

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

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:
	公開日: 2019-03-22
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 細野, 達夫, 片山, 勝之, 野村, 幹雄, 大野, 智史,
	中山, 則和, 細川, 寿
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://doi.org/10.24514/00001565

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

細野達夫*1·片山勝之*2·野村幹雄*3·大野智史*1·中山則和*1·細川 寿*4

I. はじめに
Ⅱ. 材料と方法
1. 圃場試験2
2. 水ストレスによる
ダイズ減収率のモデル推定 6
1) 土壌水分推定モデル 6
2) 減収率の推定 7
3)気候的ポテンシャル収量の推定 7
4) ポット試験
Ⅲ. 結果と考察11
1. 圃場灌溉試験11
1) 圃場試験における
耕うん層土壤水分の推移11

目 次

2) ダイズ収量11
2. 水ストレスによる
ダイズ減収率のモデル推定12
1) 圃場へ供給される水量と
推定蒸発散量12
2) 土壤水分推定モデル13
3) 推定蒸散量とダイズ減収率15
4) ポット試験における
蒸散量と子実重の関係15
3. 総合考察18
Ⅳ. 摘要
引用文献
Summary ·····23

I. はじめに

現在我が国では北海道を除いてダイズは主として 水田転換畑で生産されている.北陸地域のダイズも ほとんどが水田転換畑での作付けであり,転作作物 として水田輪作体系に組み込まれている場合も多 い.

北陸地域では、粘土含量が25%以上の「重粘土」 が水田面積の35%以上を占める(高橋,2005).重 粘土は排水性が悪く、ダイズを栽培する際はいわゆ る湿害を生じる危険性があり、北陸研究センターで は対策技術として耕うん同時畝立て播種技術の開 発・普及を行ってきたところである(細川,2005; 細川,2011).しかし、重粘土はまた、有効水分域 が狭いため、梅雨前の5月や梅雨明け後の7月後半 ~8月のように蒸発散量が大きく降雨が少ない場合 には乾燥害の危険性もあると考えられている(足立 ら,2005).特に北陸地域のムギ跡ダイズ作におい ては,開花・着莢の時期が梅雨あけの高温乾燥条件 にあたるので,水ストレスによる減収の危険性が懸 念される.しかし,重粘土転換畑において乾燥害に よる減収の危険性がどの程度あるかについての情報 は少ない(井上,1997).

本研究では、重粘土転換畑でのオオムギ跡ダイズ 作を対象に、土壌乾燥により水ストレスの生じる可 能性がどの程度あるのか、また、灌漑によって水ス トレスや減収を回避できるかについて明らかにする ことを目的に、3ヶ年にわたって圃場での灌漑試験

平成 25 年 6 月 21 日受付 平成 25 年 12 月 25 日受理

^{*1} 農研機構中央農業総合研究センター水田利用研究領域

^{*2} 現 農研機構東北農業研究センター

^{*3} 現 富山県農林水産総合技術センター

^{*4} 現 農研機構中央農業総合研究センター作業技術研究領域

を実施し、灌漑区と無灌漑区の収量を比較した.水 田転換畑における灌漑方式として現在のところ最も 一般的な畝間灌漑では、大流量の水によって土壌構 造を破壊して排水性を悪化させることが懸念される (足立ら,2005).一般に、排水性の悪い圃場では灌 漑の効果が期待できず、逆に湿害による減収を引き 起こす場合もあるとされている(有原,2000)が、 畝間灌漑ではその湿害・減収のリスクは大きいと想 像される.そこで本研究では、土壌構造の破壊や過 剰灌漑による湿害のリスクを少なくするため、点滴 灌漑を用いた.

さらに,水分ストレスによる減収率を推定するた めのモデルについて検討した.まず,土壌水分を推 定するモデルについて検討し,既往の研究で示され ている土壌水分と蒸散量の関係および蒸散量とダイ ズ収量の関係から減収率を推定しようとした.蒸散 量と収量の関係を確認するために、雨よけハウスで ポット栽培ダイズを用いた灌水制御試験も行った.

なお、「灌漑」と「灌水」は、一般的に、ほぼ同 義に使用されていることも多いように思われる.本 研究では、特に理由はないが、圃場試験では「灌漑」、 ポット試験では「灌水」という語を使用することと する.

本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「水 田底力プロ4系(旧担い手プロ)」(H20~23年度)、 および農研機構運営費交付金(H20~23年度)に より実施した。

Ⅱ. 材料と方法

1. 圃場試験場

北陸研究センター (新潟県上越市稲田)内の重粘 土転換畑圃場で、2008年~2010年の3ヶ年、オオ ムギ跡でダイズを栽培して灌漑試験を行った. 試験 圃場は. 主としてオオムギの育種試験に用いられて いる圃場で、2007年までの約10年間はオオムギ-青刈りダイズ-青刈りダイズの2年3作体系が行わ れ,青刈りダイズは圃場へ鋤込まれていた. 圃場全 体は大きく2つの区域(図1の区域Aおよび区域B) に分けられている.オオムギの作付けは区域Aと区 域Bで1年ずらしてあり、毎年、どちらかの区域で オオムギが作付けられることになる. 2007 年から 2010年の間は、ムギ跡となる区域はダイズの試験 に供用され収穫まで栽培された. ダイズ跡は従前と 同じく青刈りダイズ (鋤込み)であった. ムギ跡ダ イズ作の区域はさらに4つの区画に区切られ、本研 究の灌漑試験はそのうちの一つの区画を用いて行っ た. 灌漑試験に用いた区画以外では灌漑は一切実施 されなかった.本研究で用いた区画の位置は3ヶ 年とも異なった(図1参照)が,面積は約6a(40m × 15 m) で, その周囲に明渠 (深さ約 20 cm) が 施工されている.本暗渠は、圃場面から深さ70~ 75 cm に、区画あたり 1~3 本が (東西方向に)入っ ているが,施工年は不明である.排水路は圃場の西 側に通っており、底部は圃場面より110 cm 程度低 くなっている.弾丸暗渠は少なくとも 2007 年以降

2010年までは施工されていない.

ダイズ単作の場合の地域の慣行播種期は5月下旬 ~6月初旬であるが、オオムギ跡ダイズではそれよ り2週間から3週間の晩播となる6月中旬~下旬の 播種となる場合が多い、本研究の試験での播種日は、 2008年が6月11日、2009年と2010年が6月18日 であった、品種は「エンレイ」を使用した。

耕うん同時畝立て播種作業機(細川ら,2005) により,耕うんと同時に畝幅150 cm,畝高さ約 10 cmの平高畝を形成しながらダイズを播種した. 耕うん土層の厚さ(畝上面から鋤床までの深さ)は 22 ~ 25 cmであった.平均条間37.5 cmの4条狭畦 栽培(畝内条間30 cm,畝間条間60 cm,栽植密度 は約22 本/m²)で,無中耕・無培土である.粒状 消石灰(Gライム)を100 kg/10 a,ダイズ用複合肥 料(ニューダイズ800)はN,P₂O₅,K₂O施用量が 2.5 kg/10 a, 6.3 kg/10 a, 9.4 kg/10 aとなるように 31.3 kg/10 aを耕うん前に圃場面に散布し,耕うん によって全層に混和した.追肥は施用しなかった. 明渠は周囲明渠のみであるが,豪雨時などに発生す る畝間の湛水をできるだけ少なくするために,畝の 端では畝間と周囲明渠をつなぐための溝を掘った.

灌漑区と無灌漑区を設定した.2反復で試験を行い、反復区画の大きさは6m(4畝)×12m(2009年のみ10m)とした(図2).灌漑区では、耕うん層の土壌が後述する基準以上に乾燥した場合に点滴



図1 試験圃場周囲の土地利用略図

灌漑試験にはムギ跡ダイズ圃場(区域Aまたは区域B)の一部の区画を使用。当該圃場では、「オオムギ-ダイズ-青刈りダイズ」の2年3作体系が、区域Aおよび区域Bで作期を1年ずらして行われている。区画の縮尺、形状などは、おおよそのイメージである。用水、排水とも、南から北(図の下から上)へ流れる。用水路はコンクリート製の開水路であり、そこを流れる用水は北陸研究センター内の圃場へ直接取水されることはなく通過し、場外へと続いている。試験圃場西側の排水路の側面はコンクリート板でライニングされているが、底部は素堀り状態である。排水路の底部は圃場面より1.1m程度低い。

灌漑を行った. 点滴灌漑には, 圧力補正機能つき点 滴チューブ(ネタフィム, ドリップネット. ドリッ パー間隔15 cm, 吐出量1 L/h)を用い, 2 条に1本 の割合で条方向に配置した. 用いた水中ポンプ(寺 田, ファミリーポンプSL102)の送水能力では, 灌 漑区の2つの反復区画に同時に灌漑すると水圧不足 であったので、2つの反復区画で時間をずらして灌 漑した。

各区において、土壌の体積含水率(volumetric water content, 以下, VWC) は TDR プローブ



圃場内試験区配置図

図2 圃場灌漑試験での試験区配置および半自動灌漑制御システムの概念図(2010年)

圃場への灌漑は自動制御,灌漑水タンクへの農業用水の補給(用水路から)は半自動. 2008年と 2009年もシステムおよび 試験区の配置は同様.

(Campbell, CS616),水ポテンシャルはテンシオ メータ (コーナシステム)およびWatermark センサ (Campbell, model 253),群落表面温度は赤外線放射 温度センサ (Apogee, IRR-P),地温は熱電対 (T型) を用い,データロガー (Campbell, CR10X, CR1000 等,複数使用)で計測・記録した.TDRプローブは ロッド長 30 cm であり,2008 年は畝上面から深さ 10 cm の位置から水平面に対して 20°の角度で差 し込み,他の年は畝上面から穴を掘って深さ 15 cm の位置で水平に差し込み,穴を埋め戻した.2008 年は,畝上から深さ約 10-20 cm の平均*VWC*を測定 したことになる.テンシオメータは,ポーラスカッ

プの中心が畝面から 2008 年は深さ 10 cm, 他の年 では深さ 15 cmになるように設置した. Watermark センサは土壌の水ポテンシャルを-200 kPa 程度の乾 燥域まで計測可能なセンサで, 深さ 15 cmに埋設し, テンシオメータのデータを補完する目的で用いた. Watermark センサの測定値は温度依存性があるの で, 深さ 15 cmの地温計測値を用いて補正した. 灌 漑区において,全ての土壌水分センサは点滴チュー ブ直下近傍に設置し,TDR プローブは,ロッド長 方向を点滴チューブ伸長方向と一致するようにし た. 無灌漑区においても同等の位置に設置した.

赤外線放射温度センサは、群落の上約0.5mの位

置に地面に対して鉛直方向に設置した. このセンサ の入射角は44度で, 群落上面で直径40 cm 程度の 円の範囲の平均放射温度が測定されることになる. 群落の高さの変化に合わせてセンサの設置高さを1 週間に1回調整した. 計測はダイズ群落が地面を完 全に被陰する前から開始したが, データは地面がほ ぼ被陰された開花期以降のデータを用いた.

赤外線放射温度センサは各区で1点ずつ,その他 のセンサは各区2点以上で計測した. 灌漑区への灌 漑量を計測するために,電子式水道メータ(愛知時 計, EDS13)のパルス出力を上記ロガーで計測・記 録した.

灌漑区においては、開花期以降、耕うん層内の 敵上から深さ15 cm (2008 年は10-20 cm)におけ るVWCの値に基づいて灌漑を実施した.開花期以 前はいずれの区も無灌漑とした.根域土壌の有効 水分(植物の根が吸水可能な水分)の量が、全有効 水分量(土壌が保持できる有効水分量の最大値)の 25%以下になると蒸散が抑制されるという報告が 多い(Ritchie et al., 1972; Sinclair et al., 1998).本試 験では、ダイズの主根域は耕うん層にあると想定 し、耕うん層において有効水分量が全有効水分量の 25%に相当する量以下になったら灌漑を実施する こととした.

本研究では「有効水分」やその他の用語は、 Sinclair et al. (1998) などを参考に、以下のような 定義および用法で用いた. 有効水分とは植物が利用 可能な水分のことであり、土壌の水ポテンシャル がある範囲、すなわち有効水分域にあれば、その土 壌は有効水分を保持しているとする. 有効水分域の 下限は永久しおれ点 (-1500 kPa \Rightarrow pF4.2)、上限は -6 kPa \Rightarrow pF1.8 で定義される. *VWC*が永久しおれ点 に対応する値(下限*VWC*)以下であれば有効水分が 無い状態であり,永久しおれ点のときに土壌が保持 している水分量は無効水分量という.また,-6 kPa の水ポテンシャルに対応するVWC(上限VWC)を 超過して水を保持(最大は飽和水分量)していて も,その超過分は重力水と呼ばれ,植物が利用する 前に排水されてしまう.したがって,上限VWCの ときの水分量から無効水分量を差し引いた水分量が 全有効水分量ということになる.土壌が保持してい る有効水分量が全有効水分量の25%のときのVWC (VWC_T)は次式で計算される.

VWC_T = *VWC_{LL}* + (*VWC_{UL}* - *VWC_{LL}*)・0.25 (式 1) ここで, *VWC_{UL}*および*VWC_{LL}*は, それぞれ上限 *VWC*および下限*VWC*.

本研究では、上限VWCは、24時間容水量に相当 するVWC、すなわち、十分な降雨の後24時間経過 した時点のVWC、また、下限VWCは、土壌の乾燥 過程のモニタリング結果から、それ以上はほとんど 低下しなくなる時点のVWCとした.各年の試験で 決定した上限および下限VWCについては表1に示 した.各年で値が異なる原因は、土壌の間隙率が耕 うん時の土壌条件やTDRプローブ設置位置の局所 的な状況により異なるためと考えられる.表1に示 したVWCuLおよびVWCLの数値は、場内の別の重 粘土圃場の土壌について定法により測定された水 ポテンシャルとVWCの関係(未発表データ)から 得られる値と比較して概ね妥当な値と考えられた. VWCLが大きい、すなわち、無効水分量が多いのは 粘土質土壌の一般的な特徴である(前田、1983).

1回の灌漑量は,2008年と2009年は3mm程度, 2010年は10mm程度に設定した(機器の不具合に より設定量を灌漑できない場合もあった). 灌漑区 と無灌漑区の境界は接しているが,灌漑量が少ない ため,灌漑水の水平方向の移流は少ないものと判断

表1 各年において決定した有効水分域の上限および下限のVWC

試験年	VWC _{UL}	<i>VWC</i> _{LL}	全有効水分	VWC_T
2008	0.37	0.21	0.16	0.25
2009	0.42	0.28	0.14	0.3
2010	0.47	0.34	0.13	0.37

 VWC_{LL} および VWC_{LL} は、それぞれ有効水分域の上限および下限のVWC. 全有効水分は、 $VWC_{UL} - VWC_{LL}$ で、数値は土壌の全体積に占める全有効水分の体積の割合を表す. VWC_{T} は有効水分(= $VWC - VWC_{LL}$)が全有効水分の25%のときのVWC. VWCが VWC_{T} を下回ると灌漑を行う. ただし、この表の値は試験終了後に確定したものであり、試験途中の灌漑制御に用いた暫定的な VWC_{T} の値とは若干異なる.

される.

収穫期には、収量および収量構成要素を調査した. 坪刈り収量は、1.5m(畝幅)×1m分を各反復区画 から2点ずつ手収穫して調査し、計4反復/試験区 とした.調査項目は,主茎長,茎乾物重, 莢乾物重, 総莢数,総節数,稔実莢数,粗子実重,整粒重およ び整粒数とした。ただし、2008年は稔実莢数は調 査しなかった. 整粒は粒径が 5.5 mm 以上の子実と し、 整粒重と整粒数から百粒重を算出した、 坪刈り の約1週間後,残りの部分を反復区画(2反復/区) 毎にコンバイン収穫し粗子実重を計測し、区画面積 から坪刈り面積を差し引いた面積で割って「コンバ イン刈り収量」とした. コンバイン収穫時の刈り残 しや圃場へ散乱した子実,いわゆるコンバインロス については収量へ含めず、またその量も調査しな かった. 収量および収量構成要素の処理区間差. 年 次間差を見るための分散分析等。全ての統計処理は パソコンのソフトウェア (Synergy Software, カレ イダグラフ)を用いて行った.

また、2010年には、目視により灌漑区の方が繁 茂していると思われた.そこで、9月2日にPAR計 測装置(Decagon, AccuPAR, LP-80)を用いて、灌 漑区と無灌漑区の葉面積指数(LAI)を推定して比 較した.

2. 水ストレスによるダイズ減収率の モデル推定

1)土壌水分推定モデル

圃場の水収支から耕うん層の土壌水分を日単位で

推定するための土壌水分推定モデルについて検討した.水文学分野で河川流出量の予測などに使用されるタンクモデルの一種である,近藤ら(1992)の提案する指数関数型貯留量のタンクモデルを利用した(図3).モデルの概略を以下に示す.

耕うん層を貯水タンクにみたてると、その水分貯 留量は、以下の式で計算される.ただし、貯留量は 有効水分の貯留量とする.

 $W = W_0 + dW - (E+T)$ ただし, W ≥ 0 (式 2) $dW = (W_{max} - W_0) [1 - \exp\{(-(Pr + Ir)/(W_{max})\}]$ (式 3)

ここで、Wは貯留量、 W_0 は前日の貯留量、dWは降水および灌漑水 (の一部)による貯留量の増加 分、EおよびTはそれぞれ土壌表面からの蒸発およ び植物の蒸散によりタンクから失われる量、Prは 降水量、Irは灌漑水量、 W_{max} は最大貯留量であり、 単位はいずれもmmである。貯留量はマイナスには ならない、すなわち土壌水分は有効水分の下限以下 には低下しないものとする。 W_{max} は全有効水分量と する.

*W*および*W_{max}は、VWC*の値から以下の式で計算 される.

 $W = (VWC - VWC_{LL}) \cdot D \qquad (\ddagger 4-1)$

 $W_{max} = (VWC_{UL} - VWC_{LL}) \cdot D \qquad (\ddagger 4-2)$

逆に,Wから次式でVWCが計算される.

 $VWC = VWC_{LL} + (VWC_{UL} - VWC_{LL}) \cdot WWW_{max}$ (式 5) ここで, Dは耕うん層の厚さ (mm) である.

降水および灌漑水の一部は、いわゆる「水みち」 などを通って下層に流れ、耕うん層の水分を高める



図3 土壌水分推定のためのタンクモデルの概念図

のに有効ではない、すなわちタンクに入らない部分 があるが、その部分は式3の指数関数部分で表現さ れている。

このモデルでは、下層から耕うん層への水分供給 は想定していない.重粘土は毛管上昇速度が小さい ため、耕うん層の乾燥過程において、下層から毛管 上昇により耕うん層に供給される水量は無視できる と考えられる.ただし、実際には地下水位が上昇し て鋤床上に湛水が生じるような状況も見られる.こ のモデルではそのような状況は再現できない.

蒸散量 (T) については,

 $T = T_p (W \ge W_T \mathcal{O} \ge \mathfrak{E})$ (式 6-1) $T = T_p \cdot W/W_T (W < W_T \mathcal{O} \ge \mathfrak{E})$ (式 6-2)

と計算する.ここで、 T_p は土壌水分が十分にあっ て植物の蒸散が抑制されない場合の蒸散量である. また、 W_T はVWCが VWC_T 、すなわち植物の蒸散が 抑制され始めるVWCであるときの貯留量である.

EとT_pは、Ritchie(1972)の方法に準じて推定し、 土壌特性によって決まるパラメータの値は同報にあ る Houston Black Clay のものを用いた. EとT_pを推 定する際に必要なポテンシャル蒸発散量とダイズ群 落のLAIは、以下の様にして求めた. ポテンシャル 蒸発散量は、ペンマン法(三浦・奥野、1993)によ り計算した.計算に必要となる気象要素は、北陸研 究センター気象観測露場のデータを用いたが、純 放射量は、松岡ら(1993)の式を用いて日射量から 推定した.ダイズ群落のLAIの経時変化は、隣接す る別のダイズ試験圃場における栽培試験(片山ら、 2012)の中で、本研究の栽培試験と同じ栽植様式の 区で、PAR計測装置(Decagon、AccuPAR, LP-80) による測定で得られた推定値を用いた.

圃場灌漑試験における土壌水分のシミュレーショ ンの開始日は各年の消雪日(3月~4月)とし、そ の時点では多量の融雪水により耕うん層でも土壌水 分は飽和していると仮定し、それ以後の土壌水分の 推移をモデルにより計算した。オオムギ栽培時、ダ イズ栽培時とも、タンクの大きさに相当する耕う ん層の厚さDは実際の条件にあわせて250 mmとし て計算した。オオムギ栽培時の蒸発散量はペンマ ン蒸発散位に相当するものとして計算し、*VWC_{LL}*、 *VWC_{UL}*は各年毎に圃場試験で決定した値(表1)を 用いた。

2) 減収率の推定

TとT_pをダイズの収穫期まで積算し、水ストレス がない場合に見込まれる蒸散量に対する実際の蒸散 量の比率を計算する.水ストレスを受ける状況では、 一般的にダイズの減収率は蒸散量の減少率と直線関 係が認められる(Payero et al., 2005)ので、ダイズ 収量と蒸散量の間の比例関係を仮定して次式で推定 減収率(水ストレスがない場合の収量に対する減収 割合、 Y_{red})を計算する.

 $Y_{red} = 1 - \sum T / \sum T_{p} \tag{$\frac{1}{3}} 6$

土壌水分の推定値や減収率の推定値が前述の圃場 灌漑試験における実測と適合するかどうかを検討す ることとした.

3)気候的ポテンシャル収量の推定

土壌水分ストレスがないという条件を仮定した場 合の 2008 年~ 2010 年におけるダイズの気候的なポ テンシャル収量を推定するために、鮫島(2002)の モデルを用いてシミュレーションを行った. このモ デルは, 土壌の水分や養分条件は好適な条件であ ることを前提に、気温、日射量等から、ダイズの 発育や生育・収量を予測するものである. 「エンレ イ」用のパラメータも鮫島(2002)に示されている ものを用いた. 土壌条件に依存するパラメータは含 んでいないが、各パラメータの値はつくば市の黒ボ ク土畑での試験結果に基づいて決定されたものであ り、重粘土水田転換畑での収量等の推定精度は未確 認である.また. 密植栽培に最適化されていないた め、栽植密度の入力値は本研究の栽培試験での22 本/m²ではなく、鮫島(2002)の圃場試験と同等の 12本/m²とした. そのため, 本研究では, 収量の 推定値そのものには着目せず、ポテンシャル収量の 年次間差について考察するための材料としてのみ用 いた.

4)ポット試験

重粘土条件での蒸散量-収量関係を確認するため のモデル実験として,雨除けハウス内で灌水量制 御により蒸散を抑制するポット試験を行った.い ずれの試験でも,1/5000 aプラスチックポット(深 さ20 cm)に,水田土壌(強粘質グライ低地土)を 充填し,ダイズ(品種:「エンレイ」)を直播栽培し た. 灌水は点滴灌水により行った.点滴装置は,圧 力調整機構つき定流量点滴装置(ネタフィム, PCJ-LNCLドリッパー, 吐出量 4 L/h)を用いた(1 個/ ポット). 点滴装置から吐出される水は, 軟質ポリ エチレンチューブ(内径 3 mm), 点滴位置を固定 する装置(ネタフィム, ドロップスパイク)を通じ て各ポットの土壌表面に点滴灌水される. 点滴位置 は, ダイズの茎から約 5 cm離した.

ポット土壌の*VWC*は土壌水分センサ(後述)を 用いて、データロガー(Campbell, CR10X)で計測・ 記録した. 灌水のためのポンプ(日立, ハンディ ポンプC-P30V)および電磁弁(CKD, FWB41)の制 御は、同じデータロガーに接続したリレー制御器 (Campbell, SDM-CD16AC)により行った.

なお,いずれの場合も,ポット試験ではあるが孤 立個体としての反応をみるのではなく,ポットを適 当な間隔で並べることにより,群落を模すことを意 図した.従って,施肥量,灌水量,ダイズの収量等 は全て,1ポットあたりではなく,ポットを配置し た地面の面積あたりで表すこととする.肥料や水が 施用されるのはポット土壌に対してのみであり,根 はポット外へは出ていかない.したがって,局所施 肥・局所灌水,根域制限栽培となる.

用いたポットは土壌量が少ないため保水量が小 さい.したがって、蒸散量が多い場合に設定した VWCを保つためには少量多頻度の灌水を要する. 本研究では自動制御による多頻度灌水により、水ス トレスをかけない対照区ではVWCを適度な範囲に 保つようにした.一方、水ストレスをかける処理は、 対照区に対して一定の割合で灌水量を削減すること とした.保水量が小さいので、灌水量の削減を開始 した後は迅速に水ストレスをかけることが可能とな る.灌水量の削減は1回あたりの灌水量を削減する ことにより行い、灌水頻度は対照区と同じとした. これにより、水ストレスをかける処理区においても VWCの変動を小さくできる.

試験は計3回(3ヶ年)にわたって実施したが, 実験条件は各年で異なったので,以下,年毎に記述 する.なお,収量データ等の統計処理は前述のPC ソフトウェアを用いて行った.

(1) 試験1 (2008年)

土壌は、前作がエダマメの重粘土転換畑圃場から2008年4月に採取し、風乾後、スコップ等で土 塊径を概ね5mm以下に細かくしたものを用い、ほ

ぼポットいっぱいに充填した.施肥は.苦土生石 灰 (マグクリーン) が 60 g/m², ダイズ用複合化成 肥料 (ニューダイズ 800, N-P₂O₅-K₂O=8-20-30) が約 31 g/m² (2.5 gN/m²), となるように, それぞれ土 壌全体に混和(全層施肥)した.2008年6月26日 にポットあたり3粒を播種し、出芽後2本仕立てと して、これを一株とした、土壌のVWCを誘電率水 分計 (Decagon, EC-5) で計測した.水分計は点滴 位置付近の土壌表面から垂直に差し込み、センサ部 分(長さ5cm)が深さ1cm~6cmに位置するよう に設置した. pF2.0 に相当する VWC 以下になると灌 水するように制御した区を対照区(以下,100%区) とした. 開花期(正確には開花期の1週間後)以 降,100%区の灌水量に対して,85%,70%および 50%の量を灌水する区(以下, それぞれ, 85%区, 70%区, 50%区とする)を設定した. 開花期までは いずれの試験区も対照区と同じ灌水量とした. 灌水 の要・不要は、朝5:00から夕方17:00までの毎 正時に判定した. 100%区における1回の灌水時間 は、ポットあたり 0.1 Lの灌水量となるように 90 秒 とし、他の区の灌水時間はそれぞれの比率に応じた 秒数とすることにより所定の灌水量となるようにし た. なお、 灌水をする場合には、 一定の圧力で 灌水 するため、また、流量計が1台しか設置されていな いので、各区に対して設定した灌水量が確実に灌水 されたことを確認するため、一つの区の灌水が終了 してから次の区の灌水を行うようにした. 詳述すれ ば、0分に50%区の灌水を開始、以後、10分おき に,100%区,70%区,85%区の順に灌水を開始し た.区の配置は図4の通りである.ポットは、畝 幅1.5m, 4条植えの南北畝に見立てて図4のよう に配置した.株間0.3m, 畝内条間0.3m, 畝と畝 の間の条間 0.6 mで, 栽植密度は, 8.9 株 /m² ある いは17.8本/m²に相当する. 落葉し始めた9月24 日からは、全ての区でそれぞれの区の土壌の体積含 水率を指標にして100%区と同じ方式で灌水制御を 行った. 10月3日(開花期から63日後)に刈り取 り、ハウス内で乾燥後、子実収量および収量構成要 素を調査した、収量等は調査した各処理区5ポット 分の値に、8.9/5を乗ずることにより土地面積あた りの収量とした.

(2) 試験2(2010年)

土壌は、試験1で用いた土壌を大型バットに移





周縁のポット(網掛けの円)以外の5ポット/試験区を生育調査に供した.試験区の説明は本文参照.

し, 無植栽のまま湛水-排水を何度か繰り返した後, 風乾状態になっていたものを用いた. 固まった土 塊を移植ごて等を用いて土塊径 5 mm以下程度に砕 いた. 2010 年 6 月 17 日にポットあたり 3 粒を播種 し, 出芽後, 間引きして 1 本仕立てとした. 施肥は, 2008 年と同じである. ポットは株間 18 cm, 条間 30 cmで図 5 のように配置した. ポットを配置した 区画の面積あたりの栽植密度は, 18.5 本/m²とな る.

土 壌 の VWC を TDR 土 壌 水 分 計 測 システム (Campbell, TDR100) でモニタリングし, 灌水制 御の指標とした. センサには, ロッド長 15 cm の TDR プローブ (Campbell, CS630) を用い, 地表面 から斜めに差し込んで地表面からロッドが深さ1~ 11 cm に位置するように設置した. 各区 2 ポットず つ. 計 8 ポットの VWC をモニタリングした.

2008年の試験では一定のVWCを指標として灌水 制御した結果,100%区では過灌水による子実重減 少の可能性が推察されたので,対照区で過灌水が生 じないことに留意した灌水制御とした.具体的には, ハウス内におけるポテンシャル蒸発散量をペンマン 法で計算した値などを参考にして,1日あたりの灌 水量の上限を設定した.

2008年と同様,開花期以降に対照区の灌水量に 対して一定比率,灌水量を制限することにより蒸散 を抑制する区を設定したが,灌水制限の時期を開花 期から子実肥大中期までとする「前半抑制区」,子 実肥大中期から熟期までとする「後半抑制区」,開 花期から熟期までの期間とする「後半抑制区」,開 花期から熟期までの期間とする「全期抑制区」を 設定した.灌水制限時の灌水量は,当初,対照区 の50%に設定したが,葉の萎れが著しかったため, 前半の灌水制限開始から9日目以降は70%に変更 した.

*VWC*が一定値を下回った場合に灌水を行ったが, 灌水制御の指標とする*VWC*は灌水制限処理開始ま では全区の平均*VWC*,前半抑制区の制限開始から は対照区と後半抑制区の平均*VWC*,後半抑制区の 制限開始以降は対照区の*VWC*(2ポットの平均)と した. 灌水を行う*VWC*の値は,(過湿でも過乾でも ない)適当な土壌水分状態と思われる時の*VWC*の 実測値を元に適宜設定した.

灌水を制限しない場合の1回の灌水時間は、ポッ



図5 灌水抑制ポット試験におけるポット配置図(2010年, 2011年)

周縁のポット(網掛けの円)以外の8ポット(4ポット×2反復)/区を生育調査に供した.試験区の説明は本文参照.

トあたり約 0.08 Lの灌水量となるように,72 秒と し,灌水制限する場合は制限率に応じた秒数(50% の場合は 36 秒,70%の場合は 50 秒)とした.朝5: 00 から夕方 17:00 までの毎正時に,灌水の要・不 要を判定した.灌水が必要と判定された場合には, 当該時の 01 分に対照区の灌水を開始,以後 120 秒 おきに,後半抑制区,前半抑制区,全期抑制区の順 に灌水を開始したが,これは試験1と同様,複数の 区に同時に灌水しないようにするためである.

収穫期に収量および収量構成要素を調査した. ポット配置域の周縁部を除く内側のポットを調査の 対象とし,各処理区2反復(4ポット/反復)で調 査した(図5).収量等は各反復4ポット分の値に, 18.5/4を乗ずることにより土地面積あたりの収量 とした.

(3) 試験3 (2011年)

基本的なシステム,試験区の設定などは試験2と 同じである.2010年との違いは以下の通りである.

土壌は,2011年の4月に,前作が水稲の重粘土 圃場から採取,乾燥後,砕土機(ロータリークラッ シャー.ローター網目:6mm)にかけたものを用 いた.

施肥は、ポット底部に土壌を $2 \sim 3 \text{ cm}$ の厚さに なるように入れ、その表面に、単位土地面積あたり のN-P₂O₅-K₂O施肥量が試験1および試験2と同じ になるように、被覆尿素(LP40)、過リン酸石灰、 塩化カリウムを施用し、その上に土壌を厚さ19 cm まで充填した.表面から深さ16~17 cmのやや深 層への局所施肥となる。石灰は、試験1および試験 2と同様、あらかじめ土壌に混和しておいた。

生育期間にわたって、1日あたりの灌水量の上限 は設定しなかった.そのかわり、ポット下部の排水 穴からの排水を極力抑えるため、土壌表面に二重に 重ねたガーゼを敷き、できるだけ面的に広がるよう にした.これにより、灌水された水が「水みち」を 形成するのを防ぎ、土層を素通りして排水される割 合が少なくなると考えた.

灌水を制限しない場合の1回の灌水時間は,1
 ポットあたり約0.09Lの灌水量となるように,81
 秒とした. 灌水制限時の灌水量は対照区の約70%
 に設定し,灌水時間を57秒とした.

Ⅲ. 結果と考察

1. 圃場灌漑試験

1) 圃場試験における耕うん層土壌水分の推移

灌漑区および無灌漑区の耕うん層における土壌水 分の推移を図6に示す.2008年と2009年は、開花 期以降に適度な降水があったため耕うん層のVWC は灌漑開始点のVWC_Tまで低下することが少なく、 総灌漑量は、2008年が10mm、2009年が15mmと わずかであった.2010年は記録的な高温・干ばつ 年であり、耕うん層の水分量が大きく低下したた め、灌漑区では頻繁に灌漑が行われた結果、総灌漑 量は191mmであった.いずれの場合も、灌漑によ る土壌水分の増加は確認された.2010年は、降水 量が少なかった開花期から 40 日間において, 深さ 15 cmの水ポテンシャルは無灌漑区では Watermark センサの測定下限(-200 kPa)以下まで低下したが, 灌漑区では-10~-40 kPa(pF2.0~2.6 程度)に維持 されていた.

2) ダイズ収量

3ヶ年のダイズ収量および収量構成要素を表2に 示す.2008年と2009年では、坪刈り収量および収 量構成要素について、灌漑区と無灌漑区の間に統計 的有意差は見られなかった.これは、灌漑区の灌漑 量が非常に少なかったためと考えられる.



図6 2008年~2010年の圃場試験での耕うん層土壌水分の推移と降水量および灌漑水量

VWC(体積含水率)は,2008年は畝上から10-20 cm,他の年は畝上から約15 cmでのTDRプローブによる測定値.*SWP*(水 ポテンシャル)は,2008年は畝面から深さ10 cm,他の年は深さ15 cmでの,基本的にテンシオメータの測定値であるが,測 定限界以下に低下した時期はWatermarkセンサの値を示した.○と□は無灌漑区の*VWCとSWP*,●と■は灌漑区の*VWCと SWP*をそれぞれ示す.

		坪刈り				コンバイン
年	試験区	子実収量	総莢数	整粒数	百粒重	刈り収量
		${ m g~m}^{-2}$	m^{-2}	m^{-2}	g	$\mathrm{g}~\mathrm{m}^{-2}$
9000 年	灌 溉	355.0 ± 11.8	620.1 ± 29.5	1057 ± 34	33.6 ± 0.5	310.8 ± 10.9
2008 平 無灌漑	349.0 ± 19.7	648.6 ± 43.3	1045 ± 62	33.4 ± 0.8	301.2 ± 5.6	
9000 年	灌漑	395.2 ± 24.7	669.2 ± 36.3	1199 ± 126	32.9 ± 0.5	361.1 ± 3.0
2009 平	無灌漑	404.7 ± 26.4	678.8 ± 22.1	1242 ± 94	32.5 ± 0.9	363.8 ± 8.1
9010 年	灌溉	342.1 ± 17.2 *	779.6 ± 44.9 *	$1224 \pm 51^{*}$	27.9 ± 0.4	332.3 ± 10.0
2010 平	無灌漑	405.7 ± 13.1 *	918.1 \pm 18.5 *	$1426 \pm 51^{*}$	$28.5~\pm~0.4$	324.4 ± 0.9

表2 圃場試験における収量および収量構成要素.

坪刈りの収量および収量構成要素は、面積 1.5 m² × 4 反復/試験区の平均±標準誤差.「コンバイン刈り収量」は、 坪刈り後1週間前後に残りの部分を各試験区の反復区画毎にコンバイン収穫して粗収量を出し、2 反復の平均±標 準誤差を示した.子実収量、百粒重は、15 %水分換算値.

*は試験区間で有意差あり(t検定5%水準).

一方,2010年においては、根の多くが分布して いると考えられる耕うん層における水分量が(無灌 (瓶では)大きく低下し、灌漑により水分を補給しな ければ蒸散抑制と収量減が生じると予想された. し かし、坪刈り収量は逆に灌漑区の方が有意に低い結 果となった. 灌漑区では無灌漑区と比較して葉面積 が増加する傾向が見られた(9月2日の推定LAIは、 無灌漑区の5.7に対して灌漑区で6.8)が、8月中旬 から倒伏が無灌漑区と比較して顕著となっており. 収量調査(坪刈り)の際には病害(種類は不明)と 思われる黒化した株が多い傾向もみられた、このこ とから、2010年の灌漑区では、倒伏や病害により 稔実莢数が減少して収量が低下した可能性が推察さ れる. ただし, 2010年においてもコンバイン刈り 収量には有意差はなく、子実重の低下は局所的なも のであった可能性もある. なお, 茎葉は灌漑区の方 が繁茂していたものの、収穫時の茎の乾物重は灌漑 の有無により差異が見られなかった(データ略).

収量と収量構成要素について, 灌漑の有無に加え て年次の影響を見るために二元配置分散分析を行っ たところ, 収量については, 坪刈り, コンバイン刈 りともに有意な年次の影響はみられず, 灌漑と年次 の交互作用も認められなかった(いずれも5%水準 で). 収量構成要素については, 2010年は他の2年 に比べて, 莢数は多いものの, 百粒重が小さかった (いずれも, 1%水準で有意差あり). ポット試験の 結果(後述)では, 莢数が確保された条件で子実肥 大期に水ストレスを受けると小粒化する傾向が明ら かであったが、2010年の圃場試験では、開花期か ら40日後以降、すなわち子実肥大期の後半には水 不足となる条件ではなかったことから、子実肥大後 期の水ストレス(干害)が小粒化の原因とは考えに くい、2010年には子実肥大後期に雨の日が多くな り、日射量が少なかったことによる光合成量の減少 が小粒化の要因として考えられる。

2. 水ストレスによるダイズ減収率の モデル推定

1) 圃場へ供給される水量と推定蒸発散量

一般的に、ある期間における栽培圃場の乾燥状況 を大まかに把握するために、その期間の蒸発散量と 降水量の差が解析される. 灌漑を行う場合には降水 に加えて、灌漑水が圃場へ供給される、そこで、図 7に、本研究の3ヶ年の圃場試験におけるダイズ開 花期以降9月15日までの推定蒸発散量,降水量お よび降水量+灌漑水量の積算値の推移を示した.こ こでの推定蒸発散量はペンマン法により求めたも のであり、土壌水分不足や病虫害等の阻害要因がな い条件におけるポテンシャル蒸発散量となる. 2008 年は、開花期から2週間程度は降水量の積算値が推 定蒸発散量の積算値を下回っており、土壌水分が減 少する状況となっていたが、その後は積算降水量が 推定蒸発散量の積算値を大きく上回った. 2009年 は、常に積算降水量が推定蒸発散量の積算値より大 きく推移していた。2010年は、開花期から40日後 頃までは推定蒸発散量に比べて積算降水量が著し



図7 圃場灌漑試験における開花期以降の推定蒸発散量,降水量および降水量+灌漑水量の積算値の推移

推定蒸発散量は、ペンマン法によるポテンシャル蒸発散量. 灌漑水は灌漑区のみ.

く低く推移しており,60日頃までは積算降水量が 推定蒸発散量を上回ることはなかった.また,2010 年の灌漑区ではほぼ推定蒸発散量に見合った適正量 が灌漑されたことが確認できる.

2) 土壌水分推定モデル

しかし、単純にある期間のポテンシャル蒸発散量 と降水量の積算値の差を見るだけでは必ずしも十分 ではない、土壌には保水力があるため、一定期間降 雨がなくても植物に必要な土壌水分が保たれる可能 性がある、逆に、一度に多量の雨が降った場合、土 壌の保水力(全有効水分量)を超える量は無効とな るため、ある期間の積算降水量が蒸発散量よりも十 分に大きい場合でも土壌水分が維持されるとは限ら ない、したがって、短期的な水ストレスも含め、ダ イズに対して水ストレスがかかる可能性を詳細に評 価するためには、根域土層における有効水分量の変 化を把握する必要がある.

本研究では、土壌水分を推定するためのタンクモ デルについて検討した.モデルの妥当性を確認する ために、ダイズ栽培期間中の土壌水分の推定値と実 測値を比較した.各年における耕うん層のVWCの 実測値と推定値を図8に示す.2008年と2009年は 灌漑量が少なかったため,無灌漑区のみ示した.図 8に示す通り,各年とも,モデルによりダイズ栽培 期間中の耕うん層土壌水分の増減の傾向は概ねよく 再現されている.しかし,詳しく見ると,実測値と 推定値が大きくずれている場面も少なくない.

まず、梅雨期のような高水分側において、推定値 と実測値の適合度が低い.モデルでは、タンク(耕 うん層)には有効水分上限以上には水分を保持でき ないものと仮定しているが、実測値は上限VWC以 上になる場合が少なくなかった.特に、降水頻度が 高かった 2009 年の梅雨期には、上限VWCを超える 状態が継続していた.実測値はVWC測定値の日平 均値から計算したものであり、降雨継続中の測定値 も含まれるため、上限VWC以上となりうる.また、 モデルでは、地下水位が鋤床以上に上昇するケース を想定していないが、実際には地下水位が高まり耕 うん層の土壌が水分飽和に近い状況が一定時間継続 する場合も生じていたものと考えられる.高水分側 の土壌水分は、いわゆる湿害の評価に関連する.ま



図8 耕うん層土壌水分の実測値と推定値

実測値はTDRプローブによる深さ 15 cmのVWC測定値.

た,梅雨明け後等の乾燥過程に入る直前の土壌水分 がその後の土壌水分推定値に影響することから,モ デルの改良により高水分側の推定精度を高くするこ とが望ましい.

本研究では、有効水分の上限・下限となるVWC は、栽培試験の各年毎に決定したが、栽培期間中は 変化しないものと仮定した.しかし、栽培期間中に 間隙率は変化し、例えば干ばつ時には粗間隙が大き く増加する(足立ら, 1998)ため,厳密には有効水 分の上限・下限となる*VWC*も栽培期間を通じて変 化する.そのことも,実測値と推定値のずれの一因 となりうる.

また、梅雨明け後に乾燥が進んだ場合、VWCが 降雨によって推定値ほどには高められない場面が 見られる(図8の2008年,2010年).植物体によ る降雨遮断で捕捉されてそのまま蒸発してしまう 部分もあるが,2008年の8月4日には,日雨量が 20.5 mmと比較的まとまった降水があったにも関わ らず無灌漑区ではVWCが高められていない.この 原因として,耕うん層および下層の乾燥が進んで亀 裂が発達し,耕うん層に捕捉されずに下層へ直接抜 ける水量が増えたことが考えられる.

以上のように、土壌水分推定モデルによる推定精 度には課題もあるが、ある程度の推定は可能と考え られる.

3) 推定蒸散量とダイズ減収率

Ritchie (1972) のモデルで推定したポテンシャル 蒸散量と有効水分量(W)の推定値を用いて式 5-1 および式 5-2 によって推定した蒸散量について、開 花期から9月15日までの期間の積算値およびポテ ンシャル蒸散量に対する推定蒸散量の割合を表3に 示した.なお、有効水分量を実測 VWC から計算し ても結果はほぼ同様であった(データ略). ポテン シャル蒸散量は、土壌水分不足による蒸散抑制がな い条件下での蒸散量である. 各年とも, 灌漑区を含 めて耕うん層のVWC推定値が VWC_{T} (それ以下に なると蒸散が抑制される VWC) 以下に低下する期 間があったため、推定蒸散量はポテンシャル蒸散量 よりも小さくなっている.したがって、各年とも多 少なりとも蒸散が抑制される状況にあったことにな る. ダイズもそれに比例して減収する (式 6) とい うことになり、特に、2010年の無灌漑区では減収 率 76%と極端な減収となる.

しかし,実際には2010年の無灌漑区でも収量は 比較的高い水準であり,灌漑区と比較しても減収し なかった.極端な生育阻害や,頂小葉の傾斜角(浅 生・松下,1997)など,目視でわかるような水スト レス状況も見られなかったことから,2010年に著 しい蒸散抑制が生じていたとは考えにくい.

ダイズ収量について、圃場試験における年次間 差は小さかったが、気候的なポテンシャル収量の 年次間差がどうであったかを推定するために、鮫 島(2002)のモデルを用いた生育シミュレーション を行ったところ、2008年~2010年の3ヶ年におけ る子実重(推定収量)に、大きな差異はみられな かった(図9).推定収量に対する圃場試験の収量 (坪刈りおよびコンバイン刈り)の割合を計算する と、2008年で他の年よりも小さい傾向があったが、 2010年は小さくなかった.このことからも、2010 年においてダイズが大きな水ストレスを受けていな かったことが推定される.

4) ポット試験における蒸散量と子実重の関係

灌水量を制限して蒸散を強制的に抑制する処理を 行ったポット試験では、1回の灌水量を0.1L以下 とすることにより、底からの排水はほとんど認めら れなかった.また、ダイズが繁茂した後は土壌表面 からの蒸発も少ないと判断されるので、灌水量≒蒸 散量と考えられる.

試験1(2008年)の灌水制限は、開花期(8月1日)の翌日から開始し、9月22日に終了した.収穫期の子実重と生育期間中の灌水量を表4,収量構成要素を表5に示す.子実重は85%区で最も大きく、それより灌水量が少なくても多くても子実重は低下した.70%区および50%区における子実重の低下は総莢数の抑制によるものと推察された.100%区で子実重が85%区よりも低下した原因は不明であるが、総莢数は100%区と85%区とほぼ同様であったことから、100%区では何らかの理由で稔実歩合

表3 圃場灌漑試験の開花期から落葉始期(9月15日)までの推定蒸散量の積算値

(単位:mm).				
試験年	推定ポテンシャル 蒸散量(A)	推定蒸散量 無灌溉区(B)	推定蒸散量 灌溉区(C)	B/A %	C/A %
2008年	156.3	98.9	104.2	63.3	66.7
2009年	129.2	103.8	110.5	80.3	85.5
2010年	171.3	40.6	142.0	23.7	82.9

推定ポテンシャル蒸散量はRitchie (1972)のモデルによる推定値. 無灌漑区および灌漑区の推定蒸散量は, 推定ポテンシャル蒸散量と推定土壌水分を用いて式 5-1,式 5-2 により推定した値.



図9 鮫島(2000)のダイズ生育モデルによる 2008 年~2010 年の子実重増加シミュレーション

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	子実重	灌水量
准水区	g/m^2	mm
100 % 区	218.8	528.1
85 % 区	247.9	478.0
70 % 区	211.7	410.6
50 % 区	164.0	326.9

表4 灌水(蒸散)制限ポット試験の子実重と灌水量(2008年).

子実重は、各処理区5ポット分をまとめて調査した値を土地面積あたり、また、子実 水分15%の値に換算したもの(反復なし). 灌水量は、出芽期から収穫までの総灌水量.

蔥 水区	百粒重*	総節数**	総莢数**
准八匹	g	$/m^2$	$/m^2$
100 %区	37.7	$445.5 \pm 38.7a$	$456.0 \pm 50.5 ab$
85 % 区	36.0	495.7 ± 15.7a	464.3 ± 20.0a
70 %区	36.4	426.7 ± 15.7a	391.1 ± 12.6ab
50%区	35.0	$437.1 \pm 13.0a$	$345.1 \pm 14.4b$

表5 灌水(蒸散)制限ポット試験のダイズの収量構成要素(2008年)

* 全整粒重/全整粒数×100. 15%水分换算值.

**5株の平均±標準誤差(/株)を土地面積あたりに換算した値. 各項目内の数値で同じアル ファベットを含む試験区間には有意差がない(Tukey法, 5%水準).

が悪くなったためと推察された.100%区では灌水 が過剰であった可能性も考えられる.100%区を除 いて,85%区を基準にすると,相対灌水量と相対 子実重とはほぼ比例関係にあった(図10).

試験2(2010年)と試験3(2011年)におけるダ

イズの出芽期,開花期,灌水制限期間は表6の通り である.収穫期の子実重と生育期間中の灌水量を 表7,収量構成要素を表8に示す.相対灌水量と相 対子実重との間には明確な比例関係が見られた(図 11).Ahmedら(2009)も、3種類の土壌を用いた





相対子実重および相対灌水量は、100%区または85%区の 子実重および灌水量を1としたときの各区の相対値。





相対子実重および相対灌水量は、対照区の子実重および 灌水量を1としたときの各区の相対値。

	試験2(2010年)	試験3(2011年)
播種日	6月17日	6月24日
出芽期	6月22日	6月29日
開花期	7月22日	7月30日
前半灌水制限期間	7月29日~8月23日	8月 6日~8月30日
後半灌水制限期間	8月24日~9月24日	8月31日~9月28日
収穫日	10月 1日~5日	10月 6日

表6 ポット試験(試験2と試験3)ダイズの出芽期,開花期および灌水制限期間

前半区は前半灌水制限期間,後半区は後半灌水制限期間,全期区は両方の期間に灌水制限を行った.

表7 灌水(蒸散)制限ポット試験の子実重と灌水量(2010年と2011年).

年	加理区	子実重	灌水量
	龙柱区	$\mathrm{g}~\mathrm{m}^{-2}$	mm
	対照区	$281.8 \pm 5.0 \text{ a}$	434.2
9010 年	前半区	$255.0 \pm 9.6 \text{ ab}$	376.8
2010 年	後半区	$216.8 \pm 6.1 \text{ b}$	391.4
	全期区	$210.1 \pm 13.0 \text{ b}$	332.9
2011 年	対照区	344.8 ± 10.9 a	462.8
	前半区	$299.3 \pm 0.8 \text{ ab}$	416.8
	後半区	$305.8 \pm 11.7 \text{ ab}$	400.2
	全期区	$265.0 \pm 15.5 \text{ b}$	361.4

子実重は15%水分,土地面積あたりに換算した値で,各試験区2反復の平均±標準誤差. 灌水量は,出芽期から収穫までの灌水量.子実重は各年の中で同一英小文字を含む処理区間には有意差なし(Tukey法,5%水準).

年	処理区	稔実莢数, m ⁻²	整粒数, m ⁻²	百粒重, g
2010 年	対照区	791.7 ± 9.3 a	1321.8 ± 20.8 a	$21.3 \pm 0.0 \mathrm{bc}$
	前半区	747.7 ± 30.1 a	$1019.0 \pm 37.0 \text{ b}$	$25.0 \pm 0.0 a$
	後半区	$645.8 \pm 16.2 \text{ ab}$	$1104.0 \pm 6.9 \mathrm{b}$	$19.6 \pm 0.7 c$
	全期区	$553.2 \pm 44.0 \text{ b}$	$925.9 \pm 46.3 \text{ b}$	$22.7 \pm 0.3 \text{ b}$
2011 年	対照区	$606.5 \pm 27.8 \text{ ab}$	$1120.5 \pm 27.8 \text{ a}$	$30.8 \pm 0.2 \text{ ab}$
	前半区	$518.5 \pm 9.3 \text{ b}$	$939.9 \pm 9.3 \mathrm{b}$	$31.8 \pm 0.4 \text{ a}$
	後半区	643.5 ± 23.1 a	1141.3 ± 25.5 a	$26.8 \pm 0.4 \text{ b}$
	全期区	$504.6 \pm 18.5 \text{ b}$	919.1 \pm 2.3 b	$28.8 \pm 1.6 \text{ ab}$

表8 灌水(蒸散)制限ポット試験のダイズの収量構成要素(2010年と2011年).

百粒重は15%水分換算値. 稔実莢数と整粒数は土地面積あたりに換算した値. いずれも各試験区2反復の平均±標準誤差. 各年の同じカラムの中で同一英小文字を含む処理区間には有意差なし(Tukey法,5%水準).

ポット試験において、ダイズの蒸散量の減少と収 量の減少の間に直線関係を確認している。本研究の ポット試験の結果、重粘土においても土壌水分が失 われて一定期間蒸散が抑制されればダイズ収量が減 少することは確認できたものと考えられる。

水ストレスがダイズの根粒着生や窒素固定活性, 生育・収量に及ぼす影響は、水ストレスを受ける 生育時期により異なるとする報告が多い(Hiler et al., 1974; Mastrodomenico et al., 2013; Miao et al., 2012). したがって、水ストレスを受ける時期によっ て収量への影響も異なることが推察される.本実験 の前半ストレス区と後半ストレス区について見る と、2010年の後半ストレス区のみ、直線から外れ ているが、それ以外は生育期間中の積算蒸散量の減 少にほぼ比例して子実重が減少している。2010年 の後半ストレス区で相対灌水量に比べて相対子実 重が小さくなった原因として虫害の影響が考えら れた. すなわち, 2010年の試験ではシロイチモジ マダラノメイガの幼虫による子実の食害が多発し. データの攪乱要因となったが、収量調査時の達観に よれば後半ストレス区で被害が著しい傾向があっ た.

試験2および試験3において、収量構成要素は灌 水制限の時期によって明らかに異なった. すなわ ち、開花期から子実肥大初期まで灌水を制限した前 半抑制区では、莢数が減少したものの、百粒重は対 照区よりも大きい傾向にあり、子実肥大後期に灌水 を制限した後半抑制区では百粒重が減少した. これ らは既往の報告(例えば、福井・伊藤、1951;新田 見ら、2013)と同様の傾向である. 前半ストレス区 の莢数減は落花・落莢によるもの,後半ストレス区 の小粒化は子実肥大期の気孔閉鎖による光合成不足 によるものという解釈も可能であろう.

3. 総合考察

北陸地域の水田転換畑においても、梅雨明け後に は強い水ストレスが生じ、毎年のように灌漑が行わ れている地域もあり、例えば、富山県の壌土沖積土 の水田転換畑では灌漑により減収を回避する効果が 明らかにされている(浅生・松下,1988).しかし、 排水性が悪く、逆に保水力の大きな重粘土圃場で は、乾燥害のリスクも懸念されているものの、これ まで、ダイズの水不足による減収や灌漑による減収 回避効果などについての研究報告は少ない(井上, 1997).

本研究では、重粘土転換畑圃場におけるダイズの 栽培試験において、ダイズの根や根粒が多く分布す ると考えられる耕うん層の土壌水分をモニタリング し、そのモニタリングデータに基づいて、開花期以 降、耕うん層の容易有効水分が枯渇しないように灌 漑を行った、灌漑方式として点滴灌漑を採用し、灌 漑量を最大でも1日10mm程度に制御することに より、土壌構造の破壊や過剰灌漑による湿害のリ スクを少なくした。2008年~2010年の3ヶ年のう ち、2010年以外の2ヶ年においては、耕うん層の 水分減少を指標とする灌漑基準に基づいても灌漑の 回数および量はわずかであった。一方、記録的な高 温・干ばつ年であった2010年では、ダイズの開花 期から子実肥大中期にあたる7月中旬から9月上旬 まで、著しく少雨であったため、無灌漑では耕うん 層の有効水分は著しく減少し,灌漑区では頻繁に灌 漑を行った.そのため,2010年の無灌漑区ではダ イズの蒸散が抑制され,蒸散量の抑制割合に比例し て収量が減少することも予想された.しかし実際に は,2010年においても,赤外線放射温度計による 群落表面温度の測定値(図12)や目視による観察か ら,無灌漑区でも顕著な蒸散抑制は生じなかったと 判断され,ダイズの収量は灌漑区と比較して減少せ ず,あるいは他の年との比較においても収量水準は 低くはなかった.

2010年の無灌漑区で顕著な蒸散抑制が生じな かった理由として,根を耕うん層の下層深くまで伸 ばして吸水していた可能性が考えられる.ダイズは 深根性の作物であり,例えば,深さ1m以上まで伸 張する(飛田ら,1995).本研究の試験圃場では鋤 床より下の耕うんしていない土層にはグライ層が 発達し,見た目には根が容易に伸びていくように は思われないが,本研究では根域調査をしていない ので実態は不明である.耕うん層の下層の土壌水分 や地下水位がどのようであったかについてもデータ がないため詳細は不明であるが,排水路の底部が圃 場面から約110 cm低く,暗渠の出口が圃場面から 75 cm程度であり,降雨が少ない期間には排水路の 水深は浅かった(数 cm 以下と思われる)こと,暗 渠出口からの排水も確認できなかったことから,地 下水位は75 cm 以下になっていたものと判断され る.ただし,試験圃場の周囲には水田も多い(図1) ので,例えば1m程度の深い位置への継続的な水分 供給(地下水位上昇)の可能性は想像される.ある 程度の深さまで根を伸ばすことにより,十分に吸水 できていた可能性が考えられる.なお,未耕うんの 下層土の毛管上昇速度は極端に小さいため,地下水 位が鋤床よりも十分に低い状況では,下層から耕う ん層への水分供給はほとんどないものと考えられ る.

本研究では、灌漑効果の検証に加え、土壌乾燥に よる減収のリスクがどの程度の確率で生じるかにつ いて考察することも目的の一つであった.一般的に はダイズ栽培圃場での土壌水分のモニタリングデー タは限られるため、ダイズの生育・収量に及ぼす土 壌水分の影響を幅広く考察するためには、気象デー タ等を用いて土壌の乾燥状況を推定する手法が有効 である.そのような手法を用いれば、過去年も含め たダイズ栽培期間中の土壌水分の状況を推定でき



図 12 2010 年 8 月の晴天日におけるダイズ群落表面温度と気温との差

ΔTおよび飽差は12:00~13:00の平均値.一般に,水ストレスのない条件では空気が乾燥しているほど蒸散が多くなり ΔTは小さくなる(マイナス側になる)ため,横軸に空気の飽差をとっている.図のデータに関しても,ΔTと飽差の間には 有意な(t検定1%水準)相関が認められる.また,ΔTは無灌漑区と灌漑区で有意差あり(t検定1%水準). る.本研究で検討したタンクモデルにより耕うん層 の土壌水分はある程度推定可能であることが確認で きた.また、ポット試験によって、蒸散が抑制され れば子実重の減少に結びつくことも確認できた.し かし、前述の通り、圃場においては耕うん層の有効 水分が枯渇しただけでは蒸散抑制や収量減が生じな いことが強く示唆されたことから、今後は重粘土圃 場における鋤床下層の土壌水分を推定するモデルの 開発が必要である.

井上(1997)は、福井県の重粘土転換畑において、 高温乾燥年であった 1994 年と 1995 年に、ダイズの 栽培試験を実施したところ、「エンレイ」でも、地 下灌漑によって無灌漑に比べて10%程度の増収効 果と品質向上が認められ、その要因はLAIの増加に よると推察している、本研究においても、記録的 な高温乾燥年であった 2010 年では灌漑により無灌 漑に比べて茎葉が繁茂してLAIが増加する傾向が見 られた.また.赤外線放射温度計により測定した群 落表面温度も灌漑区でやや低い傾向が認められ(図 12) 蒸散量も灌漑により増加していたものと推察さ れる.本研究ではそれらが増収に結びつかなかった 理由の一つとして、前述の倒伏、病害による可能性 が考えられる.一般的に,狭畦栽培においては耐倒 伏性の高い品種が求められるが、「エンレイ」は耐 倒伏性が高くないため灌漑による地上部重の増加が 倒伏を助長したものと推察される。井上(1997)は、 丸葉品種である「エンレイ」よりも,長葉品種の「タ チナガハ」で灌漑による高い増収効果を得ている. 灌漑効果を発揮させるための条件の解明, 灌漑効果 の高い品種の探索なども今後の課題と考えられる.

加えて、本研究で用いた点滴灌漑がダイズ増収の ために最適な灌漑方式ではないという可能性も想像 される.点滴灌漑による湿潤域は点滴位置近傍に限 られるため根域が制限される.したがって、局所施 肥などによって養分を根域に集中させない限り養分 吸収効率は悪い.また、根粒による窒素固定に適し た水分条件となる範囲も限定されてしまう.すな わち,点滴灌漑では、ダイズの水分吸収・蒸散は促進されたものの、養分吸収量や根粒による窒素固定は効果的に高められなかったことが想像される.散水チューブなどを用いた散水灌漑(例えば、高橋、1995)は、より均一な土壌水分の分布が得られるので、重粘土転換畑のダイズ栽培でも効果的な灌漑方法である可能性が推察されるが、排水性の悪い圃場におけるダイズ栽培で、散水灌漑であるスプリンクラー灌漑は畝間潅漑と効果に差異がなかったという報告もある(Walker et al., 1982). また、散水灌漑は点滴灌漑同様コストと労力がかかるため、現在のところ我が国のダイズの灌漑法としては実用的ではない.

Walker et al., (1982) はまた, 排水不良圃場では 灌漑よりも排水改善による増収効果が高いことを 示している. 北陸地域の重粘土転換畑でも, 排水 性の良好な圃場で収量が高いこと(古畑ら, 2011a) や,排水性の改善によって増収する可能性(古畑ら, 2011b)が示されている. 近年, 基盤整備事業で導 入が進みつつある地下水位制御システム(藤森, 2007)は, 排水性を改善するとともに地下灌漑機能 を有するため重粘土転換畑でのダイズ作でも効果が 期待される(島田, 2011; Shimada et al., 2012).

以上のように、灌漑方式や品種について検討の余 地はあるものの、本研究の結果を総合的に判断する と、排水性の悪い重粘土圃場でのダイズ栽培では、 高温かんばつ年でも土壌乾燥による水ストレスは生 じにくく、灌漑による増収効果は限定的であるとい う可能性は高いと結論づけられる.実際の栽培現場 においても、土壌や立地条件が今回の試験圃場と同 様で、灌漑による増収効果が判然としない、換言す れば、灌漑が必須ではない圃場も少なくないと思わ れる.しかし、今回得られた結果をより確実なもの として一般化するためには、ダイズ栽培期間中の圃 場の下層土の土壌水分や地下水位のモニタリング、 根系調査による根域の把握とそれらのシミュレー ションモデルによる検討も必要であろう.

重粘土転換畑でのオオムギ跡ダイズ作を対象に, 土壌乾燥ストレスによる減収のリスクがどの程度あ るのか,また,灌漑によって水ストレスや減収を回

Ⅳ. 摘要

避できるか,について明らかにすることを目的に, 北陸研究センター(新潟県上越市)内の水田と隣接 する重粘土転換畑圃場において,3ヶ年にわたって 点滴灌漑を行うダイズ栽培試験を実施し、灌漑区と 無灌漑区のダイズ収量を比較した.また、水分スト レスによる減収リスクを推定するため、耕うん層の 土壌水分を推定するモデルについて検討するととも に、雨よけハウスでのポット栽培ダイズを用いた灌 水制御試験により蒸散量と収量の関係を調べた.結 果は以下のように要約される.

- 開花期以降に、耕うん層の容易有効水分(植物がストレスなく吸水できる水分)を枯渇させないという基準に基づいて灌漑を行った圃場試験では、2008年と2009年の2ヶ年については、灌漑の回数は少なく、総灌漑量も15mm以下とわずかであった。一方、高温・乾燥年の2010年は、耕うん層の水分量が大きく低下したため、灌漑区では頻繁に灌漑が行われた結果、総灌漑量は191mmであった。
- 2) 2010年の圃場試験においては、灌漑によりLAI の増加や蒸散が促進される傾向が見られたもの の、無灌漑でも顕著な水ストレスは認められな かった。ダイズ収量は、2010年を含め、3ヶ年 とも灌漑による増収は認められなかった。
- 3)土壌水分推定モデル(タンクモデル)により, 耕うん層の土壌水分の増減をよく表すことがで きた.

以上の結果,水田と隣接する排水性が悪い重粘土 圃場でのダイズ栽培では,高温かんばつ年でも土壌 乾燥による水ストレスは生じにくく,灌漑による増 収効果は限定的であると考えられた.

引用文献

- 1. 足立一日出・細川寿・吉田修一郎・伊藤公一・ 松崎守夫・高木強治(2005)転換畑圃場におけ る灌漑技術.ファーミングシステム研究, 7, 31-38.
- 2. 足立一日出・吉田修一郎・高木強治・伊藤公一 (1998) 重粘土汎用圃場における粗間隙量の変 化と暗渠流出水量.農土論集, 198, 169-174.
- 3. Ahmed, S. U., Senge, M., Ito, K. and Adomako, J. T. (2009) Evaluation of the potentialities of different soil types to yield response of soybean under deficit irrigation. 土壌の物理性, 113, 13-19.
- 3. 浅生秀孝・松下真一(1988)転換畑ダイズにおける畦間かん水の効果.北陸作物学会報,23,83-85.
- 5. 有原丈二(2000)ダイズ安定多収の革新技術-新しい生育のとらえ方と栽培の基本. 農文協, 東京.
- 藤森新作(2007)転換作物の安定多収をめざす 地下水位調節システム.農業および園芸, 82, 570-576.
- 福井重郎・伊藤隆二(1951) 生育の各期における土壌水分の不足がダイズの生育並に収量に及ぼす影響について、日作紀,20,45-48.

- 8. 古畑昌巳・足立一日出・大野智史(2011a) 圃 場排水性の良否が北陸地域のダイズの乾物と子 実生産に及ぼす影響. 日作紀, 80, 65-72.
- 9. 古畑昌巳・足立一日出・大野智史(2011b)北 陸地域の排水不良転換畑における排水改善処理 がダイズの乾物と子実生産に及ぼす影響. 日作 紀, 80, 103-109.
- 10. 飛田有支・平沢正・石原邦(1995)低土壌水分 条件におけるダイズの乾物生産と根系発達の品 種間の相違. 日作紀, 64, 573-580.
- Hiler, E. A., Howell, T. A., Lewis, R. B. and Boos, R. P. (1974) Irrigation timing by the stress day index method. *Transact. ASAE*, 17, 393-398.
- 細川寿・足立一日出・松崎守夫・伊藤公一 (2005)砕土性を向上させる耕うん同時畝立て 作業技術の開発.ファーミングシステム研究, 7, 46-53.
- 13. 細川寿(2011)ダイズの新たな耕うん・播種技 術. 農林水産技術研究ジャーナル, 34, 40-46.
- 井上健一(1997)大豆の物質生産および収量・ 品質に及ぼす灌水の効果.北陸作物学会報, 32, 85-87.
- 15. 片山勝之・大野智史・細野達夫・細川寿・野村 幹雄 (2012) 狭畝密植栽培によるオオムギ跡ダ

イズの播種期と栽植様式が収穫期の全乾物重と 莢乾物重および雑草抑制に及ぼす影響.北陸作 物学会報,47,65-68.

- 近藤純正・渡辺力・中園信 (1992) 日本各地 の森林蒸発散量の熱収支的評価. 天気, 39, 685-695.
- 前田隆(1983) "11. pF". 土の理工学性実験ガイド. 土の理工学性実験ガイド編集委員会編. 農業土木学会, 72-82.
- Mastrodomenico, A. T., Purcell, L. C. and King, C. A. (2013) The response and recovery of nitrogen fixation activity in soybean to water deficit at different reproductive developmental stages. *Environ. Exp. Bot.*, 85, 16-21.
- 松岡延浩・野村誠治・中山敬一・今 久(1993)
 日射量測定値を用いたラッカセイ植被面の純放 射量の推定. 千葉大園学報, 47, 177-181.
- Miao, S. J., Shi, H, Jin, J., Liu, J. D., Liu, X. B. and Wang, G. H. (2012) Effects of short-term drought and flooding on soybean nodulation and yield at key nodulation stage under pot culture. *J. Food Agric. Environ.*, 10, 819-824.
- 三浦健志・奥野林太郎 (1993) ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細. 農土論集, 164, 157-170.
- 22. 新田見浩由・佐藤朋和・松波寿典・伊藤亮一・ 池田武(2013)開花期の水ストレスが異なる伸 育型ダイズの収量および収量構成要素に及ぼす 影響. 日作期, 82, 141-149.
- Payero, J. O., Melvin, S. R. and Irmak, S. (2005) Response of soybean to deficit irrigation in the semi-arid environment of west-central Nebraska. *Transact. ASAE*, 48, 2189-2203.
- 24. Ritchie, J. T. (1972) Model for predicting

evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Res.*, 8, 1204-1213.

- Ritchie, J. T., Burnett, E. and Henderson, R. C. (1972) Dryland evaporative flux in a subhumid climate: III. Soil water influence. *Agronom. J.*, 64, 168-173.
- 26. 鮫島良次(2000)気象環境要因に対するダイズの生育反応の解析およびモデリングに関する研究. 農研センター研報, 32, 1-119.
- 27. 島田信二 (2011) ダイズの高位安定生産を可能 とする地下水位制御技術.農林水産技術研究 ジャーナル, 34, 34-39.
- 28. Shimada, S., Hamaguchi, H., Kim, Y., Matsuura, K., Kato, M., Kokuryu, T., Tazawa, J. and Fujimori, S. (2012) Effects of water table control by farm-oriented enhancing aquatic system on photosynthesis, nodule nitrogen fixation, and yield of soybeans. *Plant Prod. Sci.*, 15, 132-143.
- Sinclair T. R., Hammond, L. C. and Harrison, J. (1998) Extractable soil water and transpiration rate of soybean on sandy soils. *Agronom. J.*, 90, 363-368.
- 高橋幹(1995) "第4章 灌水と追肥による輪 換畑大豆の多収技術".北海道における田畑輪 換安定のための新技術開発.高谷武彦ら著.北 海道農業試験場研究資料,53号,25-33.
- 高橋智紀・松崎守夫・塩谷幸治・細川寿 (2005) 転換畑におけるダイズの収量に及ぼす土壌特性の影響-新潟県上越地域の事例-. 中央農研研報, 6, 51-58.
- 32. Walker, P. N., Thorne, M. D., Benham, E. C. and Sipp, S. K. (1982) Yield response of corn and soybeans to irrigation and drainage on a claypan soil. *Transact. ASAE*, 25, 1617-1621.

Effect of drip irrigation on the yield of soybean (*Glycine max*) in a heavy clayey upland field converted from rice paddy in the Hokuriku Region of Japan

Tatsuo Hosono^{*1}, Katsuyuki Katayama^{*2}, Mikio Nomura^{*3}, Satoshi Ohno^{*1}, Norikazu Nakayama^{*1} and Hisashi Hosokawa^{*4}

Summary

We studied the yield response of soybean to the drip irrigation, in a heavy clayey upland field converted from rice paddy neighboring to paddy fields in Hokuriku Research Center for three years (2008-2010). We also estimated soil moisture in plow layer using modified tank model. Further, we conducted the deficit irrigation experiments using potted soybean in a greenhouse to verify the linear relationship between soybean yield and cumulative transpiration during the growing period. We tried to evaluate the risk of yield decrease by drought in soybean cultivated in heavy clayey upland field in Hokuriku region, based on the results of these experiments.

The results are summarized as follows:

1) In the field experiment in which drip irrigation was applied after flowering so that the soil in plow layer was estimated to retain more than 25% of total available water, there was least need of irrigation and total amount of irrigation water during entire growing period was about 15 mm or less in each year of 2008 and 2009. On the other hand, in 2010 with higher temperature and less precipitation in summer, irrigation was often applied and 191 mm of water was irrigated in total.

2) Soybean yield did not increase with irrigation in the three years including 2010. Though LAI (Leaf Area Index) became larger and transpiration was stimulated by irrigation in 2010, the soybean with no irrigation did not suffer apparent water stress.

3) The modified tank model to estimate soil water in plow layer well represented observed data.

4) In the pot experiment, in which transpiration was limited by regulating water supply, linear relationship between grain yield of soybean and cumulative transpiration was observed.

These results suggest that severe drought stress would not occur in soybean cultivation in heavy clayey upland field in this region and the increase of soybean yield by irrigation may be limited.

^{*1} NARO Agricultural Research Center Lowland Farming Division

^{*2} Present address: NARO Tohoku Agricultural Research Center

^{*3} Present address: Toyama Prefectural Agricultural, Forestry & Fisheries Research Center

^{*4} Present address: NARO Agricultural Research Center Farm Mechanization Division