

世界の水問題と日本への バーチャルウォーター貿易

沖 大幹 *Written by Taikan Oki*

はじめに

2002年に南アフリカ共和国のヨハネスブルグで開催された持続可能な開発に関する世界首脳会議、いわゆるヨハネスブルグサミットでは、取り組むべき課題がアナン前国連事務総長らによってWEHAB、すなわち、water（水）、energy（エネルギー）、health（健康）、agriculture（農業）、biodiversity（生物多様性）の5つに整理された。このヨハネスブルグサミットでは、安全な水へのアクセスがない人口割合を2015年までに（1990年に比べて）半減するというのが国連ミレニアム開発目標に、改良された衛生施設（トイレ）へのアクセスがない人口割合も半減することが付け加えられている。さらに、2003年にフランスのエビアンで開催されたG8、主要国首脳会議では、水行動計画が採択され、2008年夏の「G8北海道洞爺湖サミット首脳宣言」には、そのフォロ

ーアップの必要性が盛り込まれている。

このように、国際政治レベルでは、水問題は従来から大きな課題であり、その解決へ向けた取り組みがさまざまに検討されてきている。これは、やはり水問題が、保健衛生・健康や食料生産、エネルギー生産や生態系保全、貧困と経済発展、さらには水汲み労働に費やされる機会費用を通じて教育やジェンダー問題にまでつながっているからであろう。

日本でも、つい数十年前、高度成長期には、産業の発展が水資源の不足によって阻害されるのではないかと懸念されていたし、下水道普及率も1970年時点では20%にも満たなかった。しかし、その後、増加する人口と経済発展に伴う需要の増加、なかでも都市へ集中する需要の増大を支えるべく水資源開発が行われたため、現在の日本では水問題を意識する機会は少なくなり、社会の関心も低くなっている。那覇や福岡など、20世紀の終わりになっても慢性的な水不足で苦しんでいた都市にも大規模な海水淡水化施設が導入され、他の日本の多くの都市のように、水に関して悩まずにす

むようになっていく。では、日本は他国の水問題に無関心でも構わないのだろうか。

暮らしで利用している水

まず、我々が毎日どれくらいの水を使って生活しているのかを考えてみよう。世界平均の1人1日あたりの生活用水使用量は約170リットルである。米国では約500リットル、日本は300リットル余り、中国やタイ、ボツワナなどでは約50リットルと国によっても大きく異なる。基本的には経済発展にしたがって水もたくさん使う傾向にあり、日本も1965年頃には現在の半分程度であった。

これに対し、人が飲む水の量というのは、せいぜい1日2〜3リットルである。水問題というと飲み水がつい注目されてしまいがちだが、実は風呂に入ったリ、洗濯をしたり、トイレや炊事に使ったりする生活用水に飲料用の数十〜百倍も多く水を使っているのである。

その他、国民1人あたりに換算すると工業用水は1日約250リットル、農業用水は約1300リットル使っている計算になる。果たして我々の暮らしを支えているのは、これらの合計1日1人あたり約2000リットルの水だけなのだろうか。

バーチャルウォーター

世界の水資源取水量の7割、水循環に戻る分を差し引いた正味の水資源消費量では、9割が農業灌漑用であると推計されている

ように、我々人類が使用している水の大半は農業生産用である。そこで、人口に比べて水資源賦存量が少なく、自然状態で水が不足している国や地域では、他の国や地域で生産された食料を輸入することにより、本来生産に必要であった水資源を、飲み水や工業用水など他の用途にまわすことができる。そういう観点から、食料の輸入は実質的に水の輸入と同じである、あるいは、仮想的な水の輸入とみなすことができる、という意味で、1990年代にロンドン大学のトニー（アンソニー）・アラン教授が「virtual water trade（仮想水貿易、以下VWTと略す）」という言葉を用いたのが「バーチャルウォーター（VW）」という言葉の由来である（Allan, 1998）。彼は、中東の地政研究者のだが、自然条件から推定されるほどの地域で水が不足しておらず、紛争や戦争の理由になっていない理由を、このVWTの概念で説明した。つまり、中東の豊かな国は一見水不足のように見えるけれども、他国で大量の水を使って生産したものを輸入しているため、自国内の水資源が乏しくとも水では困っていないのである。

どれくらいの水が 穀物を作るのに必要か？

実際にバーチャルウォーターを推計しているオランダのUNESCO-IHEのグループと筆者らのグループでは、推計手法や考え方が若干異なるものの、両者の推計値には大きな違いはない（Hoekstra, 2003の表4-1を翻訳し項目を追加したものを表1に示す）。穀物についてオランダグループの値が小さいのは、可食部についてのみ考えているわけではなく、貿易統計に掛け合わせて用いることができるように、精米前の玄米ベースで考えているからではないかと推定される。あるいは、栽培作物からの蒸散量だけを考えていて、

表1 パーチャルウォーター/ウォーターフットプリントに関連するいくつかの研究グループによる水消費原単位の推計結果
食品の可食部重さあたり生産に必要な水の量で、単位はm³/tあるいはl/kg

	Hoekstra & Hung (2003)*	Chapagain & Hoekstra (2003)*	Zimmer and Renault (2003)**	Oki et al. (2003)***
小麦	1150		1160	2000
米	2656		1400	3600
とうもろこし	450		710	1900
じゃがいも	160		105	193
大豆	2300		2750	2500
牛肉		15977	13500	20700
豚肉		5906	4600	5900
鶏肉		2828	4100	4500
卵		4657	2700	3200
牛乳		865	790	560
チーズ		5288		4428

* 世界平均 ** 大豆はエジプトの値、それ以外はカリフォルニアに対する推計値
*** 日本に対する推計値。じゃがいもとチーズ(バルメザンチーズ)は佐藤(2003)の推計値

おける年間570億立方メートルの農業用水の9割が水田に利用されていて、それによって900万トンの玄米が得られているとすると、1キログラムあたり5700リットルの水が玄米の生産には必要であり、白米1キログラムあたりに換算すると約6300リットルの水が使われている計算になり、表1の値よりも遥かに大きな値となる。これは、よく言われるように、日本の水田灌漑

漫透したり流出したり蒸発したりするよ
うな、実際には圃場
での栽培にとって必
要な水の量を考慮し
ていないからとも考
えられる。また、日
本における小麦の生
産性が、世界市場に
輸出しているような
国々に比べると半分
程度であることも、
この値の差の理由で
ある。また、コメに
ついては、蒸発で失
われる分だけではな
く、湛水させて雑草
の生育を抑えたり、
温度を一定に保つた
りという分の水を利
用していると考えら
るか否か、という違い
にも起因しているも
のと考えられる。

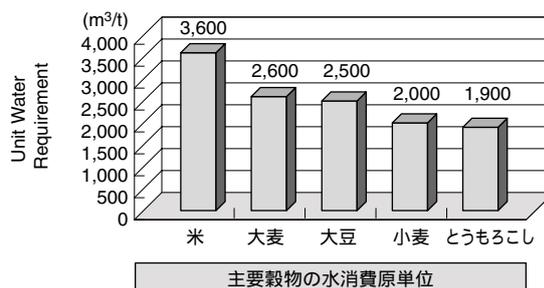
ちなみに、日本に

はイネの育成のためだけではなく、水環境の保全や「水を運ぶため」に水が使われているため、見かけ上大きな値となってしまうからだ、とも言える。一方で、オランダグループのように必要最小限の水のみをVWの算定に利用しているグループの推計値では、日本国内で利用されている水資源量は約300億立方メートルとなつてしま
まい、必ずしも実態とはそぐわない結果となつてしまつている。オランダグループの推計値は、第2次の世界水開発レポート(WWDE2)に引用されたため、「国連の推計値」として日本国内で紹介されることもあるが、こうした問題があることに注意が必要である。

どれくらいの水が 畜産物を作るのに必要か？

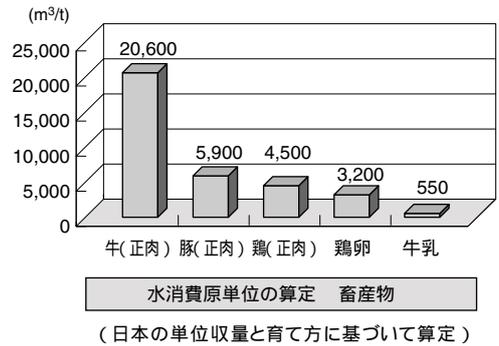
畜産物については、飼料の生産に必要な水、家畜が飲む水、そしてその他の畜産に必要な水の3種類を考え、皮革やミルクなど複数の産品が得られる場合には価格に応じて投入水量を分配する、という風にして算定されている。チーズについてはバルメザンチーズに関する推計値(佐藤、2003)を参考に表1に示したが、チーズの種類によって大きく異なる含水率によってこの値は大きく変わり、カマンベールだと2900リットル/キログラム程度

図1 日本において穀物の生産に必要な水の量
穀物1kg(あるいはt)あたりのl(あるいはm³)数
(佐藤、2003)



(日本の単位収量、世界食料機構統計より1996-2000年の平均値)

図2 日本において畜産製品の生産に必要な水の量
畜産製品可食部1kg(あるいはt)あたりのℓ
(あるいはm³)数(佐藤、2003)



する手法を組み合わせるライフサイクルアセスメントの手法が現在日本において開発途上である。

であるので、チーズとひとくくりには扱つようであれば、有効数字は1桁もない点に留意されたい。

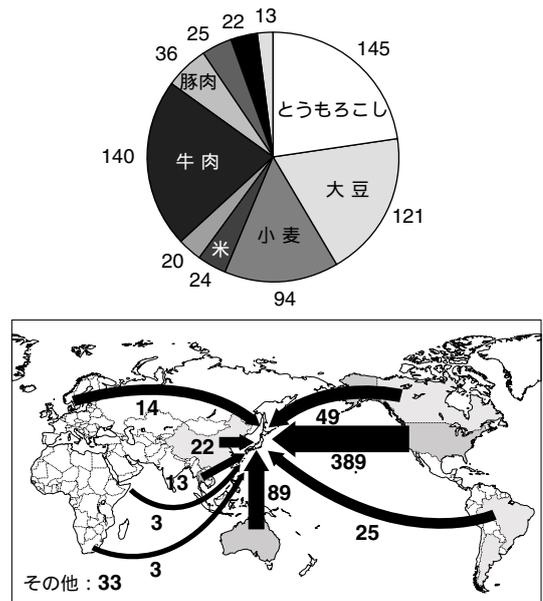
工業用水に関しては、業種別などの工業用水使用量と工場出荷額に基づいてVWTの輸出入が算定されているのが現状である。これについては、工場で行われている水量を積み上げる手法に、産業連関表を用いて原材料や設備機器製造などに利用された水量を算出

バーチャルウォーター貿易の推計結果

図3は、表1の水消費原単位を用いて、主要穀物と大豆、肉類について2000年度に関して推計した日本のVW輸入量である。VWの本来の概念に即して、輸入している主要な穀物と肉類を日本で生産したほどの程度の水が必要であったか、を示している。日本は、アメリカ、オーストラリア、カナダなどから大量のVWを輸入して、総量は日本国内の農業用水使用量を上回る640億立方メートルにも上ることがわかる。その内訳は、大半が飼料用として消費されるところもこしなどの穀物や肉類そのものであり、日本のVW輸入は主に肉食のためである、とみなせる。すなわち、

図3 日本が輸入している主要産品を日本で生産するとしたらどのくらいの水資源量が必要であったか、といういわゆるバーチャルウォーター貿易量の推定値
2000年度に対する食糧需給表の統計値に基づいて算定(佐藤、2003)

日本への品目別バーチャルウォーター輸入量(億m³/年)



総輸入量：640億m³/年 日本国内の年間灌漑用水使用量：570億m³/年
(日本の単位収量、2000年度に対する食糧需給表の統計値より)

VWという概念が提唱された中近東の状況とは異なり、日本の場合には水が不足しているから、それを補うべくVWを輸入しているというよりは、平地が不足しており、飼料用穀物や牧草を生産する農地・牧草地が十分確保できないので、いわばvirtual landとしての飼料用穀物や肉類を輸入して、そのついでに一緒にVWがついてきている、とみなす方が適切である。

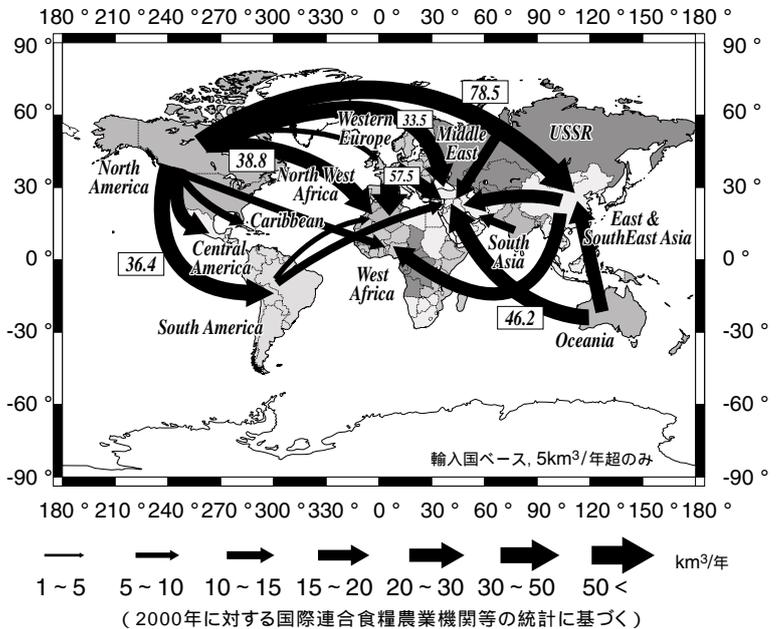
世界各国間のバーチャルウォーター貿易

各国の単位面積あたりの収穫量の違いや、各国でどのくらいの割合の牛が放牧で育てられているかなどまで考慮しつつ、国と国の間のVWのやりとりを算定し、地域ごとに集計した結果が図4であ

る。世界のVWTの主な輸元は、米国やカナダ、そしてフランスを中心とする欧州である。日本は戦後、なんとか先進国の仲間入りを果たそうと工業化を進めたが、現在世界を主導している国々の多くがVWの輸出国である、という事実は真剣に受け止めねばならないだろう。日本以外で大量に輸入しているのは中近東や地中海沿岸の産油国である。これらの国々では、食料の輸入は、いわば石油を売って水を輸入しているようなものだ、ということから元来のバーチャルウォーター貿易という名前がついているのである。つまり、物理的に水資源が不足していても、豊かな国はVWの交易のおかげで実質的には水ストレスで困ってはいない。

逆に問題は、経済的にも豊かでなく、水資源も乏しい国である。

図4 世界各国が輸入している主要穀物を各国で生産するとしたらどのくらいの水資源量が必要であったか、といういわゆるバーチャルウォーター貿易量を推定し、世界16地域に集約した結果(Oki and Kanae, 2004)



それらの国々は水もなく、食料も買えない状態にある。水問題は貧困や飢餓、食料問題と一体なのである。

一方で、単位水使用量あたりの生産高が高く、単位重さあたりのVW量の少ない(農業)先進国から輸出されて、逆に単位重さあたりのVW量が多い発展途上国へと輸入されることが多いので、結果として、VWの交易によって世界合計の水資源使用量は削減されたと見ることもできることが筆者などの研究でわかっている(Oki and Kanae, 2004)。その推計値は、全世界で年間4550億立方メートルであるが、オランダ方式でVWを算定した結果(Chapagain et al., 2006)でも3520億立方メートル/年と大きくは変わらない。

ブルーウォーターとグリーンウォーター

注意を要するのはここで示している「食料生産に必要な水の量」には、農耕地への雨水(天水)も含まれている点であろう。従来の水資源工学では、川や地下水からくみ上げる「取水量」(用水量)、あるいはその水が田畑に引かれた後、排水を通じて河川へ戻ったり、地下水へ浸透したりする分を差し引いた「消費量」(要水量)が使われる水の量だ、とされてきた。しかし、全世界の農耕地からの年間の蒸発散量約7兆立方メートルのうち、5兆立方メートル程度は降った雨によるものであり、河川や地下水からの灌漑によって消費される水は穀物の生育に必要な水の3割程度であることも明らかにしたので、近年では、天水として農耕地に供給される雨水起源の水も穀物の生育にとって欠かせない水資源として強く認識されるようになってきた。そのため、最近では河川や地下水からの従来の水資源を「ブルーウォーター」、雨水起源の水資源を「グリーンウォーター」と呼び、どちらも食料生産にとって重要な水資源である、とみなされるようになってきている(Falkenmark and

Rockstrom, 2004)。

グリーンウォーターは、そこが農耕地でなく草地や森林であったとしても、結局、蒸発散してしまう分の水なので、水資源には影響がないと考えるべきだ、という意見も国内外で根強い。しかし、それはブルーウォーターとしての下流の水資源には影響がない、ということであって、食料生産にどのくらいの水が必要か、という観点からは、グリーンウォーターも合わせて考える方が実は合理的なのではないだろうか。その方が、早魃年^{かんばつ}でグリーンウォーターが足りない際に、どれだけブルーウォーターを確保しなければならぬか、といった見積もりをするのに役立つし、地球温暖化に伴う気候変動で安定して利用可能なグリーンウォーターとブルーウォーターが今後変化していく場合に、結局、現在の食料生産に必要な水の量を確保できるのかどうか、どちらか片方の変化だけを考えていては、きちんとした将来推計はできないからである。



ウォーターフットプリント

最近では、食料生産に使われている水がグリーンウォーターがブルーウォーターかまで判別しつつ推計するような研究も行われている。

ここでは、河川流出下モデルだけではなく、穀物成育モデルやダム貯水池操作モデルなども組み込んだ全球統合水資源モデルを用い、世界の各地域で、雨水、河川水からの灌漑水、非循環型の地下水からの灌漑水をどれだけ使って主要穀物が生産されているかを推計し、ウォーターフットプリント(以下WFと略する)の内訳をも明らかにした結果を紹介する(犬塚ら, 2008)。

この研究成果によれば、2000年度に日本が輸入した主な食料の生産に、海外の産地では総計約427億立方メートル/年と、

同じ品目のVW輸入量627億立方メートル/年の約3分の2程度の水が使われているという。なぜ値が異なるかと言えば、とうもろこしや小麦など大量に輸入している穀物などに関しては、海外産地の方が単収の高い場合が多く、より狭い土地で、少ない水で同じ量の穀物が得られると算定されるからである。

さらに、年間約427億立方メートルのWFのうち、全体の2割弱に相当する約73億立方メートル/年が灌漑によって耕地にもたらされた分であり、そのうち約29億立方メートル/年、全体の7%程度は、非循環型の地下水に依存している、と推計されている。逆に日本が輸入している食料を生産するのに必要な水全体の約8割は天水(雨水)起源の水であるということなので、海外のいわゆる従来型の水資源にはあまり負担をかけていない、ということになるかもしれない。しかし、天水は気候変動の影響を受けやすく、地球温暖化の顕在化を待たずとも、早魃などによって収穫減となるリスクをはらんでいるわけである。しかも、日本へ食料を供給してくれている国や地域の食料生産だけではなく、現在は地域の需要を満たしている国でも、気候変動などによって食料生産が減ると、結果として、市場を通じて日本が海外から購入する食料の価格を引き上げることにつながるかねない。海外の食料生産に関わる水資源状況が、日本の食卓にまさに直結していると考えられ、国内の水資源に困っていないなくとも、やはり日本で暮らす限りは世界の水と食料問題に注意を払う必要があると考えられる。



おわりに

日本におけるVWTの話は、しばしば食料自給率の低さと関連して取り上げられ、「世界の水にはかり頼ってはられないから、食料自給率をあげなくてはならない」という結論を導く傍証とし

て紹介されることが多い。しかし、日本をめぐるVWTからも明らかにするのは、100%自給は難しいにせよ、肉食を減らせば食料自給率は上がる、という点である。逆に言う、世界の食料需給が逼迫してくると、肉類の価格が上がって消費を減らさざるを得なくなるだろう、という点である。

また、牛肉のように水消費原単位が大きい食べ物は食べてはいいのではないかと、という風に結果を解釈する人も多い。確かに、非循環型の地下水は適切に管理しつつ大事に使う必要があると思われるが、循環している水資源が豊富な地域では、人間が使わなければならない限り、使える時には水は多少せいたくに使っても構わないのではないだろうか。

たとえば、節約した分だけ大気中への二酸化炭素の排出量が減少する温暖化対策としての省エネなどの緩和策とは違い、日本のように水が比較的ふんだんにある地域で節水しても、水が足りずに困っている乾燥地域や途上国で使える水がその分増えるわけではない。

VWという概念は、自然的条件だけではなく、食料などの交易という社会的要因を加えてより現実的な世界規模の水資源アクセスメントをするため、あるいは将来の人口増大に対し、どの程度の水資源が必要になるかを推定するのに元々は必要な技術的な概念であった(Oki and Kanae, 2006)。しかし現在では、水問題と聞いて、つい飲み水の問題ばかりに興味が集中してしまいがちな世間に対して、水不足、旱魃が食料生産への悪影響、食料不足につながる問題であること、世界の水問題が日本と密接に関連していることを意識させる環境分野のキーワードになってしまっている。やや違和感もあるが、環境問題は人々に関心を抱いてもらうことが解決への第一歩でもあり、言葉の独り歩きも悪いことではないのであろう。

CEL

参考文献

大塚俊之、新田友子、花崎直太、鼎信次郎、沖大幹、2008 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』52、367-372。
 佐藤未希、2003 食料生産に必要な水資源の推定、東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻修士論文
 Allen, J.A., 1998: Virtual Water: A strategic resource. Global Solution to Regional Deficits, Groundwater, 36(4), 545-546.
 Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., and Savenije, H.H.G., 2006: Water saving through international trade of agricultural products. Hydrology and Earth System Sciences, 10(3), 455-468.
 Falkenmark, M. and Rockstrom, J., 2004: Balancing water for humans and nature, Earthscan, London.
 Hoekstra, A.Y., 2003: Virtual water: An introduction, Value of Water Research Report Series, No.12, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands, 13-23.
 Oki, T. and Kanae, S., 2004: Virtual water trade and world water resources. Water Science & Technology, 49(7), 203-209.
 Oki, T. and Kanae, S., 2006: Global Hydrological Cycles and World Water Resources, Science, Vol.313, no.5790, pp.1068-1072.
 参考文献
<http://hydro.its.u-tokyo.ac.jp/info/Press200207/>
<http://hydro.its.u-tokyo.ac.jp/info/Press200802/>
<http://www.waterfootprint.org/>

沖大幹(おき・たいかん)

東京大学生産技術研究所人間・社会系部門教授、気象予報士。1987年東京大学工学部土木工学科卒業、89年同大学生産技術研究所助手、93年同大学博士(工学)、2006年より現職。アメリカ航空宇宙局NASAゴダード研究所、大学共同利用機関総合地球環境学研究所、内閣府総合科学技術会議事務局にも勤務。専門分野は、地球水循環システムで、気候変動がグローバルな水循環に及ぼす影響やバーチャルウォーターを考慮した世界の水資源アクセスメントなどを研究対象としている。主な著作は、『新しい水再生・利用技術 環境保全と資源確保のために』(共著、産業技術総合研究所)、『国土の未来 アジアの時代における国土整備プラン』(共著、日本経済新聞社)、『食べ方で地球が変わる フードマイレージと食・農・環境』(共著、創森社)など。