

## 2016年8月の連続した大雨に伴う洪水流出量の再現検証

Verification of Reproduction of Flood Runoff due to Continuous Heavy Rain in August 2016

室蘭工業大学 ○学生員 小池 達也 (Tatsuya Koike)  
 室蘭工業大学 正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)

## 1. はじめに

2016年8月、北海道に4つの台風が上陸し、その大雨の影響により北海総東部を中心に河川の氾濫及び土砂災害が発生した。これにより人的被害や住宅被害の他、道路、鉄道、電気などのライフラインに甚大な被害をもたらした。今回の災害ではとりわけ中小河川での氾濫が多く、今後の調査、対策において被災時にどれほどの流量が流れていたかが重要となるが、観測所の無い場所では流量データを得ることが難しいことが課題である。

流量データのない流域での流量計算に関しては、星ら<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>、奥泉ら<sup>4)</sup>の研究例がある。

そこで本研究では、2016年8月洪水を対象として流量観測データのない河川における流出計算を行うにあたり、貯留関数法のモデルパラメータを検討した後に iRIC SRM<sup>5)</sup>を用いて計算を行った。iRIC SRM とは、河川の解析を目的としたオープンソースのソフトウェアである iRIC の機能の一部で、貯留関数モデルを用いた流出計算用ソルバーである。利用者は雨量データを与えることで容易に洪水ハイドログラフを計算することが可能である。本研究の流れを以下に示す。

- 1) 図-1に示す金山ダム流域、札内川ダム流域にて実績流入量の再現性が高いパラメータの検証を行った。
- 2) 1)により求めたパラメータを適用し、iRIC SRMを用いて観測流量の無い河川での流出計算を行った。

## 2. 方法

## 2.1 対象地点と解析データ

今回の検討は、2016年8月の豪雨期間中に、特に雨量が多く、氾濫が起こった十勝川水系のパンケシントク川、ペケレベツ川、戸蔭別川 (中島橋地点)、石狩川水系の空知川 (幾寅地点) を対象に行った。また、パラメータを検討する際に、実績流入量データのある金山ダム、札内川ダムを選定した。図-1に各地点及び各ダムの流域界を示す。計算対象期間は、パンケシントク川、ペケレベツ川、戸蔭別川 (中島橋地点) では2016年8月29日1時～8月31日24時 (72h)、空知川 (幾寅地点) では2016年8月29日11時～9月1日10時 (72h) になるよう抽出しており、どちらも台風10号の影響により豪雨となっ

た期間である。雨量データは、1 km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。流域界の切り出し及び流域面積の算出に関しては、公称値も参考しつつ ArcGIS を用いて行った。

## 2.2 iRIC SRM による流出計算

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-2に示す。

## 2.3 パラメータの設定

観測流量データの無い地点にて流量を計算する際には、過小評価にならないためのパラメータ設定が必要である。本研究では、2016年8月の大雨に見舞われ、実績流入量

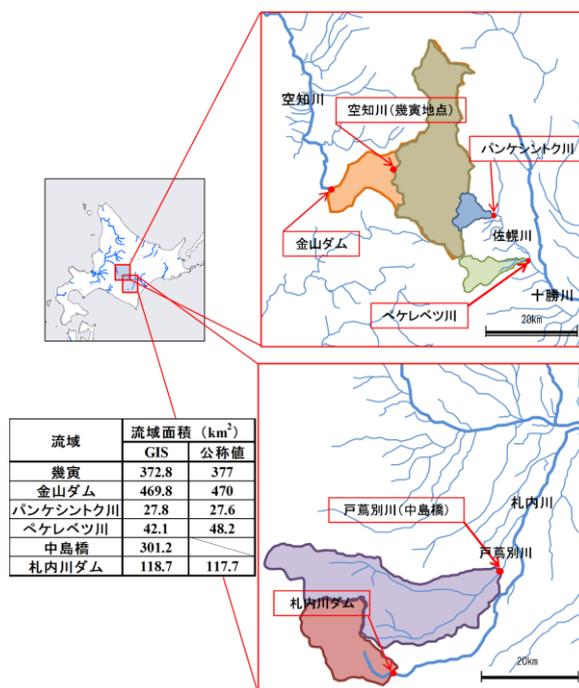


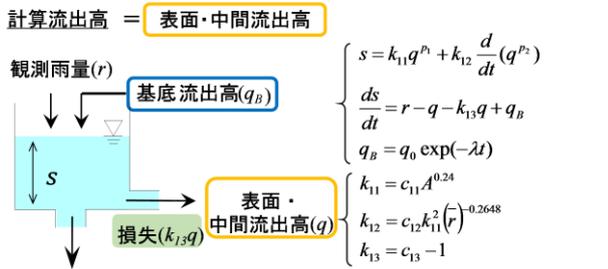
図-1 対象流域

データの得られた金山ダム、札内川ダムに着目し、各パラメータの再現性の検証を行う。候補となったパラメータを以下に示す。なお、再現期間は降雨量の大きい事例として金山ダムは2016年8月30日1時～9月1日7時(55h)、札内川ダムは2016年8月29日19時～8月31日16時(46h)としている。

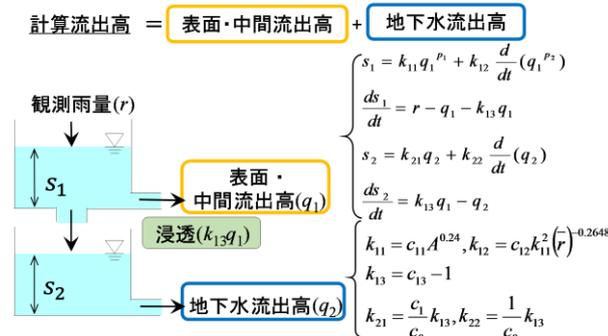
(1) 星らのパラメータ

星ら<sup>9)</sup>の報告では北海道を対象に、1段タンク型貯留関数モデルおよび2段タンク型貯留関数モデルの代表的な定数を求めた成果が示されており、既往洪水のモデル定数を解析し、地域の特性を考慮した上で、北海道を4つの地域(I~IV地域)に分け、それぞれの地域のモデル定数と、北海道全域のモデル定数を求めている。この成果を援用し、金山ダムを「I地域パラメータ」、札内川ダムを「IV地域パラメータ」と称して適用する。

〈1段タンク型貯留関数モデル〉



〈2段タンク型貯留関数モデル〉



S: 貯留量(mm), S<sub>1</sub>: 1段タンク貯留量(mm/h), S<sub>2</sub>: 2段タンク貯留量(mm/h), q: 表面流出高(mm/h), q<sub>B</sub>: 基底流出高(mm/h), q<sub>0</sub>: 初期流出高(mm/h), q<sub>1</sub>: 表面流出高(mm/h), q<sub>2</sub>: 中間・地下水流出高(mm/h), r: 観測雨量(mm/h),  $\bar{r}$ : 平均有効雨量強度(mm/h), f: 流出率, n: 等価粗度(s/m<sup>1/3</sup>), i: 平均斜面勾配, A: 流域面積(km<sup>2</sup>), k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>11</sub>, k<sub>12</sub>, k<sub>21</sub>, k<sub>22</sub>, p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>: モデルパラメータ, c<sub>11</sub>, c<sub>12</sub>, c<sub>13</sub>: モデル定数, c<sub>0</sub>, c<sub>1</sub>: 定数, λ: 減衰係数

図-2 iRIC SRM で適用される貯留関数法の概略図

(2) 表層地質の面積率に基づくパラメータ

地質分類は虫明ら<sup>7)</sup>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。そのために対象ダム流域の流域界を作成し、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<sup>4)</sup>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<sub>ij</sub>: 各モデルパラメータで図-2の赤枠で囲まれた諸量に対応する。また、a<sub>1ij</sub>~a<sub>6ij</sub>, a<sub>1Tc</sub>~a<sub>6Tc</sub>, a<sub>1λ</sub>~a<sub>6λ</sub>: 各係数, g<sub>1</sub>, g<sub>2</sub>, g<sub>3</sub>, g<sub>4</sub>, g<sub>5</sub>, g<sub>6</sub>: 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, b<sub>1</sub>~b<sub>3</sub>: 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。

(3) 各ダム流域における最適化パラメータ

2016年8月の台風7, 9号及び10号による豪雨の事例で各ダムの実績流入量を再現できるパラメータを試行錯誤によって選び出す。総雨量に対して総流出高が大きい事例では、損失係数 k<sub>3</sub> (=C<sub>13</sub>-1) が負の値をとらない様に C<sub>13</sub> ≥ 1 と下限値を設定している。この方法により推定されたパラメータを以下、最適化パラメータとする。また、台風X号事例で最適化したパラメータを「X号最適化パラメータ」と称する。

3. 結果と考察

3.1 実績ダムデータを用いたパラメータの検討結果

各ダムにおいて検討を行ったパラメータを表-1に示す。また、各パラメータを用いた台風10号事例でのダム流入量の再現結果を図-3, 4, 5に示す。

検討事例では両ダムともに総雨量を上回る流出高が算出されることから、雨量データのみでの流入で流量の計算を行う本研究では、I, IV地域パラメータ及び地質設定パラメータ、台風7, 9号事例での最適化パラメータを用いた計算は、ピーク流量を過小評価する結果となった。

一方、台風10号事例での最適化による計算では両ダムC<sub>13</sub>のパラメータが下限値の1となったものの、実績流入量のピークが精度よく再現された。(表-2)。損失に関わるパラメータC<sub>13</sub>が下限値付近に最適化されたことから、台風7, 9, 11号の影響で地中が飽和状態となり、降雨が浸透せずに流出していることを示唆している。

表-1 最適化されたパラメータの一覧

流域	パラメータ	1段法				2段法			
		C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	λ	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	Tc
金山ダム	I地域パラメータ	11.092	0.142	1.690	0.019	7.919	0.308	2.275	59.9
	地質設定パラメータ	14.567	0.076	1.744	0.011	9.588	0.276	2.759	75.7
	9号最適化パラメータ	10.650	0.276	1.600	0.001	9.000	0.215	1.800	76.0
	10号最適化パラメータ	6.400	0.276	1.000	0.011	4.000	0.844	1.600	28.0
札内川ダム	IV地域パラメータ	12.152	0.125	1.568	0.019	8.535	0.303	2.305	60.6
	地質設定パラメータ	11.372	0.085	1.625	0.010	8.229	0.230	2.168	69.0
	7号最適化パラメータ	7.250	0.276	1.400	0.001	7.000	0.215	1.400	64.0
	10号最適化パラメータ	4.700	0.276	1.000	0.001	3.000	1.264	1.200	28.0

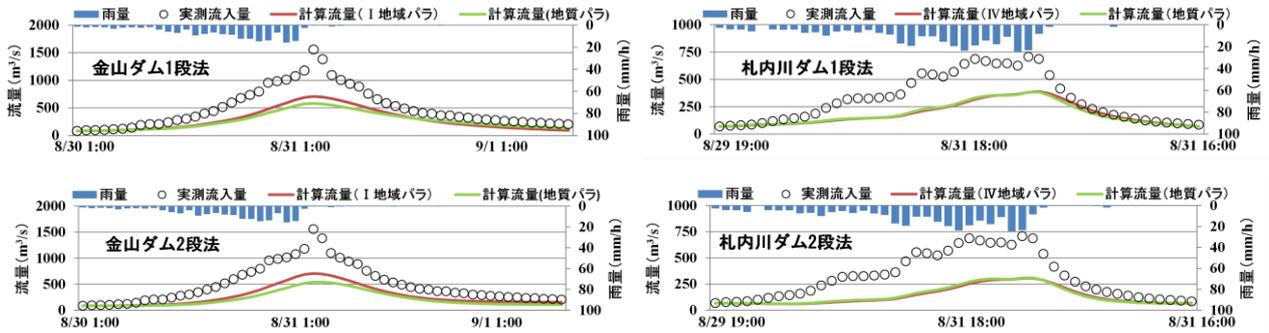


図-3 I, IV地域パラメータ及び地質設定パラメータによる流量再現結果

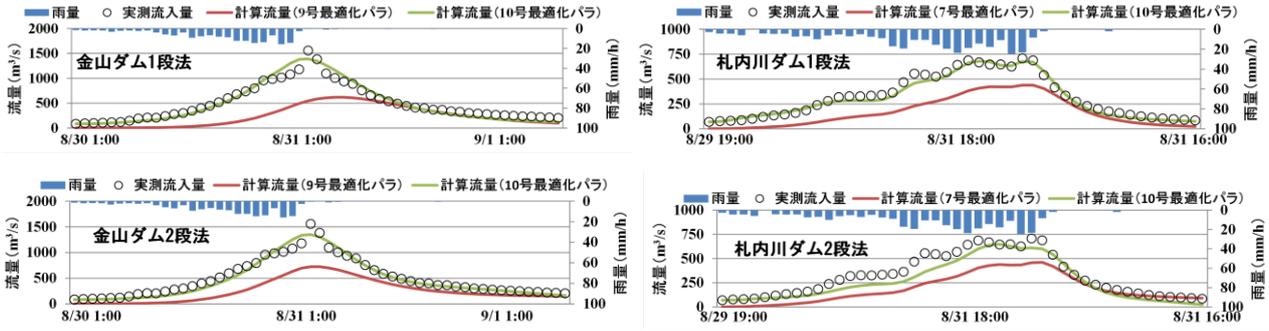


図-4 台風7, 9, 及び台風10事例の最適化パラメータによる流量再現結果

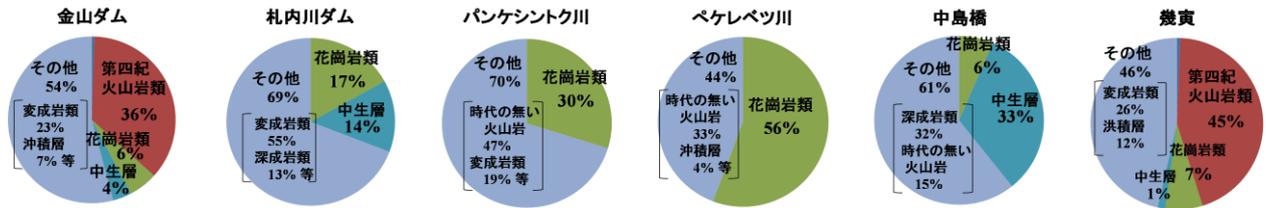


図-5 各地点集水範囲の地質区分

表-2 台風10号事例での最適化による計算結果

	流域面積 (km <sup>2</sup> )	対象期間	総雨量 (mm)	ピーク流量 (m <sup>3</sup> /s)		誤差指標				
						Nash <sup>※1</sup>		Jpc <sup>※2</sup>		
						1段法	2段法	1段法	2段法	
金山ダム	469.8	8/30 1:00~9/1 7:00 (55h)	208	1,390	1,349	1,556	0.95	0.96	0.11	0.13
札内川ダム	118.7	8/29 19:00~8/31 7:00 (46h)	446	680	648	707	0.98	0.88	0.04	0.14

※1 Nash-Sutcliffe係数: 0.7以上でモデルの再現性は高い ※2 ピーク相対誤差: 0に近いほど精度が高い

### 3.2 流出計算結果

検証のための観測流量データがない場合、どのようにパラメータ設定すればよいか問題となる。そこで、流出特性に影響する要因として、流域の地質構成に着目した。具体的には、虫明ら<sup>7)</sup>によって報告されている流出特性に大きく寄与するとした地質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)について、国土数値情報の地質情報(G05-54M)をArcGISを用いて対象流域に関して抽出し、類似性を確かめた。結果を図-5に示す。なお、地質区分における「その他」には洪積層, 沖積層, 深成岩類, 変成岩類, 圧砕岩類, 時代の無い堆積物, 時代の無い火山岩等がある。この結果、パンケシントク川, ペケレベツ川では花崗岩, 戸蔭別川中島橋地点では中生層の割合が多く、これは札内川ダムの地質構成に類似していると判断した。また、金山ダム流域に含まれる空知川幾寅地点の地質構

成が類似していることも確認できた。以上より、パンケシントク川, ペケレベツ川, 戸蔭別川中島橋では札内川ダムの10号最適化パラメータを、空知川幾寅では金山ダムの10号最適化パラメータを採用し、流出計算を行った。各地点の計算結果を図-6, 7, 8, 9に示す。

さらに計算結果のクロスチェックのため、パンケシントク川, ペケレベツ川において、以下の合理式により求めたピーク流量との比較を行った。

$$Q = \frac{1}{3.6} frA \quad (1)$$

ここで、 $Q$ : 流量 (m<sup>3</sup>/s),  $f$ : 流出係数,  $r$ : 到達時間内における平均降雨強度 (mm/h),  $A$ : 流域面積 (km<sup>2</sup>) である。今回は、両河川にてペケレベツ川の値(流出係数  $f=0.73$ , 洪水到達時間: 1.6h(北海道建設部河川砂防課より聞き取り))を使用し、計算を行った。SRMの計算によるピーク流量と合理式によって求めたピーク流量は、

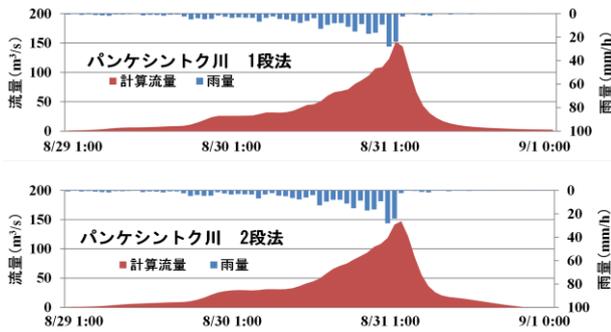


図-6 パンケシントク川流量の計算結果

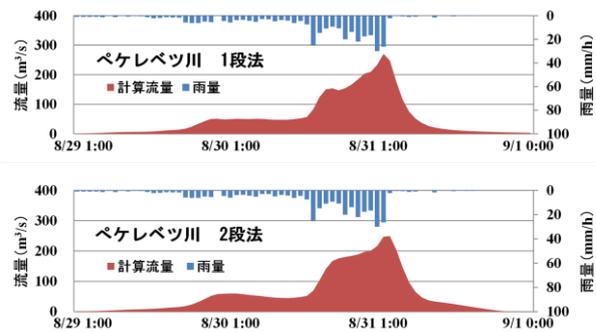


図-7 ペケレベツ川流量の計算結果

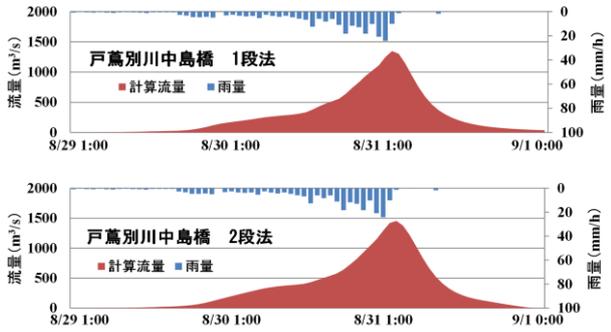


図-8 戸蔭別川中島橋地点流量の計算結果

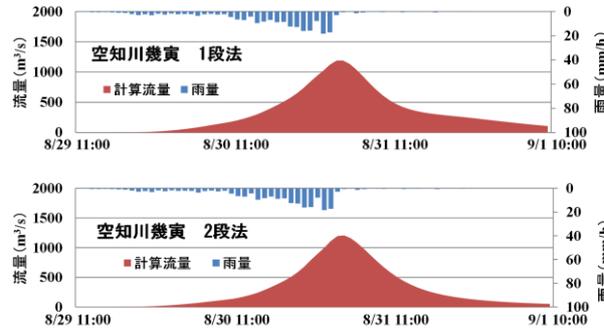


図-9 空知川幾寅地点流量の計算結果

表-3 計算流量と合理式によるピーク流量の比較

流域	流域面積 (km <sup>2</sup> )	対象期間	総雨量 (mm)	ピーク流量 (m <sup>3</sup> /s)		
				計算流量		合理式
				1段法	2段法	
パンケシントク川	27.8	8/29 1:00~8/31 24:00 (72h)	281	152	147	150
ペケレベツ川	42.1	8/29 1:00~8/31 24:00 (72h)	388	271	250	244
中島橋	301.2	8/29 1:00~8/31 24:00 (72h)	265	1,347	1,455	-
幾寅	372.8	8/29 11:00~9/1 10:00 (72h)	217	1,206	1,190	-

表-3 に示すとおりほぼ同じ値となり、これから対象地点上流域の貯留効果が失われた状態で流出していることが結果として示された。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 実測流入量データのある金山ダム流域および札内川ダム流域にて流量再現を行うことで、既往最大規模の洪水事例での妥当性のあるモデルパラメータを検討した。
- 2) 検討したパラメータを用いることで、観測流量データの無いパンケシントク川、ペケレベツ川、戸蔭別川中島橋地点、空知川幾寅地点にて流量推定を行うことができ、パンケシントク川、ペケレベツ川にて合理式による計算結果と同等の値となった。
- 3) 対象地点では度重なる降雨によって土壌が飽和状態となり、ほとんど浸透せずに流出するような結果が推算された。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、北海道開発局、北海道、日本気象協会白谷友秀氏よりデータの提供をいただいた。

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) iRIC HP : <http://i-ric.org/ja/software/21/>
- 6) (財)北海道河川防災研究センター・研究所, 実践流出解析ゼミ, 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.