

II-92

地表付近の蒸発過程における熱・水分の移動の解析

埼玉大学工学部	正会員	佐藤 邦明
" "	学生会員	○宗像 雅広
福井大学工学部	正会員	福原 輝幸
大林組技術研究所	"	西林 清茂
" "	"	須藤 賢

1. はじめに

不飽和土における熱を伴う水分移動現象は地表付近の蒸発、地中ケーブル周辺の水分移動、放射性廃棄物の地下処分、エネルギー貯蔵といったものに応用される。この現象は等温状態における場合と著しい差異が現われ、関与するパラメーターや係数は水分と温度によって変化する。著者らは特に蒸発による水と熱の移動について実験を試みたが、¹⁾現象のモデル化や解析についてはまだ十分な検討を加えていなかったので報告する。

2. 熱と水分の支配方程式とパラメーター

(1)水分移動に関する基礎式

熱を伴う水分移動をPhilip & De Vries (1959)²⁾は蒸気相と液状水に分けて移動則を与え、質量保存則を定式化して、次式を得た。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (D_T \nabla T) + \nabla (D_\theta \nabla \theta) + \frac{\partial k}{\partial z} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} D_T &= D_{Tv} + D_{Tl} \\ D_\theta &= D_{\theta v} + D_{\theta l} \\ \theta &= \theta_v + \theta_l \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 θ ：体積含水率、 k ：不飽和透水係数、 T ：温度、 D_T ：熱的水分拡散係数、 D_θ ：等温水分拡散係数、添字 v, l ：各々蒸気、液状水の値、 t ：時間、 z ：鉛直座標とする。

(2)伝熱方程式

不飽和多孔媒体中の熱移動はDe Vries (1958)³⁾により論じられたが、熱移動と保存の関係から次式をうる。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - L \lambda \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + L \lambda \left(\nabla \frac{q_l}{\rho_l} \right) - c_l q_l \nabla T \quad (3) \quad \frac{q_l}{\rho_l} = -(D_{Tl} \nabla T + D_{\theta l} \nabla \theta + k_l) \quad (4)$$

ここに、 C ：土の単位体積熱容量、 L ：蒸発熱、 λ ：見掛けの熱伝導率、 q_l ：液状水のフラックス密度、 i ：鉛直(z)方向の単位ベクトルとする。

不飽和土における熱と水分移動の解析は式(1)~(4)によって行なえるが、式中 $D_T, D_\theta, k, L, \lambda$ は一定値とはならず、

$$\left. \begin{aligned} D_{Tv} &= \frac{D_{atm}}{\rho_l} \mu \alpha a h \frac{d\rho_0}{dT}, D_{Tl} = k \frac{\psi}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT} \\ D_{\theta v} &= \frac{D_{atm}}{\rho_l} \mu \alpha a \rho_0 \frac{gh}{RT} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}, D_{\theta l} = k \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} h &= \exp\left(\frac{g\psi}{RT}\right) \\ \sigma &= (75.62 - 0.154T) \times 10^{-6} \text{ (KJ/m)} \\ \rho_0 &= 10^{-3} \exp\left(19.819 - \frac{4975.9}{T}\right) \text{ (kg/m}^3\text{)} \\ D_{atm} &= 2.10 \times 10^{-7} T^{2.3} \text{ (m}^2/\text{h)} \\ L &= 4190 \{597.3 - 0.559(T - 273.15)\} \text{ (J/kg)} \\ \lambda &= (\lambda_{sat} - \lambda^*)(\theta/n) + \lambda^* \text{ (W/mK)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となる。ここに、 D_{atm} ：水蒸気の拡散係数、 ρ_0 ：飽和水蒸気密度、 ν ：マスフローファクター(=1.02)

a : 含空率 (m^3/m^3), h : 相対湿度, α : 屈曲率 ($=0.67$), σ : 水の表面張力, ψ : サクション水頭, g : 重力加速度, R : 気体定数 ($=461.37 J/kgK$), λ_{sat} : 飽和時の熱伝導率 ($=1.465 W/mK$), λ^* : 土の純熱伝導率 ($=0.209 W/mK$), n : 空隙率 ($=0.401$) である。

3. 実験結果への基礎式の適用性

基礎式(1), (3)を境界条件の下で解くわけであるが, 解析的に解くことは出来ないので数値解析による。本報では基礎式の現場への応用というよりは適応性とパラメーターの範囲を得ることを目的とした。差分法によっても有限要素法によっても式(1), (3)を解くことは可能である。ここでは差分法を用いて Sato ら (1986) の標準砂カラム実験による温度と含水率の経時変化がどの程度説明できるか検討する¹⁾。初期・境界条件は長さ l のカラム中

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial Z} = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} Z=l, t \geq 0, T=T_0 \\ \theta=\theta_{sat} \end{array} \right\} 0 \leq Z \leq l, t=0(8)$$

と $Z=0$ での含水率及び温度条件となる。

解析を進めるに当たって, 最も基本となるパラメーター間の補助関係は図-1~3である。図-1は毛管水頭 $\psi \sim \theta$ の関係

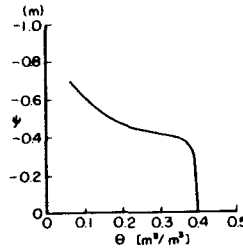


図-1 平均的な $\psi \sim \theta$ の関係

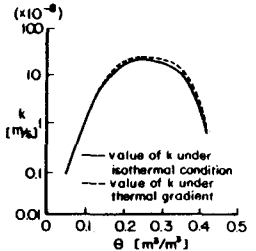


図-2 $k \sim \theta$ の関係

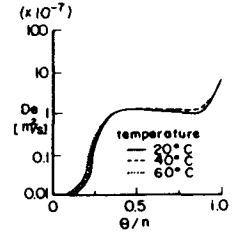
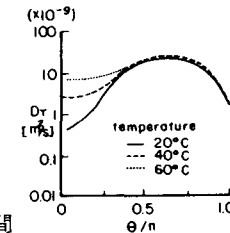


図-3 D_T, D_θ と θ/n の関係

であり, 実験による。次に, 図-2は不飽和透水係数 k と θ の関係であり, 予め実測より式(1)の支配項を残して逆算しておく。図中には温度効果を考慮した場合と無視したそれが同時に示されている。次に, 図-3は式(2), (5), (6)を用い実測より求めたものである。図-1~3により, 入力として $Z=0$ での含水率と温度条件を実測より与えて, 実験カラム下の温度と含水率の深度方向分布の経時変化を示したものが図-4である。かなり長時間にわたって分布が再現されている。また, 図-5は, 蒸発速度 $\partial \theta / \partial t$ を $Z=0$ から l まで積分したものである。本研究により従来不明であった蒸発過程の図-1~3が明らかにされた。

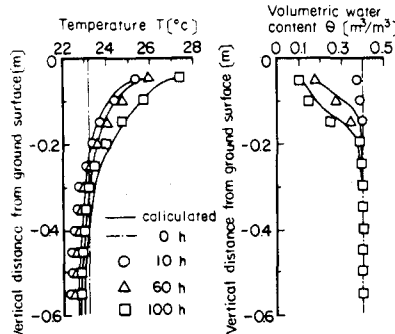


図-4 温度 T と含水率 θ の深度分布

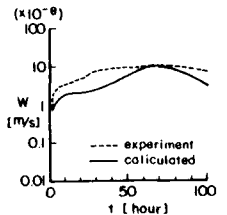


図-5 蒸発速度 w の経時変化

参考文献

- 1) Sato, K, Nishibayashi, K, Sudo, K: Fundamental study on unsaturated flow with heat transfer in drying process, 5th A P D, I A H R, 1986, pp357 ~ 374
- 2) Philip, J. R & D. A. De Vries: Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 38, No. 2, 1957, pp222 ~ 232
- 3) De Vries, D. A.: Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 39, No. 5, 1958, pp909 ~ 916