

近年の降雨予測技術を活用したダム操作について

Dam operation based on recent rainfall forecast technology

研究第一部 上席主任研究員 松ヶ平賢一
 研究第一部 主任研究員 宮本賢治
 研究第一部付部長 原 俊彦

我が国では毎年のように洪水被害が全国各地で発生しており、気候変動による洪水の更なる激甚化が懸念されている。ダムは洪水時の防災操作により下流河川の被害軽減など、極めて重要な役割を担っている。

国土交通省では、これまでの知見や最新の技術を活用した柔軟なダム操作の実施可能性について、有識者を交えた検討会を設立し、技術的な指導・助言を得て、「ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向けたダム操作規則等点検要領及び同解説」を作成している。

本稿は、既設ダムで事前放流、特別防災操作を検討する際に、近年の降雨予測技術を活用する方法ならびに検討上の注意点を整理したものである。

キーワード：ダム貯水池、洪水調節、ダム運用、降雨予測

In Japan, flood damage is occurring everywhere like every year. There is also concern that the flooding will become more severe due to climate change. Dam operation reduces damage of downstream river by disaster prevention operation at flood. The Ministry of Land, Infrastructure and Transport established a study meeting with experts on the feasibility of the dam operation utilizing the latest technology, and got the advice and created the "Dam operation rule inspection manual".

In this paper, we analyze the effectiveness of dam manipulation utilizing recent rainfall forecast technology.

Key words : dam reservoir, flood control, dam operation, rainfall forecast

1. はじめに

ダムの洪水調節では、降雨に伴う貯水池への洪水流入量を把握し、操作規則に基づき洪水調節を実施している。洪水調節にあたって、今後の降雨量の見通しを把握することの重要性は高い。

ダム流域及び下流の今後の降雨量の見通しを把握するためには、気象庁の数値予報モデルによる気象予測から得られる降雨量の予測が有用である。

気象庁では昭和34年(1959)年に数値予報を開始し、その後の数値予報モデルの進歩とコンピュータの技術革新により、今日では数値予報モデルの結果を用いた気象予報が予報業務の根幹となっている。

気象庁の数値予報モデルは、予報する目的に応じた複数のモデルがあり、継続的にモデルの改良が行われている。

本稿では近年の降雨予測技術を活用したダム操作について、メソスケールモデル(MSM)を利用した事前放流操作について、気象予測成果の利用例ならびに利用上の注意点を示す。また、降水短時間予報(VSRF)を利用した特別防災操作の例を示す。

2. 気象庁が提供する数値予報モデル

(1) 数値予報モデルの種類

ダムの洪水調節では、今後数時間から数日先までの降水量の見通しを把握できることが求められる。この目的に利用できる気象庁の現行数値予報モデルに基づく予測雨量の情報としては、表-1に示す種類がある。

表-1 主な現行数値予報モデルに基づく予測雨量の情報

名称	モデルの仕様
全球数値モデル (GSM)	計算領域：全球 空間分解能：経緯度 20km 格子 運用回数：1日4回 初期時刻 00, 06, 18UTC：時間分解能 1時間の 84 時間予報 2007年11月以降：初期時刻 12UTC：時間分解能 1時間の 84 時間予報及び時間分解能 3時間の 192 時間予報 2013年5月以降：初期時刻 12UTC：時間分解能 1時間の 84 時間予報及び時間分解能 3時間の 264 時間予報
メソスケールモデル (MSM)	計算領域：日本周辺域 空間分解能：経緯度 5km 格子 時間分解能：1時間 運用回数： 2006年2月以降：1日8回の15時間予報 2007年5月以降：1日4回(00, 06, 12, 18UTC)の15時間予報及び1日4回(03, 09, 15, 21UTC)の33時間予報 2011年5月以降：1日8回(00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC)の全てについて39時間予報
降水短時間予報 (VSRF)	計算領域：日本周辺域 空間分解能：経緯度 1km 格子 時間分解能：1時間 運用回数：1日48回(毎00分、30分)の6時間予報

(2) 全球数値モデル (GSM)

現在運用されている全球数値モデル (GSM) は、空間解像度約20km、84時間先まで1時間毎の予測を1日4回、264時間先まで3時間毎の予測が1日1回配信されている。

GSMの予測結果は3日先までの短期予報、週間天気予報に利用されており、予測可能な現象スケールは高気圧、低気圧、台風、前線など約100kmを超える規模のものが対象となる。

GSM予測モデルは、初期値データ設定方法の改良、物理過程のモデル改良など、改良が随時行われており、予測精度が継続的に改善している。



図-1 GSMによる264時間先までの降雨予測の例

(3) メソスケールモデル (MSM)

現在運用されているメソスケールモデル (MSM) は空間解像度約5km、39時間先まで1時間毎の予測が1日8回配信されている。

MSMの予測結果は集中豪雨の予測等に利用されており、予測可能な現象スケールは日本周辺域の数十kmまでの規模の気象現象が対象となる。

MSM予測モデルは、地上GPS可降水量データの利用、気象衛星観測結果の同化など、モデルの改良が随時行われており、予測精度が継続的に改善している。

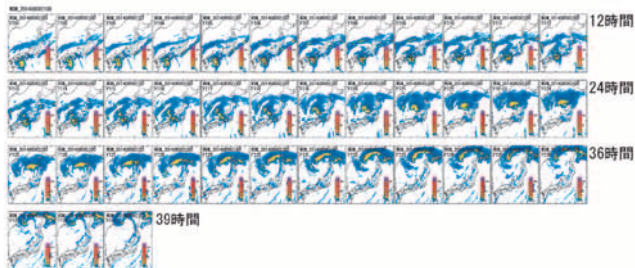


図-2 MSMによる39時間先までの降雨予測の例

(4) 降水短時間予報 (VSRF)

現在運用されている降水短時間予報 (VSRF) は実況補外型予測とMSM、局地モデル (LFM) の組み合

わせによって計算されており、空間解像度約1kmで6時間先までの予測が1日48回 (00分、30分) 配信されている。

降水短時間予報は、数時間先までの豪雨の動向を把握することで避難行動や災害対策に利用されている。

降水短時間予報は、降雨域移動モデルの改良、MSM及びLFMの改良に伴う精度改善等により予測精度が継続的に改善している。

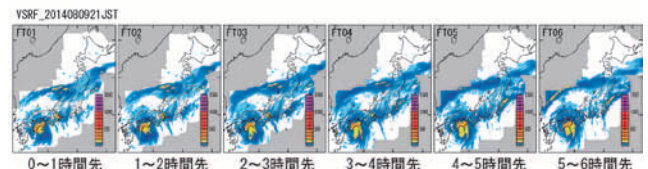


図-3 降水短時間予報による6時間先までの降雨予測の例

(5) 各予測資料の特徴の比較

a) 各種数値予報モデルによる予測結果の比較

全球数値モデル (GSM)、メソスケールモデル (MSM)、降水短時間予報 (VSRF) について、同一の初期時刻に対する0～1時間後までの日本周辺域の降水量予測を比較し、定性的な特徴について示す。

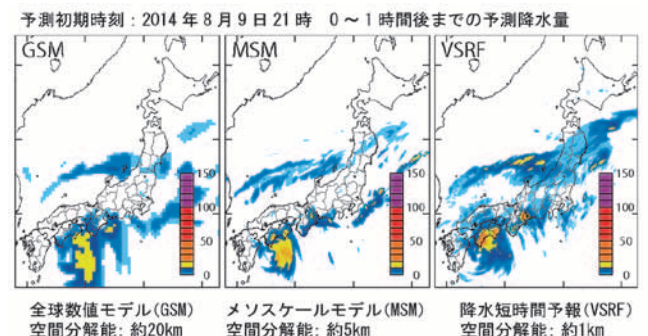


図-4 降水短時間予報による6時間先までの降雨予測の例

上図は平成26年 (2014年) 8月9日21時を初期時刻とするGSM、MSM、VSRFの初期時刻から1時間後までの降水量予測を比較したものである。先述した図-1～図-3は、この初期時刻に対する一連の降雨予測を示している。

このとき、実際の降雨状況は、台風第11号が高知県に接近し、四国地方の太平洋側、紀伊半島の太平洋側が大雨となっている。また、九州地方の北側から東北地方に前線が位置している。

b) 降水短時間予報 (VSRF) の定性的な特徴

VSRFによる降雨域の推定は、実況の雨域の移動速度を考慮した補外型予測によるものである。VSRFは地形による影響も考慮されているため、実際の雨量に最も近い。一方、6時間先までの予測であるため、この時点で強雨域となっている箇所では台風本体が通過し、降雨が減少するところまでは予測範囲となってい

ない。

c) メソスケールモデル (MSM) の定性的な特徴

MSMの予測では、台風本体の接近に伴う豪雨域は概ね実際に近い範囲として捉えられている。一方、台風本体から離れた場所での豪雨域、前線に伴う豪雨域は十分に予測されていない。

また、時系列的な予測に着目すると、39時間先までの予測であることから、台風本体が日本周辺を通過し、豪雨が降り止む時間帯を含めて予測されている。

d) 全球モデル (GSM) の定性的な特徴

GSMの予測では台風の中心位置、台風本体に伴う豪雨域が把握されている。しかしながら、空間分解能がMSMと比較すると粗いため、局地的な豪雨域は把握されていない。また、前線に伴う雨域の位置は概ね把握されているが、前線に伴う強雨域は把握されていない。

また、時系列的な予測に着目すると、11日先までの予測であるため、約2日の間に台風本体が日本周辺を通過し、豪雨が降り止むこと、おおよそ9日後に広い範囲での降雨が生じることが予測されている。

e) 数値予報モデルの定性的な特徴に関するまとめ

各数値予報モデルの定性的な特徴のまとめを表-2に示す。

表-2 現行数値予報モデルの定性的な特徴

名称	モデルの仕様
全球数値モデル (GSM)	<ul style="list-style-type: none"> 生起中の降雨の降り止み時期が予測できる。 11日後までの予測により、次の降水イベントが発生することが予測できる。 空間分解能が荒いため、降水量の定量的な予測精度は低い。
メソスケールモデル (MSM)	<ul style="list-style-type: none"> 生起中の降雨が高強度となる時間、降り止み時間が予測できる。 空間分解能が比較的細かく、地形の影響を考慮した豪雨域の範囲が把握できる。 降水量をある程度定量的に予測できる。 一連降雨の降り始めから降り止みまでを一回の予測で把握できない場合がある。
降水短時間予報 (VSRF)	<ul style="list-style-type: none"> 生起中の降雨について数時間後の状況が精度よく予測できる。 6時間を超えて降雨状況を予測するためにはMSM等との併用が必要である。

3. 近年の降雨予測技術を用いた事前放流検討

(1) 従前の事前放流検討における課題

洪水前に洪水調節に使える容量をできる限り多く確保する事前放流について、国土交通省では、「国土交通省所管ダムにおける事前放流の実施について（河川局長、平成17年3月30日）」が通達され、事前放流ガイドライン（案）に基づき各ダムで検討が実施されている。

直轄・水資源機構管理ダムで事前放流実施要領を策定しているダムは平成27年時点で13ダムと少なく、技術的な主たる原因として、確実な容量回復を前提としたときに確保できる容量がわずかであること、貯水位回復が不能となる可能性があることなど、降雨予測の精度に課題があるとしたダムが多い。

従前の事前放流ガイドライン（案）に基づく事前放流の検討では、気象庁、地方气象台から注意報・警報、台風情報に付帯して発出される「予想雨量の見込み」を用いていた。

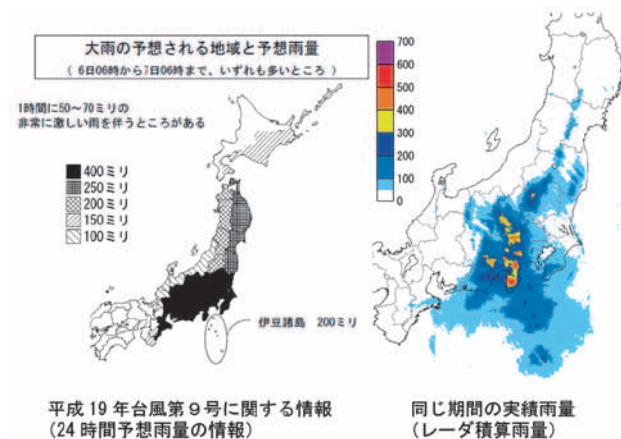


図-5 台風に伴い予想される雨量に関する情報の例

「予想雨量の見込み」は実況の監視・解釈、数値予報に基づき予想される雨量から、大きな災害をもたらす局地的な現象の発生を考慮して、「多いところでの見込み」として発表されている。この情報を予想雨量として取り扱っていると予測が実績よりも大きい過大予測となることが多い。特に、実績雨量が小さい段階での予測は、実績よりも大きい過大予測となる傾向がある。

このため、平成17年当時の回復可能水位テーブルは実績雨量が小さい範囲では貯水位を低下させることができず、ある程度の累積雨量となった段階で水位低下を開始するものが多かった。

ある程度の累積雨量となった段階から事前放流を開始した場合、既に降雨に伴う出水が貯水池に流入している場合が多く、洪水調節開始までに事前放流できる時間が短くなるため、事前放流量が十分に実施できないことが課題となった。

(2) 近年の降雨予測技術による予測精度向上

平成17年(2005年)時点の気象庁によるMSM予測は、空間解像度20kmの領域モデル(RSM)を高解像度化した空間解像度10km、1日4回の18時間予報として運用されていた。当時のMSMモデルは静力学モデルであり、力学過程、物理過程はRSMと同一であった。

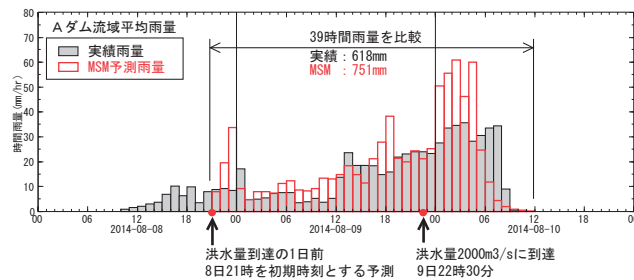
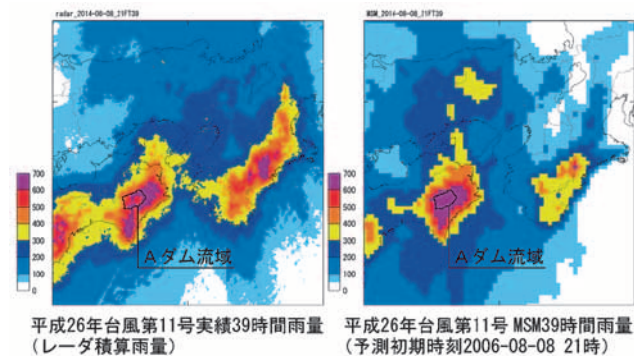
平成18年(2006年)2月15日よりMSM予測は空間解像度5kmで、1日8回の15時間予測として運用開始された。新しいMSMモデルは積乱雲の鉛直方向を表現できる非静力学モデルとなり、豪雨のシミュレーション精度が向上した。

平成19年(2007年)5月16日よりMSM予測は1日8回の予測のうち、4回が33時間予測となった。

また、平成23年(2011年)5月29日よりMSM予測は1日8回の予測全てが39時間予測となった。

MSM予測モデルは、地上GPS可降水量データの利用、気象衛星観測結果の同化など、モデルの改良が随時行われており、予測精度が継続的に改善している。

事前放流実施にあたって重要な、降雨の降り始めの段階における予測精度が向上したことで、事前放流で用いる回復可能水位テーブルの作成に際し、平成17年当時よりも確実に容量回復が見込める量を早期に精度よく推定可能となることが期待できる。



四国地方に位置するAダムについて、平成26年台風第11号の際の実績雨量とMSM39時間予測雨量の比較平面図を図-6に示す。また、Aダム流域の実績雨量とMSM39時間予測雨量について1時間雨量の時系列比較を図-7に示す。本事例ではダム流入量が洪水量に到達する約1日前の予測において、総降雨量、降雨の強まる傾向が把握できている。

(3) MSM予測雨量を用いた事前放流の検討例

国土交通省が策定した「ダムの機能を最大限活用す

る洪水調節方法の導入に向けたダム操作規則等点検要領及び同解説」(以下、点検要領と示す)において、事前放流に関する点検では『「降雨解析などにより確実に容量回復が見込める容量の活用」について近年の降雨予測技術による予測雨量を使用して検討する』こととされている。

平成17年の事前放流ガイドライン(案)と相違するのは、予測雨量としてMSMに代表される近年の降雨予測技術に基づく予測雨量を使用する点である。

点検要領に示される事前放流の検討例(以下Bダムの検討例と示す)について、以下に点検要領及び参考資料の検討例を引用して示す。

表-3 回復可能水位テーブル (①洪水調節で回復)

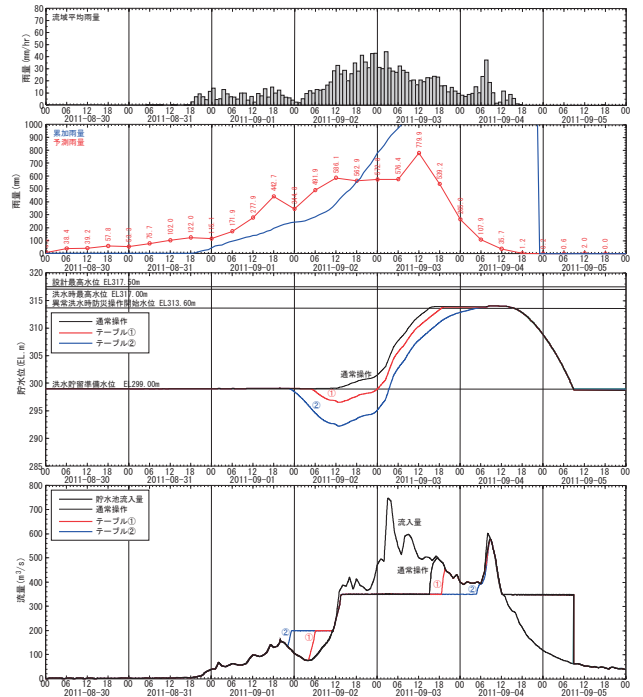
実績雨量ランク(mm)	予測雨量ランク (33時間予測雨量) (mm, 33h)	100	140	180	220	260	290	330	340	350	360	400	440	450	460	500	540	550	600	
1-18	事前放流	しない																		
19-29																				
30-39																				
40-59																				
60-79																				
80-99																				
100-119																				
120-139																				
140-159																				
160-179																				
180-199																				
200-																				

※点検要領及び同解説 参考資料P1-17より引用

表-4 回復可能水位テーブル (②洪水調節及び減水期間で回復)

実績雨量ランク(mm)	予測雨量ランク (33時間予測雨量) (mm, 33h)	100	140	180	200	240	250	290	300	340	350	360	400	440	450	460	500	540	550	600
1-18	事前放流	しない																		
19-29																				
30-39																				
40-59																				
60-79																				
80-99																				
100-119																				
120-139																				
140-159																				
160-179																				
180-199																				
200-																				

※点検要領及び同解説 参考資料P1-18より引用



※点検要領及び同解説 参考資料P1-27より引用

図-8 事前放流シミュレーション例

Bダムでは平成23年(2011年)の台風第12号に伴い近年最大規模の出水が生じており、異常洪水時防災

操作に至っている。

点検要領及び同解説に示されるBダムの検討結果では、その効果として、テーブル①、テーブル②による事前放流はともに異常洪水時防災操作そのものを回避することはできていないが、その開始時刻を遅らせることができたことが挙げられている。

(4) 回復可能水位テーブル検討上の注意点

回復可能水位テーブルを検討する際に洪水量に至る出水について、最大流入時点の累積雨量、洪水量到達前の最大予測雨量を確認し、その最小値により累積雨量の閾値(X)、予測雨量の閾値(Y)を把握し、両者を超過する出水について整理することとされている。

回復可能水位テーブルの検討において最も重要な点は、事前放流ができない範囲(表-3の灰色表示部分)、また、回復可能量の下限を明らかとすることである。

仮に、一定量の規模以上の出水を対象として回復可能量を整理した場合、予測雨量が過大評価で回復可能量が小さい事象を見落とす可能性がある。

このため、評価期間を通じた累積雨量の整理、予測雨量の整理を行い、閾値を超過する事象を悉皆で調査することで、見落としのない検討が可能となる。

Bダムにおいて、予測雨量が過大予測となった例を図-9及び図-10に示す。

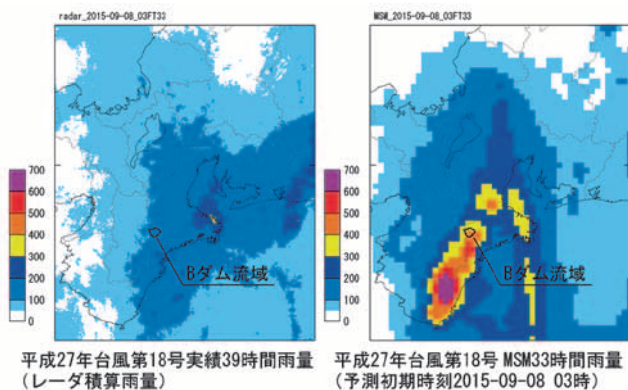


図-9 実績雨量とMSM予測の総雨量比較

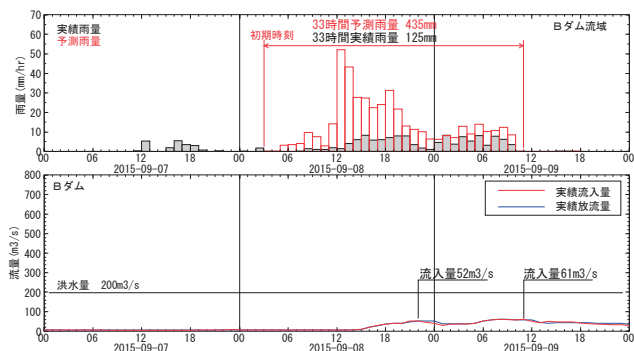


図-10 実績雨量とMSM予測の時系列比較

平成27年に台風第18号がBダムに接近した際、MSM予測雨量では9月8日3時から33時間に435mmの降雨を予想している。しかしながら、実績雨量は125mmにとどまっており、最大流入量も61m³/sと小さく、洪水量200m³/sに至っていない。

(5) MSMによる降雨予測精度の傾向

MSM予測雨量と実績雨量の相関について、ダム流域の気象特性との関係の観点から事例を示す。相関図の作成期間はMSM33時間予測が配信開始された平成19年(2007年)から平成27年(2015年)の6月から10月としており、MSM33時間予測の各回予測に対応する時間のレーダ積算雨量を示している。

a) Aダム(台風に伴う降雨が卓越するダム)

四国地方に位置するAダムでは平成26年台風第11号など規模の大きな降雨を対象期間内に経験している。AダムにおいてはMSMによる33時間予測雨量積算値と実績雨量の33時間雨量積算値の相関が比較的良好であり、著しい過小予測や過大予測は発生していない。

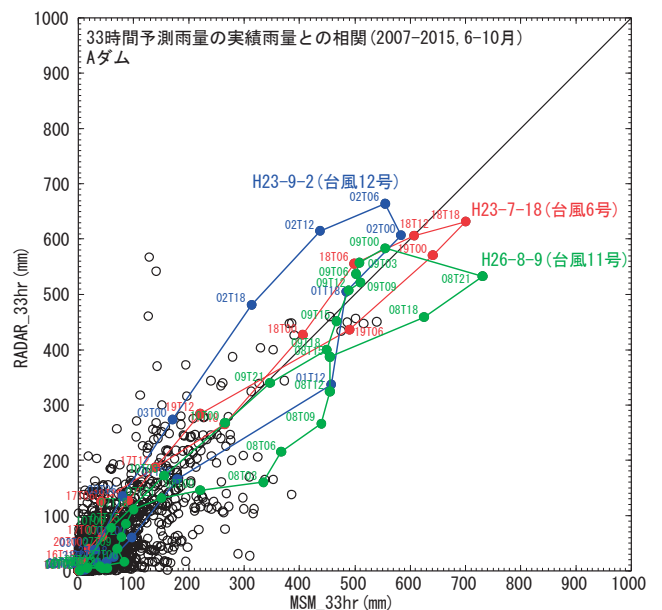
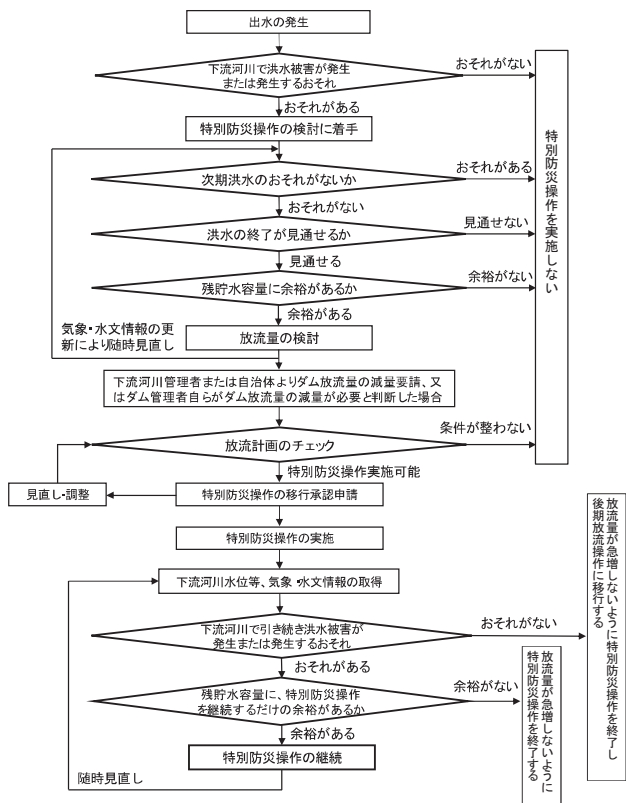


図-11 Aダムにおける予測雨量と実績雨量の比較

b) Bダム(台風に伴う降雨が卓越するダム)

中部地方に位置するBダム流域では平成23年台風第12号など規模の大きな降雨を対象期間内に経験している。BダムではMSMによる33時間予測雨量積算値と実績雨量の33時間雨量積算値の相関が比較的良好であり、著しい過小予測や過大予測は発生していない。



※点検要領P14より引用

図-15 特別防災操作の実施フロー

(2) 洪水の終了の見通しについての検討例

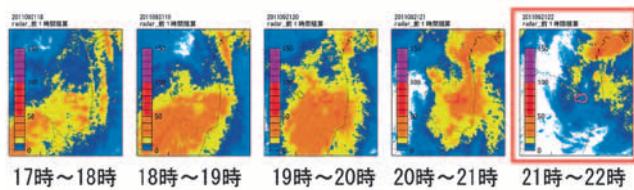
点検要領に示される特別防災操作の検討例（以下、Eダムの検討例と示す）について、以下に点検要領及び参考資料の検討例を引用して示す。

平成23年9月21日出水は当該河川流域で戦後最大規模の出水となり、支川F川に位置するEダム下流の本川G川の合流点下流で氾濫危険水位を超過し、Eダムにおいて特別防災操作を検討する。

Eダムにおいて、現況の降雨情報及び今後数時間の予測情報を基に洪水の終了について判断する。

a) 気象レーダによる現在までの降雨状況の推移

現況に至るまでの降雨の時間分布、空間分布の推移を気象レーダ（Cバンドレーダ）により監視し、流域の降雨のピーク及び降り終わりを予測する。図-16は対象出水について、10分毎の雨量を積算した1時間雨



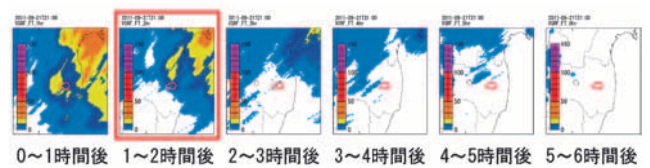
※点検要領参考資料P3-7に加筆して引用

図-16 気象レーダによるEダム周辺の1時間雨量の推移
(平成23年9月21日18時～22時)

量の時間推移を表示したものである。これによると、18時ころからEダム周辺に発生していた強雨域は徐々に北に抜け、9月21日22時の前1時間雨量は、それ以前の時間と比較して小さくなっており、既にピーク雨量が過ぎた可能性を示唆している。

b) 降水短時間予報による6時間先までの雨量予測

気象庁降水短時間予報から得られる6時間先までの時間雨量予測により、ダム流域の今後の雨の推移について見通しをたてる。図-17はダム流域周辺の予測雨量の推移を示したものであり、21日22時以降（2時間先以降）Eダム流域の雨量は大きく減少することが示唆される。



※点検要領参考資料P3-7に加筆して引用

図-17 降水短時間予報による6時間予測値
(予測初期時刻平成23年9月21日21時)

(3) 残貯水容量の余裕についての検討例

現洪水の終了が見通せた場合、本則操作による放流を継続した場合に残貯水容量に余裕があるか確認し、残貯水容量に余裕がある場合は、本則操作による放流よりも放流量を下げるのが可能かについて検討する。

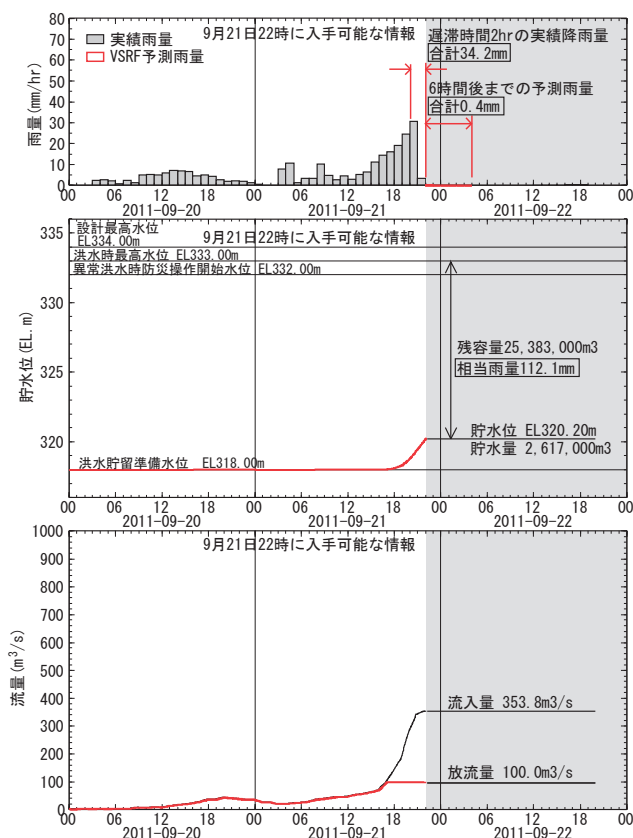
ここでは、適応操作で採用されている方法による例を示す。適応操作ではダムの流出の遅れ時間を設定し、その遅れ時間内の実績雨量及び降水短時間予報により得られる9時間の予測積算雨量が損失することなく、全てダムに流入すると仮定した総流入量と現在の空き容量の比較を通じて放流量を決定する方法である。

以下、Eダムでの9月21日22時における検討過程を点検要領参考資料から引用して示す。

9月21日22時時点の遅れ時間の実績雨量、6時間先までの予測雨量はそれぞれ34.2mm、0.4mmであり、その合計Rtotは34.6mmである。

この時点の空き容量相当雨量Rvolは空き容量を流域面積で除した $25,380 \text{ km}^3 / 226.4 \text{ km}^2 = 112.1 \text{ mm}$ である。

この結果、予測時間内の総流入量Rtotよりもその時点での空き容量Rvolを上回っているため、残貯水容量に余裕があると判断される。



※点検要領参考資料P3-9に加筆して引用

図-18 降水短時間予報による6時間予測値

5. おわりに

本稿では、気象庁が提供する現行の数値予報モデルによる予測資料について、その特徴をとりまとめた。

また、メソスケールモデル (MSM) を利用した事前放流操作について、気象予測成果の利用例ならびに利用上の注意点について示すとともに、降水短時間予報 (VSRF) を利用した特別防災操作の例を示した。

現行の数値予報モデルは、モデルの改良による精度向上と予測内容の拡張が随時行われており、既設ダムの洪水調節効果を高めるため降雨予測技術の活用方法について、引き続き研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省:事前放流ガイドライン(案),平成17年3月
- 2) ダム水源地環境整備センター:事前放流検討の手引き,平成17年6月
- 3) 国土交通省:ダムの機能を最大限活用する洪水調節方法の導入に向けたダム操作規則等点検要領及び同解説,平成29年7月
- 4) 気象庁予報部:配信資料に関する技術資料(気象編)第193号~1kmメッシュ解析雨量・降水短時間予報GPVの提供について~,平成17年3月25日
- 5) 気象庁予報部:配信資料に関する技術資料(気象編)第245

号~全球数値予報モデルGPVの変更並びにメソ数値予報モデル33時間予報、全球波浪数値モデル及び沿岸波浪数値予報モデル各GPVの配信について~,平成18年12月26日

- 6) 気象庁予報部:配信資料に関する技術資料(気象編)第259号~メソ数値予報モデルGPVの33時間予報配信開始とモデル改善について~,平成19年4月13日
- 7) 気象庁予報部:配信資料に関する技術資料(気象編)第373号~メソ数値予報モデルの計算時間延長について~,平成25年5月15日