

グローバルに適用可能な貯水池操作モデルの開発

DEVELOPMENT OF GLOBALLY APPLICABLE RESERVOIR OPERATION MODEL

花崎直太¹ 鼎信次郎² 沖大幹³ 虫明功臣⁴

Naota HANASAKI, Shinjiro KANAE, Taikan OKI and Katumi MUSIAKE

- ¹学生会員 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
²正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所助手 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
³正会員 博士(工学) 総合地球環境学研究所助教授 (〒602-0878 京都市上京区丸太町通河原町西入高島町 335)
⁴フェロー会員 工学博士 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)

In order to simulate global river discharge, global river routing network models (GRRNMs) have rapidly developed over the past decade. One practical problem of current GRRNM, is that they do not deal with reservoir operation. In this paper, simple reservoir operation model (ROM) for Total Runoff Integrating Pathways (TRIP), which is one of the GRRNMs, is introduced. The model has simple structure and its global parameters such as reservoir information, distribution of irrigated area or climatic rainfall are derived from published global data sets, aims its global application. ROM is applied to Bhumibol and Sirikit dam in the Chao Phraya river in Thailand as a case study. The calculated release and storage of them compared well with the observation, for 17 years simulation. Consequently the discharge at the lower reach calculated by TRIP-with ROM is dramatically improved compared with original TRIP calculation. It supports the usefulness of our model and possibility of global application.

Key Words : reservoir operation model, global river network model, TRIP, global application, river discharge simulation,

1. はじめに

地球の河川流量の時間・空間分布はどのようになっているか、また地球水循環システムにおける河川の役割はどれほどか。これらの問いに答えるため、全球河川流路網モデルが開発されてきた^{1),2)}。全球河川流路網モデルとは、分布型水文モデルにおける格子間流量計算を行うルーティングモデルを全球に拡大したものである。Oki and Sud (1999)により開発された「TRIP」は全球河川流路網モデルの一つである。このTRIPを用いることにより、全球の任意の地点で流量の算出が可能となる。この特徴を生かし、世界水資源評価が行われている³⁾。これは各格子での年間河川流量をその場所の年間水資源とみなし、格子内の人口・灌漑面積などから計算される水需要と対比することにより、水資源の逼迫度などを論じたものである。

しかし、現在の河川流路網モデル、世界水資源評価の問題点として、貯水池(ダム)の存在・操作を考慮していないことが挙げられる。まず全球の河道に貯留されている水量は1200km³と算定されているのに対し、現在世

界のダムの総貯水量はその7倍の8400km³であり⁴⁾、全球の河川システムを考える上で貯水池の存在は無視し得ない。また水資源を論じるうえで流量の季節間・年々変動の平準化、需給バランスの調整は基本的かつ重要な事項であり、水資源評価を行う上でも貯水池の役割を考慮しないわけにいかない。しかし全球河川流路網モデルと貯水池に関する既存の研究は少ない。Vörösmarty et al (1997)は全球河道網モデルに貯水池情報を取り込み、総貯水容量をその地点での年間流量で除することにより、貯水池の存在による河川水の「遅延時間」を全球で計算している。しかし彼らは流量の変動と貯水池操作といった動的な問題を扱っておらず、貯水池を考慮した河川流量シミュレーションを行ったとは言いがたい。

そこで本研究では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 と結合すること(ツールの開発)、およびその計算結果をもとに貯水池が全球の河川流量・水資源に与える影響を定量的に示すこと(アセスメント)を目的とする。しかし、本論文ではモデルの適用・検証をタイのチャオプラヤに絞っている。これは全球への適用に必要な膨大なデータを現段階で揃えられなかったことによる。今後、水文条件の異なるさまざまな

流域で適用・検証を行うことにより、全球への適用可能性を探りたい。そのためデータの整備に鋭意あたっているとある。

本論文の構成は以下のとおりである。まず第2章で研究の出発点となる貯水池情報の整理を紹介する。次に第3章で貯水池操作のモデル化手法を説明する。第4章で貯水池操作モデルの検証をチャオプラヤ流域の二大ダムについて行った結果を示す。第5章でオリジナルのTRIPと貯水池操作モデルを結合し流量シミュレーションを行い、同流域において検証を行った結果を紹介する。第6章はまとめである。

2. 貯水池情報のデジタル化

TRIPの格子間隔が $1^\circ \times 1^\circ$ および $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ と粗いことを考慮し、総貯水量が10億t以上の大ダムのみを扱うことにした。これより小さな貯水池は多くの場合はその流域がTRIPの河道網に現れない。基本資料としたのは世界大ダム会議の発行する世界ダム年鑑1998年版⁹⁾である。しかしこの年鑑にあるデータのうち本研究で利用可能なものはダムの名称、完成年、最寄りの都市、ダムサイトでの河川名、総貯水量、集水面積(一部)、主要目的のみであり、このままでは不十分であった。そこで他の資料から補完を行った。まず緯度・経度情報は記載されていた最寄りの都市とダムサイトでの河川名から世界地図を頼りに割り出した。ダムの水文情報(流入量、集水面積、支配面積)は可能な限りインターネットなどを通じ収集しているところであるが、得られない場合はTRIPを利用するものとする。操作基準、オペレーションカーブはグローバルに入手することは困難であるため、次章で説明する貯水池操作モデルによりオペレーションカーブそのものをモデル化する手法を取ることにする。デジタル化の成果の一例を図1に示す。これはアフリカ大陸の総貯水量10億t以上の大ダムの位置情報を流路網上に展開したものである。

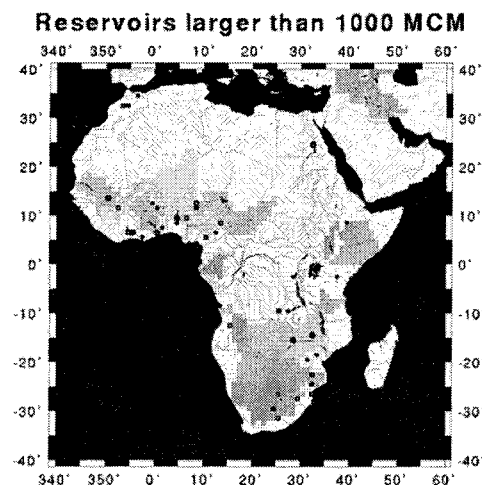


図1 アフリカ大陸の10億t以上の大ダム分布

3. 貯水池操作モデルの仕組み

前章に示したようにグローバルに得られる貯水池データは非常に限られている。特に操作基準やルールカーブ情報の入手が困難であるため、貯水池操作を利用可能なグローバルデータから再現することが必要となる。この点がルールカーブを入力値として与える貯水池モデルと大きく異なる部分である。また開発にあたり、モデルの恣意性を減らし、キャリブレーションを容易にするため、パラメータを極力減らすよう留意した。これも世界の数百のダムの操作を考慮する本研究の性質上、現実的に不可避の条件である。

貯水池操作モデル(ROM)の大枠を図2に示す。本研究では貯水池操作が

- ① 流量の季節変動緩和のための「基本操作」と
- ② 個々の目的に応じた「目的別操作」

からなると考えた。ROMはそれぞれに対応する「基本モジュール」と「目的モジュール」から構成される。基本モジュールには貯水池の水文情報を、目的モジュールには流域の水利用情報を与えておく。ROMは月間流入量、初期貯留量の入力に対し、月間放流量と次期貯留量(流入・放流の収支)を返す。ここで月間放流量は基本モジュールが計算する基本放流量 r_{norm} と目的モジュールの計算する追加放流量 r_{add} の和である。

$$r = r_{norm} + r_{add} \quad (1)$$

計算ステップは1ヶ月である。

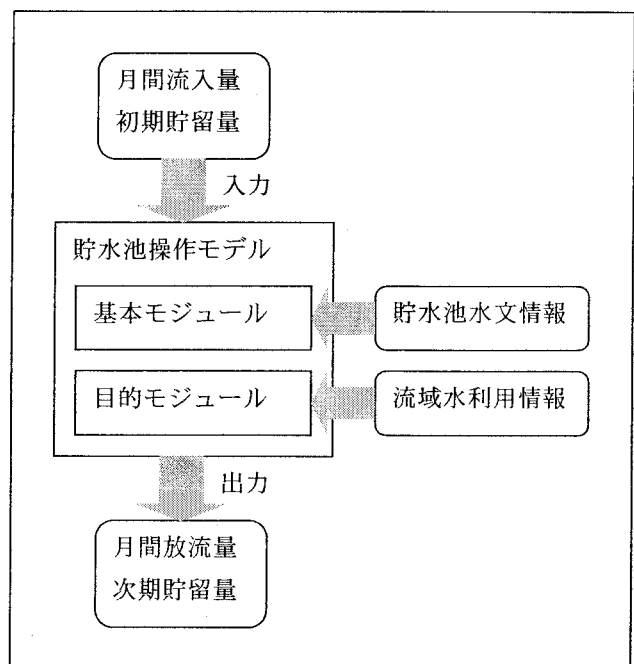


図2 貯水池操作モデルの概略

まず基本モジュールの紹介をする。モジュールの概念は次の4つである。

- ① 月間平均流量が平年の年間流量を上回る月を高水期、下回る月を低水期と名づける。
- ② 放流量は一年を通じて一定 r_{norm} とする。
- ③ ただし年間総放流量は高水期の終わりの貯水量を反映するものとする。すなわち貯水量が多いときは放流量を大きくし、少ないときは小さくする。
- ④ また高水期には目標貯留量を設定する。これも前年の高水期終わりの貯水量を反映し、貯水量が多いとき目標を低く、少ないとき高くする。目標を超えた流入は下流に放流するものとする。

これらによって、流量の季節変動の緩和(①、②)と年々変動の緩和および貯水量と放流量のバランスの維持(③、④)を再現している。

これらの概念は次のように数式化した。まず貯水量の平年値を定義するため、判定係数 α をおき、貯水状況を以下のように判定する。

$$\begin{aligned} S < \alpha C & \dots \text{渇水} \\ S = \alpha C & \dots \text{平年} \\ S > \alpha C & \dots \text{豊水} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで S : 高水期終わりの貯水量、 C : 貯水池の総貯水量である。ここで放流係数 k_{rls} を次のように定義し、毎年高水期終わりに計算する。

$$k_{rls} = \frac{S}{\alpha C} \quad (3)$$

月間基本放流量 r_{norm} 、高水期の月間目標貯留量 s_{tar} は

$$r_{norm} = k_{rls} q \quad (4)$$

$$s_{tar} = \frac{q}{k_{rls}} \frac{12}{n_{flood}} \quad (5)$$

ただし q は年間平均流量、 n_{flood} は高水期の月数である。

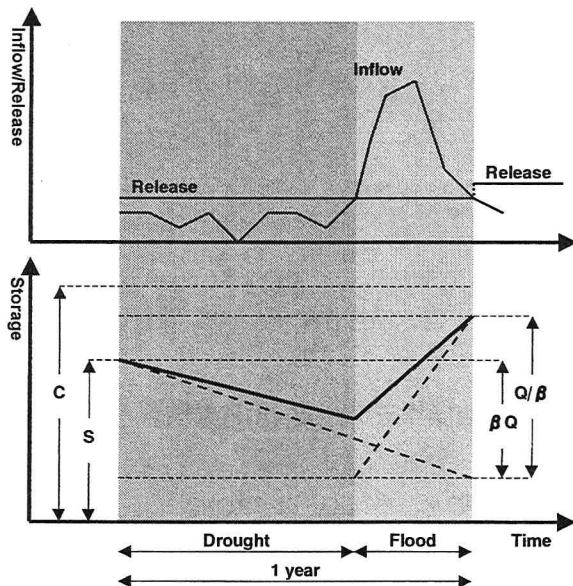


図3 基本モジュールによる貯水池操作

次に目的モジュールの中から、灌漑を主目的とするダムのための灌漑モジュールを紹介する。モジュールの概念は次のとおりである。

- ① 灌漑必要量と灌漑地雨量の差をダムから追加放流する。
 - ② ただし、追加放流量は高水期終了時の貯水量を反映させる。
 - ③ 灌漑面積は既存のグローバルデータを利用する。
- これらの概念を数式化すると次のようになる。

$$r_{add} = k_{rls} (n_{irrig} - p) \times A_{irrig} - r_{norm} \quad (5)$$

ここで r_{add} は月間追加放流量、 n_{irrig} は月間灌漑必要水量、 p は月間降水量、 A_{irrig} は灌漑作付面積、 r_{norm} は基本モジュールで算出した放流量である。

4. 貯水池操作モデルの検証

貯水池操作モデル (ROM) の妥当性を検証するため、タイのチャオプラヤ流域に対してモデルを適用した。対象としたのはチャオプラヤ流域にある Bhumibol ダムと Sirikit ダムである。ダムの情報は表1のとおりである。どちらのダムも主目的は灌漑であり、目的モジュールに灌漑モジュールを用いた。流域の水利用情報としてチャオプラヤ下流の灌漑データを表2、表3のように与えた。

表2にある灌漑面積情報は、当初 Döll (2000)によるグローバル灌漑面積データを用いる予定であった⁹⁾。しかしこのデータは灌漑農地の総面積データであり、実際の作付面積は通常これより小さい。また雨期作・乾期作の作付面積の違いも明示されていないことが分かった。このため、本論文ではタイ灌漑局の作付面積データを利用し、灌漑必要水量に関しては大チャオプラヤ灌漑計画で使われた水田の減水深 10mm/day に対し、かけ流しの効果を考えてその半分という値にしている。ただし当地の3、4、5月は乾期の後半で、気温が高く、乾燥する暑期という季節に当たることから、その3倍の値を与えた。グローバルな灌漑作付面積、灌漑必要水量の算定を行うための手法は灌漑・農業モデルの援用を中心に現在検討中である。すなわち灌漑・農業モデルを利用するにあたって日照・気温・降雨などの気象データと作付種・作付頻度など農業データが必要であるが、前者については後述するように全球の気象データが既にあり、後者を気象・土壌条件から逆推定できれば、全球での灌漑必要水量の算定が可能になる。

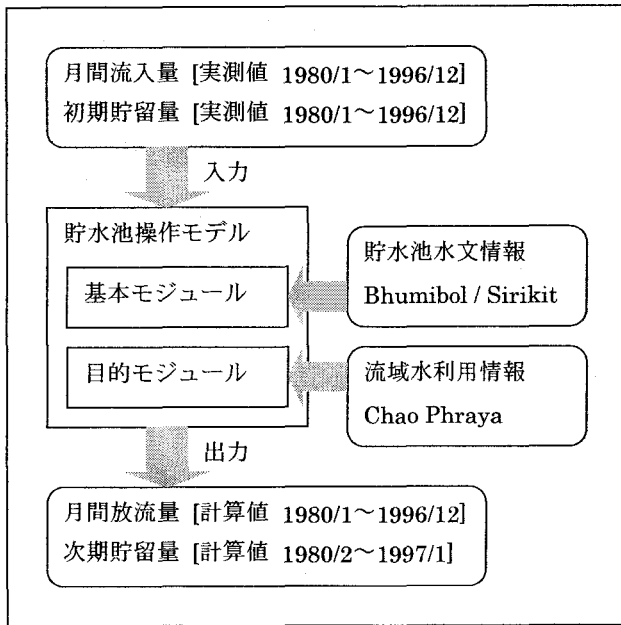


図4 貯水池操作モデルの検証

表1 チャオプラヤ流域の貯水池

	Bhumibol	Sirikit
総貯水量[MCM]	13,500	9,500
流入量[m ³ /s]	163	166
主要目的	灌漑	灌漑

表2 チャオプラヤ下流流域の灌漑面積

雨期作付[km ²]	8,400
乾期作付[km ²]	3,600
作付作物	米

表3 チャオプラヤ流域での灌漑必要水量

乾期[月]	12	1	2	3	4	5
必要水量[mm/day]	5	5	5	15	15	15
雨期[月]	6	7	8	9	10	11
必要水量[mm/day]	5	5	5	5	5	5

Bhumibol, Sirikit 両ダムに関して、1980年1月から1996年12月までの月間平均流入量の観測値を与えることにより17年分の月間平均放流量と貯水量を計算した。ただし初期値として1980年1月1日の貯水量は実測値を、判定係数 α は両ダムとも0.75という値を与えた。Bhumibolダムでの結果を図5に、Sirikitダムでの結果を図6に示す。図の上部は放流量の、下部は貯水量の時系列変化を表す。実線は計算値、破線は観測値を表す。放流量は長期的な傾向をよく捉えており、貯水量も17年間という長期間のシミュレーションにもかかわらず、変動をよく再現している。ただし誤差の絶対値は数億tから大きいところ数十億tあることに注意が必要である。流域スケールの議論ならば、この誤差は許容されえず、操作モデルのさらなる精緻化が必要となろう。しかし本研究の目

的とするグローバルな適用、グローバルスケールの議論において妥当なものと判断した。また放流量については乾期(12月~5月)に過小、雨期(6月~11月)に過大となる傾向がある。これはモデルの基本モジュールが雨期と乾期の放流量を同じにしているのに対し、実際のBhumibol, Sirikit 両ダムのオペレーションでは雨期に減らしている年が多いからである。この違いはチャオプラヤには主要支川が4本あることによる。このうち2本にBhumibolダム、Sirikitダムがあり流量調節が可能であるが、残りの2支川に大きなダムはなく、ほぼ自然流量が流れている状態である。4支川が合流した下流の流量をコントロールするに当たり、ダムのない支川を考慮に入れて季節変動調整を行う必要があるが、現在のROMでは他支川の流量を考慮していない。この点については改良の必要がある。

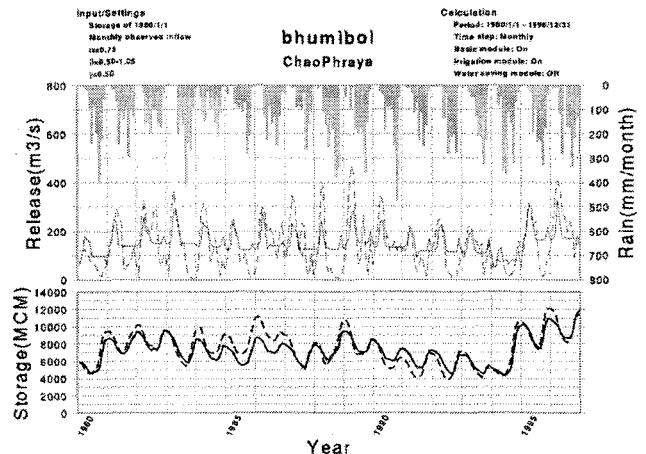


図5 貯水池操作モデル (Bhumibol ダム)

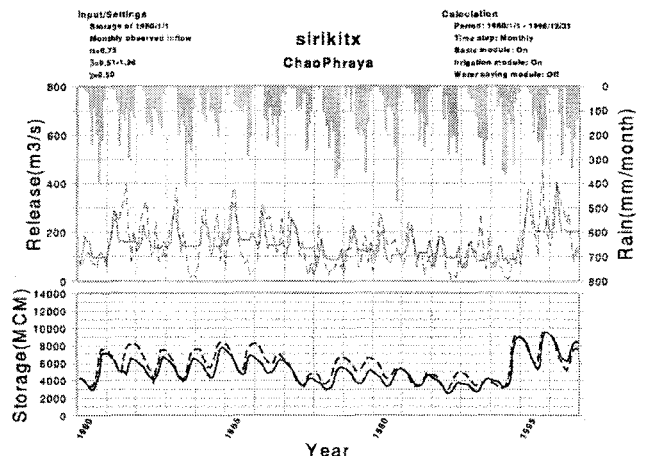


図6 貯水池操作モデル (Sirikit ダム)

5. 貯水池操作モデルとTRIPの結合とその検証

第4章で貯水池操作モデル(ROM)の有効性が示されたので、次の段階としてROMとTRIPの結合を行う。これによりTRIPの流量計算は次のようになる。ダムのない格子ではオリジナル流量計算スキームで、ダムのあ

る格子では ROM が流入量・貯水量から計算した放流量を下流の格子へ流下させるものとする(図7)。オリジナルの流量計算スキームでは流速を全球一律0.5m/sと仮定している。

繰り返しになるが、TRIP はルーティングモデルであり、外部からのグローバルな格子流出データの入力が必要となる。この流出データの作成にはさらに水収支計算モデルと入力データセットが必要となる。筆者らがとる手法はモデルに大循環モデル(GCM)の下部境界条件を与えるために開発され、グローバルな計算に適した陸面過程モデル(LSM)を、入力に地表面付近の大気状態・土地被覆などの格子データが揃ったデータセットを利用する方法である。今回 TRIP に入力した流出データは気象庁の陸面過程モデル SiB に ISLSCP I CD-ROM のデータをフォーシングして作られたものである。期間は1987年、1988年の2年分、空間解像度は全球陸域1度、時間解像度は10日である。これは Global Soil Wetness Project(GSWP)で陸面モデルの相互比較を行うため作られたデータの一部である⁷⁾。

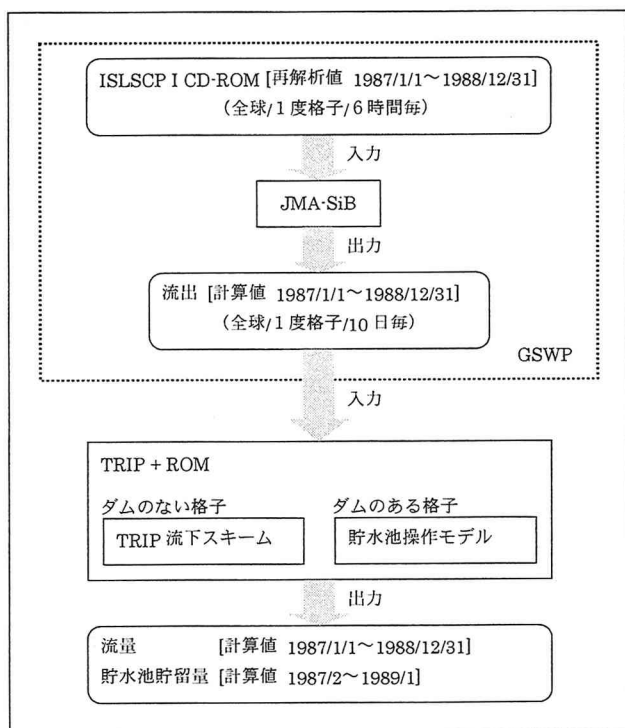


図7 ROM-TRIP 結合シミュレーションの模式図

流量の検証は同じくチャオプラヤ流域で行った。TRIP におけるチャオプラヤ流域を図8に示す。影がつけてあるのが1°版TRIPでのチャオプラヤ流域、太線で示されているのが河道網である。図中の★は Bhumibol ダム、■は Sirikit ダム、●は流量の検証を行う Nakhon Sawan である。それぞれの地点での TRIP と実測の流域面積の比較は表4に示すとおりであり、流域面積はよく一致している。

河川流量シミュレーションの結果を図9に示す。★が実測値であり、▼が貯水池を考慮しないもとのTRIP、▲が貯水池を考慮した計算結果である。実測値をみると、非常に雨の少ない3月に小さな流量ピークがあることが分かる。しかし貯水池を考慮しない場合、流量は陸面モデルの算出する流出に依存し、このようなピークは見られなかった。今回貯水池操作を考慮することにより、この小さなピークが再現された。また流量がピークを迎える11月付近でも、貯水池が流量を貯留するため、流量の減少が見られる。ただし1988年については全体的に放流量の計算値が過大になった。1987年の雨期は異常な少雨であり、雨期終了時の両ダムの貯水量が著しく少なかった。このため1988年は作付面積を大幅に減らすなど大規模な節水が行われていた。今回のシミュレーションにはこうした事態が反映されていないため、放流が現実と比べ過大になってしまったと考えられる。しかし、通常の貯水池操作、水利用が行われていた1987年に関して、流量の変動パターンがより現実のものに近づくことが示されたことは、貯水池を考慮することの有効性を示すものと考えられる。

Chao Phraya River in TRIP

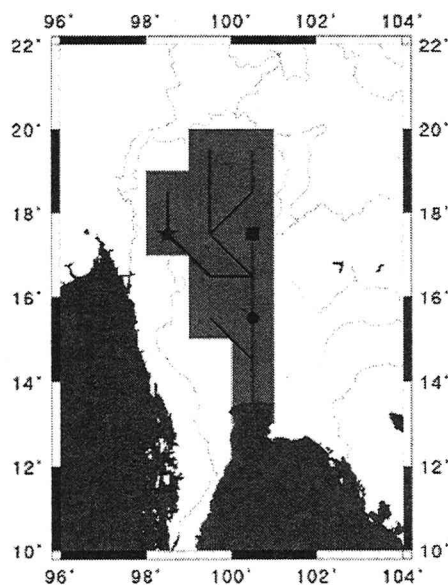


図8 チャオプラヤ流域

表4 流域面積の比較

流域面積[km ²]	TRIP 1度版	公称値
Nakhon Sawan	117,200	110,800
Bhumibol	23,400	26,400
Sirikit	11,800	13,300

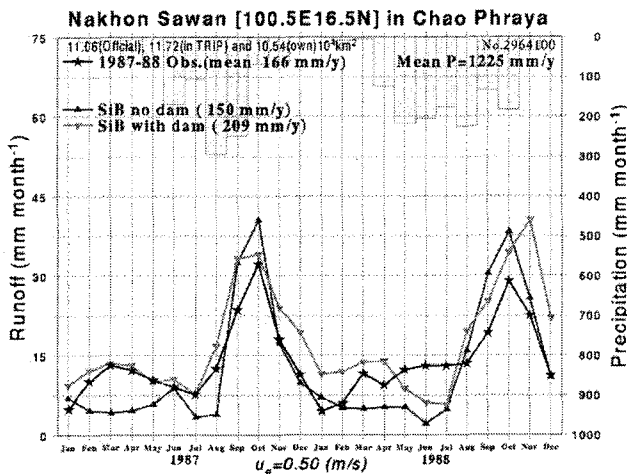


図9 流量シミュレーションの結果

貯水池操作による流量平準化効果を見るために貯水池操作を考慮しない場合(オリジナルのTRIP)と考慮した場合(TRIP-ROM 結合モデル)で流況曲線を作成した(図10)。特に、1年の2/3程度を占める乾期において流量を自然流量のほぼ倍にしている様が見られる。

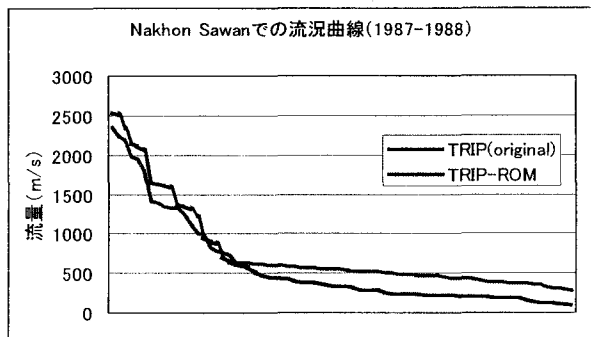


図10 Nakhon Sawan での流況曲線

6. まとめと今後の課題

グローバルな適用を目的とした貯水池操作モデルの開発を行い、タイのチャオプラヤにおいて検証を行った。モデルはグローバルな貯水池・流域水利用情報が非常に限られていることを考慮し、これらのデータとチューニングパラメータ1つ(判定係数 α)のみで計算が可能ないように設計された。この設計は貯水池の操作基準・ルールカーブのデータがグローバルに揃わないというデータ制約への解であり、モデルのグローバルな適用を可能にするものである。検証の結果、モデルは貯水池操作の傾向をよく再現し、また貯水池操作を考慮することにより流量シミュレーションの精度が向上することが示された。

ただし今回モデルの適用を行ったのはチャオプラヤ流域であり、全球への適用可能性を検証するためにはより多くの流域への適用が必要である。今回紹介できなかったが米国コロラド川でも検証を行っており、30年分のシミュレーションの結果、基本モジュールについては長期トレンドが再現されることを確認している。

今後の課題としては、入力データを揃えることにより、グローバルな検証を行いたい。このとき灌漑データの整備のための新たな手法を開発する必要がある。また現在のモデルは貯水池・河川・流域を別々に扱っているが、今後この相互作用に着目したい。具体的には下流の流量に応じた貯水池操作、河川取水などが考慮できるよう、モデルを改良していきたい。

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)の成果の一部です。チャオプラヤでの貯水池操作データは GAME-T データセンター (<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/GAME-T/>)を利用しました。ここに記して関係者のみなさまに深謝を申し上げます。

参考文献

- 1) Russell G L and Miller J R. Global river runoff for use in coupled atmosphere-ocean models. J of Hydrol. 155: 337-352. 1990.
- 2) Oki T and Sud Y C. Design of total runoff integrating pathways (TRIP) - A global river channel network. Earth Interactions. 1998.
- 3) Oki T, Agata Y, Kanae S, Saruhashi T, Yang D, Musiak K. 2001. Global assessment of current water resources using total runoff integrating pathways. Hyd. Sci. 46-6: 983-995
- 4) Vörösmarty C J, Sharma K P, Fekete B M, Copeland A H, Holden J, Marble J, Lough J. A. 1997. The storage and aging of continental runoff in large reservoir system of the world. Ambio 26 (4): 210-219
- 5) ICOLD. World Register of Dams. International Commission on Large Dams, Paris. 1998.
- 6) Döll P and Siebert S. A digital global map of irrigated areas. ICID J. 49(2), 55-66. 2000.
- 7) Chen F and K. Michell. Using GEWEX/ISLSCP forcing data to simulate global soil moisture fields and hydrological Cycle for 1987-1988, J. Met. Soc. of Japan. 77-1B: 167-182. 1999.

(2002. 9. 30受付)