

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

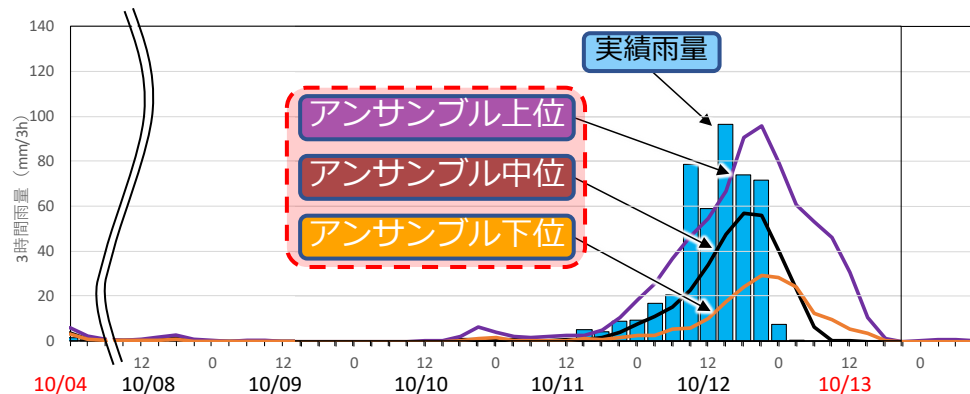
(一財) 日本気象協会	道広 有理
(独) 水資源機構	木戸 研太郎
(独) 水資源機構	曾田 英揮
京都大学 防災研究所	角 哲也

- 平成30年7月豪雨（8ダムで異常洪水時防災操作）、令和元年東日本台風（同6ダム）など、**大規模豪雨時には既存の洪水調節容量だけでは大幅に不足。**
- これを受けて**令和2年4月に事前放流ガイドラインが策定**され、国内のダムはMSM/GSMガイダンスの予測雨量を用いて事前放流の実施を開始。この予測は84時間先までと短いことや、当たり外れの変動が大きいなど、課題もある。
- 筆者らは、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」において、**長時間アンサンブル予測を活用したダムの効率的な運用**を検討してきた。
- 本研究では、予測情報を用いたダムの操作を拡張し、**長時間アンサンブル降雨予測を利用した事前放流～洪水調節～水位回復までの連携操作パターン**を設定し、治水・利水機能を最大化させるための洪水時の一気通貫のダム操作ルールを検討した。

2-1 長時間アンサンブル降雨予測

- ✓ ECMWF（欧州中期予報センター）のアンサンブル予報をベースに時空間方向に高解像度化して利用。**51メンバー・15日先までの長時間アンサンブル降雨予測**を作成。51メンバーは目先の5日間雨量でソートし、上位（1～5位）、中位（6～15位）、下位（47～51位）の3種類の情報に整理。本研究では**10日先までの予測**を利用。
- ✓ ガイダンスによる降雨予測（MSMガイダンスにGSMガイダンスを連結）も並行して活用。

■ 上位・中位・下位の3本線のイメージ

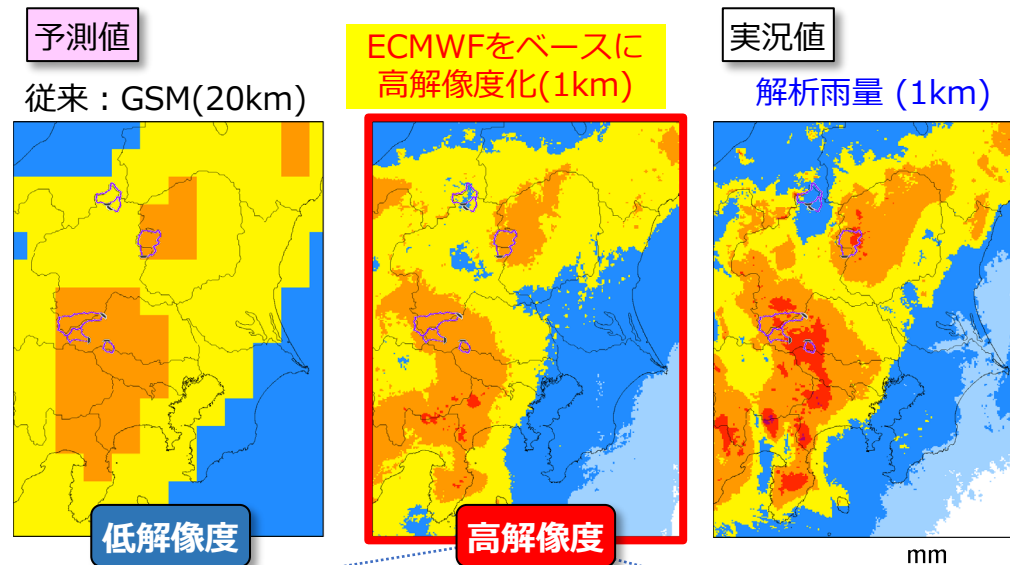


■ 高解像度化の適用例

- 教師データは解析雨量（1kmメッシュ）
- 15日先までの予測データを1時間雨量に変換
- 1km格子に高解像度化（ダウンスケーリング）

台風19号による大雨に対する予測：

<10月10日21時～10月14日9時までの84時間積算雨量>



AIを用いたダウンスケーリング技術

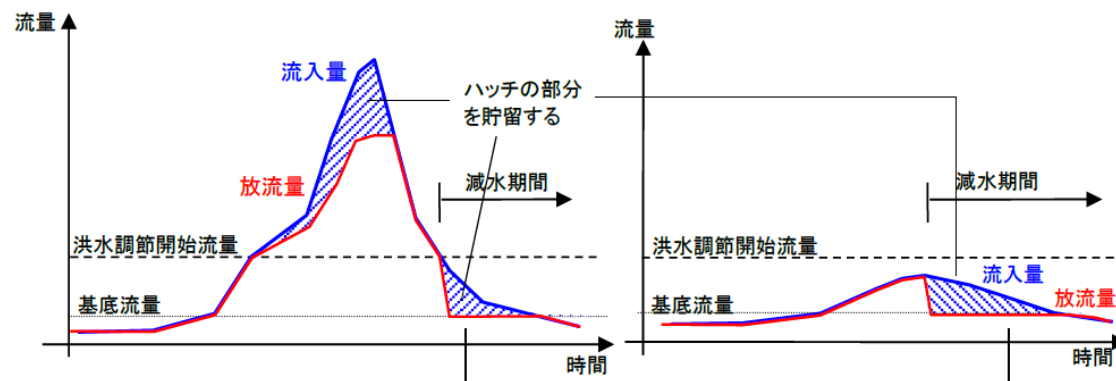
- ✓ 深層学習等により、過去の解析雨量（解像度1km格子）を学習
- ✓ 25km格子・3時間雨量のECMWFデータを、1km格子・1時間雨量に変換

2-2 予測を用いたダム操作の高度化

■ 事前放流：洪水調節容量の増大

- ✓ 基準雨量を上位の予測雨量で超過したら事前放流を行う。
- ✓ 事前放流の目標水位は、下位の予測雨量で流出予測を行って回復可能量を求めて設定。
- ✓ ガイダンス予測が基準を超過したら予測雨量を切替（3時間毎実施判断）
- ✓ 事前放流量は、洪水到達前（洪水流量の50%）までに目標水位になるように逆算。

上位予測で大雨リスクを検知
目標水位は**下位予測**で決めること
で利水リスクを回避



回復可能量の算出方法

■ 後期放流：無効放流の回避

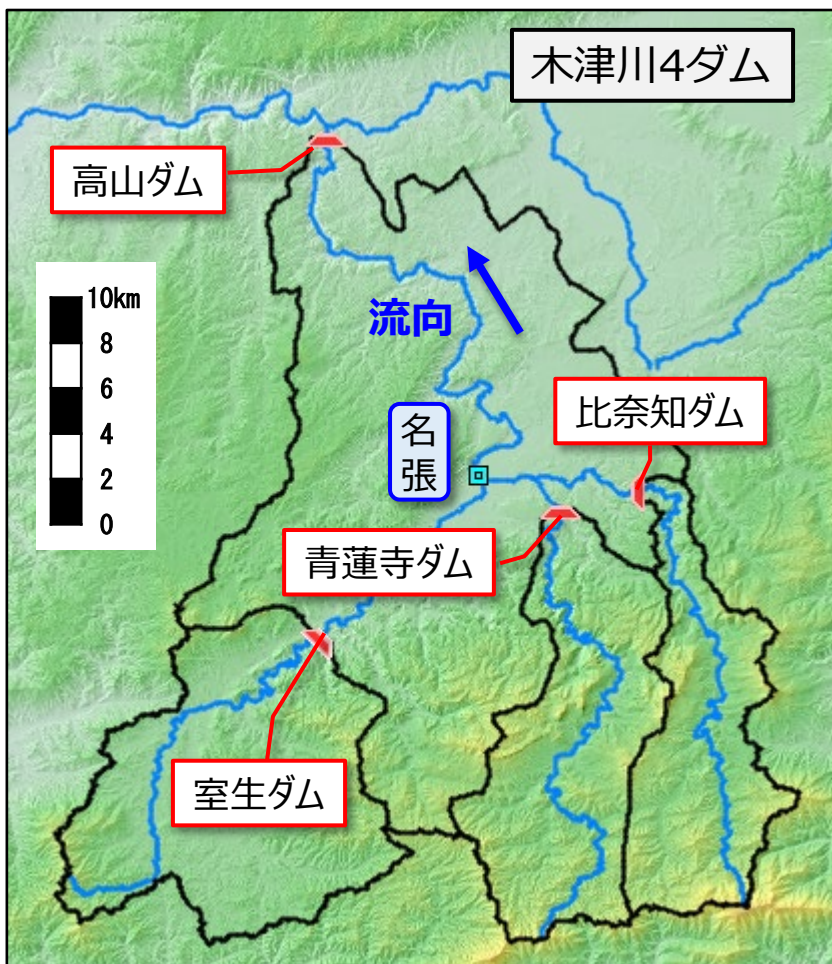
- ✓ 洪水調節終了時点で水位が高い場合は水位低下させる。まとまった降雨が予測されていない場合、利水放流でゆっくり下げる → **ゲート放流の回避 (= 増電)**
- ✓ 水位が低い場合は、降雨予測を確認しながら水位を回復（貯水）する。

長時間予測という特徴を活かして無効放流を回避

3-1 木津川4ダムの流域と諸元

■ 対象流域

高山ダムおよび上流3ダム（室生ダム、青蓮寺ダム、比奈知ダム）を対象にシミュレーション



■ ダム諸元

発電能力がいずれも小さい
利水放流能力も小さく、ゲート放流となる頻度が多い

	流域面積	治水協定 基準雨量	洪水流量	発電放流	利水放流
	km ²	mm/48h	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
室生ダム	136	110	300	—	12
青蓮寺ダム	100	170	450	4.0	33
比奈知ダム	75	200	300	3.7	47
高山ダム	615	130	1300	14.0	28

■ シミュレーション事例

- ✓ 大雨事例として2017年台風第21号。異常洪水時防災操作となるような条件としたかったので、降雨波形を実況・予測ともに1.3倍に引き伸ばした。
→ **引き伸ばし後は全ダムで異常洪水時防災操作**
- ✓ 予測が空振りとなった事例として2020年台風第14号。

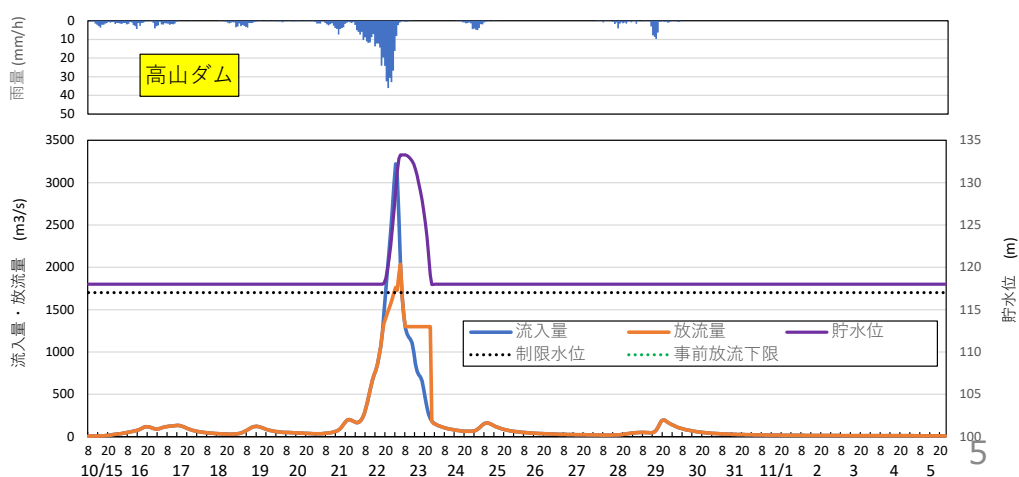
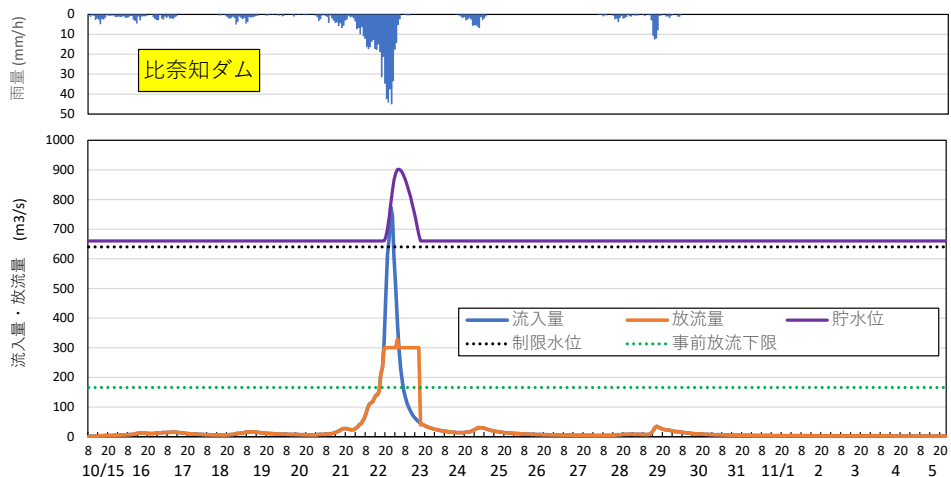
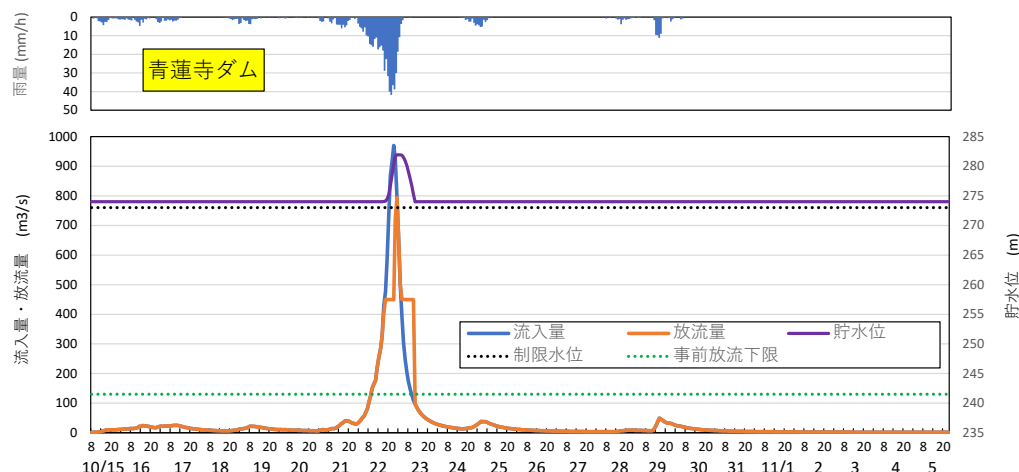
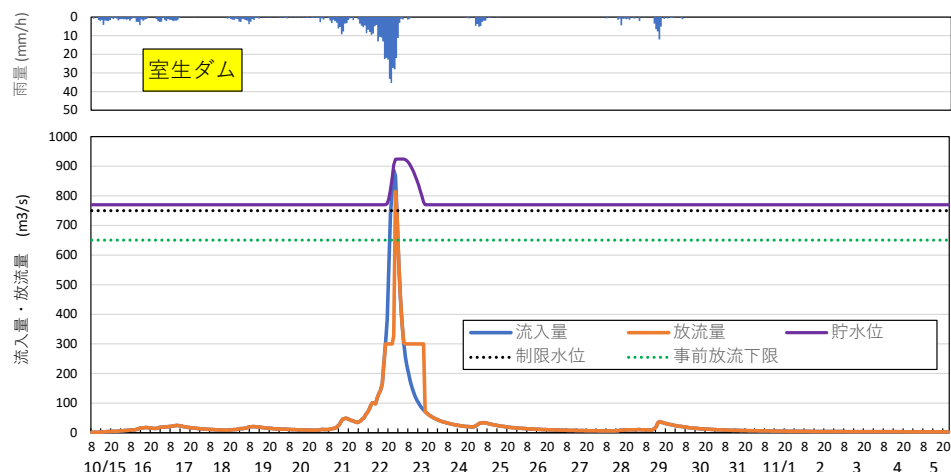
3-2 大雨事例：事前放流なし（本則操作）

■ 予測条件

- ✓ 実際に当時降った雨量（本体降雨）を1.3倍して流出計算を行った
- ✓ 弾力的運用を想定し、開始水位は制限水位+1mとした
- ✓ 洪水後は速やかに水位を下げる

■ 結果

- ✓ 全ダムで異常洪水時防災操作となっている
- ✓ この洪水波形を用いて、事前放流の効果を検討する



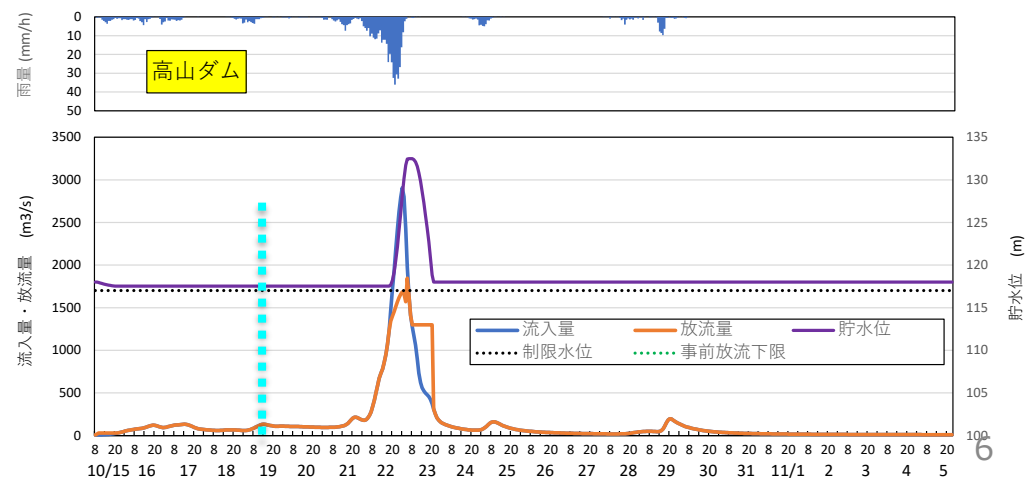
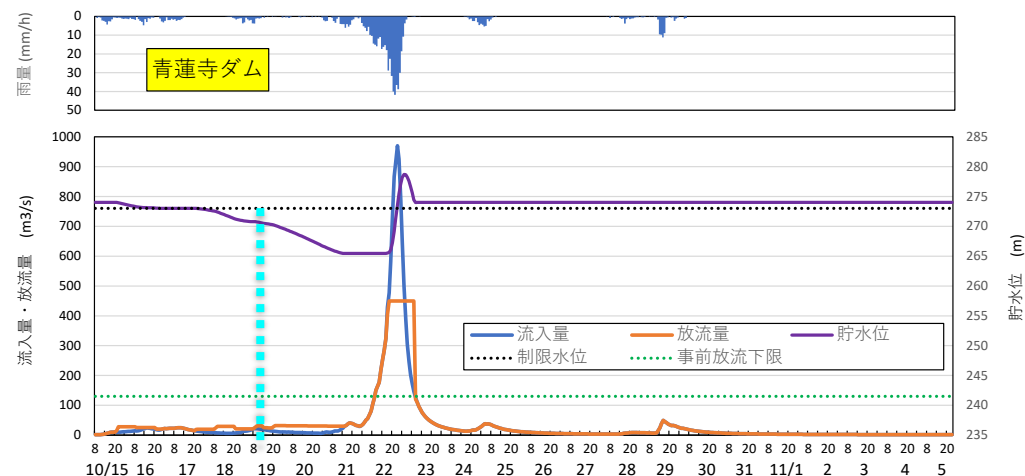
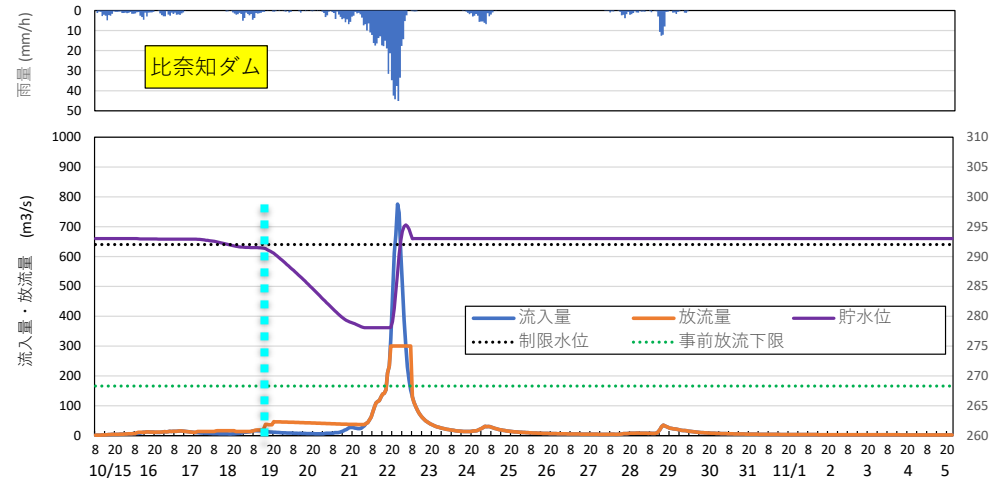
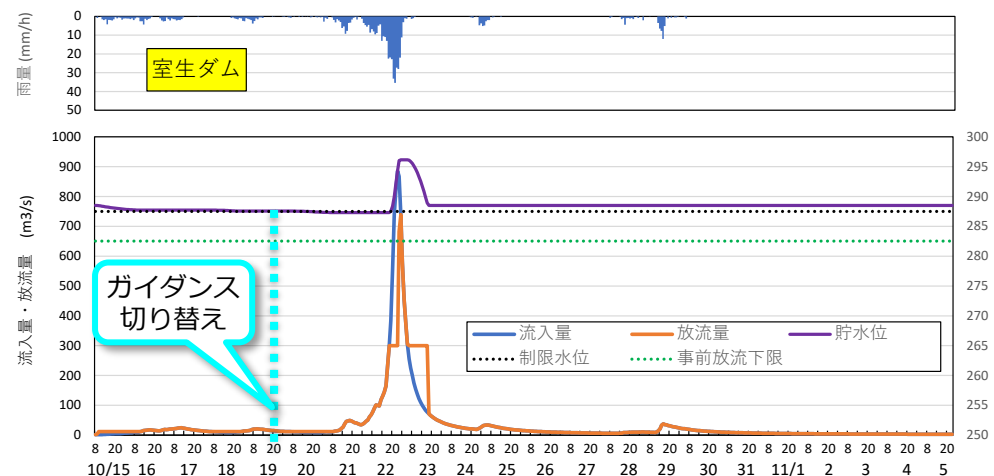
3-3 大雨事例：利水放流のみで事前放流

■ 予測条件

- ✓ 最初はアンサンブルを利用。ガイダンスで基準雨量を超過したら切替。
- ✓ 事前放流を「利水放流のみ」で実施
- ✓ 洪水後は速やかに水位を下げる（利水放流能力が小さいため、ゆっくり下げるのは困難）

■ 結果

- ✓ 室生ダム・高山ダムは流入量が大きいため事前放流がほとんど不可能
- ✓ 青蓮寺ダム・比奈知ダムは下げきれない内に洪水発生だが、異常洪水時防災操作は回避



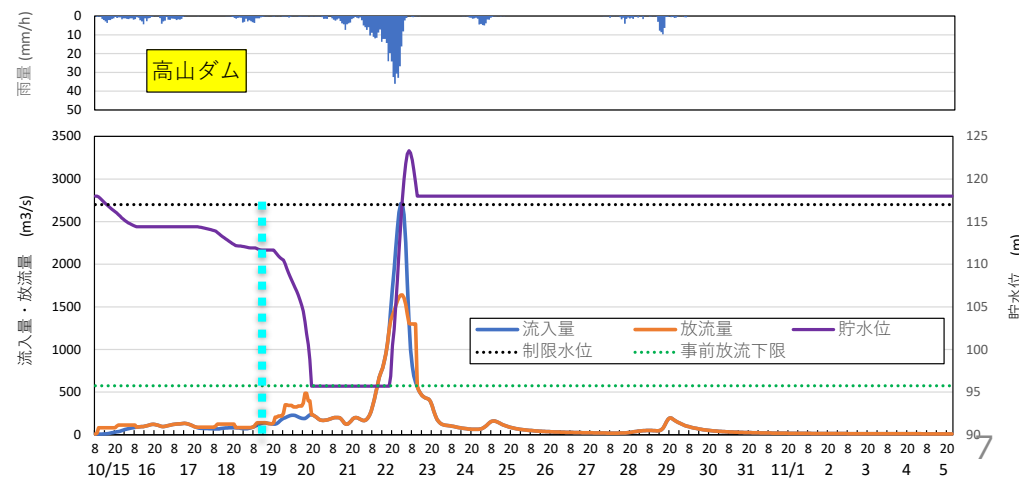
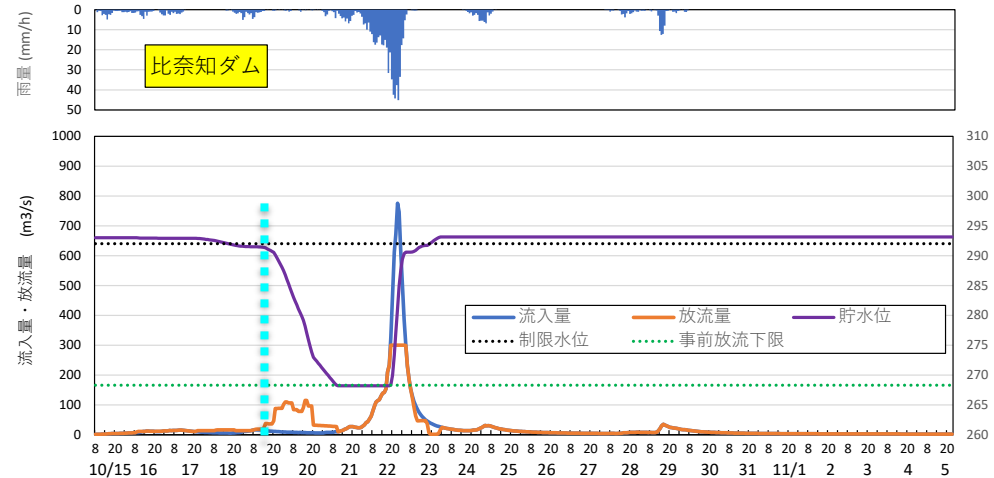
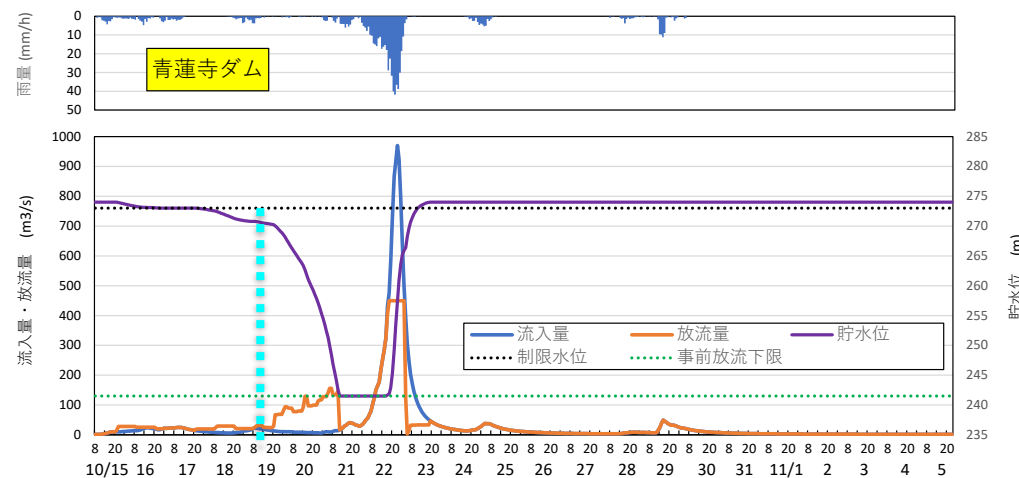
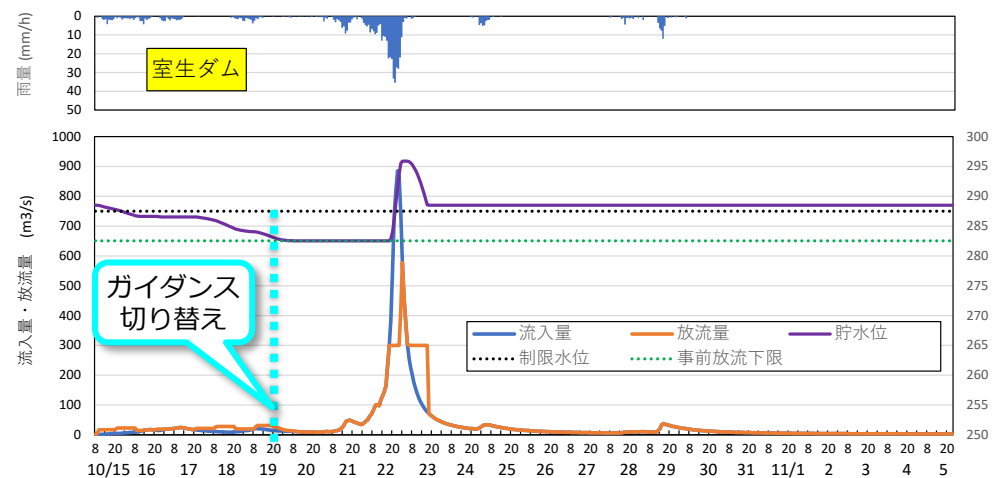
3-4 大雨事例：ゲートを使って事前放流

■ 予測条件

- ✓ 最初はアンサンブルを利用。ガイダンスで基準雨量を超過したら切替。
- ✓ 事前放流はゲート放流も活用し、洪水前に事前放流が終了するように放流量を逆算

■ 結果

- ✓ 全てのダムにおいて最大限の事前放流ができています
- ✓ 室生ダム・高山ダムは洪水後に水位が高いが、洪水調節中の放流量を維持することで速やかな水位低下は可能



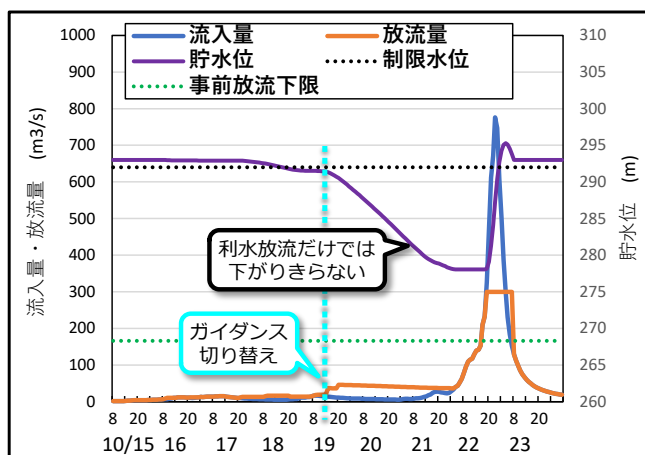
3-5 大雨事例：まとめ

■ 結果

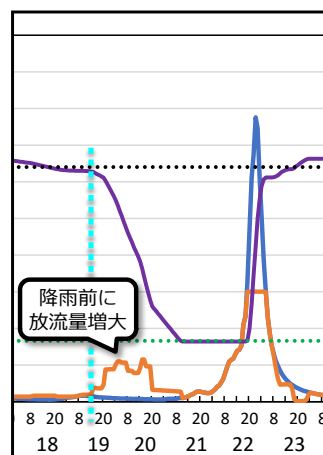
- ✓ 一定の事前放流ができていれば、名張地点のピーク水位は1m下げることができる
- ✓ 無効放流の割合は、事前放流を利水放流でゆっくり落とすことで抑制可能
- ✓ アンサンブル予測を使うことで急激な事前放流やゲート放流割合を抑制できている

シミュレーション条件	名張地点	事前放流時の最大放流量 m ³ /s				ゲート放流の割合			
	ピーク水位	室生	青蓮寺	比奈知	高山	室生	青蓮寺	比奈知	高山
事前放流なし	9.17 m	(49)	(41)	(27)	(202)	72%	62%	51%	83%
事前放流（利水放流利用）	8.59 m	49	41	46	215	70%	53%	37%	83%
事前放流（ゲート利用）	8.14 m	49	156	115	486	71%	57%	49%	85%
上記条件でガイダンス予測のみ利用	8.14 m	95	179	119	724	72%	61%	49%	84%
上記条件でアンサンブル予測のみ利用	8.14 m	49	124	52	321	71%	55%	41%	85%

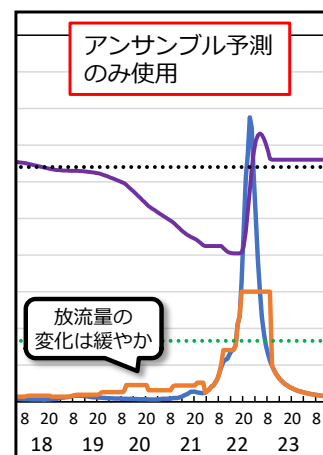
※緑セル：水位最低 ※赤字：放流量最大 緑字：放流量最小 ※黄色セル：ゲート放流最小



事前放流（利水放流のみ）



事前放流（ゲート放流利用）



← 比奈知ダムをピックアップ

アンサンブル予測だけを使うと緩やかな事前放流が可能だが、事前の水位低下も抑制される（下位予測で決めているため）

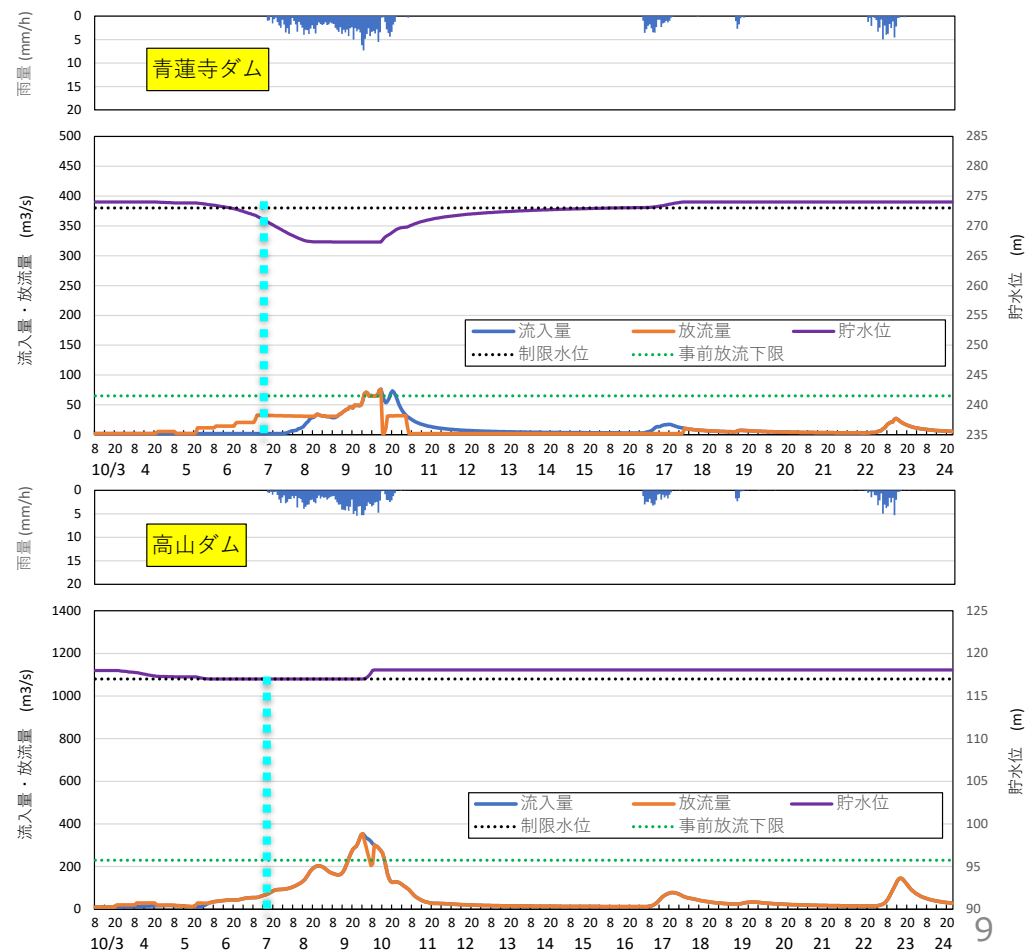
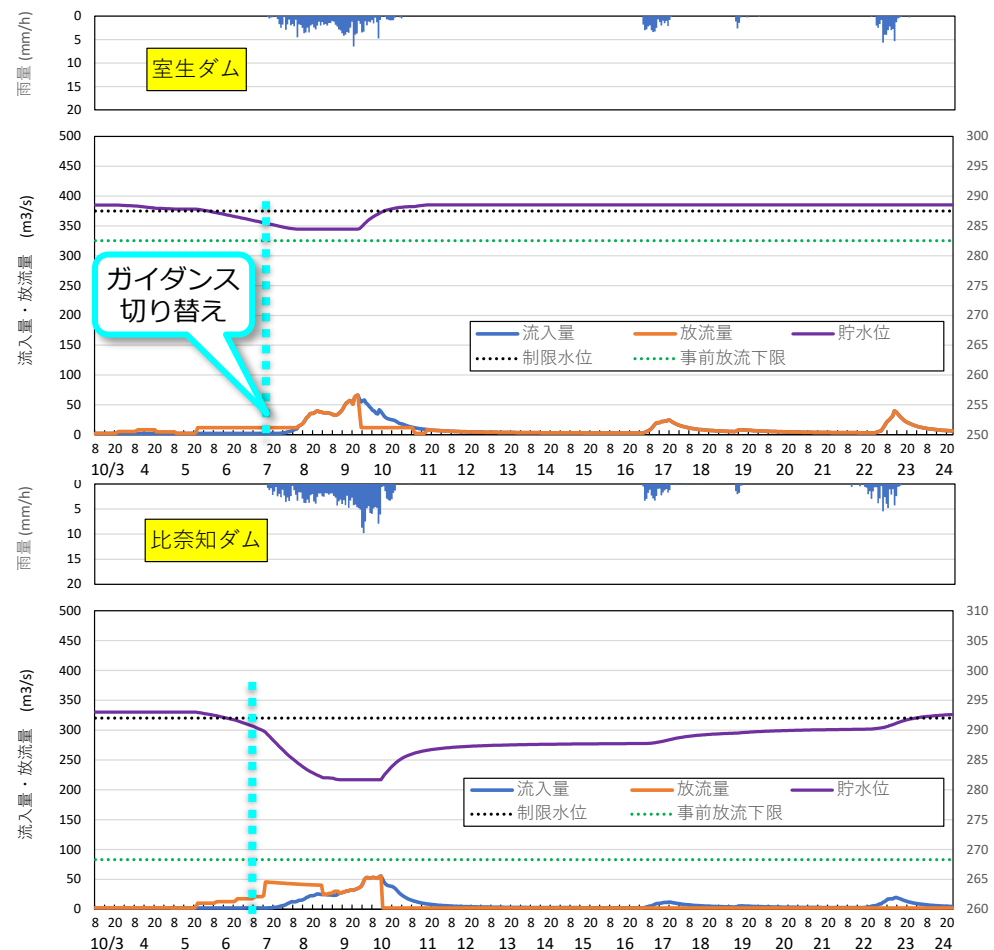
3-6 空振事例：利水放流で事前放流

■ 予測条件

- ✓ 最初はアンサンプルを利用。ガイダンスで基準雨量を超過したら切替。
- ✓ 事前放流を「利水放流のみ」で実施

■ 結果

- ✓ 各ダム、事前放流による水位低下は大きくなるが、**高山ダムは利水放流では、ほとんど下げられない**
- ✓ どのダムもグラフの終端では**水位は回復している**



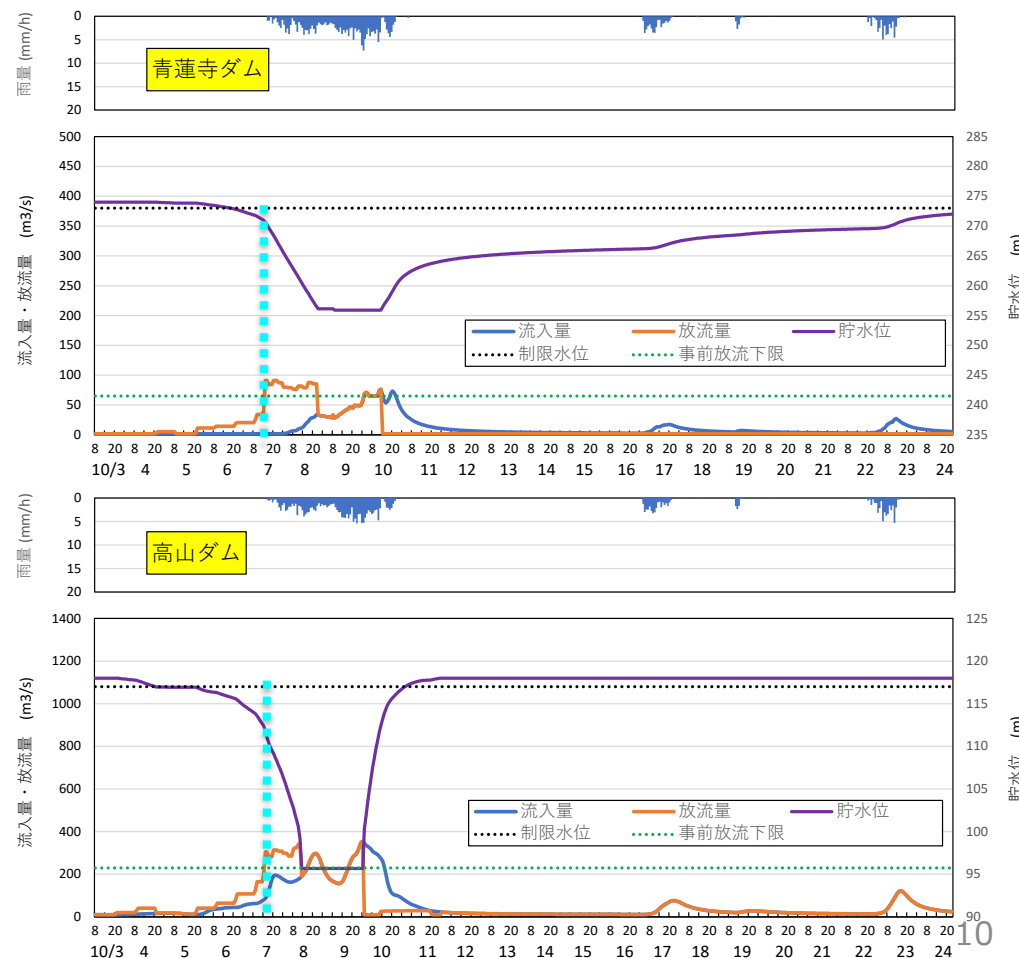
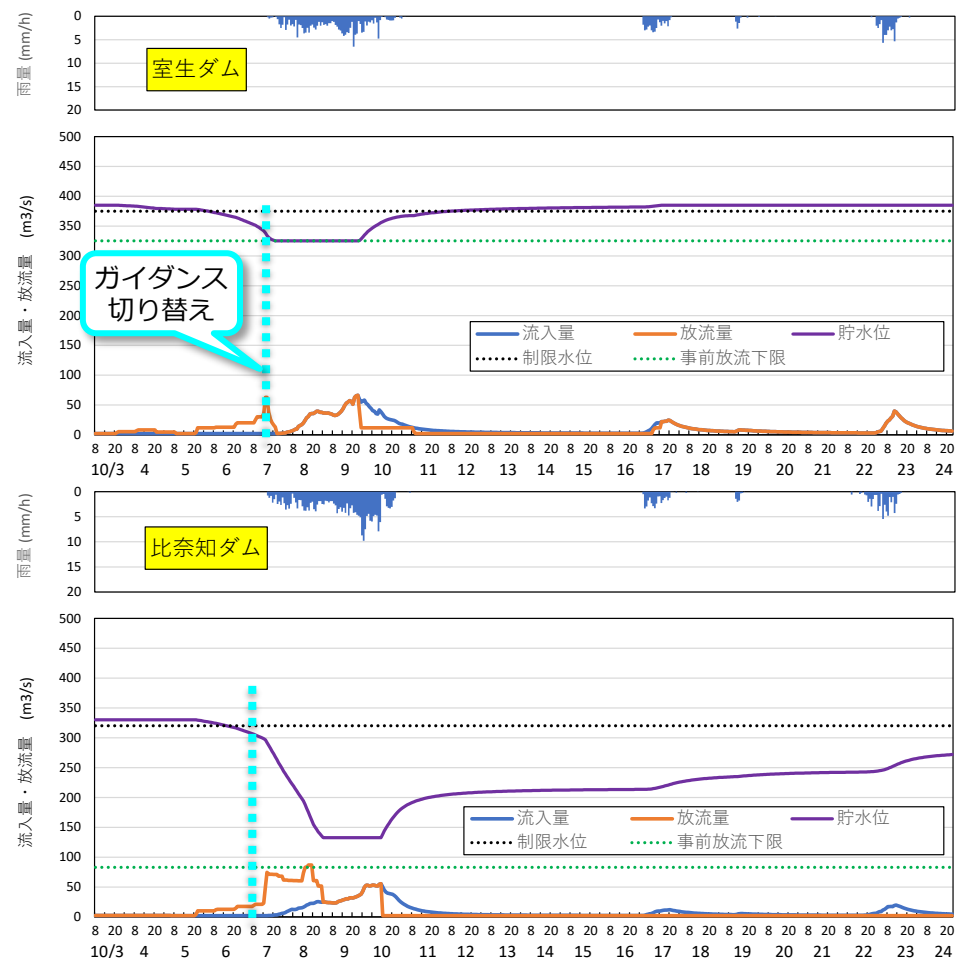
3-7 空振事例：ゲートを使って事前放流

■ 予測条件

- ✓ 最初はアンサンプルを利用。ガイダンスで基準雨量を超過したら切替。
- ✓ 事前放流はゲート放流も活用し、洪水前に事前放流が終了するように放流量を逆算

■ 結果

- ✓ 予測雨量がしだいに大きくなっていったため、直前まで事前放流を実施している。
- ✓ 降雨によるピーク流入量よりも大きな放流量が発生
- ✓ 比奈知ダム以外では水位は回復している



3-8 空振事例：まとめ

■ 結果

- ✓ 別途解析して空振り事例を選定しているため、**ここ数年間では最悪の空振りケース**。それでもこの程度の利水リスクで収まっていると評価できる。
- ✓ ゲート放流を使うと必然的に事前放流量が大きくなる。利水放流だけでは水位の低下に時間がかかるが、**アンサンブルを使うことで時間を確保**できる。
- ✓ アンサンブルだけを使った場合、**治水と利水のバランスが最も良好**と評価できる。

シミュレーション条件	事前放流時の最大放流量 m ³ /s				水位回復状況（有効貯水率）			
	室生	青蓮寺	比奈知	高山	室生	青蓮寺	比奈知	高山
事前放流（利水放流利用）	40	34	46	203	112%	106%	104%	111%
事前放流（ゲート放流利用）	63	91	87	340	111%	95%	72%	110%
上記条件でガイダンス予測のみ利用	83	103	92	523	112%	103%	78%	110%
上記条件でアンサンブル予測のみ利用	40	116	55	465	111%	94%	102%	110%

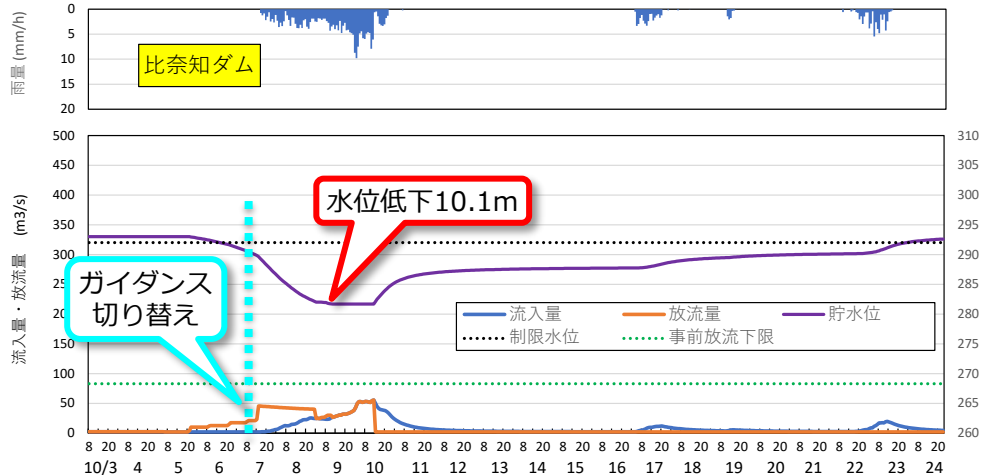
※赤字：放流量最大 緑字：放流量最小

※水色セル：有効貯水率が100%以上

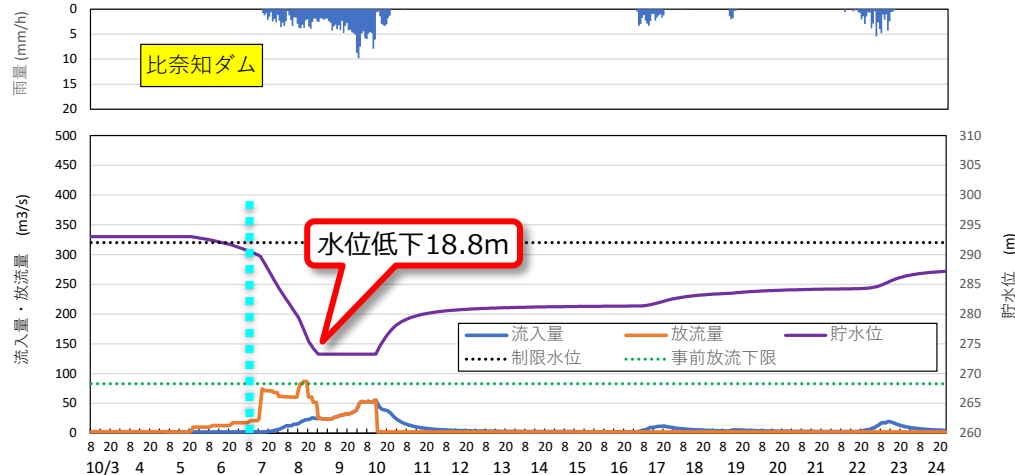
3-9 空振事例：比奈知ダムをピックアップ

- ✓ 事前放流により、制限水位から10m低下。ゲートを使うとさらに大きく低下。
- ✓ ゲートを使っても、アンサンブル予測だけを利用すると低下量は抑制されている。水位も回復。
- ✓ アンサンブル予測のみ利用は、事前放流の増加も緩やか。

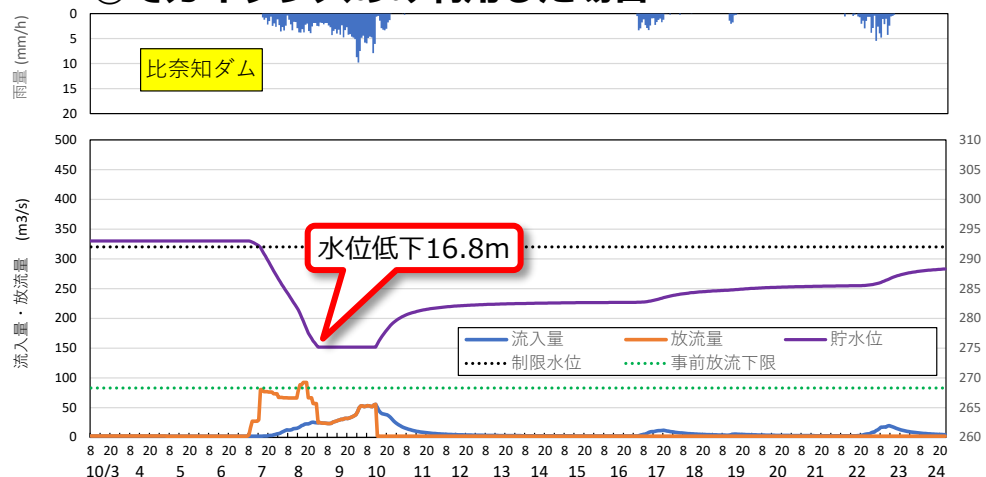
① 利水放流のみで事前放流



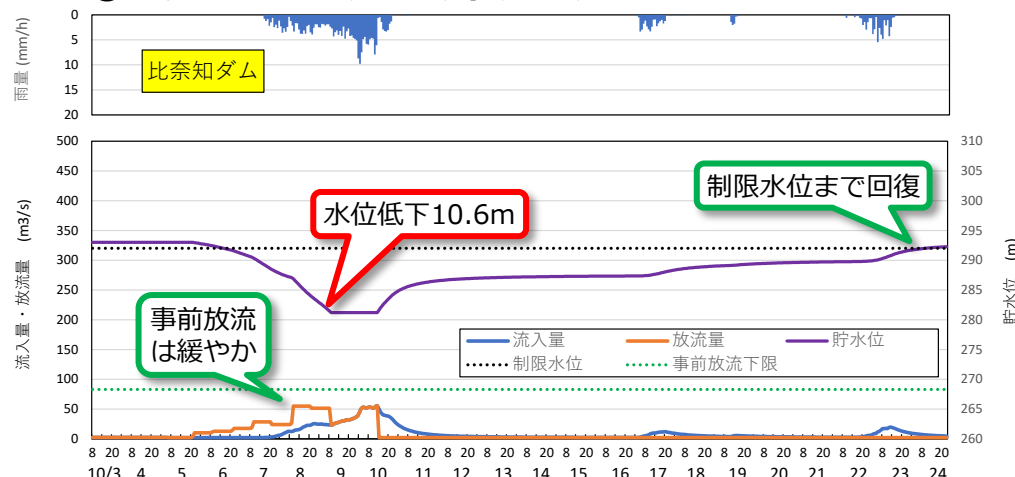
② ゲート放流も利用して事前放流



②でガイダンスのみ利用した場合



②でアンサンブルのみ利用した場合

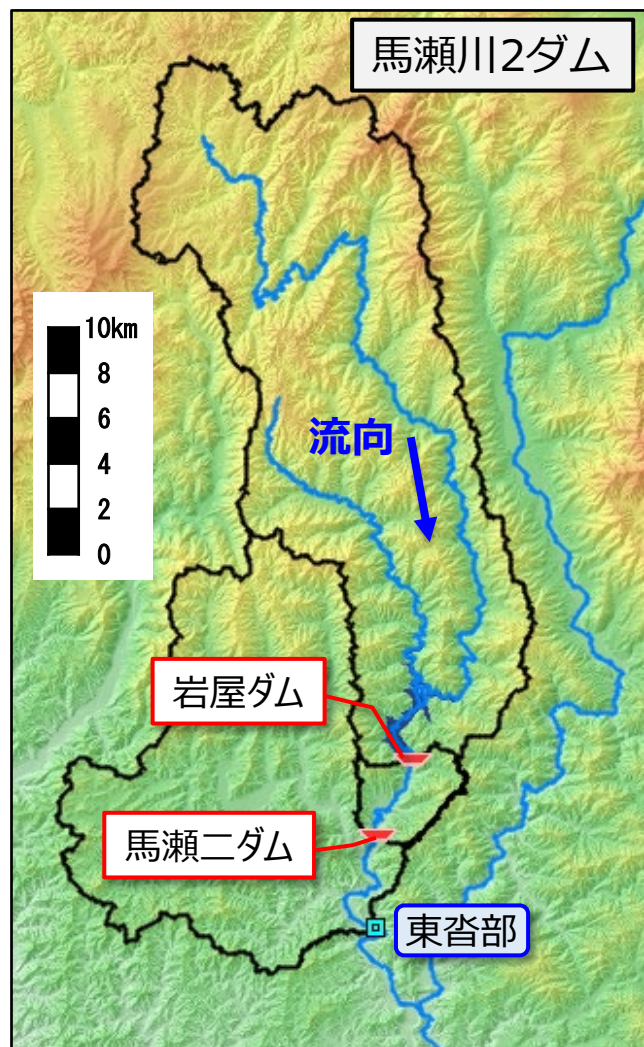


長時間アンサンブル予測活用で、降雨の終了を見通して事前放流を見直す（貯水に転ずる）ことも可能 ※今回はモデル化していない

4-1 馬瀬川2ダムの流域と諸元

■ 対象流域

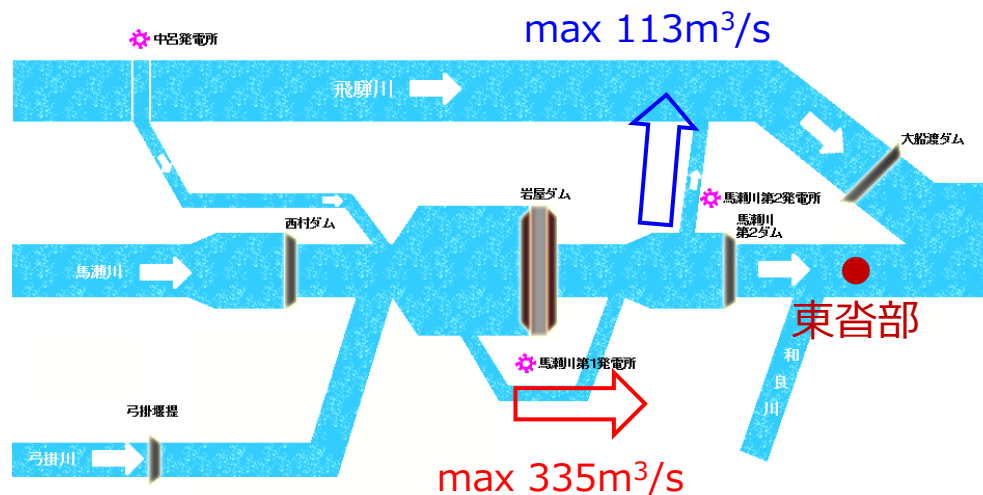
岩屋ダムおよび直下の馬瀬川第二ダムを対象にシミュレーション



■ ダム諸元

発電能力が非常に大きい（洪水流量以上）
直下流の馬瀬二ダムの発電能力は岩屋ダムの3分の1

	流域面積	治水協定 基準雨量	洪水流量	発電放流	利水放流
	km ²	mm/48h	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
岩屋ダム	265	230	300	335	335
馬瀬二ダム	279	230	—	113	113

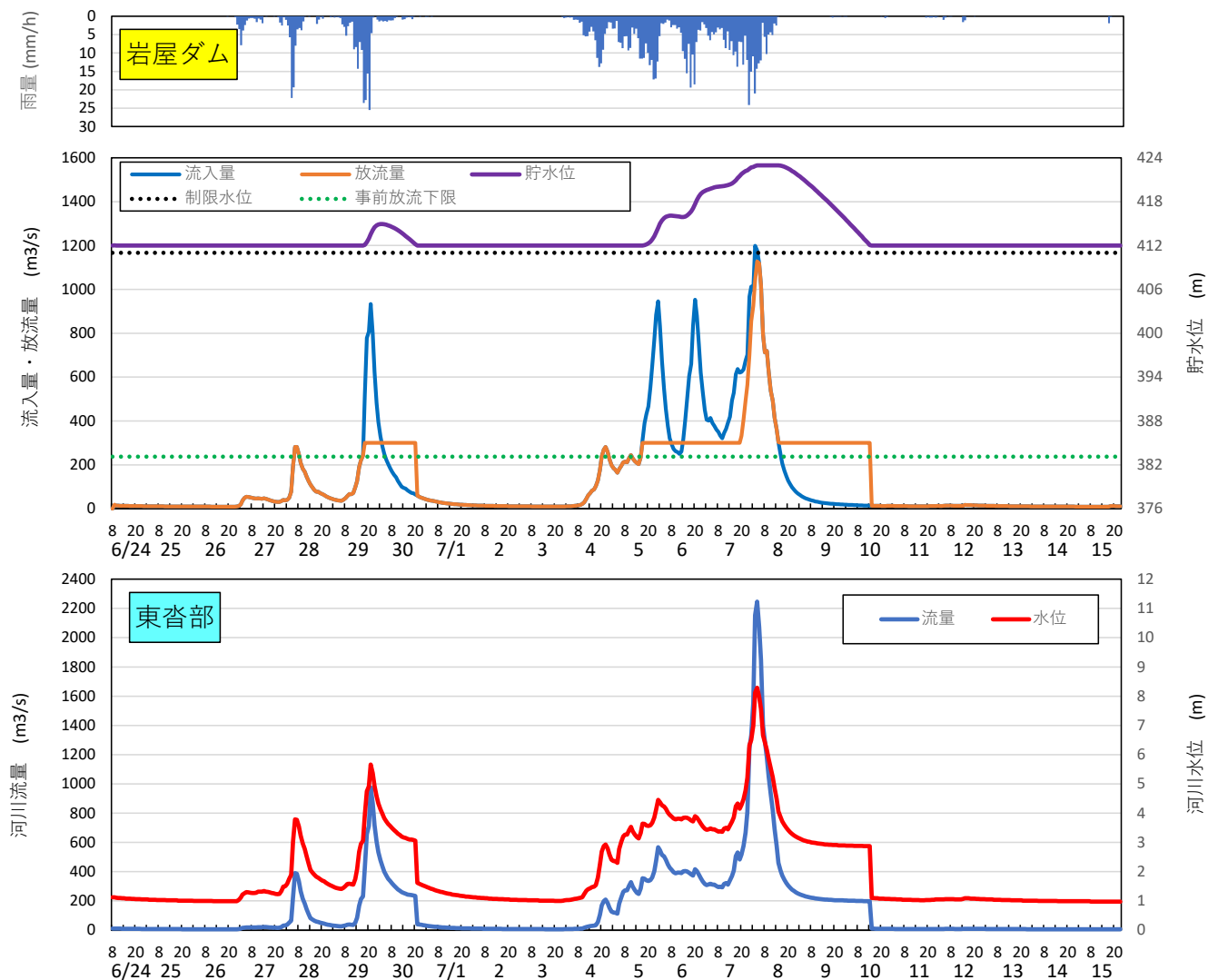


■ シミュレーション事例

- ✓ 大雨事例として平成30年7月豪雨。総雨量700mm以上であり、異常洪水時防災操作を実施。
- ✓ 予測が空振りとなった事例として2019年8月の前線事例。

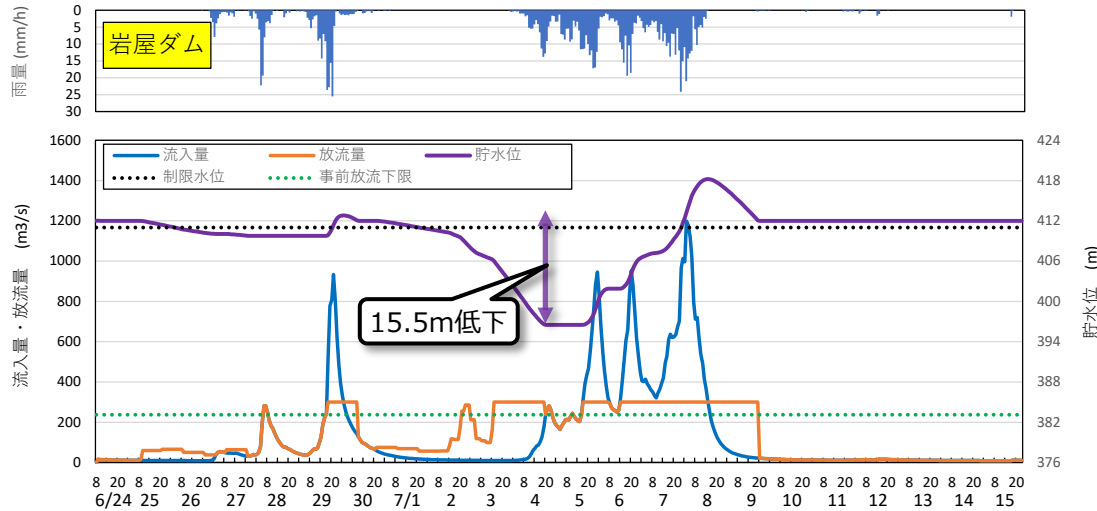
4-2 大雨事例：事前放流なし（本則操作）

- ✓ 後半の第3波で異常洪水時防災操作となっている
- ✓ 前半と後半の間は時間が空いており、水位低下は問題なく完了している
- ✓ この洪水波形を用いて、事前放流の効果を検討する



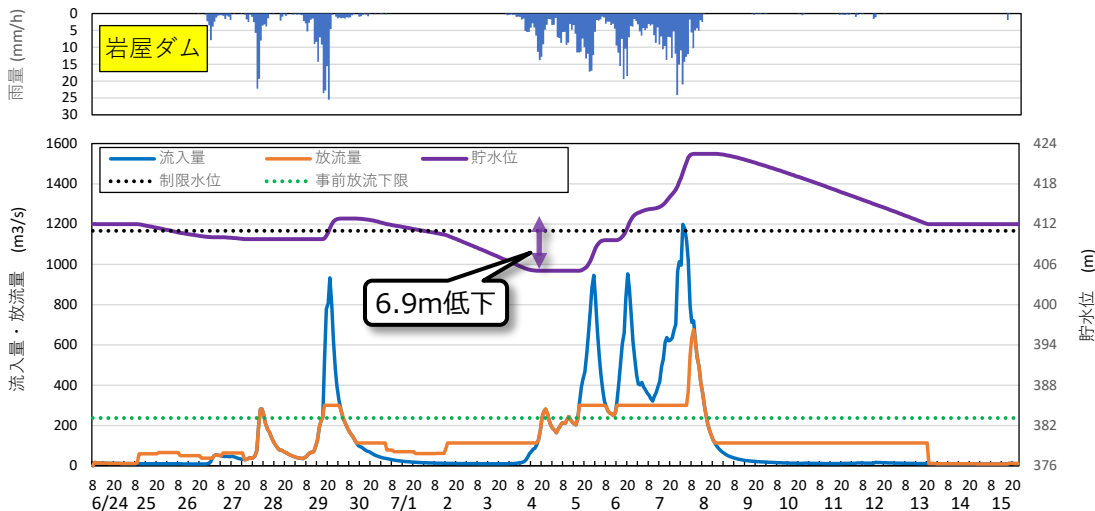
4-3 大雨事例：事前放流あり

■ 洪水量で放流



- ✓ 事前放流により異常洪水時防災操作は回避
- ✓ 前半の降雨に対しても事前放流が実施されている
- ✓ 雨が降っていない期間に洪水流量まで放流量が上昇しているという問題がある

■ 馬瀬二の発電maxで放流



- ✓ 事前放流の効果はあるが、異常洪水時防災操作を回避できていない
- ✓ 放流量は小さいため、事前放流中の下流への影響は小さい
- ✓ 東沓部地点でみると、ピーク時の水位は上と同じ →治水効果は十分に発揮

4-4 大雨事例：まとめ

■ 結果

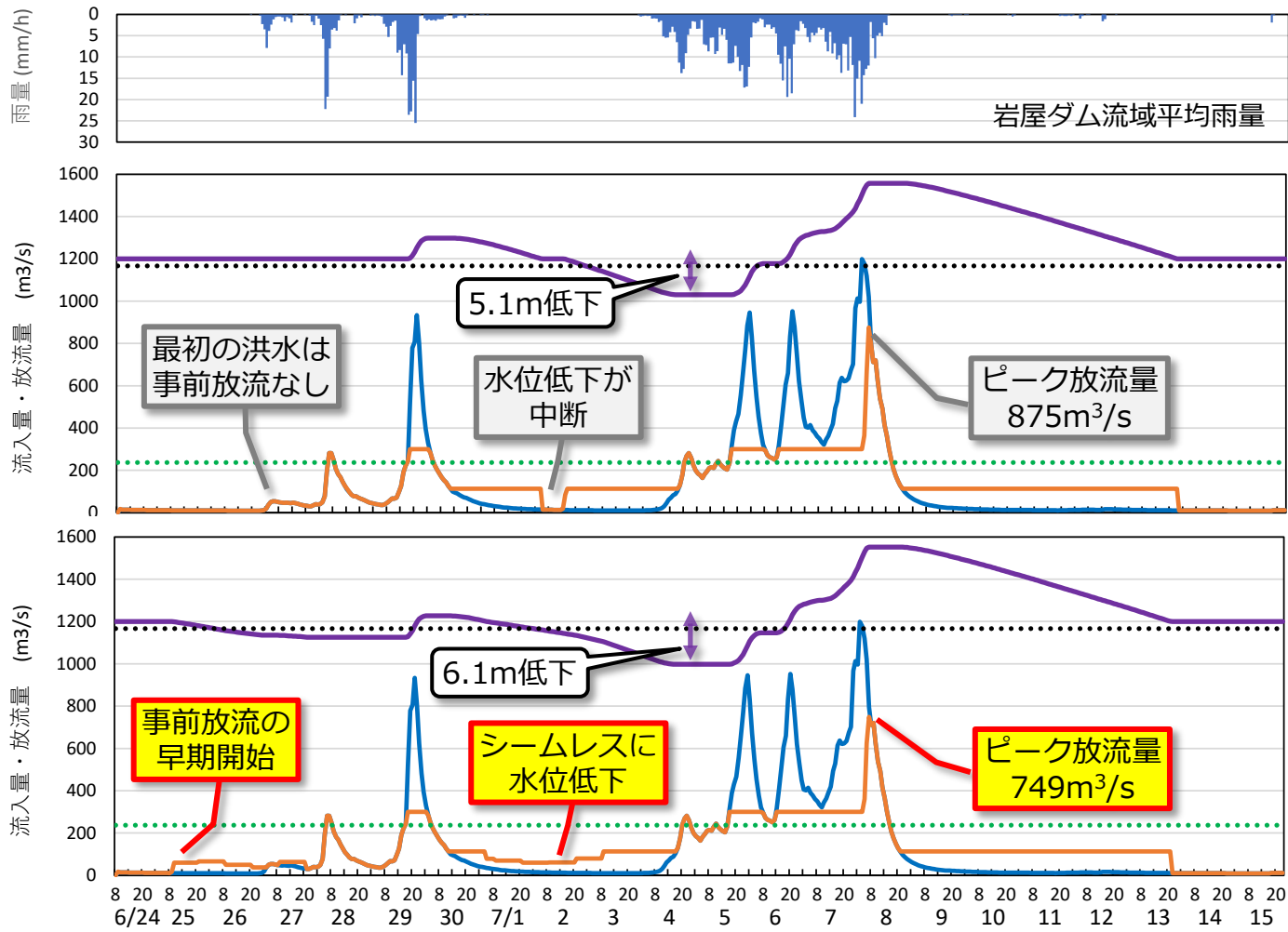
- ✓ 洪水量で事前放流すると、馬瀬二ダムの発電量が小さくなる。
- ✓ 馬瀬二の最大発電流量で事前放流すると、馬瀬二ダムの発電量は増加するが、岩屋ダムの貯水位が十分に低下しない。特に、ガイダンス予測のみを使うと、直前の事前放流となるため、貯水位の低下幅がより小さくなり、治水効果（東沓部の水位低下）が十分に発揮できない。
- ✓ 両ダムの合計発電量で比較すると、馬瀬二の最大発電放流量で事前放流を行うことが最も効率的である

シミュレーション条件	東沓部地点	岩屋ダム			馬瀬二ダム
	ピーク水位	事前放流時の最大放流量	貯水位の低下幅	発電量	発電量
事前放流なし	8.29 m	(49 m ³ /s)	(0.00 m)	51,161 MWh	16,842 MWh
事前放流（洪水流量）	6.70 m	300 m ³ /s	-15.50 m	55,893 MWh	20,665 MWh
上記条件でガイダンス予測のみ利用	6.70 m	300 m ³ /s	-14.36 m	56,059 MWh	18,712 MWh
上記条件でアンサンブル予測のみ利用	6.70 m	160 m ³ /s	-6.85 m	55,563 MWh	21,170 MWh
事前放流（馬瀬二の最大発電流量）	6.70 m	113 m ³ /s	-6.95 m	55,587 MWh	26,686 MWh
上記条件でガイダンス予測のみ利用	7.29 m	113 m ³ /s	-5.10 m	54,618 MWh	25,931 MWh
上記条件でアンサンブル予測のみ利用	6.78 m	113 m ³ /s	-6.08 m	55,134 MWh	26,325 MWh

※黄色セル：事前放流の効果が最も大きいもの

ピンク枠：発電量の合計が最大

4-5 大雨事例：ガイダンス vs アンサンブル



ガイダンス予測を利用

予測時間が短いため先が見えず、事前放流は直前にしか行われない

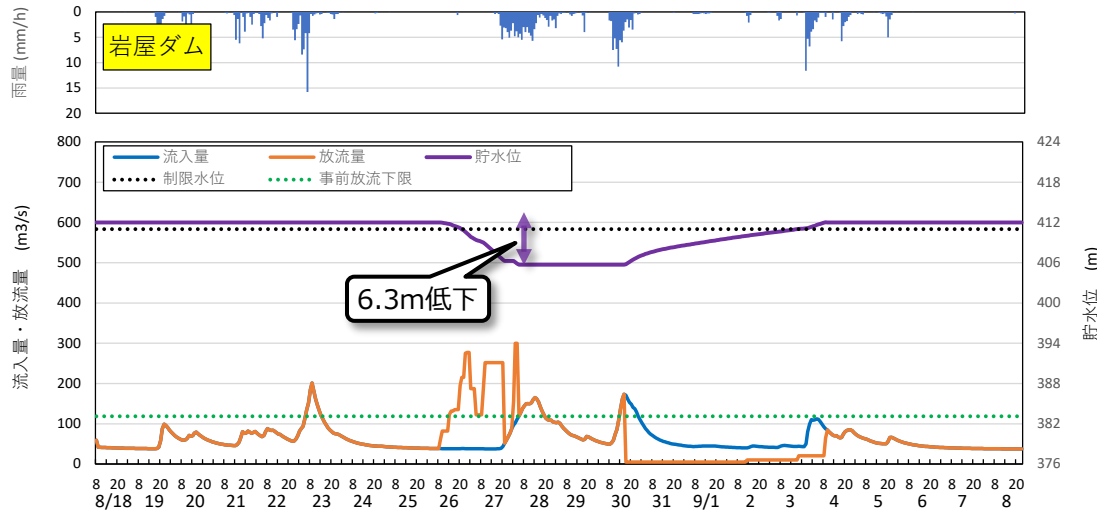
アンサンブル予測を利用

予測時間が長いため事前放流の開始が早く、最初の洪水の水位低下と次の洪水のための水位低下がシームレスに実施されている



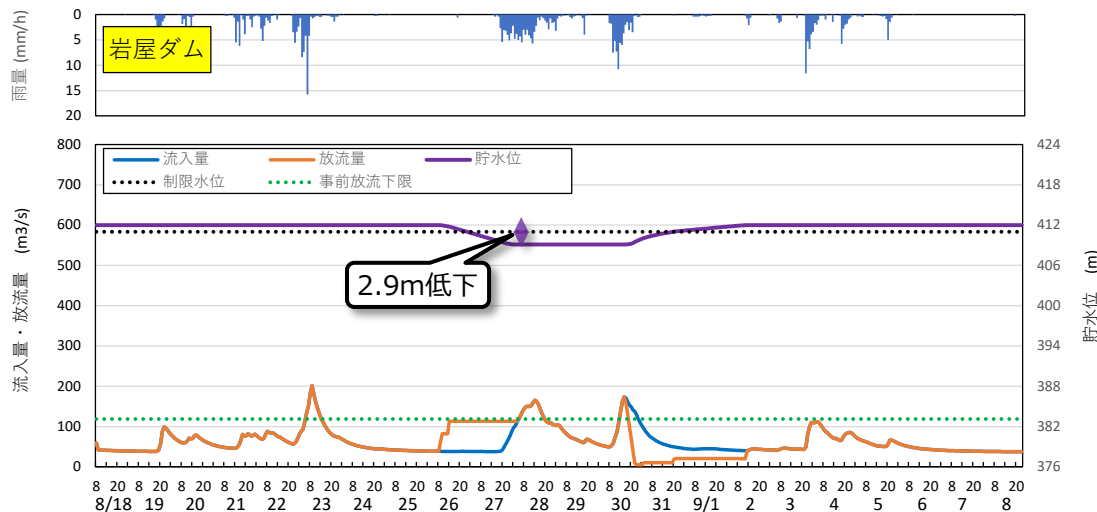
4-6 空振事例：事前放流あり

■ 洪水量で放流



- ✓ 事前放流を行っているが、洪水量には達しないため、8/30のピーク後に貯水
- ✓ 水位低下は6.3mとなったが、6日後に水位は回復している
- ✓ 雨が降っていない期間に不連続に洪水流量まで放流量が上昇しているという問題がある

■ 馬瀬二の発電maxで放流



- ✓ 事前放流を行っているが、洪水量には達しないため、8/30のピーク後に貯水
- ✓ 水位低下は2.9mであり、4日後に水位は回復している
- ✓ 雨が降っていない期間の放流量上昇はあるが、馬瀬二の放流は飛騨川に行くため、東沓部への影響はない

4-7 空振事例：まとめ

■ 結果

- ✓ 実際の流入量が洪水量を下回っていたことから、事前放流を洪水流量で行うと**事前放流しないよりも下流地点の水位が上昇している**
- ✓ 洪水量で事前放流を行うと、**無効放流が増えることで発電量が低下している**
- ✓ 馬瀬二の発電maxで事前放流した場合は、**降雨予測が空振りだった場合も利水リスクや下流への影響はほとんどない**

シミュレーション条件	東沓部地点	岩屋ダム			馬瀬二ダム
	ピーク水位	事前放流時の最大放流量	貯水位の低下幅	発電量	発電量
事前放流なし	2.86 m	(111 m ³ /s)	(0.00 m)	30,402 MWh	20,544 MWh
事前放流（洪水流量）	3.07 m	300 m ³ /s	-6.31 m	30,248 MWh	18,748 MWh
ガイダンス予測のみ利用	3.07 m	300 m ³ /s	-2.96 m	30,325 MWh	19,660 MWh
アンサンブル予測のみ利用	2.92 m	300 m ³ /s	-5.65 m	30,302 MWh	18,917 MWh
事前放流（馬瀬二の最大発電流量）	2.86 m	113 m ³ /s	-2.90 m	30,413 MWh	20,653 MWh
ガイダンス予測のみ利用	2.86 m	113 m ³ /s	-1.16 m	30,386 MWh	20,654 MWh
アンサンブル予測のみ利用	2.86 m	113 m ³ /s	-2.81 m	30,412 MWh	20,655 MWh

※黄色セル：事前放流の効果が最も大きいもの ピンク枠：発電量の合計が最大

5 おわりに

- ✓ 利水放流が小さいと、アンサンブルで早期に事前放流をしようとしても不可能な場合がある。ゲート放流を使えば水位低下は可能だが、無効放流は増加してしまう。（木津川）
- ✓ 利水放流を増やせば、アンサンブルのメリットがでやすい。アンサンブルのみを利用した場合、空振り時の水位回復も見込める。（木津川）
- ✓ 事前放流実施時の放流量を洪水量まで上げるのは、下流に対する影響が大きくなる。雨が降り始める前に河川流量が増大する。特に空振時は、降雨による流量ピークを上回る場合もある。（木津川・馬瀬川）
- ✓ ガイダンス予測のみを利用した場合、事前放流実施中の放流量の変動が不連続になる場合がある。特に洪水量まで上げる場合は、変動が大きい。（馬瀬川）
- ✓ アンサンブル予測のみを利用すると、「下位予測利用のため利水リスクが小さい」「複数メンバー平均のため変動が小さい」「12時間毎の更新」であることから、長時間でゆっくり操作することが可能。十分な治水効果を発揮できている、発電量も増加している。治水利水両面のリスクにバランスよく対応できる。（木津川・馬瀬川）
- ✓ 事前放流においては利水設備の範囲（岩屋ダムでは馬瀬二の発電最大）の放流とし、予測雨量はアンサンブル予測を使うことが最も効率がよいと評価できる。