

粒子フィルタ適用後の洪水予測挙動に 着目した分布型流出モデルの パラメータ最適化に関する考察

STUDY ON PARAMETER OPTIMIZATION OF A DISTRIBUTED RUNOFF MODEL FOCUSING ON FLOOD FORECAST BEHAVIOR AFTER PARTICLE FILTER APPLICATION

山下大輔¹・渡邊晋也²・鷲尾信哉³

Daisuke YAMASHITA, Shinya WATANABE and Shinya WASHIO

¹正会員 日本工営株式会社 大阪支店流域水管理部 (〒530-0047 大阪府大阪市北区西天満1-2-5)

²正会員 工修 日本工営株式会社 河川計画部 (〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4)

³非会員 日本工営株式会社 河川計画部 (〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4)

気候変動に伴う洪水災害の激甚化を背景に、洪水予測精度の向上が求められている。本研究では、粒子フィルタ (PF) 適用後の洪水予測挙動に着目し、分布型流出モデルのパラメータ最適化手法について検討した。従来のRMSEに基づく最適化では、PF適用後に立ち上がりおよびピーク流量が過小評価となる課題が確認された。複数のパラメータ群の比較により、立ち上がり勾配およびピーク流量を大きめに再現することがPF適用後の精度向上に有効であることを示した。さらに、過小評価を回避するための目的関数として、ピーク過小評価にペナルティを与えた改良版順位合成法の有効性を確認した。別洪水による検証においても同様の傾向が確認され、一定の適用性が示唆された。以上より、PF適用を前提とした洪水予測においては、予測挙動を考慮したパラメータ最適化が重要であることを示した。

Key Words: parameter optimization, RRI model, SCE-UA, particle filter

1. はじめに

気候変動の影響により洪水災害が激甚化・頻発化する中、被害を最小限に抑えるためのソフト対策として、洪水予測の重要性が一層高まっている。

国土交通省は、上流から下流まで縦断的に洪水危険度を把握できるよう、分布型流出モデル、河川不定流モデル、粒子フィルタ¹⁾ (以降、PFとする) を統合した「水害リスクライン」を開発し、2019年から運用を開始した。現在、分布型流出モデルとして、流出と氾濫を一体的に解析可能なRainfall-Runoff-Inundation (RRI)モデル²⁾を導入した「水害リスクラインVer.2.0」の開発を進めている³⁾。

PFは斜面水深等の状態量を補正し、現時刻の再現性を高めるものの、予測時間先の精度は基のモデルに強く依存する。流出解析モデルのパラメータの最適化ではSCE-UA法⁴⁾等の最適化アルゴリズムが一般的に採用され、過去の洪水を概ね再現できる流出解析モデルのパラ

メータが得られるものの、PF適用後にピーク部分や立上り部分を過小となる傾向があるなど、必ずしもPF適用に適したパラメータが得られないことが課題であった。PF計算は多くの粒子を並列化計算する必要があることと、データ同化のための計算〜PFによるデータ同化〜予測計算を1 ステップ (水害リスクラインの場合は10 分) として、1 つの洪水イベントを逐次計算する必要があるため計算の負荷が非常に大きい。このことからPF計算結果を対象に流出解析モデルのパラメータを最適化することが困難である。

従来の分布型流出モデルのパラメータ最適化は、再現計算における適合度 (RMSE等) を評価指標としたものが一般的である。しかしながら、粒子フィルタを適用した洪水予測では、予測精度が初期条件補正後の挙動に依存するため、再現計算時の適合度が必ずしも予測精度の向上に直結しない場合がある。すなわち、従来の波形全体の適合度を重視した最適化とは異なり、PF適用後の予測精度に直接関与する挙動に着目した最適化が必要である。本研究ではこの点に着目し、PF適用後の洪水予測に

において問題となる立上り部およびピーク付近の過小予測を回避する観点から、これらの区間における再現性を重視した評価軸を導入することで、洪水予測に適したパラメータ最適化手法を提示する。

2. 方法

(1) 流出モデル

本論文では流出解析モデルとして水害リスクラインで採用されているRRIモデルを用いた。最適化の対象パラメータは表-1のとおりとした。河道のパラメータについては実際の河道形状と流域面積の関係を基に作成したパラメータを採用した。

メッシュサイズは250 mとし、地盤高データは国土地理院の基盤地図情報を用いた。降雨データは国土交通省の同時刻合成レーダー雨量を用いた。降雨データの時空間解像度は、それぞれ10 分と1 kmである。

(2) 対象流域

広島県を流れる芦田川水系に位置する八田原ダム地点（流域面積241.6 km²）を検証地点とした。水害リスクラインでは観測所の水位予測が目的となるが、本論文では精度指標の整理や目的関数の検討を目的とすることから、HQ式の誤差の影響を回避するためにダム地点流量を対象とした。流域内の土地利用は森林の占める割合が高く、次いで水田の割合が高いことから地質+その他、水田、市街地の7 分類を行い、分類毎にパラメータを設定した。（図-1参照）

(3) 対象洪水

パラメータの最適化対象洪水は既往最大流入量となった平成30年7月洪水とした。また得られたパラメータの妥当性を令和2年7月洪水と令和3年8月洪水で検証した。

(4) 一次・二次パラメータ群の作成

本検討は最適なパラメータを求めることが目的ではなく、様々なパラメータ群のPF計算時の挙動の分析が目的である。またRMSEのみを目的関数とした場合は過小評価傾向のパラメータが生成されやすいことから、一様乱数で生成した4500ケースのパラメータについて、実績流量、実績流量の1.1倍、実績流量の1.2倍に対してRMSEが良好となる50ケース（計150ケース）を一次パラメータ群としてそれぞれ抽出した。

この150ケースのパラメータの計算結果を、RMSE、NSE、ピーク流量誤差、立上り勾配誤差率で総合評価し、PF計算対象として20ケースを二次選定した。

(5) PF計算

PF計算の概要は以下のとおりとする。同化対象パラ

表-1 最適化対象パラメータ

パラメータ名	変数名	探索範囲	備考
斜面粗度係数	n_s	0.03～3.00	表層地質毎
土層厚(m)	S_d	0.05～3.00	表層地質毎
飽和空隙率	γ_a	0.50	固定
飽和透水系数	k_a	0.01～0.50	表層地質毎
不飽和空隙率	γ_m	0.05～0.49	表層地質毎
透水系数比	β	2～30	表層地質毎
河道粗度係数	n_r	0.001～0.100	
河川・斜面閾値	riv_thresh	3～50	

地点	流域面積 (km ²)	花崗岩	流紋岩	砂	泥岩	その他	水田	市街地
八田原ダム	241.6	48.3%	6.5%	20.0%	12.4%	1.4%	9.3%	2.0%



図-1 八田原ダム流域図と地質・土地利用分類

メータは斜面水深 h_s とした。これは土壌水分量が直接観測できない水分量であることと、実運用においては時間の経過とともに h_s の誤差が大きくなるためである⁵⁾。また、データ同化時間は計算精度と計算の安定性から3 時間とした。予測計算時間6 時間と計算ステップ10 分は実運用の洪水予測システムの設定を採用した。設定幅：0.8 倍～1.2 倍、ノイズ分散：0.06及び粒子数：40は既往の業務において実施した感度分析より設定した。

PF計算では各ステップの計算結果のうち、 h_s （斜面水深）、 h_r （河道水深）、 q_r （河道流量）を次のステップの初期状態ファイルとすることで計算の連続性を確保する。

(6) PF計算結果の精度評価

PF計算結果の精度評価は以下の3 項目とし、予測時間先毎に評価した。洪水予測の結果は避難指示等の判断基準に用いられるため、予測結果が低めとなった場合に危険側の判断を行う恐れがある。そのため過小評価回避率を精度評価指標の1 つとした。

①RMSE：全体の波形誤差を評価。

②ピーク流量誤差：ピーク流量の再現性を評価。

③過小評価回避率：予測結果が観測値を上回る%。安全性の予測を良好と評価したもの。

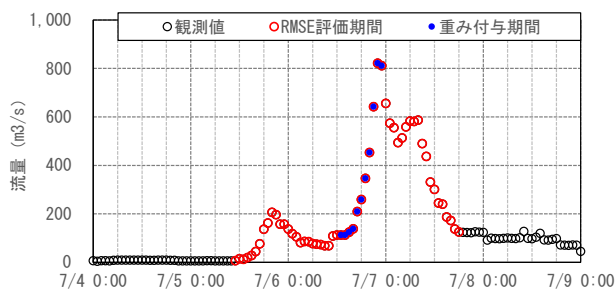


図-2 RMSE評価期間

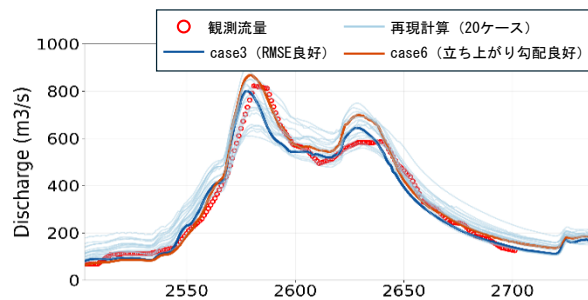


図-3 パラメータチューニング結果

(7) 最適化手法

PF計算時に良好な結果が得られる精度指標を満足できる最適化手法の評価を行う。パラメータの最適化手法は分布型流出解析モデルの最適化の採用事例の多いSCE-UA法を用いた。目的関数は以下の3手法を用いた。

①RMSE単独：洪水の初期立上り部から低減部までを評価期間としたRMSE。

②期間重み付きRMSE：①RMSE単独と同様の評価期間とするが、ピーク前の立上り部からピークまでの重みを4倍としたRMSE。（図-2参照）

③改良版順位合成法：岡峰ら⁶⁾が提案した洪水予測モデルへの適用性を考慮した目的関数で、RMSEとピーク水位誤差のランクをそれぞれ算出し、それら合計したものを評価関数とするものである。本論文では、ピークの過小評価を回避するため、改良版として計算ピーク流量が観測ピーク流量よりも小さい場合はピーク流量誤差に10倍のペナルティを乗じたものを目的関数とした。またここで用いるRMSEは①RMSE単独と同様とした。

表-2 PF計算対象洪水群の精度指標

case	RMSE	順位	ピーク流量 誤差率	順位	立上り勾配 誤差率	順位
case1	36.1	2	-4.7	7	-1.14	6
case2	38.8	3	-11.2	13	-4.35	14
case3	35.1	1	-2.7	4	-0.33	4
case4	40.8	4	-13.9	15	-5.03	16
case5	44.8	7	-21.4	18	-5.24	17
case6	43.7	5	5.6	8	1.95	1
case7	46.1	9	-20.7	17	-6.13	18
case8	47.4	11	-25.6	20	-6.20	19
case9	49.8	13	-22.9	19	-6.59	20
case10	55.7	17	3.5	5	0.05	3
case11	50.4	14	3.5	6	-1.56	7
case12	50.5	15	1.1	3	-0.97	5
case13	43.9	6	-19.8	16	-4.28	12
case14	80.6	20	-1.0	2	-3.35	9
case15	54.7	16	8.9	11	1.29	2
case16	73.9	19	-11.0	12	-4.95	15
case17	57.8	18	0.1	1	-2.27	8
case18	46.2	10	-5.9	9	-3.38	10
case19	45.3	8	-12.1	14	-3.75	11
case20	48.1	12	-7.8	10	-4.31	13

：RMSE良好 ：ピーク誤差良好 ：立上り勾配誤差率良好

3. 結果

(1) PF計算対象パラメータ群の選定

PF計算対象とする20ケースについて、再現計算ハイドログラフを図-3、再現計算時の精度指標を表-2に示す。

RMSEが良好となるcase3は立上り部の乖離は小さいものの、ピーク流量が若干小さめとなっている。立上り部が良好なcase6は立上りの乖離が大きめでピーク流量も大きめとなっている。

(2) PF計算の精度評価

PF計算結果のうちのRMSEが良好だったcase3と立上り部が良好だったcase6のハイドログラフを図-4に示す。case3は立上り部が小さめで、ピーク部分も小さめとなっている。case6は立上り部が良好でピーク部も再現性が良好である。

予測時間先毎の精度評価結果を図-5に示す。RMSEが良好となるcase1～3は、PF計算時はRMSEが最も良好となる結果とならなかった。これはPFが初期条件補正に依存する特性を持つため、立ち上がりおよびピークにおい

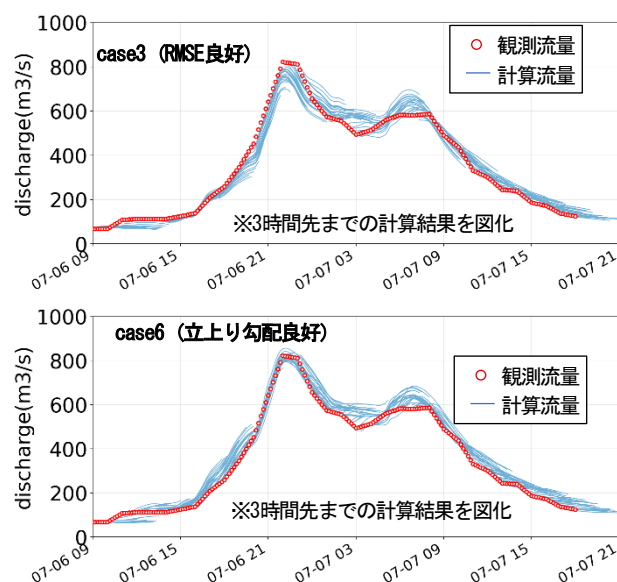


図-4 PF計算結果ハイドログラフ（ヒゲ図）

て過小評価傾向のパラメータでは予測精度が低下するためと考えられる。RMSEが比較的良好なケースは立上り

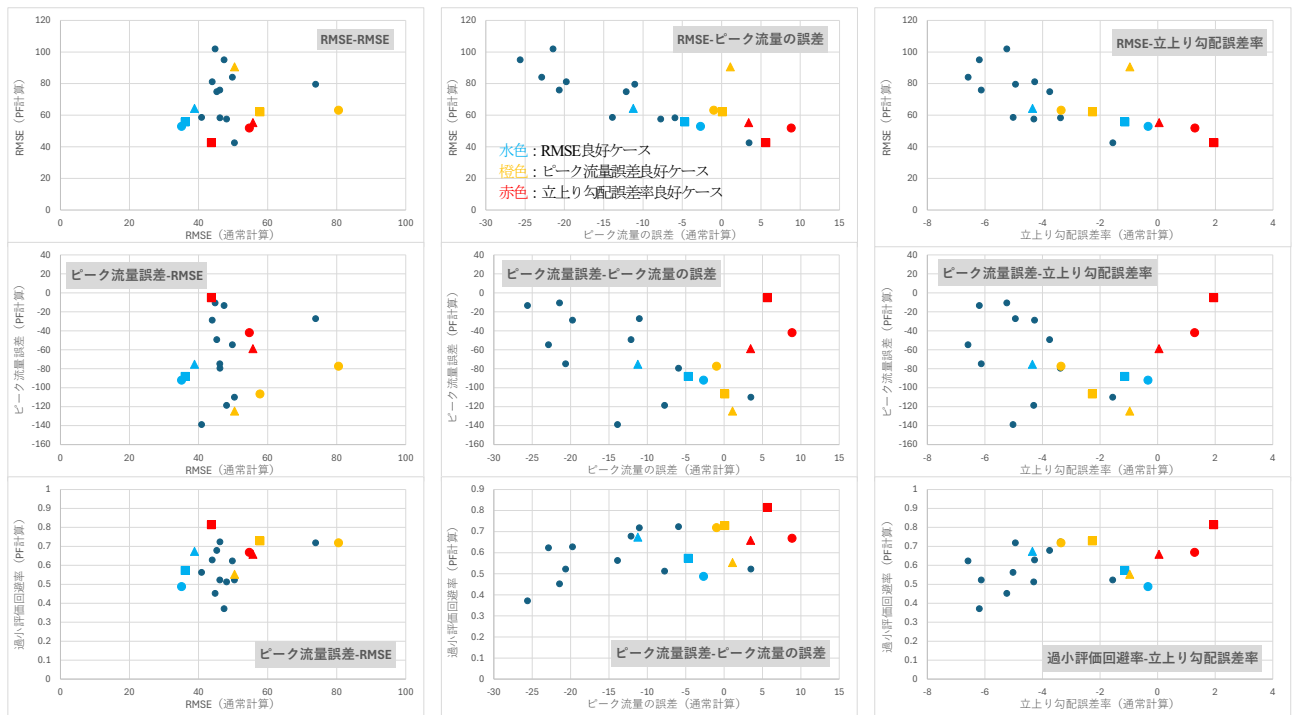


図-6 通常計算の精度指標とPF計算（3時間先予測）の精度指標の関係性

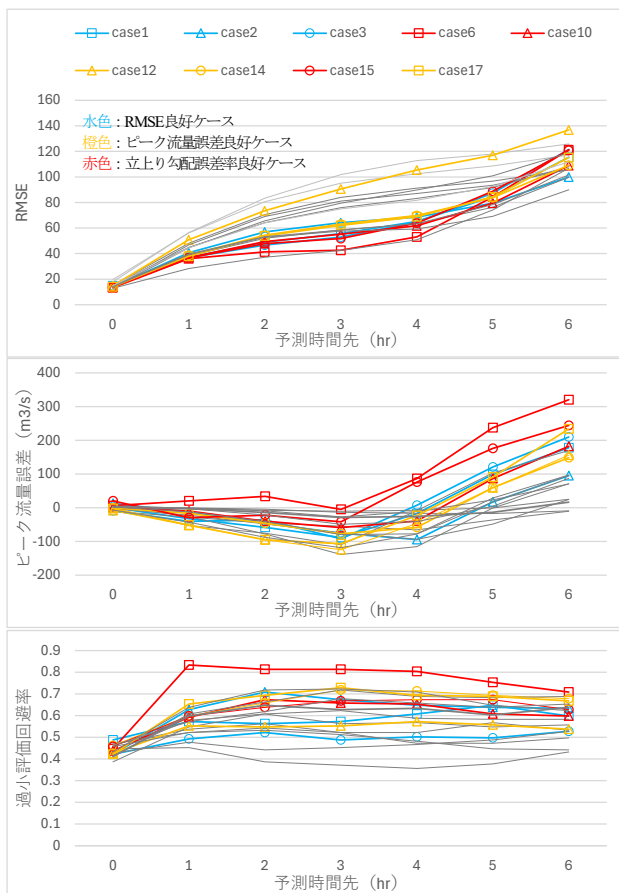


図-5 PF計算の精度評価

勾配誤差率が良好となるcase6, case10, case15で、これらのケースは過小評価回避率が高めでピーク流量誤差も同様に高めになる結果が確認された。

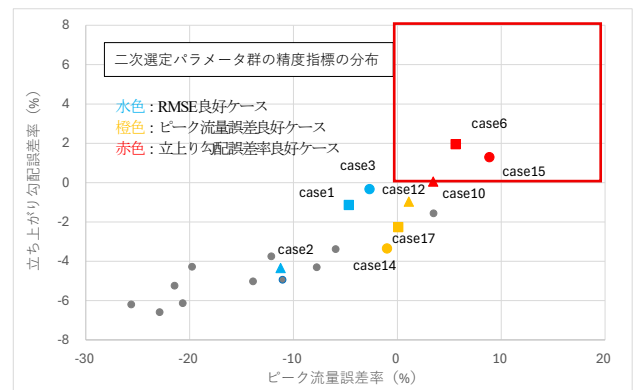


図-7 PF計算の精度評価

(3) パラメータチューニング時とPF計算時の関係性

パラメータチューニング時の精度評価結果とPF計算結果の精度評価の関係性を図-6に示す。この図で精度評価対象としているPF計算結果の精度は3 時間先予測の結果を用いた。パラメータチューニング時のRMSEとPF計算時のRMSEについては明確な関係が確認されなかった。パラメータチューニング時にピーク流量誤差が小さくなるcase12, case14, case17はPF計算結果が観測流量に対して小さくなる結果となった。立上り勾配誤差率が正となるcase6, case10, case15はPF計算時のRMSEは良好となり、特にcase6はピーク流量誤差や過小評価回避率も高くなる結果が得られた。

PF適用後に精度が良好となるケースについて立上り勾配誤差率とピーク流量誤差率に着目した結果を図-7に示す。両指標で正の誤差を持つこと（図-7赤枠）が良好な精度を確保する条件として得られた。

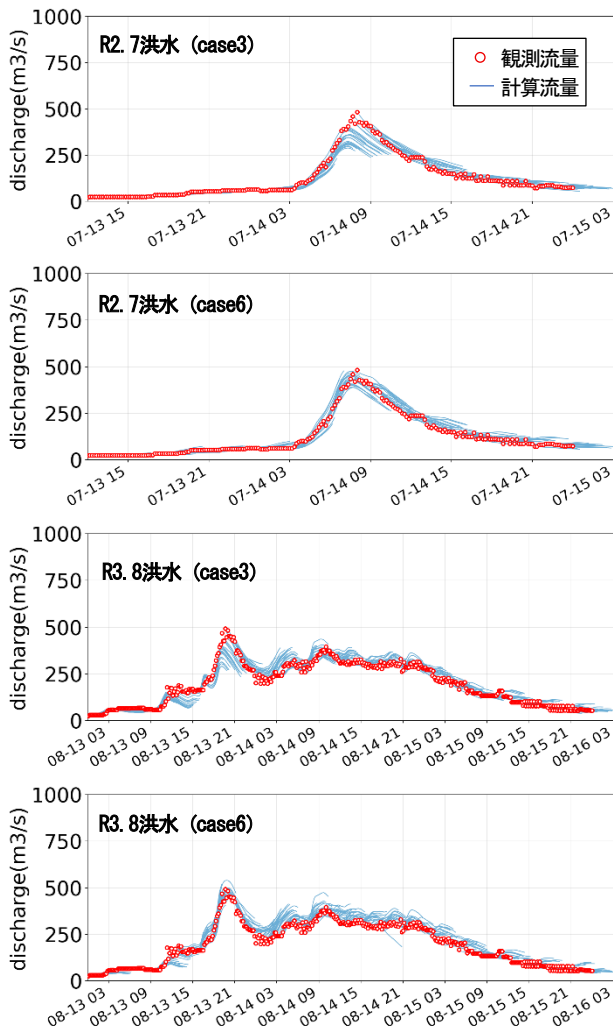


図-8 別洪水を対象としたPF計算結果（ヒゲ図）

(4) 別洪水による検証

洪水予測に適したパラメータとして立上り勾配誤差率が良好だったcase6とRMSEが良好だったcase3のパラメータセットを代表ケースとし、パラメータチューニングの対象外であるR2.7洪水とR3.8洪水についてPF計算を実施した（図-8）。いずれの洪水においても立上り勾配誤差率が良好なcase6の再現性が高いことから、最適化洪水以外でも適用可能である可能性が示唆された。

(5) 目的関数の比較検証

立上り勾配誤差率とピーク流量誤差率が正の誤差を持つことのできる最適化手法を検証した。

a) 精度指標

3つの目的関数（RMSE単独、重み付きRMSE、改良版順位合成法）を用いたSCE-UA法による最適化結果を図-9に示す。RMSE単独は全体的な適合度は高いものの、ピーク流量が過小評価となるパラメータ群が生成されている。重み付きRMSEは立上りのうち400 m³/s以下の範囲においてRMSE単独から再現性が若干向上するものの、ピーク流量部の過小評価は改善されていない。改良版順位

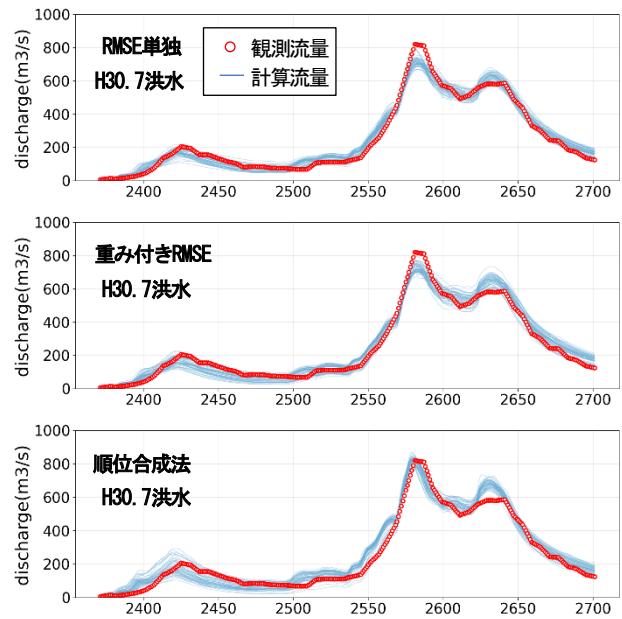


図-9 各目的関数による最適パラメータ群の再現計算結果

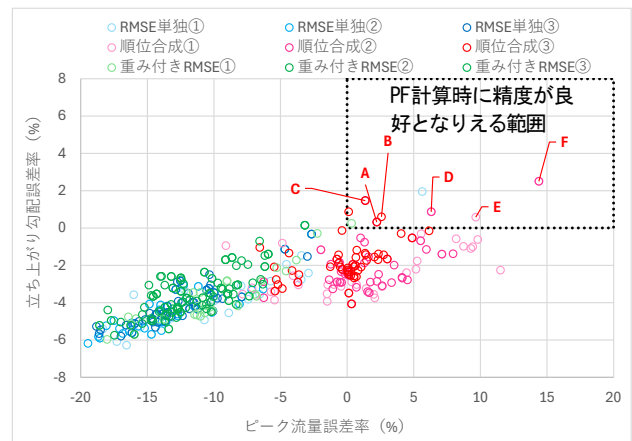


図-10 各目的関数によって得られたパラメータによる流出計算結果の精度指標分布図

位合成法はSCE-UA法では400 m³/s以下の範囲で高めとなるものの、ピーク流量の過小評価は回避できている。

次にこれらの再現ハイドログラフを用いて、ピーク流量誤差率と立上り勾配誤差率の関係性を図-10に整理した。SCE-UA法では目標とする精度が確保されるまで繰り返し計算を行う。ここでは各LOOPにおける上位50位のパラメータ群を用いた流出解析ハイドログラフについて精度指標を整理することで、精度の変化の過程を示しており、凡例の丸数字はLOOP数と対応している。

RMSE単独、重み付きRMSEはいずれも立上り勾配誤差率とピーク流量誤差率がマイナスとなる結果となった。

改良版順位合成法は、ピーク流量誤差率がマイナスになるケースを大きく減らし、かつ立上り勾配誤差率がプラスとなるケースも得られることが確認できた。

b) 再現性の確認

改良版順位合成法で得られたパラメータ群のうち、立

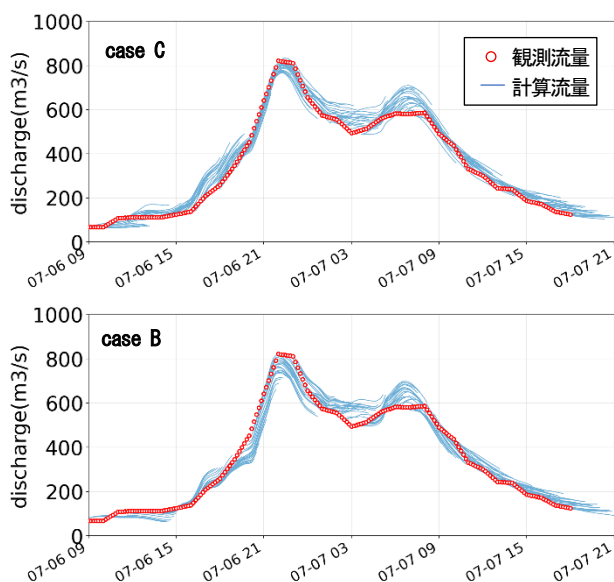


図-11 順位合成法のパラメータによるPF計算結果（ヒゲ図）

表-3 最適パラメーター一覧

ケース	パラメータ名	花崗岩	流紋岩	砂	泥岩	その他	水田	市街地
B	斜面粗度係数	1.94	2.21	0.91	2.89	1.23	1.40	1.05
	土層厚	0.54	1.08	1.82	0.53	0.86	1.98	2.69
	飽和透水係数	0.08	0.07	0.45	0.34	0.17	0.38	0.36
	不飽和空隙率	0.43	0.10	0.39	0.09	0.47	0.41	0.49
	透水係数比	27.36	20.75	13.47	16.78	14.42	21.37	16.52
C	河道粗度係数	0.041						
	斜面粗度係数	1.96	1.11	0.77	1.81	1.72	1.49	1.66
	土層厚	1.14	0.67	2.16	1.98	1.89	2.44	0.94
	飽和透水係数	0.39	0.24	0.31	0.42	0.16	0.32	0.30
	不飽和空隙率	0.32	0.26	0.28	0.32	0.26	0.21	0.32
	透水係数比	16.26	9.66	7.91	15.70	15.73	15.98	13.65
	河道粗度係数	0.043						

ち上がり勾配率とピーク流量誤差率が正となった6ケースのパラメータ群（図-10中の記載ケース）について、PF計算で良好な結果が得られるか検証した。

6 ケースのうち、立上り勾配誤差率が2%程度となるcase C（図-11 上図）とcase Fが立上りとピーク流量の再現性が良好となった。一方で立上り勾配誤差率が0～1%程度のcase B（図-11 下図）等は立上り部が過小評価傾向となった。このことから立上り勾配誤差率を2%程度確保することが効果的と考えられる。

case C と case B の最適パラメータを表-3 に示す。case C は全体的に土層厚が低めに設定されており、斜面貯留が小さく波形が立上りやすいパラメータとなっている。

4. 考察

本研究の結果は、従来の再現計算に基づく最適化では捉えられていなかったPF適用後の予測挙動を考慮する必

要性を示しており、洪水予測モデルのパラメータ最適化の考え方を再整理するものである。

本研究ではPF適用後の精度確保に着目したパラメータ最適化手法について次の検証を行い、洪水予測に適したパラメータ最適化手法を示した。

- ・パラメータの最適化においては、これまで着目されてきたRMSEとピーク流量誤差率に加えて、立上り勾配誤差率を2%程度大きくすることで、PF適用後に低めの予測を回避可能となる。
- ・最も規模の大きな1洪水を対象にパラメータの最適化を行ったが、中小規模洪水において過大評価することもなく立ち上がりを良好に再現することができた。
- ・良好な過小評価回避率となるパラメータを確保するためには、RMSEとピーク流量を考慮できる合成順位法が効果的であり、またピーク流量を過小評価しないような工夫も効果的である。

今後は立上り勾配誤差率自体を加えた目的関数の検証を行い、洪水予測の精度向上を図る。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土交通省中国地方整備局より貴重な水文観測データをご提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 立川康人, 須藤純一, 椎葉充晴, 萬和明, キムスンミン：粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発, 土木学会論文集B1（水工学）, Vol.67, No.4, 1_511-1_516, 2011.
- 2) 佐山敬洋, 岩見洋一：降雨流出氾濫(RRI)モデルの開発と応用, 土木技術資料56-6, pp.18-21, 2014.
- 3) 諸岡良優, 土屋修一, 竹下哲也：洪水予測システムの高度化とVR技術を活用した3次元表示技術の開発, 土木技術資料64-12, pp.16-19, 2022.
- 4) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K.: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, Water Resources Research, Vol.28, No.4, 1015-1031, 1992.
- 5) 中小河川洪水予測モデル開発研究会：中小河川洪水予測モデル構築マニュアル（Version.1）, 水位データ同化, pp.77-79, 2023.3.22.
- 6) 岡峰奈津美, 此島健男子, 米勢嘉智：リアルタイム洪水予測モデルにおける複数の目的関数を用いた最適化手法および自動追加学習手法の考案, 河川技術論文集, 第29巻, pp.85-90, 2023.