

22

【技術研究】

高水管理実務における降雨予測情報の適用に関する考察

国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部

和田 一 範*

ダム研究室

川崎 将 生**

富澤 洋 介***

キーワード 降水短時間予報・洪水予測・予測誤差・高水管理

1. はじめに

近年の地球規模の気象観測の充実、情報通信・情報処理能力の飛躍的な向上、気象予測モデルの高度化等により気象予測の精度が向上している。

伴って、わが国のダム管理の現場でもこういった最新の気象予測情報を導入する動きはあるものの、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、未だ予測情報を活用した効率的な高水管理・低水管理を行う状況には達していない。これは、予測情報の確度が十分に検証され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、国内外で降雨予測モデル・流出モデルおよび実時間での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、その際の入力データである実況降雨あるいは予測降雨の精度の流出予測精度への影響についての議論はあまりなされていないのが実状である。

国土技術政策総合技術研究所¹⁾では、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、気象庁と連携して気象予測情報を河川管理に活用するための新技術の開発に向けての研究プロジェクトを平成15年度より実施している。これの第一ステップとして、和田ら^{2), 3)}は気象庁が実施している降水短時間予報 (Very Short-Range Forecasting of Precipitation, 以下「VSRF」という)の洪水予測への適用可能性に着目し、これと時間単位の地上雨量との比較を行った結果、予測の先行時間が概ね1ないし2時間までであれば、比較的良好な降雨予測が成されていることなどを確認した。

* 流域管理研究室, 博(工)

** 主任研究官

*** 研究官

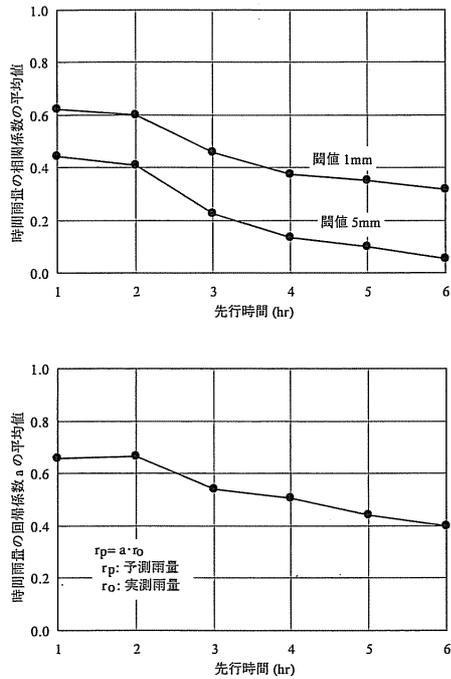
本論文では、これに続く研究として、河川・ダムの高水管理実務への降雨予測情報の活用を旨として、流出予測の現場で実際に使用されている貯水池流入量の予測モデルを用い、これへの入力降雨としてVSRFを用いた場合の流出予測精度について検討した。

2. 降水短時間予報

気象庁が実施している降水短時間予報は、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・衰弱の効果を考慮して時間的に外挿するものである。近年は現業の気象予報で用いられている最新のモデルであるメソ・モデル (MSM : Meso-Scale Spectral Model) による数値予報の結果もVSRFに反映されるようになってきている。

VSRFは平成10年度初に配信を開始しているが、数値解析予報システム (NAPS : Numerical Analysis and Prediction System) の高度化にあわせて、空間解像能、先行時間、予測更新時間間隔を細密化してきており、現在は約5km四方の格子点上の6時間先までの予測時間雨量を30分間隔で配信している。

図-1は現在のNAPSであるNAPS7が供用を開始した平成13年3月以降、平成16年末までの期間に発生した7ケースの降雨について北上川、利根川、木曾川、阿賀川、淀川 (木津川)、吉野川および筑後川の7水系の部分流域内に存在する214の雨量観測所の時間雨量と各雨量観測所の直近格子のVSRFから内挿補間で求めた先行時間毎の予測雨量との相関係数および回帰係数 (回帰モデル $r_p = a \cdot r_o$ 、 r_p : 予測降雨、 r_o : 実測降雨、 a : 回帰係数) の平均値を示すものである。相関係数は先行時間の増加とともに減少する。また、回帰分析の際の標本を1mm以上とした場合、先行時間が1ないし2時

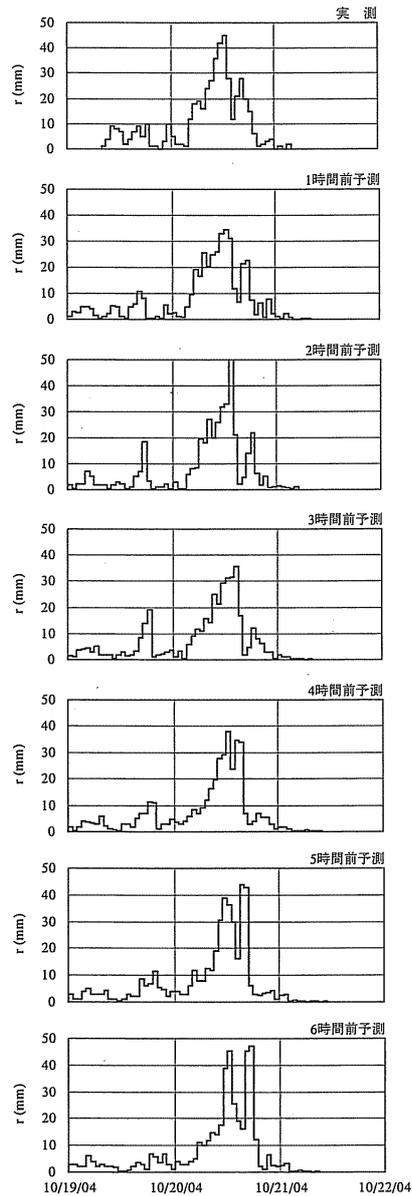


図一 先行時間別の実測降雨(点雨量)と相関係数・回帰係数の平均値

間までであれば、相関係数が0.6程度と比較的、強い相関を示すのに対して、この閾値を5mm以上とした場合は先行時間が1時間でも0.4程度に留まっている。回帰係数は閾値によらず、0.6強から0.4で推移し、実績に対して小さく見積もる傾向にある。なお、以上は各指標の平均値での議論であり、地点および降雨による格差は大きく、図-2に示す昨年10月の台風23号時の吉野川流域のN雨量観測所の例では6時間先(各段の図の左肩の数値が先行時間を示す)でも相関係数・回帰係数ともに0.85程度と良好な予測がなされている。

3. VSRFを用いた洪水予測シミュレーション

VSRFを用いて洪水予測シミュレーションを行った。予測対象は前出の7流域内で国土交通省ならび水資源機構が管理する22のダムの貯水池流入量である。これらのダムは流域の最上流に位置している。従って、これらのダムの貯水池流入量は上流ダムの放流量の影響を受けない自然流量とみなすことができる。検討対象降雨はそ



図二 実測降雨波形と先行時間別のVSRFの比較例

24

それぞれのダムについて、平成13年3月以降、同16年末までの期間で最大級のピーク流入量を記録した降雨を2ないし3ケースずつ選定した。

予測モデルは現業の洪水予測での採用実績が圧倒的に多い次の木村の貯留関数モデル⁹⁾を採用した。それぞれのダムについて、平成13年3月以降、同16年末までの期間で最大級のピーク流入量を記録した降雨を2ないし3ケースずつ選定した。

予測モデルは現業の洪水予測での採用実績が圧倒的に多い次の木村の貯留関数モデル⁹⁾を採用した。

$$q = f_1 \cdot q^{(1)} + (1 - f_1) \cdot q^{(2)} + q_B \quad (1)$$

$$ds^{(i)}/dt = r^{(i)} - q^{(i)}, \quad s^{(i)} = k \cdot [q^{(i)}]^p \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

$$r^{(1)}(t) = r(t - T_1) \quad (3a)$$

$$r^{(2)}(t) = \begin{cases} 0 & (\sum r \leq R_{sa}) \\ r(t - T_1) & (\sum r > R_{sa}) \end{cases} \quad (3b)$$

ここに、 q ：流出高、 q_B ：基底流出高、 s ：貯留高、 r ：流域平均降雨強度、 t ：時間座標、 T_1 ：遅滞時間、 R_{sa} ：飽和雨量、 f_1 ：1次流出率、 s ：貯留高である。また、括弧付きの肩字は流出成分であり、1は流出域を、2は浸透域を表す。

計算に際して、流域平均雨量は計算対象流域内に位置する格子点での降水量（実績降雨はRAP、予測降雨はVSRF）の相加平均で与えた。また、実測流量を取得する各時点においては、拡張カルマンフィルター⁹⁾を適用して逐次、予測を矯正した。すなわち、

$$P_i(-) = A_{i-1}^{-2} \cdot P_{i-1}(+) + Q_{i-1} \quad (4)$$

$$A_i = 1/\exp [J_i \Delta t / f_1] \quad (5)$$

$$G_i = J_i \cdot P_i(-) / [J_i^2 \cdot P_i(-) + R_i] \quad (6)$$

$$\hat{x}_i(+) = \hat{x}_i(-) + G_i \cdot [z_i - \hat{z}_i(-)] \quad (7)$$

$$P_i(+) = [1 - G_i \cdot J_i] \cdot P_i(-) \quad (8)$$

$$J_i = f_1 \cdot k^{-1/p} \cdot \hat{x}_i(-)^{1/p-1}/p \quad (9)$$

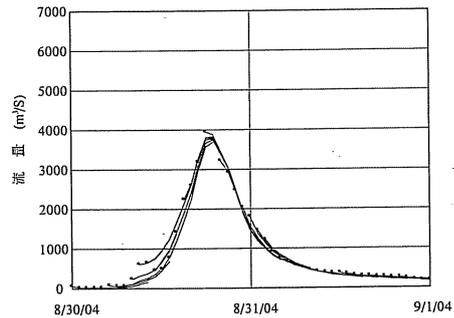
とした。ここに、 i ：時間ステップ、 Δt ：時間刻み、 x ：状態変量（ここでは、流出域の貯留高 $s^{(1)}$ ）、 z ：観測値（ここでは、流出高 q ）、 P ： x の分散、 Q ：システム誤差分散、 R ：観測誤差分散である。また、括弧内の符号±は観測流量取得の直前・直後を表し、アクセント^は推定値を表す。さらに、誤差標準偏差 $Q_i^{0.5}$ および $R_i^{0.5}$ は、それぞれ x_i 、 z_i の10%と仮定し、 Δt は1時間、予測時間はVSRFの先行時間にあわせて6時間とした。ちなみに、現業の洪水予測では「観測流量

は常に真」と仮定し、計算流量が最新の観測流量と合致するように貯留高あるいは流出率を調整して、その時点以降の予測を行う場合が多い。

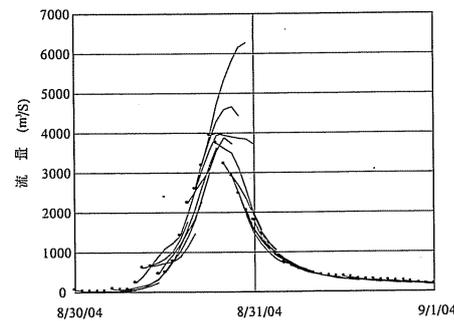
モデルパラメータは実測流域平均雨量を用いて計算した計算流量と観測流量の誤差分散が最小となる組み合わせを数値代入法により探索して与えた。つまり、理想的なモデルのもとで実時間予測が行われるものとして、純粋に降雨の予測誤差に由来する流出予測誤差を評価するものとした。

計算結果の一例を図-3に示す。図中、黒丸は実測流量を、細線は6時間先までの予測流量を示している。

当然のことながら、実測降雨による予測流量は極めて良好な再現を示している。一方、予測降雨（VSRF）による予測流量は降雨予測の誤差により実測流量との乖離が生じている。



(a) 実測降雨による予測流量



(b) 予測降雨による予測流量

図-3 流出計算の例

4. 流出予測誤差の評価

前章で行った流出予測シミュレーションの結果から実測降雨量と予測降雨量あるいは実測流量と予測流量の相関係数および予測誤差の分散(予測の期待値からのばらつき度)を先行時間別に求めて、流出予測誤差の評価を行った。

ここでは、比較的大規模な流出が発生した6ダムの例を掲げる。各ダムの集水面積および降雨毎のピーク流出高は表-1の通りである。

(1) 相関係数による評価

図-4は実測流量と予測流量の相関係数(以下、単に「流量の相関係数」)および実測降雨と予測降雨の相関係数(同じく、「降雨の相関係数」)を先行時間別に求めて図示したものである。図中、破線は流量の、実線は降雨量の相関係数を表す。また、記号は降雨のケースを表す。相関係数の計算に当たっては、実測の流域平均雨量が所定の閾値を超過する時間帯(ただし、無降雨・弱降雨下で流入量が最大となる場合は最大流入時まで延長)での実測・予測雨量の対ないし実測・予測流量の対を標本として抽出した。閾値は対象流域の集水面積の大小を

考慮するため、ダム設計洪水流量の比流量を与える Creager 曲線式⁹⁾の関数型を引用して式(10)で与えた。

$$r_{\text{threshold}} = 13 \cdot A^{c-1}, \quad c = A^{-0.05} \quad (10)$$

ここに、 $r_{\text{threshold}}$: 1時間雨量の閾値(mm)、 A : 集水面積(km²)である。式(10)で計算される閾値は概ね100 km²に対して5 mm、300 km²に対して3 mm、750 km²に対して2 mm、2,600 km²に対して1 mmとなる。表-1に示したダムおよび降雨ケースはこの閾値を超過する流出が複数回発生した事例として選定している。

表-1 流域面積および降雨毎のピーク流出高

ダム	集水面積 (km ²)	ピーク流出高 (mm/hr)		
		Run-1 ○	Run-2 △	Run-3 □
A	101.2	32.07	29.22	28.46
B	322.9	15.95	4.84	
C	417.0	34.08	33.70	31.37
D	492.3	5.69	5.62	
E	635.0	6.14	5.20	
F	1,147.4	2.80	2.44	

注) 表中の記号は図-4と対応。

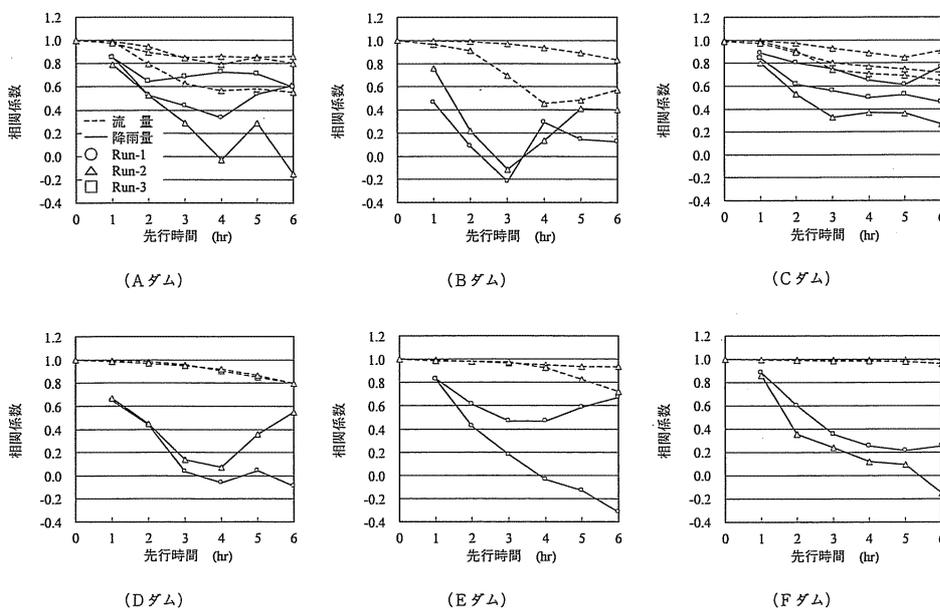


図-4 先行時間別の流量および降雨量の相関係数

26

流量の相関係数は、初期時点での係数値が大きく、降雨の相関係数に比較して変化が穏やかであるため、いずれのケースでも降雨の相関係数以上の高い水準での相関を比較的長時間維持している。流量の相関係数は先行時間に対して基本的には単調減少となっているが、降雨の相関係数の推移が下凸一降雨予測の精度が回復する一であるようなケースでは、追隨して増加に転じる場合がある。なお、降雨量（流域平均）の相関係数は、点雨量と比較した図-1とくらべて、やや大きな値となっているものの、有意な相関関係が先行時間1ないし2時間までで留まっていることに変わりはない。

また、図中で流量の相関係数が概ね1.0となっているのは、流出の遅滞効果により実績の降雨に依存した流出が発生している時間帯である。ここでは、Aダムで1時間、Dダムでは2時間、Eダムでは3時間、Fダムでは5時間先まで流量の相関係数がほぼ1.0となっており、集水面積が大きい程、予測降雨による影響の出現が先送りされていることが読み取ることができる。

(2) 予測誤差分散による評価

高樟ら⁷⁾は予測降雨の期待値と分散を次のようにモデル化した。

$$E(\hat{r}_{i+1}) = r_{i+1} \tag{11}$$

$$\text{Var}(\hat{r}_{i+1}) = (S_{i+1})^2 = a^2 \cdot l \cdot (r_{i+1})^2 \tag{12}$$

ここに、 $E(\cdot)$ ：期待値、 $\text{Var}(\cdot)$ ：分散、 \hat{r} ：予測降雨、 r ：実測降雨、 S ：標準偏差、 a ：定数、 i ：予測時間、 l ：先行時間である。

前出の6ダムの計算結果について式(12)を適用して、流量あるいは降雨量に対する予測誤差の自乗値と実測値の自乗値から先行時間別の定数 $a^2 \cdot l$ を回帰して、プロットしたものが図-5である。なお、回帰分析の標本は前章で相関係数を算定した際の標本と同一である。

前出の図-4と同じく、破線は流量、実線は降雨に対する定数を表し、記号は降雨のケースを表す。また、灰色の実線は a 値を0.1から0.5まで変化させた時の $a^2 \cdot l$ の値を示す。

まず、降雨について見ると、折れ破線は先行時間に対して単調に増加するのではなく、ある先行時間まで増加した後、減少ないし横ばいで推移している。つまり、この結果からは、一定時間先までは式(12)に従い、これより大きな先行時間に対しては、時間に依存せず同程度の分散比とする $((S_{i+1})^2 = b^2 \cdot (r_{i+1})^2)$ 。 b ：定数) 方が

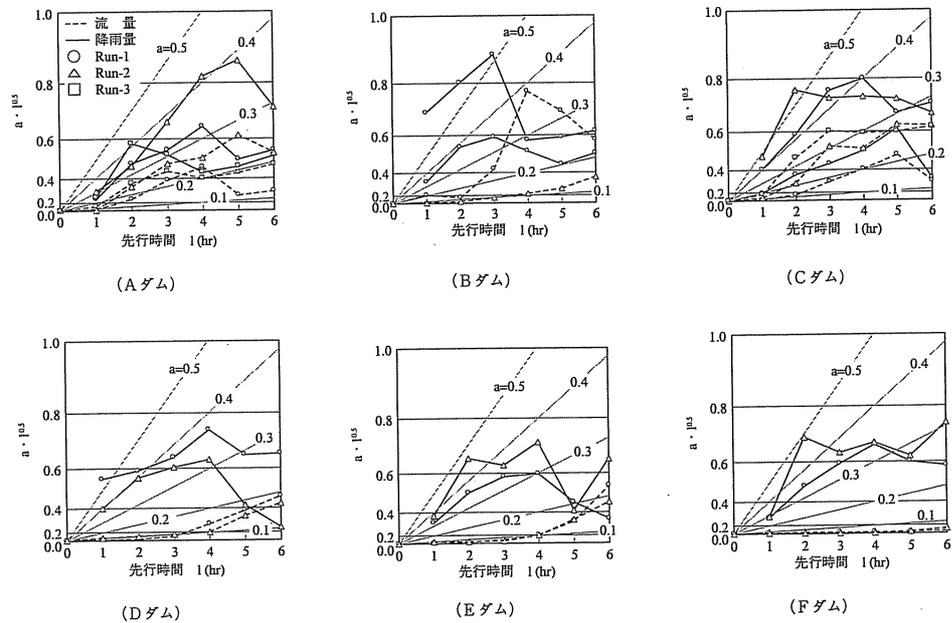


図-5 先行時間 l と $a \cdot l^{0.5}$ 値の関係

妥当である。なお、上記の一定時間までの a 値は降雨ケースによる変動が大きいものの、ほぼ 0.4 前後となっている。

次に、流量について見ると、流出の遅滞時間内ではほぼゼロで推移し、その後、概ね遅滞時間分の位相をもって上記の降雨での変化パターンに対応して推移している。立ち上がり部の傾き a を降雨の場合のそれと比較すると、一部の例外 (B ダム Run-1) を除いて緩勾配となっている。これは降雨・流出系の非線形によるものと考えられる。

ところで、図の縦軸 $a \cdot t^{0.5}$ ($= b$) は実測雨量あるいは実測流量に対する予測値の誤差率 (誤差分布に正規分布を仮定すれば、信頼水準は 68.3%) と解釈することができる。今、仮に実測値の 2 割を誤差率の許容誤差の限度とすると、今回の計算では、D ダム (492 km²) では 3 時間先予測、E ダム (635 km²) では 4 時間先予測まで許容誤差を満足するものとなり、遅滞時間に対して 1 ないし 2 時間、信頼にたる流出予測の先行時間が延長されている。今後、洪水予測実務の現場においても、このような指標を用いて予測の品質管理を行うことが重要である。

5. 結 論

気象庁の降水短時間予報 (VSRF) を用いて、実際のダム集水域を対象とするオンライン洪水予測の模擬実験を行い、予測流量あるいは予測降雨の精度について分析を行った。得られた知見を要約すると次のようである。

- 点雨量での比較と同様、流域平均雨量についても実測降雨と予測降雨が有意な相関 (相関係数 0.6 以上) をもつのは 1 ないし 2 時間先までである。
- これに対して、実測流量と予測流量は、流出の遅滞時間分、予測降雨による影響の出現が先送りされるため、同じ先行時間に対して降雨より常に高い相関を持ち、今回実験した集水面積 100 km² 以上の流域では、殆どのケースで VSRF の予測時間である 6 時間先でも有意な相関を維持している。
- 降雨量の予測誤差分散は、ある先行時間 (対象流域、降雨により異なる) までは先行時間とともに単調するが、その後は先行時間に依存しなくなる傾向にある。

- 先行時間の増加に伴う流出予測誤差の増加の割合は、降雨の場合のそれに比して小さい。このため、今回の実験では、流出予測の許容誤差率を 2 割と置く時、流出の遅滞時間からさらに 1 ないし 2 時間先まで有効な予測が延長される結果となっている。

以上、今回の検討流域で見ると、VSRF を予測降雨とする予測流量は実用可能な水準の精度を有しているものと判断される。今後は高水管理の現場における気象庁の予測降雨情報の利用 (併用) を進め、個別流域での適用可能限度を見極めて行く必要があるものと考えられる。

今回の解析では、河川・ダムの高水管理実務への降雨予測情報の活用を旨として、流出予測の現場で実際に使用されている貯水池流入量の予測モデルを用いたが、解析にあたって用いた最適モデルパラメータと、実際の予測システムで使用しているモデルパラメータとが、結果として大きく相違する流域も散見される。このことはすなわち、予測降水量の導入に際しては、流出解析モデルの同定を充分に行い、カルマンフィルタリング等、適切な実時間予測アルゴリズムを採用することで流出予測モデルの精度向上を図ることが重要であることが、あらためて認識された。

謝辞：本研究にあたり、気象庁予報部より予測降雨データの提供を受けた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 和田一範：地球規模水循環変動研究イニシアティブがスタート、土木技術資料、平成 15 年 10 月号、pp. 12～13、2003。
- 2) 和田一範・村瀬勝彦・富澤洋介：河川の高水管理における予測降雨情報の適用性、土木技術資料、平成 15 年 3 月号、pp. 64～69、2005。
- 3) 和田一範・川崎祥生・富澤洋介：河川管理における予測降雨情報の適用性に関する考察、水文・水資源学会誌、第 18 巻 6 号、2005。
- 4) 建設省河川局：「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。
- 5) (財)北海道河川防災研究センター・研究所：「実時間洪水予測システム理論」、2004。
- 6) (財)国土開発技術研究センター：改訂 解説・河川管理施設等構造令、山海堂、1999。
- 7) 高津琢馬・椎場充晴・宝野：洪水流出の確率予測におけるモデルと手法、第 19 回 自然科学シンポジウム、pp. 63～66、1982。