



水田転換畑における土壌の乾燥と気孔コンダクタンスを用いた ダイズの水ストレスの関係の観測および観測時刻別モデル化

坂口 敦¹・辻 卓弥¹・藤井理樹¹・荒木英樹¹・高橋 肇¹

Hourly observation and modeling of relationship between dryness of soil and water stress of soybean measured by stomatal conductance at converted field

Atsushi SAKAGUCHI¹, Takuya TSUJI¹, Toshiki FUJII¹, Hideki ARAKI¹ and Tadashi TAKAHASHI¹

Abstract: We defined a water stress index which is a ratio of stomatal conductance of soybean between rain fed field and non-water stress field, and regressed the water stress index on soil moisture in the rain fed field. In addition, we applied a Jarvis model of soybean to estimate the stomatal conductance in the non-water stress field without measuring in the field. As a result, the stomatal conductance of both fields did not give significant difference in the morning, and correlation was not seen between the water stress index and the root zone suction in the rain fed field at 10 o'clock. On the other hand, the stomatal conductance gave significant difference in the afternoon, and the higher coefficient of determination was seen between the index and the suction at 13 o'clock when they were regressed by the equations of ellipse, the Feddes model and the S-shape model. We suppose the 13 o'clock would be the suitable time to model the transition of water stress in response to drying of soil. Regarding the Jarvis model, we found that the calibration for each time makes the value of coefficient of determination increase, although this is not reported in previous studies.

Key Words: soil moisture, stomatal conductance, Jarvis model, drought damage, soybean

1. はじめに

本邦においては水田への輪作体系の導入や水田の転作の推奨に伴いダイズが栽培される機会が増え、水田の排水性の悪さからダイズの湿害対策が盛んに研究されている。しかし、ダイズは湿害の他に干害によっても収量が大きく変化する作物であり、熊谷ら(2018)は過去33年間に実施された生産力検定試験の成績をもとに、本邦のダイズの収量が土壌の乾燥の影響を強く受けている事を明確化した。特に本邦の九州などの温暖地を除く地域においては梅雨前の5月~6月にダイズを播種し、生育

初期の根の生長が盛んな時期と梅雨期が重なるために根の生長が抑制される場合が多く(Hirasawa et al., 1998)、梅雨明け後の蒸発散量が多い時期に比較的湿潤な深部土壌から吸水する事ができずに干害を受けやすいものと考えられる。中野ら(2017)はダイズへの灌漑効果を地域的に提示する事を目的として、水ストレスとダイズ収量の関係を解析した。当研究では降水量と作物蒸発散量の差分を水ストレスの指標としており、論文中には明記されていないが降水量と作物蒸発散量の差分は土壌水分の変化傾向と概ね一致するものと考えられる。土壌水分は推定のみならず実測もセンサーを用いて経時的に行う事ができるため、経時的な圃場の水分指標として用いられる事が多いが、土壌水分は灌漑の作物生育に対する効果の直接的な指標ではない。灌漑の作物に対する効果を経時的に評価するには作物の水ストレスを測定する必要がある。水ストレスの測定方法としてはプレッシャーチャンパーによる葉の水ポテンシャルの測定、サップフローセンサーによる茎内流量の測定、リーフポロメータを用いた葉の気孔コンダクタンスの測定、葉温測定に基づく葉気温差や、ポテンシャル蒸散状態にある湿潤葉の葉温と無蒸散状態にある乾燥葉の葉温に対する任意葉の葉温から任意葉の水ストレス状態を推定するCWSI: Crop Water Stress Index (Jackson et al., 1981)などの指標の利用が挙げられるが、気孔コンダクタンスの測定は比較的容易である。根域の土壌水分が不足した状況では作物は蒸散を抑えるために気孔を閉じ、気孔コンダクタンスは低下する。どの程度の土壌水分を作物が適当と判断するのかについては灌漑において有用な情報であるが、作物収量を指標として適当な土壌水分値を推定した研究は多いものの(柴田・金子, 1978; 村上, 2009; 細野ら, 2014)、栽培期間中に土壌水分と作物の水ストレスの関係を経時観測した研究は比較的少ない。例えば、最近スマート農業が注目され自動灌漑も普及するものと予想されるが、自動灌漑では灌漑を開始すべき閾値となる土壌水分値を適切に決定する必要があり、栽培期間中に得られた土壌水分と作物の水ストレスの関係のデータが有用に

¹Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 1677-1 Yoshida, Yamaguchi city, 753-8515, Japan, Corresponding author: 坂口 敦, 山口大学大学院創成科学研究科
2021年3月14日受稿 2021年6月21日受理

なる。

本研究では梅雨明け後のダイズ圃場において圃場の土壌水分とダイズの気孔コンダクタンスの双方を経時的に観測する。また、気孔コンダクタンスは水ストレスの指標として用いられる事が多いが、気孔コンダクタンスは光合成有効放射、飽差、気温などの土壌水分以外の環境要因でも変化するため、土壌水分が不足した圃場の作物の気孔コンダクタンスだけを観測しても、土壌水分と水ストレス指標としての気孔コンダクタンスの関係を解明する事はできないものと考えられる。そこで、土壌水分が不足した圃場（以降、水ストレス圃場と称す）の気孔コンダクタンスを隣接する土壌水分が不足していない圃場（以降、非水ストレス圃場と称す）の気孔コンダクタンスで割った値（以降、水ストレス指数と称す）と土壌水分の関係から、土壌の乾燥に伴い水ストレス指数がどのように低下するかを把握する。更に、水ストレス指数を求めるには水ストレス指数を求めたい圃場の隣に非水ストレス圃場を設けて気孔コンダクタンスを観測する必要があるが、気象条件および土壌水分条件から気孔コンダクタンスをモデルで推定できるようになれば、非水ストレス圃場の気孔コンダクタンスは気象観測値から推定できるようになり、非水ストレス圃場を設ける必要がなくなる。そこで、気孔コンダクタンスの推定モデルの一つである Jarvis モデル (Jarvis, 1976) を西日本の代表的なダイズの栽培品種であるサチユタカに対して適用する。

2. 研究方法

2.1 試験圃場

山口大学附属農場内の隣り合う 2 圃場を試験に使用した。試験圃場は北緯 34 度 8 分 56 秒、東経 131 度 28 分 15 秒、標高 42.5 m に位置し、ダイズの気孔コンダクタンスの観測を行った 2020 年 8 月の平均気温は 28.7 °C、降雨量積算値は 88.5 mm、ポテンシャル蒸発量積算値は 175.1 mm、9 月の平均気温は 23.6 °C、降雨量積算値は 287.5 mm、ポテンシャル蒸発量積算値は 114.0 mm であった (農研機構, 2021)。2 圃場は水田転換畑であり、面積はそれぞれ 180 m² である。試験圃場の土壌物理性が特殊ではない事を確認するため、9 地点において深度 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm の採土を行い土粒子密度、間隙率、飽和透水係数、土性を測定し、同深度の貫入抵抗を 3 地点で測定し、また 3 地点において深度 10 cm, 20 cm, 30 cm の土壌の耐水性団粒の粒径分布を測定した。貫入抵抗の測定には貫入式土壌硬度計 (大起理化学工業株式会社製 DIK-5590) を使用した。また、測定した耐水性団粒の粒径分布から平均重量直径 (MWD) を算出した。MWD とは各粒径画分の平均値 (d_i) と、対応する粒径画分が試料の全重量に占める割合 (p_i) の積の合計であり、次式によって定義される (Klute, 1986)。

$$\text{MWD} = \sum_i d_i \times p_i \quad (1)$$

2020 年 6 月 5 日に苦土石灰を 1 m² 当たり 100 g 散布し、8 日に畝幅 150 cm、高さ 15 cm で耕起し、塩化加里を 1 m² 当たり 5 g および過リン酸石灰を同 5 g 混入した。その後、9 日にダイズ (品種: サチユタカ) を 1 畝当たり条間 75 cm で 2 条、1 条につき 1 m 当たり 30 粒で播種した。更に、6 月 29 日に間引きを行い、栽植密度を 1 m² 当たり 15 株とした。2 圃場の内の片方は水ストレス圃場として無灌漑で天水栽培し、もう片方は非水ストレス圃場として梅雨が明けた 8 月 1 日以降、圃場に深度 10 cm で設置したテンシオメータが 19.6 kPa (pF 2.3) に達した時点で畝間灌漑を行う事とした。

2.2 気孔コンダクタンス観測

リーフポロメータ (Meter 社製 SC-1) を使用して梅雨明け以降の 8 月 1 日から 9 月 30 日まで、降雨日以外は毎日 10 時, 11 時, 13 時, 14 時に水ストレス圃場と非水ストレス圃場においてそれぞれ上位葉 6 枚をランダムに選出し、気孔コンダクタンスを計測した。尚、1 葉の計測に 30 秒間を要するため、全 12 葉の計測に合計で 10 分間から 15 分間を要する (計測により上昇したリーフポロメータのクリップ内部の湿度を低下させるために必要な時間を含む)。観測時刻を 1 日に 4 回設けたのは、土壌の乾燥に伴うダイズの気孔コンダクタンスの低下を観測するのに適した時刻が不明だからである。また、同一圃場の 6 葉の気孔コンダクタンスにはばらつきが見られるため、水ストレス圃場と非水ストレス圃場の気孔コンダクタンスの有意差を確認した。気孔コンダクタンスは植物が受けている水ストレスの指標としてしばしば使用されるが、気孔コンダクタンスは土壌水分以外の環境要因 (光合成有効放射, 温度, 飽差など) でも変化するため、本研究においては 10 cm 深の土壌の吸引圧を -19.6 kPa (pF 2.3) 以下に保つ非水ストレス圃場の蒸散速度は任意の気象条件下でのポテンシャル蒸散速度であると想定し、気孔コンダクタンスも任意の気象条件下での最大値であると考え、水ストレス圃場の気孔コンダクタンス平均値 (g_{s1}) を非水ストレス圃場の気孔コンダクタンス平均値 (g_{s0}) で除した値を水ストレス圃場のダイズの水ストレス指数 (I_s) と定義した。即ち、土壌の乾燥が任意の気象条件下において土壌水分が不足していない場合の気孔コンダクタンスを何割低下させているかでダイズの水ストレス状態を示す事とした。

$$I_s = \frac{g_{s1}}{g_{s0}} \quad (2)$$

水ストレス指数が 1 の場合は水ストレスが生じていない事を示し、1 よりも低下するほど大きな水ストレスが生じている事を示す。

2.3 土壌水分観測

データロガー (Meter 社製 ZL6) 4 台にそれぞれ吸引圧センサー (Meter 社製 TEROS-21) 3 個を接続し、圃場内 4 地点で 7 月 5 日から 10 月 1 日まで土壌水分を 15 分間隔で経時観測した。センサーは畝上面から深度 10

cm, 20 cm, 30 cm に埋設した。

2.4 根域土壌水分の推定

Nicolas et al. (2015) はアカシアの 10 cm 深における土壌の含水率と気孔コンダクタンスの関係を観測し、10 cm 深の含水率を指標として Jarvis モデル内の土壌水分関数、即ち土壌の乾燥と気孔コンダクタンスの関係の式を適用した。結果として 10 cm 深土壌の含水率と気孔コンダクタンスの関係は高い相関を示し、根域全体の土壌水分を指標とした方がより高い相関が得られると思われるが、10 cm 深の含水率でも土壌の乾燥状態の指標になり得ると結論付けている。本研究では 10 cm 深土壌の吸引圧と根域全体の吸引圧の双方で土壌水分と水ストレス指数の関係の回帰および Jarvis モデル内の土壌水分関数の適用を行い、結果を比較する事とした。根域全体を代表する吸引圧の算出については Skaggs et al. (2006) における深度別根密度分布に比例した深度別吸水量計算を参考にして、栽植密度が 1 m² 当たり 15 株と密である事から根の空間分布を鉛直方向の 1 次元と想定し、深度別根密度分布に比例して深度別の吸引圧実測値を加重平均する事で簡易に根域土壌の吸引圧を推定した。

$$h_t = \sum_i h_i \times \frac{A_i}{A_t} \quad (3)$$

ここで、 h_t は根域土壌の吸引圧推定値、 h_i は任意深度における土壌の吸引圧実測値、 A_i は任意深度における根量、 A_t は根域全体の根量である。深度別根密度分布は水ストレス圃場において、条方向の根密度は一定と仮定して 15 cm×30 cm の土壌を畝の地表面から 5 cm 深単位で採土し、2 mm メッシュの篩で水中篩別を行った後にピンセットでダイズの根を目視により分離した後、根を 105 °C で 24 時間乾燥し電子天秤 (0.1 mg 単位) で根の乾物重を計測する事で求めた。2 週間毎に 1 地点分採取し、求めた根密度分布は根密度の調査日から前後 1 週間に適用した。

2.5 土壌の吸引圧と水ストレス指数の関係の回帰

土壌の吸引圧と水ストレス指数の関係の回帰は観測時刻別に行い、土壌の吸引圧には深度 10 cm 実測値と根域推定値の 2 通りを使用した。回帰は最小二乗法により行い、回帰式には散布図の形状が楕円に近いために楕円の方程式および根の吸水モデルである Feddes モデル (Feddes et al., 1978) ならびに S-shape モデル (van Genuchten, 1987) の 3 式を用いた。回帰に根の吸水モデルを使用した理由を次に述べる。根の吸水モデルにおいて、土壌の吸引圧に対応する吸水関数 $\alpha(h)$ は以下の式で表される。

$$\alpha(h) = \frac{S(h)}{S_{\max}} \quad (4)$$

ここで、 $S(h)$ は土壌の吸引圧に対応する根の吸水速度、 S_{\max} は根のポテンシャル吸水速度である。植物体内に

おける水分の貯留が無視できるとすると、土壌の吸引圧に対応する根の吸水速度は土壌の吸引圧に対応する葉の蒸散速度、根のポテンシャル吸水速度は葉のポテンシャル蒸散速度と考えられる。本試験において土壌の吸引圧に対応する葉の蒸散速度は水ストレス圃場における蒸散速度であり、葉のポテンシャル蒸散速度は非水ストレス圃場における蒸散速度である。葉の蒸散速度 E (g m⁻² s⁻¹) は以下の式で表される。

$$E = \frac{101300(H_i - H_s)}{8.314(T + 273)(g_s^{-1} + g_a^{-1})} \quad (5)$$

ここで、 H_i は葉内の細胞間隙の水蒸気量 (g m⁻³)、 H_s は葉表面における水蒸気量 (g m⁻³)、 T は気温 (°C)、 g_s は気孔コンダクタンス (mol H₂O m⁻² s⁻¹)、 g_a は境界コンダクタンス (mol H₂O m⁻² s⁻¹) である。水ストレス圃場における蒸散速度を E_1 、非水ストレス圃場における蒸散速度を E_0 、水ストレス圃場における気孔コンダクタンスを g_{s1} 、非水ストレス圃場における気孔コンダクタンスを g_{s0} とおくと、葉内の細胞間隙の水蒸気量に対する水ストレスの影響は小さく、気温と湿度が同一とみなされる隣接した水ストレス圃場と非水ストレス圃場での葉表面における水蒸気量は同一値と考えられ、また境界コンダクタンスも水ストレス圃場と非水ストレス圃場では同一の作物が栽培されていて風速も等しいと考えられるために同一値であり、気温も両圃場は隣接しているために同一値と考えられるため、土壌の吸引圧に対応する吸水関数は以下のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \alpha(h) &= \frac{E_1}{E_0} \\ &= \frac{101300(H_i - H_s)/8.314(T + 273)(g_{s1}^{-1} + g_a^{-1})}{101300(H_i - H_s)/8.314(T + 273)(g_{s0}^{-1} + g_a^{-1})} \quad (6) \\ &= \frac{g_{s1}}{g_{s0}} = I_s \end{aligned}$$

よって、土壌の吸引圧に対応する吸水関数 $\alpha(h)$ は水ストレス圃場における気孔コンダクタンス (g_{s1}) と非水ストレス圃場における気孔コンダクタンス (g_{s0}) の比と近い値をとるため、本研究で定めた水ストレス指数 (I_s) とも近い値をとる。

次に、楕円の方程式、Feddes モデル、S-shape モデルによる回帰式を列記する。

楕円の方程式による回帰：

$$I_s = \sqrt{b^2 \left(1 - \frac{h^2}{a^2}\right)} \quad (7)$$

ここで、 a は水ストレス指数が 0 の時の土壌吸引圧を示すフィッティングパラメータ、 b は土壌吸引圧が 0 kPa の時の水ストレス指数を示すフィッティングパラメータ、 h は土壌の吸引圧 (-kPa) である。

Feddes モデルによる回帰：

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{h}{h_1} \quad (0 > h > h_1) \\ I_s &= 1 \quad (h_1 > h > h_2) \\ I_s &= \frac{h_3 - h}{h_3 - h_2} \quad (h_2 > h > h_3) \\ I_s &= 0 \quad (h_3 > h) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 h_1 は水ストレス指数が 1 の時の土壌の吸引圧最大値を示すフィッティングパラメータ、 h_2 は水ストレス指数が 1 の時の土壌の吸引圧最小値を示すフィッティングパラメータ、 h_3 は水ストレス指数が 0 の時の土壌の吸引圧最大値を示すフィッティングパラメータである。

S-shape モデルによる回帰：

$$I_s = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{0.5}}\right)^k} \quad (9)$$

ここで、 $h_{0.5}$ は水ストレス指数が 0.5 の時の土壌吸引圧を示すフィッティングパラメータ、 k は回帰曲線の曲率を示すフィッティングパラメータである。

更に、既往研究 (Tobin and Kulmatiski, 2018; 佐藤ら, 2001; 長崎・玉泉, 2006) では土壌の吸引圧もしくは含水率と植物の水ストレス状態の指標としての気孔コンダクタンスの関係が回帰もしくは比較されているが、気孔コンダクタンスを用いた場合と本研究で提案した水ストレス指数を用いた場合を比較するために、土壌の吸引圧と水ストレス圃場の気孔コンダクタンスの関係も回帰した。回帰には楕円の方程式、Feddes モデルならびに S-shape モデルを使用した。尚、Feddes モデルならびに S-shape モデルについては計算結果が吸水関数 $\alpha(h)$ (= 水ストレス指数 I_s) となるため、吸水関数に最大気孔コンダクタンスを掛けて以下のように気孔コンダクタンスに換算した。

$$g_s = \alpha(h)g_{s\max} \quad (10)$$

ここで、 g_s は気孔コンダクタンス ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 $g_{s\max}$ は最大気孔コンダクタンス ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) である。未知のパラメータである最大気孔コンダクタンスも Feddes モデルならびに S-shape モデルと同時に回帰により決定した。

2.6 Jarvis モデルの適用

Jarvis モデルとは気孔の開閉に関わる環境条件から気孔コンダクタンス (g_s) を推定する為のモデルであり、一般的には以下の式で表される。

$$g_s = g_{s\max} f(Q) f(T) f(D) f(C) f(h) \quad (11)$$

ここで、 $g_{s\max}$ は最大気孔コンダクタンス ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 Q は光合成有効放射 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 T は温

度 ($^{\circ}\text{C}$)、 D は飽差 (kPa)、 C は二酸化炭素濃度 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)、 h は土壌の吸引圧 ($-\text{kPa}$) であり、それらの関数は全て 0 ~ 1 の値をとる。本研究においては Ji et al. (2017) と同様に露地圃場における二酸化炭素濃度の変動はほとんどダイズの気孔コンダクタンスに影響を与えないと想定して、二酸化炭素濃度関数は削除する。以下に、各関数の式を示す。

光合成有効放射関数 (小杉ら, 1994)：

$$g_{s\max} f(Q) = \frac{g_{s\max} Q}{Q + \frac{g_{s\max}}{a}} \quad (12)$$

ここで、 a は回帰曲線の原点での傾きを表しており、光によって孔辺細胞の膨圧が増加して気孔が開く反応の効率を示すフィッティングパラメータである。

温度関数 (Jarvis, 1976)：

$$f(T) = \left(\frac{T - T_l}{T_o - T_l}\right) \left\{ \left(\frac{T_h - T}{T_h - T_o}\right)^{\left(\frac{T_h - T_o}{T_o - T_l}\right)} \right\} \quad (13)$$

ここで、 T_o は最適温度 ($^{\circ}\text{C}$) を示すフィッティングパラメータ、 T_l は最低限界温度 ($^{\circ}\text{C}$) を示すフィッティングパラメータ、 T_h は最高限界温度 ($^{\circ}\text{C}$) を示すフィッティングパラメータである。

飽差関数 (小杉ら, 1994)：

$$f(D) = \frac{1}{1 + \left(\frac{D}{b_1}\right)^{b_2}} \quad (14)$$

ここで、 b_1 は気孔コンダクタンスが半分の時の飽差を示すフィッティングパラメータ、 b_2 は回帰曲線の曲率を示すフィッティングパラメータである。

土壌水分関数 (van Genuchten, 1987)：

$$f(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{0.5}}\right)^k} \quad (15)$$

ここで、 $h_{0.5}$ は根の吸水速度が任意気象条件下における最大値の半分となる時の土壌吸引圧を示すフィッティングパラメータ、 k は回帰曲線の曲率を示すフィッティングパラメータである。ダイズを対象として Jarvis モデルを適用した例としては Ji et al. (2017) や Mutiibwa and Irmak (2013) が挙げられる。品種間の耐乾性などの違いによりモデル内の各パラメータ値は異なるものと思われるが、Jarvis モデルが適用されたダイズ品種の数がまだ少なく、検証されてはいない。各パラメータのキャリブレーションは気孔コンダクタンス観測値、気象観測値、葉温観測値、土壌水分観測値を基に最小二乗法により行った。また、既往研究では観測時刻別のキャリブレーションは行われていないが、午前中は気孔コンダクタンスが比較的高くなる傾向がある事、そしてダイズでは昼寝現象が見られる事から、本研究では観測時刻別にキャ

Table 1 対象圃場の土壌物理性.
Soil physical properties of the experimental site.

深度 cm	土粒子密度 Mg m ⁻³	間隙率 m ³ m ⁻³	飽和透水係数 m s ⁻¹	MWD mm	貫入抵抗 MPa	土性 -
10	2.69	0.518	8.5×10 ⁻⁶	0.68	0.55	軽埴土
20	2.70	0.526	7.0×10 ⁻⁶	0.64	0.87	軽埴土
30	2.69	0.491	5.9×10 ⁻⁶	0.86	> 2.22	軽埴土
40	2.72	0.505	1.4×10 ⁻⁵	-	> 2.33	軽埴土
50	2.72	0.490	1.1×10 ⁻⁵	-	> 2.23	軽埴土
反復	3	9	9	3	3	3

リブレーションを行い、全時刻の観測値を用いてキャリブレーションを行った場合と比較した。土壌水分関数では深度 10 cm の土壌の吸引圧実測値を使用した場合と根域土壌の吸引圧推定値を使用した場合の 2 通りを試し、比較した。温度関数については既往研究では気温を使用した例と葉温を使用した例が見られるため、気温観測値を使用した場合と葉温観測値を使用した場合の 2 通りを試し、比較した。

2.7 気象観測

本研究においては Jarvis モデルの適用に 2.3 章で述べた土壌水分観測値の他、光合成有効放射、飽差、気温、葉温の観測値を用いる。光合成有効放射 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) は圃場において 1 m の高さで光子センサー (LI-COR 社製 LI-190R) を用いて測定し、電圧ロガー (HIOKI 社製 LR5041) を用いて 1 分間隔で記録後、1 時間平均値を時刻毎に求めた。葉温 (°C) は 2.2 章の気孔コンダクタンスの観測時に同時に放射温度計 (シンワ測定株式会社製 73017) を用いて圃場毎に 6 葉分計測し、平均値を求めた。気温 (°C) は圃場から 50 m の位置にある山口大学農学部気象台の観測値を使用し、飽差 (kPa) は同気象台の気温および相対湿度から算出した。

3. 結果と考察

3.1 対象圃場の物理性

Table 1 に対象圃場の土粒子密度、間隙率、飽和透水係数、MWD、貫入抵抗、土性の測定結果を深度別に記す。なお、使用した貫入式土壌硬度計の測定可能最大値は 2.5 MPa であるが、2.5 MPa を上回る測定地点が存在したため、2.5 MPa を上回る測定値については 2.5 MPa として全測定地点の測定値を平均し、1 地点以上の 2.5 MPa を上回る測定値が含まれる深度については平均値に > と標記した。対象圃場は黄色土の水田転換畑であるため、本結果を土壌物理用語辞典 (土壌物理学会編, 2002) の日本における黄色土畑地の平均値と比較すると、間隙率は日本の平均値の表層で $0.418 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ に対し対象圃場の 10 cm 深で $0.518 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、同 25 cm 深で $0.472 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ に対し同 30 cm 深で $0.491 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、同 50 cm 深で $0.477 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ に対し同 50 cm 深で $0.490 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ と、表層 \approx 10 cm 深は耕起から採土までの期間の影響を受けるため比

較が困難だが、以深の比較から対象圃場の間隙率は日本の平均に近いと言える。飽和透水係数は日本の平均値の表層で $2.2 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ に対し対象圃場の 10 cm 深で $8.5 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ 、同 25 cm 深で $2.9 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ に対し同 30 cm 深で $5.9 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ 、同 50 cm 深で $1.6 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ に対し同 50 cm 深で $1.1 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ と、やはり表層 \approx 10 cm 深は耕起から採土までの期間の影響を受けるため比較が困難だが、以深の比較から対象圃場の飽和透水係数は日本の平均に近いと言える。MWD と貫入抵抗の日本の平均値は不明だが、MWD の 10 cm 深と 20 cm 深が同等なのは耕起の影響と考えられ、また貫入抵抗が 30 cm 深から急増する事から耕盤層上面が 30 cm 深にある事がわかり、耕起深度および耕盤層深度は畑の作土深の目標値である 25 cm (全国農業改良普及支援協会, 2021) と同程度である。よって、対象圃場の土壌物理性は日本の黄色土畑地としては一般的と考えられ、観測された土壌の吸引圧と水ストレス指数の関係も、少なくとも土壌水の移動に影響を与える土壌の物理的には特殊な圃場で得られた関係ではないと言える。

3.2 土壌の吸引圧と水ストレス指数の関係

Fig. 1 に 8 月の 13 時における水ストレス指数と根域土壌吸引圧推定値の関係をプロットした結果を示す。

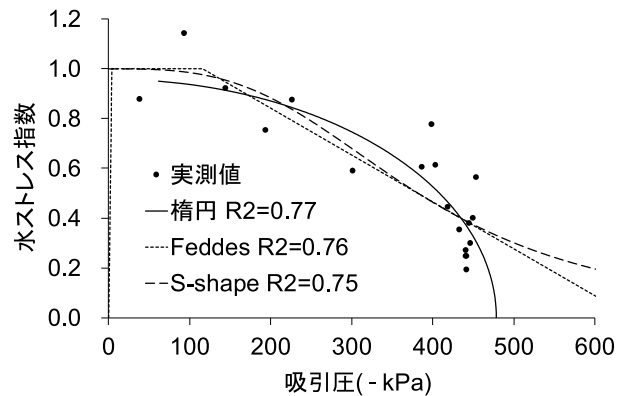


Fig. 1 13 時における水ストレス圃場の根域平均吸引圧と水ストレス指数の関係の 3 種類のモデルによる回帰曲線。Regression curves of the water stress index on root zone suction in the field under water stress condition at 13 o'clock by three models.

Table 2 土壌の吸引圧と水ストレスの関係の回帰曲線の決定係数.

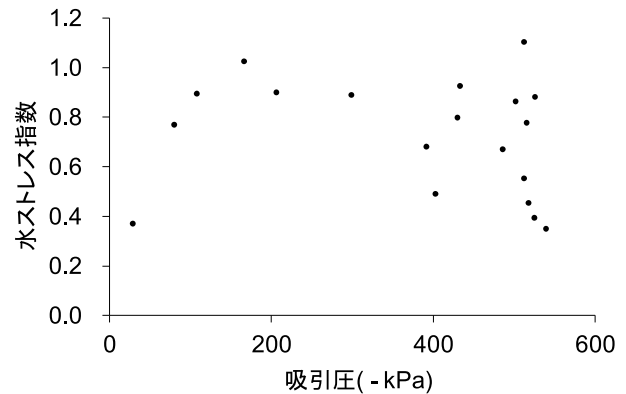
Coefficients of determination of regression curves of the water stress on the suction of soil.

観測 期間	指標	吸引圧	回帰 モデル	時刻			
				10	11	13	14
8月	I_s	根域推定	楕円	0.06	0.43	0.77	0.62
			Feddes	0.00	0.35	0.76	0.62
			S	0.00	0.39	0.75	0.60
			10 cm 深実測	楕円	0.05	0.37	0.70
	g_{s1}	根域推定	楕円	0.12	0.50	0.75	0.36
9月	I_s	根域推定	楕円	0.02	0.00	0.00	0.00

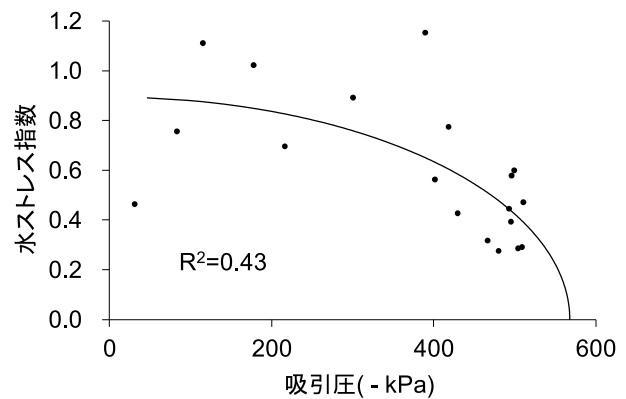
 I_s : 水ストレス指数 g_{s1} : 水ストレス圃場の気孔コンダクタンス

曲線は楕円, Feddes モデル, S-shape モデルにより回帰した結果であり, それぞれ決定係数は 0.77, 0.76, 0.75 である. 土壌の乾燥 (吸引圧の増加) と共に水ストレス指数が楕円の方方程式による回帰曲線に近い形で低下してゆく傾向が分かる. Feddes モデルと S-shape モデルによる回帰曲線は吸引圧が -430 kPa 以下の領域における水ストレス指数の急激な低下を表現できていない. Table 2 に土壌の吸引圧と水ストレスの関係を各種の条件で回帰した場合の決定係数を時刻別に示す. 8月の観測値を用いた回帰結果から, 水ストレスの指標, 土壌の吸引圧の深度, 回帰モデルに依らず, 13時の観測値を用いた場合に回帰曲線の決定係数が一番高くなる事が分かる. 一方で, 10時の決定係数は特に低く, Fig. 2 に示すように土壌の吸引圧と水ストレス指数の関係に相関が見られない. Fig. 3, Fig. 1, Fig. 4 に示すように, 11時, 13時, 14時には土壌の吸引圧と水ストレス指数の関係にある程度の相関が見られる. 10時に決定係数が低くなる原因として, 多くの作物が成長阻害を受ける -98 kPa (pF 3.0) よりも水ストレス圃場が乾いていたにも拘らず, 気孔コンダクタンスが低下していなかったことが考えられる. t 検定において両圃場の気孔コンダクタンスに 5% 水準の有意差が見られなかった観測回の割合を時刻別に示す (Table 3). 有意差が見られなかった観測回の割合は 10時に 46.7%, 11時に 36.4% であり, 午前中は土壌が乾いても気孔コンダクタンスの低下が起きにくい事が分かる. 午前中は土壌の乾きが気孔コンダクタンスの低下を招きにくく, 特に 10時には他の時刻に見られたような土壌の乾燥に伴う規則的な水ストレス指数の低下が見られなかったのは, 日の出と共に始まる蒸散の積算量がまだ少なく, 土壌の乾燥により根からの吸水量が少なくても葉はまだ水ストレス状態になっていないためであると推測される. 一方で, 13時に決定係数が最も高いという事から, 本研究で用いた方法により土壌の乾燥に伴うダイズの水ストレスの変化をモデル化する事を目

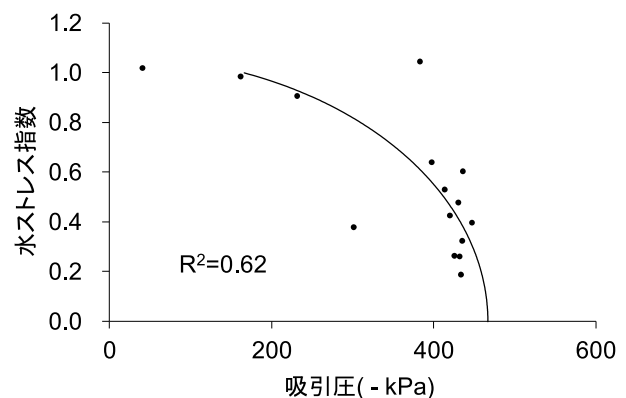
的として観測する場合, 最適な時刻は 13時であると考えられる.

**Fig. 2** 10時における水ストレス圃場の根域平均吸引圧と水ストレス指数の関係.

Relationship between the water stress index and root zone suction in the field under water stress condition at 10 o'clock.

**Fig. 3** 11時における水ストレス圃場の根域平均吸引圧と水ストレス指数の関係.

Relationship between the water stress index and root zone suction in the field under water stress condition at 11 o'clock.

**Fig. 4** 14時における水ストレス圃場の根域平均吸引圧と水ストレス指数の関係.

Relationship between the water stress index and root zone suction in the field under water stress condition at 14 o'clock.

次に、回帰に使用した楕円、Feddes モデル、S-shape モデルの決定係数を比較すると、Table 2 に示された通り大差は見られないが、楕円の決定係数がわずかに高くなる傾向がどの時刻でも見られる。これは土壤の乾燥に伴う水ストレス指数の低下傾向が Feddes モデルで表現されるような直線的な変化よりも曲線的な変化に近く、また S-shape モデルで表現されるような吸引圧が高い領域での水ストレス指数の低下速度の減速が見られなかったためと考えられる。しかし、本研究において観測された吸引圧の最大値は -540 kPa (pF 3.7) であり、より土壤が乾燥した条件下で S 形曲線を示す可能性を否定することはできない。

土壤の吸引圧に 10 cm 深における実測値を用いた場合と根域における推定値を用いた場合を比較すると、Table 2 の両ケースを楕円で回帰した際の決定係数から、10 時はどちらのケースでも回帰できず、11 時は 10 cm 深実測値の場合で 0.37 に対して根域推定値の場合で 0.43、11 時は 10 cm 深実測値の場合で 0.70 に対して根域推定値の場合で 0.77 と根域推定値の場合の方が若干高い値を示し、また 14 時は 10 cm 深実測値の場合で 0.39 に対して根域推定値の場合で 0.62 と根域推定値の場合の方が大幅に高い値を示した。なぜ特に 14 時に根域推定値を用いると 10 cm 深実測値を用いた場合に比べて決定係数が大きく向上するのは不明だが、時刻により程度に差はあるものの、10 cm 深実測値よりも根域全体の値を用いた方がより良くモデル化できようであろうというアカシアを用いてモデル化を試みた Nicolas et al. (2015) の考え通りの結果となった。また、本研究における根域推定値は根系が受けている水ストレスの真の値ではなく、深度別の土壤の吸引圧と深度別根密度分布から、根が多く分布する深度ほど土壤の吸引圧が根に与える影響が大きいであろうとの仮定で求めた推定値に過ぎないが、それでも 10 cm 深の 1 深度における実測値を用いるよりは有効である事が分かった。

Table 3 で示した通り午前水ストレス圃場の土壤が生育阻害水分点よりも乾いていても非水ストレス圃場の気孔コンダクタンスと水ストレス圃場の気孔コンダクタンスに有意差が出にくいために、午後のみで水ストレスの指標に水ストレス指数を使用した場合と気孔コンダクタンスを使用した場合の差異を検討する。Table 2 の水

Table 3 水ストレス圃場が生長阻害水分点を超過しても両圃場の気孔コンダクタンスに有意差が表れなかった観測回の時刻別割合。

Ratio of the data which the root zone suction stronger than the refill point in the field under water stress condition does not give significant difference between the stomatal conductance of both fields at each time.

時刻	10	11	13	14
割合 (%)	46.7	36.4	15.4	18.2

ストレス指数 (I_s) を水ストレスの指標として土壤の吸引圧に根域推定値、回帰に楕円を用いた場合の決定係数は 13 時に 0.77、14 時に 0.62 であり、一方で水ストレス圃場の気孔コンダクタンス (g_{s1}) を水ストレスの指標として他は同条件の場合の決定係数は 13 時に 0.75、14 時に 0.36 となり、水ストレス指数を使った場合の方が 13 時は若干、14 時は大幅に高い値を示した。Fig. 4 の水ストレス指数を用いた場合と、Fig. 5 の水ストレス圃場の気孔コンダクタンスを用いた場合を比較すると、水ストレス指数を用いる事で観測値のばらつきが減り、より規則的な変化傾向を示す事が分かる。既往研究 (Tobin and Kulmatiski, 2018; 佐藤ら, 2001; 長崎・玉泉, 2006) では気孔コンダクタンス観測値をそのまま水ストレスの指標として使用しているが、本研究で提案した水ストレス指数は特に 14 時に有効であった。水ストレス指数を用いた方が水ストレス以外の環境要因が気孔コンダクタンスを低下させている条件下ではより適切に水ストレスを評価できると考えられるが、8 月の気孔コンダクタンスの測定が可能であった無降雨日の 13 時においては、光合成有効放射は最低でも $1014 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を記録しダイズの光飽和点 $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度 (李ら, 1995) を超えていることから、光合成有効放射は気孔コンダクタンスに影響していなかったと考えられる。一方で同 14 時においては、光合成有効放射は最低で $498 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を記録し、また $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 未満であった観測回は全体の 20% を占め、光合成有効放射が気孔コンダクタンスを低下させていたものと思われる。この様に、13 時においては水ストレス以外の環境要因が気孔コンダクタンスを低下させることが少なかったために水ストレス指数を用いた場合と気孔コンダクタンスを用いた場合の決定係数に大差が生じなかった可能性が推測される。次に、Table 2 の 8 月と 9 月の観測値を同条件で回帰した場合の決定係数を比較すると、8 月は 10 時を除き回帰が可能と考えられる一方で、9 月は全時刻において本研究で用いた方法では回帰ができない事が分かる。その原因

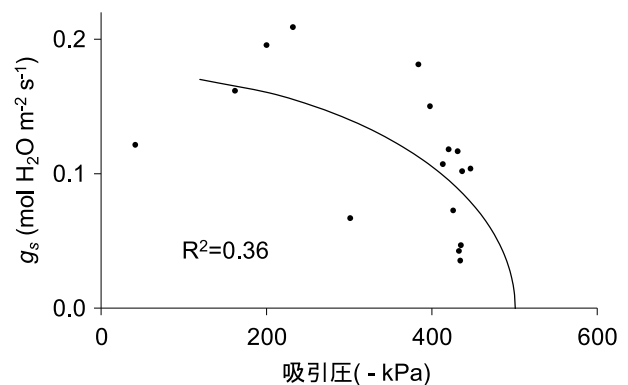


Fig. 5 14 時における水ストレス圃場の根域平均吸引圧と気孔コンダクタンスの関係。 Relationship between the stomatal conductance and root zone suction in the field under water stress condition at 14 o'clock.

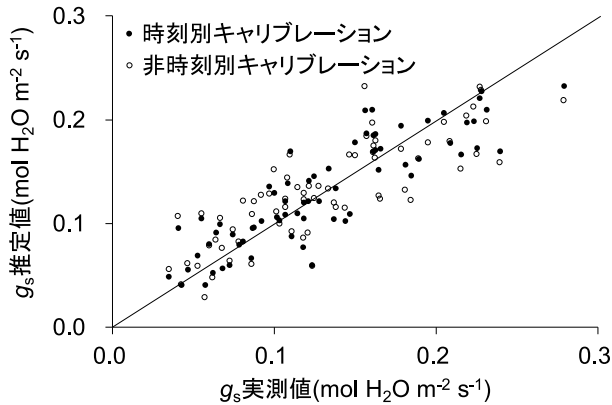


Fig. 6 8月の気孔コンダクタンス実測値に対して Jarvis モデルを時刻別にキャリブレーションした場合と時刻を区別せずにキャリブレーションした場合の推定値。

Observed stomatal conductance in August versus estimated stomatal conductance by the Jarvis models calibrated for each time and without distinction of time.

として、8月は天水栽培条件下の水ストレス圃場の土壌の吸引圧が平均で -328 kPa (pF 3.5) であったのに対して9月は平均で -63 kPa (pF 2.8) であり、強い水ストレスを受けていなかったと考えられる上に、9月2日と7日の台風により葉が傷ついた事、および9月には栄養成長が終了しているために葉が老化している事から、土壌水分以外の要素が気孔コンダクタンスに強く影響したためと推測される。

3.3 Jarvis モデルの適用結果

観測時刻を区別せずに Jarvis モデル内の各パラメータをキャリブレーションした場合と観測時刻別にキャリブレーションした場合について、気孔コンダクタンス (g_s) のモデル推定値と実測値を比較した結果を Fig. 6 に示す。8月を対象期間としており、温度については水ストレス圃場の葉温を使用し、土壌の吸引圧についても水ストレス圃場の根域推定値を使用している。観測時刻を区別せずにキャリブレーションした場合の方が推定値と実測値を 1:1 で示した直線からのばらつきが大きく、観測時刻を区別せずにキャリブレーションした場合の推定値の決定係数が 0.68 (RMSE = 0.033 mol H₂O m⁻² s⁻¹) であるのに対し、観測時刻別にキャリブレーションした場合の全時刻を対象とした推定値の決定係数は 0.76 (RMSE = 0.028 mol H₂O m⁻² s⁻¹) であった。既往研究では時刻別にキャリブレーションした例は見受けられないが、キャリブレーションを時刻別に行う事は有効であると考えられる。時刻別にキャリブレーションすると決定係数が向上する原因としては、午前中は気孔コンダクタンスが比較的高くなる傾向がある事やダイズの昼寝現象の他、Table 3 で示した通り午前中は土壌の乾きが気孔コンダクタンスを低下させ難い事などの、環境要因以外の時刻により変化する内的要因が気孔コンダクタンスに影響するためと推測される。

次に、Table 4 に 8 月を対象期間として気孔コンダクタンスを各種の条件で推定した場合の決定係数を示す。時刻別に葉温と根域推定吸引圧を用いた場合の決定係数

が 0.76 であるのに対し、時刻別に気温と根域推定吸引圧を用いた場合の決定係数が 0.63 である事から、葉温を用いると決定係数が向上する事が分かる。本研究における Jarvis モデルの使用目的は水ストレス圃場における気象観測値から非水ストレス圃場の気孔コンダクタンスを推定する事であり、気温であれば気孔コンダクタンスの推定に直接使用する事ができる。また、非水ストレス圃場という条件であるために気温から葉温を推定する事も可能である。具体的には CWSI を求める際に用いられるポテンシャル蒸散状態にある湿潤葉の葉温の推定式の利用であり、Lower Boundary と呼ばれる葉気温差の項を変形すれば良く、Lower Boundary は気象観測値とキャリブレーションによって決定したパラメータから求める経験式 (Idso et al., 1981)、もしくは気象観測値のみから求める理論式 (Jackson et al., 1988) で推定可能である。次に、時刻別に葉温と根域推定吸引圧を用いた場合の決定係数が 0.76 であるのに対し、時刻別に葉温と 10 cm 深実測吸引圧を用いた場合の決定係数が 0.74 である事から、根域推定吸引圧を用いても決定係数はわずかな向上に留まった。

次に、気象観測値から非水ストレス圃場の気孔コンダクタンスを Jarvis モデルで予測し、非水ストレス圃場を設けずに水ストレス圃場の水ストレス指数を求める事の実現性を検討した。まず、8月の水ストレス圃場観測値を用いて時刻別にキャリブレーションされた Jarvis モデルについて、非水ストレス条件における気孔コンダクタンスを予測するために土壌水分関数 ($f(h)$) を 1 とし、光合成有効放射、温度、飽差には観測値を用いて各観測回の非水ストレス圃場の気孔コンダクタンスを予測した。その予測値と各観測回の水ストレス圃場の気孔コンダクタンス実測値との比で求めた水ストレス指数予測値について、13 時における水ストレス指数と土壌の吸引圧の関係を Fig. 7 に示す。水ストレス指数予測値については、Jarvis モデルの温度関数に葉温を用いた場合と気温を用いた場合の 2 通りを示す。非水ストレス圃場の気孔コンダクタンスに実測値を用いた場合の水ストレス指数実測値と水ストレス指数予測値との間の差異を RMSE で示すと、温度関数に気温を用いた場合は 0.033、温度関数に葉温を用いた場合は 0.022 となり、気温を用いた場合の方が実測値に近い水ストレス指数を予測した。Jarvis

Table 4 8月における環境要因と Jarvis モデルの決定係数の関係。

Relationship between the environmental factors and the coefficients of determination of the Jarvis model.

時間単位	温度	吸引圧	決定係数
時刻別	葉温	根域推定	0.76
		10 cm 深実測	0.74
非時刻別	葉温	根域推定	0.63
		根域推定	0.68

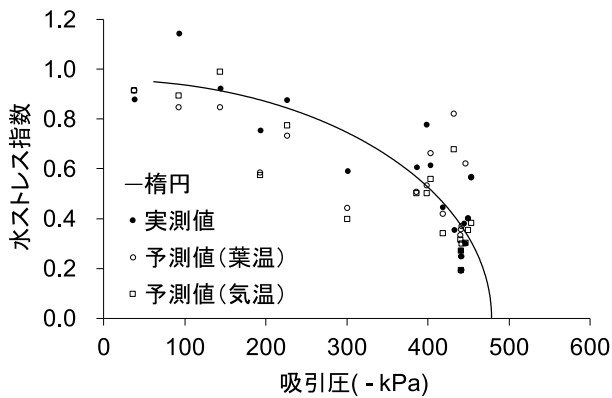


Fig. 7 非水ストレス圃場の気孔コンダクタンスを Jarvis モデルで予測した場合の 13 時における水ストレス圃場の根域平均吸引圧と水ストレス指数の関係。

Relationship between the water stress index calculated from estimated stomatal conductance by the Jarvis model and root zone suction in the field under water stress condition at 13 o'clock.

モデルの決定係数は温度関数に葉温を用いた場合の方が高かったために本結果は偶然と考えられる。8月の葉気温差(葉温-気温)を時刻別に示すと、10時で $+2.3^{\circ}\text{C} \sim -4.0^{\circ}\text{C}$ (平均 -0.7°C , 標準偏差 1.5°C), 11時で $+4.1^{\circ}\text{C} \sim -2.9^{\circ}\text{C}$ (平均 $+0.1^{\circ}\text{C}$, 標準偏差 2.2°C), 13時で $+5.1^{\circ}\text{C} \sim -3.4^{\circ}\text{C}$ (平均 $+0.2^{\circ}\text{C}$, 標準偏差 2.1°C), 14時で $+6.0^{\circ}\text{C} \sim -3.1^{\circ}\text{C}$ (平均 -0.1°C , 標準偏差 2.5°C)となり、10時は平均値が -0.7°C と葉がまだ外気よりも冷たい場合が多い事、11時~14時は標準偏差が比較的高く葉温と気温が異なる事が多いが、平均値が 0°C に近い事から葉温の方が高い場合と気温の方が高い場合の双方が同程度ある事が分かる。今後は Jarvis モデルの温度関数に気温を用いた場合と気象から推定した非水ストレス圃場の葉温を用いた場合とで非水ストレス圃場の気孔コンダクタンス予測値と実測値を比較し、気温実測値と葉温推定値のどちらの方が非水ストレス圃場の気孔コンダクタンスの予測に適しているかを判断する。水ストレス指数予測値を用いた場合でも土壤の乾燥に従って水ストレス指数が低下してゆく傾向は示されているが、Jarvis モデルによる予測で非水ストレス圃場における気孔コンダクタンスの実測を代替できるかについては、水ストレス指数に予測値を用いた場合と実測値を用いた場合の水ストレス指数と土壤の吸引圧の関係の回帰曲線の差異を複数年間比較する事で判断が可能になるものと思われる。

4. おわりに

8月の13時の水ストレス指数と根域土壤の吸引圧の関係を楕円モデルで回帰すると、パラメータ a は -478.5 kPa, パラメータ b は 0.9582 となった。今後、複数年間に渡り同様の観測を行う事で、パラメータの値の汎用性を検証する事ができる。更に、日本各地のダイズ(サチユタカ)栽培圃場においても検証を行うべきだが、その

ためには非水ストレス条件における観測を割愛して水ストレス条件、すなわち通常の栽培条件の圃場における観測のみで水ストレス指数を求める必要がある。本研究にて適用したダイズの Jarvis モデルが他年および他圃場においても通用するのかが確認する必要がある。以上から観測年や圃場に寄らず水ストレス指数と土壤吸引圧の関係の回帰モデルに汎用性が認められ、更に開花期から莢肥大期にかけての水ストレス指数の経時変化と収量の関係のデータが蓄積されて(気孔コンダクタンス積算値と収量の関係を比較した例: 田中ら(2012)), 減収時の水ストレス指数の経時変化パターンが明らかになった場合は、先述の回帰モデルから減収を免れるために必要な土壤の吸引圧の閾値も明らかになると考えられる。その閾値は、例えば地域的な灌漑計画や土壤改良時の有効水分量の目標として利用できる他、現在主流の葉が丸まったら灌漑開始という指標に代わる、自動灌漑に必要なセンシング可能な指標として利用する事ができる。

謝辞

山口県農林水産部農村整備課には本研究の遂行に多大なご協力を賜り、ここに謝辞を表します。

引用文献

- 土壤物理学会編(2002): 土壤物理用語事典, pp. 180-181. 養賢堂, 東京.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and Zaradny, H. (1978): Simulation of field water use and crop yield. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Hirasawa, T., Nakahara, M., Izumi, T., Iwamoto Y. and Ishihara, K. (1998): Effects of pre-flowering soil moisture deficits on dry matter production and ecophysiological characteristics in soybean plants under well irrigated conditions during grain filling. *Plant Prod. Sci.*, 1: 8-17.
- 細野達夫, 片山勝之, 野村幹雄, 大野智史, 中山則和, 細川寿(2014): 北陸地域の重粘土転換畑でのダイズ収量に及ぼす点滴灌漑の効果. 中央農研研究報告, 21: 1-23.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J. and Hatfield, J.L. (1981): Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.*, 24: 45-55.
- Jackson, R.D., Idso, S.D., Reginato, R.J. and Pinter, Jr.P.J. (1981): Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.*, 17: 1133-1138.
- Jackson, R.D., Kustas, W.P. and Choudhury, B.J. (1988): A reexamination of the crop water stress index. *Irrig. Sci.*, 9: 309-317.
- Jarvis, P.G. (1976): The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, 273: 593-610.

- Ji, S., Tong, L., Kang, S., Li, F., Lu, H., Du, T., Li, S. and Ding, R. (2017): A modified optimal stomatal conductance model under water-stressed condition. *Int. J. Plant Prod.*, 11(2): 295–314.
- Klute, A. (1986): *Methods of soil analysis part 1 physical and mineralogical methods second edition*, pp. 428–441. Soil Science Society of America Inc., Wisconsin.
- 小杉緑子, 小橋澄治, 柴田昌三 (1994): 数種常緑広葉樹における気孔コンダクタンスのモデル化. *日緑工誌*, 20(3): 158–167.
- 熊谷悦史, 高橋智紀, 中野聡史, 松尾直樹 (2018): 農研機構東北農業研究センターの過去33年間の生産力検定試験におけるダイズ収量と土壌乾燥との関係. *日作紀*, 87(3): 233–241.
- 李忠烈, 津野幸人, 中野淳一, 山口武視 (1995): 弱光条件に対するダイズの生態生理学的反応. *日作中支集録*, 36: 41–49.
- 村上章 (2009): 汎用水田におけるダイズ多収を目指した地下水水位制御の研究. 秋田県農林水産技術センター農業試験場特別研究報告, 49: 42–90.
- Mutiibwa, D. and Irmak, S. (2013): Transferability of Jarvis-Type models developed and re-parameterized for maize to estimate stomatal resistance of soybean: analyses on model calibration, validation, performance, sensitivity and elasticity. *Trans. ASABE*, 56(2): 409–422.
- 長崎真由, 玉泉幸一郎 (2006): 施肥と土壌乾燥に対するスギとヒノキの光合成, 気孔コンダクタンスの反応. *九州森林研究*, 59: 180–182.
- 中野聡史, 大野宏之, 島田信二 (2017): 発育予測モデルとメッシュ気象データを利用したダイズの乾燥ストレス発生リスクの広域評価. *生物と気象*, 17: 55–63.
- Nicolas, R., Francisco J.M., Nicolas F. and Nicolas B. (2015): Empirical stomatal conductance models reveal that the isohydric behavior of an *Acacia* caven Mediterranean Savannah scales from leaf to ecosystem. *Agric. For. Meteorol.*, 213: 203–216.
- 農研機構 (2021): モデル結合作物気象データベース. <https://meteocrop.dc.affrc.go.jp/real/top.php> (2021年2月1日)
- 佐藤浩子, 谷英雄, 福岡峰彦, 岩間和人, 長谷川利祐, 実山豊 (2001): 異なる土壌水分条件下における陸稲4品種の群落表面温度と気孔コンダクタンス. *育種・作物学会北海道談話会会報*, 42: 23–24.
- 柴田悖次, 金子一郎 (1978): 土壌水分ならびに地温の相違とダイズの生育反応. *東北農業研究*, 23: 63–64.
- Skaggs, T.H., van Genuchten, M.Th., Shouse, P.J. and Poss, J.A. (2006): Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agric. Water Manage.*, 86: 140–149.
- 田中景子, 三石正一, 溝口勝 (2012): FOEAS導入ダイズ畑圃場における土壌水分分布の実態. H24 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 312–313.
- Tobin, R.L. and Kulmatiski, A. (2018): Plant identity and shallow soil moisture are primary drivers of stomatal conductance in the savannas of Kruger National Park. *PLoS ONE*, 13(1): e0191396.
- van Genuchten, M.Th. (1987): A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. *Research Report N.121*, U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside, CA.
- 全国農業改良普及支援協会 (2021): みんなの農業広場. <https://www.jeinou.com/consultation/qa/machine/2020/01/10/154000.html> (2021年7月5日)

要 旨

天水栽培と非水ストレス条件のダイズ圃場を設け、両圃場の気孔コンダクタンスの比を水ストレス指数として、天水栽培圃場の土壌水分と水ストレス指数の関係を回帰した。また、非水ストレス条件の気孔コンダクタンスを実測せずに推定で済ませることを目的に、Jarvisモデルの適用を行った。午前は両圃場の気孔コンダクタンスに有意差がない場合が多く、特に10時には天水栽培圃場の土壌の吸引圧と水ストレス指数の間に相関関係は見られなかった。一方で、午後は有意差が見られ、吸引圧と水ストレス指数の関係を楕円、Feddesモデル、S-shapeモデルの3種類で回帰したところ、13時に高い決定係数が見受けられ、土壌の乾燥に伴う水ストレスの変化をモデル化するのに適した時刻であると考えられた。Jarvisモデルについては、先例は見受けられないが時刻単位でパラメータをキャリブレートすると決定係数が向上することが分かった。

キーワード：土壌水分, 気孔コンダクタンス, Jarvisモデル, 干害, ダイズ