SCE-UA法を適用した分布型流出モデルの 代表パラメータ設定手法に関する検討

STUDY ON PARAMETER IDENTIFICATION OF DISTRIBUTED
RUNOFFMODEL USING SCE-UA METHOD

松原隆之¹・土田和稔²・日比谷正則³

Takayuki MATSUBARA, Kazutoshi TSUCHIDA, and Masanori HIBIYA

¹正会員 工修 電源開発株式会社 土木建築部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

²正会員 株式会社開発設計コンサルタント (〒101-0021 東京都千代田区外神田2-16-2)

³非会員 株式会社JPビジネスサービス (〒135-8451 東京都江東区深川2-2-18)

In recent years, rainfall forecasting technologies and runoff simulation models have been advanced remarkably and some dam inflow prediction methods using a distributed runoff model have been applied to dam operations practically.

In this study, the way to identify parameters of the distributed runoff model using the temporary parameters generated in the calculation process of the SCE-UA method (Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona) has been proposed and the applicability has been examined using the distributed runoff model applied to the Shingu river basin. Analyzed dam inflow identified parameters using this way shows good agreement with the observed one in many flood events.

Key Words: *parameter identification, distributed rainfall runoff model, SCE-UA*

1. はじめに

近年、全国で異常な降雨・出水の頻度が増加する傾向にある。電源開発㈱は全国に34ダムを有しており、今後、「流域住民の安全・安心」と「水資源の有効利用」の両面について継続して実現していくためには、より効率的で弾力的な貯水池運用が求められ、信頼性の高いダム流入量予測技術の導入が必要となる。

最近では、降雨予測と流出解析モデルを組合せてダム流入量を直接予測し、実際のダム運用に活用する事例も増えつつある。ダム流入量予測に適用する流出解析モデルについては、流域を細分化し、植生、地形、地質、降雨分布特性等をより緻密に表現することで、高い再現性を確保できる分布型流出モデルの研究が進められている。流出解析モデルの再現性はパラメータの設定精度に大きく影響され、従前、技術者が試行錯誤的にパラメータを同定していたが、分布型流出モデルはパラメータの種類や計算点が増加するためパラメータ同定が煩雑となるといふ短所がある。ただし、最近では、モデルパラメータを計算機で同定する手法が開発されており、例えば、SCE-UA法¹⁾、遺伝的アルゴリズムによる手法²⁾、進化戦略による手法³⁾、群知能最適化手法⁴⁾等がある。

SCE-UA法を適用したパラメータ同定に関する研究として、高崎他⁵⁾は、都市型貯留関数モデルにおいてSCE-UA法によるパラメータ同定を実施し、SCE-UA法の有効性を評価している。また、檜山他⁶⁾は、新宮川水系熊野川流域を対象に、SCE-UA法による分布型流出モデルパラメータ同定と再現性評価を実施し、様々な規模の洪水イベントに対し、共通的に再現性の高い代表パラメータが存在する可能性を示唆している。

本検討では、ダム流入量予測精度向上検討の一方策として分布型流出モデルの再現性を改善することを目的に、複数の出水イベントに対して共通的に再現性の高い代表パラメータをSCE-UA法を用いて設定する手法を考案し、新宮川水系熊野川流域をモデルにその適用性を評価した。

2. 検討手順

本検討の手順を図-1に示す。まず、新宮川水系熊野川流域を対象とした分布型流出モデルを構築した後、予備検討として2つの代表出水を対象にSCE-UA法によるパラメータ同定を実施し、パラメータ同定過程で生み出される暫定パラメータとその再現性からSCE-UA法による同定過程の特徴を確認した。次に、同定過程で確認された

図-1 検討フロー

図-2 能野川流域におけるダムの位置

図-3 熊野川流域のダムと総貯水容量

特徴を考慮した形で、複数イベントに対し再現性の高い代表パラメータの設定手法を検討した。最後に、考案したパラメータ設定手法を適用したパラメータ同定と複数イベントに対する再現性を確認し、考案したパラメータ設定手法の適用性を評価した。

3. 分布型流出モデルの構築

(1) モデル流域の概要

新宮川水系熊野川のダムを図-2に示す。熊野川

図-4 流域モデル模式図（流水線網）

図-5 モデル概念及び主要パラメータ

は、紀伊半島南部を流れる流路延長183km、流域面積2,360km²の1級河川で、流域内に治水ダムはなく、11ダムすべてが利水専用ダムである。これらのダム群の内、電源開発㈱が発電を実施しているダムの概要を図-3に示す。池原ダム及び風屋ダムは総貯水容量が相対的に大きく弾力的な貯水池運用による効果が特に期待できる。

(2) モデルの構築

本検討では、市川他⁷⁾及び椎葉他⁸⁾の分布型流出モデルを適用した。この分布型流出モデルでは、流域に降った雨が斜面を流れる過程と、斜面から流れ込んだ水が河道を流れる過程を組合せて流域全体の水の流れを計算でき、ダム地点や任意の地点での河川流量を出力することができる。なお、斜面部は飽和・不飽和流れを考慮した kinematic wave モデルを、河道部は地表面流の kinematic wave モデルを適用している。また、国土数値情報の河道及び標高データ（250mメッシュ）をもとに水文モデル構築システム GeoHyMoS⁸⁾⁹⁾を用いて、流域モデルを作成した。構築した流域モデル、モデル概念図及び主要モデルパラメータを図-4及び図-5に示す。

(3) 流出解析条件

本検討では、気象庁のレーダーアメダス解析雨量を電源開発株が設置した地上雨量計の観測雨量で補正した雨

図-6 SCE-UA法の同定計算概略フロー

表-1 同定パラメータの初期値及び上下限值

	初期値	下限値	上限値
n	0.6	0.1	0.9
km(m/s)	0.01	0.0001	0.1
d(m)	0.0001	0.0001	0.3
dm(m)	0.45	0.0001	0.7
	4	1	100
D(m)	1.0	-	-

量（以下、解析雨量という）を上記で設定したモデルに入力して、対象ダム地点における流量（以下、計算流量という）を出力した。なお、解析雨量は、レーダーアメダス解析雨量と地上雨量の雨量比を各観測ポイントで算出し、メッシュ毎に空間内挿した雨量比をレーダーアメダス解析雨量に乗じて作成した。対象ダムの上流域に電源開発株式が管理する別のダムがある場合は、上流ダムの実績放流量を河道上流端の境界条件として与えて流出計算を実施した。なお、他社ダムはモデル化していない。

(4) モデルの再現性評価指標

モデルの再現性は、対象ダム地点における計算流量と実績流量を用い、Nash-Sutcliffe指標（以下、NS指標という）により評価することとした。一般的に、NS指標が0.7以上の場合、再現性が高いと考えることができる。NS指標の算出方法を以下に示す。

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{ob} - Q_{cal})^2}{\sum (Q_{ob} - \bar{Q}_{ob})^2} \quad (1)$$

ここに、 Q_{ob} と Q_{cal} はダム地点における毎正時の観測流量及び計算流量で、 $\bar{Q}_{ob}$ は観測流量の平均値である。

4. SCE-UA法によるパラメータ同定過程の特徴

SCE-UA法によるパラメータ同定計算の概略フローを図-6に示す。まず、同定パラメータの上下限值、NS指標の収束条件、出力条件等の条件を設定して同定計算を開始する。同定計算では、NS指標が1.0に収束するよう

図-7 同定計算過程におけるNS指標の推移

図-8 同定計算過程における斜面粗度係数nの推移

図-9 同定計算過程における透水係数kaの推移

に、暫定パラメータの発行、暫定パラメータによる流出解析、NS指標による再現性評価を繰り返し実施する。NS指標が収束した時点で計算を終了し、最終的な暫定パラメータを最適パラメータとして得ることができる。

予備検討では、池原ダム流域（池原ダムから坂本ダムまでの流域）を代表として、パラメータ同定過程で生成される暫定パラメータとそのNS指標の推移を確認した。パラメータ同定は、2007年7月洪水（台風4号）と2011年7月洪水（台風6号）の2イベントを対象に実施した。同定パラメータの種類、初期値、上下限值を表-1に示す。なお、本検討では、計算機能力を考慮しパラメータは流域で様として同定計算を実施した。

同定計算過程におけるNS指標、斜面粗度係数n、透水係数kaの推移を図-7～9に示す。いずれのイベントも、同定計算回数100回程度まではパラメータが大きく変動しているが、200回程度以上となると変動範囲が減少して、最終的にNS指標が一般に再現性が良いとされる0.7以上でパラメータが収束している。ただし、図-8の斜面粗度係数nの収束値は、2007年7月洪水が約0.3、2011年7月洪水が約0.9となり、2つのイベントで大きく異なっている。なお、その他のパラメータの挙動も概ね同様であることを確認している。上記の原因としては、モデル誤差や、出水毎の観測誤差等を含めて最適化することが影響しているものと考えられる。上記より、個々の出水イベントにおいてSCE-UA法で同定された最終的な最適パラメータは、他の出水イベントに対して必ずしも最適パラメータではないことが分かる。

一方、図-7～9の収束前段階（概ね計算回数200回以下

図-10 代表パラメータ設定の概略フロー

の範囲)で、2イベントのNS指標が0.7以上、かつ、パラメータの差が小さい場合があることが確認でき、斜面粗度係数 n に着目した場合、最適値は概ね0.2～0.9の間、特に2イベントの斜面粗度係数 n の推移線の重なりが大きい0.4～0.6の範囲にある可能性が高いと考えられる。したがって、同定するパラメータの最適値の存在範囲をある程度特定した上で同定計算を実施することで、暫定パラメータの中から複数イベントで共通的に再現性の高い代表パラメータを抽出できる可能性があると考えられる。

5. 代表パラメータ設定手法の検討

予備検討結果から、斜面粗度係数 n の範囲を特定して代表パラメータを設定する手法を図-10に示す。本検討では、熊野川流域が概ね森林に覆われており、森林域の一般的な斜面粗度係数0.6(佐山他¹⁰⁾)を参考に、特定された斜面粗度係数 n の範囲の妥当性評価が可能と考え、斜面粗度係数 n に着目した。詳細を以下に示す。

a) イベント毎の同定計算(1次)

洪水イベントを複数選定し、SCE-UA法でイベント毎に同定計算を実施する。同定計算を実施する際の各パラメータの上下限値は差を大きく設定し、同定計算過程で生み出された暫定パラメータとそのNS指標を出力する。

b) 斜面粗度係数範囲の絞り込み(1次)

得られた全計算結果について、斜面粗度係数 n とNS指標に着目し、最適な斜面粗度係数 n の存在範囲を絞り込む。具体的には、まず、同定計算で得られた暫定パラメータについて、斜面粗度係数 n を0.1刻みの範囲で区分・整理する。次に、区分された斜面粗度係数 n の範囲毎にNS指標が最大となった暫定パラメータを各イベントで抽出する。最後に、抽出された暫定パラメータの再現解析結果の比較から、NS指標、最大流入量及び総流入量等の再現性が平均的に最も高いと考えられる斜面粗度係数 n の範囲を特定する。

表-2 代表パラメータ設定に用いた出水事例

事例	降雨期間			最大流入量(m^3/s)		出水要因
	年	開始	終了	池原ダム	風屋ダム	
1	2001	06/18	06/24	1,564	3,236	前線
2	2004	06/19	06/21	2,207	2,795	台風6号
3	2004	09/27	09/29	3,337	983	台風21号
4	2005	09/04	09/07	1,485	1,966	台風14号
5	2007	07/11	07/15	1,576	2,205	台風4号
6	2009	10/05	10/08	1,770	1,659	台風18号
7	2011	07/17	07/20	3,280	2,788	台風6号
8	2011	08/31	09/05	4,113	4,873	台風12号
9	2011	09/19	09/21	3,743	1,663	台風15号
10	2012	06/18	06/22	2,068	1,378	台風4号
11	2012	09/29	09/30	2,708	1,211	台風17号

時間平均

c) イベント毎の同定計算(2次)

1次絞り込みで特定された斜面粗度係数 n の範囲を上下限値に設定して、再度、イベント毎に同定計算を実施し、同定計算過程で生み出された暫定パラメータとそのNS指標を出力する。なお、斜面粗度係数以外のパラメータの上下限値は変更しない。

d) 斜面粗度係数範囲の絞り込み(2次)

同定計算(2次)で得られた全計算結果から、1次絞り込みと同様に、斜面粗度係数 n の存在範囲を絞り込む。2次絞り込みでは、同定計算で得られた暫定パラメータについて、斜面粗度係数 n を0.01刻みの範囲で区分・整理する。以下、1次絞り込みと同様にして、再現性が平均的に最も高いと考えられる斜面粗度係数 n の範囲を特定する。

e) 代表パラメータ候補による再現解析

特定された斜面粗度係数 n の範囲内の各イベントの暫定パラメータの中から、NS指標が最も大きい暫定パラメータを代表パラメータ候補として抽出し、各代表パラメータ候補で他のイベントの再現解析を実施する。

f) 再現性評価・代表パラメータ決定

再現解析結果のNS指標から再現性を評価し、複数のイベントに対して最も再現性が高くなったパラメータを代表パラメータとする。

6. 代表パラメータ設定手法の適用性評価

上記の代表パラメータ設定手法に基づき、5ダム流域(風屋ダム、二津野ダム、池原ダム、七色ダム、小森ダム)の代表パラメータを設定した。本検討では、特に池原ダム及び風屋ダムにおける洪水時の流入量予測精度の向上を念頭に、2001～2012年の期間で池原ダムまたは風屋ダムで流入量が洪水相当(最大流入量 $1,500\text{m}^3/\text{s}$ 以上)となった16出水を抽出した。次に、各出水の流出率を考慮の上、選定する出水の最大流入量が偏らないようにして、最終的な同定対象の出水として11出水を選定した。代表パラメータ設定に用いた出水事例を表-2に示す。

表-3 設定された代表パラメータ

ダム流域	n	ka	km	da	dm	D
風屋ダム	0.560	0.062	0.006	0.556	0.271	1.0
二津野ダム	0.580	0.067	0.004	0.690	0.681	1.0
池原ダム	0.511	0.016	0.001	0.670	0.612	1.0
七色ダム	0.530	0.028	0.001	0.725	0.672	1.0
小森ダム	0.512	0.077	0.004	0.604	0.372	1.0

考案した代表パラメータ設定手法で導出された代表パラメータを表-3に示す。代表パラメータは各流域で概ね同程度の値となった。特に斜面粗度係数 n は0.511～0.560（森林の一般値0.6）となり、概ね妥当な値であると考えられる。なお、斜面粗度係数 n と飽和透水系数 ka が、池原ダム流域と七色ダム流域で相対的に小さく、モデル上、表面流出しやすく表現される結果となった。実際に、十津川筋よりも北山川筋の流域の方が岩の露出が多く見られることから、同定された代表パラメータから実際の流出特性を推定できる可能性があると考えられる。

次に、設定されたパラメータの再現性を複数の出水で確認するため、上記の代表出水（11出水）と、代表パラメータ設定では適用していない其他出水（26出水）について、導出された代表パラメータでの再現解析を実施し、その再現性を評価した。なお、其他出水とは、2001～2012年の期間で、池原ダム及び風屋ダムで流入量が $500\text{m}^3/\text{s}$ 以上となった37出水のうち代表11出水を除いた26出水である。再現性評価結果を図-11～15に示す。代表11出水のNS指標は0.7以上となり、複数の大規模な出水に対して、同定された代表パラメータは非常に高い再現性を有していることが分かる。また、其他出水（26出水）については、最大流入量 $1,500\text{m}^3/\text{s}$ 以下の小規模出水でNS指標が0.7以下となった出水もあるが、ほとんどはNS指標が0.7以上となり、高い再現性を有していると考えられる。なお、十津川筋の風屋ダム及び二津野ダム（図-11及び図-12）では、北山川筋の池原ダム、七色ダム、小森ダム（図-13、図-14、図-15）よりもNS指標が0.7を下回る小規模出水の数が多い。モデル上、風屋ダム上流域に設置された他社ダムを考慮していないため、小規模出水では上流ダムの貯留の効果が対象2ダムの計算流量と観測流量の乖離に影響しているものと考えられる。また、図-15より小森ダムにおける再現性評価結果が相対的に高いが、小森ダム流域は他の流域に比べて流域面積が小さく、計算流入量に占める七色ダムからの放流量（観測流量）の割合が大きいため、他のダム流域よりも相対的にNS指標が大きくなったと考えられる。上記より、ダム流入量を予測する場合、対象出水規模が小さい場合や、流域面積が小さい場合は、上流ダムの影響を考慮し、上流ダムの放流操作を定式化する等して精密に上流ダムをモデル化することがあることが分かる。

再現解析結果の代表例として、池原ダムの観測流量と計算流量を比較したハイドログラフを図-16～18に示す。図-16の2011年台風12号出水は既往最大の出水、図-17の

図-11 風屋ダム流域モデルの再現性評価結果

図-12 二津野ダム流域モデルの再現性評価結果

図-13 池原ダム流域モデルの再現性評価結果

図-14 七色ダム流域モデルの再現性評価結果

図-15 小森ダム流域モデルの再現性評価結果

図-16 池原ダム流入量再現結果（2011年台風12号時）

図-17 池原ダム流入量再現結果（2012年台風4号時）

図-18 池原ダム流入量再現結果（2004年12月出水時）

2012年台風4号出水は最大流入量約 $2,000\text{ m}^3/\text{s}$ クラスの出
水、図-18の2004年12月出水（低気圧性の出水）は最大
流入量 $1,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下クラスの出水である。図より、同定
計算対象外の2004年12月出水を含め、多少の誤差はある
ものの、いずれの出水も高い再現性を有していることが
分かる。なお、他の出水事例及び他のダム地点におい
ても同程度の誤差及び再現性を有していることを確認して
いる。以上より、本検討で考案したSCE-UA法を用いた
代表パラメータ設定手法の適用により、熊野川流域を対象
とした分布型流出モデルに対し、複数の取水に対して
高い再現性を有する代表パラメータを設定でき、本手法
が有効であるものと考えられる。

7. まとめ

本研究における主要な成果を以下に示す。

分布型流出モデルの同定にSCE-UA法を適用した場合、
ある出水の最適パラメータは、他の出水では最適では
ない場合がある。一方、同定過程で生成される暫定パ
ラメータの中にはNS指標が0.7以上で再現性が高く、
複数イベント間で差がないものがある。したがって、
暫定パラメータの中からより再現性の高い代表パラ
メータを抽出できる可能性があることが分かった。
SCE-UA法による同定過程で生成される暫定パラメ
ータの中から複数の出水で再現性の高い代表パラメ
ータを抽出する手法を考案し、熊野川流域を対象とした分

布型流出モデルのパラメータ同定を実施した。同定さ
れた代表パラメータの再現性を評価した結果、大規模
な出水から小規模な出水まで、概ね良好な再現性が確
認でき、考案した手法が有効であることが分かった。
適切に設定された代表パラメータから対象流域の流域
特性を把握できる可能性があることが分かった。

今後は、本検討で考案した手法を他の流域にも適用し、
手法の適用性検証と更なる再現性向上方法を検討すると
ともに、同定結果と実際の流域特性（土地利用や土質等）
との関係性を調査する計画である。また、実際に本手法
を適用した分布型流出モデルによるリアルタイムでのダ
ム流入量予測に取組み、実際のダム運用への活用方法の
検討を進める計画である。

謝辞：本検討の実施に当たっては、京都大学 立川康人
教授のご指導いただきましたこと、ここに記して感謝の
意を表します。

参考文献

- 1) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V.K. : Optimal use of the
SCE-UA global optimization method for calibrating watershed
models, Journal of Hydrology, Vol. 158, 265-284, 1994
- 2) 田中丸治哉：タンクモデル定数の大域的探索，農業土木学会
論文集，Vol.178, 103-112, 1995
- 3) 藤原洋一，田中丸治哉，畑武志，多田明夫：進化戦略による
流出モデル定数の最適化，農業土木学会論文集，Vol.227，
119-129, 2003
- 4) 小槻峻司，田中賢治，小尻利治，浜口俊雄：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：土木学会
論文集B1，Vol.68, 523-528, 2012
- 5) 高崎忠勝，河村明，天口英雄，荒木千博：都市の流出気候を
考慮した新たな貯留関数モデルの提案，土木学会論文集B，
Vol.65, No.3, 217-230, 2009
- 6) 檜山航平，立川康人，Kim Sunmin，萬和明，椎葉充晴：分
布型流出モデルを用いた熊野川における既往最大級の洪水の
再現性分析，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.68, 251-
252, 2013
- 7) 市川温，村上将道，立川康人，椎葉充晴：流域地形の新たな
数値表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステム
の開発，土木学会論文集，No.691/II-57, 43-52, 2001
- 8) 椎葉充晴，立川康人，市川温：水文学・水工計画学，京都大
学学術出版会，2013
- 9) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻水文・水資源学
分野：流域地形情報を基盤とした水文モデルシステムGeoHy
MoS，<http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/geohyos/geohyos.html>
- 10) 佐山敬洋，立川康人，寶馨：流出モデルの不確実性評価手
法とそのモデル選択への適用，土木学会論文集，No.789/II-
71, 1-13, 2005

（2014.9.30受付）