

転換畑ダイズの変動環境に対する生育収量応答の定量化

中野 聡史

第1章 緒言

日本のダイズ単収は過去 69 年間、ほとんど向上が認められていない。日本のダイズ収量の制限要因として、水田転換畑の過湿条件による生育阻害や土壌の可給態窒素量の低下が指摘されているが、それらの要因の定量的な解析は十分に行われていない。また、前世紀末から 21 世紀末まで最大で約 5°C の気温上昇が予測されているが、将来の気候条件が日本のダイズ栽培に及ぼす影響は明らかでない。これらの理由として、ダイズの収量は生育と気象や土壌など複数の条件との相互作用を通じて成立しており、収量に対する環境の影響が複雑であることが挙げられる。そのような複雑な要因の影響を定量的に評価するためには、生育と収量形成の各プロセスを数式で記述し、それらを組み合わせることで作成される生育モデルの利用が不可欠である。本研究は、日本のダイズ栽培に適用可能な生育・収量予測モデルを構築することを目的とした。加えて、構築したモデルを利用することにより、窒素供給量の変化や将来の気象条件が日本のダイズ収量に及ぼす影響の定量的な評価を試みた。

第2章 ダイズの発育過程のモデル化と乾燥ストレス発生リスク評価への適用

国内の主要ダイズ品種リュウホウ、エンレイおよびフクユタカを対象として、出芽から開花期 (R2) および R2 から子実肥大始期 (R5) における日々の発育速度を日平均気温と日長時間の関数で表した発育予測モデルを作成した。国内 3 ヶ所 (盛岡、つくば、京都) で作期移動試験を実施し、幅広い気温と日長時間の組み合わせの下で取得した発育データを用いてモデルパラメータを推定した。モデルによる推定誤差は、出芽期～開花期で 1.9 ~ 3.0 日、開花期～子実肥大始期で 1.7 ~ 4.0 日であり、温度勾配チャンバー (TGC) 実験における気温上昇の影響も同一のモデルで推定された。出芽から開花期における発育速度の温度反応は中生品種のリュウホウとエンレイで晩生品種のフクユタカより顕著であり、一方、開花期から子実肥大始期における発育速度は日長時間の延長にともない直線的に低下した。また、1980 年から 2013 年の 34 年間を基準として 3°C の気温上昇を想定した場合、東北地域では開花期が 1 週間程度早まる地域の出現が予測された。

さらに、つくばにおける 3 ヶ年、2 圃場での栽培試験から、収穫指数および子実重は R2~R5 後 30 日間における [降水量-蒸発散量] の日平均値 (\overline{WD}) が 0 の時に最も高くなり、マイナスになると乾燥ストレスにより低下することが示された。そこで、過去 34 年分の気象データを用いて、各地域の品種および作期における \overline{WD} を算出したところ、福井県北部は \overline{WD} がマイナスとなる年の出現率が 0.4 ~ 0.6 と高く、乾燥ストレス発生リスクの高い地域であることが示された。また、九州北西部では \overline{WD} が経年的に乾燥化する

傾向が示されたが、その要因は基準蒸発散量の増加傾向に加えて、同地域で特徴的に出現した降水量の減少傾向にあることが明らかになった。

第3章 ダイズの葉面積生長過程のモデル化

分枝の生長と個葉の生長を組み合わせたダイズの葉面積生長モデルを構築した。分枝生長の規則性に着目し、主莖節の増加に対応させて分枝の発生および分枝節の増加を記述した。さらに、これら分枝の生長は群落受光率の増加に応じて抑制されることとした。また、上位2節の葉が同時に生長するという規則性に基づき、各節における個葉の生長を記述した。つくばの水田転換畑圃場において、前章と同じ3品種を用いた圃場実験を3ヶ年のべ16環境で実施し、子実肥大始期までを対象として、主莖および分枝の節数と主莖・分枝別の葉面積の測定を複数回実施した。さらに、つくばの普通畑圃場において、葉長の推移を継続的に測定し、個葉の生長モデルを構築した。水田転換畑で取得したデータの半数をモデル構築、残り半数をモデル検証に用いたところ、構築した葉面積生長モデルは検証データにおける葉面積指数(LAI)をRMSE=0.76で推定可能であり、データのばらつきの92%を説明することができた。さらに、群落受光率の変化に対する分枝生長の反応をモデルに組み込んだことにより、モデル構築に利用していない栽植密度における葉面積生長の推移も推定することが可能となった。

第4章 ダイズの生育・収量予測モデルの構築

生育・収量予測モデルは、乾物生産と窒素蓄積のバランスをシンプルなモデル構造で表現した既存のダイズ生育モデル(Sinclairモデル)を基にして、前章までに構築した発育予測モデルと葉面積生長モデルを組み合わせることにより、日本のダイズ栽培に適用可能なモデルを構築した。また、Sinclairモデルはダイズへの窒素供給として窒素固定からの窒素のみを考慮しているが、本研究ではさらに土壌からの窒素供給量の推定を組み込んだ。これにより、土壌からの窒素供給量と窒素固定速度の変化がダイズの生育・収量に及ぼす影響を分けて評価することが可能となった。日々の乾物生産量は群落受光日射量と日射利用効率(RUE)を用いて推定し、子実重増加量は収穫指数(HI)を用いて推定した。ダイズの利用可能な土壌窒素量は土壌中の無機態窒素量であると仮定し、土壌窒素の無機化速度を零次反応無機化モデルにより推定した。窒素固定速度は日本のダイズ品種および栽培条件で取得されたパラメータを用いて地上部栄養生長器官乾物重の関数として記述した。第3章の実験に加えて、根粒非着生系統En1282を供試し、成熟期までの地上部の部位別乾物重および各器官における窒素濃度の測定を複数回実施し、取得したデータの半数をモデル構築、残り半数をモデル検証に用いた。

土壌および肥料からの窒素のみを利用するEn1282の窒素蓄積量の推移は、零次反応無機化モデルで推定された土壌の無機化窒素量から良く説明された。また、構築した生

育・収量予測モデルは検証データにおける地上部全乾物重と窒素蓄積量の推移を良く表しており、成熟期における子実乾物重を $RMSE = 50.25 \text{ g m}^{-2}$ で推定し、データのばらつきの 68% を説明することができた。ただし、子実乾物重の推定では En1282 よりも通常品種において推定誤差が大きくなっており、子実乾物重の推定精度の向上には、窒素固定速度の推定精度を向上させる必要があると考えられた。

第 5 章 茎内流計測に基づくダイズの気象応答の定量的評価

TGC 内で栽培した品種エンレイの蒸散速度を茎熱収支法で計測し、気温の上昇がダイズの蒸散速度および群落コンダクタンスに及ぼす影響を検討した。高温区では常温区よりも蒸散速度が増加したが、群落コンダクタンスは低下し、その差は日中よりも朝に大きくなった。また、土壌水分条件の違いは、それらの反応性に影響しなかった。偏相関係数の解析から、高温区では気温上昇よりも気温上昇にともなう飽差上昇に起因して、群落コンダクタンスの低下が生じていることが示唆された。ただし、本章で示された群落コンダクタンスの低下は時別値での変化であるのに対し、第 4 章で構築した生育・収量予測モデルは日単位での計算であるため、現時点では、飽差の上昇による群落コンダクタンスの低下をモデルに組み込むことは困難であった。

第 6 章 生育・収量予測モデルを用いた転換畑ダイズの生育収量応答の解析

第 4 章までに構築したダイズの生育・収量予測モデルを用いて、窒素供給量の変化および将来の気候条件の変化がダイズの子実重に及ぼす影響を試算した。

窒素供給量の変化については、モデルの感度解析により、土壌からの窒素供給量と窒素固定速度をそれぞれ $\pm 90\%$ の範囲で 30% ずつ変化させた場合での子実乾物重の変化を算出した。土壌からの窒素供給量と窒素固定速度を同時に 60% 低下させると子実重は 60.2% 低下するが、それぞれ一方を 60% 低下させた場合は 12.1% および 16.1% の低下となった。したがって、窒素供給量が収量の制限要因となっている場合は、土壌からの窒素供給量と窒素固定活性の低下が同時に生じている可能性が高く、土壌からの窒素供給量を高めることはダイズ収量の安定化に寄与するものと考えられた。一方、窒素固定速度の最大値を高めても収量は増加しないことがモデル解析から推測されたが、これは通常品種よりも窒素固定速度が高い根粒超着生系統ダイズにおいて収量が増加しないという既存の研究結果と定性的に一致するものであった。

次に、RUE に対する CO_2 濃度および HI に対する気温の影響をモデルに組み込み、2040 年代および 2090 年代に予測される気温と CO_2 濃度の上昇がダイズ収量に及ぼす影響を試算した。1980 年から 1999 年を基準年として RCP8.5 シナリオの予測に基づき、2040 年代は $2.4 \text{ }^\circ\text{C}$ の気温上昇、2090 年代は $4.9 \text{ }^\circ\text{C}$ の気温上昇を想定した。また、 CO_2 濃度の上昇の伴い、基準年と比較して、2040 年代は RUE が約 1.2 倍、2090 年代は約 1.4

倍に上昇すると仮定した。さらに、TGCにおける栽培試験の結果から、高温によるHIの低下を表す関数を組み込んだ。モデルによる予測結果では、2090年代の気候条件では、CO₂濃度の上昇による乾物生産量の増加によってダイズ収量が増加することが示された。一方、気温上昇がダイズ収量に及ぼす影響は小さいものであった。ただし、第2章で提示した \overline{WD} を用いて乾燥ストレス発生リスクを評価したところ、2090年代では北陸地域を中心に、気温の上昇による蒸発散量の増加によって乾燥ストレス発生リスクが高まることが予測された。したがって、将来の気候変化が日本のダイズ栽培に及ぼす影響としては、気温上昇による乾燥ストレス発生リスクの高まりが懸念されるが、一方で、適切に灌水等を実施することにより、CO₂濃度の上昇に伴う乾物生産量の増加によってダイズ収量が増加する可能性が示唆された。

第7章 総合考察

本研究は、気象や土壌などの環境条件がダイズの生育・収量に及ぼす影響を定量的に評価するために、日本のダイズ栽培に適用可能な生育・収量予測モデルの構築を目的とした。第2章では、国内主要3品種の発育速度の違いを気温と日長時間から推定可能な発育予測モデルを作成した。第3章では、分枝の生長および群落遮蔽による分枝生長の抑制を考慮することにより、栽植密度の違いが個体あたりの葉面積生長に及ぼす影響を定量的に表すことが可能な葉面積生長モデルの構築を行った。第4章では、乾物生産と窒素蓄積とのバランスに基づいてダイズの生育・収量を推定可能な生育・収量予測モデルを構築した。さらに、窒素供給については、土壌からの窒素供給量と窒素固定速度を分けてモデル化することにより、通常品種に加えて、根粒非着生系統ダイズの生育・収量についても同じモデル構造で推定することが可能となった。

モデルを用いた感度解析から、ダイズ収量の大幅な低下は土壌からの窒素供給量の低下のみでは説明されなかった。したがって、近年問題とされている土壌の可給態窒素量の低下によるダイズ収量の低下については、土壌からの窒素供給量の低下だけでなく窒素固定速度の低下も関わっている可能性が示唆された。また、モデルを利用して将来の気候変化がダイズ収量に及ぼす影響を予測したところ、現在の地域、品種、作期の組み合わせでは、2090年代の気温を想定した場合でも気温上昇によるダイズ収量への影響は顕著でなかった。一方、CO₂濃度の上昇により乾物生産量が増加するため日本のダイズ収量は増加することが予測されたが、気候変化の影響については乾燥ストレス発生リスクの増加も予測されたことから、さらなる検討が必要である。

以上、本研究では、乾物生産と窒素蓄積の両方を考慮し、日本のダイズ品種および栽培条件に適用可能な生育・収量予測モデルが初めて構築された。さらにモデルを利用することにより、土壌からの窒素供給量の低下や将来の気候変化など環境の変化が日本のダイズ収量に及ぼす影響の定量的な評価が可能となった。