

流量観測データのない河川における水位推定手法の提案

Proposal for a Flood Water Level Estimation Method for Rivers Whose Discharge is Ungauged

室蘭工業大学
室蘭工業大学
室蘭工業大学

○学生員 名久井 責成 (Sena Nakui)
正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
学生員 奥泉 宗一郎 (Soichiro Okuizumi)

1. はじめに

ここ数年、わが国では観測史上最大を塗り替える大雨が毎年発生し、大規模な洪水災害や土砂災害を引き起こしている。被害を未然に防ぐため、いつでも、またいかなる場所でも水位を予測する手法の必要性が高まってきている。水位を予測する手法としては、計算された流量に H-Q 式を当てはめて水位を求めるのが一般的だが、H-Q 式の作成には流量と水位の観測データが必要である。しかし、日本の中小河川においては流量観測が行われていない例が多く、そのような場所では流量データを得ることが困難となっている。

流量データのない流域での流量計算に関しては、星ら¹⁾が北海道の観測データに乏しい流域 (Ungauged Basin) を対象とした貯留関数法に基づく流出計算手法を提案している。また、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した小葉竹ら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横尾ら³⁾の研究例がある。いずれも流出計算におけるモデルパラメータと地質情報に関係性があることを報告している。

そこで本研究では、流量観測データのない河川において、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) に基づいて貯留関数法のモデルパラメータを決定する奥泉ら⁴⁾の方法を用いて流量計算を行い、求められた計算流量と観測水位を用いて H-Q 式を作成した。なお、観測水位の再現精度の検証に関しては、

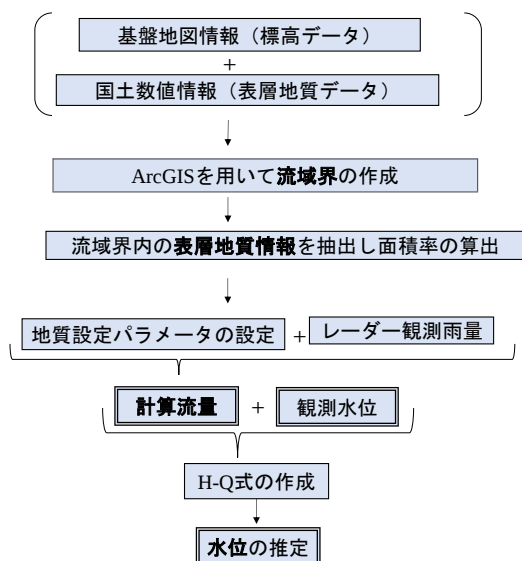


図-1 水位推定手法のフローチャート

Nash-Sutcliffe 係数およびピーク相対誤差を用いた。全体の作業の流れを図-1 に示す。とくに流量観測データのない流域でも以下のような手順で、全国でデータベース化されている地質情報のみから流量、水位の推定が行なえるようにした。

- 1) ArcGIS を用いて流域界を作成し、その流域界から表層地質の面積率を抽出する。
- 2) 抽出した表層地質の面積率から奥泉ら⁴⁾の方法を用いて求めた貯留関数法のモデルパラメータを用いて流量を推定する。
- 3) 求められた流量と観測水位データで H-Q 式を作成し、求められた回帰係数より水位の推定を行う。

2. 研究方法

2.1 調査対象地点と解析データ

今回の検討は、2014 年 9 月 9 日から 12 日の豪雨期間中に、特に雨量が多く、氾濫危険水位を超えたウヨロ川、敷生川、白老川を対象に行った。なお、これらの河川は北海道が管理する二級河川であり、流量観測は行われていない。図-2 は敷生川、ウヨロ川、白老川の流域界および水位観測所の位置を示している。対象期間は 2011 年～2015 年の 5 年間のうち、9 月の観測水位が水防団待機水位を超えた日の前後 24 時間を含む合計 3 日間 (72 時間) になるように抽出した。本研究では 2011 年 9 月 5 日から 9 月 7 日、2012 年 9 月 8 日から 9 月 10 日、2014 年 9 月 9 日から 9 月 11 日の 3 事例を選定した。水位データは、流域内の北海道所管の観測所のものを用いた。雨量データは、1km メッシュ合成レーダーエコー強度を利用し、流域界内の雨量データを切り出し、時間毎に集計したもの (以下、レーダー観測雨量) を用いた。

地質情報の抽出は、図-3 に示すように ArcGIS-SpatialAnalyst ツールを用いて基盤地図情報数値標高モ

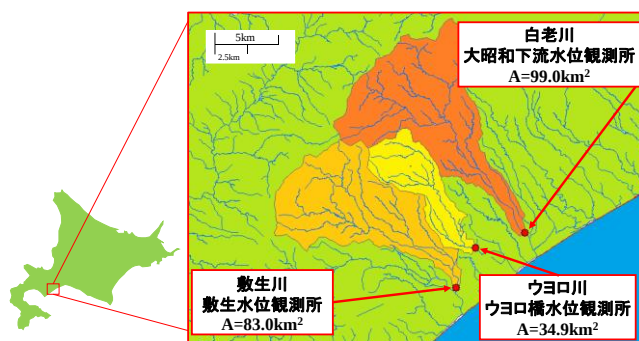


図-2 敷生川、ウヨロ川、白老川の概要図

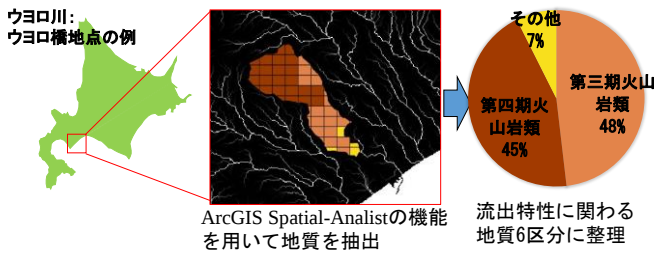
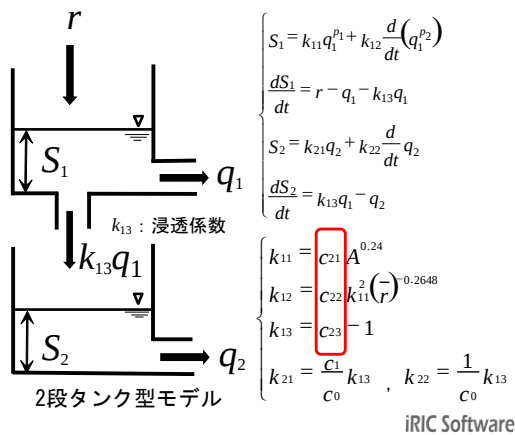
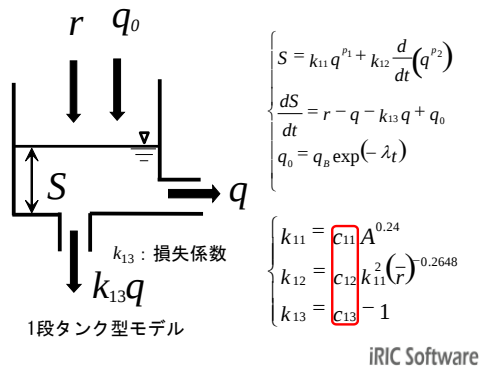


図-3 地質データ抽出イメージ図



ここで、 S : 貯留高(mm), S_1 : 1段タンク貯留量(mm/h), S_2 : 2段タンク貯留量(mm/h), q : 表面流出高(mm/h), q_0 : 基底流出高(mm/h), q_b : 初期流出高(mm/h), q_1 : 表面流出高(mm/h), q_2 : 中間・地下流出高(mm/h), r : 観測雨量(mm/h), r : 平均有効雨量強度(mm/h), f : 流出率, n : 等価粗度(s/m^{1/3}), i : 平均斜面勾配, A : 流域面積(km²), k_{11} , k_{12} , k_{13} , k_{21} , k_{22} , k_{23} , p_1 , p_2 : モデルパラメータ, c_{11} , c_{12} , c_{13} : モデル定数, c_0 , c_1 : 定数, λ : 減衰係数

図-4 iRIC SRM で適用される貯留関数法の概略図

デル(10m 間隔)より観測所の流域界を作成し、内部の地質情報を抽出することで各地質の面積率を算出した。地質情報は国土数値情報 G05-54M (1km メッシュ)を使用した。

2.2 地質を用いた流出計算手法

(1)iRIC SRM による流量計算

本研究では、流量計算に iRIC ソルバー-SRM を用いた。SRM では、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)が利用可能であり、各々について雨量から流量を計算する機能、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

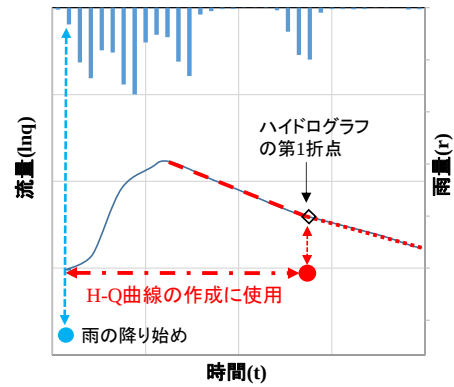


図-5 洪水期間の設定イメージ図

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るだけでハイドログラフを作成することが可能である。1 段法と 2 段法の概略図を図-4 に示す。

(2)表層地質の面積率に基づくモデルパラメータの設定

地質分類は虫明ら⁵⁾の方法に従い、流域の保水性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。そのために図-3 に示すような観測所の流域界を作成し、内部の表層地質情報を抽出し、表層地質を区分し面積率を算出した。

抽出した表層地質の面積率を奥泉ら⁴⁾の提案した重回帰式に適用し、モデルパラメータを求める。

$$C_{ij} = a_{1ij}g_1 + a_{2ij}g_2 + a_{3ij}g_3 + a_{4ij}g_4 + a_{5ij}g_5 + a_{6ij}g_6 + b_1 \quad (1)$$

$$T_c = a_{1Tc}g_1 + a_{2Tc}g_2 + a_{3Tc}g_3 + a_{4Tc}g_4 + a_{5Tc}g_5 + a_{6Tc}g_6 + b_2 \quad (2)$$

$$\lambda = a_{1\lambda}g_1 + a_{2\lambda}g_2 + a_{3\lambda}g_3 + a_{4\lambda}g_4 + a_{5\lambda}g_5 + a_{6\lambda}g_6 + b_3 \quad (3)$$

ここで、 C_{ij} : 各モデルパラメータで図-4 の赤枠で囲まれた諸量に対応する。また、 $a_{1ij} \sim a_{6ij}$, $a_{1Tc} \sim a_{6Tc}$, $a_{1\lambda} \sim a_{6\lambda}$: 各係数, $g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6$: 各々第三紀火山岩類、第四紀火山岩類、花崗岩、第三紀層、中生層、古生層の面積率(0~1), $b_1 \sim b_3$: 重回帰式の切片である。上式で推定されたパラメータを「地質設定パラメータ」と称する。

2.3 観測水位と計算流量の関係式(H-Q 式)

地質設定パラメータを用いて求めた計算流量と観測水位から H-Q 式を作成する。なお今回 H-Q 曲線の作成に使用した洪水事例の期間は、雨の降り始めを起点とし、図-5 に示すような第 1 折点までとする。これは、低水位に重みがつきすぎてピーク観測水位を過小評価しないようにするための措置である。

H-Q 式は実際に運用されているものと同様に $\sqrt{Q}$ と H の線形近似ができるものとして、次の回帰式を用いる。

$$\sqrt{Q} = aH + b \quad (4)$$

ここで、 a, b : 回帰係数, Q : 地質パラメータによる計算流量, H : 観測水位である。

表-1 各流域の表層地質の面積率

河川名	第三紀 火山岩類	第四紀 火山岩類	花崗岩	第三紀層	中生層	古生層
敷生川	0.742	0.158	0.000	0.000	0.000	0.000
ウヨロ川	0.424	0.458	0.000	0.000	0.000	0.000
白老川	0.463	0.476	0.000	0.007	0.000	0.000

表-2 各流域の地質により求めた貯留関数法のモデルパラメータ

河川名	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{21}	c_{22}	c_{23}	T_c	λ
敷生川	15.65	0.070	2.17	10.33	0.230	3.43	52.92	0.019
ウヨロ川	16.25	0.073	1.94	10.90	0.277	3.20	61.33	0.017
白老川	16.27	0.072	1.96	11.02	0.275	3.25	59.71	0.018
全国平均(奥泉ら ⁴⁾)	13.91	0.073	1.89	9.25	0.284	0.28	61.70	0.016

表-3 既往最大事例の計算流量と観測水位を用いた

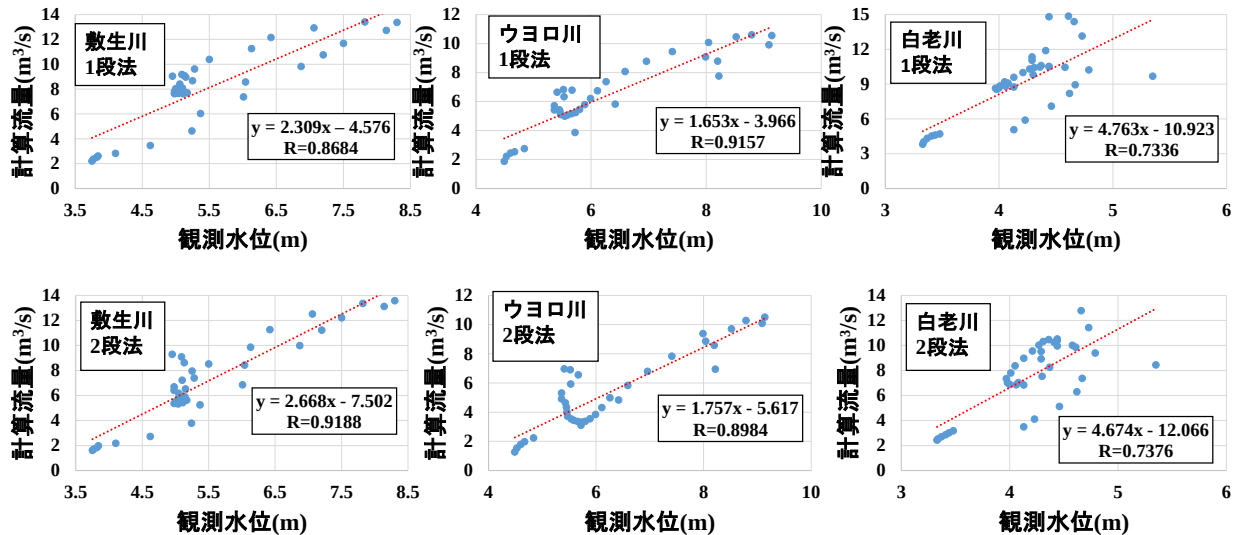
H-Q 式の回帰係数 a, b

河川名	1段法			2段法		
	a	b	b/a	a	b	b/a
敷生川	2.309	-4.575	-1.982	2.668	-7.501	-2.811
ウヨロ川	1.653	-3.966	-2.399	1.757	-5.617	-3.197
白老川	3.599	-5.863	-1.629	3.793	-7.920	-2.088

表-4 各事例で求められた回帰係数を平均化した

H-Q 式の回帰係数 a, b

河川名	1段法			2段法		
	a	b	b/a	a	b	b/a
敷生川	2.456	-5.000	-2.036	2.692	-6.980	-2.590
ウヨロ川	2.182	-6.531	-2.992	2.205	-7.484	-3.369
白老川	4.148	-8.263	-1.963	4.358	-10.541	-2.399

図-6 計算流量と観測水位の H- $\sqrt{Q}$ 関係

3. 結果と考察

3.1 表層地質の抽出結果

それぞれの流域における表層地質の面積率を表-1に示す。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。当該流域には支笏火山や、樽前火山、ホロホロ火山など火山が多く分布しており、表-1 からは第三紀火山岩類、第四紀火山岩類などの火山由来の堆積物が多い割合を占めていることがわかる。表層地質の面積率から求められた地質設定パラメータを表-2に示す。地質設定パラメータを見ると、第三紀火山岩類が多い場合、 c_{13} が大きくなり浸透性が高くなる。また、第四紀火山岩類が多くなると、 c_{11} が大きくなり貯留量が増える。表-2 を見ると、今回求めたパラメータは奥泉ら⁴⁾の求めた全国平均に比べ c_{11} 、 c_{13} が大きくなる特徴があり、対象流域は、透水性・保水性が共に高いと言える。

3.2 流出モデルと H-Q 式を用いた水位再現精度の検証

H-Q 式の作成結果を図-6に示す。左から敷生川、ウヨロ川、白老川の順になっており、上段が 1 段法、下段が 2 段法である。いずれも相関係数が 0.7 以上を示しており、相関があることが確認できた。

本研究では、既往最大の観測水位を示した事例より求められた回帰係数（以下、最大回帰係数）と、各事例の回帰係数を平均して求めた回帰係数（以下、平均回帰係

数）を用いて計算水位を求めた。使用した回帰係数については表-3、表-4に示す。これらの回帰係数を用いて計算水位を求めた。2014 年、2011 年のウヨロ川の例を図-7、図-8に示す。いずれも最大回帰係数を用いたグラフである。グラフを見ると、図-7、図-8のいずれも 1 段法より 2 段法の方がピーク観測水位を精度よく評価できている。また、いずれの場合も計算ピーク水位が観測ピーク水位を下回ることがなく、安全側の評価となっていることがわかる。

ここで、観測水位と計算水位との誤差を下式の Nash-Sutcliffe 係数（以下、Nash 係数）、ピーク相対誤差（以下、Jpe）を用いて評価する。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{H_o(i) - H_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^N \{H_o(i) - H_{av}\}^2} \quad (5)$$

$$Jpe = \frac{|H_{op} - H_{cp}|}{H_{op}} \quad (6)$$

ここで、 N ：計算時間、 $H_o(i)$ ： i 時の観測水位、 $H_c(i)$ ： i 時の計算水位、 H_{av} ：観測水位の平均である。 H_{op} ：観測ピーク水位、 H_{cp} ：計算ピーク水位である。

Nash 係数は 1.0 に近いほどモデルの精度が高く、0.7 以上でモデルの再現性は高いとされる。これらの指標を用いて 1 段法、2 段法において、観測水位と、作成した H-Q 式より求められた計算水位についてそれぞれの Nash 係数、Jpe を求めたものを表-5、表-6に示す。表-5、表-6では Jpe が 0.1 以下となったものを網掛けした。

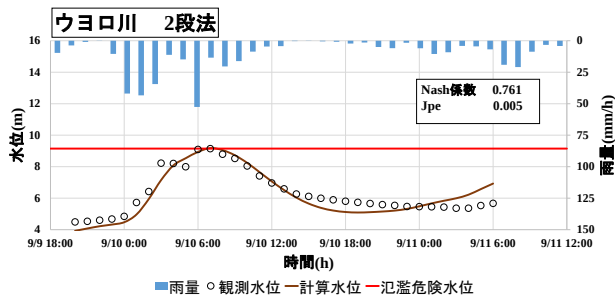
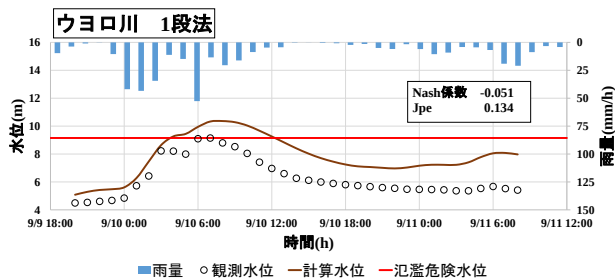


図-7 ウヨロ川の計算結果
(2014年9月9日20時～9月11日8時)

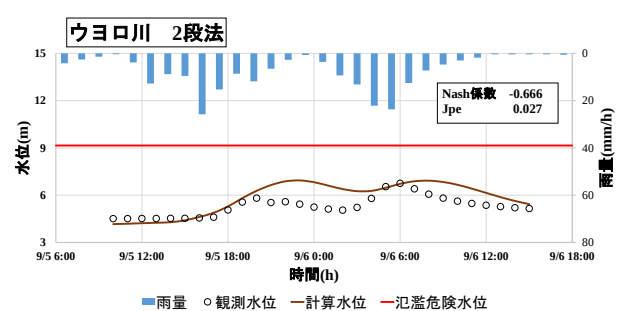
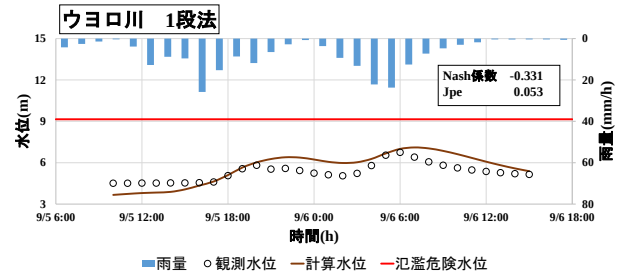


図-8 ウヨロ川の計算結果
(2011年9月5日10時～9月6日15時)

表-5 最大回帰係数より求めた計算水位と観測水位の誤差

河川名	事例	総雨量 (mm)	総流出高 (mm)	1段法		2段法	
				Nash係数	Jpe	Nash係数	Jpe
敷生川	2011/9/5 10:00-9/6 23:00	250	191	0.48	0.10	0.62	0.04
	2012/9/9 1:00-9/10 6:00	169	79	0.15	0.02	-0.30	0.04
	2014/9/9 20:00-9/11 8:00	333	313	0.75	0.06	0.86	0.05
ウヨロ川	2011/9/5 10:00-9/6 15:00	218	115	-0.31	0.05	-0.67	0.03
	2012/9/9 0:00-9/10 5:00	195	97	-0.20	0.03	-0.94	0.07
	2014/9/9 20:00-9/11 8:00	407	1012	-0.55	0.13	0.76	0.01
白老川	2011/9/5 10:00-9/6 20:00	247	158	0.72	0.07	0.35	0.03
	2012/9/9 0:00-9/10 5:00	218	119	0.25	0.03	-0.63	0.03
	2014/9/9 19:00-9/11 8:00	359	154	-0.47	0.08	-0.27	0.02

表-6 平均回帰係数より求めた計算水位と観測水位の誤差

河川名	事例	総雨量 (mm)	総流出高 (mm)	1段法		2段法	
				Nash係数	Jpe	Nash係数	Jpe
敷生川	2011/9/5 10:00-9/6 23:00	250	191	0.63	0.06	0.45	0.10
	2012/9/9 1:00-9/10 6:00	169	79	0.32	0.05	0.14	0.00
	2014/9/9 20:00-9/11 8:00	333	313	0.69	0.10	0.78	0.10
ウヨロ川	2011/9/5 10:00-9/6 15:00	218	115	0.55	0.03	0.37	0.06
	2012/9/9 0:00-9/10 5:00	195	97	0.50	0.09	-0.03	0.03
	2014/9/9 20:00-9/11 8:00	407	1012	0.77	0.20	0.71	0.11
白老川	2011/9/5 10:00-9/6 20:00	247	158	0.77	0.09	0.68	0.10
	2012/9/9 0:00-9/10 5:00	218	119	0.52	0.05	-0.03	0.01
	2014/9/9 19:00-9/11 8:00	359	154	-0.16	0.04	0.02	0.00

最大回帰係数ではピーク計算水位がピーク観測水位を安全側に評価することができた一方、平均回帰係数ではピーク観測水位を過小評価することが多かった。Nash係数で評価される全体的な適合性より防災対応の見地からピークの安全側の評価、立ち上がりを重視すると最大回帰係数を用いたほうがよいと考えられる。

以上より、流量観測データがなくても十分な精度で水位を推定可能であることが示された。

4. おわりに

本研究では、地質データを用いて求めた計算流量と観測水位からH-Q式を作成し、精度について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 流量観測データがなくても、地質データのみから流量と水位の推定が可能であることが示された。
- 2) 通常用いられる観測流量と観測水位の関係を表す

H-Q式に替り、計算流量と観測水位を用いて作成されたH-Q式で水位の推定が可能となった。

- 3) 既往最大事例の計算流量と観測水位を用いたH-Q式の回帰係数(最大回帰係数)を用いた場合、ほとんどの事例において流量のピーク時に計算水位が観測水位を上回り、安全側の推定ができた。

今後は多くの河川で検証を進め、本提案手法の汎用性を確認していきたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、北海道胆振総合振興局室蘭建設管理部登別出張所には資料を提供していただいた。また、平成26年度一般財団法人河川情報センター研究助成金(助成研究名「流量データのない河川でも利用可能な流出計算ソルバーの開発」)の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 大泉卓也, 星清, 橋本識秀: 北海道におけるPUBの提案, 土木学会北海道支部論文報告集, 第60号, pp.284-287, 2004.
- 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) 奥泉宗一郎, 中津川誠, 白谷友秀: GISを用いた汎用的な流出計算手法の提案, 水文・水資源学会誌, Vol.29, No.1, pp.278-289, 2016.
- 5) 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.