

作物収量に対する気候変動の影響の広域予測に関する研究

飯泉 仁之直

国立研究開発法人 農業環境技術研究所

Forecasting the impacts of climate variability and change on crop yields at regional to global scales

Toshichika Iizumi

National Institute for Agro-Environmental Sciences, Japan

1. はじめに

このたびは、若輩の身ながら伝統ある日本農業気象学会学術賞を頂くこととなり、大変光栄に思うとともに、身の引き締まる思いが致します。推薦下さいました平野高司 編集委員長、また、大政謙次 学会長と鮫島良次 学会賞審査委員長をはじめとする学会理事からの激励と受け止め、格式ある賞に恥じないよう今後も精進します。今回、受賞の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支援を受けて形になりました。農業気象学分野の研究に携われるようにご指導頂いた恩師の林陽生 先生、木村富士男 先生をはじめ、これまでご支援を賜った皆様に改めてお礼を申し上げます。本稿では、以下、受賞対象となった研究の主要部分である広域作物モデルの開発と季節予測を用いた全球での作物収量変動予測、経験的な日射量推定手法の開発についてご紹介致します。

2. 広域作物モデルの開発

環境条件に対する作物生長・収量の応答を予測する数値モデル(作物モデル)の多くは圃場規模を対象としており、そうしたモデルでは栽培管理や品種特性などを表わすパラメータ値を圃場実験から得ることが一般的です。圃場規模の作物モデルを国や全球といった広域での気候変化リスク評価に適用する場合、入力データの入手可能性が制約となり、代表的な栽培地域にある地点を対象にモデルシミュレーションを行うこととなります。しかしながら、選定された地点は主要生産地域にある場合が大半で、主要でない生産地域を含む面的な評価には課題がありました。

機構的な作物モデルを広域に適用する難しさのため、広域でのリスク評価の手法は、重回帰式などの簡易収量モデルを用いる方法(Iglesias *et al.*, 2000)や国際的な研究ネットワークを構築して地点での評価を積み上げる方法(Rosenzweig and Parry, 1994)に限られていました。そこに、第三の手法として、対象とする時空間規模において重要な過程のみを機構的に扱い、それ以外の過程は大胆に簡略化するという考え方に基づく半機構的な広域作物モデルが、Andrew J. Challinor 教授(英国・リーズ大学)らにより、2000 年代中頃から登場してきました(Challinor *et al.*, 2004, 2009)。日本では、横沢正幸 上席研究員(現、静岡大学教授)の発案により、都道府県内の水田地域における平均的な気象条件と統計収量データから、SIMRIW モデル(Horie *et*

al., 1995)をベースとして、品種などに由来するパラメータ値を広域で決め直すことで作物モデルをアップスケーリングする手法が開発されました(Iizumi *et al.*, 2009)(手法を開発した当初、パラメータ値のキャリブレーションにより既存のモデルを広域化する手法とその手法を適応して得られた広域用パラメータ値とモデルのセットを PRYSBI と呼んでいました。このため、PRYSBI-1 や PRYSBI-1.1, PRYSBI-2 といったバージョンごとにベースとなるモデルが異なります。このため、便宜上、後になってから SIMRIW ベースの PRYSBI は PRYSBI-1 と呼ばれるようになりました)。

当時、このモデルには「遺伝的な背景があるパラメータ値を勝手に変更するとは如何なものか」との批判もありました。しかしながら、その後、広域水稲生育・収量予測モデルの都道府県規模のパラメータ値は、当該地域の主要品種のパラメータ値が持つ傾向と大きくは矛盾しないことが分かりました(Iizumi *et al.*, 2011)。一方で、冷害影響をモデル化する際に用いられる気温の閾値などは多分に経験的で、これらの値はシミュレーションする際のメッシュの大きさに依存することを、筑波大学の学生だった田中有紀子 氏と共に明らかにしました(Iizumi *et al.*, 2014c)。

当所は批判もあった広域作物モデルですが、我が国のコメ収量(横沢ら 2009, Iizumi *et al.*, 2011)と外観品質への気候変化リスク評価(Okada *et al.*, 2011)に利用されたほか、ベースとなるモデルを SWAT(Neitsch *et al.*, 2005)に置き換え、トウモロコシなどの畑作物にも拡張されました(PRYSBI-1.1 : Iizumi *et al.*, 2014b)。さらに、今回、論文賞を受賞した研究では、メッシュ内の環境条件や品種、栽培管理などの空間的不均一性をアンサンブルシミュレーションにより取り扱うという広域作物モデルの改良法を提案しています(Iizumi *et al.*, 2013b)。現在、広域作物モデルは、環境省環境研究総合推進費 S10「作物モデルの開発と水資源・土地利用との相互作用の分析(代表: 2012-2013 年は横沢正幸, 2014 年より西森基貴。期間: 2012-2016 年)」において、櫻井玄 氏(農環研)により、主要穀物(トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズ)を全球で取扱うことができる PRYSBI-2 へと拡張され(Sakurai *et al.*, 2014)、全球の穀物生産の気候変化リスク評価に適用されているほか(環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクト S-10, 2014)、農業モデル国際相互比較・改良プロジェクト(Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project, AgMIP, Elliott *et al.*, 2014)に貢献しています。

3. 季節予測を用いた全球での作物収量変動予測

任期付研究員に着任したことを契機に、以前から温めていた季節予測の農業応用に 2011 年から取り組み始めました。日本学術振興会の科研費「季節予報を用いた作物収量変動の予測可能性と予測制約要因の解明(代表: 飯泉。期間: 2011-2013 年)」を獲得できたため、農環研の食料生産変動予測リサーチ

現 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター

Present "National Agriculture and Food Research Organization, Japan"

<http://www.agrmet.jp/sk/2016/F-1.pdf>

2016 年 4 月 20 日 掲載

Copyright 2016, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

プロジェクト(代表:2011-2013年は横沢正幸,2014年より西森基貴。期間:2011-2015年)と協働できるように,作物収量変動の予測可能性のグローバル評価を研究課題としました。(独)海洋研究開発機構アプリケーションラボ(APL)の山形俊男 所長,佐久間弘文 主任研究員より季節予測の農業応用について打診を受けていたため,APLと農環研の共同研究「全球・複数作物を対象とする作物収量変動予測の精度評価とその周辺技術に関する研究(代表:横沢正幸。期間:2012-2013年)」は円滑にスタートを切ることができました。

グローバル評価を始めるにあたり,全球で時系列解析が可能なメッシュ収量データがないことが研究の妨げになることは明らかでした。そこで,各国の農務省から収量統計資料を収集したほか,海外の研究者の知人にもデータ提供を呼びかけました。最終的には,筑波大学の学生だった堤田・竹田昭宏氏と石川龍郎氏の努力により,欠損はあるものの,世界の主要生産国23ヶ国について1981-2010年の収量統計値が集まりました。加えて,国連食糧農業機関の国別収量統計値と衛星リモートセンシング(NOAA/AVHRR)から得られた植生指数を組み合わせると約120kmのメッシュ別の収量を推定する手法を開発し,統計値と推定値からなる全球収量データベースを整備しました(Iizumi *et al.*, 2014d)。

整備した全球収量データベースに加えて,世界最高水準の予測性能を持つAPLの季節予測データを使わせてもらい,「APLの大気海洋結合モデルSINTEX-Fによる気温と土壌水分量のアンサンブル季節予測と簡易収量モデルを組み合わせた場合,世界の収穫面積の約20%の地域でコメとコムギについては収穫3カ月前に不作(前3年平均収量比で5%以上の収量低下)を予測可能」とする評価結果(Iizumi *et al.*, 2013a)をNature Climate Change誌に発表することができました。

この評価結果は科学的には評価されたものの実用化にはさらに予測可能性を上げる必要があります。そこで,季節予測において最も予測精度が高いエルニーニョ予測と収量変動を結び付けられれば,収量変動の予測可能性が改善する作物・地域があるのではないかと考えました。それには,まず,複数のエルニーニョ年(ないしはラニーニャ年)の収量偏差の平均値が,通常年の収量偏差の平均値に対して有意に差があるかどうかを調べる必要がありました。その結果,コメとコムギだけでなく,トウモロコシとダイズについても,エルニーニョが平均収量に有意に差異をもたらす地域を特定することができました(Iizumi *et al.*, 2014a)。

さて,将来の気候変化に対する適応策の開発が国を挙げて進んでいますが,適応策の有効性を評価するうえで,気候の年々変動は最適な実験台です。地域・季節にもよりますが,多くの場合,今世紀半ば頃までの気温の上昇幅よりも現在の気温の年々変動幅の方が大きく(Deser *et al.*, 2012),気候の年々変動に起因する食料供給ショックに食料輸入国の政府や企業が適切に対応できるようになれば,長期的な気候変化への適応力は確実に高まります。このため,作物収量変動予測は,現在の異常気象による供給ショックへの対策であると同時に,食料輸入国の気候変化適応策と位置付けることができます。食料貿易のグローバル化と多くの国での食料輸入量の増加,気候変化に伴う極端な気候の増加を踏まえると,作物収量変動予測は全球でこそ行う意義があると考えています。今のところ中・高緯度の季節予測の精度には課題がありますが,だからこそ,全球収量変動予測は挑戦する価値がある研究課題だと考えています。

4. 経験的な日射量推定手法の開発

気候変化リスク評価や作物収量変動予測に機構的な作物モデルを用いる場合,入力気候データとして日射量の日別値が必要になります。しかしながら,気候変化リスク評価に私が携わり始めた2000年代中盤には,気候モデルから日射量が出力されていないことがままありました。そこで,環境省地球環境研究総合推進費S5「力学的手法と統計的手法を併用した農作物影響評価のためのダウンスケーリングの研究(代表:西森基貴。期間:2007-2011年)」において,気候モデルからほぼ必ず出力されている日最高・最低気温などから日射量を経験的に推定する手法を開発しました(Iizumi *et al.*, 2008)。その後,この手法は,ベトナムのメコンデルタ地域において,日射量の長期観測データがない場合でも適用できるように改良され(Iizumi *et al.*, 2012),さらに気候モデルによる2035年までの長期予測データにも適用できることを岡田将誌氏(農環研)と共に確認しました(Okada *et al.*, 2014)。これらの研究に携わっている間,私は裁量の余地が少ないポストドクの立場にありましたが,それにも関わらず,西森基貴 上席研究員には必要な予算と自由な研究環境を与えて頂いたことに改めてお礼を申し上げます。気候変化リスク評価における日射量データの必要性が気候モデル研究者に認識されるにつれ,第5次結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project phase 5, CMIP5)などでは多くの全球気候モデルの日射量が手に入るようになってきています。日射量の推定自体がやがては不要になるでしょうが,最近でも発展途上国を対象とした同様の趣旨の論文の査読を依頼されることがあり,当面は役立てて頂けると思います。

5. 古くて新しい作物収量変動予測

明治末期の東北地方の大冷害(1902-1910年)と関東地方の大霜害(1906年)が日本における農業気象学の始まりとなったことから明らかなように(日本気象学会,1998。「農業気象(学)」の項を参照),天候がもたらす食料生産変動メカニズムの解明と予測は,農業気象学における最も古典的な研究課題の一つです。一般に,学問分野の成熟に伴い,伝統的な研究課題に対する新たな貢献は難しくなるため,今回,作物収量変動予測に関する業績で受賞できた背景には,農業気象学およびその周辺分野の発展と情報通信技術の発展に恵まれた幸運があると考えています。

まず,気候モデリング分野において,ハイ・パフォーマンス・コンピューティングと衛星による全球気象観測の充実,それらを組み合わせるデータ同化技術の発達,高解像度大気・海洋結合モデルによる数か月から数十年先までの様々な時間規模での気候変動(変化)予測を可能にし,潤沢な気候予測データが応用研究に利用できるようになりました(野村・金間,2014)。作物収量変動予測研究に使用したAPLの季節予測は(独)海洋研究開発機構で運用されている地球シミュレータを利用しており,その成果を提供頂いたAPLの山形俊男 所長に改めて感謝申し上げます。加えて,衛星リモートセンシング分野が成熟し,植生指数を含む様々な衛星プロダクトが,私のような衛星リモートセンシングを専門としない者でも利用できるようになりました。さらに,農業地理学の成果として,限られた年についてはあるものの,空間詳細な全球の作物に関する数値地図が作成されたことも重要です。とりわけ,作物別の収穫面積分布を全球でマップ化したMonfreda *et al.* (2008)をはじめとするNavin Ramankutty 教授(カナダ・ブリティッシュコロンビア大学)のグループによる一連の研究はグローバル評価に不可欠でした。

また、2011年パリで開催された主要20ヶ国農業大臣会合(農林水産省, 2011)で食料・農産物価格の高騰が取り上げられるなど、価格高騰と世界の主要生産地域の異常気象、さらには気候変化との関連が社会的な関心を呼びました。このことも今回の受賞の後押しになったと考えています。農環研などの前身である農業技術研究所の久保祐雄 物理統計部長および谷信輝 気象科長が編著された『世界の食糧と異常気象』という本が農林統計協会から1982年に出版されています。この本(久保・谷, 1982)では、異常気象の作柄影響が世界の主要穀物輸出国について報告されているだけでなく、穀物輸出国の寡占化の兆候とそれに伴う複数の輸出国での異常気象による同時生産ショックの危険性、さらには適正な国際備蓄量の水準にも言及されており、現代にも通じる視点で問題に取り組んだ先人の見識の高さに驚かされます。天候と作柄を巡る問題は常にありますが、変化する気候の中で2050年には96億人に達すると見込まれる世界人口に食料を安定的に供給し続けるために、作物収量変動予測の精度を高めつつ、収量変動予測情報の社会実装を支援することが、現代の農業気象学に求められていると考えています。これは2015年時点での私の初心であり、所信でもあります。

今回、学術賞受賞にあたり、1964年に日本農業気象学会賞牌として谷信輝氏が授与され、その後、学会に寄贈されたメダルを希望し、頂戴することが叶いました。調整と来歴書の作成にご尽力頂いた廣田知良 学会表彰担当理事、小林和彦 学会副会長にはこの場を借りてお礼申し上げます。その後、手紙でのやり取りを経て、2015年4月17日に谷信輝氏にお目にかかり、メダルを希望して譲り受けたことを報告する機会を得ました。このメダルを学会に返す日を私もやがて迎えるでしょうが、それまではこの初心を忘れずに、力を尽くしたいと存じます。

6. おわりに

お礼を申し上げたい方は尽きませんが、学生を含む農業気象学会の若手研究者の方々に2つメッセージをお伝えして結びとします。一つは、学会長はじめ本学会の役員は、若手の研究成果に目を向けており、学会の最高位の賞の一つである学術賞でさえも若手に門戸が開かれているということです。この本学会役員に意気を感じて前向きに研究に励んでほしいと願っています。もう一つは、本学会の英文誌 *Journal of Agricultural Meteorology (JAM)* を今以上に有効活用してほしいということです。JAM は、平野高司 編集委員長の主導のもとで、丸山篤志 編集委員らの尽力により2013年11月付で *Science Citation Index* に登録されており、2016年度にはインパクトファクターも付与されます。JAM に掲載された岡田将誌さん(農環研)の論文(Okada *et al.*, 2009)が、気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)の第2次作業部会(WG2)第5次報告書(AR5)第7章に引用されるなど、農業気象学におけるJAMの存在感は今後、世界的にさらに高まると期待されます。論文発表の場として特に若手の方々にJAMを一層活用して頂ければ、編集委員を務めた者として幸甚です。

引用文献

Challinor, A. J., Ewert, F., Arnold, S., Simelton, E. and E. Fraser, 2009: Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. *Journal of Experimental Botany*, **60**, 2775–2789.

Challinor, A. J., Wheeler, T. R., Slingo, J. M., Craufurd, P. Q. and Grimes, D. I. F., 2004: Design and optimisation of a large-area pro-

cess-based model for annual crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, **124**, 99–120.

Deser, C., Knutti, R., Solomon, S. and Phillips, A. S., 2012: Communication of the role of natural variability in future North American climate. *Nature Climate Change*, **2**, 775–779.

Elliott, J., Muller, C., Deryng, D., Chryssanthacopoulos, J., Boote, K. J., Buchner, M., Foster, I., Glotter, M., Heinke, J., Iizumi, T., Izaurrealde, R. C., Mueller, N. D., Ray, D. K., Rosenzweig, C., Ruane, A. C. and Sheffield, J., 2014: The Global Gridded Crop Model inter-comparison: data and modeling protocols for Phase 1 (v1.0). *Geoscientific Model Development*, **8**, 261–277.

Horie, T., Nakagawa H., Centeno, H. G. S. and Kropff, M. J., 1995: The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. In *Modeling the impact of climate change on rice production in Asia* (ed. by Matthews, R. B., Kropff, M. J., Bachelet, D. and van Laar, H. H.). IRRI and CAB International, Wallingford, pp. 51–66.

Iglesias, A., Rosenzweig, C. and Pereira, D., 2000: Agricultural impacts of climate change in Spain: developing tools for a spatial analysis. *Global Environmental Change*, **10**, 69–80.

Iizumi, T., Luo, J.-J., Challinor, A. J., Sakurai, G., Yokozawa, M., Sakuma, H., Brown, M. E. and Yamagata, T., 2014a: Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nature Communications*, **5**, 3712, doi:10.1038/ncomms4712.

Iizumi, T., Nishimori, M. and Yokozawa, M., 2008: Combined equations for estimating global solar radiation: Projection of radiation field over Japan under global warming condition by statistical downscaling. *Journal of Agricultural Meteorology*, **64**, 9–23.

Iizumi, T., Nishimori, M., Yokozawa, M., Kotera, A. and Khang, N. D., 2012: Statistical downscaling with Bayesian inference: Estimating global solar radiation from reanalysis and limited observed data. *International Journal of Climatology*, **32**, 464–480.

Iizumi, T., Yokozawa, M. and Nishimori, M., 2009: Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**, 333–348.

Iizumi, T., Yokozawa, M. and Nishimori, M., 2011: Probabilistic evaluation of climate change impacts on paddy rice productivity in Japan. *Climatic Change*, **107**, 391–415.

Iizumi, T., Sakuma, H., Yokozawa, M., Luo, J.-J., Challinor, A. J., Brown M. E., Sakurai, G. and Yamagata, T., 2013a: Prediction of seasonal climate-induced variations in global food production. *Nature Climatic Change*, **3**, 904–908.

Iizumi, T., Sakurai, G. and Yokozawa, M., 2013b: An ensemble approach to the representation of subgrid-scale heterogeneity of crop phenology and yield in coarse-resolution large-area crop models. *Journal of Agricultural Meteorology*, **69**, 243–254.

Iizumi, T., Sakurai, G., and Yokozawa, M., 2014b: Contributions of historical changes in sowing date and climate to U.S. maize yield trend: An evaluation using large-area crop modeling and data assimilation. *Journal Agricultural Meteorology*, **70**, 73–90.

Iizumi, T., Tanaka, Y., Sakurai, G., Ishigooka, Y. and Yokozawa, M., 2014c: Dependency of parameter values of a crop model on the spatial scale of simulation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **6**, 527–540.

Iizumi, T., Yokozawa, M., Sakurai, G., Travasso, M. I., Romanenkov, V., Oettli, P., Newby, T., Ishigooka, Y. and Furuya, J., 2014d: Historical changes in global yields: Major cereal and legume crops from 1982 to 2006. *Global Ecology and Biogeography*, **23**, 346–357.

- Monfreda, C., Ramankutty, N. and Foley, J. A., 2008: Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, **22**, doi:10.1029/2007GB002947.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R., 2005: *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation (Version 2005)*. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture (USDA), Temple, 476 pp.
- Okada, M., Iizumi, T., Hayashi, Y. and Yokozawa, M., 2009: A climatological analysis on the recent declining trend of rice quality in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology*, **65**, 327–337.
- Okada, M., Iizumi, T., Hayashi, Y. and Yokozawa, M., 2011: Projecting climate change impacts both on rice quality and yield in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology*, **67**, 285–295.
- Okada, M., Iizumi, T. and Yokozawa, M., 2014: Applicability of empirical solar radiation models to altered climate. *Journal of Agricultural Meteorology*, **70**, 13–23.
- Rosenzweig, C. and Parry, M. L., 1994: Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*, **367**, 133–138.
- Sakurai, G., Iizumi, T., Nishimori, M. and Yokozawa, M., 2014: How much has the increase in atmospheric CO₂ directly affected past soybean production? *Scientific Reports*, **4**, 4978, doi:10.1038/srep04978.
- 環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクト S-10, 2014: 地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢 第1版, 地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究 (愛称 ICA-RUS プロジェクト), つくば, pp. 316, <http://www.nies.go.jp/ica-rus/report/version1/pdf/all.pdf> (2015年6月29日閲覧).
- 久保祐雄・谷信輝 編著, 1982: 世界の食糧と異常気象, 農林統計協会, 東京, pp. 311.
- 日本気象学会 編, 1998: 気象科学事典, 東京書籍, 東京, pp. 637.
- 農林水産省, 2011: G20 農業大臣会合の結果概要について, <http://www.maff.go.jp/j/kokusai/kokkyo/g8agri/2011g20.html> (2015年1月29日閲覧)
- 野村稔・金間大介, 2014: 農業をめぐるIT化の動き(2) —ハイパフォーマンスコンピューティングの活用事例を中心に—, 科学技術動向, **143**, 28–35.
- 横沢正幸・飯泉仁之直・岡田将誌, 2009: 気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価. 地球環境, **14**, 199–205.