

地球表層の水循環・水収支と世界の淡水資源の現状 および今世紀の展望

沖 大 幹* 鼎 信 次 郎*

Current Situation and Future Perspectives on Global Hydrologic Cycles, Water Balances, and World Freshwater Resources

Taikan OKI* and Shinjiro KANAE*

Abstract

Water is a naturally circulating resource that is constantly recharged. Therefore, even though stocks of water in natural and artificial reservoirs help increase water resources available to human societies, the flow of water should be the main focus of water resources assessments. The climate system puts an upper limit on the circulation rate of available renewable freshwater resources (RFWR). Although current global withdrawals are well below the upper limit, more than two billion people live in highly water-stressed areas because of the uneven distribution of RFWR in time and space. Climate change is expected to accelerate water cycles, and thereby increase the available RFWR. This would slow down the increase of people living under water stress; however, changes in seasonal patterns and increasing probability of extreme events might offset this effect. Reducing current vulnerability is the first step to prepare for such anticipated changes.

Key words : river discharge, water stress, global warming, residence time, water demand and supply

キーワード : 河川流量, 水ストレス, 地球温暖化, 滞留時間, 水需給

I. はじめに

ヒトを含むすべての有機体が生きながらえるためには水が必ず必要である。したがって、水の適切な供給を必ず受けられるようにすることは人間の健康で文化的な生活にとって不可欠である。我々の惑星地球はしばしば「水の惑星」と呼ばれるにも関わらず、水不足の増加に対する警鐘がよく聞かれる。しかしながら、石油資源とは異なり、地球上の水は循環していて閉じた水文循環を構成している。地球上の水の量は地質学的年代よ

りも短い時間スケールでは決して減ることはない (Okii, 2005)。そうだとすると、どうして 20 ~ 30 年のうちに水不足が生じるなどといったことがあり得るのだろうか (Rosegrant *et al.*, 2002)。一般に聞かれる答えは、地球上にはたくさんの水が存在するけれども、そのうちのたった 2.5% が淡水で、しかもそのほとんどが氷河や深い地下水などであり、人類が利用可能な水はほんの少ししかないからだ、というようなものである。この答えは完全に正しいとは言えない。水がどの程度利用可能であるかを評価するためには、どのくらい

* 東京大学生産技術研究所

* Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

の水が溜まっているか、の貯留量ではなく、どのくらいの水が流れて循環しているか、に注目せねばならないからである。

II. 地球上の水循環と水資源賦存量

1) 貯留量ではなくフローとしての水資源

ある瞬間に世界中の川の中にある水の量は約 2,000 km³ と推定されているが、この値は年間の取水量 3,800 km³/year よりもはるかに少ない(図 1)(Korzun, 1978; Shiklomanov, 1997; Oki, 2005; Dirmeyer *et al.*, 2006) しか、こ、う、い、う、比、較、は、ナンセンスである。本来、取水量 3,800 km³/year は、地球上の全流出量 45,500 km³/year と比較されるべきなのである(図 1)。この全流出量というのは、地下水が直接海に流出する分も含まれているが、おおむね河川を通じて陸から海に流れ出る水の量であり、これが 1 年間に最大利用可能な古典的な意味での全水資源量に相当する。

2) 循環する資源とはどういうことか？

他のほとんどの天然資源とは異なり、水は自然に循環している。蒸発しても液体から気体になるだけであり、結局はまた凝結する。光合成によって炭水化物の一部となり植物に蓄えられた水も、分解された際に結局は水に戻ることになる。水を使うと、水質、温度差、位置エネルギーといった水の性質が失われてしまうが、そういう質的に劣化した水も、ほぼ 100% 太陽エネルギーによって駆動されている地球上の水文循環によって常に再生されている。水の流れる量が水資源のあるなしを測るのに重要だとすると、水循環速度が問題となってくる。ある水体に水分子が平均してどのくらいいるのか、という平均滞留時間はその水体に蓄えられている水の総量を出入りする流れの量で割り算することによって求めることができる(表 1)。人間活動の影響がなければ、川における水の平均滞留時間は約 2 週間強であるのに対し、地下帯水層によっては出入りする流れが非常に緩やかで、平均滞留時間が数百年、場合によっては数千年と推定されているものもある(Oki *et al.*, 2004)。そうした帯水層から水が汲み上げられた場合には、元の水の量に戻るには人間の時間ス

ケールで考えると非常に長い時間がかかるので、実質的には一旦汲み上げるともはや補給されず使い果たしてしまうのと同じである。水がそうした地下帯水層に貯まるには非常に長い時間がかかるので、そうした帯水層の水は化石水と呼ばれることがある。

3) どれだけの水資源賦存量が利用可能なのか？

再生可能資源としての水資源だけで人の水需要をすべてまかなえるものなのだろうか。そうとも言えるし、そうでないとも言える。再生可能資源としての水資源は自然に再生するけれども、循環速度は気候システムによって決まっているので、人間社会が利用可能な水資源賦存量には上限がある。グローバルスケールでみると、現在の水資源取水量はこの上限をはるかに下回っていて、水循環を賢明にマネジメントすれば、水資源賦存量は将来にわたって人類の水需要をまかなうことができるであろう。適切な水マネジメント、というのがその鍵である。従来の水資源工学者達は河川などの表流水や地下水から汲み上げた水が水資源で、植物の葉や土壌表面からの蒸発散はせっかく降った降水の損失であるとみなしていた。そういう観点では、陸上の降水量から蒸発散量を引いた量が最大利用可能な水資源賦存量である、ということになる。この利用可能な水資源賦存量の大部分は表流水、特に河川水である。ちなみに、河川総流量の約 10% が表流水にはならず、地下水のまま直接海洋に流出していると推定されている(Church, 1996)。

従来の見方とは違い、灌漑されていない耕地からの蒸発散量も人間社会に貢献している水資源だとみなすべきだ、という指摘もなされている。こうした新たに水資源とみなすべきとされた蒸発散量を従来の水資源と区別するために、蒸発散量はグリーンウォーターと名づけられ、従来の河川水や地下水はブルーウォーターとも呼ばれるようになった(Falkenmark and Rockstrom, 2004)。ある穀物を一定量栽培するのに必要な水の総量のうち、どのくらいを雨水に由来する蒸発散分(グリーンウォーター)でまかなうことが可能で、残りの不足分としてどのくらいの灌漑水量(ブルー

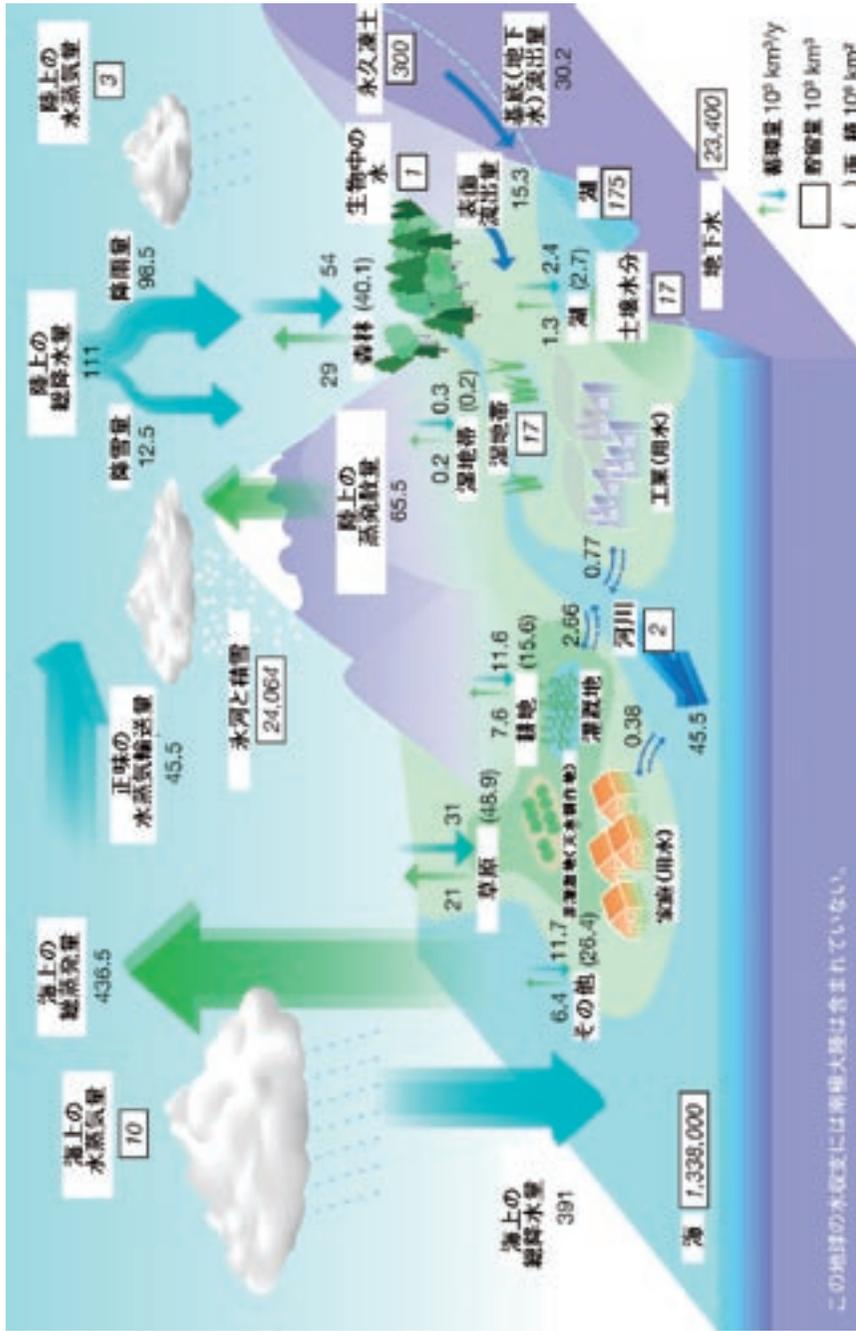


図 1 地球上の水文循環量 (1,000 km³/year) と貯留量 (1,000 km³)。自然の循環と人工的な循環を様々なデータソースから統合した。大きな矢印は陸上と海洋上における年総降水量と年総蒸発量 (1,000 km³/year) を示し、陸上の総降水量には小さな矢印で主要な土地利用ごとに示した年降水量や年蒸発量を含む。() は主要な土地利用の陸上の総面積 (百万 km²) を示す。河川流出量の約 10% と推定されている地下水から海洋への直接流出量は河川流出量に含まれている。(初出: Oki and Kanai, 2006)。

Fig. 1 Global hydrological fluxes (1,000 km³/year) and storages (1,000 km³) with natural and anthropogenic cycles are synthesized from various sources. Big vertical arrows show total annual precipitation and evapotranspiration over land and ocean (1,000 km³/year), which include annual precipitation and evapotranspiration in major landscapes (1,000 km³/year) presented by small vertical arrows; parentheses indicate area (million km²). The direct groundwater discharge, which is estimated to be about 10% of total river discharge globally, is included in river discharge. (first appeared in Oki and Kanai, 2006).

表 1 地球表層の水の貯留量とそれが覆う面積，平均水深，地球表層の水に占める割合，平均滞留時間（Korzun, 1978 等に基づいて作成された Oki, *et al.*, 2004 を一部更新）。

Table 1 World water reserves: their storage, their coverage, mean water depth, share of water in storage to all of the water on the Earth, and mean residence time (updated from Oki, *et al.*, 2004, compiled based on Korzun, 1978)

Form of water	Total volume (km ³)	Covering area (km ²)	Mean depth(m)	Share (%)	Mean residence time
World ocean	1 338 000 000	361 300 000	3 700	96.539	2 500 years
Glaciers and permanent snow cover	24 064 100	16 227 500	1 463	1.736	1 600 years
Ground water	23 400 000	134 800 000	174	1.688	1 400 years
Ground ice in zones of permafrost strata	300 000	21 000 000	14	0.0216	10 000 years
Water in lakes	176 400	2 058 700	85.7	0.0127	17 years
Soil moisture	16 500	82 000 000	0.2	0.0012	1 years
Atmospheric water	12 900	510 000 000	0.025	0.0009	8 days
Marsh water	11 470	2 682 600	4.28	0.0008	5 years
Water in rivers	2 120	148 800 000	0.014	0.0002	16 days
Biological water	1 120	510 000 000	0.002	0.0001	a few hours
Artificial reservoirs	7 200				58 days
Total water reserves	1 385 984 610	510 000 000	2718	100.00	

ウォーター)を供給する必要があるか、といった推計をする際にグリーンウォーターの概念は有効である。つまり、雨水起源の分だけブルーウォーターを使わずにすむ、というふうに機会コストとして考えることによって、グリーンウォーターも水資源であるとみなされるのである。年間約 3,800 km³/year のブルーウォーターとしての水資源が人間によって取水されていて、それは最大利用可能な水資源賦存量の 10%にも満たない。グリーンウォーターである蒸発散量については、耕作地から年間約 7,600 km³/year (図 1)、草地の約 3/4 の面積を占める放牧地から年間約 14,400 km³/year と推定されている。これらを合わせると全陸地からの蒸発散量の約 3 分の 1 に相当する。

4) 水資源賦存量をすべて使うことができるのか？

ブルーウォーターの 10%とグリーンウォー

ターの 30%にしかすぎない水資源しか現時点では使っていないのに、どうして水不足を心配する必要があるのだろうか。水資源が時間的にも空間的にも変動が大きいことがその理由のひとつである (Postel *et al.*, 1996)。例えば、アマゾン川のオビドス観測地点では、気候値としての平均値でさえ、最大月の流量と最小月の流量とでは 2 倍も違う。もっと小さい河川流域では河川流量の変動はより大きいのが普通だし、日流量はもちろん月流量よりも変動が激しい。こうした時間的変動の激しさのせいで、水資源賦存量を 100%利用することは現実的には難しい。貯留施設がきちんと整っていないかぎり、洪水時や流量の多い時期の流量を、流量が少ない時期に利用することはできない。だからこそ、無数の人工的な貯水池や湖、小規模なため池が作られ、ほとんどの川の流況が調整されているのである (Nilsson *et al.*, 2005)。こうした人工の貯留施設の総貯水容量は、年間取

水量の約2倍の約7,200 km³だと推定されている (ICOLD, 1998)。

再生可能な水資源が足りなくなり得るもうひとつの理由は、それが空間的にも不均一に分布しているせいである。年流出量 (図2) は上流から流れてくる水が上流での消費的使用や、水質汚染のため下流では利用できないとしたときに最大限利用可能な再生水資源量に対応している。流出量は河道を通じて集められ、河川流量を形成する (図3)。河川流量は、もし上流からの水がすべて利用可能だとした場合に潜在的に最大限利用可能な再生可能な水資源である (Oki *et al.*, 2001)。流出量も河川流量もどちらも限られた地域に集中していて、値もほぼゼロの地域から熱帯では流出量は年2,000 mmを超え、アマゾン川の河口付近では年平均流量は200,000 m³/sを超えている。また、健全な生態系維持のための水需要や、船舶の航行のための水需要も満たされねばならないため、再生可能な水資源のすべてを人間が利用するわけにはいかない。

III . 世界の水資源需給の現状

1) 世界の水資源はどのようにして評価されているのか?

1960年代後半の国際水文10年計画 (IHD) によって世界の水収支の研究が推進され、1970年代にその先駆的な推定値が公表された (Lvovitch, 1973; Baumgartner and Reichel, 1975; Korzun, 1978)。Shiklomanov (1997) は各国の過去や現在の取水統計データなどを収集整理し、将来展望をとりまとめた。近年の情報技術の進歩により、より細かい空間スケールで世界の水収支を推定することが可能になっている (Vörösmarty *et al.*, 2000; Oki *et al.*, 2001; Alcamo *et al.*, 2003)。また、人口や灌漑面積分布を代替として、取水量の分布を推定することも可能になり、各格子内の再生可能な水資源とそうして格子化された取水量を比較できるようになっている。渇水指標 R_{ws} は、 W を全セクターによる年取水量、 S を海水淡水化によって生成される水資源量、 Q を年水資源賦存量だとして、 $R_{ws} = (W - S)/Q$ で定義さ

れる。 R_{ws} が0.4以上だと通常その地域は高い水ストレス下にある、と判断される (Shiklomanov, 1997; Vörösmarty *et al.*, 2000; Oki *et al.*, 2001; Alcamo *et al.*, 2003)。水資源賦存量のすべてが人間社会によって利用可能なわけではないので、この0.4という数字が今後とも普遍であるとは限らないが、もっともらしい値であると考えられている。年単位の水資源賦存量と取水量に基づく評価ではなく、より細かい時間スケールの情報に基づいて、水文循環の時間的変動を考慮すれば、よりきめ細やかな評価が可能となるであろう。なお、水ストレスとは、外力により生じる力学的な歪のアナロジーで、水需給が逼迫している状況を指す。いわゆる安全な水へのアクセスがない人口、とはまた別の概念であり、平均的には足りているように見えても、水の時間的な変動に対して水利用システムが脆弱であることを意味する。

人間活動が自然の様々なプロセスに及ぼしている影響が大きい、いわば「人間世 (Anthropocene)」 (Crutzen, 2002) では、自然の水文循環のみを対象として研究することには何の意味もない。したがって、いくつかの研究では人間活動が水文循環に及ぼす影響をグローバルスケールでも考慮し始め、より現実的に水文循環をシミュレートしようとしている。そうした研究では、人間活動による取水量は河川流量から差し引かれ (Alcamo *et al.*, 2003) 主要な貯水池による流況調整なども組み込まれている (Hanasaki *et al.*, 2006)。

最新のマルチモデルアンサンブル推定値 (Dirmeyer *et al.*, 2006) に基づいて再計算された渇水指標 R_{ws} の分布が図4に示されている。 R_{ws} は中国北部、インドとパキスタンの国境付近、中東、そしてアメリカ合衆国中西部で高くなっている。この評価によると、約24億人の人々が現在高い水ストレスの地域に住んでいることになる (内海, 2006)。

2) 間接水貿易だけで水不足地域を救うことができるのか?

水が豊富な地域から乾燥して水ストレスのかかった地域まで長距離にわたって水を輸送することは重力のみを利用するのでなければ実際には経

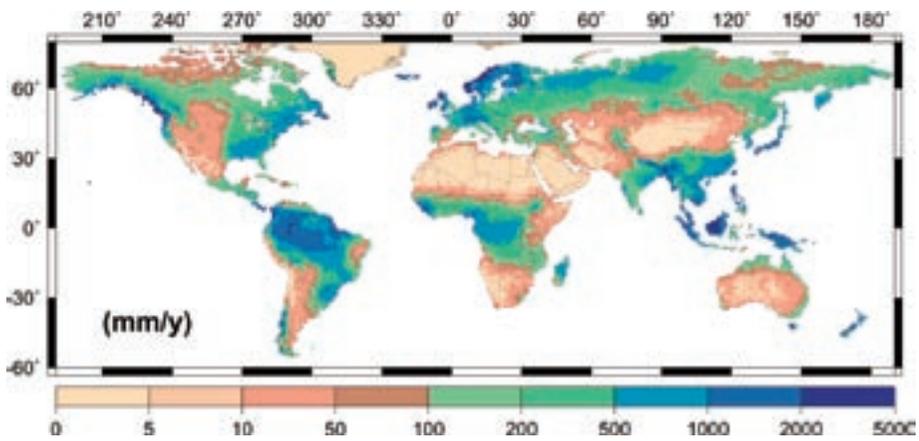


図 2 平均年流出量 (mm/year) のグローバルな分布 .
 Fig. 2 Global distribution of mean annual runoff (mm/year).

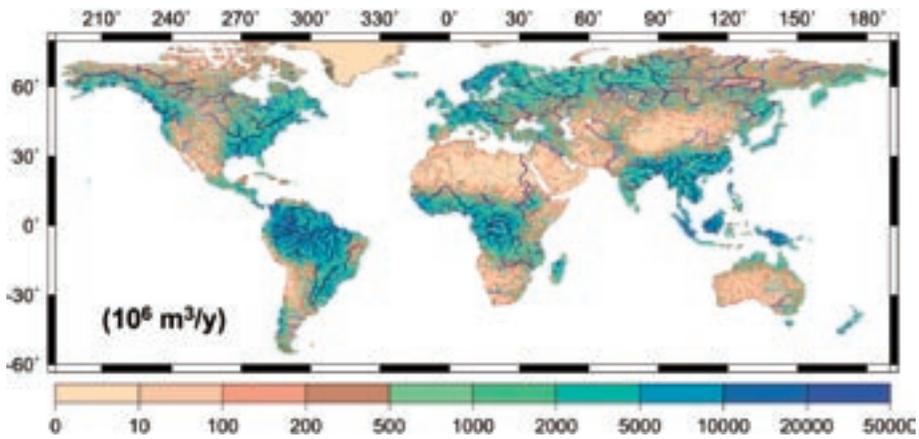


図 3 平均年河川流量 (10⁶ m³/year) のグローバルな分布 .
 Fig. 3 Global distribution of mean annual discharge (10⁶ m³/year).

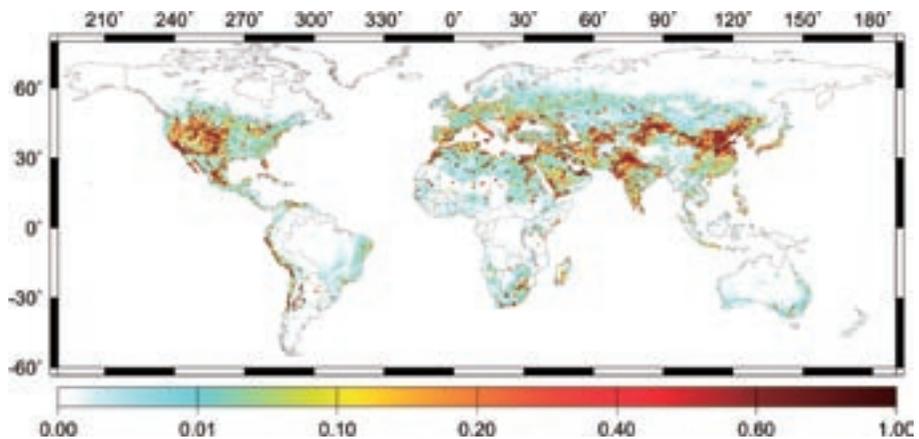


図 4 渇水指数 R_{us} のグローバルな分布 . R_{us} が大きいほど水ストレスが高い地域を表す .
 Fig. 4 Global distribution of water stress index R_{us} . Larger R_{us} indicates higher water stress region.

済的に引き合わない。飲むための質の高い水は1人1日あたり2~3リットルもあれば足りるので、国際的に貿易したり、海水淡水化によって供給したりしても経済的に引き合う。しかしながら、家庭用水、工業用水、そして農業用水には1人1日あたり発展途上国でも1立方メートル、先進国ではもっと多くの水が必要である。したがって、そうした用途への水供給は安価でなければならず、給水車やその他エネルギーを大量に消費するような手段による水輸送は普通は非現実的である (Postel *et al.*, 1996)。

一方で、乾燥地域における食料生産や工業生産のための水需要は、食料や工業製品を輸入することによって相殺することができる。食料や工業製品の貿易により水需要が緩和されるということは、あたかも食料や工業製品の貿易は輸入国にとっては水の貿易と同じようなものだ、という意味でそうした貿易は間接水貿易 (Virtual Water Trade) と呼ばれる (Allan, 1998; Chapagain and Hoekstra, 2003; Oki *et al.*, 2003)。製品の重さは、その製品を生産するのに必要な水の量の1/100や1/1000なので、水が必要な場所に水を輸送して持って行くよりは、その分の水を使って生産した製品を運ぶほうがずっと簡単なわけである。世界の国際的な間接水貿易は年間約1,000 km³と推定されているが (Chapagain and Hoekstra, 2003; Oki *et al.*, 2003) 実際にはそのうちの一部のみが水不足を解消する必要性から生じており、食料貿易が必ずしも水不足解消のために行われているわけではない (Yang *et al.*, 2003)。

水、食料、健康、そして貧困の問題は多くの発展途上国において互いに結びついており、特に水資源が少なく、地域経済が弱くて域外から食料を買い付ける経済力もなく、海水淡水化施設は高価すぎて現実的には役に立たないような地域はまさにそういう状態にある。逆に、適切な社会基盤施設投資などによって一旦水供給が確保されマネジメントがよくなれば、公衆衛生状態はよくなり、食料供給は安定し、工業発展の可能性が増大し、日々の生活に必要な水を得るために費やされていた時間をもっと生産性のよい労働や教育を受ける

機会に振り向けることができるようになる。だからこそ、「安全な飲み水に持続的にアクセスできない人口割合を半減する」という目標が、国連のミレニアム行動目標 (UN, 2000) のひとつとなっているのである。

IV. 世界の水資源需給の将来展望

1) 今後の水利用はどうなるのか？

世界の人口は少なくとも今後数十年間は成長し、その結果として水需要は増大するだろう。1人当たりの水需要もおそらく経済成長によって増加するだろう。例えば、肉の消費量の増大は、餌の生産のための水需要を増大させるだろう。

将来に関する世界の水資源評価は、もし我々が水資源のマネジメントを今日あるがままにしていたら、いったいどうなってしまうのかを国際的なコミュニティに示し、望まない結末を避けるためには、どういった行動をとるべきかを明確に表すのが究極の目標である。そういう意味では、旧態依然とした現状維持という前提に立った予測を示し、それを受けて悲惨な将来を回避するような行動を社会がとり、結果として予測が外れるようになることが将来の水資源研究の成功だ、と言えるだろう。そういうわけで、過去の経緯と現在の傾向からもっともらしいシナリオを作成し、将来の水需要を予測することになる。

農業分野は世界の水資源取水量の3分の2、世界の水消費の90%を占めると推定されている (Shiklomanov, 1997)。この分野では、1961年から2004年の間に、単位面積あたりの穀物の収量は2.3倍と人口の伸び(2.0)を上回ったため、農地面積は10%しか増えず、穀物の収穫面積はさらに伸びが少なかったが、結果として世界全体では穀物収穫量は図5のように2.4倍になった。こうした農業生産量増大は、施肥量の増大に加えて、人口と同じく2倍に増えた灌漑面積、そしてそのために必要な取水量の増大に支えられてきた (FAO, 2006)。

1人あたりの生活用水使用量は国民総生産 (GDP) の伸びに従って増大してきたが、多くの先進国でその伸びは頭打ちとなっていて、いくつ

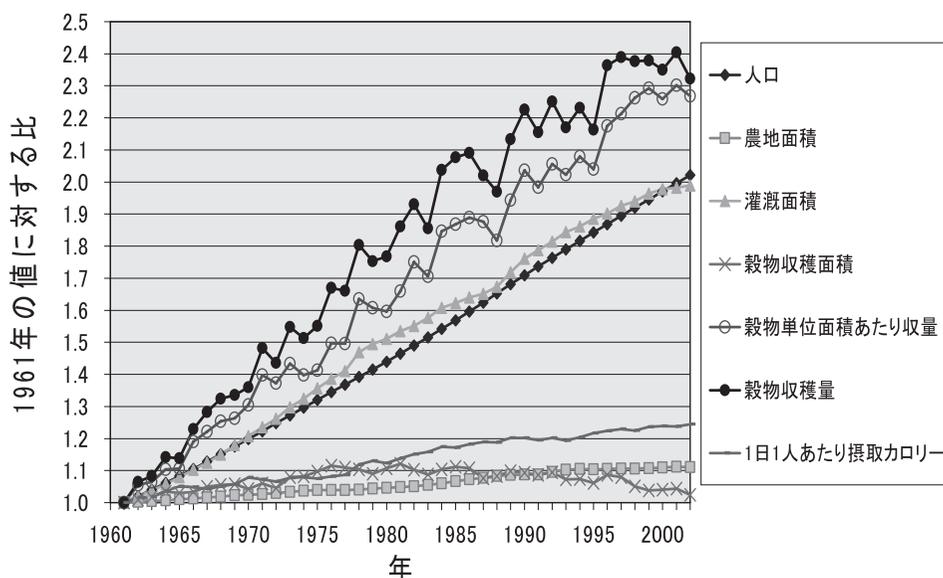


図 5 世界食糧機関のデータに基づく 1961 年の値を 1 とした各指標の推移。

Fig. 5 Time evolution of each index of which the value in year 1961 is set at 1 based on the data from FAO.

かの国々では 1 人あたりの生活用水使用量はむしろ減少している。こうした傾向も現実的な将来の水使用予測では考慮されねばならない。

工業用水使用量も国民総生産の伸びに従って増大してきたが、再生水利用技術の進展が工場への取水量を減らしてきている。例えば、現在日本では工業用水の 80% 近くが再生利用されている(国土交通省土地・水資源局水資源部, 2006)。

今後数十年のうちには、灌漑のための取水量は必要に応じて増大させることができなくなり、水不足が必要な食料生産の伸びの阻害要因になるのではないかと、という懸念が示されている。しかし、発展途上国における渇水指標 R_{ws} は一般に低く、それは、それらの国々で取水量を増やせる可能性があることを示している。そうした国々に必要なのは、技術的な水資源開発と共にいかにして法体系や政策、経済メカニズムなどの「ソフト対策」と呼ばれる方策を実施し、水供給を増大させて水需要をうまく管理するかである (Gleick, 2003)。

2) 気候変動は再生可能な水資源にどのような影響を及ぼすのか？

グローバルな気候変動が水文循環に及ぼす影響にはまだ不確実性が高いが、気温が高くなることにより雪として降るはずだった分が雨として降るようになり、雪解けの季節が早くなり、結果として春の融雪洪水の時期や流量を大きく変化させることは確実だろう (Houghton *et al.*, 2001)。また、世界人口の半分は飲み水の供給やその他の用水を地下水に頼っている (World Water Day, 1998)。海水面の上昇は海岸に近い地下帯水層への海水の浸入を引き起こし、利用可能な地下水資源を減少させるだろう。一方で、水需要の季節変化に気候変動がどう影響を及ぼすのかに関しては十分な推定がグローバルにはなされていないし、また、世界的な規模での地下水の汲み上げに関する統一的な記述は決定的に不足している。

将来の水需給に関する現状の調査では、季節変化といった時系列的に詳細な情報が欠落しているので、渇水指数 R_{ws} やファルケンマーク指標 (もしくは水混雑度指標) と呼ばれる $A_w = Q/C$ と

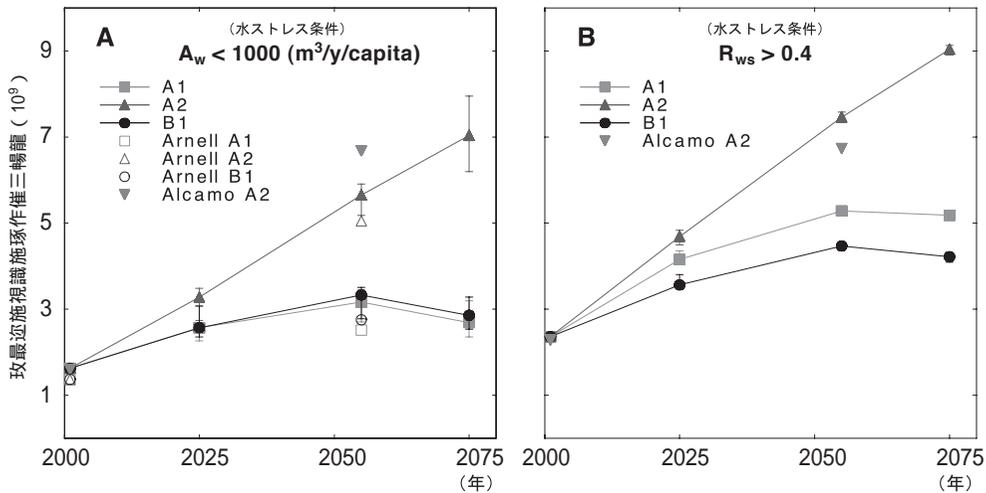


図 6 IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の SRES と呼ばれる将来シナリオに対応して推定された現在から将来にいたる高い水ストレス下にある人の数。高い水ストレスかどうかの閾値は (A) 水混雑度指標 $A_w = Q/C < 1,000 \text{ m}^3/\text{year}/\text{人}$, (B) 渇水指数 $R_{ws} = (W - S)/Q > 0.4$ とし, ここに, Q, C, W, S はそれぞれ, 再生可能水資源量, 人口, 取水量, 海水淡水化による水資源量である。エラーバーは 6 つの気候モデルによる再生可能水資源量の推計に対応した高い水ストレス下にある推定人口の最大値と最小値である。2010-39 年平均を 2025 年に, 2040-2069 年平均を 2055 年に, 2060-89 年平均を 2075 年にプロットしている。(初出: Oki and Kanae, 2006)。

Fig. 6 Current and future projections of population subject to high water stress under three business-as-usual scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change's Special Report on Emissions Scenarios. Threshold values are set at (A) water-crowding indicator $A_w = Q/C < 1,000 \text{ m}^3/\text{year}$ per capita and (B) water scarcity index $R_{ws} = (W - S)/Q > 0.4$, where $Q, C, W,$ and S are renewable freshwater resources (RFWR), population, water withdrawal, and water generated by desalination, respectively. Error bars indicate maximum and minimum populations under high water stress corresponding to the RFWR projected by six climate models. Climatic conditions averaged for 30 years are used for the plots at 2025 (averaged for 2010 to 2039), 2055 (averaged for 2040 to 2069), and 2075 (averaged for 2060 to 2089). (First appeared in Oki and Kanae, 2006)

いった必ずしも洗練されているとは言えない尺度がいまだに使われている。ここに, Q は年水資源賦存量, C は人口である。もちろん世界水資源調査にも進展があり, 例えば将来の水需要は, 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の SRES と呼ばれる将来シナリオに基づいて推計されるようになり, 気候変動に伴う水循環の変化と首尾一貫するようになってきている (Arnell, 2004; 内海, 2006; Alcamo *et al.*, 2007)。また, 将来の水循環の展望における不確実性を減らすため, マルチモデルアンサンブル手法も用いられるようになっていく (Milly *et al.*, 2005; Nohara *et al.*, 2006; 内海, 2006)。

図 6 は高い水ストレスの地域に住むことにな

る人口の 21 世紀終わりにまでいたる推移の推定結果について, いくつかの調査に基づく推計値を比較したものである (Oki *et al.*, 2001; Arnell, 2004; 内海, 2006; Alcamo *et al.*, 2007)。SRES シナリオごとに将来展望は異なるものの, 調査同士では比較的よく合致していることがわかる。注目すべき点は, 気候変動はグローバルな水循環を加速させ, 全体としては降水量を増加させる点である。大気中の二酸化炭素濃度の上昇は植物の気孔を閉じさせ, 蒸散量を減少させるので (Gedney *et al.*, 2006), 蒸発散量は降水量ほどには増加せず, 結果として河川流量はグローバルには増大する (Milly *et al.*, 2005; Nohara *et al.*, 2006)。このため, 利用できる再生可能な水資源量は人口の

増大や経済発展により増える水需要の伸びを超える速度で増加する。こういう理由で、年間の水資源賦存量に基づいて計算されている渇水指数 R_{ws} や水混雑指標 A_w の両者ともにマクロにみると、水ストレスは弱められていることがわかる。例外は A2 と呼んでいるシナリオで、地域の特性が残る多元化社会を将来像として描くこのシナリオでは人口が増大し続け、水ストレスにある人口も増加する推定となっている。また、実際には水循環の加速の影響だけではなく、A1/B1 と呼んでいるシナリオでは人口が伸びなくなる影響や、経済発展に伴って工業用水使用量がどの程度伸びたり逆に再生利用が発展したりするかもこれらの結果には影響を与えている。

しかしながら、高い水ストレス下にある人口の伸びが頭打ちになる推定結果は非常に微妙であり、年平均の水需要、水資源賦存量のみに基づいて推定されていることから、あまり楽観的にとらえるべきではない。そうした年総量への影響以外にも、利用可能な再生可能水資源量の季節推移の変化、水質の劣化、水資源マネジメントの変化など、気候変動が水資源に影響を及ぼすのではないかと懸念されている要素が十分に考慮されていないからである。

さらに、降水量はより強く間歇的になり、洪水や渇水のリスクが増大して、場合によっては同じ場所で洪水と渇水のリスクが増えることが懸念されている (Hirabayashi *et al.*, 2007)。こうしたリスクの増大は将来の水資源マネジメントに関する現時点でのグローバルな調査には十分取り込まれていないのである。

とはいえ、今でも水不足に苦しんでいる人々がいて、どんな水文循環の変化も水資源マネジメントに変革を迫ることは確かである。そしてその場合、そうした水文循環の変化の原因が地球温暖化だろうが地球寒冷化だろうが、人間活動の影響だろうが自然変動だろうが水資源マネジメントに変革を迫るという意味では同じことである。多数の人々が水ストレス下に暮らしたり、洪水など水に関連した災害のために多くの人が生活を無茶苦茶にされたりするのを見るときといった事態を招

かないように、社会がそうした変化に対する十分な準備をし、水文循環の変動を監視する必要があるだろう。

V. おわりに

世界の水資源に関する詳細な知識は国際水文 10 年計画以来の 40 年間で確実に増大した。地球上の水循環はいまより細かい時間空間スケールで測定され、それぞれの水文素過程に関する詳細な数値モデルでシミュレートされて、現在から将来にいたるグローバルな水システムの状況を描き出すことができる (図 2 ~ 図 4)。こうした自然の水文循環に関する研究成果に比べると、水利用に関する社会的なデータなどはまだまだ得にくいのが課題である。

また、水に関連する社会的問題の解決へ向けた活動に水文学で得られた専門的知識が役立つようにし、一方で、どういう知識が政策決定者や広い意味での社会に必要なかを科学者達が知るためにも、科学者と政策決定者の間のコミュニケーションを改善することが今後の水文学の発展には必要だと考えられる (Okii *et al.*, 2006)。

謝 辞

本稿は Okii *et al.* (2004)、Okii (2005) ならびに Okii and Kanae (2006) のレビュー論文に基づいて再構成したものであり、作成にあたっては東京大学生産技術研究所の水文学・水資源工学研究グループ、特に Yanjun Shen 博士、Magnus Bengtsson 博士、Hyungjun Kim 氏、内海信幸氏、そして東京大学新領域創成科学研究科の安形 康博士にお世話になった。本研究は環境省地球環境研究総合推進費「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究 (S-4)」ならびに、総合地球環境学研究所プロジェクト「地球規模の水循環変動ならびに世界の水問題の実態と将来展望」(代表：鼎 信次郎) の成果の一部である。

文 献

Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T. and Siebert, S. (2003) Global estimates of water withdrawals and availability under current and future 'business-as-usual' conditions. *Hydro. Sci. J.*, **48**, 339-348.

- Alcamo, J., Flörke, M. and Märker, M. (2007) Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrol. Sci. J.*, **52**, 247-275.
- Allan, J.A. (1998) 'Virtual water': An essential element in stabilizing the political economies of the middle east. *Bull. Yale Univ. Sch. For. Environ. Stud.*, **103**, 141-149.
- Arnell, N.W. (2004) Climate change and global water resources: SRES scenarios and socio-economic scenarios. *Global Environ. Chang.*, **14**, 31-52.
- Baumgartner, F. and Reichel, E. (1975) *The World Water Balance: Mean Annual Global, Continental and Maritime Precipitation, Evaporation and Run-off*. Elsevier.
- Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y. (2003) Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products. *Value of Water Research Report Series*, **13**, UNESCO-IHE Institute for Water Education in the Netherlands.
- Church, T.M. (1996) An underground route for the water cycle. *Nature*, **380**, 579-580.
- Crutzen, P.J. (2002) Geology of mankind-the Anthropocene. *Nature*, **415**, 23.
- Dirmeyer, P.A., Gao, X., Zhao, M., Guo, Z., Oki, T. and Hanasaki, N. (2006) The second global soil wetness project (GSWP-2) Multi-model analysis and implications for our perception of the land surface. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **87**, 1381-1397.
- Falkenmark, M. and Rockstrom, J. (2004) *Balancing Water for Humans and Nature*. Earthscan.
- FAO (2006) FAOSTAT.
<http://faostat.fao.org/> [Cited 2006/4/30]
- Gedney, N., Cox, P.M., Betts, R.A., Boucher, O., Huntingford, C. and Stott, P.A. (2006) Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, **439**, 835-838.
- Gleick, P. (2003) Global freshwater resources: Soft-path solutions for the 21st century. *Science*, **302**, 1524-1528.
- Hanasaki, N., Kanae, S. and Oki, T. (2006) A reservoir operation scheme for global river routing models. *J. Hydrol.*, **327**, 22-41.
- Hirabayashi, Y., Kanae, S., Emori, S., Oki, T., Kimoto, M. and Takeuchi, K. (2007) Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. *J. Geophys. Res. (Atmosphere)*, submitted.
- Houghton, T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguera, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A. eds. (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- ICOLD (1998) *World Register of Dams*. International Commission on Large Dams.
- 国土交通省土地・水資源局水資源部 (2006) 日本の水資源. 国土交通省.
- Korzun, V.I. (1978) World water balance and water resources of the earth. *Studies and Reports in Hydrology*, **25**, UNESCO.
- Lvovitch, M.I. (1973) The global water balance. *Trans. Am. Geophys. Union*, **54**, 28-42.
- Milly, P.C.D., Dunne, K.A. and Vecchia, A.V. (2005) Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, **433**, 347-350.
- Nilsson, C., Reidy, C.A., Dynesius, M. and Revenga, C. (2005) Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, **308**, 405-408.
- Nohara, D., Kitoh, A., Hosaka, M. and Oki, T. (2006) Impact of climate change on river discharge projected by multi-model ensemble. *J. Hydrometeorol.*, **7**, 1076-1089.
- Oki, T. (2005) The hydrologic cycles and global circulation. in *Encyclopedia of Hydrological Sciences* edited by Anderson, M.G. and McDonnell, J.J., **1**, John Wiley & Sons Ltd., 13-22.
- Oki, T. and Kanae, S. (2006) Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, **313**, 1068-1072.
- Oki, T., Agata, Y., Kanae, S., Saruhashi, T., Yang, D. and Musiake, K. (2001) Global assessment of current water resources using total runoff integrating pathways. *Hydrol. Sci. J.*, **46**, 983-996.
- Oki, T., Sato, M., Kawamura, A., Miyake, M., Kanae, S. and Musiake, K. (2003) Virtual water trade to Japan and in the world. in *Virtual Water Trade* edited by Hoekstra, A.Y., *Value of Water Research Report Series*, **12**, UNESCO-IHE, 221-235.
- Oki, T., Entekhabi, D. and Harrold, T.I. (2004) The global water cycle. in *State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics* edited by Sparks, R.S.J. and Hawkesworth, C.J., *Geophysical Monograph Series*, **150**, AGU Publications, 225-257.
- Oki, T., Valeo, C. and Heal, K. eds. (2006) *Hydrology 2020: An Integrating Science to Meet World Water Challenges*. IAHS Publication, **300**, IAHS Press.
- Postel, S.L., Daily, G.C. and Ehrlich, P.R. (1996) Human appropriation of renewable fresh water. *Science*, **271**, 785-788.
- Rosegrant M.W., Cai X. and Cline S.A. (2002) *Global Water Outlook to 2025: Averting an Impending Crisis. A Report Summary of the 2020 Vision for Food, Agriculture and the Environment Initiative*. International Food Policy Research Institute and International Water Management Institute.
- Shiklomanov I.A. ed. (1997) *Assessment of Water Resources and Water Availability in the World*. Background Report for the Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World, WMO/SEI.
- UN (2000) Millennium development goals.
<http://www.un.org/millenniumgoals/index.html>

[Cited 2007/1/31]
内海信幸 (2006) 温暖化シナリオに基づいた将来のグローバルな水需給アセスメント . 東京大学農学部 5 類卒業論文 .
Vörösmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J. and Lam-
mers, R.B. (2000) Global water resources: Vulner-
ability from climate change and population growth.
Science, **289**, 284 288.
World Water Day (1998) World water day 1998,

groundwater: The invisible resource.
<http://www.worldwaterday.org/wwday/1998/> [Cited
2007/1/31]
Yang, H., Eichert, P., Abbaspour, K.C. and Zehnder,
A.B. (2003) A water resources threshold and its
implications for food security. *Environ. Sci. Tech-
nol.*, **37**, 3048 3054.

(2007 年 2 月 5 日 受付, 2007 年 5 月 1 日 受理)