

# 中流域に洪水調節ダムを有する河川における 洪水予測システムの精度検証

Accuracy Validation of Flood Forecasting System for River  
with Flood Adjustment Dam in the Middle Basin

竹村 仁志<sup>1</sup>・眞間 修一<sup>1</sup>・吉田 武司<sup>2</sup>・石上 尚<sup>3</sup>

Hitoshi TAKEMURA, Shu-ichi MAMA, Takeshi YOSHIDA and Hisashi ISHIGAMI

<sup>1</sup>正会員 八千代エンジニアリング株式会社 大阪支店 (〒540-0001 大阪市中央区城見1-4-70)

<sup>2</sup>八千代エンジニアリング株式会社 技術推進本部 開発企画部 (〒161-8575 新宿区西落合2-18-12)

<sup>3</sup>神奈川県 県土整備局 河川課 (〒231-8588 神奈川県横浜市中区日本大通り1)

Sagami River is the first class river administered by Kanagawa prefecture, designated as a flood forecast river in 2006. It is essential to predict the water volume discharged by dam since water volume discharged by Shiroyama dam accounts for 75 to 95 percent of water volume during floods at the prediction point on the river. Artificial neural networks model, one of the correlation analysis methods, was employed to estimate water volumes of dam such as water volume discharge and flowing. In this study, predictability of online forecasting system of Typhoon No. 9 on September 2007 which rose river level to the critical water level was validated. The results are as follows, 1) Predicted water level form almost agreed with actual water level form. Especially, the rapid rising part of water form which is important for both flood control and evacuation activities was successfully predicted in advance. 2) It was suggested that water level prediction accuracy in lower basin can be improved by increasing accuracy of the upper reach flow volume through two different method, outflow analysis and correlation analysis.

**Key Words** : flood forecasting system, water level prediction, artificial neural networks,  
prediction of water volume discharged by dam

## 1. はじめに

平成12年9月の東海豪雨を始めとした重大水害発生を契機として、「減災措置」のなかでも住民の適切な避難行動に寄与する洪水予報の重要性が再認識され、この結果として、これまで国交省管理の1級河川でのみ実施されてきた洪水予報が、都道府県管理の2級河川についても、必要に応じて実施できるように水防法の一部が改正され、平成13年7月に施行された。

洪水予報とは洪水予報指定河川において、「河川管理者は、洪水のおそれがある場合に、気象庁長官と共同してその状況を水位または流量を示して水防管理者（市町村長など）等に通知する」ものである。従って、洪水予報の実施には、ある程度の予測精度を有する洪水予測システムの整備が前提となる。しかし、洪水予測システムは本運用前の出水により予測精度検証はしているものの、本運用後には所定の予測精度が確保できないという課題も全国的に発生している。

このような背景の中、神奈川県では平成18年6月に、相模川中流を県内で初めての洪水予報河川に指定して、洪水予測システムの運用を開始した。

相模川の予測基準点では、城山ダム放流量が洪水時流

量の75~95%を占めるため、洪水予測ではダム放流量の予測精度確保が不可欠であった。計画上のダム操作ルールと実操作の乖離から生じる実績放流量と予測放流量の誤差解消の方策として、非線形的関係に適用性の高い相関解析の一つであるニューラルネットワークモデル(以下、NNモデル)を採用した。本稿は、このような特殊性を有する河川での洪水予測精度について、洪水予報への実運用を踏まえ検証したものである。

## 2. 相模川中流の洪水予報<sup>1)</sup>

相模川は河口から神川橋までの約7km区間を国土交通省が管理し、神川橋から山梨県境までの区間を神奈川県が管理している。直轄区間では、従来から国土交通省と気象台が洪水予報を実施している。神奈川県は気象台と共同で、県管理区間の内、図-1に示した小倉橋~神川橋の区間で、相模川中流の洪水予報を運用している。

相模川中流の洪水予報基準地点は上依知地点、相模大橋地点の2地点である(表-1)。

基準地点である上依知地点(930km<sup>2</sup>)、相模大橋地点(1,180km<sup>2</sup>)の直上流に位置する城山ダム(885km<sup>2</sup>)では洪水調節が行われ、基準地点流量はダム放流量に75~95%程度が支配されている。

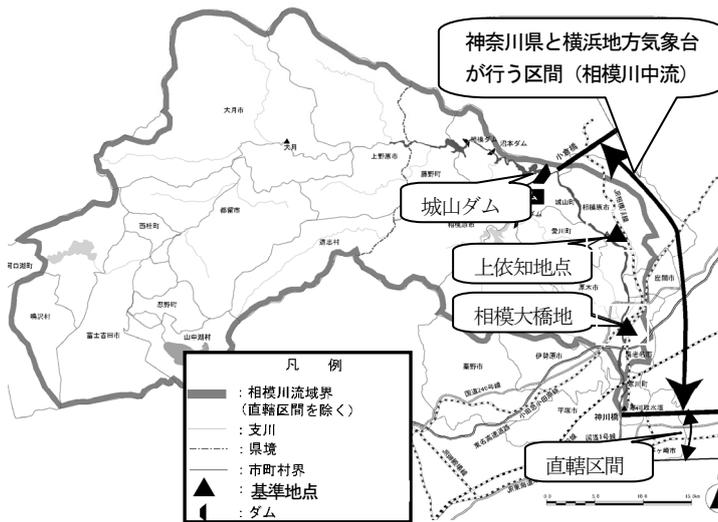


図-1 相模川中流予報区間と基準地点

表-1 基準地点と城山ダムの関係

基準地点	上流域の流域面積	城山ダムからの放流量の占める割合	城山ダムからの到達時間
上依知	930km <sup>2</sup>	約95%	約1時間
相模大橋	1,180km <sup>2</sup>	約75%	約2時間

### 3. 相模川に適した予測モデルの設定

#### (1) 洪水予測プロセスと誤差発生要因

洪水予測システムにおける予測誤差は、図-2に示すプロセスで発生するものと推定できる。図-2において、右側に示した誤差発生要因(変換誤差、計算誤差など)は、予測システムの改良で精度向上を図れる可能性が高いグループである。予測誤差がどのプロセスで拡大する傾向にあるのかを把握することで、モデル構築において重視すべき事項が明らかとなる。

相模川の基準地点流量は、城山ダム放流量に75~95%程度が支配されるため、モデル検証においては、実績ダム放流量をモデルに与えて、計算水位と実績水位を比較した(図-3)。水位予測モデルには一次元不定流計算モデルを導入し、「流量→水位」に変換することで、背水の影響など「H-Q曲線による変換誤差」も回避した。その結果、城山ダム放流量を上流端、ダム下流残流域の流出量を横流入とした一次元不定流計算により実績水位をよく再現できることが確認できた。

これより、相模川では、洪水予測モデルで水位予測精度を確保するためには、城山ダム流入量・放流量の予測精度確保が最重要であることを確認した。

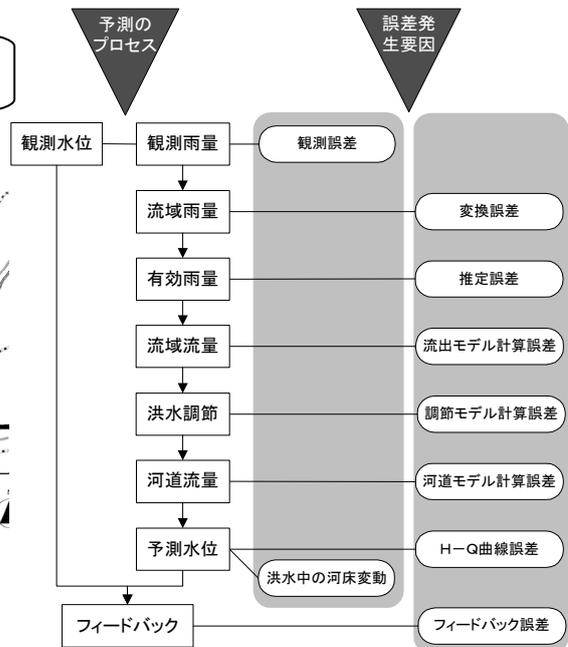


図-2 予測プロセスと誤差発生要因

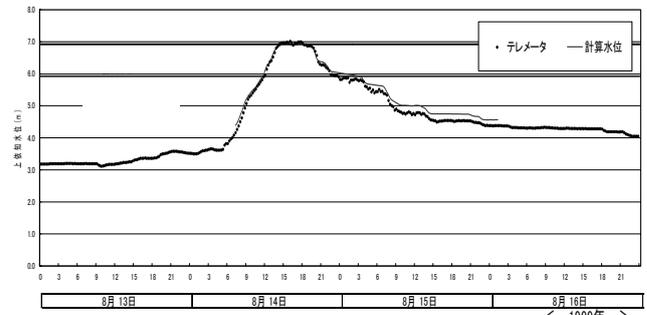


図-3 一次元不定流計算水位の再現性(上依知地点)

#### (2) 相模川に適した予測モデルの設定

相模川で設定した洪水予測モデルの構成を図-4に示す。城山ダム下流域では、ダム予測放流量を上流端入力値として、下流域の流出計算モデルを加えて、河道内を一次元不定流計算で計算する手法を選択した。

城山ダム放流量予測モデルは、表-2のようにメインとサブで特性の異なる2手法を併用した。メインモデルは、入力(雨量)と出力(流量)の関係性が量的に保たれる流出計算モデルとした。サブモデルは、計画上のダム操作ルールと実操作の乖離から生じる実放流量と予測放流量の誤差解消の方策として、非線形的関係に適用性の高い相関解析の一つであるNNモデルを採用した。NNモデルは、実績データの非線形的関係に基づいたパターン認識により、降雨パターンや降雨量に基づく洪水到達時間の変化をある程度考慮することが可能になること、実運用の操作に基づいた予測が可能となることの利点があるが、未経験の洪水規模に対する課題があるため、2手法併用を前提とした。

このモデル構成によるメリットは主に次の点である。  
・城山ダム放流量予測において、特徴の異なる2手法併

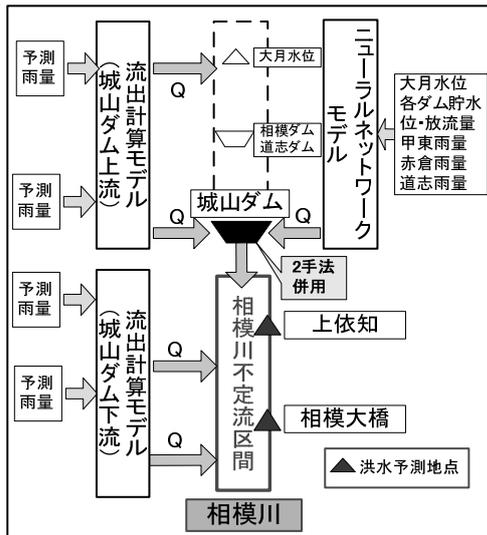
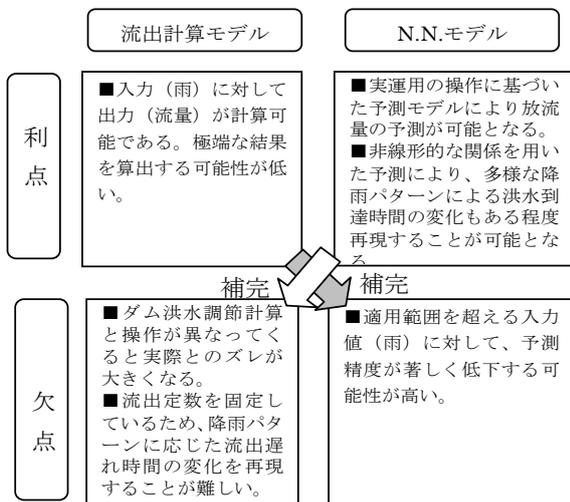


図-4 相模川予測モデルの基本構成

表-2 城山ダム放流量予測の併用方法

		メインシステム	サブシステム
		A : 準線形貯留型モデル + 洪水調節計算モデル	C : ニューラルネットワーク (N.N.) モデル
予測モデルの選択	放流量 3,000m <sup>3</sup> /s未満	・ダム放流量の予測精度を照査したうえで、安全側として予測値の大きい方を採用する。	・採用しない。
	放流量 3,000m <sup>3</sup> /s以上	・採用する。	・採用しない。
照査方法		・予測値の単位時間当たりの上昇量が、過去の実績最大放流量に安全率を乗じた上昇量を超えた場合に棄却する。	

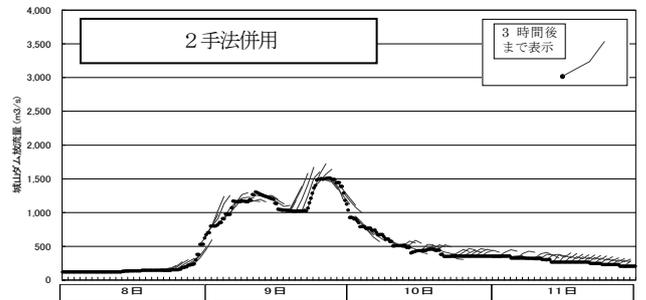
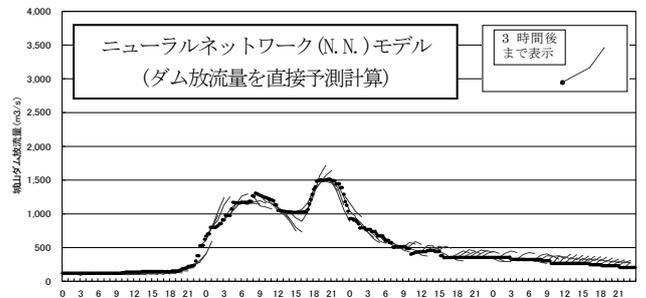
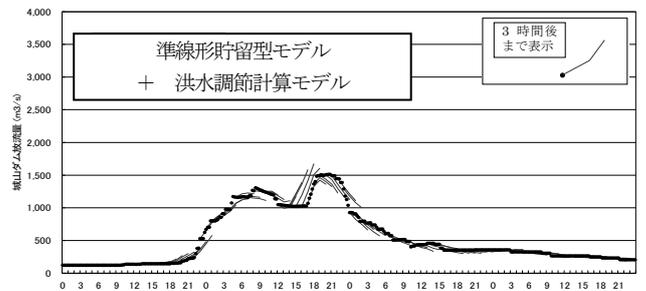
表-3 誤差発生要因の相互補完の関係



用による情報の2重化により、各々のモデルで発生する誤差（表-3）への相互補完が可能となる。2手法の予測値のうち安全側となる予測値を採用した（図-5）。

・入力値は、流出計算モデルが予測雨量、NNモデルが実績水位・雨量として、異なるデータから予測するため、データ欠測時に予測不能となりにくい。

・NNモデルをダム放流量予測に適用することで、下流部の河道改修時にもモデル更新は断面変更で対応できる。



【学習させていない出水（2004年10月8日～11日）】

図-5 2手法併用による城山ダム予測放流量の設定

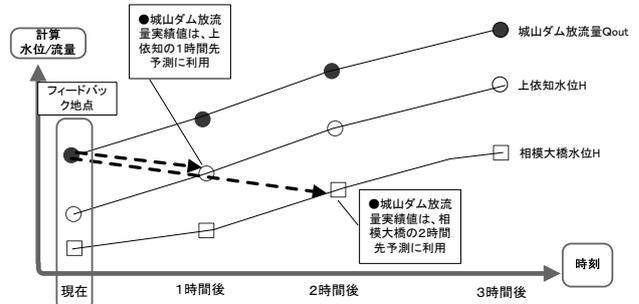


図-6 実績値によるフィードバックのイメージ

### (3) 実績値フィードバックによる安定した予測精度確保

城山ダムから基準地点までの流下時間は1～2時間程度あることから、一次元不定流計算によりダム放流量実績値のみでも1～2時間先までの予測はある程度可能である。そこで、フィードバックの地点は、基準地点だけでなく、城山ダムを追加して、実績値の流下時間のみである程度の予測ができるようにした。具体的には、図-6のように城山ダムからの流下時間は上依知が約1時間、相模大橋が約2時間であるため、実績放流量により上依知水位は1時間先、相模大橋は2時間先までである程度予測できる。さらに、ダム放流量予測+下流域流出予測で3時間先までの水位予測精度が確保できる構成とした。

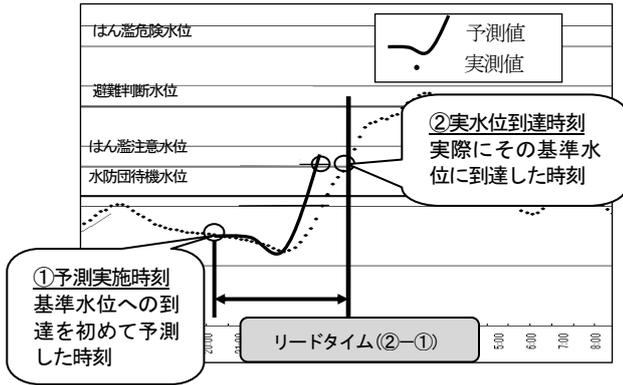


図-7 水位上昇部に着目した予測精度の評価

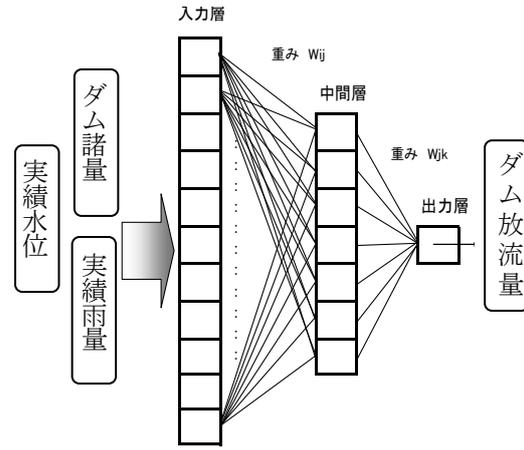


図-8 ネットワーク基本構造

#### 4. 水位上昇時の予測精度に着目した定数の設定

##### (1) 水位上昇部の予測精度評価基準の設定

洪水予報の目的は、情報提供により地域が的確な水防活動、避難行動を取ることによって減災措置として機能させることにある。そのため、洪水予測で最も重視されることは、絶対的な水位の予測精度よりも、警報・避難等の基準となる水位（はん濫注意水位、はん濫危険水位）を超過する時刻の予測精度にある。

水位上昇部を前倒して（早めに）予測することができれば、任意時刻の絶対水位誤差は大きくとも、所定の水位に到達する時刻を余裕を持って評価できる。誤差は時間的余裕（リードタイムの確保）に反映されるものの運用上の問題は基本的に発生しないと考えられる。

従って、相模川における洪水予測手法の精度評価においては、検証を水位誤差のみで行うのではなく、合わせて予測水位に到達する時刻で評価する方針とした。具体的なモデルの妥当性の判断基準は、図-7に示すように、基準水位への到達を初めて予測した時刻から実際にその基準水位に到達した時刻までの差をリードタイムと定義し、リードタイムが確保されれば、洪水予測としてのモデルの妥当性は高いと判断する。

##### (2) NNモデル定数の設定<sup>2)</sup>

###### a) ネットワーク基本構造

NNモデルでは、構造としては一般的に用いられている入力層、中間層、出力層からなる階層型ネットワークを用いた。中間層は1層とし、そのユニット数は入力値を9~21程度を想定して7と設定した。洪水予測においては、図-8の入力層に水位、雨量、ダム放流量等を与え、出力層がダム放流量となる。重み $w_{ij}$ を求める学習には、実測値と予測値の誤差の総和を最小化するバックプロパゲーション（逆伝播）法を用いた。学習における収束条件は、学習回数100,000回の制約の下で、平均2乗誤差 $E < 0.001$ とした。

	計算の流れ	内容
入力パターンの検討	入力値の選定	<ul style="list-style-type: none"> <li>■入力値は水位、ダム諸量、残流域雨量の実績値を選定。</li> <li>■水位観測所は、ダム流入までに適当な到達時間を有する観測所を選定。</li> <li>■雨量観測所は、水位観測所間の残流域流出分を把握できる観測所を選定。</li> </ul>
	入力値の組み合わせの検討	
学習パターンの検討	学習対象洪水の選定	<ul style="list-style-type: none"> <li>■はん濫注意水位を超える規模の出水を対象に選定。</li> <li>■平常時、水位上昇時、水位低減時に学習区間学習範囲を分けて立ち上がりの予測精度を高めた。</li> </ul>
	学習対象期間の選定	
	重みの算定	
予測値の検証と評価	3時間後予測の実施	<ul style="list-style-type: none"> <li>■図-7に示したリードタイムにより精度検証。</li> </ul>
	精度検証	

図-9 NNモデル定数の設定手順

###### b) NNモデルの定数設定

NNモデルの定数設定は、図-9に示すように、モデル構造の検討、入力値パターンの検討、学習パターンの検討、予測値の検証と評価により実施した。

学習出水は、洪水予報の目的を考慮して、はん濫注意水位を超えるような洪水の予測精度を確保するために、基本的にははん濫注意水位を超える規模の出水を対象に選定した。

洪水波形は、大まかに平常時、水位上昇時、水位低減時に分けることができる。平常時から水位低減時まで含めて洪水波形の全体を学習させると予測精度が低下し、特に洪水予測において最も重要な水位上昇時の予測精度が低下する場合があったため、上昇時と平常時、低下時に分けて設定した。水位上昇時は、立ち上がりからピークを越えるまでの時間帯を選んで学習させた。

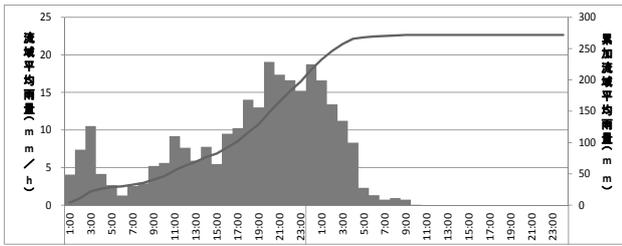


図-10 相模川流域平均雨量(平成19年9月6日～7日)

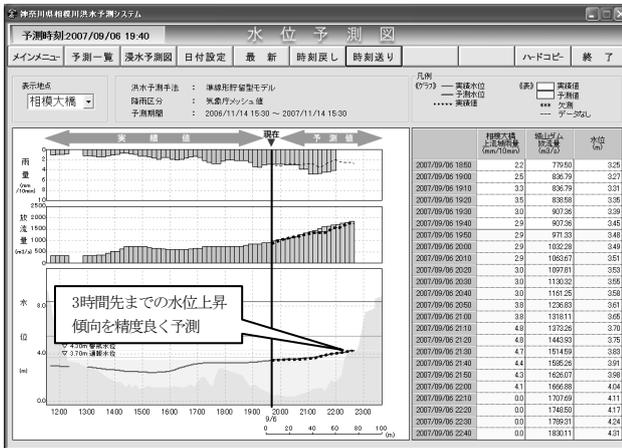


図-11 システムの予測計算画面の一例

## 5. 相模川洪水予測システムの検証

洪水予測システムは、平成18年6月からオンライン計算により運用している。ここでは、実運用後に発生した平成19年9月の台風第9号の予測計算結果を検証する。

### (1) 出水概要

平成19年9月6日～7日に関東地方を直撃した台風第9号の影響により、相模川流域では記録的な降雨、水位を記録した。相模川流域の流域平均雨量は累加で約270mmであった(図-10)。水位は、上依知で7.38m、相模大橋で5.46mに達し、観測記録の中では最高水位であった。

### (2) オンラインでの計算方法

相模川洪水予測システムは、データベースサーバから観測データ(雨量・水位等)および気象庁1kmメッシュ雨量データを取得し、10分ごとに3時間先の水位を予測している。予測した結果は、データベースサーバに格納され、予測結果と洪水予報文(案)を出力している。システム画面の一例として、9月6日19:40の相模大橋の予測画面を図-11に示す。システム画面の破線は実績値を示しており、水位、ダム放流量ともに3時間先までの水位上昇傾向を予測できていることが確認できる。

### (3) 水位予測精度の検証結果

#### a) 全体的な波形

平成19年9月の台風第9号のオンライン計算による予測結果を図-12に示す。

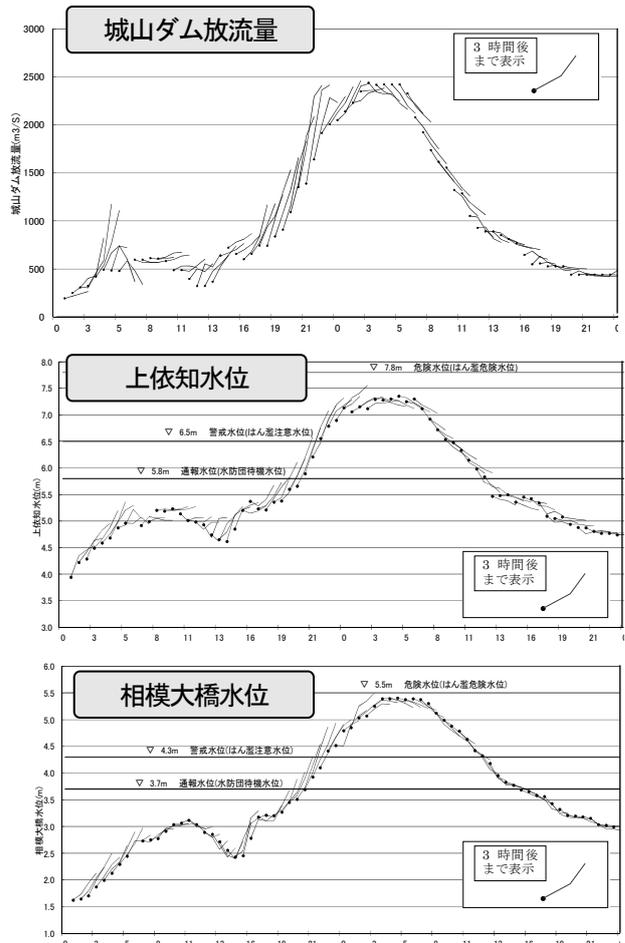


図-12 台風第9号の予測精度(オンライン計算結果)

表-4 到達時間の評価(オンライン計算結果)

【上依知予測結果】		(10分データを基にした整理)			
水位名	水位(m)	基準水位通過時刻(9月6～7日)	②実績水位到達時刻	①予測実施時刻	リードタイム ③=②-①
危険水位(はん濫危険水位)	7.8	—	—	—	—
警戒水位(はん濫注意水位)	6.5	22:20	19:30	19:30	2:50
通報水位(水防団待機水位)	5.8	22:30	17:20	17:20	5:10
—: 基準水位超過せず					
【相模大橋予測結果】		(10分データを基にした整理)			
水位名	水位(m)	基準水位通過時刻(9月6～7日)	②実績水位到達時刻	①予測実施時刻	リードタイム ③=②-①
危険水位(はん濫危険水位)	5.5	—	0:40	0:40	—
警戒水位(はん濫注意水位)	4.3	22:50	19:40	19:40	3:10
通報水位(水防団待機水位)	3.7	21:10	17:50	17:50	3:20
—: 基準水位超過せず					

この予測結果は、3時間先までの雨量は気象庁提供の予測雨量を利用した結果である。

実績水位と予測水位で全体的な波形は一致しており、ピーク付近における水位の上昇・下降傾向も概ね一致していた。特に、水防や避難行動のポイントとなる水位上昇部では前倒しの予測ができていた。これは、モデル構築時に防災上で安全側に予測することに着目し、前倒しの予測傾向となるように定数等を設定した効果といえる。

#### b) 到達時間の評価

基準水位への実績到達時間と予測到達時間を比較して表-4に示す。基準水位までのリードタイムも概ね3時間確保できていることが確認でき、良好な予測精度が確保できていることがわかる。

表-5 洪水予報の発表結果<sup>3)</sup>

発表日時	情報の名称、番号
平成19年9月6日	20時15分 相模川中流洪水予報 第1号(はん濫注意情報発表)
	21時10分 相模川中流洪水予報 第2号(はん濫注意情報)
平成19年9月7日	0時40分 相模川中流洪水予報 第3号(はん濫警戒情報発表)
	1時20分 相模川中流洪水予報 第4号(はん濫警戒情報)
	9時10分 相模川中流洪水予報 第5号(はん濫注意情報発表)
	13時10分 相模川中流洪水予報 第6号(はん濫注意情報解除)

### c) 洪水予報の発表タイミング

相模川中流の洪水予報発表結果を表-5に示す。平成19年時点の洪水予報発表基準は、「はん濫注意情報：基準地点の水位が警戒水位（はん濫注意水位）を超える洪水となることが予想されるとき、はん濫警戒情報：危険水位（はん濫危険水位）相当もしくは危険水位（はん濫危険水位）を超える洪水となることが予想されるとき」であった。

相模川中流においては、はん濫注意情報を20時15分に発表しており、警戒水位を超える2時間前には発表できた。また、はん濫警戒情報（0時40分発表）は、危険水位相当まで水位が上昇することが予測されたために発表された。相模大橋のピーク水位は5.46mで危険水位（5.5m）相当まで上昇していることから適切な発表であったといえる。

平成19年台風第9号に対しては、水位予測結果の精度がある程度確保でき、さらに洪水予報発表タイミングは適切であったと判断できる。

## 6. まとめ

城山ダム下流域では、ダム予測放流量を上流端入力値として、下流域の流出計算モデルを加えて、河道内を一次元不定流計算で計算する手法を選択した。

今回の検証により、城山ダムから基準地点までの流下時間は1～2時間程度あることから、一次元不定流計算によりダム放流量実績値のみで基準地点では1～2時間先まではある程度は予測可能であり、さらにダム放流量予測+下流域流出予測により3時間先までの水位予測精度が確保できる可能性を示した。

一方、ダム放流量を流出解析と相関解析の異なる2手法で上流端流量の精度を高めるモデル構成とすることで、下流区間の水位予測精度向上を図った。NNモデルでは、本運用前の出水により入出力パターンの選定等の検討を行い、特に水位上昇部の波形の再現性を高めるように入力値を選定した。流出計算モデルとNNモデルは相互補完的な役割を担うことが可能であり、複合的なシステムとすることで、より信頼性の高い洪水予測システムが構築できた。

実運用後に発生した平成19年9月の台風第9号の予

測計算結果を検証した結果、実績水位と予測水位で全体的な波形は概ね一致していた。特に、水防や避難行動のポイントとなる水位上昇部では前倒しの予測ができていた。これは、モデル構築時に水位上昇部の波形評価（基準水位到達予測時刻と実際に到達した時刻の差）を取り入れ、意図的にモデル定数を設定した効果といえる。

洪水予測においては、発生時刻の予測にズレが生じると防災の見地からは、致命的となる可能性を有していることから、水位上昇時の予測精度に着目した定数の設定が重要である。

## 7. 洪水予測システムの今後の展望

### (1) ダム放流量予測の精度向上

ダム放流量予測においては、特徴の異なる2手法併用による情報の2重化により、各々のモデルで発生する誤差への相互補完を目指した。現時点では、2手法の予測値のうち安全側となる予測値を採用した。

今後は、実運用により2手法の予測誤差傾向を分析する事によって更なる予測精度の向上が期待できる。適材適所の手法利用を検討して更なる予測精度の向上を図ることが必要である。

また、NNモデルは、適切な時期に学習データの追加を行い、新しい洪水波形にも対応させるための更新が必要である。

### (2) リアルタイムの水位縦断情報の提供

的確な判断・行動を実現するための防災情報の提供の一つに、「リアルタイムの水位縦断情報の提供<sup>4)</sup>」がある。相模川での一次元不定流計算水位は痕跡水位をよく再現できている。一次元不定流計算は、縦断的に任意地点での河川水位を予測することも可能であり、箇所毎の危険水位とあわせて情報提供の判断に役立てることも考えられる。

### 参考文献

- 1 級河川相模川の洪水予報河川の指定について：  
<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f3654/>
- 春原 常男, 内海 博, 井上 勝矢, 眞間 修一, 吉田 武司, 竹村 仁志：ニューラルネットワークモデルによるダム諸量予測と相模川洪水予測システムの検討, 河川技術論文集, 第12巻, pp. 229-234, 2006. 6.
- 横浜地方気象台：平成19年9月台風第9号に関する神奈川県気象速報(10月19日版), 平成19年10月19日
- 社会資本整備審議会河川分科会豪雨災害対策総合政策委員会：総合的な豪雨災害対策の推進について(提言), 2005. 4. 8 (2013. 4. 4受付)