

# 将来気候における日本の大豆と水稻の収量変化の比較

## Comparison of the yields between soybeans and rice under future climate conditions

櫻井 玄\*・岡部 憲和  
Gen SAKURAI\* and Norikazu OKABE

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門  
Institute for Agro-Environmental Sciences, National Agriculture and Food Research Organization

### 摘 要

大豆はイネの転作作物としての栽培が普及している作物であるが、将来における最適な農地利用のためには、それぞれの作物について気候変動下において作物の生産性がどう変化するかについて議論することが重要である。これまでの研究で、イネについては、日本全国を対象とした収量変化率の将来予測は存在したが、大豆については存在しなかった。本研究では、将来の気候変動が農作物に与える影響を評価するために、大豆とイネを対象として、過去の作物統計データと気象データをもとに統計モデルを作成し、収量と気象要因の関係を分析するとともに、統計モデルを将来シナリオに当てはめ、将来における収量の変化率を予測した。その結果、イネは高温に対する耐性が強く、比較的高温でも収量を維持できる一方で、大豆は高温になると収量が減少する傾向がみられた。RCP2.6-SSP1のシナリオの下での予測では、大豆もイネも数%の増収が見込まれたが、RCP8.5-SSP5のシナリオの下での予測では、イネでは増収が見込まれる地域が多くみられた一方で、大豆は多くの地域で減収が予測された。ただし、全球気候モデルによって予測は異なり、日射量の予測に左右されることがわかった。

キーワード：一般化加法モデル、イネ、気候変動、収量、大豆、統計データ

Key words : generalized additive model, rice, climate change, crop yield, soybeans, statistical data

### 1. はじめに

気候変動の影響を考える上で、農作物への影響は極めて重要な視点の1つである。農作物は、常に外部環境にさらされており、日々の気温や湿度などの変化に合わせて、気孔の開き具合などを変える。光合成などの化学反応も当然ながら温度の影響を強く受ける。つまり、他の工業製品と異なり、そもそも原理的に農作物は気候変動の影響を強く受け得るものである。実際、多くの研究が過去の気象と作物の生産性との関係を報告しており(Pörtner *et al.*, 2022)、気候変動が作物生産性に与える影響は気候変動影響評価研究においては1つの大きなトピックとなっている。世界中でこれまで膨大な研究がなされているが、主要作物であるトウモロコシや大豆、小麦、イネについての研究が盛んであり、特に赤道付近における作物の生産性の減少が懸念されている(Pörtner *et al.*, 2022)。

日本においても、特にイネについて、気候変動が作物収量に与える影響が研究されており(Masutomi

*et al.*, 2009; Ishigooka *et al.*, 2020, 2021) (日本語の文献については、下野, 2008; 横沢ほか, 2009)、気温の増加によって作物収量自体は増収する可能性があるものの、品質は低下することなどが懸念されている。また、特に日本ではイネは最も重要な作物であることから、全国を対象として気候変動の影響が評価されていることも1つの特徴である。一方で、イネ以外の作物については全国規模の研究はそれほど行われていないのが現状である(杉浦・横沢, 2004; 杉浦ほか, 2007)。

将来における作物の生産性を評価する研究においては、プロセスベースモデルによるアプローチか統計モデルによるアプローチかのどちらかが取られる。農作物におけるプロセスベースモデルとはいわゆる作物モデルと呼ばれるものであり、日々の平均や日射量、湿度などから光合成速度などが計算され、植物のバイオマスを蓄積していく過程を数理モデル化したものであり、多くのモデル比較研究により、これらのモデルの予測と特性のスキルが検証されている(Heinicke *et al.*, 2022; Paleari *et al.*, 2022;

受付：2023年6月23日、受理：2023年7月14日

\* 〒305-8604 茨城県つくば市観音台3-1-3, E-mail : sakuraigen@naro.affrc.go.jp

Jägermeyr *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021; Müller *et al.*, 2021; Ruane *et al.*, 2021; Franke *et al.*, 2020; Toreti *et al.*, 2020; Müller *et al.*, 2019, 2017; Li *et al.*, 2015; Martre *et al.*, 2015)。プロセスベースモデルを利用する利点は、1つにはその詳細さにある。プロセスベースのモデルは圃場データだけでなく、様々な温度条件の実験室データなどを組み合わせて開発されており、将来における温暖化の影響などを検証することに適している(Asseng *et al.*, 2015)。ただし、プロセスベースの作物モデルを使用する場合の問題の1つはその複雑さにある。複雑なモデル構造は、作物ごとに必要とされるパラメータの数も増加させるため、プロセスベースのモデルを利用することができる作物種の種類が限られており、また、広域展開をして気候変動影響を検証する仕様になっているものも少ない。日本においても、大豆の生育モデルなどは存在するが(中野ほか, 2015)、全国レベルで評価する仕様には今のところなっていない。

一方で、統計モデルによるアプローチは、作物収量に関する統計情報や過去の気象データから、その関係性を抽象的にモデル化し、解析する手法である。作物収量と気象要因の関係性を簡略化しているので、ある意味データさえあればどのような作物種にも適用が可能であるという利点がある。実際、これまでの気候変動影響評価研究でも統計モデルのアプローチによる研究は数多くなされており、トウモロコシやイネ、大豆、小麦などの主要作物だけでなく、コーヒー豆など他の作物でも解析研究が行われている(Lobell *et al.*, 2011; Jones *et al.*, 2017; Kern *et al.*, 2018; Ray *et al.*, 2019; Kath *et al.*, 2020)。ただし、統計モデルによるアプローチも、もちろん入手可能なデータの種類の制限されるものであり、過去において作物収量に関する詳細なデータを保持していない国や地域については統計モデルを構築することができない。

日本は農林水産省が中心となり、各市町村について、様々な作物について過去長い間作物の収量統計データを整理してきた。データは1960年代から存在しており、古いデータに関しては紙媒体の資料しか存在しないが、1990年代からのデータについては農林水産省のホームページやe-Stat(<https://www.estat.go.jp>)で公開されている(1960年代からのデータも県レベルなどに集約されたものは公開されている)。これらのデータを用いれば、様々な作物種について気象と作物収量との関係性を解析することができる。日本の作物収量データの豊富さを活かしたデータドリブンな研究は、大きなアドバンテージを持っており、数十種の作物種に対する統一的な気候変動影響予測を行うことができる潜在性を持っている。

このアドバンテージを活かして、日本では気候変動下における複数作物の影響評価研究が始まってい

る。環境省推進費2G-2201(2022年度～2024年度：脇岡靖明代表)のサブテーマ2では、50～100種の作物種を目標作物種数として、作物収量と気象要因・土壌特性との関係性を解析し、データドリブンな手法で将来の気候変動下における作物収量を予測することを行っている。また、環境省推進費S18(2020年度～2024年度：三村信男代表)のサブテーマ1-3(1)では、気候変動影響評価研究においてデータドリブンな手法で将来予測を行うにあたって、どのような手法で解析し将来予測を行うことが安定的な結果をもたらすかについて検証を行っている。

本稿では、上記のプロジェクトの成果の一部として、大豆とイネの収量に関する気候変動影響評価の結果について報告する。大豆は日本国内で水田の稲作の生産調整の一環として、転作栽培が広がってきた作物であるが(小林, 1971; 仁平, 2004)、もともと水田というイネに特化した土壌を大豆栽培に適した土壌に改良することの難しさなども含め、その転作栽培の難しさが議論されてきた作物でもある(安田・天野, 1994; 横山, 2003; 住田ほか, 2005)。一方で、将来気候において、大豆とイネの収量がどのように変化するか、並列で影響評価が行われ、議論されてきたことはなかった。本研究では、日本全国の市町村を対象として、過去の大豆とイネの作物収量データと気象データを元に統計モデルを作成し、将来の気候変動下でどのように収量が変化するかを検証することによって、将来における日本の環境政策と農業政策に資する知見を得ることを目的とする。

## 2. 方法

### 2.1 過去の作物収量データと気象データ

1993年から2020年の市町村別の年間作物収量データは、農林水産省(MAFF)の「作物統計」(MAFF, 2005)から入手した。この統計は、市町村別の作物生産量と収穫面積をデータで示している。作物の生産量を収穫面積で割った収量を統計モデルの目的変数として使用した。

過去の気象データは国立研究開発法人農業・食品産業技術研究機構の「メッシュ農業気象データ」(Ohno *et al.*, 2016)を利用した。このデータセットは、アメダスの観測データを元に内挿が行われ約1 kmの空間分解能の気象データで構成されている。この気象データのうち、本研究では平均気温のデータと平均日射量のデータを利用した。気象データを各市町村で均一に平均すると農地ではない森林や都市部の気象値が混入してしまうため、農地の気温と日射量だけをその面積に従い重み付け平均したものをそれぞれの市町村の平均的な気象とした。市町村の境界データと土地利用情報(農地、森林、建物面積など)は、国土交通省の「国土数値情報ダウンロードサービス」(MLIT, 2021)から入手した。このデー

タセットでは、農地は「田」と「その他農地」に分類されているが、本研究ではイネについては田の分類を利用し、大豆については「その他農地」の分類を利用した。栽培暦については、イネについては農林水産省公表の「水陸稲・麦類奨励品種特性表」を用いた。また、大豆については同じく農林水産省公表の「作物統計」を利用した(いずれも紙媒体)。

## 2.2 将来の気象データ

将来の気象データについては、国立環境研究所のNIES2020(Ishizaki, 2021)を利用した。このデータセットは、CMIP6の5つの全球気候モデル(Global Climate Model: GCM)(ACCESS-CM2, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0)を1 kmの空間分解能でバイアス補正したものである。このデータセットのうち、MIROC6とMRI-ESM2-0の2つのGCMのRCP2.6-SSP1とRCP8.5-SSP5シナリオを使用して、将来の作物生産性を評価した。将来の土地利用シナリオは、Yoshikawa *et al.* (2022)が構築したSSPシナリオから入手した。このシナリオは、国土数値情報ダウンロードサービスと同様の要素を各1 kmグリッドセルごとに将来の土地利用シナリオを提供する。このSSPシナリオにおいては、いくつかの市町村については将来の農地が大きく減少するところもあるが、ほとんどの地域でそれほど大きな変化はないため、今回土地利用としてSSPシナリオを用いているものの、基本的には将来の気象条件の変化に対する作物のレスポンスを見ていることになる。栽培暦は過去のデータと同様のものを利用した。対象の予測年としては2041年から2060年までの将来気象値で予測を行い、その平均的な収量の変化率を議論の対象とした。

## 2.3 統計解析と将来予測

過去の作物収量と気象要因について、統計モデルとして以下のような一般化加法モデルを利用した。一般化加法モデルにおいて、非線形関数としてスプライン関数を用いた。

$$\log(y_{it}) = f_T(T_{it}) + f_S(S_{it}) + at + b_j + \epsilon_{it}, \quad (1)$$

ここで、 $y_{it}$ は市町村*i*の年*t*における作物収量、 $T_{it}$ は栽培期間中の平均気温、 $S_{it}$ は平均日射量を表す。ここで、潜在的な作物収量 $b_j$ は県*j*ごとに変化すると仮定している。また、作物収量はトレンドを持ち、そのトレンドは $at$ の項で表されている。 $\epsilon_{it}$ は正規分布に従うと仮定している。 $f_T$ と $f_S$ はそれぞれ平均気温と日射に対するスプライン関数を表す。ここで、潜在的な作物収量が県ごとに変化する理由としては、日本においてはおおよそ県の単位で農法の推奨などが行われているからである。解析はR(R Core Team, 2021)を用いて行われた。また、一般化加法モデルはmgcvパッケージのgam関数を用いて行われた。gam関数では、数式以外の設定は初

期設定を用いた。イネについてはサンプル数が $n = 58872$ 、大豆についてはサンプル数が $n = 56269$ となった。

また、本研究の統計モデルでは、切片項の値を県ごとに変化させているため、現在において大豆やイネが栽培されていないか統計データが存在しない県については、原理的には将来予測を行うことができない。しかしながら、現在大豆やイネが栽培されていない県についても、将来における潜在的な作物収量の変化量を計算するために、切片項の値が過去の収量からは計算できない県については、気温と日射量の平均値が最も近い県の切片項の値を用いることで将来予測を行った。ただし、将来予測においては、外挿の問題をなるべく排除するために、対象となる年の平均気温と平均日射量が過去の全国の気象値における最大値または最小値を超えている場合には、その市町村の将来予測は議論から除外した。

## 3. 結果

### 3.1 過去のデータの解析結果

過去の大豆の収量と過去の気象値を用いた加法モデルの解析の結果を図1に示す。平均気温が非常に低い地域(約15度以下)では、平均気温の増加は大豆収量の増加に繋がるが、平均気温が中程度以上の地域(約18度以上)では平均気温の増加が大豆収量の減少につながることを示唆された。また、平均日射量と大豆収量との関係に関しては、平均日射量が極めて低い地域(約 $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 以下)と極めて高い地域(約 $16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 以上)では平均日射量との関係についてやや複雑な関係性が見られるものの、基本的には平均日射量が増加するほど大豆収量が増加するという関係性が見られた。

次に、過去のイネの収量と過去の気象値を用いた加法モデルの解析の結果を図2に示す。平均気温が非常に低い地域(約18度以下)では平均気温の増加はイネ収量の増加に繋がるが、大豆の結果とやや異なり、平均気温が中程度以上の地域(約18度以上)では平均気温の増加がイネ収量のわずかな微増につながるか変化なしであることが示唆された。また、平均日射量とイネ収量との関係に関しては、平均日射量が極めて低い地域(約 $12 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 以下)では、大豆と同じく平均日射量との関係についてやや複雑な関係性が見られるものの、基本的には平均日射量が増加するほどイネ収量がわずかに微増するという関係性が見られた。

### 3.2 将来における作物収量

より温暖化の程度が低いシナリオ(RCP2.6-SSP1)の将来の大豆収量の変化について、MIROC6とMRI-ESM2-0の結果を図3に示す。日本の多くの地域で5%前後の収量の増加が予測されたが、北陸地方の地域や瀬戸内海付近の地域では3%前後の

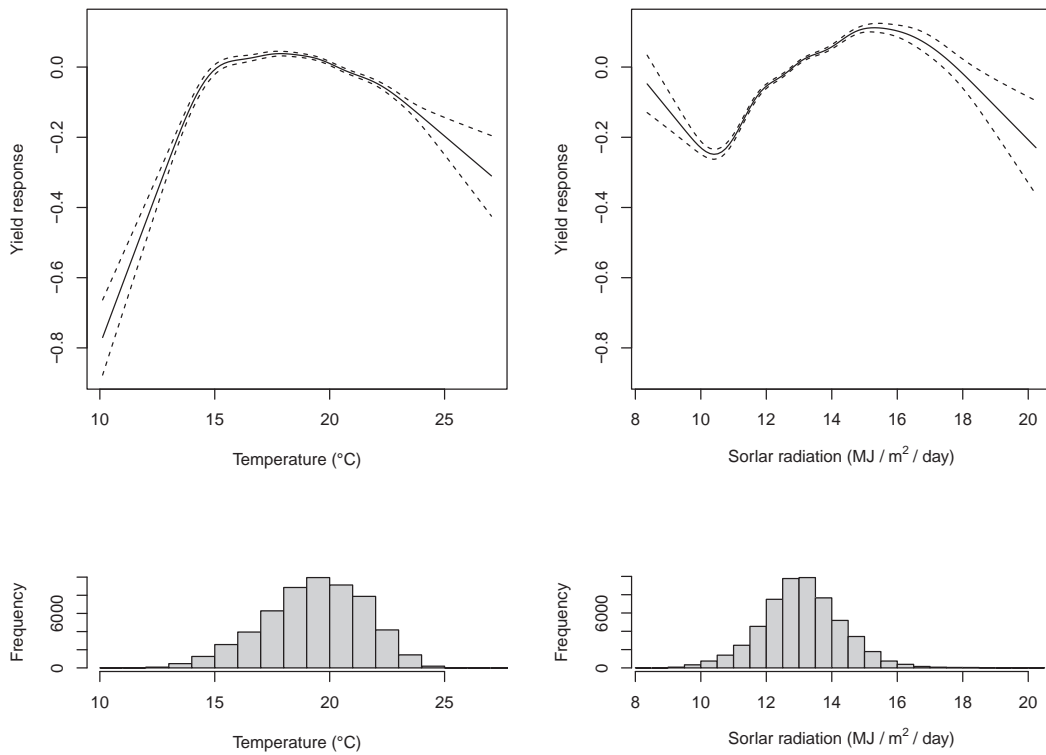


図1 大豆における作物収量と気象要因の関係性.

左上図は栽培期間の平均気温と収量のレスポンス，右上図は平均日射量と収量のレスポンスを示す。  
左下図と右下図はそれぞれ栽培期間の平均気温と平均日射量の過去データにおけるヒストグラムを示す。

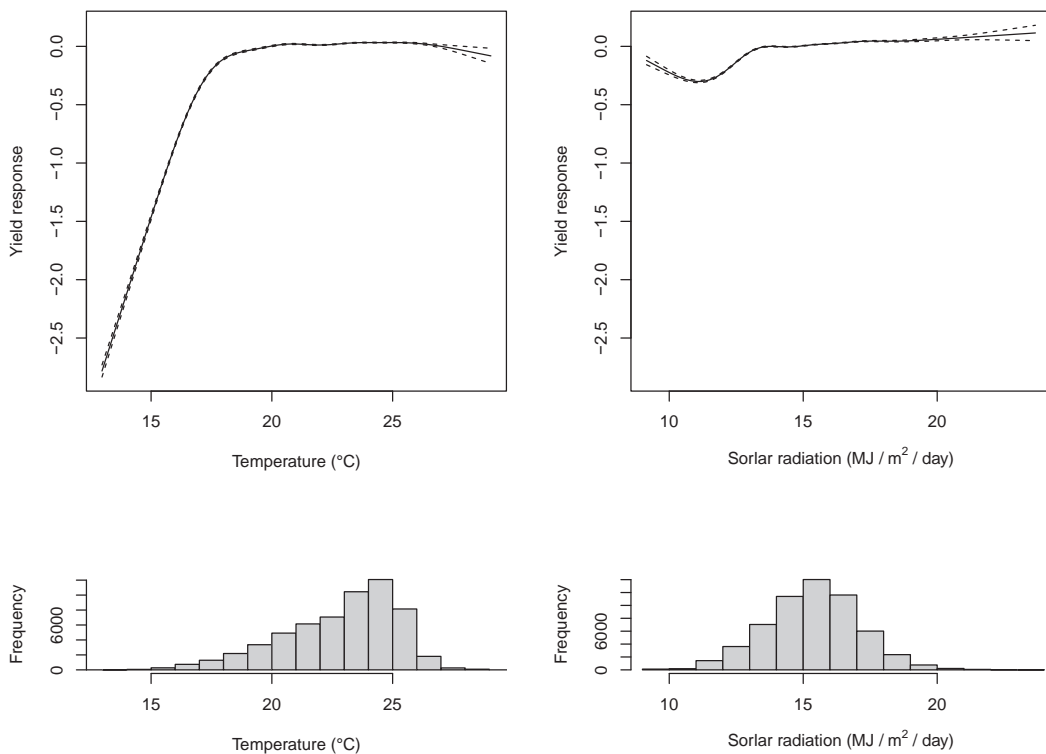


図2 イネにおける作物収量と気象要因の関係性.

左上図は栽培期間の平均気温と収量のレスポンス，右上図は平均日射量と収量のレスポンスを示す。  
左下図と右下図はそれぞれ栽培期間の平均気温と平均日射量の過去データにおけるヒストグラムを示す。

収量の減少が予測された。九州南部については、MIROC6では2%前後の増収が予測されたが、MRI-ESM2-0では2%前後の減収が予測された。一方、RCP2.6-SSP1シナリオの将来のイネ収量の変化につ

いて、MIROC6とMRI-ESM2-0の結果を図4に示す。日本全国ほとんどの地域で、イネ収量が5%前後増加することが予測された。地域間差はわずかに見られ、東北地方と北海道で10%以上増加する地域

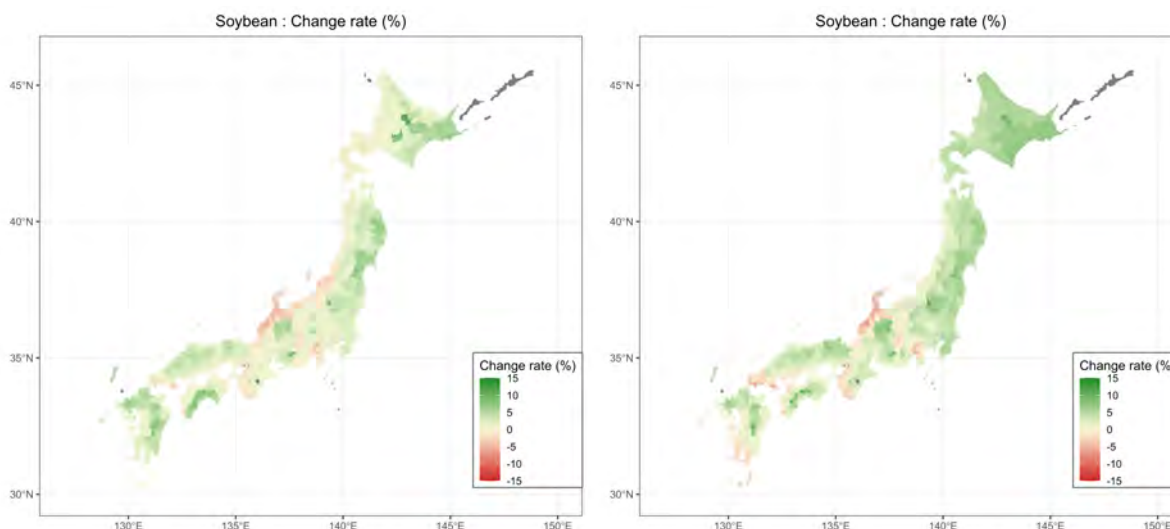


図3 大豆におけるRCP2.6-SSP1条件下での収量変化率(%)の予測。MIROC6(左図)とMRI-ESM2-0(右図)について、2041年から2060年の平均変化率を示す。見やすさを優先し、絶対値が15%を超える地域も15%と同じ色で表示している。

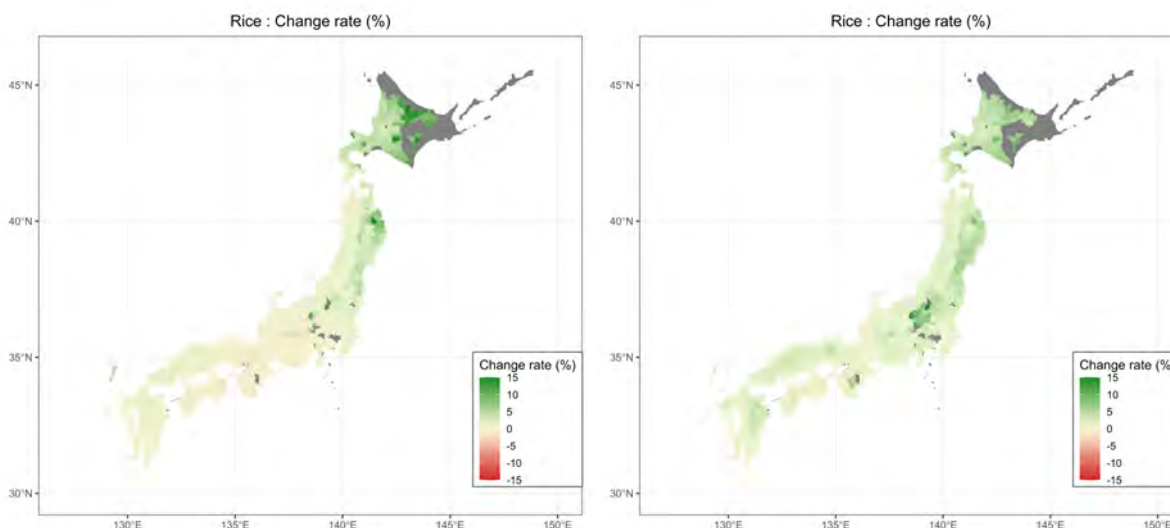


図4 イネにおけるRCP2.6-SSP1条件下での収量変化率(%)の予測。MIROC6(左図)とMRI-ESM2-0(右図)について、2041年から2060年の平均変化率を示す。見やすさを優先し、絶対値が15%を超える地域も15%と同じ色で表示している。

が見られた。

より温暖化の程度が高いシナリオ(RCP8.5-SSP5)の将来の大豆収量の変化について、MIROC6とMRI-ESM2-0の結果を図5に示す。日本全国多くの地域で、大豆収量が5%前後減少することが予測された。ただし、一部の地域では増収が予測されたが、その傾向はGCMによって異なり、MIROC6では海岸線から離れた九州地方の中央部や四国地方の中央部、中国地方の中央部などで増収が予測されたが、MRI-ESM2-0ではその傾向はそれほど顕著ではなく、北海道で5%前後の増収が予測された。一方、RCP8.5-SSP5の将来のイネ収量の変化について、MIROC6とMRI-ESM2-0の結果を図6に示す。北海道では5%前後の増収が予測され、瀬戸内海周辺や中部地方では2%前後の減収が予測されたが、その他の地域ではGCMによってわずかに傾向が異なっ

た。MIROC6では九州地方や中国地方の中央部、四国地方の中央部でも増収が予測されたが、MRI-ESM2-0ではそれらの地域の増収はほとんどなく、一方で東北地方での増収が予測された。

ちなみに、本研究の将来予測においては、年のトレンド(気象要因以外の収量増減に関するトレンドで、式中の $at$ に相当する)は考慮していないが、大豆に関しては対数化された収量に対して $-0.014/\text{年}$ のトレンドが推定されているため、年のトレンドを考慮して収量予測をした場合にはほとんどの地域で平均して10%から20%以上の大きな減収が予測された(図7)。

#### 4. 考察

本研究では、過去の作物収量統計と気象値のデー

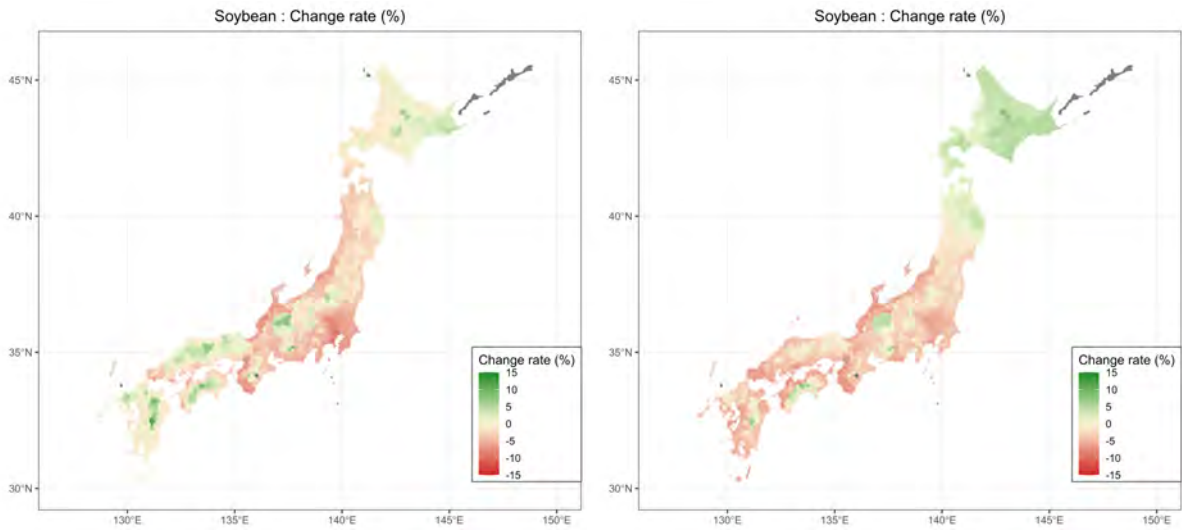


図5 大豆におけるRCP8.5-SSP5条件下での収量変化率(%)の予測。MIROC6(左図)とMRI-ESM2-0(右図)について、2041年から2060年の平均変化率を示す。見やすさを優先し、絶対値が15%を超える地域も15%と同じ色で表示している。

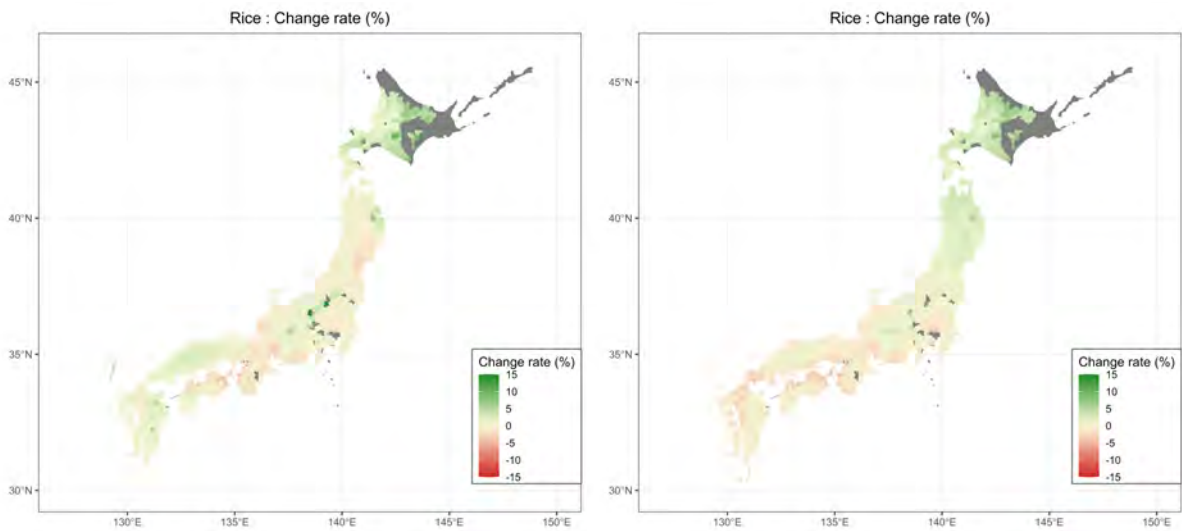


図6 イネにおけるRCP8.5-SSP5条件下での収量変化率(%)の予測。MIROC6(左図)とMRI-ESM2-0(右図)について、2041年から2060年の平均変化率を示す。見やすさを優先し、絶対値が15%を超える地域も15%と同じ色で表示している。

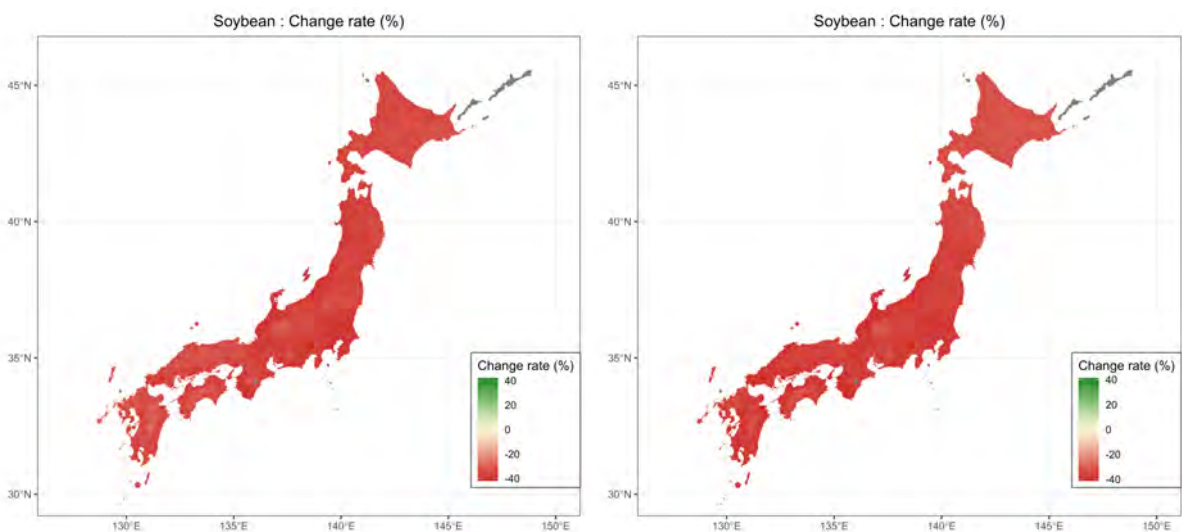


図7 大豆におけるRCP8.5-SSP5条件下での収量変化率(%)の予測。ただし、ここでは過去の収量の減少トレンド(対数化された収量に対して-0.014/年)を考慮している。MIROC6(左図)とMRI-ESM2-0(右図)について、2041年から2060年の平均変化率を示す。

タを用いて、日本全域を対象として大豆とイネについて統計モデルを作成し、それぞれの作物について収量と気象要因の関係性を明らかにするとともに、構築した統計モデルを用いて将来の気候条件下における作物収量の変化率を予測した。特に大豆に関しては、日本全国を対象として将来の収量の予測を行った初めての研究であると同時に、イネとその主要な転作作物の1つである大豆について統一的手法で全国的に将来の収量について比較を行った初めての研究である。

大豆に関しては、2050年前後について、RCP2.6-SSP1について多くの地域で増収が予測された。この結果は、RCP2.6-SSP1のシナリオにおいて、どちらのGCMも5%前後の平均日射量の増加が予測されていることに起因する。図1に示した通り、大豆は平均日射量との関係が強く予測され、平均日射量が多いほど収量が増加する傾向が見られた。日本の大豆については、水田からの転作による栽培面積の割合が比較的多く、その結果、多くの大豆栽培において湿害が問題となっている(服部ほか, 2013)。水田は基本的には水を作土層にとどめておくために、作土層より下の層が粘土質を多く含む土壌となっているが、このことが水田土壌で他の作物を栽培するときには水を悪くしてしまう。したがって、少なくともある程度の降水量が見込まれる日本においては、日射量が多く、降水量が少ない年の方が、水田土壌で栽培されている大豆にとっては適した土壌環境となる。今回の結果はその事実と整合性がある結果が統計解析を通して得られたことになり、間接的に統計解析の結果の妥当性を示唆する。一方で、RCP8.5-SSP5のシナリオについては、多くの地域で減収が予測された。RCP8.5-SSP5のシナリオではどちらのGCMでも2050年前後には1~2度程度の平

均気温の増加が予測されており、このことが減収の予測に繋がっている。加法モデルの解析によって明らかになった通り、大豆栽培にとって最適な栽培期間平均気温は18度前後であり、それより高い平均気温になると収量が減少することが解析によって示唆されたが、図1に示した通り、日本の大豆栽培における平均気温は20度前後であり、多くの地域が平均気温の増加による負の影響を受ける地域である。一方で、特に西日本においては、GCMによって予測が異なる結果が得られた。このことは、日射量の予測がGCMによって大きくことなることに起因する(図8)。MIROC6では西日本における平均日射量の増加が予測されたが、MRI-ESM2-0では逆に北日本における平均日射量の増加が予測されている。このGCMの予測の差異が大豆における将来予測の違いを生み出していると思われる。また、今回の解析では、将来予測を行うにあたって、年のトレンドは考慮していないが、大豆に関しては対数化された収量に対して-0.014/年のトレンドが推定されているため、年のトレンドを考慮して収量予測をした場合にはほとんどの地域で大きな収量減が予測されることを申し添えておく。

イネに関しては、プロセスベースモデルを利用した研究によって、日本全域に関して将来予測を行った先行研究があり、品質の低下が懸念されるものの、収量に関しては日本の多くの地域で収量の増加が予測されており(Ishigooka *et al.*, 2021)、今回の結果は、先行研究と整合性がある。先行研究でも、特に東北地方と北海道の収量の増加が予測され、西日本においては減収する地域も散見される結果となっている。図2からも明らかな通り、イネは高温に比較的強く、栽培期間の平均気温が20度を超えても収量は変化しないか微減にとどまっている。一方

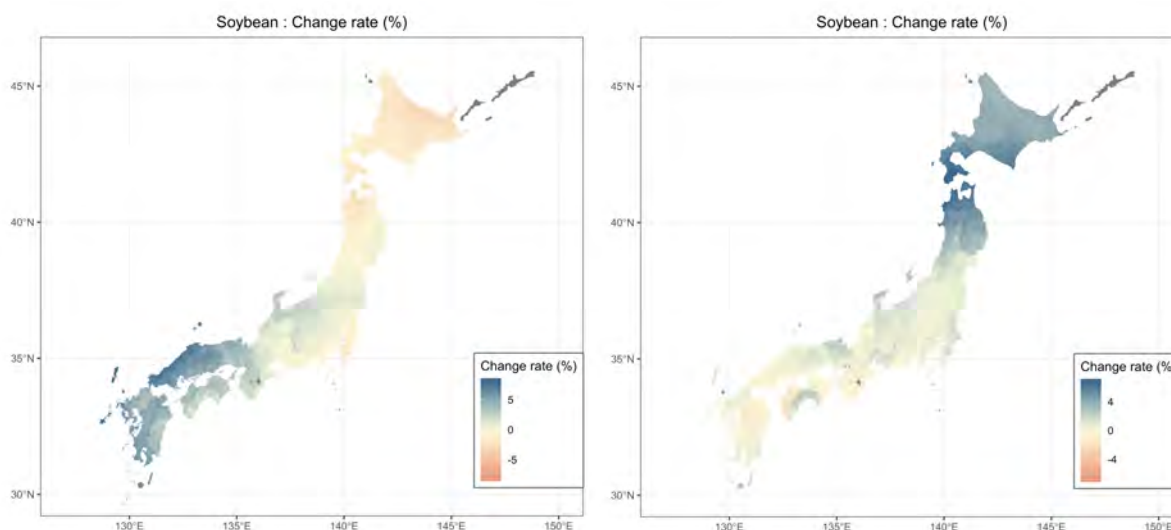


図8 大豆の栽培期間の平均日射量の将来の変化率。

RCP8.5-SSP5のシナリオについて2041年から2060年の平均変化率をMIROC6(左図)とMRI-ESM2-0(右図)について示す。地域間差をわかりやすくするため、色が示す値の絶対値は異なることに注意すること。

で、平均気温が18度前後以下の地域では平均気温の増加による大きな増収が見込まれる。したがって、東北地方及び北海道では、将来の平均気温上昇の恩恵を受けることになる。近年の温暖化の議論の中で目立たなくなってきたが、基本的にイネは歴史的に低温に悩まされてきた作物であり、今でも低温による減収の懸念が残っている(下野, 2018)。地球温暖化によって、東北地方や北海道では、低温の被害の傾向がより減ってくるのが予測される。一方で、平均気温の増加による収量の増加があまり見込まれない20度から25度の平均気温の地域では、日射の変化の影響を強く受ける。RCP2.6-SSP1のシナリオでは、どちらのGCMでも平均日射量の増加が予測されているためどの地域でも増収が予測されたと思われるが、RCP8.5-SSP5のシナリオでは、GCMごとに日射量の予測が異なるため、大豆と同じく予測に関してGCM間で違いが生じている。

本研究で使用したモデルは統計モデルであるため、大豆とイネのいずれにおいても二酸化炭素の施肥効果が考慮されていない。一般的にC3植物は大気中の二酸化炭素濃度が増加すると光合成速度が増加するため、気温や窒素の吸収量など様々な交絡要因はありつつも、将来における二酸化炭素濃度の増加によって収量が増加することが予測される(Leakey *et al.*, 2009)。今回、特にRCP8.5-SSP5の予測では多くの地域で減収が予測されたが、二酸化炭素の施肥効果を考慮すると増収が予測される地域がより増える可能性がある。ただし、二酸化炭素の施肥効果については、不確実性が高く、プロセスベースモデルであってもその予測には大きな幅があることが分かっている(Schleussner *et al.*, 2018)。

また、本研究では品質については言及することができない。プロセスベースモデルを利用したイネの将来予測の研究では、温暖化により白未熟粒の割合の増加が懸念されているが(Ishigooka *et al.*, 2021)、本研究で用いた作物統計データには品質に関するデータは含まれていないため、イネだけにかかわらず、大豆についても品質に関しての将来予測を行うことができない。この点が、現状においては、過去のデータに依存するデータドリブンな手法の限界点とも言える。しかしながら、各県の農業試験場の試験データを幅広く集めるなど、データ収集作業を幅広く行うことによって、将来の気候変動下において、作物の品質がどう変化するのか、データドリブンな解析によって全国的な評価が可能になると考える。いずれにせよ、日本には紙媒体で保存されているにもかかわらずデジタル化されていないデータが数多く眠っており、それらを掘り起こしてデジタル化し、統計解析することによって、プロセスベースモデルだけでは語りきれない多くの要素について評価することができると考えられる。

大豆はイネの転作作物として広まっている作物であり、将来の気候変動下において、水田圃場をどのように利用するかを検討する上で、大豆とイネの将来の収量の変化率について比較することは重要である。本研究で示された通り、RCP2.6-SSP1のシナリオの場合であれば、どちらも収量が増加する地域が多かったが、RCP8.5-SSP5シナリオの場合は、日射量の予測によってその地域分布にばらつきは見られるものの、概してイネの方が収量の増加が見込まれる地域が多かった。イネの転作作物として大豆の栽培を考慮する場合には、今後高温耐性品種の開発などにより重きをおいた研究が必要と考えられる。また、より大豆の増収が見込まれる地域で転作を推奨するなど、地域の特性にあった転作に関する戦略が求められる。

## 謝 辞

本研究は、環境研究総合推進費S-18「気候変動影響予測・適応評価の総合的研究」(Grant number: JPMEENF20S11803)及び環境研究総合推進費2G-2201「適応の効果と限界を考慮した地域別気候変動適応策立案支援システムの開発」(Grant number: JPMEERF20222G01)、日本学術振興会科学研究費助成事業基盤B(課題番号: 21H02294)の助成を受けて行われました。

## 引用文献

- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G., White, J. W. *et al.* (2015) Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143-147.
- Franke, J. A., Müller, C., Elliott, J., Ruane, A. C., Jägermeyr, J., Snyder, A., Dury, M., Falloon, P. D., Folberth, C., François, L. *et al.* (2020) The ggcmi phase 2 emulators: global gridded crop model responses to changes in CO<sub>2</sub>, temperature, water, and nitrogen (version 1.0). *Geoscientific Model Development*, 13(9), 3995-4018.
- 服部 誠・南雲芳文・佐藤 徹・藤田与一・樋口泰浩・大山卓爾・高橋能彦(2013)新潟県における水田転換畑ダイズの収量低下要因. 日本作物学会紀事, 82(1), 11-17.
- Heinicke, S., Frieler, K., Jägermeyr, J. and Mengel, M. (2022) Global gridded crop models underestimate yield responses to droughts and heatwaves. *Environmental Research Letters*, 17(4), 044026.
- Ishigooka, Y., Hasegawa, T., Kuwagata, T. and 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(2), 61-68.
- Ishigooka, Y., Hasegawa, T., Kuwagata, T., Nishimori, M. and 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(2), 139-149.
- Ishizaki, N. N. (2021) Bias corrected climate scenarios over Japan based on cdfdm method using cmip6, ver.1. [https://ccca-scenario.nies.go.jp/data/jpn\\_cdfdm/nies2020/Ver.2020.html](https://ccca-scenario.nies.go.jp/data/jpn_cdfdm/nies2020/Ver.2020.html) (2021年10月19日確認)
- Jägermeyr, J., Müller, C., Ruane, A. C., Elliott, J., Balkovic, J., Castillo, O., Faye, B., Foster, I., Folberth, C., Franke, J. A. *et al.* (2021) Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature Food*, 2(11), 873-885.
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E., Janssen, S. *et al.* (2017) Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, 155, 240-254.
- Kath, J., Byrareddy, V. M., Craparo, A., Nguyen-Huy, T., Mushtaq, S., Cao, L. and Bossolasco, L. (2020) Not so robust: Robusta coffee production is highly sensitive to temperature. *Global Change Biology*, 26(6), 3677-3688.
- Kern, A., Barcza, Z., Marjanovic, H., Árendás, T., Fodor, N., Bonis, P., Bognár, P. and Lichtenberger, J. (2018) Statistical modelling of crop yield in central Europe using climate data and remote sensing vegetation indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260, 300-320.
- 小林政明(1971)大豆の水田転作. 農業技術, 26(7), 305-308.
- Leakey, A. D., Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Rogers, A., Long, S. P. and Ort, D. R. (2009) Elevated CO<sub>2</sub> effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from face. *Journal of Experimental Botany*, 60(10), 2859-2876.
- Li, T., Hasegawa, T., Yin, X., Zhu, Y., Boote, K., Adam, M., Bregaglio, S., Buis, S., Confalonieri, R., Fumoto, T. *et al.* (2015) Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. *Global Change Biology*, 21(3), 1328-1341.
- Liu, W., Ye, T., Jägermeyr, J., Müller, C., Chen, S., Liu, X. and Shi, P. (2021) Future climate change significantly alters interannual wheat yield variability over half of harvested areas. *Environmental Research Letters*, 16(9), 094045.
- Lobell, D. B., Schlenker, W. and Costa-Roberts, J. (2011) Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620.
- MAFF (1993-2005). Statistics on crop. [https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou\\_kazyu](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_kazyu). (2021年9月3日確認)
- Martre, P., Wallach, D., Asseng, S., Ewert, F., Jones, J. W., Rötter, R. P., Boote, K. J., Ruane, A. C., Thorburn, P. J., Cammarano, D. *et al.* (2015) Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. *Global Change Biology*, 21(2), 911-925.
- Masutomi, Y., Takahashi, K., Harasawa, H. and Matsuoka, Y. (2009) Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(3-4), 281-291.
- MLIT (2021) Digital national land information download data service. <https://nlftp.mlit.go.jp/index.html> (2021年7月6日確認)
- Müller, C., Elliott, J., Chryssanthacopoulos, J., Arneth, A., Balkovic, J., Ciais, P., Deryng, D., Folberth, C., Glotter, M., Hoek, S. *et al.* (2017) Global gridded crop model evaluation: benchmarking, skills, deficiencies and implications. *Geoscientific Model Development*, 10(4), 1403-1422.
- Müller, C., Elliott, J., Kelly, D., Arneth, A., Balkovic, J., Ciais, P., Deryng, D., Folberth, C., Hoek, S., Izaurralde, R. C. *et al.* (2019) The global gridded crop model intercomparison phase 1 simulation dataset. *Scientific Data*, 6(1), 1-22.
- Müller, C., Franke, J., Jägermeyr, J., Ruane, A. C., Elliott, J., Moyer, E., Heinke, J., Falloon, P. D., Folberth, C., Francois, L. *et al.* (2021) Exploring uncertainties in global crop yield projections in a large ensemble of crop models and cmip5 and cmip6 climate scenarios. *Environmental Research Letters*, 16(3), 034040.
- 中野聡史・熊谷悦史・島田信二・鮫島良次・大野宏之・本間香貴・白岩立彦(2015)ダイズ品種の発育モデルの作成と気温上昇が発育速度に及ぼす影響の広域推定. 日本作物学会紀事, 84(4), 408-417.
- 仁平恒夫(2004)水田農業の現状と大豆生産の課題及び展望. 北海道農業研究センター農業経営研究, 86, 66-72.
- Ohno, H., Sasaki, K., Ohara, G. and Nakazono, K. (2016) Development of grid square air temperature and precipitation data compiled from observed, forecasted, and climatic normal data.

- Climate in Biosphere*, 16, 71–79.
- Paleari, L., Li, T., Yang, Y., Wilson, L. T., Hasegawa, T., Boote, K. J., Buis, S., Hoogenboom, G., Gao, Y., Moredi, E. *et al.* (2022) A trait-based model ensemble approach to design rice plant types for future climate. *Global Change Biology*, 28(8), 2689–2710.
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., Begum, R. A., Betts, R., Kerr, R. B., Biesbroek, R. *et al.* (2022) Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. *IPCC Sixth Assessment Report*, 37–118.
- R Core Team (2021) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ray, D. K., West, P. C., Clark, M., Gerber, J. S., Prishchepov, A. V. and Chatterjee, S. (2019) Climate change has likely already affected global food production. *PLoS one*, 14(5), e0217148.
- Ruane, A. C., Phillips, M., Müller, C., Elliott, J., Jägermeyr, J., Arneth, A., Balkovic, J., Deryng, D., Folberth, C., Iizumi, T. *et al.* (2021) Strong regional influence of climatic forcing datasets on global crop model ensembles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 300, 108313.
- Schleussner, C.-F., Deryng, D., Müller, C., Elliott, J., Saeed, F., Folberth, C., Liu, W., Wang, X., Pugh, T. A., Thiery, W. *et al.* (2018) Crop productivity changes in 1.5 °C and 2 °C worlds under climate sensitivity uncertainty. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064007.
- 下野裕之(2008)地球温暖化が北日本のイネの収量変動に及ぼす影響. 日本作物学会紀事, 77(4), 489–497.
- 下野裕之(2018)イネの障害型冷害. 日本作物学会紀事, 87(2), 113–124.
- 杉浦俊彦・横沢正幸(2004)年平均気温の変動から推定したリンゴおよびウンシュウミカンの栽培環境に対する地球温暖化の影響. 園芸学会雑誌, 73(1), 72–78.
- 杉浦俊彦・黒田治之・杉浦裕義(2007)温暖化がわが国の果樹生育に及ぼしている影響の現状. 園芸学研究, 6(2), 257–263.
- 住田弘一・加藤直人・西田瑞彦(2005)田畑輪換の繰り返しや長期畑転換に伴う転作大豆の生産力低下と土壌肥沃度の変化. 東北農業研究センター研究報告, 103, 39–52.
- Toreti, A., Deryng, D., Tubiello, F. N., Müller, C., Kimball, B. A., Moser, G., Boote, K., Asseng, S. *et al.* (2020) Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO<sub>2</sub> on crops. *Nature Food*, 1(12), 775–782.
- 安田典夫・天野洋司(1994)農業生産環境情報システムによる水田転作ダイズ生育適地図の作成と検証. 日本土壌肥科学雑誌, 65(3), 282–289.
- 横山英信(2003)水田農業転換期における米生産調整・転作をめぐる政策的諸問題. 岩手大学人文社会科学部紀要, 73, 59–79.
- 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(2), 199–206.
- Yoshikawa, S., Takahashi, K., Matsushashi, K. and Mimura, N. (in review) Development of common socio-economic scenarios for climate change impact assessments in Japan. *Geoscientific Model Development*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2022-169>.



櫻井 玄 / Gen SAKURAI

農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門 上級研究員。九州大学院理学研究科修了，博士(理学)。同大学農学研究院 非常勤研究員，農業環境技術研究所 特別研究員，南オーストラリア大学 客員研究員などを経て現職。Food securityに関わるテーマが一番の関心であり，マイクロレベルの植物モデルから，全球レベルの作物モデルモデルまで，農学に関わる様々な数理モデリング・統計解析研究に従事。



岡部 憲和 / Norikazu OKABE

農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門 契約研究員。東京都出身。専攻は森林生態学・植物分類学。国内の森林や東南アジア各国の森林で調査・研究を行ってきた。2020年より現所属へ移り，地球温暖化の影響予測研究に従事している。図書館やネット上に蓄積されている各種統計データの発掘・整形や，各国の研究機関が作成した気象シナリオデータの整形等を行っている。