

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22380014

研究課題名(和文) 転換畑ダイズ作安定化のための水環境適応・制御支援モデルの開発

研究課題名(英文) Development a soybean crop model to support production under converted lowland paddies

研究代表者

白岩 立彦 (Shiraiwa, Tatsuhiko)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30154363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円、(間接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：日本の転換畑ダイズ作における水環境変動へ適応および制御を支援するダイズの生育モデルの開発を試みた。既存のダイズ生育モデルに温度と日長に基づく発育予測モジュールを組み込んだ。ダイズの窒素固定活性に及ぼす湛水の影響と回復過程を土壌還元および温度との関連から明らかにした。過湿による葉面積展開の減少と回復を有効積算温度の関数として記述するモデルを作成した。地下水位制御システムを敷設した圃場で過湿栽培試験を行い、窒素・乾物蓄積および収量に及ぼす生育初期の過湿の影響を明らかにした。過湿が葉面積展開に及ぼす影響を考慮した初歩的なモデルを作成し、圃場実験結果に適用した。

研究成果の概要(英文)：This study attempted to develop a crop model for soybean that can be applied to predict crop performance under excess soil moisture condition. To a previously published model (Sinclair, 1986), a module of developmental stages was incorporated. For developing a module of crop response to excess water, two series of controlled experiments were conducted. One was for determination of N fixation response to waterlogging as affected by soil temperature and redox potential. Another was for leaf-growth response to excess water that revealed a common pattern of the leaf-growth response under varied temperature condition. The field experiments conducted on a field facilitated with the system for controlling underground water level and a data-set of crop responses in biomass and N accumulation and seed yield was developed. A preliminary model that accounts for reduction of leaf area development due to excess water was applied to the data from the field experiments.

研究分野：作物学

科研費の分科・細目：作物学・雑草学

キーワード：ダイズ 生育モデル 転換畑 土壌水分 収量

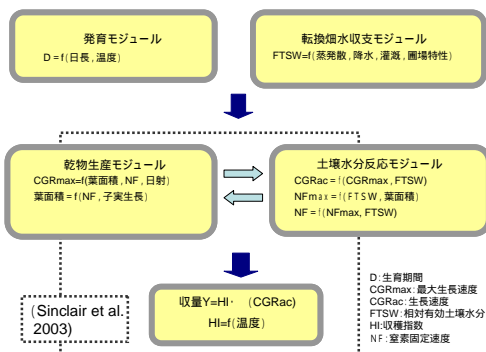
1. 研究開始当初の背景

日本のダイズ作は大部分が水田転換畑で営まれており、生育初期の梅雨と生育後半の乾燥が過湿と干ばつを引き起こすように、水環境変動が最大の収量変動要因になっている。圃場の水環境は、地域と作期によって決まる気象環境、地形および土壌特性による保水・排水性（以下、圃場特性）および圃場管理に左右される。これまで圃場管理技術として、暗渠・明渠や畝立て等による排水処理、および畦間灌漑などの水分供給により、一定の生育安定化がはかられてきた。しかし、圃場特性と気象条件によっては上記の技術だけでは制御しきれない場面が多発しており、その一因が気候変動とくに降雨パターンの変動であることが指摘されている。

このような状況のもと、ダイズ作の安定化は、地域ごとの品種および作期の組合せの変更による「適応」と圃場特性に応じた水環境の「制御」の両面からはかれる必要がある。適応に関して、一部の地域で近年、梅雨期播種を避ける晩播栽培体系の確立と普及が行われてきた。水環境制御については、近年開発された地下水水位制御システム（FOEAS）がダイズの生育改善と安定化に対し格段に有効であることが判明している。しかし、これらの方策を広範に実施・導入するには、計画段階において、気象、圃場特性にもとづく効果の検討が不可欠である。また、FOEAS導入のような多額を要する耕地整備を行う際には、その費用対効果の評価が気象環境と圃場特性にもとづいて行なわれる必要である。

2. 研究の目的

ダイズの生育を環境条件と作物形質の変化から動的にシミュレートするモデルを用い、入力条件として気象変動、品種、作期、圃場特性および制御技術の有無と条件を与え、これらの影響を要因間の相互関係も含めて量的に評価することが最も有効である。本研究では、転換畑ダイズ作における水環境変動へ適応および制御の方策を合理的に計



画するための支援ツールとして、気象、圃場特性および土壌水分制御がダイズの生育に及ぼす影響を総合的に評価するモデルを開発しようとした。

3. 研究の方法

本研究は、下図に示すように、作物生産過程の以下の3つの面に関してサブモデルを作成し、それらを統合し、新たな水環境評価型ダイズ生育収量モデルを構築した。元となる既存モデルとして、ダイズの生育を圃場の水収支および気象条件から予測する Sinclair (1986) を用いた。

(1) 発育モジュールの開発

ダイズの開花期 (R1) および成熟始 (R7) を温度と日長の推移から予測する下記のモデルを既存モデルに組み込んだ。

$$DVI = \sum_{i=0}^m DVR_i$$

$$DVR = \frac{1}{G} \cdot \frac{1}{1 + \exp(-A \cdot (T - Th))} \quad (\text{emergence} \sim DVI^*)$$

$$DVR = \frac{1}{G} \cdot \frac{1 - \exp(B \cdot (L - Lc))}{1 + \exp(-A \cdot (T - Th))} \quad (DVI^* \sim R1)$$

G, 出芽からR1までの最少日数, Lc, 限界日長; Th, ある日長条件下で発育速度が最大値の1/2になる温度, AおよびBはそれぞれ温度と日長の変化に対する反応を特徴づける係数. DVI*は日長に影響され始める時のDVI.

(2) 湿害モジュールの開発

土壌の過湿が窒素固定に及ぼす影響の定量化

数日間の湛水がダイズの窒素固定活性に及ぼす影響を湛水終了後の回復程度を含めて、土壌還元化程度や温度の影響との関連から解析した。

異なる地温において、短期的湛水期間の長さや処理（湛水 (W) 処理と湛水 + 還元 (WR) 処理）の組み合わせ処理を行い、がダイズの根粒窒素固定活性 (ARA) の活性に及ぼす影響を調査した。ポットにパーミキュライトとシリカサンドを混合し、温室とグロースチャンパーにてダイズを栽培した。様々な条件下で、W 処理と WR 処理をおこない、その前後の根粒窒素固定能を非破壊的に測定した。また、気孔伝導度、SPAD、根圏の呼吸速度も測定した。処理後にはダイズをサンプルし、乾物重を測定した。

土壌の過湿が葉面積展開に及ぼす影響の定量化

転換畑における典型的な過湿条件である地表下数 cm の滞水を想定し、過湿処理開始後の時間経過に伴う主茎葉面積の増加量の変化を量的に検討した。過湿の減少過程と回復過程には、地温と土壌有機物含量が関与するとされている。さらに過湿の程度は水位によって大きく異なる可能性が高い。それらの影響を検討するために、地温、滞水期間、土壌有機物施用の有無あるいは水位の組み合わせをさまざまに変えた過湿条件を与えたポット実験を行った。

供試品種はエンレイ、実施場所は京都大学農学研究科附属京都農場ビニールハウス内、播種日は4月26日(a)、5月24日(b)、6月28日(c)、8月2日(d)であり、それぞれ下記

のような処理を行った。

a : 過湿処理{なし(C)、あり(E)} × 地温処理{常温区(L)、高温区(H)} × 有機物処理{なし、米ぬか 15g pot⁻¹(R)}、各 4 反復。

b : 過湿処理{なし(C)、あり(E)} × 地温処理{低温区(L)、常温区(H)} × 有機物処理{なし、米ぬか 15g pot⁻¹(R)}、各 4 反復。

c : 過湿処理{なし(C)、10 日間(E10)、20 日間(E20)} × 地温処理{低温区(L)、常温区(H)} × 有機物処理{なし、米ぬか 7.5g pot⁻¹(R)}、各 6 反復。

d : 過湿処理{なし(C)、10 日間(E10)、20 日間(E20)} × 過湿処理の水位{-5cm、+2cm(D)} × 有機物処理{なし、7.5 g pot⁻¹(R1)、15 g pot⁻¹(R2)}、各 4 反復。

過湿処理の開始は出芽後 10 日から 20 日であった。



(3) モデルの検証

生育初期の過湿がダイズの乾物生産と収量に及ぼす影響の解明

2010 年から 2012 年に京都大学農学研究科附属高槻農場、滋賀県農業技術振興センターにおいて、品種エンレイを群落栽培した。

出芽後 11~18 日後から約 2 週間の過剰水分処理を行なった。処理は畦間に排水させること(2010 年)もしくは新たに敷設した地下水水位制御システム(FOEAS)によって地表下 10~20cm の高地下水水位処理(2011 年および



2012 年)を維持することによって施した。2011 年は 6 月播種と 7 月播種の 2 回実験を行い、それぞれに疎植区と密植区を設けた。2012 年は 6 月播種のみとし、窒素無施用区と多施用区(100kgN/ha)を設けた。

過湿処理開始時、終了時、子実肥大始(R5)、R5 後 15 日、R7 に器官別地上部乾物重を調査した。生育阻害を窒素固定の阻害によるものとそれ以外のものに区別する目的で、成熟 2011 年は R7 に、2012 年は各調査時における

窒素固定由来窒素量を推定した。2011 年は根粒非着生系統 Lee(-)一部を各区の一部に、2012 年は品種エンレイの根粒非着生近質遺伝子系統である En1282 をエンレイと同様にそれぞれ栽培した。採種試料の 15Nexcess% を質量分析装置(フィガン社製 Delta S 型、京大大学生態学研究センター)を用いて分析、2011 年は自然存在比報、2012 年は希釈法にて固定由来窒素比(Ndfa)を求めた。

湿害応答関数を組み込んだモデルの検証

土壌の過湿がダイズの生育に及ぼす定量的評価結果にもとづいて、窒素固定および葉面積展開の応答を既存モデルに組み込み、上記の圃場実験結果を再現できるかどうか検討した。

4. 研究成果

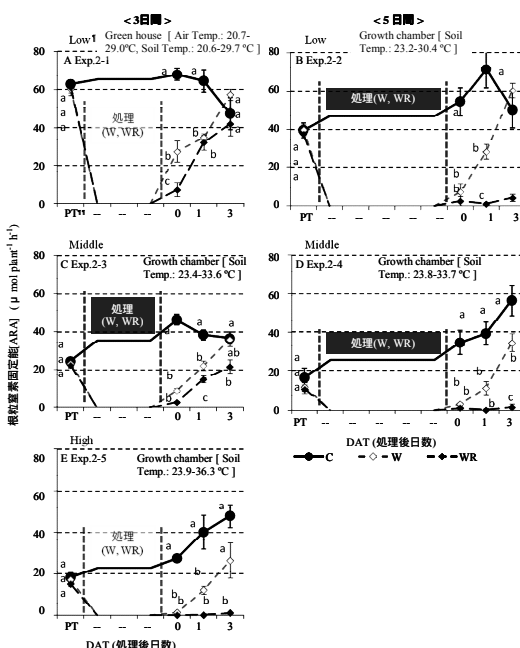
(1) 発育モジュールの開発

品種エンレイについて既に決定されている発育パラータを適用したところ、同品種の R1 と R7 は、それぞれ実測の ±3 日、±7 日の精度で予測できた。これにより、基本モデルを用いて品種エンレイにおける乾物生産量および収量の少なくとも好適条件におけるポテンシャル値の推定が可能になった。

(2) 湿害モジュールの開発

土壌の過湿が窒素固定に及ぼす影響の定量化

ポット内の酸素濃度と酸化還元電位の低下は、WR 区の方が W 区より低く、より急激に低下し、その大小関係が逆転することはなかった。W 処理、WR 処理の処理期間を変えた場合、3、5、7 日間の W 処理では、処理後 3 日後には対照区と同程度まで回復していた。そ



れに対し、3、5、7 日間の WR 処理では対照区と同程度までは回復しなかった(図省略)。次に、処理の地温条件を変えた場合(W 処理と WR 処理の 3、5 日間と地温(30 以下、

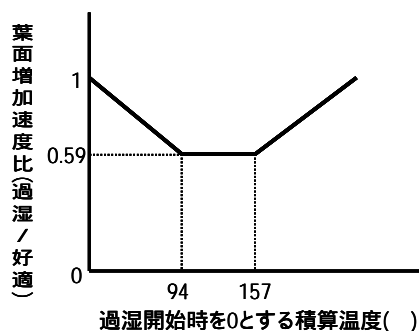
34 程度、36 以上)を組み合わせた実験)では、W 処理の ARA は地温や処理期間に関わらず、ほぼ回復した。一方、WR 処理の ARA では、30 以下、3 日間の場合のみ回復した (Fig.1)。気孔伝導度は、概して処理により有意に低下する傾向があった。また、ARA と気孔伝導度には正の相関関係があった。SPAD への影響も気孔伝導度と非常によく似た変動を示した。加えて、ARA が回復しなかった処理条件では、根粒乾物重と根系呼吸速度が有意に減少した。

これらの結果から、根粒窒素固定活性の回復には湛水時の土壤の酸化還元電位と地温が大きく関係することが考えられた。ダイズは湛水しても土壤の酸化還元電位が軽い還元状態であれば数日間の湛水は根粒窒素固定活性に影響は及ぼさないが、湛水時にそれ以下の土壤の還元化が伴うと、不可逆的に根粒はダメージを受け、特に地温が高くなるほど短い湛水でも回復が不可能となることが明らかになった。

土壤の過湿が葉面積展開に及ぼす影響の定量化

生育初期の過湿処理が主茎の葉面積展開に及ぼす効果はどの実験においても有意であり、処理期間中の葉面積増加量は 37%~63% 低下した。

地温制御 (2.4 の加温もしくは 2~3.3 の冷却)と有機物添加 (米ぬかを 0.2 または 0.4g/g 土壌混入)の組合せ実験を行なったが、盛夏期に地温を 3.3 冷却した場合、および有機物を多量に添加 (0.4%) した場合に有意な効果が見とめられた。このうち地温処理が単独で葉面積増加量に及ぼした効果は過湿処理の効果に比べて顕著ではなかった。有機物添加を行なった場合は、酸化還元電位の低下が観察され、これを通じて過湿下での葉面積展開を阻害することがうかがわれた。ただし、0.4% 添加処理は、0.6t/ha (作土 15cm を仮定) という通常の栽培条件からすると極多量の施用条件に相当する。通常の栽培における土壤有機物含量の範囲では、過湿による葉面積展開阻害を大きくは助長することはないものと推察された。



過湿処理ポット実験で明らかになった、主茎葉面積の過湿処理 (水位を地表下 5cm に維持) 反応様式

水位処理については、高水位では明らかに

葉面積増加量を減少させた。ただし酸化還元電位はこれらとは対応していなかった。高水位下で有機物を与えることで葉面積増加量が極端に減少した。水位処理は有機物なしの処理区で、34% も葉面積増加量が減少しており、本研究で想定している過湿条件 (地表下数 cm の滞水) とは分けて考える必要があると思われる。

過湿処理による葉面積減少仮定を検討するために、葉面積増加速度比 (過湿区 / 好適区) を求めた。通常過湿処理 (水位 -5cm) 区では、葉面積増加速度比はどの実験においても基本的には まず単調に減少し、次に低い状態で安定し、その後単調に増加し回復する様子が観察された。長期間過湿処理で検討した場合、葉面積増加速度比は短期間処理と同程度までしか減少せず、また過湿状態が長く続いた場合、過湿状態であっても回復しようとする傾向が見られた。2 次通気組織がみとめられたため、過湿条件に順応したものであると思われる。高水位 (0cm) 過湿処理区では水位 -5cm 区と比べ葉面積増加速度比が短時間で大きく減少し、より低い値で安定した。過湿状態が長く続いたときに回復を始めることもなかった。さらに、有機物を投入すると強く葉面積増加速度比が減少した。

以上より、高水位条件では様相が異なるものの、地表下数 cm の滞水を想定する過湿条件では、処理による主茎葉面積展開への影響はどの実験においても同じような傾向を示すことがわかった。

上の葉面積展開の過湿処理応答パターンにもとづき、葉面積増加速度比の減少率 (積算温度 1 当たり)、葉面積増加速度比の最低値、葉面積増加速度比の回復率 (積算温度 1 当たり) の各パラメータを実験ごとに求めた。

通常の過湿区 (有機物処理なし、短期間処理) では減少率が 0.0045、最低値が 0.59、回復率が 0.0041 程になった。また葉面積展開能力が最低に達するのは、水に浸かってからおよそ積算温度 94 であり、それからおよそ積算温度 60 はその状態が続くようである

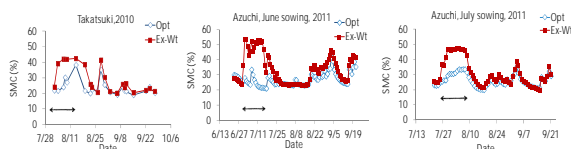
実験	処理	減少率	停滞開始()	最低値	回復率	停滞終了()
(a)	E	-0.0040	117	0.53	0.0032	161
	ER	-0.0064	113	0.28	0.0044	180
(b)	E	-0.0057	73	0.58	0.0056	143
	ER	-0.0068	82	0.44	0.0065	138
(c)	E10	-0.0055	81	0.56	0.0024	139
	E10R	-0.0048	100	0.52	0.0025	192
	E20	-0.0062	76	0.53	0.0014	98
	E20R	-0.0056	85	0.52	0.0017	175
	E10	-0.0028	105	0.71	0.0052	186
	E10R1	-0.0041	128	0.48	0.0037	188
(d)	E10R2	-0.0059	99	0.42	0.0043	178
	E20	-0.0048	98	0.53	0.0021	200
	E20R1	-0.0058	94	0.46	0.0016	199
	E20R2	-0.0051	109	0.45	0.0011	168

分枝葉面積の展開が過湿から受ける影響は、主茎葉面積展開よりも大きかった。主茎では影響されない出葉が分枝では著しく阻害され、過湿条件が与えられると速やかに新葉および新しい分枝の出現が停止した。しかしその詳細な量的評価は今後の課題となった。

(3) モデルの検証

生育初期の過湿がダイズの乾物生産と収量に及ぼす影響の解明（2010年および2011年）

処理期間中の地表下15cmにおける土壌水分は、対照区の20~30%に対して高土壌地下水処理（以下、過湿処理）区では40~50%に推移した。



過湿処理は、子実収量を23~31%を低下させた。収穫指数は処理区間でみられなかったため、子実収量の減少は主に乾物生産の減少に起因していた。

R5までの乾物生産量は、過湿処理により24~51%低下したが、R5以降の乾物生産量におよぼす処理の影響は不明瞭だった。

R5までの乾物生産は、葉面積展開の低下に起因する積算受光量の低下（13~27%）および日射利用効率（RUE）の低下（13~33%）の両方に起因していた。上位葉の気孔コンダクタンスおよび葉緑素含量（SPAD）が処理開始後速やかに低下したことから、過湿処理によるRUEの低下には水ストレスの発生および窒素蓄積能の低下が関わるものと考えられた。

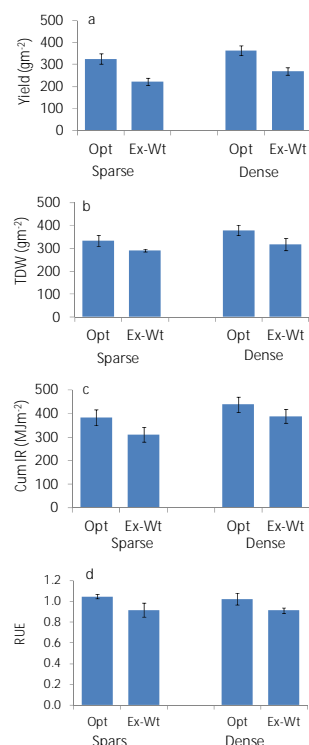


図 生育初期における高地下水処理(-15cm, Ex-Wt vs Opt)が疎植(Sparse)および密植条件(Dense)のダイズの収量、地上部乾物重、生育期間の積算受光量(CumIR)、およびRUEに及ぼす影響。

成熟期までの窒素蓄積量も18~31%低下した。成熟期（2011年）および生育期間中（2012年）のNdfaには処理による影響がみられなかったことから、窒素蓄積の減少には窒素固定とともに窒素吸収活性の低下も関与することが示唆された。

過湿による減収が疎植と密植の条件で変

わるかどうか検討した。密植条件で栽培すると積算受光量が大きくなることにより過湿の影響を緩和したが、子実収量の回復程度は限られることが判明した。

湿害応答関数を組み込んだモデルの検証

既存モデルに、生育モジュールを組み込むとともに、葉面積展開の湿害応答関数を組み込むことによって、日本の転換畑におけるダイズの生育を予測するモデルを試作した。モデルによる乾物生産過程のシミュレーション結果は圃場実験の測定結果を反映しているものの、乾物収量の過大および過小評価がみとめられた。

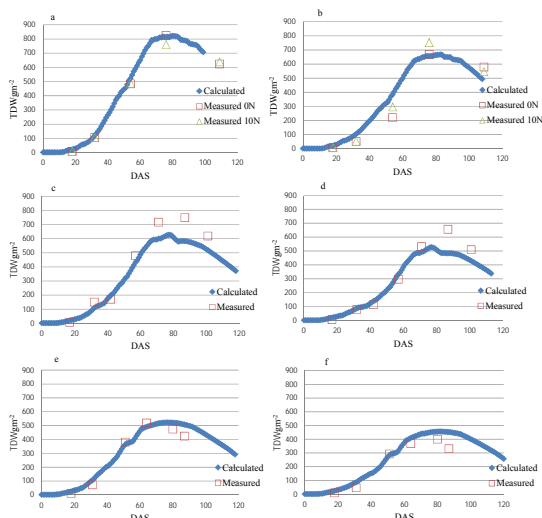


図 品種エンレイの乾物生産過程。湿害が葉面積展開に及ぼす影響を考慮したモデルによる予測値(実線)および実測値()。a) 2012年対照区、b) 2012年過湿区、c) 2011年6月播種対照区、d) 2011年6月播種過湿区、e) 2011年7月播種対照区、f) 2011年7月播種過湿区。

(4) インパクトと今後の展望

湿害の影響を考慮したダイズの生育予測モデルが完成すると、日本だけでなく夏に雨の多いアジア諸国における実用的な栽培支援モデルになると期待される。本研究では、その完成に至らなかったが葉面積展開の減退様式を定量化できた。その様相は水位によって大きく異なるものの冠水と高地下水水位とは生育反応の質が異なることが確認された。よって今後、一般の圃場条件で多くを占める高地下水水位による湿害に絞って適用範囲を広げることができれば、湿害を考慮したはじめてのダイズ生育モデルが実現する可能性は大きいと期待される。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計1件)

Maekawa, T., Shimamura, S., Shimada, S., 2011. Effects of short-term water logging on soybean nodule nitrogen fixation at different soil reductions and temperatures. PlantProd. Sci. 14, 349-358.

査読あり

〔学会発表〕(計1件)

Bajgain, R., Kawasaki, Y., Akamatsu, Y.,
Tanaka, Y., Kawamura, H. and Shiraiwa, T.
Biomass production and yield of soybean
grown under optimum condition and with
excess water during early growth stage. 日
作紀 81(別1) : 140-141.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白岩 立彦 (SHIRAIWA, Tatsuhiko)
京都大学・大学院農学研究科・教授
研究者番号 : 30154363

(2) 研究分担者

島田 信二 (SHIMADA, Shinji)
農研機構・中央農業研究センター・主任研
究員
研究者番号 : 30355309

田中 朋之 (TANAKA, Tomoyuki)
京都大学・大学院農学研究科・准教授
研究者番号 : 50224473

本間 香貴 (Homma, Koki)
京都大学・大学院農学研究科・講師
研究者番号 : 60397560

桂 圭佑 (KATSURA, Keisuke)
京都大学・大学院農学研究科・助教

(3) 連携研究者

河村 久 (KAWAMURA, Hisanori)
滋賀県・農業技術振興センター・主任技師
研究者番号 : 99999999