

ダム操作過程を導入した広域分布型流出予測システムによる淀川流域の治水安全度評価

ASSESSMENT OF FLOOD SAFETY LEVELS IN THE YODO RIVER BASIN WITH A RAINFALL-RUNOFF PREDICTION SYSTEM INCORPORATING DAM OPERATION MODELS

佐山敬洋¹・菅野浩樹²・立川康人³・寶 馨⁴

Takahiro SAYAMA, Hiroki KANNO, Yasuto TACHIKAWA and Kaoru TAKARA

¹正会員 修 (工) 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)

²学生会員 学 (工) 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 博 (工) 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)

⁴フェロー会員 工博 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)

Flood safety levels at several locations in the Yodo River basin are assessed considering the effects of dams and current river channel capacities. This paper uses a distributed rainfall-runoff prediction system incorporating dam operation models developed for the whole Yodo River basin. Input rainfall distributions are created by multiplying some factors to ten observed rainfall patterns to adjust them to be 50- to 200-year return periods in terms of two-day rainfall. The system simulates discharge with and without the effects of dams for all the input rainfall patterns. The presented method enables to assess current flood safety levels at multiple locations in the Yodo River basin and to compare the differences in flood control effects among sub-basins. The rainfall-runoff prediction system can be also used to investigate how dam reservoirs would control excess floods caused by more rainfall than designed.

Key Words : *flood safety level, dam, distributed rainfall-runoff prediction system, Yodo River basin*

1. はじめに

2004 年は新潟・福島豪雨, 福井豪雨, 台風 23 号による由良川, 円山川の洪水など, 中小河川における洪水災害が頻発した. 一連の災害は, 未だ河川の整備水準が低いことが要因のひとつではあるが, 計画で想定した自然外力を超える豪雨が発生したことも大きな要因である¹⁾. これまでの河川整備は, 計画規模に応じた基本高水を設定し, 計画高水流量を決定して, その流量を安全に流下できるように河道を整備するという方針で行ってきた. しかし, 河川整備には費用と時間がかかり, 実際にはほとんどの河川が整備途上である. また, 将来にわたって気象外力の発生頻度が同一であるとはいえず, 同じ治水施設であっても, 最近数十年の気象条件と将来の気象条件とはそれが同じ治水安全度を有するとはいえなくなっている. こうした状況下では, 既存の治水施設の効果と現状の河道の整備状況に応じて河川が現在どの程度の治水安全度を有するのかを評価することが極めて重要であり, そういった情報に応じて対策を講じなければならない. また, 計画を超える自然外力に対して, 既存の施設がどのように機能を発揮し, また機能を発揮しなくなるのかを明らかにし,

超過洪水対策を考える指針を与えなければならない.

筆者らはこれまで, ダムの流況制御の影響を考慮し中小河川も含めて洪水流出を予測することが可能なシステムを淀川流域を対象にして開発してきた²⁾. 本論はこのシステムを用いて, 淀川流域の複数の地点で既存の治水施設と河道の整備状況にもとづいた現在の治水安全度の評価を行うことを目的とする. また, どのような規模の洪水に対してダムが機能を発揮しなくなるのかを分析するとともに, そうしたダムの治水効果が流域内の地点間でどのように異なるのかを分析する.

2. 治水安全度の評価方法

異なる確率規模の降雨を流出予測システムに入力し, ダム群が存在しないと仮定する場合の河川流量の計算結果とダム群を考慮する場合の河川流量の計算結果をもとに治水安全度の評価を行う. 計画論的立場から, ダム群の影響を考慮して同様の手法で治水安全度を評価した研究はこれまでもいくつかなされているが^{3), 4)}, 本研究ではダム群の操作過程を詳細に再現する広域分布型流出予測システムを用いて, 淀川流域の現状の治水

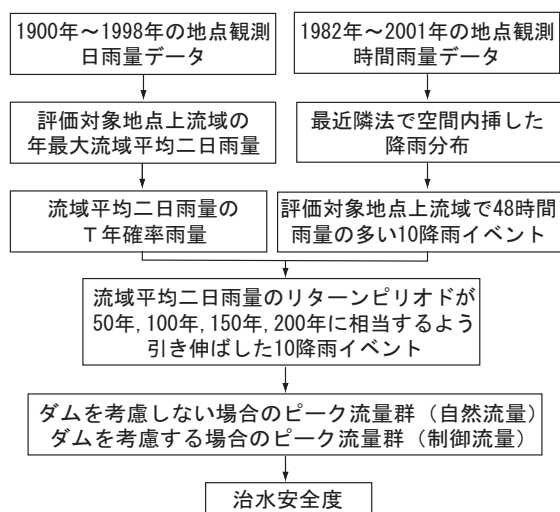


図-1 治水安全度評価の流れ。

安全度を評価する。

図-1 の左上に示すように、より長期間の観測データが得られる日雨量を用いて評価対象地点の上流域における確率雨量を求める。つぎに、図-1 の右上に示すように、過去 20 年間に観測された時間雨量の中から評価対象地点の上流域で 48 時間雨量の多い順に 10 パターンの降雨分布を得る。この降雨分布を複数の確率雨量に相当するように引き伸ばして入力降雨とする。

(1) 確率雨量の設定

確率雨量の計算には、過去 99 年間 (1900 年～1998 年) に淀川流域内で観測された旧建設省、気象台、アメダスの日雨量データを用いる。まず淀川流域を覆う領域に空間分解能 1.5 km のグリッドを設定し、最近隣法を用いて地点雨量から空間分布雨量を作成する。作成した空間分布雨量から対象流域ごとに面積雨量を計算し、99 年間分の流域平均日雨量系列を得る。つぎに、この系列をもとに年最大二日雨量を計算し、以下に示す方法で水文頻度解析を実行する。本論では流域平均二日雨量を基準に確率雨量を計算するが、これは淀川水系工事実施基本計画において枚方、加茂、羽束師、天ヶ瀬の地点がいずれも計画雨量の継続時間を二日間としていることによる。

水文頻度解析には (財) 国土技術研究センターで開発された水文統計ユーティリティ⁵⁾を用いた。本論では、極値理論に基づく Gumbel 分布と GEV 分布を基本的な水文頻度解析モデルとし、両方のモデルがともに SLSC 0.03 以下、相関係数 0.99 以上の場合にはより適合度の高い方を、どちらか一方のモデルがこの基準を満たしている場合はより適合度の高いモデルを選択した。もし、Gumbel 分布と GEV 分布の両方がこの基準を満たしていなければその他の分布で最も適合度の高いモデ

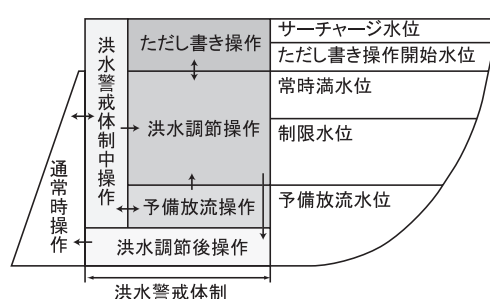


図-2 ダム要素モデルで考慮する六段階の操作過程と基準となる水位。

ルを選択する。なお、プロットングポジション公式にはカナンの式を用いた⁶⁾。

上述の基準で水文頻度解析を実行した結果、評価の対象とする 6 地点の上流域のうち、桂上流域以外では Gumbel 分布を、桂上流域では GEV 分布を採用することとなった。

(2) 入力降雨の作成

治水安全度評価を行うための入力降雨は、過去 20 年間 (1982 年～2001 年) に淀川流域内で観測された時間雨量をもとに作成した。まず、国土交通省 (旧建設省)、気象台、アメダスの時間雨量データを最近隣法で空間分布させ、空間分解能 1.5 km、時間分解能 1 時間の降雨分布を淀川流域全域で作成する。つぎに各対象地点上流域の流域平均雨量の時系列を計算し、それぞれの年で流域平均雨量が最大となる 48 時間を抽出する。その中から 48 時間雨量の多い順に 10 降雨イベントを抽出し、これを引き伸ばすもとの降雨分布とする。ここで、上位 10 イベントを採用した理由は、10 イベントでおおよその時空間パターンをカバーできること、それ以上選択すると引き伸ばし率が 3 を超え非現実的な入力降雨を作成することになるためである。対象地点ごとに選択した 10 種類の降雨イベントを流域平均二日雨量のリターンピリオドが 50 年、100 年、150 年、200 年に相当するように引き伸ばして入力降雨とした。

(3) ダム群の操作過程を考慮した流出計算

上述の手法で得た評価対象地点上流域における 40 種類 (10 イベントをそれぞれを 4 つの確率雨量に対応して引き伸ばした降雨群) の降雨分布を、ダムの操作過程を考慮する広域分布型流出予測システムに入力する。予測システムの構成や再現結果の詳細については文献²⁾を参照されたい。ここでは、その概要と本論の分析に必要なダムの要素モデルについて示す。

淀川流域の流出予測システムは、オブジェクト指向の水文モデリングシステムである OHyMoS⁷⁾を利用して開発しており、河道要素モデル、部分流域要素モデ

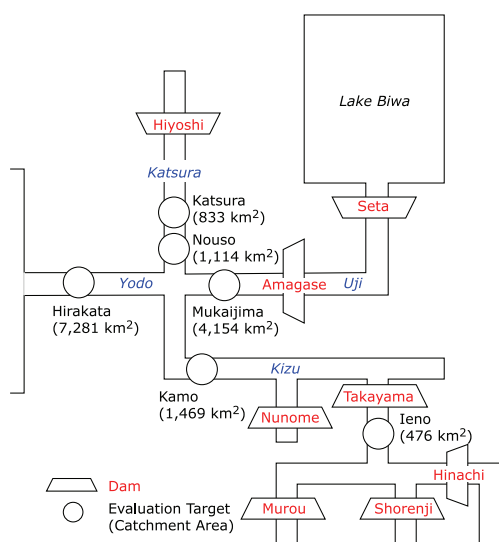


図-3 淀川流域におけるダムと評価対象地点の位置関係。

ル、湖沼要素モデル、ダム要素モデルで構成している。国土数値情報の河道データ、湖岸線データ、および、標高データ（空間分解能：250 m）をもとに地形情報を加工し⁸⁾、河道内の洪水追跡にはキネマティックウェーブモデルを、山腹斜面からの降雨流出計算には不飽和・飽和中間流・表面流モデル⁹⁾を適用する。モデルパラメータは1997年の洪水イベントで同定したものを使用した。

ダム要素モデルは、ダムの操作規定と意思決定を定式化することにより、流況制御の過程を再現するモデルである¹⁰⁾。モデルの入力情報は、ダム貯水池への流入量、ダム上流域の平均雨量、および、連携操作の対象となるダムの操作過程であり、ダム要素モデルの予測情報はダムからの放流量とダム貯水池の水位である。

図-2はダム要素モデルが考慮する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す。各操作過程での操作方法と、操作過程の移行条件をif-then形式で定式化する。ダム要素モデルのパラメータのほとんどは操作規定より決定することができる。一時間あたり最大の放流増加量を規定するパラメータに関しては、1997年の洪水イベントを対象に同定したものを使用する。また、モデルの初期水位は操作規定で定められた制限水位とする。

3. 淀川流域における治水安全度の評価

(1) 二日雨量を基準にした治水安全度評価

淀川流域は主要な8基のダムによって高度に流況が制御されている。表-1に主要8基のダムの諸元を示す。

淀川流域内の主要な計画対象地点である枚方、加茂、納所、桂、向島、家野の6地点を対象に数値実験を実行し、計算のピーク流量と河川の流下能力（平成10年現在）とを比較する。計算上は河川で溢水氾濫はないもの

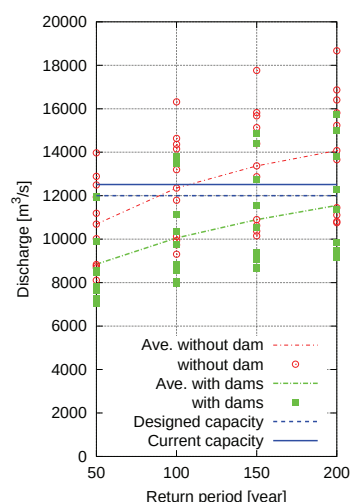


図-4 枚方地点（流域面積：7,281 km²）における流域平均二日雨量と自然ピーク流量・制御ピーク流量との関係

として洪水を追跡し、ダム制御なしの条件化でのピーク流量を自然ピーク流量、ダム制御ありの条件下でのピーク流量を制御ピーク流量と呼ぶことにする。図-3には淀川流域のダムと本論の評価対象地点の位置関係を示す。

図-4は流域下流の枚方地点（流域面積：7,281 km²）における分析結果であり、横軸に流域平均二日雨量のリターンピリオドを、縦軸に流出予測システムで計算したピーク流量をとる。丸印は自然ピーク流量を、四角印は制御ピーク流量の計算結果である。同じリターンピリオドでそれぞれ10個の計算結果があるのは、10種類の異なる降雨イベントを引き伸ばして入力降雨を作成し、これらのすべてを用いて流出計算を行ったためである。また、図中の点線と実線はそれぞれ自然ピーク流量と制御ピーク流量の平均である。

ピーク流量の平均値と枚方地点の流下能力 12,515 m³/s（図中の青実線）とを比較すると、上流のダム群がなければリターンピリオドが100年の降雨で流下能力を超過してしまうのに対し、ダム群が治水効果を発揮することによりリターンピリオドが200年の降雨でも枚方地点の流下能力を超過しなくなることがわかる。ただし、流域平均二日雨量が同じであっても降雨の時空間分布によってピーク流量は異なっている。例えば200年の降雨では、ダム群を考慮しても10回中4回は流下能力を超過していることに注意する必要がある。

淀川流域内部の他の地点においても、上流域の平均二日雨量から確率雨量を求めて同様の分析を行ったところ、自然ピーク流量と制御ピーク流量がともに大きくばらついた。これは、上流域の面積が比較的小さく、ピーク流量が二日間より短期間の降雨量に依存するためである。流域面積が数千 km² 以下の地点で治水安全度の評価を行うためには、二日雨量の生起確率を基準にするのは妥当ではないと考え、24時間雨量を基準に

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	-	2221.0	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

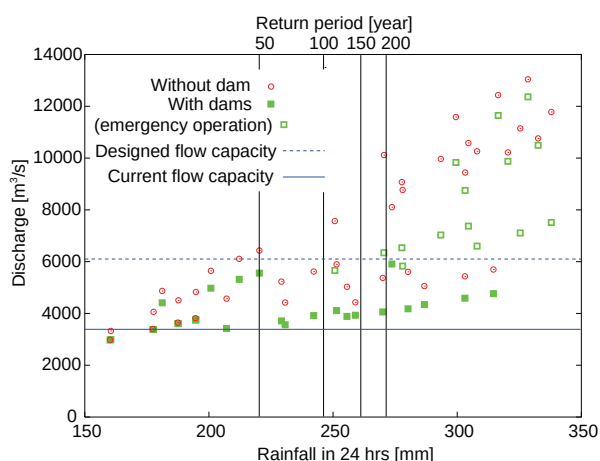


図-5 加茂地点 (流域面積：1,469 km²) における流域平均 24 時間雨量と自然ピーク流量・制御ピーク流量との関係。

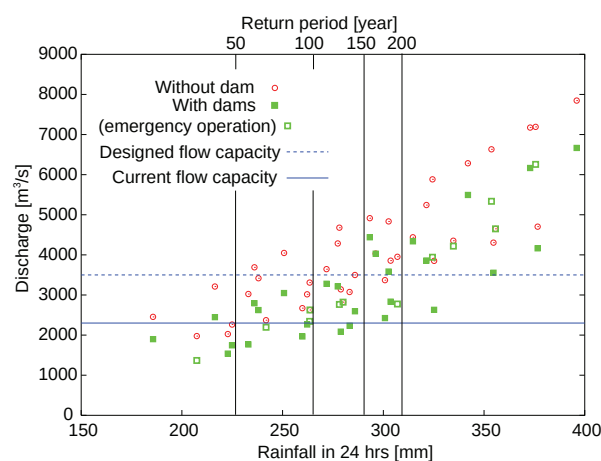


図-6 桂地点 (流域面積：833 km²) における流域平均 24 時間雨量と自然ピーク流量・制御ピーク流量との関係。

した分析を以下のように実施した。

(2) 24 時間雨量を基準にした治水安全度評価

洪水ピーク流量の計算結果を計算期間中の 24 時間雨量の最大値を基準に整理し直した。図-5 は横軸に 24 時間雨量を、縦軸にピーク流量を取り、木津川流域の加茂地点 (流域面積：1,469 km²) を対象とした場合の自然ピーク流量 (図中の○) と制御ピーク流量 (図中の■) を示している。また、図中の□の印は上流のダムがただし書き操作を行ったことを意味する。図中の上横軸には加茂地点上流域の流域平均 24 時間雨量のリターンピリオドを示している。

図-5 の結果から、加茂の上流域において 24 時間に 250 mm 以上の雨が降る場合にダムはシミュレーション上でただし書き操作を行うケースが現れ、その結果、計画高水流量 6,100 m³/s (図中の青点線) を超過することがわかる。一方、それ以下の場合では概ね現状の流下能力である 3,395 m³/s 程度 (図中の青実線) まで制御流量は低減している。

24 時間雨量が 180 mm から 220 mm の間で制御流量が 4,000 m³/s を超過するケースが 4 つ見られる。この

4 つは 1986 年の降雨イベントを引き伸ばして入力した流出計算結果である。降雨のピークが二日間にわたって二回現れるイベントであるため、24 時間雨量はその他のイベントと比べて大きくないが、二回目の降雨のピークにともなって自然流量、制御流量ともに 4,000 m³/s を超過した。1986 年のケースを除外して評価すれば、加茂上流域の 24 時間雨量が 250 mm 以上となる場合に洪水流量は現状の流下能力を超えることが多く、この雨量のリターンピリオドは 100 年に相当することから、加茂の現状の治水安全度は 100 年程度であると言える。

図-6 は同様の検討を桂川流域の桂地点 (流域面積：833 km²) で行った結果である。桂の上流域において 24 時間に約 230 mm 以上の雨が降る場合に制御流量のピークは流下能力を超過することが多く、この雨量のリターンピリオドが 50 年に相当することから、桂地点の現状の治水安全度は 50 年程度と推定できる。

4. ダム治水効果に関する流域間の比較

本節では木津川流域の加茂地点と桂川流域の桂地点に着目し、それぞれの上流に位置するダムの配置や規

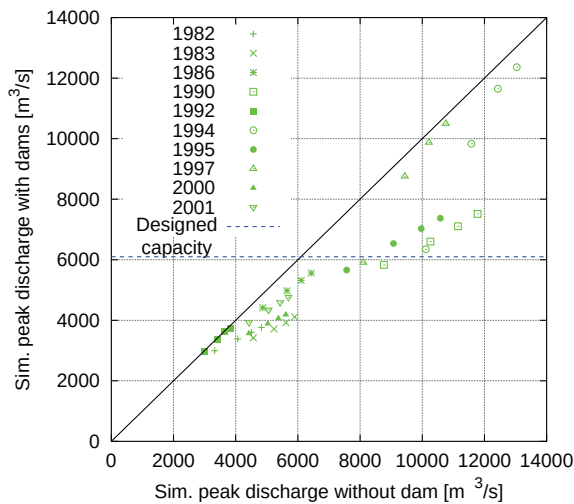


図-7 加茂地点 (流域面積：1,469 km²) におけるダム治水効果：自然ピーク流量と制御ピーク流量との比較。

模が治水効果に及ぼす影響を分析する。

(1) 木津川流域と桂川流域のダムの配置と規模の違い

高山ダムは木津川流域に位置し、3,540 万 m³ の洪水調節容量を持つ。流入量が 1,300 m³/s を超えた時点で洪水調節を開始し、流入量に応じて 1,800 m³/s 以下で放流量を制限しながら一定量一定率方式で洪水調節を行う。高山ダムの上流には比較的規模の小さい青蓮寺ダム、室生ダム、日奈知ダムが存在する。高山ダムの集水面積は 615 km² であり、加茂上流域における高山ダム流域の占める割合は 42 % である。一方、日吉ダムは桂川流域に位置し、4,200 万 m³ の洪水調節容量を持つ。流入量が 150 m³/s を超えると一定量方式で洪水調節を行う。日吉ダムの上流には主要なダムは存在しない。日吉ダムの集水面積は 290 km² であり、桂上流域における日吉ダム流域の占める割合は 35 % である。

(2) 自然ピーク流量と制御ピーク流量との関係

図-7 は、横軸に自然ピーク流量を、縦軸に制御ピーク流量をとり、加茂地点の計算結果を示したものである。図中に示した傾き 1 の直線上から下側にプロットがずれる場合に、その差分だけダム貯水池によるピーク流量低減効果があることになる。この図からわかることを以下に示す。

1. ダム群による治水効果が有効に機能する自然ピーク流量の範囲が存在する。加茂の地点では自然ピーク流量が約 7,000 m³/s から 9,000 m³/s の範囲で最も有効にピーク流量の低減効果が現れる。
2. 上記の範囲の自然ピーク流量は、ほぼ計画高水流量 6,100 m³/s にまで低減される。
3. 上記の範囲を超える自然ピーク流量に対しては、ダムはピーク流量低減効果を発揮しない場合がある。

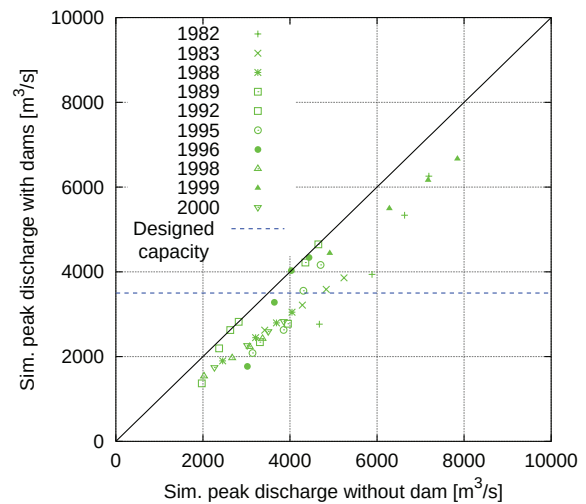


図-8 桂地点 (流域面積：833 km²) におけるダム治水効果：自然ピーク流量と制御ピーク流量との比較。

図-8 は桂地点における同様の分析結果である。日吉ダムがシミュレーション上でただし書き操作を行った 1992 年や 1996 年の場合を除いては、ほぼ一様に 1,000 m³/s 程度ピーク流量が低減しており、加茂の地点とはピーク低減効果の傾向が異なる。以下にその理由を考察する。

高山ダムは集水面積が日吉ダムに比べて大きく、ダムへの流入量は本論の数値実験では約 2,000 m³/s から 6,000 m³/s の範囲にある。高山ダムへの流入量の変動幅が大きいのは集水面積が大きいことに加え、上流に存在する 3 つのダムが流入量を制御していることに依存しており、流入量が約 6,000 m³/s となる場合には上流域のダムはシミュレーション上ただし書き操作を行っている。高山ダムは流入量が 1,300 m³/s を超えると洪水調節を開始し、流入量に応じて 1,800 m³/s を上限として放流を行うので流入量が 4,000 m³/s 程度 (加茂地点の自然流量が 9,000 m³/s 程度) に達する場合に 2,000 m³/s 以上のピーク低減効果を発揮する。しかし、ダムへの流入量がそれより大きい場合はただし書き操作を行うため低減量は小さくなる。高山ダムが治水効果を有効に発揮する自然流量の範囲が存在するのはそのためである。一方、日吉ダムは集水面積が小さく上流にダムが存在しないため、高山ダムに比べて流入量の変動幅が小さく、本論の数値実験では、1982 年のケースで流入量のピークが 2,000 m³/s を超えた以外は、流入量のピークが 1,500 m³/s 程度であった。日吉ダムは 150 m³/s で一定放流を行うので、桂地点の自然流量に関わらずほぼ 1,000 m³/s 程度のピーク低減効果を発揮する。

(3) 操作ルール変更の効果に関する考察

図-9 は加茂の地点を対象に 1997 年の降雨イベントを年超過確率 1/100 の規模まで引き伸ばして入力した結果であり、自然流量と制御流量、および高山ダムの

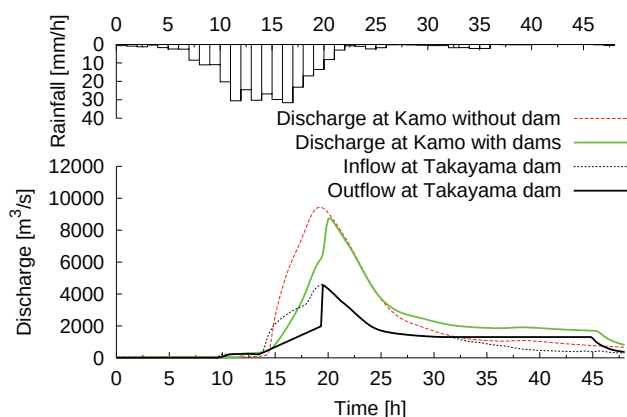


図-9 加茂地点の自然流量・制御流量と高山ダムの流入量と放流量ハイドログラフ。(1997年の降雨イベントを二日雨量が100年確率に相当するよう引き伸ばして入力。)

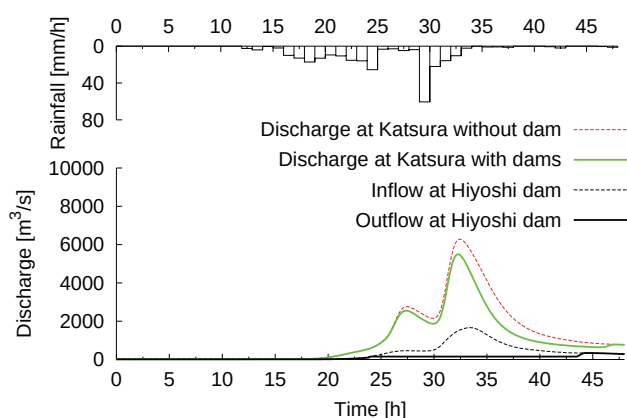


図-10 桂地点の自然流量・制御流量と日吉ダムの流入量と放流量ハイドログラフ。(1999年の降雨イベントを二日雨量が100年確率に相当するよう引き伸ばして入力。)

流入量と放流量を示している。図-10は桂の地点を対象に1999年の降雨イベントを1/100まで引き伸ばして入力した結果であり、日吉ダムの流入量と放流量をあわせて示している。

加茂地点では、高山ダムへの流入量が上流ダムのただし書き操作に伴って増大し、高山ダムがただし書き操作を行うことにより、加茂地点での制御流量が計画高水流量 $6,100 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える。ただし、洪水流量の増大を3時間程度遅らせる効果が現れている。一方、桂地点では日吉ダムは洪水イベントがほぼ終了する43時間目まではただし書き操作を行わず $1,660 \text{ m}^3/\text{s}$ から $150 \text{ m}^3/\text{s}$ までピーク流量を低減している。しかし、残流域からの流入量が大きいため計画高水流量を超過しており、洪水立ち上がり時の流量低減効果が小さい。これらの違いは、高山ダムの流域面積が大きく、かつ上流に複数のダムを擁することによる。

こうした超過洪水に対し、高山ダムは操作ルールを変更することにより、異なる治水効果を期待できる。例えば、洪水調節を開始する流量を大きくし放流量を増

加する比率を小さくすれば、洪水の立ち上がりを遅らせる効果は小さくなるが、加茂地点でのピーク流量をさらに低減することはできる。一方、日吉ダムは、流域面積が小さい割には洪水調節容量が大きいので、現在でも $150 \text{ m}^3/\text{s}$ に放流量を制限できている。操作ルール変更に伴う効果はあまり期待できない。これらの分析の結果から、高山ダムは目的に応じて操作ルールを変更することにより流量制御の方法を改善できる可能性があるが、日吉ダムは現状でも効果が発揮されており、改善の余地は少ないことがわかる。

5. おわりに

現状の治水施設・河道整備状況にもとづいた淀川流域の治水安全度評価を行い、枚方地点、加茂地点、桂地点の治水安全度がそれぞれ1/200、1/100、1/50程度であることを明らかにした。また、高山ダムと日吉ダムの治水効果の違いを定量的に分析するとともに、超過洪水に対して両ダムがどのように機能するかを分析し、操作ルール変更の効果の違いを考察した。

謝辞： 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(CREST)(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。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会河川分科会 豪雨災害対策総合政策委員会：総合的な豪雨災害対策の推進について(提言)、<http://www.mlit.go.jp/river/index.html/>, 2005.
- 2) 佐山敬洋・立川康人・寶 馨・市川 温：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, 土木学会論文集, No. 803 / II-73, pp. 13-27, 2005.
- 3) 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.
- 4) 堀 智晴・池淵周一・小尻利治：氾濫確率を計画安全度指標とした治水システムの策定法, 第31回水理講演会論文集, pp. 247-252, 1987.
- 5) 笠崎伸一郎：水文統計ユーティリティの開発, http://www.apptec.co.jp/technical/pdf/treport_vol_12-08.pdf.
- 6) 寶 馨：水文頻度解析の進歩と将来展望, 水文・水資源学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 740-756, 1998.
- 7) 高埴琢馬・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.
- 8) 市川 温・村上将道・立川康人・椎葉充晴：流域地形の新たな数値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.
- 9) 立川康人・永谷 言・寶 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.
- 10) 市川 温・平野一志・椎葉充晴・寶 馨・立川康人：構造的モデル化法によるダムモデルの構築, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp. 592-593, 1999.

(2005.9.30 受付)