

金沢大学工学部 正員 関 平和
金沢大学工学部 正員 小森 友明
INAX (株) 前原 勝

1. 緒言 不飽和土壌内の熱・水分の同時移動現象は、舗装路面下の土壌水分の蓄積¹⁾、地下埋設送電線周辺の土壌の乾き上がり²⁾、あるいは農業関係では栽培土壌加温時の温水管周辺土壌の乾き上がりの問題などに関連して重要である。従来、この現象については、主に土壌物理学の分野で Philip & de Vries³⁾ の波島モデルが提示されて以来、幾つかの報告があるが、熱・水分の移動物性値とそれらの相互関係並びにこれらの推算方法は必ずしも統一적ではなく、工学的に土壌温度、含水比分布を計算するに際し、不都合な場合が多い。本研究では、土壌のマトリック・ポテンシャル(ワクショ)を含水比、温度の関数として近似的に表す方法を検討し、その関係式に基づいて各種移動物性値の推算式を導いた。そして、土壌内の一次元的な熱・水分同時移動過程の数値解析を行い、実験的にその妥当性を検討した。

2. 理論解析 2.1 マトリック・ポテンシャルと含水比、温度の関係

不飽和土壌においては、含水比 w と空隙中の水蒸気分圧 p_v (平衡蒸気圧)の間に、次のような熱力学的平衡関係が成立する。ここで、 T は温度 $[^{\circ}\text{C}]$,

$$\frac{p_v}{p_s} = \exp \left\{ \frac{g \phi}{R_v (T + 273)} \right\} \quad \text{--- (1)}$$

R_v は水蒸気の気体定数 $[\text{J}/\text{kgK}]$, g は重力加速度 $[\text{m}/\text{sec}^2]$, ϕ はマトリック・ポ

テンシャル $[\text{m水柱}]$ を表す。 ϕ は w の増加と共にFig. 1のような傾向で変化することが知られている。簡単のため、吸水、脱水過程の hysteresis を考えないことにすれば、この曲線は土粒子に保持される水が毛管水から自由水へと遷移する点 (w_c, p_{Fc}) を境として、数学的には次のような関数でよく近似できるように思われる。

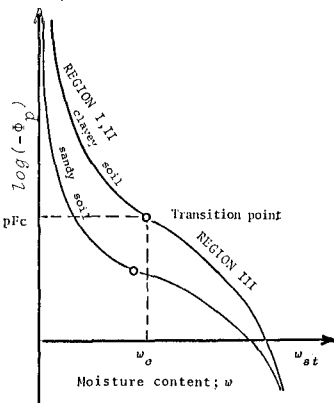


Fig. 1 Relation between moisture content and matrix potential

$$\log(-\phi) = \begin{cases} p_{Fc} + a \log_{10}(w_c/w) & (0 < w \leq w_c) \quad \text{--- (2-1)} \\ p_{Fc} - a \frac{w_c - w}{w_c} \log_{10} \left(\frac{w_c - w}{w_c} \right) & (w_c \leq w < w_{st}) \quad \text{--- (2-2)} \end{cases}$$

式(2-1)は Gardner⁴⁾の式と等価であるが、これまで $w = 0 \sim w_{st}$ (飽和含水比)までの全含水比範囲にわたってこの関係を表示した例はあまり見られない。対象土壌についての ϕ の実測結果に基づき、点 (w_c, p_{Fc}) 、定数 a を試行錯誤的に決定すれば、 w と ϕ の関係を良好に表すことができる。又、式(2)で表示された ϕ を $\phi_{20}(w)$ 〔標準温度を 20°C としたときの ϕ 〕とすれば、温度依存性をも考慮した ϕ の一般形は次式で表される。ただし、 $(1/\alpha)$

$$\phi_p = \phi_{p20}(w) e^{(1/\alpha)(20/\alpha T)(T-20)} \quad \text{--- (3)} \quad (20/\alpha T) \text{ は } 0 \sim 50^{\circ}\text{C} \text{ の温度範囲では一定値 } (-2.15 \times 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}) \text{ とみなして差し支えない。}$$

2.2 土壌内の熱・水分同時移動基礎式、境界条件及び初期条件 有限な厚さの土壌下部から熱が供給され、上端から温・湿度一定な外気へ熱放射・蒸発が起こる一次元熱・水分同時移動モデルを考える(Fig. 2)。このモデルを解析するに当たり、以下の仮定を設定する。

- 1). 土壌を構成する3相〔固相(土粒子)、液相(液状水)、気相(空気)〕の温度は、同一水平面では互いに等しく、その値を土壌温度とみなす。
- 2). 土中の任意の場所での水蒸気分圧は近似的にその場所の温度、含水比によって決まる平衡蒸気圧に等しい。
- 3). 下端(加熱部)は不透水の板で支切られており、そこでの水分移動はない。
- 4). 短波放射(日射)の系内への入射は考えない。

この場合、土壌内の熱・水分同時移動方程式は、Philip & de Vries によれば、次のごとく書かれる。

$$\rho_s \frac{\partial w}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial z} (D_s \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_w \frac{\partial w}{\partial z}) + \rho_w \frac{\partial k}{\partial z} \quad (0 < z < l) \quad (4)$$

$$\rho_s \frac{\partial ((\rho_s + \rho_w) T)}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial z} (K_{eff} \frac{\partial T}{\partial z}) + L \frac{\partial}{\partial z} (\rho_w D_w \frac{\partial w}{\partial z}) \quad (0 < z < l) \quad (5)$$

ただし、 $D_T = \rho_w D_T D$ 、 $D_w = \rho_w D_w D$ 、 $D_w = \rho_w D_w D$ を表す。境界条件、初期条件は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} -D_T \frac{\partial T}{\partial z} - D_w \frac{\partial w}{\partial z} - \rho_w k &= k_s (H_s - H_{\infty}) \quad (z=l) \quad (6), \quad -K_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} - L \rho_w D_w \frac{\partial w}{\partial z} = h_s (T - T_{\infty}) + k_s L (H_s - H_{\infty}) + h_r (T - T_{\infty}) \quad (z=l) \quad (7) \\ -D_T \frac{\partial T}{\partial z} - D_w \frac{\partial w}{\partial z} - \rho_w k &= 0 \quad (z=0) \quad (8), \quad T = f(\theta) \quad (z=0) \quad (9), \quad w = w_i, \quad T = T_i \quad (\theta=0) \quad (10), (11) \end{aligned}$$

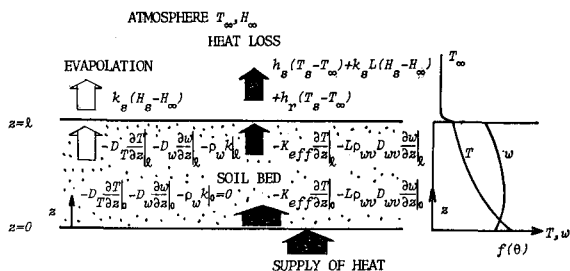


Fig. 2 Schematic representation for one-dimensional heat and moisture transfer in soil

2. 3 移動物性値の推算式 式(4)、(5)中に現れる移動物性値 D_T 、 D_w 、 D_w 、 D_w 、 k 、 K_{eff} はすべて θ の関数となる。このうち、透水性係数 k は Green & Corey の式、水蒸気拡散係数 D_T 、 D_w は渡島モデル、有効熱伝導率 K_{eff} は Krischen モデルを幾分簡略化した推算式によって求めた。

3. 実験による数式モデルの検証 3. 1 実験結果 本実験に使用した試料土は、富山県下新川郡の砂壤土である。土粒子の真密度は 2682 kg/m^3 、粒径加積曲線は Fig. 3 に示す通りである。本実験では、試料容器が小さいので、容器内の充填状態をできるだけ均一にしなければならない関係上、粗粒の混入を避け、 420μ より大きい粒子を除いて試料土とした。試料土の乾燥密度の平均値は 1432 kg/m^3 であった。Figs. 4、5 に実験で得られた試料内温度分布、実験終了時の含水比分布の一例を○印で示した。温度分布は $6 \sim 7 \text{ hr}$ でほとんど変化しなくなるが、この時点では、水分蒸発は依然として起こっており、含水比は逐次減少している。すなわち、土壌内の熱移動の進行速度が水分移動のそれに比べて大きいことがわかる。

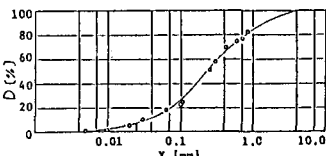


Fig. 3 Particle size distribution

3. 2 実験結果と計算結果の比較 温度分布、含水比分布の経時変化の計算結果を Figs. 4、5 に実線で示した。操作条件、物性値の誤差を加味した実験精度の範囲内で、計算結果は実験結果と比較的よく一致し、理論的取り扱いにはほぼ妥当であると思われる。

4. 結言 マトリック・ポテンシャルの数式化を行、た後、各種移動物性値の推算式を導き、一次元的熱・水分の同時移動過程の解析を行い、実測値と比較した結果、両者は良好に一致し、本理論解析の妥当性が示された。今後は、特に、暖房分野で取り扱われている温水循環方式による施設内土壌加温操作を河象として、温水管周辺の土壌水分の乾き上げの問題を中心に検討を進めたいと考えている。

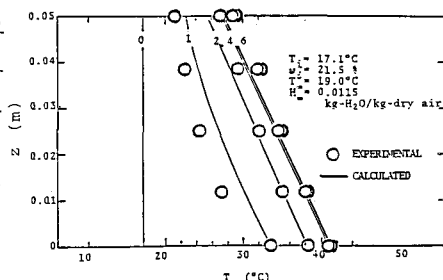


Fig. 4 Comparison of the experimental temperature distributions with the calculated results

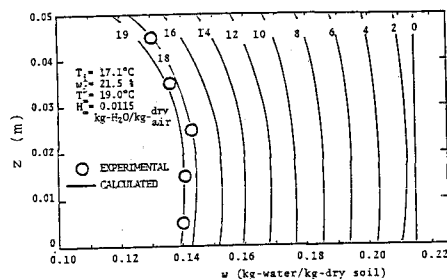


Fig. 5 Comparison of the experimental moisture distributions with the calculated results

[文献]

- 1) Roudsiv, A.J. and U'u.N.V., Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102, GT12, 1976, 1225-1244
- 2) Abdel-Hadi, O.N. and Mitchell, J.K., Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107, GT11, 1981, 1461-1487
- 3) Philip, J.R. and de Vries, D.A., Trans. American Geotechnical Union, 28, 1957, 222-232
- 4) Hillel, D. "土壌物理学概論" 岩田通年監修, 1984, 60, 養賢堂
- 5) Green, R.E. and Corey, J.C., Soil Science Society of America, 35, 1971, 3-8
- 6) 関 平和・小森友明, 日本農業気象学会に経理部会誌, 9, 1984, 43-48