

II-78

乾燥過程における飽和-不飽和多孔媒体中の蒸発に関する研究

埼玉大学工学部 正員 佐藤 邦明
茨城県土木部 中山 浩一

1. はじめに

多相系の流れと熱輸送機構の解明は工学的に重要でかつ現実に即した興味深い問題であると同時に、現在注目されている問題の1つになっている。

そこで本研究では、裸地地盤の太陽輻射による蒸発・伝熱・水分移動について、地下水位条件を変えて実験的かつ理論的に研究を行い、Philip & Devriesの式を出発点として理論的に解析解を得て、実験結果と比較を行い、その一部を報告するものである。

2. 実験装置及び方法

実験に使用した試料砂には、洗浄して粘土、シルト分を取り除いた珪砂(中央粒径0.42mm、均等係数1.30)を用い、実験は図-1のような実験装置により行った。まず試料砂を充填した砂地盤容器下部に任意の地下水位を与え、水位はマリ奥特フラスコにより一定に保てるようになっている。太陽光模擬光源の照射後、地層内及び地表面上の温度、地層内の体積含水率を経時的に測定する。砂地盤容器からの蒸発量はマリ奥特フラスコ内の水位及び実験槽の重量を経時的に測定することにより得ている。ここで温度測定に関して、地表面上5 (cm) から地表面下4 (cm) までは、ポイントゲージに取り付けた熱電対、地表面下4 (cm) 以下各点においては砂地盤容器の計測孔に熱電対を挿入することにより測定した。このような実験を地表面から光源までの高さが、全実験ケース84 (cm) と一定のもと、地下水位条件を変えて、温度20 (°C)、湿度25 (%) の恒温室で行った。

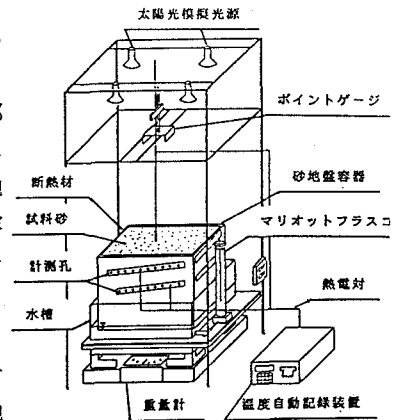


図-1 実験装置全体図

3. 従来のPhilip & Devriesの理論とガス移動を考慮した理論

Philip & Devriesによる水分・熱移動の式は次式で与えられる。

$$\text{水分移動: } \partial \theta / \partial t = \partial (D_T \partial T / \partial Z) / \partial Z + \partial (D_\theta \partial \theta / \partial Z) / \partial Z + \partial k / \partial Z \quad (1)$$

ここに、 D_T : 熱的水分拡散係数、 D_θ : 等温水分拡散係数、 k : 不飽和透水係数、 θ : 体積含水率、 Z : 鉛直方向座標

$$\text{熱移動: } c' \partial T / \partial t = \partial (\lambda \partial T / \partial Z) / \partial Z - (C_v q_v + C_l q_l) \partial T / \partial Z - L \rho_l E \quad (2)$$

ここに c' : 湿った土の体積熱容量、 λ : 熱伝導率、 C_l : 液状水の比熱、 C_v : 水蒸気の比熱、 q_l : 液状水のフラックス密度、 q_v : 水蒸気のフラックス密度、 L : 蒸発の潜熱、 E : 蒸発率、 ρ_l : 液状水密度、 T : 温度式(1), (2)において図-7のような境界条件($Z=0: T_s, \theta_s, Z=-l: T_b, \theta_b$)で定常解を導くと

$$\text{水分移動の定常解: } d\theta / dZ = (W - k - D_T dT / dZ) / D_\theta \quad (3)$$

ここに、 W : 蒸発速度

$$\text{熱移動の定常解 (乾燥領域 a) } T_a = c_1 \exp \{ (\alpha_v / \kappa_a) Z \} + c_2 \quad (4)$$

$$\text{(毛管領域 b) } T_b = c_3 \exp (\zeta Z) + c_4 \exp (\xi Z) + T_i \quad (5)$$

ここに、 c_1, c_2, c_3, c_4 : 積分定数、 κ_a : 乾燥帯における温度拡散係数、 T_i : 初期温度

次にPhilip & Devriesの式にガス移動を考慮した水分・熱移動の基礎式は次式で与えられる。

$$\text{水分移動: } \partial (\rho_l \theta_l) / \partial t + \partial (\rho_l \vec{U}_l) / \partial Z = -\dot{m} \quad (\text{液状水}) \quad (6)$$

$$\partial (\rho_v \theta_v) / \partial t + \partial (\rho_v \vec{U}_v + \vec{J}_v) / \partial Z = \dot{m} \quad (\text{水蒸気}) \quad (7)$$

ここに、 ρ_v : 水蒸気密度、 θ_v : 液状水含水率、 θ_g : 体積含有ガス率、 U_l : 液状水移流速度、 U_g : ガス移流速度、 J_v : 水蒸気拡散量、 $\dot{m}$: 蒸発量率

$$\text{熱移動: } \partial T / \partial t = \bar{K} \partial (\partial T / \partial Z) \partial Z - V_E \partial T / \partial Z - \{ \Delta h v / (\rho c) \} \dot{m} \quad (8)$$

ここに、 $\bar{K}$: 温度拡散率、 V_E : 蒸発速度、 $\Delta h v$: 蒸発熱

式(6), (7), (8)において同様に図-7に示すような境界条件より定常解を導くと

$$\text{水分移動の定常解: } \partial \theta / \partial Z = - \{ (\rho_l D_{Tl} - I_v) \partial T / \partial Z + \rho_l K_l / g + \rho_l V_E \} / \rho_l D \theta_l \quad (9)$$

ここに、 D_{Tl} : 熱的液状水拡散係数、 K_l : 透水係数、 g : 重力加速度、 $D \theta_l$: 等温液状水拡散係数

$$\text{熱移動の定常解(乾燥帯領域 a)} \quad T_a = c_5 \exp(\beta Z) + c_6 \quad (10)$$

$$(\text{毛管帯領域 b}) \quad T_b = c_7 \exp(\gamma Z) + c_8 \quad (11)$$

ここに、 c_5, c_6, c_7, c_8 : 積分定数

4. 実験結果と解析結果との比較、検討

実験で得られた温度分布を理論値と共に図-2、図-3に示す。図-3は比較的地下水位が低い場合、図-4は比較的地下水位が高い場合である。これを見ると従来の Philip & Devries の式よりも、ガス移動を考慮した式の方が実験値と良好に一致していることがわかる。これは従来の水蒸気移動のフラックス密度の式では密度差だけで圧力差を考慮していない。また水分移動には拡散だけでなく移流も起きていると考えられ、よってガス移動を考

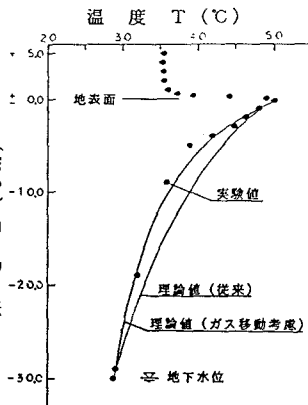


図-2 温度分布 (EXP.1)

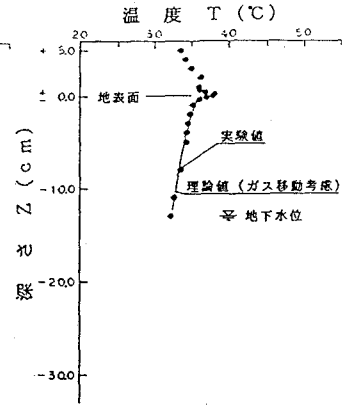


図-3 温度分布 (EXP.2)

慮した式を与えたところ、移流効果のために、実験値により近い値が得られるようになったものである。次に実験で得られた体積含水率分布を理論値と共に図-4、図-5に示す。図-4は比較的地下水位が低い場合、図-5は比較的地下水位が高い場合である。これらの図からもガス移動を考慮した式の方が実験値と良好に一致している。次に図-6は砂地盤容器からの積算蒸発量である。この図からもガス移動を考慮した式は実験値と良好に一致している。

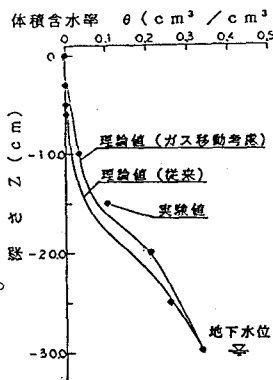


図-4 含水率分布 (EXP.1)

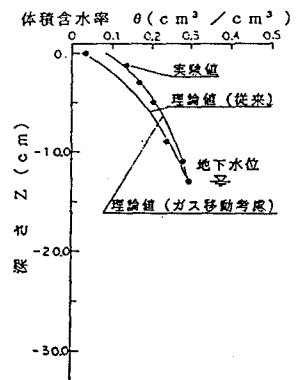


図-5 含水率分布 (EXP.2)

5. 結論

1) 定常解析結果はPhilip & Devriesの式よりもガス移動を考慮した式の方が実験値と良好に一致することが確かめられた。

2) 含水率の鉛直分布は地下水位の深さにより、つまり毛管帯の厚さによって急激に変化することが判った。

[参考文献]

佐藤邦明, 福原輝幸: 乾燥過程における飽和-不飽和多孔媒体中の蒸発に関する基礎的研究

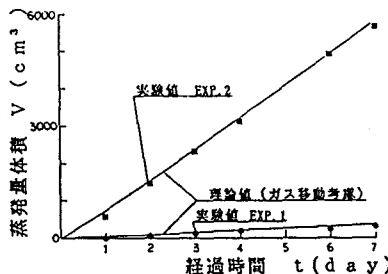


図-6 積算蒸発量 (EXP.1,2)

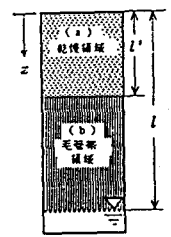


図-7 境界条件