

2.3.3 問題の理解から解決を目指しての取り組み

(1) 水問題・水管理の課題への取り組み

a. 地球規模水循環変動と世界の水問題の実態

1) 地球環境問題と地球規模の水循環変動の研究

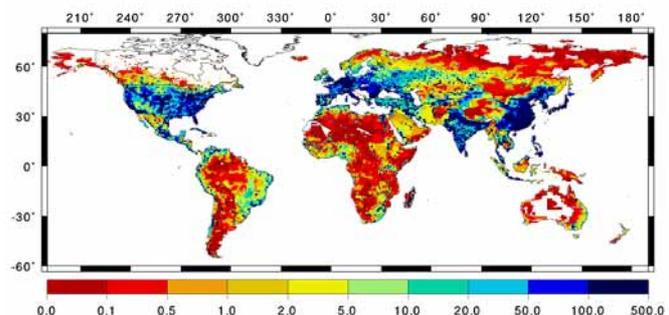
多くの地球環境問題に共通する様に、しばらくは加速すると考えられている世界的な人口増加が地球規模の水問題の根元には横たわっている。人口の増加は食料となる穀物の需要を増大させ、生活レベルの向上に伴う飼料用穀物等の間接消費の増加がさらに穀物需要の増加をもたらす。従って、世界の水問題に関して考える場合には、自然の水循環変動に加えて、社会の需要の時間的空間的分布を考慮する必要がある。

また、人口増加や経済成長に伴う将来の水需給の逼迫は現在すでに水ストレスが生じている主に発展途上国で深刻であるのに対し、地球温暖化等の気候変動は先進国・途上国を問わず水資源需給に影響を及ぼす可能性があり、世界平均で考えて気候変動による水需給変動が相対的に小さいからといって看過することはできない。また、気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）による将来予測が複数の気候モデルの結果に基づいて議論された様に、グローバルな水資源需給の将来予測には、複数の研究グループが推定値を提出し、それらの結果の吟味を行うことが不確実性の見積もりや、信頼性の担保のためには不可欠である。

以下では、最新の地球規模水循環変動モデリングやグローバルな地理情報システムを用いて緯度経度 0.5 度（約東西南北 50km 四方）の格子ごとに世界中の国々に関して水資源需給の現状を推定した結果、さらに、各国・各地域における水資源の配分を大きく変更することができる食料の交易、ヴァーチャルウォーター（virtual water）の流れをも加味したグローバルな水需給の分析結果を示して、世界の水問題の実態を明らかにする。

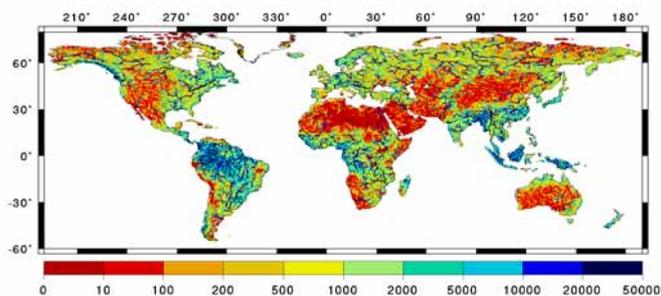
2) 世界の水利用量、利用可能な水資源量の分布

各国の水資源統計に基づき、グローバルな地理情報システムを用いて現在の水資源取水量のグローバルな分布を推定した結果が【図 1】である（Oki et al., 2001）。推定にあたっては、生活用水、工業用水に関しては国ごとに人口当たりの原単位を求め、人口分布に従って国別総取水量を各国内に分布させ、農業用水についても同様に、灌漑農地面積あたりの原単位を国ごとに求め、灌漑農地面積分布に従って国別総取水量を分布させた。アメリカ西海岸、東欧を含むヨーロッパ全域から西アジア、インド北部、中国、日本等で大量に取水されていることがわかる。



【図 1】各国統計とグローバルな地理情報システムに基づいて推定された 0.5 度格子ごとの年間水資源取水量（百万 m^3 /年/0.5 度格子）

一方、観測された値で校正された最も精度が高いと考えられる降水量や下向き放射量、あるいはデータ同化によって求められた最適推定値を陸面モデルの外力とすることによって求められた年流量（Oki et al., 1999）を、グローバルな河道網（Oki and Sud, 1998）によって年流量に変換した結果が【図2】であり、これを自然状態で最大限利用可能な水資源量（水資源賦在量）であるとした。



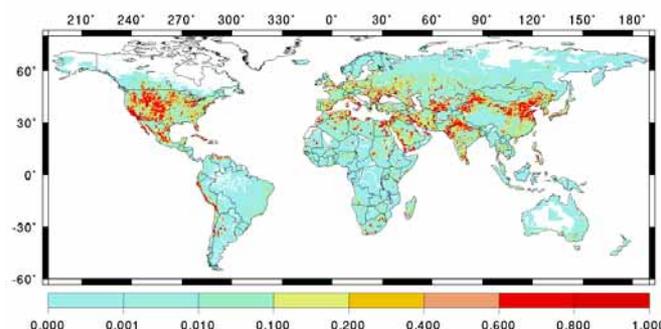
【図2】観測等に基づく降水量、下向き放射量などに基づいて陸面モデルで算定された流出量から求めた平均的な年河川流出量（百万 m^3 /年/0.5度格子）

3) 水需給（水ストレス）指標の世界的な分布

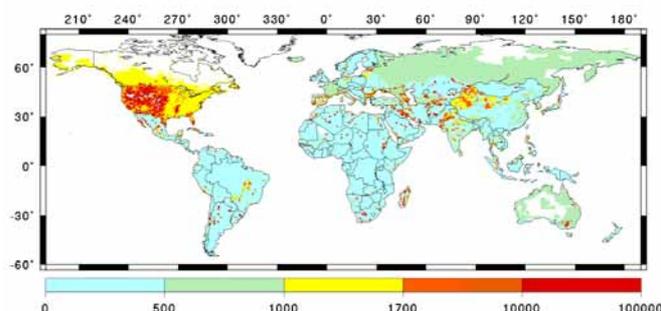
水需給が逼迫しているかどうかのひとつの指標は、Falkenmark (1989) が提案した渇水指標 R_{ws} (water scarcity index) で、水資源賦在量に対する取水量の比で求められる。 R_{ws} が 0.1 より小さいと no stress、0.1 ~ 0.2 が low stress、0.2 ~ 0.4 が moderate stress、0.4 以上が high stress と分類される（【図3】）。アメリカ西部、中近東、インド-パキスタン国境付近、インド北部チベット南縁、中国北部黄河流域～華北平原付近が 0.4 以上となっていて、利用可能な水資源量に対して実際に利用している水量が多く、水循環変動に対して持続的な水利用が脆弱であると言え、いわば水ストレスがかかっている（水需給が逼迫している）状態である。ここでは従来の研究と同様、上流からの河川水はすべて下流で利用可能であると見做しているが、上流での取水、

上流での水質劣化、その地点での取水施設の未整備等の要因により、自然流量としては利用可能であると算定されても、実際には上流からの流下河川水は利用できない状況も考えられる。したがって将来的には、自然系の水循環予測のみならず、人間社会系の条件等も加味して考慮することが必須である。

もうひとつの水資源需給指標として、一人当たり年利用可能水資源量を算出してみ



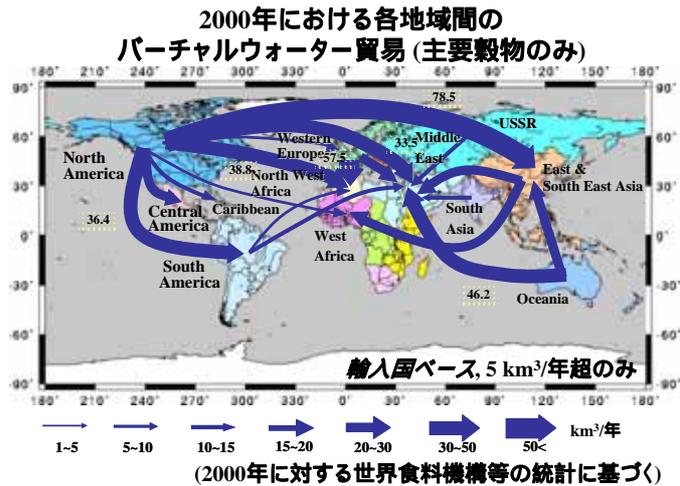
【図3】年河川流量（水資源賦在量）に対する年水資源使用量の比で求められた水逼迫度指標。大きい地域（暖色系）ほど水循環変動に対して持続的な水利用が脆弱であることを示す



【図4】1人当たりの年間水資源使用量
(m^3 /年/人)

ると、【図3】と概ね同様のグローバル分布となっており、一人当たりの取水量（【図4】）がほぼグローバルに一樣であるという事を示唆している。ただし、【図4】で北アメリカ、特にアメリカ合衆国西部においてこの一人当たり取水量が特に突出して多く、場所によっては年間 2,000m³ 以上の取水量となっている。これは、この地域に住む人々の飲料水、生活用水、工業用水、農業用水に使われるばかりではなく、他の地域に住む人々の食料生産のために水が利用されているからに他ならない。

各国間の穀物の輸出入統計に対して、輸入国でその食料を生産していたとしたらどの程度の水資源が必要であったか、を推定し、地域ごとにまとめたのが【図5】である（Oki et al., 2003b）。実際、大量の食料が北米で生産され、日本を含む東・東南アジアを始めとして世界中に輸出されていることがわかる。食料を輸入している地域では、その分の食料生産に必要な水資源量を他の水利用に振り替えて利用することが可能である。実際、中近東や北アフリカの国々では、自然状態としては利用可能な 1 人当たりの水資源量が少ないものの、世界平均で水資源取水量の 7 割、水資源消費量の 9 割を占めると推定されている食料生産に費やされる水資源利用を他国に委ねることによって、見かけ上ほどには水資源需給は逼迫していない。その様な意味で、食料の貿易はあたかも水資源の貿易である、ということから、ロンドン大学のトニー・アラン教授はこうした食料の取引をヴァーチャルウォーター貿易と名づけた（Allan, 1997）。中近東や北アフリカのそうした国々が主に産油国であることから、食料の輸入は石油を売って水を買っている様なものだ、という見方もされる。



【図5】主要穀物の取引に伴うヴァーチャルウォーターの地域間の流れ (km³/年)

4) 水の逼迫と貧困とヴァーチャルウォーター

自然状態で年間 1 人あたり利用可能な水資源量が 1,000m³ 以下であると、深刻な水不足、あるいは「深刻な水逼迫」状態にあるとされ、2000 年に対する推計で、23 カ国がその様に分類される。しかし、主要穀物ならびに肉類の輸入によるヴァーチャルウォーターの輸入分を加味すると、1 人当たりの水資源賦存量 1,000 ~ 2,000m³/年の「水逼迫」状態、あるいは 2,000 ~ 5,000m³/年の「やや水逼迫」状態に分類される国もある。その様子を各国の年間 1 人あたり GDP ごとに分類して示したのが【図6】である（Oki and Kanae, 2004）。豊かな国ほどヴァーチャルウォーターの輸入によって現実には水逼迫度は緩和されているが、貧しく水も乏しい国ではヴァーチャルウォーターも輸入できず、実際に水不足で困っているであろうことがわかる。

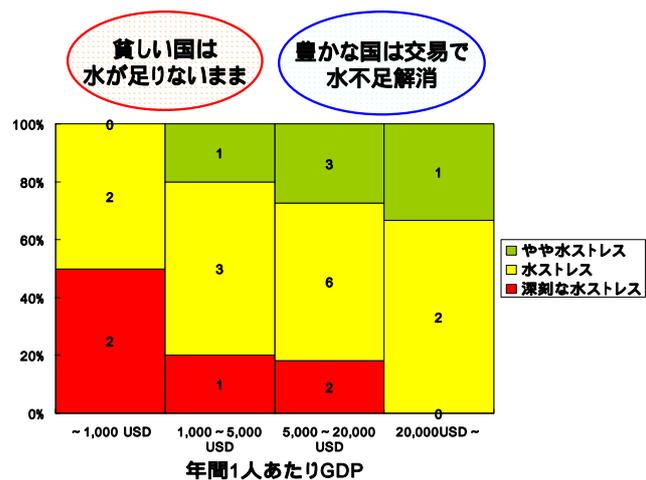
この様に、自然科学的な知見に基づいた地球規模の水循環推定と、社会経済的な洞察を組み合わせることによって、世界の水資源問題の様相と、その実態とが明らかになりつつある。従来、国ごと、あるいはもっと大きく地域ごとでしか世界規模の水資源アセスメントはできなかったが、21世紀に入り、ここに示した様に国よりも細かい単位での推計が可能となり、中国やインド、ブラジルやロシア、あるいはアメリカといった大国の中でも特に水需給が逼迫している地域が特定できる様になりつつある。

また、食料取引に伴うヴァーチャルウォーターの輸出入を考慮した分析からは、水問題が貧困問題と密着していることが浮き彫りになり、国連ミレニアム開発目標において、安全な飲み水への確保という目標が貧困と飢餓の軽減に付随している理由がよくわかる。

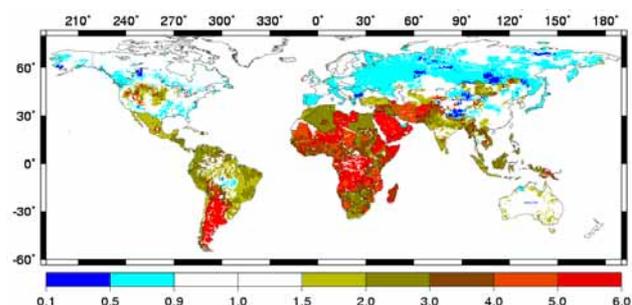
また、世界の水危機と聞いて、水道の水、あるいは自分が飲む水のことしか普通は思い浮かべない人々に対し、食料生産のための水が量的には非常に深刻な問題であること、いわば、水危機が生じたら喉が渇くのではなく、お腹が減るのだ、という実態を伝えるのに、これらの研究は大いに寄与している。

5) 世界の水需給の今後の展望

現在の水問題はある意味では既知であり、むしろ、今後数十年といった時間スケールで世界の水需給がどうなるか、ということに関する展望が求められている。【図7】は、人口増加や経済発展に伴う水需要の増減、地球温暖化等の気候変動に伴う水資源賦在量の変化などの変動要因を考慮して推定した2050年における水ストレス指標の、1995年の値(【図3】)に対する比を示したものである。鬼頭等(気象庁気象研究所)による最新の温暖化予測結果に基づき、Oki et al. (2003a)の結果を再計算しなおした結果が示されている。



【図6】自然状態では年間1000m³/人の水資源しか使えない国に対し、ヴァーチャルウォーターの輸入を考慮した場合の水逼迫度



【図7】地球温暖化の影響と人口増加、経済発展に伴う水使用量の変化を考慮した水資源賦在量に対する年間取水量の比(【図3】)が将来にかけてどの程度変化するかについて推定した結果。1995年の水逼迫度指標に対する2050年の値の比で示している

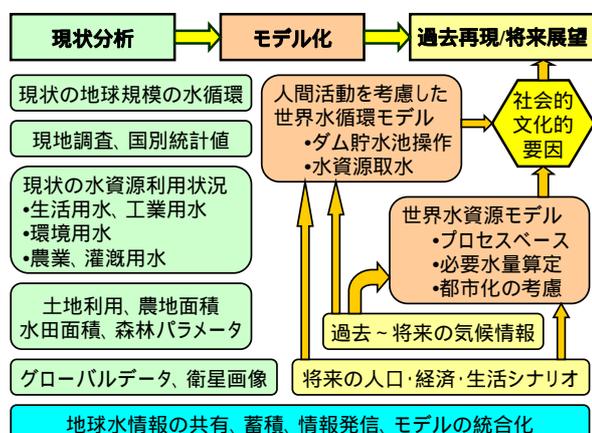
人口がほぼ横ばいか長期的には減少傾向にある先進国を中心とした地域では水逼迫度は減少かほとんど変化がないものの、南米、アフリカ、中近東から南～東南アジア、太平洋諸国に至る途上国で水逼迫指標の深刻化が懸念されることがわかる。インドや中国といった国の乾燥地域では、現在でも将来においても深刻な水需給の逼迫が想定されるが、ある意味では、それは、少ない水をそれなりに使う社会システムができあがっているということでもある。これに対して、現在の水使用量が少なく、人為的な水循環のコントロールに頼らずに水を使っている地域が多いと考えられるアフリカにおいて、今後人口の増大やその都市への集中に伴い、都市用水や農業用水、あるいは工業用水の需要が増大すると、深刻な水需給の逼迫が生じる可能性が大きいことが懸念される。

6) これからの世界水資源アセスメント

これまで、こうした研究は欧米を中心として実施、発表されてきていた（Shiklomanov 2000, Alcamo et al., 2000, Vörösmarty, 2000）。しかし、水をめぐる人と自然との関わりには地域独特の過去の経緯が反映されており、グローバルなアセスメントといえども、多様な水文化を背負う各地域において検討実施され、結果が世界中で共有されるべきである。アジアの一角に位置し、水耕文化やアジアモンスーンの影響を受けた高温多湿な気候、環太平洋造山帯上に位置する険しい地形といった水利水文条件をアジアの多くの国々と共有する日本からこうした研究成果が世界に向けて発信されるようになったことは極めて意義深い。今後、普遍的でありつつも、各地域の事情をより適切に反映したアセスメントへとさらに研究開発が進むと同時に、長期的な取り組みが必要な開発援助などにあたっては、前節で示したような世界規模の水資源アセスメント結果がぜひとも有効に利用されるようになることが期待される。

そうしたこれからのアセスメント研究においては、都市への人口集中、土地利用変化による水資源賦存量の変化などの変動要因を考慮する必要があり、また、これまで水需要データの制限などから、年降水量や年河川水量等に基づいた水資源需給分析が主であったが、今後は月単位、週単位といったより細かい時間スケールで水需給を検討していく必要があると考えられる。

さらに、ここでは量にのみ着目しているが、水質劣化による利用可能な水資源量の不足を考慮することも不可欠であるし、人間の水利用だけではなく、環境用水や生態系サービスの確保といった水需要も考慮する必要がある。また、灌漑取水や貯水池操作等人為的影響も考慮した形で水資源賦存量を推定していくことも必須であり、さらには灌漑農地からの蒸発散が大気循環に与える影響、取水による流量減少が河口付近の塩分濃度変化を通じて海洋循環に与える影響などのフィ



【図8】地球水循環変動研究に基づいた世界規模の水資源アセスメントの構成

ードバックの研究も欠かせない。一方で、水田分布など、アジアの水循環、水資源を考える上で欠かせない土地利用に関する基礎的情報をしっかりと作成し、広く世界の研究コミュニティに利用してもらえる様にする研究も重要である。

10年～20年後のグローバルな水資源アセスメントは、現在ローカルに行われている水資源アセスメントの空間分解能を持つと考えられ、また、個々の水循環、水利用に関する研究の進展と共に、【図8】に示したように、学融合的で包括的な取り組みがますます必要となってくるものと思われる。