

季節予報を用いたグローバルな穀物収量変動の 予測・情報提供システムの開発

—2021年度堀内賞受賞記念講演—

飯 泉 仁之直*

1. はじめに

この度は栄えある日本気象学会堀内賞を頂戴し、光栄です。堀内賞は「主に気象学の境界領域・隣接分野あるいは未開拓分野における調査・研究・著述等により、気象学あるいは気象技術の発展・向上に大きな影響を与えているもの」を顕彰するものですが、今回、農業分野における応用気象研究に対して同賞が贈られたことを農業気象学分野の研究者の一人として大変嬉しく思います。受賞記念講演の内容を『天気』に投稿する機会を頂いたので、受賞研究内容を踏まえつつ農業分野における応用気象研究、とりわけ気候変動適応研究について学会員の皆様にご紹介させて頂ければと存じます

2. 食料を巡る状況

2020年における日本の品目別自給率は、コメについては97%であり、ほぼ全量を自給できているものの、その他の穀物の自給率はコムギ15%、ダイズ6%、トウモロコシは1%未満です（農林水産省 2021）。すなわち、日本ではコメ以外の穀物については8~9割を海外から輸入しています。輸入先は主に米国、カナダ、ブラジルであり、これらの国で干ばつなどにより生産量が低下すると、国際市場価格が上がり、日本ではパンやカップラーメンなどが価格据え置きで内容量が減る（実質的に値上げ）といった影響を受けます。トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズは主要穀物と呼ばれ、

世界の農業由来のカロリー生産の約6割を占めます。このため、食料安全保障の観点からはこれらの主要穀物が特に重視されます。

世界の食料需要は2050年に2020年の1.6倍に増加すると予測されています。この需要増に対応するためには穀物収量（単位面積あたり生産量であり、生産性に相当）を年率2.4%で増加させる必要があります。しかし、これまで（1989~2008年）に達成できた収量増加は年率0.9%~1.6%であり、目標と実績との間には大きな乖離があります（Ray *et al.* 2013）。農業による環境負荷を減らすと同時に、今世紀半ばには97億人に達する世界人口に十分な量・質の食料を安価に供給していくことは世界の農業にとって大きな挑戦です。

3. 農業生産に対する気候影響

気候変動（地球温暖化）は農業生産にさらなる負担をもたらします。全球年平均気温偏差（対1991~2020年平均）のうち最も暑かった上位5か年を挙げると2015年以降に集中していることから温暖化の進行が窺えます（気象庁 2021）。観測された気候変動は既に穀物生産に影響を与えています。温暖化した実際の気候条件で推計した収量と、温暖化がなかったと仮定した気候条件で推計した収量とを比較すると、低緯度地域では収量が低下、高緯度地域では収量が増加したとの結果が得られています（第1図）。世界全体で集計すると温暖化の悪影響が好影響を上回り、温暖化による穀物生産被害は過去30年間（1981~2010年）で平均すると世界全体で年間424億ドルと見積もられています（Iizumi *et al.* 2018c）。これまでの温暖化による被害額が他のセクターについては不明なため、この穀物生産被害額の多寡は不明です。しかし、今世紀末を対象とする評価では、気候シナリオや社会経済シナリオ、年

* 農業・食品産業技術総合研究機構。
iizumit@affrc.go.jp

—2021年12月14日受領—
—2022年2月17日受理—

代によるものの、穀物生産被害額は他のセクター（例えば、屋外労働の暑熱ストレス）に比べて非常に小さいと考えられています（Takakura *et al.* 2019）。

こうした長期間にわたる気温や降水量の平均的な変化に加えて、異常天候や極端気象も生産に大きく影響します。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第2作業部会第5次評価報告書では、1990年以降、主に干ばつによる主要生産国での生産量低下に連動して食料価格が高騰したことが指摘されています（Porter *et al.* 2014）。2000年代に食料危機を2回（2008年と2010/11年）経験した後、2011年に開催されたG20カンヌサミットでは、世界の作物生育モニタリング能力を高めるため、および、農産物市場の透明性を高めるために2つのイニシアチブが開始されました。

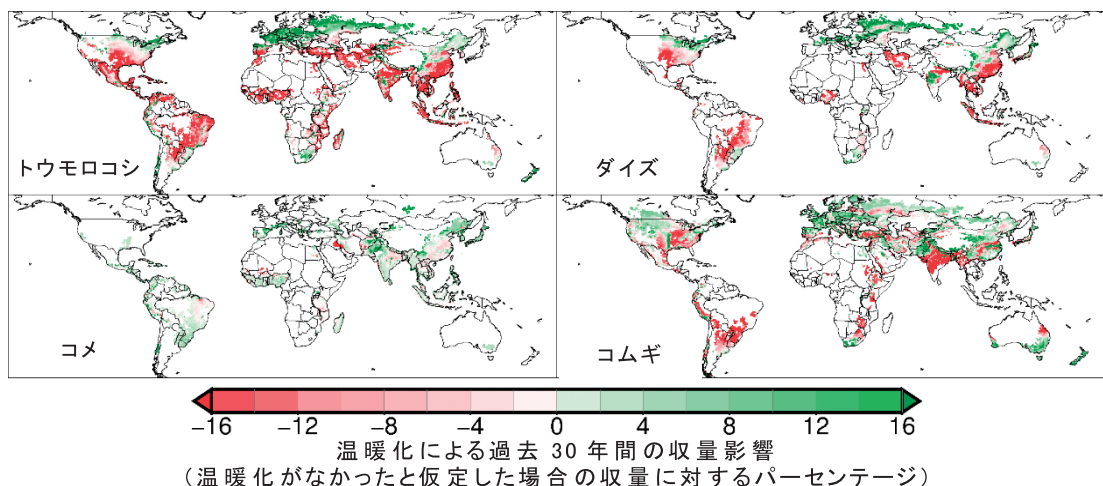
1つは地球観測衛星による全球農業モニタリングのためのイニシアチブ（GEOGLAM）、もう1つは主に農業統計に基づく食料需給・農産物価格モニタリングのためのイニシアチブ（AMIS）です。2017年11月のAMISのウェブページではラニーニャ発生について触れているように、食料機関は生産に影響する要因の1つとしてENSOなどの海洋大気振動現象にも関心を寄せています。

エルニーニョやラニーニャについては現在すでに相当の精度で発生が予測できることから、Iizumi *et al.* (2014) ではこれらの現象が発生した場合にどの地

域、どの作物が影響を受けるかを全球でマップ化しました（第2図）。トウモロコシの場合、通常年（エルニーニョとラニーニャのいずれでもない年）の収量に比べて、北米ではエルニーニョ年に収量が低下しますが、南米では収量が増加します。また、ダイズは北米ではエルニーニョ年に収量が増加します（Iizumi *et al.* 2014）。こうした知見は、2014年6月にエルニーニョの発生が予測された際に農林水産省食料安全保障室に情報提供されました（飯泉 2014）。また、国連食糧農業機関（FAO）は、2015/16年にエルニーニョが発生した際に、生産に悪影響を被る可能性がある国・地域に対して早期対応を促すためのレポートを公表しました（FAO 2016）。このように食料機関での気候予測情報や作物予測情報の活用が近年、広まりつつあります。これを受けて、ENSO以外の海洋大気振動現象についても世界各地の穀物の収量変動と対応付ける研究を進めています（Iizumi *et al.* 2021c）。

4. 気候変動適応

高温などの極端現象の増加も世界の穀物生産に影響を及ぼしています。過去30年間（1981～2010年）に世界の収穫面積の9～22%で収量が不安定化しており、その要因の3分の1は高温日数の増加であると推計されています（Iizumi and Ramankutty 2016；Iizumi *et al.* 2018a）。将来、温暖化がさらに進行すると収量はさ



第1図 温暖化による収量影響（Iizumi *et al.* 2018c の図を一部改変）。これまでの温暖化が過去30年間（1981-2010年）の平均収量に与えた影響を生理生態のプロセスに基づく全球作物モデルで推定した。温暖化を含む現実の気候条件と温暖化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、両者の差を温暖化の影響とした。赤色は温暖化により収量が低下したことを示す。緑色は温暖化により収量が増加したことを示す。白色は穀物が栽培されていない地域。

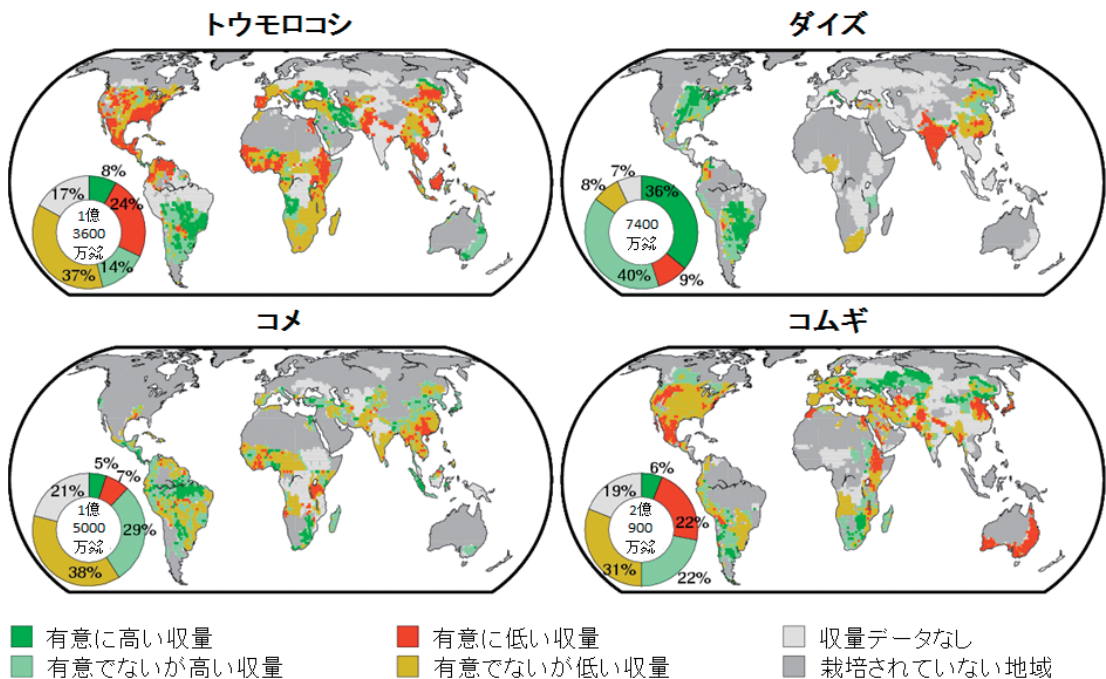
らに不安定化すると懸念されています。生育期間の気温と収量の関係を見ると、生育に適した気温条件下(最適気温)で収量が最も高くなります。最適気温から離れるに伴い、低温側、高温側のいずれでも収量は低下します。このため、温暖化により気温が高温側に移動すると、気温の年々変動が現在と同じ場合でも収量の年々変動は現在よりも大きくなります。この知見に基づく予測では、2℃上昇の場合と4℃上昇の場合をそれぞれ検討していますが、気温上昇に伴い、収量の平均が低下するとともに分散が大きくなることが指摘されています (Tigchelaar *et al.* 2018)。

このような気候変動に伴う収量の不安定化に対応するために季節予報データの活用を進めています。今世紀半ばまでの気候変動予測を見ると、長期平均気温の上昇幅よりも気温の年々変動幅の方が大きい。そして、気温など気象条件の年々変動が収量変動の主要因です。このため、来年は高温(あるいは少雨)になると予測された場合に、その悪影響を軽減できるように食料供給体制を適切に調整できれば、今世紀半ば頃までの平均的な気温上昇への適応力は自然と高まりま

す。さらに、こうした対応は気候変動への適応に際してだけでなく、現在気候下の異常天候の生産影響を軽減する際にも役立ちます。なお、温室効果ガス排出シナリオによっては今世紀末の平均気温の上昇幅は現在の気温の年々変動幅を超える場合があります。その場合は、高温耐性品種の導入や栽培地域の移動といったさらなる適応策とそのための費用が必要となります (Iizumi *et al.* 2020 ; Iizumi *et al.* 2021a)。

5. より現実的な作物予測サービスの実現に向けて

こういった考えに基づき、収穫3～6か月前の穀物のグローバルな収量変動予測サービス「NARO-APCC Joint Crop Forecasting Service」を韓国に事務局があるAPEC気候センター(APCC)と共同で開発しました。本サービスでは、11か国15気象センターからなる気温と降水量のマルチモデルアンサンブル予報データ(APCC 2021)を入力に用いて、播種前後から収穫3か月前まで毎月収量を予測します。本サービスの基本的なコンセプトは2013年に提案されていましたが(第



第2図 通常年と比較した場合のエルニーニョ年の平均の穀物収量の変動 (Iizumi *et al.* 2014の図を一部改変)。濃い緑色はエルニーニョ年と通常年の収量データを比較したときに、エルニーニョ年の収量が統計的に有意に高かった地域。赤色は同じ比較でエルニーニョ年の収量が有意に低かった地域。薄い緑色(オレンジ色)は通常年よりエルニーニョ年の収量が高い(低い)傾向があるが、有意な差ではない地域。なお、円グラフは2000年の世界の収穫面積(円グラフ中央に記載)に占める各地域の割合を示す。

3 図) (Iizumi *et al.* 2013), 2018年に継続的に運用可能な形で具体化しました (Iizumi *et al.* 2018b).

2019年6月からは本サービスの試験運用を開始し、登録された利用者(主にAPEC加盟国の食料機関・気象機関)に予測情報を送付しています(飯泉2020)。2021年12月現在、APCCでの継続的な運用に移行することを目指して協議中です。

試験運用が行われた北半球の2019年作の収量については予測精度の評価結果が公表されています。この評価では、実績との比較に加えて、欧州委員会共同研究センター(EC/JRC)の予測と米国農務省(USDA)の予測とを本サービスの予測を比較しました(Iizumi *et al.* 2021b)。USDAによる予測は生産者への聞き取りと圃場調査に基づいているため、トウモロコシの場合、シーズン最初の予測は8月に公表されます。一方、本サービスの予測はそれよりも5か月早い3月に最初の予測が行われます。USDAの予測に比べて誤差が大きいものの、播種前の時点で今作期の収量の概況を把握できる点が本サービスの特徴です(第4図)。この特徴は、欧州のコムギについてEC/JRCの予測と比較した場合も同様です。

6. 結び

世界人口は現在76億人であり、2050年に97億人に達すると見込まれます。増加する世界人口を養ううえ

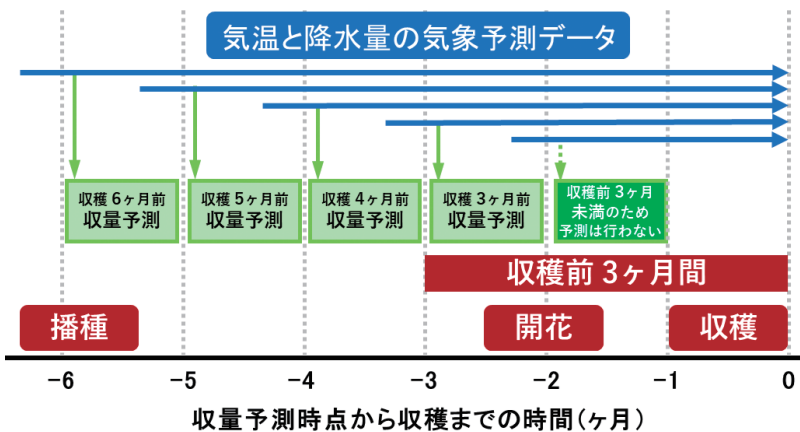
で、気候変動に適応した、より安定的な食料生産を実現する必要があります。そのための研究が、本稿で紹介した気候リスク評価や適応技術の開発といった応用気象研究です。こうした研究は気象学そのものを深化させるものではないかもしれませんが、気象学の知見や、それに基づく気象データプロダクトの普及につながるものです。そうした応用研究に対して今回、堀内賞が贈られたことを応用気象分野の研究者の一人として大変喜ばしく思います。

最後になり恐縮ですが、お世話になった方々のお名前を講演中に挙げるのが時間的に困難だったため、本稿の謝辞に記しました。恩師とこれまでの仕事仲間、今回、推薦の労をとって下さった皆様にお礼を申し上げます。

謝 辞

私は農業経済学分野で修士課程を修了しました。林陽生教授、木村富士男教授(当時:筑波大学)は、そんな私が博士後期課程に編入して気候学・気象学分野で学ぶことを快く受け入れて下さいました。山形俊男氏、佐久間弘文氏、Jing-Jia Luo氏(当時:海洋研究開発機構)は、グローバルな穀物収量変動予測サービスのプロトタイプを構築するにあたり強力に後押しして下さいました。同サービスを現在の形にするうえで Yonghee Shin氏、Jaewon Choi氏(APCC)との協力が不可欠でした。

前田修平氏、高谷祐平氏、仲江川敏之氏(気象研究所)には海洋大気振動現象と世界の収量変動を結び付けるにあたりお世話になりました。塩竈秀夫氏、花崎直太氏(国立環境研究所)、今田由紀子氏(気象研究所)にはd4PDFを用いた影響評価を行うにあたりお世話になりました。全員のお名前を挙げられないことが残念ですが、他にも多くの方から研究を進めるうえでお力添えを頂きました。今回の受賞に際しては、伊藤昭彦氏(国立環境研究所)が気象学の隣接分野における候補者



第3図 グローバルな穀物収量変動予測サービス「NARO-APCC Joint Crop Forecasting Service」の予測の概略(Iizumi *et al.* 2013の図を一部改変)。APCCでは毎月20日に来月以降の将来6か月間の気温と降水量の予測データを公表する。公表された気象データから予測される収量予測情報を本サービスでは翌月初旬に提供する。本サービスは、収穫前3か月間の気温と降水量の平均値を収量予測に用いるため、収穫までの期間が3か月未満になった場合には予測を行わない。

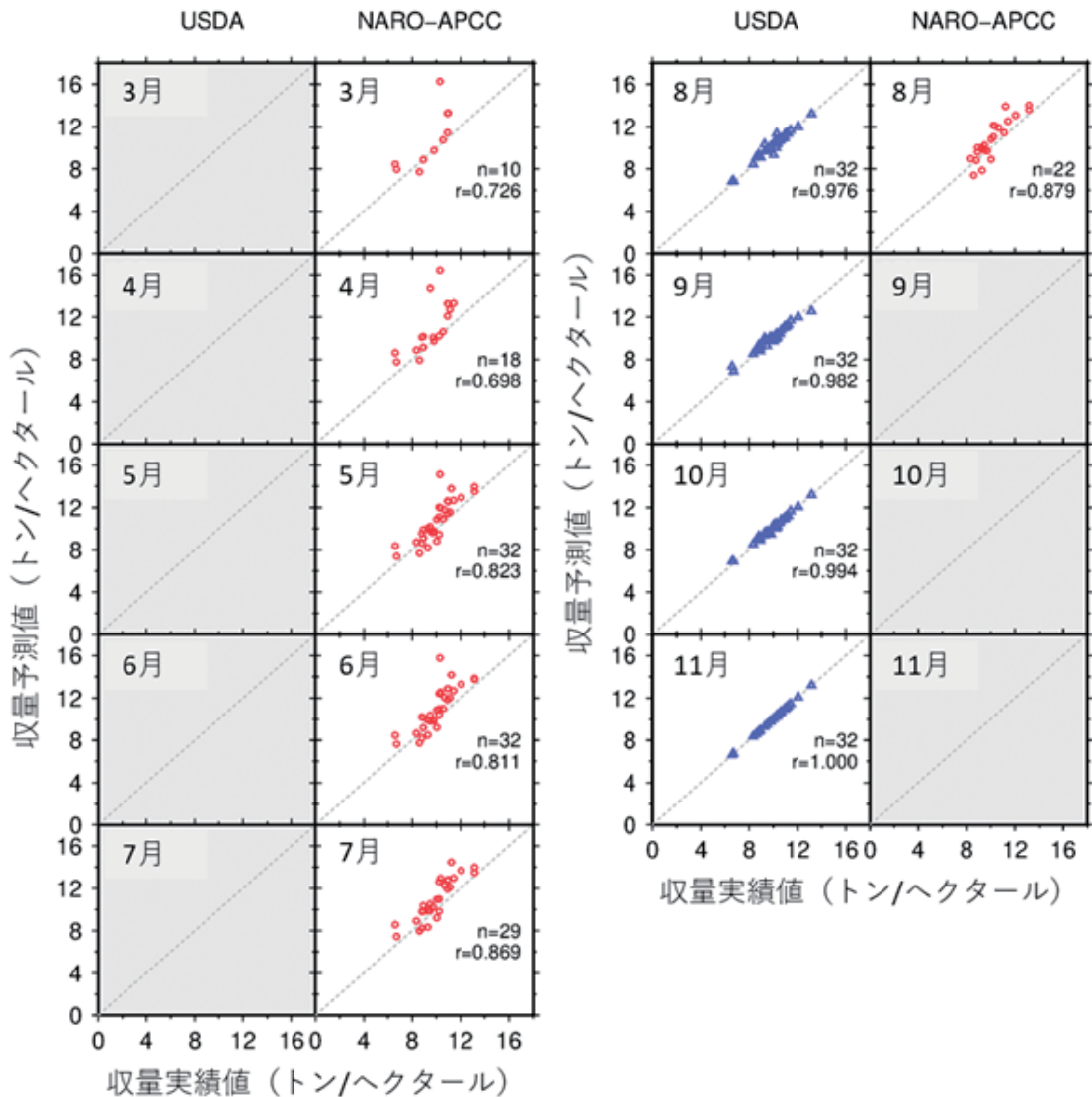
の発掘にご尽力下さり、西森基貴氏（農研機構）が推薦の労を執って下さいました。記してお礼申し上げます。

略語一覧

AMIS : Agricultural Market Information System
 APCC : APEC Climate Center

APEC : Asia-Pacific Economic Cooperation
 d4PDF : Database for Policy Decision making for Future climate change
 EC/JRC : European Commission's Joint Research Centre
 ENSO : El Niño-Southern Oscillation
 FAO : Food and Agriculture Organization of the United

2019年産米国トウモロコシの収量予測



第4図 2019年産の米国トウモロコシの収量予測 (Iizumi et al. 2021 b を一部改変)。それぞれの月の初旬に予測された収量と実績データとの比較。本サービスの予測 (NARO-APCC, 赤丸) と米国農務省の予測 (USDA, 青三角) の2種類を示す。予測対象は米国のトウモロコシを生産している32州であり、それぞれの点は各州の値を示す。図中の n は当該月に予測値が利用可能な州数、r は予測値と実績値の間の相関係数。

Nations

G20 : Group of Twenty

GEOGLAM : Group on Earth Observations Global Agricultural Monitoring

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

NARO : National Agriculture and Food Research Organization

USDA : U. S. Department of Agriculture

参 考 文 献

- APCC, 2021: APCC Seasonal Forecasts.
<https://www.apcc21.org/ser/global/methodology.do?lang=en> (2021.12.13閲覧)
- FAO, 2016: 2015–2016 El Niño–Early action and response for agriculture, food security and nutrition.
[https://www.fao.org/emergencies/resources/documents/resources-detail/en/c/340660/\(2021.12.10閲覧\)](https://www.fao.org/emergencies/resources/documents/resources-detail/en/c/340660/(2021.12.10閲覧))
- 飯泉仁之直, 2014 : 2014年のエルニーニョ発生による世界の穀物収量への影響の見通し. 海外食料需給レポート (Monthly Report : 7月).
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_rep/monthly/201407/pdf/full_report_1407a.pdf (2021.12.10閲覧)
- 飯泉仁之直, 2020 : 世界の食料機関に向けた穀物収量予測サーブス. 農研機構技報, 4, 6–9.
- Iizumi, T. and N. Ramankutty, 2016: Changes in yield variability of major crops for 1981–2010 explained by climate change. *Environ. Res. Lett.*, **11**, 034003, doi:10.1088/1748-9326/11/3/034003.
- Iizumi, T., H. Sakuma, M. Yokozawa, J.-J. Luo, A. J. Challinor, M. E. Brown, G. Sakurai and T. Yamagata, 2013: Prediction of seasonal climate-induced variations in global food production. *Nat. Clim. Change*, **3**, 904–908.
- Iizumi, T., J.-J. Luo, A. J. Challinor, G. Sakurai, M. Yokozawa, H. Sakuma, M. E. Brown and T. Yamagata, 2014: Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nat. Commun.*, **5**, 3712, doi:10.1038/ncomms4712.
- Iizumi, T., M. Kotoku, W. Kim, P. C. West, J. S. Gerber and M. E. Brown, 2018a: Uncertainties of potentials and recent changes in global yields of major crops resulting from census- and satellite-based yield datasets at multiple resolutions. *PLOS ONE*, **13**, e0203809, doi:10.1371/journal.pone.0203809.
- Iizumi, T., Y. Shin, W. Kim, M. Kim and J. Choi, 2018b: Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble. *Clim. Serv.*, **11**, 13–23.
- Iizumi, T., H. Shioyama, Y. Imada, N. Hanasaki, H. Takikawa and M. Nishimori, 2018c: Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981–2010 compared with preindustrial levels. *Int. J. Climatol.*, **38**, 5405–5417.
- Iizumi, T., Z. Shen, J. Furuya, T. Koizumi, G. Furuhashi, W. Kim and M. Nishimori, 2020: Climate change adaptation cost and residual damage to global crop production. *Clim. Res.*, **80**, 203–218.
- Iizumi, T., I.-E. A. Ali-Babiker, M. Tsubo, I. S. A. Tahir, Y. Kurosaki, W. Kim, Y. S. A. Gorafi, A. A. M. Idris and H. Tsujimoto, 2021a: Rising temperatures and increasing demand challenge wheat supply in Sudan. *Nat. Food*, **2**, 19–27.
- Iizumi, T., Y. Shin, J. Choi, M. van der Velde, L. Nisini, W. Kim and K.-H. Kim, 2021b: Evaluating the 2019 NARO–APCC Joint Crop Forecasting Service yield forecasts for Northern Hemisphere countries. *Wea. Forecast.*, **36**, 879–891.
- Iizumi, T., Y. Takaya, W. Kim, T. Nakaegawa and S. Maeda, 2021c: Global within-season yield anomaly prediction for major crops derived using seasonal forecasts of large-scale climate indices and regional temperature and precipitation. *Wea. Forecast.*, **36**, 285–299.
- 気象庁, 2021 : 世界の年平均気温偏差の経年変化 (1891～2020年).
http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html (2021.12.10閲覧)
- 農林水産省, 2021 : 総合食料自給率 (カロリー・生産額), 品目別自給率等.
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/attach/pdf/012-17.pdf (2021.12.13閲覧)
- Porter, J. R., L. Xie, A. J. Challinor, K. Cochrane, S. M. Howden, M. M. Iqbal, D. B. Lobell and M. I. Trnka, 2014: Food security and food production systems. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (C. B. Field *et al.*, eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 485–533.
- Ray, D. K., N. D. Mueller, P. C. West and J. A. Foley, 2013: Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLOS ONE*, **8**, e66428, doi:10.1371/journal.pone.0066428.
- Takakura, J., S. Fujimori, N. Hanasaki, T. Hasegawa, Y. Hirabayashi, Y. Honda, T. Iizumi, N. Kumano, C. Park, Z. Shen, K. Takahashi, M. Tamura, M. Tanoue, K. Tsuchida, H. Yokoki, Q. Zhou, T. Oki and Y. Hijioka,

2019: Dependence of economic impacts of climate change on anthropogenically directed pathways. *Nat. Clim. Chang.*, **9**, 737-741.

Tigchelaar, M., D. S. Battisti, R. L. Naylor and D. K. Ray,

2018: Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **115**, 6644-6649.

Development of Global Crop Forecasting System and Service Based on Seasonal Climate Forecasts

Toshichika IIZUMI*

* *National Agriculture and Food Research Organization, 3-1-3 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604 Japan*

(Received 14 December 2021; Accepted 17 February 2022)
