

発育予測モデルを中心とした水稻生育シミュレーションモデルの開発と水稻生産への応用展開

中川博視 (農研機構農業環境変動研究センター)

開花、成熟などの発育現象における作物の環境応答の定量的理解は、変動環境下での品種開発や栽培管理に貢献できる。中川氏は、気温と日長から、イネの発育ステージを高精度で予測しかつ汎用性の高いモデルを開発・改良し、その普及と実用化を推進した。また、出穂期予測モデルを遺伝解析に応用することで、作物モデルと遺伝学・分子生物学との協働の先鞭をつけた。さらに、環境制御実験にもとづく水稻の高温・高CO₂濃度応答をモデルに組み込み、今後の地球温暖化が水稻生産に及ぼす影響の予測を行った。これらから、中川氏は、将来の予測環境を含む幅広い条件における作物生産の特性と環境応答の解明という、従来の実験解析のみでは対応できなかった新たな研究手法の確立に貢献した。主要な研究成果は以下のように要約できる。

1. 発育予測モデルの開発と応用

水稻品種日本晴に対して、気温と日長の非線形関数としての発育指数 (DVI) を導入することで、幅広い環境条件で栽培されたイネの出穂期を、従来の経験的な方法では得られない高精度で予測できるモデルを開発した (業績 1)。さらに、出穂までの発育過程を幼穂分化期の前後で2つのステージに分割することで、日本晴、コシヒカリ、IR36 の出穂期の予測精度をそれまでの平均2.6日から1.9日に向上させた。モデルで推定される発育指数 (DVI) と幼穂長の間には品種・栽培環境によらず密接な関係があり、DVI 値を使用すれば、重要な幼穂発育ステージを気温と日長の経過から簡便に推定・予測することが可能となった。

上述の研究により推定された発育速度から、IR36 では日本型品種に比べて発育の下限温度が高いこと、日長感受性が日本晴>コシヒカリ>IR36 の順に強いことなど、環境応答性の品種間差をフィールドデータのみから定量的に推定可能であることを示した (業績 6)。さらに、全国の主要10品種について発育速度関数のパラメータを決定し、日長感受性と基本栄養成長性の地域による差異、基本栄養成長性の品種間差における幼弱相の長さの寄与などを示し、品種の環境応答解析手法としてのモデルの適用性を高めた (業績 11)。

開発した発育モデルは、世界的水稻品種の出穂期予測モデルに適用され (業績 12, 13)、他の研究者によって各地の水稲、ダイズ、コムギなどに応用されるなど、発育時期予測の標準的手法として活用されるようになった。また、気象データと組み合わせたリアルタイムの発育予測システムを開発し (業績 2, 4)、多数の公設試験・普及機関が同種の発育予測システムを用いるきっかけをつくるとともに、農業気象災害克服や作業管理の効率化のための早期警戒・栽培管理支援システム (業績 25, 26) の中核となる技術を提供した。

2. 遺伝情報に基づいた出穂期予測モデル

出穂期予測モデルのパラメータは品種固有のものであり、それによって品種間差が表現できるようになった。しかしその遺伝的要因を明らかにしたものはない。そこで、水稻の日長反応、温度反応、基本栄養生長性を最小限の3パラメータで効率的に記述可能な出穂期予測モデルを新たに開発した上で、日本と Kasalath の戻し交雑自殖系統を用いて、出穂期データから推定された系統ごとのパラメータについて遺伝分析を行い、各パラメータの QTL を検出した。それらの QTL の属性および既往の知見との比較から、*Hd1* が短日条件と長日条件で作用が逆転する、*Hd6* が長日条件の花成反応のみに作用するなど、各遺伝子座の機能に関する知見を見出した。以上より、出穂期予測モデルのパラメータを遺伝形質として扱うことが可能であることを示すと同時に、QTL 情報に基づく新たな出穂期予測モデルを構築した。すなわち遺伝子-環境相互作用をシミュレーションモデルで扱う方法が切り開かれた (業績 16)。

3. 生育モデルの改良と気候変化の影響予測

温度勾配型温室 (TGC) を開発し (業績 9)、水稻の高温・高CO₂濃度応答に関する一連の実験を行った (業績 3, 5, 14)。それらを通じて、気候変化の影響予測研究は群落状態で実験を行うべきこと (業績 3, 5)、CO₂濃度を2倍に高めたときの水稻の乾物生産の増加率が25%であること、および増加率に及ぼす温度の影響は比較的小さいこと、CO₂濃度上昇による乾物重増加には、葉面積生長および受光量よりも日射利用効率のCO₂濃度反応が大きく寄与することを指摘した (業績 14)。さらに、開花期の気温が35°Cを超えると稔実率が急減し収量が激減すること (業績 3, 14)、CO₂濃度を2倍にすると水利用効率が平均34%向上することを明らかにした (業績 5)。

これらの知見を水稻生育シミュレーションモデル SIMRIW に組み込むことにより、同モデルを気候変化の影響予測研究に応用可能な形にするとともに、これに水稻品種の発育予測サブモデルを組み込むことにより、将来の品種選択効果のシミュレーションを可能にした (業績 7, 15)。このような拡張により、SIMRIW の応用性は著しく高められた。

さらに、拡張された SIMRIW と気候予測データを用いた研究によって、CO₂倍増時の気候がわが国の水稻生産に与える影響を予測した。その結果、北日本および北部中央日本では、高CO₂濃度環境による正の効果が、南部中央日本および西南日本では、生育期間の短縮および高温不稔の発生によって負の影響が予測された (業績 8)。さらに、早晚性の異なる品種への変更、作期の変更および高温不稔耐性の品種間差を考慮したシミュレーションによって、特に北日本では、晩生品種の導入と早植の組み合わせを行うことが、中部日本以西では高温不稔耐性品種を導入することが、それぞれ水稻生産を気候変化に適応させるための技術オプションになることを提示した (業績 15)。

4. 研究成果の社会還元と実用技術への展開

中川氏は、上述の研究成果を著書・総説に著わし (業績 18, 19, 20, 21, 22, 27)、わが国における農業の気候変化の影響予測・適応研究の潮流形成に寄与した。また、研究業績のうち水稻生産に対する気候変動の影響予測は、IPCC 第3, 4次報告書に引用された。さらに、気候変動への対応技術開発のためにのべ15の道府県と、共同研究もしくは研修対応を通じた農業技術協力を行ってきた。自らも技術開発を展開させ、白未熟粒発生に与える同化産物供給の影響を明らかにしたほか (業績 17)、背白粒と基白粒 (背基白粒) の発生に及ぼす登熟気温と玄米タンパク質濃度の影響の予測式を作り、SIMRIW と組み合わせることで、移植日の変化が背基白粒発生率に及ぼす影響を推定するとともに、玄米タンパク質濃度別に手取川扇状地における背基白発生率推定マップを作成した (業績 24)。さらに、2011年3月の東日本大震災の際に、水稻作付が可能であっても移植期の遅れが生じる地域が広範囲に及ぶ事態に即応し、移植期の晩限と移植期の遅れにともなう減収率の推定を行い、その情報を提供した (業績 23)。

以上のように中川氏により開発・改良された発育予測モデルは、多くの他の研究者によって活用され生産現場の実用技術となっており、さらに SIMRIW を拡張して行った水稻生産に及ぼす気候変化の影響のシミュレーションは、わが国の影響予測・適応研究の潮流形成に影響を与えた。これらは社会的にも大きく発信された成果であり、日本作物学会賞を授与するに値する研究業績と評価される。

研究業績

1. 堀江武・中川博視 1990. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究. 第1報 モデルの基本構造とパラメータの推定法および出穂予測への適用. 日本作物学会紀事 59: 687-695.
2. Horie, T., Yajima, M. and Nakagawa, H. 1992. Yield forecasting. *Agricultural Systems* 40: 211-236.
3. Nakagawa, H., Horie, Y., Nakano, J., Kim, H. Y., Wada, K. and Kobayashi, M. 1993. Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on the growth and development of rice. *Journal of Agricultural Meteorology* 48: 799-802.
4. Nakagawa, H., Sudo, K. and Horie T. 1993. A prediction system of rice development stage for crop management. In *Low-Input Sustainable Crop Production Systems in Asia*, Kim, K. J. et al., eds., KCSC, Korea. 243-249.
5. Nakagawa, H., Horie, T. and Kim, H. Y. 1994. Environmental factors affecting rice responses to elevated carbon dioxide concentrations. *International Rice Research Notes* 19: 45-46.
6. 中川博視・堀江武 1995. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究. 第2報 幼穂の分化・発達過程の気象的予測モデル. 日本作物学会紀事 64: 33-42.
7. Horie, T., Nakagawa, H., Centeno, H.G.S. and Kropff, M. 1995. The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. In *Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia*. Matthews, R. B. et al. eds., CAB International, Oxon, UK. 51-66.
8. Horie, T., Nakagawa, H. and Ohnishi, M. 1995. Rice production in Japan under current and future climates. In *Modelling the Impact of Climate Change on Rice in Asia*. Matthews, R. B. et al. eds., CAB International, Oxon, UK. 143-164.
9. Horie, T., Nakagawa, H., Nakano, J., Hamotani, K. and Kim, H.Y. 1995. Temperature gradient chamber for research on global environment change. III. A system designed for rice in Kyoto, Japan. *Plant Cell and Environment* 18: 1064-1069.
10. Nakagawa, H., Horie, T., Kim, H.Y., Ohnishi, H. and Homma, K. 1997. Rice responses to elevated CO₂ concentrations and high temperature. *Journal of Agricultural Meteorology* 52: 797-800.
11. Nakagawa, H. and Horie, T. 1997. Phenology determination in rice. In *Breeding Strategies for Rainfed Lowland Rice in Drought-prone Environments*. Fukai, S. et al. eds, Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra. 81-88.
12. Yin, X., Kropff, M. J., Horie, T., Nakagawa, H., Centeno, H.G.S., Zhu, D. and Goudriaan, J. 1997. A model for photothermal responses of flowering in rice. I. Model description and parameterization. *Field Crops Research* 51: 189-200.
13. Yin, X., Kropff, M. J., Nakagawa, H., Horie, T., and Goudriaan, J. 1997. A model for photothermal responses of flowering in rice. II. Model evaluation. *Field Crops Research* 51: 201-211.
14. Nakagawa, H. and Horie, T. 2000. Rice responses to elevated CO₂ and Temperature. *Global Environmental Research* 3: 101-113.
15. Nakagawa, H., Horie, T. and Matsui, T. 2003. Impacts of climate change on rice production and adaptive technologies. In *Proceedings of International Rice Research Conference 2002*. International Rice Research Institute. 635-658.
16. Nakagawa, H., Yamagishi, J., Miyamoto, N., Motoyama, M., Yano, M., Nemoto, K. 2005. Flowering response of rice to photoperiod and temperature: A QTL analysis using a phenological model. *Theoretical and Applied Genetics* 110: 778-786.
17. 中川博視・田中大克・田野信博・永島秀樹 2006. 炭水化物供給能がイネの各種白未熟粒の発生に及ぼす影響. 北陸作物学会報 41: 32-34.
18. 中川博視・堀江武 1997. 温暖化, 炭酸ガス濃度上昇が作物生育に及ぼす影響. 土壌圏と地球環境問題 (木村真人編). 名古屋大学出版会, 名古屋. 186-202.
19. 中川博視・堀江武 1999. 高 CO₂ 濃度下での資源植物の環境応答反応. *環境技術* 28: 454-459.
20. 中川博視 2001. 温暖化による水稻収量と栽培地の変化. *農林水産技術研究ジャーナル* 24: 14-22.
21. 中川博視・堀江武 2003. 水稻栽培への影響. 「地球温暖化と日本」(原沢英夫・西岡秀三編著), 古今書院. 142-148.
22. 中川博視 2007. 地球環境変化の作物生産へのインパクト. *地球環境と作物* (巽二郎編著), 博友社. 23-35.
23. 中川博視・神田英司・大野宏之・吉田ひろえ・菅野洋光・鯨島良治・濱崎孝弘・根本学・中園江・大原源二・近藤始彦・石黒潔・渡邊好昭・長谷川利拓 2011. 水稻の移植水稻の移植栽培における晩限日の推定について. 農研機構 2011 年 4 月 28 日付資料, <http://www.naro.affrc.go.jp/narc/contents/files/0428.pdf>.
24. 塚口直史・中川博視・大野宏之 2012. 高温に負けないイネ栽培を目指して「手取川流域の明日をめざして 一人々の生活を支える水循環」. 石川県立大学出版会. 131-134.
25. 中川博視・大野宏之・中園江 2012. 気象情報と農業生産を結ぶ農業気象情報システム. *農村と都市をむすぶ*, No.725. 55-61.
26. 中川博視・菅野洋光・大野宏之 2014. 異常気象・温暖化への適応を支援する農業気象情報システム. *生物の科学 遺伝* 68: 76-81.
27. 中川博視 2014. 環境変動が国内の農業生産に及ぼす影響とその対策. *作物研究* 59: 55-58.