

地表面種類と表面温度を考慮した自然対流下における 蒸発効率の算定方法に関する検討

鹿児島大学大学院, 日本学術振興会特別研究員 DC 学生会員 ○軸屋 雄太
鹿児島大学学術研究院 正会員 酒匂 一成
立命館大学 正会員 伊藤 真一

1. はじめに

降雨に起因した斜面災害への対策として, 土砂災害警戒情報や交通規制などの警戒が実施されている. 警戒解除に向けた数値シミュレーションでは, 境界条件として地表面蒸発量の把握が重要となる. 蒸発量は, バルク法¹⁾を用いて, 一般的な気象データと地表面温度から推定できる. バルク法において, 土質条件の影響は蒸発効率によって評価される. これまでに, 室内試験に基づく蒸発効率の算定方法²⁾が提案されているが, その中で, バルク法のパラメータである交換速度の自然対流下における算定方法が課題とされている. そこで, 本研究では, 自然対流下を対象として, 地表面種類と表面温度を考慮した交換速度の算定方法を新たに提案する. さらに, 提案する方法で得られた交換速度を用いて蒸発効率を算定し, 既往成果^{2), 3)}との比較から, 蒸発効率の算定結果の妥当性を検討する.

2. バルク法の概要

バルク法を用いた単位時間・単位面積あたりの蒸発量 E の推定式 (バルク式) は, 次式で表せる.

$$E = \rho g_a \beta [q_{\text{sat}}(T_s) - q] \quad (1)$$

ここに, ρ : 空気密度, g_a : 交換速度, β : 蒸発効率, $q_{\text{sat}}(T_s)$: 地表面温度 T_s に対する飽和比湿, q : ある高度での大気の比湿. 交換速度 g_a は地表面と大気の間で空気塊が交換される速度を意味する. 蒸発効率 β は, 地表面での蒸発の起こりやすさを表し, 土中の水分状態に応じて 0~1 の範囲で値を取る (例えば, 乾燥土であれば $\beta = 0$, 飽和土であれば $\beta = 1$). Lee ら³⁾は, 以下に示す実験結果に基づいた β の関数を提案している.

$$\beta = \begin{cases} \frac{1}{4} \left[1 - \cos \left(\frac{\theta}{\theta_{\text{fc}}} \pi \right) \right]^2 & \theta < \theta_{\text{fc}} \\ 1 & \theta \geq \theta_{\text{fc}} \end{cases} \quad (2)$$

ここに, θ : 体積含水率, θ_{fc} : 圃場容水量 (一般に土中水ポテンシャルが -6.19 kPa (pF = 1.8) の水分量に相当).

3. 室内試験による交換速度と蒸発効率の算定

バルク式のパラメータにおいて, 交換速度 g_a と蒸発効率 β は観測データから直接算定できない. そこで, Sako ら²⁾は自然対流下を対象として, 室内試験に基づく g_a と β の算定方法 (以下, 従来法) を提案した. 室内試験では, 気象観測と同時に水槽試験と土槽試験を実施し, 両槽における蒸発量と表面温度を計測する. 水表面は蒸発効率 $\beta = 1$ と定義されるため, バルク式から, 水槽における交換速度 $g_{a, \text{water}}$ が算出される. このとき, 土槽と水槽で交換速度が等しいと仮定することで, 土槽における交換速度 $g_{a, \text{soil}}$ を算定している. さらに, 得られた $g_{a, \text{soil}}$ をバルク式に代入することで, 蒸発効率 β が算出される.

豊浦砂 (土粒子密度 2.640 Mg/m³, 間隙比 0.750, 圃場容水量 0.055) を土試料に用いて, 室内試験を実施した. 土槽と水槽には, 内径 15.5 cm, 高さ 2 cm の塩化ビニール製円筒容器を用いた. 土槽の供試体は, 初期飽和度 $S_{r,0}$ を 80, 60, 40 % に調整した試料を, 設定した間隙比に合わせて底面から 1 cm 毎に均一に締固めて作製した. さらに, 自然対流下で試験を実施するため, 土槽と水槽の表面を投光器 (180 W) で温めた. 計測間隔は 15 分とし, 計測開始後 12 時間の経過を以て試験終了とした.

図-1 に, 従来法により算出された体積含水率と蒸発効率の関係を示す. 蒸発効率 β の水分依存性を図中の I から III の範囲に分けて考察する. 範囲 I は試験開始後初期であり, 試験開始時の不安定な試験環境に影響を受け, β が 1 を大きく上回っていると思われる. そのため, 以降, 範囲 I を議論の対象としない. 範囲 II と範囲 III では, 試験結果と Lee らの関数による結果が近い傾向を示している. しかし, 範囲 II に着目すると, β がわずかに 1 を上回る値で安定している. これについて, 図-2 に示す, 初期飽和度 60 % での温度と蒸

キーワード 蒸発, バルク法, 蒸発効率, 交換速度, 不飽和土

連絡先 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40 TEL080-3957-9753

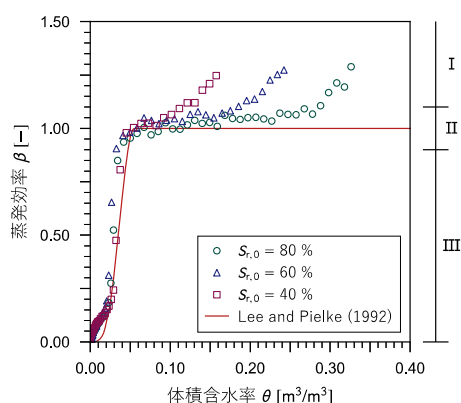


図-1 体積含水率と蒸発効率の関係（従来法）

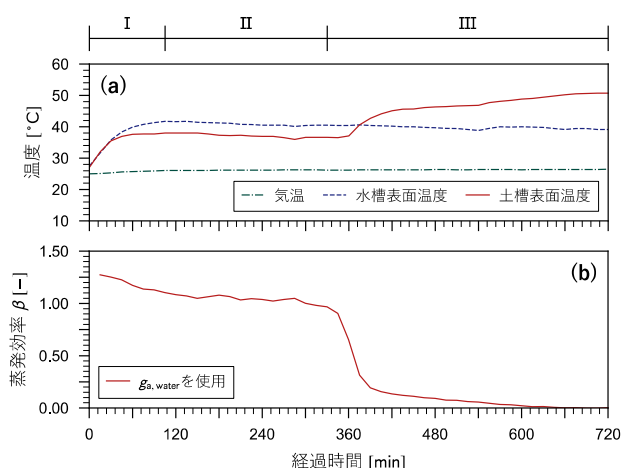


図-2 計測値の時系列変化（初期飽和度 60 %）

蒸発効率の時系列変化を用いて考察する。図-2(a)より、範囲Ⅱでは、両槽で表面温度が異なっている。従来法では、土槽における交換速度の算定に際し、土槽と水槽で交換速度が等しいと仮定しており、両槽での地表面種類や表面温度の違いが考慮されていない。その結果、 β が 1 を上回ったと推測される（図-2(b)）。

4. 交換速度の算定方法の改良と検証

従来法では、土槽における交換速度の算定方法を改良する必要がある。そこで、土槽と水槽での地表面種類と表面温度の違いを補正した方法を提案する。近藤の提案する交換速度 g_a の関係式⁴⁾を、以下に示す。

$$g_a = b \cdot (T_s - T_a)^{1/3} \quad (3)$$

ここに、 T_a ：気温、 b ：比例定数（地表面種類に応じて決定される）。上式について、土槽と水槽の比をとることとで、 $g_{a,soil}$ は次式で表される（以下、提案法）。

$$g_{a,soil} = \frac{b_{soil}}{b_{water}} \cdot \left(\frac{T_{ss} - T_a}{T_{ws} - T_a} \right)^{1/3} \cdot g_{a,water} \quad (4)$$

ここに、 T_{ss} ：土槽表面温度、 T_{ws} ：水槽表面温度、添え字 soil と water は土槽と水槽を意味する。今回、近藤が示す目安⁴⁾を参考に、 $b_{soil} = 0.0012$ と $b_{water} = 0.0011$ を

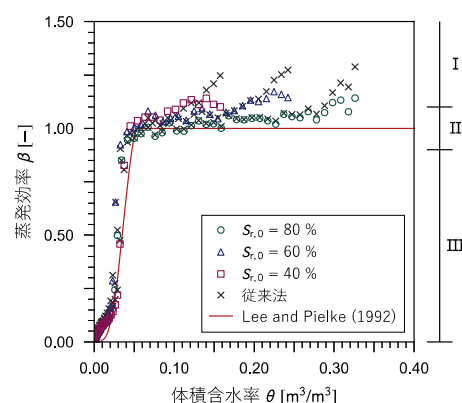


図-3 体積含水率と蒸発効率の関係（提案法）

それぞれ使用して、蒸発効率 β を算定した。

図-3 に、提案法により算出された体積含水率と蒸発効率の関係を示す。範囲Ⅱと範囲Ⅲにおいて、提案法と従来法でほとんど同様の結果となった。土槽と水槽で表面温度が異なることから（図-2(a)）、表面温度と地表面種類の違いが互いの影響を相殺した結果と予想される。また、範囲Ⅱでは、蒸発効率 β が 1 を上回る値で安定しており、その変域 ($0 \leq \beta \leq 1$) を満足していない。これは、比例定数 $b_{soil,water}$ の決定方法が影響していると予想される。今後、地表面種類に応じた適切な $b_{soil,water}$ の決定方法について検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では、自然対流下を対象に、地表面種類と表面温度を考慮した交換速度の算定方法を提案した。豊浦砂の場合、従来法と提案法で、蒸発効率の算定結果に大きな違いは見られなかった。そのため、今後、他の土試料で同様の検討を行うとともに、新たな交換速度の算定方法についても検討する必要がある。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費（20H00266, 22J14018）の助成を受けた。ここに謝意を示す。

参考文献：

- 1) 近藤純正：水環境の気象学 ―地表面の水収支・熱収支―，朝倉書店，pp.194-198, 1994.
- 2) K. Sako, M. Moriwa and T. Satomi: Experimental consideration on evaporation efficiency β of unsaturated sandy soil surface, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(4), pp.226-229, 2016.
- 3) T. J. Lee and R. A. Pielke: Estimating the soil surface specific humidity, *J. Appl. Meteor.*, 31, pp.480-484, 1992.
- 4) 近藤純正：地表面に近い大気科学 理解と応用，東京大学出版会，pp.142-143, 2000.