

気候変動と作物生産性: 14作物についての解析

農研機構 農業環境変動研究センター 櫻井玄*
東京大学大学院 農学生命科学研究科 深見一磨

要約

地球温暖化の問題が顕在化する一方で、世界の人口は増加し続けており、将来の作物生産性の予測は重要な問題となっている。特に、多くの食料を輸入に依存する日本にとって、将来の世界の作物生産性は国民の生活に直結する。地球温暖化とともに作物の収量がどうなってきたのか、また、将来の作物の収量がどうなり得るのかという研究はこれまで膨大な数になされている。特にこれまで、過去の作物の収量と過去の気象の関係についての統計解析の研究は数多くなされてきた。しかし、そのほとんどが線形関数による統計モデル化であり、作物の気温や降水量に対する複雑な非線形性を考慮していない。本研究では、CRUの過去の気象データから栽培期間や栽培面積を加味して精密な国別気象データを作成するとともに、FAOの国別収量データを参照することで、大麦・キャッサバ・落花生・トウモロコシ・オーツ麦・ライ麦・小麦・菜種・イネ・ソルガム・大豆・テンサイ・ヒマワリ・サツマイモの14種について平板スプライン関数を内包した加法モデルを作成し、全球レベルで平均気温・降水量と作物収量を統計モデル化した。その結果、オオムギやオーツ麦、ソルガム、ヒマワリ、小麦は降水量の変化よりも気温の変化がより強く収量に関係し、気温の増加とともにとともに直線的に収量が減少するが、イネや落花生、テンサイ、ダイズなどは強い非線形性を示し、気温の増加による収量の変化は国によって大きく異なることが示唆された。

Relationship between crop productivity and climate change: analysis for 14 crops

Gen Sakurai* (National Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO)

Kazuma Fukami (Tokyo University, Graduate School of Agriculture and Life Science)

Abstract

Understanding the effect of future climate change on global crop yields is one of the most important tasks for global food security. In particular, for Japan, which is heavily reliant on imported food, global future crop productivity will be directly linked to the lives of people. There has been a huge number of statistical analyses about the relationship between past weather conditions and global crop yields. However, most of them are statistical modeling by linear functions and do not take into account the complex non-linearity of the relationship between the crop yields and temperature and precipitation. In this study, we evaluated the relationship between the weather conditions and the yields of 14 crops, in which we used an additive model with two-dimensional spline curves. As a result, we found that the change in the temperature is linearly related to the crop yields in barley, oats, sorghum, sunflower, and wheat. On the other hand, rice, peanuts, sugar beet, and soybean showed a strong non-linearity between weather conditions and crop yields, which resulted in the various estimated responses of the crop yields of countries to possible temperature increase in the future.

気候変動と作物生産性: 14作物についての解析

農研機構 農業環境変動研究センター 櫻井玄*
東京大学大学院 農学生命科学研究科 深見一磨

1. はじめに

世界の人口の増加が食料需要を高めるとともに、世界で進行しつつある気候変動は食料供給における将来のリスクの一つと考えられている。将来における気温の増加の程度は、その予測において極めて不確実性が高いものの (IPCC 2013)、将来において全球の平均気温が増加することは避けられないことであり、将来の地球温暖化のもと世界の食料供給の状況がどのようになるのかを予測することは重要な課題である。特に食料の多くを海外の生産に頼る日本においては、地球温暖化が世界の食料供給にどのような影響を与えうるのか検証することの重要性が大きい。

これまで数多くの研究が全球規模における作物生産性と気象との関係を検証してきた。これまでの研究は大きく分けて、複雑な作物成長のプロセスベースモデルを利用した研究とシンプルな統計モデルを利用した研究に大別される。作物成長のプロセスベースモデルでは、作物成長における各段階の反応を数理モデルとして記述し、各数理モデルを組み合わせることによって作物成長全体をモデル化するものであり、一般的に日毎の気象値をインプットデータとして作物の成長をシミュレートし、気候変動が収量に与える影響を評価する (Challinor et al. 2004; Steduto et al. 2009)。作物の成長を細かに再現するという意味で、より現実に近いモデルといえる一方で、一般に作物成長のプロセスベースモデルでは百以上の数式が使用されており、そのそれぞれが大きな誤差を持つモデルであるため、その連結として出力される作物の収量は誤差が大きくなる可能性がある。実際、作物モデル間の予測幅は大きい (Asseng et al. 2013)。また、広域の推定の不確実性も非常に大きい (Rosenzweig et al. 2014; Müller et al. 2017)。作物成長の各プロセスの定式化は限られた地域の圃場で行われたものであり、それを広域に展開する場合の頑健性について疑問が残る。

一方で統計モデルによるアプローチでは、一般的に、過去の気象データを栽培期間の気温や降水量などに集約し、それらの気象の代表値を説明変数として過去の収量データを説明する簡潔なモデルを推定する (Lobell et al. 2011; Lobell and Bruke 2009; Lobell and Asseng 2017)。全球を対象とした研究で代表的なものはLobell et al. (2011) のものであり、FAOSTATの収量データとCRUの気象データをもとにして統計モデルを作成し、全球における作物の収量と気象要因の関係を解析し、過去における気候変動の作物収量への影響を評価したものであり、過去の地球温暖化が作物の収量に大きな影響を及ぼしたことを示唆している。しかしながら、ここで利用されている統計モデルは単純な線形の重回帰モデルであり、気温と降水量の交互作用を考慮していないだけでなく、気温と収量の関係の非線形性などもきちんと考慮していない。これまでの研究で、気温と作物の収量の関係は複雑なものであり、高温域において急激に収量の減少などが起こり得ることが明らかになっている (Schlenker and Roberts 2009)。Lobell et al. (2011) の論文では説明変数に二次関数を仮定することで非線形性を考慮しているが、二次関数の柔軟性は低く、気象と収量の非線形性を正確に表現することは難しい。これまでに、気象と収量の非線形性をきちんと考慮して統計モデルを構築した研究はあるが (Hawkins et al. 2010)、局所的な地域を対象としたものであり、全球レベルではない。

本研究では、全球を対象として、日本の輸入にとって重要な様々な作物を対象として、気象と収量の関係を、非線形性を考慮しつつ解析することを目的とする。FAOSTATの年ごとの収量データとCRUの気象データを、加法モデルによって、交互作用を考慮しつつ非線形に関連付けたモデルを作成し、各作物について気象要因と収量の関係性を検証するとともに、気温が上昇した場合の収量の予測をそれぞれの作物について行う。また、その際に、誤差を定量的に評価することで、予測の不確実性についても議論する。

2. 分析の手法

主食や飼料、食用油として重要な作物（大麦・キャッサバ・落花生・トウモロコシ・オーツ麦・ライ麦・小麦・菜種・イネ・ソルガム・大豆・テンサイ・ヒマワリ・サツマイモ）について、気象の変化が作物の生産性に与える影響を世界規模で調べるために、過去の気象データと作物収量データを用いてモデル化した。気象データとして、CRU (Climatic Research Unit) の過去気象値を栽培面積データ (Monfreda et al. 2008) と栽培面積データ (Sacks et al. 2010) で修正したデータを用いた。収量データとして、FAOSTATの1980年から2015年の収量データを用いた。データに対し、平板スプラインを利用した加法モデルを適用してモデル化した。簡易的に気温上昇の影響を評価するために、2015年の平均気温から1.0 °C気温が上昇した場合の作物収量の変化率を各国について計算した。

4. 結果及び考察

これまでプロセスベース作物モデルや統計モデルを用いた作物収量への影響評価研究は多くあるが、全球を対象としたものは主要穀物のみであり、主食や飼料、食用油に利用される多種多様な作物について全球の予測を行なったものはない。本研究は包括的に多種多様な作物を、全球を対象として気候変動影響評価を行う初めての研究であり、本研究の科学的な意義は大きい。統計モデルもこれまでの単純な線形モデルではなく、複雑な交互作用をできる平板スプラインによる解析であり、気候変動影響評価研究への適用としては新規な解析である。

統計解析の結果、気温と降水量が収量に及ぼす影響の解析結果を図1に示す。大麦、トウモロコシ、オーツ麦、小麦、ひまわりなどでは、温度が増加するほど収量が減少するという比較的単純な関係性が予測された。また、ソルガムや大豆などでは、降水量との交互作用が明確にみられ、特に大豆では、降水量に関して最適な領域が存在した。コメやテンサイなどでは、気温に関して最適な温度帯が見られた。一方で、キャッサバや菜種、サツマイモでは、気温と降水量と収量の明確な関係性は検出されなかった。落花生に関しては、高温域で急激に収量が減少する関数が推定された。

また、得られた影響評価関数を元に、簡易的に気温を1.0 °C増加させた場合の作物収量の変化率を計算した。気温上昇によって収量が減少する可能性が高いものは、トウモロコシ、大豆、ソルガム、ヒマワリ、オオムギ、テンサイ、落花生などであった。小麦や菜種、ライ麦、オーツ麦など、冬作が主のものは影響が少ないか収量が微増であった。

解析対象作物のうち、2作物の計算結果のみ図2に示す。国ごとに気温増加の影響はトウモロコシにおいても大麦においても国ごとに異なった。図2には95%信頼区間も同時に示している。上側信頼区間と下側信頼区間はどちらも大きく、有意に作物収量の減少が予測されたのは大麦のアメリカとトウモロコシなど、僅かな国であった。この結果は、予測における誤差範囲の重要性も示している。プロ

セスペースモデルでは誤差範囲を定量化し、有意に作物の収量が変化する地域を評価することは難しいが、統計モデルであれば、誤差範囲を計算することができ、作物収量の変化の統計的有意性を議論することができる。今回の解析では二酸化炭素の施肥効果を考慮していないが、考慮した場合はさらに不確実性が増加すると考えられる。

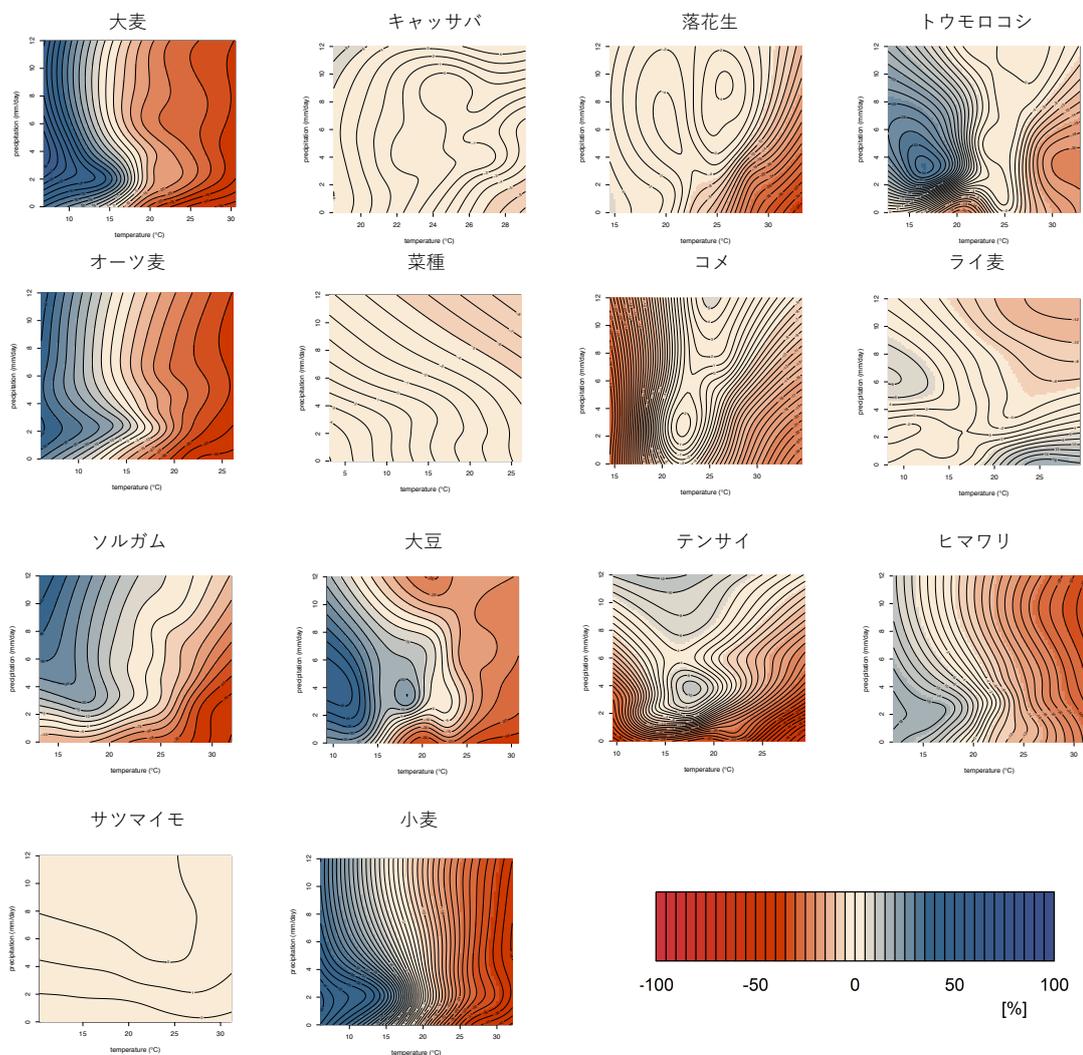
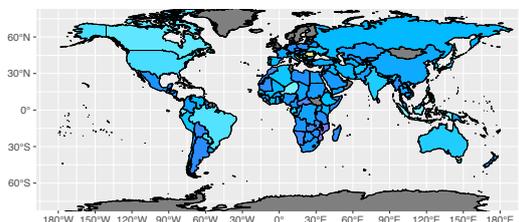


図1 気温と降水の収量への影響。横軸が栽培期間の年平均気温（°C）、縦軸が降水量（mm / day）を示す。ただし、オーツ麦と菜種、ライ麦、小麦に関しては収穫日から2ヶ月前までの値で平均している。赤色ほど収量が減少し、青色ほど収量が増加する。基準として20 °Cのところ紫色の線を引いた。

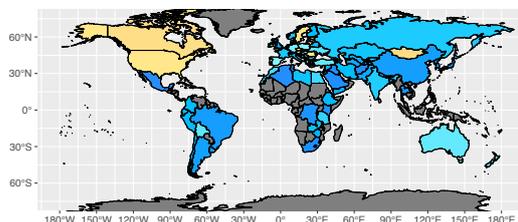
トウモロコシ

大麦

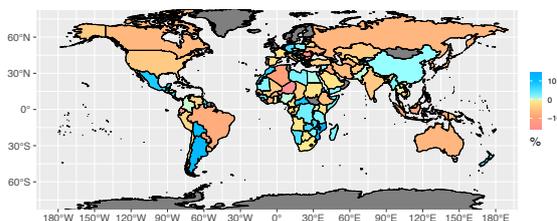
上側95%信頼区間



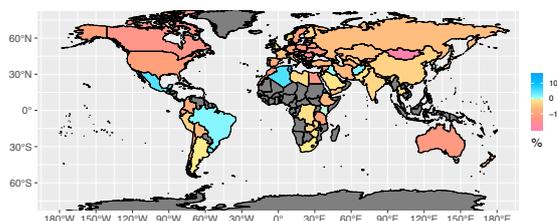
上側95%信頼区間



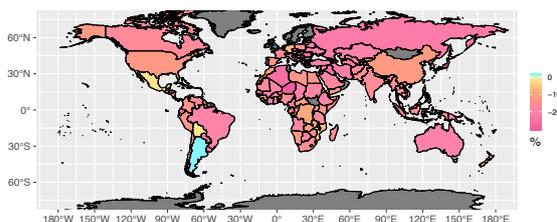
平均値



平均値



下側95%信頼区間



下側95%信頼区間

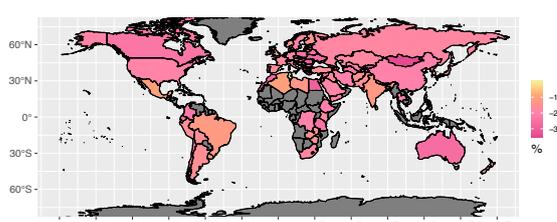


図2 気温上昇が作物の収量に与える影響。気温を1.0 °C上昇させた場合の作物収量の変化率(%)。ここで、収量の増減率は2015年の収量観測値を基準にしていることに注意。したがって、気温に伴って線形に減少する作物においても作物の収量が増加する地域が見られる。大麦とトウモロコシの結果について示しており、上から上側95%信頼区間、平均値、下側95%信頼区間の値を示している。例えば、上側95%信頼区間においても減少が予測されている国は、1.0 °C上昇によって有意な収量の減少が予測される国であることを示している。

4. おわりに

本研究では、加法モデルを用いて、全球における作物の収量と気象要因との関係性を解析した。その結果、収量と気象要因の非線形性は強く、スプライン関数など強い非線形性を柔軟に記述すること

ができる統計手法の重要性が示唆された。また、一方で将来予測における不確実性の大きさも示唆され、これまでプロセスベースモデルによる解析で行われてきたような点推定ではなく、誤差を示した上での推定が重要であることも示唆する結果が示唆された。将来の影響予測研究においては、プロセスベースモデルが使用されることが主流であるが、柔軟に非線形に予測することができる統計モデルを利用することで、予測の誤差についても深く議論することの重要性を提示するものである。

5. 参考文献

- Asseng, S., 2013, Uncertainty in simulating wheat yields under climate change, *Nature Climate Change*, Vol. 3 No. 9 pp. 827-832
- Challinor, A.J. et al, 2004, Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 124 No.1-2 pp. 99-120
- FAO, 2018, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), FAO Statistical Databases. <http://faostat.fao.org>
- Harris, I. et al., 2014, Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset, *International Journal of Climatology*, Vol. 34, pp. 623-642
- Hawkins, E. D. et al., 2013, Increasing influence of heat stress on French maize yields from the 1960s to the 2030s, *Global Change Biology*, Vol. 19 pp.937-947
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Leakey, A. D. B. et al., 2009, Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 60 No. 10 pp. 2859-2876
- Lobell, D. B. and Bruke M. B., 2010, On the use of statistical models to predict crop yield response to climate change, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 150 No. 11pp. 1443-1452
- Lobell, D. B. et al., 2011a, Climate Trends and Global Crop Production Since 1980, *Science*, Vol. 333 pp. 616-620
- Lobell D. B. and Asseng, S., 2017, Comparing estimates of climate change impacts from process-based and statistical crop models, *Environmental Research Letters*, Vol. 12 No. 1 pp. 1-12
- Monfreda, C. et al., 2008, Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields physiological types, and net primary production in the year 2000, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 22 GB1022
- Müller, C. et al., 2017, Global gridded crop model evaluation: benchmarking, skills, deficiencies and implications, *Geoscientific Model Development*, Vol. 10 No. 4 pp. 1403-1422

- Rosenzweig, C. et al., 2014, Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 111 No. 9 pp. 3268-3273
- Sacks, W. J. et al., 2010, Crop planting dates: an analysis of global patterns, *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 19 pp. 607-620
- Schlenker, W. and Roberts, M. J., 2009, Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol.106 No. 37 pp. 15594-15598
- Steduto, P. et al., 2009, AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles, *Agronomy Journal*, Vol. 101 pp. 426-437