

水工学シリーズ 12-A-9

ダム管理の高度化に向けて

国土技術政策総合研究所 河川研究部

鳥居 謙一

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2012 年 8 月

ダム管理の高度化に向けて

For the Purpose of Upgrading on Dam Flood Control

鳥居 謙一

TORII, Kenichi

1. はじめに

日本では、ダムや堤防をはじめとした治水施設への投資により治水インフラを蓄積し、その結果として治水効果が高まり洪水被害は着実に減少してきているものの、未だ洪水は毎年のように発生し、その度に大きな被害をもたらしている。2004年には観測史上最多の10個を超える台風が日本に上陸し、集中豪雨も頻発したことにより1年間で死者・行方不明者併せて232名¹⁾を出した。さらに記憶の新しいところでは昨年2011年8月の台風12号により、死者・行方不明者併せて90名を超えた²⁾。今後地球温暖化により降雨特性が二極化し、豪雨がより一層強まることにより治水安全度が低下するという予測もあり、より一層洪水に対して適切に対応していくことが求められる³⁾。

このような社会的要請を背景として、治水上のアセットの1種であるダムの効果を高めることは、アセットマネジメントの観点からも重要であり、豪雨に対する適応策とともに、「既存ダムを活用して如何にして治水効果を高めるか」が問われている。本稿では、ダムの管理のうちダムの操作を対象に、さらにダムの洪水調節に焦点を当て、ダム操作方法の法的位置づけ(2章)、出水時のダム操作の概要(3章)を述べた後、予測雨量を用いたダム洪水調節操作の評価(4章)について述べ、ダム操作の高度化についてまとめる(5章)。

2. ダムの操作方法の法的位置づけ

ダム操作は、ダム建設の所期の目的を達成するよう適切に行わなければならない。その方法を各ダム使用者の合意を得て具体的に定めたものが、ダムごとに策定する「操作規則」であり、ダムを操作するための基本となるべき事項及び基本原則を定めたものである。さらに、操作規則を受けて操作の具体的な方法及び操作上の重要事項を定めたものが「細則」である。また、細部の運用については必要に応じて別に要領及び基準を定めるのが一般的で、操作規則第15条のただし書き及び細則第29条に基づき具体的な操作方法を定めたのが「ただし書き操作要領」である。

本稿の対象であるダムの洪水調節操作は、上記の操作規則、細則およびただし書き操作要領によって規定されており、これらに基づいて実際の操作が行われる。国土交通省所管ダムにおける操作規則および細則については、河川法(昭和39年法律第167号)第14条及び特定多目的ダム法(昭和32年法律第35号)第31条の規定に基づき国土交通大臣が策定するのに対し、ただし書き操作要領はダム管理所長が地方整備局長等の承認を受けて定めることとなっており、実際にただし書き操作要領を適用する際も地方整備局長等の承認が必要である。以下に、河川法第14条および特定多目的ダム法31条の条文を記し、表1に河川法と特定多目的ダム法別の操作規則の策定手続きの概要を示した後、操作規則および細則の例を示す。

河川法：

第14条 河川管理者は、その管理する河川管理施設のうち、ダム、堰、水門その他の操作を伴う施設で政令で定めるものについては、政令で定めるところにより、操作規則を定めなければならない。

2 河川管理者は、前項の操作規則を定め、又は変更しようとするときは、あらかじめ、政令で定めるとこ

ろにより、関係行政機関の長に協議し、又は関係都道府県知事、関係市町村長若しくは当該河川管理施設の管理に要する費用の一部を負担する者で政令で定めるものの意見をきかなければならない。

特定多目的ダム法：

第31条 国土交通大臣は、多目的ダムの操作の基本原則に従い、多目的ダムの操作規則を定めなければならない。

2 多目的ダムの操作規則に定める事項については、政令で定める。

3 国土交通大臣は、多目的ダムの操作規則を定め、又は変更しようとするときは、あらかじめ、関係行政機関の長に協議するとともに、関係都道府県知事及びダム使用权の設定予定者又はダム使用权者の意見をきかなければならない。

表1 操作規則の策定に関する手続き

ダムの分類	区分	根拠法令	策定者	主な策定手続き
治水ダム	操作規則	河川法 (第14条)	河川管理者	一級河川：関係知事の意見聴取。 ※河川法第15条協議。 二級河川：関係市町村長の意見聴取。
兼用工作物 (多目的)	操作規則	河川法 (第14条)	河川管理者	①同上 ②利水者との協議(管理協定)。
特定多目的 ダム	操作規則	特ダム法 (第31条)	国交大臣	①関係行政機関の長との協議。 ②関係知事の意見聴取。 ③ダム使用权設定予定者又はダム使用权者の意見聴取。

操作規則の記載例⁵⁾：ダム洪水調節に関連する部分のみを抜粋

第1章 総則

(通則)

第1条 ○○ダムの操作については、この規則の定めるところによる。

(ダムの用途)

第2条 ○○ダムは、洪水調節、流水の正常な機能の維持、水道用水の供給及び発電をその用途とする。

第2章 貯水池の水位等

(洪水)

第3条 洪水は、流水の貯水池への流入量(以下「流入量」という。)が、毎秒300立方メートル以上である場合における当該流水とする。

(洪水期及び非洪水期)

第4条 洪水期及び非洪水期は、次の各号に定める期間とする。

- 一 洪水期 6月20日から10月31日までの期間
- 二 非洪水期 11月1日から翌年6月19日までの期間

(水位)

第5条 貯水池の水位(以下「水位」という。)は、ダム本体に取り付けられた水位計の測定結果に基づき算出するものとする。

(常時満水位)

第6条 貯水池の常時満水位は、標高515.0メートルとし、第15条の規定により洪水調節を行う場合及び第17条の規定により洪水に達しない流水の調節を行う場合を除き、水位をこれより上昇させてはならない。

(サーチャージ水位)

第7条 貯水池のサーチャージ水位は、標高566.5メートルとし、第15条の規定により洪水調節を行う場合及び第17条の規定により洪水に達しない流水の調節を行う場合には、水位をこれより上昇させてはならない。

(制限水位)

第8条 洪水期における貯水池の制限水位は、標高500.0メートルとし、第15条の規定により洪水調節を行う場合及び第17条の規定により洪水に達しない流水の調節を行う場合を除き、水位をこれより上昇させてはならない。

ただし、○○ダム管理所長(以下「所長」という。)は、第13条第1項に規定する洪水警戒体制にない場合において、河川環境の保全を図る必要があると認めるときは、標高501.0メートルを限度として、制限水位以上に水位を上昇させることができる。

第3章 貯水池の用途別利用

(洪水調節等のための利用)

第9条 洪水調節及び洪水に達しない流水の調節は、洪水期にあっては、標高500.0メートルから標高566.5メートルまでの容量15,000,000立方メートル、非洪水期にあっては、標高515.0メートルから標高566.5メートルまでの容量3,500,000立方メートルを利用して行うものとする。

第10、11、12条 略

第4章 洪水調節等

(洪水警戒体制)

第13条 所長は、次の各号の一に該当するときは、洪水警戒体制を執らなければならない。

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

2 所長は、第17条の規定により洪水に達しない流水の調節を行おうとする場合においては、洪水警戒体制を執ることができる。

(洪水警戒体制における措置)

第14条 所長は、前条の規定により洪水警戒体制を執ったときは、ただちに、次の各号に定める措置をとらなければならない。

- 一 細則で定める関係機関との連絡及び気象並びに水象に関する観測及び情報の収集を密にすること。
- 二 ゲート並びにゲートの操作に必要な機械及び器具の点検及び整備、予備電源設備の試運転その他ダムの操作に関し必要な措置をとること。
- 三 洪水期にあって水位が制限水位を超えているときは、水位を速やかに制限水位まで低下させること。

(洪水調節)

第15条 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。

- 一 流入量が、毎秒300立方メートルから毎秒4,300立方メートルまでの間にあって増加し続けているときは、毎秒{(流入量-300)×0.45+300}立方メートルの水量を放流すること。

- 二 前号の方法による操作の後、流入量が減少しはじめた時以後は、毎秒〔(前号の方法による操作中における最大流入量・300)×0.45+300〕立方メートルの水量を、流入量が当該水量に等しくなるとき又は流入量が前号の方法による操作中における最大流入量と等しくなるときまで放流すること。
- 三 前号の方法による操作の後、流入量が第1号の方法による操作中における最大流入量を超えた時以後は、前2号に規定する方法により放流すること。
- 四 規則第16条の規定によりダムから放流を行っている場合において、放流量が毎秒300立方メートルを下まわるまでの間に流入量がふたたび増加した場合で、流入量が放流量と等しくなるとき以後は、流入量が毎秒〔(当該放流量・300)×1/0.45+300〕立方メートルに等しくなるときまで、当該放流量に相当する水量を放流すること。
- 五 流入量が、前号に規定する毎秒〔(当該放流量・300)×1/0.45+300〕立方メートルを超えたとき以後は、前4号に定める方法により放流すること。
- 六 流入量が毎秒4,300立方メートルを超えたとき以後は、流入量が毎秒2,100立方メートルに等しくなるときまで、毎秒2,100立方メートルの水量を放流すること。
- (洪水調節等の後における水位の低下)
- 第16条 所長は、前条の規定により洪水調節を行った後又は次条の規定によ

細則の記載例⁵⁾：ダム洪水調節に関連する部分のみを抜粋

- (通則)
- 第1条 ○○ダムの操作については○○ダム操作規則(以下「規則」という。)に定めるほか、この細則の定めるところによる。
- (流入量)
- 第2条 規則第3条に規定する流入量は、規則第5条に規定する水位の上昇又は低下の時間的割合から次式により算出するものとする。
- $$Q=(V+q)/t$$
- Q: 流入量(単位:立方メートル/秒)
t: 単位時間(単位:秒)
V: 単位時間に増減した貯留量(単位:立方メートル)
q: 単位時間内の積算全放流量(単位:立方メートル)
- (洪水警戒体制)
- 第3条 規則第13条第1項第2号に規定する洪水警戒体制は、次の各号の一に該当する場合とする。
- 一 ○○ダム流域内(以下「流域内」という。)において連続雨量が○○ミリメートルに達したとき。
 - 二 今後、流域内において○時間の雨量が○○ミリメートルを超えると予想されるとき。
 - 三 流域内において総雨量が○○ミリメートルを超えると予想されるとき。
 - 四 台風の中心が東経○○○度から○○○度の範囲において、北緯○○度 に達したとき。
 - 五 前線の位置が東経○○○度から○○○度の範囲において、北緯○○度 に達したとき。
- 2 ○○ダム管理所長(以下「所長」という。)は、規則第13条の規定により、洪水警戒体制を執った場合における職員の呼集、作業分担、配置、その他必要な事項をあらかじめ定めておかなければならない。
- (洪水警戒体制時における関係機関への連絡)
- 第4条 規則第14条第1号に規定する関係機関は別表第○に掲げる機関とする。
- 2 所長は、規則第14条第1号の規定により連絡する内容、時期及び連絡の手段等についてあらかじめ別表第○に掲げる関係機関と協議しておくものとする。
- (洪水に達しない流水の調節)
- 第5条 規則第17条に規定する洪水に達しない流水の調節を行う場合においては、流入量を限度として、ダムから放流を行うものとする。ただし、規則第13条第1項に規定する洪水警戒体制にある場合においては、規則第15条に規定する洪水調節への円滑な移行ができるよう、その他の場合にあっては規則第22条に規定する流水の正常な機能の維持のための放流及び規則第23条に規定する水道用水の供給のための放流に支障を与えないよう行うものとする。
- (特にやむを得ない理由によるダムからの放流)
- 第6条 規則第4条第1項第5号に規定する特にやむを得ない理由があるときは、次の各号の一に該当する場合とする。
- 一 ダム本体及び貯水池等について調査又は補修を行うため必要があるとき。
 - 二 その他特に必要があるとき。
- (放流の原則)
- 第7条 規則第20条の規定により、ダムから放流を行う場合において、下流に急激な水位の変動を生じないように努めるものとした放流の原則は、次に定める方法を基準とする。
- | 放流の直前における放流量(Q)
(立法メートル/秒) | ゲート操作の最小時間間隔(分) | 1回の操作における放流量の増加割合(立法メートル/秒) |
|-------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| 0 ≤ Q < ○ | 10 | ○以内 |
| ○ ≤ Q < ○ | 10 | ○以内 |

- り洪水に達しない流水の調節を行った後(以下この条において「洪水調節等の後」という。)において、水位が制限水位又は常時満水位(以下この条において「制限水位等」という。)を超えているときは、速やかに、水位を制限水位等に低下させるため、洪水調節を行った後にあっては、前条本文に定める方法による操作中における放流量のうち最大の放流量、洪水に達しない流水の調節を行った後にあっては、毎秒300立方メートルの水量を限度として、ダムから放流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、下流に支障を与えない程度の流量を限度として、ダムから放流を行うことができる。
- 2 所長は、洪水調節等の後において、次の各号のいずれにも該当する場合においては、第8条のただし書きに規定する標高501.0メートルを限度として、制限水位以上に水位を維持することができる。
- 一 第13条第1項に規定する洪水警戒体制にないとき。
 - 二 河川環境の保全のため必要があると認めるとき。
- (洪水に達しない流水の調節)
- 第17条 所長は、気象、水象、河川環境の保全その他の状況により必要と認める場合においては、細則で定めるところにより洪水に達しない流水についても調節を行うことができる。
- 第18条～30条 略

○ ≤ Q < ○	10	○以内
○ ≤ Q ≤ 300	10	○以内

- ただし、気象、水象その他の理由により特に必要があると認める場合においては、流入量の時間的な増加割合を限度として放流を行うことができる。
- 2 所長は、気象、水象その他の理由により、ダムによって貯留された流水が、サーチャージ水位を超えると予想される場合、又はダム本体及び貯水池等に異常が生じた場合その他緊急かつやむを得ない場合においては、前項の規定によらないことができる。
- (洪水警戒体制の解除)
- 第8条 所長は、流入量が洪水量以下に減少し、気象、水象その他の状況により洪水警戒体制を維持する必要がなくなったと認めるときは、規則第18条の規定により洪水警戒体制を解除しなければならない。
- 2 所長は、洪水警戒体制を解除したときは別表第○に掲げる関係機関に連絡するものとする。
- (局長の承認事項)
- 第9条 所長は、規則第8条、規則第15条及び規則第16条第1項のそれぞれただし書きを適用する場合並びに規則第16条第2項、規則第19条第1項第2号及び第7条第2項をそれぞれ適用する場合は、あらかじめ○○地方整備局長(以下「局長」という。)の承認を得なければならない。
- (放流に関する通知等を行う場合)
- 第10条 所長は、次の各号の一に該当する場合においては、規則第25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。
- 一 コンジットゲートから放流を開始するとき。
 - 二 クレストゲートから放流を開始するとき。
 - 三 第7条第1項に規定する基準を超えて放流するとき。
 - 四 第7条第2項の規定により放流を行う場合において、下流に急激な水位の変動を生じると予想されるとき。
 - 五 その他、下流に急激な水位の変動を生じると予想されるとき。
- (放流に関する通知等を行う範囲)
- 第11条 規則第25条に規定する通知すべき関係機関は、別表第○に掲げる機関とする。
- 2 規則第25条に規定する一般に周知させるため必要な措置は、次の各号の一に示す範囲とする。
- 一 前条第1号及び第3号に規定する場合においては、○○警報所より○○警報所までの区間について行うものとする。
 - 二 前条第2号及び第4号並びに第5号に規定する場合においては、○○警報所より○○警報所までの区間について行うものとする。
- (放流に関する通知等の方法)
- 第12条 規則第25条に規定する放流に関する通知等は次の各号に定める方法により行うものとする。
- 一 関係機関に対する通知は第10条に規定する放流を開始する約1時間前に行うものとする。
 - 二 一般に周知させるため必要な措置は別表第○に掲げる警報所により行うものとする。
 - イ ダムに設置されたサイレンの吹鳴は第10条に規定する放流を行う約30分前に行うものとする。
 - ロ ダム以外の警報所のサイレンもしくはスピーカー(擬似音によるもの)の吹鳴は、各警報所地点の水位が上昇すると予想される約30分前に行うものとする。
 - ハ イ、ロに規定する措置のほか、警報車による下流の巡視を行うものとする。

ニ サイレンもしくは擬似音による吹鳴の方法は次に定める方法によるものとする。

吹 鳴	休 止	吹 鳴	
約1分	約10秒	約1分	(左記を3回繰り返し)

(放流に関する通知等の内容)

第13条 前条第1号に規定する通知は放流する日時のほか放流量又は放流により上昇する下流の水位の見込みを示して行うものとする。

(ゲート及びバルブの名称)

第14条 コンジットゲートの名称は次の各号のとおりとする。

- 一 コンジットゲートは下流側にあるものをコンジットゲート、上流側にあるものをコンジット予備ゲートという。
- 二 コンジットゲートは左岸側からコンジット1号ゲート、コンジット2号ゲートという。
- 三 コンジット予備ゲートは左岸側からコンジット予備1号ゲート及びコンジット予備2号ゲートという。

2 クレストゲートの名称は左岸側からクレスト1号ゲート、クレスト2号ゲートという。

3 ダム本体上流側にあり選択取水を行うためのゲートを取水ゲートと

4 利水放流管バルブは左岸側にあるものから主管バルブ及び分岐管バルブという。

5 利水放流管予備バルブは、左岸側にあるものから主管予備バルブ及び分岐管予備バルブという。

(コンジットゲート及びコンジット予備ゲートの操作)

第15条 コンジットゲートは、次の各号に掲げる場合を除き、常に閉塞しておくものとする。

- 一 規則第6条、規則第7条、規則第8条、規則第15条、規則第16条、規則第17条及び規則第4条の各号の一に該当する場合において、ダムから放流を行うとき。
- 二 その他、特に必要があるとき。

2 コンジット予備ゲートは、次の各号に掲げる場合を除き、常に全開しておくものとする。

- 一 規則第4条第2号の規定によりゲートの点検又は整備を行う必要があるとき。
- 二 その他、特に必要があるとき。

(コンジットゲート及びコンジット予備ゲートの操作の方法)

第16条 コンジットゲートを操作する場合には規則第4条第2号に規定する場合を除き、原則として次の各号の定めによらなければならない。

- 一 コンジットゲートの操作はコンジット1号ゲート、コンジット2号ゲートの順に開くものとし、閉じるときはその逆の順序で操作するものとする。
- 二 コンジットゲート各門の開度の差は、〇〇センチメートル以内とする。
- 三 コンジットゲートの開閉時における最小開度は〇〇センチメートルとする。

2 コンジット予備ゲートを操作する場合には、規則第4条第2号に規定する場合を除き原則として次の各号の定めによらなければならない。

- 一 コンジット予備ゲートは常に全開又は全閉するものとし、半開の状態に置いてはならない。
- 二 コンジット予備ゲートを全開する場合においてはコンジットゲートをあらかじめ全開し水圧の平衡を保ったのち操作するものとする。
- 三 コンジット予備ゲートを全開する場合においては、緊急やむを得ない場合を除き、コンジットゲートを全開したのちに操作するものとする。
- 四 コンジット予備ゲートは、操作の必要がなくなった場合においては、速やかに所定の位置に格納するものとする。

(クレストゲートの操作)

第17条 クレストゲートは、次の各号に掲げる場合を除き、常に閉塞しておくものとする。

- 一 規則第15条のただし書きにより操作を行うとき。
- 二 規則第19条第2号の規定によりクレストゲートの点検又は整備を行うため必要があるとき。
- 三 その他、特に必要があるとき。

(クレストゲート操作の方法)

第18条 クレストゲートを操作する場合には規則第4条第2号に規定する場合を除き原則として次の各号の定めによらなければならない。

- 一 クレストゲートの操作はクレスト1号ゲート、クレスト2号ゲートの順に開くものとし閉じるときはその逆の順序で操作するものとする。
- 二 クレストゲート各門の開度の差は〇〇センチメートル以内とする。
- 三 クレストゲートの開閉時における最小開度は、〇〇センチメートルとする。

第19条～第28条 略

第29条 規則及びこの細則に定めるもののほか、規則及びこの細則の実施のため必要な手続きその他の要領は所長が定めることができる。

2 局長は細則を変更した場合ダム使用権者（又は他の工作物の管理者）に報告しなければならない。

3. 出水時のダム操作の概要

本章では、ダムによる洪水調節について、参考文献 5)8)を引用しつつ概要を記す。

3. 1 出水時のダム操作の流れ

操作規則においては、貯水池への流入量が操作規則で規定する洪水量（ゲートを有するダムでは、一般的には洪水調節開始流量となっている）を超過している流水を「洪水」と定義していることから、ここでは洪水に達しない流水を含めて「出水時」のダム操作の流れを説明する。

ダムにおける出水時の操作を一般的な実施過程に従って段階的に分類すると、1) すりつけ操作、2) 水位維持操作、3) 洪水調節操作、4) 異常洪水時操作（ただし書き操作）、5) 後期放流操作に分類される。更に、予備放流方式のダムにあっては予備放流操作が、河川環境の保全や異常洪水対応のための操作を行うダムにあっては事前放流操作がそれぞれ加わることになる。出水時におけるダム操作の一般的な流れを図1に示す。

1) すりつけ操作

すりつけ操作は、洪水警戒体制が発令された後、出水の最初に行われるもので、制限水位又は常時満水位（以下「制限ダム水位等」という）や予備放流水位までの間で、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。放流量を一気に流入量まで増加させることは通常許されず、段階的に増加させるためにすりつけ操作が必要となる。具体的には、すりつけ操作における放流量の増加は、操作規則等に規定する「放流の原則（下流に急激な水位の変動を生じさせないようダムからの放流を実施することを定めた規定）」に従って行うことになる。

この操作のポイントは、ダムからの放流開始の時期をいつに設定するかという点にある。まず、現在の現貯水位から制限水位等の間の空容量の範囲内で放流の原則に従い放流量を流入量に等しくなるように設定しなければならない。したがって、空容量が小さい場合には、空容量が大きい場合に比べより早い時期にすりつけ操作を開始し、流入量が小さい時点で放流量を流入量にすりつける必要がある。

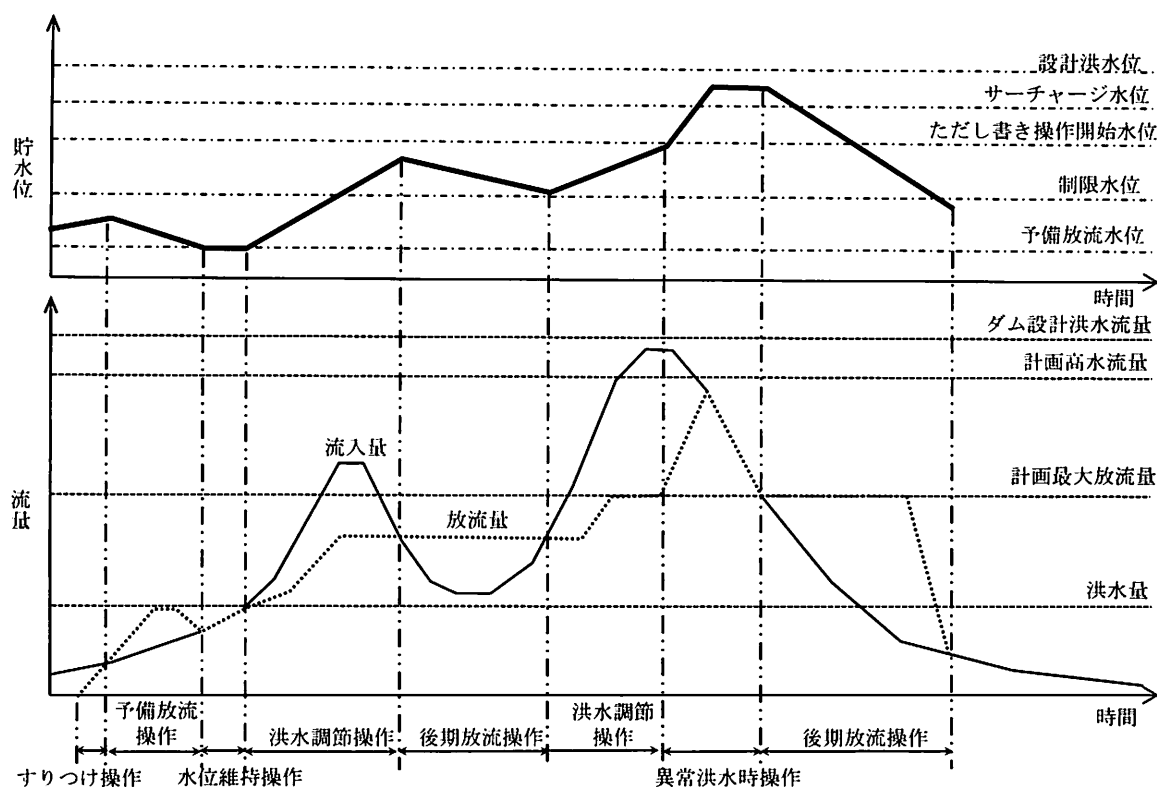


図1 出水時のダム操作の流れ（予備放流方式の場合）⁸⁾

さらに多目的ダムでは、渇水期の利水補給等によって貯水位が制限水位等や予備放流水位よりも低下している場合は、出水時には利水にとっては、できるだけ放流を遅らせて利水容量のより確実な回復を図ることが要請される。一方、治水にとっては、流入量が洪水量に達するまでに、確実にすりつけ操作を完了させ、来るべき洪水調節操作への円滑な移行を図ることが要請される。

この利水側と治水側の要請を両立するためには、流入量のある程度予測し、洪水量に達するか見極めたうえ、洪水量に達することが予測される場合には、放流の原則の下で、制限水位等までの空容量、予測流入波形から放流開始時刻を設定し、利水容量の回復を図りつつ放流量を増加させ、流入量が洪水量に到達するまでにすりつけ操作を完了させる必要がある。

一方、出水初期における流入量の予測は、流域における損失雨量（前期降雨の状況）等の影響を受けるため、既往出水における流入量の立ち上がり状況等も考慮し、あらかじめ利水者側の合意を得てダムごとに放流開始の判断基準を作成しておくことが望ましい。なお、今村⁹⁾は水位放流方式による新たな放流開始の判断基準を提案しており、この手法については3.2で紹介する。

2) 水位維持操作

水位維持操作は、貯水位をある一定の標高に維持するため放流量を流入量と等しくする操作である。出水時の操作では、予備放流水位や制限水位等を維持する場合に用いられる。

3) 洪水調節操作

洪水調節操作は、貯水池への流入量が洪水調節開始流量に達したときから流入量がピークを過ぎた後、放流量と流入量が等しくなるまでの間において、操作規則の本文に規定する洪水調節方法に従ってダムから放流を行う操作である。洪水調節操作の方式は大きく4つに分類される。これらについては3.3で紹介する。

4) 異常洪水時操作

異常洪水時操作は、各ダムの「ただし書き操作要領」において、計画規模を超える洪水時の操作方法（以下、「ただし書き操作」という）としてあらかじめ規定されている。ただし書き操作要領では、主にただし書き操作に入る時期と具体的な操作方法（ゲートの開度調整）が規定されている。例えば、ただし書き操作に入る時期は、貯水位が予め設定されている「ただし書き操作開始水位」に達し、さらに「サーチャージ水位」を越えることが予測される場合、ただし書き操作に入ることが規定されている。また、操作方法としては、要領の定めに従って水位に応じて段階的にゲートの開度を調整して（引き上げ）、最終的に流入量＝放流量となるようにゲートを操作することが規定されている。これに対し、裏戸は異常洪水時の操作として、放流量と空容量に応じて次の放流量を決定する「VR方式」を提案している¹⁰⁾。この方法については3. 4において紹介する。

5) 後期放流操作

後期放流操作は、洪水調節によって上昇した貯水位を速やかに制限水位等まで低下させる操作である。操作規則においては、後期放流操作時の放流量の上限が示されており、洪水調節後にはその時に最大放流量以下、洪水に達しない場合には洪水量以下で放流することが規定されている。下流の状況、今後の降雨の見通しにより、以下の3つのパターンが考えられる。

1. できるだけ早く水位を下げるために、最大放流量で定量放流する。（例えば、次の台風が接近している場合）
2. 洪水調節操作終了時のゲート開度を一定に保ったまま漸減させつつ放流する。（例えば、次の洪水まで時間がある場合）
3. 洪水量以下まで流入＝放流で放流を漸減させ、洪水量以下で定量放流する。（例えば、下流で被害が発生している場合）

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

6) 予備放流・事前放流操作

多目的ダムは、治水・利水双方の機能を兼ね備えているので、ダムの貯水容量を有効に利用するため、洪水が発生すると予想されるときにその都度放流を行って洪水調節容量を確保する予備放流方式が採用される場合がある。

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

予備放流水位は、以前は「予備放流水位の最低限度」が規定され、洪水の都度洪水調節に必要な容量を定め確保すればよく、どこまで予備放流を行うかは管理所長の判断に任されていた。しかし、洪水予測の不確実さから予備放流の不足を招くおそれもあり、この結果十分な洪水調節を行えなくなる場合も考えられる。このため、「予備放流水位」を設定して、洪水調節を行う場合には必ずそこまで予備放流を行うこととなった。

洪水の規模を事前に予測することは非常に困難であるが、しかし、洪水調節を行うには、その洪水に対応した洪水調節容量を貯水池内において確保する必要があり、したがって事前に洪水の規模を予測しなければならない。このことは、予備放流方式を採用しているダムにおいては特に必要である。

ダム操作細則作成要領（案）⁵⁾によれば、標準的な細則例として、現在の気象予報の精度から見て事前に降雨の時間分布を把握することは難しいため洪水の規模すなわち最大流量および洪水継続時間は総雨量より推定することと仮定している。また、流入量の時間的変化は最大流入量を頂点とする三角形と

仮定している。

また、「洪水の流出解析が完成しているダムについては、その方法により、上述のように推定した洪水の予測を修正すべきである。また、気象予報技術の進歩によって事前に降雨の時間的分布が把握できれば、そのデータをもとにして洪水の予測を修正していくものとする」としている。

さらに、基本的な考え方として「洪水計画体制に入ればまず本条の仮定により洪水を推定し、予備放流水位を定めるということ。この予測は最終的なものではなく常に新しい雨量データによって修正するものとする。洪水の流出の推定方法で他に適当な方法がある場合にはその方法によって修正すべきであること」としている。

これに対して、計画規模を超える洪水への対応や特別な河川環境の保全といった計画外の目的のためのダム貯水池の高度利用に伴う洪水調節前に行う放流操作を事前放流と呼ぶ。

前者は、計画規模を超えるような異常洪水等が予測される際に、ただし書き操作の緩和に活用するため、事前にダムから放流を行って利水容量内に一時的に洪水調節のための容量を確保するための操作である。事前放流ガイドライン（案）及び同解説においては、事前放流により確保する容量の範囲としては、1) 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、2) 未利用容量の活用、3) 不特定容量の活用、4) 堆砂（死水）容量の活用が対象として挙げられている⁵⁾。

一方後者は、「ダムの弾力的管理」と呼ばれており、ダム下流の河川環境の保全を目的とし、洪水調節容量の一部に流水を貯留し、放流するダム管理行為をいう。弾力的管理では、まず、対象とするダム下流の河川環境保全のための具体的な目的（以下、活用目的）を明確にする。弾力的管理で目標とする具体的な目的には、よどみ水の清掃、河川景観の向上、付着藻類の剥離・更新支援、魚類の遡上・降下支援、特殊環境（湿地）の保全等があげられる。これらを実現するためには、洪水調節容量の一部に流水を貯留する必要がある、あらかじめ貯留可能な貯水容量（以下、活用容量）、貯水位（以下、活用水位）及び対象期間（以下、活用期間）を設定する。弾力的管理を実施する場合にも洪水に対する安全性の確保は前提条件であり、活用期間中に洪水の発生が予想されるときには、本来の洪水調節に支障が生じないように、あらかじめ活用水位から所定の水位（制限水位）まで低下させるための事前放流を行うことが求められる。

3. 2 すりつけ操作における水位放流方式

3. 1 1) において記述した通り、すりつけ操作のポイントは、ダムからの放流開始の時期をいつに設定するかである。貯水位が制限水位等よりも下にある場合は、利水容量の回復を行いつつも放流量を流入量に近づける操作を実施する必要がある。しかし、操作規則にはその具体的な方法が明確に規定されていないため、放流開始のタイミングはダム管理者の判断に委ねられている。

この問題に対しては、今村により水位放流方式⁹⁾が提案されており、図2はその概念に示す。指標として限界流入量を導入して、放流の開始時期を流入量が限界流入量に達した時点と規定することで、高度化しようとするもので、その概要について紹介する。

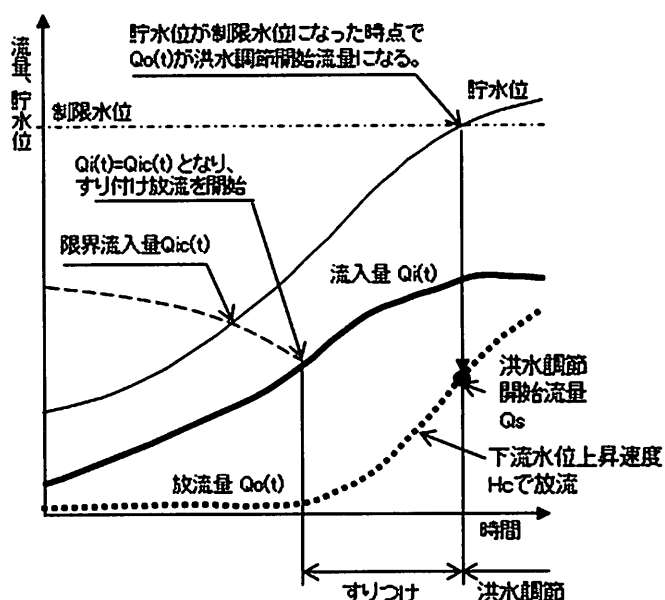


図2 水位放流方式によるすりつけ操作の概念図
(参考文献 11) 12)に加筆)

3. 2. 1 水位放流方式の考え方

水位放流方式の理論的背景や詳細は参考文献 9)11)12)等に譲り、ここでは概要のみを記す。水位放流方式は、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。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、治水容量内への過貯留を相当程度小さくできるものと期待される。

具体的な手法を示す。放流関数を式 1 で示される $V(t)$ の 2 次式とし、下流河道の水位と流量の関係が式 2 で示されるとする。治水容量内の貯留量 $V(t)$ は放流量と流入量の差で式 3 のように表される。

$$Q_o(t) = AV(t)^2 \quad \text{式 1}$$

$$Q_o(t) = K(H(t) - h_o)^2 \quad \text{式 2}$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_o(t) \quad \text{式 3}$$

ここに、 $V(t)$ ：貯留量（放流開始時点を 0 とする）、 $H(t)$ ：河川水位、 h_o ：水位観測所のゼロ点標高、 $Q_i(t)$ ：貯水池流入量、 $Q_o(t)$ ：当該時刻におけるダム放流量

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。

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{AV(t)}{K(H(t) - h_o)} (Q_i(t) - Q_o(t)) \quad \text{式 4}$$

式 4 において、貯水位が制限水位に達した時に放流量 Q_o =洪水調節開始流量 Q_s となるよう定数 A を定義すると ($A=Q_s/V_w^2$ 、 V_w ：空容量)、次のように表される。

$$Q_o(t) = \frac{Q_s}{V_w^2} V(t)^2 \quad \text{式 5}$$

これを式 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。

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{\sqrt{Q_s}}{\sqrt{KV_w}} (Q_i(t) - Q_o(t)) \quad \text{式 6}$$

$dH(t)/dt$ 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、

$$Q_i(t) \leq \frac{H_c \sqrt{KV_w}}{\sqrt{Q_s}} + Q_o(t) \equiv Q_{ic}(t) \quad \text{式 7}$$

式 7 の Q_{ic} が限界流入量である。

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 、 Q_s を定める。
- ② 時間経過の中で、その段階での空き容量 V_w から限界流入量 $Q_{ic}(t)$ を計算する。
- ③ $Q_i(t) < Q_{ic}(t)$ の場合には、②の計算を繰り返す。
- ④ $Q_i(t) = Q_{ic}(t)$ となった段階で、その時の V_w から式 1 により A ($A=Q_s/V_w^2$) を確定し、放流関数を決定する。
- ⑤ 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_o 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。

3. 2. 2 水位放流方式の留意事項

今村⁹⁾は水位放流方式を適用する際に下記の点への留意が必要であることを述べている。

- ・ 事前放流において水位放流方式における放流関数を水位（または貯水量）の関数とした場合、流入量と放流量の間に一定の差が残ってしまう。そこから一定率一定量方式の洪水調節操作（3. 3に記述）に移行する際には、一定率一定量方式の放流関数は流入量と放流量の関係で示されることから、放流量を流入量に合わせるための若干の対応措置が必要となる。
- ・ 水位上昇速度が放流の原則である 30cm/30 分（=H_c）を超える事例があり、ダムの洪水特性、下流河道の状況等の実態に基づき対処する必要がある。

また、放流を開始するためには、事前に関係機関に通知する必要があるため、放流開始時刻の決定においては、予測流入量、予測限界流入量が必要となるため、この面での不確実性は排除することはできない。

3. 3 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。また、操作自体が慎重に、かつ安全・確実を期して行う必要がある。更に、ダム及び貯水池並びに関連施設の安全性が確保されなければならないことも重要な要件である。このような観点からダムによる洪水調節操作の基本原則として、次の4点を挙げている⁸⁾。

- 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、操作規則第15、16条のただし書き規定の精神）
- ④ 洪水ごとの適応操作（上記①から③を確保した上で効果の最大化を図る）

現在の洪水調節に係る操作は、規則操作第15条において「所長は、次の各号に定める方法により洪水調節を行わなければならない。ただし、気象、水象その他の状況によりとくに必要があると認める場合においては、この限りではない。」と規定している。本規定の前半は、「固定ルール調節方式」と呼ばれるもので、あらかじめ十分な技術的検討を行って洪水調節方法を定めるものである。この操作方式は、上記①②に対応するもので一定の効果を確実に確保でき、更に操作の過程において主観的判断を要しない確実な操作を第一としている。また、後半は、上記③に対応した「ただし書き規定」と呼ばれるものであるが、判断に合理性が必要である。さらに、上記①から③に掲げる確実性、安全性、即応性を満足した上で、洪水ごとに効果の最大化を図ろうとするのが④の操作である。この操作方式は、河川全体の水文諸量の時間的な変化の予測が、十分な精度で的確に行えることが前提となるため、現段階では一定の条件下で用いられている。

代表的な洪水調節を目的に有するダムの洪水調節方式は、大きく以下に示す1)から4)に分類される。

1) 一定量放流方式

洪水の流入波形等に関わらず、一定の流入量以上を調節してダムから放流を行う、いわゆるピークカット方式であるため調節に必要な貯水容量は小さくなる。この方式は、ダム下流の河道整備が進んでおり、ある流量規模までは安全な流下が可能である場合には高い洪水調節効果を発揮できるが、河道の全区間を通じてこのような条件が整っている河川は少なく、また中小洪水に対しては効果を発揮できない場合も多い。

2) 一定率一定量調節方式

洪水の流入量のうち洪水調節開始流量以上について、流入量がピークに達す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以降は一定量を放流する調節方式である。この方式は、中小洪水に対しても効果が期待できる、ダム下流の河道整備が余り進んでいない河川に適している。

3) 自然調節方式

洪水調節用ゲートを有さないか、又はゲートは有しても一定開度を保持する等洪水時にゲート操作を行わない方式である。調節に必要な貯水容量は大きくなるが、人為的な操作がないため流出の速い小流域のダムでも所定の効果を発揮することができ、更に管理が容易な方式でもある。また、小流域（おおむね 20km² 以下）のダム並びに洪水調節容量の小さい（相当雨量がおおむね 50mm 以下）ダムでは、洪水到達までの操作が繁雑となるため自然調節方式とすることが望ましい。

4) その他の方式

前記 1) から 3) のほか、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地形的にその採用が困難な場合が多く、後者は洪水の前半部あるいは後半部において特に調節する場合、又は洪水の最大流入量付近を特に貯留（いわゆる鍋底調節）する必要のある場合に採用させるが、実操作にあたっては洪水波形の予測が必要となる。

3. 4 異常洪水時操作における VR 方式

ただし書き操作要領は、安全性・確実性の確保に主眼が置かれたものである。一方、裏戸¹⁰⁾は、ダムの有する洪水調節容量を有効に利用し、最大放流量をできるだけ小さくすることを目的とするただし書き操作として、放流率 R を貯水量 V に応じて変化させ、放流量を決定していく方法（VR 方式）を提案している。

3. 4. 1 VR 方式の考え方¹⁰⁾¹²⁾¹³⁾

VR 方式は、規則操作中のある時点の空き容量から判断して、以後の洪水を空き容量を完全に使い切って貯留するよう放流量を逐次増加又は減少させていく操作方式である。次に VR 方式の基本的な手順を示す。

① 基準流入波形の推定

流入量の低減傾向を表現する基準流入波形を導入する。基準流入波形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。（図 3 参照）。

$$Q_i'(t) = a \cdot b^{-t} \quad \text{式 8}$$

ここに、 $Q_i'(t)$ ：時刻 t におけるダム流入量（推定値）、 a ：洪水のピーク流量で定まる定数、 b ：洪水のピーク流量毎に設定される洪水の低減傾向を表現する定数

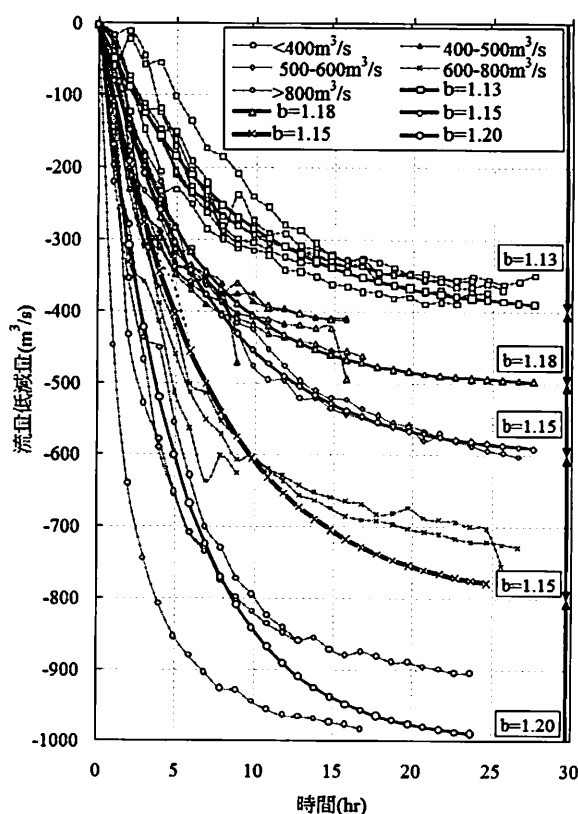
② 基準流入波形から導出される空容量率～放流率の関係

図 3 は、VR 方式において、推定した基準流入波形を活用しつつ、空容量 V_e と放流率 R' の関係の導出方法を示したものである。

基準流入波形 $Q_i'(t)$ に対して、放流量 Q_1 とすると時刻 t_f の放流率 $R'(t_f)$ は次式で与えられる。

$$R'(t_f) = (Q_1 - Q_s) / (Q_i'(t_f) - Q_s) \quad \text{式 9}$$

ここに Q_s ：洪水調節開始流量



※ 右端の矢印は各基準波形の適用範囲を示す。

図 3 基準流入波形の算定 (B ダム)¹²⁾¹³⁾

一方、時刻 t_f 以降放流量 Q_1 を固定した場合、洪水調節のために確保する必要がある容量＝空き容量 $V_e(t_f)$ は、次式で与えられる。

$$V_e(t_f) = \int_{t_f}^{t_s} (Q'_i(t) - Q_1) dt \quad \text{式 10}$$

ここで、時刻 t_s は、 $Q'_i(t) = Q_1$ となる時刻である。

式 9、式 10 により、 t_f を介して空容量率 V_e/V_f (V_f : 洪水調節容量) と放流率 R' の関係が得られる。図 5 は、 Q_1 を $B1 < B2 < B3$ とした場合の空容量 V_e/V_f と放流率 R' の関係の一例である。

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、その時の放流量と空容量の関係から求められる基準流入波形に対する放流率 $R'(t)$ と比較を行う。

$R(t) > R'(t)$ の場合：放流率が大きすぎるためダム容量を使い切れない。

$R(t) < R'(t)$ の場合：放流率が小さすぎるためダム容量が不足する。

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 $R'(t)$ に修正する。

3. 4. 2 VR 方式の留意事項

3. 4. 1 は、VR 方式の基本的な考え方であり、裏戸¹⁴⁾は、以下のような状況における VR 方式の適用については、3. 4. 1 で記した方式を修正する必要がある、その修正の考え方および試算結果を示すと同時にさらに検証を進める必要があることを述べている。

- ・最大流入時の貯水量が 8～9 割を超えるような洪水への応用
- ・二山洪水への応用
- ・ダム下流からの要請にもとづく放流量抑制への VR 方式の応用

4. 予測雨量を用いたダム洪水調節操作の評価

ここでは、近年発展が著しい予測雨量情報のダムの洪水調節への活用について述べる。精度良く雨量を予測できるようになれば、図 6 左に示すように、超過洪水発生時にあたっては、適切な事前放流の実施と放流量の設定により、ただし書き操作を回避又は緩和し、大幅に最大放流量を低減することができる。また中小洪水においては、図 6 右に示すように洪水調節開始流量（無害流量）による定量放流に変更することにより、治水容量をより多く活用することで被害を抑えることができる。ここでは、気象庁短期予測雨量に関する近年における変遷とダム流域における予測精度について述べた後、現在のダム洪水調節における予測雨量の利用事例について述べる。また、予測雨量の精度において誤差は不可避であるという立場から、予測雨量の誤差の発生確率を考慮したダム洪水調節操作の評価の視点について述べる。

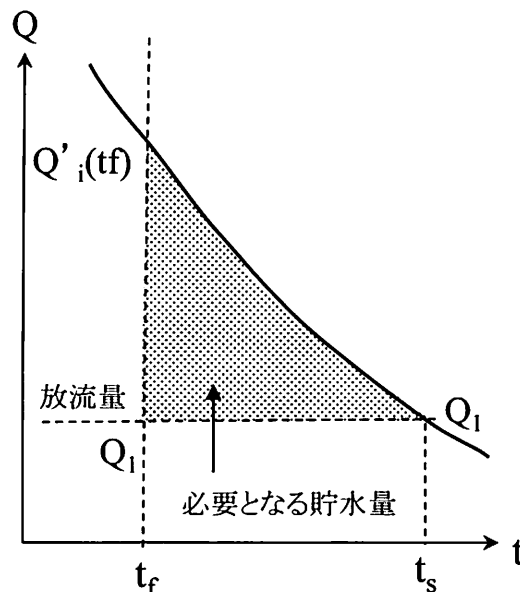


図 4 基準流入波形と空容量¹²⁾¹³⁾

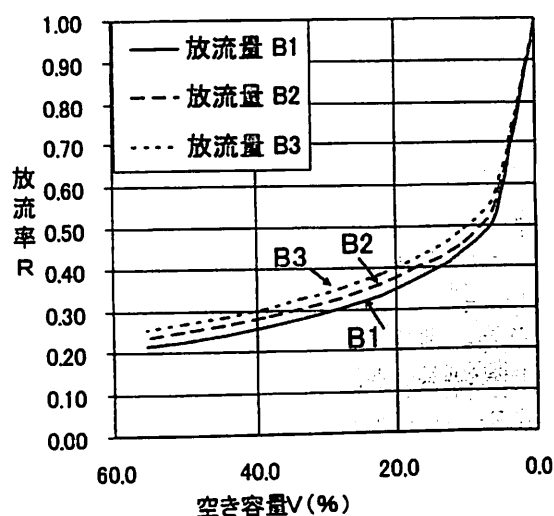


図 5 放流量毎の空容量率と放流率¹⁴⁾

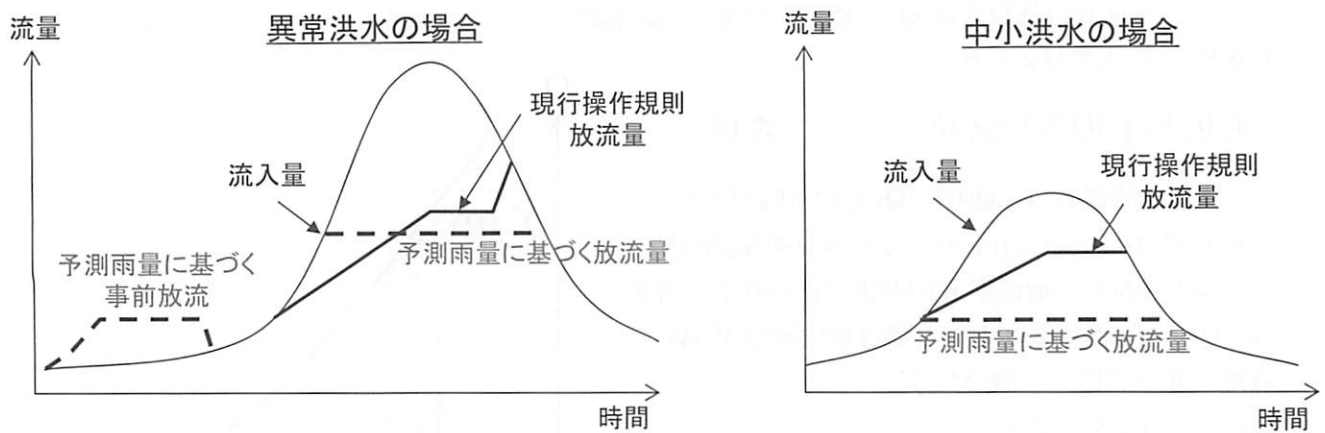


図6 予測雨量に基づく効果的なダム洪水調節のイメージ図¹²⁾

4. 1 気象庁短期予測雨量の変遷とダム流域における予測精度

表2は平成14年5月から平成19年11月(左)とそれ以降(右)の気象庁短期予測データに関する情報を簡単に気象庁HP等¹⁵⁾¹⁶⁾を参考に表にまとめたものである。全球予測モデルであるGSMは、平成14年当初から平成19年11月までは解像度が約120kmであった。それをRSMにより約20km程度にダウンスケールした後、MSMを用いて細かい解像度にダウンスケールを行っていた。平成19年11月以降は、GSMの解像度が約20kmに上がったため、GSMを直接MSMへダウンスケールを行うよう運用が変更されている。また、MSMにおいては平成21年10月28日より、国土地理院が運用する電子基準点の観測データから得られる水蒸気データの利用を開始し、降水予測の精度改善を行っている¹⁷⁾。このように、気象庁の短期予測雨量については精度向上を目的として日々改善が行われている。

次に、過去および現在運用されている予測雨量の精度を比較するため、平成19年11月まで運用されていたRSMと平成21年11月以降運用されているMSMについて精度検証を行った事例について紹介する。

平成19年11月まで運用されていたRSMについて全国の25ダムを対象として地上雨量と比較した。予測雨量については毎時の雨量が正確に予測されていることが望ましいが、毎時での予測精度が低いこととダムの洪水調節においては総雨量が正確に予測されていることが重要であるということからRSMの予報対象時間である51時間の積算雨量(流域平均)で比較を行った。図7は早明浦ダム流域におけるRSMと地上観測雨量の比較(平成8年から平成16年を対象)であり、RSMは地上雨量との相関が低いことが分かる。

表2 気象庁短期予測雨量データの変遷(左:平成14年5月・平成19年11月、右:平成19年11月・現在)

	モデル	H14	H15	H16	H17	H18	H19
ダウンスケール	(全球) GSM	H14.5 ←					H19.11
		● 計算領域: 全球 静力学モデル ● 解像度: 120km ● 運用回数: 1日2回 ・ 初期時刻: 00UTC: 84時間予報(時間分解能: 6時間) ・ 初期時刻: 12UTC: 96時間予報(時間分解能: 6時間) + 192時間予報(時間分解能: 12時間)					
	(日本) RSM	H14.5 ←					H19.11
		● 計算領域: 日本 静力学モデル ● 解像度: 20km ● 運用回数: 1日2回 ・ 初期時刻: 00, 12UTC: 51時間予報(時間分解能: 1時間)					
ダウンスケール	(日本) MSM	H14.5 ←				H18.3	
		● 計算領域: 日本 非静力学モデル ● 解像度: 10km ● 運用回数: 1日4回 ・ 初期時刻: 00, 06, 12, 18UTC: 18時間予報(時間分解能: 1時間)					
	(日本) MSM				H18.3 ←		H19.11
		● 計算領域: 日本 非静力学モデル ● 解像度: 5km ● 運用回数: 1日8回 ・ 初期時刻: 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC: 15時間予報(時間分解能: 1時間) ・ 2007年5月より、03, 09, 15, 21UTCについては33時間予報に延長(時間分解能: 1時間)					
ダウンスケール	(全球) GSM						H19.11 ←
		● 計算領域: 全球 静力学モデル ● 解像度: 20km ● 運用回数: 1日4回 ・ 初期時刻: 00, 06, 12, 18UTC: 84時間予報(時間分解能: 1時間) ・ 初期時刻: 12UTC: 84時間予報(時間分解能: 1時間) + 192時間予報(時間分解能: 3時間)					
	(日本) MSM						H21.11
		● 計算領域: 日本 非静力学モデル ● 解像度: 5km ● 運用回数: 1日8回 ・ 初期時刻: 00, 06, 12, 18UTC: 15時間予報(時間分解能: 1時間) ・ 初期時刻: 03, 09, 15, 21UTC: 33時間予報(時間分解能: 1時間)					
ダウンスケール	(日本) MSM					H21.11 ←	
		● 計算領域、解像度、運用回数については同上 ● GPS可降水量データの同化を開始					
							運用中

さらに、多くのプロットがY軸に張り付いており、予測の空振りや見逃しが多いことを示しており、事前放流をはじめとして、図7に示したような洪水調節を実施することは困難であることが伺える。他ダムの結果についても早明浦ダムの結果とほぼ同様であり、地域や季節に応じて精度が大きく異なることはなかった。

次に、平成19年11月以降運用されているMSMについてレーダー雨量との相関の比較を行った。ここでは上述のRSMにおける比較と異なり、イベント毎の比較であり、かつ前線性降雨と比較して予測精度が高いと考えられる台風のイベントを扱っていることに留意する必要がある。図8は、6時間毎に発表されるMSMとレーダーアメダスを用いて実測と予測の積算雨量を比較したものである。対象時間は、MSMの予報対象時間である33時間で比較を行った。対象の台風では、降雨初期で予測は過小評価しており、降雨終期でおおむね一致するためループを描いているが、おおむね45°の線付近にあり、RSMと地上雨量との相関と比べ、MSMとレーダーアメダスとの相関は高いように見え、気象庁の予測雨量の精度が向上していることが伺える。しかし、降雨のピーク付近においては台風12号では数百mm程度の誤差があるため、やはり現時点で図7に示したような定量的な利用は厳しそうである。また、図9に池原ダム流域の2011年の台風6、15号を対象として降雨波形の比較を行った。ピーク後の予測に関しては、MSMは降り止む時刻やピーク後の雨量を比較的精度よく予測できていることも分かった。

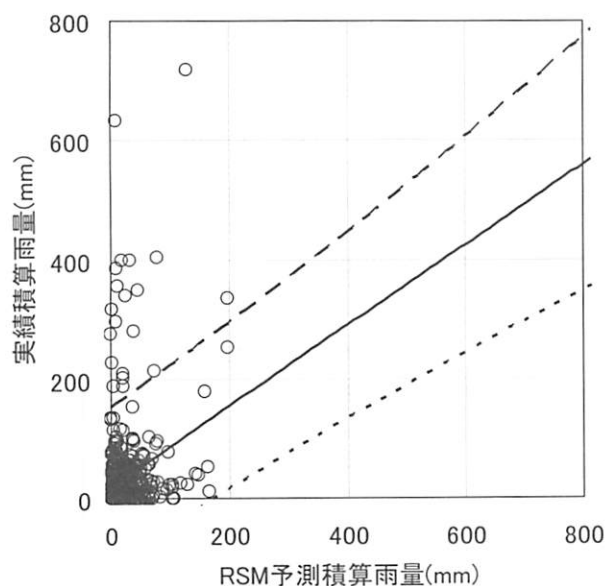


図7 RSMと地上雨量の比較（早明浦ダム流域、51時間積算雨量）

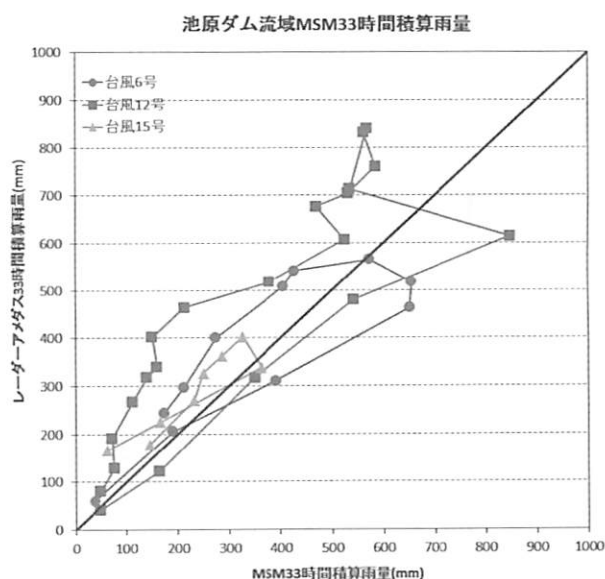
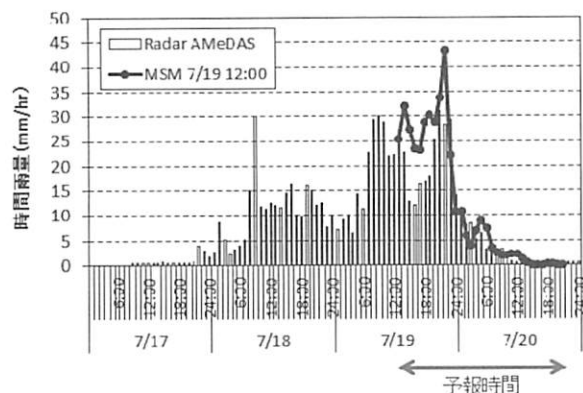
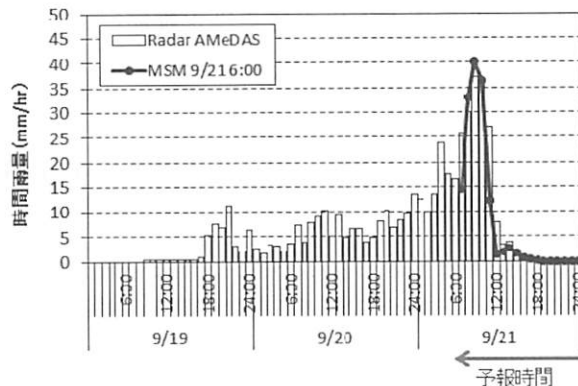


図8 MSMとレーダーアメダスの比較（池原ダム流域、33時間積算雨量）



(1) 台風6号



(2) 台風15号

図9 降り終わりにおけるMSMとレーダーアメダスの比較（池原ダム流域）

4. 2 後期放流操作における予測雨量の活用

前節において、降雨のピーク後の降雨の終わりのタイミングや雨量については、ピーク雨量の予測と比較すると精度良く予測が行われていることを示した。この特性を利用して、洪水の後期放流操作において予測雨量が実際に用いられたただし書き操作の1種である「適応操作」の事例を紹介する。「適応操作」とは、下流河川の状況及び今後の洪水の見通し並びにダムの貯留状況等を条件として、下流河川の洪水被害を軽減するため更にダムに貯留する水量を多くする操作であり、この「今後の洪水の見通し」という部分において予測雨量が活用されており、予測雨量を用いて以降のダム流入量を予測し、放流量を決定している。

中国地方整備局の平成22年7月13日から14日にかけて発生した洪水では、八田原ダム流域において約180mmの雨量が観測され、「適応操作」を実施した。この洪水では、適応操作によりダムからの放流量を最大約138m³/s低減させることに成功し、流入量と放流量の差はこの操作によって約282m³/sとなり、下流の目崎地点において約55cmの水位低下に成功した(図10)¹⁸⁾。

また、東北地方整備局の三春ダムにおいてもほぼ同様の操作が平成23年9月の台風15号に伴う洪水において実施された。この時、三春ダム下流の阿久津地点で計画高水位を上回り、破堤等の重大な被害が想定されたため、降雨予測およびダムの空き容量を勘案し、全量カットによる適応操作が実施された。これにより、三春ダムの洪水調節によって阿久津地点で約0.5mの水位を低減させる効果があったと考えられ、この時通常の規則操作に従って操作した場合は約0.35mの水位低減効果があったと考えられる。すなわち、適応操作による効果は約0.15mの水位低減効果であったと考えられる(図11)¹⁹⁾。

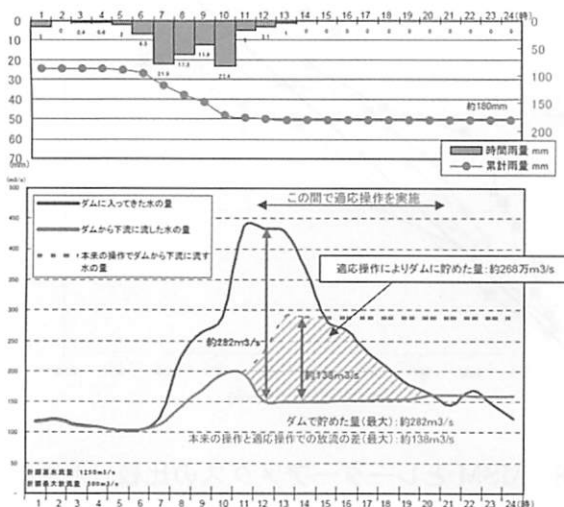


図10 八田原ダムにおける洪水調節による治水効果(H22.7洪水)¹⁸⁾

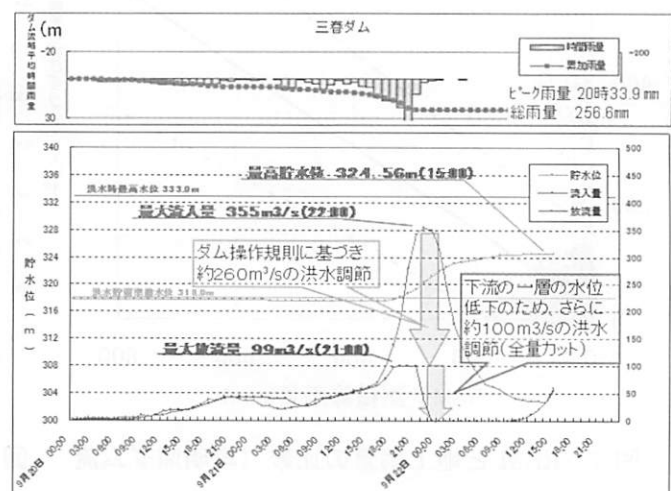


図11 三春ダムにおける洪水調節による治水効果(H23.9洪水)¹⁹⁾

4. 3 予測降雨を用いたダム洪水調節操作の評価の視点

4. 1で述べたとおり、気象庁から配信されている予測雨量の精度は、過去の予測雨量と比較して精度が向上していると考えられ、今後も精度が徐々に改善されていくことが期待される。しかし、予測誤差は小さくなっていくと考えられるが、誤差が0になることはないと考えられる。従来のダム洪水調節操作においては実際にダム流域に降った観測雨量を基にして現在の規則操作が考えられているため、「誤差を含んでいるが、それを用いることで効果を高める可能性を持つデータ」である予測雨量を用いるダム洪水調節操作方法が確立されていない。そもそも、洪水調節の「確実性」は重要な視点であり、不確実性を有する予測降雨をダムの

洪水調節に導入すること自体、各種の課題があることが想定される。そこで、予測雨量が誤差を持つことを前提としてダム洪水調節操作の評価の視点についてここでは述べる。

図6に示したように予測降雨を活用することにより洪水調節容量を最大限活用する操作を選択することが期待されている。しかし、予測降雨に基づき洪水調節を行った場合、実際の雨量が予測を大きく上回ると、予測降雨を利用しない従来の操作よりも結果的に被害が大きくなる可能性もある。予測降雨をダムの洪水調節に活用するということは、ダムの洪水調節に不確実性を導入することにほかならない。しかも、予測降雨の不確実さが大きければ、大きく外す確率も高くなる。そこで、数値実験により予測降雨の不確実性のダム洪水調節効果への影響を検討した。

図12は、ある降雨波形に対して倍率（降雨倍率）を乗じ、その降雨から流出解析によって得られた流出に対し、通常の操作Aと、操作Aより放流量を100 m³/s減じた操作Bにより洪水調節を行った場合の浸水被害額の比較である。降雨倍率が小さい時は洪水調節量の大きい操作Bの浸水被害額が小さいが、降雨倍率が大きい時は、操作Bは操作Aより早いタイミングでただし書き操作に入るため、浸水被害額が大きくなる。すなわち、操作Bは降雨倍率1.7倍までの降雨に対しては操作Aより優位にあるが、それ以上では操作Aが優位になる。

降雨倍率を予測降雨の誤差におきかえ、例えば図13のように過去の予測雨量と観測雨量を基に予測雨量の誤差（この場合、雨量比）が確率分布を持つと仮定する。一方、予測された雨量に対して雨量比を乗じて実際に発生しうる流入ハイドログラフ群を作成すると図14のようになる。それぞれの流入ハイドログラフに対して操作Aおよび操作Bで洪水調節計算および浸水被害額計算を実施すると、結果として実際の雨が予測降雨の1.7倍よりも小さければ操作Bが優位であり、1.7倍よりも大きければ操作Aが優位となる。

予測降雨をダムの洪水調節に導入するということは、ダムの操作、洪水調節効果に不確実性を導入することである。言い換えれば、例えば操作Aが有利な確率は5%、操作Bは95%という表現になる。これは、確定的ではないので、現時点においてはダムの管理に混乱をもたらすかもしれない。また、操作Aの確率5%だからといって無視していいのだろうか。

操作Bの確率が高いからといって、操作Bを選択するのは短絡的である。確率5%の意味が重要である。

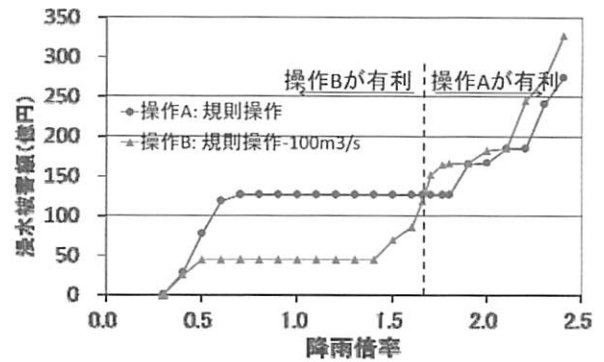


図12 降雨倍率に応じた浸水被害額

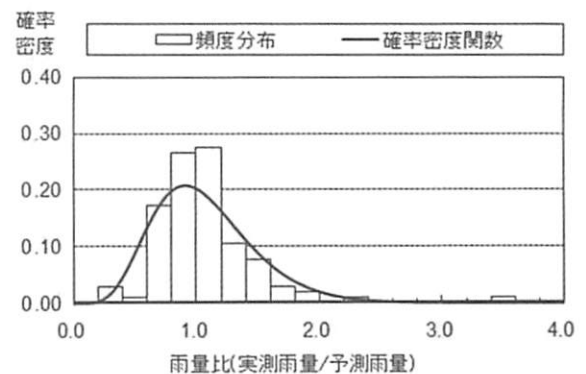


図13 予測雨量の誤差確率分布のイメージ

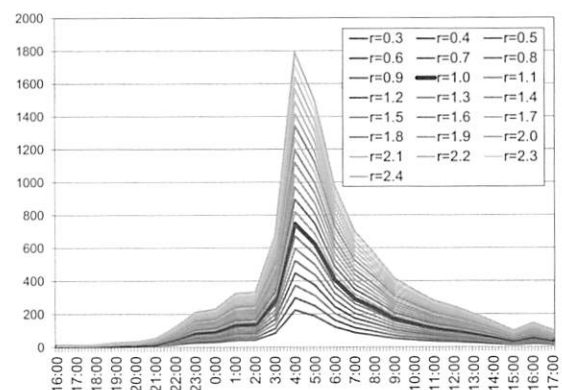


図14 予測された洪水に対して実際に発生しうる流入ハイドログラフ群

なぜなら、予測降雨が大きく外れた場合（数値実験では実際の降雨が予測降雨の 1.7 倍以上）には浸水被害額から見ると操作 A が有利になるからである。

さらに、予測降雨を用いた判断は、結果論的な批判の対象となる可能性がある。予測降雨の活用にあたって「操作 A なら救えた」と批判されることを考えると「効果は程々であるが、間違っても死者は出さない」操作 A も選択肢の 1 つである。

一方、誤差を含む予測降雨に対するダム調節効果を経済的に評価する 1 つの手法として、式 11 で表現される予測降雨に対する浸水被害額の期待値を試算する。

$$E = \int P(r) \cdot C(r) dr \quad \text{式 11}$$

ここで、 r は実測降雨/予測降雨で定義される予測降雨の誤差率、 $P(r)$ は誤差率 r の確率密度関数、 $C(r)$ は浸水被害額の関数である。

図 12 は被害額の関数 $C(r)$ に相当し、図 13 が予測降雨の誤差率の確率分布に相当することになる。ただし、本試算は数値実験であり図 13 に示した確率分布を仮定したものであり、現時点で確率分布を特定することが困難であり、実際には適用できない。

式 11 で定義される浸水被害額の期待値は操作 A の場合 126 億円、操作 B の場合 46 億円と試算され、期待値つまり平均的には操作 B の方が優位であると判断される²⁰⁾。

この結果から、被害額の期待値が操作 B の方が小さいからといって、操作 B を選択するのは短絡的であり、期待値が判断をミスリードする可能性もある。期待値で表現したことにより、予測降雨を導入したことによるダムの洪水調節効果の不確実性さえも隠してしまっており、予測が外れた場合むしろ被害を大きくする可能性が表現されていない。

期待値は、平均値的な 1 つの判断材料であるが、判断材料としては十分ではない。予測降雨をダムの洪水調節に活用することは、1 つの洪水に対してダムの洪水調節効果に不確実性を導入することになる。このため、低頻度であるが発生する可能性を認識することが不可欠である。このことは、今までの平均的な判断とともに、低頻度であるが発生する可能性のある状況に対する評価ならびに判断が必要となる。このためには、このような状況を如何に考えるかといった問題について、ダム管理者と国民の共通基盤の構築が不可欠であり、この共通基盤の上で社会の安全（例えば、死亡者数や社会の持続性）の側面から適切な評価軸を設定する必要がある。

5. まとめ

近年多発する豪雨災害は、ダムの計画規模を超えただし書き操作となる可能性も高めている。このため、既存ストックを有効活用して災害を最小化することが求められ、予測降雨に対する期待が高まっている。そこで、本稿では、ダム操作方法の技術的、社会的側面を整理することにより、ダムの高度化の前提条件についての理解を促進することを目的の 1 つとした。

第 2 章では、まず操作規則・細則の具体的な記載例を引用して、ダムの操作の基本について確認した。現在の治水ダムの操作が、過去の気象・水象を踏まえ河川管理者（1 級河川にあっては国土交通大臣）が策定する操作規則及び細則等で定められている。

第 3 章では、出水時のすりつけ操作から始まり後期放流までの一連のダム操作法について述べるともに、具体的な操作方法が管理事務所の判断にゆだねられている「すりつけ操作」や「ただし書き操作」の高度化に関する研究事例として水位放流方式や VR 方式について紹介した。現在の操作方法の多くが、確実な操作として一定量調節や一定率一定量調節が採用されている。一方、水位放流方式や VR 方式など高度な洪水調節を行おうとすると、操作方法が複雑化するため、管理への負担についても検討する必要がある。

洪水の予測の観点からは、予備放流方式のダムにおいて計画上の洪水調節容量を確保するために洪水の予測が従前から行われている。標準例⁵⁾として、現在の気象予報の精度からみて事前に降雨の時間的分布を把握することが難しいため、単純な仮定を導入して予測する方式を示しているが、一方で「洪水の流出の推定方法で他に適当な方法がある場合にはその方法によって修正すべき」とされている。

予測の正当性は、科学的な合理性が確保されていることが前提であり、科学の進歩とともに操作規則・操作細則を修正する必要がある。急速に気象学が進化しており、電子計算機的能力が向上し、観測手段が高度化しており、普段から予測手法について評価しておくことが必要である。このことが、予測技術の高度化、ひいてはダム管理の高度化につながるものと考える。

第4章では、予測降雨を活用したダムによる洪水調節について述べた。降雨予測の精度は、全期間では実用には達していないが、次第に向上しており継続的な評価が必要である。また、現在でも、慎重な判断のもとで予測降雨の活用が部分的ではあるが行われて効果を上げている。

一方、予測降雨をダムの洪水調節に活用することは、1つの洪水に対してダムの洪水調節効果に不確実性を導入することになる。予測降雨は、予測が外れた場合には、予測を使わない場合より被害が大きくなる可能性があることを考慮する必要がある。このような場合、結果からすれば、「この時このように予測すれば防げた」といった結果論的な批判を捲起する可能性もある。

こうした問題を回避するためには、このような批判に対して予測手法の正当性を担保しておく必要がある。さらに、予測降雨をダムの洪水調節に活用しうるレベルで予測手法の正当性を確保するためには、低頻度であるが発生する可能性があることをより強く認識する必要がある。このため、期待値は、平均値的な1つの判断材料を示すものであるが十分ではない。行動・選択の優先度の判断において、今までの平均的な判断とともに、低頻度で発生する状況に対する評価が必要となる。したがって、予測降雨をダムの洪水調節に活用する前提として、このような状況を如何に考えるかといった問題について、ダム管理者と国民の共通基盤の構築が不可欠であり、その上で行動・選択の優先度を決定するため社会の安全（例えば、死亡者数や社会の持続性）の側面から適切な評価軸を設定する必要がある。

一方で、予測を高度化することにより、脆弱性が増す可能性も留意する必要がある。例えば、予測降雨を外部機関に依存する場合には、確実に情報を入手するために外部機関の事業継続性、外部機関との情報ネットワークの堅牢性が前提となる。また、予測そのものを電子計算機に依存する場合、ソフト的にはブラックボックス化しやすく異常時対応システム（検出・対応）、ハード的には非常時の電源やバックアップシステムの確保が必要となる。

謝辞

本稿の作成にあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部 藤田光一河川部長のご指導をいただきました。また、同水資源研究室 川崎将生室長、猪股広典研究官には、多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局：水害レポート 2004、
http://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai2004/index.html
- 2) 総務省 消防庁：台風 12 号による被害状況及び消防機関の活動状況等について（第 15 報）、平成 23 年 10 月
- 3) 国土交通省 水管理・国土保全局：地球温暖化に伴う気候変化が水災害に及ぼす影響について、
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/080601_shiryo_all.pdf、平成 20 年 6 月
- 4) Takahiro Konami et.al.: Initiatives for Knowledge Succession in Dam Engineering、 International Symposium on Dams for a Changing World、 ICOLD 2012 Kyoto、 pp.3-19-3-24、 Kyoto、 June 5、 2012
- 5) 国土交通省河川局河川環境課、財団法人ダム水源地環境整備センター：ダムの管理 例規集、2006
- 6) 損害賠償請求事件 徳島地裁昭和五〇（ワ）三二号 昭和 63・6・8 民二部判決
- 7) 損害賠償請求控訴事件 高松高裁昭和六三（ネ）一九〇号 平 6・8・8 第二部判決
- 8) 財団法人ダム技術センター：多目的ダムの建設、第 7 巻管理編、pp.21-164、平成 17 年 6 月
- 9) 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
- 10) 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 36、pp.37-44、2001
- 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
- 12) 三石真也、角哲也、尾関敏久：洪水に対する効果的な調節手法に関する検討、ダム技術、No.297, pp.22-50, 2011
- 13) 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
- 14) 裏戸勉：VR 方式による異常洪水時のダム操作、ダム技術、No.301、pp.3-15、2011
- 15) 気象庁：数値予報モデルの種類、<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4.html>
- 16) 京都大学生存圏研究所：生存圏データベース、グローバル大気観測データ、
<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/glob-atmos/>
- 17) 気象庁、国土地理院：国土地理院電子基準点観測データ（GPS データ）の活用による気象庁メソ数値予報の改善について、平成 21 年 10 月 27 日
- 18) 国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所：平成 22 年 7 月 14 日～14 日出水（梅雨前線）における八田原ダムの洪水調節効果について、平成 22 年 7 月 15 日
- 19) 国土交通省東北地方整備局：台風 15 号による阿武隈川上流等の出水速報について、平成 23 年 9 月 23 日
- 20) 鳥居謙一、猪股広典：予測降雨を活用したダム洪水調節効果の評価、国総研レポート 2012、pp.95、平成 24 年 3 月