

砂防計画のための流砂量観測（魚野川での事例）

石田哲也・松本直樹

1. はじめに

平成10年7月に河川審議会総合土砂管理小委員会による「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」の報告¹⁾では、土砂が山腹斜面から溪流に入り、河道を移動して、海へ入る過程において、土砂災害や河川災害、貯水池の堆砂、河床低下、河口閉塞等の災害がそれぞれの領域で発生する。こうした状況を踏まえ、最上流部の山腹斜面から海岸の漂砂域までの土砂移動が起こる領域全体を「流砂系」として捉えることの必要性が指摘されている。更に、土砂移動現象は不確定・不連続であり、長時間に及ぶ現象であって、現状では十分な精度で予知・予測することが難しいことから、現地調査、観測によってデータを収集し、予知・予測手法の向上を図るための研究を推進することが提言され、これを基に、全国各地で土砂移動に関する観測が一斉に始まった。

土砂移動現象の観測結果は、総合土砂管理のみではなく、土砂災害防止の観点からも重要で、観測結果を基に数値計算等を活用することで、より精度の高い砂防計画立案への基礎資料となる。

ここでは、湯沢砂防事務所が取り組んでいる土砂移動に関する観測結果の紹介と観測に基づく再現計算を試みた結果について報告する。

2. 調査対象と流砂量観測

2.1 調査対象

湯沢砂防事務所では、信濃川水系中流域に位置する信濃川右支魚野川、同右支清津川、同右支中津川を主として直轄砂防事業を実施している。それらの支川のうち、流砂量観測は、魚野川を対象に実施している（図-1）。

2.2 流砂量觀測方法

流砂量観測は魚野川流域4箇所、掃流砂をハイドロフォン（パイプ型とプレート型）、浮遊砂を濁度及び採水により観測を実施している（表-1、

写真-1)。

観測升 (W2.0m×B2.0m×H2.0m) は、掃流砂を捕捉してロードセルにより荷重を測定し、重

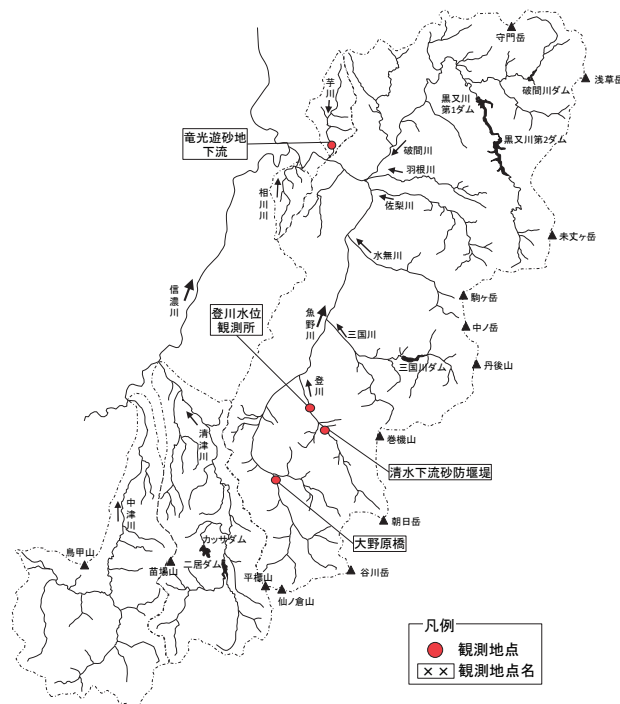


図-1 管内河川と観測所位置図

表-1 観測地点と観測項目

	河川名	水位計	流砂量			濁度計
			ハイドロフォン		観測升	
			パイプ型	プレート型		
大野原橋	魚野川	○	○	○	○	○
清水下流砂防堰堤	登川	○	○			○
登川水位観測所	登川	○	○			○
童光遊砂地下流	芋川	○	○			○

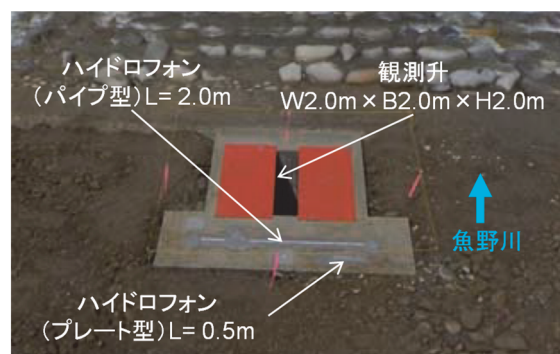


写真-1 観測升とハイドロフォン（大野原橋）

量から掃流土砂量を推定している（写真-1）。観測升がすぐに満杯にならないように、観測升の横断方向幅を0.4mに絞って観測している（写真-1）。

ハイドロフォンは、パイプ型が単管パイプの中に音響センサー（コンデンサマイク）を入れ、単管パイプに当たることによる変化をパルス回数として5分間の積算値を観測している。プレート型は、パイプ型の単管パイプを鋼板に変えたもので観測原理はパイプ型と同様である。

2.3 流砂量観測結果

大野原橋での観測結果（2021年3月21日から3月23日）を示す（図-2）。

降雨観測は大野原橋地点最寄りのAMeDAS（湯沢）のデータを用いた（図-2(a)）。なお、（一財）日本気象協会が公表している雨雲レーダー²⁾を確認すると3月21日は終日上流域を含めて雨域に覆われている状況であり、AMeDAS（湯沢）での観測より前に増水しているものの、上流域での雨量が影響したと考えられ、水位上昇は降雨と関係があると言える（図-2(a)）。

ハイドロフォンによる観測では、パイプ型とプレート型ともに3月21日6時頃からパルス数の増加が見られ、水位上昇とともにハイドロフォンで観測されたパルス数も増加している（図-2(a)、(b)）。一方で、ハイドロフォンで観測されたパルス数の増加に従い、観測升による土砂捕捉量（重量）も増加し始め、3月21日9時頃から急激に増加し、出水による顕著な土砂移動が観測された（図-2(a)、(b)、(c)）。出水がピークに到達する前に、観測升は捕捉土砂で満杯となったことにより、その後は一定重量を示している（図-2(a)、(c)）。

また、浮遊砂は、一部降雨との関連もあるようにみられるものの、斜面や溪岸の崩壊又は顕著な侵食などにより増加することが知られていることから、突発的に観測されることが多く、出水との関連性について明確なことは言えない結果であった（図-2(a)、(d)）。

3. 洪水・土砂流出モデルの検討

3.1 洪水・土砂流出モデルの概要

本検討では、魚野川上流域を対象に山野井の研究成果³⁾を基に、洪水・土砂流出モデルを構築した。構築したモデルの概要は次のとおりである。

(1) 流域地形モデル

流域を単位河道、単位斜面、斜面要素に分割し計算する。下流の単位河道では平野部を複断面に見立てて氾濫を定量評価する。

(2) 斜面での降雨流出モデル

表面流、中間流統合型kinematic wave法を採用し、計算は斜面要素ごとに行う。

$$\alpha \frac{\partial h_r}{\partial t} + \frac{\partial q_r}{\partial x} = (r - f) \cos \theta \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$q_r \begin{cases} k_A h_r \sin \theta & (D_A \geq h_r) \\ k_A D_A \sin \theta + \frac{1}{n_s} \sqrt{\sin \theta} (h_r - D_A)^{\frac{5}{2}} & (D_A < h_r) \end{cases} \dots (2)$$

ここで、 h_r は斜面部の水深、 q_r は単位幅流量、 r は降雨量、 f は単位時間当たりの損失水頭、 D_A

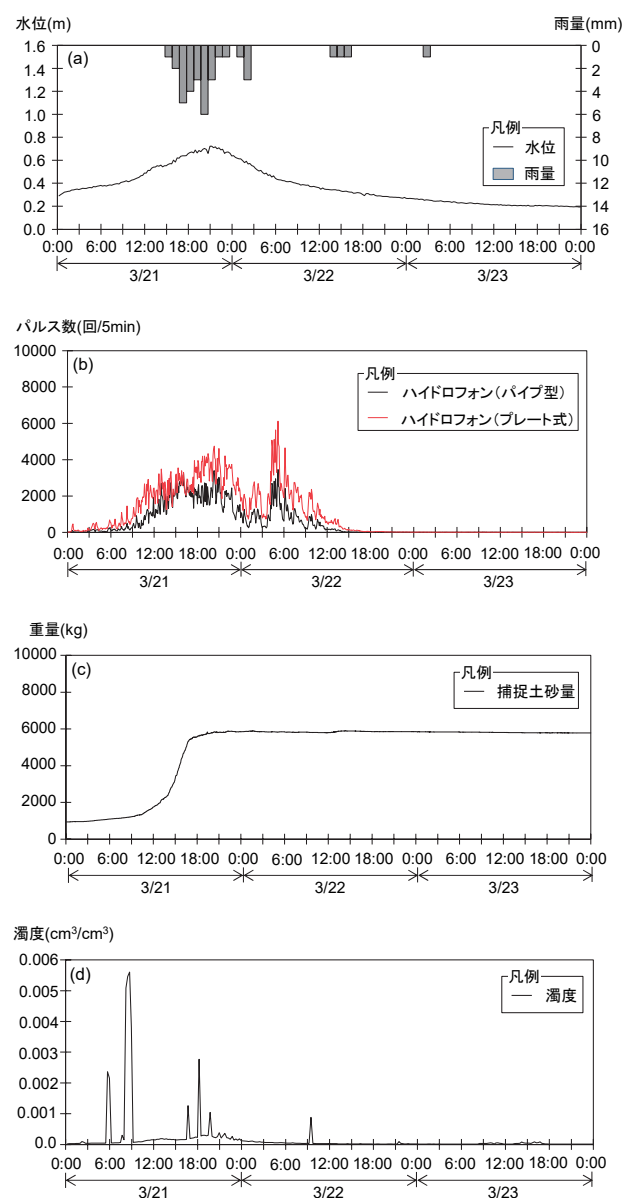


図-2 大野原橋地点での2021年3月21日から3月23日の観測結果(a)雨量(AMeDAS湯沢観測所)と水位、(b)ハイドロフォン、(c)観測升による土砂捕捉量、(d)濁度

は表土層厚、 k_A は飽和透水係数、 θ は斜面勾配、 n_s は斜面の粗度（等価粗度）である。

(3) 土砂生産、供給モデル

斜面崩壊は土中水分量と限界土中水分量の比で判定する。

$$R_{st} = \frac{w_t}{\gamma w_{cr}} \quad R_{st} \geq 1 \text{で崩壊、}\gamma \text{は補正係数} \quad \cdots(3)$$

ここで、 R_{st} は斜面崩壊指標、 w_t は土中水分量、 w_{cr} は限界土中水分量、 γ は斜面崩壊モデルにおける補正係数である。

本検討で対象とする出水では、斜面崩壊や土石流が多数発生する状況ではなかったことが確認されていることから、斜面からの土砂供給は行わず、初期河床の堆積物のみを与える。

(4) 河道での水、土砂輸送モデル

[水の質量保存則]

上流側に単位河道 $in1$ 、 $in2$ が流入する単位河道 i の水に関する保存則は次式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{B_c L} (Q_{in1} + Q_{in2} - Q_{out}) + \frac{1}{B_c} q_r \quad \cdots(4)$$

ここで、 h は単位河道の水深、 Q_{in1} 、 Q_{in2} は単位河道 $in1$ 、 $in2$ からの流入量、 Q_{out} は単位河道の流量、 q_r は斜面の下流単位における単位幅流量、 B_c は河道幅、 L は河道長である。

[土砂の質量保存則]

河道部の土砂移動は、河床に貯留された土砂の移動を対象とし、流砂の移動形態として掃流砂と浮遊砂を考えるものとする、河床の貯留土砂の質量保存則は次式で表される。

$$(1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{B_c L} (Q_{in1} + Q_{in2} - Q_{out} + Q_{sup}) \quad \cdots(5)$$

ここで、 λ は河床材料の空隙率、 z_b は河床位、 Q_{sup} は単位河道の両岸の単位斜面からの土砂供給量の和（ここではゼロ）である。

3.2 再現計算

大野原橋地点において、土砂流出が観測された2021年3月21日から3月23日の出水を対象に再現計算を行った。

3.2.1 計算条件設定

(1) 降雨・融雪と流出

雨量は、AMeDAS（湯沢）を用いた。大野原橋地点における流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ は水位観測結果から、マンニング式により流速を算出し、流積を乗じて流量 Q を算出した。再現計算対象期間中3月15日か

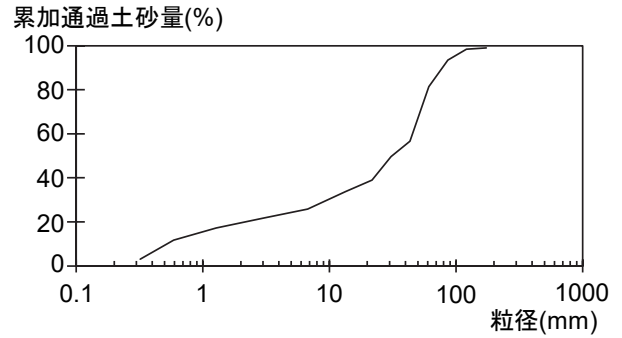


図-3 計算に用いた河床の粒度分布⁴⁾

表-2 計算ケースと諸元

	Case1	Case2	Case3
土層厚(m)	0.2	0.4	0.05
飽和透水係数(m/s)	0.005	0.02	0.005
等価粗度(s/m ^{1/3})	0.7	0.7	10
マンニングの粗度係数(s/m ^{1/3})	0.03	0.03	0.03

ら28日までの総降雨量と算出した流量を比較した結果、3月は融雪期であることから融雪量の影響により流出率が557%となった。本検討では、出水による土砂移動を評価することを目的とし、融雪量は観測していないことから水収支を考慮し、便宜的に降雨量を5.57倍として計算を行った。

(2) 粒度分布

河床の粒度分布は、「信濃川河川整備基本方針⁴⁾」のデータを用いた（図-3）。

(3) 物性値と計算ケース

マンニングの粗度係数、等価粗度係数、土層厚、飽和透水係数等は、既往検討等から一般的に用いられる値を採用し、流量による感度分析を行う目的で3ケース設定した（表-2）。

3.2.2 再現計算結果

流量および掃流砂量の再現計算結果を示す（図-4(a)、(b)）。

流量は上流域の雨量が考慮されていない影響により、全てのケースで流量の立ち上がりが遅く、Case2が他のケースと比較してピーク流量の再現性が良く、減衰部分では、Case1とCase2が再現できている。水収支の観点から観測期間（3月21日0:00から3月23日23:00）の総水量は、観測を1としてそれぞれのケースを比較すると、Case1は0.69、Case2は1.20、Case3は0.92と全体的にはCase3が他のケースと比較して再現性が良い結果となった（図-4(a)）。

掃流砂量は掃流力見合いで算出されることから、流量に追従した計算結果となり、全てのケースで前半の再現性は十分でなかったものの、後半部分はCase1で掃流砂量波形が一部再現されていた(図-4(b))。但し、観測結果から推定された掃流砂量と再現計算による掃流砂量とは、1オーダーの違いがあった。これは、ハイドロフォンは河床面を転動して移動する掃流砂が単管又はプレートに当たることで観測しており、掃流砂の挙動によっては単管やプレートに当たらず計測されないものや音響センサーによる観測がある一定以上になると飽和状態になり、観測されない場合がある。このため、観測値は実際の掃流砂量より小さく評価され、計算は流量に応じた掃流力で算出されるので、計算値の方が大きくなる傾向がある。

4. まとめ

本検討では、数値計算モデルにより再現計算を試み、再現性は十分ではなかったものの、観測結果に基づき土砂移動現象の検討を行うことができるようになったことには大きな意味があると考えている。これまでは、出水前後の河床変動測量結果による再現を主として検討がなされており、言い換えれば入口(出水前)と出口(出水後)の結果のみで途中過程は計測等がないことから、ブラックボックスとして取り扱ってきた。本検討では一部限られた条件で設定して既存の数値計算モデルで再現計算を試みたものの、更に、観測結果を基に数値計算モデルを組み立て、出水中の現象を評価することにより、土砂災害防止・軽減に対して、より確実な対策を計画することが可能となる。今後も引き続き、観測を継続するとともに、出水中の土砂移動現象を適切に評価できるように検討を継続していく予定である。

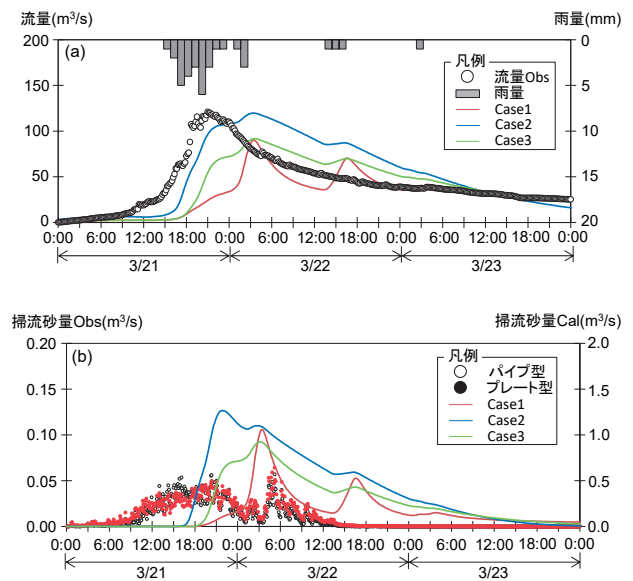


図-4 大野原橋地点での2021年3月21日から3月23日の再現計算結果

((a)雨量(AMeDAS(湯沢))と流量、(b)ハイドロフォン)

参考文献

- 1) 建設省河川局砂防部砂防課：「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」(総合土砂管理小委員会報告)、2008.7
(URL:https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/shinngikai/shingi/980730.html)
- 2) 日本気象協会：過去の天気(雨雲レーダー)
(URL:<https://tenki.jp/past/radar/>)
- 3) 山野井 一輝：土砂生産・土砂供給過程を考慮した土砂流出モデルの開発とその応用に関する研究、京都大学博士論文、2017年
- 4) 国土交通省河川局：信濃川水系河川整備基本方針、2008.6
(URL:https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigy_o_keikaku/gaiyou/seibi/shinanogawa_index.html)

石田哲也



国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所 事業対策官、博士(工学)、技術士(建設部門)
Dr. ISHIDA Tetsuya

松本直樹



国土交通省北陸地方整備局湯沢砂防事務所 事務所長
MATSUMOTO Naoki