

# 分布型洪水予測モデルのパラメータ同定 及びフィードバック手法に関する研究

PARAMETER TUNING METHOD AND REAL-TIME CALIBRATION METHOD  
OF DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL BY REAL-TIME FLOOD  
FORECASTING IN THE CHIKUGOGAWA RIVER BASIN

宮田昇平<sup>1</sup>・中島隆信<sup>1</sup>・白石芳樹<sup>1</sup>・島元尚徳<sup>2</sup>  
Shohei MIYATA, Takanobu NAKASHIMA, Yoshiki SHIRAISHI  
and Hisanori SHIMAMOTO

<sup>1</sup>正会員 工修 株式会社 建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12)

<sup>2</sup>国土交通省九州地方整備局 筑後川河川事務所 (〒830-8567 福岡県久留米市高野1-2-1)

In recent years, the real-time flood forecasting system which uses distributed hydrological model is increasing. Since a large-scale flood has occurred, it is important to perform accuracy improvement of flood forecasting. The PWRI Distributed Model is a constant distributed runoff model which estimate discharge for each mesh. The purpose of this study is establishment of the parameter tuning method and the real-time calibration method of distributed hydrological model by real-time flood forecasting system. This paper describes the real-time flood forecasting results using SCE-UA global optimaization method and real-time calibration in the Chikugogawa river basin.

**Key Words :** *distributed runoff model, real-time flood forecasting, SCE-UA global optimization method, real-time calibration method*

## 1. はじめに

平成24年7月九州北部豪雨では、多くの河川で甚大な被害をもたらした。筑後川河川事務所管内においても、筑後川水系・矢部川水系の多くの水位観測所では氾濫危険水位を超過し、広域的に外水はん濫が生じる事態となった。

このように洪水被害が多発する中、洪水被害軽減のため、洪水予測情報を活かして、円滑な水防活動や住民の安全な避難等を目的として行っている「洪水予報」や「河川周知」、市町村長に直接水位情報等を連絡する「ホットライン」が実施され、洪水予報河川における事前の予測水位の情報が自治体や避難等に役立てられている。

筑後川河川事務所では、これら洪水予測情報の提供を行うため、リアルタイムで常時稼働する洪水予測システムを構築し、従来の貯留関数法による洪水予測モデル(以下、貯留関数モデルと呼ぶ)と分布型流出モデルを用いた洪水予測モデル(以下、分布型モデルと呼ぶ)と

の併用による洪水予測精度の向上を進めているところである。しかし、貯留関数モデルとは異なり、分布型モデルは、実河川での洪水予報に用いる洪水予測システムでは導入が始まったばかりの段階にあり、パラメータの同定や実測値との乖離の補正など、リアルタイムで稼働するための課題は多い。

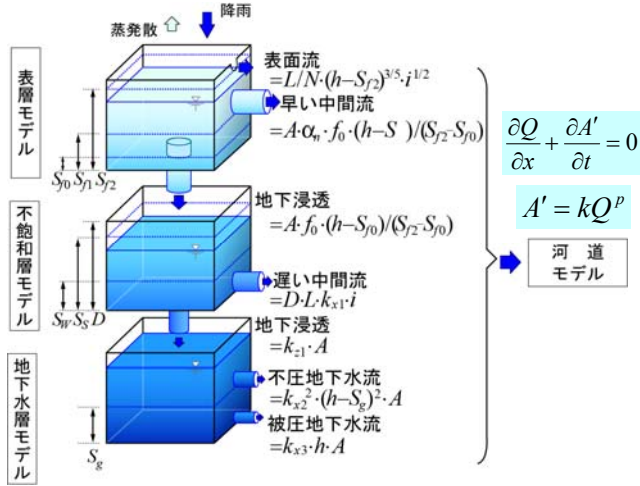
本論文では、分布型モデルのリアルタイムでの予測水位の精度向上を行う上で、特に重要となる1)パラメータの同定手法、2)フィードバック手法に着目して研究を行った成果について報告するとともに、平成24年7月九州北部豪雨における予測精度の検証結果及びそれにより明らかとなった今後の課題について述べる。

## 2. 分布型流出モデルの構築

### (1) 分布型流出モデルの概要

本研究では、分布型流出モデルとして土研分布モデル<sup>1)</sup>を用いた。この分布型流出モデルは、図-1に示すように、流域内の全メッシュに鉛直方向に3層のモデル(表層、

不飽和層、地下水層)と河道モデルから構成されている。表層モデルは、土地利用別に5分類(森林、田、畑、市街地、その他)のタンクモデルによって構成され、不飽和層モデルや地下水層モデルはそれぞれ土壌データ・表層地質データから浸透度別に3分類したタンクモデルで構成した。各層の水は落水線に沿って河道に流入し、河道内の流量はKinematic Wave法によって計算される。このモデルでは、土地利用、土壌、表層地質の局所的な水文学的特性が反映できる。



$S_{f2}$ : 表層流の発生高さ  $S_{f1}$ : 早い中間流の発生高さ  $S_{f0}$ : 地下浸透の発生高さ  $D$ : 重層  
 $S_s$ : 飽和状態の貯留高  $S_w$ : 最小水分量相当貯留高  $S_g$ : 不圧地下水流出発生高さ  
 $N$ : 等価粗度係数  $Q$ : 河道流量  $L$ : メッシュの長さ  $A'$ : 流水断面積  $i$ : 斜面勾配  
 $k, p$ : 定数  $A$ : メッシュの面積  $f_0$ : 最終浸透能  $k_{s1}, k_{s2}$ : 不飽和層透水係数  
 $k_{s2}, k_{s3}$ : 地下水層透水係数

図-1 土研分布モデル概念図

(2) 筑後川流域への適用

筑後川流域への適用にあたっては、流域のメッシュスケールとして、500mメッシュ(基準地域メッシュ第3次地域区画を4分割)を採用し、対象流域を10,677メッシュに分割した(図-2)。数値地図50mメッシュ(標高)から、各メッシュの平均標高を取得し、落水方向を設定した。また、国土数値情報河川データを用いて河道位置、河道長、河床高を算出し河道モデルを作成した。計算時間間隔は、出水の流出波形が明確に表現できるよう、また、テレメータの観測更新間隔に合わせて、 $\Delta t=10$ 分とした。なお、蒸発散量については、洪水時への影響は少ないことから、考慮しないものとした。

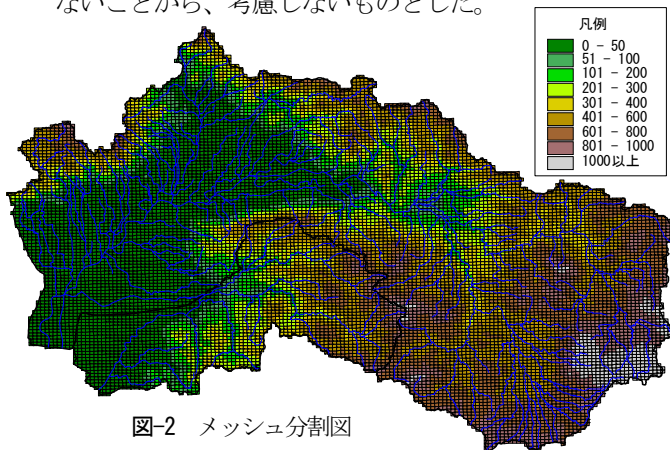


図-2 メッシュ分割図

3. パラメータの同定手法

(1) 分布型モデルのパラメータ同定の課題

分布型モデルは上記のモデル上の特性から、土地利用毎に各種パラメータを設定する必要があり、貯留関数モデルに代表される集中型モデルと比較し、多数のパラメータを有している。このため、試行錯誤による検証では、設定したパラメータの客観性が保てないという課題を有している。

(2) 既往研究のレビュー

既往の研究により数学的に分布型モデルのパラメータを最適化する研究が進められている。例えば、小林ら<sup>2)</sup>は、LM法(Levenberg-Marquardt法)を由良川流域に適用し、観測流量との適合度の高いパラメータ推定を行っている。また、Gihaら<sup>3)</sup>は、上椎葉ダム流域を対象に、SCE-UA法(Shuffled Complex Evolution)を用いた研究を行い、目的関数の違いがパラメータに与える影響について分析している。一方、小槻ら<sup>4)</sup>は、阿武隈川流域を対象にして、群知能最適化手法PSO(Particle Swarm Optimization)を適用した上で、物理的に非現実的な解を見つけてしまう数学的最適化手法の危険性を指摘し、物理的に妥当な範囲に探索範囲を設定することが重要との喚起を行っている。

これら研究の成果により、分布型モデルのパラメータ同定に数学的手法を使用する有効性は明らかとなってきてはいるものの、実河川での洪水予報に使用されている洪水予測システムについては、近年、ようやく貯留関数モデルから分布型モデルへの移行が始まってきている段階にあり、パラメータはまだ試行錯誤的に同定されている事例が大半である。このような背景を踏まえ、本研究では、筑後川流域を対象として、数学的手法によるパラメータの同定を試みた。

(3) SCE-UA法の筑後川流域への適用

本研究では、流出モデルへの適用事例が多く、また、アルゴリズムのソースコードが公開されているSCE-UA法<sup>5),6)</sup>をパラメータの同定手法として採用した。

a) SCE-UA法

SCE-UA法は、非線形水文モデル(流出モデルだけでなく、地下水流動モデル等)の数多くのパラメータを最適化するために開発された手法であり、様々なモデルで数多くの適用実績がある。

SCE-UA法は、(1)ランダム探索を組み合わせたシンプレックス法、(2)遺伝的アルゴリズム(GA)に類似した競争進化、(3)新たに開発された集団混合の3つの概念からなっている。

b) パラメータの変動範囲

同定対象とするパラメータは、洪水時の流出量への影響の大きな $S_{D2}$ 、 $S_{D1}$ 、 $S_{D0}$ 、 $f_0$ 、 $\alpha_1$ の5種類とした。この5種類のパラメータを5種類の土地利用別に設定する必要があるため、合計25（5種類×5分類）のパラメータが同定対象となる。

パラメータの同定にあたって、物理的に非現実的な解に収束しないように、表-1に示す上限値・下限値を設定した。

また、筑後川流域の洪水予報観測所は現時点では筑後川本川に限られているが、本川の予測精度向上のためには、支川の予測精度向上が必要不可欠である。本来、分布型流出モデルのパラメータは、ある土地利用、ある地質・土壌区分であれば、同一のパラメータを持つべきものである。しかし、本研究で構築した分布型モデルでは、土地利用は5分類、土壌・地質は各々3分類としてモデル化していることから、実際の細かな土地利用等の差に起因する流出形態の差までは表現できない。このため、パラメータは実績流量が観測されている支川毎に設定するものとした。

表-1 同定対象としたパラメータ及び設定範囲

パラメータの種類	単位	下限	上限	
$S_{D2}$	表面流の発生高さ	m	0.001	0.3
$S_{D1}$	早い中間流の発生高さ	m	0.001	0.2
$S_{D0}$	地下浸透の発生高さ	m	0.001	0.1
$f_0$	最終浸透能	cm/sec	$1.0 \cdot 10^{-8}$	$1.0 \cdot 10^{-1}$
$\alpha_1$	早い中間流の定数	-	0.5	2

※本研究では上下限は他河川の定数設定事例を参考に設定しており、必ずしもこの範囲内でなければならないという定めは無い。

c) 目的関数

目的関数については、以下の5指標の和とし、洪水予測モデルの実際の適用シーンとなる高水時（はん濫注意水位程度以上の高い水位）の予測精度を重視して、表-2のとおり、重み付けを行った。

なお、重み付けの設定過程では、複数パターンでの重み付けの組み合わせで計算を行い、モデル定数同定後の計算流量と実績流量を定量的に比較し、高水時の適合度が高くなる組み合わせを設定した。

表-2 目的関数の重み付け

誤差指標	重み
① ピーク流量誤差： $E_p$	1.0
② 流出波形の誤差： $E_Q$	0.2
③ 流出ボリューム誤差： $E_V$	0.2
④ 相関係数： $Cor$	1.0
⑤ 高水時（ピーク流量の5割以上）の $E_Q$ ： $E_{Qh}$	1.0

① ピーク流量誤差： $E_p$

$$E_p = \frac{Q_{op} - Q_{cp}}{Q_{op}} \quad (1)$$

② 流出波形の誤差： $E_Q$

$$E_Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_o(i) - Q_c(i)}{Q_{op}} \right)^2 \quad (2)$$

③ 流出ボリューム誤差： $E_V$

$$E_V = \frac{\sum_{i=1}^n Q_o(i) - \sum_{i=1}^n Q_c(i)}{\sum_{i=1}^n Q_o(i)} \quad (3)$$

④ 相関係数： $Cor$

$$Cor = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - \overline{Q_o})(Q_c(i) - \overline{Q_c})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - \overline{Q_o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_c(i) - \overline{Q_c})^2}} \quad (4)$$

⑤ 高水時（ピーク流量の5割以上）の $E_Q$ ： $E_{Qh}$

$$E_{Qh} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_o(i) - Q_c(i)}{Q_{op}} \right)^2 \quad (Q_o(i) > 0.5 \cdot Q_{op}) \quad (5)$$

ここに、 $Q_o(i)$ ：i時の実測流量、 $Q_c(i)$ ：i時の計算流量、 $Q_{op}$ ：実測ピーク流量、 $Q_{cp}$ ：計算ピーク流量、 $n$ ：計算時間数である。

4. フィードバック手法

(1) 分布型モデルのフィードバック手法の課題

リアルタイムで稼働する洪水予測モデルでは、現時刻の観測値を用いて予測値を補正するフィードバック（以下、FBと呼ぶ）手法が重要となる。

集中型モデルでは、元々のパラメータの数が少ないこともあり、比較的単純なFB手法（筑後川河川事務所の貯留関数モデルでは、一次流出率 $f$ をFBパラメータとして、実測値に合うように $\alpha$ 倍する手法）が用いられてきた。しかし、分布型モデルでは、状態量の数が多いこと、洪水予測システムへの適用実績が少ないこともあり、FB手法が確立されていないという課題がある。

(2) 既往研究のレビュー

分布型モデルのFB手法については、いまだ確立した手法は無いものの、近年研究が進められている状況にある。

例えば、Kimら<sup>7)</sup>は、Kinematic Wave型の分布型モデルの流域全体の貯留量をひとつの状態量と見なしてカルマンフィルタを導入した研究を行っている。また、佐山ら<sup>8)</sup>は、マスキング法によって推定する河川流量をフィルタリングの対象とするとともに、流出モデルに起因するバイアスをシステム方程式に加えて、同時に逐次推定する手法を提案している。

このように、近年の研究の成果により、幾つかのFB手法が提案されてきているものの、本研究で採用した土研分布モデル（メッシュ毎に3層のタンクを配置する形式）を使用したFB手法に関する研究については報告されている事例が少ない状況にある。

### (3) 土壌水分量をFBパラメータとするFB手法

#### a) FBパラメータの選定

本研究では、以下の考えに基づき、土壌水分量をFBパラメータとするFB手法を適用するものとした。

- ・浸透能等のその土地に固有の流出パラメータは、上記のSCE-UA法により最適化されている。
- ・状態量のパラメータとしては、流域モデルの土壌水分量（タンクの貯水位）、河道モデルの河川流量があるが、筑後川のような大流域では流出モデルの流出量が支配的である。

#### b) 土壌水分量の補正方法

土壌水分量の補正方法は、(6)式及び図-3のように、ガウス関数を用いて、区間的・時間的に徐々に各メッシュの水分量が補正されるようにした。

$$\Delta H_{n,x,t} = \Delta H_{n-1,x,t} + \frac{\Delta Q_i}{A_i} \cdot \alpha \cdot \exp\left(-\frac{(T - (T_0 - TL_{i,x}))^2}{2}\right) \quad (6)$$

ここに、

$\Delta H_{n,x,t}$  : メッシュ $x$ の時刻 $t$ における水分量補正量

$A_i$  : 観測所 $i$ の支配メッシュの総面積

$T$  : 時刻

$T_0$  : 現時刻

$n$  : 繰り返し計算回数

$\Delta Q_i$  : 現時刻 ( $T_0$ ) の計算流量と実績流量の差

$\alpha$  : 補正係数

$TL_{i,x}$  : メッシュ $x$ の観測所番号 $i$ までの洪水到達時間

具体的な計算手順は以下の通りである。

- ①実績値と観測値の流出高の差を観測所の支配メッシュの総面積で除し、さらに1メッシュあたりの面積を乗じることにより、単位メッシュあたりの補正流出高を算定する。
- ②ガウス関数の頂点部分を、各メッシュの洪水到達時間（洪水の流下速度を3m/sと一律に仮定）分だけ時間方向に遡ってずらす（水位観測所ジャストポイントのメッシュは現時刻が補正量のピークになり、洪水到達時間が1時間のメッシュは、1時間前が補正量のピークになる）
- ③各メッシュの補正流出高を各時刻の雨量値に加える。
- ④流出計算を行って、計算流量と実績流量の誤差が収束基準未満になれば計算を終了する。収束基準以上であれば、①に戻って再度水分量を補正する。

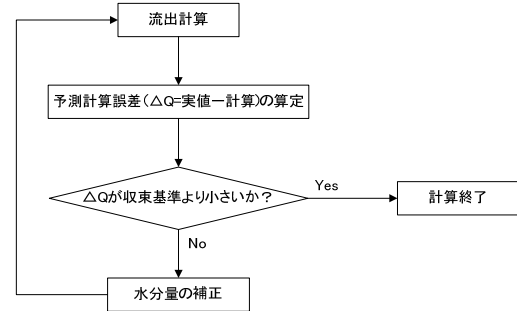
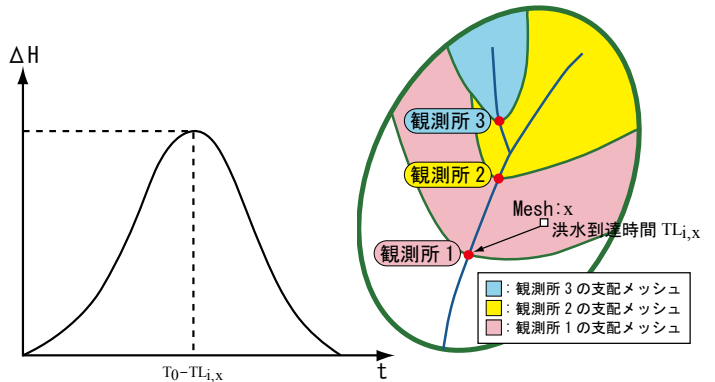


図-3 フィードバック手法の概念図

## 5. 洪水予測モデルの精度向上効果

### (1) 検証対象洪水及び使用した雨量データ

実用性の高い洪水予測モデルを構築するためには、パラメータを同定する検証対象洪水の選定が重要となる。本研究では、洪水予報発表の的確な判断に必要となる「はん濫注意水位」を超過した洪水を選定した。また、入力条件とするレーダ雨量精度の観測精度の検証を行い、筑後川流域において比較的観測精度の高い1kmメッシュの気象庁レーダアメダス解析雨量が整備される平成18年以降に発生した洪水（平成22年まで）を抽出し、合計12洪水を検証対象洪水として選定した。

なお、実際の洪水予測システムでは、観測精度が高く、また、配信遅延時間及び更新時間間隔が最も短い国土交通省全国合成レーダ雨量を使用しているが、平成20年以前の洪水では観測精度が不十分であったため、パラメータの同定には使用しなかった。

### (2) 予測精度向上効果

予測精度向上効果を確認するためには、試行錯誤的にパラメータを同定した予測結果と比較する方法が分かりやすい。しかし、本研究では試行錯誤的なパラメータ同定の過程を踏まらずに、数学的手法によるパラメータの同定を行っているため、比較対象にできる、いわゆる改良前モデルが存在しない。このため、代替的に、貯留関数モデルとの比較を行った。なお、本研究での成果を踏まえ、貯留関数モデルのパラメータも上記のSCE-UA法で最適化し、予測精度向上を行った後の貯留関数モデルと比



較を行うものとした。

予測水位のヒドログラフを図-4に示す。同図は毎正字の実績値を白抜きの丸印で表し、毎正時を予測開始時刻として3時間後までの予測水位を折れ線で表したものである。同図からは、貯留関数モデルの予測水位は実績よりも低めになっているのに対して、分布型モデルの予測水位は実績水位に追従するように予測できていることが分かる。

また、検証対象とした12洪水の全時刻での実績流量と予測流量を散布図で表したものを図-5に示す。同図からは、1時間後予測では分布型モデルと貯留関数モデルに大差は見られないものの、3時間後予測のように、予測時間が長くなると、分布型モデルよりも貯留関数モデルの予測流量と実績流量のばらつきが大きくなっていることが分かる。これは、分布型モデルは貯留関数モデルに比べて、3時間後予測という長い予測時間になっても、安定して予測精度の高い状態を維持できていることを意味している。

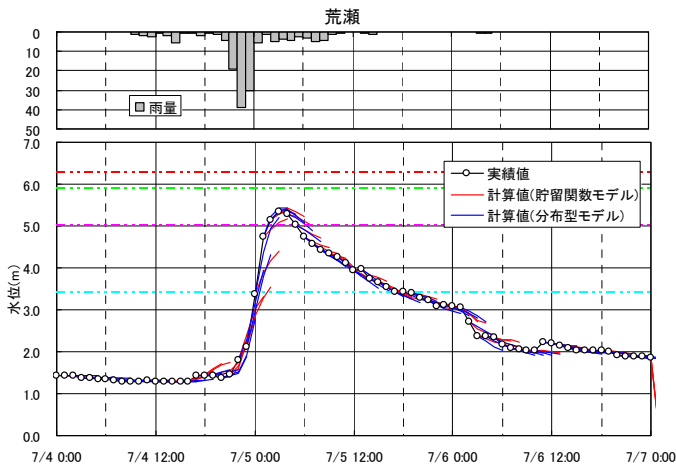


図-4 貯留関数モデルとの比較

(青：分布型モデル 赤：貯留関数モデル)  
(H18. 7.5洪水：荒瀬水位観測所)

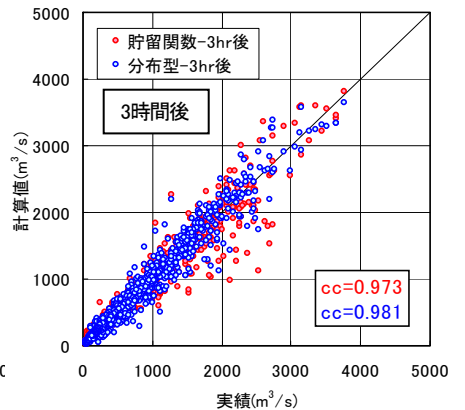
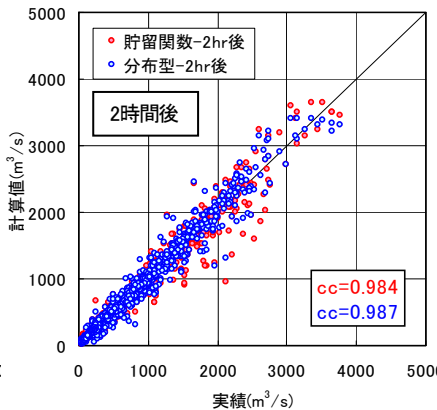
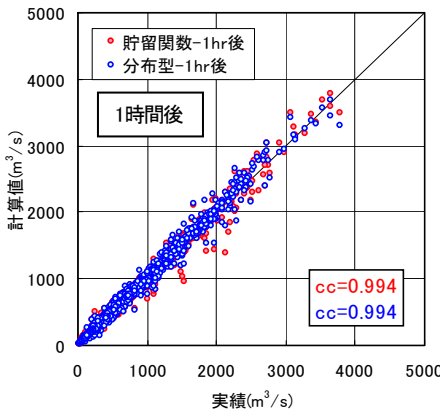


図-5 実績流量と予測流量の散布図 (左：1時間後予測、中央：2時間後予測、右：3時間後予測) (荒瀬水位観測所)

## 6. 平成24年7月九州北部豪雨での予測精度検証

本研究後に発生した平成24年7月九州北部豪雨での予測精度について検証を行ったところ、かつて経験したことのない集中豪雨により急激に水位が上昇する時間帯で予測精度が低下する現象が見られた (図-7青線)。この要因について調査を行ったところ、図-6に示すように、予測計算に使用している国土交通省全国合成レーダ (以下、国交省レーダ) が地上雨量に比べると、水位が急上昇している7/14 6:00~7:00の1時間雨量で、荒瀬水位観測所の上流域平均雨量にして、国交省レーダが地上雨量よりも約17mm/hr小さくなっていることが確認できた。

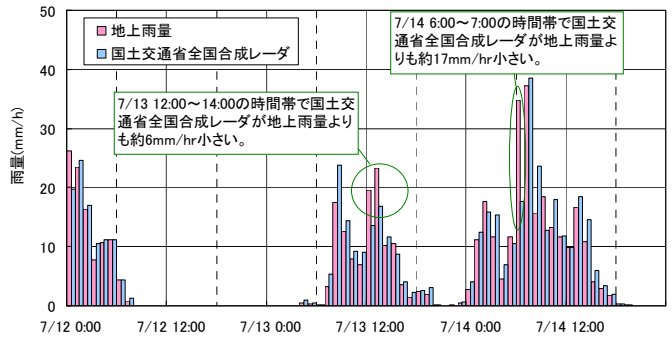


図-6 レーダ雨量と地上雨量の比較

(青：国土交通省全国合成レーダ 赤：地上雨量観測所データ)  
(平成24年7月九州北部豪雨、荒瀬水位観測所上流域平均雨量)

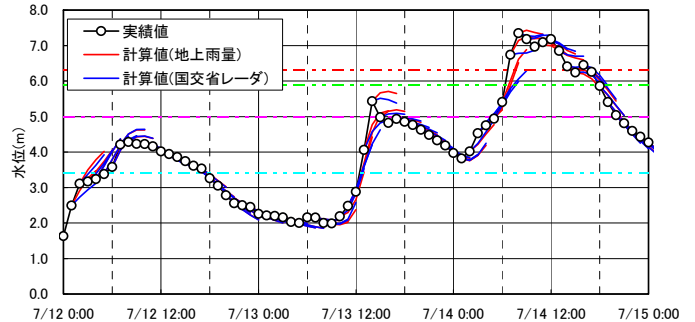


図-7 雨量データの違いによる予測水位の比較

(青：国土交通省全国合成レーダ 赤：地上雨量観測所データ)  
(平成24年7月九州北部豪雨、荒瀬水位観測所)

そこで、入力条件とする雨量データとして、国交省レーダを用いた場合、地上雨量を用いた場合の予測計算について比較を行った。地上雨量を用いた場合の計算は、ティーセン分割を行い、各雨量観測所の支配エリア内のメッシュに一律に同じ雨量値を与えるものとした。図-7に示した予測水位の比較図を見ると、地上雨量を用いた計算では、7/13 12:00~14:00、7/14 6:00~7:00の時間帯で、国交省レーダを用いた計算よりも実績の水位上昇に追従した予測ができていたことが確認できる。しかしながら、依然として、実績よりも低めの予測水位となっている。これは、図-8に示すように、地上雨量観測所網では補足できないエリアに強雨域が発生していることが原因と考えられる。

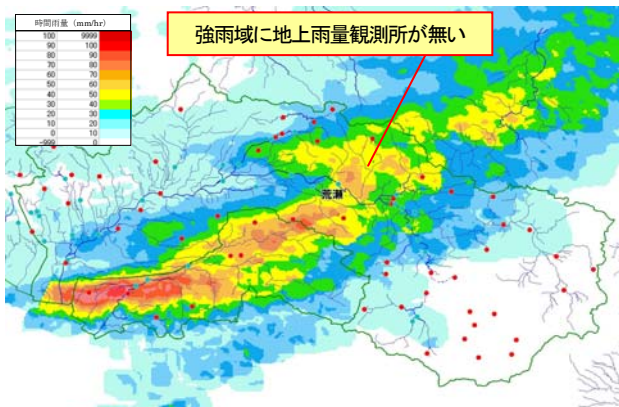


図-8 XバンドMPレーダによる降雨分布 (7/14 6:00~7:00)  
(赤丸は国交省所管の地上雨量観測所)

## 7. おわりに

以上、本研究では、筑後川流域を対象に、洪水予報発表の判断等に使用する分布型モデルの構築を行うことができた。

今後の課題としては、大別して、①流出モデル自体の精度向上、②入力条件となる雨量データの精度向上が挙げられる。

まず、流出モデル自体の精度向上について述べる。本研究では、パラメータの同定手法としてはSCE-UA法、フィードバック手法としては水分量補正方式を採用し、良好な予測結果が得られることを確認した。しかし、SCE-UA法では目的関数の選定、フィードバック手法では洪水到達時間の設定方法について、これまでの経験に頼って選定・判断している部分があり、定量的な比較検

証は行っていない。今後、これらの比較検証を行うとともに、さらには、その他のパラメータ同定手法やフィードバック手法との比較検証についても行っていく予定である。

次に、入力条件となる雨量データの精度向上について述べる。本研究では、上記の通り、特に流出モデルのパラメータ同定、フィードバック手法に着目して予測精度向上を行った。しかし、実際に洪水予測システムを稼働した後に発生した平成24年7月九州北部豪雨での精度検証を行ったところ、入力条件となる雨量データの誤差が流出モデルの誤差以上に影響していることが分かった。今後は、流出モデルの精度向上と合わせて、雨量データのさらなる精度向上にも尽力し、洪水予報に活かしていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 安陪, 大八木, 辻倉, 安田: 分布型流出モデルの広域的適用, 水工学論文集, Vol.46, pp.247-252, 2002.
- 2) 小林・寶・立川: 最適化手法による分布型降雨流出モデルのパラメータ推定, 水工学論文集, 第51巻, pp. 409-414. 2007.
- 3) Giha Lee, TACHIKAWA, Y., and TAKARA, K.: Identification of Model Structural Stability Through Comparison of Hydrologic Models, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.51. pp.49-54,2007
- 4) 小槻・田中・小尻・浜口: 群知能最適化手法を用いた分布型流出モデルのパラメータ同定, 水工学論文集, 第56巻, 2012
- 5) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K.: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resour. Res.*, Vol.28, No.4, 1015-1031, 1992.
- 6) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K.: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *J. Hydrol.*, Vol.158,265-284,1994
- 7) Kim, S., Tachikawa, Y. and Takara, K.: Applying a recursive update algorithm to a distributed hydrologic model, *J. of Hydrol. Eng.*, ASCE, Vol. 12, No. 3, pp.336-344, 2007.
- 8) 佐山・立川・寶: バイアス補正カルマンフィルタによる広域分布型流出予測システムのデータ同化, 土木学会論文集B Vol.64 No.4, pp.226-239,2008.

(2013. 4. 4受付)