

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2007～2010

課題番号：19106008

研究課題名（和文）世界の水資源の持続可能性評価のための統合型水循環モデルの構築

研究課題名（英文）Developing an Integrated Hydrological Model for Sustainability Assessment of World Water Resources

研究代表者

沖 大幹（OKI TAIKAN）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：50221148

研究成果の概要（和文）：水と食料、両者の持続性をグローバルスケールで議論可能とし、さらに、今後懸念される世界の水問題に対して国際社会がとるべき施策に資するように、統合型水循環モデルの各要素モデルの精緻化、高精度化を図り、さらにサブモデルとして窒素循環・水質、ダム・発電用水、深層地下水資源のモデルを新たに開発した。

研究成果の概要（英文）：To be able to discuss persistence of water and food at the global scale, and to contribute to the international community against future world water issues, we developed an Integrated Water Cycle and Resource model based on earth system science and coupled with human activities, crop growth, and environmental flow considerations derived from detailed process-level studies. Furthermore, we developed new models for nitrogen cycling and water quality, hydraulic power station, and groundwater resources as a sub-model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	18,000,000	5,400,000	23,400,000
2008年度	12,900,000	3,870,000	16,770,000
2009年度	18,700,000	5,610,000	24,310,000
2010年度	13,700,000	4,110,000	17,810,000
年度			
総計	63,300,000	18,990,000	82,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：水資源、温暖化、持続可能性、統合的水循環モデル、人間活動

## 1. 研究開始当初の背景

本研究の統合型水循環モデルのように、世界の水資源を推定できるモデルと呼べるのは、研究開始時点では我々グループの他にはドイツのカッセル大学にしかなく、人間活動の組み込み、物理法則・植物生理に基づいた水収支算定、詳細なプロセス研究に基づく水利用モデル、気候モデルと結合可能、などの点では日本が現時点で世界をリードしており、極めて独創的な研究である。しかし、「今

の地球システムは水資源に関して持続可能か？」という社会からの一番重要かつ素朴な疑問に対して、まだ明確な回答はできていなかった。そのような意味においても、統合型水循環モデルを全面的に深化させるための研究開発がまだまだ必要であった。

## 2. 研究の目的

2014年ごろに発表される予定の IPCC 第 5 次報告書への貢献を念頭に置き、水と食料両

者の持続性をグローバルスケールで議論できるように、さらに今後懸念される世界の水問題に対して国際社会がとるべき施策に資するように、これまで開発してきた統合型水循環モデルをより発展的に構築する。

### 3. 研究の方法

統合型水循環モデルは大きく自然系水循環モデル、人間系水利用モデルに分けられ、それらのモデルに関して精緻化、高精度化を図り、さらに、両者を結びつけるサブモデルとして窒素循環・水質、ダム・発電用水、深層地下水資源のモデルを新たに開発し、全体を統合したモデルシステムを構築する。この統合型水循環モデルを20世紀の100年分について日単位で実行し、水・エネルギー収支、水循環、水利用の推定を行い、検証データを用いてその適合性を確認するとともに、主要なフィードバック過程や、ダム貯水池の効果、人口や経済発展、土地利用変化がグローバルな水循環と水利用にどの程度インパクトを与えてきたのかを定量的かつグローバルに明らかにする。さらにいわゆる温暖化に伴う気候変動シミュレーションモデルへの採用を目指し、グローバルな水循環・水資源の将来像を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 全球水資源アセスメントのための統合水循環モデルの構築

水と食料、両者の持続性をグローバルスケールで議論可能とし、さらに、今後懸念される世界の水問題に対して国際社会がとるべき施策に資するには、季節変動を考慮した全球水資源アセスメントが必要不可欠である。そこで、陸面水文過程、河道流下、農業用水、貯水池操作、環境用水、生活・工業用水の6つの要素包括した統合モデルを構築した。32の河川を対象にモデルで推定した流出量を観測された流出量と比較した結果(図1)、他のモデルに比べて遜色のない精度であることが実証された。信頼できる推定結果を得る

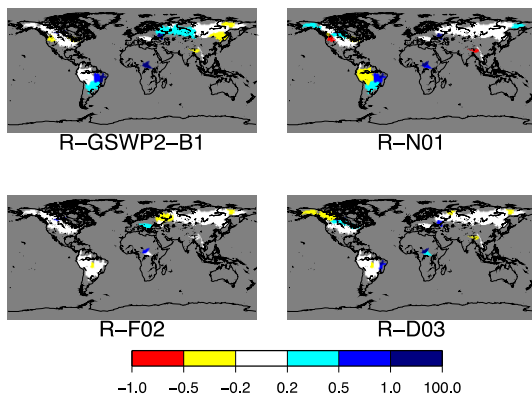


図1 全球32河川におけるモデルによる推定値と観測値の流出量の比較

には詳細なモデルのみならず、精度の高い入力値を利用するため、入力値の高精度化を進め、また更なる各要素モデルの高度化、さらにサブモデルとして窒素循環・水質、ダム・発電用水、深層地下水資源のモデルを新たに開発した。

#### (2) 大気再解析データを用いた水同位体循環推定

全球気候モデルへ安定同位体過程を組み込み、数十年間の全球同位体循環を推定した。海面温度(SST)だけを入力値に使う全球モデルと違って、スペクトルナッジング手法を適用したことで推定精度は大幅に改善された。とりわけ、北極振動の再現はSSTだけで再現されたものより非常に正確であり(図2)、また同位体の月変動量はヨーロッパなど北半球中高緯度域では観測の値とよく一致した。この手法は同位体観測が行なわれていない地域にも同位体情報を提供し、生化学分野、水文学分野、古気候研究などの境界条件や初期値情報として非常に有益である。

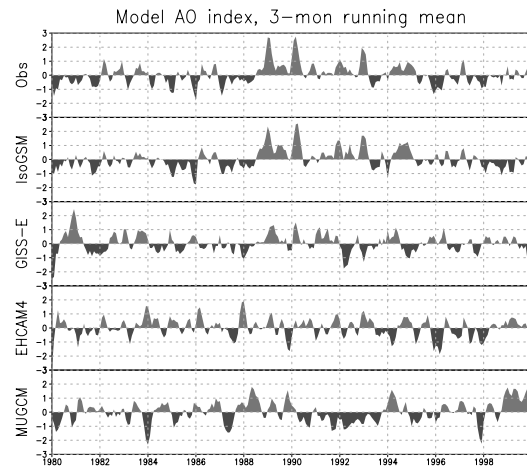


図2 北極振動におけるモデルによる推定値と観測値の比較

#### (3) 気候変動下での全球水資源アセスメントに向けた気候モデル出力値補正手法の開発と検証

将来の全球水資源アセスメントをするにあたり必要となる全球気候モデルの出力値を直接補正する手法として、月平均気温と月合計降水量に関してこれまでに用いられている出力値直接補正手法を改良した。過去の観測データを用いて検証した結果、改良によって全球気候モデルの出力値を補正せずにそのまま用いた場合に比べ誤差を減らすことができた(図3)。将来予測データに補正手法を用いた時の結果の傾向を調べた結果、誤差がより少ない補正手法ほど、気候モデルの違いに関わらず予測結果が似た値を示す

傾向があった。また、これまで全球気候モデルの出力値の補正手法がグローバルスケールで検証はされた研究はなく、本研究で検証した各補正手法の特性は非常に有益である。

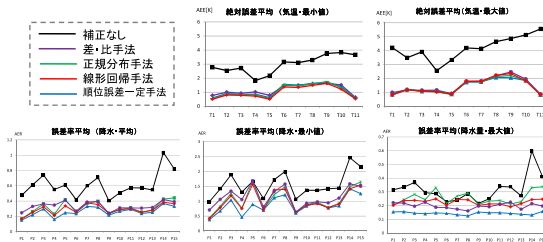


図 3 手法による検証結果の比較 (横軸: 地域, 縦軸: AEE[気温], AER[降水量]). 1951-1980 のデータを用いて 1981-2000 年の補正を行った。

#### (4) 窒素負荷量推定の生化学モデル構築

施肥量、人口分布、土地利用、社会センサスに基づき農業、工業、生活にかかる窒素負荷量を算定する統合モデルを構築した。また、土層からの窒素浸出をモデル化し、水圏への硝酸態窒素の流出を分布型数値モデルによって推定した。1976 年から 2005 年までのデータを使って日本の 59 河川で窒素負荷量を推定した結果 (図 4)、実観測値とよく一致することが実証された。このモデルは国レベルでの窒素負荷量の推定に利用でき、気候変動や土地利用変化に伴う表層水質など水圏環境への影響評価の強力な手法として期待される。

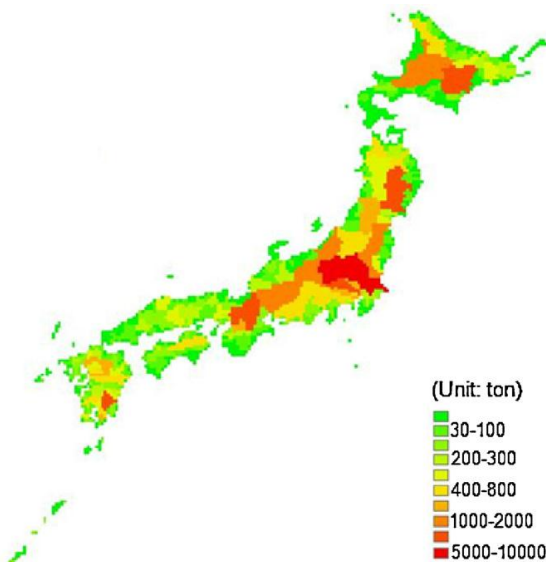


図 4 日本における年平均全窒素量の空間分布

#### (5) 工業および生活用水量推定手法の開発

将来の水資源逼迫度の予測においては農

業用水と同等以上に工業用水および生活用水の取水量の推定精度が全システムの予測の精度を左右することが分かりつつあり、統合型水循環モデルとの統合に向けた生活用水量の将来予測手法の開発を行い、生活用水量算出モデル、水質汚濁負荷算出モデルを開発した。そしてこれらのモデルを用いて、グリッドごとに水資源逼迫度および生活系汚濁負荷による濃度上昇量を算出し、生活系水利用による水循環への影響が大きい地域を同定した。また、工業用水予測の既存モデルの精度向上のためのパラメータの決定方法にも検討を加えた。

#### (6) Virtual water trade の評価手法の開発

商品生産に必要な水消費量を輸入/輸出国 (地域等) へトレードするという virtual water の概念は、水資源アセスメントをするうえで有益であり、さらに green/blue water に分類できれば持続性可能性などの評価もできるようになる。そこで、統合水循環モデルを用いて主要作物・家畜の virtual water trade の評価手法を開発した。検証として 1985 年から 1999 年の 0.5 度グリッドのデータを用いて試算したところ、総降雨量は  $113,900 \text{ km}^3/\text{yr}$ 、平均蒸発量は  $72,080 \text{ km}^3/\text{yr}$  であった。また、green water 起源の非灌漑耕地からの蒸発散量、灌漑耕地からの蒸発散量、blue water 起源の灌漑耕地からの蒸発散量はそれぞれ  $7,820$ 、 $1,720$ 、 $1,530 \text{ km}^3/\text{yr}$  であった。5 主要作物 (大麦、トウモロコシ、米、大豆、小麦) と 3 主要畜産物 (牛肉、豚肉、鶏肉) の全球での virtual water 輸出量は  $545 \text{ km}^3/\text{yr}$  であることが推定された (図 5)。その内、 $61 \text{ km}^3/\text{yr}$  (11%) が blue water であり、 $26 \text{ km}^3/\text{yr}$  (5%) が非循環型、地産地消でない水、化石水などであると推計された。本研究により、統合水循環モデルを用いて virtual water trade の評価および起源の推定が可能となった。将来の食糧問題や人口問題を検討するに当たり、本モデルは水、食物、土地利用を複合的にアセスメントする強力な手法として期待される。

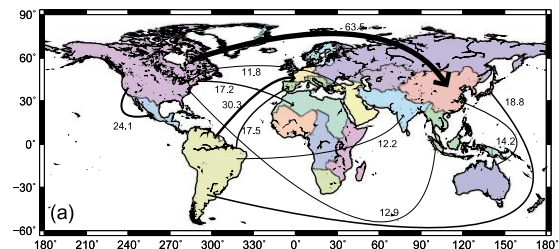


図 5 世界の virtual water 総輸出力 ( $\text{km}^3/\text{yr}$ )

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 24 件)

- ① 小槻峻司, 田中賢治, 小尻利治, 浜口俊雄: 灌漑地の拡大の影響を考慮したアラル海流域における水・熱収支の経年変化の再現, 水工学論文集, 55, 391-396, 2011. 査読有.
- ② 渡部哲史, 沖大幹, 鼎信次郎: 気候変動下での全球水資源量評価に向けた気候モデル出力値補正手法の開発と検証, 水工学論文集, 54, 259-264, 2010. 査読有.
- ③ J. Cho, P. J. F. Yeh, Y. W. Lee, H. Kim, T. Oki, S. Kanae, W. Kim, and K. Otsuki: A study on the relationship between Atlantic sea surface temperature and Amazonian greenness. *Ecological Informatics*, 5(5), 367-378, 2010. 査読有.
- ④ J. Xu, K. Masuda, Y. Ishigooka, T. Kuwagata, S. Haginoya, T. Hayasaka and T. Yasunari: Estimation and verification of daily surface shortwave flux over china. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 89A, 225-238, 2010. 査読有.
- ⑤ Hanasaki, N., Inuzuka, T., Kanae, S., and Oki, T.: 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*, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.028, 2009. 査読有.
- ⑥ He B, Oki T, Kanae S, Mouri G, Kodama K, Komori D, and Seto S.: Integrated biogeochemical modeling of nitrogen load from anthropogenic and natural sources in Japan. *Ecological Modeling*. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.05.18, (220) 2325-2334, 2009. 査読有.
- ⑦ Nakagawa, N., M. Otaki, T. Aramaki, and A. Kawamura: Influence of water-related appliances on projected domestic water use in Tokyo, *Hydrological Research Letters*, 3, 22-26, 2009. 査読有.
- ⑧ Yoshimura, K., M. Kanamitsu, D. Noone, and T. Oki: Historical isotope simulation using Reanalysis atmospheric data, *J. Geophys. Res.*, 113, doi:10.1029/2008JD010074, 2008. 査読有.
- ⑨ Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: An

integrated model for the assessment of global water resources - Part 2: Applications and assessments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 1027-1087. 2008. 査読有.

- ⑩ Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K.: An integrated model for the assessment of global water resources - Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 1007-1025. 2008. 査読有.

[学会発表] (計 56 件)

- ① Yamazaki, D., D. E. Alsdorf, S. Han, and T. Oki: Seasonal water storage on the Amazon floodplain: a comparison between satellite measurement and model simulation, American Geophysical Union (AGU) 2010 Fall Meeting, San Francisco, United States, 2010/12/13-17.
- ② Oki, T., N. Hanasaki, T. Inuzuka, and S. Kanae: Model based quantification of global virtual water trade and the sources of water withdrawal for major crops and livestock products, American Geophysical Union (AGU) 2010 Fall Meeting, San Francisco, United States, 2010/12/13-17.
- ③ Kim, H., P. J. -F. Yeh, T. Oki, and S. Kanae: Evaluating the Role of Rivers in Basin Scale Terrestrial Water Storage Variations Using Ensemble Hydrological Simulations Validated by GRACE and Gauged Discharge in Global Rivers. European Geosciences Union, Vienna, Austria, 2010/5/2-7.
- ④ Koirala, S., P. J. -F. Yeh, S. Kanae, and T. Oki: Explicit representation of groundwater process in a global-scale land surface model to improve the prediction of water resources. European Geosciences Union, Vienna, Austria, 2010/5/2-7.
- ⑤ Masuda, K. and Akasaka, I.: Combination of observational data and model product data for better coping with climate change, Philippine Meteorological Society 4th National Me

teorological Hydrological Convention, Quezon City, Philippines, 2008/11/28.

- ⑥ Nakagawa N., M. Otaki, K. Sanada, T. Aramaki: Projection of domestic water use under the spread of water saving appliances in Tokyo, International Conference on Uncertainties in Water Resource Management: causes, technologies and consequences, Ulaanbaatar, Mongolia, 2008/10/2.
- ⑦ 真田圭太郎, Magnus Bengtsson, 荒巻俊也, 大瀧雅寛, 中川直子, 花木啓祐: 地球規模の水循環モデル構築に向けた生活用水使用量の将来予測手法の開発. 水文・水資源学会2008年度研究発表会, 東京, 日本, 2008/8/26.
- ⑧ 仲江川敏之: JRA-25で解析された陸面水文過程の再現性, 気象学会春季大会, 横浜, 日本, 2008/5/21.
- ⑨ Naota Hanasaki, Sinjiro Kanae, Taik an Oki, Kooiti Masuda, Ken Motoya, Yanjun Shen, Kenji Tanaka, and Naoki Shirakawa: An integrated model for the assessment of global water resources. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2008/4/18.
- ⑩ T. Nakaegawa: Comparison of seasonal cycles of land surface hydrological processes between JRA-25 and GANAL, Third WCRP International Conference on Reanalysis, Tokyo, Japan, 2008/1/31.

[図書] (計1件)

- ① Maggie Black and Jannet King 著 沖大幹 監訳 沖明 訳, 丸善出版, 水の世界地図 第2版 刻々と変化する水と世界の問題, 2010, 130

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)  
○取得状況 (計0件)

[その他]

研究成果の社会・国民への発信 (計44件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

沖大幹 (OKI TAIKAN)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号: 50221148

### (2) 研究分担者

荒巻 俊也 (ARAMAKI TOSHIYA)  
東洋大学・国際地域学部・教授  
研究者番号: 90282673&

大瀧 雅寛 (OTAKI MASAHIRO)  
お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・准教授

研究者番号: 70272367

田中 賢治 (TANAKA KENJI)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号: 30283625

増田 耕一 (MASUDA KOICHI)  
海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター・サブリーダー  
研究者番号: 30181647

### (3) 連携研究者

鼎 信次郎 (KANAE SHINJIRO)  
東京工業大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 20313108

徐 健青 (JYO KENSEI)  
海洋研究開発機構・地球環境変動領域・主任研究員  
研究者番号: 50344304

仲江川 敏之 (NAKAEGAWA TOSHIYUKI)  
気象研究所・気候研究部・主任研究官  
研究者番号: 20282600

花崎 直太 (HANASAKI NAOTA)  
国立環境研究所・社会環境システム研究領域・主任研究員

研究者番号: 50442710

平林 由希子 (HIRABAYASHI YUKIKO)  
東京大学・大学院工学系研究科附属総合研究機構・准教授

研究者番号: 60377588

楊 大文 (YANG DAWEN)  
中国清華大学・水利水電工程系・教授  
研究者番号: 40334312

芳村 圭 (YOSHIMURA KEI)  
東京大学・生産技術研究所・准教授  
研究者番号: 50376638