

論文

WRF による降雨予測を活用したダム操作に関する検討

三石 真也¹ 角 哲也² 尾関 敏久³

Dam Operations Using Precipitation Forecasts by Weather Research and Forecasting Model

Shinya MITSUISHI Tetsuya SUMI Toshihisa OZEKI

近年、計画を超える豪雨が頻発し、ダムにおける但し書き操作や下流の氾濫による被害が多く発生している。今後気候変動による洪水の激化が予想される一方で、ダムの新たな建設が困難になっている状況の下、資産の集積している受益地を水害から守るためには、既設ダムのさらなる効果的な活用が有効である。本論文は、最近改良の著しい WRF を活用した降雨予測に基づき、ダムの治水容量と利水容量を一体的に運用しつつ、事前放流や最大放流量の最適設定などを行うことにより、氾濫区域の被害を最小化するダム操作手法を提案すべく、過去の洪水データを活用して検討を行い、その有効性を検証したものである。

キーワード: 降雨予測, 事前放流, 但し書き操作

1. はじめに

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平成 9 年、施工箇所数で平成 5 年をピークに近年減少しており²⁾、今後は、既存ストックのいっそう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腰塚ら⁴⁾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-1)、さらなる適用促進が期待される場所である。

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

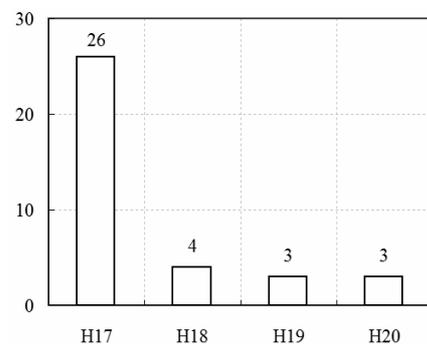


図-1 事前放流の実施ダム数

¹ 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 水資源研究室長 工修

² 京都大学防災研究所 水資源環境研究センター教授 博士(工)

³ 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 水資源研究室研究官

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。これらを踏まえて、治水効果の一層の充実に向け、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。

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、近年、同化技術の導入などによる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⁵⁾。

本研究は、WRFを活用した降雨予測を行うと共に、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と実際の洪水における検証を行ったものである。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。

2. 現況のダム洪水調節の課題

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、一定率一定量方式、一定量方式、不定率調節方式(いわゆる鍋底調節)などがあるが、なお、主要な課題として以下に示す項目が残されており、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のは、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であっても、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していること
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ことについて防御できない。

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。

3. WRFを活用した降雨予測技術

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-2に示すとおりであり、主に初期値、境界値が現実にとれだけ近いかによつて予測精度が決まってくるが、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⁶⁾。以下にWRFにおいて使用される基礎式を示す。

$x\eta$ (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)

$$\frac{\partial U}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uu) + \frac{\partial}{\partial y} (Vu) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega u) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} - \mu_d \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = F_U \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uv) + \frac{\partial}{\partial y} (Vv) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega v) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial y} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial y} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial y} - \mu_d \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = F_V \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uw) + \frac{\partial}{\partial y} (Vw) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega w) - m^{-1} g \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(\frac{\partial p'}{\partial \eta} - \mu_d (q_v + q_c + q_r) \right) + m^{-1} \mu_d \alpha' g = F_W \quad (3)$$

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

$\eta = (\pi - \pi_i) / \mu_d$: 鉛直 Mass 座標,

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

$\mu_d = \pi_s - \pi_i$: 乾燥大気の単位面積質量, π_i : 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)

・質量保存則:
$$\frac{\partial \mu_d \alpha'}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right] + m \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = 0 \quad (4)$$

ここに、 $\mu_d \alpha'$: 乾燥大気の単位面積質量 μ_d の変動成分

・温位保存式:
$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} (U\theta) + \frac{\partial}{\partial y} (V\theta) \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega\theta) = F_\Theta \quad (5)$$

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

・状態方程式 (気圧の診断式):
$$p = p_0 (R_d \theta_v / p_0 \alpha_d)^\gamma \quad (6)$$

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

・ジオポテンシャル式:

$$\frac{\partial \phi'}{\partial t} + \mu_d^{-1} \left[m^2 \left(U \frac{\partial \phi'}{\partial x} + V \frac{\partial \phi'}{\partial y} \right) + m \Omega \frac{\partial \phi'}{\partial \eta} - gW \right] = 0 \quad (7)$$

・相別比湿保存式:

$$\frac{\partial Q_n}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uq_n) + \frac{\partial}{\partial y} (Vq_n) \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega q_n) = F_{Q_n} \quad (8)$$

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)

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。
- ・ 1 km 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。ここでは、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 (10.8 km, 3.6 km, 1.2 km : A ダムの例) にダウンスケー

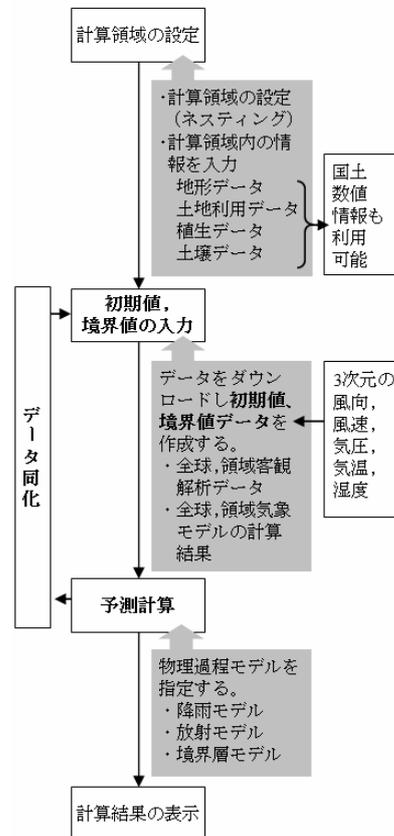


図-2 WRF の計算フロー

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。図-3にFダムにおけるWRFによる予測雨量分布図を示す。

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

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」⁷⁾による予測降雨量と実績降雨量の誤差(図-4)を利用した。この検討は、全国各地の7水系214箇所の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、予測降雨に対する実際に降るであろう雨量の上限値、下限値は次のように示される。

$$\begin{aligned} & \text{予測に対する降雨の上限値(mm)} \\ & = 1/0.700 \times \text{予測降雨(mm)} = 1.43 \times \text{予測降雨(mm)} \quad (9) \\ & \text{予測に対する降雨の下限値(mm)} \\ & = 1/1.40 \times \text{予測降雨(mm)} = 0.714 \times \text{予測降雨(mm)} \quad (10) \end{aligned}$$

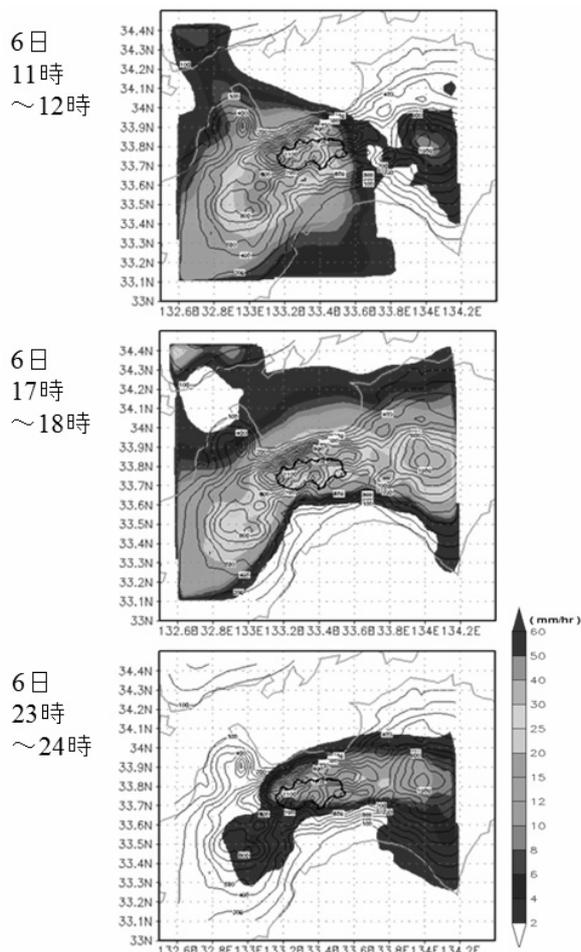


図-3 WRFによる1時間雨量分布図(Fダム流域 2005年9月5日21時を初期値とする)

表-1 検討対象ダム諸元一覧

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)
Aダム	FWP	134.0	20,200	16,900	277
Bダム	FP	1,196.0	33,900	1,600	29
Cダム	FNP	179.4	24,500	48,600	408
Dダム	FNAWIP	504.5	15,000	50,000	129
Eダム	FNWP	253.0	41,000	38,000	312
Fダム	FNAWIP	417.0	90,000	199,000	693
Gダム	FP	805.0	75,000	2,500	96

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

表-2 降雨損失諸元の考え方

項目	記号	考え方
初期損失雨量	R _{L1}	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 _{L1})
一次流出率	f _i	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。

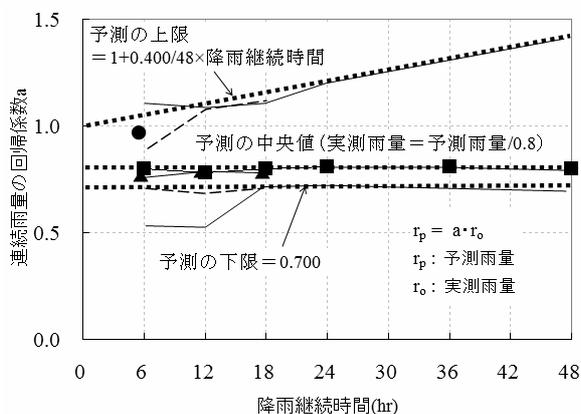


図-4 降雨継続時間と予測降雨量/実績降雨量の関係

4. 降雨予測を活用した合理的なダム操作手法

4.1 ダム流入量の予測

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。検討対象ダムは、7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。7ダムの諸元を表-1に示す。

今回提案する洪水調節手法のフローを図-5に示す。第一段階として WRF によって向こう 48 時間の降雨を予測する。予測雨量に 3 章図-4 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、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⁸⁾。すなわち、表-2 に示す降雨損失を考慮

しつつ、図-6 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次式に示すような線形の関係があると仮定する。

$$-\frac{dS(t)}{dt} = \lambda q(t) \quad (11)$$

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] = $\frac{Q(t)[m^3/s]}{A[km^2]} \times 3.6$ 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。

$$S(t) = S_0 e^{-\alpha t} \quad (12)$$

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、洪水イベントごとに異なる。降雨期間中の地中保水能は、降雨量を累加し、最大地中保水能 R_L を上限とする。

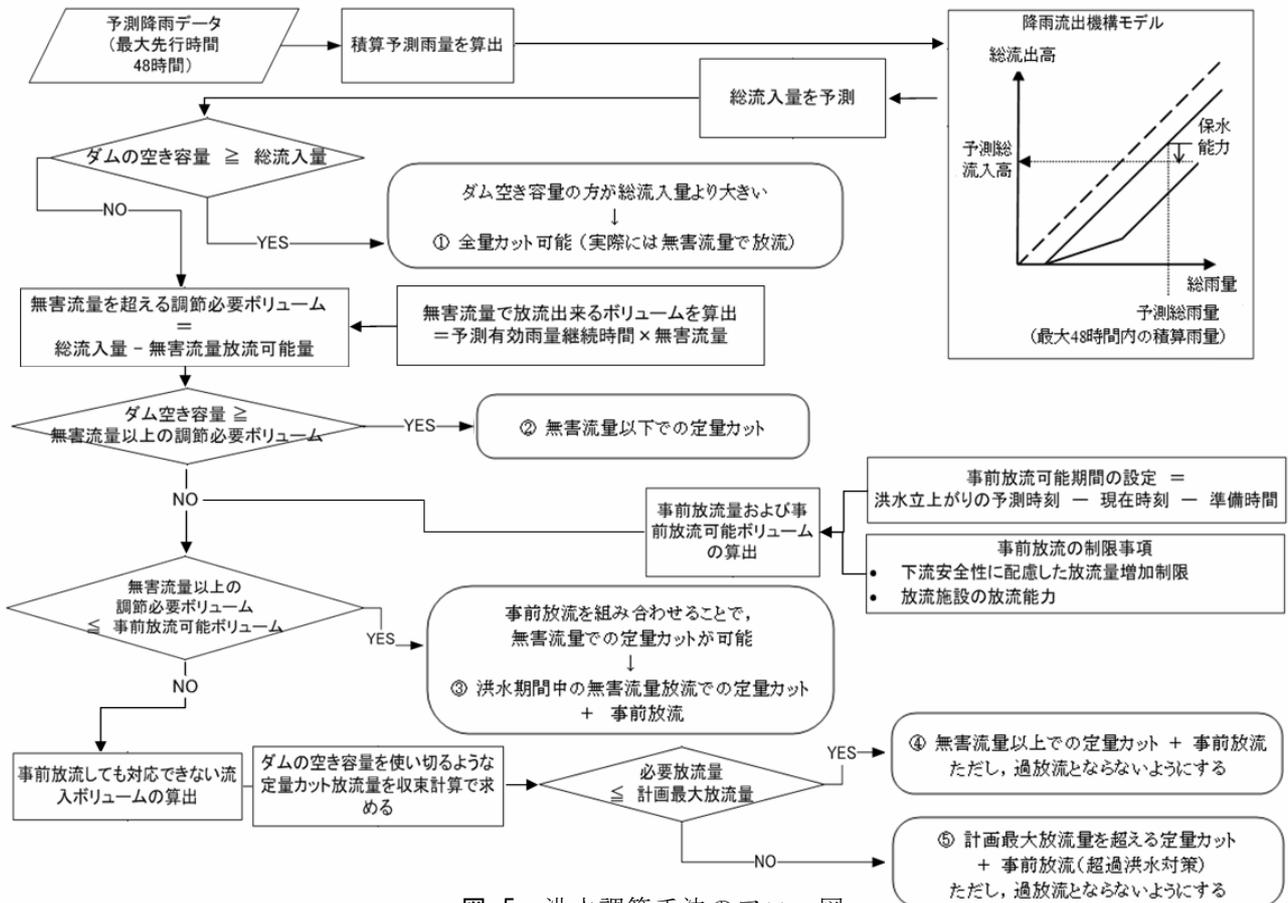


図-5 洪水調節手法のフロー図

また、低減係数 α は、図-7 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。

$$R_{sa}(t) = R_{LI} + (R_L - S(t)) / (1 - f_1) \quad (13)$$

ただし、 R_{LI} : 初期損失雨量[mm]である。

図-8 に A 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 50 mm 以上の洪水を対象としており、洪水

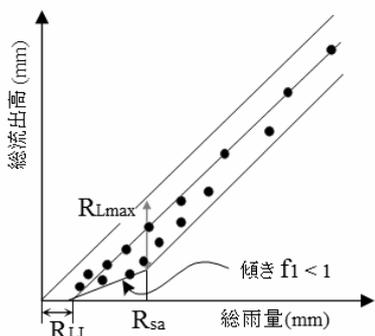
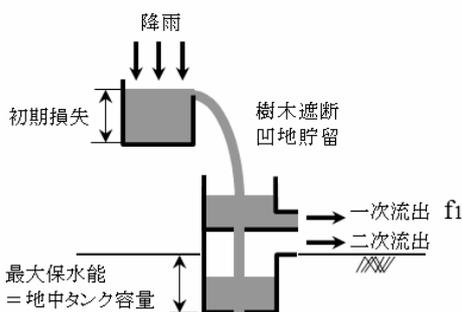


図-6 降雨流出機構と総流出高

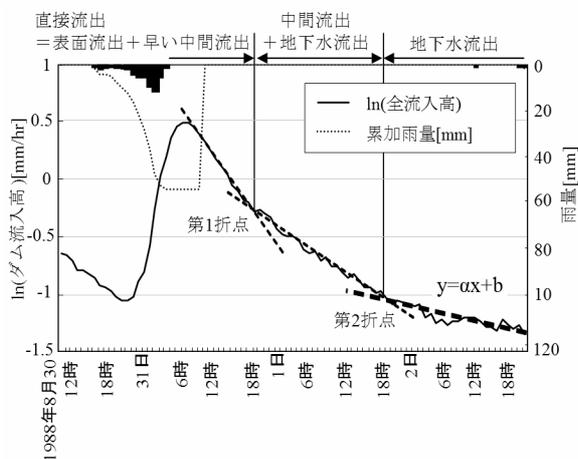


図-7 低減係数の算定

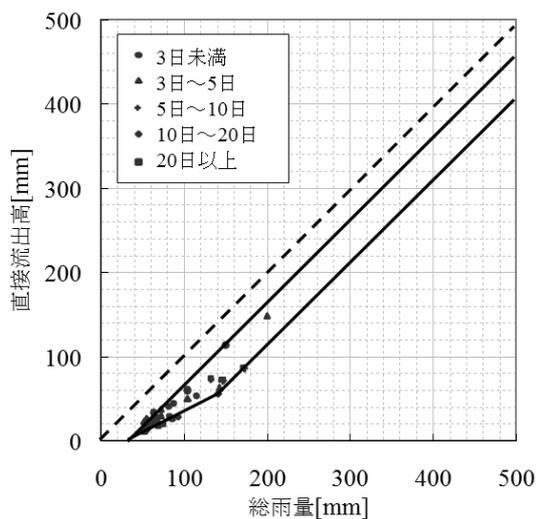
開始時における流量を基底流量とした水平分離を実施した。なお、流出高に融雪高が含まれる洪水は集計から除外した。

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。ここに、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、ここでは簡単のため、単純に流出高をもってダムへの流入量とみなした。

4.2 合理的なダム操作手法

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-5 参照）。

- (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。



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-8 総雨量～直接流出高の整理 (A ダム)

(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-9 参照)

ここに、事前放流を実施するに当たっては、無降雨の状態での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⁹⁾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を 40 cm/s 程度としている。
- ・ 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。

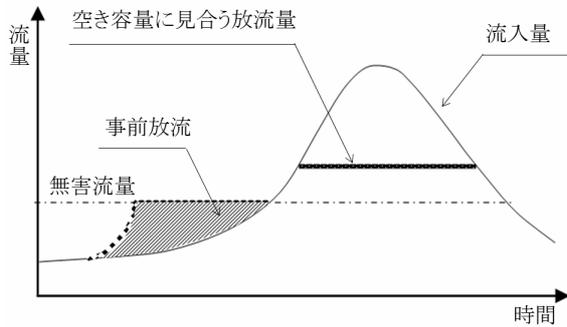


図-9 事前放流に加えて無害流量を超える定量放流を実施するケース

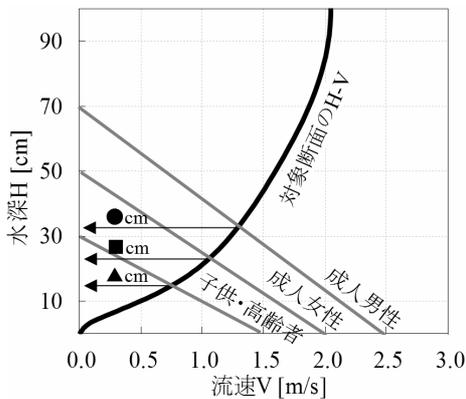


図-10 安全な避難を考慮した水深と流速の関係

とし、歩行限界水深、限界流速を定めている。これを参考に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-10 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

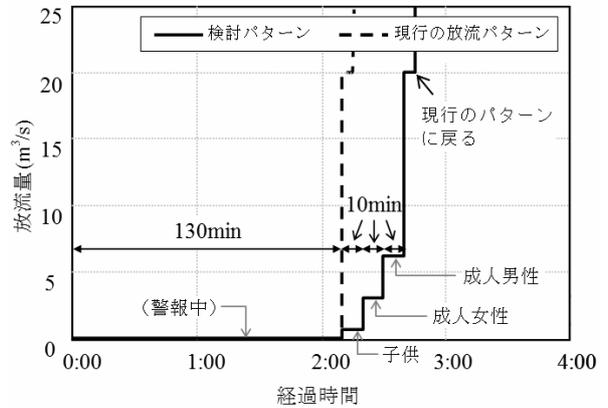


図-11 安全性を考慮した放流パターン (Cダム)

表-3 シミュレーション結果総括表

ダム名	検討対象ケース数	無害流量までの定流量実施までの定流量実施ケース数(注1)	事前放流実施ケース数	無害流量以上の放流量実施ケース数	計画最大流量以上の放流量実施ケース数	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
A ダム	上限誤差	12	11	0	1	1	0
	予測値	12	11	0	1	1	0
	下限誤差	12	11	0	1	1	0
B ダム	上限誤差	7	6	4	1	0	1(注2)
	予測値	7	6	2	1	0	0
	下限誤差	7	7	0	0	0	0
C ダム	上限誤差	6	6	0	0	0	0
	予測値	6	6	0	0	0	0
	下限誤差	6	6	0	0	0	0
D ダム	上限誤差	14	13	10	1	0	0
	予測値	14	13	1	1	0	1
	下限誤差	14	14	0	0	0	1
E ダム	上限誤差	4	4	0	0	0	0
	予測値	4	4	0	0	0	0
	下限誤差	4	4	0	0	0	0
F ダム	上限誤差	10	9	1	1	0	1
	予測値	10	9	0	1	0	1
	下限誤差	10	9	0	1	0	1
G ダム	上限誤差	11	3	11	8	1	1
	予測値	11	7	9	4	1	1
	下限誤差	11	5	3	6	1	5

注1: 無害流量までの定流量実施ケース数には、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る)。該当するダムおよびケース数は、Bダム: 2ケース、Cダム: 2ケース、Dダム: 1ケース、E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: F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。

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。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 30 cm, 50 cm を採用）とした。図-11 に C ダムにおける事前放流のパターンを示す。なお、F ダム、G 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。

以上の手法により 7 ダム 64 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結果を表-3 に示す。これらの結果を分析すると以下のとおりである。なお、A, D, E, G ダムの中小洪水については、実績降雨を WRF 予測降雨とみなして解析した。

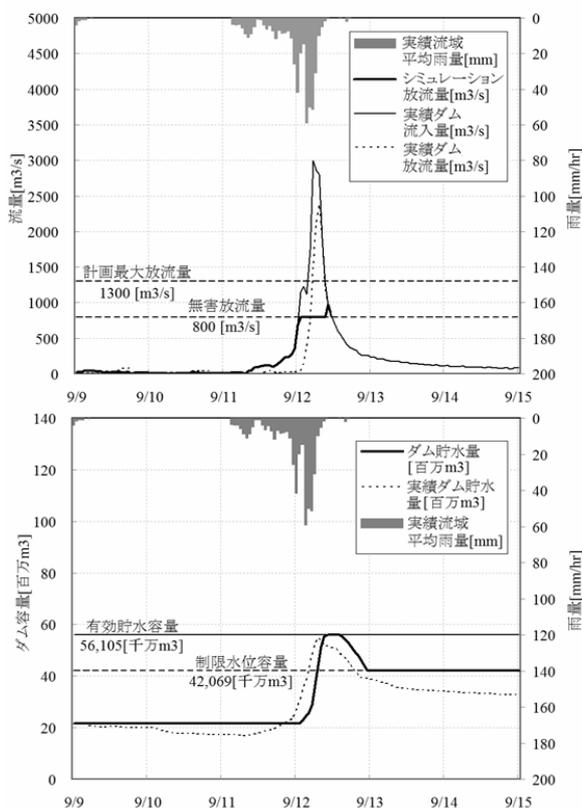


図-12 D ダム H12.9 洪水 シミュレーション結果

- 大洪水の襲来により、但し書き操作を強いられた D ダム H12.9 洪水について、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最大 1,404 m³/s 低減し、大幅に被害を軽減した（図-12 参照）。G ダム H18.7 洪水については、WRF 上限値を用い

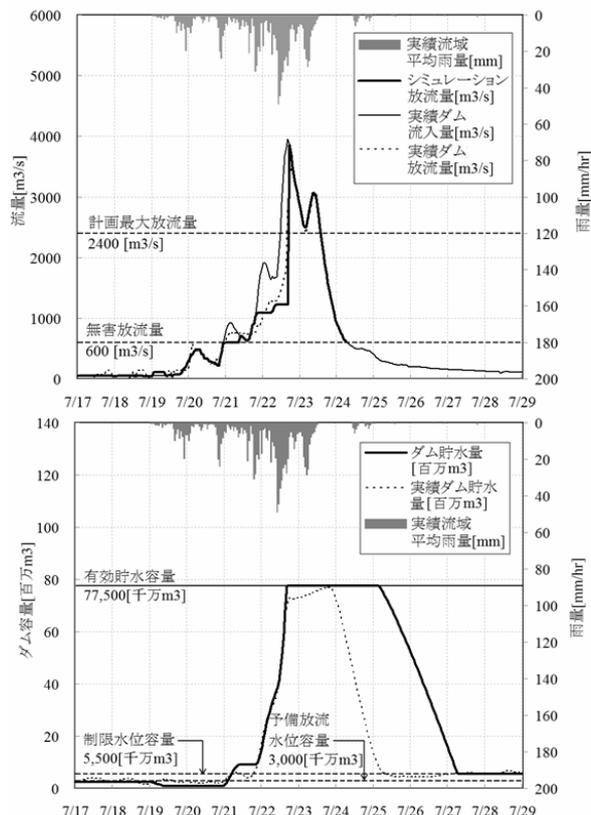


図-13 G ダム H18.7 洪水 シミュレーション結果

表-4 G ダムにおけるピーク流量低減効果

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。

たケースでも放流ピーク流量が実績操作に比べて 300 m³/s 増加した (図-13 参照)。これは、G ダムが南九州西側に位置し、東シナ海からの大量の湿った水蒸気の供給による豪雨が発生する特異な気象条件にありながら、WRF の解析にあたって海上の GPS 可降水量が測定されていないため、海域からの水蒸気の供給が考慮されていない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たことが影響しており、今後の WRF の改良が期待されるところである。

- ・ 一定率一定量方式を採用する 6 ダム 58 洪水のうち、49 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 G 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-4 参照)。G ダム流域においては、平成元、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。
- ・ F 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-14 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に主に起因するものであり、流達時間を考慮した流出解析を実施すれば容易に解決できる問題である。7 洪水で遅れ操作も発生したが、利水容量が大きいため被害の発生にはつながっていない。
- ・ B ダム H16.9 洪水 (図-15 参照)、G 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、事前放流の効果が限定的であり、但し書き操作や無害流量以上の放流を強いられる。
- ・ 融雪洪水の A ダム H12.5 洪水では、サーチャージ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-16 参照)。
- ・ C ダム、E 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。

4.3 実際のダム管理へ導入を図る上での課題

本手法を実際のダム管理に導入するためには、以下の課題が考えられる。

(1) 操作手法の改良

- ・ 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つては、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。
- ・ 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背反するリスク管理を行うべく、適切なダム操作方針の策定が必要である。操作方針の策定にあつては、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の重大性、利水容量の不充足については、補償制度が整っていることを考慮し、下流の水害を軽減することを最優先すべきであろう。
- ・ WRF による降雨予測により、超過洪水が発生すると見込まれる場合は、流域に早期の情報提供と避難の実施を求めることも有力である。
- ・ 環境面で濁水の長期化の問題も一部のダムで発生しており、これを回避するべく、ダム操作手法の検討の余地がある。

(2) 予測技術の改良

- ・ 今後、WRF による降雨予測を多くのダム流域、洪水にて実施し、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。得られた誤差を(9)、(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。また、海上の GPS 可降水量を適切に与えることによる予測降雨量の精度向上も期待される。
- ・ 土屋¹⁰⁾による融雪を考慮した流量の推定などを活用しつつ、融雪の影響を評価し、融雪洪水への対応を確立する必要がある。
- ・ 分布型モデル等の流出解析を行い、より正確なダム流入量の把握と下流域の安全性を考慮したより適切な洪水調節を実施することが重要である。

(3) 施設の改良

- ・ 洪水氾濫防止に効果のある事前放流を有効に実施するため、G ダム等の常用洪水吐きの早期改造が望ましい。
- ・ A ダムにあっては、サーチャージ容量が皆無であるため、近傍に位置するダムと容量振り替えを実施するなどして、一定の治水機能を確保することが望ましい。

5. 結論

本論文では、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。
- ② 事前放流を実施するにあたっては、人工的に流量

増大することから、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適切である。

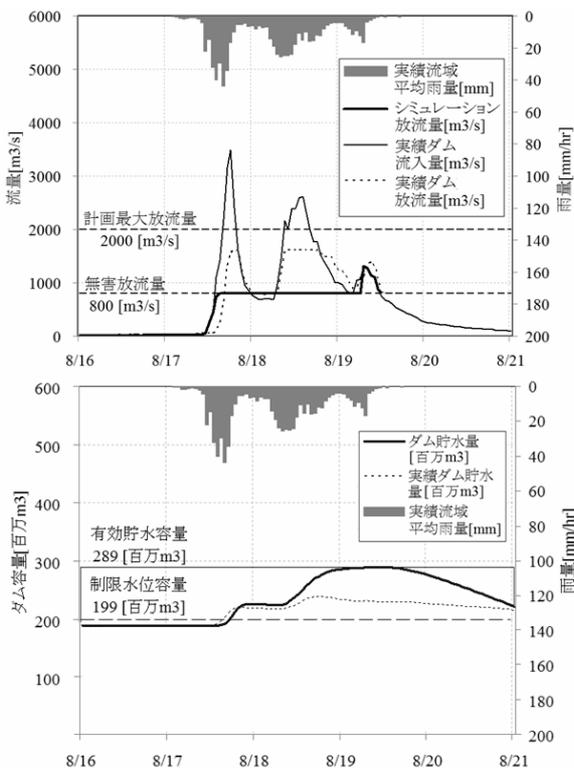


図-14 Fダム H16.8 洪水 シミュレーション結果

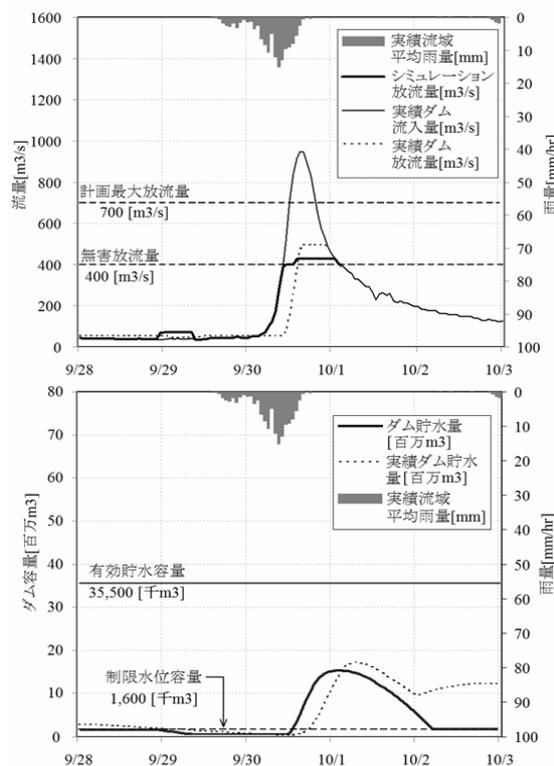


図-15 Bダム H16.9 洪水 シミュレーション結果

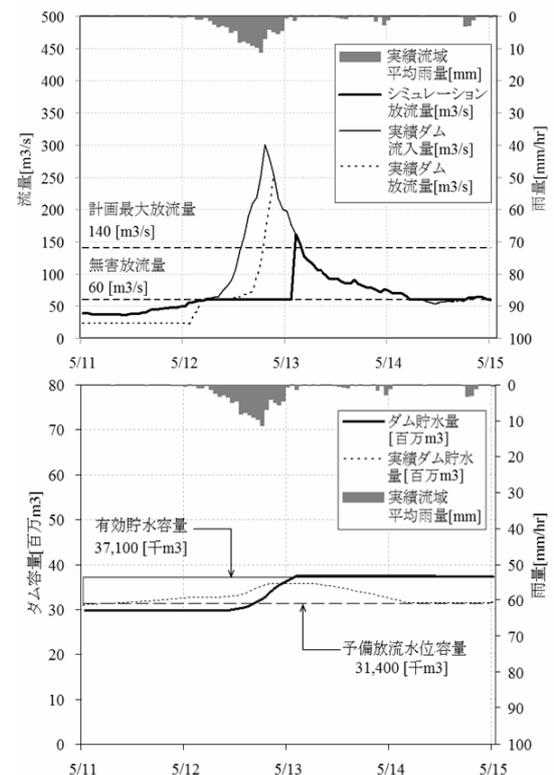


図-16 Aダム H12.5 洪水 シミュレーション結果

- ③ 本手法により、ダムへ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、その根拠を河川毎に整理する必要がある。
- 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。また、海上における GPS 可降水量を適切に降雨予測モデルに組み込むことにより、WRF による降雨予測の精度向上が期待される。
- ⑤ 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、一部の洪水にて不都合も発生するため、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。
- ⑥ 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、その改造が望ましい。

本研究を行う上で国土交通省各地方整備局、水資源機構からデータを提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

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
- 4) 腰塚雄太, ほか：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
- 5) 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
- 6) Iwabuchi, T., Braun, J. J. and Van Hove, T. : 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 須賀堯三, ほか：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
- 10) 土屋修一, ほか：気候変動によるダム流入量の変化に関する研究, 第 63 回土木学会年次学術講演会講演概要集, II-38, 2008

(2009 年 11 月 11 日 受理)

In recent years, frequent extreme heavy rainfalls exceeding planning levels have been causing shortage of flood control capacity of dams and serious flood damages as a result of extreme-flood control operations that allows the inflowing flood to continue flowing downstream in an unregulated manner. While the scale of flood damage is expected to increase due to climate change, new construction of dams is becoming increasingly difficult. Therefore, more effective operations of existing dams are essential to protect assets of the beneficiary area from floods. This paper propose a dam operation method which will minimize damages in the flood area by the preliminary discharge operation and optimization of the maximum discharge volume based on precipitation forecasts using the recently significantly improved Weather Research and Forecasting Model (WRF). We examined past flood data and verified the effectiveness of integrated management of reservoir storage volume both for flood control and water utilization.

Key words : precipitation forecast, preliminary discharge operation, extreme-flood control operation of dams