

# 流下痕跡から推定した土石流洪水位と流下速度

—2004 年台風 15 号豪雨にともなって高知県大川村で発生した土石流の例—

## Flood peak and velocity of debris flows inferred from the flood marks

—Cases of debris flows in Okawa Village in Kochi Prefecture,  
induced by the heavy rainfall of Typhoon Megi in 2004—

村井 政徳\* (高知大院・黒潮圏海洋)・横山 俊治 (高知大・理)・  
中屋 志郎 (高知大・理)・佐々 浩司 (高知大・理)・日浦 啓全 (高知大・農)

Masanori MURAI\* · Shunji YOKOYAMA ·

Shiro NAKAYA · Koji SASSA · Hiromasa HIURA (Kochi Univ.)

キーワード: 土石流, 流下痕跡, 洪水位, 流下速度, 台風 0415 号, 高知県大川村

Keywords: debris flow, flood marks, flood peak, velocity, Typhoon Megi, and Okawa Village

### 1. はじめに

2004 年 8 月 17 日, 高知県嶺北地方では記録的な豪雨に見舞われ, 土石流をはじめとする土砂災害が発生した。特に土佐郡大川村では土石流災害が多発し, いたるところで道路が寸断された。そのため, 夏休み中の合宿で同村を訪れていた児童を含む約 160 名が一時孤立させられ, ヘリコプターで救助されるという事態になった。

高知県では今回の災害以前にも, 1975 年台風 5 号による仁淀川災害, 1976 年台風 17 号による高知・徳島災害, 2001 年の高知西南豪雨災害など数多くの土石流災害を経験してきた。これらの災害についてはさまざまな視点から数多くの研究がなされてきた。しかし, 土石流の流下特性を把握する上で重要な土石流の洪水位, 流下幅, 流量, 流速といった水理量についてはこれまで具体的に示されてこなかった。これらの水理量は, 砂防堰堤などの対策工の設計・計画を行う上で必要不可欠なパラメータであり(水野, 2004), 各現場における実測値の蓄積が望まれる。

そこで本研究では, 土石流発生溪流末端堆積域に残された流下痕跡に注目して, 土石流流下時における洪水位の推定を行うとともに, 流下速度についても検討した。

### 2. 被災地の地形・地質

2004 年台風 15 号豪雨による土石流は, 四国

山地のほぼ中央部, 高知県土佐郡大川村東部と土佐町北部にまたがる, 早明浦ダム貯水池に注ぎ込む支川流域一帯で発生した(図-1)。

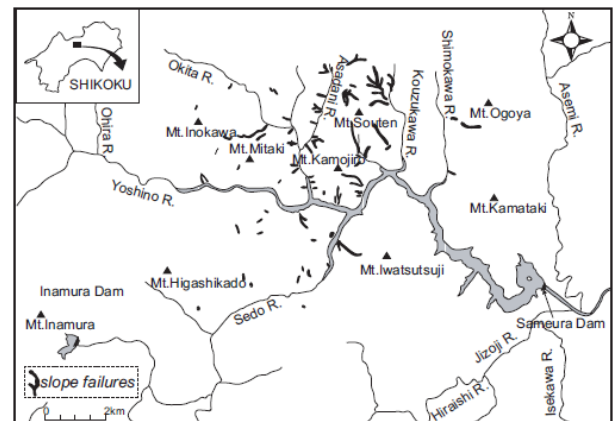


図-1 斜面崩壊箇所の分布

土石流発生地域は, 標高 1,200~1,800m の山稜がほぼ北西-南東方向に連なって分布する早壮年期山地である。この地域の地質は三波川帯に属し, 吉野川層群三縄層主部層の緑色片岩が厚く分布するほか, 珪質片岩, 泥質片岩も場所によってはかなり多く介在している。これらの結晶片岩類は局部的には小褶曲によって急斜するところがあるものの, 西北西~北西から東南東~南東方向の走向で北北東~北東に 20~30°で傾斜している。これはホッグバッグ地形としても現れている。したがって, 北向き斜面は流れ盤構造の緩斜面(斜面勾配 20~30°)で, 対照

的に南向き斜面は受け盤構造の急斜面(斜面勾配 30~40°)で、しばしば崖や滝をなしている。ただし、土石流はどちらの斜面においても発生しており、特定の岩相、地質構造が影響しているわけではないと考えられる。今回発生した土石流は、溪流上流部の溪床堆積物の移動および、それが流下に伴い侵食をして土石流となったと考えられる。

### 3. 豪雨特性

2004年8月17日から18日にかけて台風15号(メーギー)からの暖湿流によって活発化した停滞前線の活動により、四国中央部付近を中心とした豪雨が発生した。高知県嶺北地方では2004年8月17日0時過ぎから雨が降りだし、同日10時から夕刻にかけて時間雨量100mmを越す激しい雨を記録した。大川村小松では17日16時から18時の2時間で205mmの雨量を記録したほか、土佐町上津川、イシガ谷でも小松と同程度の激しい降雨を記録した。

### 4. 土石流流下時の洪水位の推定

土石流洪水位は以下の方法にしたがって推定した(図-2)。

- ① 溪岸斜面上の樹木に付着した泥の高さから土石流流下時の洪水位を推定した。泥は幹の下流側にべったりと付着しており、この泥の付着高さを洪水位の記録と解釈した。樹木の上流側はたとえ泥が付着したとしても後続流によって洗い流されることが多く、流木の衝突によって洪水位より高位に泥が付着することもあるので、樹木の上流側に付着した泥から洪水位を推定するのは危険である。樹木への泥付着による洪水位の推定は他地域の土石流においても実績があり(横山ほか, 1999)、今回も土石流流下時の洪水位の指標として下流側の泥付着の高さを用いることとした。
- ② 立木に泥が付着するのと同じように、樹幹の表面に細礫が突き刺さっているのが観察された。これも土石流中に含まれる細礫が流下途中で立木に突き刺さったものと判断し、細礫が刺さ

っている高さを洪水位として記録した。

- ③ 溪岸斜面上には溪床礫と思われる垂角~垂円礫が散在している箇所があった。これらの礫は土石流流下時の水位の上昇に伴って溪床にあった礫が斜面上部にまで運ばれたものと考えられ、この溪床礫が分布する高さも洪水位として記録した。
- ④ 立木の根元には、樹枝やツル植物などが絡みつくように捕捉されているのを確認することがしばしばある。これらからも土石流が少なくともこの高さまで到達していたと推定できる。

なお、①~④のいずれもそれぞれ流下痕跡のマーキングがあった箇所から現溪床までの垂直高を洪水位としている。

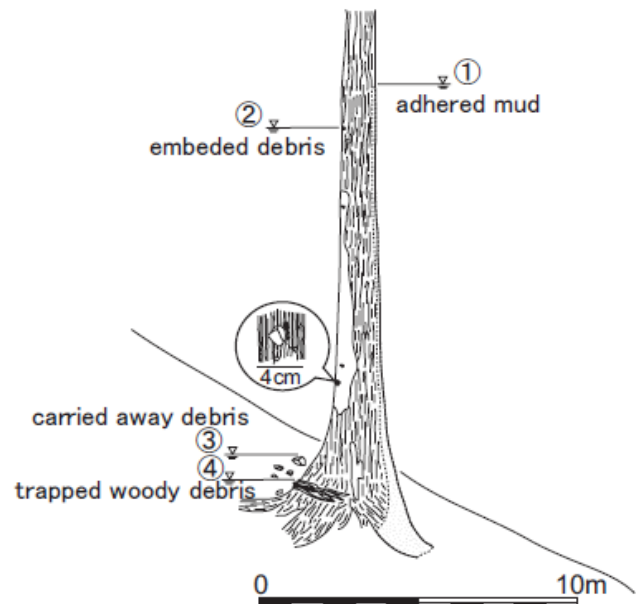


図-2 流下痕跡から土石流洪水位を推定する方法の概念図

これらの方法にしたがって洪水位を推定したところ、鈴ヶ谷における末端堆積域での洪水位は4.8~7.0mを記録しており、谷幅が広がった県道との交差部(谷幅28m)においてもコンクリート擁壁に残る流下痕跡は道路面より2.75mの高さに残っていた。末端堆積域の土石流堆積物の堆積深は厚くても2m程度であるが、この層厚の2.4~3.5倍の高い水位を保ったまま土石流はダム湖まで流れ下ったと考えられる。

また、鈴ヶ谷以外の溪流では、谷幅5.7~

18.0m で 3.5m～6.8m の洪水水位が得られている。ただし、土佐町上津川では 1.6m と低い洪水水位であるが、この洪水水位を記録した箇所の谷幅は 34m と他に比べて倍近くも谷幅が広い。このため、洪水水位は低くなったと考えられる。図-3 に示すように、谷幅が広がると洪水水位は低くなる傾向があるようである。

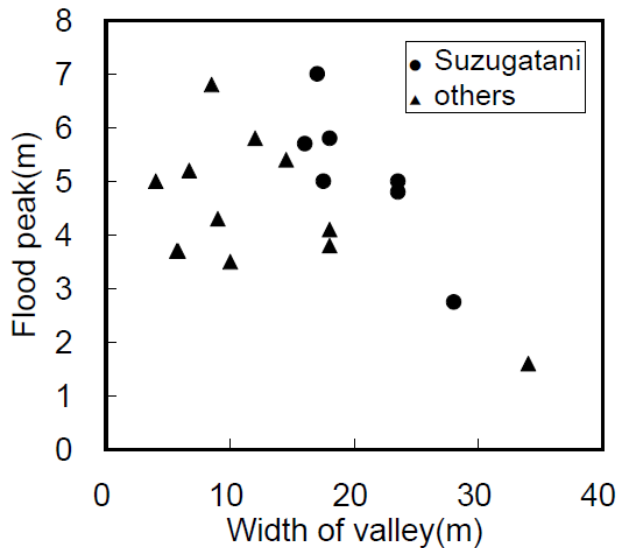


図-3 洪水水位と谷幅の関係

## 5. 土石流流下速度の推定

今回発生した土石流の流速を現地調査で得られたデータから推定してみる。まず、土石流流下時の洪水水位から流速を推定してみる。洪水水位から流速を推定する方法には、洪水水位を Manning 型の流速式(水山・上原, 1984)に代入する方法や、偏流高の推定式(水野ほか, 2003; 水野, 2004)に代入する方法などがある。今回は Manning 型の流速式を用いて流下速度を推定する。Manning 型の式;

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} (\sin \theta)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $U$ : 土石流の流速 (m/s),  $n$ : 粗度係数,  $R$ : 土石流の径深 (m) (ここでは  $R=h$  (土石流の洪水水位)とする),  $\theta$ : 溪床勾配 ( $^{\circ}$ ) である。その結果、粗度係数を 0.10 (仮定), 溪床勾配  $\theta=16^{\circ}$  (実測)として計算してみると、鈴ヶ谷での土石流の流速は 14.9～19.2m/s となる。

つぎに、土石流をダイラタント流体とした場合

の先端部平均流速  $u_f$  (m/s) を求める。

流速式は高橋 (1977) により,

$$u_f = 2.8 \sqrt{g \sin \theta \left\{ c_d + (1 - c_d) \frac{\rho}{\sigma} \right\} \left( \sqrt[3]{\frac{c_*}{c_d}} - 1 \right) \frac{\sqrt{h^3}}{d_m}} \quad (2)$$

$$c_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、溪床勾配  $\theta=16^{\circ}$  (実測), 内部摩擦角  $\phi=35^{\circ}$ , 水の密度  $\rho=1.0\text{g/cm}^3$ , 砂礫の密度  $\sigma=2.8$  (結晶片岩の比重), 重力加速度  $g=9.8\text{m/s}^2$ , 容積濃度  $c_d=0.39$ , 堆積層の容積濃度  $c_*=0.7$ , 水深  $h=7.0\text{m}$  (流下痕跡から推定した最高洪水水位)とする。この計算式は、砂礫の平均粒径  $d_m$  の定め方によって、求める先端部の平均流速  $u_f$  が幅広く変動する。 $d_m=1\sim 0.4\text{m}$  のとき  $u_f=15\sim 36\text{m/s}$ ,  $d_m=2\text{m}$  のときは  $u_f=7\text{m/s}$  という結果を得る。

最後に、土石流流下速度推定の新たな試みとして、スギの樹幹に突き刺さった礫の運動速度に基づいて土石流の流速を推定する(中屋ほか, 2004)。

土石流発生溪流では、樹幹に礫が突き刺さった樹木がみられた。その多くはスギであったが、その他の樹種にも礫の突き刺さりが見られた。礫の粒径は見つかった最大のもので 56mm, 小さいものでは数 mm 程度までである。礫の種類は緑色片岩と珪質片岩が主であり、しかもその大部分が緑色片岩である。

樹木に埋め込まれた礫が流下して来た時に持っていた運動エネルギーと、樹木との衝突後に樹幹にめり込んで失われたエネルギーの間には、礫の質量を  $m$  (kg), 礫の流下速度を  $U$  (m/s), 樹木の硬度を  $S$  (N/m<sup>2</sup>), 礫の断面積を  $d$  (m<sup>2</sup>), 礫が樹幹内部を進んだ距離を  $l$  (m), 礫が樹幹にめり込んだ体積を  $V$  (m<sup>3</sup>)とすると、エネルギー保存則により,

$$\frac{1}{2} m U^2 = S d l = S V \quad (4)$$

$$U = \sqrt{\frac{2 S V}{m}} = \sqrt{\frac{2 S d l}{m}} \quad (5)$$

が成り立つ。この式を用いて礫の流下速度  $U$

(m/s)を求める。礫は土石流中を流下することから、礫の流下速度＝土石流の流下速度と考えることができる。

スギ生木の硬度  $S(N/m^2)$  は木口面、柾目面、板目面においてそれぞれ  $12.7\sim 18.6\times 10^6$ ,  $5.9\sim 7.8\times 10^6$ ,  $4.9\sim 5.9\times 10^6$  である。岩石の比重  $\rho$  は、結晶片岩:2.8 である。

鈴ヶ谷で観察されたスギ立木に突き刺さっていた礫の中で大きいものは、板目面に埋め込まれていた緑色片岩礫:  $1.7\times 1.4\times 0.8\text{cm}$  と珪質片岩礫:  $1.5\times 1.0\times 0.5\text{cm}$  である。これらの礫が樹幹に埋め込まれるのに必要な速度を式(5)によって求めると、緑色片岩礫では  $U=13\text{ m/s}$ 、珪質片岩礫では  $U=19\text{m/s}$  となる。この速度は、礫が樹幹に完全に埋まるのに必要最低の速度であり、実際の土石流の速度はこれ以上だったと考えられる。



写真-1 樹幹に突き刺さった礫

また、樹幹に突き刺さった礫の中には写真-1に示すような大きな径の礫もあり、礫全部が樹幹に突き刺さるのではなく、一部しか突き刺さっていなかった。このような大きな礫で、全部が樹幹に埋め込まれていないものに関しては、樹幹に埋め込まれた体積を正確に計測すれば、ほぼ土石流の流速と考えられる速度を得ることができると思われる。

## 6. まとめ

流下痕跡からみた土石流の洪水位は 3.5m 以上と高く、最大で 7m であった。また、谷幅が広く

なるにつれて洪水位は低くなる傾向がある。

土石流の流速は、流下痕跡をもとに国土交通省砂防設計技術指針でも採用されている Manning 型の流速式、ダイラタント流体モデル式、樹幹に埋め込まれた礫のエネルギー保存則から求める式(3)と併せて推定した結果、鈴ヶ谷で発生した土石流の流速は  $13\sim 36\text{m/s}$  と推測される。しかし、Manning 型の流速式では粗度係数、ダイラタント流体モデルの流速式では砂礫の平均粒径や堆積層の容積濃度など、そのパラメータに仮定条件が多いのに対し、今回新たに試みた方法は、観察事実に基づいて直接、しかも簡便に流速を推定できるという利点をもつ。また、従来法と比較しても、妥当な流速を算出できていると考えられる。

## <引用文献>

- 水野秀明・杉浦信男・寺田秀樹・内田太郎・原楨利幸・曾我部匡敏・桜井 亘・西本晴男・小山内信智・武澤永純・土井康弘(2003):2003 年 7 月梅雨前線豪雨によって発生した九州地方の土石流災害(速報). 新砂防, Vol.56, No.3, pp.36-43.
- 水野秀明(2004):S 字型湾曲部の流下痕跡から土石流の流速を推定する方法に関する実験的研究. 新砂防, Vol.57, No.4, pp.56-59.
- 水山高久・上原信司(1984):土石流の水深と流速の観測結果の検討. 新砂防, Vol.37, No.4, pp.23-26.
- 中屋志郎・佐々浩司・横山俊治(2004):樹木被害から推定した阿津江土石流の流動パターン. 第 4 回日本地質学会四国支部講演会ポスター発表(P-2).
- 高橋 保(1977):土石流の発生と流動に関する研究. 京都大学防災研究所年報, Vol.20, B-2, pp.405-435.
- 横山俊治・小川孝宏・平野裕三(1999):突発的豪雨によって山地斜面の表層堆積物で発生した高速斜面変動の発生条件. 第 38 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.559-562.