

地表面温度の測定に基づく低水分領域の不飽和透水係数の推定 Estimation of unsaturated hydraulic conductivity for lower water content based on soil surface temperature measurement

○坂井 勝* 北田 彰隆**

Masaru Sakai Akitaka Kitada

1. はじめに 土壌水分量及び地温の予測は、作物栽培を行う上で重要である。とりわけ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。しかし、透水係数の測定は困難であり、現場測定データに基づいて推定した例も少ない。

蒸発は潜熱消費をともなう相変化であり、水分移動だけでなく、熱移動に対しても重要な役割を果たす。土壌が湿潤な可能蒸発段階では、潜熱消費が大きく、地温は低く維持される。一方で乾燥が進行し、土の透水係数が制限要因となる減率蒸発段階では、地温は上昇する。つまり現場で容易に測定可能な地温は、減率蒸発段階の透水係数の情報を有している。特に地表面温度は、非接触、かつ低労力で測定することが可能である。

そこで本研究では、減率蒸発段階における地表面温度の上昇から、低水分領域の不飽和透水係数を推定することを目的とした。まず裸地圃場において、赤外放射温度計で地表面温度を測定した。そして、土中水分・熱移動の数値計算を行い、地表面温度の測定値と計算値の比較から、不飽和透水係数を推定した。

2. 方法 2-1. 実験方法 三重大学附属農場内の裸地圃場で現場測定を行った。放射温度計 SI-111 (Apogee 社) を高さ 100 cm に設置し、直径約 80 cm 領域の地表面温度を測定した(図 1)。また、5, 13, 28 cm 深の体積含水率、土中水圧力、地温、および気象データを 30 分間隔で測定した。

2-2. 計算方法 HYDRUS-1D を用いて、降雨が少なく、土壌乾燥が進行した 2021/8/21~9/2 を対象に土中水分・熱移動の数値計算を行った。

気象データの測定値を反映した地表面熱収支式から求まる土壌面蒸発速度、土中熱フラックスを上端境界条件に与えた。表層 0~20 cm 深と 20 cm 以深の 2 層の土層を計算領域とし、体積含水率 θ と圧力水頭 h の現場測定値に基づく水分特性曲線 $\theta(h)$ を各層に与えた。また、Durner モデルで水分特性曲線から不飽和透水係数 K を推定し、各層に与えた(図 2)。

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

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。ここでは、 ℓ 値を変えた計算を行い、地表面温度の測定値と計算値を比較することで、表層 0~20 cm 深の K を検討した。また、仮想的に土壌が常に湿潤な可能蒸発条件下でも、別途計算を行った。

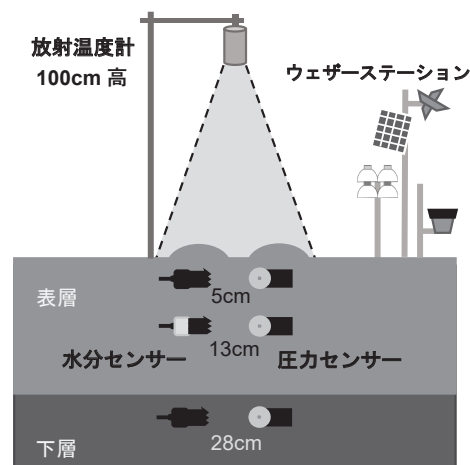


図 1. 現場測定の概略図

Fig. 1 Schematic illustration of the field observation.

*三重大学大学院生物資源学研究所 Graduate school of Bioresources, Mie Univ., **三重大学生物資源学部 Faculty of Bioresources, Mie Univ., キーワード: 土中水分・熱移動, 不飽和透水係数, 地表面温度, HYDRUS-1D

3. **結果** 図3(a)に8/24～9/1の地表面温度の測定値を示す。土壌の乾燥が進行した8/27頃から、地表面温度が上昇した。図3(b)に積算蒸発量の計算値を示す。常に湿潤な条件下で計算した可能蒸発は、最大の蒸発量を示す。可能蒸発で蒸発が進行する期間は、 $\ell = 0.5$ を用いた計算では8/27正午頃まで、透水係数が高い $\ell = -2$ では8/28正午頃までであり、その後透水係数の低下により蒸発速度が低下した。地表面温度の計算値(図3(a))は、いずれの計算においても8/27までは地表面温度の測定値を良く再現した。土壌が湿潤な条件下では、透水係数に依らず数値計算は現場の蒸発速度を良く表していると言える。可能蒸発の計算は、8/27以降日中で地表面温度の測定値を過小評価した。これは、蒸発速度の計算値が実際よりも大きく、潜熱消費を過大評価したことが原因である。一方 $\ell = 0.5$ では、8/27以降で測定値を過大評価した。これは逆に、乾燥に伴う透水係数の低下が実際よりも大きく、蒸発速度を過小評価したためだと考えられる。 $\ell = -2$ では、8/30以降は地表面温度を過大評価したが、全体的に測定値を良く再現した。 $\ell = -2$ で表される K が、現場の透水係数の低下、およびそれに伴う蒸発速度の低下をよく表していると言える。

図4(a), (b)に $\ell = -2$ で計算した8/24～8/30の体積含水率分布と、8/28の地温分布の日変化をそれぞれ示す。計算は、1日を通して各深さの地温の変化を良く再現し、含水率の低下を概ね再現した。以上より、地表面温度の測定に基づいて、表層0～20 cm深を均一な層と仮定した場合の、表層の水分・熱移動を再現する低水分領域の不飽和透水係数と圧力水頭の関係が推定可能であることが示された。今回の計算で、8/27～8/29までの表層の圧力範囲は約 10^2 cmから 10^5 cm程度であったことから、この領域の K を推定したと言える。今後、植生条件下への適用による植物の水ストレスの推定、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可能であると考えられる。

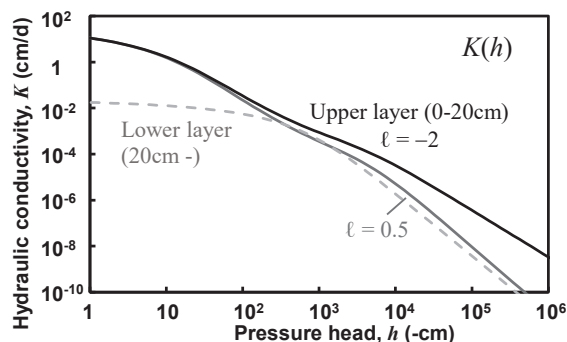


図2. 計算に用いた不飽和透水係数
Fig. 2 Hydraulic conductivity used for simulations.

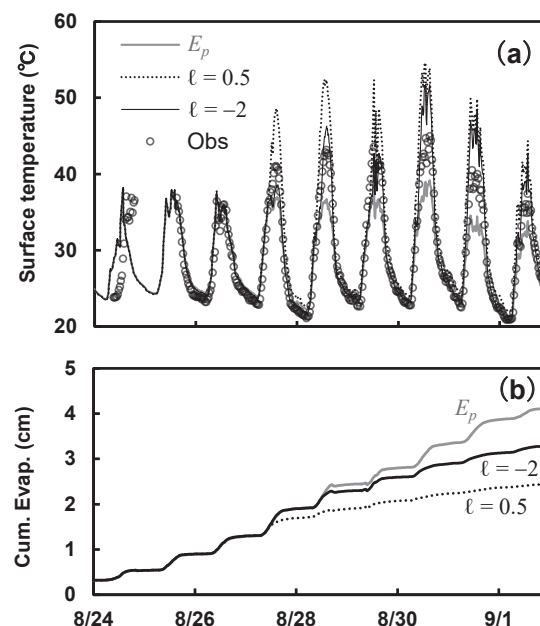


図3. 地表面温度(a)と積算蒸発量(b)の計算値
Fig. 3 Simulated results of surface temperature (a) and cumulative evaporation (b).

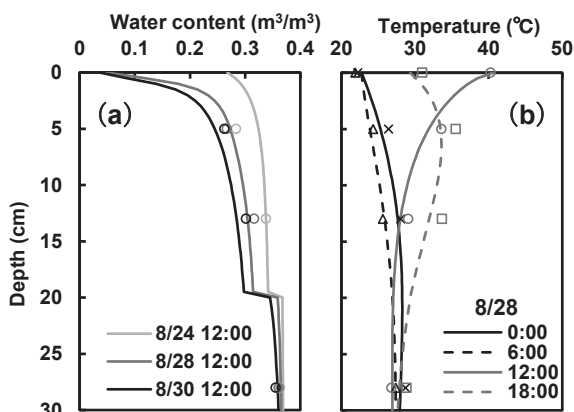


図4. $\ell = -2$ で計算した体積含水率分布(a)と地温分布(b)

Fig. 4 Water content (a) and soil temperature profiles (b) simulated with $\ell = -2$.