

数値実験による不飽和透水係数推定に対する地表面温度データの有効性の検討
Numerical analysis to evaluate availability of surface temperature data
for unsaturated hydraulic conductivity estimation

坂井 勝

Masaru Sakai

1. はじめに 土壌水分量および地温の予測は、作物栽培を行う上で重要である。特に土壌面蒸発による乾燥過程での水分・地温変化の予測には、低水分領域の不飽和透水係数の把握が必要である。発表者らは、赤外放射温度計で測定した地表面温度変化に対し、土中水分・熱移動の数値シミュレーションを適用することで、低水分領域の透水係数を推定する方法を提案した¹⁾。地表面温度は、非接触、かつ低労力で測定することが可能であるため、サーモグラフィ搭載 UAV を用いた透水係数の空間分布の評価等にも応用が期待できる。UAV では空間的な観測ができる一方で、設置型の放射温度計の様に時間的な連続データを得ることはできず、観測データは多くても一日数点程度に限られる。

本研究では、観測数が限られた地表面温度データの不飽和透水係数推定に対する有効性について、数値実験で評価することを目的とした。

2. 計算方法 2.1 順解析 晴天時の気象データを反映した地表面熱収支式と HYDRUS-1D を用いて、裸地の土中水分・熱移動の順解析を行った。三重大学附属農場内の畑地土壌を想定し、表層 0~20 cm 深の作土層と 20 cm 以深の 2 層の土層を計算領域とし、それぞれ Durner モデルで水分特性曲線と不飽和透水係数を与えた。

$$K(S_e) = K_s (w_1 S_{e1} + w_2 S_{e2})^{\ell} \times \frac{\left(w_1 \alpha_1 \left[1 - \left(1 - S_{e1}^{1/m_1} \right)^{m_1} \right] + w_2 \alpha_2 \left[1 - \left(1 - S_{e2}^{1/m_2} \right)^{m_2} \right] \right)^2}{(w_1 \alpha_1 + w_2 \alpha_2)^2}$$

ここで、 K_s は飽和透水係数、 S_e は有効飽和度、 w_i ($i=1, 2$) は重み係数 (-) , α_i , n_i , m_i は曲線の形状を与えるパラメータ、 ℓ は間隙結合係数である。ここでの計算では、作土層に $K_s = 52.6 \text{ cm d}^{-1}$ と $\ell = 0.5$ を与えた。初期圧力水頭を全層で -10 cm とし、7 日間の乾燥過程の計算を行い、得られた地表面温度や土壌水分量変化を人工的な観測データとした。

2.1 逆解析 順解析で得られた地表面温度を目的関数とし、逆解析で不飽和透水係数に影響を与える K_s と ℓ の 2 パラメータのみの推定を行った。UAV 空撮による観測を想定し、目的関数には計算開始から 5 日目 14 時 (4.58 d) の地表面温度 1 点のみの場合と、それに 2 日目 14 時 (1.58 d) の地表面温度を加えた 2 点の場合の 2 ケースを検討した。推定パラメータの初期値については、 $K_s = 52.6 \text{ cm d}^{-1}$ と $\ell = 0.5$ に対して乱数でばらつきを与えた 10 通りの組合せを用意し ($0.5 < K_s < 500 \text{ cm d}^{-1}$, $-5 < \ell < 5$)、逆解析による不飽和透水係数の真値への収束性について検討した。逆解析には汎用ソフト PEST を用いた。

3. 結果 図 1 に順解析で求めた蒸発速度と地表面温度を示す。ここで灰色線は、土壌が常に湿潤な条件下で別途計算した可能蒸発条件下の結果である。計算開始から 2.5 d までは可能蒸発段階で、大きな蒸発速度と比較的小さい温度振幅を示した。その後、乾燥による表層の透水係数低下にともない減率蒸発段階となり、蒸

発速度が低下し、地表面温度は最大で 50℃ 以上となり、大きな温度振幅を示した。

図 2 に初期パラメータおよび逆解析で得られたパラメータによる不飽和透水係数を、また図 3 にそれぞれの透水係数で計算した地表面温度と 5 cm 深の体積含水率を示す (図中灰色線)。初期パラメータによる透水係数は真値 (図 2 プロット) に対して、湿潤から乾燥領域において幅を持った設定となっている。真値に対して低い透水係数を用いた場合は、早期の蒸発速度低下により、計算開始直後から地表面温度および土壌水分量を過大評価した。一方、真値に対して高い透水係数を用いた場合は、可能蒸発期間が長くなるため、計算後期の地表面温度および土壌水分量を過小評価した。

減率蒸発段階の地表面温度 1 点 (4.58 d) を目的関数として逆解析を行った場合、推定した透水係数は、主に圧力水頭が -100 ~ -10,000 cm の領域で真値へ比較的狭い範囲に集約した (図中青線)。この時、1.5 d や 2.5 d の減率蒸発段階に移行する時間帯に、日中の温度上昇をやや過大評価するものの、計算後半の温度変化を良く再現した。また 5 cm 深の土壌水分量についても、計算後半でやや過大評価するケースがあるものの、真値を概ね良く再現した。ここから、減率蒸発段階の 1 回の観測でも、比較的乾燥領域の透水係数の情報を得ることが可能だと言える。さらに可能蒸発段階の地表面温度 1 点 (1.58 d) を目的関数に加えることで (図中赤線)、透水係数の推定値は全圧力領域で真値とほぼ一致し、地表面温度と土壌水分量を良く再現した。土壌が湿潤な日と乾燥した日で地表面温度の観測をすることで、広い圧力範囲の透水係数を推定できる可能性が示された。

サーモグラフィを用いた実際の温度測定では、 $\pm 2^\circ\text{C}$ 程度の誤差が生じる。今後は、この測定誤差を考慮した上で、有効な目的関数の評価が必要である。

引用文献: 坂井・北田 (2022) 農業農村工学会講演要旨集

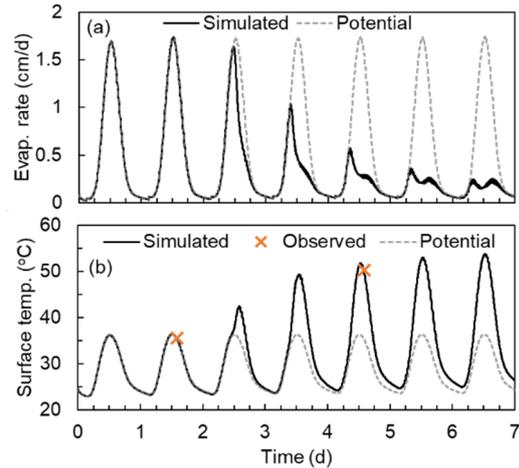


図 1. 順解析による (a) 蒸発速度と (b) 土壌面温度
Fig. 1 Results of a forward simulation. (a) evaporation rate, (b) soil surface temperature.

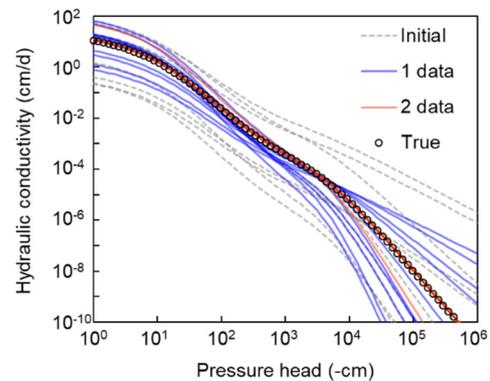


図 2. 様々な初期パラメータから逆解析で推定した不飽和透水係数
Fig. 2 Unsaturated hydraulic conductivities estimated from various initial parameters.

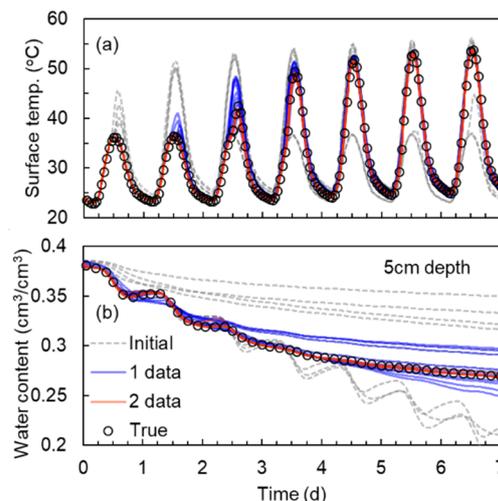


図 3. 初期および逆解析パラメータで計算した (a) 土壌面温度と (b) 5cm 深の体積含水率
Fig. 3 (a) Soil surface temperature and (b) water content at 5 cm depth simulated with initial and estimated unsaturated hydraulic conductivities.