地球規模の灌漑用水要求量とその水源に対する 気候変化の影響

IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON GLOBAL IRRIGATION WATER REQUIREMENT AND ITS SOURCES

眞崎良光¹・花崎直太²・高橋潔³・肱岡靖明⁴

Yoshimitsu MASAKI, Naota HANASAKI, Kiyoshi TAKAHASHI and Yasuaki HIJIOKA

¹正会員 博（理） 国立環境研究所（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

²正会員 博（工） 国立環境研究所（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

³正会員 博（工） 国立環境研究所（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

⁴正会員 博（工） 国立環境研究所（〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2）

We have evaluated evapotranspiration from different types of cropland and its water sources under future climate conditions when the current cultivation and irrigation practices will be kept in the future. A future increase in evapotranspiration from irrigated croplands will be larger than that from rain-fed croplands. To compensate increasing water loss from irrigated croplands through evapotranspiration, a larger amount of water will be supplied from non-river water sources than today: cultivation of the second crops in a double-cropping system in India is a typical example. Additional adaptation measures will be necessary to prevent future water shortage where the capacity of currently existing reservoirs or groundwater will be insufficient for future irrigation requirement.

Key Words : *Irrigation water, climatic change, cropland type, water resources, crop evapotranspiration*

1. はじめに

水は人間活動に不可欠な資源であり、将来にわたって必要な水資源量を確保できるかは、持続可能な地球・社会システムを構築する上で主要な課題の一つである。現在、人為活動に伴う取水量のうち、灌漑用水が全体の約7割を占めており、最も主要な取水用途になっている¹⁾。

灌漑は、作物生育の水ストレスを防ぎ、乾燥地での栽培や多毛作を可能にすることで、食糧生産量の増加に貢献してきた。少なくとも今後数十年間は世界人口の増加が見込まれ²⁾、農地拡大や単収増による食糧生産量の増加が求められており、同時に灌漑の需要が増えることも予測される。加えて、温暖化による農地からの蒸発散が促進されることによる灌漑水量の増加も予測されている。これら灌漑水量が増加する要因がある中、無秩序な灌漑取水は、河川流域の水不足を誘発する可能性がある。気候変動影響予測のためのモデル間相互比較プロジェクト Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP)³⁾の初期成果からも、河川流域における灌漑取水

の問題が指摘されている⁴⁾。

灌漑水量が増大する中、持続可能な水利用の実現は大きな社会問題である。これまでの水資源評価に関する研究では、河川流域毎に河川流量を評価し、灌漑等水使用量との需給バランスを議論してきた。しかし、多毛作栽培や灌漑栽培が、水資源をどの程度圧迫し、これらの栽培様式を変更することで水不足を回避できるかについては、検討するための基礎的情報が不足している。具体的には、地域毎に異なる栽培様式が、将来、どの程度の灌漑水量を必要とし、それをどの水源に依存するのかを評価した研究事例は少ない。

そこで本研究では、最新の将来気候シナリオに従って、将来、現存の多毛作栽培・灌漑農地を維持する場合、作物生育に必要な水について、①水源（降水、河川、それ以外）別、および②農地利用（二毛作・一毛作および灌漑の有無）別に評価し、それぞれの将来変化を調べた。農地に供給された灌漑水は、蒸発散や流出により失われる。後者は、灌漑により土壌水分が定常的に高めに維持されるため、降雨時以外はほぼ定常であるのに対し、前者は、気候条件により大きく左右される。そこで本研

究では、水文モデルによる計算の利点を活かして、灌漑により農地に供給されてから蒸発散として失われるまでの水の流れを追跡し、それぞれの水量を記録することで、各地域の農地利用と将来の灌漑水源依存性との関係を調べた。これにより、温暖化に伴う気象条件の変化に対する水源別・農地利用別蒸発散量の応答と、その大きさの地理的分布を明らかにすることを目的とする。

2. 手法

将来気候として、ISI-MIPが作成し、配布・提供している5つのGCM気象データセット（GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M）を用いた。空間分解能は $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ であり、全球陸域について現在（1951～2005年）および将来（2006～2099年）をカバーしている。将来の気候は、4種類の代表的濃度パス⁵⁾（RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5）に基づく。湿度以外の全気象要素入力値にバイアス補正が適用されている⁶⁾。その概要は、1960～1999年の観測ベースのWATCH気象データ⁷⁾と各GCMのデータから、気象要素日別値の累積度数分布をそれぞれ求め、前者の分布に合うように後者を変換する補正法である。変換関数は月ごとに決めるものの、月初・月末における気温等の不連続性を避けるため、変換関数のパラメータを補間して適用する。

水文モデルはH08⁸⁾を使用し、上記日別値の気象データを入力し、水文過程（積分計算の時間間隔1日）の計算をした。ダム運用は、将来の運用に関する不定性が大きいため、本研究では現在・将来ともに扱わないこととする。

H08では、1つの陸域セルに対して、異なる水管理環

図-1 H08における再分割の概念図。陸域セルを、4種類の農地利用（#1：二毛作灌漑地、#2：一毛作灌漑地、#3：天水農地、#4：その他）に各面積割合に応じて分割する。モザイク毎に独立した灌漑様式を設定することで、同一地点であっても、農地利用ごとに異なる蒸発散量、土壌水分量を持つ。

境下での水文過程計算ができるように、再分割する機能が設けられている（図-1）。本研究では、1つの陸域セルを4つの農地利用（二毛作灌漑地、一毛作灌漑地、天水農地、その他）に分割し、それぞれをモザイク#1, #2, #3, #4と呼ぶ。灌漑農地面積についてはSiebert⁹⁾を用いた（各農地利用の分布を図-2に示す）。栽培作物はMonfreda¹⁰⁾のデータに基づき、主要19作物種に再編集した上で、二毛作灌漑地では、そのセルにおける最大および第2位の作付面積作物（以降、主作物、副作物と称す）を、一毛作灌漑地および天水農地では、最大作付面積作物を栽培することとする。灌漑条件（灌漑期間や灌漑面積の増減、維持すべき土壌水分量など）・栽培条件（栽培作物種や作付面積の増減など）の将来変化予測は難しいため、現状（2000年）の値に固定した。栽培暦は1971～2000年のWATCH気象データに基づき、最大収量の得られる平均植付日を求め、これを将来にも適用した。ただし、作物の生育・登熟は積算気温に基づいて計算（作物種ごとに決められたSWIM¹¹⁾の生育パラメータを使用）するため、栽培期間は将来の気候条件によって変わる。

灌漑農地では、栽培期間およびその前30日間、作物が水ストレスを感じない土壌水分量（圃場容水量の75%、水田は同100%）を維持できるように、灌漑用水を供給し続けるものとする。本研究では、農地に供給される水源として、降水、河川水および非河川水を考える。水源から農地を経由して蒸発散として失われるまでの水量を、水源別・農地利用別に記録する。水源別解析の妥当性は、

図-2 本解析で使用了農地利用とその分布（黒色部分）。(a) 二毛作灌漑地、(b) 一毛作灌漑地、(c) 天水農地。

観測値が存在しないため、同種水文モデル解析結果との比較を通じて検証¹²⁾されている。非河川水は、河川の自然流量以外から得るすべての水源（貯水池や地下水、ダム操作による河川流量割増分も含む）を包含したものを想定しており、上記灌漑条件を河川取水のみで維持できない場合、その不足分を非河川水源から取水するものとする。この仮定により、河川・非河川起源を合わせた灌漑水量は、水ストレスのない理想条件下での灌漑栽培において必要になる水量を与えることになる。

灌漑以外にも、工業用水、家庭用水を、河川から取水した。これらの水量に関しては、国別統計データ AQUASTAT¹³⁾から、GPWv3¹⁴⁾の人口密度分布に応じて各セルに水使用量を配分して、セルごとのデータを用意した。将来の不確実性が大きいので、2000年の値で固定した。

3. 結果と考察

(1) 水源別・農地利用別の作物栽培期間中の蒸発散量変化

まず、作物栽培期間中の蒸発散量について、農地利用ごとに面積割合に応じた重み付けをして全球平均をとり、全体的傾向を把握する。図-3は、現在（1971～2000年）および将来（2070～2099年）の作物栽培期間中の蒸発散量であり、また、現在値に対する将来の変化率を表-1に示す。

灌漑農地では、現在気候下において蒸発散を通じて1回の作付あたり400mm程度を消費しており、その水源を降水と灌漑水でほぼ半々に分けあっている。二毛作灌漑地での副作物栽培期間中の全蒸発散量は、他の灌漑地の結果とほぼ同じであるのに対し、降水への依存度が小さい。これは、主作物に比べて天水環境が厳しい条件（栽培季節など）下で栽培されているものの、灌漑により作物を水ストレスから防いでいる状況が示唆される。天水農地は、灌漑農地よりも冷涼な高緯度地域にまで広く分布していることに加え、土壤水分量が低いために作物の蒸発散量が抑制される効果もあり、栽培期間を通じた蒸発散量は、灌漑農地の結果に比べて小さい。

将来、いずれの灌漑農地においても全蒸発散量の増加が認められ、温暖化が進む気候シナリオ（RCP8.5）ほど大きく増加する。東南～南アジアにかけて多く分布する二毛作灌漑地では、降水・河川水起源の蒸発散量も増加しているものの、非河川灌漑水の増加が著しい。温暖な地域を中心に全球に広がる一毛作灌漑地では、降水起源がほぼ不変ないし微減するのに対し、灌漑起源の割合が増加し、特に非河川水起源の増加が顕著である。乾燥地や寒冷地以外の全球に広がる天水農地では、将来も蒸発

図-3 水源別・農地利用別の栽培期間中の蒸発散量[mm]。対象農地利用について全球を平均した値であり、5つのGCM平均をとった。二毛作灌漑地#1については、主作物（1st）と副作物（2nd）に細分した。各モザイクについて、左から順に現在、RCP2.6、RCP8.5の結果を示し、水源別に色分けした。なお、#3は天水農地であるため、降水起源のみが対象となる。

表-1 水源別・農地利用別の栽培期間中における蒸発散量の、現在（1971～2000年）に対する将来（2070～2099年）の変化率[%]。二毛作灌漑地#1については、主作物（1st）と副作物（2nd）に細分した。

(a) RCP2.6				
水源 \ モザイク	#1(1 st)	#1(2 nd)	#2	#3
降水起源	+4.4	+3.1	0.0	+2.3
河川水起源	+6.0	+1.3	+0.2	—
非河川水起源	+12.1	+8.6	+8.2	—
（全水源）蒸発散	+6.9	+5.7	+2.5	+2.3
(b) RCP8.5				
水源 \ モザイク	#1(1 st)	#1(2 nd)	#2	#3
降水起源	+4.9	+3.6	-6.7	-2.0
河川水起源	+14.3	+1.4	+4.7	—
非河川水起源	+31.9	+24.2	+33.1	—
（全水源）蒸発散	+14.3	+14.4	+7.9	-2.0

散量はあまり変わらない。

灌漑農地では栽培期間中の土壤水分量が強く維持されているため、常に可能蒸発散量に近い蒸発散が実現されていると考えられ、気温上昇が蒸発散量の増加につながっている。これに対し、天水農地では、気温が上昇しても降水量が増えない限り土壤水分量による蒸発散の抑制効果が働き、蒸発散量があまり増えなかったものと考えられる。この理由の裏付けとして、天水農地における栽培期間中の全球平均蒸発散量が将来もほぼ変わらない（現在275.3mm、RCP8.5における将来269.7mm：図-3）

のに対し、同じ方法で求めた可能蒸発散量は増加（それぞれ509.7mm, 587.1mm：図未掲載）していることが挙げられる。灌漑水源として、河川水より非河川水への依存度が大きくなっているが、河川流量はその地域あるいは上流域の降水量に支配されることを考えると、降水量が増加しない限りは河川流量の増加も見込めず、必要な灌漑水を河川以外に求めざるを得ないものと考えられる。

(2) 作物栽培期間中の蒸発散量の将来変化に見られる地理的分布とその特徴

気候条件によって蒸発散量が変わるとともに、降水量や河川流量などの水資源量も異なるため、地域によって水源別の灌漑水供給依存度も異なる。前節では全球での傾向を捉えたので、本節では各地域の特性を解析する。

作物栽培期間中の蒸発散量について、水源別の将来変化量を図-4に示す。以下ではRCP8.5を例に記述するが、温暖化が進むシナリオほど変化量が大きくなる傾向があり、増減の傾向や地理的分布はRCPによらず同様の傾向を示す。

二毛作灌漑地では、全球での傾向を反映して、降水・河川起源の蒸発散量がやや増加し、副作物に比べて主作物の蒸発散増加量の方がやや大きい。非河川水起源の蒸

発散量は大きく増加し、特に副作物栽培期間中のインドや地中海沿岸では100mm程度以上の増加を示す。

一毛作灌漑農地では、降水起源の蒸発散量に二つの傾向が見られる。将来降水量が減少するヨーロッパ中部～地中海周辺やアメリカ西岸では、降水・河川起源の蒸発散量も減少する。それ以外の地域では、降水・河川起源の蒸発散量が微増する。いずれの地域も、非河川灌漑水起源の蒸発散量は増加し、中南米やアフリカの一部では100mm近い増加を示す地域がある。

天水農地でも、将来の降水量変化傾向と似た蒸発散量の変化傾向を示し、ヨーロッパ中部～地中海沿岸やアメリカ穀倉地帯で減少するが、アフリカ赤道地域、東～南アジアでは増加傾向にある。これは、気温上昇による蒸発散の活性化と、降水減少により土壌水分の減少を介した蒸発散の抑制化との、両効果の大小によって地域的差異が生じるものと考えられる。

つぎに特徴的な将来変化を示す2地域を詳しく解析する。インド南部（70°E～90°E, 10°N～20°N）とヨーロッパ中部～地中海沿岸（0°～20°E, 40°N～50°N）に矩形領域を設定し、領域内での蒸発散量の平均をとる以外は、前節と同様の解析をする。その結果（図-5）を、全球での結果（図-3）と比較する。

図-4 水源別・農地利用別の栽培期間中における蒸発散量の将来変化量[mm]（1971～2000年に対する2070～2099年の変化量）。気候シナリオはRCP8.5を使用し、5つのGCMの平均をとった。各パネルは上段より、二毛作灌漑地の主作物、同副作物、一毛作灌漑地、天水農地であり、水源別に、（左）降水起源、（中）河川水起源、（右）非河川水起源を示す。

図-5 特徴的な2地域（(a)インド南部、(b)ヨーロッパ中部～地中海沿岸）における水源別・農地利用別の栽培期間中の蒸発散量[mm]。図-2に示した各農地利用について、対象領域（挿入地図に黒で塗りつぶした領域）内の平均をとった。各モザイクについて、現在とRCP8.5の結果を示したものであり、水源に関する凡例は図-3に同じ。

インド南部の場合、二毛作灌漑地の主作物の全蒸発散量は、全球平均と同程度の400～500mm程度であるが、降水起源の割合が大きい。主作物の栽培期間が、主にモンスーンの雨期にあたるためである。一方、副作物の全蒸発散量はその倍近い700mm程度におよぶものの、降水起源は100mm程度にとどまり、残り大部分は灌漑水によって賄われている。栽培期間がモンスーンの雨期から外れているためである。灌漑水の内訳を見ても、河川水起源は40mm程度と少なく、非河川水に大きく依存していることが分かる。将来（RCP8.5）の蒸発散量も、二毛作灌漑地の副作物栽培期間での増加が顕著であり、その増加分のほとんどを非河川水に求めなければならない。

ヨーロッパ中部～地中海沿岸の一毛作灌漑地では、全蒸発散量が300mm程度と小さいものの、その6～7割近くが降水でまかなわれている。将来、蒸発散量は増加するものの、降水量が減少するため、降水への依存度が下がる。その不足分を灌漑水で補っている。

4. 議論

(1) 栽培期間と蒸発散量とのトレードオフ

気温の上昇は蒸発散を促進させるため、灌漑取水量が増加する。一方、作物生育速度は（生育に適正な温度レンジ内であれば）気温が高くなると速くなるため、温暖

図-6 現在に対する将来の（左）作物栽培日数の変化[d]、および（右）栽培期間中の蒸発散量の変化量[mm]。気候シナリオはRCP8.5を使用し、5つのGCMの平均をとった。上から順に、二毛作灌漑地の主作物、同副作物、一毛作灌漑地に対する結果。

化により栽培期間が短くなり、灌漑期間が短縮され、灌漑取水量が減少する。では、この二者のどちらの効果が勝るのだろうか。

将来気候下における灌漑農地の栽培期間の変化と、栽培期間中の全蒸発散量（各水源の総和）を図-6に示す。地理的条件や気候シナリオによって異なるものの、概して、10日程度の栽培期間の短縮があったとしても、栽培期間中の蒸発散量は増加する地域が多い。しかし、地中海沿岸や米国南西部など、数十日規模での栽培期間の短縮が見られる地域では、それに応じた蒸発散量減少の効果の方が勝る。全球で平均すれば、前者の効果が卓越するため、図-3のように蒸発散量が増加すると解される。

なお、本モデルでは、高CO₂環境下における植物の生理学的応答（気孔開度の減少による蒸発散の抑制）を扱っていない。葉面積増大による蒸発散増加との相殺効果もあり、植物種によって全蒸発散量への影響は大きく異なる¹⁵⁾。現在、高CO₂環境下での栽培実験等を通して精力的に測定が進められており¹⁶⁾、同効果の水文計算への取り込みは、今後の課題とする。

5. 結論

現状の栽培環境を維持するとき、二毛作・一毛作の違いや灌漑の有無と、将来に必要な灌漑の取水源との

関連性を調査するため、水源から農地を経て蒸発散に至る過程を水文モデルで追跡することで、将来気候下での作物栽培期間中の蒸発散量を水源別・農地利用別に評価した。全球平均での蒸発散量は、天水農地より灌漑農地で大きく増加する。このうち、降水や河川からの灌漑水量は、現在と同程度ないし微増にとどまるため、不足分をこれら以外の水源に頼る必要があり、その水量は現在より増加すると予測される。灌漑により乾燥地や乾季での作物栽培が可能になった地域の中には、将来の降水量が減少するなど、現在より厳しい栽培環境を強いられると予測される地域も多く、より多くの非河川灌漑水を供給する必要がある。インドの二毛作灌漑地（特に副作物）などでは、非河川灌漑水の水量の大幅な増加が予測され、もし地下水や既存の貯水池等で賄えない場合は、新たな貯水池建設等の代替取水源の確保や、多毛作栽培・灌漑様式の見直し等の対策が必要となる可能性がある。

本研究では、将来の気候条件による影響に焦点を合わせたため、貯水池を考慮しなかったり、河川の自然流量のみを考えたりするなど、解析条件の簡略化を図った。より現実的な条件設定の上で解析することが今後の課題である。また、気候変動に対する適応策として、貯水池等の代替取水源の確保に向けた検討¹⁷⁾が既に始まっている。農業は、水資源や食糧生産を含む社会システムの持続可能性を左右する社会の主要産業であり、今後も継続して研究に取り組むことが重要である。

謝辞：本研究は、環境省環境研究総合推進費(S-10)により実施された。入力気象データとして、ISI-MIPにより作成・配布されたものを使用した。

参考文献

- 1) Wada, Y., Wissner, D., Eisner, S., Flörke, M., Gerten, D., Haddeland, I., Hanasaki, N., Masaki, Y., Portmann, F. T., Stacke, T., Tessler, Z. and Schewe, J.: Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change, *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1002/grl.50686 (accepted).
- 2) United Nations: *World population prospects, The 2012 Revision, Highlights and advance tables*, Working Paper No. ESA/P/WP.228, 2013.
- 3) The Intersectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): *Project design and simulation protocol*, Version 1.3, 2012.
- 4) Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Konzmann, M., Ludwig, F., Masaki, Y., Schewe, J., Stacke, T., Tessler, Z. D., Wada, Y. and Wissner, D.: Global water resources affected by human interventions and climate change, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, (accepted)
- 5) Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. and Wilbanks, T.J.: The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, Vol. 463, pp. 747-756, 2010.
- 6) Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J. and Piontek, F.: A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach, *Earth Syst. Dynam. Discuss.*, Vol. 4, pp. 49–92, 2013.
- 7) Weedon, G.P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W.J., Blyth, E., Österle, H., Adam, J.C., Bellouin, N., Boucher, O. and Best, M.: Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century, *J. Hydrometeorol.*, Vol.12, pp.823-848, 2011.
- 8) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y. and Tanaka, K.: An integrated model for the assessment of global water resources – Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol.12, pp.1007-1025, 2008.
- 9) Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J.-M., Frenken, K. and Feick, S.: Development and validation of the global map of irrigation areas, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol.9, pp. 535-547, 2005.
- 10) Monfreda, C., Ramankutty, N. and Foley, J.A.: Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000, *Glob. Biogeochem. Cycles*, Vol. 22, GB1022, doi:10.1029/2007GB002947, 2008.
- 11) Krysanova, V., Wechsung, F., Arnold, J., Srinivasan, R. and Williams, J.: SWIM (Soil and Water Integrated Model) user manual (version SWIM-8), 2000.
- 12) Hanasaki, N., Inuzuka, T., Kanae, S. and Oki, T.: An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model, *J. Hydrol.*, Vol. 384, pp. 232-244, 2010.
- 13) Food and Agriculture Organization (FAO), <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>, 2013.
- 14) Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) and Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT): Gridded Population of the World, Version 3, <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw/index.jsp>, 2005.
- 15) Saxe, H., Ellsworth, D.S. and Heath, J.: Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere (Tansley Review No. 98), *New Phytol.*, Vol. 139, pp. 395-436, 1998.
- 16) Shimono, H., Nakamura, H., Hasegawa, T. and Okada, M.: Lower responsiveness of canopy evapotranspiration rate than of leaf stomatal conductance to open-air CO₂ elevation in rice, *Global Change Biol.*, Vol. 19, pp.2444-2453, doi:10.1111/gcb.12214, 2013.
- 17) Hanasaki, N., Masaki, Y. and Yamamoto, T.: Adaptation measures for the impact of climate change on global water resources— Option 2: Adding storage capacity, *Impacts World 2013, International Conference on Climate Change Effects*, pp.433-437, 2013.

(2013. 9. 30受付)