

各国の水資源消費に伴う世界規模での健康被害評価モデルの開発

本下 晶晴¹・小野 雄也²・Stephan Pfister³・Anne-Marie Boulay⁴・Markus Berger⁵・南斉 規介⁶・伊坪 徳宏⁷・田原 聖隆⁸・稲葉 敦⁹

¹正会員 (独) 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 (〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)

Technical University of Berlin, Dept. of Environ. Technol. (Str. des 17. Juni 135 10623, Berlin, Germany)

E-mail:m-motoshita@aist.go.jp

²非会員 東京都市大学 環境情報学研究科 (〒224-8551 神奈川県横浜市都筑区牛久保西3-3-1)

E-mail: g1293101@tcu.ac.jp

³非会員 ETH Zurich, Inst. for Environ. Eng. (John-von-Neumann-Weg 9 8093 Zurich, Switzerland)

E-mail:stephan.pfister@ifu.baug.ethz.ch

⁴非会員 Ecole Polytechnique of Montreal, CIRAI (Montreal QC H3T 1J4, Canada)

E-mail:anne-marie.boulay@polymtl.ca

⁵非会員 Technical University of Berlin, Dept. of Environ. Technol. (Str. des 17. Juni 135 10623, Berlin, Germany)

E-mail:markus.berger@tu-berlin.de

⁶非会員 (独) 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail: nansai.keisuke@nies.go.jp

⁷非会員 東京都市大学 環境情報学部 (〒224-8551 神奈川県横浜市都筑区牛久保西3-3-1)

E-mail:itsubo-n@tcu.ac.jp

⁸非会員 (独) 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 (〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1)

E-mail:k.tahara@aist.go.jp

⁹非会員 工学院大学 工学部 (〒163-8677 東京都新宿区西新宿1-24-2)

E-mail:a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

本研究では水資源の不足に伴う影響を低減するための水資源管理に役立つツールとして、水不足に伴う影響の定量的評価モデルを構築することを目指し、特に大きな需要である農業用水の不足に伴う影響を対象としてモデル開発を行った。水不足に対する感度の違いを反映するため、国別の水資源賦存量、農業用水の需要割合、灌漑用水ベースの農作物の収量、食糧備蓄量を用いて、水不足による食糧供給量への影響評価モジュールを作成した。食糧貿易の影響については、FAOの食糧貿易統計データを基に、各国の購買力を考慮した農作物減収による多国間連鎖影響を記述するモジュールを構築した。食糧供給不足による各国での健康被害として、WHOの栄養失調被害データを基に栄養状態のパラメータを説明変数とした非線形重回帰分析を行い、食糧供給不足に伴う栄養失調被害評価モジュールを作成し、各モジュールを統合して水不足による健康被害評価モデルを開発した。

国別に単位量の水不足による影響を算定した結果、平均 4.26×10^{-6} [DALY/m³]となったが、標準偏差が 9.25×10^{-6} [DALY/m³]と国による違いが大きく見られた。また、新興国や途上国だけでなく、先進国における水消費は自国内での影響はほとんどないものの、食糧貿易を通じて他国での食糧供給に影響を及ぼす結果として小さくない影響がみられることが明らかとなった。

Key Words : Water consumption, human health, water footprint, trade-induced effects, global scale

1. はじめに

人口増加や生活様式の変化に伴う水不足から、2025年

には世界人口の23が水資源の不足に直面すると言われている¹⁾。特に、近年のサプライチェーンのグローバル化により、製品の背後には隠れた水利用のフローが存在

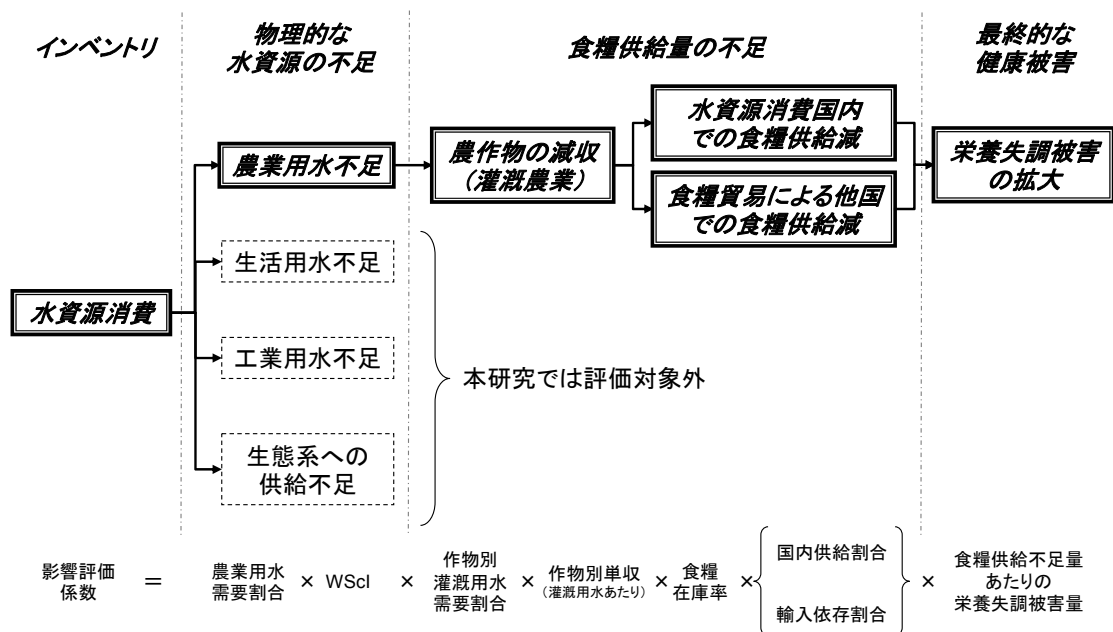


図-1 水資源消費による栄養失調被害評価モデルの概要

し、製品のライフサイクルを通じて水消費の影響は世界の様々な地域に広がっていることが懸念される。さらに、水資源の賦存量、水資源需要、水不足に対する適応力など水消費に伴う影響は地域により異なることが考えられ、地域における水不足に対する脆弱性を考慮した上での製品のライフサイクルを通じた水資源管理の重要性が指摘されている²⁾。

こうした背景から、水資源消費による影響をライフサイクルで評価し水資源管理に生かすためのツールの一つとして、ウォーターフットプリントが注目されている³⁾。ウォーターフットプリントでは製品などのライフサイクルを通じた水利用が、下流のユーザーに対して与える潜在的な影響を評価する⁴⁾。ウォーターフットプリントでは水利用による影響を定量評価するため、インベントリとして水利用量を他のユーザーへの影響の種類に応じて形態(使用、消費など)を区別し、その水利用量に応じた影響をインパクトとして評価する。特に、水資源が製品そのものに取り込まれる場合や蒸発散等により消失するなど他のユーザーが利用できない「消費」として区別される水利用形態は水利用による影響を考える上での重要な要因の一つとして注目され、様々な影響評価の手法が開発されている⁵⁾⁶⁾。

水資源の不足により影響を受けるユーザーは主に人間社会と生態系に分類することができる⁷⁾。各ユーザーの水資源に対する需要には様々なものがあるが、特に農業用水は人間社会における淡水資源需要の約7割を占める大きな用途であり、その影響は農作物の減収を通じた食

糧供給不足による健康被害が懸念されている。一方で、地域により食糧不足に対する適応力(食糧在庫の程度など)や食糧不足に伴う健康被害に対する栄養状態などを通じた感度の違いがあり、各地域により影響の程度は異なる。さらに、農作物は貿易を通じて多国間でやり取りされるため、ある地域における水不足の影響が波及的に世界に広がることが懸念される。

こうした点から、水資源消費に伴う農作物の減収を通じた健康被害の抑制のためには、水資源消費に伴う農業用水不足による影響を把握することが重要である。これまでも、水資源消費に起因した農業用水不足による健康被害に影響評価する手法は開発されているが⁸⁾⁹⁾、地域固有の食糧不足に対する感度として食糧在庫や栄養状態など食糧不足による栄養失調被害に直接的に関わるパラメータを考慮した影響評価が行われていない。また、食糧貿易を通じた食糧不足の影響の波及的な被害についてもこれまで考慮されたモデルはない。

そこで本研究では、水不足に対する地域による感度の違いを考慮した上で、食糧貿易を通じた波及的な影響を表現するモデルを世界スケールで構築することを目的としている。

2. 健康被害評価モデルの構築

(1) 健康被害評価モデルの概要

本研究では、水資源消費によって引き起こされる水不

足を原因として、農作物の減収とそれに伴う食糧供給不足による栄養失調被害の増加を評価の対象とした。本研究で想定した、水資源消費から栄養失調被害に至るまでの影響フローの概要を図-1に示す。本評価モデルでは、ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment: LCA）およびウォーターフットプリントでの利用を想定し、単位水量（1m³）の水資源消費による潜在的健康被害を評価するものとしてモデルを構築した。

(2) 物理的な水資源不足の評価

水資源消費は様々なユーザーの需要に対する不足を招き、人間社会における各用途の需要に対する不足（農業用水、生活用水、工業用水）に加えて、生態系における需要への不足が生じ得る。しかしながら、生態系への水需要量については、様々な研究での推計がなされているが、多くの困難があり現在でもまだその妥当性については議論されている。こうした不確実性から本研究では、水資源消費による水不足を人間社会における各用途へその需要の程度に応じて分配することで保守的な評価を行うこととした。分配において、各国における各用途への需要量を基に、全需要における農業用水需要の割合を水消費量に乗じることで各国における水消費に伴う農業用水の不足量を算定した。

一方、水資源賦存量に対する需要量の割合は地域により異なる。各ユーザーへの需要量に対して十分な水資源賦存量があれば、物理的な水資源の不足を補完することができる。こうした地域による適応力の違いを考慮するため、現状の人間社会における各用途（農業用水、生活用水、工業用水）の需要量と、各地域における利用可能な水資源賦存量との比（Water Scarcity Index：WSI）を物理的な水資源不足に対する適応力を表す係数として乗じた。これにより、各地域の適応力を考慮した水消費による物理的な水資源不足による農業用水不足への影響を算定した。

(3) 農作物減収と食糧供給への影響評価

農業用水の不足により各国で生じる食糧供給への影響については、水消費が起る国内での農作物の減収と、それによる食糧貿易を通じた他国への波及影響の評価を行った。水消費国内での農作物の減収については、各国における農作物の生育に必要とされる水量を農作物別（FAOの統計に準じて45種類）に算定し、各国の降水量および灌漑用水量を基に、全灌漑用水に対する作物別の灌漑用水の需要割合を算定することで、灌漑用水量の不足量を各農作物に配分した。それに前述した算定により得られる作物別の灌漑用水あたりの単収を乗じることで、農業用水の不足による各農作物の減収量を算定した。一方、各国の食糧在庫の量に応じてある程度の農作物の減

収に対する適応力があるものと考えられるため、各国における各農作物の生産量と在庫量（過去10年平均）の割合から在庫による補完能力を国別に算定することで、前述の減収量に対する適応力を考慮した。

水消費国における農作物の減収が貿易を通じて他国へ波及する影響を評価するため、水消費国内での食糧供給量と他国への供給量の不足分とその配分を行った。まず、水消費国内での食糧供給量の減少分について、重量単位の農作物生産量を栄養エネルギー量に換算し、それを基に各国における各農作物の供給量に対する国内需要の割合を乗じることで国内への供給量の減少分を算定した。ただし、各国の経済状況により国内の食糧供給分を他国から輸入を増やす、あるいは他国への輸出を減らすことで適応できることを考慮し、各国の一人当たりGNIに応じた適応力係数（ACI：Adaptation Capacity Index）⁹⁾を乗じて、水消費国内での食糧供給量の減少分を求めた。食糧生産量の減少分と水消費国内での食糧供給の減少分の差分は、各食糧に対する正味の輸入国（輸入量＞輸出量）がその輸入量に応じてシェアするものとして各国における輸入食糧の減少分を算定した。ただし、各国の経済状況に応じて貿易を通じて食糧不足の影響を回避できることから、水資源消費国と同様に適応力係数ACIを乗じて減少分のシェアを計算した。

(4) 栄養失調被害評価

まず、食糧供給量の減少による栄養失調人口の増分の算定した。ただし、栄養失調人口は平均的な栄養状態だけでなく、栄養状態の格差にも影響を受けることが予測されるため、各国における栄養失調人口割合を目的変数として、各国における平均食糧消費量、および食糧消費量のジニ係数を説明変数とした非線形重回帰分析により、栄養失調人口割合を推定する回帰式を得た（R²=0.92, N=171）。得られた回帰式を平均食糧消費量について偏微分することで、食糧供給量の変化分に対する栄養失調人口割合の変化分を国ごとに算定し、各国の人口と栄養失調1ケースあたりの健康被害量を乗じることで健康被害量の変化分を評価した。

3. 各国における水資源消費による栄養失調被害

(1) 各国の水消費に伴う栄養失調被害の感度と水消費量との関係

前章までに述べた分析により、各国における単位水量あたりの水資源消費による潜在的な栄養失調被害量が、水消費に対する各国の感度として世界125カ国について得られた。水消費に対する栄養失調被害の感度と、各国における水資源消費量¹⁰⁾の関係を図-2に示す。

国別に単位量の水不足による影響を算定した結果、平均 4.26×10^6 [DALY/m³]となったが、標準偏差が 9.25×10^6 [DALY/m³]と国による違いが大きく見られた。水消費に対する各国の感度が 10^9 から 10^5 オーダーまで幅広いことから水消費に伴う影響を評価する上で、水消費量そのものだけでなく、各国の脆弱性を考慮した潜在的な影響評価が必要であることが分かる。また、アフリカ地域、アメリカ地域の国々では水消費による栄養失調の被害の感度は 10^9 オーダーから 10^5 オーダーまで分布しており、さらに年間水消費量も幅広く分布している。概ね、水消費に対する感度が高い国において、実際の年間水消費量が大きくなっている傾向がみられる。東南アジア地域、西太平洋地域では水消費に対する感度が相対的に高く、かつ実際の水消費量も多い国が多い。一方、東地中海地域、ヨーロッパ地域では水消費に対する感度が高い国が多いが、年間の水消費量の分布は幅広い。こうした点からも水消費量の大きさと、それに伴う被害量は地域により大きく異なるため、地域の特性を考慮した影響評価が不可欠であるといえる。

(2) 食糧貿易による波及影響の寄与

本文席で得られた水消費に伴う栄養失調被害の感度は水消費国内だけでなく、食糧貿易を通じて他国で起こる被害の感度が含まれている。そこで、図-3に単位量の水消費に伴う栄養失調被害量と、そのうち食糧貿易により他国で発生する被害量との関係を示す。

図-2でも示されているように、ヨーロッパ地域および東地中海地域では水消費に対する感度がいずれも高いが、東地中海地域ではその影響は水消費国内でも生じている一方で、ヨーロッパ地域ではほとんどの影響が食糧貿易を通じて他国で起こる被害であることが図-3より分かる。アフリカ地域、東地中海地域、東南アジア地域以外では水消費に対する影響の多くが食糧貿易を通じて他国で生じる健康被害であるといえる。したがって、水消費による農業用水不足を通じた栄養失調被害を評価する上で、食糧貿易による影響を考慮することは非常に重要であることが示唆された。

4. まとめ

本研究では、水資源消費により生じる農作物の減収に起因する栄養失調被害量について、国レベルでの農業用水の需要の程度、利用可能な水資源による適応力、さらに各国の灌漑用水への依存度、食糧貿易を通じた他国との関係や、各国の経済条件、栄養状態を考慮して評価できるモデルを構築した。水消費に伴う栄養失調被害の感度は国によって異なっており、水消費量の把握だけでな

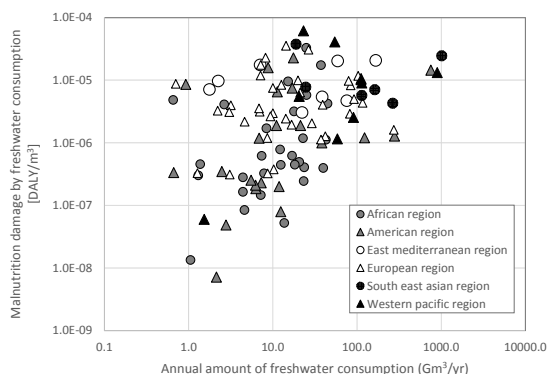


図-2 各国の年間水資源消費量と単位量の水消費に伴う栄養失調被害量の関係

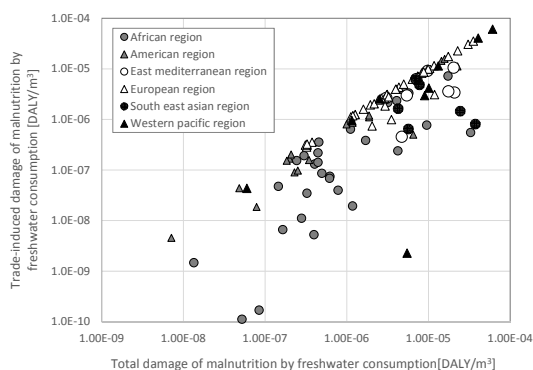


図-3 単位量の水消費に伴う栄養失調被害の総量と他国内で生じる被害の関係

く、地域の適応力や脆弱性を考慮した潜在的な影響の把握が重要であることが示された。また、特に水消費による影響は、水消費国内だけでなく食糧貿易を通じて他国に波及するため、一つの地域における水資源問題に留まらず、より広範な視点での評価や水資源管理が必要となることが示唆された。

これまではデータの制約上から国レベルでの評価を行っているが、水資源消費による影響を評価・管理する上で、影響評価の地理的範囲の細分化や水資源の利用可能量や需要量の季節変動など時価軸での分析を詳細に行うことが、評価の精度を向上させる上で不可欠であるといえる。また、人間社会だけでなく生態系も重要な水資源のユーザーであり、生態系における水需要量やその不足による影響の評価が今後必要である。

参考文献

- 1) UNESCO, Summary of the monograph World water resources at the beginning of the 21st century prepared in the

- framework of IHP UNESCO,
<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/summary/html/summary.html>
- 2) Köehler A: Water use in LCA: managing the planet's freshwater resources. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol.13, No.6, pp.451–455, 2008
 - 3) 沖大幹, 近藤剛: ウォーターフットプリントの現状と課題, *日本 LCA 学会誌*, Vol.6, No.3, pp.187-192, 2010
 - 4) The International Organization for Standardization: ISO14046: 2014, Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines, http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=43263&utm_source=ISO&utm_medium=RSS&utm_campaign=Catalogue, 2014
 - 5) Kounina, A., Margni, M., Bayart, J.B., Boulay, A.M., Berger, M., Bulle, C., Frischknecht, R., Köehler, A., Milà i Canals, L., Motoshita, M., Núñez, M., Peters, G., Pfister, S., Ridoutt, B., van Zelm, R., Verones, F., Humbert, S.: Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol.18, No.3, pp.707-721, 2013
 - 6) 本下晶晴: ライフサイクルアセスメントにおける水利用に関わる影響評価のこれまでと最新動向, *日本水環境学会誌*, Vol.37(A), No.8, pp.271-275, 2014
 - 7) Bayart, J. B., Bulle, C., Deshènes, L., Margni, M., Pfister, S., Vince, F., Köehler, A.: A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol.15, No.5, pp.439-453, 2010
 - 8) Pfister, S., Köehler, A., Hellweg, S.: Assessing the environmental impact of freshwater consumption in LCA, *Environmental Science and Technology*, Vol.43, No.11, pp.4098–4104, 2009
 - 9) Boulay, A.M., Bulle, C., Bayart, J.B., Deshènes, L., Margni, M.: Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health, *Environmental Science and Technology*, Vol.45, No.20, pp.8948-8957, 2011
 - 10) Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y.: Water footprints of nations, *Value of Water Research Report Series*, No. 16, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands. Appendices Volume2, 2004

(2014. 7. 11 受付)

ASSESSMENT MODEL OF WORLDWIDE HUMAN HEALTH DAMAGE RESULTED FROM WATER CONSUMPTION AT THE COUNTRY SCALE

Masaharu MOTOSHITA, Yuya ONO, Stephan PFISTER, Anne-Marie BOULAY,
Markus BERGER, Keisuke NANSAI, Norihiro ITSUBO, Kiyotaka TAHARA and
Atsushi INABA

This study aims to develop the assessment model for assessing the effects of freshwater scarcity. The assessment model focusing on agricultural water scarcity due to freshwater consumption was developed in expectation of contributing to water resource management for reducing the effects of freshwater scarcity. Considering the differences among countries in the vulnerability to water scarcity, the assessment module for the effects on food production integrated significant factors (freshwater availability, agricultural water demand, irrigated crop yields and food stocks) on countries. The assessment module for trade-induced effects was established based on food-trade statistics for describing the relationships of countries in food-trade with the consideration of economic adaptation capacity. The human health damage of malnutrition was predicted based parameters of nutritional conditions in countries by applying non-linear multiple regression analysis to statistic data.

The results showed that the large differences among countries such that the damage due to unit volume of freshwater consumption was 4.26×10^{-6} [DALY/m³] on average with the standard deviation of 9.25×10^{-6} [DALY/m³]. The characterisation factors for not only emerging and developing countries but also developed countries were large. In developing countries, while the domestic effect of malnutrition due to agricultural water scarcity is not significant, freshwater consumption will result in not negligible effects in other countries through international food-trade.