

「水の循環系モデリングと利用システム」

平成13年度採択研究代表者

沖 大幹

(東京大学生産技術研究所 助教授)

「人間活動を考慮した世界水循環・水資源モデル」

1. 研究実施の概要

現在の世界の水の循環は人間がいかに関与するかにより大きく影響されており、同時に人間の水利活動は水循環に影響されている。その相互作用を取り込むモデルフレームワークを構築し、今世紀に予想される世界的な水危機に関して情報発信することが最終的な目標である。今年度は代表的なものとして、以下の事項に関して研究を進めた。

1. 水循環（水供給）モデルの開発
2. 各水需要モデルの開発
 - 2-1. 農業水需要・土地利用モデルの開発
 - 2-2. 都市・生活用水需要モデルの開発
 - 2-3. 環境用水需要モデルの開発
3. 衛星データを含む情報技術の有効活用に関する研究の推進
4. 統合水循環・水資源モデルシステムの構築、及び全球規模水需給アセスメント

2. 研究実施内容

2-1. 水循環モデルの開発

大循環モデル(GCM)を用いた温暖化実験結果の水循環場には、モデル独自の時空間バイアスが存在する。それを可能な限り除去し、信頼性のより高い現実的な予測降水量分布を作成する手法を構築した。具体的には、モデル出力（過去・将来）と観測データ（過去）の2つを、主成分分析を用いて、卓越する空間パターン（モード）とその時系列変化に分解し、観測の各モードとそれに対応するモデルの将来の時系列変動を組み合わせることによって、将来的な変動トレンドは維持したまま、現状の気候モデル出力にありがちな『なまされた』時空間変動が、現実的なものとなるという手法である。今後、この手法を用いて作成した降水量将来予測等を用いて水資源の将来予測を行っていく。

また、昨年から引き続き、GSWP（全球土壌水分プロジェクト）の推進及び全球陸域水文量の推定を行っている。最先端のWeb技術・データアーカイブ技術を駆使した相互比較センター(ICC)及びデータダウンロードセンター(DDC)を構築した。

さらに、水量だけではなく、水質にも着目してアプローチするため、河川水に対する

農業起源の窒素負荷量の算定を行っており、中国・黄河での季節変動及び年々変動が精度よく表された。この研究に関しては、17年度以降に精華大学と共同して観測を行っていく予定である。

2-2. 各水需要モデルの開発

2-2-1. 農業水需要・土地利用モデルの開発

1) インドや中国を対象とした土地利用や水利用の集約化や転換に関する調査・分析

16年度は、インド全体を対象に州別、県別の統計データを時系列に収集し、農業生産の集約化と灌漑の広がり进行分析することをさらに進めたうえで、土地利用や水利用の集約化がどのような経済メカニズムのもとで進行しているのか、その前提条件は何かなどを明らかにし、農家行動モデルを開発するために、ガンジス川流域のいくつかの地域に関して、より詳細なデータの収集・整理を行った。また、中国では水資源制約の厳しい黄河中流部において小麦耕作地域を対象に灌漑状況と単収のサンプル調査を行い、インドと同様の土地利用・水消費モデルの構築準備を行った。平成17年度は両地域において、土地利用と水性比の連携モデルの構築を行う。

2) 世界の食糧需給と水消費

東京大学から Culture and Education Information Center Huazhong Normal Universityへ転出したDr. Guoxigen Tan氏が開発したモデル(LUCM)と世界食料需給モデル(IFPSIM 3 2地域)を組み合わせることにより、人口増加、経済発展、地球温暖化の影響を考慮した食料需給量推移および農産物の空間的な作付面積変化を説明するモデルの構築に取り組んできた。本年度は、食料生産性セクター、土地利用セクター、国際交易セクターを構成するモデルを融合することにより、WHEAT(小麦)、MAIZE(トウモロコシ)、RICE(米)、SOYBEANS(大豆)に関する品目別作付面積の時空間変化を説明するモデルより安定的な計算結果を出すことに成功した。具体的な手法としては、4品目の作付面積および生産性はLUCMからの計算結果を導入する構造となっている。組み合わせられたモデルの計算結果が大きく逸脱しないように、IFPSIMだけによる計算結果と比較した上で自動的に調整する仕組みを組み込むことにより、安定性の確保と計算結果の精度向上を試みた。

構築されたモデルは、マイクロソフト社の表計算ソフトおよびVISUALC++を用いて構築されている。そのためにパラメーターの変更や計算結果の推移を視覚的に、かつ比較的容易にとらえることが可能となる。資源問題を定量的に理解するための教材としての開発準備を進める。また政策的な要素の変化、たとえば農業政策を反映した外生変数に対してどのような状況がおりうるかについての計算を行い、モデルの予測精度の向上と安定性の確保を目指し、計算結果について順次報告を行っていく予定である。

3) 農業生産と水需要研究

東アジアにおいて、農業や人間活動が水質に与える影響を定量的に予測する数理モデルを全年度に引き続き作成した。数理モデルのメッシュを平成15年度までに作成した0.5度から1kmに引き上げたことが、平成16年度の最大の成果である。この拡張により、

都市とその周辺における水質汚染の広がりを推定することが可能になった。また数理モデルの検証のための、東アジアにおける農村地域の水質汚染実態調査を継続した。

平成17年度においては、東アジアにおける汚染負荷発生量をより正確に推定することを予定している。このために、東アジアにおいて実地調査を継続する。行政機関、大規模工業などへの聞き取り調査を強化する予定である。実施調査を踏まえて、東アジアにおける2030年までの、より精度の高いエミッションシナリオの作成にも取り掛かる。平成17年度の成果を平成16年度までに作成した数理モデルと組み合わせることにより、より精度の高い東アジア地域の水質予測が可能となる。

2-2-2. 都市・生活用水需要モデルの開発

昨年度に引き続き、複数の都市を対象とした水使用状況の経年変化とその影響因子の解析を継続して行った。また、ロンドンなどの欧米の都市を中心として現地研究者を通じた文献調査を行って水使用状況とそれに影響を与える要因について経年変化の状況をさらに収集し、解析を行った。さらには、昨年度チェンマイにて行った各家庭の用途別水利用状況の調査を雨期（6～8月）に行うとともに、新たにコンケン（タイ）を対象として乾期（12～2月）にかけて同様の調査を行った。さらに、全球の水資源水需要モデルへ都市用水使用量を実装するために、まず現状で0.5度グリッドでの都市用水使用量の推定方法を検討した。2050年および2100年における都市用水需要の予測モデルについての検討も開始している。これらの成果は別に示す論文、口頭発表、あるいは次年度に予定されている口頭発表の中で公開されている。

本年度は、昨年度から行っているコンケン（タイ国）を対象とした各家庭の用途別水利用状況の調査を雨季（6～8月）に行う。また、東南アジアでより経済発展が遅れている地域を対象とした調査の可能性を検討する。これらの結果は、過去に行ったチェンマイでの調査や、他の先進国の値と比較することにより、今後の途上国において水使用がどのように変化していくかについて重要な示唆を与えうるものと考えられる。また、全球の水資源水需要モデルへのインプットとなる都市用水需要及び工業用水需要についての検討も継続する。今後の社会経済の動向により、一人あたりの生活用水使用量の変遷は大きな影響を受けるものと考えられ、社会経済シナリオの設定、それに対応した各国での一人あたり水使用量の変動、についてこれまで得られた知見（特に国内での知見）をもとにアジア諸国への適用性などについて議論を進めていく。

2-2-3. 環境用水需要モデルの開発

昨年度は、環境用水需要量算定モデルの骨組を具体化・定量化してグローバルな需要量算定を行った。本プロジェクトの水循環モデルグループで計算された河川流量値を用い、9年間の推定自然流況をもとに水文気候分類を行ったうえで各グリッドの環境用水需要量を月ごとに求めた。流量要素として基底流量に加え出水攪乱と渇水を考慮し、それぞれの頻度や量は諸外国の実施報告例から原単位を定めた。結果をみると、おおむね年総流量の30%弱の割合になっているものの、場所による気候の違いが明確に反映されている。例えばCongo川では流出高にして通年10mm程度でほぼ一定だが、Amazonでは最

少月で10mm, 最大月で45mm, Mekongでは同じく0.5mmおよび50mmというように雨季と乾季で環境用水の需要量も異なるという性質がよく表されたといえる。また, 標高と勾配により上流山間地と平野部の違いなど地形的特徴を考慮できるようモデルの改善を試みている。また, いくつかの河川で流域の社会経済発展と環境配慮の関係を調べたが, 普遍的な一般化までは至らなかった。本年度は, 昨年度に一通り出来上がった水文気候条件による分類に加え, 現在進行中の地文条件および社会条件のモデル化を組みあわせて環境用水モデルを完成させる。そして水循環モデルの成果を利用して定量化し, いくつかの場所で検証を実施するとともに, 他の水需要モデルと統合して全体の水需給アセスメントに供すべく, 他需要評価との整合性や統合の仕方などモデル細部の詰めを行いたい。

2-3. 衛星データを含む情報技術の有効活用に関する研究の推進

2-3-1. 衛星データ利用

1) 大陸スケールの水田域の抽出

本年度は, 東京大学生産技術研究所でアーカイブを行っている東アジアおよび東南アジアのMODISデータ受信領域における水田分布マップを作成した。昨年度開発した狭域から広域へとスケールアップする手法をASTERとMODISとの間に適用し, 東アジアおよび東南アジアにおける国ごとのデータベースの整備および水田分布図作成モデルの開発を行った。作成したデータベースとモデルをもとに, 1kmグリッドの水田面積比率分布図を作成した。作成した分布図を, 国際稲研究所(IRRI)、世界食料機関(FAO)、各国の農業関連省庁より発行されている統計データをもとに検証した結果, 現在大陸レベルで入手可能などの土地被覆分類図よりも高精度の水田分布図を作成されたことが確認された。

来年度は, 水田分布図を作成する領域を全アジア域へ拡張するため, 東京大学生産技術研究所およびアジア工科大学院で受信しているデータのみならず, 中国及び西アジアの国々のMODISデータをNASA/GSFCより入手し, データベースの拡張を図る。同時に, 検証データとして必要となる統計データおよびASTERを使用して作成しているデータベースの拡充も引き続き行う。また, 現在国別に作成している水田抽出モデルをより細分化することにより, 水田分布図の高精度化を行う。さらに, 現モデルでは実装されていない一期作と二期作の区別についてもモデルに組み込む。

2) 衛星画像と穀物生産力モデルの組み合わせによる灌漑農地の抽出と灌漑水量の推定方法の開発

キャリブレーションされた穀物生産力モデルからのLAI(葉面積指数)の時系列変化値と衛星画像から得られるLAIの変化値から, 作付日や収穫日, 収量や灌漑水投入量が推定可能である。16年度は中国の黄河中流域において, 詳細な現地調査と衛星画像の収集を行い, モデルのキャリブレーションをほぼ終了した。平成17年度はその成果を基に, 作付状況がわかっている穀物栽培地域において単収と水消費量の同時推定を試みる。さらにこの方法を大陸スケールに適用する。

2-3-2. 情報技術の有効活用

GSWP2データを対象とし, 様々なデータ間の相互比較を実現するInter Comparison

Centerの構築を進めた。本システムはTB級のデータを一元的に管理し、Webページ上の平易な操作で柔軟かつ容易に視覚化が可能となっており、当年度は1データ間の相互比較機能、指定データの全モデル間同時一括比較機能、領域指定時系列抽出機能の実装を行った。また、これらの出力結果の確認を行うツールとして、アニメーション機能も含めた視覚化ツール群の開発を行い、上記機能と統合したシステムとして構築を行った。本システムは実際にデータを利用する多くの専門家によるテスト利用も開始している。

H17年度は本システムの構築を更に進め、より高度な機能を有するインターフェースの実装、実利用者の視点に立った柔軟な相互比較実現手法の開発、効果的な視覚化手法の実現を進める。インターフェースに関しては、現在より更に少ないクリック数で必要とする比較機能が実現する手法の検討を行い、視覚化に関しては、ノートパソコン等低解像度の表示装置から巨大なディスプレイウォールまで、幅広い環境下で対応可能な手法の検討開発を進める。また、通常本データを利用している当該分野の研究者との協力を更に進め、従前のツールや手法では発見が困難であったモデルの特徴や問題点の発見等、実用的な利用実験を行う。

2-4. 統合水循環・水資源モデルシステムの構築、及び全球規模水需給アセスメント

人間活動を組み込んだ世界水資源水循環モデルの構築のために必要なデータを収集しつつある。具体的には、本年度は各国の農業生産・人口動態・工業用水使用量・都市用水使用量・灌漑用水使用量・都市／郊外人口比率・GDPなどの人文社会的データの最新改訂版、そしてグローバルグリッド（いずれも1度ないしそれ以上細かい解像度）の温暖化時気候変動予測（地球シミュレータによる）値やわが国におけるこれまでデジタル化が大きく遅れていた河川流量データ（紙資料）である。これらのデータを、本研究グループの共通フォーマットに変換する作業を開始し、かつデータアクセスへの標準インターフェースを策定中である。また、これらを用いて主要SRESシナリオ下における人口・GDPの将来予測値をグローバル0.5度グリッドで作成した。

来年度には、わが国の河川流量資料についてデジタル化を完成させる。これに加えて、各サブグループがさまざまな国・地域でこれまでに得てきた豊富な人文社会データおよび気象データを包括的に組み合わせることで、高度経済成長にともなって人間社会と河川水とのかかわりがどのような変化をもたらしたか記述するモデルを作成する。このモデルをグローバルな水資源変動・社会変動をもたらすシナリオ下で動かすことで、世界的な水資源需給バランスおよびその将来像を検討する。この際、種々のデータを透過的にアクセスするインターフェースを策定し、標準モデルの作成を容易にする。最終的に、水資源水需給バランスを人間活動を加味しながら表現するモデルを構築し、主要SRESシナリオおよびそのもとでの仮想水輸出入下における世界の水需給バランスのアセスメントを行なう。

3. 研究実施体制

世界水モデル・データベース研究グループ

- ① 研究分担グループ長：沖大幹（東京大学生産技術研究所・助教授）
- ② 研究項目：
 - ・ 自然水循環だけでなく灌漑等の人間活動を取り込んだ水循環モデルの作成
 - ・ 水需要算定との統合による水資源アセスメント
 - ・ モデリングとアセスメントのための、大規模リモートセンシングデータの処理
 - ・ 超巨大データベースの開発、シミュレーション結果の可視化技術の開発

農業生産と水需要研究グループ

- ① 研究分担グループ長：川島博之（東京大学大学院農学生命科学研究科・助教授）
- ② 研究項目
 - ・ 世界の水需要の過半を占める農業用水需要について、統計解析とモデリングによる、0.5度あるいは0.1度グリッドスケールで算定・予測。及び水資源が制限要因となり得る将来の農業生産／土地利用の予測と分析。

人間活動と水需要研究グループ

- ① 研究分担グループ長：荒巻俊也（東京大学先端科学技術研究センター・講師）
- ② 研究項目
 - ・ 用途ごとの生活・工業用水需要に影響を与える因子についての検討、及びモデル化
 - ・ 上記モデルのグローバル評価

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文発表

[海外]

- Kumagai T, Saitoh TM, Sato Y, Takahashi H, Manfroi OJ, Morooka T, Kuraji K, Suzuki M, Yasunari T, Komatsu H., Annual water balance and seasonality of evapotranspiration from a Bornean tropical rainforest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 128(1-2), pp.81-92, 2005.
- Komatsu H, Kumagai T, Hotta N., Is surface conductance theoretically independent of reference height?, *Hydrological Processes*, 19(1), pp.339-347, 2005.
- Miyazaki, S., T. Yasunari, T. Miyamoto, I. Kaihotsu, G. Davaa, D. Oyunbaatar, L. Natsagdorj, and T. Oki, Agrometeorological conditions of grassland vegetation in central Mongolia and their impact for leaf area growth, *J. Geophys. Res.*, 109, D22106, doi:10.1029/2004JD005179, 2004.

- Kumagai T, T.M. Saitoh, Y. Sato, T. Takahashi, O.J. Manfroi, T. Morooka, K. Kuraji, M. Suzuki, T. Yasunari, H. Komatsu, Annual water balance and seasonality of evapotranspiration from a Bornean tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 128, 81-92, 2004.
- The GLACE Team: R.D. Koster, P.A. Dirmeyer, Z. Guo, G. Bonan, E. Chan, P. Cox, C. T. Gordon, S. Kanae, E. Kowalczyk, D. Lawrence, P. Liu, C-H. Lu, S. Malyshev, B. McAvaney, K. Mitchell, D. Mocko, T. Oki, K. Oleson, A. Pitman, Y. C. Sud, C.M. Taylor, D. Verseghy, R. Vasic, Y. Xue, and T. Yamada, Regions of Strong Coupling Between Soil Moisture and Precipitation, *Science*, 1138-1140, 2004.
- Komatsu H., A general method of parameterizing the big-leaf model to predict the dry-canopy evaporation rate of individual coniferous forest stands, *Hydrological Processes*, 18(16), 3019-3036, 2004
- Yoshimura, K., T. Oki, and K. Ichiyanagi, Evaluation of two-dimensional atmospheric water circulation fields in reanalyses by using precipitation isotopes databases *J. Geophysical Research, Atmosphere*, October, 2004
- Yang P., Tan G.X., Zha Y., Shibasaki R., 2004. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate crop yield in North China. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Turkey, Vol. XXXV, Part B7, pp.150-155. 出版日: 2004/07
- Environmental Conservation Vs Compensation: Explorations from the Uttaranchal Himalaya
S. Nautiyal, K.S. Rajan and R. Shibasaki, *Environmental Informatics Archives*, Volume 2 (2004), 88-99 出版日: 2004/08
- T. Aramaki, M. Suzuki and K. Hanaki. International Analysis and Projection of Domestic Water Use, *Journal of Global Environment Engineering*, 10, 1-10, 2004.

[国内]

- 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*、49、pp.403-408、2005
- 山田朋人、鼎信次郎、沖大幹、相似性を示す統計指標の数学的構造、*水工学論文集*、49、pp.1-6、2005
- 須賀 可人、平林 由希子、鼎 信次郎、沖 大幹、施肥量の増加に伴う全球河川の硝酸輸送量変化、*水工学論文集*、49、1495-1500、2005.
- 平林 由希子、鼎 信次郎、沖 大幹、20世紀の世界陸域水文量の長期変動、*水工学論*

文集, 49, 409-504, 2005.

- 梶谷宜弘, 堀田紀文, 小松光, 久米朋宣, 鈴木雅一、斜面上部・下部に生育するスギ樹木の蒸散日変化パターンの差異. 日本森林学会誌 87(1), 63-72. Feb., 2005.
- 竹内 渉, 安岡 善文, 衛星リモートセンシングデータを用いた正規化植生, 土壌, 水指数の開発, 写真測量とリモートセンシング, 43(6), 7-19. 出版日: 2005/01/17
- 竹内 渉, 安岡善文 MODISデータを用いた東アジアの水田面積比率分布図の作成, 写真測量とリモートセンシング, 43(6), 20-33. 出版日: 2005/01/17
- 白川直樹 (2005) 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 49: 391-396.
- 小松光, 数値モデルの利用・理解を容易にする無次元化---多層植被モデルを題材として---, 水文・水資源学会誌, 17(4), 401-413, 2004
- Yoshimura, K., T. Oki, N. Ohte, and S. Kanae, Colored moisture analysis estimates of variations in 1998 Asian monsoon water sources, J. Meteor. Soc. Japan, October, 2004
- Oki, T. and S. Kanae, Virtual water trade and world water resources, Water Science & Technology, 49, No. 7, 203-209, 2004.
- Dairaku, K., S. Emori, and T. Oki, Rainfall amount, intensity, duration, and frequency relationships in the Mae Chaem watershed in Southeast Asia, J. Hydrometeor., 5, No. 3, 458-470, 2004.
- Kanae, K., T. Oki, and A. Kashida, Changes in Hourly Heavy Precipitation at Tokyo from 1890 to 1999, J. Meteor. Soc. Japan, 82, No.1, 241-247, 2004.
- 松村 寛一郎, 共著 第2章担当, 東京化学同人, 環境科学-人間と地球の調和をめざして, 193pp. 2004
- 竹内 渉, 安岡 善文 MODISデータを用いた合成画像作成手法の開発, 写真測量とリモートセンシング, 43(5), 36-48. 出版日: 2004/11/10
- 竹内 渉, 安岡善文WWWを用いたASTERデータ管理システムの構築, 2004. 写真測量とリモートセンシング, 43(4), 35-40. 出版日: 2004/09/06