

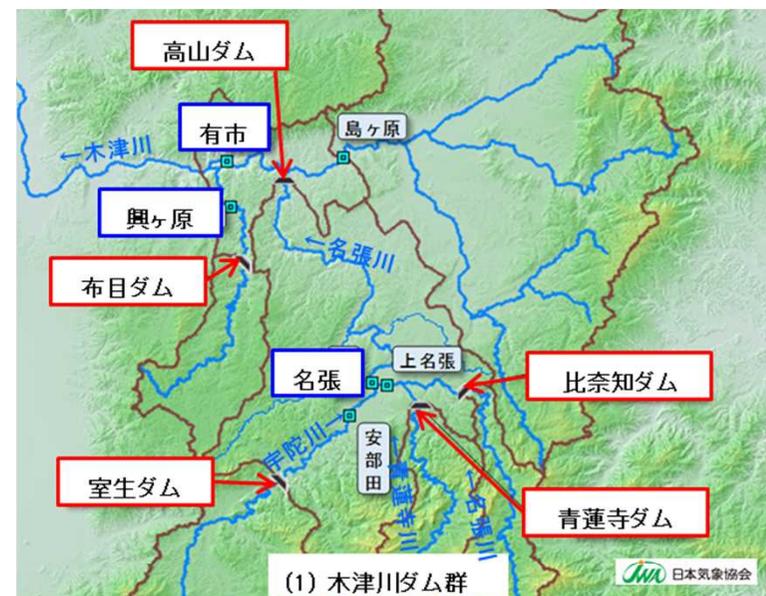
ダム群連携最適操作 シミュレータの開発

DEVELOPMENT OF A SIMULATOR TO OPTIMIZE
THE COORDINATED OPERATION OF DAMS

SIP2期 サブテーマ2：
河川・ダムの長時間洪水予測・防災支援システムの開発

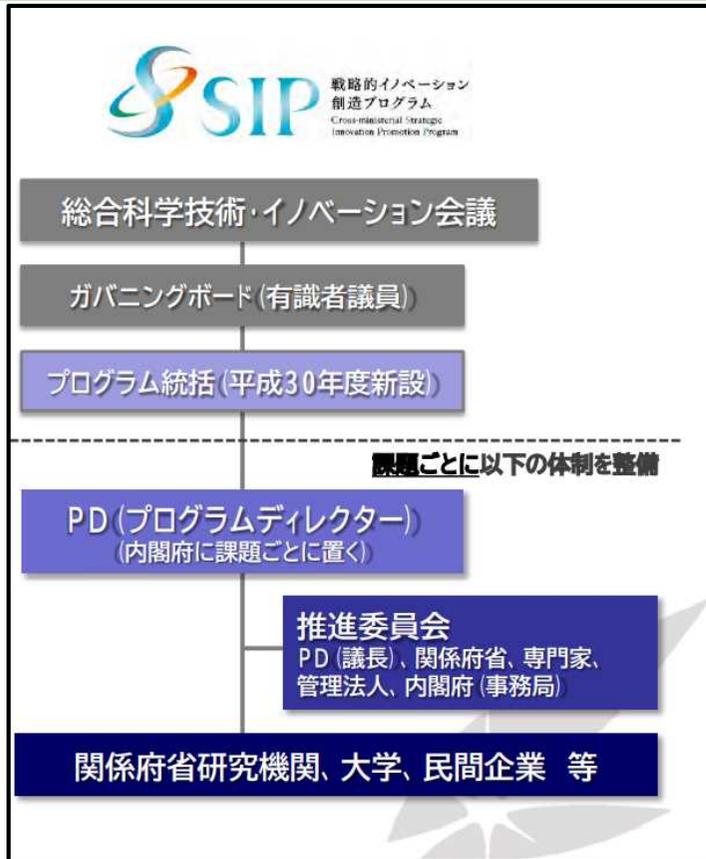
(独)水資源機構
(独)水資源機構
パシフィックコンサルタンツ(株)
京都大学防災研究所

田村 和則
木戸 研太郎
小森谷 哲夫
角 哲也



開発の背景

SIP第2期 研究課題中の位置づけ

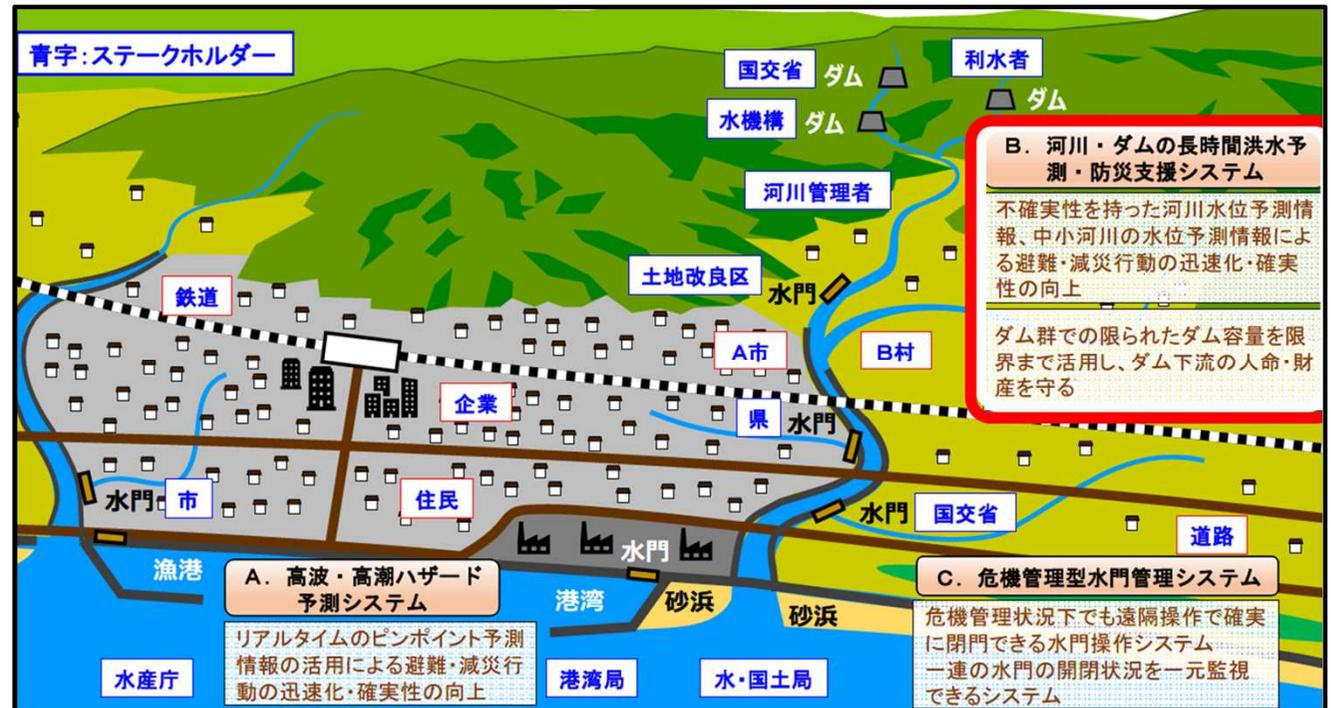


出典)内閣府ホームページ

No.	分野	研究開発課題
1	サイバー空間基盤技術	ビッグデータ・AIを活用したサイバー空間基盤技術
2	フィジカル空間基盤技術	フィジカル空間デジタルデータ処理基盤
3	セキュリティ (サイバー・フィジカル・セキュリティ)	IoT社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティー
4	自動走行	自動運転(システムとサービスの拡張)
5	材料開発基盤	統合型材料開発システムによるマテリアル革命
6	光・量子技術基盤	光・量子を活用したSociety5.0実現化技術
7	バイオ	スマートバイオ産業・農業基盤技術
8	エネルギー・環境	脱炭素社会実現のためのエネルギーシステム
9	防災・減災	国家レジリエンス(防災・減災)の強化
10	健康・医療	AIホスピタルによる高度診断・医療システム
11	物流(陸上・海上)	スマート物流
12	海洋	革新的深海資源調査技術

国家レジリエンス(防災・減災)の強化

研究開発項目「テーマVI.スーパー台風被害予測システム」の本研究開発の位置づけ



出典)国土技術研究センター(JICE)ホームページ

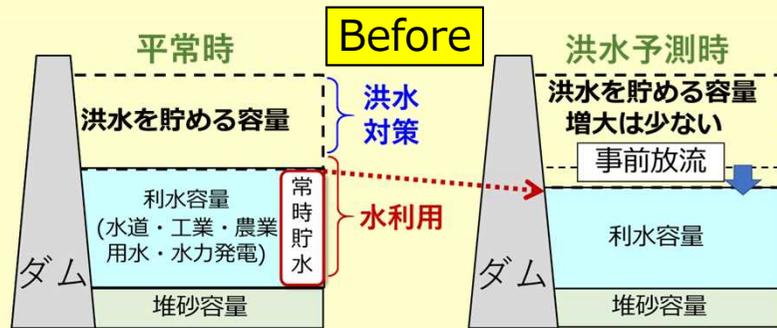
開発の背景 統合ダム防災支援システムの目指すところ

ダムの目的は「治水(洪水対策)」と「利水(水利用)」

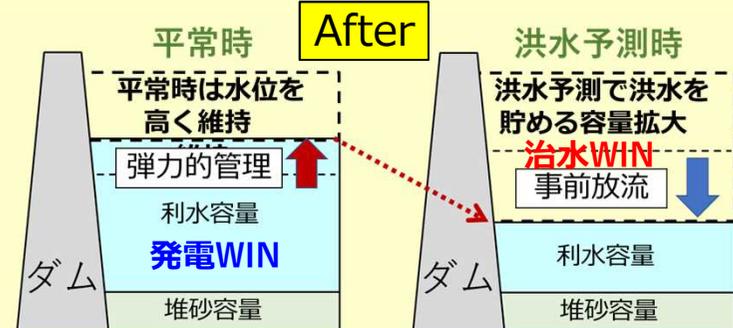
現状

事前放流は限定的。1～3日程度
(R2開始の事前放流ガイドライン)

GSM(84時間)は予測不安定, MSM(39時間)は時間不足



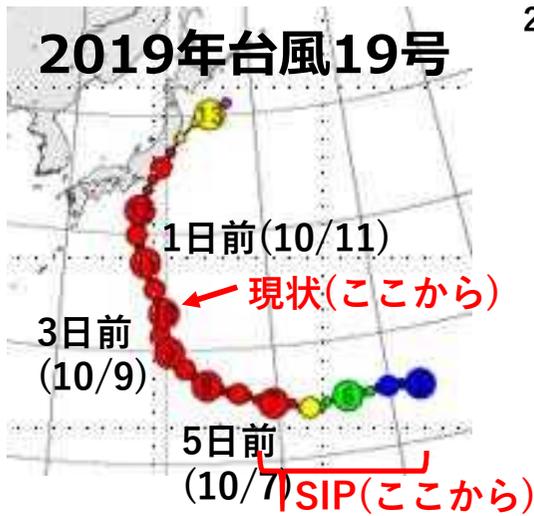
SIP技術



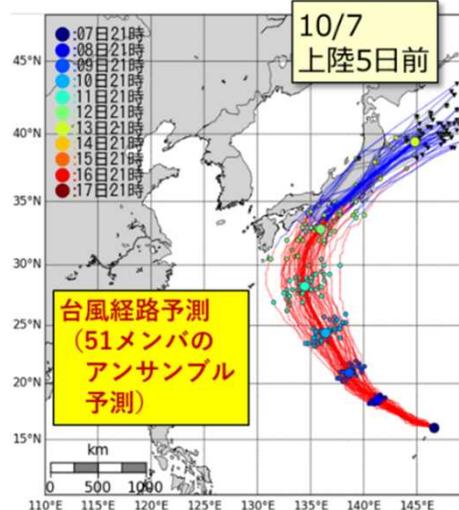
ECMWF(51メンバー・15日先)活用

SIP

数日～1週間程度前からの事前放流を実現し、洪水貯留機能の拡大(治水WIN)と水力発電増大(発電WIN)を実現



2019年台風19号時の長時間アンサンブル予測



4つのコア技術

- ① 早期の事前放流開始
コア技術：アンサンブル気象予測を利用した長時間リードタイムの確保 (1-3日前 → 5-7日前)
- ② ダム流域への正確な流入量予測
コア技術：降雨予測の高解像度化 (20km → 1km)
- ③ 発電量の増大かつ洪水貯留能力の最大化
コア技術：アンサンブル流入量予測による予測幅の獲得 (1本の予測 → 51本の予測(上位/下位予測))
- ④ ダム群最適操作による治水効果の拡大
コア技術：ダム群連携最適操作シミュレータ

本研究開発

開発の背景 統合ダム防災支援システムの研究達成状況

① 早期の事前放流開始 4つのコア技術

コア技術：アンサンブル気象予測を利用した長時間リードタイムの確保 (1-3日前 → 5-7日前)

② ダム流域への正確な流入量予測

コア技術：降雨予測の高解像度化 (20km → 1km)

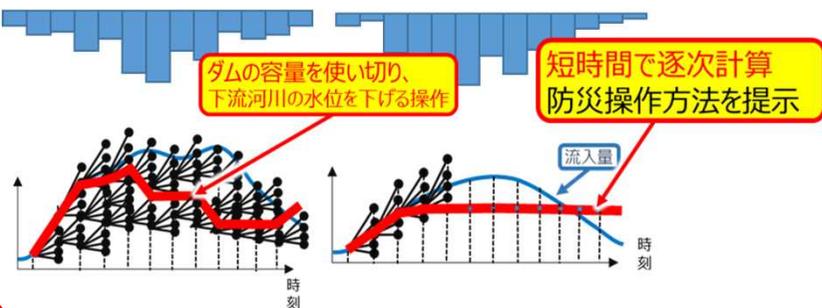
③ 発電量の増大かつ洪水貯留能力の最大化

コア技術：アンサンブル流入量予測による予測幅の獲得 (1本の予測 → 51本の予測(上位/下位予測))

④ ダム群最適操作による治水効果の拡大

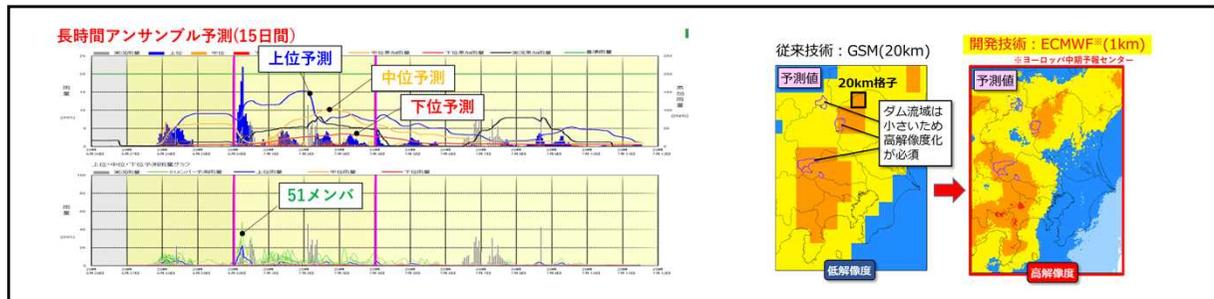
コア技術：ダム群連携最適操作シミュレータ

④ 目標達成：プロタイプ完成、木津川ダム群、荒川ダム群で過去洪水で検証



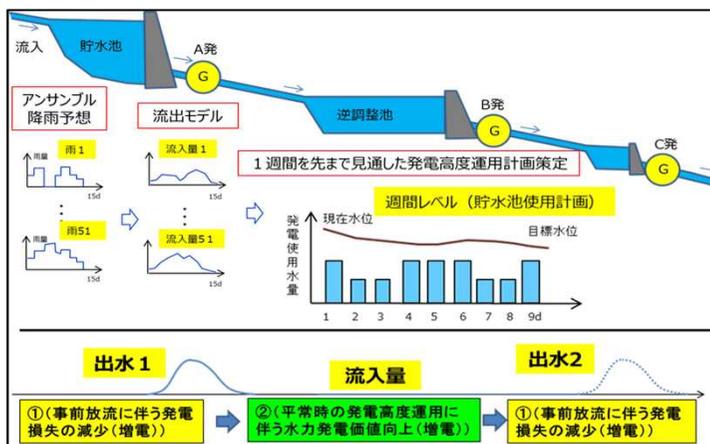
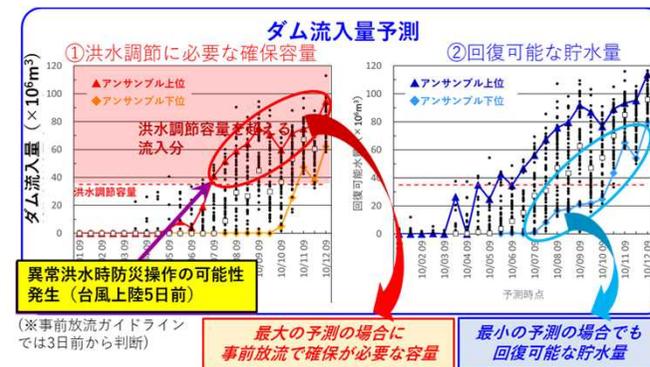
本研究開発

① 目標達成：多目的ダム（水機構全ダムに導入済）、電力ダムなど、全国50ダム以上に情報配信



② 目標達成：5km/1km解像度の2バージョンを提供

③ 目標達成：プロタイプ完成、過去洪水でダム操作検証、木津川ダム群等の実操作でフィードバック、3電力会社と連携（マッチングファンド）、発電高度運用プロタイプ完成、台風や前線性降雨で検証



ダム群連携操作の必要性

「ダム群連携」による防災操作とは

- ✓ 流域内の複数のダムの容量を最大活用して、下流地域の被害の最小化を目指すもの。
- ✓ そのためには、各ダム流入量および河川流量の正確な把握・予測と、通常のダム操作ルールを超えた高度な操作による的確な貯留・放流操作が必要。

本研究開発対象地域：木津川上流域はもともと地形的に洪水に脆弱な土地柄

⇒ 河道の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食い止める努力を行ってきた

高度なダム操作と現地河川の特性に熟達した
複数の人材が不可欠

⇒気候変動等による降雨災害の激甚化・頻発化
に備え、防災操作支援が必要

限られた時間の中で、
電卓と表計算で
トライ&エラーの繰り返し
(熟練し、卓越した技量が必須)



2009年台風18号 比奈知ダム操作状況

開発したダム群連携最適操作シミュレータの位置づけ

放流計画の検討支援システム

高速かつ便利な計算機を構築

様々な操作の可能性を高速に提案

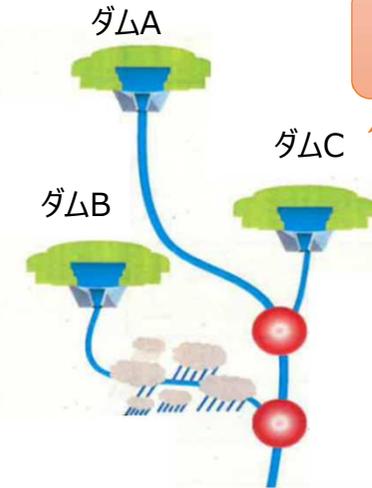
ダム群連携に係る職員
の検討の時間を短縮

関係者との調整時間や共有時間を増加

最終的に職員が放流計画を決定

コア技術：

アニーリング
技術を用いた
高速演算



ナウキャスト・降水短時間予測・GSM・MSM (ガイダンス)

各ダム流域の予測の雨

下流河川の予測の雨

流出量算出 (分布型流出予測システム)

各ダムで
放流の原則を守りながら
ダムの放流方法を
全て計算

サーチャージ容量95% (目標)

各ダムの放流量と
残留域の影響を
全て計算

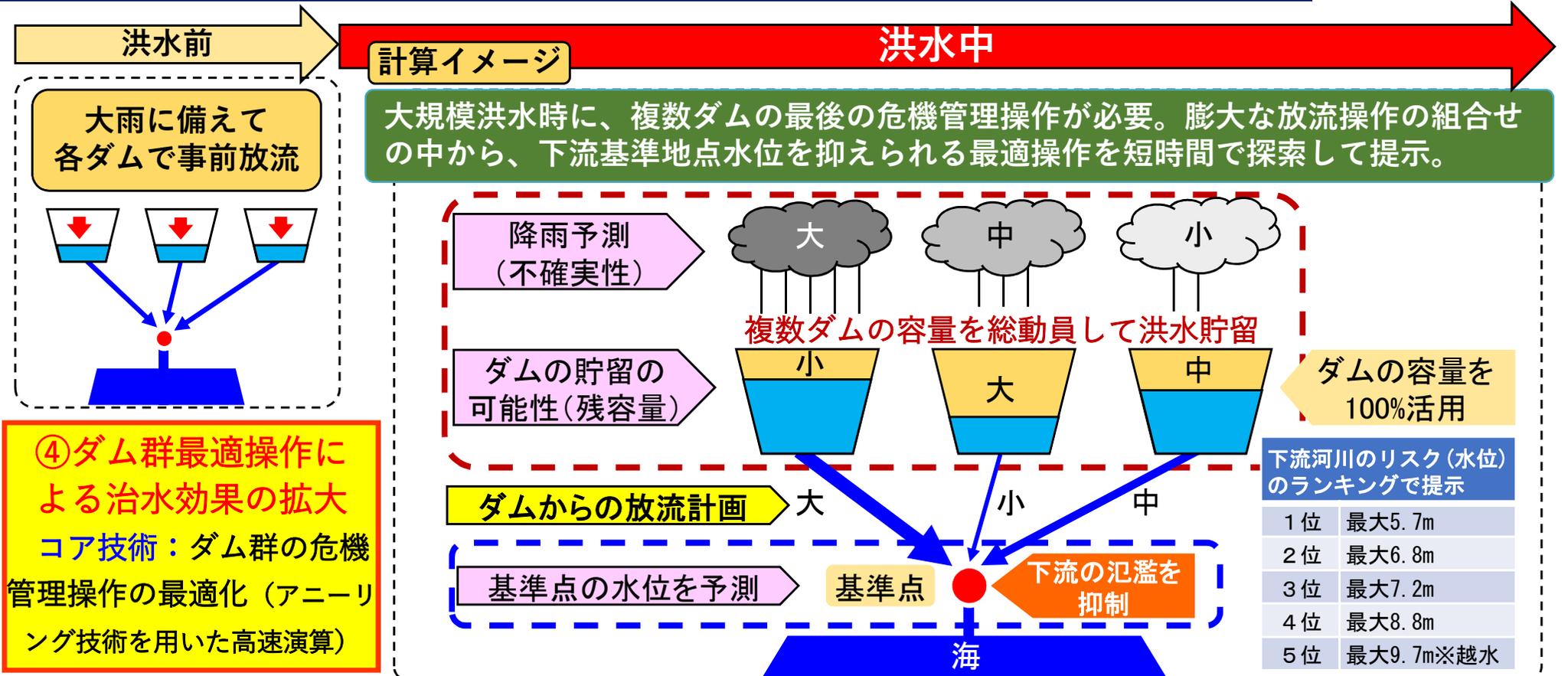
氾濫危険水位以下 (目標)

各ダムの安全

下流河川の安全

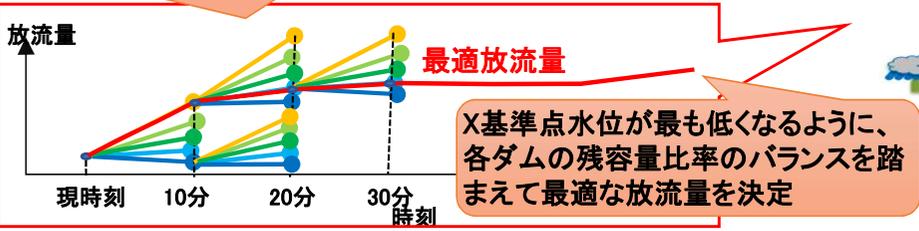
計算上：最もベストな操作方法を提示

ダム群連携最適操作シミュレータの開発の目的



④ダム群最適操作による治水効果の拡大
コア技術：ダム群の危機管理操作の最適化 (アニーリング技術を用いた高速演算)

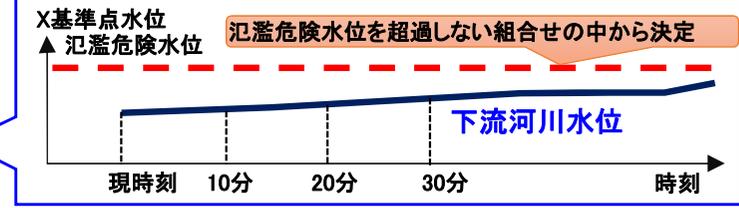
各ダムについて、時刻ごとに $0.5\text{m}^3/\text{s}$ ピッチで増減した放流量の組合せを**全通り**計算



アニーリング技術の処理イメージ

10分後の数十パターンを選択肢から放流量の組合せを計算

■Aダム・Bダム・Cダム放流量: Q_a, Q_b, Q_c
 ■X基準点の流量: $Q_x = Q_a + Q_b + Q_c + \text{残流域流量}$
 → 河川水位に換算
 ※各ダムからX基準点までの到達時刻も考慮



ダム群連携最適操作シミュレータの最適化技術 概要

影響因子

- 各ダムの上流の雨の変化
- 各ダムへの流入量の変動
- ダム下流の雨の変化
- 各ダムの放流量と残留域の影響で下流河川の水位変動

目的

- ダムの貯水容量を使い切って、下流河川の水位を低下させて、地域の命と財産を守る。
- 逐次、降雨予測状況が変わる中で、迅速に検討し、確実な防災操作方針を決定し、関係機関と調整を図り、放流操作を実施する。

Before:

- 経験豊富な職員等で、熟練し、卓越した技量により、限られた時間の中で、トライ&エラーの繰り返しで検討。
- 職員による検討ケースも限界がある。

After:

- 今後も気象変動により、さらに降雨による激甚災害の確率は高まる傾向。
- 刻々と変化する雨量予測に、迅速にあらゆる検討ケースを逐次計算し、提案。

目標:ダム群連携により下流河川の安全を確保できる防災操作方法を超高速で提示

計算プロセス

膨大な組合せの中から最適な組合せを超高速で探索することに特化した解析技術が必要

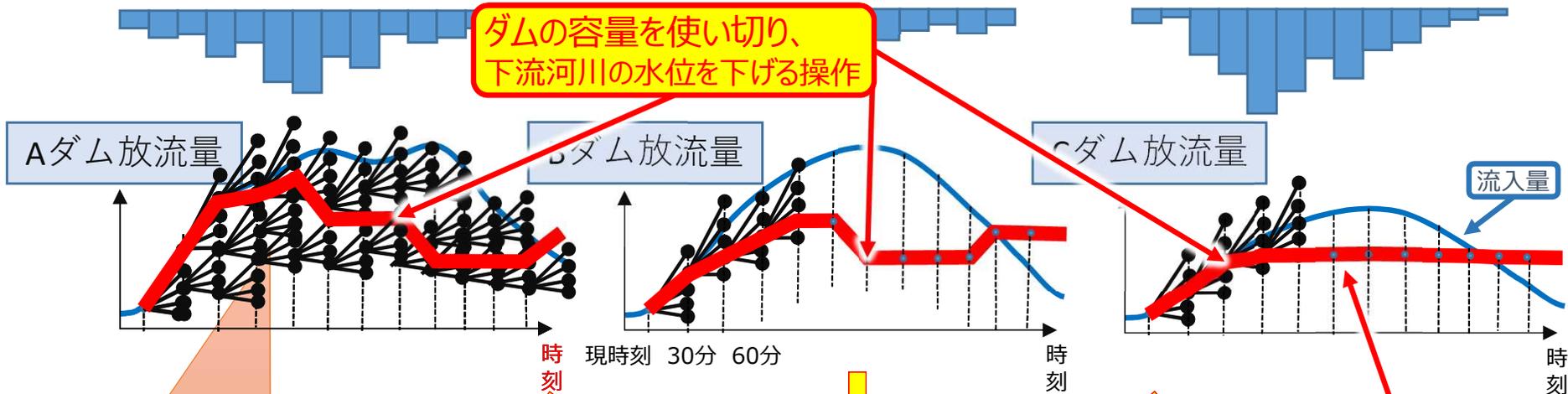
量子力学の現象に着想を得たデジタル回路を搭載する疑似的な量子コンピュータを活用

アニーリング技術による高速演算

降雨予測更新毎に膨大なダム群連携防災操作の組合せの中から最も効果を得られる結果を超高速かつ高精度に得ることができる

デジタルアニーラによる計算プロセスイメージ

放流の原則を上限とし、ダムの安全を確保しつつ、**全ての放流操作パターンを計算**



「組合せ」
ダムごとの多数の放流量の選択肢
組合せ数は例えば
5×5×5×…のように指数関数的に増加

放流方法: 3.3×10^6 の 3676 乗通り
組合せ

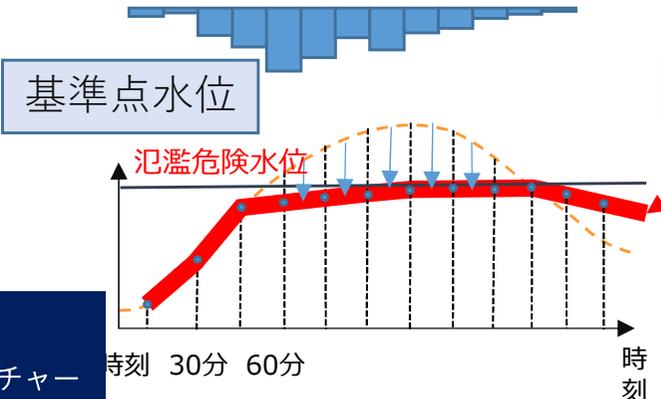
短時間で逐次計算して
具体的な防災操作方法を提示

氾濫危険水位相当流
量 $\geq Q_A + Q_B + Q_C + Q_{残}$

残流域流量 $Q_{残}$

■技術: アニーリング (組合せ最適化技術)
スーパーコンピュータ富岳が数億年
×10の数千乗年かかる計算を本シス
テムでは、計算時間は1分程度
(デジタルアニーラ (富士通) 採用)

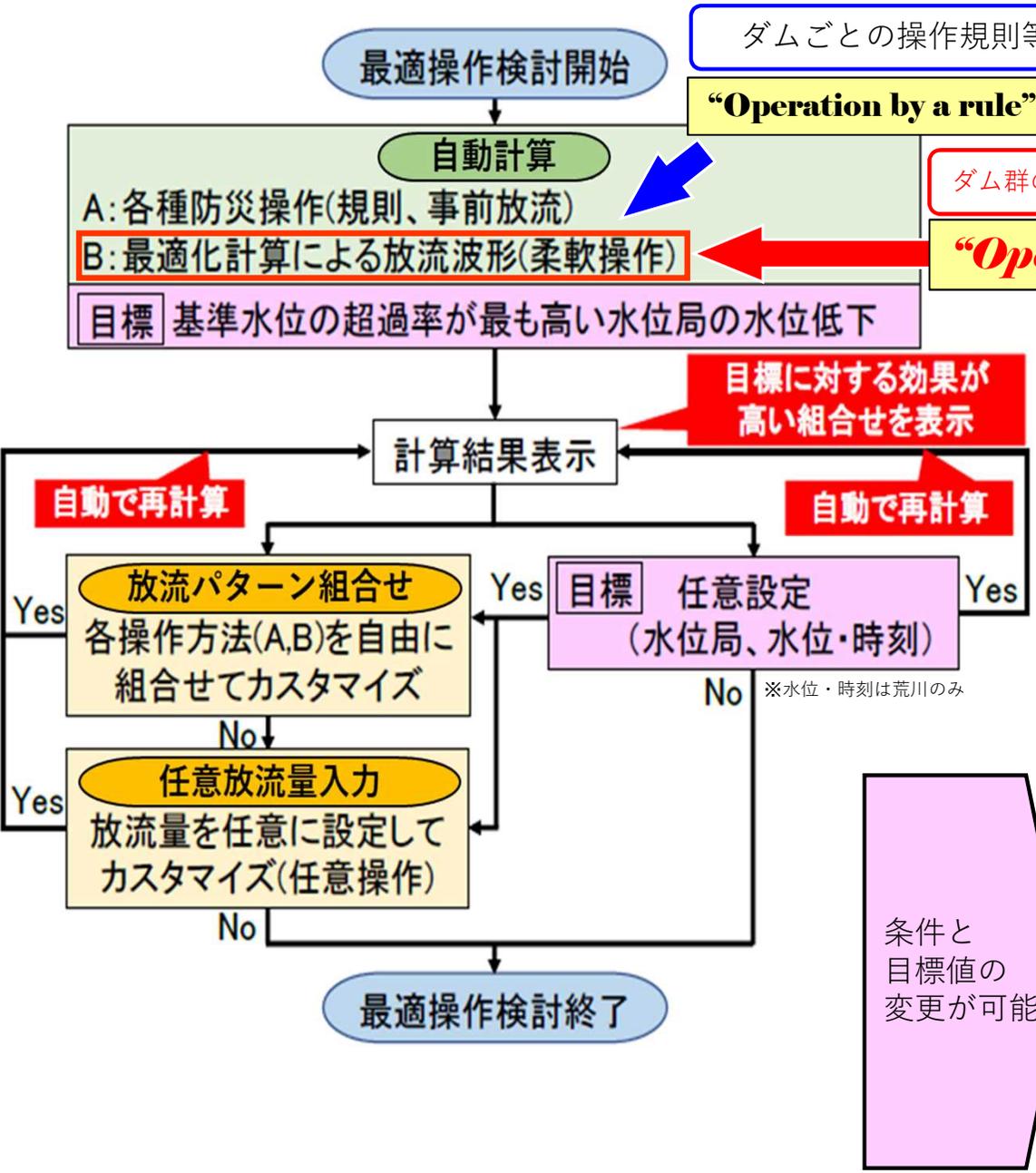
■デジタルアニーラとは:
量子現象に着想を得たデジタル回路で
「組合せ最適化問題」を高速に解くアーキテクチャー



下流水位

各ダムの容量を使い切り、かつ、
下流河川の水位が最も
低くなるように、**放流方法を決定**

デジタルアニーラによる計算プロセス



ダム・水位局名	入力	入力可能範囲
青蓮寺	280.3	241.5以上、282.0以下
比奈知	305.0	268.3以上、305.0以下
室生	295.0	272.0以上、296.5以下
高山	132.2	104.0以上、135.0以下
布目	287.3	256.0以上、287.3以下
青蓮寺	40.0	40.0以上
比奈知	60.0	60.0以上
室生	40.0	40.0以上
高山	160.0	160.0以上
布目	60.0	60.0以上
高山	洪水調節中の最大放流量	-
布目	洪水調節中の最大放流量	-
名張	7.40	2.47以上、7.66以下
有市	2,600.0	160.0以上、2,800.0以下

値を保存 保存した値を使用

アニーリング（採用技術：富士通：デジタルアニーラ）

組合せの最適化

組合せ最適化技術とは、さまざまな課題に対応するために、**どのような組合せが最適なのかを見つけ出すことに特化している**もので、この場合の最適な選択肢とは、例えば旅行計画を立てる時に、訪れる都市の順番をどうすると最も効率的になるか、というような回答を見つけるイメージ。

デジタルアニーラは、量子現象に着想を得たデジタル回路により、**組合せ最適化問題を瞬時に解けるのが特徴**

富士通 HPより引用

デジタルアニーラの技術の解説

一部引用

デジタルアニーラは、組合せ最適化問題を高速に解くために、**イジングモデル**という概念を活用。

イジングモデルとは、イメージとして、磁石などの磁性体の性質を表すモデルであり、このモデルは、**プラスやマイナスなどで表す二つの値の向きの状態を表す「スピン（格子点）」**により、構成。

このイジングモデルのスピン状態をバイナリー変数(0, 1)に変換したエネルギー関数に対して、**エネルギーが最も小さくなる基底状態を探索する技術がデジタルアニーラ**。

このスピンの状態の全体の傾向として捉え、様々な因子によりスピンの向きを調整するのが、組合せ最適化問題を解くイメージ。

なお、**エネルギーを高速に最小化するためのプロセスとしてマルコフ連鎖モンテカルロ法**を使用。

マルコフ連鎖モンテカルロ法は、確率的な課題を解く手法で、ランダムな試行を何度も繰り返すモンテカルロ法と、現在の状況は直前の状態に依存する確率モデルのマルコフ連鎖を組合わせたものであり、計算のイメージは、ランダムに選んだ解を試し（モンテカルロ法）、その結果に基づいて次の解を選ぶ（マルコフ連鎖）という手続きを繰り返すことで、最適な解を探し出す原理となる。

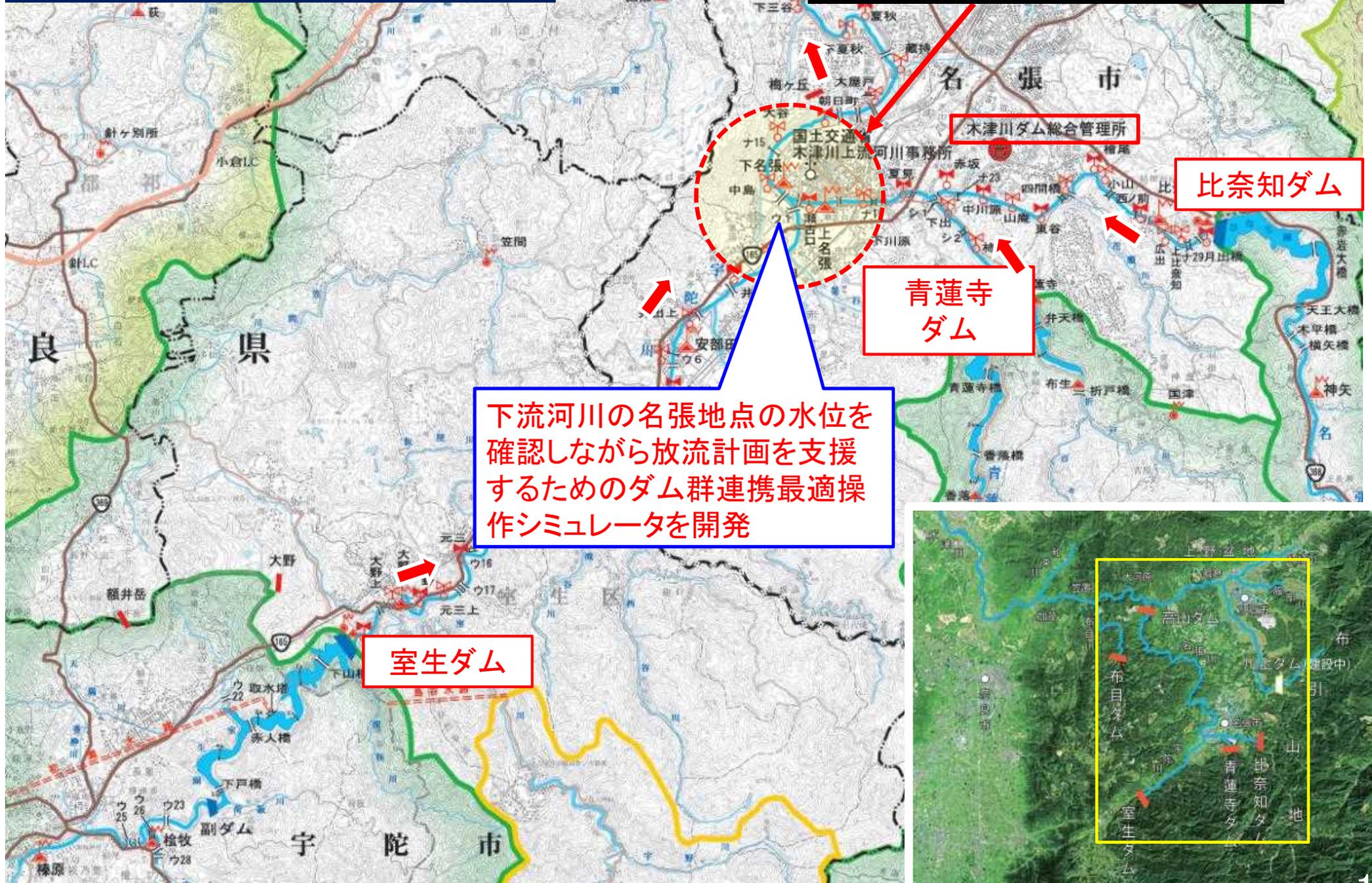
デジタルアニーラの解説は以下より、引用抜粋

第三世代のデジタルアニーラの技術

<https://www.fujitsu.com/jp/digitalannealer/researcharticles/>

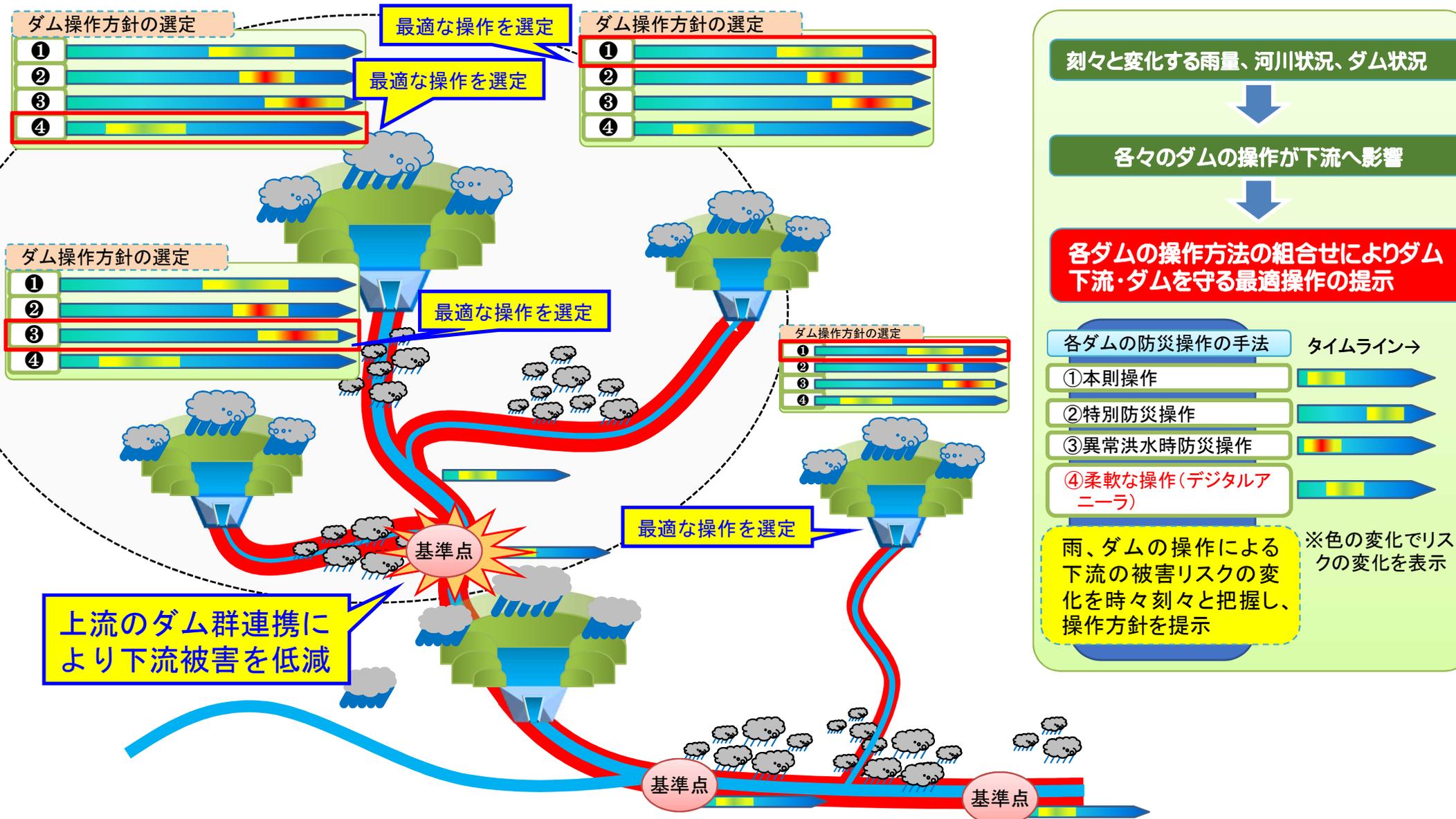
木津川ダム総合管理所

川の水があふれやすいエリア



目的 木津川ダム群のイメージ（5ダム）

【システム開発目的】ダム機能の最大活用による氾濫被害リスクの最小化



2017年台風21号降雨による木津川ダム群計算結果

2017年 10月 21日 20時 00分 更新

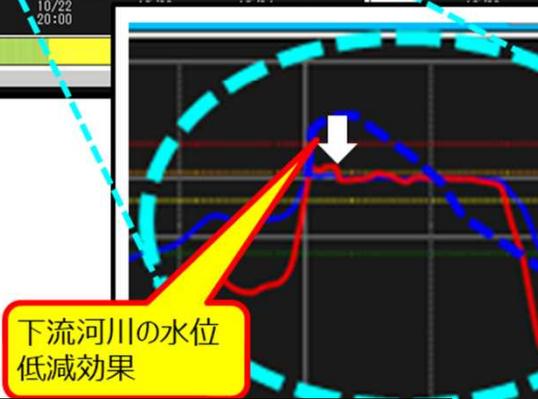
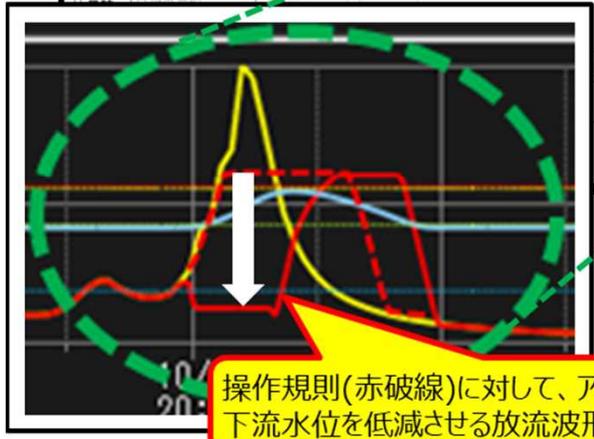
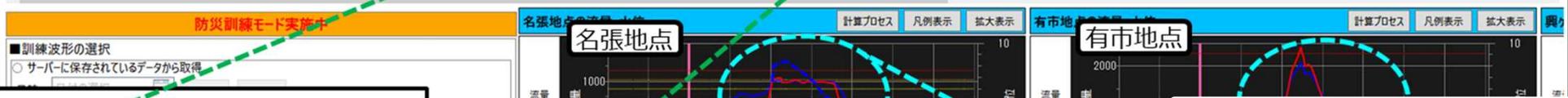
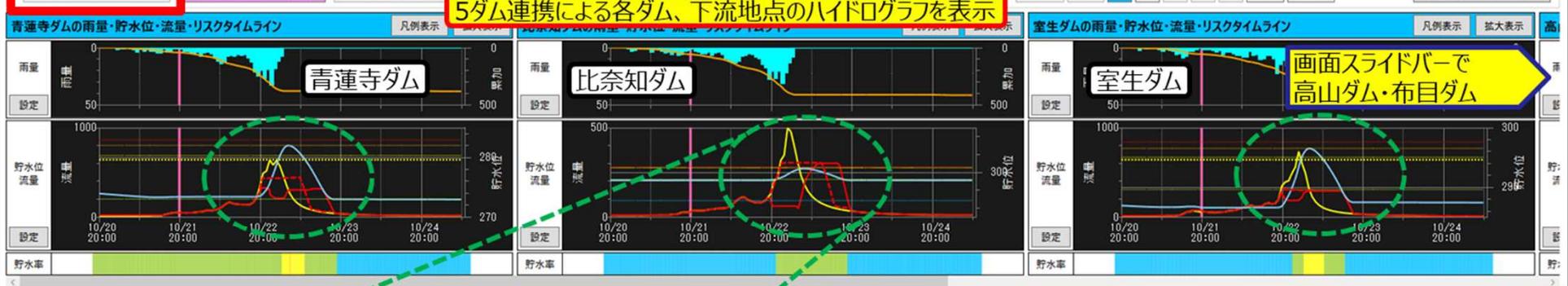
現在、柔軟操作利用可能です。不具合が発生した場合はこちらまでご連絡ください

ダム構成表示切替 共有用ファイル出力 防災訓練の実施 防災訓練の終了 通知等様式出力 通知等様式編集 グラフ出力 関連資料出力 システム全体説明動画 防災訓練説明動画 予測データ取得先切替 初期値設定

防災操作の組合せによる水位低下効果順に一覧表で表示

下流	有市	青蓮寺ダム			比奈知ダム			室生ダム							
		防災操作方式	最高貯水位(EL,m)	貯水率(%)	最大放流量(m³/s)	防災操作方式	最高貯水位(EL,m)	貯水率(%)	最大放流量(m³/s)	防災操作方式	最高貯水位(EL,m)	貯水率(%)	最大放流量(m³/s)		
選択中	自 1	有市基準水位未満	8.283m	柔軟操作	282.00 1023-04:30	99.98	324.50	柔軟操作	304.09 1023-05:50	96.00	300.00	柔軟操作	296.49 1023-04:00	99.92	300.00
選択可	自 2	有市基準水位未満	8.283m	柔軟操作	282.00 1023-04:30	99.98	324.50	柔軟操作	304.09 1023-05:50	96.00	300.00	柔軟操作	296.49	99.92	300.00
選択可	自 3	有市基準水位未満	8.283m	柔軟操作	282.00 1023-04:30	99.98	324.50	柔軟操作	304.09 1023-05:50	96.00	300.00	柔軟操作	296.49	99.92	300.00
選択可	自 4	有市基準水位未満	8.753m	柔軟操作	282.00 1023-04:30	99.98	324.50	柔軟操作	304.09 1023-05:50	96.00	300.00	柔軟操作	1023-04:00		
選択可	自 5	有市基準水位		柔軟操作	282.00 1023-04:30	99.98	324.50	柔軟操作	304.09 1023-05:50	96.00	300.00	柔軟操作	296.49 1023-04:00	99.92	300.00

画面スライダーで高山ダム・布目ダム

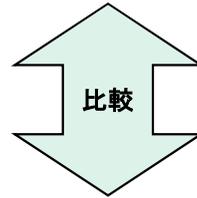


各ダム貯水容量および下流水位(2017年台風21号降雨による木津川ダム群計算結果)

	①再現計算			②アニメ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		

2017年台風21号降雨による木津川ダム群計算結果 解説

①各ダムの実績流入量を用い実際の放流操作を再現したケース(再現計算)



②各ダム流入に対してアニ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

※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、今回はアニーリングによる可能性を検証する意味でこのような設定とした。

検証結果

名張上流3ダムでは、②ではそれぞれ貯水容量の97～ほぼ100%(①に比べ約3～11ポイント増)まで活用し、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。この天文学的な組合せの最適化に計算に要した時間は約20秒。

実際の運用

実務上の適用については、ダム管理者が本シミュレーション結果を参考としつつ、流域や出水の特性を考慮して設定した基本方針や、その時々状況に即したより適切な操作方法や種々の制約条件等に応じて総合的な判断を行い、関係機関との調整の上、放流方法が決定される。

なお、調整の際には、放流量等を手入力で修正し再計算するカスタマイズ機能を用いることにより、ダム管理者の検討を支援することができる。

職員手入力による防災操作方針作成

シミュレータの手入力による防災操作作成

- 社会的情勢
- 関係機関からの要望

職員によるマニュアルで防災操作方針を作成し、検討

手入力での防災操作計画を作成

シミュレータでダム容量への影響
下流河川への影響を確認

関係者へ提示

防災操作方針の確定

防災訓練モード実施中

- 予測データ取得先切替
- 防災訓練の実施
- 通知等様式出力
- 通知等様式編集
- グラフ出力
- ナビゲートヘルプ出力
- 放流の原則表示
- ただし書き操作テーブル表示

比奈知ダムの放流量編集

比奈知ダム									
雨量	累加雨量	流入量	全放流量	貯水位	各基地系水位	雨量	流入量	全放流量	
1.7	16.9	45.38	45.00	290.95	4.312	1.7	45.18	50.00	
1.4	17.3	45.38	45.00	290.95	4.321	1.4	45.18	50.00	
1.7	17.4	45.17	45.00	290.95	4.371	1.7	45.17	50.00	
1.7	17.7	48.71	48.50	290.95	4.403	1.7		50.00	
1.6	17.9	46.71	48.50	290.95	4.470		48.71	50.00	
2.0	18.3	48.70	48.50	290.95		2.0	48.70	50.00	
2.3	18.6	51.57	51.50		4.542	2.3	51.57	51.50	
2.0	19.0	56.15	56.00	290.95	4.581	2.0	56.15	56.00	
2.6		56.15	56.00	290.95	4.613	2.6	56.15	56.00	
	19.7	57.38	57.00	290.95	4.730	2.0	57.18	57.00	
2.0	20.4	64.63	64.50	290.95	4.738	1.7	64.63	64.50	
2.0	20.4	68.94	68.50	290.95	4.825	2.0	68.94	68.50	
2.4	20.8	68.93	68.50	290.95	4.821	2.4	68.93	68.50	
2.8	21.2	68.93	68.50	290.95	4.861	2.8	68.93	68.50	

手動で放流計画を作成

下流河川への影響を確認

下流河川
流量

下流河川水位

まとめ

- 流域内のダム群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をダム管理者が検討するにあたり、各ダムの操作規則等に従う範囲で考える膨大な操作パターンに対して流入・放流計算を逐一行い、最適ないし有力と考えられる複数案を提示しダム管理者の作業を補完・支援するツールとして「ダム群連携最適操作シミュレータ」を開発した。
- 本シミュレータでは、組合せ最適化の高速演算手法としてアニーリング技術を採用した。それにより、スーパーコンピュータでも長時間を要する計算がごく短時間(今回の試算では約20秒)で実行可能となった。ただし、実際のダム放流計画において計算結果がそのまま採用されるわけではない。シミュレータは自動計算結果をカスタマイズ(手入力で修正し再計算)する機能を有しており、ダム管理者が総合的に判断し放流方法を決定するための資料を提供することができる。
- シミュレータには「訓練モード」を搭載しており、ダム現場のパソコンにおいて、随時、既往出水時を再現し操作体験、練習を積むことができる。
- 本シミュレータは、大規模洪水時におけるダム群連携による防災操作の際の各ダムの放流量調整にあたり、マンパワーでは不可能な多数の放流パターンの試算を高速で実施し技術者に提案する支援ツールである。下流河川氾濫被害の最小化を見据えたダム群の最適操作をシステムティックに遂行する技術は、今後さらに必要性が高まるものと考えられる。本シミュレータが、今後のダム群連携による防災操作の一層の高度化・実用化の推進に役立つツールとなることが期待される。