

分布型水文モデルに基づく 水利用シミュレーションモデルの開発の試み

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF WATER UTILIZATION BASED ON A DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL

陸 旻皎*・小池俊雄** 石平 博***
Minjiao LU, Toshio KOIKE and Hiroshi ISHIDAIRA

- ¹ 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 (〒 940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)
² 正会員 工博 東京大学大学院工学研究科教授 (〒 113-8654 文京区本郷 7-3-1)
³ 正会員 工博 山梨大学工学部助教授 (〒 400-8510 山梨県甲府市武田 4-4-37)

The objective of this study is to develop a simulation model of water utilization such as reservoir regulation, water intake and irrigation. This model is based on a distributed hydrological model developed by the authors. In this model, the entire river basin is divided into many grid blocks, the type of water utilization of all grid blocks can be defined. In this study, these data are stored in a database in which all grid blocks are arranged in the order same with the optimal routing order. In the simulation, the runoff generation is computed by using XinAnJiang model. The sum of runoff from a grid block and upstream river channels subjects to the water use, and then be routed to adjacent downstream grid block by using the kinematic wave method. In this study, this simulation model is applied to the Brantas River basin in Indonesia. The result shows the applicability of this simulation model.

Key Words : *Simulation model of water utilization, distributed hydrological model, geographic information system, irrigation, reservoir regulation*

1. はじめに

近年の水需要の増加に伴い、ダムによる貯水・放流だけでなく、灌漑をはじめとする流域内あるいは流域間の水の移動を含め、流域水利用がますます高度化されてきた。本研究では、分布型水文モデルをベースに流域水利用システムのシミュレーションモデルのプロトタイプを作成し、高度な水利用が行われているインドネシアの Brantas 川の水利用の再現を試みる。

従来の集中型水文モデルでは、ダムなどの水利用を考慮に入れるために、流域を分割して扱わなければならない。しかし、分布型水文モデルでは、流域が数多くの正方形あるいは長方形のメッシュに分割されており、個々のメッシュの水文特性を考慮して、そこで起る水文プロセスを表現し、流出を算出している。そして流出が下流へと追跡計算される。このような分布型水文モデルの利点を行かし、水利用を取り入れた水利用シミュレーションモデルの開発が可能である。本研究では、水利用タイプを柔軟に表現できる数値表現とそのデータベース化を提案し、水利用シミュレーションの分布型水文モデルへの組み込み方法を示した。そして、インドネシアの Brantas 川流域を対象にモデルの

構築を行い、ダム調節、取水や灌漑を含む水利用を受けた後の河川流量を再現し、実測値と比較している。

2. 対象流域とデータの概要

Brantas 川は、インドネシアジャワ島の東部に位置し、南緯 7 度から 9 度、東経 111 度から 113 度の範囲に入っている大河川である。その流路延長が 320km、集水面積が 11800km² である。流域の年平均降水量が約 2000mm で、その 80% が 11 月から 5 月までの雨期に発生する。そのため、流域内での水資源開発が盛んである¹⁾。図-1 に Brantas 流域の水系と水利用施設を示している。流域内に、Sutami ダムをはじめとする 8 つのダム、19 個の取水施設を有する 7 つの灌漑区が整備されており、高度な水利用が行われている。

本研究では、分布型水文モデルの構築に必要な数値地理情報として、空間分解能 30 秒の全球数値標高データ (GTOPO30) と河道位置データ (DCW) から、南緯 7 度から 9 度、東経 111 度から 113 度の範囲の DEM と実河道データを抽出し、それらから、空間分解能 30 秒の河道網を算出し、最適追跡順番ファイルを作成した。また、流域内の各灌漑区域の位置を示す灌漑マップ、そして各ダムの位置情報、各取水口の位置情報を整

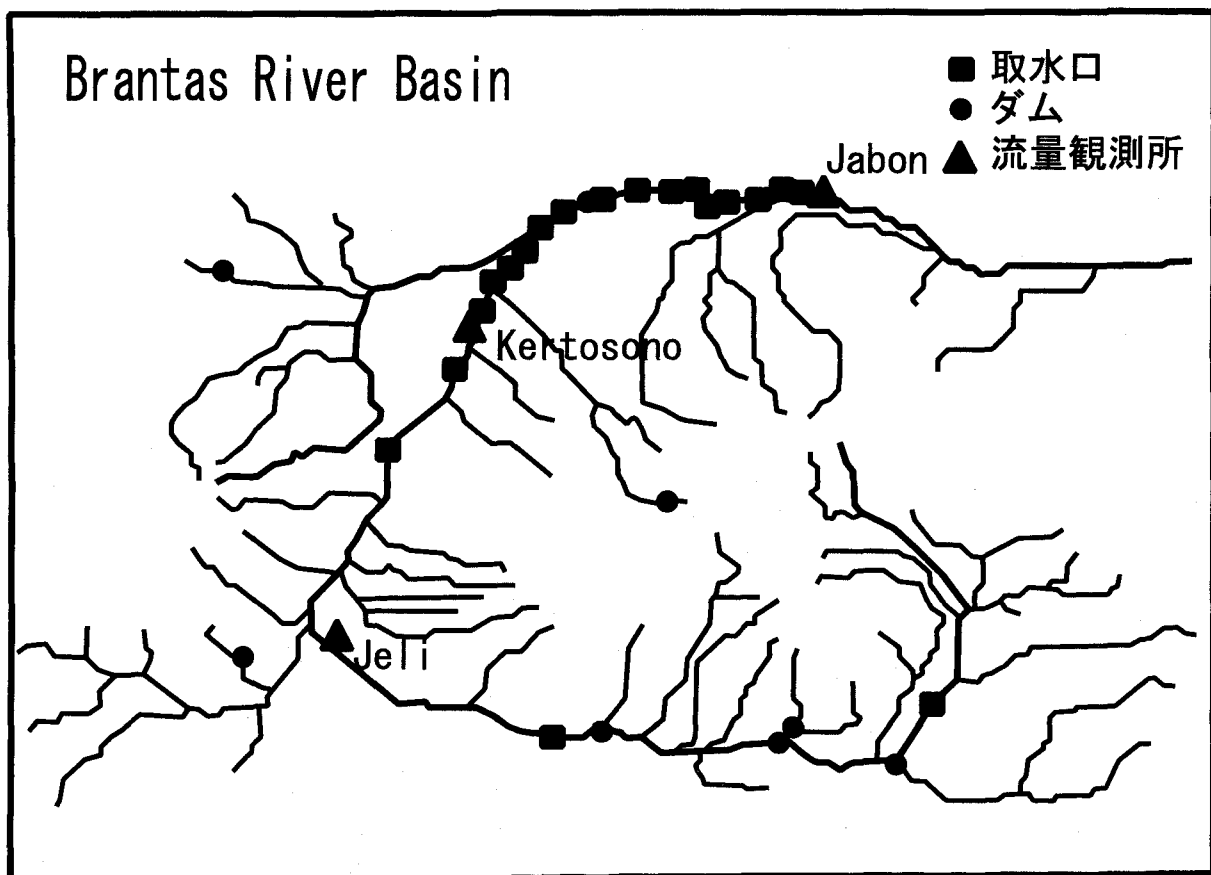


図-1 Brantas 川の河道システムと水利用システムの概略図

備した。

また、通常の水文データとして、流域内の 78 地点の月降水量データ、流域出口付近の Surabaya での月パン蒸発量データ、流域中部に位置する Jeli と Kertosono での月観測流量を収集した。そして、ダムに関するデータとして、総有効貯水量の 60% を占めている Sutami ダムの旬流入量と旬放流量、灌漑に関するデータとして、各灌漑区の旬灌漑水量の他に、取水した水の外流域へ輸送される比率や Brantas 川の河道システムへ戻る比率を整備した。

本研究では、上記のデータから、流域内各メッシュでの降水量と蒸発能力データを作成した。蒸発能力データに関しては、最下流部の Surabaya の一点しかなく、流域の各メッシュに同じ値を適用することにした。雨量データについては、同じ 30 秒の分解能でグリッド化した。グリッド化するにあたり、雨量地点にカバーされている領域には、雨量地点を頂点とする三角形のネットワークを構成し、個々の三角形の内部において線形補間を行い、各メッシュの雨量を得る。その外側の領域には最近隣法を用いて、一番近い雨量地点の雨量を引っ張ってくることにした。雨量データに関しては、雨量地点のかなりの部分が位置情報が無いため、地図上で見つけて位置情報を与えなければならなかった。位

置情報にある程度の誤差があり、グリッド化した雨量データにも雨量観測の誤差だけでなく、この種の誤差が入っている可能性がある。

灌漑データに関しては、各取水口の灌漑面積が不明なので、各取水口の取水流量を集計し、灌漑区ごとの総取水量を求め、そして灌漑区域のメッシュ数で割り、各灌漑区域内の各メッシュへの灌漑水量を推定した。

なお、対象期間は 1961 年から 1987 年までの計 27 年間で、日単位でシミュレーションを行う。

3. 水利用システムのシミュレーションモデルの概要

ベースとなる分布型水文モデルは、陸ら²⁾の分布型水文モデルを採用した。このモデルでは、流域をメッシュに分割し、流域内のすべてのメッシュを、陸ら³⁾が提案した最適追跡順番に従って並べ替えられている。モデル計算では、最適追跡順番の順に、各メッシュに対し、そのメッシュでの水文気象データからメッシュ水文モデルを用いて流出量を計算し、その流出量は数値地理情報から作成した河道網を介し、河道追跡法により流域出口まで追跡計算され、流域出口あるいは流域内の研究対象地点での洪水波形を得る。本研究では、メッシュ水文モデルに新安江モデル^{4),5)}、河道追跡法に kinematic

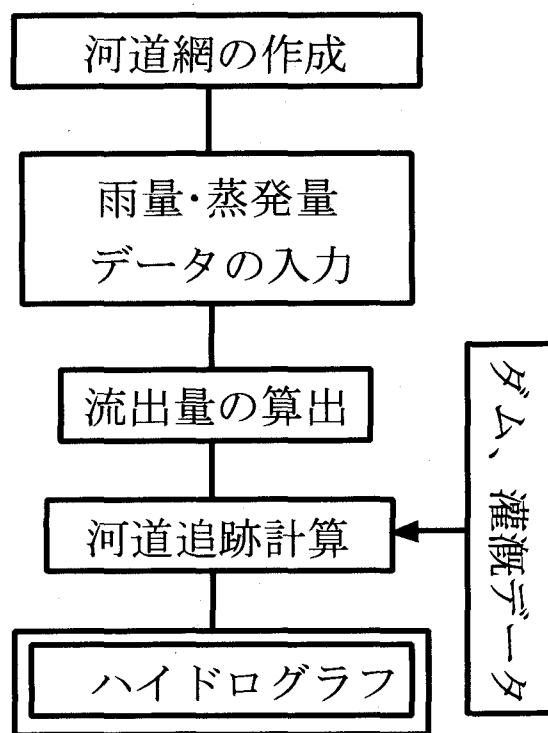
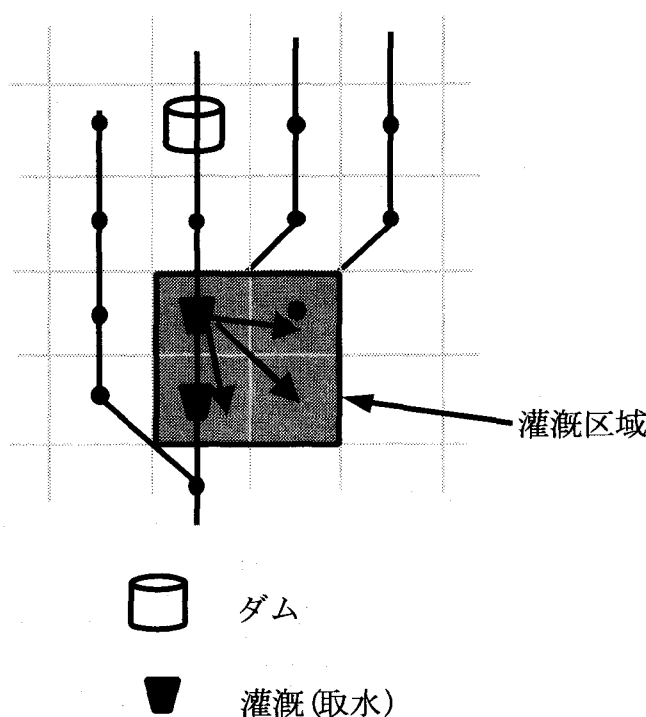


図-2 ダムと灌漑を考慮した分布型水文モデルの概念図

wave 法²⁾を用いる。ここで、最適追跡順番は上流側のメッシュ（河道）がその下流側のメッシュ（河道）より先に計算されることを保証し、河道の合流処理も自動的に行っている。また、バッファリング技術により分布型水文モデルに必要な主記憶容量を最小化している。詳しくは陸ら³⁾を参照されたい。

流域内の水利用を表現するためには、まず流域を 30 秒メッシュに分割し、個々のメッシュでの水利用形態を後述の数値表現で数量化し、データベース化する。そして、それぞれのメッシュの計算において、そのメッシュで発生した流出と上流河道からの流入の和、つまり河道への流入に対して、これらの水利用形態に応じて水利用のシミュレーションを行い、そして追跡計算を行えば良い。個々のメッシュでの具体的な計算手順は以下になる。

- そのメッシュの水文データにメッシュ水文モデル、本研究では新安江モデルを適用し、流出量を計算する。
- 最適追跡順番で示されている入力バッファから、上流側河道からの流入を取り出し、そのバッファをクリアしておく。
- 両者を和を求め、そのメッシュと下流側メッシュを結ぶ河道への流入とする。
- 水利用データベースに照合し、計算中のメッシュで水利用が行われているか否かをチェックする。も

し、行っていれば、河道への流入に対して、それに対応する操作、たとえば取水やダム調節を行う。

- 上記の流入に対して河道追跡計算を行い、河道の下流端の流量を得る。
- 下流端の流量を、最適追跡順番で示されている出力バッファに足合わせる。

本モデルではこのように河道追跡の前に太字のように水資源利用のシミュレーションを行う。このモデルも分布型水文モデルと同様に、すべてのメッシュが最適追跡順番どおりに並べ替えており、上記の手順で計算すれば、すべてのメッシュ（河道）の上下流関係と合流処理が行われる。図-2に水利用を取り入れたこのシミュレーションモデルの概略を示している。

4. 水利用の数値表現とデータベース化

本研究では、Brantas 川の水利用システムを念頭におき、主に灌漑用取水、灌漑、ダム調節を考慮する。これらの水利用情報に関するデータセットを作成しなければならない。ここで灌漑域マップ、灌漑域情報、取水地点情報、ダム情報に基づき、各メッシュに以下の情報を付与する。

- 水利用タイプ：これはこのメッシュでの水利用タイプを示している。現時点では、以下の水利用タイプが定義されている。
 - 0 自然状態

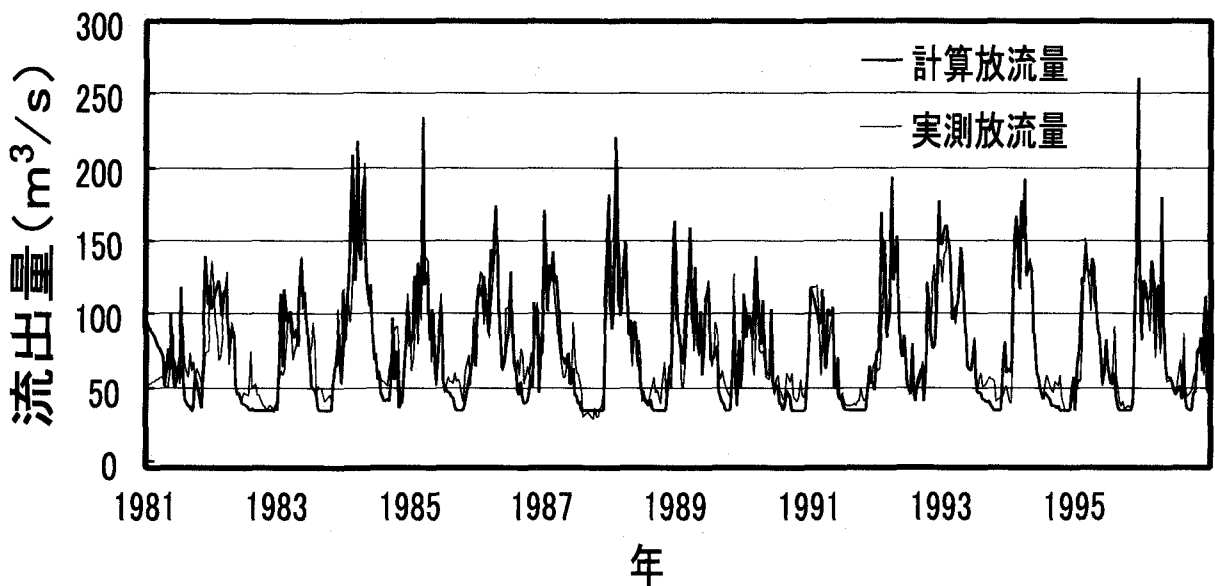


図-3 推定操作ルールによる Sutami ダムと Lahor ダムの計算総放流量とその実測値

- 1 ダム
- 2 取水
- 4 灌漑

あるメッシュで複合的に水利用が行われている場合には、これらの論理和で表現する事ができる。たとえば、取水していて、かつ灌漑も受けている場合にそのメッシュの水利用タイプは6となる。これにより、将来的により多くの水利用タイプに簡単に対応できるようになる。

- 灌漑区番号：これはこのメッシュの属している灌漑区番号である。本研究では灌漑区毎に灌漑流量を決定しているために、これが必要である。また、個々の取水口の灌漑面積が特定できる場合に、取水口ごとに灌漑区を設定すれば良い。

個々のメッシュのこれらの情報を、最適追跡順番に保存し、モデル実行時に最適追跡順番と連動して順次読みだして処理を行うようにする。

(1) 水利用：ダム

ダムのあるメッシュにおいては、基本的にそのダムの操作ルールにしたがって、ダム調節を行う事が可能である。Brantas 川流域に大小8個のダムがあるが、その中でも、Sutamiダムが Lahorダムとトンネルで連結しており、その総貯水能力が流域総貯水容量の60%を占めている。本研究では、これらのダムを一つのダムとして扱い、シミュレーションの対象とした。具体的な操作ルールが得られないので、発電と喝水流量の確保がこの二つのダムの主たる目的であることを考慮し、

両ダムの総放流量と総流入量の関係を調べ、次式

$$Q_{out} = \begin{cases} Q_{in} & V \geq V_{max} \\ Q_{min} & 0 < V < V_{max} \\ 0 & V = 0 \end{cases} \quad (1)$$

でおおむね表現できることが分かった。ここで、 Q_{out} は総放流量、 Q_{in} は総流入量、 Q_{min} は放流しなければならない最小放流量で、 V_{max} は両貯水池の総有効貯水容量である。実測旬総流入量に対して上記の操作ルールを適用し、計算総放流量と実測総放流量が最も一致するように、 $V_{max} = 2.25 \times 10^8 m^3$ と $Q_{min} = 35 m^3/s$ と推定した。なお、ダムの運用が1978年からである。図-3は推定操作ルールによる Sutami ダムと Lahor ダムの計算総放流量とその実測値を示しており、良く再現している。

(2) 水利用：灌漑

本来なら各取水施設とその灌漑面積との対応関係を考慮し、その取水量を各メッシュに配分する方法が一番望ましいが、これらの情報の入手が困難であるため、本研究では、図-4のように灌漑区単位でモデル化することにした。図-5に Brantas 川の主河道、取水口と灌漑区の位置を示している。

Brantas 流域に全部で12個の灌漑区があるが、ここではこれらを7つに統合した。各灌漑区の個々のメッシュへの灌漑水量は当該灌漑区の総灌漑水量をその灌漑区のメッシュ数で割れば求まる。つまり、

$$Q_{(x,y)} = Q_{t,j} / M_j \quad (2)$$

である。ここで、 $Q_{t,j}$ がj番目の灌漑区の総灌漑水量で、その灌漑区内のすべての取水口の取水量の和で、 $Q_{(x,y)}$ はメッシュ(x,y)での灌漑水量、 M_j はこのメッシュが

属している j 番目の灌漑区域のメッシュ数で、灌漑マップから求めたものである。この灌漑水量が求まれば、あとはどのような経路で河川流量または蒸発量になるかだけを考えれば良い。灌漑水の扱い方について、大きく分けて、降雨と合算してメッシュ水文モデルへの入力とするやり方と、灌漑水を直接地下水に加えるやり方（菅原, personal communication）があるが、現時点において、定説がないと考えられる。本研究で用いているメッシュ水文モデルもまだ灌漑水の取り入れに対応していない。そこで、本研究では水の授受だけを考え、以下のように簡略化し、モデル化している。Brantas 川に戻る流量を

$$R_{(x,y)} = f_1 f_2 Q_{(x,y)} \quad (3)$$

で計算した。ここで、 $R_{(x,y)}$ はメッシュ (x,y) で流域内の河川に戻る流量で、 f_1 は灌漑水量 $Q_{(x,y)}$ が河川に戻る割合、 f_2 は戻った水のうちに流域内の河川に戻る割合である。これらの値は今までの Brantas 流域での実績から（株）日本工営が推定した値を用いる。本研究では、7つの灌漑区の1961年から1987年までの旬平均総灌漑水量を整備した。なお、データの無い期間に関しては、その直後の5年間の各旬の平均値を用いた。

(3) 水利用：取水

Brantas 流域に合計 19 個の取水施設がある。これらの取水施設の取水ルール、取水量、取った水の行き先、ここでは灌漑区が分かれば、河川水、つまり上流からの流入と当該メッシュの流出から引き、その行き先に入れば良い。しかし、Brantas 川では、各取水口の灌漑面積が特定できない。本研究では、灌漑区ごとに取水量を集計し、灌漑区ごとの総灌漑水量を求め、そして各取水地点取水量を

$$Q_i = Q_{t,j} / N_j \quad (4)$$

で推定した。ここで、 Q_i は i 番目の取水地点の取水量、 $Q_{t,j}$ は j 番目の灌漑区での総灌漑水量で、 N_j は j 番目の灌漑区に水を送っている取水施設数である。各取水地点に以下のデータ

- 座標：取水地点の座標
- 灌漑区番号：取った水が使用される灌漑区番号

を用意し、計算中のメッシュの座標が取水地点の座標が一致すれば、当該メッシュの河川流量から取水する。なお、河川流量が足りないときには、河川の維持流量等を考慮せず取りきるようにしている。これは個々の取水地点での維持流量が不明であるため、多少問題を起す可能性がある。

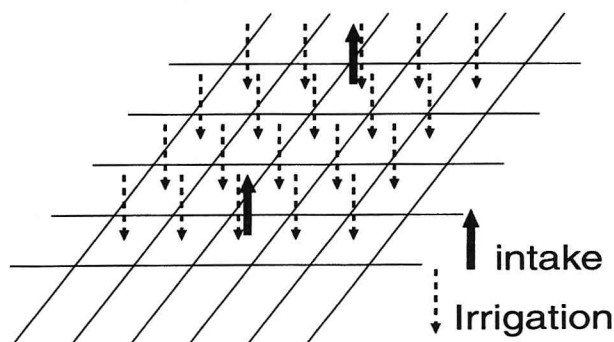


図-4 灌漑区における取水と灌漑の概念図

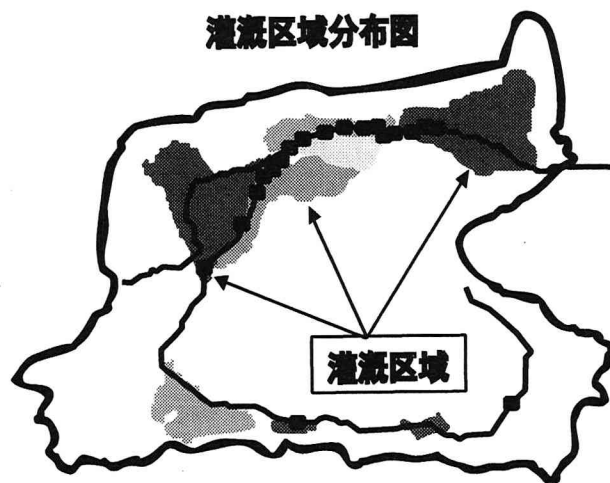


図-5 Brantas 川の灌漑域分布図

5. シミュレーションの結果と考察

本研究ではダム調節、取水や灌漑などの水利用形態に柔軟に対応できるように、水利用形態の数値表現を行い、すべてのメッシュにおける水利用形態を分布型水文モデルと連動するようにデータベース化する方法を示した。そして、水利用シミュレーションを分布型水文モデルへの取り入れ方を示した。

そして、Brantas 川流域を対象にモデルを実装し、1961年から1987年までの期間を日単位で水利用のシミュレーションを行った。図-6に、ダム下流側の Jeli と Kertosono での1975年から1984年までの計算と実測流量ハイドログラフを示している。太線が実測月流量で、細線が計算値で日単位で細かい変化を見るためにあえて月単位にしていない。また、1978年までの期間が Sutami ダムと Lahor ダムの運用前である。この図から、所々合わない部分もあるが、両地点ともダムの運用前と運用後の期間にわたり、全体の河川流量の変動をほぼ再現しており、また、ダムを考慮しないケースと比べて、ダム放流による乾季河川流量の上昇が表現されている。データの入手等でいろいろ制約が多く、簡略化せざるを得ない部分もあり、実際に行われている水利用に忠実に表現しているとは言い切れない部分も

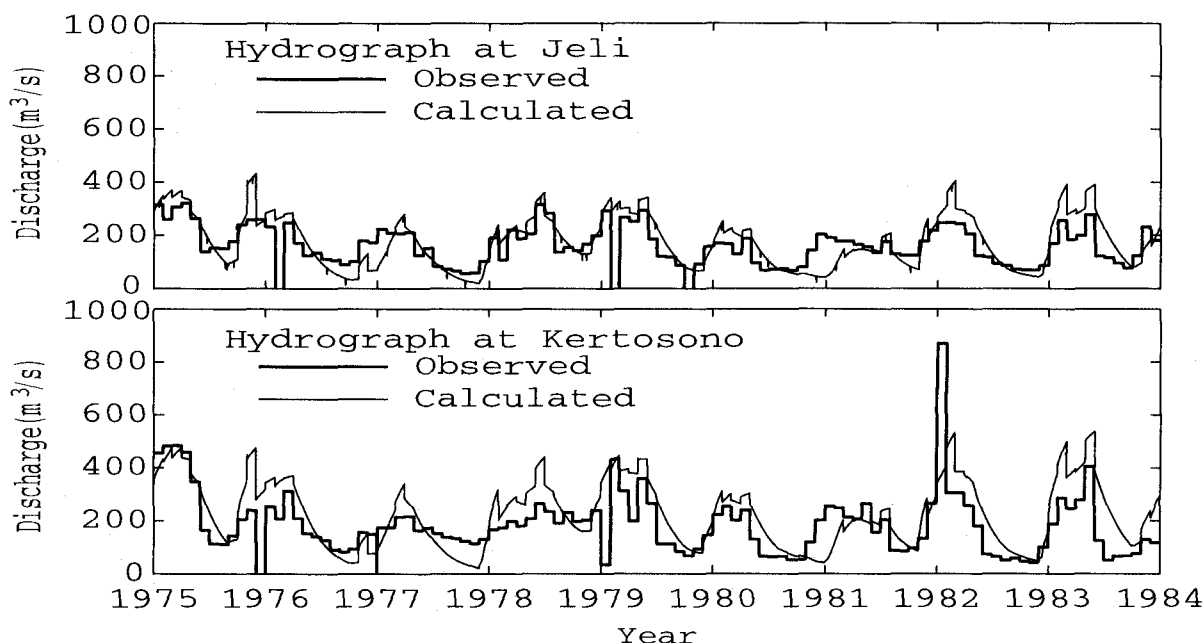


図-6 Jeli と Kertosono での計算と実測流量

あるが、これにより Brantas 川流域内の灌漑およびダム調節を考慮する水利用シミュレーションモデルが構築できたことが示された。これにより、一つのモデルで、流域面上に行われている各種の水利用を一元的に扱うことができるようになった。

このような高度な水利用シミュレーションを行うために、流域水資源管理の上で必要となるデータそしてモデリング技術の基本的なフレームワークが明らかになったと言えよう。データに関しては、取水口ごとの灌漑面積を示す灌漑マップ、各取水口の取水ルール、各ダムの操作ルールの整備がこのような水利用シミュレーションモデルの運用に不可欠である。その整備が望まれる。また、灌漑水のモデルにおける扱いに関しても、本研究では、極めて簡単な扱いをしたが、さらなる検討が必要である。本モデルを用いて数値実験により検討することを考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、東京大学藤井秀幸氏、広瀬典昭氏、中川和男氏をはじめとする(株)日本工営の方々、インドネシア政府機関 JASA TIRTA の

方々からデータ提供、現地調査など多岐に渡ってアドバイスを協力を得た。ここに記して深謝を申し上げる。

参考文献

- 1) JICA: Development of the Brantas river basin, Technical report, Japan International Cooperation Agency, 1998.
- 2) 陸旻皎・小池俊雄・早川典生: 分布型水文情報に対応する流出モデルの開発, 土木学会論文集, No. 411/II-12, pp. 135-140, 1989.
- 3) 陸旻皎・早川典生・小池俊雄: 河道網構造に基づく最適追跡順番の決定法, 土木学会論文集, No. 473/II-24, pp. 1-6, 1993.
- 4) 陸旻皎・小池俊雄・早川典生: Multi-step, multi-reach Muskingum-Cunge 法を用いた分布型水文モデルの開発, 水文・水資源学会誌, Vol. 12(5), pp. 384-390, 1999.
- 5) Zhao, R-J.: The Xinanjiang model applied in China, *Journal of Hydrology*, Vol. 135, pp. 371-381, 1992.

(2001.10.1受付)