

特集「第12回日本LCA学会研究発表会からの投稿」

[研究論文]

食料消費に関わる世界の淡水資源需給バランスに対する国際貿易の影響評価

山口 陽平^{1,*}, 田村 賢人¹, 吉川 直樹², 天野 耕二², 橋本 征二²

1 立命館大学大学院 理工学研究科, 2 立命館大学 理工学部

*連絡先: rv0023hs@ed.ritsumei.ac.jp

概要: 本研究では、食料消費に関わる灌漑用水消費に焦点を当て、水ストレス指標により、世界全体の淡水資源需給バランスに対する国際貿易の影響を評価した。淡水資源消費量については、ウォーター・フットプリントにより、各国の国内生産による淡水資源の直接消費量と、当該国の他国からの国際貿易に伴う淡水資源の間接消費量に分けて評価した。さらに、灌漑効率を用いて、淡水資源消費量を淡水資源取水量に換算した。淡水資源利用可能量は、農業において最大限利用可能な淡水資源量として定義した。2010年時点において、41ヶ国が高いストレス(28ヶ国、19億人) または中位のストレス(13ヶ国、18億人) に直面している可能性が示唆された。このうち8ヶ国では、他国への食料輸出により水ストレスが強まっている可能性が示唆された。Thailandの場合、輸出向け食料の生産に要する同国の灌漑用水取水量の86%(26.7 km³) を占める米の輸出によって、同国の水ストレスが強められている可能性が示唆された。

キーワード: 国際貿易、淡水資源需給バランス、食料需要、灌漑用水、水ストレス指標

1. はじめに

1.1 研究背景

人間の社会活動にとって不可欠な食料の生産には、淡水資源消費が必要となる。既往研究¹⁾によると、世界全体の年間淡水資源消費量に占める農業用水消費量の割合は、2000年時点で70%(2,658 km³) に達することが推計されている。したがって、世界全体の食料生産に対する淡水資源制約は無視できないと考えられ、食料生産に要する農業用水に焦点を当てて淡水資源必要量を評価することは重要である。

淡水資源は地域ごとに偏在しており、淡水資源単体の直接的な国際貿易も困難であると言われている²⁾。そのため、自国の食料需要量を賄えるだけの淡水資源を得られない地域では、淡水資源の豊富な地域からの食料輸入を通して、間接的に淡水資源を消費せざるを得なくなる。したがって、食料の国内生産によって直接消費される淡水資源量に加えて、食料貿易由来の仮想水移動量を考慮することが重要である。さらに、前述した淡水資源の地域偏在性によって、水資源の需給不均衡が顕在化しつつある。そのため、近年では、淡水資源必要量の評価に加えて、実際に利用可能な淡水資源量と淡水資源消費量を比較し、淡水資源需給バランスを評価することが注目されている。

1.2 淡水資源の評価手法

Hoekstra and Hung³⁾ は、淡水資源消費量の評価手法と

して、ウォーター・フットプリント (water footprint; WF) と呼ばれる概念を提唱した。本来、製品やサービスが生産後その場ですぐに消費されることは少なく、ほとんどの場合、原料段階から加工段階、流通・販売段階を経て最終消費段階に至る。ここで、最終消費段階は、消費者による家庭や事業所等での製品やサービスの消費段階を指す。WFでは、製品やサービスに関わる淡水資源消費量をいくつかの段階に分けた後、各段階における淡水資源消費量を積み上げ方式で足し合わせ、その合計値により、各段階で消費された淡水資源量を評価する。Hoekstra et al.⁴⁾ によると、WFでは淡水資源消費量を3種類 (green water, blue water, grey water) に区別して評価する。同文献において、green waterは降水由来の淡水資源消費量と定義されており、地表水や地下水に直ちに還元されない、田畑や作物からの蒸発散量を表す。地表水・地下水に還元された淡水資源の一部は、水循環のプロセスを経て、地表水・地下水に由来する灌漑用水としてblue waterの形で消費される。また、grey waterは、仮に現行の水質環境基準まで汚濁負荷物質の希釈した場合に必要な淡水資源量を表す。

淡水資源は日常生活における飲料水や生活用水として以外に、農業用水や工業用水のような形で農業や工業などの経済活動にも利用される。特に、急速な国際化が進行する現代では、世界規模での製品やサービスの輸出入が頻繁に行われている。Allan⁵⁾ は、製品やサービスの輸入の際に支払った対価により、これら輸入品自体の購入と合わせて、

それらの生産に消費された淡水資源量を購入したものと解釈できることを述べ、バーチャル・ウォーター (virtual water; VW) の概念を提唱した。上記の場合、輸入国はこれら輸入品を国内生産した場合に消費されるはずだった淡水資源量を輸出国の国際貿易によって節約したことになり、この分の淡水資源消費量を輸出国が負担し、輸入国は自国で節約できた淡水資源量と等価の淡水資源量を輸出国から間接的に消費したものと捉える⁶⁾。なお、WFは生産国で製品やサービスを実際に生産した際に消費される「実際の淡水資源消費量」を表しているが、VWはそれらを輸入国において仮に生産した場合に消費されると考えられる「仮の淡水資源消費量」を表す⁷⁾。どちらの指標も、製品やサービスの生産に伴って消費された淡水資源量を評価している点は共通している。

水ストレス指標は、淡水資源需給バランスを評価する指標として広く利用されており、これまでにいくつかの定義式が提案されている⁸⁻¹¹⁾が、いずれの指標も淡水資源供給可能量に対する淡水資源必要量の比として定義される。例えば、淡水賦存量に対する取水量の比⁹⁻¹¹⁾ (withdrawal to water resources ratio; WWR)、90%流量 (Q90) に対する淡水消費量の比^{8, 9)} (consumption to Q90 ratio; CQ90)、取水可能量に対する取水量の比^{9, 11)} (cumulative withdrawal to demand ratio; CWD) などが、水ストレス指標の代表例として挙げられる。CQ90では、淡水資源供給可能量として月ごとに乾燥状況下での河川流量 (Q90) を推計するため、水ストレスの評価に対する季節性の考慮が可能となり、WWRと比較して水ストレスの閾値に対する物理的解釈が容易になると考えられている^{8, 9)}。CWDでは、取水可能量を淡水資源供給可能量として扱うことにより、季節ごとの取水量の変化に加えて、より現実に近い淡水資源の利用可能量に基づいて、水ストレスを評価できるようになると考えられている^{9, 11)}。CQ90とCWDの双方とも季節性を評価に反映できるため、気候変動等による将来の長期的な水ストレスの変化を見る場合は、WWRよりも信頼性の高い結果が得られると言われている^{9, 11)}。しかし、いずれも利用可能な統計データが限られているため、WWRと比較してデータ収集が困難であることが課題とされている¹¹⁾。一方、WWRでは、他の2つの指標に比べて、比較的容易に利用できる淡水消費量や淡水賦存量の統計データを用いて、水ストレスを評価できる^{8, 11)}。それにも関わらず、現状の水ストレス分布について、ある程度信頼性の高い結果が得られることが示されている⁹⁾。これらの特徴は、WWRの利点であるといえる。

前述したように、評価対象の製品やサービス、あるいは評価範囲を決定すれば、WFを用いて淡水資源必要量を簡単に評価できる。さらに、WFの評価範囲の設定時に、製

品・サービスごとに各国間の貿易収支を明確にすることで、輸入国 (消費国) のVWを輸出国 (生産国) のWFとして捉え直すことが可能となる。生産国で直接消費されたWFに加えて、当該生産国からの輸入により輸入国で間接消費されたVWについても当該生産国の淡水消費として計上し、両者の和をWWRの淡水資源必要量として用いることにより、当該生産国について、水ストレスに対する国際貿易の影響を簡易に評価できる。

1.3 研究目的

世界規模での淡水資源需給バランスの評価については数多く研究がなされている^{8, 10, 11)}。これらの研究では、農業用水・生活用水・工業用水を対象に、水ストレス指標を用いた淡水資源需給バランスの評価が行われており、社会経済変化や気候変動に関する将来シナリオに基づいて、水ストレスの将来推移が予測されている。そのため、主に水ストレスの将来予測に焦点が置かれており、食料貿易由来の仮想水移動がもたらす水ストレスへの影響については不明確である。一方、食料貿易由来の仮想水移動量の評価については、既往文献^{12, 13)}などで現状評価が行われているが、いずれも淡水資源必要量の評価のみに止まっている。

以上より、国別・食料品目別に、食料貿易由来の仮想水移動がもたらす水ストレスへの影響を評価した研究は少ないと考えられる。前述したように、国ごとに資源が偏在する現代において、地球規模での食料需給問題を緩和するためには、ある程度の食料貿易による仮想水移動は避けられない。淡水資源の観点から持続可能性を向上させていくためには、その第一歩として、現状の食料貿易がもたらす淡水資源への影響の定量評価が重要であると考えられる。そこで、本研究では、食料消費に焦点を当てた上で、食料の国内生産に要する直接消費水、および国際貿易由来の仮想水移動量について、国別・食料品目別に世界規模で推計した。次に、推計した食料消費に関わる淡水資源必要量を淡水資源供給可能量と比較し、淡水資源需給バランスを評価した。最後に、国際貿易由来の仮想水移動量が淡水資源需給バランスに及ぼす影響を、国別・食料品目別に評価した。

2. 研究方法

2.1 推計の流れ

本研究の推計フローの概要をFigure 1に図示する。まず、食料需給バランス式を用いて、一次生産レベルの食料需要量、および畜産物需要量を推計した (2.3.1節)。これらの食料需要推計値を国内生産と輸入に配分し、国内生産食料需要量と輸入食料需要量を推計した。また、各対象国の輸入食料需要量に対して、別途設定した輸入相手国別配分係数を乗じることにより、輸入相手国別輸入食料需要量を推計

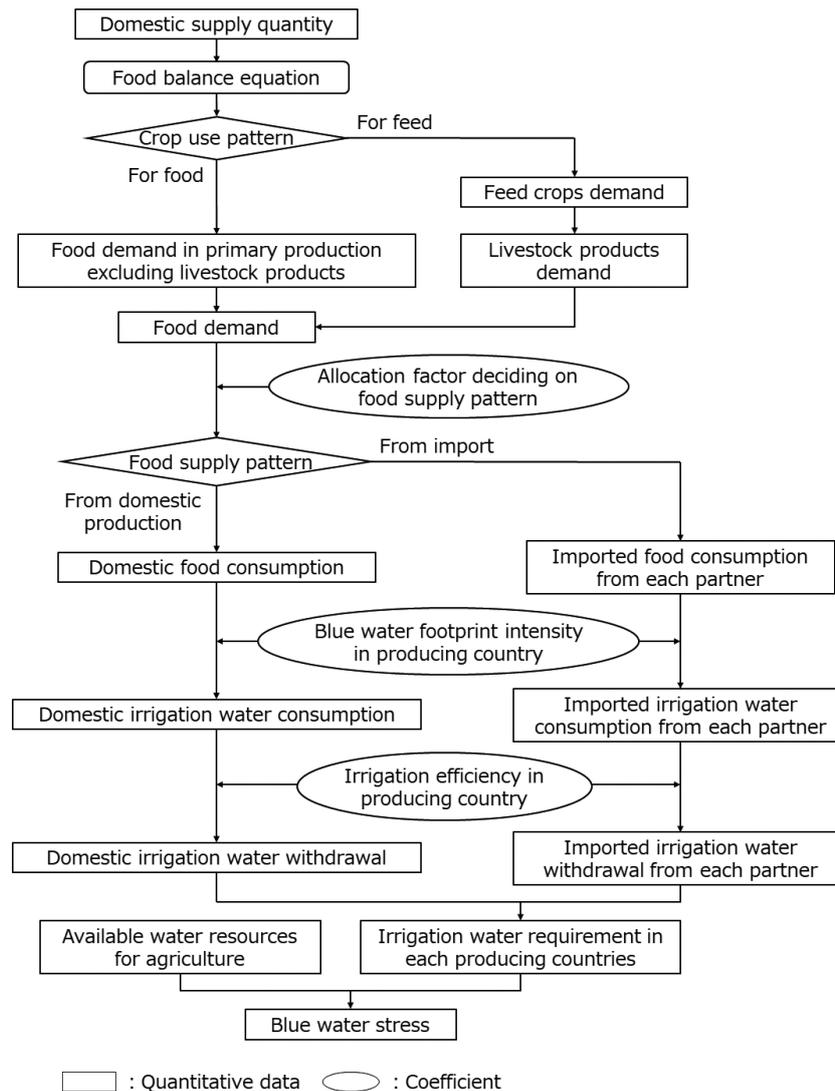


Figure 1 Schematic calculation flow in the evaluation of irrigation water supply-demand balances as blue water stress.

した (2.3.2節)。国内生産食料需要量と輸入食料需要量それぞれに生産国の淡水資源消費原単位を乗じることにより、消費量ベースで国内生産淡水資源必要量と輸入淡水資源必要量を推計した。さらに、各々を生産国の灌漑効率で除すことにより、消費量ベースから取水量ベースに換算した (2.3.3節)。各国の国内生産淡水資源必要量については当該国の淡水資源必要量、輸入相手国別輸入淡水資源必要量については輸入相手国の淡水資源必要量として集計することにより、生産国別に生産ベースの淡水資源必要量を推計した。別途推計した淡水資源供給可能量 (2.3.4節) に対する淡水資源必要量の比により、水ストレス指標を定義し、各国の食料消費に関わる淡水資源需給バランスを評価した (2.3.5節)。

2.2 使用データと対象設定

本研究では、評価対象年を2010年に設定した。本研究の評価対象国は、国際連合食糧農業機関 (Food and

Agriculture Organization of the United Nations; FAO) のFAOSTATデータベースにおける食料需給表¹⁴⁾ (以下、FAO食料需給表)、および同データベースにおける貿易収支表¹⁴⁾ (以下、FAO貿易収支表) に記載の134ヶ国とした。また、本研究の評価対象品目は、FAO食料需給表に記載の96品目とした。

食料需要量の推計 (2.3.1節) では、一次生産レベルの食料需要量および畜産物需要量を推計するための投入係数行列の作成において、国際貿易分析プロジェクト (Global Trade Analysis Project; GTAP) のデータベース¹⁵⁾、畜産物の生産効率の仮定¹⁶⁾、およびFAOの生産物樹形図の技術変換率¹⁷⁾ を用いた。

食料消費内訳の推計 (2.3.2節) では、一次生産レベルの食料需要量および畜産物需要量の各々を国内生産と輸入に配分するための配分係数の設定において、FAO食料需給表¹⁴⁾ を用いた。また、各国の輸入食料需要量を輸入相手国別に配分するために、FAO貿易収支表¹⁴⁾ を用いて輸入

相手国別配分係数を設定した。ここで、輸入相手国別配分係数の設定のために用いた原料換算係数として、国土交通省の報告書¹⁸⁾に記載された品目については、同文献の原料換算係数を使用した。また、同文献に記載されていない品目に関しては、文部科学省の日本食品標準成分表2010の統計データ¹⁹⁾やUSDAの報告書に記載された文献値²⁰⁾を参考に、独自に原料換算係数を設定した。

淡水資源必要量の推計(2.3.3節)では、2.3.2節で推計した各国の国内生産食料需要量および輸入食料需要量の各々を消費ベースの淡水資源必要量に換算するために、ウォーター・フットプリント・ネットワーク(Water Footprint Network; WFN)が公表している国別・品目別の淡水資源消費原単位²¹⁾(以下、WFN淡水資源消費原単位)を用いた。さらに、灌漑効率の文献値²²⁾を用いて、消費ベースの淡水資源必要量を取水ベースに換算した。

淡水資源供給可能量(2.3.4節)の推計では、FAOのAQUASTATデータベース²³⁾に記載された各国の淡水資源賦存量、農業用水取水量、総取水量の統計データを用いて、淡水資源供給可能量を設定した。

2.3 推計モデル

2.3.1 食料需要量の推計

本研究では、基準年における最終消費レベルの食料需要量データとして、FAO食料需給表¹⁴⁾に記載された国内消費仕向け量の項目を用いた。最終消費レベルの食料需要量は、食事において直接消費される食料の量を表す。本研究では、食料消費に関わる淡水資源必要量の推計(2.4節)において、食用・飼料作物の栽培段階に要する灌漑用水消費、および生育段階の畜産物の直接消費水のみを評価対象とした。そこで、最終消費レベルの食料需要量から、中間投入による間接的な作物消費を含めた一次生産レベルの食料需要量を推計した。

FAO食料需給表において、国内消費仕向け量は、家畜飼料、食料、加工食品原料、種子用食料、廃棄物発生量、その他原料の6項目に振り分けられている。このうち、その他原料は、食品以外の加工品の原料として用いられる作物の消費量であるため、食料需要とは無関係である。そこで、既往文献²⁴⁾を参考に、その他原料を除いた国内消費仕向けベクトル x (成分 x_j)を次式(1)のようににおいて、食料需給バランス式を設定した。

$$x = Ax + s + w + f \quad (1)$$

ここで、 A (成分 a_{ij})は家畜飼料および加工食品原料の投入係数行列、 s (成分 s_j)は種子ベクトル、 w (成分 w_j)は廃棄物ベクトル、 f (成分 f_j)は食料の最終需要ベクトルを表す。また、添え字 i は投入される品目、 j は産出される品目を表し、いずれもFAO食料需給表に記載の96品目とした。

次に、種子係数を対角成分とする対角行列 S 、および廃棄物発生率を対角成分とする対角行列 W をそれぞれ設定した。種子係数は、国内消費仕向け量に占める種子用食料の割合とした。また、廃棄物発生率は、国内消費仕向け量に占める廃棄物発生量の割合とした。(1)式の種子ベクトル s 、および廃棄物ベクトル w は、対角行列 S と W を用いて、次式(2)と(3)のように表せる。

$$s = Sx \quad (2)$$

$$w = Wx \quad (3)$$

したがって、(1)式の食料需給バランス式から、国内消費仕向けベクトル x は、

$$x = (I - A - S - W)^{-1} f \quad (4)$$

と表される。(4)式の I は単位行列を表す。同式の f の各成分を最終消費レベルの食料需要量に置き換えることにより、一次生産レベルの食料需要量を推計した。ここで、家畜飼料に関しては、一次生産レベルの食料需要量から畜産物需要量に換算した。

なお、(4)式の投入係数行列 A について、投入係数 $a_{ij} = m_{ij} / q_j$ は、畜産物または加工食品 j の単位生産に必要な家畜飼料または加工食品原料 i の投入量を表す。ここで、 q_j は畜産物または加工食品の国内生産量を表し、FAO食料需給表における国内生産量の項目に相当する。 m_{ij} はこれらの食品を生産するために原料として投入される家畜飼料または加工食品原料の投入量を表す。家畜飼料の投入配分については、国際貿易分析プロジェクト(Global Trade Analysis Project; GTAP)のデータベースにおける2007年基準の産業部門間の中間財取引財¹⁵⁾、および畜産物の生産効率の仮定¹⁶⁾より決定した。また、加工食品原料の投入配分については、GTAPにおける食料生産部門の中間財取引財¹⁵⁾、およびFAOの生産物樹形図の技術変換率¹⁷⁾より決定した。

2.3.2 食料消費内訳の推計

畜産飼料以外の一次生産レベルの食料需要量、および畜産物需要量(以下、食料需要推計値)では、食料需要が国内生産・輸入のいずれに由来するのか、その内訳は不明である。しかし、本研究では、各国間の国際貿易の影響を推計に反映させるため、食料需要に対する国内生産・輸入の内訳を考慮する必要がある。そこで、これらの食料消費内訳を推計に反映させるために、食料需要推計値に対して食料消費内訳の配分を試みた。

まず、FAO食料需給表¹⁴⁾に記載された国内生産量、輸入量、在庫純減量の3項目を用いて、国内生産内訳係数、輸入内訳係数、在庫内訳係数をそれぞれ設定した。すなわち、国内生産量・輸入量・在庫純減量の合計値に対する国内生産量、輸入量、在庫純減量それぞれの寄与の割合を決

定した。各々の食料消費内訳係数を食料需要推計値に乗じることにより、基準年における、国内生産由来国内消費量、輸入由来国内消費量、および国内在庫量を推計した。さらに、本研究では、基準年の在庫の次年度への繰り越しが発生しない状況を想定した。そこで、在庫内訳係数に対して、国内生産量・輸入量の合計値に対する国内生産量、輸入量それぞれの寄与の割合を乗じることにより、国内生産由来在庫内訳係数および輸入由来在庫内訳係数を設定した。基準年の国内在庫量に対して、国内生産由来在庫内訳係数と輸入由来在庫内訳係数をそれぞれ乗じることにより、当該年の国内生産由来在庫量および輸入由来在庫量に配分した。最後に、国内生産由来国内消費量と国内生産由来在庫量の和、および輸入由来国内消費量と輸入由来在庫量の和をそれぞれとって、国内生産食料需要量および輸入食料需要量を推計した。なお、FAO食料需給表の国内生産量、輸入量、在庫純減量のデータは、いずれも2009-2011年の3年平均値を基準年値として用いた。

次に、国際貿易による食料生産地と食料消費地の乖離の関係性を評価に反映させるために、FAO貿易収支表¹⁴⁾に記載された各国の品目別の貿易収支データを用いて、輸入食料需要量に対して可能な範囲で貿易収支の反映を試みた。すなわち、次式(5)により、輸入相手国別配分係数 R_{klm} (対象国 k 、輸入相手国 l 、輸入品目 m)を設定した。輸入相手国別配分係数は、各国の輸入に占める輸入相手国別の輸入依存率の割合を表す。

$$R_{klm} = \frac{C_m \cdot Imp_{klm}}{\sum_l \sum_m (C_m \cdot Imp_{klm})} \quad (5)$$

ここで、 Imp_{klm} はFAO貿易収支表の輸入量、 C_m は原料換算係数、 N_l は輸入国 k の輸入相手国 l の数、 $N_{m,j}$ は品目 j に対応するFAO貿易収支表に記載された輸入品目 m の数を表す。FAO貿易収支表の輸入量については、2009-2011年の3年平均値を基準年値として用いた。その際、輸入品目 m はFAO貿易収支表に記載された品目のうち、食料品目に該当する319品目とし、FAO食料需給表に記載の96品目と対応させた。

なお、(5)式の原料換算係数 C_m は、FAO貿易収支表に記載の食料品目を生鮮品当量に原料換算するための係数である。生鮮加工品、飲料品については、各食品に関する原料換算係数の文献値¹⁸⁾を引用した。肉類・卵については、同文献に原料換算係数が記載されていなかったが、日本食品標準成分表2010¹⁹⁾において、肉類単体と肉類加工品との間で摂取カロリー量にほとんど違いが見られなかったため、一律に1.00と設定した。乳製品については、各乳製品と生乳に関する乳脂肪分率の文献値²⁰⁾を用いて、各乳製品を生乳換算した。乾燥品については、各乾燥品とその生

鮮原料品に関する水分率・可食部率等の統計データ¹⁹⁾を用いて、各乾燥品の生鮮品原料に当量換算した。

最後に、(5)式で定義した輸入相手国別配分係数を輸入食料需要量に乗じることにより、輸入相手国別輸入食料需要量を推計した。

なお、本研究では、モデルを単純化するために、国際貿易の形態として、2国間での食料輸入が行われる状況を想定した。すなわち、輸入国から見た場合、輸入品目はすべて輸入相手国内で生産されるものと仮定した。ここで、国際貿易の形態として輸入を想定した理由は、輸入(すなわち消費)の観点から国際貿易を捉えることにより、輸出よりも比較的高い精度で、各国の食料供給の事情(食料自給の高い国かどうか、食料輸入依存国かどうかなど)を反映した推計が可能になると考えたためである。

2.3.3 淡水資源必要量の推計

本研究では、灌漑用水を評価対象とし、食料消費に関わる淡水資源必要量について、消費量ベースの淡水資源必要量を推計した。まず、2.3節で推計した国内生産食料需要量および輸入相手国別輸入食料需要量それぞれに対して、生産国における品目別のWFN淡水資源消費原単位²¹⁾を乗じることにより、国内生産淡水資源消費量および輸入淡水資源消費量を推計した。WFN淡水資源消費原単位は、green water(降水由来の淡水資源消費量)、blue water(地表水・地下水由来の灌漑用水消費量)、grey water(汚濁負荷物質に対する希釈水量)の3種類のwater footprint(WF)から構成されており、生産国別・品目別に、単位生産量あたりの淡水資源消費量 [m^3/ton] の10年平均値(1995-2005年)として与えられている。本研究では、灌漑用水を評価対象としているため、3種類のWFN淡水資源消費原単位のうち、blue waterのみを用いた。

ここで、本研究では、加工段階以降の淡水資源消費に関するデータが得られなかったため、食料品の原料作物の栽培段階に投入される淡水資源の直接消費量のみをWFの対象範囲とした。すなわち、農作物については、栽培段階で直接消費される淡水資源量のみを評価対象とした。また、畜産物については、飼料作物の栽培段階、および家畜の飼育段階における淡水資源の直接消費量を評価対象とした。したがって、食用作物・飼料作物の原料栽培時に使用される肥料・農薬・農業用具等の製造などにより上流部で消費される淡水資源量、および原料作物の加工段階から最終消費段階までの各過程における淡水資源消費量は、すべて評価対象外とした。

なお、輸入相手国別の貿易収支データが明確な134ヶ国のうち、WFN淡水資源消費原単位に記載されていない国に関しては、他国のWFN淡水資源消費原単位、または未

記載国に隣接する国のWFN淡水資源消費原単位を単純平均したもので代用した。また、水産物と蜂蜜に関しては、各々の生育過程がもたらす淡水資源消費量に対する影響は小さいと仮定し、淡水資源消費原単位を0と設定した。水産物に関しては、その餌の大部分を海藻や小魚などの水生動物植物あるいはプランクトンが占めているため、餌の生産による灌漑用水消費の寄与はほとんどないものと見なした。また、蜂蜜についても、養蜂業の形態から考えてその生産に灌漑用水は消費されないものと見なした。

次に、国内生産淡水資源消費量および輸入淡水資源消費量をそれぞれ、生産国の灌漑効率で除することにより、消費量ベースから取水量ベースに換算して国内生産淡水資源必要量および輸入淡水資源必要量を推計した。ここで、灌漑効率のデータについては、文献値²²⁾を引用した。同文献では、世界を19地域・国に分類した上で、riceとnon-riceの2品目について、灌漑効率のデータが記載されている。本研究では、国別・品目別の詳細な灌漑効率のデータが得られなかったため、この文献に記載された地域分類と品目分類を本研究の対象国・対象品目と対応させて、灌漑効率を設定した。同文献では、Middle Africaについてのデータが欠如していたため、他の4地域のAfricaのデータを品目別に単純平均したもので代用した。ここで、畜産物については、その生育段階に要する飼料作物の栽培に灌漑効率が伴うものと考え、non-riceの灌漑効率を一律に適用した。

2.3.4 淡水資源供給可能量の推計

本研究では、輸入相手国別の貿易収支データが明確な134ヶ国のうち、AQUASTATデータベース²³⁾に記載の120ヶ国を評価対象として、基準年における生産国別の淡水資源供給可能量を推計した。 I 国における淡水資源供給可能量 AWR_I は、農業に最大限利用可能な淡水資源量を表しており、次式(6)により定義した。

$$AWR_I = TRWR_I \cdot \frac{AWW_I}{TWW_I} \quad (6)$$

ここで、 $TRWR_I$ は淡水資源賦存量、 AWW_I は農業用水取水量、 TWW_I は総取水量を表し、いずれもAQUASTATデータベース²³⁾に記載された2008–2012年の5年平均値を基準年値として用いた。このうち、 AWW_I および TWW_I については、当該年のデータに欠如が見られる国が存在したため、その場合は当該年の前後で最も近い年度のデータを代用した。また、すべての年度において TWW_I が0となる国については、淡水資源供給可能量の評価対象から除外した。

2.3.5 淡水資源需給バランスの推計

本研究では、2.5節で示した120ヶ国を対象に、水スト

Table 1 Criteria of water stress index.

WSI Ranges	Degrees of Water Stress
$WSI < 0.2$	Low Water Stress
$0.2 \leq WSI < 0.4$	Moderate Water Stress
$0.4 \leq WSI$	High Water Stress

レス指標より食料消費に関わる淡水資源需給バランスを評価した。 I 国における水ストレス WSI_I は、次式(7)により定義した。

$$WSI_I = \frac{WR_I}{AWR_I} \quad (7)$$

ここで、 WR_I は総淡水資源必要量を表す。なお、 WR_I の推計において、各対象国の国内生産淡水資源必要量については当該国の淡水資源必要量、輸入相手国別輸入淡水資源必要量については輸入相手国の淡水資源必要量(以下、淡水資源貿易量)として集計した。

本研究では、Table 1に示した3段階の判断基準により、(7)式の水ストレスを評価した。同表の判断基準は、既往文献²⁵⁾を参考に設定した。同表において、Low Water Stressは低い水ストレス($WSI < 0.2$)、Moderate Water Stressは中位の水ストレス($0.2 \leq WSI < 0.4$)、High Water Stressは高い水ストレス($0.4 \leq WSI$)を表す。なお、本研究では、水ストレスの判断基準において、環境流量は考慮していない。環境流量²⁶⁾は、流域生態系構造や河川基底流量の維持、およびそれらに関係する湿地帯の維持に必要とされる淡水資源量を指す。

3. 結果と考察

3.1 統計値との比較

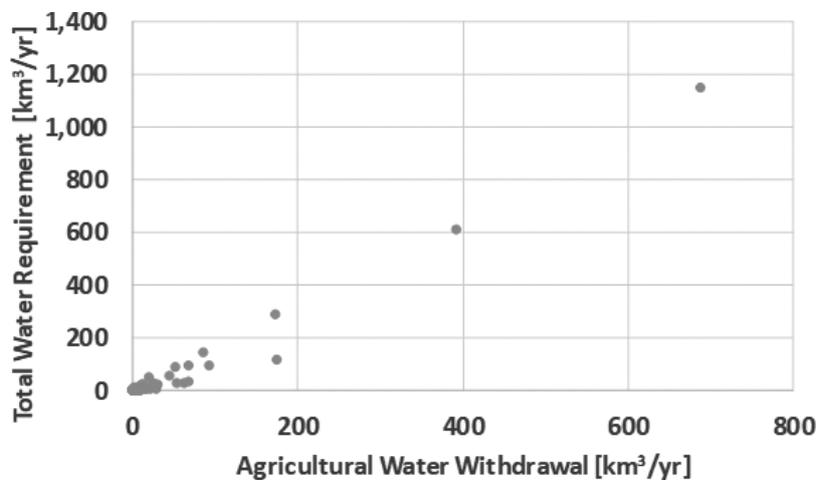
本研究の総淡水資源必要量について、その推計結果の妥当性を検証するために、総淡水資源必要量と農業用水取水量の実測値の間で、単回帰分析を行った。Table 2は回帰分析の検定結果を抜粋した表である。また、総淡水資源必要量に対して、農業用水取水量の実測値をプロットした散布図をFigure 2に示す。ここで、横軸の農業用水取水量の実測値として、AQUASTATデータベース²³⁾における各国の農業用水取水量 [km^3/yr] の統計値を用いた。また、縦軸の総淡水資源必要量 [km^3/yr] は、本研究で推計した国内生産淡水資源必要量および淡水資源貿易量を生産国ごとに合計した値である。

Figure 2より、散布図のプロットはほぼ対角線上に並んでいることが分かる。また、Table 2より、本研究の推計値は、有意水準1%で実測値と有意に整合していると判断される。以上のことから、本研究の総淡水資源必要量は、高い精度で基準年の淡水資源取水量を表現できているといえる。

Table 2 Implementation results of regression analysis: comparison between total water requirement and agricultural water withdrawal.

Parameter	Intercept	Partial Regression Coefficient
Correlation Coefficient (R)		0.9862
Coefficient of Determination (R ²)		0.9725
Adjusted R-Square		0.9723
Significant F-Number		6.214×10^{-94}
Parameter Value	-4.486	1.585
t-Value	-2.343	64.60
P-Value	0.02081	6.214×10^{-94}

Note: Total water requirement [km³/yr] means simulated irrigation water requirement (withdrawal base) in this study. Agricultural water withdrawal [km³/yr] is used as an observed value, which is referred to the AQUASTAT database.



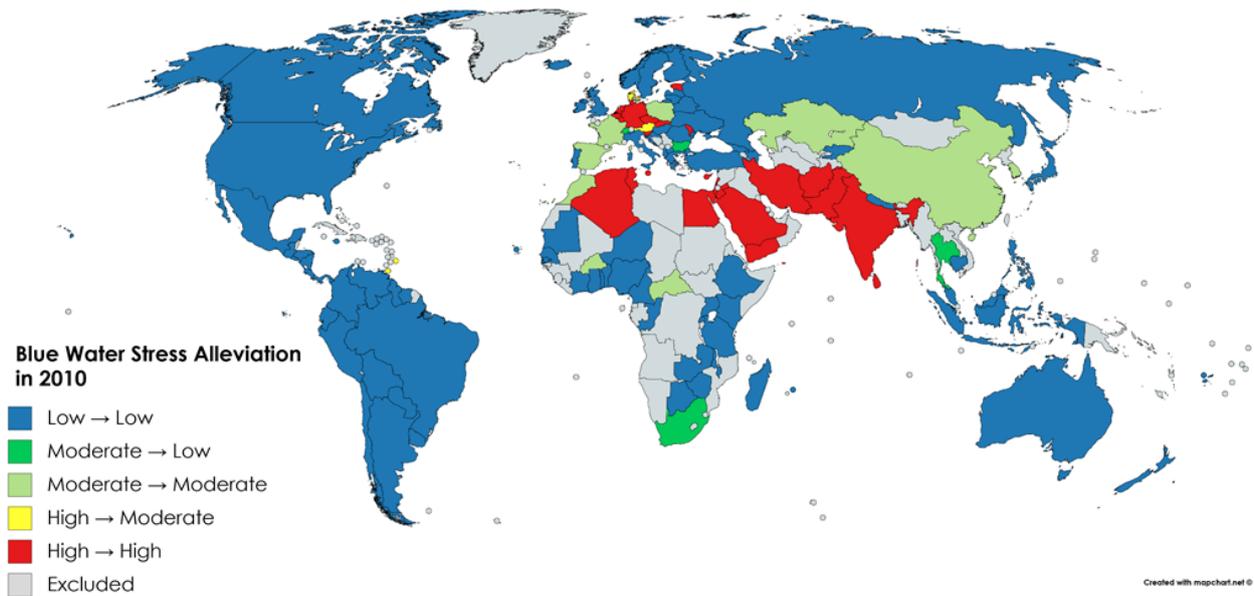
Note: As a scatter diagram, total water requirement and agricultural water withdrawal are put on vertical and horizontal axis, respectively. Total water requirement [km³/yr] means simulated irrigation water requirement (withdrawal base) in this study. Agricultural water withdrawal [km³/yr] is used as an observed value, which is referred to the AQUASTAT database.

Figure 2 Comparison between total water requirement and agricultural water withdrawal in all the targeted countries (134 countries).

ただし、本研究では、食用・飼料用作物の栽培段階に要する灌漑用水消費、および生育段階における家畜の直接消費水に限定して、総淡水資源必要量を推計した。そのため、本来であれば、これらの食料生産に要する淡水資源量の実測値と本研究の総淡水資源必要量を比較すべきであるが、本研究では該当する実測値データを得られなかった。そこで、淡水資源必要量の実測値として、AQUASTATデータベースにおける農業用水取水量の統計データを用いるものとした。しかし、AQUASTATデータベースの農業用水取水量は、食用・飼料作物および非食用作物の栽培に要する淡水資源取水量の総量を表すため、本研究の推計値が実測値と有意に整合していると判断された場合であっても、対象国によっては、本研究の総淡水資源必要量に過大評価を生じている可能性があることを注記しておく。

3.2 輸出の考慮有無による水ストレスの強度変化

本研究で推計した水ストレスの結果に基づいて、輸出の考慮有無による水ストレスの強度変化をFigure 3に示す。この図では、各国の国内生産淡水資源必要量と淡水資源貿易量（輸出食料生産に必要な淡水資源量）の合計値を(7)式の分子に適用して算出した水ストレス（以下、総食料生産由来の水ストレス）と、各国の国内生産淡水資源必要量のみを(7)式の分子に適用して算出した水ストレス（以下、国内生産由来の水ストレス）を比較し、前者と後者の間で水ストレスの強度に変化が現れたかどうかを評価している。Figure 3において、黄色領域および濃緑色領域は、総淡水資源必要量から淡水資源貿易量を除いた結果、水ストレスの強度が緩和された国を表す。また、水ストレス強度に属する国の割合と人口分布について、淡水資源貿易量を含めた場合の結果をTable 3、淡水資源貿易量を除外した場合の結果をTable 4に示す。



Note: Arrow's left label expresses the degrees of blue water stress including exported irrigation water requirement in simulated irrigation water requirement. Arrow's right label is that excluding exported irrigation water requirement.

Figure 3 Alleviation effect caused by excluding export on blue water stress.

Table 3 Comparison of global blue water stress by three indicators including export.

Degree of Water Stress	Number of Countries	Population Rate	Population
Unit	–	%	billion
Low Water Stress	79	41	2.6
Moderate Water Stress	13	28	1.8
High Water Stress	28	30	1.9

Note: Three indicators are as follows: the number of countries, population rate [percent] and population [billion]. Those are including exported irrigation water requirement in simulated irrigation water requirement. Population rate is calculated as the ratio of regional population classified by the degrees of water stress to the world population.

Table 4 Comparison of global blue water stress by three indicators excluding export.

Degree of Water Stress	Number of Countries	Population Rate	Population
Unit	–	%	billion
Low Water Stress	83	43	2.7
Moderate Water Stress	13	26	1.7
High Water Stress	24	30	1.9

Note: Three indicators are as follows: the number of countries, population rate [percent] and population [billion]. Those are excluding exported irrigation water requirement from simulated irrigation water requirement. Population rate is calculated as the ratio of regional population classified by the degrees of water stress to the world population.

Figure 3より、総食料生産由来の水ストレスを見た場合、41ヶ国において、食料生産に伴って高い水ストレス（28ヶ国）または中位の水ストレス（13ヶ国）が発生している可能性が示唆された。この結果は、全対象国の人口のうちの30%（19億人）と28%（18億人）に相当することが分かる。さらに、Figure 3において、国内生産由来の水

ストレス結果を見ると、上記41ヶ国のうち、8ヶ国において、輸出由来の淡水資源消費を除くことで、水ストレスの強度が緩和されたことが分かる。すなわち、これら8ヶ国では、他国への食料輸出によって、当該国の水ストレスが強められている可能性が示唆された。ここで、Table 3とTable 4を見比べると、淡水資源貿易量を除外することに

より、高い水ストレスの国が4ヶ国減少し、低い水ストレスの国が4ヶ国増加したことが分かる。両表を見比べた場合、中位の水ストレスの国に変化が起っていないように見えるが、これは淡水資源貿易量を除外することにより、高い水ストレスの国が中位の水ストレスに遷移したと同時に、中位の水ストレスからも4ヶ国が低い水ストレスに遷移したことを表している。

ただし、本研究では、淡水資源貿易量の推計において2国間貿易の仮定を想定したため、輸出食料の生産に要する淡水資源量は、すべて輸出国内で生産されている評価モデルとなっている。実際には、加工貿易等により、他国から輸入した原料・飼料作物を用いて生産した食料を他国に輸出している場合が考えられる。本研究の評価モデルでは、ある国が他国への食料輸出のために輸入した原料作物・飼料作物の生産に要する淡水資源量についても、当該輸出国が負担することになっているため、当該輸出国における輸出食料の生産に要する淡水資源量に過大評価を生じている可能性がある。その結果、当該輸出国の水ストレスに関して、過大評価を生じている可能性があることを注記しておく。

3.3 既往文献との水ストレスの比較

本研究では、Table 3に示した総食料生産由来の水ストレスの推計結果の妥当性検討として、総取水量に由来する水ストレス（以下、総取水量由来の水ストレス）を別途推計し、この推計値を既往研究の結果と比較した。総取水由来の水ストレスで見た場合、17ヶ国（18億人）が高い水ストレス、14ヶ国（19億人）が中位の水ストレス、89ヶ国（27億人）が低い水ストレスに属している結果となった。若干の差が認められるものの、本研究の総取水由来の水ストレスの結果は、既往文献¹⁰⁾において提示されている水ストレスの結果（高い水ストレス：4～26億人、中位の水ストレス：4～15億人、低い水ストレス：17～44億人）

とほぼ整合している。ここで、両者の比較結果に差が見られた理由としては、本研究と既往研究の間での推計手法の差異によるものであり、この結果は両研究の不確実性の幅を表していると考えられる。以上のことから、本研究における総取水量由来の水ストレスの結果は、ある程度の妥当性を有していると考えられる。既往文献¹⁾より、世界全体の総取水量に占める農業用水取水量の割合は約70%を占めると言われていることから、総食料生産由来の水ストレスについても、ある程度の妥当性を有すると判断した。しかし、厳密には総取水量と農業用水取水量との間に差異が存在するため、総食料生産由来の水ストレスの結果についての妥当性の厳密な比較評価は、本研究における今後の課題である。

次に、総取水由来の水ストレスに関する国別の傾向について、既往研究の結果と比較した。既往文献⁹⁾では、1.2節で例示した、WWR、CWD、CQ90の3種類の水ストレス指標それぞれについて、世界全体の水ストレスの強度分布が提示されている。同文献における各指標の水ストレス強度の分布図によると、アメリカ中西部、北部アフリカ、地中海沿岸地域、中東・西アジア、南アジア、および中国北東部において、中位または高い水ストレスが発生している。この傾向は、本研究における総取水量由来の水ストレスの傾向とほぼ整合している。この点からも、本研究における総取水量由来の水ストレスの結果は、ある程度の妥当性を有していると考えられる。

Table 5は、本研究における総取水由来の水ストレス、総食料生産由来の水ストレス、および国内生産由来の水ストレスについて、各々の水ストレスの強度を比較した表である。同表によると、Barbados、Bulgaria、South Africa、およびThailandの4ヶ国では、総取水由来の水ストレスと総食料生産由来の水ストレスの間で水ストレスの強度に変化が現れておらず、国内生産由来の水ストレスのみに変化が認められる。すなわち、これら4ヶ国では、水ストレス

Table 5 Comparison of the degrees of blue water stress by three indicators in selected eight countries.

Country Name	Degrees of Water Stress (All Sectors)	Degrees of Water Stress (Agricultural Sector including Export)	Degrees of Water Stress (Agricultural Sector excluding Export)
Austria	Low	High	Moderate
Barbados	High	High	Moderate
Bulgaria	Moderate	Moderate	Low
Denmark	Moderate	High	Moderate
South Africa	Moderate	Moderate	Low
Switzerland	Low	Moderate	Low
Thailand	Moderate	Moderate	Low
Trinidad and Tobago	Low	High	Moderate

Note: Three indicators are as follows: water stress index in All Sectors, Agricultural Sector including or excluding Export. "All Sectors" consists of the agricultural, domestic and industrial sector. "Agricultural Sector including Export" is calculated by including exported irrigation water requirement. "Agricultural Sector excluding Export" is calculated by that without exported.

の緩和に対する淡水資源貿易量の削減効果が大きいことが期待される。一方、Austria、Denmark、Switzerland、およびTrinidad and Tobagoの4ヶ国では、総取水由来の水ストレスよりも総食料生産由来の水ストレスが高くなっている。すなわち、これら4ヶ国では、全部門で見た場合と比べて、農業部門のみに由来する水ストレスの方が相対的に高いことが分かる。さらに、総食料生産由来の水ストレスと国内生産由来の水ストレスを比較すると、後者の水ストレスの強度が相対的に低くなっている。以上より、これら4ヶ国では、農業部門の淡水消費が水ストレスを強める主因となっている可能性が高く、かつ、水ストレスの緩和に対する淡水資源貿易量の低減効果も大きいことが期待される。よって、これら4ヶ国では、水ストレスの緩和に対する農業用水消費の低減が、特に有効であることが期待される。

3.4 水ストレスに対する国際貿易の影響

Table 6は淡水資源貿易量によって水ストレスが強められている可能性のある8ヶ国について、国内生産淡水資源量、淡水資源貿易量（輸出食料生産に必要な淡水資源量）、淡水資源供給可能量、および水ストレスの値をまとめた表である。同表より、Denmarkでは、淡水資源貿易量が国内生産淡水資源必要量を大きく上回っており、総淡水資源必要量の7割以上を淡水資源貿易量が占める結果となった。また、Austria、Bulgaria、Switzerlandの3ヶ国では、国内生産淡水資源必要量と淡水資源貿易量が同程度の大きさを示している。残りの4ヶ国については、総淡水資源必要量に占める淡水資源貿易量の割合が2～3割程度に止まっているものの、3.2節のFigure 3で見たように、国内生産

淡水資源必要量に淡水資源貿易量加わることにより、これら4ヶ国の水ストレスの強度をより強める結果となった。この結果から国内生産淡水資源必要量と比較して淡水資源貿易量の大きさが小さく見えるような場合であっても、対象国によっては、そのわずかな淡水資源貿易量が水ストレスを強める恐れがあることが示唆された。したがって、水ストレスに対する淡水資源貿易量の影響は、必ずしも無視できるものではないということがいえる。

次に、どのような国への輸出、あるいはどのような食品目目の輸出によって、上記8ヶ国の水ストレスが強められているか、その定量評価を試みた。Figure 4は、これら8ヶ国の淡水資源貿易量の輸出先別シェアを示したものである。同図より、これら8ヶ国のうち、ほとんどの国では、近隣諸国との国際貿易が盛んに行われていることが分かる。例えば、Austria、Bulgaria、およびDenmarkの3ヶ国については、ヨーロッパ連合（European Union; EU）との国際貿易の比重が最も高くなっている。同様に、South Africa、Trinidad and Tobagoではそれぞれ、Africa、Central America and Caribbeanとの国際貿易が盛んであること分かる。以上の結果から、これら5ヶ国では、近隣諸国との国際貿易により、水ストレスが強められている可能性がある。一方、BarbadosではEU諸国、SwitzerlandではAfricaと国際貿易が盛んに行われている。この結果から、国によっては、必ずしも近隣諸国との国際貿易の比重が高くなる訳ではなく、ある程度遠方の諸国との国際貿易によっても、水ストレスが強められる可能性が考えられる。したがって、水ストレスに対する国際貿易の影響を評価する際は、世界全体で貿易収支を評価することが重要であるといえる。

Table 6 Evaluation of irrigation water requirement, available water resources (respectively, million m³/yr) and blue water stress in the agricultural sector in selected eight countries.

Country Name	Domestic WW	Export WW	AWR	WSI (including Export)	WSI (excluding Export)
Unit	million m ³ /yr	million m ³ /yr	million m ³ /yr	-	-
Austria	381	403	1,715	0.46	0.22
Barbados	20	8	54	0.53	0.38
Bulgaria	351	334	2,402	0.29	0.15
Denmark	320	1,036	1,509	0.90	0.21
South Africa	6,168	1,830	32,102	0.25	0.19
Switzerland	566	419	4,272	0.23	0.13
Thailand	60,151	31,105	396,382	0.23	0.15
Trinidad and Tobago	64	16	167	0.48	0.38

Note: WW, AWR and WSI are short for water withdrawal, available water resources and water stress index, respectively. "Domestic WW" and "Export WW" are calculated as the irrigation water requirement caused by domestic food production and food exportation, respectively. "WSI including Export" is evaluated by dividing the sum of Domestic WW and Exported WW by AWR. In the evaluation of "WSI excluding Export", AWR and Exported WW are used as the denominator and numerator of WSI, respectively.

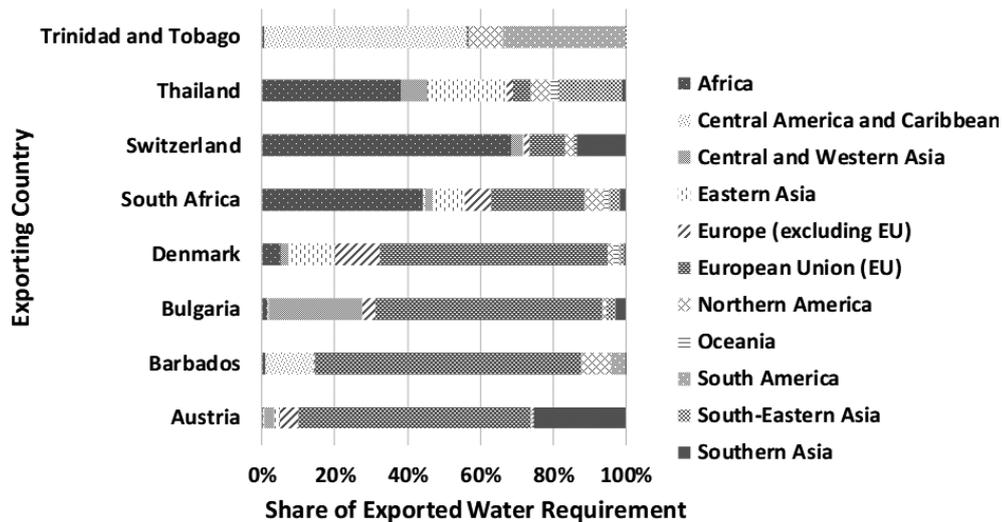


Figure 4 Exported region's share of exported irrigation water requirement derived from eight exporting countries [percent].

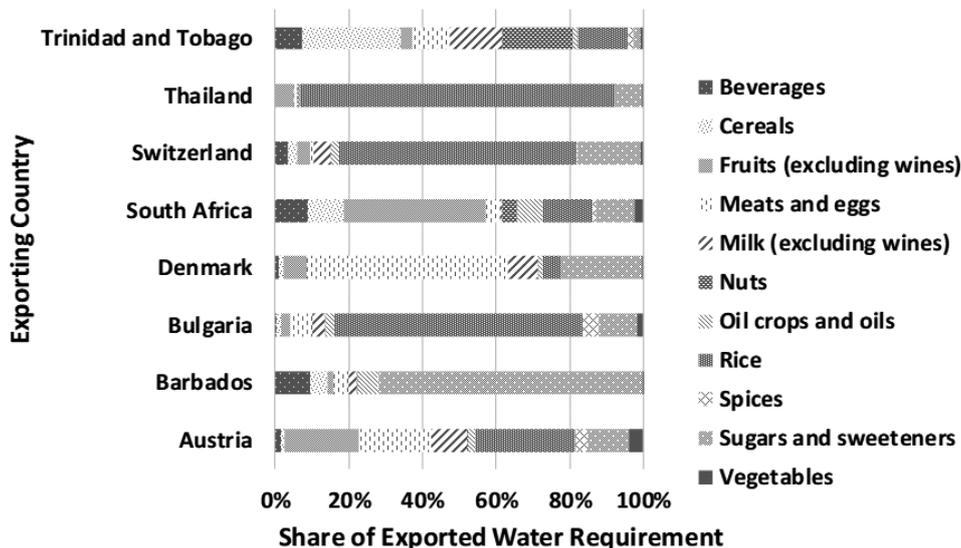


Figure 5 Exported item's share of exported irrigation water requirement derived from eight exporting countries [percent].

次に、上記の8ヶ国について、各国の淡水資源貿易量の輸出品目別シェアをFigure 5に示す。同図より、淡水資源貿易量に占める食料品目の種類に、各国間で差異が見られることが分かる。例えば、Bulgaria、Switzerland、Thailandの3ヶ国では、輸出食料の6～8割（淡水資源量として、 $225 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $270 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 26.7 km^3 ）をriceが占めており、この品目の輸出が3ヶ国の水ストレスを強めている可能性がある。これに対して、Barbadosではsugars and sweetenersが輸出食料の71% ($6.08 \times 10^6 \text{ m}^3$)を占めており、これが同国の水ストレスを強めている可能性がある。また、Denmarkでは輸出食料の55% ($56 \times 10^6 \text{ m}^3$)をmeats and eggsが占めている。South Africaでは輸出食料の39% ($706 \times 10^6 \text{ m}^3$)をfruitsが占めている。両国では、各々の品目の輸出が今後、水ストレスを強め

る可能性がある。以上の結果は、国ごとに水ストレスを強めている食料品目に差異が存在することを示唆している。一方で、上記以外の3ヶ国では、複数の食料品目について、淡水資源貿易量に占める割合が同程度となっている。そのため、これら3ヶ国では、水ストレスを強める可能性のある食料品目を直ちに特定することは困難であるが、それらの品目の輸出が合わさることにより、水ストレスが強められている可能性は否定できない。以上の結果より、水ストレスに対する国際貿易の影響を評価する際には、ある程度、対象品目の種類の幅を広げることが重要であるといえる。

ここで、上記8ヶ国の淡水資源貿易量の値を比較すると、Thailandが突出して高くなっていることが分かる。Thailandでは現在、地下水位の低下により、地下水の塩化

による水質悪化や地盤沈下が問題とされている²⁷⁾。ここで、同国の部門別の地下水利用量の内訳を見ると、2003年時点で、全地下水利用量 ($175.55 \times 10^6 \text{ m}^3$) に占める工業用水と生活用水の割合が各々、60.8%、38.6%であり、農業用水の0.2%に比べると突出して高い²⁷⁾。このため、同国では現在、種々の規制的手法や経済的手法により、工業用水や生活用水としての地下水利用の抑制に努めている。加えて、工業用水や生活用水を確保する手段として、水道管の整備、海水淡水化、排水の再生利用技術の導入も進められている。一方、農業に関しては、同国内の農業従事者を完全に把握できていない状況にあるため、現在は地下水利用に規制がかけられておらず、地下水利用の代替手段も議論されていない²⁷⁾。同国では今後、最大で7,647万人まで人口が増加することが予測されており²⁸⁾、食料生産の拡大に伴う将来的な淡水資源消費量の増加が予想される。また、Figure 5を見ても分かるように、同国は主要な米の輸出国でもある。以上のことから、同国では将来的に農業用水を賄えなくなる恐れがあるため、現状の農業用水消費を低減させて水ストレスを緩和することが必要になると考えられる。しかし、水ストレスを緩和する手段として、同国からの米の禁輸を導入することは、現実には不可能であるように思われる。このような状況において、同国の農業用水消費を低減させるためには、米の品種改良や灌漑効率向上のための技術の支援が最も有効であると考えられる。

また、世界的に見ても、淡水賦存量が乏しい国では、先進国、途上国を問わず、自国で消費する淡水資源の安定確保を目的に、海水淡水化や排水の再生利用技術の導入、

あるいは水取引制度による水市場の導入など、自国の淡水自給率を高める政策に主眼が置かれる傾向にある²⁹⁾。よって、現在のところ、国際貿易による間接的な淡水消費に対する政策は、世界全体でもほとんど導入されていないように思われる。しかし、輸出によって水ストレスが高められているとはいえ、これに該当する国の輸出品に対して、禁輸などを通して輸出量の規制をかけることは現実的ではない。比較優位性などの地理的・経済的要因が淡水資源制約と合わさることにより、最終的な輸出货量が決定されている可能性を否定できないためである。よって、世界全体で水ストレスを緩和させるためには、品種改良や灌漑効率向上のための技術の導入が最も有効であると考えられる。そのためには、輸出により水ストレスが強まっている国を特定し、該当国に対してこれらの技術の導入を促進することが必要である。

最後に、上記の8ヶ国について、淡水資源貿易量の輸出先別・輸出品目別のシェアを合わせた評価を試みた。Figure 6は、輸出に占めるriceの割合が特に高い値を示したBulgaria、Switzerland、およびThailandの3ヶ国について、その輸出先別のシェアを示した図である。同図より、SwitzerlandではAfrica向けの輸出が99% ($267 \times 10^6 \text{ m}^3$) を占めており、これが同国の水ストレスを強めている可能性がある。また、本論文では、推計結果の図表を記載していないが、Barbadosでは、sugars and sweetenersのEU諸国向け輸出がほぼ100% ($6.07 \times 10^6 \text{ m}^3$) を占めており、これが同国の水ストレスを強めている可能性がある。

例えば、Bulgariaについて見ると、本研究の推計では、

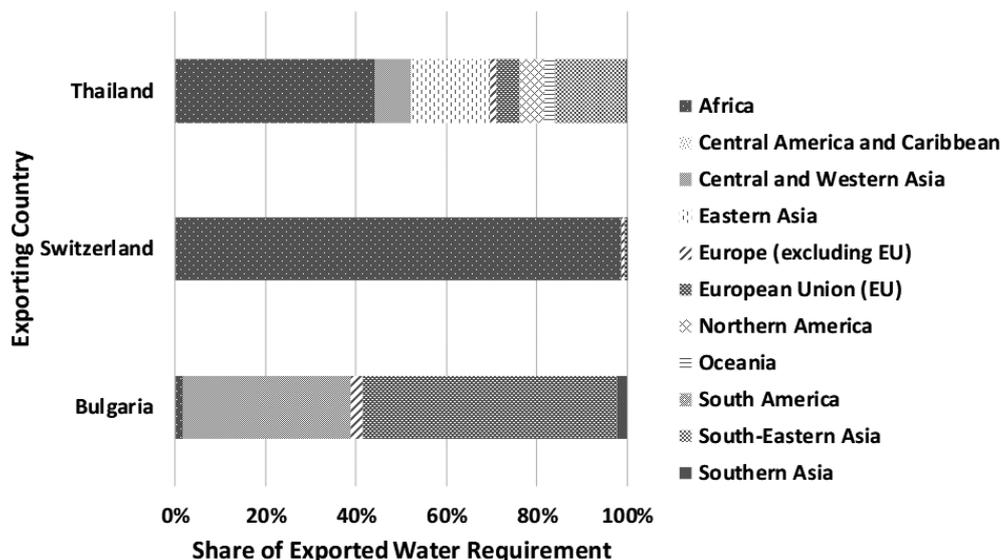


Figure 6 Exported region's share of exported irrigation water requirement derived from three prominent exporting countries in terms of rice exportation [percent].

米の国内生産量と輸入量がそれぞれ、13.2千トン、9.54千トン、輸出量は20.5千トンとなっている。Figure 6におけるBulgariaの米の淡水資源貿易量は、上記の米の輸出量を取水量ベースの淡水資源必要量に換算したものである。本研究では、米の灌漑効率を低く設定したため、米の輸出量を淡水資源必要量に換算する過程において、同国の米の淡水資源貿易量が高くなったと考えられる。輸出量の値が国内生産量と輸入量それぞれの値を上回っていることから、同国では、国内生産された米に輸入米が加わるにより、米の輸出が賄われている可能性が示唆される。

一方、Switzerlandについて見ると、本研究の推計では、基準年における同国の米の国内生産量は0となっており、同国内では米を全く生産していないことが分かる。実際、本研究の推計によると、同国の米の輸入量が38.4千トン、輸出量は32.7千トンとなっていることから、同国では、自国内で消費される米の供給のすべてを国外からの輸入に依存している現状にあり、輸出用の米についても輸入ですべて賄われていることが分かる。それにも関わらず、Figure 6では、同国の淡水資源貿易量に占める米の割合が突出して高くなっており、輸出向けの米を自国で国内生産している結果となっている。このような矛盾は、輸出食料はすべて輸出国内で生産されるという仮定（2国間貿易の仮定）により、同国からの輸出量に過大評価を生じて発生したと考えられる。したがって、現状の評価モデルでは、Switzerlandの米の需給バランスを正確に表現できていないといえる。評価モデルにおける国際貿易の取り扱い、本研究における今後の課題である。

4. おわりに

本研究では、食料消費に焦点を当てた上で、国内生産淡水資源必要量および淡水資源貿易量について、国別・品目別に世界規模で推計した。次に、推計した総淡水資源必要量を淡水資源供給可能量と比較し、水ストレス指標を用いて淡水資源需給バランスを評価した。最後に、淡水資源貿易量が及ぼす水ストレスへの影響を評価した。その結果、2010年時点では、41ヶ国が高いストレス（28ヶ国、19億人）または中位のストレス（13ヶ国、18億人）に直面している可能性が示唆された。このうち8ヶ国では、他国への食料輸出により水ストレスが強まっている可能性が示唆された。Thailandの場合、輸出向け食料の生産に要する同国の灌漑用水取水量の86% (26.7 km³) を占める米の輸出によって、同国の水ストレスが強められている可能性が示唆された。同国のように、淡水資源貿易量を除外することで水ストレスが緩和された国では、水ストレスの改善に対する淡水資源貿易量の削減効果が大き

いことが期待される。しかし、現在のところ、国際貿易による間接的な淡水消費に対する政策は、世界全体ではほとんど導入されておらず、むしろ自国で消費する淡水資源の安定確保を目的に、自国の淡水自給率を高める政策に主眼が置かれる傾向にある。そこで、同国の水ストレスを緩和するためには、品種改良や灌漑効率向上のための技術の導入により、栽培段階における淡水消費の効率を高めることが最も有効であると考えられる。本研究で得られた知見は、水ストレスの緩和に向けて、淡水消費の効率化のための技術を優先的に導入すべき国を特定する判断指標の1つになると考える。本研究により、地球規模での食料需給問題に関して、淡水資源の観点から持続可能性を向上させていくための第一歩となる重要な知見を提示できると考える。

本研究では、国際貿易の取り扱いとして、2国間での食料輸入を想定しており、輸入国から見た場合、輸入品目はすべて輸入相手国内で生産されると仮定した。実際には、ある国が他国へ輸出する食料の生産において、当該輸出国が他国から輸入した原料・飼料作物を使用している場合が考えられるため、2国間貿易の仮定の下では、当該輸出国の淡水資源貿易量に過大評価を生じている可能性がある。また、本研究では、大まかな分類に従って、灌漑効率を設定した。そのため、一部の対象国では、設定した灌漑効率に過大評価を生じている可能性がある。さらに、本研究の推計値に対する実測値・文献値との比較についても、課題が残る結果となった。これらの問題点の改善は、本研究の今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、環境省環境研究総合推進費（S-11）の支援により実施された。ここに記して謝意を表す。

（平成29年6月26日受付、平成29年11月13日採択）

参考文献

- 1) Shen Y., Oki T., Utsumi N., Kanae S., Hanasaki N. (2008): Hydrological Sciences Journal Science, 53 (1), 11-33
- 2) Hoekstra Y. A. (2003): Virtual water: An introduction, Value of Water Research Report Series, No.12, UNESCO-IHE, Delft, NLD, 13-23
- 3) Hoekstra Y. A., Hung. Q. P. (2002): Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade, Value of Water Research Report Series, No.11, UNESCO-IHE, Delft, NLD, 1-66
- 4) Hoekstra Y. A., Chapagain K. A., Aldaya M. M.,

- Mekonnen M. M. (2011): The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard, Earthscan, London, GBR, Washington DC, USA, 228pp.
- 5) Allan T. (1993): Fortunately there are substitutes for water: otherwise our hydropolitical futures would be impossible, Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management, ODA, London, GBR, 13-26
 - 6) Oki T., Kanai S. (2004): Water Science and Technology, 49 (7), 203-209
 - 7) 小野雄也, 堀口健, 伊坪徳宏 (2013): 日本LCA学会誌, 9 (2), 108-115
 - 8) Alcamo A., Flörke M., Märker M. (2007): Hydrological Sciences Journal, 52 (2), 247-275
 - 9) Hanasaki N., Kanai S., Oki T., Masuda K., Motoya K., Shirakawa N., Shen Y., Tanaka K. (2008): Hydrology and Earth System Sciences, 12 (4), 1027-1037
 - 10) Wada Y., van Beek H. P. L., Viviroli D., Dürr H. H., Weingartner R., Bierkens P. F. M. (2011): Water Resources Research, 47 (7), 1-17
 - 11) Hanasaki N., Fujimori S., Yamamoto T., Yoshikawa S., Masaki Y., Hijioka Y., Kainuma M., Kanamori Y., Masui T., Takahashi K., Kanai S. (2013): Hydrology and Earth System Sciences, 17 (7), 2393-2413
 - 12) Yang H., Wang L., Abbaspour C. Y., Zehnder B. J. A. (2006): Hydrology and Earth System Science, 10 (3), 443-454
 - 13) Mekonnen M. M., Hoekstra Y. A. (2011): National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption - Volume I: Main Report, Value of Water Research Report Series, No.50, UNESCO-IHE, Delft, NLD, 1-50
 - 14) FAO, FAOSTAT, FAOホームページ, 入手先 <<http://www.fao.org/faostat/en/#data>>, (参照 2015-12-11)
 - 15) Narayanan G. B., Agular A., McDougall R., Eds. (2012): Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 8 Data Base, Center for Global Trade Analysis, Purdue University, GTAPホームページ, 入手先 <<https://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases/v8/>>, (参照 2017-6-25)
 - 16) Speedy W. A., Overview of world feed protein needs and supply, Animal Production and Health Division, FAO Expert Consultation and Workshop on Protein Sources for the Animal Feed Industry, Apr 29 -May 3, FAOホームページ, 入手先 <<http://www.fao.org/docrep/007/y5019e/y5019e05.htm>>, (参照 2017-6-25)
 - 17) FAO, Technical Conversion Factors for Agricultural Commodities, 1-782
 - 18) 国土交通省国土計画局 (2003): 自然界の物質循環への負荷の少ない社会を目指した資源消費水準のあり方検討調査報告書, 参考3-1-参考3-11
 - 19) 文部科学省, 資源調査分科会報告「日本食品標準成分表2010」について, 文部科学省ホームページ, 入手先 <http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/houkoku/1298713.htm>, (参照 2015-10-13)
 - 20) USDA (1992): Weights, Measures, and Conversion Factors for Agricultural Commodities and Their Products, Agricultural Handbook, No.697, Economic Research Service, USA, 1-77
 - 21) Mekonnen M. M., Hoekstra Y. A. (2011): National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption - Volume 2: Appendices, Value of Water Research Report Series, No.50, UNESCO-IHE, Delft, NLD, 1-94
 - 22) Döll P., Siebert S. (2002): Water Resources Research, 38 (4), 8-1-8-10
 - 23) FAO, AQUASTAT, FAOホームページ, 入手先 <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>>, (参照 2017-6-19)
 - 24) 棟居洋介, 増井利彦 (2008): 環境科学会誌, 21 (1), 63-88
 - 25) Smakhtin V., Revenga C., Döll P. (2004): Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments, Comprehensive Assessment Research Report 2, Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, IWMI, Colombo, Sri Lanka, 1-32
 - 26) Acreman M., Dunbar J. M. (2004): Hydrology and Earth System Sciences, 8 (5), 861-876
 - 27) Institute for Global Environmental Strategies (2006): Sustainable groundwater management in Asian cities: A final report of research on sustainable water management policy, 26-43
 - 28) IIASA, SSP Database (Shared Socioeconomic Pathways) - Version 1.1, IIASAホームページ, 入手先 <<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>>, (参照 2017-3-17)
 - 29) 小寺正一 (2010): レファレンス, 60 (6), 国立国会図書館調査及び立法考査局, 73-97

[Research Article]

Assessment for the Impact of International Trade on the Global Water Supply-Demand Balance Focusing on Food Consumption

Yohei YAMAGUCHI^{1,*}, Kento TAMURA¹, Naoki YOSHIKAWA²,
Koji AMANO² and Seiji HASHIMOTO²

¹ Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University;

² College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

*Corresponding author: rv0023hs@ed.ritsumei.ac.jp

Synopsis: This study aims to evaluate the impact of international trade on global water supply-demand balance, focusing on irrigation water requirements derived from food consumption. In this study, the water supply-demand balance is estimated by using the water stress index. The concept of a water footprint is applied to evaluate indirect water consumption caused by importing food, along with direct water consumption derived from domestic food production. Irrigation efficiency is used to convert water consumption into water withdrawal. The amount of available water resources is defined as a restriction on the maximum water availability for agriculture, which does not mean all the renewable water resources used in the agricultural sector. In 2010, 41 countries were found to be under high or moderate water stress, those are equivalent to 30% (1.9 billion) and 28% (1.8 billion) of the world population, respectively. In addition, water stress of the 8 countries in these 41 countries should be caused by food exportation. For example, in Thailand, water stress should be caused by exporting rice, which is accounted for 86% (26.7 km³) of its irrigation water withdrawal originated from food production for export.

Keywords: International trade; water supply-demand balance; food demand; irrigation water; water stress index