

リアルタイム洪水予測精度向上のためのフィードバック手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～平 30

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：宮本 守，伊藤 弘之

【要旨】

近年の降雨観測技術の向上により洪水氾濫を引き起こす集中豪雨の降雨強度や時空間分布を正確に捉えることが可能になり、それに伴って洪水予測の精度も向上している。しかしながら洪水予測の際には降雨データ等の入力データの他に、モデル構造やモデルパラメータ等の誤差要因も挙げられる。本研究では、地上観測雨量とCバンドレーダ雨量をそれぞれ入力条件とした土研分布モデルを対象に、パラメータの最適化による洪水予測精度向上に関する有用性を明らかにした。土研分布モデルのパラメータ最適化による誤差の収束結果からは、地上雨量観測とCバンドレーダ雨量の収束値の違いを明確に示すことができ、Cバンドレーダ雨量の方がNash-Sutcliffe指標、ピーク値とも再現性が高いという結果が得られた。特に支川等を含めた流域全体の解析にはレーダ雨量等の空間解像度の高い面的雨量が必要であることが示された。

キーワード：パラメータ最適化，土研分布モデル，Cバンドレーダ雨量，地上観測雨量，誤差評価

1. はじめに

洪水時の迅速な水防活動や避難行動のためには、適時かつ信頼性の高い洪水予測が不可欠であり、精度の高い洪水予測には高精度の降雨情報を流出モデルに与える必要がある。国内における洪水予測では地上観測雨量やレーダ雨量計による面的雨量、もしくはそれらを組み合わせた解析雨量、さらには都市部を中心に整備されている時空間解像度の高い国土交通省XバンドMPレーダなどが用いられており、洪水氾濫等を引き起こす集中豪雨の降雨強度や雨域の時空間分布をより正確に捉えた情報が活用されている。このような近年の降雨観測技術の向上は洪水流出予測の精度の向上に寄与している。

降雨データの空間解像度が流出計算に及ぼす影響に関する研究はいくつか取り組まれている。市川ら¹⁾は段階的に平均化したレーダ雨量と分布型流出モデルにより流出計算で考慮すべき降水空間スケールを桂川流域を対象に調査し、各平均化したレーダ雨量に対して流出計算誤差が5%以下となる集水面積を具体的に示している。Sangati et al.²⁾は1, 4, 8, 16 kmに平均化したレーダ雨量データを分布型流出モデルに適用し様々な流域スケールで評価し、降雨データの解像度と流域スケールの比からなるパラメータを用いてピーク流量の感度を評価している。Zoccatelli et al.³⁾は小規模流域において降雨の空間的なばらつきを考慮しないことが解析結果のNash-sutcliffe係数を30%の割合で下

げること示している。このように、様々な解像度の面的雨量データを用いた流出解析結果に基づいて降雨データの空間解像度が流出解析に及ぼす影響を評価する研究がいくつかの手法で取り組まれているが、流出モデルで計算された河川流量を実測値で評価した誤差には、入力データ、モデル構造、キャリブレーションに起因する誤差が含まれており、それぞれの誤差を個別に特定することは難しい。

本研究では、安倍川流域において地上観測雨量の誤差を空間代表性の観点から評価した上で、流域全体の面積雨量をCバンドレーダ雨量と比較評価した。さらに洪水予測の精度評価を目的として土研分布モデルを用いて洪水の再現計算を行った。その際にキャリブレーションに起因する誤差を最小にするために、地上観測雨量とCバンドレーダ雨量を適用したそれぞれの計算に対してパラメータを最適化を行い、河川流量の再現性と誤差の収束結果から比較することにより、降雨・水位観測データからモデルパラメータをフィードバックする技術の有効性を把握した

2. 地上観測雨量の空間代表性

2.1 安部川流域

対象とした安倍川流域は、静岡県を流れる流域面積567 km²の一級河川である。図-1に示すように水位観測所が3地点、雨量観測所が13地点設置されており、1雨量観測所当たりの代表面積の平均は43.6 km²であ

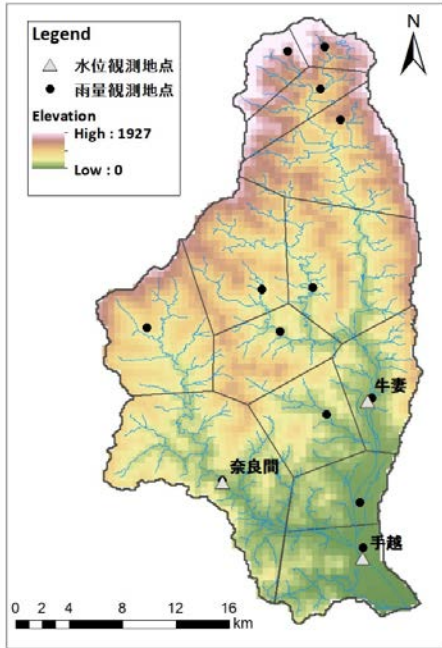


図-1 安倍川流域の雨量・水位観測地点

る。2007年以降に手越地点で $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上を記録した出水を表-1に示す。なお、2013年9月にも出水があったがCバンドレーダ雨量データに異常値が含まれることから本解析では対象外とした。

2. 2 雨量観測所数による空間的偏りの評価

地上観測雨量から流域平均雨量を算出する際の流域内の雨量観測所数に起因する偏りを評価した。図-2は2014年10月洪水における1雨量観測所の代表面積と流域平均総降雨量の関係である。各代表面積における流域平均雨量は、流域内の任意の観測地点数 n ($n = 1, 2, \dots, 12$) を仮定し、13地点の値の中からモンテカルロ法により任意に抽出し算術平均法により流域平均雨量を算出した結果である。モンテカルロ法による抽出は2000パターンとした。1雨量観測所の代表面積が大きくなると分布の幅は大きくなり平均値も大きくなっていることが図-2から確認できる。図-3はティーセン平均雨量を真値と仮定した場合の各代表面積の平均雨量の誤差である。1雨量観測所当たりの代表面積が大きくなるにつれて誤差は大きくなり、代表面積が 400 km^2 以上になると誤差は平均値で0.1を上回っている。表-1に示した8洪水に対する観測所の代表面積と流域平均雨量の誤差の関係を図-4に示す。過去の8洪水の平均値では、代表面積が 400 km^2 以下で誤差は0.2を下回り、代表面積が 150 km^2 以下で誤差は0.1を下回っている。この結果は吉野⁴⁾による観測密度と流域面積が日雨量の推定に及ぼす影響に関する知見と整合する結果であり、時間雨量であっても同様であることが示された。

表-1 対象洪水イベント

	期間	日数	総降雨量 (mm)	最大流量 (m^3/s)
1	2007/7/13 - 18	6	365.7	2351
2	2011/7/18 - 23	6	406.1	1467
3	2011/8/31 - 9/7	8	478.9	1313
4	2011/9/16 - 23	8	508.1	3501
5	2011/11/19 - 21	3	190.0	1168
6	2012/6/19 - 21	3	248.3	2474
7	2012/7/11 - 16	6	284.1	1301
8	2014/10/5 - 7	3	379.8	3860

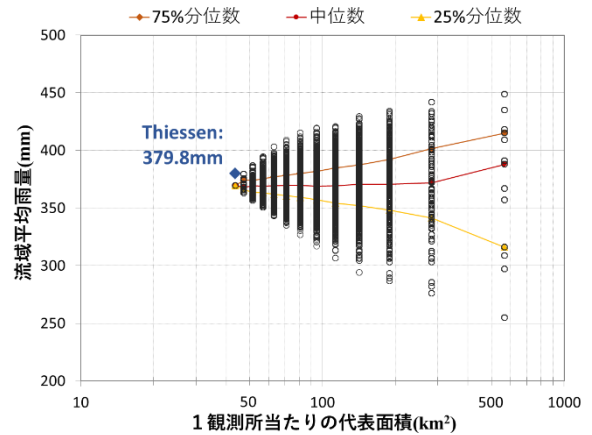


図-2 観測所数と流域平均総降雨量の関係

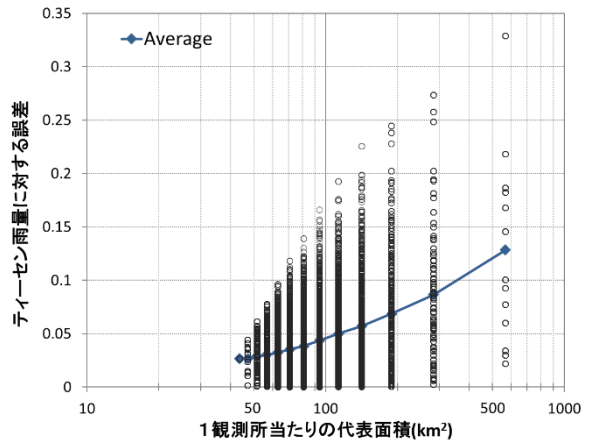


図-3 ティーセン平均雨量に対する誤差

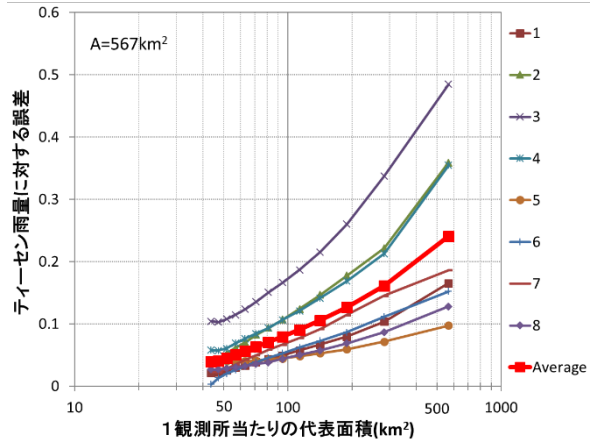


図-4 1観測所当たりの代表面積と流域平均雨量の誤差の関係

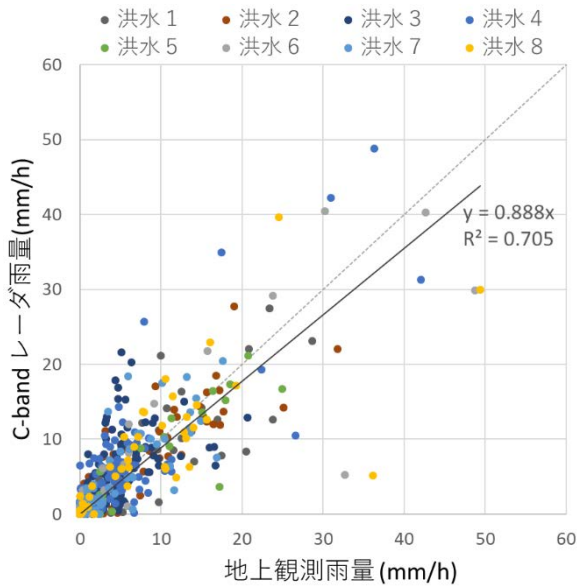


図-5 地上観測と C-band レーダの流域平均雨量の比較

3. Cバンドレーダ雨量と地上観測雨量の比較

地上観測雨量とCバンドレーダ雨量から求められる流域全体の面積雨量を比較した。図-5は8洪水の地上観測のティーン平均雨量とCバンドレーダの流域平均雨量の比較である。8洪水を通して見ると地上観測雨量が相対的に10%程度過小になっている。図-6は一雨総降雨量が最大であった2011年9月洪水における地上観測雨量とCバンドレーダ雨量の総降雨量の空間分布である。流域平均の総降雨量は地上観測雨量が508.1mm、Cバンドレーダ雨量が608.7mmであった。地上観測雨量のティーン分割では降雨量の空間的な偏りが顕著では無いが、空間解像度が1kmメッシュのCバンドレーダ雨量では高強度の雨域を表現できている。しかしながら、Cバンドレーダ雨量においても流域の南西部においてグランドクラッターが原因と考えられる帯状の低強度帯が確認された。

4. 土研分布モデルのパラメータ最適化手法

本研究ではキャリブレーションに起因する誤差を最小にするために、土研分布モデルのパラメータを地上観測雨量とCバンドレーダ雨量のそれぞれに対して最適化し、再現誤差の収束結果を比較した。

4.1 モデル概要

本研究で適用した土研分布モデルの概念図を図-7に示す。土研分布モデルでは2段タンクを各メッシュに分布させ、各タンクからの流出量を式(1)から(5)により算出し、河道に流入するタンクからの各流出量の合計を用いて式(6)から(7)に示した Kinematic Wave 法に

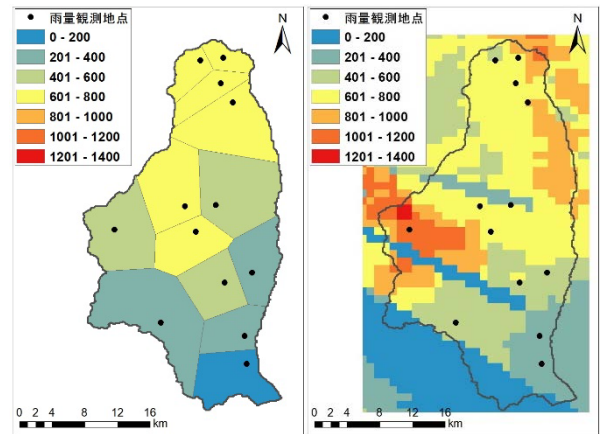


図-6 2011年9月洪水の地上観測雨量とC-bandレーダ雨量の総降雨量の空間分布

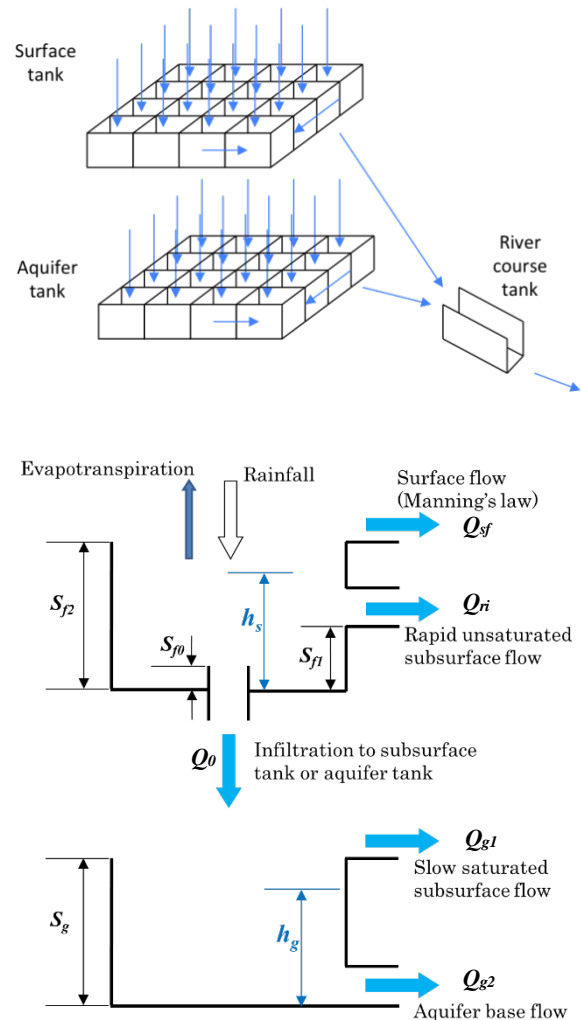


図-7 土研分布モデルの概念図

より河道追跡を行う。本論文ではメッシュサイズは500mとした。

$$Q_{sf} = L \frac{1}{N} (h - S_{f2})^{\frac{5}{3}} \sqrt{i} \quad (1)$$

$$Q_{ri} = \alpha_n \cdot A \cdot f_0 \frac{(h - S_{f1})}{(S_{f2} - S_{f1})} \quad (2)$$

$$Q_0 = A \cdot f_0 \frac{(h - S_{f0})}{(S_{f2} - S_{f0})} \quad (3)$$

$$Q_{g1} = A_u^2 \cdot (h - S_g)^2 \cdot A \quad (4)$$

$$Q_{g2} = A_g \cdot h \cdot A \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$C = \frac{dQ}{dA} \quad (7)$$

ここに、 Q_{sf} : 表面流出量(m^3/s), L : メッシュ長(m), N : 地表面粗度($s/m^{1/3}$), h : 水位(m), S_{f2} : 表層タンクの最大貯留高(m), i : 勾配, Q_{ri} : 早い中間流出量(m^3/s), A : メッシュ面積(m^2), S_{f1} : 早い中間流発生高さ(m) Q_0 : 地下タンクへの浸透量(m^3/s), S_{f0} : 地下浸透発生高さ(m), Q_{g1} : 遅い中間流出量(m^3/s), S_g : 遅い中間流発生高さ(m), Q_{g2} : 基底流量(m^3/s), α_n : 早い中間流の流出係数, f_0 : 最終浸透能 (cm/s), A_u : 遅い中間流の流出係数 ($(1/mm/day)^{1/2}$), A_g : 基底流出係数($1/day$), Q : 河川流量 (m^3/s), C : 伝播速度(m/s)である。

4. 2 水文モデルのパラメータの最適化手法

本解析では土研分布モデルのパラメータのうち最終浸透能, 表層タンクの最大貯留高, 地表面粗度, 早い中間流の流出係数, 遅い中間流の流出係数, 基底流出係数の6種類を最適化の対象とし, 各パラメータの探索範囲は表-2のように設定した。なお, モデルでは最終浸透能と地表面粗度は土地利用ごとに個別値を与えているが, 流域の土地利用は森林が支配的であるため, 最適化の対象は森林の値のみとした。最適化アルゴリズムは, 著者らの既往研究^{5),6)}に基づいてオープンソースの最適化ソフトウェアである pyOpt の SDPEN⁷⁾と粒子群最適化法に基づいた ALPSO (Augmented Lagrangian Particle Swarm Optimizer)⁷⁾を用いた。粒子数は20とし最大外部反復数は40として繰り返し計算を行った。誤差評価は手越観測所の実測流量と計算流量を比較することで行い, 評価関数は著者らの既往研究⁵⁾から式(8)に示した平均二乗誤差とした。

$$E_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ci})^2 \quad (8)$$

ここに、 E_M : 平均二乗誤差, n : データ数, Q_{oi} : 時刻 i に

表-2 最適化対象パラメータの探索範囲

パラメータ	単位	上限	下限
最終浸透能 f_0	cm/s	0.01	0.00001
表層タンクの最大貯留高 S_{f2}	m	1	0.01
地表面粗度 N	$s/m^{1/3}$	2.0	0.1
早い中間流の流出係数 α_n	-	1	0
地下タンク流出係数 A_u	$(1/mm/day)^{1/2}$	0.6	0.01
基底流出係数 A_g	1/day	0.1	0.0001

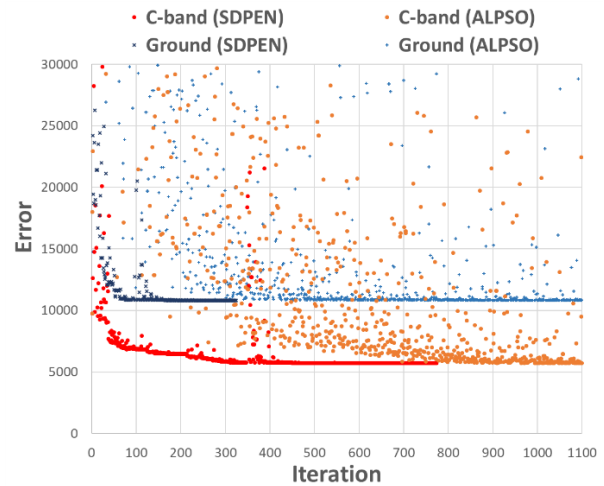


図-8 パラメータの最適化計算における誤差の収束

における実測流量(m^3/s), Q_{ci} : 時刻 i における計算流量 (m^3/s)である。

5. 最適化結果による降雨データの評価

5. 1 誤差の収束値

地上観測雨量とCバンドレーダ雨量を用いて土研分布モデルのパラメータを最適化した際の誤差値の収束に関して特に降雨データの違いが顕著であった2011年9月洪水の事例を図-8に示す。SDPENとALPSOのどちらの最適化アルゴリズムを使用した場合でも収束値はほぼ同じであるが, Cバンドレーダ雨量を適用した方が地上観測雨量の場合より誤差の収束値が小さくなっていることがわかる。つまり, 地上観測雨量を使用した計算ではパラメータをどのように調整しても誤差を減らせるのは10,000程度までであるが, Cバンドレーダ雨量を使用した計算では5,000程度まで減らすことができた。

5. 2 流量の再現結果

2011年9月洪水の誤差評価地点における流量の再現結果を図-9に示す。誤差の収束値はCバンドレーダの方が優れていることが示されたが、流量のハイドログラフでは、式(9)で求めた Nash-Sutcliffe 指標(以降NSEとする)についてCバンドレーダ雨量の計算結果は0.988、地上観測雨量の計算結果は0.967といずれも相当高い値となった。一方、洪水予測において重要となるピーク流量については、いずれも過小評価であるものの、Cバンドレーダ雨量がより近い値となっている。

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ave})^2} \quad (9)$$

ここに、 E : Nash-Sutcliffe 指標、 n : データ数、 Q_{oi} : 時刻 i における観測流量(m^3/s)、 Q_{ci} : 時刻 i における計算流量(m^3/s)、 Q_{ave} : 観測流量の平均値(m^3/s)である。

5. 3 誤差評価地点以外における再現性

パラメータ最適化を図った対象地点以外において流量の再現性を確認した。安倍川流域には誤差評価地点とした手越観測所以外に本川の上流部に牛妻観測所、流域西部を流れる支川である藁科川に奈良間観測所があり、この2地点における流量の再現結果が図-10である。牛妻観測所における流量の再現結果は、Cバンドレーダ雨量を用いた結果と地上観測雨量を用いた結果の両方が観測流量よりかなり過大になっている。ただし、手越、牛妻、奈良間の3地点における水収支から観測流量の精度に問題があることも考えられた。奈良間観測所における再現流量は、Cバンドレーダ雨量を用いた結果は精度良く再現できておりNSEは0.918であったが、地上観測雨量を用いた結果は過小評価になっておりNSEは0.751であった。これは流域西部の藁科川の降雨を地上観測雨量が空間的に正確に表現できていないことによるものと考えられる。

上記に示した2011年9月洪水の事例のみでなく8洪水すべての3観測地点における流量の再現性をNSEを用いて表-3に示した。なお、NSEが0.7以上で地上観測雨量とCバンドレーダのうち再現性が高い方を太字で示している。誤差評価地点である手越観測所では洪水によって異なるものの地上観測雨量とCバンドレーダのどちらもNSEが高い。一方で地上雨量観測密度が比較的疎である奈良間観測所の流量に着目すると7洪水でCバンドレーダの方が再現性が高いことが確認された。牛妻観測所では全体的に再現性が低く、実測流量の信頼性をする必要のあるものと考えられる。

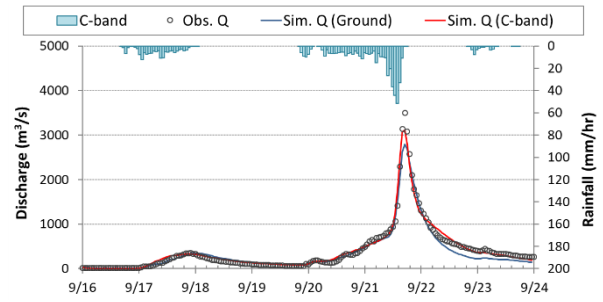
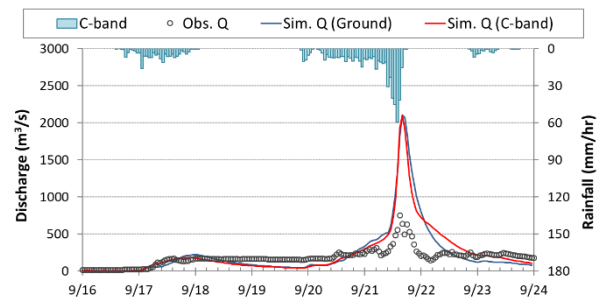
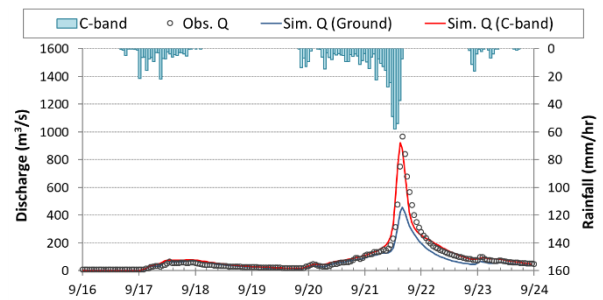


図-9 誤差評価地点(手越)における流量の再現結果



(牛妻)



(奈良間)

図-10 誤差評価地点以外における流量の再現結果

表-3 8洪水に対する各地点の洪水流量の再現性 (NSE)

	手越地点		奈良間地点		牛妻地点	
	地上	C-band	地上	C-band	地上	C-band
1	0.977	0.963	0.847	0.893	0.858	0.842
2	0.969	0.948	0.606	0.751	0.571	0.518
3	0.916	0.985	0.781	0.972	0.159	0.495
4	0.967	0.988	0.751	0.918	-4.953	-3.979
5	0.985	0.983	0.863	0.938	-0.073	-0.568
6	0.969	0.953	0.692	0.823	0.794	0.730
7	0.817	0.790	0.672	0.755	0.556	0.606
8	0.963	0.926	0.590	0.413	0.594	0.537

以上のことから、比較的空間解像度が低い降雨データであっても基準点等の誤差評価の対象となる地点に

おける再現性はパラメータの調整により一定程度確保することができるが、誤差評価地点以外においては空間解像度が高い降雨データを使用する方が再現性が高くなることが示された。

6. まとめ

本研究では、安倍川流域における地上観測雨量の誤差を1観測所当たりの代表面積から評価した上で、流域平均雨量をCバンドレーダ雨量と比較評価した。さらに土研分布モデルのパラメータを最適化することでキャリブレーションに起因する誤差を最小にした条件下で地上観測雨量とCバンドレーダ雨量の洪水予測に対する有用性を明らかにした。

土研分布モデルのパラメータ最適化に基づいた降雨データの評価では、最適化計算における誤差の収束結果から地上雨量観測とCバンドレーダ雨量の収束値の違いを明確に示すことができ、Cバンドレーダ雨量の方が再現性が高いという結果が得られた。特に支川等を含めた流域全体の解析にはレーダ雨量等の空間解像度の高い面的雨量が必要であることが示された。なお、本研究では1地点のみにおける誤差評価でパラメータの最適化を行ったが、今後の検討として複数の観測地点の誤差を目的関数とした多目的最適化も考えられ、その最適パラメータによる降雨データの影響評価も必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 市川温, 立川康人, 堀智晴, 宝馨, 椎葉充晴: 流出計算で考慮すべき降水空間分布スケールに関する基礎的検討, 水工学論文集, 第46巻, pp. 133-138, 2002.
- 2) M. Sangati and M. Borga: Influence of rainfall spatial resolution on flash flood modeling, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 575-584, 2009.
- 3) D. Zoccatelli, M. Borga, F. Zanon, B. Antonescu and G. Stancalie: Which rainfall spatial information for flash flood response modelling? A numerical investigation based on data from the Carpathian range, Romania, J. Hydrol., 394(1-2), 148-161, 2010.
- 4) 吉野文雄: レーダ水文学, pp.73-78, 森北出版, 2002.
- 5) 宮本守, 松本和宏, 津田守正, 山影譲, 岩見洋一, 穴井宏和: 複数の洪水イベントにおける分布型流出モデルの最適パラメータの推定, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.71, No.4, I_271-I_276, 2015.
- 6) 松本和宏, 宮本守, 山影譲, 津田守正, 穴井宏和, 岩見洋一: 分布型流出モデルのパラメータ同定への数値最適化手法の適用, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.71, No.4, I_277-I_282, 2015.
- 7) pyOpt ウェブサイト:

A STUDY ON FEEDBACK FOR RELIABILITY IMPROVEMENT OF REAL-TIME FLOOD FORECASTING

Research Period : FY2017-2018

Research Team : Water-related Disaster Research
Group

Author : ITO Hiroyuki

MIYAMOTO Mamoru

Abstract : Recent advancements in precipitation observation technology makes possible to precisely describe intensity and temporal-spatial distribution of heavy rainfall which cause severe floods and inundation. Accuracy of flood forecasting is also increased by following the advancement. However, error factors of flood forecasting include structure of a model and calibration except input data. This study focuses on convergence results of errors in parameter optimization of the PWRI Distributed Hydrological Model and the reproducibility of river discharge. Reliability of ground gauge and C-band radar rain-fall is compared in terms of flood forecasting under the condition of minimum error due to calibration. Although the convergence results show that C-band radar is superior than ground gauge, both can re-produce river discharge with higher NSE of 0.9. On the other hand, reproducibility of river discharge with C-band radar is highly superior at other stations than error assessment point. In this sense, grid-based rainfall data is necessary for basin-wide flood forecasting.

Key words : C-band radar, ground gauge, parameter optimization, IFAS, error assessment