

# 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

A GLOBAL INTEGRATED WATER RESOURCES MODEL  
BASED ON A BUCKET TYPE LAND SURFACE MODEL

花崎直太<sup>1</sup>・鼎信次郎<sup>2</sup>・沖大幹<sup>3</sup>  
Naota Hanasaki, Shinjiro Kanae and Taikan Oki

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

<sup>2</sup>正会員 工博 総合地球環境学研究所 (〒602-0878 京都市上京区高島町335)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

A global integrated water resources model was developed. The model consists of four sub models, a bucket type land surface model, a global river routing model, a process based agricultural model and a reservoir operation model. The model was designed to work with near surface meteorological data and currently available global grid-based digital GIS data. It enable us to conduct 1) monthly or daily assessments of global water supply and demand, 2) numerical experiments concerning the interaction of human activity and land hydrology, 3) analyses on global water balance components in which energy and water balances are perfectly closed. In the former part of this report, the structure of model and the simulation setting are described. In the latter part, the performance and limitation of the model are discussed using the results of a preliminary global simulation.

**Key Words:** *Global simulation, Land surface process, River, Agriculture, Reservoir Operation*

## 1. はじめに

世界の人口は60億人を突破し増加を続け、世界の経済も発展途上国を中心に著しい成長を遂げている。この人口と経済を支える地球の淡水資源の持続可能性に国際的な注目が集まっている。これまでに多くの国際機関や研究機関が水文・水資源学的な見地から世界の水資源と水利用の現状と将来展望を報告してきた<sup>1) 13)</sup>。これらの報告は河川流量、水利用量、人口などの地理的分布データを収集・編集することにより、現在と将来の水資源逼迫域を明らかにした。

既存の報告は3つの問題を抱えている。第1に年平均の水資源量と水利用量から評価が行われていることである。両者には季節変動があって需給のタイミングは必ずしも一致しない。需給バランスはより短い時間単位(月・日など)で評価する必要がある。この問題については花崎らが考察を行っている<sup>15)</sup>。第2に水資源や水利用に関する相互作用が明示的に表されないことである。例えば河川から灌漑用水を取水すれば、河川水が減少し、灌漑農地の土壌水分が増加し、蒸発散量が増加し、一部は川に戻るが、このような過程は無視されることが多

かった(図-1の青の矢印)。第3に収集するデータの時間的・物理的な不整合があることである。独立に作成されたデータを編集している都合上、データ間で対象期間が異なっていたり、物理量(例えば可能蒸発散量など)の計算方法が異なっていたりすることがあった。

そこで全球統合水資源モデルの開発を行った。このモデルは主に気象の時系列データと地理情報(土地利用・河川網など)を入力とし、対象とする水の動きを全て計算によって求める。このため、1)年単位未満の時間解像度での水需給バランスの評価、2)モデル内の水の相互作用の把握、3)単一の入力に基づく整合的な出力を得ることが可能である。同様の全球統合水資源モデルとしてはWaterGAP2があるが<sup>1)</sup>、本研究では農業収量を計算する農業プロセスモデルを組み込んでいること、河川流量シミュレーションで貯水池操作が考慮できること、農業プロセスモデルとの整合性が良く物理過程に基づき地表面の熱水収支を解く陸面過程モデルをベースにしていること、白川による環境用水モデル<sup>17)</sup>を組み込んだことが大きな特徴である。本報告ではモデルの構造とテストシミュレーションの結果を紹介し、モデルの利点と欠点を論じる。

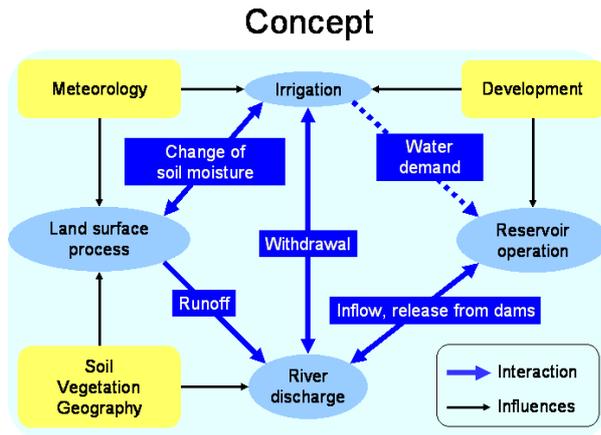


図-1 水の相互作用

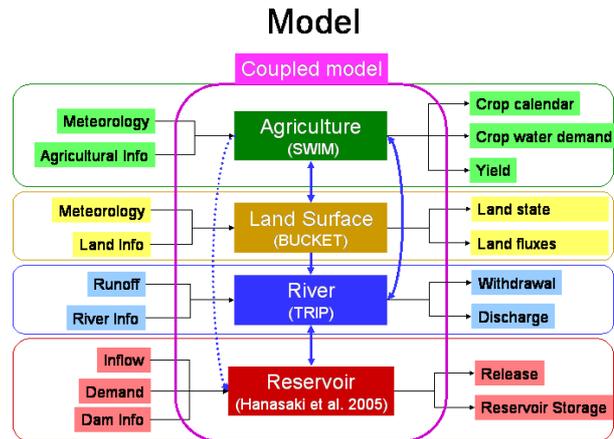


図-2 4つのモデルの入出力

## 2. 方法

### (1) モデル

全球統合水資源モデルは陸面過程・河川・農業・貯水池操作の4つのモデルからなる。これらは独立に利用することもできるし、任意に組み合わせて利用することもできる(図-2)。

#### a) 陸面過程モデル

陸面過程モデルとは大気モデルの陸面の境界条件を与えるモデルである。地表面付近の気象データ(短波・長波放射, 気温, 湿度, 風速, 気圧, 降雨, 降雪)の入力に対して, 地表面フラックス(潜熱・顕熱フラックス, 地中熱流量など)や陸面状態量(土壌水分量・土壌温度など)の出力を返す。陸面過程モデルにはBUCKETモデル<sup>9) 14)</sup>を利用した。BUCKETモデルでは土壌と土壌水分を深さ15cmのバケツとその中に入った水量に見立てる。水量ゼロはしおれ点, 満杯は圃場容量を示す。水量がバケツの容量を超える場合, すなわち土壌水分量が圃場容量を上回るとき, 流出(表面流出)が発生し, それ以外の場合には流出が発生しないとする。顕熱( $H$ )と可能蒸発散量( $E_{pot}$ )は以下のように表される。

$$H = C_p \rho C_H U (T_s - T_{air}) \quad (1)$$

$$E_{pot} = \rho C_H U (q_{SAT}(T_s) - q_{air}) \quad (2)$$

ここで $C_p$ は空気の定圧比熱[1005 J kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>],  $\rho$ は空気の密度[kg m<sup>-3</sup>],  $C_H$ はパルク係数,  $U$ は風速[m s<sup>-1</sup>],  $T_s$ は地表面温度[K],  $T_{air}$ は気温[K],  $q_{SAT}(T_s)$ は $T_s$ に対する飽和比湿[kg kg<sup>-1</sup>],  $q_{air}$ は比湿[kg kg<sup>-1</sup>]である。熱収支は以下のように表される。

$$(1 - \alpha) S_d + L_d = \sigma T_s^4 + H + \beta E_{pot} \quad (3)$$

ここで $\alpha$ はアルベド,  $S_d$ は下向き短波放射[W m<sup>-2</sup>],  $L_d$

は下向きの長波放射[W m<sup>-2</sup>],  $\sigma$ はステファン・ボルツマン定数[5.67 × 10<sup>-8</sup> W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>],  $L$ は水の気化の潜熱[J kg<sup>-1</sup>],  $\beta$ は蒸発効率であり土壌水分状態を反映する。

本研究では標準的なBUCKETモデルに対して3つの改良を行っている。第一に土壌水分が圃場用水量を超えにくい乾燥・半乾燥地でも河川流量の計算が必要なることから, 土壌水分が圃場用水量に達しなくても基底流を発生させるパラメタリゼーション(leaky bucketと呼ばれる)を導入した。基底流は

$$Q_{SB} = 1.5 \times (\theta / \theta_{max})^2 \text{ [kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{]} \text{とした。ただし,}$$

$\theta$ は土壌水分量,  $\theta_{max}$ は圃場用水量である。第二に標準的なBUCKETモデルは土壌の熱容量や地中熱流量を計算しないが, 地表面温度の日内変動を安定させるため, Deardorffによる土壌温度の強制復元法<sup>2)</sup>も導入した。第三に灌漑による灌漑地の土壌水分量や蒸発散量の変化を考えるため, 灌漑地・非灌漑地の2種類からなるサブグリッド化(モザイク化)を行った。サブグリッドには同一の入力が与えられるが, 独立の土壌水分量・土壌温度を持つ。それぞれの計算が終了した後, 面積の重み付けをしてグリッド平均値を算出する。BUCKETモデルは非植生モデルであるが, 与えたアルベドと粗度には植生状態が反映されている。

#### b) 河川モデル

河川モデルには全球河川流下モデルTRIP<sup>11)</sup>を利用した。TRIPは空間解像度1°×1°のデジタル河道網地図に沿ってグリッド毎に計算される流出量を上流から下流へ, 0.5[m s<sup>-1</sup>]相当の速度で流下させ河川流量の計算を行うモデルである。本研究では河川取水を扱うモジュールを組み込んだ。これは後述する環境用水に相当する流量を維持しつつ, 灌漑需要量を河川から取水する。本研究では灌漑用水の取水のみを考え, 工業用水や家庭用水は無視する。取水された水は灌漑農地の土壌水分量に加えらる。灌漑用水は作付け期間中の灌漑地の土壌水分量が圃場用水量の75%に等しくなるように与

えられる（河川の状況によっては不足する場合もある）。

### c) 農業モデル

農業モデルには農業プロセスモデルSoil and Water Integrated Model (SWIM)<sup>7)</sup>を利用した。農業プロセスモデルとは気象・土壌・栽培条件を与えて作物の成長をシミュレートするモデルである。作付け種、作付け開始日、作付け期間中の気象データ、土壌・施肥・管理情報などの入力に対し、収穫日、総生物体量・収量、蒸発散量などの出力を返す。全球統合水資源モデルに適用するにあたりSWIMの数式・パラメタを利用し、農事歴推定モジュールと収量推定モジュールの2つを作成した。農事歴推定モジュールは全球・日単位で最適栽培期間（農事歴）を作付け種ごとに推定する。ここで作付け種はLeff et al.の全球作付け作物地図<sup>8)</sup>にある18種類（大麦、トウモロコシ、キビ・アワ・モロコシ (Millet)、米、ライ麦、モロコシ (Sorghum)、小麦、キャッサバ、ジャガイモ、テンサイ、サトウキビ、豆類、落花生、アブラナ、アブラヤシ、大豆、ヒマワリ、綿、その他）である。作付け開始日推定アルゴリズムは1月1日から12月31日まで作物を作付けしていき（植えた直後に低温のため枯死することもある）、収量が最大になる月日を探しだすものである。このプログラムは現時点で二期作・二毛作を扱えないため、1年に1度だけ作付けされるとした。この点は現在改良を進めている。収量推定モジュールは作付け種と農事歴、作付け期間中の気象条件の入力に対し、収穫日や収量を計算する。本研究ではグリッド内の作付け面積が最大の種についてのみ計算される。

$$\Delta HUNA = T_{air} - T_b \quad (4)$$

$$\Delta B = BE \cdot PAR \cdot REGF \quad (5)$$

$$PAR = 0.02092 \cdot RAD \cdot [1 - \exp(-0.65 \cdot LAI)] \quad (6)$$

$$REGF = \min(WS, TS, NS, PS) \quad (7)$$

$$YLD = HI \cdot BAG \quad (8)$$

$$HI = HVSTI \cdot f(SWU, SWP) \cdot f(HUNA) \quad (9)$$

$$BAG = (1 - RWT) \cdot B \quad (10)$$

ここで  $\Delta HUNA$  は積算温度の日変化量[K],  $T_{air}$  は日平均気温[K],  $T_b$  は基準温度[K]（これを下回ると生長が止まる）,  $\Delta B$  は生物体量の日変化量[kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>],  $BE$  は係数[kg m<sup>2</sup> MJ<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>],  $PAR$  は光合成有効放射量[MJ m<sup>-2</sup>],  $RAD$  は下向き短波放射量[Ly],  $LAI$  は葉面積指数,  $REGF$  は生長ストレスである。  $WS$  は栽培期間中の蒸発散量と可能蒸発散量から得られる水ストレス,  $TS$  は栽培期間中の気温と最適栽培温度から得ら

れる温度ストレス,  $NS$  は土壌の窒素濃度から得られる窒素ストレス,  $PS$  は土壌のリン濃度から得られるリンストレスであり, それぞれ0（ストレス最大）から1（ストレスなし）までの値を取る。  $YLD$  は作物収量[kg ha<sup>-1</sup>],  $HI$  は収穫指数,  $BAG$  は地上生物体量[kg ha<sup>-1</sup>],  $HVSTI$  はストレスがない場合の収穫指数,  $SWU$  は栽培期間後半の蒸散量[mm],  $SWP$  は栽培期間後半の可能蒸散量[mm],  $HUNA$  は積算温度[K]である。  $f$  はこれらが単純な関数で指標化されることを示しているが詳細は割愛する。  $B$  は収穫時の全生物体量[kg ha<sup>-1</sup>],  $RWT$  は  $B$  に占める根の割合である。リン・窒素肥料の全球データが未整備のため, 現在はこれらのストレスを無視して計算している。

### d) 貯水池操作モデル

貯水池操作モデルは全球河川流下モデルTRIPに貯水池操作を取り入れるためのモジュールである<sup>9)</sup>。世界の総貯水容量10億m<sup>3</sup>以上の462の貯水池について, 貯水容量, 年平均流量, 貯水池の主目的, 下流の水需要の情報から操作ルールを個々の貯水池に毎年割り当てる。TRIPのデジタル河道網上に配置された貯水池は河川流下計算中に操作ルールにそって放流・貯留の操作を行う。

### e) 環境用水

環境用水（すなわち河川の自然環境を維持するために必要な流量）のグローバルな推定には白川のモデル<sup>17)</sup>を利用した。これは月流量の最大値と最小値から各グリッドを1) 年中少雨, 2) 年中多雨, 3) 年を通して安定, 4) 乾季と雨季が存在の4つに分類し, それぞれの環境流量の設定基準に基づき環境用水量を決定するものである。この計算に必要な月流量は全球統合水資源モデルとは別に, 陸面過程モデルと河川モデルのみを利用したシミュレーションを行って求める。

### f) モデルの相互作用

4つのモデルを全て結合する際の, 結合順序を示す。  
1) 灌漑を実行する。灌漑地の土壌水分量から灌漑用水需要量を計算し, 灌漑用水供給量を灌漑地の土壌水分量に加える。2) 陸面過程モデルを実行する。計算は灌漑地サブグリッドと非灌漑地サブグリッドについてそれぞれ行う。3) 貯水池操作モデルを実行する。灌漑用水需要量から貯水池操作ルールを設定する。4) 河川モデルを実行する。流出量と貯水池操作ルールから貯水池操作を考慮した河川流量の計算を行う。平行して河川流量, 灌漑用水需要量, 環境用水量から灌漑用水供給量を決定し, 河川水から差し引く。5) 農業モデルを実行する。蒸発量・可能蒸発散量から作物の生長の計算を行う。

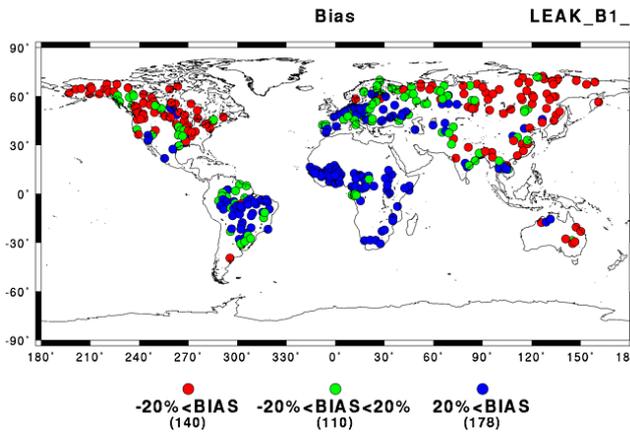


図-3 年流量のバイアス

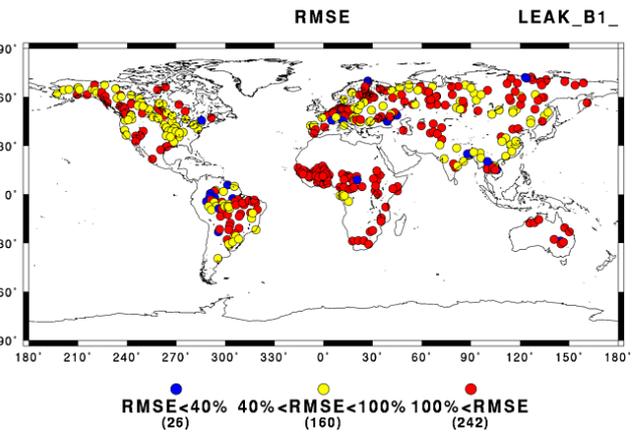


図-4 月流量のRMSE

## 2) 数値実験

シミュレーションはSecond Global Soil Wetness Project (GSWP2)のフレームワーク<sup>3)</sup>を利用した。本研究で利用した気象データはB1betaというGSWP2の標準入力データで、地球環境フロンティア研究センターの増田耕一博士らのチームが開発したものである。ヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF)の再解析データをベースにした3時間単位、空間解像度 $1^\circ \times 1^\circ$ のグローバルデータである。この外に地理情報データとして、全球河川地図<sup>10)</sup>、全球貯水池地図<sup>6)</sup>、全球灌漑農地地図<sup>4)</sup>、全球農地地図<sup>12)</sup>、全球作付け作物地図<sup>8)</sup>を利用した。数値実験はモデルの組み合わせを変えて6通り行った。陸面過程をL、河川をR、農業をA、貯水池操作をD、環境用水をEと表すと、1) LR, 2) LA, 3) LRA, 4) LRAE, 5) LRAD, 6) LRADEである。1)のみ1986年から1995年までの10年のシミュレーションを行い、それ以外は1986年から1988年までの3年のシミュレーションを行った。

## 3. 結果と考察

### (1) 河川流量での検証

本モデルの出力は農事歴、灌漑用水需要量、収量、土壌水分量、蒸発散量、河川流量、河川取水量、貯水池貯水量などである。このうち観測データのグローバルな入手可能性を考慮し、河川流量について検証を行った。1986年から1995年の10年平均の月河川流量の計算値を求め、Global Runoff Data Center (GRDC)の月河川流量の観測値と比較した。比較に利用したのは最低5年以上の流量を報告し、集水面積が $10000\text{km}^2$ 以上の428の流量観測地点のデータである。報告している期間が地点ごとに異なっていたため、全期間のデータを利用して月毎の平均を取ることで、平年の月流量データを作成した。年流量のバイアスと月流量のRoot Mean Square Error (RMSE)を求めた結果を図-3と図-4

に示す。

まず年流量のバイアスであるが、北米の高緯度、シベリアで20%以上の過小評価、南米のアマゾン河の南部の流域、アフリカのほぼ全域、ヨーロッパ西部の一部で20%以上の過大評価となった。その他の地域では過小評価も混在するが、他地域に比べてバイアスが20%以内に収まる場合が多い。次に月流量のRMSEであるが、100%を超える観測地点が242地点と全体の半分以上を占める結果となった。

全球の年間河川流量は $41,100[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ であった。既存の研究の多くがこれを $40,000[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ 前後と推定していることを考慮すると、若干過大評価であるが全球の流出量としては妥当だといえる。年流量のバイアスが小さいところでは月流量のRMSEも小さくなっていることから、RMSEはバイアスの大きさが原因になっていることが考えられる。

花崎らはGSWP2の流出量に関して以下のような報告を行っている<sup>16)</sup>。そもそもGSWP2ではB0という入力データが採用されていたが、降水量に過大傾向があり、GSWP2に参加した全ての陸面過程モデルで流出量が過大に算出された。B1betaはこの問題の解決を目的として開発されたが、B1betaに関する詳細な報告も、B1betaを利用した陸面過程モデルのシミュレーション結果もまだ報告されていない。また筆者らは本研究で利用しているBUCKETモデルでGSWP2に参加しているが、GSWP2に参加している陸面過程モデルの中では蒸発を大きく、流出を小さく見積もる傾向がある。陸面過程モデルの特徴に加え、入力データの特性にも注意し、検証とモデルの改良を行っていく必要がある。

### (2) 全球平均値

検証の強化やモデルの改良の余地は残されているが、現時点のシミュレーションの出力から得られる1988年の全球の水収支を表-1に示す。

表-1 全球の水収支 (1988年の計算値, 単位は $\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}$ )

実験		LR	LA	LRA	LRAE	LRAD	LRADE
全球	降水量	107,800					
	蒸発散量	63,400	63,900	63,600	63,600	63,600	63,500
	流出量	43,900	44,100	44,000	44,000	44,000	44,000
	河口到達流量	43,900		43,700	43,700	43,700	43,700
	貯留量変化量	500	500	500	500	500	600
	環境用水量				12,800		12,800
非灌漑農地	蒸発散量	3,480					
	可能蒸発散量	13,400					
	収量 [ $\text{kg ha}^{-2}$ ]	2,260					
灌漑農地	蒸発散量	769	522	502	537	519	
	可能蒸発散量	792	1,520	1,580	1,470	1,520	
	収量 [ $\text{kg ha}^{-2}$ ]	4,090	2,600	2,470	2,690	2,600	
	灌漑用水需要量	691					
	灌漑用水供給量	691	298	237	328	271	

降水量は入力データなので各実験で変化がない。蒸発散量は結合の過程で変化し、灌漑がないLR実験で最小、灌漑用水需要量が水収支を無視して無尽蔵に与えられるLA実験で最大をとる。流出量は陸面から河川に流れ込んだ水量で、河口到達流量はそのうち河口から海へ流れ出た水量である。両者の差は河道や貯水池の貯留量変化や灌漑による取水によるものである。貯留量変化量は土壌水分量、積雪水等量、河道内貯水量、貯水池貯水量の変化を示している。変化量のうち約 $400[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ は積雪水等量の変化によるものである。環境用水量は取水されることなく河口に到達する流量で $12,800[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ と推定された。

世界の非灌漑農地面積は $18.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ あり、1年に一回作付けを行った場合、作付け期間中の蒸発散量は $3,480[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$  ( $188[\text{mm yr}^{-1}]$ )、可能蒸発散量は $13,400[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$  ( $724[\text{mm yr}^{-1}]$ )、収量は $2,260[\text{kg ha}^{-1}]$ と推定された。世界の灌漑農地面積は $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ あり、灌漑用水供給量や収量はモデルの結合により大きく変化する。1年に一回作付けを行った場合、作付け期間中に $691[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ の灌漑用水需要が発生する。まず灌漑用水需要が無尽蔵に与えられるLA実験の場合、 $691[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ が供給され、 $4090[\text{kg ha}^{-1}]$ の収量が得られる。灌漑用水が河川のみから取水されるLRA実験では供給量が $298[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ に減少し、収量も $2,600[\text{kg ha}^{-1}]$ に落ち込む。さらに環境用水を設定し取水を制限したLRAE実験では、供給量は $237[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ まで減少し、収量も $2,470[\text{kg ha}^{-1}]$ となる。次に下流の水需要に応じて放流を行う貯水池操作を取り込んだLRAD実験では供給量が $328[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ に増大し、収量も $2,690[\text{kg ha}^{-1}]$ になる。環境用水を設定したLRADE実験でも供給量は $271[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ に維持され、収量も $2,600[\text{kg ha}^{-1}]$ と貯水操作がなく環境用水を考慮しないLRA実験程度に維持できることが示された。繰り返すがここに示した数値は全て計算値であり、検証や改良

の余地は残されている。しかし人間活動を考慮した水循環や水資源問題の理解に不可欠なこれらの要素が $1^\circ \times 1^\circ$ の空間解像度、日単位の時間解像度でグローバルに計算できる仕組みが完成したことを強調したい。

現段階で考察できる点は2つある。1つ目は灌漑用水需要がDöll and Siebertの先行研究<sup>5)</sup>の $1092[\text{km}^3 \text{ yr}^{-1}]$ の約六割しかない。これは彼らが二期作を考慮し、栽培期間を一律に150日に固定しているのに対し、本研究では二期作を無視し、収穫日を推定したとき、多くの地域で150日より短くなったことが原因だと考えられる。2つ目はBUCKETモデルの計算する可能蒸発散量が大きく、灌漑農地では灌漑供給水量によって変化することからも分かるように土壌水分量によって変化することである。式(2)より現在の可能蒸発散量の推定式は地表面温度の関数であり、式(3)より地表面温度は を通じて土壌水分に強く影響されるからだと考えられる。このBUCKETモデルで計算した実蒸発散量と可能蒸発散量を農業モデルでも利用するため、灌漑需要量や収量計算にまで影響を与える(式(7)や式(9)にあるとおり可能蒸発散量と実蒸発散量の比が収量に直接関係している)。可能蒸発散量を現実的な値に落ち着けるためのパラメタリゼーションについて検討を行う必要が示されている。

#### 4. 結論と今後の課題

全球統合水資源モデルの開発を行った。このモデルはBUCKETモデルをベースにした陸面過程モデル、TRIPモデルをベースにした河川モデル、SWIMモデルをベースにした農業モデル、Hanasaki et al.の貯水池操作モデル<sup>6)</sup>の4つのモデルからなり、白川の環境用水モデル<sup>17)</sup>も組み込まれている。モデルへの入力気象の時系

列データと地理情報（土地利用・河川網など）で、地球の陸上の水の動きを計算し出力する。本報告では3年間のテストシミュレーションを行った結果を示した。出力は現時点で必ずしも満足できる精度ではなかったが、今後改良を加えることにより、世界水資源アセスメントへの応用に堪える精度を持つツールになっていくことが期待される。気象の将来予測データを用いることで、将来の気候変動下の水資源量や水利用量の予測にも有効であると考えられる。

本研究は1) 入力データの不確実性、2) モデルの不確実性、3) 検証データの不足という、グローバルモデル研究の問題を全て内包している。1) については今後の急激な精度向上が望めないため、まずは出典の異なる複数の入力データを利用して実験を行い、現時点での入力データの不確実性の幅を示すことが有効だと考える。2) については、グローバルに入手できるデータに限りがあってモデル変数を増やすのが難しいこと、検証データの不足によりパラメタのチューンが難しいことが原因になっている。感度実験を繰り返し、検証サイトを少しずつ増やすことで、単純な構造からでも現象を的確に表現できるように各モデルを改良していく研究が必要である。3) については文字通り新たな検証データを収集することとモデルで検証できるデータを増やすことの二つの方策がある。前者に関しては近年グローバルデータの整備・公開が国内外で進んでおり、重要な検証データの入手可能性が高まっている。後者に関しては、モデルの中間出力の利用、具体的には地表面温度、LAIなどを衛星データと比較できないか、検討している。

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）ならびに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。また内閣府科学技術振興調整費、環境省地球環境研究総合推進費、日本学術振興会21世紀COEプログラムからも援助を受けています。有益な意見を下さった二名の査読者の方に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F. Lehner, B., Rösch T. and Siebert, S.: Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, *Hydrological Sciences J.*, Vol.48, No.3, pp.317-337, 2003
- 2) Deardorff, J.W.: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *J. of Geophys. Research*, Vol.83, No.C4, 1978
- 3) Dirmeyer, P.A., X. Gao and T. Oki.: The second global soil wetness project science and implementation plan, IGPO Publication Series, No.37, 2002
- 4) Döll, P and Siebert, S.: A digital global map of irrigated areas, *ICID J.*, Vol.49, No.2, pp.55-66, 2000
- 5) Döll, P and Siebert, S.: Global modeling of irrigation water requirements. *Water Res. Research*, Vol.38, No.4, 2002
- 6) Hanasaki, N., S. Kanae and T. Oki: A reservoir operation scheme for global river routing models, *Journal of Hydrology*, (accepted, 2005)
- 7) Krysanova, V, F. Wechsung, J. Arnold, R. Srinivasan, J. Williams: SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual, 2000
- 8) Leff, B., N. Ramankutty, J.A. Foley.: Geographic distribution of major crops across the world, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.18, 2004
- 9) Manabe, S.: Climate and the ocean circulation 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Monthly Weather Review*, Vol.97, No.11, 1969
- 10) Oki, T. and Sud, Y. C. Design of Total runoff integrating pathways (TRIP) –A global river channel network. *Earth Interactions*, Vol.2, 1998. <http://EarthInteractions.org>
- 11) Oki, T. and 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. of Meteorological Society of Japan*, Vol.77, pp.235-255, 1999.
- 12) Ramankutty, N. and J.A. Foley.: Characterizing patterns of global land use: An analysis of global croplands data, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.12, No.4, pp.667-685, 1998
- 13) Raskin, P., P. Gleick, P. Kirshen, G. Pontius and K. Strzepek.: Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world, Stockholm Environment Institute, 1997
- 14) Robock, A, K.Y. Vinikov.: Use of mid latitude soil moisture and meteorological observations to validate soil moisture simulations with biosphere and Bucket models. *Journal of Climate*, Vol.8, pp.15-35, 1995
- 15) 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹：灌漑取水の影響を考慮した全球河川流量シミュレーション, *水工学論文集*, Vol.49, pp.403-408, 2005.
- 16) 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹：全球土壌水分プロジェクトを利用した全球日単位の流出グリッドデータの構築, *水文・水資源学会2005年大会予稿集*, 2005
- 17) 白川直樹：水文気候の季節性から推定される環境用水のグローバル必要量, *水工学論文集*, Vol.49, pp. 391-396, 2005

(2005.9.30受付)