

広域分布型流出予測システムの開発と ダム群治水効果の評価

佐山敬洋¹・立川康人²・寶馨³・市川温⁴

¹正会員 京都大学防災研究所助手 社会防災研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)
E-mail: sayama@flood.dpri.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学防災研究所助教授 社会防災研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

³フェロー会員 京都大学防災研究所教授 社会防災研究部門 (〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴正会員 京都大学大学院工学研究科助手 都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

淀川流域全域を対象としてダム群の流況制御過程を考慮した分布型の流出予測システムを開発した。再現計算の結果、ダムが予備放流に続いて洪水調節に入る過程や、他のダムの操作状況に応じて放流量を決定する連携操作の過程など、洪水時の高度な流況制御の過程を定量的に再現できることを確認した。開発した流出予測システムを用いてダム群治水効果の評価を行った結果、1960年には年超過確率 1/30 の降雨で枚方地点の計画高水流量を超えるのに対し、ダム群の治水効果が期待できる 2000年には 1/100 の降雨でそれを超過することがわかった。また、高山ダムを例に、ダムが単体で機能する場合とダム群として機能する場合との治水効果を比較し、後者の場合は前者の場合より規模の大きな降雨に対して治水効果を発揮することを明らかにした。

Key Words : dams, distributed rainfall-runoff model, Yodo River basin, flow regime control, flood control effects

1. はじめに

流域の水循環は、本来、自然の摂理に従うものであるが、我々はそれを人工的に改変し、非常に複雑な水循環システムを形成してきた。農業用水の確保を目的とした灌漑事業や、治水・利水を目的としたダムの開発、さらには、最近では生態系の多様性を回復することを目的としたダム操作など、流況制御の目的と方法は千差万別であり、それらの過程が複雑に影響しあって、実際の流域水循環システムを形成している。

これまで水循環に関する研究は、流況制御の影響が少ない流域を対象として水の挙動を物理的に解明し、数値モデルを構築することに多くの時間を費やしてきた。今後、流域管理に関する計画の策定や意思決定を支援するためには、こうした研究に加えて、現在行われている流況制御の効果を定量的に把握し、現状の土工施設の能力を最大限引き出すような流水制御ルールの開発や、新たな土工施設の治水・利水・環境に対する効果を分析する研究を一層進める必要がある。

本論で着目する我が国の治水事業に関して言えば、大型のダム群を含む治水施設が高度に流況を制御し、洪水に対する安全性を向上させてきたことは間違いない。しかし、その流況制御の結果が弊害を生み出していることも認識されている。水循環に関するステークホルダーが納得するような治水・利水・環境を調和させた河川事業の推進が求められている。こうした事業を実施

するためには、これまでの治水整備がどの程度安全性を向上させてきて、当初目標とした安全性に現在どの程度まで達成しているのか、さらに、どういった規模の洪水に対して現存する治水施設は有効に機能するのか、といったことを定量的に分析し、把握しておく必要がある。

ダム群による流況制御が水循環に与える影響を評価する方法は、観測された流量データを解析する方法と、流況制御過程を考慮した流出モデルを用いる方法とに大別できる。例えば、Batalla *et al.*¹⁾はダム群(灌漑用または発電用)が建設される前後の数十年の流量データを用いて洪水頻度解析を行い、年超過確率がそれぞれ 1/2 と 1/10 のピーク流量について、ダム群がピーク流量を約 30% 低減させたことを示している。このようなデータ解析にもとづく手法は、流況制御の過程をモデル化できない場合に有効であるが、そのためには長期のデータが必要であり、またこれまで経験したことの無いような大きな洪水に対するダムの治水効果を評価できないという問題がある。

一方、Montaldo *et al.*²⁾は発電用ダムの放流過程のモデルと分布型流出モデルを統合して、ダム群の効果を評価している。ダム貯留量の初期条件を変えてシミュレーションを行い、洪水前の貯水容量がピーク低減に影響を及ぼすことを示している。流出モデルを用いる方法は、このように条件を変えて計算できることに利点

がある。ただし、Montaldo *et al.*²⁾が対象とした貯水池はゲート操作を伴う治水目的のダムではないので、その放流量の算定方法は極めて単純であり、本論で対象とするような多目的ダムの治水効果を算定するためには、より精緻な制御過程のモデルが必要である。

多目的ダムの流況制御過程をモデル化する手法については、ダムの操作規定と意思決定を詳細に再現し、ダムの放流量と水位を予測する手法が市川³⁾によって提案されている。この手法の特徴は、予備放流や洪水調節などすべてのダムに共通する操作をあらかじめオブジェクト指向型の設計手法でモデル化しておき、個々のダムのモデルは、このモデルを継承しつつ、各モデルで異なる操作方法を付け加えることで実現するという点にある。本論では、このダムモデルを基本として、淀川流域内の主要8基のダムの流況制御過程をモデル化し、淀川流域全域(枚方地点上流: 7,281 km²)を対象として流況制御の効果を考慮した広域分布型流出予測システムを開発する。

分布型流出予測システムの構成要素は、国土数値情報の河道網位置データを基本とする河道のモデル、全流域を250 mのグリッドセルで覆う落水線型の分布型流出モデル、湖沼の水収支を計算する湖沼のモデル、そして上述のダムモデルである。従来、こうした詳細な地形効果を考慮する分布型流出モデルは主に数百km²程度の流域を対象に開発が進められてきた。一方、それより大きな数千km²から数万km²程度の流域を対象とする場合には、計算機能力の制限と詳細な地理情報を入手することの難しさから、部分流域ごとに集中型モデルを構成し、それを結合して流域全域のモデルとしてきた。もちろん流域下端の流出量を予測するためにはこうした手法も有効ではあるが、わが国での洪水予測には、中小河川でも高い精度を持つ流域一体とした流出予測システムが必要である。そのためには数百mの空間分解能で数万km²の流域を対象とする流出予測システムが必要となるが、現在の計算機能力を用いれば、十分な速度で流出計算を実行できる。ここで開発する流出予測システムは7,281 km²の淀川流域全域での流出予測をダム制御を含めて計算することを可能としており、同様の枠組みはわが国のほとんどの流域で適用可能であると筆者らは考える。

以下、2. では、淀川流域の概要を示すとともに構造的モデリングシステムを利用した淀川流域全域を対象とする広域分布型流出予測システムの開発について述べる。3. では、ダムの流況制御過程のモデル化手法について述べる。そして、4. で構築した流出予測システムを1982年と97年の台風イベントを対象にして検証した後、5. において、ダム群の治水効果を以下の二つの観点から評価する。

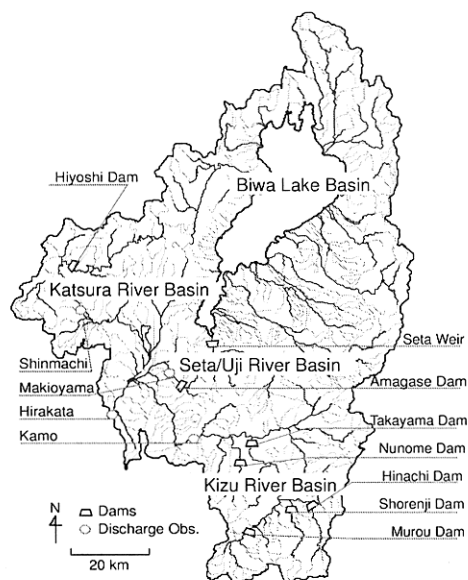


図-1 淀川全流域(枚方上流)の数値河道網データ、主要8ダム、および流量観測所の位置。

- (a) 淀川流域でダム建設が始まった1960年代から現在に至るまで、どのように治水に対する安全性が向上してきたかを、洪水規模に応じて調べる。
- (b) ダムが単体で機能する場合の治水効果と、ダム群の構成要素として機能する場合の治水効果とを比較評価する。

2. 淀川流域を対象とした分布型流出予測システム

(1) 淀川流域の概要

淀川流域(8,240km²)は、大阪、京都、兵庫、奈良、滋賀、三重の近畿2府4県に広がり、国内最大の琵琶湖(湖面面積: 670km²)が流域内に存在する。流域は琵琶湖流域(3,848km²)、木津川流域(1,596km²)、宇治川流域(506km²)、桂川流域(1,100km²)、淀川下流流域(807km²)、猪名川流域(383km²)の6つの流域で構成される。琵琶湖から流れ出た河川流量は宇治川を通過して、淀の地点で木津川、桂川と合流する。この地点を三川合流と呼び、その下流が淀川本川となる。本研究で開発する流出予測システムは、下流端を淀川本川に位置する枚方地点(7,281km²)に設定する(図-1)。

淀川流域は高度に流況制御が行われており、高山ダム、青蓮寺ダム、布目ダム、室生ダム、比奈知ダムなど主要なダムは主に木津川流域に存在する。また、琵琶湖からの流出は瀬田洗堰で制御され、さらに下流の

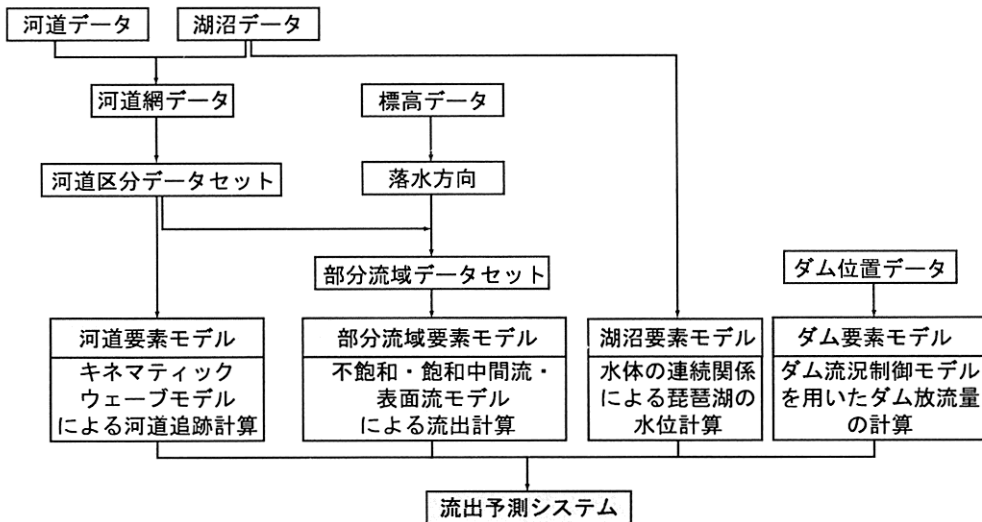


図-2 分布型流出予測システムの構成.

天ヶ瀬ダムで制御される。桂川流域には日吉ダムが存在し、これらのダムの操作は河川法で定められた各ダムの操作規定にもとづいて行われる。

(2) 流出予測システムの全体構成

従来、数百 km² 程度の中小流域に適用されてきた詳細な地形情報にもとづく分布型流出モデル⁴⁾を、7,000 km² を超える淀川流域に適用する。そのために、本研究では、構造的モデリングシステム⁵⁾を利用し、全体の流出予測システムを以下に示す要素モデルの集合として構成する。

- 河道要素モデル
- 部分流域要素モデル
- 湖沼要素モデル
- ダム要素モデル

以下に、流出予測システム構築の手順を示す。図-2はその流れを図示したものである。

- 国土数値情報の河道データと湖沼データを接続することにより湖岸線を含む河道網データを作成する。
- 河道網を約 3 km 毎に分割して河道区分データセットを作成する。
- 河道区分にキネマティックウェーブモデルを適用して河道要素モデルを構築する。
- 標高データから落水方向を決定し、約 3km ごとに分割した河道区分に流入する部分流域を抽出する。
- 部分流域のデータセットは勾配、落水方向、面積の情報をもつ矩形斜面の集合であり、それぞれの矩形斜面に不飽和・飽和中間流・表面流モデル⁷⁾を適用して、分布型の部分流域要素モデルを構築する。

(f) 流入量、降雨量、放流量から琵琶湖の水位変化を算定する湖沼要素モデルを構築する。なお、琵琶湖からの放流量は、ダム流況制御モデルを瀬田川洗堰に適用した瀬田川洗堰のダム要素モデルによって算定する。

- 淀川流域内の主要 8 基のダムを対象に、ダム流況制御モデルを適用し、ダム要素モデルを構築する。
- これらすべての要素モデルを接続して、流域全体の流出予測システムを構築する。

なお、ダム要素モデルの基本モデルとなるダム流況制御モデルについては 3. でその詳細を述べることとし、ここでは、各要素モデルの構築手法とその接続手法について述べる。

(3) 河道要素モデル

国土数値情報の河道データ (W15-52L) と湖沼 (面) データ (W09-50A) を接続し、琵琶湖の湖岸線を含む河道網データ (図-1) を作成する。合流点、流量観測所地点、ダム地点で河道網を分割し、さらに 3 km 以上の河道があれば、その長さが約 3 km になるように分割する。また、琵琶湖の湖岸線も同様、河川の流入点で分割し、さらに 3 km 以上の湖岸線があれば、その長さが約 3 km になるように分割する。ここでは、これらを河道区分、湖岸線区分と呼ぶことにする。

河道、湖岸線を約 3 km に分割する理由は、一つの部分流域の大きさを約 3 km×3 km にするためである。この大きさは、国土交通省旧深山レーダの空間分解能に対応している。本論で構築する部分流域の要素モデルは、空間分解能 250 m の落水線型の分布型流出モデル

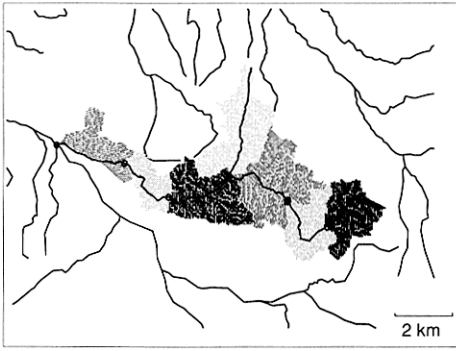


図-3 河道網を約 3km 毎に分割した河道区分データセット (実線) と各河道区分に流入する部分流域データセットの一例: 部分流域は 250 m 分解能の標高データをもとにする斜面の集合で構成される。

であるが、今後、実時間予測を目的として流出計算する場合、この部分流域の要素モデルを集中化し、計算効率のよい流出予測システムを開発することを想定している。その際、降雨の空間分布情報を失わず、かつ効率のよいモデルを構築するためには、部分流域の大きさを約 3 km×3 km にしておく都合がよいと考えた。

河道幅に関しては、淀川流域内の木津川流域、琵琶湖流域、桂川流域において 22 地点の河道幅 (起底流量時の河道幅) と集水面積の関係から式 (1) に示す回帰式を作成し、すべての河道区分に対する河道幅を算出する。

$$W = 0.024A^{0.39} \quad (1)$$

ここに、 W : 河道幅 [m]、 A : 集水面積 [m²] である。ただし、淀川本川、瀬田川・宇治川については上流に琵琶湖が存在し、回帰式が適合しないので、それぞれ数地点の河道幅を平均し、淀川本川、瀬田川・宇治川の河道幅をそれぞれ 262 m、116 m とした。

それぞれの河道区分にキネマティックウェーブモデルを適用し、河道要素モデルを構築する。このモデルの単位幅流量 q [m²/s] と水深 h [m] の関係は式 (2) で表され、式 (3) の連続式と組み合わせて河道流量を計算する。

$$q = \alpha h^m \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q_L \quad (3)$$

ここに、 α : パラメータ ($\alpha = \sqrt{i}/n$, i : 勾配 [rad], n : 粗度係数 [m^{-1/3}s]), m : 定数 [-] (= 5/3), q_L : 単位長さあたりの側方流入量 [m/s] である。

(4) 部分流域要素モデル

国土数値情報の標高データ (空間分解能: 250 m) をもとに最急勾配法で落水方向を決定し、各河道区分に

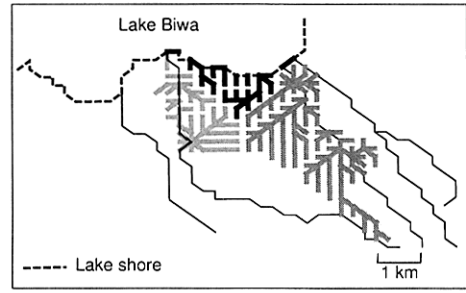


図-4 琵琶湖付近の河道区分 (実線)・湖岸線区分 (破線) とその部分流域データセットの一例。湖岸に近隣する斜面要素は河道ではなく、琵琶湖に直接流入する。

流入する部分流域を抽出する⁶⁾。図-3 は河道区分と部分流域の例を示している。色分けされている部分が一つの部分流域に対応している。また、河川に流入せずに直接琵琶湖に流入する流域については、湖岸線区分に流入する部分流域として抽出する。図-4 は琵琶湖付近の河道区分、湖岸線区分とそこに流入する部分流域の例を示している。

部分流域は勾配、落水方向、面積の情報をもつ矩形斜面の集合であり、それぞれの矩形斜面に不飽和・飽和中間流・表面流モデル⁷⁾を適用し、分布型の部分流域要素モデルを構築する。図-5 (a) はこの流出モデルが想定する土層を図示したものである。このモデルでは、土壌中のマトリクス部を流れる不飽和流、土壌中の空隙部を重力水として流れる飽和中間流、そして地表を流れる表面流の三種類の流れを考え、土層厚を D [m]、土壌中の最大水分量に対応する水深高さを d_s [m]、マトリクス部の最大水分量に対応する水深高さを d_c [m] とする。 k_c をマトリクス部の飽和透水係数 [m/s], k_a を大空隙での飽和透水係数 [m/s] とし、 $v_c = k_c i$, $v_a = k_a i$ とし、単位幅流量 q [m²/s] と水深 h [m] の関係を

$$q = \begin{cases} v_c d_c \left(\frac{h}{d_c} \right)^\beta, & (0 \leq h \leq d_c) \\ v_c d_c + v_a (h - d_c), & (d_c < h \leq d_s) \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) + \alpha (h - d_s)^m, & (d_s < h) \end{cases} \quad (4)$$

とモデル化する。ここに、 β [-] はマトリクス部において含水率の減少に伴う透水係数の減少の大きさを表すパラメータである。マトリクス部と大空隙部の流量流積関係の連続性から $\beta = k_a/k_c$ とする⁷⁾。この式で表される q と h の関係を図-5 (b) に示す。また、伝播速

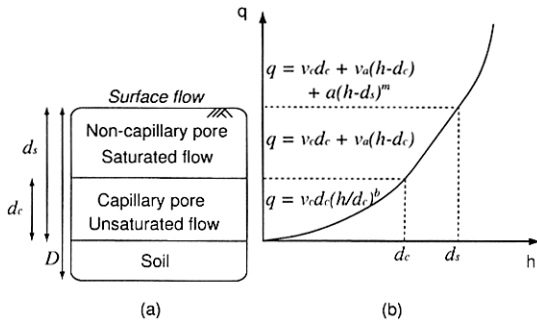


図-5 不飽和・飽和中間流・表面流モデルの概念図 (a) とその流量流積関係 (b)。

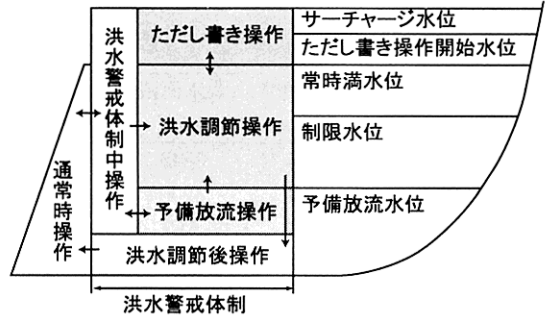


図-6 ダム流況制御モデルで考慮する六段階の操作過程と操作過程の基準となる水位。

度 c [m/s] は、

$$c = \frac{\partial q}{\partial h} = \begin{cases} \beta v_c \left(\frac{h}{d_c}\right)^{\beta-1}, & (0 \leq h \leq d_c) \\ v_a, & (d_c < h \leq d_s) \\ m\alpha(h-d_s)^{m-1} + v_a, & (d_s < h) \end{cases} \quad (5)$$

となる。これらの関係式と連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (6)$$

とを組み合わせて矩形斜面からの降雨流出を計算する。なお、式 (6) において $r(t)$ は降雨強度 [m/s] である。

(5) 湖沼要素モデル

琵琶湖への流入量 q_{in} [m³/s]、瀬田川洗堰からの放流量 q_{out} [m³/s]、湖沼上の降雨強度 r_l [m/s] から琵琶湖水位 h_l [m] の変化を算定する湖沼要素モデルを構築する。水面は水平であると仮定し、連続式が成立するとして h_l を算定する。

$$\frac{dh_l}{dt} = \frac{1}{A_l} (q_{in} - q_{out}) + r_l \quad (7)$$

ここに、 A_l : 琵琶湖の面積 (=670×10⁶ m²) である。

(6) ダム要素モデル

淀川流域内の主要な 8 基のダム (表-1) にダム流況制御モデルを適用してダム要素モデルを構築する。3. にその詳細を示す

(7) 要素モデルの接続

淀川流域全体の流出予測システムは、複数の河道要素モデル (1707 個)、部分流域要素モデル (1707 個)、湖沼要素モデル (1 個)、およびダム要素モデル (8 個) によって構成される。

流域全体のシステムを要素モデルの組み合わせとして取り扱う方法は、高樟ら⁵⁾ によって開発された構造的モデリングシステムによって実現する。このシステムでは、要素モデルの実行制御やデータの授受など、計算

機シミュレーションを行う上で基本的な機能はあらかじめオブジェクト指向言語で記述しており、ユーザーは要素モデルを構築し、その接続関係を構造定義ファイル⁸⁾ のフォーマットに従って記述すればよい。

ただし、本研究が対象とする淀川流域の流出予測システムは 3000 個以上の要素モデルが全体のシステムを構成しており、その接続関係を手作業で指定することは現実的ではない。そこで、河道区分データセットをもとに部分流域要素モデルと河道要素モデル、および河道要素モデル間の接続関係を構造定義ファイルのフォーマットで記述するプログラムを開発した。これにより、下流端の河道区分を指定すると、その上流のみを含む流域全体の流出予測システムを自動的に構築することが可能となった。

3. ダム流況制御モデルの構築

ダムの操作規定と意思決定を定式化することにより、ダムによる流況制御の過程をモデル化する。ここで構築するモデルは、ダムへの流入量、ダム上流域の平均降雨量、および、連携操作の対象となるダムの操作過程を入力情報とし、ダムからの放流量とダム貯水池の水位を予測するモデルである。

本論で対象とする淀川流域の主要な 8 基のダムは、すべて洪水制御をその目的の一つとする多目的ダムである。それぞれは異なった操作規定に従って運用されているが、以下に示す 6 段階の操作過程は洪水制御を目的としたダムに共通した操作過程であり、一般化することができる³⁾。

- 通常時の操作
- 洪水警戒体制中の操作
- 予備放流操作
- 洪水調節操作
- ただし書き操作

表-1 淀川流域主要8ダムの諸元.

ダム	運用開始年	集水面積 [km ²]	総貯水容量 [× 10 ⁶ m ³]	洪水調節容量 * [× 10 ⁶ m ³]	洪水調節方式	予備放流
瀬田川洗堰	1905 **	3848	-	2221 ***	一定量	なし
天ヶ瀬ダム	1964	4200	26.3	20.0	一定量	あり
高山ダム	1969	615	56.8	35.4	一定量一定率	なし ****
青蓮寺ダム	1970	100	27.2	8.4	一定量	あり
室生ダム	1974	169	16.9	7.8	一定量	あり
布目ダム	1992	75	17.3	6.4	一定量一定率	なし
日吉ダム	1998	290	66.0	42.0	一定量	なし
比奈知ダム	1999	76	20.8	9.0	一定量	なし

* 制限水位からサーチャージ水位まで貯水容量.

** 1905年：南郷洗堰が完成，1961：現在の瀬田川洗堰が完成.

*** 基準水位 (-0.30 m) から計画高水位 (1.40 m) までの琵琶湖貯水量.

**** 非洪水期間は予備放流あり.

● 洪水調節後の操作

ダム流況制御モデルで考慮する操作過程は常に上の6段階の操作過程のいずれかにあり，各操作過程にある場合の操作方法と，ある操作過程から別の操作過程に移行する条件をif-then形式で定式化する。図-6はダム流況制御モデルの操作過程と移行の順序，および操作規定で定められた水位を示している。表-1に示すように，一部のダムは予備放流を行わないが，その場合は予備放流操作過程に入らないようダム流況制御モデルに条件を加える。以後，操作規定に明記される各操作過程の操作方針とそのモデル化手法，およびその過程へ移行する条件のモデル化手法について詳しく述べる。なお，ここでは，ダム施設管理規定，ダム操作細則，各種操作要領をまとめて操作規定と呼ぶことにする。

(1) 通常時の操作

a) 操作方針

通常時(洪水警戒体制中でない時)はダムの水位を目標とする水位に保つための操作を行う。一般に一年を洪水期間と非洪水期間に分け，洪水期間は制限水位に，非洪水期間は常時満水位に水位を保つことを目標とする。例えば，青蓮寺ダムでは6月16日から10月15日までを洪水期間，10月16日から翌年6月15日までを非洪水期間としている。

b) 通常時の操作過程のモデル化

洪水期間，非洪水期間，制限水位，常時満水位をそれぞれモデルパラメータとし，洪水期間は常時満水位に，非洪水期間は制限水位に水位を保つよう放流量を決定する。なお，洪水期間から非洪水期間への移行期間

は放流実績をもとに決定し，15日間とした。また，非洪水期間から洪水期間への移行期間も同様に15日間とした。

c) 通常時の操作過程への移行条件

上述のとおり洪水警戒体制中でなければ通常時の操作を行う。言い換えば，洪水警戒体制を解除して通常操作にもどる条件が通常操作に移行する条件である。洪水警戒体制を解除する条件はその開始条件とあわせて(2)c)に示す。

(2) 洪水警戒体制中の操作

a) 操作方針

一般に近接する気象台から降雨に関する注意報や警報が発令された場合は洪水警戒体制に入り，関係機関との連絡を密にするなど情報収集を行うとともに，予備放流や洪水調節の計画を立てる。水位は洪水警戒体制に入った時点の水位より高くないように維持する。

b) 洪水警戒体制中の操作過程のモデル化

洪水警戒体制に入った時点の水位(一般に洪水期間であれば制限水位，非洪水期間であれば常時満水位)を保つよう放流する。なお，予備放流や洪水調節を行っている間も洪水警戒体制を敷いているので，厳密には洪水警戒態勢中の操作といえるが，本論では，予備放流あるいは洪水調節に入る前のダムの操作を洪水警戒体制中の操作と呼ぶことにしている。

c) 洪水警戒体制中の操作過程への移行条件

洪水警戒体制に入る条件は，「近接する気象台から注意報や警報が発令された場合やダム統合管理事務所から指示があった場合」などとされており，施設管理規

定には詳細な条件は明記されていない。ただし、ダムによってはその操作細則に「流域内の平均累計雨量が数十 mm に達して、かつ降雨の継続が予想される場合に洪水警戒体制に入る」などの記述があり、過去の降雨履歴と将来の降雨予測をもとに管理者による意思決定がなされていることがわかる。従って、ダム流況制御モデルは洪水警戒体制に入る条件を以下のように定義することによりダム管理者の意思決定を反映させることにする。

- 現在時刻から将来 T_{wf} 時間内の総降水量が R_{wf} [mm] 以上と予想された場合は洪水警戒体制に入る。

ここに、 T_{wf} と R_{wf} はパラメータであり、本論ではそれぞれ 9 時間以内、50 mm とした。また、実際のダム操作では将来の降雨を何らかの手法で予測することになるが、本論では計算に用いる入力降雨を将来時刻にわたって積算して予測値とみなしている。

洪水警戒体制の解除の条件についても、施設管理規定には「洪水警戒体制を維持する必要がなくなったと認める場合」などの記述があるのみで詳細な条件は明記されていない。そこで、ダム流況制御モデルでは洪水警戒体制の解除の条件を以下のように定義することによりダム管理者の意思決定を反映させる。

- 現在時刻から過去 T_{wp} 時間内の総降水量が R_{wp} [mm] 以下となった場合は洪水警戒体制を解除する。

ここに、 T_{wp} と R_{wp} はパラメータであり、本論ではそれぞれ 24 時間以内、50 mm とした。

(3) 予備放流操作

a) 操作方針

一般に予備放流を行うことによって洪水前の貯水容量を確保することが操作規定に定められている。予備放流によって達成する目標の水位を予備放流水位と呼び、これは予測する洪水の規模に応じてその都度ダム管理者が決定する。予備放流量はその最大放流量が施設管理規定に明記されているが、実際には事前放流指示要領に書かれている予備放流量の基準値に従うことが多いようである。また、予備放流を実施する前には準備期間をとり、その間に関係機関や下流域に対して通知・警告を出す。

b) 予備放流操作過程のモデル化

上述のとおり予備放流水位は洪水規模に応じて決定される。本論では、予備放流によって下げることができる最低水位が操作規定に明記されている場合はその値を、明記されていない場合は操作実績から予備放流水位を推定し、モデルのパラメータとする。予備放流量に関しても、その基準値が事前放流指示要領に明記されている場合はその値を、明記されていない場合は

観測値から予備放流量を推定し、モデルのパラメータとする。

予備放流操作はダムの水位が予備放流水位に達するまで予備放流量を放流し続ける。ただし、短い時間で放流量を急増させないという操作方針を反映させるため、モデルパラメータとして時間あたりの最大放流増加量を決定し、その値を超過しないように放流量を増加させる。また、予備放流を行うための準備期間としてその操作の実施を数時間遅らせる。この準備期間はパラメータとして与え、本論では 3 時間とした。

c) 予備放流操作過程への移行条件

予備放流に入る条件は、「洪水調節を行う必要が生ずると認められ、水位が予備放流水位を超えている場合」などの記述があるだけで施設管理規定には詳細な条件は明記されていない。ただし、ダムによってはその事前放流指示要領に「台風が $N25^\circ$ 以北にあり、近畿地方に接近または上流の恐れが 24 時間以内となったとき」や「台風の接近により、ダム流域内に実績降雨が観測されたとき」などの記述があり、管理者が過去の降雨履歴と将来の降雨予測をもとにして意思決定を行っていることがわかる。そこで、ダム流況制御モデルは予備放流に入る条件を、以下のように定義することによりダム管理者の意思決定を反映させることにする。

- 現在時刻から過去 T_{pp} 時間内の総降水量が R_{pp} [mm] 以上となり、かつ、将来 T_{pf} 時間内の総降水量が R_{pf} [mm] 以上と予想された場合は予備放流操作に入る。

ここに、 T_{pp} 、 R_{pp} 、 T_{pf} 、 R_{pf} はパラメータであり、それぞれ、24 時間、50mm、24 時間、200 mm (天ヶ瀬ダム：100 mm) とした。また、洪水警戒体制の開始条件と同様、将来の予測降雨 R_{pf} に関しては、計算に用いる入力降雨を将来にわたって積算し予測値とみなす。

(4) 洪水調節操作

a) 操作方針

一般に流入量が操作規定で定められた洪水流量を超えると洪水調節を行う。洪水調節にはいくつかの方式があり、それぞれのダムで定められた操作規定にもとづいて洪水調節を行う。なお、本論で対象とする淀川流域内の 8 基のダムは以下の二種類の洪水調節方式をとる。

一定量放流方式：流入量に関係なく放流量を一定に保つ。なお、この場合の一定の放流量は操作規定で定められる洪水流量と同じ流量である。

一定率一定量放流方式：流入量がピークに達するまでは流入量に対して一定の割合で放流し、流入量がピークに達した後はそのときの放流量を保つ。

b) 洪水調節操作過程のモデル化

一定量放流方式：操作規定に定められる洪水流量をパラメータとし、洪水調節中の放流量はこの洪水流量とする。

一定率一定量放流方式：操作規定に定められている洪水調節をそのまま定式化する。例えば高山ダムの場合は、流入量が $1,300 \text{ m}^3/\text{s}$ に達する前は、 $(\text{流入量} - 1,300) \times 0.24 + 1,300 \text{ m}^3/\text{s}$ 放流し、流入量が最大に達した後は、 $(\text{最大流入量} - 1,300) \times 0.24 + 1,300 \text{ m}^3/\text{s}$ 放流する。

c) 洪水調節操作過程への移行条件

流入量が洪水流量を超えた場合は洪水調節に入る。これはたとえ当該ダムが予備放流中であっても例外ではない。流入量が洪水流量よりも少なくなれば、洪水調節を終了する。

(5) ただし書き操作

a) 操作方針

計画規模を超える洪水が発生した場合には、洪水調節を続けるとダムの水位が上昇して危険な状態に陥る。従って、水位がただし書き操作開始水位を超え、かつ、今後サーチャージ水位を超えることが予想される場合には、水位がそれ以上上昇しないよう非常用ゲートを開放する。

b) ただし書き操作過程のモデル化

ダムへの流入量をそのまま放流することにより、水位の上昇を防ぐ。ただし、一時間あたりの放流増加量は、水位がサーチャージ水位を超えない限りにおいて、パラメータで定める一時間あたりの最大放流量増加量以下にする。

c) ただし書き操作過程への移行条件

水位がただし書き操作開始水位を超えた場合は当該操作に入る。そして、水位がただし書き操作開始水位よりも低くなった時点で当該操作を終了する。

(6) 洪水調節後の操作

a) 操作方針

洪水調節を行った後に、水位が洪水期間にあつては制限水位、非洪水期間にあつては常時満水位を超えているときは、速やかに水位を制限水位または常時満水位にまで低下させる。この場合の放流量は操作規定に定められている洪水流量を最大値とする。

b) 洪水調節後の操作過程のモデル化

流入量に関わらず操作規則で定められる洪水流量で放流を実施し、水位を制限水位または常時満水位にまで低下させる。

c) 洪水調節後の操作過程への移行条件

洪水調節中、または、ただし書き操作中に流入量が洪水流量を下回った時点で洪水調節を終了し、当該操作過程に入る。そして水位が制限水位または常時満水位にまで低下した時点で当該操作を終了する。

(7) ダム流況制御モデルのパラメータのまとめ

ダム流況制御モデルのパラメータを列挙する。

● 水位に関するパラメータ

制限水位

常時満水位

予備放流水位

ただし書き操作開始水位

サーチャージ水位

● 流量に関するパラメータ

洪水流量

最大予備放流量

一時間あたりの最大放流増加量

● 期間に関するパラメータ

非洪水期間

洪水期間

予備放流準備期間

● 移行条件に関するパラメータ

洪水警戒体制の開始終了条件：

$$T_{wf}, R_{wf}, T_{wp}, R_{wp}$$

予備放流の開始条件：

$$T_{pf}, R_{pf}, T_{pp}, R_{pp}$$

● 貯留量-水位関係

このうち、予備放流水位、一時間あたりの最大放流増加量、予備放流準備期間、洪水警戒体制の開始終了条件、および、予備放流の開始条件は、操作規定に明記されていないか、明記されていても直接パラメータとして用いることができないので、観測値等から推定する。

4. モデル検証

(1) 計算条件

a) 対象降雨イベント

過去 30 年で近畿地方に最も大きな洪水被害をもたらした 1982 年の台風 10 号 (T8210) の降雨イベントを対象として、淀川全流域 (枚方上流) の流出計算を行った。計算期間は、T8210 が近畿地方を通過した 8 月 1 日 0 時から 8 月 3 日 0 時までの 48 時間とした。モデルへの入力降雨は、流域内の 58 地点で観測された時間雨量をもとに最近隣法を用いて作成した 1.5 km 格子の時空間分布雨量とする。計算期間中の枚方上流の流域平均雨量は 2 日間で 203 mm であり、これは 1/15 の年超過確

率に相当する¹⁰⁾。

また、1997年の台風9号(T9709)の降雨イベントを対象にした流出計算も行う。計算期間は7月25日0時から7月29日0時までの96時間とし、同じく地上観測雨量をもとに最近隣法で作成した時空間分布雨量を入力降雨とした。計算期間中の枚方上流の流域平均雨量は4日間で149mmである。

特に断らない限り、降雨規模の大きいT8210の計算結果について考察する。一部、ダム要素モデルの水位予測結果の検証を目的として、T9709の計算結果を考察する。

b) モデルパラメータ

国土数値情報の土地利用データをもとにして流域全体を森林域、農地域、都市域に分割し、それぞれ異なる流出パラメータを使用した。琵琶湖を除いた流域全体に対する面積率は、森林域が63%、農地域が20%、都市域が17%であった。使用したパラメータの値は、森林域において $n = 0.6 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、 $D = 1.0 \text{ m}$ 、 $d_s = 0.15 \text{ m}$ (木津川、宇治川流域は0.25m)、 $d_c = 0.1 \text{ m}$ 、 $k_a = 0.015 \text{ m/s}$ 、 $\beta = 8.0$ 、農地域において $n = 1.0 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、都市域において $n = 0.3 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ である。農地域と都市域は土層を考慮せず式(4)の d_c と d_s をゼロとした表面流モデルを用いた。河道の n は $0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ とした。なお、T9709に対してはダムモデルがうまく作動するかどうかを確認するため、観測流量をもとに森林域の d_s を調節し、0.2mとした。

(2) ダム流入量・放流量計算結果

1982年の台風10号(T8210)の観測降雨を入力し、淀川全域でシミュレーションを行った。各ダムにおける流入量および放流量の計算結果を示す。

a) 天ヶ瀬ダム

図-8は天ヶ瀬ダムにおける計算(図中: Simulated)および観測(図中: Observed)の流入量(図中: inflow)と放流量(図中: outflow)を示している。天ヶ瀬ダムは宇治川流域に位置し、琵琶湖からの流出を制御する瀬田川洗堰の下流に位置する(図-7)。ピーク流入量の計算結果は観測値のそれを若干大きく見積もっているが、ピークの立ち上がりや低減を含めて全体的な傾向はよく再現できている。

放流量に関しては、操作規定に定められている洪水流量が $840 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、流入量が洪水流量を越えた時点で一定量放流方式によって放流を行う。また、計算開始時刻より8時間後から予備放流を開始し、18時間後ぐらいまで天ヶ瀬ダムは予備放流を継続していることが観測流量結果よりわかる。ダムモデルはやや予備放流のタイミングが早い、その予備放流操作を再現している。

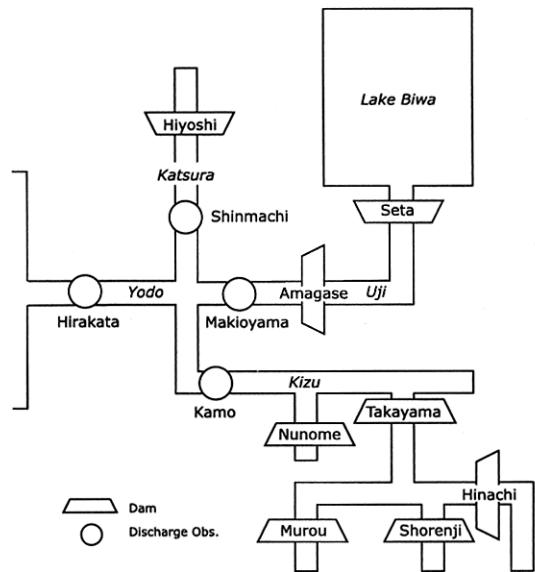


図-7 淀川全流域(枚方上流)における主要8ダムと流量観測所の位置関係概略図。

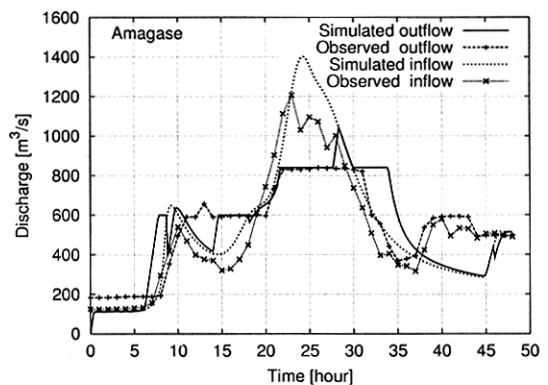


図-8 天ヶ瀬ダムにおけるT8210時の計算および観測による流入量と放流量。1982年8月1日0時を起点とする。

b) 青蓮寺ダム

図-9は青蓮寺ダムにおける計算および観測の流入量と放流量を示している。青蓮寺ダムは木津川上流域に位置する(図-7)。計算放流量は予備放流、洪水調節の傾向を再現している。ダムモデルは予備放流によって水位をあらかじめ予備放流水位まで低下させるが、計算の予備放流時間が観測のそれより短いのは、計算開始時刻から約10時間後までの計算流入量が観測流入量に比べて小さいためであると考えられる。

ピーク時の放流量の計算結果は $460 \text{ m}^3/\text{s}$ 、観測値は約 $390 \text{ m}^3/\text{s}$ であり計算結果の方が大きい。ダムモデル

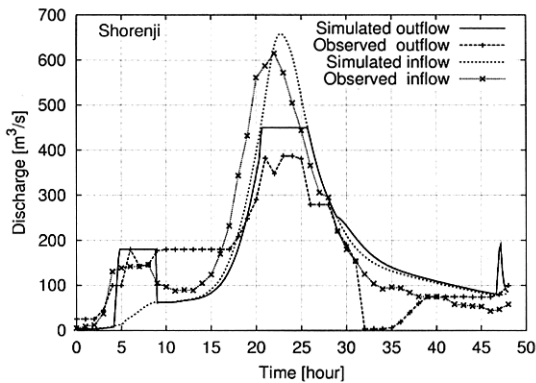


図-9 青蓮寺ダムにおける T8210 時の計算および観測による流入量と放流量. 1982年8月1日0時を起点とする.

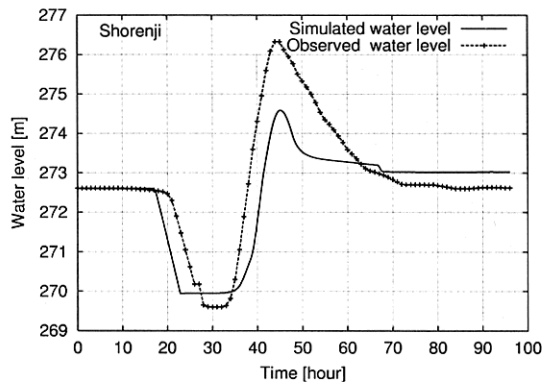


図-11 青蓮寺ダムにおける T9709 時の計算および観測による水位. 1997年7月25日0時を起点とする.

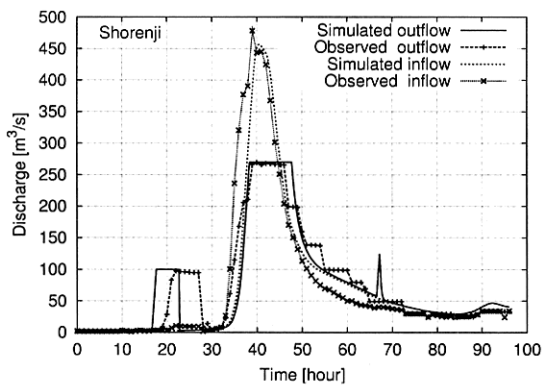


図-10 青蓮寺ダムにおける T9709 時の計算および観測による流入量と放流量. 1997年7月25日0時を起点とする.

が操作規定に定められた洪水流量 $460 \text{ m}^3/\text{s}$ を放流しているのに対し、実際の放流量がそれより少ないのは、管理者がダムの貯水容量と予測流入量にもとづいて次期の利水のために貯水量を確保するような操作時判断を行ったためであると考えられる。こういった操作判断は洪水規模が小さいほど積極的に行われる。例えば、図-10は T8210 より規模の小さい T9709 時の青蓮寺ダムにおける流入量と放流量を示しており、ピーク時の観測放流量は T8210 の場合よりさらに小さい $270 \text{ m}^3/\text{s}$ であることがわかる。

この観測放流量を洪水流量のパラメータ値として再現計算を行った。図-10の計算放流量は実際に洪水流量を操作規定に示されている $460 \text{ m}^3/\text{s}$ から $270 \text{ m}^3/\text{s}$ に変更して計算した結果である。予備放流量についても、その基準値である $180 \text{ m}^3/\text{s}$ ではなく観測値をもと

に $100 \text{ m}^3/\text{s}$ をパラメータの値とした。なお、T9709 時の観測水位を入手しており、図-11に観測水位と計算水位を示している。予備放流で水位を低下させ、洪水調節中に水位が上昇するという傾向が再現できている。

このように、洪水規模が小さい場合は貯水量を確保する操作判断が行われるようであるが、治水安全度の算定を目的とする場合など、取り扱う洪水の規模が大きい場合は、操作規定に定められた洪水流量と予備放流量の基準値をパラメータの値として用いればよいと考えられる。なお、図-9、図-10において、計算開始時刻からそれぞれ 48 時間後、67 時間後に計算放流量が一時的に増加している。この時刻はモデル上で洪水警戒体制を解除した時点であり、このときに水位を制限水位まで戻している。こうした一時的な放流量の増加は観測値には見られないため、洪水警戒体制を解除する時の水位操作については、今後モデルの改良が必要である。

c) 高山ダム

図-12は高山ダムにおける計算および観測の流入量と放流量を示している。高山ダムは木津川流域のダム群の下流に位置し、室生ダム、青蓮寺ダム、比奈知ダムからの放流が流入する(図-7)。ただし、82年当時に運用を開始していない比奈知ダムはこの計算では考慮しない。計算流入量が観測流入量のある程度の精度で再現していることから、室生ダム、青蓮寺ダムとその他の流域の降雨流出が再現できていることがわかる。

高山ダムは、予備放流は行わず、一定量一定率方式で洪水調節を行う。計算結果は操作規定をそのまま反映しており、計算によるピーク流量は観測結果をよく再現しているものの、計算開始時刻より 30 時間後ぐらいから 40 時間後ぐらいまでは計算放流量の方が観測放流量よりも大きくなっている。ダムモデルはピークが

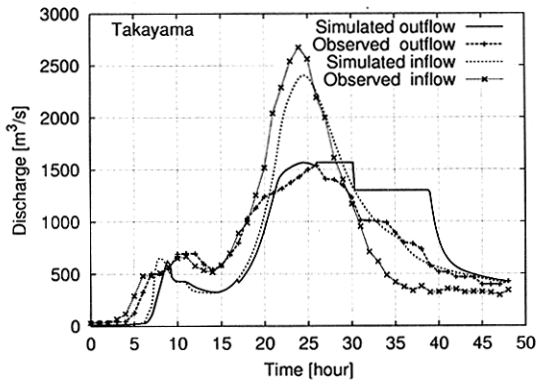


図-12 高山ダムにおける T8210 時の計算および観測による流入量と放流量。1982年8月1日0時を起点とする。

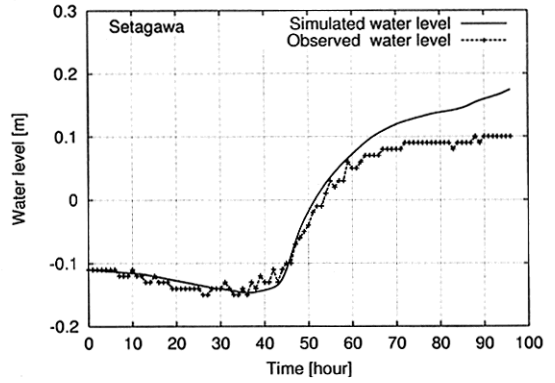


図-14 瀬田川洗堰における T9709 時の計算および観測による水位。1997年7月25日0時を起点とする。

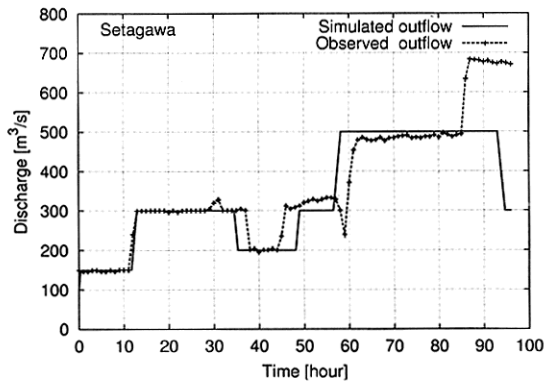


図-13 瀬田川洗堰における T9709 時の計算および観測による放流量。1997年7月25日0時を起点とする。

終了した後に水位低下を積極的に行うのに対し、実際の操作ではピーク後数時間以内に別の洪水の危険性は差し迫っていないと判断し、放流量をできる限り少なくする操作を行っているものと考えられる。

d) 瀬田川洗堰

図-13は T9709 時の瀬田川洗堰における観測放流量と計算放流量を示している。瀬田川洗堰は琵琶湖からの流出を制御する(図-7)、瀬田川洗堰のダム要素モデルは他のダム要素モデルとは異なり、モデルの操作過程を以下のように分割する。

- 通常時の操作
- 流入量がピークに達する前の洪水警戒体制中の操作
- 流入量がピークに達した後の洪水警戒態勢中の操作
- 琵琶湖の水位が危険水位(琵琶湖基準水位 + 50mm) 以上の場合の操作

それぞれの操作過程に応じた放流量をパラメータとし、

パラメータの値は観測値をもとに決定した。T9709 に対しては、上記の操作過程に対し、それぞれ 150 m³/s, 300 m³/s, 500 m³/s, 600 m³/s とした。さらに、「天ヶ瀬ダムが予備放流中の場合は瀬田川洗堰からの放流量は 200 m³/s 以下とする」という連携操作規定を反映させる。

図-13の計算開始時刻 35 時間後ぐらいから 40 時間後ぐらいに着目すると、観測値・計算結果ともに放流量を一時的に 200 m³/s まで低減していることがわかる。これは、天ヶ瀬ダムが予備放流の準備、または予備放流を実施している時間帯であり、ダムの要素モデルは連携操作の過程をよく再現している。

図-14は T9709 時の琵琶湖の水位の観測値と計算結果である。琵琶湖の標準基準水位を縦軸にとって図示している。計算開始時刻より 60 時間後以降は観測値と計算値に若干の差異が見られるが、それ以前の計算結果は観測値に非常に良く適合している。このことは、琵琶湖流域の流出計算の妥当性を示している。

(3) 流域内の各地点における流量計算結果

図-15～図-18に淀川流域内の各地点における計算流量と観測流量を示す。図中の実線はダムを考慮して計算した場合の結果であり、点線は瀬田川洗堰のみを考慮し、その他のダムを考慮せずに計算した場合の結果である。

図-15に示す木津川流域の加茂地点では、1982年当時に加茂地点の上流で運用されていた3基のダム(高山ダム、青蓮寺ダム、室生ダム)の治水効果によりピーク流量が約 1,000 m³/s 低減している。また、それらのダムを考慮した計算結果は観測値とよく適合している。

図-16に示す宇治川流域の横尾山地点では、天ヶ瀬ダムの治水効果によりピーク流量を約 600 m³/s 低減

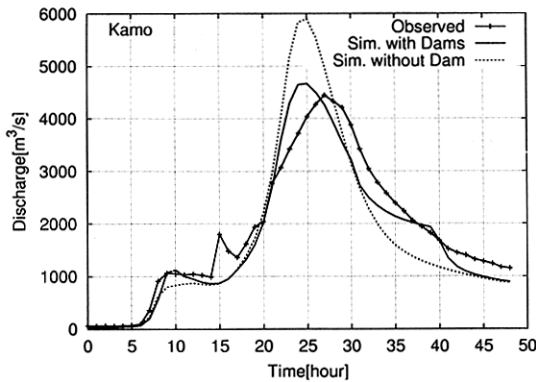


図-15 加茂地点における T8210 時の計算および観測流量結果：ダムを考慮した場合(実線)としない場合(点線)。1982年8月1日0時を起点とする。

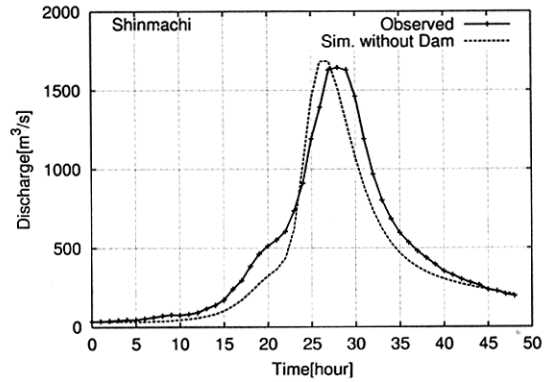


図-17 新町地点における T8210 時の計算および観測流量結果：ダムを考慮した場合(実線)としない場合(点線)。1982年8月1日0時を起点とする。

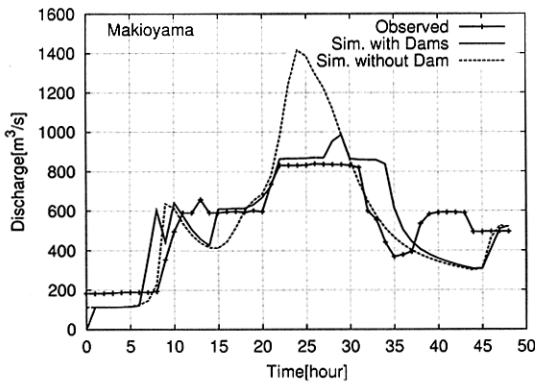


図-16 榎尾山地点における T8210 時の計算および観測流量結果：ダムを考慮した場合(実線)としない場合(点線)。1982年8月1日0時を起点とする。

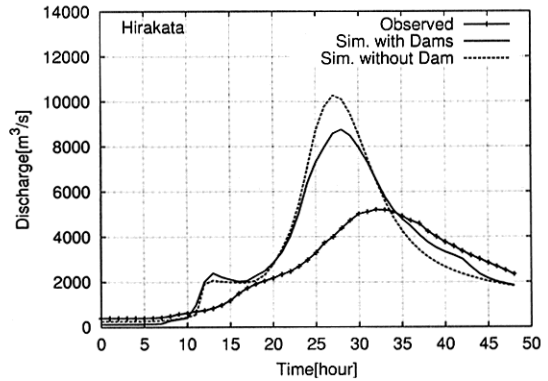


図-18 枚方地点における T8210 時の計算および観測流量結果：ダムを考慮した場合(実線)としない場合(点線)。1982年8月1日0時を起点とする。

している。計算開始から28時間後のあたりで計算流量が $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度まで一時的に上昇するのは、上流の天ヶ瀬ダムのモデルがその間ただし書き操作を行ったためである。

図-17に示す桂川流域の新町地点では、82年当時は日吉ダムの建設が終了していなかったため、その上流に主要なダムが存在せず、この地点では、ダムの効果は入っていない。計算値は観測値とよく適合している。

図-18に示す枚方地点は、上記の3地点を中下流にもつ木津川、宇治川、桂川が合流した淀川本線に位置し、本論で対象とする淀川流域の最下流端である。82年当時に建設が終了していたすべてのダムを考慮して計算した結果、それを考慮しない場合に比べてピーク流量を約 $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 低減していたことが分かった。ダ

ムを考慮した場合の計算結果は、観測流量よりも過大評価しているが、三川合流地点上流の複数地点で計算結果が観測流量をよく再現していたことから、枚方地点での観測流量が実際よりも過小であった可能性がある。

5. ダム群治水効果の評価

(1) 年代別の治水効果の評価

淀川流域では1953年の洪水災害を継ぎに治水計画が見直され、1954年に淀川水系改修基本計画が制定された。しかし、その後も1959年、1961年と大規模な出水が立て続けに起こったため、1965年に淀川水系改修基本計画を見直し、淀川水系工事実施基本計画を制定している。現在淀川に敷設されている主要なダムはすべてこの改修基本計画または工事実施基本計画に盛り

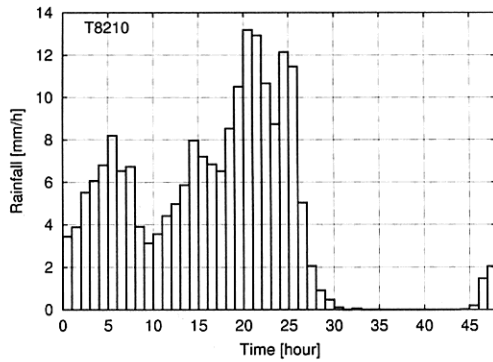


図-19 ダム群治水効果の評価に用いた流域平均の降雨ハイトグラフ (1982年8月1日0時から3日0時).

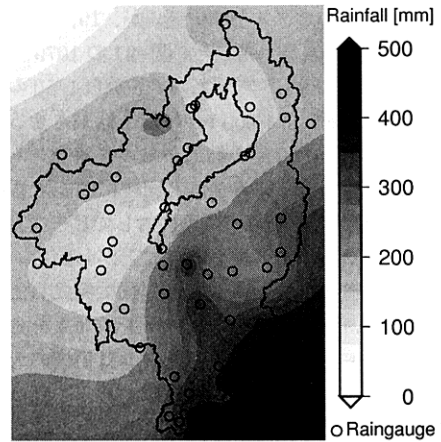


図-20 ダム群治水効果の評価に用いた積算降雨分布 (1982年8月1日0時から3日0時).

込まれたものであり、1965年の天ヶ瀬ダムを皮切りに、1999年に比奈知ダムが完成するまでの30余年にわたりダムの建設が続いてきた^{10),11)}。

このようなダムの完成は淀川の治水安全度を向上させてきたと考えられているが、果たしてその治水効果はこれまでどの程度向上してきたか、現在どの程度のレベルまで達しているのか、といったことは明らかではない。そこで、本節では1960年から10年毎に淀川流域内のダムによる治水効果がどのように向上してきたかを分析する。

a) 評価方法

1960年、1970年、1980年、1990年、2000年においてその年のはじめに完成しているダム(表-1)のみを考慮して流出計算を行い、同じ降雨イベントを入力した場合のピーク流量の違いを調べる。対象とする降雨イベントは1980年以降でもっとも淀川流域に大きな被害をもたらした1982年の台風10号時の2日間(8月1日0時から8月3日0時、流域平均2日雨量:203mm)の降雨分布とする。この期間の流域平均雨量の降雨ハイトグラフを図-19に、積算降雨分布を図-20に示す。ダムがどの程度の規模の洪水に対して有効なのかを調べるため、枚方上流における流域平均2日雨量が年超過確率1/15, 1/30, 1/50, 1/100, 1/150, 1/200, 1/300に相当するように引き伸ばして入力降雨とした。なお、枚方上流における流域平均2日雨量の年超過確率は文献¹²⁾を参考にして求めた。流出モデルとダムモデルのパラメータ、およびそれらの初期値は4.のモデル検証で使用したものをを用いた。

b) 結果と考察

図-21に枚方地点におけるピーク流量の計算結果を示す。図の横軸は降雨のリターンピリオドであり、縦軸は計算期間中の枚方地点でのピーク流量を表す。図中の折線はそれぞれの年のはじめに建設が終了している

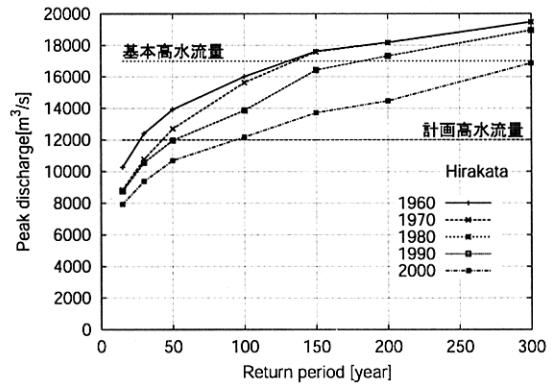


図-21 年代別治水効果の検討結果:横軸にリターンピリオド、縦軸に枚方地点でのピーク流量を取り、10年毎にその年のはじめに運用しているダムを考慮して計算。

ダムのみをモデルに組み込んで計算した場合のピーク流量を結んでいる。なお、1980年代には流域内に新しいダムが建設されていないので、1980年と1990年の線は重なっている。

まず、瀬田川洗堰のみが主要なダムとして存在していた1960年に着目すると、淀川の治水計画が対象としている1/200の年超過確率に相当する降雨(以後「1/200の降雨」のように呼ぶことにする)を入力した場合、ピーク流量が約18,000 m³/sとなった。これは枚方地点の基本高水流量のピーク流量17,000 m³/sと符合している。また、同地点での計画高水流量は12,000 m³/sであり、仮に上流で氾濫がなく、枚方地点の通水能力が1960年当時に12,000 m³/sであったと仮定すれば、1/30の降雨で計画高水流量に達することになる。

1960年代に天ヶ瀬ダムと高山ダムが、1970年代に青蓮寺ダムと室生ダムが完成した。図-21の1970年の結果から、天ヶ瀬ダムと高山ダムは、1/15から1/50の降雨に対してピーク流量を1,000 m³/s以上低減させることがわかる。また、1980年の結果から、青蓮寺ダムと室生ダムは天ヶ瀬ダム、高山ダムと同時に機能することにより、1/100から1/150の降雨に対してピーク流量をさらに1000 m³/s以上低減させることがわかる。このように、淀川流域の場合は、1960年代に完成したダムは規模の小さい降雨に対してピーク低減効果を発揮するのに対し、1970年代に完成したダムは規模の大きい降雨に対してピーク低減効果を発揮する。これは、高山ダムの上流に位置する青蓮寺ダムと室生ダムが高山ダムへの流入量を低減させることにより、1/100を超える規模の大きな降雨の場合でも高山ダムがただし書き操作に入ることなく流量調節を行えるためである。なお、1/30より小さな規模の降雨に対しては、高山ダムのみで洪水調節が可能であるため、1960年と1970年の1/30以下の結果は同じとなる。

2000年までに布目ダム、比奈知ダム、日吉ダムが完成した。ピーク流量の低減効果が降雨の規模に関わらず現れており、特に、1/200から1/300の規模の大きな降雨に対してもそのピーク流量の低減効果が現れている。これらのダム群の完成により、現在では1/100の降雨で計画高水流量に達する程度まで、枚方地点の治水安全度は向上したと考えられる。

(2) ダム単体がダム群の中で発揮する治水効果の分析

(1)の検討から、1970年当時、高山ダムは1/50より規模の小さな降雨に対しては1,000 m³/s以上のピーク低減効果を発揮するものの、1/150より規模の大きな降雨に対しては50 m³/s以下のピーク低減効果しか発揮しないことがわかった。ダムが単体で存在する場合は、降雨規模が大きくなるにつれてその機能を失ってしまうが、他のダムが建設されると、他のダム群とあわせてピーク低減効果を発揮することになる。ダムを評価するうえでは、ダムが単体として発揮する効果に加えて、ダム群のひとつとして発揮する効果を評価する必要がある。ここでは、他のダムが建設された場合に高山ダムが全体のダム群の中でどのような役割を果たすのかを定量的に示す。

a) 分析方法

(1)と同様、対象地点は枚方地点とし、対象降雨は1982年の台風10号を1/15から1/200まで引き伸ばした7種類とする。流出モデルとダムモデルのパラメータおよび初期値は4.のモデル検証で使用したものをを用い、すべての降雨に対して以下の条件で枚方地点のピーク流量を計算する。

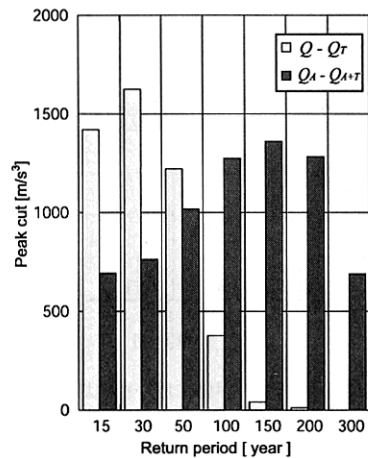


図-22 高山ダムが単体で存在する場合のピーク低減量 ($Q - Q_T$) と高山ダムがダム群の中で発揮するピーク低減量 ($Q_A - Q_{A+T}$) の比較。

- ダムを全く考慮しない(瀬田川洗堰は考慮する)場合のピーク流量 Q 。
- 高山ダムのみを考慮する場合のピーク流量 Q_T 。
- 高山ダムを除くすべてのダム群を考慮する場合のピーク流量 Q_A 。
- 高山ダムを含むすべてのダム群を考慮する場合のピーク流量 Q_{A+T} 。

高山ダムが単体で存在する場合のピーク低減量を ($Q - Q_T$) とし、高山ダムを含む淀川流域内の全てのダムが建設された場合に高山ダムが発揮するピーク低減量を ($Q_A - Q_{A+T}$) と考える。

b) 結果と考察

図-22に計算結果を示す。横軸には降雨のリターンペリオドを、縦軸にはピーク低減量をとる。各入力降雨に対して左側の棒グラフが高山ダムが単体で存在する場合のピーク低減量 ($Q - Q_T$) を、右側の棒グラフが高山ダムがダム群の中で発揮するピーク低減量 ($Q_A - Q_{A+T}$) を表す。

上述のとおり、高山ダム単体では1/150より規模の大きな降雨に対しては、ただし書き操作を行うため、そのピーク低減効果は小さい。一方、高山ダム以外のダムが存在する場合には、高山ダムは、計算した全てのリターンペリオドの降雨に対して600 m³/s以上のピーク低減効果を発揮する。特にその効果をもっとも大きく現れるのは1/150の降雨の場合であり、そのピーク低減量は1360 m³/sとなる。

すなわち、高山ダム建設当初の1970年には高山ダムは年超過確率が1/150以下の降雨に対してその治水効果を発揮しなかったが、現時点ではそうした大きな降雨

に対しても高山ダムはその効果を発揮していることがわかる。分布型流出予測システムを用いてダム群治水効果を評価をすることにより、ダムが単体で存在する場合に果たす役割に加えて、ダム単体がダム群のひとつとして果たす役割を定量的に評価することができた。

6. おわりに

淀川流域全域を対象とした分布型の流出予測システムを開発した。ダムの操作過程と意思決定をモデル化することにより、高度に制御された淀川流域の洪水時の流出を再現することが可能となった。また、ダム群の流況制御効果を調べた結果、以下の結論を得た。

- (a) 1960年から最初の10年間に建設されたダムは年超過確率1/50程度の比較的小規模の降雨に対してピーク低減効果があり、それ以降に建設されたダム群は年超過確率1/100や1/150といった比較的大規模の降雨に対してピーク低減効果がある。
- (b) 1960年当時は年超過確率1/30の降雨で枚方地点の計画高水流量を超過していたが、2000年までに年超過確率1/100の降雨に対応するまで淀川流域の枚方地点における治水安全度は向上した。
- (c) 高山ダムが単体で存在する場合には、年超過確率が1/150以下の規模の大きな降雨に対して、ピーク低減効果を発揮しないのに対し、他のダムが建設された場合には、高山ダムは1/150より規模の大きな降雨に対してもそのピーク低減効果を示す。ダムが単体で機能する場合に加え、ダム群のひとつとして機能する場合の役割を明らかにした。

本論では、枚方地点を対象に1982年の台風イベントを引き伸ばした降雨分布を用いて分析した。今後、流域内部の地点も含めて、複数の降雨イベントを用いたより詳細な治水安全度の評価を行う。

謝辞：本研究は、戦略的創造研究推進事業（CREST）平成13年度採択課題「社会変動と水循環の相互作用評価モデルの構築」（代表：寶馨）および、科学研究費補助金 基盤研究（C）16560445（代表：立川 康人）の補助を受けた。本研究で使用した水文データは国土交通省淀川ダム統合管理事務所より提供していただいた。また、匿名の査読者の方々から貴重なコメントを頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Batalla, R.J., Cómez, C.M. and Kondolf, G.M. : Reservoir - induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain), *J. of Hydrol.*, Vol. 290, pp. 117 - 136, 2004.
- 2) Montaldo, N., Mancini, M. and Rosso, R. : Flood hydrograph attenuation induced by a reservoir system: analysis with a distributed rainfall-runoff model, *Hydrol. Process.*, Vol. 18, pp. 545 - 563, 2004.
- 3) 市川 温 : 分布型流域流出系モデルの構成と集中化に関する研究, 京都大学博士論文, 2001.
- 4) 市川 温, 村上将道, 立川康人, 椎葉充晴 : 流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発, 土木学会論文集, No. 691 / II-57, pp. 42 - 52, 2001.
- 5) 高棟琢馬, 椎葉充晴, 市川 温 : 構造的モデリングシステムを用いた流出シミュレーション, 水工学論文集, 第39巻, pp. 141 - 146, 1995.
- 6) 椎葉充晴, 市川 温, 柳原哲由, 立川康人 : 河川流域地形の新しい数理表現形式, 土木学会論文集, No. 621 / II-47, pp. 1 - 9, 1999.
- 7) 立川康人, 永谷 言, 宝馨 : 飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, 第48巻, pp. 7 - 12, 2004.
- 8) 金澤瑞樹 : 長期連続計算可能な集中化流出モデルの開発, 京都大学修士論文, 2001.
- 9) 淀川工事事務所 : 過去の淀川流域災害資料集, 2001.
- 10) 建設省近畿地方建設局 : 淀川百年史, 社団法人近畿建設協会, 1974.
- 11) 大町利勝 : 計画洪水流量決定手法に関する一考察, 水文・水資源学会誌, Vol. 17, No. 2, pp. 170 - 179, 2004.
- 12) 望月邦夫 : 淀川の治水計画とそのシステム工学的研究, 京都大学博士論文, 1970.

(2005. 2. 7 受付)

DEVELOPMENT OF A DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF PREDICTION SYSTEM AND ASSESSMENT OF THE FLOOD CONTROL ABILITY OF DAMS

Takahiro SAYAMA, Yasuto TACHIKAWA, Kaoru TAKARA and Yutaka ICHIKAWA

This paper presents the development of a distributed rainfall-runoff prediction system considering flood control by dam reservoirs in the Yodo River basin. The simulation results show that the system can reproduce quantitatively flood control processes such as pre-release, peak discharge attenuation, and cooperative dam operations. According to multiple simulations with different magnitudes of rainfall, we found that one in 30 year event had exceeded the design high water discharge at Hirakata in 1960, while in 2000 one in 100 year event exceeded it because of the effect of flood control by dam reservoirs. The comparison of dam flood control effects under single dam operation and multiple dam operations indicated that a dam can attenuate peak discharge effectively for larger floods when other dams work together.