

FAO56 モデルを用いた土壌の乾湿指標によるダイズ乾湿害の実態解析

宮城県古川農業試験場
作物栽培部
今野 智寛

はじめに

ダイズの単収向上を妨げている要因は圃場ごとに異なるが、様々な低収要因の背景には土壌の過湿や過乾燥が存在している場合が多い。そのため、低収要因の実態解明には、乾湿害の実態を明らかにすることが重要である。そこで、本研究では、FAO56モデル(Allenら1998)で算出された土壌水分を利用して、乾燥害と湿害の両リスクを評価するための指標(Wet Index, WI)を作成した。この指標を用いて、日本の乾湿害の実態を明らかにすることを目的とした。

なお、本報は、日本作物学会紀事第89巻4号P.337-345「FAO56モデルを用いた土壌の乾湿指標によるダイズ乾湿害の実態解析」の報告を一部抜粋してまとめたものである。

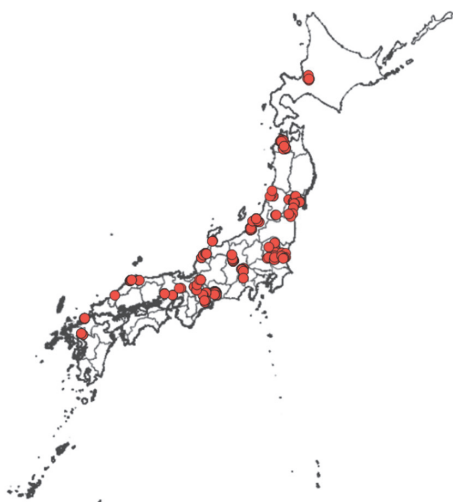


図-1 解析データの取得地点
赤色のプロットがデータの取得地点を示す。

試験の概要

2015年から2017年の3か年で16道県の現地圃場から取得した合計337地点のデータを用いた(図-1)。本研究では、各生育ステージにおける土壌の乾湿程度と収量の関係を順位相関分析の偏相関係数によって解析した。各生育ステージは出芽期から開花期までを4等分、開花期から成熟期までを4等分にした合計8のフェーズに分けて、同じフェーズ同士で地点間の比較を行った(表-1)。収量及び土壌の調査は現地調査を実施し、生育ステージはアンケートによって調査した。また、気象データは「農研機構メッシュ農業気象データ」(大野2014)から取得した。

FAO56モデルの概要

FAO56モデルでは、圃場容水量(θ_{FC} , %)からの土壌水分の減少量(Dr , mm)を算出し、乾燥害のリスク評価に利用する。 Dr は有効土層(Z_r , mm)中の水の収支計算から求める。FAO56モデルにおける水の侵入は日降水量(mm/日)、排出は土壌とダイズからの日蒸発散量(mm/日)とし、圃場容水量を超えた分の土壌水分は重力水として速やかに排水されると仮定する(図-2)。日蒸発散量は、下記の式(1)から算出する。

$$ET_{c,adj} = (K_s K_{cd} + K_e) ET_0 \quad (1)$$

式(1)の ET_0 はPenman-Monteith

表-1 フェーズと対応する生育ステージ

フェーズ	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
生育ステージ	出芽期	初期	中期	後期	開花期	始期	後期	成熟期
		栄養生長期				子実肥大期		

出芽期から開花期までを4等分、開花期から成熟期までを4等分にした合計8フェーズ

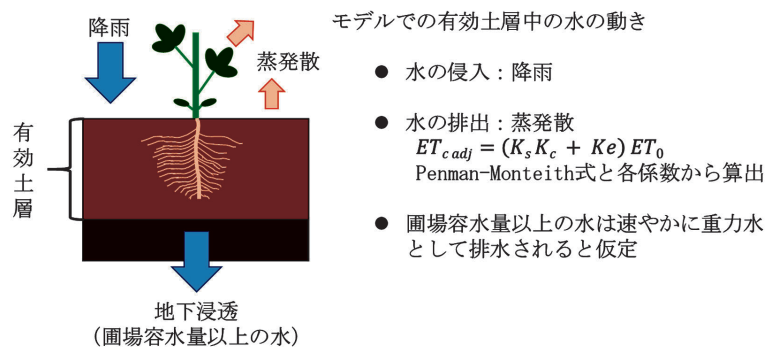


図-2 FAO56モデルの概要

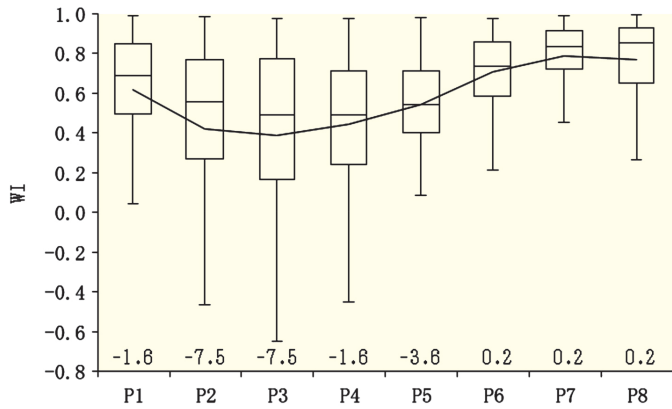


図-3 ダイズ生育期間中の各フェーズにおける WI

箱ひげ図の最大、最小値から 1.5 倍以上の数値は外れ値とした。図中の折れ線グラフは平均値を示す。図中の数値は外れ値を含めた最小値を示す。

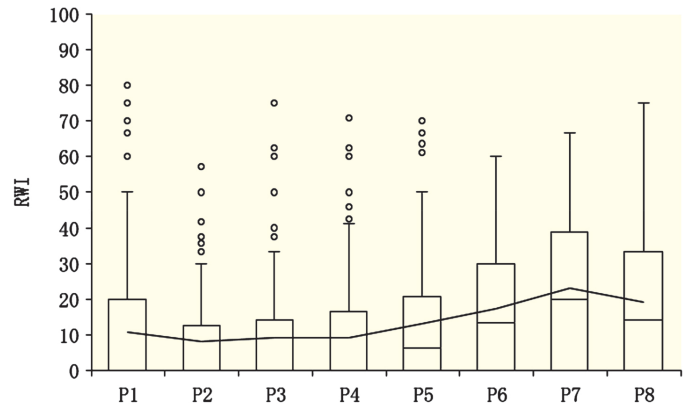


図-4 ダイズ生育期間中の各フェーズにおける RWI

箱ひげ図の最大、最小値から 1.5 倍以上の数値は外れ値とした。図中のプロットは外れ値、折れ線グラフは平均値を示す。

式によるポテンシャル蒸発散量 (mm/日)、 K_s は水ストレス係数、 K_{cd} は作物基礎係数、 K_e は土壌からの蒸発に関する係数を示す。

乾湿指標 (WI) の作成

FAO56 モデルで算出される土壌水分は体積含水率である。圃場ごとの圃場容水量及び永久しおれ点 (θ_{wp} , %) の体積含水率は異なることから、体積含水率では異なる圃場間の乾湿程度を比較することができない。そのため、下記の式 (2) のとおり乾湿指標 (WI) を作成した。

$$WI = (\theta - \theta_{wp}) / (\theta_{fc} - \theta_{wp}) \quad (2)$$

本式の θ は体積含水率 (%) であり、「 $\theta = \theta_{fc} - 100Dr / Zr$ 」で表される。 θ が上昇し、圃場容水量 (θ_{fc}) と同じ土壌水分になると $WI = 1$ となる。また、 θ が低下し、永久しおれ点と同じ土壌水分になると $WI = 0$ となる。つまり、WI は高いほど湿潤条件、低いほど乾燥条件と捉えることができる。WI は、圃場ごとの圃場容水量、永久しおれ点によって規格化されているため、土壌タイプが異なる条件でも相互の比較が可能となる。

湿害の評価には、各フェーズにおける $WI = 1$ の日数割合 (Ratio of $WI = 1$ days, RWI, %) を指標とした。FAO56 モデルは、灌水支援を目的に作られたモデルであるため、土壌乾燥程度の評価に利用されている。モデルでは、圃場容水量 (すなわち $W = 1$) を超える水分は重力水として速やかに排水されると仮定しており、WI そのものでは圃場容水量以上の土壌水分を定量化できないため、RWI を使用することとした。

ダイズ生育期間中の乾湿指標の推移

WI の平均値は P1 から P3 にかけて低下していき、P3 以降は上昇していた。最も変動が大きい時期は P3 であり、最大値は 0.97、最小値は -7.45 であった (図-3)。いずれのフェーズにおいても最大値は 0.97 以上、最小値は 0.22 以下であり、地理的要因や年次の違いによって、同じ生育ステージでも幅広い土壌水分条件が存在することが明らかとなった。

RWI の第 3 四分位 (全地点の 75%) の値は、P1 ~ P5 においては 20% 程度であったが、P6 以降は RWI が 30 ~ 40% 程度に上昇しており、P6 以前

のフェーズと比較し、湿潤条件の地点割合が高くなった (図-4)。外れ値を含む最大値では、いずれのフェーズでも RWI が 50% 以上であり、各フェーズにおいて期間中の半分以上が湿潤条件だった地点が存在した。

乾湿指標の変動要因

WI 及び RWI が変動する要因を明らかにするために、最も WI の変動が大きかった P3 において WI 及び RWI と土壌水分に影響しうる要因 (フェーズ内の気象条件、土壌条件) の間の偏相関係数を求めた (表-2)。WI と有意な偏相関があったものとして、気象条件では降水量と降雨日割合との正の偏相関が、土壌条件では有効水保有能力 (有効水保有能力 = $[(\theta_{fc} - \theta_{wp}) Zr] / 100$) との正の偏相関が有意だった。よって、WI は有効水保有能力が低い土壌条件で、降雨日、降雨量が少ない場合に低くなることが示された。

RWI は降水量との正の偏相関、降雨日割合との負の偏相関が有意だった。降雨日割合と RWI の負の偏相関については、降水量が同じ条件だった場合は少ない日数に集中して降雨があるほど RWI が高くなることを

表-2 P3 における WI 及び RWI と気象条件、土壌条件との偏相関係数

			偏相関係数	
			WI	RWI
気象条件	降水量	(mm/日)	0.476 ***	0.686 ***
	降雨日割合	(%)	0.252 ***	-0.191 ***
	日平均気温	(°C)	-0.317 ***	0.044 ns
	日射量	(MJ/m ² /日)	-0.008 ns	0.016 ns
土壌条件	有効土層	(mm)	0.060 ns	-0.050 ns
	圃場容水量	(%)	-0.009 ns	-0.098 ns
	永久しおれ点	(%)	0.031 ns	0.038 ns
	有効水保有能力	(mm)	0.273 ***	0.061 ns

***は0.1%水準で有意、nsは偏相関がないことを示す。制御変数は説明変数以外の気象条件、土壌条件の変数とした。

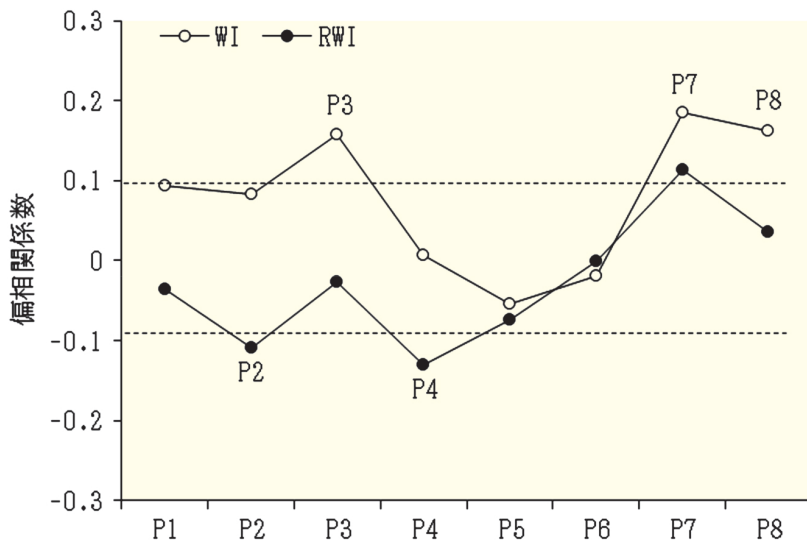


図-5 ダイズ生育期間中の各フェーズにおける収量と WI, RWI の偏相関係数
図中の点線は 5% 有意水準の限界値を示す。図中の数字は有意な偏相関があったフェーズ番号を示す。

示していると考えられ、短期集中の降雨条件ほど RWI が高くなることが示唆された。以上のように WI 及び RWI の変動は気象条件や土壌条件と密接に関係しており、乾湿害が起こりやすい気象条件や土壌条件の変動と一致していた。よって WI 及び RWI は気象条件と土壌条件の影響を踏まえた乾湿害指標として有効であると考えられた。

乾湿指標を用いた乾湿害の実態解析

WI 及び RWI は降水量と降雨日割合の影響を受け変動することが明らかとなったが、日平均気温や日射量も降水量及び降雨日割合と密接に関係し、収量に影響を及ぼしていると考えられる。よって、収量に対する WI 及び RWI の単一の影響を評価するために、日平均気温と日射量を制御変数と

して、フェーズごとに収量と WI 及び RWI との偏相関係数を求めた。

WI が収量と有意な正の偏相関があったフェーズは P3, P7, P8 だった (図-5)。P3, P7, P8 は、それぞれ栄養生長中期、子実肥大中後期、成熟期に相当する時期であり、日本のダイズ生産現場ではこの時期に乾燥害が生じていることが示された。栄養生長中期の乾燥害について、飛田ら (1995) は、栄養生長期からの低土壌水分処理によって開花期頃の葉面積、乾物重が減少したと報告している。また、WI の時期的な変動では、P3 の時期は乾燥傾向を示しており、潜在的に乾燥害のリスクがある時期と考えられる (図-3)。子実肥大期については、齋藤ら (1999) はこの時期の乾燥害によって百粒重が小さくなること、結実率の低下によって不稔実粒が増加し一莢内粒数が少なくなることを報告している。また、成熟が進むにつれて葉は黄化、落葉するが、葉の黄化、落葉は乾燥ストレスによって葉にアブシジン酸が蓄積することで進行することが知られている (中島ら 2015)。このことから日本においては、乾燥条件によって栄養生長が阻害されること、百粒重の低下や不稔実粒の増加が生じること、葉の黄化、落葉が早まることで収量が低下するリスクがあると考えられた。

土壌過湿の影響評価として RWI を用いた場合、RWI が収量と有意な負の偏相関があったフェーズは P2, P4 だった (図-5)。P2, P4 は、それぞれ栄養生長初期、栄養生長後期に相当

する時期であり、日本のダイズ生産現場ではこの時期に湿害が生じていることが示された。栄養生長初期での湿害は、葉色の低下、葉面積の生長阻害、乾物生産の低下が生じ、その後過湿条件を回避できたとしても栄養生長不足から回復できずに収量が低下することが示されている(田淵ら 2008; 緒方・内川 2014)。栄養生長後期(P4)に相当する開花前の花芽分化期での湿害については、杉本ら(1988)の研究で報告されている。この時期の過湿処理は乾物生産と収量に大きな影響を及ぼすことを指摘しており、主茎の伸長、葉面積の拡大、乾物重の増加が抑制され、莢数、稔実莢歩合が低下することにより収量低下に繋がることを報告している。このことから日本においては、栄養生長期での湿害によって生育が阻害されることで収量が低下するリスクがあると考えられた。

まとめ

本研究では、日本の乾湿害の実態を明らかにするために複数年次かつ広域的な現地実態調査で得られたデータを用いて、ダイズの各生育ステージにおける土壤水分が収量に及ぼす影響を評価した。今回の解析は広範囲のデータを基にしており、日本の実態を概ね捉

えていると考えられる。一方で、既存の報告では、本研究では影響が見られなかった生育ステージにおける乾燥害(福井・伊藤 1951; 齋藤ら 1999)と湿害(杉本ら 1988)が報告されていることから、条件によっては、本研究結果では見られなかった時期の乾湿害が地域単位で生じる可能性があった。また、本研究では各フェーズ単独での要因解析としたが、ダイズ生育・収量に対する乾湿害の影響はフェーズ間で相互作用があると考えられる。よって、今後は、地域単位やフェーズ間の相互作用に着目した解析を行うことが重要と考える。

謝辞

本研究では、農林水産省委託プロジェクト収益力向上のための研究開発「多収阻害要因の診断法及び対策技術の開発」(2015年～2017年)に参画したコンソーシアム構成員及び現地農家の方々のご協力により得られたデータを使わせて頂きました。本研究は、2018年に依頼研究員として受け入れて頂いた農研機構東北農業研究センター大仙拠点において、高橋智紀水田環境グループ長(当時)をはじめ同所内の皆様に多くのご指導及びご助言をいただき実施することができまし

た。ここに記して深く感謝の意を表します。

引用文献

- Allen, R.G *et al.* 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No 56.
- 福井重郎・伊藤隆二 1951. 生育の各期における土壤水分の不足が大豆の生育並に収量に及ぼす影響について. 日作紀 20, 45-48.
- 飛田有支ら 1995. 低土壤水分条件におけるダイズの乾物生産と根系発達の種類間の相違. 日作紀 64, 573-580.
- 今野智寛ら 2020. FAO56 モデルを用いた土壤の乾湿指標によるダイズ乾湿害の実態解析. 日作紀 89, 337-345.
- 中島一雄ら 2015. 長期の乾燥による葉の黄化防止に関わる遺伝子を発見. 国際農林水産業研究センター 平成 27 年度 成果情報.
- 緒方大輔・内川修 2014. 生育時期別の湛水処理が大豆品種「フクユタカ」の生育に及ぼす影響. 日作九支報 80, 14-15.
- 大野宏之 2014. メッシュ農業気象データ利用マニュアル. 中央農研研究資料 9, 1-77.
- 斎藤邦行ら 1999. 土壤水分の欠乏がダイズの開花結実に及ぼす影響: エンレイと東山 69 号の比較. 日作紀 68, 537-544.
- 杉本秀樹ら 1988. 水田転換畑におけるダイズの過湿障害: 第 1 報 土壤の過湿処理が乾物生産と子実収量に及ぼす影響. 日作紀 57, 71-76.
- 田淵公清ら 2008. ダイズの生育・収量におよぼす生育初期の土壤過湿の影響. 日作紀 77 (別 2), 202-203.