

## 世界の穀物生産における気候変動影響と適応

飯泉 仁之直（農研機構 農業環境研究部門）

### 1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は第6次評価報告書（AR6）第2作業部会（WG2）報告書を2022年2月に公表した。自然システムと人間システムのいずれでも人為起源の気候変動（地球温暖化）による影響が顕在化しており、農業分野も例外ではない。生産現場をはじめとするフードサプライチェーンの各段階において様々な適応が始まっている。

そうした気候変動の影響・適応・脆弱性に関する最新の科学的な知見はAR6 WG2のうち主に第5章「食料、繊維、その他の生態系産物」にまとめられている。講師（飯泉）が著者として関係し、AR6 WG2に引用された論文19報のうち多くが同章に引用されている。本講義では、これらの論文に基づき、広域スケール（全国規模から全世界規模）での気候変動の穀物生産影響と適応策の評価についての近年の知見を紹介する。

### 2. 世界の食料需給と気候変動

世界の食料需要は2050年に現在の約1.5倍に増加すると予測されている。この需要を満たすためには、仮に収穫面積を拡大しない場合、食料供給側では単位面積あたりの生産量（生産性、または収量と呼ばれる）を増加させる必要がある。収量増加のみで需要増加に対応する場合、毎年2.4%収量を増加させなくてはならない。しかし、主要穀物（トウモロコシ、コムギ、ダイズ）について見ると、過去20年間（1989-2008年）に達成できた収量増加率は年間0.9%から1.6%であり、必要な増加率を大きく下回っている（Ray et al. 2013）。すなわち、2050年に98億人と見込まれる世界人口を養ううえで十分な食料を供給することは農業分野にとって大きな挑戦である。

一方で気候変動が進行している。気象庁のデータ（[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an\\_w1d.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_w1d.html)）では、世界の年平均気温が最も暑かった上位5か年は全て2015年以降に集中している。気候変動による気温上昇や降水パターンの変化、熱波や干ばつ、洪水など極端現象の増加は、既に厳しい世界の食料需給状況に更なる圧力を加えている。

### 3. これまでの気候変動による影響

#### 3.1 平均収量への影響

2011年に発表された先駆的な推計（Lobell et al. 2011）では、これまでの気候変動による生産量低下は、平均すると、全世界でトウモロコシが3.8%、コムギが5.5%と見積もられた。これはメキシコのトウモロコシ年間生産量2,300万トンとフランスの年間コムギ生産量3,300万トンにそれぞれ相当する。生産量低下の要因は主に気温上昇であり、降水量変化の寄与は認められなかった。また、コメとダイズについては気候変動の影響は検出されなかった。

その後、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF, <https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF/about.html>）とプロセスベース作物モデルを用いた、新たな推計が2018年に公表された（Iizumi et al. 2018）（図1）。その推計では、世界の平均収量の低下（対：非温暖化過去条件での収量）はトウモロコシで4.1%、コムギで1.8%、ダイズで4.5%と見積もられ、金額換算すると3穀物合計で424億ドルと評価された。コムギについては気候変動の影響は検出されなかった。d4PDFを用いた気候変動の生産影響の評価は西アフリカで地域的に重要な穀物であるミレットとソルガムにも適用され、収量低下はそれぞれ10~20%および5~15%と推計

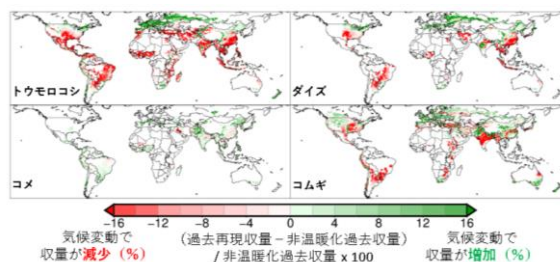


図1 これまでの気候変動による収量影響の推定値。過去30年間（1981-2010年）の平均収量に気候変動が与えた影響を作物モデルで推定した。気候変動を含む現実の気候条件と、気候変動がなかったと仮定した気候条件のそれぞれについて収量を推定し、両者の差を気候変動の影響とした。赤色は気候変動により収量が低下したこと、緑色は気候変動により収量が増加したことを示す。白色は非栽培地域。

された (Sultan et al. 2019)。収量に対する気候変動影響を検出することはこれまで解析技術的に困難だったため、d4PDF を用いたこれら 2 つの論文は評価が高く、AR6 WG2 でも 14 か所で引用された。

### 3.2 収量の安定性への影響

気候変動の悪影響として、上述した平均収量の低下に加えて、収量の不安定化が懸念されている。Tigchelaar et al. (2018) において概念的に説明されたように、収量は最適気温条件下で最も高くなり、それより高温側、低温側のいずれでも収量は低下する。現在気候下の平均気温が最適になるように生産システムは調整されているため、温暖化すると平均気温は最適気温よりも高温側に移動する。この結果、生育期間の平均気温の年々変動が温暖化前と同じ場合でも、最適気温から高温側に外れた温度領域で気温が年々変動するため、収量の年々変動が増大し、収量が不安定化する。過去 30 年間 (1981-2010 年) の主要穀物の収量変動の変化を評価した結果、世界の収穫面積の 9%~22%の地域で収量の不安定化が検出された。こうした地域は特に中国東北部やオーストラリア、地中海沿岸に見られた。収量変動の変化のうち 21%が気候変動で説明され、最適気温を上回る高温日数の増加が最も大きな要因であることが示された (Iizumi and Ramankutty 2016)。

複数の主要生産・輸出地域での同時不作も懸念されている。同時不作にはエルニーニョ/ラニーニャ現象など海洋・大気振動によるテレコネクションが寄与している (Heino et al. 2020, Iizumi et al. 2021)。しかし、気候変動による同時不作リスクの変化についてはまだ十分な知見が得られていない状況である。

## 4. 将来の気候変動により予測される影響

### 4.1 収量増加の鈍化

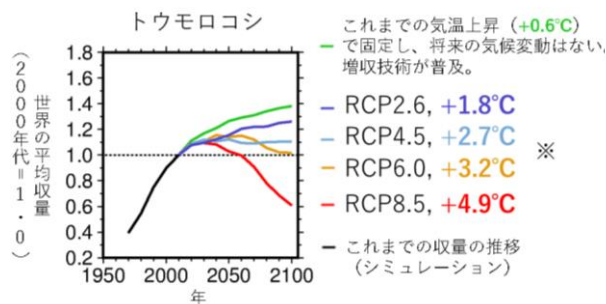
食料需要の増加に対応するうえで技術発展による収量増加が不可欠だが、気候変動の悪影響は収量の増加率を鈍化させる。気候変動により鈍化した収量増加率を気候変動がない場合の水準にまで回復するには適応策の導入が必要となる。適応策の評価はこれまででも行われてきたが、適応策の限界や、とりわけ適応費用については評価例が少なかった。

2017 年に公表された新たな影響予測 (Iizumi et al. 2017) では、世界の主要穀物の将来の収量変化について、気候変動の影響に加えて、経済発展に伴

う既存の増収技術の開発途上国への普及や、播種期の移動などの簡易な適応技術の導入を考慮した。この予測によれば、トウモロコシとダイズは今世紀末までの世界の平均気温の上昇が 1.8°C未満 (対工業化以前) でも、また、コムとコムギは気温上昇が 3.2°Cを超えると世界の平均収量の増加が停滞し始めることが示された (図 2 はトウモロコシについての予測)。この知見を用いることにより、気温上昇 1.5°Cと 2°Cの場合の気候変動影響を比較できるようになり、IPCC の 1.5°C特別報告書にも貢献した。

### 4.2 適応コスト

農業分野で既に導入されている適応策は実施が比較的容易なものから導入が困難なものまで多岐に渡る。Iizumi (2019) は文献サーベイにより既に実施、あるいは検討されている適応策を収集した。温暖化しても現在と同じ作物を栽培し続ける場合には、播種期や肥料などの資材の投入量・時期を変更する、既存の別品種に切り替えるといった対応が見られた。これまでと同じ作物の栽培が困難になった場合には高温耐性品種などの新品種に切り替える、あるいは栽培作物を変更するなどの対策が取られる場合があった。実施は容易ではないが、灌漑設備の導入なども検討されていた。適応策には上述した栽培技術的



※ 産業革命以前 (1850-1900年) に対する今世紀末 (2091-2100年) の世界の平均気温の上昇。気候変動が進行し、増収技術と簡易な適応技術が普及

図 2 主要穀物のうちトウモロコシの世界平均収量予測値の推移。黒線は作物モデルにより再現した過去 50 年間 (1961-2010 年) の世界の平均収量の推移、青～緑色の線はそれぞれの代表的濃度シナリオ (RCP) のもとでの収量予測値の推移で、いずれも 2000 年代値を基準 (1.0) とした相対値。気温上昇はそれぞれ RCP シナリオのもとで予測される今世紀末 (2091-2100 年) の気温上昇。過去の収量の再現値・予測値はいずれも、10 年間ごとに平均値を計算し、それをつないだ線グラフとして示す。

なものに加えて、非栽培技術的なものもあった。非栽培技術的な適応策には生産者向けの早期警戒・栽培管理支援システムの導入、気象保険や作物保険の導入などが報告されている。

比較的实施が容易な適応策（播種期の変更と既存の別品種への切り替え、資材の追加投入）に要するコストを世界の穀物生産について試算した結果、2℃上昇（対：工業化以前）では、主要穀物の生産被害は世界全体で年間 800 億ドル、そのうち 610 億ドルは適応策により被害の軽減が可能であり、対処しきれずに生じる残余被害は 190 億ドルと推定された（Iizumi et al. 2020）。なお、610 億ドルは世界第 2 位のトウモロコシ生産国である中国の年間生産額に相当する金額である。しかし、気温上昇が 3℃となると、適応策で対処できる被害割合は低下し、残余被害の割合は増大し、適応策を導入しても対処しきれずに生じる生産被害が深刻化していくとの結果だった（図 3）。一方、気温上昇を低く抑えられれば、それに伴う生産被害の大部分に対応できると推定された。これらの結果は、対応がより困難にならないように、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の重要性を示すものである。さらに、ここで想定した比較的容易な適応策では対処できないほど気候変動が進行した場合に備えて、より大きな変化を伴う対策（例：栽培作物の変更）や、より時間と労力が必要な対策（例：新品種の育成）

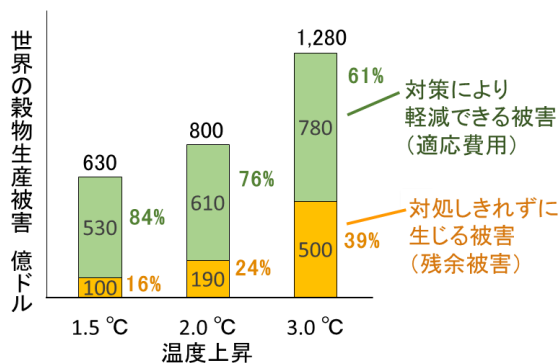


図 3 気候変動による 1.5℃、2℃、3℃の平均気温上昇が世界の穀物生産に引き起こす生産被害額、およびそのうち対策により軽減できる被害（適応費用）と対処しきれずに生じる被害（残余被害）の内訳。棒中の数値は内訳の金額、棒の上の数値は合計金額（億ドル）を示す。温度上昇は工業化以前（1850-1900 年）に対する現在および将来期間（1961-2100 年）のうち任意の 10 年間の平均の気温上昇を表す。

の導入が必要と示唆された。

#### 4.2 適応に必要な高温耐性品種の育成速度

より実施が困難な適応策のうち、予測される気温上昇に対応するために必要な高温耐性品種の育成速度を推計した（Iizumi et al. 2021）。世界で最も暑いコムギ栽培地域である東アフリカのスーダンでは、2050 年に 4.2℃上昇（対工業化以前）との想定ではコムギ収量を維持するには現在主力の高温耐性品種比で年あたり 2.7%の収量増加（＝育成・普及速度）が必要と推計された。しかし、過去 20 年間に達成できたコムギ収量増加率は世界平均で年間 0.9%であり、2.7%は達成が極めて困難と考えられる。1.5℃上昇との想定では、適応に必要な、新たな高温耐性品種の育成・普及速度は年あたり 0.3%と緩やかであることができるとの結果であった。排出削減等により気候変動の進行を緩やかにできれば、高温耐性品種の育成・普及にかけられる時間をより長く確保できる。すなわち、適応策を実施していくうえでも気候緩和が重要であることを強調する結果である。

#### 4.3 季節予報の活用

IPCC の第 5 次評価報告書（WG2 AR5）で指摘されたように、気候の年々変動により生じる高温などの異常天候への対応は現在の気候リスクを低下させ、将来の気候変動適応の試金石となる。気温を例にとると、世界の多くの地域では今世紀半ば頃までの平均気温の上昇幅は現在の気温の年々変動幅より小さいため、現在気候下の高温年に生じる悪影響に対処できれば、気候変動の高温にも自ずとある程度適応可能と期待できる（Deser et al. 2012）。このため、日々の天気予報に加えて、季節予報など長期予報を気候変動適応に活用することが農業分野で進んでいる。エルニーニョ／ラニーニャ現象の発生時に食料機関や市場関係者に早期警戒を促すために、気候や作物についての予測情報が利用されるようになってきている（FAO 2016, AMIS 2022）。季節予報に基づく世界の主要穀物の収穫前収量予測もその一つである。

#### 5. おわりに

本講義では AR6 WG2 で引用された論文のうち講師が著者として関係したものについて解説した。強調すべき知見は以下の通りである。①農業分野において気候変動の影響が既に顕在化しており、栽培管理

的・非栽培管理的な適応策のいずれもが世界のフードサプライチェーンの様々な段階で導入されている。②播種日の変更や既存の別品種への切替など簡易な適応策であっても効果は見られるものの、気候変動が進行した場合には簡易な適応策のみで食料生産への気候変動の悪影響に対処することは困難である可能性が高い。③生産システムの適応限界を超えないようにするため、また、生産システムに対してより大きな変革を伴う適応策を導入するまでの時間を確保するうえで、気候変動の緩和は必須であり、気候緩和と適応の速度を一層速める必要がある。

### 参考文献

- Agricultural Market Information System (AMIS), 2022: AMIS Market Monitor No. 100 July 2022. [http://www.amis-outlook.org/fileadmin/user\\_upload/amis/docs/Market\\_monitor/AMIS\\_Market\\_Monitor\\_current.pdf](http://www.amis-outlook.org/fileadmin/user_upload/amis/docs/Market_monitor/AMIS_Market_Monitor_current.pdf) (2022. 7. 24 閲覧)
- Deser, C., R. Knutti, S. Solomon and A. S. Phillips, 2012: Communication of the role of natural variability in future North American climate. *Nat. Clim. Change*, 2, 775-779.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2016: 2015-2016 El Niño-Early action and response for agriculture, food security and nutrition. <http://www.fao.org/emergencies/resources/documents/resources-detail/en/c/340660> (2022. 7. 24 閲覧).
- Heino, M., J. H. A. Guillaume, C. Müller, T. Iizumi and M. Kummu, 2020: A multi-model analysis of teleconnected crop yield variability in a range of cropping systems. *Earth Syst. Dynam.*, 11, 113-128.
- Iizumi, T., 2019: Emerging Adaptation to Climate Change in Agriculture. *Adaptation to Climate Change in Agriculture* (Iizumi, T., R. Hirata and R. Matsuda, eds.), Springer, 3-16.
- 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.
- Iizumi, T., J. Furuya, Z. Shen, W. Kim, M. Okada, S. Fujimori, T. Hasegawa and M. Nishimori, 2017: Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes. *Sci. Rep.*, 7, 7800.
- Iizumi, T., H. Shiogama, Y. Imada, N. Hanasaki, H. Takikawa and M. Nishimori, 2018: 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, 2021: Rising temperatures and increasing demand challenge wheat supply in Sudan. *Nat. Food*, 2, 19-27.
- Iizumi, T., Y. Takaya, W. Kim, T. Nakaegawa, T. and S. Maeda, 2021: Global within-season yield anomaly prediction for major crops derived using seasonal forecasts of large-scale climate indices and regional temperature and precipitation. *Weather Forecast.*, 36, 285-299.
- Lobell, D. B., W. Schlenker and J. Costa-Roberts, 2011: Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. *Science*, 333, 616-620.
- 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.
- Sultan, B., D. Defrance and T. Iizumi, 2019: Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models. *Sci. Rep.*, 9, 12834.
- 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.