

河川の高水管理における予測降雨情報の適用性に関する考察

和田 一範¹⁾・川崎 将生²⁾・富澤 洋介²⁾

Kazunori WADA, Masaki KAWASAKI and Yosuke TOMIZAWA

1) 国土交通省国土技術政策総合研究所 流域管理研究官, 2) 同 河川研究部
*National Institute for Land and Infrastructure Management,
 Ministry of Land, Infrastructure and Transport*

I. はじめに

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。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いことが原因の一端にあると考えられる。

これまで、国内外で流出モデルや流出予測手法に関しては様々な研究がなされてきているが、その際の系への入力である降雨の予測精度についての議論はあまりなされていない。また、降雨予測についての研究も同様に、方法論に力点が置かれ、水管理の実務的な立場からその予測精度を吟味したような報告は例を見ない。

本研究は内閣総合科学技術会議の下、環境研究イニシアティブの一つとして指定された「地球規模水循環変動イニシアティブ」の一環として気象庁との連携のもとで進めているものであり、近年の気候変動から発生が懸念される、計画規模を超過する洪水や渇水の多発を視野に入れた、水管理の高度化に資する技術開発を行うものである。環境研究イニシアティブについては内閣府(2005)を参照されたい。

その一ステップとして、本稿ではダムにおける高水管理に焦点をあて、気象庁が現業の気象予報業務で用いている予測雨量と実測雨量の比較を行うとともに、短時間の予測雨量を用いた流出予測シミュレ

ーションを行い、現状の降雨予測情報の高水管理への適用性について考察する。

II. 気象庁の降雨予測

現在、気象庁が実施している降雨予報は降水短時間予報(Very Short-Range Forecasting of Precipitation:以下「VSRF」という)と数値予報に大別される。VSRFは実況の降雨分布を表すレーダー・アメダス解析雨量(Radar-AMeDAS Precipitation:以下「RAP」という)を、風向・風速、地形による降水の発達・衰弱の効果、数値予報の結果を考慮して時間的に外挿して降雨予測を行うものである。また、数値予報は気象に関する様々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で、用途に応じてメソ・モデル(MSM: MesoScale Spectral Model)、領域モデル(RSM: Regional Spectral Model)、全球数値予報モデル(GSM)、台風数値予報モデル(TYM)、週間/1ヶ月/季節アンサンブル予報モデル、エルニーニョ予測モデルを使い分けしている。このうちMSMは日本およびその近海を解析領域とし、メソ α (200~2,000 km 台風・低気圧・前線)および100 km以上の地形性メソ β (20~200 km 雷雨性集中豪雨)の気象擾乱を予報対象としている。また、RSMは日本を中心とする東アジアを解析領域として、メソ α の気象擾乱を予測している。

MSMは現行の数値解析予報システム(NAPS7: Numerical Analysis and Prediction System7)が供用を開始した2002年3月に導入されたモデル

1), 2) 〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地 1, Asahi, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0804, Japan

表-1 予測降雨情報の仕様.
Table1 Specifications of rainfall forecast products used by this study.

	VSRF	MSM	RSM
空間格子間隔	約2.5km	10km	約20km
更新時間間隔	0.5hr (毎正時, 毎正時30分後)	6hr (3AM/PM 9AM/PM)	12hr (9AM/PM)
最大先行時間	6hr	18hr	51hr

注) 気象庁 (2004) をもとに作成.

であり, 当初は現在の RSM と同様, 鉛直方向の圧力傾度力と重力の平衡を仮定した静力学モデルであったが, 2004 年 9 月にはこの近似を廃した非静力学モデルとなっている. また, 観測方法・観測場所が異なる多様な気象観測情報から合理的に全ての計算格子の初期値を与えることを「データ同化」というが, データ同化システムとして MSM は導入時より, RSM は 2003 年 9 月より, 4 次元変分法 (メン 4D-Var) を世界に先駆けて採用している. さらに, 次期 NAPS では MSM の格子間隔の細密化 (5km) が予定されるなど, 予報精度向上のためのモデルの改良・拡張が進められている.

III. 実測雨量と予測雨量の比較

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.

対象流域は国土交通省直轄ないし水資源機構が管理しているダムが存在する北上川, 利根川, 木曾川, 阿賀川, 淀川, 吉野川および筑後川の 7 水系の部分流域をモデル流域とした. 比較対象の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. 予測雨量は VSRF, MSM および RSM の 3 種とし, 前記の雨量観測所の最寄りに位置する東西南北格子点値 (GPV: Grid Point Value) を用いて, 観測所の座標における雨量値を空間的に補間して与えた.

1. 時間雨量の比較

ダムによる洪水調節では貯水池への流入量に応じた所定の水量を放流する必要があり, 先立って精度の良い時間雨量が取得可能であれば, 流入量の予測精度も向上して, 確実な放流操作が可能となる. そこで, 先ず, 時間雨量の予測精度の現状について分析を行った.

図-1 は 2004 年, 各地で大きな水害を引き起こ

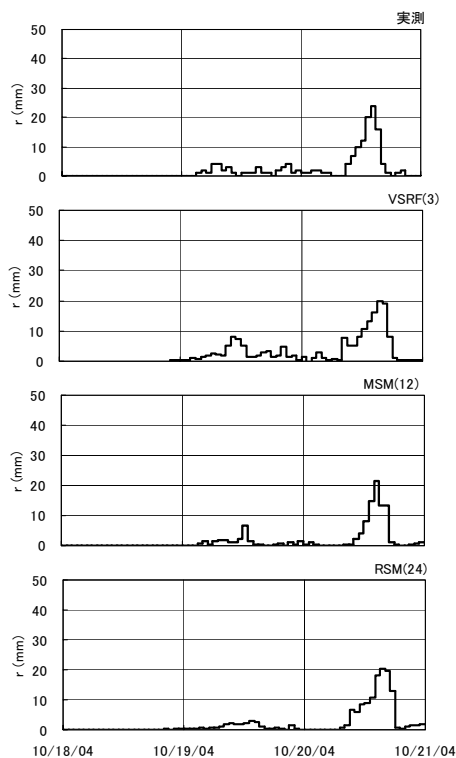


図-1 実測雨量・予測雨量の降雨波形の比較例.
Fig. 1 Comparison of observed and forecasted rainfall at a sample location.

した台風 23 号時の淀川水系の M 雨量観測所での実測雨量 (最上段) と同地点の VSRF, MSM および RSM による予測雨量の比較を示すものである.

2 段目以下の予測雨量を表す図の右肩に記した括弧書の数字は予測の更新間隔を刻みとする時間帯中の先行時間の最大値を表している. すなわち, VSRF(3) は実際の時間の 3 時間前, MSM(12) は 7~12 時間前, RSM(24) は 13~24 時間前に予測された時間雨量を連ねたものである. したがって, この図では作画にあたって VSRF, MSM, RSM それぞれ, 72 回, 12 回 (1 日 4 回更新), 6 回 (1 日 2 回更新) 分の GPV を用いている.

図-1 と同様に定義される VSRF(1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6), MSM(6 / 12 / 18) および RSM(12 / 24 / 36 / 48) を全ての降雨イベントおよび雨量観測点について求め, さらにこれらと実測雨量との相関係数およ

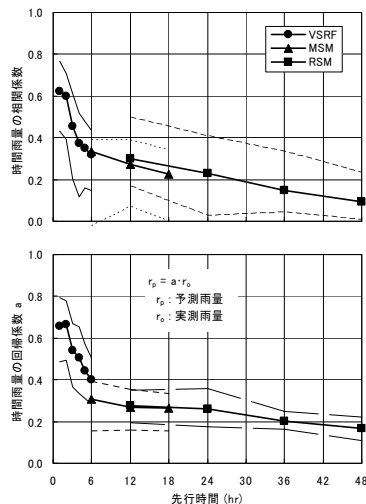


図-2 時間雨量の先行時間別の相関係数・回帰係数.
Fig. 2 Correlation and regression coefficient between observed and forecasted rainfall versus leading time.

び回帰係数(実測時間雨量を r_o 、予測時間雨量を r_p とする時の回帰式 $r_p = a \cdot r_o$ の係数 a 。ただし、 $r_o + r_p > 1 \text{ mm}$)を算出した。このようにして求めた相関係数・回帰係数と先行時間との関係を示したものが図-2である。図中、記号付きの太線は全地点・全降雨の平均値を表し、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指標の平均値を表す。

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、各時刻の雨量も一致することを意味するが、図によると両指標とも先行時間の増加とともに指標値が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、時間雨量を小さく見積もる傾向が強くなっている。

地点による変動が大きいため(割愛するが、降雨イベントによる変動も大きい)、一概には言えないが、全平均(太線)で見ると、MSM および 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 VSRF でも先行時間が 2 時間を越えると急減に指標値が小さくなり予測精度が劣化する結果となっている。このような事からダム貯水池の流入量予測に適用可能な予測降雨は 2 時間前までの VSRF の予測値と考えられる。

なお、今回は2002年以降の 7 ケースの大型気象

擾乱について検討を行ったが、2004 年 10 月の台風 23 号降雨の予測精度が他に比して特に高かったことを付記する。

2. 積算雨量の比較

ダムの洪水調節に先立っては、諸関係機関との連絡、貯水池周辺・下流河川の巡視、臨時点検、放流警報の実施などの多くの事前作業が発生する。また、ダムによっては事前に貯留水を放流して、所定の洪水調節容量を確保する貯水池操作が行われる。これらの事前作業の執行に際しては、前項の降雨の時間波形よりも今後発生する降雨の時機や概ねの規模を把握することがむしろ重要となる。より早い時期により正確に、こういった予測情報が得られれば、余裕をもった的確な準備作業が実施できるようになることは言うまでもない。

図-3 はこのような目的への適用性を確認するため、検討対象期間に掛かる全ての予報時刻での VSRF の 6 時間雨量、MSM の 6・12・18 時間雨量および 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・回帰係数を求め、図示したものである。

図の横軸が積算雨量を求める時間間隔となっていることを除き、図の様式、指標の算定方法は図-2と同様である。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

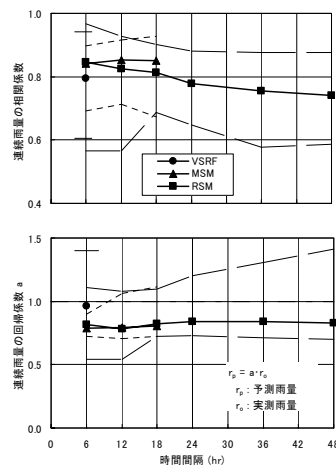


図-3 積算雨量の相関係数・回帰係数.
Fig. 3 Correlation and regression coefficient between observed and forecasted rainfall at a sample location versus accumulation hours.

なく相関を維持していることが読み取れる。一方、回帰係数については、VSRF の 6 時間雨量が比較的大きな値を示しているもののいずれの時間間隔に対しても予測値が実測値を下回る結果となっていること、若干ではあるが時間間隔が大きいくほど係数値が増加傾向にあることが読み取れる。さらに、平均的に見れば、MSM と RSM の差異は小さいが、下段の図の破線に見られるように、モデル流域によっては 12 時間雨量より長い時間間隔の雨量で RSM の予測精度が高い場合が見られる。

以上より、降雨強度を小さく見積もる傾向にあるものの、6 時間雨量 ~ 48 時間雨量の降雨波形は VSRF, MSM, RSM と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。

3. 流域平均雨量の比較

前節では雨量観測所での実測雨量と予測雨量との比較を行ったが、実際の河川管理・ダム管理では特定の位置での予測雨量が問題となることはまずなく、主要地点上流域・ダム流域などの流域平均雨量の実績値あるいは予測値が行動の判断材料となっている。また、後述のように、現業における洪水予測は専ら、流出現象の空間特性をモデル・パラメータに集約する集中定数型の予測モデルで行われおり、この演算にも斜面要素毎の流域平均雨量が必要となる。

図-4 は、今回のモデル流域で最も豪雨の発生頻度が大きかった吉野川水系のモデル流域である D ダム上流域内で平均雨量を算定する流域スケールを変化させた場合の実測雨量と予測雨量の相関係数・回帰係数を積算雨量について示したものである。図からは平均操作によって相関係数が極めて大きくなっていること、RSM で流域スケールが大きい程、回帰係数がより 1.0 に近づいていることが読み取れる。これは降水量の予測値をより広域でとらえることにより、予測の雨域が実績から多少ずれても捕捉される可能性が高まるためと推測される。

なお、ここでの流域平均雨量は RAP の GPV から推定した。具体的には分割流域内に位置する格子点値の相加平均をとった。また、予測雨量の流域平均雨量も VSRF, MSM, RSM それぞれの GPV から同様に推定した。ただし、RAP との格子点間隔の相違を補正するため RAP と同程度の空間解像度となるように格子内を細分し、内部格子点での値を四隅の GPV から補間して与えている。図-5 にこのモデル流域での雨量観測所と RAP および予測

雨量の格子点の位置図を示す。RAP を表す○印の間隔が約 2.5km である。雨量観測の密度は概ね 60km² に 1 ヶ所となっており、国土交通省としては平均的な観測密度となっている。RAP は実測雨量と高い相関を有していることは別途確認されており、格子点は約 6 km² に 1 ヶ所と高密度である。

雨量観測密度が疎な空間では、実務的に使用されることの多いティーセン法による流域平均雨量の推定値よりも RAP を用いて推定される流域平均雨量の精度が高いことが予想される。

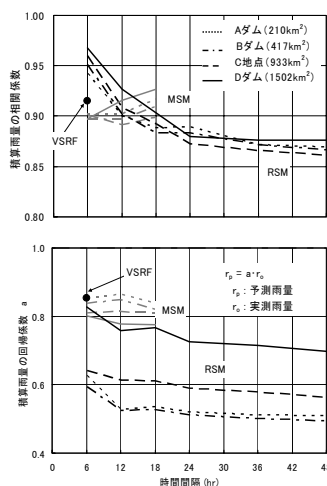


図-4 積算雨量（流域平均雨量）の相関係数・回帰係数。

Fig. 4 Correlation and regression coefficient between observed and forecasted rainfall in several catchment area versus accumulation hours.



図-5 雨量観測所・降雨予測格子点の位置。

Fig. 5 Relative location map of rain gauge stations in the grid systems for rainfall forecast used in this study.

V. VSRFによる洪水予測シミュレーション

ダム貯水池の流入量予測の入力降雨としての適用が可能と判断された VSRF の予測降雨を用いて洪水予測シミュレーションを実施し、流量の予測精度についての評価を行った。

1. 予測計算

流出モデルは今回のモデル流域を始めとして我が国の河川の洪水予測モデルとして採用されることが極めて多い、木村の貯留関数モデルを採用した。同モデルの詳細は例えば、建設省(1997)に詳しい。

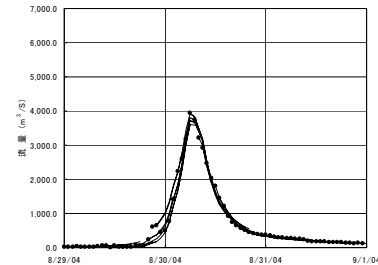
通常、現業の洪水予測システムではモデル・パラメータを一定値で与えている場合が多いが、ここでは、流出予測の誤差のうち、予測降雨の誤差に由来する成分を明確にするため、これを実測の降雨波形を与えて計算した再現流量と実測流量の二乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) が最小となるよう降雨イベント毎に最適化した定数群で与えた。つまり、理想的な貯留関数モデルで予測がなされた場合を仮想してシミュレーションを実施した。また、流量予測の先行時間は VSRF の先行時間に合わせて 3 時間 (2000 年以前) ないし 6 時間 (2001 年以降)、更新時間間隔は 1 時間とし、各予測時間ステップでは単純に最新の実測流量から逆算した貯留高を初期値として与えた。

図-6 は以上の条件のもとで実行した予測計算の一例を示すものである。図中の黒丸は実測流量を表し、折れ線は各予測時間ステップでの 6 時間先までの予測流量を表す。上記の理由により当然の事ながら実測雨量による予測計算は実測流量をよく再現しているのに対して、VSRF を時間雨量として与えた場合の予測計算ではハイドログラフの頂部付近で過大な流量を予測している。

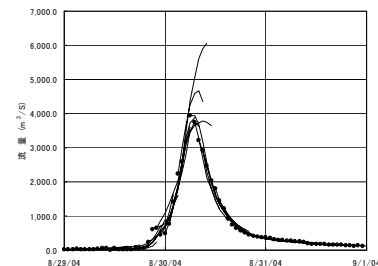
同様の計算は VSRF が開始された 1998 年以降 2004 年 10 月までの間で最大級の流量を記録した数降雨をモデル流域毎に選定して実行した。

2. 流出予測精度の評価

III に示した全対象流域について予測計算を行い、① 流域平均の実測雨量と予測雨量、② 実測流量と実測雨量による予測流量、③ 実測流量と予測雨量による予測流量のそれぞれについて先行時間別の相関係数・回帰係数を求め、全流量予測地点・全降雨イベントの平均値を比較したものが 図-7 である。図中、破線で示した流域平均雨量については先行時



(a) 実測雨量による流出予測



(b) 予測雨量 (VSRF) による流出予測

図-6 吉野川水系 S ダム流域の計算結果。

Fig. 6 A comparison of runoff forecast simulations. (a) is made by using observed rainfall and (b) is made by using forecasted rainfall VSRF in S-dam catchment in Yoshino river system.

間の増加に伴い、相関係数・回帰係数ともに減少している。3 時間前予測と 4 時間前予測で折線が屈曲しているのは 2000 年前後の先行時間の採り方の違いによるサンプル・サイズの相違が影響している。実測雨量による予測流量は先行時間によらず、相関係数、回帰係数ともにほぼ 1.0 となっているのに対して予測雨量による予測流量は相関係数が流域平均雨量と同様の傾きで先行時間とともに低減する。しかし、初期段階での係数値がほぼ 1.0 となっているため、予測精度の水準は流域平均雨量に比べて高い。また、量的にも流域平均雨量のように先行時間とともに過小評価することなく、実測流量相当で推移していることが回帰係数の図から読み取れる。

図-7 の実測雨量による予測流量(q_{e1})と実測流量(q_0)の相関係数と予測雨量による予測流量(q_{e2})と実測流量の相関係数の差($\text{Cor}(q_0, q_{e1}) - \text{Cor}(q_0, q_{e2})$)は予測降雨に起因するものと見なせる。図-8 は全

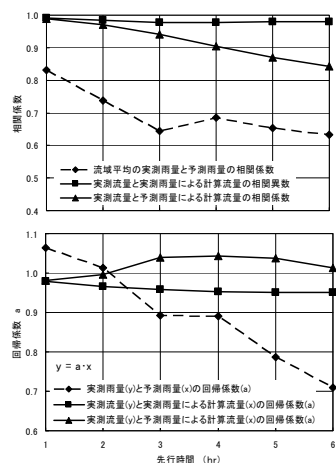


図-7 雨量・流量の相関係数・回帰係数。
Fig. 7 Correlation and regression coefficient between observed and forecasted rainfall (dashed line). Correlation and regression coefficient using observed rainfall and forecasted rainfall versus leading time. This shows accuracy change due to rainfall data used.

での予測地点について、この相関係数の差の絶対値を流域面積との関係で示したものである。図中の直線は先行時間別に回帰した傾向線である。同図からは、いずれの先行時間についても線分が右きがりて流域スケールが大きくなるほど予測降雨の誤差の影響が少なくなること、および先行時間が大きいほど線分の傾きが急になり、上記の傾向が助長されることが読み取れる。

つまり、VSRF による予測流量は降雨・流出系の持つ非線形性と遅滞効果により予測降雨ほどには先行時間による予測精度の劣化を伴わず、VSRF の先行時間である 6 時間前の予測値でも流出予測の現業に供し得る精度を維持しており、かつ流域が大きいほど、その水準が高いことが確認された。

IV. まとめ

以上、本稿では実測降雨と気象庁が実施している VSRF, MSM, RSM の 3 種類の手法による予測降雨との比較および VSRF を用いた洪水予測の予測精度の評価を行った。まず、実測降雨と予測降雨との比較では洪水予測用の予測降雨として 2 時間先までの VSRF の利用が可能であること、また 6 時間以上 48 時間までの時間間隔別の積算雨量の

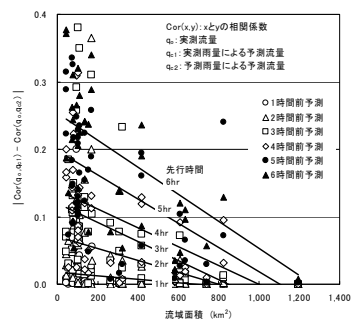


図-8 相関係数の差と流域面積の関係。
Fig. 8 The accuracy change of runoff forecast due to rainfall data used versus catchment area. Vertical axis indicates the changes in correlation coefficient between models using observed rainfall and forecasted rainfall.

予測値については実測雨量のそれに対して少なめに見積もる傾向はあるものの、MSM, RSM でも実測雨量と比較的高い相関を示し、洪水調節の事前作業時の監視情報として十分利用可能であることが確認された。また、VSRF を用いた洪水予測のシミュレーションでは理想的なモデルで洪水予測がなされた場合、VSRF の先行時間である 6 時間前でも実測流量と予測流量が高い相関を示し、流域スケールが大きいほど、その水準が高く十分に実用に供し得る現状にあることが知れた。

今後は高水管理の高度化に向けて、最新の気象予報情報を積極的に利用するための環境を整備するとともに、分布型モデルへの移行など従来の概念型モデルに代わる流出予測モデルの適用を検討することが必要と考える。

謝辞：本研究にあたり気象庁予報部より本稿で取り上げた予測降雨の各種 GPV の提供を受けた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

引用文献

- 内閣府(2005)：環境研究イニシアティブの位置付け www8.cao.go.jp/cstp/project/envpt/main/position.pdf
気象庁(2004)：「気象業務はいま 2004 一活かそう情報、防ごう災害」、佐伯印刷, pp.88-89
建設省河川局(1997)：「改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)調査編」、山海堂, pp.89-90

(受付：2005年3月8日，受理：2005年8月23日)