

平成28年8月豪雨により黒岳沢川で発生した土石流に関する考察

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム ○阿部 孝章
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 研究連携推進監 藤浪 武史
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 道北支所 田中 忠彦

平成28年8月豪雨により上川町層雲峡の黒岳沢川で発生した土石流は、砂防えん堤に捕捉され下流市街地への被害は未然に防がれた。本報告では、この土石流現象について水理・水文学的見地から土石流の発生や流動に関する定量的な考察を行い、今後黒岳沢川で発生する可能性のある土石流について留意事項をまとめることを目的とする。具体的には、観測されたデータや発生後の痕跡調査、追跡調査の結果から流動深・流量規模の推定を行った。

キーワード：黒岳沢川、土石流、発生及び流動メカニズム、現象解明

1. はじめに

2016年は北海道において記録的な大雨がもたらされた。8月17日から31日までの4つの台風が来襲し、常呂川、十勝川、空知川流域などにおいて、破堤、浸水、橋梁損傷をはじめとした甚大な被害がもたらされた¹⁾。特に十勝川水系では土石流が複数の溪流で発生したことも確認された²⁾。その一方で、黒岳沢川においては図-1に示すように、8月後半に断続的な降雨があり350 mmを超える累加雨量があった。特に8月23日は30 mm/hrを超える強い降雨により土石流が発生した。当該地域において土砂災害警戒情報も発表されたが、砂防施設等の効果により、大きな被害は免れたことが確認されている⁴⁾。

近年、こうした極端化する水災害現象について、特に急傾斜地域の土砂移動現象に限って着目すれば、多数の犠牲者を出した2013年の東京都伊豆大島泥流災害、2014年広島県広島市の土石流災害などが代表的な事例である。一方で北海道内で発生した2014年8月の礼文島の土砂災害⁵⁾や2014年9月の恵庭岳における土石流災害も見逃してはならない。寒地土木研究所ではこれまで、特に2014年恵庭岳土石流について、現地調査からの土石流発生現象に対する考察⁶⁾、構造物周辺での土石流挙動に関する考察⁷⁾、平面2次元モデルを用いた再現計算⁸⁾などを通じ、その発生規模や現象について様々な考察を加えてきた。このように、災害発生事例や調査報告が乏しかった道内の土石流発生溪流について、上記のような分析や調査報告を蓄積することにより、将来的に同じ溪流で発生しうる土石流対策のための基礎データとなる可能性がある。

本稿では同様の考え方にに基づき、図-2に示す黒岳沢川において発生した土石流の実態把握・知見の蓄積と将来的な対策に関する留意事項をまとめることを最終的な目

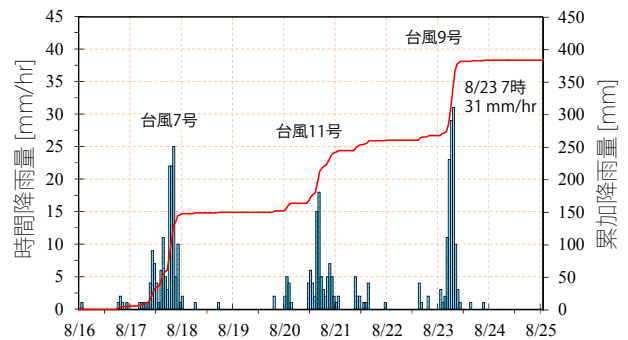


図-1 黒岳雨量観測所における降雨量³⁾

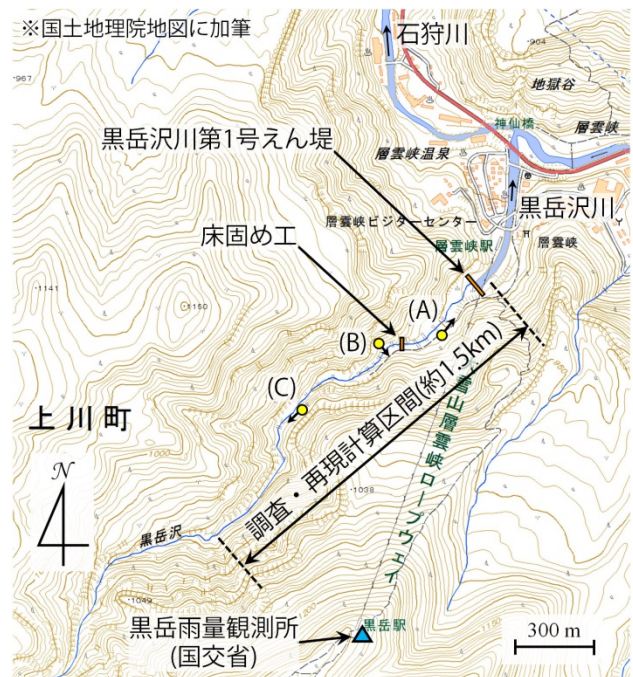


図-2 黒岳沢川周辺図 (国土地理院の地図に加筆して作成)



写真-1 現地調査の様子（左がレーザー距離計による計測、右がスタッフによる痕跡深の測定）

的とした。そのため、災害発生直後に行われた現地調査結果をもとに、数値解析モデルを併用しつつ黒岳沢川の土石流の実態について考察を加えた。

2. 検討手法

(1) 現地調査

本稿で論じる現地調査は、砂防学会北海道支部活動の一環として、産官学の研究者・技術者らと合同で平成28年8月25日に実施した。対象とした領域は図-2に示した通りである。黒岳沢川第1号えん堤を起点とし上流へ概ね1.5 kmの区間において踏査し、写真撮影を行った。図-2の(A)～(C)地点は後述の調査時の写真-2～4にそれぞれ対応する。着眼点としては黒岳沢川で発生した土石流の痕跡に重点を置き、土石流発生後の侵食や堆積現象、構造物や河道周辺植生への泥の付着痕跡などに着目した。また、土石流現象の定量的な把握のため、測量ポール、スタッフ、レーザー距離計（Vectronix社製、スイス）を用いて写真-1の様子に示すように痕跡深及び土石流の流下幅の計測を行った。土石流の流下痕跡は、その激しい流況のために縦横断的にばらつく性質を持っている。そのため、上流から下流へわたる土石流現象の概括的な把握という目的に絞り、流下幅は1 m単位、痕跡深は0.1 m単位での計測を行った。

(2) 再現計算

本稿では、現地調査により得られた諸現象の理解を補足することを目的とし、土石流の1次元再現計算を行った。数値計算モデルは里深ら⁹⁾のものをベースとし、中谷ら¹⁰⁾の取り組みにより開発されたGUI（Kanako Ver.1.44）上で数値解析を実施した。旭川開発建設部により取得されたCCTVカメラ映像や痕跡調査から、石礫を豊富に含んだ石礫型土石流モデルを適用することとした。土石流計算の支配方程式は以下に示す連続式及び運動方程式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = i_b \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho} \quad (2)$$

Takaaki Abe, Takeshi Fujinami, Tadahiko Tanaka

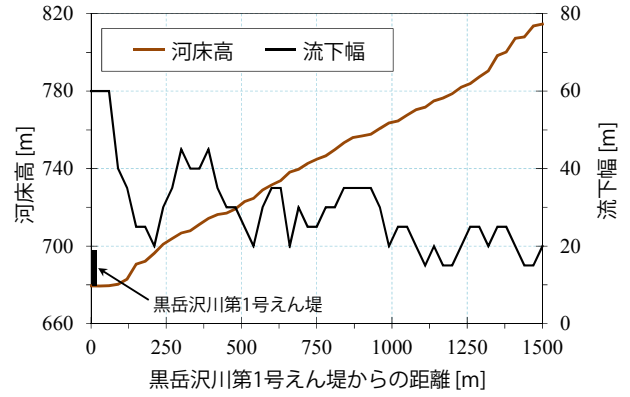


図-3 黒岳沢川の1次元再現計算領域

但し、 hl は土石流の流動深[m]、 u は断面平均流速[m/s]、 $M = uh$ は運動量フラックス[m²/s]、 i_b は河床における侵食・堆積の進行速度[m/s]、 g は重力加速度[m/s²]、 H は水位[m]、 τ_b は河床面剪断力[N/m²]、 ρ は混合物の密度[kg/m³]である。流れにおける大小2種類の石礫粒子の連続式は、それぞれ以下のものである。

$$\frac{\partial C_L h}{\partial t} + \frac{\partial C_L M}{\partial x} = i_{bL} C_* \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_F h}{\partial t} + \frac{\partial C_F M}{\partial x} = i_{bF} C_* \quad (4)$$

ここに、 $i_b = i_{bL} + i_{bF}$ であり、 i_{bL} 、 i_{bF} はそれぞれ大粒子(Large)、小粒子(Fine)の侵食堆積速度である。現地調査結果¹¹⁾を参考に、大粒子の粒径は0.2 m、小粒子の粒径は0.02 mを設定した。侵食及び堆積は里深ら⁹⁾の研究に従い、それぞれ以下の式で求めた。

$$i_b = \delta_e \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \frac{M}{d_m} \quad (5)$$

$$i_b = \delta_d \frac{C_\infty - C}{C_*} \frac{M}{d_m} \quad (6)$$

但し、 C は土砂濃度、 C_* は河床の容積濃度(=0.65)、 C_∞ は平衡濃度、 δ_e は侵食速度係数(erosion)、 δ_d は堆積速度係数(deposition)、 d_m は平均粒径である。河床位 z の連続式は、

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i_b = 0 \quad (7)$$

となる。

計算領域は、次のようにして作成した。河床高については国土地理院基盤地図情報¹²⁾、林野庁による縦断図の公開資料¹³⁾、及び黒岳沢川第1号えん堤上流付近は小山内ら¹¹⁾の報告における数値を縦断的に読み取った。計算領域は図-3のように黒岳沢川第1号えん堤から上流へ約1.5 km地点までとした。

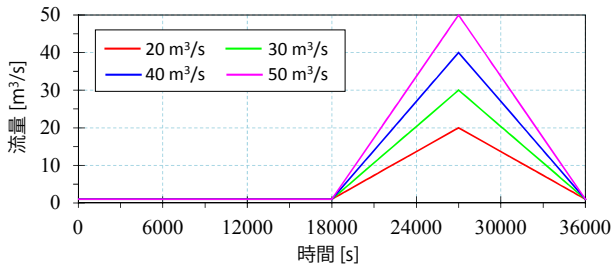


図4 土石流の流入ハイドログラフ

流下幅については、各段面において、Google Earthソフトウェア上で読み取ることのできる出水前（2014年取得）衛星写真内の低水路幅と、出水後8月24日に旭川開発建設部により取得されたUAV映像から最大の流下幅を読み取り、それらの中間値を用いた。なお、再現計算には矩形断面を用いた1次元モデルを使用することから、現地調査よりも小さい出水前と出水後の平均値を流下幅として設定した。計算格子間隔は30 mとし、時間増分 Δt は0.5秒と設定した。

また、上流端の境界条件としてえん堤上流1.5 km地点にて以下に示す方法で土石流ハイドログラフを与えた。流量や水位データは直ちに入手できなかったため、芦田ら¹⁴⁾の研究を参考に土石流ピーク流量 Q_{smax} を以下の式

$$Q_{smax} = \frac{C_*}{C_* - C_d} Q_{wmax} \quad (8)$$

によって推定した上で三角形ハイドログラフを設定した。その算定にあたり、清水ピーク流量については合理式 $Q_{wmax} = fRA / 3.6$ を用いた。 f は流出率で、例えば図-1のような降雨状況によって決まるが、ここでは取り得る値の範囲を0.7~0.9とした。 $R = 31$ は最大時間降雨量[mm/hr]、 $A = 3.0$ は計算区間上流端での流域面積[km²]である。 f や流入部土砂濃度 C_d を変化させ試算したところ、 Q_{smax} は20~50 m³/sの範囲の値が得られた。そこで、図-4のように20から50まで10ずつピークを増加させたハイドログラフを作成した。

継続時間については、現状では入手できる情報が乏しかったこともあり、検討の第1歩としてハイドログラフは5時間継続するものとして作成した。これは、8月23日の土石流発生時前の最大時間降雨量31 mm/hrに対し、その1割の約3 mm/hr以上の降雨が継続した時間を用いたものである。2時間半かけてピーク流量に到達し、2時間半の時間をかけて減衰するハイドログラフとした。なお、各ケースにおいて、計算開始前の5時間の間、助走計算として1 m³/sの流量を上流端に与えている。

もちろん、以上のように仮定を多く含んでいることから、今後降雨強度分布、支川流入や詳細地形データの準備・整備がなされれば、適宜精緻なデータを用いた修正と精査が可能となることは言うまでもない。以上の条件



写真-2 黒岳沢川第1号えん堤上流部 (図-2(A)地点)



写真-3 黒岳沢No.3 CCTVカメラ地点右岸部 (図-2(B)地点)

に基づいた再現計算を実施し、上の現地調査結果と併せて土石流現象の考察を行う。

3. 結果及び考察

(1) 現地調査

写真-2に示したのは、黒岳沢川第1号えん堤より上流約300 m地点からえん堤方向を写したものである。手前側にはφ 10 cm程度の砂礫が堆積しておりこれを縫うように蛇行した黒岳沢川が流下している。満砂したえん堤の直上流部ではφ 2 mm程度の砂が堆積しており¹¹⁾、短い区間に粒径分布が変化しながら土砂の堆積が起こっている。また、この地点では緩やかな傾斜を持ちながら土砂堆積が生じていた。

写真-3に示したのは、黒岳沢No.3 CCTVカメラ地点から対岸（右岸側）を撮影したものである。流路の中央付近にφ 50 cm程の石礫の堆積が見られるが、その直下ではφ 1~5 cm程の砂礫層の堆積が支配的であった。また、奥部の植生に着目すると1 m以上の高さまで泥の付着痕跡が見られる。こうした泥は土石流の水位痕跡と言う

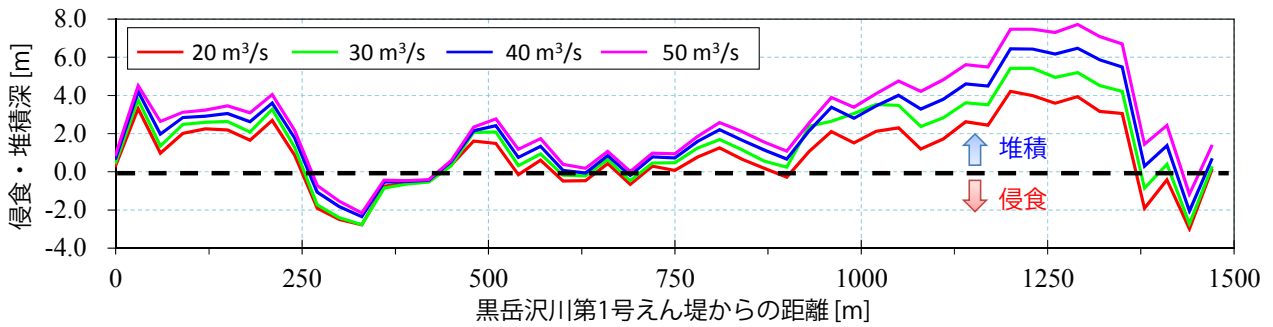


図-5 土石流ハイドログラフのピーク流量別の再現計算で得られた縦断的な侵食・堆積の傾向



写真-4 黒岳沢川第1号えん堤から上流約1km地点 (図-2(C)地点)

よりは激しい水面変動で生じた飛沫の付着と推定される。そのため、土石流の発生時は兩岸の幅いっぱい流下していたと推定された。

写真-4に示したのは黒岳沢川第1号えん堤から上流約1km地点である。この付近で谷はやや開けて石礫の堆積がほぼ一様に見られた。表層の一部には写真の中央部のように2 m程の巨礫も見られるが、堆積しているのはφ30 cm以下の砂礫が主体であった。

ここで、表-1に示したのは、上述の痕跡写真のほか、構造物等の地点付近で計測された土石流痕跡の計測値である。こうした痕跡は時間の経過と共に消失するため、本稿の調査のように可能な限り発生後時間を置かず実施することが望ましいと言える。

谷部を流下する黒岳沢川は、非出水期は流路内を蛇行しつつ流下しているが、土石流発生時には谷の兩岸まで水位は上昇し流下したものと推定された。調査で計測された区間には限りがあるものの、表-1より踏査した流下区間では概ね流下幅は25 m~50 m程度であることが分かる。また、地点数は少ないながらも土石流の痕跡深は1~2 m程度であることが分かる。但し、写真-4からも分かるように調査区間はほとんど堆積傾向で、また林道が石礫に埋没した箇所が見られたこともあり、痕跡深より大きな河床変動量が生じていた可能性がある。

表-1 現地調査結果

| 第1号えん堤からの距離[m] | 痕跡種類 | 数値 [m] | 摘要 |
|----------------|------|--------|---------------------------------|
| 170 | 流路幅 | 30 | レーザー距離計使用 |
| 190 | 流路幅 | 27 | レーザー距離計使用 |
| 380 | 流路幅 | 33 | レーザー距離計使用 |
| 570 | 流路幅 | 28 | レーザー距離計使用 |
| 600 | 流路幅 | 30 | レーザー距離計使用 |
| 730 | 流路幅 | 28 | レーザー距離計使用 |
| 730 | 痕跡深 | 1.5 | スタッフ・測量ポール使用 痕跡深は現在の河床高からの高さ |
| 750 | 流路幅 | 33 | レーザー距離計使用 |
| 850 | 流路幅 | 41 | レーザー距離計使用 |
| 1,050 | 流路幅 | 48 | レーザー距離計使用 |
| 1,180 | 流路幅 | 35 | レーザー距離計使用 |
| 1,550 | 流路幅 | 23 | レーザー距離計使用 |
| 1,550 | 痕跡深 | 2.5 | スタッフ・測量ポール使用 痕跡深は現在の河床高からの高さ |

(2) 再現計算

次に、以上の現地調査結果を踏まえた上で再現計算を実施し、地点情報である痕跡調査写真や測量成果を縦断的に補完する目的の検討を行う。

土石流の再現計算にあたっては多くのパラメータを設定する必要があるが、特に里深ら⁹⁾のモデルに用いられているような侵食・堆積速度を切り分ける手法では、侵食と堆積速度係数の設定が大きく結果を変える。まず、中谷ら¹⁰⁾に従い $\delta_e=0.0007$ 、 $\delta_d=0.05$ を用いた場合、上流端付近で異常堆積が生じた。そこで上流部での堆積傾向を抑制するため δ_d を小さくしていき、現地事象と大きな矛盾の無い堆積傾向が得られる値として、 $\delta_d=0.0002$ を採用した。各種のパラメータは本来、土石流内部の物理的機構に従って決まるべきものであるが、本稿では、8月23日土石流の黒岳沢川での堆積傾向を再現することの目的に絞り、上記の値を選択することを認めた。

図-5に示したのは、河道の縦断的な侵食・堆積深分布である。土石流ハイドログラフのピーク別に示した。図より、地点ごとの侵食・堆積の傾向はピーク流量によら

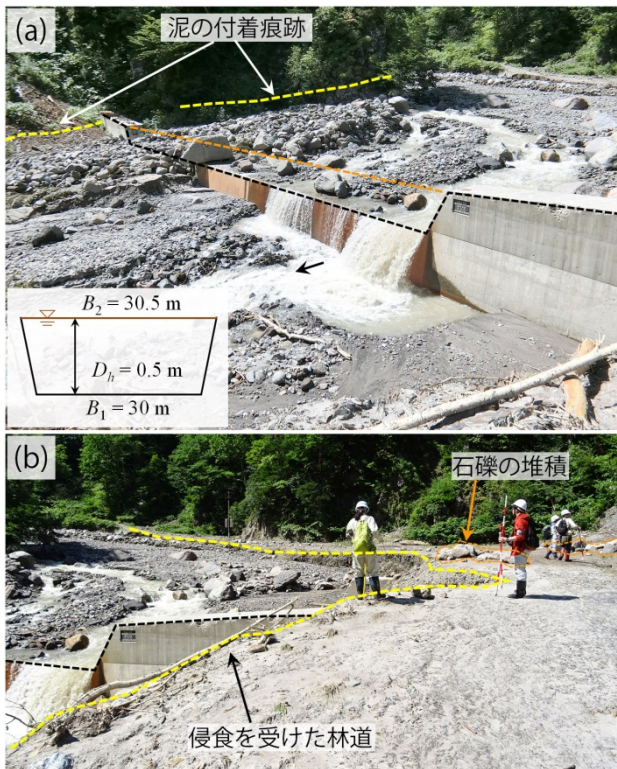


写真5 床固め工付近における土石流の流下痕跡（文献¹¹⁾の写真に加筆修正したもの）

ず近い傾向である。すなわち、0～250 m区間（第1号えん堤から上流側）では堆積傾向、その上流でやや侵食を受ける区間が見られた後、上流に行くに従って堆積の傾向は顕著になる。写真-4の川幅拡幅の区間では現地でも堆積が顕著に発生し左岸部に設置されていた林道も埋没していたことから、概ね5 m程度以上の堆積厚が発生していたと考えられ、図-5に示された結果からも同様の結果が読み取れる。

また、筆者らは、別途えん堤切り欠き部の泥の付着痕跡からピーク流量を推定する試みを行い、砂防学会誌の災害報告に別途報告している¹¹⁾。これは、現地調査で得られた泥の付着痕跡からピーク水位を推定し、逆台形せきの公式

$$Q_{smax} = \frac{2}{15} C \sqrt{2g} (3B_1 + 2B_2) D_h^{3/2} \quad (9)$$

によって簡易に切り欠き部での通過流量を算定するものである¹⁵⁾。但し、 C は流量係数(ここでは0.6とした)、 B_1 は水通しの底幅[m]、 B_2 は水通しの水面幅[m]、 D_h は越流水深[m]である。以下ではその結果を簡単に示す。

写真-5の床固め工地点では、床固め工上下流に確認された側岸・植生への泥の付着痕跡（写真-5の(a)）、そして上流部左岸側の林道の侵食状況（写真-5の(b)）を考慮し、少なくとも水通し部満杯まで土石流が流下していたと見なせるとし、逆台形せきの式を用いて越流量は約20

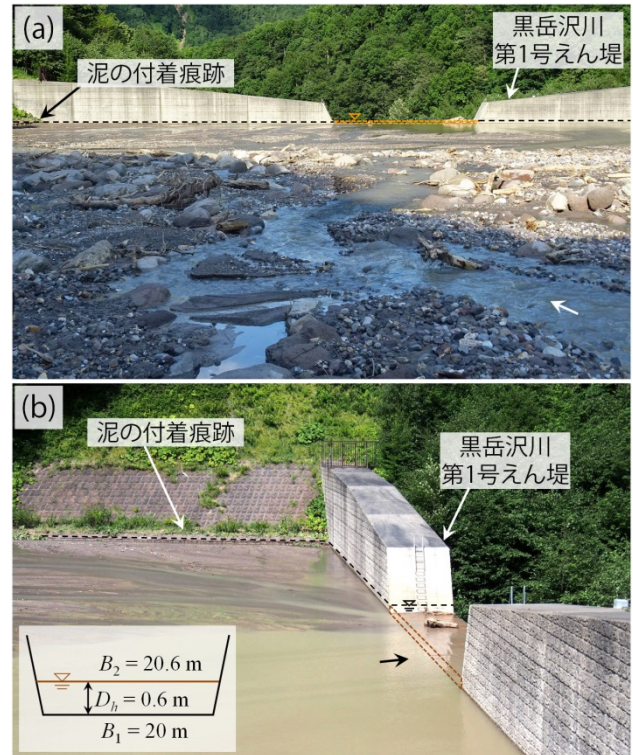


写真-6 黒岳沢川第1号えん堤付近における土石流の流下痕跡（文献¹¹⁾の写真に加筆修正したもの）

m^3/s であったと推定された。

次に、第1号えん堤地点の流量推定に関しては、えん堤上流部に写真-6(a)のような一部石礫の堆積も見られたものの、えん堤の直上流部ではほぼ水平に満砂していたと見なすこととした。その上で、写真-6(b)左下に示すように泥の付着痕跡からピーク時の水位を推定し、その結果越流量は約 $15 m^3/s$ と推定された。

本節で実施した1次元計算結果から、床固め工地点での推定ピーク流量（ $17 \sim 42 m^3/s$ ）は、上流端での流入ピーク流量（ $20 \sim 50 m^3/s$ ）よりやや小さい近い数値であった。そこで、痕跡で得られた推定結果に流量が近いと考えられた $Q_{smax} = 20, 30 m^3/s$ のケースについて、床固め工地点、第1号えん堤地点で計算上得られた通過流量ハイドログラフを示したのが図-6である。図-6(a)が $20 m^3/s$ 、(b)が $30 m^3/s$ のケースである（縦軸が異なることに注意されたい）。両ケース共に流下に伴う流量の低減傾向は類似している。第1号えん堤地点での通過流量は(a)の場合 $16 m^3/s$ 、(b)の場合は $24 m^3/s$ という結果が得られた。特に(a)の場合は上述の現地調査からの推定と再現計算上の推定とが近い値であるから、本稿で構築したモデルによっても、ある程度は土石流発生時の流況も推定できる可能性がある。

一方で、他のケースでは通過流量について数値計算結果の方がやや大きめの値となっている。これは計算格子のサイズが粗いことや上流からの供給流量に未知の要素が残っているため、継続的にデータの整備や蓄積を行い、精度向上を試みる必要がある。

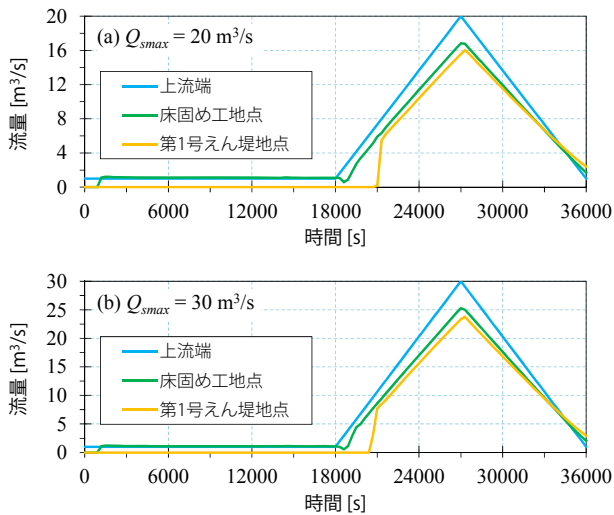


図-6 代表的な2ケースにおける土石流の通過流量

また、床固め工や砂防えん堤周辺の段落ちなどの流況を的確にモデルに反映できていないという計算技術上の問題も原因の一つと考えられ、このような構造物周辺の局所的解析を別途開発中の数値解析モデル¹⁶⁾によって行うなどして解決を試みていく予定である。

4. まとめ及び今後の課題

本稿では、平成28年8月23日に黒岳沢川で発生した土石流現象を対象として、現地調査、及び1次元混合粒径再現計算モデルを通じて現象解明を試みた。その結果、現地調査結果で得られた堆積傾向は再現計算上もある程度再現された。但し、本稿はあくまで現地状況と再現計算結果の速報であり、今後データの収集や数値モデルの改良によって精度向上を図っていく必要がある。

こうした数値解析モデルを活用することにより、今後発生しうる土石流の発生規模予測や堆砂量予測を効率的に行うことができる可能性がある。そのためにも過去に発生した土石流の再現計算事例の蓄積や、過去行われた黒岳沢川の模型実験¹⁷⁾の再現などを通じて、モデルの適用性確認や改良を進めることが肝要である。

謝辞：本稿の現地調査写真及び痕跡に基づく土石流ピーク流量の推定結果は砂防学会北海道支部活動の一環として得られたものであり、支部会員各位には多くの示唆に富むご助言を頂きました。また、旭川開発建設部には災害直後の繁忙期にも関わらず、現象解明の基礎となる貴重な映像資料を提供頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局, 第2回平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会 参考資料-1, URL: http://www.hkd.mlit.go.jp/zigyoka/z_kasen/mizubousaiin/pdf/h28_02/sankousiryuu01.pdf (参照日 2017年1月5日).
- 2) 砂防学会北海道支部, 平成28年台風10号豪雨により北海道十勝地方で発生した土砂流出に関する調査(速報), 15p, 2016.
- 3) 国土交通省, 国土交通省水文水質データベース 水文水質観測所情報 黒岳, URL: <http://163.49.30.82/cgi-bin/SiteInfo.exe?ID=101031281104150> (参照日 2016年12月28日).
- 4) 吉川契太郎, 近藤雄一, 村上泰啓, 平成28年豪雨による土砂流出と石狩川上流の砂防施設について—減災効果と今後の課題—, 平成28年度北海道開発技術研究発表会, 安-30, 2017.
- 5) (国研)防災科学技術研究所, 水・土砂防災研究ユニット, 2014年8月24日の北海道礼文島における斜面崩壊, URL: http://mizubosai.go.jp/c/c.cgi?key=2014_rebun (参照日 2017年1月5日).
- 6) 藤浪武史, 阿部孝章, 船木淳悟, 2014年9月に恵庭岳山麓で発生した土石流の特徴, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.71, B-39, 2015.
- 7) 藤浪武史, 阿部孝章, 倉橋稔幸, 橋梁の損傷状況からみた恵庭岳ポロピナイ沢土石流の流動形態に関する考察, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.223-228, 土木学会西部支部, 2016.
- 8) 阿部孝章, 藤浪武史, 矢部浩規, 2014年9月支笏豪雨災害により発生した恵庭岳土石流の再現計算, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.199-204, 2016.
- 9) 里深好文, 水山高久, 砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, Vol.58(1), pp.14-19, 2005.
- 10) 中谷加奈, 里深好文, 水山高久, GUIを実装した土石流一次元シミュレータ開発, 砂防学会誌, Vol.61(2), pp.41-46, 2008.
- 11) 小山内信智, 林真一郎, 古市剛久, 藤浪武史, 阿部孝章, 田中忠彦, 吉川契太郎, 一法師隆充, 巖倉啓子, 早川智也, 松岡暁, 永野統宏, 齋藤篤司, 大島千和, 平成28年8月北海道上川町(層雲峡)で発生した土石流の実態, 砂防学会誌, Vol.69(5), pp.47-57, 2017(印刷中).
- 12) 国土地理院, 地理院地図(電子国土Web), URL: <https://maps.gsi.go.jp/> (参照日 2016年12月26日).
- 13) 林野庁 北海道森林管理局 上川中部森林管理署, 層雲峡黒岳沢の治山, URL: <http://www.rinya.maff.go.jp/hokkaido/kamikawatyubu/pdf/kurodakezawa.pdf> (参照日 2017年1月5日).
- 14) 芦田和男, 高橋保, 沢田豊明: 山地流域における出水と土砂流出(5)—穂高砂防観測所の観測結果—, 京都大学防災研究所年報, 第19号B, pp.345-360, 1976.
- 15) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 土石流・流木対策設計技術指針解説, 国総研資料第905号, 78pp., 2016.
- 16) 阿部孝章, 藤浪武史, 船木淳悟, 3次元粒子法における土石流構成則モデルの定式化に関する基礎検討, 平成28年度砂防学会研究発表会概要集A, pp.28-29, 2016.
- 17) 片山寛, 郡義和, 原田元土, 黒岳沢川の砂防事業計画について, 昭和57年度北海道開発庁技術研究発表会, E-14, pp.141-150, 1983.