

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

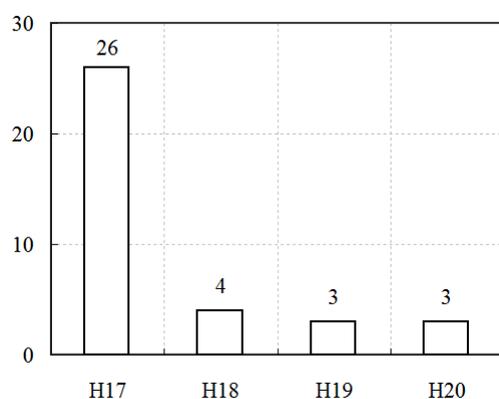


図-3.1.1 事前放流の実施ダム数⁸⁾

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⁹⁾。

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¹⁰⁾。

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

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

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

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)

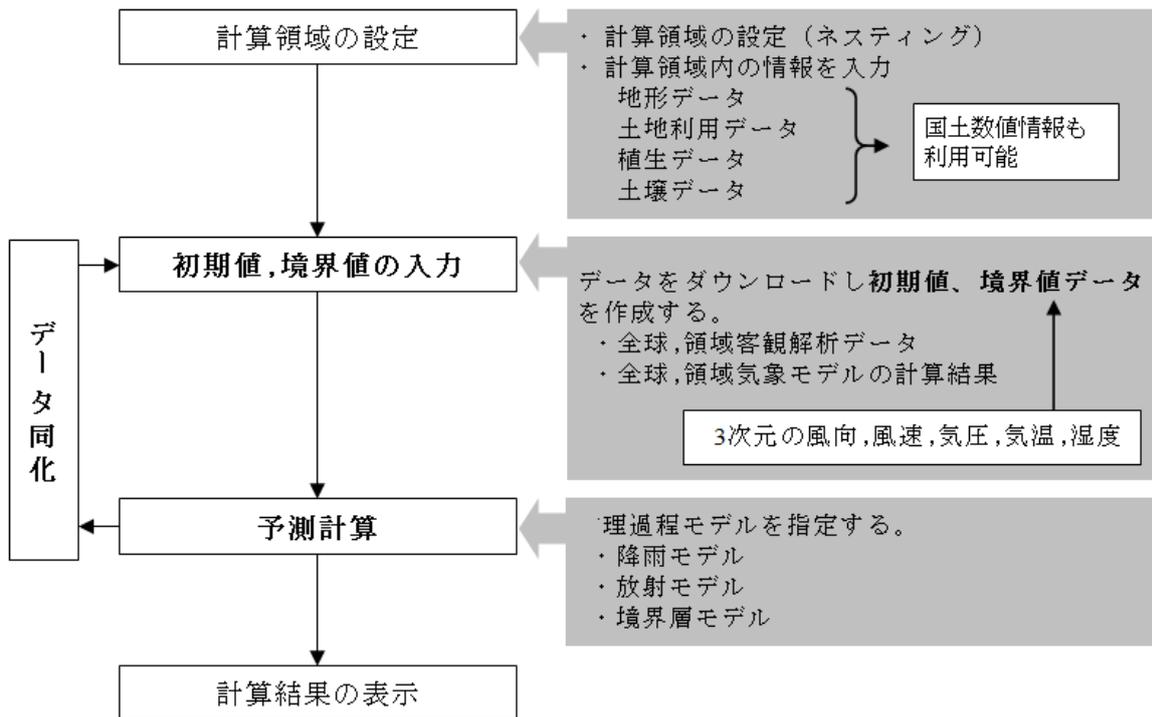


図-3.3.1 WRF の計算フロー⁸⁾

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。

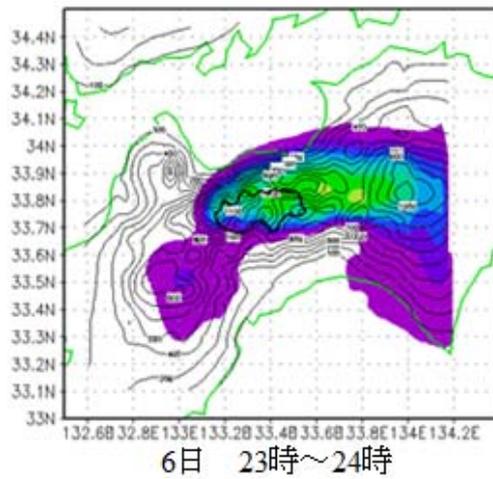
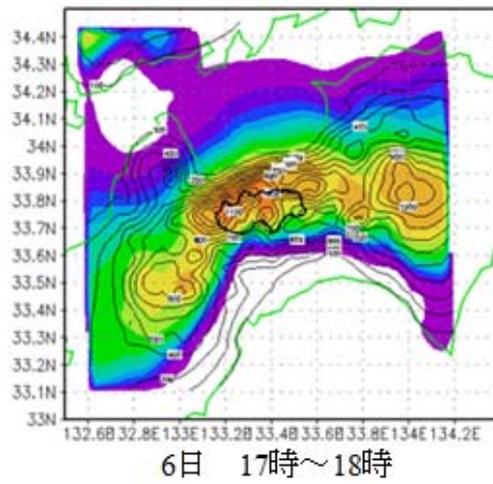
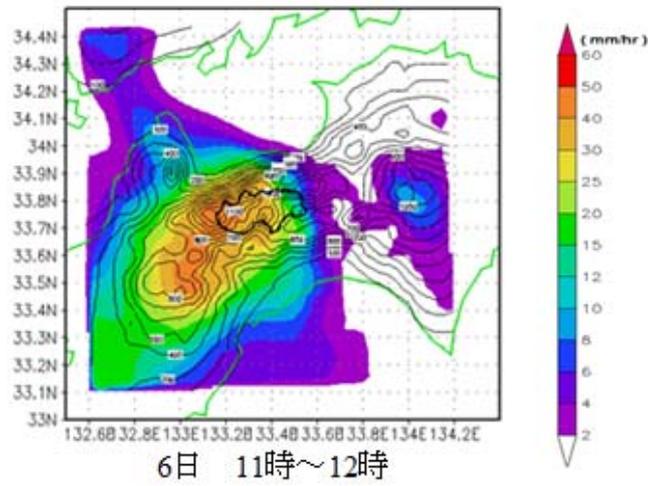


図-3.3.2 WRFによる1時間雨量分布図⁸⁾
 (早明浦ダム流域 2005年9月6日21時を初期値とする)

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。

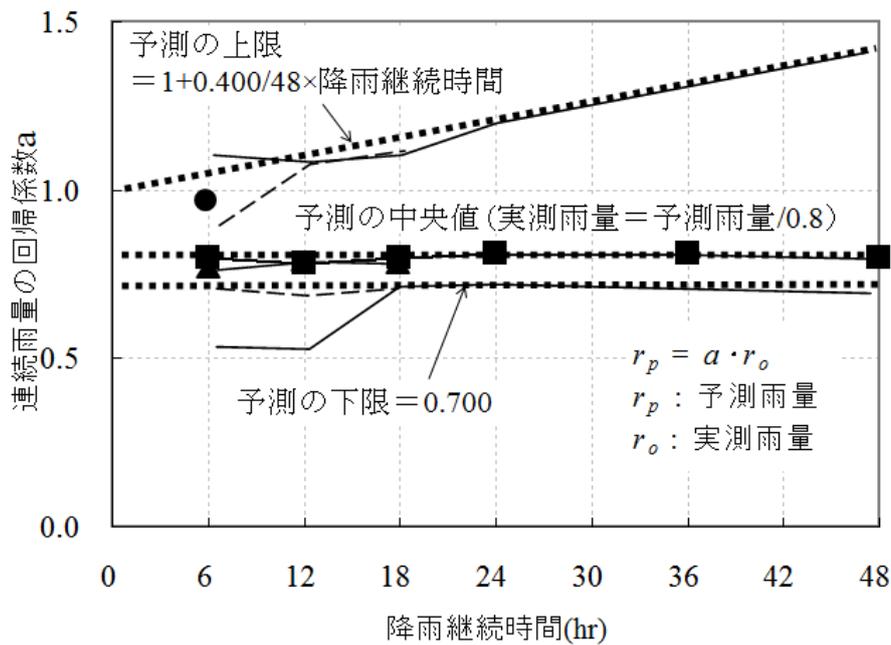


図-3.3.3 降雨継続時間と予測降雨量/実績降雨量の関係¹¹⁾

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^{8)、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⁸⁾

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

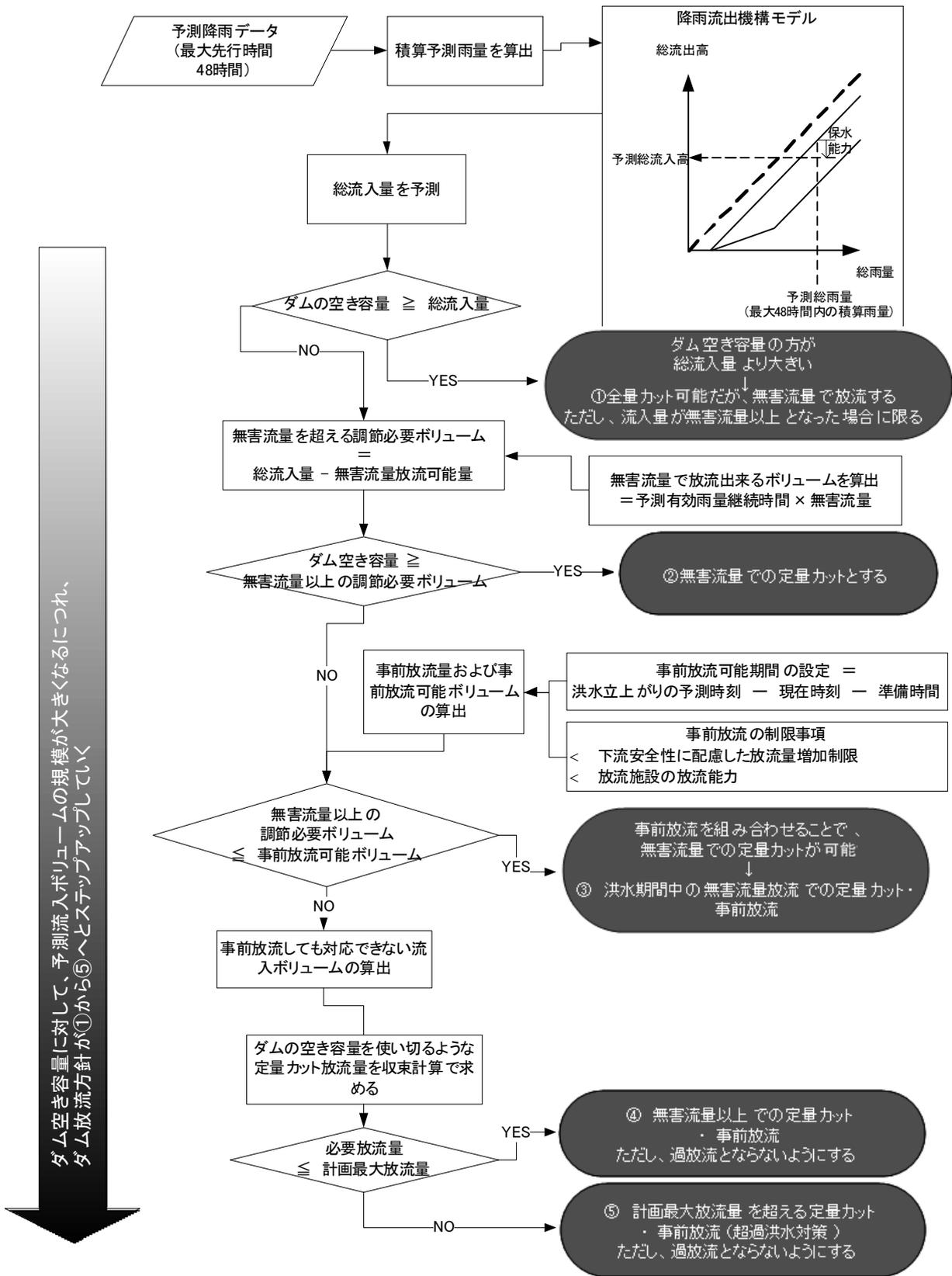


図-3.4.1 洪水調節手法のフロー図⁸⁾

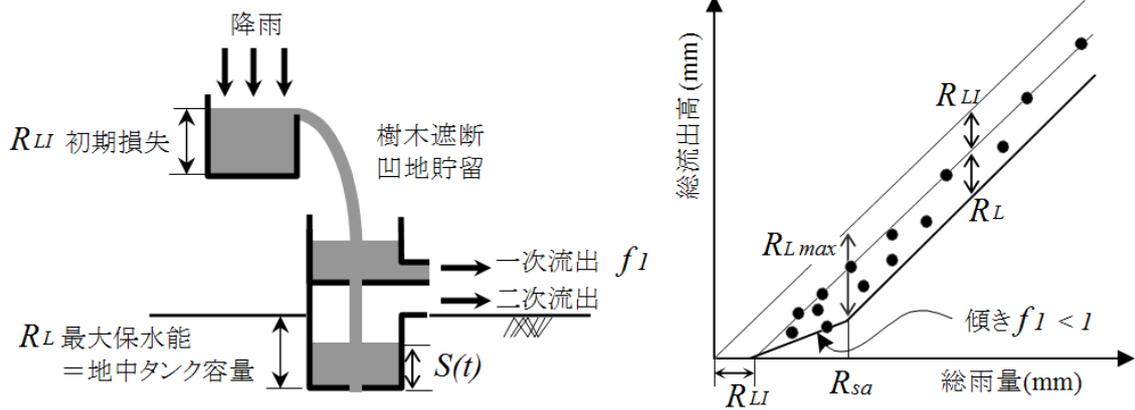


図-3.4.2 降雨流出機構と総流出高⁸⁾

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

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[m^3/s]

A ：流量観測地点に対応する集水域面積[km^2]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。

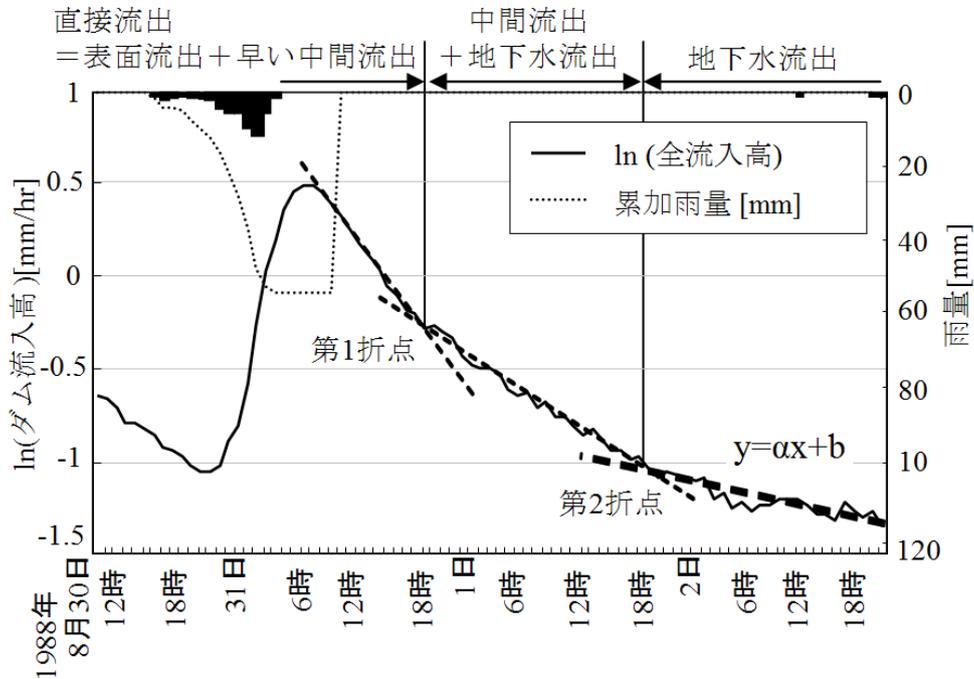
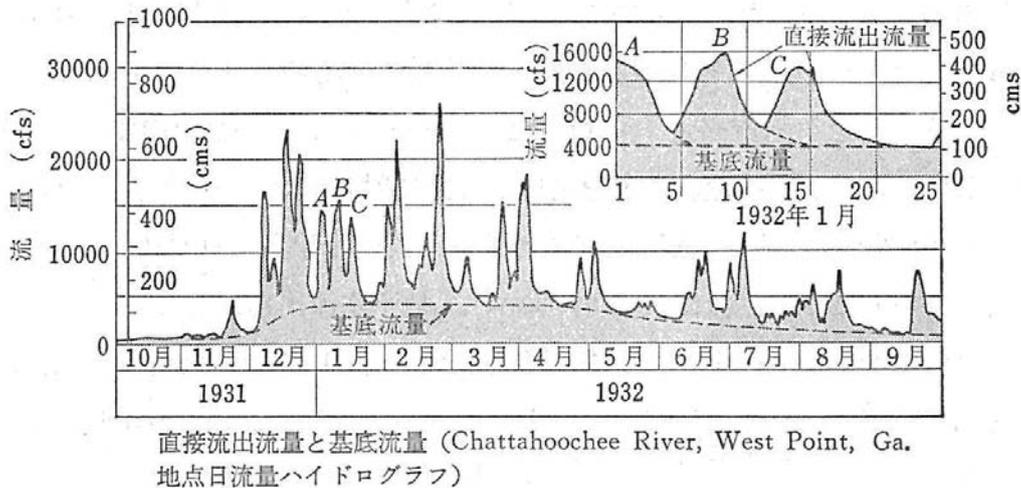


図-3.4.3 低減係数の算定⁸⁾

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¹⁵⁾

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

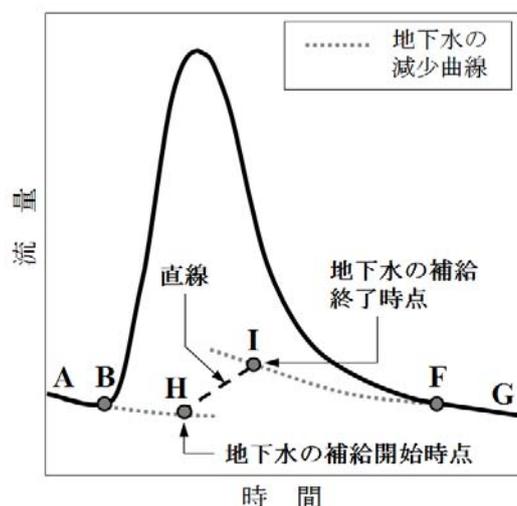


図-3.4.5 地下水低減曲線を延伸する方法¹⁵⁾

(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。

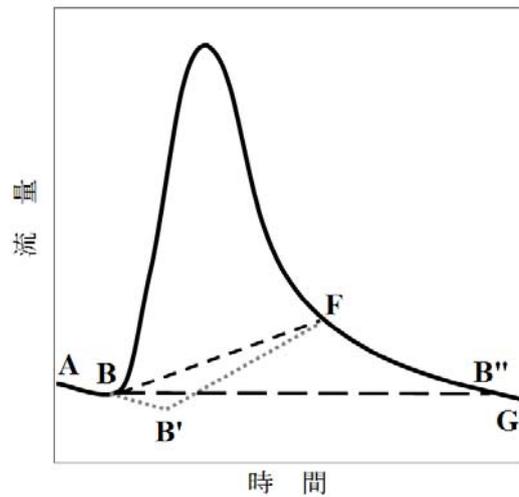
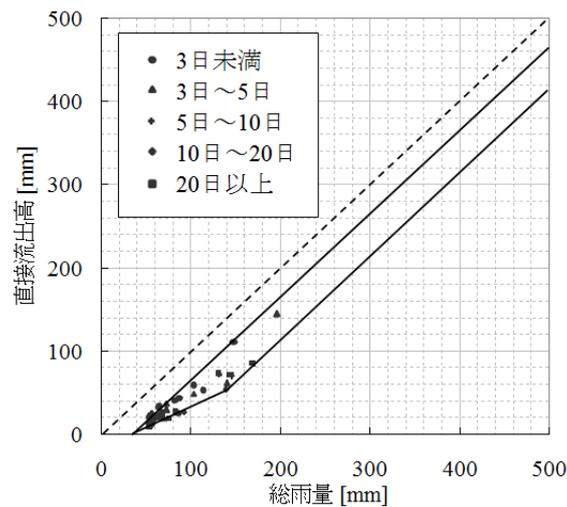


図-3.4.6 比較的簡易な方法¹⁵⁾



初期損失雨量 (R_{L1})	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）⁸⁾

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⁸⁾）。

(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、無降雨の状態でも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。

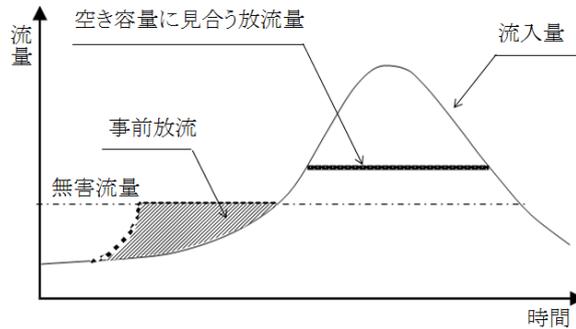


図-3.4.8 事前放流に加えて無害流量を超える定量放流を実施するケース⁸⁾

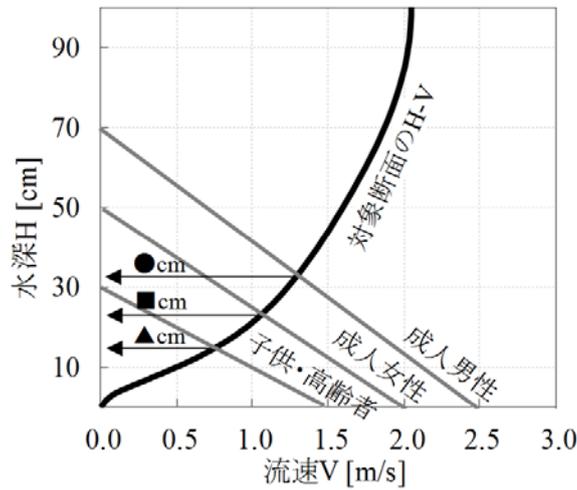


図-3.4.9 安全な避難を考慮した水深と流速の関係⁸⁾

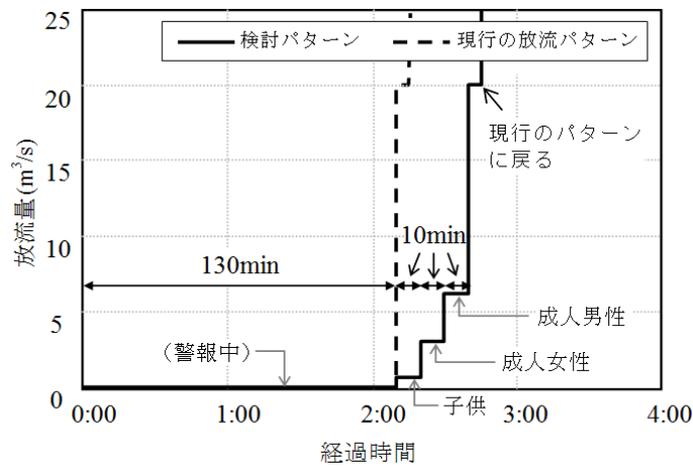


図-3.4.10 安全性を考慮した放流パターン (川俣ダム)⁸⁾

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⁸⁾、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)

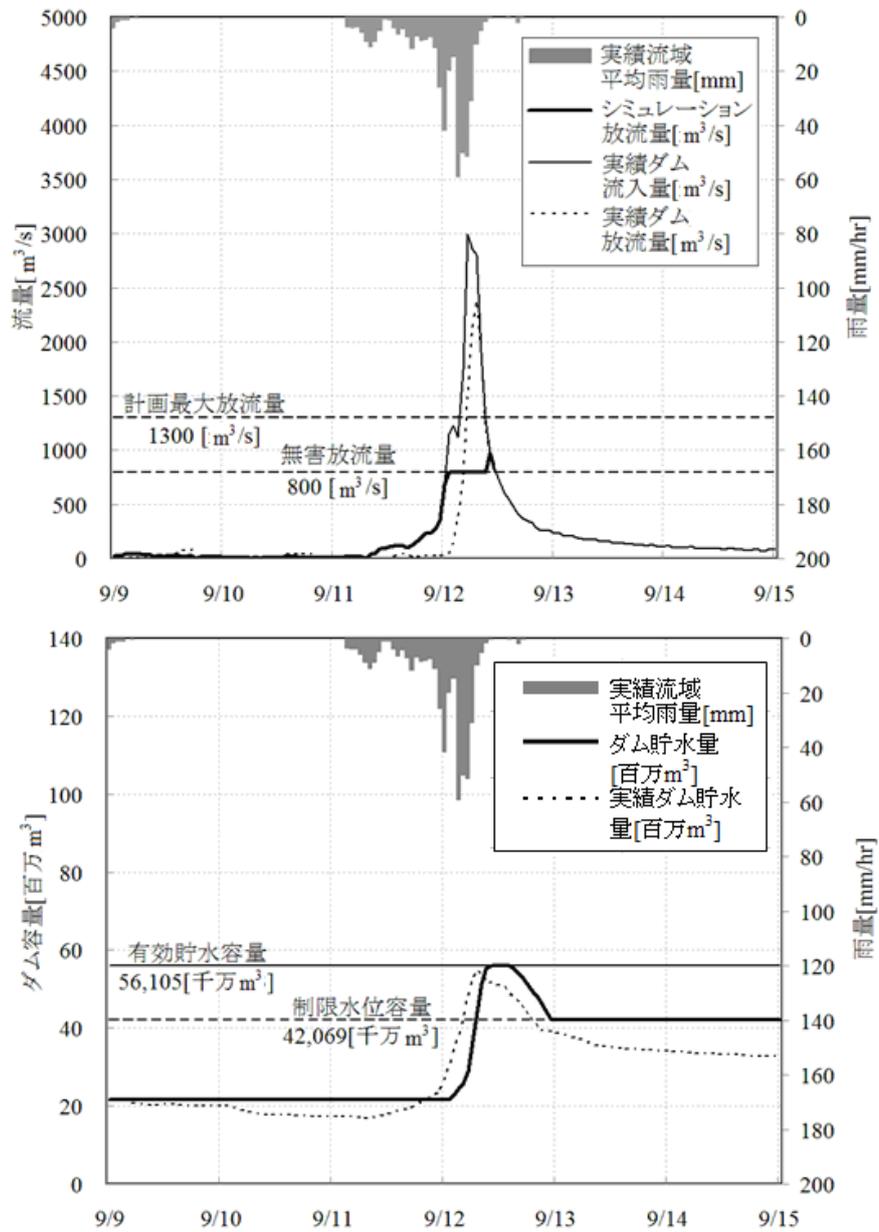


図-3.4.1.1 矢作ダム H12年9月洪水 シミュレーション結果⁸⁾

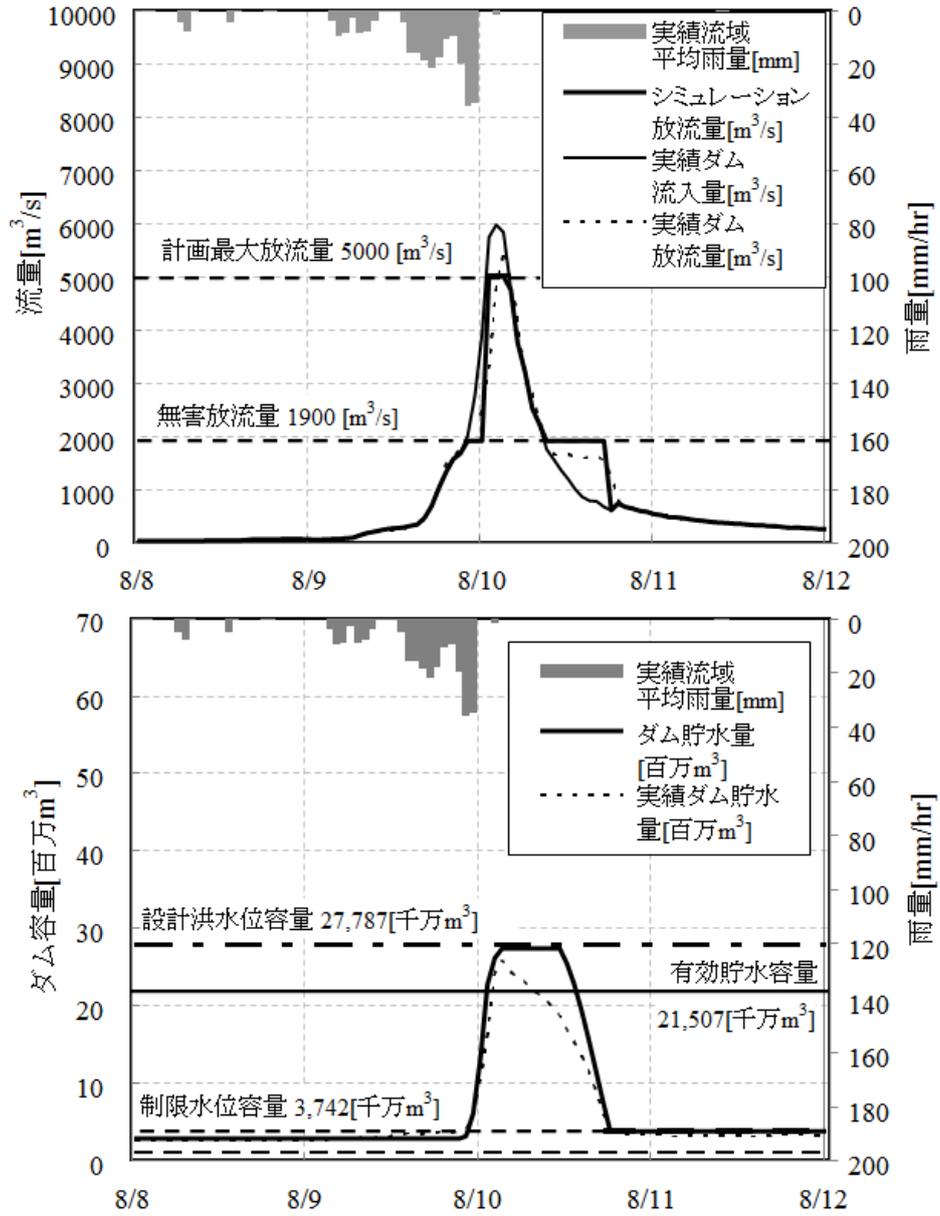


図-3.4.1.2 二風谷ダム H15年8月洪水 シミュレーション結果^{1,2)}

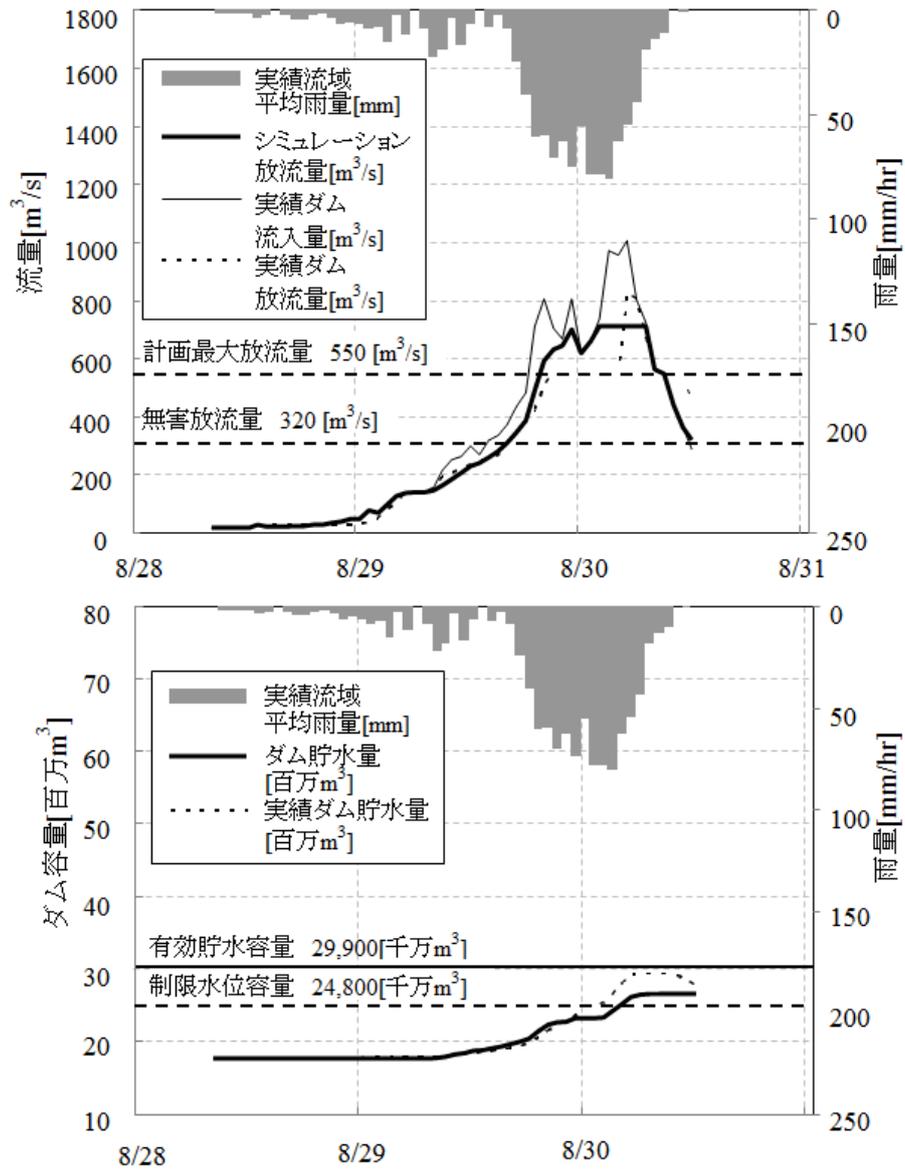


図-3.4.1.3 渡川ダム H16年8月洪水シミュレーション結果

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。

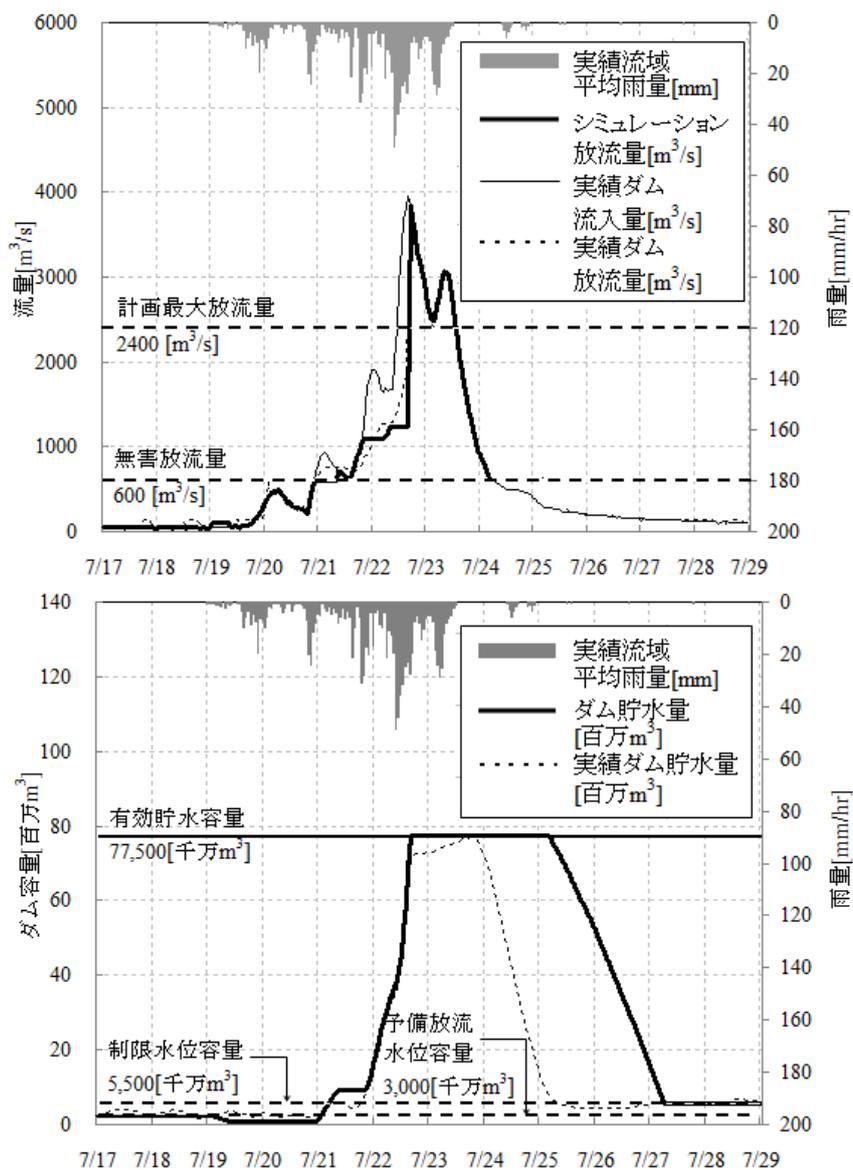


図-3.4.1 4 鶴田ダム H18年7月洪水 シミュレーション結果⁸⁾

- (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⁸⁾

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。

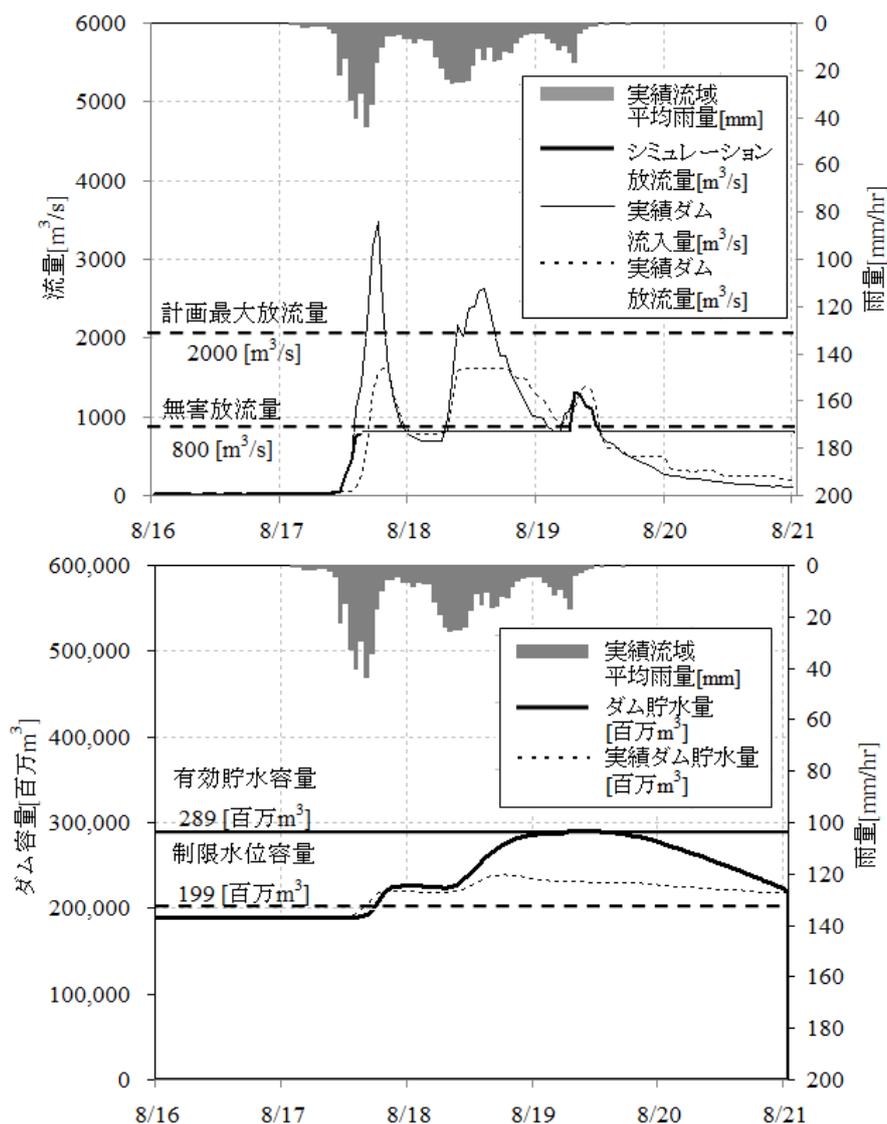


図-3.4.15 早明浦ダム H16 年 8 月洪水 シミュレーション結果⁸⁾

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。

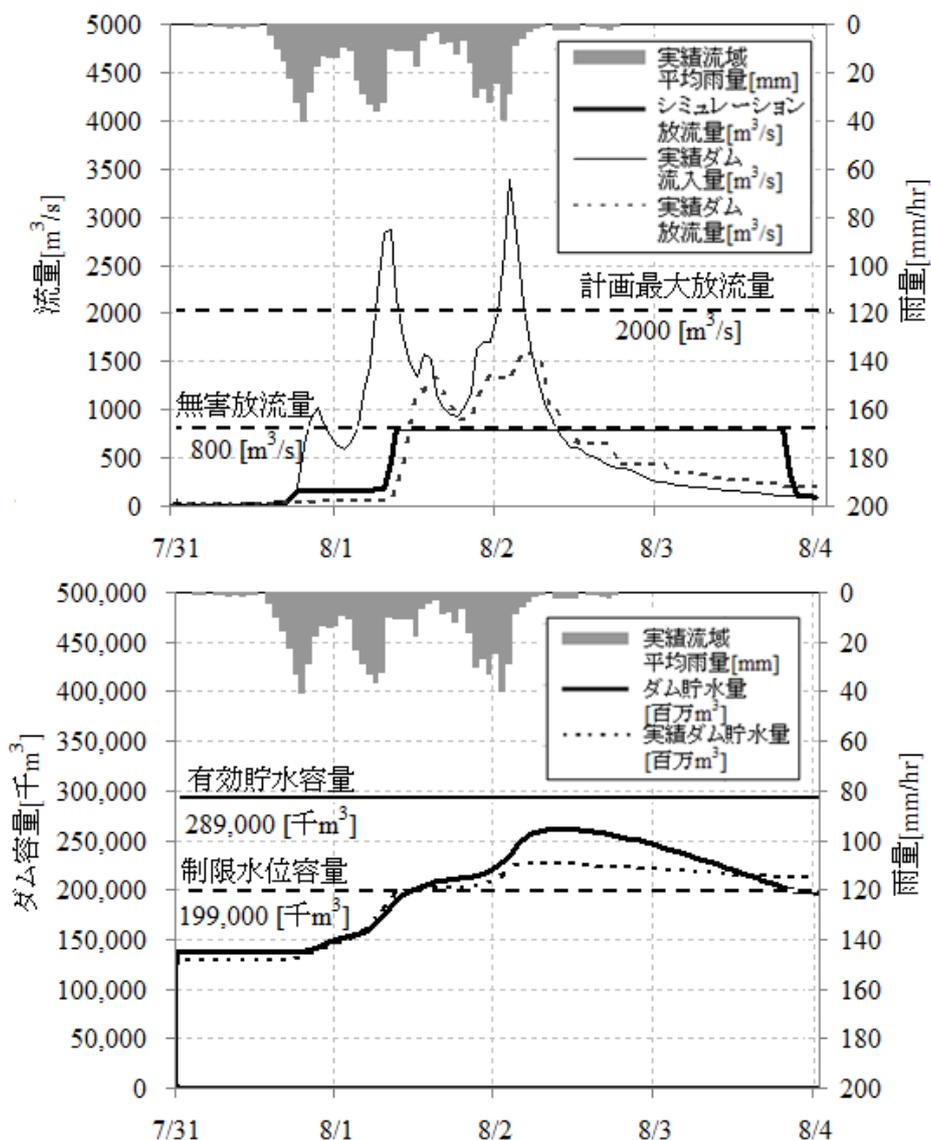


図-3.4.16 早明浦ダム H16年7月洪水 シミュレーション結果

- (4) 四十四田ダム H16.9 洪水（図-3.4.1 7 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。

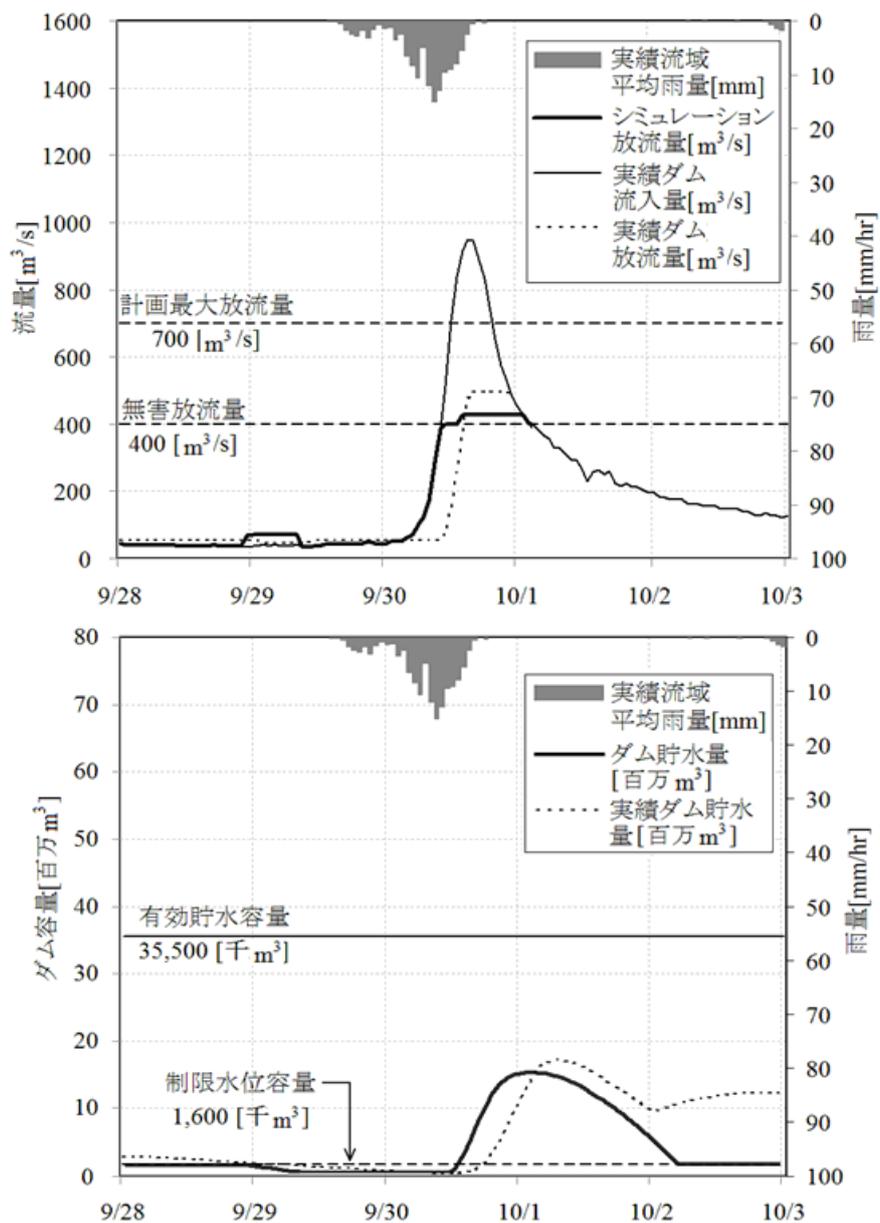


図-3.4.1 7 四十四田ダム H16年 9月洪水 シミュレーション結果⁸⁾

- (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。

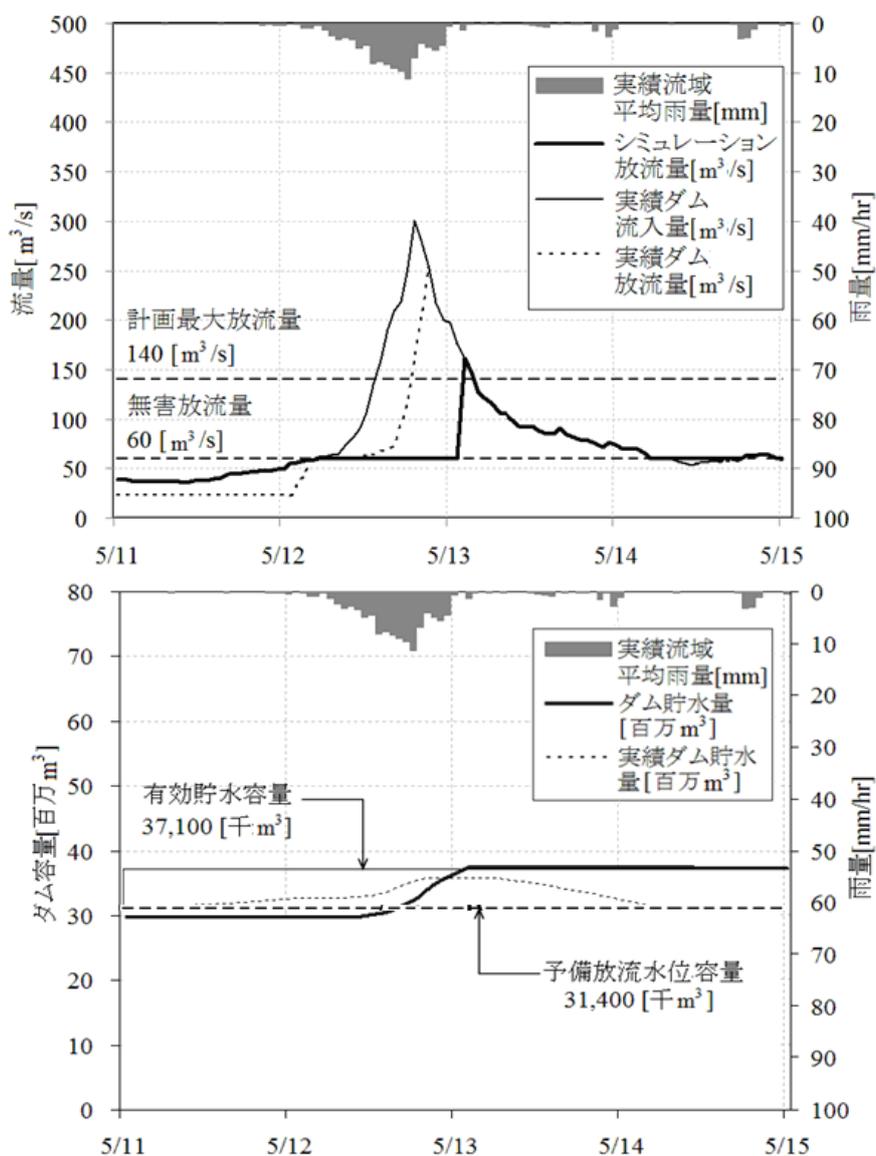


図-3.4.18 豊平峡ダム H12 年 5 月洪水 シミュレーション結果⁸⁾

(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。

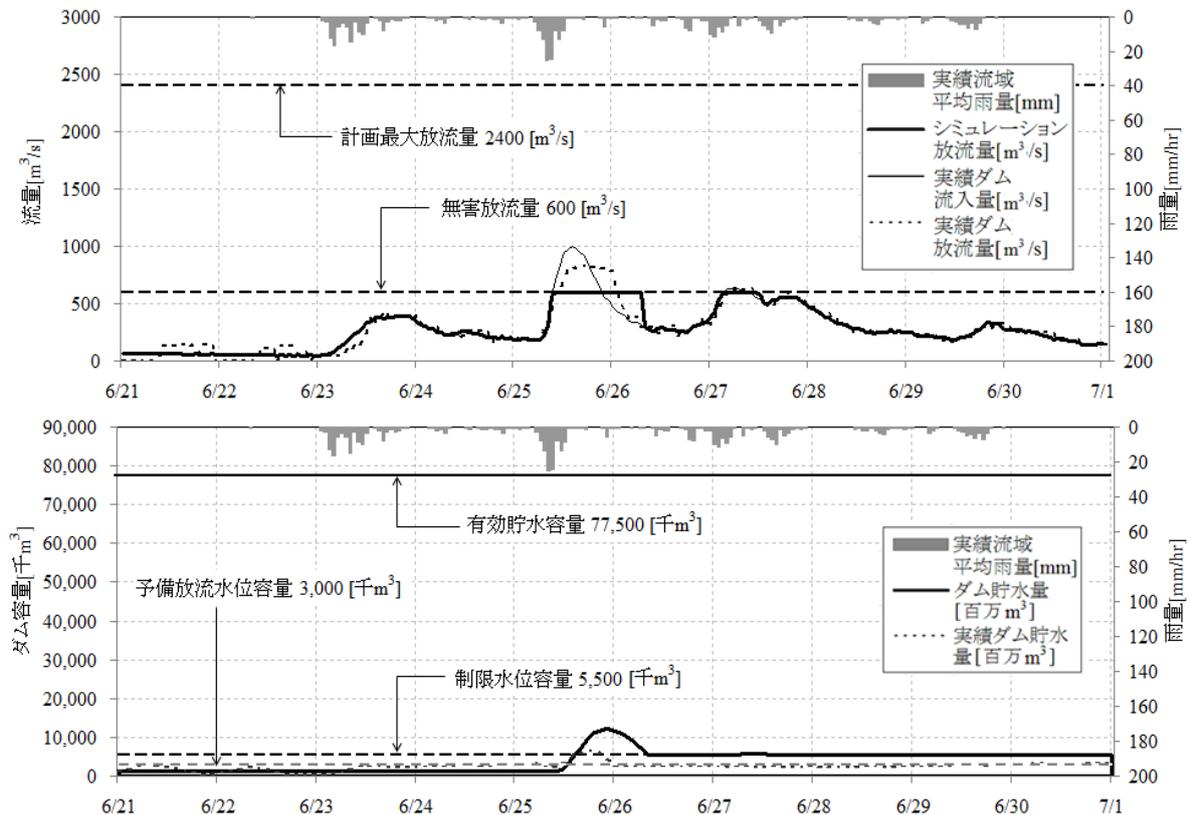


図-3.4.19 鶴田ダム H11 年 6 月洪水 シミュレーション結果

- (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。

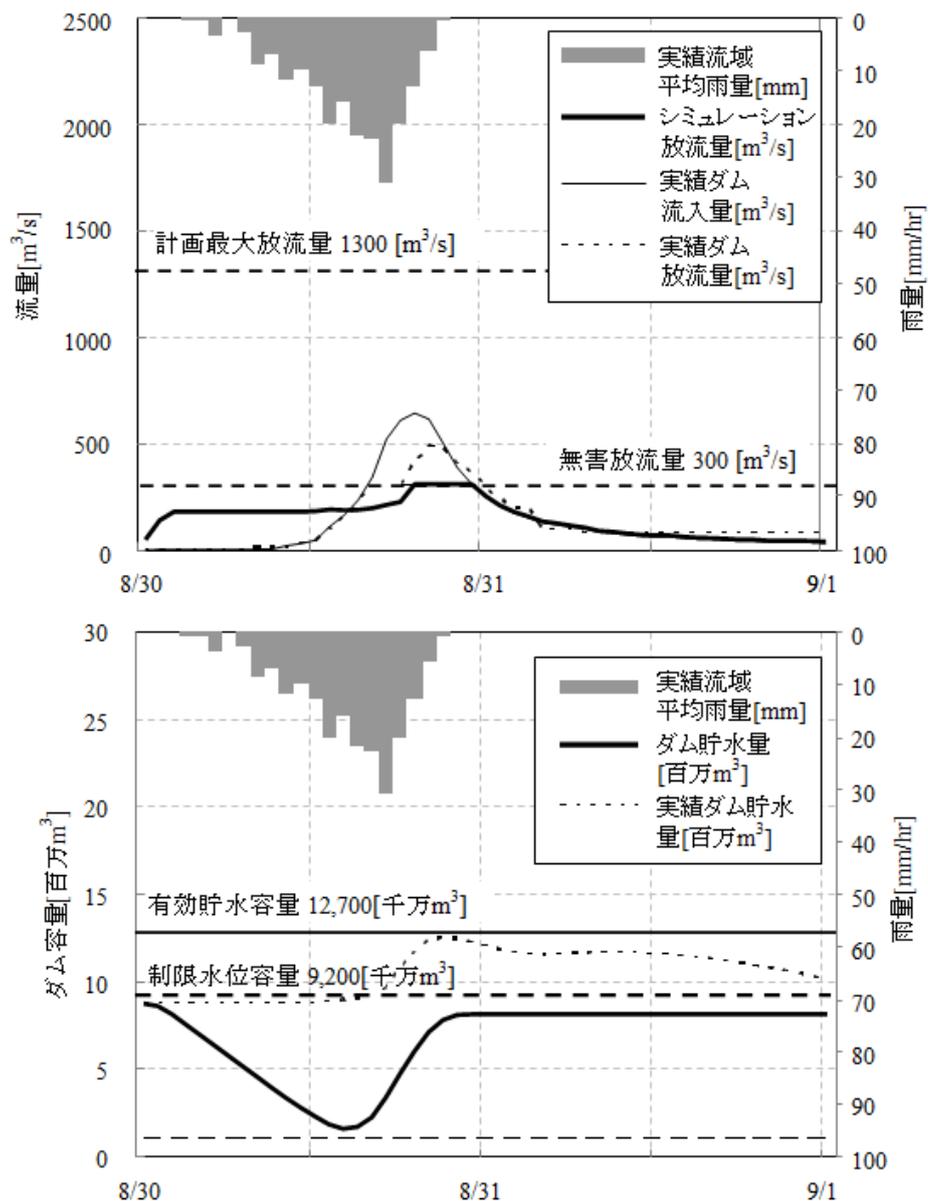


図-3.4.20 野村ダム H16年8月洪水 シミュレーション結果^{1,2)}

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洪水において大小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。

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

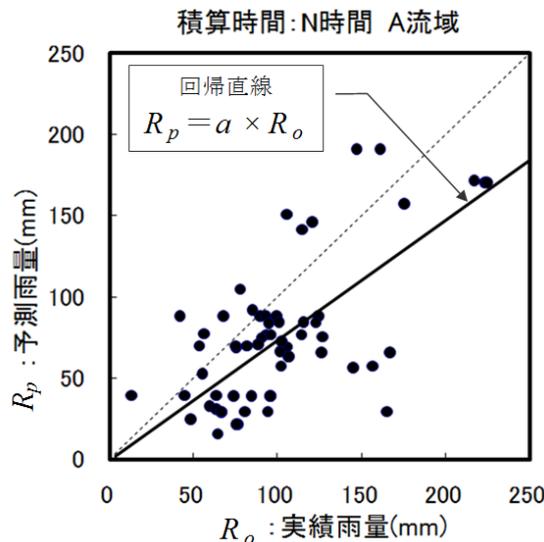


図-3.4.2.1 予測雨量と実績雨量の関係

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

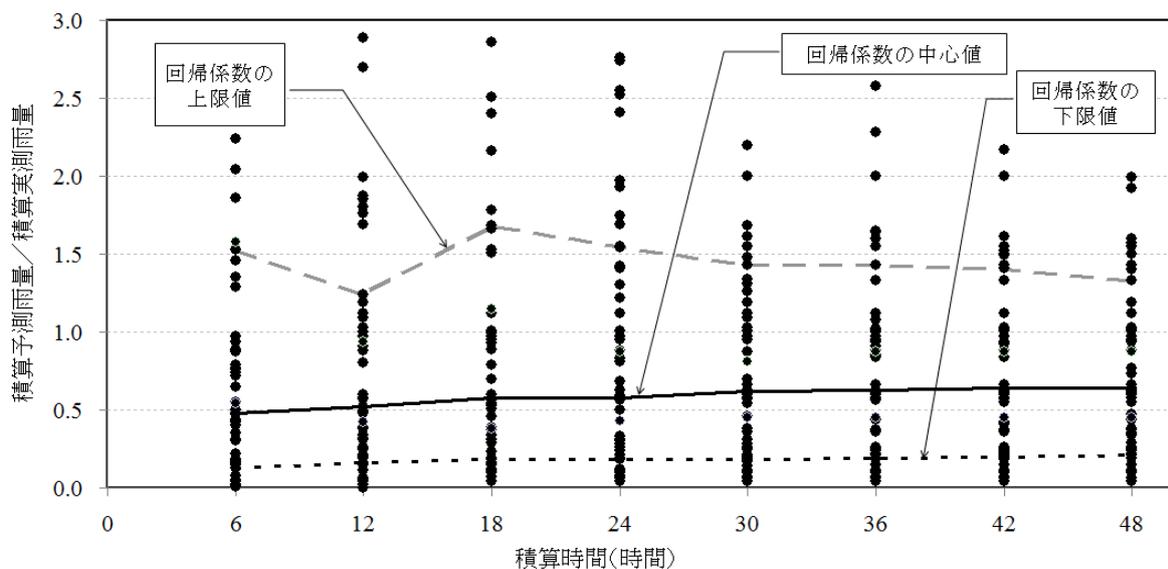


図-3.4.2 2 積算時間毎のWRF予測雨量の回帰係数¹⁾²⁾

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。

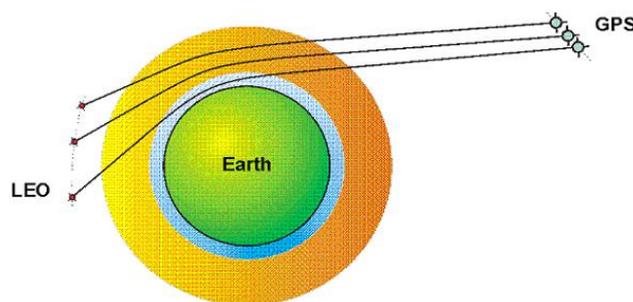


図-3.4.2.3 GPS^{えんべい}掩蔽観測

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)}。

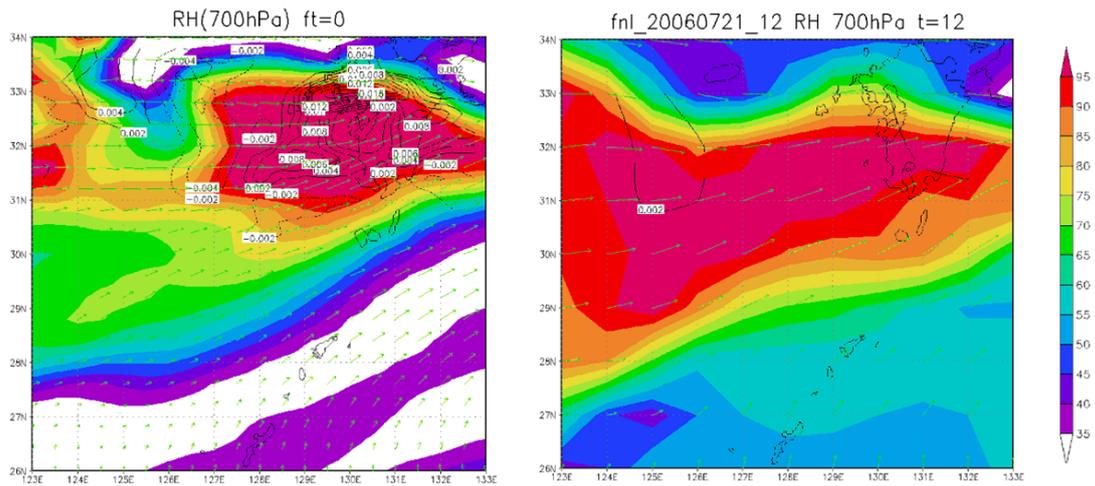


図-3.4.24 高度約 3,000m の相対湿度の分布 (2006 年 7 月 22 日 9 時)
(左 : RSM 右 : FNL)

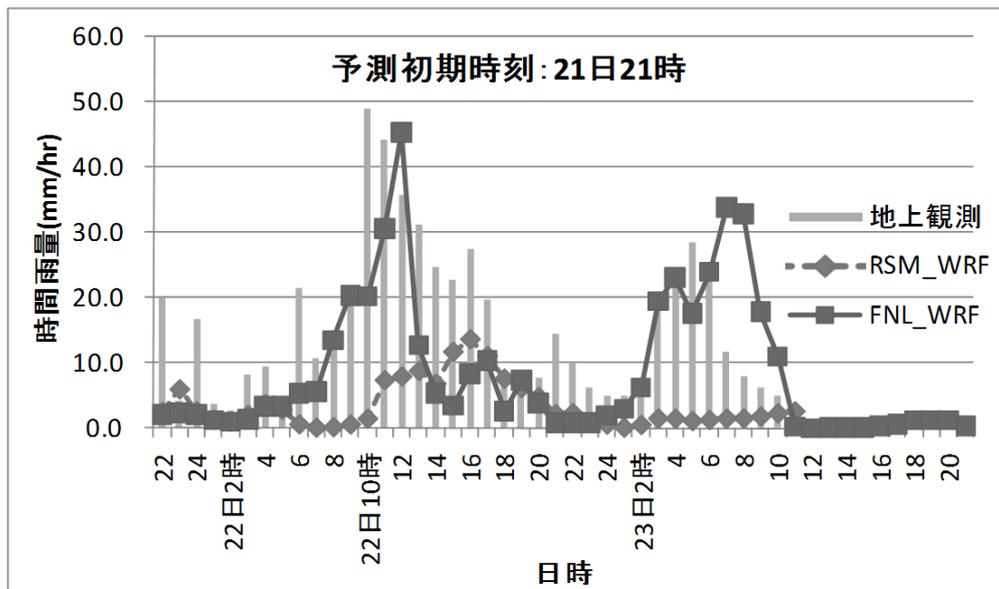


図-3.4.25 鶴田ダム流域平均毎時雨量の実績と WRF による予測雨量の比較
(2006 年 7 月)^{1 2)}

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。

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

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

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。

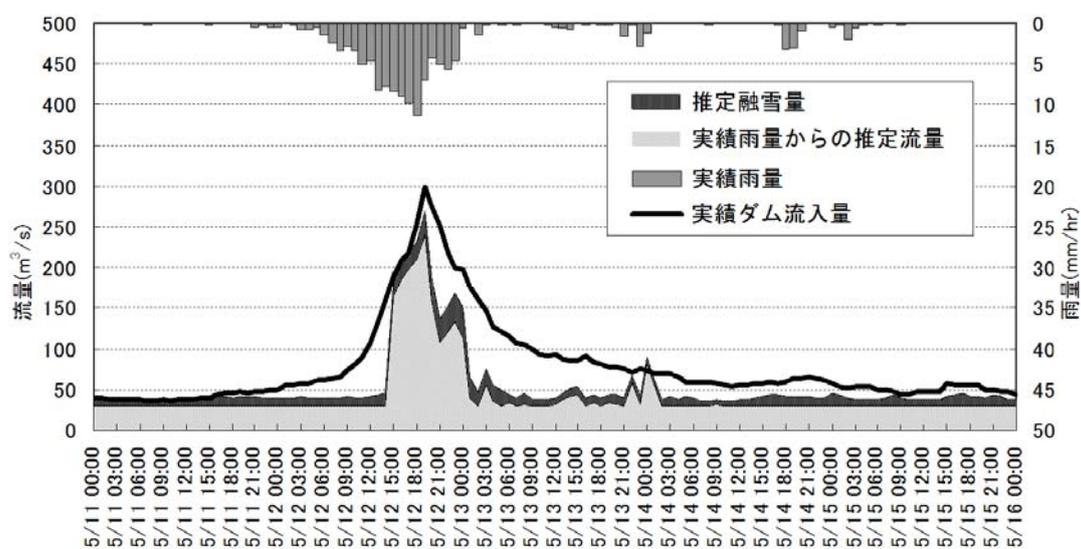


図-3.4.26 平成12年5月11日洪水の流出成分の分析

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。

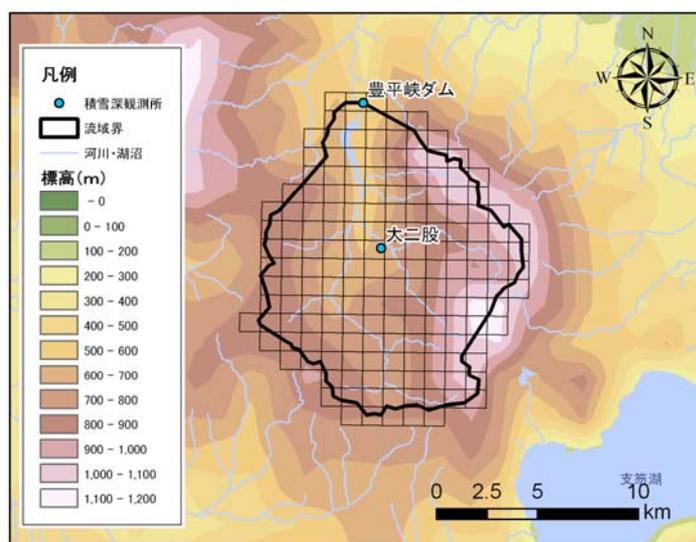


図-3.4.27 豊平峡ダム流域の標高コンター図

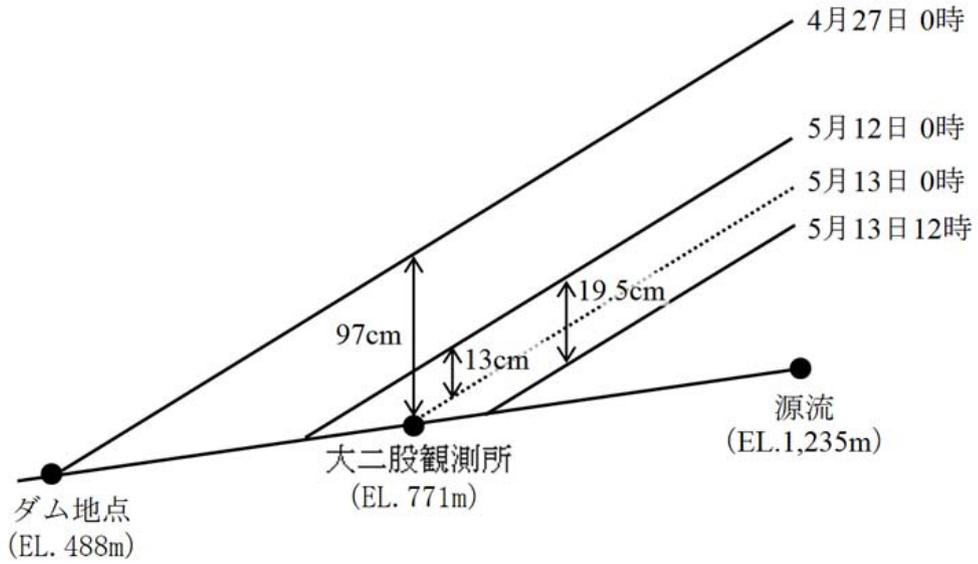


図-3.4.2 8 豊平峡ダム流域における推定積雪深

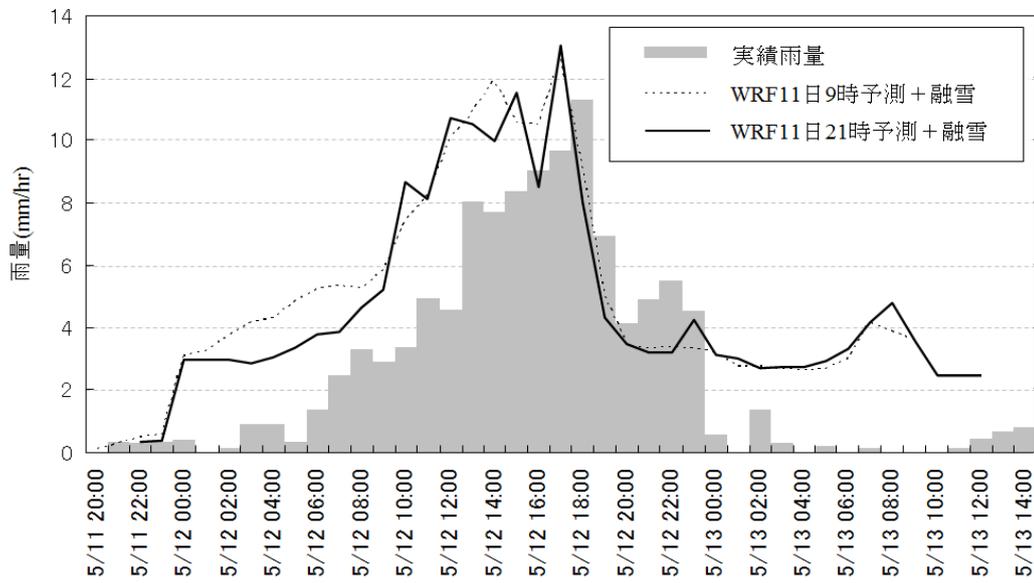


図-3.4.2 9 融雪を考慮したダム流入量

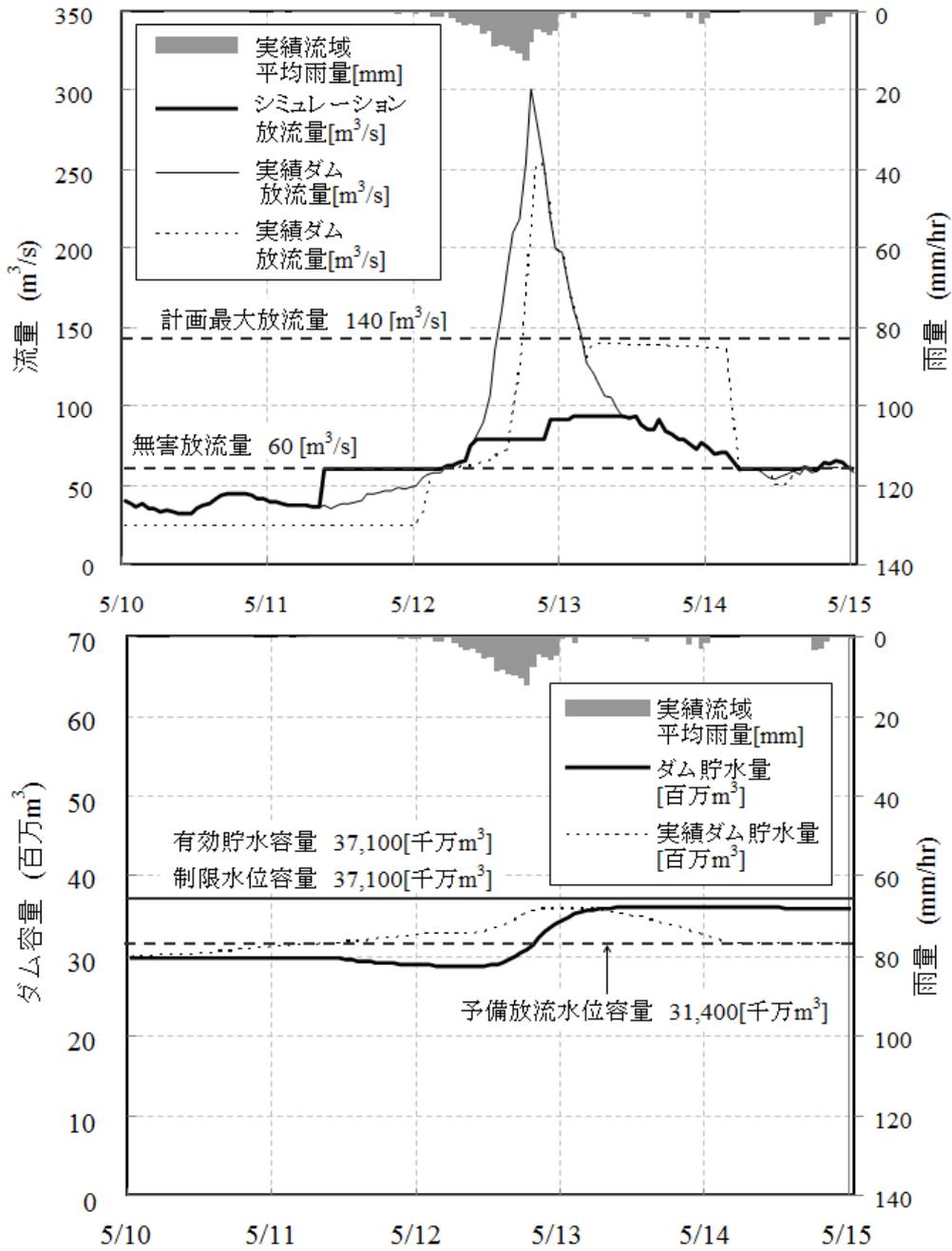


図-3.4.30 融雪を考慮したダム洪水調節シミュレーション

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。

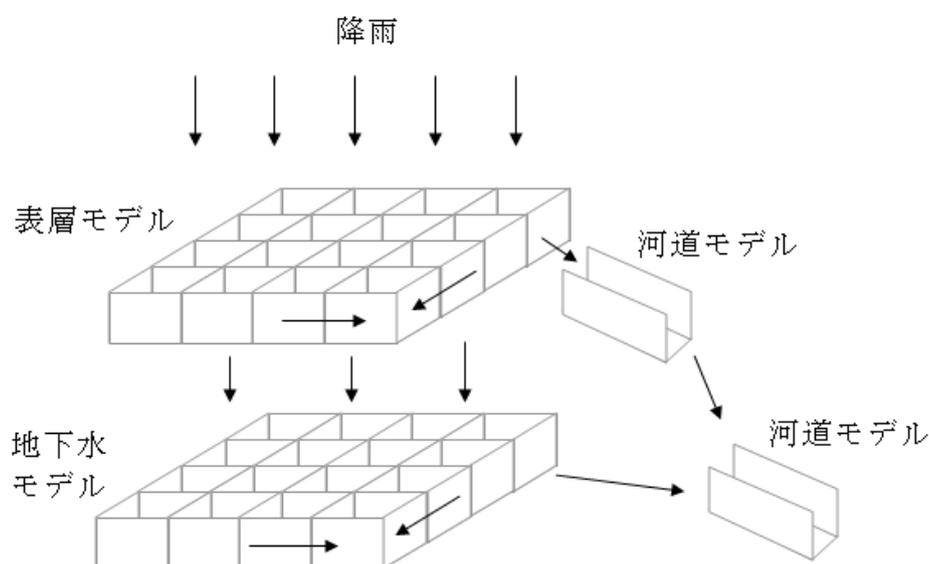


図-3.4.31 早明浦ダム流域分布型モデルの概要図²⁵⁾

- 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

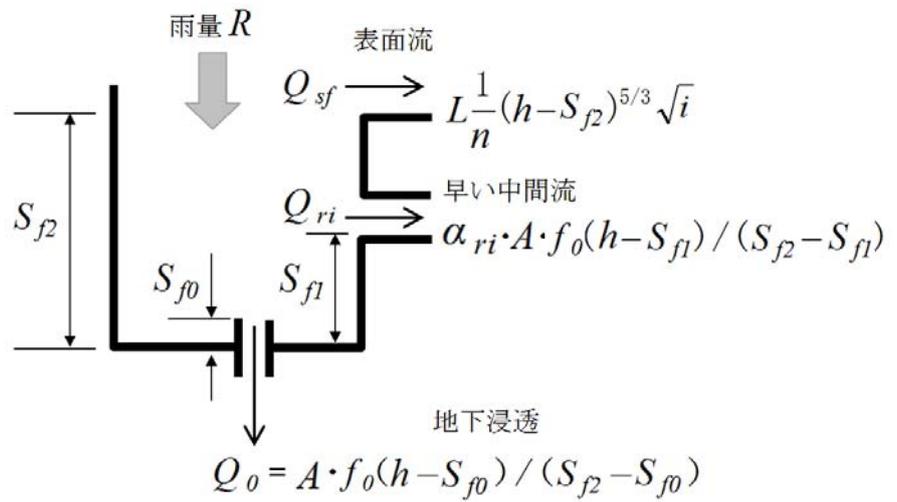


図-3.4.3.2 表層モデルの概念図^{2.5)}

- 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

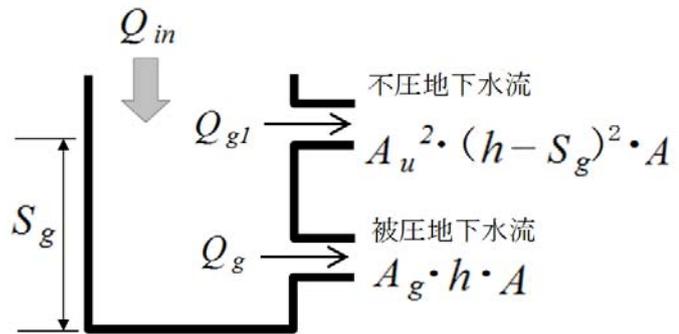


図-3.4.3.3 地下水モデルの概念図^{2.5)}

- 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

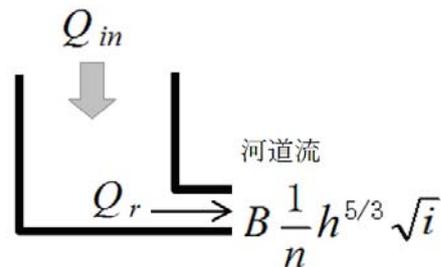


図-3.4.3.4 河道モデルの概念図^{2.5)}

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。

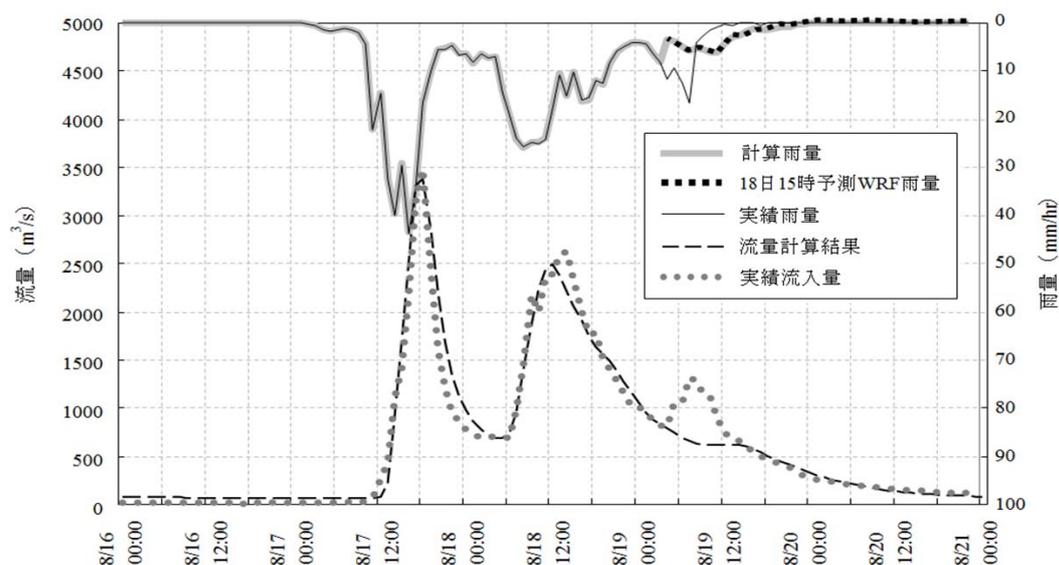


図-3.4.35 分布型モデルを用いた流出計算結果^{1 2)}

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。

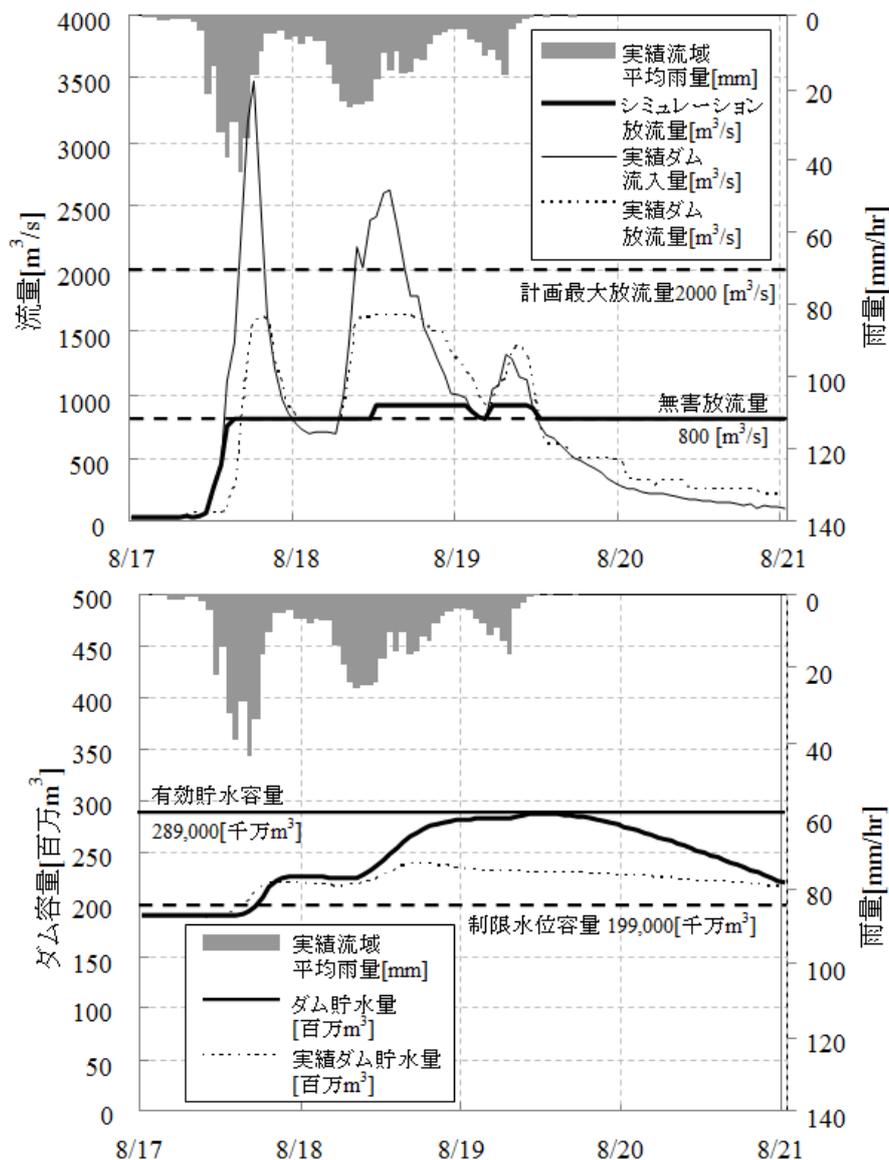


図-3.4.36 早明浦ダム H16 年 8 月洪水 空き容量の 35.5% を留保した操作^{1 2)}

(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

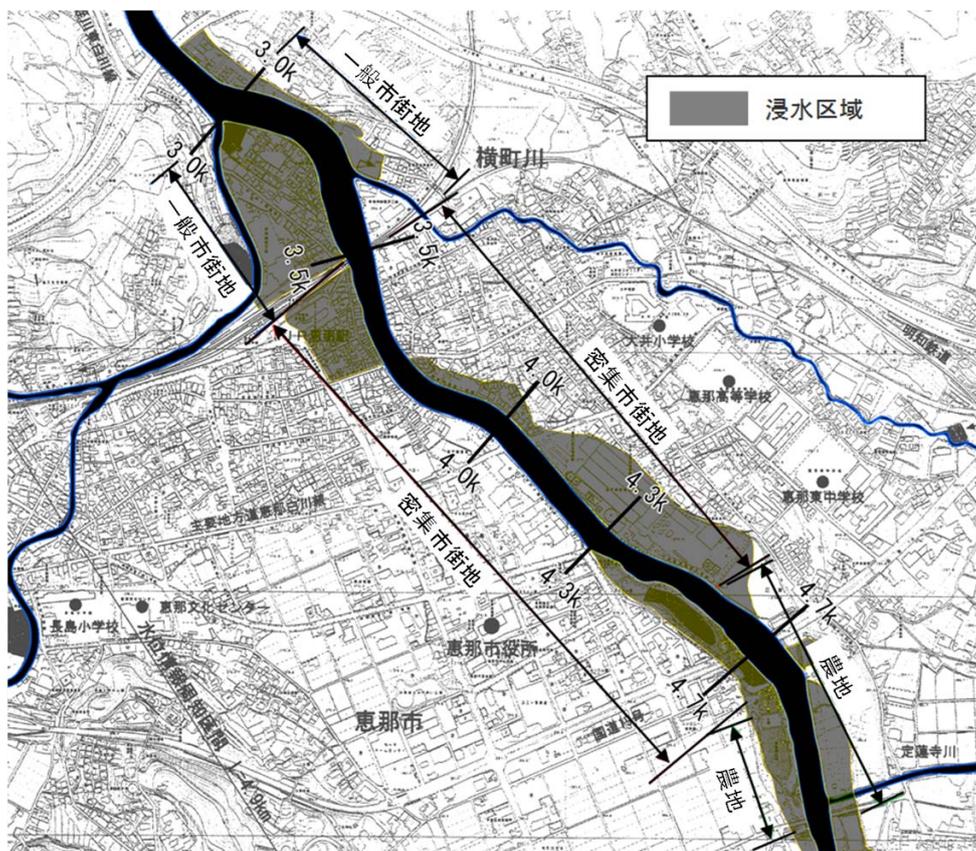


図-3.4.37 ダム放流量 $600\text{m}^3/\text{s}$ 時の下流河川浸水状況

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利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-3.4.38 のようになる。

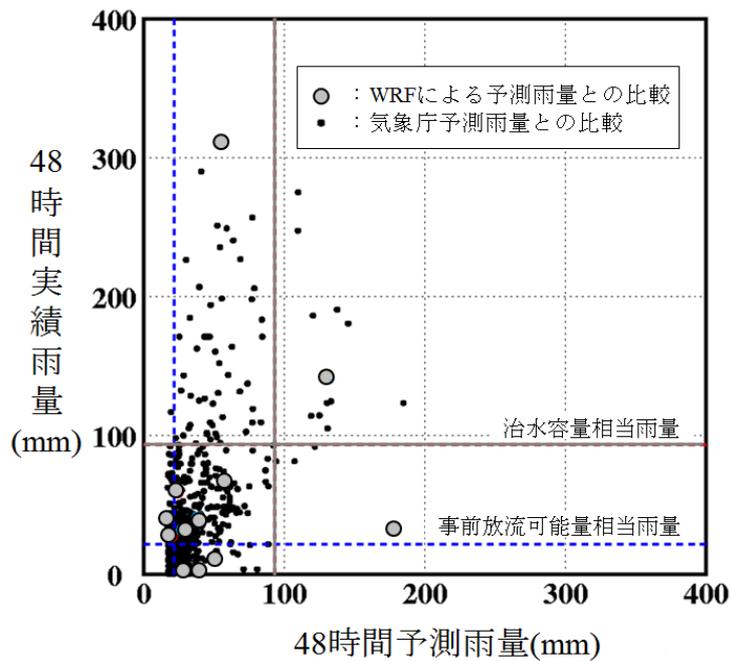


図-3.4.38 鶴田ダムにおける48時間予測雨量と実績雨量^{1 2)}

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

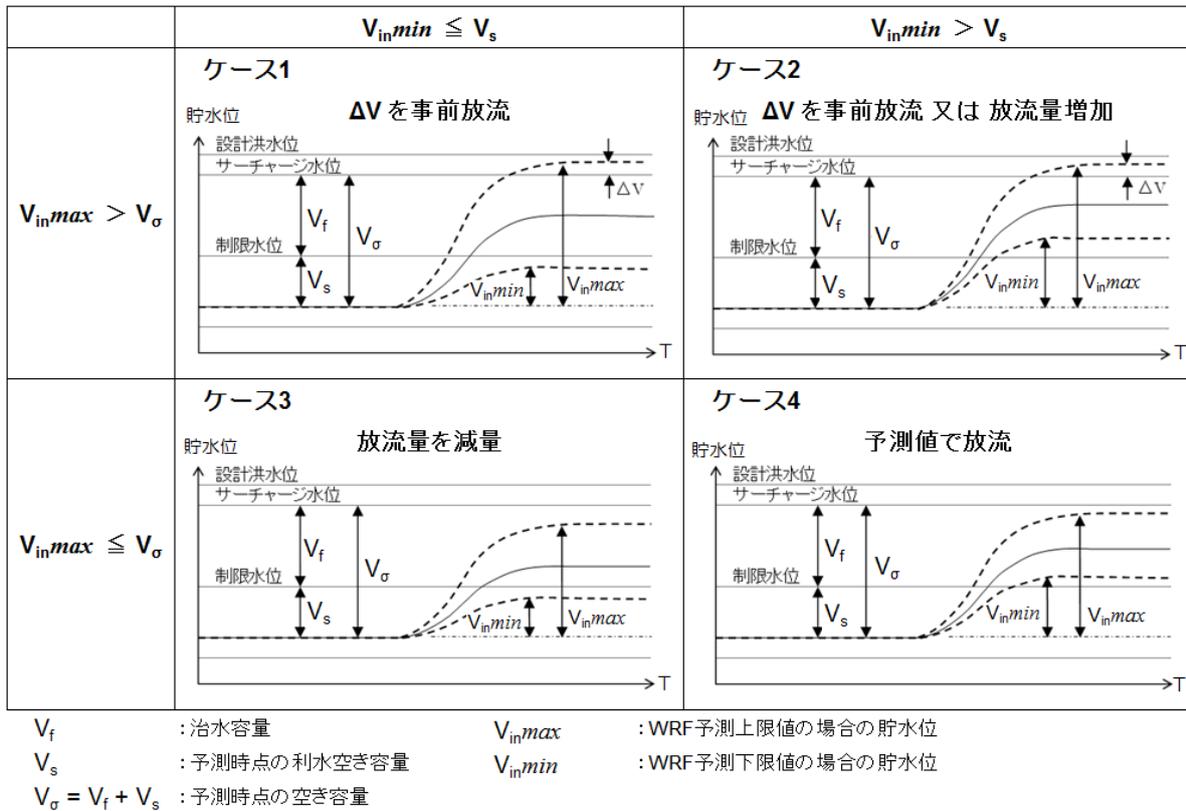


図-3.4.3.9 降雨誤差による貯水位と放流操作¹⁾²⁾

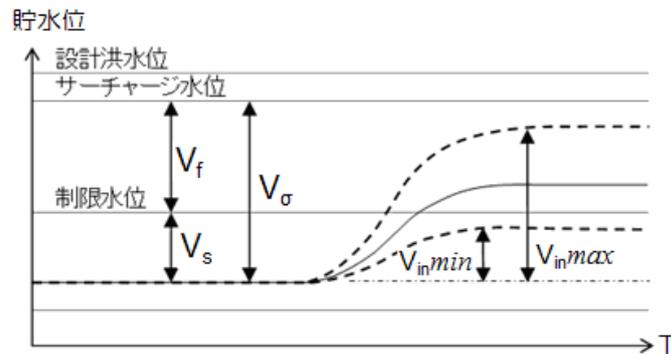


図-3.4.4.0 利水容量不充足のリスクに配慮した放流

(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。

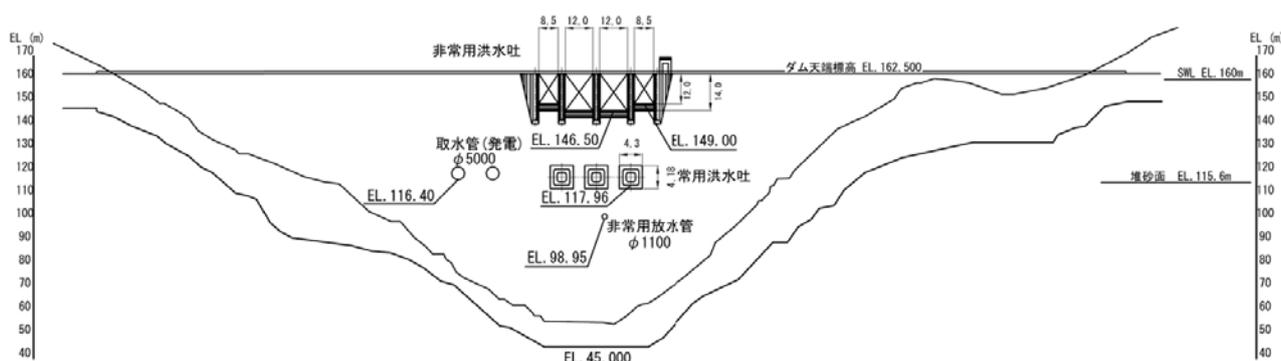
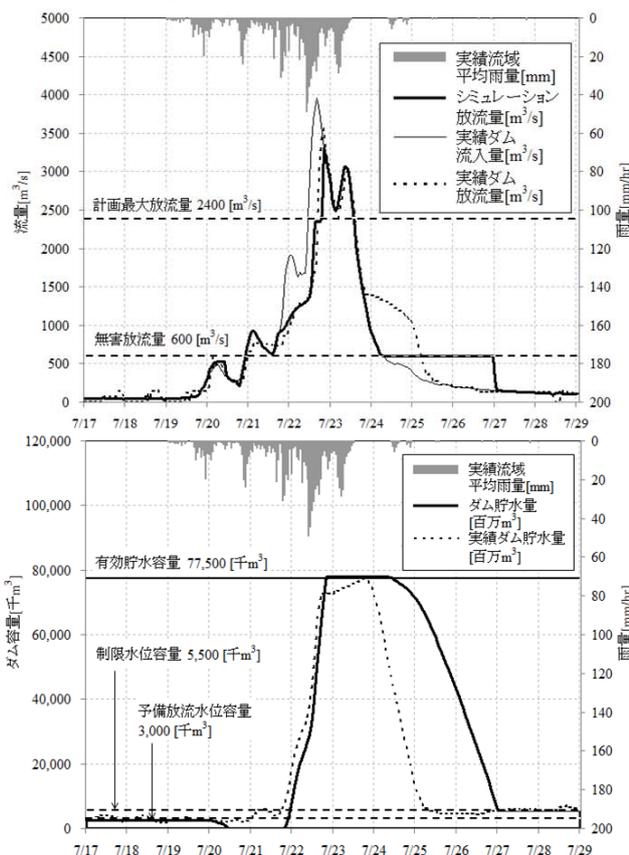


図-3.4.4 1 鶴田ダムの放流設備

[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]

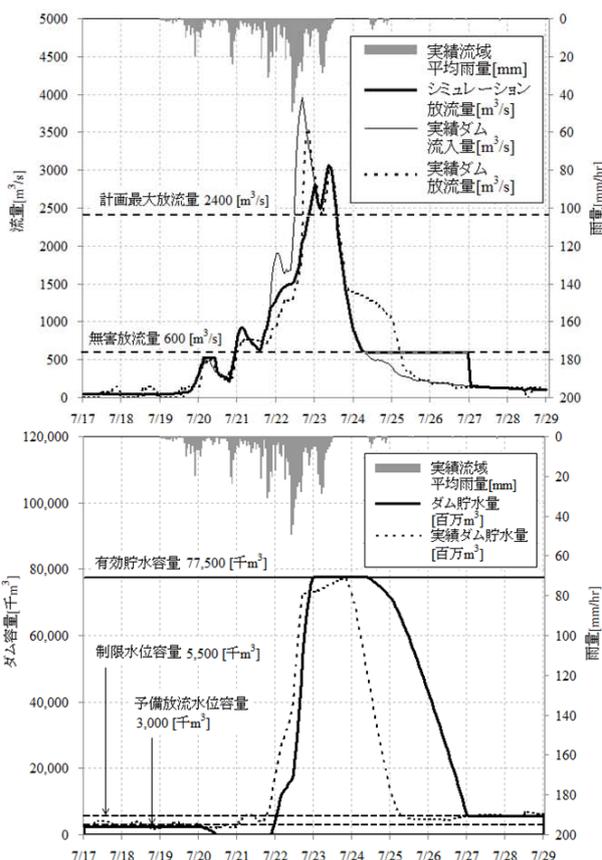


図-3.4.4 2 鶴田ダム放流施設改良の効果 (H18年7月洪水)

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。

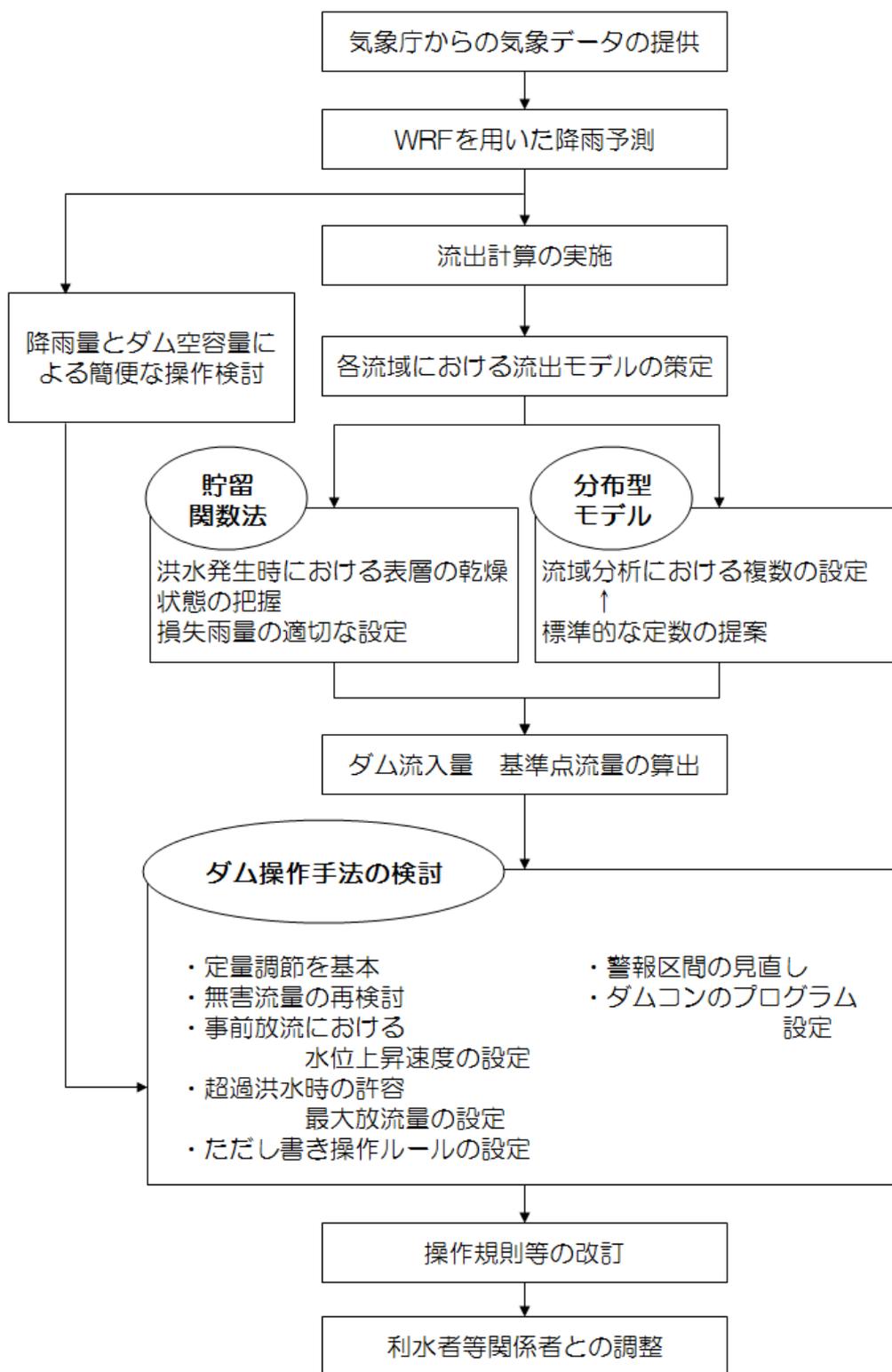


図-3.4.43 ダム管理に導入するにあたっての手続き

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、超過洪水の発生時であっても、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) 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
- 9) 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
- 10) 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.
- 11) 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.
- 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.