

日本の家計消費に起因する ウォーターフットプリント

本下 晶晴¹・Stephan Pfister²・佐々木 貴央³・
南斉 規介⁴・橋本 征二⁵・Matthias Finkbeiner⁶

¹正会員 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: m-motoshita@aist.go.jp

²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

³非会員 立命館大学 理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

E-mail: rv0037ie@kankyousystem.jp

⁴非会員 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

⁵正会員 立命館大学 理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

E-mail: shashimo@fc.ritsumei.ac.jp

⁶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

日本の家計消費がサプライチェーン全体で世界の様々な地域での水消費に依存している状況について定量的に分析し課題を明らかにするため、世界における日本の家計消費由来の水消費量の推定し、その潜在的な環境影響を評価することで日本の家計消費に起因するウォーターフットプリントを明らかにした。家計消費に起因した水消費のうち日本における水消費は約38%と最も大きい。潜在的環境影響としては全体の約2%に留まっていた。一方、海外での水消費による潜在的環境影響として米国、中国、豪州での影響は全体の影響の大部分を占めていた。これらの国での水消費は主に穀類やその加工品が最も多く、次いで畜産品の生産に起因していた。こうした水消費とその影響の低減の1つの方策として、食品ロスの削減などが有効であろうことが示唆された。

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

1. はじめに

淡水資源は我々の生活を支える重要な資源であるが、人口増加や新興国の経済発展を背景として需要の将来的な増加が見込まれ、2030年には世界の人口の約2/3が水不足に直面すると予測されている。近年サプライチェーンがグローバル化し、家庭が消費する財についても原料調達を含めたライフサイクルの中で様々な地域での生産活動に依存しており、我々の消費活動がこうした間接的な水消費に関与している。このように家計消費がサプライチェーン全体で世界の様々な地域での水消費に依存している状況について、定量的に分析し課題を明らかにすることは、我が国だけでなく世界の水資源問題に対して

貢献するための重要なステップとなる。

家庭で消費される財の水消費量として、オランダのNGO団体であるWater Footprint Networkは農産物とその加工品¹⁾や畜産品²⁾について単位生産量あたりの水消費量を算定している。これらの事例では農作物や飼料作物の生産に直接的に消費される水資源量が算定対象とされており、関連する資材やエネルギーなどの生産に必要な間接的な水消費量は算定されておらず、家庭で消費される財のサプライチェーンとしてカバーされている範囲は限定的なものとなっている。

家庭で消費される財のサプライチェーンをより網羅的に捉えるためのアプローチとして、各産業間の取引によるモノやサービスのつながりをマトリクス化した産業連

関表を援用した分析は一つの有用な手法であり、これまでもサプライチェーンにおける水消費量の算定を試みた事例がみられる³⁾⁴⁾。日本を対象とした分析結果⁴⁾から、家庭で消費される財の生産において直接消費される淡水量は約20%に留まっており、残りの80%はサプライチェーン全体で間接的に消費されていることが明らかとなっている。このことからサプライチェーン全体での水消費量を把握することが重要であることが分かるが、これらの事例で用いられている産業連関表は国内での取引を対象としており、先の事例では輸入財に関する水消費量は国産財と同等であると仮定して分析されている。家庭で消費される財に起因する水消費量をより正確に算定するためには、輸入財の生産に関する条件を反映することが重要である。

こうした輸入財も含めてサプライチェーンにおけるモノやサービスのつながりをより包括的に分析できる多地域間産業連関表が近年開発されてきた⁵⁾⁶⁾。多地域間産業連関表を用いたサプライチェーンの水消費に関する分析として、欧州をベースとした多地域間産業連関分析モデルEXIOBASEを用いた事例⁷⁾、世界各国を対象とした多地域間産業連関分析モデルとしてGTAPやEORAを用いた事例⁸⁾⁹⁾がこれまでにみられる。日本を中心として世界の貿易をカバーする多地域間産業連関分析モデルとして、南斉らは世界連結型産業連関分析モデル（Global Linked Input-Output model: GLIO）を開発しており¹⁰⁾、その特徴として日本で消費される財を中心としてモデル化されていることと、対象国が230カ国と他の多地域間産業連関分析モデルに比べて分析対象となる国の網羅性が最も高い。

そこで、本研究では世界連結型産業連関分析モデルGLIOを用いて世界各国における日本の家計消費由来のサプライチェーンにおける水消費量の推定を試みた。また、水消費が同量であってもその影響は各地域の水資源賦存量や需要などを踏まえた水ストレスの程度により異なる。そのため、各地域の水資源利用可能量に基づいた水ストレス評価指標を用いて、各地域における水消費量だけでなくその潜在的な環境影響の程度についても分析を行った。これらにより家庭で消費される財に関するウォーターフットプリントを評価することで、現状の把握とその改善点の探索を試みた。

2. 家庭で消費される財に起因する水消費量の算定とその潜在的環境影響の評価方法

(1) 水消費量の算定

まず、各国における直接的な水消費量として、灌漑用水、畜産用水、工業用水、生活用水の消費量を推計し、

各国における産業との対応付けを行うことで、財の生産で直接消費される水資源量を算定した。日本については2005年産業連関表の406部門に対応して各部門の直接水消費量を算定し、各部門の生産額で除すことで生産額あたりの水消費原単位を得た。日本以外の国については、Global Trade Analysis Project（GTAP）により開発されたGTAPモデル（GTAP 7）の対象国となっている93カ国はGTAPの産業分類に応じて57部門に分類して水消費原単位を作成し、それ以外の136カ国については部門別の算定を行わず国全体の水消費量を国内生産額で除すことで国平均の水消費原単位を作成した。算定方法の詳細は既報にて報告しており、こちらを参照されたい¹⁰⁾。

(2) 水消費に関わる潜在的環境影響の評価

各国で水資源が消費されることによる環境影響は、各国における水資源賦存量や生態系・人間社会の需要量により異なる。こうした水消費に伴う潜在的な環境影響評価手法について、これまで様々な手法が開発されてきている¹¹⁾。こうした評価手法が乱立する問題を解決するべく、合意形成に基づいた評価手法の開発プロジェクトが国連環境計画（UNEP）と毒性化学会（SETAC）の共同プロジェクト（UNEP-SETAC Life Cycle Initiative）として進められており、水資源消費に関する合意形成に基づいた影響評価モデルとしてAWARE¹²⁾が推奨されている¹³⁾。そこで本研究ではAWAREの国別影響評価係数リストを基に水消費に関わる潜在的環境影響評価を行った。

AWAREでは流域別の水資源賦存量を基に、人為的な水消費量と水域生態系に必要とされる需要量（Environmental Water Requirement: EWR）を差し引いた正味の利用可能な水資源量を算定し、流域の面積あたりの利用可能な水資源量の逆数を潜在的環境影響を表現する指標としている。これをさらに世界平均値で除して正規化することで、世界の平均に対してある流域における面積あたりの利用可能水量がどれほど少ないかを表現しており、ある流域で水を消費することによる潜在的な環境への影響の大きさをAWAREの影響評価係数は表しているといえる。前項の方法により算定する各国の水消費量にAWAREの国別影響評価係数を乗じることで、世界平均に比べてどれだけ環境影響を及ぼす可能性があるのかを評価できる。これにより、家庭で消費される財に関するウォーターフットプリントを評価した。

3. 日本の家計消費に起因するウォーターフットプリント

(1) 家計消費に起因する各国での水資源消費量

前章までに述べた分析により、日本の家計消費に起因

する各国における水資源消費量が世界 230 カ国について得られた。日本の家計消費に起因する水資源消費量の合計は、62,186（百万m³）と算定された。Ono et al.⁴⁾による日本国内のみを対象とした産業連関分析では輸入財についても国産財と同じ水消費原単位と想定されており、家計消費起因の水消費量は 29,453（百万 m³）と今回の算定結果の約半分程度であり、国産財と輸入財を同等として仮定した推定ではかなり過小評価であったといえる。

日本の家計消費に起因する水資源消費の国別内訳を図-1 に示す。こうした家計起因の水消費のうち、日本で消費される水資源量は 38%であり、残り 62%と大部分は海外で消費されていることが分かる。中でもアメリカ、中国、オーストラリアといった貿易面でのつながりが強い国での水消費量が多い。

こうした家計消費起因の水消費に対してどのような品目が大きな影響を与えているのかを把握するため、家庭の購入品目のうち水消費量の多い品目の水消費量とその国内・海外分の内訳を図-2 に示す。図-2 に示す上位 11 品目で全体の水消費量の約 50%を占めており、これらの品目は家計消費起因の水消費の大きな要因であるといえる。「上水道・簡易水道」は家庭で水道から直接消費される水であり、当然ながら国内での消費がほとんどである。それ以外の品目について、「精穀」以外はほとんどが海外での水消費となっている。「一般飲食店（除喫茶店）」も含めていずれも食料品あるいは飼料などの農作物に関わる品目であり、海外で生産された農作物を輸入して消費していることで間接的に海外での水消費につながっている。「精穀」では米の消費が多く、国産米の消費が多いため、他の食料品関連の項目とは違う傾向が見られたものと考えられる。

また、特に水消費量の大きいアメリカ、中国、オーストラリアについて、水消費量の多い品目を表-1～表-3 に示す。アメリカ、オーストラリアについては主に食料品が水資源消費量の多い項目として挙がっており、これらの品目の生産に必要な原料の生産に必要な水資源が両国で消費されている影響が大きい。一方、中国については衣服（輸入品）に関わる水消費量が多く、食料品の水少量も多いがアメリカ、オーストラリアとは異なり輸入加工食品の水消費量が相対的に大きい。

(2) 家計消費に起因する水資源消費と潜在的環境影響

家計消費に起因する各国での水資源消費に対して、AWAREを用いて潜在的環境影響を評価した結果、全水消費量に対する潜在的環境影響の合計は1,371,555（百万 m³ world eq.）と算定された。前項で述べた通り、水消費量は62,186（百万m³）であり、面積あたりの利用可能な水資源量が世界の平均に相当する地域でこの水資源量をすべて消費した場合にはAWAREでの評価結果は62,186

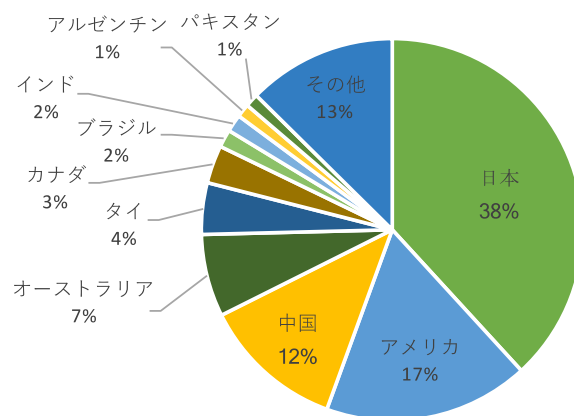


図-1 日本の家計消費に起因する水資源消費の国別内訳



図-2 水資源消費の多い品目とその国内・海外分の内訳

表-1 アメリカにおける水資源消費量の多い上位 10 品目

品目名	水消費量(百万 m ³)	割合 (%)
と畜 (含肉鶏処理)	1,480	13.7
一般飲食店 (除喫茶店)	1,025	9.5
パン類	686	6.3
酪農品	635	5.9
飼料	577	5.3
菓子類	568	5.3
めん類	432	4.0
その他の食料品	424	3.9
そう菜・すし・弁当	394	3.6
植物油脂	359	3.3

表-2 中国における水資源消費量の多い上位 10 品目

品目名	水消費量(百万 m ³)	割合 (%)
繊維物製衣服	674	9.0
ニット製衣服	561	7.5
一般飲食店 (除喫茶店)	515	6.9
その他の水産食品	353	4.7
農産保存食料品	284	3.8
冷凍魚介類	273	3.6
肉加工品	246	3.3
そう菜・すし・弁当	221	3.0
と畜 (含肉鶏処理)	219	2.9
飼料	187	2.5

表-3 オーストラリアにおける水資源消費量の多い上位 10 品目

品目名	水消費量(百万 m ³)	割合 (%)
パン類	553	12.7
と畜 (含肉鶏処理)	402	9.3
飼料	394	9.1
一般飲食店 (除喫茶店)	387	8.9
めん類	370	8.5
菓子類	272	6.3
酪農品	208	4.8
その他の食料品	126	2.9
そう菜・すし・弁当	104	2.4
精穀	91	2.1

(百万m³ world eq.) となる。つまり、日本の家計消費に起因する水消費は世界平均に比べて水ストレス度が高い地域で起こっており、その潜在的な環境影響は世界平均の国で消費する場合に比べて2倍以上大きいといえる。

その要因について分析するため、図-3に潜在的環境影響評価結果の国別内訳を示す。日本での水消費は全体の38%を占めていたが、潜在的環境影響としては2%に留まっている。その一方で、海外の中では水消費量が多いアメリカ、中国、オーストラリアがそれぞれ3割程度と大部分を占めている。また、水消費量としては上位に見られなかったエジプトやチリも潜在的環境影響としては上位に挙がっており、水消費量は少ないながらもそれによる潜在的影響は大きい。こうした理由として、AWAREの影響評価係数は日本の場合、約0.90となっており世界平均に比べると相対的に面積あたりの利用可能水資源量が多い一方で、アメリカは33.8、中国は42.3、オーストラリアは72.1、エジプトは98.4、チリは80.1といずれも相対的に面積あたりの利用可能水資源量がかなり少ない国であることが挙げられる。

表-4に潜在的環境影響の合計が全体の影響の半数以上となる上位の品目を示す。図-2で示した水資源消費量の多い項目のうち日本国内での消費が多い「上水道・簡易水道」、「精穀」を除いて水消費量の多い品目が潜在的環境影響も大きな品目として挙がっている。ただし、「石油製品」、「織物製衣服」、「ニット製衣服」など水資源消費量ではそれぞれ上位から12位、14位、23位であったが、潜在的影響としては相対的に大きい。「石油製品」ではパキスタン、オーストラリアからの原料輸入、「織物製衣服」では中国からの製品輸入、「ニット製衣服」ではエジプト、中国からの製品輸入の影響が大きい結果となっていた。いずれもAWAREの影響評価係数が大きな地域であり、こうした地域での原料生産に必要な水消費に伴う影響が家庭で消費される財のサプライチェーンに隠れた影響として大きいことが明らかとなった。

図-4には潜在的影響が大きい品目について、その家計支出額と潜在的影響との関係を示す。潜在的環境影響の大きさは必ずしも支出額の大きさととは比例しておらず、

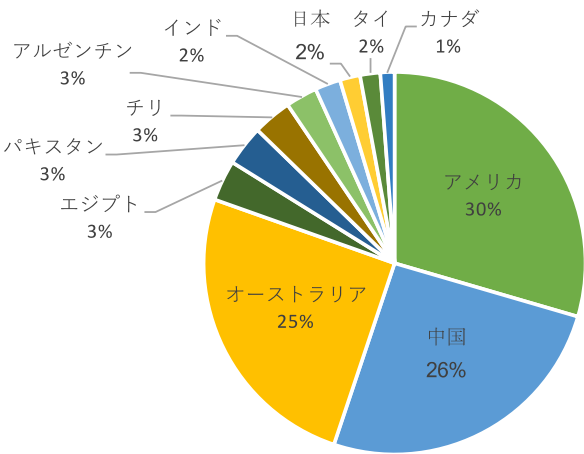


図-3 水資源消費による潜在的環境影響の国別内訳

表-4 水資源消費による潜在的環境影響の大きな品目

品目名	潜在的環境影響 [百万 m ³ world eq.]
と畜 (含肉鶏処理)	107,841.8
一般飲食店 (除喫茶店)	106,546.4
飼料	88,178.6
パン類	75,622.1
菓子類	54,391.5
めん類	48,908.0
酪農品	47,787.3
そう菜・すし・弁当	38,028.4
石油製品	36,667.6
織物製衣服	33,563.3
その他の食料品	33,226.5
ニット製衣服	27,103.5

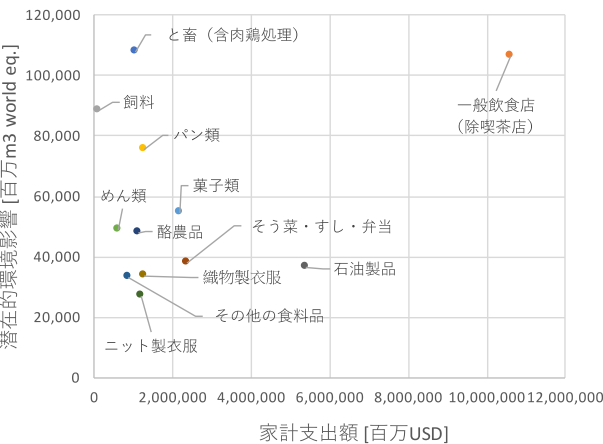


図-4 主要な品目の支出額と潜在的環境影響の関係

主に食料品類(肉、パン類、めん類、菓子類、酪農品、惣菜など)は支出額が小さくとも水消費による潜在的影響が大きい。一方でこうした品目は家庭での生活における基本的な支出項目であり、健康面などの観点からも単純に支出を削減することは必ずしも有効であるとは限らない。しかし、我が国において廃棄される食料のうち可食部である食品ロスとは約642万tとされ、食用仕向量の約

8%にも相当すると推定されている¹⁴⁾。こうした食品ロスを削減することで上記のような家計消費に起因する水資源消費による潜在的な環境影響を低減できる可能性がある。このような食品ロスの削減によるウォーターフットプリント低減の可能性については、本研究発表会にて「食品ロスに伴う淡水消費量の推計」として発表するため、そちらも参照されたい¹⁵⁾。

本研究では水消費に伴う潜在的環境影響評価手法としてAWARE¹²⁾を用いており、これは対象国・流域における利用可能な水資源量に応じた水ストレスの程度を表すミッドポイント指標と呼ばれるである。一方、水資源が不足することによる具体的な影響（例えば、農業用水不足による食料生産の低下とそれに伴う栄養失調被害の増加など）は対象国・流域における社会・経済的な条件により異なるため、水ストレスの程度が高い地域において必ずしも具体的な健康被害などの影響が高いとは限らない。したがって、こうした水消費に伴って生じる健康被害などを評価するためには、エンドポイント指標¹³⁾、¹⁶⁾を用いた評価が必要であり、今後はこうしたエンドポイントレベルでの潜在的環境影響の評価を含む分析を行う予定である。

4. まとめ

本研究では、家計消費に起因する水資源消費量を世界連結型産業連関分析モデル（Global Linked Input-Output model）を用いて世界各国での消費量として推定し、各地域の水資源利用可能量に基づいた水ストレス評価モデル（AWARE model）を用いて各国における水消費量だけでなくその潜在的な環境影響の程度についても分析を行い、家計消費起因のウォーターフットプリントを評価した。世界各国における財の生産に必要な水消費量を算定することで、国産財と輸入財を同等と仮定した従来の分析⁹⁾に比べて2倍以上の水資源がサプライチェーンで消費されていることを明らかにした。その水資源消費は日本国内では全消費量の約38%程度に留まり、日本に比べて利用可能水資源量の少ない海外の国々での水消費に頼ることで、同量の水を世界の平均的な地域で消費することに比べて2倍以上の潜在的環境影響を与えている可能性が明らかとなった。こうした家計消費に起因する水消費に伴う潜在的環境影響に対して食品の消費が大きな割合を占めており、その影響を削減するための可能性としては食品ロスの削減が有効である可能性が示唆された。

今後の課題として、特に今回の分析により日本の家計消費起因のウォーターフットプリントが多いことが明らかとなったアメリカ、中国、オーストラリアなどは特に国土が広く、地域により利用可能な水資源量は異なるが

今回の分析では国平均の影響評価係数を用いて評価を行っている。また、水需要ならびに水資源利用可能量はいずれも季節的に変動することが多く、こうした時間的な変動を踏まえた分析も家計消費起因のウォーターフットプリント評価の精度向上には不可欠であると考えられる。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金（15H02863、15H05342）による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

- 1) Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y.: The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol.15, No.5, pp.1577-1600, 2011
- 2) Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y.: A global assessment of the water footprint of farm animal products, *Ecosystems*, Vol.15, No.3, pp.401-415, 2012
- 3) Zhao, X., Chen, B., Yang, Z. F.: National water footprint in an input-output framework – A case study of China 2002, Vol.220, No.2, pp.245-253, 2009
- 4) Ono, Y., Motoshita, M., Itsubo, N.: Development of water footprint inventory database on Japanese goods and services distinguishing the types of water resources and the forms of water uses based on input-output analysis, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol.20, No.10, pp.1456-1467, 2015
- 5) Wiedmann, T.: A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting, *Ecological Economics*, Vol.69, No.2, pp.211-222, 2009
- 6) Daniels, P. L., Lenzen, M., Kenway, S. J.: The ins and outs of water use - a review of multi-region input-output analysis and water footprints for regional sustainability analysis and policy, *Economic Systems Research*, Vol.23, No.4, pp.353-370, 2011
- 7) Lutter, S., Pfister, S., Giljum, S., Wieland, H., Mutel, C.: Spatially explicit assessment of water embodied in European trade: A product-level multi-regional input-output analysis, *Global Environmental Change*, Vol.38, pp.171-182, 2016
- 8) Steen-Olsen, K., Weinzettel, J., Cranston, G., Ercin, A. E., Hertwich, E. G.: Carbon, land and water footprint accounts for the European Union: Consumption, production, and displacements through international trade, *Environmental Science and Technology*, Vol.46, No.20, pp.10883-10891, 2012
- 9) Lenzen, M., Moran, D., Bhaduri, A., Kanemoto, K., Bekchanov, M., Geschke, A., Foran, B.: International trade

- of scarce water, *Ecological Economics*, Vol.94, pp.78-85, 2013
- 10) 佐々木貴央, 本下晶晴, 南斉規介, 橋本征二: 家計消費とプラネタリー・バウンダリー: 淡水利用について, 第 12 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.182-183, 2017
 - 11) 本下晶晴, 中谷隼, 小野雄也, Matthias Finkbeiner: ウォーターフットプリントにおける潜在的環境影響の評価手法, 日本 LCA 学会誌, Vol.11, No.3, pp.246-256, 2015
 - 12) Boulay, A.M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M.J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A.V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., Pfister, S.: The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE), *The International Journal of Life Cycle Assessment*, in press (doi: 10.1007/s11367-017-1333-8)
 - 13) United Nations Environment Programme: Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators. Volume 1, United Nations Environment Programme, <http://www.lifecycleinitiative.org/applying-lca/lcia-cf/>, 2017
 - 14) 農林水産省:食品ロスの現状(フロー図)平成24年度推計値,http://www.aff.go.jp/j/shokusan/recycle/syoku_loss/pdf/hurorev2.pdf, 2017年6月アクセス
 - 15) 佐々木貴央, 本下晶晴, 南斉規介, 橋本征二: 食品ロスに伴う淡水消費量の推計, 第45回環境システム研究論文論文発表会講演集, 印刷中, 2017
 - 16) Motoshita, M., Ono, Y., Pfister, S., Boulay, A.M., Berger, M., Nansai, K., Tahara, K., Itsubo, N., Inaba, A.: Consistent characterisation factors at midpoint and endpoint relevant to agricultural water scarcity arising from freshwater consumption, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, in press (doi: 10.1007/s11367-014-0811-5)

(2017. 6. 21 受付)

WATER FOOTPRINT ORIGINATES IN JAPANESE HOUSEHOLD EXPENDITURE

Masaharu MOTOSHITA, Stephan PFISTER, Takao SASAKI, Keisuke NANSAI, Seiji HASHIMOTO and Matthias FINKBEINER

This study aimed to quantitatively analyze water consumption in global supply chains and associated potential environmental impacts (water footprint) that originated in Japanese household expenditure and seek solutions for the reduction of water footprint. The potential environmental impact by water consumption in Japan represented only 2% of total impact while the amount of water consumption in Japan accounted for around 38% of total water consumption amount. Water consumption in the United States of America, China and Australia resulted in major parts of total water footprint associated with Japanese household expenditure. Cereals and its processed food products were most attributable to water consumption in these countries, followed by animal products. The results implied that the reduction of food loss would contribute to the improvement of water footprint associated with Japanese household expenditure.