

**蒸発法による砂丘砂の水分移動特性の推定**  
**Parameter estimation for the hydraulic properties of a dune sand**  
**using the evaporation method**

**坂井 勝 取出 伸夫**  
**Masaru Sakai Nobuo Toride**

1. **はじめに** 蒸発過程の圧力変化から、水分移動特性モデル(たとえば van Genuchten モデル)のパラメータを逆解析する蒸発法は、-700 cm 程度までの不飽和透水係数を推定するのに有効である。しかし、通常は水蒸気を含まない Richards 式を用いて推定するが、低圧力領域の水蒸気移動の逆解析に及ぼす影響は不確かである。また、砂丘砂のような粗粒な土に対しては、van Genuchten モデルが乾燥に伴う圧力変化を表現できないことが報告されている。そこで本研究では、砂丘砂の蒸発過程の圧力変化に対して、dual porosity モデル(Durner 1994)を適用し、低水分領域における砂の不飽和透水係数の検討を行なった。また、Philip & de Vries モデルを用いて、水蒸気移動が逆解析に与える影響を検討した。

2. **逆解析による水分移動特性の推定** 蒸発実験は、鳥取砂丘砂をカラムに充填し、飽和からの蒸発過程における各深さ(0.5, 5.9, 10.2 cm)の圧力を測定した。そして、カラム総重量の変化を測定し、蒸発速度を求めた。逆解析には、水蒸気移動を含まない Richards 式と次式の dual porosity モデルを用いた。

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = S_1 + S_2 = w_1 \left[ 1 + (\alpha_1 h)^{m_1} \right]^{-m_1} + w_2 \left[ 1 + (\alpha_2 h)^{m_2} \right]^{-m_2} \quad (1)$$

$$K(S_e) = K_s \frac{(w_1 S_{e1} + w_2 S_{e2})^l \left( w_1 \alpha_1 \left[ 1 - (1 - S_{e1}^{1/m_1})^{m_1} \right] + w_2 \alpha_2 \left[ 1 - (1 - S_{e2}^{1/m_2})^{m_2} \right] \right)^2}{(w_1 \alpha_1 + w_2 \alpha_2)^2} \quad (2)$$

ここで、 $w_2 = 0$  のときは van Genuchten モデルと等しい。 $\theta_s$  を 0.35 とし、van Genuchten モデルと dual porosity モデルについて、蒸発速度、各深さの圧力変化の実測データを用いて逆解析を行なった。表 1 に推定したパラメータを、Fig. 1 に圧力変化の実測値と計算値を示す。圧力の実測値は、深さ 0.5 cm のみ 1.5 日後から急激に -700 cm 程度まで低下するが、他の 2 点は緩やかに低下した。van Genuchten モデルでは、5.9 cm, 10.2 cm の圧力低下も 0.5 cm とほぼ同時に進行し、実測値に比べて計算値は小さい。一方、dual porosity モデルによる圧力は、3 点とも実測値をよく再現している。推定した dual porosity モデルの不飽和透水係数は、-100 cm までは急激に低下するが、-100 cm 以下では緩やかに低下する(Fig. 2)。砂中の不飽和流れは、高水分領域では間隙間の流れが卓越し、低水分領域では土粒子表面の膜流が卓越する(Fig. 3)。間隙径モデルに基づく van Genuchten モデルは、パラメータ  $l$  で全圧力領域に対して  $dK/dh$  を表現するため、流れの形態の異なる高水分、低水分領域の不飽和透水係数を表現できないと考えられる。一方、dual porosity モデルは、本来は団粒土を対象にしたモデルであるが、2 つの関数型を重ね合わせることで、高水分領域と低水分領域の不飽和透水係数をそれぞれ表現することが可能となる。

3. **水蒸気移動が逆解析に及ぼす影響** 得られた dual porosity モデルのパラメータを用いて、水蒸気移動を含めた蒸発過程の数値計算を行なった。計算開始 3 日目の水分分布を Fig. 4 に示す。水蒸気移動の有無による水分分布の違いは表面付近のみに現われる。水蒸気を含まない場合、土表面のみの蒸発を仮定するのに対し、水蒸気移動を含む場合は、蒸発面が下層に移動して、表面 0.1 cm 付近では水蒸

気移動が卓越した蒸発過程を再現している。そこで、Fig. 1 の圧力変化に対して、水蒸気移動を含めた Richards 式と dual porosity モデルを用いて逆解析を行なった(Table 1)。圧力の経時変化(Fig. 1)は実測値をよく再現するし、推定した不飽和透水係数(Fig. 2)も、水蒸気移動を考慮しない場合とほぼ等しい結果が得られた。蒸発法の適用圧力範囲では、粗粒な砂ほど水蒸気移動の影響が大きい。そのため、通常は、水蒸気移動を含まない Richards 式の適用には問題がないが、水分移動特性モデルの選定には慎重な検討が必要である。

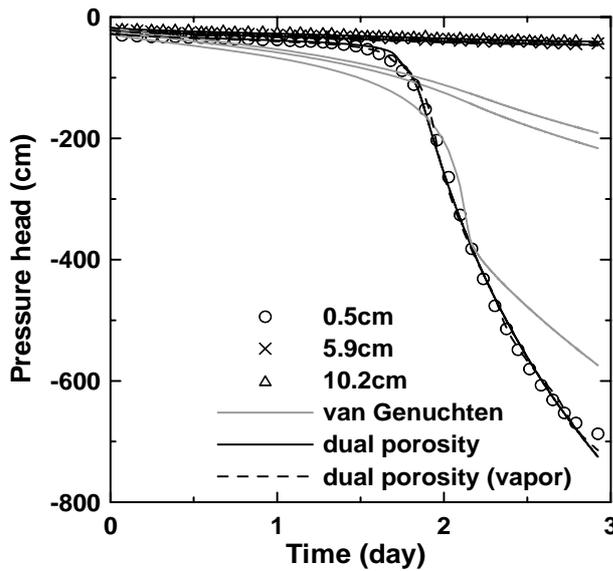


Fig. 1. Changes of pressure heads in an evaporation process of Tottori dune sand.

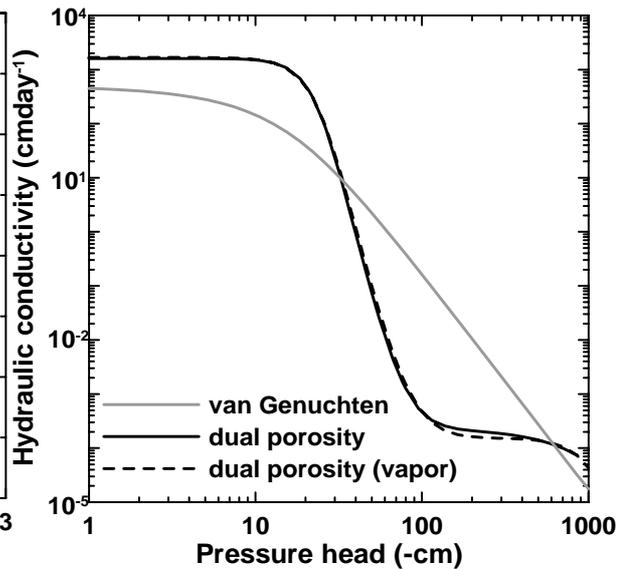


Fig. 2. Inversely estimated unsaturated hydraulic conductivities of Tottori dune sand.

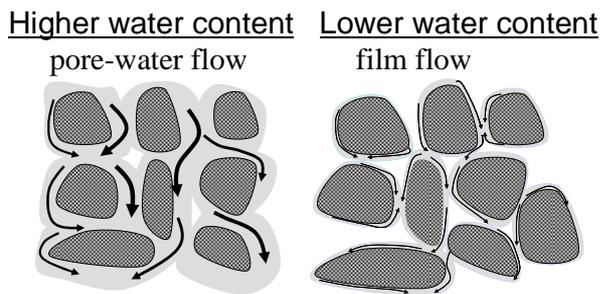


Fig. 3. Schematic unsaturated water flow in a sand.

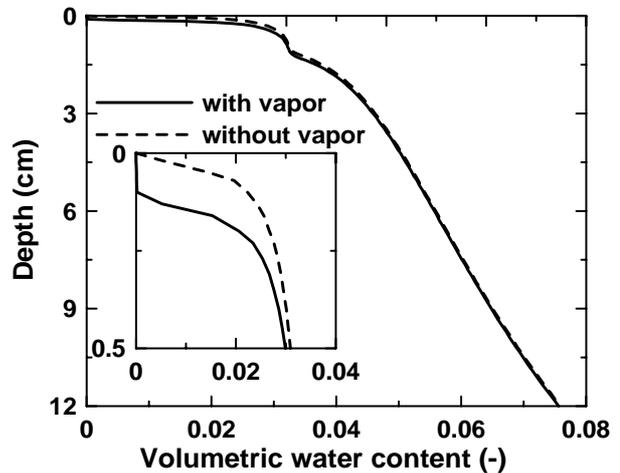


Fig. 4. Volumetric water content profiles after 3 days calculated with and without vapor transport.

Table Inversely estimated parameters of van Genuchten model and dual porosity model.

		$\theta_r$	$\alpha_1$ (cm <sup>-1</sup> )	$n_1$	$K_s$ (cmday <sup>-1</sup> )	$l$	$w_2$	$\alpha_2$ (cm <sup>-1</sup> )	$n_2$
van Genuchtenモデル	水蒸気無	0.000152	0.052	2	500	0.0013	0	-	-
dual porosityモデル	水蒸気無	0.000019	0.041	5.03	1605.4	1.22	0.093	0.00065	2.40
	水蒸気有	0.0016	0.040	4.56	1685.3	1.71	0.099	0.00079	4.47