粒子径に着目したバルク法における蒸発効率の土中水分依存性モデルに関する検討

A STUDY ON A MODEL OF SOIL MOISTURE DEPENDENCE OF EVAPORATION EFFICIENCY IN THE BULK METHOD WITH A FOCUS ON PARTICLE SIZE

山田 結斗[1]・軸屋 雄太[2]・鈴木 素之[3]
Yuto YAMADA, Yuta JIKUYA and Motoyuki SUZUKI

[1]山口大学大学院創成科学研究科（〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1）
E-mail: g038veu@yamaguchi-u.ac.jp
[2]山口大学大学院創成科学研究科（〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1）
E-mail: yuta-j@yamaguchi-u.ac.jp
[3]山口大学大学院創成科学研究科（〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1）
E-mail: msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp

***Key Words**: evaporation, water vapor transport, bulk method, particle size*

1. はじめに

近年，豪雨を誘因とした斜面崩壊の激甚化が進んでいる．その対策として，土砂災害防止施設の整備に代表されるハード対策と，警戒避難体制の構築に代表されるソフト対策が実施されている．しかし，全ての危険斜面に対してハード対策を施すことは現実的に困難であるため，ハード対策と並行してソフト対策の強化を図ることが不可欠である．主要なソフト対策として，土砂災害警戒情報の発表や交通規制などの警報運用が挙げられる．従来，警報等の発令基準は，主として土壌雨量指数や 60 分間積算雨量などの雨量指標に基づき設定されてきた．一方で，降雨後の警報解除には技術的判断を要する場合も多く [1]，解除判断に係る管理者の負担は大きいのが現状である．一般に，降雨後の斜面安定性は地盤内から水分量が減少するに伴い回復するため，地盤内水分量を低下させる地表面蒸発量は警報解除を合理的に判断するための有効な指標となり得る．

地表面蒸発量の推定手法の一つに，バルク法 [2]がある．バルク法では，地表面からの蒸発の生じやすさを表す蒸発効率が明らかであれば，一般的な気象観測データと地表面温度を用いて，簡易に地表面蒸発量を推定できる．ここで，蒸発効率は土中水分量の関数であり，その関数形は土の種類や締まり具合などの土質条件に依存して変化する [3]．これまで，蒸発効率を表現するモデル関数は様々提案されてきたが [4)-6)]，いずれも経験的なものであり，未知の土質に対する予測性が十分であるとはいえない．

そこで本研究では，バルク法における蒸発効率に着目し，蒸発効率～土中水分量の関数形（後述する土中水分依存性）を土質条件から推定するための新たなモデル関数を提案した．さらに，モデルに導入したパラメータと粒子径の関係について，比較的均一な粒径を有したガラスビーズおよび珪砂を用いた室内蒸発試験の結果に基づき検討した．加えて，上述の試料よりも広い粒度分布を有する 2 種類のシラス混じり土についても，同様の検討を行った．

2. 蒸発効率の土中水分依存性モデル

(1) 蒸発効率の概要

バルク法（β 法 [2]）では，単位時間・単位面積当たりの地表面蒸発量 E を次のバルク式により算定する

ことができる．

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

ここに，ρ：空気密度，g_a：交換速度，β：蒸発効率，$q_{sat}(T_s)$：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である．交換速度 g_a および蒸発効率 β を除くバルク法の各パラメータは，単一高度の気象観測データと地表面温度から直接得られる．そのため，事前に g_a と β を得ておけば，簡易な観測データのみから地表面蒸発量を推定できる．交換速度 g_a とは，地表面とその直上の大気との間で空気塊が交換される速度を表しており，主に風速や気温などといった大気条件に応じて変化する関数である [7]．そのため，本研究では β に着目する．

蒸発効率 β は，地表面からの蒸発の生じやすさを表す無次元パラメータであり，土中の水分状態に応じて 0～1.0 の範囲で値を取る（例えば，乾燥状態では $\beta = 0$，飽和状態では $\beta = 1.0$）．Lee and Pielke[6]によって得られた体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係（蒸発効率の土中水分依存性）を，**図-1** に示す．この関係は，ある土中水分量を境に 2 つの傾向，Ⅰ）β が 1.0 で安定している傾向，Ⅱ）β が 1.0 から低下し始めて土中水分量の低下に伴い 0 に近づく傾向，に分けられる．これらの傾向は，粒度分布や間隙比などの土質条件によって異なることが知られており [3]，本研究では粒子径との関係について検討する．

(2) 蒸発効率の土中水分依存性モデルの構築

本研究では，体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係をモデル化した．**図-1** にも示すように既往の試験データ [5), 6)]の観察より，β が 1 から低下する過程において，β の θ に対する変化率は増加し，ある θ を境に減少へ転じる挙動が確認された．そこで，β の θ に対する変化率 $d\beta/d\theta$ が，飽和状態からの β の低下量（$1-\beta$）に応じて，頂点(p, q)を有する上に凸の二次関数で表されると仮定した（式(2)）．

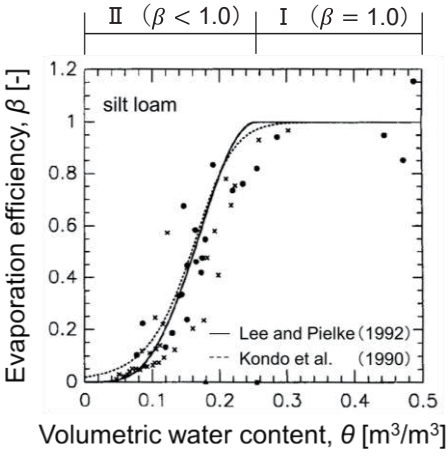


図-1　体積含水率～蒸発効率の関係 [6)に加筆修正]

$$\frac{d\beta}{d\theta} = -\frac{q}{p^2}(1-\beta)\left[(1-\beta) - 2p\right] \quad (2)$$

ここで，$d\beta/d\theta$ を常に正とするため，頂点の位置は $0.5 < p < 1.0$ かつ $0 < q$ の範囲に設定した．式(2)に示す微分方程式に初期条件 $\beta(\theta = 0) = 0$ を与えて解くことにより，式(3)に示す蒸発効率の土中水分依存性のモデル関数を導出した．

$$\beta = 1 - 2p\left[1 - (1-2p)\cdot\exp\left(\frac{2q}{p}\theta\right)\right]^{-1} \quad \left(0 \le \theta \le \theta_{sat}\right) \quad (3)$$

ここに，θ_{sat} は飽和体積含水率であり，p および q は土質条件に依存するモデルパラメータとなる．

3．室内蒸発試験

(1) 試験方法

体積含水率と蒸発効率の関係を得るための試験方法（室内蒸発試験手法）は，Kondo et al.[5)]により提案された．この手法では，風速により蒸発を促進する強制対流条件を対象としており，気象観測と同時に土槽からの蒸発量を計測する．その際，風速の制御に加えて，飽和供試体を作製する必要があり，実験装置および実験条件の管理が複雑となる．その後，里見ら [8)]により，飽和域の土槽計測を，水槽からの蒸発量に代替する手法が提案された．さらに，Sako et al.[9)]は，両槽表面への輻射加熱を導入することで自然対流条件下での蒸発を促し，風速の制御を必要としない簡易な試験方法を提案した．本研究では，比較的簡易に実施可能であることから，Sako et al.の手法を採用した．

図-2 に示すように，室内蒸発試験装置は，気象観測装置，土槽試験および水槽試験装置から構成される．本試験では，気象観測（気温 T_a，気圧 P，相対湿度 h_r，風速 U）と並行して土槽試験および水槽試験を実施した．土槽試験では，側面と底面に断熱材を貼付けた内径 12.65 cm，高さ 2.00 cm のアクリル製円筒容器内に供試体を作製した．容器上面に投光器による輻射熱を与えて蒸発を促進しつつ，蒸発量および表面温度を一定時間間隔で計測した．一方，水槽試験では，供試体の代わりに蒸留水を充填し，同様の計測を行った．

以下で，蒸発効率の土中水分依存性を得るための計算フローを説明する．水槽試験では，常に蒸発効率 $\beta = 1.0$ と定義されるため，水槽試験の計測データと気象観測データをバルク式に代入し，水槽における交換速度 $g_{a,water}$ を算出した．このとき，土槽と水

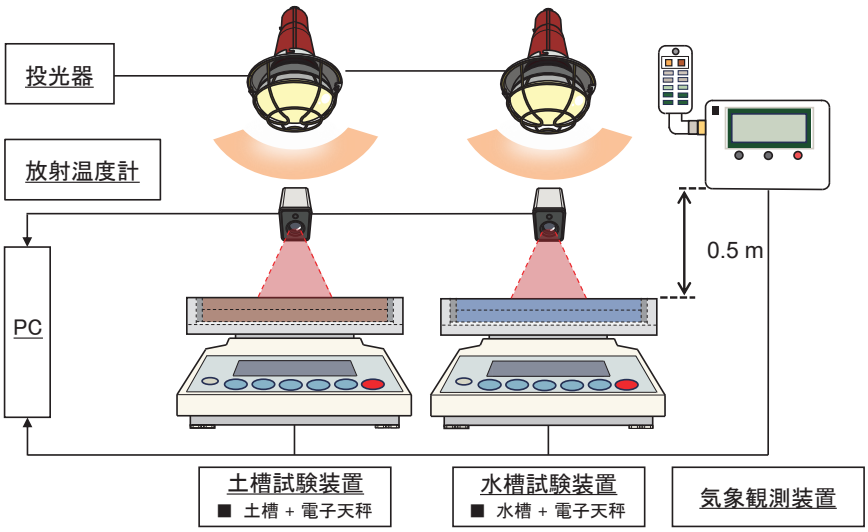


図-2　室内蒸発試験装置の概要

表-1　ガラスビーズ（GB）の基本的物性値および計測条件一覧（平均粒径は粒径範囲の中央値とした）

	粒径範囲 [mm]	平均粒径 [mm]	ガラスビーズの密度 [Mg/m^3]	相対密度 D_r [%]	初期飽和度 $S_{r,0}$ [%]
GB-200	2.0 ± 0.2	2.0	2.500	50.0	66.3
GB-085	0.710～0.990	0.85	2.500	47.8	67.8
GB-043	0.350～0.500	0.43	2.500	49.4	63.8
GB-030	0.250～0.355	0.30	2.500	47.8	64.9
GB-017	0.150～0.180	0.17	2.500	49.3	66.3
GB-010	0.090～0.106	0.10	2.500	50.9	67.4
GB-007	0.063～0.075	0.07	2.500	49.4	65.9
GB-005	0.038～0.053	0.05	2.500	50.3	66.0

槽で交換速度が等しいと仮定し [9]，土槽における交換速度 $g_{a,soil}$ を取得した．その後，土槽試験の計測データと気象観測データに加え，得られた $g_{a,soil}$ をバルク式に代入することで，蒸発効率 β を算出した．土槽の重量変化から体積含水率 θ を算出し，体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係を求めることで，蒸発効率の土中水分依存性として整理した．さらに，この関係を最小二乗法により式(3)にフィッティングすることで，モデルパラメータ p および q を決定した．

(2) 試験条件

試料の代表粒径とモデルパラメータの関係を検討するため，粒径が比較的均一な試料として，球形に近い形状を有するガラスビーズおよび実際の土粒子である珪砂を用い，室内蒸発試験を実施した．また，粒径が不均一な試料として，斜面表層崩壊の発生リスクが高いとされるシラス混じり土を用いた．シラス混じり土については，東俣シラス（鹿児島県東俣町で採取されたシラス混じり土）および郡山シラス（鹿児島県郡山町で採取されたシラス混じり土）を対象とし，供試体寸法を考慮して，いずれも 2 mm ふるい通過試料を用いた．**表-1** にガラスビーズ，**表-2** に珪砂およびシラス混じり土の基本物性値と計測条件をそれぞれ示す．また，珪砂およびシラス混じり土の粒径加積曲線を**図-3** に示す．初期飽和度 70%を目標に調整した試料を，相対密度 50%となるように均一に締固めることで，供試体を作製した．また，各試験は別日に実施しており，計測は 30 分間隔で行い，蒸発量の変化が収束した時点まで継続した．また，蒸発に伴う水槽試験での水位低下を考慮し，水槽には概ね 1 日間隔で蒸留水を補充した．

(3) ガラスビーズおよび珪砂の試験結果

ガラスビーズおよび珪砂について，室内蒸発試験から得られた体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係を**図-4** に示す．β は θ の低下に伴い，Ⅰ）β がほぼ一定値を示す比較的安定した領域，Ⅱ）β が顕著に低下する領域，で推移する．領域Ⅰでは，供試体が湿潤な状態にあり，土中から地表面への水分供給が維持されるため，β は理論的に 1.0 付近で安定するものの，GB-200 および GB-085 では，この理論値を大きく下回る値となった．これは，採用したデータ整理

表-2　珪砂およびシラス混じり土の基本的物性値および計測条件一覧

	50%通過粒径 [mm]	細粒分含有率 F_c [%]	均等係数 U_c	土粒子の密度 ρ_s [Mg/m^3]	相対密度 D_r [%]	初期飽和度 $S_{r,0}$ [%]
三河珪砂 4 号	0.96	0.32	2.36	2.631	49.8	67.1
三河珪砂 5 号	0.60	0.04	1.81	2.643	50.0	65.4
三河珪砂 6 号	0.32	0.31	1.71	2.638	50.0	66.3
三河珪砂 7 号	0.18	1.76	1.67	2.648	49.9	67.7
三河珪砂 8 号	0.16	18.62	4.43	2.649	43.0	67.5
豊浦珪砂	0.21	0.14	1.85	2.640	49.7	68.8
東俣シラス	0.28	27.96	69.31	2.515	50.5	67.9
郡山シラス	0.25	18.69	16.88	2.327	46.2	68.6

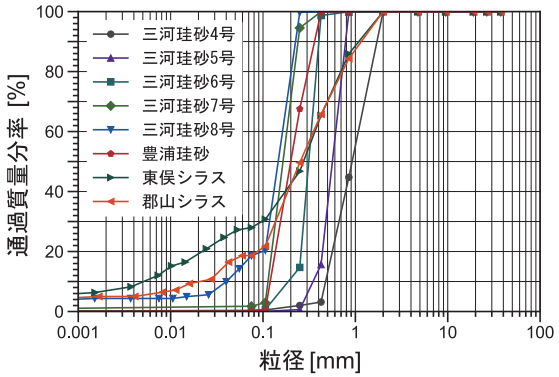


図-3　粒径加積曲線

手法 [9]において，土槽と水槽での交換速度が等しいと仮定していることが原因と考えられる．土槽における交換速度 $g_{a,soil}$ の算出に際して，両槽間での表面温度や蒸発量の差が考慮されておらず，β が過小評価されたと推測される．さらに，GB-200 および GB-085 で β が理論値を特に大きく下回ったことから，この影響は粒径の増大とともに顕在しやすいと予想される．一方で，**図-4 (b)** に示すように，領域 II では 50%通過粒径 D_{50} が小さい珪砂ほど，より湿潤側から β の低下が開始する傾向が認められた．一方，ガラスビーズでは，GB-200 および GB-085 を含め，粒径による β の低下開始点の明確な差はみられなかった．

(4) シラス混じり土の試験結果

シラス混じり土について，室内蒸発試験から得られた体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係を**図-5** に示す．シラス混じり土では，**図-4** に示すガラスビーズおよび珪砂と比較して，より湿潤な体積含水率で β が顕著に低下する傾向が確認された．これはシラス混じり土の方が広い粒度分布を有し，細粒分を多く含むため，保水性が向上したことに起因する [10]と考えられる．一方で，細粒分含有率が異なる東俣シラスと郡山シラスにおいて，β の低下開始点を含め，

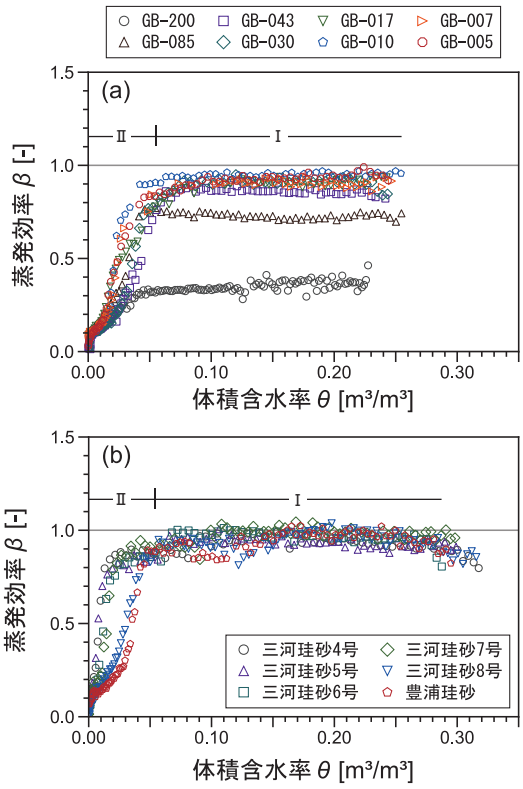


図-4　体積含水率～蒸発効率の関係：(a) ガラスビーズ（GB-005～GB200，領域は GB-010 を例示）；(b) 珪砂（三河珪砂 4～8 号，豊浦珪砂，領域は三河珪砂 6 号を例示）

体積含水率と蒸発効率の関係に大きな差は認められず，今後，保水性と併せて検討する必要がある．

4. モデルパラメータの検討

(1) フィッティング手法の概要

式(3)に示す蒸発効率の土中水分依存性モデルに対し，室内蒸発試験により得られた体積含水率と蒸発効率の関係（**図-4** および**図-5**）を最小二乗法によりフィッティングすることで，各試料におけるモデルパラメータ p および q を算出した．

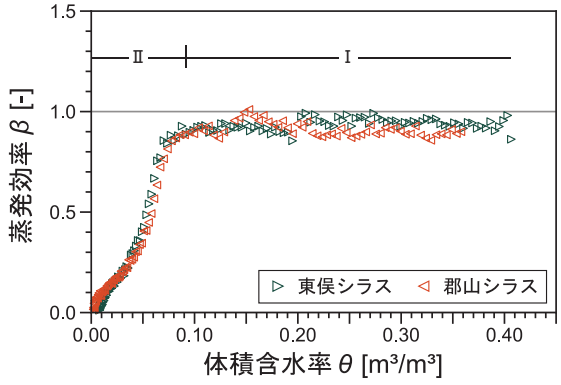


図-5　シラス混じり土の体積含水率～蒸発効率の関係（東俣シラスの領域を例示）

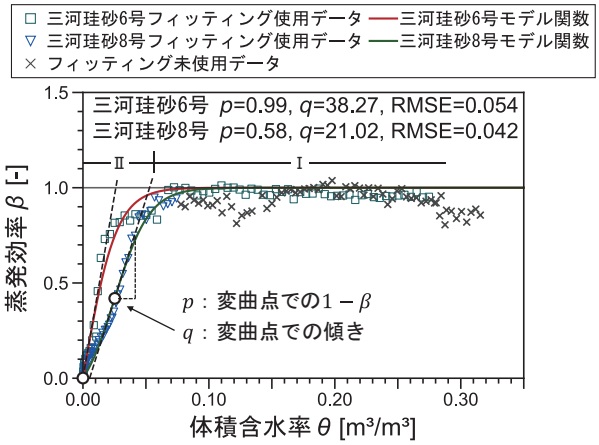


図-6　モデル関数へのフィッティング手法の一例（三河珪砂 6 号の領域を例示）

フィッティング手法について，**図-6** に三河珪砂 6 号，および三河珪砂 8 号を例示して説明する．領域Ⅰでは実測データのばらつきが大きいため，湿潤側からデータを 1 点ずつ除外し，二乗平均平方根誤差 RMSE が最小となる上限値を設定した．ただし，領域Ⅱにおける蒸発効率 $\beta \leq 0.8$ のデータは，β の低下挙動を適切に表現する上で重要であると判断し，すべて使用した．なお，GB-200 および GB-085 では，領域Ⅰにおいて β が 1.0 を大きく下回る値を示したため，フィッティングの対象外とした．以降，パラメータ p および q について，代表的な粒度特性として，平均粒径および 50%通過粒径，細粒分含有率に着目して検討する．

(2) 平均粒径および D_{50} とモデルパラメータの関係

図-7 (a)～(b) に，パラメータ p および q を平均粒径および D_{50} に対して整理した結果を示す．ここで，p は変曲点における飽和状態からの β の低下量（$1-\beta$）を，q は同変曲点における傾き（β の θ に対する変化率 $d\beta/d\theta$）を表す．粒径に依らず p は 1.0 付近または 0.5～0.7 の範囲に分布し，q は試料間で大きなばらつきを示した．領域Ⅱにおいてモデル関数の適合性が低い試料では，変曲点が乾燥側へ過度に移動することで p が過大評価される傾向が認められた．その結果，q のばらつきも拡大したと考えられる．

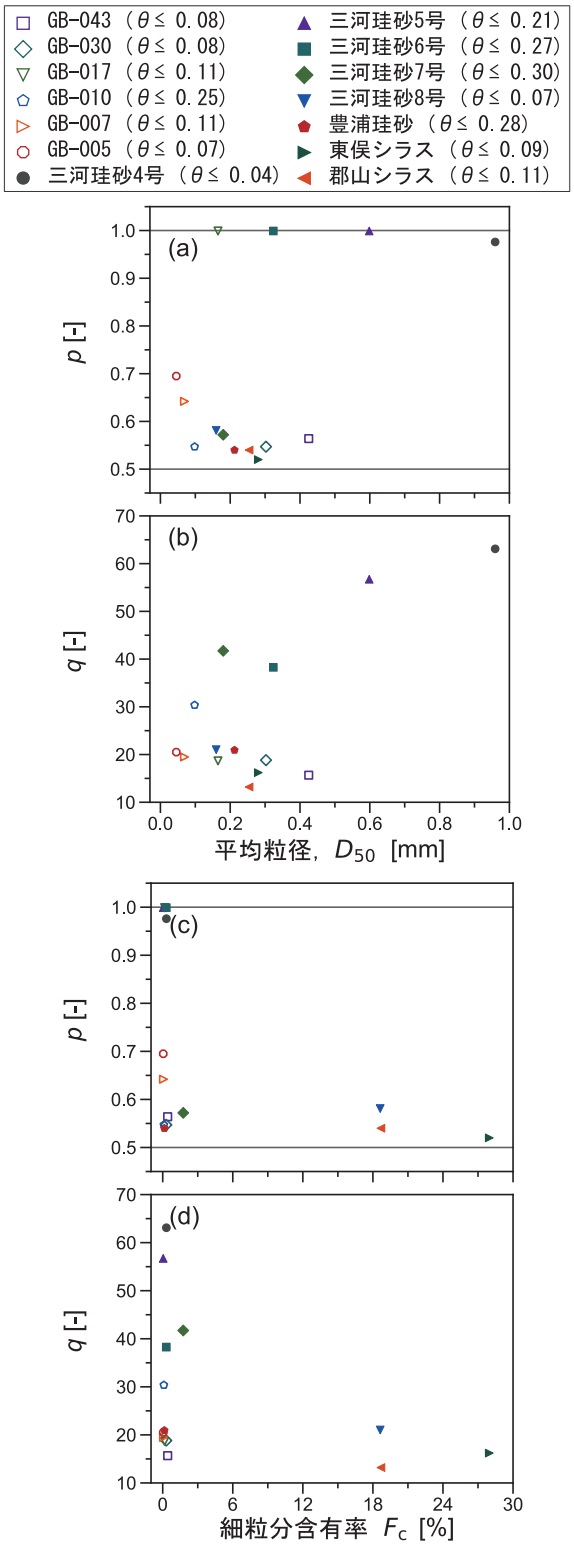


図-7　粒度特性～パラメータ p および q の関係：(a) 平均粒径および D_{50} と p の関係；(b) 平均粒径および D_{50} と q の関係；(c) 細粒分含有率と p の関係；(d) 細粒分含有率と q の関係

(3) 細粒分含有率とモデルパラメータの関係

図-7(c)～(d)に，パラメータ p および q を細粒分含有率に対して整理した結果を示す．細粒分含有率が 2%未満の試料では，p および q に大きなばらつきが認められた．これらの試料では，低い体積含水率域において β が顕著に低下する傾向を示した（**図-4**）．しかし，式(3)に示すモデル関数では，このような低含水率域における急激な β の低下を十分に表現できず，p が過大に推定される場合があった．その結果，両パラメータにばらつきが生じた可能性がある．一方，細粒分含有率が比較的高い三河珪砂 8 号，東俣シラスおよび郡山シラスでは，p が 0.5～0.6，q は 10～25 の範囲に分布する傾向が認められた．以上の結果から，細粒分含有率が比較的高い試料では，低含水率域における p の過大評価の影響が比較的小さく，式(3)に示すモデル関数をより安定的に適用できる可能性が示唆された．ただし，本検討で用いた試料数には限りがあるため，細粒分含有率とモデル適用性の関係については，今後検討する必要がある．

5. おわりに

本研究では，蒸発効率 β の土中水分依存性を表現するモデル関数を提案し，ガラスビーズ，珪砂およびシラス混じり土を対象に室内蒸発試験を実施した．さらに，モデルパラメータ p および q と平均粒径ならびに細粒分含有率との関係について検討した．得られた知見を以下に示す．

1）体積含水率 θ～蒸発効率 β の関係について，珪砂では，平均粒径および 50%通過粒径が小さいほど，蒸発効率 β がより湿潤な体積含水率において低下し始めた．一方，ガラスビーズでは，粒径による明確な影響は認められなかった．また，シラス混じり土ではガラスビーズおよび珪砂より湿潤側で β が低下し始めた．

2）蒸発効率の土中水分依存性を土質条件から推定するための新たなモデル関数を提案した．土質条件に依存するモデルパラメータとして，関数の変曲点における β の低下量を表す p，変曲点における傾きを表す q を導入した．

3）平均粒径とモデルパラメータ p および q との間に明確な相関は認められなかった．

4）細粒分含有率が比較的高い試料では，低含水率域における p の過大評価による影響が小さく，モデル関数を安定して適用できる可能性がある．

今後は，β が顕著に低下する領域をより適切に再現可能なモデル関数へ改良することで，土質条件と蒸発効率の関係の解明に取り組む．これにより，蒸発量を考慮した降雨後地盤内水分量の評価手法を高度化し，警報解除の合理的判断に貢献することが期待される．

謝辞：本研究は，一般財団法人山口県建設技術センターとの共同研究の一環として実施したものです．ここに関係各位に謝意を示します．

参考文献

1) 櫻谷慶治，水谷大二郎，小濱健吾，貝戸清之，音地拓：高速道路斜面災害に対する降雨時通行規制基準値の設定方法，土木学会論文集 F6（安全問題），75 巻，1 号，pp. 12-30，2019.
2) 近藤純正：水環境の気象学－地表面の水収支・熱収支－，pp. 194-198，朝倉書店，1994.
3) 近藤純正，柳原あずさ，三枝信子：土壌の蒸発パラメータに関する実験的研究，天気，40 巻 12 号，pp. 873-879，1993.
4) Deardorff, J. W.: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys. Res*., Vol. 83, No. C4, pp. 1889-1903, 1978.
5) Kondo, J., Saigusa, N. and Sato, T.: A parameterization of evaporation from bare soil surfaces, *J. Appl. Meteor*., Vol. 29, Issue 5, pp. 385-389, 1990.
6) Lee, T. J. and Pielke, R. A.: Estimating the soil surface specific humidity, *J. Appl. Meteor*., Vol. 31, Issue 5, pp. 480-484, 1992.
7) Kondo, J. and Ishida, S.: Sensible heat flux from the earth's surface under natural convective conditions, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 54, Issue 4, pp. 498-509, 1997.
8) 里見知昭，酒匂一成，吉留花江，深川良一：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，応用力学論文集，13 巻，pp. 525-534，2010.
9) Sako, K., Moriiwa, M. and Satomi, T.: Experimental consideration on evaporation efficiency β of unsaturated sandy soil surface, *JGSSP*, Vol. 2, No. 4, pp. 226-229, 2016.
10) 軸屋雄太，酒匂一成，伊藤真一，昌本卓也，中島亮輔，鈴木素之：粒径が比較的均一な砂質土を用いた不飽和土の保水・浸透・蒸発特性に関する一考察，第 12 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.263-268，2024.

（2026.5.29　受付）