

気候変動と世界の水資源、日本の水資源

*沖 大幹 (東京大学生産技術研究所
総合地球環境学研究所)

1 地球環境問題と水資源

地球温暖化やオゾンホール、熱帯雨林の森林伐採や半乾燥地における沙漠化の進行といったまさに地球規模の問題から、都市のゴミ問題とリサイクルや農薬と食糧の安全性、大気汚染や土壌汚染、あるいはダイオキシンを始めとする環境ホルモンなど比較的身近な地域の問題までが地球環境問題として話題にのぼる。それらに比較的共通する特徴を探ってみると、

- 現象の影響が及ぶ範囲が広く、1つの国や地域にとどまらない
- 複数の主体が対応策をとる必要がある
- 直接的な対応策はともすれば経済成長の阻害要因になる
- 対応策実施に向けた合意形成が難しく、各人の根本的な人生観やライフスタイルにも影響を及ぼす

等があげられる。そして、これらの根元には、しばらくは加速するであろう世界的な人口増加に伴う食糧とエネルギー消費の増大を現代文明が支えられるかどうか、という問題が横たわっている。この食糧とエネルギー消費の両者に関わっているのが水資源である。

一般に水資源といった場合、まずは飲み水を思い浮かべられることが多いが、資源としての水は

- 農業生産のための灌漑や排水 (農業用水)
- 工業製品生産のための工業用水
- 都市等における生活用水
- 水力発電などのエネルギー生産
- 舟運・漁業・景観のための水面・低水維持
- 水生生態系と沿岸域の海水保全

などの目的に利用される。鉱物資源やエネルギー資源に比した水資源の特徴としては、

- 循環型、持続的な資源である
- 単価が安い
- 必要な時に必要な場所に必要な質の水でなければ価値が無い

などが上げられる。

循環型である、ということは必ずしも無尽蔵であるということの意味しない。なぜなら、ある時間内に利用可能な水の量には上限があり、それ以上は利用できないからである。すなわち、水の消費とは、水循環の一部を排他的に独占して使用する行為である。なお、化石水 (fossil water) と呼ばれる涵養されていない地下水は鉱物資源と同様に利用し続けるとやがては失くなってしまふ。

また、単位体積あるいは重量あたりの単価が安いという特徴は、貯留や輸送コストが相対的に非常にかさむ、ということになり、生命維持に不可欠であるという点以外に水資源を他の資源とは一線を画す経済財にしている一因である。

最後の点も極めて重要で、年平均、あるいは気候値として水が十分に存在しても、それが時間的空間的に不均一にしか利用可能でなければ水資源としては価値が低いし、量の消費を伴わなくても質の悪化は水資源の消費であることになる。すなわち、必要な質が確保されていない水は、資源としては存在していないのと同じである。

水資源の取水源としては、世界的にみると河川水の利用が主で、地下水は15%程度と見積もられている。地下水のまま海洋へ流出する淡水量は全河川流出量の5%からせいぜい10%程度とされるので、汲み上げられなかった地下水は海に流れ出す前に最終的には河川水となるものと考えられる。したがって、水資源の源は河川流出=雨+融雪-蒸発散、だと考えて良い。日本の都市用水の場合には地下水利用が30%程度と高い水準である。

世界的には取水ベースでは70%が農業用水であり、20%が工業用水、そして都市用水が10%である。これに対し、消費量という面では、農業用水が93%程度、工業用水が4%推定されている。日本の場合には取水ベースで農業用水が66%、工業用水と家庭用水がそれぞれ17%ずつ位である。

2 水資源の消費

水資源の消費には量と質の側面がある。量の消費としては水面からの蒸発と、植物による蒸散がある。蒸散量のうち実際に光合成によって固定される水分は約0.1%程度であるとされ、実際には根から養分などを葉へ運ぶ媒体としての役割が強い。人間で考えてみても、生物として必要な飲用水は1日2リットル程度とされている。すなわち、多く見積もっても、1年間に1人あたり1m³あれば足りることになる。

これに対し、生活用水使用量は1998年の日本全国平均で330リットル/人/日である。家庭内で消費されているのはこのうち250リットル/人/日(東京都の例)とされ、残りはホテルやデパート等の大規模施設等で消費されている。家庭内での水の利用は、風呂、洗濯、炊事、トイレが主な用途であり、いずれも洗浄用であることがわかる。1965年には生活用水使用量が1人1日平均170リットルであったことを考えると、トイレの水洗化、内風呂化等、生活スタイルの変化がこうした水使用量の増加をもたらしていることがわかる。いずれにせよ、日本では生活用水として1人年間約100m³利用していることになる。これは飲用に必要な量の100倍である。日本において降る雨から蒸発する分を差し引いた残り、地下水となったり川に流出したりして水資源として利用可能な水の量は平均すると水の高さに換算して約1,000mm(=1m)程度である。すなわち、日本人一人当たりで、10m四方の面積分の水資源を利用していることになり、都会ではそこに降る雨による水資源だけではとても必要な生活水を供給できないということが容易に想像可能であろう。

質の消費にはいわゆる水質劣化だけではなく、温度の消費も考える必要がある。量の消費を考える場合に難しいのは、多くの水資源統計が取水量ベースであるのに対し、実際には農業用水などでは循環再利用される分が多いと考えられる点である。大まかな推定とし

では、農業の場合取水量の約半分程度が実際に量として失われる分であるとされる。工業用水の場合には、発電などでは量の消費はほとんどない。また、工場内での循環利用も極めて高度化していて、日本では平均回収率が80%程度となっていて、年間工業用水供給量の5倍程度が実際に工場内では利用されている。

3 水資源の間接消費

我々人間の暮らしにおける水資源の消費は、前節で紹介したような蛇口からの水だけではない。我々が食べる食糧を作るのに使われている水も間接的に消費している、と考えねばならないからである。農業生産において実際に消費されている水の量の推定は難しいが、例えば取水量ベースで考えて、精米後の米1kgを作るのに約8tの水が必要であり、同様に小麦粉1kgを灌漑により得るには4t以上の水が消費されていると推定される。こうした水は特に仮想水(virtual water)とも呼ばれる。この様に、日本が輸入している穀物は灌漑により生育されたとしたら、重量比でその数千倍の水資源が利用されたと考えねばならないのである。さらに、飼料用穀物で育てられた家畜の肉類は、鶏肉でも4倍、豚肉なら7倍、牛肉なら可食部の11倍もの重量の穀物が必要であると言われており、こうした飼料用穀物の間接消費を考慮すると、輸入肉類あるいは輸入飼料で育てられた肉類を食べることは、形を変えた水資源を輸入して消費していることだと考えられる。こうした間接的な海外依存の水資源消費量は日本の場合年間400~500億 m^3 にものぼると算定され、直接的な国内での農業用水取水量600億 m^3 と合わせて、国民一人当たり約1,000 m^3 /年の水を間接的に消費していることになる。これは、生活用水の10倍にものぼる量に相当する。

4 水資源の限界

では、一体、どのくらいの間人が水資源という観点から見て地球上に暮らすことが可能であろうか。

まず地球全体を平均して考える。陸地の平均降水量は約850mm/年で、このうち600mm程度が蒸発し、残りの250mm程度が河川等の表流水あるいは地下水の形で流動し水資源に利用可能であるとする。地球上の全陸地面積は約 $1.6 \times 10^{14} m^2$ なので利用可能な水資源量は $4 \times 10^{13} m^3$ /年、すなわち年間約400億トンとなる。日本人と同程度の水利用、ライフスタイルだとすると、工業用水も考慮して年間1,200 m^3 (=約1.2トン)程度の水が必要だと考えられるので、この場合、333億人が地球上に暮せることになる。

しかしながら、河川流量は年間を通じて一定しているわけではなく、洪水をすべて貯留しておいて平滑化して利用することも出来ないし、空間的にも遍在しているので、実際には利用可能な水資源量は400億トン/年よりはかなり少ないはずである。一方で、食糧のすべてが灌漑により水資源を利用して得られているわけではないし、生活用水だけで比較しても日本は世界平均の倍近くの量を一人当たり利用している。そういう意味で、現実的な数字として水資源の制約から何人が地球上に暮せるか、という問いに対する答えを出すことは難しい。

そこで現在の状況からの類推で考えてみる。現在全世界で 60 億人の人口で年間 38 億トンの水資源が利用されているとされる。耕地は陸地面積の約 10%程度であり、平均的に考えると、耕地から発生する水資源 40 億トン/年のほとんどが利用されているという計算になる。実際にはその背後の森林地等からの流出が利用されているはずである。また、潜在的な水資源賦存量に対して実際に利用可能な割合は、日本や先進諸国での事例から推定してどんなに社会基盤を整備しても 20%程度であると考えられ、グローバルな陸地の 1/3 が乾燥地であるとしてその残りの面積からの流出量に相当する約 270 億トン/年のうちの 2 割が利用可能であるとする、54 億トン/年が現実的に利用可能な水資源量であるということになる。現在の利用量、人口との比で単純計算すると、ダム等による社会基盤整備によって水資源を開発すれば 85 億人程度までは現在と同様のライフスタイルの人口構成が可能であることになる。

この 85 億人という数字は、現在期待される 21 世紀後半の世界人口ピークにほぼ対応している。すなわち、水が足りず食糧にも事欠く人口も、水をふんだんに利用し肉類もどんどん食べる人口も同様に増加しても、水資源開発に努めて自然の水循環のうち人間が利用可能な割合を増やせばなんとか水資源的にはなりそうだが、ということになる。しかし、この見通しでは、水ストレスにより飢餓や非衛生状態に置かれた人々は救われず、途上国の水消費レベルも上げられない。一方で、農業用水の有効利用や、生活用水の循環利用の促進、食文化の変化、水洗トイレの見直し等、文化レベル、生活レベルを落さずとも水需要を抑制することは可能であり、必ずしも見通しが暗いとは言えないと思われる。

今後は、上記の様な地球を大枠で捉えた議論に対し、各地域ごとに細かく積み上げた需給、そして将来展望を踏まえて、世界的な水の需給、水危機を注意深く見守る必要があると考えられる。

5 世界水危機

世界水危機とは何だろうか。「21 世紀は水の世紀」である、と、無批判に喧伝される様になったそもそもの原因は、当時世界銀行の副総裁であったイスマイル・セラゲルディン氏が 1995 年に言ったとされる

「20 世紀は石油をめぐる経済的戦争が繰り返された。現在の状況が続くとすれば 21 世紀は水をめぐる紛争の世紀になってしまう」

という名キャッチコピーのインパクトと、彼も主導的な役割を果たした世界水評議会 (WWC) のその後の活動、特に世界水フォーラム (WWF) の開催による宣伝のおかげによるところが大きい。

そうしたグローバルな水問題が語られる際には、現在でも水不足による貧困、不衛生状態、病気等に悩む地域があり、今後しばらくは更なる悪化が懸念されると主張される。その理由は、21 世紀における水資源需要の増大であり、

- 人口の増加
- 生活レベルの向上
- 都市化の進展

等が主な変動要因である。人口の増加は食糧となる穀物の需要を増加させ、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。こうした農業用水に対し現時点では世界で $2,500\text{km}^3$ 程度が利用されていると見積もられているのに対し、人間が直接飲用、調理、入浴、洗濯、庭の水まきや洗車等に利用する生活(都市)用水は世界で 350km^3 程度であると算定されており、そうしたライフスタイル変化に伴う水需要の増大は、農業用水需要の増大に比べると比較的小さいと考えられる。こうしたグローバルな水問題の将来を考える際には需要と供給の両者の変化を本来考慮すべきであるが、供給側の変化が語られることは少ない。それは、WWF 等に世界の水資源需給の基礎を提供した Shiklomanov(1997) では、水資源供給(自然)側の変化として考えられる気候変動に関しては不確実性が大きく、地球温暖化の影響が顕在化するのも 21 世紀後半以降であろうからという理由で自然の水循環は変化しないものとして世界水資源アセスメントがなされているからである。

これに対し、Vorosmarty(2000) では、いくつかの気候モデルによる推定値から得られる 1985 年に対する 2025 年の降水量と気温の変化を利用して水収支モデルから河川流量変化を推定し、需給バランスの変化が調べられている。その結果によると、気候変動のみを考慮した場合、グローバル平均での水資源需給比(需要/供給)は 4% 増大してより逼迫する、という結果になるのに対し、人口増加と経済成長に伴う需要増大のみを考慮すると水資源需給比は 50% の増大、両者を考慮すると 61% の増大という結果が示されている。すなわち、2025 年を想定すると気候変動よりも人口増大や経済成長がグローバルな水需給に及ぼす影響の方が大きい、ということになる。

しかしながら、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。

ここでは、気候変動に関する最新の報告書(IPCC, 2001)を参考にしつつ、筆者のグループで取り組んでいる最近の成果を交えて紹介する。

6 気候変動、地球温暖化の現状と将来展望

エルニーニョやラニーニャ等数年スケールの現象から、氷期間氷期サイクル等数 10 万年単位の現象まで、気候システムには様々なスケールの変動が内在していると考えられているが、世界水危機にもっとも関連があるのは今後数十年スケールの気候変化であろう。特に、人間活動の影響を強く受けた地球温暖化は 21 世紀初頭以降の気候変化の大きな支配要因であると考えられている。化石燃料の消費による大気中の二酸化炭素量増大に伴う温暖化の他にも、人間起因のエアロゾル排出も地球規模の気候変動をもたらしているとされているし、都市化に伴う気候変化や大規模な土地被覆改変なども地域的な気候を変化させ、水資源賦存量を大きく変えてしまう恐れがあり、エアロゾルについては最新の「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」の第三次報告書(IPCC, 2001)では考慮されているが、将来の都市化の進展や土地利用の改変に関しては必ずしも将来の気候には考慮されていない

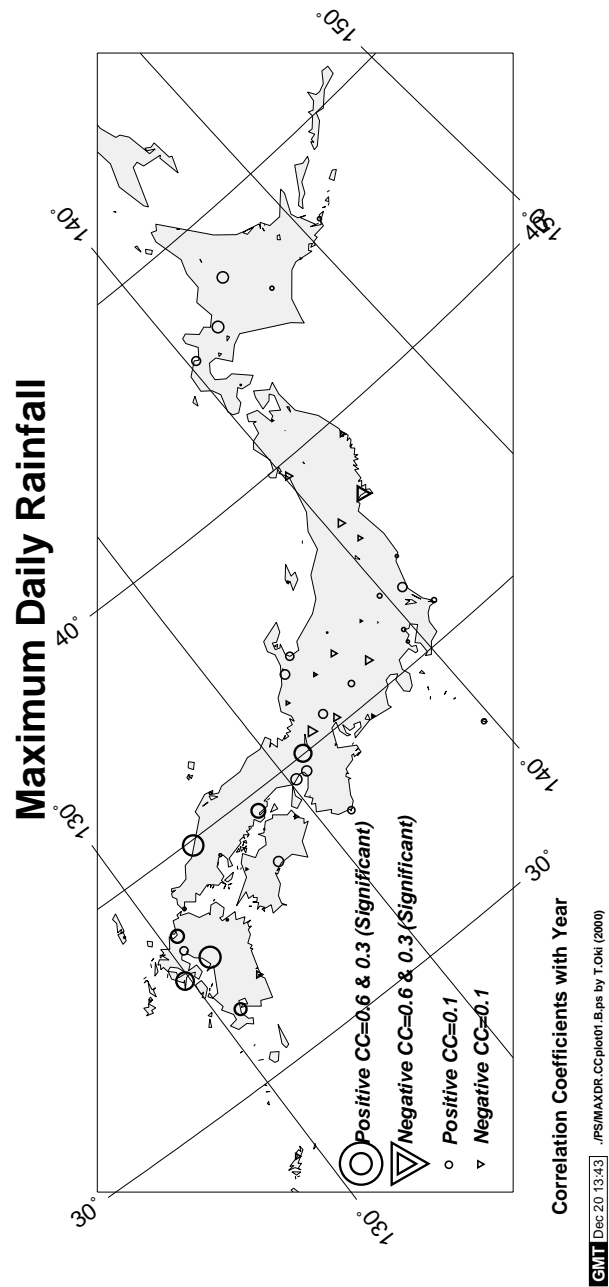


図 1: 年最大日降水量の 20 世紀におけるトレンド。 が増加、 が減少を示す。

点に注意が必要である。

気候システムの変動を表現した大気大循環モデル (GCM) の予測によると、世界の水危機に関連するグローバルな気候変動の主なものは次の通りである。

- 1990 年に比べて 2100 年には全球平均気温が 1.4～5.8 度程度上昇。
- 特に陸地での気温上昇が急速で、特に冬の北半球高緯度で顕著。
- 21 世紀の間全球平均降水量は増加。
- 21 世紀後半には北半球の中高緯度と南極で冬季降水量が増加。
- 低緯度陸上では増加する地域と減少する地域がある。
- 平均降水量が増大すると予測されている地域では降水量の年々変動が増大。
- 夏のアジアモンスーン降水量の変動の増加
- 北半球ではさらに積雪面積が減少、氷河の後退

こうした予測の妥当性は、すでに温暖化の影響が出ていると考えられる過去 100 年程度の変化傾向と比較することによってある程度検討できる。気温に関しては、すでに全球平均で 0.6 ± 0.2 度上昇し、特に 20 世紀の最後に上昇傾向が急激になっていて、GCM によるシミュレーションもよくこうした傾向を再現している。

しかしながら、降水量に関しては、サンプリング密度等観測上の問題のためか気温の様な急激な上昇は検知されておらず、いくつかの GCM による様々な温暖化ガスならびにエアロゾルの排出シナリオに対応する将来予測の結果にもばらつきが大きく、モデルによる予測結果の検討はまだ難しい状況であると感じられる。そもそも、現状の降水量の定量的な算定に関して、年降水量はなんとか合わせ込んでいる GCM もあるものの、季節進行や降水帯の正確な位置、まして年々変動や極値に関しては観測とそのまま対応付けられる精度で再現計算できるようになるには今しばらく研究開発が必要であろう。地域的に変動の激しい降水分布を再現できるだけの高空間解像度での温暖化数値実験にはまだまだ計算機リソースが大量に必要なことも、温暖化予測をそのまま水資源予測の基礎にはしにくい大きな理由となっている。ただし、水危機との関連で言えば、日本において、豪雨頻度が増加し、無降雨継続時間も長くなる傾向が探知されている。図-1 は旧建設省土木研究所がデジタル化した気象庁日降水量データに基づいて算定した年最大日降水量の長期傾向で、大きい () ほど 20 世紀により増大 (減少) したことを示している。西日本で極値が増大傾向にあることが分かる。また、図-2 は同じデータに基づいて算定した日雨量 1mm 以上の間隔の年平均値の長期傾向を同様に示している。太平洋側を中心として広い範囲で長期的に増大傾向にあり、渇水危険度が増す方向に変化していることが分かる。この様に過去の記録から学ぶことは重用であり、逆に、現在の水循環、水資源に関する記録をきちんと残しておくことは将来世代に対する我々の義務であると言える。

7 気候変動が世界水危機に及ぼす影響

温暖化がグローバルな水資源に及ぼす影響は主に次の通りである。

- 温度上昇の直接的影響
 - －融雪促進による河川流況パターンの変化

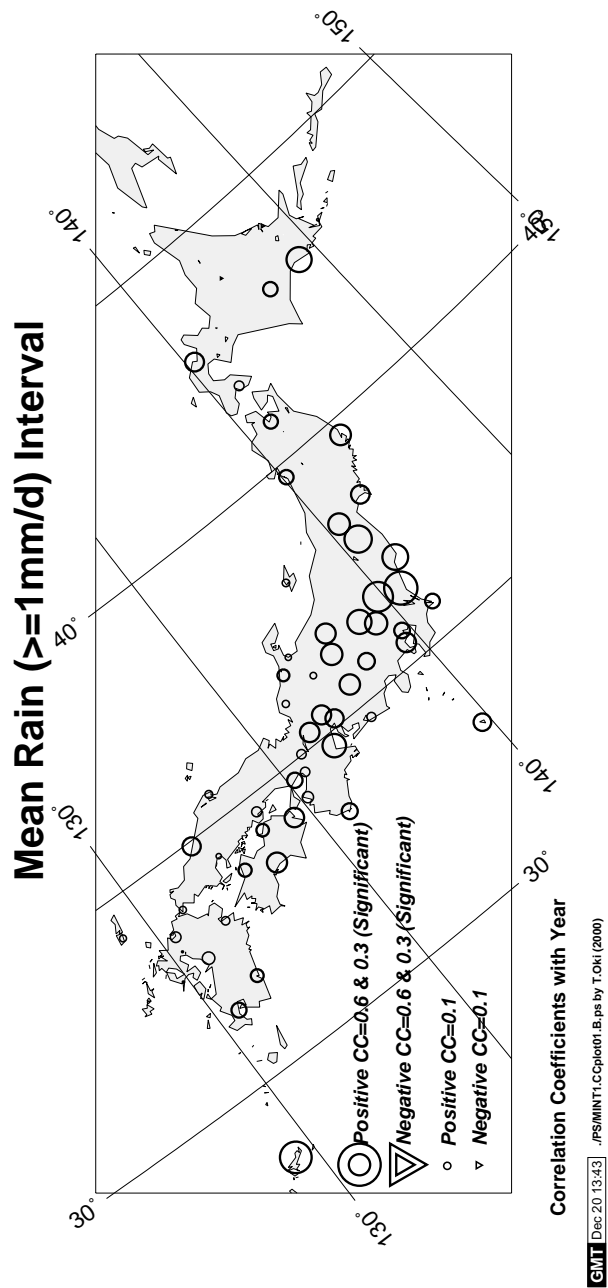


図 2: 日雨量 1mm 以上の降水日の間隔の 20 世紀におけるトレンド。 \bigcirc が増加、 ∇ が減少を示す。

Change of Annual River Discharge

Double CO₂ - current [$10^6 \text{ m}^3/\text{year}/0.5^\circ\text{grid}$]

2060 - 1990

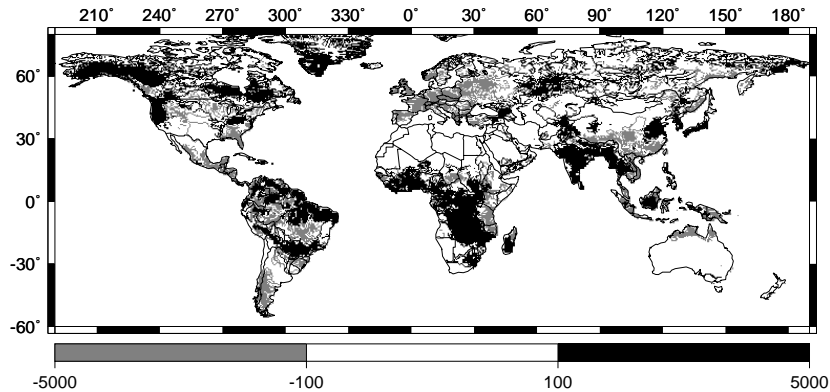


図 3: 温暖化によるグローバルな河川流量の増減。

- 氷河・氷床の融解に伴う河川流量の一時的な増加
- 農作物育成暦の変化による水需要期の変化
- 水需要原単位 (人口あたりの量) の増加
- 水温の変化 (上昇) に伴う水質の変化 (悪化)、生態系への影響
- 損失量 (蒸発散量) の増加
- 気候変動の間接的影響
 - 降雨変動パターン (豪雨・寡雨) の変化と、それに伴う河川の洪水流量、濁水流量の変化

このうち、量的にもっとも影響が大きくほぼ確実なのは中高緯度で融雪水が重要な水資源となっている地域であろう。日本のみならずアメリカに関しても温暖化が水資源に与える影響として積雪量の減少と冬季の流量の増加、夏季の土壌水分量や水資源賦存量の減少が深刻であると予想されている。

図-3 は、東京大学気候システム研究センターと国立環境研究所が共同で開発運用している GCM による温暖化実験の結果における 1990 年から 2060 年への年流出量の増減に基づき、河道網モデルを利用して年河川流量の増減を算定した結果である (Oki 2001)。グローバルな現状の水資源需給比算定結果に対して、水資源賦存量に関してはこの温暖化時の河川流量変化を加味し、水需要に関しては人口増加や経済発展に伴う水利用原単位の増加等を考慮して変化させて 2050 年頃の水資源需給比を推定した結果が図-4 である。この値が大きいほど、自然に利用可能な水資源賦存量に対する実際の取水量が大きく水ストレスが高い、ということを示している。水ストレスの高い地域は、1995 年現在の水ストレスの高い地域 (図略) 付近に分布していて、現在深刻な地域で水不足が深刻化する展望が得られて

いる。しかし、例えば中国北部黄河流域近傍では温暖化により若干の降水量、流出量の増加が算定されているため気候変動が無かった場合に比べると若干水ストレスは低く予想される結果となっている。逆に黒海西岸や北米フロリダ半島付近では温暖化により水ストレスが増大して深刻化が懸念される算定値が得られている。この温暖化シミュレーション結果は比較的高解像度（格子間隔約 100km）で毎日の降水量や気温等の気候因子を出力した点に特色があり、今後はこうした年総量でのアセスメントではなく、年々変動を考慮した月単位や週単位での豪雨や渇水のリスク変化を吟味していく研究が必要であると考えられる。また、Vorosmarty(2000)では河川流量は潜在的に全て水供給に利用可能であるという仮定でアセスメントが行なわれているが、Oki(2001)で示されている様に、大規模河川の上流での取水や水質悪化、社会資本未整備などによる上流からの河川流量の利用可能性の限界を考慮すると、当然のことながらより切迫した水需給状況が想定されるので、気候変動が世界の水資源に及ぼす影響といった自然科学的研究にも、社会科学的側面の知識ベースを取り込んでいかねばならない。

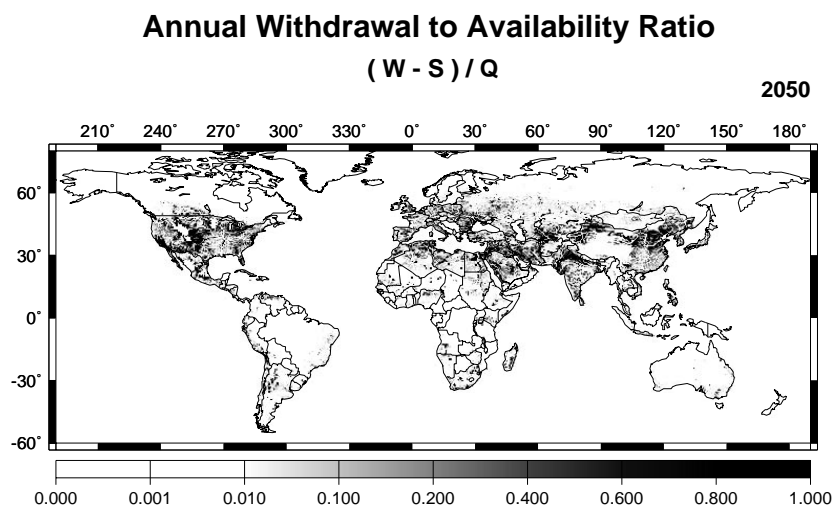


図 4: 1995 年のグローバルな水ストレス (利用可能量に対する取水量) 分布

8 世界の水危機と日本

地域によっては切迫した状況が懸念される世界の水資源の将来像に対し、日本は、大幅な人口増も見込めず、むしろ長期的には減少すると予測され、農業生産も長期減少傾向にあり、工業用水はリサイクル率の向上で消費量は横ばい状態であり、長期的に需要が大きく増大するとは考えられない。したがって、地球温暖化などにより極端な気候変動が生じて降水量が激減したりしない限り、日本の水資源は足りなくなることはないであろうと考

えられている。そういう意味では、日本にとっては地球温暖化に伴う日本付近の気候変動を精確に予想することこそが重要である。しかし、だからといって、現在危惧されている世界の水資源危機に目を向けなくても良いというわけにはいかない。その最大の理由は、日本の生活、産業、社会そのものが海外からの物資の輸入に大幅に頼っており、食糧であれ工業産品であれ、現地の水を使って作られた品物がないと日本社会は成り立たないためである。つまり、ものを輸入して国内で消費することは間接的に海外の水資源を消費していることなのである。この水の間接消費がどの地域のどのような水源にどの程度依存しているか、どの程度の潜在リスクが見込まれるか、ということは現在ほとんどわかっていない。水危機が顕在化する前に、そうした見えない水の流れを把握することとともに、グローバルな水資源状況を準実時間で監視するシステムを構築することが非常に重要である。

9 おわりに

この様に懸念される気候変動と世界の水危機問題に対し、学問的な取り組みが期待されるのは次の点である。

- 過去と現在に関して信頼のおけるグローバルな水循環情報を提供すること
- 集中豪雨の様な激しい大気に関する準実時間予測や、エルニーニョやラニーニャ等に伴う季節～数年スケールの気候の自然変動の予測に関する精度を向上すること
- 地球温暖化等の気候変化時における水循環の信頼のおける予測を提供すること
- どれだけの水が人間にとって現在利用可能であり将来それがどうなるのか、という点に関する定量的な推定
- 現在ならびに将来の水需要を満たす水供給を確保するためにはどのような施策を取れば良いのかという選択肢の提示
- 仮想的な水の輸出入や間接消費の実態把握と「水資源安全保障」の枠組みの提示

これらのうち、最初の3つは、従来の自然科学やエンジニアリングの枠組みで充分推進可能な課題である。しかし、後の3つに関しては、技術レベルに加えて人間行動や生活文化、社会の法制度や体制等の現状の的確な把握と将来予測が必要であり、多分野の学際的な連携なしには解決が不可能である。

参考文献

- IPCC , (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Oki, T. , Y. Agata, S. Kanae, T. Saruhashi, D. Yang, and K. Musiake (2001): Global Assessment of Current Water Resources using the Total Runoff Integrating Pathways.

Hydrol. Sci. J., 46, in print.

Shiklomanov, I. A. (1997): Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources and Water Availability in the World. Geneva (Switzerland): World Meteorological Organization.

Vorosmarty C. J. , P. Green, J. Salisbury, and R. B. Lammers (2000): Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, 289, 284-288.