

SIP におけるダム群連携最適操作シミュレータの開発

○松橋 輝明¹・田村 和則²・木戸 研太郎³

概要：

河川やダムの治水計画規模を超えるような豪雨時において、流域内の複数のダムの洪水調節機能を最大限活用し下流河川の氾濫を回避ないし軽減するため、高速演算・組合せ最適化技術であるアニーリング技術を用いて迅速にダム放流量を計算しダム管理者の検討作業を補完する意思決定支援ツール「ダム群連携最適操作シミュレータ」を開発した。本シミュレータは、流域内の複数のダムについて、考えられる流入と放流の膨大な組合せを、降雨予測の更新等に適応して逐一計算、最適ないし有力な解を見だしダム管理者に提案する。ダム管理者は当該出水におけるダム操作の考え方や方針等に基づき、放流方法決定のための補助資料として自動計算結果を活用することができる。また、シミュレータには過去の出水を再現できる訓練機能も装備しており、随時パソコンで操作を体験、練習することが可能である。

キーワード：ダム群連携、シミュレータ、アニーリング、意思決定支援ツール（DSS）、SIP

1. はじめに

近年の深刻な豪雨災害の頻発により、既存ダムのソフト・ハード機能の有効活用の必要性が高まっている。そのような状況のもと、内閣府総合科学技術・イノベーション会議による第2期SIP（戦略的イノベーション創造プログラム：2018～2022年度）において、京都大学防災研究所、水資源機構および日本気象協会（2021年度より関西電力、中部電力および九州電力が参加）のチームにより、既存ダムの洪水調節機能の最大活用を目指す「統合ダム防災支援システム」の開発が進められた¹⁾。

統合ダム防災支援システムは、ダムの防災操作に長時間アンサンブル降雨予測等を活用し、洪水貯留機能の拡大と利水（特に水力発電）の増大を目指すものであり、①ダム流域への正確な流入量予測、②早期の事前放流開始、③発電量の増大かつ洪水貯留能力の最大化、④ダム群最適操作による治水効果の拡大、の4つのコア技術から構成される。

本稿は、このうち④で開発した「ダム群連携最適操作シミュレータ（以下「シミュレータ」という。）」について述べるものである²⁾。

2. シミュレータ開発目的

河川やダムの治水計画規模を超えるような豪雨時において、流域内の複数のダムは、個別に最適な操作をするのではなく、ダム群としての洪水調節機能を最大限活用できるように連携した操作を行うことで、下流河川の水位を低下させ浸水被害を回避ないし軽減できる可能性がある。

このような連携操作の際、ダム管理者は限られた時間とマンパワーのもとで、気象や河川・ダム等の大量の情報を俯瞰的に整理分析し、流域や出水の特性に基づいて複数ダムの操作の基本方針を設定したうえで、逐次変化する降雨予測や予測のブレ等をも考慮して各ダムの放流量を調整し、河川管理者等関係機関との緊密な連絡調整を図る等、高度な技術的判断とともに多大な労力が必要とされている^{たとえ³⁾}。しかし、気候変化による大規模洪水の頻発化・激甚化やベテラン技術者の減少という状況に鑑みると、そのような状況下での検討作業を補完・支援するツールの必要性は高いといえる。

そこで、近年発達著しい高速演算・組合せ最適化技術に着目し、下流の被害最小化すなわち河川氾濫の回避・軽減を目的関数として、ダム群の放流と流入の膨大な組合せを迅速に計算し、ダム管理者の検討を補完するための意思決定支援ツ

1. 総合技術センター 水路グループ

2. 総合技術センター 情報グループ チーフ

3. 総合技術センター 上席エンジニア

ール (Decision Support System) として、本シミュレータの開発を行った。

3. シミュレータの機能および構成

3.1 概要

本シミュレータは、下流での河川氾濫の回避・軽減を目的として、貯水容量、ダム操作規則及び特別防災操作、放流の原則等のルールその他制約条件を踏まえ、降雨予測に基づく流入計算など水文情報からダム群の流入と放流の考えられる組合せを逐一計算し、最適ないし有力な複数の解を提示するものである。シミュレータにおける検討フローを図-1に示す。これらに要する計算量は膨大であり、かつ実操作に反映するためには短時間に計算結果を得る必要があることから、3.2に述べる高速演算手法「アニーリング技術」⁴⁾を採用した。本シミュレータは、いわゆるAIとは異なり、考える操作方法の組合せを逐一計算し最適解を見いだす方法をとっており、AIの弱点の未学習タイプのイベントに対する精度や妥当性に対する懸念等は生じないとされる。

さらに、実効性の高い操作方法をダム管理者が判断し選定するための支援機能として、各ダムの放流パターンを組

合せの変更や任意の放流量の設定等を手入力により調整する「カスタマイズ機能」も装備している。

3.2 最適化操作の高速演算手法

アニーリング技術は、組合せ最適化問題を解くための汎用近似解法として開発された計算手法である。一般的なコンピュータでは解くことが難しい膨大な組合せ最適化問題に特化した技術であり、演算スピードは極めて速く、数式と制約条件を与えることで最適解を求めることができる。具体的には、組合せ最適化問題をイジングモデルに落とし込みスピン状態 (-1, +1) をバイナリー変数(0, 1)に変換したエネルギー関数に対し、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) でエネルギーを最小化する基底状態を探索する仕組みである。

本シミュレータでは、各ダムの放流の原則やその他制約条件の範囲内で考えられる放流量の組合せ (10分ピッチ、 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ の刻み幅で増減) を反映した下流河川水位を計算し、各ダムの洪水調節容量の範囲で、下流河川水位を最も下げられる放流波形を表示する仕様としている (図-2参照)。

3.3 モデルダム群

淀川水系木津川の上流域 (図-3(1)参照) は地形的条件等から過去のたびたび氾濫が発生し、河道整備が進捗するまでの間、ダムの特別な操作により可能な限り洪水被害を軽減する努力がなされてきた経緯がある³⁾。そこで、まず名張市の上流に位置する比奈知ダム、青蓮寺ダムおよび室生ダム (以下「名張上流3ダム」という。) を対象としたシミュレータを先行開発し、機能検証を行った後、高山ダムおよび布目ダムを加えたシミュレータ [木津川ダム群版] を作成した。

次に、SIPの検討の進捗により荒川水系をモデルとしてダム・河川・高潮を連携させた長時間/広域洪水予測システムを構築する方針となったことを受け、木津川ダム群での成果をふまえ、滝沢ダム、浦山ダム、二瀬ダム (国土交通省) および合角ダム (埼玉県) (図-3(2)参照) を対象としたシミュレ

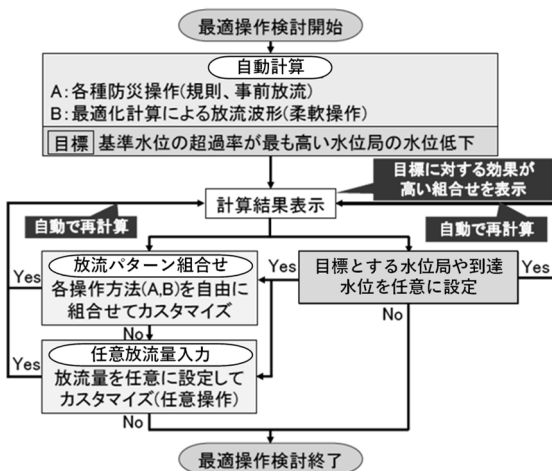


図-1 シミュレータ検討フロー

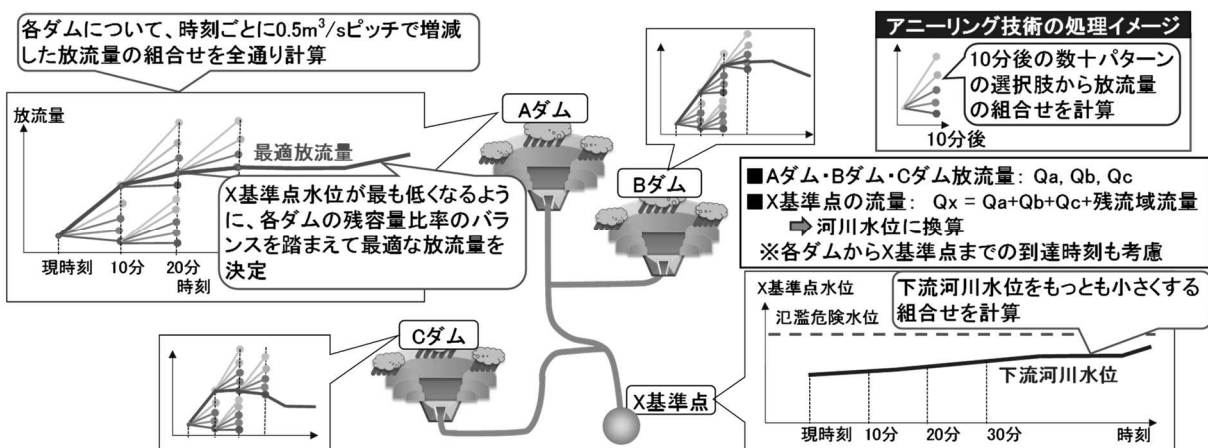


図-2 アニーリング技術による最適化計算のイメージ

ータ [荒川ダム群版] を開発した。

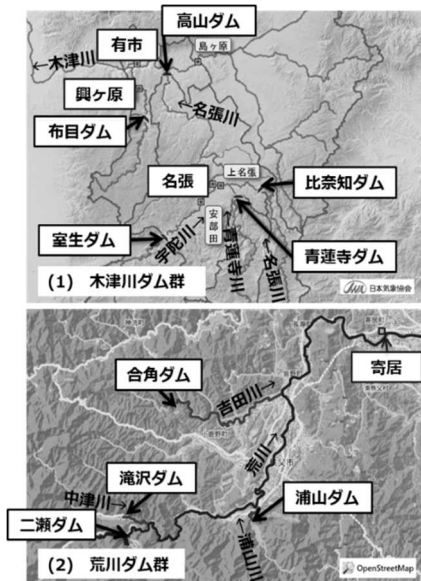


図-3 モデルダム群の位置

3. 4 シミュレータの基本構成

木津川ダム群版および荒川ダム群版の基本構成はほぼ同様であり、以下の3つのモードから構成される。

(1) 通常モード

通常モードでは、84時間先までの降雨予測を用いた流入／放流計算により、操作規則等や治水協定に応じた事前放流を含む放流操作や、アニメーリング技術を活用したダム群としての最適化の自動計算を行う。降雨予測は、予測時間に応じ、GSM ガイダンス (84時間先まで)、MSM ガイダンス (39時間先まで)、さらに降水短時間予報等を組合せて高精度化を図っている。自動計算結果は、下流河川水位 (流量から換算) の抑制効果から「最適」と判断される解から順に有力な案が複数提示される。それをもとに、ダム管理者が各ダムの放流方法をカスタマイズした上で再度計算し、下流河川水位、各ダム放流方法および貯留率を表示するシステムである。降雨予測のブレや二山目の出水が予想される場合等に備えるため、ダムの活用可能容量の上限を100%だけでなく、例えば95%にする設定も可能である。

また、各ダムの操作方針をクラウド上で共有し、ダム群として意思統一を図るための共有ツールを実装している。

(2) アンサンブルモード

アンサンブルモード (荒川ダム群版のみ搭載) は、今後、長時間アンサンブル降雨予測を用いた放流計画の立案が社会実装されることを見据えて、最大15日先までの長時間アンサンブル降雨予測を用いたシミュレーションが可能な機能である。それにより、最大3日前からの現行の事前放流に先だった水位低下や、治水・利水両面のリスクを考慮した最大15日先までの放流計画を立案できると考えられる。特に、

水位低下速度に制約のあるダムや、予備放流および事前放流による水位低下量が特に大きいダム等においては、長時間降雨予測の利用価値は高いと考えられる。

なお、長時間アンサンブル降雨予測のダム操作への適用については、第2期SIPにおいて有効性や実装に向けての考え方等が示されており、現在、個別ダムの操作ルール等への適用について検討が進められているところである。

(3) 訓練モード

訓練モードは、シミュレータ操作に習熟するため、過去の洪水やスーパー台風等を想定した予測波形を呼び出し、放流計画を立案する訓練に用いる機能である。これにより、ダム管理者は平常時等にいつでも現場のパソコンで疑似体験し、操作および判断の習熟に役立てることができる。

4. 既往出水によるシミュレーション結果の検証

シミュレータの効果検証の一例として、木津川ダム版シミュレータによる2017年10月18～23日の台風21号時の出水をモデルとした計算結果を示す。この台風は、比奈知ダム流域で総雨量522mm (テレメータ観測速報値) を記録した、木津川流域では過去5か年 (2017～2021年) で最大規模、青蓮寺ダム流域等では管理開始以降2番目の規模の降雨である。このとき名張上流3ダムでは特別防災操作が実施され、ダムがなかったと仮定した場合に比べ名張地点で約1.3m (速報値) の水位低減効果があったとされる。

シミュレータによる計算結果は図-4のようにパソコン画面上で表示される。画面上段に操作方法案が水位低下効果の大きい順に一覧表形式で表示されるとともに、選択した操作方法における各ダム・下流地点のハイドログラフ等が画面中・下段に並列表示され、各ダムの操作方法とその全体の効果が直観的・俯瞰的に把握できるようになっている。表示する操作方は、必ずしもシミュレータが「最適」と判断したパターンに限らず任意に選択することができる。

この出水において、①各ダムの実績流入量を用いた実際の放流操作を再現したケース (再現計算) と、②各ダム流入に対してアニメーリングを用いた柔軟な最適操作によりダムの容量100%まで貯留しようと設定したケースの計算結果を表-1に示す。なお、②はいわゆる「神様操作」であり、実際にここまでダム容量を計画的に使い切ることはないと思われるが、今回はアニメーリングによる可能性を検証する意味で設定した。また②では、名張上流3ダムおよび布目ダムの流入量は実績値、高山ダムの流入量は名張上流3ダムのアニメーリング計算による放流量と残流域の実績流入量の和となる。表-1によれば、名張上流3ダムでは、②ではそれぞれ貯水容量の97～100% (①に比べ約3～11ポイント増) まで活

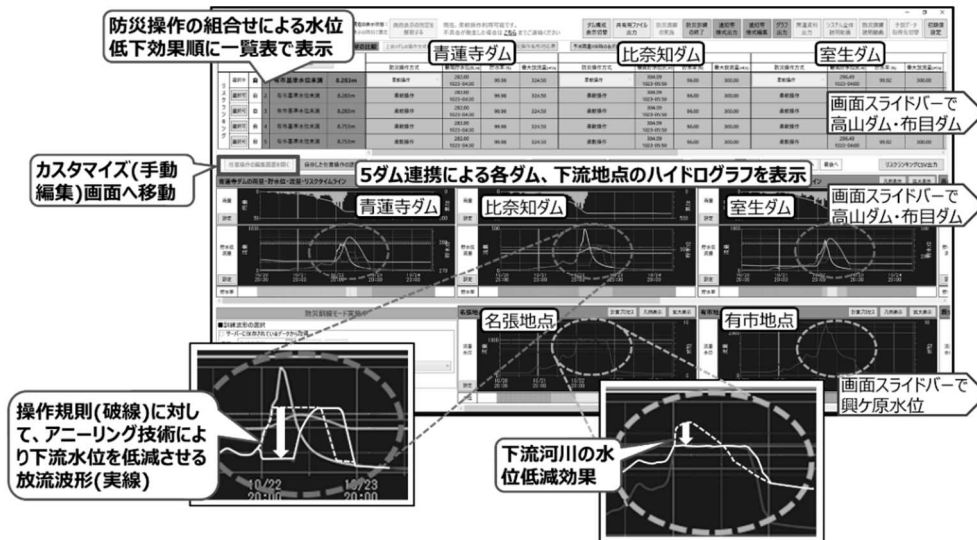


図4 シミュレータによる自動計算結果画面 (加筆)

表-1 計算結果の比較

	①再現計算			②アニーリングによる最適操作		
	青蓮寺ダム	比奈知ダム	室生ダム	青蓮寺ダム	比奈知ダム	室生ダム
有効貯水容量使用率	91.48%	94.72%	88.15%	99.96%	97.33%	99.20%
下流水位	名張地点 7.70m (> 氾濫危険水位)			名張地点 7.56m (< 氾濫危険水位)		
有効貯水容量使用率	高山ダム 81.33%			高山ダム 99.96%		
下流水位	有市地点 9.22m			有市地点 8.77m		
有効貯水容量使用率	布目ダム 76.61%			布目ダム 99.92%		
下流水位	興ヶ原地点 2.72m			興ヶ原地点 1.42m		

用し、名張地点水位が①より 0.14m 低下し氾濫危険水位を下回るという結果となった。下流の高山ダムでは、②では貯水容量のほぼ 100% (①に比べ約 19 ポイント増) まで活用し、木津川合流後の有市地点水位が①より 0.45m 低下するという結果となった。また、布目ダムでは、②では貯水容量のほぼ 100% (①に比べ約 23 ポイント増) まで活用し、興ヶ原地点水位が①より 1.30m 低下するという結果となった。この計算に要した時間は約 20 秒である。

特別防災操作などの際には、降雨予測の更新等に応じて放流量を随時調整する必要がある。本シミュレータを活用することにより、従前よりはるかに多くの放流パターンの試算が可能となりダム管理者の作業負担が軽減され、マンパワーを分析・判断・調整等に充てることができるようになるため、ダム群の貯水容量のさらなる有効活用と下流水位の低減効果増大の推進に寄与することが可能となると考えられる。

5. まとめ

本シミュレータは、流域内の複数ダムの容量を最大限活用

し下流被害の回避・軽減を図るためのダム群連携操作による放流方法の検討にあたり、各ダムの操作規則、放流の原則やその他制約条件の範囲内で考えられる流入と放流の膨大な組合せを、降雨予測の更新等に適用して逐一計算、最適ないし有力な解を見だし、ダム管理者に提案するものである。

気候変化による大規模洪水の頻発化・激甚化やベテラン技術者の減少という現状に対し、本シミュレータはダムの洪水調節技術の維持向上に寄与するものであると考える。

謝辞

本技術開発は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の SIP 「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」 (管理法人: 防災科学技術研究所) により実施されました。また、国土交通省関東地方整備局荒川上流河川事務所、埼玉県県土整備部、水資源機構荒川ダム総合管理所および木津川ダム総合管理所の皆様には、データ提供等のご協力をいただきました。

参考文献

- 1) 吉岡敏幸: SIP における統合ダム防災支援システム開発の取り組み, 河川 No.914, pp.45-48, 2022.
- 2) 田村和則ほか: ダム群連携最適操作シミュレータの開発, 河川技術論文集第 29 巻, 2023.
- 3) 松村貴義: 平成 21 年台風 18 号における名張川上流 3 ダムの統合操作による洪水調節, ダム技術, No.287, pp.98-102, 2010.
- 4) 中山寛ほか: 富士通 解説 第三世代デジタルアニーラの技術, https://www.fujitsu.com/jp/documents/digitalannealer/researcharticles/DA_WP_JP_20210922.pdf