

アンサンブル予測雨量を用いた
洪水時ダム操作決定方法に関する研究

猪股 広典

目 次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	4
1.3 本論文の主旨, 構成	4
参考文献	6

第2章 予測雨量を用いた洪水時ダム操作に関する既往研究・取組

2.1 多目的ダムにおける標準的な洪水時ダム操作	9
2.2 操作規則における予測情報の位置づけ	13
2.3 事前放流操作	18
2.4 特別防災操作	22
2.5 予測雨量を用いずに洪水時ダム操作を高度化するための研究・取組	25
2.6 洪水時ダム操作における予測情報利用に関する既往の取組に関するまとめ	27
2.7 洪水時ダム操作への予測雨量の利用に関する既往研究	28
2.8 アンサンブル予測雨量の利活用に関する既往研究・取組	33
2.9 まとめ	40
参考文献	40

第3章 アンサンブル予測雨量の洪水調節操作への適用

3.1 はじめに	45
3.2 シミュレーション実施内容	46
3.3 計算結果	49
3.4 考察	56
3.5 まとめと課題	60
参考文献	61

第4章 アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作に関わるリスクの定量化と操作方法の決定

4.1 はじめに	63
4.2 検討対象流域・ダム, 使用するアンサンブル予測雨量, 流出計算モデル	64
4.3 アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作の決定方法	68
4.4 計算結果	72
4.5 考察	76
4.6 まとめ	77

参考文献	77
第5章 アンサンブル予測雨量を用いた活用水位からの事前放流操作, 洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作の決定方法	
5.1 はじめに	79
5.2 検討対象流域・ダム, 使用するアンサンブル予測雨量, 流出計算モデル	79
5.3 アンサンブル予測雨量を用いた活用水位からの事前放流操作, 洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作の決定方法	82
5.4 ダム操作シミュレーションにおける計算フロー及び計算条件	95
5.5 計算結果	96
5.6 考察	103
5.7 まとめ	110
参考文献	110
第6章 アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作における予測先行時間延長の効果	
6.1 はじめに	113
6.2 検討対象洪水, アンサンブル予測雨量の概要, 流出計算モデルについて	113
6.3 アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作シミュレーションにおける計算条件と事前放流操作の決定方法	116
6.4 計算結果	124
6.5 考察	131
6.6 まとめ	132
参考文献	133
第7章 まとめ	135
参考文献	138
謝辞	139
付録 土研分布型流出モデル 2018 について	140

用語集

ここでは、本論文において用いるダムに関連した用語の意味をまとめて記す。用語の後に章番号を記載したものは、当該章においても説明があることを示す。

ダムの弾力的管理（第2章，第5章）：

洪水調節に支障を与えない範囲で、洪水調節容量の一部に流水を貯留し、これを適切に放流することにより、下流河川の環境の保全を図るもの。第2章及び第5章においても説明。

ダム設計洪水流量：

ダムの新築又は改築に関する計画において、ダムの直上流において200年につき1回の割合で発生するものと予想される洪水の流量、当該地点において発生した最大の洪水の流量又は当該ダムに係る流域と水象もしくは気象の観測の結果に照らして当該地点に発生する恐れが認められる洪水の流量のうちいずれか大きい流量

平常時最高貯水位：

ダムの新築又は改築に関する計画において非洪水時にダムによって貯留することとした流水の最高の水位

本則操作：

操作規則の本文に規定する洪水調節方法

異常洪水時防災操作（第2章）：

大きな出水によりダムの洪水調節容量を使い切る可能性が生じたため、放流量を徐々に増加させ、流入量と同じ流量を放流する操作

異常洪水時防災操作開始水位：

異常洪水時防災操作が原則として開始される水位

活用水位（第5章）：

洪水貯留準備水位を越える水位であり、この水位と洪水貯留準備水位との間の容量（「活用容量」という）をダムの弾力的管理においてダム下流の河川環境の向上等に資することを目的として用いられる。

後期放流操作（第2章）：

後期放流操作は、洪水調節によって上昇した貯水位を速やかに洪水貯留準備水位等まで低下させる操作

洪水貯留準備水位：

洪水期間における貯水池の最高水位で、洪水調節を行う場合及び洪水に達しない流水の調節を行う場合を除いてこの水位より貯水位を上昇させてはいけない。

洪水調節操作（第 2 章）：

貯水池への流入量が洪水量に達したときから流入量がピークを過ぎた後、放流量と流入量が等しくなるまでの間において、操作規則の本文に規定する洪水調節方法（本則操作）に従ってダムから放流を行う操作

洪水時最高水位：

洪水調節計画上定められた水位であり、異常洪水時防災操作を行う場合を除き、洪水調節または洪水に達しない流水の調節を行う場合には水位をこれより上昇させてはいけない。

設計最高水位：

ダム設計洪水流量の流水がダムの洪水吐きを流下するものとした場合におけるダムの飛越流部の直上流部における最高の水位

操作規則（第 2 章）：

各ダムについて策定が義務付けられており、操作に関する必要な事項等が定められたもの

特別防災操作（第 2 章，第 5 章）：

下流の被害を軽減するために貯留量を増やして容量を有効に活用する高度な操作

予備放流操作（第 2 章）：

貯水池への流入量が洪水量に達する前に、洪水調節計画上必要となる空容量を確保するため必要となる貯留水をダムから放流する操作

事前放流操作（第 2 章，第 4 章，第 5 章）：

予測雨量情報等に基づいて洪水の発生を予測した場合に、事前に貯水位を低下させる操作。利水容量を事前に放流することで治水容量として一時的に活用する操作と、平常時最高貯水位又は洪水貯留準備水位と活用水位との間の容量に貯留した流水を放流する操作の 2 種類があり、本論文においては必要に応じて前者を「洪水貯留準備水位からの事前放流操作」、後者を「活用水位からの事前放流操作」と区別して表記する。

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 近年の豪雨とダム操作

近年日本では、平成23年新潟・福島豪雨（2011年7月）、平成23年台風第12号（2011年8、9月）、平成25年台風18号（2013年9月）、関東・東北豪雨（2015年9月）、九州北部豪雨（2017年6月）、平成30年7月豪雨（2018年7月）、令和元年東日本台風（2019年10月）をはじめとして毎年のように豪雨が発生し、それに伴う災害に見舞われている。

上記の豪雨において、多くのダムが洪水調節操作を実施し相応の治水効果を発揮する一方で、「大きな出水によりダムの洪水調節容量を使い切る可能性が生じたため、放流量を徐々に増加させ、流入量と同じ流量を放流する操作（国土交通省，2014）」である異常洪水時防災操作を実施したダムも数多く存在する。最近の事例では、平成30年7月豪雨において四国、中国、近畿地方の8ダムで、また令和元年台風第19号において関東、中部地方の6ダムで異常洪水時防災操作が実施された（異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会，2018；ダムの洪水調節に関する検討会，2019）。また、平成27年9月関東・東北豪雨時の川俣ダム、川治ダム、平成29年7月九州北部豪雨時の寺内ダムにおいては、異常洪水時防災操作の実施判断の一つである異常洪水時防災操作開始水位を貯水位が超過したものの、異常洪水時防災操作が回避された事例もある（田畑，2017；松川，2017）。これらは一事例に過ぎないが、ダムの洪水調節容量を使い切る大規模な洪水が近年数多く発生している。

さらに今後、気候変動に伴い日本国内外で豪雨が増大化する可能性について以前から現在に至るまで数多く指摘されている（例えば和田ら，2006；柏井ら，2008；社会資本整備審議会，2008；2015；気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会，2019）。これに伴い、治水計画等についても気候変動を踏まえて考えることが必要とされており（気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会，2019）、既設ダムの洪水調節容量を使い切る大規模な洪水への対応が今後ますます重要になると考えられる。

1.1.2 洪水調節容量を確保するための方策と実施状況

既設ダムの洪水調節容量を使い切るほどの大規模な洪水への対応としては、洪水調節容量の増大や運用の高度化により対応することが考えられる。

洪水調節容量を増大するための方策としてはダムの新規建設が挙げられる。しかし、ダム建設の進展とともに、地形・地質の条件に恵まれたダムサイトが減少してきている。その一方で、ダム開発に係る技術の進展は目覚ましく、例えばダム建設当時には不可能であった基礎地盤改良が、最近の土木技術によると可能となり、既設ダムのダム高さより十分高いダムの建設が可能となるような場合があり得る。このような場合、新しいダムサイトに新規にダムを建設するよりも、既設ダムを改造するほうが開発効率を高くすることができる。またダムサイトの減少に加えて、急速な高齢化の進行に伴って社会資本への投資余

力が減少してきていることや自然環境保全に対する社会的要望の高まりの観点からも、新規にダムを建設することは困難になってきている。このため、貴重な社会資本ストックである既設ダムを効率的に利用する「再開発」が求められる状況となっている（佐々木・山本，2005）。治水機能の増強を目的とした再開発事業としては、「貯水容量の増大」、「放流能力の増強」がある。貯水容量の増大については、例えば新桂沢ダムにおいて、桂沢ダム堤体を同軸で約 1.2 倍にかさ上げすることにより、ダムの貯水容量を 1.6 倍に増加させ、洪水調節容量の増加とともに、発電容量増加や工業用水確保等を図る事業を実施している。放流能力の増強については、例えば鶴田ダムにおいて、ダムを運用しながら大水深で放流管の増設を行うことにより、死水容量を減らし、洪水調節容量を増大させる事業を実施している。上記の事例をはじめとして、これまでに 29 ダムで実施済み、20 ダムで実施中（2017 年 7 月時点）であり、既設ダムの有効活用の実施事例が積み重ねられて知見が蓄積されつつある状況であり、今後さらに推進することが必要であるとされている（国土交通省 水管理・国土保全局，2017）。

ダム再開発を今後さらに推進する必要がある一方で、既設ダムの運用操作を柔軟・高度にすることで洪水調節に利用できる容量を確保することを目指す対策も同様に重要である（国土交通省 水管理・国土保全局，2017；角，2019）。既設ダムの運用操作の高度化の一例として事前放流操作や特別防災操作といった気象予測を用いたダム操作が挙げられる。事前放流操作は、気象予測等に基づいて洪水の発生を予測した場合に、利水容量を洪水の発生前に放流して貯水位を低下させるものであり、利水容量を洪水調節容量として一時的に活用する操作である（国土交通省河川局長，2005；国土交通省 水管理・国土保全局河川環境課，2017）。また特別防災操作は、事前放流操作のように直接的に洪水調節に利用できる容量を増加させる操作ではないものの、本則操作よりも貯留量を増やして容量を有効に活用する高度な操作であり、気象予測を活用して下流の被害軽減に資する操作である（国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課，2017）。気象予測を用いたダム操作に関する取組状況として、事前放流操作においてはこれまでに導入に向けた取組が度々行われてきており（国土交通省河川局長，2005；国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課，2017）、近年徐々に実施事例が報告されはじめている。例えば令和元年台風 19 号においては草木ダムをはじめとした複数のダムにおいて実施された（ダムの洪水調節に関する検討会，2019；水資源機構草木ダム管理所，2019）。また 2020 年には、国土交通省所管ダムだけでなく利水ダムも対象として事前放流操作を実施するにあたっての基本的事項をとりまとめた「事前放流ガイドライン」が策定された（国土交通省 水管理・国土保全局，2020）。本ガイドラインにおいては事前放流後に水位が回復しなかった場合の対応としての損失補填制度が明示されていることが特徴的であり、令和 2 年度出水期においては本ガイドラインに基づいて全国 122 ダム（うち、63 ダムが利水ダム）において事前放流操作が実施された（国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課，2020）。特別防災操作については、これまでに複数のダムにおいて実施された実績があり（例えば、国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所，2010；国土交通省東北地方整備局，2011；国土交通省東北地方整備局最上川ダム統合管理事務所，2020）、さらに実施ダム数を増やすべく取組を行っている（国

1.1.3 洪水時ダム操作における予測雨量の利用における不確実性への配慮

気象予測情報の一つである予測雨量を活用した操作である事前放流操作や特別防災操作は近年実施事例が増えつつあるが、予測雨量には予測不確実性が不可避であることは広く認識されているため、国土交通省水管理・国土保全局河川環境課（2017）や国土交通省水管理・国土保全局（2020）をはじめとした予測雨量を利用するためのこれまでの検討・取組においても、予測雨量の予測不確実性を定量的に操作に組み入れているわけではないが、予測不確実性の存在に配慮しながら適切に導入が図られている。

1.1.4 洪水時ダム操作における予測雨量活用に関する研究動向

気象予測技術の進展により予測精度はこれまで日々向上してきており、今後とも向上することが期待される。ダム管理者は、予測技術の進歩により、将来的には予測雨量の不確実性が無くなる、すなわち予測誤差がゼロになることを期待しがちである。しかし、従来から行われてきた1つの初期値・境界値から計算される確定的な予測雨量を用いる限り、計算に用いる数値予報モデルが完全でないことや観測誤差の存在などから予測の不確実性は不可避であり、予測不確実性の評価が重要であると近年認識されており（気象庁予報部, 2016）、ダム管理者も予測誤差がゼロになることは難しいという視点に立つことが重要であると考えられる。その際、「予測誤差も考慮した上でどのように活用できるのか」という視点に立って考えることが重要であると考えられる。既に臼谷・中津川（2010）、中津川（2014）、三石ら（2011）は、予測雨量の不確実性を考慮したダム操作について検討を行っている。臼谷・中津川（2010）、中津川（2014）は過去の予測雨量と実績値の関係から予測雨量の値に対する実績値の出現範囲を確率的に求め、得られた出現範囲を基にした洪水時ダム操作について検討を行った。三石ら（2011）も同様に、過去の予測雨量と実績雨量を用いて予測雨量に対する実績雨量の出現範囲について確率分布を求め、洪水調節操作における放流量について検討している。これらの研究においては、予測雨量の不確実性を、予測雨量の値に対する実績雨量の出現範囲として扱っている点で共通している。しかし、予測雨量を計算する数値予報モデルが継続的に改良されるため統計的性質が変化すること、また台風や前線など降雨要因の違いによる不確実性の違い、例えば同じ台風による降雨であってもイベントによって不確実性が異なると考えられることなど、その時々々の気象状況により予測の不確実性は異なると考えられることから、過去の予測雨量に基づいて不確実性を求めるよりもその時々々の気象状況に合わせた不確実性情報が得られることが望ましいと考えられる。

その時々々の気象状況に応じた予測不確実性を評価する手法として気象分野においてアンサンブル予測がこれまでに研究が数多く行われてきている。アンサンブル予測を水文分野において利用する研究もヨーロッパを中心にして数多く行われてきており、特にヨーロッパ中期予報センター（European Centre for Medium-Range Weather: ECMWF）においてはアンサンブル予測を用いた洪水予測が既に運用されている（Thielen *et al.*, 2009; Bartholmes *et al.*,

2009). 日本においても、気象庁が豪雨をはじめとするメソスケール現象の予測を目的としたメソアンサンブル予測システムを 2019 年 6 月より運用を開始した (気象庁予報部, 2016 ; 2019). また、アンサンブル予測雨量を用いた洪水予測への研究も行われており、近年の大規模豪雨を対象としてメソアンサンブル予測雨量を用いた洪水予測に関する研究 (Ushiyama *et al.*, 2016), ダムの予備放流操作へのアンサンブル予測雨量の適用性 (Nohara *et al.*, 2015), ECMWF のアンサンブル予測雨量のダムの治水操作に活用するための基礎的な検討 (木谷ら, 2018) 等が行われてきている. しかし、アンサンブル予測雨量から得られる不確実性情報を利用した洪水時ダム操作決定に関する研究事例は現状において未だ少ない.

1.2 研究の目的

以上を踏まえ本論文では、「アンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作決定方法」について示すことを研究の主たる目的とする. 研究においては、下記 2 項目を要点とする.

- アンサンブル予測雨量から得られる予測の不確実性情報を用いて、どのように操作 (=放流量) を決定するかについて具体的に示す.
- 第 2 章で述べる通り、洪水時ダム操作は事前放流操作や洪水調節操作等、様々な段階に分けられ、それぞれの段階に応じて求められる要件が異なるため、それぞれの段階毎の要件を考慮したアンサンブル予測雨量を用いた操作決定方法を示す.

1.3 本論文の主旨、構成

1.1 及び 1.2 で述べた主旨を踏まえ、本論文におけるテーマと各章の概要を以下に示し、構成を図 1.1 に示す.

本章においては、予測雨量には予測の不確実性が必ず伴うものであるため、従来の決定論的な予測雨量に基づいてダム操作を決定することの難しさ及び予測の不確実性を考慮した操作について今後検討が必要であり、そのツールとしてアンサンブル予測雨量が利用しうることを述べた.

第 2 章では本章で述べた研究の背景について詳細に述べる. 具体的には、最初に国土交通省所管ダムにおける基本的な洪水時ダム操作に関する規定、考え方、背景等について述べた後、国土交通省所管ダムにおける予測雨量を活用した洪水時ダム操作の実績や予測雨量活用に関する検討事例の紹介を通じて、予測雨量を実運用において活用することの課題等について述べる. その後、予測雨量を活用したダム操作方法に関する日本国内で行われてきた研究について述べ、続いてアンサンブル予測雨量の活用について主としてヨーロッパの洪水予測において行われてきている研究、実運用の状況について述べる.

日本の洪水時ダム操作は大きく予備放流操作、事前放流操作、洪水調節操作及び特別防災操作の 4 つに大別される. さらに事前放流操作については活用水位からの事前放流操作と、洪水貯留準備水位からの事前放流操作に分けられる. 3 章から 5 章では、これらの操作のうち事前放流操作、洪水調節操作及び特別防災操作におけるアンサンブル予測雨量を活

論文のテーマ:

アンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作決定方法に関する研究

第1章 序論

- アンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作決定方法に関する研究を実施する背景・必要性

第2章 予測雨量を用いた洪水時ダム操作に関する既往研究・取組

- 第1章で述べた研究の背景・必要性について、洪水時ダム操作の基本的な考え方、予測雨量を活用した操作に関するこれまでの取組、既往研究のレビューを中心に説明

第3章～第5章 アンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作決定方法

洪水時のダム操作を予備放流操作、事前放流操作、洪水調節操作、特別防災操作に大別し、このうち事前放流操作、洪水調節操作及び特別防災操作を対象としてアンサンブル予測雨量を活用した操作決定方法について説明

■ 事前放流操作

- 活用水位からの事前放流操作:5章
- 洪水貯留準備水位からの事前放流操作:4章、5章

■ 洪水調節操作:3章

■ 特別防災操作:5章

第6章 アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作における予測先行時間延長の効果

- アンサンブル予測雨量の予測先行時間が延長された場合の効果の把握
- 大規模洪水だけでなく中小規模洪水も含めた複数洪水に対する手法の適用性検証

第7章 まとめ

- 論文のまとめと今後の課題

図 1.1 本論文の構成

用した操作の決定方法について述べる。いずれの章においても、過去において実際に発生した洪水事例を対象としてアンサンブル予測雨量を計算し、得られたアンサンブル予測雨量と流出計算モデルを用いて検討を行う。

最初に第3章では、洪水調節操作へのアンサンブル予測雨量の利用について述べる。具体的には、本則操作と比較して洪水調節容量をできる限り多く使うことによって下流への放流量を低減させる操作（オーバーカット）を、アンサンブル予測雨量を用いて決定する方法について述べる。

第4章では、洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関するアンサンブル予測雨量を用いた操作決定方法について述べる。最初に、洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施する際に考えるリスクとして、「大きな雨が予測されたため事前放流操作を実施したものの、実際には雨があまり降らずに利水容量が回復しないリスク」及び「事前放流操作を実施したものの、その量が不十分であったために洪水調節容量が不足して異常洪水時防災操作を実施するリスク」の2種類のリスクを定義する。計算されたアンサンブル予測雨量を

用いてこれらのリスクを定量化し、事前放流操作の放流量を決定する考え方について述べる。

第 5 章では、活用水位からの事前放流操作及び特別防災操作に関するアンサンブル予測雨量を用いた操作決定方法について述べる。ここでも第 4 章と同様に、それぞれの操作に関わるリスクを最初に定義する。活用水位からの事前放流操作に関するリスクとしては「放流量が十分ではなく、流入量が洪水量に到達する前までに貯水位を洪水貯留準備水位まで低下させられないリスク」を定義する。特別防災操作に関するリスクとして「特別防災操作の実施に伴う貯留により貯水位が洪水時最高水位を超過するリスク」の 2 種類を定義する。両操作について、アンサンブル予測雨量を活用することで定義したリスクを定量化し、放流量を決定する考え方について述べる。また、第 4 章で述べる洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関する放流量決定の考え方についても修正する。

第 3 章から第 5 章を通じて、洪水時ダム操作を構成する主たる 4 つの操作のうち、予備放流操作を除く 3 つの操作に対してアンサンブル予測雨量を用いた操作の決定方法を述べることとなる。予備放流操作へのアンサンブル予測雨量の適用については本論文の中では扱わないものの、第 5 章で述べる活用水位からの事前放流操作における考え方が適用可能と考えられるため、洪水時ダム操作を構成する主たる 4 つの操作に対するアンサンブル予測雨量の適用について、本論文の中で一通り述べられることになる。

第 6 章では、第 5 章までに述べたアンサンブル予測雨量を活用した洪水貯留準備水位からの事前放流操作の決定方法について、予測先行時間が延長された場合、操作規則に基づく操作では異常洪水時防災操作を必要とする大規模洪水に対する効果を具体的に検討する。また、操作規則に基づく操作では異常洪水時防災操作を必要としない中小規模洪水に対しても手法を適用することで、事前放流操作を回避することができるのかについて検討する。

第 7 章においては、第 3 章から第 6 章までのまとめを通じ、洪水時ダム操作においてアンサンブル予測雨量を用いることの意義と今後の課題について述べる。

参考文献：

Bartholmes JC, Thielen J, Ramos MH, Gentilini S. 2009. The european flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 141-153.

ダムの洪水調節に関する検討会 2019. “令和元年台風第 19 号におけるダムの状況”.
http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/damchousetsu_kentoukai/dai01kai/23_R1T19_dam_taiou.pdf (参照：2020/01/19)

異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能に関する検討会 2018. “異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能と情報の充実に向けて”. https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chousetsu_kentoukai/pdf/teigen.pdf (参照：2021/03/02)

柏井条介・土屋修一・石神孝之 2008. 気候変動による豪雨時の降雨量変化予測—GCM20 による評価を中心に—. 国土技術政策総合研究所資料. 第 462 号

気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会 2019. “気候変動を踏まえた治水計画のあ

- り方 提言”。 https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/02_honbun.pdf
(参照：2021/03/02)
- 気象庁予報部 2016. 確率的な気象予測のためのアンサンブル予報の課題と展望. 数値予報課報告 別冊第 62 号 ; 93-113.
- 気象庁予報部 2019. メソスケール気象予測の現状と展望. 数値予報課報告 別冊第 66 号 ; 1-18.
- 国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所. “平成 22 年 7 月 14 日～14 日出水（梅雨前線）における八田原ダムの洪水調節効果について”. <http://www.cgr.mlit.go.jp/hattabara/info/masscom/material/220715.pdf> (参照：2015/09/07)
- 国土交通省河川局長 2005. 国土交通省所管ダムにおける事前放流の実施について. 平成 17年3月30日 国河流第20号.
- 国土交通省 水管理・国土保全局 2017. “ダム再生ビジョン”. <https://www.mlit.go.jp/common/001190127.pdf> (参照：2021/02/27)
- 国土交通省 水管理・国土保全局 2020. “事前放流ガイドライン”. <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001341537.pdf> (参照：2021/02/24)
- 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 2017. “ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向けたダム操作規則等点検要領及び同解説”. https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam7/pdf/damsousakisokutenkenyoryoH29.pdf (参照：2021/02/24)
- 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 2020. “令和 2 年度出水期における事前放流の実施状況”. <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001369657.pdf> (参照：2021/02/24)
- 国土交通省東北地方整備局 2011. “台風 15 号による阿武隈川上流等の出水速報について”. <http://www.thr.mlit.go.jp/fukushima/pressedit/content/201109231140570000.html> (参照：2015/09/07)
- 国土交通省 東北地方整備局 最上川ダム統合管理事務所 2020. “前線及び低気圧に伴う出水における寒河江ダム・白川ダム・長井ダムの防災操作（洪水調節）効果について”. http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/kisya/kisyah/images/68049_1.pdf (参照：2021/05/16)
- 松川知三・松浦旬 2018. “寺内ダムの操作について～平成29年7月九州北部豪雨対応～”. [http://www.qsr.mlit.go.jp/useful/n-shiryō/kikaku/kenkyu/h30/01/1_10\(88\).pdf](http://www.qsr.mlit.go.jp/useful/n-shiryō/kikaku/kenkyu/h30/01/1_10(88).pdf) (参照：2021/03/02)
- 三石真也・角哲也・尾関敏久・矢神卓也 2011. 降雨予測を活用したダム洪水調節におけるリスク管理に関する研究. ダム工学 21(4): 242-250.
- 水資源機構草木ダム管理所 2019. “草木ダムにおける防災操作（洪水調節）について～台風第 19 号における洪水貯留効果～” https://www.water.go.jp/honsya/honsya/kisya/pdf/2019/10/191013_kusaki.pdf?20191101 (参照：2021/02/02).
- 中津川誠 2014. 気象・水文情報を利用した既存ダムの機能向上策について. 天気 61(8): 648-657.

- Nohara D, Nishioka Y, Hori T, Sato Y 2015. Real-Time Reservoir Operation for Flood Management Considering Ensemble Streamflow Prediction and Its Uncertainty. In *Advances in Hydroinformatics: SYMHYDRO 2014*, Gourbesville P., Cunge J. A., Caignaert G. (ed). Springer: 333-347.
- 佐々木隆・山本力 2005. 第 28 章 ダムの再開発. 多目的ダムの建設 第 5 巻 設計 II 編. 財団法人ダム技術センター: 229.
- 角哲也 2019. “豪雨が問うダムの賢い運用”. 日本経済新聞. 2019 年 1 月 28 日. 朝刊 15 面
- 社会資本整備審議会 2008. “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” http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/index.html (参照: 2015/09/07)
- 社会資本整備審議会 2015. “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～” http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou/index.html (参照: 2015/09/07)
- 田畑和寛 2017. 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨における鬼怒川上流ダム群の操作について. *ダム工学* 27(2): 113-123.
- Ushiyama T, Sayama T, Iwami Y 2016. Ensemble Flood Forecasting of Typhoon Talas and Roke at Hiyoshi Dam Basin. *Journal of Disaster Research* 11(6): 1032-1039.
- 臼谷友秀・中津川誠 2010. 積算予測雨量に基づいた融雪期におけるダム洪水調節機能の向上について. *土木学会論文集* 66(3): 268-279.
- 和田一範・川崎将生・富澤洋介 2006. 気象予測データの利用可能性に関する研究. 国土技術政策総合研究所資料 329.

第2章 予測雨量を用いた洪水時ダム操作に関する既往研究・取組

本章では、国土交通省所管ダムにおける標準的な洪水時ダム操作の考え方、操作規則における予測雨量の位置づけの変遷について述べる。事前放流操作及び特別防災操作において予測雨量の具体的な利用方法について述べる。次に、予測雨量の不確実性を考慮した洪水時ダム操作の既往研究について述べた後、予測雨量の不確実性を定量的に評価するためのツールとして挙げられるアンサンブル予測雨量に関する国内外での利活用状況・研究について述べることを通じ、本研究の位置づけを示す。

2.1 多目的ダムにおける標準的な洪水時ダム操作

ここでは、秋山ら（2005）を基に、標準的な洪水時のダム操作の流れについて示す。なお、水位については国土交通省（2014）に則った表記とする。

図2.1は予備放流方式のダムにおける洪水時ダム操作の流れを示したものである。洪水時ダム操作を大きく分類すると、すりつけ操作、（予備放流方式のダムにおいては）予備放流操作、水位維持操作、洪水調節操作、異常洪水時防災操作、後期放流操作に分類される。それぞれの操作の概要を記す。

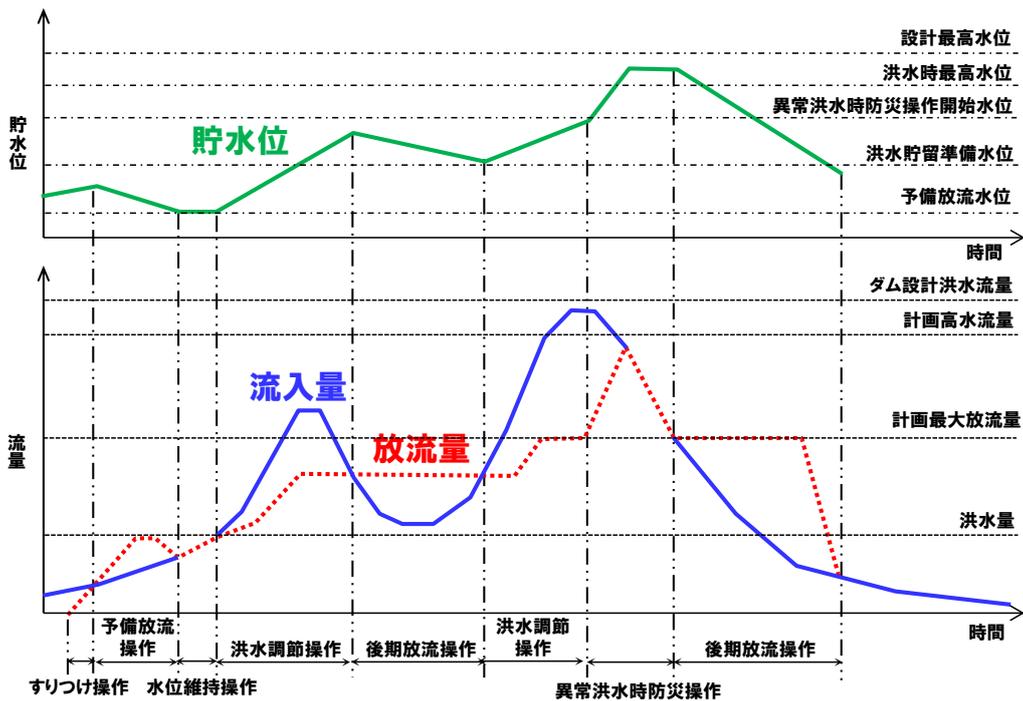


図 2.1 洪水時のダム操作の流れ（予備放流方式）

1) すりつけ操作

すりつけ操作は、洪水警戒体制が発令された後、出水の最初に行われるもので、ダムからの放流量を流入量と等しくするまで徐々に増加させる操作である。特に多目的ダムでは、渇水期の利水補給等によって貯水位が洪水貯留準備水位または平常時最高貯水位よりも低

下している場合は、利水容量の回復に配慮しながら放流を行うことになる。また、すでに貯水位が洪水貯留準備水位等の付近にあり、水位維持操作が行われている場合はすりつけ操作は不要となる。この操作のポイントは、ダムからの放流開始の時期をいつに設定するかという点にある。前述のように貯水位が洪水貯留準備水位等よりも下にある場合は、利水側から見れば出水を貯留し速やかに利水容量の回復を図るべきであり、一方、治水側にとっては、流入量が著しく増加するまでにすりつけ操作を完了させ、来るべき洪水調節操作への円滑な移行を図るべきである。このように両者にとって、全く異なる操作目標が存在する操作である。

2) 予備放流操作

予備放流操作は、貯水池への流入量が洪水量に達する前に、洪水調節計画上必要となる空容量を確保するため必要となる貯留水をダムから放流する操作である。この操作は、洪水量の大きさや予備放流開始時点の貯水位の高低によっても異なるが、数時間を要するのが普通である。

予備放流方式は、我が国独自の概念として自然発生的に独特な発展を遂げたものと考えられている。かつては、多目的ダムの利水補給によって生じる長期の貯水位の漸次低下を利用して洪水を調節し、再びこの貯留された流水を利水に利用する、いわば自然調節的な運用が考慮されていた。ただし、この方法では、洪水調節としての不確定要素が多いことから、この点を改善するため人為的に短期間で貯水位を低下させ、洪水調節を行う予備放流方式が現れたものと考えられている。

予備放流方式は、洪水調節容量の全部又は一部を利水のための容量と共用することから、貯水池の効率的な利用という点では優れているが、その反面、確実な洪水の予測が必要となる。このため、予備放流操作を行ったが予測したはずの洪水が発生せず、失われた利水容量の回復ができない場合や利水容量の回復の失敗をおそれるあまり、必要な予備放流を行わず結果的に洪水調節に支障を来すことも考えられる。このように予備放流方式は、貯水池の有効利用という面からは優れた方式と言えるが、管理上は洪水の発生する前にダムから放流を行う必要があるため河川利用者の安全確保や精度の高い洪水の予測が必要となる等課題の多い方式である。このため、最近のダム計画において採用されることはまれである。

3) 水位維持操作

水位維持操作は、貯水位をある一定の標高に維持するため放流量を流入量と等しくする操作である。出水時の操作では、予備放流水位や洪水貯留準備水位等を維持する場合に用いられる。操作方法としては、維持したい一定の貯水位を上限として、その下方に一定の制御水位幅を設け、この制御水位幅内に貯水位を維持するよう貯水位の変化量に応じて放流量を増減させるものである。この方法は「水位偏差方式」と呼ばれるもので、放流設備の操作の安定を目的として、近似的に一定の貯水位を維持しようとするものである。水位偏差方式は、ダム管理用制御処理設備の標準的な方式として多くのダムで採用されている。

4) 洪水調節操作

洪水調節操作は、貯水池への流入量が洪水量に達したときから流入量がピークを過ぎた後、放流量と流入量が等しくなるまでの間において、操作規則の本文に規定する洪水調節方法に従ってダムから放流を行う操作である。

ダムによる洪水調節は、下流河川の被害を防止し又は軽減することを目的としたものであるから、流量を適切に制御しなければならない。そのためには、安定して、確実に効果を発揮させることが、第一の目標であり、適切な操作ルールの設定と確実な操作が要求される。また、操作の前提条件として、人為操作による公衆の生命、財産を危険にさらすことは許されないため操作は慎重に、かつ安全を期して行う必要がある。

このような観点からダムによる洪水調節操作の基本原則として次の4点が挙げられる。

- ① 確実な操作を行い、確実な効果を発揮
- ② 安全性の確保（放流に対する下流の安全確保、ダム等施設の安全）
- ③ 即応性（洪水変化に即応した行動、臨機の処理）
- ④ 洪水ごとの適応操作（上記①から③を確保した上で効果の最大化を図る）

現在の洪水調節に係る操作は、操作規則において「所長は、次の各号に定める方法により洪水調節を行わなければならない。ただし、気象、水象その他の状況によりとくに必要があると認める場合においては、この限りでない。」と規定している。本文の規定は、「固定ルール調節方式」と呼ばれるもので、あらかじめ十分な技術的検討を行って洪水調節方法を定めるものである。この操作方式は、一定の効果を確実に確保でき、更に操作の過程において適応判断を要しない確実な操作を第一としている。ただし書き規定は、「適応化操作方式」と呼ばれるもので、上記①から③に掲げる確実性、安全性、即応性を満足した上で、洪水ごとに効果の最大化を図ろうとするものである。この操作方式は、河川全体の水文諸量の時間的な変化の予測が、十分な精度で的確に行えることが前提となるため、現段階では特別な場合に限って用いられている。

ダムの洪水調節方法は、流入量に対してダムからの放流量を設定する操作上のルールをいうものである。現在のところ洪水調節を目的に有するダムの洪水調節方式は、一定量放流方式、一定率一定量調節方式、自然調節方式、鍋底をはじめとする其他方式に分類される。

5) 後期放流操作

後期放流操作は、洪水調節によって上昇した貯水位を速やかに洪水貯留準備水位等まで低下させる操作である。操作規則においては、後期放流操作のいわば上限が示されており、実操作ではおおむね以下の3つのパターンが考えられる。

- ① 次に来る洪水に備えて最も速く水位低下を行う場合。
- ② 次に洪水が来るおそれがなく、洪水調節操作終了時のゲート開度を一定に保ったまま貯水位の低下を行う場合。
- ③ 下流河川が氾濫しており、かつ次に来る洪水が来るおそれがない場合に洪水量以下の放流で貯水位の低下を行う場合。

どのような操作方法を用いるかは、個々のケースによって異なるため、気象、水象の状況及び貯水池の貯留状況並びに下流河川の状況を考慮しながら決定することとなる。

6) 異常洪水時防災操作

異常洪水時防災操作は、各ダムの「ただし書き操作要領」において、計画規模を超える洪水時の操作方法としてあらかじめ規定されている。異常洪水時防災操作は、ダムの安全を確保しつつ、下流河川での被害を最小限に抑えることをその基本としているが、計画最大放流量を超えて放流を行うこととなるため、ダム管理者が下流河川での氾濫のおそれがあることをあらかじめ認知して行う操作である。建設省河川局長（1984）に記載されている異常洪水時防災操作における基本的な考え方・実施方法等は以下のとおりである。

6-1) 異常洪水時防災操作への移行判断

当該洪水が、ダムの計画規模を超える洪水（以下「異常洪水」という）であったか否かは、洪水が終了した後においては、当該洪水の実績降雨量と計画降雨量の比較や最大流入量と計画高水流量との比較を通じて客観的に判断することができる。しかし、洪水の終了を待たずして、実操作中に当該洪水の異常性を迅速かつ確実に判断することは難しい。一方、実操作中においては、操作規則の本文に規定する洪水調節方法（本則操作）から異常洪水時防災操作への移行をどの時点で、どのような基準で判断するかが重要なポイントとなる。このため、客観的な指標でもある貯水位（言い換えれば残容量）と今後の流入量の予測から、次の①及び②のいずれの条件にも該当する場合に、異常洪水時防災操作へ移行することとされている。

- ① 貯水位が異常洪水時防災操作開始水位に到達。
- ② 貯水位が異常洪水時防災操作開始水位に達する直前に推定した概略の予測流入波形に対し、本則操作を継続した場合に今後必要となる貯留量を算出し、この貯留量が残容量（異常洪水時防災操作開始水位から洪水貯留準備水位の間の洪水調節容量）を超えると予測される場合。

この場合、異常洪水時防災操作への移行は、操作の重要性及び適正を期するためダム管理所長は、あらかじめ地方整備局長等の承認を受けなければならない。また、異常洪水時防災操作は、ダム下流での氾濫が予想されることから、地元関係機関等が時間的な余裕をもって、迅速かつ円滑に住民の避難等の適切な措置が行えるよう関係機関に対し、異常洪水時防災操作移行の予告を通知するとともに、一般に周知するためサイレン等による放流警報を実施する必要がある。

6-2) 洪水吐ゲートの操作方法

異常洪水時防災操作における洪水吐きゲート等の操作方法は、ダムの安全を確保しつつ、過放流によって下流河川の洪水被害を助長することのないよう、あらかじめ定められた操作方法に従って適切かつ確実に行われなければならない。異常洪水時防災操作におけるダムからの放流の基本的な考え方は、次の通りである。

- ① 貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超え洪水時最高水位に達するまでは、洪水

時最高水位において計画高水流量が放流できるように、貯水位に応じて洪水吐きゲートを開けていくものとする。

- ② 前記の操作を行っている際に貯水位が洪水時最高水位を超えた場合には、前記の操作に引き続き、設計最高水位においてダム設計洪水流量が放流できるように、貯水位に応じて洪水吐きゲートを更に開けていくものとする。

洪水吐きゲートの操作にあたっては、確実な操作を行うため原則としてオリフィスゲート（コンジットゲート）は、異常洪水時防災操作開始水位になったときの開度を保ち、クレストゲートの開閉のみによって行う。しかし、クレストゲートのみではダム設計洪水流量を放流できないダムにあつては、オリフィスゲートの操作が必要となるため、オリフィスゲートについても操作方法を定めておく必要がある。このため、あらかじめダムごとに放流設備の状況に応じて、貯水位とゲート開度の対応表（以下「ゲート開度表」という）を作成し「ただし書き操作要領」に規定しておくものである。洪水吐きゲートの操作は、ゲート開度表に基づいて、貯水位に対応するゲート開度を確保するよう行う。

異常洪水時防災操作を継続中において、流入量がピークを過ぎた後、放流量が流入量と等しくなったときは、流入量が計画最大放流量に低減するまでの間は、下流の洪水被害を最小限にとどめるため、流入量に等しい放流を行い、流入量が計画最大放流量まで下がり、異常洪水時防災操作が解除された後は、クレストゲートは全閉とし、オリフィスゲートを用いて後期放流操作を行う。

（注）後述する操作規則において、「洪水」とは各ダムにおいて定められる洪水量を流入量が上回った状態として通常定義される。そのため、すりつけ操作、水位維持操作、予備放流操作及び後期放流操作の 4 操作は通常、流入量が洪水量よりも小さい状態において実施される操作であるため、厳密には「洪水時」に実施される操作ではない。しかし、4 操作いずれも洪水調節操作に深く関係する操作であることから、本論文においては 4 操作を含めて上記(1)～(6)をまとめて「洪水時ダム操作」と述べるものとする。

2.2 操作規則における予測情報の位置づけ

2.2.1 操作規則

前節では、本論文の中心的なテーマである洪水時ダム操作について標準的な流れと各操作の概要を示した。これらの操作は、河川法（第 14 条）や特定多目的ダム法（第 31 条）において各ダムについて策定が義務付けられている「操作規則」において具体的に定められている。例えば河川法による河川管理施設であるダムにおいては、河川管理者が下記の事項について操作規則の中で定めなければならない。

- 1) 施設の操作の基準となる水位、流量等に関する事項
- 2) 施設の操作の方法に関する事項
- 3) 施設及び施設を操作するため必要な機械、器具等の点検及び整備に関する事項
- 4) 施設を操作するため必要な気象及び水象の観測に関する事項
- 5) 施設の操作の際にとるべき措置に関する事項

6) その他施設の操作に関し必要な事項

操作規則は、ダムを操作するための基本となるべき事項及び基本原則を定めたものであり、操作規則を受けて操作の具体的な方法及び操作上の重要事項を定めたものが細則であり、ダムの管理に携わる者は、操作規則等の内容を熟知し、これを遵守しなければならない。その一方で、ダムは時代の変化や社会の要請に対応できるよう管理・運用されなければならない。そのためには、ダム完成後の管理実績の蓄積によって得られる知見及び社会情勢の変化並びに技術の進展等を踏まえ、適切な時期に操作規則等の点検又は評価を行い、必要に応じて見直すことが肝要であるとされている（秋山ら、2005）。

国土交通省所管ダムにおける操作規則は、河川法（昭和39年法律第167号）第14条及び特定多目的ダム法（昭和32年法律第35号）第31条の規定に基づく昭和40年7月9日付け建河発第263号河川局長通達「多目的ダム操作規則の様式について」（建設省河川局長、1965）により策定が行われてきた。この通達においては、標準的な操作規則の事例として横山ダムの操作規則が示されている。その後、平成13年11月28日国河環第78号 国河治第170号国土交通省河川局長通達「河川法第14条及び特定多目的ダム法第31条に基づくダムに係る操作規則の策定について」（国土交通省河川局長、2001）が示され、新たな標準的な操作規則例が示された。この通達以降において操作規則を策定又は変更する場合は、この通達に基づいて措置することとされている。ここでは、昭和40年7月9日付け建河発第263号河川局長通達「多目的ダム操作規則の様式について」（建設省河川局長、1965）において示された操作規則を「旧規則」、平成13年11月28日国河環第78号 国河治第170号国土交通省河川局長通達「河川法第14条及び特定多目的ダム法第31条に基づくダムに係る操作規則の策定について」（国土交通省河川局長、2001）において示された操作規則を「新規則」として、旧規則から新規則において予測情報がどのように位置づけられ利用されてきたかについて述べる。

2.2.2 旧規則における予測情報の位置づけ

旧規則においては、予備放流操作の実施判断において予測情報の利用が想定されている。横山ダムの操作規則においては、

====以下、引用=====

（予備放流水位の最低限度）

第11条 予備放流水位の最低限度は、標高192.7メートルとする。

=====

とされている。これは、予備放流操作によって水位を低下させる場合に、どこまで低下させることができるのかについて、その限度を定めているものであり、実際に予備放流操作を行う場合に常にここまで低下させることを定めたものではない。さらに、洪水警戒体制時における措置に関する条文において、

====以下、引用=====

（洪水警戒体制における措置）

第16条 所長は、前条の規定により洪水警戒体制をとったときは、ただちに、次の各号に

定める措置をとらなければならない。

- 一 中部地方建設局木曾川上流工事事務所，木曾川下流工事事務所，岐阜地方气象台，横山発電所，久瀬発電所，その他の関係機関との連絡並びに気象および水象に関する観測及び情報の収集を密にすること。
- 二 最大流入量，洪水総量，洪水継続時間および流入量の時間的变化を予測すること。
- 三 洪水調節計画をたて，予備放流水位を定めること。
- 四 ゲート並びにゲートの操作に必要な機械および器具の点検および整備，予備電源設備の試運転その他ダム の操作に関し必要な措置をとること。

とされている（建設省河川局長，1965）。ここで，二において，最大流入量，洪水総量，洪水継続時間および流入量の時間的变化を「予測」し，その結果に基づき三において予備放流水位を定めることとなる。まとめると，旧規則においては，予備放流操作における予備放流水位を定めるために予測情報が定量的に用いられていたことが特徴である。なお，ダム操作細則作成要領（案）においては洪水の予測について下記の通りとされている（国土交通省河川環境課，2006）。

以下，引用（洪水の予測等）

第〇条 所長は次に掲げる仮定及び別紙第 1 に掲げる資料によって最大流量，洪水総量，洪水継続時間及び時間变化を予測するものとし，その後入手した気象情報等により漸次これを修正するものとする。

- イ 最大流量は総雨量により推定できる。
- ロ 洪水の継続時間は総雨量により推定できる。
- ハ 流入量の時間的变化は最大流量を頂点とする三角形とする。

2 洪水調節容量は，計算によって推定された容量に 2 割程度の余裕を見込むものとする。

2.2.3 新規則における予測情報の位置づけ

その後，平成 13 年 11 月 28 日国河環第 78 号 国河治第 170 号国土交通省河川局長通達「河川法第 14 条及び特定多目的ダム法第 31 条に基づくダムに係る操作規則の策定について」（国土交通省河川局長，2001）が発出され，この通達以降に策定又は変更される操作規則については，この通達に基づいて措置することとされた。この通達における要点は下記の通りであり，下記引用における 1.および 2.が予測情報の活用に係る記述である。

以下，引用

1. 既存ダムのより一層の有効活用を図るため，平成 9 年度より試験的に実施してきたダムの弾力的管理（洪水調節容量の一部を活用して，河川環境の保全を図るための操作を言う。）を操作規則に明記することとされたい。

なお操作に当たっては，従前どおり「ダムの弾力的管理試験」を実施し，試験によってその安全性及び有効性が確認されていることを実施の条件とする。

2. 洪水警戒態勢の発令基準については、近年の降雨及び洪水に関する予測技術の進展及びダム管理実績による知見の蓄積を踏まえ、より安全で確実な発令基準の設定が行えるよう措置されたい。
3. 所管ダムにおいて、ダム本体、貯水池及びダムに係る施設等の定期的な検査を新たに実施できるよう措置されたい。
4. 利水のためのダムからの放流については、操作規則に規定するダム計画上の水量と現在の水利使用の許可条件との整合を図るよう措置されたい。
5. 所管ダムの操作規則の策定及び変更に際しては、河川法及び特定多目的ダム法に基づく手続きのほか、ダムの役割、操作の内容、ダムからの放流に伴う危害防止の措置等を周知し、ダム管理者としての説明責任を果たすため、関係市町村及び関係市町村からの要請に応じて関係住民への説明を行うよう措置されたい。
6. 操作規則及び操作細則の具体の記載例については、別途、河川局河川環境課長・治水課長より通知するので参考とされたい。

=====
 平成9年の河川法改正により従前の治水、利水を中心に規定されたものから、「河川環境（河川の持つ自然環境、河川と人との関わりにおける生活環境）」が明確に位置付けられたことにより、河川法の目的として、治水、利水に加え、「河川環境の整備と保全」が位置付けられた。この河川法改正を受け、ダムにおける河川環境の整備と保全に向けた取組として「ダムの弾力的管理試験」が実施された（国土交通省河川局河川環境課，2003）。ダムの弾力的管理試験は、既存ダムのより有効な活用を図るため、平常時は空容量となっている洪水調節容量の一部に流水を貯留し、この貯留された流水を適切に放流することで、ダム下流の河川環境の保全を図ろうとするものであり、この操作を反映する条項が上記引用の1.である。弾力的管理は既に多くのダムにおいて導入されている（例えば、真名川ダム弾力的管理検討委員会，2016）。弾力的管理は、洪水調節に支障を及ぼさないことが前提となる。このため洪水の発生が予想される時は、「事前放流操作（※）」によって洪水調節容量内に貯留した活用貯留水をダムから放流し、貯水位を洪水貯留準備水位等まで低下させなければならない。洪水の発生が予想される際の事前放流操作開始について判断するための基準を事前放流開始基準と称している。事前放流開始基準は、所定のリードタイムを確保した上で洪水の発生を的確に予想するものであり、概念的には洪水警戒体制の発令基準と同様となる。ただし、事前放流操作による水位の低下という新たな操作が加わるため、これに要する時間を従来のリードタイムに加味しておく必要がある。（（※）ここでいう事前放流操作は、洪水調節容量内（洪水貯留準備水位よりも上）に貯留した活用貯留水を洪水発生の前に放流するものである。一方、近年使われる事前放流操作は洪水貯留準備水位よりも下の貯留水を放流する操作である。両者は同じ言葉を用いているが実施する操作が異なることに留意が必要である。）

洪水警戒体制の発令基準については、旧規則においては下記の通りとなっている（建設省河川局長，1965）。

=====
 以下、引用=====

第 15 条 横山ダム管理所長は次の各号の一に該当する場合には、洪水警戒体制をとらなければならない。

- 一 岐阜地方気象台から降雨に関する注意報または警報が発せられたとき。
- 二 その他洪水が予想されたとき。

=====
これが、新規則においては下記の通りとなった（国土交通省河川局長，2001）。

====以下，引用=====
規則第 13 条

所長は、次の各号の一に該当するときは、洪水警戒体制を執らなければならない。

- 一 ○○地方気象台から○○地方において、降雨に関する注意報又は警報が発せられ、洪水の発生が予想されるとき。
- 二 その他細則で定めるところにより洪水の発生が予想されるとき。

細則第 3 条（洪水警戒体制）

規則第 13 条第 1 項第二号に規定する洪水警戒体制は、次の各号の一に該当する場合とする。

- 一 ○○ダム流域内（以下、「流域内」という。）において連続雨量が○○ミリメートルに達したとき。
 - 二 今後、流域内において○時間の雨量が○○ミリメートルを超えると予想されるとき。
 - 三 流域内において総雨量が○○ミリメートルを超えると予想されるとき。
 - 四 台風の中心が東経○○○度から○○○度の範囲において、北緯○○度に達したとき。
 - 五 前線の位置が東経○○○度から○○○度の範囲において、北緯○○度に達したとき。
- （以下，略）

=====
旧規則においては、気象台から降雨に関する注意報又は警報が発せられた場合は、いかなる場合においても洪水警戒体制を執ることが規定されていた。一方、レーダ雨量計等の観測体制の整備をはじめ、降雨に関する予測技術及び情報提供サービスの進展及びそれらの特性を踏まえ、新規則においては規則第 13 条第 1 項第一号において「降雨に関する注意報又は警報が発せられ」の後に「洪水の発生が予想される時」を新たに設け、いたずらに洪水警戒体制が発令され、職員を過度に拘束することのないよう合理的な発令を可能としたものである。

上述の洪水警戒体制における条文の他、予備放流操作についても新規則において旧規則から変更が行われ、予測情報の扱が変更されている。大雪ダムの操作規則第 10 条では以下のように記載されている（国土交通省河川環境課，2006）。

====以下，引用=====
（予備放流水位）

====以下，引用=====
（予備放流水位）

第 10 条 非洪水期間における予備放流水位は、標高 807.0 メートルとする。

旧規則においては「予備放流水位の最低限度」が定められており、どこまで予備放流を行うかは管理所長の判断に任されていたところであるが、洪水予測の不確実さから予備放流の不足を招くおそれがあり、このため新規則では洪水期における予備放流操作は、洪水調節計画上必要な容量を確保するために行うものであるから、洪水を迎えるにあたっては、どのような場合でもダム計画において定められた予備放流水位を目途に予備放流操作を行うこととされた。これに併せて、細則の（洪水警戒体制時における措置）に定められていた、「最大流入量，洪水総量，洪水継続時間および流入量の時間的変化を予測すること.」，「洪水調節計画をたて，予備放流水位を定めること」という 2 号について削除された（秋山ら，2005；国土交通省河川環境課，2006）

2.3 事前放流操作

2.3.1 操作の概要

前項で述べた通り，弾力的管理における活用貯留水の放流や，洪水警戒体制の判断への利用が新規則における予測情報の主たる位置づけであった。その後，平成 16 年の「総合的な豪雨災害対策についての緊急提言（社会資本整備審議会河川分科会 豪雨災害対策総合政策委員会）」を受けてまとめられた「豪雨災害対策緊急アクションプラン」において，防災機能を一層向上させるための既存施設の有効活用の一環として，「降雨予測技術の進展も踏まえた，ダムの機能をより効果的に発揮させるための操作ルールの変更」が実施する施策として挙げられ，事前放流操作等について検討することが明記された（国土交通省，2004）。日本国内において洪水調節を目的として有しているダムの多くは，図 2.2 左に示されるように，洪水調節容量と利水容量を併せ持つ多目的ダムが一般的である。事前放流操作は，予測雨量情報等に基づいて事前に洪水の発生が予見できた場合において，利水者の合意の上で洪水調節容量の下にある利水容量を洪水が発生する前に放流する操作である（図 2.2 右）。洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施することにより一時的に洪水調節容量として利用できる容量が増加するため，洪水貯留準備水位からの事前放流操作は異常洪水時防災操作を回避または開始を遅らせることにより，異常洪水時防災操作を実施した時に生じる放流量増加を回避または抑制するための操作と言える。しかしその一方で，仮に予測雨量に基づいて利水容量を事前放流した後で，予測が空振りまたは極端な過大予測であった場合，放流した利水容量が回復せずにその後の利水補給に支障をきたす恐れがある。

事前放流操作に係るこれまでの取組は大きく分けて事前放流ガイドライン（案）（国土交通省河川局河川環境課長，2005）（以下，「旧事前放流ガイドライン」）と事前放流ガイドライン（国土交通省 水管理・国土保全局，2020）（以下，「新事前放流ガイドライン」）の 2 つがある。旧事前放流ガイドラインは事前放流操作の実施対象を国土交通省所管ダムとするのに対し，新事前放流ガイドラインは国土交通省所管ダムだけでなく利水ダムも対象に含めて事前放流操作を実施するにあたっての基本的事項を扱っている点において異なっている。以下，両者の概要を説明する。

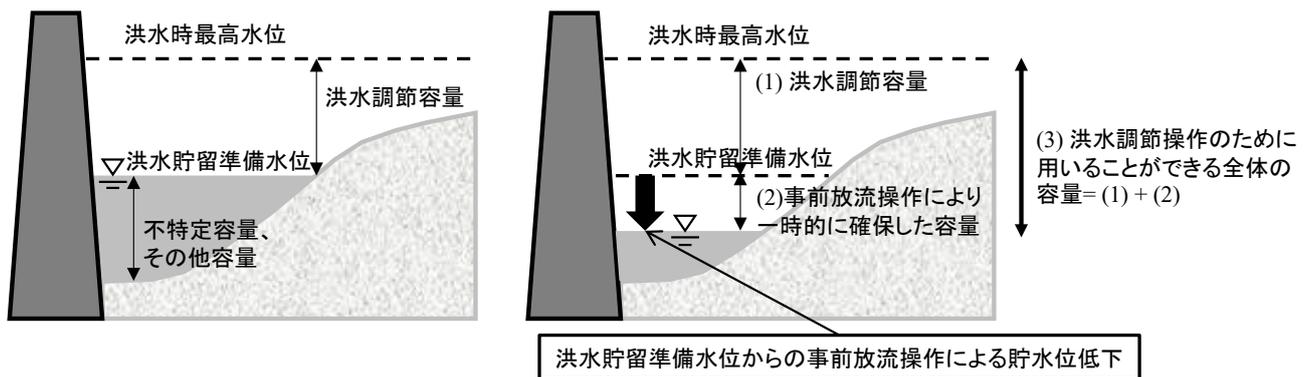


図 2.2 日本の多目的ダムにおける容量配分例（左）及び事前放流操作（右）のイメージ図（国土交通省の資料を参考に作成（国土交通省 水管理・国土保全局，2017）. また，洪水調節容量及び利水容量についてのみ描いており，堆砂容量，死水容量をはじめとしたその他の容量については省略している.）（Inomata *et al.*, 2018；猪股ら，2021）

2.3.2 旧事前放流ガイドラインに基づく事前放流操作

旧事前放流ガイドラインにおいては，事前放流操作により確保する空容量の範囲として，利水の共同事業者に支障を与えない範囲かつ，下流河川利用者の安全を確保できる放流や貯水池法面の安定を確保できる水位低下速度により確保可能な容量を事前放流の対象とすること，事前放流の実施に当たっては，共同事業者に対して利水容量を活用すること及び沿川市町村に対して事前放流の目的と方法を，洪水期前または事前放流の開始前に十分に説明を行うこととされ，その実施範囲は「降雨解析などにより確実に容量回復が見込める容量の活用」，「未利用容量の活用」，「不特定容量の活用」及び「堆砂（死水）容量の活用」の4つが挙げられている（国土交通省河川局河川環境課長 2005）. 特に「降雨解析などにより確実に容量回復が見込める容量の活用」については，このガイドラインに付随した手引き（ダム水源地環境整備センター，2005）に基づいた事前放流操作の導入検討が行われた. さらにそれから10年以上経過した後，予測技術の進展状況を踏まえて，再度導入検討が行われた（国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課，2017）.

2.3.3 旧事前放流ガイドラインにおける予測雨量の利用方法

ここでは，国土交通省水管理・国土保全局河川環境課（2017）及び国土交通省国土技術政策総合研究所（2018）を参照し，旧事前放流ガイドラインにおいて，予測雨量がどのように用いられているかについて具体的に述べる.

事前放流操作については，平成17年の「国土交通省所管ダムにおける事前放流の実施について」（国土交通省河川局長，2005）が通達され，旧事前放流ガイドラインに基づいて最初の検討が実施された. その後，ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向けたダム操作規則等点検要領及び同解説（国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課，2017）に基づいた検討が行われた.

旧事前放流ガイドラインにおいては，「回復可能水位テーブル」というテーブルを用いた事前放流操作が定められている. ここでは，「事前放流検討の手引き（1次案）（ダム水源地環境整備センター，2005）」及び「ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向け

たダム操作規則等点検要領及び同解説（国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課，2017）」から引用して回復可能水位テーブルの性質について述べる。

1) 回復可能水位テーブルの使い方

表 2.1 が回復可能水位テーブルの一例である。縦軸は実績の累積雨量を一定間隔で区切った「累積雨量ランク」を示し，横軸は予測積算雨量を一定間隔で区切った「予測雨量ランク」を示し，それぞれに対応する「回復可能水位」を表示した構成となっている。使用方法は，洪水調節開始前の任意の時間における累積雨量およびその時点で発表されている予測雨量の情報を収集し，それに対応する回復可能水位をテーブルから読み取り，その水位まで事前放流を実施するという順序で利用する。テーブル状の構成となっているため，利用が簡便であり誰が操作を行っても同様に操作されることが利点として挙げられる。また事前放流だけでなく，洪水調節開始前において利水容量に空容量がある場合，水位維持操作の判断にも利用することができる。

2) 回復可能水位テーブルの作成方法概要，性質，技術的な課題

回復可能水位テーブルの作成は，過去の複数の出水に関する実績の流入量，放流量，雨量及びその時に発表された予測雨量を基に行われる。表 2.1 に示される各累積雨量ランク及び各予測雨量ランクに対応する回復可能水位は，過去に同等の累積雨量が発生し，かつその予測雨量ランクを上回る大きさの予測雨量が発表された全ての出水の中で，貯留量が最も少なかった出水の貯留量を洪水貯留準備水位相当容量から引き，その貯水量に対応する貯水位として定められる。これは，予測雨量には誤差が含まれることが不可避であり，予測雨量が実測雨量を過大に予測した場合において事前放流を実施すると，放流した容量が回復できない恐れがある。そのため，過去において同等の予測雨量が発表された事例において最も貯留量が小さかった事例を回復可能量とすることで，極力容量回復を狙っているものである。このような性質を持っているため，事前放流操作を行いつつも洪水貯留準備水位までの確実な貯水位回復を意識していると言える。しかしその一方で，回復可能水位テーブルの欠点としては，過去事例の学習において，大きくはずれた事例が新たに発生し，その結果を踏まえて回復可能水位テーブルを更新すると，回復可能水位テーブルの回復可能水位の値が大きくなる（＝実施できる事前放流量が小さくなっていく）という点に留意する必要がある（ダムの洪水調節に関する検討会，2020）。また，過去の事例において経験がないほど予測雨量が実績雨量を過大評価した場合に事前放流を実施すると，放流した容量が回復できない恐れがある。

3) 事前放流操作に関する既往検討において用いられた予測雨量

事前放流操作は，国土交通省河川局長（2005）及び国土交通省 水管理・国土保全局河川環境課（2017）に基いて検討が行われた。両者は回復可能水位テーブルを用いるという点においては一緒であり，異なる点としては用いる予測雨量が異なることである。

事前放流検討の手引き（1次案）（ダム水源地環境整備センター，2005）には矢作ダムを対象とした回復可能水位テーブルの作成事例が記載されている。当時は，過去の予測雨量に関する生データを入手することが困難であったため，東海地方气象台が保存している「予警報情報原簿」に記載されている予測雨量値を用いて回復可能水位テーブルを作成し

たことが記されている。その一方で、実際の洪水の発生時においては、2005年当時は気象庁の予測雨量（RSM）を用いて実施することとなっていた。このため、回復可能水位テーブルの作成に用いている過去の予測雨量情報と実際の洪水発生時に用いる予測雨量が異なるということが一つの問題であったと考えられる。またRSMは、静力学平衡を仮定した気象モデルであり豪雨に対する表現が十分ではなかったと考えられる。旧事前放流ガイドラインに基づく検討は、これら複数の課題が重なった状況において実施されたものであった。

その後、豪雨をはじめとするメソスケール現象に対して良好な予測精度を有することが期待されるMSMが気象庁により運用開始されてから一定年数が経過したことを受け、再度回復可能水位テーブルの考え方に基づいて事前放流操作を実施する検討が行われた。ここでは、回復可能水位テーブルの作成及び実際の洪水の発生時に用いる予測情報共に、MSMを用いることとされている（国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課，2017）。

表 2.1 回復可能水テーブルの例（国土交通省 国土技術政策総合研究所，2018）

累積雨量ランク (mm)	予測雨量ランク (33時間予測積算雨量 mm/33hr)											
	0 - 49	50 - 99	100 - 149	150 - 199	200 - 249	250 - 299	300 - 349	350 - 399	400 - 449	450 - 499	500 - 549	550 - 600
0	事前放流											
1 - 19	しない											
20 - 39									293.5			
40 - 59									(-5.5m)			
60 - 79					298.2							
80 - 99					(-0.2m)	297.3						
100 - 119				296.1	(-2.9m)							
120 - 139	295.0		294.3					291.4				
140 - 159	(-4.0m)		(-4.7m)					(-7.6m)				
160 - 179									289.7			
180 - 199									(-9.3m)			
200 -												

2.3.4 新事前放流ガイドラインの概要と予測雨量の利用

国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課（2017）における事前放流操作の導入検討の後、国土交通省所管ダムだけでなく利水ダムを対象に事前放流操作を実施するにあたっての基本的事項をとりまとめた新事前放流ガイドラインが策定された。新事前放流ガイドラインにおいては、気象庁の全球モデルであるGSM及びメソモデルであるMSMの平均降水量ガイダンスから得られる予測雨量が基準降雨量を超過した場合に事前放流操作を実施することとしている。また、事前放流操作により放流する容量は、予測雨量の値をそのまま用いて流入量を推定し、多目的ダムにおいては当該ダムの洪水調節操作を適用して洪水を貯留するとともに放流する計算を行い、洪水調節容量が不足する場合には不足となった時点以降の流入総量と放流総量の差から利水空き容量を差し引いたものとして算出する。利水ダムにおいては、ダムに流入する総量の予測値から、放流総量と利水空き容量を差し引いたものとして算出する。旧事前放流ガイドラインにおける回復可能水位テーブルでは、過去において同等の予測雨量が発表された事例において最も貯留量が小さかった事例を回復可能量とすることで予測雨量の不確実性を扱っていると言える一方で、新事前放流ガイドラインにおいては、全球モデルであるGSM及びメソモデルであるMSMの平均降水量ガイダンスから得られる予測雨量の値をそのまま用いる点で異なっている。また、事前放流操作実施後に貯水位が回復しなかった場合の対応として損失補填制度が明記されているこ

とが特徴である（国土交通省 水管理・国土保全局，2020）。

2.4 特別防災操作

2.4.1 操作の概要

平成 13 年に新操作規則が示された後，事前放流操作と並んで導入された予測を活用した高度な操作として特別防災操作が挙げられる。特別防災操作は，洪水時においてダム下流の被害を軽減するために貯留量を増やして容量を有効に活用する高度な操作である（国土交通省，2014）。より具体的には，下流河川で洪水被害が発生又は発生するおそれがあり河川管理者からダム放流量の減量を要請された場合に，洪水の終わりの見通しが相当程度確実かつ残貯水容量に余裕がある状況において本則操作に基づく操作よりも放流量をカットする操作である。これまでに複数のダムにおいて実施された実績がある（例えば，国土交通省 東北地方整備局，2011；国土交通省 東北地方整備局 最上川ダム統管理事務所，2020）。より具体的な実施手順，計算事例を示す。

2.4.2 特別防災操作の実施手順

特別防災操作は，下流河川で洪水被害が発生又は発生するおそれがある場合において，洪水の終わりの見通しが相当程度確実と考えられる場合にのみ実施するものであり，気象水文観測・予測情報を基に開始・継続の判断を行うものである。具体的には，図2.2に示されるフローを基本として実施されるものであり，特別防災操作の「開始判断」と「継続判断」に大別される。開始判断については以下①～④のステップで検討が行われ，継続判断については⑤で検討が行われる。

① 下流河川で洪水被害が発生または発生するおそれがないか

下流河川で洪水被害が発生又は発生するおそれがあるかについて，雨量や水位情報を参考に判断する。

② 次期洪水のおそれがないか

気象庁の府県天気予報（明後日までの天気）および週間天気予報資料を参考に，現洪水に次ぐ洪水が発生するおそれがないか，又は現洪水に対する洪水調節によって貯留した容量を洪水貯留準備水位まで低下させるまでの期間に次の洪水の発生のおそれが無いこと確認する。

③ 洪水の終了が見通せるか

現況の雨および今後（数時間先まで）の雨の予測に関する情報を基に，雨量のピークおよび降り終わりを確実に確認又は予測できるかについて確認する。ここでは，現況に至るまでの雨の推移および現況の雨の把握については国土交通省 C バンドレーダおよび XRAIN を用いることを基本とする。また，今後の雨の見通し（今後の雨域の移動，ダム流域の流域平均雨量の予測）については，6 時間先までの予測雨量である降水短時間予報を用いることを基本とする。

④ 残貯水容量に余裕があるか，放流量の検討

洪水の終了が見通せた場合、本則操作による放流を継続した場合に残貯水容量に余裕があるか確認する。残貯水容量に余裕がある場合、本則操作に基づく放流よりも放流量をカットできるか検討する。

⑤ 特別防災操作を継続するか

特別防災操作を開始した後は、ダム貯水位、流入量および下流河川の状況を把握しながら、天気予報や予測雨量が更新されるたびに次期洪水発生の恐れおよび今後数時間に予測される雨量について確認を行い、状況に変化がない場合は特別防災操作を継続する。再び雨が降るなど次の予測雨量の更新までに残貯水容量が不足する状況が予測される場合、特別防災操作を終了する。

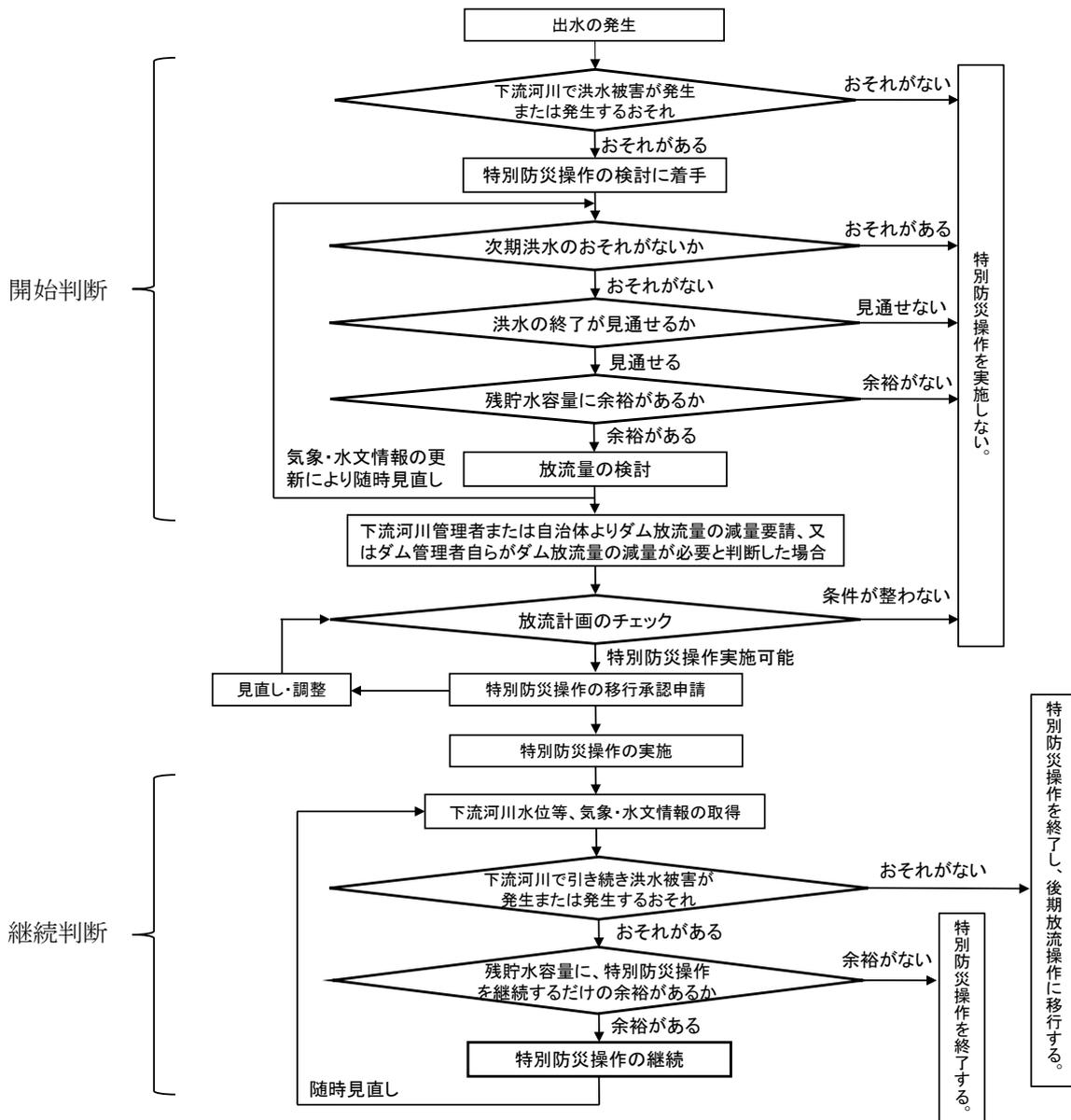


図 2.2 特別防災操作の実施フロー（国土交通省 国土技術政策総合研究所，2018）

上記の②～④において予測情報が用いられる。②においては府県天気予報を用いることで数日先までの天気の見通しを立てる。③においては、気象庁の降水短時間予報を用いることで6時間先までの降雨の見通しを立てることとしており、②及び③においては予測情報を定性的に利用している。それに対し④では、降水短時間予報から得られる予測雨量の値を用いてダムからの放流量を計算するため、降水短時間予報を定量的に扱う。

2.4.3 計算事例

ここでは、特別防災操作における予測雨量の使用方法を示すことを目的として、2.4.2④に示した「残貯水容量に余裕があるか、放流量の検討」について事例ダムにおける計算事例を示す。

1) 事例ダムの基本諸元

- 流域面積：226.4 km²
- 流域の流出遅れ時間 (T_L)：2 hr
- 洪水量：100.0 m³/s
- 洪水調節方式：計画最大放流量 100.0 m³/s による一定量放流方式

2) 計算の手順

まず「本則操作による放流を継続した場合に残貯水容量に余裕があるか」について確認する。次に、残貯水容量に余裕がある場合、本則操作による放流よりも放流量を下げるのが可能かについて検討する。ここでは、ダムの流出の遅れ時間を設定し、その遅れ時間内に降った実績の雨量及び、降水短時間予報から得られる6時間の予測積算雨量が損失することなく全てダムに流入すると仮定した総流入量と現在の空容量の比較を通じて放流量を決定する。以下、事例ダムにおける9月21日22時における検討過程について示す。

9月21日22時時点での事例ダムの貯水位は320.20 m、空容量は25,380,000 m³、流入量は353.8 m³/s、放流量は100 m³/s、下流地点の水位は8.66 m (氾濫危険水位 + 0.76 m) という状況で、洪水氾濫の発生が懸念される状況である。残貯水容量の余裕については、上述した通り、遅れ時間内に降った実績の雨量及び、降水短時間予報から得られる6時間の予測積算雨量が損失することなく全てダムに流入すると仮定した総流入量と現在の空容量の比較することで検討する。具体的には、以下の手順で検討する。

① T_L 内での実績流域平均雨量の累積：

$$R_{obs} = 34.2 \text{ mm} \quad (\text{レーダ雨量より算出}) \quad \text{式(2.1)}$$

② 6時間先までの予測雨量の合計：

$$R_{for} = 0.4 \text{ mm} \quad (22\text{時時点の降水短時間予報より算出}) \quad \text{式(2.2)}$$

③ 予測時間内の総流入量相当雨量：

$$R_{tot} = R_{obs} + R_{for} = 34.2 \text{ mm} + 0.4 \text{ mm} = 34.6 \text{ mm} \quad \text{式(2.3)}$$

④ この時点での空容量相当雨量：

$$R_{vol} = \frac{25,380,000 \text{ m}^3}{226.4 \text{ km}^2} = 0.112 \text{ m} = 112.1 \text{ mm} \quad \text{式(2.4)}$$

以上より、この事例においては、 $R_{vol} = 112.1 \text{ mm} > R_{tot} = 34.6 \text{ mm}$ となっており、予測時間内の総流入量をその時点での空容量が上回っているため、残貯水容量に余裕があると

判断される。

次に放流量について検討する。この事例では $R_{vol} > R_{tot}$ となっており、これは放流量をゼロとしても洪水調節容量は不足しないことを示しているため、ここでは放流量をゼロとする。仮に R_{vol} が R_{tot} よりも小さい場合、式(2.5)に示すように放流量相当雨量 R_{out} を R_{vol} と R_{tot} の差で求め、放流量を決定する。

$$R_{out} = R_{tot} - R_{vol} \quad \text{式(2.5)}$$

2.5 予測雨量を用いずに洪水時ダム操作を高度化するための研究・取組

上記までは、洪水時ダム操作の高度化に向けた予測雨量の利活用について述べてきたが、予測雨量を用いずに高度化する試みも存在する。2.1 で述べた操作のうち、すりつけ操作については水位放流方式による操作改善について提案されている（今村，1998；三石ら，2010a）。また、異常洪水時防災操作についても予測雨量を用いずに高度化を目指す手法が研究・検討が行われており、一部のダムにおいては実際に実施されてもいる。ここでは、それらについて紹介する（国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課，2017；ダムの洪水調節に関する検討会，2020）。

1) VR方式（裏戸，1993；三石ら，2010b；裏戸，2011；宮崎ら，2013）

過去の実績流入量等から作成される流入量逓減期の基準流入波形に基づいて、異常洪水時防災操作開始以降の任意の時点以降の総流入量を予測し、その時点の空容量との大小関係から放流量を決定する方式である。基準流入波形の事例を図2.3に示す。

基準流入波形は流入量の逓減期に関する流入量予測に用いられるものであるため、ピーク以降の流入量が単調に減少する洪水に対しては時々刻々放流量を見直して洪水調節容量を多く使用することで洪水調節効果を高めることが期待できる。そのため、気象観測、予測情報を参考にして、流入量の減少が見込まれる場合に実施することが望ましい。操作中に流入量が減少から増加に転じると、単調な減少を仮定する基準流入波形と実際の流入量との乖離が大きくなるため、操作遅れが生じるおそれがある。このため、二山洪水等に対する留意が必要となる。

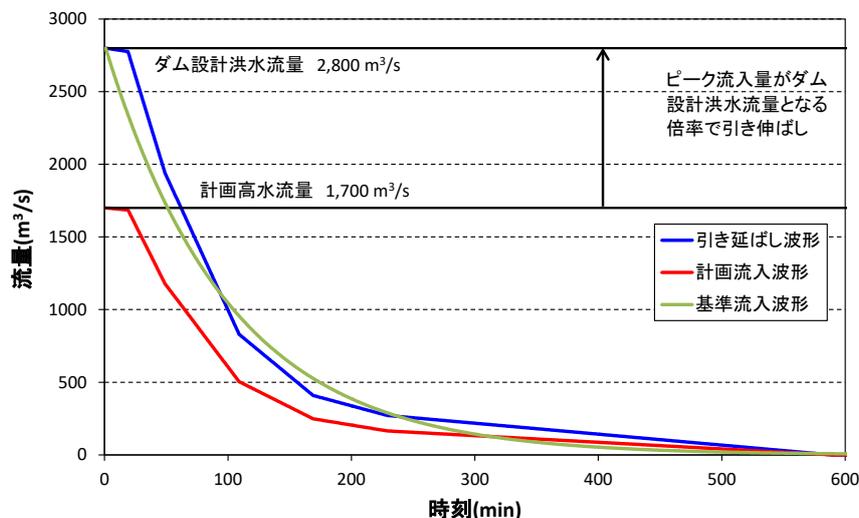


図 2.3 基準流入波形の例（国土交通省 国土技術政策総合研究所，2018）

2) 限界放流量方式 (今村, 1998)

「限界流入量」と呼ばれる変数を, 下流河道の水位流量曲線の定数, 流入量, 放流量等を基に解析的に求め, 流入量はその限界流入量を上回った段階で異常洪水時防災操作の放流を開始することで, 下流の水位上昇速度を目標値以下に抑えることができる操作方式である. 流入波形によっては, 目標とする下流の水位上昇速度を遅く設定すると洪水調節効果が適切に得られないおそれがある. また, 放流量を計算する放流関数 (通常, 貯水位の2乗の関数で表される) の定数の値を, 洪水毎に算定する必要がある.

3) 放流量曲線逐次見直し方式 (国土交通省 九州地方整備局 鶴田ダム管理所 川内川河川事務所, 2007)

貯水位が異常洪水時防災操作の開始水位を超えた後, 流入量がピークを過ぎて逡減している場合, 60分毎にその時点における流入量を洪水時最高水位で放流するように放流量曲線を設定する操作方式である. 図2.4は, 操作の概要を模式的に示したものである.

流入量が単調に減少する洪水に対しては, 60分毎に放流量曲線を設定し, 放流量を決定して洪水調節容量を多く使用することで洪水調節効果を高めることが期待できる. そのため, 気象観測, 予測情報を参考に, 流入量の減少が見込まれる場合に実施することが望ましい. 流入量が低減することを前提とした操作方式であるため, 操作中に流入量が減少から増加に転じる場合は, 洪水時最高水位における放流量の目標値を計画高水流量とするよう放流量曲線を設定しなおす等の留意が必要となる.

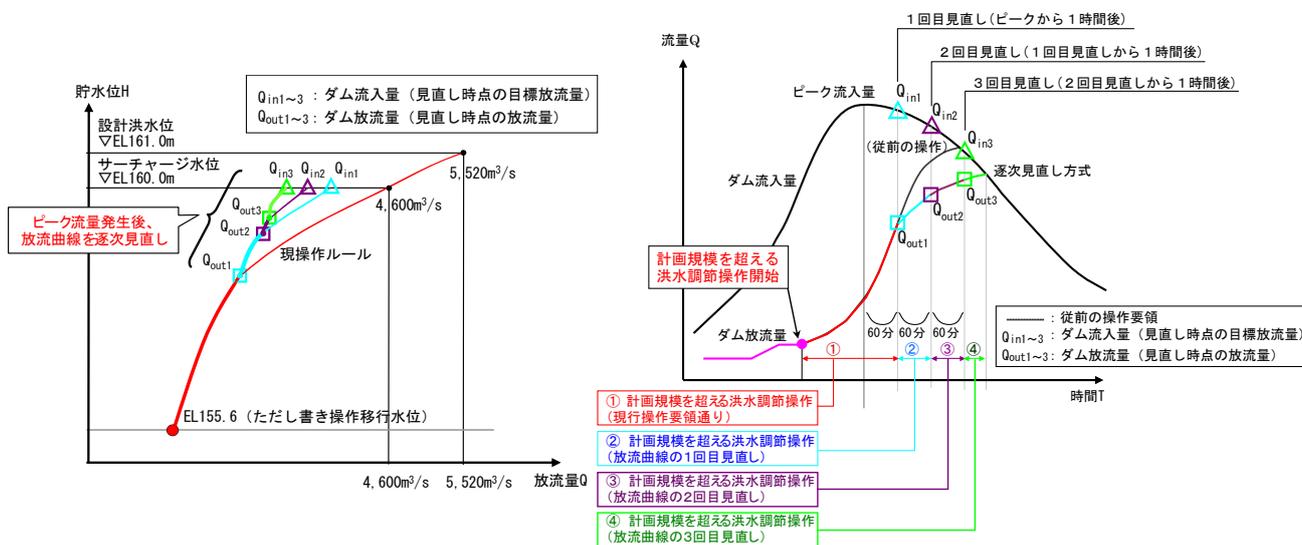


図 2.4 放流量曲線逐次見直し方式 (左: 放流量曲線の設定, 右: 放流量曲線の見直し方法) (国土交通省 九州地方整備局 鶴田ダム管理所 川内川河川事務所, 2007)

4) 必要最小放流量方式 (柏井, 2013 ; 高田, 2015)

任意の流入量・貯水位から一定割合で流入量がダム設計洪水流量まで増加・継続した際に, 規定に定められたゲート操作を行って設計洪水水位でダム設計洪水流量を放流するために現時点で最低でも放流しなければいけない放流量 (必要最小放流量) を定めたテーブル

(必要最小放流量テーブル)を作成し、このテーブルに基づいて操作を行う方式である。

流入量が任意の値からダム設計洪水流量まで上昇する場合においても設計最高水位におけるダム設計洪水流量の放流が満足される操作方式であるため、操作中に流入量が減少から増加に転じる場合においても必要最小放流量テーブルに則った操作を実施することで適切に操作が行われる。流入量の増加割合が必要最小放流量テーブルの作成において想定した増加割合を上回る場合、操作の遅れが生じるおそれがある。

表 2.2 必要最小放流量テーブルのイメージ (柏井 (2013) に加筆して作成)
(国土交通省 国土技術政策総合研究所, 2018)

貯水位(EL.m)	流入量(m ³ /s)								ダム設計 洪水流量
	調節開始 流量								
異常洪水時防災操作開始水位	①	①	①	①	①	①	①	①	①
	②	②	②	②	必要最小放流量				②
	②	②	②	②	②	②	②	②	②
	②	②	②	②	②	②	②	②	②
	②	②	②	②	②	②	②	②	②
	②	②	②	②	②	②	②	②	②
	②	②	②	②	②	②	②	②	②
	②	②	②	②	②	②	②	②	②
洪水時最高水位	②	②	②	②	②	②	②	②	②
									大
設計最高水位	③	③	③	③	③	③	③	③	③

- ①洪水調節操作から設定される最小の流量以下となる必要がある(例えば、一定率一定量操作では一定率操作時の放流量(計画最大放流量を最大)以下の流量)
- ②新設ダムでは①と同じ条件設定が望ましい(設計最高水位をそのように設定する必要がある)。
- ③流入量に等しく設定される。

VR方式、放流量曲線逐次見直し方式においては、「流入量が低減する局面」という部分において気象予測情報を利用した方法であるが、予測情報を定量的に用いているものではなく、定性的に利用しており、その意味で特別防災操作における降雨の降り終わりの見直しにおける利用方法と近い。また、現行の異常洪水時防災操作、必要最小放流量方式、限界操作方式については気象予測情報を全く用いない。現状においては、現行の異常洪水時防災操作以外の操作方法のうち、必要最小放流量方式、VR方式及び放流量曲線逐次見直し方式については、いくつかのダムにおいて導入(国土交通省九州地方整備局鶴田ダム管理所 川内川河川事務所, 2007)または試行、導入に向けた検討(宮崎ら, 2013; 高田, 2015)が行われている。

2.6 洪水時ダム操作における予測情報利用に関する既往の取組に関するまとめ

ここまでは、標準的な操作規則のこれまでの変遷の中で、予測情報が操作規則の中でどのように位置づけられ、利用されてきたかについて述べた。

国土交通省所管ダムでは、旧規則において予備放流操作において予測情報を利用していたが、その後、新規則においては予測情報の精度に合わせた利用方法、具体的には洪水警戒体制を執るか否かの判断及び弾力的管理試験における活用貯留水の事前放流への適用へ

と利用範囲を拡げた一方で、予備放流操作においては定量的に利用しなくなったことが特徴である。

その後、豪雨災害対策アクションプランに位置付けられた事前放流操作について、旧事前放流ガイドラインに基づく導入検討が進められた。事前放流操作は確実に容量回復が見込まれることが要件であったため、主として予測雨量が実績雨量を過大評価しても容量回復できることを想定した回復可能水位テーブルに基づいた検討が行われた。ただし回復可能水位テーブルは、利水容量の回復に配慮したものであり、空振り事例が増えるほど事前放流できる容量が減少する仕組みとなっている。その後、新事前放流ガイドラインに基づく検討が実施された。新事前放流ガイドラインにおいては、全球モデルである GSM 及びメソモデルである MSM の平均降水量ガイダンスから得られる予測雨量の値をそのまま用いることで事前放流する容量を算出することとされており、併せて事前放流操作実施後に貯水位が回復しない場合も視野に入れた損失補填制度が明記されていることが特徴である。

事前放流操作と並んで導入された予測を活用した高度な操作として特別防災操作が挙げられる。特別防災操作は、洪水時においてダム下流の被害を軽減するために貯留量を増やして容量を有効に活用する高度な操作であり、降雨の降り終わりにおいて予測雨量の予測精度が良好である性質を利用した操作である。また、異常洪水時防災操作の高度化を主旨として提案されている手法については、予測情報を利用しないか、利用しても定量的ではなく定性的な利用にとどめる手法が主である。

以上、国土交通省所管ダムの洪水時ダム操作における予測情報の利用についてまとめると、予測雨量の精度の限界を見極めながら、また場合によっては新事前放流ガイドラインにおける損失補填制度のように必要な措置を適宜併用しながら、ダム管理において求められる要件を満足するように導入されてきていると言える。次節では、研究において行われている予測雨量を用いた操作の高度化について述べる。

2.7 洪水時ダム操作への予測雨量の利用に関する既往研究

予測雨量には不確実性が不可避であるため、予測雨量の情報をそのままダム管理において用いた場合、これまでに述べてきたダム管理において要求される要件を満足できない恐れがある。そのため、これまでに、予測雨量の不確実性を考慮しつつダム管理へ予測雨量の適用を試みる研究がこれまでに行われてきている。ここでは、これらの研究について述べる。

2.7.1 予測雨量を極力使用しない事前放流操作

前節において述べた通り、国土交通省所管ダムにおける事前放流操作に関する検討では、MSM 等の予測雨量を用いた（国土交通省河川局長，2005；国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課，2017）。それに対し戸谷ら（2006）、下坂ら（2009）及び北田ら（2010）は、一連の研究においては予測雨量を可能な限り使用しない事前放流操作について提案している。戸谷ら（2006）及び下坂ら（2009）は、任意時刻におけるダム流入量や実績の雨量情報を基にしてその時刻以降のダムへの総流入量を推定し、その量を事前放流する方法を提案している。図 2.5 左は実績流入量、図 2.5 右は実績雨量から求められた総直接流出量

との相関である。洪水が発生すると見込まれた際、実績流入量を用いる場合は図 2.5 左に示された総直接流出量との関係から任意の流入量に対して見込まれる総直接流出高及び流入すると見込まれる容量を推定し、その容量を事前放流するものである（実績雨量を用いる場合は図 2.5 右）。まとめると、任意時刻において得られている実績の水文量（流量，雨量）を基に，確実な流入が見込まれる容量を推定・事前放流することで，事前放流しても確実に洪水後に容量が回復することを主旨とした方法であり，予測雨量を用いないことが特徴である。図 2.6 は，草木ダムを対象として事前放流シミュレーションを行った事例であり，提案手法に基づいて事前放流が行われ，最大放流量が低減されていることが確認できる（下坂ら，2009）。しかし，このシミュレーションにおいては事前放流操作開始前の巡視に要する時間や下流の水位上昇速度の制限といった事前放流操作の実施に当たって必要な条件が考慮されておらず，これらの条件を考慮する場合においても一定の効果を出すためには，降雨予測情報やレーダ雨量情報を活用する等して放流開始を早期化することが望ましいとされている（下坂ら，2009）。これを受けて，戸谷ら（2006）及び下坂ら（2009）の手法に予測先行時間が 6 時間である気象庁の降水短時間予報を組み合わせる事前放流する手法が提案された。図 2.7 はそのシミュレーション結果である。総降雨方式において予測雨量を考慮することで事前放流の放流開始を早めることが可能となり，異常洪水時防災操作が避けられたとしている（北田ら，2010）。ただし，ここでも事前放流操作実施前の巡視に要する時間や下流の水位上昇速度の制限については考慮されていないため，手法の効果については留意が必要であると考えられる。

2.7.2 予測雨量の不確実性を定量的に考慮した操作の高度化

前節で述べた一連の研究は，予測雨量を極力使用しないことを主旨とした操作の高度化であった。その一方で，予測雨量が持つ不確実性を定量化し，洪水時ダム操作における放流量の決定に不確実性を組み込む研究事例も行われている。臼谷，中津川（2010），中津川（2014）は過去の予測雨量と実績値の関係から予測雨量の値に対する実績値の出現範囲を確率的に求め，得られた出現範囲を基にした洪水時ダム操作について検討を行った。具体的には，過去の降雨イベントについて気象庁の Regional Spectral Model (RSM) と実績雨量を比較，確率分布の当てはめを行い，RSM の予測積算雨量を 0.7~1.8 倍した範囲に実績積算雨量の概ね 70 %が収まることを示した（図 2.8）。図 2.9 は，RSM の予測積算雨量の誤差として上限値である 1.8 倍を見込んで事前放流操作に適用したシミュレーション結果であり，大規模洪水に対して適切に事前放流操作が実施され，異常洪水時防災操作を回避できたことが示された（臼谷，中津川，2010；中津川 2014）。

三石ら（2011a）は，Weather Research and Forecasting Model (WRF) により計算した予測雨量のダム操作への適応性について検討している。WRF を用いて 48 時間先までの予測雨量を計算するだけでなく，和田ら（2006）において示されている，気象庁の過去の予測雨量と実績値の比較から得られる誤差率を活用し，予測雨量の上限及び下限を示す式（式(2.6)及び式(2.7)）を設定した。次に，この式から得られる予測の上限値と下限値を用いて流出計算を行うことで総流入量を算出し，予測の上限値及び下限値を考慮した洪水時のダム操作について検討を行った。

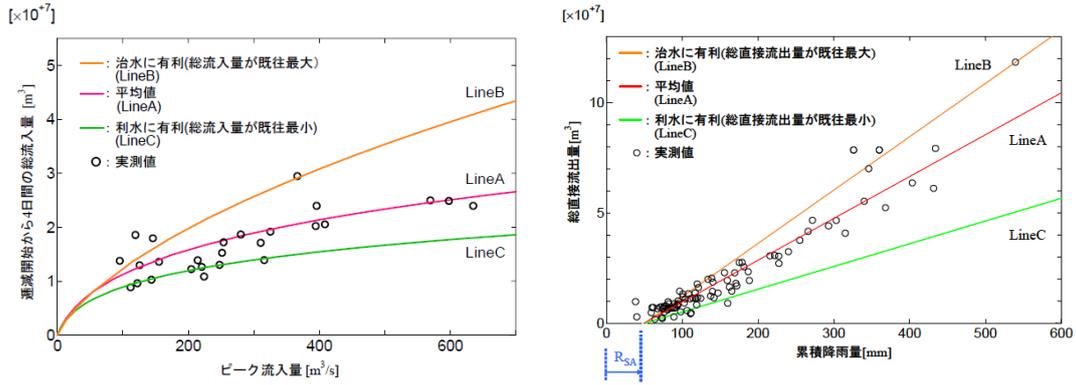


図 2.5 総流入量と逡減開始時の流入量関係 (左：流入量 (戸谷ら, 2006)) 及び総流入量と総降雨量の関係 (右：総降雨量 (下坂ら, 2009 ; 北田ら, 2010))

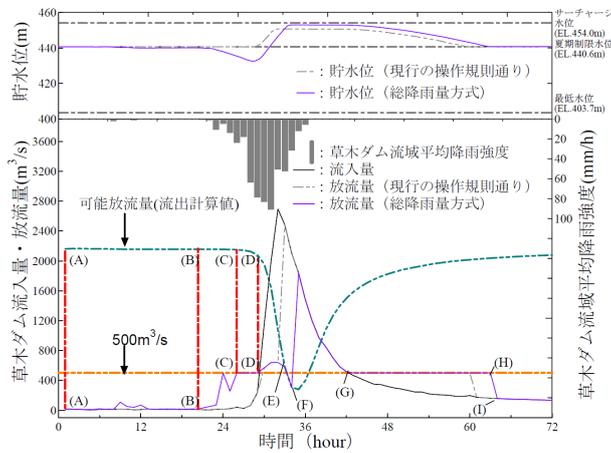


図 2.6 総降雨量方式による操作と操作規則に基づく操作の結果の比較 (下坂ら, 2009)

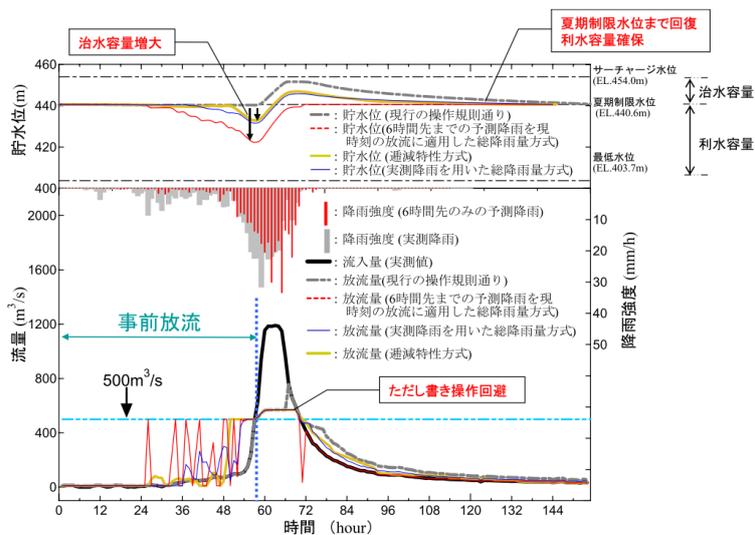


図 2.7 6時間先までの降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列 (北田ら, 2010)

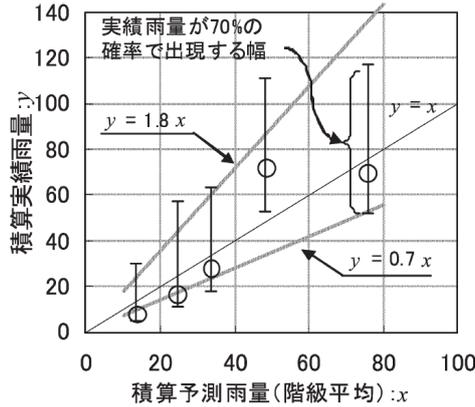


図 2.8 GPV の予測値に対する実績値 70%出現範囲 (リードタイム 24 時間)
(中津川, 2014)

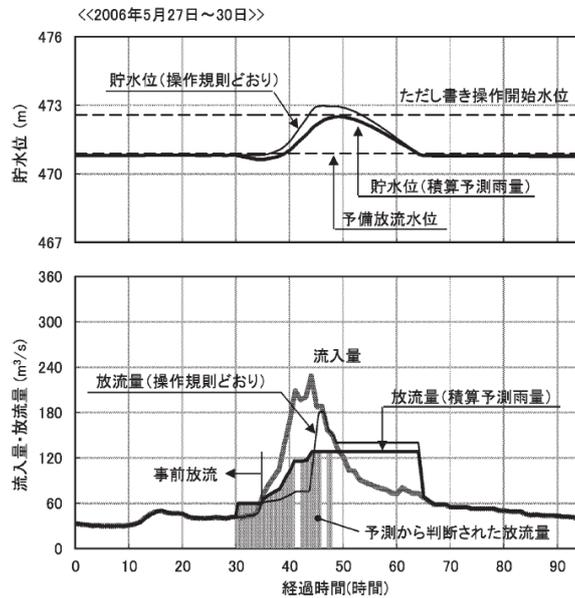


図 2.9 積算予測雨量を活用した操作結果 (中津川, 2014)

予測に対する降雨の上限値 (mm) = $1.43 \times$ 予測降雨 (mm) 式(2.6)

予測に対する降雨の下限値 (mm) = $0.714 \times$ 予測降雨 (mm) 式(2.7)

三石ら (2011b) においても、洪水調節操作時のオーバーカットを対象として、予測雨量の不確実性を考慮した手法について検討している。手順は下記の通りである。

- 1) 任意ダムにおいて、計画最大放流量からのオーバーカット量を設定した複数の操作候補を定める。また、下流の評価地点においてピーク流量と浸水被害額の関係性を定める。
- 2) 過去の予測雨量と実績雨量を用いて予測雨量に対する実績雨量の出現範囲について確率分布を求める。図 2.10 は過去の予測雨量と実測雨量から取得された誤差率の相対頻度分布の事例である。
- 3) 実績の流入量に対して 2)の任意区間の誤差率を乗じたものを予測流入量とみなす。任意区間について得られた予測流入量に対して 1)で設定した任意の操作候補について洪

水調節計算を行うことで下流評価地点におけるピーク流量を求めた後、1)で設定した浸水被害額との関係を用いて浸水被害額を得る。

- 4) 3)の計算を、2)の各区間において実施し、それぞれの区間について得られた浸水被害額に対してその区間の発生確率を乗じた後に各区間の値を足し合わせることで、任意の操作候補を実施することによる浸水被害額期待値を取得する。
- 5) 3)及び 4)の計算を、1)で定めた全ての操作候補について実施し、浸水被害額期待値を最小とする操作を選定する。ここで、オーバーカット量が多い操作は小さい操作と比較して中小規模洪水に対して治水効果が高くなるが、大規模洪水に対しては洪水の早い段階で洪水調節容量を使い切った後に異常洪水時防災操作を実施することとなるため、オーバーカット量が小さい操作と比較して浸水被害額期待値が大きくなることが想定される (図 2.11)。

図 2.12 は、木津川ダム群の平成 21 年 10 月洪水を対象とした適用事例であり、計画最大放流量からのオーバーカット量について $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 毎に操作候補を定め、操作候補毎に浸水被害額期待値を算出・プロットしたものである。この事例においてはオーバーカット量 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合に浸水被害額期待値が最小となり選択されることになる。

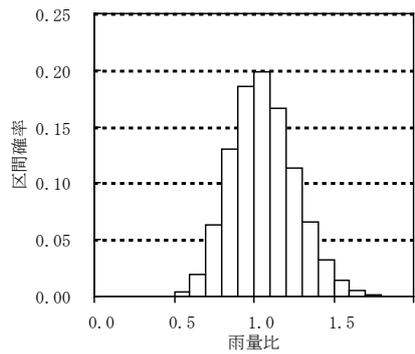


図 2.10 予測誤差率の発生確率分布図 (三石ら, 2011b)

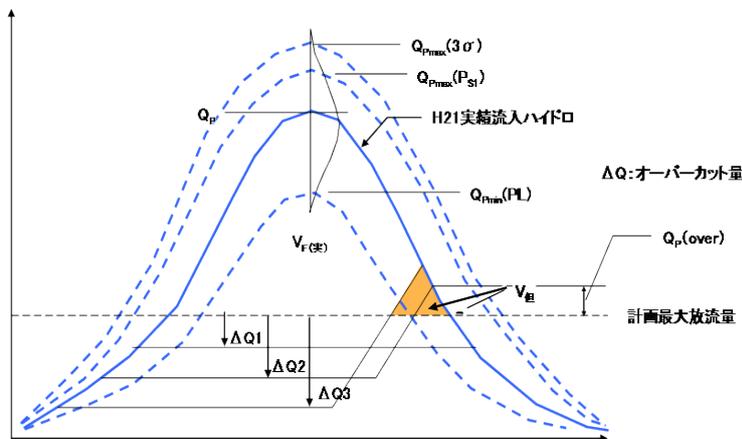


図 2.11 オーバーカット操作模式図 (三石ら, 2011b)

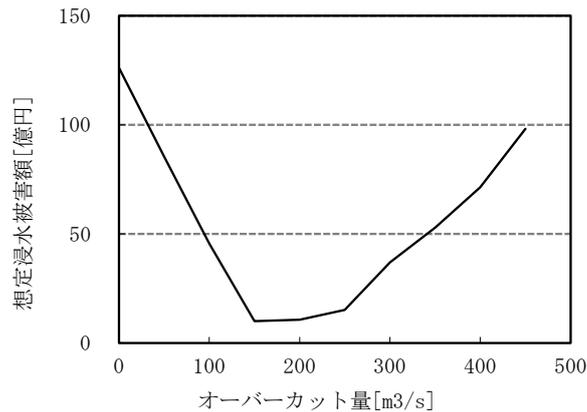


図 2.12 オーバーカット量と浸水被害額の関係 (三石ら, 2011b)

2.7.3 洪水時ダム操作への予測雨量の利用に関する既往研究のまとめ

戸谷ら (2006), 下坂ら (2009) 及び北田ら (2010) の一連の研究における主旨は, 予測不確実性が不可避である予測雨量を可能な限り用いないで事前放流操作を実施することである. ただし, 予測雨量を極力使用しないことにより, 流域面積が小さいダムにおいては十分な時間的余裕を持って事前放流操作を行うことができないことが考えられる. 事前放流開始前の巡視に要する時間や下流の水位上昇速度の制限をはじめとしたダム管理において必要とされる諸条件を考慮しつつ一定の効果を出すためには, 不確実性が不可避ではあるが, 一定の予測先行時間を有する予測雨量を用いることが事前放流操作において必要であると考えられる.

一方で臼谷・中津川 (2010), 中津川 (2014), 三石ら (2011a ; 2011b) の研究は, 予測雨量の不確実性を明確に組み込んだ操作方法の提案であり, 予測雨量の不確実性を, 過去の予測雨量と実績雨量の関係から統計的に算出する点で共通している. しかし, 予測雨量を計算する数値予報モデルが継続的に改良されるため統計的性質が変化すること, また台風や前線など降雨要因の違いによる不確実性の違い, 例えば同じ台風による降雨であってもイベントによって不確実性が異なると考えられることなど, その時々々の気象状況により予測の不確実性は異なると考えられることから, 過去の予測雨量に基いて不確実性を求めるよりもその時々々の気象状況に合わせた不確実性情報が得られることが望ましいと考えられる.

2.8 アンサンブル予測雨量の利活用に関する既往研究・取組

気象の数値予報とは, 物理方程式に基づいて現在の状態 (初期状態) から未来の状態を数値計算によって予測する手法である. これまでに数値予報モデルや解析手法の緻密化が精力的に行われてきており, 予報業務においてなくてはならない存在になっている一方で, 「バタフライ効果」として知られる初期値への依存性のため, 数値予報の誤差を完全になくすことは不可能であることが知られている. その不完全性を補うため, 予報に用いる初期値を 1 つではなく集合で用意し, それぞれの初期値から数値予報を行って予報値の集合

を得るものが、図 2.13 にイメージを示すアンサンブル予報である。気象庁においては、1996 年 3 月に 1 か月先を予報するアンサンブル予報を導入した後、1999 年 3 月から週間アンサンブル予報を導入した（経田・林，2007）。日本で発生する豪雨はメソスケール現象であり、時間・空間スケールが小さく 1 日先程度の予測においては初期値の不確実性により誤差が大きくなりやすい。そこで、決定論的な予測を行う MSM に対し、信頼度や確率的な情報とともに、数値予報による複数の客観的な予測情報を目的として水平格子間隔 5 km のメソアンサンブル予測システムの開発が行われ、2019 年 6 月よりメソアンサンブル予報システムの本運用が開始されている（気象庁予報部，2016；2019）。

アンサンブル予報は、European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)、National Centers for Environmental Prediction (NCEP) において最初に実用化され（経田・林，2007）、その後主にヨーロッパにおける洪水予測を中心にしてアンサンブル予報の活用に係る研究が行われてきており、洪水予測において実運用化されているものもある。ここでは、ヨーロッパ及びアメリカを中心としたアンサンブル予測雨量を利活用に関する研究、実運用の概要について述べた後、日本における利活用に関する研究事例について述べる。

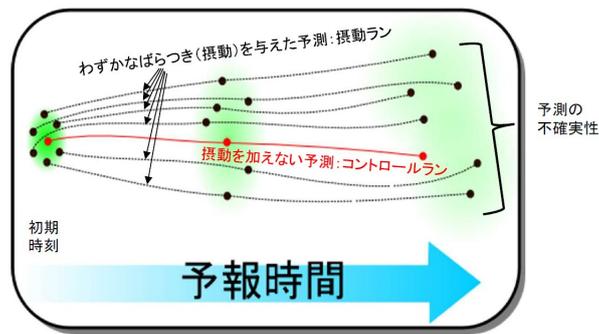


図 2.13 アンサンブル予測のイメージ（気象庁予報部数値予報課，2019）

2.8.1 ヨーロッパを中心としたアンサンブル予測を用いた研究

ヨーロッパの大河川における洪水予測では、短期間の予測については上流の流量観測を境界条件として下流の流量・水位を予測することで予測可能であるため予測雨量の精度への依存性は高くないが、中長期（2～15日先）の予測については上流の流量の境界条件を用いることができないため、数値気象予測を入力とした洪水予測を行うことが必須と考えられている（牛山・佐山，2017）。上述した通り ECMWF において最初にアンサンブル予報が実用化されたことを反映し、洪水予測においてもアンサンブル予報の活用に関する研究が早くから進められてきた。

ヨーロッパにおけるアンサンブル予測を用いた洪水予測に関する研究において、最も用いられてきているのは ECMWF のアンサンブル予測（アンサンブルメンバー数：51，空間解像度：80 km）及び ECMWF のアンサンブルメンバーの一部についてダウンスケールした COSMO-LEPS（アンサンブルメンバー数：20，空間解像度：7 km，予測先行時間：132 時間）（COSMO，2020）である。ECMWF のアンサンブル予測を用いた研究事例として、ベルギー内の 2 流域において、6 年間の ECMWF のアンサンブル予測を用いて流出計算を行い、

洪水予測予警報への適用性を評価した事例 (Roulin and Vannitsem, 2005; Roulin, 2007) が挙げられる。また、オーストリア内の流域 (流域面積: 622 km²) を対象として、決定論的な雨量予測と ECMWF のアンサンブル予測を混合したアンサンブル予測雨量を作成して流出計算に入力し、流出現象の非線形性によりアンサンブル予測雨量の予測幅よりも流出計算モデルに入力して流出量に変換することで予測幅が増幅されることを示した事例が挙げられる (Komma *et al.*, 2007)。ヨーロッパ外への適用事例としては、バングラデシュ (ガンジス・ブラマプトラ川) を対象とし、ECMWF のアンサンブル予測、NOAA と NASA が配信する衛星観測雨量等を用いてバングラデシュ国内におけるガンジス・ブラマプトラ川の洪水流量について予測するシステムを開発・運用した事例が挙げられる (Hopson *et al.*, 2010)。COSMO-LEPS を用いた事例としては、アルプス地域を対象に、COSMO-LEPS を含む様々な気象予測モデルを流出計算モデルに入力する洪水予測システムを開発し、6か月間に渡るリアルタイムでの運用について報告した事例が挙げられる (Rotach *et al.*, 2007)。また、スイス国内の河川流域を対象とし、COSMO-LEPS のアンサンブル予測雨量を流出計算モデルに入力して得られた流出計算結果に対しガンマ分布を適用することで、流量値が大きいところでの確率評価が可能となるため、洪水予測において合理的であることを示した事例も挙げられる (Alfieri *et al.*, 2012)。COSMO-LEPS 以外にも ECMWF のアンサンブル予測を独自にダウンスケールした事例もある。ライン川の Rheinfelden 地点の上流域 (34,550 km²) を対象とし、過去に発生した 2 洪水イベントについて ECMWF のアンサンブル予測を非静力学の数値気象モデル (nonhydrostatic Lokal Modell) を用いて空間解像度 10 km にダウンスケールした後に流出計算モデルに入力し、確定的な予測を用いた場合とアンサンブル予測を用いた場合での予測性能を評価したところ、確定的な予測では洪水を予見できなかったのに対しアンサンブル予測を用いた確率的な流出予測では早期に洪水が検知されるという事例がある (Verbunt *et al.*, 2007)。

上記の事例は、主に洪水を対象としてアンサンブル予測を流出計算モデルに入力して得られた結果について考察するものである。その一方で、アンサンブル予測から得られる確率的な洪水予測情報は、従来の決定論的な予測と比較して情報が多くなる分、従来の決定論的な予測に慣れ親しんだ予測情報使用者にとってはアンサンブル情報から得られた多くの予測結果をどう解釈してどのように予警報において用いるべきかといった実運用の面における扱いが難しい。そのため、上述した研究に続いて、アンサンブル予測をどのように活用すれば有益な情報が得られるか、意思決定者にとって扱いやすい情報となるかについて研究が行われてきている。図 2.14 のように示されるアンサンブルの予測流量の計算結果について、特にピーク流量に着目し、ピーク流量の値や発生時刻について実用的に分かりやすく表示するための試み (Zappa *et al.*, 2013)、洪水予測の実務に携わる者、学生、研究者等を対象として、洪水時において洪水発生確率が与えられ場合、遊水池へ通じるゲートの開閉に関するシミュレーションを行うことで不確実性情報が有利な情報となりえるかについて研究した事例 (Ramos *et al.*, 2013)、アンサンブル気象予測を流出計算モデルに入力することで得られる流量の予測結果について、専門家たちがどのような表示方法を好むかについて調べた事例 (Pappenberger *et al.*, 2013) 等が挙げられる。

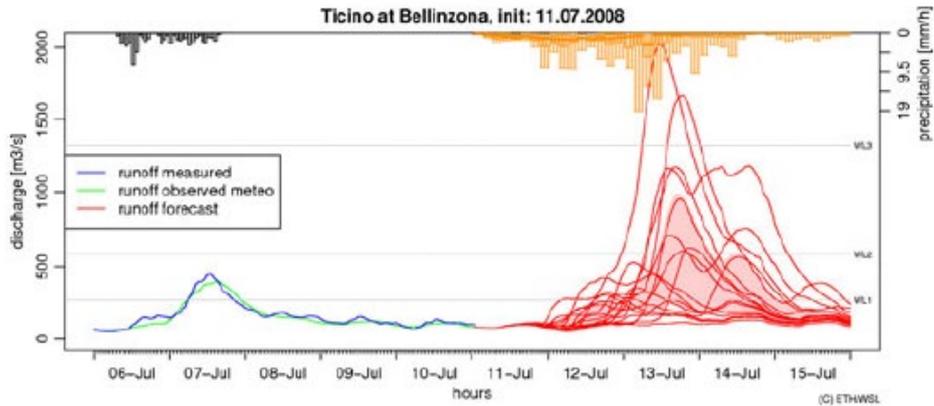


図 2.14 アンサンブル気象予測を用いた流出計算の結果事例 (Zappa *et al.*, 2013)

アンサンブル予測雨量を用いた意思決定に関する研究として、洪水が予測される場合の取り外し可能な浸水防止フェンスの設置に関する意思決定に関する研究が事例として挙げられ、後述する European Flood Alert System (EFAS) を基に計算されたアンサンブル水位予測結果を用いて期待浸水被害額を算出し、期待浸水被害額が大きい場合はフェンスを設置することが望ましいとしている (Dale *et al.*, 2014)。また、カナダの Gatineau 流域に設置されている Hydro-Quebec の水力発電施設 (貯水池, Instream plant) における水力発電運用においてアンサンブル予測を活用した事例がある。線形計画法に基づく操作が行われており、線形計画法への入力として決定論的予測を用いるよりも、アンサンブル予測を用いた方が水力発電の発電電力量を大きくすることができることを示した (Boucher M-A *et al.*, 2012)。アンサンブル予測を流出計算モデルに入力して得られた結果について考察する研究事例と比較してアンサンブル予測の具体的な意思決定への利用に関する研究事例は数が少なく、Dale *et al.* (2014) は、アンサンブル予測を用いて意思決定をサポートするための手法が明らかに欠けていると指摘している。

2.8.2 ヨーロッパにおけるアンサンブル予測を用いた実運用 (Thielen *et al.*, 2009 ; Bartholmes *et al.*, 2009 ; Ramos *et al.*, 2007)

EFAS (European Flood Alert System) は、2003年にプロジェクトがスタートし、European Commission Joint Research Centre において開発が行われてきた。ヨーロッパを横断的に走る国際河川について、洪水に関する予測先行時間を 3~10 日とし、加盟国における洪水予測業務を補完することを目的に開発されたものである。EFAS においては、ECMWF 及び DWD (German Weather Service-Deutscher Wetterdienst) が運用している決定論的に計算された予測雨量の他、ECMWF が運用しているアンサンブル予測雨量 (アンサンブルメンバー数: 51 メンバー, 予測先行時間: 10 日, 空間解像度 80 km (※2007 年当時)) を分布型流出モデル (LISFLOOD) に入力することで得られる予測結果を基に洪水予測を行うものである。図 2.15 は EFAS の計算領域、図 2.16 は ECMWF のアンサンブル予測を LISFLOOD に入力することで得られる流出計算結果について、洪水の危険度を示す閾値である High Alert Level の超過状況について色分けで示したものである。

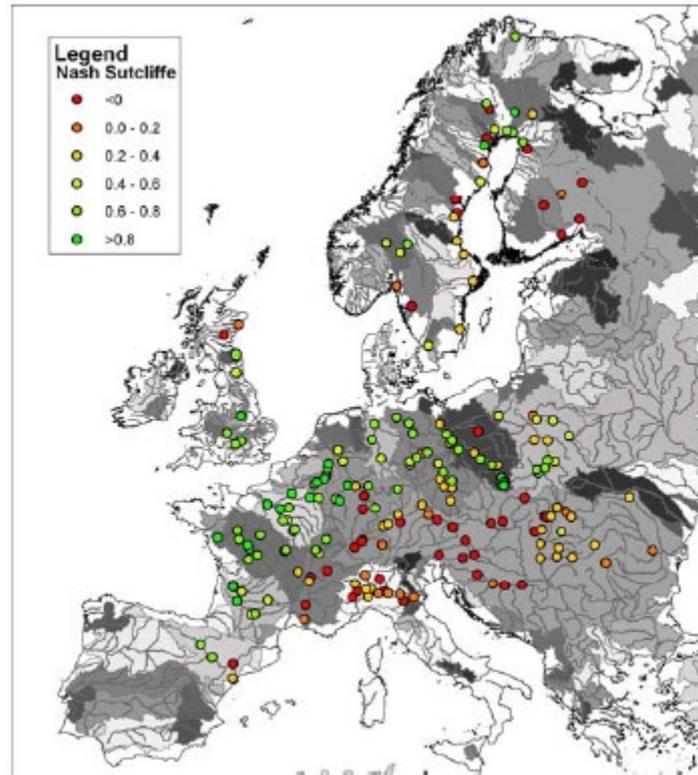


図 2.15 EFAS の計算領域（188 観測地点における Nash 係数値）

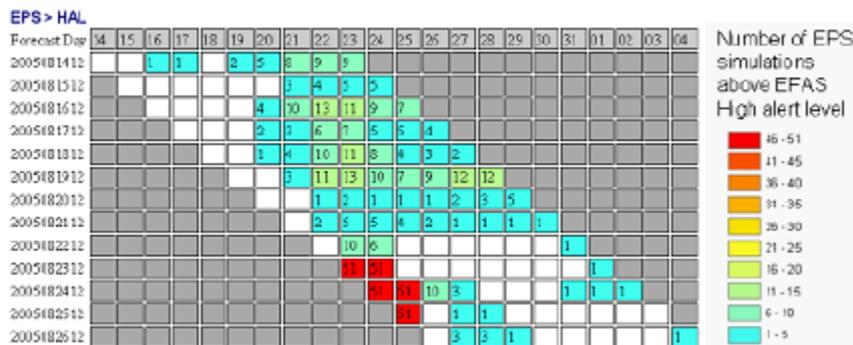


図 2.16 EFAS により計算される閾値超過状況

2.8.3 アメリカにおけるアンサンブル予測雨量の活用 (McEnery *et al.*, 2005 ; Demargne *et al.*, 2014)

アメリカにおいては National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, アメリカ海洋大気庁) の National Weather Service (NWS) が 13 の River Forecast Center 及び 122 の Weather Forecast Offices に対して水位・流量をはじめとした水文に係る予測情報の提供を行っている。NWS においては、アンサンブル予測を活用したシステムである Hydrologic Ensemble Forecast Service (HEFS) が開発・運用されており、HEFS のアンサンブル予測システムは、洪水リスク管理、水供給マネジメント、レクリエーション計画、生態系マネジメント等、短期、中期、長期に跨る予測情報を提供している。図 2.17 は、NWS で採用され

ている HEFS の概要図であり、計算に係る大まかなフローとしては、最初に Meteorological Ensemble Forecast Processor で計算されたアンサンブル予測を流出計算に入力した後、Hydrologic Ensemble Post-Processor にて処理して可視化 (Graphics Generator) する。また、Ensemble Verification Service において、その計算結果の妥当性評価を実施する。計算の主たる部分である Meteorological Ensemble Forecast Processor 及び Hydrologic Ensemble Post-Processor の概要は以下の通りである。

1) Meteorological Ensemble Forecast Processor

現在、様々な数値予報モデルの出力結果を利用できる時代になっているが、多くのアンサンブル予測結果は平均、広がり等についてバイアスを持っている。特に、豪雨についてはその傾向が顕著になる。この Processor では、入力データの不確実性を低減させることを目的として、アンサンブルの降水量及び気温についてバイアス補正が実施される。雨については、Short term (7 日先まで) については、確定的な予測を用いている。これは、数値気象予測により計算された生値の予測に対して予報官が修正を加えたものを使用する。1 年先までの予測については、複数の数値気象予測から計算されたアンサンブル平均 (日降水量、最高気温、最低気温) を用いてアンサンブルを構成する。このアンサンブルについて過去の観測データに基づいて補正を加えている。将来的には、NCEP の Short-Range Ensemble Forecast の予報値や THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE) の情報も加えてアンサンブル予測を構成することも検討している。

2) Hydrologic Processor 及び Hydrologic Ensemble Post-Processor

Hydrologic Processor においては、作成されたアンサンブルを入力して河川流量のアンサンブルシミュレーションを行う。データ同化については、予報官がパラメータ値や状態量について手作業で修正を行う。Hydrologic Ensemble Post-Processor においては、河川流量について得られたアンサンブルシミュレーション結果について、バイアス補正を行う。

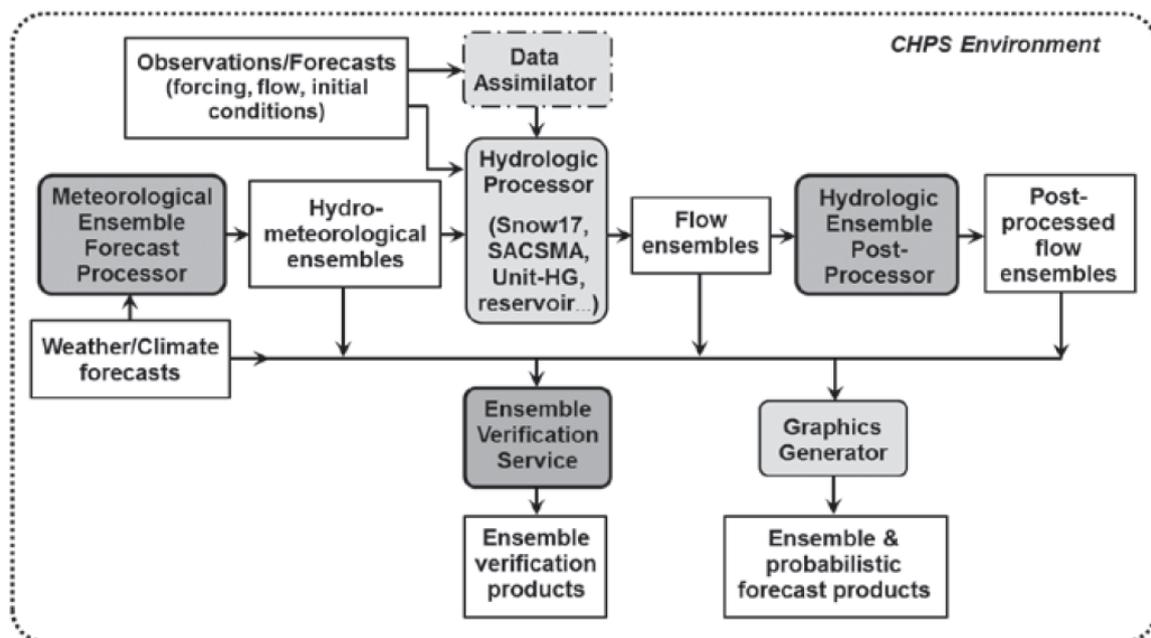


図 2.17 HEFS の概要図 (Demargne *et al.*, 2014)

2.8.4 日本におけるアンサンブル予測雨量の研究事例

前節において、ヨーロッパを中心としたアンサンブル予測の活用に関する研究、実運用の状況について述べた。日本においても、近年の大規模洪水を対象としてアンサンブル予測雨量を用いた洪水予測への研究が行われている。例えば Ushiyama *et al.* (2016) は、過去に発生した台風を対象にメソアンサンブル予測雨量の計算を行い、得られたメソアンサンブル予測雨量を RRI (Rainfall-Runoff-Inundation) モデルに入力して日吉ダムの流入量予測計算を実施した。さらに、アンサンブル予測雨量を日本における洪水時のダム操作に活用した既往研究として Saavedra *et al.* (2010), Nohara *et al.* (2015), 木谷ら (2018) が挙げられる。Saavedra *et al.* (2010) は、アンサンブル予測雨量を流出計算に入力して得られる流入量と数理最適化手法である SCE 法 (Duan *et al.*, 1992) を組み合わせることで、利根川上流にあるダム群 (藤原ダム, 相俣ダム, 菌原ダム) からの洪水時の放流量を決定する手法を示しており、システム構築も行われているが (Shibuo *et al.*, 2016), 事前放流操作実施前の巡視に要する時間や下流の水位上昇速度の制限をはじめとして、日本の洪水時ダム操作に係る必要な条件が適切にシミュレーションに反映されていないと考えられる。Nohara *et al.* (2015) は、気象庁の週間アンサンブル予報を長安口ダムの予備放流操作に対して適用した。週間アンサンブル予報は予測先行時間が 1 週間程度と長いことがメリットである一方で、メソスケール現象を表現するためには時空間解像度が粗く、豪雨に対して過小評価する傾向を持つ。そのような傾向を有する週間アンサンブル予報をどのように使えば適切な予備放流操作が行われるのかについて検討している。また木谷ら (2018) においても、予測先行時間が 120 時間と長いものの時空間解像度が粗い ECMWF のアンサンブル予測雨量の事前放流操作への利用方法について検討している。Nohara *et al.* (2015), 木谷ら (2018) とともに、アンサンブル予測雨量をそのまま利用するのではなく、時空間解像度の粗さに伴う過小評価傾向を補うための統計的補正手法を導入しつつ利用方法を検討していることに特徴がある一方で、洪水時のダム操作についてアンサンブル予測雨量を用いて具体的に放流量を決定する手法については述べていない。

またダムの利水運用におけるアンサンブル予測の活用事例としては、早明浦ダムからの利水に関する放流量の決定において、動的計画法への入力を過去の流入量とする場合とアンサンブル予測 (気象庁) を用いる場合のシミュレーションを行い、アンサンブル予測雨量を用いた方が渇水の緩和効果が高いことを示した事例が挙げられる (Nohara *et al.*, 2018)。

2.8.5 アンサンブル予測雨量の利活用に関する既往研究・取組のまとめ

ヨーロッパを中心としてアンサンブル予測雨量の利活用に関する研究が進められてきている。アンサンブル予測に関する研究が盛んであるヨーロッパにおいては、主として洪水予測への適用、より具体的にはアンサンブル予測を流出計算モデルに入力しその予測幅を評価すること及び予測結果に関する表示方法に係る研究が主である。その一方で、意思決定への適用事例がまだ少ないと考えられる。また、ダム運用操作における意思決定への適用事例としては利水放流量の決定が挙げられるが、洪水時への適用事例がない。日本におけるアンサンブル予測雨量の利活用事例についても、洪水時のダム操作の意思決定への適

用事例数はまだ少ないのが現状であると考えられる。

2.9 まとめ

本章では、日本の洪水時ダム操作においてこれまでどのように予測情報が位置づけられてきたかについて述べた後、既設ダムにおける洪水調節機能向上に関する既往研究、アンサンブル予測雨量に係る既往研究等についてレビューした。以下、本章のまとめを示す。

日本の洪水時ダムの実運用においては予測情報が用いられたのは、予備放流方式における利用が最初と考えられる。その後、洪水警戒体制や弾力的管理における事前放流操作への利用、近年の豪雨災害対策における超過洪水対策としての洪水貯留準備水位からの事前放流操作、特別防災操作への適用において用いられてきた。これらの操作において予測情報を用いるにあたっては、ダム管理において求められる要件を満足するように、予測技術の進展、予測情報の精度・不確実性に配慮しながら適切に利用されてきている。

研究においては、予測雨量の不確実性を明確に組み込んだ操作方法に関する既往研究が存在するものの、それら既往研究においては予測雨量の不確実性を、過去の予測雨量と実績雨量の関係から統計的に算出して用いている。しかし、予測雨量を計算する数値予報モデルが継続的に改良されるため統計的性質が変化すること等の理由から、過去の予測雨量に基づいて不確実性を求めるよりもその時々々の気象状況に合わせた不確実性情報が得られることが望ましいと考えられ、そのためのツールとして予測不確実性を定量的に評価するアンサンブル予測雨量の利用が考えられる。

アンサンブル予測雨量については、ヨーロッパを中心として利活用に関する研究が進められてきている。ヨーロッパにおいては、主として洪水予測への適用、より具体的にはアンサンブル予測を流出計算モデルに入力しその予測幅を評価すること及び予測結果に関する表示方法に係る研究が主である。しかしその一方で意思決定への適用事例はまだ限定的であり、ダム運用操作における意思決定への適用事例としては利水放流量の決定が挙げられるが洪水時のダム操作への適用事例がない。日本におけるアンサンブル予測雨量の利活用事例についても、洪水時のダム操作の意思決定への適用事例数はまだ少ない。

以上の背景を踏まえ本論文では、下記 2 項目を要点とした「アンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作決定方法」について示すことを主たる目的とする。

- アンサンブル予測雨量から得られる予測の不確実性情報を用いて、どのように放流量を決定するかを具体的に示す。
- 事前放流操作、洪水調節操作等、洪水時ダム操作のそれぞれの段階に応じて求められる要件を考慮した操作決定方法を示す。

参考文献：

秋山良壮・谷田広樹・角哲也 2005. 第36章 流水・土砂管理. 多目的ダムの建設 第7巻 管理編. 財団法人ダム技術センター：21-162.

Alfieri L, Thielen J, Pappenberger F 2012. Ensemble hydro-meteorological simulation for flash flood early detection in southern Switzerland. *Journal of Hydrology* 424-425: 143-153.

- Bartholmes JC, Thielen J, Ramos MH, Gentilini S. 2009. The european flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 141-153.
- Boucher M-A, Tremblay D, Delorme L, Perreault L, Anctil F 2012. Hydro-economic assessment of hydrological forecasting systems. *Journal of Hydrology* 416-417: 133-144.
- Cloke HL, Pappenberger F 2009. Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology* 375(3-4): 613-626.
- COSMO. “COSMO Limited-Area Ensemble Prediction System”, <http://www.cosmo-model.org/content/tasks/operational/leps/> (参照 : 2020/12/1)
- Dale M, Wicks J, Mylne K, Pappenberger F, Laeger S, Taylor S 2014. Probabilistic flood forecasting and decision-making: an innovative risk-based approach. *Natural Hazards* 70: 159-172.
- ダムの洪水調節に関する検討会 2020. “ダムの洪水調節に関する検討とりまとめ”. https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/damchousetsu_kentoukai/pdf/01torimatomehonbun.pdf (参照 : 2020/08/11)
- ダム水源地環境整備センター 2005. “事前放流検討の手引き (1次案)”.
- Demargne J, Wu L, Regonda SK, Brown JD, He LM, Seo D-J, Herr HD, Fresch M, Schaake J, Zhu Y 2014. The science of NOAA’s operational hydrologic ensemble forecast service. *Bulleting of American Meteorological Society* 95(1): 79-98.
- Hopson TM, Webster PJ 2010. A 1-10 Day Ensemble Forecasting Scheme for the Major River Basins of Bangladesh: Forecasting Severe Floods 2003-2007. *Journal of Hydrometeorology* 11(3): 618-641.
- 今村瑞穂 1998. ダム貯水池による洪水調節の合理化に関する2, 3の考察. *ダム工学*8(2): 102-116.
- Inomata H, Kawasaki M, Kudo S 2018. Quantification of the Risks on Dam Preliminary Release Based on Ensemble Rainfall Forecasts and Determination of Operation. *Journal of Disaster Research* 13(4): 637-649.
- 猪股広典・川崎将生・工藤俊 2021. アンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作における操作決定方法に関する研究. *水文・水資源学会誌* 34(1): 144-173.
- 柏井条介 2013. 貯水池を有効利用する異常洪水時操作の試案. *ダム技術*320: 49-62.
- 建設省河川局長 1965. 多目的ダム操作規則の様式について. 昭和40年7月9日付け建河発第263号河川局長通達
- 建設省河川局長 1984. 計画規模を超える洪水時におけるただし書き操作の運用の改訂について. 昭和59年6月29日 建設省河開発第62号.
- 気象庁予報部 2016. 確率的な気象予測のためのアンサンブル予報の課題と展望. 数値予報課報告 別冊第 62 号 ; 93-113.
- 気象庁予報部 2019. メソスケール気象予測の現状と展望. 数値予報課報告 別冊第 66 号 ; 1-18.
- 気象庁予報部数値予報課 2019. “メソアンサンブル予報の紹介”. 2019.3.13 気象・地震等の情報を扱う事業者等を対象とした講習会 (第 6 回). <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/>

minkan/koushu190313/shiryu2.pdf (参照：2020/10/8)

- 北田悠星・菊地慶・岡部真人・山田正 2010. 気象庁の降水短時間予報を用いて既存のダムの洪水調節機能を向上させる手法の提案. 水工学論文集 54: 523-528.
- 木谷和大・増田有俊・野原大督・角哲也 2018. ECMWF アンサンブル予測雨量の予測特性及びダム運用への活用方法に関する基礎的検討. 土木学会論文集 B1 (水工学) 74(5): 1321-1326.
- 国土交通省 2014. “河川砂防技術基準 維持管理編 (ダム編)”. https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/ijikanri_dam/pdf/ijikanri_dam.pdf (参照：2020/08/11)
- 国土交通省河川局長 2001. 河川法第14条及び特定多目的ダム法第31条に基づくダムに係る操作規則の策定について 平成13年11月28日 国河環第78号.
- 国土交通省河川局長 2005. 国土交通省所管ダムにおける事前放流の実施について. 平成17年3月30日 国河流第20号.
- 国土交通省河川局河川環境課長 2005. 国土交通省所管ダムにおける事前放流の実施について. 平成17年3月30日 国河流第24号.
- 国土交通省 九州地方整備局 鶴田ダム管理所 川内川河川事務所 2007. “第5回 鶴田ダムの洪水調節に関する検討会”. http://www.qsr.mlit.go.jp/turuta/d4_kouzuikentou/pdf/h190529_no05_setumei.pdf (参照：2020/08/11)
- 国土交通省 2004. “豪雨災害対策緊急アクションプラン”. https://www.mlit.go.jp/river/saigaisokuho_blog/past_saigaisokuho/index/041210actionplan.pdf (参照：2021/03/02)
- 国土交通省河川局河川環境課 2003. “ダムの弾力的管理試験の手引き (案)”. https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam5/pdf/danryokukanri_tebiki.pdf (参照：2020/08/11)
- 国土交通省河川環境課 監修 2006. 第2編 操作規則等. ダムの管理 例規集 (平成18年版). 財団法人 ダム水源地環境整備センター 編集：88-245.
- 国土交通省河川局長 2001. 河川法第14条及び特定多目的ダム法第31条に基づくダムに係る操作規則の策定について. 平成13年11月28日国河環第78号 国河治第170号国土交通省河川局長通達
- 国土交通省 国土技術政策総合研究所 2018. ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向けたダム操作規則等点検に関する資料. 国土技術政策総合研究所資料 1028.
- 国土交通省 水管理・国土保全局 2017. “ダム再生ビジョン”. <https://www.mlit.go.jp/common/001190127.pdf> (参照：2021/02/27)
- 国土交通省 水管理・国土保全局 2020. “事前放流ガイドライン”. <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001341537.pdf> (参照：2021/02/24)
- 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 2017. “ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向けたダム操作規則等点検要領及び同解説”. https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam7/pdf/damsousakisokutenkenyoryoH29.pdf (参照：2020/08/11)
- 国土交通省 東北地方整備局 2011. “台風15号による阿武隈川上流等の出水速報について”. <http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00037/k00290/river-hp/kasen/syussuisokuhou/>

- newpage1.files/1.abukumagawajouryuutou.pdf (参照 : 2020/08/11)
- 国土交通省 東北地方整備局 最上川ダム統管理事務所 2020. “前線及び低気圧に伴う出水における寒河江ダム・白川ダム・長井ダムの防災操作 (洪水調節) 効果について”. http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/kisya/kisyah/images/68049_1.pdf (参照 : 2021/05/16)
- Komma J, Reszler C, Bloschl G, Haiden T 2007. Ensemble prediction of floods -catchment non-linearity and forecast probabilities. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7: 431-444.
- 真名川ダム弾力的管理検討委員会 2016. “ダム弾力的管理本運用に向けて”. <https://www.kkr.mlit.go.jp/kuzuryu/managawa/danryoku/kaigi/pdf/no012-04.pdf> (参照 : 2020/08/11)
- McEnery J, Ingram J, Duan Q, Adams T, Anderson L 2005. NOAA’s advanced hydrologic prediction service. *Bulletin of the American Meteorological Society* 86(3): 375-386.
- 三石真也・角哲也・尾関敏久・松木浩志 2010a. 水位放流方式によるダム操作の適用性に関する検討. *ダム工学*20(1): 6-15.
- 三石真也・角哲也・尾関敏久 2010b. VR方式によるダム洪水調節の適用性に関する検討. *ダム工学*20(2): 105-115.
- 三石真也・尾関敏久・角哲也 2011a. 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* 24(2): 110-120.
- 三石真也・角哲也・尾関敏久・矢神卓也 2011b. 降雨予測を活用したダム洪水調節におけるリスク管理に関する研究. *ダム工学* 21(4): 242-250.
- 宮崎智也・松森博・福岡亮平・村上一徳 2013. “早明浦ダムのただし書操作における VR 法適用の検討”. https://www.water.go.jp/honsya/honsya/torikumi/gijyutu/kenkyuhappyou/pdf/h25_ikeda.pdf (参照 : 2020/08/11)
- 中津川誠 2014. 5. 気象・水文情報を利用した既存ダムの機能向上策について. *天気* 61(8): 20-29
- Nohara D, Hori T 2018. Reservoir Operation for Water Supply Considering Operational Ensemble Hydrological Predictions. *Journal of Disaster Research* 13(4): 650-659.
- Nohara D, Nishioka Y, Hori T, Sato Y 2015. Real-Time Reservoir Operation for Flood Management Considering Ensemble Streamflow Prediction and Its Uncertainty. In *Advances in Hydroinformatics: SYMHYDRO 2014*, Gourbesville P., Cunge J. A., Caignaert G. (ed). Springer: 333-347.
- Pappenberger F, Stephens E, Thielen J, Salamon P, Demeritt D, van Andel SJ, Wetterhall F, Alfieri L 2013. Visualizing probabilistic flood forecast information: expert preferences and perceptions of best practice in uncertainty communication. *Hydrological Processes* 27: 132-146.
- Ramos MH, van Andel SJ, Pappenberger F 2013. Do probabilistic forecasts lead to better decisions?. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 2219-2232.
- Ramos MH, Bartholmes J, Thielen J 2007. Development of decision support products based on ensemble forecasts in the European flood alert system. *Atmospheric Science Letters* 8: 113-119.
- Rotach MW, Ambrosetti P, Ament F, Appenzeller C, Arpagaus M, Bauser H-S, Behrendt A, Bouttier F, Buzzi A, Corazza M, Davolio S, Denhard M, Dorninger M, Fontannaz L, Frick J,

- Fundel F, Germann U, Gorgas T, Hegg C, Hering A, Keil C, Liniger MA, Marsigli C, Mctaggart-Cowan R, Montaini A, Mylne K, Ranzi R, Richard E, Rossa A, Santos-Munoz D, Schar C, Staudinger M, Stoll M, Volkert H, Walser A, Wang Y, Werhahn J, Wulfmeyer V, Zappa M 2007. MAP D-PHASE: Real-Time Demonstration of Weather Forecast Quality in the Alpine Region. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90(9): 1321-1336.
- Roulin E, Vannistem S 2005. Skill of Medium-Range Hydrological Ensemble Predictions. *Journal of Hydrometeorology* 6(5): 729-744.
- Saavedra O, Koike T, Yang K, Graf T, Li X, Wang L, Han X 2010. Decision support for dam release during floods using a distributed biosphere hydrological model driven by quantitative precipitation forecasts. *Water Resources Research* 46(10): W10544
- 高田徹 2015. 平成25年台風18号出水における大野ダムの防災操作. *ダム技術*346: 29-35.
- Thielen J, Bartholmes J, Ramos M-H, Roo Ad 2009. The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 125-140.
- 経田正幸・林久美 2007. アンサンブル予報とその利用. *天気* 54(3): 15-18.
- Shibuo Y, Ikoma E, Valeriano OS, Wang L, Lawford P, Kitsuregawa M, Koike T 2016. Implementation of Real-Time Flood Prediction and its Application to Dam Operations by Data Integration Analysis System. *Journal of Disaster Research* 11(6): 1052-1061.
- 下坂将史・呉修一・山田正・吉川秀夫 2009. 既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案. *土木学会論文集 B65(2)*: 106-122.
- 戸谷英雄・秋葉雅章・宮本守・山田正・吉川秀夫 2006. ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案. *土木学会論文集B62(1)*: 27-40.
- 裏戸勉 1993. 洪水時のダム操作について. *ダム技術*86: 4-12.
- 裏戸勉 2011. VR方式による異常洪水時のダム操作. *ダム技術*301: 3-15.
- Ushiyama T, Sayama T, Iwami Y 2016. Ensemble Flood Forecasting of Typhoon Talas and Roke at Hiyoshi Dam Basin. *Journal of Disaster Research* 11(6): 1032-1039.
- 牛山朋来・佐山敬洋・岩見洋一 2017. 欧州における数値天気予報を利用したフラッシュフラッド予測の現状. *水文・水資源学会誌*30(2): 112-125.
- 臼谷友秀・中津川誠 2010. 積算予測雨量に基づいた融雪機におけるダムの洪水調節機能の向上について. *土木学会論文集B66(3)*: 268-279.
- Verbunt M, Walser A, Gurtz J, Montani A, Schar C 2007. Probabilistic Flood Forecasting with a Limited-Area Ensemble Prediction System: Selected Case Studies. *Journal of Hydrometeorology* 8(4): 897-909.
- 和田一範・川崎将生・富澤洋介 2006. 気象予測データの利用可能性に関する研究. *国土技術政策総合研究所資料* 329.
- Zappa M, Fundel F, Jaun S 2013. A 'Peak-Box' approach for supporting interpretation and verification of operational ensemble peak-flow forecasts. *Hydrological Processes* 27: 117-131.

第3章 アンサンブル予測雨量の洪水調節操作への適用

3.1 はじめに

気候変動に伴って世界的に豪雨が強大化する可能性については、現在までに IPCC レポートやその他の研究において多く指摘されており、日本国内を対象とした既往検討においても気候変動に伴って豪雨の規模が増大する可能性が示唆されている（和田ら，2006；柏井ら2008）。豪雨の規模が増大化する可能性が高い一方で、適応策として既存施設の能力をできるだけ幅広く引き出すことがコストや早期効果発現の面で極めて有効であり（社会資本整備審議会，2008，2015），既設のダムにおいて洪水調節操作方法を高度化することにより従来以上に洪水調節効果を発揮させることが求められている。

既設ダムの治水機能向上の一つの方策として予測雨量を活用した洪水調節が挙げられる。「予測雨量を利用することでダムの洪水調節をより効果的に」という発想自体はかなり以前より考えられており多くの検討が実施されてきている（三石ら，2011a）。しかし，ダムの洪水調節は予測雨量に対して極めて高い精度を要求するため，特別防災操作への利用等に留まっている（国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所，2010；国土交通省東北地方整備局，2011）。豪雨に対する予測精度は日々向上しており，今後とも精度向上が進み，ダム洪水調節における適用も増加すると見込まれるが，予測誤差が完全にゼロになるのは困難である。そのため，「予測雨量とは誤差を含んでいるが，それを用いることでダムの洪水調節効果を高める可能性のあるデータ」という認識を持ってその利用法を考えることが重要である（鳥居，2012）。その一例として，過去の予測雨量について実績雨量との比較から誤差の発生確率分布を設定し，その誤差の発生確率分布を考慮（予測の幅を考慮することに相当）して洪水調節操作時の最適な放流量を決定する考え方が提案されている（三石ら，2011b）。

一方で気象予測の分野では，豪雨の予測で用いられるメソ気象モデルのアンサンブル予測計算について研究が盛んに行われている（吉野ら，2011；Seko *et al.*，2010）。アンサンブル予測とは，一つの初期値による予測では気象の時間推移の評価が難しいという認識に基づき，複数の初期値について予測計算を行うことによって得られた予測の幅を評価するものである。気象庁は1ヶ月，3ヶ月といった長期予測においては既にアンサンブル予測を現業化しており，39時間先までのメソアンサンブル予測についても運用が始まっている（気象庁，2016；2019）。このように，気象予測の分野では予測の幅を評価するアンサンブル予測が豪雨予測についても運用されつつあり，ダム分野においては予測の幅を利用して洪水調節操作時における最適な放流量を決定する基本的な考え方が提案された。アンサンブル予測雨量の河川分野における利用に関する研究では，国内外で精度評価や流出計算への適用事例は挙げられるが（牛山ら，2014；Yu *et al.*，2013；Cloke *et al.*，2009），アンサンブル予測雨量に基づいた洪水調節操作に関する検討は未だ行われていない。本章では過去の複数の出水事例についてメソアンサンブル予測雨量（以下，本報告においては断りがない限り「アンサンブル予測」は「メソアンサンブル予測」を示すものとする。）の計算を行い，その結果を基に三石ら（2011b）で提案されている予測雨量の誤差発生確率を考慮したダム洪水調節手法に対して適用する

ことで、現時点における適用性および今後の課題について述べる。

3.2 シミュレーション実施内容

3.2.1 検討対象流域・ダム，対象洪水

アンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節の検討対象流域として、平成 23 年に複数の台風により洪水調節操作を実施した紀伊半島に位置する A ダム（流域面積約 80 km²）を含む B 川流域（流域面積約 450 km²，治水基準地点：C 地点（A ダムから約 60 km 下流））を対象とした。検討対象とする台風およびその検討対象期間は以下の通りである。

台風 6 号：2011 年 7 月 15 日 9 時～7 月 20 日 15 時

台風 12 号：2011 年 8 月 29 日 9 時～9 月 4 日 15 時

台風 15 号：2011 年 9 月 16 日 9 時～9 月 21 日 21 時

3.2.2 アンサンブル予測雨量の計算

1) 実施したアンサンブル予測計算の概要

アンサンブル予測雨量は、気象庁 GSM の 84 時間予測を初期値・境界値として、WRF (Weather Research and Forecasting Model) により計算した。各台風について上述の対象期間について、GSM（領域：日本域，空間解像度：20 km，予測更新間隔：6 時間毎（03, 09, 15, 21 JST），予測先行時間：84 時間，時間解像度：毎時）の予測が更新される毎にその予測値を初期値・境界値として 84 時間先までの計算を行う。予測に用いる初期値についてはその時点よりも 6 時間前に行った予測計算結果および観測値を基に次項に概要を記す Hybrid ETKF-3DVAR 法 (Wang *et al.*, 2008a; 2008b) によるデータ同化を行った。計算領域については図 3.1 に示し、空間解像度は親領域において 15 km とした。子領域は A ダムが領域中央付近に位置するように設定し、空間解像度は 5 km とした。鉛直層の数は親領域，子領域共に 50 層とした。WRF によるシミュレーションにおいて採用した物理過程およびデータ同化に用いた観測データ一覧を表 3.1 および表 3.2 に示す。ここでアンサンブルメンバー数は計算機環境および計算所要時間を考慮して 20 とした。しかし、Hybrid ETKF-3DVAR 法を用いた既往研究ではアメリカに上陸した 2 つのハリケーンの予測進路シミュレーションに 32 メンバーを用いており (Wang X, 2011)，アンサンブルメンバー数の違いが予測結果に与える影響については今後の検討事項である。

2) Hybrid ETKF-3DVAR 法の概要

シミュレーションにより求めた状態（例えば風速）の推定値および観測値を用いてその時点の状態の最も確からしい値（以降、解析値と呼ぶ）を推定する行為をデータ同化と呼び、3次元変分法（以下、3DVAR）はデータ同化の代表的な一手法である。3DVAR では、任意の値から推定値および観測値それぞれまでの距離の和を表す評価関数を導入し、この関数を最小とする値を反復計算により探索し、求めた値を解析値とする方法である。詳細は例えば碓井ら (2009) を参考にして頂きたいが、解析値を求める過程においてシミュレーションの誤差情報が必要となる。3DVAR において誤差情報はシミュレーションの統計的な誤差分散で与えられ、台風、前線といったその時々々の気象状況の違いや時間変化を考慮せずに常に一定とする。しかし、その時々々の気象状況を考慮した誤差情報を組み入れることで解析値の

精度が向上することが示唆されている (Wang *et al.*, 2008a).

Hybrid ETKF-3DVAR 法は, 3DVAR を基本としつつも初期値が異なる複数のアンサンブルメンバーを用いて予測シミュレーションを実施し, 予測結果に関する分散を統計的な誤差分散と併用することで解析値の精度向上を図る手法である. Hybrid ETKF-3DVAR 法の処理の過程を図 3.2 に示す. 最初に各アンサンブルメンバーについて予測シミュレーションを実施し (①), 状態のアンサンブル平均値 (②) および各アンサンブルメンバーについて予測された状態の推定値とアンサンブル平均値との偏差を算出する (③). 各アンサンブルメンバーについて求められた偏差から分散を算出し (④), これとアンサンブル平均値, 観測値および統計的な誤差分散を入力として 3DVAR により解析値を求める (⑤). ここで, ④で求めた分散はその時々々のアンサンブルシミュレーションの結果に基づく値であるため時間変化する. また, ③で求めた各アンサンブルメンバーの偏差については, 推定値の偏差について観測値を用いてデータ同化する手法の一種であるアンサンブル変換カルマンフィルタ (ETKF) (Wang *et al.* 2008A; 2008B) により更新する (⑥). 次に, 3DVAR によって求めた解析値に ETKF により更新された各アンサンブルメンバーに関する偏差を加えることで, 各アンサンブルメンバーの状態量が更新される (⑦). その更新された状態量を初期値として次の予測計算を実行する (⑧). 以降は①~⑧を繰り返す.

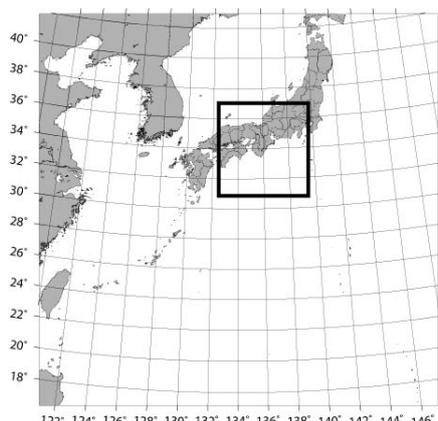


図 3.1 計算領域 (全体が親領域, 太枠内が子領域)

表 3.1 採用した物理過程

物理過程	スキーム
雲物理過程 (親領域)	WRF Single-Moment 5-class scheme
雲物理過程 (子領域)	WRF Single-Moment 6-class scheme
積雲パラメタリゼーション	Kain-Fritsch scheme
長波放射	Rapid Radiative Transfer Model
短波放射	Dudhia scheme
地表面	Noah Land Surface Model
境界層	Yonsei University scheme
接地層	Monin-Obukhov

表 3.2 データ同化に用いた観測データ一覧

種別	要素	入手先
気象観測衛星 (AMSU-A, B)	気温, 水蒸気	NCAR Research Data Archive
衛星大気追跡風	風	
高層実況, 海上実況, 飛行場実況, 地上実況	気温, 風, 水蒸気, 気圧	
航空機実況	気温, 風	
ドップラーレーダ	風, 反射強度 (雨水)	(一財) 気象業務支援センター

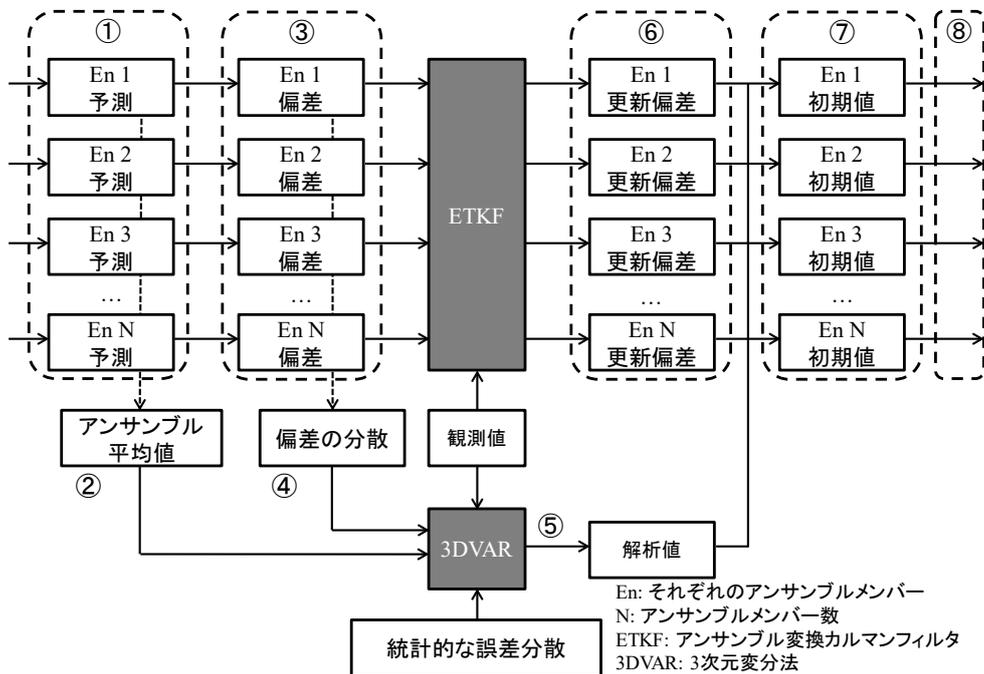


図 3.2 Hybrid ETKF-3DVAR 法によるデータ同化処理過程

3.2.3 アンサンブル予測雨量を用いたダム洪水調節手法

3.2.2 の手法で計算されるアンサンブル予測雨量を用いて、三石ら (2011b) の手法を参考にダム最適放流量を以下の通り決定した。

- 1) 洪水調節開始流量 (本検討では $200 \text{ m}^3/\text{s}$) から計画最大放流量 (本検討では $350 \text{ m}^3/\text{s}$) の間を $200, 240, 280, 320, 350 \text{ m}^3/\text{s}$ に分けた 5 通りの一定量放流方式による操作ケースを予め設定する。以下、 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定量放流方式を「操作ケース 1」、 $240 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定量放流方式を「操作ケース 2」...、 $350 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定量放流方式を「操作ケース 5」のように記す。
- 2) GSM の予測が更新されるタイミングで、3.2.2 で示した予測先行時間 84 時間のアンサンブル予測雨量の計算を行う。得られた各アンサンブルメンバーの予測雨量の結果をここでは $m01, m02, \dots, m20$ とする。

- 3) 得られたアンサンブル予測雨量のメンバー1 (m01) についてダム流域を含めた流域全体で流出計算を行う。
- 4) 3)においてダム流域について得られる予測流入量に対し、操作ケース 1 (200 m³/s の一定量放流方式) で操作したときの下流基準地点 (C 地点) のピーク流量を計算する。ここでは求められたピーク流量を、アンサンブルメンバー1 (m01) の流出に対して操作ケース 1 で調節した結果という意味で $Q_{p1,m01}$ と表記することとする。
- 5) 3)と 4)と同様の計算により、操作ケース 1 についてその他のアンサンブルメンバー (m02, m03, ..., m20) に対する下流基準地点ピーク流量 ($Q_{p1,m01}, Q_{p1,m02}, \dots, Q_{p1,m20}$) を算出する。
- 6) 各アンサンブルメンバーの発生確率は等しいものとし、4)および 5)で計算したアンサンブルメンバー毎の下流基準地点ピーク流量を算術平均することで、操作ケース 1 で操作した時の下流基準地点ピーク流量期待値を式(3.1)により得る (Q_{p1})。

$$Q_{p1} = (\sum_{e=1}^{20} Q_{p1,me})/20 \quad \text{式(3.1)}$$

- 7) 3)~6)の計算を 1)で設定した残り 4 つの操作ケースについても同様に行うことで、操作ケース毎の下流基準地点ピーク流量期待値 ($Q_{p2}, Q_{p3}, Q_{p4}, Q_{p5}$) を計算する。
- 8) 7)までの計算で全操作ケースについて得られた下流基準地点ピーク流量期待値を比較し、下流基準地点ピーク流量期待値を最小にする操作ケースをその時点における最適操作として次の GSM の予測更新までその放流量で操作する。
- 9) GSM の予測が更新される度に 2)~8)の計算・操作を行うことで最適操作を決定する。

なお、上記計算においてダム貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過した場合は、ただし書き操作実施要領に基づく既定の操作に移行するものとした。

上記計算をアンサンブル計算の境界値である GSM の予測が更新されるたびにを行い、洪水が終了するまで実施した。上記操作は、確率的に最も発生する可能性が高い予測に対して最適操作 (洪水調節容量を極力多く使用して下流河川の流量を低減させる。) を実施することに相当する。

なお、上記 3)の流出計算においては土研分布モデル (鈴木ら, 1996 ; 猪股ら, 2007) を用いた。土研分布モデルのパラメータは、対象 3 洪水の実績雨量、A ダム流入量および C 地点の実績流量を用いて SCE-UA 法 (Duan *et al.*, 1992) により最適化を行った。

3.3 計算結果

3.3.1 台風 6 号の結果

1) アンサンブル予測雨量

最初に台風 6 号の結果について示す。図 3.3 は、実績のダム流入量が洪水調節開始流量に到達する約 1 日前の時点 (7 月 18 日 9 時) を初期時刻として予測した結果である。図 3.3 の左図に示す時系列の予測結果では、降り始めの直後に発生する 40 mm/hr 程度の雨をアンサンブル予測雨量では予測できていない。また、7 月 20 日の未明以降は雨がほとんど観測されていないにも関わらず、アンサンブル予測ではほぼ全てのメンバーが 5~30 mm/hr 程度の

雨を予測しており、過大評価している。要因については次章で考察する。しかし、ダム洪水調節において最も重要である総雨量の観点では、アンサンブル平均（黒太線）に着目すると高い精度が得られていることが分かる（図 3.3, 右図）。また、ダム流入量が洪水調節開始流量に到達する 1 日前の時点の予測であるにも係わらず、雨の降り終わりまでほぼ見通すことができていることもダムの洪水調節にとっては有意義な情報である。図 3.3 には現在運用されている長時間の予測情報として MSM33 時間予測（領域：日本域，空間解像度：5 km，予測先行時間および予測更新時間：15 時間（0, 6, 12, 18 UTC）および 33 時間（3, 9, 15, 21 UTC），時間解像度：毎時 ※2011 年時点での仕様）の結果を併せて図示しているが，MSM では一山目の終わりまでしか見通すことができず，今回の検討で計算したアンサンブル予測雨量の有効性が確認できる。また，図 3.4 は初期時刻別のアンサンブル平均雨量の時系列（左図）および積算雨量（右図）である。なお右図に示す積算雨量については，予測初期時刻までの観測の積算雨量に予測雨量を足して表示している。今回の検討でアンサンブル予測計算は 1 日 4 回分（03, 09, 15, 21 JST）の初期時刻について実施したが，ここでは図を簡明にするため 1 日 2 回分（09, 15 JST）の初期時刻の予測結果を図に示し，また降雨が降り始める約 1 日前から最後の降雨のピークが生じた 7 月 19 日 21 時を初期時刻とする予測結果までを図に示した。図 3.4 左図に示す時系列では，初期時刻毎に予測結果にある程度のばらつきがある。また，図 3.4 右図に示す積算雨量では最大で約 40%程度過大評価する初期時刻が存在するが，概ね良好な精度の予測結果が得られた。また，予測初期時刻毎に過大評価と過小評価が入れ替わるような不安定な予測ではなく，いずれの初期時刻についても一貫して過大評価傾向であった。

2) 洪水調節計算

次に，台風 6 号について 3.2.3 で述べた手法によりダム洪水調節操作を行った結果を図 3.5 に示す。この結果，本則操作（最大放流量 $350 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定量放流方式）の場合は洪水時の最大放流量は $350 \text{ m}^3/\text{s}$ であり，貯水量最大時において洪水調節容量の 18%を使用した。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では，最大放流量は 7 月 19 日 9 時～15 時にかけての $240 \text{ m}^3/\text{s}$ であり，その後は $200 \text{ m}^3/\text{s}$ まで放流量を下げる結果となった。貯水容量の使用率については，貯水量最大時において洪水調節容量の 67%を使用し，操作規則に基づく操作よりも多い容量を使用している。図 3.6 に下流基準地点である C 地点の水位の時系列を示す。ピーク水位については，一つ目のピーク，二つ目のピークともにアンサンブル予測雨量に基づく操作は操作規則に基づく操作と比較して約 20 cm 低くすることができ，操作規則に基づく操作と比較して効果的な洪水調節を行うことができた。

3.3.2 台風 12 号の結果

1) アンサンブル予測雨量

次に台風 12 号の結果について示す。図 3.7 は，実績のダム流入量が洪水調節開始流量に到達した時間の約 1 日前の時点（9 月 1 日 9 時）を初期時刻として予測した結果である。図 3.7 の左図を見ると，実績の降雨は大きく二つのピークが観測されている。それに対してアンサンブル予測は，一つ目のピークまではタイミング，雨量共に概ね精度良く予測できているが，

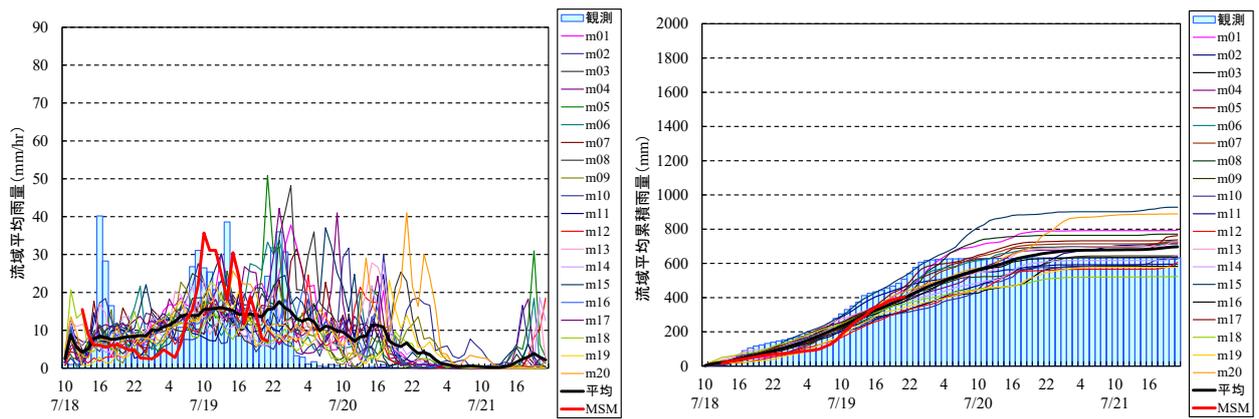


図 3.3 7月18日9時のGSMを初期値としたAダム流域平均雨量の84時間アンサンブル予測結果（左：84時間の時系列，右：積算雨量）

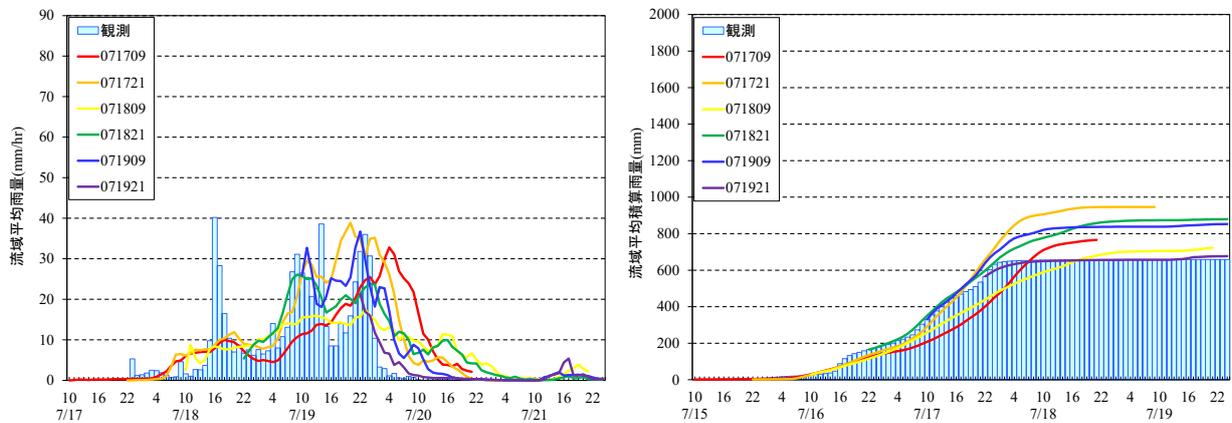


図 3.4 初期時刻別アンサンブル平均値（台風6号，左：84時間時系列，右：積算雨量）

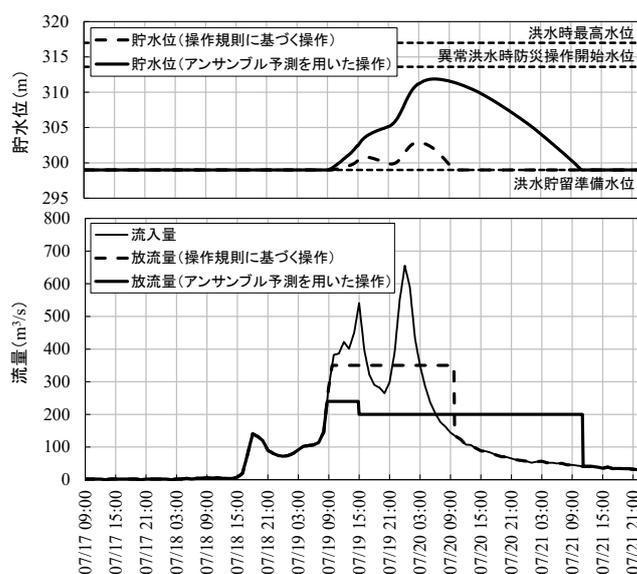


図 3.5 台風6号時のAダムの流入量，放流量および貯水位の時系列

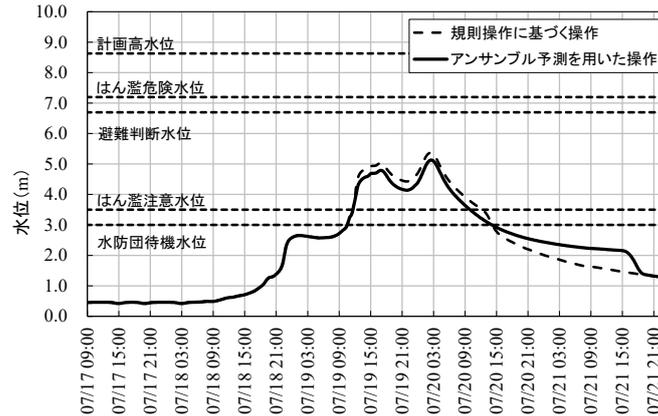


図 3.6 台風 6 号時の C 地点の水位の時系列

全てのアンサンブルメンバーが一つ目のピークを過ぎたところで雨が降り止むと予測して二つ目のピークを予測できない結果となった。図 3.7 の右図に示される積算雨量についても、二つ目のピークを予測できなかったためアンサンブル平均は実績積算雨量の半分程度の予測にとどまり、アンサンブルメンバーの中で最も大きい積算雨量を示す予測でも実績積算雨量よりも小さい予測となった。要因については次章で考察する。また、図 3.8 は初期時刻別のアンサンブル平均雨量の時系列（左図）および積算雨量（右図）である。図 3.8 の左図に示す時系列では、やはりいずれの初期時刻の予測についても二つ目のピークを予測することができていないことが分かる。特に、二つ目のピークが降る直前である 9 月 3 日 21 時の予測においても二つ目のピークを見逃す予測となっている。図 3.8 右図に示す積算雨量ではいずれの初期時刻についても一貫して過小評価傾向であり、イベント後半の予測である 9 月 3 日 9 時や 9 月 3 日 21 時の予測においても二つ目のピークを相当程度過小評価しているために積算雨量としてもかなりの過小評価となった。

2) 洪水調節計算

次に、台風 12 号について 3.2.3 で述べた手法によりダム洪水調節操作を行った結果を図 3.9 に示す。操作規則に基づく操作の場合は 9 月 3 日 20 時頃に異常洪水時防災操作に入り、放流量の最大値は 9 月 4 日 9 時頃の約 $580 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。また、洪水調節容量は最大時で 81% を使用している。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、上述した通り二つ目のピークをアンサンブル予測が見逃しているために、一つ目のピークに対して洪水調節容量を使い切る操作を行っている。実際には、予測できなかった二つ目のピークが存在したため、二つ目のピークを迎える頃には操作規則に基づく操作と同様に既に異常洪水時防災操作に入っており、放流量が約 $580 \text{ m}^3/\text{s}$ まで増加した。図 3.10 に下流基準地点である C 地点の水位の時系列を示す。一つ目のピークは操作規則に基づく操作よりも約 10 cm 低減させることができたが、二つ目のピークは異常洪水時防災操作に入った結果として操作規則に基づく操作の場合と比較してほぼ同じ水位となった。しかし、アンサンブル予測雨量に基づく操作では操作規則に基づく操作と比較してかなり早いタイミングで異常洪水時防災操作に移行（9 月 3 日 13 時頃）してしまった点が大きな問題である。

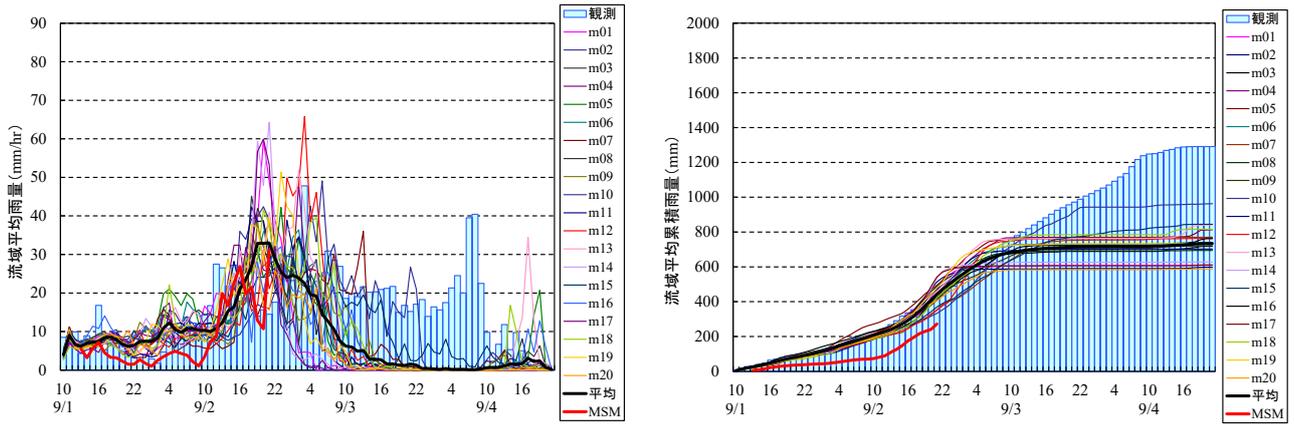


図 3.7 9月1日9時のGSMを初期値としたAダム流域平均雨量の84時間アンサンブル予測結果（左：84時間の時系列，右：積算雨量）

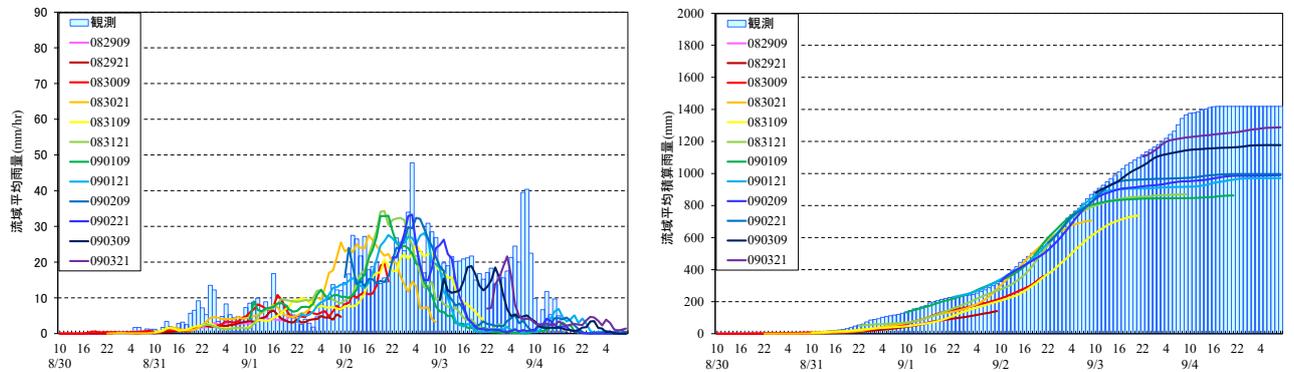


図 3.8 初期時刻別アンサンブル平均値（台風12号，左：84時間時系列，右：積算雨量）

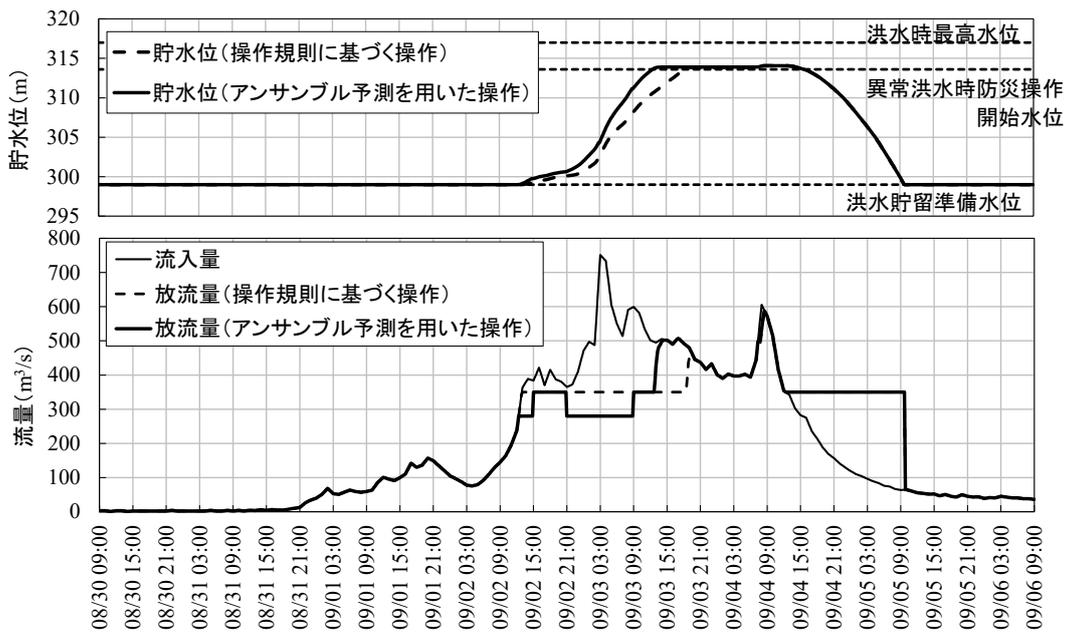


図 3.9 台風12号時のAダム流入量，放流量および貯水位の時系列

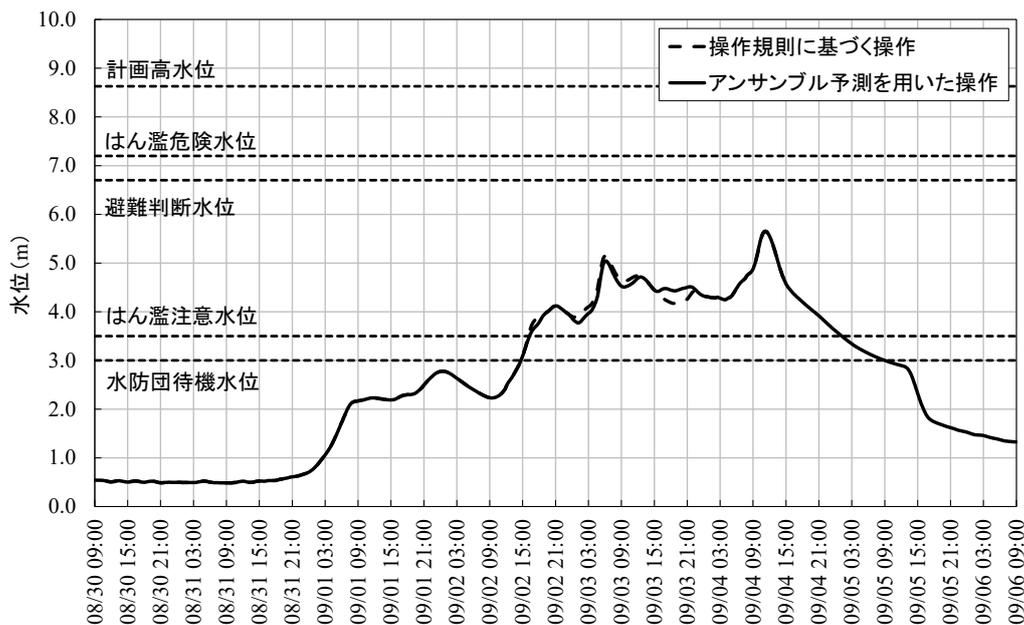


図 3.10 台風 12 号時の C 地点の水位の時系列

3.3.3 台風 15 号の結果

1) アンサンブル予測雨量

次に台風 15 号の計算結果について示す。図 3.11 は、実績のダム流入量が洪水調節開始流量に到達した時間の約 1 日前の時点（9 月 20 日 3 時）を初期時刻として予測した結果である。図 3.11 の左図によると、台風 15 号は 2 日程度で終了した洪水であったため GSM84 時間予測を初期値・境界値として行った予測計算は降雨の降り始めから終わりまでを見通すことができている。また、アンサンブル平均は降雨のピークを量、タイミング共に正確に予測できており、図 3.11 の右図に示される積算雨量の値についてもアンサンブル平均は観測値と相違ない結果となった。また、図 3.12 は初期時刻毎のアンサンブル平均雨量の時系列（左図）および積算雨量（右図）である。図 3.12 の左図に示す時系列では、初期時刻毎に予測結果に大きな差が見られず台風 6 号および 12 号の予測と比較すると安定した予測が行われた。図 3.12 右図に示す積算雨量ではやや過小評価する初期時刻が存在するが、いずれの初期時刻についても安定して良好な予測が行われた。

2) 洪水調節計算

次に、台風 15 号について 3.2.3 で述べた手法によりダム洪水調節操作を行った結果を図 3.13 に示す。この結果、操作規則に基づく操作の場合は洪水時の最大放流量は $350 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、貯水量最大時において洪水調節容量の 8%を使用した。それに対しアンサンブル予測雨量に基づく計算結果では、最大放流量 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定量放流となり、最大時において洪水調節容量の 30%を使用した。また、図 3.14 に下流基準地点である C 地点の水位の時系列を示す。ピーク水位については、アンサンブル予測雨量に基づく操作は操作規則に基づく操作と比較して約 20 cm 低くすることができ、操作規則に基づく操作と比較して効果的な洪水調節を行うことができた。

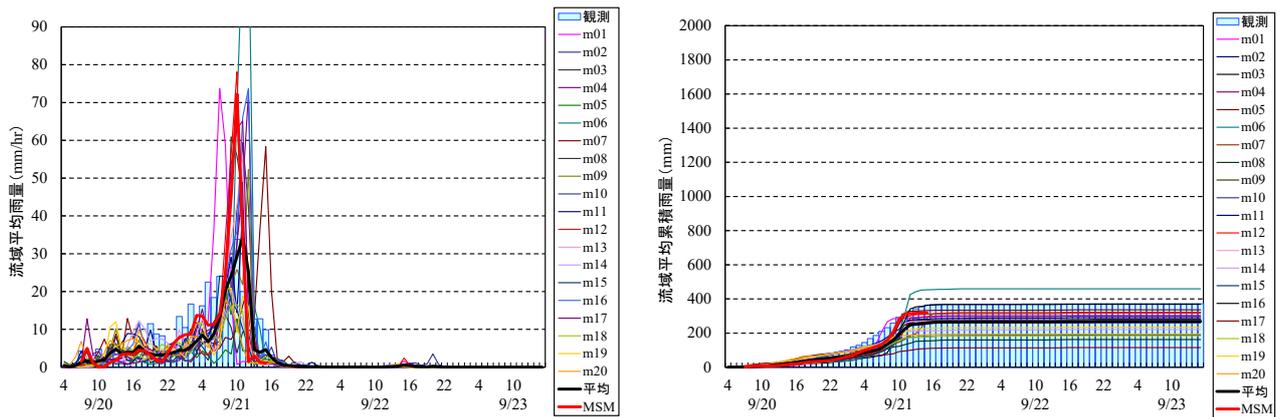


図 3.11 9月20日3時のGSMを初期値としたAダム流域平均雨量の84時間アンサンブル予測結果(左:84時間の時系列,右:積算雨量)

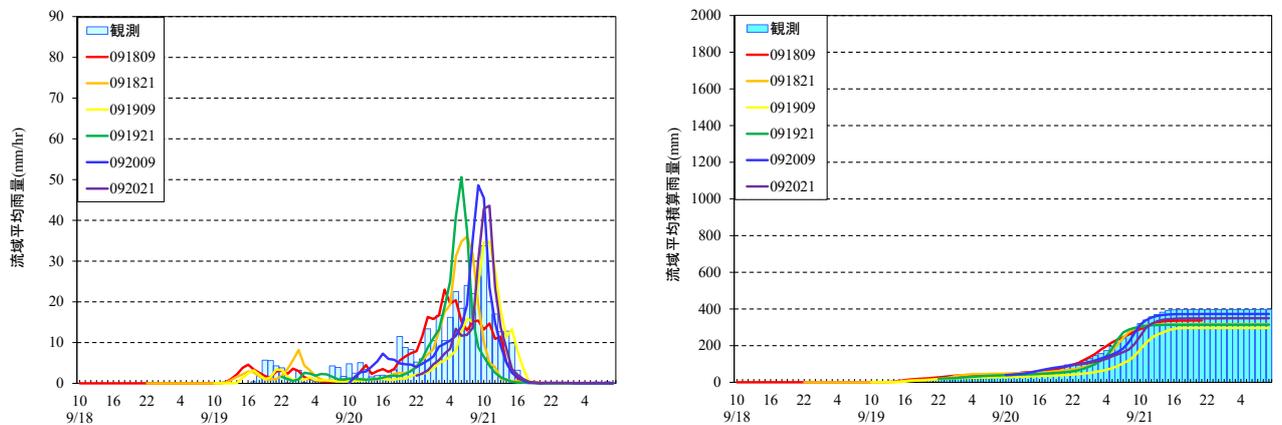


図 3.12 初期時刻別アンサンブル平均値(台風15号,左:84時間時系列,右:積算雨量)

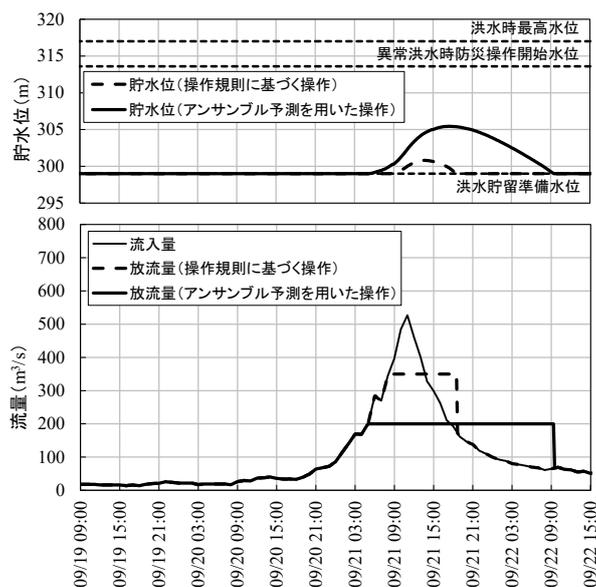


図 3.13 台風15号時のAダムの流入量,放流量および貯水位の時系列

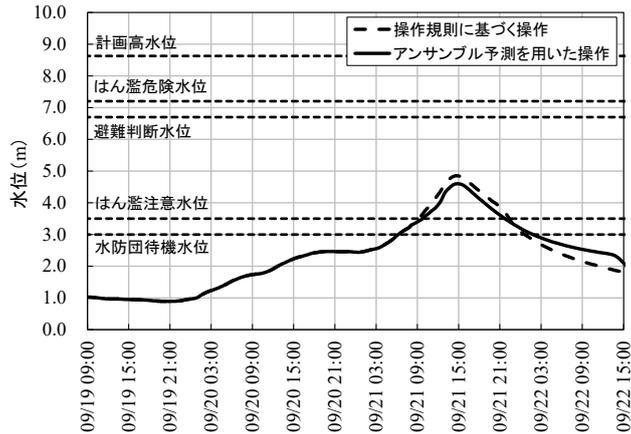


図 3.14 台風 15 号時の C 地点の水位の時系列

3.4 考察

前章に記した通りアンサンブル予測雨量の精度はイベント毎に異なっており、3.2.3 で述べたアンサンブル予測雨量を用いたダム洪水調節手法が操作規則に基づく操作と比較して効果があるか否かはアンサンブル予測雨量の精度に強く依存することが分かる。ここでは、アンサンブル予測およびその初期値・境界値として用いた GSM で予測されている台風進路と気象庁のベストトラックデータから得られる実績の台風経路に着目してアンサンブル予測雨量の精度との関係について述べた後、実務への適用に向けた課題について述べる。なお以降においてアンサンブル予測および GSM の台風位置は地上気圧が最も低い位置としている。またベストトラックデータは、衛星画像やレーダデータをはじめとしたリアルタイムで取得される情報を基に解析された台風諸元(台風の中心位置, 中心気圧, 最大風速など)に、事後に入手される情報を加えて改めて解析を行って確定された台風諸元データである。

3.4.1 アンサンブル予測雨量の精度と台風進路の関係

ここでは、前章とは異なり台風 15 号, 6 号, 12 号の順序で説明する。台風 15 号において、流入量が洪水調節開始流量に到達する約 1 日前である 9 月 20 日 3 時を初期時刻とした予測(図 3.11 と同じ初期時刻)では、図 3.15 に示すとおりアンサンブル予測の境界条件として用いた GSM は、24 時間先予測および 36 時間先予測においてそれぞれ約 130 km, 約 180 km ほどベストトラックより離れているが、その一方でアンサンブル予測では進路・進行速度共にリードタイムの長さに関わらず概ねベストトラックに近いことが分かる。その結果として図 3.11 に示したようにアンサンブル予測雨量の精度は全般的にかなり高い予測精度を示したと考えられる。

次に台風 6 号の場合、図 3.16 に示すようにベストトラックでは台風は四国に向かって南から北上して室戸岬付近を通過した後に紀伊半島を通過、その後南東に向けて進んだ。図 3.16 に示す 7 月 18 日 9 時を初期時刻とした予測(図 3.3 と同じ初期時刻)では、24 時間先までは GSM およびアンサンブル予測共にベストトラックに近い予測を行っているものの、36 時間先から長い予測時間になると GSM およびアンサンブル予測共にベストトラックとは離れた予測を行っており、両者は約 110 km 離れている。また 36 時間先以降においては、

アンサンブル予測はベストトラックよりも北側に大回りする予測を行っている。この大回りする予測が原因となってアンサンブルで予測された台風は実際よりも紀伊半島にある A ダム付近への接近および通過のタイミングが遅くなった。これにより、図 3.3 の左図に示したように降雨の前半部分で過小評価、後半部分で過大評価となったと考えられる。

次に台風 12 号の場合、台風本体が紀伊半島に近づいてきた 9 月 1 日 9 時を初期時刻（図 3.7 と同じ初期時刻）とした予測では、図 3.17 に示すとおり 48 時間後の予測においては多くのアンサンブルメンバーで台風は中国地方から日本海側に抜けると予測されているのに対し、ベストトラックでは 48 時間後においても四国の室戸岬近辺に位置している。さらに、72 時間後の予測では全てのアンサンブルメンバーが日本海に抜けて時間が経過しているのに対し、ベストトラックでは中国地方をわずかに北に抜けた程度である。このことから実績の台風はアンサンブル予測よりも長い時間をかけて四国地方から中国地方を通過したものと考えられる。これにより実績の雨は A ダム流域において長時間降り続いたのに対し、アンサンブル予測は実績の雨よりも早く降り止み過小評価の予測になったと考えられる。

また、台風 12 号については 48 時間先以降の予測においてアンサンブルで予測された台風進路の精度が低だけでなく、特に 48 時間先以降の予測についてアンサンブルメンバー間の予測進路のばらつきが非常に大きいことが図 3.17 よりうかがえる。アンサンブルで予測された台風の位置を、台風 6 号に関する予測である図 3.16 および台風 12 号に関する予測である図 3.17 の 48 時間後の予測について調べると、台風 6 号ではアンサンブルメンバー間で経度方向に最大で 280 km 離れており標準偏差は 70 km であった。また緯度方向は最大で 200 km 離れており、標準偏差は 50 km であった。それに対し台風 12 号では、アンサンブルメンバー間で経度方向は最大で 190 km 離れており、標準偏差は 50 km であり台風 6 号と比較してやや小さい値となっていた。しかし緯度方向は最大で 570 km 離れ、標準偏差は 140 km であり台風 6 号に関する予測と比較してアンサンブルメンバー間の予測進路のばらつきが非常に大きいことが分かる。このことから、アンサンブルで予測された台風進路のばらつきの大きさは、その台風の進路予測の不確実性・予測の困難さを示唆していると考えられる。次にアンサンブル予測の境界条件として用いられた GSM の予測についてみてみると、48 時間後や 60 時間後についてはベストトラックと GSM の予測との間の距離は 110 km よりも小さく、台風 6 号および台風 15 号の事例と比較して予測誤差がやや小さいことが分かる。それにも関わらず上で述べたとおり台風 12 号のアンサンブル予測雨量の精度は台風 6 号に関する予測よりも著しく低い結果となった。

3 つの台風に関する以上の考察から、アンサンブル予測雨量の精度は境界条件として用いた GSM の予測位置の精度のみに依存するわけではなく、アンサンブルで予測された台風進路の精度やアンサンブルメンバー間のばらつきの大きさに依存している可能性が示唆された。今後は、台風 6 号についてアンサンブル予測がベストトラックよりも北側に大回りする進路を予測したことや台風 12 号についてアンサンブルメンバー間で台風の進路予測が大きくばらついたことに代表されるように、アンサンブルメンバーの台風予測進路に着目して精査することが必要である。

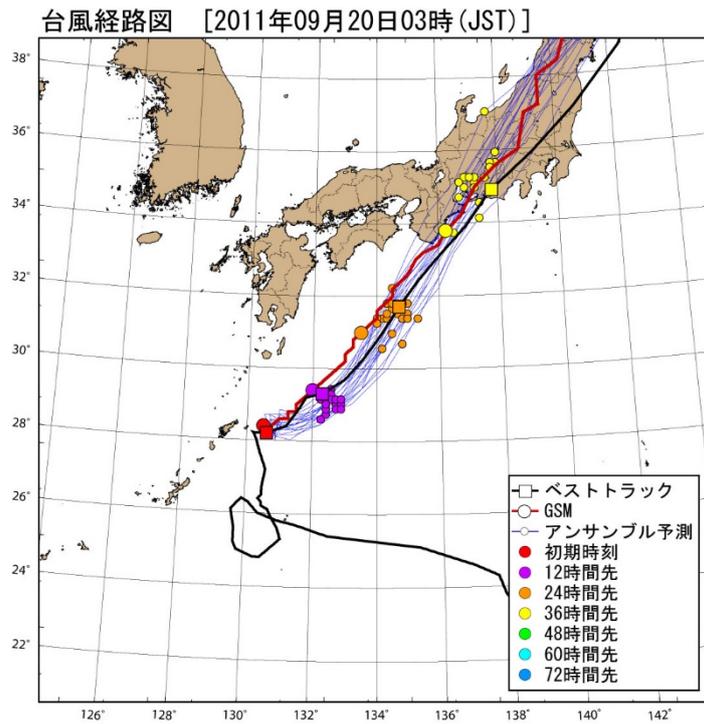


図 3.15 ベストトラック，GSM およびアンサンブル予測の台風進路図
(台風 15 号，予測初期時刻：9 月 20 日 3 時)

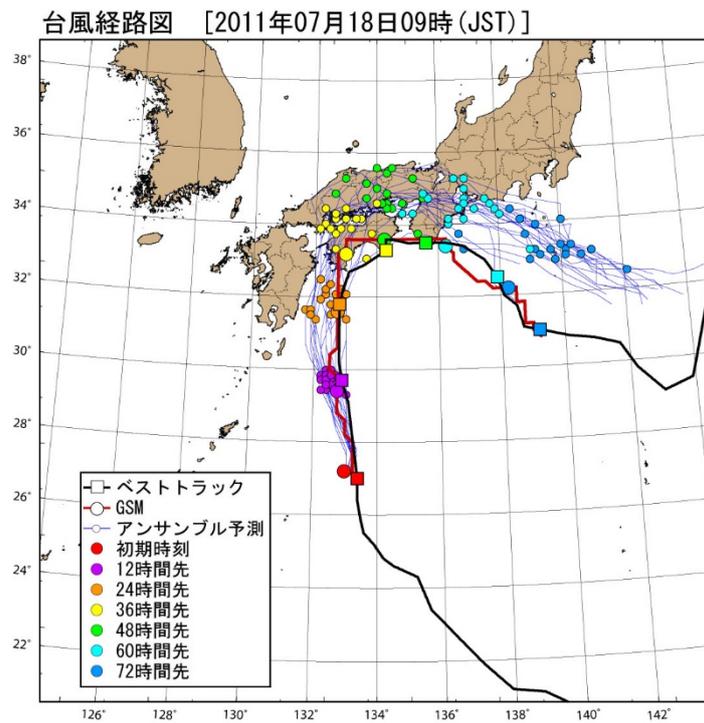


図 3.16 ベストトラック，GSM およびアンサンブル予測の台風進路図
(台風 6 号，予測初期時刻：7 月 18 日 9 時)

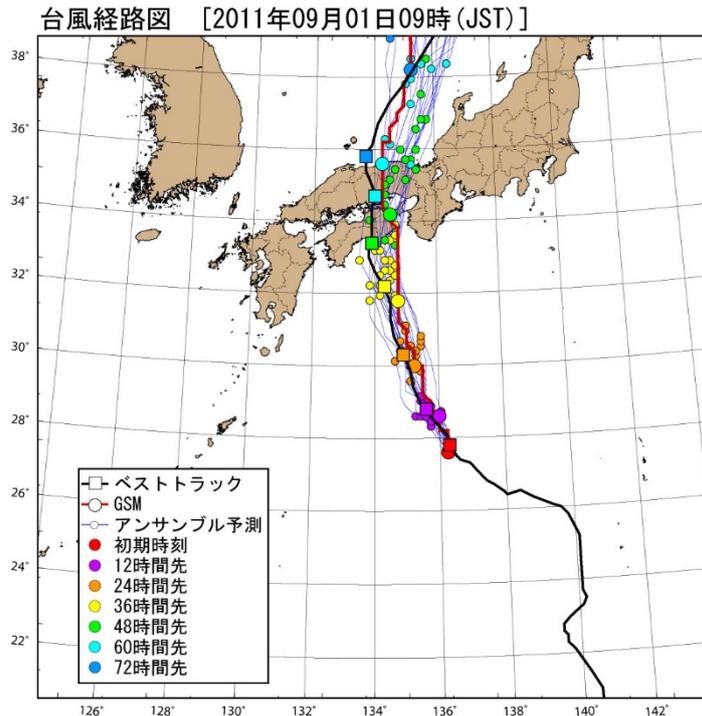


図 3.17 ベストトラック，GSM およびアンサンブル予測の台風進路図
(台風 12 号，予測初期時刻：9 月 1 日 9 時)

3.4.2 ダム管理の実務への適用に向けた課題

今回の結果から，現状ではアンサンブル予測雨量の精度は事例によってばらつきがあり，台風 12 号のように著しく精度が低い事例も存在する．低い予測精度のアンサンブル予測雨量に従って操作を行った結果として操作規則に基づく操作よりも放流量を増加させることや早いタイミングで異常洪水時防災操作に入ってしまうことは，ダムに要求される所定の洪水調節効果を発揮できなかったことを意味するため，そのような操作は避けなければいけない．そのため，台風 6 号，15 号のような成功する事例が存在する一方で，台風 12 号のような事例が存在する現状においては本報告で述べた手法を実務に即適用することは難しい．今後実務に適用するためには，台風 12 号のような操作を避けるための工夫が必要と筆者らは考える．その一案として，リアルタイムでその時点のアンサンブル予測の精度が高いか低いかを判断し，予測精度が低いと想定される場合においては下流の危険度を高めてしまう可能性が高いアンサンブル予測に基づく操作は実施せずに，最適操作ではないものの確実に所定の洪水調節機能を発揮すべく操作規則に基づく操作を行うと判断することが考えられる．そのための具体的な考え方としては，図 3.17 に示された台風 12 号の事例のように，アンサンブル予測で計算された台風進路のばらつきは台風進路予測の不確実性を示唆していると考え，ばらつきが小さい場合は台風進路予測の確実性が高いと判断しアンサンブル予測に基づく操作を行い，反対にばらつきが大きい場合は台風進路予測が不確実であると判断し，アンサンブル予測に基づく操作ではなく操作規則に基づく操作を行うことが考えられる．ばらつきは，台風進路に関するアンサンブルメンバー間の距離の大きさや標準偏差等を用いて定量化することが考えられるが，これについては今後の検討課題である．または，海外の気象機

関が行っている台風進路予測も利用して台風進路の予測不確実性を評価し、不確実性が高い場合は操作規則に基づく操作、不確実性が低い場合はアンサンブル予測に基づく操作を実施することも考えられる。今後はこれらの案について検討する必要がある。

3.5 まとめと課題

本章では、2011年の台風6、12、15号を対象としてGSM84時間予測を初期値・境界値としたアンサンブル予測雨量の計算を行い、ダム洪水調節への適用性について調べた。本章で示した洪水調節操作時の放流量を操作規則に基づく操作よりも低減させる状況は実際のダム管理においては少ないと考えられるものの、実際に発生した洪水イベントを対象として豪雨に係るアンサンブル予測雨量を計算し、それをを用いて洪水時ダム操作における放流量決定方法を具体的に示した最初の事例として本章の内容は位置づけられる。本章で得られた結果に関する具体的なまとめと今後の課題・検討を以下に挙げる。

3.5.1 まとめ

- 今回行ったGSM84時間予測を初期値・境界値としたアンサンブル予測計算の結果、Aダム流域の流域平均雨量でアンサンブル平均値と実績雨量と比較した場合、台風6号、15号については満足な予測精度が得られた一方で、台風12号では満足な予測結果が得られなかった。アンサンブル予測雨量の精度はイベント毎に精度にばらつきが存在し、その精度はアンサンブルで予測された台風進路の精度や台風進路予測のばらつきと関係があることが示唆された。
- 今回実施したアンサンブル予測雨量の計算においては、84時間という長い予測先行時間であっても台風6号、15号については著しい予測精度の低下は生じなかった。また、MSM33時間予測と比べて予測先行時間が長いため、ダム洪水調節においては概ね洪水の始まりから終わりまでを見通すことができるため、非常に有益な情報になり得ると考えられる。
- アンサンブル予測で一定の精度が得られた事例については本報告で示した最適放流量決定手法を利用することで操作規則に基づく操作以上に効果的な洪水調節が実施可能であることが示された。その一方で、台風12号の事例のように予測精度が低い場合は操作規則に基づく操作よりも下流の危険度を増加させてしまうため、現時点でダム管理の実務において即適用することは難しい。なお、本手法はアンサンブル予測雨量から得られる情報を活用することでその時点における最適放流量を機械的に算出することができることがメリットである。

3.5.2 今後の課題・検討

- 本報告は少ない検証事例に基づくものであるのでダム管理の実務への適用に向けてはアンサンブル予測雨量の精度評価を中心として検証事例を増やす必要がある。
- アンサンブル予測に基づいた操作により操作規則に基づく操作よりも下流の危険度を上げてしまう操作は避けなければいけないため、ダム管理の実務に適用するためにはアンサンブル予測に基づく操作を実施するかしないかをリアルタイムで判断するための

手法を今後考案する必要がある。アンサンブルで予測された台風の進路予測のばらつき
の大きさは、リアルタイムでの操作実施判断の指標として利用できる可能性がある。

- 本報告で示した最適放流量決定手法は、アンサンブル予測から得られる情報を基に確率的に最も起こりうる予測流出に対して最適な調節操作（＝洪水調節容量を極力多く使用して下流河川の流量をできるだけ低減させる。）を行うものと言える。アンサンブル予測には雨量の上限値や下限値といった幅に関する情報も含まれているため、これらの情報を活用して洪水調節だけでなく事前放流についても今後検討することが考えられる。
- 本報告で示したアンサンブル予測は計算量が膨大であるため計算に長い時間を要する。このアンサンブル予測計算手法を実際に運用するためにはアンサンブルメンバー数に関する検討も含めて計算時間の短縮化についても検討が必要となる。
- 洪水時ダム操作において予測雨量を用いる事前放流操作や特別防災操作への適用が期待される。

参考文献：

Cloke HL, Pappenberger F 2009: Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology* 375: 613-626.

Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK 1992: Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research* 28(4): 1015-1031.

猪股広典・深見和彦 2007: 吉野川流域広域水危険度判断支援システムの開発. 河川技術論文集 13: 433-438.

柏井条介・土屋修一・石神孝之 2008: 気候変動による豪雨時の降雨量変化予測—GCM20による評価を中心に—. 国土技術政策総合研究所資料 462.

国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所 2010. “平成22年7月14日～14日出水（梅雨前線）における八田原ダムの洪水調節効果について”, <http://www.cgr.mlit.go.jp/hattabara/info/masscom/material/220715.pdf>（参照：2015/09/07）

国土交通省東北地方整備局 2011. “台風15号による阿武隈川上流等の出水速報について”. <http://www.thr.mlit.go.jp/fukushima/pressedit/content/201109231140570000.html>（参照：2015/09/07）

三石真也・尾関敏久・角哲也 2011a. 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* 24(2): 110-120.

三石真也・角哲也・尾関敏久・矢神卓也 2011b. 降雨予測を活用したダム洪水調節におけるリスク管理に関する研究. *ダム工学* 21(4): 242-250.

Seko H, Miyoshi T, Shoji Y, Saito K 2010. Data assimilation experiments of precipitable water vapor using the LETKF system: intense rainfall event over Japan 28 July 2008, *Tellus* 63A: 402-414.

鈴木俊朗・寺川陽 1996. 実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発. *土木技術資料* 38(10): 26-31.

社会資本整備審議会 2008. “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” http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/index.html (参照 : 2015/09/07)
- 社会資本整備審議会 2015 : “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～” http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou/index.html (参照 : 2015/09/07)
- 牛山朋來・佐山敬洋・岩見洋一・三好建正 2014. 2011 年台風 12 号, 15 号を対象としたアンサンブル降雨流出予測実験, 河川技術論文集 20: 455-460.
- 碓氷典久・藤井陽介 2009. データ同化 観測・実験とモデルを融合するイノベーション. 京都大学学術出版会 : 28-62.
- 鳥居謙一 2012. ダム管理の高度化に向けて. 第 48 回土木学会水工学に関する夏期研修会講義集 A コース: A-9-1 – A-9-18
- 和田一範・川崎将生・富澤洋介 2006. 気象予測データの利用可能性に関する研究. 国土技術政策総合研究所資料 329.
- Wang X, Baker DM, Snyder C, Hamill TM 2008a. A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF model. Part I: Observing System Simulation Experiment, *Monthly Weather Review* 136: 5116-5131.
- Wang X, Baker DM, Snyder C, Hamill TM 2008b. A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF model. Part II: Real Observation Experiments, *Monthly Weather Review* 136: 5132-5147.
- Wang X 2011. Application of the WRF Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation System for Hurricane Track Forecasts, *Weather and Forecasting* 26: 868-884.
- 吉野純・飯田潤士・安田孝志 2011. モデルアンサンブル予報による 2010 年 7 月可児豪雨の予測可能性. 水工学論文集 55: S475-S480.
- Yu W, Nakakita E, Yamaguchi K, 2013. Assessment of probabilistic flood forecasting using ensemble nwp rainfall with 30hr forecast time during typhoon events, *Advances in River Engineering* 19: 235-240.

第4章 アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作に関わるリスクの定量化と操作方法の決定

4.1 はじめに

第2章までにおいて、今後激甚化すると考えられる洪水に対して予測雨量を活用することで洪水時ダム操作を高度化する必要があること、予測雨量を活用した洪水時ダム操作においては予測雨量の不確実性を考慮する必要があること、予測雨量の不確実性を定量的に示すツールとしてアンサンブル予測があること及び洪水時ダム操作には予備放流操作や洪水調節操作等の段階があり、アンサンブル予測を用いるに当たってはそれぞれの段階に応じた操作決定方法を考える必要があることを述べた。さらに第3章においては、アンサンブル予測雨量を用いた洪水調節操作時の放流量決定方法について述べた。本章においては、洪水貯留準備水位からの事前放流操作（以下、本章においては「事前放流操作」とする。）について、アンサンブル予測雨量を用いた操作決定方法について述べる。

日本国内において洪水調節を目的として有しているダムの多くは、図4.1左に示されるように、洪水調節容量と利水容量を併せ持つ多目的ダムが一般的である。事前放流操作は、予測雨量情報等に基づいて事前に洪水の発生が予見できた場合において、利水者の合意の上で洪水調節容量の下にある利水容量を洪水が発生する前に放流(事前放流)する操作である(図4.1右)。事前放流操作を実施することにより一時的に洪水調節容量として利用できる容量が増加するため、事前放流操作は異常洪水時防災操作を回避または開始を遅らせることにより、異常洪水時防災操作を実施した時に生じる放流量増加を回避または抑制するための操作と言える。しかしその一方で、仮に予測雨量に基づいて利水容量を事前放流した後で、予測が空振りまたは極端な過大予測であった場合、事前放流操作実施後に貯水位が洪水貯留準備水位まで回復せずにその後の利水補給に支障をきたす恐れがある。このように事前放流操作には、大規模出水時に事前放流操作を実施しなかった、または十分に実施しなかった場合に起こりうる「異常洪水時防災操作の実施」と、事前放流操作を実施したものの実積雨量と比較して予測雨量が過大だった場合に起こりうる「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない」という2つのリスクが存在すると言える。

第2章でも述べた通り事前放流ガイドライン(案)(国土交通省河川局河川環境課長, 2005)においては、事前放流操作を実施する範囲の1つとして「降雨解析などにより確実に容量回復が見込める容量の活用」とされており、事前放流操作実施後の確実な貯水位回復に重点が置かれていたと考えられる。それに対して事前放流ガイドライン(国土交通省 水管理・国土保全局, 2020)においては、事前放流操作実施後に貯水位が回復しなかった場合における措置として損失補填制度が明示されることにより事前放流操作の積極的な実施を促しており、令和2年度の出水期においては多くのダムにおける実施実績が報告されている(国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課, 2020)。ただしここで留意が必要なのは、事前放流ガイドライン(国土交通省 水管理・国土保全局, 2020)において損失補填制度が明記されているからといって損失補填制度の積極的な利用を意図したわけではなく、事前放流操作実施後に貯水位が回復しなかったことが妥当であったと認められる場合において損失補填

制度が適用されると考えられることである。そのため、予測技術の進展を適宜反映しながら、損失補填制度に極力依存しない事前放流操作の運用を目指す必要がある。事前放流ガイドラインにおいても、確定的な予測である気象庁の全球モデル GSM 及びメソモデル MSM による数値予報の平均降水量ガイダンスを用いることが明記されている一方で、今後予測手法の進展に応じて必要な検討を行い、適用の見直しをしていくことともされており、アンサンブル予測の利用は今後の展開の 1 つであるとされている（国土交通省 水管理・国土保全局, 2020）。そのため、アンサンブル予測を用いた事前放流操作に関する具体的な方法及び事前放流操作においてアンサンブル予測を用いることの得失等について検討することは、事前放流ガイドライン（国土交通省 水管理・国土保全局, 2020）に基づく事前放流操作の今後の運用に資するものと考えられる。そこで本章では、上述した事前放流操作に係る 2 つのリスクである「異常洪水時防災操作の実施」と「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない」についてアンサンブル予測雨量を用いて定量化し、その情報に基づいて具体的な操作を決定する方法について述べる。

なお、これまでに事前放流操作について研究を行った事例として、戸谷ら（2006）、下坂ら（2009）及び北田ら（2010）の一連の研究が挙げられる。戸谷ら（2006）及び下坂ら（2009）は、任意時刻におけるダム流入量や実績の雨量情報を基にしてその時刻以降のダムへの総流入量を推定し、その量を事前放流する方法を提案している。さらに、戸谷ら（2006）及び下坂ら（2009）の手法に予測先行時間が 6 時間である気象庁の降水短時間予報を組み合わせる事前放流する手法についても提案されている（北田ら, 2010）。また、予測雨量の不確実性を考慮した事前放流操作として、臼谷・中津川（2010）、中津川（2014）は過去の予測雨量と実績値の関係から予測雨量の値に対する実績値の出現範囲を確率的に求め、得られた出現範囲に基づいて事前放流操作を実施する方法を示した。上記の既往研究はいずれも事前放流操作を対象としたものであるが、アンサンブル予測雨量を用いていない点において本章での検討内容とは異なっている。また Saavedra *et al.*（2010）は、アンサンブル予測雨量を流出計算に入力して得られる流入量と数理最適化手法である SCE 法（Duan *et al.*, 1992）を組み合わせることで、利根川上流にあるダム群（藤原ダム、相俣ダム、菌原ダム）からの洪水時の放流量（洪水貯留準備水位からの事前放流操作を含む）を決定する手法を示している。数理最適化手法を用いることで複数のダムからの放流量を同時に機械的に決定することができるのが特徴である一方で、数理最適化手法により導かれた操作について実施判断の根拠が明示されておらず、また事前放流操作開始前の巡視に要する時間や放流の原則といった条件が考慮されていないことに留意が必要である。

4.2 検討対象流域・ダム，使用するアンサンブル予測雨量，流出計算モデル

本論文では最初に検討対象洪水に関するアンサンブル予測雨量を計算する。その後、アンサンブル予測雨量を流出計算モデルに入力してダム流入量予測計算し、得られた予測流入量を用いて洪水調節計算を行う。次に、得られた洪水調節計算結果を用いて事前放流量操作に関する意思決定を行う。本節では、検討対象流域・ダム，検討対象洪水及び以上の計算に用いるアンサンブル予測雨量の計算方法，用いる流出計算モデルについて述べる。

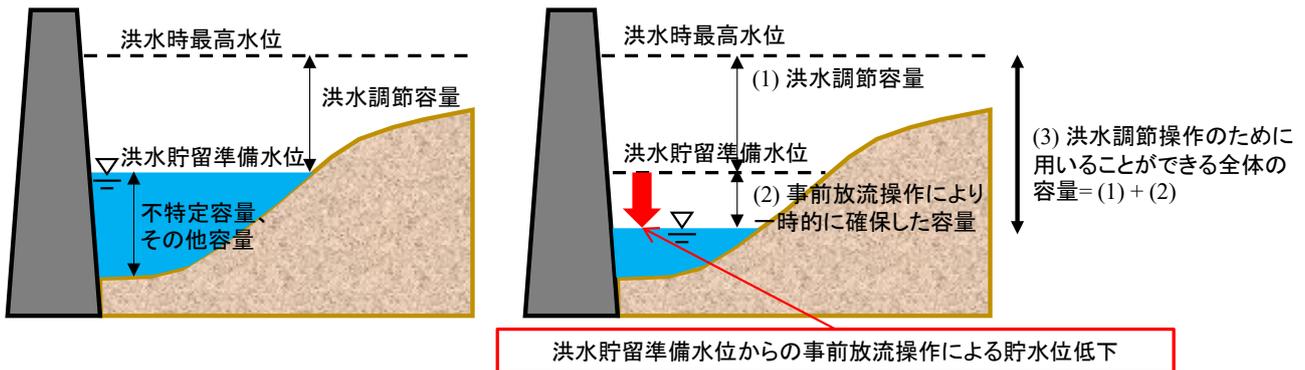


図 4.1 日本の多目的ダムにおける容量配分例（左）及び事前放流（右）のイメージ図（ダム再生ビジョン資料（国土交通省 水管理・国土保全局，2017）を参考に作成した．堆砂容量，死水容量をはじめとした容量については左図の「その他容量」に含まれるものとして扱っている．）

4.2.1 検討対象流域・ダム，対象洪水

検討対象流域及びダムとして，淀川水系桂川流域（流域面積：848.3 km²）と桂川上流に位置する日吉ダム（流域面積：290.0 km²）を対象として扱う（図 4.2）．桂川は，日吉ダムの下流で南方向に流れ，その後東方向へ流れた後桂地点を通過し，その下流において淀川本川と合流する．本流域においては平成 25 年台風第 18 号において大規模な洪水が発生し，特に日吉ダムにおいては異常洪水時防災操作を実施した．本論文では，この平成 25 年台風第 18 号を対象洪水として扱う．

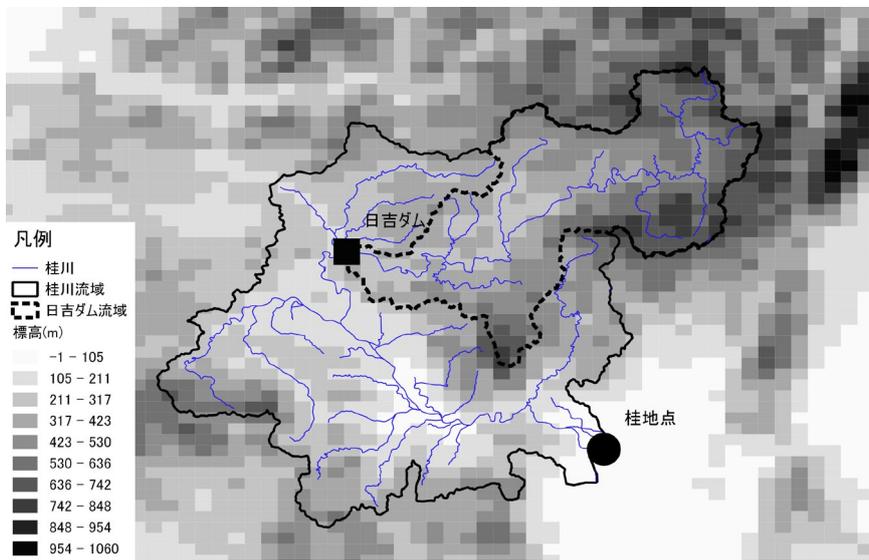


図 4.2 桂川流域図

4.2.2 日吉ダムの緒元，洪水調節操作

日吉ダムは，洪水期制限水位方式のダムであり，洪水期(6/16-10/15)において，洪水調節容量 42,000,000 m³，利水容量 16,000,000 m³（不特定容量：9,600,000 m³，特定利水容量：6,400,000 m³）を有するダムである．洪水調節操作は，流入量が 150 m³/s を超えた時点から開始し，放

流量を $150 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定量とし、流入量と放流量の差分を貯留する。洪水調節容量の 9.5 割に相当する貯水位まで貯水位が上昇したら、異常洪水時防災操作を開始する。容量配分及び貯水位について図 4.3 に示す。

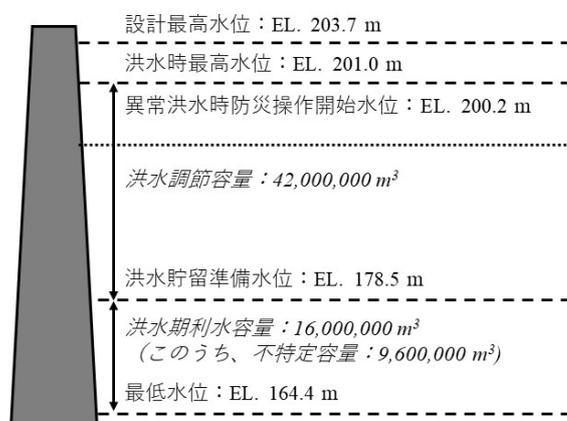


図 4.3 日吉ダムの容量配分図

4.2.3 アンサンブル予測雨量の計算

アンサンブル予測雨量は、気象庁 GSM の 84 時間予測を初期値・境界値として、WRF (Weather Research and Forecasting Model) により計算した。各台風について上述の対象期間について、GSM (領域: 全球, 空間解像度: 50 km , 予測更新間隔: 6 時間毎 (03, 09, 15, 21 JST), 予測先行時間: 84 時間, 時間解像度: 毎時) の予測が更新される毎にその予測値を初期値・境界値として 63 時間先までの計算を行う。予測に用いる初期値についてはその時点よりも 6 時間前に行った予測計算結果および観測値を基に次項に概要を記す Hybrid ETKF-3DVAR 法 (Wang *et al.*, 2008a; 2008b) によるデータ同化を行った。予測計算を実行した初期時刻は 9 月 13 日 3 時から 9 月 15 日 15 時までの 11 初期時刻である。

計算領域については図 4.4 に示し、空間解像度は親領域において 15 km とした。子領域は日吉ダムが領域中央付近におおよそ位置するように設定し、空間解像度は 5 km とした。鉛直層の数は親領域、子領域共に 50 層とした。WRF によるシミュレーションにおいて採用した物理過程およびデータ同化に用いた観測データ一覧を表 4.1 および表 4.2 に示す。ここでアンサンブルメンバー数は計算機環境および計算所要時間を考慮して 20 とした。

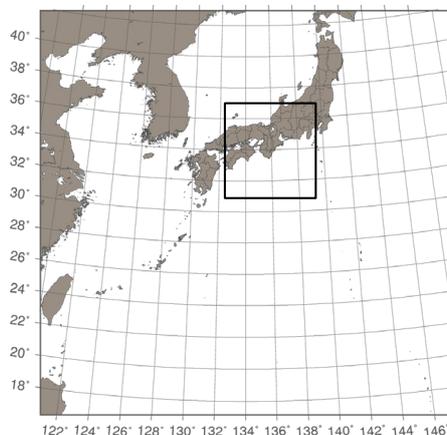


図4.4 計算領域 (全体が親領域, 太枠内が子領域)

表 4.1 採用した物理過程

物理過程	スキーム
雲物理過程（親領域）	WRF Single-Moment 5-class scheme
雲物理過程（子領域）	WRF Single-Moment 6-class scheme
積雲パラメタリゼーション	Kain-Fritsch scheme
長波放射	Rapid Radiative Transfer Model
短波放射	Dudhia scheme
地表面	Noah Land Surface Model
境界層	Yonsei University scheme
接地層	Monin-Obukhov

表4.2 データ同化に用いた観測データ一覧

種別	要素	入手先
気象観測衛星（AMSU-A, B）	気温，水蒸気	NCAR Research Data Archive
衛星大気追跡風	風	
高層実況，海上実況，飛行場実況，地上実況	気温，風，水蒸気，気圧	
航空機実況	気温，風	
ドップラーレーダ	風，反射強度（雨水）	（一財）気象業務支援センター

4.2.4 流出計算モデル

4.2.3 で計算されるアンサンブル予測雨量を入力する流出計算モデルは、土研分布モデル（猪股ら，2007）を用いた。土研分布モデルは淀川水系の桂川流域を対象としてモデルを作成した（図 4.2）。土研分布モデルのパラメータについては、平成 25 年台風第 18 号を含む比較的規模が大きかった過去 4 出水データについて日吉ダムの総流入量の誤差を小さくするよう調整を行った。なお、入力する実積雨量データとしてはレーダ雨量を用い、パラメータの自動最適化法として SCE-UA 法（Duan *et al.*, 1992）を用いた。パラメータ調整を行った結果、総流入量に関する誤差率は 4 洪水平均で 8.4%の過大評価であり、一定の再現精度が得られた。また、日吉ダムのピーク流入量及び下流の桂地点におけるピーク流量は 4 洪水平均でそれぞれ 6.2%の過大評価，6.1%の過大評価であった。図 4.5 は、事前放流シミュレーションの対象洪水である平成 25 年台風 18 号における日吉ダム流入量及び桂地点流量の再現結果であり、概ね良好な再現精度が得られていることが分かる。以降で用いる流出計算は、過去の出水について上述した精度を有する土研分布モデルを用いる。

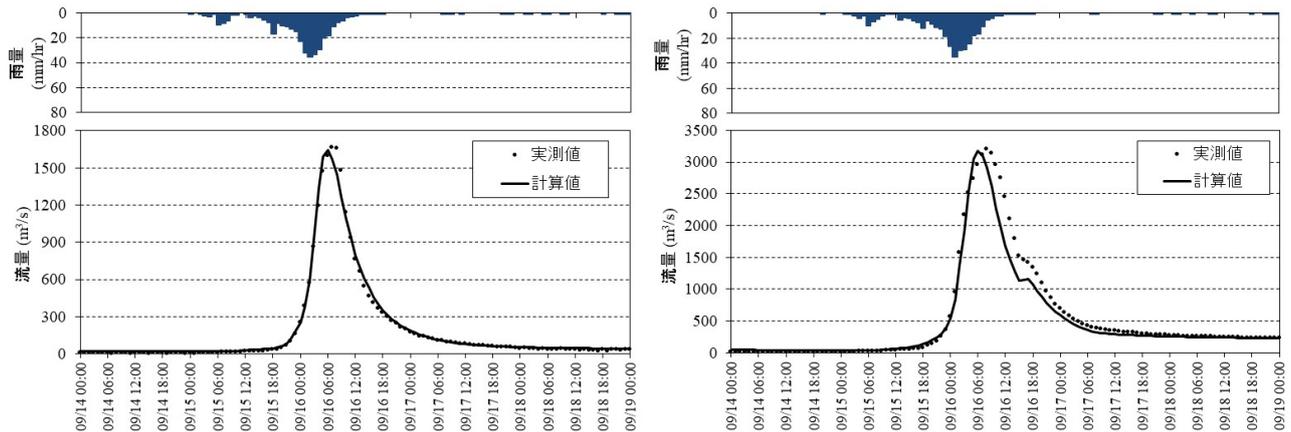


図 4.5 日吉ダム地点及び桂地点における平成 25 年台風 18 号の再現結果
(左：日吉ダム地点，右：桂地点)

4.3 アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作の決定方法

4.3.1 アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作決定方法の手順

事前放流操作の決定は、4.2.3 で述べたアンサンブル予測雨量及び 4.2.4 で述べた流出計算モデルを用いて、事前放流操作における 2 つのリスクについて、「異常洪水時防災操作を実施する確率」及び「洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率」として定量化し、その情報を基に決定する。以下にその手順を示す。また、次節 4.3.2 において計算事例を示す。

0) 事前放流操作の目標水位の設定

不特定容量である $9,600,000 \text{ m}^3$ をおおよそ 5 等分し、値が小さい方からそれぞれ V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 とする。それぞれの値は $V_1 = 2,000,000 \text{ m}^3, V_2 = 4,000,000 \text{ m}^3, V_3 = 6,000,000 \text{ m}^3, V_4 = 8,000,000 \text{ m}^3, V_5 = 9,600,000 \text{ m}^3$ として設定した。それぞれの容量を、洪水貯留準備水位における容量から差し引いた時の水位を H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 とする。 $V_1 < V_2 < V_3 < V_4 < V_5$ であるため貯水位については逆に $H_1 > H_2 > H_3 > H_4 > H_5$ となり、それぞれの値は $H_0 = \text{EL. } 178.5 \text{ m}, H_1 = \text{EL. } 177.3 \text{ m}, H_2 = \text{EL. } 175.9 \text{ m}, H_3 = \text{EL. } 174.4 \text{ m}, H_4 = \text{EL. } 172.8 \text{ m}, H_5 = \text{EL. } 171.1 \text{ m}$ である。求めた H_1 から H_5 と、事前放流操作を行わない場合の貯水位 H_0 を加えて合計 6 種類を事前放流操作による目標水位として定める。以降、それぞれの目標水位に向けて行われる事前放流操作を、事前放流操作 0 (操作 0)、事前放流操作 1 (操作 1)、…事前放流操作 5 (操作 5) と記載する。なお、操作 0 は事前放流操作を実施しないことを意味する。

1) アンサンブル予測雨量の計算

4.2.3 で述べた方法により、任意初期時刻のアンサンブル予測雨量 (20 メンバー) を実施する。アンサンブル予測計算は計算時間を要するため、アンサンブル予測雨量を入手できるのは初期時刻ではなく、初期時刻から一定の配信遅れ時間が経過した時点とする。ここでは、配信遅れ時間を 4 時間とする。実態としては、63 時間予測から配信遅れ時間である 4 時間を引いた 59 時間が予測情報として利用可能となる。

2) アンサンブル予測雨量を入力とした、ダム流入量予測計算の実施

1) で計算したアンサンブル予測雨量を 4.2.4 で述べた流出計算モデルに入力して 20 通りの

ダム流入量予測計算を行う。なお、アンサンブル予測雨量が入手される時刻において予測流出計算を実施するための土研分布モデルの初期条件は、その時刻までレーダ雨量を入力とした流出計算を実施することで得られる。また、流出予測計算は 59 時間まではアンサンブル予測雨量を入力とした計算を行い、それ以降は雨量をゼロとした流出計算を 72 時間行う。

3) ダム流入量予測計算を入力とした洪水調節計算

2)で得られる 20 種類それぞれの予測流入量を用いて、事前放流操作毎に洪水調節計算を行う。洪水調節計算の初期条件については、貯水位はそれぞれの事前放流操作の目標水位、放流量は流入量と等しいものとする。この設定は、それぞれの事前放流操作を実施したことにより貯水位が各目標水位まで低下し、流入量＝放流量で水位維持操作を実施している状態から洪水調節操作が開始されると仮定することを意味する。この初期条件に対してアンサンブル予測流入量を入力として洪水調節計算を行う。

洪水調節操作は、4.2.2 で述べた規則操作通りに行うものとする。洪水調節操作が終了した時点（流入量が $150 \text{ m}^3/\text{s}$ を下回った時点）で貯水位が洪水貯留準備水位に達していないアンサンブルメンバーについては、貯水位を回復させるために最大発電使用水量 $11.6 \text{ m}^3/\text{s}$ と維持流量 $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ を合計した $13.6 \text{ m}^3/\text{s}$ まで放流量を低下させる操作を行うものとする。また、予測流入量のピークが洪水調節開始流量に到達しないアンサンブルメンバーについても、ピーク流入量以降に放流量を発電放流量まで低下させることによる貯水位回復操作を行うものとする。

4) 事前放流操作毎の異常洪水時防災操作を実施する確率及び洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率の算出

3)で実施した洪水調節計算の結果から、事前放流操作毎に予測貯水位が異常洪水時防災操作の開始水位に到達するアンサンブルメンバー数をカウントし、全アンサンブルメンバー数である 20 で割ることで「異常洪水時防災操作を実施する確率」を算出する。また、計算対象期間における最終的な貯水位が洪水貯留準備水位まで到達しないアンサンブルメンバー数をカウントし、全アンサンブルメンバー数である 20 で割ることで「洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率」を算出する。

5) 実施する事前放流操作の決定

6 種類の事前放流操作の中で、洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率を最小とし、かつ異常洪水時防災操作を実施する確率を最小とする事前放流操作をその初期時刻における事前放流操作として決定する。放流量は、現時刻（アンサンブル予測結果を入手した時刻）における貯水量から目標水位における貯水量を引いた値を、現時刻から洪水調節開始までの時間で割ることで求める。また、事前放流操作における放流量の上限は洪水調節開始流量とし、放流量の増加速度は放流の原則に従うものとした。なお、最初に事前放流を開始する際は、巡視や関係機関への連絡のために 6 時間要するものとした。

上記 1)～5)の計算を、予測初期時刻が更新するたびに行い、事前放流操作の目標水位を逐次見直す。流入量が洪水調節開始流量に到達したら、操作規則に基づく洪水調節操作を行う。

4.3.2 計算事例

4.3.1 で述べた 1)から 5)で行われる事前放流操作の決定方法について、9月13日21時の初期時刻を事例として示す。

図4.6は9月13日21時を初期時刻とするアンサンブル予測雨量の計算結果である。ただし、予測結果の入手は配信遅れ時間である4時間を考慮して9月14日1時である。予測結果については、おおむね真値であるレーダ雨量の周辺にアンサンブルメンバーの予測結果が分布していることが分かる。次に図4.6に示したアンサンブル予測雨量を4.2.4で述べた流出計算モデルに入力して得られた流入量予測計算結果が図4.7である。次に図4.8は、それぞれの事前放流操作により貯水位が目標水位である H_0 から H_5 まで到達したと仮定し、その目標水位を初期条件として実施して各アンサンブルメンバーについて実施した洪水調節計算の結果得られる予測貯水位である。図4.8には、予測水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過すると予測されるアンサンブルメンバー数及び予測水位が洪水貯留準備水位まで回復しないと予測されるアンサンブルメンバー数を示している。これを全アンサンブルメンバー数である20で割ることで求められる「異常洪水時防災操作を実施する確率」及び「洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率」を事前放流操作毎に示したのが図4.9である。図4.9より、洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率が最も低く、かつ異常洪水時防災操作を実施する確率が最も低いPR5がこの予測初期時刻における事前放流操作と決定される。上記のような計算を洪水調節開始まで各初期時刻について実施する。

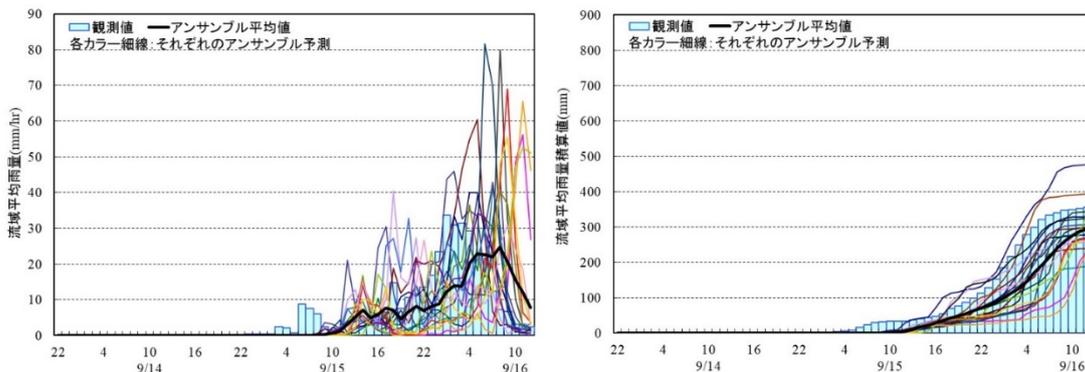


図4.6 日吉ダム流域平均雨量でのアンサンブル予測結果
(予測初期時刻：9月13日21時，左図：時系列，右図：積算雨量)

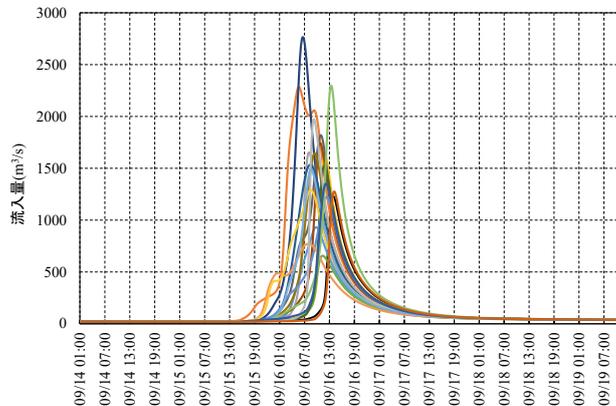


図4.7 アンサンブル予測雨量を入力として得られる流入量予測結果

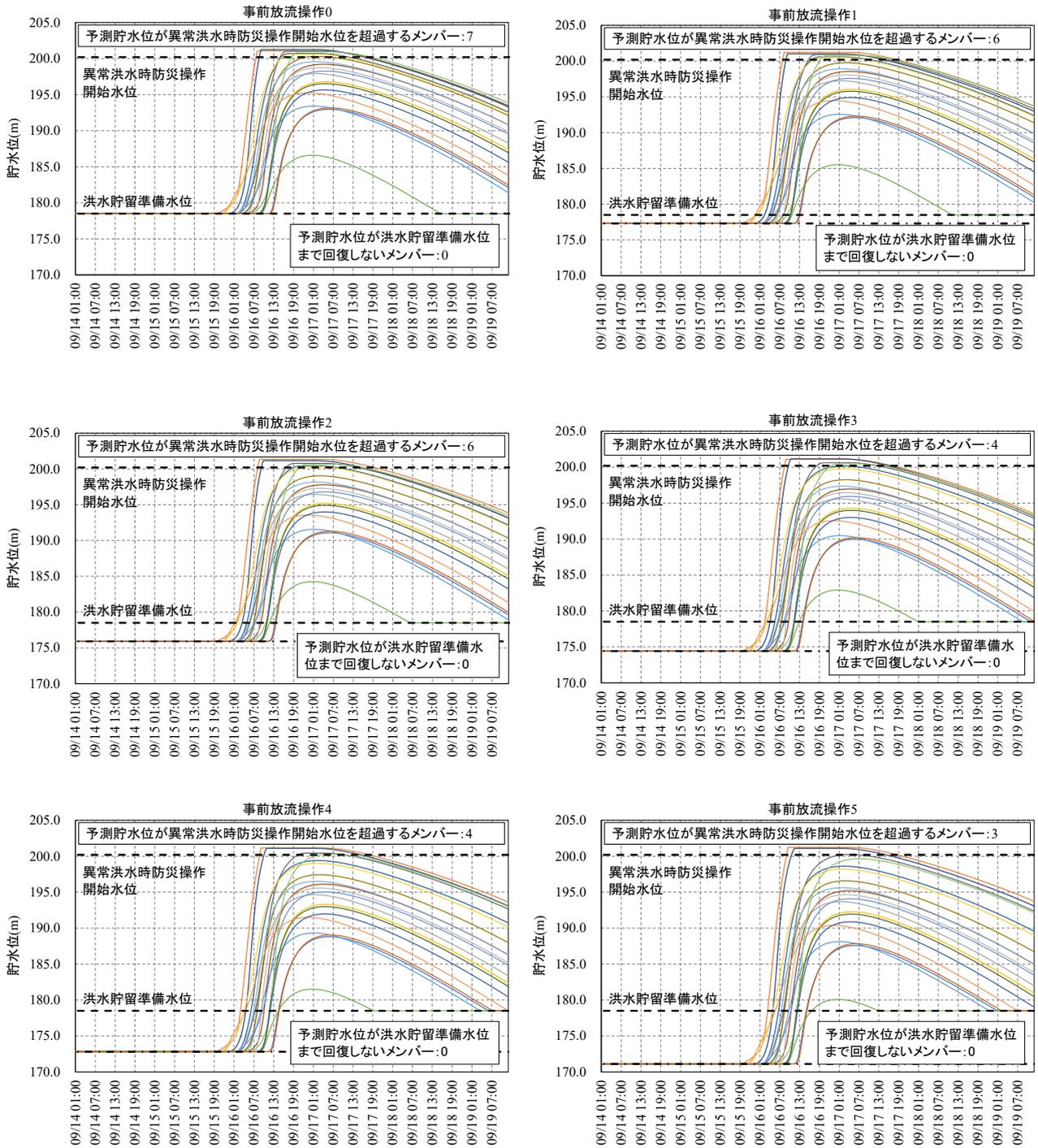


図 4.8 事前放流操作毎の予測貯水位，予測貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過するメンバー数及び予測貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しないメンバー数

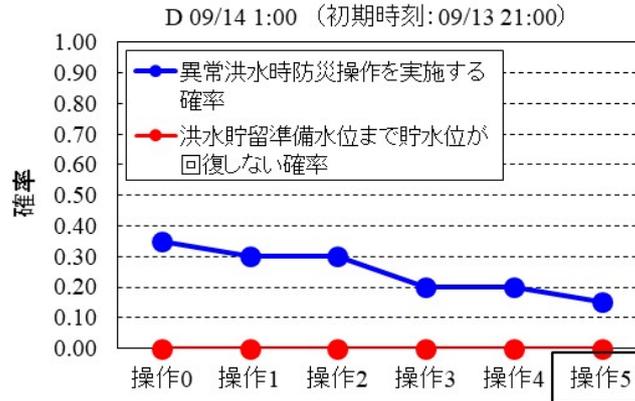


図 4.9 事前放流操作別の異常洪水時防災操作を実施する確率及び洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率（操作 5 が四角で囲われているのは、この初期時刻において操作 5 が事前放流操作として採用されたことを意味する。）

4.4 計算結果

ここでは、4.3.1 で述べた手法を 4.2.3 で述べた洪水調節開始前の全初期時刻について実施した結果について示す。なお流入量が $150 \text{ m}^3/\text{s}$ を超えた以降は、4.2.2. で述べた洪水調節操作を行うものとしてシミュレーションを実施した。以下に結果について述べる。

4.4.1 アンサンブル予測雨量の計算結果

表 4.3 は、4.2.3 で述べた手法により計算したアンサンブル予測雨量の 63 時間積算雨量について実績値（レーダ雨量）、アンサンブル平均値、アンサンブルメンバーの中で最も大きい予測値、最も小さい予測値及びアンサンブルメンバーの標準偏差について示したものである。併せて、アンサンブル平均値、アンサンブルメンバーの中で最も大きい予測値及び最も小さい予測値それぞれの誤差率も示している。それぞれの誤差率は下記の式(4.1)から式(4.3)により計算した。アンサンブル平均値で見ると、おおむね過小評価の傾向であった。最も大きい予測値の誤差率及び最も小さい予測値の誤差率を見ると、全ての初期時刻において最も大きい予測値の誤差率は正の値、最も小さい予測値の誤差率は負の値を示しており、アンサンブル予測が実績値を挟んで分布していることが分かる。

$$E_{ave} = \frac{EP_{ave} - R_{obs}}{R_{obs}} \times 100 \quad \text{式(4.1)}$$

$$E_{max} = \frac{EP_{max} - R_{obs}}{R_{obs}} \times 100 \quad \text{式(4.2)}$$

$$E_{min} = \frac{EP_{min} - R_{obs}}{R_{obs}} \times 100 \quad \text{式(4.3)}$$

ここで、 R_{obs} ：アンサンブル予測の予測対象時間における実績積算雨量(mm)、 E_{ave} ：アンサンブル平均値の実績雨量に対する相対誤差(%), EP_{ave} ：アンサンブル平均値(mm), E_{max} ：アンサンブル最大値の実績雨量に対する相対誤差(%), EP_{max} ：アンサンブル最大値(mm), E_{min} ：アンサンブル最小値の実績雨量に対する相対誤差(%), EP_{min} ：アンサンブル最小値(mm)

表 4.3 各予測対象時間（63 時間）における観測値の積算雨量，予測積算雨量の平均値，最大値，最小値

番号	予測対象期間 初期時刻 - 終わり	観測値 R_{obs} (mm)	アンサンブル 平均値 EP_{ave} (mm)	アンサンブル 最大値 EP_{max} (mm)	アンサンブル 最小値 EP_{min} (mm)	アンサンブル 予測の 標準偏差 SD_{EP} (mm)	アンサンブル 平均値の 相対誤差 E_{ave} (%)	アンサンブル 最大値の 相対誤差 E_{max} (%)	アンサンブル 最小値の 相対誤差 E_{min} (%)
A	9/13 03:00 - 9/15 18:00	68.8	70.6	262.1	8.2	64.8	2.62	280.96	-88.08
B	9/13 09:00 - 9/15 24:00	152.3	154.7	308.9	33.0	74.2	1.58	102.82	-78.33
C	9/13 15:00 - 9/16 06:00	321.2	231.1	356.7	25.9	96.8	-28.05	11.05	-91.94
D	9/13 21:00 - 9/16 12:00	355.1	295.0	476.2	187.8	63.3	-16.92	34.10	-47.11
E	9/14 03:00 - 9/16 18:00	355.6	280.6	426.6	91.6	74.2	-21.09	19.97	-74.24
F	9/14 09:00 - 9/16 24:00	355.6	284.7	391.4	176.0	59.0	-19.94	10.07	-50.51
G	9/14 15:00 - 9/17 06:00	355.6	285.6	409.0	163.3	82.3	-19.69	15.02	-54.08
H	9/14 21:00 - 9/17 12:00	355.6	265.8	472.7	133.7	75.2	-25.25	32.93	-62.40
I	9/15 03:00 - 9/17 18:00	351.5	309.4	497.7	153.8	87.4	-11.98	41.59	-56.24
J	9/15 09:00 - 9/17 24:00	323.9	388.0	440.5	323.4	35.0	19.79	36.00	-0.15
K	9/15 15:00 - 9/18 06:00	312.4	257.1	383.2	165.0	50.3	-17.70	22.66	-47.18

4.4.2 事前放流シミュレーション結果

1) 事前放流操作の決定過程

図 4.10 は，4.3.1 に示した事前放流操作の決定を 11 の初期時刻について実施して得られた事前放流シミュレーションの結果である。また，比較対象として事前放流操作を実施しない操作規則に基づく操作によるシミュレーション結果についても併せて示している。なお日吉ダムは対象洪水時，貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過しても異常洪水時防災操作を実施しなかったが，このシミュレーションでは，操作規則に基づく操作との結果について比較を行うため，実際に実施された操作の結果である実積放流量及び貯水位との比較を行わずに操作規則に基づく操作によるシミュレーションの結果と比較することとした。

また図 4.11 は，各初期時刻における異常洪水時防災操作を実施する確率，洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率及び採用された事前放流操作について示した図である。図 4.11 より，初期時刻 A においては 63 時間予測であっても予測期間は降雨の初期までであり，表 4.3 より 63 時間予測積算値ではアンサンブル平均値が 81 mm，アンサンブルメンバーで最も大きい予測値が 285 mm であった。異常洪水時防災操作を実施する確率は PR0 においてもゼロである一方で，操作 1 から操作 5 の事前放流操作を実施した場合は洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率が発生する結果となった。この結果から，初期時刻 A において事前放流操作は実施しないという判断となった（図 4.11，A）。初期時刻 B 及び C についても洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率を一番低くする事前放流操作が優先的に採用されるため，操作 0 が採用された（図 4.11，B 及び C）。初期時刻 D は 4.3.2 で述べた事例であり，操作 5 が採用される（図 4.11，D）。この初期時刻においてはじめて事前放流操作を開始するという判断になる。事前放流操作の開始に当たっては河川沿いの巡視，関係機関への連絡をはじめとした準備に 6 時間を要するため，準備が終わり実際に放流を開始するのは 9 月 14 日 7 時になる。その時刻になると，初期時刻 E のアンサンブル予測結果が取得されるため，そのアンサンブル予測に基づいて事前放流操作を決定すると操作 1 が採用される（図 4.11，E）。ここから実際の事前放流操作が開始される。以降，初期時刻 F から初期

時刻 J までは概ね操作 5 または操作 4 が採用され (図 4.11, F-J), 初期時刻 K の直前に貯水位は初期時刻 J における目標水位である $H_5 = \text{EL. } 171.1 \text{ m}$ に到達した. 続いて初期時刻 K では, 操作 1 から操作 5 について異常洪水時防災操作を実施する確率及び洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率が全て同じで, 操作 0 の異常洪水時防災操作を実施する確率がその他 5 操作と比較して高いため操作 1 が選択された (図 4.11, K). この時の具体的な操作については, この時点の貯水位が既に操作 1 の目標水位である $H_1 = \text{EL. } 177.3 \text{ m}$ よりも下回っていた. 貯水位を H_1 に戻す等, 様々な操作が考えられるが, ここでは操作 1 から操作 5 は, 洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率については全て同じであり, 操作 1 がそのほかの操作と比較して洪水貯留準備水位までの貯水位の回復において有利とは必ずしも考えられないことから現状の貯水位を維持する操作 (流入量 = 放流量) とすることとした. その後流入量が洪水調節開始流量を超えたため, 洪水調節操作を開始した.

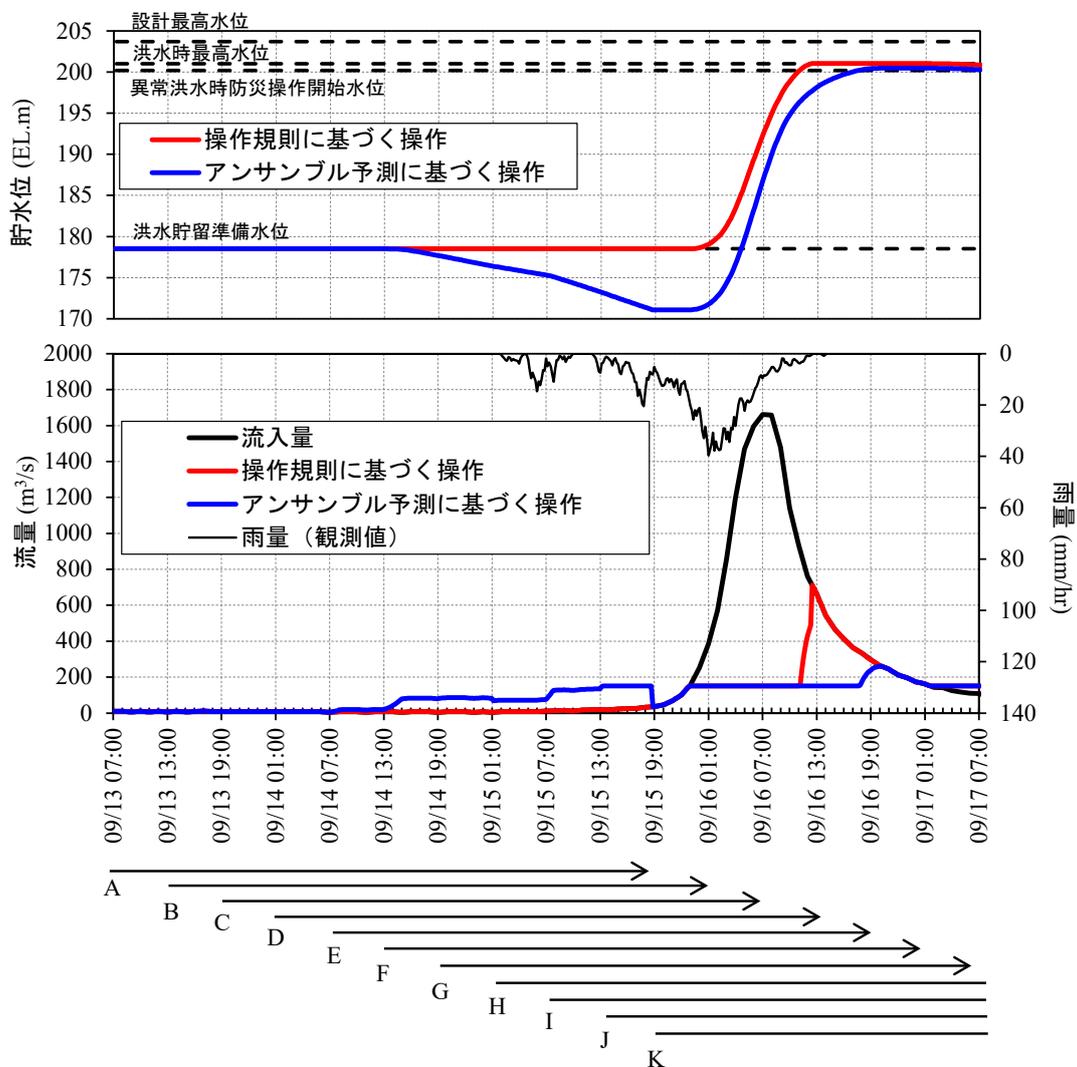


図 4.10 事前放流シミュレーション結果 (下の A から K は予測初期時刻及び予測対象時間を示す.)

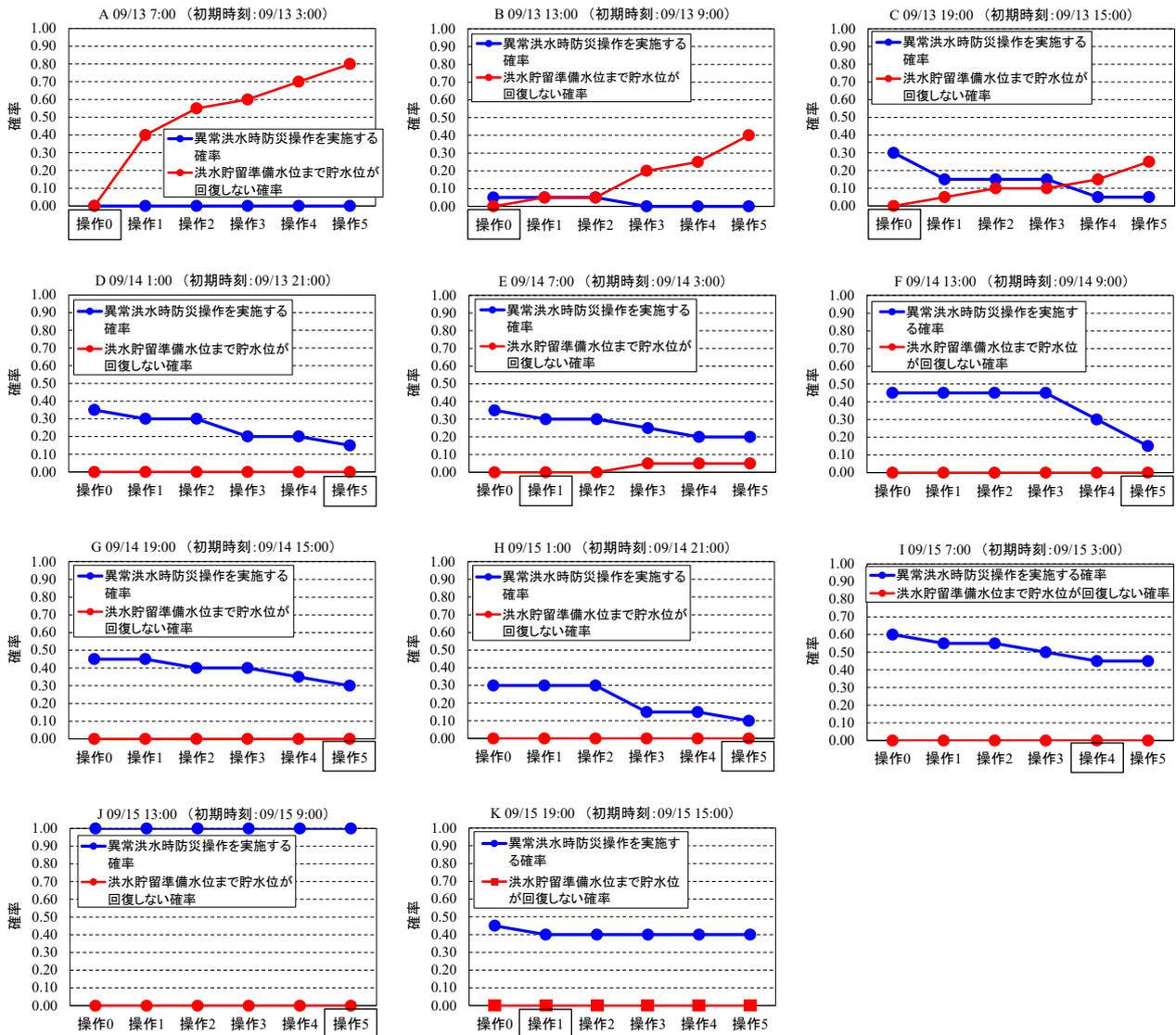


図 4.11 各初期時刻における事前放流操作別の異常洪水時防災操作の実施確率及び洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率(各図の上に記載されている A から K は, 図 4.10 に記載されている A から K と対応する. また, X 軸において四角で囲われた事前放流操作がこの初期時刻において採用された操作を示す.)

2) アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作の効果

図 4.11 に示されるように, 事前放流操作を実施しない場合は 9 月 16 日 11 時に異常洪水時防災操作を実施するのに対し, アンサンブル予測雨量を用いて事前放流操作を実施した場合, 事前放流操作により洪水調節容量を多く確保できるため, 異常洪水時防災操作の開始が 9 月 16 日 18 時となり約 7 時間遅らせることができた. 事前放流操作を実施しても主目的である異常洪水時防災操作を回避することはできなかったが, 避難をはじめとした下流の水防活動において非常に有効である. さらに, 最大放流量については規則操作を実施すると $712 \text{ m}^3/\text{s}$ であるのに対し, アンサンブル予測雨量を用いて事前放流操作を実施した場合 $260 \text{ m}^3/\text{s}$ であり, およそ 63 %低減することができた. このように本論文の対象洪水では, アンサン

ブル予測雨量を用いて事前放流操作に関するリスクを定量的に表示しながら操作方法を決定することで、効果的な洪水調節効果が得られることが分かった。

4.5 考察

本論文で述べたアンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作の決定方法は、6種類の事前放流操作について異常洪水時防災操作を実施する確率及び洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率を定量的に表示した上で、「洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率を最も低くし、かつ異常洪水時防災操作を実施する確率を低くする操作」として決定すると述べた。その結果として、対象洪水においては4.4.2で述べたような効果を得ることができた。

本検討では不特定容量のみを事前放流操作の対象としているが、事前放流操作は不特定容量及び特定容量両方の利水者の合意が不可欠であり、かつ洪水貯留準備水位までの貯水位回復が重要である。そのため本検討では事前放流操作の決定は「洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率を最も低くする操作」として設定した。しかし、例えば過去に洪水被害が発生し利水者も含めて被災した経験を持つような流域では、治水に対する意識が高くなり、利水についてももう少しリスクを負って事前放流操作を積極的に実施したいと考える流域もあるかもしれない。そのような流域では、例えば「洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しないリスクについて10%は許容する」という考えが成立しうる。そうすると、例えば図4.10の初期時刻Bにおいても操作1の事前放流操作が可能となり、早い時刻から事前放流操作を行うことが可能となる。その一方で、前述した「異常洪水時防災操作を実施する確率を低くする操作」という考え方では、異常洪水時防災操作の確率が少しでも存在すれば事前放流操作が行われる可能性がある。この考え方についても、洪水被害が発生する確率が多少上昇したとしても洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率を下げたいと考えれば、例えば「異常洪水時防災操作の実施確率が50%を上回らない限り事前放流操作は実施しない。」と設定することで積極的な事前放流操作を避けることもできる。

これらの2つのリスクについて、「何パーセントまで許容するのか」については上述した通りダムが存在する各流域における治水・利水に対する意識によって変わりうるものであり、ダム管理者や利水者をはじめとした流域の当事者たちが合意に基づいて決定すべき事項であると考えられる。その意味でアンサンブル予測雨量は、これまでの1つの初期値・境界値から計算される従来の確定的な予測雨量を用いる限り見えなかった事前放流操作に関わるリスクの定量化・可視化を通じて、ダム管理者と利水者の間でのリスク共有化及び事前放流操作に関する合意の円滑化に資する可能性を持つツールであると言える。Saavedra *et al.*

(2010) は、アンサンブル予測雨量を流出計算に入力して得られる流入量と数理最適化手法であるSCE法(Duan *et al.*, 1992)を組み合わせることでダムからの放流量を決定する手法を示した。Saavedra *et al.* (2010)の手法では放流量が数理最適化手法により導かれるため操作の実施判断が明確でないことが課題と考えられる一方で、本章で提案する方法ではアンサンブル予測雨量を用いることで事前放流操作に係るリスクを定量的に表示し、得られたリスクの値に基づいて操作を決定するため、操作の根拠が明瞭であることが相違である。

本研究の主たる狙いは、アンサンブル予測雨量を用いた事前放流の考え方を提案することであり、ここでは1事例について述べているにすぎない。今後は気象庁から実運用化される見通しであるメソアンサンブル予測（気象庁予報部，2016）を活用しつつ、事例を積み重ねることが必要である。事例検討においては、事前放流ガイドライン（国土交通省 水管理・国土保全局 2020）の方法と本章で提案した手法との比較、予測雨量が大幅にはずれた事例における事前放流操作実施後の貯水位回復状況、事前放流操作を必要としない中小規模洪水に対して事前放流操作が回避されるか、操作の煩雑性といった観点から検討をも重要であると考えられる。それに加え、アンサンブル予測雨量や流出計算の誤差特性についても事例検証を通じて調査する必要がある、実際のダムの運用の中で採用するにあたってはこれらの誤差についても考慮に入れる必要がある。

4.6 まとめ

アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作の操作決定方法として、アンサンブル予測雨量と流出計算を組み合わせることで事前放流操作に関する2つのリスクである「異常洪水時防災操作の実施」及び「洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率」についてそれぞれ確率を算出し、得られた確率を基に操作を決定する方法を示した。実際に異常洪水時防災操作を実施した日吉ダムの平成25年台風18号に対して提案方法を適用した結果、以下の結論・課題を得た。

- 対象洪水に関するシミュレーションの結果、アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作により異常洪水時防災操作を回避することはできなかったが、開始を遅らせ、かつ最大放流量を低減するという効果が得られた。
- アンサンブル予測雨量は、これまでの1つの初期値・境界値から計算される従来の確定的な予測雨量を用いる限り見えなかった事前放流操作に関わるリスクの定量化・可視化を通じて、ダム管理者と利水者の間でのリスク共有化及び事前放流操作に関する合意の円滑化に資する可能性を持つツールであることが分かった。
- 課題としては、本章では1事例のみを対象事例として扱っていること及び操作規則に基づく操作のみをアンサンブル予測雨量に基づく操作の比較対象としていることが挙げられる。今後は、事前放流ガイドライン（国土交通省 水管理・国土保全局 2020）に記載されている方法と比較しつつ、検討事例数を追加する必要がある。比較検討においては、予測雨量が大幅にはずれた事例における事前放流操作実施後の貯水位回復状況、事前放流操作を必要としない中小規模洪水に対して事前放流操作が回避されるか、操作の煩雑性といった観点から検討を実施することが考えられる。
- アンサンブル予測雨量や流出計算の誤差特性についても事例検証を通じて調査する必要がある、実際のダムの運用の中で採用するにあたってはこれらの誤差についても考慮に入れる必要がある。

参考文献：

Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK 1992. Effective and Efficient Global Optimization for

- Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research* 28(4): 1015-1031.
- 猪股広典・深見和彦 2007. 吉野川広域水危険度判断支援システムの開発. 河川技術論文集 13: 433-438.
- 気象庁予報部 2016. 確率的な気象予測のためのアンサンブル予報の課題と展望. 数値予報 課報告 別冊第 62 号 : 93-113.
- 北田悠星・菊地慶・岡部真人・山田正 2010. 気象庁の降水短時間予報を用いて既存のダムの洪水調節機能を向上させる手法の提案. 水工学論文集 54: 523-528.
- 中津川誠 2014. 5. 気象・水文情報を利用した既存ダムの機能向上策について. 天気 61: 648-657.
- 下坂将史・呉修一・山田正・吉川秀夫 2009. 既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案. 土木学会論文集 B_65(2): 106-122. DOI: 10.2208/jscejb.65.106.
- 国土交通省河川局河川環境課長 2005. 国土交通省所管ダムにおける事前放流の実施について. 平成17年3月30日 国河流第24号.
- 国土交通省 水管理・国土保全局 2017. “ダム再生ビジョン “. <https://www.mlit.go.jp/common/001190127.pdf> (参照 : 2021/02/27)
- 国土交通省 水管理・国土保全局 2020. “事前放流ガイドライン”. <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001341537.pdf> (参照 : 2021/02/24)
- 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 2020. “令和 2 年度出水期における事前放流の実施状況”. <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001369657.pdf> (参照 : 2021/02/24)
- Saavedra O, Koike T, Yang K, Graf T, Li X, Wang L, Han X 2010. Decision support for dam release during floods using a distributed biosphere hydrological model driven by quantitative precipitation forecasts. *Water Resources Research* 46(10): W10544. DOI: 10.1029/2010WR009502.
- 戸谷英雄・秋葉雅章・宮本守・山田正・吉川秀夫 2006. ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案. 土木学会論文集 B_62(1): 27-40. DOI: 10.2208/jscejb.62.27.
- 臼谷友秀・中津川誠 2010. 積算予測雨量に基づいた融雪機におけるダムの洪水調節機能の向上について. 土木学会論文集 B_66(3): 268-279. DOI: 10.2208/jscejb.66.268.
- Wang X, Baker DM, Snyder C, Hamill TM 2008a. A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF model. Part I: Observing System Simulation Experiment. *Monthly Weather Review* 136: 5116-5131.
- Wang X, Baker DM, Snyder C, Hamill TM 2008b. A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF model. Part II: Real Observation Experiments. *Monthly Weather Review* 136: 5132-5147

第5章 アンサンブル予測雨量を用いた活用水位からの事前放流操作，洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作の決定方法

5.1 はじめに

第3章においては，アンサンブル予測雨量を用いた洪水調節操作時の放流量決定方法，第4章においては洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関する操作決定方法について述べた．特に第4章においては，アンサンブル予測雨量を用いることで，洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関わるリスクを定量化し，定量化したリスクに基づいて放流量を決定する手法について述べた．洪水時ダム操作は第1章及び第2章で述べた通り，予備放流操作，事前放流操作，洪水調節操作，特別防災操作に大きく分けられ，このうち事前放流操作については，弾力的管理において設定される活用水位からの事前放流操作と洪水貯留準備水位からの事前放流操作に分けられる．ここで弾力的管理とは，ダムの下流河川の環境の保全を目的として，洪水調節に支障を与えない範囲で，洪水時以外には原則として流水が貯留されない洪水調節容量の一部に流水を貯留し，これを適切に放流することにより下流河川の環境の保全を図ることを目的としたダムの管理であり（国土交通省，2003; 2014），複数のダムにおいて実施，検討が行われている（例えば九頭竜川ダム統合管理事務所，2020; 三春ダム管理所，2020）．また特別防災操作は，洪水時においてダム下流の被害を軽減するために貯留量を増やして容量を有効に活用する高度な操作である（国土交通省，2017a）．より具体的には，下流河川で洪水被害が発生又は発生するおそれがあり河川管理者からダム放流量の減量を要請された場合に，洪水の終わりの見通しが相当程度確実かつ残貯水容量に余裕がある状況において本則操作に基づく操作よりも放流量をカットする操作であり，これまでに複数のダムにおいて実施された実績がある（例えば，国土交通省 東北地方整備局 最上川ダム統合管理事務所，2020）．活用水位からの事前放流操作、特別防災操作共に，予測雨量を用いた操作であるものの，予測雨量の不確実性を考慮した操作に関する検討はこれまでに実施されてきていない．以上より本章においては，第4章で述べたリスク評価及び操作決定方法の考え方を，予測雨量に基づく操作であるがこれまで研究事例のない活用水位からの事前放流操作及び特別防災操作へ適用する．また洪水貯留準備水位からの事前放流操作についても，第4章で示した方法から修正を行う．

本章の構成は以下の通りである．最初に5.2及び5.3において活用水位及び洪水貯留準備水位からの事前放流操作と特別防災操作について，アンサンブル予測雨量を用いた操作決定手法を述べる．5.4において実際に発生した過去洪水への手法適用にあたっての計算条件，5.5において計算結果，5.6では考察，5.7ではまとめを述べる．

5.2 検討対象流域・ダム，使用するアンサンブル予測雨量，流出計算モデル

本章では，5.1で述べた予測雨量を用いた3操作（活用水位からの事前放流操作，洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作）について，アンサンブル予測雨量を用いた操作決定方法について述べる．具体的には，アンサンブル予測雨量を流出計算モデルに入

力することでダムへの予測流入量を取得し、得られた予測流入量を用いて3操作の操作方法を決定する。本節では、検討対象流域、検討対象洪水、アンサンブル予測雨量の計算方法、用いる流出計算モデルについて述べた後、次節において3操作それぞれに関する操作決定方法について述べる。

5.2.1 検討対象流域・ダム、対象洪水

検討対象流域及びダムは、Aダム（流域面積：約80 km²）を含むB川流域（流域面積：約450 km²，治水基準点：C地点（Aダムから約60 km下流））を扱う。対象洪水は平成23年台風6号及び12号とする。いずれの台風においてもAダムは洪水調節操作を実施した。

5.2.2 ダムの緒元、洪水調節操作

Aダムは、制限水位方式のダムであり、洪水期（6月16日～10月31日）において、洪水調節容量17,000,000 m³，利水容量12,400,000 m³（不特定容量：5,500,000 m³，特定利水容量：6,900,000 m³）を有するダムである。洪水量（洪水時以外の平常時において、ダムから放流を行う場合の放流量の最大）は200.0 m³/sであり、洪水調節操作は、流入量が洪水調節開始流量である350.0 m³/sを超えた時点から開始し、放流量を350.0 m³/sの一定量とし、流入量と放流量の差分を貯留する。貯水位が洪水調節容量の8.0割に相当する貯水位（EL. 313.6 m）に達し、今後さらに洪水時最高水位を越えることが予想される場合は、異常洪水時防災操作を開始する。容量配分について図5.1に示す。また5.3.4において述べる弾力的管理における活用水位については、本章では洪水貯留準備水位から0.5 m上のEL. 299.5 mとして設定する。洪水貯留準備水位から活用水位までの容量は、およそ355,000 m³である。また、利水放流バルブの放流能力は9.0 m³/sであり、発電は利水に従属する（従属発電）。

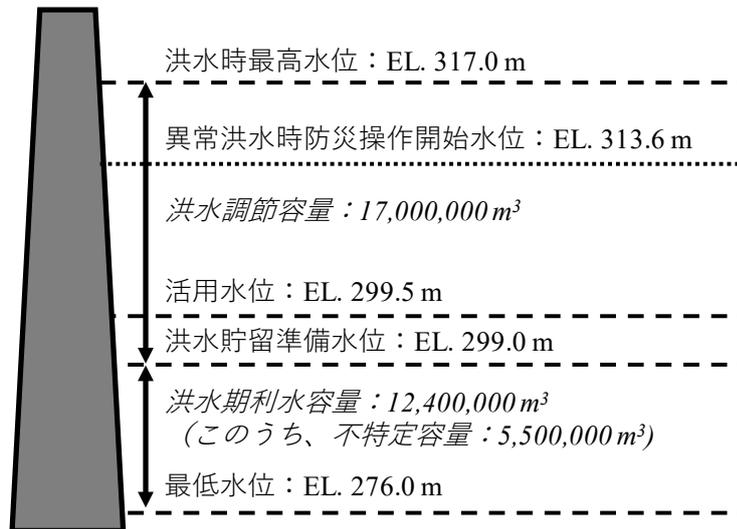


図 5.1 Aダムの容量配分図

5.2.3 アンサンブル予測雨量の計算の概要

アンサンブル予測雨量は、3章で計算したものを用いることとした。3章にて実施したアンサンブル予測計算の概要は以下の通りである。

1) 使用した計算モデル，境界条件，アンサンブル予測計算の更新頻度

気象庁 GSM の 84 時間予測を初期値・境界値として，WRF (Weather Research and Forecasting Model) により計算する．各台風について 2) で示す計算対象期間について，GSM (領域：全球，空間解像度：50 km，予測更新間隔：6 時間毎 (03, 09, 15, 21 JST)，予測先行時間：84 時間，時間解像度：毎時) の予測が更新される毎にその予測値を初期値・境界値として予測計算を行う．GSM の予測が更新される 6 時間毎にアンサンブル予測雨量の計算を行うため，アンサンブル予測雨量は 1 日 4 回更新される．

2) 計算対象期間

台風 6 号：2011 年 7 月 15 日 9 時～7 月 20 日 15 時 (21 初期時刻)

台風 12 号：2011 年 8 月 29 日 9 時～9 月 4 日 15 時 (25 初期時刻)

3) データ同化，計算に用いた物理過程，データ同化に用いた観測データ

予測に用いる初期値は，その時点よりも 6 時間前に行った予測計算結果及び観測値を基に Hybrid ETKF-3DVAR 法 (Wang *et al.*, 2008a; 2008b) によるデータ同化を行った．WRF によるシミュレーションにおいて採用した物理過程およびデータ同化に用いた観測データ一覧については猪股ら (2015) を確認して頂きたい．

4) 計算領域，空間解像度

計算領域については図 5.2 に示し，空間解像度は親領域において 15 km，子領域において 5 km である．鉛直層の数は親領域，子領域共に 50 層である．

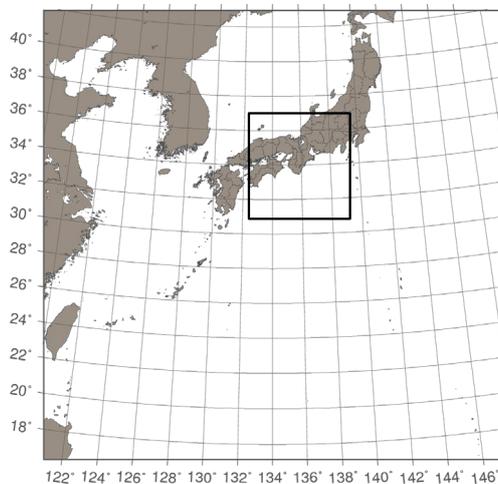


図 5.2 アンサンブル予測雨量の計算領域 (全体が親領域，太枠内が子領域)
(猪股ら，2015)

5) 予測先行時間，アンサンブル数，配信時間遅れの考慮

猪股ら (2015) においては，アンサンブル予測雨量の予測先行時間は GSM の予測先行時間に合わせて 84 時間としたが，気象庁が現業化しているアンサンブル予測の予測先行時間が 39 時間であることを考慮し (気象庁予報部，2016)，本章においても 39 時間先までの予測雨量を使用して，40 時間以降は使用しないこととした．またアンサンブルメンバー数は，計算機環境及び計算所要時間を考慮して 20 とした．また，予測計算結果は必ずしも予測初

期時刻において直ちに入手できるわけではなく数時間遅れて入手されることがあるため、本章においては予測計算結果の入手は予測初期時刻から4時間後として設定した。

5.2.4 流出計算モデルとパラメータ調整

1) 流出計算モデル

5.2.3 で計算されるアンサンブル予測雨量を入力する流出計算モデルは、土研分布型流出モデル 2018（以下、土研モデル）を用いた。土研モデルは、従来の土研分布型流出モデル（猪股・深見，2007）（以下、旧土研モデルと呼ぶ）の一部モデル構造に変更を加えた上でソースプログラムを更新したものである。その概要、旧土研モデルとの違いについては付録を参照のこと。

2) パラメータ調整

土研モデルのパラメータについては、対象2洪水を含む過去10洪水についてAダムの総流入量の誤差を小さくするようSCE-UA法（Duan *et al.*, 1992）により自動最適化を行った。入力する実績雨量データとしてはレーダ雨量を用いた。図5.3は、台風6号及び12号について、Aダムの流入量及びC地点の流量について調整したパラメータで計算した結果を示す。パラメータ調整を行った結果、Aダムのピーク流入量及び総流入量に関する誤差率は、台風6号において9.7%過少、5.8%過少、台風12号において6.0%過少、5.0%過少であり、概ね妥当な精度が得られた。しかし図5.3下段から分かるようにC地点の流量の計算結果については、実績水位からHQ式により流量に換算した実績値と計算値との間に大きな隔たりが見られ、計算値は常に実績値を下回っていた。この傾向がほぼ全ての洪水において確認されたため、本章においては、観測水位は正しいものとして土研モデルにより計算されたC地点流量と観測水位との間でHQ式を作成し、以降の検討で用いることとした。

5.3 アンサンブル予測雨量を用いた活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作の決定方法

5.1でも述べた通り、洪水時ダム操作は予備放流操作、事前放流操作、洪水調節操作及び特別防災操作に大きく分けられ、事前放流操作については活用水位からの事前放流操作と洪水貯留準備水位からの事前放流操作に分けられる。これらの操作の中で、本章の中では予測雨量に基づく操作として活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作を扱う。本節ではこれら3操作それぞれについて概要を述べた後、対象洪水である台風6号及び台風12号の中から特徴的な計算事例を交えてアンサンブル予測雨量を用いた操作決定方法について述べる。そのため、3操作それぞれについて特徴的な計算結果が得られる1時刻のみを抽出して述べることとし、台風6号及び台風12号を通じての操作決定方法に関するシミュレーションについては5.3.において述べる。なお各操作の概要は、本章における対象であるAダム（制限水位方式、発電は従属発電）を想定して記載している。また下記の1)では本章における用語の扱い、2)及び3)では活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作の操作決定方法に関する共通事項を示す。

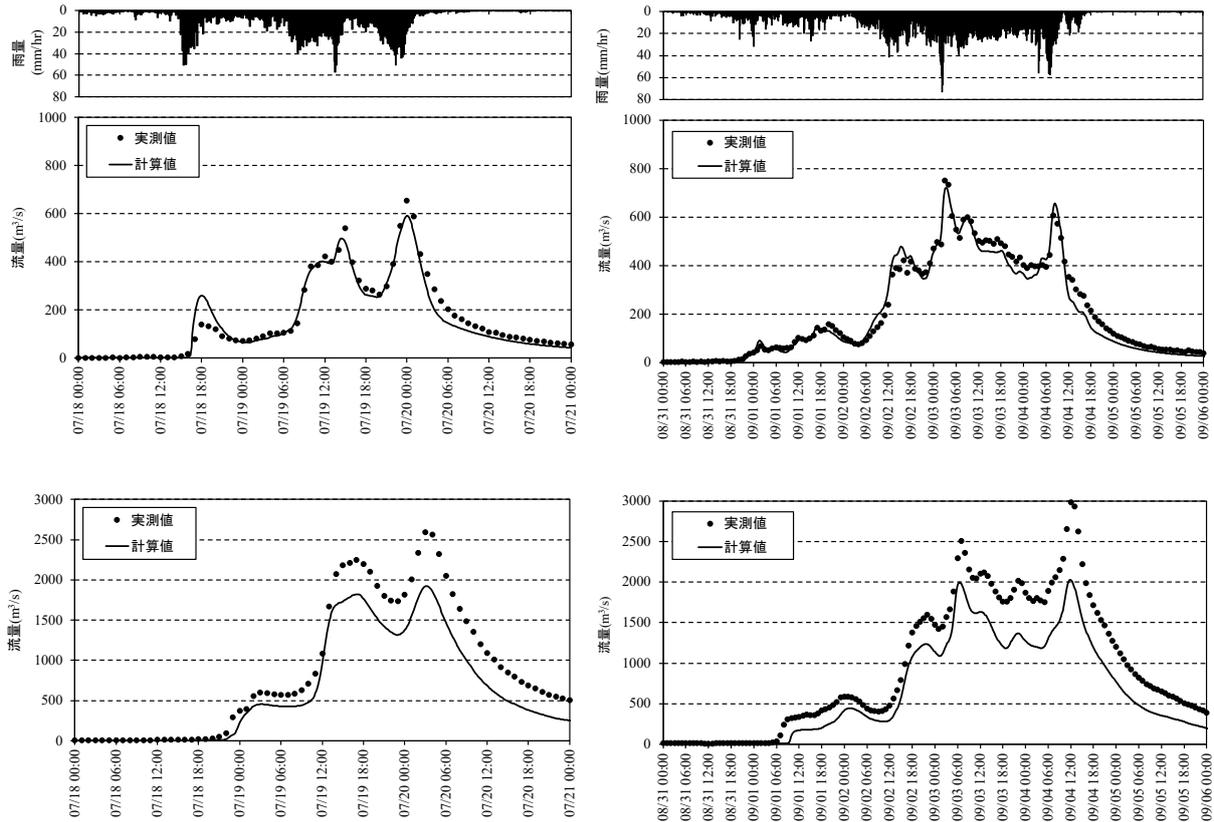


図 5.3 台風 6 号及び 12 号の再現結果

(上段 : A ダム流入量, 下段 : C 地点流量, 左段 : 台風 6 号, 右段 : 台風 12 号)

5.3.1 「洪水調節計算」の本章における扱いについて

本節以降、「洪水調節計算」という言葉を度々用いる。洪水調節操作は、流入量が洪水量を超えてから実施する操作であり、活用水位及び洪水貯留準備水位からの事前放流操作は流入量が洪水量を上回る前に実施される操作であるため洪水調節操作ではない。また特別防災操作についても、流入量が洪水量を下回っても放流量を操作規則により規定される放流量以下に抑えて操作することがあり、このような操作も洪水調節操作には該当しない。そのため、「洪水調節計算」という言葉は上記のような操作に係る水収支計算を本来は含まないものと考えられるが、本章では言葉の使い分けによる煩雑さをさけるため、活用水位及び洪水貯留準備水位からの事前放流操作、特別防災操作に係る水収支計算も含めて洪水調節計算という言葉を用いることとする。

5.3.2 操作決定方法の手順

活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作、いずれについてもアンサンブル予測雨量を用いた操作方法決定の手順は以下の通りである。

- ① 操作候補を予め複数設定
- ② アンサンブル予測雨量を用いた流出計算
- ③ 得られたアンサンブル予測流入量に対して、①で定義したそれぞれの操作候補で洪水調節計算

④ 洪水調節計算の結果を基にして、各操作候補の中から操作方法を決定

5.3.3 アンサンブル予測雨量を入力とした流出計算の計算期間について

5.2.3 5)で述べた通り、アンサンブル予測雨量は39時間先までを利用する。ただし、39時間先までに降った雨が40時間以降にも流出することを考慮し、40時間より先は予測雨量をゼロとした流出計算を60時間程度行い、合計100時間程度の予測計算を実施する。

5.3.4 活用水位からの事前放流操作の操作決定方法と計算事例

1) 活用水位からの事前放流操作の概要

ダム管理においては、ダムの下流河川の環境の保全を目的として、洪水調節に支障を与えない範囲で、洪水調節容量の一部に流水を貯留し、これを適切に放流することにより下流河川の環境の保全を図ることを目的とした弾力的管理の取り組みが進められている。洪水調節容量内に貯留する流水について上限となる水位を活用水位として設定し、洪水調節容量内に貯留した流水は、洪水が発生するおそれがある場合には、所定の時間までに貯水位が洪水貯留準備水位以下になるように放流させる必要がある(国土交通省, 2003; 2014)。国土交通省(2003)ではこの操作は「事前放流」として定義しているが、本章では5.2.において述べる洪水貯留準備水位からの事前放流操作と区別するため、この操作を「活用水位からの事前放流操作」と呼ぶこととする。

洪水の発生が予見された場合、洪水調節容量内に貯留した流水を放流する必要があり、その際放流能力は小さいが発電に寄与できる利水放流バルブから放流または、放流能力は大きいが発電ができない洪水吐と利水放流バルブを組み合わせ放流する必要がある。所定の時間までに貯水位を洪水貯留準備水位以下に低下させることが必須であることを考えると、放流能力が大きい洪水吐を使って短時間に放流することが考えられる一方で、放流能力が小さいため長い時間を要するが、可能な限り利水放流バルブから放流することで発電に寄与することも考えられる。このように活用水位からの事前放流操作においては、できるだけ放流量を小さくして発電に寄与できる時間を長くすることが望ましい一方で、放流量が流入量に対して小さすぎると所定の時間までに「貯水位が洪水貯留準備水位まで低下しないリスク」を負っていると言える。

2) 操作候補の設定

最初に、放流量がそれぞれ異なる複数の操作候補を設定する。1)において述べた通り、活用水位からの事前放流操作の際は、洪水貯留準備水位までの確実な貯水位低下が求められる一方で、利水放流バルブから放流を行うことが望ましい。そこで、放流量の最小値を利水放流バルブの放流能力である $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ とする。許容される最大の放流量は洪水量であるため、最大値は $200.0 \text{ m}^3/\text{s}$ とする。その最小値と最大値の間に3種類の放流量を設定し、合計5種類の放流量を操作候補として設定した。設定した5種類の放流量は、 9.0 、 50.0 、 100.0 、 150.0 、 $200.0 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、以降それぞれの放流量による操作を、活用1、活用2、活用3、活用4、活用5と述べることとする。

3) 操作候補の中から実施する操作を決定する方法

1)で述べた通り、活用水位からの事前放流操作のリスクは、所定の時間までに貯水位が洪水貯留準備水位まで低下しないことである。このリスクを 2)で定めた操作候補毎に定量化し、得られた結果を基に操作候補の中から実施する操作方法を決定する。手順を以下に示す。ここで活用水位については、2.で述べた通り洪水貯留準備水位から 0.5 m 上の EL. 299.5 m として設定した。

- ① 3.で述べた手法により計算されたアンサンブル予測雨量を入力として 4.で述べた土研モデルに入力することで、アンサンブル予測流入量を計算する。活用水位からの事前放流操作は、確実に洪水貯留準備水位までの低下が求められていることを考慮して、得られたアンサンブル予測流入量の中で1メンバーでも洪水量を超過するという予測がある場合には②に進む。
- ② 得られたアンサンブル予測流入量のうち、流入量が洪水量を超過すると予測されるメンバーについて、2)で設定した各操作候補の放流量で操作した場合の洪水調節計算を行う。
- ③ 各操作候補について洪水貯留準備水位まで貯水位が低下しないと予測されるメンバー数をカウントし、そのメンバー数を全メンバー数である 20 で割ることで得られる値を、各操作候補における「洪水貯留準備水位まで貯水位が低下しない確率」と定義する。
- ④ 活用水位からの事前放流操作については、洪水貯留準備水位までの貯水位低下が最優先である一方で、できる限り利水放流バルブを通じて放流する割合が多いことが望ましいため、洪水貯留準備水位まで低下しない確率がゼロである操作候補の中から放流量が最も小さい操作を選定して操作する。

4) 計算事例

以下は台風 12 号における計算事例である。図 5.4 は、予測初期時刻 8 月 31 日 9 時におけるアンサンブル予測雨量、図 5.5 が図 5.4 のアンサンブル予測雨量を土研モデルに入力して得られたアンサンブル予測流入量である。図 5.5 は、時間軸の最初の時刻が 8 月 31 日 13 時となっており、予測初期時刻である 9 時から遅れているのは、5.2.3 5) で述べた通り予測結果の配信遅れ時間として 4 時間を考慮しているためである。図 5.5 より、2 メンバーが洪水量を超過することが予測されていることが分かるため、活用水位からの事前放流操作の実施に向けて放流量を決定する必要がある。図 5.6 は、図 5.5 において流入量が洪水量を超過すると予測する 2 メンバーに対して、活用 1 (放流量 9.0 m³/s) 及び活用 2 (放流量 50.0 m³/s) で操作した際の貯水位の予測結果である。洪水量を超過すると予想される 2 メンバー共に活用 1 による操作では貯水位が洪水貯留準備水位まで低下しないことが示されているのに対し、活用 2 は 2 メンバー共に貯水位が予測時間内に洪水貯留準備水位まで低下することを示している。活用 3, 4, 5 については、図には示さないが放流量が活用 2 よりも大きいため、活用 2 と同様に 2 メンバーは洪水貯留準備水位まで貯水位が低下する。活用 1 から活用 5 の各操作候補について計算される洪水貯留準備水位まで貯水位が低下しないメンバー数を、全メンバー数である 20 で割ることで貯水位が洪水貯留準備水位まで低下しない確率を求め、示したのが図 5.7 である。ここでは、活用 1 では洪水貯留準備水位まで貯水位が低下しない

恐れがあるため、洪水貯留準備水位まで低下しない確率がゼロである操作の中で最も放流量が小さい活用2が実施する操作として選定される。

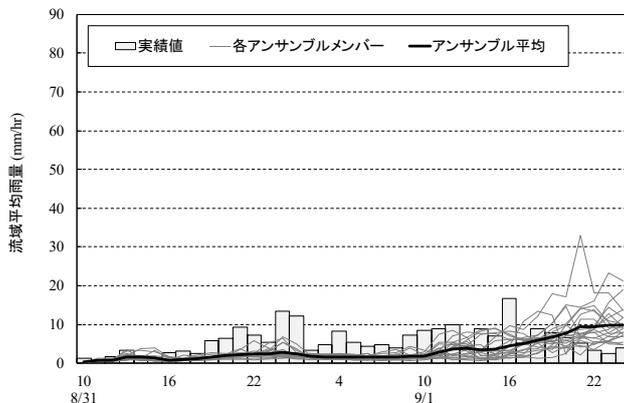


図 5.4 アンサンブル予測雨量 (A ダム流域平均雨量, 予測初期時刻: 8月31日9時)

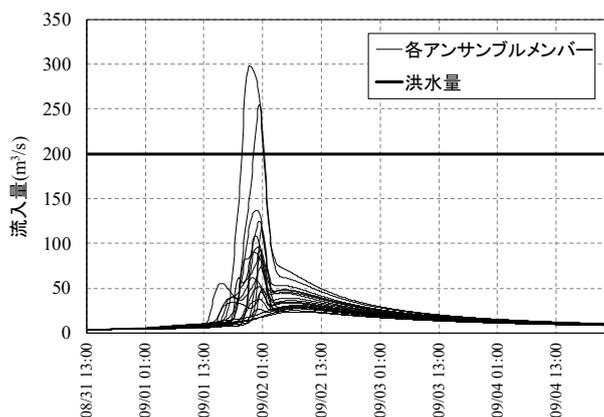


図 5.5 アンサンブル予測雨量を入力とした流出計算結果

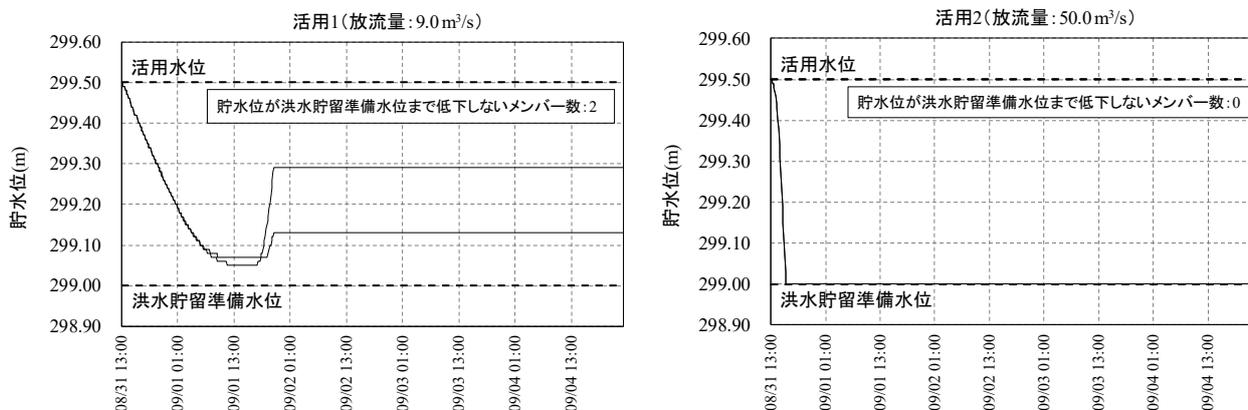


図 5.6 予測貯水位 (左: 活用1 (放流量 $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$) での操作, 右: 活用2 (放流量 $50.0 \text{ m}^3/\text{s}$) での操作)

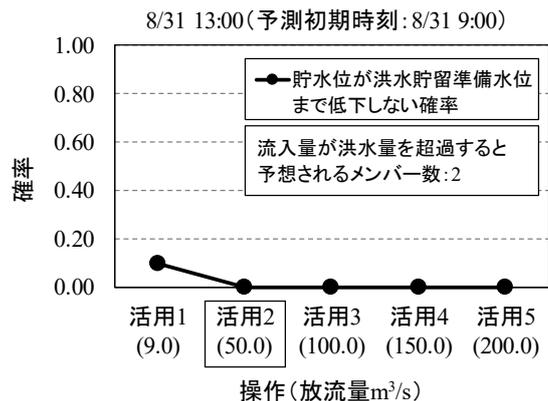


図 5.7 操作候補毎の貯水位が洪水貯留準備水位まで低下しない確率

5) 予備放流方式を採る利水ダムへの適用

予備放流方式を採用している利水ダムにおいては、平常時においては貯水位が常時満水位にあり、洪水が予見される場合においては常時満水位よりも低い水位である予備放流水位まで貯水位を低下させる必要がある。その際、発電に寄与しないゲートから放流を行うのではなく、発電を行える放流管からできるだけ放流することで、発電を行いつつ洪水開始前までに貯水位を予備放流水位まで低下させることが望ましい。予備放流方式を採る利水ダムにおける以上の状況は、1)で述べた多目的ダムにおける活用水位からの事前放流操作と全く同じ状況であることと考えられるため、予備放流方式を採る利水ダムにおいても 1)~4)で述べた考え方・方法が適用可能であると考えられる。

5.3.5 洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関する操作決定方法と計算事例

1) 洪水貯留準備水位からの事前放流操作の概要

日本国内において洪水調節を目的として有しているダムの多くは、図 5.8 左に示されるように、洪水調節容量と利水容量を併せ持つ多目的ダムが一般的である。事前放流操作は、予測雨量情報等に基づいて事前に洪水の発生が予見できた場合において、利水者の合意の上で洪水調節容量の下にある利水容量を洪水が発生する前に放流する操作である(図 5.8 右)。通常、「事前放流操作」という用語はこの操作を意味して用いられることが多いが、本章では 5.3.4 で述べた活用水位からの事前放流操作と区別するために「洪水貯留準備水位からの事前放流操作」と呼ぶこととする。洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施することにより一時的に洪水調節容量として利用できる容量が増加するため、洪水貯留準備水位からの事前放流操作は異常洪水時防災操作を回避または開始を遅らせることにより、異常洪水時防災操作を実施した時に生じる放流量増加を回避または抑制するための操作と言える。しかしその一方で、仮に予測雨量に基づいて利水容量を事前放流した後で、予測が空振りまたは極端な過大予測であった場合、放流した利水容量が回復せずにその後の利水補給に支障をきたす恐れがある。このように洪水貯留準備水位からの事前放流操作には、大規模出水時に事前放流操作を実施しなかった、または事前放流量が少なかった場合に洪水調節容量が不足、言

い換えると「貯水位が洪水時最高水位を超過するリスク」と、事前放流操作を実施したものの実積雨量と比較して予測雨量が過大だった場合に利水容量が回復しない、言い換えると「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しないリスク」という2つのリスクが存在すると言える。

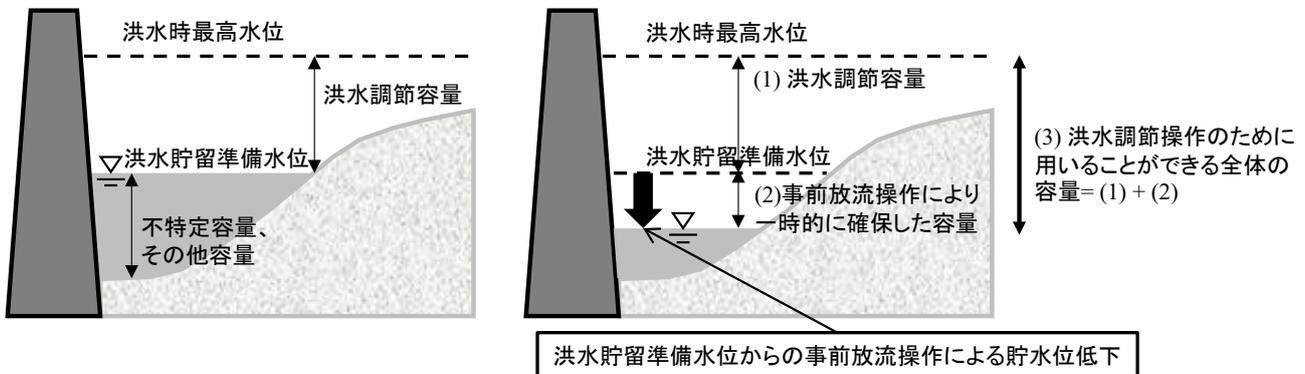


図 5.8 日本の多目的ダムにおける容量配分例（左）及び事前放流（右）のイメージ図（ダム再生ビジョン資料（国土交通省 水管理・国土保全局，2017）を参考に作成した．堆砂容量，死水容量をはじめとした容量については左図の「その他容量」に含まれるものとして扱っている．）（Inomata *et al.*, 2018）

2) 操作候補の設定

活用水位からの事前放流操作及び後述する特別防災操作では操作候補を流量で設定しているのに対し，洪水貯留準備水位からの事前放流操作では体積で操作候補を設定する．これは，洪水貯留準備水位からの事前放流操作においては利水者をはじめとした関係者との合意が必要であり，その際に放流しようとする流量ではなく総量としての体積の方が関係者間で理解しやすいと考えたためである．

操作候補のうち，A ダムの不特定容量全て（ $=5,500,000 \text{ m}^3$ ）を放流する操作を最大の事前放流量（体積）として設定する．次に，事前放流操作を実施しない操作規則に基づく操作では事前放流量（体積）が 0 m^3 であり，この値を最小として設定する． 0 m^3 と $5,500,000 \text{ m}^3$ の間を区切り，合計で 5 種類（ $1,100,000 \text{ m}^3$ ， $2,200,000 \text{ m}^3$ ， $3,300,000 \text{ m}^3$ ， $4,400,000 \text{ m}^3$ ， $5,500,000 \text{ m}^3$ ）の事前放流量（体積）を操作候補として設定する．洪水貯留準備水位に対応した貯水量からそれぞれの事前放流量（体積）を差し引いた際の貯水量に対応する貯水位は 297.3 m ， 295.5 m ， 293.5 m ， 291.5 m ， 289.2 m である．以降，洪水貯留準備水位からの事前放流操作の操作候補を事前 1，事前 2，事前 3，事前 4，事前 5 とし，対応するそれぞれの貯水位を目標水位 1，目標水位 2，目標水位 3，目標水位 4，目標水位 5 と述べることにする．

本章では以上述べた通り不特定容量を事前放流操作の対象として設定したが，特定利水容量を含めて設定することも考えられる．

3) 操作候補の中から実施する操作を決定する方法

1)で述べた通り洪水貯留準備水位からの事前放流操作のリスクは，貯水位が洪水時最高水

位を超過すること及び貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しないことである。このリスクを2)で定めた操作候補毎に定量化し、得られた結果を基に操作候補の中から実施する操作方法を決定する。手順を以下に示す。

- ① アンサンブル予測雨量を土研モデルに入力することでアンサンブル予測流入量を取得する。
- ② 2)で定めた各操作候補で設定した目標水位を初期水位として、アンサンブル予測流入量を入力とした洪水調節計算を行う。洪水調節操作は 5.2.2 で述べた操作に従うものとする。洪水調節操作が終了した時点（流入量が $350.0 \text{ m}^3/\text{s}$ を下回った時点）で貯水位が洪水貯留準備水位に達していないアンサンブルメンバーについては、放流量を利水放流バルブの放流能力である $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ まで低下させることで貯水位回復を図るものとして計算する。また、予測流入量のピークが洪水量に到達しないアンサンブルメンバーについても、ピーク流入発生時点において貯水位が洪水貯留準備水位に達していない場合、ピーク流入量以降に放流量を利水放流バルブの放流能力まで低下させることにより貯水位回復操作を行うものとして計算する。
- ③ 洪水調節計算の結果から、貯水位が洪水時最高水位を超えるメンバー数及び洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しないメンバー数をカウントする。この数を全メンバー数で割って得られる値を、洪水時最高水位を超過する確率及び貯水位が洪水貯留準備水位を回復しない確率と定義する。
- ④ 事前放流操作後に貯水位が洪水貯留準備水位まで回復することが優先と考え、洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率をゼロとする操作候補の中から貯水位が洪水時最高水位を超過する確率を最小とする操作を選定する。この条件を満たす操作候補が複数存在する場合には、その中で事前放流量（体積）が最も小さい操作候補を選択することとする。また、事前放流操作を実施する際の放流量は洪水量である $200.0 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。

ここで述べた方法は、Inomata *et al.* (2018) に記載した手法を一部修正したものである。

Inomata *et al.* (2018) においては異常洪水時防災操作の実施に関わるリスクを「貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過する確率」で表現したが、異常洪水時防災操作は「貯水位が洪水時最高水位を越えることが予想される場合」に実施する操作であるため、その考え方に合わせて本章では「貯水位が洪水時最高水位を超過する確率」で表現するよう修正した。異常洪水時防災操作開始水位における貯留量と洪水時最高水位における貯留量を比較すると当然後者が大きいいため、同じアンサンブル予測流入量に対しては Inomata *et al.* (2018) で扱った「貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過する確率」よりも本章で扱う「貯水位が洪水時最高水位を超過する確率」の方が値が小さくなる。

4) 計算事例

以下は台風 12 号における計算事例である。図 5.9 が予測初期時刻 9 月 1 日 15 時におけるアンサンブル予測雨量、図 5.10 がアンサンブル予測雨量を土研モデルに入力して得られたアンサンブル予測流入量である。この予測流入量を入力とし、各操作候補の目標水位を初期水位として洪水調節計算した結果が図 5.11 である。図 5.11 のそれぞれの図には、貯水位が

洪水時最高水位を超過するメンバー数及び貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しないメンバー数が付されており，これらのメンバー数を全メンバー数である 20 で割ることで，貯水位が洪水時最高水位を超過する確率及び貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率が得られる．各操作候補について，これらの確率を図示したものが図 5.12 である．ここでは，全操作候補について貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率はゼロである．貯水位が洪水時最高水位を超過する確率については事前 1 が最も高く，事前 2 についてもゼロより大きい値が算出されている一方で，事前 3,4 及び 5 についてはゼロとなっている．事前 3,4 及び 5 の中で事前放流量（体積）が最も小さい事前 3 が選定されることとなる．

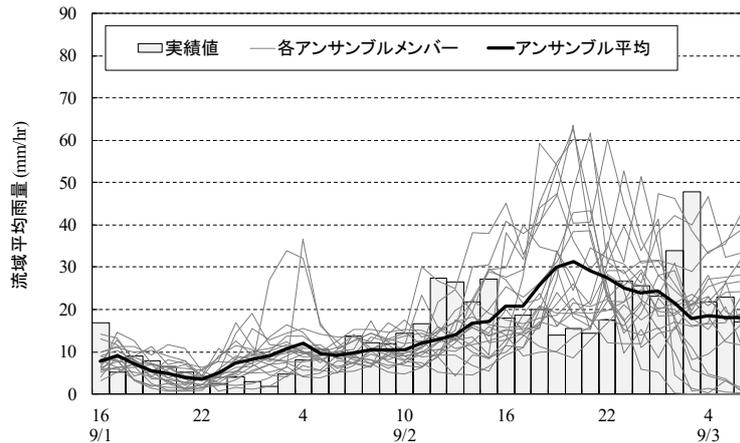


図 5.9 アンサンブル予測雨量（A ダム流域平均雨量，予測初期時刻：9月1日15時）

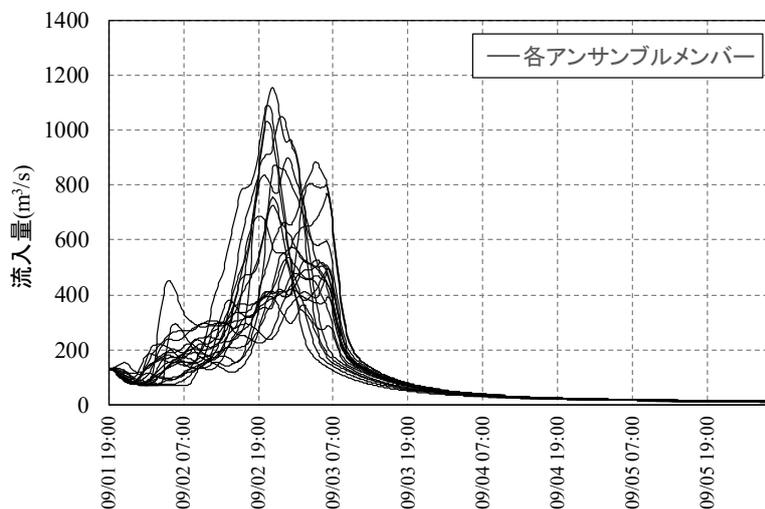


図 5.10 アンサンブル予測雨量を入力とした流出計算結果

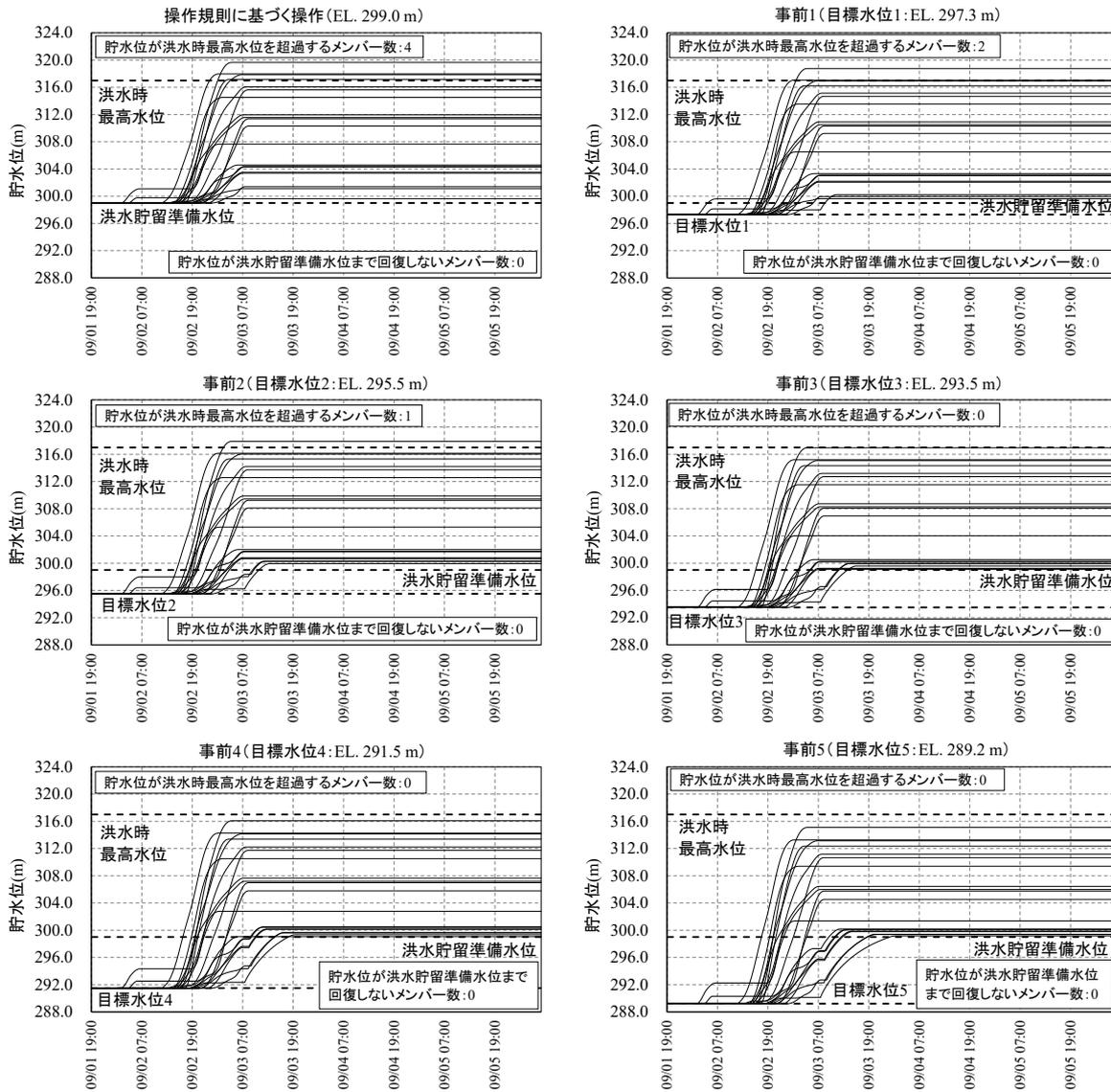


図 5.11 各操作候補に関する貯水位予測計算結果

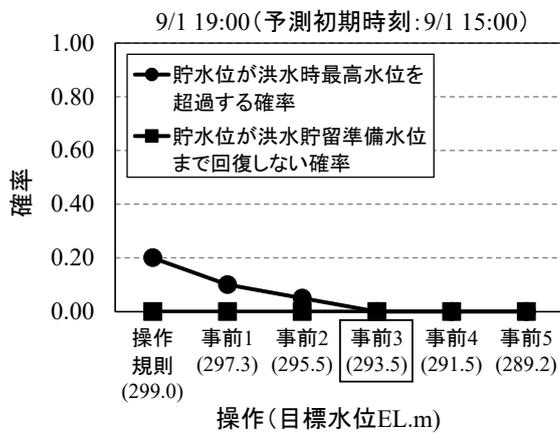


図 5.12 操作候補毎の「貯水位が洪水時最高水位を超過する確率」及び「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率」

5.3.6 特別防災操作に関する操作決定方法と計算事例

1) 特別防災操作の概要

特別防災操作は、洪水時においてダム下流の被害を軽減するために貯留量を増やして容量を有効に活用する高度な操作である（国土交通省，2017b）。より具体的には、下流河川で洪水被害が発生又は発生するおそれがあり河川管理者からダム放流量の減量を要請された場合に、洪水の終わりの見通しが相当程度確実かつ残貯水容量に余裕がある状況において本則操作よりも放流量をカットする操作である。これまでに複数のダムにおいて実施された実績がある（例えば、三春ダム管理所，2017）。

特別防災操作においては、降雨の終了に係る見通しの判断に予測雨量が用いられる。特別防災操作においては、予測雨量に基づいて放流量を決定する際、下流の危険をできるだけ低減させるために可能な限りダムからの放流量を小さくすることが望まれる。しかし、予測雨量が実績雨量を過小評価した場合、放流量によっては洪水調節容量が不足、言い換えると「貯水位が洪水時最高水位を超過するリスク」が存在する。

2) 操作候補の設定

特別防災操作は 1)で述べた通り、下流河川において被害が発生又は被害発生の恐れがあり、かつダムの残容量に余裕がある場合に実施する操作であるため、残容量に十分な余裕がある状況においては放流量をゼロとして下流への放流を最大限抑えることが考えられる。このことから、操作候補の中で最小の放流量を $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$ と設定する。その一方で、特別防災操作は放流量を本則操作の放流量よりも小さくする操作であると考えられるため、本則操作（特別防災操作を実施しない）も操作候補として設定する。洪水調節操作時の本則操作の放流量は $350.0 \text{ m}^3/\text{s}$ であるため、最小値である $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$ と $350.0 \text{ m}^3/\text{s}$ の間に利水放流バルブの放流能力である $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ を含めて 4 種類の放流量を設定し、最小値と本則操作を合わせて合計 6 種類（ $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $50.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $100.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $150.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 本則）の操作候補を設定した。以下、それぞれの放流量での操作について特別 1, 特別 2, 特別 3, 特別 4, 特別 5, 本則と表記する。

ここで、本則操作の放流量については、流入量によって変化するものであることに留意が必要である。流入量が洪水調節開始流量を超過している状態においては $350.0 \text{ m}^3/\text{s}$ であるが、流入量が洪水調節開始流量を下回っている状態においては本則操作の放流量は流入量と同じ値となるため、流入量によっては本則操作の放流量はその他の操作候補で設定される放流量より小さくなる場合がある。

3) 操作候補の中から実施する操作を決定する方法

1)で述べた通り特別防災操作のリスクは、貯水位が洪水時最高水位を超過することである。このリスクを 2)で定めた操作候補毎に定量化し、得られた結果を基に操作候補の中から実施する操作方法を決定する。手順を以下に示す。

- ① アンサンブル予測雨量を土研モデルに入力することでアンサンブル予測流入量を取得する。

- ② 得られたアンサンブル予測流入量に対して、2)で各操作候補について設定した放流量で操作した場合の洪水調節計算を行う。
- ③ 各操作候補について、貯水位が洪水時最高水位を超過すると予測されるメンバー数をカウントし、そのメンバー数を全メンバー数である 20 で割ることで得られる値を各操作候補における「貯水位が洪水時最高水位を超過する確率」として定義する。
- ④ 特別防災操作は、下流からダムに対する放流量の減量要請に基づいて行われる操作であるため、ダムの容量が不足しない限りできるだけ放流量を下げるのが望ましいと考えられる。よって、各操作候補について得られたリスクを基に、貯水位が洪水時最高水位を超過する確率をゼロとする操作候補の中で最も放流量が小さい操作を選定する。

操作決定方法については上述した通りであるが、特別防災操作は下流河川管理者または自治体よりダム放流量の減量要請又はダム管理者自らがダム放流量の減少が必要と判断した場合に実施する操作であるという条件がつくことに留意が必要である。どのタイミングにおいてダム放流量の減少が必要と判断されるかについては定まったものはない。本章においては、対象洪水として扱った台風 6 号及び 12 号において、C 地点の水位が避難判断水位を超過する程度の洪水であったため、避難判断水位を超過した時点でダム放流量の減少が必要と判断されるものと仮定した。ここで設定した条件は本章での扱いであり、実際には流域毎に様々な条件が考えうる。

また、2)において記載した通り、流入量が洪水調節開始流量を下回っている状態においては本則操作の放流量は流入量と同じ値となるため、流入量によっては本則操作の放流量はその他の操作候補で設定される放流量より小さくなる場合がある。しかし、特別防災操作は本則操作よりも放流量を小さくする操作であるため、このような状況においては本則操作の放流量よりも大きい放流量の操作候補は選択されない。例えば流入量が $80.0 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合は本則操作の放流量は $80.0 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、特別 4 及び特別 5 の放流量である $100.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $150.0 \text{ m}^3/\text{s}$ よりも小さい。この状況において特別防災操作を実施する場合、特別 4 及び特別 5 は選択されない。

4) 計算事例

以下は、台風 6 号における計算事例である。5.5.2 において述べる台風 6 号におけるシミュレーションにおいては、7 月 20 日 2 時において下流の C 地点の水位が避難判断水位を 0.24 m 超過したため特別防災操作の実施が検討される。図 5.13 は 7 月 20 日 2 時時点において利用できる最新のアンサンブル予測雨量（予測初期時刻 7 月 19 日 21 時）であり、図 5.14 が 7 月 20 日 2 時時点でアンサンブル予測雨量を土研モデルに入力して得られたアンサンブル予測流入量である。図 5.15 はアンサンブル予測流入量に対して、特別 1（放流量 $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）及び特別 2（放流量 $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）で操作した際の予測貯水位である。貯水位が洪水最高水位を超過するメンバー数は、特別 1 については 15 であるのに対し、特別 2 についてはゼロである。また、図には示さないが特別 2 よりも放流量が大きい特別 3, 4, 5 及び本則操作についても貯水が洪水時最高水位を超過するメンバー数はゼロであった。これらの値を全メンバー数で割ることで貯水位が洪水時最高水位を超過する確率が算出される。図 5.16 は、操作候補

毎の貯水位が洪水時最高水位を超過する確率を示したものである。特別2,3,4,5及び本則操作について、貯水量が洪水時最高水位を超過する確率がゼロであり、これらの操作の中で最も放流量が小さい特別2（放流量 $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）が選定される。

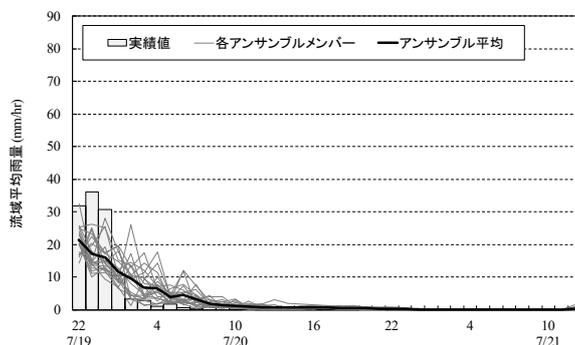


図 5.13 アンサンブル予測雨量（A ダム流域平均雨量，予測初期時刻：7月19日21時）

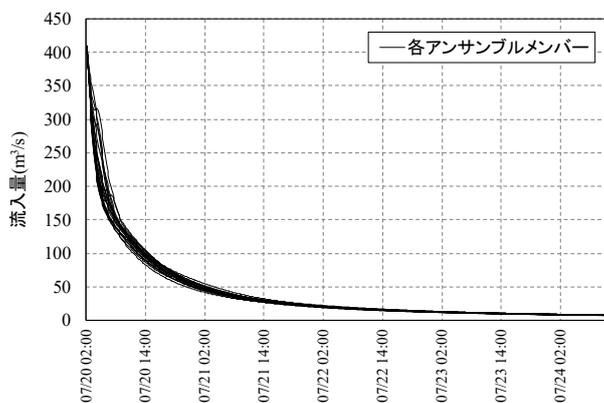


図 5.14 7月20日2時時点で土研モデルにアンサンブル予測雨量を入力することで得られるアンサンブル予測流入量

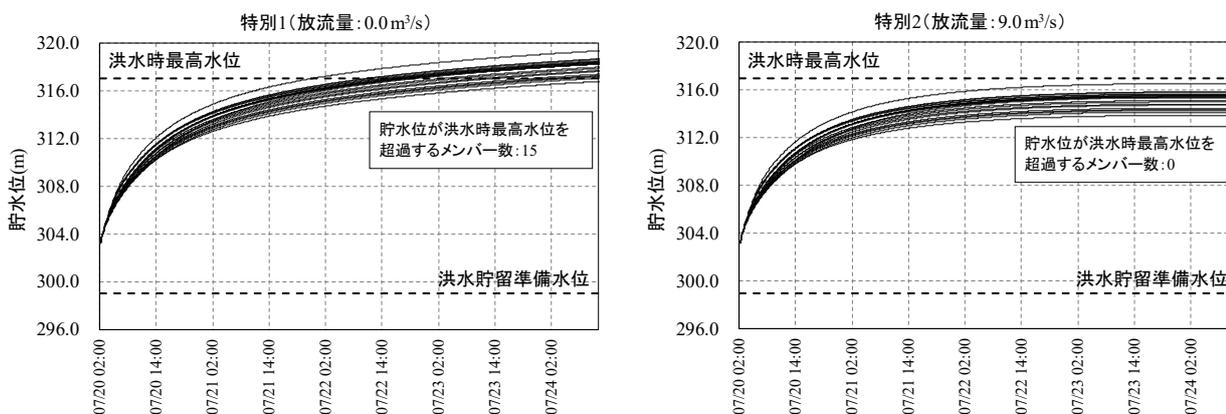


図 5.15 予測貯水位（左：特別1（放流量 $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）での操作，右：特別2（放流量 $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）での操作）

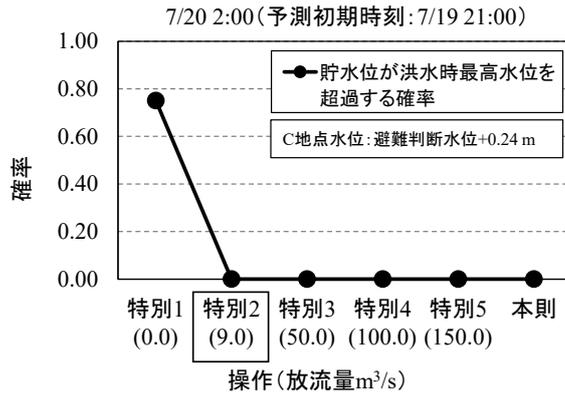


図 5.16 操作候補毎の貯水位が洪水時最高水位を超過する確率

5.4 ダム操作シミュレーションにおける計算フロー及び計算条件

5.3 では、アンサンブル予測雨量を用いた活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作の 3 操作に関する操作決定方法について説明することを目的として、ある 1 時刻を対象として事例的に述べた。ここでは、台風 6 号及び 12 号の 2 つの洪水を通じて 3 操作に関する操作決定方法を適用した計算事例について述べる。また、アンサンブル予測雨量を用いない、操作規則に基づく操作による計算も比較として実施した。

5.4.1 計算条件

1) 計算時間間隔

1 時間とした。

2) 計算の初期水位

操作規則に基づく操作については初期水位を洪水貯留準備水位とした一方で、アンサンブル予測雨量を用いた操作については活用水位を初期水位とした。

5.4.2 アンサンブル予測雨量を用いた操作に関する計算フロー

台風 6 号及び 12 号に関する、アンサンブル予測雨量を用いた活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作について、計算フローを図 5.17 に、概要を下記に示す。

- ① 時間更新に伴い GSM の更新があった場合、アンサンブル予測雨量を計算する。
- ② アンサンブル予測雨量 (GSM の更新があった場合には①で計算したアンサンブル予測雨量、①において GSM の更新がなかった場合には現時刻より前に計算された最新のアンサンブル予測雨量) を土研モデルに入力することでアンサンブル予測流入量を取得する。なお土研モデルについては、実績雨量 (レーダ雨量) を入力として現時刻までの流出計算を予め実施しておき、その状態からアンサンブル予測雨量を入力するものとする。
- ③ ②で得られたアンサンブル予測流入量を用いて、活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作について 5.3.4 3), 5.3.5 3)及び 5.3.6 3) に記した手順によりリスクを定量化する。
- ④ 実施する操作を決定する。

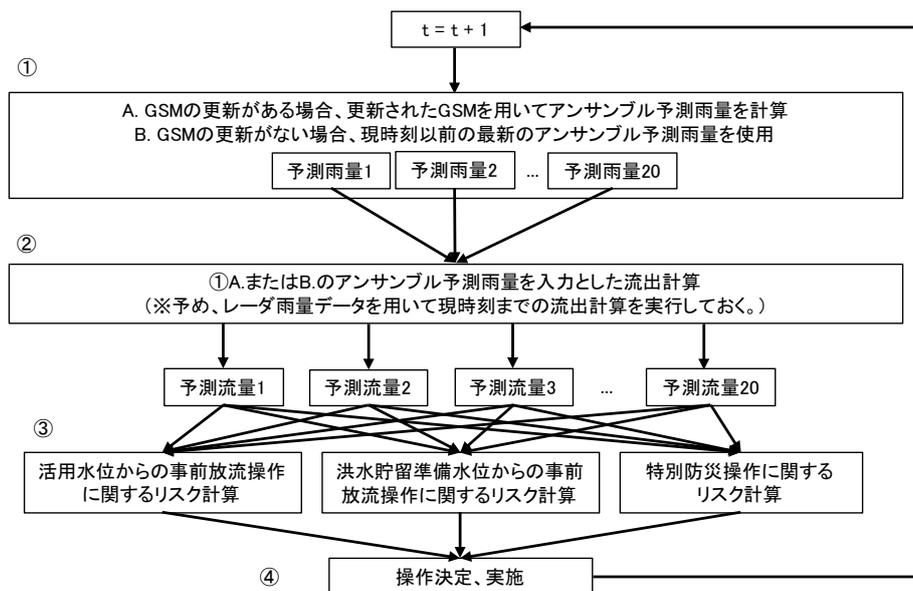


図 5.17 計算フロー図

5.4.3 事前放流操作実施前の巡視に要する時間及び放流の原則に関する設定

活用水位からの事前放流操作及び洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施する際は、操作の実施に先立って下流の安全を確認するための巡視を行う必要がある。本章におけるシミュレーションでは、巡視に要する時間を6時間として設定した。活用水位からの事前放流操作を実施した後に洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施する場合、活用水位からの事前放流操作実施前に巡視を行っていただければ洪水貯留準備水位からの事前放流操作前の巡視は不要とした。また操作規則においては、放流により下流に急激な水位の変動を生じないように努めるためのものとして放流の原則が設定されているため、本章におけるシミュレーションにおいても操作規則において定められている放流量の増加割合の制限を考慮した。

5.5 計算結果

時間的に前後するものの、台風12号の計算結果を先に述べたのちに台風6号の結果を述べる。

5.5.1 台風12号

1) アンサンブル予測雨量の計算結果

図5.18は、Aダム流域平均雨量の39時間積算値について、アンサンブル平均値と観測値を比較した図である。エラーバーはアンサンブルメンバーの中の最大値及び最小値を示している。アンサンブル平均値と観測値の相違が大きくなり、かつアンサンブルメンバーの最大値と最小値の間に観測値が収まっていることが、アンサンブル予測が一定の精度を有している目安と考えられる。その観点では、予測初期時刻9月1日21時の予測まではおおむねその一定の精度を有しているとみなせるが、予測初期時刻9月2日3時の予測から観測値とアンサンブル平均値の乖離が大きくなりアンサンブル平均値は著しく過小評価となる。また

アンサンブルメンバーの最大値よりも観測値が大きくなっていることから、アンサンブルメンバーは全て観測値を表現できず過小評価となっていることが分かる。その傾向は徐々に大きくなり、予測初期時刻 9 月 2 日 21 時や 9 月 3 日 3 時の予測ではアンサンブル平均値と観測値の乖離が相当程度大きくなっている。

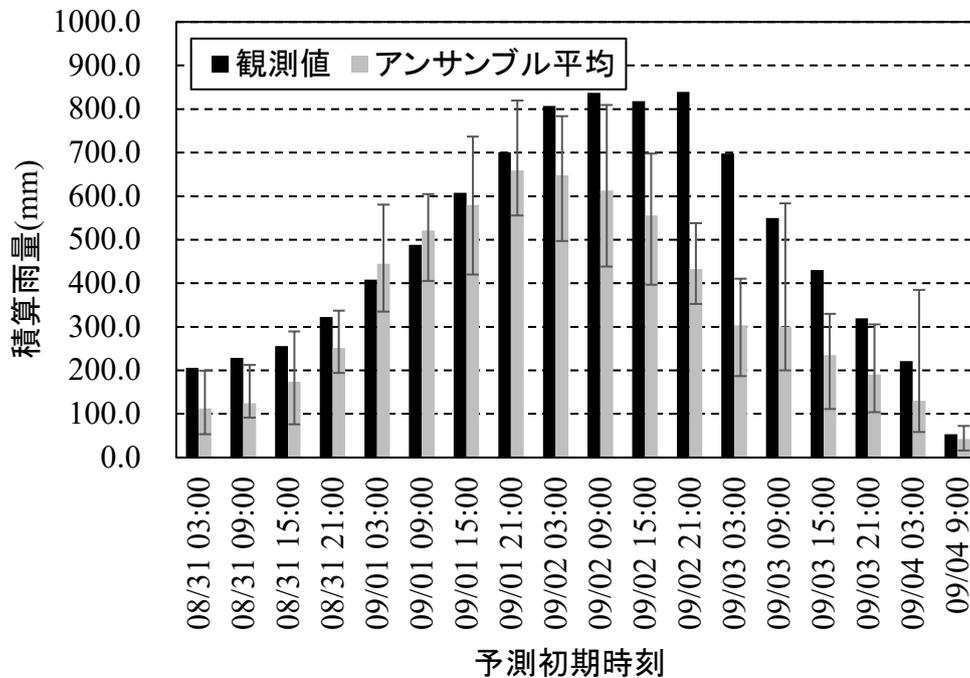


図 5.18 アンサンブル平均値と観測値の比較（台風 12 号，39 時間積算雨量）

2) ダム操作シミュレーション

図 5.19 は、台風 12 号に関するダム操作シミュレーションの結果である。図 5.19 は、以下の構成となっている。なお、③～⑧については、アンサンブル予測雨量を用いた操作に係る情報である。

- ① A ダムの貯水位時系列
- ② A ダムの流入量，放流量，実績雨量時系列
- ③ 実施する操作

操作規則に基づく操作，活用水位からの事前放流操作，洪水貯留準備水位からの事前放流操作，特別防災操作の中からどの操作が実施されたかを色別で示す。

- ④ 洪水量を超過する予測の有無

アンサンブル予測流入量の中に 1 つでも洪水量を超えるメンバーがいる場合，黒で示される。

- ⑤ A ダム貯水位の洪水貯留準備水位の超過状況

貯水位が洪水貯留準備水位よりも高い場合，黒で示される。

- ⑥ 活用水位からの事前放流操作に関するリスク計算結果

図 5.7 で事例として示した計算結果を別の形で表示したもの。具体的には、各操作候補に

ついて計算される「貯水位が洪水貯留準備水位まで低下しない確率」を1時間毎に色別表示したもの。

⑦ 洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関するリスク計算結果

図 5.12 で事例として示した計算結果を別の形で表示したもの。具体的には、各操作候補について計算される「貯水位が洪水時最高水位を超過する確率」及び「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率」を1時間毎に色別表示したもの。

⑧ 特別防災操作に関するリスク計算結果

図 5.16 で事例として示した計算結果を別の形で表示したもの。具体的には、各操作候補について計算される「貯水位が洪水時最高水位を超過する確率」を1時間毎に色別表示したもの。

⑨ C地点水位の避難判断水位超過状況

C地点の実況水位が避難判断水位を超過している場合、黒で示される。

⑩ C地点水位時系列

ここで、⑥、⑦、⑧において、活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作が実施された場合、太線で囲われた操作がその時刻において選択された操作を示す。また、②、⑩の時間軸において時間表記がある時間(08/31 07:00, 08/31 13:00 等)及び③、⑥、⑦、⑧において実線の区切が入っている時間は、新たに更新されたアンサンブル予測雨量の入手時刻であることを示す。下記において丸囲いの数字は、上記で示した図 5.19 中の図番号を示す。

操作規則に基づく操作の場合、①及び②に示される通り、洪水調節が開始する9月2日13時頃までは流入量＝放流量とした操作が行われ、その後、計画最大放流量 350.0 m³/s の一定量放流による洪水調節操作に入った。その後、1日以上に渡り洪水調節操作を継続した後、9月3日15時頃に貯水位が異常洪水時防災操作開始水位に到達したため異常洪水時防災操作を開始した。その約2時間後には流入量と放流量が同じとなり、貯水位を維持する操作に移行した。

次にアンサンブル予測に基づく操作について述べる。最初に、④に示す通り8月31日13時に洪水量を超える予測流入量が出る。⑤より、その時点で貯水位は洪水貯留準備水位を超過しており、計算の初期水位である活用水位と等しくなっているため、活用水位からの事前放流操作の実施が検討される。⑥より、最初に13時時点で活用1(放流量 9.0 m³/s)以外の操作では貯水位が洪水貯留準備水位まで低下しない確率がゼロであるため、活用1以外の操作の中で放流量が最も小さい活用2(放流量 50.0 m³/s)が選択される。しかし、6時間の巡視を行うため13時時点では活用水位からの事前放流操作は行われずに操作規則に基づく操作(流入量＝放流量)が行われる。巡視が終了する19時において、④に示す通り予測流入量が洪水量を超過する状況が継続しているため、活用水位からの事前放流操作が開始される。この時も引き続いて⑥に示す通り活用1以外の操作では貯水位が洪水貯留準備水位まで低下しない確率がゼロであるため、活用1以外の操作の中で放流量が最も小さい活用2による操作が行われる。活用2による操作により、①及び②に示す通り9月1日0時頃に貯水位が洪水貯留準備水位に下がり、活用水位からの事前放流操作は終了となる。

その後は洪水貯留準備水位からの事前放流操作について検討される。⑦に示す通り、9月1日1時から19時までは全ての操作候補において貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率及び貯水位が洪水時最高水位を超過する確率共にゼロの状態が続くため、流入量＝放流量とする操作規則に基づく操作が継続される。その後、9月1日19時に取得される新しいアンサンブル予測において、貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率は引き続き全ての操作候補についてゼロである。その一方で貯水位が洪水時最高水位を超過する確率がゼロより大きくなる操作候補が出てくるため、貯水位が洪水時最高水位を超過する確率を最小とする操作候補の中で最も事前放流量（体積）が少ない操作が選択される。具体的には、19時においては事前3、20時から23時までは事前4、24時から再び事前3による操作となる。その後、9月2日1時に予測が更新され、引き続いて全ての操作候補について貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率はゼロであり、かつ貯水位が洪水時最高水位を超過する確率はゼロより大きくなる。図5.20は、9月2日1時における操作候補毎の貯水位が洪水時最高水位を超過する確率及び貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率であり、事前2、3、4、5については貯水位が洪水時最高水位を超過する確率が同じ値となっている。事前2～5について確率は同じであるが、事前放流量（体積）が最も大きい操作5で操作した場合、異常洪水時防災操作が実施されたとしてもその他の操作候補と比較して被害軽減が期待されること及び貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率はゼロであり利水回復については問題がないことが想定されることを考慮して、事前5で操作することとした。②に示す通り、事前5による操作が9月2日10時頃まで継続した時点で流入量が洪水量である200.0 m³/sを超過したため、洪水貯留準備水位からの事前放流操作が終了となり、その後9月2日13時頃から洪水調節操作が開始された。なお①に示す通り洪水調節開始時点での貯水位は、事前5の目標水位である289.2 mまで下げることができていない。

洪水調節操作を開始した後、⑨及び⑩に示す通り9月3日6時頃にC地点の水位が避難判断水位を超過したため特別防災操作の実施について検討されるが、⑧に示す通りこの時は本則操作以外の操作候補は貯水位が洪水時最高水位を超過する確率がゼロよりも大きいため、ここでは特別防災操作は実施されずに本則操作が継続される。その後、①に示す通り9月4日7時頃に貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過した。異常洪水時防災操作に移行することも考えられるが、⑧及び図5.21に示す通りこの時点では本則操作を継続した場合でも貯水位が洪水時最高水位を超過する確率は10%と低かったため、ここでのシミュレーションでは異常洪水時防災操作を行わずに本則操作を継続させることとした。次に⑨及び⑩に示す通り、9月4日11時過ぎから4時間程度C地点の水位が避難判断水位を再度超過したため特別防災操作の実施について検討されるが、①に示す通りこの時点では貯水位が既に異常洪水時防災操作開始水位を超過していることから、ここでも特別防災操作を実施せずに本則操作を継続するという結果となった。その後、9月4日12時頃から流入量が洪水調節開始流量を下回り、貯水位低下操作に移行した。

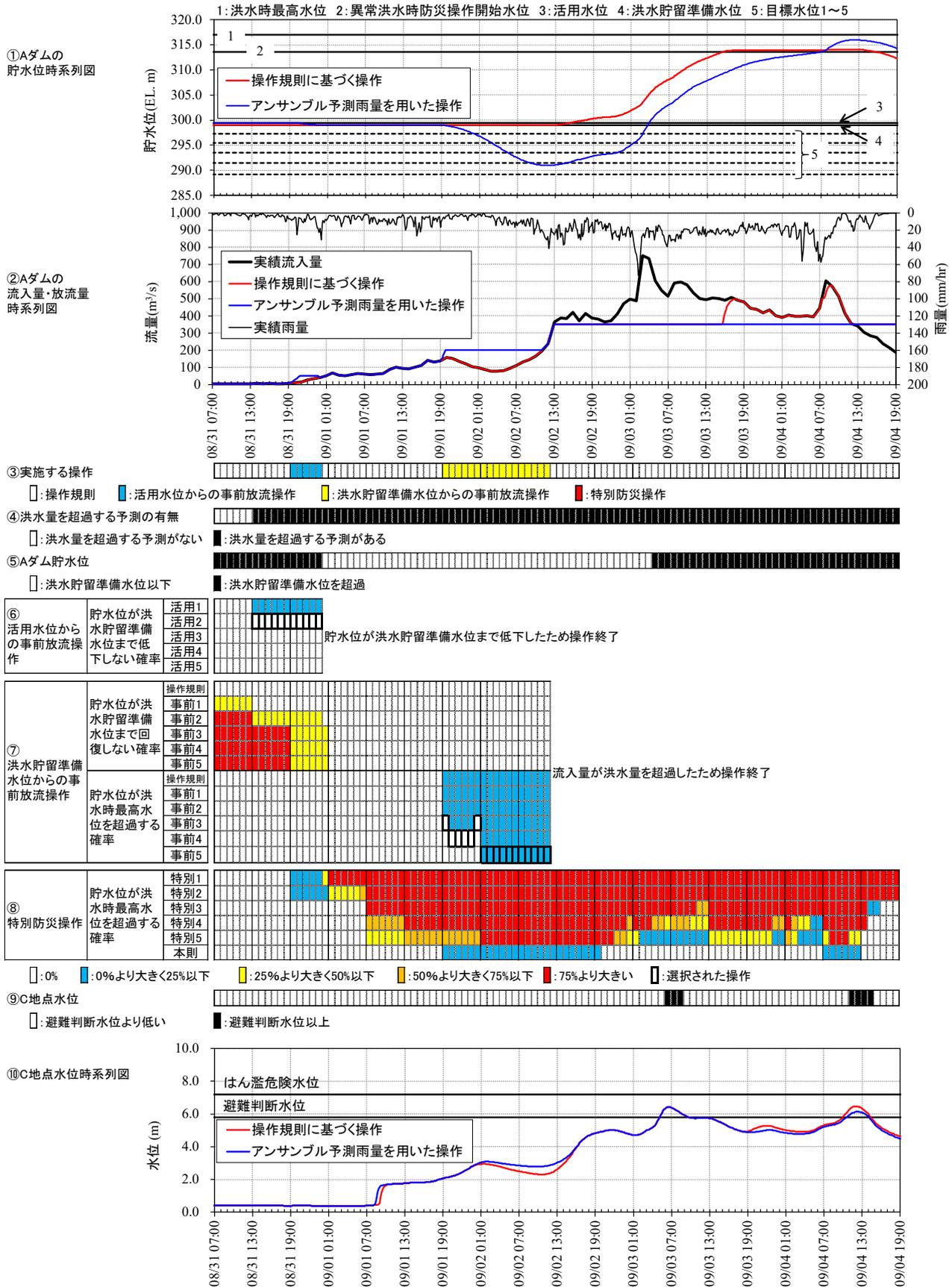


図 5.19 ダム操作シミュレーション結果 (台風 12 号)

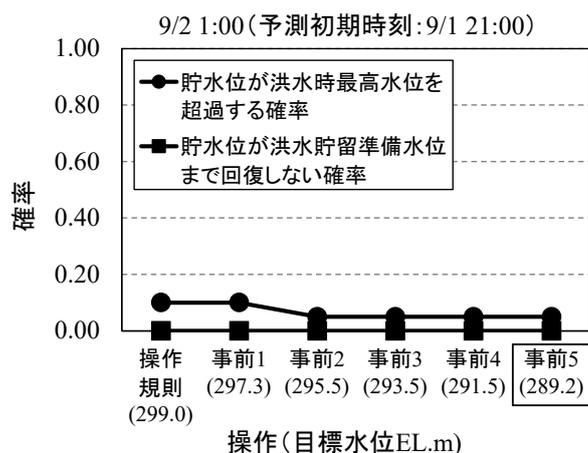


図 5.20 9月2日1時時点の、操作候補毎の「貯水位が洪水時最高水位を超過する確率」及び「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率」

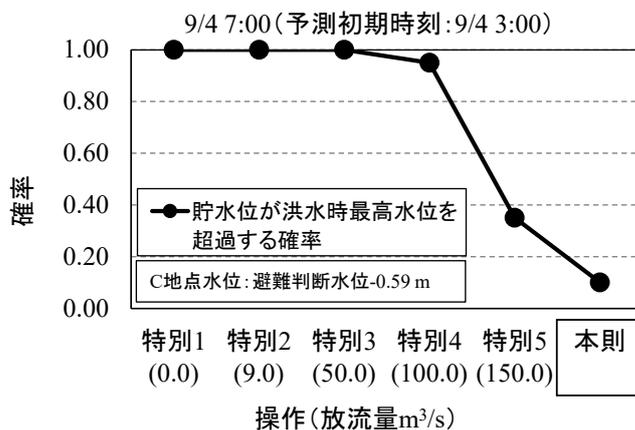


図 5.21 9月4日7時時点の、操作候補毎の貯水位が洪水時最高水位を超過する確率

5.5.2 台風6号

1) アンサンブル予測雨量の計算結果

図 5.22 は、A ダム流域平均雨量の 39 時間積算値について、アンサンブル平均値と観測値を比較した図である。エラーバーはアンサンブルメンバーの中の最大値及び最小値を示している。予測初期時刻 7 月 18 日 3 時の予測まではアンサンブル平均と観測値の乖離は大きくなく、最大値と最小値の間に観測値が収まっている。しかしその後、予測初期時刻 7 月 18 日 9 時の予測においてアンサンブル平均と観測値の乖離が大きくなり、最大値よりも観測値が大きくなる。また、予測初期時刻 7 月 18 日 21 時から 7 月 19 日 9 時までは、アンサンブル平均と観測値の乖離が更に大きくなり、アンサンブル平均が過大評価となる。また、アンサンブル最小値が観測値よりも大きい状況となる。

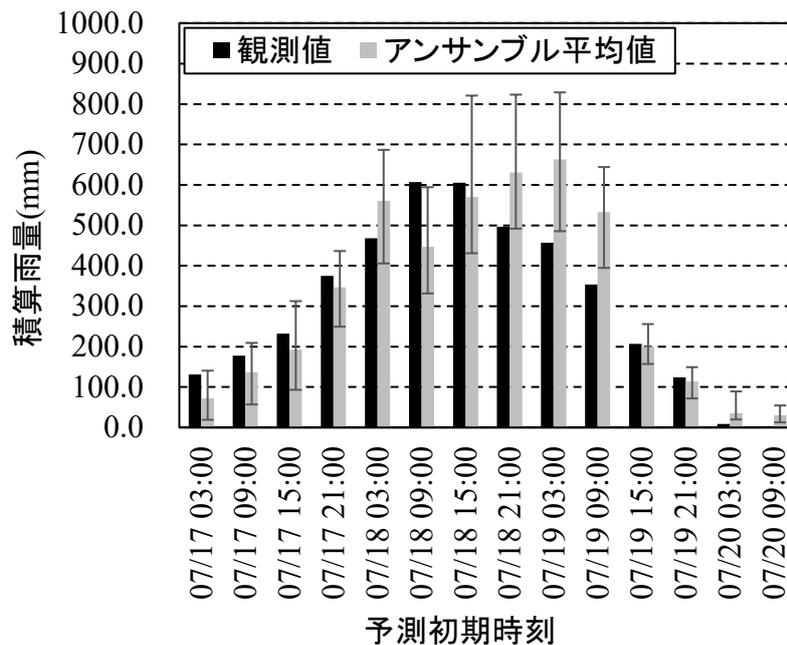


図 5.22 アンサンブル予測平均値と観測値の比較（台風 6 号，39 時間積算雨量）

2) ダム操作シミュレーション

図 5.23 は，平成 23 年台風 6 号の計算結果であり，図の構成は図 5.19 と同じである．図 5.23 の①及び②に示す通り，操作規則に基づく操作の場合，流入量が洪水調節開始流量である $350.0 \text{ m}^3/\text{s}$ に到達するまでは放流量＝流入量として貯水位の維持を行い，7 月 19 日 9 時過ぎから洪水調節操作を開始する．7 月 20 日 2 時過ぎまで洪水調節操作を実施した後は，貯水位低下操作に移行し，7 月 20 日 11 時頃に放流量が流入量と同量まで低下する．

アンサンブル予測に基づく操作については，④及び⑤に示す通り 7 月 17 日 13 時より流入量が洪水量を超過する予測が発生し，かつ貯水位は洪水貯留準備水位を超えて計算初期水位である活用水位と等しい状態であるため，活用水位からの事前放流操作について検討される．⑥に示される通り，13 時の時点で全ての操作候補について貯水位が洪水貯留準備水位まで低下しない確率がゼロであるため，放流量が最も小さい活用 1 が選択される．しかし，6 時間の巡視を行う必要があるため巡視が終了となる 19 時までは操作規則に基づく操作（流入量＝放流量）を行う．巡視が終了となる 19 時に入手される予測に基くと，引き続いて活用 1 から活用 5 までの全ての操作候補について貯水位が洪水貯留準備水位まで低下しない確率がゼロであるため，放流量が最も小さい活用 1（放流量 $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）での操作が開始される．活用 1 での放流を 7 月 18 日 10 時頃まで継続した結果，①及び②に示す通り貯水位が洪水貯留準備水位まで低下したため活用水位からの事前放流操作は終了となる．

次に洪水貯留準備水位からの事前放流操作について検討される．⑦に示す通り，活用水位からの事前放流操作が 7 月 18 日 10 時頃に終了した後，19 時の予測入手までは貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率及び貯水位が洪水時最高水位を超過する確率が全ての操作候補についてゼロであるため，操作規則に基づく操作（流入量＝放流量）が行われる．

19 時の予測において、貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率は引き続いて全ての操作候補についてゼロである一方で、貯水位が洪水時最高水位を超過する確率については操作規則に基づく操作ではゼロよりも大きくその他の操作候補についてゼロであるため、事前 1 から事前 5 の中で事前放流量（体積）が最も小さい事前 1 による操作が行われる。21 時において操作規則に基づく操作について貯水位が洪水時最高水位を超過する確率がゼロとなるため一時的に操作規則に基づく操作に戻したが、22 時に操作規則に基づく操作について再び確率がゼロより大きくなるため、再度事前 1 による操作が行われる。ここでの操作については 5.6.3 で述べる。その後 7 月 19 日 1 時の予測更新時に、全ての操作候補について貯水位が洪水時最高水位を超過する確率がゼロとなるため操作規則に基づく操作（流入量＝放流量）を行う。次の予測更新である 7 時以降、7 時に事前 3、8 時に事前 2 と操作が決定された後、流入量が洪水量を超過したために洪水貯留準備水位からの事前放流操作は終了となり洪水調節操作に移行した。

7 月 19 日 10 時ごろから開始された洪水調節操作は、流入量の 1 山目を過ぎたところで一度貯水位低下操作を実施するが、その後流入量が再び増加したため再度洪水調節操作を行う。A ダムにおいて 1 山目の流入ピークを迎える 19 日 15 時頃に、⑨及び⑩に示される通り下流 C 地点の水位も下流から A ダムに対して放流量の減量要請が行われる基準である避難判断水位を超過しているが、⑧に示す通りこの時本則操作以外の特別防災操作の操作候補においては洪水時最高水位を超過する確率がゼロ以上となっているためここでは本則操作が選択される。その後 2 山目の流入ピークを迎えた後の 7 月 20 日 2 時頃に、C 地点の水位が再度避難判断水位を超過したため特別防災操作の実施が検討される。この時、⑧に示す通り特別 1（放流量 $0.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）のみ洪水時最高水位を超過する予測がゼロ以上となっているため、特別 2 から特別 5 の操作の中で放流量を最も抑えて下流の水位上昇を抑制する特別 2（放流量 $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）により操作が行われる。特別 1 による特別防災操作を開始した直後、⑨及び⑩で示される通り C 地点の水位は避難判断水位を下回るが、特別防災操作の終了判断は下流の様々な状況に依るものであるため本章におけるシミュレーションでは特別防災操作を継続させた。⑧に示す通り 20 日 7 時の予測更新においてこれまで実施していた特別 2 による操作でも洪水時最高水位を超過する確率がゼロ以上となるため、確率をゼロとする操作候補の中から最も放流量が小さい特別 3（放流量 $50.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）で操作した。

5.6 考察

5.3 で示した、活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作に関するアンサンブル予測雨量を用いた操作決定方法を過去発生した 2 つの洪水へ適用した。その結果、5.5 において示した通り放流量が極端に不自然な挙動を示すことはなく概ね方法の適用性が確認されたと考えられる。従来は、誤差が不可避であり、かつ確からしさが不明確である確定的な予測雨量を用いて操作の実施判断を行っていた洪水時ダム操作について、アンサンブル予測雨量を用いることで各操作を実施する際のリスクがどの程度の確からしさで発生するかを把握した上で放流量を決定することが本章で提案した手法の主たる特徴である。ここでは、得られた結果を基に考察を行う。

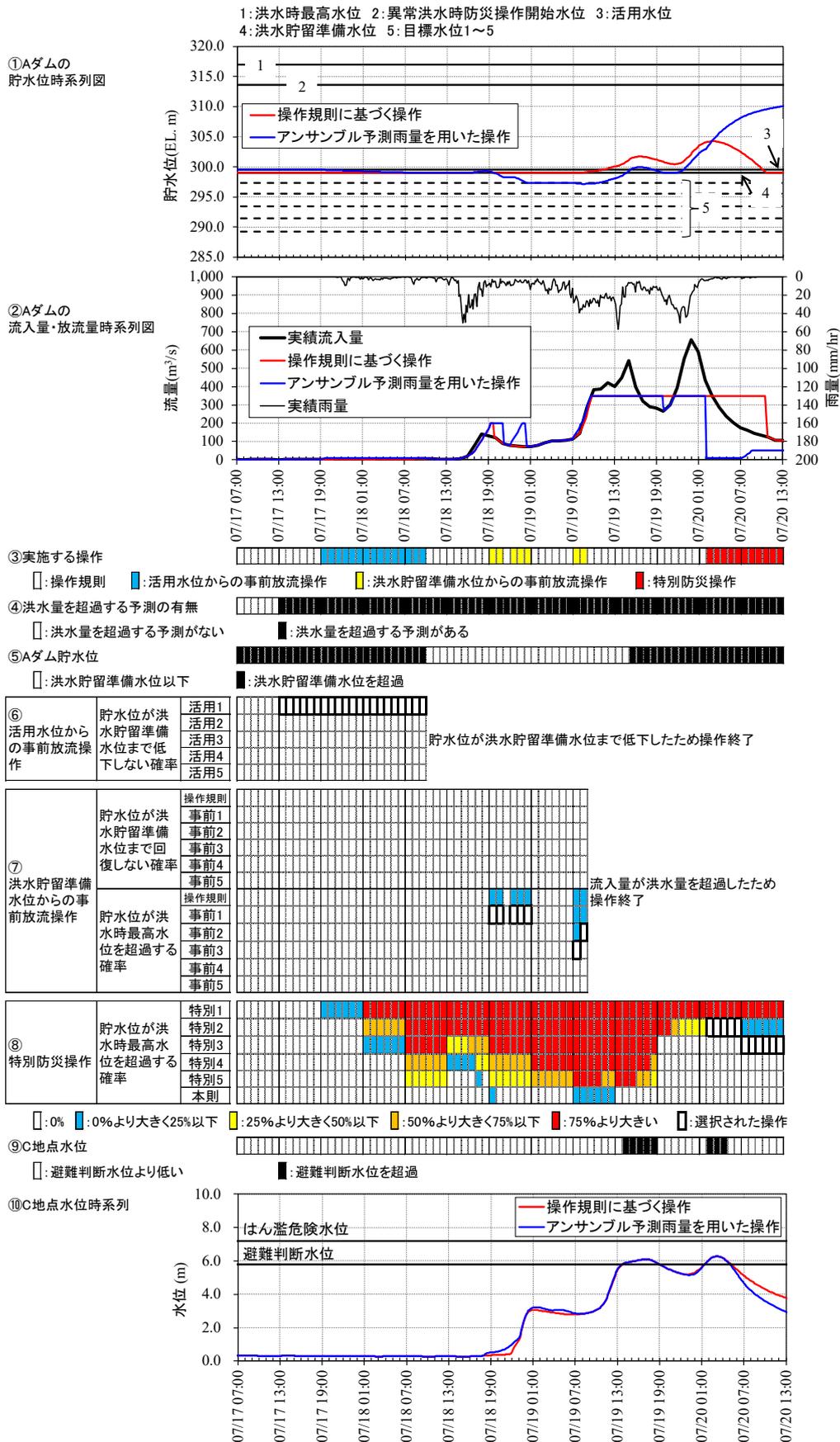


図 5.23 ダム操作シミュレーション結果 (台風 6 号)

5.6.1 アンサンブル予測雨量の精度

図 5.19 及び図 5.23 は、台風 12 号及び台風 6 号に対してアンサンブル予測雨量を用いたダム操作決定方法を適用した結果である。本章において提案した操作を適用したことによって操作規則に基づく操作よりも悪い結果になることはなく、妥当性が概ね示されたと考えられる。しかしその一方で、これらのシミュレーションは、図 5.18 及び図 5.22 に示したアンサンブル予測雨量を用いて実施したものである。図 5.18 及び図 5.22 については 5.5.1 1) 及び 5.5.2 1) で述べた通り、一定の精度が得られている予測がある一方で実績値がアンサンブルメンバーの最大値と最小値の間に収まらない予測も存在している。また、台風 6 号と台風 12 号で比較した場合、台風 12 号においてアンサンブル予測雨量と実績値との間の乖離が大きい。

当然ながらアンサンブル予測雨量の精度は、それに基づいて実施される操作に直接的な影響を及ぼす。本章においては、提案した操作によって操作規則に基づく操作よりも悪い結果になるということとはなかったが、本章で使用したアンサンブル予測雨量を台風 12 号の洪水調節操作に対して適用した結果、アンサンブル予測雨量に基づいて操作することで操作規則に基づく操作よりも下流の危険度を増大させる結果となった事例も存在する(猪股ら, 2015)。今後、本章において提案したダム操作における操作決定方法を実運用化する場合には、気象庁が現業化しているアンサンブル予測雨量(気象庁予報部, 2016)を用いることを想定している。今後、気象庁が現業化しているアンサンブル予測雨量について精度検証するに当たっては、上述した通りアンサンブル予測雨量から得られる予測幅が実績値を包含しない場合があることを認識し、アンサンブル予測雨量を用いた操作にどのような影響をもたらすかに留意して精度検証することが重要である。

5.6.2 アンサンブル予測雨量の予測先行時間について

今後、本章において提案したダム操作における操作決定方法を実運用化する場合には、気象庁が現業化しているアンサンブル予測雨量(気象庁予報部, 2016)を用いることを想定している。そのため、本章において使用するアンサンブル予測雨量の仕様は可能な限り気象庁が現業化しているアンサンブル予測雨量に合わせることにした。予測先行時間を 39 時間としたのは上記の理由による。しかし、39 時間という予測先行時間は、洪水貯留準備水位からの事前放流操作においては必ずしも十分な長さであるとは言えない。

Nohara *et al.* (2015) は、長安口ダムにおいて実際に予備放流操作が行われた過去の洪水イベントを対象として、気象庁の週間アンサンブル予報の予備放流操作への適用可能性・利用方法について検討している。気象庁の週間アンサンブル予報は、本章におけるアンサンブル予測雨量と比較して時空間解像度が粗い一方で、予測先行時間は 1 週間程度と長いのが特徴である。予測先行時間が長い予測雨量を用いることで、時空間解像度が粗くなることに起因する豪雨に対する過小評価傾向について留意が必要である一方で、洪水発生の予見から実際の洪水発生までの間に十分な時間が確保できることが期待される。このことにより 2 つのメリットが得られると考えられる。一つは、洪水発生の予見から洪水発生までの時間が長くなるため、余裕を持って予備放流操作を行うことができ

るようになり、結果として所定の水位までの確実な貯水位低下が期待できることである。もう一つは、予備放流操作による放流を、できるだけ洪水吐に依らず利水放流バルブから行うことで、所定の水位まで貯水位低下させつつ発電への貢献が期待できることである。また、木谷ら（2018）は ECMWF のアンサンブル予測雨量を用いて日吉ダムにおいて過去発生した複数の洪水を対象として精度検証を行うと共に事前放流操作への適用性について検討した。ECMWF のアンサンブル予測雨量についても予測先行時間が 120 時間と本章で使用したアンサンブル予測雨量の予測先行時間よりも長いため、これを用いることで上述した 2 つのメリットが得られると期待される。

一方で本章において用いた 39 時間の予測先行時間の場合、時空間解像度を細かくすることによりアンサンブル予測雨量の予測精度について一定の精度が期待できることに伴い、アンサンブル予測雨量を用いて洪水時ダム操作のリスクを定量化し、操作方法を決定できることを示した。しかし、予測先行時間 39 時間では洪水発生の予見から実際の洪水発生までの時間が限られるため、台風 12 号の結果（図 5.19）について 5.5.2 2) で述べたように洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施したものの目標水位まで貯水位を低下させることができないことがある。さらに、限られた時間内で洪水貯留準備水位からの事前放流操作による貯水位低下を行う必要があるため、放流の多くを利水放流バルブではなく洪水吐で行うことになり発電への貢献も限定的となる。上記の課題を解消するために、豪雨のようなメソスケール現象を表現できる時空間分解能を有しつつ、予測先行時間が長いアンサンブル予測雨量が今後利用可能になることが望まれる。

5.6.3 洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関する操作決定方法について

本章で対象とした 3 つの洪水時ダム操作のうち、活用水位からの事前放流操作及び特別防災操作については、著者らが知る限りアンサンブル予測雨量の利用の有無に関わらず研究事例は存在しない。その一方で、洪水貯留準備水位からの事前放流操作については既往研究が存在する（戸谷ら、2006；下坂ら、2009；北田ら、2010；Saavedra *et al.*, 2010；臼谷・中津川、2010；三石ら、2011b）。これらの既往研究との相違・特徴については 4.1. や 4.4. において述べた通りであり、本章において提案した洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関する操作決定方法の適用性については 2 つの洪水イベントへの適用を通じて概ね確認されたと考えられる。しかし、台風 6 号のシミュレーション結果から 2 つの課題が見いだされた。

1 つ目は、図 5.23 の①及び②に示された操作規則に基づく操作に関するシミュレーション結果から明らかのように、台風 6 号はそもそも洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施しなくても洪水調節容量だけで洪水調節可能な規模の洪水（以下、簡略的に「中小規模洪水」とする。）であるのに対し、本章において提案したアンサンブル予測雨量を用いた操作は、洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施していることである。洪水貯留準備水位からの事前放流操作は、操作の実施そのものがダム管理所の負担を増やすものであるため、洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施しなかった場合、洪水調節容量が不足して異常洪水時防災操作を実施する規模の洪水（以下、簡略的に「大規模洪水」とする。）に対してのみ操作が行われ、台風 6 号のような中小規模洪水に対しては操作を実施しないことが望ましい。

本章ではその時々々の気象状況に合わせた予測不確実性を定量的に評価できるアンサンブル予測雨量を用いることで、大規模洪水に対してのみ洪水貯留準備水位からの事前放流操作が実施され、中小規模洪水に対しては操作が回避されることが期待されたが、本章においてはその結果は得られなかった。中小規模洪水に対して洪水貯留準備水位からの事前放流操作が実施された事例については、既往研究においても確認されている（臼谷・中津川，2010；三石ら，2011b；Saavedra *et al.*, 2010）。中小規模洪水に対して洪水貯留準備水位からの事前放流操作を回避することは、ダム管理所の負担軽減の観点から重要であると考えられるため、今後本章で提案した手法を改良する必要がある。手法の改良方針の一つとして、例えば「洪水貯留準備水位からの事前放流操作は、操作規則に基づく操作を実施した場合の貯水位が洪水時最高水位を超過する確率が20%より大きい場合にのみ実施する。」といった条件を追加し、できるだけ大規模洪水に対してのみ操作が行われるようにすることが考えられる。

2点目は、煩雑なゲート操作開閉が行われている点である。図5.23の②及び⑦において、7月18日19時から7月19日1時にかけて洪水貯留準備水からの事前放流操作を実施、中止、再実施、中止、という経過をたどっており、煩雑なゲート開閉操作が行われている。洪水貯留準備水位からの事前放流操作は、操作の実施そのものがダム管理所の負担を増やすものであるため、大規模洪水に対してのみ操作が行われ、中小規模洪水に対しては操作が行われないのが望ましいことについては上述した通りである。これに加え、煩雑なゲート開閉操作についても極力回避することでダム管理所の負担軽減を図るべきであると考えられる。ここで、台風6号のシミュレーションにおいて煩雑なゲート開閉操作が行われた要因について述べる。図5.24は、台風6号において洪水貯留準備水位からの事前放流操作を開始した7月18日19時に計算された貯水位が洪水時最高水位を超過する確率及び貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率を示したものである。この時、操作規則に基づく操作における貯水位が洪水時最高水位を超過する確率が5%存在し、それ以外の操作である事前1から事前5については同確率がゼロであったため、事前1から事前5の中で最も事前放流量（体積）が小さい事前1が選択されることとなった。その結果として図5.23に示されているように7月18日19時から洪水貯留準備水位からの事前放流操作が開始された。しかしこの後21時時点での計算では、操作規則に基づく操作においても貯水位が洪水時最高水位を超過する確率がゼロとなったため操作規則に基づく操作に戻すこととなり、更にその1時間後である22時時点の計算では、再度操作規則に基づく操作のみ貯水位が洪水時最高水位を超過する確率が5%となったために事前1での操作に戻した。結果的に、洪水貯留準備水位からの事前放流操作を開始した19時から数時間の間に煩雑なゲート開閉操作が行われたことになる。事前1による操作を実施する判断となった19時時点及び操作規則に基づく操作に戻す判断となった21時時点の操作規則に基づく操作による貯水位予測計算結果を図5.25に示す。19時時点では1つのメンバーが洪水時最高水位を超過する予測となっているのに対し、21時時点ではそのメンバーが洪水時最高水位をわずかに下回っており、この結果から操作規則に基づく操作でも貯水位が洪水時最高水位を超過することはないと予測されたため、事前1から操作規則に基づく操作に変更となった。流出計算の入力として用いているアンサンブル予測雨量は、19時時点と21時時点で同じ7月18日15時の予測初期時刻のもの

を用いているため、流出計算に用いている土研モデルの初期条件が計算を実施した 19 時時点と 21 時時点で異なっていることがこの計算結果の差及び煩雑なゲート開閉操作の主要因と推察される。

以上、洪水貯留準備水位からの事前放流操作について本章で提案した手法について、シミュレーション結果から分かった 2 つの課題について述べた。今後、洪水貯留準備水位からの事前放流操作について見いだされた上記 2 課題に加え、今回のシミュレーション結果からは明確な課題が見いだされなかった活用水位からの事前放流操作及び特別防災操作と併せて、気象庁のアンサンブル予測雨量（気象庁予報部，2016）を用いた精度評価及び本章で示した手法への適用を通じ、より合理的な操作決定方法について検討が必要である。

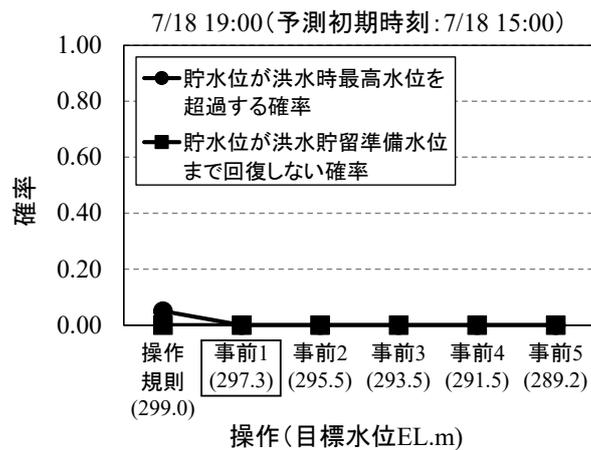


図 5.24 7 月 18 日 19 時時点の、操作候補毎の「貯水位が洪水時最高水位を超過する確率」及び「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率」

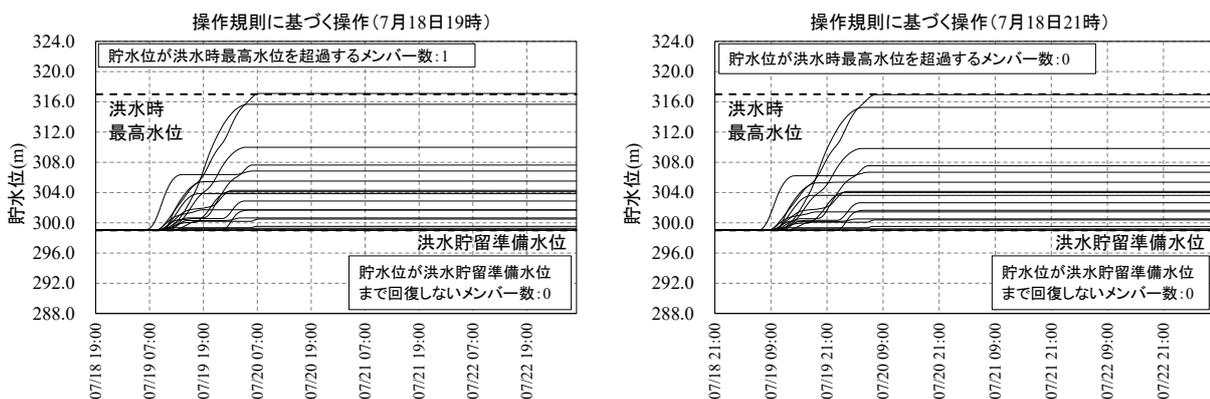


図 5.25 操作規則に基づく操作による貯水予測計算結果（左：7 月 18 日 19 時，右：7 月 18 日 21 時）

5. 6. 4 許容されるリスクについて

本章では、アンサンブル予測雨量を特別な処理は行わず、そのまま分布型流出計算に入力することとした。得られた流出計算結果を基に、活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作について、実施する操作を操作候補の中から選

択する際に、それぞれ定義したリスクがゼロである操作候補を選択することとしたが、これはリスクを全く許容しない堅実、安全な操作となっている。この考え方は一定の合理性を有すると考えられるものの、例えば洪水貯留準備水位からの事前放流操作においては、「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率を 10%までは許容する」といった、「実施する操作の選択に当たって許容されるリスク」を設定することも考えられる。

既往研究では既に述べた通り、過去の予測雨量と実績値の比較を通じて予測雨量を利用する際に見込むべき誤差率を設定する事例がある。一つは、過去の予測雨量と実績値から得られる予測雨量の誤差について確率分布を当てはめた後、気象庁の予報円の考え方を援用し、得られた確率分布を基に予測雨量の値に対して 70%の確率で実績雨量が収まる範囲を示した事例である（臼谷・中津川，2010）。また、予測雨量の誤差率に対して確率分布を当てはめた後、1/100 や 1/200 といった河川の治水安全度で用いられる確率を発生確率として確率分布に対して入力し、得られた誤差率を予測雨量を用いる上で見込むべき上限値とすると、ダム管理上の実務に耐えうる比較的良好な精度が得られるとしている事例もある（三石ら，2011a）。上記既往研究では、予測雨量を利用するに当たって、予測雨量の誤差に対してリスクを見込んでいると言える。これらの手法で示されたリスクの考え方をアンサンブル予測雨量に対して援用しようとするならば、得られたアンサンブル予測雨量に対して確率分布を当てはめた後、上述した既往研究と同様に 70%や 1/100, 1/200 といった確率を与えて確率雨量を算出することが考えられる。しかしアンサンブル予測雨量に対して確率分布を当てはめる場合、メッシュ毎にアンサンブルメンバーの数だけ得られた雨量値に対して確率分布を当てはめることは、リアルタイムでの運用を想定した場合、処理の煩雑さを増やしてしまう。また各アンサンブルメンバーについて流域平均雨量を算出し、アンサンブルメンバーの数だけ得られた流域平均雨量に対して確率分布を当てはめることも考えられるが、分布型流出計算に入力するためには流域平均雨量として得られた確率雨量値をメッシュ毎の雨量値に変換する必要がある。この際、アンサンブルメンバーそれぞれが持つ雨量の空間分布を考慮しながら確率雨量値をメッシュ毎の雨量値に変換することを別途考慮する必要がある。また、アンサンブル予測雨量をメッシュ値で扱う場合においても流域平均雨量値で扱う場合においても、適合度の高い頻度分布やパラメータが予測初期時刻毎に変化することも想定される。この場合、予測初期時刻毎に適合度の高い確率分布を探索しパラメータを設定する必要があるが、リアルタイムでの運用を想定した場合にやはり処理の煩雑さを招いてしまう。このようにアンサンブル予測雨量を用いる場合、「雨量に対してリスク」を見込むことは、上述した通りリアルタイムでの運用における煩雑さや分布型流出モデルへの入力といった観点から課題があると考えたため、本章ではアンサンブル予測雨量については確率処理等を行わずにそのまま分布型流出計算に入力することとした。その結果として、本節の冒頭に記載した通り「実施する操作の選択に当たって許容されるリスク」を設定する必要性が生じることとなった。本章のように、アンサンブル予測雨量を用いて操作に関するリスクについて研究した事例は著者が知る限りこれまでにないため、合理的な根拠に基づく許容されるリスクの設定方法について今後の検討が必要である。

5.6.5 利水回復操作

本章で実施したアンサンブル予測雨量を用いた洪水貯留準備水位からの事前放流操作については、対象とした2洪水においては利水容量が回復しないということにはなかった。しかしこれは、実際に洪水が発生した事例を対象としているため当然の結果である。その一方で1.で述べた通り、アンサンブル予測雨量はイベントによっては全てのメンバーが観測値から外れることがあり、特に5.5.2 1)で述べた通り、台風6号においては全てのアンサンブルメンバーが過大予測（空振り）する予測初期時刻が存在した。洪水調節開始前においてこのような空振りの予測が発生し、その予測に基づいて洪水貯留準備水位からの事前放流操作が実施された場合、利水容量が回復しない恐れがある。このような状況になった場合、利水容量を回復するための操作（利水回復操作）が求められると考えられる。本章で対象としたイベントは実際に洪水が発生した場合であったため利水回復操作の必要性はなかったが、利水回復操作の具体的な検討にあたってはアンサンブル予測雨量が空振りした事例を対象とする必要がある。洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施する際のリスクの一つである利水容量が回復しないことに対する不安を軽減するためにも、利水回復操作の具体的な考え方を準備しておくことは、洪水貯留準備水からの事前放流操作を今後適切・安定的に実施する上で重要である。

5.7 まとめ

本章のまとめを以下に示す。

- 誤差が不可避であり、かつ確からしさが不明確である確定的な予測雨量を用いて操作の実施判断を行っていた活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作それぞれについて、操作実施に係るリスクを定義し、アンサンブル予測雨量を用いたリスクの定量化及び操作決定方法を示した。
- 過去発生した2つの洪水に対してアンサンブル予測雨量を用いた操作決定方法を適用した結果、洪水の開始から終了まで、貯水位、流入量、下流地点水位の状況に応じて上記3操作が適切に選択・実施されることが確認され、方法の妥当性を示すことができた。
- 本章では洪水調節容量を有する多目的ダムを対象としているが、アンサンブル予測雨量を用いた活用水位からの事前放流操作の操作決定方法については、予備放流方式を採る利水ダムにも適用可能と考えられる。
- 気象庁のアンサンブル予測の精度評価と本章で示した手法への適用性評価、その結果を踏まえた操作方法の条件設定の改良、許容されるリスクの考え方、利水回復操作への適用が今後の課題として挙げられる。またアンサンブル予測雨量については、豪雨のようなメソスケール現象を表現できる時空間分解能を有しつつ、予測先行時間が長いアンサンブル予測雨量が利用可能となることが望まれる。

参考文献：

Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 28(4): 1015-1031. DOI: 10.1029/91WR02985.

- 猪股広典・深見和彦 2007. 吉野川流域広域水危険度判断支援システムの開発. 河川技術論文集 13: 433-438.
- 猪股広典・川崎将生・後藤祐輔・増田有俊・荒木千博・荒木孝之 2015. 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 28(6): 278-290. DOI: 10.3178/jjshwr.28.278.
- Inomata H, Kawasaki M, Kudo S 2018. Quantification of the risks on dam preliminary release based on ensemble rainfall forecast and determination of operation. *Journal of Disaster Research* 13(4): 637-649. DOI: 10.20965/jdr.2018.p0637.
- 気象庁予報部 2016. 確率的な気象予測のためのアンサンブル予報の課題と展望. 数値予報課報告 別冊第 62 号: 93-113.
- 北田悠星・菊地慶・岡部真人・山田正 2010. 気象庁の降水短時間予報を用いて既存のダムの洪水調節機能を向上させる手法の提案. 水工学論文集 54: 523-528.
- 木谷和夫・増田有俊・野原大督・角哲也 2018. ECMWF アンサンブル予測雨量の予測特性及びダム運用への活用方法に関する基礎的検討. 土木学会論文集 B1 (水工学) 74(5): 1321-1326. DOI: 10.2208/jscejhe.74.5_I_1321.
- 国土交通省 2003. “ダムの弾力的管理試験の手引き (案)”. https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam5/pdf/danryokukanri_tebiki.pdf (参照: 2019/10/30).
- 国土交通省 2014. “河川砂防技術基準維持管理編 (ダム編)”, https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/ijikanri_dam/pdf/ijikanri_dam.pdf. (参照: 2019/08/31).
- 国土交通省 2017a. “ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向けたダム操作規則等点検要領及び同解説”. https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam7/pdf/damsousakisokutenkenyoryoH29.pdf (参照: 2019/11/03).
- 国土交通省 2017b. “ダム再生ビジョン”. <https://www.mlit.go.jp/common/001190127.pdf> (参照: 2019/10/27).
- 国土交通省 東北地方整備局 最上川ダム統管理事務所 2020. “前線及び低気圧に伴う出水における寒河江ダム・白川ダム・長井ダムの防災操作 (洪水調節) 効果について”. http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/kisya/kisyah/images/68049_1.pdf (参照: 2021/05/16)
- 九頭竜川ダム統管理事務所 2020. “真名川ダム弾力的管理検討委員会”. <https://www.kkr.mlit.go.jp/kuzuryu/managawa/danryoku/index.html> (参照: 2020/03/20).
- 三春ダム管理所 2020. “新たなダム管理の取組”. <http://www.thr.mlit.go.jp/miharu/introduction/work/effort.html> (参照: 2020/03/20).
- 三石真也・角哲也・尾関敏久・矢神卓也 2011a. 降雨予測を活用したダム洪水調節におけるリスク管理に関する研究. *ダム工学* 21(4): 242-250. DOI: 10.11315/jsde.21.242.
- 三石真也・尾関敏久・角哲也 2011b. 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 24(2): 110-120. DOI: 10.3178/jjshwr.24.110.
- 中津川誠 2014. 5. 気象・水文情報を利用した既存ダムの機能向上策について. *天気* 61: 648-657.

- Nohara D, Nishioka Y, Hori T, Sato Y 2015. Real-time reservoir operation for flood management considering ensemble streamflow prediction and its uncertainty. In *Advances in Hydroinformatics: SYMHYDRO 2014*, Gourbesville P, Cunge JA, Caignaert G (ed). Springer: 333-347. DOI: 10.1007/978-981-287-615-7_23.
- Saavedra O, Koike T, Yang K, Graf T, Li X, Wang L, Han X 2010. Decision support for dam release during floods using a distributed biosphere hydrological model driven by quantitative precipitation forecasts. *Water Resources Research* 46(10): W10544. DOI: 10.1029/2010WR009502.
- 下坂将史・呉修一・山田正・吉川秀夫 2009. 既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案. 土木学会論文集 B_65(2): 106-122. DOI: 10.2208/jscejb.65.106.
- 戸谷英雄・秋葉雅章・宮本守・山田正・吉川秀夫 2006. ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案. 土木学会論文集 B_62(1): 27-40. DOI: 10.2208/jscejb.62.27.
- Ushiyama T, Sayama T, Iwami Y 2016. Ensemble flood forecasting of typhoons Talas and Roke at Hiyoshi Dam Basin. *Journal of Disaster Research* 11(6): 1032-1039. DOI: 10.20965/jdr.2016.p1032.
- 臼谷友秀・中津川誠 2010. 積算予測雨量に基づいた融雪機におけるダムの洪水調節機能の向上について. 土木学会論文集 B_66(3): 268-279. DOI: 10.2208/jscejb.66.268.
- Wang X, Baker DM, Snyder C, Hamill TM 2008a. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment. *Monthly Weather Review* 136: 5116-5131. DOI: 10.1175/2008MWR2444.1.
- Wang X, Baker DM, Snyder C, Hamill TM 2008b. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part II: Real observation experiments. *Monthly Weather Review* 136: 5132-5147. DOI: 10.1175/2008MWR2445.1.

第6章 アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作における予測先行時間延長の効果

6.1 はじめに

第5章において、弾力的管理における活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作それぞれについて、操作実施に係るリスクを定義し、アンサンブル予測雨量を用いたリスクの定量化及び操作決定方法を示した。第4章及び第5章においては、主として異常洪水時防災操作を実施する規模の大きな洪水を対象としてアンサンブル予測雨量を用いた洪水貯留準備水位からの事前放流操作（以下、「事前放流操作」）に関する操作決定方法について検討を行った。また第5章においては、検討に用いたアンサンブル予測雨量の予測先行時間は39時間とした。これは、実務において利用が想定される気象庁のメソアンサンブル予測の予測先行時間が39時間であるためである。しかし、予測先行時間39時間では事前放流操作において設定された目標水位まで貯水位を低下させることができなかった事例が第5章の事例において確認され、39時間という予測先行時間は十分ではないことが考えられる。そのため、より予測先行時間の長いアンサンブル予測雨量を用いることが望ましいと考えられる一方で、39時間予測よりも長い予測先行時間のアンサンブル予測を用いることがどのようなメリット・デメリットをもたらすかについては具体的に把握されていない。今後気象庁のメソアンサンブル予測の予測先行時間が延長された場合、そのメソアンサンブル予測を実際のダム管理において用いることも想定されるため、予測先行時間延長によるメリット・デメリットを予め把握しておくことは実管理での利用において重要であると考えられる。また、事前放流操作を実施しない操作規則に則った操作（以下、「操作規則に基づく操作」）で操作した場合において異常洪水時防災操作を実施する規模の洪水（以下、「大規模洪水」）に対してのみ事前放流操作が適切に実施されることが望ましい一方で、操作規則に基づく操作を実施した場合に異常洪水時防災操作を必要としない規模の洪水（以下、「中小規模洪水」）に対しては実施されないことが望ましいため、大規模洪水だけでなく中小規模洪水も含めて提案手法の適用性を検証する必要がある。上記に鑑みて、本章では以下の2点について検討を行う。

- アンサンブル予測の予測先行時間が39時間から延長された場合の効果の把握
- 大規模洪水だけでなく中小規模洪水も含めた複数洪水に対する提案手法の適用性の検証

本章での検討内容は、中小規模洪水を含む複数洪水を対象として事前放流操作について検討する点については野原ら（2020）と同様であるが、野原ら（2020）は利水ダムを対象とするのに対して、本研究では洪水調節容量を有する多目的ダムを対象とする点で異なる。

6.2 検討対象洪水、アンサンブル予測雨量の概要、流出計算モデルについて

本章では、複数ダム・複数洪水を対象として、4章及び5章で述べた提案手法（Inomata *et*

al., 2018 ; 工藤ら, 2017 ; 猪股ら, 2021 ; 工藤ら, 2021) を用いる。提案手法においては、アンサンブル予測雨量を流出計算モデルに入力することで得られるアンサンブルの予測流入量を基にして事前放流操作の目標水位を決定、放流を実施するものである。本節では、検討対象ダムと緒元、検討対象洪水について述べた後、提案手法において用いるアンサンブル予測雨量の計算方法の概要、流出計算モデルについて述べる。次節において、本章において用いる提案手法の概要及び事前放流操作シミュレーションの概要について述べる。

6.2.1 検討対象ダムと諸元

検討対象ダムは、A ダム及びB ダムである。両ダムの諸元を表 6.1 に示す。なお、A ダム、B ダムともに洪水期制限水位方式のダムである。

表 6.1 A ダム及びB ダムの諸元

項目	A ダム	B ダム
流域面積	約 290 km ²	約 80 km ²
洪水期の洪水調節容量	42,000,000 m ³	17,000,000 m ³
利水容量 (不特定容量)	16,000,000 m ³ (9,600,000 m ³)	12,400,000 m ³ (5,500,000 m ³)
洪水として扱われる基準となる流量 (以下, 洪水流量)	150 m ³ /s	200 m ³ /s
洪水調節開始流量	150 m ³ /s	350 m ³ /s
洪水調節方式	150 m ³ /s の一定量放流	350 m ³ /s の一定量放流
洪水時最高水位, 異常洪水時防災操作開始水位, 洪水貯留準備水位, 最低水位	201.0 m, 200.2 m, 178.5 m, 164.4 m 異常洪水時防災操作開始水位は, 洪水調節容量の 9.5 割に相当する水位	317.0 m, 313.6 m, 299.5 m, 276.0 m 異常洪水時防災操作開始水位は, 洪水調節容量の 8.0 割に相当する水位
利水放流バルブ放流能力	13.6 m ³ /s 発電は利水に従属	9.0 m ³ /s 発電は利水に従属

6.2.2 検討対象洪水

検討対象洪水は平成 23 年台風 6 号, 12 号, 15 号, 平成 25 年台風 18 号, 平成 27 年台風 18 号の合計 5 洪水 (以下, それぞれ H23T6, H23T12, H23T15, H25T18, H27T18 と記す) を対象とする。各洪水における A ダム及び B ダムにおける洪水調節操作の実施状況 (異常洪水時防災操作の実施状況含む) について表 6.2 に示す。2 ダムについてそれぞれ 5 事例, 合計で 10 事例が検討対象洪水である。そのうち 2 事例 (A ダムの H25T18 及び B ダムの H23T12) が異常洪水時防災操作を実施した大規模洪水であり, その 2 事例を除いた 8 事例が中小規模洪水である。

表 6.2 検討対象洪水一覧及び A ダム及び B ダムにおける洪水調節操作実施実績

洪水		A ダム	B ダム
1	H23T6	洪水調節操作を実施 (最大流入量：310 m ³ /s)	洪水調節操作を実施 (最大流入量：655 m ³ /s)
2	H23T12	洪水調節操作を実施 (最大流入量：391 m ³ /s)	異常洪水時防災操作を実施 (最大流入量：752 m ³ /s)
3	H23T15	洪水調節操作を実施 (最大流入量：487 m ³ /s)	洪水調節操作を実施 (最大流入量：527 m ³ /s)
4	H25T18	異常洪水時防災操作を実施 (最大流入量：1,661 m ³ /s)	洪水調節操作を実施 (最大流入量：644 m ³ /s)
5	H27T18	流入量が洪水調節開始流量に至らなかったため、洪水調節操作は不実施	

6.2.3 アンサンブル予測雨量の計算の概要

アンサンブル予測雨量の計算方法は、3章において記したものをを用いる。以下に、その概要を記す。

1) 使用した計算モデル、境界条件、アンサンブル予測計算の更新頻度

気象庁 GSM の 84 時間予測を初期値・境界値として、WRF (Weather Research and Forecasting Model) により計算する。各台風について 2) で示す計算対象期間について、GSM (領域：全球、空間解像度：50 km、予測更新間隔：6 時間毎 (03, 09, 15, 21 JST)、予測先行時間：84 時間、時間解像度：毎時) の予測が更新される毎にその予測値を境界値として予測計算を行う。GSM の予測が更新される 6 時間毎にアンサンブル予測雨量の計算を行うため、アンサンブル予測雨量は 1 日 4 回更新される。

2) 計算対象期間

H23T6：2011 年 7 月 15 日 9 時～7 月 20 日 9 時 (21 初期時刻)

H23T12：2011 年 8 月 29 日 9 時～9 月 4 日 9 時 (25 初期時刻)

H23T15：2011 年 9 月 16 日 9 時～9 月 21 日 15 時 (22 初期時刻)

H25T18：2013 年 9 月 13 日 3 時～9 月 16 日 21 時 (16 初期時刻)

H27T18：2015 年 9 月 7 日 3 時～9 月 9 日 21 時 (12 初期時刻)

3) データ同化、計算に用いた物理過程、データ同化に用いた観測データ

予測に用いる初期値は、その時点よりも 6 時間前に行った予測計算結果および観測値を基に Hybrid ETKF-3DVAR 法 (Wang *et al.*, 2008a; 2008b) によるデータ同化を行った。WRF によるシミュレーションにおいて採用した物理過程およびデータ同化に用いた観測データ一覧については第 3 章と同様である。

4) 計算領域、空間解像度

計算領域については図 6.1 に示し、空間解像度は親領域において 15 km、子領域において 5 km である。鉛直層の数は親領域、子領域共に 50 層である。

5) 予測先行時間、配信時間遅れの考慮、アンサンブルメンバー数

- 予測先行時間

アンサンブル予測雨量の計算としては 1)で述べた通り GSM の予測先行時間である 84 時間の計算を実施するが、6.3 以降で述べるシミュレーションでの利用にあたっては、気象庁が現業化しているアンサンブル予測の予測先行時間が 39 時間であること（気象庁予報部，2016）及び、39 時間から予測先行時間が 24 時間延長されて 63 時間になった場合を仮定し、予測初期時刻から 39 時間及び 63 時間分のアンサンブル予測雨量を、計算された 84 時間予測から切り出して用いることとする。また、アンサンブル予測計算結果は境界条件である GSM の予測初期時刻において直ちに入手できず数時間遅れて入手できるものとし、本研究においては予測計算結果の入手は予測初期時刻から 4 時間後として設定した。すなわち、39 時間予測及び 63 時間予測について予測情報入手時点で利用できる時間は、予測先行時間から配信遅れ時間である 4 時間を引いた 35 時間及び 59 時間となる。

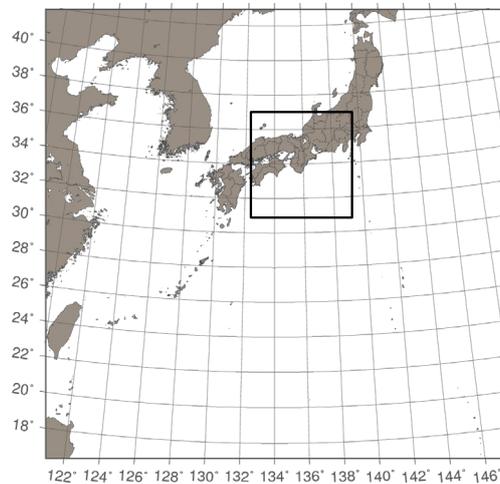


図 6.1 アンサンブル予測雨量の計算領域（全体が親領域，太枠内が子領域）
（猪股ら，2015）

- アンサンブルメンバー数

計算機資源及び気象庁のメソアンサンブルで採用されているアンサンブル数が 21 であること（気象庁予報部，2016）等を考慮し，20 とした。

6.2.4 流出計算モデル

6.2.3 で計算されるアンサンブル予測雨量を入力する流出計算モデルは，土研分布型流出モデルを用いた。モデルパラメータについては，A ダム及び B ダムそれぞれについて SCE-UA 法（Duan *et al.*, 1998）により自動最適化を行った（Inomata *et al.*, 2018；猪股ら，2021）。

6.3 アンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作シミュレーションにおける計算条件と事前放流操作の決定方法

ここでは，6.2 で述べたアンサンブル予測雨量及び流出計算モデルを用いた対象洪水における事前放流操作シミュレーションの計算条件について，事前放流操作の決定方法を交えて

述べる。

6.3.1 事前放流操作シミュレーションのフロー

図 6.2 は、本章で実施する事前放流操作シミュレーションのフローである。シミュレーションの計算時間間隔は 1 時間である。

- ① 時間更新に伴い、流入量が洪水調節開始流量を下回っているかを確認する。
- ② ①において、流入量が洪水調節開始流量を下回っていた場合、更新されたアンサンブル予測雨量が入手されるか確認する。ここで「更新されたアンサンブル予測雨量」とは、アンサンブル予測雨量の境界条件で用いられる GSM が更新されたタイミングではなく、アンサンブル予測計算に要する時間等を考慮して GSM の更新から配信遅れ時間である 4 時間後に入手されたアンサンブル予測雨量であることを意味する。更新されたアンサンブル予測雨量が無い場合、前時刻において事前放流操作を実施中である場合は前時刻における放流量で操作し、前時刻において事前放流操作を実施していない場合は流入量と同じ流量を放流する。
- ③ ②において更新されたアンサンブル予測雨量がある場合、6.3.2 で述べる事前放流操作における貯水位低下の目標となる水位（以下、「目標水位」）を設定する。さらに、目標水位まで貯水位低下を行う際の放流量を、6.3.3 で述べる方法により設定する。

図 6.2 は洪水調節操作開始前までのフローであり、①において流入量が洪水調節開始流量を上回った時点で表 6.1 に示す洪水調節操作が実施される。

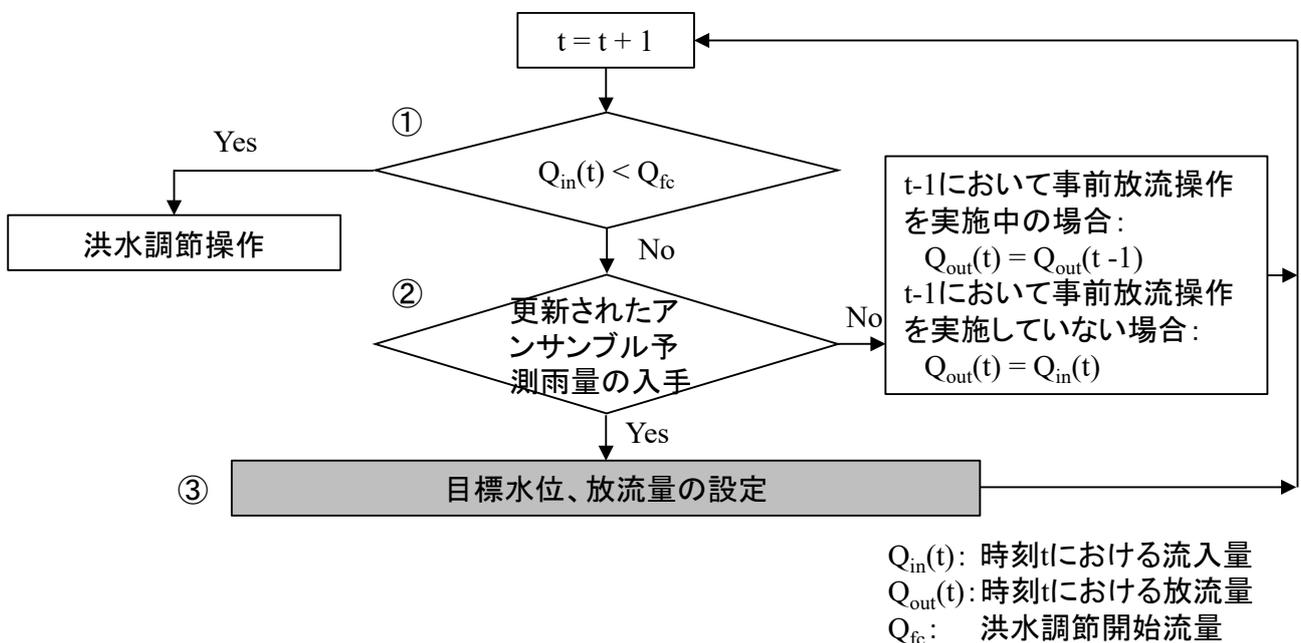


図 6.2 事前放流操作シミュレーションのフロー

6.3.2 目標水位の設定方法

本章では、既往研究において提案した手法（Inomata *et al.*, 2018；工藤・川崎，2017；猪股ら，2021）を基に、図 6.2 の③における目標水位の設定方法について述べる。最初に 1)にお

いて事前放流操作に係るリスクを定義し、次に、1)において定義したリスクの定量化方法及び目標水位の設定方法を 2)において示す。事前放流操作における放流量の設定方法については次項において述べる。

1) 事前放流操作実施に係るリスクの設定

事前放流操作実施に係るリスクとして、大規模出水時に事前放流操作を実施しなかった、または事前放流量が少なかった場合に異常洪水時防災操作を実施すること、言い換えると「貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過するリスク」と、事前放流操作を実施したものの実積雨量と比較して予測雨量が過大だった場合に利水容量が回復しない、言い換えると「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しないリスク」という 2 つのリスクを定義する。

2) 事前放流操作における目標水位の決定

ここでは、アンサンブル予測雨量を用いて 1)で示した 2 つのリスクの定量化方法及び事前放流操作における目標水位の設定方法を示す。

ステップ 0：複数の事前放流水位の設定

A ダム、B ダムそれぞれの不特定容量を対象として 5 種類の事前放流量を設定し、それぞれの事前放流量を洪水貯留準備水位における容量から差し引いた 5 種類の水位を、事前放流水位として設定する。ここで、事前放流量は流量ではなく体積の次元を持つことに留意が必要である。

A ダムにおいては、2,000,000 m³、4,000,000 m³、6,000,000 m³、8,000,000 m³、9,600,000 m³、B ダムにおいては、1,100,000 m³、2,200,000 m³、3,300,000 m³、4,400,000 m³、5,500,000 m³ のそれぞれ 5 種類を事前放流量として設定する。これらの事前放流量を洪水貯留準備水位における貯水量からそれぞれの事前放流量を差し引いた時の水位を事前放流水位 1～5 とする。事前放流水位 1～5 は、A ダムにおいては EL. 177.3 m, 175.9 m, 174.4 m, 172.8 m, 171.1 m となり、B ダムにおいては EL. 297.3 m, 295.5 m, 293.5 m, 291.5 m, 289.2 m となる。なお、事前放流水位 5 は、それぞれのダムの不特定容量を全て放流した際の貯水位となる。

ステップ 1：アンサンブル予測雨量の計算

アンサンブル予測雨量の境界条件として用いる GSM が更新されたタイミングにおいて、6.2.3 で示した手法によりアンサンブル予測雨量を計算する。

ステップ 2：アンサンブル予測流入量の計算

得られたアンサンブル予測雨量を 6.2.4 で述べた A ダム及び B ダムそれぞれに構築した流出計算モデルに入力することでアンサンブル予測流入量を取得する。

ステップ 3：事前放流水位毎の洪水調節計算

ステップ 0 で定めた 5 種類の事前放流水位に、操作規則に基づく操作における貯水位である洪水貯留準備水位を加えた 6 種類を初期貯水位として、アンサンブル予測流入量を入力と

した洪水調節計算を行う。ここで、洪水調節操作は 6.2.1 で述べた洪水調節方式に従うものとする。図 6.3 はアンサンブル予測流入量を入力として実施した洪水調節計算で得られた予測貯水位の概念図であり、ここではこの洪水調節計算を 6 種類の初期貯水位それぞれについて実施することとなる。

洪水調節操作が終了した時点（流入量が計画最大放流量を下回った時点）で貯水位が洪水貯留準備水位に達していないアンサンブルメンバーについては、放流量を利水放流バルブの放流能力まで低下させることで貯水位回復を図るものとして計算する。また、予測流入量のピークが洪水量に到達しないアンサンブルメンバーについても、ピーク流入発生時点において貯水位が洪水貯留準備水位に達していない場合、ピーク流入量以降に放流量を利水放流バルブの放流能力まで低下させることにより貯水位回復操作を行うものとして計算する。

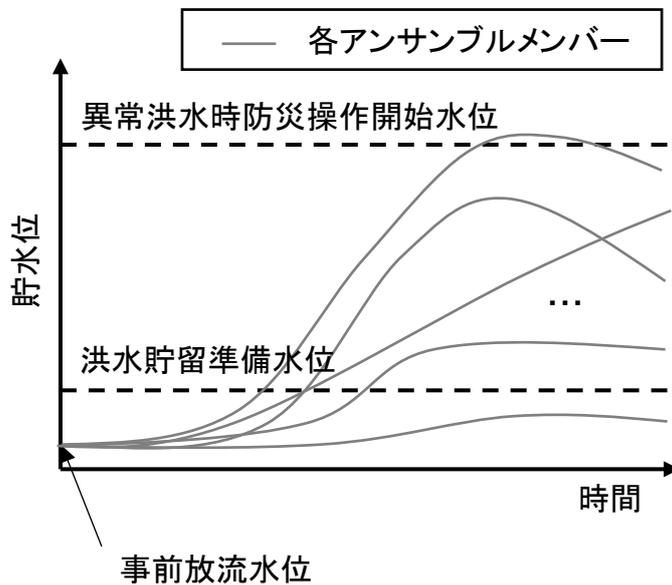


図 6.3 事前放流水位を初期貯水位とし、アンサンブル予測流入量を入力として実施した洪水調節計算で得られた予測貯水位の概念図

ステップ 4：リスクの定量化，目標水位の決定

ステップ 3 において 6 種類の初期貯水位についてそれぞれ実施した洪水調節計算の結果から、貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超えるメンバー数及び洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しないメンバー数をカウントする。この数を全メンバー数 (20) で割ることで得られる値を、「貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過する確率」及び「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率」と定義する。図 6.4 は、各初期貯水位（洪水貯留準備水位及び事前放流水位 1~5）について得られた異常洪水時防災操作開始水位を超過する確率及び貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率をプロットした概念図である。

ここでは、事前放流操作後に貯水位が洪水貯留準備水位まで回復することを優先させる観点から、貯水位が洪水貯留準備水位まで貯水位が回復しない確率をゼロとする事前放流水位の中から、貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過する確率を最小とする事前放流水位

を目標水位として選定する。この条件を満たす事前放流水位が複数存在する場合には、その中で事前放流量が最も小さい事前放流水位を目標水位として選択する。図 6.4 の概念図の例では、上記条件を満たす事前放流水位 3 が選定されることとなる。

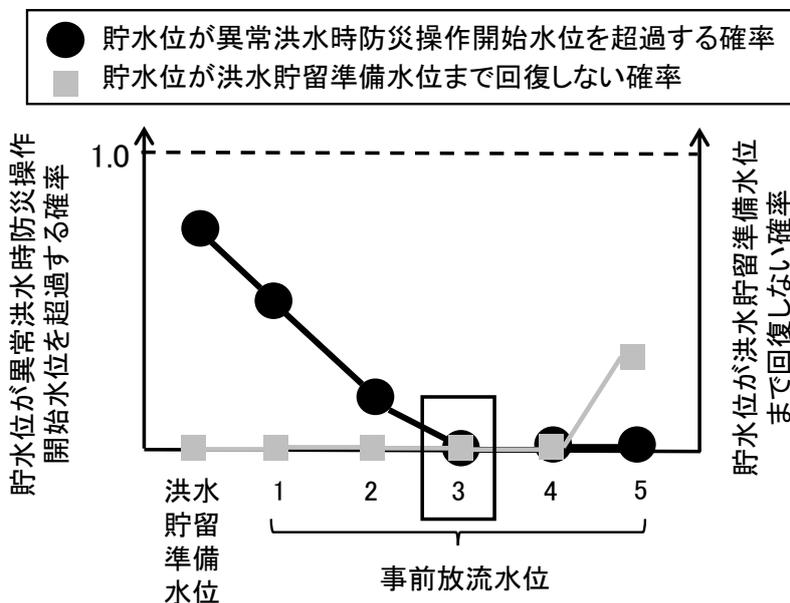


図 6.4 初期貯水位毎の「貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過する確率」及び「貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない確率」の概念図

6.3.3 目標水位まで貯水位を低下させる際の放流量の設定方法

前項において、目標水位の設定方法を述べた。ここでは、設定した目標水位まで貯水位を低下させる際の放流量設定の考え方について、39 時間予測を用いる場合と 63 時間予測を用いる場合に分けて述べる。

第 5 章においては、39 時間という予測先行時間は、事前放流操作の実施にあたって決して十分な予測先行時間ではないと考えられるため、平水時において放流可能な最大の放流量である洪水流量を事前放流操作における放流量として設定した。一方で、予測先行時間が延長されて 63 時間になった場合、洪水流量での放流以外にも放流方法が設定可能であると考えられる。ここでは、39 時間予測を用いる場合の放流量の考え方を 1 種類、63 時間予測を用いる場合の放流量の考え方を 4 種類の合計 5 種類の放流量の考え方を設定する。39 時間予測を用いる場合の放流量の考え方をケース 1、63 時間予測を用いる場合の 4 種類の放流量の考え方をケース 2-1、2-2、2-3、2-4 とし、5 ケースの考え方について以下に示す。いずれのケースにおいても、放流量の増加時は放流の原則に則って操作するものとする。また、以下に記す放流量の考え方及びシミュレーションフローは、いずれも洪水調節操作開始前までの操作について示すものであり、洪水調節操作開始以降はいずれのケースにおいても表 6.1 に示した操作規則に基づく操作を行う。

ケース 1 :

図 6.5 は、ケース 1 の放流量の設定方法について図 6.2 の「③目標水位，放流量の設定」の具体を示すフロー（図 6.2 の「②更新されたアンサンブル予測雨量の入手」に接続するフロー）を示したものである。以下概要を述べる。

- ① 39 時間予測のアンサンブル予測雨量を用いて 6.3.2 の手法により目標水位を検討する。
- ② ①の結果，洪水貯留準備水位以外の事前放流水位 1～5 のいずれかが目標水位として設定された場合，目標水位に関わらず洪水流量まで放流量を増加させて放流することにより貯水位低下を図る。最初に目標水位が示された際には巡視を行う。巡視が完了するまでは事前放流操作は実施しない。
- ③ ①の検討において洪水貯留準備水位が選択され事前放流操作を必要としない結果となった場合，事前放流操作は実施せずに流入量と同じ流量を放流する。

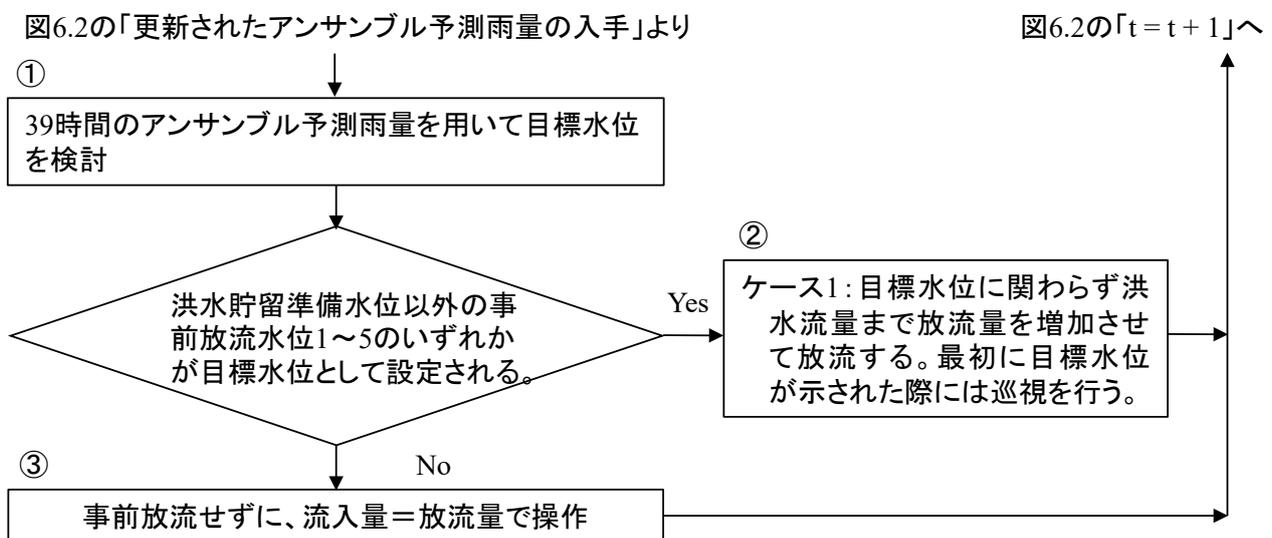


図 6.5 ケース 1 に関する事前放流操作シミュレーションフロー

ケース 2-1 及びケース 2-2 :

図 6.6 は、ケース 2-1 及びケース 2-2 の放流量の設定方法について図 6.2 の「③目標水位，放流量の設定」の具体を示すフロー（図 6.2 の「②更新されたアンサンブル予測雨量の入手」に接続するフロー）を示したものである。以下概要を述べる。ケース 2-1 及びケース 2-2 においては，下記①，③及び④は共通で，②において異なっている。

- ① 39 時間予測及び 63 時間予測のアンサンブル予測雨量を用いて，6.3.2 の手法により目標水位の検討を行う。
- ② 39 時間予測のアンサンブル予測雨量を用いた場合は洪水貯留準備水位が選定されるが，63 時間予測を用いると事前放流水位 1～5 のいずれかが目標水位として設定される場合，
 ケース 2-1：巡視を実施する。
 ケース 2-2：利水放流バルブの放流能力を事前放流操作の放流量として操作する。巡視は，利水放流バルブの放流能力による放流の最中に実施するものとする。
- ③ 39 時間予測において事前放流操作の目標水位が設定された場合には，巡視は実施済みと

して洪水流量まで放流量を増加させる。

- ④ ①の検討において39時間予測を用いる場合と63時間予測を用いる場合のいずれにおいても洪水貯留準備水位が選択され事前放流操作を必要としない結果となった場合、事前放流操作は実施せずに流入量と同じ流量を放流する。

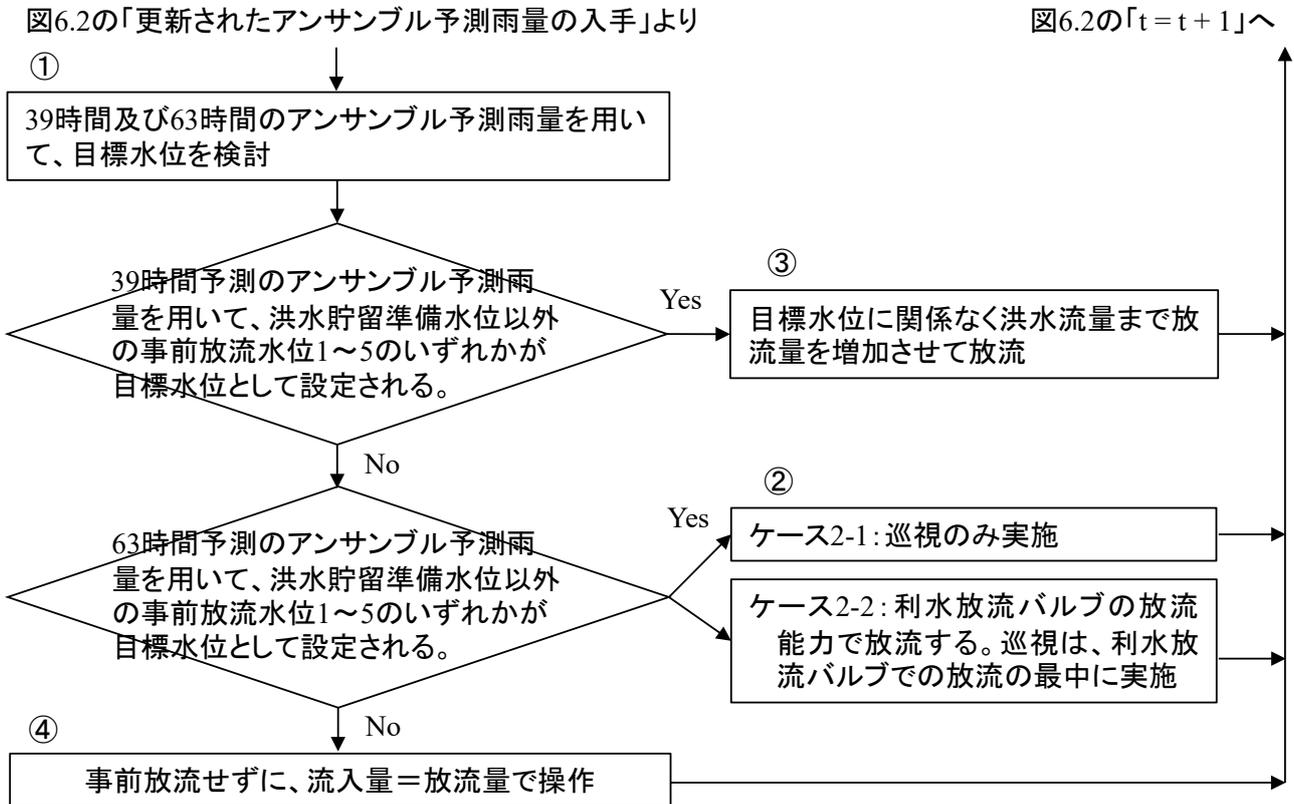


図 6.6 ケース 2-1 及び 2-2 に関する事前放流操作シミュレーションフロー

ケース 2-3 及びケース 2-4 :

図 6.7 は、ケース 2-3 及びケース 2-4 の放流量の設定方法について図 6.2 の「③目標水位、放流量の設定」の具体を示すフロー（図 6.2 の「更新されたアンサンブル予測雨量の入手」に接続するフロー）を示したものである。以下概要を述べる。ケース 2-3 及びケース 2-4 においては、下記①、③及び④は共通で、②において異なっている。

- ① 63 時間予測のアンサンブル予測雨量を用いて 6.3.2 の手法により目標水位を検討する。
- ② ①の結果、洪水貯留準備水位以外の事前放流水位 1～5 のいずれかが目標水位として設定された場合、ケース 2-4 においては目標水位に関わらず洪水流量で放流する。ケース 2-3 においては以下の手順により放流量を決定する。最初に目標水位が示された際には巡視を行う。巡視が完了するまでは事前放流操作は実施しない。
- 予測先行時間 63 時間のアンサンブル予測雨量と流出計算モデルから計算されるアンサンブル予測流入量を用いて洪水調節計算（計算の初期貯水位は洪水貯留準備水位）を行い、異常洪水時防災操作開始水位を超過するアンサンブルメンバーを抽出する。抽出さ

図6.2の「更新されたアンサンブル予測雨量の入手」より

図6.2の「t=t+1」へ

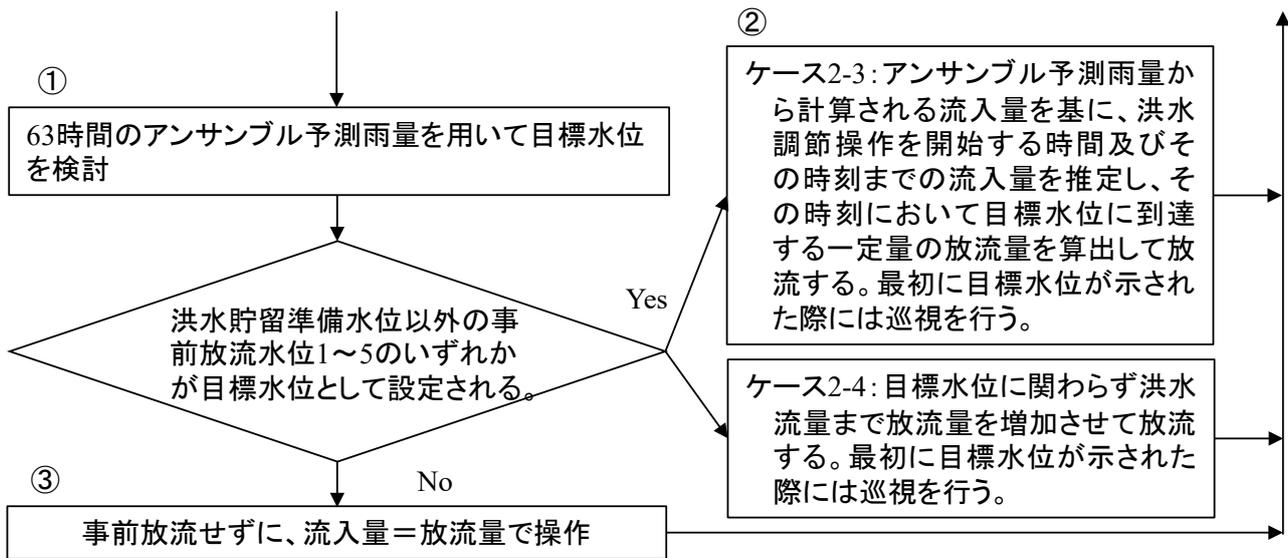


図 6.7 ケース 2-3 及び 2-4 に関する事前放流操作シミュレーションフロー

れた各アンサンブルメンバーについて、洪水調節操作が開始される時間及び洪水調節操作開始までの流入量の体積を求める。

- 異常洪水時防災操作開始水位を超過するアンサンブルメンバーについて得られた洪水調節操作が開始されるまでの時間及び洪水調節操作開始までの流入量の体積について、平均値を計算する (式(6.1)及び式(6.2))。
- 現時刻における貯水位と目標水位における貯水量の差と、上記で算出した流入量の体積の和を、洪水調節操作が開始されるまでの時間で割ることで放流量を決定し (式(6.3))、その放流量で操作する。得られた放流量の値が洪水流量よりも大きい場合、洪水流量で放流する。

$$T_{fco} = \left(\sum_{e=1}^{N_{fcoef}} T_{fco_e}(e) \right) / N_{fcoef} \quad \text{式(6.1)}$$

$$V_{fco} = \left(\sum_{e=1}^{N_{fcoef}} V_{fco_e}(e) \right) / N_{fcoef} \quad \text{式(6.2)}$$

$$Q_{out} = (V - V_{pr} + V_{fco}) / T_{fco} \quad \text{式(6.3)}$$

ここで、 T_{fco} : 洪水調節操作を開始すると予測される時間、 N_{fcoef} : 異常洪水時防災操作開始水位を超過するアンサンブルメンバー数、 $T_{fco_e}(e)$: 異常洪水時防災操作開始水位を超過するアンサンブルメンバー e が、洪水調節操作を開始すると予測される時間、 V_{fco} : 洪水調節操作開始までの流入量、 $V_{fco_e}(e)$: 異常洪水時防災操作開始水位を超過するアンサンブルメンバー e の洪水調節操作開始までの流入量 (体積)、 V : 任意時刻における貯水量、 V_{pr} : 目標水位における貯水量、 Q_{out} : 事前放流操作の放流量

③ ①の検討において洪水貯留準備水位が選択され事前放流操作を必要としない結果とな

った場合、事前放流操作は実施せずに流入量と同じ流量を放流する。

6.3.4 利水回復操作

6.3.1 のフローに従って事前放流操作を実施した後、洪水調節操作終了時点において貯水位が洪水貯留準備水位まで回復していない場合、放流量を利水バルブの放流能力まで低下させることで洪水貯留準備水位まで貯水位回復（不特定容量の回復）を図るものとする。

6.4 計算結果

6.3 で述べた手法を表 6.2 に示した対象洪水に対して適用した結果について述べる。最初は大規模洪水である A ダムの H23T6 及び B ダムの H25T18 に対する計算結果について述べた後、中小規模洪水に対する適用結果について述べる。

6.4.1 大規模洪水に対して 39 時間予測を用いた場合の計算結果

異常洪水時防災操作を実施した A ダムの H23T6 及び B ダムの H25T18 の結果を用いて、39 時間予測を大規模洪水に対して用いる場合の結果について述べる。図 6.8 及び図 6.9 は、A ダムの H23T6、B ダムの H25T18 における計算結果であり、39 時間予測の結果に着目するためケース 1 の結果のみについて示している。

A ダムにおいては、洪水調節開始の約 28 時間前から事前放流操作の目標水位が示され、巡視に引き続いて事前放流操作が実施された。洪水調節開始時点では、目標水位である事前放流水位 4 まで貯水位を下げ、洪水調節操作を開始することができた。その結果、最終的には異常洪水時防災操作を回避するまでには至らないものの、異常洪水時防災操作の開始を操作規則に基づく操作と比較して約 4 時間遅らせ、最大放流量も約 $310 \text{ m}^3/\text{s}$ 低下させた。B ダムにおいては、洪水調節開始の約 18 時間前に事前放流操作の目標水位が示され、巡視に引き続いて事前放流操作が実施された。洪水調節開始直前の目標水位は事前放流水位 5 であるが、その時点で貯水位は事前放流水位 2 を少し下回った程度であり、目標水位まで貯水位を低下させることができなかった。最終的には異常洪水時防災操作が必要となり、操作規則に基づく操作と比較して異常洪水時防災操作の開始を約 8 時間遅らせることができたが、最大放流量については操作規則に基づく操作と比較して低下させることはできなかった。

A ダムと B ダムの結果を比較すると、A ダムでは洪水調節操作開始時点で貯水位が目標水位まで到達しているのに対し、B ダムでは到達していないことが両者の違いとして挙げられる。その主要因は A ダム及び B ダムの流入波形の違いであると考えられる。A ダムにおいては操作規則に基づく操作において洪水調節開始後 12 時間程度で異常洪水時防災操作を開始するのにに対し、B ダムにおいては 27 時間程度経過してから開始される。6.3 で述べた事前放流操作決定方法では、事前放流操作の実施条件の 1 つとして「貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過する予測があること」が挙げられるため、A ダムのように洪水調節開始から異常洪水時防災操作開始までの時間が比較的短い場合、洪水調節操作の開始以前に異常洪水時防災操作の実施が予測された時点において、洪水調節操作開始までに比較的時間が残されている、すなわち事前放流操作を実施可能な時間が残されていると考えられる。その一方で、B ダムのように洪水調節操作開始から比較的長い時間が経過した後に異常洪水時防災操

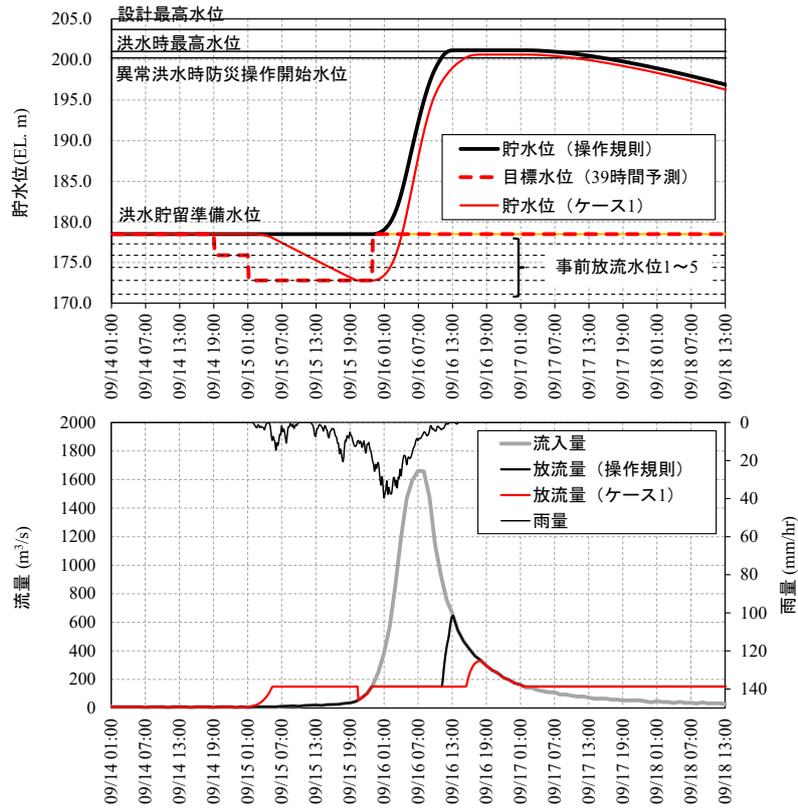


図 6.8 A ダムの事例 (H25T18, ケース 1 のみ)

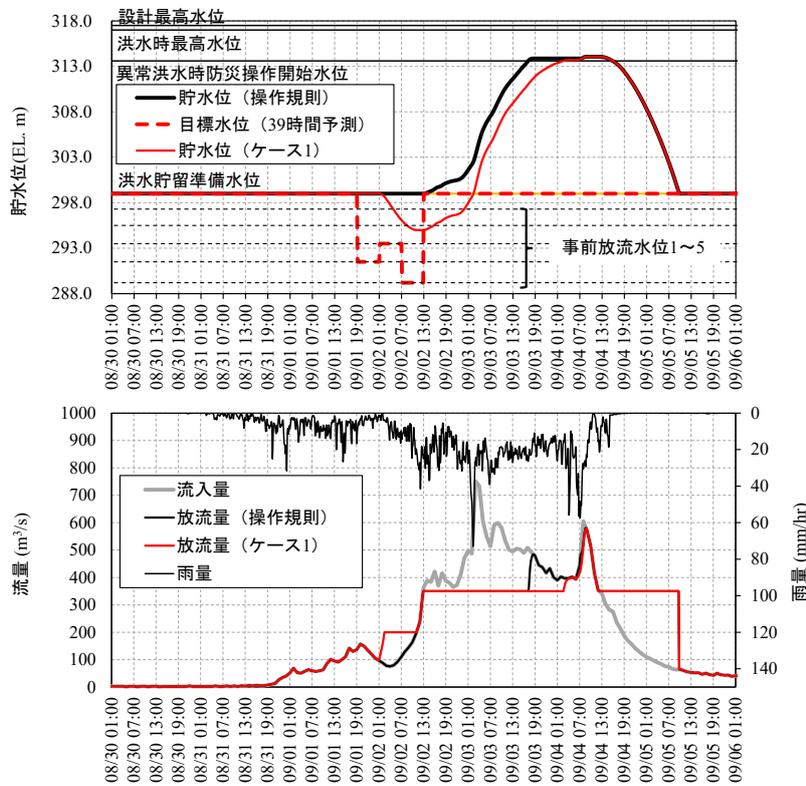


図 6.9 B ダムの事例 (H23T12, ケース 1 のみ)

作が開始される流入波形の場合、洪水調節操作開始以前に異常洪水時防災操作の実施が予測された時点において、既に洪水調節操作開始までに残された時間があまりない、すなわち事前放流操作を実施可能な時間があまり残されていない状況であると考えられる。次に事前放流操作実施時の流入量に着目すると、A ダムでは洪水調節操作の開始直前まで事前放流操作の放流量である洪水流量と比較して流入量が小さいため貯水位低下を行いやすいのに対し、B ダムにおいては事前放流操作の開始時点において、既に流入量が洪水流量の半分程度まで上昇していて貯水位低下を行いにくかったことが違いとして挙げられる。上記2点が洪水調節操作開始時点における貯水位の目標水位到達状況に違いをもたらした主要因と考えられ、A ダムの流入波形は B ダムの流入波形と比較して事前放流操作による貯水位低下を実施しやすい流入波形であったと言える。

以上より、39 時間予測でも十分な事前放流操作を実施できる場合もあるが流入量の波形に依存すると言え、流入量の波形への依存性を抑えた事前放流操作を実施するためには長時間の予測を用いて流入量が上昇してくる前に放流・貯水位を低下させることが望ましいと考えられる。

6.4.2 大規模洪水に対して 63 時間予測を用いた場合の計算結果

次に、同事例について 63 時間予測を用いるケース 2-1～2-4 の 4 ケースの結果について述べる。図 6.10 は、A ダムの H25T18 の計算結果である。63 時間予測を用いる場合、洪水調節開始時点において目標水位は事前放流水位 4 であるが、それに先立つ 9 月 14 日 13 時から 15 日 7 時までは目標水位は事前放流水位 5 である。ケース 2-1 から 2-4 の中で最も事前放流操作の放流量が多いケース 2-4 では、9 月 15 日 7 時までに貯水位が事前放流水位 5 に到達するため、その貯水位を洪水調節操作開始まで維持した後に洪水調節操作が開始される。その一方で、その他の 3 ケースでは目標水位が事前放流水位 5 から 4 に変わる 9 月 15 日 7 時時点では貯水位は事前放流水位 5 に到達しておらず、9 月 15 日 7 時以降に目標水位である事前放流水位 4 に到達した後に洪水調節操作が開始される。ケース 1 とケース 2-1～2-3 は洪水調節開始時点での貯水位が同じであるため、事前放流操作により得られる効果についてもケース 1 とケース 2-1～2-3 は同じである。ケース 2-4 については、事前放流水位 5 まで到達していることから他ケースと比較して洪水調節効果が高かった。

図 6.11 は、B ダムの H23T12 の計算結果である。63 時間予測を用いる場合、最初に目標水位が示される 8 月 31 日 7 時から洪水調節開始前の 9 月 2 日 7 時まで、目標水位が事前放流水位 3, 5, 3, 5, 4, 2, 4, 3, 5 と予測更新の度に变化する。ケース 2-1 については、63 時間予測において目標水位が示された時点で巡視が行われ、39 時間予測で目標水位が示された時点から洪水流量まで放流量を増加させる。そのため、39 時間予測で目標水位が示された時点から巡視を開始するケース 1 と比較して、巡視に要する時間分（6 時間）だけケース 2-1 は早く放流を開始する。その結果、ケース 1 と比較して貯水位を大きく低下させることができた。ケース 2-2 については、63 時間予測において目標水位が示された時点から利水放流バルブの放流能力で放流を開始するものであるが、利水放流バルブの放流能力が流入量と比較してあまり大きくないことに加え、洪水調節開始の 1 日以上前から流入量が利水放流

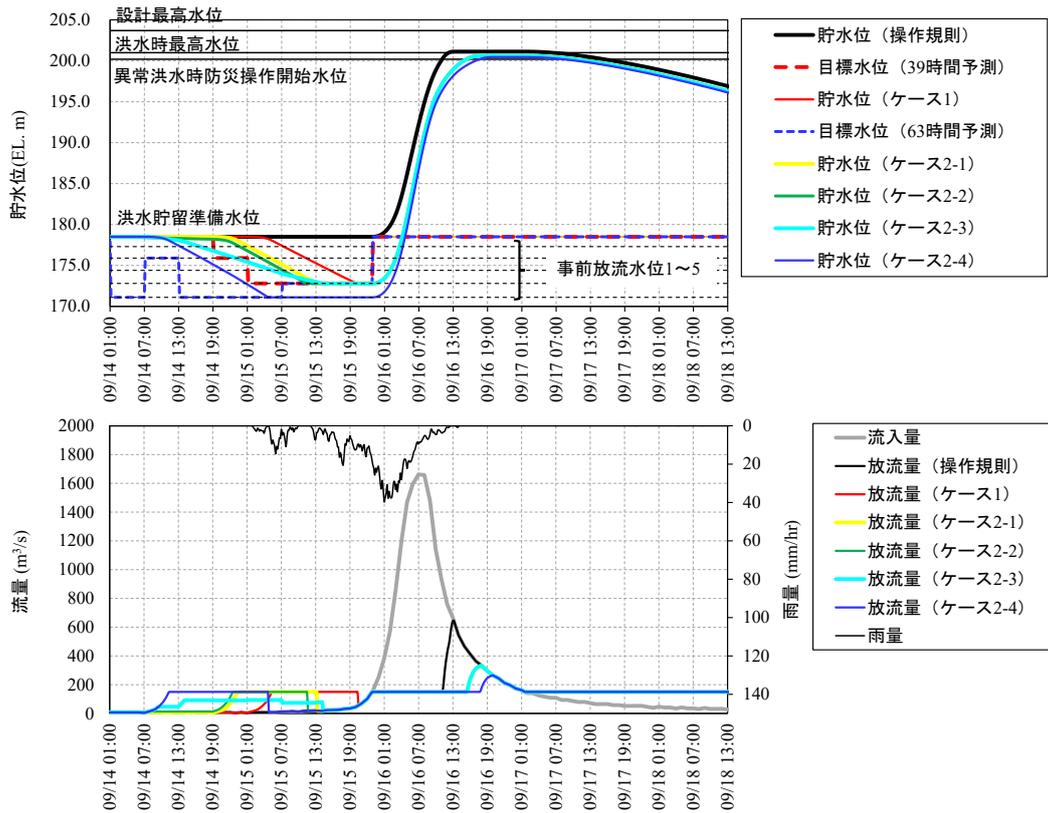


図 6.10 H25T18 の事例 (A ダム, 全ケース)

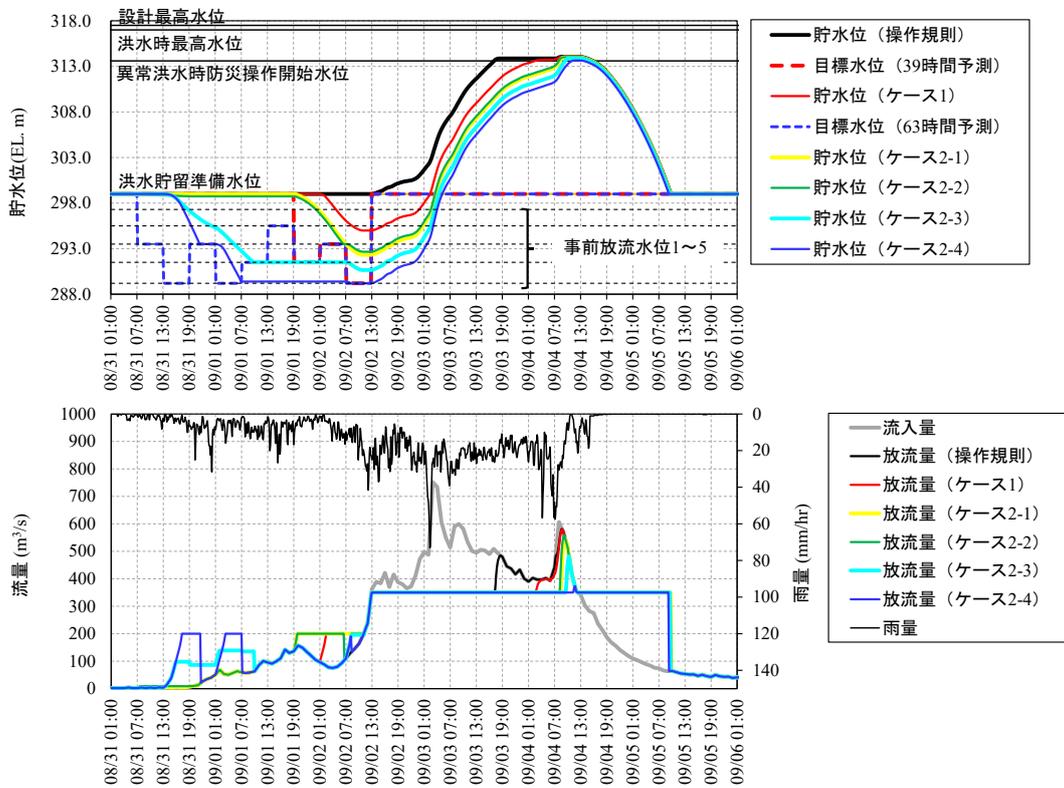


図 6.11 H23T12 の事例 (B ダム, 全ケース)

バルブの放流能力を超えるため 39 時間予測において目標水位が示される 9 月 1 日 19 時時点でケース 2-1 と比較してあまり貯水位を下げる事ができていない。結果的に、ケース 2-1 及び 2-2 はほぼ同時刻に異常洪水時防災操作を開始し、操作規則に基づく操作と比較して異常洪水時防災操作の開始時間を約 15 時間遅らせたものの、最大放流量の低減効果はほとんど得られなかった。ケース 2-3 は、8 月 31 日 13 時より放流の原則に沿って放流量を増加させ、数時間後に約 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ での放流を行う。その後、予測更新のタイミングに合わせて放流量を増減しながら、9 月 1 日 10 時頃にその時点での目標水位である事前放流水位 4 に到達して貯水位維持操作に移行する。その後、約 1 日経て 9 月 2 日 7 時の予測において、目標水位が事前放流水位 4 から 5 に移行するため再度事前放流操作を開始するが、目標水位である事前放流水位 5 には到達せずに洪水調節操作が開始される。結果として、操作規則に基づく操作と比較して異常洪水時防災操作の開始時間を約 16 時間遅らせ、最大放流量を約 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 低減させる効果が得られた。ケース 2-4 では、ケース 2-3 と同様に 8 月 31 日 13 時より放流の原則に従って放流量を増加させ、数時間後に洪水流量である $200 \text{ m}^3/\text{s}$ に到達する。その後、8 月 31 日 21 時過ぎに目標水位である事前放流水位 3 に到達して水位維持操作に移行した後、9 月 1 日 1 時の予測更新において目標水位が事前放流水位 5 になったため、再度事前放流操作を開始する。9 月 1 日 7 時の予測更新において目標水位が事前放流水位 4 に上がり、その時点で貯水位は事前放流水位 4 を下回っていたため水位維持操作に移行する。最終的に、9 月 2 日 7 時の予測更新において再度目標水位が事前放流水位 5 となったため事前放流操作を再開し、事前放流水位 5 に到達して洪水調節操作に移行した。結果的に異常洪水時防災操作を回避することはできなかったが、操作規則に基づく操作と比較して異常洪水時防災操作の開始時間を約 18 時間、最大放流量を約 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 低減させることができた。9 月 4 日 11 時過ぎに貯水位が異常洪水時防災操作開始水位を超過したために機械的に異常洪水時防災操作に移行するように計算したが、流入量低下が明瞭であったため、計画最大放流量での放流を継続させて異常洪水時防災操作を回避することも考えうる状況であり、相当な洪水調節効果が得られた事前放流操作であったと言える。

6.4.3 中小規模洪水への適用結果

表 6.3 は、中小規模洪水に対する適用結果をまとめたものである。全 10 洪水のうち、2 洪水が 6.4.1 及び 6.4.2 で述べた大規模洪水であり、残り 8 洪水が中小規模洪水となる。8 つの中小規模洪水のうち 5 つの洪水においては事前放流操作が回避されたものの、3 洪水 (A ダムの H23T6、H23T12 及び B ダムの H23T6) において 39 時間予測、63 時間予測共に事前放流操作が実施された。また 3 洪水のうち 2 洪水 (A ダム及び B ダムの H23T6) においては、63 時間予測を用いた場合において洪水調節終了後から貯水位回復操作が必要となった。以下、洪水調節終了後から貯水位回復操作を要した A ダムの H23T6 における計算結果について述べる。

6.4.4 A ダムの H23T6 における計算結果

図 6.12 は A ダムの H23T6 における計算結果である。ケース 1 については、7 月 18 日 19

表 6.3 A ダム及び B ダムの対象 5 洪水に対する計算結果概要

対象 洪水	A ダム	B ダム
H23T6	(中小規模洪水) <ul style="list-style-type: none"> 39 時間予測, 63 時間予測共に事前放流操作を実施 63 時間予測を用いた場合, 洪水調節終了後から貯水位回復操作が必要 	(中小規模洪水) <ul style="list-style-type: none"> 39 時間予測, 63 時間予測共に事前放流操作を実施 63 時間予測を用いた場合, 洪水調節終了後から貯水位回復操作が必要
H23T12	(中小規模洪水) <ul style="list-style-type: none"> 39 時間予測, 63 時間予測共に事前放流操作を実施 洪水調節終了時点で洪水貯留準備水位まで貯水位が回復 	(大規模洪水)
H23T15	(中小規模洪水) <ul style="list-style-type: none"> 39 時間予測, 63 時間予測共に事前放流操作は不実施 	(中小規模洪水) <ul style="list-style-type: none"> 39 時間予測, 63 時間予測共に事前放流操作は不実施
H25T18	(大規模洪水)	(中小規模洪水) <ul style="list-style-type: none"> 39 時間予測, 63 時間予測共に事前放流操作は不実施
H27T18	(洪水調節操作を要しない中小規模洪水) <ul style="list-style-type: none"> 39 時間予測, 63 時間予測共に事前放流操作は不実施 	(洪水調節操作を要しない中小規模洪水) <ul style="list-style-type: none"> 39 時間予測, 63 時間予測共に事前放流操作は不実施

時において目標水位として事前放流水位 3 が示され, その後 19 日 1 時から洪水調節開始まで事前放流水位 4 が目標水位となる. 巡視終了後の 7 月 19 日 1 時より放流の原則に則って放流量を洪水量まで増加させが, 洪水調節開始時点において貯水位は事前放流水位 2 を少し下回った程度であり, 目標水位である事前放流水位 4 まで貯水位を低下させることはできなかった. その後, 洪水調節操作を実施し, 洪水調節操作終了時点において貯水位が洪水貯留準備水位を上回っており, 貯水位低下操作に移行した.

63 時間予測を用いた場合, 目標水位は 7 月 18 日 1 時から事前放流水位 3, 4, 3, 5, 4 と予測更新の度に変化している. ケース 2-1 については, ケース 1 と比較して巡視に要する時間 (6 時間) の分だけ早く放流を開始するためケース 1 と比較して洪水調節時点で貯水位が低下しているが, 洪水調節終了時点では貯水位は洪水貯留準備水位を上回っており洪水調節終了時点から水位低下操作を実施した. ケース 2-2 については, 63 時間予測において目標水位が示された時点で利水放流バルブの放流能力での放流が行われるため, ケース 2-1 と比較して洪水調節開始時点で貯水位は若干低くなる. その結果, 洪水調節終了時点において, 貯

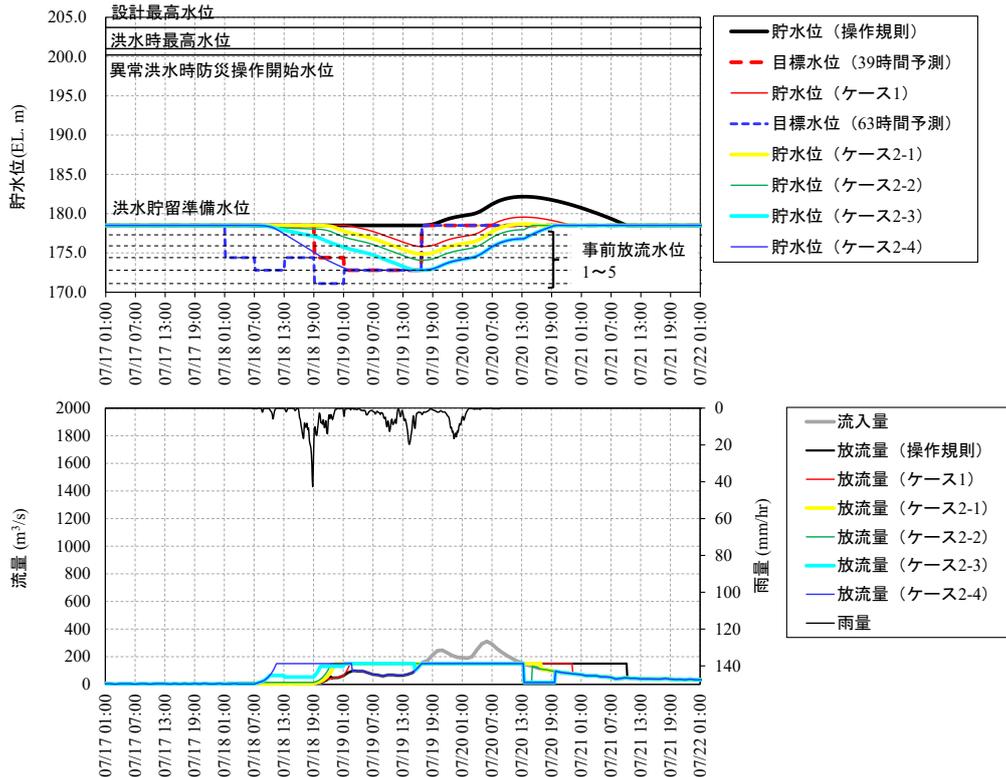


図 6.12 H23T6 の事例 (A ダム, 全ケース)

水位が洪水貯留準備水位よりも下回っていたため、貯水位回復操作が必要となった。また、ケース 2-2 よりも早い時点から大きい放流量で放流を行うケース 2-3 及び 2-4 については、両ケースともに洪水調節開始時点で目標水位である事前放流水位 4 に到達した後に洪水調節操作を実施した。洪水調節操作終了時点において貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しなかったため、貯水位回復操作が必要となった。ケース 2-2 では貯水位回復操作に要する時間が約 2 時間であったのに対し、ケース 2-3 及び 2-4 は約 6 時間とケース 2-2 と比較して 4 時間程度長い時間を要した。

図 6.13 は A ダムの H23T6 における予測初期時刻毎の観測値及びアンサンブル予測の流域平均積算雨量の比較図である。この図からは、H23T6 の A ダムにおいて洪水調節操作が開始される 7 月 19 日 13 時～19 時から 1 日以上前である 7 月 18 日 1 時から、63 時間予測ではアンサンブル平均が観測値を大きく上回る予測となっており、さらに最大値と最小値の幅の中に観測値がほぼ収まらない、すなわち全てのアンサンブルメンバーが過大評価する時間帯が長く続いたことを示している。この「全てのアンサンブルメンバーの過大評価」が、63 時間予測を用いる場合において洪水調節終了時点から貯水位回復操作が必要となった原因である。63 時間予測に対して 39 時間予測では、全てのアンサンブルメンバーが過大評価すること自体を避けられてはいないが、63 時間予測での過大評価が開始する 7 月 18 日 1 時から 1 日遅れの 7 月 19 日 1 時から過大評価が開始する。これにより 39 時間予測を用いる場合は 63 時間予測を用いる場合と比較して事前放流操作を実施する時間が短くなったため、貯水位回復操作を要しなかった。

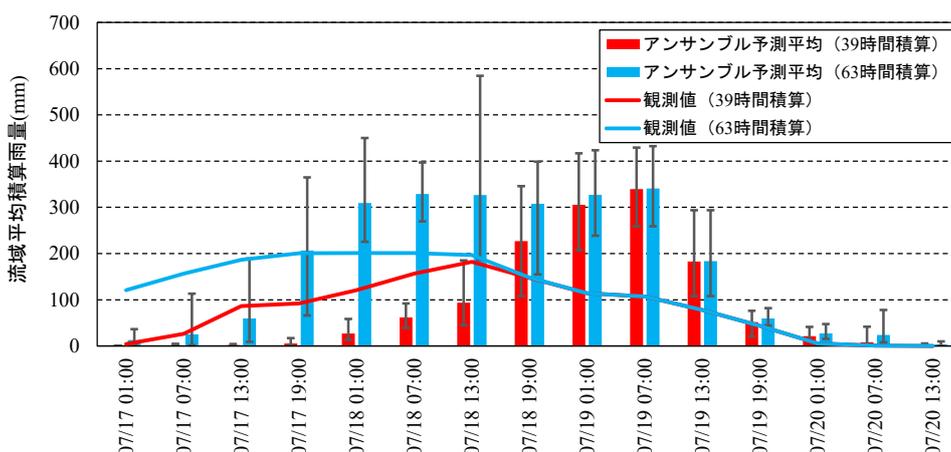


図 6.13 A ダムの H23T6 における予測初期時刻毎の観測値とアンサンブル予測の流域平均積算雨量の比較（エラーバーは、アンサンブルメンバーの中の最大値及び最小値を示す。）

図には示さないが、B ダムにおける H23T6 についても上述した A ダムと同様の結果が得られた。

6.5 考察

6.5.1 予測先行時間延長の効果

6.4.1 において述べた通り、39 時間予測を用いる場合でも大規模洪水に対して十分な事前放流操作を実施できる場合もあるが、流入量の波形に依存することを示した。その後、6.4.2 において、39 時間予測では十分な事前放流操作を行えなかった B ダムの H23T12 に対して、63 時間予測を用いた場合、39 時間予測を用いる場合と比較して十分な事前放流操作を実施することができ、効果が大きく上昇することを示した。治水面での効果を期待する場合、流入量が上昇してくる洪水調節開始直前における事前放流操作は十分な貯水位低下が期待できないため、予測先行時間の長いアンサンブル予測雨量を用いることで流入量が増加し始める前にできるだけ事前放流操作を実施して貯水位低下することが望ましい。

中小規模洪水に対する適用性としては、今回対象とした 8 事例の中小規模洪水のうち、5 事例においては事前放流操作を実施しなかった。その一方で、6.4.4 で示した A ダムの H23T6 のように、63 時間予測を用いた場合、事前放流操作及び事前放流操作に続いて実施される洪水調節終了後に、貯水位を洪水貯留準備水位まで回復させるための貯水位回復操作が必要である事例が存在する。同事例においては、39 時間予測を用いる場合では洪水調節終了時点の貯水位回復操作を必要としなかった。これは、全てのアンサンブルメンバーが観測値に対して過大評価する時間が、特に 63 時間予測において長時間に渡って続いたことが原因であった。ここで示したような、全てのアンサンブルメンバーが観測値に対して過大評価する事例が存在する限り、予測先行時間の延長は利水面においては洪水調節終了時点で貯水位が回復しない可能性を高めることとなる。

上記をまとめると、予測先行時間の延長は治水面においては長所である一方で、利水面においては短所となり得る。しかし利水面における短所については、今回対象とした事例においては、洪水調節終了時点において洪水貯留準備水位まで到達していなかった貯水位を、その後の貯水位回復操作で回復させることができた。これは、洪水調節終了時点で貯水位が回復していなくても、ダム の 操 作 に よ り 対 応 で き る 余 地 が あ る こ と を 示 し て い る 。 そ の 一 方 で 治 水 面 に つ い て は 、 39 時 間 と い う 予 測 先 行 時 間 の 範 囲 内 で 効 果 を 増 加 さ せ る た め に は 事 前 放 流 操 作 に お け る 放 流 量 の 最 大 値 と 考 え ら れ る 洪 水 流 量 の 増 加 が 必 要 で あ り 、 こ れ は 容 易 で は な い 。 そ の た め 、 治 水 面 で 事 前 放 流 操 作 の 効 果 を 増 加 さ せ る た め に は 、 予 測 先 行 時 間 の 延 長 以 外 の 手 段 に 抛 り が た い と 考 え ら れ る 。 以 上 の こ と か ら 、 利 水 面 で の 短 所 に 配 慮 し つ つ 、 39 時 間 よ り も 長 い 予 測 先 行 時 間 の ア ン サ ン プ ル 予 測 雨 量 を 用 い る こ と で で き る だ け 流 入 量 の 波 形 の 影 響 を 受 け ない 事 前 放 流 操 作 を 行 う こ と が 望 ま し い と 考 え ら れ る 。 現 在 気 象 庁 で 運 用 し て い る メ ソ ア ン サ ン プ ル 予 測 の 予 測 先 行 時 間 は 39 時 間 で あ り 、 延 長 が 望 ま れ る 。 ま た 、 ア ン サ ン プ ル メ ン バ ー の 幅 の 中 に 観 測 値 が 収 ま ら ない こ と に つ い て は 、 運 用 が 始 ま っ て い る 気 象 庁 の メ ソ ア ン サ ン プ ル 予 測 を 中 心 と し て 今 後 検 証 、 対 応 に 関 す る 検 討 が 必 要 で あ る 。

6.5.2 63 時間予測を用いる場合の放流量設定の考え方について

63 時間予測を用いる場合について、4 種類の放流量設定の考え方について示し比較した。ケース 2-1 については、63 時間予測において目標水位が示された時点で巡視は実施するものの、主たる事前放流操作は 39 時間予測において目標水位が示された時点から開始するため、39 時間予測を用いる場合と比較すれば貯水位を下げるができるが、流入量が既に上昇している段階での放流とならざるを得ないため、必ずしも十分に貯水位を低下させることができない。ケース 2-2 については、今回対象としたダムは利水放流バルブの放流能力が流入量と比較して大きくなかったため、ケース 2-1 と比較してもあまり貯水位を低下させることができなかつたが、放流能力の大きい発電放流設備を有するダムであれば、発電を行いながら事前放流操作による貯水位低下が十分に行える考え方である。今回対象としたような利水放流バルブの放流能力が大きいダムにおいて十分に貯水位を低下させるのであれば、ケース 2-2 ではなく、ケース 2-3 または 2-4 の考え方で操作する必要があると考えられる。ケース 2-3 または 2-4 で操作する場合、他ケースと比較して事前放流操作により貯水位低下が大きくなるため、H23T6 で示したようなアンサンブルメンバーの予測幅に観測値が収まらないような事例において、洪水調節終了時点で貯水位が洪水貯留準備水位まで回復せず貯水位回復操作が必要となる可能性が高くなることを留意することが必要である。

6.6 まとめ

39 時間予測と 63 時間予測を用いて、A ダム及び B ダムの複数の洪水を対象としてアンサンブル予測雨量を用いた事前放流操作について検討した。本研究では、多目的ダムを対象としていること、不特定容量を事前放流操作の対象容量としたこと、用いたアンサンブル予測は気象庁が運用しているものとは異なるという前提のもと、下記のこと が 分 か っ た 。

- 複数ダム・複数洪水に対して手法を適用した結果、中小規模洪水に対して、事前放流操

作を実施しなかった事例がある一方で、事前放流操作を実施する事例も確認された。

- 予測先行時間が 39 時間であっても、大規模洪水に対して十分な事前放流操作を実施できる場合もあるが、流入量の波形に依存する。洪水調節操作開始から異常洪水時防災操作を開始するまでの時間が長く、洪水調節操作開始前の流入量が大きい波形であるほど事前放流操作による貯水位低下を行いにくい。このような波形に対して事前放流操作により十分な貯水位低下を行うためには、39 時間よりも長い予測先行時間を用いることで、流入量が小さい段階で放流・貯水位低下を行うことが必要である。
- 中小規模洪水に対して全アンサンブルメンバーが過大評価する場合、39 時間予測を用いる場合と比較して 63 時間予測を用いる場合の方が、事前放流操作及び洪水調節操作終了後に貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない可能性を高める。ただし、本研究における対象事例においては、洪水調節操作終了後の貯水位回復操作により貯水位を回復することができた。
- 予測先行時間の延長は治水面においては望ましい一方で、利水面では洪水調節操作終了時点において貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しない可能性を高めるため短所となり得る。予測先行時間の延長による利水面での短所についてはダムの操作により対応する余地がある一方で、治水面で得られる長所である事前放流操作による治水効果の増大については、予測先行時間の延長以外の手段に拠りたいと考えられる。よって、利水面での短所に配慮しつつ、39 時間よりも長い予測先行時間のアンサンブル予測雨量を用いることでできるだけ流入量の波形の影響を受けない事前放流操作を行うことが望ましいと考えられる。
- 現在気象庁で運用しているメソアンサンブル予測の予測先行時間である 39 時間からの延長及びそれを用いて事前放流操作が実施されることが望まれる。
- アンサンブルメンバーの幅の中に観測値が収まらないことについては、今後引き続いて検証、対応に関する検討が必要である。

参考文献：

- Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 28(4): 1015-1031. DOI: 10.1029/91WR02985.
- 猪股広典・川崎将生・後藤祐輔・増田有俊・荒木千博・荒木孝之 2015. 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* 28(6): 278-290. DOI: 10.3178/jjshwr.28.278.
- Inomata H, Kawasaki M, Kudo S. 2018. Quantification of the risks on dam preliminary release based on ensemble rainfall forecast and determination of operation. *Journal of Disaster Research* 13(4): 637-649. DOI: 10.20965/jdr.2018.p0637.
- 猪股広典・川崎将生・工藤俊 2021. アンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作における操作決定方法に関する研究. *水文・水資源学会誌* 34(1): 144-173.
- 気象庁予報部 2016. 確率的な気象予測のためのアンサンブル予報の課題と展望. 数値予報課報告 別冊第 62 号 : 93-113.

- 工藤俊・川崎将生 2017. 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. 土木技術資料 29(12): 38-41.
- 工藤俊・川崎将生・猪股広典 2021. 洪水時ダム操作へのアンサンブル予測雨量の活用方法. ダム技術 413: 10-19.
- 野原大督・木谷和大・道広有理・角哲也 2020. 利水ダムにおける事前放流の意思決定への ECMWF 中期アンサンブル予報の利用性の分析. 土木学会論文集 B1 (水工学) 76(2): I_829-I_834.
- Wang X, Baker DM, Snyder C, Hamill TM 2008a. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment. *Monthly Weather Review* 136: 5116-5131. DOI: 10.1175/2008MWR2444.1.
- Wang X, Baker DM, Snyder C, Hamill TM 2008b. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part II: Real observation experiments. *Monthly Weather Review* 136: 5132-5147. DOI: 10.1175/2008MWR2445.1.

第7章 まとめ

近年日本では、毎年のように豪雨及びそれに伴う災害が発生している。それらの豪雨において、ダム洪水調節容量を使い切る大規模な洪水が流入したことにより異常洪水時防災操作を実施したダムが数多く存在する。さらに今後、気候変動に伴い日本国内外で豪雨が増大化する可能性について数多く指摘されている。新規ダム建設が今後望みにくい状況においては、大規模な洪水への対応として既設ダムの洪水調節機能を向上させることが重要である。既設ダムの洪水調節機能を向上させる方策の一つとして、予測雨量を活用した操作が従来から検討されているものの、予測誤差が不可避であるが従来から懸念されている。今後、洪水時のダム操作において予測雨量を用いるための方策の一つとして、不可避である予測誤差（不確実性）を前提とした操作方法が挙げられる。予測雨量の不確実性を定量的に評価するための技術としてはアンサンブル予測が気象分野において開発されてきており、本研究においては予測雨量の不確実性を考慮した洪水時ダム操作として、アンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作決定方法について研究を実施した。

本論文は、計7章で構成されており、第1章では、上述の内容を主旨とした本研究の背景・目的について述べた。第2章では、国土交通省所管ダムの洪水時ダム操作においてこれまでどのように予測情報が利用されてきたか、既設ダムにおける洪水調節機能向上に関する既往研究、アンサンブル予測雨量に係る既往研究等についてレビューした。日本の洪水時ダム操作は大きく予備放流操作、事前放流操作、洪水調節操作及び特別防災操作の4つに大別され、さらに事前放流操作については活用水位からの事前放流操作と洪水貯留準備水位からの事前放流操作に分けられる。第3章から第5章において上記操作のうち、第3章においては洪水調節操作、第4章においては洪水貯留準備水位からの事前放流操作、第5章においては活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作について、それぞれアンサンブル予測雨量を用いた操作決定方法について述べた。さらに第6章においては、洪水貯留準備水位からの事前放流操作について、アンサンブル予測雨量の予測先行時間が延長されることで得られる効果について検討した。以下、各章の内容を示す。

第1章は研究の背景・目的として、近年の豪雨時におけるダムの洪水調節操作の概要及び、今後の洪水激甚化への対応に向けた既設ダムにおける洪水調節機能向上の必要性について述べた後、操作の高度化による洪水調節機能向上の手段として予測雨量の利用が挙げられること、予測雨量を洪水時ダム操作において用いるためには予測雨量の不確実性を考慮した操作を考える必要があることを述べ、予測雨量の不確実性を定量的に示すアンサンブル予測雨量を用いた洪水時ダム操作決定方法を本研究のテーマとすることを述べた。

第2章では、洪水時ダム操作における基本的な考え方、国土交通省所管ダムの洪水時ダム操作においてこれまでどのように予測情報が利用されてきたか、既設ダムにおける洪水調節機能の向上に関する既往研究、アンサンブル予測を用いた洪水予測等に関する既往研究についてレビューを行った。最初に国土交通省所管ダムにおいては、予測情報が有する精度や不確実性を考慮しながら適切に実務において導入が図られてきていることを示した。次に、予

測情報を用いた洪水時ダム操作の高度化に係る研究として、予測情報の不確実性を定量的に組み込んだ研究が実施されてきているものの、その不確実性は過去の予測雨量と実績雨量の関係から統計的に導き出されたものであり、その時々々の気象状況に合わせた不確実性情報ではないことを示した。その時々々の気象状況に合わせて予測不確実性を定量的に評価するツールとしてアンサンブル予測情報が挙げられ、ヨーロッパを中心としたアンサンブル予測情報の利用研究及び日本のダムを対象としたアンサンブル予測情報の利用に関する研究状況について述べた。

第3章ではアンサンブル予測雨量を用いた洪水調節時の放流量決定方法、具体的には、アンサンブル予測雨量を用いて洪水調節操作時の放流量を操作規則に基づく操作の放流量と比較して低減させる方法について述べた。事例ダムにおいて洪水調節操作を実施した複数の洪水イベントを対象とし、方法の適用性を確認した。その結果、あるイベントについては、アンサンブル予測雨量を用いた操作は操作規則に基づく操作よりも洪水調節容量を多く使用し、放流量を低減させることで下流のピーク流量を低下させることができた。その一方で、アンサンブル予測雨量が示す予測幅の中に実績雨量が含まれず十分なアンサンブル予測雨量の精度が得られなかったため、そのアンサンブル予測雨量を用いた操作は操作規則に基づく操作よりも下流の危険性を高める結果となったイベントも確認された。本章で示した洪水調節操作時の放流量を操作規則に基づく操作よりも低減させる状況は実際のダム管理においては少ないと考えられるものの、実際に発生した洪水イベントを対象として豪雨に係るアンサンブル予測雨量を計算し、それを用いて洪水時ダム操作における放流量決定方法を具体的に示した最初の事例として本章の内容は位置づけられる。

第4章では、アンサンブル予測雨量を用いた洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関する操作決定方法について述べた。最初に、予測雨量に基づいて洪水貯留準備水位からの事前放流操作を実施する際に発生しうるリスクとして、「大きな雨が予測されたため事前放流操作を実施したものの、実際には雨があまり降らずに利水容量が回復しないリスク」及び「事前放流操作を実施したものの、その量が不十分であったために洪水調節容量が不足して異常洪水時防災操作を実施するリスク」という2種類のリスクを定義した。上記2種類のリスクを、アンサンブル予測雨量を用いることで定量化し、その値を基に実施する操作を決定する方法を示した。日吉ダムで異常洪水時防災操作を実施した平成25年台風18号を対象として手法を適用した結果、本手法を用いることで操作規則に基づく操作と比較して異常洪水時防災操作の開始時間を大幅に遅らせ、最大放流量を低減させる効果が確認された。

第5章では、活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作に関するアンサンブル予測雨量を用いた操作決定方法について述べた。活用水位からの事前放流操作及び特別防災操作については、第4章と同様にそれぞれの操作の実施に係るリスクを最初に定義した。活用水位からの事前放流操作に係るリスクとして「放流量が十分ではなく、流入量が洪水量に到達するまでに貯水位を洪水貯留準備水位まで低下させられないリスク」を定義した。また、特別防災操作に係るリスクとして「特別防災操作の実施に伴う貯留により、貯水位が洪水時最高水位を超過するリスク」を定義した。両操作について、アンサンブル予測雨量を活用して、これら定義したリスクを定量化し、放流量を決定す

る方法について示した。この手法を、第4章で述べた洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関する操作決定方法と併せて事例ダムにおける洪水イベントに対して適用し、その方法の妥当性を確認した。

第6章においては、第4章及び第5章において述べたアンサンブル予測雨量を用いた洪水貯留準備水位からの事前放流操作に関する操作決定方法を複数のダム・イベントに適用することで方法の適用性について検討した。方法の適用性の検討と併せて、気象庁が運用しているメソアンサンブル予測の予測先行時間である39時間よりも予測先行時間が延長された場合に得られる効果について検討した。その結果、39時間よりも長い予測先行時間のアンサンブル予測雨量を用いて事前放流操作を行うことで、洪水調節操作開始までに十分な貯水位低下が行われるため治水での効果を増加させることが分かった。その一方で、中小規模洪水において全てのアンサンブルメンバーが実際の雨量（正解）を過大評価（空振り）する場合、洪水調節操作終了時点で貯水位が洪水貯留準備水位まで回復しないという利水面でのリスクを高めるイベントが存在することが分かった。ただしこの利水面でのリスクは洪水調節終了後の貯水位回復操作により対応可能であった。治水において十分な効果を得るためには予測先行時間の延長以外の手段に抛りがたいと考えられる一方で利水面でのリスクはダムの操作により対応する余地があることを考慮すると、利水面でのリスクに配慮しつつも、長い予測先行時間のアンサンブル予測雨量を用いて治水において効果的な事前放流操作を行うが望ましいことを述べた。

本研究での成果は、洪水時ダム操作において予測雨量を用いる操作である活用水位からの事前放流操作、洪水貯留準備水位からの事前放流操作及び特別防災操作について、各操作に係るリスクを定義し、そのリスクについてアンサンブル予測雨量を用いることで定量化し、その値に基づいて放流量を決定する方法を示したことである。従来の確定的な予測雨量では操作の実施に係るリスクの程度が不明であることに起因して操作の実施判断に困難が伴ったが、この方法を用いることで従来よりも円滑な意思決定が行われることが期待される。一方で重要な課題として確認されたのはアンサンブル予測雨量の精度である。アンサンブル予測雨量は本来、アンサンブルメンバーの予測幅の中に実際の雨量（正解）が含まれているべきであるが、第3章、第6章等において述べた通りアンサンブル予測雨量が示す予測幅の中に実際の雨量（正解）が含まれない事例が確認された。このようなアンサンブル予測雨量を用いると、操作に係るリスクを適切に定量化することができず、誤った操作の実施につながる恐れがある。今後は、気象庁が運用しているメソアンサンブル予測等について精度検証を積み重ねるとともに、アンサンブルメンバーの予測幅の中に実際の雨量（正解）が含まれない可能性も視野に入れた利用方法を講じることも必要であると考えられる。また洪水貯留準備水位からの事前放流操作については、本研究において提案した方法と事前放流ガイドライン（国土交通省 水管理・国土保全局，2020）において示されている方法を比較することが必要である。両者の比較においては、洪水調節効果だけでなく、予測雨量が大幅にはずれした場合における事前放流操作実施後の貯水位の回復状況、事前放流操作を必要としない中小規模洪水に対して事前放流操作を回避できたか、操作の煩雑性といった複数の観点について比較検討する必要があると考えられる。

本研究で示した手法がすべてのダムにおいて適用可能となるとは限らないが, 洪水調節を目的として有するダムだけでなく, 洪水調節を目的としない利水ダムにおける事前放流操作についても本論文において示した方法は応用可能であると考えられるため, 予測雨量を用いた洪水時ダム操作の合理的な実施に向け, 今後の展開が期待される.

参考文献 :

国土交通省 水管理・国土保全局 2020. “事前放流ガイドライン”. <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001341537.pdf> (参照 : 2021/02/24)

謝 辞

最初に、京都大学防災研究所水資源環境研究センター教授 角哲也 先生に心から感謝の意を表します。角先生には、大変お忙しい中私の学位取得希望に応じてください、指導教員として適切・親身にご指導頂きました。角先生とは、私が国土交通省国土技術政策総合研究所（国総研）に在籍していた際、私が携わっていたダムの運用操作に係る委員会に委員としてご参画頂いた際にお世話になりました。その際は、委員会の趣旨であるダムの運用操作についてご意見を頂いていましたが、この度学生として角先生の研究室で勉強する機会を頂き、ゼミ等の場で幅広い視点から角先生が豊富な知識に基づいてご発言されるのを聞き、私も本論文のテーマであるダムの運用操作以外にも幅広い視点を持つことの重要性を感じました。今回の在学期間の間では重要性に気付くのみで実際に知識を蓄積するには至りませんでした。本論文のテーマ以外の分野にも今後取り組むことで研鑽に努めて参ります。また、田中茂信教授、堀智晴教授にも感謝申し上げます。お二人には、お忙しいにも関わらず副指導教員を引き受けていただき、研究内容に関するご指導だけでなく論文の細部に至るまで親身にご指導・ご指摘を頂きました。

次に、国総研河川研究部水循環研究室の川崎将生室長に心から感謝申し上げます。川崎室長は、私が国総研在籍時にダムの運用操作にアンサンブル予測を使うことを最初に意見した時から、本論文を書き上げるに至るまで、終始一貫して建設的なご意見・ご発言により私の背中を温かく・力強く押して頂きました。また、同じく国総研水循環研究室の工藤俊研究官にも心から感謝申し上げます。工藤研究官も私が国総研から土木研究所に異動して以降、私の博士論文の執筆に多大なるサポート・貢献をして頂きました。お二人には私が出した査読付き論文に共著者として入っていただいております。お二人の御協力・サポート無しでは本論文を完成させることはできませんでした。改めて感謝申し上げます。また、解析に必要な現場データのご提供等でご協力頂いた、国土交通省河川環境課流水管理室、地方整備局、水資源機構の方々にお礼申し上げます。

妻の彩子は、在学期間中、土日祝日、年末年始等の長期休みも私が博士論文の作成に多くの時間を費やしているにも関わらず、一度たりとも嫌な顔をせず、常に献身的に応援してくれました。妻のサポートがなければ本論文を完成させることはできませんでした。改めて深く感謝申し上げます。

付録 土研分布型流出モデル 2018 について

ここでは、第 5 章において用いた土研分布型流出モデル 2018 の概要及び土研分布型流出モデル鈴木・寺川（1996）及び猪股・深見（2007）で用いられている土研分布型流出モデルとの違いについて示す。

- 1) 分布型流出モデルであり、国土数値情報の標高、土地利用、土地分類のデータを用いてモデルを構築する。流域内のメッシュ分割は、地域メッシュ統計で定める 5 次メッシュに準じる。
- 2) 標高データから落水線を作成し、その落水線に基いて流域内のメッシュが接続される。落水線に従って上流側から下流側に向かい、任意のメッシュに集まる上流側のメッシュ数が一定数以上の場合、そのメッシュには河川が存在すると仮定して Kinematic Wave 法により計算を行う。
- 3) 旧土研モデルは開発着手当時の計算機資源の制約を考慮して各メッシュについて 2 段タンクで構成したのに対し、土研モデルは低水部分の計算精度向上を目的として図 5.A に示される 3 段タンク（表層タンク、地下水タンク 1、地下水タンク 2）で構成する。各タンクの水収支式、各孔の計算式について式(1)～式(10)に示す。
- 4) 国土数値情報から取得される土地利用及び表層土壌の情報をを用いて流域内の各メッシュを分類する。土地利用については、国土数値情報の土地利用細分メッシュデータを用いる。土地利用細分メッシュデータは、各メッシュを土地利用については田、農用地、森林、荒地など 13 種類に分類している。この分類を、「森林」、「田」、「荒地・ゴルフ場・農用地他」、「建物用地・道路・鉄道・用地他」及び「河川湖沼・海浜・海水域」の 5 種類に分類する。さらに森林については、国土数値情報の土地分類メッシュデータから取得できる土壌分類を、浸透性に応じて 3 種類に分類した。よって、土地利用について 5 種類、その中の 1 種類である森林についてはさらに 3 種類（森林 1、森林 2、森林 3 とする）に分類されるため、合計で 7 種類のいずれかに各メッシュが分類されることになる。表層タンクのパラメータである $a_1 \sim a_7$ の値について、森林 1 の $a_1 \sim a_7$ の値、森林 2 の $a_1 \sim a_7$ の値、田の $a_1 \sim a_7$ の値という具合に、分類された 7 種類がそれぞれ $a_1 \sim a_7$ の値を持つこととした。
- 5) 国土数値情報の土地分類メッシュデータから取得される地質分類及び地質年代を踏まえて各メッシュを 3 種類（地質 1、地質 2、地質 3 とする）に分類した。地質 1、地質 2、地質 3 がそれぞれ地下水タンク 1 のパラメータである $a_8 \sim a_{12}$ の値及び地下水田タンク 2 のパラメータである a_{13} 及び a_{14} の値を持つこととした。
- 6) パラメータである $a_1 \sim a_{14}$ の値は、過去の洪水の雨量、流量の実績値を用いて調整する。本論文執筆時点で利用した土研モデルは、扱える計算時間ステップが 1 時間のみであり、またモデル構造や不定流計算の導入等開発途上のものを使用した。今後、計算式やプログラム等について変更が加えられる予定である。

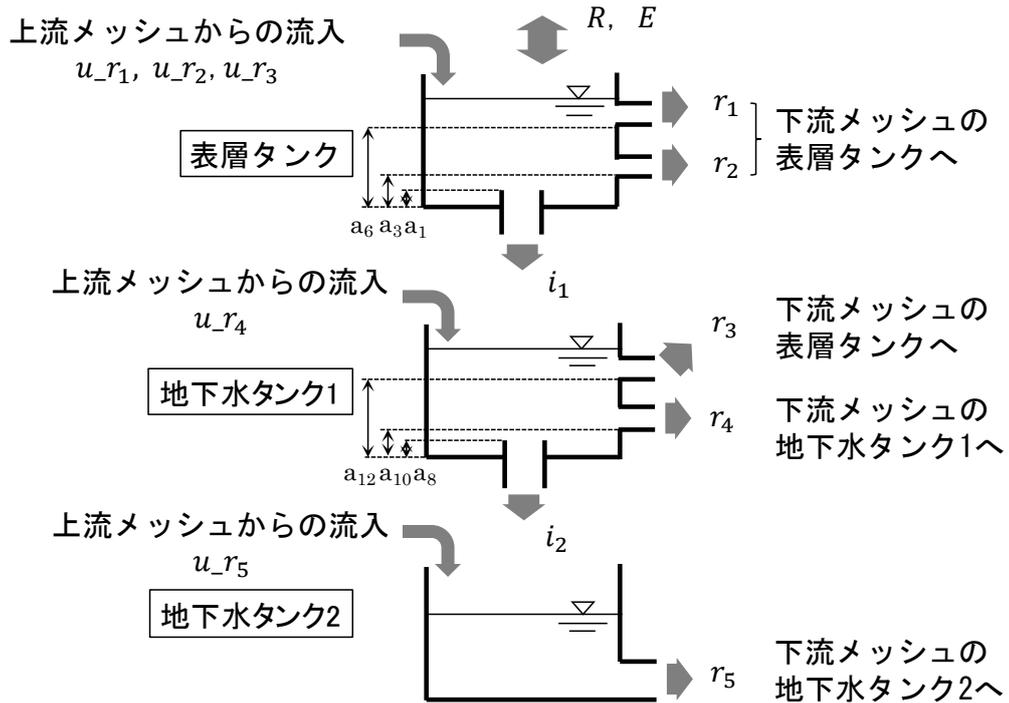


図 A 土研分布型流出モデル 2018 の構造

表層タンク 1 :

$$h_1(t) = h_1(t-1) + R(t) + u_{r1}(t-1) + u_{r2}(t-1) + u_{r3}(t-1) - E(t) - r_1(t-1) - r_2(t-1) - i_1(t-1)$$

式(1)

$$r_1(t) = \frac{Bi^{1/2}}{Aa_7} (h_1(t) - a_6)^{\frac{5}{3}} \times 3.6 \times 10^{-6}$$

式(2)

$$r_2(t) = a_4(h_1(t) - a_3)^{a_5}$$

式(3)

$$i_1(t) = a_2(h_1(t) - a_1)$$

式(4)

地下水タンク 1 :

$$h_2(t) = h_2(t-1) + i_1(t-1) + u_{r4}(t-1) - r_3(t-1) - r_4(t-1) - i_2(t-1)$$

式(5)

$$r_3(t) = a_2(h_2(t) - a_{12})$$

式(6)

$$r_4(t) = a_{11}(h_2(t) - a_{10})$$

式(7)

$$i_2(t) = a_9(h_2(t) - a_8)$$

式(8)

地下水タンク 2 :

$$h_3(t) = h_3(t-1) + u_{r5}(t-1) - r_5(t-1)$$

式(9)

$$r_5(t) = \frac{\exp\left(\frac{h_3(t)}{a_{13}}\right)}{a_{13}} + a_{14}$$

式(10)

ここで,

B : メッシュ幅(m)

A : メッシュ面積(km²)

i : 勾配

$h_1(t), h_2(t), h_3(t)$: 表層タンク, 地下水タンク 1, 地下水タンク 2 の貯留高(mm)

$R(t)$: 降水量(mm/hr)

$r_1(t)$: 表層タンクの側面上孔からの流出高(mm/hr)

$r_2(t)$: 表層タンクの側面下孔からの流出高(mm/hr)

$r_3(t)$: 地下水タンク 1 の側面上孔からの流出高(mm/hr)

$r_4(t)$: 地下水タンク 1 の側面下孔からの流出高(mm/hr)

$r_5(t)$: 地下水タンク 2 の側面孔からの流出高(mm/hr)

$i_1(t)$: 表層タンクの底面孔からの流出高(mm/hr)

$i_2(t)$: 地下水タンク 1 の底面孔からの流出高(mm/hr)

$u_{r_1}(t)$: 上流メッシュの表層タンクの側面上孔からの流出高(mm/hr)

$u_{r_2}(t)$: 上流メッシュの表層タンクの側面下孔からの流出高(mm/hr)

$u_{r_3}(t)$: 上流メッシュの地下水タンク 1 の側面上孔からの流出高(mm/hr)

$u_{r_4}(t)$: 上流メッシュの地下水タンク 1 の側面下孔からの流出高(mm/hr)

$u_{r_5}(t)$: 上流メッシュの地下水タンク 2 の側面孔からの流出高(mm/hr)

$a_1 \sim a_{14}$: 定数

参考文献 :

鈴木俊朗・寺川陽 1996. 実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発. 土木技術資料
38(10): 26-31.

猪股広典・深見和彦 2007. 吉野川広域水危険度判断支援システムの開発. 河川技術論文集
13: 433-438.