

## 世界の穀物生産における気候変動適応コスト

農研機構 飯泉仁之直

### 概要

増加する世界の農産物需要を満たすうえで必要な穀物生産性（収量）の増加を維持するためには、高収量技術への開発投資に加えて、気候変動適応への投資が避けられない。これまでに推計された農業分野の適応コストは、どの時点（現在から 2050 年）を対象とするかにより大きく異なるが、世界全体で年間 40 億ドルから 1660 億ドルと見積もられている。こうした値は農業分野の適応コストがどの程度の規模かについて政策立案者が知るといえる点では有用だが、適応コストと残余被害（適応後の気候変動影響）が気温上昇の度合いに応じて、どのように変化するかについては不明である。そこで、本研究では、気候変動予測シナリオの下での、世界の穀物生産における適応コストと残余被害を推定する。トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズは合計すると世界のカロリー生産の過半を占めるため、これらの主要穀物を対象とする。本研究では、適応コストは、気候変動がない場合の収量水準を気候変動下で達成するために必要な、生産コストの追加投入と定義する。もし、追加投入を行っても、生物学的限界により、収量がそれ以上、増加しない場合や、追加投入による収量増加がそれ以上、生産者の収益増加をもたらさない場合、気候変動がない場合とある場合の収量の差は残余被害となる。

## Costs of climate change adaptation for global crop production

National Agriculture and Food Research Organization, Toshichika Iizumi

### Abstract

Investments to adaptation in addition to high-yielding technology are unavoidable to maintain crop yield growth at rates necessary to keep up with increasing demand. Global adaptation costs in agriculture would account for US\$ 4–166 billion per year, with varying time horizons (present to 2050). These estimates give policymakers a sense of the scale of adaptation cost in agriculture, but do not tell little about how the amount of adaptation cost and residual damage (that is, climate change impacts after adaptation) change with warming levels. Here this study estimates adaptation cost and residual damage for global crop production under future climate projections. Four major crops—maize, rice, wheat and soybean—which together make up the vast majority of caloric production in the world were examined. Adaptation cost is defined as the producers' additional production cost in a warmer climate required to produce crop yield at level that would be achieved without climate change. If producers' additional expenditure of production cost would no longer increase yield due to crops' biological limits or no longer maintain current profitability in crop production, the difference between yield with and without warming is deemed as the residual damage.

## 世界の穀物生産における気候変動適応コスト

農研機構 農業環境変動研究センター 飯泉仁之直

### 1. はじめに

これまでに蓄積された知見から、気候変動（地球温暖化）は既に世界の穀物生産に検出可能な影響を及ぼしている可能性が高い（Cramer et al., 2014, Moore and Lobell, 2015, Iizumi et al., 2018）。このため、増加する世界の農産物需要を満たすうえで必要な穀物生産の増加（とりわけ、年あたり収量増加率）を維持するためには、高収量技術への開発投資に加えて、気候変動適応への投資が避けられない。

しかしながら、斬新的な適応（incremental adaptation）では、既存の農業生産システムに追加的な資材投入（水や肥料、薬剤、労働力、設備機器など）を行う場合が多い（Porter et al., 2014, Kabir et al., 2017, Brown et al. 2018）。それにより、気候変動下の収量を気候変動がない場合の収量に近づけようとするため、適応により生産コストの上昇が懸念されるほか、作物の生理生態的な限界に加えて、「経済的に見合わない」という意味での適応限界がある可能性が高い。

これまでに推計された農業分野の適応コストの額は、時間スケールや使用した手法、シナリオにより大きく異なるが、世界全体で年間40億ドルから1660億ドルと見積もられている（Wreford and Renwick, 2012）。複数のセクターを集計した場合には、2030年には世界全体で年間1,400億ドルから3,000億ドル、2050年には2,800億ドルから5,000億ドルに達すると推計されている

（UNEP, 2016）。こうした値は、農業分野の適応コストがどの程度の規模かを政策立案者が把握するという点においては有用だが、適応コストと残余被害（適応後の気候変動影響）が全球平均気温の上昇に応じて、どのように変化するかが分からない。そこで、本研究では、主要穀物（トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズ）を対象に、様々な気候変動予測シナリオの下での、世界の穀物生産における適応コストと残余被害を推定した。本解析では、世界の総生産量の90%を占める生産量上位52カ国を対象とした。

### 2. 適応コストと残余被害、気候変動の総コスト

図1は農業生産システムにおける適応コストと残余被害の考え方を整理している。適応コストは、気候変動がない場合の収量を気候変動下で達成するために必要な、生産コストの追加投入と定義する（ $P^* - P_{\text{fact}}$ ；図1）。もし、追加投入を行っても、生理生態的な限界により、収量がそれ以上、増加しない場合や、追加投入による収量増加がそれ以上、生産者の収益増加をもたらさない場合、気候変動がない場合とある場合の収量差は残余被害（ $Y_{\text{ctd}} - Y^*$ ；図1）となる。適応コストと残余被害の和は気候変動の総コストと呼ばれる。なお、適応費用と比較可能となるように、残余被害は収穫面積と生産者価格を乗じて金銭単位（USD）で表記される。ここでは、国連食糧農業機関の統計データベース（FAOSTAT）から得られる生産者価格の2001年から2010年の平均値を用いた。二酸化炭素の増加による施肥効果や高緯度地域での気温上昇による生育環境の改善などにより、気候変動下の収量の方が気候変動がないときの収量より高い場合（ $Y_{\text{ctd}} > Y_{\text{fact}}$ ；図1）には残余被害は負値をとり、気候変動の好影響を意味する。これらの定義は先行研究（Stern, 2006,

Chambwera et al., 2014) と整合的である。

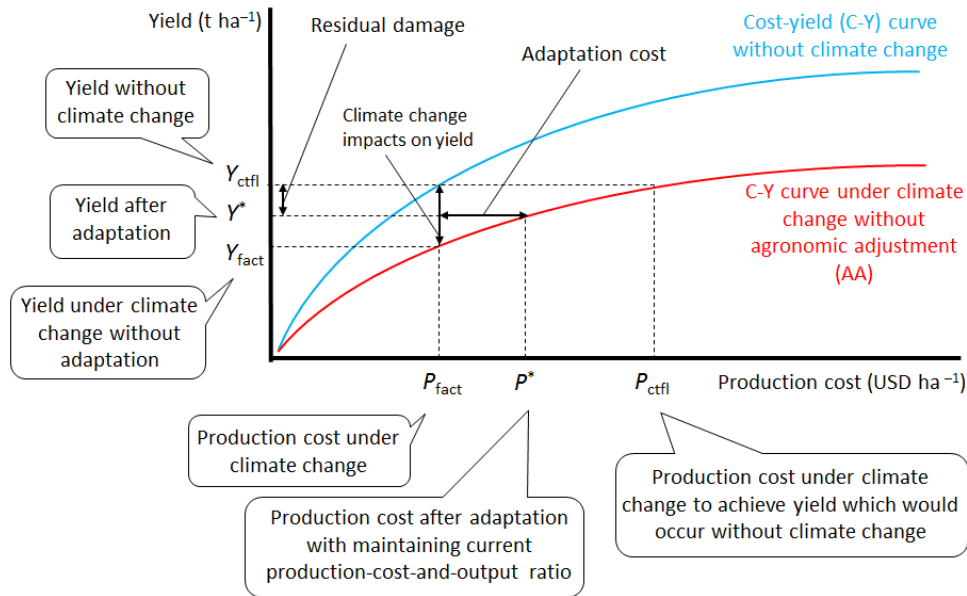


図1 農業生産における適応コストと残余被害

### 3. データ・手法

本研究では、2種類のデータソースから生産コストデータを収集した。一つは各国の生産費統計であり、59の国・作物の組み合わせについてデータを得た。データの年数は国や作物によって異なるものの、最も期間が長い場合で20年間（1991年から2010年）の時系列データが利用可能である。もう一つはGTAP 9データベース（Aguilar et al., 2016）であり、140国・地域における2011年の生産コストおよび産出額データを利用した。非熟練労働者、熟練労働者、資本、土地、薬剤のそれぞれの費用データが格納されているため、これらの和を総生産コストとして解析に使用した。

気候変動の収量影響を考慮したうえで、収量と生産コスト、技術水準との関係は以下のコブ・ダグラス型生産関数で記述した。

$$Y = W A P^\alpha R^\beta, (1)$$

$Y$ は10年平均収量 ( $t\ ha^{-1}$ )、 $W$ は気候変動の収量影響（無次元）、 $P$ は生産コスト ( $USD\ ha^{-1}$ )、 $R$ は農業知識ストック ( $10^3\ USD$ )、 $A$ はスケール係数、 $\alpha$ と $\beta$ は産出額の生産コストと農業知識ストックに対する弾力性である。符号条件は $0 < A$ 、 $0 < \alpha < 1$ 、 $0 < \beta < 1$ の全てを満たす必要がある。また、一般に農産物では $\alpha + \beta < 1$ となる場合が多いことが経験的に知られている。生産コストモデルは作物別に構築した。

気候変動の収量影響は、生理生態的な生育過程に基づく作物モデルCYGMA（Crop Yield Growth Model with Assumptions on climate and socioeconomics；Iizumi et al., 2017a, 2018, Fujimori et al., 2018）を用いたシミュレーションにより以下のように計算した。

$$W = \frac{Y_{fact}}{Y_{ctfl}}, (2)$$

$Y_{fact}$ と $Y_{ctfl}$ はそれぞれ気候変動がある場合とない場合のそれぞれの10年平均収量 ( $t\ ha^{-1}$ ) である。

作物モデルによるシミュレーションの詳細は Iizumi et al. (2017) に記載されている。

1961 年以降の農業知識ストックは以下で計算される。

$$R_t = E_{t-6} + (1 - \delta) R_{t-1}, (3)$$

ここで、 $E$  は政府の年間研究開発支出 (USD)、 $\delta$  は知識の陳腐化率 (ここでは 0.1 を使用) を表す。なお、添え字の  $t$  は年を表す。政府研究開発支出は以下の式で近似的に計算した。

$$E = GDP \frac{AGV}{100} \frac{RDE}{100}, (4)$$

$GDP$  は国内総生産 (USD)、 $AGV$  は GDP に占める農業の割合 (GDP に対する%)、 $RDE$  は GDP に占める全セクターの総研究開発支出割合 (GDP に対する%) である。これらの国別・年別データは世界銀行の World Development Indicators から得た。将来の GDP シナリオは Shared Socioeconomic Pathways のデータを用い、AGV と RDE については 2010 年の値を使用した。

式 1 を生産コスト  $P$  について解くことで以下の式を得られる。

$$P = \exp \left[ \frac{\log \left( \frac{Y}{W A R \beta} \right)}{\alpha} \right], (5)$$

これにより、作物モデルが計算した収量データと社会経済シナリオから得られる農業知識ストックのデータがあれば、生産コストを推定することが可能である。

統計モデルを用いた気候変動影響評価では、異なる仕様のモデルを用いることが多い (Lobell and Burke, 2010, Zhou and Turvey, 2014, Tokunaga et al., 2015)。そこで、本研究では、キャリブレーションする際に使用するデータセットの違いに応じて、3 種類の生産コストモデルを構築した。すなわち、1) 時系列モデル：生産費統計データのみを使用、2) クロスセクションモデル：GTAP データのみを使用、3) パネルモデル：生産費統計データと GTAP データの両方を使用、である。ただし、紙面の制約からパネルモデルの結果のみを示す。

#### 4. 結果

4 穀物を合計した場合の 10 年平均全球適応コスト、残余被害、気候変動の総コスト (適応コスト + 残余被害) の将来見通しを図 2 に示す。気候変動の総コストは、年代あるいは排出シナリオの違いに代表される今世紀末の気温上昇の度合いに応じて増加する (図 2 上下右パネル)。残余被害の推移は気候変動の総コストとほぼ同様だが (図 2 上下中央パネル)、適応コストは異なる挙動を示した (図 2 上下左パネル)。

簡易な対応策 (播種日の移動と品種の切替) の有無は、気候変動の総コストと残余被害の推移にはあまり影響しない。対応策がある場合とない場合のいずれでも、RCP8.5 の今世紀末では、気候変動の総コストは 2,500 億ドル~2,700 億ドルに達する。しかしながら、簡易な対応策がないと、対応策がある場合に比べて、残余被害が相対的に大きくなる傾向が見られる (対応策あり・1,700 億ドル、対応策なし・2,400 億ドル。いずれも RCP8.5 の今世紀末。図 2 上下中央)。これは、簡易な対応策があると、対応策がない場合に比べて、生産コストを追加せずに気候変動下の収量のある程度増加させることができるため、気候変動がない場合の収量との差が小さくなり、残余被害が縮小するためである。

一方、簡易な対応策の有無が適応コストの結果には大きく影響する。簡易な対応策がある場合には、適応コストに排出シナリオ間の差異はほとんど見られないが、簡易な対応策がない場合には、

排出シナリオ間の違いにより適応コストが異なる（図2上下左パネル）。これは、簡易な対応策があることにより気候変動下の収量と気候変動がない場合の収量の差が相対的に小さいため、生産コストを追加すれば収量が増加する余地があるためと考えられる。今世紀末では、いずれの排出シナリオでも適応コストは1,000億ドル前後と推計された。一方、簡易な対応策がない場合は、作物の生理生態的な限界や生産コストの増加に対する生産者の収益の増加が釣り合わないことにより、気温上昇が著しい排出シナリオ（RCP8.5）では経済的に生産者が負担できる適応コストが減少し、残余被害が増加する。将来の気温上昇が抑制される排出シナリオ（RCP2.6）では、適応コストを支出後も生産コスト・産出額の比が釣り合うものであり、残余被害は顕著に増加せずに頭打ちになる。今世紀末の適応コストは、RCP8.5で500億ドル、RCP2.6で100億ドルと推計された。

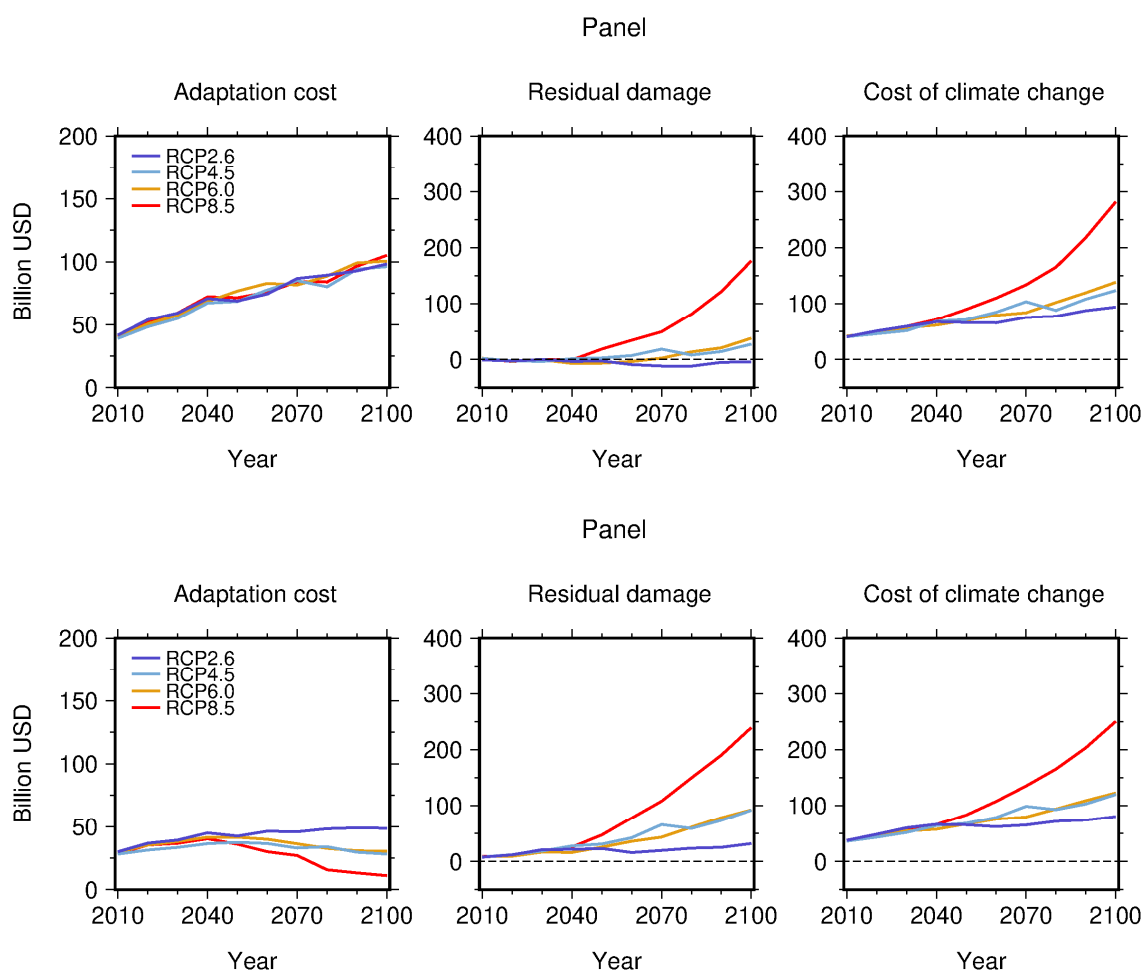


図2 適応コストと残余被害、気候変動の総コストの将来見通し。4穀物合計の10年平均全球積算値を示す。上のパネルは、播種日の移動や品種の切替といった生産コストに影響しない簡易な対応策があると仮定した場合、下のパネルは簡易な対応策がないと仮定した場合の結果。5つの気候モデル（GCM）の平均をそれぞれの排出シナリオ（RCP）について示した。社会経済シナリオは中庸なSSP2を仮定した。生産コストモデルはパネルモデルを使用した。

## 5. まとめ

本研究では、気候変動の将来予測シナリオに基づき、主要穀物を対象に、適応コストと残余被害、それらの和である気候変動の総コストを全球で推計した。適応コストは全球平均気温の上昇に伴って増加し、その後、減少に転じる。この推移パターンは穀物生産システムにおいては適応限界があることを示唆する。作物の高温耐性には生理生態的な限界があることが知られているが、これは、それに加えて、適応コスト（追加生産コスト）が追加産出額に見合うかどうかという意味での経済的な適応限界があることを意味する。

全球の適応コストについて既存研究を整理した Wreford and Renwick (2012) は、農業分野の適応コストは世界全体で年間 40 億ドルから 1660 億ドルと報告している。このうち、2030 年から 2050 年を想定した場合の適応コストは 280 億ドルから 1,660 億ドルである。本推計で得られた 2050 年の適応コストは 300 億ドルから 700 億ドルである。使用した排出や気候変動、社会経済についての将来シナリオが研究例ごとに異なるため、単純な比較は難しいが、本研究で得られた適応コストは先行研究と整合的か、やや小さい値となった。

既存研究と本研究との適応コストの差の原因を明らかにすることは本研究の目的ではない。しかしながら、既存研究で「全球適応コスト」と呼んではいないものが、実際は、開発途上国のみを適応コストを指している場合が多い点に注意が必要である。一方で、本研究では主要生産国 52 カ国を対象としており、先進国を含むが、開発途上国の全てを含んでいない。したがって、全ての生産国を含む適応コストは、本研究を含む、いずれの推計値よりも大きくなる可能性が高い。

#### 引用文献

- Aguiar A, Narayanan B, McDougall R (2016) An Overview of the GTAP 9 Data Base. *J Glob Econ Anal* 1:181–208.
- Brown PR, et al. (2018) Constraints to the capacity of smallholder farming households to adapt to climate change in South and Southeast Asia. *Clim Dev* doi:10.1080/17565529.2018.1442798.
- Chambwera M, et al. Economics of adaptation. *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*, eds Field CB, et al. (Cambridge University Press, Cambridge and New York) pp 945-977.
- Cramer W, et al. (2014) Detection and attribution of observed impacts. *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*, eds Field CB, et al. (Cambridge University Press, Cambridge and New York), pp. 979–1037.
- Fujimori S, et al. (2018) Macroeconomic impacts of climate change driven by changes in crop yields. *Sustainability* 10:3673.
- Iizumi T, et al. (2017a) Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes. *Sci Rep* 7:7800.
- Iizumi T, et al. (2018) Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981–2010 compared with preindustrial levels. *Int J Climatol* 38:5405–5417.
- Kabir MJ, Alauddin M, Crimp S (2017) Farm-level adaptation to climate change in Western Bangladesh: An analysis of adaptation dynamics, profitability and risks. *Land Use Policy*

- 64:212–224.
- Lobell DB, Burke MB (2010) On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agric For Meteorol* 150:1443-1452.
- Moore FC, Lobell DB (2015) The fingerprint of climate trends on European crop yields. *Proc Natl Acad Sci USA* 112:2670–2675.
- Porter JR, et al. (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*, eds Field CB, et al. (Cambridge University Press, Cambridge and New York), pp 485–533.
- Stern N (2006) *The Economics of Climate Change* (HM Treasury, London).
- Tokunaga S, Okiyama M, Ikegawa M (2015) Dynamic panel data analysis of the impacts of climate change on agricultural production in Japan. *Japan Agric Res Q* 49:149-157.
- UNEP (2016) *The Adaptation Finance Gap Report 2016* (United Nations Environment Programme, Nairobi).
- Wreford A, Renwick A (2012) Estimating the costs of climate change adaptation in the agricultural sector. *CAB Rev* 7:1–10.
- Zhou L, Turvey CG (2014) Climate change, adaptation and China's grain production. *China Econ Rev* 28:72–89.