

日本全域を対象とした貯留関数法のモデルパラメータの一般化

Generalization of Parameters of Storage Routing Model for Entire Japan

室蘭工業大学
室蘭工業大学
室蘭工業大学
日本気象協会
室蘭工業大学

○学生員 上田 伸也
学生員 奥泉 宗一郎
正員 中津川 誠
正員 臼谷 友秀
学生員 林下 直樹

(Shinya Ueda)
(Soichiro Okuizumi)
(Makoto Nakatsugawa)
(Tomohide Usutani)
(Naoki Hayashishita)

1. はじめに

iRIC における流出解析ソルバーとして SRM(Storage Routing Model)の開発が進んでいる。SRM は、雨量と流量を入力することで、SRM で用いられている貯留関数モデルのモデルパラメータを最適化する機能がある。また、雨量とモデルパラメータを入力する事で、流量計算する機能がある。従って、適切なモデルパラメータと予測雨量を与えることができれば、高い精度で流量を予測することができる可能性がある。一方で、流量データを得ることができない地点においては、モデルパラメータを最適化することができないため、流量計算が困難となる。

以上を背景に本研究では、SRM におけるモデルパラメータを地質より推定する手法を提案し、流量計算の汎用性を高めることを試みた。地質に関しては日本のほぼ全域において国土交通省により 1km メッシュでデータが整理されているため¹⁾、この推定手法を一般化することで流量データの得られない地域においても、流量予測を精度良く行うことが可能になると考える。

流量データの少ない流域での流量計算に関しては、洪水予測に向けたタンクモデルのモデルパラメータの総合化についての報告(小葉竹ら²⁾)や、長期流出を対象に地質や土地利用などからモデルパラメータを設定する方法を提案した研究(横尾ら³⁾)がある。いずれもモデルパラメータを決める際に地質情報を取り入れ、パラメータ決

定に有効であることを報告している。

そこで本研究では、全国の河川のうち、流域面積が 1,000km² 以下で、本川上流部にダムの無い河川を対象とし、地質区分の面積率(流域に占める任意の地質区分の面積の割合)に基づいてモデルパラメータを決定する方法を提案する。具体的には次の手順で検討を進めた。

- 1) 全国の河川の洪水事例を収集し、各流域の地下水分離時定数 T_c を推定した。
- 2) 得られた T_c と収集したデータを基に貯留関数モデルにおけるモデルパラメータの最適化を行い、流量計算を行った。
- 3) 各流域のモデルパラメータと地質区分の面積率との関係に基づき、モデルパラメータを算定する重回帰式を作成した。
- 4) 重回帰式によって算出された地質設定パラメータを用いて流量を計算し、最適化したモデルパラメータを用いた場合と比較した。

2. 対象流域と基礎データ

今回対象とした河川は、表-1 に示す 18 河川である。収集した洪水時の雨量データおよび流量データは、流域内の国土交通省所管の観測所のものを基本とした⁴⁾。収集期間は 1999 年 10 月～2010 年 12 月の約 11 年間とし、単位時間あたりのデータを対象にした。また、解析する洪水の基準としてはピーク比流量が 0.4(m³/sec/km²)とした。地質には国土交通省の国土数値情報⁵⁾(G05-54M)を基礎データとして用いた。

3. 流量計算手法

3.1 SRM における貯留関数モデル

本研究では、SRM におけるモデルパラメータの推定を試みる。SRM は貯留関数法を用いたものであり、1 段タンク型貯留関数法(以下 1 段法)、2 段タンク型貯留関数法(以下 2 段法)での解析が可能である。雨量から流量を計算する機能、また、1 段法と 2 段法のモデルパラメータを最適化する機能を持つ。

1 段法・2 段法は、有効雨量を必要とせず、観測雨量がそのまま使えるといった特徴がある。このため、流出解析の前処理として必要とされていた基底流量の分離作業や流出率を決めるといった作業が不要である。解析者は前処理なしに観測雨量をそのまま流出モデルに入力す

表-1 対象河川と流域面積

地方	河川名	観測所	流域面積(km ²)
東北	高瀬川	上野	344
	名取川	湯元	130
	雄物川	川井	145
北陸	荒川	小国	287
	梯川	植田	167
中部	狩野川	徳倉	568
	豊川	石田	545
	庄内川	土岐	285
	鈴鹿川	中富田	208
中国	天神川	小田	464
	佐波川	真尾	404
四国	土器川	丸亀橋	127
	物部川	深淵	468
九州	肝属川	俣瀬	450
	小丸川	小丸大橋	433
	番匠川	番匠橋	278
	白川	代継橋	477
	矢部川	船小屋	460

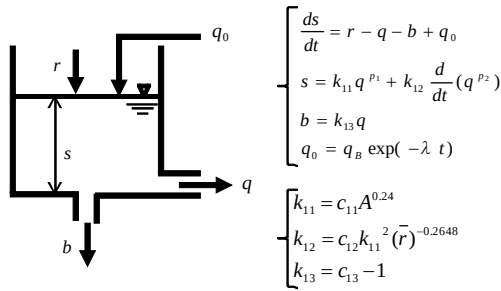


図-1 1 段タンク型貯留関数法の概略図

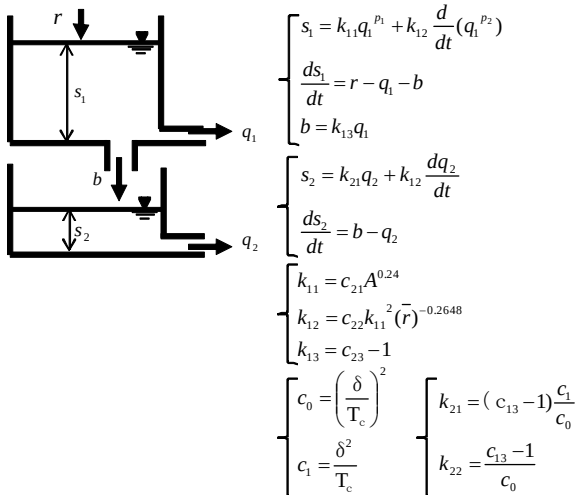


図-2 2 段タンク型貯留関数法の概略図

表-2 各流域の調整パラメータ

河川名	C11	C12	C13	C21	C22	C23	Tc
高瀬川	12.41	0.17	1.71	8.32	0.51	2.85	68.84
名取川	12.54	0.05	1.62	9.18	0.23	2.41	60.77
雄物川	19.94	0.02	1.30	14.83	0.04	1.86	57.55
荒川	7.21	0.07	1.46	5.98	0.15	1.83	59.38
梯川	10.51	0.13	0.95	6.38	0.25	1.61	57.57
狩野川	11.04	0.08	2.10	7.76	0.19	2.83	61.23
豊川	14.40	0.09	2.85	9.25	0.30	5.23	60.27
庄内川	9.24	0.06	1.71	6.69	0.16	2.45	57.29
鈴鹿川	12.26	0.07	1.99	8.91	0.24	3.06	59.91
天神川	13.28	0.05	1.45	10.51	0.15	1.87	105.60
佐波川	10.25	0.15	1.97	8.04	0.30	2.65	69.60
土器川	9.67	0.10	1.02	8.57	0.16	1.18	65.80
物部川	11.99	0.10	1.24	8.90	0.35	1.89	74.70
肝属川	12.44	0.12	1.44	9.09	0.32	1.83	68.80
小丸川	9.99	0.05	1.01	9.87	0.01	1.04	68.50
番匠川	8.37	0.15	0.96	8.27	0.17	1.02	62.10
白川	9.85	0.08	2.05	6.76	0.24	2.95	62.90
矢部川	12.48	0.01	1.30	9.62	0.07	1.79	70.02

るだけでハイドログラフを生成することが可能である。
1 段法と 2 段法の概略図を図-1, 図-2 に示す。

3.2 SRM を用いたモデルパラメータの最適化

SRM における, モデルパラメータを最適化する機能を用いて対象河川のモデルパラメータの最適化を行い, 表-2 に示す調整パラメータとした. c_{11} , c_{12} , c_{13} は 1 段法の調整パラメータ, c_{21} , c_{22} , c_{23} は 2 段法の調整パラメータを示す. また, 2 段法の流量計算においては地下水分離時定数 T_c が必要となるため, 以下の方法⁹⁾に従い, 洪水時のハイドログラフの低減部について, 次式を用いて推定を行った。

$$T_c = -(t_2 - t_1) / (\ln q_2 - \ln q_1) \quad (1)$$

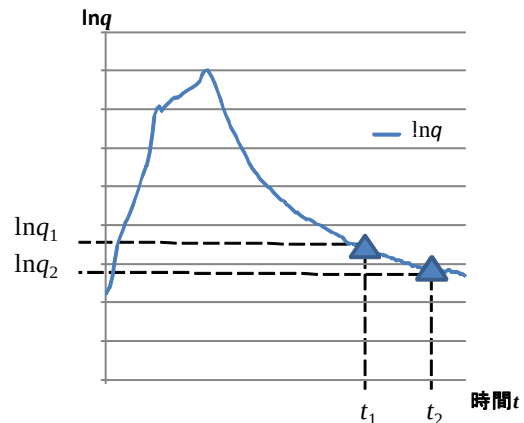
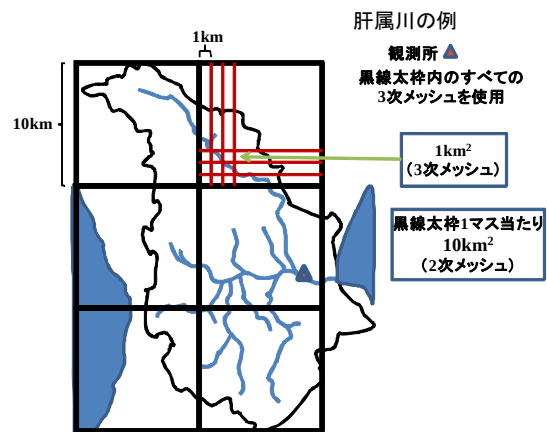
図-3 T_c の算出方法

図-4 メッシュの取得イメージ

(1)式における変数の取り方は, 図-3 に示す通りである。すなわち, ハイドログラフの低減部における傾きが T_c となる。各流域で 10 個の洪水事例において T_c を算出し平均することでその流域の 2 段法の計算で使用する T_c とした。

4. 表層地質の面積率に基づく流量計算

4.1 表層地質の面積率によるモデルパラメータの設定

地質分類は虫明ら⁷⁾の方法に従い, 保水性能に大きく関わる地質 6 区分(第三紀火山岩類, 第四紀火山岩類, 花崗岩類, 第三紀層, 中生層, 古生層)の面積率を算出する。以下にその手順を示す。

- 1) GIS のフリーサービスにおける 2 次メッシュ (10km²)において, 各流域を含むものを抽出する(図-4 参照)。
- 2) 抽出した 2 次メッシュ内のすべての 3 次メッシュにおける地質データを整理する。
- 3) 整理した 3 次メッシュの地質データの中で 6 区分に含まれるものをそれぞれ合計し, 抽出した 2 次メッシュの総面積で除したものをその流域における地質の面積率とする。

それぞれの流域の面積率を表-3 に示す。なお, 上述のとおり流域を含む 2 次メッシュを地質区分に使用しているため, 実際の流域面積よりも最大で 30%ほどの誤差

表-3 各流域における地質の面積率

河川名	第三紀 火山岩	第四紀 火山岩	花崗岩	第三紀層	中生層	古生層
高瀬川	0.225	0.460	0.000	0.113	0.000	0.000
名取川	0.275	0.077	0.013	0.156	0.000	0.000
雄物川	0.727	0.110	0.047	0.003	0.000	0.000
荒川	0.350	0.000	0.273	0.295	0.000	0.015
梯川	0.358	0.000	0.000	0.052	0.000	0.000
狩野川	0.163	0.035	0.000	0.095	0.313	0.000
豊川	0.000	0.000	0.018	0.069	0.250	0.000
庄内川	0.000	0.000	0.250	0.000	0.002	0.014
鈴鹿川	0.000	0.000	0.234	0.294	0.000	0.000
天神川	0.006	0.000	0.434	0.000	0.000	0.000
佐波川	0.000	0.000	0.230	0.024	0.000	0.026
土器川	0.011	0.000	0.296	0.000	0.000	0.000
物部川	0.000	0.000	0.000	0.000	0.456	0.382
肝属川	0.005	0.583	0.088	0.040	0.163	0.000
小丸川	0.000	0.004	0.003	0.376	0.444	0.006
番匠川	0.000	0.018	0.000	0.000	0.620	0.328
白川	0.125	0.327	0.000	0.000	0.020	0.000
矢部川	0.234	0.018	0.000	0.008	0.000	0.000

がある。なお、6 区分の地質に該当しないメッシュがあるため、面積率の合計は 1 にならない。また、全流域の地質区分の割合を図-5 に示す。図から古生層は若干少ないものの、全体的に極端な偏りがないことがわかる。表-2 に示した各流域のモデルパラメータを目的変数、地質の面積率を説明変数として重回帰式を作成した。なお、説明変数間の相関係数は-0.45~0.72 の範囲にあった。得られた回帰式は次のとおりである。

$$c_{11} = 10.828 + 7.346g_1 + 1.149g_2 + 0.597g_3 - 7.331g_4 + 3.849g_5 - 7.556g_6 \quad (2)$$

$$c_{12} = 0.086 - 0.070g_1 + 0.098g_2 - 0.023g_3 - 0.001g_4 - 0.041g_5 + 1.171g_6 \quad (3)$$

$$c_{13} = 2.041 - 1.158g_1 - 10.260g_2 - 1.214g_3 - 0.319g_4 - 0.485g_5 - 1.854g_6 \quad (4)$$

$$c_{21} = 6.934 + 6.470g_1 + 0.826g_2 + 5.084g_3 - 3.957g_4 + 6.890g_5 - 5.822g_6 \quad (5)$$

$$c_{22} = 0.284 - 0.031g_1 + 0.318g_2 - 0.324g_3 + 0.117g_4 - 0.495g_5 + 0.685g_6 \quad (6)$$

$$c_{23} = 3.406 - 2.326g_1 - 0.833g_2 - 3.584g_3 - 0.611g_4 - 1.815g_5 - 2.654g_6 \quad (7)$$

$$T_c = 60.679 - 5.299g_1 + 11.324g_2 + 47.558g_3 - 19.674g_4 + 15.139g_5 - 1.026g_6 \quad (8)$$

ここで、 g_1 , g_2 , g_3 , g_4 , g_5 , g_6 : 第三紀火山岩類, 第四紀火山岩類, 花崗岩類, 第三紀層, 中生層, 古生層の面積率である。

式(2)~(8)を用いて、それぞれの流域ごとに貯留関数モデルのモデルパラメータを算定した。調整パラメータと地質から算定した地質設定パラメータ c_{11} , c_{12} の相違を表したものを図-6 に示す。図の横軸は調整パラメータ、縦軸は式(2)~(8)により算定した地質設定パラメータである。ここに示すように点は散らばってはいるものの、概ね傾き 45 度の直線に並んでいることが分かる。他のモデルパラメータにおいても同様の傾向が見られた。

4.2 地質設定パラメータを用いた流量再現

以上で算定した地質設定パラメータと調整パラメータを用いて、流量を再現した。その結果を図-7, 図-8 に示す。図は誤差の小さかった天神川を図-7 に、誤差の大きかった豊川を図-8 に示す。それぞれ上段が 1 段法、

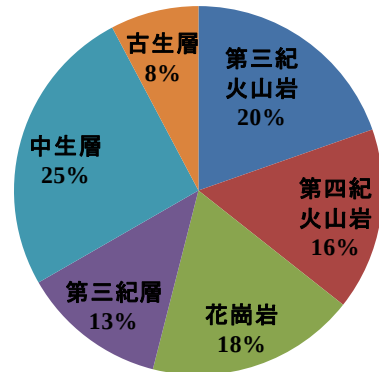
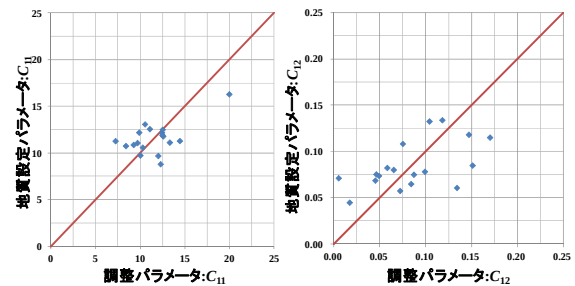


図-5 全流域の地質区分の割合

図-6 地質設定パラメータと調整パラメータの相違
左: c_{11} 右: c_{12}

下段が 2 段法の計算結果である。図中、水色の棒グラフが雨量、赤色の実線が実測流量、緑色の実線が調整パラメータによる計算流量、紫色の実線が本章で検討した地質設定パラメータによる計算流量である。図によると、天神川はピーク時と低減部に多少の誤差が見られるものの、それ以外は調整パラメータ、地質設定パラメータともに精度良く再現できている。それに対して豊川は、調整パラメータを用いた流量計算は 1 段法、2 段法ともに精度良く再現できているものの、地質設定パラメータによる流量計算は 1 段法、2 段法ともに過大評価している。

ここで、各実測流量と計算流量との誤差を評価する。誤差の評価には、Nash-Sutcliffe 係数を用いた。以下に式を示す。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{q_o(i) - q_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^N \{q_o(i) - q_{av}\}^2} \quad (9)$$

ここで、 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_{av} : 実測流量の平均である。Nash-Sutcliffe 係数は 1.0 に近いほどモデルの精度が高いとされ、0.7 以上でモデルの再現性は高いとされている。この指標を用いて 1 段法、2 段法において、調整パラメータと地質設定パラメータを用いた流量計算についてそれぞれの Nash-Sutcliffe 係数を求めたものを表-4 に示す。表-4 を見てわかるように調整パラメータを用いた計算流量における Nash-Sutcliffe 係数は最低でも 0.814 となっており、精度良く流量を再現できていると言える。地質設定パラメータを用いた流量計算は、豊川と狩野川の 2 段法で特

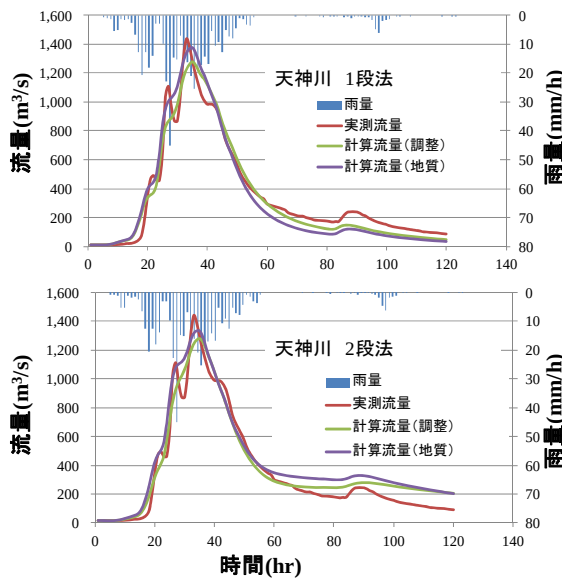


図-7 天神川の計算結果

表-4 それぞれのパラメータにおける計算流量と実測流量の誤差 (Nash-Sutcliffe 係数)

河川名	1段タンク型貯留関数法		2段タンク型貯留関数法	
	調整パラメータ	地質設定パラメータ	調整パラメータ	地質設定パラメータ
高瀬川	0.964	0.870	0.981	0.828
名取川	0.947	0.948	0.915	0.914
雄物川	0.814	0.779	0.842	0.504
荒川	0.968	0.773	0.956	0.713
梯川	0.816	0.686	0.982	0.718
狩野川	0.943	0.856	0.960	0.302
豊川	0.963	0.505	0.936	0.263
庄内川	0.972	0.916	0.965	0.856
鈴鹿川	0.980	0.772	0.928	0.802
天神川	0.961	0.940	0.952	0.923
佐波川	0.959	0.926	0.963	0.928
土器川	0.973	0.753	0.974	0.660
物部川	0.968	0.877	0.973	0.897
肝属川	0.991	0.965	0.894	0.870
小丸川	0.981	0.409	0.982	0.659
番匠川	0.973	0.926	0.971	0.869
白川	0.953	0.855	0.826	0.728
矢部川	0.918	0.822	0.906	0.787
平均	0.947	0.810	0.939	0.735

に誤差が大きくなっており、この点については今後さらなる検討が必要となる。しかしながら、平均的に見ると今回対象とした河川全体としては、大幅な精度低下は見られなかった。

以上より地質の面積率を利用したパラメータ設定は、流量データの得られない地点での流出計算に有効であると考えられる。

5. まとめ

SRM におけるモデルパラメータを地質から推定する手法について検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 流出解析ソルバーSRM の機能を用いてモデルパラメータを調整し洪水時における流量計算を行った結果、高い精度で流量を再現できた。
- 2) 各流域におけるモデルパラメータと地質の面積率の関係に基づき、パラメータを算定する重回帰式を導いた。

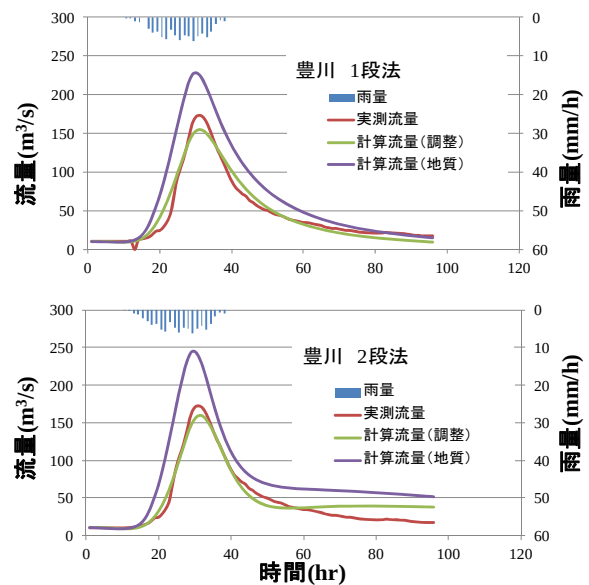


図-8 豊川の計算結果

- 3) SRM により調整したモデルパラメータによる流量計算と、重回帰式に基づく地質設定パラメータによる流量計算を比較した。その結果、調整パラメータによる流量計算に比べて、地質設定パラメータによる流量計算に大幅な精度低下は見られなかった。

以上より、地質データを用いることで流量資料の少ない地域において、精度よく流量計算しうる可能性が示唆された。今後、さらに多くの流域において検証を進めていきたい。

謝辞：本研究の一部は学術研究助成基金助成基盤研究および国土交通省河川砂防技術研究開発公募(水防災技術分野)の助成を受けた。また、今回の研究を行うにあたり、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所の関係各位には貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土数値情報（土地分類メッシュ）国土交通省：
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gmlold/index.html>
- 2) 小葉竹重機，石原安雄：タンクモデルおよび集中面積図を利用した洪水流出モデルの総合化，土木学会論文報告集，第337号，pp.129-135，1983。
- 3) 横尾善之，風間聡，西村仁嗣，沢本正樹：国土数値情報に基づくタンクモデル定数の推定，水文・水資源学会誌，Vol.12，No.6，pp.481-491，1999。
- 4) 水文水質データベース 国土交通省：
<http://www1.river.go.jp/>
- 5) 国土地理院基盤地図情報；基盤地図情報ダウンロードサービス：<http://fgd.gsi.go.jp/download/>
- 6) 財団法人北海道河川防災研究センター・研究所：実践流出解析ゼミ，株式会社アイワード，pp.9-1-10-15，2006。
- 7) 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，土木学会論文報告集，第309号，pp.51-62，1981。