

## 地表面温度の測定に基づくダイズの水ストレス推定 Estimation of Water Stress Based on Surface Temperature in a Soybean Field

○和中久実      坂井 勝  
Kumi Wanaka    Masaru Sakai

**1. はじめに** 作物の水ストレス状態の把握は、適切な水管理を行う上で重要である。土壌が乾燥し作物が水ストレスを受けると、根の吸水、それに伴う葉からの蒸散が低下する。この時、水分蒸発の潜熱消費が減少するため、葉温上昇を観測することで水ストレス状態を推定できる可能性がある。本研究では、葉温の観測からダイズの水ストレス状態を推定することを目的とした。そのために、ダイズ栽培圃場において放射温度計で地表面温度の観測を行った。そして、気象条件を反映した群落熱収支モデル(2層モデル)及び土壌水分・熱移動モデルを用いた数値計算で得られる地表面温度と比較することで、水ストレス状態を判断した。

**2. 方法 2.1 現場観測** 2023/7/19 から 10/18 において、三重大学附属農場内のダイズ栽培圃場(7/4 播種)で現場観測を行った(図1)。赤外放射温度計 SI-111 (Apogee 社)を土壌面から高さ 100 cm に設置し、8月2日以降は高さ 50 cm に下げ、地表面温度を 30 分間隔で測定した。また各種気象データ及び 5、13、28 cm 深の体積含水率、土中水圧力、地温を 30 分間隔で測定した。この年はダイズの生育が悪く、葉が十分に繁茂しなかった。そのため放射温度計で測定した地表面温度 $T_s$ は、葉温と土壌面温度及び測定対象面積割合を反映した値だと考えられる。

**2.2 数値計算** 土中水分・地温予測プログラム HYDRUS-1D を用いて観測データに対して数値計算を行った。計算には、群落の放射透過率 $\tau$ に基づいて分割した土壌面と植披層の熱収支

を考慮する2層モデルを用い、気象データを反映した土壌面蒸発速度 $E_g$ と土中熱フラックス $G_s$ 、及び蒸散速度 $E_c$ をそれぞれ境界条件と根の吸水モデルに与えた。

$Rn_g = H_g + L_w E_g + G_s$  :  $Rn_c = H_c + L_w E_c$   
ここで、 $Rn_g$ と $Rn_c$ は土壌面と植披層に対する純放射量、 $H_g$ と $H_c$ は土壌面-大気間と植披面-大気間の顕熱フラックス、 $L_w$ は水単位質量当たりの蒸発潜熱である。計算からは土壌面温度 $T_g$ 、葉温 $T_c$ が出力されるため、ステファン・ボルツマンの法則に基づいて、放射透過率 $\tau$ を用いて地表面温度 $T_s$ の計算値とした。

$$T_s = \sqrt[4]{\tau T_g^4 + (1 - \tau) T_c^4}$$

計算土層は 0~20 cm 深の作土層と、20 cm 以深の下層土を想定し、根は 20 cm 深まで均一な分布とした。下端境界条件は自由排水条件とし、初期条件は土中水圧力及び地温の測定値を与えた(乾燥過程)。また、下端境界条件で地下水位を 20 cm 深に設定することで、仮想的に土壌が常に浸潤であり、水ストレスを受けず可能蒸発散が生じる条件下でも、地表面温度及び蒸散速度の計算を行った(可能蒸発散条件)。解析は図2に示した気温と地表面温度及び土中水圧力の変化をもとに、期間①:7月21日~7月23日、期間②:8月17日~8月19日、期間③:8月4日~8月6日に分けて行った。土壌が乾燥かつダイズが小さく裸地と見なせる期間①では、 $T_s$ に基づき作土層の不飽和透水係数を決定した。土壌が十分に湿潤な期間②では、透水係数の低下による $E_g$ の低下や水ストレスによる $E_c$ の低下を考慮する必要がなく、比較的単純

な可能蒸発散条件で解析ができる。そこで、群落ではない小さい個体のダイズに対して、放射透過率 $\tau$ を調整することで2層モデルが適用可能か検証した。最後に、土壌が乾燥し土中水圧力が初期しおれ点 $-170$  kPa を下回り水ストレスを受けている可能性がある期間③で、水ストレス状態の推定を行った。ここで $T_s$ の実測値を再現する乾燥過程の計算の蒸散速度と、可能蒸散速度の比を水ストレスの指標として評価した。

**3. 結果** 期間②と期間③について述べる。期間②について、放射透過率 $\tau$ を0~1で0.1刻みで変化させ計算した。図3に $\tau=0.1, 0.4, 0.9$ の地表面温度 $T_s$ の計算値と実測値の比較を示す。 $\tau$ は葉温 $T_c$ と土壌面温度 $T_g$ の計算結果に影響し、その結果 $T_s$ が変化した。RMSEより実測値を最も再現した $\tau$ は0.4であった。この期間中、放射温度計の測定対象領域における葉面と土壌面の面積割合(被覆率)が0.6程度であったことから、透過率を“1-被覆率”と仮定することで、小さなダイズ個体に対して2層モデルが適用できると言える。

期間③について、水ストレスの推定を行った。図4(a)に $T_s$ の実測値と可能蒸発散条件及び乾燥過程の条件での計算値を示す。まず、実測値は水ストレスを受けていない可能蒸発散条件での $T_s$ より日中に最大で $4^\circ\text{C}$ 程度上回った。乾燥過程の計算は、 $T_s$ の実測値を再現するように根の吸水モデルのパラメータを調整した。乾燥過程の蒸散速度は可能蒸散速度を日中下回った(図4b)。水ストレスの指標となる2つの蒸散速度の比を図4(b)に示す。蒸散比が1を下回るときダイズは水ストレスを受けている。蒸散比は8/4に0.7、8/5は0.5、8/6には0.4程度に低下し、土壌の乾燥の進行とともに水ストレスが強くなった。ここから放射温度計による地表面温度の観測に基づき作物が受けている水ストレス度合いを評価できることが示された。

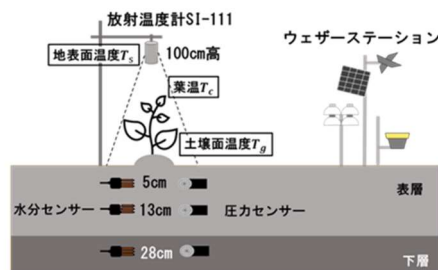


図1.現場観測の概略図

Fig.1 Illustration of the field observation

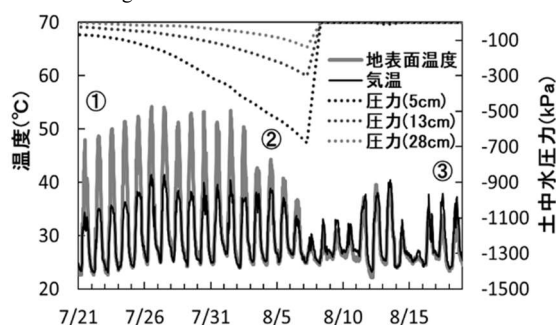


図2.期間①~③における気温および地表面温度と各深度の土中水圧力の変化

Fig.2 Changes of air temperature, surface temperatures, and soil water pressure heads

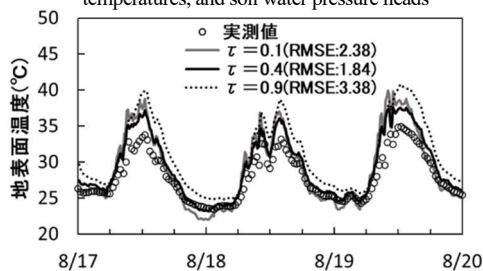


図3.期間②における地表面温度の実測値と異なる透過率 $\tau$ を用いた計算値の比較

Fig.3 Comparison between observed surface temperature and simulated results using different radiation transmissivity  $\tau$ .

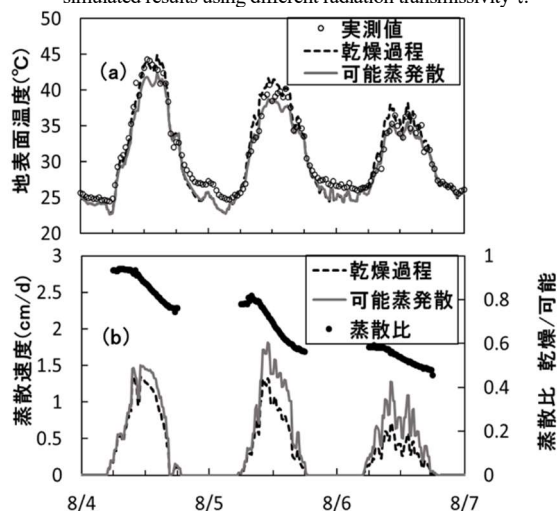


図4.(a)期間③における地表面温度の実測値と乾燥過程及び可能蒸発散条件での計算値 (b)乾燥過程の蒸散速度と可能蒸散速度の比較及び蒸散比

Fig.4 (a) Observed and simulated surface temperatures. (b) Comparison of transpiration rates simulated under a drying condition and a wet condition.