

事前放流操作へのアンサンブル予測雨量の活用の可能性

工藤 俊・川崎将生

1. はじめに

気候変動に伴い豪雨の規模が増大する可能性が指摘される中、適応策として既存防災施設の能力をより効率的に発揮することの重要性が示唆されており^{1),2)}、既設のダムにおいては洪水調節操作方法を高度化して従来以上に洪水調節効果を発揮することが求められている。これを実現するための一つの方策として、予測雨量の活用が挙げられる。つまり、これまでは現時刻のダムの貯水位及び流入量に応じて放流量を決定しているのに対し、これらに加えて現時点以降の流入量やダム下流の河川の状況も考慮して放流量を決定しようとするものである。

予測雨量を活用したダム操作の検討はこれまで多く実施されており³⁾、予測雨量を活用した放流量の決定方法が提案されてきた。また、予測雨量は必ず大小の誤差を含むものであることから、予測の幅を考慮する操作方法も検討されてきた。例えば、猪股ら⁴⁾は、アンサンブル予測雨量を活用した洪水調節操作を試行し、操作規則に基づく操作と比較して下流基準地点におけるピーク水位をより低くできるシミュレーション事例を示した。

本報では、事前放流操作（洪水の発生が予測される場合に利水のための貯水量の一部を洪水調節前に放流し、洪水調節に用いることのできる空き容量を一時的に増やす操作）に着目し、アンサンブル予測雨量を活用した意思決定手法を検討する。さらに、検討した手法に基づく操作シミュレーションを実施し、既存の操作方法に基づく操作との比較結果を示し、アンサンブル予測雨量を活用したダム操作の効果を展望する。

2. アンサンブル予測雨量を活用した事前放流の意思決定手法

2.1 アンサンブル予測雨量

アンサンブル予測雨量の計算には、気象予測の

ための非静力学モデルであるWRF (Weather Research and Forecasting Model)を用い、初期値・境界値には気象庁全球モデル(GSM)の84時間予測を用いた。ここで、今回使用したGSM (全球域)の空間解像度は約50kmであり、WRFによる計算の空間解像度は5kmとした。また、GSMの予測が更新される6時間毎に計算を実施した。すなわち、6時間毎に予測先行時間84時間のアンサンブル予測雨量を得た。より具体的な計算方法は猪股ら⁴⁾に示されるとおりであり、これを今回の対象ダムが存する流域を包含する領域に適用して計算した。

図-1は計算結果の一例であり、対象ダムの上流域における流域平均累積雨量の時系列変化を示す。さらに観測雨量として、国土交通省解析雨量も併せて示す。この例では、アンサンブル予測雨量の平均値は観測雨量に比べて過小であることがわかる。一方、アンサンブルメンバーの幅の範囲に実績雨量が入っていることが確認できる。このようにアンサンブルの平均値が観測と差異が見られる場合でも、予測の平均値のみで判断せずに、各メンバーから得られる複数の予測結果から、確率的に最も効果が高いと考えられる事前放流操作を意思決定する手法を考える。

2.2 事前放流の意思決定手法

事前放流を実施する際は、もともと利水のために貯留している貯水量を放流することから、洪水後には利水容量を回復させる必要がある。よって、

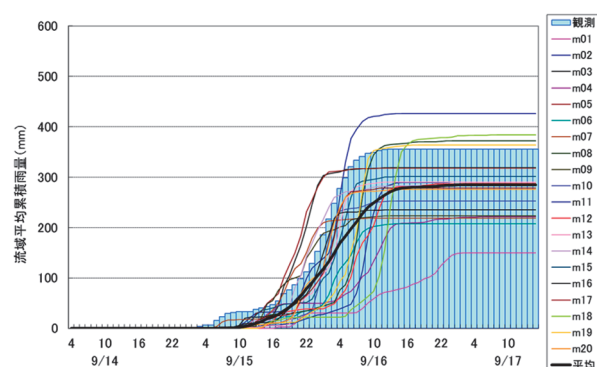


図-1 アンサンブル予測雨量の計算結果
(対象ダムにおける流域平均累積雨量)

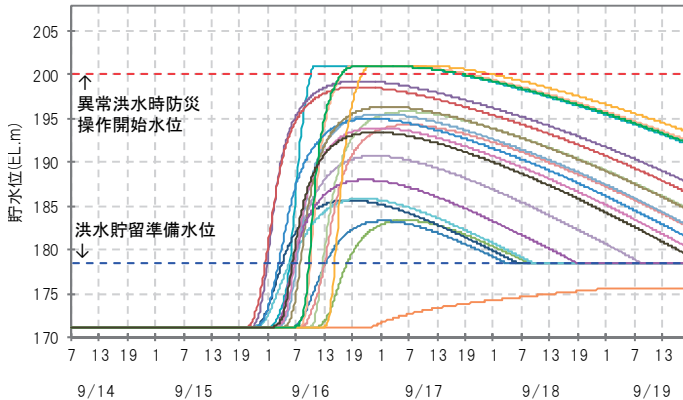


図-2 アンサンブル予測雨量を用いた貯水位の計算例
(計算時刻を9/14 3:00とし、予測先行時間63時間の予測雨量を入力した結果)

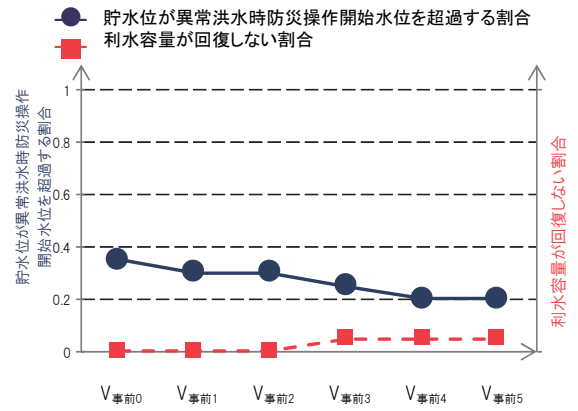


図-3 事前放流量と各指標の関係

流入量を過大に予測して多くの貯水量を事前に放流した場合、利水容量を回復できない可能性があり、洪水後の利水にとってリスクとなる。一方、当然ながら事前放流する貯水量が少ない場合には、事前放流による洪水調節効果が十分増加しない。すなわち、事前放流する貯水量には、治水と利水それぞれの観点からのトレードオフの関係が存在する。そのため、両者のリスクを総合的に勘案した上で最適な事前放流量を決定する必要がある。

今回は、治水面のリスクとして「貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過する」、利水面のリスクとして「利水容量が回復しない」という指標を考える。図-2は、アンサンブル予測雨量を、降雨流出計算でダムへの流入量に変換した上で、貯水位を計算したものの一例である。ここで、図-2における計算開始時の貯水位は洪水貯留準備水位より低くしており、これは事前放流による貯水位低下を考慮するためである。図-2の例では不特定容量の全量を事前放流した場合の貯水位を計算開始時の貯水位としている。20のアンサンブルメンバーのうち、貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過するアンサンブル数が4、利水容量が回復しない(洪水貯留準備水位に達しない)アンサンブル数が1であったため、全アンサンブル数に対するそれぞれの割合は0.2と0.05となる。

図-3は、上記と同様の計算を複数の事前放流量に対して実施し、結果を整理したものである。今回は、事前放流量無し($V_{事前0}$)から不特定容量全量($V_{事前5}$)までを6段階で区切った。図-3の $V_{事前5}$ に対するそれぞれの割合は図-2に示した計算結果から算出されたものである。

実際の事前放流量の判断方法は各ダムの個別の状況によって様々であると考えられるが、今回は図-3を用いて以下の手順により事前放流量を設定した。

1. 利水容量が回復しない割合が最も小さい事前放流量を抽出。(図-3では $V_{事前0} \sim V_{事前2}$ の3つ)
2. 1.に該当する事前放流量が複数ある場合は、その中で貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過する割合が最も小さい事前放流量を抽出。(図-3では $V_{事前1}$ と $V_{事前2}$ の2つ)
3. 2.に該当する事前放流量が複数ある場合は、利水面の安全側をより重視する観点から、事前放流量が最も小さいものを選択。(図-3では $V_{事前1}$ に決定される)

3. 事前放流シミュレーション

前章で示した方法及び回復可能水位テーブル⁵⁾を用いて事前放流量を決定し、これら2つの方法で事前放流を実施した場合のシミュレーションを行う。その上で、操作規則に基づく操作のシミュレーションと比較した結果を示す。

3.1 アンサンブル予測雨量に基づく事前放流操作のシミュレーション手順

シミュレーション開始時の貯水位は洪水貯留準備水位とし、対象ダムの実績流入量及び決定した放流量から貯水位の時間的変化を計算する。放流量の決定方法は次のとおりである。すなわち、アンサンブル予測雨量を得る時刻で、前章で示した手順で各指標の割合を計算して事前放流量を決定し、それに応じた目標水位までの放流を、巡視・点検等の放流前作業に要する時間を考慮した上で行う。また、アンサンブル予測雨量が更新されるタイミング(今回は6時間毎)で各指標の割合を

累積雨量ランク(mm)	予測雨量ランク(mm/33hr)									
	30以下	60以下	90以下	120以下	150以下	180以下	210以下	240以下	270以下	300以下
0	事前放流しない									
20以下	事前放流しない									
40以下	事前放流しない									
60以下	事前放流しない									
80以下	事前放流しない									
100以下	事前放流しない									178.4m
120以下	174.7m					173.3m				
140以下	174.7m					173.3m				
160以下	174.7m					173.3m				
180以下	174.7m					173.3m				
200以下	171.1m									
200より大きい	171.1m									

図-4 対象ダムにおける回復可能水位テーブル

再度計算した上で更新し、事前放流量が変更される場合にはそれに応じて目標水位を更新する。これを、洪水調節開始まで繰り返し、洪水調節開始後は操作規則に基づく放流量によりシミュレーションを実施する。

3.2 回復可能水位テーブルに基づく事前放流操作

回復可能水位テーブルとは、任意の時点におけるそれまでの実績雨量と、その時点で発表されている予測雨量の組合せに対する事前放流の目標水位を示した表であり、図-4は今回の対象ダムにおける作成結果を示す。ここで、目標水位は、任意の実績雨量と予測雨量の組合せを経験した過去の出水のうち、最小の貯留量を記録した出水を採用し、その貯留量を洪水貯留準備水位に相当する貯水容量から差し引き、算出された容量を貯水位に変換したものである。すなわち、任意の実績雨量と予測雨量の組合せにおいて、過去の経験から利水容量の回復にとって最も安全側となる目標水位を表すものである。使用方法は、例えば洪水調節開始前のある時間における累積雨量が90mm、その時点で発表されている予測雨量が170mmの場合、178.4mを目標水位として事前放流を実施するというものである。予測雨量には気象庁のMSM（空間解像度：約5km）を用いており、これは3時間毎に配信されるため、3時間毎に目標水位の更新を行いながら事前放流シミュレーションを実施した。

3.3 計算結果

以下の3種類のシミュレーション結果を示す。

1. 操作規則に基づく操作
2. 回復可能水位テーブルに基づく操作
3. アンサンブル予測雨量に基づく操作

図-5は上述した3種類のシミュレーションの結果を示しており、対象ダムの貯水位と流入量及び放流量の時系列変化である。いずれのケースでも貯水位が異常洪水時防災操作開始水位まで到達し

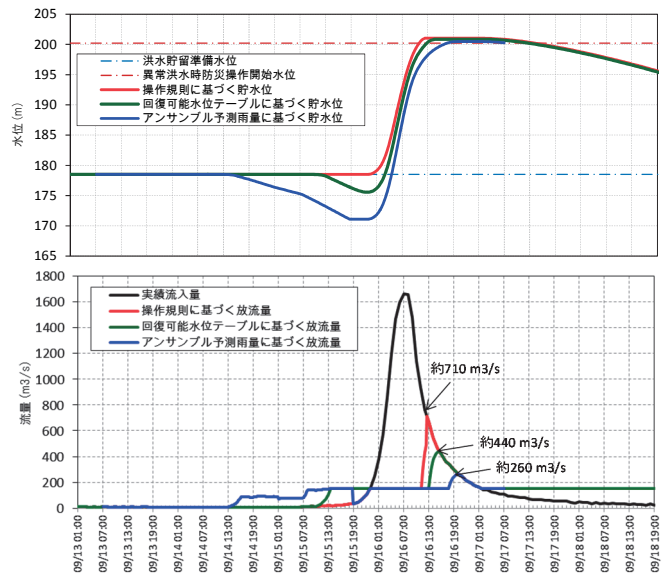


図-5 対象ダムの貯水位及び流入量・放流量の比較

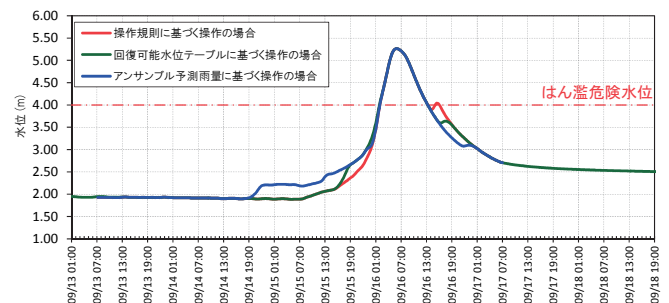


図-6 下流の基準地点の水位の比較

ているものの、回復可能水位テーブルに基づく操作では事前放流によって約2.9m貯水位を下げている。また、約2時間異常洪水時防災操作への移行を遅らせ、ピーク放流量を約270m³/s低減させる計算結果となった。さらにアンサンブル予測雨量に基づく操作では、事前放流によって約7.4m貯水位を下げている。操作規則に基づく操作と比べて異常洪水時防災操作への移行を約7時間遅らせ、ピーク放流量を約450m³/s低減させる計算結果となった。

また、今回は回復可能水位テーブルに基づく操作よりも、アンサンブル予測雨量に基づく操作の方が事前放流における貯水位の低下幅が大きい結

果となった。この要因は、目標水位と事前放流開始時刻の違いであり、今回はアンサンブル予測雨量に基づく操作の方が目標水位は低く、事前放流開始時刻は早かった。

回復可能水位テーブルの特徴として、実績雨量と予測雨量の組合せに対する経験上最小の貯留量を事前放流量に設定するため、過去に特異に小さい貯留量を記録した場合は、貯水位の低下幅は小さくなり、事前放流を実施するタイミングも遅くなる傾向がある。一方、アンサンブル予測雨量を活用する場合は、過去の事例によらず、当該洪水の流入量を直接予測しながら目標水位を判断するため、適切なアンサンブル予測雨量によって適切な流入量が得られれば、より効率的に事前放流操作を実施できる。ただし、今回は限られた検討事例を示しているのみであり、回復可能水位テーブルに基づく操作とアンサンブル予測雨量に基づく操作の性能を一般化して評価するものではないことに留意する必要がある。

図-6は対象ダムの下流の基準地点における水位を示しており、いずれのケースにおいても対象ダムで異常洪水時防災操作を実施したことに起因して、ハイドログラフの逓減部において水位が再上昇している。水位約4mの鎖線は当該地点のはん濫危険水位を表しており、操作規則に基づく操作では水位の再上昇時にこれを超える計算結果となった。一方、回復可能水位テーブルに基づく操作及びアンサンブル予測雨量に基づく操作では、水位再上昇時にはん濫危険水位を超過しない結果となり、特にアンサンブル予測雨量に基づく操作では、再上昇時の水位が大幅に低くなっている。

4. まとめ

アンサンブル予測雨量を用いることで、予測の幅を考慮して事前放流操作を意思決定する方法と、それに基づく事前放流操作のシミュレーション結果を示した。シミュレーションからは、アンサンブル予測雨量に基づく操作は、操作規則による操作及び回復可能水位テーブルに基づく操作と比較して、異常洪水時防災操作への移行を遅らせ、下流の基準地点において洪水後期の水位をより低下させる結果が得られた。今回は限られた事例における検討であるため、検討事例数を増やして本手法の適用性を検証していくことが課題である。ま

た、本報文で紹介した比較的予測先行時間の長いアンサンブル降雨予測は、計算コストが非常に高いため、現在の計算機資源で直ちに現業化することは困難である。しかしながら、比較的短時間のアンサンブル降雨予測については、近い将来の現業化が見込まれている。今回用いたような長時間のアンサンブル予測であっても、計算機性能の進展を背景にいずれ現業化が実現すると想定されることから、今回は長時間のアンサンブル予測を活用したダム操作を試行し、その効果を展望したものである。今後は比較的短時間のアンサンブル予測雨量の効果も検討する予定である。また、事前放流のみならず、特別防災操作に着眼した意思決定手法の検討も行い、洪水前から洪水後期までのダム操作全体を対象とした意思決定を支援できる手法として発展させていきたい。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について、2008、
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/index.html
- 2) 社会資本整備審議会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について ～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～、2015、
http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou/index.html
- 3) 例えば、三石真也、尾関敏久、角哲也：WRFによる降雨予測を活用した新たな洪水調節手法の適用性検討、水文・水資源学会誌、第24巻、第2号、pp.110～120、2011
- 4) 猪股広典、川崎将生、後藤祐輔、増田有俊、荒木千博、荒木孝之：アンサンブル予測雨量のダム洪水調節操作への適用に関する研究、水文・水資源学会誌、第28巻、第6号、pp.278～290、2015
- 5) 財団法人ダム水源地環境整備センター：事前放流検討の手引き（1次案）、2005

工藤 俊



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部
水循環研究室 研究官
Shun KUDO

川崎将生



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部
水循環研究室長
Masaki KAWASAKI