

II-87

温度勾配下での土壌内水分移動と土壌面蒸発

東京大学工学部 正員 玉井 信行
 東京大学工学部 正員 浅枝 隆
 電力中央研究所 正員 ○田中 靖治

1. はじめに

蒸発散量を正確に推定することは、水収支の推定精度を上昇させ、また、水資源の有効利用という観点から大切である。また、畑地かんがいにおける水利用率の向上、土壌の塩化の防止といった課題に対しても重要である。

2. 間隙のモデル化

本研究においては、中野¹⁾の間隙保水モデルを改良した図1に示すモデルにより土壌間隙のモデル化を行う。

図2は、一つの間隙内において水が吸引圧 ψ で平衡している状態である。図2の中の r_k (以下臨界間隙半径と呼ぶ)は、

$$r_k = R \cos \delta = 2 \sigma \cos \delta / \rho g \psi \quad (1)$$

で表すことができる。ただし、 R はメニスカスの曲率半径、 δ は固相と間隙との境界線と鉛直軸のなす角、 σ は水の表面張力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。

$r_k \geq r_d$ の間隙においては水は間隙のすべてを満たしており(図1(a))、 $r_d > r_k \geq r_n$ のような間隙においては中央の部分は全て水で満たし、両端の部分においては $r_k / \cos \delta$ の曲率半径のメニスカスを境界として間隙の一部分のみに水をもつことになり(図1(b))、 $r_n > r_k$ のような間隙においては間隙内に水は存在しない(図1(c))。ここに、 r_d と r_n はそれぞれ間隙の最大半径と最小半径である。

土壌中の間隙を図1のモデルで表すことにより、個々の間隙の含水量を吸引圧と対応させることができるだけでなく、間隙との関係保水における”インク瓶効果”も再現することが可能となった。間隙の1単位長の半径 d および r_d は全ての間隙について一定とし、 r_n は間隙により異なる値をもち、Burgerに従いその値は対数正規分布をすると仮定した。図3は、Columbia fine sandy loamの水分特性曲線²⁾に対するシミュレーションの結果である。図に示したように以上に述べた間隙モデルは、土壌の間隙保水特性をかなりよく再現できる。

3. 温度勾配下の水分移動

温度勾配のある土壌中の水蒸気流束の実測値は、単純な拡散理論による計算値よりもかなり多い。それは、土壌を構成する土粒子、水および空気の熱伝導率が互いにかかなり異なるために、土壌の空隙内の温度勾配は土壌全体の温度勾配とは相当異なっているのが原因である。このことを考慮して、土壌間隙が2.に示したモデルにより構成されると仮定して、温度勾配下の密閉容器にColumbia fine sandy loam詰めた場合²⁾の平衡状態における水蒸気流束 $q_{v,n}$ を求めた。このとき、水分量差による水蒸気の移動および温度差による液状水の移動は無視でき、水分量差に起因する液状水の移動量 $q_{l,w}$ は通常用いられている拡散型の算出式により求めた。その結果を示したのが、図4である。従って、図4より、間隙モデルを用いることによりかなり正確に温度勾配による土壌内の水蒸気の移動量を推定できるといえる。

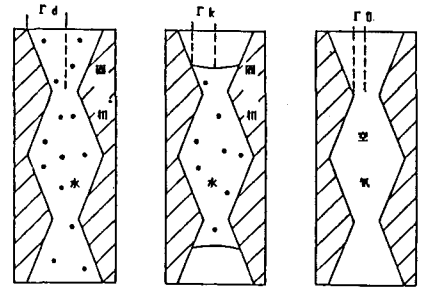


図1 Y-O混合型の間隙内の水の存在状態

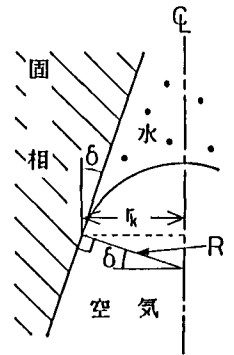


図2 臨界間隙半径 r_k とメニスカスの曲率半径 R との関係

4. 土壌面蒸発

地表面からの蒸発フラックス E は次式で与えられる³⁾。

$$E = C d_r^{1/2} \{ \alpha_v^{-1} (C d_r^{-1/2} - 5) + 7.3 R e_n^{1/4} S c^{1/2} \}^{-1} \cdot \rho u_r (q_s - q_r) \quad (2)$$

ただし、 ρ は湿潤空気密度、 u_r 、 q_r はそれぞれ地表面から高さ z_r の位置における風速および比湿、 q_s は地表面の比湿、 $C d_r$ は抵抗係数(U_*^2 / u_r^2)、 α_v は乱流シュミット数の逆数、 $R e_n$ は粗度 z_0 に関するレイノルズ数 $U_* z_0 / \nu$ 、 $S c$ はシュミット数である。

温度勾配による水分移動量は2.、3.で示した方法により算出し、水分量差による水分移動量および熱流量は一般に用いられている放物型の微分方程式により算出して、地表面への水分の供給量および地表面付近の温度を計算し、式(2)により地表面からの水分の蒸発量の評価を行った。図5は様々な外部環境におかれたColumbia fine sandy loamから成る地盤からの積算蒸発量の経時変化の計算結果を示したものである。図5より外部環境により土壌面からの蒸発量にかなり差があることがわかる。なお、計算においては地表面下5mの深さまでの水分量および温度の変化を考慮した。各計算Caseにおける外部環境を表す変数の値は表1に示す通りである。また、地盤内の初期条件としては、すべてのCaseにおいて深さ方向に様に温度20℃、体積含水率0.1 cm³/cm³とし、境界条件としては、地表面下5mの断面において、熱および水の出入りはないものとした。

5. 結論

間隙モデルにより土壌内の温度勾配に起因する水蒸気移動量を評価する方法を開発し、それと従来より用いられている拡散型の水分量差に起因する水分移動量の算出式および地表面からの蒸発量の算出式を組み合わせることにより、土壌内部の条件と土壌を取り巻く外部環境の影響の両方を取入れた蒸発量の計算が可能となった。

参考文献：(1)中野政詩、農業土木学会論文集、Vol.35、1971。

(2) Cassel, D.K., Nielsen, D.R., and Biggar, J.W., Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol.33, 1969. (3) Brutsaert, W., Water Res. Res., Vol.11, 1975.

表-1 各計算Caseにおける外部環境

	Q^* ly	T_r C	u_r cm/s	q_r
Case1	0.50	15.0	400	5.80×10^{-3}
Case2	0.25	15.0	400	5.80×10^{-3}
Case3	0.50	20.0	400	5.80×10^{-3}
Case4	0.50	15.0	600	5.80×10^{-3}
Case5	0.50	15.0	400	1.16×10^{-3}

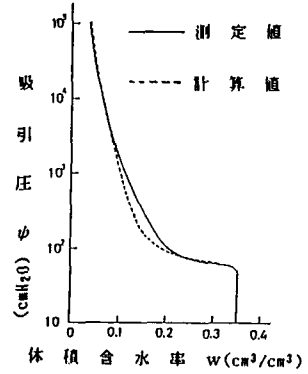


図3 Columbia fine sandy loamの水分特性曲線に対するシミュレーション

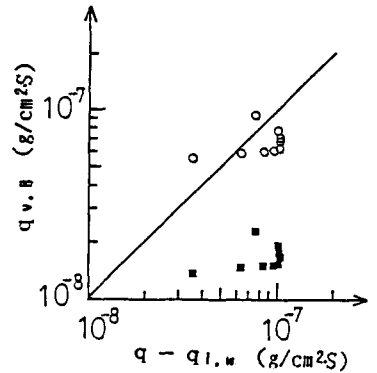


図4 Cassel, Nielsen and Biggarの水分移動実験に対する計算結果

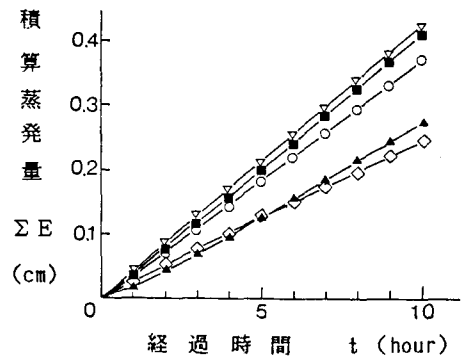


図5 外部環境の違いによる積算蒸発量の変化 (Columbia fine sandy loamの場合)