

# 農業分野におけるマルチ時空間スケールでの気候変動の影響と適応

Impacts and adaptation to climate change at different spatial scales in agriculture

西森基貴\*

## 1. はじめに

世界の年平均気温は  $0.72^{\circ}\text{C}/100$  年の値で上昇し、特に 1990 年代半ば以降、上昇が大きい。また日本の上昇率は  $1.26^{\circ}\text{C}/100$  年で世界平均よりも大きく、2000 年に入ってからの継続的な高温傾向が目立っている<sup>1)</sup>。さらに近年、「平成 30 年 7 月豪雨（西日本豪雨）」のほか、「29 年 7 月九州北部豪雨」、「27 年 9 月関東・東北豪雨（鬼怒川決壊）」「26 年 8 月豪雨（広島土砂災害）」等、連年にわたり日本各地で豪雨災害が発生していたところ、2019 年 9～10 月には、台風 15 号、19 号および温帯低気圧によるさらに甚大な災害が起こった。直近でも、2021 年 8 月中旬に、九州をはじめ全国各地で豪雨とそれに伴う災害が多く発生している。

2021 年 8 月 6 日に公表されたばかりの、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change：IPCC）第六次報告書第一作業部会報告<sup>2)</sup>では、世界平均気温は全ての排出シナリオにおいて、少なくとも今世紀半ばまでは上昇を続け、向こう数十年の間に二酸化炭素およびその他の温室効果ガスの排出が大幅に減少しない限り、21 世紀中に地球温暖化は  $1.5^{\circ}\text{C}$  ないし  $2^{\circ}\text{C}$  を超える、としている。また気象庁による将来予測<sup>3)</sup>では、今世紀末頃の年平均気温は日本平均で  $4.5^{\circ}\text{C}$  上昇するとともに、日降水量 200 mm 以上の大雨、時間 50 mm 以上の短時間強雨の発生回数はいずれも大きく増加し、無降水日の日数もまた全国で有意に増加するなど、いわゆる極端気象の増加も予測している。

それら気候変動の影響も既に顕在化し、例えばわが国の主食であるコメの減収や外観品質・食味低下は、その対策が急務であり<sup>4)</sup>、2018 年 12 月に施行された「気候変動適応法案」では地方自治体に、信

頼性の高い将来影響評価に基づく気候変動適応策の策定を努力目標化している。そのため、気候変動による影響について信頼性の高い予測へのニーズが高まっている。これらの背景のもと、ここでは日本と世界の農業における気候変動の影響を概説するとともに、今後の適応策の見通しについて述べる。

## 2. 日本の農業・コメ生産への影響と適応

水稻（コメ）はわが国の基幹作物であり、気候変動による収量や白未熟粒など外観品質への影響予測を、農研機構を含め様々な研究グループが継続的に実施している。農研機構はこれまで、品種や移植日、肥料投入量等の栽培管理データと、気温や日射量等の日々の気象データから、水稻の発育過程（出穂・開花期や成熟期）と玄米収量を予測する「水稻生育収量予測モデル」を構築し、水稻の収量予測などを行ってきた。ここで、 $\text{CO}_2$  濃度を現在よりも 200 ppm 高い約 580 ppm に制御した屋外栽培実験「開放系大気  $\text{CO}_2$  増加実験（Free air  $\text{CO}_2$  enrichment：FACE 実験）」を岩手県と茨城県で実施したところ、 $\text{CO}_2$  濃度の上昇により光合成が活発になる「増収効果」が栽培地の気温が高いほど小さくなること、高  $\text{CO}_2$  では外観品質が低下するなど新たな知見が得た。そこで農研機構では、上記の屋外栽培実験の結果に基づいて、高温と高  $\text{CO}_2$  の複合的な影響を考慮した水稻の生育収量予測モデルを構築し、これを用いて気候変動による国内のコメの収量（1981 年～2000 年の 20 年間の平均値に対する比としての相対収量）および外観品質の主要な指標である「白未熟粒発生率」への影響を予測した<sup>5, 6)</sup>。

まず複数の気候予測シナリオを入力して、日本全

\* 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）農業環境研究部門

体の1981～2100年のコメの相対収量および白未熟粒発生率を予測した結果（各シナリオの平均値）をまとめて、図1に示す。白色は従来のモデル、薄赤色は最新のモデルの結果をそれぞれ示し、箱ひげ図は、気候モデルの違いによる結果のばらつきを示す。横線は、上から最大値、75、50、25パーセントイル値、最小値を、黒丸は平均値を表す。

温室効果ガスの排出によってCO<sub>2</sub>濃度が上昇し続け日本での気温上昇が大きくなる条件（温室効果ガス排出シナリオのRCP8.5）で計算した相対収量は、1981～2000年の20世紀末を基準に、従来の予測モデルでは今世紀中頃までは増収傾向、それ以降は減収に転じ今世紀末は20世紀末と同等に戻る。これに対し最新の予測モデルでは、従来のモデルでの算定値を下回り、その差は年代が進むにつれて拡

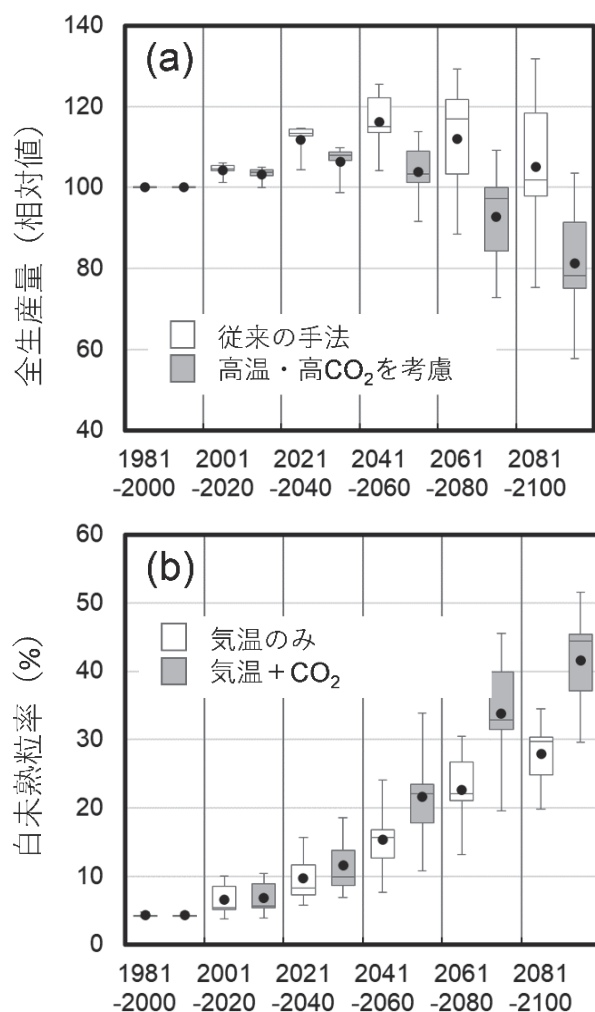


Fig.1 Time series change in (a) total rice production and (b) percentage of chalky grain estimated by the previous model and by the modified model in RCP8.5.

図1 RCP8.5シナリオを基に予測された水稻の(a)相対収量および(b)白未熟粒発生率の20年毎の全国平均の推移。文献6)を一部改変。

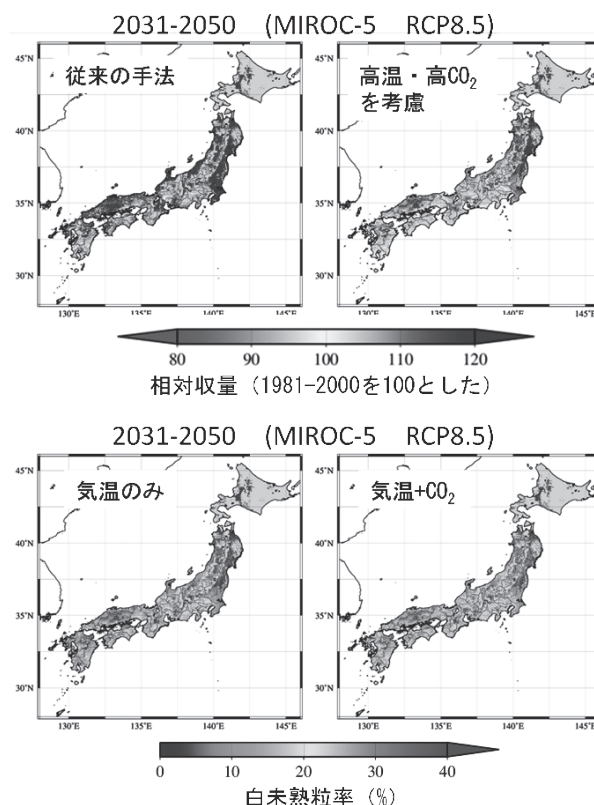


Fig.2 Spatial distribution map of 20-year average of (upper) relative yield (percentage of that of baseline period, 1981-2000) and (lower) percentage of chalky grains under RCP8.5 in the mid period (2031-2050).

図2 最新の予測モデルと従来の予測モデルによる今世紀半ば(2031-2050年)コメの(上)相対収量算定値および(下)白未熟粒率推定値の分布の比較。文献6)を一部改変。

大、今世紀末には約80%に減収すると予測された(図1a)。また白未熟粒発生率について、収量と同様にCO<sub>2</sub>濃度が上昇し続ける条件の複数の気候予測シナリオを用いて予測したところ、気温のみを考慮した従来の推定モデルでは、白未熟粒発生率は、今世紀半ばでは約15%、今世紀末では約30%と予測したのに対し、気温とCO<sub>2</sub>濃度を考慮した最新の推定モデルでは、白未熟粒は、今世紀半ばでは約20%、今世紀末では約40%と予測された(図1b)。

次に、気候モデルMIROC-5(気温上昇の予測が中庸)によるRCP8.5での今世紀中頃(2031～2050年)の予測で、相対収量と白未熟粒発生率への影響の空間分布をみる。いずれも、複数の気候予測シナリオ(5種の気候モデル(GCM)×2種の温室効果ガスシナリオ(RCP))を入力した結果のうち、気温変化が中庸なMIROC5モデルとCO<sub>2</sub>濃度が上昇し続ける温室効果ガスシナリオRCP8.5の組み合わせの結果のみ示している。

相対収量は、従来の予測モデルでは限られた地域

以外では青色系が目立っており増収が予測されている（図2左上）が、改良された最新の予測モデルでは、青色系の収量増加域が狭くなり、黄色から赤色系の減収域が広い範囲に拡大している（図2右上）。同様に品質に関して白未熟粒発生率は、気温のみの従来の推定モデル（図2左下）よりもCO<sub>2</sub>濃度も考慮した最新の推定モデルの方が高くなっており、黄色から赤系の白未熟粒多発地域が広がっている（図2右下）。

このほかの農作物では、まず果樹ですでに、りんごやぶどうの着色不良・着色遅延等が報告され、将来はウンシュウミカンやりんご栽培適地の北上により、安定生産と供給が不安視されている。またコムギでは、高温による登熟期間短縮で減収・品質低下等が予測されている。茶では晩霜凍霜害の影響が見られ、露地野菜では収穫期が早まるほか、生育障害の発生頻度の増加も報告されている。施設野菜では、トマトの着果不良、裂果、着色不良と、イチゴの花芽分化の遅延等が、さらに花きでは、高温による開花期の前進・遅延、奇形花、短茎花、茎の軟弱化等の生育不良等が見られるなど、気候変動の農業影響は多岐にわたっている<sup>4)</sup>。

### 3. 世界の農業・食料安全保障への影響

気候変動下で将来にわたり、世界的に穀物収量を増加させていくためには、対応する技術の開発と普及が、特に影響が大きい低緯度、熱帯亜熱帯地域の開発途上国で急がれる。しかしながら、それに必要な開発資金の提供のための科学的根拠、すなわち温暖化影響の定量的評価はこれまで困難だった。

そこで農研機構ではまず、過去の温暖化が主要穀物の過去30年間の平均収量に与えた影響を世界全体について評価した<sup>7,8)</sup>。図3Aは過去30年間（1981-2010年）における世界平均収量への温暖化影響を、図3Bはそれを換算した年あたりの世界全体の被害額を、それぞれ示す。収量影響は、温暖化がなかったと仮定した気候条件での収量に対する、温暖化を含む現実の気候条件下での収量の増減（%）で、生産額影響（被害額）は収量影響に収穫面積と生産者価格を乗じて計算した。結果として、いずれの穀物も温暖化により高緯度で増収、低緯度で減収となり、全球平均した収量低下割合は、トウモロコシで4.1%、コムギで1.8%、ダイズで4.5%となった（図3A）。これらの値に国別の収穫面積（1981-2010年における各年の値）と生産者価格（2005-2009年の平均値）を乗じて生産被害額を算出したところ、

世界全体で年間424億ドルに上った（図3B）。つまり、すでに気候変動による主要穀物の生産被害が生じており、温暖化が進行すると年間の被害額はさらに増加する恐れがある。

ところで、食料の過半を輸入に頼る日本では、これら気候変動影響のほか、特に世界の主要生産国における異常気象・極端現象に注目する必要がある。2014年春に東太平洋の海面水温が上昇し世界に異常気象をもたらす「エルニーニョ現象」の発生が予測され、食料需給に関心が高まっていった。この時には世界的な問題とはならなかったが、農研機構では現在、季節予報を用いた世界的な収量予測手法の実用化に向けた取り組みを進めている。具体的には、APEC気候センター（APCC）と共同で、穀物の世界的な収量変動（対前年の収量増減）を予測する方法を新たに開発した<sup>9,10)</sup>。5つの気象機関が作成する短期気候予測（季節予測）を利用することにより、トウモロコシ、ダイズ、コメ、コムギの収量を、前年からの変動という形で、世界の収穫面積の約1/3で収穫3ヵ月前に予測可能とした。図4は、収穫3ヵ

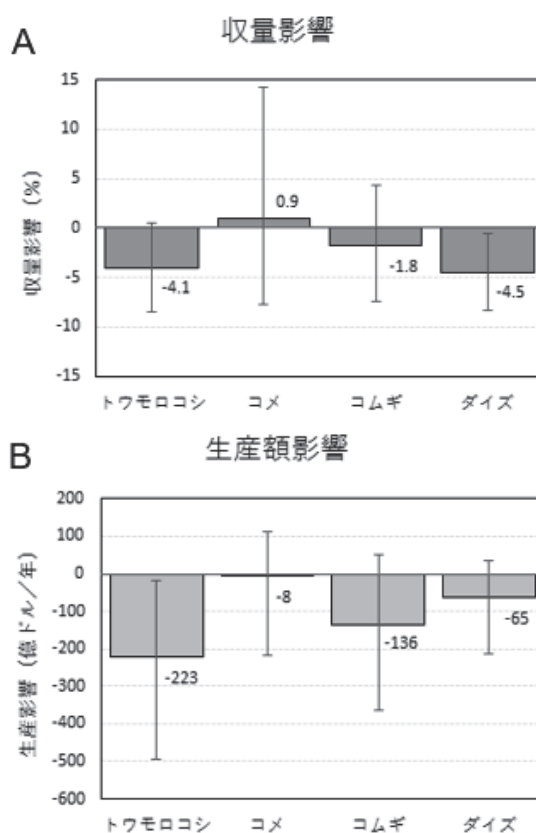


Fig.3 Past climate change impact on (A) crop yield production values and (B) and their monetary value of damages in recent years.

図3 過去の温暖化による近年の(A)収量影響および(B)生産額影響(被害額)。文献8)を一部改変。



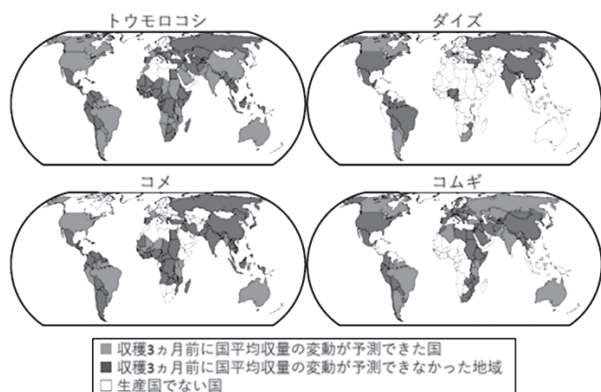


Fig.4 Areas where yield variability could be predicted 3 months before harvest.

図4 収穫3ヵ月前に収量変動を予測できた地域. 文献10)を一部改変.

月前に APCC が作成した生育後期3ヵ月間の気温と降水量の予測データを、120 km メッシュごとで収量予測式に入力した結果である。実際の収量変動を予測できた地域（オレンジ色）と予測できなかった地域（黒色）に分けられるが、オーストラリアのコムギなど日本の輸入先を含む世界の生産国の約1/4で、国別の収量変動予測もできるようになった。なお農研機構では、APCC での実運用を目的に、この方法を用いた全世界対象の収量変動予測サービスを国際機関向けに開発しており、2023年までのWEB ページでの収量予測情報の提供を開始する予定である<sup>11)</sup>。

さらに、農研機構を中心とした研究グループは、生産費用と収量の関係をもとに、気候変動が世界の主要穀物の生産に及ぼす影響とその適応に要する費用を試算した<sup>12,13)</sup>。図5では、気温上昇が世界の穀物生産に引き起こす生産被害額、およびそのうち対策により軽減できる被害（適応費用）と対処しきれずに生じる被害（残余被害）の内訳を示す。棒中の数値は内訳の金額、棒の上の数値は合計金額（いずれも億ドル）である。

対工業化以前2℃の上昇では、温暖化がない場合と比較して世界全体の生産額は年間800億ドル相当減少し、このうち610億ドルについては投入資材を追加するなどの適応を図ることで被害の軽減が可能であるものの、対処しきれずに生じる残余被害が190億ドルであると推定された（図5）。つまり、気温上昇が進むと、適応に要する費用と残余被害がともに増大することから、温室効果ガスの排出削減等により気候変動の進行を抑えることと、さらに気温が上昇した場合に備え、栽培作物の変更や灌漑設備の整備等のより大きな変化を伴う対策の検討が必要

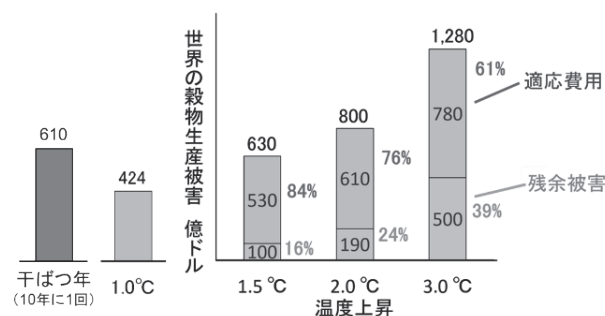


Fig.5 The production damage caused to global cereal production by a 1.5°C, 2°C, or 3°C increase in average temperature due to climate change, with a breakdown of the damage that can be mitigated by measures (adaptation costs) and the damage that cannot be addressed (residual damage).

図5 気候変動による1.5℃、2℃、3℃の平均気温上昇が世界の穀物生産に引き起こす生産被害額、およびそのうち対策により軽減できる被害（適応費用）と対処しきれずに生じる被害（残余被害）の内訳. 文献13)を一部改変.

である。

#### 4. まとめと展望

まず、気候変動による国内のコメ収量および外観品質への影響を予測した結果、従来のモデルによる予測と比べ、最新のモデルではコメの収量の減少や、外観品質の低下がより早く深刻化することが分かった。得られた成果は、このような被害を軽減するために生産現場で必要とされる高温耐性品種や栽培管理技術の導入の目安、および国・自治体による気候変動適応計画の策定や更新の際の重要な基礎情報となる。

次に、世界の農業への影響について、農研機構の研究例を紹介した。主な結果として、温暖化での穀物生産被害は世界・過去30年平均で年間424億ド

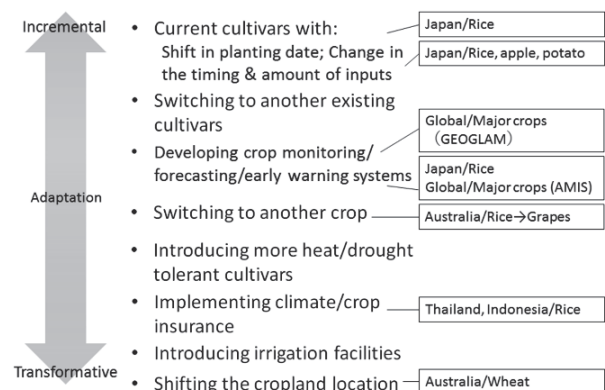


Fig.6. Three qualitative categories of emerging adaptations in agriculture.

図6 農業における新たな適応の3つの質的カテゴリ. 文献14)を一部改変.

ルであること、世界の穀物収穫面積の3分の1で3ヶ月前に収量が予測可能になったこと、および世界の穀物生産における温暖化適応費用は、対工業化以前2℃で年間610億ドルとなったことである。

これらの結果から、温暖化適応策の開発・普及、そのための投資が緊急に必要であることがわかる。現在、農業における気候変動への新たな適応には、多種多様な方法が存在するが、Iizumi<sup>14)</sup>は、個々の適応策を、「incremental：漸進的」、「intermediate：中間的」、「transformative：変革的」の3つのカテゴリーに分類した(図6)。対象とする時空間スケールに応じた、適切な適応策の評価が望まれる

## 参考文献

- 1) 気象庁, 気温・降水量の長期変化傾向(2021年8月17日閲覧), <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/index.html>
- 2) IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis(第6次報告書第一作業部会報告). 政政策決定者向け要約(SPM)の概要(ヘッドライン・ステートメント)の暫定和訳(2021年8月17日閲覧), <http://www.env.go.jp/press/109850/116628.pdf>
- 3) 文部科学省・気象庁, 日本の気候変動2020 - 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書 - (2021年8月17日閲覧), <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>
- 4) 農林水産省, 農林水産省気候変動適応計画(2021年8月17日閲覧), <http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/tekioukeikaku.html>
- 5) Y. Ishigooka, T. Hasegawa, T. Kuwagata, M. Nishimori and H. Wakatsuki, 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. *J. Agric. Meteorol.*, **77** (2), 139-149 (2021).
- 6) 農研機構, プレスリリース(研究成果)気候変動による水稻(コメ)の収量や外観品質への影響は従来の予測以上に深刻である - 高温と高CO<sub>2</sub>の複合影響を組み込んだ最新のモデルによる予測 - (2021年7月19日付). [https://www.naro.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/niaes/143133.html](https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/niaes/143133.html)
- 7) T. Iizumi, H. Shioyama, Y. Imada, N. Hanasaki, M. Nishimori et al., Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981-2010 compared with preindustrial levels. *International Journal of Climatology*, <https://doi.org/10.1002/joc.5818> (2018).
- 8) 農研機構, プレスリリース(研究成果)地球温暖化による穀物生産被害は過去30年間で平均すると世界全体で年間424億ドルと推定(2018年12月11日付). [https://www.naro.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/niaes/120453.html](https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/niaes/120453.html)
- 9) T. Iizumi, Y. Shin, W. Kim, M. Kim and J. Choi, Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble, *Climate Services*, <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.06.003> (2018).
- 10) 農研機構, プレスリリース(研究成果)世界の穀物収穫面積の3分の1で3ヶ月前に収量が予測可能に - 各国の食糧機関向けの収量予測サービス実現に向けて前進 - (2019年1月16日付). [https://www.naro.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/niaes/120985.html](https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/niaes/120985.html)
- 11) 農研機構, プレスリリース(研究成果)全世界を対象とした穀物の収量予測情報を提供 - サービスの速報性と予測の精度を確認し本格運用へ前進 - (2021年8月19日付).
- 12) T. Iizumi, Z. Shen, J. Furuya, T. Koizumi, M. Nishimori et al., Climate change adaptation cost and residual damage to global crop production. *Climate Research*, **80**, 203-218 (2020). <https://doi.org/10.3354/cr01605>
- 13) 農研機構, プレスリリース(研究成果)世界の穀物生産における温暖化への適応費用を試算 - 2℃上昇で年間610億ドル, 対策困難な被害の増加も - (2020年10月1日付). [https://www.naro.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/niaes/136782.html](https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/niaes/136782.html)
- 14) T. Iizumi, Emerging Adaptation to Climate Change in Agriculture. DOI: 10.1007/978-981-13-9235-1\_1 (2020), In book: *Adaptation to Climate Change in Agriculture*, Springer.

## 謝辞

本稿は、農研機構第4期中長期計画(2016～2020年)中の「気候変動影響評価」課題の成果を取りまとめたものである。主要な成果は農研機構の石郷岡康史

主席研究員および飯泉仁之直上級研究員に拠るものであり、両名に深く感謝する。また日本のコメ研究については、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費 S18-2 (JPMEERF20S11806) により更新されたものであることを、併せて記す。

## 著者略歴



西森基貴 (ニシモリ モトキ)

筑波大学大学院地球科学研究科(地理学・水文学専攻)単位取得修了。筑波大学技術職員・助手を経て2000年4月農林水産省農業環境技術研究所入省。現在、農研機構農業環境研究部門主席研究員。専門は気候学、農業気象学、環境モデリング等で、地域の気候変動・異常気象予測データの作成・補正やそれらを用いた影響評価、世界の生産予測研究を行っている。