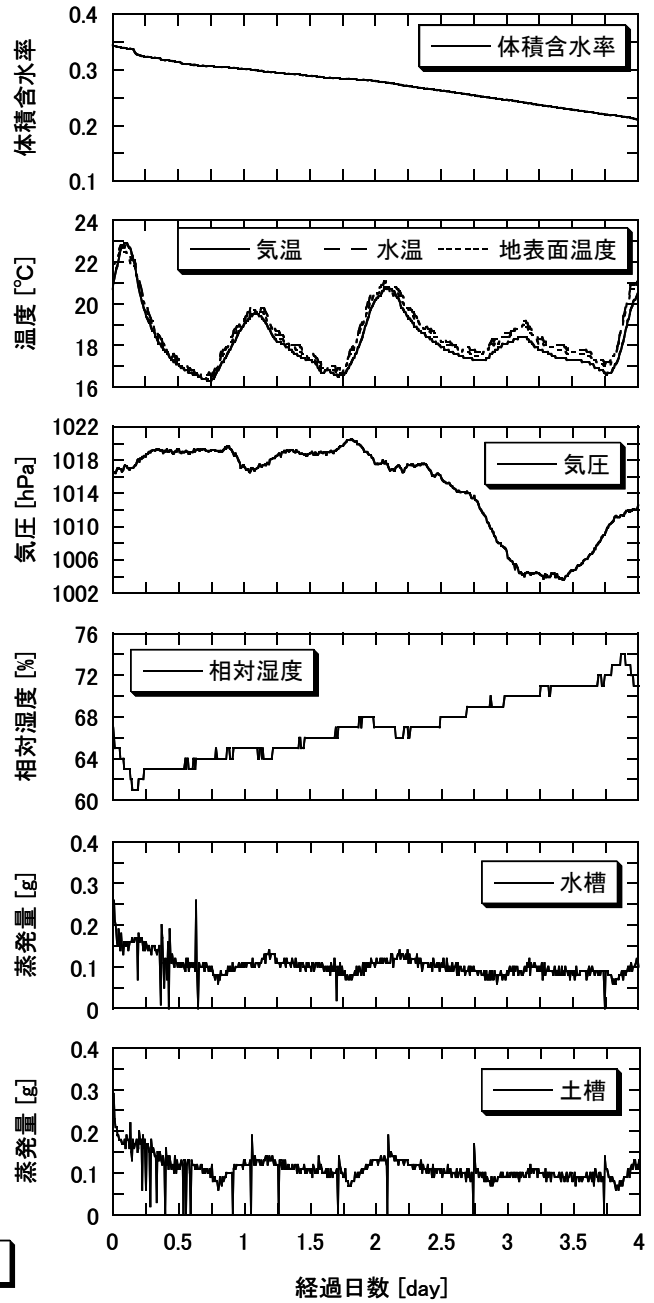


図-18 計測結果

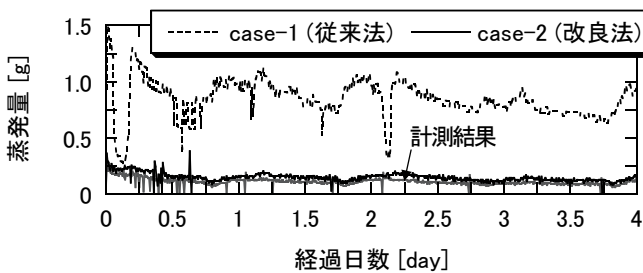


図-19 蒸発量の計算結果(case-1, case-2)

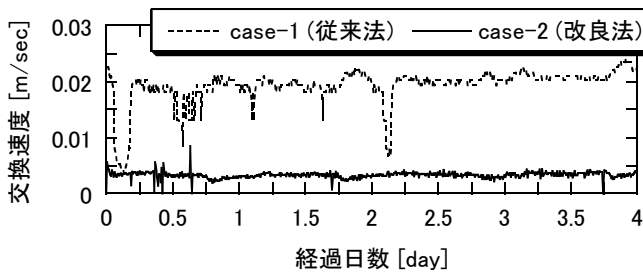


図-21 交換速度(case-1, case-2)の時系列変化

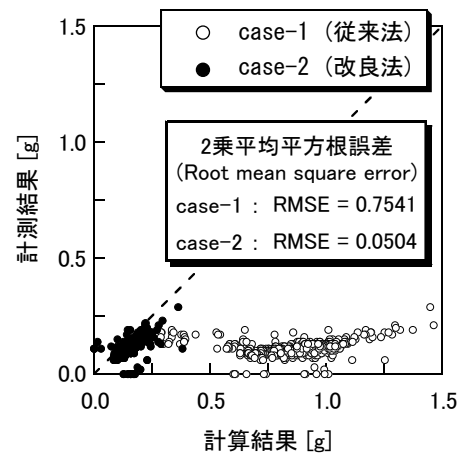


図-20 蒸発量の計算結果と計測結果の関係

とバルク法の併用型モニタリングシステム)のほうが有効であると判断される。

6. おわりに

本論文では、最表層土の蒸発量を推定するために地盤内の水分変動を考慮したバルク式の β 法を採用し、室内土槽を対象に蒸発量の推定手法について議論した。はじめに、バルク法の未知パラメータである交換速度 g_a と蒸発効率 β の算定に関して近藤らの方法⁷⁾で検討し、算定方法の改良を試みて改良法の有効性について考察した。そして、この改良法をもとに蒸発量測定方法の将来展望について述べ、未知パラメータの交換速度 g_a と蒸発効率 β が既知となった際のバルク法の有効性について蒸発量の計測結果と計算結果を用いて考察した。以下、得られた知見を述べる。

- (1) 交換速度 g_a は地表面温度 T_s と気温 T_a の差のみの関係で表すことが容易ではないことを試験結果と文献をもとに検討できた。
- (2) 水槽を追加して水と土の体積熱容量 C に注目した改良法を用いることで、任意の水分量に対する蒸発効率 β の算定結果のばらつきを抑えることができ、既往の成果と同様の傾向を表現できた。
- (3) 水槽を用いた改良法による蒸発量の測定方法は、ライシメータ法とバルク法の併用型モニタリングシステムとして提案できる可能性がある。
- (4) 既知となった交換速度 g_a と蒸発効率 β を用いて室内土槽試験より蒸発量を求めた結果、交換速度を温度差の関係で表す従来法よりも水と土の体積熱容量 C で補正する改良法を採用したほうが推定精度は良好であることが確認できた。

以上の知見をもとに今後の課題と展開を示し、さらに研究を進める予定である。

- (1) 体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係を蒸発試験から求めるのではなく、簡易な土質試験結果を利用して算定する土質力学的なアプローチも視野に入れることが望まれる。そのためには、試験条件や土の種類を変えた試験結果をより多く蓄積する必要がある。
- (2) バルク式の未知パラメータ(交換速度と蒸発効率)を算定するための試験方法(試験時の水分量制御など)について検討することで、算定結果の精度は向上する可能性がある。
- (3) 今回新たに提案できる可能性のある蒸発量の測定方法(ライシメータ法とバルク法の併用型)を屋外に適用し、屋外測定の課題を明らかにする必要がある。このとき、屋外特有の条件である風速と蒸発量の関係についても議論する必要がある。

参考文献

- 1) 岡田憲治：土壌雨量指数，測候時報，気象庁，第 69

巻，5 号，pp.83-84，2002。

- 2) 酒匂一成，深川良一，岩崎賢一，里見知昭，安川郁夫：降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング，地盤工学ジャーナル，Vol.1，No.3，pp.57-69，2006。
- 3) 里見知昭，酒匂一成，安川郁夫，深川良一：主成分分析を用いた降雨に対する重要文化財後背斜面のリアルタイム崩壊危険度評価，土木学会論文集 C，Vol.65，No.2，pp.564-578，2009。
- 4) 日本気象学会：気象研究ノート，地表面フラックス測定法，第 199 号，pp.98-104，2001。
- 5) C. W. Thornthwaite and B. Holzman: The determination of evaporation from land and water surfaces, *Monthly Weather Review*, Vol.67 (1), pp.4-11, 1939.
- 6) 竹内清秀，近藤純正：大気科学講座 I，地表に近い大気，東京大学出版会，pp.93-94，1981。
- 7) J. Kondo, N. Saigusa and T. Sato: A parameterization of evaporation from bares soil surfaces, *J. Appl. Meteor.*, Vol.29, pp.385-389, 1990.
- 8) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，pp.194-195，1994。
- 9) 近藤純正：地表面に近い大気科学，東京大学出版会，p.142，2000。
- 10) 近藤純正：前掲 9)，pp.3-5。
- 11) 近藤純正：前掲 9)，p.143。
- 12) J. Kondo and S. Ishida: Sensible heat flux from the earth's surface under natural convective conditions, *J. Appl. Meteor.*, Vol.54, p.501, 1997.
- 13) J.W. Deardorff: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys. Res.*, Vol.83, pp.1889-1903, 1978.
- 14) T. J. Lee and R. A. Pielke: Estimating the soil surface specific humidity, *J. Appl. Meteor.*, Vol.31, pp.480-484, 1992.
- 15) 東山勇，石田朋靖：pF の基本的意味(その 2)，土と基礎，Vol.34，No.12，pp.71-76，1986。
- 16) D. E. Rumelhart, J. L. McClelland, the PDP Research Group: Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition, *MIT Press*, Vol.1, No.2, 1986.
- 17) D. E. Rumelhart, G. E. Hinton and R. J. Williams: Learning representations by back-propagating errors, *Nature*, Vol.323, pp.533-536, 1986.
- 18) J. Kondo and T. Watanabe: Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, pp.2183- 2199, 1992.
- 19) 宮崎毅，長谷川周一，粕淵辰昭：土壌物理学，朝倉書店，pp.73-74，2005。

(2010 年 3 月 9 日受付)