

超過洪水等に対する合理的な洪水調節手法に関する研究

2010 年

三 石 真 也

目 次

第1章 序論	1
第2章 ダム洪水操作に係わる規定、課題と既往の研究	11
2.1 現在採用されている代表的な洪水調節方式	11
2.2 出水時のダム操作	12
2.3 国土交通省等管理ダムにおけるダム操作に関する課題	15
2.4 洪水調節手法に関する既往の研究成果	21
2.4.1 ダムの空き容量を考慮したダム洪水調節操作に関する研究（VR方式）	21
2.4.2 流入量特性を活用したダム容量の効果的な活用に関する研究	24
2.4.3 予測雨量を用いたダム洪水調節に関する研究	28
2.4.4 下流河川への放流限度を考慮した洪水調節移行操作に関する研究	31
2.4.5 ファジィ理論やニューラルネットワークなどの数学的理論を取り入れた操作支援システムの研究	33
2.4.6 地球温暖化に伴うダム操作に関する研究	34
2.4.7 環境の課題改善に向けたダム操作に関する研究	35
2.5 WRFの開発と改良の歴史	35
2.5.1 WRF開発の経緯	35
2.5.2 降雨予測精度の向上と成果	36
2.6 流出解析に関する研究	37
2.6.1 河川計画策定において用いられてきた流出計算手法	38
2.6.2 既往流出モデルに関するダム操作の観点からの課題	39
2.6.3 分布型流出モデルに関する研究の概要	39
2.6.4 ダム操作検討における分布型流出解析モデルの適用に関する研究	43
2.6.5 分布型流出解析モデルの課題	45
2.7 既往文献をふまえた本研究の取組み	45
第3章 WRFを活用した新たな洪水調節手法	51
3.1 はじめに	51
3.2 現況のダム洪水調節の課題	53
3.3 WRFを活用した降雨予測技術	54
3.3.1 WRFの特徴と各ダムにおける降雨予測	54
3.3.2 降雨予測の誤差の設定	58
3.4 降雨予測を活用した合理的なダム操作手法	59
3.4.1 ダム流入量の予測	59

3.4.2	合理的なダム操作手法	66
3.4.3	WRFによる降雨予測を活用したダム操作シミュレーション結果	68
3.4.4	実際のダム管理へ導入を図る上での改良	81
3.4.5	WRFによる降雨予測を現場のダム管理に導入するための手続き	100
3.5	まとめ	102
第4章	水位放流方式適用性の検証と改良	105
4.1	水位放流方式とVR方式の必要性	105
4.2	ダムによる洪水調節の現状と問題点	105
4.2.1	すり付け操作の現状	105
4.2.2	洪水調節方式と操作規則	106
4.3	水位放流方式の考え方	108
4.4	実績洪水による水位放流方式適用の検証	110
4.5	水位放流方式の評価と改良	117
4.5.1	水位放流方式の評価	117
4.5.2	水位放流方式の改良	118
4.6	まとめ	122
第5章	VR方式を活用した洪水調節手法	125
5.1	超過洪水等への適切な対処の必要性	125
5.2	VR方式の概要	126
5.3	管理中のダムにおけるVR方式適用シミュレーション	131
5.3.1	基準流入量波形の設定	132
5.3.2	洪水操作シミュレーションの実施	133
5.4	VR方式の合理的な適用手法の検討	138
5.4.1	VR方式の適用性について	138
5.4.2	基準流入波形の妥当な設定について	144
5.4.3	VR方式移行時期の適切な判断	146
5.5	まとめ	147
第6章	結論	149
謝辞		155

第1章 序論

我が国において、ダムが初めて建設されたのは、弥生時代の末期であり、西暦6年に大阪府大和川支川西除川上流に狭山池が造られたという記録が日本書紀に記述されている。その後、大和時代に入り、貯水池は西日本において盛んに造られるようになり、多くのアースダムが江戸時代末期までに主に灌漑用ため池として我が国固有の技術により建設された。

明治時代に入るとコレラの流行に対処するため、欧米の技術を取り入れつつ、水道水源として本河内高部ダム（長崎県）、五本松ダム（神戸市）などの大規模なダムが建設された。本河内高部ダムは、ゾーン型フィルダムの形式であり、五本松ダムは、コンクリートという新しい素材を日本で初めて適用したダムであり、いずれも近代的な土木施工法により建設されている¹⁾。

その後も、水道や灌漑用のダムが続々と建設され、大正元年には鬼怒川黒部ダム（33.9m）、大正13年には、木曾川大井ダム（53.4m）、昭和5年には庄川小牧ダム（79.2m）と発電用のハイダムも次々に建設された。

大正15年に物部長穂は、論文²⁾を発表し、多目的ダム建設による洪水調節の優位性を説いた。その主要な考えは次のとおりである。

- 1) 河道が全能力を発揮する期間は極めて短いので、貯水による河川水量の調節は洪水防御上有利である。
- 2) 発電が渇水に苦しむのは冬期であり、その季節には大洪水の心配がないので、洪水調節容量は発電に利用できる。夏期渇水に対しては多目的として貯水池を多少大きくしておけばよい。
- 3) 貯水池地点は、我が国では一般に有利な所が少ないので多目的に利用すべきである。治水、灌漑用のものはなるべく平地の近くに設けるべきであり、発電用には上流部のものが有利である点から、水系的に効率的・有機的に運用すべきである。

内務省（当時）等は、物部の考え方を踏まえ、公共事業として治水、利水を行う河水統制事業を提唱し、予算要求した結果、昭和12年に予算が認められ、利根川、淀川など16水系において内務省（当時）直轄による事業が開始された。

戦後の昭和25年には、国土の保全、食糧増産、水力の開発を目的として国土総合開発法が施行されるとともに、胆沢川石淵ダム、鬼怒川五十里ダム等は河川総合開発事業と改称された。

この後、多目的ダムの費用負担者である治水、各種利水者と施工者間の委託契約の煩雑さと施工工程や維持管理への影響を解消するため、昭和32年には、特定多目的ダム法が制定され、建設省（当時）直轄ダムについて、建設省（当時）が施工し、維持管理することとなった。

以上に示したように、我が国においては、技術の進歩や法制度の整備とともに、ダム事業が推進され、2008年までに全国で2,890のダムが完成している³⁾。また、国土交通省所管事業に限ってみれば、河川総合開発事業によって、治水容量として58億4千万 m^3 を確保したほか、都市用水173億 m^3 /年、農業用水34億 m^3 /年を新規に開発するとともに水力発電として最大出力898万kWを開発している。

これら国土交通省所管既設ダムの効果の検証については、平成13年6月に制定された行政機関が行う政策の評価に関する法律に基づき、国土交通省が平成13～14年においてプログラム評価の項目として「ダム事業」を取り上げ、実施している。プログラム評価とは、実施中の施策等を目的や政策課題等に応じて一括して対象とし、それが目的に照らして初期の効果をあげているかどうかを検証するとともに、結果と施策等の因果関係について詳しく分析し、課題とその改善方策等を発見するものである。

平成15年3月に国土交通省が発表したプログラム評価書⁴⁾によれば、ダムの役割と効果として、洪水被害の軽減効果を次のように記述している。

「ダムは、洪水被害の軽減を図るため、融雪期、梅雨期、台風期を中心に、1年の大半の期間を通じ洪水調節を行っている。国土交通省所管の406ダム（補助ダム、生活貯水池を含む）における実績を見ると、平成3年から平成12年までの10年間の洪水調節回数が約4千回に及んでいる。また、こうした洪水調節による被害軽減、回避の事例も数多く挙げられている。

これまでに国土交通省所管の洪水調節を目的に持つ直轄、水資源開発公団のダムを93ダム建設してきたが、その投資額（治水分）は約3.7兆円（平成13年単価）となっている。これらのダムの洪水調節による洪水被害軽減効果について、金額に換算してみると、昭和62年から平成13年の15年間だけでも約4.2兆円（平成13年単価）を超える規模であったと推計される。

また、ダムによる洪水調節により下流河川の水位が下がることは、水防活動を行う沿川の水防団の負担を大幅に軽減するなどの効果を併せ持っている。

なお、ダムは洪水時の流量を低減する以外にも、上流からの流木を捕捉し、下流の河川における橋脚等での流木による塞き止めを回避し、これに伴う氾濫を防止するなどの効果を発揮することもある。」

以上に示したように、洪水調節について見れば、ダムはこれまで発生した多くの洪水について、一定の効果を発現し、流域の治水安全度向上に寄与してきた。しかし、従来に比して近年は宅地等の水害区域面積は小さくなってきているものの、氾濫区域における人口、資産は著しく集積し、災害ポテンシャルは増大していること⁵⁾、近い将来発生が予測される地球温暖化に伴う気候変動により、我が国における洪水被害は極めて大きくなることが予測されていること⁶⁾から、適切な対応策を講じる必要がある。一方、ダム建設を取り巻く環境は、ダム建設適地の減少、財政の硬直化、環境保全への関心の高まりなど、大変に厳しいものがあり、今後は新規ダムの建設が極めて困難な状況にあ

る。これらの現状を踏まえれば、現在保有する一定数の既設ダムを適切に維持管理、とりわけ洪水調節方法について最適化を図り、最大限にその効果を発揮させることが重要な課題と考えられる。

ここに、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ているため、洪水を適切に制御する必要がある。このため、洪水規模の大小、洪水波形を問わずさまざまな形で発生する洪水に対して、安定して確実に効果を発揮することが必要であり、ヒューマンエラーを防止する観点からも、適切な操作規則の制定と操作員による確実な操作が求められる。その前提条件として、人為操作により住民の生命、財産が危険にさらされることは避けるべきであり、洪水調節は慎重かつ安全に行う必要がある。さらには、ダムや関連構造物の安全性を確保しなければならないことも重要であり、確実性、安全性、即応性の原則を遵守することが求められる。

以上の観点から、現在多くのダムにおいて採用されている洪水調節操作は、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特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。これは、「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り⁷⁾、一般的に一定量放流方式、一定率一定量調節方式、自然調節方式などが多く採用されてきた。これらの操作方式は、治水計画で定めた超過確率以下の洪水にあつては、一定の効果を確実に発揮し、さらに操作の過程において操作員に適応判断を要しない利点がある。

これらの操作方法は、洪水の襲来を控えて、将来の流入量が予測できないことを大前提として策定されており、計画を超える大きな洪水が襲来した場合や中小洪水に終わることが確実な場合には、なお操作方法について改善の余地がある。特に、超過洪水の発生に対する事前放流については、これまで必ずしも十分には実施されていないほか、治水容量が不足することが明らかになった場合に採用される但し書き操作については、ダムによる洪水調節効果を低下させ、下流における洪水被害を十分には防御できない結果となってきた。また、多目的ダムにあつては、迎洪水位が制限水位よりも低い場合に、利水容量内において洪水調節操作に移行する時期は規定されておらず、利水と治水が背反する操作のあり方について、ダム管理所の操作員を悩ませてきた。

国土交通省河川局が、平成 20 年に 105 の直轄及び水資源機構管理ダム・堰管理所職員を対象に実施した聞き取り調査によれば⁸⁾、ダム操作に関する課題として、立ち上がりの急な洪水時の放流の遅れ、予備放流実施の困難さ、融雪洪水への対処、但し書き操作における下流地域の浸水及び治水容量の不十分な活用、洪水調節未実施にもかかわらず発生する下流浸水、統合ダム管理所における洪水調節に係わる統合運用、気象庁から提供される予測雨量の不活用など多くの問題点が浮き彫りとなった（具体的には、第 2 章にて詳述する）。

ここに、全球モデルによる解析技術を駆使した気候モデルの技術進歩はめざましいも

のがあり、オーストラリア連邦科学産業機構、ドイツマックス・プランク研究所において、それぞれ 1870～2000 年及び 1860～2000 年について現況の地上降雨量を再現したほか、気候変動(A1B シナリオ)を踏まえた将来の予測として、地上の降雨量及び上空の水蒸気量を含めた水量をそれぞれ 2000～2300 年(上空のデータは、この期間のうち 84 年分のみ)、2001～2100 年についてシミュレーションを行い、結果を公表するなどしている。また、米国においては、メソスケール気象モデルとして現業用、研究用に開発された WRF (Weather Research and Forecasting Model) が公開され、1km 程度での非静力学モデルによる計算を行うことが容易に可能となっている。従来の天気予報業務で使用されてきた気象モデルと異なり、WRF は、集中豪雨、雷雨などの水平スケールが 10～100km の気象現象を扱うことが可能である。近年、実測雨量などにより、予測計算を補正する同化技術の導入などにより、精度向上が進んでいる。具体的には、洪水予測に活用すべく、48 時間以内までの降雨予測が相当程度の信頼性で実行可能となっており⁹⁾、これらの降雨予測を活用することにより、ダムへの流入量をあらかじめ把握することが可能となるならば、前述したダム操作の問題点の多くは解決される可能性が高い。すなわち、WRF による降雨予測により、ダム流入量を正確に把握し、治水容量のみならず利水容量も含めたダム空き容量を最大限に活用し、最大放流量と下流被害を極力低減する手法が実行可能となる。

また、今村が提唱した水位放流方式によるダム操作は、貯水池情報を基に、放流開始時期及び放流量を決定するダム操作方法であり、迎洪水位が制限水位に比べて低い場合においてダム操作を行う際に適した手法である¹⁰⁾。放流の開始時期は、ダムの空き容量、下流河川の水位上昇速度から求められる限界流入量を指標とし、限界流入量が流入量と等しくなった時点で放流を開始することとされている。これにより、放流開始時点を一意的に決定するとともに、治水容量内に余分に洪水を貯留するような状況を最小限に抑えることが可能である。

さらに、VR 方式(Water storage Volume with the Ratio of discharge to the flow method)は、裏戸が超過洪水時における有効なダム操作手法として提案している方式であり、その時点の空き容量から判断して、以後の洪水をその空き容量内で貯留できない場合に、放流量を逐次増加していく操作方式^{11)、12)}である。すなわち、ダムの現時点の空き容量 $V_e(t)$ と現時点の放流を継続した場合に今後必要となる調節容量 $V_m(t)$ を等しくなるように放流量 $Q_o(t)$ を変化させ、限られた貯水容量を最大限活用して洪水調節効果を高めようとする洪水調節手法である。VR 方式の導入により、但し書き操作を早い時点から開始し、治水容量を有効かつ最大限に活用して、超過洪水発生時にあっても、下流への最大放流量を極力下げることが期待される。

本研究は、以上に示した 3 つの洪水操作手法を適切に組み合わせて、上述したダム操作の課題の解決を試みたものである。すなわち、予備放流や事前放流、後期放流の適切な実施、下流河道の流下能力不足への対応、複数ダムの統合管理、超過洪水時の但し書

き操作による被害の緩和などの問題については、将来におけるダム流入ハイドログラフが把握できれば、ダム空き容量との比較により、利水容量を含めたダム容量を十分に活用しつつ下流被害の最小化を図ることが期待され、また予備放流や事前放流、後期放流も円滑に実施することが可能である。このため、本研究では、**WRF** による降雨予測を活用してダム流入量を予測し、予測時点でのダム空き容量と比較しつつ、放流量の最小化問題を解くことにより、現行の操作規則によった実績操作よりも最大放流量の低減等合理的な洪水調節操作を行うことを目指した。また、洪水初期において放流量を適切な時期に所定の放流量に引き上げる、すり付け操作については、水位放流方式を適用することにより、限界流入量を用いて一義的にすり付け開始時刻が決定され、治水容量内に治水計画で想定していない流水をため込む過貯留も大きく縮小することが見込まれる。これを踏まえて、洪水初期において **WRF** を活用した操作を補完することを目指して、水位放流方式の適用性を検証するとともに、下流水位上昇速度の遵守に向けた改良策について検討した。さらには、超過洪水発生時にあっては、**WRF** による降雨予測において、誤差による影響を完全には除去できないことから、その問題を補うべく裏戸の提案した **VR** 方式の適用を試み、適用性を検証を行うとともに基準流入波形の適切な設定方法を明らかにし、ダム空き容量に応じた **VR** 方式適用の可否について検討を行った。これら 3 方式とも、国土交通省、水資源機構、県が管理するダムを全国からバランス良く選抜し、過去に発生した洪水を用いてシミュレーションを行って、最大放流量の最小化と下流被害の軽減を目的とした合理的な洪水調節手法の提案を目指した。

以下に、各章毎の要約を述べる。序章に続く第 2 章では、国土交通省が実施したダム管理所職員からの聞き取り調査を分析、整理してダム操作上の問題点についてとりまとめた。そして、現在、国土交通省所管ダムにおいて一般的に採用されている洪水調節方法について解説を行い、これに変わる操作手法について検討を行った研究事例について取りまとめた。近年提案されている新たな操作手法の主要なものとしては、前述した水位放流方式、**VR** 方式のほか、秋葉ら¹³⁾、戸谷ら¹⁴⁾、下坂ら¹⁵⁾、腰塚ら¹⁶⁾ は、総降雨量と総流出高の関係等から事前放流量を算出し、事前放流によりダムの治水機能向上を図る運用方法を提案した。松木ら¹⁷⁾ は、予測降雨を用いたダム操作の一環として、流入量又は降雨量ピーク後について洪水到達時間、実績の降雨量及び 6 時間予測雨量からダムへの流入量を予測し、事前放流を実施する手法を提案している。青山¹⁸⁾ は、超過洪水に対して大きな被害を回避するため、計画最大放流量を上回る流量の放流により、下流氾濫を最小化する手法を考案した。小尻ら¹⁹⁾、加藤ら²⁰⁾、長谷部ら²¹⁾、高棹ら²²⁾ は、最適放流操作について、**DP**(Dynamic Programming)を応用して、ファジィ理論、AI 理論、ニューラルネットワークを用いた操作支援システムの構築に関する研究が行われている。森ら²³⁾ は、地球温暖化の影響として **GCM20** の予測値を用いて分布型流出計算を行い、ダム流入量へ与える影響を検討している。さらに、本研究において提案するダム操作の中核となる降雨予測を支える **WRF** の改良経過について述べた。すなわち、

WRF による降雨予測を実施するにあたっては、擾乱の予測精度について、空間分布を考慮する必要があることや、日本のような島国においては、海上の水蒸気量の情報を得ること、放射過程や雲微物理課程の解析にあつて精度向上を図る必要があることなどが課題として認識されていたが、これらに対する改良策について説明した。

第3章では、第2章で指摘された超過洪水発生時における下流被害の緩和や遅れ操作の解消、中小洪水発生時における被害の解消を目指して、WRF による降雨予測を活用しつつ、治水容量と利水容量を一体的に運用する合理的な洪水調節手法を確立すべく、その手法の説明を行った。さらに、その適用性を確認すべく、全国の国土交通省、水資源機構、県が管理する12ダムにおいて実際に発生した超過洪水6洪水を含む69洪水を対象として、シミュレーションを行い、最大放流量やダム容量の貯水状況を検証した。提案する手法の合理性の検証については、現在実施されている操作規則に基づいた洪水調節を行った実績操作と比較しつつ、最大放流量を低減できているか、さらには、計画最大放流量や無害流量以下に抑え、下流河道における被害を皆無又は小規模に抑えることができているかに着目した。降雨予測は、実績降雨と比較して誤差を伴うものであるが、未だ48時間程度の降雨実績と比較しつつ信頼性について明らかにした研究事例は存在しないことから、ここでは気象庁の実施した時間降雨毎の予測降雨と実績降雨の乖離率を参考に誤差率を設定し、予測降雨を推定した。損失雨量について、洪水後期の流量低減曲線の傾きを参考に地中保水能をダム流域毎に設定し、予測降雨総量から控除することにより、ダム流入総量を算定した。ダム管理所において、多くの技術者が容易に利用可能とする観点から、ここでは流出解析を行うことをあえて避け、ダム流入総量とその時点での空き容量を比較することにより、事前放流の実施を判断するとともに放流量を求めた。洪水調節に入ってから放流は、ダム治水容量を完全に使い切るとともに、下流における被害を最小化することを念頭に置き、一定量放流とした。

事前放流の実施にあたっては、災害弱者の河川内における歩行能力（水深、流速）を考慮して、十分安全に河川から待避できる時間を確保して、放流を実施することとした。この結果、ほとんどのダムにおいては、実績の操作よりも最大放流量を低減させることに成功した。鶴田ダム H18.7 洪水にあつては、東シナ海上の水蒸気、水滴等を多く含んだ海域の評価が十分ではないため、予測降雨量が実績降雨量に比べて著しく小さくなり、これが原因となって、実績操作に比べて本方式による操作の方が最大放流量を大きくする結果となった。WRF による降雨予測の誤差率を正確に把握することは、ダム操作を設定する上で重要であるため、ここでは、10ダム14洪水と数少なく、信頼性には未だ不十分ながら、今後の研究の礎とするべく、ダム流域における WRF による予測降雨と実績降雨の比較を行い、その乖離率について分析を行った。

今後の課題として、WRF による予測降雨の誤差率について、多くのデータを収集するとともに、合理的な設定手法を開発する必要性が挙げられる。また、現場への本方式の導入については、事前放流は比較的容易に実施できうるものと考えられるが、洪水調

節に入ってから放流量を操作規則から変更することは、予測降雨誤差の評価が向上することを待ってから実施すべきと考えられる。

WRF による降雨予測を用いて洪水調節を行う場合にあっては、迎洪水位が低い場合には、適切な時期にダム放流量を適切な放流量に段階的に引き上げるすり付け操作を行う必要がある。また、前述したようにその誤差率が未だ不確定であるため、予測した降雨量よりも実際に多く降る場合も想定され、その際には、現在の但し書き操作とほぼ同様の操作を強いられることから、その対応について改善を図る余地が残されている。これらを踏まえ、WRF による降雨予測を活用したダム操作を補完する手法として、2つの手法の適用性を検討した。まず、第4章においては、洪水時立ち上がり時の操作の支援として、今村が提案した水位放流方式の現場への適用を試みた。ここでは、国土交通省、水資源機構、県が管理する多目的ダムで迎洪水位が低い状態で比較的大きな洪水が発生した場合を取り上げて、本方式のシミュレーションを行い、洪水防御計画で定めた以上の過貯留が治水容量内に発生しないか、下流河道における水位上昇速度は規定された範囲内に収まるかのほか、すり付け操作開始時刻について検証した。この結果、過貯留とすり付け操作開始時刻については、効果が明快に見られたものの、下流河道水位上昇速度については、通常の規則操作によった場合よりもかえって改悪となるケースも多く、課題として残った。

これを踏まえて、水位放流方式の欠点を克服するべく、限界流入量の規定や下流河道上昇速度の規定を厳しくするなどの改善策を提案し、一定の効果を見いだした。さらに、短所を完全に克服する手法として、下流河道の水位が、河川利用者が存在する可能性のある水深 1m までは、通常の操作によることとし、それ以上の水深にあっては、本操作による手法を適用した結果、過貯留と下流河道上昇速度という必ずしも両立はしない事項について、双方とも満足する結果を得た。限界流入量の算定によって求められるすり付け操作開始時刻は、現状の規則操作に基づいて操作を行う場合にあっては、ダム操作員に対してすり付け操作の開始時刻到来を知らせるアラームとして使用することが可能であり、今後の現場への導入が期待される。

第5章においては、裏戸が開発した VR 方式による洪水操作の適用性について、検討を行った。超過洪水の発生時にあっては、規則操作によった場合、治水容量が不足することから、ダムのオーバートッピングを避けるため、放流量を流入量にすり付ける但し書き操作が実行されるが、この結果、ダムは、相当の洪水調節効果を発揮したものの、下流河道において氾濫が発生し、大きな被害が発生したケースも存在した。このため、超過洪水発生時に効果があるとされている VR 方式について、但し書き操作実績の多い国土交通省、県管理ダムにおいて、過去に発生した実際の洪水波形やダム貯水位を用いてシミュレーションを実施し、操作実績と比較してその有効性を検証した。結果は、極めて降水量の大きな長雨洪水や洪水ピーク時に治水容量が満杯又は相当程度貯留されている洪水を除いて、最大放流量を低減させる効果が確認された。また、但し書き操作

開始水位程度で洪水調節が終了する洪水にあつては、VR 操作の導入により、但し書き操作を回避する大きなメリットがあることが理解できた。

VR 方式の適用にあたっては、将来の流入量を予測するにあたって必要となる洪水の低減傾向を指数関数でハイドログラフに示した基準流入波形を適切に与えることが重要であり、洪水の低減傾向を表すパラメータ b について、過去の洪水群を参考にしつつ適切な値を設定することが焦点となる。ここでは、実績洪水に対して b の値をさまざまに変化させて感度分析を行い、適切な値の設定手法について、提案を行った。また、洪水ピーク時に治水容量貯水率が大きい場合の VR 操作適用の是非についても、さまざまな貯水率を設定して分析を行い、洪水ピーク時にダム貯水率が概ね 70~90% の場合に本方式が効果を発揮することを見いだした。

第 6 章においては、以上の分析を総括して、現場への導入を図るためのフローとして取りまとめた。すなわち、洪水発生時において、すり付け操作から洪水調節、超過洪水に至った場合の円滑な処理までの洪水対応について、3 つの操作手法を組み合わせた新たなダム洪水調節操作手法を提案するとともに、実際に現場へ導入するにあたっての課題を述べた。

参考文献

- 1) (財) ダム技術センター、多目的ダムの建設第 1 巻計画・行政編、pp.33、2005.
- 2) 物部長穂、我国に於ける河川水量の調節並貯水事業に就て、1926.
- 3) (財) 日本ダム協会、ダム年鑑 2009 年版、2009.3
- 4) 国土交通省、平成 13 年度～平成 14 年度プログラム評価書、ダム事業 2003.
- 5) 国土交通省、国土交通白書 2007、平成 18 年度年次報告、2007.5
- 6) 藤 歩、川越清樹、風間 聡、沢本正樹、降雨極値データを利用した気候変動に伴う全国浸水被害額評価、水工学論文集、第 52 巻、pp.433-438、2008.
- 7) (財) ダム技術センター、多目的ダムの建設第 7 巻管理編、pp.76-77、2005.
- 8) 国土交通省河川局河川環境課、各ダムの洪水調節と下流河川の状況調査、2008.
- 9) 豊田康嗣、気象予測モデルと連携した出水予測手法の開発、電力中央研究所報告 No8058、2009.
- 10) 今村瑞穂、ダム貯水池における洪水調節の工学的特性の分析と改善に関する研究、九州大学博士論文、1998.
- 11) 裏戸 勉、洪水時のダム操作について、ダム技術、No.86、pp.4-12、1993.
- 12) 裏戸 勉、異常洪水時のダム操作手法について、第 10 回ダム工学会研究発表会講演集、pp.40-42、1999.
- 13) 秋葉雅章、腰塚雄太、宮本 守、戸谷英雄、佐藤直良、山田 正、流出特性に応じたダム放流量の決定方法とその洪水水位低減効果に関する研究、河川技術論文集、

第 10 卷、PP.89-94、2004.6

- 14) 戸谷英雄、秋葉雅章、宮本 守、山田 正、吉川秀夫、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 Vol.62 No.1、PP.27-40、2006.2
- 15) 下坂将史、呉 修一、山田 正、吉川秀夫、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 Vol.66 No.2、PP.106-122、2009.6
- 16) 腰塚雄太、下坂将史、戸谷英雄、山田 正、確率予報を用いた事前放流量の決定手法に関する研究第 33 回土木学会関東支部技術研究発表会、2006.3
- 17) 松木浩志、齋藤 源、清水直樹、上谷昌史、より効果的なダムによる洪水調節方法の考え方について、平成 19 年度水資源機構技術研究発表会発表論文、2007.
- 18) 青山俊樹、大被害発生水位を睨んだダム操作方法に関する提案、リザーバー2007.3、PP.1-2、2007.3
- 19) 小尻利治、池淵周一、十合貴弘、ファジィ制御によるダム貯水池の実時間操作に関する研究、京都大学防災研究所年報、第 30 号 B-2、PP.323-339、1987.
- 20) 加藤純一、長谷部正彦、鈴木喜晴、ファジィ及びニューラルネットワークシステムを用いたダム操作支援システムの比較検討、土木学会第 59 回年次学術講演会、PP.153-154、2004.9
- 21) 長谷部正彦、長山八州稔、桑川高德、ニューラルネット・ファジィ理論による治水型ダム操作支援制御システムの適用について、水文・水資源学会誌第 10 卷 3 号、PP.213-225、1997.
- 22) 高棹琢馬、池淵周一、小尻利治、水量制御から見たダム群のシステム設計に関する DP 論的研究、土木学会論文報告集、第 241 号、PP.39-50、1975.9
- 23) 森 英祐、浜口俊雄、小尻利治、田中賢治、ダム貯水池を含む流域水資源分布の地球温暖化影響評価に関する研究、平成 20 年度土木学会関西支部年次学術講演会、PP. II -59、2008.

第2章 ダム洪水操作に係わる規定、課題と既往の研究

2.1 現在採用されている代表的な洪水調節方式

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。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は、次の4点とされている¹⁾。

- 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 洪水毎の適応操作（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わる操作は、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特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²⁾。これは、「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り、一定の効果を確実に確保し、操作の過程において適応判断を要しない利点を有している。但し書き規定（前述した操作規則の「ただし」以下の部分）は、「適応化操作方式」と呼ばれ、上記の①～③を満足した上で洪水毎にダムの安全性を確保しつつ、洪水調節効果も極力発揮させようとするものである。この操作方式は、現段階では主に超過洪水発生時などの特別な洪水に限って用いられている¹⁾。

現在、我が国のダムにおいて洪水調節を目的とする「固定ルール調節方式」は、以下に示す4方式に分類される。洪水調節方式の選定にあたっては、河川改修や背後地の状況、洪水流出の水文学的特性、貯水容量、放流設備、調節の目的及び管理の容易性等が考慮される³⁾。以下に各洪水調節方式の特徴を概説する。

(1) 一定量放流方式

洪水の流入波形等に係わらず、一定量の流入量以上を調節して、ダムから一定量の放流を行う洪水調節方式であり、必要となる治水容量は小さくなる。ダム下流の河道整備が進んでおり、一定の流量規模までは洪水氾濫の危険性がなく、安全な洪水流下が可能である河川に適している。

(2) 一定率一定量調節方式

洪水流入量のうち、洪水調節開始流量以上について、流入量が最大になるまでは、流入量に対して一定の割合で放流を行い、流入量がピークに達した後は、一定量を放流する調節方式である。この方式は、下流河川に未改修区間が残っている場合、当該区間にも一定の効果が発現するほか、中小洪水にも効果が期

待できる長所を有しているが、短所として、最大放流量に見合う流下能力を有しない未改修区間においては、一定量放流方式とは異なり、一定以上の規模の洪水が襲来した場合に被害が発生する点がある。

(3) 自然調節方式

洪水調節用のゲートを有さないか、又はゲートを有していても一定開度を保持して洪水時にゲート操作を行わない方式である。洪水調節に必要な治水容量は大きくなるが、人為的な操作がないため、流域面積が小さく流出が早い小流域のダムにおいても、所定の効果を発揮することができる。また、管理も容易な調節方式であり、概ね 20km^2 以下の小流域、治水容量をダム流域面積で除した相当雨量が概ね 50mm 以下の洪水調節容量の小さいダムにあつては、警報時間が取れない、ゲート操作では操作が煩雑となることから、自然調節方式が良く採用されている。

(4) その他の方式

上記(1)～(3)に示したほか、全洪水量貯留方式や不定率調節方式などがあるが、前者は、相当規模の洪水調節容量が必要となるために、地形的に採用が困難な場合が多く、後者は洪水の前半又は後半に重点的に貯留する場合や最大流入量近辺で大量の洪水を貯留する場合（いわゆる鍋底調節）に採用されるが、洪水波形の予測が必要となり、操作は困難である。

2.2 出水時のダム操作

ダムにおける洪水時の操作を実施の段階に従って分類すると、一般的に、事前放流操作、すり付け操作、水位維持操作、洪水調節操作、但し書き操作（超過洪水時の操作）、後期放流操作に分類される。予備放流方式を採用しているダムにあつては、これに予備放流操作が加わることとなる。洪水時におけるダム操作の流れを図-2.2.1に示す。

(1) 事前放流操作

計画規模を超える洪水等においても洪水調節機能を発揮させることを目的として、利水容量にたまつた流水を洪水が流入するに先だつて放流するものであり、確保した空き容量は、但し書き操作による放流量増加の緩和に使用することとされている。すなわち、計画規模を超える洪水対応や下流河道に対応した洪水調節方法の採用に伴う容量不足に対応するものである。

事前放流については、利水の共同事業者に支障を与えない範囲で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対象としている。具体的には、次に示す容量を活用することとされている⁴⁾。

- ・ 降雨解析などにより確実に容量回復が見込める容量
- ・ 未利用容量（利水需要が未だ発生していない利水容量）

- ・ 不特定容量（維持流量、既得水利権の補給のために確保している容量）
- ・ 堆砂容量

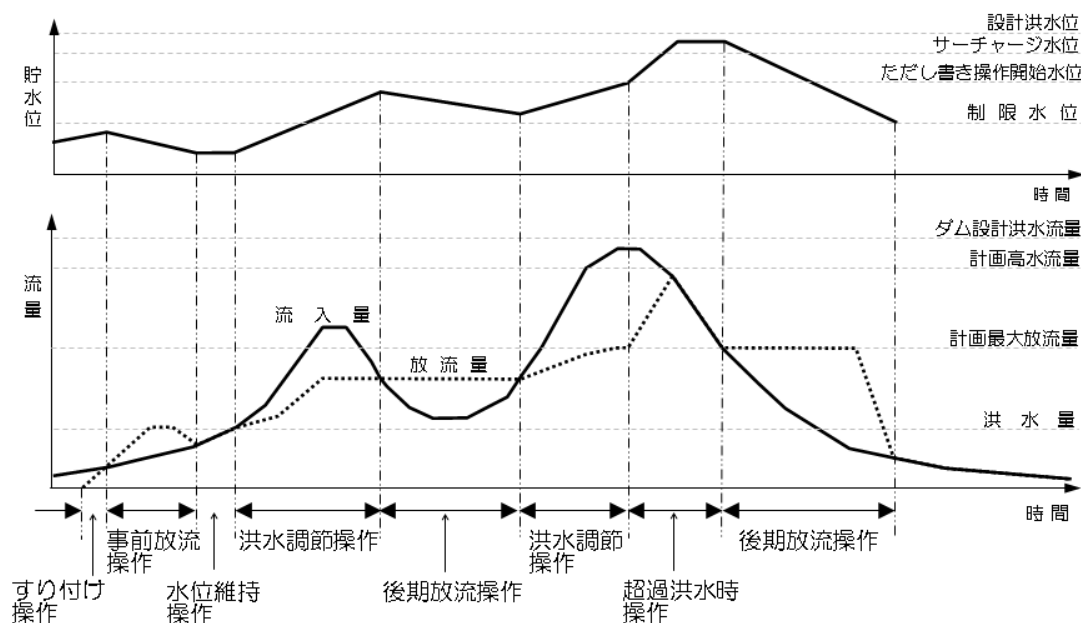


図-2.2.1 洪水時のダム操作の流れ³⁾

(2) 予備放流操作

治水容量と利水容量を兼ねているダムにあって、貯水池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治水容量を確保するために必要となる容量を確保するべく、貯留水をダムの予備放流容量から放流する操作である。予備放流は、洪水量の大きさや予備放流開始時点で予備放流容量内に貯留された容量によって異なるが、通常、数時間以上を要する。

(3) すり付け操作

洪水がダムに流入した際に最初に行われる操作であり、ダムからの放流量を流入量と等しくなるまで徐々に増加させる操作である。治水、利水を目的に含む多目的ダムでは、渇水に対応した利水補給により、貯水位が制限水位や常時満水位よりも低下している場合、利水容量の回復に配慮しつつすり付け操作を行うこととなる。なお、貯水位が制限水位等に近い水位であり、水位維持操作が行われている場合は、すり付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であるが、操作規則には、特段の規定もなく、一般的には、現場の経験や勘に頼っているのが実情である。仮に操作が遅れた場合は、洪水計画以上の流量を治水容量内にため込む（過貯留）ことが発生し、治水上危険となる。また、中小洪水に終わり、かつ、すり付けが早すぎた場合にあっては、洪水が終了しても利水容量が充足されていない恐れがある。このようにすり付け操作は、治水、利

水面で相互に背反する操作を強いられる性質を有しているため、その合理的な対処方法として、第4章に示す水位放流方式による放流判断が有効と思われる。

(4) 水位維持操作

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。洪水時の操作では、予備放流水位や制限水位等を維持する場合に用いられる。具体的な操作方法としては、「水位偏差方式」が良く採用されており、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、この幅内に貯水位を維持すべく、貯水位の変化に応じて放流量を調節することとしている。

(5) 洪水調節操作

貯水池への流入量が洪水量に達した時点から流入量が最大となった後、放流量が流入量に等しくなるまでの間、操作規則に規定した洪水調節方法に従ってダムから放流を行う操作である。具体的な手法は、前項に示したとおりである。

(6) 超過洪水時操作

ダムの治水計画を超える超過洪水が発生し、治水容量が不足する恐れがある場合に採用される操作であり、各ダムの但し書き操作要領においてその手法が具体的に規定されている。ダムのオーバートップングを防ぐなど安全性を確保しつつ、下流河川における被害を極力抑えることを目標として定められているが、計画最大放流量を上回る放流を行うことから、下流河川において氾濫する可能性は強く、警報による周知を速やかに行う必要がある。

但し書き操作における洪水吐きゲート等の操作は、ダムの安全性を確保しつつ、過放流によって下流河川における被害を助長することのないよう、以下に示す考え方⁵⁾により実施することとしている（図-2.2.2参照）。

- ・貯水位が但し書き操作開始水位を超え、サーチャージ水位に至るまでは、サーチャージ水位において、計画高水流量を放流できるように貯水位に応じたゲート開度を採用する。
- ・貯水位がサーチャージ水位を超えた場合には、上記の操作に引き続いて設計洪水水位において、設計洪水流量が放流できるように貯水位に応じたゲート開度を採用する。

ゲート開度表は、但し書き操作開始水位から設計洪水水位までの貯水位 1cm 毎に作成し、上記の水位で所定の流量が放流できるように配慮する。一般に洪水吐きゲートの操作にあたっては、操作の確実性を担保するため、コンジットゲートは一定の開度を保ちつつ、クレストゲートの開度調整により適切な放流を行うこととしている。

超過洪水時において現在採用されているゲートの操作方法は、上記に説明し

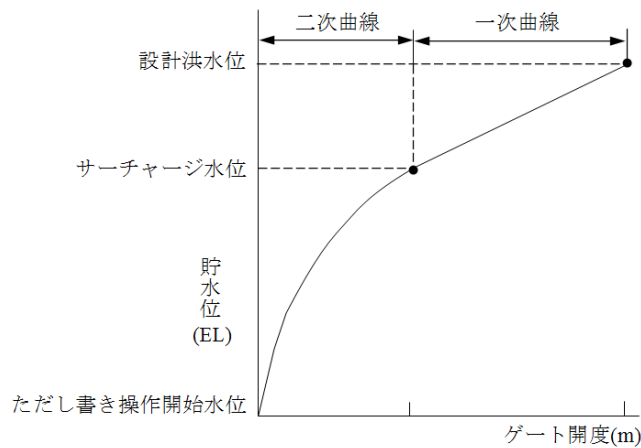


図-2.2.2 貯水位とゲート開度の対応図⁵⁾

たとおりであるが、過去に発生した洪水実績を見ても、ダム洪水調節効果が低下し、大規模な被害が発生する場合も存在することから、その改良について余地があり、第5章においては、裏戸の開発した VR 方式の適用性について検討を行うとともに、より適切な活用に向けて、ダム空き容量に応じた VR 方式適用の可否や基準流入波形の適切な設定手法について検討を行う。

(7) 後期放流操作

洪水調節によって上昇した貯水位を速やかに制限水位等にまで低下させる操作であり、規則操作においては、放流量の上限を定めている。現実には、以下の3つの手法により、後期放流が行われている。

- ・次に来る洪水に備えて水位低下を最速で行う
- ・次に洪水が来る恐れがなく、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
- ・下流河川が氾濫しており、かつ近日中に洪水が来る恐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

2.3 国土交通省等管理ダムにおけるダム操作に関する課題

前項までに記述した操作手法に基づいて、国土交通省及び水資源機構は、全国で2009年現在182ダムの管理を実施している。ダムの管理にあたっては、治水、利水、環境の各々の要素について、配慮することが求められるが、ダムを取り巻く環境はもちろんのこと、洪水や渇水についても自然現象であるため、ダム毎にその条件が異なり、画一的な対応は不可能である。例えば洪水は降雨という自然現象によって引き起こされるものであるため、同一の洪水が再来することは皆無であり、ダムの貯水状況、洪水の発生時刻、要員の配置状況、設備の整備状態によりダムの操作条件は異なる。

国土交通省や水資源機構所管のダム管理所にあっては、これまで操作規則を策定し、

最善の手法でダム操作にあたってきたが、最大で 50 年程度に及ぶ管理を経て、治水、利水、環境面でさまざまな課題が浮き彫りとなってきた。国土交通省河川局河川環境課は、以上の状況を踏まえ、平成 20 年にこれらの 105 のダムや堰を対象に管理上の課題に関する聞き取り調査⁶⁾を行い、ダム毎に個票に記述した。本研究においては、聞き取り調査の個票を分析し、治水、利水、環境の各項目毎に課題と対応策を表-2.3.1のとおりとりまとめた。適用、対応策の欄にあつて、低位放流設備の問題に起因する放流遅れについては、適切なすり付け操作が必要なことから、水位放流方式の適用が適切であると考へた。また、超過洪水時発生時における但し書き操作に伴う下流浸水、治水容量の不充足については、VR 方式の基準流入波形の活用により、最大放流量を低減できることが見込まれる。予備放流や事前放流、後期放流の適切な実施、下流河道の流下能力不足への対応、複数ダムの統合管理、超過洪水時の但し書き操作による被害の緩和のほか、濁水長期化の防止などについては、将来のダム流入ハイドログラフが把握できれば、相当程度適正な対応が可能であるため、WRF による降雨予測を活用したダム操作が適切であるとした。筆者は、これらの課題について、治水、利水、環境面について、次のとおり集約した。

治水面においては、大きく区分してダム施設、ダム操作、下流河道状況、ダム計画、ダム管理に起因する課題に区分される。このうち、ダム施設については、放流設備の能力不足やゲート起動速度の遅さによって、放流の遅れや但し書き操作へ移行する可能性があること、計画された洪水調節や設計洪水流量の安全な流下が行えないことが指摘された。また、放流設備の放流能力が大きすぎて、下流放流制限を遵守できないダムや洪水吐きが一門のみのため、信頼性が小さいダムも見られた。このほか、貯水容量が小さいため、局地的豪雨や融雪出水への対応に課題があるダムも存在した。ダム操作に関しては、事前放流や予備放流が実施できていない、後期放流の規定がないなどの指摘があったほか、但し書き操作において、下流における浸水の発生やダム容量の完全な活用、複数ダムの連携などの課題が明らかになった。また、洪水調節時に降雨予測が活用されていないとの意見も存在した。このほか、貯水池地すべりのため、ダム水位低下に時間を要するダムや発電運用から洪水調節操作への移行が難しいダムも存在した。下流河道状況に関しては、ネック区間の存在により暫定操作を強いられている点や操作規則で定める洪水調節ルールや限度カーブ（下流放流制限を遵守するための流量増大に係わる関係式）と河道流下能力との不整合が見られる。ダム計画については、統合管理事務所を有する水系において、洪水調節に関する統合管理を実施していないこと、河川整備基本方針見合いの洪水調節が実施できていないダムがあること、期別に定めた制限水位と発生する洪水規模の不整合などが挙げられる。このほか、ダム管理については、流入量や堆砂量などの把握が困難との意見が出された。

環境面については、富栄養化、濁水の長期化、冷水の取水など古くからダム管理の問題として認識されてきた課題が出されたほか、栄養塩捕捉による海域生物への影響、正

常流量の不足、強酸性水の流入や流況変動の減少による生態系への影響、土砂供給の減少、降雨予測精度の低さに伴う弾力的運用の効率低下などが指摘された。

利水面では、夏期制限水位への移行時や降雨発生時における無効放流の発生、発電放流との調整、渇水時における需要未発生に係わる利水容量の配分、豊水年代に策定された利水計画であることに起因する渇水の頻発、営農形態の変化による取水パターンの変化、渇水時における確保流量の大幅な低下などが指摘されている。

本論文では、表-2.3.1に掲載されたダム管理上の問題のうち、治水面での課題について、解決を図るべく対策の検討を行うこととする。

表-2.3.1 ダム操作に関する課題と対応策

■ 治水

ダム操作の課題	具体事例等	適用 ^{※1}	対応策 ^{※2}
低位放流設備	洪水吐以下にコンジットゲートなどの放流設備がない、または設備があっても放流能力が不足している等の理由により、低水位時の放流が遅れる、または利水放流や発電放流との併用が必要となる。	*	<ul style="list-style-type: none"> 低位部における放流施設の設置、改良による空き容量（利水容量）の活用 水位放流方式によるすりつけ操作の実施
	立ち上がりの急な洪水に対し放流の遅れが生じる。遅れ操作の発生を警戒して制限水位より低い管理水位を設定している。	○*	<ul style="list-style-type: none"> 降雨予測の活用による遅れ操作発生時の操作方法の検討 水位放流方式によるすりつけ操作の実施
放流の原則	コンジットゲートからの放流では、放流能力が大きすぎ下流放流制限を遵守できない。放流制限を遵守した放流のためには利水放流設備の利用が必要となる。	-	<ul style="list-style-type: none"> コンジットゲートの改良、別途、放流設備を設置
ダム施設	洪水対応の放流能力不足	-	<ul style="list-style-type: none"> 洪水放流施設の改良
	現設備では設計洪水流量を放流できない。	-	
ゲート起動時間・開閉速度	ゲート起動時間の遅れにより但し書き操作移行の可能性が高まる。ゲート開閉速度が遅いため流入量の急増に対し計画放流ができない。	○	<ul style="list-style-type: none"> ゲート改良と降雨予測の活用による遅れ操作発生時の操作方法の検討
融雪出水対応	非洪水期におけるサーチャージ容量がないため融雪洪水に対処できない。	○	<ul style="list-style-type: none"> 降雨予測の活用による事前放流の検討
	洪水調節開始流量が小さいため融雪出水に対する洪水調節の頻度が高い。	-	<ul style="list-style-type: none"> 洪水調節方法の見直し
局地豪雨対応	貯水容量が小さいため局地的豪雨への対応に課題がある。	○	<ul style="list-style-type: none"> 降雨予測の活用による事前放流、遅れ操作発生時の操作方法の検討
常用洪水吐きの代替	常用洪水吐きが1門のみで故障の場合の代替がない。	-	<ul style="list-style-type: none"> 代替施設の検討

※1適用 ○：降雨予測により対応可能 *：水位放流方式により対応可能 **：VR方式により対応可能 -：別途方法で対応
 ※2対応策 太字は降雨予測、水位放流方式、VR方式を利用した対応策

■ 治水（続き）

ダム操作の課題		具体事例等	適用 ^{*1}	対応策 ^{*2}
ダム操作	洪水時操作	洪水調節を発電施設で実施するため洪水時の発電放流からダム放流への切り替えが課題となる。	-	・発電放流設備と洪水吐きの併用による洪水調節の規則化
	事前放流、予備放流	予備放流が実施できていない。	○	・降雨予測の活用による予備放流、事前放流の検討
		超過洪水時に事前放流が実施できていない。		
	後期放流操作	下流氾濫時の後期放流操作について規定がない。	○	・降雨予測を活用した下流浸水状況に応じた後期放流方法の検討
	水位低下制限	貯水池内地滑りによる水位低下速度制限により洪水調節後の水位低下に時間を要する。	-	・貯水池内地滑り対策実施による水位低下速度制限の緩和
	但し書き操作	但し書き操作実施時に下流で浸水する。	○ **	・下流河道のネック部解消 ・降雨予測の活用による但し書き操作時の最大放流量低減の検討 ・VR方式による放流の実施
		複数ダムとの連携による安全な但し書き操作の実施が課題である。	○ **	・各ダムの放流特性を考慮した但し書き操作の検討 ・降雨予測の活用による複数ダムでの放流操作の高度化・連携の検討 ・VR方式による放流の実施
但し書き操作を実施したにもかかわらず治水容量が満杯になっていない。		○ **	・降雨予測の活用による但し書き操作の検討 ・VR方式による放流の実施	
降雨予測	降雨予測の精度が十分でないため、洪水調節時に予測雨量が活用されていない。	○	・WRF等による降雨予測精度の向上	
下流河道状況	下流河道の流下能力不足	下流流下能力ネック区間の存在により暫定操作規則となっており所要の治水安全度が発揮できていない。下流河道未整備のため暫定的に定開度（自然調節）方式を採用している。	○	・降雨予測の活用による洪水規模に応じた操作の検討 ・下流河道の改修
		下流で被害が発生しているにもかかわらず、上流ダムで洪水調節を行っていない。最大放流量の放流によりダム下流で浸水する。	○	・降雨予測の活用による最大放流量低減可能性の検討 ・最大放流量の見直し ・下流河道の改修

※1適用 ○：降雨予測により対応可能 *：水位放流方式により対応可能 **：VR方式により対応可能 -：別途方法で対応
 ※2対応策 太字は降雨予測、水位放流方式、VR方式を利用した対応策

■ 治水（続き）

ダム操作の課題		具体事例等	適用 ^{*1}	対応策 ^{*2}
下流河道状況	下流流下能力との不整合	下流河道改修の進捗にもかかわらず限度カーブを改訂していない。	-	・放流限度カーブの見直し
		洪水調節開始流量の根拠が不明、またはその後の改修により過小となっている。	-	・洪水調節開始流量の再検討
		最大放流量に対し下流河道の流下能力に余裕がある。	-	・洪水調節方法の見直し
ダム計画	統合管理	統合管理事務所直轄ダムであるが洪水調節に係わる統合管理操作を実施していない。	○	・降雨予測の活用による利水ダムを含めた統合管理
		後発ダムの建設に対し操作規則を改定していない。	-	・後発ダムを考慮した操作規則の見直し
		シリーズダムであるが他機関管轄ダムからの放流連絡が遅く放流操作に苦労している。	○	・降雨予測の活用による円滑な放流連絡体制の確立 ・放流連絡体制の見直し
ダム管理	制限水位の設定	期別に制限水位を設定しているが、近年の出水状況の変化に対応できていない。	-	・近年の出水状況に合わせた制限水位の見直し
	河川整備基本方針対応	基本方針見合いの洪水調節が不可能又は今後の検討が必要である。	-	・基本方針計画を反映した、操作規則の立案
ダム管理	流入量把握	波浪の影響により貯水位から換算する流入量の把握が困難である。	-	・流出解析により即時に算定する流入量による検証 ・観測地点の追加等貯水位観測方法の改善 ・使用水量報告の改善

■ 環境

ダム操作の課題		具体事例等	適用 ^{*1}	対応策 ^{*2}
富栄養化	富栄養化の進行によりアオコの発生等景観、利水に支障がでている。	-	・曝気循環等水質保全対策の実施	
栄養塩の捕捉	ダムによる栄養塩類の捕捉により海域の栄養塩が不足し海苔の養殖への悪影響が生じている。	-	・海域への栄養塩補給のための放流	
濁水の長期化	洪水による濁水の長期化により漁業等に支障がでている。貯水位の低下に伴い底泥が巻き上がるなど濁水時に濁水が生じる。	○	・降雨予測による利水容量回復を前提とした洪水直後の濁水の早期放流	
	濁水放流により苔が生えずアユの生育が悪化している。			
冷水の取水	躍層が形成され冷水を放流するため農業、漁業に支障が生じている。	-	・選択取水施設等の設置	
	冷水放流によるアユへの悪影響が発生している。濁水時の水位低下により冷水層から放流せざるを得ない状況が生じる。			

※1適用 ○：降雨予測により対応可能 *：水位放流方式により対応可能 **：VR方式により対応可能 -：別途方法で対応
※2対応策 太字は降雨予測、水位放流方式、VR方式を利用した対応策

■ 環境（続き）

ダム操作の課題	具体事例等	適用 ^{*1}	対応策 ^{*2}
強酸性水の流入	強酸性水の流入により河川環境、利水に支障がでている。	-	・中和処理施設の建設
流況変動の減少	流況変動の減少により、下流河道の河原の減少、滞筋固定化、瀬・淵の減少、樹林化、生態系の変化等が見られる。	○	・降雨予測を活用したフラッシュ放流、弾力運用による流況変動の再生
正常流量の不足	発電バイパス区間などの無水区間において正常流量が不足し、アユの遡上阻害などの課題がある。	○	・降雨予測を活用した弾力運用 ・発電運用見直しによる維持流量確保
土砂供給	土砂供給の減少により下流河道で河床が低下している。	-	・排砂施設設置、置き砂等の土砂対策
	土砂供給の減少により下流河道の河床材料の粒度分布が変化し、粗粒化・アーマー化している。	-	
	ダム直下にシルト粘土が堆積している。	-	・洪水期における清水放流
弾力的運用	降雨予測精度が低いため、効果的な弾力運用が実施できない。	○	・WRF等による降雨予測精度の向上

■ 利水

ダム操作の課題	具体事例等	適用 ^{*1}	対応策 ^{*2}
発電放流との調整	融雪流出を期待して3月末に貯水量を最低にするが、融雪量が少なく満水に至らないため渇水の一因となっている。	-	・融雪期前の発電運用、用水補給方法の見直し
確保流量	確保流量を確保すべく放流するが途中の利水者により貯留、放流されるため仕上がり流量が不安定となっている。	-	・利水者との調整・連絡
渇水調整	渇水時に需要未発生の利水に係わる貯留水の配分を巡って調整が難航する。	-	・渇水調整方法の規則化
利水計画	比較的豊水の時代に利水計画を策定しており、近年利水容量が枯渇する年が多い。	-	・利水計画の見直し
取水時期の変化	当初計画では8月に農水取水のピークがあったが、取水時期の早まりにより貯留期間中の補給が必要となっている。	○	・長期的な降雨予測を活用した利水補給方法の検討
夏期制限水位移行	夏期制限水位移行時の無効放流の有効活用を図る必要がある。	○	・降雨予測を活用した利水補給、フラッシュ放流、弾力運用
渇水時補給方法	利水容量が枯渇するとダム下流の流況が一気に悪化する。	-	・渇水時に確保流量を段階的に低減させる等渇水調整方法の工夫
無効放流	補給放流後の下流域における降雨により結果的に補給が無効放流となることがある。	○	・ダムから基準地点までの流下時間内の降雨予測を活用した補給方法の検討

※1適用 ○：降雨予測により対応可能 *：水位放流方式により対応可能 **：VR方式により対応可能 -：別途方法で対応

※2対応策 太字は降雨予測、水位放流方式、VR方式を利用した対応策

2.4 洪水調節手法に関する既往の研究成果

ここでは、ダム洪水調節手法について、過去に研究された事例について述べる。まず、主に超過洪水への円滑な対応を主な目的として考案された VR 方式を用いた研究が数事例存在する。これらは、過去の洪水時における流入量の低減状況を基準として、ダムの空き容量を考慮しつつダム洪水調節操作を行うものであり、超過洪水発生時の下流被害を緩和する効果が期待されている。このほか、山田らを中心に流入量特性を活用した放流量の決定方法に関する研究が行われている。この手法は、過去に発生した洪水におけるピーク流入量、降雨量と総流入量の関係から総流入量を算定し、これを事前に放流するものである。さらに、これらの手法に予測降雨に関する情報を加えて、放流量をより高度に算定する手法も試みられている。今村らは、迎洪水位が低い状態で洪水が流入した場合の円滑な洪水調節移行操作を行う手法として水位放流方式を考案し、その適用性についてシミュレーションを行って検証している。このほか、高棹らは、ダムからの最適放流操作を行う手法として、Dynamic Programming を応用してファジィ理論、AI、ニューラルネットワークを用いた操作支援システムの構築に関する研究を行っている。さらには、地球温暖化に伴うダム操作に関する研究として、小尻らは地球温暖化による気候変動を踏まえて、GCM20 の予測降雨値を用いつつ、分布型モデルによる流出計算を実施し、ダム流入量に与える影響を求めている。環境に係わるダム操作に関する研究としては、角らによるフラッシュ放流の効果に関する研究のほか、治水安全度に配慮した弾力的運用のあり方、冷水、濁水長期化への対応策などに関する研究が行われている。以下に個別にこれらの研究の概要について述べる。

2.4.1 ダムの空き容量を考慮したダム洪水調節操作に関する研究（VR 方式）

計画を上回る超過洪水が発生して、ダムの容量が不足すると想定され、但し書き操作に入る場合に、極力最大放流量を下げ、下流被害を最小化することを目的として提案された手法である。現在実施されている操作規則に基づく「但し書き操作」に変わって、過去に発生した洪水における流入量低減曲線を参考にしつつ、ダムの空き容量を有効に活用するべく、放流量を決定する手法として、VR 方式が提案されている。

この手法は、裏戸^{7)、8)、9)、10)、11)}が提案した手法であり、既往の洪水における流入量の低減状況を基準として各時刻の空き容量から判断して、以後流入すると推定される洪水量を空き容量内で貯留できない場合に、放流量をあらかじめ定めた放流率に従って、逐次増加していく操作方式である（空き容量に余剰が発生する場合は逆に放流率を下げることとなる）。ここに、放流率については、過去に発生した複数の洪水の流入波形を参考に、空き容量を使い切る放流率 R について、空き容量 V との関係を示した VR 曲線をあらかじめ作成しておき、この VR 曲線に従って放流

率を決定することとしている。

VR方式は、現行の但し書き操作よりも放流開始時期が早まるとともに、空き容量を使い切るように合理的に放流量を定めることから、現在ダム管理において採用されている但し書き操作に比べて、下流への最大放流量を低減でき、氾濫被害も抑えられる長所がある。これについては、裏戸による検討⁸⁾、及び竹下ら^{1 2)}、松浦ら^{1 3)}における検討において、過去に発生した超過洪水や想定したモデル洪水により検証されている（表-2.4.1参照）。しかし、検証対象としたダムの数が少ないこと、対象洪水にモデル洪水も含まれており、過去に経験した多くの厳しい洪水群について、その有用性を検証したとは必ずしもいえないため、現場における導入を技術者が躊躇する結果となっているものと思われる。

表-2.4.1 VR方式におけるシミュレーション検討状況

研究者	対象ダム	対象洪水	検討成果
裏戸	早明浦ダム 洪水調節容量 90,000千m ³	昭和50年8月洪水実績 平成9年9月洪水の1.6倍	現行ただし書き操作に比べ、最大放流量を、昭和50年8月型で約850m ³ /s、平成9年9月型で約400m ³ /s低下させることができた。
竹下ら	Aダム Bダム Cダム	モデル洪水。 ダムの計画洪水を設計洪水 流量で引き伸ばした洪水	現行操作に比べVR方式での操作は、最大放流量を7割～8.5割程度に抑えられる。 VR方式はただし書き操作に入る時間帯が現行操作よりも早くなる傾向がある。
松浦ら	早明浦ダム 洪水調節容量 90,000千m ³	平成17年台風14号実績 平成16年台風16号の1.6倍	現行ただし書き操作に比べ、最大放流量を、両洪水とも約600m ³ /s程度低下させることができた。 初期～中期の放流量が多く、空き容量を残して洪水調節が終了するケースが見られた。

竹下^{1 2)}らは、3ダムを対象にダムの計画洪水波形を設計洪水流量で引き伸ばしたモデル洪水を想定して、現行操作規則に基づく方式とVR方式によった場合についてそれぞれシミュレーションを行っている。この結果、VR方式は現行操作規則に基づく方式よりも但し書き操作による放流量増加操作に入る時刻が早くなり、放流量増加率は小さくなることから、最大放流量が現行操作規則の7割～8.5割程度に抑えられることが確認されている。

また、松浦ら^{1 3)}は、早明浦ダムでの平成17年台風14号実績洪水及び平成16年台風14号洪水を1.6倍に引き伸ばした洪水を用いて、VR方式を適用したシミュレーションを行っている。この結果、VR方式では操作規則に基づく操作よりも最大放流量を抑えることが可能であることを確認している（図-2.4.1参照）。課題として、

過去の洪水波形から VR 曲線を設定しているため、過去の洪水と異なる波形の洪水に対しては適合性が低いこと、また、VR 曲線が図-2.4.2のように空き容量 0 付近で急激に放流率が上昇する特性があるため、場合によっては、洪水調節終了間際に放流量が急増する可能性があることを指摘している。この点については、考案者の裏戸も VR 曲線の精度向上や対象波形範囲拡大のため、できるだけ複数の洪水を用いて試算することや複数の既往洪水を用いて VR 曲線を作成することを推奨している。

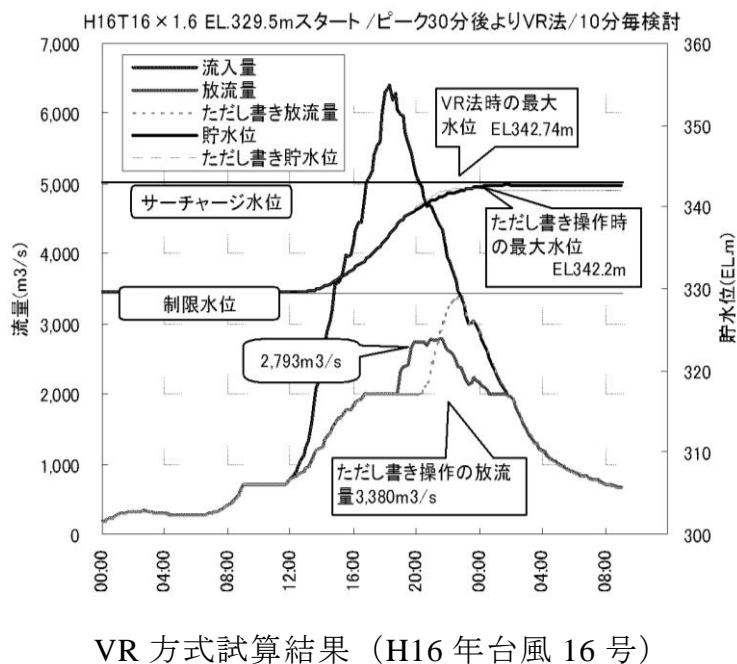
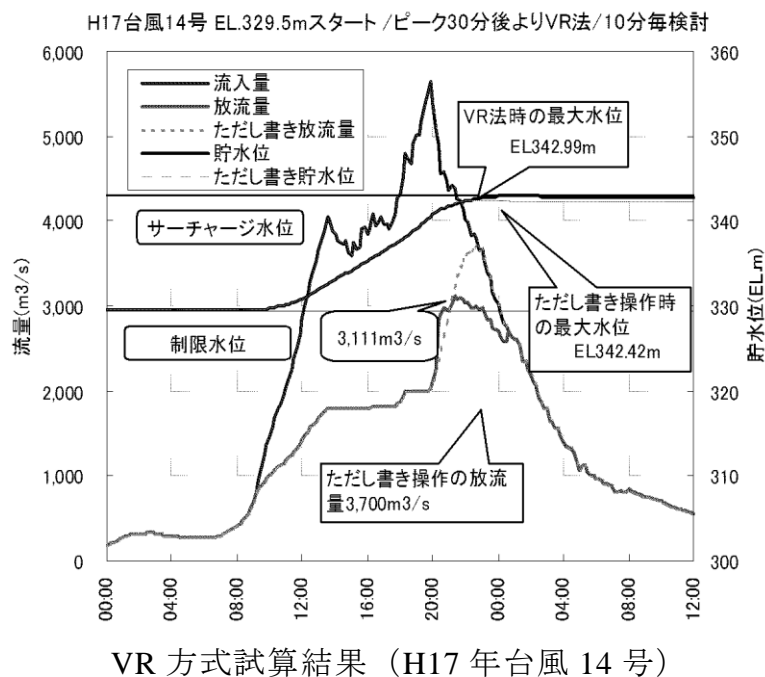


図-2.4.1 松浦らによる VR 方式でのシミュレーション結果^{1 3)}

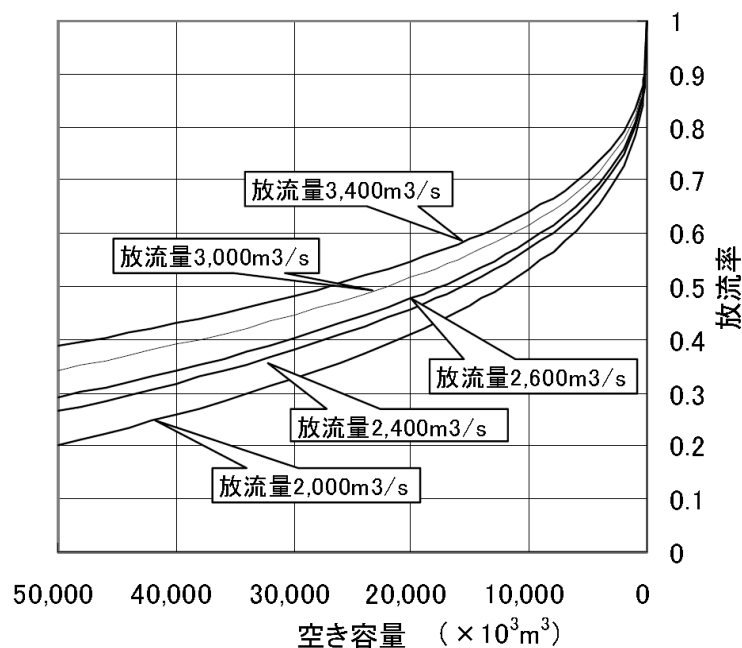


図-2.4.2 VR 曲線¹³⁾

一方、台風性豪雨のような台風進路を監視することにより、降雨のピークを把握することが可能である豪雨に対しては、洪水中に適切な VR 曲線を選択することにより精度確保を図ることが可能なことから適合性が高いとしている。

現場への導入にあたっては、さまざまな波形の実績洪水について、適用可能か検証することが必須であり、特に VR 方式適用が適する空き容量の範囲のほか、流入低減曲線のパラメータの設定手法等についても検討が必要と思われる。

2.4.2 流入量特性を活用したダム容量の効果的な活用に関する研究

秋葉ら¹⁴⁾、戸谷ら¹⁵⁾、下坂ら¹⁶⁾、腰塚ら¹⁷⁾は、過去の洪水から把握できる洪水低減部における総流入量を算定することにより、ダムへの流入量を簡便に算出し、これを事前放流することにより、ダムの洪水調節機能の向上と利水安全度の保全の両立を図るダム運用方法を提案している。

その放流ルールの考え方は、図-2.4.3、(2.4.1)式に示すとおりであり、洪水ピーク後に確実にダムへ流入する量を事前に放流することを基本的な考えとしている。具体的な放流方法の算出方法としては、(2.4.1)式に示すように、ダム貯水池における流入量と放流量の連続式を満たすように放流量を決定する。

$$Q_{out} = Q_{in} + \frac{dV}{dt} \quad (2.4.1)$$

ここに V : 流入ハイドログラフ逡減部の総流入量[m³]

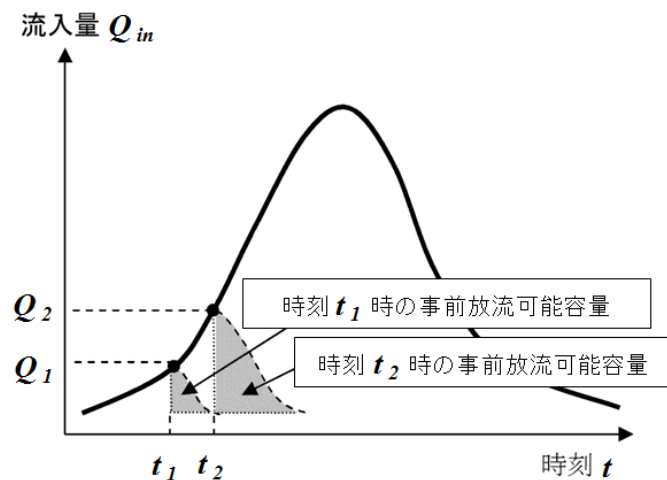


図-2.4.3 山田方式による事前放流量算出の考え方（逡減特性方式の場合）

実際のダム管理にあつては、洪水時の非常に緊迫した中での確かつ瞬時の判断力が必要とされる。このため、(2.4.1)式を簡便に算出するため、ある時刻における流入量や降雨量などダム貯水池において迅速かつ容易に把握できる水文諸量から、その後貯水池へ流入する総流入量を算出することを提案している。具体的には、放流量の算出方法として、以下に示す逡減特性方式と総降雨量方式の2つの決定方法を提案している。

逡減特性方式は、ダム貯水池への時々刻々の流入量から放流量を算出する方法であり、図-2.4.4に示すような、流入量と逡減開始からの総流入量の関係図を事前に作成し、事前放流量を決定する手法である。

(1) 逡減特性方式

$$Q_{out}(t) = Q_{in}(t) + \frac{dV(t)}{dQ_{in}(t)} \cdot \frac{dQ_{in}(t)}{dt} \quad (2.4.2)$$

上式において、 $\frac{dV(t)}{dQ_{in}(t)}$ の部分（流入量の変化の割合における総流入量の変化の割合）は、図-2.4.4の関係式（LINE1~3のいずれか）より算出し、

それを単位時間あたりの流入量に乗じて放流量を算出する。

これを単位時間の流入量毎について行い、時刻毎に放流量を決定していく。

(2) 総降雨量方式

総降雨量方式は、時々刻々の降雨データ（累積降雨量）を元に放流量を算出する方法であり、図-2.4.5に示す累積降雨量 $R(t)$ と総直接流出量との関係を用いることにより、事前放流量を決定する手法である。

$$Q_{out}(t) = Q_{in}(t) + \frac{dV(t)}{dR} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = Q_{in}(t) + \frac{dV(t)}{dR} \cdot r(t) \quad (2.4.3)$$

$r(t)$: 時々刻々の降雨量 (mm/h)

上式において、 $\frac{dV(t)}{dR}$ の部分 (総雨量(mm)の変化の割合に対する総直接流出量(m³)の変化の割合) は図-2.4.5 の関係式 (Line A~C のいずれか) より算出し、それを単位時間あたりの降雨量に乗じて放流量を算出する。

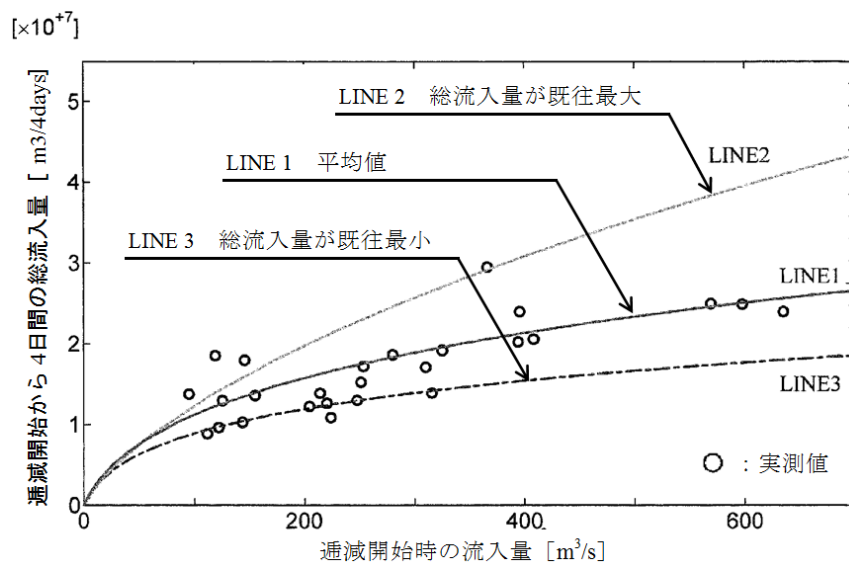


図-2.4.4 流入量と透減開始からの総流入量の関係 (草木ダム流域) ¹⁴⁾

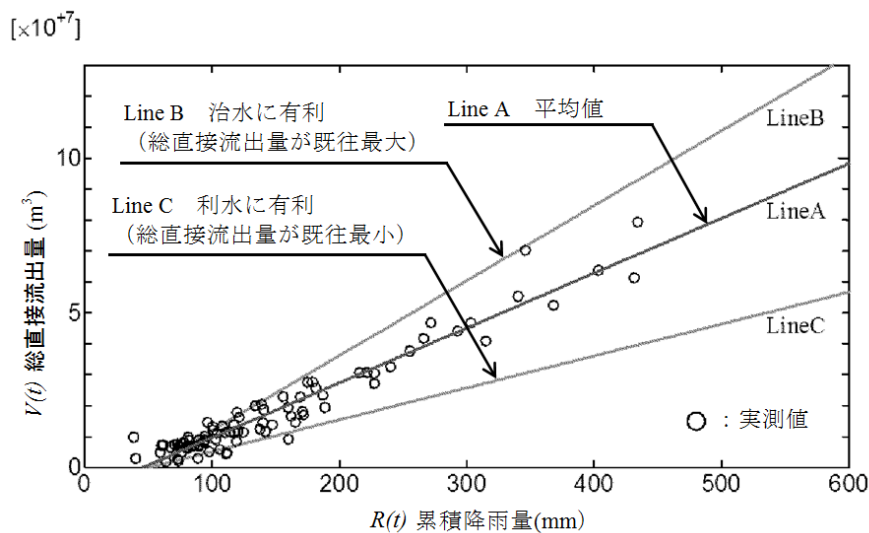


図-2.4.5 総降雨量と総直接流出量の関係 (草木ダム流域) ¹⁶⁾

いずれの方式も直接流出量との関係にバラツキがある場合は、治水に有利なライン (LINE 2、Line B)、利水に有利なライン (LINE 3、Line C) などダム管理者サイドで出水の出現頻度や洪水調節、利水安全度への配慮の必要性に応じて図-2.4.4のLINE1~3、図-2.4.5のLine A~Cを決定することができるとされている。

この手法を用いた事前放流による洪水調節効果として、渡良瀬川草木ダムの2001年9月洪水流量を対象に検証が行われており、事前放流によりダム水位を約10m低下させ、ダム空き容量を大幅に増大させた状態で洪水を迎えることができるとともに、その後は草木ダムの洪水流量 $500\text{m}^3/\text{s}$ に達した時点から通常の実操作規則に切り替えた結果、但し書き操作への移行を回避したことを示している。また、洪水後は、逓減部の流入量を貯留することによりダム貯水位は制限水位まで回復した (図-2.4.6 参照)。

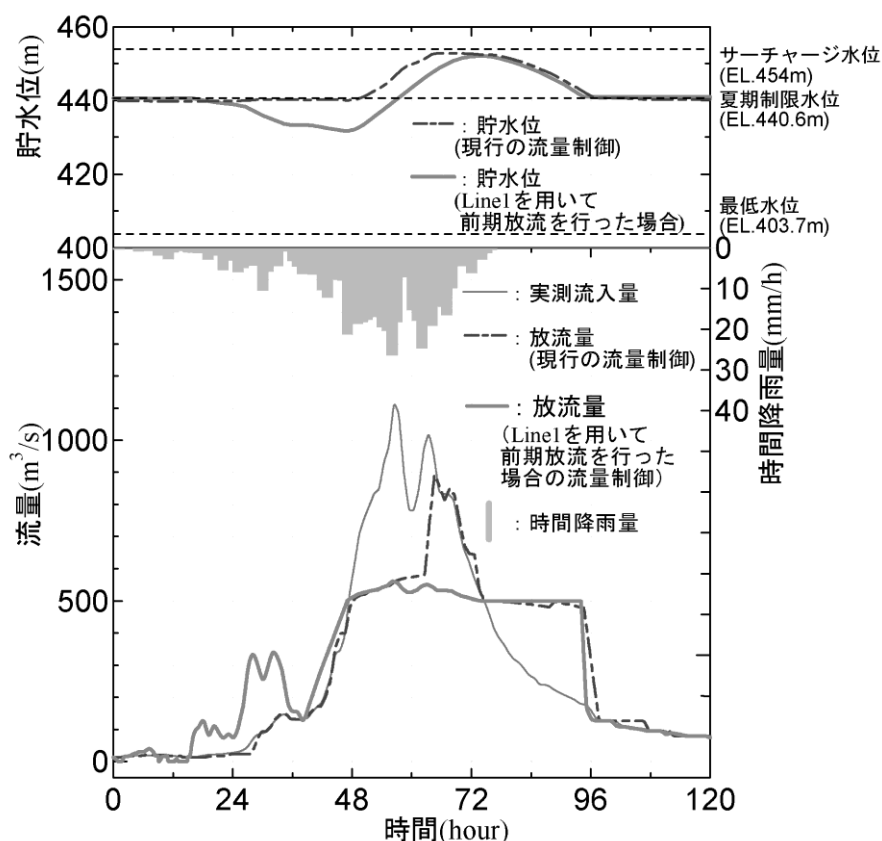


図-2.4.6 逓減特性方式 LINE1 を用いて実施した事前放流の効果¹⁴⁾
(草木ダム 2001年9月洪水)

上記に概要を示した山田らによる洪水調節方式は、事前放流を実施することにより、特定の洪水にあっては、但し書き操作を回避するなど治水上一定の効果があることが示されているが、利水安全度の確保に配慮した結果、事前放流量は、今後、ダムへの流入が確実に見込める量に限定されている。また、事前放流は、流入量を

上回る放流を行う操作、すなわち、いわば人工的に洪水を発生させる操作であり、下流河川利用者への影響などリスクを伴うものであることから、その実施は超過洪水の発生とそれに伴う治水容量の不足が予想される場合に限定するなど慎重に判断することが望ましい。

2.4.3 予測雨量を用いたダム洪水調節に関する研究

予測雨量を用いたダム洪水調節に関する研究として、松木ら¹⁸⁾による下流河川の状況に応じて総流入量を全量カットする方法、青山¹⁹⁾による超過洪水に対して大規模災害を避けることを目的とした洪水調節操作を変更する方法、北田ら²⁰⁾によるダム流域の流入特性に基づいた事前放流による洪水調節方法が提案されている。いずれの方法にあっても、精度の高い降雨予測を得ることがその大前提であり、今後、降雨予測精度のさらなる向上が期待される。

(1) 下流河川の水位に応じたダム操作方法

松木ら¹⁸⁾は、流入量ピーク後もしくは雨量ピーク後において過去の洪水到達時間内実績雨量と以降6時間の予測雨量の全量が流入すると仮定して総流入量を求め、この総流入量が空き容量より小さい場合に全量カットに移行するといった操作を検討している。ここに空き容量としては、下流河川の水位が避難判断水位以上の時は但し書き操作開始水位までの空き容量、氾濫危険水位以上の時はサーチャージ水位までの空き容量、氾濫が発生している時は設計洪水位までの空き容量とそれぞれ定義し、下流河川の状況に応じた操作を行うこととしている。なお、損失雨量を考慮せず降雨全量が流入すると仮定することについては予測誤差に対する安全率として評価している。

(2) 大被害発生水位を睨んだダム操作方法

青山¹⁹⁾は、超過洪水に対し大被害を回避するダム操作として以下の方法を提唱している（図-2.4.7参照）。超過洪水発生が予測された段階で、洪水調節開始流量からの調節を実施せず流入＝放流の操作により洪水調節容量を温存する。下流河川における水位が大被害発生水位（当該水位を超えると大被害が生じる水位）を越えると予測した段階で、当該水位を超えないように洪水調節を開始する。水位上昇の予測は、予測雨量を利用して行う。以上の操作により但し書き操作時に発生する大被害を回避することが可能となる。この操作の課題としては、超過洪水の発生を洪水初期の段階で予測する必要があるとともに、洪水調節中にも下流河川の大被害発生水位以上に水位が上昇することを予測する必要がある。また、無害流量以上の放流を行うため、中小規模の氾濫の許容が前提となる。

田口ら²¹⁾は、阿木川ダムにおいて上記の考え方を踏まえ、台風の位置・進路、前線の位置、ダム流入量の12時間予測値を参考に、洪水時の放流量を公

園浸水回避流量、床下浸水回避流量、床上浸水回避流量と段階的に上げる操作を検討した（図-2.4.8 参照）。

当該操作手法は、川内川鶴田ダムにて下流鶴田地区や宮之城地区の家屋浸水防御に配慮して規定されている暫定操作規則に類似しているが、ここでは、公園や床下浸水など必ずしもその保全が必然性を有しない問題が残されている。

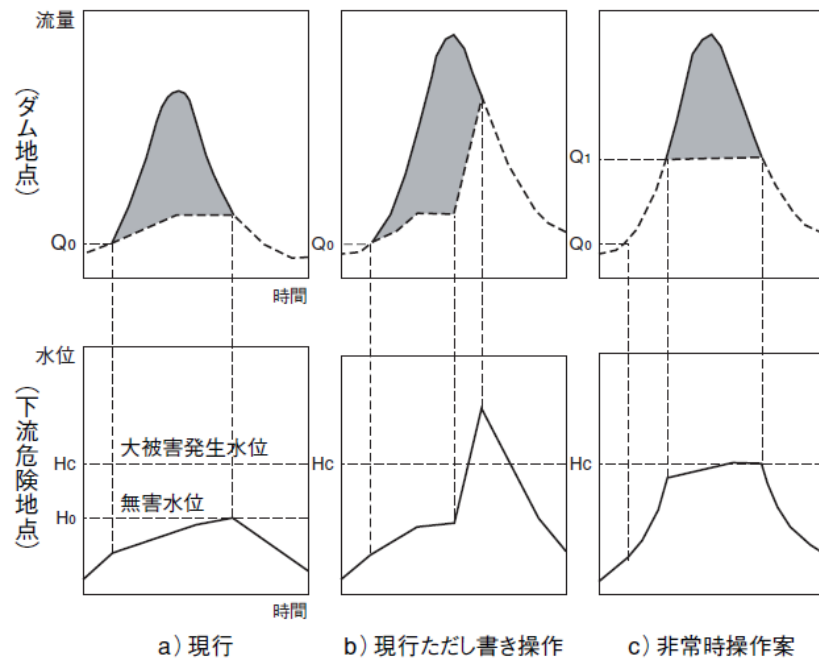


図-2.4.7 ダムの洪水調節と下流水位の変化¹⁹⁾

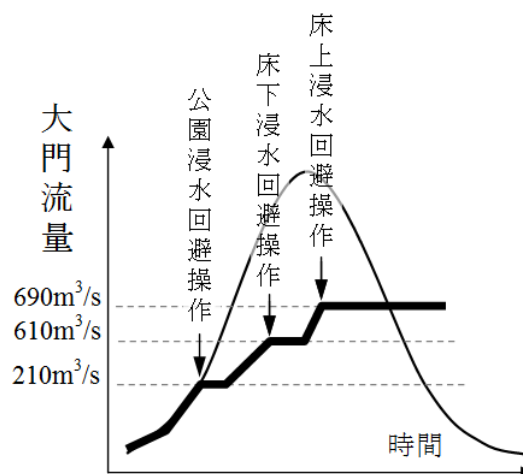


図-2.4.8 阿木川ダムにおける大被害回避のための操作案²¹⁾

(3) 降水短時間予報を用いたダム流域の流入特性に基づいた洪水調節方法

北田ら²⁰⁾は、前項において説明した事前放流手法と、気象庁の降水短時間予報（30分間隔で発表され、6時間先までの各1時間雨量を予測する）による予測降雨量の累積値を用いて、事前放流量を用いた洪水調節シミュレーションを実施している。

対象は、渡良瀬川の草木ダム（流域面積 254km²）であり、事前放流量決定に用いる累積降雨量と総直接流出量の関係は、過去の草木ダム流域の実績洪水から関係を設定している。

予測降雨量を用いた事前放流は、時間 t において n 時間後に降ると予測された雨によって貯水池に入ると想定される量を時間 t において放流することとしている。

このようなモデルを用いて、2007年9月の台風9号の実績洪水（草木ダム既往第2位洪水）を対象に、降水短時間予報による雨量を用いたシミュレーションを実施している。

この結果、図-2.4.9に示すように、現行の操作規則では但し書き操作に入っているのに対して、予測降雨量を用いて事前放流を行ったケースでは、ダム貯水池への流入がピークを迎える前に事前放流を行い、空き容量を大幅に増大させて、但し書き操作を回避する洪水調節に成功している。また、洪水終了後には利水容量も回復している。

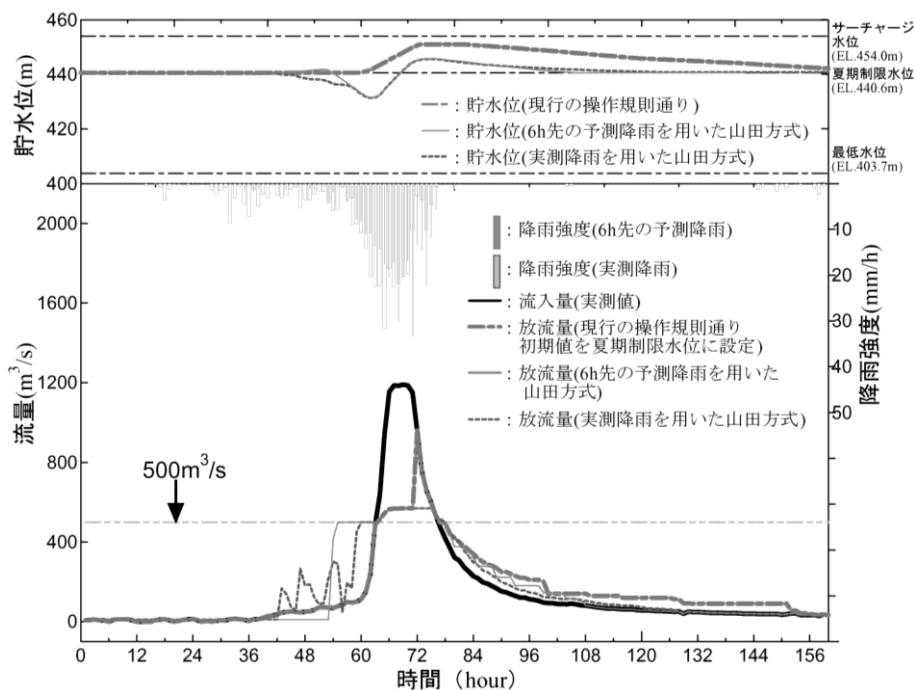


図-2.4.9 6時間先の降雨予測を用いた事前放流の効果²⁰⁾
(草木ダム 2007年9月洪水)

今後、波形や洪水規模が異なる検討により、予測雨量を用いることによる効果について検証されることが望まれるほか、降雨予測についても気象庁の行う6時間予測では、治水機能向上にも自ら一定の限度があるため、WRF等の技術を活用しつつ、これを大幅に超える長時間の降雨予測を実施することが期待される。

2.4.4 下流河川への放流限度を考慮した洪水調節移行操作に関する研究

制限水位を大きく下回る迎洪水位において洪水が発生した際に、利水貯留操作から洪水調節操作に移行する際のダム操作にあっては、下流河道の水位上昇速度制限に配慮した放流限度を守りながら、貯水位を制限水位にすり付けさせ、貯水位が制限水位に達する時点までに操作規則において定められた所定の放流量を放流することが求められる。また、迎洪水位が制限水位より極端に低い場合は、洪水調節を円滑に実施することに加えて、中小洪水に終わった場合に備えて、利水容量の回復も考慮しなければならない。

以上の課題に対応すべく、今村²²⁾、²³⁾、今村ら²⁴⁾は、下流河川への放流限度を考慮した「水位放流方式」によるダム放流操作を提案している。「水位放流方式」は、下流放流限度を遵守しつつすり付け操作が可能な流入量を限界流入量と定義し、流入量が限界流入量に達した時点ですり付け操作を開始する操作である（図-2.4.10参照）。

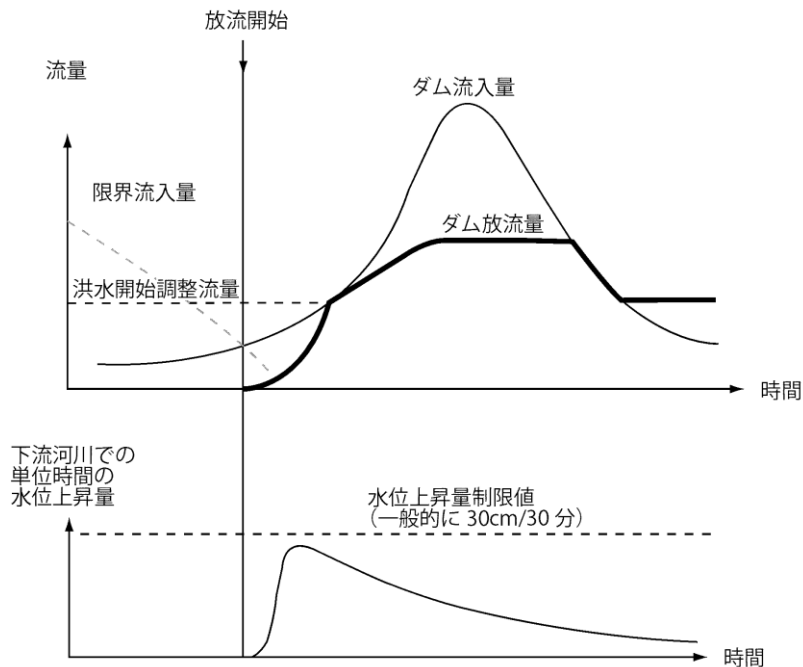


図-2.4.10 水位放流方式によるすり付け操作

ここに、限界流入量 $Q_{ic}(t)$ とは、洪水初期のある時点における洪水期制限水位までの空き容量やダム放流量、洪水調節開始流量、下流河川における河道特性から求まる水理量であり、次式で示される。

$$Q_{ic}(t) = \frac{H_c \cdot \sqrt{K} \cdot V_w(t)}{\sqrt{Q_s}} \quad (2.4.4)$$

H_c : 下流河川における水位上昇量の限度 (30分/30cm 等)

K : 河道定数。河道 $H-Q$ の $Q = K(H-a)^2$ としたときの係数 K

$V_w(t)$: 時刻 t での洪水期制限水位までの空き容量

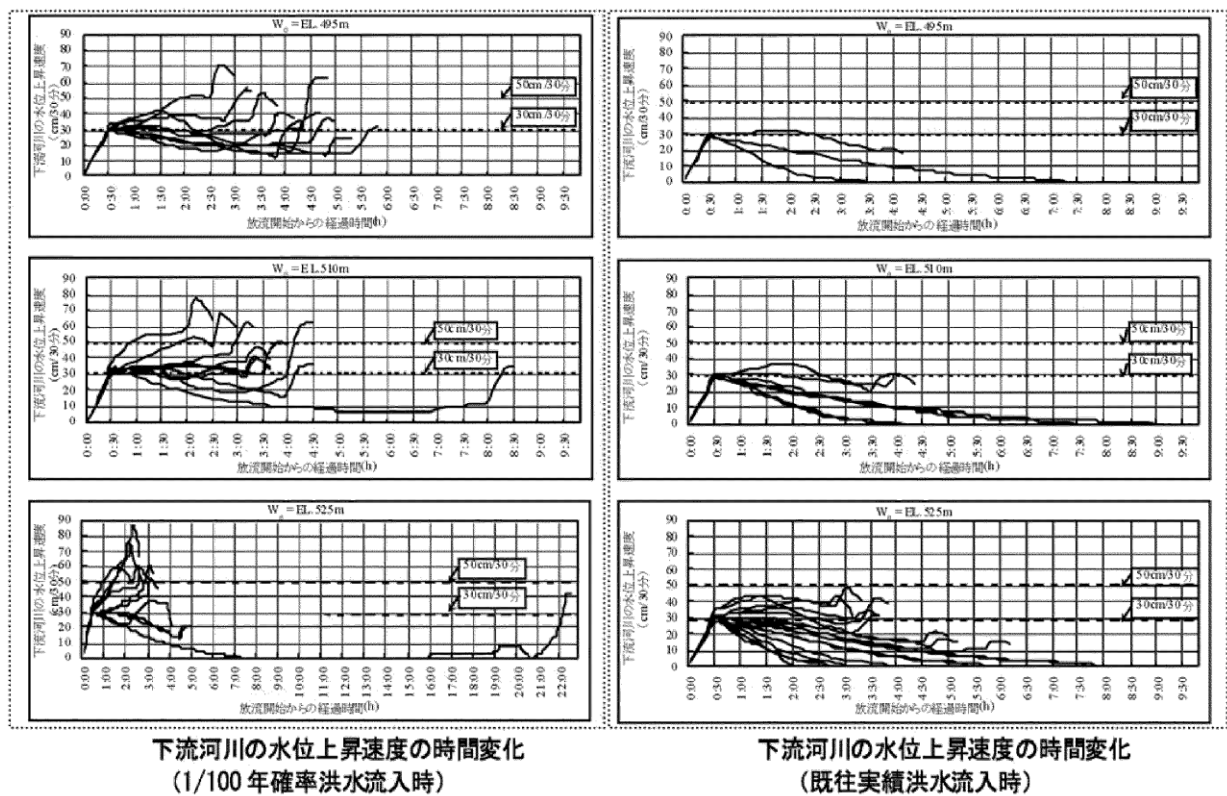
Q_s : 洪水調節開始流量

放流量については、貯水位に基づく貯留量と関連づけた放流関数として設定しておき、これに基づいて貯水位に応じた放流量を決定することとしている。一般的に放流関数は、放流開始後の貯留量 $V(t)$ の二次曲線として定められている。放流開始後の放流操作をこの式に基づき実施すれば、貯水位が制限水位に達する時点までに、放流量 \doteq 流入量 $=$ 洪水調節開始流量となる。

大谷ら^{2,5)}は、滝沢ダムをモデルケースとして、計画規模 1/100 相当の洪水 10 洪水及び過去の実績洪水でピーク流量が $100\text{m}^3/\text{s}$ を上回る洪水 23 洪水を対象に水位放流方式によるシミュレーションを行っている。この結果、計画規模 1/100 相当洪水では、限界流入量によって放流開始時期を判断し水位放流方式に基づいて放流操作を行った場合、半数近くのケースで下流河川の水位上昇速度が 30~50cm/30 分を上回ることが確認され、必ずしも水位放流方式で下流河川の水位上昇速度が厳守されないことを指摘している。一方、実績洪水の検討では、迎洪水位を EL.495m (最低水位)、EL.510m、EL.525m の三種類で検討しているが、いずれのケースでも 30~50cm/30 分を上回ることとはなく (図-2.4.1.1 参照)、利水容量の回復の観点から見れば、制限水位に達しない洪水では 60%~90% の回復率が期待できる結果となっている。

これらより、水位放流方式は、1/100 洪水などの大規模な洪水では、必ずしも水位上昇速度制限が遵守されない点に課題はあるものの、特定の洪水においては、限界流入量を目安とした客観的な判断基準のもとダム放流操作を開始することができ、下流河川の水位上昇速度制限を守りながらの洪水調節への移行が可能な操作方法としている。また、貯水位が制限水位より極端に低い場合における洪水調節前の利水容量の回復効果についても期待できる操作方法としている。

今後の課題として、現場において導入を図るためには、前述した水位上昇速度も遵守できるよう改善することが必要とされるほか、さまざまな迎洪水位や洪水波形により、その有効性を確認することが求められる。



下流河川の水位上昇速度の時間変化
(1/100年確率洪水流入時)

下流河川の水位上昇速度の時間変化
(既往実績洪水流入時)

図-2.4.1 1 大谷らによる水位放流方式での下流河川の水位上昇速度の時間変化
検討結果²⁵⁾

2.4.5 ファジィ理論やニューラルネットワークなどの数学的理論を取り入れた 操作支援システムの研究

ダムからの最適放流操作については、DP (Dynamic Programming) やファジィ理論、ニューラルネットワークを用いて操作支援システムの構築を図る研究が行われている。

小尻ら²⁶⁾は、洪水調節にファジィ理論を取り入れ、降雨量予測と結合したダム貯水池制御法を提案している。これは、貯水位、流入量、流入量増加率、予測総雨量を入力情報として、ファジィ制御則による放流量の決定、貯水池操作を行うものである。これにより、知識や経験が豊富なオペレーターが行う操作を理論化し、同等な操作が可能となり得るとしている。

加藤ら²⁷⁾、長谷部ら²⁸⁾は、ダム操作支援システムにニューラルネットとファジィ理論を取り入れ、操作方針部分にニューラルネットを、ダム放流量部分にファジィ理論を用いて決定するシステムを構築した。ニューラルネットによる操作方針は、ダムの基本操作となる「放流」、「貯水」、「維持」の3つの操作方針から最適なものを選択する方法で、ダム流域の水文資料や、ダム流入量、変化量、ダム水位等にニューロンを組み込み、最適操作方針を決定するシステムとしている。ダム放流

量には、ファジィ理論が用いられ、現在のダム流入量と流入予測量の二つの変数から、前述のダム操作方針を元にダム放流量を決定している。

これらは、原則として過去の洪水情報をもとに最適化を行っていくシステムであるため、現状で発生したことがないような洪水波形の異なる洪水や計画規模を超える超過洪水への対応については慎重な対応が望まれる。

高棹ら²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾は、ダム操作支援システムとして、降雨・流量の確率予測のように主として数学的なモデル化の適した定量的なデータ処理を行うシステムと、河川管理者個人の資質や経験に依存する定性的な情報処理を行うシステムの両者を統合したファジィ推論を用いるモデルを提案している。さらに、手法の異なる降雨・流量予測モデル等を複数利用でき、新たな予測モデル等も追加しやすいシステムとして、複数の独立した下位知識システム群とそれらを統括するメタ知識システムに分割したモデル構造により、不完全な知識の積極的活用とシステムの成長を可能にする多段階型知識ベース構成法によるシステム設計の提案を行っている。

上記のシステムを発展させた形であるダム群の最適配置・規模決定を扱った研究として、高棹ら³²⁾によって水量制御手法を DP 理論により解析する手法などが提案されている。しかし、現場における実際のダム管理の現状としては、利根川水系や淀川水系におけるダム群に代表されるように、低水管理については利水容量を費用負担した利水者にとらわれず、複数のダムの利水容量をプールで運用する統合的な運用が行われているものの、洪水管理についてはダム毎に定められた操作規則に則って行われており、降雨予測や洪水予測の精度の問題もあって治水面上における統合的管理は難しい状況にある。

2.4.6 地球温暖化に伴うダム操作に関する研究

森ら³³⁾は、地球温暖化による気候変動の影響を考慮して、気象庁の全球モデル GCM20 の予測値を降雨量として用いて分布型流出計算を行い、ダム流入量に与える影響を淀川流域の日吉ダムなどを対象として行っている。気候変動による淀川流域の流量特性の変化としては、全体的に流量の増加傾向が見られ、ピーク流量は大幅に増加する結果となっている。これより、今後、ダムにおける洪水調節や但し書き操作の頻度が増加することが予想される。

佐山ら³⁴⁾は、今後の地球温暖化を考慮した場合の淀川流域における洪水流量の増加、ダム操作への影響について、気象庁の地域気候モデル RCM20 の3期分（Ⅰ：1981年～2000年、Ⅱ：2031年～2050年、Ⅲ：2081年～2100年）のデータを用いて、分布型流出モデルにより検討を行っている。この結果、中小洪水頻度が多くなるⅡ期において、洪水流量が小さい日吉ダムにて洪水調節回数、但し書き操作の回数が増加している。高山ダムにおいては、Ⅰ期、Ⅱ期でほとんど変化はなく、頻度が増加した中小洪水は洪水調節の対象にならないことが予測される。計画規模を越えるよう

な超過洪水頻度が多くなるⅢ期においては、日吉ダムにおいて、但し書き操作回数がⅠ期に比べ増加している。

今後、このような地球温暖化による気候変動の影響を考慮したダム操作方法と併せて、クリーガー流量やダムの設計洪水流量の改訂について、検討が必要となると考えられる。

2.4.7 環境の課題改善に向けたダム操作に関する研究

ダム操作に関する環境に関する課題としては、ダム貯水池における冷水現象、濁水長期化現象や下流河川の流況変動減少に伴う河川環境の変化が問題となっているダムが比較的多く見られる。冷水現象、濁水長期化現象に関しては、選択取水設備による対応が多く、多くのダムで行われているが、梅田ら³⁵⁾は、選択取水設備運用時におけるモニタリングに重点をおいた「選択取水設備運用方法設定の考え方」を提案している。下流河川の流況変動減少に伴う河川環境の変化に関しては、角ら³⁶⁾がダムからのフラッシュ放流により一定の効果が得られることを五十里ダムでの調査結果より示している。フラッシュ放流を実施する際に併せて利用される弾力的運用について、実施時の治水の安全度を確保する方法として、一庫ダムでは、従来の活用水位を期間中一定に設定する方法ではなく、活用水位をある期間で徐々に制限水位に近づけていく「制限水位移行方式」による弾力的運用の試みが行われている³⁷⁾。このほか、角ら³⁸⁾、角³⁹⁾は、流域における土砂の健全な循環を目指して、ダムの堆砂を下流河道に還元する手法について研究を行っている。

2.5 WRFの開発と改良の歴史

2.5.1 WRF開発の経緯

WRFモデルは、実用的な天気予報や気候変動等に関連する研究のために米国NCAR / NCEP (The National Center for Atmospheric Research / National Centers for Environmental Prediction) によって開発された21世紀のメソスケール気象予測数値モデルであり、開発の経緯は以下に示すとおりである。

暴風雨災害の予測と解析に対して、メソスケール気象モデルが古くから用いられてきた。1970-80年代に広く使われていた、鉛直流を直接的に計算しない静力学モデル(静水圧近似モデル)は、計算時間が速いなどの長所があるが、水平格子間隔を10km以上程度に設定する必要があり、豪雨をもたらす積乱雲の空間スケールが数kmである点を考慮すると豪雨の予測には適さないという問題があった。

この問題を解決するために、1990年代からNCARとペンシルベニア州立大学、NCEP、NOAA(米国大気海洋庁)/FSL(予報システム研究所)、オクラホマ州立大学、コロラド州立大学などの予報機関や大学が、MM5、ARPS、RAMSなど、1kmメ

ッシュ程度で鉛直運動を含めた計算を行うことが可能な非静力学モデルの開発を個々に進めてきた。

このようにメソスケールモデルが乱立したことを受けて、学術研究と天気予報の現業の両方に対応した気象モデル、誰でも使えるコミュニティーモデルを統一的に開発することの要請がますます高まるようになり、この結果、モデル開発機関によるメソスケール気象モデルの共同開発プロジェクト「WRFプロジェクト」が発足し、従来の非静力学モデルの成果を統合する形で2000年にWRFのVer.1.0が構築された。WRFプロジェクトは、3次元変分法、4次元変分法、物理過程、アンサンブル予報などのワーキンググループ（WG）から構成されている。

最近までは、ハリケーン予測については、GFDL（プリントン大学地球流体研究所）のモデルが最も正確であるとされていたが、NOAA / NCEP / EMC（環境モデリングセンター）が非静力学モデルと海洋モデルを結合させた Hurricane WRF (HWRF)を開発し、NHC（全米ハリケーンセンター）の予報は2009年からHWRFに置き換わることになった。大型台風については、通常のWRFの予測精度は低い場合が多いが、近々公開されるHWRFを用いることにより、精度の向上が期待される。

2.5.2 降雨予測精度の向上と成果

観測値とその時刻の第1推定値（一般には前回予測値）とから最適解析値を求める3次元変分法のWGでは、最適解析値を決定するために一つの統計的誤差共分散を用いる通常の方法に対し、空間的に非一様な誤差共分散を用いた3次元変分法を開発した⁴⁰⁾。この手法の開発により、実際の擾乱の予測精度には空間分布がある点を考慮した同化が可能となった。

また、GPSシグナルの水蒸気吸収による遅延量を天頂までの総水蒸気量とみなすGPS可降水量を用いた研究⁴¹⁾も行われており、その成果は降雨予測精度の向上に大きく寄与するものである。

3次元変分同化技術を導入し、地上観測データによる初期値補正を行うだけでも、予測精度向上はめざましいものがあるが、地上観測データのみではなく、地上設置型や衛星搭載のセンサーで観測される接地境界層より上空の代表性のある観測データの活用が効果的である。例えば、GPS可降水量やXバンドMPレーダ観測では、陸上の水蒸気や雨滴情報を同化することにより短時間予測の精度を向上させる。しかし、日本のような島国では、大規模な豪雨を継続させる海上からの水蒸気の移流の方が重要であるにもかかわらず、それを直接観測するする手法は少ない。そこで、GPSを高度に利用し、GPS可降水量だけでなく、地上局のない場所の情報を得る方法が研究されている。

特に、低軌道衛星とGPS衛星の情報（地上付近での電波の屈折率）を利用して、

気温及び湿度の鉛直分布を観測する技術（GPS掩蔽法^{えんぺい}）を活用することにより、空間に密な気象情報を初期値に取り込むことが可能となった。この観測技術の開発成果を活用することにより、さらなる予測精度向上が期待される。

温度バランスを決める長波・短波放射過程や降水現象、地表面での熱・運動量輸送や乱流など物理過程を扱っている WG では、基本的には世界中の研究者が開発したさまざまな物理過程のスキームを、WRF 用にコーディング・実装し、予測精度が向上するかチェックしている。日本人が開発したヒートアイランド解析用陸面過程⁴²⁾や、大気中の乱れの大きさを予測する Mellor Yamada モデルを改良した大気境界層乱流クロージャーモデル⁴³⁾も導入されている。これらの改良は高度 1.5km 程度までの乱れの大きい層である大気境界層の再現精度向上や、都市の豪雨の予測に大きく寄与すると考えられる。

Ver.3.0 以降の大きな改良として、雲微物理過程のダブルモーメントスキームが研究され⁴⁴⁾、実装された⁴⁵⁾、⁴⁶⁾。雲微物理過程のダブルモーメントスキームとは、雲水、雨水、霰などの雲物理量について、質量混合比 (g/g) のみを予報するシングルモーメントスキームに対し、数密度 (m⁻³) も併せて予報する手法である。これは、MP レーダによる観測が開始され、それらに関する観測値が得られるようになったことが大きく寄与している。このスキームを適用することにより、豪雨に深く関係のある雲微物理過程をより精緻に計算することが可能となり、豪雨の予測精度向上に大きく寄与することが期待される。

2.6 流出解析に関する研究

ダム操作・運用に関しては、洪水のピーク流量、洪水波形を適切に評価することが必要である。また、高水計画のように実績洪水群の検証から、流域の安全性を考慮しつつ計画値を決めるのではなく、発生した洪水に対して流入量の予測を的確かつ迅速に行い、ダム操作の判断を直ちに行うため、想定される現象を統合化するとともに、発生した時点の浸透保水能等の流域状況を反映可能なモデルであることが望まれる。

ここでは、まず河川計画策定において、用いられてきた流出計算手法の特徴と適用性について概説するとともに、ダム操作の観点から、これらの流出解析手法の課題を整理する。さらに、近年、物理的な流出過程を表現するための流出解析手法として注目され、多くの研究者によって研究が進められるとともに、一部の一級水系において洪水予報に活用されている分布型流出解析手法について、洪水の再現精度、ダム操作、洪水予測などに関する適用性について整理する。

2.6.1 河川計画策定において用いられてきた流出計算手法

これまで河川計画策定にあたって、用いられてきた流出計算モデルは、(1)流出に寄与する有効降雨モデルと、(2)降雨量から流出量への変換過程モデルにより表現される。有効降雨モデルに関しては、一次流出率(f_1)－飽和雨量(R_{sa})法が用いられている場合が多く、降雨から流出への変換については線形、非線形で扱うものに大別され、1)線形モデルには、①合理式法、②単位図法、③流出関数法などがあり、2)非線形モデルには①準線形貯留型モデル、②貯留関数法、③特性曲線法、④タンクモデル法などがある。

これらの流出解析方法の一級水系における利用状況は、平成7年河川法改正以前に策定された工事実施基本計画、改正以降に策定された河川整備基本方針を比較すると、次のとおりである⁴⁷⁾。

- ・貯留関数法を用いている河川は、76%から97%に増加している。
- ・単位図法を用いている河川は11%から1%に減少している。
- ・合理式は、工事実施基本計画では7%の河川で用いられていたが、河川整備基本方針では用いられていない。
- ・特性曲線法は、工事実施基本計画では2%の河川で用いられていたが、河川整備基本方針では用いられていない。

以上の方法のうち、中小河川流域では、流域内の水文資料が少ないことから合理式法によりピーク流量を算定し、施設計画などでハイドログラフの作成が必要な場合には、合成合理式法により波形の作成を行っている場合が多い。この手法は、貯留効果を表現できないため、流域面積が大きくなると(一般的に概ね200Km²以下を適用範囲としている)ピーク流量の適合性が低くなる。また、流出率が洪水期間中一定として表現するため、ハイドログラフの適切な評価が困難である。

単位図法に関しては、流域の大きさ、流路延長、勾配から比較的容易に定数設定ができるという特徴があるが、貯留効果が大きい場合はピーク流量、ハイドログラフの表現が困難という合理式と同様の課題がある。

直轄河川における高水計画、ダム計画では、貯留関数法が用いられている場合が多い。貯留関数法は非線形性を表現できる手法であるため、規模の大きな河川でも、合理式と比べて比較的適合性が高いが、物理的モデルではなく、洪水中の流れの変化を表現することが困難であること、洪水毎の損失雨量に伴う立ち上がり部の表現が困難であるため、流入波形の予測が困難であるという課題がある。

洪水中の降雨強度の変化による斜面流れの変化を与える手法として二価の貯留関数法⁴⁸⁾が北海道開発局により検討が行われているが実河川での適用例は少ない。

また、洪水立ち上がり部の損失雨量を表現する方法として、タンクモデル法により、地下水流出、中間流出について表現するモデルがあるが、主に低水流出解析に用いられる手法であり、洪水流出と組み合わせた統合モデルは確立されておらず実績も

少ない。

2.6.2 既往流出モデルに関するダム操作の観点からの課題

ダム操作にあたっては、降雨の発生により、今後どのようなハイドログラフで洪水がダムに流入するかを速やかに把握することが重要であり、発生する洪水は、その時点での気象状況、流域状況によりそれぞれ流出が異なってくることから、計画策定時以上に精度が要求されることとなる。

このような観点から、既存流出モデルには、以下に示す3つの主要な課題がある。

(1) 降雨強度、降雨パターンによる流出量の変化を表現することが困難

貯留関数法により実績洪水の洪水予測を行った場合、ピーク流量の適合が困難な場合がある。これは、貯留関数法では、等価粗度法などにより斜面の流れ方が一定としているためである。実際は、洪水初期の水路、谷に流れが集中する場合と、洪水ピーク時の斜面全体に流れが発生する場合で、流れの現象が異なる。従って、洪水波形、洪水規模毎に流れの変化を物理的に表現できるモデルが必要である。

(2) 損失雨量の変化による洪水立ち上がり部の予測が困難

損失雨量の評価は、洪水の立ち上がり、洪水ピーク流量に影響を与える定数であるが、これまで、現場において観測されたデータから見ても、損失雨量は洪水毎にばらつきが大きく、前期雨量との相関も必ずしも明確ではなく、浸透能力を評価した物理モデルが必要である。

(3) 洪水低減部の中間流出の評価が困難

貯留関数法などの斜面モデルは、等価粗度法などによる表面流出を評価するモデルであり、直接流出(=表面流出+中間流出)を表現するモデルとなっていない。従って、洪水低減期に早い中間流出が顕著な流域では、ダムの操作、水位回復などの管理のため、中間流出も表現できる流出計算モデルが望ましいと考えられる。

2.6.3 分布型流出モデルに関する研究の概要

前項に示した状況を踏まえれば、今後ダム操作を効率的かつ的確に実施するにあたっては、前節に記述した WRF による降雨予測を活用しつつ分布型流出モデルにより将来のダム流入量を把握することが有望と考えられる。以下に分布型流出モデルの概要と研究状況について述べる。

分布型流出モデルの構造は、一般に、図-2.6.1に示すように、有効降雨モデル、表層モデル、中間層モデル、地下水モデルからなる。地表に降った降雨は、地質条件から決まる浸透能力により地下に浸透し、中間流出、地下水流出となる。

分布型モデルの実績洪水との適用性に関しては、立川ら^{4 9)}、深見ら^{5 0)}などによ

って検討されており、降雨の空間的な分布が大きい降雨、前期降雨の影響が顕著な降雨などに対しても、分布型モデルは良好な適合性が得られるとしている。また、全国的に規模の大きな洪水被害を与えた平成 16、17 年度の洪水に関して、由良川、円山川、福井豪雨などについて、分布型流出モデルを用いた適合性の検討^{5 1)}、^{5 2)}を行っている。

田村^{5 3)}は、森林の影響を洪水面、水質面などを含めて研究対象としつつ、広葉樹と針葉樹の流出形態の違いなどを分布型流出モデルにより評価しており^{5 4)}、流域被覆条件の違いを踏まえた流出解析を行うにあたって参考となる（図-2.6.2 参照）。

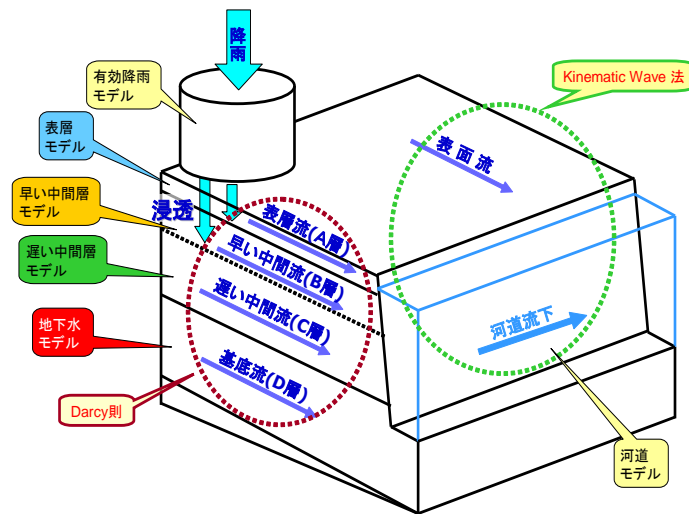


図-2.6.1 分布型流出モデルの構造

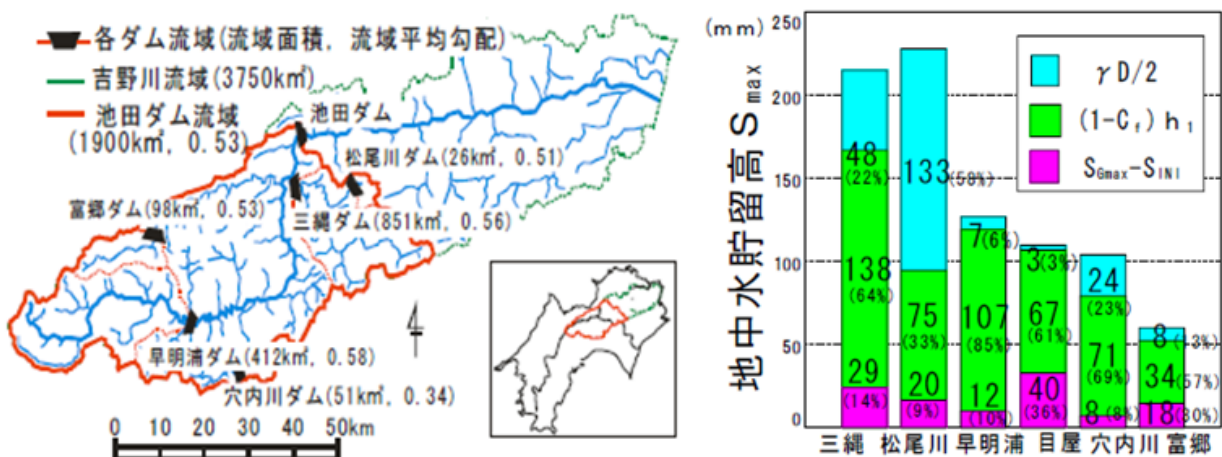


図-2.6.2 吉野川において、樹種の違いによる地中貯留高（洪水低減機能に影響）を評価した事例^{5 4)}

市川⁵⁵⁾は、流域地形と流出現象の関連に着目して研究を行い、ダム操作方法、水田の変化等にも言及している。特にダム操作の観点からは、洪水予測のための演算時間にも着目し、地形要素をクラスター分析により、分類し、計算を実行する流域を代表流域群のみにすることにより演算時間を短縮した上で、精度確保する研究を行っており、洪水予測に有効な検討であると考えられる（図-2.6.3参照）。

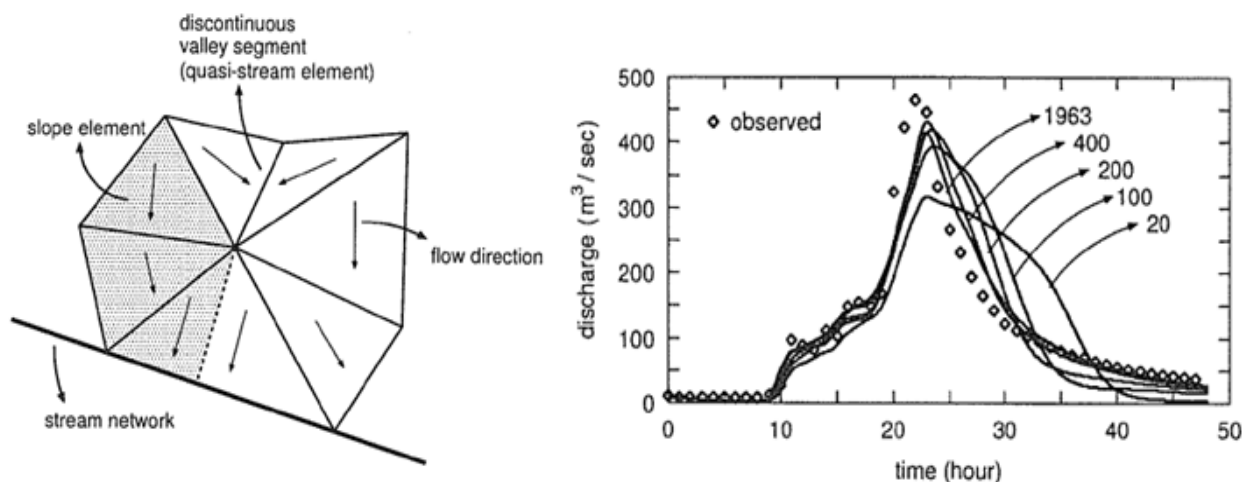


図-2.6.3 市川による地形のモデル化と集中化による精度の比較⁵⁵⁾

分布型流出解析の分類としては、表面モデルでは、寶ら⁵⁶⁾のセル分布型のように定型の格子を用いる方法（図-2.6.4参照）、斉藤ら⁵⁷⁾のように斜面の谷形状に着目した非構造格子モデルがある（図-2.6.5参照）。物理的な現象からは、非構造格子モデルの方が詳細な斜面流を評価できると思われるが、洪水、低水など取り扱う現象、レーダ雨量などのメッシュデータの適用、メッシュサイズと演算時間の関係などを考慮して選定する必要がある。また、地下層のモデルには、深見ら⁵⁰⁾のようにタンクモデルにより表現する方法、寶ら⁵⁶⁾斉藤ら⁵⁷⁾のように飽和・不飽和浸透流モデルにより地質条件を考慮して物理的に現象を解析する方法が存在する。これについても着目すべき現象と演算時間を考慮して適切な選択が必要である。

また、分布型流出解析は、洪水流出だけでなく、低水流出、水質の評価に用いた研究事例も多い。恩田⁵⁸⁾は森林荒廃と河川環境の関係を分布型モデルを用いて評価している。小尻ら⁵⁹⁾はGISを利用した水量、水質の推定を庄内川を対象として行っている。

また、融雪を考慮した分布型流出解析の研究事例も多く、ダム流域における融雪洪水、水資源管理に有効であると考えられる。陸ら⁶⁰⁾は、ランドサットなどの衛星画像による積雪範囲を基礎情報として併用しながら融雪に関する検討を行っている。

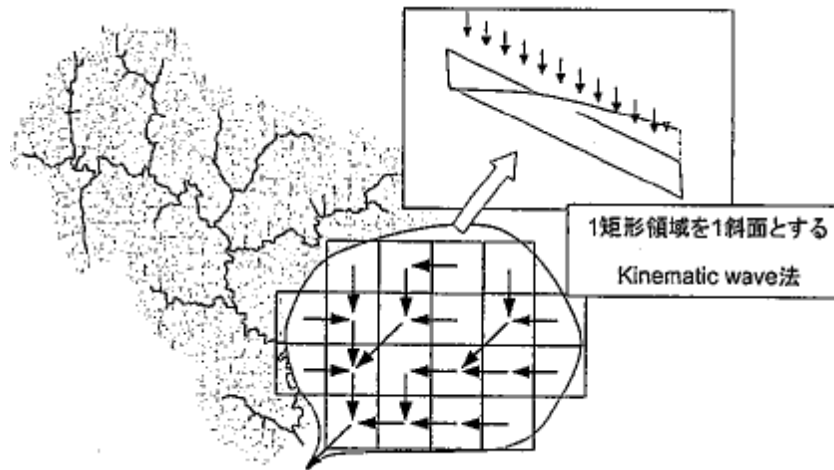


図-2.6.4 セル分布型流出モデル⁵⁶⁾

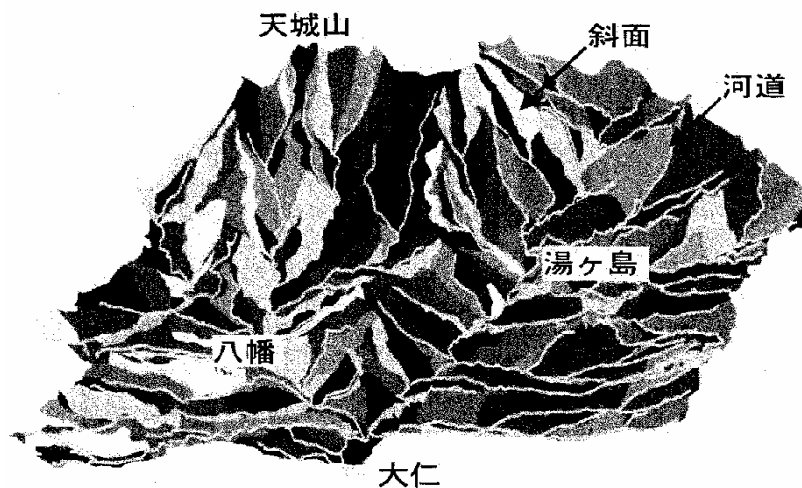


図-2.6.5 非構造格子斜面モデル⁵⁷⁾

2.6.4 ダム操作検討における分布型流出解析モデルの適用に関する研究

前項に示したように、ダム操作のための流入量予測情報としては、分布型流出解析による情報が有効と考えられ、研究事例も多い。立川ら⁶¹⁾は、淀川流域を対象として「広域の分布型流出モデル」を用いた予測システムの開発を行っている（図-2.6.6参照）。

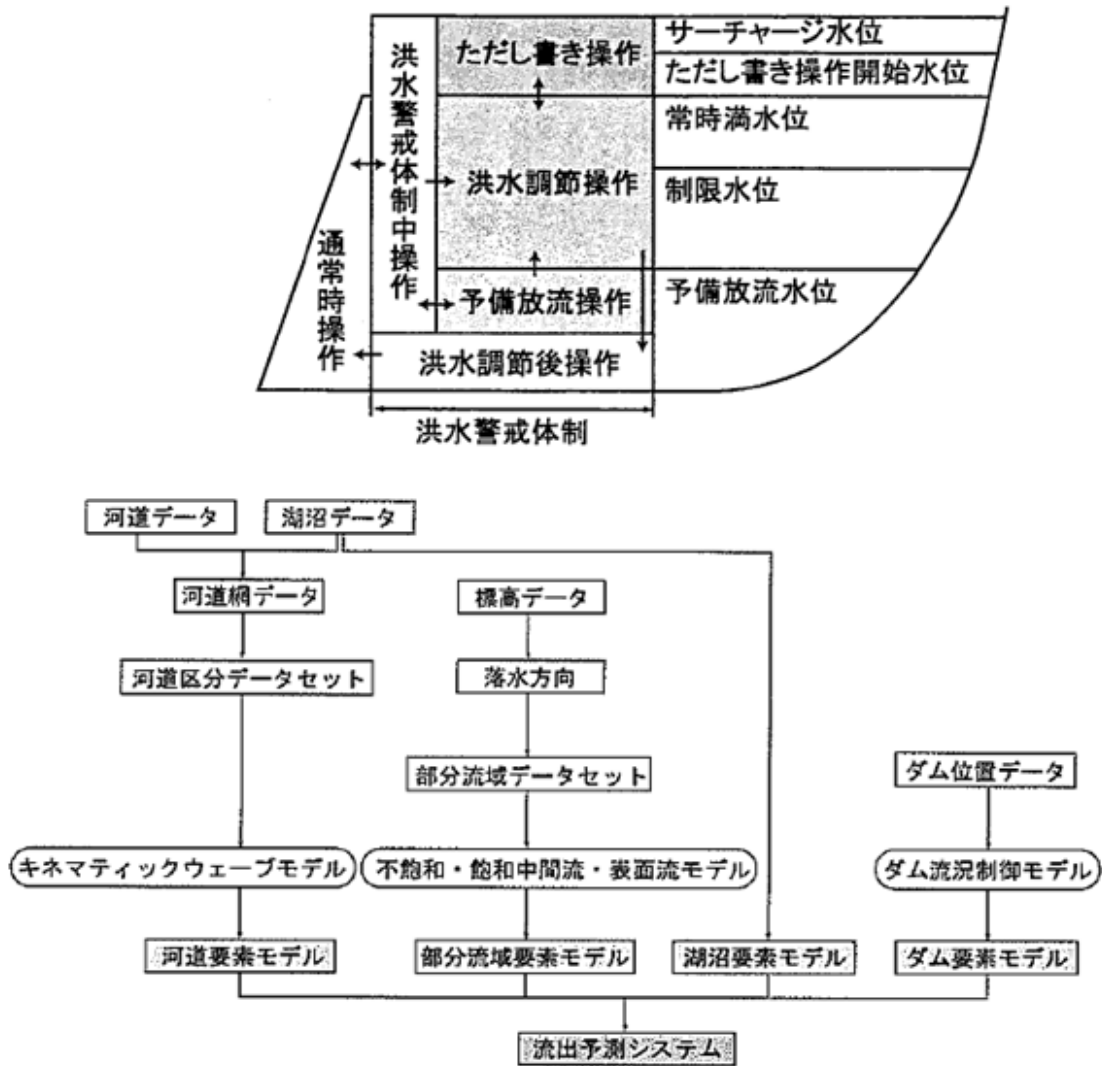


図-2.6.6 ダム操作水位と広域ダム予測システムの考え方⁶¹⁾

その他、井上ら^{6 2)}による四十四田ダム、橋本ら^{6 3)}による黒部川ダム群に関するダム流域への適用に関する論文も発表されている。四十四田ダムにおいては、レーダ雨量メッシュに対応した平均面積が 1.7Km²の平均面積に分割した分布型流出モデルにより 10 洪水以上の実績洪水に対して適合性を確認している（図-2.6.7 参照）。

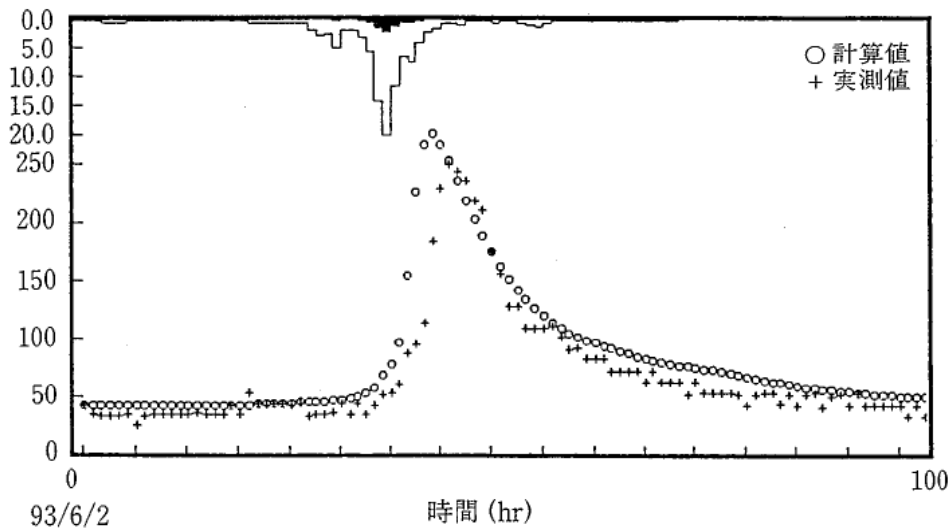


図-2.6.7 四十四田ダムにおける検証事例^{6 2)}

黒部川においては、流入量の変化に応じた安全なダム操作を行うため、分布型流出モデルを用いて、雨量の空間分布に関する情報の活用、集中豪雨の適切な評価などを目的とした検討を行っている。出し平ダム上流域に分布型モデルを適用した結果、平成 16 年 7 月洪水において良好な予測結果を得ている（図-2.6.8 参照）。

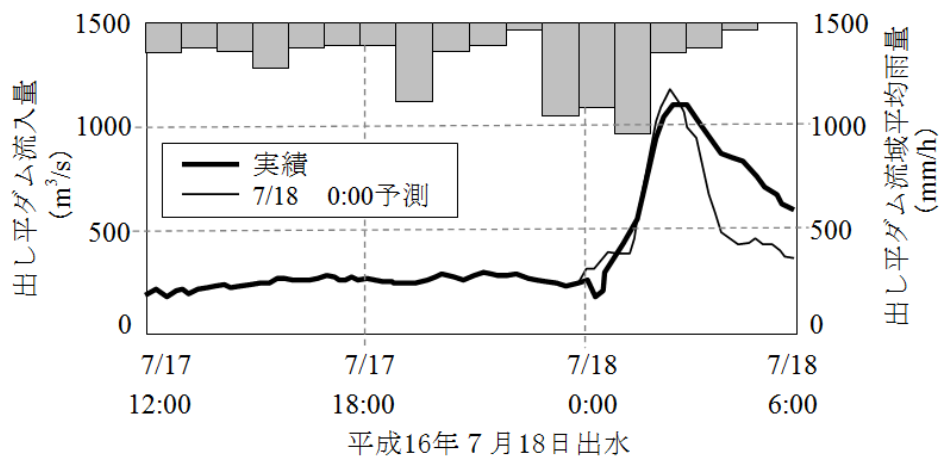


図-2.6.8 黒部川出し平ダムにおける検証事例^{6 3)}

2.6.5 分布型流出解析モデルの課題

分布型流出解析モデルは、実績洪水再現への適合性が確認されているほか、治水、利水、環境面の評価、ダム操作の合理化、今後の温暖化の影響など適用できる分野も拡大している。

現状の課題としては、モデル定数の同定に多大な労力を必要としていることが挙げられる。これは、モデルが物理モデルであるため、メッシュ毎に詳細なデータが必要であるが、現状では層厚、土壌、地質成分などのデータは一部分しか得られないため、感度分析的に多数の試算を繰り返してモデル定数を設定する必要があるためである。

今後は、モデル事態の改善と合わせて、層厚、土壌、地表成分のデータの蓄積、多くの河川でのモデル定数の蓄積などにより標準的なモデル定数の設定を行っていくことが求められる。

2.7 既往文献を踏まえた本研究の取り組み

以下に既往文献を総括するとともに、本研究における研究方針について概説する。

現在、国土交通省等が所管するダムの操作規則においては、ダムへの流入量を測定するとともに、流入量によって一義的に定まる放流量を放流する方式が一般的に採用されている。これは、特定多目的ダム法が制定され、ダムの操作規則を定めることと規定された時期が昭和 32 年と古く、当時の技術水準にあつては、将来のダム流入量を推定することはほとんど不可能であったとあって良く、確実に治水効果を発揮するためには、当然の措置であったと考えられる。

その後の気象庁による降雨予測技術の進歩や流出解析技術の発展を踏まえて、松木ら¹⁸⁾、北田ら²⁰⁾が考案した降雨予測による流域からの流出量を含めてダム流入量をダムから事前に放流する方式は、治水、利水上のリスクを低減しつつ、ダム容量をより有効に活用する点で実践的と考えられる。しかし、利用している降雨予測の時間が、気象庁によって提供される 6 時間に留まっており、流域の大きさや洪水到達時間を考慮すれば短時間過ぎるものと考えられる。また、近年 WRF の改良技術はめざましく、48 時間以内までの降雨予測が相当程度の信頼性で実行可能となっていること⁶⁴⁾を踏まえれば、WRF による降雨予測を利用しつつ、ダムの容量を十分に活用して洪水調節効果をさらに強力に発揮させる手法の開発が望まれるところである。

また、流出解析に関する技術にあつては、従来一般的に利用されてきた貯留関数などの集中型モデルに加えて、分布型流出モデルが昨今、幾つかの水系で活用されてきており、精度向上などその進歩も著しい。具体的には、個々の流域における損失雨量の時系列的な評価も実行しつつ、レーダ雨量やメソスケール気象モデルによる降雨量など、細分化した雨量データを流出モデルに読み込むことが可能である。

これを踏まえ、本研究では、WRF による 48 時間先までの降雨予測を利用して、ダム

容量を治水容量のみならず、利水容量も含めて、十分に活用する手法を中心に検討を行う。流出解析については、現場のダム管理所における実務の簡素化を考へて、降雨から損失雨量を差し引き、洪水到達時間を考慮するのみの簡単な手法を基本とし、必要に応じて分布型モデル、融雪モデルを使用することとする。ここで、超過洪水が発生した場合には、計画最大放流量を上回る放流を行うこととなるが、その基本的な手法は、基本的に青山¹⁹⁾の考え方を踏襲する。この手法を実行する上で必要となる最大放流量に関する田口ら²¹⁾の研究は、合理的な考え方であるが、公園の浸水防御を考慮するなど、非常時における防御対象の選定の考え方にやや問題を残しており、被害最小化の観点からは改良の余地があるため、本研究においては、人口、資産を考慮しつつ、妥当な算出手法を開発することを試みる。

ダム操作の初期におけるすり付け操作や超過洪水が発生した際の但し書き操作については、これをより円滑に実施すべく、今村^{22)、23)、24)}が考案した水位放流方式や裏戸^{7)、8)、9)、10)、11)}が開発した VR 方式を導入することについて、数名の研究者^{12)、13)、25)}が研究を実施しているが、検討を行った洪水が実際の洪水波形ではないことや検討した洪水数が少ないなどの問題も残っているほか、これらの方式を活用した場合にかえって逆効果となるケースの分析も行われていない。上記2方式は、これらの課題が解決されれば、WRF による降雨予測を活用した洪水調節操作を行う場合にあっても、迎洪水位が低い場合や超過洪水が襲来した場合に、操作を補完する手法として用いることが有望である。よって、本研究では、実際に発生した多くの洪水を元にシミュレーションを行い、水位放流方式にあつては、下流河道水位上昇速度の遵守や過貯留量の縮小など、VR 方式にあつては、手法適用時の空き容量の割合や基準流入波形の与え方、実際の洪水操作における最大放流量との比較などの検討を行い、その適用性について検証を行う。

森ら³³⁾、佐山ら³⁴⁾が実施した地球温暖化による気候変動を考慮した河川流量の変化やダム操作の変化は、今後重要な課題として、ダム管理者において現象の分析と設計洪水流量や洪水調節計画の変更など適応策策定に取り組むべきものである。本研究においても、WRF による降雨予測を活用する際に、予測雨量の実際の降雨量との上限誤差、下限誤差の与え方はダム操作の中核部分をなすものと考えられ、気候変動によりその乖離は、なお一層大きくなるものと考えられる。本研究においては、昨今の超過洪水の頻発等極端現象の顕在化を踏まえて、限定された数の降雨データではあるが、今後のこれらに関わる研究の礎とすべく、誤差の算出を試みる。

参考文献

- 1) (財)ダム技術センター、多目的ダムの建設第7巻、pp.76、2005.
- 2) 大雪ダム操作規則第18条、北海道開発局、昭和56年8月31日付け建設省訓令第4号

- 3) (財)ダム技術センター、多目的ダムの建設第7巻、pp.77～80、2005.
- 4) 国土交通省河川局河川環境課長、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日付け国河流第24号
- 5) 建設省河川局長、計画規模を超える洪水時における但し書き操作の運用の改訂について、昭和59年6月29日付け建設省河開発第62号
- 6) 国土交通省河川局河川環境課、各ダムの洪水調節と下流河川の状況調査、2008.
- 7) 裏戸 勉、ダムによる洪水調節方法の合理化について、松江高専研究紀要第36号、PP.37-44、2001.2
- 8) 裏戸 勉、異常洪水時のダム操作手法について、ダム工学会第10回研究発表会講演集、PP.40-42、1999.
- 9) 裏戸 勉、洪水時のダム操作について、ダム技術 No.86、PP.4-12、1993.
- 10) 裏戸 勉、異常洪水に適応する洪水調節の手法について、リザーバー2006.3、PP.11-13、2006.3
- 11) 裏戸 勉、異常洪水時のダム操作手法とその運用について、土木学会中国支部第52回研究発表会概要集、PP.117-118、2000.
- 12) 竹下 清、菊池英明、齋藤 源、末次忠司、異常洪水に対する洪水調節方式の改善に関する検討、ダム水源地環境技術研究所所報、PP.50-56、2006.
- 13) 松浦 旬、宮内 茂行、流入量の逡減予測を用いた洪水調節方法の検討、平成19年度水資源機構技術研究発表会発表論文、2007.
- 14) 秋葉雅章、腰塚雄太、宮本 守、戸谷英雄、佐藤直良、山田 正、流出特性に応じたダム放流量の決定方法とその洪水水位低減効果に関する研究、河川技術論文集 第10巻、PP.89-94、2004.6
- 15) 戸谷英雄、秋葉雅章、宮本 守、山田 正、吉川秀夫、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 Vol.62 No.1、PP.27-40、2006.2
- 16) 下坂将史、呉 修一、山田 正、吉川秀夫、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、Vol.66 No.2、PP.106-122、2009.6
- 17) 腰塚雄太、下坂将史、戸谷英雄、山田 正、確率予報を用いた事前放流量の決定手法に関する研究、第33回土木学会関東支部技術研究発表会、2006.3
- 18) 松木浩志、齋藤 源、清水直樹、上谷昌史、より効果的なダムによる洪水調節方法の考え方について、平成20年度ダム水資源環境技術研究所 所報、PP.56-64、2009.11
- 19) 青山俊樹、大被害発生水位を睨んだダム操作方法に関する提案、リザーバー2007.3、PP.1-2、2007.3
- 20) 北田悠星、菊地 慶、岡部真人、山田 正、降水短時間予報を用いた新しいダム

- 放流手法の効果検証、土木学会第 64 回年次学術講演会、PP.317-318、2009.9
- 21) 田口孝男、牧野 隆、下嶋みか子、大被害発生水位を睨んだ非常時ダム操作、平成 19 年度水資源機構技術研究発表会 発表論文 2009.
 - 22) 今村瑞穂、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 Vol.8、No.2、PP.102-116、1998.2
 - 23) 今村瑞穂、ダム操作について考えること、ダム技術 No.193、PP.3-9、2002.10
 - 24) 今村瑞穂、日野 徹、芳地廉征、日本における多目的ダムの新たな操作方法の提案、大ダム No.190、PP.121~126、2005.1
 - 25) 大谷知樹、一ノ瀬泰彦、竜澤宏昌、水位放流方式に基づく低貯水位条件下でのダム放流操作シミュレーション、第 15 回水資源機構関東ブロック技術研究発表会、2003.
 - 26) 小尻利治、池淵周一、十合貴弘、ファジィ制御によるダム貯水池の実時間操作に関する研究、京都大学防災研究所年報 第 30 号 B-2、PP.323-339、1987.
 - 27) 加藤純一、長谷部正彦、鈴木喜晴、ファジィ及びニューラルネットワークシステムを用いたダム操作支援システムの比較検討、土木学会第 59 回年次学術講演会、PP.153-154、2004.9
 - 28) 長谷部正彦、長山八州稔、糸川高德、ニューラルネット・ファジィ理論による治水型ダム操作支援制御システムの適用について、水文・水資源学会誌第 10 巻 3 号、PP.213-225、1997.
 - 29) 高棹琢馬、椎葉充晴、堀 智晴、佐々木秀紀、協調問題解決型洪水制御支援環境の設計、水工学論文集、第 34 巻、pp.595-600、1990.
 - 30) 高棹琢馬、椎葉充晴、堀 智晴、洪水制御支援のためのメタ知識とその利用法に関する研究、京都大学防災研究所年報、第 37 号 B-2、pp.335-349、1994.
 - 31) Takasao,T., Shiiba,M. and Hori,T., Hierarchical Structuring of Knowledge-based Systems for Flood Control Supporting, Applications of Artificial Intelligence in Engineering, Vol.9, pp.379-386,1994.
 - 32) 高棹琢馬、池淵周一、小尻利治、水量制御から見たダム群のシステム設計に関する DP 論的研究、土木学会論文報告集 第 241 号、PP.39-50、1975.9
 - 33) 森 英祐、浜口俊雄、小尻利治、田中賢治、ダム貯水池を含む流域水資源分布の地球温暖化影響評価に関する研究、平成 20 年度土木学会関西支部年次学術講演会、PP.Ⅱ-59、2008.
 - 34) 佐山敬洋、立川康人、寶 馨、増田亜美加、鈴木琢也、地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価、水文・水資源学会誌 Vol.21、No.4、PP.296-313、2008.7
 - 35) 梅田 信、和泉恵之、冷水・温水・濁水長期化現象の軽減策としての選択取水設備の運用方法、平成 17 年度ダム水源地環境技術研究所 所報、PP3-10、2006.11

- 36) 角 哲也、塚原千明、柏井条介、ダムによる河川流況の変化とフラッシュ放流に関する考察、ダム技術 No.143、PP.40-51、1998.8
- 37) 内藤信二、向居忠明、一庫ダム弾力的管理試験（制限水位移行方式）について、平成 19 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集、調査計画・設計部門Ⅱ、No.2、2009.
- 38) 角 哲也、久保田 明、淵上五郎他、ダム堆砂の河川還元利用における簡易処理手法に関する研究、河川技術論文集、2008.6
- 39) 角 哲也、排砂効率及び環境適合を考慮したダム堆砂対策の選択、土砂管理とダムに関する国際シンポジウム 2005.10
- 40) Wu, W.-S., R. J. Purser, and D. F. Parrish. Three dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariance. Mon. Wea. Rev. 130.2002.
- 41) Iwabuchi, T., J. J. Braun, T. Van Hove,. Impact of Ground-based GPS Precipitable Water Vapor and COSMIC GPS Refractivity Profile on Hurricane Dean Forecast. 13th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS). 2009.
- 42) Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura,. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. Bound.-Layer Meteorol., 101. 2001.
- 43) Nakanishi, M., and H. Niino. An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. Boundary-Layer Meteorol., 119, 397-407. 2006.
- 44) Morrison, H., J.A. Curry, M. Shupe, P. ZuidemaH.,. A new double-moment microphysics parameterization. Part 2: Application to Arctic stratiform clouds. . Atmos. Sci., 62, 1678-1693. 2005.
- 45) Lim, Song-You Hong and Kyo-Sun Sunny. The WRF Double-Moment Cloud Microphysics Scheme (WDM). 10th WRF Users' Workshop, Boulder CO, June 2009.
- 46) Kyo-Sun Sunny Lim, Song-You Hong, Seong-Soo Yum, and Jimmy Dudhia. Examination of aerosol effects on the development of supercell storm using the WRF Double-Moment (WDM) microphysics schemes. 10th WRF Users' Workshop, Boulder CO, June 2009.
- 47) 国土技術研究センター、高水計画検討の手引き（案）、P82、2009.10
- 48) 北海道開発局土木試験所河川研究室、実用的な洪水流出計算法、1987.3
- 49) 立川康人、永谷 言、寶 馨、分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価、京都大学防災研究所年報、第 48 号 B-2、pp.1-10、2003.
- 50) 深見親雄、高橋直人、レーダ雨量計を用いた分布型洪水予測システム（続報）、河川情報シンポジウム論文集、pp5-1～8、2006.12
- 51) 立川康人、平成 16 年洪水による洪水流出予測モデルの予測精度健勝に関する研究

河川整備基金助成事業、研究成果報告書、pp.11-22、2006.6

- 52) 立川康人、田窪遼一、佐山敬洋、寶 馨、平成 16 年福井豪雨における洪水流量の推定と中小河川流域の治水計画に関する研究、京都大学防災研究所年報、48B pp.1-13、2005.
- 53) 田村隆雄、山地森林流域における物質流出機構のモデル化に関する研究、徳島大学学位論文、2002.4
- 54) 穴水秀樹、端野道夫、田村隆雄、荒木隆夫、吉野川池田ダム上流域における森林の洪水低減機能評価、土木学会年次学術講演会概要集、2007.9
- 55) 市川 温、分布型流域流出系モデルの構成と集中化に関する研究、京都大学学位論文、2001.6
- 56) 寶 馨、立川康人、児島利治、可児良昭、池淵周一、降雨流出に及ぼす山腹斜面の影響—いわゆる「緑のダム」の洪水調節効果の流域水文学的検討—京都大学防災研究所年報、第 47 号 B、2004.4
- 57) 斉藤泰久、鈴木章浩、伊藤 覚、準三次元地下浸透流解析モデルを応用した分布型水循環モデル (WCAP) の構築、土木学会論文集 B Vol.62、N.o.1、pp1-15、2006.2
- 58) 恩田裕一、森林荒廃が洪水・河川環境の及ぼす影響の解明とモデル化、筑波大学講演概要集、pp.26-35、2008.9
- 59) 小尻利治、小林 稔、GIS を利用した分布型流出モデルによる水量、水質の推定、河川技術論文集、第 8 巻、pp.431-436、2002.6
- 60) 陸、早川典生、吉岡喜治、衛星積雪面積情報と分布型流出モデルを用いた広域降雪特性抽出の試み、水工学論文集、第 41 巻、pp.239-244、1997.2
- 61) 立川康人、佐山敬洋、可児良昭、宝 馨、松浦秀起、山崎友也、広域分布型洪水流出モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用、京都大学防災研究所年報、第 49 号 B、2006.4
- 62) 井上博康、横野明彦、石川淳一、四十四田ダム流域における分布型流出モデルについて、ダム技術、No.119、1996.8
- 63) 橋本徳昭、藤田 暁、椎葉充春、立川康人、市川 温、分布型流出モデルに基づくダム流入量予測システムの構築、水工学論文集、第 50 巻、pp.289-294、2006.2
- 64) 豊田康嗣、気象予測モデルと連携した出水予測手法の開発電力中央研究所報告 No8058、2009.

第3章 WRF を活用した新たな洪水調節手法

3.1 はじめに

地球温暖化に伴う影響として、IPCC 第4次報告書¹⁾において、気候変動による温暖化が世界中の地域の自然と社会に影響を与えていることが明らかになった。同報告書では、気候変動の影響として21世紀末における地上の世界平均気温が昭和55年から平成11年と比べて、最大で4℃上昇し、極端な降水現象の発生頻度が引き続き増加する可能性が非常に高いこと等が指摘されており、これらの影響が顕在化する前に的確に把握し、適切に対処することが求められている。

一方、我が国におけるダムの建設は、国土交通省所管事業に限れば事業費でH9年、施工箇所数でH5年をピークに近年減少しており²⁾、今後は、既存ストックの一層の機能強化が必要と思われる。

我が国の多目的ダムにおいては、予備放流容量を持つダムと事前放流を除いて、治水容量と利水容量は完全に分離して利用されてきた。また、洪水調節についても超過洪水発生時における但し書き操作を除けば、ダム操作規則において定められた調節方式に則って操作が行われてきた。このうち、事前放流の手法については、国土交通省通達「国土交通省所管ダムの操作規則及び操作細則に関する記載例について」（平成13年11月28日）において規定され、実施にあたって必要となる具体的な事項は事前放流ガイドラインで定められている³⁾。研究分野においても秋葉ら⁴⁾、戸谷ら⁵⁾、下坂ら⁶⁾、腰塚ら⁷⁾によって合理的な事前放流方法が提案されているものの、事前放流を実施した実績は、全国で年間3~4ダム程度、多い年でも26ダムに留まっており（図-3.1.1）、さらなる適用が期待されるところである。

また、一定率一定量方式を採用しているダムにおいて、洪水調節開始流量以上の洪水が襲来した場合、最大放流量以下の流下能力である区間において浸水被害が発生する

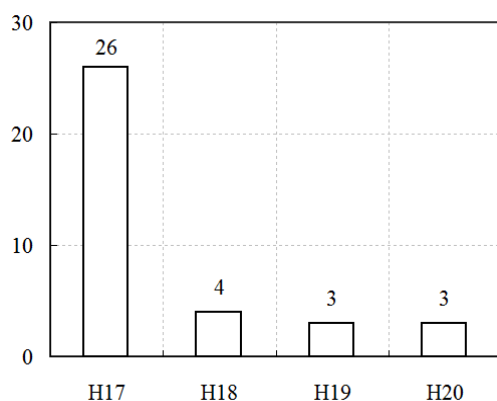


図-3.1.1 事前放流の実施ダム数¹⁾

問題があるほか、超過洪水が流入し、但し書き操作を行った場合に下流で甚大な被害が発生する問題についても何らかの改善策が待たれるところである。これらを踏まえれば、治水効果の一層の充実に向けて、利水容量と治水容量を併せて有効に活用しつつ、ダム貯水容量をより効率的に活用した総合的な洪水調節が必要と考えられる。

さらに、住民への速やかな情報提供の観点からも、近年、観測史上の記録を上回る大雨や局地的な集中豪雨による洪水被害や高波災害が発生し、河川管理者等による洪水予報、水防警報や地方公共団体等による水防活動等の迅速で的確な対応の重要性が増していることから、上記地球温暖化に伴う影響への対応と併せて、国土交通省においては、平成 21 年 4 月に全 8 地方整備局に水災害予報センターを置き、以下に示す業務を行うこととした⁸⁾。

① 水災害の監視・予測の高度化

- ・ X バンド MP レーダによる水災害監視の強化（関東、北陸、中部、近畿）
- ・ 高度な洪水予測システム（分布型モデル等）の導入と運用
- ・ リアルタイム氾濫シミュレーションの導入と運用等

② 水災害の監視・予測、予警報、水位情報等に関する情報収集や情報提供

- ・ 防災関係機関への情報提供
- ・ 地デジ放送局向け河川情報提供システムの構築と運用 等

③ 気候変化による水災害への影響の分析、評価

- ・ 気候変化による洪水や渇水等に対する影響のモニタリング
- ・ 水災害リスクの評価・分析 等

④ 都道府県河川管理者や水防管理者等に対する支援

以上に示した施策のうち、4 地方整備局において導入される X バンド MP レーダは、既に整備されている C バンドレーダによる監視・観測の空間的・時間的ギャップを埋めるため、三大都市圏等に高解度のレーダを整備するものであり、空間的に 250～500m 程度、時間的に 1 分程度毎の監視、観測を行うものである。

さらに、2 章で述べた流出解析手法としての分布型モデルに関する研究の進捗を踏まえ、レーダにより観測した降雨量データを活用し、分布型モデルを適用した精度の良い流出解析を行うことにより、高度な洪水予測システムを構築することとしている。

ここで、洪水予測の精度を向上させるためには、実績の降雨量の観測のみならず、精度の良い降雨予測を導入することが不可欠である。現在、気象庁は最大将来 192 時間に及ぶ降雨予測を気象庁 GSM として実施しているが、使用しているモデルが、台風、梅雨前線などの全球規模の気象現象を扱う静力学モデルのため、10km メッシュの細かさが限界とされ、集中豪雨、雷雨など局所的な気象現象を扱うには不適切である。

ここに、WRF（Weather Research and Forecasting Model）は、米国において開発された非静力学のメソスケール気象モデルであり、1km 程度での計算を行うことが可能である。そして、近年、同化技術の導入などによって精度向上が進んでおり、48 時間以内

までの降雨予測が相当程度の信頼性で実行可能となっている⁹⁾。

本章では、WRF を活用した降雨予測を行うとともに、流域における損失雨量を簡便に算出してダム流入量を求め、ダムの容量を最大限に活用した効率的な洪水調節方法について検討するとともに実際の洪水における検証を行った。すなわち、利水容量を治水容量と一体的に運用することを目指して、利水と協調した事前放流の実施やダム容量全量を活用した効率的な洪水調節を行い、下流の洪水被害を最小化することを目指した。

3.2 現況のダム洪水調節の課題

国土交通省所管のダムにおける洪水調節方法は、「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。このうち、ゲート操作による洪水調節を実施しているダムにあつては、2章で述べたように、一定量方式、一定率一定量方式、不定率調節方式（いわゆる鍋底調節）などの調節方式があり、これまで相当の効果を発揮してきた。しかし、最大で50年程度に及ぶ管理を経て、これらのダムの現場においては、第2章で表-2.3.1に示した洪水調節上の課題が顕在化している。このうち主要な課題としては以下に示す項目が挙げられ、なお改善の余地があるものと思われる。

① 利水容量を有効に活用する余地があること

操作規則において、洪水調節の実施を定めている場合は、ダムの貯水位が制限水位以上に達した時点以降であり、利水容量に空きがある場合において、洪水調節に有効活用する余地が残されている。

② 事前放流が必ずしも十分には行えていないこと

降雨解析などにより確実に回復が見込める容量を活用しつつ、共同事業者に対して十分に説明を行うこととされていることから、大規模な洪水により下流において甚大な被害が発生した時にあつても、必ずしも十分には事前放流が実施できていない。

③ 但し書き操作により激甚な被害が発生する可能性があること

現況の操作規則は、治水計画で定めた確率規模までの洪水に対しては、確実な操作が普遍的に担保できる一方で、計画を超える超過洪水が発生した際には、放流量を流入量にすり付ける但し書き操作に移行することから、ダムの洪水調節機能には限界があり、下流で激甚な被害を被る可能性がある。

④ 中小洪水発生時においても下流で被害が発生する可能性があること

中小洪水に終わることが予想され、治水容量に余裕が発生することが相当の確率である場合にあつても、通常、操作規則に則った操作が行われるため、残留域に相当の降雨があつた場合などにおいては、下流で氾濫被害を被る可能性がある。また、下流堤防の質的な強度に多くの課題がある現状にあつては、できる限り低い水位で洪水を流下させることが望ましく、操作規則における対応が期待される。

以上に示した課題は、洪水発生時に将来ダムや下流に流入する流量が推定できない、

あるいは、できてもその精度が粗く、信頼性に乏しいことに多くは起因しており、定められた固定ルールから離れた操作については、それが効率的かつ効果的な操作であっても、実施することについてダム管理者が躊躇することと推察される。

すなわち、仮に降雨予測が相当程度の精度で実施可能となれば、事前放流を円滑に行いつつ、ダムの容量を十分に活用して、最大限に効率的な洪水調節操作を適用することが可能となるため、今後、降雨予測技術の向上とダム管理への応用が期待される場所である。

3.3 WRF を活用した降雨予測技術

3.3.1 WRF の特徴と各ダムにおける降雨予測

WRF は、米国の NCAR/NCEP (The National Center for Atmospheric Research / National Centers for Environmental Prediction)により現業用、研究用に開発されたメソスケール気象モデルであり、従来米国においてメソスケールモデルが乱立したことに反省を受け、統一的に開発されている。天気予報業務で使用されている気象モデルが静力学モデルであり、計算が速い一方 10km メッシュの細かさが限界であるのに対して、WRF は集中豪雨、雷雨などの水平スケールが 10~100km の気象現象を扱う非静力学モデルであり、1km メッシュ程度での計算を行うことが可能である。その計算フローは、図-3.3.1 に示すとおりであり、主に初期値、境界値が現実にとどれだけ近いかによって予測精度が支配されるが、近年同化技術を導入し、センサーによる観測データを活用した補正を行うことが可能となったことから、その精度向上はめざましいものがある¹⁰⁾。以下に WRF において一般的に使用されている基礎式を示す。

xyη (鉛直 Mass) 座標系において、基礎方程式系は以下のように記述される。

- ・ 運動方程式 (風の 3 成分の予報式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uu) + \frac{\partial}{\partial y} (Vu) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega u) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) \\ + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} - \mu_d \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = F_U \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uv) + \frac{\partial}{\partial y} (Vv) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega v) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial y} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) \\ + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial y} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial y} - \mu_d \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = F_V \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uw) + \frac{\partial}{\partial y} (Vw) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega w) \\ - m^{-1} g \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\frac{\partial p'}{\partial \eta} - \bar{\mu}_d (q_v + q_c + q_r) \right) + m^{-1} \mu_d \alpha' g = F_W \end{aligned} \quad (3.3.3)$$

ここに、 u, v, w : 風の東西、南北、鉛直成分、

$U = \mu_d u, V = \mu_d v, W = \mu_d w$: 水平・鉛直運動量フラックス

$\eta = (\pi - \pi_t) / \mu_d$: 鉛直 Mass 座標、

$\Omega = \mu \frac{\partial \eta}{\partial t}$: η 座標系における鉛直速度

$\mu_d = \pi_s - \pi_t$: 乾燥大気の単位面積質量、 π_t : 計算範囲上端の乾燥大気の静水圧、

π_s : 地表面の乾燥大気の静水圧、 π : 対応する高さの乾燥大気の静水圧

m : マップファクター、 α : 比容($1/\rho$, ρ : 湿潤大気密度)、

α_d : 乾燥大気の比容($1/\rho_d$, ρ_d : 乾燥大気の密度)、

ϕ : ジオポテンシャル (単位質量の空気塊が持つ位置エネルギー)、

ϕ' : ジオポテンシャルのうち、静力学平衡($\bar{\phi} = gz$)が成り立つ平均値 $\bar{\phi}$ からの偏差、

p : 気圧、 p' : 気圧、静力学平衡が成り立つ平均値 \bar{p} からの偏差 ($p = \bar{p} + p'$)、

F_Φ : 各成分に対する外力 (コリオリ力、屈曲項、乱流拡散、物理過程による外力)

$$\cdot \text{質量保存則} : \frac{\partial \mu_d'}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right] + m \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = 0 \quad (3.3.4)$$

ここに、 μ_d' : 乾燥大気の単位面積質量 μ_d の変動成分

$$\cdot \text{温位保存式} : \frac{\partial \Theta}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} (U\theta) + \frac{\partial}{\partial y} (V\theta) \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega\theta) = F_\Theta \quad (3.3.5)$$

ここに、温位フラックス $\Theta \equiv \mu_d \theta$, θ : 温位

$$\cdot \text{状態方程式(気圧の診断式)} : p = p_0 (R_d \theta_v / p_0 \alpha_d)^\gamma \quad (3.3.6)$$

ここに、 R_d : 乾燥大気の気体定数、

比熱比 $\gamma = C_p / C_v$, p_0 : 基準気圧, θ_v : 仮温位

$$\cdot \text{ジオポテンシャル式} : \frac{\partial \phi'}{\partial t} + \mu_d^{-1} \left[m^2 \left(U \frac{\partial \phi}{\partial x} + V \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + m \Omega \frac{\partial \phi}{\partial \eta} - gW \right] = 0 \quad (3.3.7)$$

$$\cdot \text{相別比湿保存式} : \frac{\partial Q_n}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} (U q_n) + \frac{\partial}{\partial y} (V q_n) \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega q_n) = F_{Q_n} \quad (3.3.8)$$

ここに、水物質フラックス $Q_n \equiv \mu_d q_n$, q_n は水蒸気・雲水・雪・氷・霰などの比湿で、番号 n は雲微物理モデルが扱う水の相の番号で、その最大値は雲微物理モデルのスキームに依存する。

F_{Q_n} は各水物質に対する外力 (相変化など)

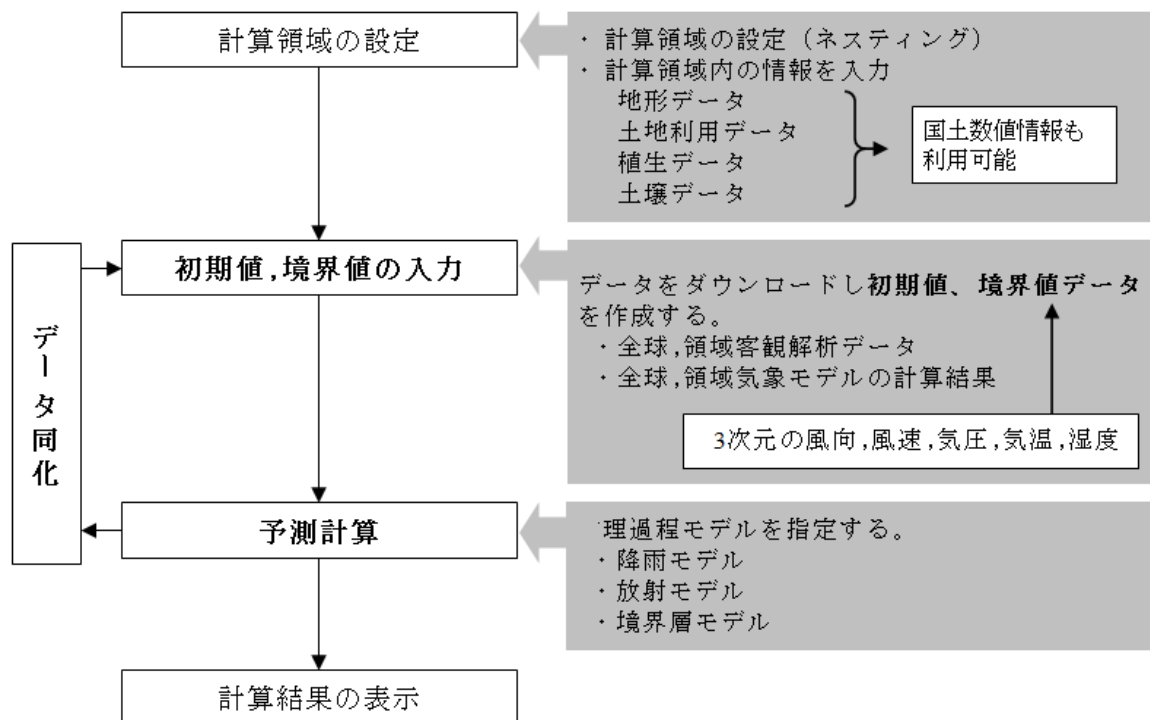


図-3.3.1 WRF の計算フロー¹¹⁾

WRF は、次のような利点を有しており、48 時間程度の降雨予測が相当の精度で実施可能なことから、これを活用しつつ適切かつ機敏な流出解析を行い、ダム流入量を予測して洪水調節操作を最適化することが可能である。

- ・ 厳密な支配方程式（非静力学モデル）を使って、降雨予測するため、予測精度の向上が期待できる。
- ・ 解像度を細かくできるため、地形の起伏や土地利用、植生等の分布の影響を反映した降雨予測を行うことができる。
- ・ 1km メッシュ程度での降雨予測情報を提供することが可能である。
- ・ 必要な領域に対して詳細な降雨予測ができる。

本研究では、気象庁数値予報データ（RSM）を初期値、境界値として使用し、WRF により、3 段階（10.8km、3.6km、1.2km：豊平峡ダムの例）にダウンスケーリングを行い、計算した。予測は、48 時間先までの降雨を予測し、6 時間毎に予測を更新した¹¹⁾、¹²⁾。図-3.3.2 に早明浦ダムにおける WRF による予測雨量分布図を示す。

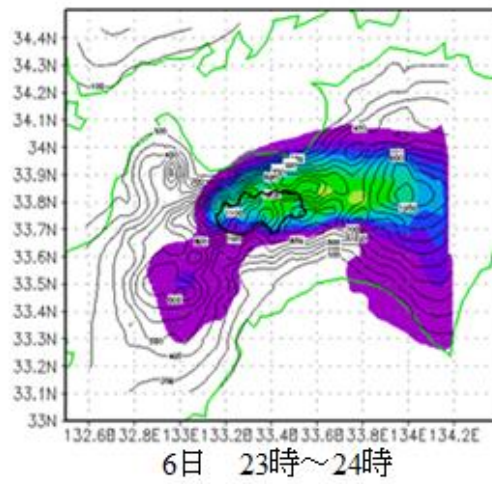
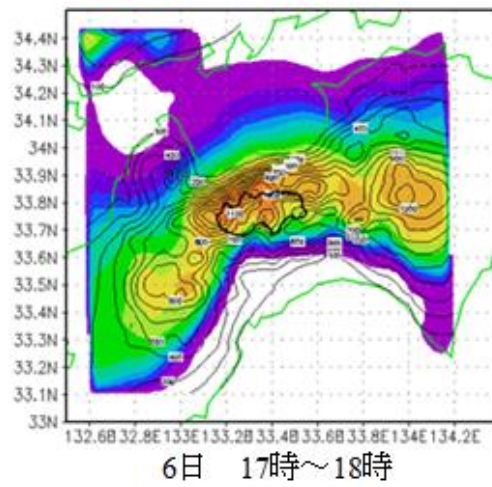
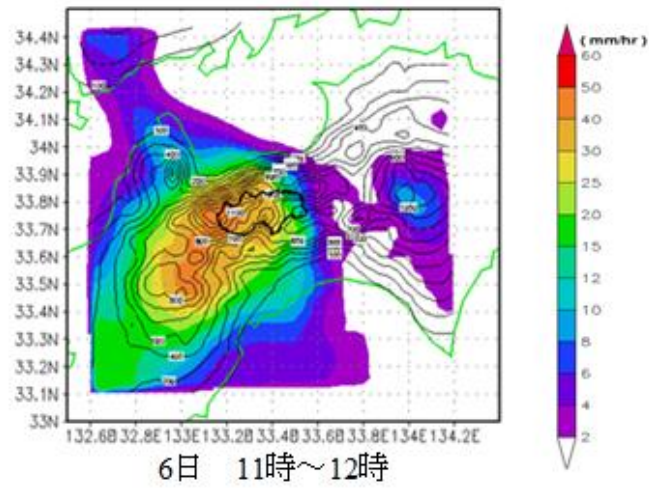


図-3.3.2 WRFによる1時間雨量分布図¹⁾
 (早明浦ダム流域 2005年9月6日21時を初期値とする)

3.3.2 降雨予測の誤差の設定

WRF による降雨予測を用いたダム操作を行うにあたっては、予測以上に降雨が発生し治水容量が不足するリスクや逆にほとんど降雨が生じず、利水容量を回復できないリスクがあることを考慮して、降雨予測に含まれる誤差を見込んだ検討を行うことが望ましい。しかし、ダム流域における WRF による降雨予測の誤差については、未だ信頼できるデータに乏しいため、気象庁の降雨予測と実際の降雨量の誤差についての研究実績「気象予測データの利用可能性に関する研究」¹³⁾ による予測降雨量と実績降雨量の誤差（図-3.3.3）を利用した。

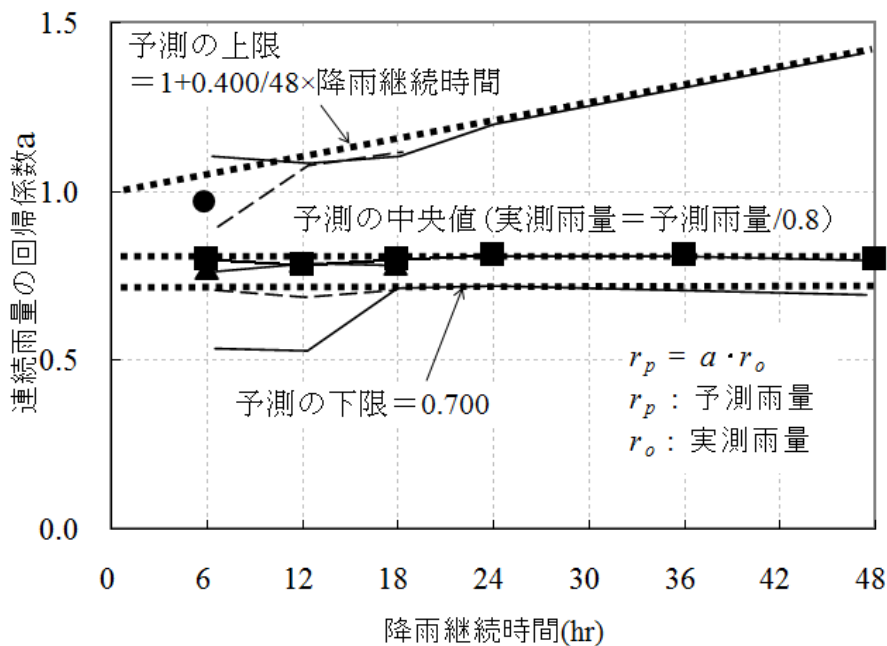


図-3.3.3 降雨継続時間と予測降雨量/実績降雨量の関係¹¹⁾

この検討は、全国各地の7水系214箇所雨量観測所を対象としてデータ処理したものである。このグラフから48時間における予測降雨は、実績降雨に対して上限値1.40、下限値0.700であるから、予測降雨に対して実際に降る可能性のある雨量の上限値、下限値は次のように示される。

$$\text{予測に対する降雨の上限値(mm)} = 1/0.700 \times \text{予測降雨(mm)} = 1.43 \times \text{予測降雨(mm)} \quad (3.3.9)$$

$$\text{予測に対する降雨の下限値(mm)} = 1/1.40 \times \text{予測降雨(mm)} = 0.714 \times \text{予測降雨(mm)} \quad (3.3.10)$$

なお、WRFによる降雨予測の誤差率に関する算定の試みについては、後述する。

3.4 降雨予測を活用した合理的なダム操作手法

3.4.1 ダム流入量の予測

本研究では、WRFによる降雨予測技術を活用しつつ、簡便な手法によるダム流入量の把握を行い、下流被害を最小化することを目標とした合理的なダム操作手法を開発すべく、シミュレーションを実施した^{11)、12)}。検討対象ダムは、12ダムであり、北海道から九州に至る国土交通省、水資源機構、県所管のゲート操作を伴う多目的ダムについて、地域別にバランス良く選抜した。12ダムの諸元を表-3.4.1に示す。

表-3.4.1 検討対象ダム諸元一覧¹²⁾

ダム名	目的	流域面積 (km ²)	治水容量 (千m ³)	利水容量 (千m ³)	相当雨量 (mm)
豊平峡ダム	FWP	134.0	20,200	16,900	277
四十四田ダム	FP	1,196.0	33,900	1,600	29
川俣ダム	FNP	179.4	24,500	48,600	408
矢作ダム	FNAWIP	504.5	15,000	50,000	129
温井ダム	FNWP	253.0	41,000	38,000	312
早明浦ダム	FNAWIP	417.0	90,000	199,000	693
鶴田ダム	FP	805.0	75,000	2,500	96
二風谷ダム	FNWP	1,215.0	17,200	※ 200	14
鹿野川ダム	FP	455.6	16,500	13,300	65
野村ダム	FAW	168.0	3,500	9,200	76
渡川ダム	FNP	81.0	10,300	19,600	369
祝子ダム	FNIP	45.2	4,100	764	108

F:洪水調節 N:流水の正常な機能の維持 A:農業 W:水道 I:工業 P:発電

※ 予備放流を行う容量である。

相当雨量は、治水容量と利水容量を対象に計算している。

今回提案する洪水調節手法のフローを図-3.4.1に示す。第一段階としてWRFによって向こう48時間の降雨を予測し、6時間毎に予測の更新を行った。得られた予測雨量に前節図-3.3.3にて示した誤差率を乗してダム上流域において発生する予測降雨とした。予測降雨は、上限値、下限値、WRF計算値の3種類存在することとなる。次にダムへの流入量を簡便に把握するため、吉野川の例¹⁴⁾を参考にしつつ、ダム上流域

における初期損失、一次流出、飽和流出、最大地中保水能とその低減曲線によりモデル化を行った。すなわち、表-3.4.2に示す降雨損失を考慮しつつ、図-3.4.2に示す概念図に基づき総雨量と総流出高の関係を実績降雨に基づき設定した。ここに洪水終了後の河川流量は、単位時間当たりの地中保水量の増加量と（3.4.1）式に示すような線形の関係があると仮定する。

表-3.4.2 降雨損失諸元の考え方¹⁾

項目	記号	考え方
初期損失雨量	R_L	すべての洪水で流域の湿潤状態とは無関係に損失する量
最大損失雨量	R_{Lmax}	初期損失を含めた降雨損失の最大値
最大地中保水能	R_L	最大損失雨量から初期損失雨量を差し引いた値が流域の有する保水能の限界量と考えられる ($R_L = R_{Lmax} - R_L$)
一次流出率	f_1	比較的小さな洪水群の直接流出高の下限を示す直線の傾き
飽和雨量	R_{sa}	全洪水群の直接流出高の下限値を示す直線の折れ点となる雨量

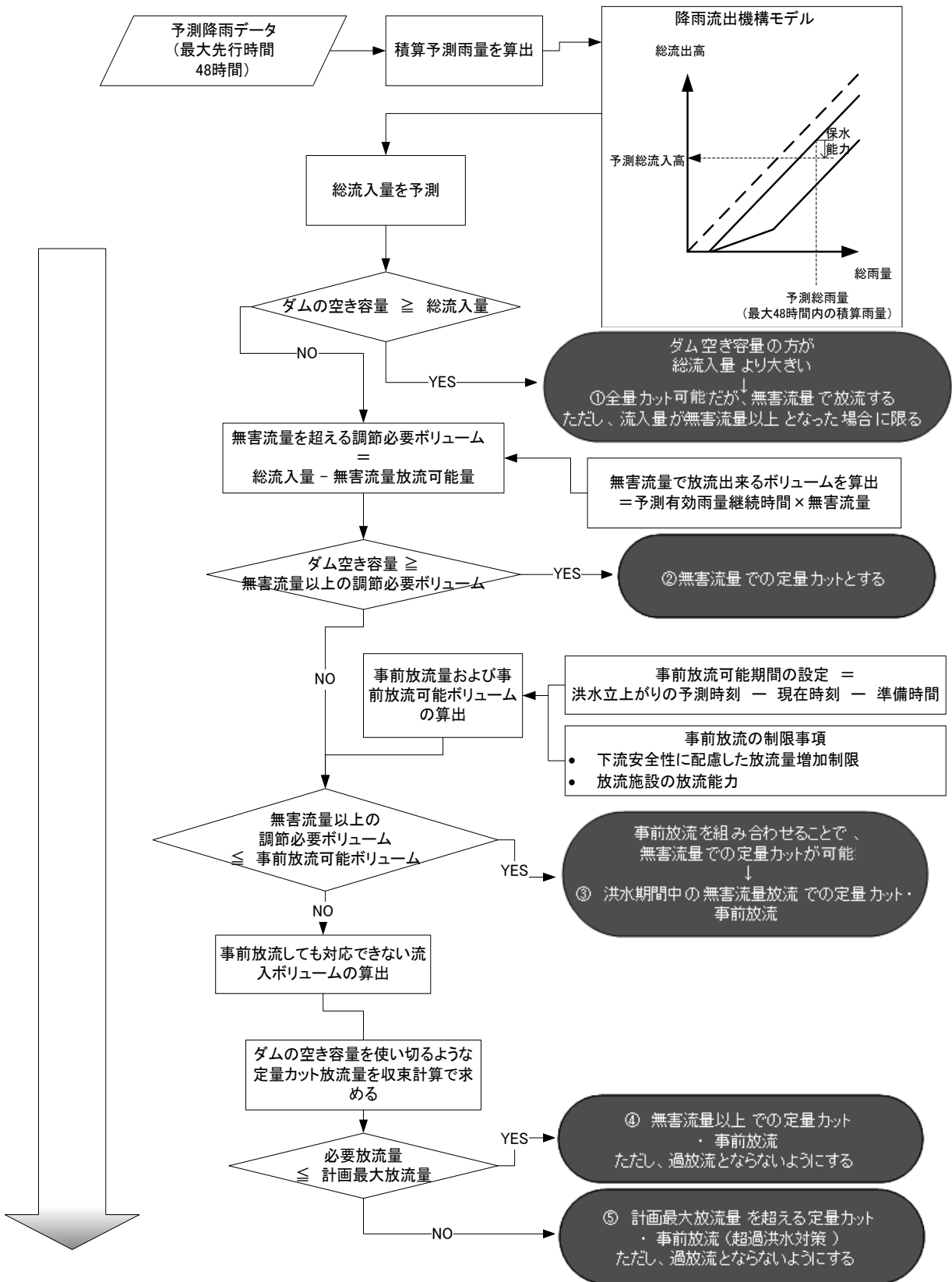


図-3.4.1 洪水調節手法のフロー図¹⁾

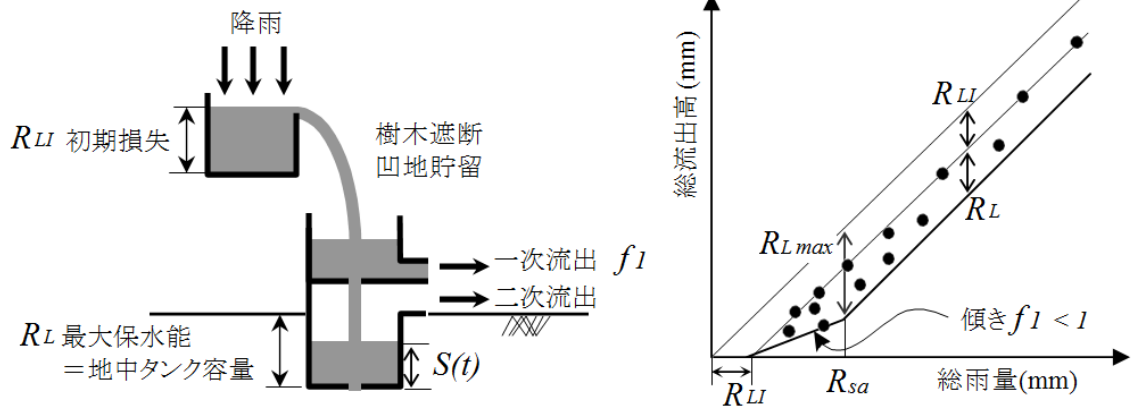


図-3.4.2 降雨流出機構と総流出高¹⁾

$$-\frac{dS(t)}{dt} = \lambda q(t) \quad (3.4.1)$$

ここで、 $S(t)$ ：地中保水高(=地中保水量)[mm]であり、 $0 \leq S(t) \leq R_L$ である。

λ ：流出高/(流出高+降下浸透)でありここでは1とした。

また、 $q(t)$ ：流出高[mm/hr] = $\frac{Q(t)[\text{m}^3/\text{s}]}{A[\text{km}^2]} \times 3.6$ である。

ただし、 $Q(t)$ ：時刻 t における河川流量[m³/s]、

A ：流量観測地点に対応する集水域面積[km²]である。

洪水終了後の地中保水量 $S(t)$ の低減は、以下に示すとおりである。

$$S(t) = S_0 e^{-\alpha t} \quad (3.4.2)$$

洪水イベントごとに異なる。

α ：直接流出の終了後の基底流出量の時間経過の関係より求める係数。

ここに、 S_0 ：洪水終了時点での地中保水能 (mm) であり、洪水イベント毎に異なる。降雨期間中の地中保水能は、降雨後の時間により増大し、最大地中保水能 R_L を上限とする。また、低減係数 α は、図-3.4.3に示す洪水後期(第2折点以降)の流量低減曲線の傾きから設定した。洪水開始時点での飽和雨量 $R_{sa}(t)$ は、初期損失雨量 R_{LI} と地中保水量 $S(t)$ の関係により次式により求めることができる。

$$R_{sa}(t) = R_{LI} + (R_L - S(t)) / (1 - f_1) \quad (3.4.3)$$

ただし、 R_{LI} : 初期損失雨量[mm]である。

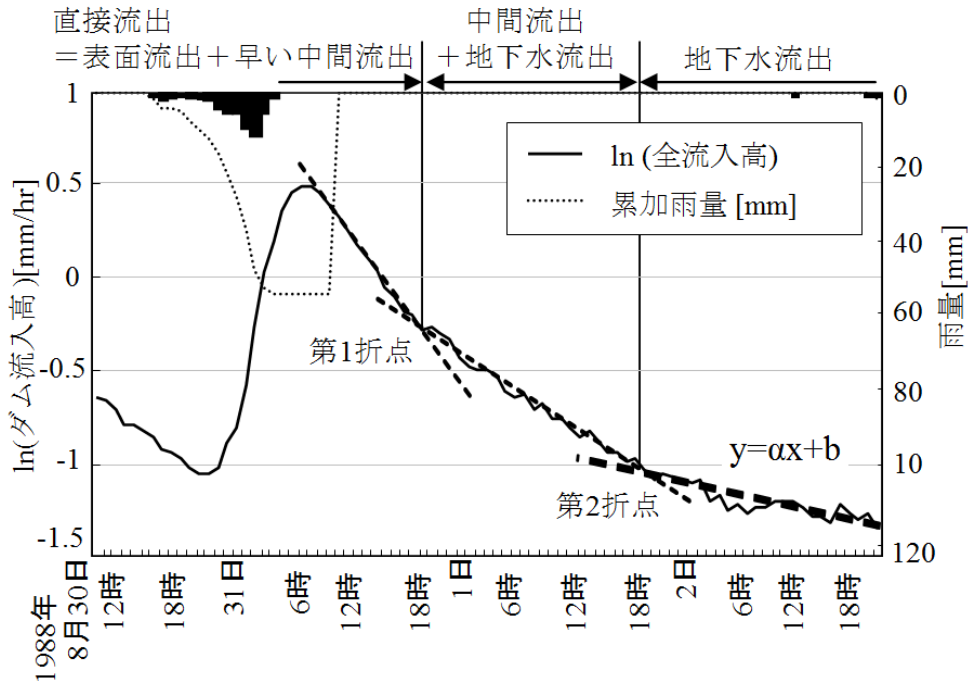
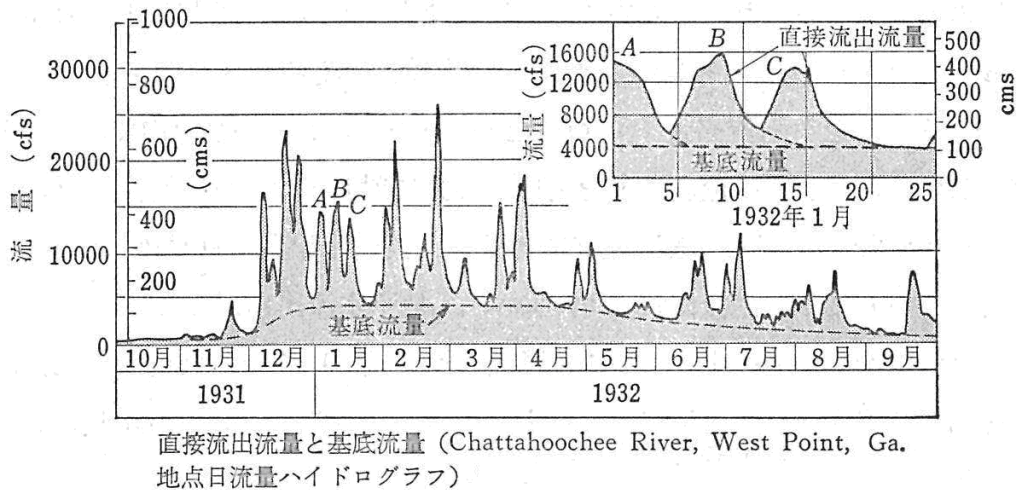


図-3.4.3 低減係数の算定¹⁾¹⁾

ここに、低減係数 α は、地下水の減少曲線から求めるものであり、直接流出量と呼ばれる部分と基底流量と呼ばれる部分にあらかじめ分類する必要がある。直接流出量は、表面流出と早い中間流出で構成され、基底流量は、遅い地下水の流出が互いに干渉しながら形成した流出成分である (図-3.4.4 参照)。



直接流出流量と基底流量 (Chattahoochee River, West Point, Ga. 地点日流量ハイドログラフ)

図-3.4.4 直接流出量と基底流量¹⁾⁵⁾

流出ハイドログラフにおいて、基底流量と直接流出量の分離は以下に示すとおり、岡本¹⁵⁾により、複数提案されているが、いずれの方法も洪水時の地下水の変化は推定に頼らざるを得ない。

(1) 地下水の減少曲線を延伸する方法 (図-3.4.5 参照)

地下水の減少曲線を延伸する方法では、洪水の地下水の流出量を地下水低減曲線から推定する方法である。

- ① 洪水終了の F 点、洪水開始の B 点から地下水低減曲線を用いて洪水中の地下水の変化を推定
- ② H 点を土の湿り不足が解消され、地下水の補給が開始された時点、I 点を地下水の補給が終了した時点と考え、H 点、I 点を推定
- ③ H 点 I 点を適当な線 (たとえば直線) で結ぶ

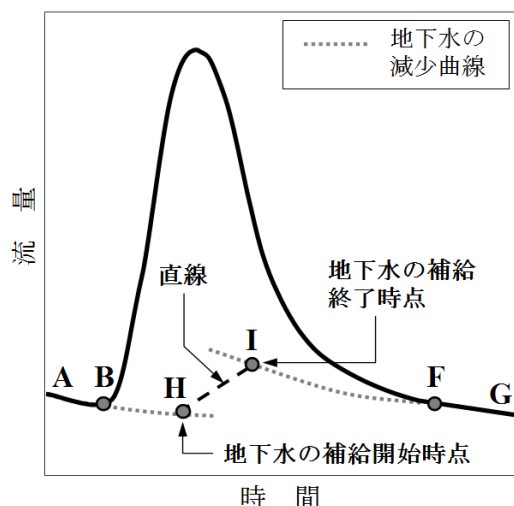


図-3.4.5 地下水低減曲線を延伸する方法¹⁵⁾

(2) 比較的簡易な方法 (図-3.4.6 参照)

1) F 点に一致させる方法

- ① ハイドログラフの減少部分を片対数方眼紙上にプロットして移り変わり点を見つけて、これを F 点とする。
- ② F 点と B 点を結んで直線を引くか、あるいは接近部分 AB を適当に B' 点まで延長して、折れ線 BB'F を引くかして基底流量部分を分離する。

2) 水平分離法

B 点より水平線 B'' を引いて基底流量を分離する方法である

本研究では、(2) 2)の水平分離法を採用した。図-3.4.7に豊平峡ダムにおける総雨量～直接流出高（直接流出+早い中間流）の関係を示す。集計は、1988～2007年の総雨量50mm以上の洪水を対象としており、洪水開始時における流量を基底流量とした水平分離を実施した。なお、流出高に融雪高が含まれる洪水は集計から除外した。

以上に示した降雨流出機構モデルにより、ダムへの流入量が推定できる。ダム流入量を算定するにあたっては、厳密には、分布型モデルや貯留関数法などにより流出解析を実施すべきではあるが、本研究では簡単のため、単純に流出高に洪水到達時間を加えることによりダムへの流入量とみなした。

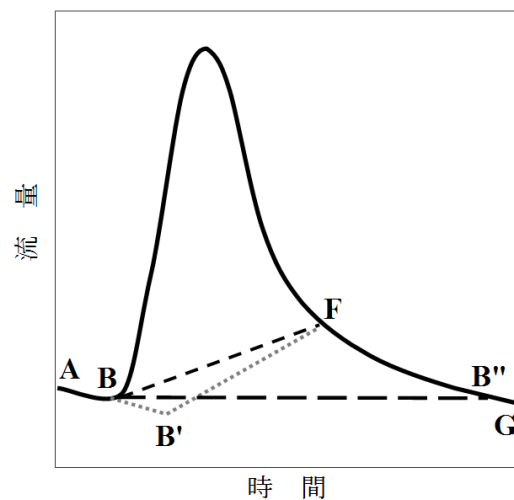
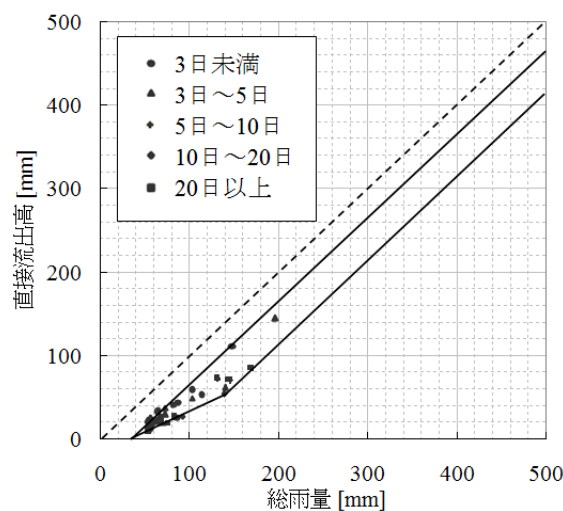


図-3.4.6 比較的簡易な方法¹⁵⁾



初期損失雨量 (R_{LI})	35 [mm]
一次流出率 (f_1)	0.5
飽和雨量 (R_{sa})	140 [mm]
最大地中保水能 (R_L)	52.5 [mm]

図-3.4.7 総雨量～直接流出高の整理（豊平峡ダム）¹¹⁾

3.4.2 合理的なダム操作手法

本研究では、WRFによる降雨予測を実施する時点毎に前節に示した方法により流入量を予測し、次の手順により毎正時にダムの操作を決定する（図-3.4.1 参照）¹¹⁾。

(1) ダム空き容量の方が総流入量より大きい場合

全量カット可能であるが無害流量で定量放流を行う。

(2) ダム空き容量の方が無害流量を超える調節必要容量より大きい場合

無害流量で定量放流を行う。

(3) ダム空き容量の方が無害流量を超える調節必要容量より小さい場合

空き容量を超える流入量について、事前放流を実施する。

(4) ダム空き容量が事前放流量＋無害流量を超える調節必要容量より小さい場合

事前放流を行った上でダムの空き容量を使い切るような定量カット放流量を求め、放流を実施する。（定量カット流量は、無害流量よりも大きくなる：図-3.4.8 参照）

ここに、事前放流を実施するにあたっては、無降雨の状態で河川の増水が発生する可能性もあることから、河川利用者に対して十分な安全性を確保することが重要であるとともに、河川利用者においては確実な避難行動が必要となる。須賀ら¹⁶⁾によれば、人が河川内を歩行する特性として

- ・ 人が恐怖感を感じずに移動できる歩行速度は 40cm/s 程度である。
- ・ 水深が股を超えた場合は、歩行速度が急に下がり、恐怖感を感じ始める。
- ・ 歩行速度は、水深あるいは流速の増加につれて遅くなるが、流速よりも水深に大きく影響される。

とし、歩行限界水深、限界流速を定めている。具体的には、避難限界の目安としては、股下高さが基準となり、実験により歩行限界水深は流速も考慮し、成人男性 70cm、成人女性 50cm、子供・高齢者 30cm としている。

ダムの事前放流にあたっては、流速の増加を人工的に発生させることから、水深だけでなく、流速の要素も加味する必要がある。本研究では、水深のみならず流速の要素も加味して放流量を決定すべく、図-3.4.9 に示すように子供・高齢者、成人女性、成人男性に区分した関係式を作成した。これを用いることにより、H-V の関係と安全避難が可能な領域の関係から必要とされる水深を求めることができ、H-Q 式により流量に換算した値により安全避難が可能な限界の流量が算出できる。

これらを踏まえて、ダム放流量については、放流開始からダム下流のパトロールを開始し、巡視が完了するまでの時間内にあつては、基底流量のみの放流とし、その後は、子供・高齢者が避難可能な流量、その次の段階にあつては、成人女性、成人男性がそれぞれ避難するに要する時間内について、避難を可能とする流量を放流の限界とそれぞれ設定した。その後は、通常の河川水位上昇速度の制限値（通常は 30 分 30cm 又は 50cm を採用）とした。図-3.4.10 に川俣ダムにおける事前放流のパターンを示す。なお、

早明浦ダム、鶴田ダム等コンジットゲート等の放流設備能力が小さいダムも存在するが、現況の放流能力を尊重してシミュレーションを実施した。

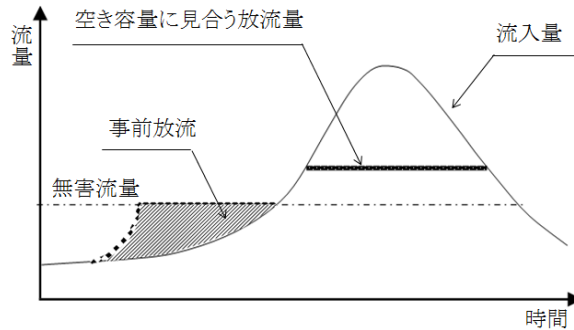


図-3.4.8 事前放流に加えて無害流量を超える定量放流を実施するケース¹⁾

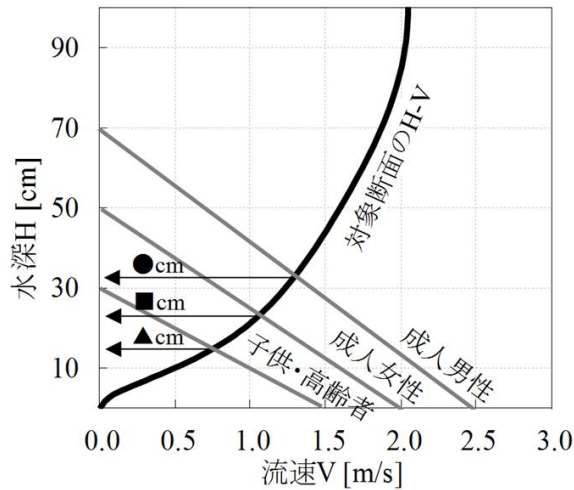


図-3.4.9 安全な避難を考慮した水深と流速の関係¹⁾

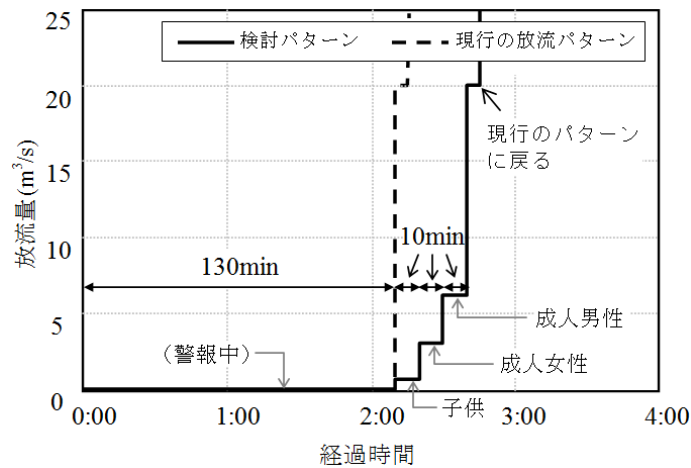


図-3.4.10 安全性を考慮した放流パターン (川俣ダム)¹⁾

3.4.3 WRFによる降雨予測を活用したダム操作シミュレーション結果

本研究においては、前項までに示した手法により 12 ダム 69 洪水について合理的な洪水調節のシミュレーションを実施した。その結果を表-3.4.3に示す¹¹⁾、¹²⁾。これらの結果を分析すると以下のとおりである。なお、豊平峡ダム、矢作ダム、温井ダム、鶴田ダムの中小洪水については、降雨予測計算結果の想定される誤差が、本研究で提示する操作の改善には影響しないと考えられるため、実績降雨を WRF 予測降雨とみなして解析した。その他の超過洪水、計画規模相当の洪水など主要な洪水については、全て WRF による降雨予測を用いている。

- (1) 大洪水が襲来したケースについては、適切な事前放流と最大放流量の決定により、被害を最小化することが期待される。但し書き操作を強いられ、下流氾濫が発生した矢作ダム H12.9 洪水については、速やかなすり付け操作により放流ピーク流量を実績操作よりも $1,404\text{m}^3/\text{s}$ 低減し、大幅に被害を軽減した（図-3.4.1 1 参照）。同様に超過洪水が発生した二風谷ダム H15 年 8 月洪水においては、設計洪水位まで貯留することを前提に最大放流量を $489\text{m}^3/\text{s}$ 低減して計画最大放流量に抑えることが可能であり、下流氾濫を防ぐことができる（図-3.4.1 2 参照）。また、渡川ダム H16 年 8 月洪水にあつては、計画最大放流量を上回る放流となるものの、最大放流量を $115\text{m}^3/\text{s}$ 低減することができる（図-3.4.1 3 参照）。同じく大災害が発生した鶴田ダム H18.7 洪水については、WRF 上限値を用いたケースでも放流ピーク流量が実績操作に比べて $300\text{m}^3/\text{s}$ 増加した（図-3.4.1 4 参照）。これは、鶴田ダムが南九州西側に位置し、東シナ海からの大量の水蒸気等の供給により、長時間にわたる豪雨が発生する特異な気象条件にありながら、WRF の解析にあたって、用いる気象庁の気象モデルによる降雨予測について、海上の水分量が正確に測定されていないため、海域からの水分の供給が過小に評価されていることに主な原因があるものと思われる。この結果、予測降雨量が小さすぎて、洪水前半で放流量を過小に設定し、放流率を上げず、貯水率が大幅に上がってしまったことが影響している。

表-3.4.3 シミュレーション結果総括表¹⁾²⁾

ダム名	検討対象 ケース数	無害流量 までの定量 カット実施 ケース数 (注1)	事前放流実 施ケース数	無害流量 以上の放流 実施ケー ス数	計画最大流 量以上の 放流実施 ケース数	ダム容量を 使い切る ケース数	遅れ操作を 生じた ケース数	利水容量を 回復できな かったケー ス数(注4)	
豊平峡 ダム	上限誤差	12	11	0	1	1	1	0	9 (0)
	予測値	12	11	0	1	1	1	0	9 (0)
	下限誤差	12	11	0	1	1	1	0	9 (0)
四十四田 ダム	上限誤差	7	6	4	1	0	0	1(注2)	4 (2)
	予測値	7	6	2	1	0	0	0	4 (0)
	下限誤差	7	7	0	0	0	0	0	4 (0)
川俣 ダム	上限誤差	6	6	0	0	0	0	0	5 (0)
	予測値	6	6	0	0	0	0	0	5 (0)
	下限誤差	6	6	0	0	0	0	0	5 (0)
矢作 ダム	上限誤差	14	13	10	1	0	0	0	13 (9)
	予測値	14	13	1	1	0	1	0	12 (1)
	下限誤差	14	14	0	0	0	1	0	12 (0)
温井 ダム	上限誤差	4	4	0	0	0	0	0	1 (0)
	予測値	4	4	0	0	0	0	0	1 (0)
	下限誤差	4	4	0	0	0	0	0	1 (0)
早明浦 ダム	上限誤差	10	9	1	1	0	1	8(注3)	4 (0)
	予測値	10	9	0	1	0	1	7	4 (0)
	下限誤差	10	9	0	1	0	1	7	4 (0)
鶴田 ダム	上限誤差	11	3	11	8	1	1	1	1 (1)
	予測値	11	7	9	4	1	2	1	1 (1)
	下限誤差	11	5	3	6	1	5	0	1 (0)
二風谷 ダム	上限誤差	1	0	1	1	1	1	0	0
	予測値	1	0	0	1	1	1	0	0
	下限誤差	1	0	0	1	1	1	0	0
鹿野川 ダム	上限誤差	1	0	1	1	0	0	1	0
	予測値	1	0	0	1	0	1	1	0
	下限誤差	1	0	0	1	0	1	1	0
野村 ダム	上限誤差	1	1	1	0	0	0	0	1 (1)
	予測値	1	1	1	0	0	0	0	0
	下限誤差	1	0	0	1	0	0	0	0
渡川 ダム	上限誤差	1	0	1	1	1	0	1	0
	予測値	1	0	0	1	1	0	1	0
	下限誤差	1	0	0	1	1	1	1	0
祝子 ダム	上限誤差	1	0	0	1	1	1	0	0
	予測値	1	0	0	1	1	1	0	0
	下限誤差	1	0	0	1	1	1	0	0
計	上限誤差	69	53	30	16	5	5	12	38 (13)
	予測値	69	57	13	12	5	8	10	36 (2)
	下限誤差	69	56	3	13	5	12	9	36

注1: 無害流量までの定量カット実施ケース数には、洪水流入量が無害流量に到達せずに終了したケースも含んでいる(予測誤差の設定によらない)。該当するダムおよびケース数は、四十四田ダム:2ケース、川俣ダム:2ケース、矢作ダム:1ケース、温井ダム:2ケースである。

注2: 遅れ操作となったのは、事前放流により水位が低下したことによる。

注3: 早明浦ダムは、コンジットゲートがないため、特に制限水位未満(クレストゲート数高未満)の時に遅れが生じる。H16.8洪水はクレストゲート数高を超えるが水深が低く、放流能力が上がらない。

注4: 貯水位が制限水位未満で洪水調節を終了したケース数(内、事前放流を行ったケース数)

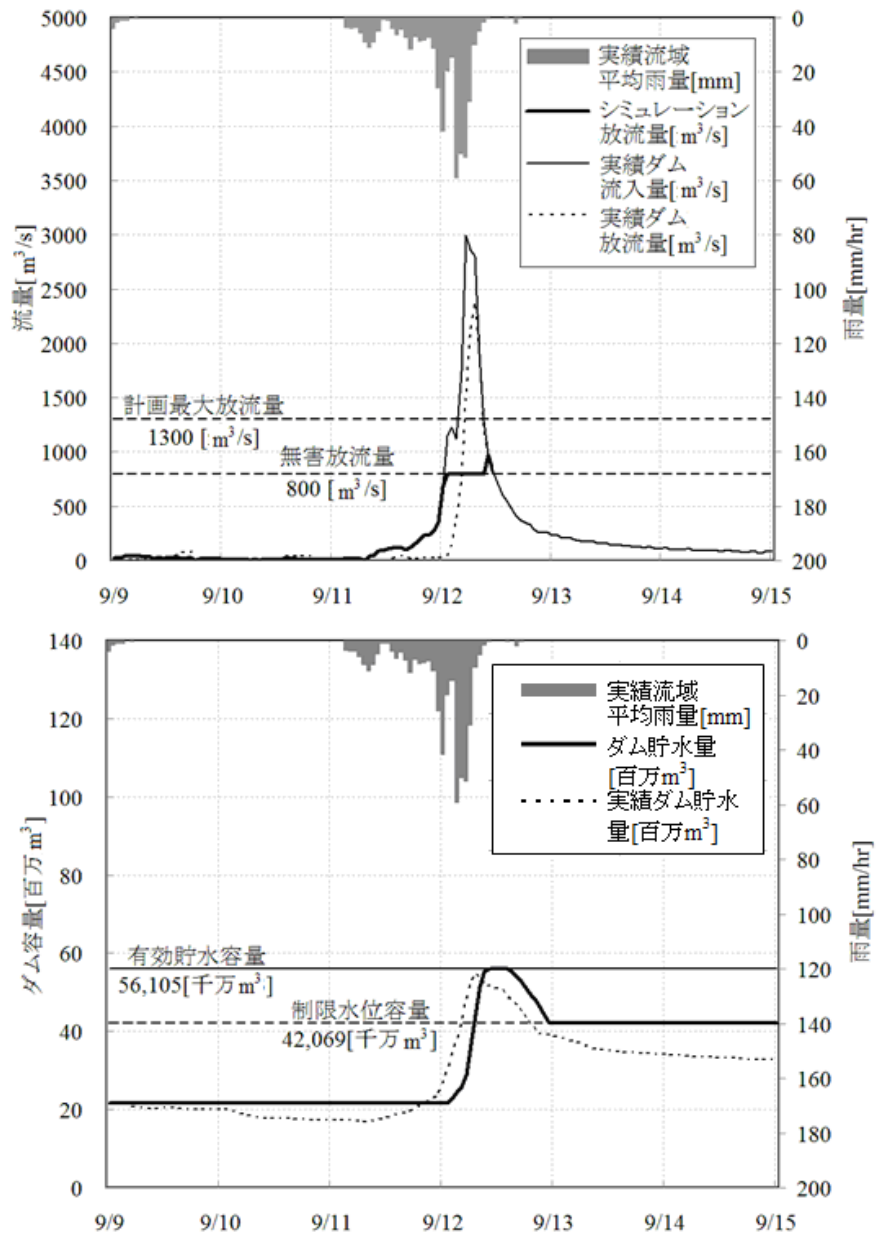


図-3.4.1.1 矢作ダム H12年9月洪水 シミュレーション結果¹⁾

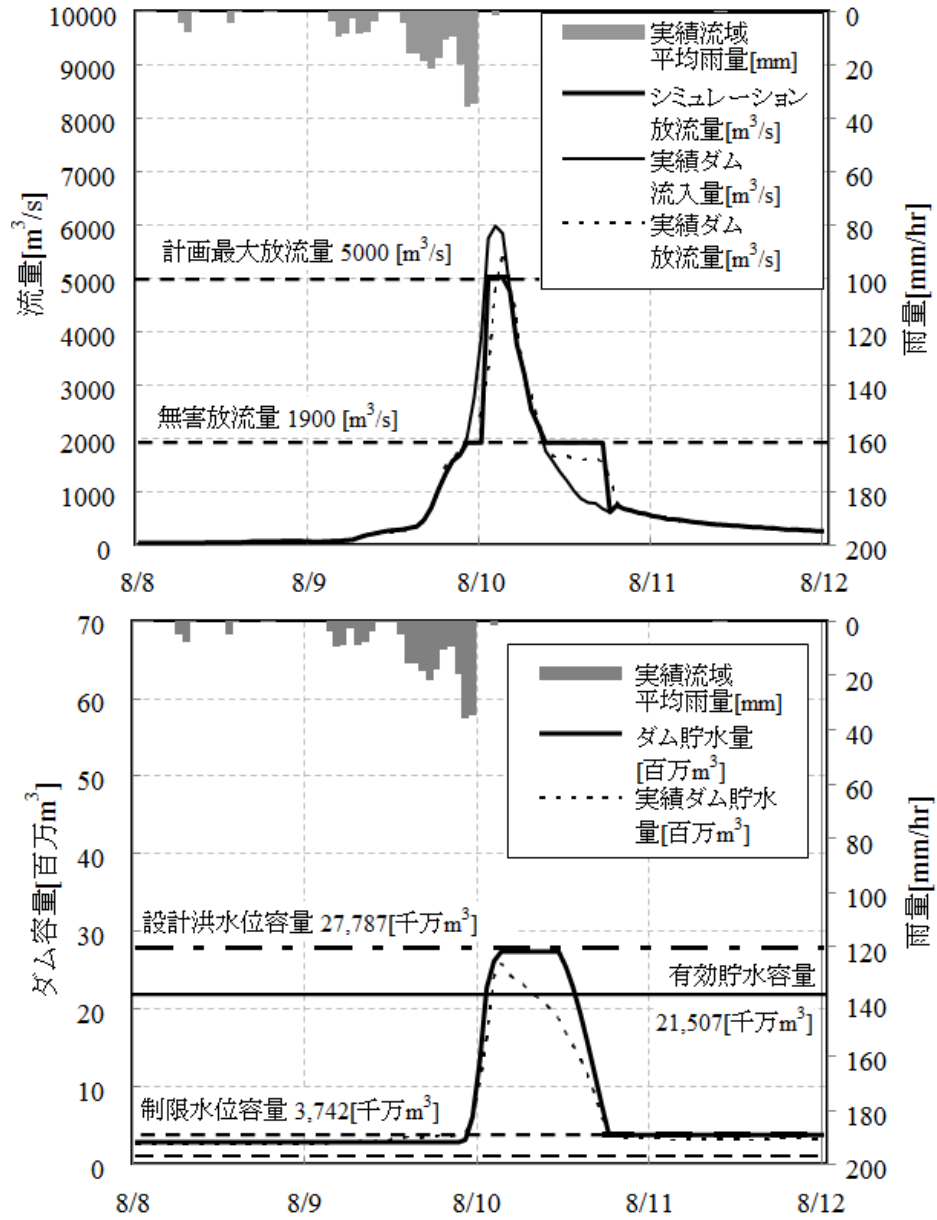


図-3.4.1 2 二風谷ダム H15 年 8 月洪水 シミュレーション結果^{1 2)}

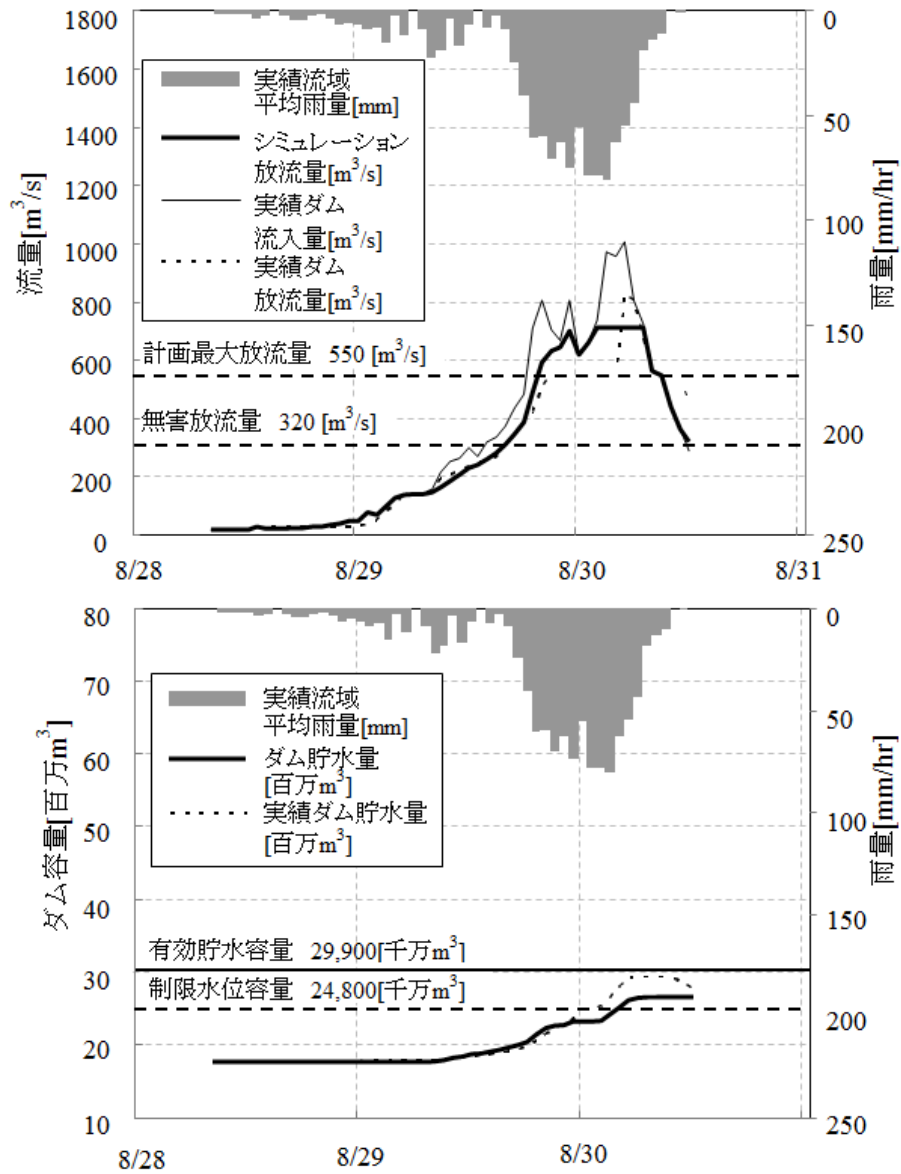


図-3.4.1.3 渡川ダム H16年8月洪水シミュレーション結果

これに対応するためには、解析に使用する初期条件、境界条件である気象モデルの改良、特に海上における水蒸気量等のモデルへの反映が必要と考えられ、これについては、後述する。なお、図-3.4.1 4に示すような計画最大放流量を上回る放流が見込まれる場合にあっては、流域の住民に早期の情報提供を行うとともに避難の実行を求めることも重要である。

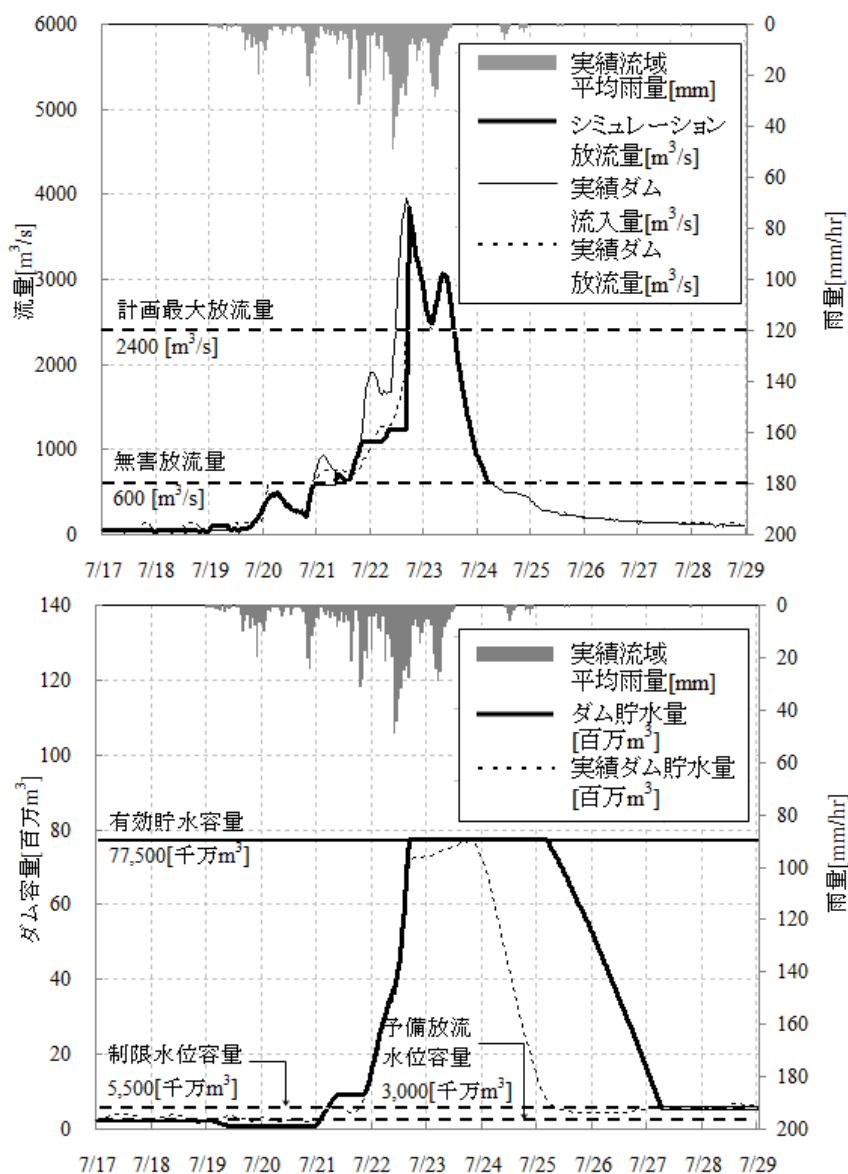


図-3.4.1 4 鶴田ダム H18年7月洪水 シミュレーション結果¹⁾¹⁾

- (2) シミュレーションを実施した 12 ダム 69 洪水のうち、WRF の降雨予測量をそのまま使用したケースにあたっては、57 洪水において事前放流を実施するなどして無害流量のみの放流により、被害を皆無にすることができた。特に鶴田ダムにあつては 11 洪水中 9 洪水で事前放流を実施し、1 洪水を除いて、最大放流量を実績操作よりも低減した（表-3.4.4 参照）。鶴田ダム流域においては、H 元、5、9、18 年と相次いで洪水被害に見舞われており、無堤部も多く残されていることから、この効果は期待される。

表-3.4.4 鶴田ダムにおけるピーク流量低減効果¹⁾¹⁾

洪水	ピーク流入量 (m ³ /s)	実績最大放流量 (m ³ /s)	シミュレーションにおける事前放流	シミュレーションにおける最大放流量 (m ³ /s)	ピーク流量低減効果 (m ³ /s)	ピーク流量低減率 (%)※
H18.7	3,955	3,553	○	3,852	-300	-12.5%
H9.7	2,013	1,247		862	385	16.0%
H5.7	2,678	1,589	○	1,152	437	18.2%
H7.6	1,483	1,036	○	729	307	12.8%
H2.6	1,282	906	○	600	306	12.8%
H11.6	999	821		600	221	9.2%
H17.9	2,178	1,098	○	600	498	20.8%
H1.7	1,873	1,195	○	600	595	24.8%
H16.9	1,793	999	○	600	399	16.6%
H9.9	1,790	1,111	○	600	511	21.3%
H16.8	1,675	1,078	○	600	478	19.9%

※ピーク流量低減効果の計画最大放流量に対する比率を示す。

- (3) 早明浦ダム H16.8 洪水では、洪水末期の予測誤差に対応できず、無害流量を上回る放流量が発生した（図-3.4.15 参照）。これは、降雨からダムへの流入に至るまでの時間を考慮していないこと、WRF による降雨予測において、第 3 波の洪水ピークを予測できていないことに主に起因するものであり、その対応策については、後述する。

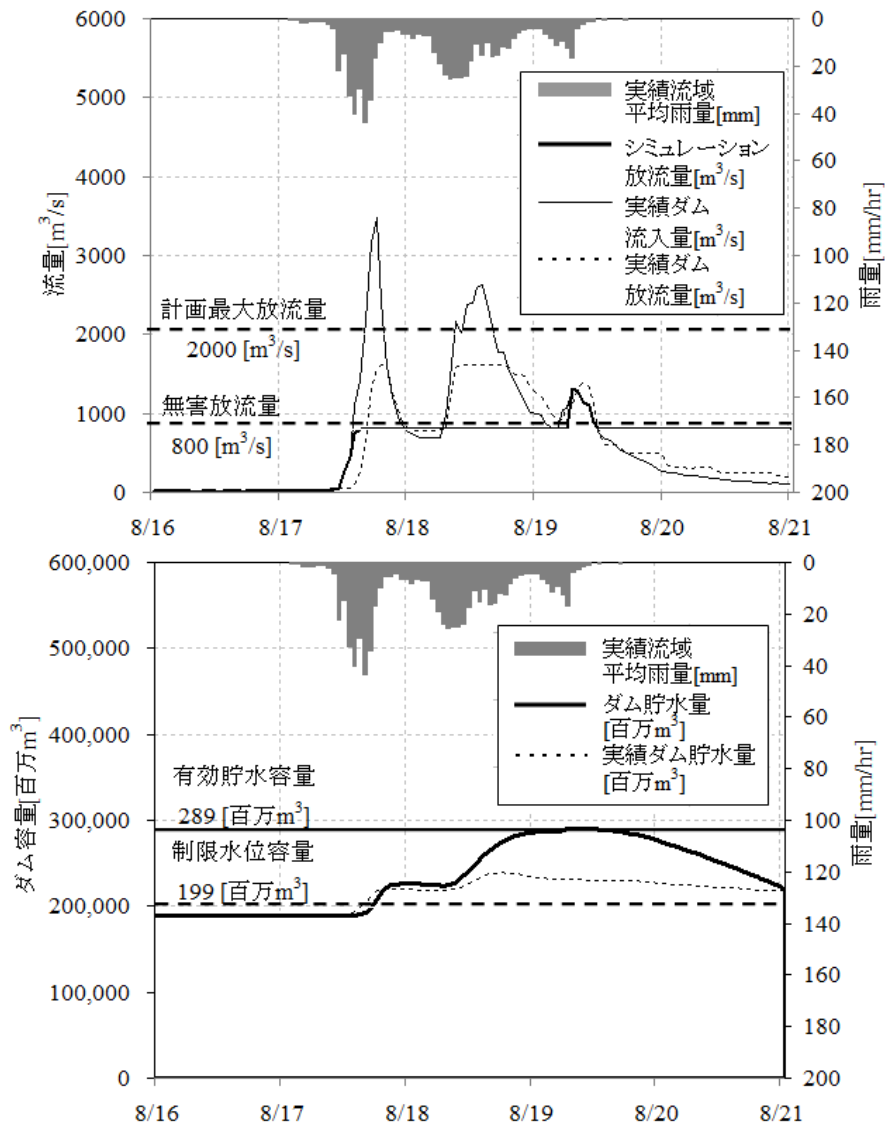


図-3.4.15 早明浦ダム H16 年 8 月洪水 シミュレーション結果¹⁾

このほか、図-3.4.16に示すように H16.7 洪水など 7 洪水で遅れ操作も発生したが、利水容量が大きいいため被害の発生にはつながっていない。この遅れ操作は、早明浦ダムにおいてはコンジットゲートがなく、水位が低い状況で放流量を増加させることができないことに起因しており、放流設備の改良効果については後述する。

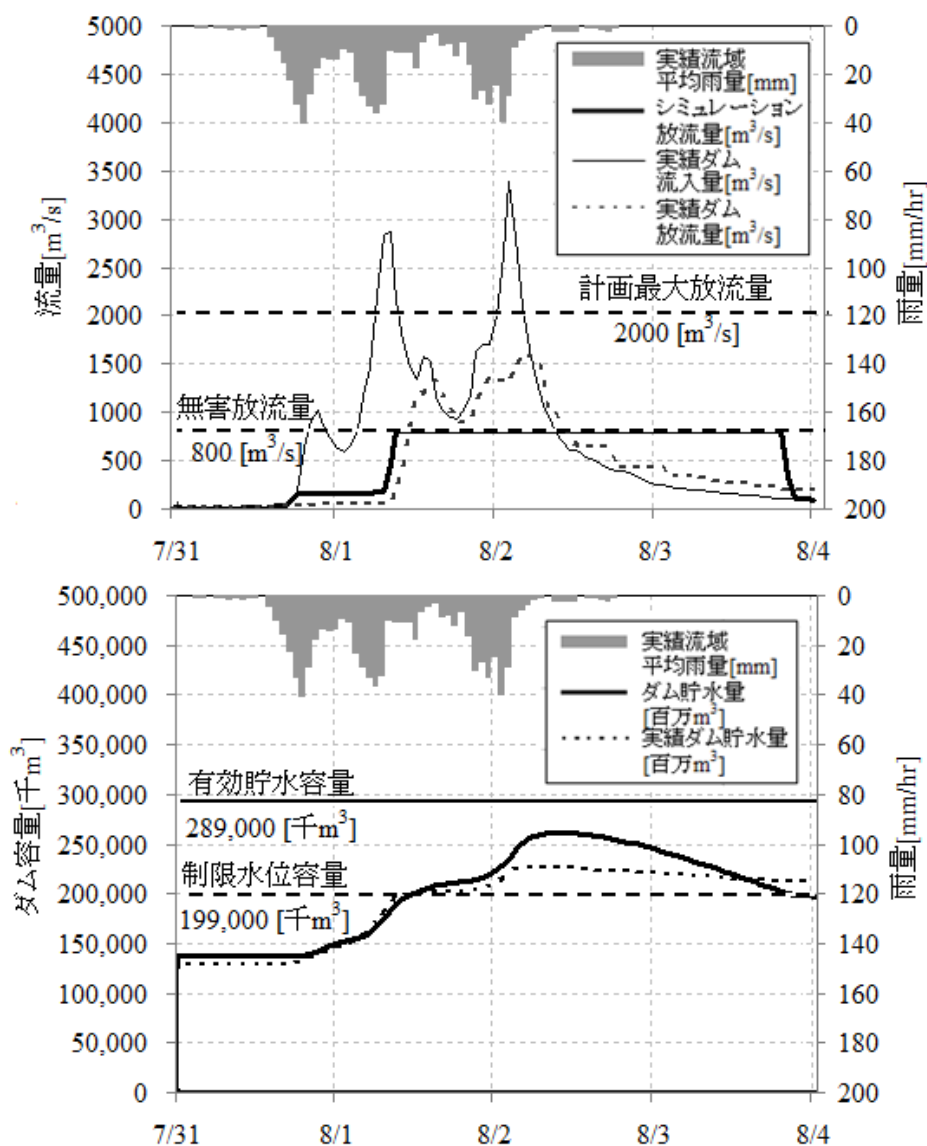


図-3.4.16 早明浦ダム H16 年 7 月洪水 シミュレーション結果

- (4) 四十四田ダム H16.9 洪水（図-3.4.17 参照）、鶴田ダム H5.7 洪水、H18.7 洪水では、夏期制限水位以下の利水容量が小さいため、事前放流の効果に限定的であり、但し書き操作や無害流量以上の放流を強いられる。

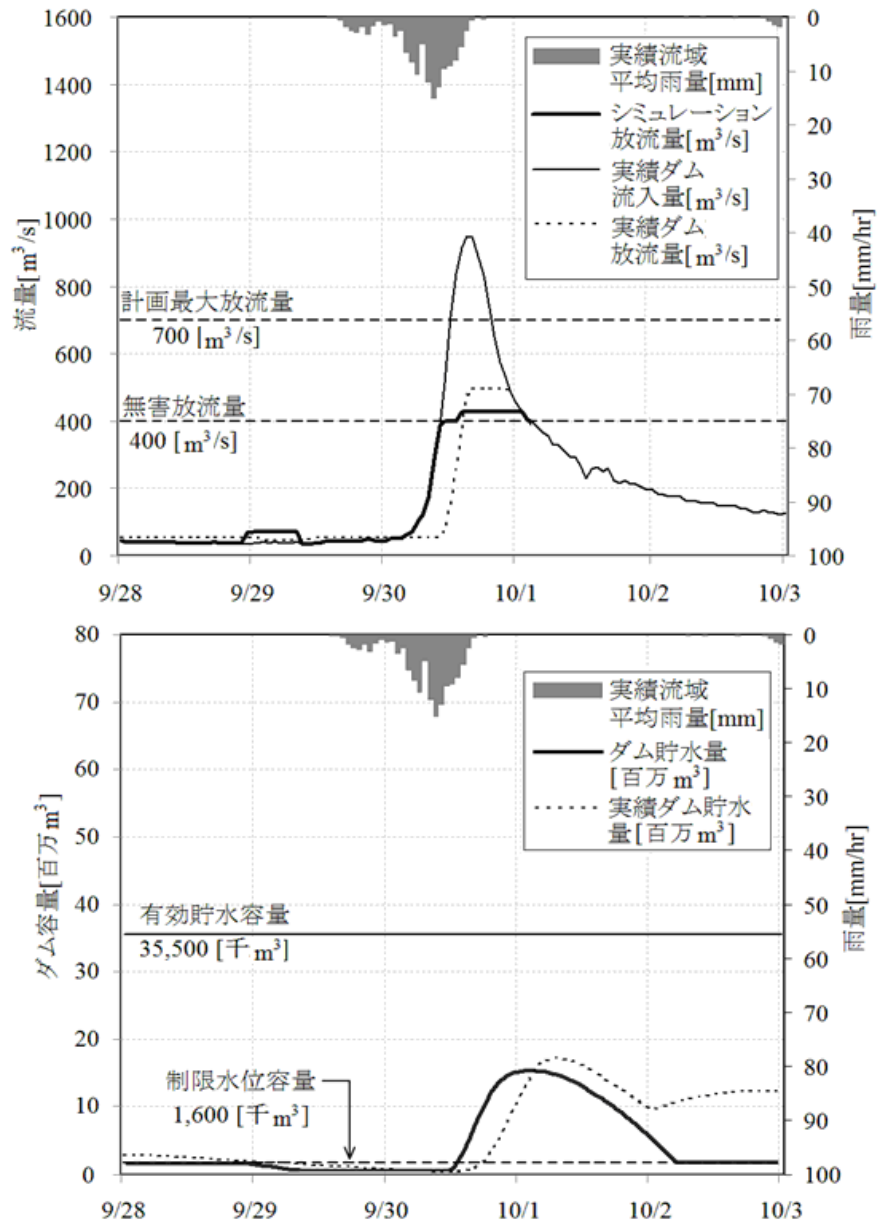


図-3.4.17 四十四田ダム H16 年 9 月洪水 シミュレーション結果¹⁾

- (5) 融雪洪水の豊平峡ダム H12.5 洪水では、非洪水期における治水容量が皆無であること、融雪に係わる予測誤差に対応できないことから、計画最大放流量を上回る放流が発生した（図-3.4.18 参照）。この問題については、融雪を考慮した解析手法について後述する。
- (6) 川俣ダム、温井ダムにおいては近年大規模な洪水が発生していないため、特に問題は発生していない。今後、大きな洪水に関するデータを蓄積してさらなる検討が必要と思われる。

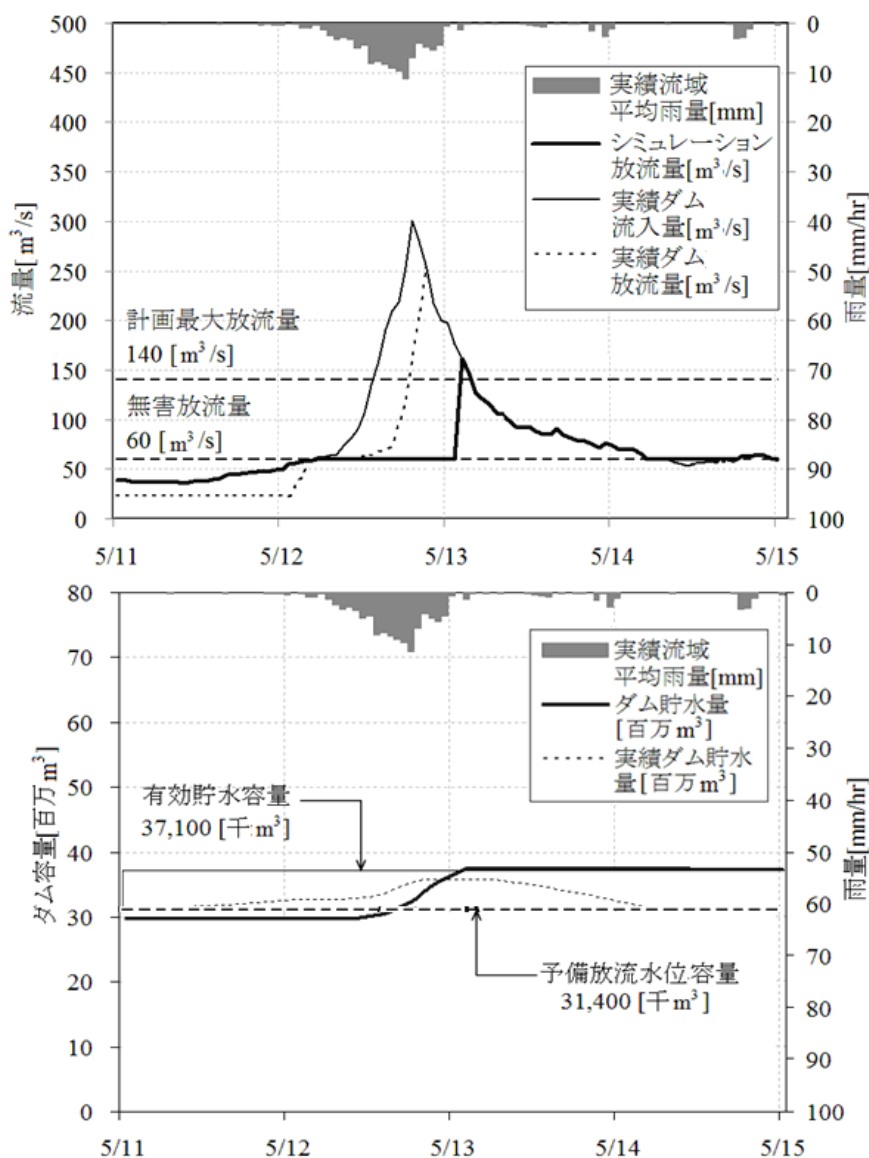


図-3.4.18 豊平峡ダム H12 年 5 月洪水 シミュレーション結果¹⁾¹⁾

(7) 豊平峡ダム H5.10 洪水、鶴田ダム H11.6 洪水（図-3.4.19 参照）では、無害流量到達前において、放流量の急激な増加が見られるが、単位時間（豊平峡ダム 10 分、鶴田ダム 20 分）当たりの放流量増加量は、放流限度カーブ（下流河道の水位上昇速度を制限以内に収めるために、設定されている放流量増加の関数）のそれぞれ 1.47、1.59 倍に相当している。これは、これらの 2 洪水におけるダム操作において、下流河道の水位上昇速度が規定値を守れていないことを示す。これらの洪水においては、中小洪水に終わったため、支障は発生していないが、仮に大規模な洪水が発生した場合、放流限度カーブを遵守すれば、治水容量内に操作規則の規定以上の流水を貯留してしまう恐れがある。この課題への対応策は、第 4 章で詳述する。

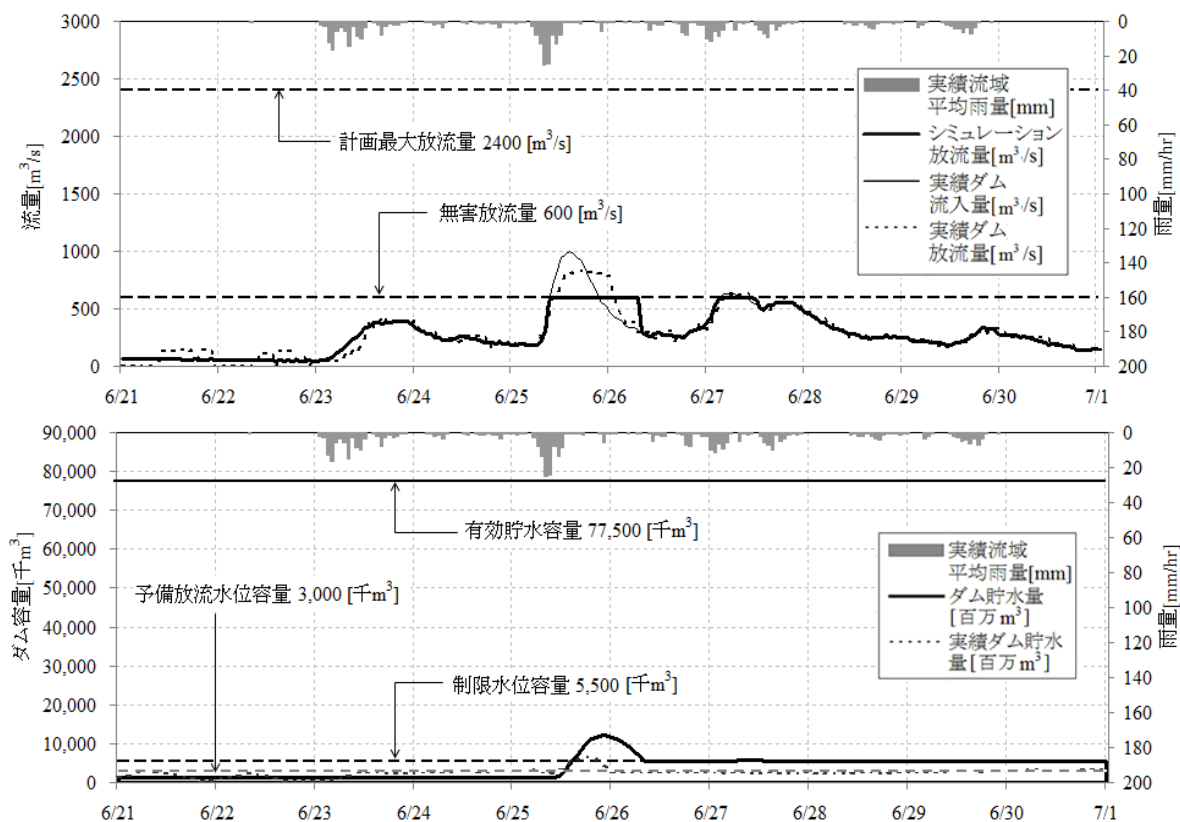


図-3.4.19 鶴田ダム H11 年 6 月洪水 シミュレーション結果

- (8) 野村ダム H16年8月洪水において WRF 上限誤差(1.43 倍)を採用したケースでは、予測降雨量が大きすぎたため、大量の事前放流を行った結果、洪水終了後も利水容量が充足できない結果となった(図-3.4.20 参照)。多目的ダムの管理にあっては、互いに相反する治水、利水についてリスク管理を行うことが重要であり、これについては後述する。

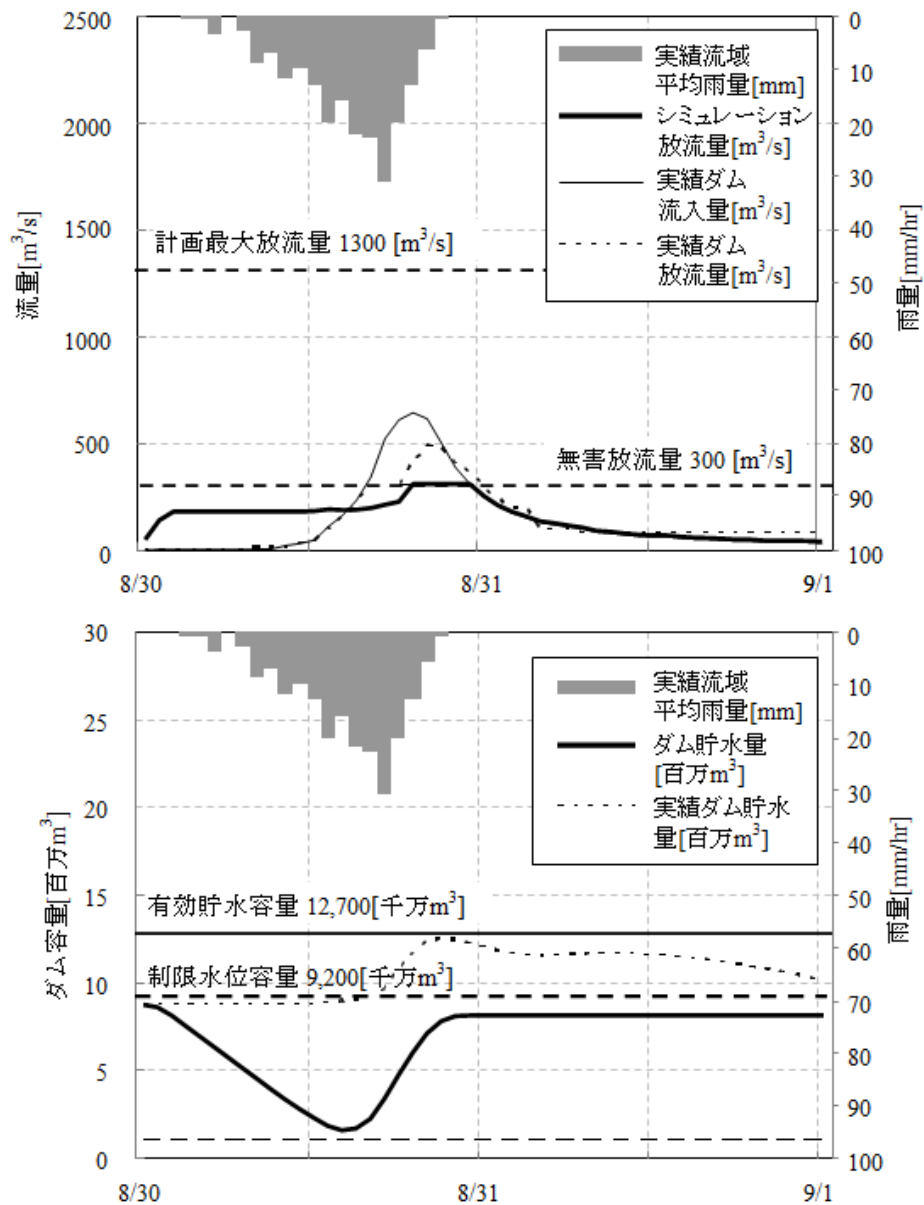


図-3.4.20 野村ダム H16年8月洪水 シミュレーション結果^{1,2)}

3.4.4 実際のダム管理へ導入を図る上での改良

本研究においては、前項において明らかとなった問題への対応を含めて、本手法を実際のダム管理に導入するために、以下に示す改良を試みた^{1,2)}。

(1) 予測技術の改良

1) WRFによる降雨予測の誤差の解明

第4節における検討においては、WRFによる降雨予測の誤差を算出するにあたって、既往の研究事例がなかったことから、解析のメッシュは20kmと大きいですが、気象庁の実施した降雨予測の実績降雨に対する誤差に関して国土技術政策総合研究所が実施した研究成果^{1,3)}を援用した。

ここでは、今後のこの種の研究の礎とすべく、10ダム14洪水においてさまざまな洪水について、WRFによる降雨予測を行い、実績降雨と比較することにより、その誤差について、検討を行った。

まず、図-3.4.2.1に示すように、予測降雨 R_p と実績降雨 R_o の回帰式を求めた。

$$R_p = a \cdot R_o \quad (3.4.4)$$

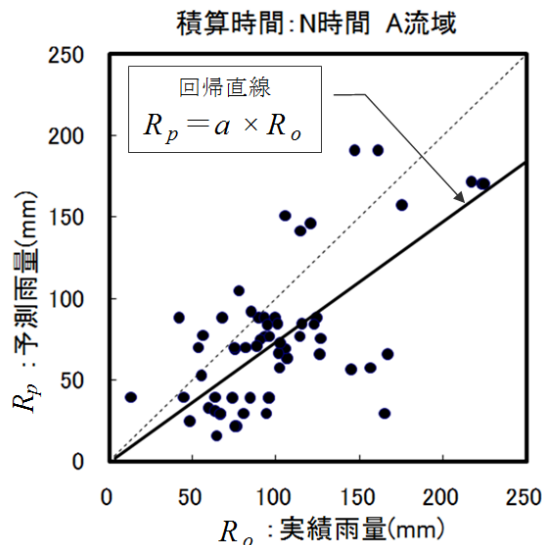


図-3.4.2.1 予測雨量と実績雨量の関係

ここで、回帰係数 a と R_p/R_o の標準偏差 $\sigma(R_p/R_o)$ を基に回帰係数の上限 a_{max} と下限 a_{min} を以下の式により算出することとした。

$$a_{max} = a + \sigma(R_p/R_o) \quad (3.4.5)$$

$$a_{min} = a - \sigma(R_p/R_o) \quad (3.4.6)$$

ここに、

$$\sigma(R_p/R_o) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{\bar{y} - (R_{p,i}/R_{o,i})\}^2}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{p,i}/R_{o,i})$$

結果は、表-3.4.5、図-3.4.2 2に示すとおりであり、回帰係数は、0.13～1.68 と大きく乖離することとなった。

以上の解析は、データ数が14洪水と数少ないため、確率統計的に信頼できるものではなく、今後、多くのダム流域、洪水において実施し、実績降雨との乖離を分析して、その上限値から下限値に至るまでの誤差を正確に把握することが求められる。その際には、ダム流域面積の大小、台風、前線、移動性低気圧など気象現象、ダムの所在する地域などについて区分して誤差を解析することが望ましい。解析によって得られた誤差は(3.3.9)、(3.3.10)式の係数に適切に使用することにより、適切な予測降雨を得ることが期待できる。

表-3.4.5 積算時間毎のWRF予測雨量と実績雨量の回帰係数及び上限値・下限値

積算時間	6	12	18	24	30	36	42	48
回帰係数	0.48	0.52	0.58	0.58	0.62	0.63	0.64	0.64
上限値	1.53	1.24	1.68	1.55	1.43	1.43	1.41	1.33
下限値	0.13	0.16	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20	0.21

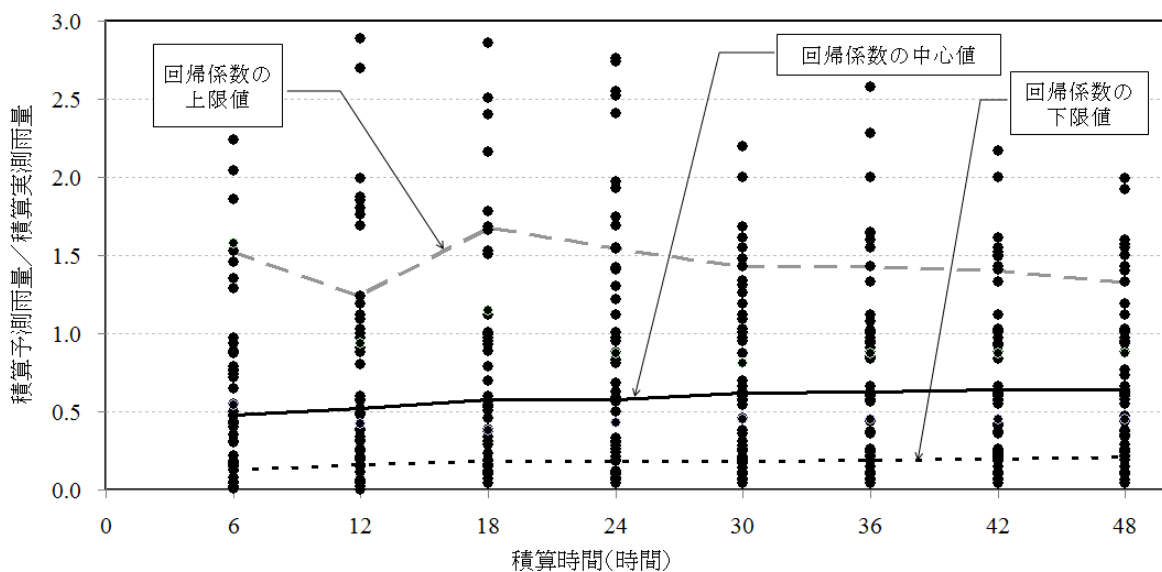


図-3.4.2 2 積算時間毎のWRF予測雨量の回帰係数¹⁾²⁾

2) WRF 解析の初期値、境界条件の精度向上

3.4.3 (1) においては、鶴田ダム H16.7 洪水における降雨予測について実施したが、実績降雨に比べて WRF による予測降雨が小さすぎたため、操作実績よりも放流量を増大させる悪い結果を招いた。すなわち、21 日 21 時以降の鶴田ダム流域平均 48 時間実績雨量は、589mm にも達するが、WRF による予測雨量は、134mm に過ぎない。この主たる原因は、WRF の初期値、境界条件を算出する気象庁による 20km メッシュの全球気象予測モデル RSM のデータが、東シナ海海上における水蒸気量等の水分を実際のデータよりも少なく計上していることと推定した。

「湿舌」と呼ばれるように、過去にも東海豪雨などにおいて、海上に大量の水分量が発生し、これが次々に陸上に供給されて豪雨をもたらす現象が観測されている。WRF の初期値、境界条件となる当時の気象庁 RSM にあっては、海上の観測値の精度が悪かったため、大きな誤差が発生したものと考えられる。WRF による降雨予測の精度向上を図るためには、初期値、境界条件の精度向上が重要であることは言うまでもない。

ここに、NCEP (米国環境予測センター) で開発された FNL は、COSMIC 衛星による GPS^{えんべい}掩蔽観測 (図-3.4.2.3 参照) によるデータを使用して、解析を行っている^{17)、18)、19)}。GPS^{えんべい}掩蔽観測とは、衛星観測により地上付近での電波の屈折率を利用して湿度、温度などの鉛直分布を観測するものであり、海上などの観測精度を大幅に上げることが可能となる。

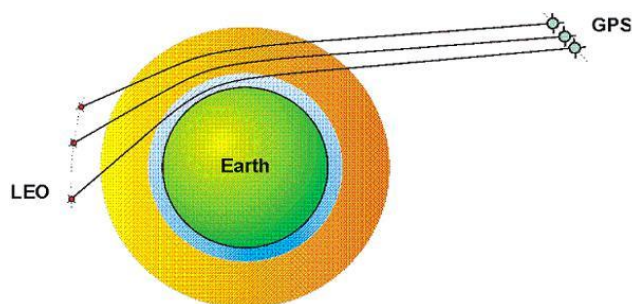


図-3.4.2.3 GPS^{えんべい}掩蔽観測

前線への水蒸気量の供給源となる対流圏下部の高度は、約 1,500~4,000m であり、これを代表する高度 3,000m (700hpa) における水蒸気量の FNL と RSM の比較を図-3.4.2.4 に示す。東シナ海上における水蒸気の相対湿度が高い区域が、FNL においては、RSM よりも大きく広がっており、特に 90% を超える区域が広いことが読み取れる。この原因として、気象庁 RSM は、気球を飛ばすことによ

り海上の水分量を測定するゾンデ観測により得られたデータを使用しており、水分の鉛直分布を把握できないため精度が悪いことが考えられる。

本研究では、この FNL データを初期値、境界値として用いて WRF による降雨予測を行った結果、図-3.4.25に示すように、実績降雨データに約 70%に相当する予測値 412mm を得た^{1 2)}。

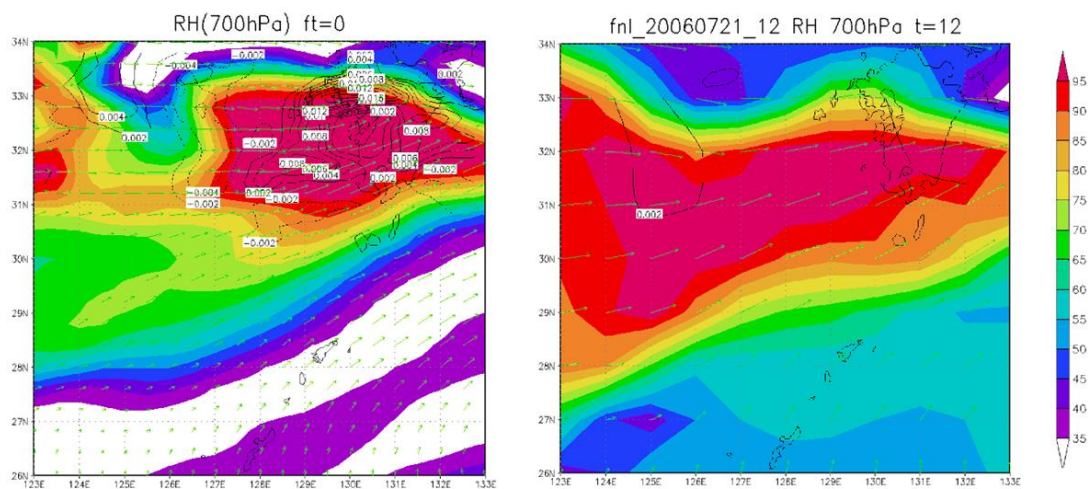


図-3.4.24 高度約 3,000m の相対湿度の分布 (2006 年 7 月 22 日 9 時)
(左 : RSM 右 : FNL)

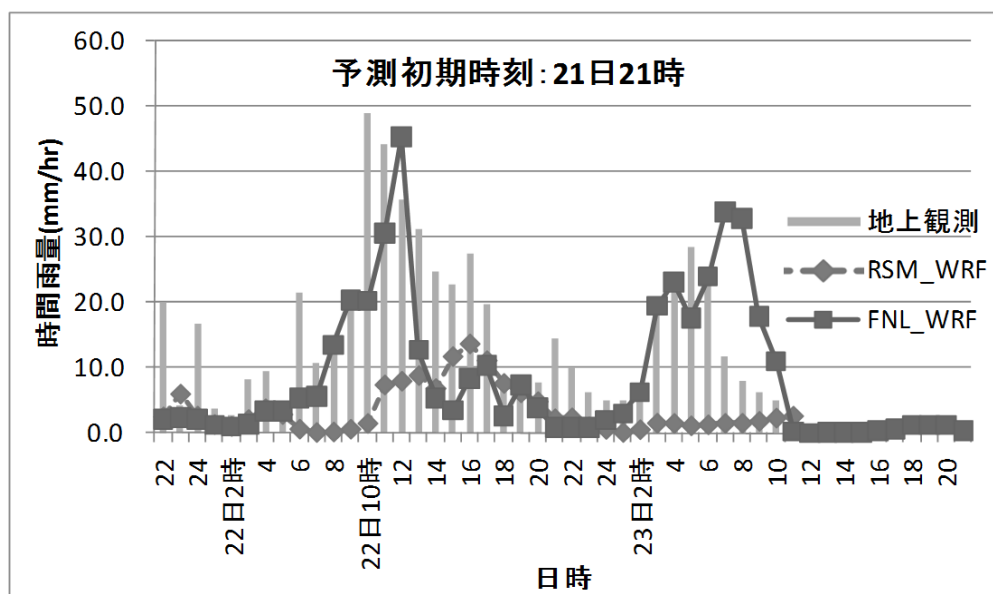


図-3.4.25 鶴田ダム流域平均毎時雨量の実績と WRF による予測雨量の比較
(2006 年 7 月)^{1 2)}

この降雨予測の事例から見ても、豪雨をもたらす陸上の前線に水分を送り込む対流圏下部の水分の値が正しくなければ、10～20時間先の降雨予測精度を向上させることは困難であることがわかる。但し、FNL 観測値をダム管理所において入手できるのは、約 24 時間遅れとなることから、ダム管理の実践においては、同じく NCEP が公開しているデータである GFS を活用することとなる。一方、気象庁の RSM においても、表-3.4.6 に示すように、近年の技術革新は著しく、2009 年 12 月以降は、同様の処理が行える状況になっている。なお、これら GPS^{えんべい} 掩蔽観測による観測値の鶴田ダム以外への適用性については、各々確認する必要がある。

表-3.4.6 気象庁 20km メッシュモデルの改良

時期	1996年3月～ 2007年10月	2007年11月～ 2008年8月	2008年9月～ 2009年11月	2009年11月～
モデル名	RSM	GSM	改良版GSM	改良版GSM
概要	60kmメッシュの全球モデル (GSM) の出力値を初期値・境界値に用い、アジア域を 20kmメッシュで計算する領域モデル	20kmメッシュ全球モデル	20kmメッシュ全球モデル	20kmメッシュ全球モデル
改善内容		ネスティングすることなく 20kmメッシュで全球を計算	静止気象衛星の水蒸気チャネルの情報を初期値解析に利用開始 計算格子の改良 (適合ガウス格子の導入)	Metop (EU) 衛星データを主として活用した GPS 掩蔽データの同化

3) 融雪による流出量の変化を考慮した解析

豊平峡ダムにあっては、5 月の融雪期に降雨及び気温上昇が発生したことから、降雨による流出のみならず、融雪による大量の流水がダムに流入したと考えられ、これを WRF では予測できず、放流率を上げなかったことから、結果的に洪水末期においてダム容量が不足し、無害流量以上の放流を招く結果となった。

これを改良するためには、WRF による降雨予測に加えて、融雪量の推定を行う必要がある。本研究では、以下に示す丹羽ら²⁰⁾の式により、融雪量の推定を行ったが、結果は、図-3.4.26 に示すとおりであり、洪水低減時にダム管理所

において観測した実績ダム流入量と約 113m³/s（実績流入量の 69.6%に相当）の差が生じるなど、相当の乖離が出る結果となった。

$$q = \frac{mI(T - T_{\min})(1 - \gamma)}{\text{(第1項)}} + \frac{(m_T + m_v)V}{\text{(第2項)}} T + \frac{RT}{C_m} + \frac{CC}{\text{(第4項)}} \quad (3.4.7)$$

$$\gamma = 0.85(0.82)^{N^{0.46}}$$

q : 融雪量 (mm)	m : 融雪係数 (mm/°C)
I : 地形因子 (0~1)	T : 気温 (°C)
T_{\min} : 日最低気温 (°C)	γ : 雪面反射率 (0~1)
V : 風速 (m/s)	m_T : 気温融雪係数 (mm/°C)
m_v : 対流伝達係数 (mm/°C・m/s)	R : 降雨・降雪量 (mm/°C)
C_m : 水の比熱 (80cal/g・°C)	N : 最後の降雪からの経過日数 (日)
CC : コールドコンテンツ (mm)	

第1項（気温変化による融雪）、第2項（風による融雪）、第3項（降雨による融雪）、第4項（雪温上昇によるエネルギー消費）である。

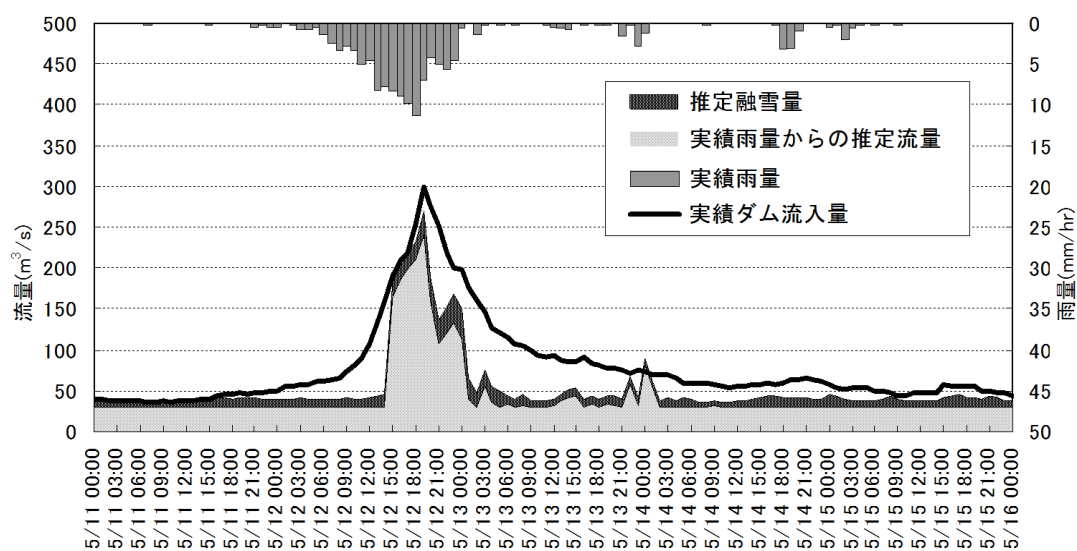


図-3.4.26 平成12年5月11日洪水の流出成分の分析

このため、ダム上流域において観測している積雪量の変化から融雪量を推定する手法を試みた^{1,2)}。ダム上流に位置する大二股観測所（EL.771m、図-3.4.27参照）においては、12日0時から13日0時にかけて、積雪深13cmが溶けてなくなっており、これらは、ダムに流入したものと考えられる。これに対して、ダム地点は、標高約448mと低いため早く融雪し、4月27日の時点で積雪量は0cmの状態であった。同時点の大二股観測所の積雪深は、97cmである。図-3.4.26により5月12日0時頃から降雨が始まったこと、ダム実績流入量は13日12時頃に折れ点があり、ほぼこの時刻までに融雪出水としての表面流の流出が終わっていることから、12日0時～13日12時に大量の融雪が発生したと推定した。ここで、図-3.4.28のように、標高と積雪の関係が一定の勾配関係にあり、12日～13日の融雪量が時間に比例すると仮定すれば、今回の融雪に伴い36時間で積雪深が最大で19.5cm減少したと推定できる。これに標高毎の流域面積を乗じて融雪量を求め、WRFによる降雨予測に加えるとともに、流域面積を考慮して1時間の到達時間を考慮してダム流入量を予測した。結果は、図-3.4.29に示すとおりであり、洪水末期を含めてほぼ実績流入量を再現することができた。ここに、図-3.4.29における実績雨量とは、ダム流入量を流域面積で除した流出高である。これを用いて洪水調節を行った結果は、図-3.4.30のとおりであり、最大放流量を実績操作に比べて162m³/s低減させることができた。

融雪の推定に関する研究は、土屋ら²¹⁾、中山ら²²⁾、小池ら²³⁾、小原ら²⁴⁾など多くの研究者によって実施されており、融雪期の洪水調節の実施にあたっては、適切な手法を選択することが望ましい。

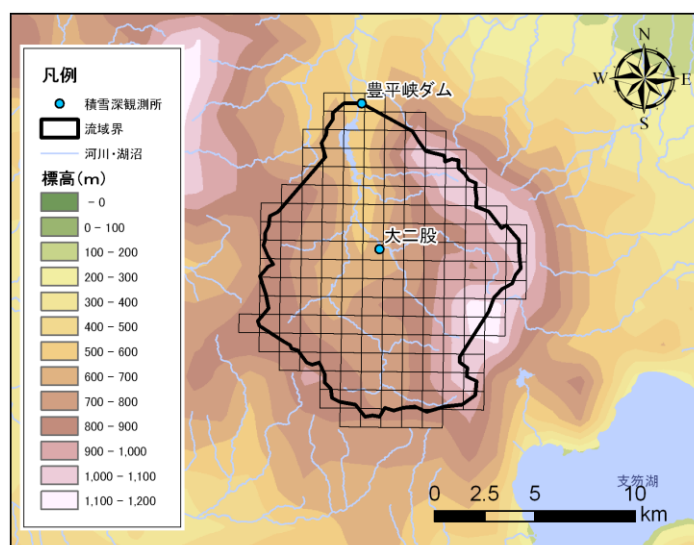


図-3.4.27 豊平峡ダム流域の標高コンター図

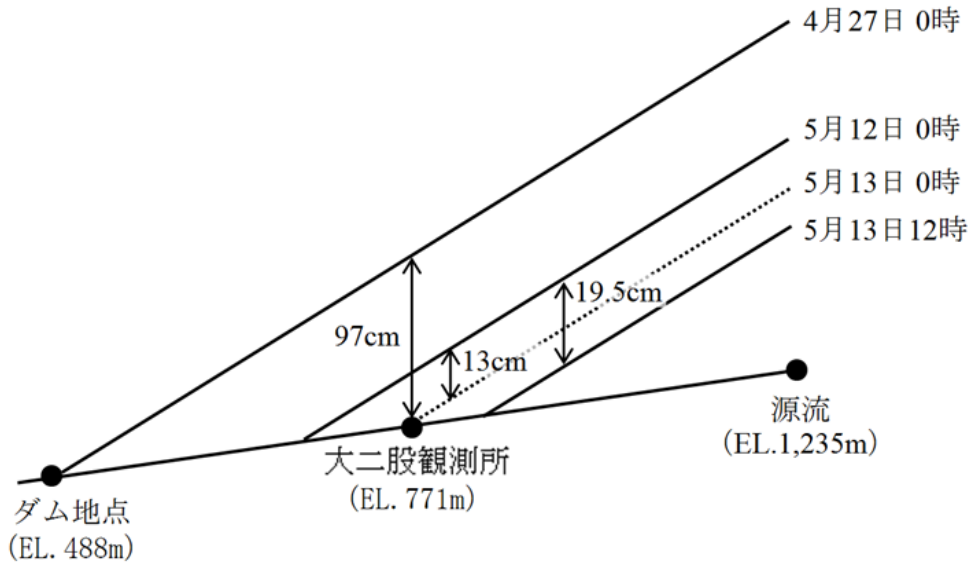


図-3.4.2 8 豊平峡ダム流域における推定積雪深

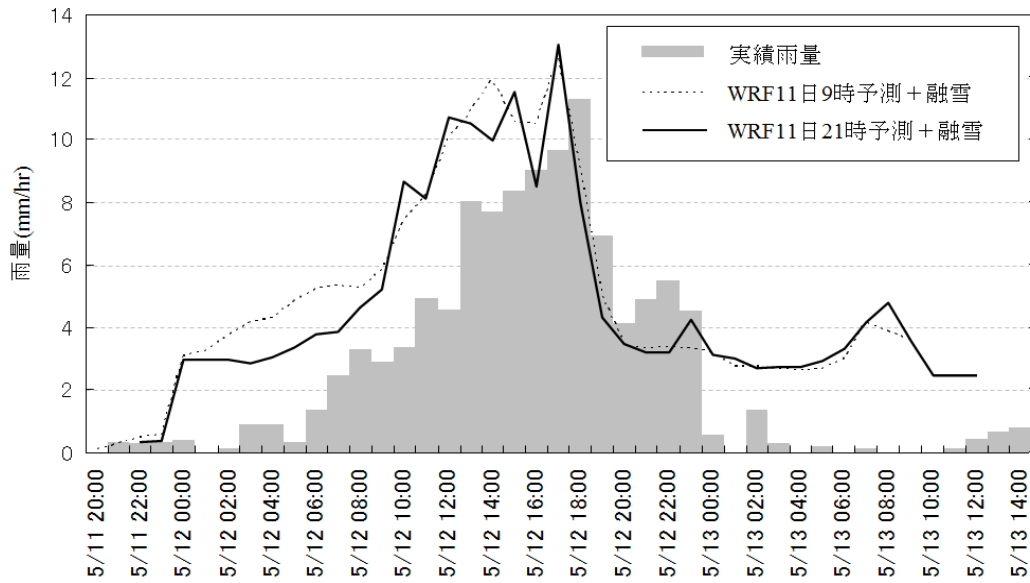


図-3.4.2 9 融雪を考慮したダム流入量

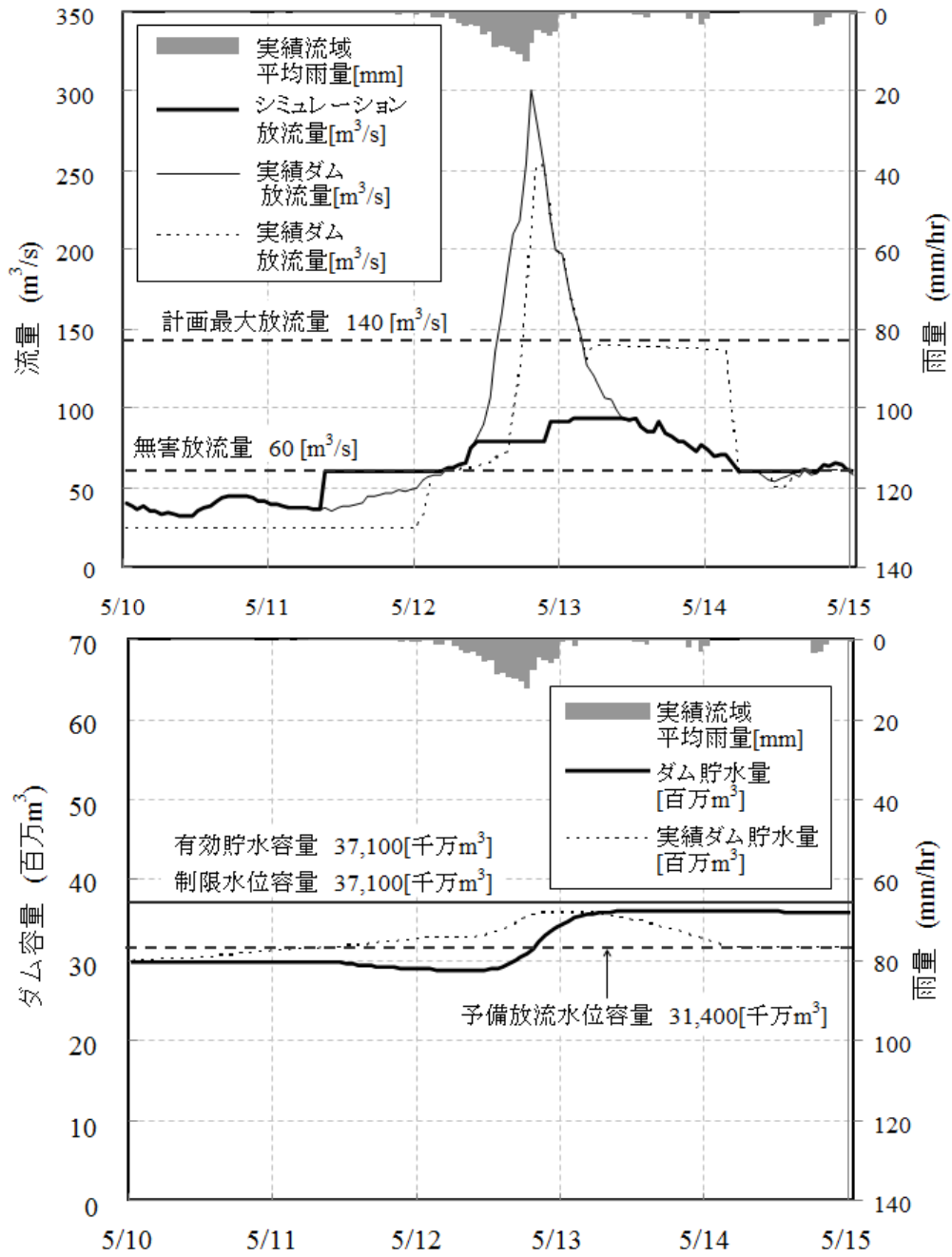


図-3.4.3 0 融雪を考慮したダム洪水調節シミュレーション

4) 分布型モデルによる流出解析と空き容量留保率の適用

3.4.3 (3) で示した早明浦ダムに関するシミュレーションにおいては、H16.8 洪水について、洪水末期の第3波のピークを予測できず、それまでにダム容量を使い切っていたために、放流量=流入量とせざるを得ず、無害放流量を上回る放流を行う結果となった(図-3.4.15参照)。この洪水第3波は、8月19日0時~7時頃の降雨が流出して、ダム地点に流入したものと考えられる。

本シミュレーションにおいて採用している損失雨量について、誤差を有していることがその一因と推定した。

この問題に対応するためには、分布型モデルによる流出解析を行うことが精度向上の観点から最適と考えられるため、本研究では、土研分布型モデル(吉野川バージョン)を用いて流出解析を行い、ダム流入量の算定を行った。モデルの概要²⁵⁾は、図-3.4.31のとおりであり、表層モデル、地下水モデル、河道モデルはそれぞれ図-3.4.32、図-3.4.33、図-3.4.34のとおりである。ここで、代表的な定数は、表-3.4.7のように設定している。

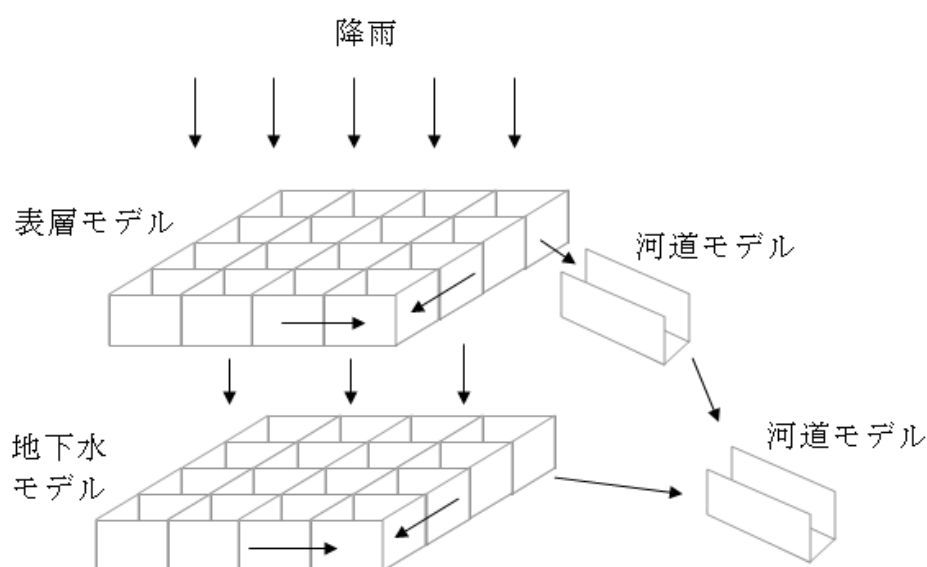


図-3.4.31 早明浦ダム流域分布型モデルの概要図²⁵⁾

- R : 雨量
- E_{ps} : 蒸発量
- S_{f2} : 表面流の発生する高さ
- S_{f1} : 中間流の発生する高さ
- S_{f0} : 地下浸透の発生する高さ
- Q_0 : 浸透モデルへの浸透量
- Q_{sf} : 表面流出量
- Q_{ri} : 早い中間流出量
- h : モデルの貯留高
- f_0 : 最終浸透能
- α_{ri} : 係数
- n : 粗度係数
- L : メッシュの長さ

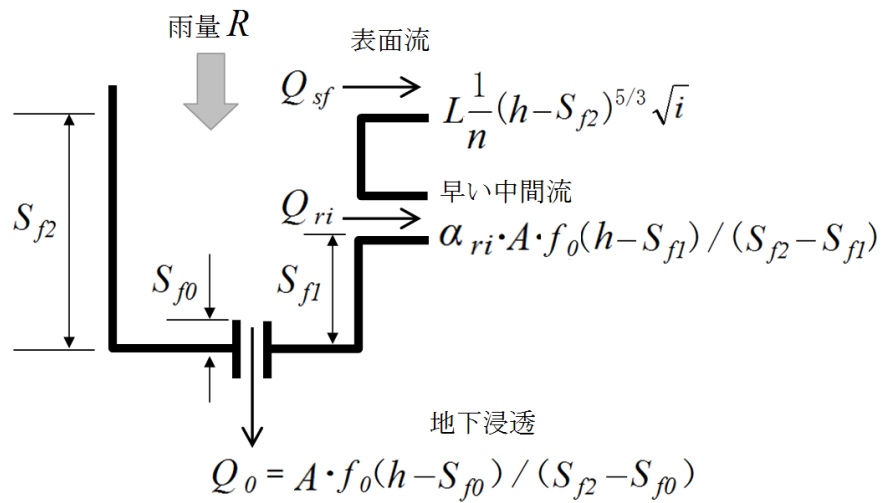


図-3.4.3.2 表層モデルの概念図^{2.5)}

- Q_{in} : 浸透モデルからの流入量
 - Q_{gl} : 不圧地下水流出量
 - Q_g : 被圧不圧地下水流出量
 - h : モデルの貯留高
 - S_g : 不圧地下水流出が発生する高さ
- A_u 、 A_g はそれぞれ、不圧、
被圧地下水流出量に係る係数

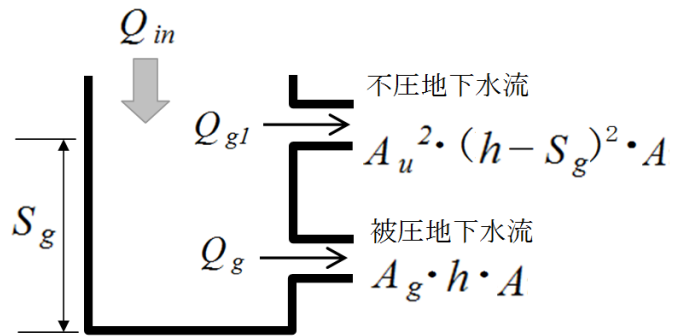


図-3.4.3.3 地下水モデルの概念図^{2.5)}

- Q_{in} : 地下水モデル及び上流
河道モデルからの流入量
- Q_r : 河道流出量
- B : 河道幅
- n : 粗度係数

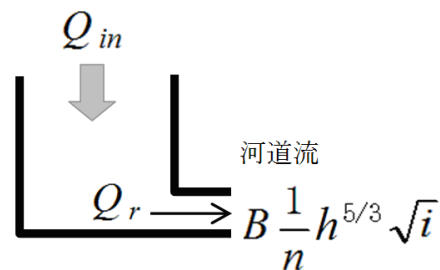


図-3.4.3.4 河道モデルの概念図^{2.5)}

表-3.4.7 分布型モデル定数^{2 5)}

表層モデル

項目	森林(大)	森林(中)	森林(小)	畑地水田	市街地
$S_{f2}(mm)$	50	65	80	20	10
$S_{f1}(mm)$	20	20	20	10	10
$S_{f0}(mm)$	10	10	10	5	5
$f_0(mm/h)$	7.2	5.4	3.6	0.72	0.36
α_{ri}	0.01	0.2	0.3	2	1
$n(m^{-1/3}s^{-1})$	0.6	0.6	0.6	3	0.1

地下水モデル

定数	大	中		小
		黒色片岩 緑色片岩	黒色片岩・緑 色片岩以外	
$S_g(mm)$	400	300	300	100
$A_u(mm^{-1/2}day^{-1/2})$	0.05	1	0.1	2
$A_g(mm^{-1})$	0.004	0.08	0.02	0.2

H16.7 洪水について、WRF による降雨予測を用いて流出解析を行った結果は、図-3.4.35 のとおりであり、8月19日8時頃発生する洪水ピークを再現するには至らなかった。このように、流出解析を緻密に実施しても、予測降雨に誤差が残る以上、その精度向上には限界がある。具体的には、今回のように、予測時点以降について無害流量以下の流出に留まる降雨を予測した場合、ダム容量を使い切ってしまう、その後の誤差（予測よりも流入量が多いこと）に対応できないこととなる。

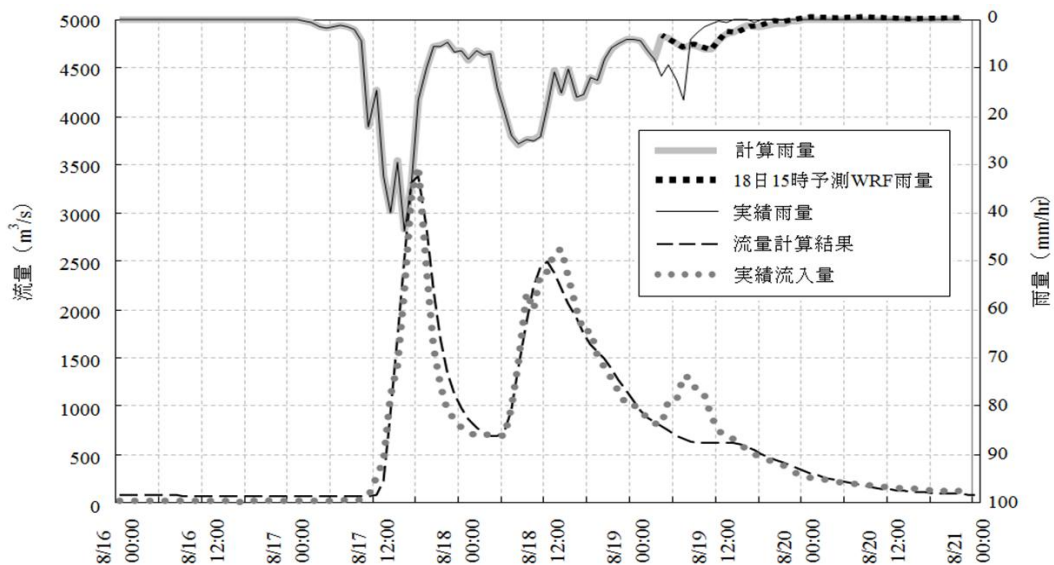


図-3.4.35 分布型モデルを用いた流出計算結果^{1 2)}

本研究では、以上の問題点に対応するために、さらなる改良策として、本方式を適用するにあたって、考慮するダムの空き容量を一定率留保する手法を考えた。WRF による誤差により、予測よりも多くの降雨が発生した場合に備えて留保するものであり、ここでは、空き容量の 35.5% を留保して洪水操作を行い、容量を使い切った後には、留保していた 35.5% の空き容量を使うこととした。ここに、35.5% は第 3 波の予測雨量の誤差に相当する流入量をダムの治水容量で割ったものに概ね相当し、結果は、図-3.4.36 のとおり、第 3 波の洪水ピークについて、実績操作よりも約 $490\text{m}^3/\text{s}$ の低減を行うことが可能となった。35.5% の留保率は、一般的に但し書き操作開始の目安となる 20% に比べてやや大きい感があり、降雨予測どおりの降雨が発生した場合にあっては、無害流量を上回る放流を行うデメリットもあるが、現場での実施にあたっては、ダム毎に多くの洪水によりその検証を図る必要がある。

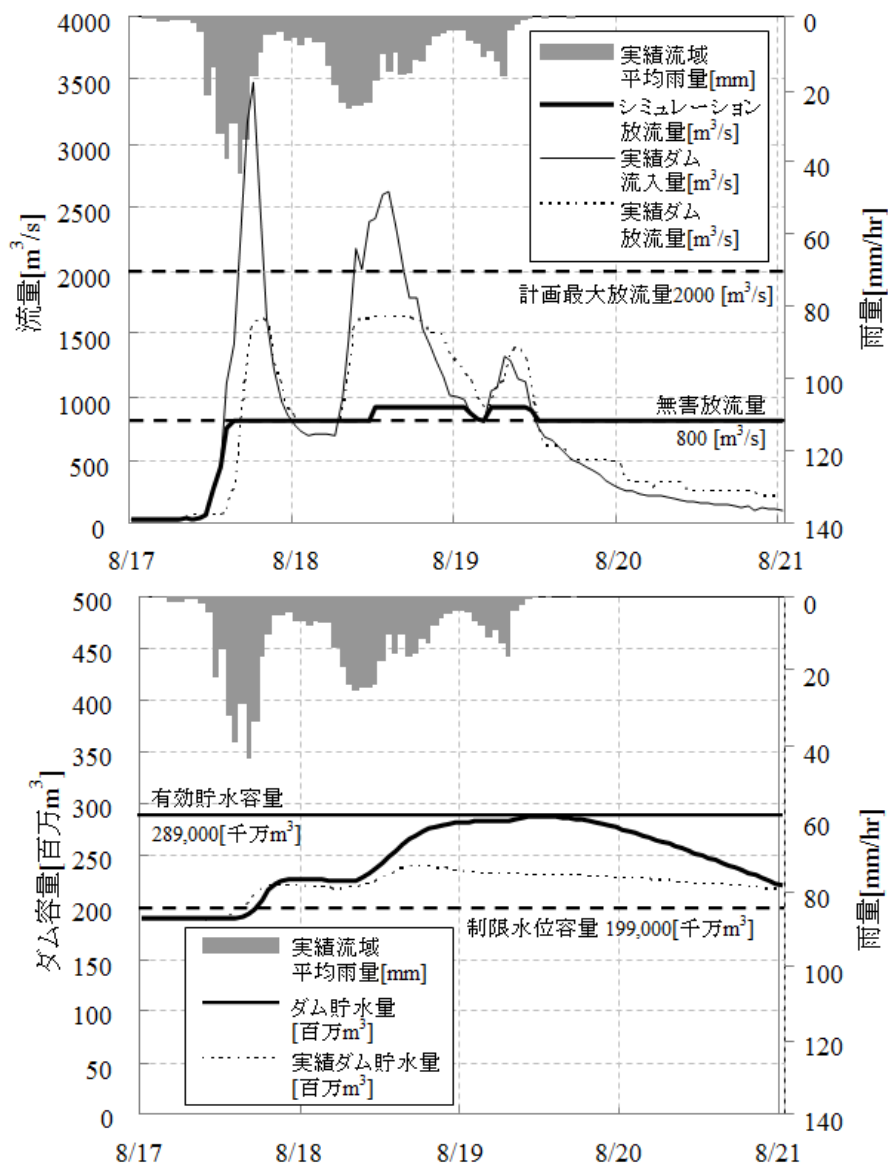


図-3.4.36 早明浦ダム H16 年 8 月洪水 空き容量の 35.5% を留保した操作^{1) 2)}

(2) 操作手法の改良

1) 超過洪水時における最大放流量の増大について

事前放流を実施してもなお、治水容量が不足する場合にあっては、計画最大放流量以上の流量を放流することとなるが、WRF の予測降雨に誤差が含まれることを加味すれば、許容される最大放流量の設定（例えば床下浸水が発生する流量）が必要である。

本研究では、阿木川ダムを対象として、治水容量が不足した場合、阿木川沿川の土地利用状況を考慮して、許容される最大放流量の増加について、田口ら²⁶⁾の手法を改良して検討を行った。すなわち、超過洪水の発生が一定の確率で予想される場合にあって、最小限防御すべき生命、資産を数段階に分けて規定し、河道流下能力を算出した。阿木川ダム操作規則によれば、計画洪水流量として、最大流入量 $850\text{m}^3/\text{s}$ に対して、 $730\text{m}^3/\text{s}$ を調節し、 $120\text{m}^3/\text{s}$ を下流へ放流することとされている。事前放流を実施してもなお、ダムの容量が不足する場合は、この最大放流量を引き上げて放流を行い、但し書き操作に移行することを極力回避、最大放流量を低下させることとし、次の 6 種類の流量を検討した。検討にあたっては、生命、財産を最低限保全することを考慮して、田口らの手法のような公園等の浸水防止のための流量は検討の対象とせず、次のケースを設定した。また、WRF による降雨予測により流入量が予測できるため、段階的な放流量の増加は採用せず、一定量放流とした。これにより、下流被害の最小化を図ることが可能となる。

ケース 1 : 農地、市街地ともに浸水を許容しない流量

ケース 2 : 一般市街地の浸水を許容しない流量

ケース 3 : 一般市街地の床上浸水を許容しない流量（床下浸水は許容）

ケース 4 : 密集市街地の浸水を許容しない流量

ケース 5 : 密集市街地の床上浸水を許容しない流量（床下浸水は許容）

ケース 6 : 木曾川本川の浸水を防御するために最大限許容される流量

検討の対象は、人口、資産が集中する永田川合流点から飯沼川合流点までとし、一次元不等流計算により現況河道断面を用いて計算した。粗度係数は岐阜県施行阿木川局部改良事業の計画粗度係数 0.035 を採用した。床上浸水は浸水深 0.5m で発生するものとし、築堤区間にあっては、余裕高が確保されていれば、破堤しないものと仮定した。ダム放流量については、岐阜県資料における残留域からの流出量を参考に求めた。

ケース 6 については、阿木川ダムが（独）水資源機構所管ダムであり、本来の治水目的は、木曾川国土交通省直轄管理区間の防御であることから、木曾川河川整備基本方針で定めた治水計画の基準点である犬山地点の基本高水流量 $19,500\text{m}^3/\text{s}$ に対する洪水調節施設による調節量 $6,000\text{m}^3/\text{s}$ の割合 0.308 を阿木川ダ

ム流入量に乘じ、得られた流量 $262\text{m}^3/\text{s}$ を調節流量とし、ダム放流量 $588\text{m}^3/\text{s}$ を得た。結果は、密集市街地を守る流量よりも小さな流量となった。これらの結果は、表-3.4.8のとおりである。

ケース5のように密集市街地の床下浸水を許容する流量に近い $600\text{m}^3/\text{s}$ を阿木川ダムから放流した際に、下流において氾濫が予想される区域は、図-3.4.37のとおりである。なお、現実に洪水時にこれらの放流を行うことを意志決定するためには、WRF 誤差の徹底した管理が必須である。

表-3.4.8 ダムの可能最大放流量

ケース	目標	評価地点	下流河川 最小流下能力 (m^3/s)	ダム放流量 (m^3/s)
-	現行操作	永田川合流点 ~ 飯沼川合流点	600	120
1	農地の浸水を防ぐ	5.15k 右岸	643	163
2	一般市街地の浸水を防ぐ	3.05k 右岸	656	176
3	一般市街地の床上浸水を防ぐ	3.20k 左岸	761	281
4	密集市街地の浸水を防ぐ	4.5k 右岸	959	479
5	密集市街地の床上浸水を防ぐ	3.70k 左岸	1,108	628
6	木曾川本川の浸水を防ぐ	木曾川本川犬山	1,068	588

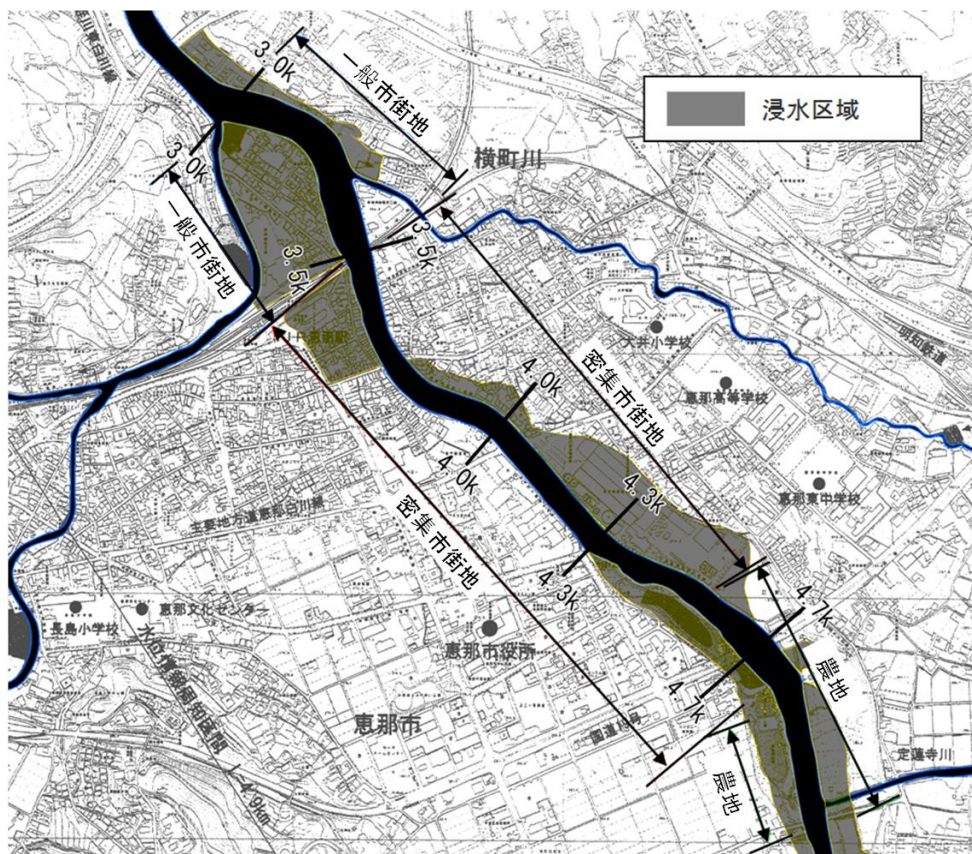


図-3.4.37 ダム放流量 $600\text{m}^3/\text{s}$ 時の下流河川浸水状況

2) WRF による降雨予測のリスク管理

本研究では、WRF の誤差を踏まえて、治水容量が不足するリスクと洪水終了後に治水容量が充足しないリスクの互いに背反するリスク管理を行うべく、5 ダムについて、気象庁 GSM データ、実績雨量について検証を行った^{1 2)}。

鶴田ダムの事前放流可能容量と治水容量を相当雨量に換算し、予測雨量と実績雨量の散布図に示すと図-3.4.3 8 のようになる。

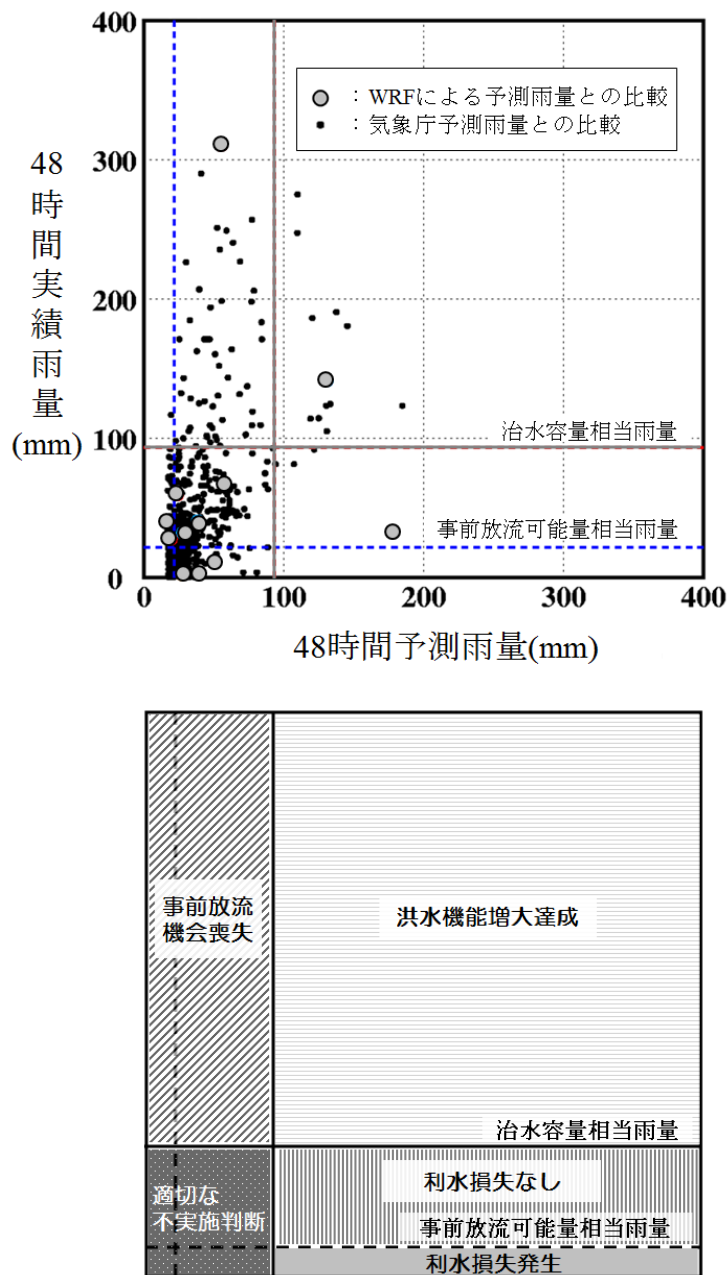


図-3.4.3 8 鶴田ダムにおける 48 時間予測雨量と実績雨量^{1 2)}

洪水機能増大達成は、事前放流が功を奏して、ダム空き容量を増大させ、ダムの洪水調節効果を高めて超過洪水による被害を緩和したケースであり、全体のデータのうち、2.4%が該当する。利水損失発生は、治水容量を上回る豪雨が降ると予測し、事前放流を行ったものの、実際には少量の雨しか降らず、事前放流量すらも回復できなかったケースを想定したものであるが、そのようなケースは当該ダムにおいては存在しない。利水損失なしは、事前放流したものの、流入量が比較的大きく、利水容量は充足できた事例であって、ここでは0.8%が該当するが、治水、利水上の実害はない。以上を比較すれば、当該ダムに限っては、一定のメリットがある一方、デメリットは皆無であることが理解できる。但し、事前放流の必要はないと判断したものの、治水容量を上回る雨量があり、いわば事前放流の指令を出し損ねたケース（事前放流機会喪失）が10.8%存在することが問題と思われる。これは、前項(2)2)で記述したWRF解析の初期条件、境界条件の誤差が大きいことに主に起因するものと考えられる。なお、適切な未実施判断とは、事前放流を行わなくて良いと判断し、実際にも降雨量が治水容量内に収まった例である。5ダムについて、予測雨量の治水、利水への影響は、表-3.4.9のとおりであり、豊平峡ダムを除けば、いずれも洪水機能増大達成の方が利水損失発生を上回っており、メリットの方がデメリットよりも大きいと判断される。

現場における実際の操作にあたっては、さらにWRFの上限誤差と下限誤差に相当する降雨が発生した場合の治水、利水への影響も考慮すべきと思われる。具体的には、図-3.4.39に示すように4つのケースに分類される。表-3.4.3の四十四田ダムH16年12月洪水に代表されるケース1にあっては、誤差上限の降雨では治水容量が不足し、誤差下限の降雨では利水容量が充足できないなど、治水、利水が背反する場面も想定されるが、超過洪水による被害が重大である一方、利水容量の不充足については、発電を除けば直ちに被害が発生するとは限らず、補償制度も整っていることを考慮すれば、下流の水害を軽減することを最優先すべきであろう。現実的には、このようなケースでは、治水容量を上回る部分 ΔV について、事前放流を行うべきと考える。早明浦ダムH16年8月洪水に代表されるケース2、早明浦ダムH15年9月洪水に代表されるケース3は、誤差上限の降雨、誤差下限の降雨のいずれかが、治水、利水上支障となる場合であり、これらのケースにあっては、支障となる現象の回避のみ配慮すれば問題はないと考えられる。すなわち、ケース2にあっては、 ΔV の事前放流を実施すれば良く、ケース3については、図-3.4.40に示すように、誤差率を考慮しつつ上限であっても治水容量を使い切るような流量を想定すれば良いと思われる。川俣ダムH15年8月洪水に代表されるケース4については、誤差の範囲内であれば、どのような降雨が発生しようとも問題はない。

表-3.4.9 5ダムにおける 治水利水効果 (%)

ダム名	洪水機能増大達成	利水損失発生	事前放流機会喪失	利水損失なし	適切な不実施判断
豊平峡 ダム	0.0	1.3	0.0	2.3	96.4
矢作 ダム	35.8	2.4	17.4	15.6	28.8
早明浦 ダム	0.0	0.0	1.0	0.0	99.0
鶴田 ダム	2.4	0.0	10.8	0.8	86.0
二風谷 ダム	50.5	16.0	8.0	8.4	17.0

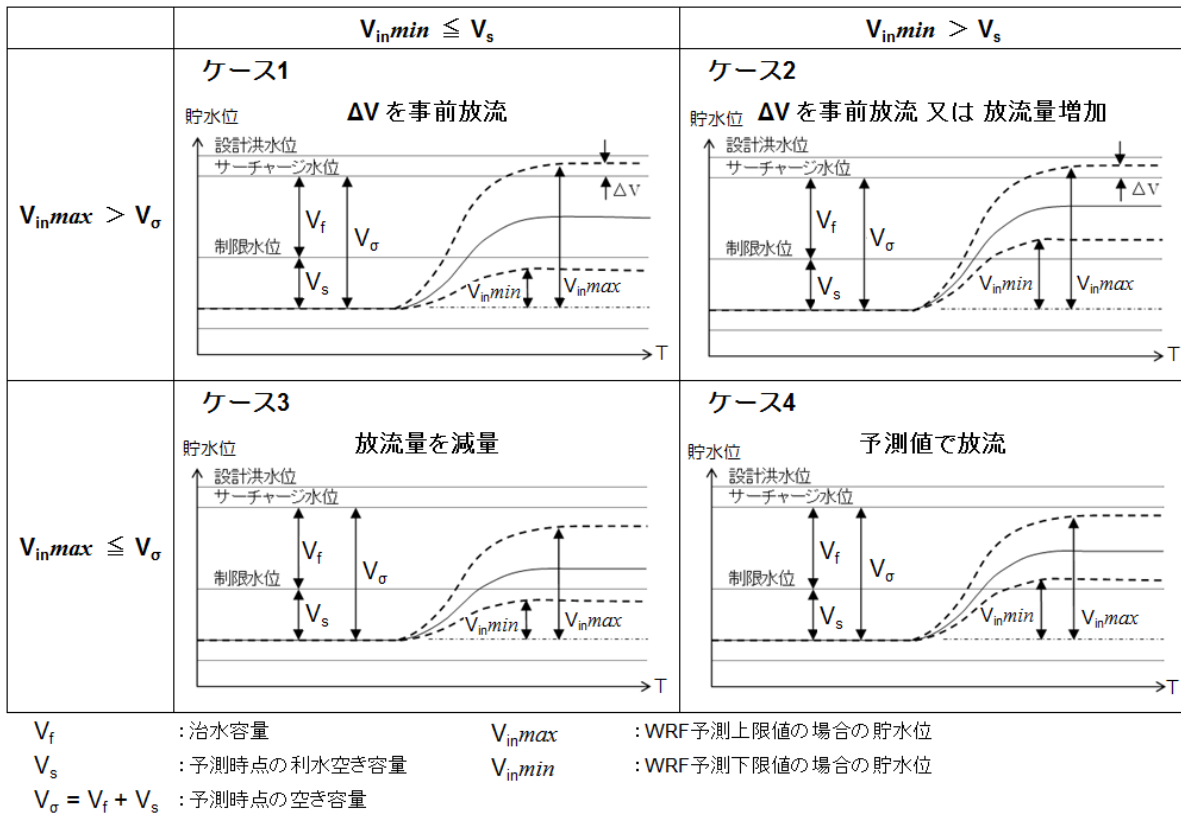


図-3.4.39 降雨誤差による貯水位と放流操作¹⁾²⁾

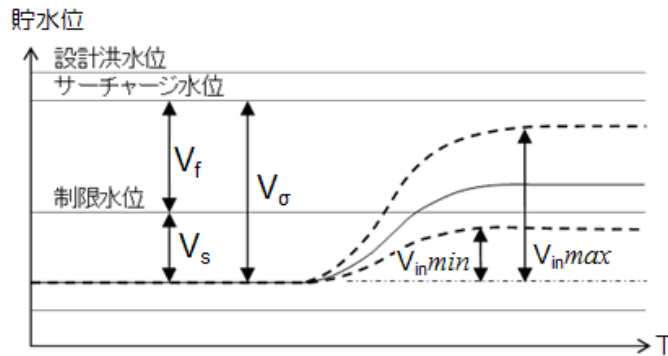


図-3.4.40 利水容量不充足のリスクに配慮した放流

(3) 施設の改良

鶴田ダムにあっては、コンジットゲートが3門のみであり（図-3.4.4 1 参照）、また、早明浦ダムにあっては、低標高部における放流設備は、利水放流管しか存在しないため、放流量を流入量に速やかに増大させるすり付け操作や超過洪水時に洪水氾濫緩和に効果のある事前放流が円滑に実施できない状況にある。本研究では、鶴田ダム H18.7 洪水を対象に、常用洪水吐きを改造することによる洪水調節効果の向上を検討した。

放流設備の改造は、大きさ 4.3×5.5m の常用洪水吐きを同じ標高に 1 門追加することとし、WRF による降雨予測の誤差を取り除くため、実績降雨を外力として与えて、第 2 項に示したダム操作方法に基づいて、シミュレーションを行った。

結果は、図-3.4.4 2 のとおりであり、結果として但し書き操作は回避できなかったものの、7月21日19時から22日13時にかけて操作実績に比べて、放流量を増大することができたため、最大放流量を 243m³/s 低減することができる。

このように、古くに建設されたダムにあっては、常用洪水吐きの能力が不足するダムが見られるが、治水容量、利水容量等を勘案しつつ、適切にその改造に取り組むことが望ましい。

また、豊平峡ダムにあっては、サーチャージ容量が皆無であるが、近傍に位置する定山溪ダムはオールサーチャージ方式であることから、相互に容量を振り替えて、非洪水期にあっても、ともに一定の治水機能を確保することが望ましい。

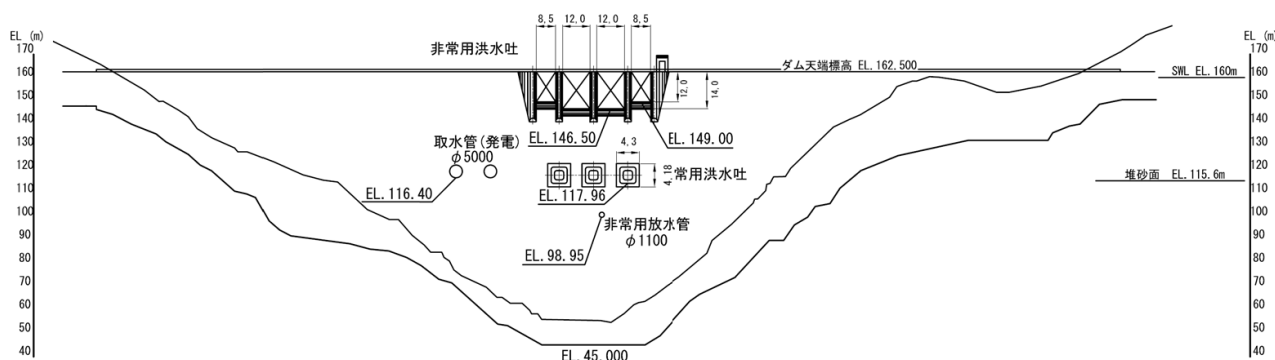


図-3.4.4 1 鶴田ダムの放流設備

[現況能力でのシミュレーション結果]

[放流能力増強を想定したシミュレーション結果]

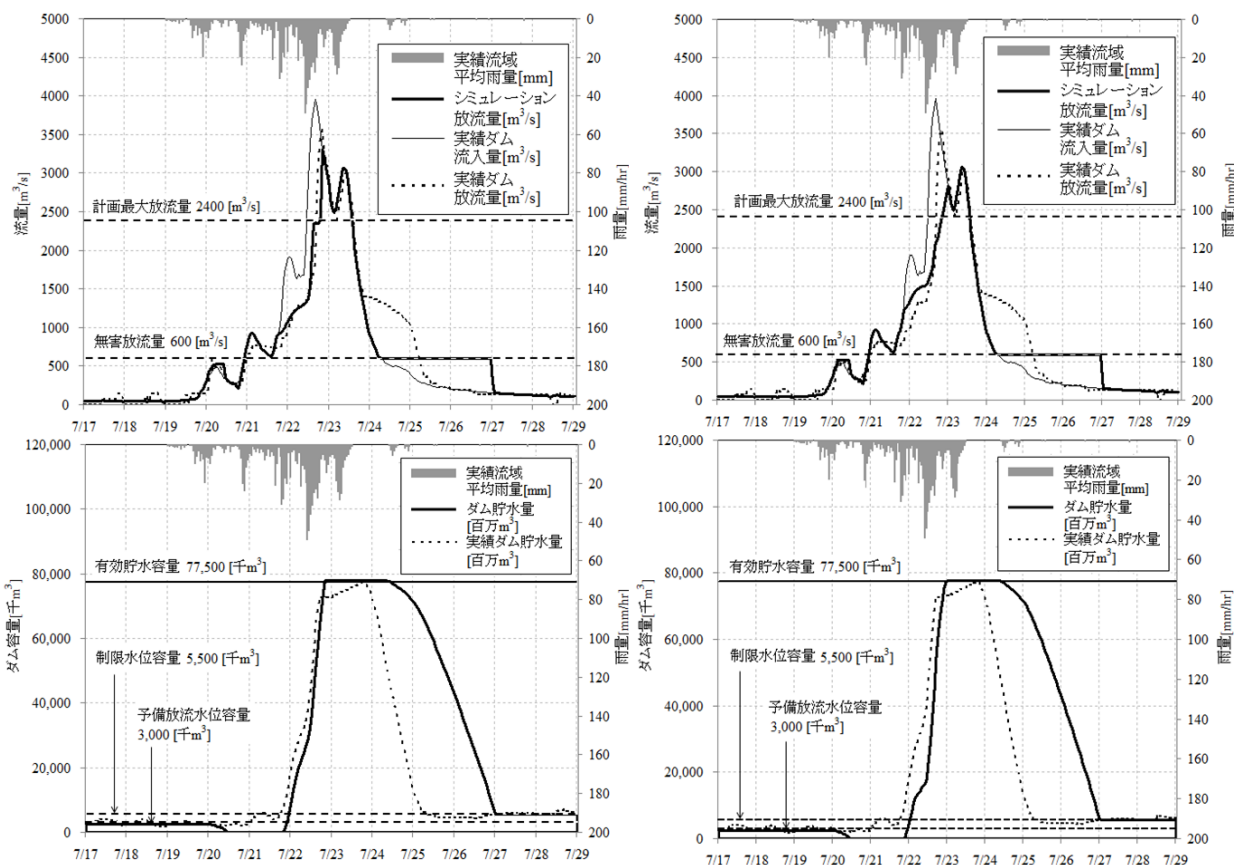


図-3.4.4 2 鶴田ダム放流施設改良の効果 (H18年7月洪水)

3.4.5 WRFによる降雨予測を現場のダム管理に導入するための手続き

以上、WRFによる降雨予測を活用した合理的なダム洪水調節のあり方について、幾つかのダムの洪水事例を用いて検証を行うとともに、改良策を検討してきた。今後、これらの手法を現場に導入するにあたって、検討すべきフローは、図-3.4.4 3に示すとおりである。本章では、ダム管理者の業務負担軽減に配慮して、流出解析を実施しない簡便な手法を基本に検討を行ったが、XバンドMPレーダによる細密な降雨データの供給などを考慮すれば、今後、分布型モデルなどの流出モデルの導入も期待される。

また、ダム操作手法についても、下流改修の進捗等により無害流量や警報区間を精査すべきダムも存在するほか、事前放流は、人工的に洪水を発生させることから、3.4.2に示した手法を参考にしつつ、下流河道水位上昇速度について慎重な設定が求められる。さらに、前項(1)4)、(2)1)に示したように、超過洪水時における許容最大放流量について決定しておくことが望まれるほか、空き容量が極端に小さくなった場合に備えて、但し書き操作のあり方についても検討が必要である。この他、実務的には、ダムコンのプログラムや操作規則の改定も行うことが求められる。

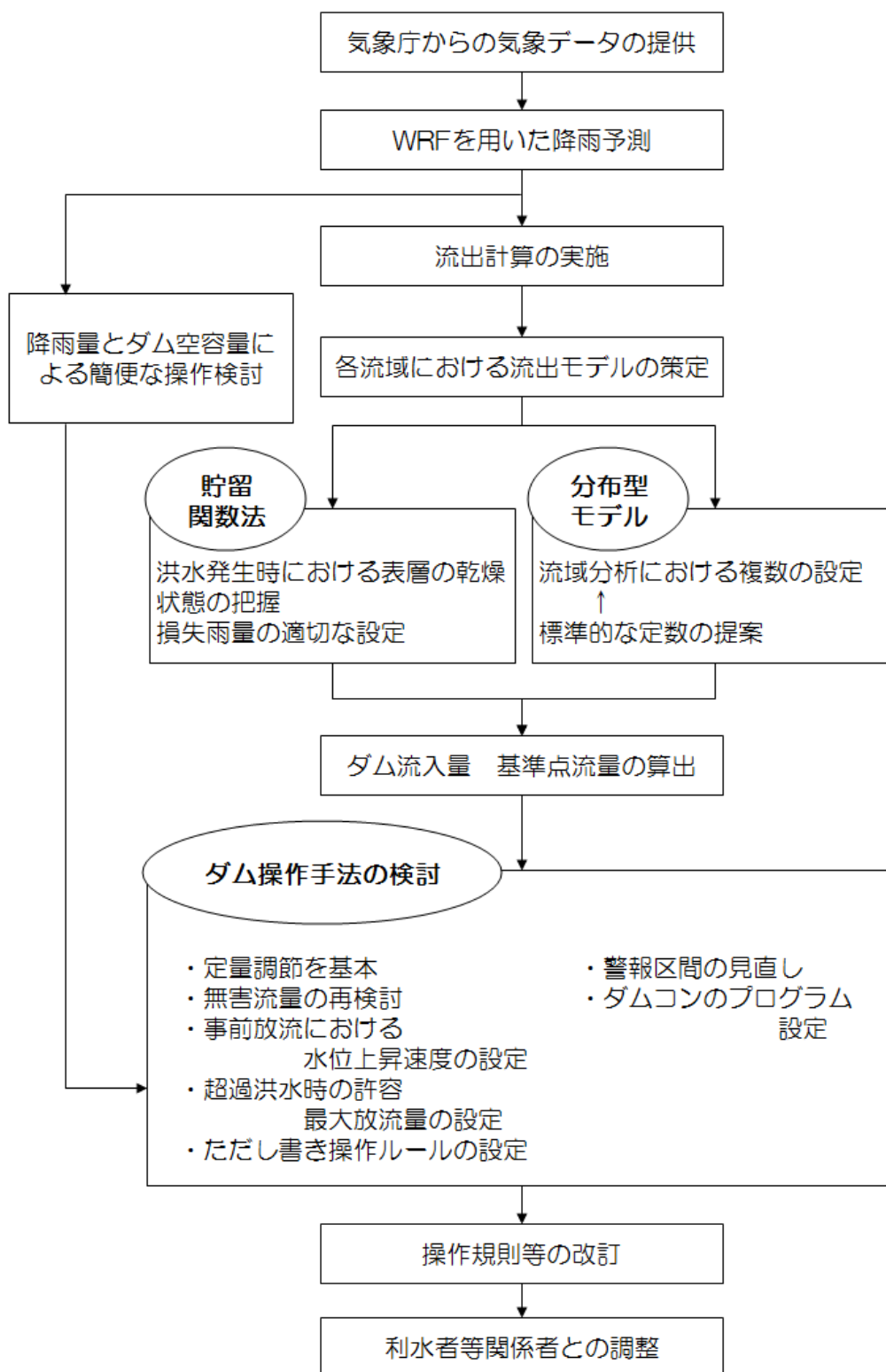


図-3.4.4.3 ダム管理に導入するにあたっての手続き

3.5 まとめ

本章では、近年改良が著しい WRF 技術を利用した降雨予測を用いてダムへの総流入量の予測を簡便に行うとともに、治水容量と利水容量を一体的に運用して下流の氾濫被害を最小化するための洪水調節方法を提案し、実際に発生した降雨、洪水とダム操作実績によりその有効性を検証した。その結果として得られた結論は次のとおりである。

- (1) 治水容量が不足すると予想される大洪水が発生する場合を中心に WRF による降雨予測を活用した事前放流を実施することが有効である。ここで、事前放流を実施するにあたっては、人工的に流量を増大させることから、下流河川の水深のみならず、流速も考慮した丁寧な放流量の設定が必要である。
- (2) 本手法により、ダムへの一定時間内の総流入量を予測することが可能となることから、超過洪水の発生時にあっても、最大放流量を現在の但し書き操作による場合よりも低減し、氾濫被害を抑制することが多くの洪水で可能である。ここに、計画最大放流量よりも大きな流量を放流する際には、その根拠を人口、資産の集積状況に配慮しつつ、河川毎に整理する必要がある。また、ダム操作に加えて、ソフト的対策として、流域住民に早期の情報提供を行うとともに避難の実行を求めることも重要である。
- (3) 洪水によっては、下流河道の水位上昇速度制限を守れないような急激な放流量の増加が発生することから、すり付け操作について、本方式を補完する手法が必要である。
- (4) WRF による降雨予測の誤差をより正確に把握するため、今後多くのダム、洪水を対象として実績降雨との比較を行う必要がある。特に海上における水分量を適切に反映した気象モデルによる降雨予測を初期値、境界値として与えることにより、WRF による降雨予測の精度向上が期待される。これを踏まえて、GPS^{えんべい}掩蔽観測が可能となった 2009 年以降の気象庁降雨データについて、予測誤差の解析を行うことが重要と考えられる。
- (5) WRF による降雨予測の誤差が、解析手法のいかなる精度向上を図ろうとも、一定の率で残ることを考慮すれば、本方式の適用にあたっては、予測以上の降雨が発生した場合に備えて、ダム容量の一定割合を留保しておくべきであり、適切な留保率の与え方については、ダム毎に検討が必要である。
- (6) ダム流入量を計算する上で必要となる流出解析について、本論文の簡便なモデルでは、一部の洪水にて対応できない状況も発生するため、分布型モデル等による流出解析を行うとともに、必要に応じて融雪の効果を加味するなどして、精度を向上することが適切である。特に融雪量の推定にあたっては、未解明な部分を多く、研究の促進が待たれるところである。
- (7) 事前放流等を効果的に実施するため、常用洪水吐き等の能力が不足するダムにあ

っては、改造によって一定の効果が得られることから、治水容量、利水容量や下流における水害の発生状況を勘案しつつ、適切に改造を行うことが望ましい。

参考文献

- 1) IPCC AR4 Climate Change 2007, Synthesis Report
- 2) (財) ダム技術センター、多目的ダムの建設第1巻、pp.42、2005.
- 3) (財) ダム水源地環境整備センター、ダムの管理例規集、pp.211-218、2006.3
- 4) 秋葉雅章、腰塚雄太、宮本 守、戸谷英雄、佐藤直良、山田 正、流出特性に応じたダム放流量の決定方法とその洪水水位低減効果に関する研究、河川技術論文集第10巻、PP.89-94、2004.6
- 5) 戸谷英雄、秋葉雅章、宮本 守、山田 正、吉川秀夫、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 Vol.62 No.1、PP.27-40、2006.2
- 6) 下坂将史、呉 修一、山田 正、吉川秀夫、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 Vol.66 No.2、PP.106-122、2009.6
- 7) 腰塚雄太他、確率予報を用いたダムによる事前放流量の決定手法に関する研究、第33回土木学会関東支部技術研究発表会、2006.
- 8) 国土交通省河川局長、水災害の監視・予測の高度化等の推進について、2009年3月27日付け国河情第17-2号
- 9) 豊田康嗣、気象予測モデルと連携した出水予測手法の開発電力中央研究所報告 No8058、2009.
- 10) Iwabuchi, T. J. J. Braun, T. Van Hove, Impact of Ground-based GPS Precipitable Water Vapor and COSMIC GPS Refractivity Profile on Hurricane Dean Forecast, Integrated Observing and Assimilation System for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, 2009.
- 11) 三石真也、角哲也、尾関敏久、WRFによる降雨予測を活用したダム操作に関する検討、ダム工学 Vol.20 No.2、pp.94-104、2010.6
- 12) 三石真也、角哲也、尾関敏久、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・水資源学会誌に投稿中
- 13) 国土技術政策総合研究所、気象予測データの利用可能性に関する研究、国総研資料第329号、2006.
- 14) 日本建設コンサルタント、吉野川流出解析検討業務委託報告書、2001.
- 15) 岡本芳美、技術水文学、日刊工業新聞社 PP.168-178、1982.
- 16) 須賀堯三他、水害時の安全避難行動（水中歩行）に関する検討、水工学論文集 第39巻、pp.829-832、1995.
- 17) Kuo ,Bill, Early Results from the COSMIC/FORMOSAT-3 Mission. JCSDA Seminar 2007.

- 18) Kuo, Ying-Hwa, *et al.*, COSMIC Status and Prospects for COSMIC-II. GRAS SAF Workshop on Applications of GPS radio occultation measurements, 16-18 2008.6
- 19) Chen, Yu-Chun, M.J., Yang, C.T., Fong, J.H., Tseng, Impact to CWB/GFS for assimilation of the FORMOSAT-3/COSMIC GPS RO local refractivity observations. Fourth FORMOSAT-3/COSMIC Data Users Workshop, 2009.
- 20) 丹羽薫、盛谷明弘、ダム流入量予測のための融雪流出のモデル化、土木学会研究所資料、第 2826 号、2000.3
- 21) 土屋修一他、気候変動によるダム流入量の変化に関する研究、第 63 回土木学次学術講演会講演概要集、II-38、2008.
- 22) 中山恵介、伊藤 哲、藤田睦博、斎藤大作、融雪を考慮した山地流出モデルに関する研究、土木学会論文集 No,691/II-57、pp.25-41、2001.11
- 23) 小池俊雄、高橋裕、吉野昭一、融雪量分布のモデル化に関する研究、土木学会論文集第 363 号/II-4、pp.165-174、1985.11
- 24) 小原一哉、堺 茂樹、降雪・積雪・融雪過程のモデル化と河川融雪流出予測への応用に関する研究、土木学会論文集 B、vol.64、No,1、pp.49-61、2008.3
- 25) 建設技術研究所、土研分布型モデル（吉野川バージョン）解説書 2007.3
- 26) 田口孝男、牧野 隆、下嶋みか子、大被害発生水位を睨んだ非常時ダム操作、平成 19 年度水資源機構技術研究発表会 発表論文 2008.

第4章 水位放流方式適用性の検証と改良

4.1 水位放流方式とVR方式の必要性

第3章で述べたWRFによる降雨予測を利用したダム洪水調節手法は、WRFによる降雨予測誤差のリスク管理が極めて重要であり、一定の数の洪水を対象とした解析を試みたが、現場における導入にあたっては、今後その上限誤差、下限誤差の設定について、多くのデータに基づいた詳細な検討を行う必要がある。さらには、洪水発生初期段階における放流量の増加について、下流河道上昇速度制限（通常30分30cm又は50cmを採用）を守れない課題や超過洪水が発生したにもかかわらず、WRFによる降雨予測において予測できなかった場合における円滑な操作手法の開発など解決すべき課題が残されている。

これらの課題の解決手法として、今村の提案した水位放流方式¹⁾や裏戸の提案したVR方式²⁾が有力と考えられるが、両者ともに考案されてから、それぞれ12、17年が経過しているものの、未だ現場のダムにおける導入は、ほとんど行われていない。

さらには、現行の操作規則に則って操作を行う場合にあっては、迎洪水位が低い状況で洪水が襲来した場合のすり付け操作や超過洪水が発生した場合の但し書き操作に代わる円滑な操作手法の開発は、多くのダム管理技術者において切実な問題として待たれているところである。

これらの状況を踏まえ、第4章では、水位放流方式の適用について、第5章では、VR方式の適用について、それぞれ検証を行うとともに、課題を明らかにし、改良の検討を行った。

4.2 ダムによる洪水調節の現状と問題点

4.2.1 すり付け操作の現状

ゲートによる洪水操作を行う多目的ダムにおいて、迎洪水位が制限水位よりも相当低い状況で洪水が発生した場合には、貯留回復に努めつつ放流量を流入量に漸近させる「すり付け操作」を行う必要がある³⁾が、ダム操作規則には具体的な操作方法について規定されておらず、放流の開始時期については、ダム管理者の判断に委ねられてきた。現実には、一部のダムにおいて降雨予測に基づく流出予測とダム地点の流入量予測を行い⁴⁾、放流開始時期を決定しているが、大部分のダム管理者は、過去の経験や勘に基づき、放流開始時期を決定しているのが現状である。この問題は、適切な洪水操作と利水容量の回復の両方にまたがる問題でもあり、とりわけ発電容量については、無効放流が発生した場合に減電が確実であることから、一般的には利水安全度を確保すべく、ぎりぎりまで利水容量の回復を優先した操作が実施されてきた。このため、大規模かつシャ

一平な洪水が襲来した場合にあっては、すり付け操作が追いつかず、ダム水位が制限水位以上に達しても、操作規則で定められた所要の放流量を放流できない、すなわち治水容量内に余分な流量を貯留してしまうケースが散見された。

本章では、すり付け操作を円滑かつ確実に実施する上で有力な手法である今村が提案した「水位放流方式」の現場への適用性を検証した。すなわち、国土交通省管轄ダム等において水位が低い状況で大規模な洪水が襲来した過去の事例を基に水位放流方式を適用した場合のシミュレーションを行い、過貯留、下流河川水位上昇速度超過等の発生状況について調査した。さらに、明らかになった問題点を解決すべく「水位放流方式」の改良策を提案した。

4.2.2 洪水調節方式と操作規則

第2章で述べたように、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ているため、洪水を適切に制御する必要がある。このため、安定して確実に効果を発揮することが必要であり、ヒューマンエラーを防止する観点からも、適切な操作規則の制定と操作員による確実な操作が求められる。その前提条件として、人為操作により住民の生命、財産が危険にさらされることは避けるべきであり、洪水調節は慎重かつ安全に行う必要がある。さらには、ダム本体や関連構造物の安全性を確保しなければならないことも重要であり、確実性、安全性、即応性の原則を遵守することが求められる。

具体的な洪水調節の操作手法は、特定多目的ダムにあっては、特定多目的ダム法第31条、水資源機構ダムにあっては、水資源機構法第23条、治水ダムや河川法に基づく兼用工作物としての多目的ダムにあっては、河川法第14条に基づく操作規則において、定められている。

しかしながら、制限水位以下に迎洪水位がある場合は、ダムからの放流量について具体的に規定されていなく、ダム管理者の判断に委ねられている。このため、多くのダム管理者は、過去の洪水における経験や勘を基に、ダム操作細則において定められた下流河川の水位上昇速度を勘案しつつ、放流量を決定しているのが実情である。

ここに、下流河川の水位上昇速度を考慮した放流については、早明浦ダムを例にとれば、次のように実施されている。

- 一 放流を開始してから1時間を経過するまでは、ゲート操作の時間間隔を10分とし、かつ、下流吉田橋地点における水位の上昇が30分に50センチメートルを超えないように行う。
- 二 前号の期間を経過した後は、ゲート操作の時間間隔を10分、15分、又は20分とし、かつ、下流吉田橋地点における水位の上昇が30分に1メートルを超えないように行う。

以上の放流の原則を基に、時間と放流量の関係は、図-4.2.1のとおり定められている。

このように、操作規則や操作細則において、下流河川水位上昇速度やゲート開度に基本的に制限を課されていることも相まって、放流開始の初動対応が遅れた場合には、洪水時には図-4.2.2に示すような過貯留が発生する可能性がある。ここに、過貯留とは、ダム水位が制限水位以上に到達した際に、所定のダム放流量を放流することができず、治水容量内に余分な流水（図の②～④の部分）を貯留してしまうことを指し、治水計画を策定する上で、必要な治水容量として計上されていないものである。現実には、治水計画上必要な容量に計上されていながら、利水容量内に貯留されている⑤の部分により過貯留量は軽減されるが、安全のため、ここでは、⑤の効果は考慮しないものとする。特に治水計画を上回るような洪水が発生した場合においては、但し書き操作に入り、計画最大放流量を上回る放流量が発生するが、本来の洪水調節前に過貯留によって治水容量の一部を消費してしまっていた場合には、ダム下流への最大放流量を増大させ、下流で発生する被害を助長することとなる。特に計画放流量の大きなダムにおいては、放流量が計画放流量に達するまでに時間を要するため、結果的に規定どおりの放流を行えないままダムが満水となる事態も生ずる可能性もある。このように、過貯留の容量が大きくなるような場合は、貯留の方法が適切でなく、放流開始が遅れていることとなり、治水上の観点から非常に大きな危険を伴うことになる⁵⁾。以上に示した危険性を少しでも避けるために、通常管理水位を制限水位よりも下に設定しているダムも見られ、例えば大雪ダムにあっては、0.5メートルを設定している。

なお、図の⑤の部分は、計画上治水容量として必要な部分として計算されているが、実際の操作においては、迎洪水位が低いことから利水容量内に貯留され、治水計画上は余裕の部分となる。

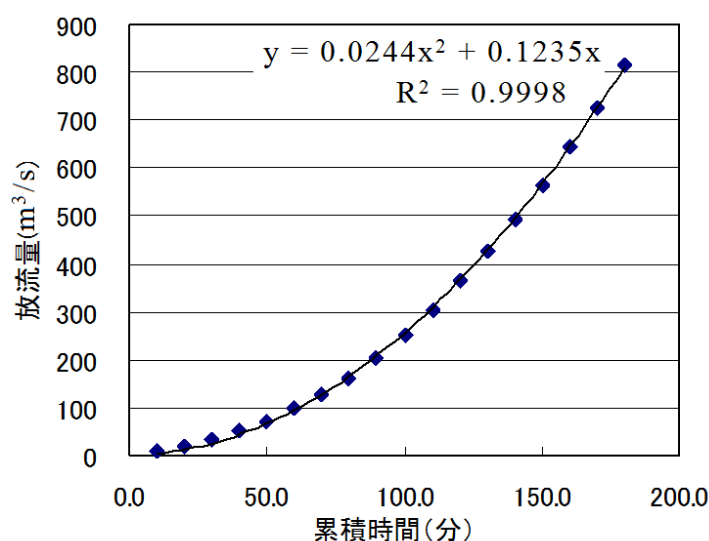


図-4.2.1 累積時間と放流量の関係

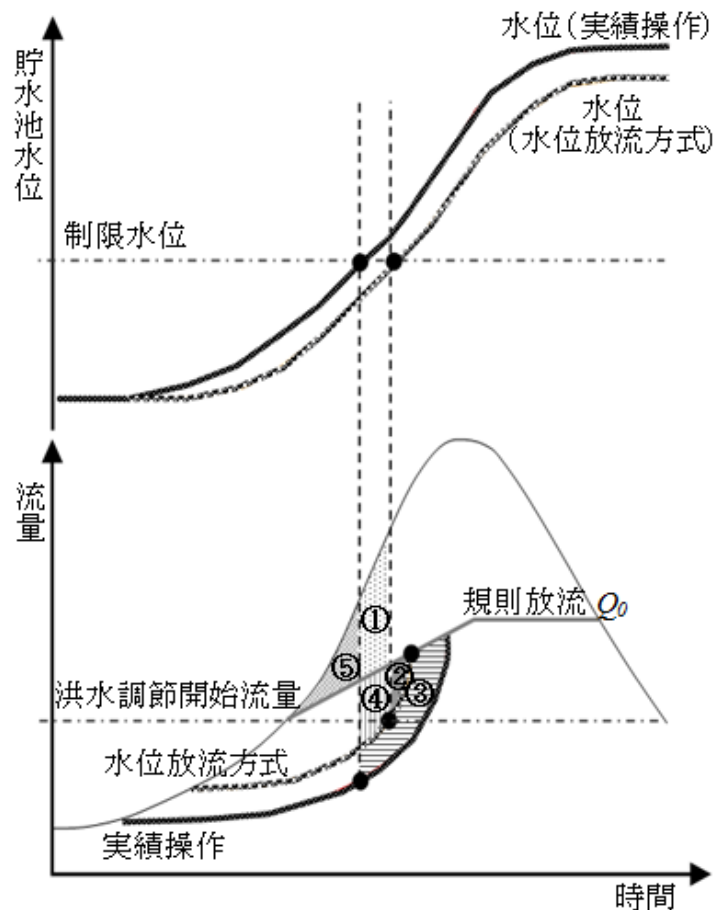


図-4.2.2 水位放流方式による擦り付け操作の模式図¹⁾¹⁾

4.3 水位放流方式の考え方

水位放流方式は、今村により提案されたダム放流方式であり、貯水池情報を基に、放流開始時期および放流量を決定するダム操作方法である¹⁾。放流の開始時期は、ダムの空き容量、下流河川の水位上昇速度から求められる限界流入量を指標とし、限界流入量が流入量と等しくなった時点で放流を開始することとされている。これにより、放流開始時点を一意的に決定する^{6)、7)、8)、9)}とともに、治水容量内への過貯留を相当程度小さくできる(図-4.2.2の②の部分のみ)ものと期待される。

水位放流方式において一般的に使用されている具体的な手法は、次のとおりである。すなわち、放流量は、空容量比率の2乗に比例した放流量となるよう設定した放流関数により、水位に対して一意的に決定する。そして貯水位が制限水位時に達した際に放流量が洪水調節開始流量となるよう放流関数を設定する。その模式図を図-4.3.1に示す。以下に、維持流量や発電などの放流量がない場合の、限界流入量、放流関数の求め方を示す。

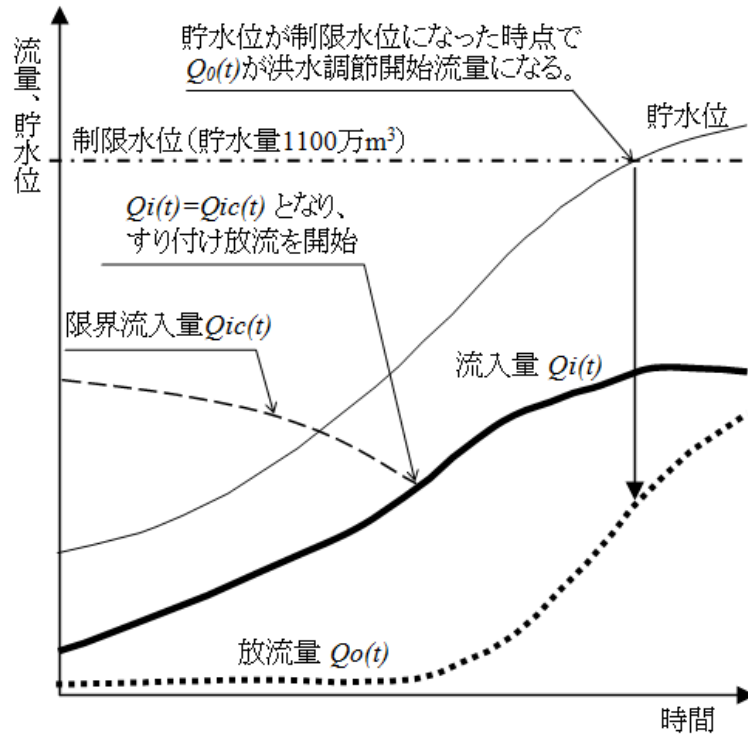


図-4.3.1 水位放流方式の模式図¹⁾

放流関数を(4.3.1)式に示す $V(t)$ の 2 次式、下流河道の水位と流量の関係を(4.3.2)により規定する。治水容量内の貯留量 $V(t)$ は放流量と流入量の差で(4.3.3)式のように表される。

$$Q_o(t) = AV(t)^2 \quad (4.3.1)$$

$$Q_o(t) = K(H(t)-h_0)^2 \quad (4.3.2)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_o(t) \quad (4.3.3)$$

$V(t)$: 貯留量(放流開始時点を0とする) (m^3)

A : 定数

$H(t)$: 河川水位 (m)

h_0 : 水位観測所のゼロ点標高 (m)

K : 河道定数

$Q_i(t)$: 貯水池流入量 (m^3/s)

$Q_o(t)$: 当該時刻におけるダム放流量 (m^3/s)

以上3つの式により、下流の水位上昇速度は、次の式により示される。

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{AV(t)}{K(H(t)-h_0)} (Q_i(t)-Q_0(t)) \quad (4.3.4)$$

(4.3.1) 式において、貯水位が制限水位時に放流量が洪水調節開始流量 となるよう定数 A を決定し、次のように表される。

$$Q_0(t) = \frac{q_u}{V_w^2} V(t)^2 \quad (4.3.5)$$

q_u : 制限水位時の目標放流量(洪水調節開始流量)(m^3/s)

V_w : 制限水位までの空き容量 (m^3)

これを (4.3.4) に代入し下流河道の水位上昇速度 $dH(t)/dt$ について解くと、次式のように示される。

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{\sqrt{q_u}}{\sqrt{K} V_w} (Q_i(t)-Q_0(t)) \quad (4.3.6)$$

$dH(t)/dt$ が、下流河道における水位上昇速度の制限 H_c よりも小さくなる必要があることからその限界流入量 Q_{ic} は次式で示される。

$$Q_{ic} = \frac{H_c \sqrt{K} V_w}{\sqrt{q_u}} \quad (4.3.7)$$

具体的な放流操作の手順は以下のとおりである。

- (1) H_c 、 K を定める。
- (2) $V_w(t)$ から $Q_{ic}(t)$ を計算する。
- (3) $Q_i(t) < Q_{ic}(t)$ の場合には、(4.3.2) の計算を繰り返す。
- (4) $Q_i(t) = Q_{ic}(t)$ となった段階で $V_w(t) = V_w$ を確定し、式 (4.3.5) の放流関数を決定する。
- (5) 上記(4)で決定した放流関数に基づいて、貯留量 $V(t)$ に対応する放流量 Q_0 を放流し、これを貯水位が制限水位付近に達するまで継続する。

4.4 実績洪水による水位放流方式適用の検証

今村は、水位放流方式の洪水への適用性の検証として、三角ハイドロの様々な波形の洪水を定義して解析し、その有効性を示している。しかしながら、その後現在においてもダム管理の現場における導入状況は、県管理の一部のダムにおいて活用するに留まっているのが実情であり、その理由の一つとして、過去に発生した実際の洪水、ダム貯水位を想定したシミュレーションが十分には実施されておらず、操作実績と比べた優位性、問題点が明らかにされていないことが挙げられる。また、大谷ら¹⁰⁾は、過去に発

生じた洪水について、最低水位を条件として設定した水位放流方式によるシミュレーションを行い、その有効性を確認しているが、実際に発生した迎洪水位とは異なる条件のシミュレーションとなっており、同様の問題点を有している。

本研究では、迎洪水位が低い状況で比較的大きな洪水が発生したダムを対象として、水位放流方式によるダム操作のシミュレーションを現場の水位、流量をそのまま使用して実施し、実際に洪水時に行われた操作との比較を行ってその有効性を確認した¹¹⁾。

検討対象ダムの選定にあたっては、次の観点を考慮して12ダムを選定し、19洪水についてシミュレーションを実施した。

- ・国土交通省、（独）水資源機構、都道府県土木部が管理する多目的ダム（治水容量と利水容量を有するダム）
- ・ゲート操作により洪水調節を実施しているダム
- ・迎洪水位が低い状態で比較的大きな洪水が発生したダム
- ・洪水調節に当たり、治水容量内に過貯留が発生したダム

選定した各ダムの諸元を表-4.4.1に示す。シミュレーション結果は表-4.4.2に示すとおりである¹¹⁾。図-4.4.1に四十四田ダムにおけるすり付け操作のハイドログラフを示す。この洪水における実績操作では、すり付け操作が遅れたため、規定の放流量に達する前に洪水ピークを迎える結果となった。また、過貯留量は比較的大きな貯水量に達しており、仮に襲来した洪水がもう少し大きければ、但し書き操作に移行した可能性がある。但し、水位放流方式の活用により、これらの問題は解決されている。

表-4.4.1 水位放流方式シミュレーション選定ダム¹¹⁾

ダム名	事業者	目的	流域面積 (km ²)	治水容量 (千m ³)	利水容量 (千m ³)	相当雨量 (mm)
土師ダム	国交省	F.N.A.W.I.P	307.5	31,500	9,600	102
弥栄ダム	国交省	F.N.W.I.P	301.0	58,000	48,000	193
八田原ダム	国交省	F.N.W.I	246.1	34,000	26,000	138
苫田ダム	国交省	F.N.A.W.I.P	217.4	50,000	28,100	230
矢作ダム	国交省	F.N.A.W.I.P	504.5	15,000	46,000	30
野村ダム	国交省	F.A.W	168.0	3,500	9,200	21
四十四田ダム	国交省	F.P	1196.0	33,900	1,600	28
下笠ダム	国交省	F.N.P	185.0	51,300	1,000	277
早明浦ダム	水資源機構	F.N.A.W.I.P	417.0	90,000	199,000	216
市房ダム	県	F.N.P	157.8	18,300	16,800	116
祝子ダム	県	F.N.I.P	45.2	4,100	764	91
渡川ダム	県	F.N.P	81.0	10,300	19,600	127

表-4.4.4.2 すりつけ操作シミュレーション結果(11)

ダム名	洪水発生年月	実績操作			水位放流方式			すりつけ操作の効果			水位上昇速度(cm/30min)						下流河川の水位変動※4		
		過貯留量(千m ³) ①	治水容量内貯留率(①治水容量%) ②	遅れ時間※1 ③	過貯留量(千m ³) ④	治水容量内貯留率(④治水容量%) ⑤	遅れ時間※1 ⑥	過貯留減少量(千m ³) ⑦-⑧	放流開始時刻の差※3 ⑨	規定値	実績操作		水位放流方式		放流の原則	実績			
											最大値	超過値平均	最大値	超過値平均					
土師ダム	H18.9.16	3,118	9.9	-1:40	6	0.0	0:00	○	3,112	-10:30	50	7.9	42.3	0.0	35.3	61.3	61.3	×	×
弥栄ダム	H17.9.5	372	0.6	-0:50	16	0.0	0:00	○	357	-9:00	30	9.9	37.5	37.5	45.5	69.3	45.5	×	×
八田原ダム	H10.10.17	142	0.4	-0:20	2	0.0	0:00	○	140	0:40	30	10.1	38.7	35.1	14.5	40.9	39.0	×	×
	H11.6.29	1,748	5.1	-1:20	4	0.0	0:00	○	1,743	-1:20	30	28.0	64.9	64.9	37.6	61.6	44.8	×	○
菅田ダム	H18.7.17	1,140	2.3	-2:50	4	0.0	0:00	○	1,136	-0:30	30	10.1	34.5	34.5	29.7	46.0	46.0	×	×
矢作ダム	H12.9.12	803	5.4	-0:10	436	2.9	0:00	○	367	-1:50	50	28.9	71.2	71.2	46.7	50.8	50.8	×	○
野村ダム	H16.8.30	18	0.5	-0:50	0	0.0	0:00	○	18	-4:20	50	16.3	24.0	0.0	22.8	38.3	0.0	○	×
四十四田ダム	H16.9.30	6,955	20.5	-5:10	4	0.0	0:00	○	6,951	3:00	30	23.3	42.9	39.9	30.3	37.9	37.8	×	○
下釜ダム	H18.7.4	273	0.5	-0:50	0	0.0	0:00	○	273	-0:30	30	8.3	16.6	0.0	17.9	29.8	0.0	○	×
早明浦ダム	S50.8.17	5,099	5.7	-0:40	1,229	1.4	0:00	○	3,870	-1:30	50	28.5	41.2	0.0	33.5	57.1	57.1	×	×
	H9.9.16	14,206	15.8	-1:40	4,237	4.7	0:00	○	9,969	0:10	50	50.2	81.9	79.0	53.2	68.7	61.3	×	○
	H17.9.6	45,649	50.7	-11:00	9,950	11.1	0:00	○	35,699	-0:40	50	14.4	62.1	57.4	38.5	44.3	0.0	○	○
	H19.7.14	19,846	22.1	-1:20	2,048	2.3	0:00	○	17,798	-0:10	50	24.4	38.0	0.0	35.8	45.2	0.0	○	×
市原ダム	H5.9.3	768	4.2	0:00	108	0.6	0:00	○	660	-2:40	30	33.0	78.7	56.8	64.0	153.5	95.7	×	×
	S55.6.20	1,783	21.0	-3:40	5	0.1	0:00	○	1,778	3:30	30	27.7	54.4	53.4	17.3	25.7	0.0	○	○
	S57.7.10	2,036	24.0	-1:20	45	0.5	0:00	○	1,991	1:40	30	66.4	110.1	92.7	45.0	67.6	58.3	×	○
祝子ダム	H5.9.3	1,156	28.2	-2:00	0	0.0	0:00	○	1,156	-5:00	30	23.8	47.9	39.8	23.8	62.0	62.0	×	×
	H4.8.8	305	7.4	-2:10	0	0.0	0:00	○	305	-1:00	30	27.1	33.7	32.3	36.1	58.6	48.4	×	×
渡川ダム	H16.10.20	4,099	39.8	-3:10	650	6.3	0:00	○	3,449	1:10	30	26.1	45.9	45.9	41.7	48.2	41.7	×	×

※1 遅れ時間は、貯留水位が制限水位に達した時刻ー放流量が治水副開始流量に達した時刻として算出。

※2 早明浦ダム(H17.9.6)では、迎洪水位が非常に低かったために、すりつけ操作が流入量のピーク後の低減部になり、放流量は規則操作にすりつかず、治水容量内貯留量が大きくなった。

※3 放流開始時刻の差は、「実績操作においてすりつけ操作を開始した時刻ー限界流入量に達した時刻」とした。正は遅れ操作であることを示す。

※4 水位放流方式による放流と放流の原則による放流を比較し、水位放流方式による放流が放流の原則を満たす場合、○とした。水位放流方式と実績操作による水位上昇速度の最大値を比較し、水位放流方式が小さい場合○とした。

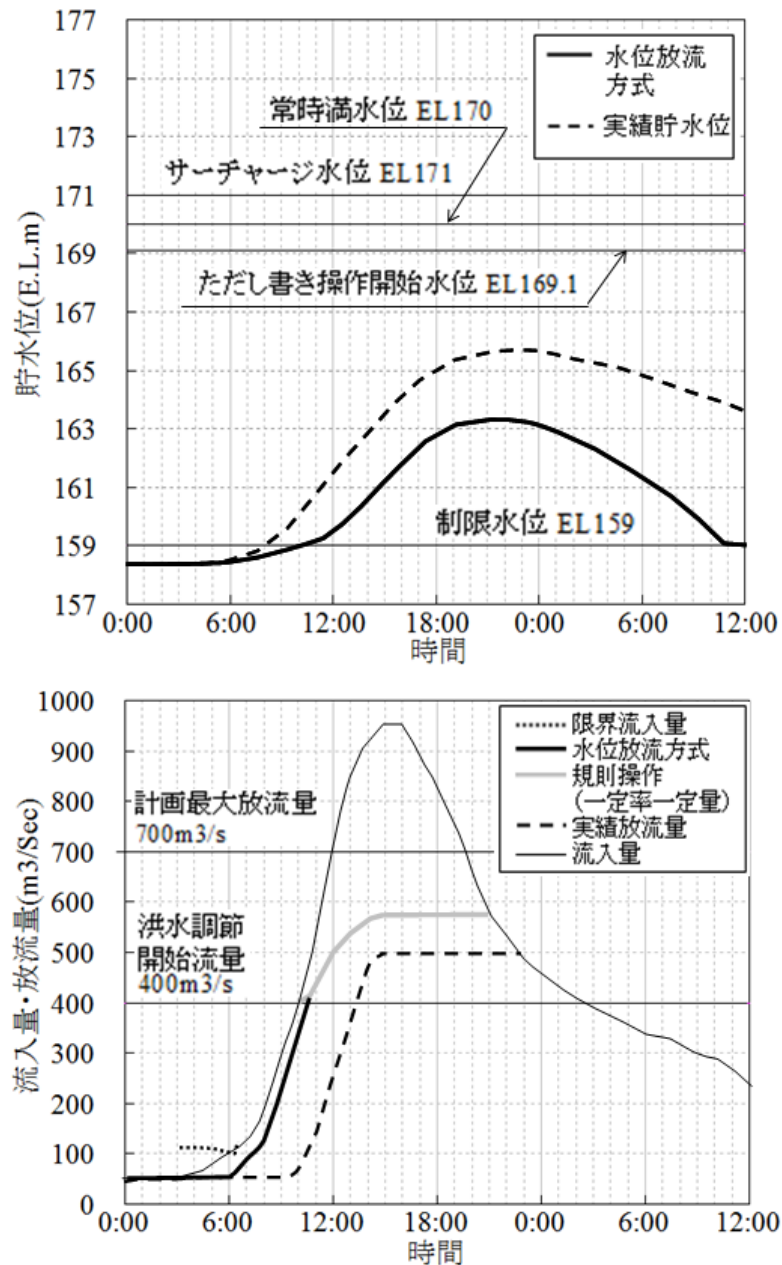


図-4.4.1 四十四田ダム H16年9月洪水 シミュレーション結果¹⁾

図-4.4.2は、市房ダムにおけるハイドログラフであるが、すり付け操作が遅れた結果、但し書き水位を上回り、計画最大放流量を約 $200\text{m}^3/\text{s}$ 上回る放流を行っている。水位放流方式の採用により、但し書き操作は回避できないものの、最大放流量を約 $120\text{m}^3/\text{s}$ 低減することができる。

シミュレーションを実施した12ダム全般については、次のとおりである。すなわち、4.2.2で述べた治水計画上下流に悪影響をもたらす治水容量内の過貯留は、表-4.4.2に示す実績の操作においては、表-4.4.2に示すように国土交通省管理1ダム、水機構管理ダム、県管理4ダムにおいて治水容量の20~50%を占める結果となった。

これに対して、表-4.4.2に示すように水位放流方式を導入することにより、過貯留は大幅に縮小され、最大でも治水容量の5%程度に抑えることが可能となる。なお、早明浦ダムの場合は、利水容量が極めて大きく、また、コンジットゲートがなく低い貯水位での放流能力が不足するために円滑なすり付け操作が困難であり、過貯留が発生する特殊な条件である。

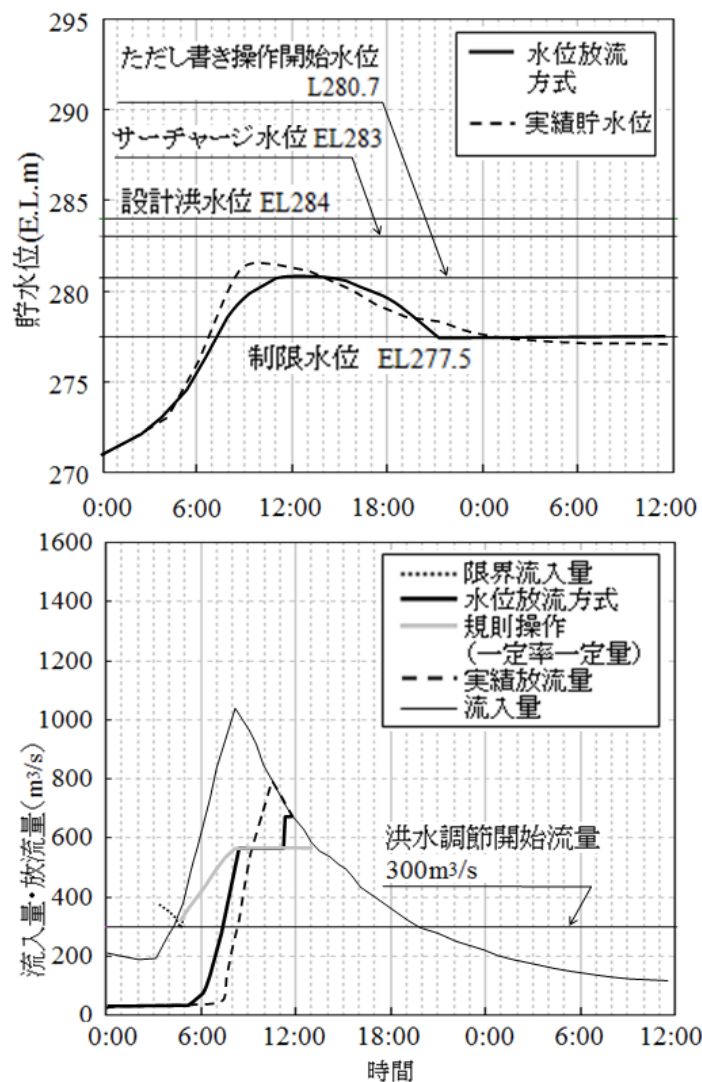


図-4.4.2 市房ダム S57年7月洪水 シミュレーション結果¹⁾

また、貯水位が制限水位に達した時点で放流量は洪水調節開始流量となる必要があるが、実績の操作では1~3時間程度、最大で11時間遅れている。水位放流方式の採用により、この遅れ時間についても皆無とすることができる。すり付け操作を開始した時刻については、直轄ダムについては、実績操作の方が水位放流方式よりも早いダムが多い。これはダム管理所職員が慎重を期して早めの操作に入っていること、流域面積が比較的大きく、洪水末期の貯留により利水容量を貯水することが容易であるため、洪水初期に

利水容量への貯留操作を行う必要性が小さいことが経験的に知られていることによると推察される。水資源機構ダムについては、両者概ね同じであり、県管理のダムについては、まちまちである。四十四田ダム、市房ダム S55.6 洪水、S57.7 洪水など実績操作の方が遅いケースも見られ、これらのケースにおいては、治水容量の 20%を超える過貯留が発生しており、水位放流方式の採用により、これらを大幅に改善することが可能である。

一方、下流の水位上昇速度については、河道の条件や利用状況などにより原則として 30cm/30min または 50cm/30min 以内に抑えることと規定されているが、県管理 3 ダム全てを含む 14 ケースにおいて原則を遵守できず、また土師ダム、弥栄ダムなど 12 ケースにおいて放流実績よりも水位上昇速度が大きくなることが認められる。

これは、水位放流方式の構造上、ダム流入量が限界流量に達した以降は、(4.3.5) 式の放流関数、すなわち空き容量と洪水調節開始流量のみによって放流量を決定しており、流入量を考慮していないことによる。特にシャープな洪水等大きな流量がダム貯水池に流入したケースでは、大量の流水の流入により貯留量 $V(t)$ が短時間に急激に大きくなり、これに対応して大量の流水の放流を実施することとなるため、下流水位上昇速度が大きく規定値を上回るものと考えられる。ダム操作細則においては、下流水位上昇速度が規定値を上回る場合、

「所長は、次の各号の一に該当する場合には、規則第〇条の規定により関係機関に通知するとともに、一般への周知を行うものとする。」と定められており、サイレン等警報による周知やパトロールを入念に実施することにより、このような放流を実施することは可能である。

図-4.4.3 に下流水位上昇速度の最大値とすり付け期間中の 10 分間ダム最大流入量/最大流入時点の空き容量 $V_w(t)$ の関係を示す。さらに、図-4.4.4 に水位上昇速度の平均値と 10 分間ダム最大流入量/空き容量 $V_w(t)$ の関係を示す。空き容量に対するピーク流量の比が大きいほど、 Δt の間の流入量が大きいため、 $V_w(t)$ に基づいて算出した放流量が過小となり、これに伴って空き容量が小さくなって放流量 $Q_o(t+\Delta t)$ と下流水位上昇速度が大きくなるものと考えられる。

図-4.4.5 に、下流河道水位上昇速度の最大値とすり付け期間中の流入量増大比率最大値の比較を、図-4.4.6 に、下流河道水位上昇速度の平均値とすり付け期間中の流入量増大比率最大値の比較をそれぞれ示す。これらのことから急激な流入量の増大に対して、水位放流方式が十分な対応ができず、下流河道水位上昇速度の規定を守れないことがわかる。

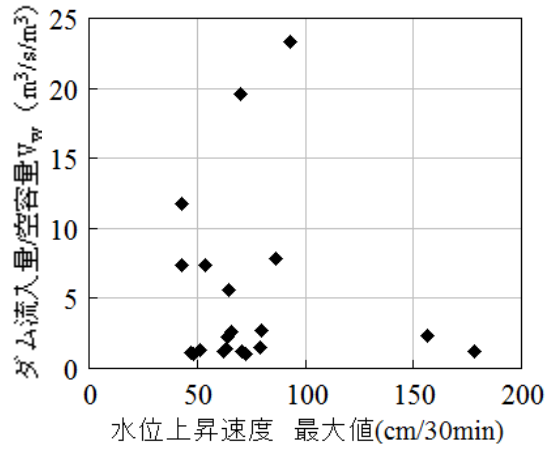


図-4.4.3 10分間ダム流入量最大値/ $V_w(t)$ ～水位上昇速度最大値¹⁾

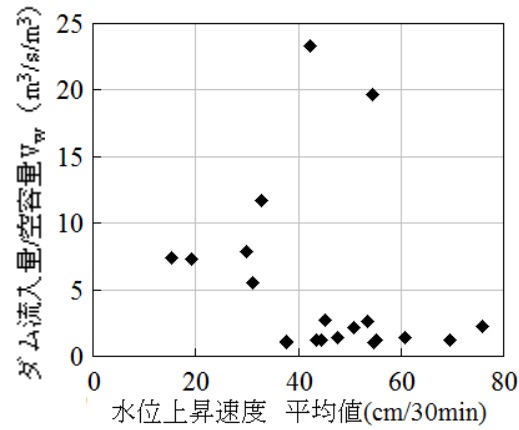


図-4.4.4 10分間ダム流入量最大値/ V_w ～水位上昇速度平均値¹⁾

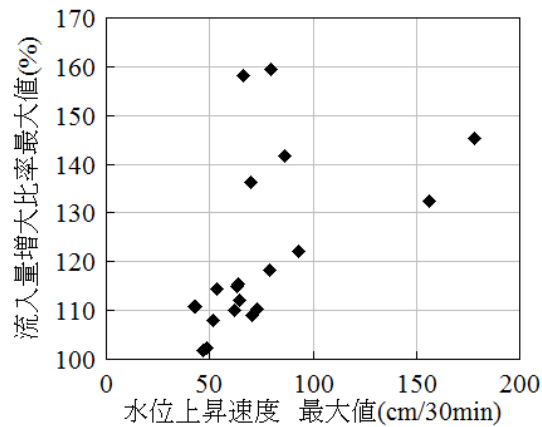


図-4.4.5 流入量増大比率最大値～水位上昇速度最大値¹⁾

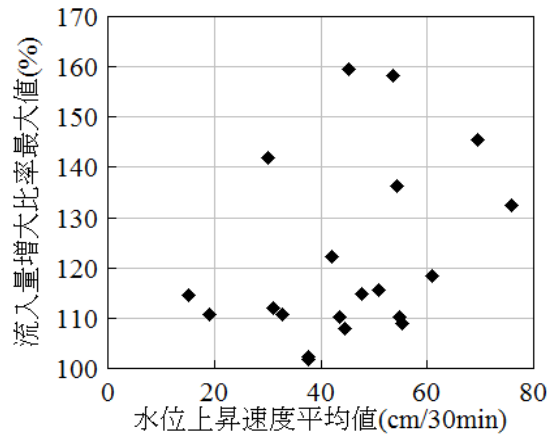


図-4.4.6 流入量増大比率最大値～水位上昇速度平均値¹⁾

4.5 水位放流方式の評価と改良

4.5.1 水位放流方式の評価

前節では、水位放流方式のメリット、デメリットについて述べた。現場における活用を考えた場合、少なくともすり付け操作を開始する時刻の判断に限界流入量を活用することは、その後の放流を従来どおりの手法に基づいて行う限り、全く問題は発生しない。四十四田ダムや市房ダムのように、限界流入量発生から約3時間遅れて実際の操作に入った経験のあるダムなどを中心に、その活用価値は大きく、ダム管理に携わる技術者を支援する意義は大きいものと思われる。

すり付け操作開始以降の放流量を水位放流方式により実施する場合は、過貯留の発生が削減される一方で下流河道水位上昇速度が増大する可能性があるというトレードオフ関係にある2種類のリスクを管理することとなる。リスクアセスメント¹²⁾の考え方は、図-4.5.1に示すとおりであり、発生確率が小さくともその被害が大きナリスクはリスク低減させるべきとされ、発生確率が大きいとその被害が小さなリスクはリスク保有（リスクにより被害が発生することを許容範囲内として受容すること）が適切と考えられている。過貯留は、計画を超える大洪水が発生した場合、下流での氾濫を増大させ、莫大な被害を発生させる可能性があることから、リスク低減が適切であり、一方の下流河道上昇速度の増大は、サイレン等による警報、パトロールを適切に実施することにより、河川利用者に対する大きな被害を回避することは可能と考えられ、リスク保有もひとつの選択肢と思われる。

しかしながら、ダム放流は、天然現象である洪水を人工的に制御することから、水位放流方式による副作用とも言える水位上昇速度の増大は、極力小さくすることが望ましい。そこで、本研究では水位上昇速度増大の改善を目指して次のように水位放流方式の改良を試みた¹¹⁾。

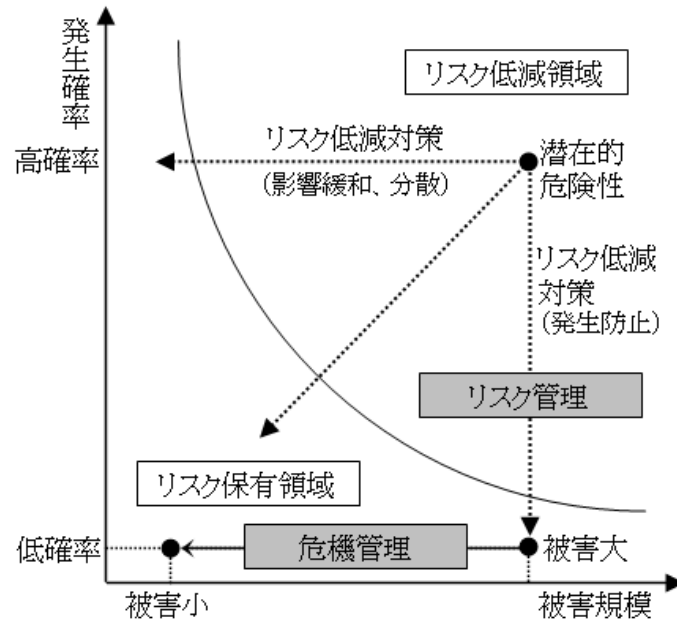


図-4.5.1 リスクアセスメントの考え方^{1 2)}

4.5.2 水位放流方式の改良

(1) 限界流入量等の縮小

すり付け操作を早期に開始することにより、貯留量に余裕ができ、水位上昇速度の抑制に繋がると考えられることから、次の2とおりの改良案を考えた。

- 1) 水位上昇速度の規定値 H_c を規定よりも小さく設定する案
- 2) 限界流入量 Q_{ic} を算出された値よりも小さく設定する案

以上の2案について、改良の効果を検証する対象として、前節に示したシミュレーションのうち、水位上昇速度の規定値を守れなく、速度が比較的大きな6ダム7洪水を選定した。また、規定値よりも小さな値として、1/2、1/3に相当する値をそれぞれ検討した。結果は、表-4.5.1に示すとおりである。図-4.5.2に市房ダムにおけるハイドログラフを示す。規定値を縮小しても水位上昇速度低下の感度は悪いが、10~50%程度の低減が確認できた。

(2) 放流関数の改良

今村の提案した水位放流方式においては、(4.3.5)式に示した放流関数により放流量が決定されている。すなわち、限界流入量に達した時点の空き容量に対する各時点の空き容量比の2乗により放流量を規定している。実績の流入波形によっては、この放流関数の適合性が悪く、下流河川水位上昇速度を規定値よりも大きくする現象に係わっている可能性がある。このため、本研究では改良案としてこのべき乗を1から3まで0.5刻みで放流関数を設定し、早明浦ダムの4洪水について、下流河川水位上昇速度と治水容量内過貯留量がどのような挙動を示すか感度分析を行った¹¹⁾。

表-4.5.1 水位上昇速度規定値、限界流入量の縮小の効果¹⁾

ダム名	洪水	放流開始時間						水位上昇速度 (cm/30min)						備考
		実績操作	水位放流方式	Hc/2	Hc/3	Qic/2	Qic/3	実績操作	水位放流方式	Hc/2	Hc/3	Qic/2	Qic/3	
土師ダム	H18.9	8:00	18:40	17:20	14:40	17:10	14:20	42.32	61.33	51.39	46.22	50.17	47.82	Hc=50cm
弥栄ダム	H17.9	7:00	16:10	15:20	14:40	15:20	14:30	37.53	69.33	56.94	52.52	56.94	51.72	Hc=30cm
苦田ダム	H18.7	0:00	23:40	23:20	23:10	(19:00)	(19:00)	34.50	45.96	42.11	41.37	39.07	39.07	Hc=30cm
早明浦ダム	S50.8	12:00	12:40	11:50	11:20	11:50	11:10	41.20	57.10	47.07	43.79	47.07	43.07	Hc=50cm
市房ダム	H5.9	14:00	16:50	15:50	15:20	15:30	14:50	78.72	153.45	129.97	123.66	125.46	119.69	Hc=30cm
	S57.7	6:00	3:30	20:10	16:10	20:10	16:10	110.13	69.84	37.76	30.01	37.76	30.01	Hc=30cm
祝子ダム	H5.9	11:00	14:20	11:50	11:20	11:20	10:30	47.93	72.70	68.53	67.58	67.58	66.60	Hc=30cm

: Hc超過
 水位放流方式 : Hc、Qicとも規定値を採用
 () : この時刻より前の時刻であることを示す

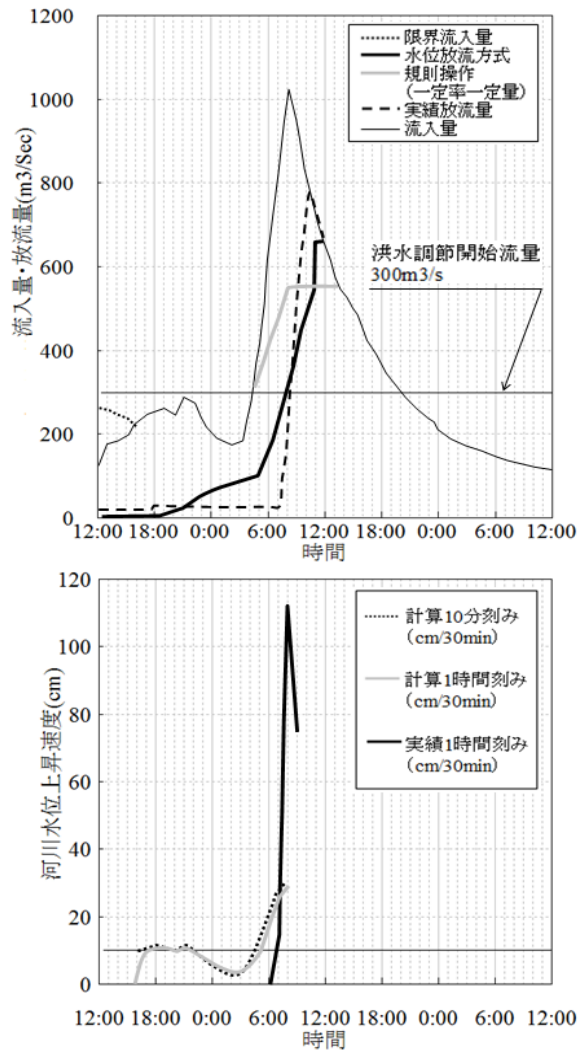


図-4.5.2 すり付け操作改良の結果(市房ダム S57年7月12日洪水)¹⁾

結果は、図-4.5.3、図-4.5.4に示すとおりである。早明浦ダムにあっては、べき数を1.5から3に増加させるに従って、下流の河川水位上昇速度（最大値）は大きくなるが、河川水位上昇速度（平均値）については大きな差はない。

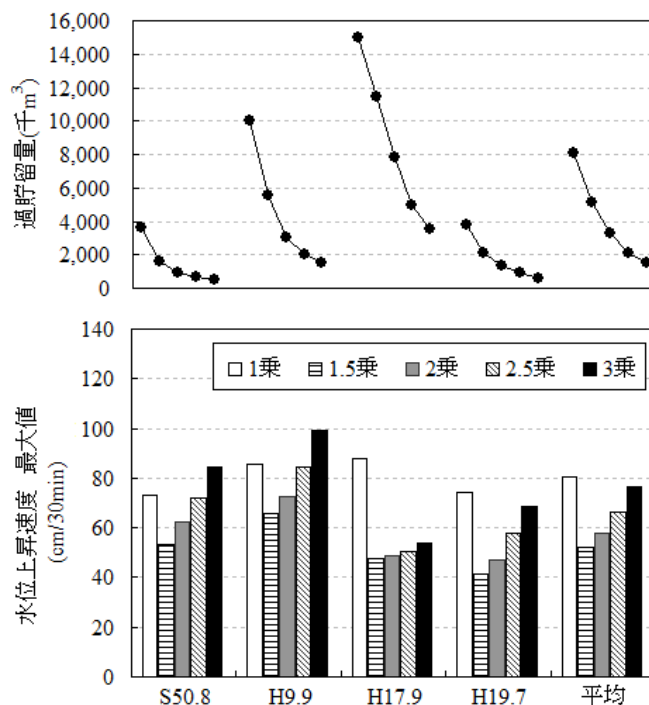


図-4.5.3 放流関数と過貯留量、水位上昇速度（最大値）¹¹⁾

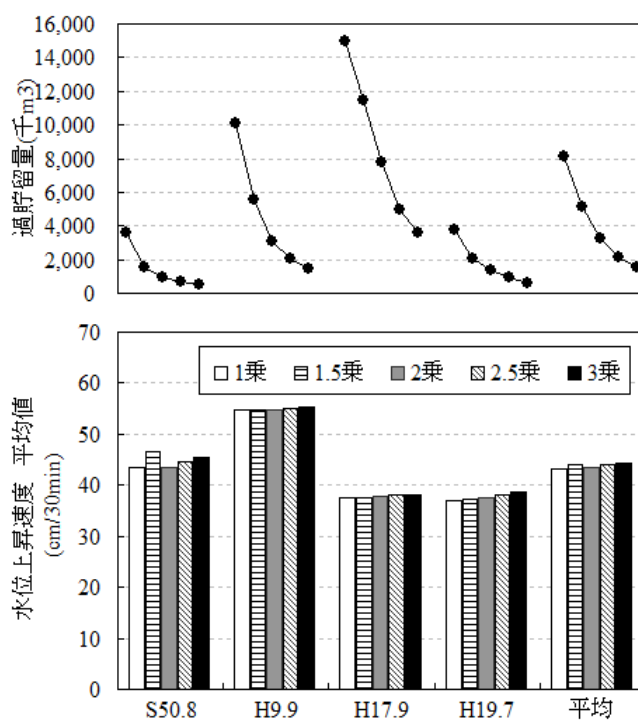


図-4.5.4 放流関数と過貯留量、水位上昇速度（平均値）¹¹⁾

すなわち、放流関数のべき乗を 1.5 乗に設定した場合が最も下流河川水位上昇速度（最大値）を抑えることができた。4 洪水ともにべき乗を 1 から 3 に増加するに従って、治水容量内への過貯留は減少していき、特に 2.5 までは過貯留量が低下する感度が良い。よって、早明浦ダムにあつては、放流関数のべき乗として 2.5 を採用する方が河川管理上、より適切と思われる。但し、放流関数の形は、ダムの流入特性によって変わるものと考えられ、管理への導入にあたっては、ダム毎に多くの洪水データを試算して決定するとともに、水位放流方式を採用することについて操作規則に反映する必要がある。

(3) 操作規則と水位放流方式を組み合わせた操作手法

4.5.1 で述べたように、水位放流方式は、過貯留量の減少という大きなメリットがあるものの、下流河道上昇速度の増大というデメリットが発生し、本項(1)、(2)の改良により、デメリットを縮小させることができたものの、依然として小さな問題点としては残されたところである。

このため本研究では、この問題点の完全な解決を図るため、やや操作は煩雑になるものの、新たな操作手法を考案した¹¹⁾。3.4.2 に述べたように、河道において、河川利用者が歩行可能な水深は、70cm までと考えられる。よって、これを切り上げて 1m として、河川利用者が河川区域内に存在する可能性のある水深と見なした。下流河道水位が 1m に達するまでは、下流河道上昇速度制限(通常、30 分 30cm 又は 50cm)を遵守した放流量とし、1m 以上の水深にあつては、水位放流方式の放流関数に従った放流とする。すり付け操作開始時刻は、当然ながら流入量が限界流入量に達した時刻となる。

渡川ダムにおいて実施したシミュレーションの結果は、図-4.5.5 に示すとおりであり、下流河道の水深が 1m 以下の状況にあつては、本方式の採用により、水位上昇速度が最大で 23.6cm/30 分と守ることができ、過貯留量も 514 千 m^3 と一般の水位放流方式によった場合の 650 千 m^3 よりも縮小できた。水深が 1m 以上に上がったからの河道水位上昇速度については、最大で 103cm/30 分と通常の水位放流方式や実績操作と比べて大きくなるが、河川内に河川利用者が存在する可能性は無いことから、問題ないものと判断できる。本方式の導入により、すり付け操作について、過貯留量の減少と水位上昇速度の遵守という 2 つの課題について、同時に守りながら、円滑に操作を実施することが可能となる。

この他、前節で述べたように、ダムによってはコンジットゲートがない、あるいはあつても低い貯水位での放流能力が不足するなど、水位放流方式を採用したとしても、円滑なすり付け操作がハード的に対応できない場合も想定され、今後の気候変動による洪水波形の増大に対する既存施設の機能強化の観点からも、十分な検討に基づく早期の改造が望まれるところである。

また、本研究においては、大規模な洪水についてシミュレーションを実施したが、中小洪水に終わった場合は、水位放流方式の適用による早期のすり付けにより、利水容量すらも充足できない恐れも完全には否定できないため、これらの分析も必要である。

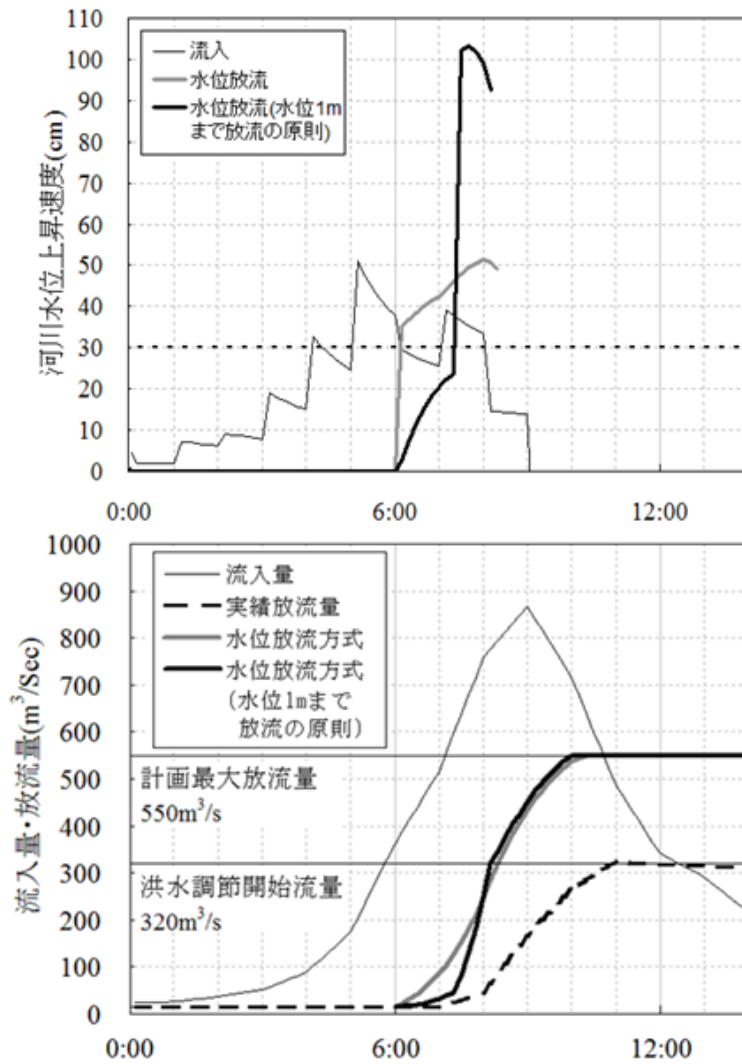


図-4.5.5 渡川ダム H16年10月洪水

4.6 まとめ

本章では、迎洪水位が制限水位よりも低い状態で大きな洪水を迎えた場合の適切なすり付け操作の実施について、実際に発生した洪水によりその有効性を検証するとともに問題点を明らかにし、併せてその改良策の検討を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 水位放流方式の限界流入量により、すり付け操作開始時期を判断することは、その後の放流量が適切に設定される限り有効であり、ダム管理者の判断を支援する「アラーム」としての活用が期待される。但し、国土交通省管理の多くのダムにおいて実施されているより早期のすり付け操作を妨げるものではない。
- (2) 今村が提案した(4.3.5)式の放流関数を活用した放流を実施することにより、実績操作においてしばしば起こっている治水容量内の過貯留について大幅に低減することが可能であり、超過洪水が発生した場合などに、必要以上の最大放流量を

発生させない点で有効である。

- (3) 下流河道における水位上昇速度については、既定値を守れない場合や実績の操作よりも悪化させる場合が見られるが、丁寧な警報やパトロールの実施によりリスクは小さくできるものと考えられる。
- (4) 水位上昇速度の制限値や限界流入量を既定値よりも小さく設定することにより、下流水位上昇速度をより小さく抑えることが可能である。また、操作はやや煩雑になるが、下流河道水深 1m までは、河道水位上昇速度を守る放流とし、水深 1m 以上にあつては、水位放流方式の放流関数に基づいた放流とすることにより、過貯留量の減少と河道水位上昇速度の遵守という二つの課題を達成することが可能となる。
- (5) 放流関数の設定にあつては、必ずしもべき乗 2 とする必然性はなく、ダム毎に多くの洪水データにより適合性を確認することが望ましい。
- (6) 低標高部における放流施設能力が不足しているダムにあつては、本方式を適用しても、物理的にすり付け操作が不可能であり、遅れ操作となつて過貯留量が発生することが不可避である。このようなダムにあつては、コンジットゲートの新設等の改造を行うことにより、遅れ操作を回避することが望まれる。
- (7) 本研究では、大規模な洪水が流入した場合の適用性について検討を行ったが、中小洪水が流入した場合においては、すり付け操作を行うことにより、利水容量が回復できない状況が発生することも想定される。今後は、現場における本方式の導入に向けて、中小洪水を含むさまざまな規模の洪水について検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) 今村瑞穂、ダム貯水池における洪水調節の工学的特性の分析と改善に関する研究、九州大学博士論文、1998.
- 2) 裏戸 勉、洪水時のダム操作について、ダム技術 No.86、pp.4-12、1993.
- 3) (財)ダム技術センター、多目的ダムの建設第7巻管理編、pp.76-84、2005.
- 4) (財)ダム水源地環境整備センター、ダム管理の実務、pp.58-60、2000.
- 5) (財)ダム水源地環境整備センター、ダムの管理例規集、pp.151-154、2006.
- 6) 今村瑞穂、洪水時のダム操作について、ダム工学会第16回学術講演会、2006.
- 7) 今村瑞穂、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、Vol.8 No.2、pp.102-116、1998.
- 8) 今村瑞穂、ダム操作について考えること、ダム技術 No.193、PP.3-9、2002.10
- 9) 今村瑞穂、日野 徹、芳地廉征、日本における多目的ダムの新たな操作方法の提案、大ダム No.190、PP.121~126、2005.1
- 10) 大谷知樹、一ノ瀬泰彦、竜澤宏昌、水位放流方式に基づく低貯水位条件下でのダム放流操作シミュレーション、第15回水資源機構関東ブロック技術研究発表会、2003.

- 11) 三石真也、角哲也、尾関敏久、松木浩志、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 Vol.20 No.1、pp.6-15、2010.3
- 12) (社)日本技術士会、技術士制度における総合技術監理部門の技術体系(第2版)、pp.134-135、2004.

第5章 VR方式を活用した洪水調節手法

5.1 超過洪水等への適切な対処の必要性

第3章第5節まとめ(5)に示したように、WRFによる降雨予測においては、解析手法のいかなる精度向上を図ろうとも、誤差が一定の率で誤差が残ることを指摘した。

具体的には、第3章図-3.4.15、図-3.4.18に示すように、無害流量以下の流入量しか発生しない降雨をWRFにおいて予測した場合、貯水池を使い切ってしまう（早明浦ダムでは、8月19日3時頃）、その後無害流量を上回る流量が発生した場合には、洪水調節が全くできず、流入量＝放流量となる。このように2山以上の洪水や大規模な洪水の低減部などにおいて、WRFによる降雨予測が実際よりも過小に算出した場合においては、下流で大きな氾濫被害を発生させる恐れがあり、図-3.4.1による手法は、構造的な欠点を有している。特に超過洪水発生時にあっては、下流で氾濫する恐れがかなりの確率であり、問題の根は深い。このため、3.4.4(1)4)において、空き容量の一定率を留保した操作手法を提案し、欠点の克服を試みたところである。しかし、この手法にあっても、WRFによる降雨予測が大きな誤差を有する場合、特に予測降雨を過小に評価した際には、空き容量が少なくなった状態において合理的な放流方法が取られているとは必ずしも言い難く、降雨予測の誤差が下流氾濫へ繋がる恐れのあることへの対応を考えれば、その改善が望まれるところである。

一方、現在、ダム管理の現場において採用されている洪水調節に係わる操作は、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特に必要があると認める場合においては、この限りでない。」と規定されている。これは、「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¹⁾。これらの操作方式は、治水計画で定めた超過確率以下の洪水にあっては、一定の効果を確実に発揮し、さらに操作の過程において操作員に適応判断を要しない利点がある。

しかしながら、治水計画を超える超過洪水発生時にあっては、但し書き操作が行われる。具体的には、貯水位が但し書き操作開始水位（通常、治水容量の8割の容量に相当する水位で規定）に達し、さらにサーチャージ水位を超えることが予測される場合は、貯水位に対応したゲート開度として放流量を引き上げ流入量にすり付けることとし（第2章図-2.2.2参照）、流入量が計画最大放流量に等しくなるまでの間は、貯水位を流入量が放流量と等しくなった時の貯水位に保つことにより、流入量に等しい放流を行うことと定められている²⁾。この結果、ダムの洪水調節機能は低下し、過去の洪水においても、甚大な被害の発生が見られたところである。但し書き操作の開始にあたっては、下流河川において洪水氾濫のおそれがあるため、地元関係機関等が時間的余裕をもって住民の避難等の適切な措置が行えるよう、操作規則において、但し書き操作への移行を

予告するための通知を行うものとする定められていることから、その状況が理解できる。

平成 16 年新潟・福島豪雨において刈谷田川ダム及び笠堀ダムが、平成 18 年川内川豪雨において鶴田ダムがそれぞれ相当の治水機能を発揮し、下流の洪水被害軽減に寄与³⁾、⁴⁾しながらも、結果的には下流河川において氾濫し、大きな浸水被害が発生したことに代表されるように、現在のダム管理において、採用されている操作規則にあっても、超過洪水発生時におけるダム操作手法については、なお改善の余地がある。

以上の問題点から理解できるように、WRF による降雨予測を活用した新たな洪水調節手法を現場において採用する場合においても、また現況の操作規則に基づき操作する場合においても、予測以上の洪水、とりわけ超過洪水が発生した場合の適切な対応手法の策定が必要とされる場所である。すなわち、ダム最大放流量について極力小さくすること、具体的には、現況の操作規則において一般的に採用されている但し書き操作手法によるよりもさらに低減させ、下流被害をより小さくすることを実現すべく、次に示す観点からの技術的改良が図られることが期待される。

- 1) 但し書き操作をできる限り早い時点から開始し、治水容量を有効に使うことで最大放流量を極力下げること
- 2) 但し書き操作の放流曲線の増加割合を抑えて、最大放流量を下げること

本章では、超過洪水への対応のために考案された VR 方式について、実際に発生した洪水を用いて適用性を検証し、併せてその合理的な適用策について検討を行った。

5.2 VR 方式の概要

VR 方式(Water storage Volume with the Ratio of discharge to the flow method)は、裏戸が超過洪水時における有効なダム操作手法として提案している方式⁵⁾、⁶⁾であり、その時点の空き容量から判断して、以後の洪水をその空き容量内で貯留できない場合に、放流量を逐次増加していく操作方式である。すなわち、ダムの現時点の空き容量 $V_e(t)$ と現時点の放流を継続した場合に今後必要となる調節容量 $V_m(t)$ を等しくなるように放流量 $Q_o(t)$ を変化させ、限られた貯水容量を最大限活用して洪水調節効果を高めようとする洪水調節手法である。本方式を活用することにより、洪水調節において流入量＝放流量となった時点で空き容量＝0 とすることができる。

空き容量及び通常の操作から VR 方式への移行時期は任意に設定が可能であるが、これまでの検討では、一般的に空き容量は設計洪水位までの容量、移行時期は流入量がピークとなった時点が良く採用されている。VR 方式による放流にあつては、空き容量が大きく、規模が小さい洪水の場合は、放流量を低下させ貯留量を多くする操作に移行する。逆に空き容量が小さく、規模が大きい洪水の場合、放流量を増加させる操作に移行することとなる。VR 方式による放流概要図を図-5.2.1 に示すとともに、一般的に採用される実行手順を示す。

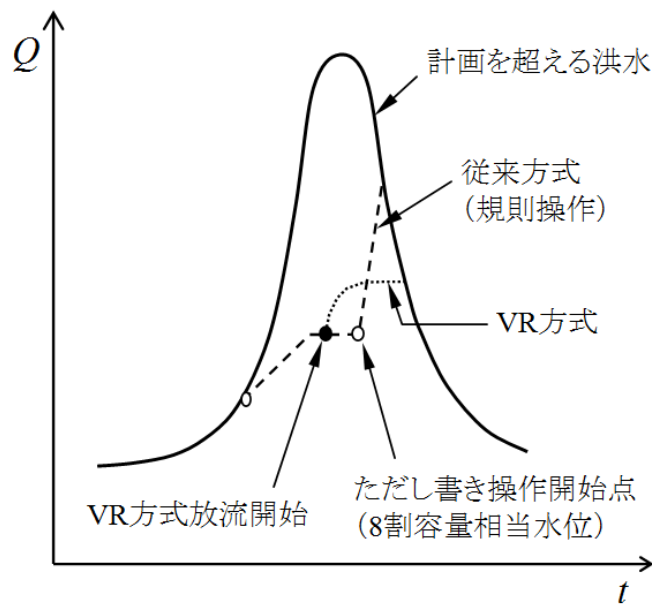


図-5.2.1 VR方式による放流の概要図¹⁾

① 基準流入波形の推定

基準流入波形（流入量の低減傾向）を計画波形や既往洪水から推定する。基準流入波形は、ほぼ等比級数的に低減するものとして時間の指数関数で表されると仮定し、以下の関数で表現する。定数 b は当該ダムにおける既往洪水波形をピーク流量に着目しつつ、いくつかのパターンに分類し、低減部について代表的な低減波形を表す数値によって定める（図-5.2.2 参照）。

$$Q(t) = a \cdot b^{-t} \quad (5.2.1)$$

ここに、 $Q(t)$ ：時刻 t におけるダム流入量

a ：洪水のピーク流量で定まる定数

b ：洪水の低減状況で定まる定数

基準流入波形は洪水の低減部を表す関数であるため、定数 a, b は $a > 0, b > 1$ となり、下に凸の曲線となる。

② 現放流量を継続した場合の空き容量と放流率の関係の算定

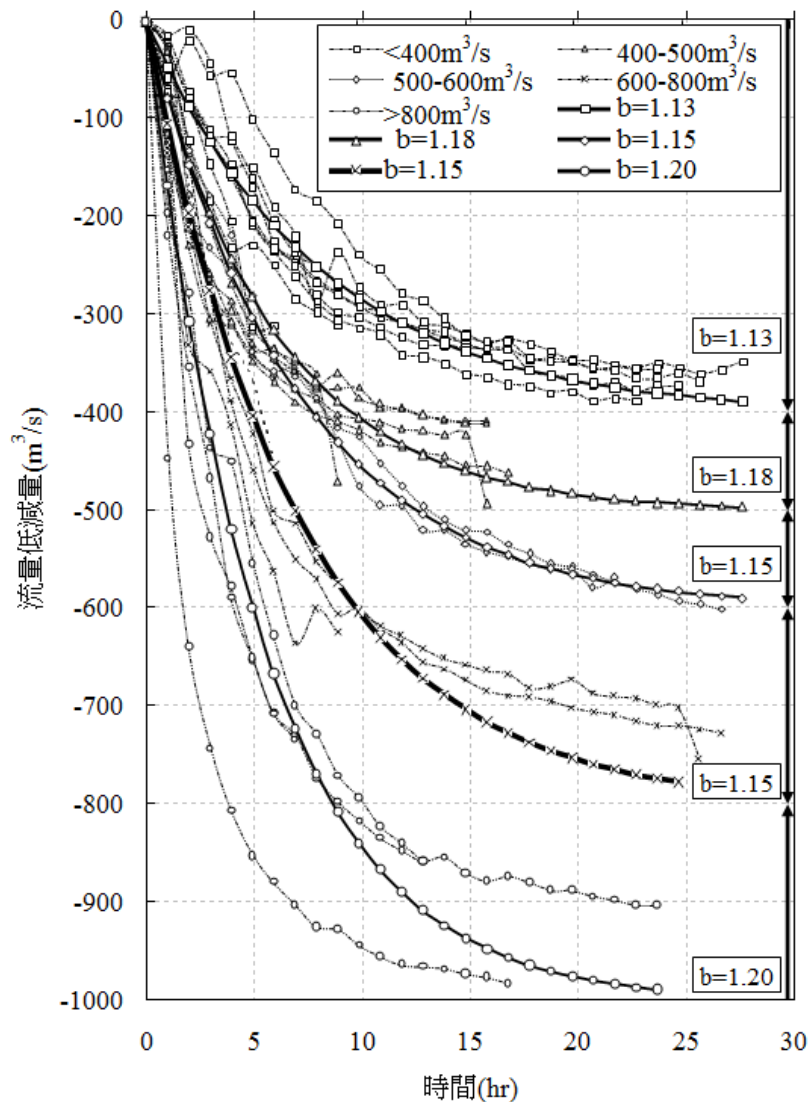
推定した基準流入波形を活用しつつ、さまざまな空き容量と放流量の組み合わせから、対応する放流率をそれぞれ求める。図-5.2.3において、現放流量 $Q_0(t)$ を固定し、ダムの空き容量 $V_e(t)$ を一定の値に設定すると、洪水調節によりダムに貯留される量が空き容量 $V_e(t)$ に等しくなるハイドログラフは、 $t_f \sim t_s$ の期間であり、時刻 t_f における流入量は $Q'_i(t_f)$ である。すなわち、ダムの空き容量と放流量に見合う放流率 $R'(t)$ は、次式の値で求められる。

$$R'(t) = (Q_0(t) - Q_s) / (Q'_i(t_f) - Q_s) \quad (5.2.2)$$

ここに Q_s : 洪水調節開始流量

洪水のピークから導入する VR 方式にあって、洪水調節開始流量 Q_s を用いていることは、やや理解困難であるが、裏戸においては、流入量に対する放流率を規定するにあたって、ダム管理者が通常用いる一定率一定量方式の放流率と混同しないよう、あえて (5.2.2) の定義としている。

VR 方式における洪水開始流量からの放流率は、図-5.2.4 に示すとおりとなる。



※ 右端の矢印は各基準波形の適用範囲を示す。

図-5.2.2 基準流入波形の算定 (渡川ダム) ¹¹⁾

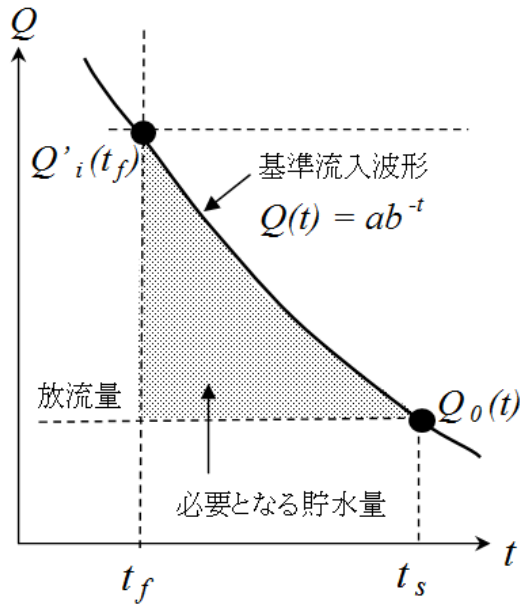


図-5.2.3 基準流入波形と空き容量¹⁾

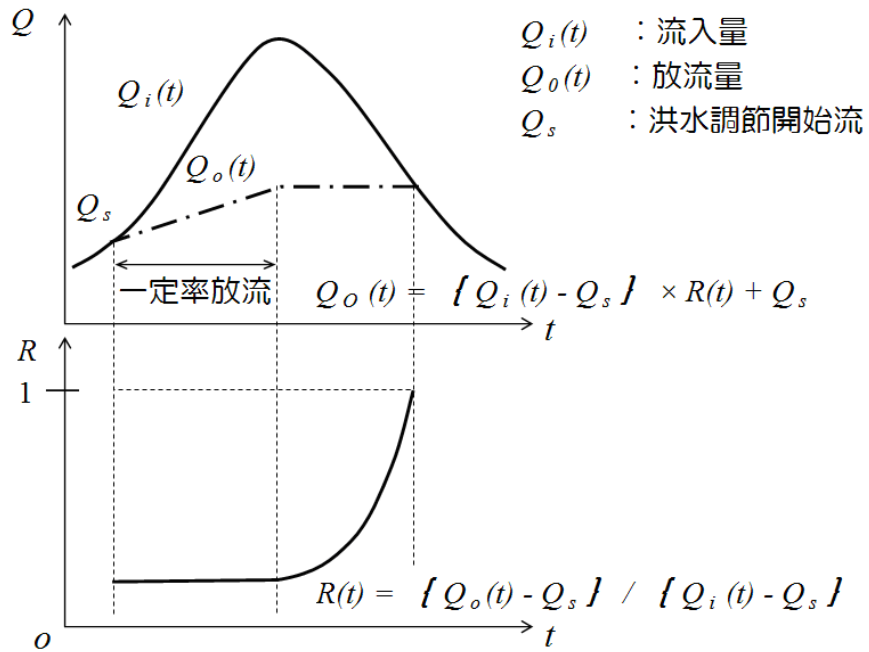


図-5.2.4 一定率一定量放流方式における放流率

表-5.2.1に示すようにダムの空き容量と放流量のさまざまな組み合わせに対して、洪水調節が終了した際にダム容量を使い切るような放流率が求められる。次に $R'(t)$ を用いて実際の放流量を修正する。ゲート操作に必要な時間（通常 10 分）を考慮して、時刻 $t+\Delta t$ における放流量 $Q_o(t+\Delta t)$ は、次式で表される。

$$Q_o(t+\Delta t) = (Q_i(t+\Delta t) - Q_s)R'(t) + Q_s \quad (5.2.3)$$

表-5.2.1 貯水量、放流量に対応した放流率¹⁾¹⁾

貯水量 (千 m^3)	放流量(m^3/s)					
	2,000	2,100	2,200	2,300	2,400	...
40,000	0.2473	0.2594	0.2708	0.2815	0.2917	...
41,000	0.2499	0.2620	0.2734	0.2842	0.2945	...
42,000	0.2524	0.2646	0.2761	0.2870	0.2973	...
43,000	0.2551	0.2673	0.2789	0.2898	0.3002	...
44,000	0.2578	0.2701	0.2817	0.2927	0.3031	...
45,000	0.2606	0.2730	0.2847	0.2957	0.3062	...
46,000	0.2635	0.2759	0.2877	0.2988	0.3093	...
47,000	0.2664	0.2789	0.2908	0.3019	0.3124	...
48,000	0.2694	0.2821	0.2939	0.3051	0.3157	...
49,000	0.2726	0.2852	0.2972	0.3084	0.3191	...
50,000	0.2758	0.2885	0.3005	0.3119	0.3225	...
...

③ 放流率、放流量の算定

VR方式の適用にあたっては、時刻 t における現放流率 $R(t)$ について、現放流量と空き容量の関係から表-5.2.1により求められる放流率 $R'(t)$ と比較を行う。

- 1) $R(t) < R'(t)$ 放流率が小さすぎるためダム容量が不足する
- 2) $R(t) > R'(t)$ 放流率が大きすぎるためダム容量を使い切れない

いずれの場合も、洪水調節終了時にダム容量を使い切るべく、放流率を $R'(t)$ に修正し、図-5.2.5のように放流量を修正する。すなわち、1)にあつては、放流量を増加させ、2)にあつては、放流量を減少させることとなる。

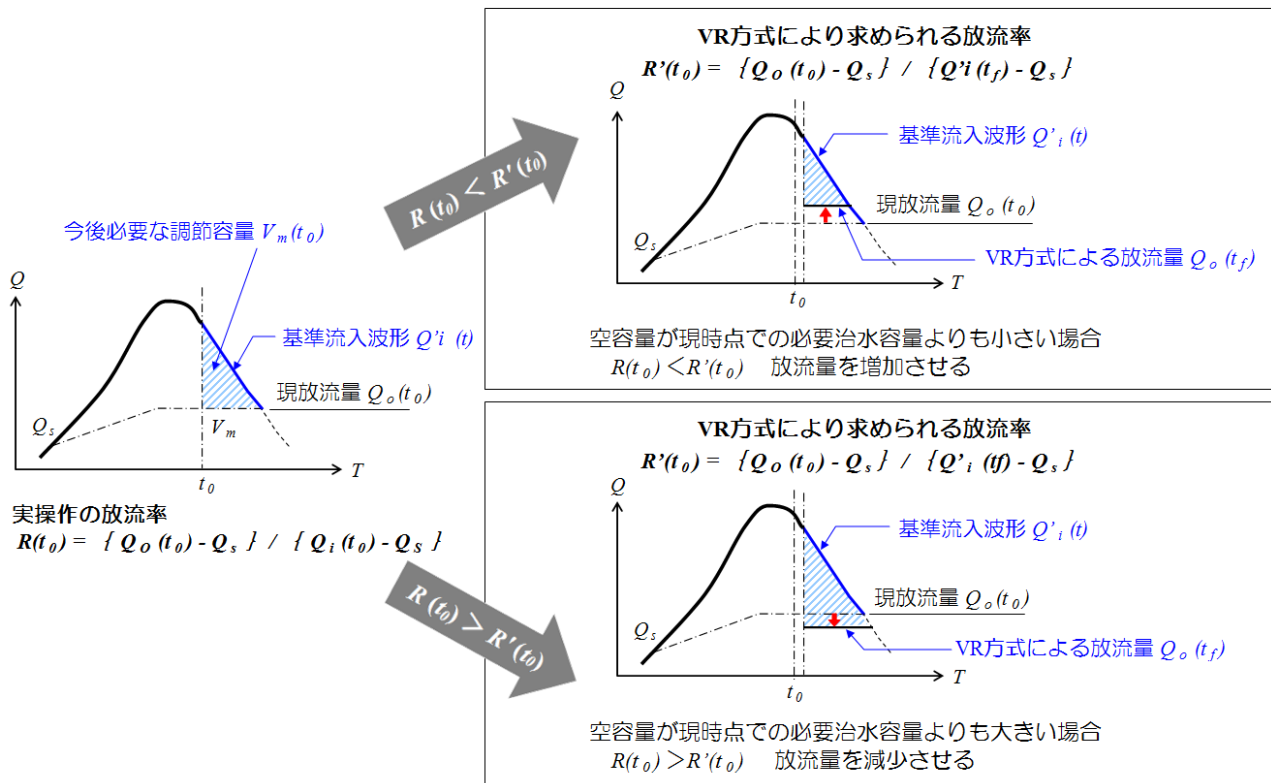


図-5.2.5 必要調節容量と比較した放流量の修正

5.3 管理中のダムにおけるVR方式適用シミュレーション

VR方式は、17年前の1993年に提案されながらも、未だ国土交通省所管のダムにおいては採用されていない。これは、裏戸⁷⁾、⁸⁾の検討において、検証の対象とされた実績洪水が数少ないこと、その後にも、竹下ら⁹⁾、松浦ら¹⁰⁾によってその実用性が検討されるも、竹下らにあっては、計画高水流量の波形をダム設計洪水流量で引き延ばした波形であり、実績の超過洪水について検討が少ないこと、松浦らにあっては、VR曲線として特定できておらず、解析した洪水と異なる流入波形の場合は、うまく適応できないものと評価していることが、その一因と考えられる。すなわち、ダム管理者にとって、過去に経験した厳しい超過洪水に関するVR方式の効果が不明又は不確実であり、その有効性を証明するには、これまでの検討が必ずしも十分ではないと推察される。

以上の状況を踏まえ、本研究では、但し書き操作の実績の多い国土交通省、県管理の8ダムにおいて、実際の洪水波形(16洪水)やダム貯水位を用いてVR方式のシミュレーションを実施し、実績の但し書き操作による洪水調節と比較してその有効性を検証するとともに、より良い適用性について分析を行った¹¹⁾。表-5.3.1に検討対象としたダムの諸元を示す。

表-5.3.1 検討対象ダムの放流方式¹⁾

ダム名	洪水調節方式	洪水調節開始流量 (m ³ /s)	計画最大放流量 (m ³ /s)
二風谷ダム	自然調節方式	1,900	5,000
矢作ダム	一定率一定量方式	800	1,300
弥栄ダム	一定率一定量方式	300	600
野村ダム	一定量後一定開度	300	1,000
鶴田ダム	一定率一定量方式	600	2,400
刈谷田川ダム	自然調節方式	-	85
渡川ダム	一定率一定量方式	320	550
祝子ダム	一定量方式	220	220

5.3.1 基準流入量波形の設定

まず、前節(5.2.1)式に示した基準流入量波形の定数 a 、 b の設定をダム毎に行った。 a は、放流率算定時放流量である。本研究では、 b について、各ダム既往洪水のピーク流量以降における低減部の波形により、洪水規模（ピーク流量）毎に洪水群に適合するよう配慮しつつ設定した。

表-5.3.2に流量規模毎の a の設定例を示す。また、基準流入量波形の b の算定例は、前節図-5.2.2に示したとおりであり、流域面積が 81km² の渡川ダムの場合、一部の洪水を除いて概ね 30%以下の誤差に留まっている。

表-5.3.2 流量規模毎の a の設定例¹⁾

渡川ダム	
流量範囲(m ³ /s)	a の設定値
800以上	1,000
600以上 800未満	800
500以上 600未満	600
400以上 500未満	500
300以上 400未満	400
300未満	300

5.3.2 洪水操作シミュレーションの実施

シミュレーション開始時の貯水位は、検討ダムにおける但し書き洪水時の実績貯水位とし、流入波形は、但し書き洪水実績流入波形とした。なお、弥栄ダムにあつては、過去に但し書き操作の実績がないため、流入波形について計画対象洪水を設計洪水流量にまで引き伸ばして使用した。計算間隔は 10 分、活用する容量は設計洪水位までとし、VR 方式の適用開始は、流入量のピーク発生時点とした。ダム放流量の計算にあたっては、放流設備の設置標高及び貯水位に応じた放流能力に留意しつつ行った。

放流量の計算に際して、空き容量の状況によっては計画最大放流量以下に放流量を抑えることが解として出される場合も発生するが、最低でも計画最大放流量を放流することとした。これは、放流量を小さく絞りすぎると、往々にして、その後の流入量の増大により、計画最大放流量を大きく上回る放流が発生することによる。

図-5.3.1 に代表例として、鶴田ダム H18.7 洪水におけるシミュレーション結果を示す。実績操作による最大放流量 $3,490\text{m}^3/\text{s}$ に対して VR 方式の導入により、最大放流量を $329\text{m}^3/\text{s}$ 低減し、計画最大放流量 $2,400\text{m}^3/\text{s}$ を超過した流量を約 30% 抑えることが可能となった。

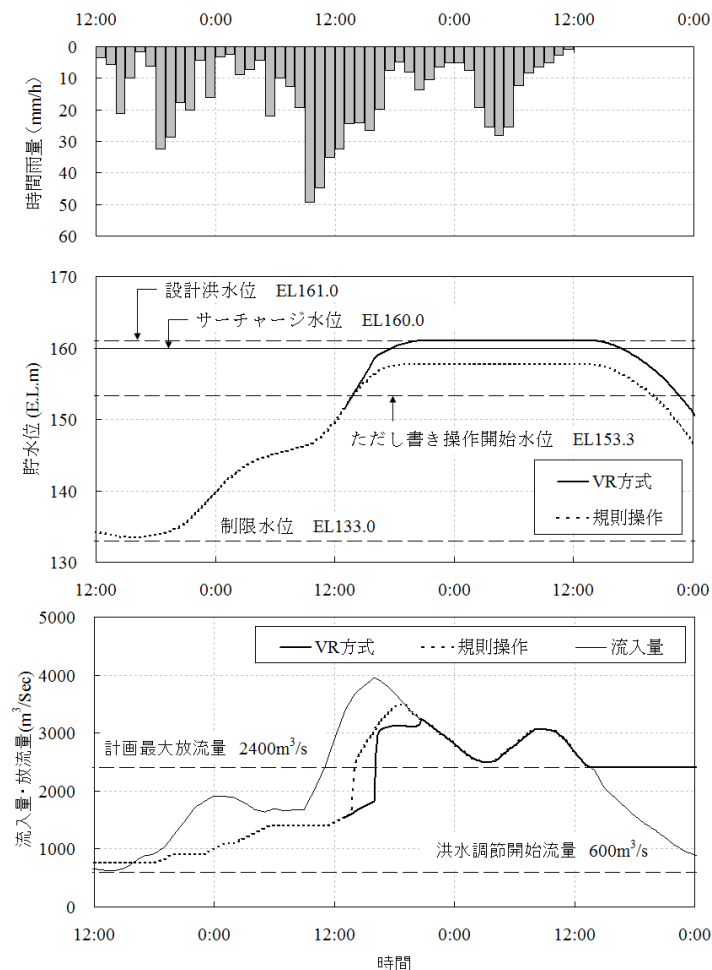


図-5.3.1 鶴田ダム H18年7月洪水¹⁾

設計洪水位までの空き容量については、実績操作において約 12,000 千 m^3 残っていたが、VR 方式においては、37 千 m^3 と貯水池容量をほぼ全て使い切ることができた。H18.7 洪水においては、鶴田ダム下流河道において大量の流水が氾濫し、とりわけ、さつま町においては、約 206 億円にのぼる浸水被害が発生したことから、VR 方式適用の意義は大きいと考えられる。

表-5.3.3 に 8 ダム 16 洪水のシミュレーション総括表を示す¹¹⁾。祝子ダムの 2 洪水においては、洪水の流入量がピークを迎える前に貯水位が設計洪水位に達することから、今回設定した条件による VR 方式が適用できない。これらを除けば、設計洪水位までの空き容量活用の観点からは、全てのダム、洪水において、空き容量をほぼ使い切ることができ、VR 方式導入の効果が見られる。また、弥栄ダム、渡川ダム H17.9 洪水、祝子ダム H5.8 洪水の 3 洪水を除けば、12 洪水について最大放流量の低減が図られ、実績洪水と比較した最大放流量の低減率は単純平均で約 38% となる。野村ダム、渡川ダム H9.9 洪水、祝子ダム H11.7、H18.8 洪水においては、VR 方式の適用により、計画最大放流量を上回る放流、すなわち但し書き操作に入ることが防げ、この効果は著しい。いずれの洪水も但し書き操作開始水位を若干上回る洪水である。図-5.3.2 に渡川ダム H9.9 洪水の調節状況を示す。

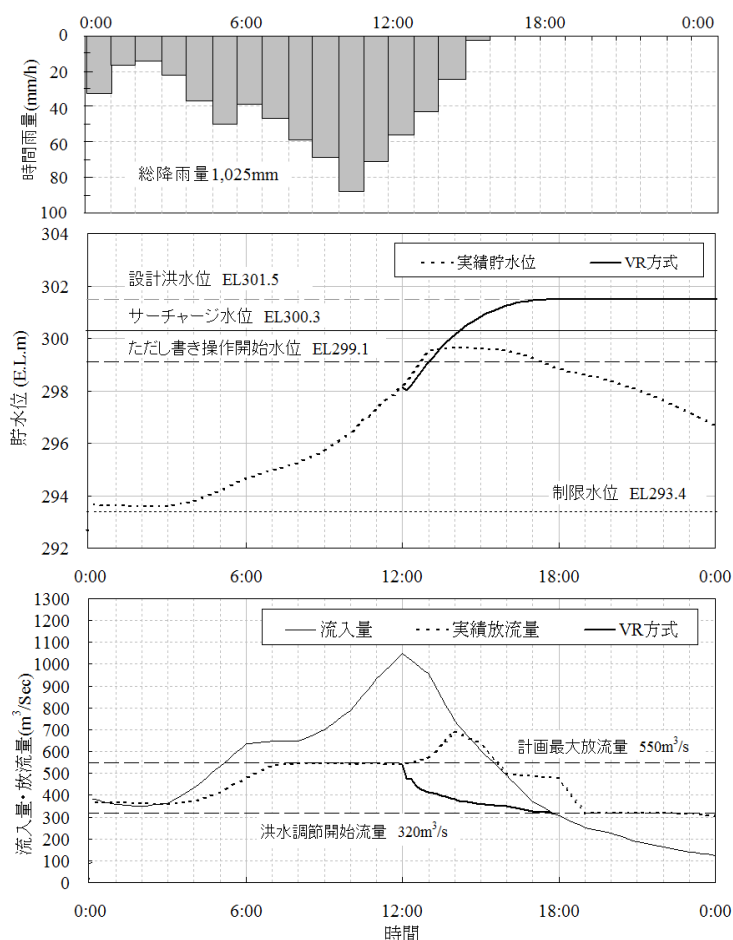


図-5.3.2 渡川ダム H9 年 9 月洪水

表-5.3.3 ただし書き操作の適用性総括表¹⁾

ダム名	洪水発生年月日	ただし書き操作開始水位 (A) (m)	設計洪水位 (B) (m)	制限水位から設計洪水位までの容量 (千m ³) (C)	計画最大放流量 (m ³ /s) (D)	規則操作			VR方式			VR方式の効果 (規則と比較)						
						最大放流量 (m ³ /s) (1)	最高水位 (m) (2)	最高水位・ただし書き操作開始水位 (m) (2-A)	設計洪水位までの容量 (千m ³) (3)	ただし書き操作移行時期 (4)	最大放流量 (m ³ /s) (5)	最高水位 (m) (6)	設計洪水位までの容量 (千m ³) (7)	ただし書き操作移行時期 (8)	最大放流量の低減量 (1-5) (m ³)	最大放流量の低減率 (1-5)/100 (9)	容量の活用 (3-7) (%)	ただし書き操作への移行 (4) (10)
二風谷ダム (国)	H15.8.11	48.0	49.4	24,885	3,850	5,402	48.83	0.83	2,465	8/10 1:50	4838	49.40	0	2:10	564	36.3%	2,465	遅
矢作ダム (国)	H12.9.12	296.8	299.0	16,515	1,300	2,560	298.43	1.63	1,426	9/12 5:20	2148	298.97	75	5:10	412	32.7%	1,351	早
弥栄ダム (国)	引き伸ばし (計画波形状)	124.8	129.5	63,239	600	3,408	128.99	4.19	1,675	10/15 23:50	3972	129.18	975	1:10	-564	-20.1%	700	遅
野村ダム (国)	H16.8.30	169.4	171.5	4,691	400	578	169.74	0.34	1,666	8/30 20:00	400	170.51	941	移行せず	178	100.0%	725	移行せず
鶴田ダム (国)	H18.7.21	153.3	161.0	75,536	2,400	3,490	157.64	4.34	11,911	7/22 13:50	3236	161.00	6	16:10	254	23.3%	11,905	遅
刈谷田川ダム (県)	H16.7.13	268.3	272.6	4,320	85	212	272.26	3.96	74	7/13 13:50	149	272.59	2	7/13 12:00	64	50.4%	72	早
渡川ダム (県)	H9.9.15					691	299.65	0.55	2,970	9/15 12:30	550	300.00	2,439	移行せず	141	100.0%	531	移行せず
	H17.9.4	299.1	301.5	12,256	550	1,088	300.25	1.15	2,037	9/5 23:50	1088	301.48	2	9/6 1:30	0	0.0%	2,035	遅
	H16.8.28					934	299.97	0.87	2,484	8/30 10:00	579	301.40	171	8/30 11:00	355	92.4%	2,313	遅
祝子ダム (県)	H5.8.8					425	323.65	2.75	228	8/10 2:10	458	324.50	0	8/10 3:10	-33	-16.1%	228	遅
	H5.8.8 ※					499	323.83	2.93	180	8/10 3:00	458	324.50	0	8/10 3:10	41	14.7%	180	遅
	H16.8.29					460	323.77	2.87	196	8/30 12:10	449	324.50	0	8/30 12:10	11	4.6%	196	同じ
	H9.9.15	320.9	324.5	4,233	220	665	324.45	3.55	15	9/16 11:30	流入量ピーク前に設計洪水位を超える			運用不可		-	運用不可	-
	H18.8.17					237	321.22	0.32	869	8/18 8:10	220	322.21	611	移行せず	17	100.0%	258	移行せず
S57.8.26	H19.7.13					484	323.95	3.05	148	7/14 12:10	流入量ピーク前に設計洪水位を超える			運用不可		-	運用不可	-
	H11.7.26					316	322.70	1.80	485	8/27 4:10	251	324.50	0	8/27 5:10	65	67.8%	485	遅
						298	322.00	1.10	668	7/27 4:40	220	323.20	348	移行せず	78	100.0%	320	移行せず

※ 規則操作を行った場合

祝子ダム H5.8 洪水における実績操作は、管理所職員が豪雨の発生による超過洪水の発生を早くから予想していたものと推察され、貯水位が但し書き操作開始水位の約 4m も低い時点から但し書き操作に入っており、ピーク流量を相当下げることを実現している。これは、ダム管理者の間でいわゆる「神様運転」と呼ばれるものであり、極めて高度な判断と熟練した経験を要する。仮に操作規則どおり、但し書き開始水位から但し書き操作に移行していた場合と比較すれば、VR 方式による最大放流量低下の効果は $41\text{m}^3/\text{s}$ と推定される（図-5.3.3 参照）。

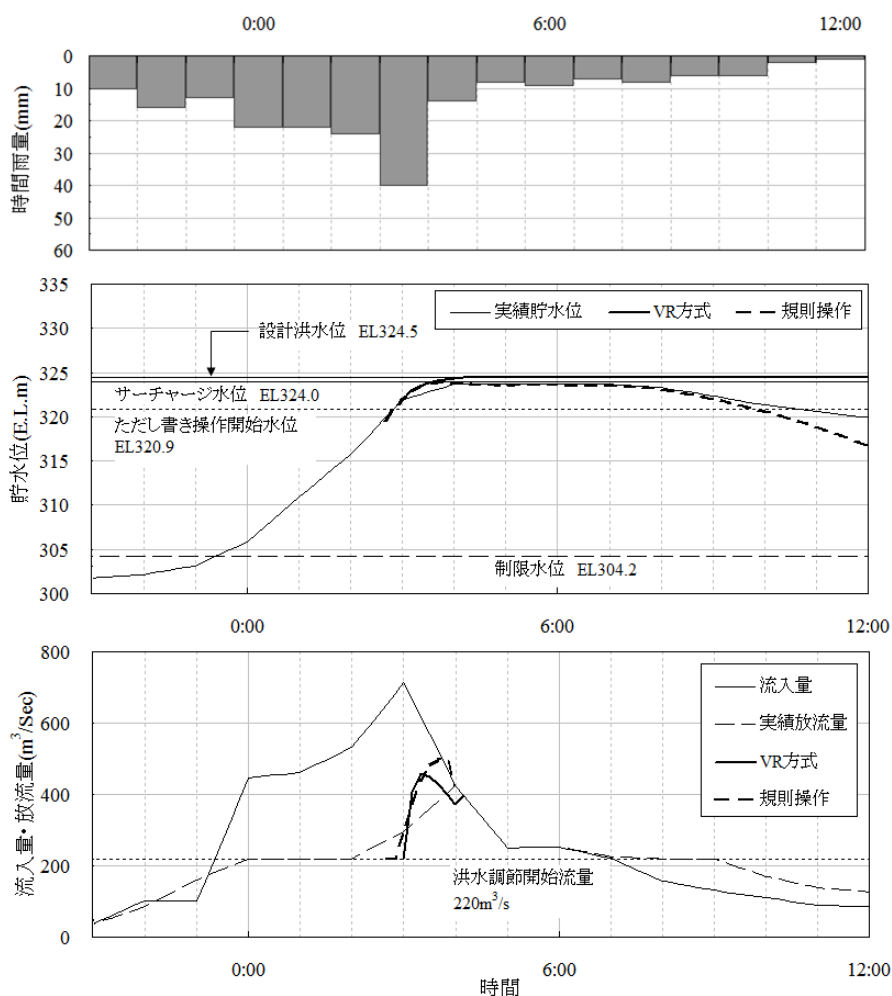


図-5.3.3 祝子ダム H5 年 8 月洪水^{1) 1)}

渡川ダム H17.9 洪水は、図-5.3.4 に示すように、洪水ピークが約 12 時間にわたって続く特異な洪水であり、このような長大な降雨による洪水に対しては、どのような洪水調節方法を採用しても、いずれは放流量=流入量となることは免れなく、VR 方式の最大放流量低減効果がないことはやむを得ないものと思われる。

弥栄ダムのシミュレーションにおいて、計画洪水流量の引き伸ばした洪水について、VR 方式の導入により最大放流量が規則操作によるよりも大きくなる状況が発生している（図-5.3.5 参照）。この洪水においては、計画洪水波形を設計洪水流量まで引き伸ばしているため、洪水低減部が過大である可能性があり、降雨量の生起確率を加味したハイドログラフの設定方法について検討が必要である。さらに、流入量ピーク時において、貯水位がサーチャージ水位を超えており、VR 方式の適用開始時に空き容量が極めて小さい特徴がある。このような状況下においては、VR 方式の適用は適切ではないと考えられる。

以上を総括すれば、洪水ピークが発生する前に設計洪水水位に至る洪水や長大な降雨による洪水、洪水ピーク時に空き容量が極めて小さい洪水を除けば、VR 方式の適用は、最大放流量の低減、空き容量の有効利用の観点から、規則操作に比べて有効である。

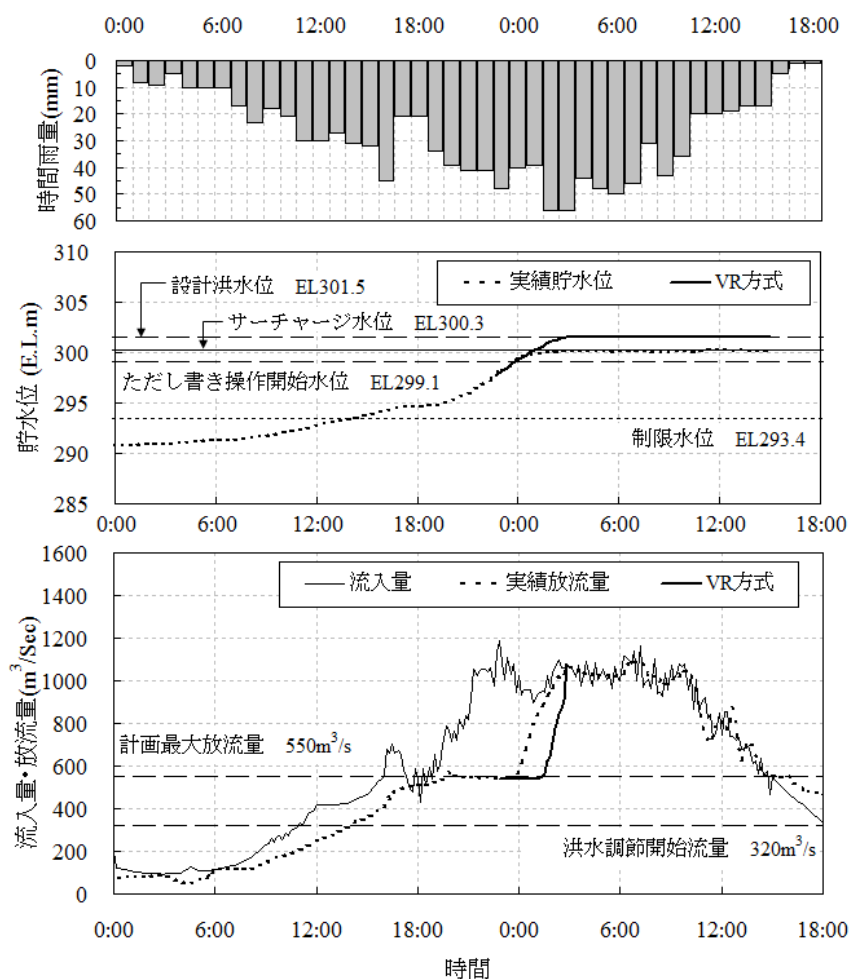


図-5.3.4 渡川ダム H17年9月洪水¹⁾¹⁾

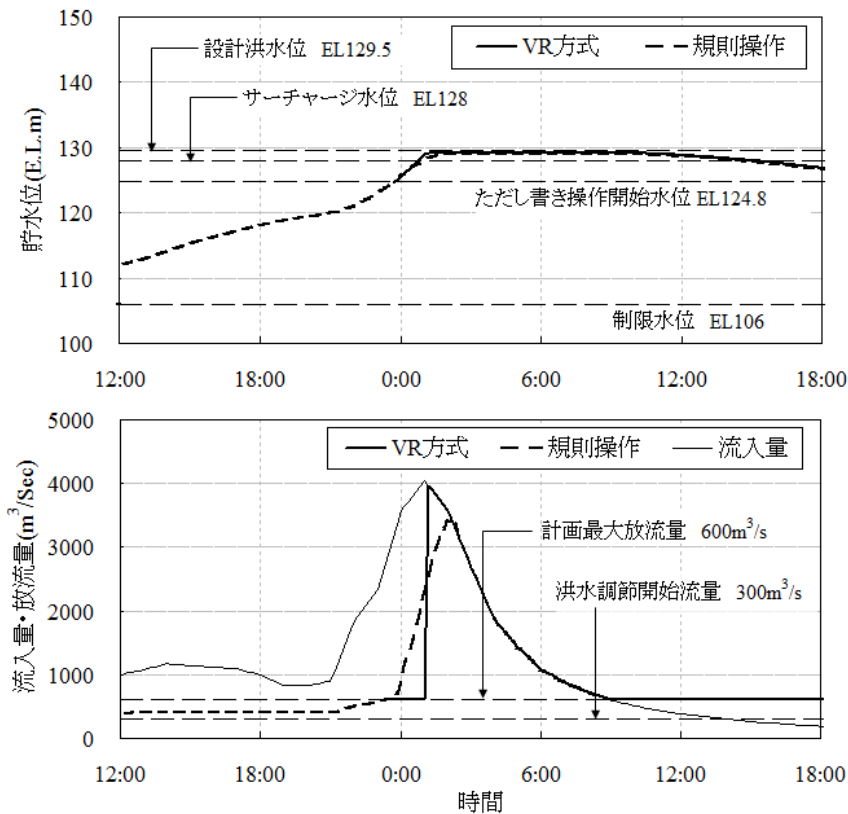


図-5.3.5 弥栄ダム 計画洪水設計洪水流量引き延ばし¹⁾

5.4 VR方式の合理的な適用手法の検討

5.4.1 VR方式の適用性について

ここでは、本研究で試みたVR方式の適用について、より合理的に実施すべく、適用手法の検討を行った¹⁾。祝子ダム2洪水においては、最大放流量の低減量が計画最大放流量の15%以下と比較的小さい。これは、図-5.4.1に示すように実績の洪水波形が、設定した基準流入波形に比べて一部の期間において大きく上回る流量を示しており、流入波形に基づいて設定した放流率に従った結果、空き容量が大幅に低減して、放流率を大幅に引き上げざるを得なくなった結果と考えられる。

この背景として、VR曲線が、図-2.4.2に例を示すように、空き容量が小さな水位にあっては、空き容量が0に近づくにつれて、急激に放流量が増加する特性を有していることが上げられる。このため、基準流入波形と比較した流入波形の特性やVR方式を適用する際の空き容量との関係は、重要である。

前節にてシミュレーションを行ったダム、洪水に関して、図-5.4.2に(最大流入量-計画最大放流量)/ピーク時空き容量~最大放流量/計画最大放流量の関係を、図-5.4.3に(最大流入量-計画最大放流量)/ピーク時空き容量~放流量増大率最大値の関係をそれぞれ示す。ここに、放流量増大率とは、10分間における放流量の増大す

る割合をいう。いずれも右肩上がりの相関を示しており、空き容量が小さい状況下において、大きな洪水が流入すると放流量が大きく変化し、最大放流量も大きくなることが理解できる。この現象は前述した基準流入波形を大きく上回ることと類似した現象と推察される。

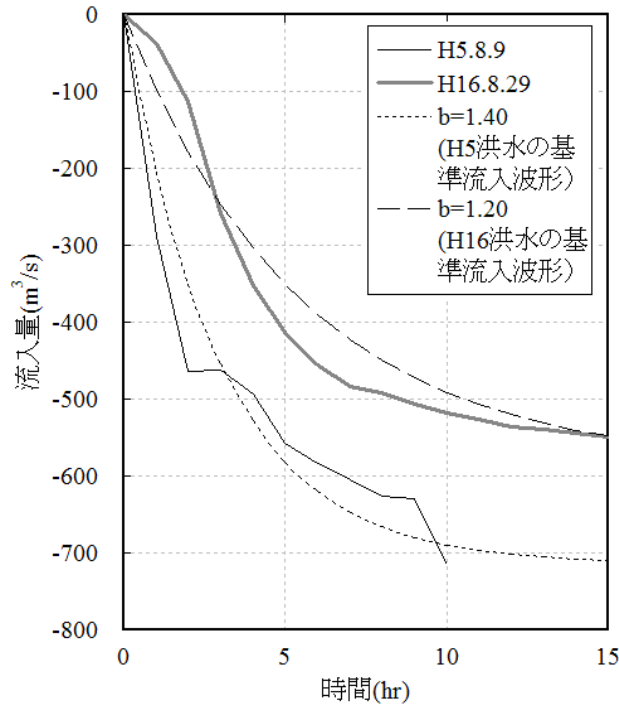


図-5.4.1 実績洪水低減部と基準流入波形¹⁾¹⁾

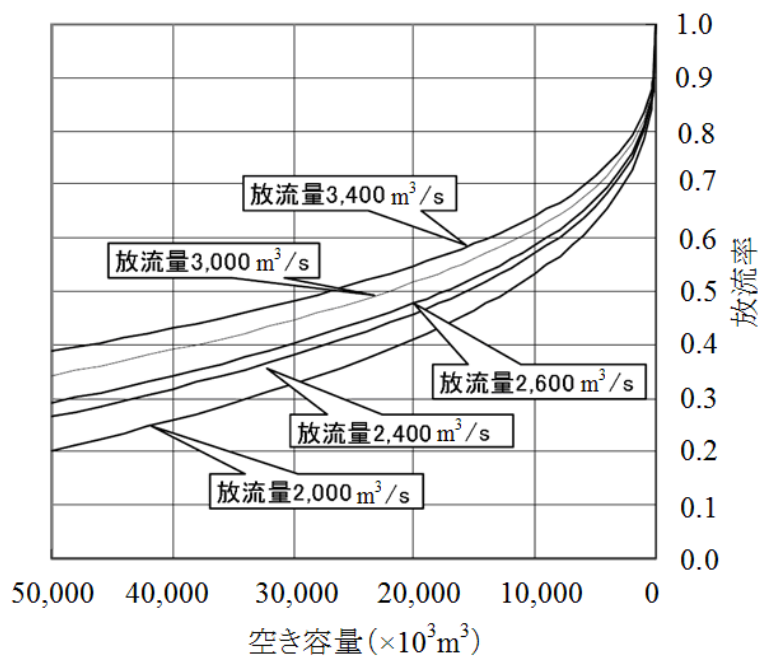


図-2.4.2 VR 曲線 (再掲)¹⁾²⁾

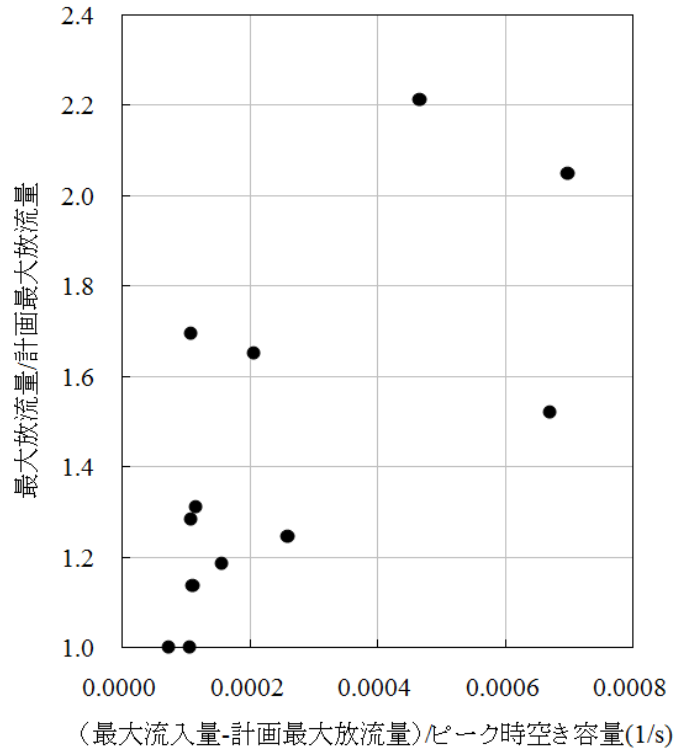


図-5.4.2 最大流入量のピーク時空き容量に対する比率と最大放流量の関係¹⁾

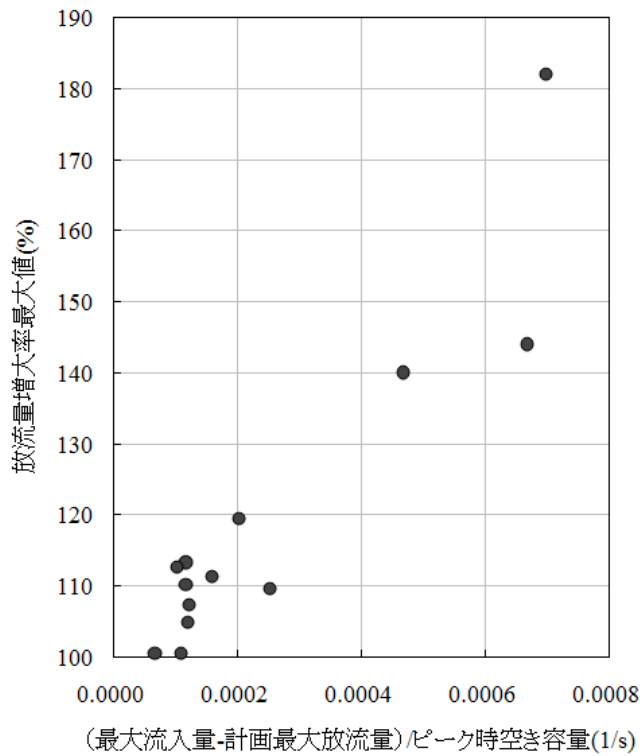


図-5.4.3 最大流入量、空き容量と放流量増加率最大値の関係¹⁾

実際のダム管理にあつては、但し書き操作開始水位前後に到達する洪水時において但し書き操作を実行するか否か、判断に苦慮することが散見される。また、松浦ら¹⁰⁾は、第2章図-2.4.2に示したように、VR 曲線が空き容量が少ない部分で放流率が急増するため、場合によっては洪水調節終了間際に放流量が急増する可能性があるとして指摘している。このような洪水発生時における VR 方式の適用性を検証するため、これまでに7回の但し書き操作を経験している祝子ダムについて、S57.8、H5.8、H18.8 洪水を対象に流入ピーク時の空き容量を変化させてシミュレーションを行った。結果は図-5.4.4、5.4.5、表-5.4.1に示すとおりであり、洪水ピーク時における貯留率が治水容量に対して70~90%の場合にあつては、3洪水とも VR 方式による操作の方が規則操作によるよりも最大放流量を低く抑えることができ、優れている。

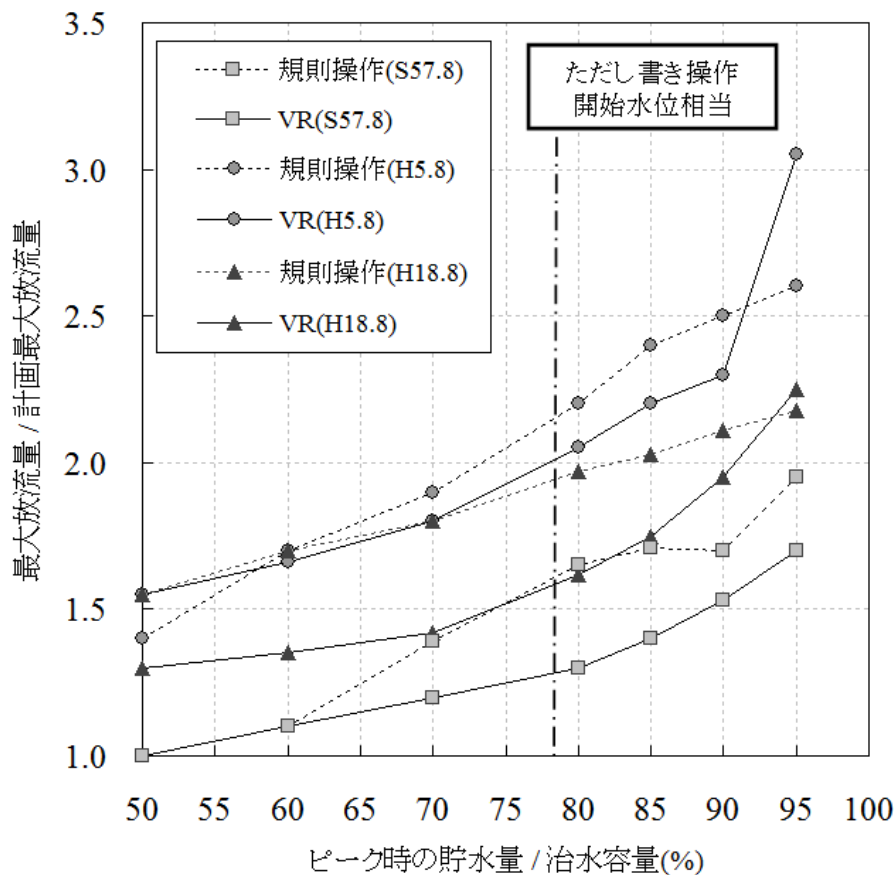


図-5.4.4 ピーク時の空き容量と計画最大放流量超過比率¹¹⁾

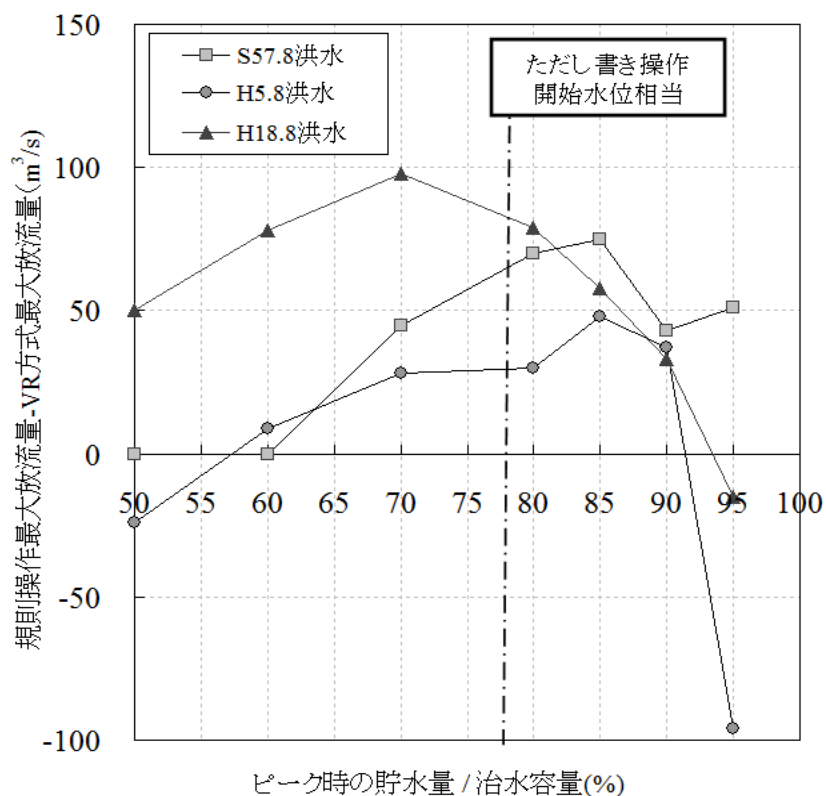


図-5.4.5 ピーク時の空き容量と最大放流量低減効果（祝子ダム）¹¹⁾

表-5.4.1 空き容量による感度分析結果一覧表¹¹⁾

	① 流入ピーク時 総貯留量 (千m³)	② 流入ピーク時 貯留率 (%)	③ 流入ピーク時 空き容量 (千m³)	④ ピーク時 水位 (EL.m)	⑤ 規則操作最 大放流量 (m³/s)	⑥ VR操作最 大放流量 (m³/s)	⑦ 規則操作最 大放流量⑤/ 計画最大放 流量	⑧ VR操作最 大放流量⑥/ 計画最大放 流量	⑨ 規則操作最 大放流量⑤- VR操作最 大放流量⑥ (m³/s)
S57.8 洪水	2,882	50	2,117	315.96	220.00	220.00	1.00	1.00	0.00
	3,305	60	1,693	317.83	232.00	232.61	1.05	1.06	-0.61
	3,729	70	1,270	319.61	297.99	253.37	1.35	1.15	44.62
	4,152	80	847	321.30	354.60	286.83	1.61	1.30	67.77
	4,364	85	635	322.12	379.90	308.44	1.73	1.40	71.46
	4,575	90	423	322.92	379.90	336.05	1.73	1.53	43.85
	4,787	95	212	323.71	428.60	377.63	1.95	1.72	50.97
H5.8 洪水	2,882	50	2,117	315.96	308.43	331.93	1.40	1.51	-23.50
	3,305	60	1,693	317.83	366.87	361.35	1.67	1.64	5.52
	3,729	70	1,270	319.61	425.30	397.20	1.93	1.81	28.10
	4,152	80	847	321.30	474.90	443.51	2.16	2.02	31.39
	4,364	85	635	322.12	521.73	473.55	2.37	2.15	48.18
	4,575	90	423	322.92	549.60	512.99	2.50	2.33	36.61
	4,787	95	212	323.73	569.95	666.38	2.59	3.03	-96.43
H18.8 洪水	2,882	50	2,117	315.96	333.70	284.01	1.52	1.29	49.70
	3,305	60	1,693	317.83	368.50	288.37	1.68	1.31	80.13
	3,729	70	1,270	319.61	401.51	303.79	1.83	1.38	97.71
	4,152	80	847	321.30	431.70	350.59	1.96	1.59	81.12
	4,364	85	635	322.12	447.20	389.02	2.03	1.77	58.18
	4,575	90	423	322.92	459.90	426.48	2.09	1.94	33.42
	4,787	95	212	323.71	470.29	485.95	2.14	2.21	-15.66

このうち、最も効果がある貯留率は、洪水によって異なるが、70%又は85%である。一方、貯留率が95%の場合は、2洪水において規則操作の方が最大放流量を小さくすることが可能である。また、貯留率が50%の場合は、2洪水において規則操作による最大放流量がVR方式によった場合の最大放流量以下となる。

同様のシミュレーションを二風谷ダム、矢作ダム、鶴田ダム、渡川ダムについてそれぞれ実施した。洪水ピーク時の治水容量に対する貯水率とVR方式導入による最大放流量低減効果は、図-5.4.6のとおりである。二風谷ダム、矢作ダムにあつては、貯水率が80%以上の場合、VR方式の効果は得られない。また、鶴田ダム、渡川ダムにあつては貯水率が95%以上の場合、極めて小さくなる。貯水率が60%以下の場合については、祝子ダムのような傾向は見られない。

以上の結果により、ダムによって境界となる数値は異なるものの、洪水ピーク時の空き容量が極めて小さい場合（治水容量の5~20%以下）において、VR方式による放流を行うことは、かえってリスクを伴うことが理解できる。

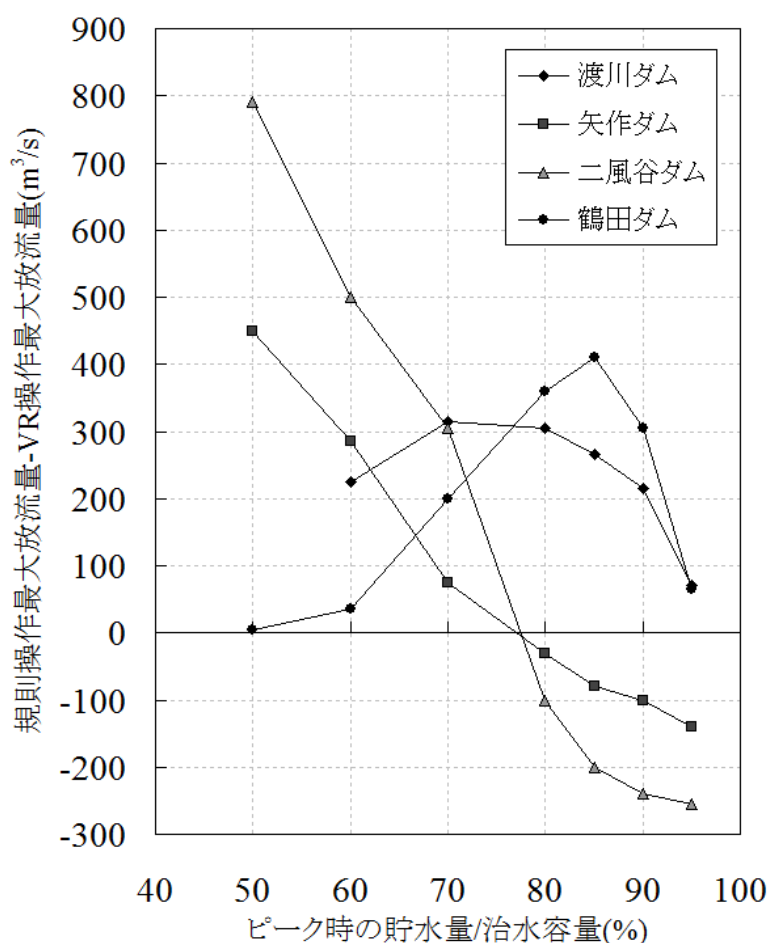


図-5.4.6 ピーク時の貯水量比率とVR操作の効果¹¹⁾

5.4.2 基準流入波形の妥当な設定について

松浦ら¹⁰⁾は、VR 曲線について、「ある特定の出水事例の流入波形に基づいているため、元の事例と異なる流入波形の場合うまく適応できないものと想像される。」と評価している。当然ながら、VR 方式の適用にあたっては、洪水の低減状況を示すパラメータ b の値をさまざまな洪水に適応できるよう、適切に設定する必要がある。ここに、 b の値が小さいほど低減しにくい洪水といえ、多くのダム貯水量を要することとなる。本研究では、但し書き操作実績の多い祝子ダムにおいて、洪水ピーク流量を $500\text{m}^3/\text{s}$ とし、基準流入波形を洪水群に適合する値 $b=1.21$ に設定し、さまざまな洪水が流入した場合を想定して、実洪水波形の b の値を $1.05\sim 1.50$ に変化させて VR 方式を適用した場合の最大放流量について検討したところ、図-5.4.7に示すように、 b の値が大きい洪水ほど（急激に低減する洪水ほど）最大放流量を抑えることができた¹¹⁾。

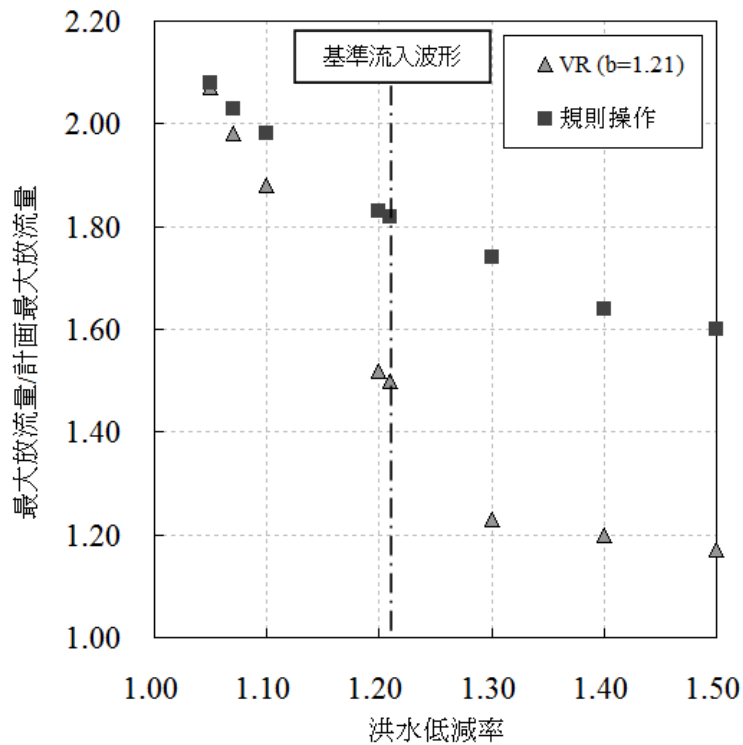


図-5.4.7 洪水流入波形低減部の感度分析結果¹¹⁾

一般的には、基準流入波形の設定にあたって、同一規模のピーク流量を持つ洪水群に関して、図-5.2.2に示すように、ほぼ中間値となるべく、(5.2.1)式の b の値を設定している。また、裏戸によれば、他ダムの検討結果から最初に採用を検討すべき b の値として 1.12 が提唱されている¹³⁾。一方、前節で記述したように、基準流入波形を上回る流入量が見られる洪水にあつては、VR 方式の有効性が低減することから、本研究

では、基準流入波形のパラメータ b の合理的な設定手法について祝子ダムを対象に検討を行った¹⁾。すなわち基準流入波形を上回る部分が洪水量の20%となるよう b の値を1.155 と設定した(図-5.4.8)。なお、基準流入波形を上回る部分の洪水量の対する割合と b の値の関係は、表-5.4.2 のとおりである。さらに b の値を既往洪水の大半を網羅できるように、1.02~1.50 の範囲で変化させてシミュレーションを実施して規則操作による場合との比較を行った。 b の値と最大放流量の関係は、図-5.4.9 のとおりであり、祝子ダムの場合は、洪水によって変化するものの、 $b=1.10\sim 1.35$ の範囲であれば、いずれの洪水においても規則操作による最大放流量よりも放流量を低減することが可能であるため、 b の設定値として適している。また、表-5.4.2 から基準流入波形を上回る部分の割合が20%の場合、 b の値1.155 が1.10~1.35 の範囲内に入ること、図-5.4.9 からいずれの洪水においても最大放流量低減の効果が高いことから、図-5.4.8 により、20%を考慮しつつ基準流入波形を設定することが概ね妥当であることも確認できる。

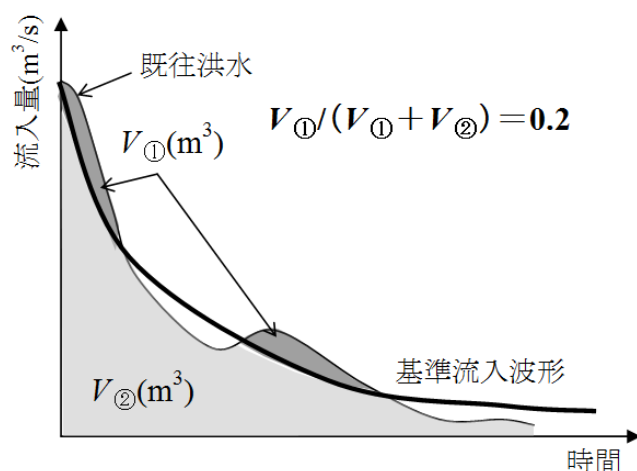


図-5.4.8 b の設定方法概念図¹⁾

表-5.4.2 貯留量と基準流入波形低減率¹⁾

	6割	5割	4割	3割	2割	1割
b値	1.446	1.336	1.261	1.202	1.155	1.112

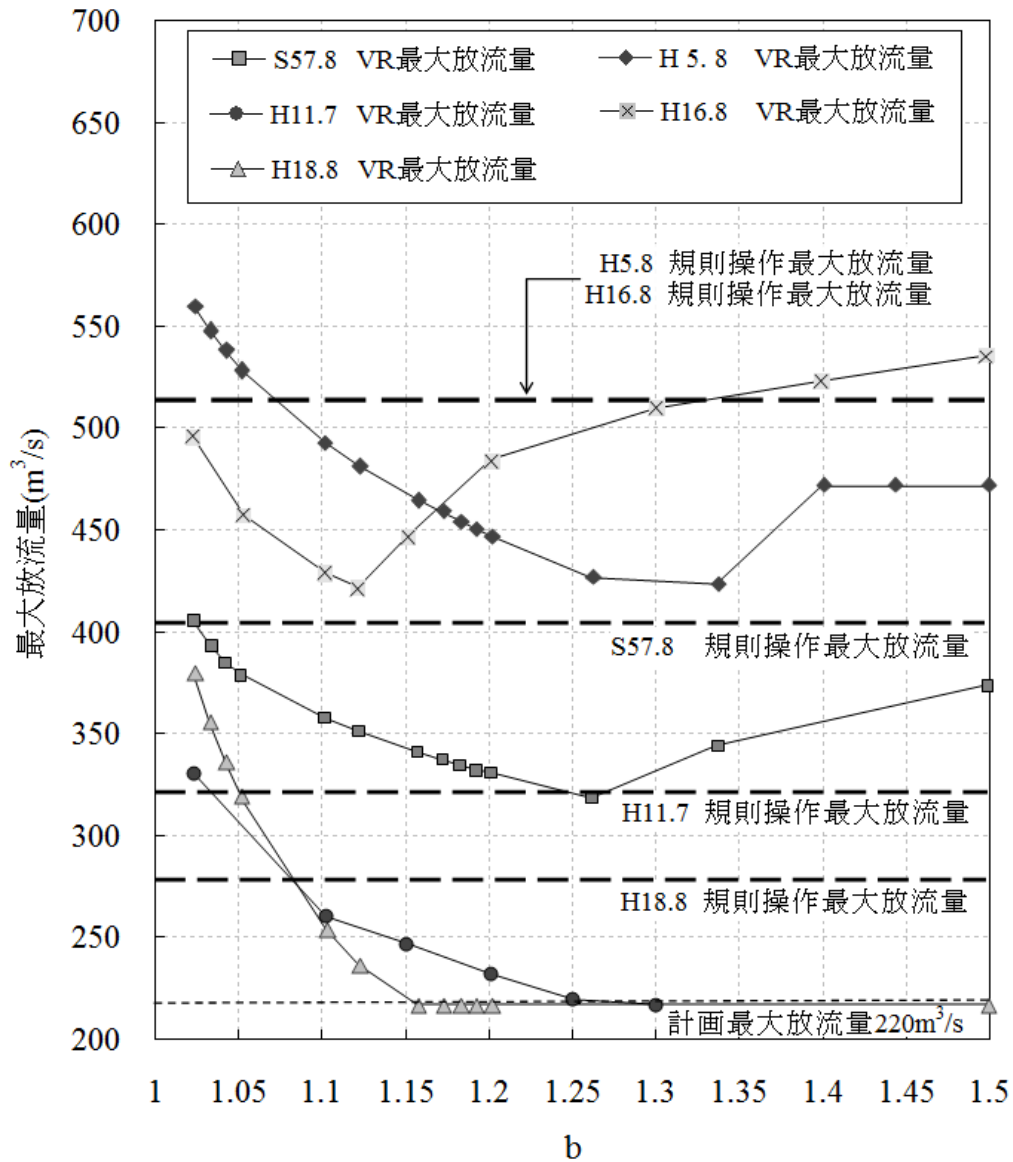


図-5.4.9 基準流入波形と VR 方式による最大放流量の関係¹⁾

5.4.3 VR 方式移行時期の適切な判断

本研究においては、VR 方式への移行時期について、流入量のピーク時としたが、実際の洪水調節時には、流入量のピークは、洪水が終了した後でないと正確には判断できない。また、計画最大放流量を上回る放流量を放流する際には、警報、通知、巡視を実施する時間を確保する必要がある、これらの時間を考慮した実操作の実施方法について、例えば、第3章で述べた WRF による洪水予測と適切な流出解析を組み合わせ、流入量と洪水ピーク発生時刻を予測する手法などを含めて、今後検討が必要である。

流入量がピークに達する前に、治水容量が流水で満水してしまい、本研究で採用する手法では、VR 方式が適用できないケースも祝子ダム 2 洪水で見られた。今後は、2 山以上の洪水などの洪水波形についての適用性も合わせて検証する必要がある。

5.5 まとめ

本章では、異常洪水発生時の下流被害軽減を目的として、VR方式の適用性について、実洪水を用いて検証を行うとともに、その特性を分析し、合理的な適用手法の検討を実施した。その結果として得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 長大な降雨による洪水、ピーク流量までの流入量が大規模な洪水等特殊な洪水を除いて、VR方式の適用により、ダム空容量をほぼ全て使い切るとともに、最大放流量を低減して下流被害を軽減することが可能である。
- (2) 長大な降雨による洪水にあつては、VR方式を適用しても、いずれは放流量＝流入量となり、最大放流量を低減することは不可能である。また、ピーク流量までの流入量が大規模な洪水にあつては、流入量がピークに達する前にダム空容量を使い切ってしまう、VR方式の適用は困難である。
- (3) 超過洪水が未発生なダムにあつては、既往洪水を引き伸ばすことにより、検証を行うこととなるが、引き伸ばし洪水の降雨量の生起可能性を加味しつつ、超過洪水の設定方法について引き続き検討する必要がある。
- (4) VR方式の適用はダム毎に特性が異なるものの、洪水ピーク時にダム貯水率が治水容量の70～90%の範囲にある場合に効果を発揮し、操作規則において定める但し書き操作による場合よりも、最大放流量を低減することができる。ダム貯水率が80～95%以上の場合、すなわち、空容量が極めて小さい場合にVR方式を適用することは、かえって最大放流量の増大を招く場合も見られ、リスクが大きい。
- (5) 洪水流入波形の関数のパラメータ b については、既往超過洪水から妥当な値を求めることが必要である。今回試算を行った祝子ダムにあつては、基準流入波形を上回る部分の洪水量の割合が20%となるよう設定することにより、概ね妥当な値が得られる。
- (6) 実際のダム操作にあつては、洪水のピーク発生時刻を推定するとともに、警報、通知等の時間を確保してVR方式移行時期を決定する必要がある、これらの判定方法について、今後詳細な検討が必要である。
- (7) 昨今の情報処理技術の進歩に鑑みれば、洪水時に分布型モデル等の流出解析を迅速に行うことにより、さらに精度の高い洪水流入波形の臨機応変な設定が可能であり、VR方式適用のさらなる改良の可能性が期待される。

参考文献

- 1) (財)ダム技術センター、多目的ダムの建設第7巻管理編、pp.76-77、2005.
- 2) (財)ダム水源地環境整備センター、ダムの管理例規集、pp.203-210、2006.
- 3) (財)日本ダム協会、ダム便覧、平成16年新潟・福島豪雨とダムの役割、2004.
- 4) 今井 徹、平成18年7月の川内川豪雨における鶴田ダムの操作について

(社)九州地方計画協会、九州技報第41号、2007.

- 5) 裏戸 勉、洪水時のダム操作について、ダム技術 No.86、pp.4-12、1993.
- 6) 裏戸 勉、異常洪水時のダム操作手法について、ダム工学会第10回研究発表会講演集、pp.40-42、1999.
- 7) 裏戸 勉、ダムによる洪水調節方法の合理化について、松江高専研究紀要第36号、PP.37-44、2001.2
- 8) 裏戸 勉、異常洪水に適応する洪水調節の手法について、リザーバー2006.3、PP.11-13、2006.3
- 9) 竹下清他、異常洪水に対する洪水調節方式の改善に関する検討、ダム水源地環境技術研究所所報 pp.50-56、2006.
- 10) 松浦 旬、宮内茂行、流入量の逡減予測を用いた洪水調節方法の検討、平成19年度水資源機構技術研究発表会発表論文、2007.
- 11) 三石真也、角哲也、尾関敏久、松木浩志、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 Vol.20 No.2、pp.105-115、2010.6
- 12) 松浦 旬、宮内 茂行、流入量の逡減予測を用いた洪水調節方法の検討、平成19年度水資源機構技術研究発表会発表論文、2007.
- 13) 裏戸 勉、異常洪水時のダム操作手法とその運用について、土木学会中国支部第52回研究発表会発表概要集、pp.117-118、2000.

第6章 結論

本論文は、新規ダムの積極的な建設が困難な情勢にある中、今後、地球温暖化に伴う気候変動等により、極端現象が顕在化する恐れが強いことや近年、全国各地で激甚な水害が頻発していることを踏まえ、超過洪水等の洪水の発生に対して、合理的かつ効果的なダム操作手法を提案することにより、流域の治水安全度の向上を目指したものである。

もとより、流域の治水整備を行う上で、新規ダムの建設は多くの水系における治水施設整備の根幹をなすものであり、計画的に整備を行っていく必要があることは言うまでもないが、現在、なおその整備水準が高くはなく、今後ダム、堤防等の整備に時間を要することを考え合わせれば、現在有するダム等のストックを有効に活用する手法を検討することは、重要な課題である。

以上の状況を背景に、本論文では、近年、技術革新の著しい全球モデルによる解析技術に基づいた気候モデル、とりわけメソスケール気象モデルとして、米国において現業、研究用に開発され、公開されている WRF (Weather Research and Forecasting Model) を基に降雨予測を行った。そして、地中保水能を考慮しつつ、ダム流入量の予測を簡便に実施して、ダム空き容量と比較することにより、最適な放流操作を行って、下流域の被害を最小化することを提案した。

さらに、この方式の短所であるすり付け操作時の下流河道水位上昇速度の超過や治水容量内における操作規則で規定された流量以上の流水の貯留、いわゆる過貯留、超過洪水発生時にあって空き容量が少なくなった状況下において散見される放流量の増大を補完すべく、今村¹⁾により提唱されている水位放流方式によるすり付け操作、裏戸²⁾、³⁾によって提唱されている VR 方式による但し書き操作を付加的に用いることを試みた。具体的には、これら3つの手法の適用性について、国土交通省、(独)水資源機構、県管理の延べ27ダムを対象にそれぞれの解析に適した過去の大小さまざまな洪水の事例を基にシミュレーションを行い、その有効性を確認するとともに、改良策を考案した。以下に各章毎に簡単に取りまとめる。

第2章においては、国土交通省、(独)水資源機構管理ダムにおける管理所を対象にダム管理に関して顕在化している問題点の聞き取りを国土交通省河川環境課が行った結果について取りまとめた。治水、利水、環境面でさまざまな課題が浮き彫りになったが、このうち、治水については、但し書き操作に伴う下流被害の発生や放流の遅れ操作の発生、事前放流、予備放流、後期放流が必ずしも円滑に、もしくは十分に実施できていないこと、治水容量が洪水時に十分には活用されていないことなどが上げられた。これらの課題は、現在、気象庁による降雨予測が配信されているものの、未だその精度が信頼性に十分ではないため、洪水を迎えるにあたって、ダム管理者がその高精度なハイ

ドログラフを事前に把握できないことに主に起因している。このため、ダム流入量の実績に応じた定型的な操作、いわゆる「固定ルール調節方式」を採用せざるを得ない状況にあるが、WRF による降雨予測の信頼性が相当程度向上してきている現在、降雨予測と地中保水能の算定による損失雨量の算出、分布型流出モデルの適用と相まって、ハイドログラフの予測が相当の精度で可能となってきた。

さらに、現在採用されている一定率一定量調節方式に代わる合理的かつ効果的なダム洪水調節手法について、過去に研究者によって提案された文献を取りまとめた。水位放流方式や VR 方式の適用性の検証については、大谷ら⁴⁾、松浦ら⁵⁾によって試みられたが、検証の洪水事例が少ないことなどから、実際のダム管理に導入するには時期尚早と考えられた。山田ら⁶⁾は、気象庁の降雨予測や洪水到達時間内降雨を含め、相当の精度で把握可能なダムへの流入量について、これを事前に放流し、治水安全度を向上させる手法を提案している。この手法は、リスクが小さく実践的ではあるものの、ストックの実力を十分に発揮させる観点からは、前述したダム管理所から指摘された課題に十分には応えていない。このほか、小尻ら⁷⁾他は、ファジィ理論やニューラルネットワークなどの数学的理論を用いた操作支援システムの構築を図っているが、これまでに経験していない異常な規模又は波形の洪水への対応の安定性を解明することが現場への導入にあたっては必要となろう。

このほか、WRF の開発と改良の歴史について概説し、同化技術や GPS^{えんべい}掩蔽法による技術革新などについて触れた。また、ダム流入量を推定するにあたって重要となる流出解析手法について、近年、盛んに導入されている分布型流出モデルの開発状況についても説明した。

第3章においては、WRF による降雨予測の設定手法について検討を行った。実績降雨量に対する WRF の予測降雨量の誤差については、未だそれを明らかにした研究が存在しないことから、気象予測データの利用可能性に関する研究⁸⁾において示された気象庁の予測降雨量の上限誤差及び下限誤差を援用して予測降雨を設定した。さらに、吉野川流出解析検討⁹⁾を参考に、地中保水能やその回復について規定し、降雨損失とダム流入量を簡便に予測する手法を提案した。

次に得られた予測ダム流入量と空き容量を比較して、その大小に応じて、事前放流や、無害流量、最大計画放流量あるいはこれを超える流量を放流し、下流域の水害を最小限に抑える洪水調節手法を考案した。特に事前放流にあつては、人工的に流量を増大させることから、須賀¹⁰⁾による人の河川内歩行特性に関する研究成果を参考に、放流にあたって留意すべき水深、流速に関する規定を設定した。

これらの手法を用いて、国土交通省、(独)水資源機構、県所管 12 ダム 69 洪水を対象にシミュレーションを実施したところ、激甚な水害であった矢作ダム H12.9 洪水のように $1,404\text{m}^3/\text{s}$ もの流量を低減し、洪水被害を抑えるケースがある一方、鶴田ダム

H18.7 洪水のように主に海上の水分量の把握が不十分なために、WRF による降雨予測が過小であり、結果的に操作実績よりも改悪となってしまう例も発生した。しかし、全般的には、WRF の降雨予測量をそのまま使用したケースにあっては、69 洪水のうち、57 洪水において事前放流を実施するなどして無害流量のみの放流により被害を皆無に抑えることができしており、有用性は高い。但し、早明浦ダム H16.8 洪水のように洪水末期の降雨予測が鈍く、無害放流量以上の放流を強いられるケースや豊平峡ダム H12.5 洪水のように融雪による出水が予測できず、放流増を招いたダムも見られた。

これらの結果を踏まえて、改良策について、個々に検討を行った。WRF による降雨予測誤差の縮小は、本研究の重要なポイントである。WRF による解析の初期値、境界値を与える気象予測については、WRF による降雨予測の誤差の多くを支配するが、衛星を用いた GPS^{えんべい} 掩蔽観測により、相当程度精度向上が図られ、WRF による降雨予測についても良い結果となることが鶴田ダム H18.7 洪水の事例で把握できた。さらに、ここでは、今後の研究の礎とすべく、WRF 解析による予測降雨量と実績降雨量との誤差について、10 ダム 14 洪水の事例で算出したが、今後は米国によって開発された GFS や気象庁の GSM20 の利用も含めて、多くの豪雨に関する予測降雨の誤差のデータ取得に務めて、WRF による降雨予測の上限、下限誤差の回帰式の確立を図ることが求められる。このほか、融雪量の推定やダム容量の一定率を留保して洪水調節を行う手法を試みて、一定の効果があることを確認した。ここに、融雪量の推定式は未だ実測値に合わない部分も多く、その精度向上に関する研究が待たれる。また、治水、利水双方のリスクに配慮した放流方法選択手法について、4 つのケースに分けてその対応を明示するとともに、5 ダムの事例からリスク分析を行い、1 ダムを除いてメリットの方が大きいことを確認した。さらには、超過洪水発生時にあって許容される最大放流量の設定手法について、阿木川の例を基に数種類の提案を行ったほか、放流設備能力の小さなダムにおける設備改善効果も把握した。

第 4 章においては、迎洪水位が低い状態で洪水が襲来した場合に問題となるすり付け操作の円滑な実施について、ダム管理者を支援する手法を確立すべく、今村¹⁾ の提案した水位放流方式について、現場への適用を視野に 12 ダム 19 洪水を対象としてシミュレーションを行い、その有用性を確認するとともに問題点の解明と改良策の検討を行った。

すり付け操作において、問題となる治水容量内における過貯留については、低標高部における放流設備が不十分な早明浦ダムを除いてほぼ解消できた。早明浦ダムについても、実績操作に比べれば大幅に過貯留量を減少できた。一方、下流河道の水位上昇速度については、まちまちで、実績操作よりもかえって水位上昇速度を上げる結果となる洪水も 12 洪水（最大値で比較）発生した。すり付け操作開始時刻については、国土交通省所管ダムにあっては、ほとんどが実績操作においても早めの操作に入っていることが

確認されたが、県管理ダムなど4ダムにあっては、本方式で定める時刻の方が実績操作よりも1時間以上早いことが判明し、現場においてダム操作に携わる技術者に対して、限界流入量到達がすり付け操作開始時刻の到来を知らせる「アラーム」として有効であることが確認できた。

本方式の採用により、水位上昇速度が増大する点については、限界流入量や下流河道水位上昇速度の規制値を縮小することにより、10～50%程度の低減を行うことができた。この課題の完全な解決手法として、操作は煩雑になるものの、下流水位が河川利用者の存在する可能性のある1m以下までの期間について、操作規則を遵守し、その後は本方式の放流関数による手法を考案し、過貯留の解消と水位上昇速度の遵守という2つの課題の両立を実現した。このほか、放流関数のべき数を変化させる感度分析も試みた結果、今村が提案するべき数2には必ずしもこだわる必要もなく、早明浦ダムにあっては、むしろ2.5の方が適用性に優れていることを見いだした。現場への適用にあたっては、放流関数の適合性の確認はもちろんのこと、限界流入量到達時刻の把握について、警報、巡視に要する時間の確保も含めて検討が必要である。

第5章においては、超過洪水発生時において、適用される但し書き操作による下流氾濫被害の軽減を目指して、裏戸²⁾、³⁾が提案するVR方式の適用性について8ダム16洪水を用いて検証した。結果は、流入量がピークを迎える前に設計洪水位に到達する祝子ダム2洪水を除いて、VR方式の適用が可能であり、ダムの空き容量をほぼ使い切ることができた。また総雨量が極めて大きな長雨洪水や計画波形を用いた弥栄ダム、いわゆる「神様運転」を行った祝子ダムの3洪水を除いて、最大放流量の低減を図ることが可能であり、その平均は、約38%に達した。

VR方式が基準流入波形（VR曲線）を策定し、必要な貯水容量を推定して放流率を定めていることから、基準流入波形と異なる洪水が到達した場合や空き容量が少ない状態で洪水が流入した場合に最大放流量が増大する傾向があることを確認した。この短所を補正すべく、洪水ピーク時の貯水量の治水容量に対する比率をさまざまに変化させて祝子ダムに3洪水について検証したところ、貯水率が70～90%の場合について、最大放流量を低減させる効果があった。同様の分析を4ダムを対象として貯水率をさまざまに変化させて感度分析を行った結果、空き容量が治水容量の5～20%の状態でVR方式を適用することは、実績操作よりも最大放流量を増大させ、かえってリスクが大きいことがわかった。基準流入波形の式の中で流量の低減割合を支配するパラメータである b については、裏戸¹⁾は1.12を基本として検討していたが、祝子ダム5洪水を対象に b を変化させてシミュレーションを実施した結果、 b の値は、1.10～1.35の範囲内で設定することが適していることが把握できた。現場への適用にあたっては、VR方式を適用すべき貯水率や基準流入波形について、ダム毎に過去の洪水等を用いた詳細な検討を行うほか、特に洪水ピークの把握について、警報、巡視に必要な時間の確保を含めて今後検討する必要がある。

第3章に記述した WRF による降雨予測を軸とした洪水調節手法にあっては、洪水初期のすり付け操作、洪水ピーク時から末期にかけて、ダム空き容量が小さくなった状態で超過洪水が発生した際の但し書き操作移行について、課題が見いだされたが、以上、第4章、第5章の検討により、水位放流方式、VR 方式を補完的に活用することにより、その課題を相当程度克服することが可能となった。3つの手法を組み合わせた合理的なダム洪水調節手法のフローは、図-6.1に示すとおりである。

今後は、WRF による降雨予測の誤差の精度向上を早期に行うとともに、その他の諸課題を解決することにより、これら3手法の現場への導入を図り、重要な社会資本であるダムをより効率的かつ効果的に運用し、超過洪水を始めとする水害に的確に対処することが期待される。

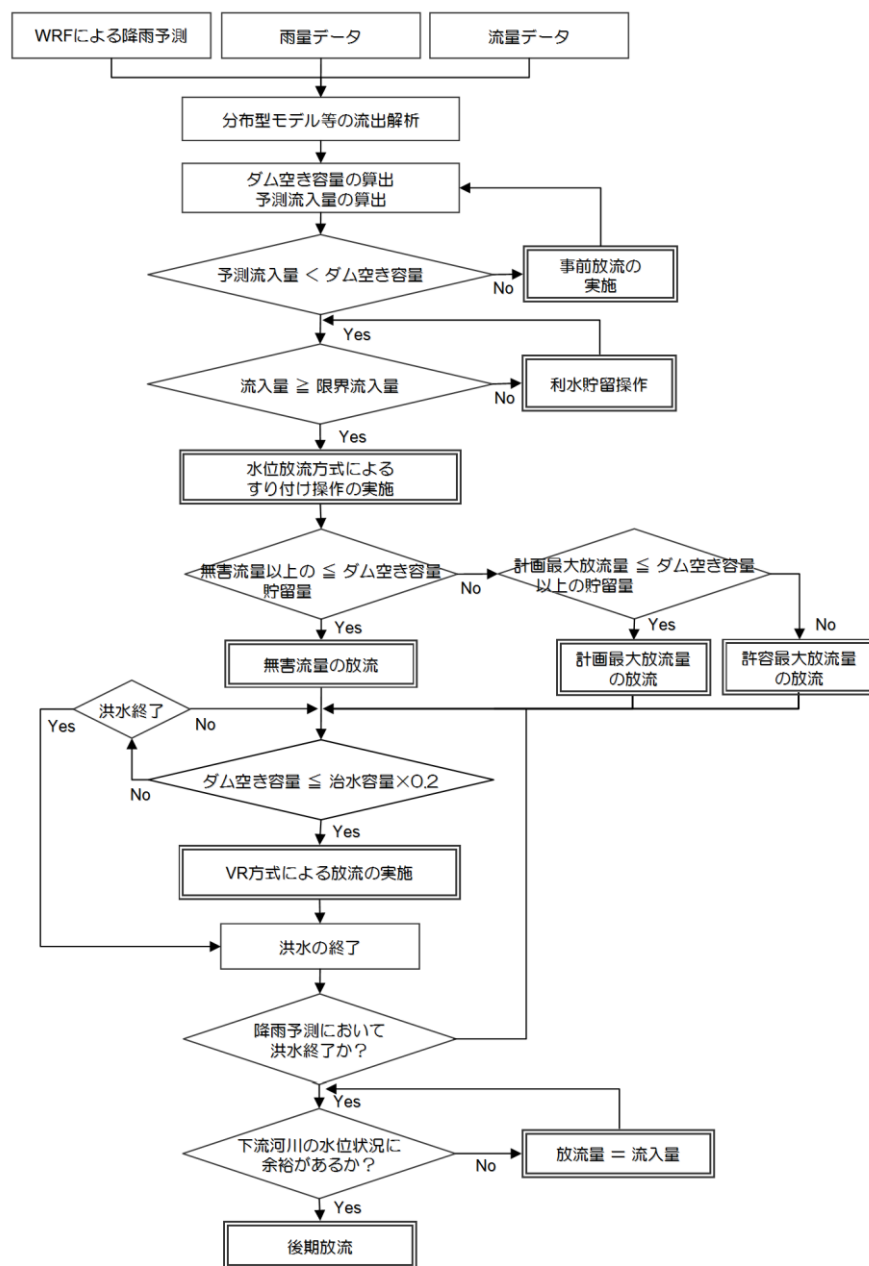


図-6.1 3手法を活用した新たな洪水調節手法

参考文献

- 1) 今村瑞穂、ダム貯水池における洪水調節の工学的特性の分析と改善に関する研究、九州大学博士論文、1998.
- 2) 裏戸 勉、洪水時のダム操作について、ダム技術 No.86 pp.4-12、1993.
- 3) 裏戸 勉、異常洪水時のダム操作手法について、ダム工学会第 10 回研究発表会講演集、pp.40-42、1999.
- 4) 大谷知樹、一ノ瀬泰彦、竜澤宏昌、水位放流方式に基づく低貯水位条件下でのダム放流操作シミュレーション、第 15 回水資源機構関東ブロック技術研究発表会、2003.
- 5) 松浦 旬、宮内茂行、流入量の逡減予測を用いた洪水調節方法の検討、平成 19 年度水資源機構技術研究発表会発表論文、2007.
- 6) 北田悠星、菊地 慶、岡部真人、山田 正、降水短時間予報を用いた新しいダム放流手法の効果検証、土木学会第 64 回年次学術講演会、PP.317-318、2009.9
- 7) 小尻利治、池淵周一、十合貴弘、ファジィ制御によるダム貯水池の実時間操作に関する研究、京都大学防災研究所年報、第 30 号、B-2 PP.323-339、1987.
- 8) 国土技術政策総合研究所、気象予測データの利用可能性に関する研究、国総研資料第 329 号、2006.
- 9) 日本建設コンサルタント、吉野川流出解析検討業務委託報告書、2001.
- 10) 須賀堯三他、水害時の安全避難行動（水中歩行）に関する検討、水工学論文集 第 39 巻、pp.829-832、1995.
- 11) 裏戸 勉、異常洪水時のダム操作手法とその運用について、土木学会中国支部第 52 回研究発表会発表概要集、pp.117-118、2000.

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、その機会を与えていただき、熱心かつ的確な御指導を賜った京都大学教授 角 哲也先生に深く感謝いたします。また、論文草稿に目を通していただき、貴重な御指導を賜った京都大学教授 堀 智晴先生、京都大学准教授 立川 康人先生に感謝の意を表します。

本論文は、国土交通省国土技術政策総合研究所における研究成果をまとめたものです。本研究の実施にあたり、自由な研究の場である河川研究部において共同で研究に携わった尾関敏久研究官ほか研究部の皆様方に御礼申し上げます。また、本論文をとりまとめるにあたり御協力いただいた（財）ダム水源地環境整備センターの松木浩志主任研究員、VR方式の理論、特性について、詳細に御教授いただいた松江高専名誉教授裏戸 勉先生に感謝いたします。

最後になりましたが、解析に必要な現場のデータを提供いただいた国土交通本省河川環境課流水管理室、地方整備局、北海道開発局、（独）水資源機構、県土木部の職員の方々にも感謝申し上げます。