

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

A CONSIDERATION OF WATER RETENTION, SEEPAGE, AND EVAPORATION
PROPERTIES IN UNSATURATED SANDY SOIL
WITH RELATIVELY UNIFORM GRAIN SIZE

軸屋 雄太¹・酒匂 一成²・伊藤 真一³・昌本 拓也⁴・中島 亮輔⁵・鈴木 素之¹
Yuta JIKUYA, Kazunari SAKO, Shinichi ITO, Takuya MASAMOTO, Ryosuke NAKAJIMA and
Motoyuki SUZUKI

¹ 山口大学大学院創成科学研究科工学系学域 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: yuta-j@yamaguchi-u.ac.jp

² 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

³ 立命館大学理工学部 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)

⁴ 株式会社地域地盤環境研究所 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 2-1-2)

⁵ 元鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

Key Words: evaporation, soil water characteristic curve, hydraulic conductivity, unsaturated sandy soil

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おり、それら災害への対策は急務である。全ての危険斜面に、土砂災害防止施設の整備などのハード対策を施すことは困難であるため、ハード対策に並行して警戒避難体制を整備するなど、ソフト対策を充実および強化することが要求されている¹⁾。主要なソフト対策としては、土砂災害警戒情報をはじめとした、各種通行規制や運転規制などの警報の提供が挙げられる。これまで、雨量と土砂災害の関係を帰納的に検討することで、警報の発令基準や危険雨量基準などが設定されてきた(例えば、Sugiyama et al.²⁾、倉本ら³⁾)。一方で、降雨後の警報解除の判断は困難とされており、その判断に際しては、降雨後の地盤内での水分変動(不飽和浸透挙動)を経時的かつ定量的に把握する必要がある。不飽和浸透挙動は、不飽和土の保水・浸透特性である水分特性曲線と不飽和透水関数(土中水分量～不飽和透水係数の関係)を用いて、不飽和浸透流解析を行うことによ

り評価できる。特に、降雨後の解析では、保水・浸透特性に加え、地表面での水分流束の境界条件である蒸発特性の把握も重要となる。蒸発特性は、バルク法⁴⁾のパラメータである蒸発効率によって評価できる。ここで、蒸発効率は土中水分量の関数であり、その関数形(水分依存性)が保水・浸透特性と同様に土質条件に依存して変化するものの⁵⁾、両者の関係は明らかとされていない。著者らは、水分特性曲線、不飽和透水関数、および蒸発効率の水分依存性を同一供試体から同時に計測できる手法の開発に取り組んでおり⁶⁾、砂質土を対象に同時計測手法の妥当性と計測範囲を確認している。これにより、砂質土の蒸発効率の水分依存性を、同一供試体から得られた水分特性曲線および不飽和透水関数との関係から考察することが可能となった。

本論文では、蒸発効率の水分依存性～土質条件の関係の定量評価に向けて、粒径が比較的均一な砂質土を対象に、水分特性曲線および不飽和透水関数に基づき、蒸発効率の水分依存性を議論する。はじめに、バルク法および蒸発効率の概要、不飽和土の保

水・浸透・蒸発特性の同時計測手法を説明する。次に、粒径が比較的均一な砂質土を用いた同時計測結果より、水分特性曲線、不飽和透水関数、および蒸発効率の水分依存性について、粒度特性値の観点から考察する。最後に、蒸発効率の水分依存性～水分特性曲線および不飽和透水関数の関係を議論する。

2. バルク法の概要

不飽和土の蒸発特性は、バルク法 (β 法) における蒸発効率 β で評価できる。バルク法は微気象学的な原理に基づいており、単位時間・単位面積当たりの蒸発量 E を次式 (バルク式) から推定できる。

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

ここに、 ρ : 空気密度, g_a : 交換速度, $q_{\text{sat}}(T_s)$: 地表面温度 T_s に対する飽和比湿, q : ある高度での大気 の比湿である。交換速度 g_a と蒸発効率 β を除くバルク法のパラメータは、1 高度の気象観測データと地表面温度から直接得られる⁷⁾。そのため、事前に g_a と β を室内試験から得ておけば、簡単な観測データのみから現地の地表面蒸発量を推定できる。

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しており、主に大気の状態に応じて変化する。蒸発効率 β は、地表面からの蒸発の起こりやすさを表し、土中の水分状態に応じて 0~1.0 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 $\beta = 1.0$)。Kondo et al.⁵⁾により得られた体積含水率～蒸発効率の関係を、図-1 に示す。図中に示すように、蒸発効率の水分依存性は、ある土中水分量を境に大きく 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 に近づいていく傾向、に分けられる。土中水分量が比較的高い範囲 I では、

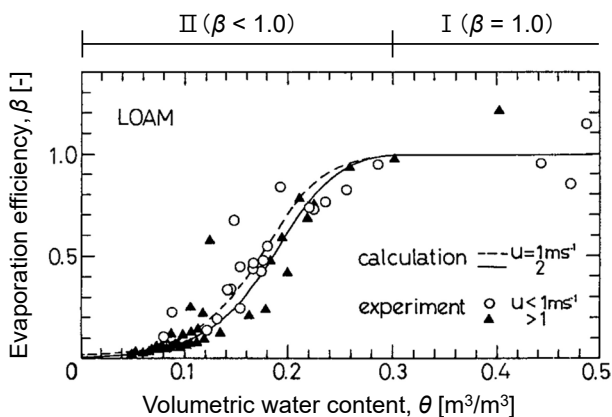


図-1 ロームの体積含水率～蒸発効率の関係: 風速 U の異なる計算結果および実験結果 (加筆修正)⁵⁾。

気温や湿度などの大気的水分需要に従って蒸発量が決まる。一方で、土中水分量が低い範囲 II では、蒸発量は土からの制限によって大気的水分需要よりも少なくなる。蒸発効率の水分依存性の傾向を決定する境界の土中水分量 (図-1 の場合、0.3 程度) は、土の種類や締まり具合などの土質条件によって異なる⁸⁾。そのため、不飽和土の蒸発特性の解明に向けては、 β が低下し始めるときの土中水分量を、土質条件に応じて適切に評価することが重要となる。

3. 保水・浸透・蒸発特性の同時計測

(1) 同時計測手法の概要

不飽和土の保水・浸透・蒸発特性の同時計測手法は、著者らが提案している蒸発効率を計測するための室内試験方法⁹⁾と、水分特性曲線および不飽和透水関数の計測手法である簡易蒸発法¹⁰⁾ (HYPROP 装置; METER Group, Inc. USA) を組み合わせた手法である。図-2 に示すように、同時計測装置は、気象観測装置、水槽試験装置、土槽試験装置としての HYPROP 装置で構成されており、1 つの供試体を用いた 1 回の蒸発実験から、水分特性曲線 (排水過程)、不飽和透水関数、蒸発効率の水分依存性を計測できる。以下で、各特性の計測原理を説明する。

水分特性曲線と不飽和透水関数は、HYPROP 装置のみを用いて計測される。HYPROP 装置では、直径 8.0cm かつ高さ 5.0cm で作製した供試体を、側面と底面を閉じて電子天秤 (最小表示: 0.01g, 標準偏差: 0.01g) に設置する。このとき、供試体の重量変化から体積含水率と蒸発量が計算できる。供試体内の体積含水率は深さによって異なるが¹¹⁾、今回は供試体内で一様であると仮定した。加えて、2 本のテンシオメータ (測定精度: 0.05hPa) を供試体内の 1/4 と 3/4 深さに設置し、土中 2 点のマトリックサクションを測定する。2 つのマトリックサクションの時空間での平均値 ψ_m を、体積含水率の深さ方向の分布を考慮した計算手法である、算術平均と幾何平均を組み合わせた Peters et al.¹²⁾の方法 (式 (2)) で計算し、これを供試体内の平均的なマトリックサクションとして扱う。

$$\psi_m = w_{\text{avg}} \cdot \frac{1}{4} \cdot (\psi_{\text{upp}}^{i-1} + \psi_{\text{upp}}^i + \psi_{\text{low}}^{i-1} + \psi_{\text{low}}^i) + (1 - w_{\text{avg}}) \cdot \frac{\sqrt{(\psi_{\text{upp}}^{i-1} + \psi_{\text{upp}}^i) \cdot (\psi_{\text{low}}^{i-1} + \psi_{\text{low}}^i)}}{2} \quad (2)$$

ここに、 w_{avg} : 算術平均から幾何平均へのシフトを制御する重みづけパラメータ, ψ : マトリックサクションの測定値, 下付き添え字 upp と low は空間位

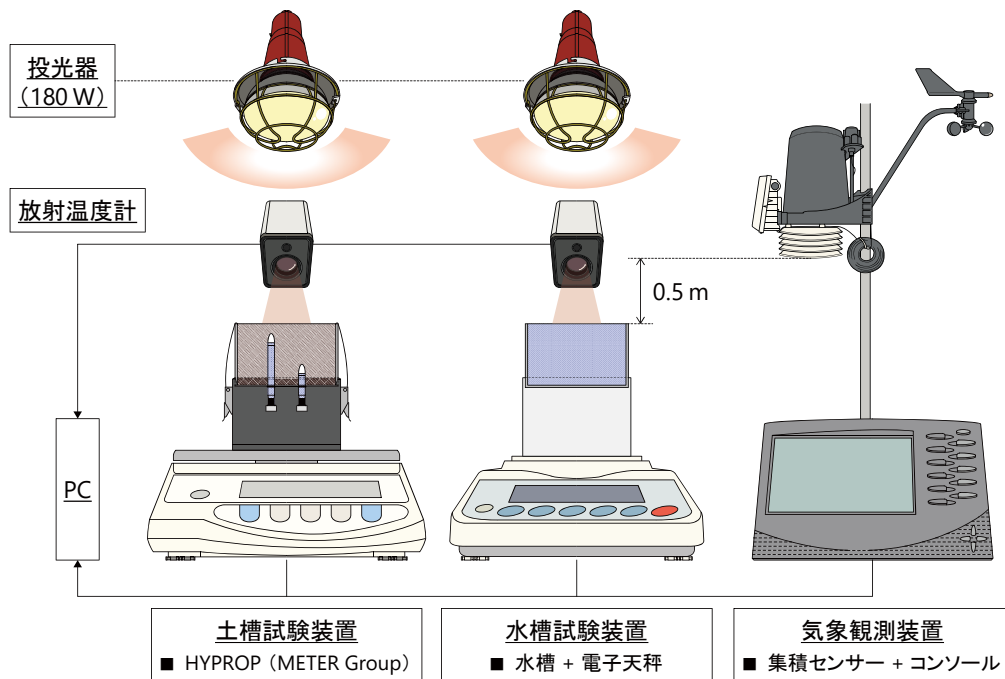


図-2 不飽和土の保水・浸透・蒸発特性の同時計測装置の概要。

置 (upp : 深さ 1.25cm, low : 深さ 3.75cm), 上付き添え字 i は時間ステップである。本研究では, w_{avg} として圧力水頭の鉛直勾配の逆数を使用した¹²⁾。計算された平均サクシオン ψ_m と体積含水率から, 水分特性曲線が得られる。さらに, 式(3)に示す蒸発量の半分を流量 q_c とした Darcy-Buckingham 則を用いて, 不飽和透水係数 k が計算できる。

$$k = -q_c \cdot \left[\frac{\psi_{\text{upp}}^{i-1/2} - \psi_{\text{low}}^{i-1/2}}{\rho_w g \cdot (z_{\text{low}} - z_{\text{upp}})} - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

ここに, ρ_w : 水の密度, g : 重力加速度, z : テンシオメータの設置深さ, 上付き添え字 $i - 1/2$ は時間ステップでの算術平均を意味する。なお, HYPROP 装置による計測は, テンシオメータの内部にキャビテーションが生じた時点 (おおよそ 200kPa 超過), あるいは供試体重量の変化がほとんど無くなる時点まで行うことができる。

蒸発効率の水分依存性は, 土槽試験装置として使用している HYPROP 装置と, それと同じ寸法の水槽試験装置からの蒸発量を比較することで計測される。従来の蒸発効率を計測するための室内試験方法では, 高さ 2cm の薄い土槽と水槽を使用していたが, 同時計測手法では, HYPROP 供試体と同様の寸法に変更している。計測開始後, 気象観測 (気温, 気圧, 相対湿度) と同時に, HYPROP 装置を使用した土槽試験と水槽試験を実施して, 表面温度と蒸発量をそれぞれ測定する。計測中は, 自然対流条件を満足するため, 両槽の表面に投光器 (180W) を用

いて輻射で熱量を供給する。水槽試験では, 水面から蒸発が起こるため, 常に蒸発効率 $\beta = 1$ と定義される。そのため, 水槽試験の計測データと気象観測データを式(1)に示すバルク式に代入することで, 水槽における交換速度 $g_{\text{a,water}}$ が算出される。次に, 得られた $g_{\text{a,water}}$ を用いて, 土と水の熱容量の違いを考慮した次式⁹⁾により, 土槽における交換速度 $g_{\text{a,soil}}$ が算出される。

$$g_{\text{a,soil}} = \left(\frac{\zeta_{\text{water}}}{\zeta_{\text{soil,sat}}} \right)^{1/3} \cdot g_{\text{a,water}} \quad (4)$$

ここに, ζ : 体積熱容量, 添え字 soil,sat と water は飽和土と水を意味する ($\zeta_{\text{soil,sat}} = 4.2 \times 10^6 \text{ J/(m}^3 \text{ K)}$, $\zeta_{\text{water}} = 3.1 \times 10^6 \text{ J/(m}^3 \text{ K)}$)。その後, 土槽試験の計測データと気象観測データに加え, 得られた交換速度 $g_{\text{a,soil}}$ をバルク式に代入することで, 蒸発効率 β が算出される。なお, マトリックサクシオン ψ_m および不飽和透水係数 k と同様に, β も時間ステップでの算術平均として計算している。供試体内の体積含水率は HYPROP 装置で計測されているため, 最終的に, 蒸発効率の水分依存性が得られる。

(2) 同時計測の条件

均等係数が小さく, 粒径が比較的均一である豊浦砂, 珪砂 3 号, 珪砂 5 号を土試料に用いて, 水分特性曲線, 不飽和透水係数, 蒸発効率の水分依存性を同時計測した。土試料の基本物性値と各計測の条件を表-1 にまとめ, 粒径加積曲線を図-3 に示す。平

表-1 土試料の基本物性値および計測条件の一覧.

	土粒子密度 ρ_s [Mg/m ³]	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}	粒度特性値				初期状態値	
				均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	平均粒径 D_{50} [mm]	細粒分含有率 F_c [%]	間隙比 e	飽和度 $S_{r,0}$ [%]
豊浦砂①	2.640	0.900	0.600	1.39	0.96	0.32	0.05	0.756	88.51
豊浦砂②								0.759	89.49
珪砂 3 号	2.556	0.935	0.633	1.63	0.96	1.41	0.18	0.780	77.16
珪砂 5 号	2.559	0.911	0.589	2.00	1.11	0.61	0.67	0.751	81.64

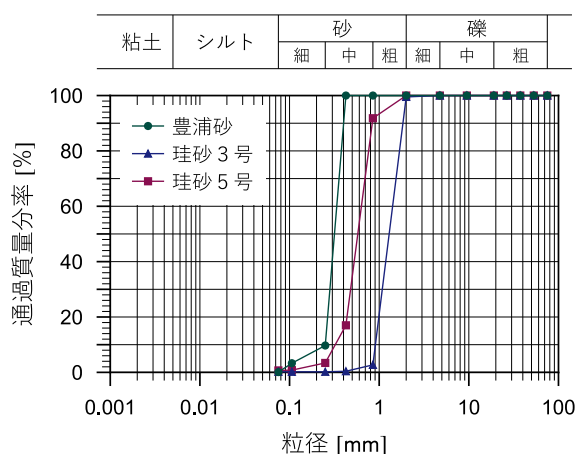


図-3 粒径加積曲線.

均粒径 (50%通過粒径) は, 豊浦砂, 珪砂 5 号, 珪砂 3 号の順番で大きくなり, いずれの土試料も細粒分含水率が 1%未満と非常に小さい特徴がある. なお, 豊浦砂については 2 回 (①と②), 他は 1 回の計測をそれぞれ別日に実施している.

供試体は, 初期飽和度を 30%に調整し, 相対密度が 50%となるように 3 層で締めめた土試料を, 脱気水に 24 時間浸潤させることで作製した. 供試体と水槽からの蒸発量は電子天秤 (最小表示: 0.01g, 標準偏差: 0.01g) で, 表面温度は放射温度計 (分解能: 0.1°C, 測定精度: $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内) でそれぞれ計測した. 気象観測装置は, 両槽の表面から 0.5m の高さ⁵⁾に設置した. 計測間隔を 30 分とし, 水分特性曲線と不飽和透水関数は, HYPROP 装置で 사용되는テンシオメータの内部にキャピテーションが生じた時点, 蒸発効率の水分依存性は, 0.01g 未満の蒸発量が計測された時点をもて計測終了とした. また, 蒸発に伴う水槽試験での水位低下を考慮して, 水槽にはおおよそ 1 日間隔で蒸留水を補充した. なお, 補充直後のデータは各計測に使用していない.

(3) 同時計測結果と考察

図-4 に, 表-1 に示した各同時計測から得られた水分特性曲線, 不飽和透水関数, および蒸発効率の

水分依存性を示す. さらに, 図-4 の低水分領域を拡大したものを, 図-5 に示す.

はじめに, 図-4 (a) と図-5 (a) に示す水分特性曲線を考察する. 豊浦砂では, 2 回の計測結果の概形がほとんど同様である一方で, 計測初期であるマトリックサクシオン ψ_m が空気侵入値に達するまでの範囲でばらつきがみられる (図-4 (a)). この範囲での土中水分量は, 供試体の初期飽和度や間隙比などの条件に依存して決まるため¹³⁾, 表-1 に示す供試体作製時の条件の違いがばらつきの原因と予想される. その後, 水分特性曲線の傾きが急増するまでの範囲では, 平均粒径が小さい試料ほど ψ_m が大きくなっており, Zapata¹⁴⁾ が示す水分特性曲線 ~60%通過粒径の関係と整合する結果を示している. 一方で, 水分特性曲線の傾きが急増するときの土中水分量については, 平均粒径に依らず, 豊浦砂, 珪砂 3 号, 珪砂 5 号の順番で大きくなっており, また, 他の粒度特性値との有意な関係も確認できなかった. ここで, このときの土中水分量は残留体積含水率 θ_r として定義されており, 間隙水の主な保持形態が土粒子の接点付近における毛管作用によるものから, 土粒子表面での強い吸着力によるものへと移行するときの水分量に相当するといわれている¹⁵⁾. そのため, 今後, 粒度特性値のみでなく, 吸着水量なども踏まえた考察が必要といえる. 加えて, 豊浦砂の 2 回の計測結果でも θ_r が異なることから, 供試体作製時の条件の影響についても検討が必要である.

次に, 図-4 (b) と図-5 (b) に示す不飽和透水関数を考察する. 体積含水率がおおよそ 0.05 以上の範囲では計測値が示されていない. これは, 簡易蒸発法では, Peters and Durner¹¹⁾ が提案する基準値よりも低い動水勾配から計算された不飽和透水係数 k の信頼性が低いことから, その計測値を除外しているためである. なお, 豊浦砂①での体積含水率が 0.4 付近における計測値は, テンシオメータの脱気が不十分であったために除外されなかった信頼性の低い結果である (図-4 (b)). 残留体積含水率 θ_r 付近の範囲に着目すると, 平均粒径やマトリックサクシオンの大小

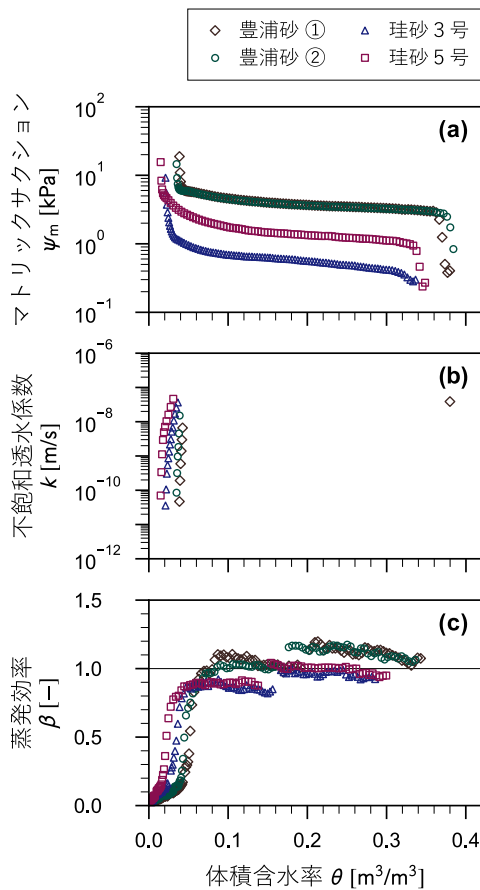


図-4 水分特性曲線，不飽和透水関数，蒸発効率の水分依存性の同時計測結果。

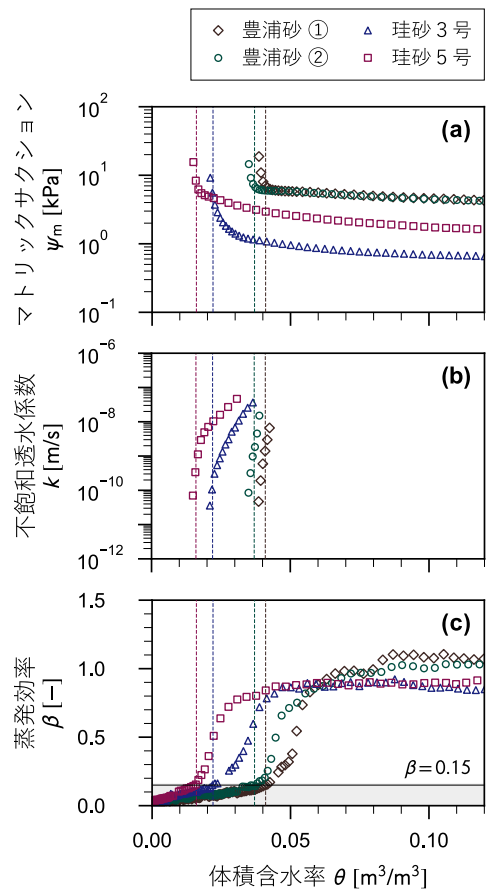


図-5 水分特性曲線，不飽和透水関数，蒸発効率の水分依存性の同時計測結果（図-4の低水分領域）。

関係に依らず θ_r に対応した順番で k が大きく，豊浦砂の2回の計測結果に差があることが分かる。

最後に，図-4(c)と図-5(c)に示す蒸発効率の水分依存性を考察する。今回，計測初期の不安定な環境条件に影響を受けたデータは，土槽と水槽の温度変化に基づいた方法⁹⁾で除外してある。体積含水率が0.15付近では，蒸発効率 β がステップ状に変動しているが，これは水槽への水の補充に伴う水位の変化に影響を受けたものである（図-4(c)）。また， β が急激に低下するまでの範囲では，本来，図-1に示すように β はその定義からほぼ1.0となるものの，一部の計測値では1.0となっていない。式(4)の交換速度の算定方法では，土の種類によって同範囲で β が1.0とならないことが指摘されており⁹⁾，交換速度の算定方法が β のばらつきの原因であると考えられる。ここで，図-5(c)に示す低水分領域に着目する。蒸発効率の水分依存性は大きく，I) β が安定している範囲，II) β が急激に低下している範囲，III) β が緩やかに低下している範囲，に分けられる。範囲IIと範囲IIIでは，不飽和透水係数と同様に平均粒径に依らず β の大小関係が決まっている。さらに，範囲IIと範囲IIIが土の種類に依らず $\beta = 0.15$ 程度で

区分されており，そのときの土中水分量が残留体積含水率 θ_r とおおよそ等しいことが分かる（図-5中の破線を参照）。そこで，蒸発効率～マトリックサクションと不飽和透水係数の関係を，図-6に示し考察する。なお，図中のIからIIIの範囲は，先の説明と対応したものである。 $\beta = 0.15$ 付近において土の種類に依らず，マトリックサクション ψ_m が5kPa程度で，不飽和透水係数 k が 10^{-9} m/s 程度の値となり，以降では直線的に変化していることが分かる。そのため， β が0.15を下回るときの土中水分量においては， β の値からおおよそその ψ_m と k を推測できると期待される。さらに， β が1.0から低下し始めるときの ψ_m が，土の種類（平均粒径の違い）に応じて異なると明らかになった。

4. おわりに

本論文では，粒径が比較的均一な砂質土を対象とした水分特性曲線，不飽和透水関数，蒸発効率の水分依存性の同時計測結果を，粒度特性値の観点から考察した。さらに，同一供試体から得られたマトリックサクションと不飽和透水係数に關係付けて，蒸

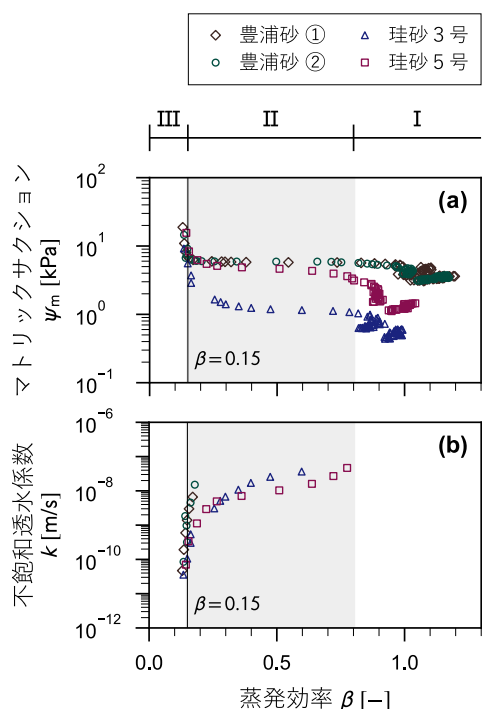


図-6 蒸発効率の水分依存性～水分特性曲線および不飽和透水関数の関係。

蒸発効率を考察した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 土中水分量が残留体積含水率に至るまでの範囲では、マトリックサクションが平均粒径と負の相関関係にあることが確認できた。一方で、不飽和透水係数と蒸発効率については、平均粒径ではなく残留体積含水率の大きさに依存すると予想される。
- (2) 蒸発効率が 0.15 程度するとき、土中水分量が残留体積含水率程度となり、マトリックサクションと不飽和透水係数が、平均粒径に関係なくおよそ一定の値になることが分かった。

今回、残留体積含水率、およびそのときのマトリックサクション、不飽和透水係数、蒸発効率について、粒度特性値との明確な関係は確認できなかった。今後、他の土試料を用いた検討に加え、吸着水量などを考慮した更なる詳細な議論が必要と考える。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 (22KJ2532) の助成を受けたものである。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 玉田沙耶香：防災基礎講座 改正土砂災害防止法について、そんぼ予防時報, Vol.262, pp.8-11, 2015.
- 2) Sugiyama, T., Okada, K., Muraishi, H., Noguchi, T. and Samizo, M.: Statistical rainfall risk estimating method for a deep collapse of a cut slope, *Soils and Foundations*,

Vol.35, No.4, pp.37-48, 1995.

- 3) 倉本和正, 鉄賀博己, 東寛和, 荒川雅生, 中山弘隆, 古川浩平: RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究, 土木学会論文集, 672号/VI-50, pp.117-132, 2001.
- 4) 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.
- 5) Kondo, J., Saigusa, N. and Sato, T.: A parameterization of evaporation from bare soil surfaces, *J. Appl. Meteor.*, Vol.29, Issue5, pp.385-389, 1990.
- 6) 軸屋雄太, 酒匂一成, 伊藤真一: 不飽和土の保水・浸透・蒸発特性の同時計測方法に関する検討, 第15回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.631-637, 2023.
- 7) 近藤純正: 地表面に近い大気科学 理解と応用, pp.3-5, 東京大学出版会, 2000.
- 8) 近藤純正, 本山浩司: 2種類の粒径の粒子を用いた土壌の蒸発パラメータに関する実験, 水文・水資源学会誌, 7巻, 5号, pp.430-435, 1994.
- 9) 軸屋雄太, 酒匂一成, 伊藤真一: 土と水の熱容量の違いを考慮したバルク法における蒸発効率の算定方法に関する検討, 土木学会論文特集号 (応用力学), 80巻, 15号, 23-15040, 2024.
- 10) Schindler, U.: Ein schnellverfahren zur messung der wasserleitfähigkeit im teilgesättigten boden an stechzylinderproben, *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk.*, Berlin 24 (1), pp.1-7, 1980.
- 11) Peters, A. and Durner, D.: Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties, *J. Hydrol.*, Vol.356 (1-2), pp.147-162, 2008.
- 12) Peters, A., Iden S. C. and Durner W.: Revisiting the simplified evaporation method: Identification of hydraulic functions considering vapor, film and corner flow, *J. Hydrol.*, Vol.527, pp.531-542, 2015.
- 13) Topp, G. C. and Miller, E. E.: Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.30, Issue2, pp.156-162, 1996.
- 14) Zapata, C. E.: Uncertainty in soil-water-characteristic curve and impacts on unsaturated shear strength predictions, PhD Thesis, Arizona State University, Tempe, AZ, 1999.
- 15) Vanapalli, S. K., Sillers, W. S. and Fredlund, M. D.: The meaning and relevance of residual state to unsaturated soils, *Proceedings of the 51st Canadian Geotechnical Conference*, 4-7 October 1998, Edmonton, Canada, 1998.

(2024. 5. 31 受付)