

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

目 次

I. はじめに	1	2) ダイズ収量	11
II. 材料と方法	2	2. 水ストレスによる	
1. 圃場試験	2	ダイズ減収率のモデル推定	12
2. 水ストレスによる		1) 圃場へ供給される水量と	
ダイズ減収率のモデル推定	6	推定蒸発散量	12
1) 土壌水分推定モデル	6	2) 土壌水分推定モデル	13
2) 減収率の推定	7	3) 推定蒸散量とダイズ減収率	15
3) 気候的ポテンシャル収量の推定	7	4) ポット試験における	
4) ポット試験	7	蒸散量と子実重の関係	15
III. 結果と考察	11	3. 総合考察	18
1. 圃場灌漑試験	11	IV. 摘要	20
1) 圃場試験における		引用文献	21
耕うん層土壌水分の推移	11	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ヶ年も異なった(図1参照)が、面積は約6a(40m×15m)で、その周囲に明渠(深さ約20cm)が施工されている。本暗渠は、圃場面から深さ70～75cm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110cm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150cm、畝高さ約10cm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22～25cmであった。平均条間37.5cmの4条狭畦栽培(畝内条間30cm、畝間条間60cm、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100kg/10a、ダイズ用複合肥料(ニューダイズ800)はN、P₂O₅、K₂O施用量が2.5kg/10a、6.3kg/10a、9.4kg/10aとなるように31.3kg/10a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

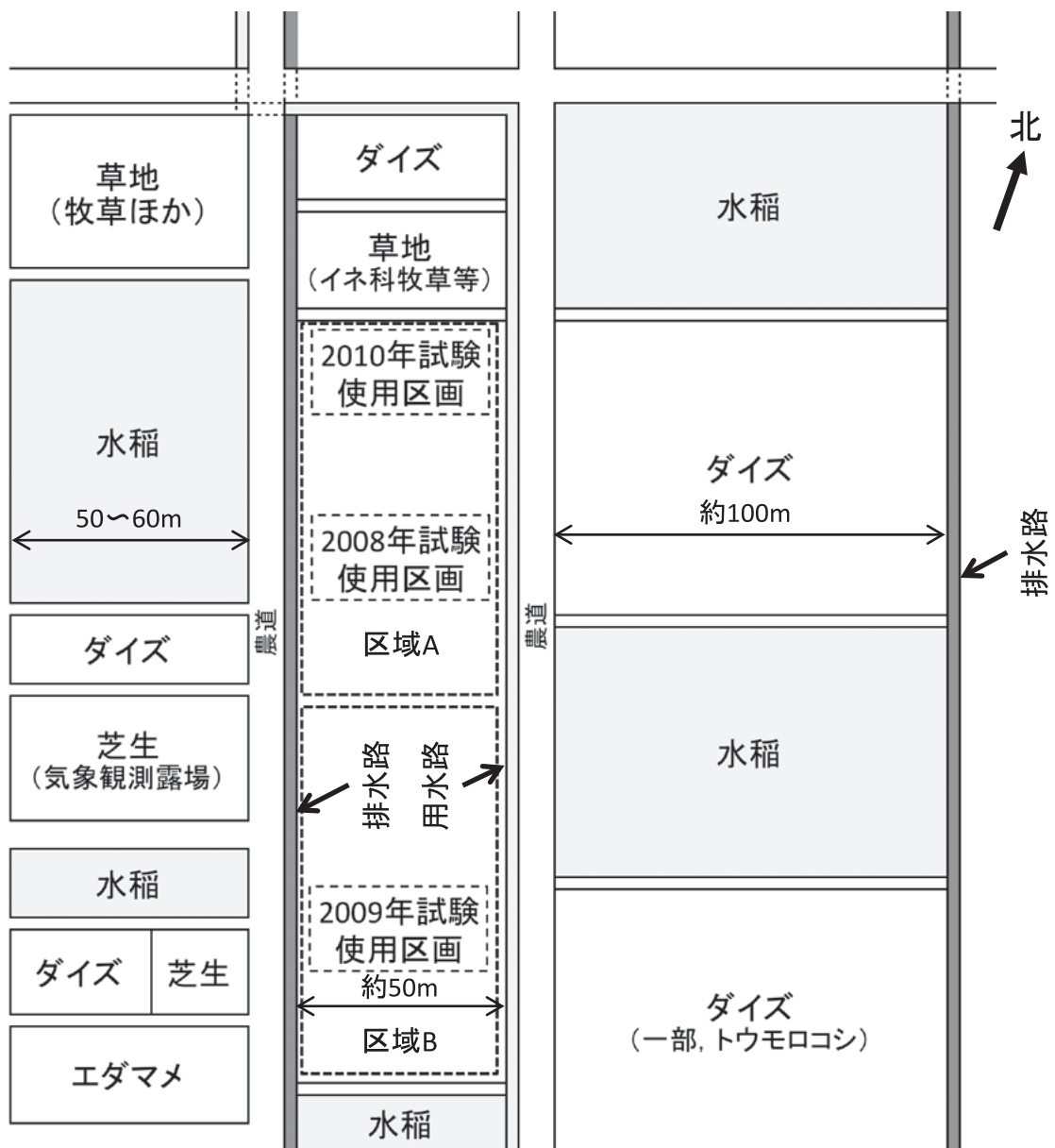


図1 試験圃場周囲の土地利用略図

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（ネタフィルム、ドリップネット、ドリッパー間隔15cm、吐出量1L/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

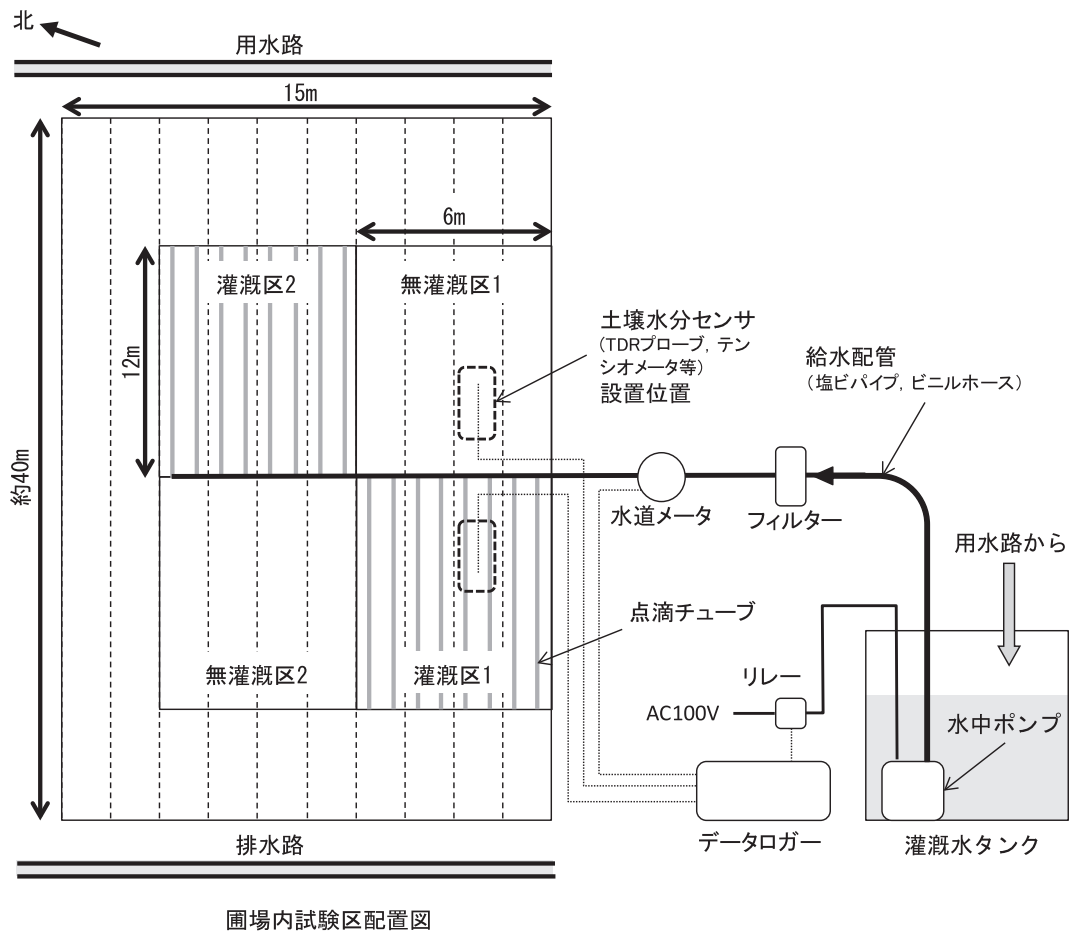


図2 圃場灌漑試験での試験区配置および半自動灌漑制御システムの概念図 (2010年)

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30cmであり, 2008年は畝上面から深さ10cm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15cm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10-20cm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10cm, 他の年では深さ15cm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-200kPa程度の乾燥域まで計測可能なセンサで, 深さ15cm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15cmの地温計測値を用いて補正した。灌漑区において, 全ての土壤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、耕うん層内の畝上から深さ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 ≡ pF4.2）、上限は-6 kPa ≡ 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。

$$VWC_T = VWC_{LL} + (VWC_{UL} - VWC_{LL}) \cdot 0.25 \quad (\text{式1})$$

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 VWC_{UL} および VWC_{LL} 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。 VWC_{LL} 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3 mm程度、2010年は10 mm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}	VWC_{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_{UL} 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、1.5 m (畝幅) × 1 m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。

$$W = W_0 + dW - (E + T) \quad \text{ただし、} W \geq 0 \quad (\text{式2})$$

$$dW = (W_{max} - W_0) [1 - \exp \{-(Pr + Ir)/(W_{max})\}] \quad (\text{式3})$$

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。

$$W = (VWC - VWC_{LL}) \cdot D \quad (\text{式4-1})$$

$$W_{max} = (VWC_{UL} - VWC_{LL}) \cdot D \quad (\text{式4-2})$$

逆に、 W から次式でVWCが計算される。

$$VWC = VWC_{LL} + (VWC_{UL} - VWC_{LL}) \cdot W/W_{max} \quad (\text{式5})$$

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」などを通して下層に流れ、耕うん層の水分を高める

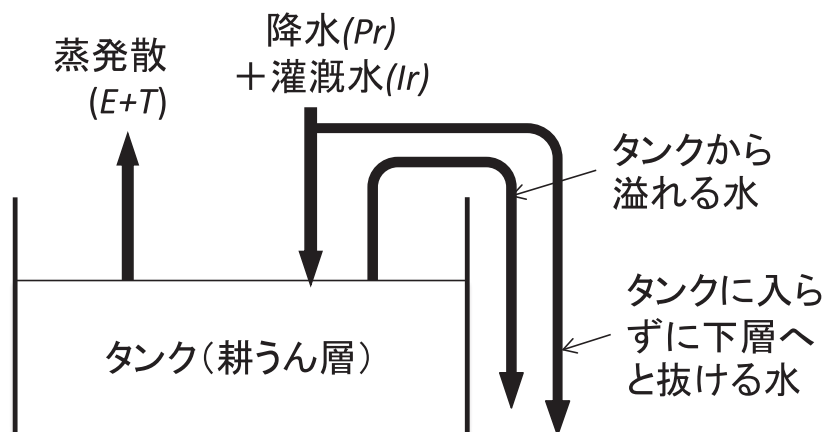


図3 土壌水分推定のためのタンクモデルの概念図

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、

$$T = T_p \quad (W \geq W_T \text{ のとき}) \quad (\text{式 6-1})$$

$$T = T_p \cdot W/W_T \quad (W < W_T \text{ のとき}) \quad (\text{式 6-2})$$

と計算する。ここで、 T_p は土壤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、土壤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。計算に必要な気象要素は、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壤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壤水分は飽和していると仮定し、それ以後の土壤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。

$$Y_{red} = 1 - \Sigma T / \Sigma T_p \quad (\text{式 6})$$

土壤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

土壤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、土壤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。土壤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 離れた。

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、群落を模することを意図した。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 5 mm 以下に細かくしたものを、ほ

ぼポットいっぱい充填した。施肥は、苦土生石灰（マグクリン）が 60 g/m^2 、ダイズ用複化成肥料（ニューダイズ 800, $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}=8\text{-}20\text{-}30$ ）が約 31 g/m^2 (2.5 gN/m^2)、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 5 cm）が深さ 1 cm ~ 6 cm 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 1.5 m、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 0.3 m、畝内条間 0.3 m、畝と畝の間の条間 0.6 m で、栽植密度は、 8.9 株/m^2 あるいは 17.8 本/m^2 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

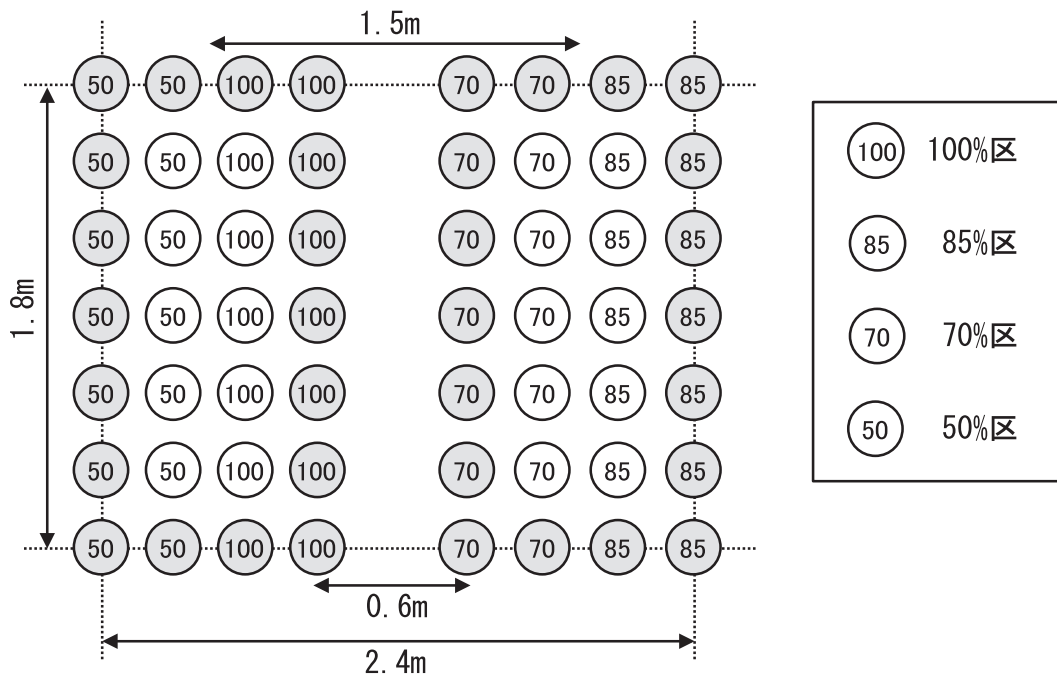


図4 灌水抑制ポット試験におけるポット配置図 (2008年)

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5mm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18cm、条間30cm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15cm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1~11cm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水量に対して一定比率、灌水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「全期抑制区」を設定した。灌水制限時の灌水水量は、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、ポツ

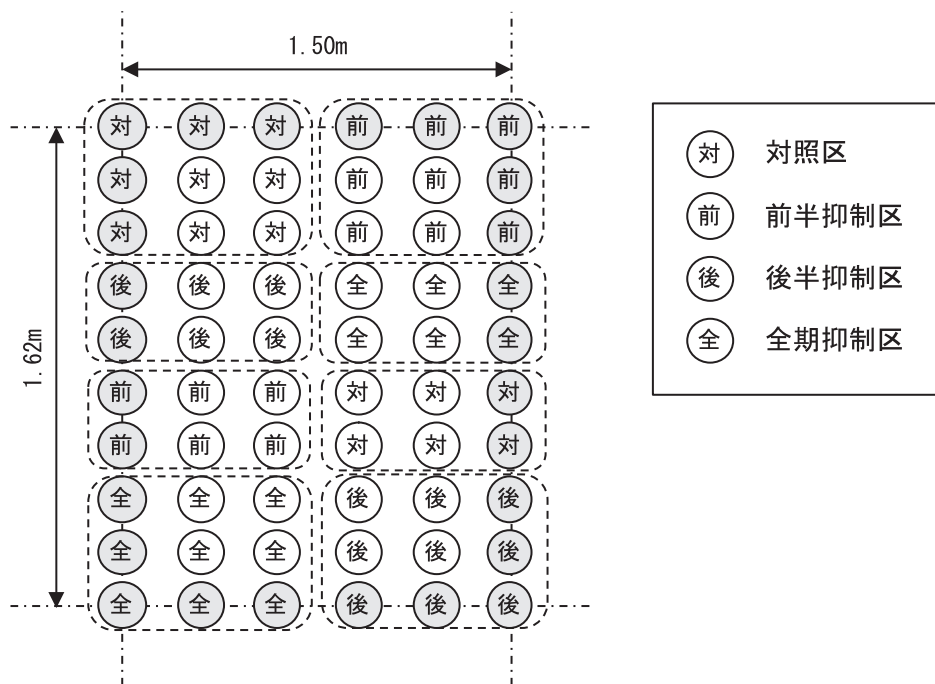


図5 灌水抑制ポット試験におけるポット配置図 (2010年, 2011年)

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、前作が水稻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: 6 mm) にかけてものを用

いた。

施肥は、ポット底部に土壌を2~3 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 $N-P_2O_5-K_2O$ 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0.09 L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VWC₇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、耕うん層の水分が大きく低下したため、灌漑区では頻り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15cmの水ポテンシャルは無灌漑区ではWatermarkセンサの測定下限(-200kPa)以下まで低下したが、灌漑区では-10~-40kPa(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。

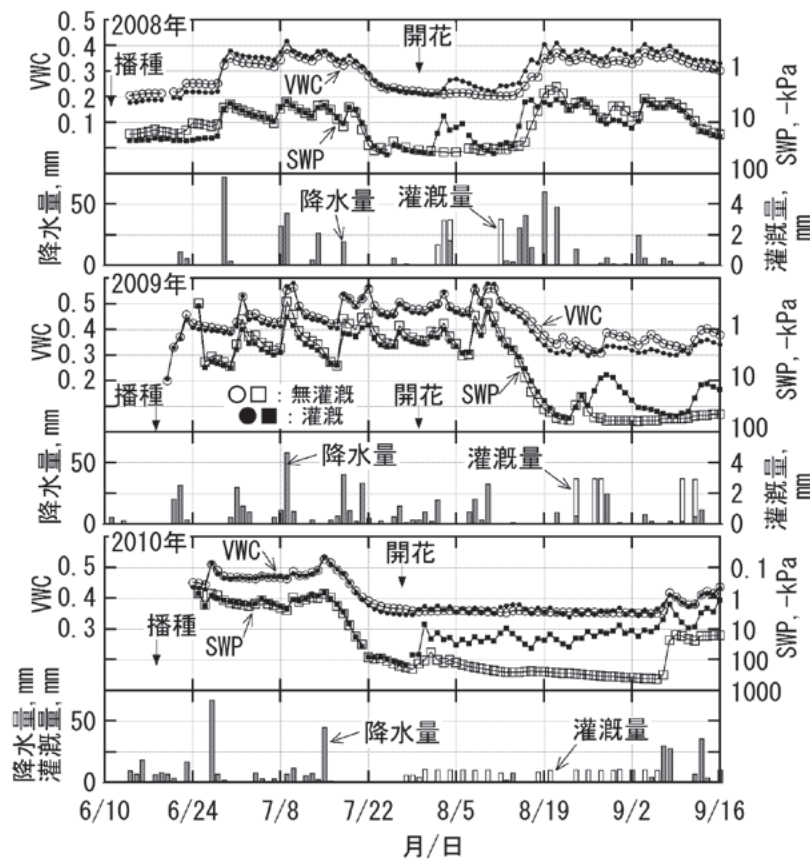


図6 2008年~2010年の圃場試験での耕うん層土壌水分の推移と降水量および灌漑水量

VWC (体積含水率)は、2008年は畝上から10-20cm、他の年は畝上から約15cm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10cm、他の年は深さ15cm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。

表2 圃場試験における収量および収量構成要素.

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

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（無灌漑では）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

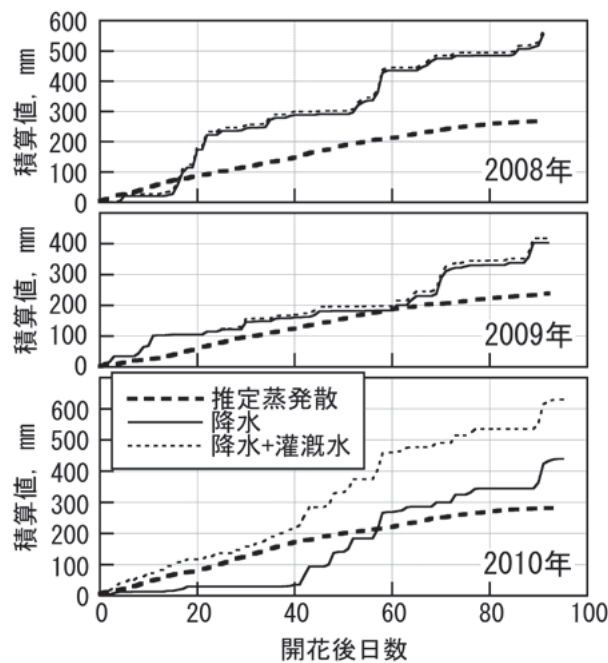


図7 圃場灌漑試験における開花期以降の推定蒸発散量，降水量および降水量+灌漑水量の積算値の推移

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

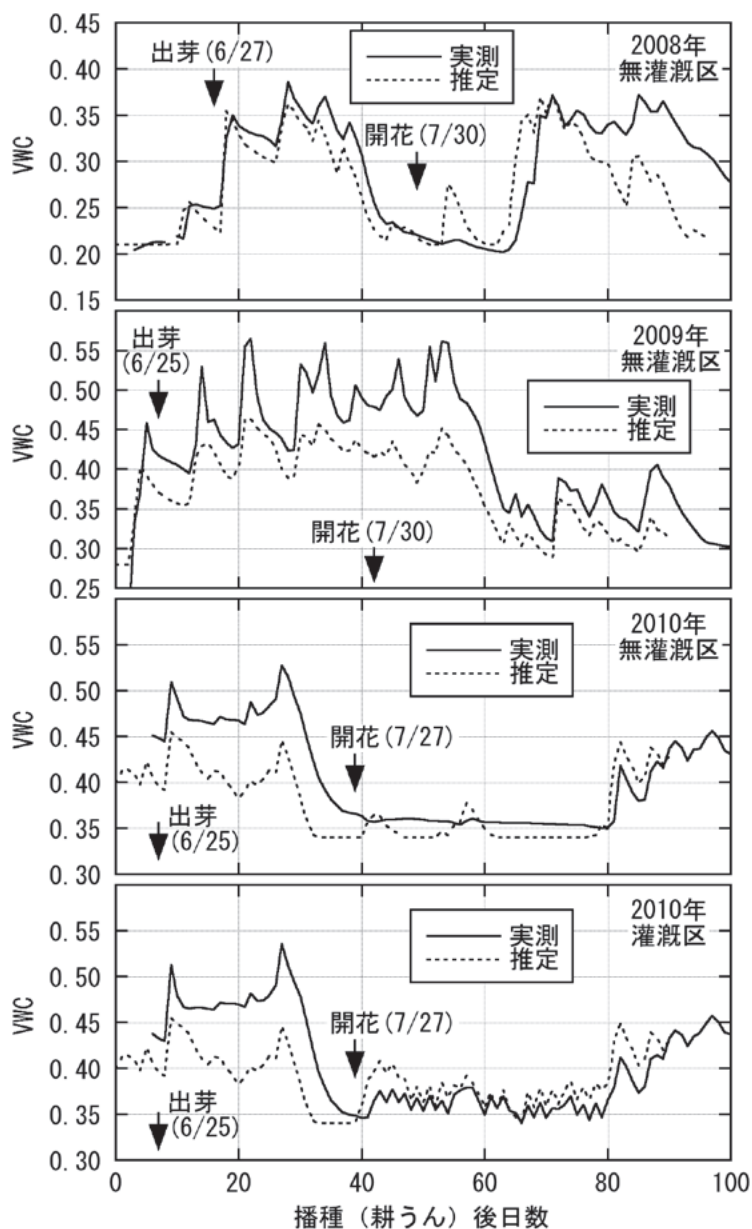


図8 耕うん層土壌水分の実測値と推定値

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、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 \approx 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)	推定蒸散量無灌漑区(B)	推定蒸散量灌漑区(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。

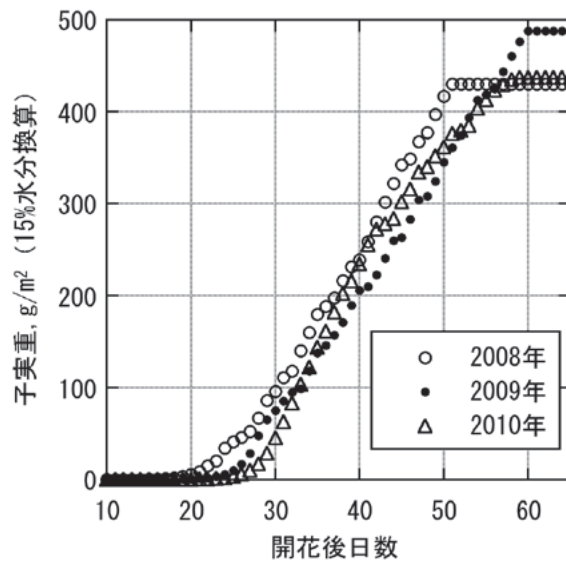


図9 鮫島 (2000) のダイズ生育モデルによる2008年～2010年の子実重増加シミュレーション

表4 灌水(蒸散)制限ポット試験の子実重と灌水量(2008年).

灌水区	子実重 g/m ²	灌水量 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

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。

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)

灌水区	百粒重* g	総節数** /m ²	総莢数** /m ²
100%区	37.7	445.5 ± 38.7a	456.0 ± 50.5ab
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 ± 13.0a	345.1 ± 14.4b

* 全整粒重/全整粒数×100. 15%水分換算値.

** 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

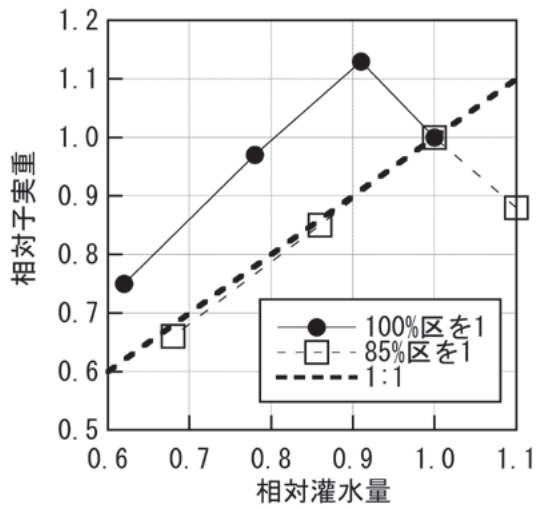


図 10 ポット試験における相対灌水量と相対収量の関係 (2008年)

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。

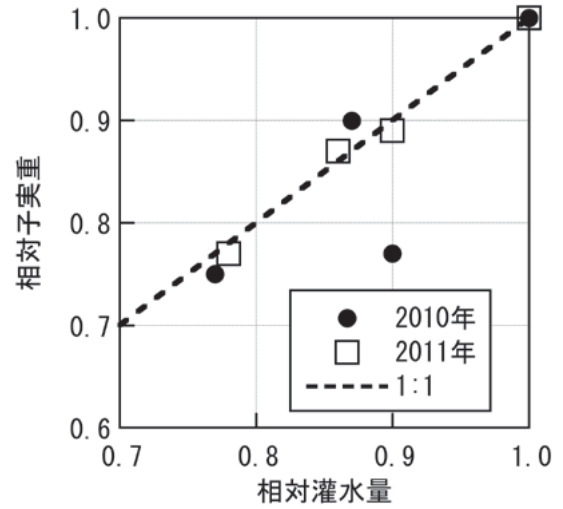


図 11 ポット試験における相対灌水量と相対収量の関係 (2010年と2011年)

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。

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

	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

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	処理区	子実重 g m ⁻²	灌水量 mm
2010年	対照区	281.8 ± 5.0 a	434.2
	前半区	255.0 ± 9.6 ab	376.8
	後半区	216.8 ± 6.1 b	391.4
	全期区	210.1 ± 13.0 b	332.9
2011年	対照区	344.8 ± 10.9 a	462.8
	前半区	299.3 ± 0.8 ab	416.8
	後半区	305.8 ± 11.7 ab	400.2
	全期区	265.0 ± 15.5 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).

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).

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 ± 0.0 bc
	前半区	747.7 ± 30.1 a	1019.0 ± 37.0 b	25.0 ± 0.0 a
	後半区	645.8 ± 16.2 ab	1104.0 ± 6.9 b	19.6 ± 0.7 c
	全期区	553.2 ± 44.0 b	925.9 ± 46.3 b	22.7 ± 0.3 b
2011年	対照区	606.5 ± 27.8 ab	1120.5 ± 27.8 a	30.8 ± 0.2 ab
	前半区	518.5 ± 9.3 b	939.9 ± 9.3 b	31.8 ± 0.4 a
	後半区	643.5 ± 23.1 a	1141.3 ± 25.5 a	26.8 ± 0.4 b
	全期区	504.6 ± 18.5 b	919.1 ± 2.3 b	28.8 ± 1.6 ab

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壤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、富山県の壤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壤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、土壤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ぬが、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壤水分や地下水位がどのような状態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110cm低く、暗渠の出口が圃場面から

75cm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75cm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、土壤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壤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・収量に及ぼす土壤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壤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壤水分の状況を推定でき

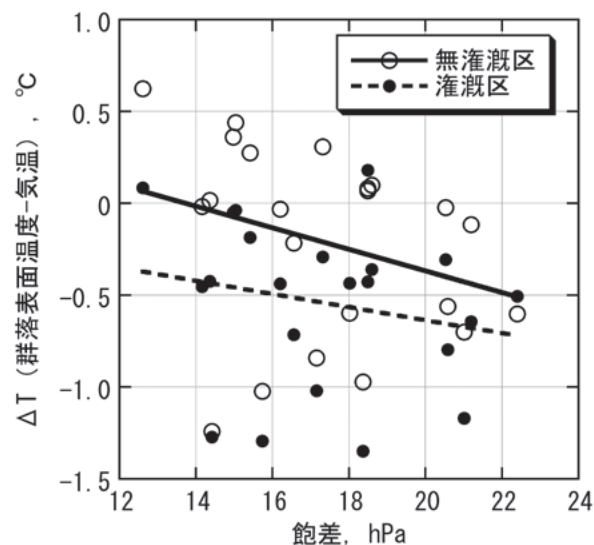


図12 2010年8月の晴天日におけるダイズ群落表面温度と気温との差

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壤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壤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」は耐倒伏性が不高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性は悪い。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、より均一な土壤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灌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壤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壤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。

IV. 摘要

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

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、耕うん層の土壤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。

- 1) 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15 mm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、灌漑区では頻りに灌漑が行われた結果、総灌漑量は191 mm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) 土壤水分推定モデル（タンクモデル）により、耕うん層の土壤水分の増減をよく表すことができた。
- 4) 灌水を制限し、強制的に蒸散抑制をするポット試験において、子実重の減少率は生育期間中の灌水量（≒蒸散量）の減少率とよく一致した。

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壤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. 土壤の物理性, 113, 13-19.
4. 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。
6. 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.
7. 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）低土壤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.
11. 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.
12. 細川寿・足立一日出・松崎守夫・伊藤公一（2005）碎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.
14. 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.
16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 21. 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.
 23. 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.
 25. 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.
 29. 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.
 30. 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.
 31. 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