

## 第2章 ダム洪水操作に係わる規定、課題と既往の研究

### 2.1 現在採用されている代表的な洪水調節方式

ダムによる洪水調節は、下流河川の被害を防止し又は軽減することを目的としたものであるから、流量を適切に制御しなければならない。そのためには、安定して確実に効果を発揮させることが、第一の目標であり、適切な操作ルールの設定と確実な操作が要求される。このような観点から、ダムによる洪水調節操作の基本原則は、次の4点とされている<sup>1)</sup>。

- ① 確実な操作を行い、確実な効果を発揮
- ② 安全性の確保（放流に対する下流の安全確保、ダム等施設の安全）
- ③ 即応性（洪水変化に即応した行動、臨機の処理）
- ④ 洪水毎の適応操作（上記①から③を確保した上で効果の最大化を図る）

現在の洪水調節に係わる操作は、操作規則において「所長は、次の各号に定める方法により洪水調節を行わなければならない。ただし、気象、水象その他の状況により特に必要があると認める場合においては、この限りでない。」と規定している<sup>2)</sup>。これは、「固定ルール調節方式」と呼ばれるもので、あらかじめ十分な技術的検討を行って洪水調節方法を定めるものであり、一定の効果を確実に確保し、操作の過程において適応判断を要しない利点を有している。但し書き規定（前述した操作規則の「ただし」以下の部分）は、「適応化操作方式」と呼ばれ、上記の①～③を満足した上で洪水毎にダムの安全性を確保しつつ、洪水調節効果も極力発揮させようとするものである。この操作方式は、現段階では主に超過洪水発生時などの特別な洪水に限って用いられている<sup>1)</sup>。

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

#### (1) 一定量放流方式

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

#### (2) 一定率一定量調節方式

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

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

### (3) 自然調節方式

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

### (4) その他の方式

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

## 2.2 出水時のダム操作

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

### (1) 事前放流操作

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

事前放流については、利水の共同事業者に支障を与えない範囲でかつ下流河川利用者の安全を確保できる放流や貯水池法面の安定を確保できる水位低下速度により確保可能な容量を対象としている。具体的には、次に示す容量を活用することとされている<sup>4)</sup>。

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

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

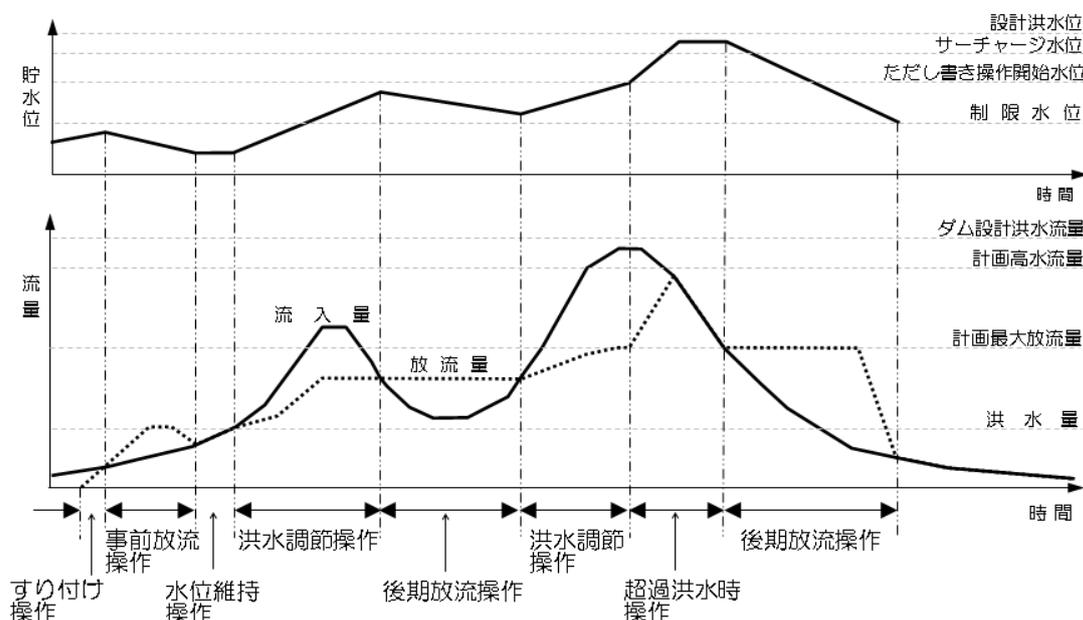


図-2.2.1 洪水時のダム操作の流れ<sup>3)</sup>

## (2) 予備放流操作

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

## (3) すり付け操作

洪水がダムに流入した際に最初に行われる操作であり、ダムからの放流量を流入量と等しくなるまで徐々に増加させる操作である。治水、利水を目的に含む多目的ダムでは、渇水に対応した利水補給により、貯水位が制限水位や常時満水位よりも低下している場合、利水容量の回復に配慮しつつすり付け操作を行うこととなる。なお、貯水位が制限水位等に近い水位であり、水位維持操作が行われている場合は、すり付け操作は不要となる。

この操作のポイントは、ダムからの放流開始の時期をいつに設定するかであるが、操作規則には、特段の規定もなく、一般的には、現場の経験や勘に頼っているのが実情である。仮に操作が遅れた場合は、洪水計画以上の流量を治水容量内にため込む（過貯留）ことが発生し、治水上危険となる。また、中小洪水に終わり、かつ、すり付けが早すぎた場合にあっては、洪水が終了しても利水容量が充足されていない恐れがある。このようにすり付け操作は、治水、利

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

#### (4) 水位維持操作

貯水位をある一定の標高に維持するため、放流量を流入量と等しくする操作である。洪水時の操作では、予備放流水位や制限水位等を維持する場合に用いられる。具体的な操作方法としては、「水位偏差方式」が良く採用されており、維持したい一定の貯水位を上限として、その下方に一定の制御水位幅を設け、この幅内に貯水位を維持すべく、貯水位の変化に応じて放流量を調節することとしている。

#### (5) 洪水調節操作

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

#### (6) 超過洪水時操作

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

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

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

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

超過洪水時において現在採用されているゲートの操作方法は、上記に説明し

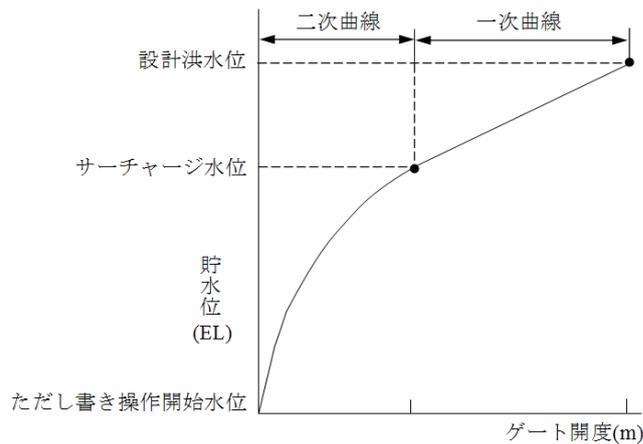


図-2.2.2 貯水位とゲート開度の対応図<sup>5)</sup>

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

#### (7) 後期放流操作

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

- ・次に来る洪水に備えて水位低下を最速で行う
- ・次に洪水が来る恐れがなく、洪水調節操作終了時のゲート開度を一定に保ったまま貯水位の低下を行う
- ・下流河川が氾濫しており、かつ近日中に洪水が来る恐れがない場合に洪水量以下の放流で貯水位の低下を行う

### 2.3 国土交通省等管理ダムにおけるダム操作に関する課題

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

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

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

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

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

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

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

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

表-2.3.1 ダム操作に関する課題と対応策

■ 治水

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

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

■ 治水（続き）

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

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

■ 治水（続き）

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

■ 環境

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

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

■ 環境（続き）

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

■ 利水

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

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

※2対応策 太字は降雨予測、水位放流方式、VR方式を利用した対応策

## 2.4 洪水調節手法に関する既往の研究成果

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

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

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

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

率を決定することとしている。

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

表-2.4.1 VR方式におけるシミュレーション検討状況

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

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

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

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

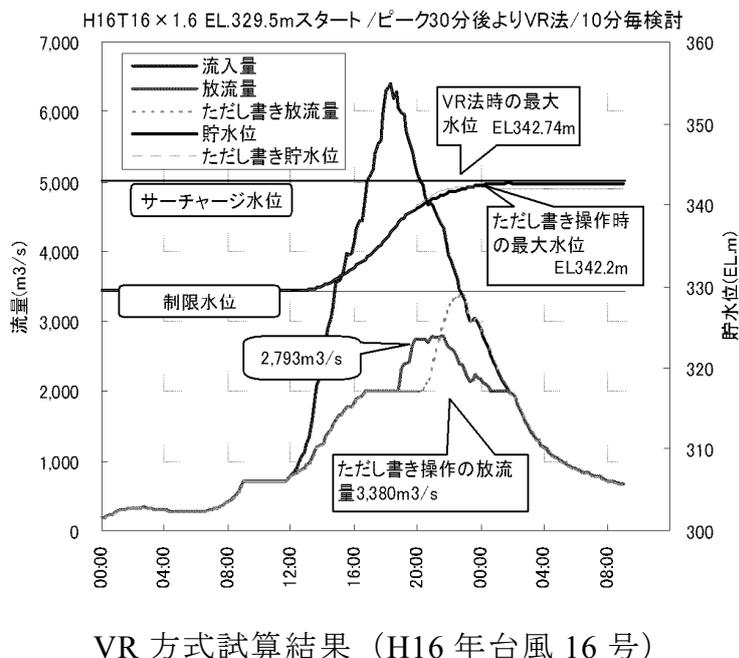
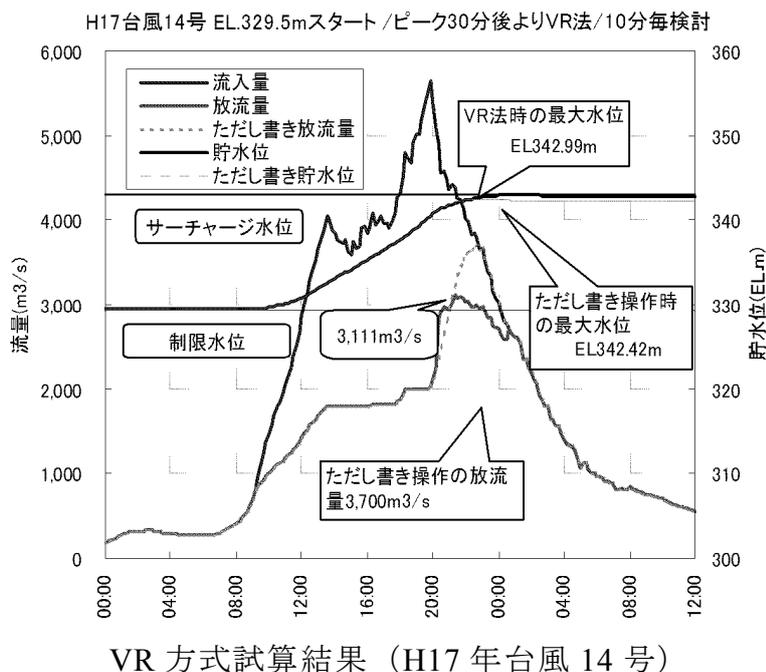


図-2.4.1 松浦らによる VR 方式でのシミュレーション結果<sup>1 3)</sup>

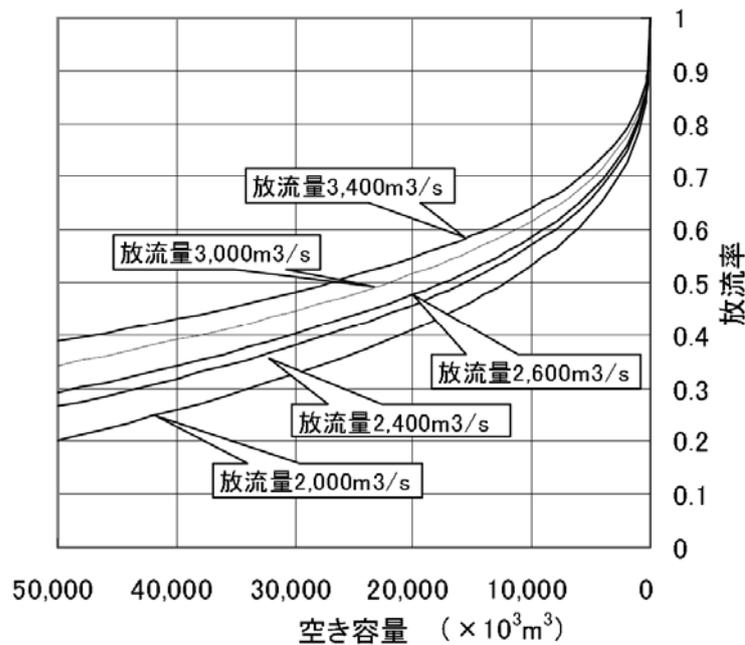


図-2.4.2 VR 曲線<sup>13)</sup>

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

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

## 2.4.2 流入量特性を活用したダム容量の効果的な活用に関する研究

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

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

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

ここに V : 流入ヒドログラフ逓減部の総流入量[m<sup>3</sup>]

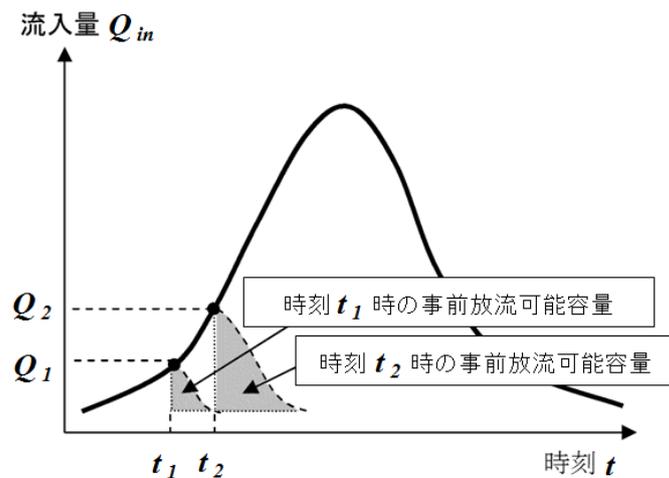


図-2.4.3 山田方式による事前放流量算出の考え方（逡減特性方式の場合）

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

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

(1) 逡減特性方式

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

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

それを単位時間あたりの流入量に乗じて放流量を算出する。

これを単位時間の流入量毎について行い、時刻毎に放流量を決定していく。

(2) 総降雨量方式

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

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

$r(t)$  : 時々刻々の降雨量 (mm/h)

上式において、 $\frac{dV(t)}{dR}$  の部分 (総雨量(mm)の変化の割合に対する総直接流出量(m<sup>3</sup>)の変化の割合) は図-2.4.5の関係式 (Line A~Cのいずれか) より算出し、それを単位時間あたりの降雨量に乗じて放流量を算出する。

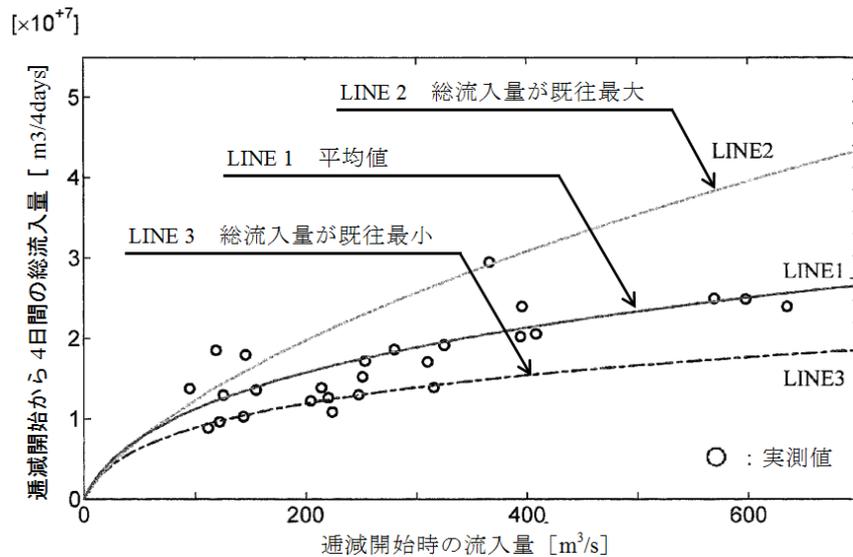


図-2.4.4 流入量と透減開始からの総流入量の関係 (草木ダム流域) <sup>14)</sup>

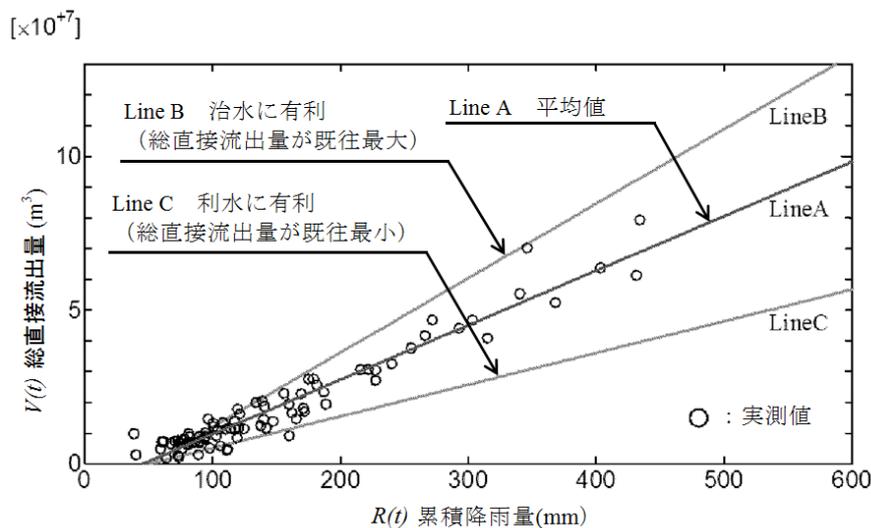


図-2.4.5 総降雨量と総直接流出量の関係 (草木ダム流域) <sup>16)</sup>

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

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

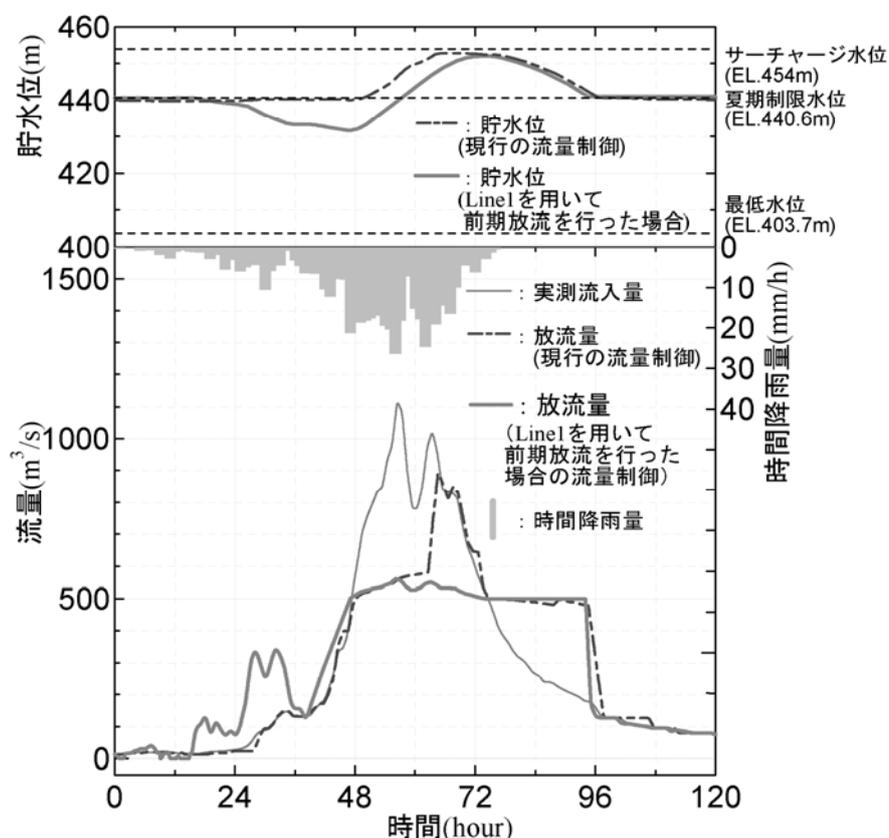


図-2.4.6 逓減特性方式 LINE1 を用いて実施した事前放流の効果<sup>14)</sup>  
(草木ダム 2001年9月洪水)

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

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

### 2.4.3 予測雨量を用いたダム洪水調節に関する研究

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

#### (1) 下流河川の水位に応じたダム操作方法

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

#### (2) 大被害発生水位を睨んだダム操作方法

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

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

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

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

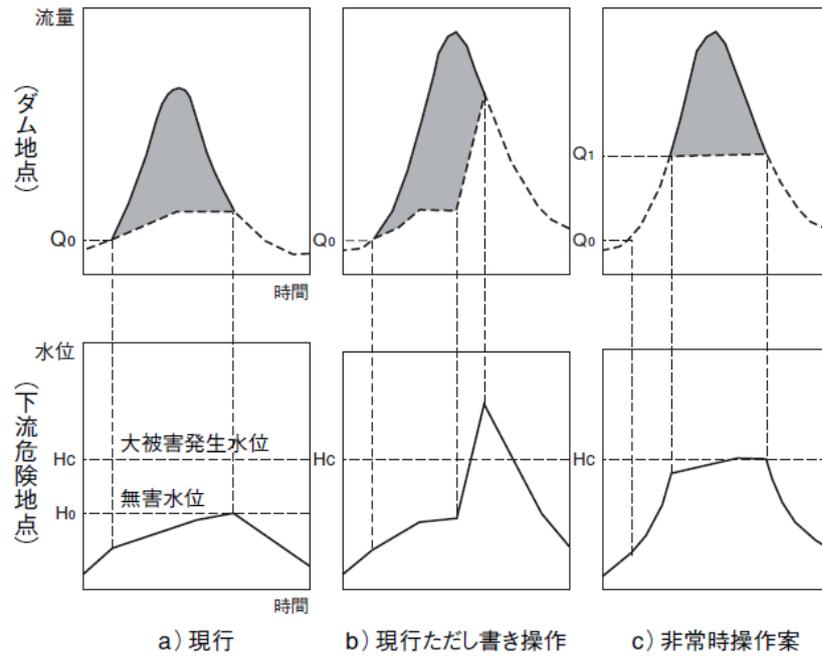


図-2.4.7 ダムの洪水調節と下流水位の変化<sup>1)9)</sup>

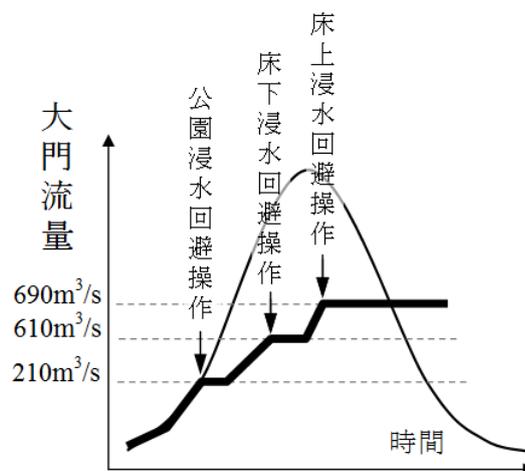


図-2.4.8 阿木川ダムにおける大被害回避のための操作案<sup>2)1)</sup>

### (3) 降水短時間予報を用いたダム流域の流入特性に基づいた洪水調節方法

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

対象は、渡良瀬川の草木ダム（流域面積254km<sup>2</sup>）であり、事前放流量決定に用いる累積降雨量と総直接流出量の関係は、過去の草木ダム流域の実績洪水から関係を設定している。

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

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

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

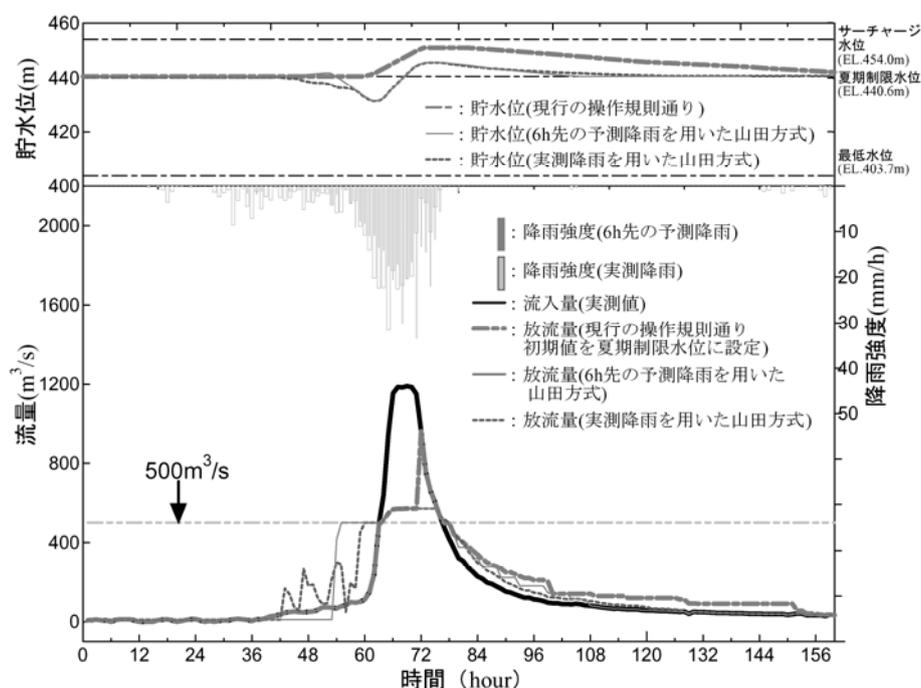


図-2.4.9 6時間先の降雨予測を用いた事前放流の効果<sup>20)</sup>  
(草木ダム 2007年9月洪水)

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

#### 2.4.4 下流河川への放流限度を考慮した洪水調節移行操作に関する研究

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

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

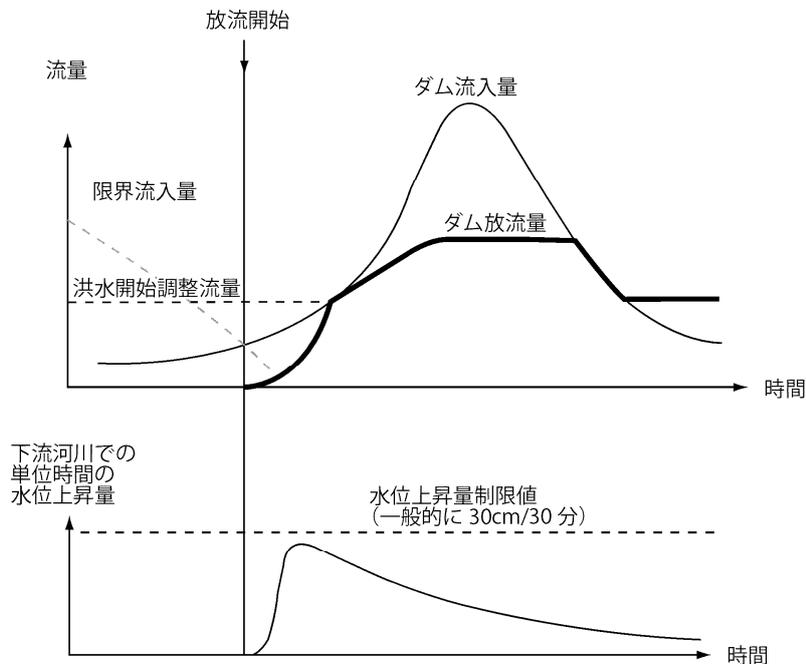


図-2.4.10 水位放流方式によるすり付け操作

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

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

$H_c$  : 下流河川における水位上昇量の限度 (30分/30cm 等)

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

$V_w(t)$  : 時刻  $t$  での洪水期制限水位までの空き容量

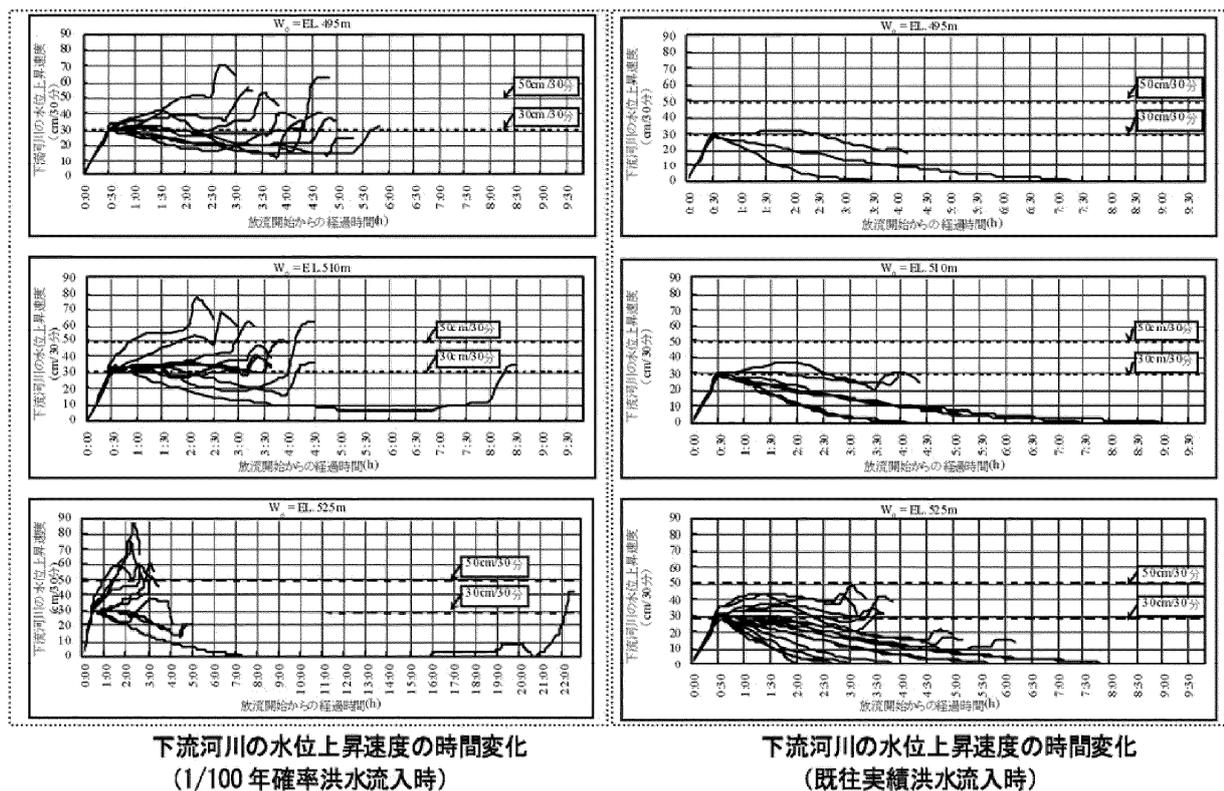
$Q_s$  : 洪水調節開始流量

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

大谷ら<sup>2.5)</sup>は、滝沢ダムをモデルケースとして、計画規模 1/100 相当の洪水 10 洪水及び過去の実績洪水でピーク流量が  $100\text{m}^3/\text{s}$  を上回る洪水 23 洪水を対象に水位放流方式によるシミュレーションを行っている。この結果、計画規模 1/100 相当洪水では、限界流入量によって放流開始時期を判断し水位放流方式に基づいて放流操作を行った場合、半数近くのケースで下流河川の水位上昇速度が 30~50cm/30 分を上回ることが確認され、必ずしも水位放流方式で下流河川の水位上昇速度が厳守されないことを指摘している。一方、実績洪水の検討では、迎洪水位を EL.495m (最低水位)、EL.510m、EL.525m の三種類で検討しているが、いずれのケースでも 30~50cm/30 分を上回ることとはなく (図-2.4.1.1 参照)、利水容量の回復の観点から見れば、制限水位に達しない洪水では 60%~90%の回復率が期待できる結果となっている。

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

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



下流河川の水位上昇速度の時間変化  
(1/100年確率洪水流入時)

下流河川の水位上昇速度の時間変化  
(既往実績洪水流入時)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### 2.4.6 地球温暖化に伴うダム操作に関する研究

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

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

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

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

#### 2.4.7 環境の課題改善に向けたダム操作に関する研究

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

### 2.5 WRF の開発と改良の歴史

#### 2.5.1 WRF 開発の経緯

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

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

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

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

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

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

## 2.5.2 降雨予測精度の向上と成果

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

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

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

特に、低軌道衛星とGPS衛星の情報（地上付近での電波の屈折率）を利用して、

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

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

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

## 2.6 流出解析に関する研究

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

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

## 2.6.1 河川計画策定において用いられてきた流出計算手法

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

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

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

以上の方法のうち、中小河川流域では、流域内の水文資料が少ないことから合理式法によりピーク流量を算定し、施設計画などでハイドログラフの作成が必要な場合には、合成合理式法により波形の作成を行っている場合が多い。この手法は、貯留効果を表現できないため、流域面積が大きくなると（一般的に概ね200Km<sup>2</sup>以下を適用範囲としている）ピーク流量の適合性が低くなる。また、流出率が洪水期間中一定として表現するため、ハイドログラフの適切な評価が困難である。

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

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

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

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

少ない。

## 2.6.2 既往流出モデルに関するダム操作の観点からの課題

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

このような観点から、既存流出モデルには、以下に示す3つの主要な課題がある。

### (1) 降雨強度、降雨パターンによる流出量の変化を表現することが困難

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

### (2) 損失雨量の変化による洪水立ち上がり部の予測が困難

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

### (3) 洪水低減部の中間流出の評価が困難

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

## 2.6.3 分布型流出モデルに関する研究の概要

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

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

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

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

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

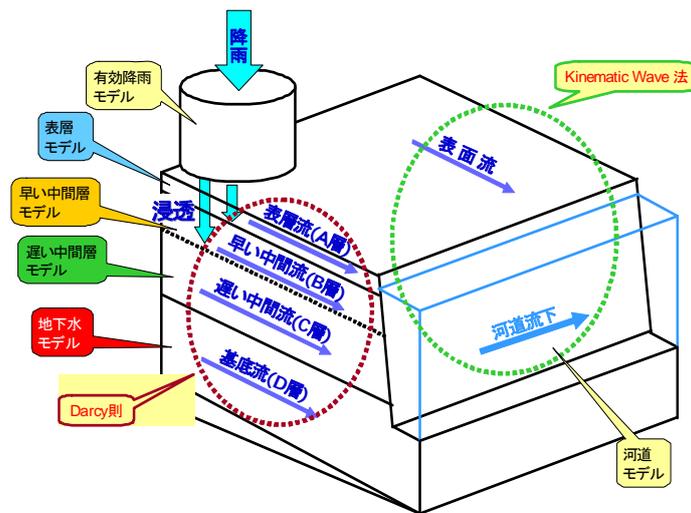


図-2.6.1 分布型流出モデルの構造

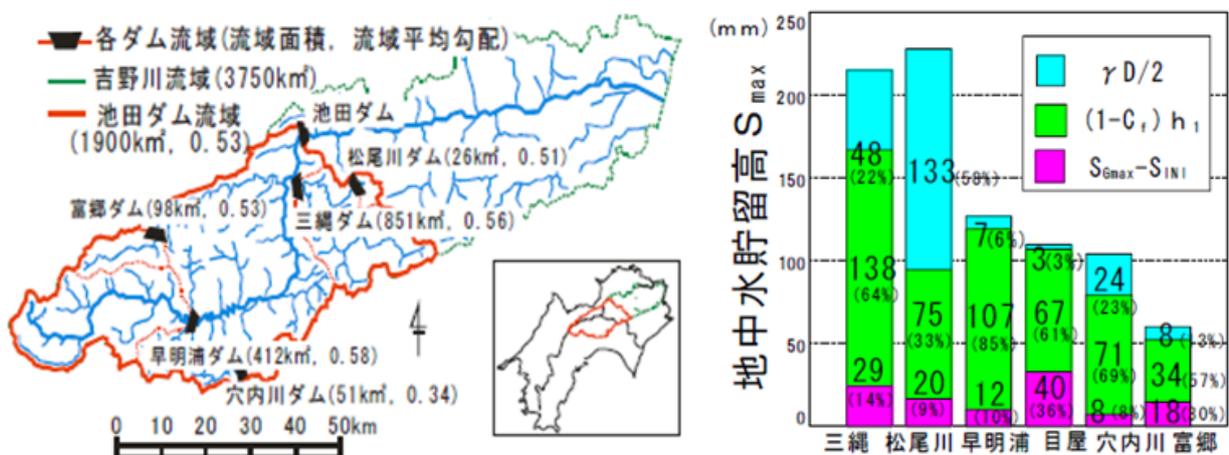


図-2.6.2 吉野川において、樹種の違いによる地中貯留高（洪水低減機能に影響）を評価した事例<sup>5 4)</sup>

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

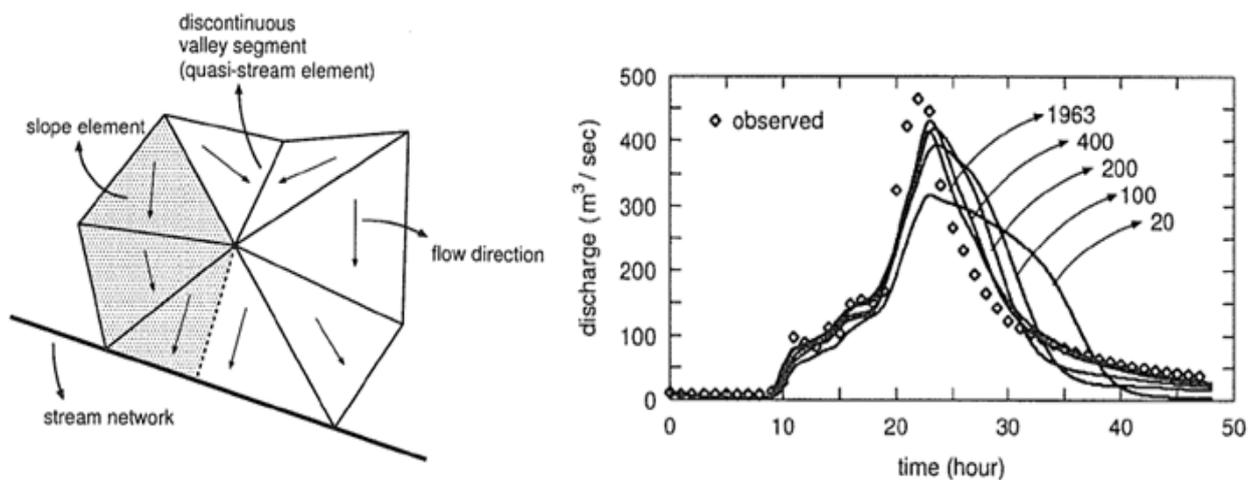


図-2.6.3 市川による地形のモデル化と集中化による精度の比較<sup>55)</sup>

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

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

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

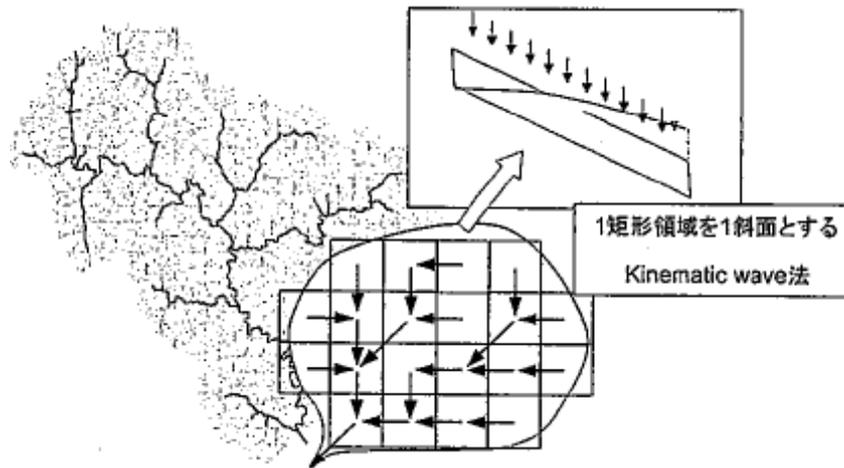


図-2.6.4 セル分布型流出モデル<sup>56)</sup>

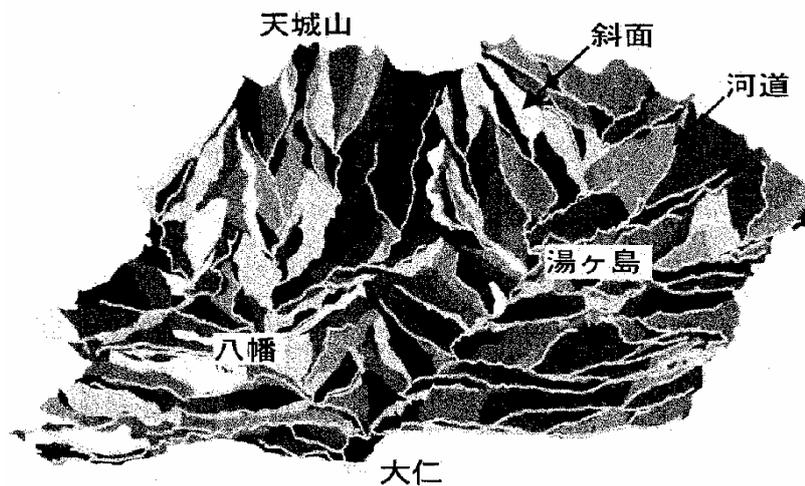


図-2.6.5 非構造格子斜面モデル<sup>57)</sup>

## 2.6.4 ダム操作検討における分布型流出解析モデルの適用に関する研究

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

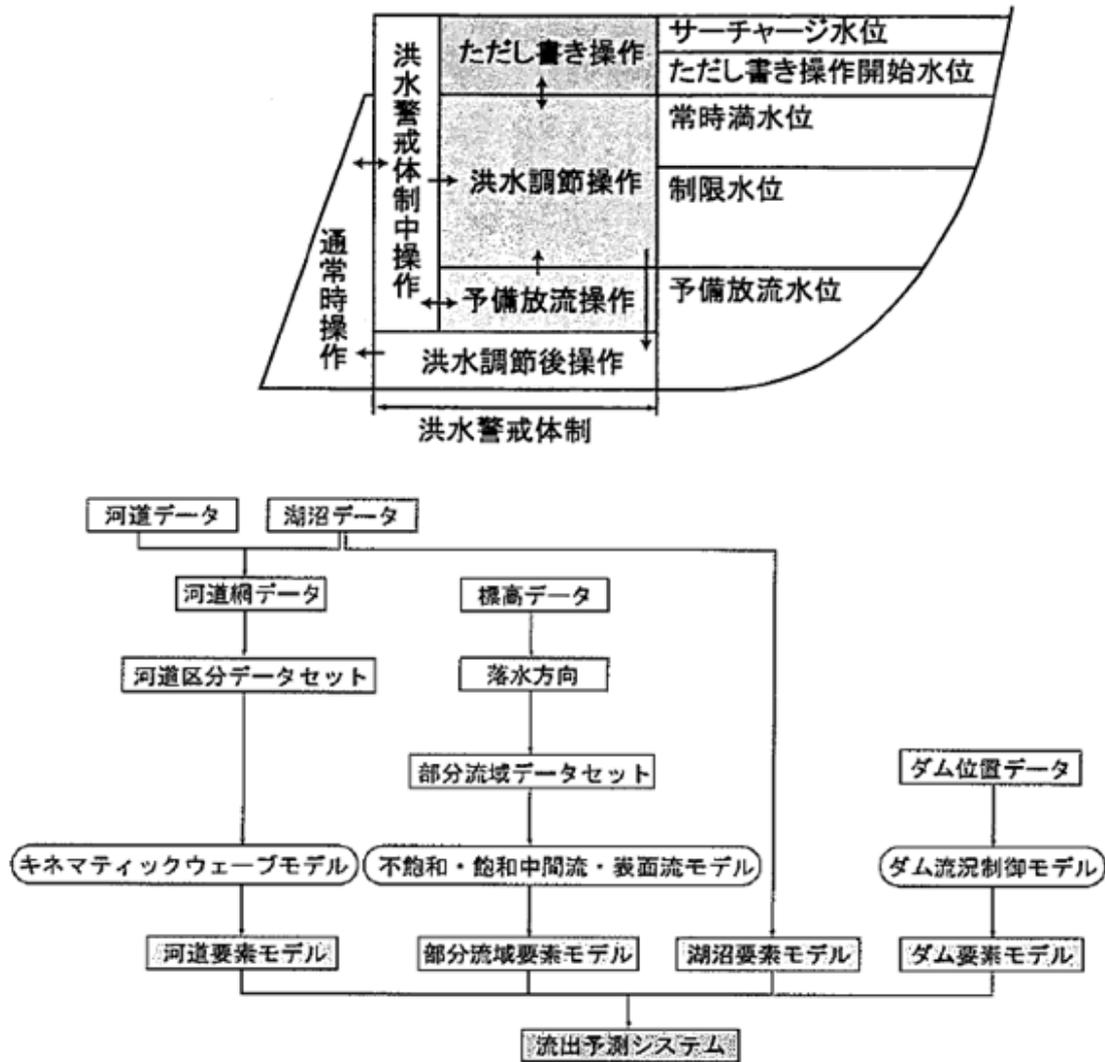


図-2.6.6 ダム操作水位と広域ダム予測システムの考え方<sup>61)</sup>

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

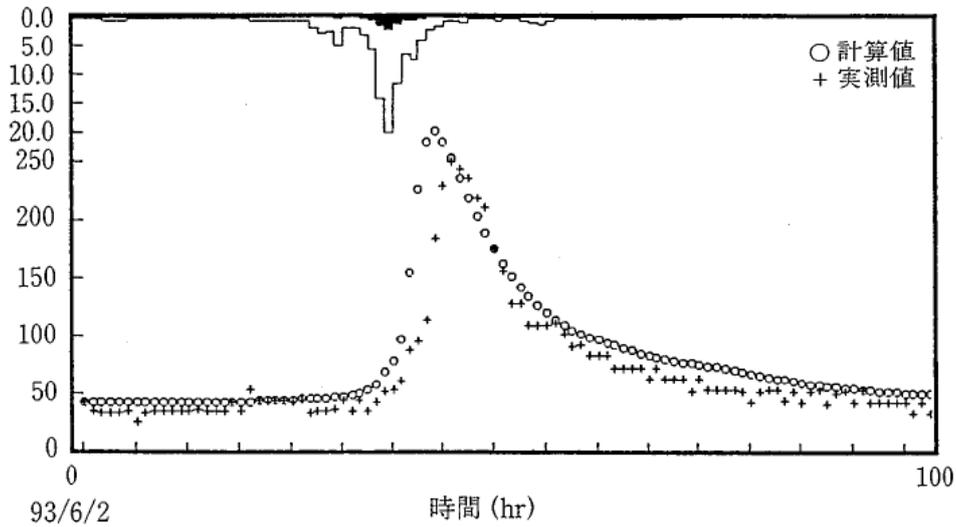


図-2.6.7 四十四田ダムにおける検証事例<sup>6 2)</sup>

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

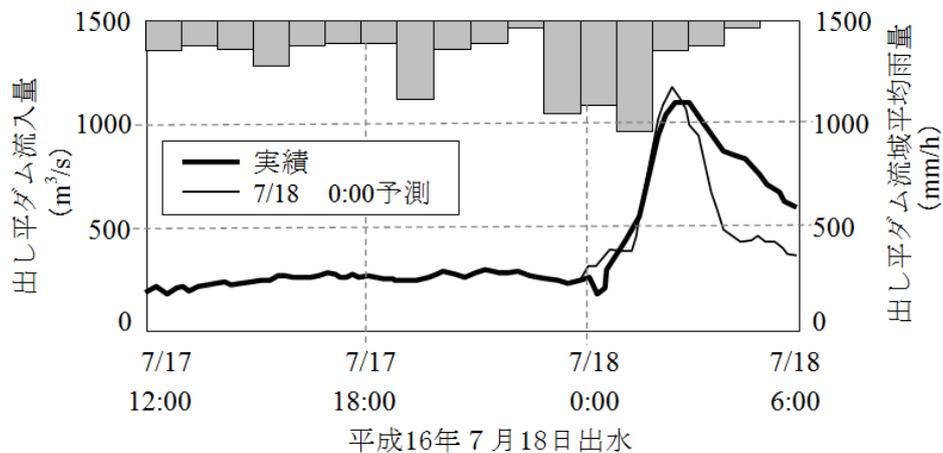


図-2.6.8 黒部川出し平ダムにおける検証事例<sup>6 3)</sup>

## 2.6.5 分布型流出解析モデルの課題

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

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

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

## 2.7 既往文献を踏まえた本研究の取り組み

以下に既往文献を総括するとともに、本研究における研究方針について概説する。

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

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

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

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

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

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

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

## 参考文献

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

- 3) (財)ダム技術センター、多目的ダムの建設第7巻、pp.77～80、2005.
- 4) 国土交通省河川局河川環境課長、国土交通省所管ダムにおける事前放流の実施について、平成17年3月30日付け国河流第24号
- 5) 建設省河川局長、計画規模を超える洪水時における但し書き操作の運用の改訂について、昭和59年6月29日付け建設省河開発第62号
- 6) 国土交通省河川局河川環境課、各ダムの洪水調節と下流河川の状況調査、2008.
- 7) 裏戸 勉、ダムによる洪水調節方法の合理化について、松江高専研究紀要第36号、PP.37-44、2001.2
- 8) 裏戸 勉、異常洪水時のダム操作手法について、ダム工学会第10回研究発表会講演集、PP.40-42、1999.
- 9) 裏戸 勉、洪水時のダム操作について、ダム技術 No.86、PP.4-12、1993.
- 10) 裏戸 勉、異常洪水に適応する洪水調節の手法について、リザーバー2006.3、PP.11-13、2006.3
- 11) 裏戸 勉、異常洪水時のダム操作手法とその運用について、土木学会中国支部第52回研究発表会概要集、PP.117-118、2000.
- 12) 竹下 清、菊池英明、齋藤 源、末次忠司、異常洪水に対する洪水調節方式の改善に関する検討、ダム水源地環境技術研究所所報、PP.50-56、2006.
- 13) 松浦 旬、宮内 茂行、流入量の逡減予測を用いた洪水調節方法の検討、平成19年度水資源機構技術研究発表会発表論文、2007.
- 14) 秋葉雅章、腰塚雄太、宮本 守、戸谷英雄、佐藤直良、山田 正、流出特性に応じたダム放流量の決定方法とその洪水水位低減効果に関する研究、河川技術論文集 第10巻、PP.89-94、2004.6
- 15) 戸谷英雄、秋葉雅章、宮本 守、山田 正、吉川秀夫、ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案 土木学会論文集 B Vol.62 No.1、PP.27-40、2006.2
- 16) 下坂将史、呉 修一、山田 正、吉川秀夫、既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案、土木学会論文集 B、Vol.66 No.2、PP.106-122、2009.6
- 17) 腰塚雄太、下坂将史、戸谷英雄、山田 正、確率予報を用いた事前放流量の決定手法に関する研究、第33回土木学会関東支部技術研究発表会、2006.3
- 18) 松木浩志、齋藤 源、清水直樹、上谷昌史、より効果的なダムによる洪水調節方法の考え方について、平成20年度 ダム水資源環境技術研究所 所報、PP.56-64、2009.11
- 19) 青山俊樹、大被害発生水位を睨んだダム操作方法に関する提案、リザーバー2007.3、PP.1-2、2007.3
- 20) 北田悠星、菊地 慶、岡部真人、山田 正、降水短時間予報を用いた新しいダム

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

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

河川整備基金助成事業、研究成果報告書、pp.11-22、2006.6

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