

世界の農業生産に対する気候変動影響と適応策の評価

飯泉 仁之直

(農研機構 農業環境研究部門)

1. はじめに

このたびは、日本農業気象学会から推薦を得て、大変光栄にも第20回(2023年度)日本学術振興会賞を頂戴しました。推薦して下さった富士原和宏会長、平野高司前会長、推薦理由書を作成して下さった長谷川利弘領域長(当時、現エグゼクティブリサーチャー)、沖大幹先生(東京大学大学院工学研究科・教授)にお礼を申し上げます。

日本学術振興会賞は「我が国の学術研究の水準を世界のトップレベルにおいて発展させるためには創造性に富み優れた研究能力を有する若手研究者を早い段階から顕彰し、その研究意欲を高め、研究の発展を支援していく必要がある」との趣旨から創設され、人文学、社会科学、自然科学にわたる全分野を対象としています。推薦を得るには45歳未満などの条件があり、研究業績と将来性の観点から選考されます。

今回、491人の候補者の中から選ばれた受賞者25人に名前を連ねられたことは僥倖でした。賞の趣旨に恥じないよう、研究の発展にさらに精進します。本学会の推薦による日本学術振興会賞の受賞は伊藤昭彦会員(2017年度)に続いて2例目となり、農業気象学の研究内容や社会的意義について世の中に広く知ってもらいたい機会となりました。今回は30代前半の受賞者もいらっしゃいました。本学会の若手会員には、こうしたより大きな賞につながる道が本学会から通じていることを知り、ご自身の研究に邁進して頂ければと思います。

2. 受賞対象研究の概要

受賞対象となった研究は、本稿の表題にある「世界の農業生産に対する気候変動影響と適応策の評価」です。学術振興会から発表された私の受賞理由は次の通りです。

- 世界の主要な穀物を対象として収量や栽培条件などに関する長期の全球グリッドデータを構築するとともに、作物の気候応答に加え、播種日の移動や品種の変更などの適応技術を考慮した作物収量モデルを開発した。
- それにより、全世界の穀物生産の気候変動影響と適応策の効果を、より高い精度で定量評価することを可能にした。
- これらの研究成果は気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第6次評価報告書や国連食糧農業機関(FAO)の主要報告書で引用され、気候政策のみならず農業政策の立案にも貢献している。
- 主要な学術誌から多くの国際共著論文を公表しており、農学・地球科学・環境科学にまたがる学際的な研究分野

において国際的に広く認知されている。今後も世界をリードする研究者になることが期待できる。

気候変動の影響の顕在化と、対応のための国際交渉の進展が重要との社会の認識が今回の受賞を後押ししたと考えられます。以下、受賞対象となった研究について概要をご紹介します。

2.1 全球グリッド作物収量データの構築

空間詳細な作物生産の実態把握と、実態に基づく現実的な全球シミュレーションは、収量などの全球グリッドデータが構築されたことにより可能になりました。私は、農業統計データと衛星リモートセンシングから得られた植生指数を組み合わせて過去25年間の穀物収量の全球グリッドデータを2014年に公表しました⁸⁾。このデータセットが開発されたことにより、エルニーニョ・南方振動(ENSO)による生産変動を全世界についてマップ化できました⁷⁾。さらに、ENSOに代表される海洋の緩やかな変動が季節規模での気温・降水量の予測を可能にしていることに着目し、気象の季節予報を収穫前収量予測に活用することにより、年々の異常天候への対処と同時に今世紀半ば頃までの気候変動適応が可能になることを指摘しました⁶⁾。異常天候による生産影響の実態把握に加えて、過去30年間に世界の収穫面積の9~22%の地域で高温日数の増加により収量が不安定化していることを明らかにしました⁹⁾。これらの研究を通じて広域での生産変動について理解が進み、それまでに比べて格段に現実的な作物の全球シミュレーションが可能になりました。収量データセットは継続的に更新されており¹⁴⁾、近年は栽培暦についてもデータセットの開発が進んでいます²¹⁾。

私が構築した収量データセットは、米国ミネソタ大学が発表したデータセットと共に国際的な農業モデル相互比較・改良プロジェクト(AgMIP)などの関連する研究コミュニティにおいて広く利用されています^{2, 5, 20, 22)}。また、本データセット発表以降、作物のグリッドデータを構築する類似の研究が地球科学のデータジャーナルにおいて活発に発表されています。

2.2 気候変動の穀物収量への影響および適応

既に生じている気候変動影響の評価は、その必要性にも関わらず、解析技術的に困難でした。また、既存研究では、食料需要の増加や気候変動の進行に対して増収技術や適応策の開発・普及速度が十分であるのかについて答えることができませんでした。とりわけ適応策については地域性が高いことから、これまで実態が十分に把握されておらず、作物モデルに組み込むことが困難でした。

私は編集者として日本農業気象学会75周年記念書籍『Adaptation to Climate Change in Agriculture - Research and Practices』の出版に携わり²⁶⁾、様々な適応策がアジアの農業

生産現場で既に実施されていることを報告し¹³⁾、播種日の移動や品種の変更といった適応策を考慮できる全球作物モデルを開発しました¹⁰⁾。このモデルは日本を代表する全球モデルの一つとして AgMIP にも参加しています¹⁸⁾。開発したモデルを用いて、私は、気候変動が生じた現実の気候条件と気候変動がなかったと仮定した気候条件のそれぞれについて収量を推定して両者の差から過去の気候変動影響を評価する手法を開発し、主要穀物の収量に既に気候変動の影響が生じていることを明らかにしました¹²⁾。さらに、社会経済の将来シナリオと開発途上国への増収技術の普及を対応付けるとともに適応策を考慮した新たな影響予測を行い、気候変動が進行すると増収技術の普及にも関わらず収量増加が停滞することを指摘しました^{10, 25)}。

これらの研究で用いられた評価手法¹⁰⁾は、気候変動影響と適応策に加えて、増収技術の普及を考慮可能であり、世界の関連研究の動向に影響を与えました。例えば、この手法は鳥取大学乾燥地研究センター、東アフリカのスーダン農業研究機構と共同で、世界で最も高温のコムギ生産地域で必要となる高温耐性品種の開発速度を明らかにするために活用されました¹⁵⁾。

また、既に生じている気候変動影響を評価可能にした手法¹²⁾は、その後フランス国立開発研究所との共同研究により西アフリカ地域のミレットとソルガムに適用されました²³⁾。これらの論文の反響は大きく、IPCC 第2作業部会第6次評価報告書でのこれら2報の引用は14か所に及びます。同報告書の政策決定者向け要約が「農業生産性は全体的に向上してきたが、過去50年間、気候変動によってその伸び率は世界全体で鈍化しており(確信度が中程度)、主に中緯度から低緯度の地域で負の影響が観測されているのに対し、一部の高緯度地域では正の影響も起こった(確信度が高い)」と結論付ける根拠の一つになりました。さらにFAOの主要報告書⁴⁾でも引用され、世界の農業が気候変動に対応するための科学的根拠を提供しています。

2.3 適応策としての穀物収量の収穫前予測

高温や少雨といった異常天候を予測し、適切に対処し、毎年の生産被害を軽減できれば、長期的な気候変動にも適応が可能と考えられます。世界の食料機関が自国の生産動向に加えて世界の主要輸出国の生産動向を迅速に把握・対処できるよう私は気温と降水量の予報を利用した収穫3~6か月前の収量予測を食料機関の適応策として開発しました^{6, 11, 17)}。

収穫前予測については本学会の学術賞や文部科学大臣表彰若手科学者賞、日本気象学会堀内賞を受賞し、既に学術的に高い評価を得ていました。近年は、我が国の農林水産省食料安全保障室をはじめとする世界の食料機関の適応に資するために、韓国にある気象機関 APEC Climate Center (APCC) と共同で2019年から予測システムの試験運用を開始し、17か国で精度を検証しました^{1, 16)}。共同研究成果の継続利用に関する合意書が2023年に締結され、収穫前予測のAPCCでの実運用に向けた作業が現在進んでいます。

3. 今後の課題

最後に、私の研究分野に近い範囲で今後の研究動向について見通しを述べ、結びに代えたいと思います。

気候変動の悪影響に特に財弱な開発途上国が損失と損害(ロス&ダメージ)に対応するための新たな資金措置を運用化することが2023年11月にドバイで開催された国連気候変動枠組条約第28回締約国会議(COP28)において合意されました。これを受けて、FAOでは、開発途上国を支援するために、極端気象に伴う農林水産業のロス&ダメージを定量化する手法の開発を研究機関と協力して進めています^{3, 4)}。そこでの議論に貢献するために、イベントアトリビューション²⁸⁾の派生形であるインパクトアトリビューションの解析事例を蓄積し、広範な国・作物に適用できるように一般化することが求められています。

適応に関する研究については、農業分野の個別の適応策の効果を評価する研究に加えて、セクター横断的な統合評価を可能にするために「適応指標」の整理が今後進むと考えられます。国連が掲げる持続可能な開発目標において17の目標の進捗を評価するため定量化が可能な169のターゲットが定義されているように、セクターごとの適応の進捗を評価するための指標が定義されるイメージです。IPCCの第7次評価サイクルでは、第2作業部会評価報告書と別に、1994年に発行された気候変動影響と適応の評価に関するガイドラインの更新が2028年頃までに予定されています。農業気象学では適応に関連する研究が多く行われているため、第7次評価サイクルの進捗に従って明らかになってくる研究テーマに注視が必要です。

作物の全球グリッドデータの開発や全球シミュレーションに関連する分野は動きが激しくなっており、先を見通すことが難しくなっています。例えば、昨年2月に中国の研究チームが4km解像度でアジア域のコメ収量データセットを発表しました²⁴⁾。また、昨年6月には欧州の研究チームが1km解像度の全球日別気象データを発表しました¹⁹⁾。私は2022年度から科研費基盤研究(A)を得て、1km解像度で全球月別コメ収量データセットの開発を進めています。これらの新たなデータセットが発表されたことにより研究計画を見直しました。高解像度のグリッド収量データセットが利用可能になれば、それを利用したプロセスモデルや機械学習モデルの高度化が活発になることは自明です。多数のシナリオを考慮することは難しいかもしれませんが、今後数年のうちに1km解像度で作物の全球シミュレーションが行われるようになる可能性は高いと見ています。

謝辞

今回受賞対象となった研究は、共同研究者をはじめとする多くの方々のお力添えを得て形になりました。お礼を申し上げます。とりわけ、環境研究総合推進費のプロジェクトでは、気候変動に関する研究の最前線に触発され、多くのアイデアを得ました。同推進費S14のプロジェクトリーダーを務めた沖大幹先生が推薦理由書の作成を快く引き受けて下さいました。同推進費2-2005のプロジェクトリーダーを務めた平林由希子先生(芝浦工業大学土木工学科・教授)は、学術振興会賞の業績調書の

書き方についてご自身が受賞されたときの経験を惜しみなく教えて下さいました。気候変動関連の研究テーマの受賞としては、沖大幹先生、伊藤昭彦会員、平林由希子先生、藤森真一郎先生(京都大学大学院工学研究科・准教授)に続くことができ、嬉しい限りです。

直接の上長でもあった長谷川利拓エグゼクティブリサーチャーのお陰で、職場では闊達な議論をすることができました。また、IPCC 第2作業部会第6次評価報告書の統括執筆責任者を務められた視点から、求められている研究について多くの示唆を頂きました。農研機構では研究の主眼は当然、我が国の農業現場に置かれますが、全世界の食料生産を対象として研究することを温かく支援して下さいました気候変動適応策研究領域の皆様、とりわけ、宮田明元領域長、細野達夫元領域長、西森基貴領域長には感謝の念に堪えません。1980年代に農環研で世界の農業生産に対する気候リスクを研究した先達の足跡²⁷⁾があったことには大変勇気付けられました。

平田竜一会員、松田怜会員とともに編集に携わった日本農業気象学会 75周年記念出版書籍は今回の受賞業績のうち重要な位置を占めます。次世代活性化理事として出版に携わる機会を与えて下さった北野雅治元会長にはお礼を申し上げます。推薦に係る事務手続きでは井上聡会員理事、吉本真由美総務理事にお世話になりました。

授賞式には、大学院の学費を捻出してくれた母を同伴して出席しました。母が僅かでも報われた気持ちになればと思います。修士課程を修了後に就職した青果物卸売会社を1年足らずで退職し、気候学・気象学の門を叩いた2004年から約20年を経て、研究者として何とか形になりました。農業気象学の研究に携われるようにご指導下さった恩師の林陽生先生、木村富士男先生、農業環境技術研究所(当時、現農研機構農業環境研究部門)に就職後、多くの助言を下された横沢正幸元上席研究員(現早稲田大学人間科学学術院・教授)をはじめ、これまでご支援を賜った皆様にこの機会を借りてお礼を申し上げます。

引用文献

- Doi Y, Shin Y, Kim W, Choi J, Iizumi T, 2022: Assessing the subnational-level yield forecast skills of the 2019/20 season NARO-APCC Joint Crop Forecasting Service for Southern Hemisphere countries. *Journal of Agricultural Meteorology* **78**, 66–77.
- Elliott J, Müller C, Deryng D, Chrystanthacopoulos J, Boote KJ, Buchner M, Foster I, Glotter M, Heinke J, Iizumi T, Izaurralde RC, Mueller ND, Ray DK, Rosenzweig C, Ruane AC, Sheffield J, 2015: The Global Gridded Crop Model intercomparison: data and modeling protocols for Phase 1 (v1.0). *Geoscientific Model Development* **8**, 261–277.
- FAO, 2023: *Loss and Damage and Agrifood Systems – Addressing Gaps and Challenges*. FAO, Rome, 74 pp.
- FAO, 2023: *The Impact of Disasters on Agriculture and Food Security 2023 – Avoiding and Reducing Losses through Investment in Resilience*. FAO, Rome. 168 pp.
- Guilpart N, Iizumi T, Makowski D, 2022: Data-driven projections suggest large opportunities to improve Europe’s soybean self-sufficiency under climate change. *Nature Food* **3**, 255–265.
- Iizumi T, Sakuma H, Yokozawa M, Luo J-J, Challinor AJ, Brown ME, Sakurai G, Yamagata T, 2013: Prediction of seasonal climate-induced variations in global food production. *Nature Climate Change* **3**, 904–908.
- Iizumi T, Luo J-J, Challinor AJ, Sakurai G, Yokozawa M, Sakuma H, Brown ME, Yamagata T, 2014: Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nature Communications* **5**, 3712.
- Iizumi T, Yokozawa M, Sakurai G, Travasso MI, Romanenkov V, Oettli P, Newby T, Ishigooka Y, Furuya J, 2014: Historical changes in global yields: Major cereal and legume crops from 1982 to 2006. *Global Ecology and Biogeography* **23**, 346–357.
- Iizumi T, Ramankutty N, 2016: Changes in yield variability of major crops for 1981–2010 explained by climate change. *Environmental Research Letters* **11**, 034003.
- Iizumi T, Furuya J, Shen Z, Kim W, Okada M, Fujimori S, Hasegawa T, Nishimori M, 2017: Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes. *Scientific Reports* **7**, 7800.
- Iizumi T, Shin Y, Kim W, Kim M, Choi J, 2018: Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble. *Climate Services* **11**, 13–23.
- Iizumi T, Shioyama H, Imada Y, Hanasaki N, Takikawa H, Nishimori M, 2018: Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981–2010 compared with preindustrial levels. *International Journal of Climatology* **38**, 5405–5417.
- Iizumi T, Hirata R, Matsuda R 2019: *Adaptation to Climate Change in Agriculture – Research and Practices*. Springer, Singapore, 229 pp.
- Iizumi T, Sakai T, 2020: The global dataset of historical yields for major crops 1981–2016. *Scientific Data* **7**, 97.
- Iizumi T, Ali-Babiker IEA, Tsubo M, Tahir ISA, Kurosaki Y, Kim W, Gorafi YSA, Idris AAM, Tsujimoto H, 2021: Rising temperatures and increasing demand challenge wheat supply in Sudan. *Nature Food* **2**, 19–27.
- Iizumi T, Shin Y, Choi J, van der Velde M, Nisini L, Kim W, Kim K-H, 2021: Evaluating the 2019 NARO-APCC Joint Crop Forecasting Service yield forecasts for Northern Hemisphere countries. *Weather and Forecasting* **36**, 879–891.
- Iizumi T, Takaya Y, Kim W, Nakaegawa T, Maeda S, 2021: Global within-season yield anomaly prediction for major crops derived using seasonal forecasts of large-scale climate indices and regional temperature and precipitation. *Weather and Forecasting* **36**, 285–299.
- Jägermeyr J, Müller C, Ruane AC, Elliott J, Balkovic J, Castillo O, Faye B, Foster I, Folberth C, Franke JA, Fuchs

- K, Guarin JR, Heinke J, Hoogenboom G, Iizumi T, Jain AK, Kelly D, Khabarov N, Lange S, Lin T-S, Liu W, Mialyk O, Minoli S, Moyer EJ, Okada M, Phillips M, Porter C, Rabin SS, Scheer C, Schneider JM, Schyns JF, Skalsky R, Smerald A, Stella T, Stephens H, Webber H, Zabel F, Rosenzweig C, 2021: Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature Food* **2**, 873–885.
- 19) Karger DN, Lange S, Hari C, Reyer CPO, Conrad O, Zimmermann NE, Frieler K, 2023: CHELSA-W5E5: daily 1 km meteorological forcing data for climate impact studies. *Earth System Science Data* **15**, 2445–2464.
- 20) Kim W, Iizumi T, Nishimori M, 2019: Global patterns of crop production losses associated with droughts from 1983 to 2009. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **58**, 1233–1244.
- 21) Mori A, Doi Y, Iizumi T, 2023: GCPE: The global dataset of crop phenological events for agricultural and earth system modeling. *Journal of Agricultural Meteorology* **79**, 120–129.
- 22) Müller C, Elliott J, Chryssanthacopoulos J, Arneith A, Balkovic J, Ciais P, Deryng D, Folberth C, Glotter M, Hoek S, Iizumi T, Izaurralde RC, Jones C, Khabarov N, Lawrence P, Liu W, Olin S, Pugh TAM, Ray D, Reddy A, Rosenzweig C, Ruane AC, Sakurai G, Schmid E, Skalsky R, Song CX, Wang X, de Wit A, Yang H, 2017: Global gridded crop model evaluation: benchmarking, skills, deficiencies and implications. *Geoscience Model Development* **10**, 1403–1422.
- 23) Sultan B, Defrance D, Iizumi T, 2019: Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models. *Scientific Reports* **9**, 12834.
- 24) Wu H, Zhang J, Zhang Z, Han J, Cao J, Zhang L, Luo Y, Mei Q, Xu J, Tao F, 2023: AsiaRiceYield4km: seasonal rice yield in Asia from 1995 to 2015. *Earth System Science Data* **15**, 791–808.
- 25) Yoshida R, Iizumi T, 2023: Climate mitigation sustains agricultural research and development expenditure returns for maize yield improvement in developing countries. *Environmental Research Letters* **18** 044026
- 26) 飯泉仁之直・平田竜一・松田怜, 2019: 日本農業気象学会 75 周年記念出版「Adaptation to Climate Change in Agriculture - Research and Practices」の紹介. *生物と気象* **19**, 87–92.
- 27) 久保祐雄・谷信輝, 1982: 世界の食糧と異常気象. 農林統計協会, 東京, 311 pp.
- 28) 森正人・今田由紀子・塩竈秀夫・渡部雅浩, 2013: Event Attribution (イベントアトリビューション), *天気* **60**, 413–414.