

III-A 263 不飽和土中の溶質輸送に関する実験と解析の比較

岐阜大学 正会員 佐藤 健
 日本工営(株) 正会員 中村 幸生
 岐阜大学 学生員 ○石川 健次

1. 研究目的

地表面付近では、温度の影響は無視できず、熱の影響を考慮した水分移動の解析モデルとして、Philip & de Vries¹⁾モデルがよく用いられている。本研究では、熱の影響を考えた室内カラム実験を行うとともに、Philip & de Vriesモデルに新たに移流拡散方程式を組み込んで、地表付近に負荷された溶質の輸送機構の解明に努めた。

2. 熱・水分移動に伴う溶質輸送の基礎式

熱・水分・溶質輸送の基礎式を(1)~(5)式に示した。重み付き残差法で有限要素法に離散化をし、EL法により数値計算を行った。

$$\text{水蒸気輸送} \quad \frac{q_v}{\rho_1} = -D_{\theta v} \frac{\partial \theta_1}{\partial z} - D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} \tag{1}$$

$$\text{液状水輸送} \quad \frac{q_l}{\rho_1} = -D_{\theta l} \frac{\partial \theta_1}{\partial z} - D_{Tl} \frac{\partial T}{\partial z} - k_w \tag{2}$$

$$\text{水分輸送} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = D_T \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + D_\theta \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\partial k_w}{\partial z} \tag{3}$$

$$\text{熱輸送} \quad c^* \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - (c_v q_v + c_l q_l) \frac{\partial T}{\partial z} - L_a \rho_1 E \tag{4}$$

$$\text{溶質輸送} \quad \theta_1 \frac{\partial C}{\partial t} = \theta_1 D_h \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \left(\frac{q_l}{\rho_1} \right) \frac{\partial C}{\partial z} + EC \tag{5}$$

ここに、 k_w :透水係数、 L_a :蒸発の潜熱、 C :濃度、 T :温度、 c^* :容積比熱、 θ :体積含水率($\theta = \theta_l + \theta_v$)、 E :蒸発率、 $D_{\theta l}$:等温液状水拡散係数、 D_{Tl} :熱的液状水拡散係数、 $D_{\theta v}$:等温水蒸気拡散係数、 D_{Tv} :熱的水蒸気拡散係数、 q_l, q_v :水蒸気、液状水の質量フラックス、 ρ_1, ρ_v :液状水、水蒸気の密度、 λ :熱伝導率、 c_l, c_v :液状水、水蒸気の比熱。

3. 熱移動を考えた室内カラム実験

室内カラム実験は試料砂として、豊浦標準砂を乾燥密度 $\rho_d = 1.55(\text{g}/\text{cm}^3)$ で充填したものである。カラム下端にNaCl水溶液を接触させ、カラム上端を45°Cで加熱したときと、加熱しないときの2種類の実験を行った。実験装置をFig. 1に示す。

4. 計算結果

計算は、鉛直一次元カラムを想定しており、カラム長18cmとして室内実験との比較を行った。水分移動、熱移動、溶質移動は、いずれも鉛直一次元場で考え、下端からの毛管上昇、上端からの加熱を基本に考えている。

Fig. 2, Fig. 3は実験と計算による飽和度分布を示したもので、カラム下端部分では非常によく水分分布が表現されている。カラム上端部分で実験値のほうが非加熱、加熱の両方の場合で高い飽和度になっている。

Fig. 4, Fig. 5に濃度分布の比較を示す。計算濃度分布は、蒸発率(E)を考慮し

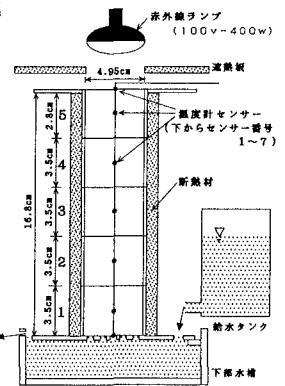


Fig.1 実験装置

た加熱カラムの方が非加熱カラムに較べて非常に高濃度になっており、カラム上端では約8倍の濃度が計算された。実験に較べて、濃度変化が早くなっているのは、蒸発率(E)の与え方による影響が強いためと思われる。

Fig. 6, Fig. 5に計算温度分布を示す。カラム上端を加熱したときの計算では、時間の経過とともに熱が下方へ向かって伝わっていることが分かる。

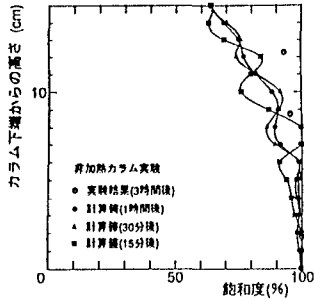


Fig. 2 飽和度分布(実験との比較)

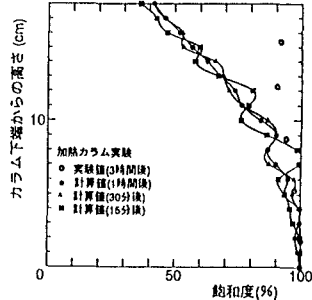


Fig. 3 飽和度分布(実験との比較)

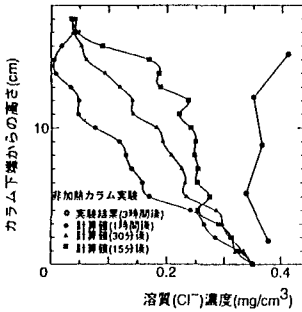


Fig. 4 濃度分布(実験との比較)

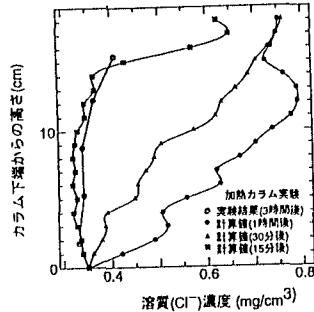


Fig. 5 濃度分布(実験との比較)

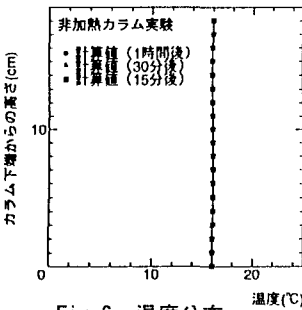


Fig. 6 温度分布

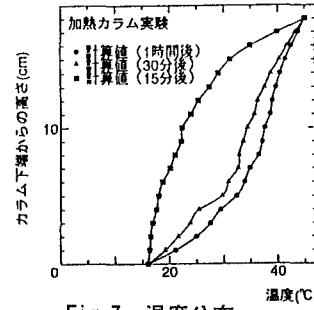


Fig. 7 温度分布

5. 結論

- Philip & de Vriesが提案した熱と水分移動のモデルに移流拡散方程式を加えて、地表付近における気温などの影響を考慮できる不飽和帯中の溶質輸送モデルを提案した。
- 豊浦砂を用いた室内実験に提案したモデルを適用した。カラム上端を加熱したときと加熱しないときのカラム内の飽和度分布、濃度分布の比較から、計算値は加熱によるカラム上端の高濃度変化をよく再現しており、計算の妥当性を確認した。

参考文献

- Philip, J.R. and D.A. De Vries : Moisture movement in porous materials under temperature gradient, Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 38, pp222-232, 1957