

# 第1章 研究の概要

## 1. 概要

地球規模の水循環変動に伴う異常気象により、近年水害・土砂災害、渇水被害が頻発している。これらの災害等を防止・軽減するためには、降水量の予測情報を活用して豪雨や渇水の発生する時期と規模を予知することによりの確な対策を事前に講じる必要があるが、これまでわが国の水管理においては、降水量の予測情報は精度上の問題があることから十分活用されてこなかった。

しかし、近年、気象衛星等による気象観測が充実するとともに、気象予測モデルの進歩等により降水量の予測精度が向上しつつある。そこで本研究では、降水量の予測情報を新たに活用して洪水予警報、土砂災害の警戒・避難、貯水池の効率的運用等を行うことができる次世代水管理技術の開発を行った。

また、アジアモンスーン地域等の技術者との国際的ネットワークを構築し、ここで開発した技術を含めわが国の水管理技術を提供するなど、海外との情報交換を行った。

## 2. 目的

本研究は、予測降水量を活用した洪水予警報、土砂災害の警戒・避難、貯水池の効率的運用等が可能な次世代水管理技術を開発するとともに、アジアモンスーン地域をはじめとした海外との情報交換・提供を行うことにより、水災害等の防止・軽減による安全な社会の実現に資することを目的とし、具体的には以下の成果目標を設定して研究を実施した。

### I. 次世代水管理技術に関する研究

- ①予測降水量を活用した洪水予警報に関する技術開発
- ②予測降水量を活用した土砂災害警戒・避難に関する技術開発
- ③予測降水量を活用したダム貯水池の効率的運用に関する技術開発
- ④予測降水量を活用したダム貯水池水質の効率的管理に関する技術開発

### II. 海外の水問題を解決するための国際貢献

- ①水管理技術に関する海外との情報交換・提供

## 3. 研究の内容

### 3-1. 次世代水管理技術に関する研究

#### 3-1-1 予測降水量を活用した洪水予警報に関する技術開発

我が国で多く利用されている、雨量や水位・流量等の洪水実績資料を基にした経験則に基づく洪水予測システムは、過去に経験したことがない洪水が発生した時に、洪水予測システムが十分に機能・対応できなくなる恐れがある。そこで、本研究では、不確定事象である予測雨量の変化に対して確率的な表現を用い、予測に幅を持たせる柔軟な洪水予測手法について検討した。

#### (1) 降雨予測の特性

過去の気象庁の降水短時間予報の予測雨量を用いて、図 3-1-1 に示す九州地方の松浦川水系を対象に、過去7年間の予測雨量データから30降雨を抽出し、予測雨量の定量的な分析を行

った。予測雨量の誤差は、降雨強度分布の変化の大きさ（標準偏差で表現）が大きくなるにつれて誤算分布に広がりがある。この特性を利用し、降雨分布の標準偏差のある区間内において、分布値が90%含まれる範囲を上限値、下限値とし、予測雨量の上限・下限値誤差曲線を作成した(図 3-1-2)。なお、標準偏差が 10mm 以上の場合は分布値が少ないため、誤差曲線は外挿によって求めた。

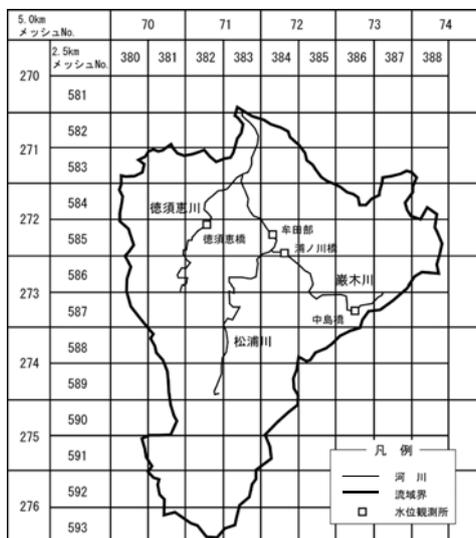


図 3-1-1 松浦川流域

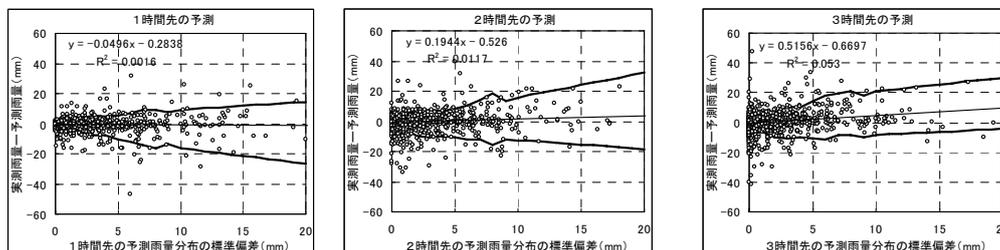


図 3-1-2 降雨分布の標準偏差と誤差曲線

## (2)洪水予測の確率的表現方法

図 3-1-2 の上下限値の誤差曲線を利用して、洪水予測結果に確率的な表現を加えた、確率論的洪水予測の計算手順を図 3-1-3 に示す。(1)で設定した予測雨量の上下限値を流出計算の入力データとして、それぞれ流出量を計算し、H-Q 曲線を介在させて、確率論的な表現の予測水位（信頼区間 90%）を算出する。洪水予測計算では計算水位を観測水位で補正するフィードバック計算を行っている。そのため、上下限の予測雨量で洪水計算を行っても、予測水位は実測水位と大きく異なることはなく、予測水位の上下限の範囲内に実測水位が含まれる結果となった(図 3-1-4)。

ただし、予測雨量の波形が実際の雨量の波形と大きく異なる場合は、フィードバック計算では対応できず、予測水位の上下限の範囲内に実測水位が含まれない場合もあった。

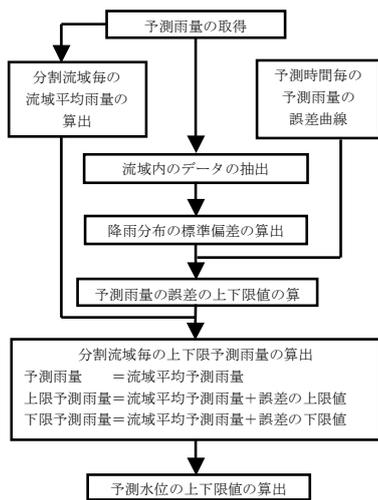


図 3-1-3 確率論的洪水予測の計算手順

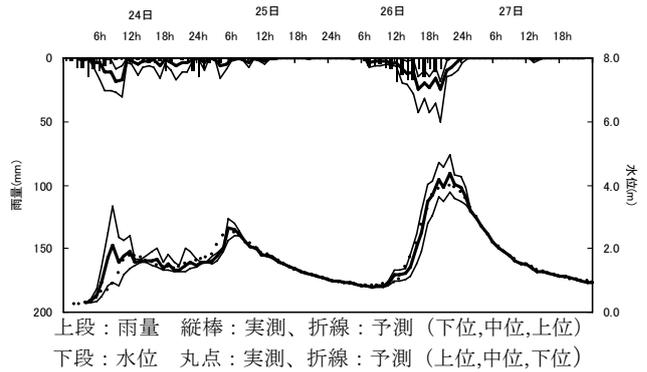


図 3-1-4 洪水予測の確率表現 (3 時間先の予測)

### (3)洪水予測システムの開発

実績雨量（レーダアメダス等）と予測雨量（気象庁降水短時間予報、降水ノウキャスト等）を基に予測雨量の誤差を考慮した上記の確率論的洪水予測手法、現時刻の流出率を用いて計算流量を実測値に合わせる「現時刻 f 合わせ」、現時刻の計算水位と実績水位の差( $\Delta h$ )をスライドして実績水位に合わせる「 $\Delta h$  合わせ」等のフィードバック計算手法の選択機能等を組み込んだ洪水予測システムを開発した。

### 3-1-2 予測降水量が活用可能な土砂災害警戒・避難に関する技術開発

地球規模の気象観測や数値モデルの高度化などにより、降雨予測の精度向上が図られてきている。今後、これらの降雨予測情報を土砂災害対策に有効に活用するためには、土砂生産予測モデルの精度向上が必要である。これまで土砂生産に関する予測手法として提案されたものは、過去の災害実績にもとづく経験的な手法が多いが、このような手法では、植生、地質、地形などの場の条件や、先行降雨量、降雨波形など土砂災害の誘因となる条件が多様であるため、適用には限界がある。

1980 年代以降、土砂生産予測モデルとして、土砂移動現象に影響する表面流、鉛直浸透、飽和側方流などの雨水一流出過程に関するモデルや、雨滴侵食、斜面安定計算などの土砂生産一移動現象に関するモデルを結合したいわゆる物理モデルの構築・提案がなされてきた。また、数多くの実験や現地観測が行われ、モデルに適用することで改良や提案もされてきている。しかし、これらのモデルが土砂災害対策として十分に活用されているとは言い難いのが現状である。そこで本研究では、土砂生産予測モデルが実務上で利用可能となるように現状の各種の物理モデルを分析し、課題を克服できる物理モデルの構築を目的とした。

#### (1)物理モデルの現状と課題

土砂生産予測には、数多くのモデルを組み合わせる必要があるため、モデルの構築に多大な労力を要し、モデル全体を詳細に把握することが困難である。その上、各要素に対して多くのモデルが提案されており、目的、対象スケール、事象にあった最適なモデルを抽出するのが難

しい。そこで、統一の規格・コンピュータ言語を用い、従来提案されている土砂移動現象をコントロールする数値計算手法のプログラミングを行い、各要素のモデルから自由にモデルを選択でき、それらを自由に組み合わせることが可能で、新たに提案されたモデルを追加できるシステムの開発を目的とした。

(2)統合型土砂生産予測モデルの検討

図 3-1-5 に本研究の開発モデルの概略を示す。これは i)計算メッシュ作成モデル、ii)雨水一流出モデル、iii)表面侵食モデル、iv)表層崩壊一崩土流下モデルの 4 モデルかなり、ii)～iv)のモデルは 2 - 4 のサブルーチンからなる。さらに、各サブルーチンは複数のモデルから選択可能とした。プログラムを作成したモデルを表 3-1-1 に示す。

このように、本モデルを用いることによって、計算手法の違いが土砂生産予測に及ぼす影響を検証することが可能となる。今後、実測の水文観測結果、災害事例と計算結果の比較を行い、計算手法が土砂生産予測精度に及ぼす影響を明らかにすることで、作成した物理モデルの課題が抽出可能であると考えられる。

表 3-1-1 プログラムを作成した計算手法

モデル	サブルーチン	計算手法
メッシュ作成モデル		正方形メッシュ作成
雨水一流出モデル	表面流発生ルーチン 表面流ルーチン	Smith-Parlangeの式(Smith and Parlange, 1978) 2次元浅水流モデル
	地中流ルーチン	2次元キネマチックウエーブモデル 1次元Richards式+飽和側方流 小杉ら(2002)式+飽和側方流 拡散方程式(Iverson, 2000) 定常流モデル(Montgomery and Dietrich, 1994)
表面侵食モデル	岩盤浸透ルーチン 土砂剥離ルーチン	一定量浸透(平松ら, 1990) 欧らの粘性土の侵食速度式 KINEROS中の侵食速度式(Smith et al. 1995)
表層崩壊一崩土流下モデル	土砂運搬ルーチン 斜面崩壊発生ルーチン 崩壊土砂流下ルーチン	水山式 無限長斜面の安定解析 未プログラミング

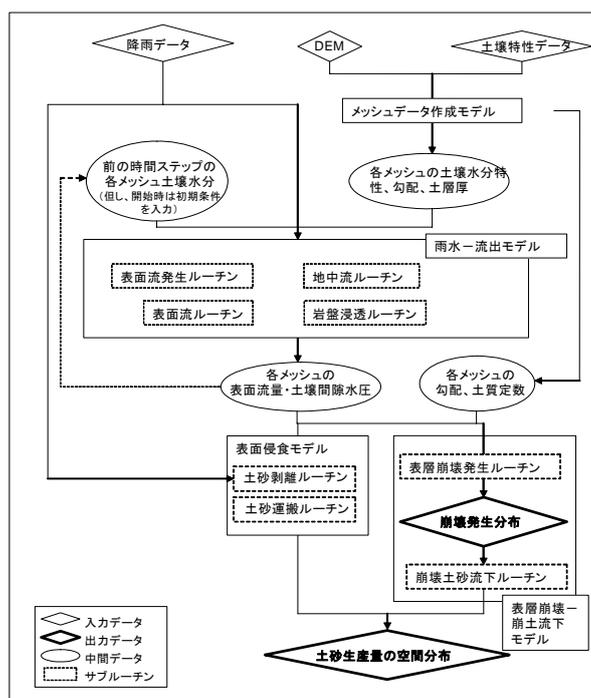


図 3-1-5 統合型土砂生産予測モデルの概要

### (3)まとめ

本モデルを用いることによって、計算手法の違いが土砂生産予測に及ぼす影響を検証していくことが可能となった。今後、実測の水文観測結果、災害事例と計算結果の比較を通して、計算手法が土砂生産予測精度に及ぼす影響を明らかにし、土砂生産予測に関する物理モデルの課題を抽出するとともに、目的、対象とする期間、地域ごとに最適なモデルの組合せが明らかになると考えられる。その上で、一般的に利用可能な形としてモデルを改良して、土砂災害のソフト対策に活用する予定である。

## 3-1-3 予測降水量を活用したダム貯水池の効率的運用に関する技術開発

### (1)実測雨量と予測雨量の比較

地球規模の気象観測や数値モデルの高度化等により気象予測の精度向上に向けて取り組みが進められている(表 3-1-2)。一方、わが国のダムでは実績の気象・水象情報に基づく経験的な手法により洪水調節や各種用水の補給を実施している場合が多く、これら最新の予測情報を活用し効率的な高水管理・低水管理を行う環境が十分に整えられていないのが現状である。これは、これらの予測情報の定量性に関する評価が定まっていなかったことが原因の一端にあると考えられる。そこで、気象庁の現行の数値解析予報システム(NAPS7) 供用開始の 2002 年 3 月以降、2004 年末までの期間で規模の大きい洪水を発生させた 7 回の降雨イベントについて実測雨量と予測雨量の比較を行った。対象流域は北上川、阿賀川、利根川、木曾川、淀川、吉野川、筑後川の 7 水系のダム流域とし、実測雨量はこれらの流域内で観測されている 214 箇所の雨量観測所の時間雨量とした。

表 3-1-2 本研究で使用した気象庁の降水量予測情報

	降水短時間予報 (VSRF)	メソ数値予報モデル (MSM)	領域数値予報モデル (RSM)
空間格子間隔	約 5km	約 10km	約 20km
更新時間間隔	0.5hr	6hr	12hr
最大先行時間	6hr	18hr	51hr

図 3-1-6 は、予測先行時間別に、時間雨量の予測値と実測値の関係を相関係数及び回帰係数で表したものである。図中、記号付きの太線は全地点・全降雨の平均値を示し、上側の折れ線は最も精度が良い、また下側の折れ線は最も精度が悪いモデル流域での平均値を示す。ここでは、相関係数が 1.0 であれば降雨波形が相似で、かつ回帰係数が 1.0 であれば各時間の雨量も一致することを意味するが、図によるといずれの係数も先行時間の増加とともに減少する傾向にある。つまり、先行時間が増加すると降雨波形の相似の度合いが低くなり、時間雨量が小さく見積もられる傾向が強くなっている。全平均で見る限り、メソ数値予報モデル(MSM)及び領域数値予報モデル(RSM)は時間単位の予測雨量として精度があまり期待できない。また降水

短時間予報(VSRF)でも先行時間が2時間を超えると急激に予測精度が劣化する結果となっている。このようなことからダム貯水池の流入量予測に適用可能な予測降雨は1ないし2時間先までのVSRFの予報値と考えられる。図3-1-7は、検討対象期間における全ての予報時刻でのVSRFの6時間雨量、MSMの6・12・18時間雨量及びRSMの6・12・18・24・36・48時間雨量の予測値とこれに対応する実測の積算雨量との相関係数・回帰係数を示している。相関係数に着目すると、降雨の予測方法、時間間隔によらず、高い水準で大きな変動もなく相関を維持していることが読み取れる。回帰係数を見ると予測が実測より多少小さい傾向を示しているものの、6時間～48時間雨量の降雨波形は、VSRF、MSM、RSMともに、比較的精度良く予測されていると考えることができる。このことは、ダムの洪水調節の事前作業時に今後発生する降雨の時機や概ねの規模を把握するなどの監視情報としての利用可能性を示している。

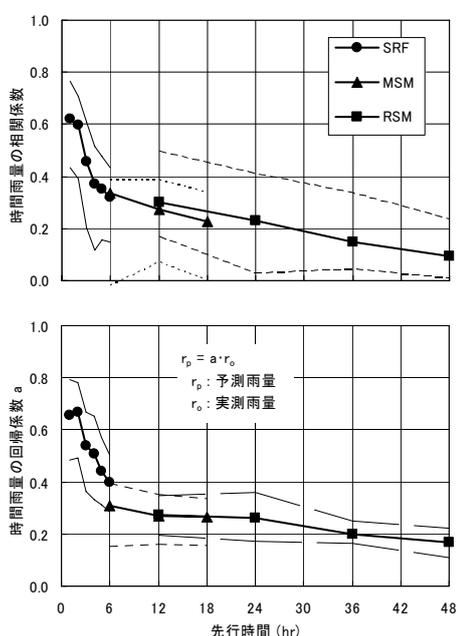


図3-1-6 時間雨量の相関係数・回帰係数

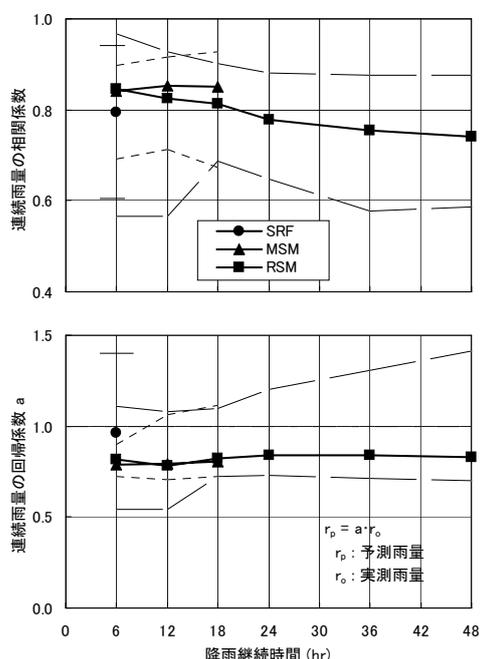


図3-1-7 積算雨量の相関係数・回帰係数

## (2)VSRFによるリアルタイムダム流入量予測モデルの開発

ダム貯水池の流入量予測の入力降雨としての適用可能性が見出されたVSRFの予測降雨を用いたリアルタイムダム流入量予測モデルを開発した。モデル形式として面的な情報を活用できる実用的な分布型モデルを採用することとし、具体的には以下の要件を満たすモデルを開発した。

### 1) 流出の再現性に優れていること【モデルの近似性】

いうまでもないが、流出解析手法としての洪水流出の再現性が確保されるモデルとする必要がある。このためには、実流域に適用され、洪水の再現性が確認されているモデルが候補になる。

### 2) パラメータの同定が容易なこと【モデル化の難易】

パラメータの数が多ければその再現性が高まる可能性があるが、一方でパラメータの同

定が難しくなる（労力がかかる）ことも考えられる。したがって、パラメータの数が極力少なく、他の数値データから推定できるような物理的意味をもったモデルを採用することが望ましい。

3) 既存のデータをもとに容易にモデル化できること【モデルの適用性・全国展開】

本検討では筑後川を対象としているが、今後全国の河川やダム流域に適用することを想定すると、1)、2)の問題を含め入手可能な既存のデータをもとに容易にモデル化を図れるようなモデルを採用することが望ましい。

4) 計算時間が短いこと【計算時間】

洪水予測ではリアルタイム処理を行い、少しでも早く予測情報を河川・ダム管理に活用することが重要である。このためには、計算所要時間の短いモデルとする必要がある。

既存の分布型流出予測モデルの特徴を整理し、陸・小池・早川によって提案された分布型流出モデルを基本とするモデルを開発した。洪水流量曲線の構成概念図を図 3-1-8 に、モデルのフローチャートを図 3-1-9 に示す。

上記の分布型流出予測モデルにより、レーダーアメダス解析雨量と VSRF を用いてリアルタイムダム流入量予測実験を行った。(図 3-1-10) 流域面積約 1000km<sup>2</sup>に対し 6 時間先までの予測計算にかかった時間は約 4 分であり、時間的には大きな問題はない。今回検証した 3 洪水では、6 時間先まで比較的精度の良い予測が可能であった。今後、ダムを管理しているいくつかの事務所に試験的に導入し、ダム管理実務に利用した場合の効果や問題点について、現場と一体となってケーススタディを重ね、必要な改良を進めていく。

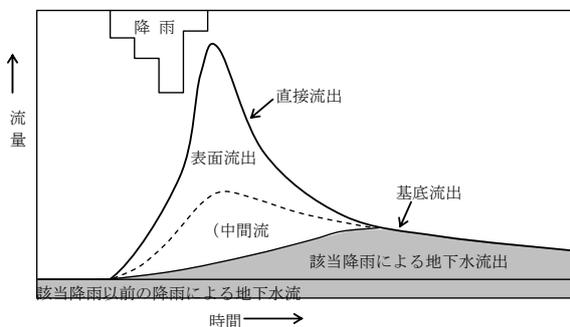


図 3-1-8 洪水流量曲線の構成概念図

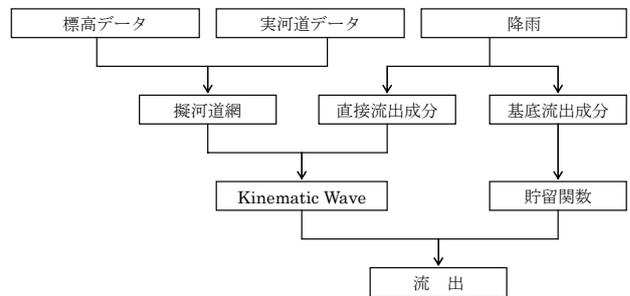


図 3-1-9 モデルフローチャート

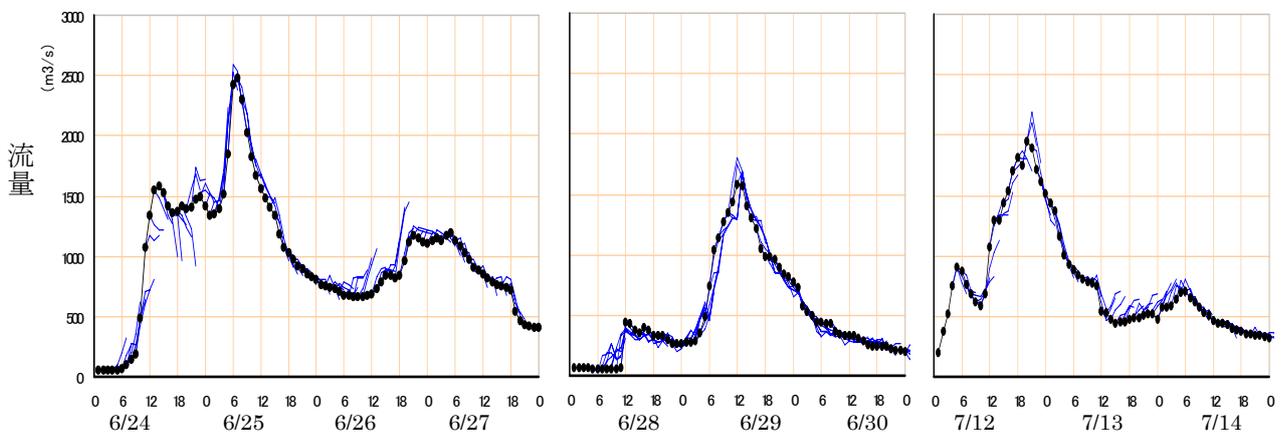


図 3-1-10 分布型流出予測モデルによるリアルタイム流出計算結果（黒丸：実測、実線：予測計算結果）

### (3)分布型流出モデルの活用例

#### ①事前放流

時間と共に更新される降雨予測情報を利用して、事前放流の実施・中断の判断として活用することが可能となる。

長時間の降雨予測を活用し、事前放流の実施を決定した後も、常に、更新され続ける最新の長時間及び短時間の降雨予測情報により、事前放流量の調整や終了の判断が可能となる。

#### ②ただし書き操作

従来型の流入量予測モデルでは、ただし書き操作(計画規模を超える洪水時に放流量を増やす操作)が必要であると判断されるようなケースでも、降雨予測情報を活用した分布型流出モデルにより、流入量が速やかに減少すると予測されたケースでは、ただし書き操作の必要性はないと判断することが可能になり、通常のダム操作により洪水調節の実施が可能となる。

また、分布型流出モデルによりただし書き操作が必要であると判断された場合にも、早期の情報提供が可能となる。

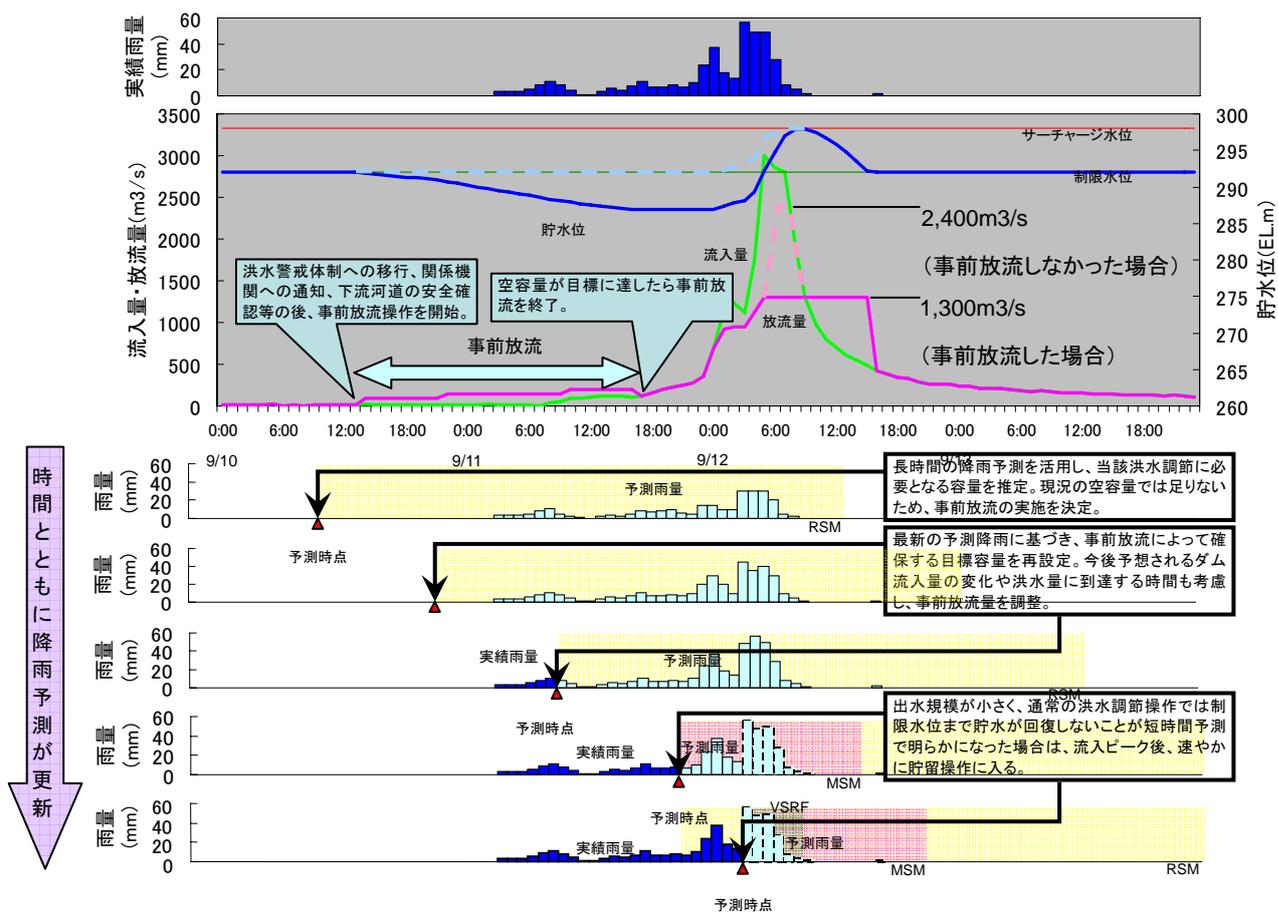


図 3-1-11 分布型流出モデルの活用例(事前放流)

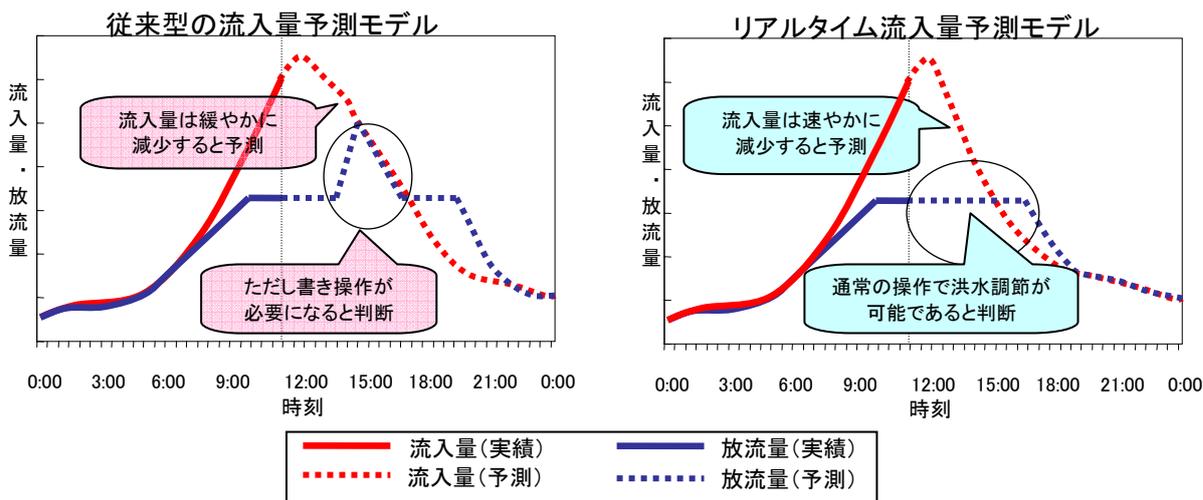


図 3-1-12 分布型流出モデルの活用例(ただし書き操作)

### 3-1-4 予測降水量を活用したダム貯水池水質の効率的管理に関する技術開発

#### (1) 降雨予測情報を活用したダム操作方法の検討

ダム貯水池及び下流河川の水質を適切に管理するため、降雨予測情報を前提とした選択取水施設の操作方法について、阿武隈川水系の三春ダムを対象に構築した貯水池水質モデルにより検討した。

降雨予測情報は、気象庁から入手した以下の2種類のデータを用いた。

- ・RSM(領域数値予報モデル)：1～2日までの平均的な雨量(または積算雨量)の把握に用いられる。
- ・降水短時間予報：6時間先までの時間雨量の把握に用いられる。

ダム貯水池で顕著な富栄養化現象が夏季の大中規模出水後に見られ、その一因として出水時に流入する高濃度の栄養塩にあると言われている。水質改善のために、高濁度水塊がダムサイトに近づいてからコンジット放流を開始し、制限水位を下回っても高濁度水塊が通過し終わるまでコンジット追加放流することで、濃い濁水塊を、その拡散を押さえながら比較的スムーズにダムサイトまで引き寄せ放流することが可能になると期待される。上記に着目し、水質・利水・治水に配慮した降雨予測情報を活用したダム操作ルール(以下、降雨予測ルールと表記)の概要を以下に示す。

#### 1)放流開始の判断

現行ルールでは  $100\text{m}^3/\text{s}$  まではダム流入量=放流量となるよう放流するが( $25\text{m}^3/\text{s}$  以上はコンジット放流)、ここでは濁水塊が到達した時刻からコンジット放流を開始するルールとする(今回は濁度 50 度と設定した)。ただし、降雨予測情報からサーチャージ水位を超えると判定される場合には、サーチャージ水位を超えないように早めにコンジット放流を開始する。

#### 2)放流終了の判断

降雨予測情報によって得られたダム流入量と「放流の原則」（ダム貯水池の水位下降速度）とダム直下流の正常流量の確保の観点から放流操作をしたとき、一定期間内に制限水位に戻すことができるような放流終了限界時刻を推定し、この時刻にコンジット放流を終了する。本検討では降雨予測期間内に回復することを条件とした。

(2) 降雨予測情報を用いたダム水質管理のリスクの検討

流域からの降雨流出モデルとダム水質モデルにより、降雨予測情報を踏まえ、濁水塊のダムサイト到達時差を考慮した遅れ放流や、予測される降雨による貯水量回復を見込んだ濁水の継続放流といったダム操作をシミュレートした結果、利水リスクを考慮して高濁度水塊が通過し終わる前にコンジット放流を停止してしまうため、富栄養化を抑制するほどの大幅な水質改善効果は期待できないことがわかった。（図 3-1-13）

ただ、今回の放流操作は降雨予測期間内に制限水位が回復するような条件設定を行っているために、現況と比較して水質改善の観点からは劇的な改善効果が表れていない。水質改善効果を得ようとして濃い濁水塊が通過し切るまで放流した場合、制限水位に回復するまでに1ヶ月以上かかるために、今度は利水リスクが許容範囲を越えてしまう。（図 3-1-14）したがって1ヶ月程度の長期降雨予測が可能となれば一層柔軟なダム操作を行うことができる可能性がある。また治水安全度や利水安全度への影響についてはより深く検討するには、異なる特徴を持つダムを対象にした検討が必要である。総合的な水管理という観点から、降雨予測情報のダム水質管理への活用には、より一層降雨予測精度の向上が必要である。

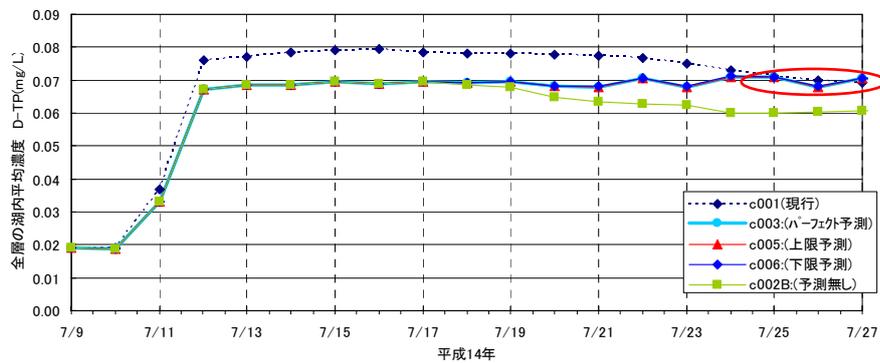


図 3-1-13 貯水池水質モデルによる湖内平均濃度予測結果 (D-TP)

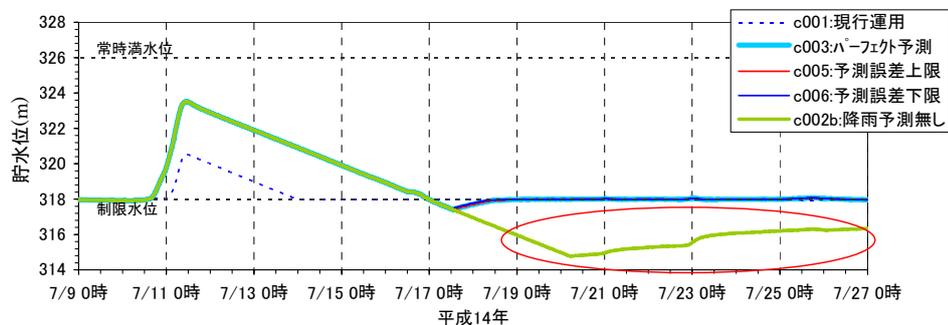


図 3-1-14 現行の運用ルールと降雨予測ルールにおける貯水池水位予測

### 3-2. 海外の水問題を解決するための国際貢献

アジアの自然的・社会的条件の下で、水循環変動という自然要因に加えて急激な人口増加による農業用水需要の増大や、都市開発、産業発展などの社会的要因に起因した治水・利水・環境等の様々な水問題を解決するためには、総合的かつ実践的な水マネジメントを実施する必要がある。そのためには、科学技術の観点の研究開発のみならず、人文・社会科学の立場でのアプローチが必要である。これは、地域住民の水管理に対する要求をどう把握するか、情報の開示・共有を具体的にどのように行うか、水マネジメントについて様々な主体がどのように合意を形成するか、といった課題の解決を目指すアプローチである。科学技術的な研究開発に加えて、人文・社会科学的研究開発も同時に行われてこそ、実際の現場での水の管理・運用を含む水マネジメントが、個別開発技術の適用のような段階まで含めてスムーズに実行されるといえる。また、どの国にもその国固有の歴史・文化から形成された水に関する「秩序」、「制度」が存在し、実際の水マネジメントはそうした国ごとの秩序の下で対策シナリオを構築しなければならない。国際河川を抱えるアジア地域においては、国内はもとより、河川流域の全ての国々が協力しあつて国を超えたガバナンスの枠組みを確立する必要がある。そこで、アジア諸国の事例、水に関する秩序、マネジメントのあり方について情報交換、討論を行うための国際会議を開催した。

#### 3-2-1 アジア太平洋地域水文水資源国際会議（APHW2004）「NILIM 特別セッション」の開催

2004年7月5～8日までの4日間、シンガポール・サンテックインターナショナル・コンベンション&エキシビションセンターにおいて、第2回アジア太平洋地域水文水資源国際会議（APHW2004）が開催された。APHW2004では8つの特別セッションが開催され、国土技術政策総合研究所（National Institute for Land and Infrastructure Management, NILIM）もそのうちの一つとして、7月7日に「NILIM 特別セッション」を主催した。

このNILIM 特別セッションでは、アジアモンスーン地域諸国の水問題と、これに対する対策として進められている水制度の紹介を行い、アジアモンスーン地域諸国の共通の処方箋として活用できる情報の共有化のためのツールボックスとされることを想定し、アジア5カ国から7名の参加者を招聘し各国における水管理についての法制度について議論を行った。

#### 3-2-2 「NILIM 特別セッション」における成果

NILIM 特別セッションを開催することによって、アジア各国から参加した水管理に関する専門家の中で、アジアモンスーン地域諸国の水管理における教訓や、それぞれの地域ごとに異なった特徴的で重要な課題があるという認識を共有することができた。

NILIM 特別セッションは、アジア各国の水管理に携わる専門家が情報共有のもと各地の水問題を解決していく第一歩として、所期の目的を達成できた。アジアモンスーン地域諸国の水問題解決に向け、今後も引き続き、アジア太平洋地域の専門家がより緊密な連携を図っていくことが期待される。