

京都大学 学生員 堀田尚哉
京都大学 正員 井上頼輝
京都大学 正員 堀内将人

1. はじめに 地表面における大気と土壌との間の熱交換現象は、従来から主として気象学分野で研究が進められ、その熱交換のメカニズムはかなり解明されてきた。しかし、地層内部の熱挙動となると土壌水分の移動との複雑な相互作用を無視できないため、評価が難しい。最近では、地表面近くの地層中での物質移動を温度勾配の影響を考慮して評価する試みにおいて、地層内での熱・水分挙動の解析が進められつつある。地表面付近では、土壌水分および温度分布の変化が激しく、水分と熱の移動を独立に解析することには無理がある。そこで本研究では、温度勾配条件下での物質移動を解析する前段階として、Philip and de Vries の理論を援用して、土壌水分と熱の挙動を同時解析する方法を、関連環境パラメータの設定方法・手順を含めて構成することを試みた。

2. Philip and de Vries の理論 Philip and de Vries^{*}によれば、定常状態の土壌水分、および熱フラックスは次式で与えられる。上式正とする。

$$\text{水蒸気フラックス} : g_v/g_e = -D_{ov} \frac{\partial \theta_e}{\partial z} - D_{tv} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

$$\text{液状水フラックス} : g_l/g_e = -D_{el} \frac{\partial \theta_e}{\partial z} - D_{tl} \frac{\partial T}{\partial z} - K \quad (2)$$

$$\text{トータルの水分フラックス} : g_m/g_e = -D_e \frac{\partial \theta_e}{\partial z} - D_T \frac{\partial T}{\partial z} - K \quad (3)$$

$$\text{熱フラックス} : g_h = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + L_o g_v + C_p(T-T_o)g_v + C_l(T-T_o)g_l \quad (4)$$

これらの式を連立させ温度勾配($\frac{\partial T}{\partial z}$)、水分勾配($\frac{\partial \theta_e}{\partial z}$)について解くと次式を得る。

$$\frac{\partial \theta_e}{\partial z} = \frac{g_h D_T - K \lambda - g_m (T-T_o) D_{TV} - g_m \lambda}{\lambda D_e - L_o D_{TV} D_T} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{g_h D_e - K L_o D_{TV} - g_m (T-T_o) D_e - g_m \lambda D_{TV}}{\lambda D_e - L_o D_{TV} D_T} \quad (6)$$

各パラメータの値、熱および水分フラックスを与え、式(5)(6)を θ_e , T について解くことにより、所定の条件下での温度分布および水分分布を算定することができる。

3. 土壌水分及び熱挙動の同時解析手法 式(5)、式(6)中のパラメータには、直接実測できず提案されている値(文献値)の妥当性についても疑問がもたれているものがある。

本報では図1に示す手順に従い未知なパラメータを水分及び温度の実測値から、パラメータ同定手法により推定し、同パラメータを用いて目的とする系の熱・水分を同時解析する手法を提案する。

4. 実験方法及び結果 実験装置を図2に示す。カラムには風乾砂を均一に充填し、赤外線ランプにより熱フラックスを与え、カラム内温度分布が定常に達した後、カラム下部より水道水を供給した。砂層表面からの蒸発量が定常になった時、カラム内水分分布が定常に達したと見なし、カラムを分解して水分分布を実測した。結果の1例を図3に示す。

5. 解析 (5-1) パラメータの決定

実験結果の中から基本となる実験条件で行った実験A(図3)を

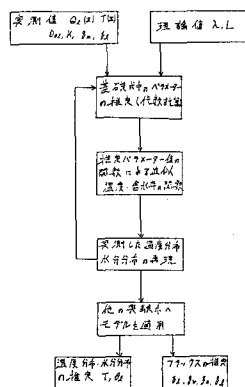


図1 Philip and de Vries 理論の適用の手順

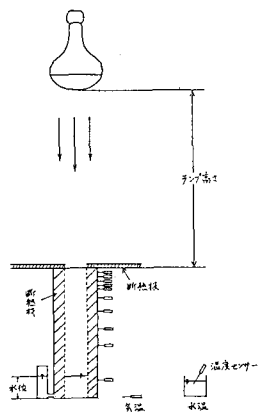


図2 温度勾配下での水分分布の測定装置

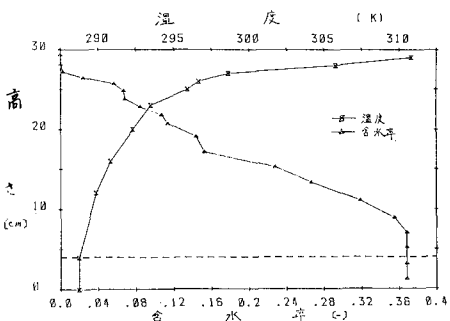


図3 実験Aの水分分布と温度分布 (20分後 35cm)

選ぶ。式(5)、式(6)を用いた数値実験及び感度解析の結果より、式(5)、式(6)中の D_{ov} が含まれる項は無視できることがわかり、次式を得た。

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{q_0 D_T - K \lambda - g_m (T - T_0) D_T v - g_m \lambda}{\lambda} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = - \frac{g_0 - g_m (T - T_0)}{\lambda} \quad (8)$$

$$g_0 = g_m (T - T_0) - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (9)$$

式(8)を g_0 について解くと式(9)となり、砂層内温度分布の実測値を代入して式(9)により計算した結果、熱フラックス g_0 は高さ方向の分布をもつことがわかった。

また、式(7)(8)において独立に実測されていないパラメータは D_T のみとなる。

$$D_T = \frac{K \lambda + g_m \lambda + \lambda D_{ov} \frac{\partial T}{\partial z}}{g_0 - g_m (T - T_0)} \quad (10)$$

式(7)より式(10)を得る。実験Aの温度・水分の実測分布、式(9)及び式(10)より本実験砂のパラメータ D_T を算出した。一方、Philip and de Vries は水の表面張力や不飽和透水係数、水蒸気分散係数、空隙率等のパラメータを用いて理論的に D_T を算定する

式を提案している。同式により算定した D_T の値を仮に D_{th} とし、実験に用いた砂の特性を反映する式(10)による計算値 D_T との間の相関関係、図4式(11)を把握して、 D_{th} を媒介にして実験系に対する D_T の温度及び土壌水分量についての変数を決定した。式(12)を用いて g_0 は評価した。

$$D_T = 1.68 \times 10^{-4} \cdot D_{th}^{1.77} \quad (11)$$

$$g_0 = g_m - \int_0^z U(T - T_0) dz \quad (12)$$

(5-2) 温度分布、水分分布の予測 まず、 D_T 、 U の評価精度を確認するために、 D_T を式(7)(8)に適用し実験Aに対する計算機シミュレーションを実施した。図5に示すように温度分布の計算値は表層を

除いて実測値と一致した。水分分布も蒸発位置は一致し、分布の概略を再現することができた。このことより D_T 、 U は土壌水分及び温度分布の予測に対し十分な精度をもつことが確認された。つぎにこのようにして設定した D_T 、 U を用いて他の実験条件で得た温度分布、水分分布の予測を試みた。計算はすべて飽和位置より行い、飽和位置での境界条件は実測値を内挿して決定した。実験Aに対して水位のみを高くした場合の実測分布と予測分布を図6に示す。赤外線ランプと土壌カラム上端との距離を短くして、熱フラックスのみを増加させた場合の実測分布と予測分布を図7に示す。温度、水分分布ともに良好一致を示し、実験条件の変化による定常分布の変化を本報で採用した手法により予測できることがわかった。

6. まとめ Philip and de Vriesの理論に含まれる諸パラメータのうち、試料砂について独立に測定することができないパラメータを、基礎実験による実測水分分布及び温度分布より同定した。Philip and de Vriesの理論を一部修正し、本実験系に適用することにより、水分及び温度分布の予測が、ある程度の精度で可能であることを示した。

参考文献

* Philip, J.R. and de Vries, D.A.: Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients. Trans. Amer. Geophys. Union, Vol.38, No.2, pp.222-222

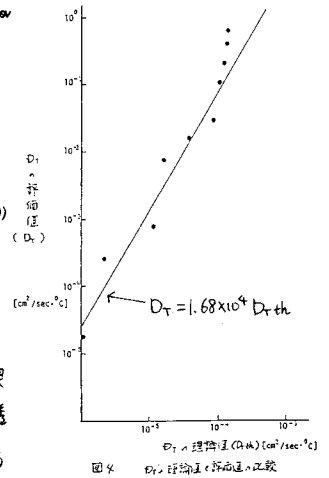


図4 D_T と D_{th} の相関関係 (両軸対数)

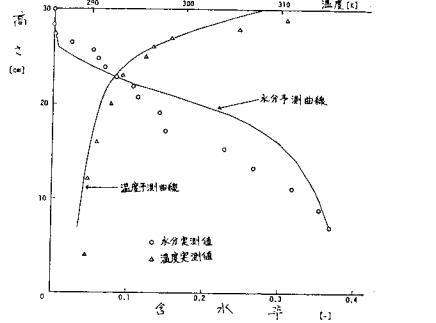


図5 実験Aの実測分布と予測分布 (高さ7cmより計)

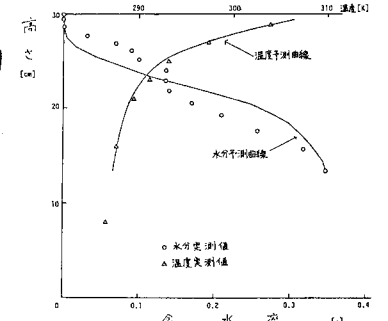


図6 実験Cの実測分布と予測分布 (高さ7cmより計)

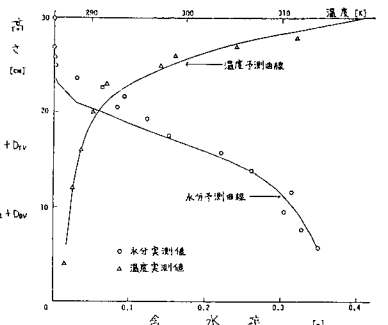


図7 実験Dの実測分布と予測分布 (高さ7cmより計)

(1957)