

3. 3 仮想水への対応

当初は仮想水の輸出入量について別表にて試算を行うことを目的としていたが、仮想水の量には、ヴァーチャルウォーター輸入量 (Virtual Water Trade) とリアルウォーター量 (Real Water, Water Footprint と呼ばれている) があり、また、国連 SEEAW ハンドブックでも仮想水の定義が定まっていないため、データの収集と整理に留めた。

(1) 仮想水関連論文

仮想水関連論文には以下のものがある。

論文 1) T. Oki, M. Sato, A. Kawamura, M. Miyake, S. Kanae, and K. Musiake : “Virtual water trade to Japan and in the world”, Virtual Water Trade, Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, IHE Delft, The Netherlands, 2003

論文 2) 犬塚俊之・新田友子・花崎直太・鼎信次郎・沖大幹、「水の供給源に着目した日本における仮想的な水輸入の内訳」、水工学論文集、第 52 巻、2008 年 2 月

論文 1) は、日本の食料の輸入に伴うヴァーチャルウォーター輸入量 (「輸入物質を自国内で生産するとしたら必要となると想定される水の量」) の推定を行い、その輸入量は約 627 億 m^3 /年(2000 年)で先進国の中で最大である。

論文 2) は、ヴァーチャルウォーターとの対比でリアルウォーター (「輸出国で実際に消費された水資源量」、著者らは Water Footprint と呼んでいる) が日本で約 427 億 m^3 /年(2000 年)と算定され、そのうち約 73 億 m^3 /年(約 17%)が灌漑用水、約 29 億 m^3 /年(約 7%)が非循環型地下水起源であると推計している。

(2) 論文 2) 「水の供給源に着目した日本における仮想的な水輸入の内訳」の概要

論文 2) について、沖大幹らの HP¹⁵を引用しその論文概要を以下に示す。

① 抄訳

食料生産と水とを定量的に結びつけるヴァーチャルウォーターの概念は、日本でも広く知られるようになりつつあるが、国際政治における水問題への関心の高まりに伴い、EU を中心とした海外でもその定量的な推計が盛んになり始めている。特に、これまで「食料などの生産に必要な水の量」は外形的な統計に基づいて推計されることが多かったのに対し、作物成長を表現できる数値シミュレーションを用いてその水の起源が雨水(green water)なのか、灌漑水(blue water)なのか、といった区分まで推定することが研究のひとつのフロンティアとなっている。

本研究では、ダム貯水池操作や灌漑取水、作物生育モデル等を含む全球統合水資源モデル(花崎等、2007)に中規模貯水池、非循環地下水(非持続的な地下水)からの取水プロセス

¹⁵ 沖大幹、鼎信次郎(東京大学)、花崎直太(国立環境研究所)「日本のウォーターフットプリントの 7%は非持続的な水源」<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/Info/Press200802/>より引用。

を追加した。その結果、灌漑取水量の結果が改善され、より再現性の高い水資源循環シミュレーションが実現した。また、全球統合水資源モデルの出力を用いて、「供給源別」の日本のヴァーチャルウォーター輸入量を推定した。なお本研究では、従来ヴァーチャルウォーターとの対比でリアルウォーターと呼ばれていた「輸出国で実際に消費された水資源量」の名称を **Water Footprint** と呼ぶこととした。これは、「一人の人間が持続的な生活を営むために必要な土地面積」を表す「エコロジカル・フットプリント」の概念を水資源に置き換えたもの、であり、UNESCO-IHE のグループが使用し始めた用語である。

その結果、

- ・ 農業生産に寄与している全世界の雨水量(グリーンウォーター)と 灌漑水量(ブルーウォーター)の推定値と先行研究との比較
- ・ 2000 年の日本の仮想的な水の輸入量(Water Footprint)
- ・ 灌漑用水起源の日本の Water Footprint
- ・ 非循環地下水起源の日本の Water Footprint
- ・ 作物ごとの日本の Water Footprint の供給源別内訳

などが明らかとなり、日本の Water Footprint は 2000 年当時で約 $42.7\text{km}^3/\text{年}$ と算定され、そのうち約 $7.3\text{km}^3/\text{年}$ (約 17%) が灌漑用水、約 $2.9\text{km}^3/\text{年}$ (約 7%) が非循環地下水起源であると推計された。

なお、本研究における灌漑用水や非循環地下水という区分は全球統合水資源モデルの中での区分であり、必ずしも実際の灌漑用水や非循環地下水(化石水)の消費量に直結するものではない。しかし、今回の結果は水資源の消費量のうちの持続不可能な分を表していると考えることができ、推定として一定の意味をもつと考えられる。日本の食料輸入の 5% 以上が持続不可能な水資源に依存している可能性を示した今回の結果により、世界の水問題に対して日本が無関係のものではないという事がより具体的に示されたといえる。

② ヴァーチャルウォーター輸入量と Water Footprint の定義

図 3.3-1 にヴァーチャルウォーター輸入量と Water Footprint の違いの概念図を示す。これは従来推計してきたヴァーチャルウォーター輸入量、本論文で今回取り上げた Water Footprint の違いを示した図である。

③ 全球統合水資源モデルの特徴と構成・概要

図 3.3-2 に全球統合水資源モデルの特徴を示す。これは本論文の推計に用いられた Hanasaki et al.の全球統合水資源モデル(H07)の特徴を示したものである。

図 6.2-3 に全球統合水資源モデルの構成・概要を示す。これは、本論文の推計に用いられた Hanasaki et al.の全球統合水資源モデル(H07) の構成と概要を示したものである。

④ 推定方法

図 3.3-4 に農地の水利用量の推定を示す。これは、いつ、どこで、何が作付けされているか、また、栽培期間中どれくらい水を利用しているかなど農地の水利用量の推定について示したものである。

図 3.3-5 に取水源の推定を示す。これは雨水、自然の河川流量、ダムからの放流水、中規模貯水池からの放流水、非循環型の地下水からの取水の取り扱いの概念図を示したものである。

図 3.3-6 に Water Footprint の算定式を示す。2000 年は 82 品目の農畜製品の輸入データを利用し、農産物は 5 品種（大麦、トウモロコシ、コメ、大豆、小麦）、畜産物は 3 品種（牛肉、豚肉、鶏肉）を使用して算定している。

⑤ モデルの検証

図 3.3-7 に世界の農地の水消費量(検証 1)を示す。これは改良された全球統合水循環水資源モデルの検証結果を示している。全球の天水農地、灌漑農地における雨水起源、灌漑水起源の蒸発散量に関する既往の推計との比較し本論文で推計した数値が妥当なことを示している。

図 3.3-8 に地下水取水量（検証 2）を示す。これは World Resources Institute (WRI)による各国の地下水揚水量と改良された全球統合水循環水資源モデルの推計値との比較検証したもので、取水原別の Water Footprint もますます妥当と検証している。

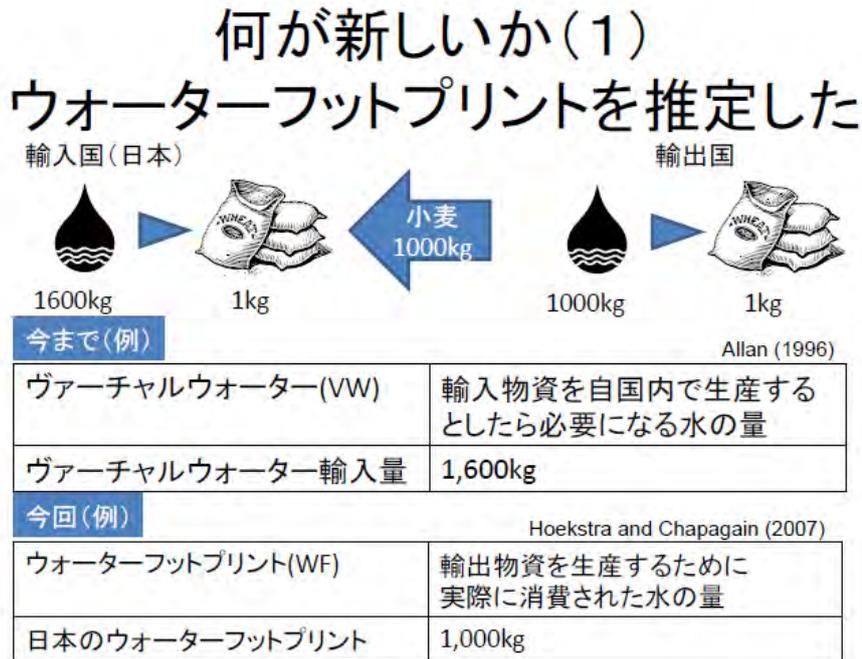
⑥ 計算結果

図 3.3-9 に日本の Water Footprint の推定（結果 1）を示す。これは、日本の Water Footprint (WF)の 2000 年に対する推定値を示したものである。WF とヴァーチャルウォーター(VW)輸入量との比較や、WF と VW それぞれに対する水消費原単位の比較を示している。日本の WF は 42.7km³/年（427 億 m³/年）、VW 輸入量は 62.7 km³/年（627 億 m³/年）と推計している。この図中の表はアメリカから日本へ向かう主な品目の VW 輸入量と WF を比較したものである。原単位（VW）は日本を対象に、統計ベースで推定された必要水量と単位収量を掛けて算出した値であり、VW 輸入量の計算に用いられる。ただし、トウモロコシに関しては日本での生産がほとんど行われていないため、世界平均の単位収量を用いた水消費原単位の推定を行っている。一方、本論文で算出した原単位（WF）はモデル出力の水消費量に統計ベースの単位収量を掛けたものであり、WF の計算に用いられる。この表によると、トウモロコシと牛肉で水消費原単位が WF で VW より小さくなっており、この差が結果に反映されている。

図 3.3-10 に日本の Water Footprint の取水源を示す。これは日本の全 Water Footprint (WF)、ヴァーチャルウォーター(VW)輸入量、灌漑水に関する WF、非循環的な地下水に関する WF の世界的な流れの比較したものである。日本の WF 及び VW 輸入量は米国からの量が多いことを示している。

図 3.3-11 に Water Footprint の品目別の水源割合を示す。これは主要農畜産物別の日本の WF の利用水源ごとの割合を示したものである。天水の割合が高いのは大麦と牛肉である。特に牛肉の天水起源割合が高いのは、放牧牛の餌となる牧草の水供給源はすべて天水であるとしているためである。灌漑用水の割合が高いのは米、大豆、小麦である。

図 3.3-1 ヴァーチャルウォーター輸入量と Water Footprint の違いの概念図



ウォーターフットプリントは水の量ですが、エコロジカルフットプリントやカーボンフットプリントとの並びでこういう名称が使われています。

図 3.3-2 全球統合水資源モデルの特徴

何が新しいか(2) 取水源情報が加わった

- 海外のどんな水が使われたのだろうか？
 - 天水 低環境負荷・持続可能
 - 灌漑水
 - 河川水
 - ダム・貯水池・ため池
 - 地下水(化石水) 高環境負荷・持続不可能

- 全球統合水資源モデルの活用
 - 取水源別の水資源量と農地での水利用量を空間解像度100km × 100km 日単位で全球計算

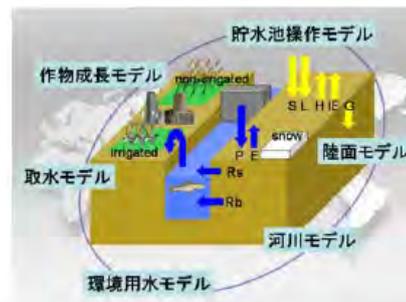
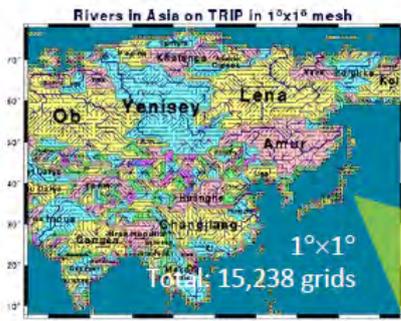


図 3.3-3 全球統合水資源モデルの構成・概要

全球統合水資源モデルとは？



国立環境研究所と東京大学が開発する
全球水資源モデル

出力項目: 水資源量 + 水利用量
空間解像度: $1^\circ \times 1^\circ$ (緯度・経度)
時間解像度: 日単位

特徴1: 充実した人間活動サブモデル
取水、灌漑、ダム操作、環境用水など

特徴2: 高い時間解像度
水資源量と水利用量を日単位で計算

特徴3: 高い要素間の整合性
気象条件が全てのサブモデルを駆動

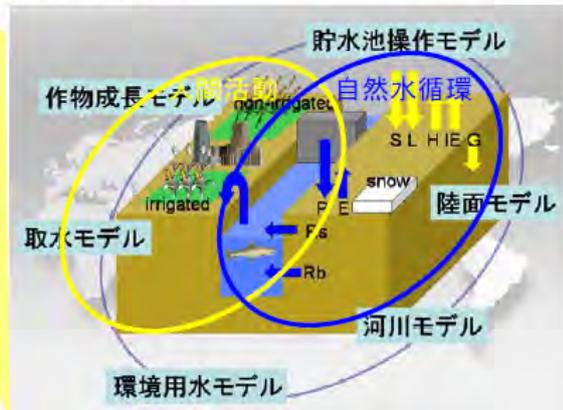
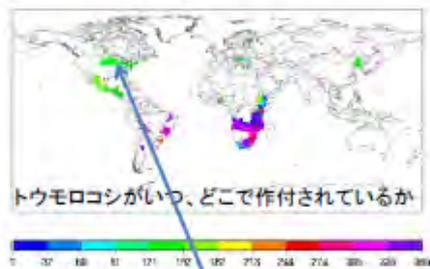
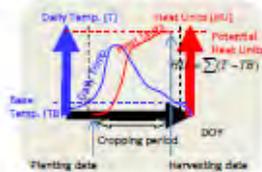


図 3.3-4 農地の水利用量の推定

Step 1. 農地の水利用量の推定

いつ、どこで、何が作付けされているか？

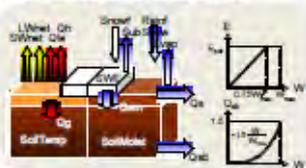
一作物成長サブモデルを利用し、収穫量が最も多く見込める栽培期間を推定



トウモロコシがいつ、どこで作付けされているか

栽培期間中、どれくらい水を利用しているか？

一陸面過程サブモデルを利用し、期間中の蒸発量などを計算



天水農地蒸発量[mm/day] 灌漑必要水量[mm/day]

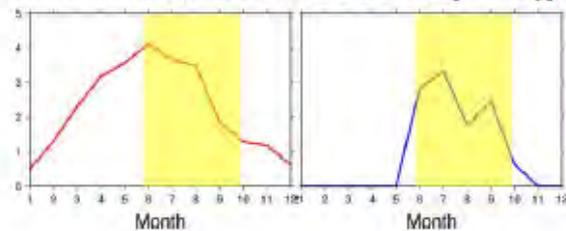


図 3.3-5 取水源の推定

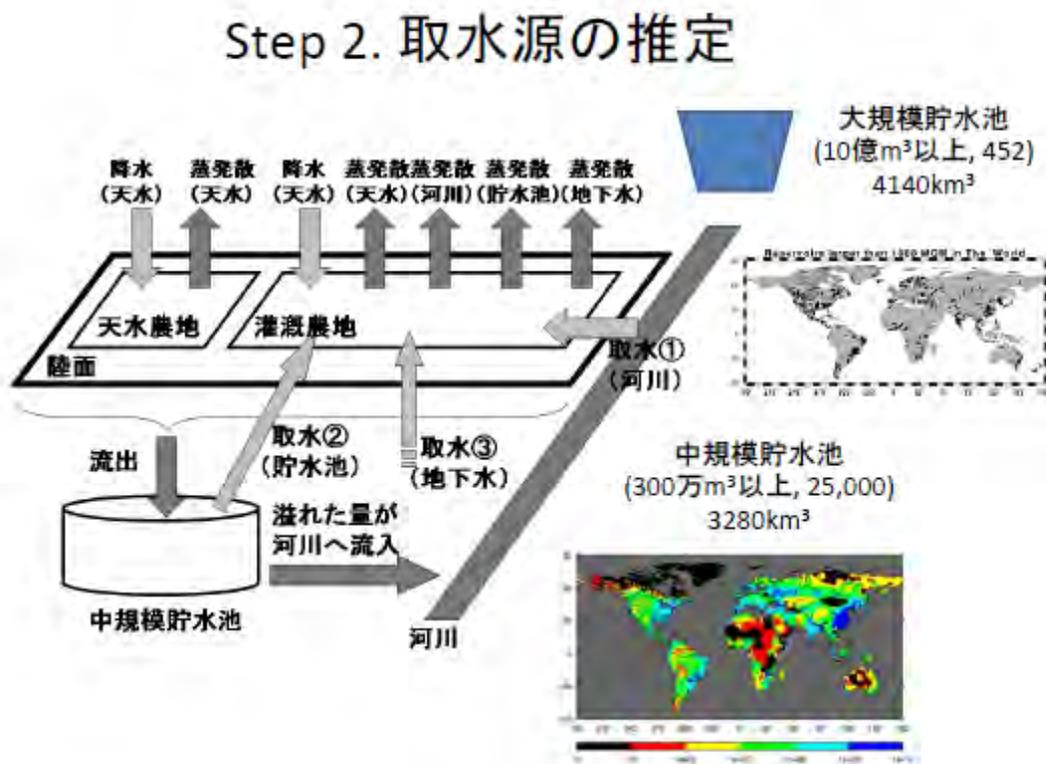


図 3.3-6 Water Footprint の算定式

Step 3. ウォーターフットプリントの推定

- 2000年の82品目の農畜産物の輸入量データを利用
- 農産物は5品種(大麦、トウモロコシ、米、大豆、小麦)
- 畜産物は3品種(牛肉、豚肉、鶏肉)

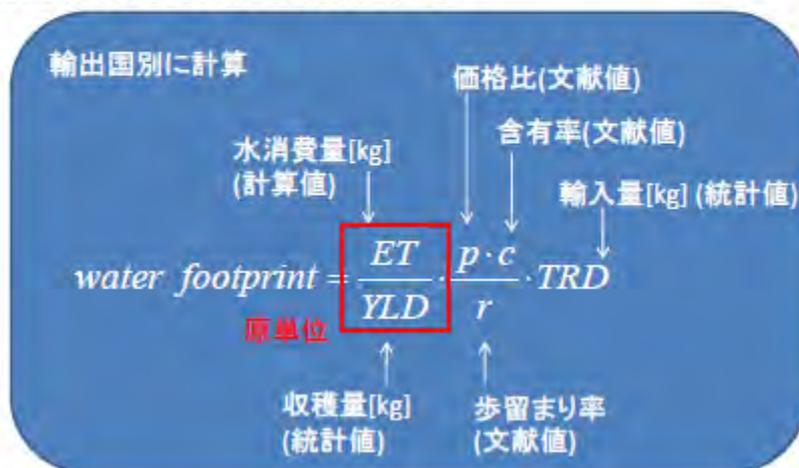


図 3.3-7 世界の農地の水消費量(検証 1)

検証1:世界の農地の水消費量

世界の農地の水消費量

単位: km ³ /yr	本研究	Molden (2007)	Falkenmark and Rockström (2004)
全農地からの蒸発量	7650	7130	6800
天水農地の天水起源の蒸発量	5080	4910	5000
灌漑農地の天水起源の蒸発量	1220	650	
灌漑農地の灌漑起源の蒸発量	1350	1570	1800

全球レベルで

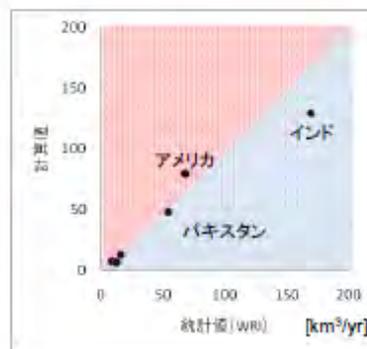
農地からの蒸発量(水消費量)が妥当
 ↓
 ウォーターフットプリントも妥当
 (他は統計値や文献値で信頼性が高いので)

図 3.3-8 地下水取水量(検証 2)

検証2:地下水取水量

主要国の地下水取水量

単位: km ³ /yr	本研究	WRI (2007)
インド	129.3	169.1
アメリカ	78.8	68.4
パキスタン	47.3	54.0
メキシコ	12.3	16.0
バングラデシュ	6.6	9.4
サウジアラビア	6.0	13.0



主要国レベルで

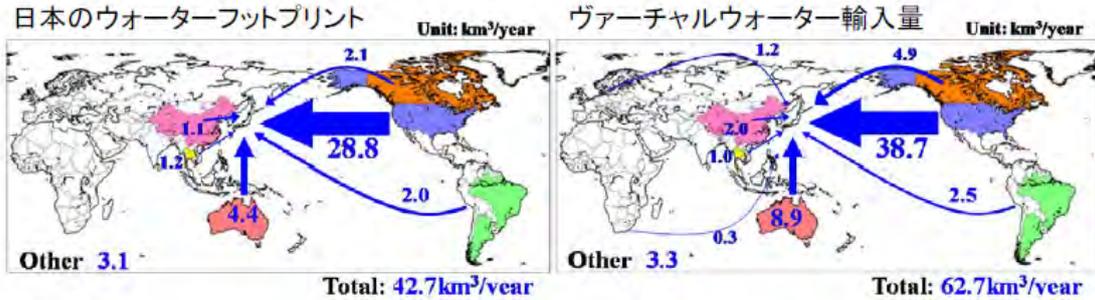
地下水取水量の推定値が妥当
 ↓
 取水源別のウォーターフットプリントもまずまず妥当

ただし、

本研究: 非循環地下水; 統計値: 全ての地下水

図 3.3-9 日本の Water Footprint の推定 (結果 1)

結果1 日本のウォーターフットプリントの推定



なぜWFはVWよりも小さいか？

- ・単位当たりのトウモロコシのWFがVWよりも小さいから(アメリカの場合、単位当たり収穫量が多いことが主因)。
- ・単位当たりの牛肉のWFがVWよりも小さいから(アメリカの場合、放牧率が高いことが主因)

VWとWF(アメリカ)の原単位

	Unit VW kg/kg	Unit WF kg/kg	VW/ km ³	WF/ km ³
Maize	900	660	14	10.3
Wheat	1600	1670	5.1	5.3
Beef	8800	5480	6.4	3.6

図 3.3-10 日本の Water Footprint の取水源 (結果 2)

結果2 ウォーターフットプリントの取水源

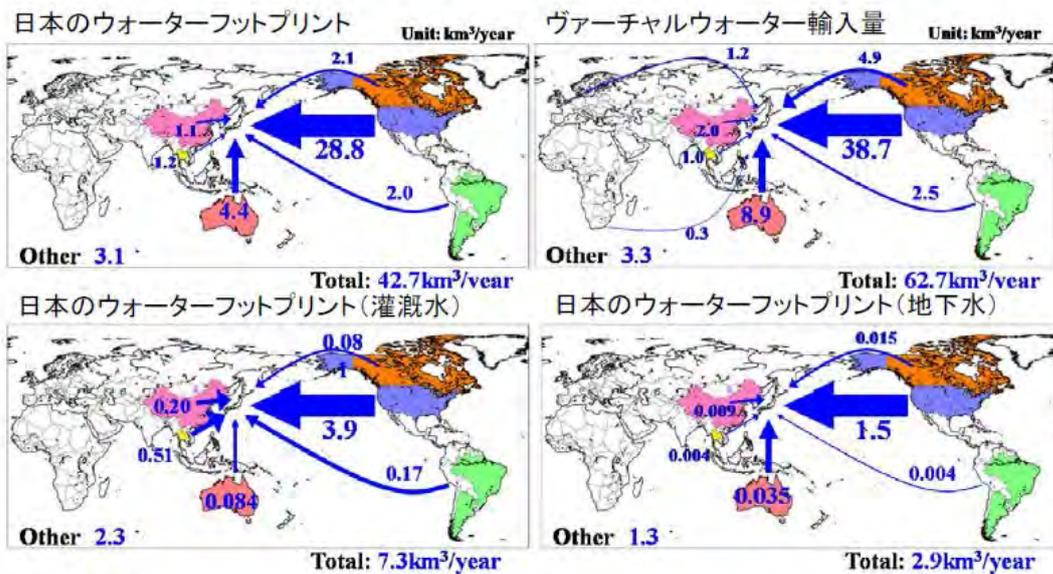
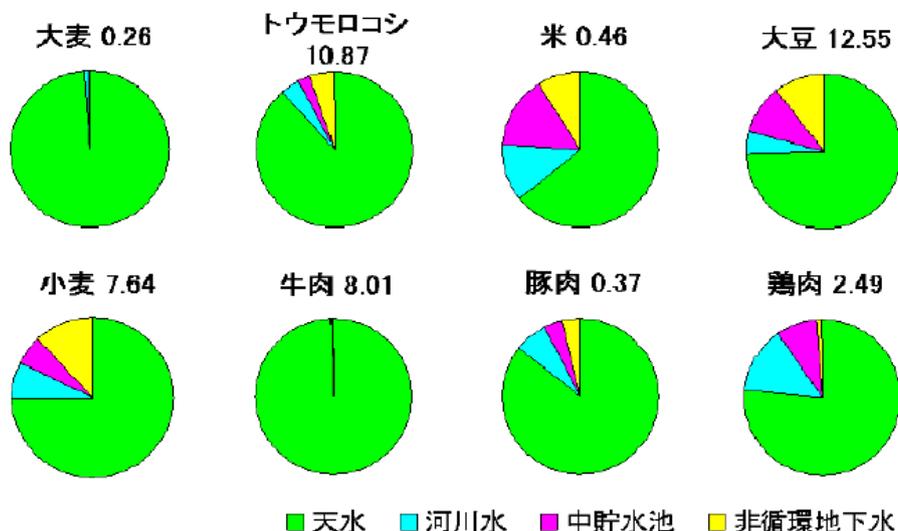


図 3.3-11 Water Footprint の品目別の水源割合 (結果 3)

結果3 品目別の水源割合



⑦ 精度について

細かく考えると、基準年の設定(何年における単位面積当たり収穫量を用いるか)、対象作物の設定(当該国での生産量が極めて少ない場合でもその国の収量を利用するのか、地域或は世界平均の値で代用するのか)、といった点の取り扱いにより、ここに示された数字は今後見直される可能性がある。

全世界平均の値としては、Falkenmark and Rockstrom (2004)によると、農地全体の水消費量 6,800km³/年、そのうち灌漑用水の割合が 1,100km³/年(Doell, P., and S. Siebert, 2002)~1,800km³/年(Shiklomanov, I. A., 1999)なので、灌漑用水の割合は 16~27%程度(今回推計された日本への water footprint では 17%)。農業用の地下水取水量に関しては、250km³/年(Shiklomanov, I. A., 1999)~ 420km³/年(WRI, 2007)なので、地下水依存の割合は 3.7~6.2%程度(日本への water footprint では 6.8%)。つまり、今回の推計値はこれまでに発表された世界の平均的な値とも整合的だと言える。ただし、Shiklomanov も WRI も地下水を循環型と非循環型に分けていないので、非循環地下水起源の割合はより小さく、ゆえに我々の値は大きめであると言える。

その他、図表で示した全世界の灌漑水量や蒸発散量の推計値による検証、各国の地下水汲上げ量の推計値による検証が良好なことから、今回の推計値はかなりの確度を持っているものと期待される。

⑧ 今後の展開について

今回の改良により、全球統合水循環水資源モデルによって貯留や取水といった人間活動を考慮しつつ、かつ農業生産量も同時に推計しながら自然の水循環と世界の水資源状況を推計する枠組みが完成した。

今後は、

- ・他の研究グループの各種推計値との詳細な比較検証
- ・全球統合水資源モデルにおける仮定の改良(中規模貯水池配置の吟味、より小さな貯水池分布の推計手法の検討など)
- ・入力データの改良(天水農地の収穫面積の推計など)
- ・全球統合水資源モデルの拡張(格子点内に複数種類の穀物栽培を考慮可能なモデルへの改良など)

など、より精密化すると共に、IPCCの次期アセスメントレポートには間に合うタイミングで、将来推計へと研究を進めることが目標である。

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究(S)(平成19-23年度)の成果である。すでに終了した科学技術振興事業団 戦略的創造研究推進事業(JST/CREST)平成13年度新規発足研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」『人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル』の成果を大いに利用している。

⑨ 主な参考文献

- 1)Doell, P., and S. Siebert, 2002: Global modeling of irrigation water requirements, *Water Resour. Res.*, 38, 1037, doi:10.1029/2001WR000355.
- 2)Falkenmark, M. and Rockstrom, J., 2004: *Balancing water for humans and nature*, Earthscan, London.
- 3)Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K. and Tanaka, K.: An integrated model for assessment of global water resources. Part 1: Input meteorological forcing and natural hydrological cycle modules, *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, under revision.
- 4)Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T. and Shirakawa, N.: An integrated model for assessment of global water resources. Part 2: Anthropogenic activities modules and assessments, *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, under revision.
- 5)Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. 2007: Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern, *Water Resour. Manage.*, 21, 35-48.
- 6)Molden, D., 2007: *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*, Earthscan, London.
- 7)Oki, T., and Kanae, S., 2004: Virtual water trade and world water resources, *Water Science and Tech.*, 49, No. 7, 203-209.
- 8)Oki, T. and Kanae, S., 2006: Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, Vol.313, pp.1068-1072.
- 9)Shiklomanov, I. A., 1999: *World water resources and their use*, a joint SHI/UNESCO product, Available at <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/>.
- 10)World Resources Institute, 2007: *EarthTrends: Environmental Information*. Available at <http://earthtrends.wri.org>. Washington DC.