

## 砂層間隙内における相変化を考慮した砂層中の熱・液状水・蒸気状水連成移動解析

福井大学工学部 正会員 高野保英  
 福井大学工学部 正会員 福原輝幸  
 埼玉大学工学部 正会員 佐藤邦明

**1. はじめに** 裸地における砂層からの蒸発および砂層中の熱・水分移動特性に関する研究は、農学・気象学および水文学など広範囲の分野に渡って行われ、砂層中の熱・水分移動解析モデルが種々提案されているが<sup>1),2)</sup>、その多くは Philip と De Vries の式<sup>3)</sup>を基にしている。この式は液状水移動に関して Darcy 則を用いているために、厳密には砂層中の液状水が連続している範囲においてのみ適用可能になる。従って、実際の砂漠のように表層に乾燥層が存在し、その下方で蒸発が生じている場合、Philip と De Vries のモデルによって解析することは難しい。この場合には、特に水蒸気移動が重要となり、水蒸気移動量を支配する蒸気圧（水蒸気密度）分布も同時に解くことが必要となる。

そこで本研究では、砂層間隙内での水分の相変化を考慮した飽和-不飽和-乾燥層中の熱、液状水および蒸気状水連成解析モデルの提案を行い、砂層内蒸発実験結果<sup>4)</sup>との比較からその妥当性の検証を試みた。

**2. 砂層中の熱・水分移動理論**

**2.1 基礎式** 砂層間隙内部における水分の相変化を考慮した、液状水、蒸気状水（水蒸気）および熱の移動方程式は、それぞれ次式で与えられる。

$$\text{液状水} : \frac{\partial(\rho_l \theta)}{\partial t} = -\frac{\partial m_l}{\partial z} - E_v(\theta, P_v) \quad ; \quad m_l = -\rho_l \frac{KK_{rl}g}{\nu} \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \quad (1)$$

$$\text{蒸気状水} : \frac{\partial [P_v(\varepsilon - \theta) / R_v T]}{\partial t} = -\frac{\partial m_v}{\partial z} + E_v(\theta, P_v) \quad ; \quad m_v = -D_{atm} \xi \eta (\varepsilon - \theta) \frac{\partial (P_v / R_v T)}{\partial z} \quad (2)$$

$$\text{熱} : \frac{\partial [(\rho_s C_s) T]}{\partial t} = -\frac{\partial q_h}{\partial z} - LE_v(\theta, P_v) + Q_{source} - Q_{sink} \quad ; \quad q_h = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + (\rho_l C_l) V_l T \quad (3)$$

ここに、 $\rho_l$ ：液状水密度、 $\theta$ ：体積含水率、 $t$ ：時間、 $m_l$ ：液状水フラックス密度、 $z$ ：鉛直座標、 $E_v$ ：単位体積当たりの内部蒸発量、 $P_v$ ：間隙蒸気圧、 $K$ ：飽和透水係数、 $K_{rl}$ ：相対透水係数、 $g$ ：重力加速度、 $\nu$ ：液状水の動粘性係数、 $\phi$ ：マトリックスポテンシャル、 $\varepsilon$ ：間隙率、 $R_v$ ：水蒸気の気体定数、 $T$ ：温度、 $m_v$ ：水蒸気フラックス密度、 $D_{atm}$ ：水蒸気の拡散係数、 $\xi$ ：蒸発面補正係数、 $\eta$ ：屈曲率、 $\rho_s$ ：砂の密度、 $C_s$ ：砂の比熱、 $q_h$ ：熱フラックス密度、 $L$ ：蒸発潜熱、 $Q_{source}$ ：砂層に供給される熱量、 $Q_{sink}$ ：砂層が失う熱量（熱損失量）、 $\lambda$ ：熱伝導率、 $C_l$ ：液状水の比熱、 $V_l$ ：液状水流速である。なお、式中の多くの物性値は水分および温度に依存するとして計算される。

**2.2 内部蒸発量** 上の3つの移動方程式は、Kondo ら<sup>5)</sup>が提案したモデルと類似しているが、次に述べる各式の右辺第2項の内部蒸発量の定義において違いがある。

**Fig. 1** のように内部蒸発を、間隙水蒸気圧  $P_{vs}$ （飽和蒸気圧）とその周囲の間隙蒸気圧  $P_v$  との差から生じる間隙水蒸発として捉えると、単位体積当たり（厚さ  $\Delta z$  の層内）の

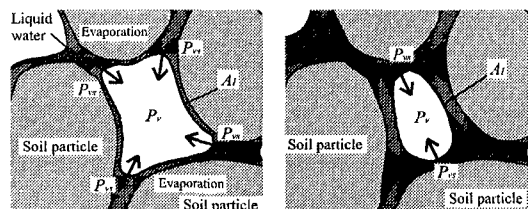


Fig. 1 内部蒸発の概念

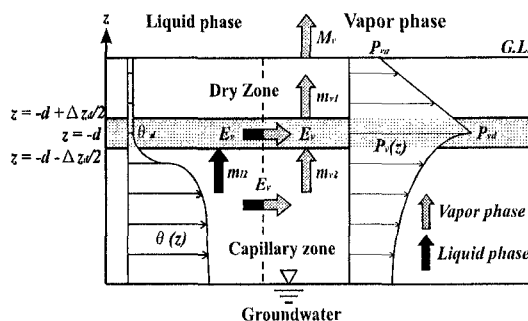


Fig. 2 界面層における水分収支の概念

キーワード：砂層内蒸発、熱・液状水・蒸気状水移動、内部蒸発量

〒910 福井市文京 3-9-1 TEL 0776-23-0500 (2809)

FAX 0776-27-8746

〒910 福井市文京 3-9-1 TEL 0776-23-0500 (2809)

FAX 0776-27-8746

〒388 浦和市下大久保 255 TEL 048-858-3570

FAX

内部蒸発量  $E_v$  は、次のようになる。

$$E_v(\theta, P_v) = A_l K_G' (P_{vs} - P_v) / \Delta z \quad (4)$$

ここに、 $A_l$ ：気-液界面の面積、 $K_G'$ ：蒸発係数である。また Fig. 1 から判るように、気-液界面の面積  $A_l$  は飽和に近いほど小さくなると考えられるので、 $A_l$  は含空率  $(\varepsilon - \theta)$  に比例する ( $A_l \propto (\varepsilon - \theta)$ ) と仮定する。よって、 $E_v$  は、

$$E_v(\theta, P_v) = (\varepsilon - \theta) K_G (P_{vs} - P_v) / \Delta z \quad (5)$$

となる。ここに、 $K_G$ ：内部蒸発係数である。Kondo らは<sup>9)</sup>、地表に近い大空隙と地中内部の小空隙との間の比湿（水蒸気密度）の差および移動抵抗で、内部蒸発量が表現されており、本モデルとは定義が異なる。また、その移動抵抗は小空隙が飽和に近いほど小さくなることから、内部蒸発量は飽和に近いほど大きくなるという点において、式 (5) とは違いがある。なお  $K_G$  は、実験結果を用いて後述する界面層での蒸気状水の保存則より逆算され、 $2 \times 10^{-6}$  s/m を用いた。

**2.3 境界条件** Fig. 3 に、界面（乾燥層と毛管層の境界）における液状水および蒸気状水の保存則の概念図が示される。保存則は、 $z = -d$  に位置する厚さ  $\Delta z_d$  の界面層を想定し、次の離散化した式で与えられる。

$$\text{液状水} : \left[ (\rho_l \theta_d)^{k+1} - (\rho_l \theta_d)^k \right] \Delta z_d = (m_{l2} - E_v \Delta z_d)^{k+1/2} \Delta t \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{蒸気状水} : & \left\{ P_{vd} (\varepsilon - \theta_d) / R_v T_d \right\}^{k+1} - \left\{ P_{vd} (\varepsilon - \theta_d) / R_v T_d \right\}^k \Delta z_d \\ & = (m_{v2} + E_v \Delta z_d - m_{v1})^{k+1/2} \Delta t \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 $m_{l2}$ ：界面層の下部を横切る液状水フラックス密度、 $\Delta t$ ：時間間隔、 $m_{v2}$ ：界面層の下部を横切る水蒸気フラックス密度、 $m_{v1}$ ：界面層の上部を横切る水蒸気フラックス密度、 $k$ ：時間ステップ、添字  $d$ ：界面層である。

地表面 ( $z = 0$ ) における熱保存則は、厚さ  $\Delta z_s$  の表面層を想定し、表面層での熱エネルギー収支（純放射、顕熱および地中伝導熱エネルギーの和）がゼロになるとして与えられる。また、地表面の蒸気圧は便宜的に大気蒸気圧  $P_{va}$  と等しいと仮定する。

以上の液状水・蒸気状水・熱移動方程式および境界条件より、体積含水率、蒸気圧および温度が有限差分法により計算される。

**2.4 蒸発量の算定** 砂層からの蒸発フラックス密度  $M_v$  は、Fick の拡散則に従って、地表面での蒸気圧勾配に比例するものとして、次式より計算される。

$$M_v = -D_{atm} \xi \eta \varepsilon \left[ \partial (P_v / R_v T) / \partial z \right] \Big|_{z=0} \quad (8)$$

**3. 解析結果と実験結果<sup>4)</sup>との比較** Fig. 3 は、実験開始時および終了時の体積含水率  $\theta$  の鉛直分布について計算結果と比較したものである。地下水位は実験中一定であるため、実験値および計算値とも  $\theta$  は殆ど変化しない。Fig. 4 は実験終了時までの温度  $T$  の鉛直分布、Fig. 5 は蒸気圧  $P_v$  の鉛直分布、Fig. 6 は単位面積当たりの積算蒸発量  $Q_v$  の経時変化をそれぞれ実験結果と計算結果について併示したものである。いずれも実験値と計算値は概ね一致する。ただし、乾燥層における蒸気圧分布の誤差は境界条件の設定に起因すると思われる、今後検討すべき課題である。

なお、上述した Kondo<sup>9)</sup>の考えに従って、 $E_v$  は  $\theta$  に比例する場合の解析を行ったが、界面付近の蒸気圧分布に違いが現れ、これでは現象の説明ができなかった。

**参考文献** 1) 近藤純正・徐健育：火山灰土壌及び砂丘砂の裸地からの蒸発量の計算、農業気象、51(3)、pp. 219-228, 1995. 2) 諸泉利嗣・佐藤裕一・佐藤幸一：表層不飽和帯における熱・水分同時移動に関する数値解析、平成9年度農業土木学会大会講演会講演要旨集、pp. 242-243, 1996. 3) Philip, J. R. and De Vries, P. J.: Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans. Amer. Geophys. Union, 38, pp. 222-232, 1957. 4) 高野保英：日周期的な放射変化を受ける砂層カラムからの蒸発現象、福井大学修士論文、1995. 5) Kond, J. and Saigusa, S.: Modelling the evaporation from bare soil with a formula for vaporization in the soil pores, J. Met. Soc. Jpn., 413-421, 1994.

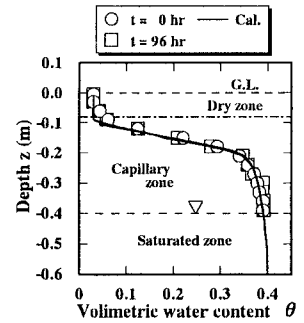


Fig. 3 体積含水率鉛直分布

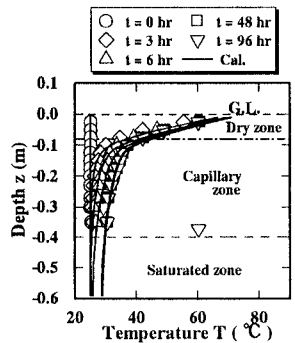


Fig. 4 温度鉛直分布

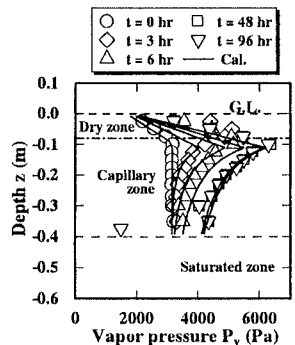


Fig. 5 蒸気圧鉛直分布

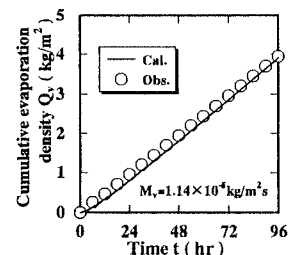


Fig. 6 積算蒸発量経時変化