◆報　文◆

洪水流出解析におけるモデル適用妥当性の検討方法に関する一考察

猪股広典* 深見和彦**

1. はじめに

河川の計画・管理を行うにあたって、流域の降水量と河川流出量との関係を定量的に把握するための流出解析は、最も基本的な手段の一つである。現在までに貯留関数法やタンクモデルをはじめとして、国内外で数多くの流出解析のためのモデル（流出モデル）が開発されてきており、それぞれが独自の特徴を持っている。それらの流出モデルを用いて流出現象をシミュレーションする際には、一般的にはモデルが持っているパラメータの値を既往の流出イベントをうまく再現できるように調整する。過去の流出イベントの再現という観点からは、どのモデルもパラメータ調整を行えば良好に流出現象を再現できることが多く、モデル間の優劣を明確につけることは難しい。また、ある流出イベントでパラメータ調整計算を行い、そのパラメータセットで他の流出イベントを計算しても必ずしも一定の精度が得られるわけではなく、この観点からもモデル間の優劣をつけることは難しい。これらのことが、実際に流出モデルを適用するにあたってモデル選択を困難にさせている。以上のような背景から、どの流出モデルが、パラメータ調整を行った流出イベント以外の流出イベントでも精度良く計算できるかを客観的に評価するための指標が必要とされる。

水文統計における降雨確率分布モデルの評価については、実績雨量のプロットに対する適合度に加えて、雨量データ母集団に対する安定性も重要な評価の視点であるとしてJackknife法やBoot Strap法によるモデルの安定性に関する客観的な評価手法の適用プロセスが整理され、標準化されている。しかし流出解析にはパラメータの安定性を客観的に評価するための方法が標準化されていない。以上の背景のもとで、本稿では流出モデルが持つパラメータの安定性をモデルの評価指標として任意の流出モデル間で比較を客観的・定量的に行うことができる手法を提案する。具体的にはJackknife法およびモンテカルロ法を流出解析に適用した、2つの異なる評価手法について比較検討した結果を報告したい。

2. モデル評価手法検討にあたっての諸条件

評価手法の提案に当たって利用するモデルは、日本国内の多くの河川において適用実績を持つ貯留関数法、準線形型貯留型モデル、等価粗度法及び合理式合成法の4つのモデルとした。

また、試験流域としては釜房ダム（流域面積：196km^2）及び邪馬渓ダム（流域面積：89km^2）を選んだ。その理由は以下の通りである。

1. 1990年から2002年までの洪水イベントにおける時間雨量、流量データが整備されている。
2. 雨量、流量観測の精度が良好と判断される
3. 流域面積が約196km^{2}および89km^{2}であり、流出計算において単一流域として取り扱うことが可能である。

対象洪水イベントは、釜房ダムについては表-1に示される洪水到達時間内の雨量上位の10洪水イベントとした。また、邪馬渓ダムについては表-2に示される雨量上位の5洪水イベントとした。

3. Jackknife法を用いたモデル安定性の評価

3.1 Jackknife法を用いた評価手法の概要

複数の洪水に対する流出モデルの安定性の評価手法の一つとして複数の洪水イベントに対する誤差指標値（誤差の平方和）の平均値を最小とするパラメータを総当り法で求め、最適化されたパラメータによる流出モデルを用いてJackknife検定を実施し、Jackknife誤差指標を求める手法を検討した。手順を以下に示す。

Study on the Method Which Examines Validity of Flood Runoff Models

表-1 抽出した洪水イベント（釜房ダム）

No.	降雨開始日	総雨量 (mm)	洪水到達時間内雨量［mm/2hr.］	ピーク流量 [m^3/s]
1	1999/8/13	422.1	87.5	785.9
2	2002/7/9	225.8	50.6	804.8
3	1994/9/29	221.0	50.0	712.3
4	1999/10/27	163.4	49.2	324.1
5	1990/11/4	95.0	43.0	272.0
6	1994/9/22	135.0	42.0	191.0
7	1998/7/22	99.0	39.7	218.1
8	1990/11/30	112.0	37.0	462.9
9	1998/9/15	110.8	36.5	402.4
10	2002/9/30	108.8	35.6	368.5

表-2 抽出した洪水イベント（邪馬渓ダム）

No.	降雨開始日	総雨量 (mm)	洪水到達時間内雨量［mm/2hr.］	ピーク流量 [m^3/s]
1	1993/9/2	907.0	38.0	907.1
2	1997/9/14	631.5	29.0	631.5
3	1995/6/30	358.0	22.2	358.0
4	2001/7/5	355.5	20.0	355.5
5	1999/9/14	207.3	7.8	207.3

1. N 個の複数洪水に対する最適パラメータを算出する。ここでは、各洪水に対する誤差指標値である$E=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{Q_O(t)-Q_C(t)}{Q_{OP}}\right)^2$ の N 個の平均値を最小とするパラメータを最適なものとして求める。ここに$Q_O(t)$：時刻tの流量観測値、$Q_C(t)$：同時刻の流量計算値、Q_{OP}：観測ピーク流量である。
2. N 個の洪水に対する平均誤差指標値を次式から求める。
$$\overline{E}_N=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}E_i$$
3. 複数のパラメータセットについて$\overline{E}_N$ を計算し、これが最小となる時のパラメータセットを最適なパラメータセットとする。この時の$\overline{E}_N$ を$\overline{E}_{N\min}$ と定義する。
4. 1. から3. の操作を、N 個の複数洪水ではなくN個からj 番目の洪水データを取り除いた$N-1$個の洪水データセットについて行ない、最小誤差指標値を算出する。この値を$\overline{E}_{N-1\min(j)}$ とする。
5. 4. の操作を取り除く洪水データを変えながらN 回繰り返し、それぞれの$\overline{E}_{N-1\min(j)}$ を算出する。
6. N 個の$\overline{E}_{N-1\min(j)}$ の平均値を算出する。
$$\overline{E}_{N-1\min(\cdot)}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\overline{E}_{N-1\min(j)}$$
7. Jackknife推定誤差を求める。
Jackknife推定誤差
$=N$ 個の洪水の最小平均誤差指標のバイアス
$$=(N-1)\left(\overline{E}_{N-1\min(\cdot)}-\overline{E}_{N\min}\right)$$

7. に示されているJackknife推定誤差の値が0に近ければ近いほど、モデルの安定性が高いことを示す。

3.2 評価指標について

3.1 の手順に従い、表-1および表-2に挙げたそれぞれの洪水イベントについて4つのモデルで計算を行って$\overline{E}_{N\min}$ を求め、その後Jackknife誤差指標を算定した。それにあたって、ここでは表-3に示す4つの指標について検討を行った。ここで、例えばNo.1の「総量」を検討する場合は評価期間を洪水全期間に設定するのに対し、No.2の「立ち上がり部」の場合、評価期間を洪水ピーク発生時刻よりも前に設定する。また、No.4の「ピーク時」の場合は、誤差指標として3.1 の1. で述べた

$$E=\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{Q_O(t)-Q_C(t)}{Q_{OP}}\right)^2$$

ではなく次式で示されるピーク流量の相対誤差で評価した。

$$相対誤差：E=\frac{Q_{OP}(t_P)-Q_{CP}(t_P)}{Q_{OP}}$$

ここで、t_P：ピーク流量が発生する時刻 である。

表-3 モデル性能評価指標

指標	対象	評価範囲
1	総量	ピークを含む範囲
2	立ち上がり部	ピークより前の範囲
3	低減部	ピークより後の範囲
4	ピーク時	ピーク値 ※ピーク発生時刻の差異は無視する。

3.3 釜房ダム流域、邪馬渓ダム流域への適用

3.1の手順および3.2の評価指標に基づいて、表-1および表-2に挙げた洪水イベントについて4つのモデルで計算を行い、$\overline{E}_{N\min}$ を求めた。その後、Jackknife誤差指標を算定した。釜房ダムの検証結果を表-4および表-5に、邪馬渓ダムの検証結果を表-6および表-7に示す。

表-4　各モデルの $\overline{E}_{N\min}$ の値（釜房ダム）

	指標1	指標2	指標3	指標4
貯留関数報	0.024	0.014	0.018	0.224
準線形貯留型モデル	0.012	0.006	0.006	0.048
等価粗度法	0.007	0.004	0.006	0.053
合理式合成法	0.051	0.030	0.039	0.297

表-5　Jackknife誤差指標（釜房ダム）

	指標1	指標2	指標3	指標4
貯留関数法	5.86×10^{-6}	2.43×10^{-5}	2.36×10^{-5}	1.90×10^{-3}
準線形貯留型モデル	8.94×10^{-6}	3.75×10^{-6}	2.37×10^{-6}	4.96×10^{-4}
等価粗度法	2.48×10^{-6}	1.92×10^{-6}	4.06×10^{-6}	3.26×10^{-4}
合理式合成法	5.54×10^{-5}	3.77×10^{-5}	3.70×10^{-5}	1.05×10^{-2}

表-6　各モデルの $\overline{E}_{N\min}$ の値（邪馬渓ダム）

	指標1	指標2	指標3	指標4
貯留関数報	0.006	0.003	0.003	0.032
準線形貯留型モデル	0.008	0.006	0.006	0.046
等価粗度法	0.005	0.003	0.005	0.035
合理式合成法	0.032	0.027	0.011	0.084

表-7　Jackknife誤差指標（邪馬渓ダム）

	指標1	指標2	指標3	指標4
貯留関数法	1.87×10^{-6}	9.10×10^{-7}	2.44×10^{-6}	1.10×10^{-4}
準線形貯留型モデル	2.40×10^{-6}	1.12×10^{-6}	6.87×10^{-6}	5.96×10^{-4}
等価粗度法	2.76×10^{-6}	8.83×10^{-7}	7.24×10^{-6}	3.26×10^{-4}
合理式合成法	1.40×10^{-4}	5.38×10^{-4}	2.74×10^{-5}	7.81×10^{-4}

3.4 結果

1）釜房ダムについて

$\overline{E}_{N\min}$ の値に関しては、全指標を通じて合理式合成法が大きな値を示しており、最適なパラメータであってもその他の3手法に比べて誤差が大きいことを示している。その他の3手法の値に関しては貯留関数法が若干大きな値を示しているものの、準線形貯留型モデルおよび等価粗度法は概ね似たような値を示している。Jackknife誤差指標については、指標1（総量）では等価粗度法、指標2（立ち上がり部）では等価粗度法、指標3（低減部）では準線形貯留型モデル、指標4（ピーク値）では等価粗度法が一番良い結果を示した。しかし、合理式合成法を除けば各手法間でJackknife誤差指標に大きさはそれほど大きな差は見られない。

2）邪馬渓ダム

$\overline{E}_{N\min}$ の値に関しては、釜房ダムの結果と同様に全指標を通じて合理式合成法が大きな値を示しており、最適なパラメータであってもその他の3手法に比べて誤差が大きいことを示している。その他の3手法の値に関してはほぼ同じ結果を示している。Jackknife誤差指標については、指標1（総量）では貯留関数法、指標2（立ち上がり部）では等価粗度法、指標3（低減部）では貯留関数法、指標4（ピーク値）では貯留関数法が一番良い結果を示した。

釜房ダム流域での安定性に比べて邪馬渓ダムでの安定性のほうが概ね全ての手法について高くなっていることが分かる。これは、流域面積の差に起因しているものと考えられる。流域面積が小さい邪馬渓ダム流域では釜房ダム流域と比較して流域の一様性が高い事が想定される。それに起因してモデルパラメータの流域代表性が釜房ダム流域と比較して高くなり、パラメータの不確実性が小さくなっていることが理由と考えられる。

今回行った検証においては釜房ダム流域、邪馬渓ダム流域共に合理式合成法の結果がその他の手法と比較して大きなJackknife誤差指標を示した。また合理式合成法以外の3手法についてはJackknife指標誤差の差が非常に小さく、明確な差が生じなかった。しかし、評価指標項目毎にモデルの安定性が異なる事が示され、それぞれの指標についてどのモデルが高い安定性を示すかを客観的に表示する事ができた。

その一方で、Jackknife法を用いたモデル安定性評価手法は、総当り法という客観性を導入しているものの、パラメータ調整作業という恣意性が含まれており、評価結果に個人差が生じる可能性がある。モデルの安定性を客観的に評価するため

には、評価結果に個人差が生じないことが望ましいため、次節では最適パラメータ同定を必要としないモンテカルロ法を用いたモデル安定性評価手法の提示を行う。

4. モンテカルロ法を用いたモデル安定性の評価

4.1 モンテカルロ法を用いた評価手法の概要

モンテカルロ法を用いたモデル安定性評価手法はBeven[1]、Binley[2]、Singh[3]および佐山[4]によって行われている。その概要を以下に述べる。

モデルが持っている複数個のパラメータの各々について、ある値の範囲内で乱数を発生させて、得られたパラメータセット全てについて流出計算を行う。ここで得られたハイドログラフはある範囲の幅をもっていることが予想され、この幅が大きいほどパラメータの安定性が低い、幅が小さいほどパラメータの安定性が高いという評価を行うものである。

上記の既存研究成果では、その文献の中で扱われているモデルそれ自体の安定性評価を行ったものであり、複数のモデルについて横断的に評価したものではない。今回の我々の研究では、複数のモデルを横断的に評価することを目的としているため、モデル間で共通の誤差指標を導入して検討を行った。具体的な手順は以下の通りである。

1. あるモデルの各パラメータの値の範囲を既存の資料から決定する。
2. その範囲内で各パラメータについてモンテカルロ法により乱数を発生させ10,000個のパラメータセットを作成する。
3. 全てのパラメータセットについてある流出イベントの流出計算を実施し、表-8に示す各誤差指標を満足するパラメータセットを抽出する。今回の検討では4つの誤差指標を想定した。
4. 3. で抽出されたパラメータセットを同じ流域の別の流出イベントに対して適用し、流出計算を行う。ここで、適用した全てのパラメータセットのうち、どれだけの割合のパラメータセットが表-8の指標を満足したかを計算する。この割合をモデルのパラメータの安定性の評価指標とした。

表-8 設定した誤差指標

指標	対象	評価範囲	基準
1	総量	ピークを含む範囲	RMSE≦0.03
2	立ち上がり部	ピークより前の範囲	RMSE≦0.03
3	低減部	ピークより後の範囲	RMSE≦0.03
4	ピーク値	ピーク時	相対誤差≦0.1 ※ピーク発生時刻の差違は無視する。

5. 1. から4. の作業を他のモデルについても行い、モデル間の比較を行う。

なお、表-8のRMSEは河川砂防技術基準(案)[5]で定義されている誤差評価式であり、次式で示される。RMSEの基準値としては、0.03という値が同書の中で定められている。

$$RMSE = \frac{1}{n}\sum_{n}\left(\frac{Q_C - Q_O}{Q_{OP}}\right)^2$$

ここに、n：サンプル数、Q_C：計算流量、Q_O：観測流量、Q_{OP}：観測ピーク流量である。

4.2 パラメータ値の範囲設定

パラメータの値の範囲としては実務での利用という観点から、全国の一級河川水系における工事実施基本計画を調査して各モデル各パラメータの最大値と最小値を設定した。具体的な設定値を表-9に示す。なお、各パラメータについては「建設省河川砂防技術基準（案）同解説　調査編[5]」に詳述されている。

表-9 設定したパラメータの範囲

パラメータ	範　囲	対象モデル
f1	0.1～0.9	貯留関数、準線形、等価粗度
fsa	0.6～1.5	貯留関数、準線形、 等価粗度、合理式合成法
Rsa	10～総雨量 (mm)	貯留関数、準線形、等価粗度
K	0～100	貯留関数
p	0.1～1	〃
Tl	0.1～3（hr)	〃
C	50～1000	準線形
N	0.1～3.0	等価粗度
Tc	0～10.0hr	合理式合成法

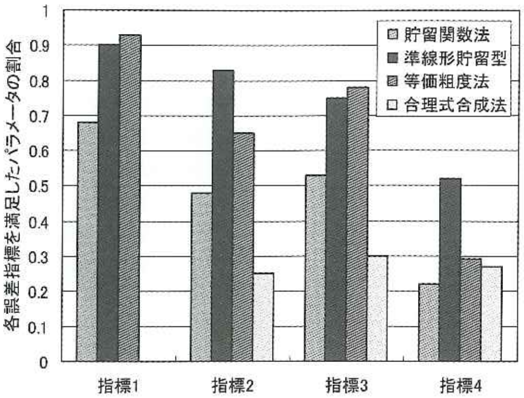

図-1 モンテカルロ法によるモデル安定性評価
(釜房ダム流域)

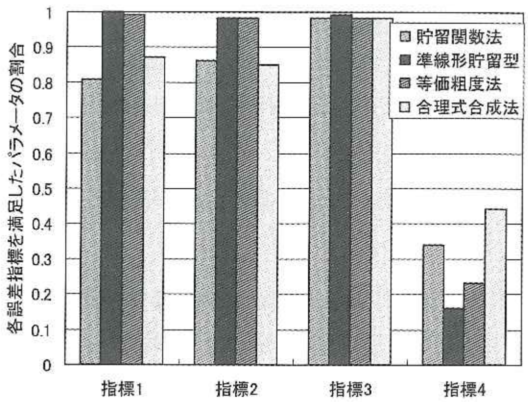

図-2 モンテカルロ法によるモデル安定性評価
(邪馬渓ダム流域)

4.3 釜房ダム流域への適用

4.1で述べた方法を釜房ダム流域および邪馬渓ダム流域に対して適用した。今回の検討では既往の洪水で調整したパラメータが例えば計画規模の洪水に代表される未知の洪水に対してどれだけ安定して精度を有するかを評価することが目的である。そこで、釜房ダムの検証では最初に表-1の中で中規模の洪水である洪水5を10,000個のパラメータセットについて計算する。表-8の誤差指標を満足したパラメータセットを表-1の中の大規模洪水に該当する洪水1に対して適用し、安定性を計算した。これを貯留関数法、準線形貯留型モデル、等価粗度法および合理式合成法について行い、各モデル間の安定性を比較した。邪馬渓ダムについては表-2の洪水3を10,000個のパラメータセットについて計算する。表-8の誤差指標を満足したパラメータセットについて表-3の洪水1に対して適用し、安定性を検討した。釜房ダム流域での結果を図-1に、邪馬渓ダム流域での結果を図-2に示す。

4.4 結果

1) 釜房ダム流域

指標1については準線形貯留型モデルおよび等価粗度法、指標2については準線形貯留型モデル、指標3に関しては等価粗度法および準線形貯留型モデル、指標4については全体的に安定性が低いが準線形貯留型モデルが他の手法と比べて高い安定性をそれぞれ示している。全体として準線形貯留型モデルが全ての指標について他のモデルよりも高い安定性を示している。貯留関数法は高い安定性を示しているとは言えず、合成合理式も全体的に安定性が低い結果となった。

2) 邪馬渓ダム流域

指標4を除いてどの手法についても概ね高い安定性が得られていることが分かる。指標4については合理式合成法が一番高い安定性を示していることがわかる。

Jackknife法の結果(3.4)と同様で、全体的に釜房ダムでの安定性検証よりも邪馬渓ダムの安定性検証のほうが高い安定性を示している。この理由は3.4で述べた事と同じである。

このようにして、どのような目的でモデルの比較を行うのかを明らかにした上で、モンテカルロ法による上記手法を用いれば、各モデル間の比較を行うことができる。

5. まとめ

本検討では、Jackknife法およびモンテカルロ法を用いたモデル安定性評価手法の検討を行った。両手法共に客観的なモデル安定性評価を行うに当たり有効な手法であることを示した。

Jackknife法を用いた評価手法は、総当り法という客観性を導入しているものの最適パラメータ調整作業を行わなければならない。総当り法で求めたパラメータが必ずしもすべての流出イベントに対して最適なパラメータであるとは限らない。別の流出イベントに適用した際に極めて大きな誤差が生じる可能性もある。しかし、計算手法は非

常に簡便で、計算負荷も大きくないことが特徴である。

それに対してモンテカルロ法を用いた評価手法では、最適なパラメータを同定する必要なくモデル間の比較を行うことができるため恣意性が全く含まれないことが特徴である。その一方で、計算にかかる時間・手間が膨大であるため、多数の流出イベント・多数のモデル間での比較を行う際はJackknife法を用いた評価手法と比較して非常に負荷が大きい。これらの利害得失を念頭においた上で、各河川流域におけるデータやモデルの準備・利用状況や計算機の能力等を考慮しながら、評価手法を選択する必要がある。

なお、今回の検討では、あくまで研究のための一つの事例として、貯留関数法、準線形貯留型モデル、等価粗度法および合理式合成法という集中型モデルを選択したが、その際、流域を小流域に分割することなく検討を行った。その結果、流域面積が小さい流域のほうがモデルパラメータの流域代表性が高くなるため全体的にモデル安定性が高くなることが分かった。今回の検討の目的は、モデルの適用性評価手法を提案することであり、一般論としてモデル間の優劣を評価するものではないことに留意する必要がある。今後は一つ一つのメッシュや小流域ごとに土地利用や地質特性をふまえたパラメータを設定できる分布型流出モデルについても本稿で提示した手法を用いて安定性の評価を行いたい。

参 考 文 献

1) Keith Beven and Andrew Binley: "The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction" Hydrological Processes, Vol. 6, 279-298, 1992
2) A. M. Binley and K. J. Beven: "Changing Responses in Hydrology: Assessing the Uncertainty in Physically Based Model Predictions", Water Resources Research, Vol.27, No.6, 1253-1261, June 1991
3) Vijay P. Singh: "Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, January 1995
4) 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
5) 改訂新版　建設省河川砂防技術（案）同解説　調査編, pp.80-94, 1994

猪股広典*

独立行政法人土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ水文チーム研究員
Hironori INOMATA

深見和彦**

独立行政法人土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ水文チーム上席研究員
Kazuhiko FUKAMI