

4. 流域内の斜面崩落割合による流出変化の調査 ～近悦府川における水文観測と流出解析～

谷口 陽子¹・八田 茂実²・山家 悠翔³

Yoko TANIGUCHI, Shigemi HATTA and Yuto YAMAKA

¹ 苫小牧工業高等専門学校創造工学科都市 環境系 助教

² 苫小牧工業高等専門学校創造工学科都市 環境系 教授

³ 苫小牧工業高等専門学校創造工学科都市 環境系 学生

要 旨

2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震では、震源に近い北海道勇払群厚真町で震度7の激しい地震動が観測されるとともに、厚真町各地で土砂崩れが発生した。数千か所にも及ぶ崩落箇所では、地面が露頭し、小さな降雨強度でも土砂が河川に流入する恐れがある。土砂の流入により、河床の変化が起こり、流出形態が変化することが考えられる。

そこで本研究では、厚真川流域の中でも、崩落箇所が多い河川と比較的崩落箇所が少ない河川の流出の違いを明らかにすることを目的とした。今年度は崩落地面積率が東和川に次いで多い¹⁾ 近悦府川の流量観測を行い、その結果から直列3段タンクモデルのパラメータを設定することができた。本川の厚真川の流量は、既往研究で提案されており、気象庁の土壌雨量指数の計算にも使用されている石原・小葉竹²⁾のパラメータで再現はできたが、支川の小規模河川である近悦府川では再現できていなかった。

今後は、崩落箇所が多い河川として、ウクル川支川のオバウス沢川を対象河川として追加し、近悦府川との流出の相違点を探る。さらに、崩落箇所が少ないウクル川支川の石油沢川も対象河川として追加し、崩落箇所の割合の違いによって、流出に変化が起こるのかを比較検討していく予定である。

《キーワード：厚真川；近悦府川；降雨流出；土砂流出；崩落地面面積率；3段タンクモデルパラメータ》

4.1. はじめに

2018年9月に起こった北海道胆振東部地震は、厚真町を中心に大きな被害をもたらした。この地震の影響により斜面崩壊が発生し、流出現象に大きく関わる地被状態が地震前とは変化した流域も多い。

流域特性は地形的要因、土地被覆的要因および地質的要因の3つに大別できる。前二者は地表付近の特性であり、後者は地下の特性である。流出現象はこれらすべての要因が複雑に影響しあって構成される³⁾。

山間部の場合、降雨はその殆どが表土層中に浸透し、斜面に沿って流下した地中流が洪水の多くを占めるといわれている。また、植生は直接的には降雨時の遮断損失を通して地表面に達する雨水の量を決めるほか、無降雨時の蒸散作用を通して斜面表層部の水分状態を決定する。さらに、樹冠の被覆状態は地面蒸発量に影響を与え、間接的には土層の水文学的性質に影響を及ぼす⁴⁾。よって、地表面が失われることでその流域の洪水流出特性が変化する。

本研究は、土砂崩れが起こり、表層土が失われた状態の厚真町の河川の洪水流出特性を調べ、将来的に、地被状態が回復した際の流出特性の比較を行うための基礎資料を得るものである。

4.2. 研究方法

4.2.1. 対象流域

本研究では、地震により流域内での斜面崩壊が多数発生した近悦府川を対象流域に選定した。図-1には2018年北海道胆振東部地震被害調査報告の第6章¹⁾に示された図を拝借したもので、厚真川流域付近で発生した崩落地の分布状況を示している。これより、今回対象とする近悦府川流域では、流域面積に

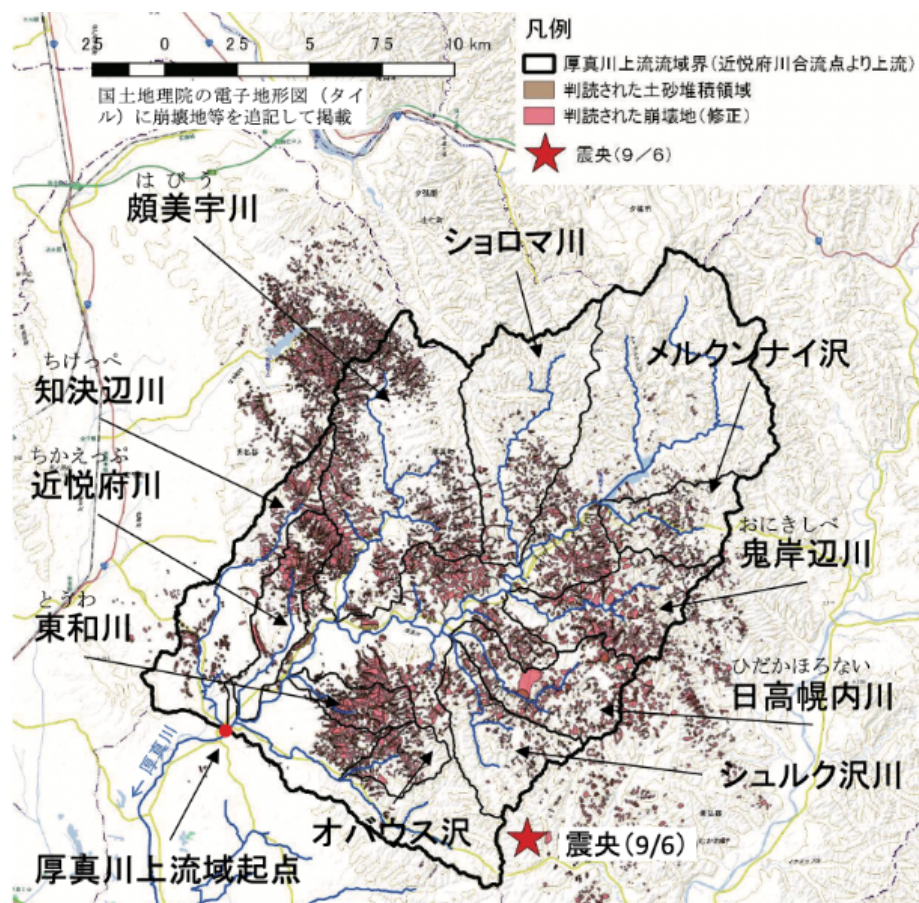


図-1 厚真川支川流域における土砂の体積状況
(村上¹⁾の図6.2-1 崩壊地分布図)

対して崩落地面積が多いことが視覚的にわかる。さらに、表-1は図-1と同様に2018年北海道胆振東部地震被害調査報告の第6章に示された表を拝借したものであり、流域面積に対する崩落地面積率を算出しているが、これより近悦府川では東和川の崩落地面積率35.3%に次いで多い、26.1%の崩壊地面積率となっている。

表-1 厚真川支川流域における流域面積に対する崩壊地面積率
(村上¹⁾の表6.2-1 厚真川上流域における崩壊地面積率)

流域名	流域面積 (km ²)	崩壊地面積 (km ²)	崩壊地面積率 (%)
近悦府川	10.15	2.65	26.1
知決辺川	20.07	2.09	10.4
顔美宇川	40.44	6.51	16.1
ショロマ川	25.91	1.17	4.5
メルクンナイ川	10.17	1.12	11
鬼岸辺川	14.99	3.42	22.8
日高幌内川	13.7	3.1	22.6
シュルク川	13.04	1.12	8.6
東和川	5.08	1.95	35.3
オバウス沢	5.16	1.1	21.3
厚真川上流	261.7	33.08	12.6

※ 値は今後精査の中で修正される可能性があることに注意されたい。

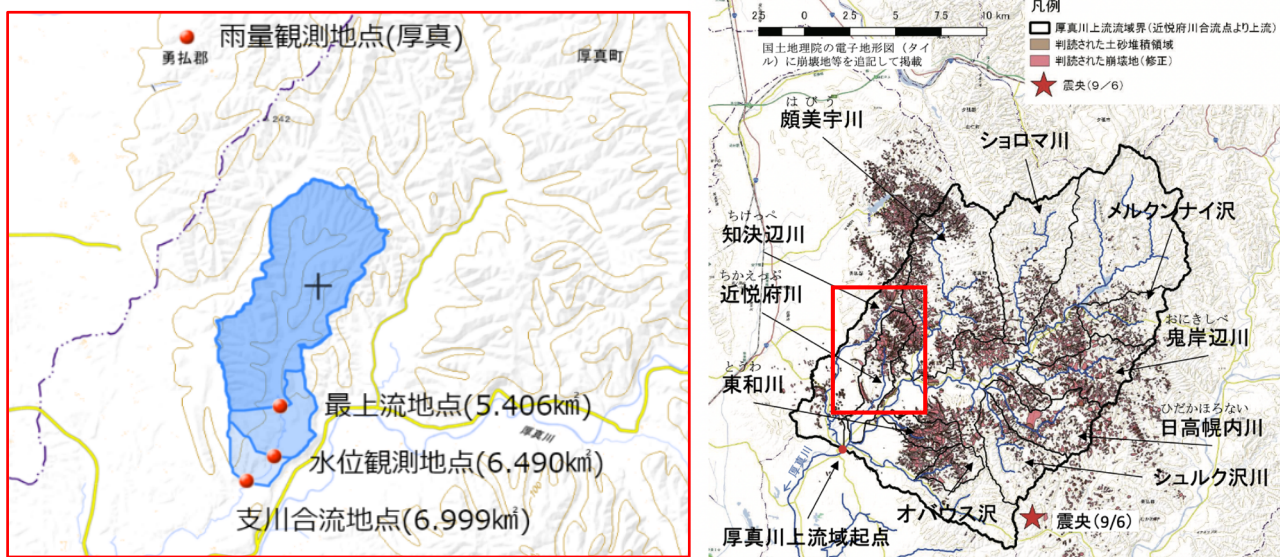


図-2 近悦府川流域での水位・流量観測場所および雨量観測地点の位置図
(()内の数値はその地点での流域面積を示している)

これらの理由から、崩壊地面積率が高い近悦府川を対象に、圧力式水位計を1箇所設置（水位観測地点）し、水位流量曲線を作成して流量資料を収集した。また、本研究では縦断方向の流量分布を調べるため、更に2地点（支川合流地点、最上流地点）で流量観測を適宜実施した。一方、雨量資料は対象流域とアメダスの雨量観測地点（厚真）と近いので、アメダス資料を利用することとした。図-2に観測場所を示した位置図を示す。図中の（）内の数値はその地点での流域面積を表している。なお、この水文調査は昨年度から引き続き行なっているが、昨年度の観測場所はさらに下流地点にあり、観測地点から上流側で農業用水として取水していることが判明した。これによりこのままでは自然流の観測ができないと判断し、今年度は昨年度より上流側に移して、近悦府川の自然流の流量観測を試みた。

4.2.2. 流出モデル

本研究では、流出モデルとして直列3段タンクモデル⁵⁾を採用した。タンクモデルは図-3に示すように側方と下方に流出孔のついたタンクを複数個重ねることによって河川流出を再現しようとするもので、側方流出孔からの水量の合計を河川流量、下方の流出孔からの流出は土中深くの浸透に対応する。今回はこのタンクを直列に3段重ねた3段タンクモデルを採用した。

タンクの側方流出孔からは、ある時刻 t の河川への流出量 $q_1(t)$ が流出する。 $q_1(t)$ は次式で表される。

$$q_{11}(t) = a_{11}(S_1(t) - h_{11}) \quad (1)$$

ここで、 a は側方流出孔の係数、 S はタンク高、 h は側方流出孔高である。他の流出孔に対しても同様に次式で表すことができる。

$$q_{12}(t) = a_{12}(S_1(t) - h_{12}) \quad (2)$$

$$q_{21}(t) = a_{21}(S_2(t) - h_{21}) \quad (3)$$

$$q_{22}(t) = a_{22}(S_2(t) - h_{22}) \quad (4)$$

$$q_{31}(t) = a_{31}(S_3(t) - h_{31}) \quad (5)$$

$$q_{32}(t) = a_{32}(S_3(t) - h_{32}) \quad (6)$$

また、下方の流出孔から流出する流量 P は各タンクで次のように表される。

$$P_1(t) = b_1 S_1(t) \quad (7)$$

$$P_2(t) = b_2 S_2(t) \quad (8)$$

$$P_3(t) = b_3 S_3(t) \quad (9)$$

ここで、 b は浸透孔の係数である。さらに次の時刻の貯留高 $S(t+1)$ はこれまでの式を用いて次のように計算する。

$$S_1(t+1) = S_1(t) + R - (q_{11}(t) + q_{12}(t) + P_1(t)) \quad (10)$$

$$S_2(t+1) = S_2(t) + P_1(t) - (q_{21}(t) + q_{22}(t) + P_2(t)) \quad (11)$$

$$S_3(t+1) = S_3(t) + P_2(t) - (q_{31}(t) + q_{32}(t) + P_3(t)) \quad (12)$$

ここで、 R は降雨量（mm）である。これらにより、ある時刻の三段分の河川への流出量 $q(t)$ は次式で求めることができる。

$$q(t) = q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{21}(t) + q_{22}(t) + q_{31}(t) + q_{32}(t) \quad (11)$$

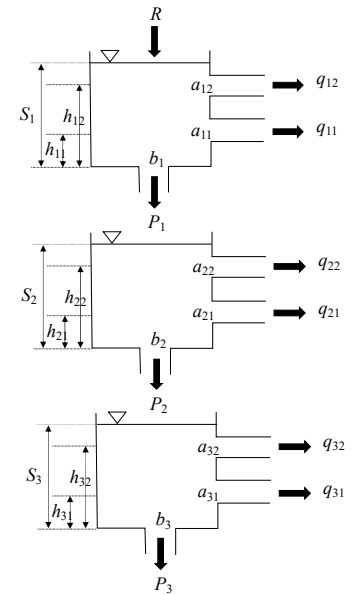


図-3 直列3段タンクモデルの概要図

4.3. 様々なタンクモデルパラメータ

3段タンクモデルは非常に簡便でありながら，長期流出再現精度が良いため，他の研究でも良く使用されている流出モデルである．その一方で，11個のモデルパラメータを設定する必要があり，流出の再現精度はモデルパラメータの精度によるものと言っても過言ではない．

4.3.1. 石原・小葉竹の直列3段タンクモデルパラメータ

石原，小葉竹ら²⁾は，対象流域の地質によって5種類のモデルパラメータを提唱しており，このパラメータは気象庁の土壤雨量指数の算出にも使用されている．表-2は，石原・小葉竹の直列3段タンクモデルパラメータを示している．

表-2 石原・小葉竹の3段タンクモデルパラメータ²⁾

No	河川名	地質	h_{11}	h_{12}	h_{21}	h_{31}	b_1	b_2	b_3	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{31}
1	筑後川	安山岩・凝灰岩 透水性(大)	40	75	15	15	0.12	0.08	0.01	0.10	0.15	0.05	0.01
2	馬洗川		30	60	15	15	0.12	0.08	0.01	0.10	0.15	0.05	0.01
3	木津川	花崗岩	15	60	15	15	0.12	0.05	0.01	0.10	0.15	0.05	0.01
4	長良川		30	75	5	15	0.12	0.04	0.01	0.10	0.15	0.05	0.01
5	夕張川	第三紀層 透水性(小)	15	40	5	15	0.12	0.04	0.01	0.10	0.15	0.05	0.01

※ここに書かれていないパラメータは全て0の値である．

図-4は石原・小葉竹のパラメータのうち，No.1のものを厚真川に適用して流出計算を行なった結果を示している．これより，厚真川での洪水イベントでの再現性は高く，このパラメータの汎用性が高いことが分かった．一方で，図-5には近悦府川を対象にして図-4と同じパラメータを使用した流出計算の結果を示す．この結果，近悦府川では，石原・小葉竹のパラメータだと実際の観測値よりも過大評価しており，全く流出再現ができないことが分かった．改めて，モデルパラメータは各流域に適したものを求める必要があることが示された．

石原・小葉竹パラメータ No.1を使用した厚真川の流量再現結果 (2010/6/1~10/31)

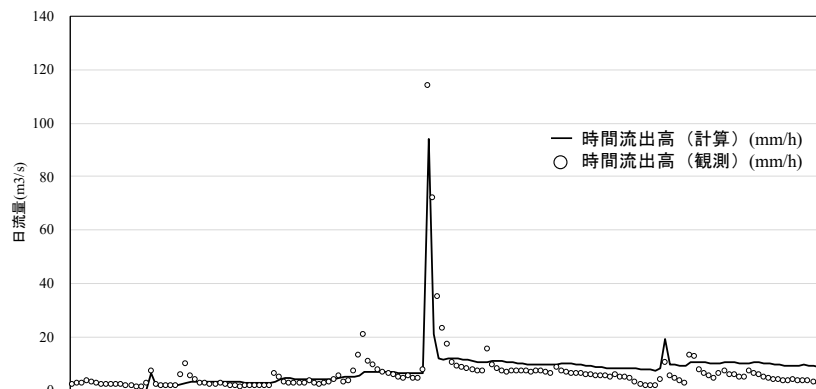


図-4 厚真川での3段タンクモデルを使用した流量計算結果 (石原・小葉竹のモデルパラメータ)

石原・小葉竹パラメータNo.1を使用した
近悦府川の流出高再現結果(2020/8/7~12/23)

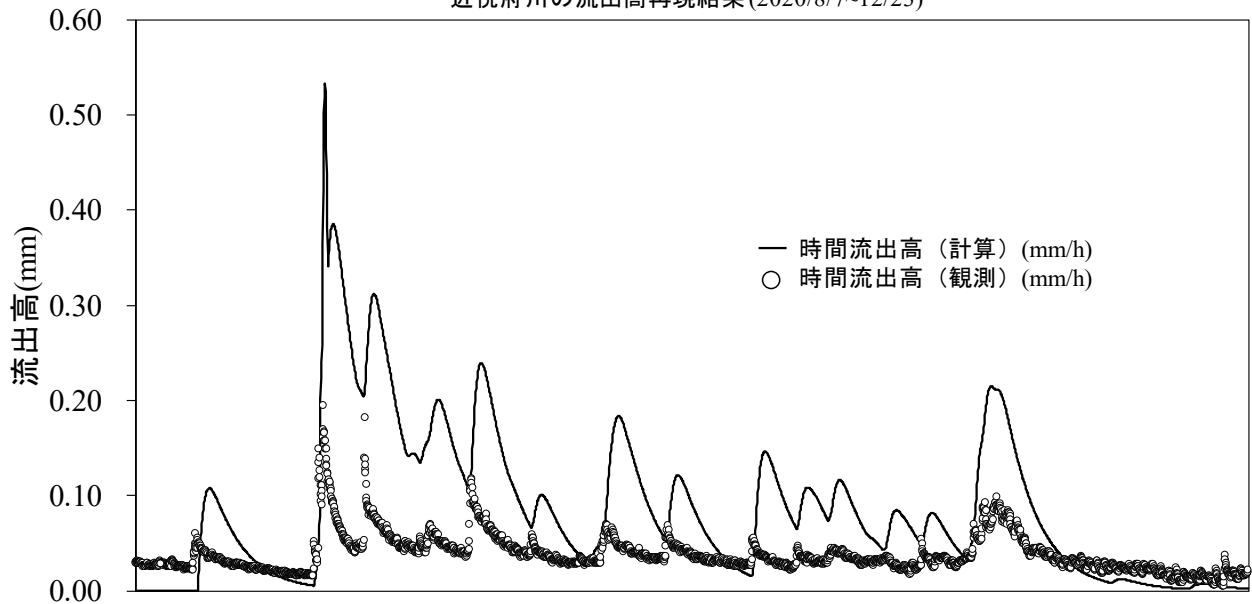


図-5 近悦府川での直列3段タンクモデルを使用した流量計算結果（石原・小葉竹のモデルパラメータ）

4.3.2. 厚真川の直列3段タンクモデルパラメータ

厚真川で最適化したモデルパラメータが近悦府川で適用できるのか確認する。2010年の厚真川の厚真大橋地点での流量年表（6月から10月）を用いて、最適化したモデルパラメータを表-3に示す。前節での石原・小葉竹のパラメータと比較すると、2つのパラメータの類似点は無いように見える。

表-3 厚真大橋での直列3段タンクモデルパラメータ

h_{11}	h_{12}	h_{21}	h_{31}	b_1	b_2	b_3	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{31}
3.00	4.00	4.00	4.00	0.70	0.10	0.05	0.01	0.20	0.04	0.007

※ここに書かれていないパラメータは全て0の値である。

このモデルパラメータを厚真大橋地点に適用した計算結果を図-6に示す。図-4の石原・小葉竹のモデルパラメータを使用した結果と比較すると、図-6の厚真川の最適モデルパラメータを使用した結果の方が、ピーク流量の再現性や低水位での応答が鋭敏になっており、再現精度が高いことが分かった。そこで、このパラメータを近悦府川に使用した結果、図-7のような結果になった。近悦府川では、流出高を大幅に過大評価しており、厚真川の最適モデルパラメータは近悦府川には適用できない。近悦府川では、図-5の石原・小葉竹のモデルパラメータを使用した時よりも、再現性が大幅に下がった。

これより、厚真川と近悦府川の流出特性は異なり、近悦府川では、全国的に使われている石原・小葉竹のパラメータも適用できないことが分かった。そこで、今年度の2020年8月から12月下旬まで近悦府川で行なった観測結果をもとに、近悦府川の最適パラメータを求めていくことにした。

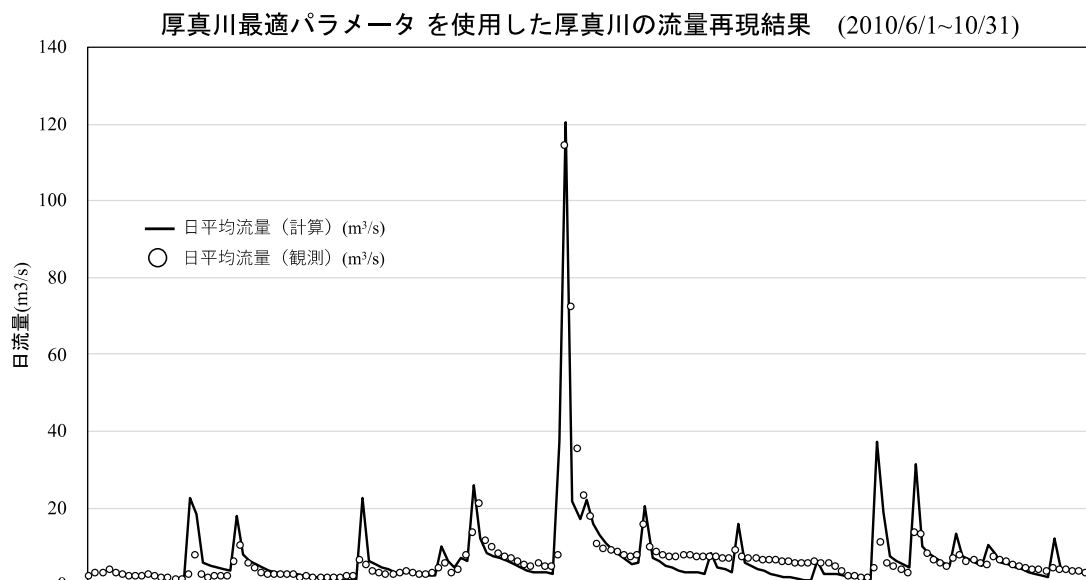


図-6 厚真川での直列3段タンクモデルを使用した流量計算結果 (厚真川の最適モデルパラメータ)

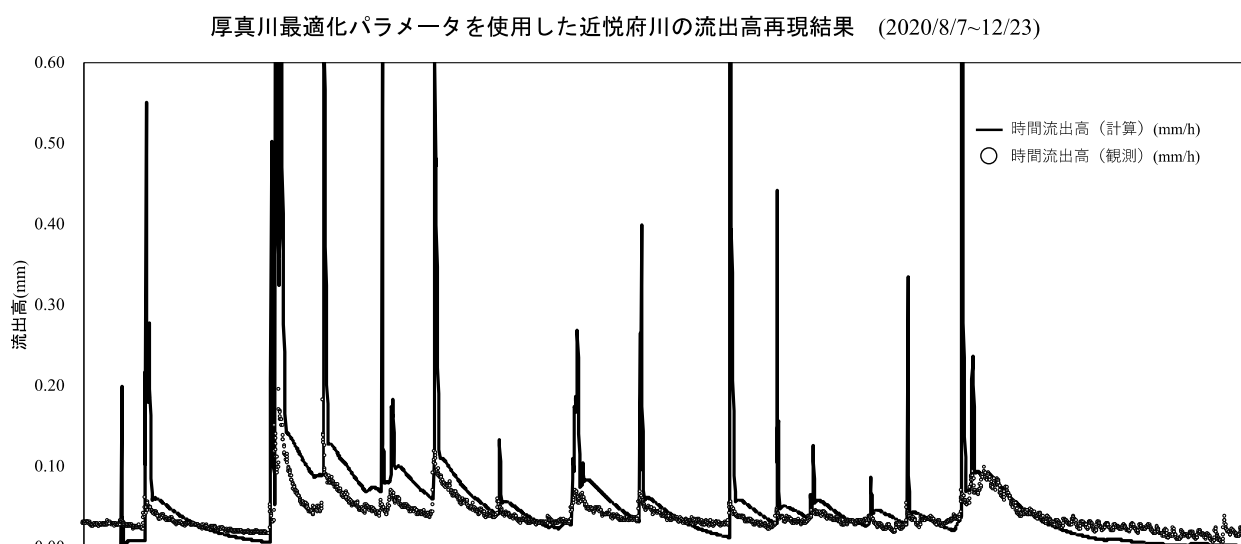


図-7 近悦府川での直列3段タンクモデルを使用した流量計算結果 (厚真川の最適モデルパラメータ)

4.4. 近悦府川の流出特性

4.4.1. 流量観測結果

近悦府川の観測は昨年度から行っており今年度で2年目になるが、昨年度の観測場所では上流で農業用水として一部取水していることが判明した。そのため、今年度は近悦府川の砂防堤防のすぐ上流点に観測地点を設定し、人工的な影響を受けずに自然流を観測することを試みた。そのため、観測回数が少なく、昨年度の結果を使用できないことを先に説明しておく。

本年度は2020年8月7日から12月23日まで図-2に示す観測場所で流量観測を実施し、得られた結果をもとに作成した近悦府川の観測流量を図-8に示す。なお、図-8の雨量データはアメダス(厚真)の観測結果である。また、表-4には各降雨イベントでの最大流量、合計流量、合計雨量を示している。

近悦府川の観測流量と厚真のAMeDAS雨量データ(2020/8/7~12/24)

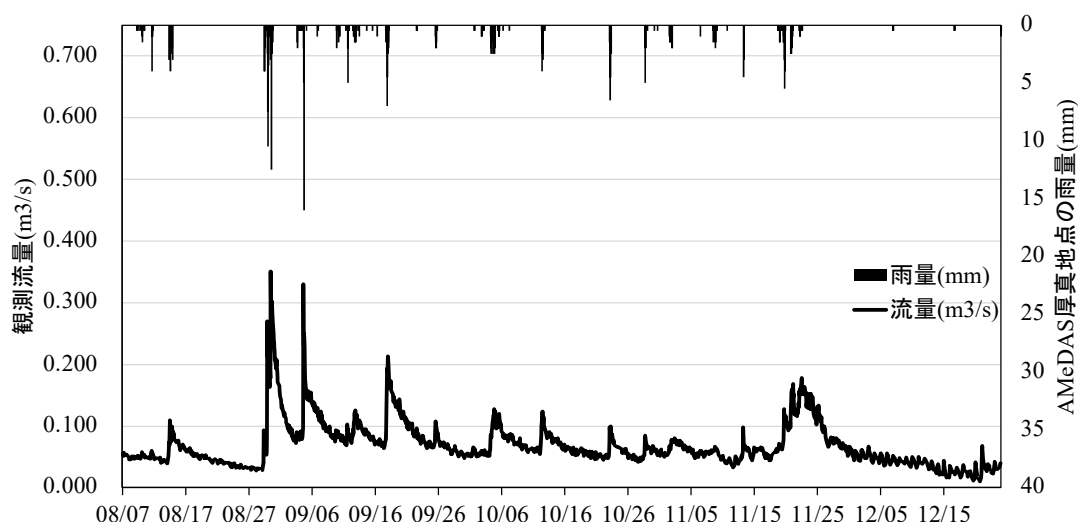


図-8 近悦府川の流量観測結果とAMeDAS(厚真)の観測雨量(2020/8/7~12/23)

表-4 近悦府川での洪水イベントにおける最大流量, 合計流量, 合計雨量(2020/8/7~12/23)

洪水イベント	8/30~9/2	9/5~9/7	9/13~9/17	9/18~9/21	11/23~11/26
最大流量(m³/s)	0.38	0.35	0.12	0.22	0.18
合計流量(m³/s)	12.53	10.29	9.76	11.41	12.09
合計雨量(mm)	66	31.5	12.5	26.5	39.5

4.4.2. 流量の縦断分布

近悦府川の縦断方向の流量分布を調べるために、それぞれの地点の流量計測したものを表-5に示す。なお、表-5は、1：最上流地点、2：水位観測地点、3：支川合流地点となっている(図-2)。また、図-9は流域面積を横軸に、流量を縦軸に取ったグラフである。これは、流域面積に比例して流量が増加していると、河川のどのポイントにおいても、降雨が河川へ流入する量が一定といえる。今回は8月31日の地点3が少し高いが、流域面積が大きくなれば大きくなるほど流量が比例して増加しているため、近悦府川では一様に地下水が流れているといえる。

表-5 近悦府川での縦断方向における流量分布の調査

8月31日	1	2	3
流域面積(km²)	6.490	5.406	6.999
合計流量(m³/s)	0.1688	0.1372	0.2215
10月12日	1	2	3
流域面積(km²)	6.490	5.406	6.999
合計流量(m³/s)	0.0693	0.0598	0.088

近悦府川の縦断分布における流域面積-流量グラフ

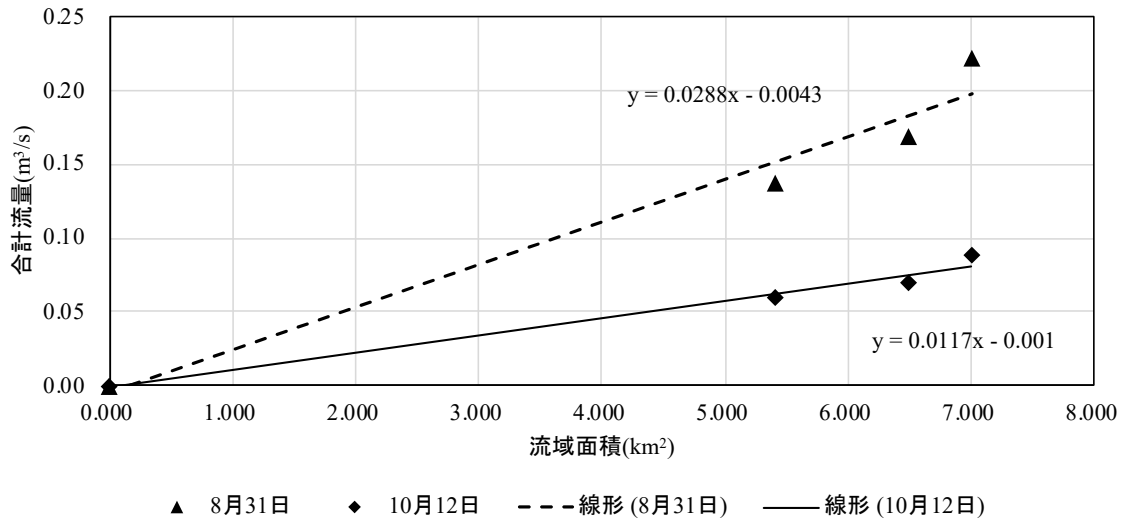


図-9 近悦府川の縦断流量分布

4.4.3. 直列3段タンクモデルによる洪水流出の解析結果

観測結果によって得られた、近悦府川での直列3段タンクモデルの最適モデルパラメータを表-6に示す。また、その最適パラメータによって計算された流出高の結果を図-10に示す。表-6から、近悦府川では、1段タンクだけではなく、2段タンク、3段タンクにも2つの側方流出孔を設定することによって最適化している。図-10より最適化されたモデルパラメータは近悦府川での流出再現精度を高めている。他のパラメータで再現された図-5、図-7と比較すると、よりモデルパラメータの有効性が確認できる。

表-6 近悦府川での最適モデルパラメータ

S_1	S_2	S_3	h_{11}	h_{12}	h_{21}	h_{22}	h_{31}	h_{32}	b_1	b_2	b_3	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	a_{31}	a_{32}
15	15	10	3	25	10	30	0	10	0.04	0.006	0.004	0.003	0.003	0.0018	0.001	0.0001	0.0005

近悦府川最適化パラメータを使用した近悦府川の流出高再現結果 (2020/8/7~12/23)

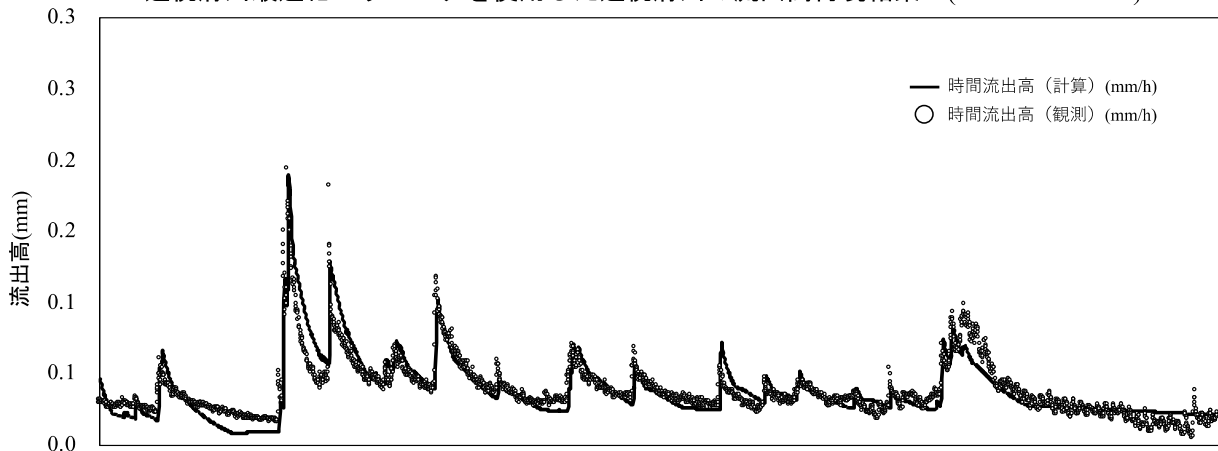


図-10 近悦府川での直列3段タンクモデルを使用した流量計算結果(近悦府川の最適モデルパラメータ)

4.5. まとめ

本年度の近悦府川における調査で明らかになったことを次に記す。

1. 近悦府川では、直列3段タンクモデルにおいて石原・小葉竹や厚真川のモデルパラメータは適用できない。
2. 近悦府川の縦断方向での流量分布は流域面積に比例しており、上流と下流で流出の違いは観られず、流域全体で一様な流出であると考えられる。
3. 近悦府川の直列3段タンクモデルの最適モデルパラメータは表-6のように求められた。このモデルパラメータによる流出高の再現性は高い。

4.6. 今後の展望

崩落箇所が多い河川として、ウクル川支川のオバウス沢川を対象河川として追加し、近悦府川との流出の相違点を探る。さらに、崩落箇所が少ないウクル川支川の石油沢川も対象河川として追加し、崩落箇所の割合の違いによって、流出に変化が起こるのかを比較検討していく予定である。

参考文献

- 1) 村上泰啓，2018年北海道胆振東部地震・大阪府北部の地震 被害調査報告書第6章2節厚真川流域における河道の被害，地震被害調査シリーズ，No.2，No.3，公益社団法人土木学会，2019。
- 2) 石原安雄，小葉竹重機：Runoff Model for Flood Forecasting，pp.35-38，1979。
- 3) 塚本良則：森林水文学，p.146，1992。
- 4) 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，p.51，1981。
- 5) 気象庁HP，土壤雨量指数，<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html>，（参照 2021-03-17）。