

岩尾内ダムにおけるRRIモデルによる 流出予測の再現性向上 —物理分布型モデルでの流域地質分布の考慮—

旭川開発建設部 名寄河川事務所 岩尾内ダム管理支所 ○矢野 雅昭
以後 昭洋

著者らの既往研究により岩尾内ダム流域を対象として、物理分布型モデルのRRIモデルの適用し、規模の大きな複数の既往洪水に対してNash-Sutcliffe係数の平均値が0.79となるパラメータ設定が提案されている。本研究では、更なる再現性の向上のため、SCE-UA法を用いて最適化し、地質区分により流域内で複数のパラメータを使用した。その結果、ダム地点においては既往研究の対象洪水に対し、Nash-Sutcliffe係数の平均値が0.83となり、再現性を向上できた。一方で、ダム湖流入支川の流量観測地点の一つでは再現性が低いことなどの課題があり、現況モデルでの最適化の改善の他に、基岩の涵養効果を考慮する必要性が示唆された。

キーワード：流出モデル、物理分布型モデル、地質分布、SCE-UA法

1. はじめに

平成30年7月の西日本豪雨を受けて、同年12月に有識者により「異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能と情報の充実に向けて」が提言された¹⁾。これによりダム管理において計画規模を超える洪水時に実施される異常洪水時防災操作を念頭においた対応が推進されることとなった。また、令和2年度から、国土交通省所管ダム及び河川法第26条の許可を受けて設置された利水ダムにおいて、治水計画規模や河川・ダム等の施設能力を上回る洪水の発生時に事前放流を行い、洪水被害の防止・軽減を図ることとなった²⁾。

このような、計画規模を超える洪水対応を行うには、未経験の豪雨に対しても妥当な流入量の予測を行う必要がある。そのため、著者ら³⁾は物理分布型モデルが未経験の洪水に対しても適用できる可能性があることから⁴⁾、その一つである降雨流出氾濫モデル (Rainfall-Runoff-Inundation:RRI Model、以降、RRIモデル)⁵⁾を用いた流出予測の検討を行った。その結果、複数の規模の大きな既往洪水の再現計算において、Nash-Sutcliffe係数 (以降、NSE) の値において再現性が良いとされる0.7を超え⁴⁾、平均値で0.79となるパラメータ設定を提案した。しかし、この設定では、大きな流入量の立ち上がりの途中に生じる小規模な降雨による流入量が、観測よりも大きく計算されてしまう課題があった³⁾。

山地河川における流域の地質による河川流況の違いについて、第四紀火山岩類、花崗岩類、第三紀火山岩類、中生層および古生層の違いで区分すると、平水流量や年最大流量に傾向の違いがあることが指摘されている⁶⁾。

岩尾内ダムの流域は複数の地質からなり、当該流域の流出計算においても、地質分布の影響を反映させることで、著者ら³⁾の既往研究課題の解消や、更なる精度向上が行える可能性が考えられる。

本研究は、岩尾内ダム流域の地質分布により、流域内のRRIモデルのパラメータ設定を変えることで、流出予測の再現性を向上させることを目的としたものである。なお、パラメータ設定の検討においては、流出予測の設定パラメータ最適化手法として実績が多い、SCE-UA (shuffled complex evolution method developed at The University of Arizona) 法⁷⁾を用いた。

2. 方法

(1)対象洪水と使用データ

本研究において、パラメータ設定の検討および再現計算の対象とする洪水は、表-1に示す著者らの既往研究³⁾と同じものとし、近年10年以内に発生したダム地点における最大流入量の大きい上位5つの洪水とした。

再現計算と比較する実績の流量データは、天塩川本川のダム地点と、ダム湖直上流の似峡川の似峡水位流量観測所地点 (以降、似峡地点) および天塩川の茂志利水位流量観測所地点 (以降、茂志利地点) のものを使用した。

(2) RRIモデルの設定

a) RRIモデルのパラメータ設定の平面分布

本研究でRRIモデルの計算に用いた標高データ、斜面方向データおよび累積流量データは、著者ら³⁾の既往研

表-1 本検討の対象洪水

検討対象洪水	総流域平均雨量 (mm)	観測最大ダム流入量 (m ³ /s)	計算内容
H23.9洪水	189	219	再現計算
H26.8洪水	300	358	再現計算
H27.7洪水	117	349	再現計算
H28.8洪水	275	248	再現計算
H30.7洪水	172	350	再現計算

究と同様のものを用いた。図-1に、RRI-GUI⁹⁾を用いて可視化したこれらのデータと、降雨の設定例を示す。なお、ここに示す降雨は、2011年9月洪水において観測されたダム流域の雨量観測所4地点における累計雨量を、RRI-GUIのプログラムにより平面補間した値を示している。なお、RRIモデルの計算では平面補間された時系列の降雨を使用している。図-1の累積流量データの図には、後述の検討を行うダム地点、似峽地点、茂志利地点を追記して示している。

流域内の地質分布により、流域内のRRIモデルのパラメータ設定を変えるため、平面的に複数の設定が可能なRRI-CUIを用いた⁹⁾。流域の地質分布は産業総合研究所の公開データ⁸⁾を用い、QGIS⁹⁾を用いてシェープファイルをラスターファイルに変換し、RRIモデルに入力可能な形式とした。

流域の地質区分は、図-2左および表-2に示すとおり16種類あるが、図-2右および表-2の色塗りした行に示すとおり、主要な4種類に縮約した。地質1の「白亜紀-前期古第三紀(K-PG)の付加コンプレックスの基質」は、約1億4,600万~4,000万年前に海溝で複雑に変形した地層(付加体)であり、メラングジュ基質(付加コンプレックス)である⁸⁾。地質2の「中-後期中新世(N2)の海成または非海成堆積岩類」は、約1500万年前~700万年前に形成された地層であり、堆積岩類(海成及び非海成層)である⁸⁾。地質3の「中期中新世-後期中新世(N2)の非アルカリ珪長質火山岩類」は、約1500万年前~700万年前に噴火した火山の岩石(デイサイト・流紋岩類)である⁸⁾。地質4の「中期中新世-後期中新世(N2)の非アルカリ苦鉄質火山岩類」は、約1500万年前~700万年前に噴火した火山の岩石(安山岩・玄武岩類)である⁸⁾。

b) RRIモデル計算におけるパラメータ設定値

RRIモデルは適用する場の条件に応じて、複数の降雨浸透・流出モデルを使い分けることができ、本研究では、著者らの既往研究³⁾と同様に、立川らのモデル¹⁰⁾を使用した。このモデルを使用する場合、河道粗度、斜面粗度以外の降雨浸透・流出に関わるパラメータ設定項目は、土層厚、空隙率 γ_a 、側方の飽和透水係数 k_a 、圃場容量水量に相当する体積含水率 γ_m および体積含水率の減少に伴う透水係数の減少の程度の大きさを表すパラメータ β (不飽和透水係数 $k_m = k_a / \beta$) の5つとなる。

著者らの既往研究³⁾では、既往文献¹¹⁾から河道粗度を0.04 (山地流路)、斜面粗度を0.8 (土地利用形態：山

林)、流域の土質が細礫層程度であることを想定して、空隙率 γ_a を0.35、体積含水率 γ_m を0.20とした。その他のパラメータである土層厚 (sd)、側方の飽和透水係数 k_a および β の値については、それぞれ、いくつか値を想定し、これを組み合わせて、NSEを指標にして適合性の良いものを検討していた。その結果5つの洪水のNSEの平均値が0.7以上の組み合わせは、sd:0.9m k_a :0.05m/s β :8、sd:1.1m k_a :0.10m/s β :8、sd:1.1m k_a :0.15m/s β :4、sd:1.1m k_a :0.15m/s β :8およびsd:1.2m k_a :0.20m/s β :8 (NSE平均値:0.74-0.79)であった。

本研究では、河道粗度、斜面粗度、空隙率 γ_a 、体積含水率 γ_m は、著者らの既往研究³⁾と同様とした。また、 β については、著者らの既往研究³⁾でNSEが0.7以上であったパラメータ設定で、8を使用したものが多かったため同様の値とした。このことから、本研究でSCE-UA法によりパラメータの最適化を行うのは、4種類の地質の土層厚と飽和透水係数となり、合計8つパラメータとなる。

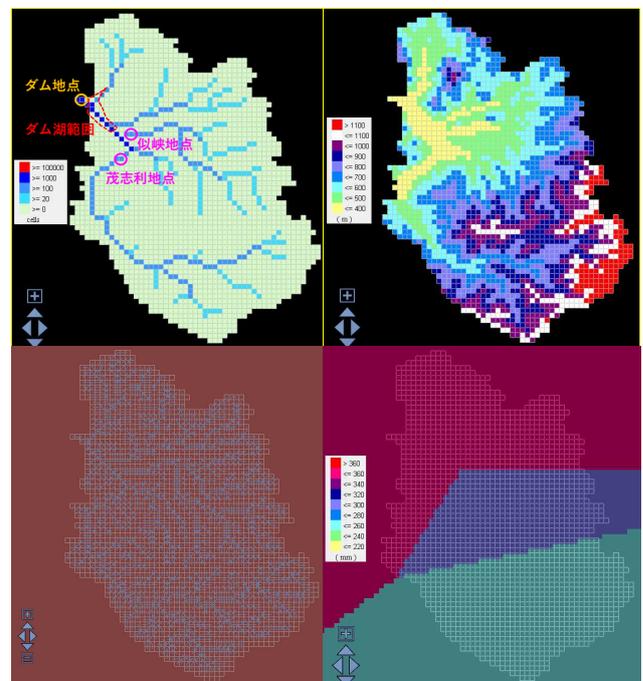


図-1 RRIモデル入力条件【左上：累積流量（流量観測地点を加筆）、右上：標高分布、左下：斜面方向、右下：降雨分布（H23年8月14日~9月8日累計値）】

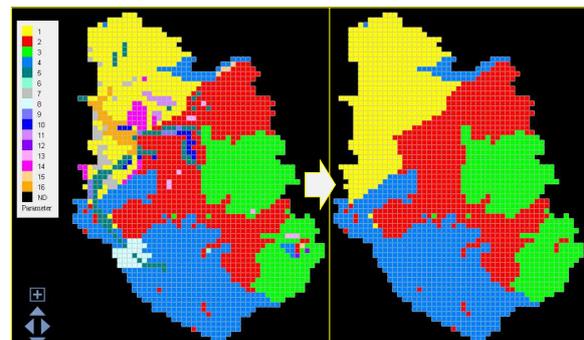


図-2 岩尾内ダム流域地質区分の縮約 (左：縮約前の地質区分、右：縮約後の地質区分)

表-2 岩尾内ダム流域の地質(色塗りは図-2右の4地質に対応)

番号	凡例
1	白亜紀-前期古第三紀(K-PG)の付加コンプレックスの基質
2	中-後期中新世(N2)の海成または非海成堆積岩類
3	中期中新世-後期中新世(N2)の非アルカリ珪長質火山岩類
4	中期中新世-後期中新世(N2)の非アルカリ苦鉄質火山岩類
5	後期更新世-完新世(H)の海成または非海成堆積岩類
6	後期中新世-鮮新世(N3)の非アルカリ苦鉄質火山岩類
7	後期ジュラ紀-前期白亜紀(J3-K1)の付加コンプレックスの玄武岩ブロック(ペルム紀)
8	前期中新世-中期中新世(N1)の非アルカリ苦鉄質火山岩類
9	後期更新世(Q3)の低位段丘堆積物
10	後期更新世(Q3)の中位段丘堆積物
11	前期漸新世-前期中新世(N1)の花崗閃緑岩
12	後期中新世-鮮新世(N3)の苦鉄質深成岩類
13	中-後期中新世(N2)の苦鉄質深成岩類
14	前-中期中新世(N1)の苦鉄質深成岩類
15	後期白亜紀後期-前期漸新世(K22-PG3)の付加コンプレックスの泥岩優勢砂岩泥岩互層
16	湖水・河川・海など

(3) SCE-UA法によるパラメータ設定の推定

SCE-UA法は、概念的な流域モデル定数のキャリブレーションのために考案されたものである。解析の大まかな流れは、①ランダム生成された個体(パラメータ設定)群からなる複数のグループ内で、個体群を目的関数が向上する方向に競争的(良いものが生き残り、より良い子孫を残す概念に基づく)に進化させ、②局所解にトラップされることを防ぐ効果がある、全グループの統合・再分割を行う。これら①と②を繰り返すものである。本研究においては、Pythonのパッケージとして公開されているSPOTPY (Statistical Parameter Optimization Tool) ¹³⁾を用いた。このSPOTPYのSCE-UA法は、RMSE (Root Mean Square Error) を目的関数とし、これが最小化された最適なパラメータ設定となるように、モデルのパラメータ設定の変更、モデルの実行を繰り返すものである。

a) 本研究におけるSCE-UA法の設定

本研究ではSCE-UA法の繰り返し回数は10,000回とし、計算終了までにRSMEが最小となったパラメータ設定を最適化された設定と判断した。最適化の対象とするパラメータである土層厚と飽和透水係数の値の探索範囲は、それぞれ0.5m-5.0m、0.01~1.00m/sとした。また、パラメータの最適化は、表-1に示す5つの既往洪水に対してそれぞれ行った。

b) NSEの算出

5つ既往洪水から最適化された5つのパラメータ設定(以降、洪水パラメータ設定)を、それぞれ5つの既往洪水の再現計算に用い、各洪水パラメータ設定毎にNSEの平均値を算出した。また、ダム地点の他に、似峽地点、茂志利地点においてもNSEの平均値を算出した。

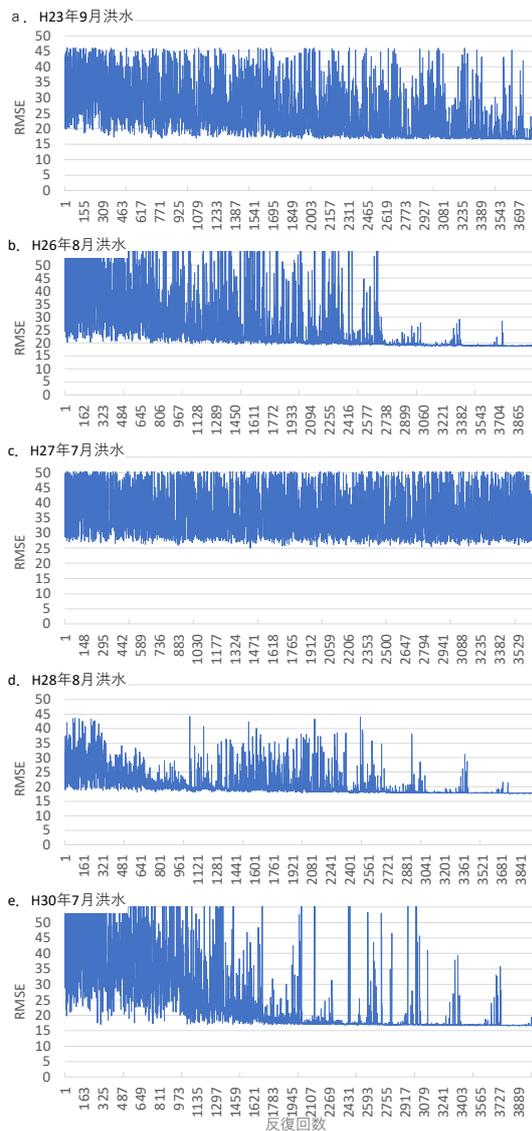


図-3 SCE-UA法によるパラメータ最適化状況

3. 結果

(1) SCE-UA法によるパラメータ最適化結果

図-3にSCE-UA法の反復によるRMSEの変化を示す。また、表-3に、RMSEが最低となったものを最適値と判断した洪水パラメータ設定と、そのRMSEを示す。「b. 2014年8月洪水」、「d. 2016年8月洪水」および「e. 2018年7月洪水」については、RMSEの下げ止まりが見られる。「a. 2011年9月洪水」については、反復に伴いRMSEが減少しているが、「b」、「d」、「e」の既往洪水のように、下げ止まる状態まで至っていない。しかし、表-3に示すとおりRMSEは他の洪水よりも低くなっている。「c. 2015年7月洪水」については、RMSEの変動が収束しておらず、RMSEについても他の洪水よりも大きい。

(2) 各洪水パラメータ設定を用いた再現計算とNSE

a) 各洪水パラメータ設定のNSE

表-3の各洪水パラメータ設定を用いて行った各洪水の再現計算のNSEとその平均値を表-4に示す。これより、ダム地点においてNSEの平均値が最も高い洪水パラメータ設定は、H26年8月洪水によるものであり、再現性が良いとされる0.7以上⁴⁾である0.83であった。また、茂志利地点においても、NSEの平均値も0.73であり、再現性が良くなっているが、似峽地点については0.45であり、再現性が低い。なお、表-4全体のNSEの値の大まかな傾向として、観測地点の中ではダム地点のNSEが最も高く、

表-3 最適化された各洪水パラメータ設定

	地質1		地質2		地質3		地質4		RMSE
	土層厚 (m)	透水係数 (m/s)							
パラメータ H23.9洪水	2.37	0.581	1.15	0.627	1.45	0.520	0.91	0.420	16.55
パラメータ H26.8洪水	1.46	0.517	0.65	0.107	3.48	0.531	0.77	0.094	18.57
パラメータ H27.7洪水	0.52	0.026	0.64	0.831	1.54	0.808	2.15	0.552	25.00
パラメータ H28.8洪水	2.40	0.507	1.97	0.519	1.98	0.315	0.52	0.066	17.71
パラメータ H30.7洪水	1.24	0.326	0.98	0.676	1.05	0.038	1.50	0.501	16.59

次いで茂志利地点、似峽地点となり、似峽地点についてはNSEが0.7を下回るものが多く、再現性が低い。またH27年7月洪水の再現性は、全洪水パラメータ設定のNSEの平均値がダム地点で0.64であり、再現性が低い。

表-4 各同定パラメータを使用した流出計算のNSE

	観測地点	H23.9洪水	H26.8洪水	H27.7洪水	H28.8洪水	H30.7洪水	平均値
パラメータ H23.9洪水	ダム	0.89	0.88	0.56	0.76	0.90	0.80
	似峽	0.71	0.27	0.27	0.41	0.83	0.50
	茂志利	0.87	-	0.14	0.68	0.88	0.64
パラメータ H26.8洪水	ダム	0.85	0.92	0.67	0.80	0.90	0.83
	似峽	0.47	0.63	0.05	0.49	0.60	0.45
	茂志利	0.85	-	0.45	0.76	0.86	0.73
パラメータ H27.7洪水	ダム	0.73	0.86	0.73	0.68	0.91	0.78
	似峽	0.47	-0.15	0.13	0.08	0.69	0.24
	茂志利	0.66	-	0.53	0.74	0.79	0.68
パラメータ H28.8洪水	ダム	0.75	0.84	0.62	0.85	0.74	0.76
	似峽	0.10	0.36	-0.53	0.57	0.34	0.17
	茂志利	0.84	-	0.61	0.79	0.85	0.77
パラメータ H30.7洪水	ダム	0.86	0.85	0.63	0.71	0.93	0.80
	似峽	0.67	0.31	0.24	0.41	0.80	0.49
	茂志利	0.70	-	0.37	0.70	0.87	0.66
平均値	ダム	0.82	0.87	0.64	0.76	0.87	0.79
	似峽	0.48	0.28	0.03	0.39	0.65	0.37
	茂志利	0.78	-	0.42	0.73	0.85	0.70

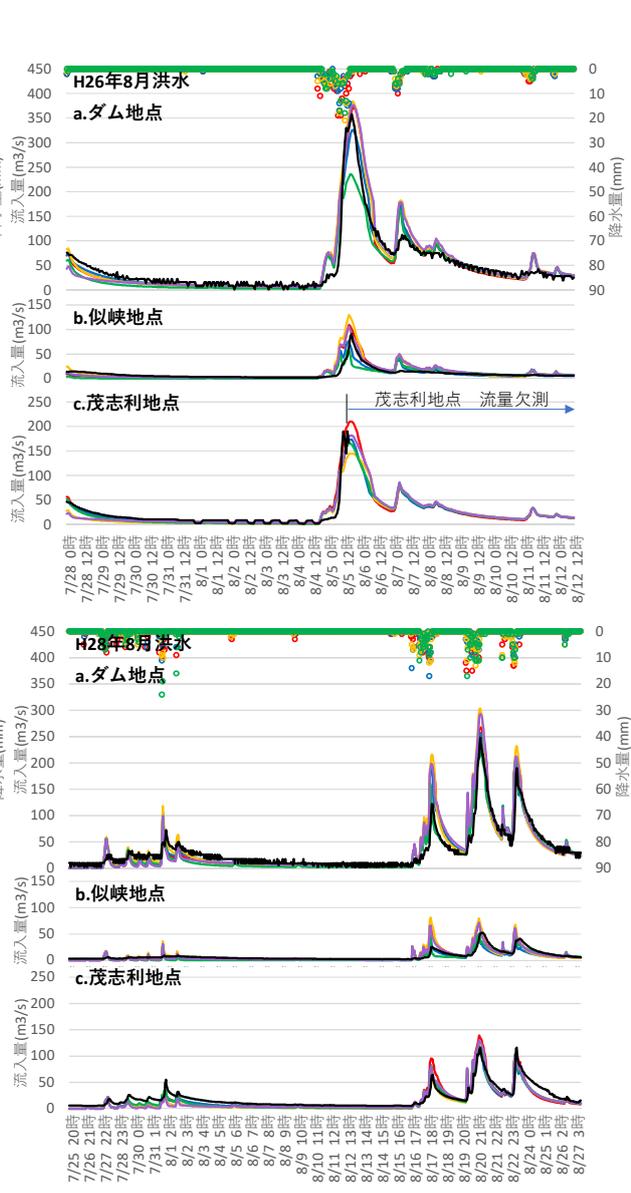
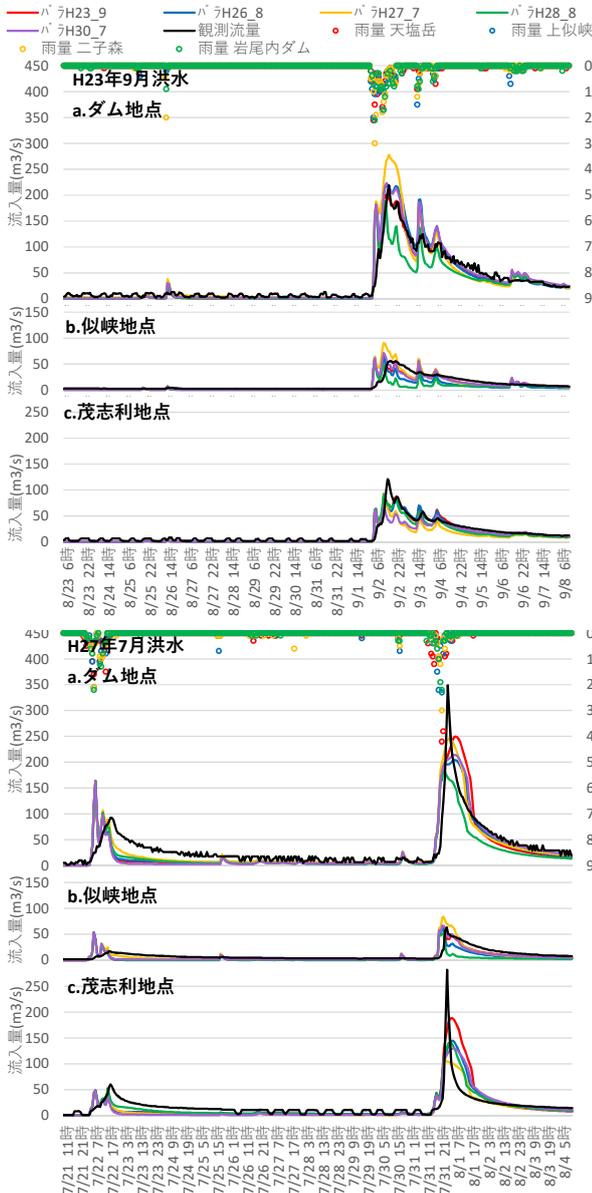


図-4 再現計算結果と実績流量の比較 (H23年9月洪水, H26年8月洪水, H27年7月洪水, H28年8月洪水)

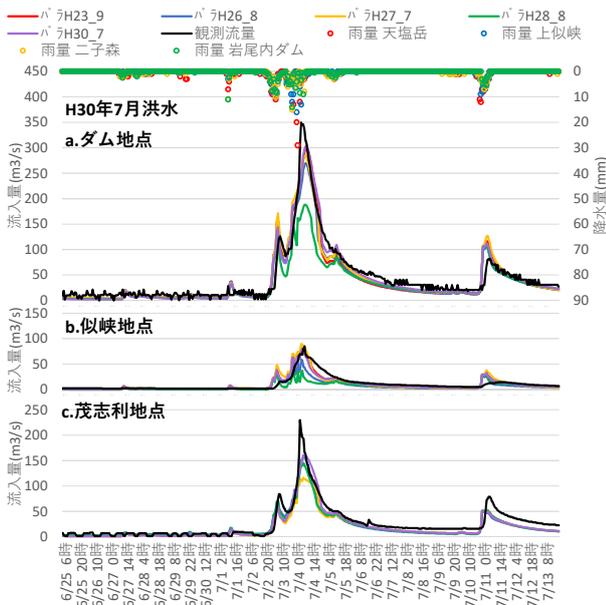


図-5 再現計算結果と実績流量の比較 (H30年7月洪水)

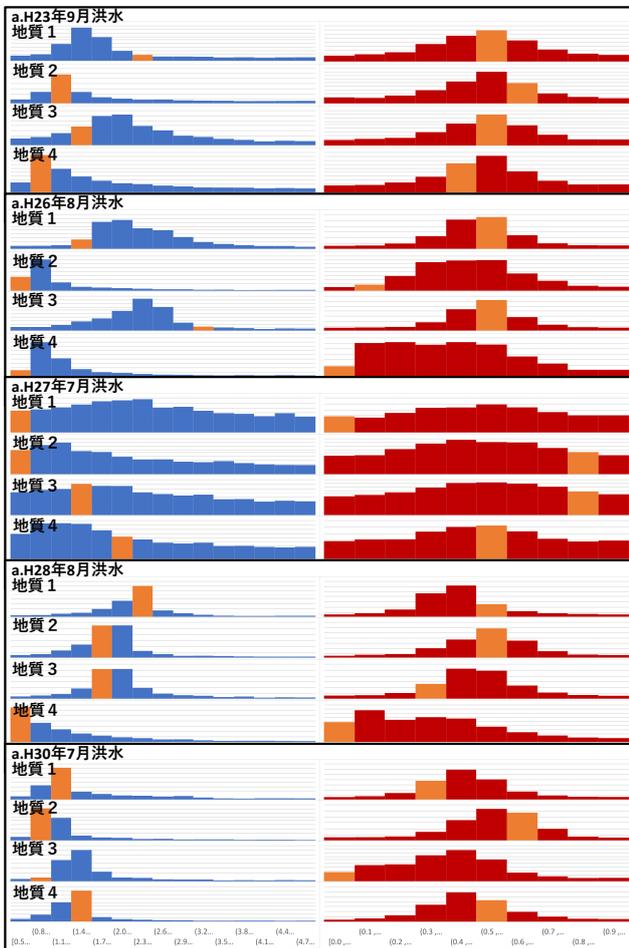


図-6 SCE-UA法による最適化過程のパラメーター値のヒストグラム (左図：土層厚、右図：飽和透水係数、橙色は表-3の最適値がある区分)

b) 実績と再現計算の洪水波形

SCE-UA法により推定されたパラメータ設定を対象洪水の再現計算に適用した結果と実績流量を図-4, 5に示す。最もNSEの平均値が高かったH26年8月の洪水パラメータ

設定に着目すると、ダム地点と茂志利地点においては全体的に実績流量と再現計算が概ね一致しているが、どの洪水パラメータ設定でも再現性が低いH27年7月洪水においては、再現計算の最大流入量は実績流量よりも過小で、実績より洪水が後まで続いている。同じく、どの洪水パラメータ設定でも再現性が低いH28年8月洪水の8月17日の洪水第1波の立ち上がりに対しては、過大となっている。また、似峽地点の再現については、ほとんどの洪水でピーク流量後の減衰が実績流量よりも大きい傾向にあり、似峽川の特徴であるピーク流量後の減衰の遅さを再現できていない。

著者ら³⁾の既往研究で確認された、大きな流入量の立ち上がりの途中に生じる小規模な降雨の流況が過大に計算される課題については、例えば、H23年9月洪水のダム地点において、9月3～4日の降雨時の再現計算が実績流量よりも大きく、解消していない。なお、茂志利地点と似峽地点についても、同降雨時の状況を確認すると、似峽地点の方が再現計算が過大な傾向が大きいようにみえる。

4. 考察

(1) 最適化過程からみたパラメータ設定の妥当性

SCE-UA法によるパラメータ設定の検討の結果、ダム地点においては、H26年8月の洪水パラメータ設定を使用した場合のNSEの平均値が最も高かった。このパラメータ設定の特徴として、表-3に示すとおり地質1と地質3の土層厚が、地質2と4よりも大きいことが上げられる。このような特徴を持つ洪水パラメータ設定が妥当か検討するため、SCE-UA法の最適化過程のパラメータ値のヒストグラムを用いる。SCE-UA法では、目的関数が向上するようにパラメータ設定を進化させていき、最終的には変数の変化が限りなく少なくなると最適解に収束したと判断される。そのためパラメータが最適値に収束する過程で、理想的にはその値周辺の出現頻度が多くなり、ヒストグラムのピークとして検出されるはずである。図-6にこのヒストグラムに示す。なお、ヒストグラムの橙色に着色したバーはSCE-UA法で、RMSEが最小となり最適値と判断された表-3に示すパラメータ値が含まれる数値帯である。これより、パラメータの中には最適値と判断された値とヒストグラムのピークにズレがあり、完全には一致していないものがあることが分かる。しかしながら、最もNSEの平均値が高くなったH26年8月洪水に着目すると、ヒストグラムのピークにおいても、地質1と3の土層厚が地質2と4よりも大きい値である特徴は同じであり、更にこの特徴は、数値は異なるがH23年9月洪水の最適値およびヒストグラムにも見られる。また、不鮮明ではあるが、H27年7月洪水のヒストグラムおよびH30年7月洪水のヒストグラムにもみられる。そのため、H26年8月の洪水パラメータ設定の4つの地質の関係性は、他の洪水の最適化からも確認される特徴を持っていると判断でき、NSEの

平均値も大きいことから、ある程度妥当なもの判断される。SCE-UA法により検討するパラメータを増やすことや、繰り返し回数を増やすことで、更にNSEが向上するパラメータ設定が出現する可能性も考えられるが、後述する課題と合わせて、今後の課題とする。

(2) 地質、再現計算からみたパラメータ設定の妥当性

NSEの平均値が最も高かったH26年8月の洪水パラメータ設定の土層厚は、地質1、2および4では0.65~1.46mなのに対し、地質3では3.48mと厚かった。小杉¹⁵⁾は、花崗岩からなる地質のある流域において、土層厚が流域出口付近では薄く(約0.2m)、中腹部では比較的厚く(約1m)、尾根部で若干薄い(0.4~0.6m)ことを確認している。これと比べるとH26年8月の洪水パラメータ設定の地質1、2および4の土層厚については、想定できるものであるが、地質3の土層厚は実際よりも過大である可能性がある。本研究ではRRIモデルの飽和・不飽和流れのモデルを用いて、降雨浸透・流出を再現しているが、山地河川においては、基岩の地質が降雨流出に影響することが指摘されている^{6,13,14)}。虫明ら⁹⁾は地下水流出が支配的と考えられる平水以下の流量については、流域の地質要因の規定力が卓越し、第四紀火山岩類、花崗岩類、第三紀火山岩類、中生層・古生層の順に流量値が小さくなり、年最大流量については逆の順で大きくなることを指摘している。また、小杉ら¹⁴⁾は土層からの流出は洪水ハイドログラフを形成するが、降雨後には直ちに消失してしまい、無降雨時の渓流水を直接涵養しているのは基岩に浸透した雨水であると指摘している。実際の岩尾内ダム流域においても、似峽地点の洪水ピーク後の減衰が遅い流況であり、新第三紀の火山岩である地質3および4に基岩の涵養効果がある可能性がある。小杉¹³⁾は土層厚が透水性基岩への涵養に果たす役割について、土層が降雨を一時的に貯留して波形を穏やかに変換した上で系外に放出する「バッファー」の役割を果たしていることを示している。つまり、降雨強度に対して土層が厚く貯水能力が大きい場合には、降雨波形が十分穏やかなものに変換されるため、浸透水の全てが透水性の低い基岩に浸透し基底流を涵養することになるが、土層が薄く変換能力が不十分な場合には、浸透水の一部が飽和側方流や地表面流となって直接流出成分を形成することとなる¹³⁾。本研究の最適化において、地質3の土層厚が大きくなったのは、土層が厚いことで降雨を一時的に貯留し、流出波形を穏やかにする状況が、実河川の基岩の涵養効果をいくらか疑似したためだと推察される。

似峽川の流況の再現性が低い(基底流が少なく算出される)状況や、著者ら³⁾の既往研究で確認された、ダム地点における大きな流入量の立ち上がりの途中に生じる小規模な降雨の影響が過大に計算される原因は、基岩の涵養作用を考慮していない影響である可能性がある。今後、精度向上のため、現況モデルでのパラメータの最適

化を改善する他に、山体地下水モデル¹⁴⁾など基岩の涵養作用を考慮したモデルの適用を検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、岩尾内ダム流域を対象に、RRIモデルを用いた降雨流出の再現性を向上させることを目的に、SCE-UA法を用いて、流域の地質分布を考慮したパラメータ設定の検討を行った。その結果以下のとおりである。
①流域内で複数の土層厚、飽和透水係数となるパラメータ設定を検討し、近年発生した規模の大きい5つの既往洪水の再現計算を行った。その結果、Nash-Sutcliffe係数が平均で0.83となり、流域内で単一の設定を使用した著者ら³⁾の既往研究での0.79を超え、精度が向上した。
②このパラメータ設定では、新第三紀火山岩の1つの地層の土層厚が3mを超える設定となり、実際よりも過大であることが考えられたが、使用したモデルでは考慮されない基岩の涵養効果をいくらか疑似したことが推察された。今後、更なる精度向上のために、現況モデルでのパラメータの最適化の改善の他に、基岩の涵養効果を考慮するモデルを使用する必要性が示唆された。

参考文献

- 1) 国土交通省, 異常豪雨の頻発化に備えたダムの洪水調節機能と情報の充実に向けて(提言), 2018, 12.
- 2) 国土交通省, 事前放流ガイドライン, 2020, 4.
- 3) 矢野雅昭・滝口真澄: 岩尾内ダムにおけるRRIモデルによる流出予測の検討について, 北海道開発技術研究発表会論文, 第64回, 2020, 2.
- 4) 日本学術会議, 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価 公開説明(質疑)回答, 2011.9.28.
- 5) Takahiro, S.: Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model User's Manual ver1.4.2.4, ICHARM PWRI, 2021, 9.
- 6) 虫明功臣・高橋裕・安藤義久: 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果, 土木学会論文集, 第309号・1981, 5.
- 7) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K.: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, Journal of Hydrology, 158, pp.265-284, 1994.
- 8) 産業技術総合研究所, 地質調査総合センター, <https://gbank.gsj.jp/datastore/>
- 9) QGISプロジェクト, <http://www.qgis.org/>
- 10) 立川康人・永谷言・寶馨: 飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, Vol. 48, pp7-12, 2004, 2.
- 11) 土木学会 水理公式集. 社団法人 土木学会, 1999.
- 12) Houska, T., Kraft, P., Chamorro-Chavez, A. and Breuer, L.: SPOTting Model Parameters Using a Ready-Made Python Package, PLoS ONE 10(12): e0145180. doi:10.1371/journal.pone.0145180, 2015, 12.
- 13) 小杉賢一郎: 森林の水源涵養機能に土層と透水性基岩が果たす役割の評価, 水文・水資源学会誌, Vol. 20, No. 3, 2007, 3.
- 14) 佐山敬洋・小杉賢一郎・岩見洋一: 山体地下水の流動を表現する分布型降雨流出モデルの開発, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 71, No. 4, I_331-1336, 2015.