

# 豪雨に伴う土砂・流木の生産と 流下過程に関する研究

TRANSPORT PROCESS OF DRIFTWOOD RESULTING  
FROM HEAVY RAINFALL IN MOUNTAINOUS RIVERS

山崎祐介<sup>1</sup>・江頭進治<sup>2</sup>

Yusuke YAMAZAKI and Shinji EGASHIRA

<sup>1</sup>正会員 博士(農学) 土木研究所ICHARM専門研究員(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>2</sup>正会員 工博 土木研究所ICHARM研究・研修指導監(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

The present study proposes a method to evaluate a transport process of driftwood in mountainous rivers. The erosion and deposition rates of driftwood are formulated using sediment erosion/deposition rate formula for debris flow. We describe the transport process of driftwood by means of a convection equation with the formulated erosion and deposition formulas. The transport process of driftwood is solved numerically by integrating the convection equation and governing equations of debris flow simultaneously. The numerical result shows a good agreement with data observed in the 2017 rainfall event of Northern Kyusyu at the small tributary of Akatani River.

**Key Words** : drift wood, transport process of drift wood, convection equation, debris flow

## 1. はじめに

豪雨に伴って山腹斜面で発生する表層崩壊や、崩壊に起因する土石流による土砂輸送は、土砂そのものが被害を与えるだけでなく、洪水時の河川への異常な土砂供給により流路・河床変動を激化させる。また、崩壊・土石流に伴い流木も多く発生し、橋梁部などでの集積により氾濫を生じさせる。このような現象は、2017年九州北部豪雨における赤谷川流域や2016年8月に岩手県小本川流域で生じた災害においてみられるように、流域面積が小さく勾配が急である中山間地河川において顕著である。このことは、中山間地河川において、土砂・流木を伴う洪水流を評価し、それに基づいて川を整備していく上で、山地小流域からの土砂および流木の流出予測が重要であることを示している。

土砂・流木の流出および河川への流入条件の設定には、崩壊発生と崩壊土砂の移動過程あるいは土石流の流動過程の予測が必要になる。崩壊発生については、浸透流解析と無限長斜面の安定解析を組み合わせた方法で、ある程度の予測が可能になっている。土石流の流動機構については、既往の研究により、抵抗則や侵食・堆積の評価方法などがある程度明らかになっている<sup>1,2,3,4)</sup>。近年、江頭ら<sup>4)</sup>により、山腹斜面や溪床堆積物における微細土砂

が液体相として振る舞うものとする、その含有率によって、土石流の土砂濃度や間隙流体の密度、侵食・堆積速度式<sup>4)</sup>の重要な変数である平衡勾配が決定されることから、微細土砂の含有率が流動機構を決定づける重要な要素であるところまで明らかになっている。これに加えて、流域における表層地形・地質や雨量の空間分布および河道の合流を考慮すれば、崩壊・土石流による流出土砂量の空間分布の推定は可能である<sup>5)</sup>。

流木を伴う土石流においては、流木は支川の合流点や谷の出口など土砂が堆積しやすいところで堆積すること<sup>6)</sup>や、溪流で発生した土石流による土砂流出量と流木流出量が概ね比例すること<sup>7)</sup>が示されている。

本研究は、下流域河道に対する土砂・流木の供給条件の設定法を明らかにしようとするものであるが、所定の断面には、これより上流域におけるプロセスが積分された結果があらわれているため、上流域の崩壊・土石流による表土層の侵食に伴う流木の生産・流出過程に着目している。土砂の侵食・堆積速度式を用いて流木の生成および貯留に関する定式化を行い、これらを用いて流木の移流方程式および貯留方程式を導いている。流木の挙動は、これらの式と土石流に関する支配方程式によって記述されるが、これを平成29年九州北部豪雨における福岡県赤谷川流域の小流域に適用し、その妥当性を検討している。

## 2. 水・土砂混合流および流木の支配方程式

### (1) 粗粒土砂および微細土砂の質量保存則

山腹斜面や溪床における土砂について、粗粒成分と微細成分を分離して扱う。豪雨により山腹斜面や溪床が水で飽和され、流動化して土石流に遷移するとき、粗粒成分は土石流の固相を形成し、微細成分は飽和している水とともに液相を形成する。このような土石流についての支配方程式を次のように表す。

$x-y$ 平面上の土石流の侵食過程および堆積過程における、土石流全体、粗粒土砂および微細土砂の質量保存則は、それぞれ次式で表される<sup>8)</sup>。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial c_c uh}{\partial x} + \frac{\partial c_c vh}{\partial y} = p_c E \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_f(1-c_c)h}{\partial t} + \frac{\partial c_f(1-c_c)uh}{\partial x} + \frac{\partial c_f(1-c_c)vh}{\partial y} = p_f E \quad (3)$$

一方、堆積過程における質量保存則は、次式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = \frac{E}{c_{*D}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_c h}{\partial t} + \frac{\partial c_c uh}{\partial x} + \frac{\partial c_c vh}{\partial y} = E \quad (5)$$

$$\frac{\partial c_f(1-c_c)h}{\partial t} + \frac{\partial c_f(1-c_c)uh}{\partial x} + \frac{\partial c_f(1-c_c)vh}{\partial y} = (1/c_{*D} - 1)c_f E \quad (6)$$

ここに、 $h$ は水深、 $t$ は時間、 $u$ は $x$ 軸方向の水深平均の流速、 $v$ は $y$ 軸方向の水深平均の流速、 $E$ は侵食・堆積速度、 $c_*$ は山腹および溪床における土砂の体積濃度、 $c_c$ は粗粒土砂の水深平均の体積濃度、 $p_c$ は $c_*$ における粗粒土砂の含有率、 $c_f$ は流体相における微細土砂の体積濃度、 $p_f$ は $c_*$ における微細土砂の含有率である。侵食・堆積速度は、次式で表される<sup>3)</sup>。

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (7)$$

ここに、 $\theta_e$ は土石流の平衡勾配で、次式で表される。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_c}{(\sigma/\rho - 1)c_c + 1} \tan \phi \quad (8)$$

ここに、 $\sigma$ は砂礫の質量密度、 $\rho$ は水と微細土砂からなる間隙流体の質量密度、 $\phi$ は砂礫の内部摩擦角である。

### (2) 混合流の運動量保存則

土石流の運動量保存則は次式で表される。

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial \beta u uh}{\partial x} + \frac{\partial \beta v uh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (9)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial \beta u vh}{\partial x} + \frac{\partial \beta v vh}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (10)$$

ここに、 $\beta$ は運動量補正係数、 $H$ は土石流の流れの表面の位置、 $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$ は、それぞれ、 $x$ 、 $y$ 方向河床せん断力、 $\rho_m$ は土石流の質量密度であり次式で表される。

$$\rho_m = (\sigma - \rho)c_c + \rho \quad (11)$$

$$\rho = (\sigma - \rho_w)c_f + \rho_w \quad (12)$$

ここに、 $\sigma$ は砂礫の質量密度、 $\rho$ は水と微細土砂からなる間隙流体の質量密度、 $\rho_w$ は水の質量密度である。河床せん断力 $\tau_b$ とその $x$ 、 $y$ 成分 $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$ は、それぞれ、次式で表される。

$$\tau_{bx} = \tau_b u / \sqrt{u^2 + v^2} \quad (13)$$

$$\tau_{by} = \tau_b v / \sqrt{u^2 + v^2} \quad (14)$$

$$\tau_b = \tau_y + \rho f_b (u^2 + v^2) \quad (15)$$

ここに、 $\tau_y$ はクーロン型の降伏応力であり、次式で表され、 $f_b$ は流動抵抗係数である。

$$\tau_y = \left(\frac{c_c}{c_*}\right)^{1/5} (\sigma - \rho)c_c g h \cos \theta \tan \phi \quad (16)$$

流動抵抗係数 $f_b$ は、次式で表される。

$$f_b = \frac{25}{4} (f_d + f_f) \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \quad (17)$$

$$f_d = k_d (\sigma/\rho) (1 - e^2) c_c^{(1/3)} \quad (18)$$

$$f_f = k_f (1 - c_c)^{5/3} c_c^{(-2/3)} \quad (19)$$

ここに、 $d$ は粗粒土砂の粒径、 $k_f = 0.16$ 、 $k_d = 0.0828$ 、 $e$ は砂礫同士における反発係数である。

なお、Julien and Paris<sup>7)</sup>の $f_b$ に関する実測値を参考にして、

$$\frac{25}{4} (f_d + f_f) \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \leq 1 / \left\{ A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{\kappa_s} \right\}$$

のとき、 $f_b$ を次式によって評価することになっている。

$$f_b = 1 / \left\{ A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{\kappa_s} \right\} \quad (20)$$

ここで、当面 $A_r = 8.5$ 、 $\kappa = 0.4$ 、 $\kappa_s = d$ を採用する。

### (3) 流木の輸送・貯留方程式

立木が表土層の侵食によって単位時間に土石流に取り込まれる量は $ES/D$ に比例し、一旦流れに取り込まれた流木は、土砂の堆積とともに溪床に堆積するものと考えれば、単位時間単位面積当たりの立木の堆積量は、 $Ec_{drf}$ のように表現される。ここに、 $S$ は山腹斜面や溪床の単位面積あたりの立木あるいは流木の体積、 $D$ は侵食可能深、 $c_{drf}$ は土石流の流れにおける流木の体積濃度である。すると、流木の輸送方程式および溪床における貯留方程式は、それぞれ、次のように記述できる。

$E \geq 0$  (侵食過程)

$$\frac{\partial c_{drf} h}{\partial t} + \frac{\partial c_{drf} uh}{\partial x} + \frac{\partial c_{drf} vh}{\partial y} = E \frac{S}{D} r \quad (21)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -E \frac{S}{D} r \quad (22)$$



図-1 対象流域位置図

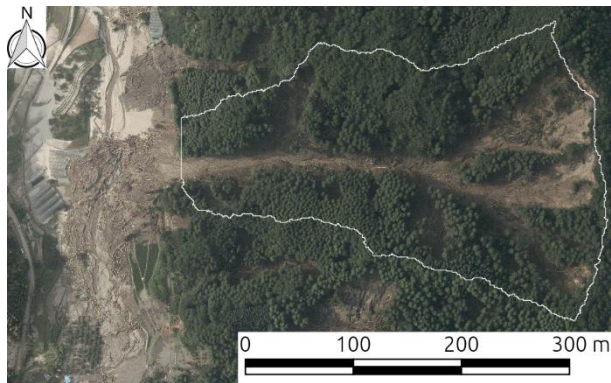


図-2 対象流域における災害後の空中写真

$E < 0$  (堆積過程)

$$\frac{\partial c_{drf}h}{\partial t} + \frac{\partial c_{drf}uh}{\partial x} + \frac{\partial c_{drf}vh}{\partial y} = Ec_{drf}r \quad (23)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -Ec_{drf}r \quad (24)$$

ここに、 $r$ は修正係数で、後述の計算では当面、侵食過程では $r = 1$ 、一方、堆積過程では $h/d_{drt} < h_{drt}/d_{drt}$ のとき $r = 1$ 、 $h/d_{drt} \geq h_{drt}/d_{drt}$ の時 $r = 0$ としておく。ここに、 $h_{drt}$ は流木の堆積が生じる限界水深、 $d_{drt}$ は流木の直径である。

### 3. 土砂・流木の生産・輸送の実態把握

2017年7月に生じた九州北部豪雨により、筑後川右岸

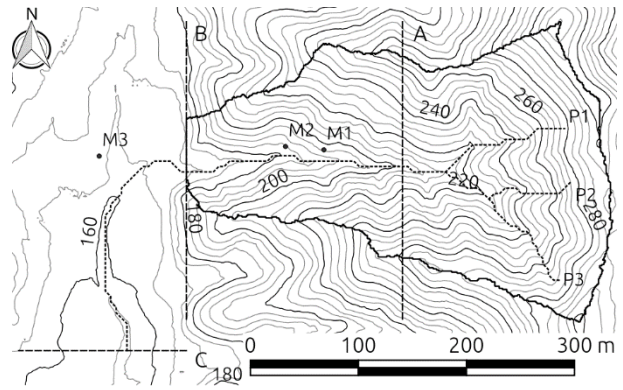


図-3 対象流域の地形、溪流P1-3および山腹斜面材料の試料採取地点

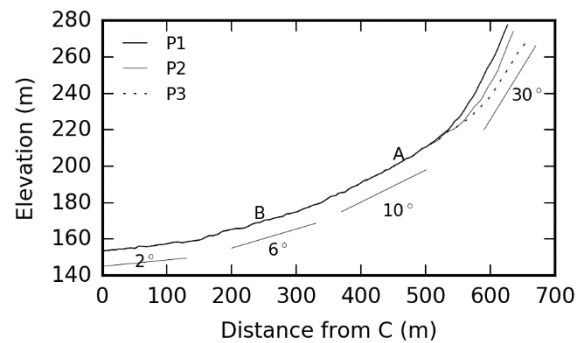


図-4 溪流の縦断勾配。図中のAおよびBは平面図における位置を示している。

の赤谷川流域では、広範囲に崩壊・土石流が発生し、赤谷川の流路沿いは、流木や土砂の氾濫により地形や景観が大きく変わった。ここでは、後述の数値計算との比較のため、赤谷上流域にある小流域を対象に崩壊・土石流による土砂および流木の生産・輸送量を空中写真や災害前後の標高データにより判読する。

図-1に本研究の対象流域の位置を示す。流域面積は、6.7 haである。気象庁Cバンドレーダー雨量によれば、対象流域周辺の最大時間雨量は100 mm程度、最大24時間雨量は、450 mm程度である。

図-2に対象流域の災害後の空中写真を示す。上流の広範囲に土砂移動痕跡が確認され、谷筋と谷出口には土砂と流木の堆積が確認される。これは、崩壊および土石流による侵食によって生産された流木の一部が溪床や谷出口で堆積したものと推察される。なおこの溪流では、谷出口の土砂および流木の堆積は、一部本川の洪水流によって輸送されているものと思われるが、洪水による下流域への輸送量の詳細は分からない。この空中写真において、残存している針葉樹の樹冠の数を数えて単位面積あたりの本数を算出し、分布している流木の位置と長さを読み取った。

図-3, 4は流域地形の平面図と縦断図である。縦断図は、平面図に示す測線Cを下流端とするP1, P2およびP3の溪流に沿って作成している。これによれば、崩壊が生じた

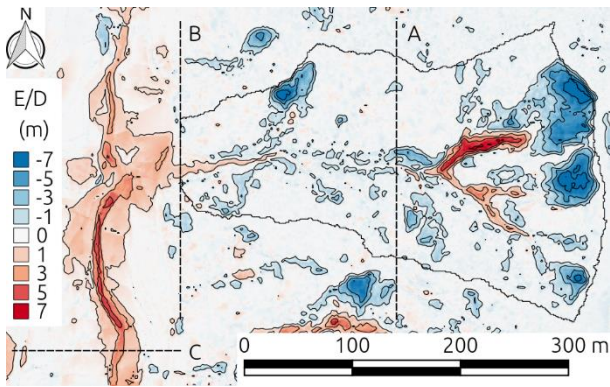


図-5 災害前後の地形変化。  
青色は侵食，赤色は堆積を示している。

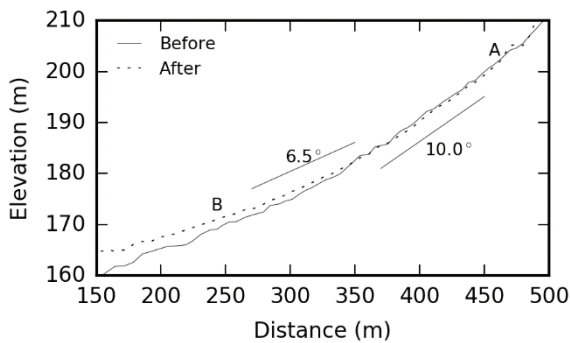


図-6 災害前後の溪床縦断変化。

斜面の勾配は30度で，P1，P2およびP3が合流している箇所から谷出口のB地点までの溪床勾配は10度から6度，本川の河床勾配は2度になっている。また，山腹斜面の材料を採取しており，その場所を平面図にM1，M2およびM3として示している。

図-5，6に災害前後の地形変化の平面図と溪床の縦断変化を示す。標高データの観測値には流木の集積等のため，誤差を生じることもあるが，ここでは，標高が低下した領域を侵食域，標高が増加した領域を堆積域とみなしている。すると，流域内の侵食量および堆積量は，それぞれ，5.9万 m<sup>3</sup>および1.2万 m<sup>3</sup>である。よって，流域からの流出土砂量は4.7万 m<sup>3</sup>程度となる。また，測線BとCの間の谷出口に堆積している土砂量は，2.3万 m<sup>3</sup>程度である。この領域の堆積には本川の洪水流による土砂輸送の影響を受けていることを考慮しておく必要がある。これより，本川へ流出しているのは，2.4万 m<sup>3</sup>程度となる。図-6の350 mから450 mの区間においては，0.5 m程度侵食され，350 m地点から下流にかけて堆積している。堆積域の溪床勾配は6.5度程度である。

図-7に山腹斜面における材料の粒度分布を示す。試料の採取地点は，図-3に示すとおりであるが，M3については，流木の根系に付いている土壌を採取したものであり，本来あった場所は山腹斜面であると思われる。微細土砂として扱う粒径の厳密な定義はないが，山地河川で

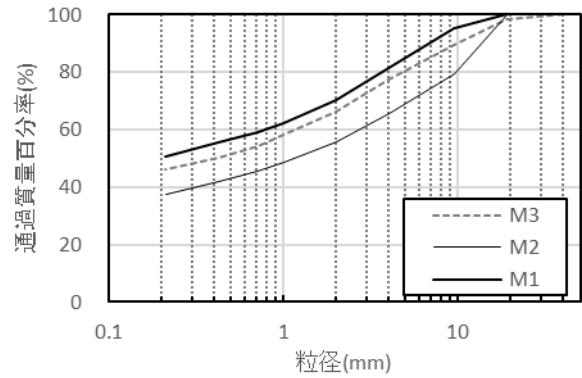


図-7 山腹斜面における材料の粒度分布。採取箇所は平面図に示している。

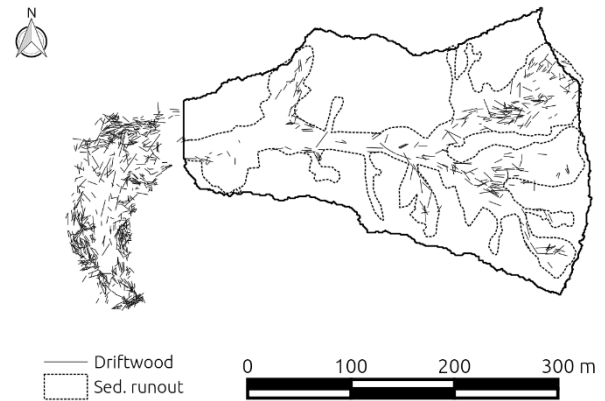


図-8 流木の位置および長さ土砂移動範囲

いわゆるwash loadとして扱うことのできる0.2 mm以下の粒子を微細土砂としておく。すると，微細土砂含有率 $p_f$ は0.3から0.5程度である。ここで， $p_f = 0.3, 0.4, 0.5$ における平衡勾配について，後述の土質パラメータと式(8)によって求めると，それぞれ，10.3度，8度，6.1度である。図-6において，土石流による堆積が開始しているのは350 m付近であり，この区間の災害前の溪床勾配は，上流の10度と下流の6度との勾配の領域(図-6)に相当している。

図-8に空中写真から読み取った流木の長さおよび位置および侵食・堆積を含む土砂移動範囲を示す。流木の堆積は，谷出口に集中しているほか，土砂移動範囲にも少し残存している。流木の流出量について，次のように算出する。空中写真より，単位面積あたりの樹木の本数は，0.09本/m<sup>2</sup>である。現地調査によると，胸高直径(地上1.2 m高さでの直径)および樹高は，それぞれ，30 cmおよび30 mである。幹の形状を円錐と仮定すると，樹木の一本あたりの体積は0.77 m<sup>3</sup>である。また，樹木の単位長さあたりの体積は0.03 m<sup>3</sup>となる。これより，単位面積あたりの立木の体積は，668 m<sup>3</sup>/haである。空中写真から読み取った崩壊・土石流による土砂移動の面積は2.95 haであり，そのうちの侵食領域は，1.58 haである。なお，空中写真との比較により，図-5において-1 m以下の領域を侵食領

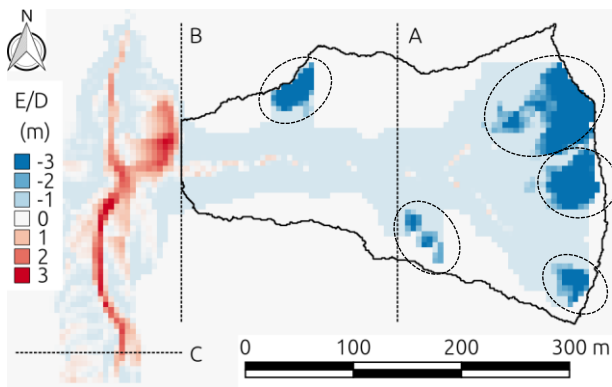


図-9 計算開始から600秒後の侵食 (E)・堆積 (D) の空間分布。青色が侵食，赤色が堆積を示す。

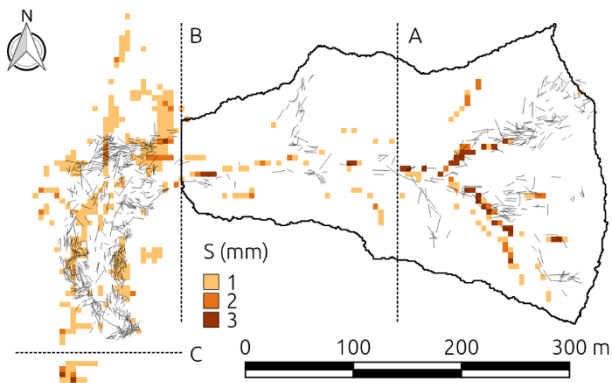


図-10 計算開始から600秒後の流木の単位面積あたり堆積量の空間分布と実際の流木の空間分布

域としている。これより、流域で生産された流木の体積の合計値は、 $1055 \text{ m}^3$ である。そのうち、流域内に残存している流木の体積は $70 \text{ m}^3$ となり、流域からの流木流出量は $985 \text{ m}^3$ となる。谷出口付近に堆積している流木の体積は $120 \text{ m}^3$ であるので、本川へ供給された流木の体積は、 $865 \text{ m}^3$ と見積もられる。

#### 4. 流木と土砂の生産・輸送の数値解析

前述の崩壊・土石流の発生に伴う土砂・流木の生産・輸送について、前述のモデルを用いて数値解析を行う。計算条件および設定値は次のようである。初期条件として、表土層は水で飽和しており、図-9に示す範囲の土塊が計算開始と同時に実際に崩壊した深さ(図-5)まで流動化すると設定している。これ以外の領域における侵食可能深は $0.5 \text{ m}$ とする。計算メッシュサイズは $5 \text{ m}$ 、重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、砂礫の質量密度 $\sigma = 2650 \text{ kg/m}^3$ 、水の質量密度 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、砂礫の内部摩擦角 $\phi = 37^\circ$ 、砂礫の粒径 $d = 0.1 \text{ m}$ 、反発係数 $e = 0.85$ 、渓床における土砂の体積濃度 $c_* = 0.6$ 、粗粒土砂の含有率 $p_c = 0.6$ 、微細土砂の含有率 $p_f = 0.4$ としている。

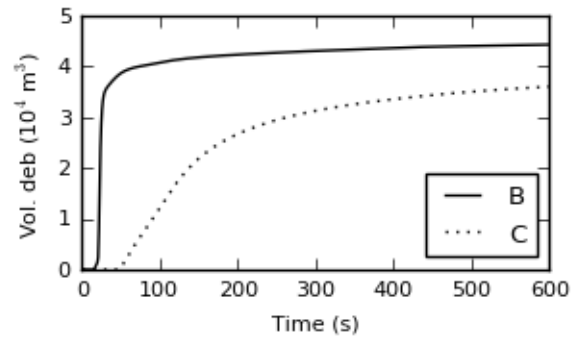


図-11 土石流の流出量の累積値の時間変化

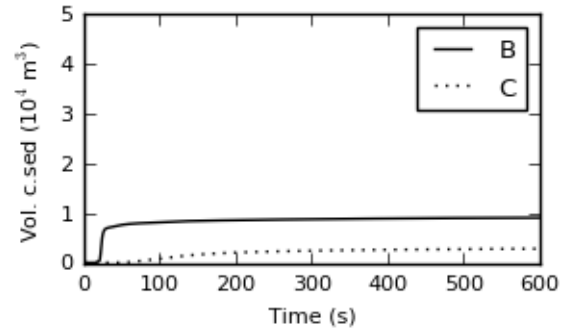


図-12 粗粒土砂の流出土砂の累積値の時間変化

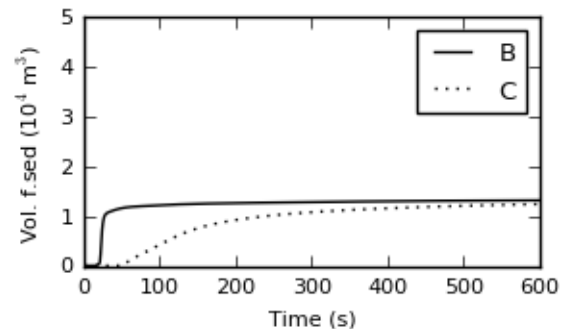


図-13 微細土砂の流出土砂の累積値の時間変化

図-9, 10に、それぞれ、計算開始から600秒後の侵食・堆積の空間分布および流木の単位面積あたり堆積量 (mm) の空間分布を示す。図-9において、A地点直上流において実際には生じていた過剰な堆積は計算されていないが、A-B間における溪流の侵食・堆積傾向や、全体的な侵食・堆積の空間分布の特徴は算定されている。侵食領域を土砂生産量とみると、その体積は $5.3 \text{ 万 m}^3$ であり、 $c_* = 0.6$ 、 $p_c = 0.6$ 、 $p_f = 0.4$ より、空隙を含まない粗粒土砂量は $1.9 \text{ 万 m}^3$ 、微細土砂は $1.3 \text{ 万 m}^3$ となる。図-10において、流木の堆積の空間分布の特徴は算定されている。流域内の流木の堆積量は $7 \text{ m}^3$ である。

図-11-13に土石流全体、粗粒土砂および微細土砂の谷出口 (B) および少し下流の本川地点 (C) における流出量 (単位時間あたりの通過量の累積値) の時間変化を示す。土石流は15秒程度で谷出口に到達し、100秒程度で全量の90%程度が流域外へ流出している。谷出口にお

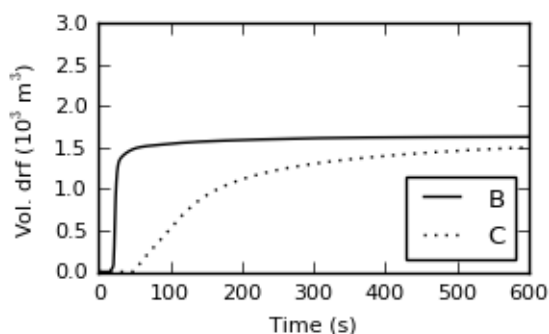


図-14 流木の流出量の時間変化

ける水を含む流出土砂量（図11における600秒のBの値）は、44200 m<sup>3</sup>である。谷出口に到達した土石流は、BとCの間の領域に滞留しその後Cから流出していく。粗粒土砂および微細土砂の谷出口における空隙を含まない流出量（図12, 13における600秒のBの値）は、それぞれ、9070 m<sup>3</sup>, 12170 m<sup>3</sup>であり、出口付近の堆積量（図12, 13における600秒のBの値とCの値の差）は、それぞれ、6230 m<sup>3</sup>および750 m<sup>3</sup>である。これより、本川への粗粒土砂および微細土砂の流出量は、それぞれ、2840 m<sup>3</sup>および11420 m<sup>3</sup>となる。崩壊により発生した土石流の粗粒土砂は、その7割程度が谷出口へ堆積し、微細土砂はその9割以上が本川へ流出していることがわかる。

図-14に計算により推定した流木の流出量を示す。谷出口における流出量は1630 m<sup>3</sup>、谷出口における堆積量は130 m<sup>3</sup>、本川への流出量は1500 m<sup>3</sup>となっている。

表-1は、土砂および流木について、空中写真と現地調査により算出した3章の結果と数値解析による結果である。ここで、土砂生産量は流域内の侵食により生じた土砂量、流木生産量は侵食に伴って発生した流木の量である。流出量は、図-9, 10の谷出口の通過量である。本研究による流木の生産量および流出量の推定値は、3章の方法に比べて1.6倍程度であるが、これは、立木の体積および本数密度の推定値の違いによるものと考えられる。

表-1 土砂および流木の流出

解析方法	項目	生産量	流出量
画像解析 (3章より)	土砂	5.9万m <sup>3</sup>	4.7万m <sup>3</sup>
	流木	1055 m <sup>3</sup>	985 m <sup>3</sup>
数値解析	土砂	5.3万m <sup>3</sup>	4.4万m <sup>3</sup>
	流木	1639 m <sup>3</sup>	1630 m <sup>3</sup>

## 5. おわりに

本研究は、下流域河道に対する土砂・流木の供給条件の設定のために、その前段として豪雨による土砂・流木

の生産・輸送過程についての検討を行った。得られた主要な結果は次のようである。

- ・土砂・流木の生産・輸送過程を定式化し、これを平成29年九州北部豪雨における赤谷川の小流域に適用した。その結果、土砂・流木の生産・輸送モデルは、実際の現象をある程度再現できた。流木の輸送方程式における修正係数 $r$ についての今後の検討が必要であるものの、下流河川への土砂・流木の供給条件の設定に資するものと期待される。
  - ・本計算によれば、溪流に沿って輸送される粗粒土砂の7割は谷出口に堆積し、細粒土砂の9割以上が本川まで流出するというような事象を推定することができる。流木は、小流域内に残存するものや、谷出口に堆積するものもあるが9割以上は本川に流出している。
- 本研究における計算条件は、まだ少し検討の余地もあり、詳細な検証も追加して、今後も解析を行う予定である。

謝辞：本研究は、土木研究所重点研究「中山間地域の洪水災害レジリエンスの総合的な向上に資する技術の戦略的開発」の一環で行われた。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 高橋 保：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，第20号B-2, pp.405-435, 1977.
- 2) 江頭進治，芦田和男，矢島啓，高濱淳一郎：土石流の抵抗則に関する研究，京都大学防災研究所年報，第32号B-2, pp.487-501, 1989.
- 3) 江頭進治，宮本邦明，伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈，水工学論文集，Vol. 41, pp.789-794, 1997.
- 4) 江頭進治，宮本邦明，竹林洋史：崩壊に伴う土石流・泥流の形成と規模の決定機構，砂防学会誌（新砂防），vol. 68, no. 5, pp.38-42, 2016.
- 5) 山崎祐介，江頭進治，南雲直子：豪雨時における土砂流出量の推定法，土木学会論文集B1（水工学），Vol.74, No.4, I\_931-I936, 2018.
- 6) 水山高久，大場 章，万膳英彦：土石流発生に伴う流木の生産，流出事例と対策，砂防学会誌（新砂防），Vol.38, No.1, pp.2-6, 1985.
- 7) 石川芳治，水山高久，福澤 誠：土石流に伴う流木の発生及び流下機構，砂防学会誌（新砂防），Vol.42, No.3, pp.4-10, 1989.
- 8) 江頭進治，萬矢敦啓，エスカローナ ロシレット，山崎祐介，工藤 俊：土石流形成における微細砂の役割，砂防学会研究発表会概要集，pp.B-72-73, 2016
- 9) Julien P. Y. and Paris A.: Mean velocity of mudflows and debris flows, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 136, No. 9, pp. 676-679, 2010

(2018. 4. 3受付)