

熱移動を考慮した蒸発法による乾燥領域の不飽和透水係数の推定 Estimation of Unsaturated Hydraulic Conductivity in Lower Water Content Range Using the Evaporation Method with Heat Transport

○鈴木 萌香*・坂井 勝*・取出 伸夫*
Moka Suzuki, Masaru Sakai and Nobuo Toride

はじめに 不飽和透水係数 K を推定する方法の一つに、蒸発実験の土中水圧力変化を数値計算が再現するように逆解析する蒸発法がある。蒸発過程では熱移動も同時に生じるが、特に水蒸気移動が卓越する乾燥領域の K の推定に対する影響は、十分に検討されていない。温度勾配下の土中水分移動は次式で表される。

$$q = -K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) - K_{LT} \frac{\partial T}{\partial z} - K_{Vh} \frac{\partial h}{\partial z} - K_{VT} \frac{\partial T}{\partial z}$$

ここで、 q は水分フラックス (cm/s)、 h は土中水圧力 (cm)、 T は地温 ($^{\circ}\text{C}$)、 z は上向きを正とする位置 (cm)、 K は不飽和透水係数 (cm/s)、 K_{LT} は温度勾配による液状水の透水係数 (cm/s)、 K_{Vh} 、 K_{VT} はそれぞれ圧力勾配、温度勾配による水蒸気移動の透水係数 (cm/s) である。本研究では、蒸発法を用いて乾燥領域の K を推定することを目的とし、土カラム側面を断熱した蒸発実験を行い、熱移動を考慮した数値計算で逆解析を行った。また、断熱の効果が K の推定に与える影響についても検討を行った。

蒸発実験 図1に蒸発実験装置の概略図を示す。高さ10cm、内径15cmの亚克力カラムに鳥取砂丘砂を乾燥密度 1.62 g/cm^3 で充填した。土中水圧力測定のため、テンシオメータ・誘電率式センサー (MPS-6)・温湿度計 (HC2) を1, 2, 5cm深に、鉛直・水平方向の温度分布測定のため熱電対を各位置に設置した。カラム側面を厚さ9cmまたは3cmのスタイロフォームで断熱した。カラム下端から毛管飽和後、地表面10cm上に設置した小型ファンを用いて蒸発を促進し、カラム重量変化による蒸発量、地表面5cm上の大気の温湿度変化を測定した。実験終了時に、炉乾法で深さごとの水分量、WP4で土中水圧力を求めた。

数値計算 水分・熱移動の数値計算を行い、不飽和透水係数を推定した。初期条件には、実験開始時の土中水圧力と地温を与えた。上端境界条件は、地表面熱収支式を用いて空気中の温湿度に基づく水分・熱フラックスを与えた。下端には水分ゼロフラックスと、カラム下の温度に基づく熱フラックスを与えた。また、土中水圧力と積算蒸発量の測定値を逆解析の目的関数とした。不飽和水分移動特性関数には管流と膜流の影響を考慮した PDI モデルを用いた。水分特性曲線のパラメータは別途測定した水分特

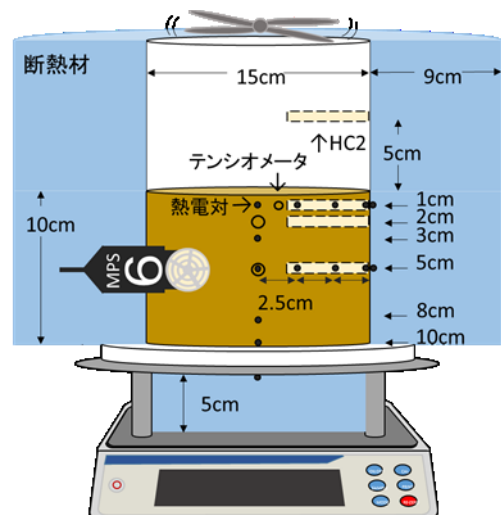


図1 蒸発実験の概要図
Fig.1 illustration of evaporation experiment

*三重大学大学院生物資源学研究科 Graduate School of Bioresources, Mie University

キーワード：蒸発法，不飽和透水係数，水分移動，熱移動，数値計算

性曲線から決め、透水係数に関わる4つのパラメータを推定した。本研究の数値計算には、不飽和水分移動汎用プログラム HYDRUS-1D を用いた。

結果と考察 図2に断熱9cmの場合の積算蒸発量の経時変化を示す。9日目までは恒率蒸発が続き、その後減率蒸発となった。図3に各深さの土中水圧力 h の変化を示す。HC2を用いて乾燥領域まで h の低下を測定できた。 h の上下変動は地表面の温度変化による影響である。数値計算は、実験の積算蒸発量と、各深さの h の変動を含む低下をよく再現した。図4に推定した不飽和透水係数 K を示す。

$h = -20$ cm から急激に低下し、 $h < -60$ cm で低下が緩やかになる K が推定できた。熱移動を考慮せず、湿潤領域の圧力測定値のみを使用して推定した K (従来法) と比較すると、 $h > -40$ cm の湿潤領域ではおおよそ一致するが、乾燥領域では大きく異なった。このため、乾燥領域の K の推定には、乾燥領域を含む圧力測定値に対して熱移動を考慮した数値計算を適用することが重要だと考えられる。図5に蒸発速度が最も大きい時間の1cm深の水平温度分布を示す。水平方向の温度勾配の最大値は、断熱9cmで $0.17^\circ\text{C}/\text{cm}$ 、断熱3cmで $0.27^\circ\text{C}/\text{cm}$ であったため、断熱を厚くすることで側面からの熱流入を抑制できたと考えられる。ここで、断熱9cmと3cmの実験から推定した K を比較すると、 $h > -40$ cm の湿潤領域で少しずれているものの、推定結果はほぼ一致した(図4)。水蒸気移動が卓越する時間帯は蒸発速度が低下しているため、鉛直方向の温度勾配が小さくなる。そのため、温度勾配による水蒸気移動量は小さくなり、側面からの熱の流入が不飽和透水係数の推定に与える影響は小さかったと考えられる。

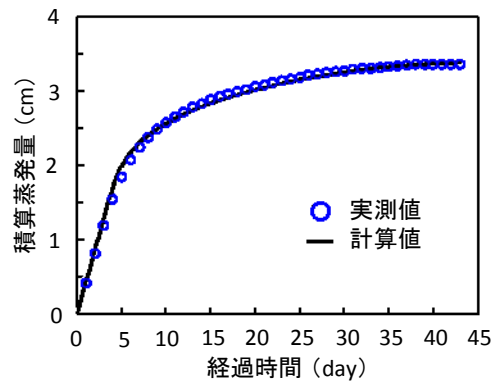


図2 積算蒸発量(断熱9cm)

Fig.2 Cumulative evaporation amount

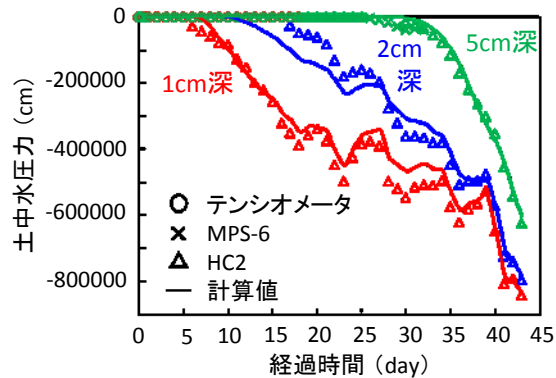


図3 各深さの圧力変化(断熱9cm)

Fig.3 Observed and simulated pressure heads

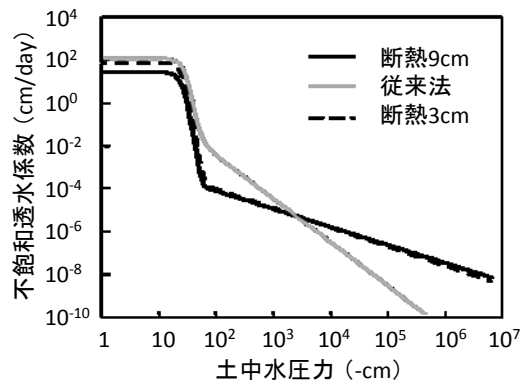


図4 推定した不飽和透水係数

Fig.4 Estimated hydraulic conductivity

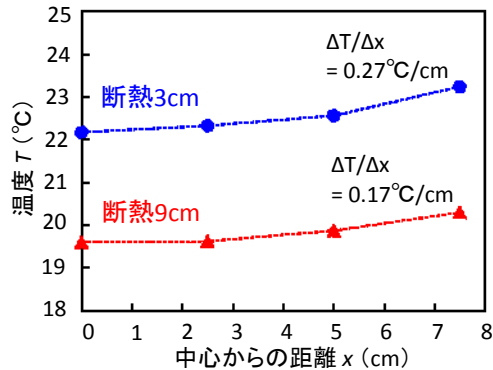


図5 1cm深水平方向の温度分布

Fig.5 Horizontal temperature profiles at 1 cm depth