

砂カラム中の水蒸気凝縮過程における水分移動 Water movement with vapor condensation in a sand column

坂井 勝 取出 伸夫
Masaru Sakai Nobuo Toride

1. はじめに

土中の水蒸気移動は Philip & de Vries (1957) により定式化されている。しかし、温度勾配による水蒸気移動を補正するエンハンスメントファクターや、低水分領域の不飽和透水係数は、実測が難しい上、その効果については十分に明らかにされていない。そこで本研究では、水蒸気凝縮過程について数値解析を行ない、エンハンスメントファクターと不飽和透水係数の効果について検討した。

2. 水蒸気凝縮実験

宮崎 (1979) の水蒸気凝縮実験を数値解析の対象とした。試料には風乾した浜岡砂丘砂 (体積含水率 $0.0045 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) を、内径 10 cm、高さ 10 cm のアクリルリングに乾燥密度 1.5 g cm^{-3} で充填し用いている。試料下端は閉鎖系とし、温度を 20 に制御している。また、試料上端は開放系とし、温度 37、相対湿度 85~90% に制御した空気と接触させている。炉乾法により水分分布を測定し、外部空気からの水蒸気凝縮量を評価している。

3. 水分移動モデル

計算には Philip & de Vries モデルを用いた。以下主要な関係式のみを示す。

保存則: 土中の水分移動の保存則を以下に示す。

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = -\frac{\partial q_l}{\partial z} - E \quad (1) \quad \frac{\partial \theta_v}{\partial t} = -\frac{\partial q_v}{\partial z} + E \quad (2)$$

θ_l は体積含水率、 q_l は液状水フラックス、 t は時間、 z は鉛直座標、 E は蒸発速度、 θ_v は水蒸気の体積分率 (液状水等量)、 q_v は Philip & de Vries モデルによる水蒸気フラックスである。

エンハンスメントファクター: Cass (1984)、Campbell (1985) の式を用いた。

$$\eta = a + b \frac{\theta}{\theta_s} - (a-1) \exp \left\{ - \left[\left(1 + \frac{2.6}{\sqrt{f_c}} \right) \frac{\theta}{\theta_s} \right]^4 \right\} \quad (3)$$

θ_s は間隙率、 f_c は粘土分率である。Cass らは $a=9.5$ 、 $b=3$ としているが、本研究では a をパラメータとして用い、 $f_c=0.02$ とした (Fig. 1)。

水分特性: 水分特性曲線、不飽和透水係数には Brooks & Corey モデルを用いた。不飽和透水係数は次式で

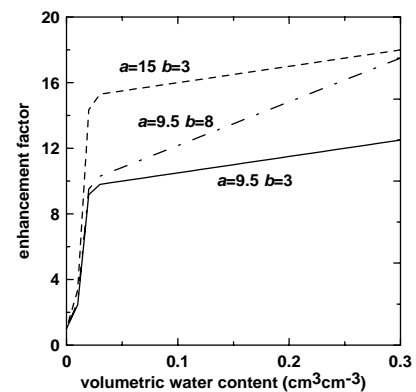


Fig. 1 Effects of parameter a and b on enhancement factor.

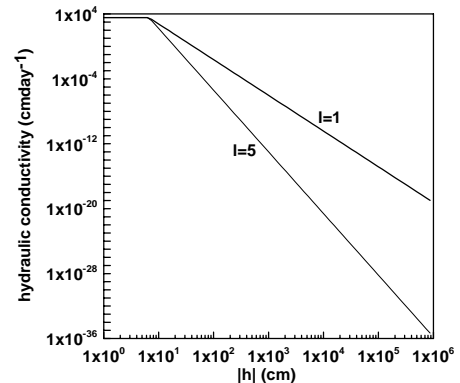


Fig. 2 Effects of parameter l on Brooks & Corey unsaturated hydraulic conductivity model.

示される。

$$K(h) = K_s S_e^{2/n+1+2} \quad (4)$$

K_s は飽和透水係数, S_e は有効飽和度, n, l はパラメータであり, 一般的に $l=1$ が用いられる (Fig. 2)。

初期条件と境界条件: 水分境界条件は, 上部には実測値に即した水蒸気侵入量を与え, 下部には水分フラックス0を与えた。温度境界条件には, 上部, 下部共に実測値を与えた。初期体積含水率は $0.0045 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ とした。計算には, 修正版 HYDRUS-1D を用いた。

4. 結果と考察

水分分布を Fig. 3 にフラックス分布を Fig. 2 に示す。計算は, 試料下端から水分量が増加する現象を再現した。この時, 試料表面から侵入した水蒸気が, 土中において蒸発した水蒸気と共に下方へ降下し, その一方で, 試料下端から液状水が上昇するという水の循環が生じた。しかし, 計算値の水分上昇到達点は実測値を過大評価し, また, 実測水分分布が直線的な形状であるのに対し, 計算値は上に凸な形状となった。

エンハンスメントファクターの効果: エンハンスメントファクターを大きくすることにより ($a=15$, Fig. 4 点線), 水蒸気移動量は大きくなったが, 水分分布に変化はなかった (Fig. 3 点線)。これは, 下向きの水蒸気フラックスを増加する一方で, 上向きの液状水フラックスも増加し, 全体の水の循環は保たれるためである (Fig. 4 点線)。

不飽和透水係数の効果: 不飽和透水係数を減少させると ($l=5$), 液状水の上昇を抑制することができた。しかし, 水分分布の形状は依然異なるままであった (Fig. 3 一点鎖線)。

蒸発・凝縮位置: Fig. 5 に(1)式より求めた蒸発速度分布を示す。負の蒸発速度は凝縮速度を示す。水分の急な勾配が現れる深さ (16日目は6.8cm, 30日目は3.8cm付近)において局所的な蒸発が生じ, その直下で凝縮が生じた。このような局所的な蒸発は, ならかな水分勾配をもつ実測データでは生じないと考えられる。

5. おわりに

計算結果の局所的な蒸発・凝縮から生じる水分分布では, 実測の水分分布の形状を再現することができない。土中の蒸発・凝縮について, 十分に表現できていないメカニズムの可能性が示唆された。

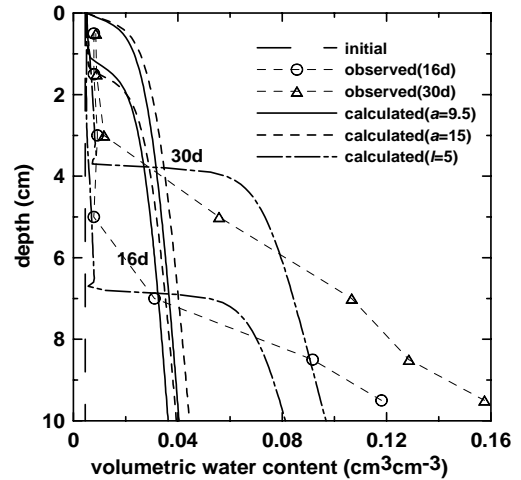


Fig. 3 Volumetric water content profiles.

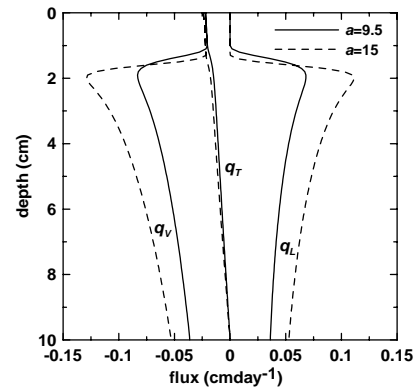


Fig. 4 Vapor (q_v), liquid (q_l), and total (q_t) flux profiles.

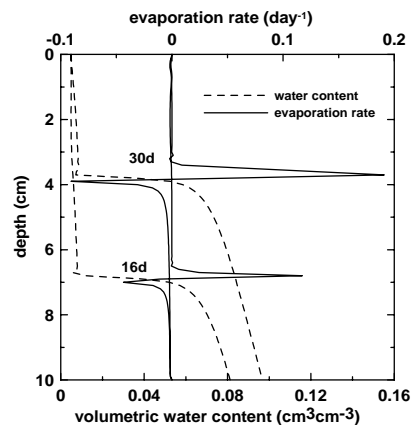


Fig. 5 Relation between volumetric water content profiles (dashed) and evaporation rate profiles (solid) profiles.