

大規模洪水時に既存ダムの最大活用を目指す 統合ダム防災支援システムの開発

高橋 陽一

近年多発する豪雨災害を踏まえ、ダムによる洪水調節効果の最大化を目指して、第2期SIPの課題「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」の中で、京都大学防災研究所、日本気象協会、水資源機構の三者が協働してスーパー台風被害軽減システム—統合ダム防災支援システムの開発に取り組んでいる。本稿では長時間アンサンブル降雨予測を活用した最適事前放流予測モデルおよびダム群連携最適操作シミュレータを開発し、ダム下流域の被害軽減を目指す取り組みを紹介する。

キーワード：スーパー台風、長時間アンサンブル降雨予測、事前放流、ダム群連携最適操作シミュレータ、ダム防災支援システム

1. はじめに

近年、平成30年7月豪雨、令和元年台風19号、令和2年7月豪雨など、広域の豪雨災害が毎年のように発生している。IPCC第5次報告書等によれば、気候変動によって激しい降雨の頻度が今後さらに増加することが指摘されている。このような豪雨によって、治水を目的とするダムにおいては、洪水調節容量を使い切ると予測され放流量を流入量に等しくする異常洪水時防災操作（いわゆる緊急放流）に移行するダムが増えている。平成30年7月豪雨では西日本を中心に8ダム、令和元年台風19号では東日本を中心に6ダム

で異常洪水時防災操作が行われた（図-1）。

平成30年7月豪雨におけるダムの状況を受けて国土交通省は、同年9月に「異常洪水の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会」¹⁾を立ち上げ、11月に対策の基本方針として3項目、①ハード対策とソフト対策の一体的推進、②利水容量の治水活用など流域内で連携した対策、③ダムの操作や防災情報の共有と避難行動への結びつけ、をとりまとめた。

これに前後して平成30年8月から第2期SIP（戦略的イノベーション創造プログラム、平成30年度～令和4年度）が動き出した。その課題の一つ「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」²⁾のサブ課題「スー

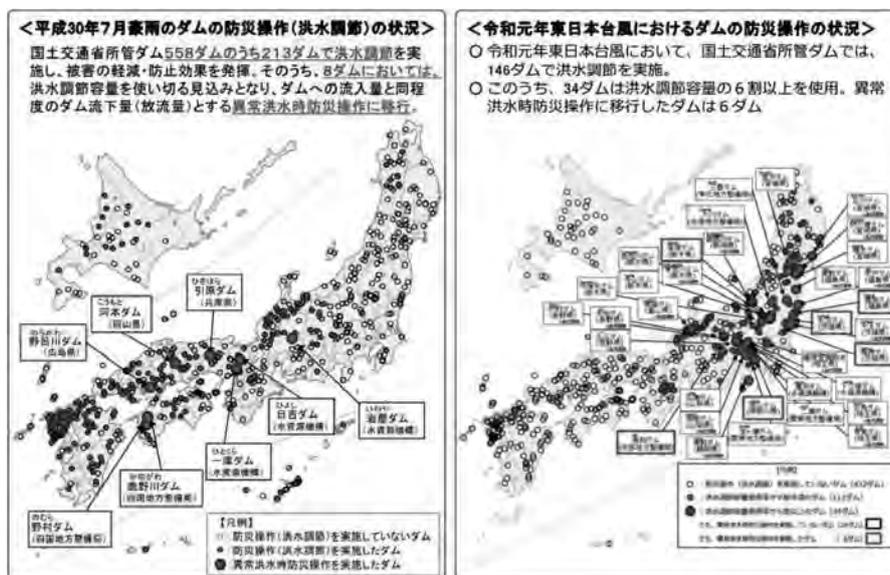


図-1 H30.7 豪雨, R1 台風 19号におけるダム操作 (国土交通省資料より)

「パー台風被害予測システムの開発」がある。この課題の一部として、京都大学防災研究所、(一財)日本気象協会、(独法)水資源機構の三者のチームが採択され、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」に取り組んでいる。

その後、令和元年10月の台風19号を経験して、同年12月に「既存ダムの洪水調節機能の強化に向けた基本方針」(令和元年12月12日 既存ダムの洪水調節機能強化に向けた検討会議、官邸・政策会議)³⁾が策定され、利水ダムも含めて洪水調節機能の強化が強力に推進されることとなった。これを受けて国土交通省は令和2年4月に、国土交通省所管ダム及び河川法第26条の許可を受けて設置された利水ダムを対象とする「事前放流ガイドライン」⁴⁾を定め、河川管理者と利水ダムも含めたすべてのダム管理者及び関係利水者との治水協定の締結、河川管理者とダム管理者との間の情報網の整備、等を推進している。ダムの防災操作における事前放流とは、大規模な洪水が予想される場合に、本来は利水目的で貯水しておくべき容量を一時的に目的変更し、あらかじめダムの貯水位を低下させて洪水を貯留可能な容量を拡大して確保するものである(図-2)。

この事前放流ガイドラインでは、降雨予測に原則として気象庁の数値予報モデルGSMガイダンス(84時間)、MSMガイダンス(39時間)を活用し、3日前からの事前放流の実施判断を求めている。しかしながら、これによれば事前放流を実施できる期間が3日以内に限定される上、数値予報が大きめの予測なのか小さめの予測なのかわからず、降雨量が想定よりも少なかった場合の利水容量が回復しないリスクや、逆に想定よりも多かった場合の洪水調節容量が不足するリスクの両面の不確実性が常に残り、ダム管理者の判断や操作が難しい課題がある。開発する統合ダム防災支援システムは、このような不確実性が存在することを前提に、それでも、より早い時点からの効果的な事前放流等の防災操作を開始するための支援を行う仕組みを目指しており、

これらの課題の解決につながるものと考えている。

2. 統合ダム防災支援システムの概要

昨年の台風19号において利根川水系渡良瀬川上流の草木ダムは、台風による大規模な洪水に備えて洪水調節容量2000万 m^3 に加えて利水容量約1500万 m^3 の事前放流を行い、水位を低下させて貯留容量を追加的に確保した(図-3)。事前放流を行わなかった場合、異常洪水時防災操作が必要となる貯水位を超えていたと推定され、事前放流が大きな効果を発揮した一例である⁵⁾。

事前放流を積極的に実施したダムがある一方で、事前放流を実施しなかったために異常洪水時防災操作に至ったダムやその可能性のあったダムが多数存在した。近年の洪水で異常洪水時防災操作に至ったダムは相当雨量(洪水調節容量÷集水面積)が小さい(概ね100mm以下)傾向にあることがわかっている(図-4)。事前放流は、この相当雨量を一時的に増やして洪水調節能力を向上させる方策であり、例えば、草木ダム(流域面積:254 km^2)の場合、相当雨量が79mm(=2000万 m^3 /254 km^2)から138mm(3500万 m^3 /254 km^2)に増加させて洪水対応を行うことができた。

こうした事前放流による個々のダムの洪水調節機能の強化には、降雨予測精度の向上が必須であり、精度の高い降雨予測情報に基づいて、より早い時点から貯水位低下操作を行うことが望ましい。その際に欠かせないのは、洪水後にいかに確実に利水容量が回復できるかを見極めることである。さらに、流域に複数のダムがある場合には、これらを協働させて、流域全体の治水機能を高めるための連携操作を行うことが重要である。

このような背景を受けて、現在、三者で研究開発を進めている統合ダム防災支援システムは、ダムの防災操作に有効な降雨予測を実用化し、最適な事前放流と複数ダムの連携活用を実現することを目的とするものであ

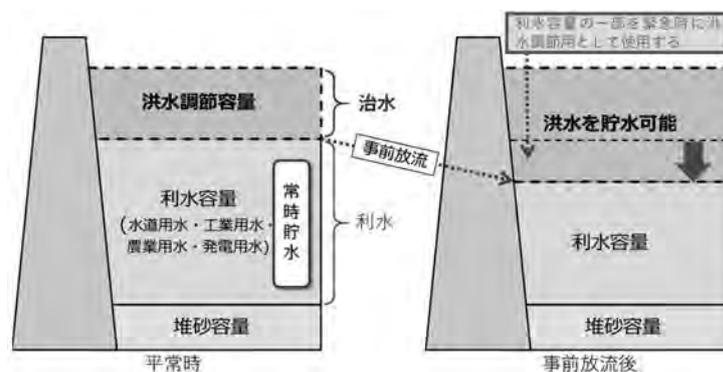
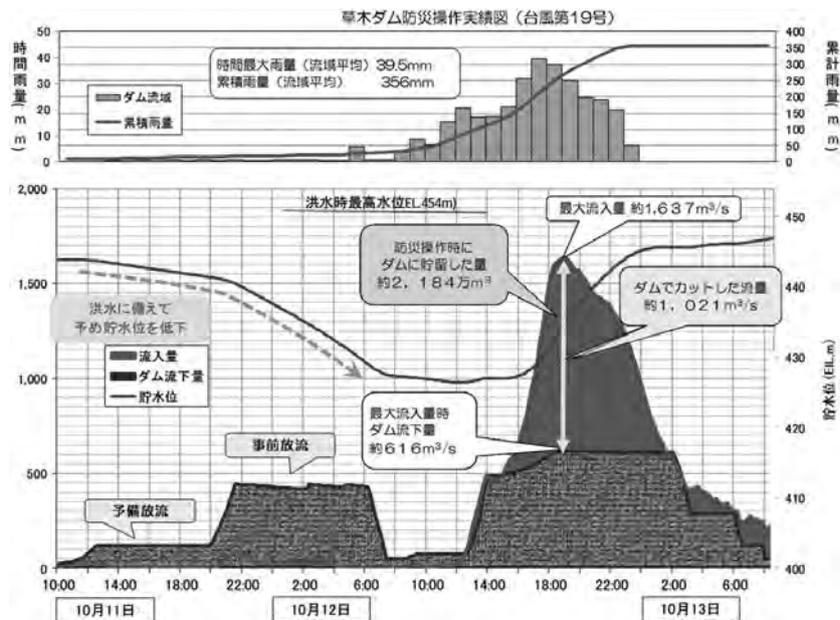
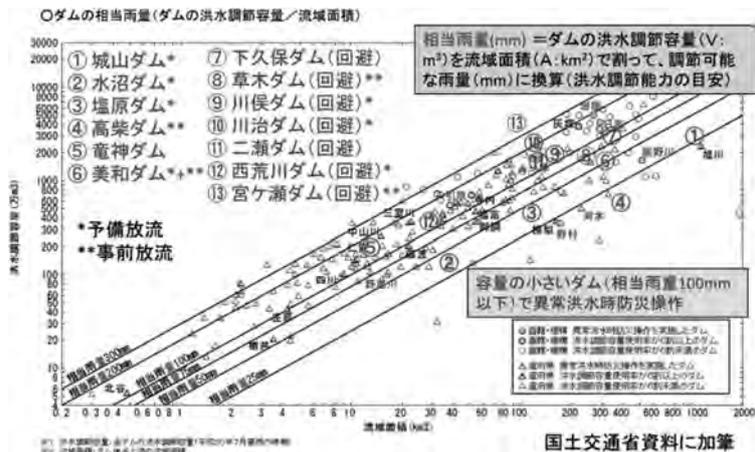


図-2 事前放流概念図



図一三 R1 台風 19 号における草木ダムの防災操作（草木ダム資料に加筆）



図一四 ダムの相当雨量と R1 台風 19 号の対応（国土交通省資料に加筆）

り、①高解像度の長時間アンサンブル降雨予測の実用化、②①を活用した最適な事前放流予測モデルの開発、③②も取り込んだ流域内の複数ダムを連携活用するダム操作支援システムの開発、の3つの柱から構成される。

(1) 長時間アンサンブル降雨予測システムの開発

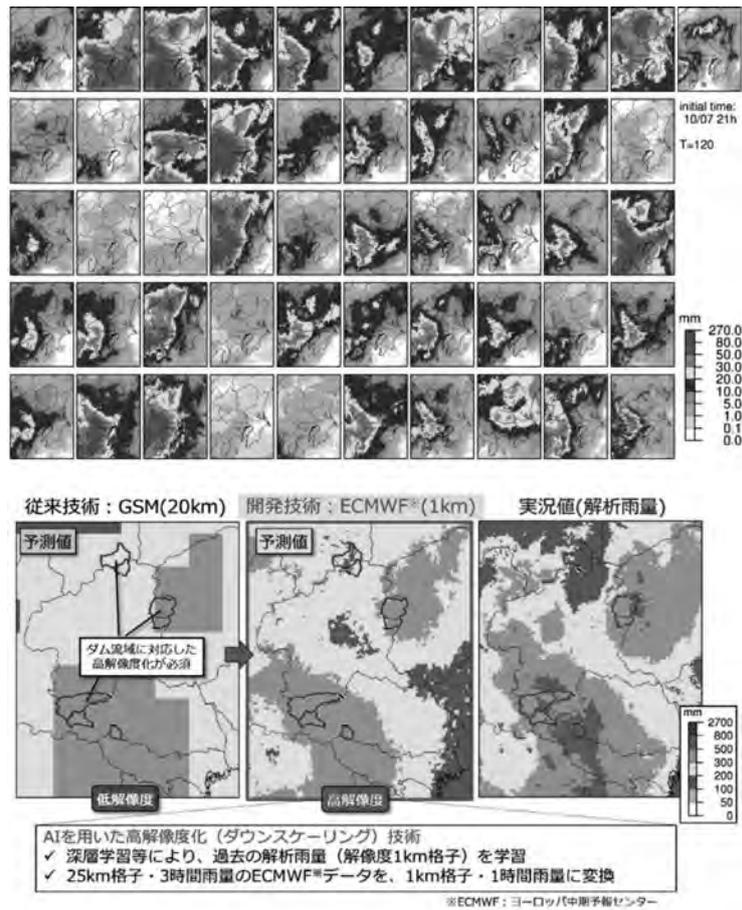
アンサンブル予報とは、初期値をわずかにずらす（摂動を与える）ことによって多数の数値予測を行うもので、多数のデータセットが存在するため予測の幅を確率的に表示することが可能で、実際の現象はおそらくその幅の中に納まるであろうと予想できる。近年、世界各国で研究開発され実用化が図られてきており、気象庁においても 39 時間のメソアンサンブル降雨予報 (MEPS; 21 メンバ) の運用・提供が令和元年 6 月 27 日から開始されている。

本研究開発では、より長時間の精度の高い予測を目

指し、運用実績の長い欧州中期予報センター (ECMWF) のアンサンブル降雨予報を活用することとした。この予報からは 51 メンバ・15 日先までの予報が得られる。ただしこれはメッシュの大きさが 25 km 格子で、我が国のダムの一般的な集水域面積と比べると降雨分布の特徴が表せないものとなっている。また雨量の時間解像度が 3 時間ということも、時々刻々と変化する洪水に対応してダム操作を行うには解像度が粗い。これをダム流域の降雨予測に使えるように、AI を用いたアンサンブル降雨予測の時空間ダウンスケージング手法⁶⁾を開発し、1 km 格子・1 時間雨量に高解像度化を図っている (図一五)。

(2) ダム最適事前放流予測モデルの開発

事前放流は、異常洪水時防災操作が予想されるような洪水に備えてあらかじめ貯水位を低下させて容量を



図—5 アンサンブル降雨予測事例(51メンバ)とダウンスケーリング技術

確保するものであるが、これは利水のために貯留した水を放流することにより確保するものであるため、利水者にとっては洪水後に貯水位が回復するか否かが重要な関心事である。事前放流の実施を判断する時点で回復可能性が精度よく予測できていれば、利水者の理解も得られやすい。

台風等による大規模豪雨の継続時間は長いもので数日かかる場合もあるので、回復可能性を早期に把握するには洪水継続時間をすべて見通すことのできる長時間の降雨予測が必要とされる。事前放流ガイドラインでは、気象庁のGSMガイダンス(84時間)、MSMガイダンス(39時間)の予測を使用することを基本としており、洪水の終わりまで早期に見通すには十分とは言えない。そのためダム最適事前放流予測モデルではECMWFの15日先までの降雨予測を活用する。

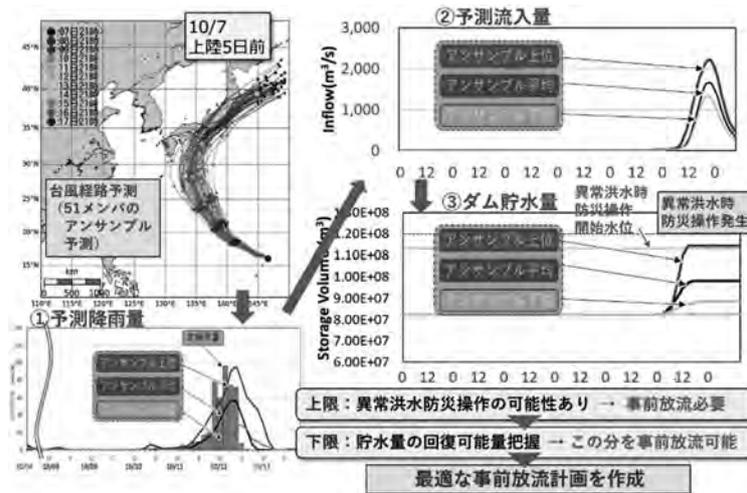
また、現在、一般的にダムの操作予測で用いられる降雨予測は、確定的な1本の降雨予測であるため、それが実際より上振れしているのか下振れしているのかわからず、予測更新ごとの変動も大きいのが課題である。これに対しアンサンブル降雨予測は、可能性のある降雨量を、その変動幅とともに示すことができ、これを降雨—流出モデルに与えてダムへの流入量を予測

することで事前放流の判断へ活用することができる。

事前放流の実施にアンサンブル降雨予測を活用する基本的な考え方は次の通りである(図—6)。すなわち、ECMWFの降雨予測51メンバそれぞれに対して流出モデルを用いてダムの流入量予測を行えば、51メンバそれぞれに対応したダム操作予測を行うことができる。このうち予測流入量の大きいメンバ(上位予測)は、ダムが異常洪水時防災操作(いわゆる緊急放流)に至る可能性を示すので、事前放流を行って容量を増強させる必要性を早期に判断し、準備することができる。次に、メンバのうち予測流入量の小さいメンバ(下位予測)は、もしも台風がコースを外れた場合でも、少なくともこのぐらひはダムに流入する水量、すなわち貯水容量の回復可能性が得られ、事前放流の目標水位が定められる。これは利水者にとって大きな安心材料となる。

これらの上位予測、下位予測の活用にあたっては、最上位、最下位の予測だけを取り上げては極端な判断になる可能性があるため、例えば上位、下位のそれぞれ5メンバの平均を上位平均、下位平均とするなどの工夫が必要であり、ダムごとの特性に応じた適切な適用手法を設定する必要がある。

このようにダム最適事前放流予測モデルでは、15



図一六 事前放流へのアンサンブル降雨予測の活用

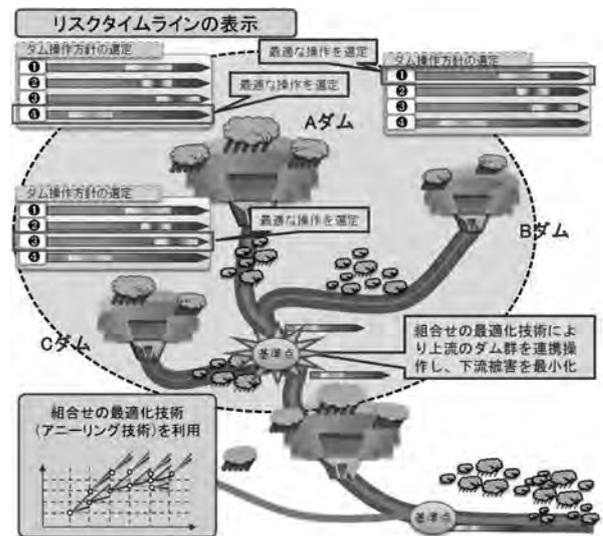
日先までの長時間アンサンブル降雨予測を活用して、「いつから」「どのくらいの放流量を」「いつまで」という最適な事前放流計画を提示できる手法を構築し、降雨予測の更新の度に逐次最適化を図って、利水リスクを増大させず、一方で治水効果を最大化させることを目指している。

(3) ダム群連携最適操作シミュレータの開発

ダムは、基本的にダムごとに操作規則等が定められており、それによって洪水調節操作を行うことが原則である。一方で、流域に複数のダムがある場合、個別ダムでそれぞれ洪水調節操作を行っても、降雨域が偏った場合に、一方のダムは満杯、あるいはそれ以上になるまで水が流入したが、他のダムでは容量に余裕があるなどのアンバランスが起こりうる。このように流域全体を見たときに、全体の洪水調節容量に余裕がある場合は、ダムの洪水調節機能を最大限活用する方策として、複数のダムの貯水量の変化を見ながら、これらを連携して操作することによって、各ダムの洪水調節容量を有効に使う手法が考えられる。

具体的には、例えばA、B、Cの3ダムがある流域において、Aダム流域の降雨が多く、与えられた洪水調節容量を使い切るような状況が予測され、残りのBダム、Cダムではまだ洪水調節容量に余裕があると予測される場合に、Aダムの放流量を少し増加させて異常洪水時防災操作への移行を回避するとともに、Bダム、Cダムの放流量を減少(=貯留量を増加)させて、下流河川の流量も安全な流量範囲に収めるように操作するものである(図一七)。

複数ダムの連携操作を最適化するには、被害最小化を目的関数として、操作規則や操作要領など定められたルールに加えて、各ダムの任意の操作を組み合わせ



図一七 ダム群連携最適操作シミュレータのイメージ

て最適解を求める必要があり、一定時間毎に降雨予測が更新される度に膨大な組合せの中から最適な操作の組合せを迅速に抽出することが必要である。

そこで、これを実現させるために、近年発達著しい高速演算・組合せ最適化技術を導入したダム群連携最適操作シミュレータの開発を行っている。具体的には既に開発・活用されている量子ビットを用いたアニーリング技術を使うこととし、これによれば一京通り以上の組合せを1秒で計算可能とされている。

対象ダムが多くなるほどより複雑な計算が必要となるが、それらも瞬時に計算してダム群の最適な操作計画を提示して、流域の河川管理者の判断や各ダム管理者の操作計画の立案を支援するシステムである。

3. 開発状況と今後の展望

長時間アンサンブル降雨予測システムは、令和元年

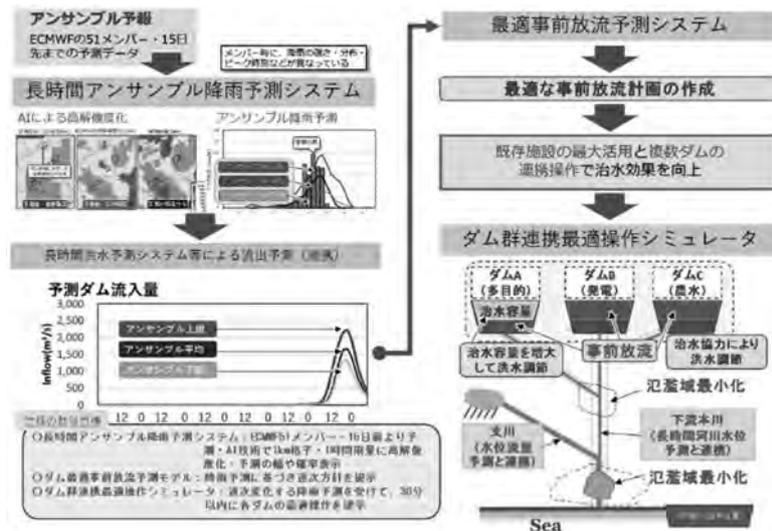


図-8 統合ダム防災支援システム

度にプロトタイプを構築し、新成羽川ダム（高梁川水系，利水ダム）などで試行運用を行っている。現在，プロトタイプのさらなる高精度化を進めるとともに，一庫ダム（淀川水系，多目的ダム）など他の水系への展開を進めているところである。また，メッシュの大きさ5 kmのモデルについては，流域設定をすれば全国でサービス提供可能な状況であり，すでに千葉県など複数のダムでサービスを開始している。

ダム最適事前放流予測モデルは新成羽川ダムなどをモデルに，ダム群連携操作シミュレータは木津川3ダム（淀川水系，多目的ダム）をモデルにプロトタイプを構築中で，今年の洪水期に試行運用を開始し，検証および改良を進めることとしている。なお，本システムはスーパー台風による豪雨を対象に開発を始めたが，近年は前線性豪雨による被害も急増しており，前線性豪雨へのシステムの適用性を高めることも新たな課題となってきた。

長時間アンサンブル降雨予測を用いて行う事前放流の副次的な効果として，発電施設を有するダムでは，早期に事前放流を開始して，発電施設を利用しながら順次貯水位を低下させることにより，貯留水を無駄にすることなく有効に活用することができる。また出水後の貯水位低下操作においても，その後の降雨状況が15日先まで見通せるので，降雨がなければ同様に発電施設もフル活用してエネルギー回収を図りながら洪水調節容量の回復を図ることが期待できる。

長時間アンサンブル降雨予測を使って予測の更新毎に操作を最適化するという操作方法は“Operation by Rule”から“Operation by Analysis”への転換ともいえる。気象予測技術が日々向上する時代にあって，科学的な予測に基づくダム操作がより重要になること

は間違いがない。そのため社会実装するにあたっては，技術的な開発のほか，このような操作方法をどのようにダムの操作要領等に位置づけるかも重要であり，並行して検討しているところである。

今後は，長時間アンサンブル降雨予測，ダム最適事前放流予測モデル，ダム群連携最適操作シミュレータを一体的に運用する統合ダム防災支援システム（図-8）に発展させるとともに，SIP「スーパー台風被害予測システムの開発」で別グループが研究開発を進めている河川の長時間洪水予測システム等とも連携して，ダムの洪水調節効果を最大に発揮させて下流域の氾濫被害の最小化を図り，“逃げ遅れゼロ”，“経済早期復旧”の実現を目指す。

J|C|MA

《参考文献等》

- 1) 国土交通省ウェブページ (https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chousetsu_kentoukai/index.html)
- 2) 内閣府ウェブページ (https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/9_resilience.pdf)
- 3) 官邸ウェブページ (https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kisondam_kouzuichousetsu/)
- 4) 国土交通省ウェブページ (<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001341537.pdf>)
- 5) 草木ダムウェブページ (https://www.water.go.jp/honsya/honsya/kisya/pdf/2019/10/191013_kusaki.pdf?20191101)
- 6) 山本・増田，深層学習による降雨予測の時空間方向へのダウンスケールリング手法の開発，河川技術論文集，第25巻 P.97，2019

【筆者紹介】

高橋 陽一（たかはし よういち）
（独水資源機構 総合技術センター
所長

