

気候変動を考慮した グローバルな水資源需給の将来

Future Demand and Supply of Global Water Resources under Climatic Change

沖 大幹^{1,2,3}・安形 康^{2,3}・鼎 信次郎³・虫明 功臣³・猿橋 崇央⁴

Taikan Oki, Yasushi Agata, Shinjiro Kanae, Katumi Musiake, and Takao Saruhashi

¹ 総合地球環境学研究所 研究部 (〒 602-0878 京都市上京区丸太町通河原町西入高島町 335)

² 科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業

³ 東京大学生産技術研究所 人間・社会大部門 (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

⁴ (株) ニュージェック 東京本社 (〒 113-0024 東京都文京区西片 1-15-15)

要旨

現状と将来のグローバルな水資源需給に関して、陸面水文植生モデルとグローバルな河川流路網による水資源賦存量と、国別統計値から推計した総取水量とを全球 0.5 度グリッドで求め、アセスメントを行った。人口増加に伴う灌漑用水量の増加や、工業用水における水利用効率の向上も考慮して水需給の将来展望を行った結果、人口増加のみを考慮すると水資源需給比が 0.4 よりも大きく強い水ストレス下に置かれる人口は現在 (1995 年頃) に比べて 2050 年には 90% 増加するという推定結果が得られた。さらに温暖化の影響も考慮した場合には、強い水ストレス下の人口は 74% の増加に留まり、温暖化が生じない場合に比べてやや需給が緩和される試算となった。

Keywords: World Water Resources Assessment, Climatic Change, Global Water Balance

1 はじめに

多くの地球環境問題の根元には、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。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、さらに

- 人口の増加
- 生活レベルの向上
- 都市化の進展

等により今後しばらくは特に発展途上国に於いて水需給の更なる悪化が懸念される。人口の増加は食糧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。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かった。例えば世界水フォーラム

等に水資源需給の基礎資料を提供している Shiklomanov^[1] 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将来に関する世界水資源アセスメントがなされている。

これに対し、Vörösmarty 等^[2] では、カナダの気候モデルによる推定値に基づき、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 (需要量 / 水資源賦存量) 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。

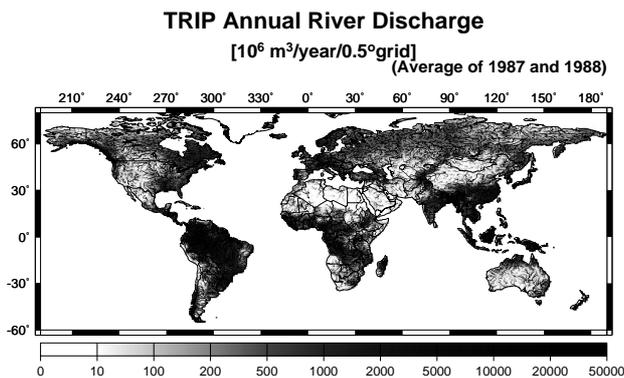


図-1 陸面水文植生モデルとグローバル河道流下網によって推定された現状の年河川流量分布。

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。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を見積もりや、信頼性の担保のためには不可欠であると考えられる。

そこで、本稿では、緯度経度 0.5 度の格子ごとに世界中の国々に関してグローバルな水資源需給の現状と 2050 年における将来展望を推定し、逼迫度や変化を調査した結果を報告する^[3]。

2 グローバルな水資源賦存量の現状

現状の水資源賦存量に関しては、全球土壌水分プロジェクト (GSWP; Global Soil Wetness Project)^[4]に於いて 1987-88 年に対し全球 1 度グリッドで陸面水文植生モデル (LSM; Land Surface Model) によって推定された流出量を、グローバルな河道網 (TRIP; Total Runoff Integrating Pathways)^[5]により河川流量に変換し、水資源賦存量だと見做した。日本では、全水資源取水量の 10%以上を地下水に依存しており、世界的にも特に都市域の生活用水や工業用水に関しては地下水への依存度が大きい。これに対し、LSM によって推定される流出量は、蒸発散せずに系外へ移動する水量、すなわち年単位の水収支で考えると降水量-蒸発散量に相当するので、潜在的な水資源賦存量とみなして良いものと考えられる。すなわち、地下水経由の水も最終的には河道に流出するものとして以下で算定した年河川流量が最大利用可能な水資源であると仮定した。

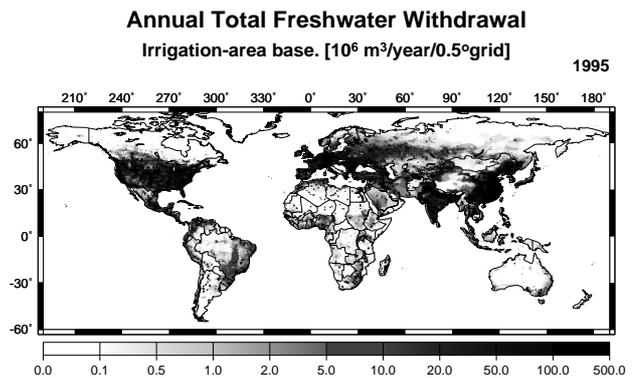


図-2 各国の取水量統計値と人口分布、灌漑農地面積分布とから、グローバルな地理情報システムを用いて推定した 1995 年の年間総取水量分布 ($10^6 \text{ m}^3/\text{y}/0.5^\circ \times 0.5^\circ \text{ grid box}$)

こうして得られた全球流出量データは、観測河川流量データと比較すると、

- LSM に与えられる“外力”としての降水量データが、疎らな雨量計密度に基づいて推定されている流域では年流量の推定精度が悪い、
- 高緯度でどの LSM も流出量を過小評価する傾向にある

等が明らかとなっていて^[6]、全球からの流出量も約 $30,000 \text{ km}^3$ とやや少な目の推定値となっている。このため、ここで示す結果はやや水ストレスが多目に推定されている可能性があるが、現状に対する推定結果を比較した結果によると既存の他の研究と概ね合致していることがわかっていて^[7]。

LSM によって推定された流出量を、グローバルな河道網 TRIP を用いて河川流量に変換し、年総量を算出した結果が図-1 である。基本的には雨量の多い熱帯域や大陸東岸、アジアモンスーン域等で流量も多いという推定値になっているが、上流からの流下により、例えばエジプトではナイル川に沿って利用可能な水が多い様子が示されている。

3 世界の水資源取水量分布の現状

水資源取水量 (withdrawal) のグローバルな分布推定にあたっては、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た。農業用水に関しても同様に、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。

国別の年間総取水量に関しては、国連や FAO (Food and Agriculture Organization) 等の機関が取りまとめた統計値に基づいたが、統計年次が異なるため、Shiklomanov^[8]に倣い、過去 40 年の大陸別総取水量評価結果に基づき、大陸ごとに 1970 年から 1995 年への取水量の変化は同様であったと仮定し、

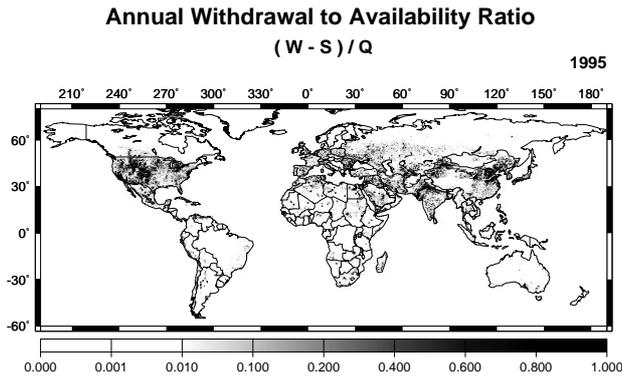


図-3 淡水化によって賄われている分を差し引いた正味の年取水量の、年水資源賦存量に対する割合で定義された渇水指標 R_{ws} の1995年に対するグローバル分布。

1995年の値に揃えた。これは総取水量に対して適用したため、生活用水、工業用水、農業用水の各部門間の構成比は統計が示された年次と変化していないと仮定したことになる。

国境に関してはESRI(Environmental Systems Research Institute)が作成したDCW(Digital Chart of the World)に基いて0.5度グリッド上のテンプレートを作成し、その後の国際情勢の変化を反映させるよう修正を加えた。

人口分布に関しては、CIESIN(Center for International Earth Science Information Network)により作成された2.5分グリッドデータを0.5度グリッドに集約して利用した。この際、0.5度グリッドでは海洋と判断される領域に、実際には全世界で2~3億人の人口が存在していたので、それらは近隣のグリッドに振り分けることを行った。

灌漑農地面積分布に関してはDöll等^[9]により推定された1995年に対するグリッドごとの灌漑農地面積データを利用した。これはFAOの国別データならびにFAOSTATデータベースから算出されていて、世界の灌漑農地面積の47%を占めるインド、中国、米国に関しては国単位ではなく州、あるいは郡単位の統計データに基づいて面積分布が推定されている。

こうして各種処理をして得られたデータに基づき、各国・各部門ごとに原単位を求めて算出された年総取水量分布が図-2である。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。

4 グローバルな水資源需給分布の現状

前節までで得られたグローバル分布を用いて、現状の水資源需給を評価した。ひとつの指標は、Falkenmark^[10]が提案した渇水指標 R_{ws} (water scarcity index) で、年取水量を W 、淡水化等によって賄われている年水資源量を S 、

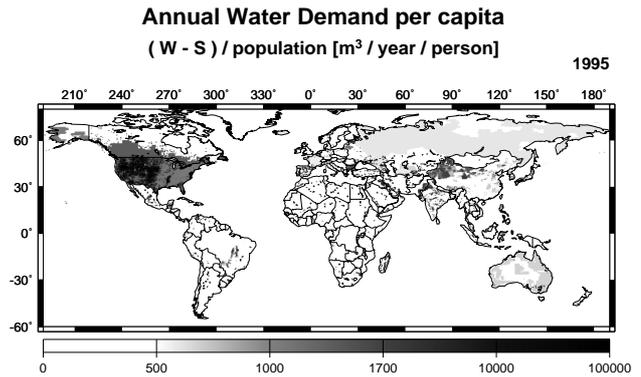


図-4 人口一人当たりの年取水量 $(W - S) / C$ $m^3/y/人$ の分布。

年水資源賦存量を Q として

$$R_{ws} = \frac{W - S}{Q} \quad (1)$$

と定義される。 R_{ws} の分布を図-3に示す。 R_{ws} に対しては

$R_{ws} < 0.1$	no water stress
$0.1 < R_{ws} < 0.2$	low water stress
$0.2 < R_{ws} < 0.4$	moderate water stress
$0.4 < R_{ws}$	high water stress

と判断される。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 $0.4 < R_{ws}$ 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、変動に対して脆弱で水ストレスがかかっている状態であるとされることになる。

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。仮に実際に利用可能な水資源量 Q_{real} を、その地点(格子内)からの流出量 R に加えて、上流からの流下量の和 ΣD_{up} のうち係数 α だけ利用可能であるとして、

$$Q_{real} = R + \alpha \Sigma D_{up} \quad (2)$$

と置いて考えると、後に示す取水量比(water withdrawal ratio)が0.4以下で、深刻な水ストレス下にはない、とみなせる人口が、 $\alpha = 1.0$ の場合と $\alpha = 0.0$ の場合とでは、前者では約40億人なのに対し、後者では約30億人と、大きく異なってくる。したがって、今後の水資源賦存量の算定では、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と考えられる。

Change of Annual River Discharge

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

2060 - 1990

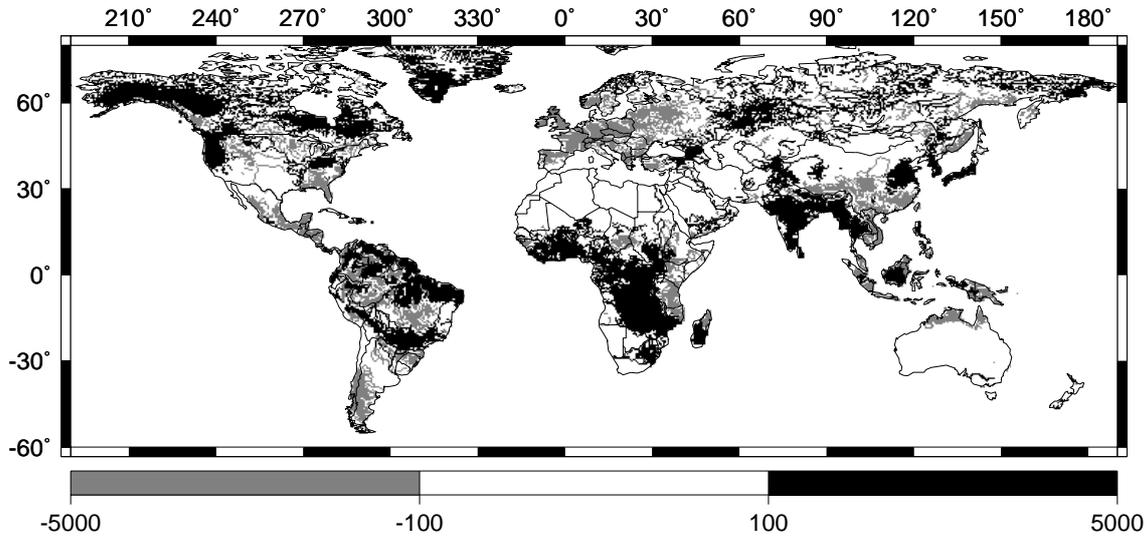


図-5 温暖化を考慮した2050年頃に於ける年河川流出量と現状との差 ($10^6 \text{ m}^3/\text{y}/0.5^\circ \times 0.5^\circ \text{ grid box}$).

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、すなわち人口を C として Q/C を算出した結果も、図-3 と概ね同様のグローバル分布となっていた。水ストレスが高いと判断される領域が $R_{ws} = (W-S)/Q$ と Q/C とで同様に抽出されるということは、 $(W-S)/C$ 、すなわち一人当たりの取水量がほぼグローバルに一定であるという事を示唆するが、実際には図-4 の様になっていた。すなわち、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、他の地域ではほぼ同程度であることがわかった。特に多い地域では年間一人当たり $1,000 \text{ m}^3$ 以上の取水量となっており、これは、生活用水や工業用水、あるいは自分達で消費する農業用水のみならず、他地域へ出荷する農業生産物用であると考えられ、ある意味では、図-4 は、仮想水^[11]の起源を示しているとも言える。ただし、中国西部に関しては、農業用水の取水量分布を求める際に、穀物種類や農業様式の差異を考慮せずに各国内では一様に灌漑地面積当たりの取水量を決定した影響が現れている可能性があり、今後のさらなる検討が必要である。

5 グローバルな水資源需給の将来推定

グローバルな水資源需給の将来展望を考える場合には、

- 長期的な気候の変動に伴う水供給量の変化
- 人口の増減や社会経済的变化による取水量の変化

の両方を考える必要がある。

自然系の水資源賦存量の将来推定に関しては、東京大学気候システム研究センターならびに国立環境研究所が開

発している大気大循環モデル(GCM)による二酸化炭素倍増時の数値実験結果を利用した。これはほぼ2050年頃の状況に対応すると考えられる。気候予測結果を水資源賦存量推定に応用する方法としては、

- (i) GCMの河川流出量予測値をそのまま利用する
- (ii) GCMの降水量や気温等の予測値を陸面水文植生モデルなどに与えて、水(+エネルギー)収支を算定して利用する
- (iii) GCMの河川流出量算定値に関して現状に対するシミュレーションと将来に対するシミュレーションの変化を、現状に対する信頼のおける河川流出量算定値に対して勘案して利用する
- (iv) 同様にGCM内の将来に対する変化量を現状の降水量や気温に対して勘案し、オフラインシミュレーションによって将来の河川流出量を算定して利用する

等が考えられる。現状では、GCMによる現在の気候条件に対するシミュレーションが降水量の絶対値に関しては必ずしも完全ではないので、ここでは(iii)に従い、GCMにおける河川流出量の現状シミュレーションと将来予測の差を、観測値に基づいて算定した河川流出量に上乗せすることによって将来の河川流出量とし、TRIPを利用して将来の河川流量を求めた。

温暖化時における年間水資源賦存量の現状との差を示したのが図-5である。白黒のため増減だけを濃淡で示しているが、この温暖化シミュレーション結果では、中国北部、インド、インド-パキスタン国境付近～アラブ海方面にかけて流量が増加する傾向にあり、水資源需給的には緩

和が期待できる結果となっている。一方、ヨーロッパからロシア東部の穀倉地帯では全面的に減少傾向にあり、農作物への影響が懸念される。

一方で、需要側に関しては、次の様なシナリオを設定した。まず、人口に関しては国連の中位推計にしたがって増加すること、また、農業用水取水量は人口増加に比例して増加するとした。これは、過去1960年頃から1990年にかけての灌漑面積と人口増加がほぼ対応していることに依拠して、今後さらにきめ細かく推計する必要がある点である。また、単位灌漑面積当たりの灌漑取水量も変化しないと仮定した。

生活用水、工業用水の水需要原単位の増加については、Raskin等^[12]に基づき高橋等^[13]にまとめられた将来推計を利用した。工業用水に関しては高橋等^[13]の水使用効率改善係数に加えて、GDPの増加に伴い工業用水取水量が伸びることを考慮した。

こうして得られた将来推計に関して、前節と同様に渇水指標などを求めたが、得られたグローバル分布は図-3と大きく異なることはなかった。それは、基本的に現在水ストレスがかかっている地域で、将来的により深刻な状況が想定される、ということではあるが、基本的には過去のトレンドに基づいて将来推計を行った本研究の限界でもある。

表-1 人口増加のみ、気候変動を考慮した場合、さらに人口当たりの取水量原単位の増加を考慮した場合の、2050年の世界における渇水指標ごとの推計人口(単位: 百万人)。

R_{ws}	人口増加	+気候変動	+原単位増加
- 0.1	4,303	4,354	4,194
0.1 - 0.2	943	963	1,004
0.2 - 0.3	532	506	559
0.3 - 0.4	376	420	412
0.4 -	2,663	2,434	2,510

しかしながら、2050年の世界人口のうちの何人がどの程度の R_{ws} クラスに分類される地域に住むことになるかを、人口増加のみを考慮した場合、気候変動も考慮した場合、さらに取水量原単位の増加も考慮した場合を比べてみると(表-1)、 $R_{ws} > 0.4$ の高い水ストレスにさらされる人口は、現状に対する推定値14億人に対して、人口増加のみを考慮すると2050年には90%増加するのに対し、気候変動を考慮すると現状に比べて74%の増加に留まると推定される。さらに取水量原単位の増加も考慮すると、79%の増加となり、将来の水需給の逼迫を考える場合には第一義的にはやはり人口増加が問題であることがわかる。

Vörösmarty等^[2]も人口増加が主要因であるという結論的には同様であるが、彼らの結果では気候変動はグローバルな水需給をより逼迫させているのに対し、本研究で用いた温暖化時の水循環予測結果では、現状で水需給が逼迫している領域で降水量が増加し、グローバルに見ても降水

量は増加しており、流量も増加して水需給を緩和させる結果となっている。

IPCCの第3次レポート^[14]によると、21世紀の間に全球平均降水量は増加するだろうとされており、おそらくは全体としてみると地球温暖化の影響で水資源需給は緩和される方向にあると思われるが、個々の水問題は地域的であり、例えば中国でも、平均して降水量が増加しても、それが北部の黄河流域であるのか、南部地域であるのかで水需給に及ぼす影響は大きく異なってくる。したがって、そうしたきめ細かい空間的な違いをきちんと表現できるような数値モデルの解像度で、将来の水循環がどう変化するのかを的確に推計できる様にすることが極めて重要であると考えられる。

6 おわりに

全球0.5度の格子ごとに現状と将来の水資源賦存量と取水量を算定、推計し、水資源需給に関するアセスメントを行った。将来の水需給に関しては、人口増加の影響がもつとも支配的で、現状でも水ストレスが高い地域、ならびに途上国で深刻であり、本研究で利用した温暖化時の水循環予測結果によると、地球温暖化によって全体としては水循環が活発となり、水需給が緩和されるという推計結果となった。しかし、温暖化による水循環の変化は、年降水量や年河川水量等で考えてプラスとなっても、極値の増大や降水頻度の変化などを通じて必ずしも水資源管理にとっては望ましい変化であるとは限らず、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。また、人口増加や都市への集中による水不足が主に途上国で懸念されるのに対し、気候変動の影響は先進国にも等しく及ぶため、よりきめの細かい予測が不可欠であると考えられる。また、ここでは量にのみ着目したが、水質劣化による利用可能な水資源量の不足を今後は考慮することが必要であるし、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ると考えられる。そうした研究で成果をあげ、国際的な場で日本からも情報発信ができる様になりたいと考えている。

謝辞

貴重なデータを提供して下さった各国際機関、Kassel大学、東京大学気候システム研究センターに感謝いたします。また、本研究は、科学技術振興事業団戦略的創造研究推進事業『人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル』(代表: 沖大幹)、科学技術振興調整費先導的研究等の推進『21世紀のアジアの水資源変動予測』(代表: 鬼頭昭雄、気象庁

気象研究所)、ならびに総合地球環境学研究所平成14年度プロジェクト『地球環境情報ライブラリと世界モデルとを統合した水危機管理システムの構築』(代表: 沖大幹)の成果の一部である。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] I. A. Shiklomanov. *Assessment of Water Resources and Water Availability in the World*. UNESCO, Paris, France, 2000.
- [2] C. J. Vörösmarty, P. Green, J. Salisbury, and R. B. Lammers. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289:284–288, 2000.
- [3] 猿橋 崇央. 全球河川流路網モデルを用いた世界水資源評価. Master's thesis, 東京大学大学院工学系研究科, 3月 2001.
- [4] P. A. Dirmeyer, A. J. Dolman, and N. Sato. The pilot phase of the Global Soil Wetness Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80:851–878, 1999.
- [5] T. Oki and Y. C. Sud. Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) – A global river channel network. *Earth Interactions*, 2, 1998. [Available on-line at <http://EarthInteractions.org/>].
- [6] T. Oki, T. Nishimura, and P. Dirmeyer. Assessment of land surface models by runoff in major river basins of the globe using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP). *J. Meteor. Soc. Japan*, 77:235–255, 1999.
- [7] Taikan Oki, Yasushi Agata, Shinjiro Kanae, Takao Saruhashi, Dawen Yang, and K. Musiake. Global assessment of current water resources using the total runoff integrating pathways. *Hydrolog. Sci. J.*, 46:1159–1171, 2001.
- [8] I. A. Shiklomanov. *World Water Resources: Modern Assessment and Outlook for the 21st Century*. IHP/UNESCO, Paris, France, 2000.
- [9] P. Döll and S. Siebert. A digital global map of irrigated areas. Report a9901, Center for Environmental System Research, University of Kassel, 1999.
- [10] M. Falkenmark, J. Lundqvist, and C. Widstrand. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches; Aspects of vulnerability in semi-arid development. *Natural Resources Forum*, 14(11):258–267, 1989.
- [11] 三宅 基文, 沖 大幹, and 虫明 功臣. 日本を中心とした仮想水の輸出入. 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, 2002.
- [12] P. Raskin, E. Hansen, and R. Mongolis. Water and sustainability: Global outlook, 1995.
- [13] 高橋 潔, 松岡 譲, 島田 洋子, and 嶋村 亮. 気候変動下での地球規模の水資源評価と渇水対策戦略評価のためのモデル開発. 第8回地球環境シンポジウム講演集, 8:175–180, 2000.
- [14] J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson (eds.). *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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.

Abstract

Current and future world water resources are assessed using land surface models associated with Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) and country-base statistics in 0.5 degree by 0.5 degree longitude/latitude resolution. With the increase of population only, future population under strong water scarcity, with water scarcity index is larger than 0.4, will increase by 90% in 2050 compared to the current situation in 1995. Consideration of the climatic change due to the global warming will relax this situation, and only 74% will be under the strong water scarcity according to the future projection used in this study.

(第6回水資源に関するシンポジウム論文集、2002年8月)