

遺伝子型・環境相互作用を考慮したイネの生育予測モデルの開発とモデルを用いた気候変動対応に関する研究
吉田ひろえ（農研機構農業環境変動研究センター）

イネの生育・収量は遺伝子型と環境の相互作用によって決まる。気候変動の下でイネ収量・品質の高位安定化をはかるには、環境に応じた多収性品種の育成と栽培技術の向上が必須であり、イネの生育・収量形成過程についての統一的理解と、その遺伝子型・環境相互作用の解明が不可欠である。本業績は、イネの生育・収量における遺伝的・環境的変異の成立過程を説明・予測するモデルを開発し、モデル解析によって、所与の環境下での収量支配形質の同定、さらに気候変動下での収量・品質向上のための基礎的知見と解析技術を提示したものである。得られた成果は以下のように要約される。

1. イネの生育・収量における遺伝的・環境的変異の成立過程のモデル化

アジア 8 地点におけるイネ 9 品種の品種比較栽培実験の結果をもとに、イネの生育・収量形成に関与する (1) 発育, (2) バイオマス生長, (3) 葉面積展開, (4) 穎花数生産, (5) 窒素吸収, (6) 窒素分配, (7) 収量器官形成の各プロセスを、環境と稲体要因から説明する 7 つのサブモデルを構築した。次にこれらを統合して、イネの生育・収量における遺伝的・環境的変異の成立過程を説明する機構的モデルを開発した。

光合成とバイオマス生長に注目したモデル解析により、イネの物質生産力の遺伝的変異は、単位葉面積あたり葉身窒素量と気孔コンダクタンスの変異によって強く支配されていることを明らかにした (業績 3)。葉面積展開に注目したモデル解析では、イネの葉面積展開の遺伝的・環境的変異は、バイオマスの相対生長速度と単位葉面積あたり葉身窒素量によって説明できることを示し、葉身の枯死が始まる葉身窒素濃度に大きな品種間差異があることを明らかにした。品種固有パラメータとして同定されたこの限界葉身窒素濃度の値は、近年育成された品種で高い傾向が認められ、これら品種は、生育後半まで高い葉身窒素濃度を維持するものの、葉面積の維持に劣ることを指摘した (業績 2)。さらに品種比較栽培実験の結果から、分化穎花数は出穂 2 週間前の植物体窒素量に強く依存するが、その後 2 週間の乾物生長速度 (CGR) が分化穎花の退化率に影響を及ぼし、この両者から最終穎花数が決定することが示唆された。このことに基づいて構築した穎花数生産サブモデルは、遺伝子型と環境による穎花数の極めて大きな変異 (5000~70000 m²) を、決定係数 R²=0.85 の高い精度で説明した。モデル解析の結果、植物体窒素量あたりの分化穎花数には供試品種間で約 3 倍もの変異が認められ、これが穎花数の遺伝子型間差異を支配する重要形質であると考えられた (業績 1)。以上のサブモデルと発育、植物体内の窒素分配、収量形成プロセスサブモデルを統合し、実測の植物体吸収窒素量に基づいて、生育・収量形成に関与する諸特性のモデル解析を行ったところ、モデルは成熟期植物体窒素吸収量あたりの粗粒収量 (NUE) の品種間差異を、相関係数 0.90 (n=9) の精度で説明した。モデル解析により、NUE の品種間差異は、穎果生産効率および気孔コンダクタンスの品種間差異に強く支配されていることを示した (業績 4)。

水平方向への根系の拡大速度を葉面積指数の展開速度と関係づけて、イネの窒素吸収プロセスを説明するサブモデルを構築し、全てのサブモデルを統合して、イネの生育予測モデルを構築した。開発したモデルは、アジアの多様な環境下で生育したイネ 9 品種の窒素吸収動態、乾物生長動態、穎花数、粗粒収量を、初期値と気象条件、土壌パラメータに基づいて同時に高い精度で説明した。イネ品種の収量性、気候適応性を支配する重要形質として、11 の品種固有パラメータが同定された (業績 5)。

2. 水稲収量の 대기 CO₂ 濃度反応における品種・窒素依存性のモデルシミュレーション

水稲の 대기 CO₂ 濃度 ([CO₂]) 応答には、品種・環境条件により大きな差異があることが明らかにされているが、その差異の生じるプロセス・要因が総合的に理解されるには至っていない。高 [CO₂] に対する水稲の生長・収量反応について、窒素 (N) 施肥量および品種によって増収率に差異の生じる機構と要因を解析的に明らかにすることを目的に、上記に開発したイネ生育予測モデルを用いて、アジア 4 地点・イネ 9 品種を対象にシミュレーション解析を行った。この結果、多様な品種・気象条件を平均して、高 [CO₂] による水稲収量の相対増加率 ([CO₂] 700 ppm 下の粗粒収量 / [CO₂] 360 ppm 下の粗粒収量) は、全生育期間の N 施肥量が多いほど大きくなるが、高 [CO₂] による地上部乾物重の相対増加率には、大きな N 依存性は認められないことが予測された。また現在 [CO₂] 下で単位面積当たり粗数が大きい品種ほど、高 [CO₂] による収量の相対増加率が高くなることが予測され、これら水稲収量の [CO₂] 応答の品種・N 施肥条件による差異は、どちらも現在 [CO₂] 条件下でのシンク・ソースバランスによって決まっており、現在 [CO₂] 下でシンクないしは粗数が大きいほど、収量の相対増加率が大きくなることを示した (業績 6)。

3. 水稲白未熟粒率に関連する稲体栄養条件の予測

頻発する水稲の高温登熟障害による被害を軽減するため、施肥基準や作期の策定をサポートする技術の開発が期待されている。そこでコシヒカリの多様な施肥・作期試験データをもとに、窒素吸収プロセスモデルの高度化を行い、機構的モデルを用いた水稲の外観品質予測の可能性について検討した。これまでに開発したイネ生育予測モデルは、コシヒカリの作期・窒素施肥試験の生育・収量の変動を妥当な精度で説明し、このとき一穂あたりの利用可能炭水化物量を登熟初期までの茎葉の非構造的炭水化物蓄積量と登熟期間中の物質生長量の和を粗数で除したものと定義すると、モデルによるその推定値は、実測された乳白粒率と密接な負の相関関係にあった。さらに一穂あたりの利用可能窒素量を、登熟初期までに茎葉に蓄積された粗へ転流可能な窒素量と登熟期間中の窒素吸収量の和を粗数で除したものと定義すると、生育予測モデルによるこの推定値は、乳白粒率と背白粒、基白粒率の合計である白未熟粒率と密接な負の相関関係にあった。イネ生育予測モデルによる一穂あたり利用可能炭水化物量および同窒素量の推定値は、実測の単位面積あたり粗数および玄米タンパク濃度よりも白未熟粒率との相関が強く、これらがそれぞれ、乳白粒率、背基白粒率の指標となることが示唆された (業績 7)。

以上のように本業績は、イネの生育モデルを遺伝子・環境相互作用の解析が可能なものに発展させたものであり、これを用いることでイネの収量・品質の変動要因の包括的な理解に貢献しつつある。今後さらなる発展が期待されることから、日本作物学会奨励賞に十分値する業績と評価される。

研究業績

1. Yoshida H., Horie, T. and Shiraiwa, T. 2006. A model explaining genotypic and environmental variation of rice spikelet number per unit area measured by cross-locational experiments in Asia. *Field Crops Research* 97: 337-343.

2. Yoshida H., Horie, T., Katsura, K. and Shiraiwa, T. 2007. A model explaining genotypic and environmental variation in leaf area development of rice based on biomass growth and leaf N accumulation. *Field Crops Research* 102: 228-238.
3. Yoshida H., Horie, T. and Shiraiwa, T. 2008. A model for explaining genotypic and environmental variation in vegetative biomass growth in rice based on observed LAI and leaf nitrogen content. *Field Crops Research* 108: 222-230.
4. Yoshida, H. and Horie, T. 2009. A process model for explaining genotypic and environmental variation in growth and yield of rice based on measured plant N accumulation. *Field Crops Research* 113: 227-237.
5. Yoshida, H. and Horie, T. 2010. A model for simulating plant N accumulation, growth and yield of diverse rice genotypes grown under different soil and climatic conditions. *Field Crops Research* 117: 122-130.
6. Yoshida, H., Horie, T., Nakazono, K., Ohno, H. and Nakagawa, H. 2011. Simulation of the effects of genotype and N availability on rice growth and yield response to an elevated atmospheric CO₂ concentration. *Field Crops Research* 124: 433-440.
7. Yoshida, H., Takehisa, K., Kojima T., Ohno, H., Sasaki, K. and Nakagawa, H. 2016. Modelling the effects of N application on growth, yield and plant properties associated with the occurrence of chalky grains of rice. *Plant Production Science* 19: 30-42.