

地理特性を含んだ総合化貯留関数パラメータの導出に関する検討

環境システム工学専攻 水文気象研究室 安藤 大和
指導教員 陸 旻皎

1. はじめに

昨年の鬼怒川の氾濫など台風やゲリラ豪雨などによる局所的な大雨は後を絶たず今後も発生すると予想され、速やかな流出解析、対策が必要となる。現在、日本の様々な河川の流出解析で用いられている流出モデルに木村(1961)によって提案された貯留関数法¹⁾がある。貯留関数法にはパラメータがあり、流入量の実測値を使用してパラメータを求め計算を行う。しかしそのパラメータの意義は不明確であり、上流部の山地河川では解析を行うための実測流量などの基礎データが人的、費用的な問題から不足しているなどの問題がある。そこで、モデルパラメータと地形との関係を定式化した貯留関数法の総合化という手法がある。この手法により実測値がない河川でもパラメータを推定できるが、既存の総合化貯留関数推定式の問題点として主に流域面積のみを用いて総合化²⁾を行っていること、流域面積 300km²以下の流域に重点を置いて総合化を図っていること³⁾、流域面積が約 300km²以上の流域での適用事例が少なく、幅広い流域に適用可能とは言い難いことが挙げられる⁴⁾。そこで、本研究では幅広い流域に適用できる総合化貯留関数パラメータの推定式の導出を目的とした。そのために地形特性を詳細に組み込んだ分布型流出モデルの計算結果について、貯留関数法によって再現計算を行いパラメータの同定を行った。また貯留関数パラメータと地形との関係を直接式に表現するため、流域の地形特性である地理特性を式に取り入れたパラメータ推定式を導出する。本研究における地理特性は、流域面積、流域平均勾配、降雨の強さを表す降雨強度である。降雨強度は降雨特性であるが、降雨が強くなることでピーク流量や流出が発生する時間への影響を考慮し、推定式

に含めた。

2. 研究方針

本研究では、幅広い流域に適用できる総合化貯留関数パラメータの推定式の導出するため、モデル化された流域を用いてパラメータの検討を行った。使用したモデルは、地形データを詳細に計算モデルに組み込んでいる分布型流出モデルである。分布型流出モデルは精度よく計算ができるが、入力データが多く水文資料が乏しい河川では運用は難しいという特徴がある。その分布型流出モデルの解析結果を実測値として使用し、貯留関数法でパラメータの同定を行った。また地理特性を変化させるため、流域ごとに勾配、面積を拡大・縮小させた流域を作成し、パラメータの検討を行った。これら全てを含め定式化を行うことにより、幅広い流域に適用でき、分布型流出モデルの計算結果を表現するような貯留関数パラメータを得ることができると考えられる。

3. 使用モデル

貯留関数法は、集中型の洪水流出計算法である。流出現象の非線形を表現でき、また計算を比較的容易に行えるということもあり、日本では多くの河川で基本高水の検討など広く実用的に利用されている。貯留関数法では流域を貯留池(タンク)とし、貯留量と流出量に関数関係があると考え流出計算を行う方法である(図 1)。本研究における貯留関数法の基礎式を以下に示す。

$$s(t) = Kq(t + T_l)^p \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{ds(t)}{dt} = re - q(t) \dots\dots\dots (2)$$

$$re = fr \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $q(t)$:流量 [mm/h] , $s(t)$:貯留量 [mm] , re :有効降雨 [mm/h] , r :観測降雨 [mm/h] , t :時間 [h] , f :流出率, K , P :貯留関数パラメータ, T_l :遅れ時間 [h] .

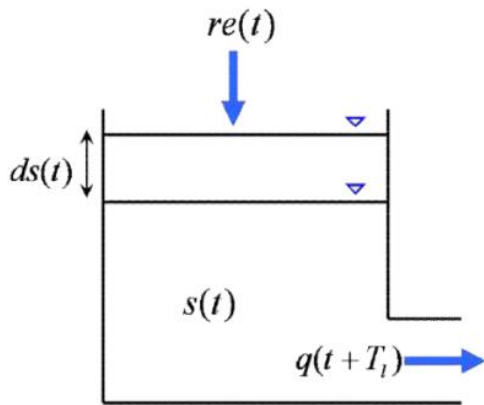


図 1 : 貯留関数法のタンクモデル

4. 使用データと対象流域

本研究では、信濃川の支川である魚野川六日町上流域を対象とする。この流域は新潟県南魚沼地方に位置し、山岳地域を流れている。その地理情報が100mメッシュで整備されている。中川らは、数値地理情報から、10 km²程度の集水面積をもつ小流域を8つ、30 km²程度の小流域を3つ、80 km²程度の小流域を2つ、201.35 km²の小流域を1つ、そして流域全体(集水面積:362.33 km²)をそれぞれ選定している⁵⁾。以降、流域スケールが10 km²程度の流域群をA流域群、30 km²程度の流域群をB流域群、80 km²程度の流域群をC流域群、201.35 km²の流域の呼称をD流域、全流域をO流域と呼ぶ。各流域出口と流域の範囲を、図2に示す。また、A, B, C, D, O流域群について、各流域を以下のように伸縮させて地理特性を変化させた新たな仮想流域を作成した。本研究ではこれら全ての流域で分布型流出モデルの計算流量を使用し、貯留関数法で再現計算を行った。

- ① 流域を鉛直方向に伸縮して標高(勾配)を変化させた流域(引き伸ばし倍率:0.2倍から1.8倍まで、0.2間隔)
- ② 流域を水平・鉛直方向に伸縮して流域面積を変化させた流域(引き伸ばし倍率:0.2倍から1.8倍まで、0.2間隔)

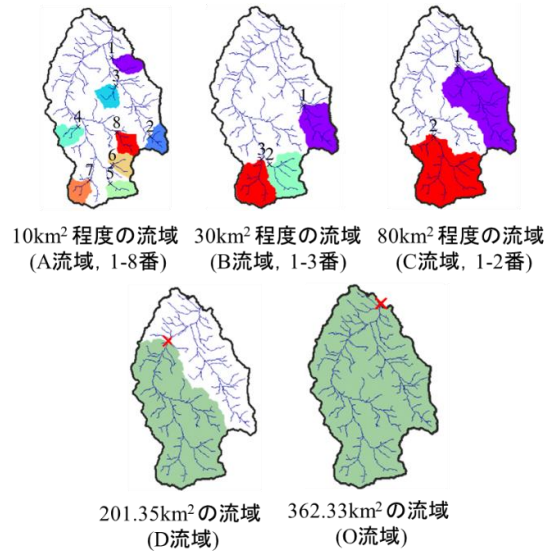


図 2 : 対象流域である魚野川の上流部流域

表 1 : 対象流域の地理特性の諸元

流域名	流域面積[km ²]	流路長[m]	流域平均勾配 [-]
A-1	10.02	4147	0.111
A-2	10	2340	0.215
A-3	10.01	2911	0.118
A-4	10.36	2715	0.103
A-5	10.15	2858	0.208
A-6	10.32	2436	0.194
A-7	10.06	3233	0.181
A-8	10.17	3194	0.156
B-1	31.18	5682	0.12
B-2	30.02	4768	0.136
B-3	30.01	5835	0.117
C-1	81.79	9458	0.088
C-2	80.74	8706	0.081
D	201.32	16939	0.043
O	362.33	19386	0.033

5. パラメータ同定法

S-Q 曲線法という貯留量と流量の関係からパラメータ T_l を同定し、その後パラメータ K の同定を行い、得られたパラメータで検討を行った。永井らの研究により、大中出水の場合パラメータ P の値は、 $P=0.6$ に固定できることが知られており、本研究でもこの値を用いた⁹⁾。まず貯留量 $s(t)$ を式(2)の関係から差分法で算出した。S-Q 曲線法は、貯留量と流量の関係を一価関数に近似する方法である。S-Q 曲線がループの関係になっているとき、つまり S-Q 曲線が一価関係になっていない時、遅れ時間 T_l の値を仮定して、計算を繰り返す。この時、S-Q 曲線が時計回りのループの場合、 T_l を大きくし、反時計回りのループの場合、 T_l を小さくする。このようにして S-Q 曲線が、最も一価関数に近づいたときの時間を T_l として同定した(図 3)。 $P=0.6$ と固定した場合、式(1)は式(4)の形で表すことができ、パラメータ K 以外は既知のため一次関数と同様に扱うことができる。y 軸に $s(t)$ を、x 軸に $q(t+T_l)^{0.6}$ を取り、その傾きからパラメータ K を同定した。

$$s(t) = Kq(t+T_l)^{0.6} \quad (4)$$

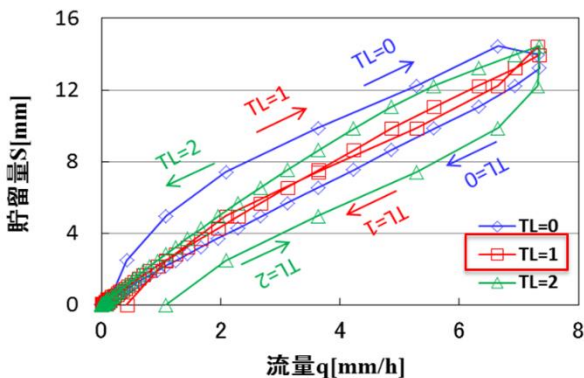


図 3 : S-Q 曲線法における T_l の決定

6. パラメータ推定式の決定

同定したパラメータを使用して流域の地理特性を直接式に含んだ貯留関数パラメータ K, T_l 推

定式を導出する。今回、パラメータ K, T_l の推定式を以下の式(5)、式(6)を基礎式とした。

$$K = aA^b S^c Re^d \dots\dots\dots (5)$$

$$T_l = eA^f S^g Re^h \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 K :貯留関数のパラメータ、 T_l :遅れ時間 [min]、 $a \sim h$:モデルの定数、 A :流域面積 [km²]、 S :流域平均流路勾配 [-] である。本研究では、地理特性 3 つを変数とし、以下の 2 つの方法によってモデル定数を決定する。

- i. エクセルのソルバーによる最小二乗法
- ii. 回帰分析による方法

i はエクセルのソルバーにより、上記の式による推定式による K と S-Q 曲線法で同定された K の差の 2 乗和が最小になる時の定数をモデル定数として決定する方法である。ii は、まず式(5)、式(6)それぞれに常用対数をとる。その結果を式(7)、式(8)に示す。

$$\log K = \log a + b \log A + c \log S + d \log Re \quad (7)$$

$$\log T_l = \log e + f \log A + g \log S + h \log Re \quad (8)$$

3 つの地理特性も同様に常用対数を取り、回帰分析によってモデル定数を求める方法である。

その結果得られたパラメータ K, T_l についてのモデル定数の結果を表 2、3 に示し、パラメータ K, T_l について推定式のパラメータと実測値との比較を図 4、5 に示す。図 4、5 の決定係数はパラメータ K については 0.89、パラメータ T_l は 0.87 であり、良好な当てはまりを示した。

表 2 : パラメータ K についてのモデル定数結果

	a	b	c	d
最小二乗法	2.49	0.11	-0.16	-0.02
回帰分析	2.65	0.10	-0.16	-0.02

表 3 : パラメータ T_l についてのモデル定数結果

	e	f	g	h
最小二乗法	124.39	0.22	-0.15	-0.53
回帰分析	126.22	0.22	-0.15	-0.54

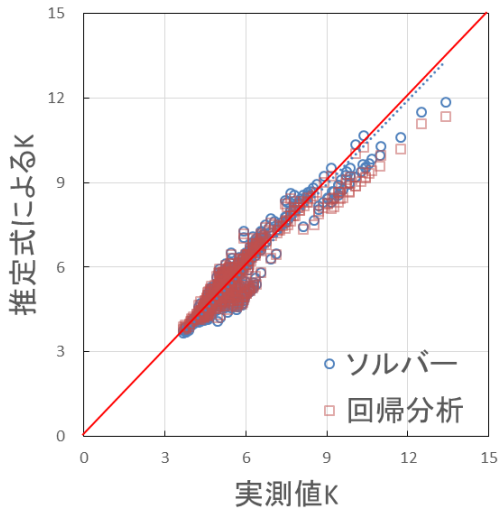


図 4：パラメータ K について推定式による K と実測値の K との比較

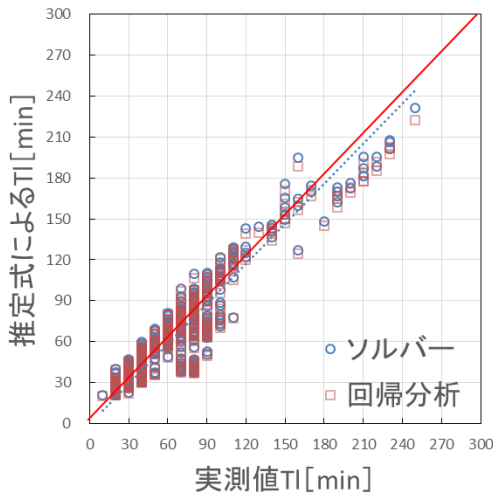


図 5：パラメータ T_l について推定式による T_l と実測値の T_l との比較

表 2, 3 のパラメータ毎に最小二乗法と回帰分析の結果を平均した値を本研究における貯留関数パラメータの推定式とした。その結果を以下に示す。

$$K = 2.57A^{0.11}S^{-0.16}Re^{-0.02} \dots\dots\dots (9)$$

$$T_l = 126.2A^{0.22}S^{-0.148}Re^{-0.537} \dots\dots\dots (10)$$

7. 実河川への適用

本定数推定式を全国 5 河川 6 流域に適用させ、既存式との比較を行った。これらの流域は幅広い流域面積、流域平均勾配になるように選択した。また 2004 年から 2014 年までの大中出水を対象とした。表 4 に適用河川の基本データを示す。

表 4：適用河川の基本データ

県	河川名	流域	流域面積 [km ²]	洪水イベント数	分類
新潟	天王川	天王川	7.7	2	小流域
		大谷ダム	55	1	
	笠堀ダム	69.5	1		
香川	土器川	常包橋	92	2	中流域
静岡	安倍川	牛妻	284	5	
福岡	矢部川	船小屋	459	4	

ここで、流域面積 100km² 以下の流域を小流域、流域面積が約 300km² 以上の流域を中流域として分類した。既存式は流域面積が 300km² 以下の流域で重みづけをした後、総合化を図っているため、300km² を基準としてそれより大きい流域、小さい流域での傾向を評価するためである。流出計算の再現性は以下の式に示す Nash and Sutcliffe(1970)の効率係数(以下 Nash 係数)を用いて評価した⁷⁾。Nash 係数は一般に 0.7 以上であれば再現性が良いとされる。

$$e = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{q_o(i) - q_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^N \{q_o(i) - q_{ave}\}^2} \dots\dots\dots (11)$$

N：計算時間数， $q_o(i)$ ：i 時の実測流量，
 $q_c(i)$ ：i 時の計算流量， q_{ave} ：実測流量の平均値である。

6 流域の流出結果について Nash 係数を算出した結果と流域面積との関係を図 6 に示す。

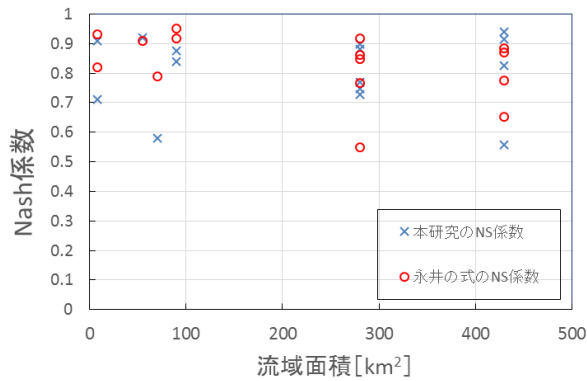


図 6：流域面積と Nash 係数の関係

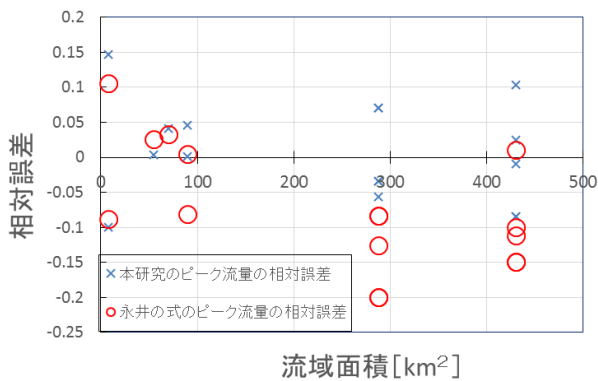


図 7：流域面積とピーク流量の相対誤差の関係

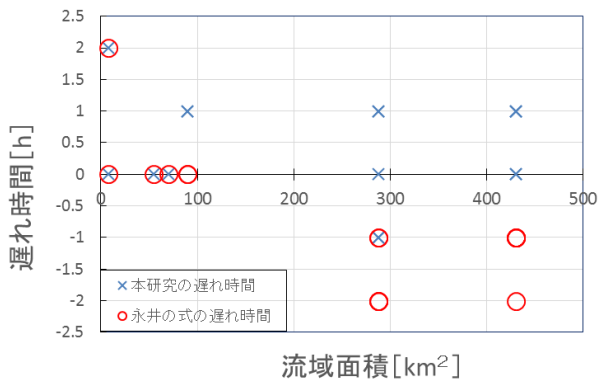


図 8：流域面積と遅れ時間の関係

まず、図 6 を見ると、ほとんどの洪水イベントについて本検討式、既存式共に Nash 係数が 0.7 を上回っており、流域面積と Nash 係数の傾向は確認できなかった。Nash 係数は洪水イベント全体としての再現性を評価している指標である。そこで洪水解析において重要な値である、ピーク流量、遅れ時間に注目して既存式との評価を行った。ピーク流量に関しては、実測値との相対誤差を算出し比較した。図 7,8 を見

ると、小流域については、既存式、本研究式ともに大きな差はないと言える。しかし、流域面積が約 300km² 以上の中流域に関しては、既存式ではピーク流量、遅れ時間ともに過小に表現されている。本研究式では、既存式と比べピーク流量の相対誤差が小さいことがわかる。遅れ時間に関しては、過大に表現されているイベントもあるが、既存式より優位に表現された。

8. XAJ3 への適用

洪水の流出には、表面流出、中間流出、地下水流出など様々な成分に分けられる。貯留関数法は降った雨が木々や土壌などの貯留を 1 次流出率、飽和雨量などで表現し、河道に流れ出した流出量を貯留関数法により、河道の貯留として表現し河川流量を算出する。このため、地下水流出などを再現することはできない。そのため、表面流出、中間流出、地下水流出を計算モデルに組み込んでいる XAJ3 モデル(新安江モデル)で河道への流出過程を表現し、河道の集中過程を貯留関数法(SF モデル)によって表現する SFXAJ3 モデル⁸⁾の貯留関数パラメータに本検討式を使用し、結果の検討を行った。検討を行った流域は、新潟県五十嵐川の笠堀、大谷ダム流域であり、対象洪水は 2011 年 7 月 28 から 31 日に発生した新潟・福島豪雨である。流出解析結果を図 9,10 に示し、Nash 係数のまとめを表 5 に示す。

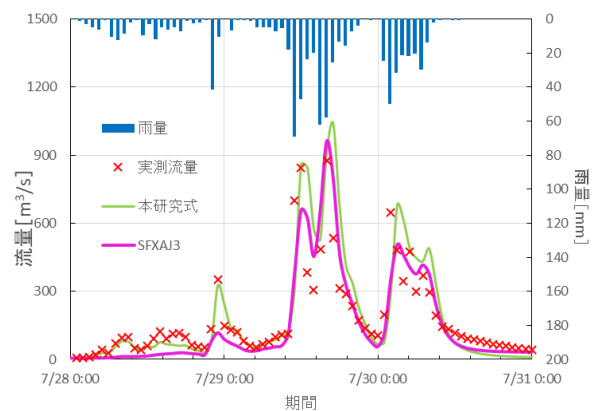


図 9：笠堀ダム流域における貯留関数法と本研究式を含んだSFXAJ3モデルの比較

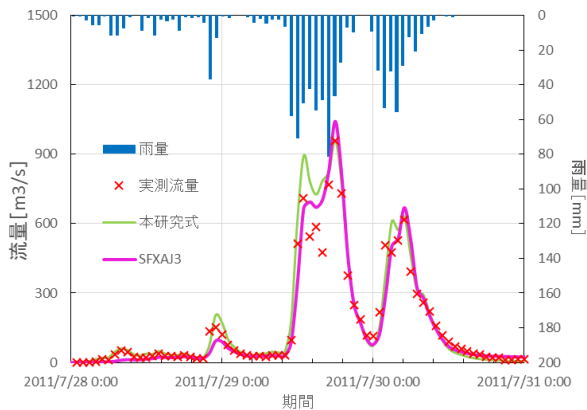


図 10：大谷ダム流域における貯留関数法と本研究式を含んだSFXAJ3モデルの比較

表 5：流出解析結果の Nash 係数まとめ

	笠堀ダム Nash 係数	大谷ダム Nash 係数
本研究式	0.58	0.92
SFXAJ3	0.78	0.94

図 9, 10, から本研究式をパラメータとした貯留関数法と本研究式の総合化貯留関数パラメータを含んだ SFXAJ3 モデルの計算結果を比較する。笠堀ダム流域では、洪水のピーク流量の再現性は本検討式が良く再現できているが、SFXAJ3 モデルは遅れ時間や最も実測流量が大きい 3 山目のピークをよく表現できている。大谷ダム流域に関しては貯留関数法では再現できていない 2 山目のピークを SFXAJ3 モデルではよく表現できている。また、表 5 から本研究式をパラメータとした貯留関数法より本研究式の総合化貯留関数パラメータを含んだ SFXAJ3 モデル方が流出解析結果の再現性が高いという結果であった。

9. まとめ

本研究では、分布型流出モデルの計算結果を実測値として用いることにより、流域特性、そして降雨強度といった降雨特性から定数を決定することができる、幅広い流域に適用可能な貯留関数法の定数推定式を導出することができた。この定

数推定式を全国 5 河川 6 流域に適用させ既存式との比較を行ったところ、全体的な再現性に大きな差はないという結果であった。しかし既存式で精度が低下する流域面積が約 300km² 以上の流域では、ピーク流量、遅れ時間ともに本研究式の方が優位に表現できることが示された。貯留関数法と新安江モデルの複合モデルである SFXAJ3 モデルの貯留関数法に本研究式を適用させたところ、問題なく適用でき、新潟県五十嵐川流域において流出解析を行ったところ貯留関数法のみでの計算結果と比較して、本検討式を含んだ SFXAJ3 モデルの再現性が高く表現できることが示された。

参考文献

- 1) 木村俊晃, 貯留関数法, 株式会社 河鍋書店, pp10, 1975
- 2) 永井明博・角屋睦・杉山博信・鈴木克英, 貯留関数法の総合化, 京都大学防災研究所年報, 第 25 号 B-2, pp8, 1982
- 3) 前掲書, pp7
- 4) 前掲書, pp12
- 5) 中川雅宏, 分布型流出モデルによる洪水到達時間の調査, 長岡技術科学大学, pp15-18, 2011
- 6) 永井明博・角屋睦・杉山博信・鈴木克英, 貯留関数法の総合化, 京都大学防災研究所年報, 第 25 号 B-2, pp7, 1982
- 7) Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe, River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of Principle. J. Hydrology, 10, pp282-290, 1970
- 8) 山本隆広・陸 旻皎, 連続流出シミュレーションが可能な貯留関数法の開発と評価-有効降雨計算を 2 成分, 3 成分新安江モデルに置き換えた場合の比較-, 水文・水資源学会発表会要旨集, 2009