

リアルタイム洪水管理のための洪水予測技術に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：平 26～平 28
担当チーム：水災害研究グループ
研究担当者：岩見 洋一、宮本 守、
津田 守正

【要旨】

洪水予測モデルの水文パラメータは、過去の洪水実績に基づいてキャリブレーションされるのが一般的である。近年では数理最適化手法により最適パラメータを決定することも多いが、その最適化手法の特性および複数の洪水に対して適切に同定する手法については良くわかっていない。さらに、ハイドログラフ全体の再現性で誤差評価することで洪水予測にとって重要な洪水の立ち上がり部分やピーク流量について過小に予測すること、つまり河川管理上危険側に予測することも起こりえる。本研究課題では複数の洪水イベントを対象として、誤差評価手法の際に洪水予測上重要な項目を考慮して、河川流量の再現精度を検証した。さらに IFAS の汎用性を向上させることを目的としてパラメータ自動最適化ツール「IFAS Calibrator」を開発した。

キーワード：IFAS Calibrator、パラメータ最適化、洪水予測適正、誤差評価

1. はじめに

洪水発生時に被害を回避・軽減するためには水防活動や避難活動が必要不可欠であり、そのためには迅速かつ正確な洪水予測が求められる。洪水予測の現場では通常、降雨情報を入力データとする流出解析モデルを用いて対象河川の基準地点における水位、流量を予測するが、洪水予測モデルのパラメータは一般に過去の洪水実績に基づいて事前に同定される。貯留関数法等の集中型モデルを用いる場合は比較的少数のパラメータ同定で済むが、集中型モデルではリモートセンシング情報やレーダ雨量等の流域内の空間分布を考慮することができない。そのため近年では分布型モデルによる洪水予測の適用が広まっているが、分布型モデルはパラメータの数が多いため同定が煩雑になり最適なパラメータを決定することが難しい。

分布型流出モデルのパラメータ同定に関する研究はこれまでにいくつか取り組まれている。立川ら¹⁾は熊野川流域の洪水を対象に SCE-UA 法(Shuffled Complex Evolution method)²⁾でパラメータを同定した上で入力雨量、モデルパラメータ、水位流量曲線の不確かさを分析し実時間水位予測の精度向上への課題を考察している。宮田ら³⁾は土研分布モデルのモデルパラメータを SCE-UA 法で同定することで立ち上がり部やピーク部の適合性向上を確認している。重枝ら⁴⁾は多点河道水位に基づく実験計画法と応用



図-1. 五ヶ瀬川流域の雨量・水位観測地点

曲面法を援用した流出モデルパラメータの最適化の事例を報告している。また PSO や LM 法 (Levenberg-Marquardt method)⁵⁾によりモデルパラメータを同定した事例もある^{6), 7)}。上記の研究ではパラメータを同定する際の目的関数に平均二乗誤差や相対誤差などの一般的な誤差評価関数が用いられている。藤原ら⁸⁾は SCE-UA 法によるタンクモデルのパラメータ最適化の際に使用する誤差評価関数の選択基準や制約条件に関して、7 種類の誤差評価関数を対象に詳細に検証しており、平均二乗誤差や平均二乗平方根誤差は高水部を重視し相対誤差と対数誤差は低水部を重視することを確認している。しかし実際の洪水予測において最大流量の過小評価や水位の立ち上がりを遅く予測した場合は、水防活動や避難活動の遅れを招くことに繋がり河川管理上の危

表-1. 対象洪水の緒元

洪水イベント	期間				降雨タイプ	最大流量 m ³ /s
	年	開始	終了	日数		
C-1	2004	8/28	9/1	4	台風16号	6116
C-2	2007	8/1	8/4	3	台風5号	5287
C-3	2007	7/2	7/17	15	台風4号	4435
C-4	2004	9/4	9/9	5	台風18号	3563
C-5	2006	8/17	8/20	3	台風10号	2795
C-6	2003	8/6	8/10	4	台風10号	2484
C-7	2004	10/18	10/22	4	台風23号	2482
C-8	2004	9/28	10/1	3	台風21号	2247
C-9	2002	7/25	7/29	4	前線性	2013
C-10	2003	5/29	6/2	4	台風4号	1956
C-11	2002	7/5	7/8	3	前線性	1708
C-12	2002	8/29	9/2	4	前線性	1694
C-13	2004	6/19	6/23	4	台風6号	1678
C-14	2006	6/23	6/29	6	前線性	1374
C-15	2003	9/10	9/14	4	台風14号(接近)	1350

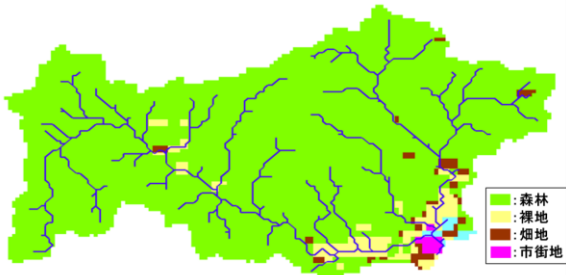


図-2. 五ヶ瀬川流域の土地利用

険側に予測することになる。本研究課題では複数の洪水イベントを対象として、ハイドログラフ全体に対する一般的な誤差評価に洪水予測適正の観点を加えて再現精度を検証した。

2. 対象流域

本課題では、大規模な洪水調節機能を有したダムが存在しない五ヶ瀬川流域を対象とした。五ヶ瀬川流域は宮崎県北部を流れる流域面積 1,820km² の一級河川である(図-1)。流域内の土地利用分布は図-2に示したように、森林が支配的である。流量検証地点は三輪観測所とし、雨量データは13地点の地上雨量計のデータを用いた。対象洪水は2002年から2010年までにピーク流量が1,000m³/s以上を記録した15洪水イベントとした。対象洪水の諸元を表-1に最大流量順に示す。なお、三輪観測所では氾濫危険水位等は設定されていないが、流量1,000m³/sはおおよそ水防団待機水位と同程度である。

3. 分布型流出モデル

3. 1 モデル概要

本課題で適用した土研分布モデルの概念図を図-3に示す。土研分布モデルは2段タンクもしくは不飽

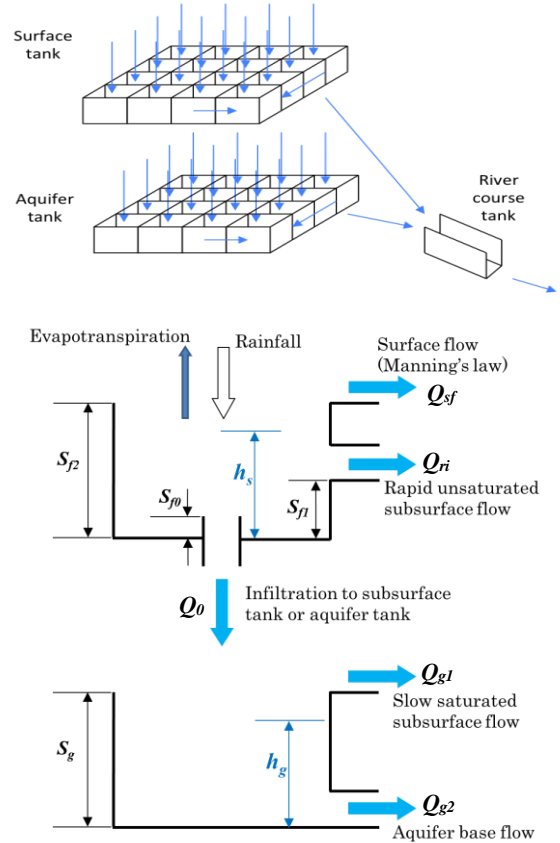


図-3. 土研分布モデルの概念図

和帯水層を含む3段タンクを各メッシュに分布させるが、本解析は比較的短期間の洪水イベントごとの解析のため上段の表層タンクと下段の地下タンクの2段とした。各タンクからの流出量は式(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 法により河道追跡を行った。

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

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

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

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

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

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

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

ここに、 Q_{sf} : 表面流出量(m³/s), L : メッシュ長(m), N :

表-2. 各パラメータの探索範囲の上限値と下限値

パラメータ	単位	上限	下限
最終浸透能 f_{01} (log)	cm/s	-1.301	-5.301
最終浸透能 f_{02} (log)	cm/s	-2.699	-6.699
最終浸透能 f_{03} (log)	cm/s	-3.0	-7.0
最終浸透能 f_{04} (log)	cm/s	-4.0	-8.0
最終浸透能 f_{05} (log)	cm/s	-3.0	-7.0
地表面粗度 N_1, N_2, N_3, N_4, N_5	$s/m^{1/3}$	2.0	0.1
流出係数 A_u	$(1/mm/day)^{1/2}$	0.6	0.05
基底流出係数 A_g	1/day	0.05	0.001
表層タンク初期水位	m	0.01	0
地下タンク初期水位	m	2.0	1.0

地表面の粗度係数($s/m^{1/3}$), h : 水位(m), S_{j2} : 表面流出発生高さ(m), i : 勾配, Q_{ni} : 早い中間流出量(m^3/s), A : メッシュ面積(m^2), S_{j1} : 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_{j0} : 地下浸透発生高さ(m), Q_{g1} : 遅い中間流出量(m^3/s), S_{g1} : 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。

3. 2 パラメータサンプリング方法

モデルのパラメータである最終浸透能 f_0 、地表面粗度 N 、流出係数 A_u 、基底流出係数 A_g と表層タンク初期水位、地下タンク初期水位についてラテン超方格法^{9), 10)}の概念に基づいて探索範囲内で均等にサンプリングした。ただし、本研究では各パラメータの探索範囲を等間隔に 10,000 分割し上下限値を含めた 10,001 通りの値をそれぞれ 1 回ずつ均等にサンプリングした。最終浸透能 f_0 および地表面粗度 N は 5 種類の各土地利用に対して設定したためサンプリング対象は全 14 項目である。初期水位は初期状態の影響を軽減するためにサンプリングに含めた。各パラメータの上限値と下限値は表-2 に示す通りである。

4. 一般的な誤差評価関数の課題

ラテン超方格法によるパラメータサンプリングに基づいて計算された結果から平均二乗誤差を最小とする結果(Top1)と上位 5 件(Top5)を抽出した結果を図-4 に示す。なお再現精度を示す縦軸は、洪水規模の違いによる影響を減らすために誤差値を実測値とその期間平均値との差で除した Nash-Sutcliffe 指標(以降 NSE とする)で表記した。一般に洪水予測モデルとしての NSE の基準値は 0.7 とされている。平均二乗誤差は式(8)、NSE は式(9)により算出した。

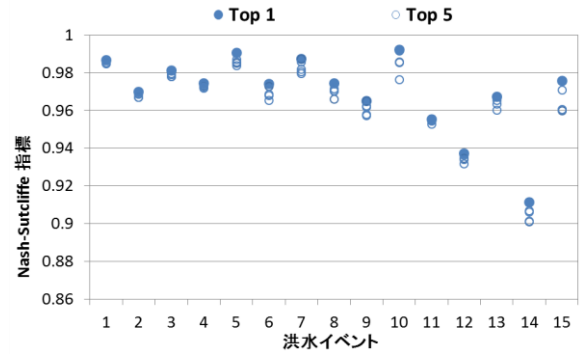


図-4. 各洪水イベントの最良誤差および上位 5 件の再現性精度

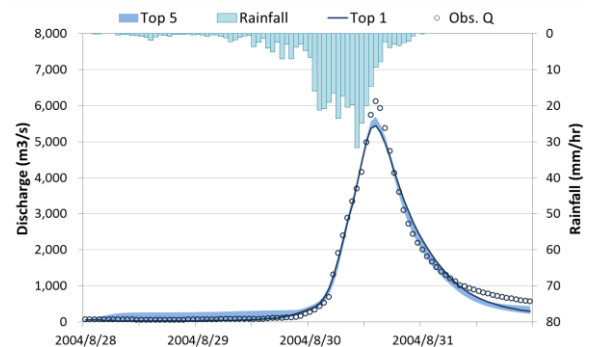


図-5. 既往最大洪水 (C-1) に対する最良誤差および上位 5 件の計算結果

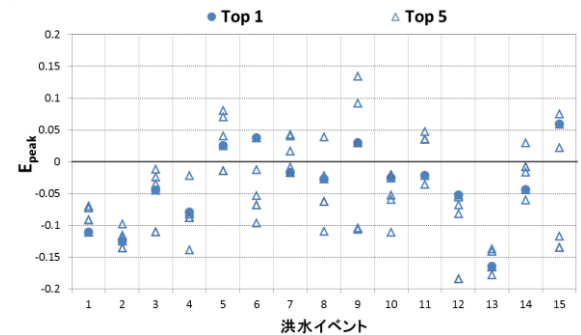


図-6. 各洪水イベントの最良誤差および上位 5 件の最大流量再現性精度

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

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

ここに、 E_M : 平均二乗誤差, n : データ数, Q_{oi} : 時刻 i 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), E : NSE, Q_{ave} : 実測流量の平均値(m^3/s)であ

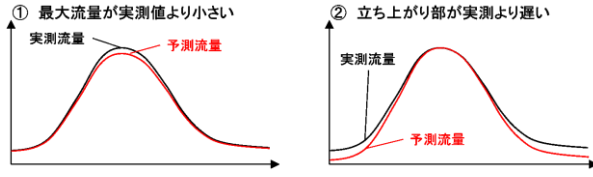


図-7. 全体の再現性は良いが洪水予測に適さない事例

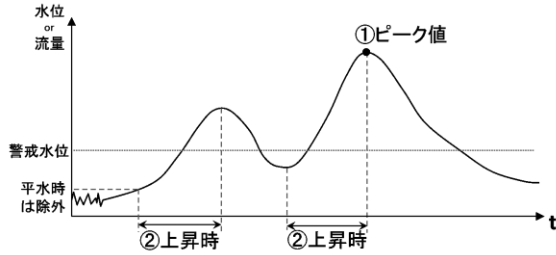


図-8. 洪水予測適正の対象

る。全ての結果でNSEは0.9以上であり精度よく再現されていることが図-4から確認できる。しかしながら図-5に示した既往最大洪水に対する再現結果のハイドログラフを見ると全体的には精度よく再現されているが最大流量を過小評価していることがわかる。そこで各洪水の最大流量に着目して再現性を確認した。図-6は各洪水イベントの最大流量の誤差評価結果である。最大流量再現性は式(10)で評価しており、負の値は実測値に対して過小に再現していることを意味している。

$$E_{peak} = \frac{Q_{o,peak} - Q_{c,peak}}{Q_{o,peak}} \quad (10)$$

ここに、 $Q_{o,peak}$: 実測流量の最大値(m^3/s), $Q_{c,peak}$: 計算流量の最大値(m^3/s), E_{peak} : ピーク誤差である。ハイドログラフ全体で平均二乗誤差が最小の結果(Top1)は最大流量の評価では15洪水中11洪水が過小再現になっており10%以上過小に再現している洪水イベントも確認された。平均二乗誤差は実測値と計算値の差の二乗値を評価値とするため高水部を重視した誤差評価関数であるが、最大流量に着目すると誤差の絶対値は平均で5.7%であり特に過小再現が多いことが確認された。

5. 誤差評価における洪水予測適正

5.1 誤差評価時における洪水予測適正の定義

洪水予測の観点からモデル再現性を考えると実測値に対して過小再現することは水防活動や避難活動等の遅れに繋がり河川管理上の危険側に予測することになる。したがって本研究では誤差評価の際の洪

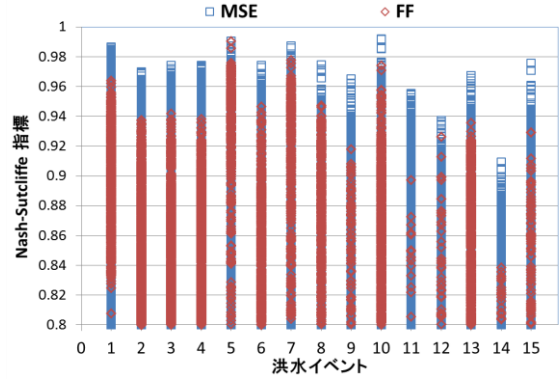


図-9. 平均二乗誤差のみで評価した場合(MSE)と洪水予測適性を満たす場合(FF)の再現精度の分布

表-3. NSEが0.8以上の件数

	NSEが0.8以上の件数(MSE)	NSEが0.8以上の件数(FF)	MSEに対するFFの割合(%)
C-1	4599	467	10.2
C-2	3724	943	25.3
C-3	4116	743	18.1
C-4	3328	777	23.3
C-5	3322	262	7.9
C-6	2448	433	17.7
C-7	3558	243	6.8
C-8	2913	318	10.9
C-9	2508	69	2.8
C-10	2079	584	28.1
C-11	2623	14	0.5
C-12	2142	34	1.6
C-13	2649	585	22.1
C-14	369	16	4.3
C-15	1462	70	4.8

水予測適正として、図-7に示すような最大流量とハイドログラフの立ち上がり部で計算値が過小となる場合は洪水予測に不適であると定義した。具体的には図-8に示す最大流量と水位上昇時の2項目について次式により制約した。ただし平水時の流量の微小な変動を無視するために200 m^3/s 以上を対象とした。

① 最大流量を過小評価しない

$$Q_{o,peak} \leq Q_{c,peak} \leq 1.2 \times Q_{o,peak} \quad (11)$$

② 立ち上がり部が遅れない

$$Q_{oi-1} \leq Q_{oi} \leq Q_{oi+1} \cap Q_{oi} \geq 200 \text{ のとき } Q_{oi} \leq Q_{ci} \quad (12)$$

この他、警戒水位を超過する継続時間も洪水予測に重要な要素であるが、継続時間に関しては平均二乗誤差による精度評価に含まれるとした。

5.2 誤差評価時における洪水予測適正の設定

前節で述べた洪水予測適性に関する条件を考慮し、

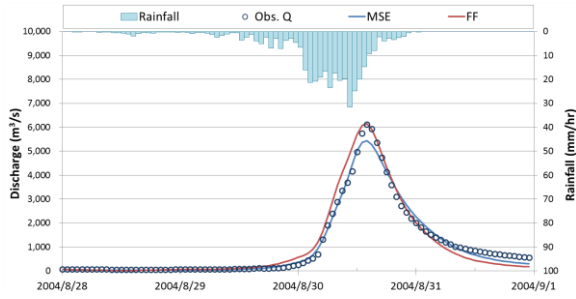


図-10. 既往最大洪水(C-1)に対して最良の誤差値となった計算結果の比較

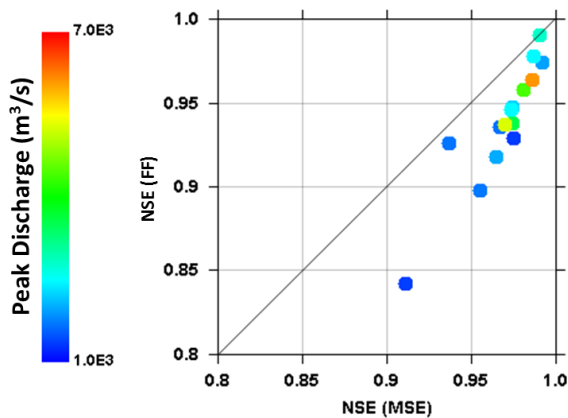


図-11. 平均二乗誤差のみによる誤差評価(MSE)と洪水予測適性を考慮した誤差評価(FF)の比較

平均二乗誤差のみで評価した場合(図中では MSE と表記)と洪水予測適性を満たす場合(図中では FF と表記)の再現精度の検証を行った。図-9 は各洪水における NSE の分布である。洪水予測適性を満たす結果の最良の誤差値は平均二乗誤差のみによる評価の場合より低い、全ての洪水で NSE が 0.8 以上の結果が得られた。表-3 は NSE が 0.8 以上の件数である。洪水予測適性条件を満たした件数は各洪水で異なるが 15 洪水の平均では 12.3%であった。図-10 は既往最大洪水における平均二乗誤差のみによる評価で最良の誤差値であった計算結果と洪水予測適性を満たす結果の中で最良の誤差値であった計算結果の比較である。洪水予測適性を満たす結果は立ち上がり部でやや過大であるが最大流量を精度よく再現している。図-11 は平均二乗誤差のみによる評価と洪水予測適性を満たす結果の NSE を実測最大流量に応じた色別で示している。洪水予測適性を満たす結果の誤差値は平均二乗誤差のみの結果に劣るが、15 洪水中 13 洪水が 0.9 以上であり、特に大きな洪水では精度良く再現できている。一方、図-12 に示した最大流量の誤差は洪水予測適性条件として定義した通

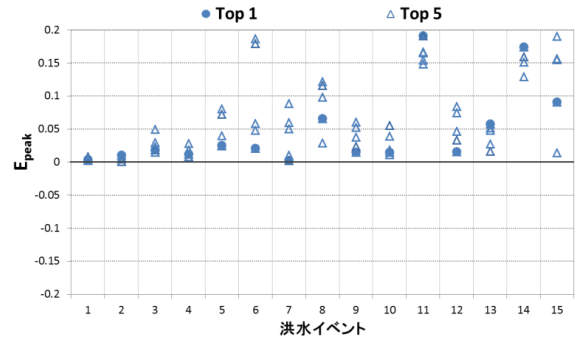


図-12. 洪水予測適性条件を満たす最良誤差および上位 5 件の最大流量再現性精度

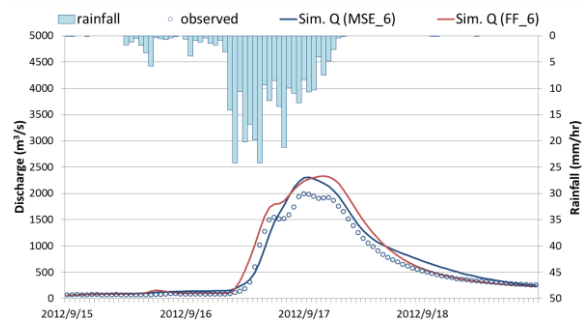


図-13. 2012年9月(未学習)洪水の再現結果

り実測値から+20%までの範囲内であり誤差の平均は 4.8%であった。図-6 に示した平均二乗誤差のみで評価した場合の誤差の絶対値の平均は 5.7%であったことから洪水予測適性を考慮することで最大流量の再現性は向上した。

6. 未学習洪水による検証

未学習の 2012 年 9 月洪水を対象に再現性・適用性を検証した。著者らはこれまでに、流出率を高・中・低の 3 段階程度に分類し同程度の流出率の洪水でパラメータを同定した場合に NSE が大きいという結果を得ている¹¹⁾ため、流出率が同程度の洪水 C-6 で同定したパラメータ値を採用した。図-13 は洪水 C-6 で最良の誤差値であったパラメータを用いた再現結果である。最大流量はどちらも過小再現することは無かったが、平均二乗誤差のみで評価したパラメータでは hidrograph の立ち上がり部で実測より遅く再現された。一方で洪水予測適性を考慮した場合は全体的に過大ではあるが、立ち上がり部を過小に再現することはなかった。平均二乗誤差のみで評価したパラメータによる結果の NSE は 0.94、洪水予測適性を考慮した場合は 0.90 であった。

7. まとめ

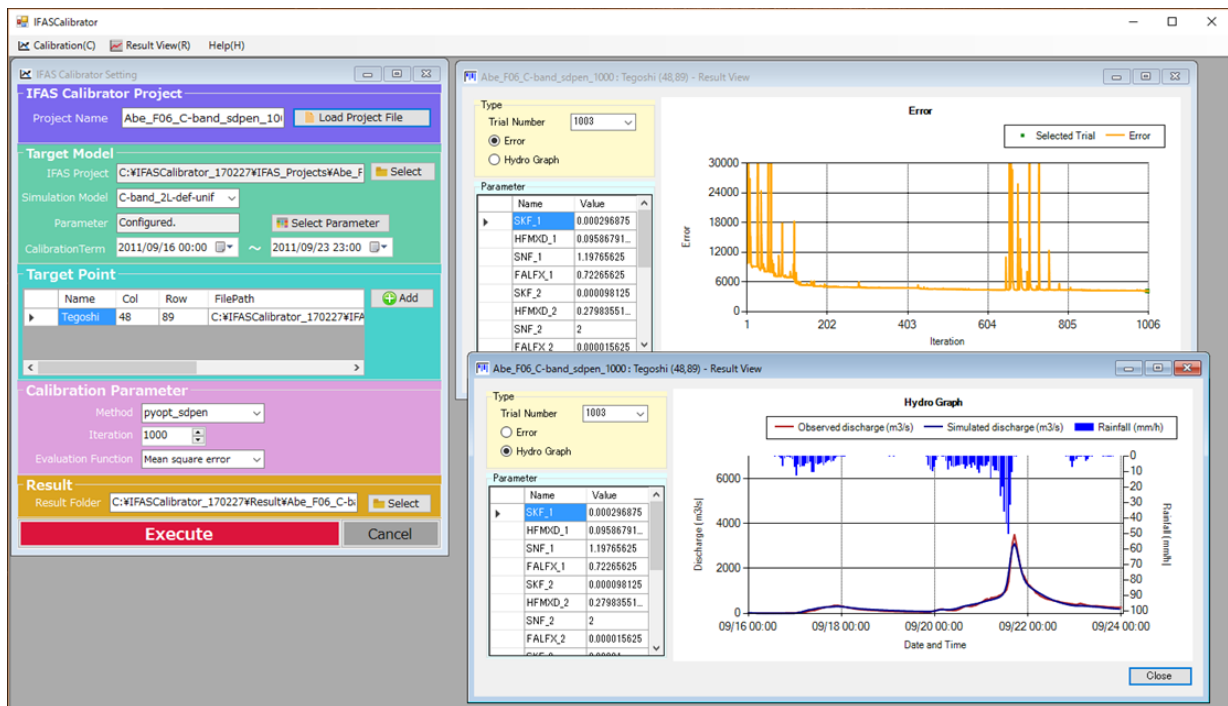


図-14. IFAS Calibrator の操作画面

本論文では分布型流出モデルのパラメータ同定に関して、平均二乗誤差による評価の際に洪水予測適性の条件を付加して再現性を検証した。平均二乗誤差は高水部を重視する目的関数であるが、最大流量の再現性のみに着目するとピーク流量を過小に再現するケースが多いことが確認された。つまりハイドログラフ全体を対象とした平均二乗誤差が最良であったとしても、最大流量を過小に再現すると洪水予測にとっては実用的なパラメータとは言えない。また最大流量と立ち上がり部で過小に再現しないという洪水予測適性を満たす結果のみに着目すると誤差値は相対的には大きくなったが全ての対象洪水でNSEが0.8以上であり再現精度は保たれていた。さらに、未学習の洪水に対して平均二乗誤差のみで誤差評価した最良のパラメータセットと洪水予測適性を考慮して誤差評価した最良のパラメータセットを適用した結果、洪水予測適性を満たすパラメータセットのみが最大流量と水位上昇時で過小評価しない結果が得られた。以上より、洪水予測モデルの実用的なパラメータを効率的に同定するためには、ハイドログラフ全体のフィッティング等による特定の誤差評価指標のみでなく、一定の再現精度を保った上で目的に応じた制約条件を課することが有効な手法であり、本研究ではその実用的な事例を示すことができた。

8. IFAS Calibrator の開発

前述で示した研究成果は、国立研究開発法人土木研究所の ICHARM と株式会社富士通研究所の共同研究協定に基づいた学術的な成果である。一方で、河川管理の現場における実際の洪水予測システムとして汎用性の高いツールを開発することも重要であるため、これらの研究成果に基づいて IFAS の水文パラメータを自動で最適化するツールである IFAS Calibrator を開発した。図-14 は、IFAS Calibrator の操作画面である。IFAS Calibrator では、既存の IFAS のプロジェクトファイルと河川流量の実測値を読み込んだ上で、最適化対象パラメータおよびその探索範囲、使用する最適化アルゴリズム、誤差評価対象期間、誤差評価関数を選択することで最適化の繰り返し計算を実行することができ、最も精度よく河川流量再現するパラメータと誤差値、流量ハイドログラフを表示することができる。これにより様々な流域に IFAS を適用する際にキャリブレーションの煩雑さを省くことができ、多くのユーザーが容易に洪水予測を行うことができる。また研修等において教育ツールとして使用することで洪水流出モデルの構造やキャリブレーションの必要性を学ぶ機会としても期待できる。

参考文献

- 1) 立川康人, 日野貴嗣, キムスンミン, 椎葉充晴: 2011年熊野川大洪水の再現計算からみた実時間河川水位予測の精度向上への課題, 河川技術論文集, 第19巻, pp.229-234, 2013.
- 2) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K.: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, 28(4), pp.1015-1031, 1992.
- 3) 宮田昇平, 中島隆信, 白石芳樹, 島本尚徳: 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, 河川技術論文集, 第19巻, pp.313-318, 2013.
- 4) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 野村心平: 実測水位に基づく分布型流出・平面2次元洪水追跡モデルのパラメータ最適化法, 河川技術論文集, 第18巻, pp.459-464, 2012.
- 5) Levenberg, K.: A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares, *Quart. Appl. Math.*, Vol. 2, pp.164-168, 1944.
- 6) 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, 水工学論文集, No.56, pp.523-528, 2012.
- 7) 小林健一郎, 寶馨, 立川康人: 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, No.51, pp.409-414, 2012.
- 8) 藤原洋一, 田中丸治哉, 畑武志, 多田明夫: 流出モデル定数の最適同定における誤差評価関数の選択に関する研究, 農業土木学会論文集, No.225, pp.137-149, 2003.
- 9) M. D. McKay, R. J. Beckman and W. J. Conover: Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code, *Technometrics*, Vol. 21, Issue 2, pp.239-245, 1979.
- 10) Michael Stein: Large Sample Properties of Simulations Using Latin Hypercube Sampling, *Technometrics*, Vol. 29, Issue 2, pp.143-151, 1987.
- 11) 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.

A STUDY ON FLOOD FORECASTING FOR REAL-TIME FLOOD MANAGEMENT

Research Period : FY2014-2016

Research Team : Water-related Hazard Research
Group

Author : IWAMI Yoichi

MIYAMOTO Mamoru

TSUDA Morimasa

Abstract : The hydrological parameters of a flood forecasting model are normally calibrated based on an entire hydrograph of past flood events with an error assessment function such as mean square error and relative error. However, the specific parts of a hydrograph, peak discharge and the rising part, are particularly important for flood forecasting in the sense that underestimation may lead to a more dangerous situation due to delay in flood prevention and evacuation activities. The purpose of this study is to develop an error assessment method for calibration appropriate for flood forecasting. The PWRI distributed hydrological model is applied to fifteen past floods in the Gokase River basin with 10,001 patterns of parameter sets determined by the Latin Hypercube Sampling. The cases with non-underestimation in the peak discharge and the rising part of hydrograph are analyzed as the appropriate cases for flood forecasting. Furthermore, the applicability of the appropriate parameter set for flood forecasting is validated by applying it to another flood event. Based on the achievements of collaborative research between ICHARM and Fujitsu Laboratories, a parameter optimization tool named “IFAS Calibrator” was developed in order to increase versatility of IFAS. It is expected that IFAS Calibrator could be utilized for easy calibration and some educational opportunities.

Key words : parameter optimization, IFAS Calibrator, flood forecasting aptitudes, error assessment