

# 温暖化時の水資源影響評価のための 全球統合水資源モデルの開発

DEVELOPMENT OF A GLOBAL INTEGRATED WATER RESOURCES MODEL  
FOR WATER RESOURCES ASSESSMENTS UNDER CLIMATE CHANGE

花崎直太<sup>1</sup>・内海信幸<sup>2</sup>・山田智子<sup>3</sup>・沈彦俊<sup>4</sup>・Magnus Bengtsson<sup>5</sup>・鼎信次郎<sup>6</sup>・大瀧雅寛<sup>7</sup>・沖大幹<sup>8</sup>

Naota HANASAKI, Nobuyuki UTSUMI, Tomoko YAMADA, Yanjun SHEN,  
Magnus BENGTTSSON, Shinjiro KANAE, Masahiro OTAKI, Taikan OKI

<sup>1</sup>正会員 工博 国立環境研究所 研究員 (〒305-0051 茨城県つくば市小野川 16-2)

<sup>2</sup>非会員 東京大学生産技術研究所 学生 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

<sup>3</sup>非会員 お茶の水女子大学大学院人間文化研究科 学生 (〒122-8610 東京都文京区大塚 2-1-1)

<sup>4</sup>非会員 理博 東京大学生産技術研究所 研究員 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

<sup>5</sup>非会員 PhD 東京大学生産技術研究所 研究員 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

<sup>6</sup>正会員 工博 総合地球環境学研究所 助教授 (〒603-8047 京都市北区上賀茂本山457番地4)

<sup>7</sup>正会員 工博 お茶の水女子大学大学院人間文化研究科 助教授 (〒122-8610 東京都文京区大塚 2-1-1)

<sup>8</sup>正会員 工博 東京大学生産技術研究所 教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

A global water resources model was developed to assess the impact of climate change on water resources. The model consists of six modules, namely, land surface, river, agriculture, reservoir operation, environmental flow, and irrigation. One of the primary purposes of this model is to analyze availability of water resources at daily temporal resolution. We estimated the global distribution of water stressed area due to not only the limitation of annual total water resources but also the strong seasonality of them. The results show that the number of population living under water stressed condition reaches its peak around 2050 and remains high until the end of 21<sup>st</sup> century under SRES A1B scenario.

**Key Words:** *Global warming, Water resources, Integrated assessment*

## 1. はじめに

水資源は我々の社会活動に必要な不可欠な資源であるが、地球温暖化により大きな影響を受けるのではないかと懸念されている。これは気候システムの変化による降水や積雪・融雪の変化といった水資源量への影響と、気温上昇や乾燥・湿潤化に伴う農業用水需要の変化といった水需要量への影響の両方が考えられる。この他に人口増加や経済発展など社会経済的な影響による需給変化もあり、将来を見通すのは容易ではない。

地球温暖化による世界の水資源への影響を評価した研究はこれまでも数多く行われて来た。最近の研究として Alcamo et al. は全球統合水資源モデル Water GAP を利用することにより、将来の水資源量と水需要量をシミュレートし、それらの関係から将

来の水資源逼迫域を予測した<sup>1)</sup>。Arnell は複数の全球気候モデル (GCM) による気候予測と SRES シナリオによる人口予測から水資源制約下にある人口を予測した<sup>2)</sup>。Oki and Kanae も独自の将来推計を発表している<sup>3)</sup>。

しかし、これらの研究は年単位で推計されているという大きな問題がある。現実には水資源量と水需要量に大きな季節変化があり、温暖化では降水の強度や頻度といった短い時間スケールでの水文現象への影響が懸念されているので、月単位、日単位での評価が不可欠である。そのためには、水需要に大きな影響を与える農事暦や作付け種、需給バランスの時間的調整を行う貯水池操作を明示的に扱えるモデルが必要になる。そこで花崎らの全球統合水資源モデル<sup>4)</sup>を拡張し、水需給の時間偏在を考慮した地球温暖化時の水資源への影響評価を試みる。

## 2. 方法

### (1) 全球統合水資源モデル

モデルは花崎らの全球統合水資源モデルを利用した。このモデルは陸面過程, 河川, 農業, 貯水池操作, 環境用水, 灌漑の 6 つのサブモデルからなる。計算対象は全球の陸域で, 空間解像度は  $1^\circ \times 1^\circ$  である。3 時間単位の気象要素 (長波, 短波, 気温, 気圧, 風速, 比湿, 降雨, 降雪) および地理情報 (河道網, 灌漑面積, ダム分布など) の入力データに対し, 日単位の河川流量や灌漑消費量といった水循環や水資源に関する出力データを返す。陸面過程モデルは BUCKET<sup>5)</sup> をベースにしたもので土壌水分を深さ 15cm のパケツに見立てて地表面の水熱収支を解く。河川モデルは TRIP<sup>6)</sup> で, 流速を全球一律  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  とみなし, 上流から下流へ流出量を流下させる。農業モデルは SWIM<sup>7)</sup> をベースにしたもので, 日単位で Monteith 型の光合成モデル<sup>8)</sup> を解く。貯水池操作は Hanasaki et al. によるもので<sup>9)</sup>, 世界の 452 の主要な貯水池を制御する。主目的が灌漑の場合は下流の月単位の需要に応じて, それ以外は貯水池からの放流量の季節変動性が最も小さくなるように放流量の調節を行う。

### (2) 全球気象データ

温暖化時の全球気象データは「人・自然・地球共生プロジェクト 高分解能大気海洋モデルを用いた地球温暖化予測に関する研究 (K1)」で開発されたものを利用した。排出シナリオには SRES A1B が用いられている。期間は 2001–2100 年で, 時間解像度は 3 時間, 空間解像度は約  $1.125^\circ \times 1.125^\circ$  である。このデータを  $1^\circ \times 1^\circ$  に空間内挿してモデルに入力した。

この全球気象データには系統的なバイアスが見いだされた。そこで本研究を進めるにあたって最も重要だと考えられる気温, 降水, 風速のみ以下の手法を用いて修正を行ったデータも作成した。

$$T'_{GCM, ymdh} = T_{GCM, ymdh} + (T_{CRU, 61-90} - T_{GCM, 61-90}) \quad (1)$$

$$P'_{GCM, ymdh} = P_{CRU, 61-90} / P_{GCM, 61-90} \cdot P_{GCM, ymdh} \quad (2)$$

$$U'_{GCM, ymdh} = U_{ISL, 87-88} / U_{GCM, 61-90} \cdot U_{GCM, ymdh} \quad (3)$$

ここで  $T'_{GCM, ymdh}$  は修正後の,  $T_{GCM, ymdh}$  は修正前の K1 データの 3 時間単位の気温である。添え字の  $ymdh$  はそれぞれ年, 月, 日, 時間を表す。 $T_{CRU, 61-90}$  は New et al. による地上観測をベースにした 1961 年から 1990 年までの 30 年間の年平均気温の全球グリッドデータセットである<sup>10)</sup>。 $T_{GCM, 61-90}$  は GCM のその値である。同じく  $P$  は降水量,  $U$  は風速である。風速の補正には ISLSCP データセットを利用した<sup>11)</sup>。ただし,

水蒸気圧など未補正の物理量との不整合を減らすため, 補正量の上限として気温は  $\pm 3\text{K}$ , 降水量と風速は 0.5 以上 2.0 以下を設定した。季節変化と日周期の補正は行わない。この手法は簡便であるが物理的な根拠に乏しく, GCM の熱水収支も破壊してしまう。より物理的に整合的な補正の実施が今後の課題である。補正前の気象データを K1, 補正後を K1C と呼ぶことにする。

### (3) 土地利用データ

土地被覆 (農地面積, 灌漑面積, 作付け種) は将来 100 年にわたり変化していくと考えられる。まず農地面積は 1960–2000 年にかけて増大したものの最近の伸び率は鈍く<sup>12)</sup>, 今後も大幅な増加が見込めないとみなして 2000 年時点で固定した。

灌漑面積は増加傾向が続いており, 人口との相関が報告されていることから, 以下のように求めた。

$$A_y = aP_y + b \quad (4)$$

ここで  $P_y$  は国別人口,  $A_y$  は灌漑面積である。 $a$  と  $b$  は FAOSTAT による 1961 年から 2000 年の国別の統計データを利用して最小二乗法で国別に推定した。この式と SRES による将来の人口データを利用してまず国別の灌漑面積を求めた。次に国内の灌漑地の分布が将来も変わらないと仮定し, グリッドデータを作成した。ただし, 人口増との競合を考慮し, 現在世界で最も人口密度の高い地域でのデータから人口一人当たりの非農用地 (居住地や交通, 造園などの用地) が最低  $150 \text{ m}^2 \text{ capita}^{-1}$  確保されるようにした。

作付け種に関しては以下のように求めた。本研究では世界で最も収量の多い, 小麦, トウモロコシ, 米の 3 種だけを考え, 各グリッドに 1 種が選択されるとする。まず 2001 年から 2100 年まで気象データの過去 10 年の移動平均を作成した (2001 年の値は 1991–2000 年の平均)。これは農家が作付けを開始するタイミングを見計らうにあたり直近 10 年程度を参考にすると仮定したからである。統合モデルの農業モジュールにこの気象データを入力することにより, 1 年の中で収量が最大になる日を探し栽培日 (農事暦) とし, 気温や水のストレスが最も小さくなる種を栽培種として推定した。ただし, 年降水量が 400mm 未満では米が, 1000mm 以上では小麦が作付けできないとみなした<sup>13)</sup>。栽培種の決定には食習慣や経済力にも影響を受けると考えられるが, 今回は考慮していない。

### (4) 水需要データ

水需要は農業用水, 工業用水, 家庭用水の三つを考慮する。このうち農業用水は統合モデルが日単位で計算するが, 工業用水と家庭用水に関しては内海の

推定値を利用し、年を通じて一定とした<sup>14)</sup>。以下では取水量（水源から取る水量）と消費量（蒸発したり汚染されたりして他の用途に使えなくなる水量）を区別して考える。

消費ベースの農業用水需要量は栽培期間中の灌漑地の土壌水分量を圃場揚水量の 75%に保つ水量とし、統合水資源モデルで計算した。取水ベースの農業用水需要量には以下の式を利用して換算する。

$$W_{irg} = e_{irg} \cdot d_{CWD} \cdot A \quad (5)$$

ここで、 $e_{irg}$  は農業用水の送水効率、 $d_{CWD}$  は単位面積あたりの消費ベースの農業用水需要量、 $A$  は灌漑農地面積である。送水効率および作付け回数は Döll and Siebert による地域別の値を利用した<sup>15)</sup>。本研究では二期作と二毛作まで考慮している。工業用水は GDP あたりの工業用水取水量が OECD 諸国で増加、減少、停滞と推移していることを利用し、各国の統計データからこの 3 期をフィッティングして推計した。各国の一人当たり取水ベースの家庭用水需要量 ( $W_{dom}$ ) は<sup>14)</sup>

$$\log(W_{dom,y}) = \frac{2.03169 \cdot GDP_y}{GDP_y + 324.989} \quad (6)$$

ここで GDP は一人当たりの国内総生産 (2000 年換算 USD) である。将来の GDP と人口は SRES シナリオを利用した。取水に対する消費の割合は、20 世紀の統計データより<sup>16)</sup>、工業用水は 10%、家庭用水は 20% だとした。取水は河川のみから行い、全ての水需要がまかなえない場合は家庭用水、工業用水、農業用水の順に優先的に取水されるとする。ただし環境用水サブモデルが設定した月別の維持流量分は取水せずに流下させる。

### 3. 検証

#### (1) 流出量の再現性

まず全球の水収支の再現性の検証を行った (表-1)。検証データとしたのは Baumgartner and Reichel (BR75) による全球の降水量、蒸発量、流出量の気候値である<sup>17)</sup>。また比較のため同じモデルに The 2<sup>nd</sup> Global Soil Wetness Project (GSWP2) による ERA40 再解析を各種の地上観測で補正した気象データ (現在最も信頼性の高い全球グリッド気象データの一つ) を入力した場合の結果も示す<sup>4)</sup>。GSWP2 データは流出量に過大傾向があるが、BR75 と概ね一致する。K1 データの降水量は BR75 と比較して全球で約 14% 多く、流出量は約 48% 多い。K1C では降水量の過大評価は 6% に、流出量は 35% に抑えられたが、流出量は依然として大きく過大である。この流出量について緯度帯別に見たのが図-1 である。まず GSWP2 データ

を与えたとき、低緯度で流出量に過大傾向があるものの、本モデルの出力値は観測値とよく一致することが示される。つまり精度の良い気象データを入力した場合、モデルは全球の流出量を精度良く再現できることが示された。K1 データを入力した場合は北半球の中高緯度ではおおむね流出量の観測値を捉えているものの、低緯度で著しく過大な流出を発生させていることが分かる。バイアスを補正した K1C では低緯度帯の過大評価がほぼ解消したが、北半球の中高緯度では降水量が増え、流出量が過大評価となった。これは K1 データの北半球中高緯度の降水量が 1980 年代以降顕著に増加することによる。現実には K1 データほど大きな降水量の増加は観測されておらず、補正が過大になった。低緯度での流出の過大傾向の改良やバイアス補正の手法の改良が今後の課題である。

表-1 年間水循環 単位 (km<sup>3</sup> yr<sup>-1</sup>)

	BR75	K1	K1C	GSWP2
年	気候値	2001	2001	86-95
降水量	111,000	127,000	118,000	108,000
蒸発量	71,000	68,000	64,000	62,000
流出量	40,000	59,000	54,000	46,000

Zonal\_mean\_runoff[mm/yr]

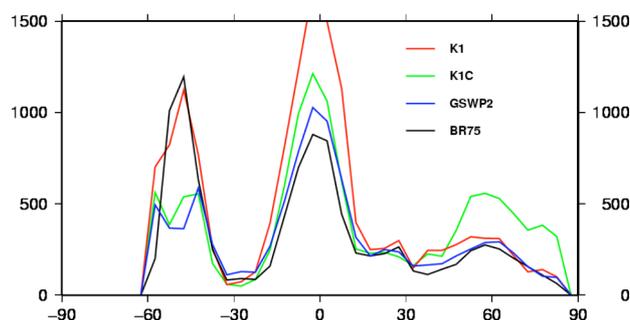


図-1 緯度帯別の年流出量

#### (2) 水需要量の再現性

次に全球の水需要量の検証を行った (表-2)。検証に利用したのは Shiklomanov (S00) による灌漑用水、工業用水、都市用水の取水水量である<sup>16)</sup>。S00 は各国や国際機関の統計データを利用し、世界 26 の地域について取水水量を示している。本研究で推定した灌漑用水は S00 より約 30% 小さくなった。この原因は農業モデルに栽培日数を短く見積もる性質があるため、GSWP2 の気象データを利用した場合の過小評価は 20% である。今回利用した降水量が多いことにより、さらに過小評価が大きくなったと考えられる。また工業用水はよく一致するが、家庭用水は 20% 小さくなった。本研究では各国の GDP と一人当たり取水水量の関係から全球一律の近似式を作成しているが、S00 のように国別の統計値を元に、地域ごとの特性

に応じて将来推計すれば, 推計値の乖離は縮まるかもしれない。

表-2 年間取水量 単位(km<sup>3</sup>yr<sup>-1</sup>)

	S00	K1	K1C	GSWP2
年	2000	2001	2001	86-95
灌漑用水	2605	2110	1791	2085
工業用水	776		769	
家庭用水	384		313	
合計	3765	3192	2873	

### (3) 土地利用の再現性

次に作付け種の再現性の検証を行った。検証データとしたのは Leff et al. による主要 18 種についてのグローバルな作付け面積グリッドデータから<sup>18)</sup>, 小麦, トウモロコシ, 米の作付け割合が 5%以上のグリッドについて, 3 種の中で最も作付け面積が大きい種を抜き出して作成した全球作付け種分布データである(図-2a)。2001 年の推定値は農地面積が 1000km<sup>2</sup>以上のグリッドについて示した(図-2b)。図-2b)では 3 品種のうち最適なものが選択されると仮定しているため, 図-2a)より栽培面積が大きくなっていることに注意されたい。

K1C データを入力して推定した作付け種と観測値をグリッド毎に比較した際の一致度を表-3 に示す。これを見ると小麦の作付けに関しては 74%の一致度を示すものの, トウモロコシと米はそれぞれ 48%, 48%と低く, 特にトウモロコシと米の判別が悪いことが示された。現在 SWIM での農業収量の計算には水田が考慮されず, 最適温度と最低温度でのみトウモロコシと米の分類を試みているため, 一致度が低いと考えられる。湛水が可能か否かをモデルに取り組みることにより, 精度の向上を図ることができるかもしれない。

図-2a)と b)から地域別に特徴を見る。北米では小麦とトウモロコシの分布が概ね再現されたものの, アメリカ中部の小麦地帯と東部のトウモロコシ地帯に米が多く混じってしまう問題がある。南米は概ね一致する。ヨーロッパは小麦, 中部のトウモロコシの再現性もよい。アフリカは南部で小麦類を推定しているが, 実際はトウモロコシ類が多い。アジアは中央アジアからシベリアにかけて小麦類が推定され, よく現実を再現しているものの, 中国で黄河まで米作地帯が広がり, インドや東南アジアの米作地帯に広くトウモロコシ類が推定されているところに問題がある。オーストラリアは再現性がおおむねよい。

## 4. 結果

### (1) 土地利用の将来予測

推定された 2050 年の作付け種分布は図-2c)のようになった。農地面積を固定しているため, 着色部の広がりはない。南米やアフリカでは作付け種の変化が小さい。北米では中部を中心に小麦の作付け地帯が広がる様子が示された。東アジアでは米の作付け域が北上して行く。ヨーロッパでは小麦からトウモロコシや米へと最適作物が変化する地域が示された。

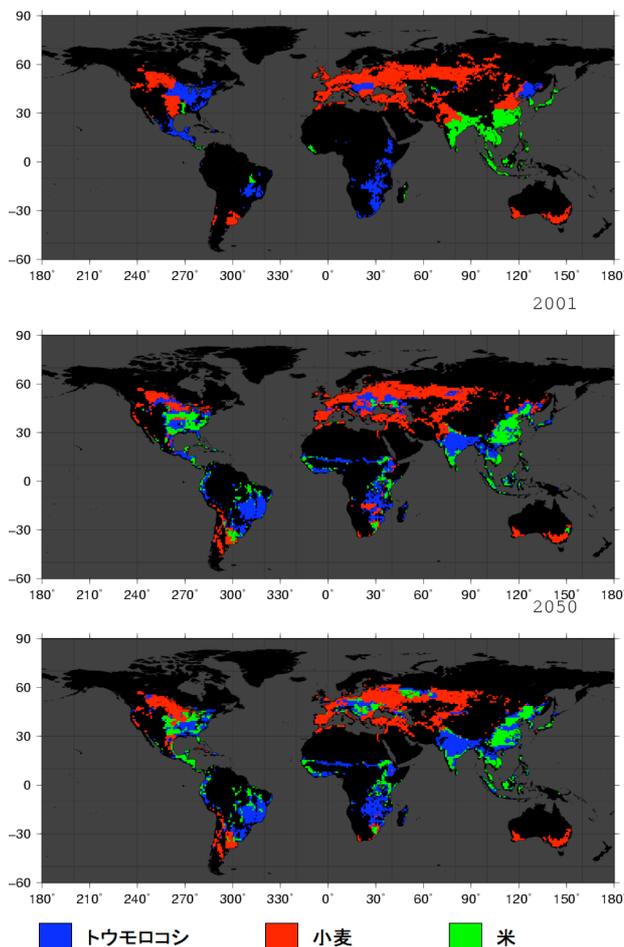


図-2 作付け種の分布。

(上から a) 観測値, b) 2001 年, c) 2050 年)

表-3 K1C データを入力した場合の一致度

		観測値			
		トウモロコシ	米	小麦	合計
計算値	トウモロコシ	364	316	331	1011
	米	200	304	199	703
	小麦	192	10	1485	1687
	合計	756	630	2015	3401
	正答率	48%	48%	74%	

### (2) 水需要量の将来予測

推定された世界の灌漑用水, 工業用水, 都市用水の取水量ベースの水需要量を図-3 に示した。工業用水は SRES による GDP 予測を元にしており, 世界全体で

見た場合 GDP の顕著な増加に対して効率の改善が小さいため、2100 年まで伸び続ける。家庭用水は国別の一人当たり取水量をまず GDP 予測を元にして求め、これに人口をかけている。一人当たり取水量は経済成長に伴い 2100 年まで増加を続けるが、対数型の関数を採用しているため、伸び率が押さえられる。SRES A1B シナリオでは人口は 2050 年以降減少し、都市用水も 2065 年を境に減少に転じる。農業用水は毎年の気象条件に応じて計算されるため年々変動を持つ。取水量は 2030 年まで緩やかに上昇した後、緩やかに減少していく。参考値として気候変化による変動を考慮せず、灌漑面積に比例して灌漑取水量が変化すると仮定した結果を破線で示す。本研究では灌漑面積がピークに達する前に農業用水需要が飽和する結果といえる。

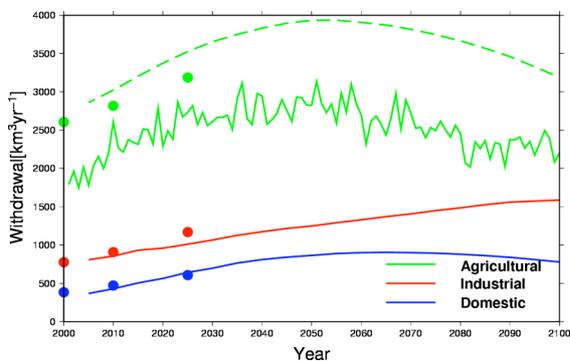


図-3 取水ベースの需要量の将来予測。  
(点は Shiklomanov (2000) の推計値)

### (3) 需給バランスの将来予測

次にこの水需要が賄えるかを考察してみたい。ここで以下の指標  $R_{CWD}$  を考える。

$$R_{CWD} = \frac{\sum_{DOY=1}^{365} W_{DOY}}{\sum_{DOY=1}^{365} D_{DOY}} \quad (7)$$

ここで  $W_{DOY}$  は日単位の河川からの取水量 (上限はその日の需要量),  $D_{DOY}$  は日単位の消費ベースの需要量である。つまり、日単位の水需要量に対してどれだけの水資源が実際に供給できたかを示すもので、需給の時間変動性を考慮した水資源指標である。 $R_{CWD}$  が 1 に近いほど、水ストレスが小さく、0 に近いと必要なときに水が取れないことを示す。本研究では  $R_{CWD}$  が 0.8 以上の場合を低ストレス、 $R_{CWD}$  が 0.4 以上の場合を中ストレス、それ未満の場合を高ストレスとした。比較のため従来の研究で利用されてきた取水水資源比 ( $R_{WWR}$ ) についても結果を示す。

$$R_{WWR} = \frac{\sum_{DOY=1}^{365} D_{DOY}}{\sum_{DOY=1}^{365} Q_{DOY}} \quad (8)$$

ただし、 $Q_{DOY}$  は日単位の河川流量である。本研究では既存の研究に従い  $R_{WWR}$  が 0.1 未満の場合を低スト

レス、 $R_{WWR}$  が 0.4 未満の場合を中ストレス、それ以上の場合を高ストレスとした。

図-4 は 2001 年のストレスと比べて 2050 年のストレスがどのように変化するか  $R_{WWR}$  と  $R_{CWD}$  それぞれについて示したものである。まず  $R_{WWR}$  では中国の華北平原、インド西部、中近東、アフリカ北部、アメリカ西部にストレスが現れている。この分布は Alcamo et al. とほぼ一致する。これに対して  $R_{CWD}$  では中・高ストレスの地域は  $R_{WWR}$  より大きく広がり、降水量に大きな季節性があるアジアモンスーン地域やアフリカのサヘルなど地域にも現れている。これらの地域は各種報告書で水不足が指摘されている地域である。しかし  $R_{CWD}$  では年流量の豊富なアマゾン、コンゴ、水需要の小さな東シベリアなどにも中ストレスの地域が広がっている。これらの地域にも河川流量に強い季節偏在性があるが、モデルの仮定 (浅い土壌、地下水や積雪からの取水や 452 の大貯水池以外の取水設備を考慮しないなど) に起因するものもあり、今後改良していく必要がある。需給の季節偏在性を考慮しても水ストレスが低い地域はカナダ、ヨーロッパ、ロシア西部、南米南部である。

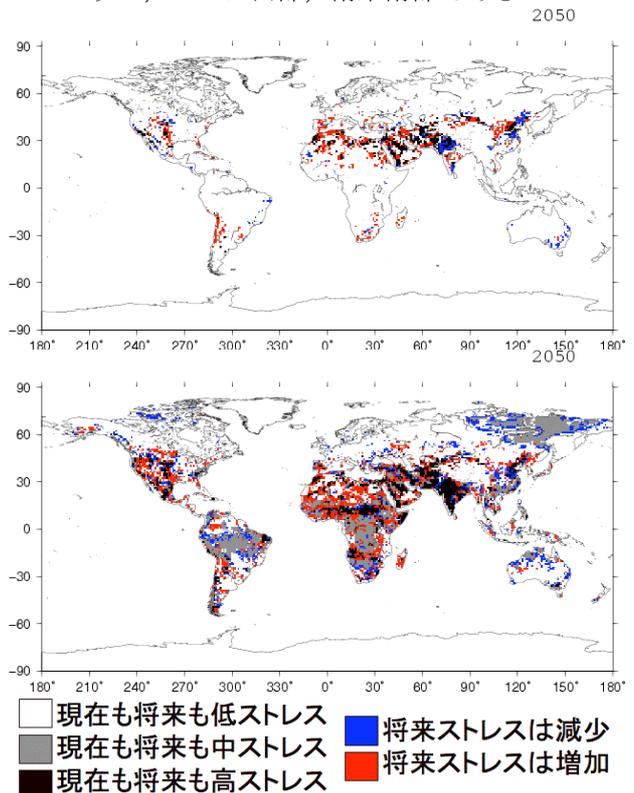


図-4 2001 年と比較した 2050 年の水ストレス  
(上から a)  $R_{WWR}$ , b)  $R_{CWD}$ )

図-5 は世界の総人口のうちそれぞれのストレス下にある人口を示したものである。高ストレスにある人口は 21 世紀半ばまで増加し、その後世界人口が減少に転じて、ほとんど減少しないことが示された。図-4 で示されたようにアフリカやアジアなど人

口増加が著しい地域の水ストレスが高いからだと考えられる。

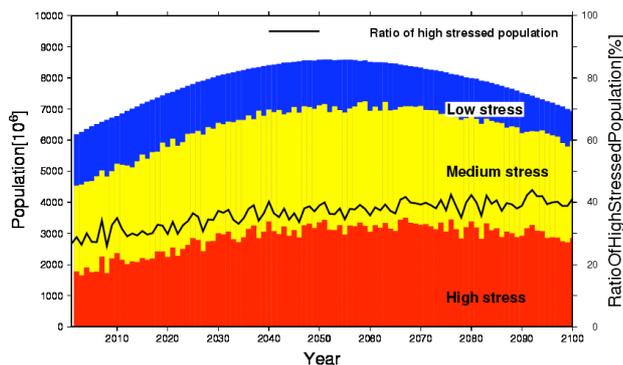


図-5 世界の総人口と水ストレス人口  
(実線は全人口に占める高ストレス下人口の割合)

## 5. 結論と今後の課題

全球統合水資源モデルを利用し、気候変動による世界の水資源への影響を日単位の水需給収支を考慮して 2001 年から 2100 年まで評価した。

今後モデルの信頼性を高めていくために本研究では 3 つの課題が明らかになった。第一に気候データのバイアス補正である。気象・気候の再現性を高めつつ、GCM の気象要素間の矛盾を減らすためのより詳細な検討が必要である。第二に農業モデルの改良である。今回のシミュレーションからは栽培種の推定や栽培期間の推定に問題があることが明らかになった。第三に予測の不確実性の幅を示すことである。異なる GCM 出力を利用した実験や、SRES シナリオを変えた実験、検証データのある 20 世紀再現実験などを行い、入力データとモデル双方の感度や再現性についてより詳細に検討していく必要がある。

**謝辞:** 本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業「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) および総合地球環境学研究所平成 17 年度プロジェクト「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) の成果の一部です。本研究を実施するにあたり計算機資源を提供して下さった東京大学生産技術研究所喜連川研究室に感謝します。

### 参考文献

- 1) Alcamo, J. and Döll, P. and Henrichs, T. and Kaspar, F. and Lehner, B. and Rosch, T. and Siebert, S. Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business-as-usual" conditions, *Hydrol. Sci. J.*, 48-3, 339-348, 2003
- 2) Arnell, N.W. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economics scenarios, *Global Env.*

*Change*, 14, 31-52, 2004

- 3) Oki, T. and S. Kanae, Global hydrological cycles and world water resources., *Science*, 313, 1068-1072, 2006
- 4) 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹 Bucket 型の陸面過程モデルをベースにした全球統合水資源モデルの開発 水工学論文集 第 50 巻, 2006
- 5) Manabe, S. Climate and the ocean circulation 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, 97-11, 739-774, 1969
- 6) Oki, T. and Nishimura, T. and Dirmeyer, P., Assessment of annual runoff from land surface models using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP), *J. of Met. Soc. of Japan*, 77-1B, 235-255, 1999
- 7) Krysanova, V. and Wechsung, F. and Arnold, J. and Srinivasan, R. and Williams, J. SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual, 2000
- 8) Monteith, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Roy. Soc. London. B.* 281, 277-329, 1977
- 9) Hanasaki, N., S. Kanae and T. Oki: A reservoir operation scheme for global river routing models, *J. of Hydrol*, 327, 22-41, 2006
- 10) New, M., Hulme, M. and Jones, P.D.: Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *J. of Clim* 12, 829-856. 1999
- 11) Meeson, B.W. and Corprew, F.E. and McManus, J.M. P. and Myers, D.M. and Closs, J.W. and Sun, K.-J. and Sunday, D.J. and Sellers, P.J., ISLSCP Initiative I -Global data sets for land-atmosphere models, 1987-1988, NASA, 1995
- 12) FAOSTAT data, 2006
- 13) 王勤学, 大坪国順 自然条件からみた中国の潜在耕地の分布 *CGER Report*, 1042, 22-28
- 14) 内海信幸 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, 東京大学卒業論文, 2006
- 15) Döll, P. and Siebert, S. Global modeling of irrigation water requirements, *Wat. Res. Research*, 38-4, 2002
- 16) Shiklomanov, I. A. Appraisal and assessment of World Water Resources, *Water Intl.* 25, 11-32, 2000
- 17) Baumgartner, A. and Reichel, E. *The world water balance*, Elsevier, 1975
- 18) Leff, B. and Ramankutty, N. and Foley, J.A., Geographic distribution of major crops across the world, *Global Biogeochemical Cycles*, 18, 2004

(2006. 9. 30 受付)