

# 気候と大気の変化が日本のコメ生産に及ぼす 影響の解明と予測

石郷岡康史

(農研機構・北海道農業研究センター)

Understanding and predicting the effects of climate and atmospheric changes on rice production in Japan

Yasushi ISHIGOOKA

(Hokkaido Agricultural Research Center, National Agriculture and Food Research Organization)

## 1. はじめに

この度は、伝統ある日本農業気象学会学術賞を賜り、大変光栄に存じます。ご推薦いただきました小林和彦先生、長谷川利拓氏、学会賞選考委員ほか関係者の皆様には、心よりの感謝を申し上げます。受賞の対象となりました研究は、私が 2020 年まで所属しておりました農環研(農業環境技術研究所, 農業環境変動センター, 農業環境研究部門と改名)において取り組んで参りました日本の水稻の温暖化影響の広域評価です。本研究に取り組む機会を与えていただき、研究を推進するにあたりご指導ご鞭撻、叱咤激励いただきました農環研の皆様をはじめ全ての方々に、先ずは厚く御礼申し上げます。

私の当学会との関りは、当時在学していた北海道大学農学部 堀口郁夫先生の薦めで卒論の内容を全国大会(1993 年, お茶の水女子大開催)で発表させていただいたことが始まりでした。この時のテーマは、衛星データを利用した土地利用と地表面温度に関する研究でした。当時まともにコンピュータに触ったことも無かった私が何とか取りまとめられたのは、農業物理学講座で同じテーマに取り組んでおられた井上聡氏(現東北農研)より衛星データを解析するためのプログラミングの基礎をゼロから教えていただいたお陰であります。これで大容量データ処理のノウハウが得られたことがその後の一連の研究の出発点となり、30 年を経て今回受賞の対象となった研究に繋がったものと確信しております。

## 2. 農業気候資源量と水稻ポテンシャル収量予測

農環研へ採用後に配属された当時の気候資源研究室では、後に室長となる鳥谷均氏と後藤慎吉氏がメンバーとして在籍しており、先任者である内嶋善兵衛氏や清野裕氏らによる農業気候資源量(作物栽培可能地域を説明する有効積算温度や、気候的潜在植生の生産力を表す純一次生産力)の空間分布特性に関する研究が継続的に取り組まれておりました。折しも地球温暖化問題が脚光を浴びており、予測される気候変動が農業生産力に与える影響が重要な研究テーマとして認識されて

いる状況でした。大学院生時代にメッシュ気象値作成に取り組んだ経験から(石郷岡ら, 1998)空間データの扱いに慣れていたこともあり、比較的難なくこのテーマに馴染めたかと思われま。そのような中、配属後の最初の仕事として、気候登熟量示数を利用したわが国の水稻のポテンシャル収量の将来予測を、新人研修でもお世話になった元室長の林陽生氏のアドバイスの下で取り組むこととなりました。気候登熟量示数はかなり以前に提唱された概念で、出穂期以降 40 日間を登熟期間として単位日照時間当たりの水稻収量(登熟量)は同期間の気温に依存し、21.4°Cで最大値を示す凸型 2 次曲線で表せるというものです。この考え方を取り入れ、日照時間の代わりに日射量を使用し、清野氏が開発した「アメダスメッシュ化データ」と農林水産省の作柄表示地帯別水稻統計資料を用いて再解析し、簡易ながら水稻ポテンシャル収量予測モデルを作成しました。これを使用し、温室効果ガス排出シナリオ IS92a に基づく 4 種の GCM を入力値として、温暖化により可能移植日が早まる効果と生育期間が短縮する効果を考慮し収量が最多になる最適移植日の分布を推定しました。その結果、最適移植日が現在より早期化するか晩期化するかは地域により異なる、最適な移植日を選択した場合でも全国平均収量は約 10%減少するということが示されました(林ら, 2001)。これらの結果は、その後国や自治体の資料に水稻温暖化影響の代表的成果として掲載された他、テレビや雑誌等のメディアで紹介されることもありました。このことは研究のモチベーションを大いに高めることになりましたが、同時に行った研究の成果を公表することに対する社会的責任の大きさを強く感じることもありました。

## 3. 広域水循環のモデル化

気候登熟量示数による水稻ポテンシャル収量推定への取り組みが一段落し、メッシュ気象データを活用した気候資源評価の新たな展開を模索していた頃、GEWEX や GAME といった広域水循環に関連する国際プロジェクトの様々な成果を目にするに従い、大陸スケールの水循環と農業水利用のシミュレーションに興味を持つようになりました。特に、東京大学の沖大幹先生の、グリッド標高値から作成した河道網で広域水循環が再現できるツールである“TRIP”に感銘を受けておりました。また、農環研の独法化による組織改編で所属が地球環境部となったこともあり、海外を対象とした研究が非常にやり易かった時期で

もありました。新生の気候資源ユニットリーダー鳥谷氏からの強い後押しもあり、農業水利用を考慮したユーラシア大陸東部の水循環モデルの開発に取り組んでみようと思に至りました。水循環を再現するための陸面過程のモデル化は私には敷居が高いものでしたが、その頃手にした FAO Irrigation and drainage paper 56 (いわゆる FAO56) にはモデル化に必要な地表面水収支過程や作物水需要に関する情報が広範かつ簡潔明瞭に記述されており、これをベースにモデル構築を始めてみることにしました。モデルスキームは、可能な限り実態をイメージできるようにとの考えで、最終的にグリッドベースではなく小流域ポリゴンと河道ラインデータの組み合わせで構築することとしました。この研究を進める上で幸運だったことは、大気陸面プロセスのスペシャリストである桑形恒男氏が東北農研から異動して来られたことで、モデル構築から解析方法、論文文化に至るまで強力なサポートを得ることができました。また、JIRCAS から異動して来られた大野宏之氏も広域熱水収支に造詣が深く、多くの有用な助言を頂くことができました。試行錯誤を繰り返し、ようやくアジアの全河道に“水が流れた”時には大きな達成感と喜びを覚えました。また、実測の河川流量を用いてモデル出力値を検証したところ、世界で標準的に使用されている既存の陸面モデルと比較しても遜色のない結果が得られたことに嬉しさが込み上げてきたものでした。しかし、ここから論文文化までの道のりが長く、数々のリジェクトを経て内容を練り直し、最終的に受理されたのは 2007 年でした (Ishigooka *et al.*, 2008)。なお、この論文は、誠に幸いなことに、国際水田・水環境工学会論文賞 (沢田賞) を頂くことができました。この研究成果は他の関連する成果と合わせて、博士論文として取りまとめることができました。学位取得の際、ご指導いただきました主査の北海道大学浦野慎一先生、また貴重なアドバイスをいただきました副査の先生方に、この場を借りて改めてお礼申し上げます。この広域水循環関連の研究成果は今回の受賞対象研究に直接関係するものではありませんが、研究を進める過程で習得できた、大容量データのハンドリングや GIS ソフトを利用した空間解析、計算結果のマップ画像としての大量出力に関する技術は、それに続く影響評価研究の基盤となったことは確かであると思われます。また、関連する各種研究集会に参加することで、気候変動分野における国内外の多くの先駆的な研究者の方々との面識を得たことは、その後の研究人生における大きな財産となりました。

#### 4. 日本のコメ生産への温暖化影響

2010 年度より環境省推進費 S8 プロジェクト (温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究) が開始されるとのことで、先行する S4 プロで農業関係課題を取りまとめておられた横沢正幸氏より、次期の S8 プロは農業サブ課題の代表を担当してみないかとのお勧めを受け、再び日本の水稻を対象とした気候変動影響に取り組むことになりました。以後、農環研の長谷川利拓氏、桑形恒男氏、西森基貴氏、そして私を中心メンバーとして、現在に至るまで継続的にこの課題に取り組むことになります。S8 プロジェクトは温暖化影響のみならず適応策の効果の評価まで実施することが求められておりました。そのため、水稻課題においても栽培の実態を考慮した収量予測と、温暖化影響を

軽減するための具体的で現実的な適応策を取り入れた場合の効果まで評価することが必要と考え、影響予測モデルとしては品種や作型といった栽培条件に基づく推定が可能なプロセスモデルを導入できないかと考えました。それまで、モデルの実行に必要な栽培条件関連情報を広域で面的に得ることが困難であることから、広域影響評価には統計モデルが利用されることが一般的でした。しかしながら、精密な地理情報の整備や統計情報の蓄積により、少なくとも国内の水稻影響予測のためのプロセスモデルの稼働は十分に可能な状況になっていると思われました。懸案となっていた影響予測に使用するモデルとして、長谷川氏を中心に開発されていた水稻生育収量予測モデル (H/H モデル: Hasegawa and Horie, 1997; Yoshida *et al.*, 2015) を使用させていただけたことは大変有難いことでした。このモデルは当時国内で栽培されていた水稻主要 15 品種に対応しており、地域毎の品種や作型の実態を反映した生育収量予測が可能となりました。光合成産物生成過程として、FvCB 光合成モデルと Ball-Berry 型気孔コンダクタンスモデルの組み合わせにより CO<sub>2</sub> 増収効果の算定が可能であることも、温暖化影響予測モデルとして優位性がありました。また、ポスドクとして在籍していた福井眞氏 (現水産資源研究所) の尽力により客観性の高い手法で改めて主要 15 品種の発育パラメータが最適化され (Fukui *et al.*, 2015)、モデルの全国への適用が可能になりました。

当初は影響評価の対象として収量のみを考えておりましたが、既に知られているように、近年の高温傾向により白未熟粒の増加に代表される外観品質の低下が顕在化しておりました。特に S8 プロが始まった 2010 年は夏季の平均気温としては観測史上最高となり、各地で一等米比率の低下が顕著に現れ、品質面での高温障害の重要性が再認識されました。そのため、温暖化影響評価としては対象が収量のみでは不十分で、品質も評価対象として考慮する必要があると考えました。しかし、外観品質を表す指標となる一等米比率と気象の関係は、品種や栽培管理の方法等により異なることから、全国一律に算定することは困難でした。そのため、先行して実施した近年の夏季の高温出現と水稻品質への影響に関する解析では、高温による外観品質低下の主要因である白未熟粒が登熟期前半の平均気温が 26°C を超過すると発生しやすくなるという知見に基づき、日平均気温 26°C を閾値として出穂後 20 日間の積算気温 (以下、HD\_m26) を高温による品質低下のリスクを表す指標として導入しました (Ishigooka *et al.*, 2011)。そこで今回も、この HD\_m26 を高温による品質低下リスク指標として採用することとしました。10km 空間解像度で整備した複数の気候シナリオにより今世紀末までのシミュレーションを行った結果、現行の移植日の場合には全国の生産量は概ね増加傾向である一方で、品質低下リスクの高い生産物の割合が温度上昇に伴い顕著に増加すること、生産量を維持し品質の低下を回避するための適応策として移植日の移動を考えた場合、気候シナリオにより最適移植日が早期化する地域と晩期化する地域があること、移植日移動の効果が顕著に現れる地域とそうでない地域が混在することなどが判明しました (Ishigooka *et al.*, 2017)。この研究成果は、日本の主食であるコメの生産量と品質の低下を防ぐ適応策を示しており、今後の日本の農業の指針の一つとなるものであることから社

会に与えるインパクトも大きいと評価され、2018 年度日本農業気象学会論文賞を頂くことができました。

S8 プロの後には、同様に日本全国を対象とした温暖化影響に関係する後継のプロジェクトへ幸いにも参画することができ、この課題に継続的に取り組み内容を発展させることができました。気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT: 文部科学省)とそれに続く地域適応コンソーシアム事業(環境省、農林水産省、国土交通省)では、研究成果の地域レベルでの具体的な適応策の立案実施への貢献が目標として掲げられておりました。この目的に対応するために影響予測計算の空間解像度が既往の 10km で十分かどうかを、先ず検討する必要があります。そのため、2 種の異なるメッシュサイズ(1km, 10km)の入力データを使用して、H/H モデルにより全国を対象とした水稻収量の計算を行い、それぞれのメッシュサイズによる計算結果を、100m メッシュを使用して算出した結果と比較し、地域ごとに適正なメッシュサイズについて検討しました。その結果、10km メッシュサイズでは甲信地方のような地形が複雑な地域では低温バイアスによる影響が見られましたが、1km サイズでは明確な影響は見られませんでした。これは、水田は低標高地域に立地することが多く水田とメッシュに標高差が生じることが原因であり、適切な影響評価を行うためには地域によっては 1km のサイズは必要であることを定量的に示すことができました (Ishigooka *et al.*, 2020)。2018 年に施行された「気候変動適応法」では、地方自治体においても地域気候変動適応計画を策定し気候変動へ適応を推進することが努力義務とされています。このニーズに対応できるよう、以後入力気象値のメッシュサイズ 1km を基本とすることとしました。これにより計算量は約 100 倍に増大してしまいましたが、影響評価結果の地域スケールでの精密な空間分布が得られるようになったことで自治体からのニーズが高まり、長野県、茨城県、香川県といった自治体との連携協力の下で研究を進められる機会が得られました。

2020 年に始まり現在進行中の環境省推進費 S18 プロジェクト(気候変動影響予測・適応評価の総合的研究)では、気候変動適応法に基づき国や自治体による適応への取り組みの支援のため、最新の影響・適応に関する情報を創出することが目標として明文化されています。そのため、品質に関する指標をより具体的な情報として発信できるようにする必要があったと考えました。そこで、西森氏が中心となり HD\_m26 と水稻外観品質に関する調査データから統計的に導き出された白未熟粒率推定モデル(西森ら, 2020)を導入し、品質の指標として白未熟粒率を使用することとしました。他方、将来想定される栽培環境における作物の応答特性を解明するための様々な環境制御実験が実施されており、水稻の栽培環境への生理応答に関する新たな知見が得られています。1998 年から 2018 年まで岩手県と茨城県の 2 か所で実施された開放系大気 CO<sub>2</sub> 増加(FACE)実験では、CO<sub>2</sub> による水稻の増収効果は高温により減衰するという増収効果の温度依存性(Hasegawa *et al.*, 2016)や、高 CO<sub>2</sub> で白未熟粒の発生率が増加する効果(Usui *et al.*, 2014; 2016; Hasegawa *et al.*, 2019)といった新知見が得られています。このような高温・高 CO<sub>2</sub> 複合影響が考慮されていない従来の影響予測モデルで予測した結果は、楽観的である可能性が示唆されました。そこで、実際に実験と解析を実施された長谷川氏と白

井靖浩氏(現中日本農研)の助言を得て、FACE 実験で得られたこれらの知見を組み込み、従来モデルを改良しました。この最新の影響予測モデルにより、全国 1km メッシュでの気候変動下における水稻収量と品質の再評価を行いました。予測の結果は、収量、品質とも、従来の予測よりも負の影響が強く示されました。特に収量については、発育期間の短縮や不稔の増加といった高温による減収効果に対し、高 CO<sub>2</sub> による増収効果による補填が高温条件では期待できなくなるため、従来のモデルでは増収とされた地域でも新たなモデルでは減収になる場合が顕著に見られました。以上の高温・高 CO<sub>2</sub> 複合影響の組み込みによるモデルの改良とその効果について取りまとめた論文(Ishigooka *et al.*, 2021)は IPCC 第 6 次評価報告書第 2 作業部会報告書にも引用され、また西森氏の主導でプレスリリースを行い、メディアを通じて多くの方に情報をお届けすることができたかと思われま。

## 5. おわりに

長きにわたり PC での作業に終始する研究に取り組んで参りましたが、このような研究は現場で汗を流し土にまみれ現象解明に取り組んでおられる方々からは厳しいご意見をいただくことも少なくありませんでした。多くはインターネットを通じて(労せずして)入手できる膨大な容量の気象データはモデル入力値として適切であるか、あるいはモデルで表現される個々のプロセスが現場の実態と乖離していないか等々に細心の注意を払うことは、発信する成果の信頼性に関わるため大変重要と考えております。他方、気候変動適応法の施行により、温暖化影響評価研究への社会的ニーズが大きく高まりました。適応法では、概ね 5 年毎の影響評価のアップデートとそれを勘案した適応計画の改定が求められています。研究サイドの対応としましては、栽培試験による作物の環境応答に関する新知見の蓄積と、それが反映された改良モデルによる信頼度の高い影響評価結果の提示のサイクルを概ね 5 年周期で繰り返すことが求められます(影響評価結果の“賞味期限”は 5 年ということになるでしょうか)。農業気象学への期待とニーズが益々高まることは確実と思われま。

今回の受賞は誠に光栄であるとともに、大変身の引き締まる思いです。社会のニーズに応えられる情報を発信できる研究を続けられるよう、今後とも精進してまいります。改めて、農環研に配属されて以来お世話になりました全ての先輩、同僚の皆様、北海道大学在学中にお世話になりました先生方、先輩方、同級生や後輩の皆様に心よりお礼申し上げます。また、現所属の北海道農業研究センターの皆様には、農環研での仕事の取りまとめや継続しての取り組みにご理解いただいた上に、適切な助言を頂くなど多大なご支援を頂きました。この場を借りて深謝いたします。

## 引用文献

- 石郷岡康史・町村尚・楊桂清, 1998: 地形および衛星データによる中国・寧夏の気温分布の推定. 農業気象 54, 133-142.  
西森森貴・石郷岡康史・若月ひとみ・桑形恒男・長谷川利拓・吉田ひろえ・滝本貴弘・近藤始彦, 2020: 作況基準筆データを

- 用いた近年の日本のコメ品質に対する気候影響の統計解析. *生物と気象* **20**, 1-8.
- 林陽生・石郷岡康史・横沢正幸・鳥谷均・後藤慎吉, 2001: 温暖化が日本の水稲栽培の潜在的特性に及ぼすインパクト. *地球環境* **6**, 141-148.
- Fukui S, Ishigooka Y, Kuwagata T, Hasegawa T, 2015: A methodology for estimating phenological parameters of rice cultivars utilizing data from common variety trials. *Journal of Agricultural Meteorology* **71**, 77-89.
- Hasegawa T, Horie T, 1997: Modelling the effect of nitrogen on rice growth and development. In *Applications of systems approaches at the field level*. (ed. by Kropff MJ, Teng PS, Aggarwal PK, Bouma J, Bouman BAM, Jones JW, van Laar HH). Kluwer, Dordrecht, pp. 243-257.
- Hasegawa T, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Yoshimoto M, Fukuoka M, Nakamura H, Shimono H, Okada M, Hatfield JL, Fleisher D, 2016: Rice free-air carbon dioxide enrichment studies to improve assessment of climate change effects on rice agriculture. In *Improving Modeling Tools to Assess Climate Change Effects on Crop Response* (ed. by Hatfield JL, Fleisher D). American Society of Agronomy, Madison, WI USA.
- Hasegawa T, Sakai H, Tokida T, Usui Y, Nakamura H, Wakatsuki H, Chen CP, Ikawa H, Zhang G, Nakano H, Matsushima MY, Hayashi K, 2019: A high-yielding rice cultivar “Takanari” shows no N constraints on CO<sub>2</sub> fertilization. *Frontiers in Plant Science* **10**, 1-15.
- Ishigooka Y, Kuwagata T, Goto S, Toritani H, Ohno H, Urano S, 2008: Modeling of continental-scale crop water requirement and available water resources. *Paddy and Water Environment* **6**, 55-71.
- Ishigooka Y, Kuwagata T, Nishimori M, Hasegawa T, Ohno H, 2011: Spatial characterization of recent hot summers in Japan with agro-climatic indices related to rice production. *Journal of Agricultural Meteorology* **67**, 209-224.
- Ishigooka Y, Fukui S, Hasegawa T, Kuwagata T, Nishimori M, Kondo M, 2017: Large-scale evaluation of the effects of adaptation to climate change by shifting transplanting date on rice production and quality in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* **73**, 156-173.
- Ishigooka Y, Hasegawa T, Kuwagata T, Nishimori M, 2020: Evaluation of the most appropriate spatial resolution of input data for assessing the impact of climate change on rice productivity in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* **76**, 61-68.
- Ishigooka Y, Hasegawa T, Kuwagata T, Nishimori M, Wakatsuki H, 2021: Revision of estimates of climate change impacts on rice yield and quality in Japan by considering the combined effects of temperature and CO<sub>2</sub> concentration. *Journal of Agricultural Meteorology* **77**, 139-149.
- Usui Y, Sakai H, Tokida T, Nakamura H, Nakagawa H, Hasegawa T, 2014: Heat-tolerant rice cultivars retain grain appearance quality under free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Rice* **7**, 6.
- Usui Y, Sakai H, Tokida T, Nakamura H, Nakagawa H, Hasegawa T, 2016: Rice grain yield and quality responses to free-air CO<sub>2</sub> enrichment combined with soil and water warming. *Global Change Biology* **22**, 1256-1270.
- Yoshida R, Fukui S, Shimada T, Hasegawa T, Ishigooka Y, Yakayabu I, Iwasaki T, 2015: Adaptation of rice to climate change through a cultivar-based simulation: a possible cultivar shift in eastern Japan. *Climate Research* **64**, 275-290.