

気候変動下の高温ストレスに対するスーダンのコムギ生産への影響

農研機構 農業環境変動研究センター 飯泉仁之直

鳥取大学 乾燥地研究センター 坪充

概要

スーダンにおけるコムギ需要はこの数十年の間に大きく増加した。2018年時点でスーダンは250万トンのコムギを輸入しており、これは国内消費量の83%に上る。スーダンの総人口は2017年の3,300万人から2050年には8,000万人に増加すると見込まれており、増加するコムギ需要に対応するために、スーダンの農業者や育種家、農学者、食料機関は国内の生産力を強化する必要がある。しかしながら、スーダンのコムギ生産量は、為替レートの度重なる変更といった社会経済要因により、繰り返し変動してきた。加えて、近年、顕在化している気候変動はコムギ生産上の更なる重荷になっている。本研究では、生理・生態的過程に基づく作物モデルCYGMAを改良し、圃場実験で観測された、生長・収量の気温に対する応答の品種間差を再現できるようにする。改良したモデルを用いて、気候変動下でコムギ供給目標を達成するうえでの高温耐性品種の潜在的な効果を評価する。

Impacts on wheat yield in Sudan associated with high temperatures under climate change

Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO, Toshichika Iizumi
Arid Land Research Center, Tottori University, Mitsuru Tsubo

Abstract

Demands for wheat in Sudan have increased for the last decades. Sudan imported wheat of 2.5 million tonnes in 2018, which accounts for 83% of the national wheat consumption. The national population in Sudan accounts for about 33 million in 2017 and would increase to 80 million by 2050. This requires farmers, breeders, agronomists and national food agencies strengthening the capacity of domestic wheat production to meet expected increases in demands. However, wheat production in Sudan is suffering from cyclic fluctuation because of socioeconomic factors, such as exchange rates reforms. Additionally, recent climate change constitutes an additional burden. In this study, we modify the eco-physiological process-based crop model CYGMA to enable it capturing the major differences in observed growth and yield response of wheat to growing-season temperature across the earlier and recent heat-tolerant varieties. Using the crop model, potential effects of utilizing the heat-tolerance varieties in achieving the production goal are assessed.

気候変動下的高温ストレスに対するスーダンのコムギ生産への影響

農研機構 農業環境変動研究センター 飯泉仁之直

鳥取大学 乾燥地研究センター 坪充

1. はじめに

スーダンにおけるコムギの需要量はこの数十年の間に大きく増加した。2018 年時点でスーダンは 250 万トンのコムギを輸入しており、これは国内消費量の 83%に上る。その一方で、国連の中位推計によれば、スーダンの総人口は 2017 年の 3,300 万人から 2050 年には 8,000 万人に増加すると見込まれている。増加するコムギ需要に対応するために、スーダンの農業生産者や育種家、農学者、食料機関は国内の生産力を一層強化する必要がある。しかしながら、スーダンのコムギ生産量は、為替レートや度重なる変更といった社会経済要因により、繰り返し変動してきた。それに加えて、近年、顕在化している気候変動は既にコムギ生産上の重荷になっている可能性が高い (Cramer et al., 2014, Moore and Lobell, 2015, Iizumi et al., 2018)。そのうえ将来の更なる温暖化による生産影響も懸念されている (Asseng et al., 2015)。

そこで、本研究では、まず、社会経済シナリオに基づく簡易な方法で、将来のスーダンのコムギ需要量を推計する。次いで、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, Benjamin et al., 2019) を改良し、圃場実験で観測された春コムギの生長・収量の気温応答の品種間差を再現できるようにする。これにより、改良したモデルと将来シナリオを用いて、気候変動下でスーダンのコムギ供給目標を達成するうえで、高温耐性品種の潜在的な有効性を評価する準備を整える。

2. データ・手法

2.1. コムギ需要量の推計

スーダンのコムギの年間消費量 (生産量+輸入量-輸出量) を人口と一人あたり国内総生産 (GDP) で回帰し、経験的な関係式を得た (以下の 1 式)。

$$\text{wheat_demand}(t/\text{yr}) = \log(\text{population}(\text{person})) + \log(\text{per_capita_GDP}(\text{USD}/\text{person}/\text{yr})), (1)$$
一人あたり GDP は平均収入を表す指標として用いた。米国農務省から得られる 57 年間 (1961~2017 年) のデータを使用し、関係式の回帰係数を決定した。その関係式に、共通社会経済経路 (Shared Socioeconomic Pathways, SSP, O'Neill et al., 2014) から得られる人口と GDP の将来シナリオを入力し、将来のスーダンにおけるコムギ需要量を推計した。

2.2. 作物モデルの改良・検証用コムギデータ

本研究では 2 種類のデータソースからコムギのデータを得た。一つは、スーダンのワド・メダニ (北緯 14°24'、東経 33°31') で行われた、春コムギの栽培試験データである。2008/2009 年から 2017/2018 年の 10 年間のうち 7 年間でデータが得られている。それぞれの栽培年について Debeira と Imam の 2 品種がそれぞれ 2 反復、試験され、播種日、出穂日、成熟日、収量のデータが報告されている。Imam と Debeira はいずれも高温耐性品種でだが、Imam は Debeira よりも新しい品種

であり、より高温耐性が高い。このデータを用いて、播種から成熟までに必要な温度要求量と高温ストレスへの抵抗性を品種別に設定した。

もう一つのデータは、広域の統計収量データである。このデータセットではニュー・ハルファとワド・メダニの2地域について過去48年間（1971～2018年）の地域平均収量データが利用できる。このデータは広域での作物モデルシミュレーションの妥当性を検証するために使用した。

2.3. 作物モデルによるシミュレーション

本研究で使用した作物モデルCYGMAは全球モデルだが、品種別の生育パラメータを決定する際には1地点（ワド・メダニ）のみでシミュレーションを行った。品種別に設定したパラメータは、播種日から成熟日までに必要な熱要求量と、葉面積指数とバイオマスの日々の増加を減少させる高温ストレスへの抵抗性の2つである。窒素欠乏、低温、乾燥、過湿といった高温以外のストレスに対する抵抗性はいずれの品種でも同じとした。観測データから得られた生育日数と収量の気温応答とモデルの計算結果から得られるそれがほぼ同じになるように、パラメータ値を試行錯誤で決定した。モデルへの入力気象データには、バイアス補正したJRA-55再解析データ（Kobayashi et al., 2015, Harada et al., 2016, Iizumi et al., 2017b）を、現地気象観測データで検証したうえで利用した。播種日は観測値をモデルに与えた。

2地域（ニュー・ハルファ、ワド・メダニ）における広域のモデルシミュレーションについては、現段階では品種間差を考慮せずに、CYGMAモデルの初期設定にある、全球共通パラメータ値を用いた。播種日と成熟までに必要な熱要求量はモデル内で気温条件と湿度条件から内生的に与えられる。窒素肥料投入量は一人あたりGDPと一人あたり農地面積に応じて変化するようにし、2004～2006年の平均値が文献値（86 kg N/ha/yr, Abdelgadir et al., 2010）と同じになるようにスケールリングを行ったうえで利用した。

3. 結果

3.1. コムギ需要量の推計

スーダンのコムギ需要量は2000年代半ばから急激に増加しているが、その傾向が将来も続く結果を示した。想定する社会経済シナリオによりコムギ需要量は大きく異なるが、今世紀半ばでは400万トンから600万トン、今世紀末には460万トンから760万トンに達すると見込まれる（図1）。

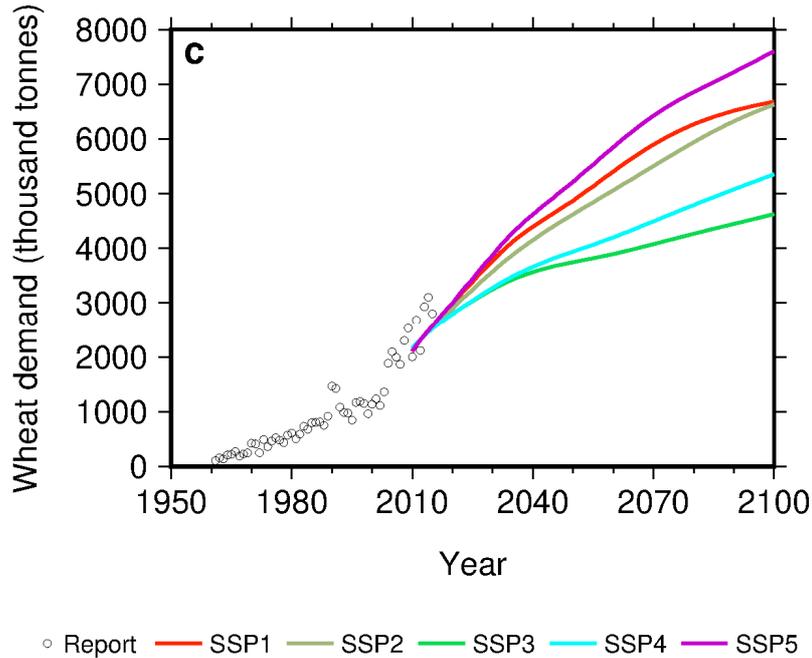


図1 スーダンのコムギ需要量の将来見通し。SSP1～5はそれぞれ異なる社会経済シナリオ（人口とGDPの組み合わせ）を示す。

3.2. 作物モデルで記述された品種間差

ワド・メダニ (Wad Medani) における栽培試験データを解析した結果、生育期間の平均気温が高いほど、播種日から出穂日までの日数と播種日から成熟日までの日数はいずれも短くなる傾向が見られた (図2の左上段と左中段)。平均気温が25°Cを超えると、生育期間の短縮が鈍化する傾向が特にImamで見られた。この傾向はDebeiraではあまり明瞭に見られなかった。また、平均気温が高いと収量が低下する傾向が見られた (図2の左下段)。2つの品種を比較すると、平均気温が同じであれば、平均的には、Imamの方がDebeiraよりも生育期間が長く、収量もより高いことが示された。これは、Imamの方がDebeiraよりも高温耐性が高いという既存の知見を裏付ける結果である。品種特性を考慮したCYGMAモデルのシミュレーションは、生育期間と収量についての上記の気温応答の品種間差異を適切に記述した (図2右上・中下段)。しかしながら、25°Cを超える高温条件下でImamの生育日数が停滞する現象はモデル出力値には見られなかった (図2右・中段)。

最適気温を超えた高温条件下で作物の生育速度が減少するモデリングは、ORYZA2000 (Bouman et al., 2001) などのイネの生育モデルに見られる。しかしながら、こうしたモデリングを用いると、作物モデルによる生育日数の予測値と観測値の乖離が大きくなることが、van Oort et al. (2011) や Zhang et al. (2016) により報告されている。すなわち、高温条件下での生育の停滞については観測事実としての信頼性が低いことが示唆されている。このため、ここで見られた高温条件下での生育の停滞についても栽培試験データを追加して再度、解析を行う必要があると考えられる。

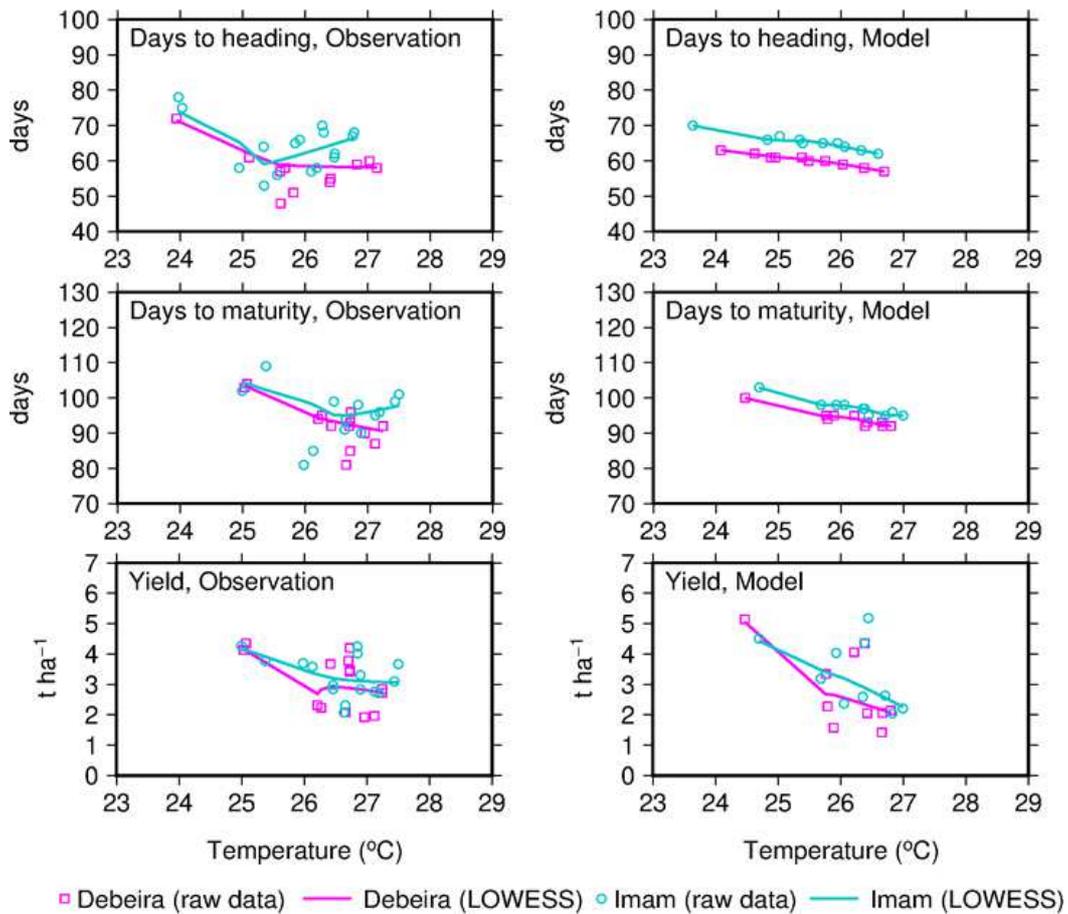


図2 圃場試験データに見られる、生育期間（上段：播種日から出穂日、中段：播種日から成熟日）、収量（下段）と生育期間の平均気温との関係（左パネル）。シンボルと線の色の違いは品種の違いを表す（紫色：Debeira、水色：Imam）。シンボルは生データ、線はlocally weighted regression (LOWESS)により平滑化した結果で、それぞれの作物変数の平均的な気温応答を示す。右パネルは左パネルと同様だが、作物モデルの出力値についてである。

3.3. 作物モデルによる地域平均収量の再現

図3は、スーダンの2つの地域（ニュー・ハルファとワド・メダニ）における過去48年間のコムギ収量の統計値とモデルシミュレーション結果を比較している。モデルは、統計値に見られる収量の増加トレンドを捉えているが、収量を過大評価しているほか、統計値に比べて、年々変動の幅が小さい。これは、広域の統計データでは収量しか報告されておらず、シミュレーションにおいて生育期間や窒素肥料投入量、主要品種といった要因の時間変化を正確にモデルに与えることができなかったためと考えられる。

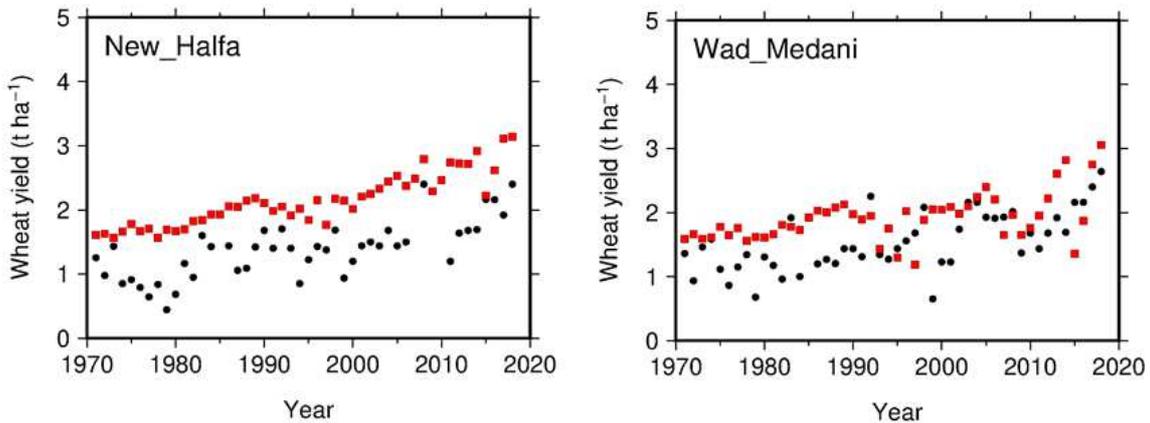


図3 ニュー・ハルファ (New Halfa) とワド・メダニ (Wad Medani) における過去 48 年間 (1971~2018 年) のコムギの統計収量 (黒丸) とモデルの出力値 (赤四角) との比較。

4. まとめ

本研究では、社会経済シナリオを用いて、将来のスーダンのコムギ需要量を推計した。さらに、圃場試験データを用いて、現在の主要品種である Debeira と Imam の気温応答の差異を作物モデルで再現できるようにした。これらの品種間差は、広域での作物モデルシミュレーションにはまだ反映されていない。このため、品種別の広域シミュレーションを今後、行う予定である。将来の気候変動シナリオとしては、バイアス補正した CMIP5 (Coupled Model Intercomparison phase 5, Taylor et al., 2012) データが既に利用可能である (Iizumi et al., 2017b)。品種別の広域シミュレーションが進捗した後は、気候変動下での収量見通しを品種別に示す。加えて、より高温耐性の高い品種 (Imam) を最大限に利用する仮想的なシナリオの下での、スーダンのコムギ生産のメリットを定量化することを予定している。

引用文献

- Abdelgadir EM, Fadul EM, Fageer EA, Ali EA (2010) Response of wheat to nitrogen fertilizer at reclaimed high terrace saltaffected soils in Sudan. *J. Agric. Soc. Sci.*, 6, 43–47.
- Asseng S, et al. (2015) Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature climate Change*, 5, 143–147.
- Bouman BAM, et al. (2001) ORYZA2000: modeling lowland rice (International Rice Research Institute, and Wageningen University and Research Centre, Los Baños).
- 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. *Sustain.*, 10, 3673.
- Harada, Y., et al. (2016), The JRA-55 Reanalysis: Representation of atmospheric circulation and climate variability, *J. Meteorol. Soc. Jpn., Ser. II*, 94, 269–302.
- Iizumi T, et al. (2017a) Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes. *Sci. Rep.* 7, 7800.
- Iizumi T, et al. (2017b) Contributions of different bias correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 7800–7819.
- 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.
- Kobayashi, S., et al. (2015), The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics, *J. Meteorol. Soc. Jpn., Ser. II*, 93, 5–48.
- Moore FC, Lobell DB (2015) The fingerprint of climate trends on European crop yields. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 112, 2670–2675.
- O'Neill BC, et al. (2014) A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Clim. Change*, 122, 387–400.
- 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.
- Sultan B, Defrance D, Iizumi T (2019) Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models. *Sci. Rep.* (in press).
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl (2012), An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 485–498.
- van Oort PAJ, et al. (2011) Correlation between temperature and phenology prediction error in rice (*Oryza sativa* L.). *Agric. For. Meteorol.*, 151, 1545–1555.
- Zhang T, et al. (2016) Model biases in rice phenology under warmer climates. *Sci. Rep.*, 6, 27355.