

「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. 人為的な作用による水循環・河川流量の変化のモデル化（主に、灌漑を考慮したダム貯水池による影響）を行った。
2. アジアの河川水質負荷のモデル化を行った。
3. 数値モデルを用いて農業用水量のグローバルな推定を行うとともに、世界各国の食糧需要動向と世界各国の都市人口比率、農村人口比率、土地利用変化データとの関連についての研究に着手した。
4. 世界各国における環境用水政策の状況を調査・整理し、傾向を把握した。
その他数々の研究を進めたが、詳細な点に関しては以下の実施内容中に記す。

2. 研究実施内容

2-1. 水循環モデルの開発

本年度は水資源の空間・時間的な偏在を同時に考慮したアセスメントを行うために有効な数値モデルの開発を目的とした。この際、水資源の時間的偏在の緩和に重要な役割を果たしている貯水池の考慮が不可欠であった。そこで貯水池操作モデルを新たに開発し、全球河川流路網モデルTRIPに組み込むことでこの問題の克服を目指した。作業は世界の貯水池に関するデータの収集・整理から始まった。ここで、貯水池に関するデータは極めて限られており、特にその操作に関するデータはほとんど公開されていないことが判明した。このため貯水池操作モデルには、入手可能なグローバルデータから貯水池の操作ルールを推定する機能が求められた。この点が、操作ルールの入力を前提とした貯水池操作モデルと本研究のそれが根本的に異なる部分である。現実の貯水池操作はその時間スケールにより、年・季節単位の流量変動の緩和操作と月・週単位の需要変動に応じた放流操作の二つに分類され、前者は全ての貯水池に共通な操作、後者は貯水池の目的別の操作だとみなし

た。これに対応して貯水池操作モデルは全てに共通な操作ルールを設定する「基本モジュール」と目的別の操作ルールを設定する「目的別モジュール」からなる。基本モジュールは平年の流量の季節変化に基づき、一年を豊水期・渇水期に分類し、季節変動緩和操作を行い、また、渇水期初めの貯水量と貯水容量の関係から年々変動緩和操作を行う。目的別モジュールは需要の季節変動が最も大きいと考えられた灌漑についてのみ用意された。灌漑モジュールは下流の支配面積内の灌漑必要水量と雨量の差を放流する。ただし、貯水池の貯水量によっては節水を行い、また自然の氾濫が得られる場合には放流を減らすなどの考慮を行う。貯水池操作モデルは貯水池操作の長期実測データが取得できたChao Phraya、Colorado、Missouriの3流域の9貯水池において、入力として実測流量を用い、出力された貯水量・放流量をそれらの実測値と比較することにより検証が行われた。その結果モデルへの入力である流入量が正確であれば、モデルからの出力となる放流量・貯水量はグローバルな研究に十分な精度で再現されることが分かった。同時に貯水池操作の個別性も明らかになったが、モデルのグローバルな適用性を最優先に考え、流域ごとのチューニングを行わなかった。続いて貯水池操作モデルと全球河川流路網モデルTRIPを結合し世界の500の貯水池操作を考慮した全球河川流量シミュレーションを行った。上記の3流域において、貯水池操作を考慮しない場合と比較し、流量の季節変動の再現性が大幅に向上することが示された。しかしこのときの個々の貯水池操作は、前述の検証実験ほどには良好な結果が得られたわけではなかった。この問題の解決には結合モデルへの入力データを計算する、陸面モデルの流出過程に改良が必要だと考えられた。来年度はこの点を集中的に進めたいと考えている。

2-2. 農業水需要・土地利用モデルの開発

これまでの農業水需要推定は、その算定の基礎となる単位耕地面積あたりの水投入量なども統計量をもとに、国全体の平均値として算定ができる程度であり、作物の種類や灌漑の有無による差などは考慮できないなどきわめて不備なものになっている。一方、作目や灌漑水の投入スケジュールなどを反映した実際の圃場レベルの水消費データは存在するが、きわめて少なく、また個別の地点データであるため、それを広域に広げることがきわめて困難である。こうしたデータの不備が水需給の逼迫度や気候変動下での今後の逼迫度の展開などに関する合理的なシナリオを描くことを困難にしている。そこで、本年度は、穀物成長モデルを利用して、より合理的、統合的な農業用水投入量の推定を試み、全球マップを作成した。すなわち、既存の地図データを組み合わせることで推定された灌漑地域分布に、気候条件と農業統計、地図情報から推定された作目分布を重ね合わせ、さらに穀物生長モデルを組み合わせることで、穀物単収を推定した。この穀物単収の推定には天水、灌漑水のそれぞれについてどの程度の水を投入したかを想定する必要があるが、単収が農業統計データとほぼ合致していることを利用して、逆に生産量と整合性の取れた水使用量を推定することができる。同様の手法を中国黄河中流域である陝西省に適用し、空間的により詳細な結果を得、これに関しては個別地点における水投入量データを文献より得ており、良好な一致を見ている。

これらの農業水需要は国際食糧交易の視点を交えて分析しモデル化する必要がある。そこで、世界規模の食糧需給・貿易の研究を開始し、全世界各国の品目別食糧需要量のデータセットを入手し、そのデータを用いて、世界各国の食糧需要の多様性についての議論を展開した。さらに世界各国の食糧需要動向と世界各国の都市人口比率、農村人口比率、土地利用変化データとの関連についての研究に着手した。米国大気海洋局（NOAA）のDr. Chrisのチームとの連携により、特にアジア地域における夜間光衛星画像データセットを構築し、統計データを空間的に分布させることの可能性について検討した。

また特に人口増加が著しいアジア地域においては、その食糧増産が主要河川の水質に及ぼす影響を評価することが必要である。そのためそれを表現する数値モデルを開発しつつある。このモデルはパキスタン以東のアジアを緯度・経度ともに 0.5° のグリッドに分割し、グリッド毎に水収支と食糧生産に伴う窒素収支を求めたものである。河川水質は水中の窒素濃度で代表している。現在、アジアの主要河川流域全体で発生している負荷量は2,180万トンと推定されるが、現状においても黄河などでは汚染が深刻している。今後、経済発展に伴う都市化と動物性タンパク質の需要増大につれて、深刻な水質汚染がアジア全域に広がるおそれがあることを明らかにした。

2-3. 都市・生活用水需要モデルの開発

都市用水需要、工業用水需要に影響する因子を解析するために以下の項目に関して検討を行った。

- ・ 国内数都市を対象とした都市用水使用量の経年変化と影響因子の解析
- ・ 国内の製造業種別工業用水使用量の経年変化と影響因子の解析
- ・ 各国の生活用水使用と影響因子の解析
- ・ 東京、京都、シンガポールを対象とした都市用水、家庭用水使用量の経年変化とその要因の解析
- ・ 世界各都市の用途別家庭用水使用量に関する調査とその比較

これらの解析を通じて、都市用水需要に関しては経済状態が主要な因子として考えられるものの、経済水準が同じような状況にある地域においても水使用状況に大きな差があることが示された。また、図のように先進国のさまざまな都市において用途別の家庭用水使用量を比較した場合にも、ヨーロッパの都市とアメリカや日本、オーストラリアの都市では、水使用状況に差があることが示された。

2-4. 環境用水需要モデルの開発

世界各国における環境用水政策の状況を調査・整理し、傾向を把握した。この分野における先進国はアメリカ合衆国を筆頭にイギリス、オーストラリア、南アフリカ共和国などであり、フランス・スペイン・イタリア・カナダなどがそれに次ぐ。ただしその力点は、アメリカなど漁業資源の保護の必要から出発した国、ヨーロッパ先進国など水質汚染との関係が語られる国、南半球諸国など逼迫する水資源需給バランスの中で水配分の一プレーヤーとして環境用水を位置づける国、と微妙に異なっている。定量化には水文指標を用いた基準設定方式が最も広範に使用されており、これと生息場モデルを利用した方法を組み

合わせて実務に当たっている国が多いことがわかった。他にも水理量法や合意形成論的アプローチなどの提案・応用例がみられるが、本プロジェクトの目的、およびデータの取得性といった条件に照らして最も優れているのは水文指標を用いた年間値推定法であると判断された。

そこで、水文指標法の中でもアメリカ合衆国をはじめ最も多くの国々で利用されているTennant法の適用性を日本の河川で検討した。日本には、精度よい日流量データが大量・容易に手に入り、またこれまで環境用水の概念があまり普及していないアジアモンスーン地域に属するという特徴がある。年平均流量に対する比をとるのがTennant法の根幹だが、試算してみると日本の河川では地域による流況のバラツキが大きすぎてうまく指標を抽出できなかった。イギリス等で用いられている超過確率基準を用いると事態はやや改善されたものの、同一河川の支流間で2倍ほどの差が出るなど安定した手法とはまだいえない。

来年度はグリッドごとの環境用水需要量（または取水後の流況環境負荷度）のグローバルなアウトプットを試算し、視覚化することを目標とする。水循環モデルから日流量または月流量を得、適切な流況指標を地域特性に応じて選択することで環境用水の需要量基準を算出する。都市近辺では水質、河口付近では閉塞防止、火山山地では河道形成、先進国湿潤地では生態系、といったように地域の立地特性に応じて管理目標を異にし、社会経済指標から達成水準を定めるように社会特性を反映させる。

具体的な作業項目としては、乾燥地における環境用水の意味を明確にするためにオーストラリア等の事例をレビューすること、先進国における合意例や経済指標との関係を調べて立地条件と流況指標による表現との整合性を分析すること、の二つを大きな柱とする。

2-5. 衛星データ利用研究

1) TERRA/MODISデータによる水田分布マップの作成：TERRA衛星およびAQUA衛星によるMODIS画像を用いて東アジア・東南アジアの水田分布マップを作るための処理システムの構築と分類手法の開発を行った。

データ整備の点で、①2002年6月から12月までの約半年にわたり、生産技術研究所での受信障害のため、東アジア地域の画像が得られていないこと、②バンコク(AIT：アジア工科大学院)で受信したデータを準リアルタイム(24時間以内)で転送するためのネットワークが不安定であること、などを理由に、2002年度のデータベースが不完全となった。現時点(2003年2月)で、欠損データをAITとNASAから入手中である。また、2002年12月にTERRA/MODISのみを受信する既存システムをAQUA/MODISも受信できるようにアップグレードしたことにより、NASAから提供される前処理のプログラムに変更が行われた。新しいプログラムでは、幾何補正精度が改良されており、それ以前に受信されているデータについても再処理の検討を行っている。一方、AITデータについては2003年12月からAQUA/MODISへのアップグレードを行っているが、システムのトラブルにより、未だデータの受信に成功していない。

アルゴリズム開発では、1km解像度の雲なしコンポジット作成を作成し、VSW(植生・

土壌・水)の比から、1ピクセル内の水域比率を求める処理を自動処理するためのシステムが構築された。ただし、V、S、Wについて、それぞれ代表する分光特性(エンドメンバー)を精度よく決定するために、より解像度の高いデータを複合的に用いる必要があり、250m解像度で、同様の処理システムを開発中で、250m解像度の画像では、系統的な幾何補正のずれが生じていることが判明した。250m解像度でコンポジットデータを作成中である。

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（論文発表および特許出願）

（1）論文（原著論文）発表

- N. Chapelon, H. Douville, P. Kosuth, and T. Oki, Off-line simulation of the Amazon water balance: a sensitivity study with implications for GSWP. *Clim. Dynamics*, **19**, pp.141-154, 2002
- Shinjiro Kanae, Taikan Oki, and Katumi Musiake, Principal condition for the earliest Asian summer monsoon onset. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2002GL015346, 2002
- 平林由希子, 鼎信次郎, 沖大幹, 虫明功臣, 陸面水文モデルに対する降水時間スケールのグローバル影響評価. 水工学論文集第47巻, pp.169-174, 2003

- 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹, 虫明功臣, グローバルに適用可能な貯水池操作モデルの開発. 水工学論文集第47巻, pp. 181-186, 2003
- 大楽浩司, 江守正多, 沖大幹, 虫明功臣, 領域気候モデルを用いた東南アジア熱帯山岳地域における降水特性の解析. 水工学論文集第47巻, pp. 79-84, 2003
- 山田朋人, 鼎信次郎, 沖大幹, 虫明功臣, 地球温暖化に伴うアジアにおける降水量の年々変動の変化. 水工学論文集第47巻, pp. 97-102, 2003
- 芳村圭, 沖大幹, 大手信人, 小池雅洋, 水の安定同位体 (^{18}O) の鉛直積分型水平2次元循環モデルの構築と検証. 水工学論文集第47巻, pp. 109-114, 2003
- 瀬戸心太, 沖大幹, 虫明功臣, 植生層の放射伝達を詳細に考慮したマイクロ波放射計による土壌水分推定. 水工学論文集第47巻, pp. 49-54, 2003

(2) 特許出願

なし