

1. 地球温暖化による世界の水資源影響評価とその適応策に関する一考察

山本 隆広^{1*}・花崎 直太¹・高橋 潔²・肱岡 靖明¹・申 龍熙²

¹国立環境研究所 社会環境システム研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

²国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

* E-mail: yamamoto.takahiro@nies.go.jp

従来, 地球温暖化による世界の水資源への影響の評価では年取水量と年河川流量の比で定義される年単位の水逼迫指標が広く用いられてきた. 近年, 水需給の季節性を考慮した水逼迫指標が提案され適用が始められている. 本研究では水利用量の多くを占める灌漑の水需要量を計算するために, 地球温暖化の影響によって農事歴がどう変化するかを推定した. 同時に, 貯水池による水の貯留が水需給の季節性に及ぼす影響の評価を行った. さらに, 地球温暖化による将来気候において悪化した水逼迫を現在気候の水逼迫と同程度に軽減するにはどこにどれくらいの貯水容量が必要かを定量的に示した. その結果, 世界の総貯水容量が新たに29~41 km³程度必要だということが示された.

Key Words : climate change, water resources, water scarcity index, reservoir, adaptation

1. はじめに

地球温暖化による水資源の影響評価が行われてきた¹⁾. 既往の多くの研究では年河川流量に対する年取水量の比で定義される年単位の水逼迫指標 (Withdrawal-to-Water Resources ratio. 以下, *WWR*という) を用いて水資源の温暖化影響評価が行われてきた¹⁾³⁾. 地球温暖化により高緯度帯を中心として多くの地域で年平均流出量が増えることが指摘されているが²⁾⁴⁾, *WWR*に従うと年平均流出量が増える地域では基本的に水逼迫が軽減する. では実際に年平均流出量が増えると水逼迫が軽減されるだろうか? 近年, 年単位未満の時間スケールの水文現象や人間活動を統合して表現することができる全球水資源モデルが開発されてきている⁵⁾⁶⁾. Hanasaki et al.⁶⁾は全球水資源モデルを用いて計算できる日単位の水需要量の積算値に対する日単位の取水量の積算値の比で定義される水逼迫指標 (Cumulative Withdrawal-to-Demand ratio. 以下, *CWD*という) を提案した. この指標を使えば, 必要な時に必要な量の水資源があるかを評価することができる. 山本ら⁷⁾は大規模貯水池モデル, 環境用水モデルなどを無効にするなど機能を限定した全球水資源モデルを利用して温暖化時の世界の*CWD*の空間分布を推定し, 年平均流出量が増える地域において必ずしも水逼迫が軽減されるとはいえないことを指摘した⁷⁾. しかし, 山本ら⁷⁾の

研究は簡便のため全球水資源モデルに人間活動の影響が十分に考慮されていなかった. 現実問題として, 水資源の影響評価は人間活動と密接に関係している.

本研究ではより現実的な世界の水資源の影響を評価するために, 山本ら⁷⁾で考慮されていなかった大規模貯水池モデル, 河川の自然環境を維持するために必要な流量を計算する環境用水モデルを有効にして, 地球温暖化による農事歴の変化, 二期作も考慮した水資源の影響を評価した. さらに, 適応策検討につなげるため, 理想的な貯水池である中規模貯水池¹⁰⁾ (第2章 (2) で詳述する) を全球水資源モデルに導入した. 温暖化によって悪化した季節的な水需給の逼迫によって低下した*CWD*を現在気候のそれと同程度にすることを適応策と定義し, その中規模貯水池の容量を推定した.

2. 温暖化水資源影響評価の方法

(1) 全球水資源モデルH08

本研究の目的を達成するために次の2つの特徴を有する水資源モデルを用いる必要がある. 第一に, 水需給を推定するために自然水循環だけでなく人間活動の影響も考慮する機能を有することである. 第二に, 水需給の季節性を表現するために年単位未満の水利用量と水需要量の計算を行う機能を有することである. 本研究では上述

表-1 本研究で行ったシミュレーションの一覧

	CTRL	OCL	CCLM
年代	1960-1989 年	2070-2099 年	2070-2099 年
気象データ (気温, 相対湿度, 気圧, 風速, 下向き短波放射, 下向き長波放射, 降水)	GSWP2 ⁹⁾	MIROC3.2medres MRI-CGCM2.3.2 GFDL-CM2.1 CSIRO-MK3.0 気温, 降水, 長波放射のみ バイアス補正を考慮 ¹¹⁾	MIROC3.2medres MRI-CGCM2.3.2 GFDL-CM2.1 CSIRO-MK3.0 気温, 降水, 長波放射のみ バイアス補正を考慮 ¹¹⁾
作物面積	1990 年頃で固定 ¹²⁾	1990 年頃で固定 ¹²⁾	1990 年頃で固定 ¹²⁾
灌漑面積	1990 年頃で固定 ¹³⁾	1990 年頃で固定 ¹³⁾	1990 年頃で固定 ¹³⁾
作付け回数	一期作/二期作	一期作/二期作	一期作/二期作
大規模貯水池	考慮あり ¹⁴⁾	考慮あり ¹⁴⁾	考慮あり ¹⁴⁾
中規模貯水池	考慮なし	考慮なし	考慮あり ¹⁰⁾ ($\alpha=10^4, 10^3, 10^2, 2 \times 10^2, 3 \times 10^3$)
農業用水の需要	H08 内部で計算	H08 内部で計算	H08 内部で計算
生活用水の需要	1990 年頃で固定	1990 年頃で固定	1990 年頃で固定
工業用水の需要	1990 年頃で固定	1990 年頃で固定	1990 年頃で固定

の機能を有し、日単位で水利用量と水需要量の計算を行うことのできる全球水資源モデルH08を用いた⁹⁾。本研究で用いたモデル構成は基本的に山本ら⁹⁾と同様であるが、山本らが利用した陸面過程モデル、河川モデル、取水モデル、作物成長モデルに加えて、本研究では大規模貯水池モデルと環境用水モデルも利用した。さらに、山本ら⁹⁾は将来気候の農事歴を1990年頃で固定するとともに一期作のみ考慮していたが、本研究では地球温暖化による農事歴の変化を推定するとともに、二期作が可能な地域は二期作も考慮した。二期目の栽培は一期目の栽培の期間以外で行い、一期目の収穫日と二期目の作付け日は15日以上空けるものとする。この条件で一期作以外に収穫できる場合、二期作可能と判断した。本研究で用いたH08はHanasaki et al.⁹⁾や山本ら⁹⁾に詳しいが、読者の便宜のために概略を付録で紹介した。温暖化実験の気象データも山本らに詳しいが、同様に付録で紹介した。但し、用いた気候モデルはCMIP3のSRES A2シナリオの4つの気候モデルであるMIROC3.2medres, MRI-CGCM2.3.2, GFDL-CM2.1, CSIRO MK3.0である。SRES A2シナリオを用いた理由は他のSRESシナリオと比べて地球温暖化の傾向が顕著だからである。H08に用いた気象データと地理データなどは表-1に示した。

(2) 季節性を考慮した水逼迫指標

第1章でCWDの定義を述べたが本研究において重要な指標であるため、Hanasaki et al.⁹⁾を参考に本節ではCWDを詳しく説明する。CWDは次式で定義される。

CWD

$$= \sum_{\text{year}} \sum_{\text{DOY}=1}^{365} w_{\text{year}, \text{DOY}} / \sum_{\text{year}} \sum_{\text{DOY}=1}^{365} d_{\text{year}, \text{DOY}} \quad (1)$$

ここで、yearは西暦を、DOYは1月1日を起算日とした積算日数で最大が365日、 $w_{\text{year}, \text{DOY}}$ は計算日取水量、 $d_{\text{year}, \text{DOY}}$ は計算日水需要量である。日取水量は日水需要量より大きくならない($w_{\text{year}, \text{DOY}} \leq d_{\text{year}, \text{DOY}}$)。水需要が河川流量より高い期間が生じると水需要分だけ河川から水が取水できないため水不足が生じる。この時、 $w_{\text{year}, \text{DOY}} < d_{\text{year}, \text{DOY}}$ になるため、水不足が生じるとCWDの値が小さくなる。WWRの水ストレス分類と対応するように、 $CWD < 0.5$ で高い水ストレス、 $0.5 \leq CWD < 0.8$ で中程度の水ストレス、 $0.8 \leq CWD \leq 1$ で低い水ストレスと定義されている。砂漠のように人口密度が低い地域において水逼迫指標を算出したとしても、その指標の必要性は低く、さらにその指標の値が安定しない。本研究では人口密度が1人/km²以下の地域を解析から除外した。

(3) 中規模貯水池による適応策

本研究では、地球温暖化の適応策を「将来気候のCWDを現在気候のCWDと同程度に保つための方法」と定義する。適応策の一つに流出量(河川水)を新たに建設した貯水池に貯留し、必要な時に取水を行う方法がある。年単位の指標であるWWRは年水利用量と年河川流量の比で表現されるため、河川流量の季節性を低減する貯水池は基本的に指標に影響を与えない。しかし、水需給の季節性の変化を考慮できるCWDは日取水量の積算値と日水需要量の積算値の比であるために、河川流量が低水時に水を供給する貯水池導入の効果が顕著に現れる。

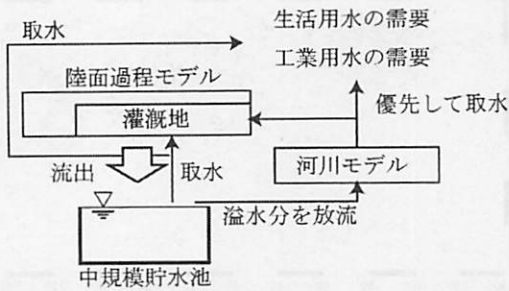


図-1 中規模貯水池の概念図。

本研究では適応策として新たに建設する貯水池として中規模貯水池モデル¹⁰⁾をH08に導入した。中規模貯水池モデルはもともと中規模の容量 (3.0×10^3 から 1 km^3) をもつ貯水池をモデル化するために構築されたものだが、本研究では水資源用途として理想的な貯水池であること、そして簡単なモデル構造でH08に導入しやすいという理由により中規模貯水池モデルを利用した。本研究では中規模貯水池にため池のような 1 km^3 以下の貯留容量を持つ小規模貯水池も含める。図-1に中規模貯水池の概念図、以下にその図に従って中規模貯水池のモデル構造を説明する。陸面過程モデルから算出された流出量はいったん中規模貯水池に貯まる。中規模貯水池が水で満たされ、溢れた分が河川に流入する。各グリッドにおいて生活用水、工業用水及び農業用水の水需要が生じると、まず河川から取水されるが、それでも需要が満たされなければ中規模貯水池から取水される。この中規模貯水池は陸域のすべてのグリッドに配置される。

3. 数値実験

表-1に示すように本研究では大きく分けて3つの数値実験を行った。まず、H08に現在気候の気象データ(GSWP2)を与えて、1986から1995年までの10年間のシミュレーションを行った。このシミュレーションをCTRLシミュレーションと呼ぶ。CTRLシミュレーション(すなわち過去の再現シミュレーション)の流出量や灌漑水需要量などの結果の検証は既に行われている^{9), 10)}。紙面上の関係から詳細はそちらを参照されたい。

次に、付録で示した式(2)、(3)及び(4)を使って将来気象データを作成し、H08に入力してシミュレーションを行った。期間は今世紀中で地球温暖化が顕著であると考えられている2070から2099年の30年間である。SRES A2シナリオを用いた理由も上記と同様である。このシミュレーションをCCLシミュレーションと呼ぶ。本研究ではCTRLシミュレーションとCCLシミュレーションの結果を比較することで、温暖化による世界の水資源の影響を評価した。

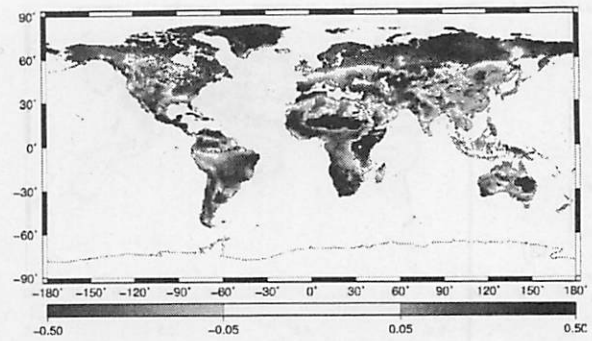


図-2 現在気候に対する将来気候の年平均流出量の変化率。

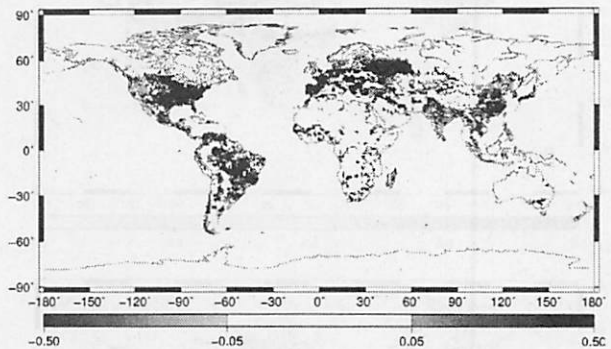


図-3 現在気候に対する将来気候の年平均灌漑水需要量の変化率。

最後に、適応策を検討するための数値実験を行った。本研究では、将来気候で減少したCWDを現在気候と同程度にするために必要な中規模貯水池の容量を以下のように推定した。まず、グリッド毎に将来気候の年平均流出量に係数(これ以降、この係数を α という)を乗じた容量の中規模貯水池をH08に導入した。本研究では $\alpha = 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 2 \times 10^{-2}, 3 \times 10^{-2}$ の5通りの中規模貯水池をH08に導入し、温暖化シミュレーションを行った。次に、グリッド毎に得られた5通りのCWDのうち、現在気候のCWDより大きくなる最小の α を推定することで、適応策に必要な中規模貯水池の貯留量の全球グリッドデータを推定した。このシミュレーションをCCLMシミュレーションと呼ぶ。

4. 結果と考察

(1) 水資源の影響評価

図-2に現在気候(1960-1989年)に対する将来気候(2070-2099年)の年平均流出量の変化率の空間分布を示した。カナダやロシアなどの高緯度帯などで年平均流出量が増加しており、年平均流出量の増減傾向は既往の研究とおおよそ一致している²⁾。

次に、灌漑水需要量について考える。現在気候と将来気候の灌漑水需要量はそれぞれ2897と3423 km^3/y であっ

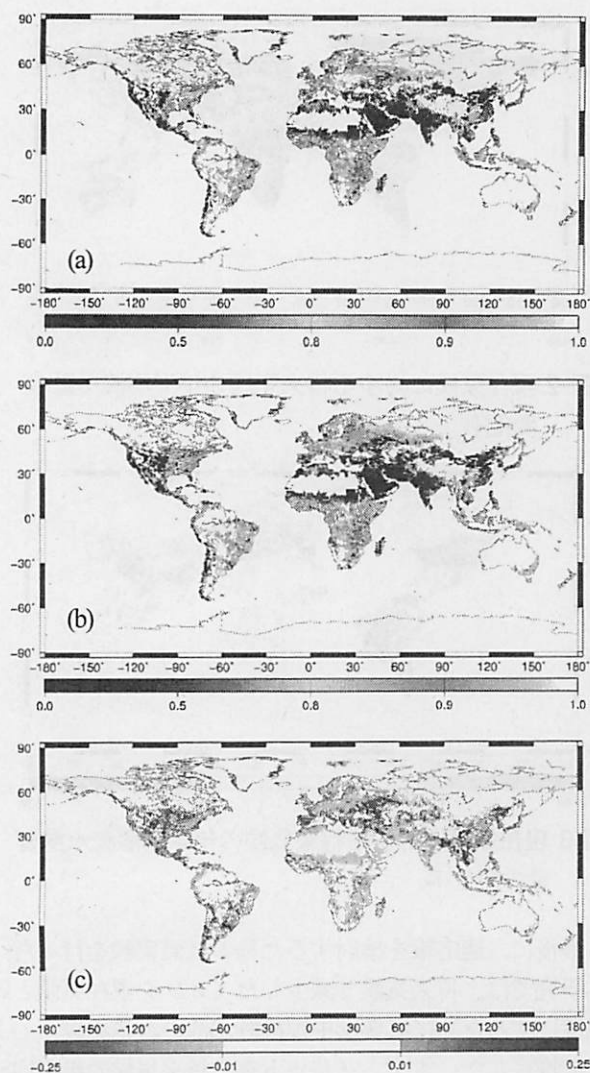


図-4 現在気候と将来気候の CWD. (a)は現在気候の CWD を, (b)は将来気候の CWD を示す. (c)は現在気候と将来気候の CWD の差を示した.

た. これは4つの気候モデルを用いた場合の平均値である. 変化率で考えると, 灌漑水需要量は地球温暖化の影響によって 18.2 %増加した. 農事歴を 1990 年頃で固定し, 一期作のみを考えていた山本ら⁹⁾の現在気候と将来気候の灌漑水需要量は 2213, 2490 km³/y であり, その変化率は 12.5 %である. この変化率の違いを調べるために図-3 に現在気候に対する将来気候の灌漑水需要量の変化率の空間分布を示した. この図は Döll and Siebert¹³⁾の全球灌漑地マップのほとんどの灌漑地で灌漑水需要が増加したことを示している. 図-3 より, この変化率が高い地域はアメリカの東部, ヨーロッパ, 中国の東部などであった. 山本ら⁹⁾と比較すると, 本研究はこれらの地域で灌漑水需要量の変化率が高かった.

図-4 に将来気候と現在気候の CWD の空間分布及び将来気候と現在気候の CWD の差を示した. CWD の値が小さい地域ほどより高い水ストレス地域であることを示している. 現在気候に比べて将来気候においてアメリカ,

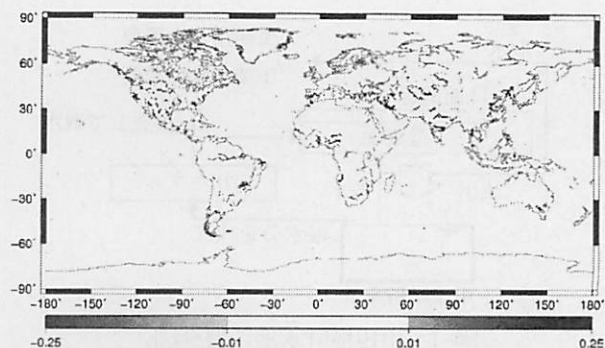


図-5 大規模貯水池の有無による現在気候の CWD の差

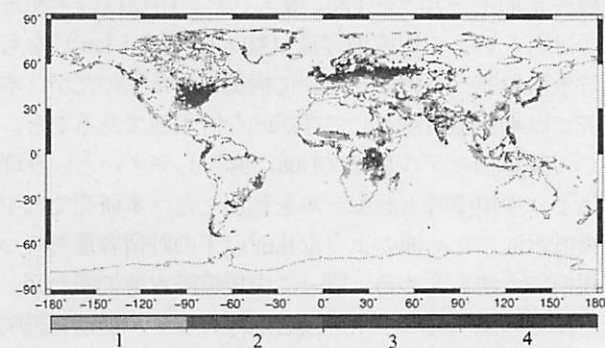


図-6 年平均流出量が増えたにもかかわらず水ストレスが増加した地域. 数字は 4 つの気候モデルのうち何個の気候モデルでそれに該当しているかを示したものである.

ヨーロッパ, 中国の北部で水逼迫が悪化していることが分かった. これらの地域は灌漑水需要量の変化率が大きかった地域とほぼ一致した. CWD<0.5 の高い水ストレスを有するグリッドの人口を数えることで, 現在気候 (1960-1989 年) の高い水ストレス人口は約 18.0 億人, 将来気候 (2070-2099 年) のそれは 19.5±0.9 億人と推定された. 但し, 将来気候 (2070-2099 年) の世界人口を 1990 年頃で固定している. また, ±の数字は本研究で用いた 4 つの気候モデルの出力の場合の標準偏差を示す. SRES A2 シナリオの人口増加を考慮すると高い水ストレス人口は 56.6±2.4 億人と推定された. 既往の研究においても気候システムの変化よりも社会経済システムの変化 (人口増加) が水ストレス人口に影響を与えていることが指摘されている¹⁷⁾.

本研究が山本ら⁹⁾の研究と大きく異なる点の 1 つに大規模貯水池モデルを H08 に導入したことがある. 大規模貯水池は大河川に建設され, その下流のグリッドの水逼迫を軽減する効果を持つ. CTRL シミュレーションの計算条件で大規模ダムを考慮しない場合のシミュレーションを行い, それらの CWD の差を調べた (図-5). 図-5 より大規模貯水池が多いアメリカにおいて水逼迫の軽減効果が高かった. また, 比較的大規模貯水池の多いイ

ンドや中国の北部においても水逼迫の軽減効果があった。しかし、一部の地域で水逼迫が悪化している地域もある。流下による時間遅れにより、上流での貯水池操作が下流の水需要と不整合を起こしている可能性が考えられる。

図-6 に年平均流出量が増えたにも関わらず、CWD が減少する地域を示した。但し、数字は4つの気候モデルのうち何個の気候モデルがそれに該当するかを示したものである。年流出量が増えた地域は4つの気候モデルによる結果を平均的に考えると陸域の45%で、その内の60%の地域で水ストレスが増加した。CWDを用いることで年平均流出量が増えても必ずしも水逼迫が軽減するとは限らないことが示された。

(2) 中規模貯水池による適応策

CWDで評価することで将来気候において悪化した水逼迫を現在気候のそれと同程度に軽減するためにどうすればよいだろうか？本研究では水資源用途として理想的な中規模貯水池¹⁰⁾を陸域の各グリッドに導入したシミュレーション（OCLMシミュレーション）を行った。世界一律に $\alpha=10^4, 10^3, 10^2, 2 \times 10^2, 3 \times 10^2$ とした場合の中規模貯水池の総容量はそれぞれ4, 42, 425, 851, 1277 km³となった。これらの中規模貯水池の容量の空間分布は流出量と対応するため、相対的にサハラ砂漠、アメリカ西部などで低く、南米北部、東南アジア、アフリカ大陸の中部で高くなる傾向がある。この5つの α から適応策を満たす α をグリッド毎に推定した。その結果、適応策として必要な中規模貯水池の総容量は4つの気候モデルを用いることで29から41 km³と推定された。現在の世界の大規模貯水池の総貯水容量が7000 km³程度¹⁶⁾であることを考えると新たに追加された中規模貯水池の総容量は相対的に小さい。ただし、今は水資源用途として理想的な貯水池を検討していることに注意が必要である。具体的には、中規模貯水池の湖面からの蒸発は無視している。実際の貯水池は蒸発のように貯水池の貯留に関する損失があり、そうした損失量を考慮すると現実には29から41 km³以上の貯水容量が必要である。さらに、世界のダムの総貯水容量には水の貯留目的だけでなく、平時は貯水量をできるだけ下げることで効果を発揮する洪水防御や水資源以外に平時にもできるだけ貯留を行うことで効果を発揮する水力発電が含まれている。多目的で貯水池を運用している場合は少なくない¹⁷⁾

図-7に推定された α の空間分布を、図-8に推定された中規模貯水池の容量の空間分布を示した。これらの図より、世界の多くの地域で年平均流出量の1%以下の中規模貯水池容量の追加で将来気候の水逼迫が現在気候のそれと同程度に軽減されていることが分かる。

Bartle¹⁸⁾はアフリカの新規貯水池建設のポテンシャルが高いと報告しているが、本研究では相対的に新たな中規

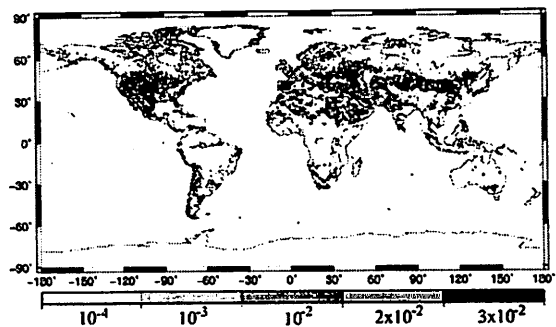


図-7 最適な α の空間分布。

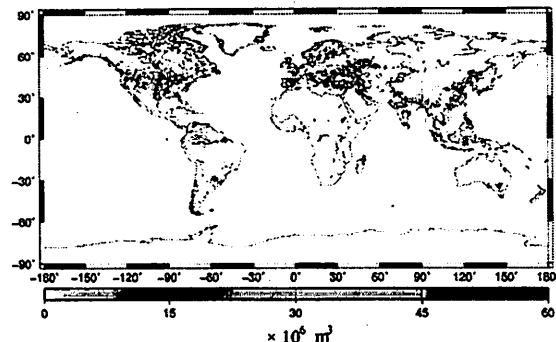


図-8 中規模貯水池容量の空間分布。

模貯水池容量の追加を要しないという結果が得られた。将来気候（2070-2099年）の工業用水と生活用水、灌漑面積を1990年頃で固定したためである。将来の工業用水や生活用水が増加することを想定した場合、あるいは灌漑面積が増えることを想定した場合に適応策として新たに建設する中規模貯水池の容量が増えることは十分に考えられる。将来のこれらの起こり得るシナリオの作成は今後の課題である。

$\alpha=3 \times 10^2$ の地域はアメリカ、中国の北部に分布しており、これらの地域では将来気候の水逼迫が現在気候のそれと同程度まで軽減されていない。特にアメリカの西部や中国の北部では、 $\alpha=1$ とした場合においても軽減されなかった。 $\alpha=1$ とは将来気候の年平均流出量の中規模貯水池の容量とすることであり、その時の追加した中規模貯水池の総容量を仮に陸域の全てのグリッドに導入した場合、その総容量は40000 km³をこえる極めて非現実的な過大な想定である。

こうした地域は季節性による水需給の変化により水が逼迫する以前に、流出量の総量が足りていない地域である。本研究では持続可能な河川からの取水を前提としてきたが、こうした地域では水利用として地下水も多く利用されている。アメリカ西部や中国北部では地下水涵養量より地下水の利用量が上回っており、アメリカ西部や中国北部を含む半乾燥地帯、乾燥地帯では1960年から2000年までその差が拡大していることが指摘されている¹⁹⁾。こうした地域において新たな貯水池の建設による適応策はその効果が限定的である。ただし、本研究で検討

した中規模貯水池は対象としているグリッド内でのみその効果を発揮するため、遠方に水を供給する大規模ダム（例えば、アスワンハイダム）のようなグリッド間の貯水池の効果は中規模貯水池に含まれないことに注意が必要である。

5. まとめと今後の課題

本研究では、陸面モデル、河川モデル、取水モデル、大規模貯水池モデル、環境用水モデル、作物成長モデルによって構成される水資源モデルを用いて、地球温暖化による世界の水資源の影響を評価した。水逼迫指標はCWDを用いた。その結果、現在気候（1969-1989年）と将来気候（2070-2099年）の水ストレス人口がそれぞれ18.0億人と19.5±0.9億人と推定された。WWRでは年流出量が増えると水逼迫の程度が軽減される。しかし、CWDを用いることで年平均流出量が増えた地域は陸地の45%で、その内の60%の地域で水逼迫の程度が悪化した。

さらに、水資源用途として理想的な中規模貯水池による水資源の適応策を検討した。その結果、将来気候のCWDを現在気候のCWD程度にするために必要な世界の総貯水容量は4つの気候モデルを用いることで29から41 km³と推定された。しかし $\alpha=1$ の場合においても、アメリカ西部と中国北部の将来気候のCWDは現在気候のCWDまで小さくならなかった。この原因は水需給の季節性の変化以前に水資源の総量が足りていないためである。そのため、このような地域では貯水池による適応策の効果は限定的である。

最後に、今後の課題について述べる。本研究の目的の一つは山本ら⁹⁾の温暖化実験に基づいて、さらに人間活動の影響をH08に組み込み、より現実性の高い温暖化水資源影響評価を行うことであった。しかし、地球温暖化によるそれぞれの人間活動の影響を詳細に分類できていない。例えば、地球温暖化による農事歴の変化がどの程度水需給に寄与したか明らかになっておらず、要素を一つずつ導入してシミュレーションを実施し、分析していく必要がある。また、図-5で示したように大規模貯水池モデルを導入することによって水逼迫が軽減されることが期待されるが、一部の地域で水逼迫が悪化している場合もある。流下による時間遅れにより、上流での貯水池操作が下流の水需要と不整合を起こしている可能性などが考えられ、詳細な分析と貯水池操作の改良は今後の課題としたい。

謝辞：本研究は国立環境研究所特別研究「全球水資源モデルとの統合を目指した水需要モデル及び貿易モデルの開発と長期シナリオ分析への適用」および環境省の環境

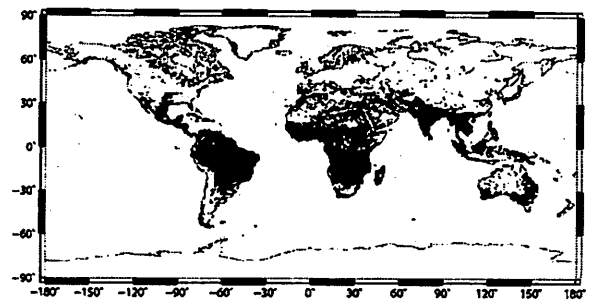


図-9 CTRL実験における二期作の地域。

研究総合推進費（S-8）の支援により実施された。ここに記して謝意を表する。

付録

(1) 全球水資源モデル

本付録では本研究で用いた全球水資源モデルの概要を説明する。詳細はHanasaki et al.⁹⁾や山本ら⁹⁾を参照されたい。H08において南極を除く陸域は1°×1°のグリッドに分割される。グリッド毎に各サブモデルが実行され、それぞれが相互作用しながら水循環の計算が行われる。陸面過程モデルはManabe²⁰⁾によって開発された一層のBUCKETモデルをベースにしたもので、最大土壌水分量を0.15 mのバケツに見立てて地表面の水熱収支を解く。河川モデルはグローバルな河川流路網情報²¹⁾を用い、Miller et al.²²⁾を参考に河道の流速を全球一律で0.5 m/sと見なした。陸域のすべての水移送は河川モデルが担っている。作物成長モデルはSWIM²³⁾をベースにしたものである。このモデルの重要な概念は積算温度であり、作物の作付け日からの有効積算温度が作物固有の値に達すると収穫期をむかえる。本研究ではLeff et al.²⁴⁾の収穫面積の世界分布が示された19品種について、世界のすべての地点で計算を行い最も収量の高い作物の農事歴を推定した。また、二期作が可能な地域は二期作も考慮した。二期目の栽培は一期目の栽培の期間以外で行い、一期目の収穫日と二期目の作付け日は15日以上空けるものとする。この条件で一期作以外に収穫できる場合、二期作可能と判断した。図-9に、一例としてCTRL実験の二期作を行っている地域を示した。取水モデルは灌漑水需要量に応じて河川から取水し、灌漑農地の土壌水分に加える。灌漑水需要量の推定は作物の栽培期間中の灌漑地の土壌水分量を圃場容水量の75%に保つ水量として計算した。また、取水モデルはモデル外で計算された生活用水需要量と工業用水需要量も取水する。現在、この2つの需要量は将来推定が困難であることから、本研究では需要量を現在気候と将来気候で同じとした。現在、世界の灌漑水消費量はすべての水消費量の87%に達するため、生活用水と

工業用水の水消費量は少ない¹⁵⁾。灌漑面積はDöll and Siebert¹³⁾を用いた。本研究で用いた灌漑面積などの地理情報の一覧は表-1に示した。ここで示した地理情報はおよそ1990年頃のものである。H08の出力変数である河川流量や農事歴などの検証は全球土壌水分プロジェクト第二期（以下、GSWP2と言う）という気象データを用いて既に行われている^{9a)}。本研究で行った現在気候における水資源評価も同様な条件で行っている。紙面の都合上、詳細な検証についてはそれらを参照されたい。

(2) 温暖化実験の気象データ

全球水資源モデルH08を実行させるために7つ（気温、相対湿度、気圧、風速、下向き短波放射、下向き長波放射、および降水）の気象データが必要とされる。現在気候の気象データは1986から1995年までの10年間のGSWP2⁹⁾を用いた。その結果を現在気候（1960-1989年）とした。GSWP2は全球の空間解像度が1°×1°で、時間解像度が3時間である。将来気候の気象データはGSWP2に対して、気候モデル出力の現在気候（1960-1989年）と将来気候（2070-2099年）の差（あるいは比）を使って作成した。全球水文モデルを利用した既存の水資源評価では降水と気温のみ嵩上げを考慮することが多い。しかし、地表面熱収支を解くH08において降水と気温の嵩上げを考慮した場合とさらに下向き長波放射の嵩上げも考慮した場合を比較し、長波放射の嵩上げを考慮することが重要であることが指摘されている¹¹⁾。本研究においても次式で示すように気温 T 、下向き長波放射 L 、及び降水 P をバイアス補正の対象とした。

$$T_{y,m,d,h} = T_{y0,m,d,h}^{GSWP2} + (\bar{T}_{future,m}^{GCM} - \bar{T}_{present,m}^{GCM}) \quad (2)$$

$$L_{y,m,d,h} = L_{y0,m,d,h}^{GSWP2} + (\bar{L}_{future,m}^{GCM} - \bar{L}_{present,m}^{GCM}) \quad (3)$$

$$p_{y0,m,d,h}^{GSWP2} = p_{y0,m,d,h}^{GSWP2} \times (\bar{p}_{future,m}^{GCM} / \bar{p}_{present,m}^{GCM}) \quad (4)$$

ここで、 $T_{y,m,d,h}$ 、 $T_{y0,m,d,h}^{GSWP2}$ 、 $\bar{T}_{future,m}^{GCM}$ 、及び $\bar{T}_{present,m}^{GCM}$ はそれぞれ y 年 m 月 d 日 h 時の気温、GSWP2の y_0 年 m 月 d 日 h 時の気温、2070から2099年までの30年平均の将来の大気大循環モデル（以下、GCMと言う）の月平均気温、1960から1989年までの30年平均の現在気候のGCMの月平均気温である。下向き長波放射 L 、降水 P の記号も同様に考える。式（4）を用いて現在気候と将来気候の比を計算する場合、降水量が小さいと得られる比が非現実的な過大な値になってしまうことがある。そこで、現在気候の月平均降水量が10 mm/month以下の場合、その比を1とした。GSWP2では、降雨と降雪のデータセットが用意されている。地球が温暖化すると降雨量と降雪量の比率が変化する可能性が高いため、降雨と降雪を足し合わせた後にH08に入力し、H08の内部で近藤²⁹⁾による雨雪判別を行っている。

参考文献

- 1) Oki T. and Kanae S.: Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, Vol.313, No.5970, pp.1068-1072, 2006.
- 2) Arnell N. W.: Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios, *Global Environmental Change*, Vol.14, No. 1, pp.31-52, 2004.
- 3) Alcamo J et al.: Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes, *Hydrological Sciences Journal*, Vol52, No.2, pp.247-275, 2007.
- 4) Milly P.C.D. et al: Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate, *Nature*, Vol.438, pp.347-350, 2005.
- 5) Gerten D. et al.: Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites, *Earth Interactions*, 8, 6, 1, available at: <http://dods.ipsl.jussieu.fr/orchidee/WEBORCHIDEE/Gervois EA EarthInter 2004.pdf>, 2004.
- 6) Hanasaki N. et al.: An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol.12, pp.1007-1025, 2008.
- 7) Rost S. et al.: Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system, *Water Resources Research*, Vol.44, W09405, doi:10.1029/2007WR006331, 2008.
- 8) Hanasaki N. et al.: An integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments, *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, pp.1027-1037, 2008.
- 9) 山本隆広ら：季節性を考慮した水逼迫指標を用いた全球温暖化水資源評価，*水工学論文集*，Vol.55，pp.259-264，2010.
- 10) Hanasaki N. et al.: An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model, *Journal of Hydrology*, Vol.384, pp.232-244, 2010.
- 11) 山本隆広ら：全球水資源モデル H08 を利用した季節性を考慮した世界の温暖化水資源影響評価に向けてー将来気象データに対する H08 の応答に関する一考察ー，*水文・水資源学会 2010 年度研究発表会要旨集*，pp.158-159，2010.
- 12) Ramankutty N. and Foley J. A.: Characterizing patterns of global land use: An analysis of global croplands data, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.12, 4, pp.667-685, 1998.
- 13) Döll P. and Siebert S.: A digital global map of irrigated

- areas, *Journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, Vol.49, No.2, pp.55-66, 2000.
- 14) Hanasaki N et al.: A reservoir operation scheme for global river routing models, *Journal of Hydrology*, Vol.327, pp.22-41, 2006.
 - 15) Döll P. and Siebert S.: Global modeling of irrigation water requirements, *Water Resources Research*, Vol.38, No.4, WR000355, 2002.
 - 16) Vörösmarty C. J. P et al.: Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth, *Science*, Vol.239, No.5477, pp.284-288, 2000.
 - 17) ICOLD: World Register of Dams, International Commission on Large Dams, Paris, 1998.
 - 18) Bartle A.: Hydropower potential and development activities, *Energy Policy*, Vol.30, No.14, pp.1231-1239, 2002.
 - 19) Wada Y. et al.: Global depletion of ground water resources, *Geophysical Research Letters*, Vol.37, L20402, 2010.
 - 20) Manabe S.: Climate and the ocean circulation I. the atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface, *Monthly Weather Review*, Vol.97, No.11, pp.739-774, 1969.
 - 21) Oki T. and Sud Y.C.: Design of total runoff integrating pathways (TRIP)-A global river channel network, *Earth Interact*, Vol.2, pp.1-37, 1998.
 - 22) Miller J. R. et al.: Continental-scale river flow in climate model, *Journal of Climate*, Vol.7, pp.914-928, 1994.
 - 23) Krysanova V. et al.: SWIM(Soil and Water Integrated Model) User Manual, 2000.
 - 24) Leff B. et al.: Geographic distribution of major crops across the world, *Global Biogeochemical Cycles*, 18, doi:10.1029/2003GB002108, 2004.
 - 25) 近藤純正 : 水環境の気象学地表面の水収支・熱収支, 朝倉書店, pp.48-49, 2000.

(2011.3.27 受付)

(2011.6.14 受理)

An Impact Assessment and Adaptation of Climate Change on Global Water Resources

Takahiro YAMAMOTO¹, Naota HANASAKI¹, Kiyoshi TAKAHASHI², Yasuaki HIJIOKA¹ and Yonghee SHIN²

¹Social and Environmental Systems Division, National Institute for Environmental Studies

²Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

Several reports have assessed water scarcity globally using the widely accepted ratio of annual withdrawal to the annual renewable water resources. The index has been used widely to assess the impact of climate change on global water resources. Recently, to assess the impact of climate change on global water resources incorporating sub-annual phenomena, a water scarcity index, the cumulative withdrawal-to-demand ratio has also been used. This index is defined as the ratio of the accumulation of daily water withdrawal to accumulation of daily water demand and these variables are simulated by a global water resources model. However, human activities have not been taken into account for the assessment. To assess more realistically, this study also estimated a farming calendar in the future climate condition, and introduced large reservoirs into the model. Furthermore, adaptation of global water resources were examined on the global warming by introducing ideal reservoirs for water use purpose into the model. The results indicated that the additional storage capacity was ranged from 29 to 41 km³ in the world.