

地球規模水循環変動に対応する 水管理技術に関する研究

国土交通省国土技術政策総合研究所

企画部企画課 課長

(前 河川研究部水資源研究室 主任研究官)

河川研究部水資源研究室 主任研究官

かわさき

川崎

ただ

多田

まさき

将生

ともかず

智和

1. はじめに

近年、人間活動に由来すると考えられる地球規模の水循環変動によって、世界的に洪水や干ばつ等の被害が顕在化してきている。わが国でも降水量の変動が経年的に拡大する傾向が確認されており(図 1)、これまでの計画規模を超える洪水や渇水の発生する危険性が増大しつつある。これらに機動的かつ的確に対応し、生じる被害を防止・軽減するため、洪水予測、土砂災害警戒避難情報、ダム管理といった水管理実務における降雨予測情報の有効活用が期待されており、そのための新たな水管理技術の開発が急務となっている。

こうした地球規模水循環変動による問題の解決のためには、地球規模の観測(現象把握)・モデル(現象理解)・評価(予測)・対策シナリオ(実践)の研究が同時に進められる必要があることから、平成15年度に総合科学技術会議・環境分野の重点課題「地球規模水循環変動研究イニシャティブ」が設定され、気象・水文・農業・環境・災害などさまざまな分野の関係省庁(行政機関・研究機関)、大学および産業界が連携して、(a)地球規模の水循環変動を観測し、(b)科学的に信頼できるモデルを開発し、それに基づいて、(c)水循環変動による影響を評価し、(d)その影響を最小にするための適切な対策を提示することを目的に、研究開発が推進されてきた¹⁾。国土技術政策総合研究所としても、このイニシャティブの一環として上記

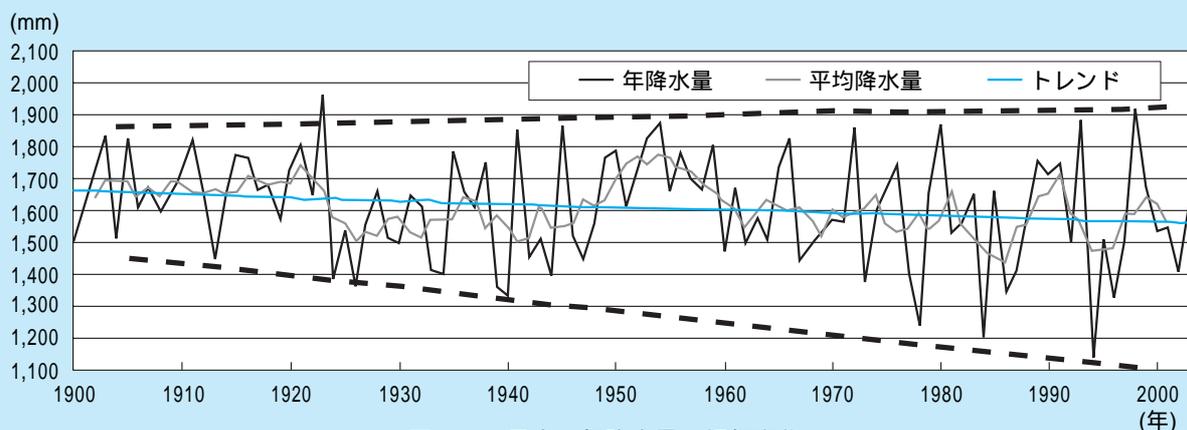


図 1 日本の年降水量の経年変化

(c), (d)に対応するプロジェクト研究「地球規模水循環変動に対応する水管理技術に関する研究」を平成15年度に立ち上げ、以降3カ年にわたって降雨予測情報を水管理に活用するための技術開発等を進めてきたところである。

2. 気象庁の降雨予測

地球規模の気象観測や数値モデルの高度化等、気象予測の精度向上に向けた取り組みが進められている。

気象庁が実施している降雨予測は、①実況の降雨分布を表すレーダー・アメダス解析雨量を風向・風速、地形による雨域の発達・衰弱等を考慮して時間的に外挿したもの、および、②気象に関するさまざまな物理過程を組み込んだ予報モデルにより気象予報を行うもの、に大別される。前者は、降水短時間予報として空間解像度1kmで6時間先までの1時間雨量が30分ごとに、また降水ナウキャストとして1時間先までの10分雨量が10分ごとに発表されている。後者は数値予報と呼ばれ、用途に応じてメソ・モデル(MSM)、領域モデル(RSM)、全球数値予報モデル(GSM)、台風数値予報モデル(TYM)、週間/1カ月/季節アンサンブル予報モデル、エルニーニョ予測モデルが使分けられている。主な数値予報の概要を表 1

に示す²⁾。

3. 予測降水量を水管理に活用するための技術開発

(1) 洪水予測

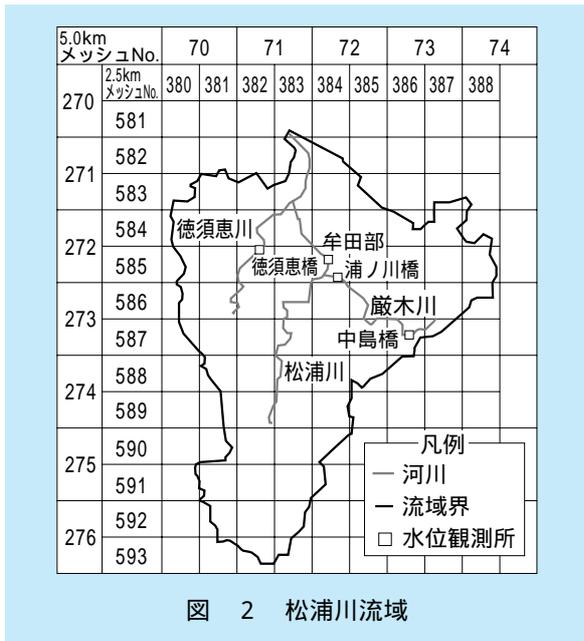
予測雨量を用いた洪水予測はすでに多くの現場で行われているが、予測結果は参考値として扱われることが多い。これは、誤差を有している予測雨量が確定的な値として扱われ、さらに誤差を有する洪水予測モデルによる予測水位も確定的な値として出力されるため、予測結果の誤差の程度が分からず、洪水予測結果をそのまま利用できないからである。そこで、予測雨量に含まれる誤差や予測モデルの誤差を評価し、洪水予測結果に確率や分散等の精度の情報を付加する、「確率論的洪水予測」手法について検討した。確率論的洪水予測を用いることにより、予測の不確かさを考慮し、予測水位に幅を持たせることで、水位が警戒水位や危険水位を超過する危険性を早期に把握することが可能となり、より早い段階での準備が可能となる。

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 2 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。図 3

表 1 主な数値予報モデルの概要(気象庁)

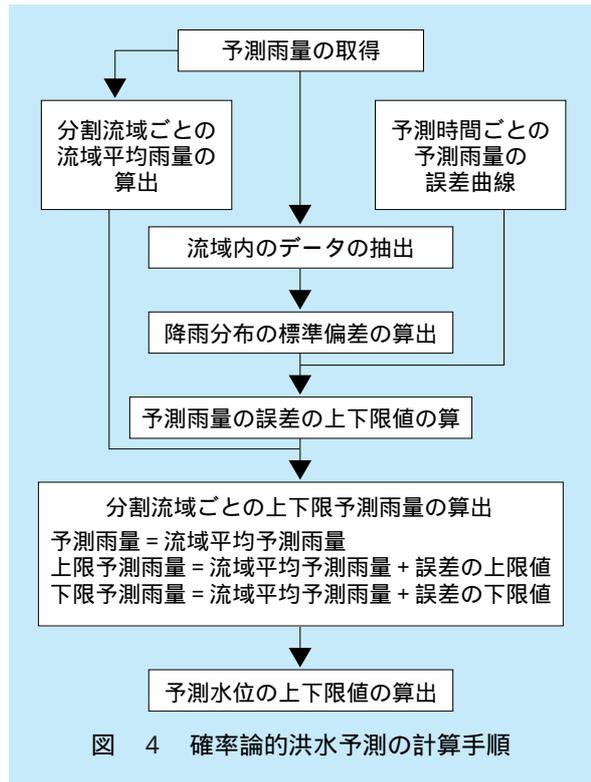
予報モデルの種類	モデルを用いて発表する予報	予報領域と水平解像度	予報期間	実行回数
メソモデル(MSM)	防災気象情報	日本周辺 5km	15時間	1日8回
領域モデル(RSM)	分布予報, 時系列予報, 府県天気予報	東アジア 20km	2日間	1日2回
台風モデル(TYM)	台風予報	北西太平洋の台風周辺 24km	3.5日間	1日4回
全球モデル(GSM)	府県天気予報, 週間天気予報	地球全体 60km	~9日間	1日4回
アンサンブル週間予報モデル	週間天気予報	地球全体 110km	9日間	1日1回
1カ月予報モデル	1カ月予報	地球全体 110km	1カ月	週1回



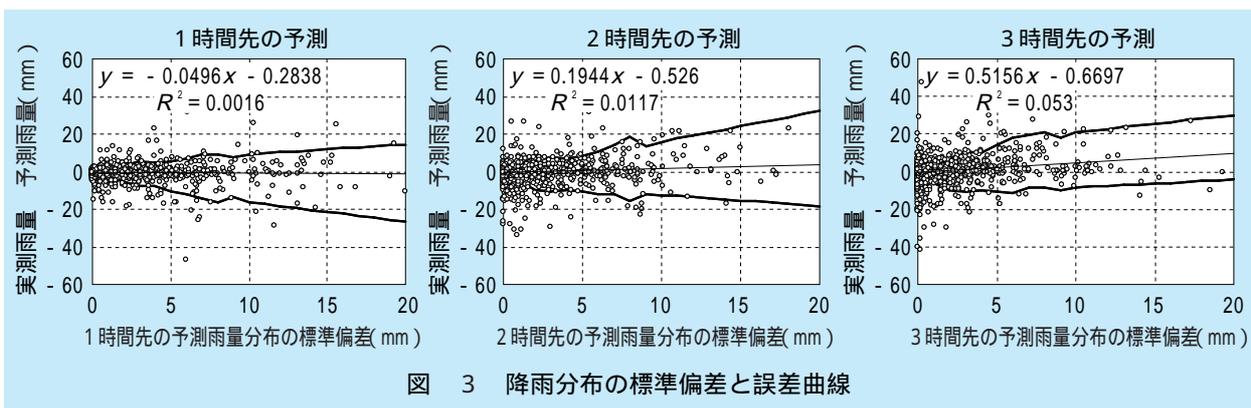
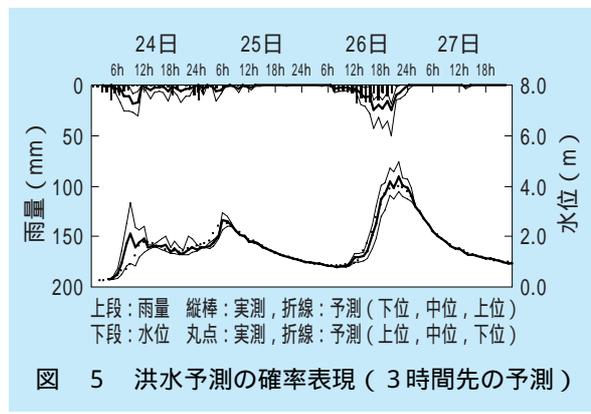
のように、予測雨量の誤差は降雨強度分布の変化の大きさ（標準偏差で表現）が大きくなるにつれて誤算分布に広がりがある。この特性を利用し、降雨分布の標準偏差のある区間内において、分布値が90%含まれる範囲を上限値、下限値とし、予測雨量の上限・下限値誤差曲線を作成した。なお、標準偏差が10mm 以上の場合は分布値が少ないため、誤差曲線は外挿によって求めた。

② 洪水予測の確率的表現方法

確率論的洪水予測の計算手順を図 4 に示す。図 3 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、水位流量曲線を介在させて、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 5）。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。

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，降水ナウキャスト等）をもと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（ Δh ）をスライドして実績水位に合わせる「 Δh 合わせ」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。

(2) 土砂災害発生予測

精度向上が進められていく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，過去の災害実績に基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。そこで，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を構築した。

土砂生産予測モデルには，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移動現象に関するモデルなど，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

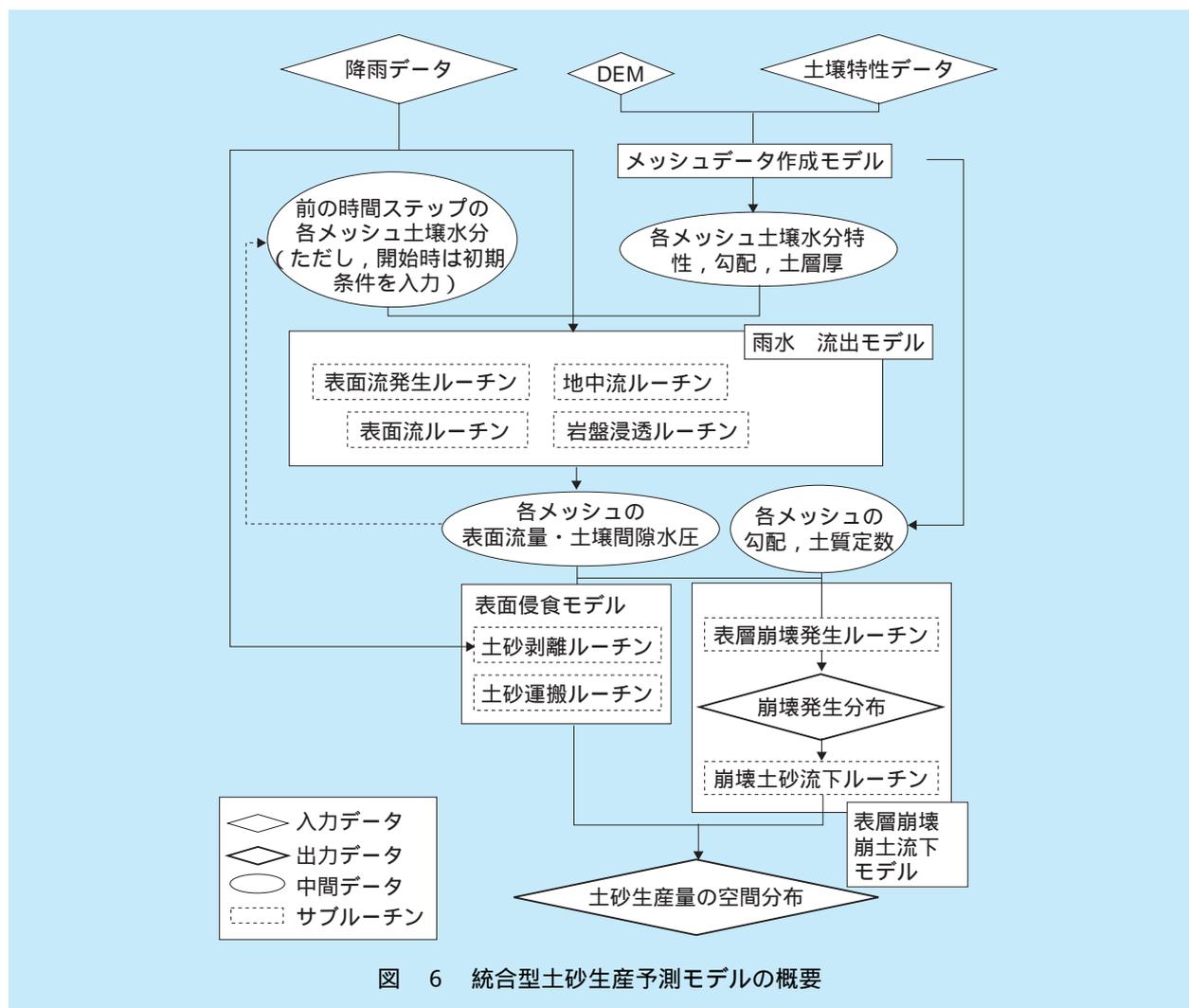


図 6 統合型土砂生産予測モデルの概要

表 2 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 雨水 流出モデル	表面流発生ルーチン 表面流ルーチン	正方形メッシュ作成 Smith Parlange の式 (Smith and Parlange , 1978) 2次元浅水流モデル 2次元キネマチックウエーブモデル
	地中流ルーチン	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) 一定量浸透 (平松ら , 1990)
表面侵食モデル	岩盤浸透ルーチン 土砂剥離ルーチン	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 - 崩土流下モデル	土砂運搬ルーチン	水山式
	斜面崩壊発生ルーチン 崩壊土砂流下ルーチン	無限長斜面の安定解析 未プログラミング

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とした。

図 6 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 流出モデル、iii) 表面侵食モデル、iv) 表層崩壊 崩土流下モデルの 4 モデルからなり、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計算手法を表 2 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していくことが可能となる。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) ダム管理

① ダム貯水池の効率的運用のための技術

わが国のダムでは、実績の気象・水象情報に基づいて洪水調節や各種用水の補給を実施することを基本としてきた背景から、降雨予測や流入量予測を活用した高水・低水管理を行う環境が十分整えられていないのが現状である。これはダム管理実務の面から見た降雨予測、流入量予測の定量性に関する評価が定まっていないことが原因の一端にある。そこで、降雨予測の精度評価およびダム

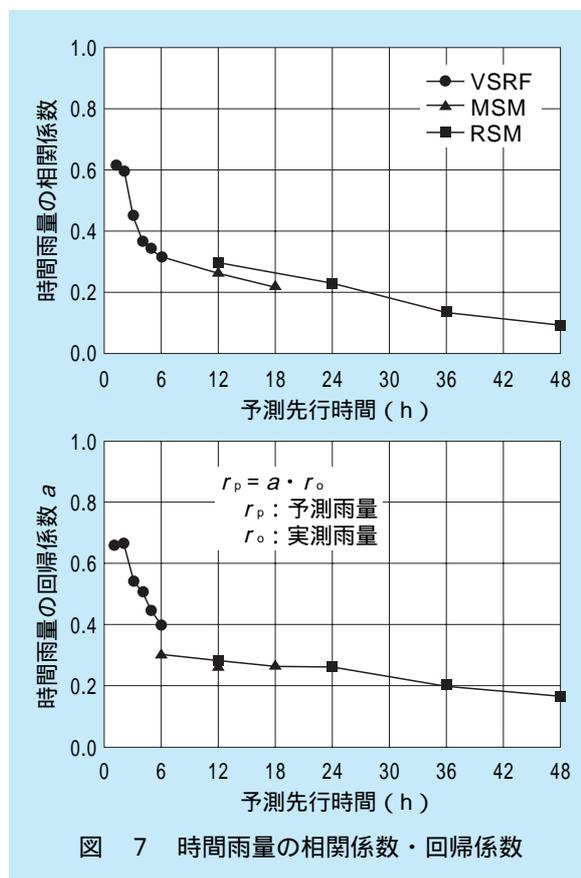


図 7 時間雨量の相関係数・回帰係数

管理実務への適用性に関する検討を実施するとともに、降雨予測情報に対応した分布型ダム流入量予測モデルの開発を行った。

1) 降雨予測情報の精度

図 7 は、全国 7 水系において 2002 年 3 月から 2004 年末までに発生した規模の大きい降雨イベントの際に水系内の延べ 214 カ所の雨量観測所で観測された実測時間雨量と、同じ降雨イベントにおいて気象庁が発表した降水短時間予報 (VSRF) および数値予報 (MSM, RSM) による予測時間雨量を比較したものである。相関係数が 1 であれば降雨波形が相似で、かつ回帰係数が 1 であれば各時刻の雨量も一致することを意味している。これらの図は、全観測所、全降雨の平均値を表していることから、観測所や降雨イベントごとに見れば必ずしも同様な傾向を示すわけではないが、降雨予測精度の平均的な傾向として、以下のことが分かる。すなわち、i) 予測先行時間が長くなると降雨波形の相似の度合いが低くなり、時間雨量を小さく見積もる傾向が強くなる。ii) VSRF は予測先行時間が 2 時間までは実測値との相関が比較的良いが、これを超えると急激に予測精度が劣化する。iii) MSM, 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。このようなことから、ダム貯水池の流入量予測への活用が期待できるのは、平均的に見れば 2 時間先までの VSRF の予報値であると考えられる。

2) 降雨予測情報に対応した分布型ダム流入量予測モデルの開発

ダム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。面的な降雨予測情報を直接入力できる分布型モデルを採用することとし、実用性も考慮して以下の要件を満たすモデルとした。

- i) 流出の再現性に優れていること
- ii) パラメータの同定が容易なこと
- iii) 既存のデータをもとに容易にモデル化できること
- iv) 計算時間が短いこと

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³⁾によって提案された分布型流出モデルにフィードバック機能を付加したモデルを開発した。モデルのフローチャートを図 8 に示す。このモデルにより、筑後川上流部をモデル流域としてレーダーアメダス解析雨量と VSRF を用いたリアルタイムダム流入量予測実験を行った (図 9)。流域面積約 1,000km²において 6 時間先までの予測計算を実施したが、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り、また 1 回の予測計算にかかった時間は約 4 分と時間的にも大きな問題はなかった。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ケーススタディを重ね、必要な改良を進めていく。

② ダム貯水池水質の効率的な管理技術

ダム貯水池および下流河川の水質を適切に管理

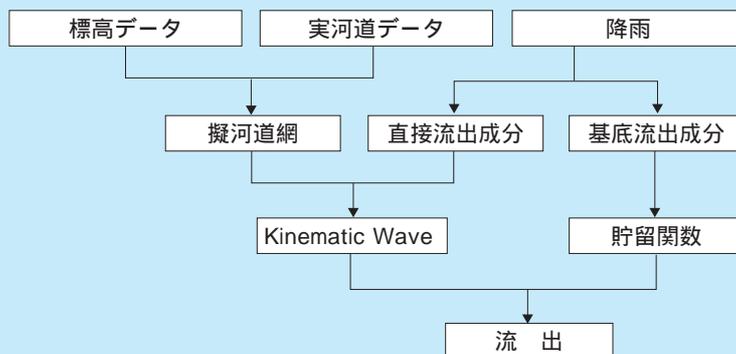
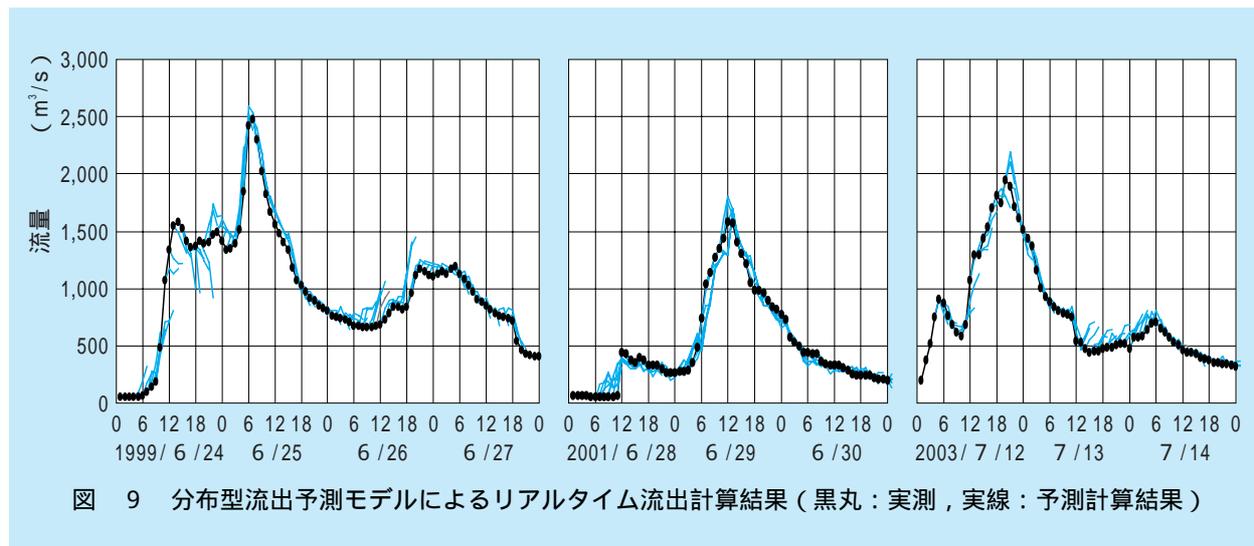


図 8 モデルフローチャート



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。

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、その一因は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。そこで、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)を、次のように設定した。

i) 放流開始の判断

現行ルールでは100m³/sまではダム流入量 = 放流量となるよう放流するが(25m³/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。

ii) 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、

「放流の原則」(ダム貯水池の水位下降速度)、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分かった(図 10)。

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きるまで放流した場合、制限水位に回復するまでに1カ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 11)。従って1カ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より深く検討するには、異

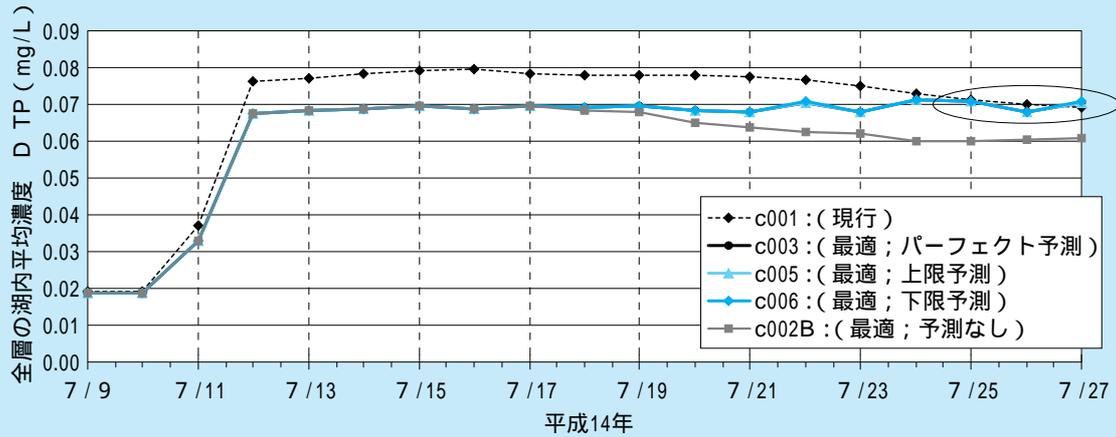


図 10 貯水池水質モデルによる湖内平均濃度予測結果 (D TP)

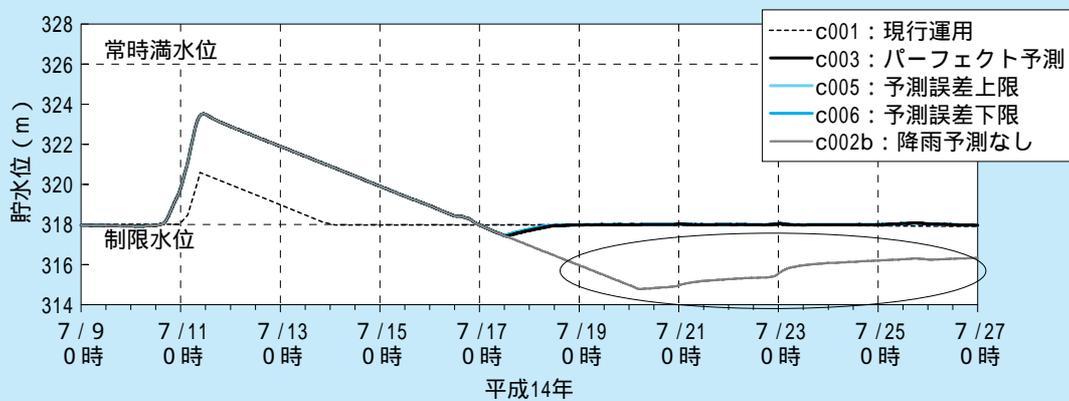


図 11 現行の運用ルールと降雨予測ルールにおける貯水池水位予測

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。

4. おわりに

気象庁では、平成18年3月から、それまで2.5 km メッシュであったレーダー・アメダス解析雨量、5 km メッシュであった降水短時間予報 (VSRF) をいずれも 1 km メッシュで計算するとともに、それまで10km メッシュで1日4回であったメソ数値予報モデル (MSM) を 5 km メッシュで1日8回計算するようになっている⁴⁾。精度が向上しつつある降雨予測情報を水害や土砂災

害危険度の予測、ダム管理に適用することは、不確実性が増す地球規模の水循環変動に対応していく上で今後ますます重要になってくるものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 地球規模水循環変動研究の最前線と社会への貢献，総合科学技術会議地球規模水循環変動研究イニシャティブ，http://www8.cao.go.jp/cstp/project/envpt/pub/H17water_report/water_top.html
- 2) 主な数値予報モデルの概要，気象庁，<http://www.kishou.go.jp/know/whitep/131.html>
- 3) 陸旻皎，小池俊雄，早川典生：分布型水文情報に対応する流出モデルの開発，土木学会論文集411号，1989
- 4) スーパーコンピュータの更新及び数値予報等の改善について，気象庁，<http://www.jma.go.jp/jma/press/0602/23a/suchiyohokaizen.html>