

長時間アンサンブル降雨予測を活用したハイブリッドダムの推進



河川政策グループ
主任研究員

藤津 亜弥子



河川政策グループ
首席研究員

遠藤 武志



河川政策グループ
上席主任研究員

宮本 和樹

1 はじめに

気候変動に伴い頻発・激甚化する水害等に対し、「流域治水」の考え方にも基づいてダム再生などの対策をより一層加速するとともに、集水域から氾濫域にわたる流域のあらゆる関係者で水災害対策を推進することとなっている。

また、我が国では、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする脱炭素社会の実現を目指すこと¹⁾が示されている。ダムの高度運用（既存ダムにおける事前放流やハイブリッドダム^{*1}等、運用の工夫によりダムの機能を強化する取組み）により水力エネルギーを徹底的に活用することで、脱炭素社会への更なる貢献が期待される。

上記の背景の中、流域治水施策の一環として事前放流が制度化されるとともに、ハイブリッドダムの取組みも始まったところである。ダムの高度運用で使われる予測降雨量は、現在、MSM^{*2}やGSM^{*3}等の情報がある。しかし、近年、確率論的な予測を行う長時間のアンサンブル降雨予測を用いたダムの高度運用の研究が進められており、降雨予測技術の進展に応じた更なるダムの高度運用の取組みの可能性が広がっている。

降雨予測技術の研究として、SIP^{*4}第2期（以下、SIP第2期）では、長時間アンサンブル降雨予測を活用した治水と利水（水力発電）のWIN-WINを目指す技術開発が行われた。2023年からは、BRIDGE^{*5}施策の一つである「ダム運用高度化による流域治水能力向上と再生可能エネルギー増強の加速化プロジェクト」として、SIP第2期で開発された技術を都道府県の管理ダムや発電ダム（揚水発電を含む）等へ展開するとともに、技術の標準仕様の策定等を行うための技術開発を進めている。

なお、アンサンブル予測とは、数値予測で用いる初期値にはそもそも誤差が含まれていることを考慮し、観測誤差などの摂動を与えた初期値の集合（アンサンブル）に対して数値予測を行うものであり、複数の予測データが得られることが特徴である。複数の予測データを使うことで、平均や標準偏差といった統計量を得ることが可能であり、平均的な精度を向上させたり、

予測のぶれ幅を把握したりすることが可能となる。

※1 ハイブリッドダム：治水機能の強化、水力発電の増強のため、気象予測も活用し、ダムの容量等の共有化など、ダムをさらに活用する取組みのこと。

※2 MSM（エムエスエム）：気象庁の降雨予測。予測時間：39時間先、予報単位：1時間、更新頻度：3時間毎、格子間隔：5km。

※3 GSM（ジーエスエム）：気象庁の降雨予測。予測時間：84時間先、予報単位：1時間、更新頻度：6時間毎、格子間隔：20km。

※4 SIP（エスアイピー）：戦略的イノベーション創造プログラム。科学技術イノベーション実現のために創設した国家プロジェクト。第2期は2018～2022年の5年間実施された。本稿の成果は、SIP第2期の課題の一つ「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」の中の研究開発課題名「スーパー台風被害予測システム」のサブテーマ「河川・ダムの長時間洪水予測・防災支援システムの開発」の中の研究開発として行われた。

※5 BRIDGE（ブリッジ）：研究開発とSociety5.0との橋渡しプログラム。科学技術・イノベーション政策の方針に基づき、総合科学技術・イノベーション会議の司令塔機能を生かし各省庁の研究開発等のイノベーション化を推進する。

1.1 BRIDGEでの狙い

これまでの研究成果として、ダムの高度運用を図る上で、長時間アンサンブル降雨予測をダムの操作に使うことによるメリットがあることは明確となっている。その一方で、これらの技術を社会実装していくためには、長時間アンサンブル降雨予測を活用したダム操作の（1）適用するフェーズを増やす、（2）適用するダムタイプを増やす、ための研究を行うとともに、（3）実際のダムで運用するためのルール化に関する検討が必要であり、これらの課題に対する技術開発をBRIDGEで行っている。本稿では、このうちの特に（1）、（3）を中心にこれまでに得られた成果を報告する。

1.2 SIP 第2期の成果

BRIDGE での取組みの前に、SIP 第2期の成果を述べる。

SIP 第2期では、①治水容量のさらなる確保と②水位運用の工夫による発電量増大の技術開発を行った。①により流域治水に貢献し（治水 WIN）、②によりハイブリッドダム（治水 WIN 及び発電 WIN）に貢献する技術基盤が構築された。

まず、①について説明する。大きな洪水に備えてより治水容量を確保するために実施する事前放流について、長時間アンサンブル降雨予測を活用することにより、実施できる時間を従前より長く確保できないか研究を行った。従来の事前放流の実施可能時間は、気象庁の配信する 1-3 日先の予測をベースとしていたため、十分に確保できないという課題があった。そのため、事前放流により確保できる治水容量のボリュームは限定的であった。SIP 第2期では、長時間アンサンブル降雨予測を用いることで、約 1 週間前からの事前放流を実現させる技術開発の成果が得られた（治水 WIN）。

次に、②について説明する。水位運用について、多目的ダムでは、治水のためには容量を空けておく方が治水効果を発揮で

きる一方で、利水（都市用水、農業用水）や発電のためにはできるだけ水位を高く維持しておきたい。利水専用の電力ダムなどでは治水目的はないため、通常はできるだけ高い水位で貯留している。事前放流の取組みは、当初は国土交通省が管理する多目的ダムのみで実施されていた。しかし、近年の豪雨災害、令和元年東日本台風を受けて策定された「事前放流ガイドライン（以下、現行ガイドライン）」²⁾において、利水専用ダムにも事前放流の取組みが拡大されることになった。SIP 第2期の成果から、長時間アンサンブル降雨予測は、事前放流において利水回復リスクを最小化しながら治水機能を最大化する目的にとどまらず、無効放流^{※6}を減少させて水力発電量を増大させるためにも有効（発電 WIN）な予測であることが明確である。これは、カーボンニュートラルの実現のためにも期待される技術である。（図 1）

※6 無効放流：水力エネルギーの有効活用という視点に立った場合、発電施設を通さずに放流すること。水力発電に利用するのに、利用せずに放流すること。

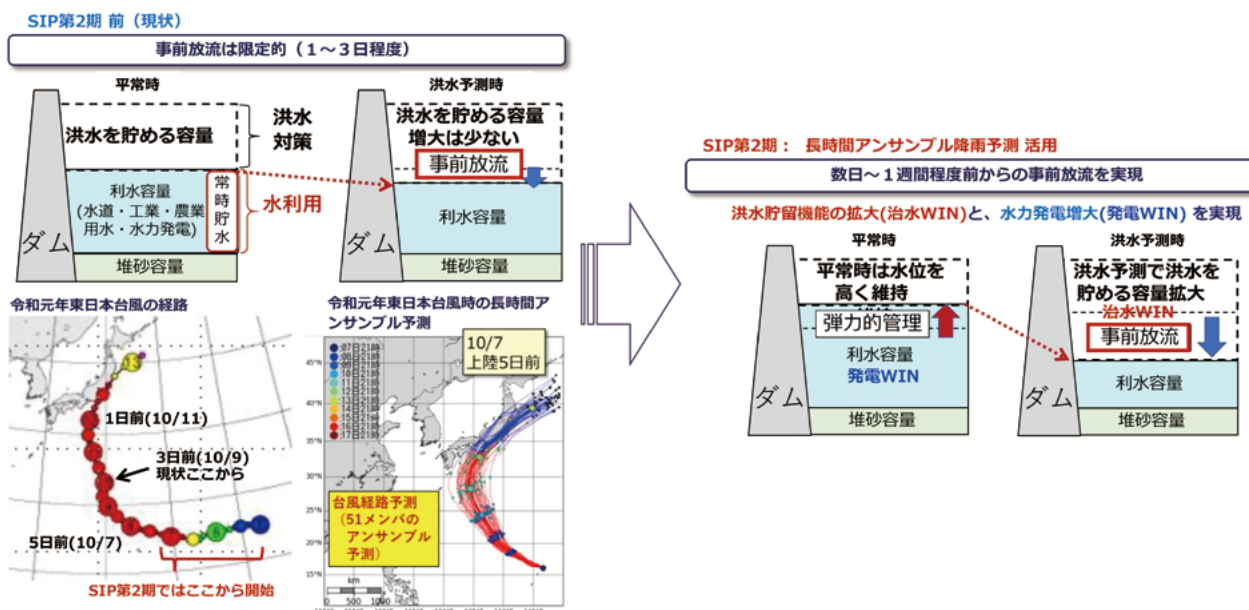


図1 SIP 第2期の成果

2 適用するダム操作のフェーズを増やす

国土交通省によるダム操作の高度化に関する取組みは、現在事前放流のフェーズが中心であり、一部の先駆的なダムでは後期放流のフェーズで試行されている。本研究では、洪水期の一連のダムの操作フェーズを5段階に分類し、それぞれのフェーズ毎の長時間アンサンブル降雨予測の活用方法を検討した。図2のように、洪水期のダムの一連の操作を分類・定義することにより、各段階での長時間アンサンブル降雨予測の適用性やルール化を体系的に分析・検討することが可能となる。

本分類に基づいた各段階でのダム運用について、長時間アンサンブル降雨予測を表1に示す方針のもと活用することを提案する。

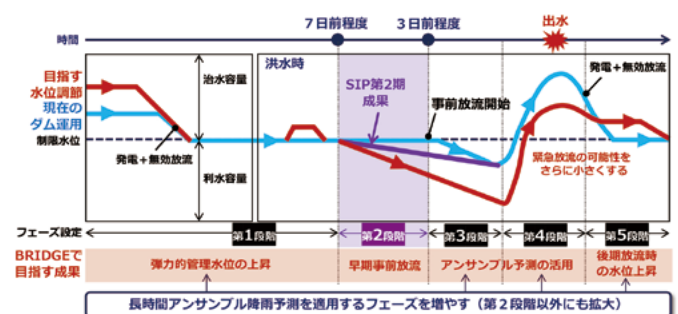


図2 適用するダム操作のフェーズを増やす

表1 第1～第5段階の定義及び方針

段階	定義 (該当するダム操作)	ダム運用の方針
第1	小規模出水の一時的な貯留、弾力的管理、高めの水位運用、融雪出水時	降雨がしばらくの間予測されていない時には高い水位を維持し、発電量増大を目指す。
第2	早期（3日前以前）の事前放流、予備放流	事前放流量等を増やして治水容量を確保し、治水効果を増大させる。発電放流量を利用し、増電につなげる。
第3	予備放流、事前放流	
第4	洪水調節	緊急放流の可能性を小さくする。
第5	後期放流	しばらくの間次の洪水は見込まれないという予測を基に、高い水位を維持し緩やかに放流することで、発電放流量を利用し、増電につなげる。

第1～第5段階のうち、本稿では、既往研究により長時間アンサンブル降雨予測の社会実装へ向けた研究がより進められている第2及び第5段階における検討結果を述べる。検討は、関東地方のAダム及びBダムで行った。

2.1 第2段階（早期の事前放流開始）の検討

第2段階において、早期の事前放流の開始による発電量増大と治水容量の確保について検討を行った。検討には、関東地方のAダムにおける令和元年東日本台風でのデータを用いた。

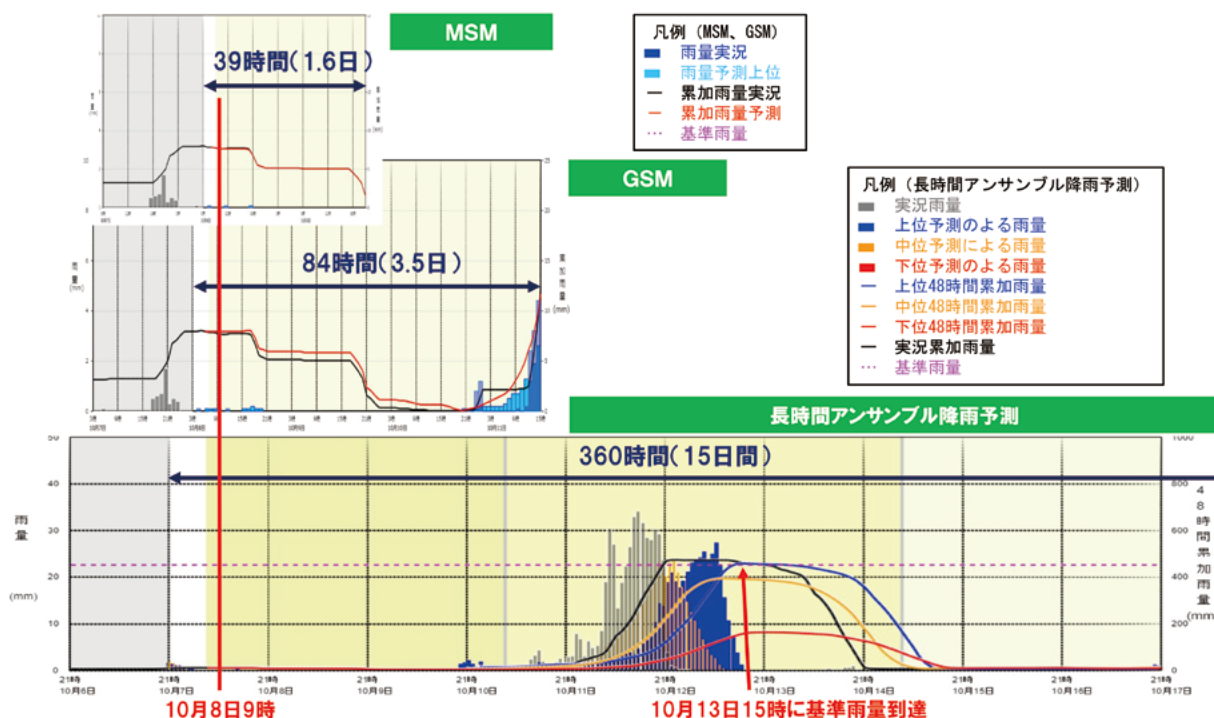


図3 第2段階での予測情報（Aダム）

次に、第2段階において、早期の事前放流を開始することにより、水位をどこまで低下させることができるのか、検証を行った。検証には、Bダムにおける2022年9月23日の降雨量（実績の引き延ばし）及びダム水位（アンサンブル予測を用いた場合と用いない場合）のデータを用いた。

図4に示す通り、現行ガイドラインに基づき、GSMが事前放流基準雨量に達した9月21日11時から放流設備を最大限に使って事前放流を実施しても、ダム水位は目標水位に到達し

2019年10月8日9時時点でのMSM及びGSMによる降雨予測と長時間アンサンブル降雨予測の情報を図3に示す。この図から、長時間アンサンブルの上位予測^{*7}が10月13日15時頃に基準雨量に達していることがわかる（観測値が基準雨量に達したのは10月12日21時頃）。この時点において、GSMからはこのような長時間の降雨を見通す情報は得られない。

この場合、次の操作を行うことで、発電量を増大しながら治水容量を確保する確実性を高めることが可能と言える。

- 長時間アンサンブル降雨予測の上位予測が基準雨量に達していることをトリガーとして、放流を開始する。
- 降雨開始まで4日あることから、発電放流管を利用して水位低下を行う。
- 水位の回復を考慮して、放流量は下位予測^{*8}の降雨相当量を目途とする。³⁾

※7 上位予測：アンサンブルによる複数の予測データのうち雨量の大きい予測を意味する。

※8 下位予測：アンサンブルによる複数の予測データのうち雨量の小さい予測を意味する。

ない。このように、現行ガイドラインでは短時間で目標水位まで下げる必要があるため、無効放流となっている。しかし、長時間アンサンブル降雨予測を活用すると13日前から放流を開始することが可能となり、目標水位まで水位を低下させることがより確実になる可能性が高くなる。さらに、放流を洪水吐からではなく発電放流管から行うことにより増電も可能となる。

以上2つの事例から、第2段階においては、長時間アンサ

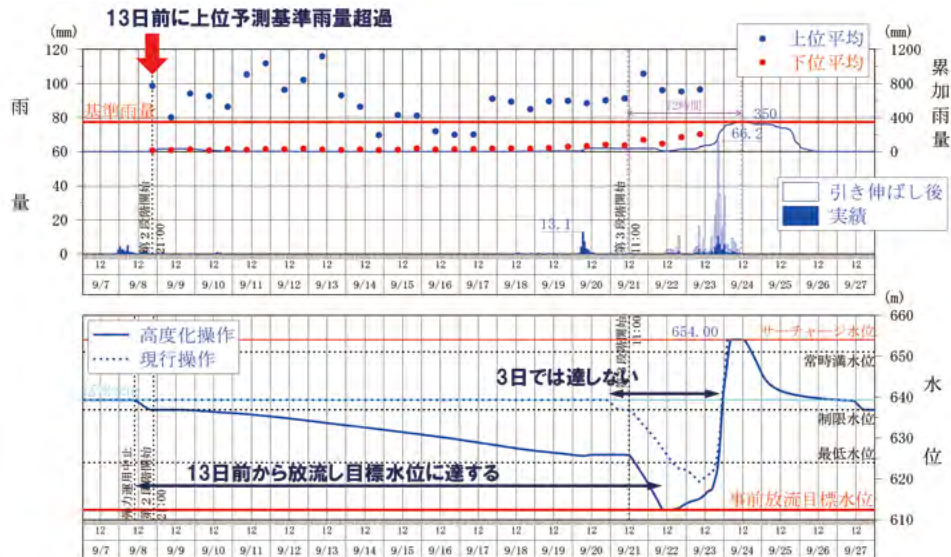


図4 第2段階での長時間アンサンブル降雨予測の活用効果 (Bダム)

ンブル降雨予測の活用により従前より長時間のリードタイムの確保が可能となり、次の2点のメリットが確認された。

- メリット1：早期の事前放流により余裕を持って水位低下を行い、治水効果が向上する
- メリット2：事前放流時に貯留水を有効活用することにより、増電が期待される

2.2 第5段階（後期放流時の貯留水の有効活用）の検討

次に、第5段階において、後期放流時の貯留水を増電に利用できないか検討を行った。検討には、Aダムにおける令和元年東日本台風のデータを用いた。

現行の標準操作ルール⁴⁾では、次の洪水に備え、洪水後は速やかに水位を下げるのが望ましいとされている。そのため、短期間で水位を下げる必要があり無効放流となっている。一方、水力発電は水の位置エネルギー（ダムの水位）を利用して発電機を動かすため、ダムの水位が高い方が発電には有効である。

2019年10月13日9時時点でのMSM及びGSMによる降雨予測と、長時間アンサンブル降雨予測の情報を図5に示す。長時間アンサンブル降雨予測より、洪水後15日間は次の洪水の見込みがない（上位予測でも時間雨量5mm以下）という情報が得られる。この情報により、次の洪水に備え洪水吐からの放流により早急に水位を低下させる必要はない、という判断が可能となる。その結果、操作としては発電放流管のみを使って緩やかに水位を低下させることが可能となり、増電に寄与する。

なお、降雨情報については、現在でも週間天気予報などにより降雨の可能性が小さい情報は得られる。しかし、長時間アンサンブル降雨予測を活用することにより、定量的に降雨がないことを確認した上で発電放流管のみの放流に切り替えた方が、ダム操作上は安全側の判断となる。操作ルールへの反映に際しては、週間天気予報のような定性的な情報ではなく、長時間アンサンブル降雨予測のような定量的な情報であることが望ましいと考える。

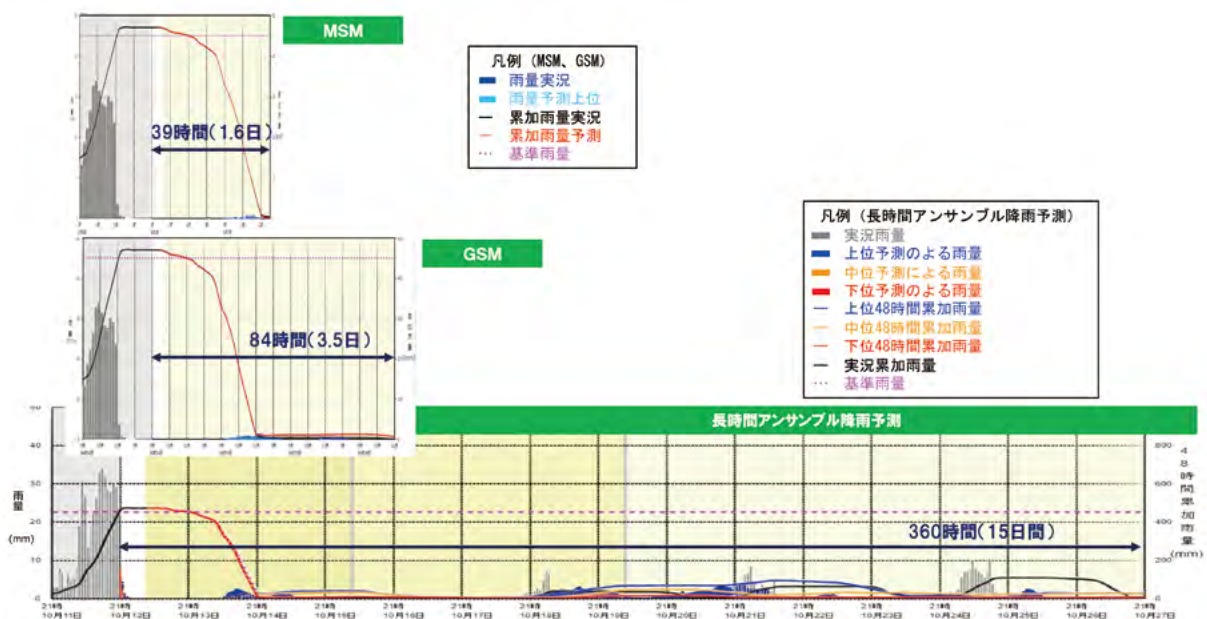


図5 第5段階での予測情報 (Aダム)

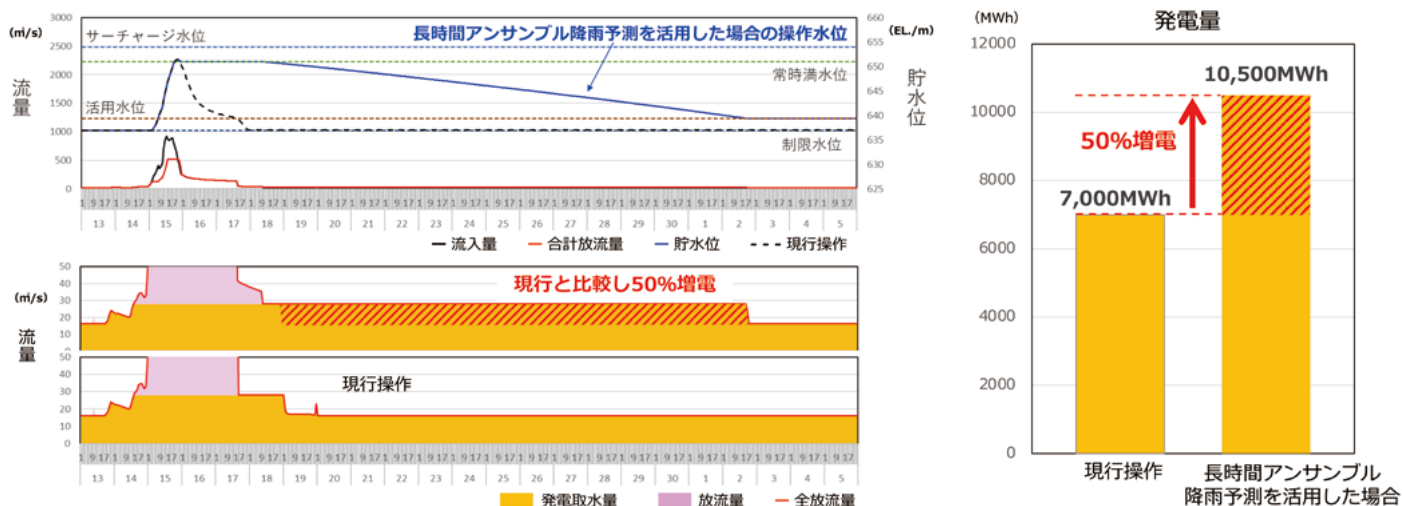


図6 第5段階での長時間アンサンブル降雨予測の活用効果（Bダム）

さらに、第5段階において、後期放流時のダムの水位を従前より高く維持することが可能となることにより、どの程度の増電効果があるか試算を行った。試算には、Bダムにおける河川計画の対象となる実績洪水を用いた。

その結果、図6に示すように、発電による取水量が約50%増加する効果が確認された。併せて、次の操作を実施することにより、現行の操作より増電が可能となる。

- ・ピーク流量到達後、貯水位が常時満水位まで低下するまでは現行の操作（ピーク流量到達時に貯水位が常時満水位以下の場合は、その時点まで）を実施する。
- ・その後、流入量が発電最大使用水量となるまで流入量＝放流量を維持する。
- ・流入量が発電最大使用水量以下となり、貯水位が活用水位まで低下する間は発電最大使用水量で放流する。^{3) 5)}

以上2つの事例から、第5段階においては、長時間アンサンブル降雨予測より洪水後しばらくの間、降雨がないことを確認できる場合、発電放流管を使って放流できるため従前よりゆっくりと水位低下させることができる、つまり洪水による貯留水により、従前より高い水位を維持することが可能となり、次のメリットが確認された。

メリット3：後期放流時の貯留水の有効活用による増電が期待される

今後、第1から第5段階までの各フェーズの研究を進め、上述のメリットに加え、次の2点のメリットについても確認する。

メリット4：第1段階において平常時の貯水位上昇により貯留水の有効活用による増電が期待される

メリット5：第4及び第5段階において先の予測が見えることで、二山洪水に対する治水対応が向上する

並行して、想定される次の2点のリスクについて、長時間アンサンブル降雨予測情報の使い方の工夫や、複数のアンサン

ブル予測の活用（フュージョンアンサンブル）によって対処する可能性について検討を行っていく予定である。

リスク1：早期の事前放流に対する利水リスク（空振り時の容量回復）

リスク2：第1及び第5段階において高い水位で運用していた場合の治水リスク（見逃し時の水位上昇）

3 適用するためにルール化する

長時間アンサンブル降雨予測は、「予測の不確実性」をダム操作に活用しようとする、ダム管理にパラダイムシフトをもたらすもの⁶⁾である。長時間アンサンブル降雨予測を使うことは、ダムの高度運用を図る上でメリットがあることが明確である一方、ダム管理者による実際のダムの操作は、河川法に基づき策定される操作規則や操作細則、操作規程など（以下、操作ルール）に基づいて行う必要がある。

操作ルールに基づかない操作、つまり、法制度に基づかない操作を行った結果、洪水の被害を助長するような事態になれば、ダムの管理責任を問われるおそれがある。長時間アンサンブル降雨予測を用いたダム操作を実装するためには、降雨予測技術の進展といった技術的観点だけでなく、ダム操作と法制度との整合性をとるといった観点からの検討も必要である。

また、現在のダム操作の考え方は、様々な文書に分散して示されている（発電に資する操作やダム下流の河川環境に配慮した操作を行うための通達等）。一方、ダム管理者に向けては、長時間アンサンブル降雨予測の活用を各文書上整理し、ダム操作の各段階を統合した1つの文書を示すことが望ましいと考える。（図7、図8）そのためBRIDGEでは、全国のダムにおいて長時間アンサンブル降雨予測の活用が進むよう、「長時間アンサンブル降雨予測を活用したダム操作ガイドライン（案）」（以下、ダム操作ガイドライン（案））の策定を進めべく、現在は骨子を作成している。（図7）

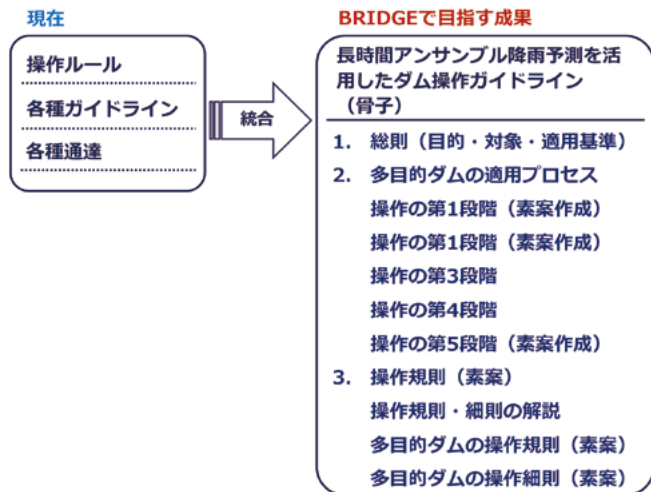


図7 ダム操作ガイドライン（案）

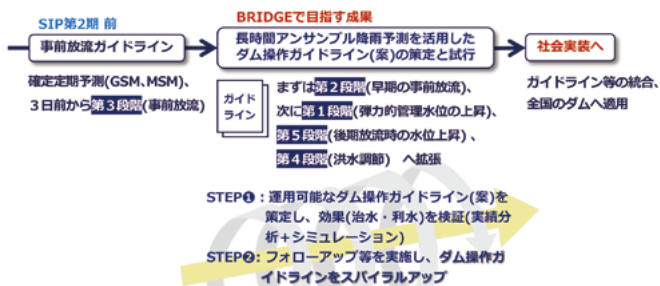


図8 社会実装に向けたルール化

理責任と降雨予測技術との関係を整理しながら、ダム操作ガイドライン（案）の策定を進めていきたい。

上記と並行して、都道府県管理の多目的ダム、発電ダム及び水道ダムへと長時間アンサンブル降雨予測を活用するダムの対象を拡大していく予定である。これらの種類のダムは、長時間アンサンブル降雨予測はダム操作の参考情報としての活用にとどまっているケースが大半であるのが現状である。

これらの課題をクリアにしていくことにより、洪水調節機能の拡大と水力発電の増大の実装を進める。これらの推進は、流域治水やカーボンニュートラルの実現、しいてはハイブリッドダムの推進に大きく貢献すると考える。

BRIDGEの最終的な成果の目標は、ダム操作ガイドライン（案）を国土交通省に提案することである。提案した案を国土交通省がダム操作ガイドラインとして発出し、全国のダムに普及展開を図っていく。BRIDGEとしては、ダム操作ガイドライン（案）の作成と並行して、全国のダムへの普及展開を念頭に、引き続き国土交通省やダム管理者との意見交換、啓発活動を行う予定である。これらを通して得られた現場の声をダム操作ガイドライン（案）に反映して、より適用を確実なものにしていく。

参考文献

- 1) 総理官邸：第二百四回国会における菅内閣総理大臣施政方針演説、2021.1.18
- 2) 国土交通省：事前放流ガイドライン <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001341537.pdf>, 令和2年4月
- 3) 道広有理, 木戸研太郎, 曾田英揮, 角哲也：長時間アンサンブル降雨予測を活用した多目的ダムの高度運用に関する検討, 河川技術論文集, 第29巻, pp. 485-490, 2023.
- 4) 一般財団法人水源地環境センター：ダムの管理 例規集 令和3年版
- 5) 西 琴江, 岡本優希, 角哲也：長時間アンサンブル降雨予測を用いた多目的ダムの後期放流操作に関する研究, 河川技術論文集, 第29巻, pp. 473-478, 2023.
- 6) 角哲也, 加納茂紀, 道広有理：長時間アンサンブル降雨予測を用いたダム操作のパラダイムシフト, 河川, 77巻1号

4 今後の展開

今後、ダム操作ガイドライン（案）の作成を進める上では、ダム操作におけるリスクや責任の観点から、下記事項の考え方を盛り込むべきであると考えている。

- ① どのくらいのリスク（空振り、見逃し）を許容するか（社会的に許容されるか）
- ② 残余のリスクにどのように備えるか
- ③ 被害が出た場合の考え方
- ④ 長時間アンサンブル降雨予測を活用した上で最も合理的な操作をできなかった場合の責任
- ⑤ 早期の事前放流に対する利水リスク（空振り時の容量回復）
- ⑥ 第1及び第5段階における高い水位で運用した場合の治水リスク（見逃し時の水位上昇）

上記のような観点については、科学的・合理的に説明が可能な客観性の高いルールを、社会的正当性をもった手続きに基づいて定めておく必要がある。これにより、上記①～⑥に対応していくことが可能であると考ええる。

客観性の高いルールについては、2024年度に試行を開始するダムにおける操作ルールの検証及び分析も併せて、ダムの管