

## 土石流監視カメラおよびLP データ解析による山地河川の土石流・洪水流出の実態

国土技術政策総合研究所：○桜井 亘・内田太郎・高原晃宙(現 国土交通省砂防部)・工藤司(現 砂防エンジニアリング(株))  
(株)気象工学研究所：友村光秀・坂井大作

## 1. はじめに

山地流域で発生する土石流や洪水流出については、観測が困難であるため、その実態は不明な点が多かった。一方、近年、直轄砂防事務所等により CCTV の設置が進み、土石流や出水時の画像データの蓄積が進んでいる。また LP 等の詳細な地形データを活用し土石流痕跡から土石流の実態把握も可能となってきた<sup>1)</sup>。そこで筆者らは画像データや地形データを活用して土石流や洪水流出現象を解明し、現象規模の推定手法の精度向上に取り組んでいる。これまで、土石流とそれ以外の出水時のピーク流量の比較を行い土石流の場合は、通常の出水と比較すると降雨規模が同程度であっても数倍のオーダーで大きくなることなどを示した<sup>2)</sup>。今回は、土石流のピーク流量について、降雨による表流水の影響を受けること、および土砂と水のピーク流量から構成されるという前提に立ち、特に土石流ピーク流量に寄与する降雨流出の影響を評価する。このことにより、土石流ピーク流量の発達過程が解明できることが期待され、ピーク流量の推定手法の精度向上ができると考える。

## 2. 検討手法

## (1) CCTV 画像データを用いたハイドログラフ作成

画像データから 156 事例（土石流 72 事例。土石流以外の出水 84 事例；以下“出水のみ”と略す）のハイドログラフを作成した。流域面積は 0.23km<sup>2</sup>～193.1km<sup>2</sup>である。これらは、ピーク流量とその前後 1～2 時間程度を 5～10 分間隔でキャプチャ画像から水位のピクセル位置を読み取り流量に変換した。流量への変換は、画像取得位置の砂防施設が満砂時は床固工水通断面の流量算定方法<sup>3)</sup>を、未満砂の場合は堰の公式を用いた。粗度係数は、河川砂防技術基準調査編や浅野ら<sup>4)</sup>に従い、また砂防施設の水通断面や溪床勾配は砂防施設台帳に基づいた。また出水形態は、土砂濃度を目視で判断して、土石流、泥流、出水に分類した。

## (2) LP データを用いたピーク流量の推定

CCTV 画像データ以外に、土石流発生後の LP データを用いた土石流の痕跡から、秦ら<sup>1)</sup>の手法に基づき、24 事例のピーク流量を推定した。流域面積は 0.01km<sup>2</sup>～5.34km<sup>2</sup>である。

## (3) 雨量データの収集整理

雨量データは、当該流域の地上雨量計データと高解像度ナウキャストの 250m メッシュデータを収集し、流域平均雨量を算出した。

## (4) 表流水起源ピーク流量の推定

解析に際して、(1)、(2)で推測した土石流ピーク流量

から、表流水起源のピーク流量 ( $Q_{wsp}$ ) を分離した。この手法は下記に従った。

まず、土石流ピーク流量 ( $Q_p$ ) は①式のように分類できるものとする。

$$Q_p = Q_{sp} + Q_{wp} = Q_{sp} + Q_{wsp} + Q_{wgp} \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで、 $Q_{sp}$ : 土砂ピーク流量、 $Q_{wp}$ : 水ピーク流量、 $Q_{wsp}$ : 表流水起源の水ピーク流量、 $Q_{wgp}$ : 地中水起源の水ピーク流量である。また「 $Q_{wgp}$  は全て土石流発生・侵食時に河床に含まれ、 $Q_{wgp}$  と  $Q_{sp}$  の割合は河床や斜面の水と土砂の割合に等しい。さらに河床は完全に飽和していた」と仮定する。

河床の土砂濃度を  $C_*$  とすると、 $Q_{wgp}$  と  $Q_{sp}$  の関係は②式で、また①②式から③式が導かれる。

$$C_* = \frac{Q_{sp}}{Q_{sp} + Q_{wgp}} \quad \dots \textcircled{2} \quad Q_{wsp} = Q_p - \frac{Q_{sp}}{C_*} \quad \dots \textcircled{3}$$

土石流は粗礫とフェーズシフトした細粒土砂に分類できるとし、粗礫は高橋の土石流の平衡濃度式に従うと仮定すると、 $Q_{sp}$  と  $Q_p$  の比は④式で、間隙流体密度  $\rho$  は⑤式で表せる。

$$\frac{Q_{sp}}{Q_p} = C_c + C_f = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho) \cdot (\tan \theta - \tan \theta)} + C_f \quad \dots \textcircled{4}$$

$$\rho = \frac{\sigma \cdot C_f + \rho_w \cdot C_w}{C_f + C_w} \quad \dots \textcircled{5}$$

ここで、 $C_c$ : 土石流中の粗礫濃度、 $C_f$ : 土石流中の細砂濃度、 $C_w$ : 土石流中の清水の割合、 $\rho$ : 間隙流体密度、 $\sigma$ : 砂礫の密度 (2600kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho_w$ : 水の密度 (1000kg/m<sup>3</sup>)、 $\theta$ : 溪床勾配 (°)、 $\varphi$ : 内部摩擦角 (35°) である。なお、解析に際して  $\rho$  は、1000、1200、1600kg/m<sup>3</sup> の 3 通りを設定 (この時、 $C_f/(C_f + C_w)$  はそれぞれ 0、0.13、0.38) した。

## 3. 解析結果

## (1) 出水形態毎のピーク流量と降雨強度、地形の関係

出水形態毎 (土石流の場合は表流水起源の水ピーク流量  $Q_{wsp}$ ) に、流出率、流出高と降雨指標 (5、10、30、60 分間雨量、3、12、24 時間雨量) と地形 (流域面積、溪床勾配) の関係を分析した。図 1 に最大 5 分間雨量とピーク流出率の関係を示す。ここでピーク流出率は、ピーク流出高を流出ピークまでの最大ピーク雨量強度で除したものである。図 1 には最大 5 分間雨量との関係のみを示すが、降雨指標を大きくしてもピーク流出率は大きな変化は見られなかった。また  $\rho$  が大きくなると、 $Q_{wsp}$  の流出率は低下し、出水のみの

場合と大きな違いは見られなくなる。なお流出高も同様の傾向を示す。

流域面積と流出率との関係は、 $Q_{wsp}$ が $\rho=1000\text{kg/m}^3$ の場合は流域面積が小さいほどピーク流出率は大きくなるが、 $\rho$ が大きくなると出水のみの場合と同様に流域面積と明瞭な関係は見られず流出率は10以下に分布する傾向がみられた。溪床勾配との関係を見ると、 $Q_{wsp}$ は $\rho$ が小さい場合は溪床勾配が急なほどピーク流出率は大きくなるが、 $\rho$ が大きな場合は出水のみの場合と同様に流出率は10以下に分布する。

以上のように、土石流の $Q_{wsp}$ に着目すると、ピーク流出高・流出率と降雨指標、地形（勾配、流域面積）の関係は、何れも $\rho$ が大きくなると出水のみの場合と同程度の傾向を示すことが分かる。

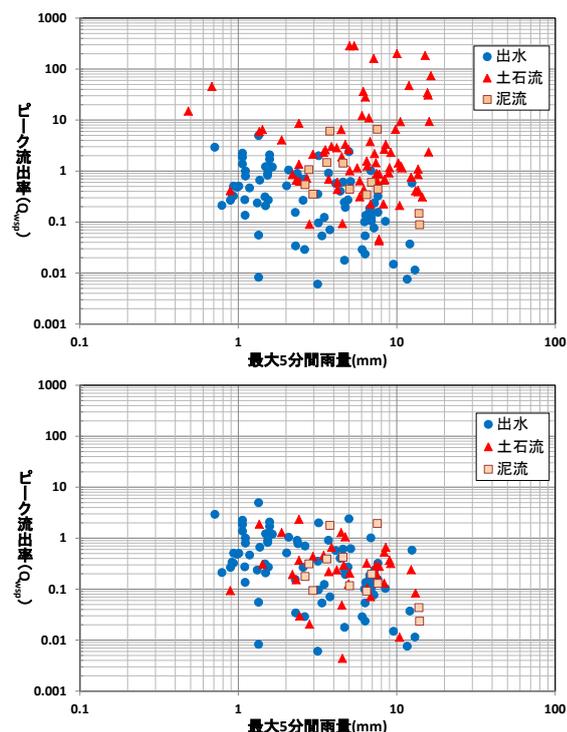


図-1 出水形態毎の最大5分間雨量とピーク流出率との関係（上； $\rho=1000\text{kg/m}^3$ ，下； $\rho=1600\text{kg/m}^3$ ）

## (2) 流出解析による検討

$Q_{wsp}$ 及び他の出水形態のピーク流量について、タンクモデル、貯留関数法、合理式の各流出解析モデルを用いて算出し、映像やLPデータによるピーク流量と比較した。各流出解析モデルは、坂井ら<sup>2)</sup>が求めた出水のみと土石流のモデルのうち、流域面積が最も小さい春木川(1.7km<sup>2</sup>)のものを用いた。タンクモデルは4段タンクのパラメータを、貯留関数法はk, p, TI, f1, RsaをそれぞれSCE-UA法で同定している。合理式のパラメータはピーク流出係数である。用いた降雨データは、レーダー解析雨量から求めた5分毎の流域平均雨量である。図2にタンクモデルによる結果を代表事例として示すが、他の手法による結果と共通して $Q_{wsp}$ は $\rho$ が大きくなると出水の場合と同程度の範囲に収まる傾向にあり、ピーク流出率が大きな土石流であって

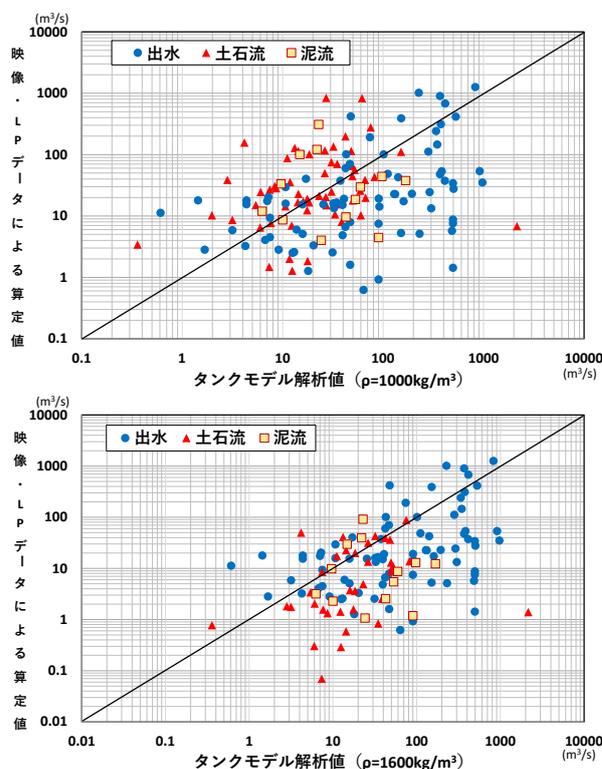


図-2 タンクモデルと映像・LPデータにより推定したピーク流量の関係(上； $\rho=1000\text{kg/m}^3$ ，下； $\rho=1600\text{kg/m}^3$ )

も、そこに含まれる表流水起源の水ピーク流量は通常の降雨流出解析のモデルで説明できる量であると言える可能性が高い。

## 4. 考察

$Q_{wsp}$ は、間隙流体密度 $\rho$ が高くなると、流出高や流出率は出水のみの場合と同程度の傾向を示し、また降雨流出解析によるピーク流量の値も、出水のみの場合と同程度であることが分かった。これは $\rho$ が大きくなることは、土石流が発達し細粒土砂が間隙流体として振る舞うフェーズシフトの状態であり、この条件下では、土石流は降雨による流域内のみの表流水だけで流動化することを示すと考えられる。また、その降雨量は、流出土砂量を規定する降雨継続時間に関するこれまでの研究成果(例えば<sup>5)</sup>)と合わせて考えると、短時間の降雨量でも十分であると考えられる。

さらに①式により、土石流ピーク流量がそれぞれ水と土砂のピーク流量に規定されると考えると、水ピーク流量は流域内の降雨流出に規定されることが明らかになったため、今後は、侵食量等がピーク流量に与える影響を解明することにより、土石流ピーク流量の推定精度の向上を図っていきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 秦ら (2016) : 平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集 A, p-118-119, 2) 坂井ら (2017) : 平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集, p642-643, 3) 日本河川協会 (1997) : 建設省河川砂防技術基準 (案) 同解説設計編II, p19, 4) 浅野ら (2015) : 平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集 A, p150-151, 5) 工藤ら (2017) : 砂防学会誌 Vol.70, No.3, p.3-12