

2017年九州北部豪雨により発生した朝倉市 白木谷川流域の流木・土砂・水混相流の 流出規模に関する研究

FLOW CHARACTERISTICS OF WOOD-SEDIMENT-WATER MIXTURE
IN THE SHIRAKIDANI RIVER, ASAKURA CITY, JAPAN IN 2017

永野博之¹・福岡尚樹²・橋本晴行³

Hiroyuki NAGANO, Naoki FUKUOKA and Haruyuki HASHIMOTO

¹正会員 博 (工) 群馬工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町580番地)

²正会員 修 (工) 西日本技術開発 (株) 土木本部河川部 (〒810-0004 福岡市中央区渡辺通1-1-1)

³フェロー会員 工博 元九州大学大学院工学研究院教授

This paper describes the characteristics of the debris flow with woody debris which occurred in the Shirakidani River in Asakura City, Japan on July 5th, 2017. Field survey and numerical simulation were made in this research. The field survey shows the amount of sediment and woody debris outflowing from the mountain area and the results are compared with the numerical simulation. One-dimensional simulation model is developed for the debris flow with woody debris. This model considers two-layer flow; the lower layer expresses sediment-water mixture and the upper layer shows wood-sediment-water mixture. The numerical simulation indicates the peak flow discharge $Q=70\text{m}^3/\text{s}$ and peak sediment concentration $C=0.2$ along the river valley. The sediment runoff volume is estimated about $160,000\text{m}^3$ and this result agrees with field survey.

Key Words: debris flow, flood flow, woody debris, drift wood, sediment disaster, Asakura City

1. はじめに

2017年7月5日, 九州北部付近に位置していた梅雨前線の南側にあたる九州・山口県では, 南から温かく湿った空気が流入して大気の状態が不安定となり, 筑後川右岸流域の福岡県朝倉市, 東峰村, 大分県日田市などにおいて猛烈な豪雨が発生した¹⁾. その結果, 筑後川に合流する中小河川が氾濫し, 甚大な被害が発生した. 中でも, 朝倉市赤谷川や白木谷川流域などでは, 上流域で崩壊や土石流が発生し, 大量の土砂と流木が下流域に流出した. その結果, 流木が橋梁などに大量に捕捉されるとともに, 橋梁の上流を中心に土砂堆積・氾濫が発生した. 著者らは, 災害直後より, 白木谷川流域において河道の写真撮影や流木計測を通じて橋梁と流木捕捉との関係, 土砂堆積と地形勾配や流木捕捉との関係を中心に調査を実施してきた. 今後の対策を立案するためにはこれらについて定量的考察を進める必要があり, そのためには, 上流域からの流木・土砂・水混相流 (流木を伴った土石流) の

流出規模や流動特性を明らかにする必要がある. しかしながら, それらを定量的に解明できる手法は確立していない. 著者らは, 従来, 流木を伴った土石流の1次元数値シミュレーションモデルについて検討してきた²⁾. 本研究は, このモデルと現地調査結果をもとに, 白木谷川流域で発生した, 流木を伴った土石流を対象にシミュレーションを実施し, その流出規模と流動特性について考察したものである. なお, 本論文における「土石流」は, 急勾配河道において現れる土砂移動形態の土石流, 泥流, 掃流状集合流動, 高濃度浮流砂流³⁾を総称して使用されたものである.

2. 災害と流域の概要

(1) 災害の概要

2017年7月5日12時頃から朝倉市朝倉, 杷木, 黒川地区を中心に急激な豪雨が発生した. 同地区の朝倉 (気象), 松末小学校, 北小路公民館観測所などでは2日間雨量が

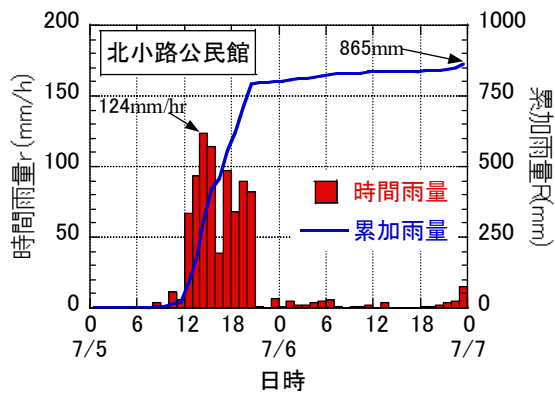


図-1 時間雨量（北小路公民館）

それぞれ586, 412（5日18時以降は欠測）、865mmにも達した⁴⁾。山地部の観測降雨として北小路公民館（福岡県所管）の雨量の時系列を図-1に示す。7月5日は、8:00まで無降雨が続き、その後12:00まで少量の雨であったが、午後からは時間雨量30mmを上回る激しい雨が、12:00から21:00までの9時間にわたり継続した。時間雨量のピークは14:00～15:00で124mmを観測し、7月5日の日雨量は803mmとなった。

このような豪雨により、朝倉市の平野部では広範囲に浸水被害が生じるとともに、山地部では崩壊・土石流が多発した。特に、北川、白木谷川、赤谷川、黒川など中小河川流域では、上流域で群発した崩壊が土石流となって流下し、大量の土砂と流木を下流域に流出させ被害を拡大させた。白木谷川流域の位置図を図-2に示す。図中には北小路公民館観測所の位置もあわせて示した。

(2) 白木谷川流域の概要と航空写真解析

白木谷川は、筑後川中流域の右岸側に位置する流域面積3.9km²、流路延長2.5kmの一級河川である。図-3に白木谷川の流域図を示す。また、図-4に主流路の縦断面図を示す。流域図は、国土地理院公表の基盤地図データ⁹⁾より作成し、等高線は1/25000縮尺である。縦断面図は、流域図の図上計測により作成し、縦断面図中の区間Ⅰ～Ⅲは勾配に基づいて河道を区分したものである。標高130mより上流（区間Ⅰ）は林地からなる溪流であり、それより下流の区間Ⅱ、Ⅲは田畑が広がる平地で、特に大分自動車道より下流は住宅街が分布している。河道形状は掘り込み河道で、後述の現地調査によれば、河床からの比高差は5m程度、川幅は最下流の白木谷橋で14m、県道の前田橋で11mとなっており、小規模な河川である。また、流路床・側岸の地質は花崗岩であり、流路沿いの林地はスギ・ヒノキが主で図-3中の地点Aでは間伐跡があった。

図-3には、本災害における流域内の崩壊・溪岸侵食状況と主な流下経路もあわせて示した。崩壊・溪岸侵食状況と流下経路は、国土地理院公表の正射画像⁹⁾から判読した。なお、崩壊と溪岸侵食の厳密な区別が困難であるため、崩壊と溪岸侵食は区別せずに記載した。図-3より、崩壊・溪岸侵食による土砂生産は、上流域で著しいこと

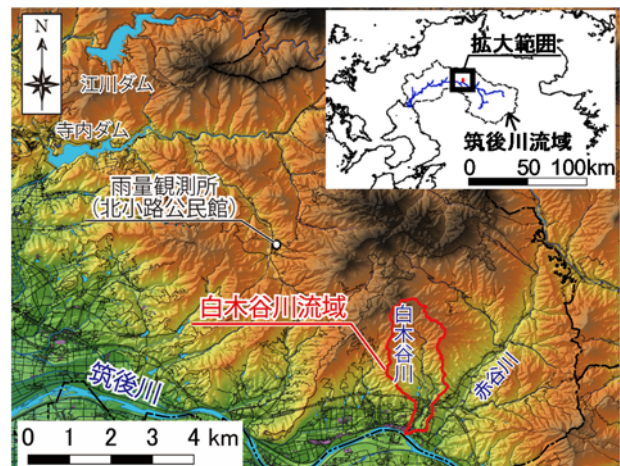


図-2 白木谷川流域位置図

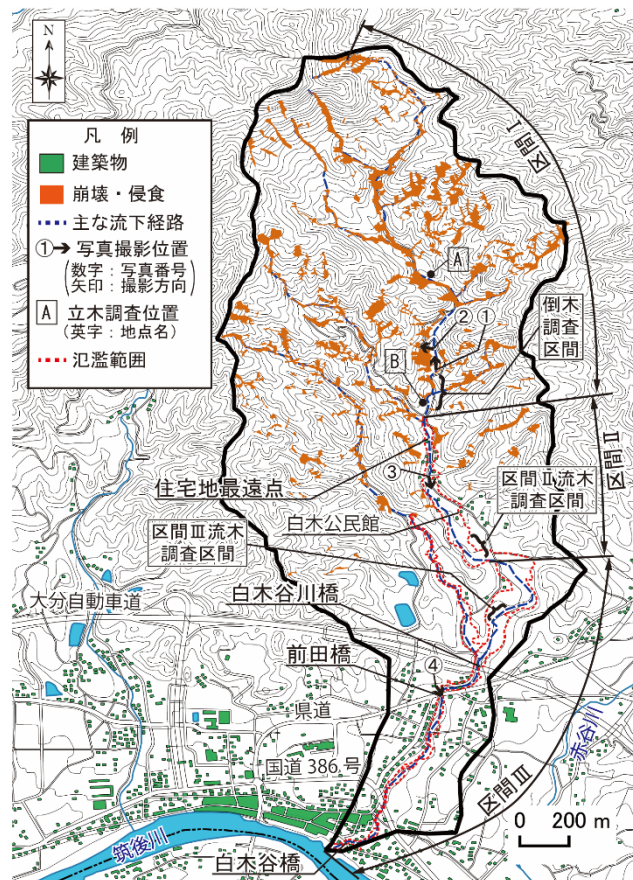


図-3 白木谷川流域図

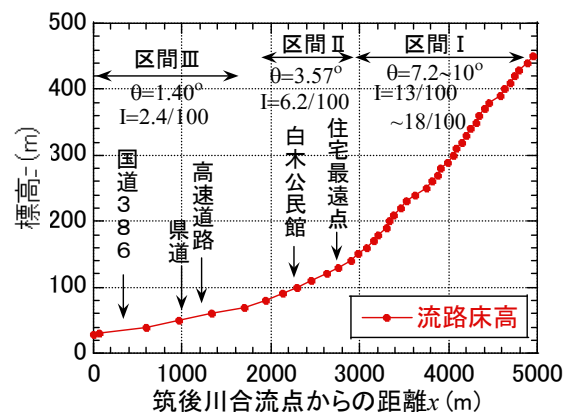


図-4 白木谷川縦断面図

がわかる。図中の崩壊・溪岸侵食箇所を図上計測した面積は約0.31 km²であり、流域面積の約8%を占めていた。後述の現地調査に基づき、流域内での平均崩壊深を2.0mと仮定すれば、生産土砂量は「かさ」表示で約62万m³と推定される。正射画像からの判読では、白木谷川流域の東側で流下痕跡が途中で途切れるものが多く、それらは主流路に到達する前に堆積し、流域内に残存していることが推測される。

3. 現地調査

(1) 調査の概要

現地調査を実施し、白木谷川流域における土砂および流木の生産・流出・氾濫状況を把握した。現地調査範囲は、図-3にあわせて示した。また図中には、現地調査と国土地理院公表の正射画像判読結果より作成した氾濫範囲もあわせて示した。現地調査では、主流路における侵食・堆積・氾濫状況の写真撮影、エスロンテープ・ポールによる地形形状の計測、側岸斜面での立木調査および流出流木の長さ、直径の計測を行った。立木調査は、図-3に示した地点A、Bそれぞれ1箇所ずつの側岸斜面において、直径5cm以上の樹木を対象として10m×10m四方に存在する立木の本数、直径を測定した。

(2) 土砂の生産・流出・氾濫

上流域で生産・流出した土砂は、谷の出口から下流域全体にわたって氾濫した。現地調査にて撮影した流域内の状況を写真-1～写真-4に示す。区間Iでは溪岸および溪床の侵食が著しく、写真-1に示すように、既設流路工が破壊されている区間が目立った。流下痕跡は流路工の外側にも広がっていた。側岸斜面の崩壊深は2.0m程度（写真-2）であった。区間IIでは、土砂の堆積・氾濫が著しく、写真-3に示すように、住宅最遠点より下流から白木谷川橋にかけて、河道が完全に埋没し、広く土砂が氾濫していた。区間IIIにおいても土砂堆積・氾濫が著しいが、その状況は前田橋を境に異なっており、市街地が広がる前田橋より下流では、土砂氾濫は河道沿いの狭い範囲に限定された。写真-4に示すように、前田橋地点では大量の流木により河道閉塞が確認されており、それより上流において大部分の土砂が堆積したためと考えられる。土砂氾濫範囲の図上計測値と現地調査の結果によると、溪流（区間I）から下流域に流出・堆積した土砂量は約17万m³（支川からの流出土砂は白木谷川合流点までに堆積したと仮定した場合）と見積もられた。

(3) 流木の生産・流出・氾濫

図-3に示した2箇所の側岸斜面における立木調査の結果、立木の数密度0.11本/m²、樹高約30m、立木の直径約21cmであった。したがって、図-3に示した流域内の崩



写真-1 侵食状況（区間I）（8月12日撮影）



写真-2 崩壊状況（区間I）（7月30日撮影）



写真-3 土砂氾濫状況（区間II）（7月23日撮影）



写真-4 前田橋閉塞状況（区間III）（8月10日撮影）

壊・侵食箇所の面積が0.31km²であることから、そこに繁茂していた立木の本数は34,000本と評価される。この立木が崩壊や侵食により全て流木化したものと仮定すると、白木谷川流域で生産された流木の総量は「かさ」表示で約17.5万（実積表示で3.5万）m³と評価される。しかしながら、現地調査では、流木化せず倒木として残留した樹木が数多く観察された。このため、下流域に流出・氾濫した流木の堆積状況についても調査を行った。その結果、流木の堆積状況は、既往研究⁷⁾⁸⁾と同様に①個別に単独で堆積した流木、②群を形成して堆積した流木の2パターンに大別された。後者はさらにa)橋梁の上流側に捕捉・堆積した流木と、b)立ち木や田畑の段差などに

捕捉・堆積した流木とに分けられた。

まず、群を形成して堆積した流木について写真計測により流木群量を評価すると、「かさ」表示で総計約1万 m^3 となった。次に、2箇所の流木群を構成する流木や、単独で堆積した流木についてそれぞれ $N = 20$ 本抽出し、長さ L と直径 D を直接計測した。比較のため、上流の溪流に流下せず残留した倒木についても同様に測定した。測定結果の頻度分布の一例を図-5に示す。流木生産源付近に残留した倒木の平均長 $L_{ave} = 19.6m$ であった。一方、中流において堆積した単独流木の平均長 $L = 7.6m$ 、下流において流木群（2箇所）を形成した個々の流木の平均長はそれぞれ、 $L = 5.1m$ および $6.6m$ であった。また、それらの直径は流木、倒木に無関係に $D = 19cm \sim 24cm$ であった。流木は流下の過程（大略の流下距離2.5km）において、上流に残留した倒木の約3分の1まで長さを減少させたことが分かる。これは、立木が流木化し流下する過程の中で摩耗・破断した結果と考えられる。

4. 流木を伴った土石流の流動シミュレーション

白木谷川流域で発生した流木を伴う土石流の1次元流動シミュレーションを行った。解析モデルは、Nagano *et al.*²⁾に基づき、土砂・水混相流（土石流）である主流層と流木・土砂・水混相流である表層の2層構造モデルとして、流木は主流層の上を流下するものとした（図-6）。

(1) 土石流流動モデル（主流層部）の基礎式

主流層部の解析モデルは、河床の侵食・堆積と側岸侵食の評価が可能な高岡⁹⁾、Takaoka *et al.*¹⁰⁾のモデルを基に構築した。流路断面は長方形で近似し、側岸は直立を保ったまま水平方向に侵食され、侵食土砂は側方流入として即座に流れに取り込まれるとした。また、河床は流砂濃度と平衡流砂濃度の大小関係により侵食または堆積するものとした。基礎式は、運動方程式、全相と固相の連続式、河床と両岸の変動式の5個であり、未知数は流量、水深、土砂濃度、河床高、河道幅の5個である。

本計算で用いた基礎式を式（1）～（5）に示す。

運動方程式：

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(vQ)}{\partial x} = -gBh \frac{\partial H}{\partial x} - (B + 2h) \frac{v^2}{\varphi^2} \quad (1)$$

全相の連続式：

$$\frac{\partial(Bh)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \varepsilon_z i_s + Bi_b + q_{in} \quad (2)$$

固相の連続式：

$$\frac{\partial(CBh)}{\partial t} + \frac{\partial(C_T Q)}{\partial x} = C^* \varepsilon_z i_s + C^* Bi_b + q_{sin} \quad (3)$$

河床の変動式：

$$i_b = -\frac{\partial z}{\partial t} \quad (4)$$

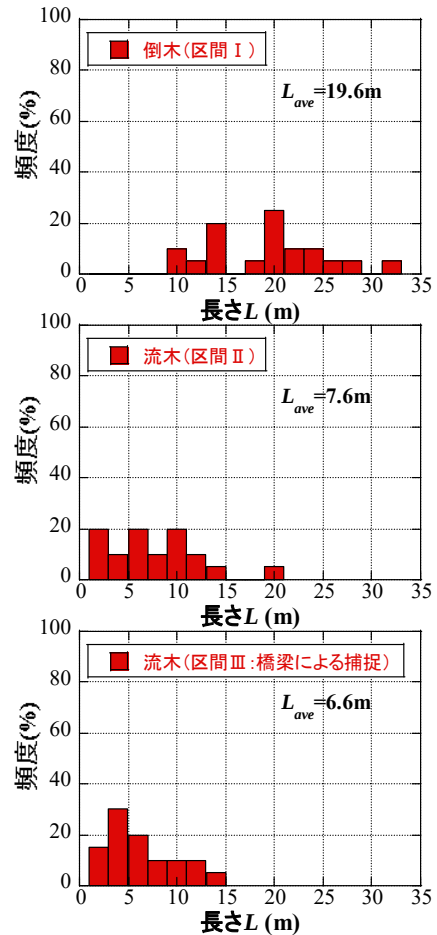


図-5 倒木と流木の長さの頻度分布

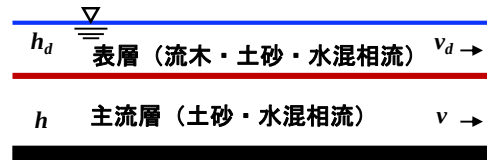


図-6 流木を伴った土石流の流動モデル

両岸の変動式：

$$i_s = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (5)$$

ここに、 Q ：流量、 t ：時間、 x ：流下方向距離、 v ：流速、 g ：重力加速度、 B ：流路幅、 h ：水深、 H ：水位 ($H = h + z$)、 z ：河床高、 φ ：流速係数、 ε_z ：両岸侵食に伴って崩落する両岸部分の高さ、 i_s ：両岸侵食速度、 i_b ：河床侵食・堆積速度、 q_{in} ：河道単位長さ当たりの横流入量、 C ：断面平均流砂濃度、 C_T ：流砂の輸送濃度、 $C_{T\infty}$ ：平衡流砂濃度、 C^* ：堆積土砂濃度、 q_{sin} ：河道単位長さ当たりの横流入流砂量。 ε_z は現地の侵食状況から5.0mと仮定した。また、濃度分布は一様と仮定し、 $C = C_T$ とした。式(4)の河床変動速度は以下の式により評価した。

河床の侵食速度 ($C_T < C_{T\infty}$ の場合)：

$$i_b = k_b (C_{T\infty} - C_T)^p \cdot v \quad (6)$$

河床の堆積速度 ($C_T > C_{T\infty}$ の場合)：

$$i_b = -k_b (C_T - C_{T\infty})^p \cdot v \quad (7)$$

ここに、侵食速度係数 k_b 、 p の値は、高岡⁹⁾の実験結果か

ら $k_b = 0.01$, $p = 0.7$ と評価し, 平衡流砂濃度 $C_{T\infty}$ は, 広範な流砂形態に適用可能な橋本らの平衡流砂量式¹¹⁾から, 次のように求めた.

$$C_{T\infty} = Bq_{soo}/Q \quad (8)$$

ここに, q_{soo} は単位幅当たりの平衡流砂量である.

また, 式(5)の兩岸の侵食速度は以下の式より評価した. 兩岸の侵食速度:

$$i_s = k_s(v - kv_c) \quad (9)$$

ここに侵食速度係数 k_s の値は, 高岡⁹⁾の実験結果から $k_s = 0.002$ と評価した. この兩岸侵食速度式は, 高岡⁹⁾の提案式に侵食限界の概念を導入したものであり, その限界速度 v_c は次のようにして求めた.

$$v_c = \varphi u_{*c} = \varphi \sqrt{\tau_{*c} s g d} \quad (10)$$

ここに, u_{*c} : 限界摩擦速度, τ_{*c} : 無次元限界掃流力(= 0.05), s : 土粒子水中比重(= 1.65)である. また, 侵食限界速度の補正係数 k は, 現地河道の側岸を構成する土質特性に依存するものと考えられるが, ここでは試行錯誤的に $k = 10$ と決定した.

(2) 流木流動モデル(表層部)の基礎式

流木の解析では, Nagano *et al.*²⁾の流動モデルに基づき基礎式を構築した. すなわち

流木相(表層部)の連続式:

$$\frac{\partial V_d}{\partial t} + \frac{\partial Q_d}{\partial x} = n_0 i_s \frac{\pi}{4} d_d^2 l_d \quad (11)$$

ここに, V_d : 河道単位長さ当たりの流木の実質体積, Q_d : 流木流量, n_0 : 側岸斜面における単位面積当たりの樹木数(数密度), d_d : 樹木の直径, l_d : 樹木の長さ.

流木(実質体積)量 V_d と河道単位面積当たりの流木本数 n_d との関係は次のようになる.

$$V_d = B n_d \frac{\pi}{4} d_d^2 l_d \quad (12)$$

流木速度を v_d とすれば, 流木流量 Q_d および流木本数フラックス N_d は次のようになる.

$$Q_d = V_d v_d \quad (13)$$

$$N_d = B n_d v_d \quad (14)$$

流木の流速 v_d は土石流の平均流速 v に関連付けて

$$v_d = a_s v \quad (15)$$

とした. 流木の流速を主流層の表面流速で近似すると, 係数 a_s は, 表面流速と平均流速との比を意味しており, 大略 $a_s = 1.25$ となる. ここに, 急勾配河道において現れる土砂移動形態(土石流, 泥流, 掃流状集合流動, 高濃度浮流砂流)に対して提案された流速分布式³⁾を用いた.

(3) 計算条件

a) 計算河道

計算断面間隔は $\Delta x = 50\text{m}$ とし, 初期河床高は図-3で用いた等高線データを線形補間して作成した. また, 初期流路幅は, 現地調査結果から設定した. 本研究では, 図

-3に示した区間Iを渓流区間, 区間IIおよびIIIを氾濫区間とし, 渓流区間では側岸と河床の侵食を許容するが, 氾濫区間では初期段階を考え, 氾濫や側岸侵食は許容しない条件で計算した.

b) 降雨・境界条件

降雨条件は, 北小路公民館観測所における7月5日12:00から18:00までの各時間雨量とし(図-1), 流出率 $f = 0.8$ として合理式より算定した流量を上流端に与えた.

c) その他の計算条件

流速係数は, 流況に基づき渓流区間で8, 氾濫区間で10とした. 流砂の粒径は現地調査より $d = 0.005\text{m}$ と仮定した. また, 溪床の侵食可能深 $D_z = 20\text{m}$ と仮定し, それより下方には岩盤のため侵食されないとした. 溪床および側岸の堆積土砂濃度は $C_s = 0.7$, 流木条件は, 3章の調査より $n_0 = 0.12$ (本/ m^2), $d_d = 0.22(\text{m})$, $l_d = 6.4(\text{m})$ とした.

(4) 計算結果の検証と考察

図-7~10に流量, 流砂濃度, 流路床変動高, 流路幅の計算結果をそれぞれ示す. 図-9, 10には, 比較のため, 災害後の流路床変動高, 流路幅の実測値も示した.

流量の縦断方向変化を見ると(図-7), 流量が $x = 1200, 2650, 3750\text{m}$ で急変している. これは, 支川が合流しているためである. ピーク流量は, 渓流区間(区間I)で $Q \approx 70\text{m}^3/\text{s}$ ($x = 2650\text{m}$), 氾濫区間(区間III)で $Q \approx 120\text{m}^3/\text{s}$ となった.

流砂濃度については(図-8) 渓流区間で $C = 0.10 \sim 0.20$ であった. ピーク値は $C = 0.22$ ($x = 3800\text{m}$)となった.

流路床変動高の計算結果を見ると(図-9), 渓流区間の上流で流路床の縦侵食が, その下流および氾濫区間の上流(区間II)で堆砂が著しい. これらは概ね実際現象を説明するが, 氾濫区間の中流($x \approx 1250\text{m}$)では顕著な堆積が認められず, 実際現象と一致しない.

流路幅の計算結果については(図-10), 渓流区間の中下流で横侵食が顕著で, 最大約20mまで流路幅を拡大させている. これは概ね実際現象を説明している.

従って, 渓流区間下流の堆砂は横侵食による流路幅の拡大が掃流力の減少を引き起こした結果と考えられる. 一方, 氾濫区間上流(区間II)の堆砂は, 土石流が急勾配の渓流区間から緩勾配の氾濫区間に流出し, 平衡流砂量を超える過剰な土砂流出の結果と考えられる. しかし, 氾濫区間中流の土砂堆積は本計算により再現できていない. これは本モデルが橋梁の流木捕捉を考慮していないことによると考えられる.

本計算では, 渓流区間から下流に流出した土砂量および流木量は, 「かさ」表示でそれぞれ約16万 m^3 , 0.25万 m^3 と評価された. 前者は3章の現地調査結果(約17万 m^3)と概ね一致したが, 後者の流木量は, 3章の写真計測値(約1万 m^3)より過少となった. 実際の流木は流域全体から流出したが, 本計算では本川の側岸侵食による流出しか考慮しなかったことがその原因と考えられる.

5. おわりに

本研究では、白木谷川流域を対象に現地調査および1次元流動シミュレーションにより、流木を伴う土石流の流動・流出特性を調べた。その結果、渓流区間の流量、水深、土砂濃度のピーク値は、それぞれ約70m³/s、1.6m、0.2と評価された。河道幅は最大で約20mまで拡大した。また、渓流区間から下流に流出した土砂量と流木量は、それぞれ約16万m³、約0.25万m³と評価され、前者は現地調査結果とほぼ一致したが、後者の流木量は一致しなかった。流木の発生モデルについては今後さらに検討が必要である。

謝辞：本研究に際して、国土交通省九州地方整備局、福岡県河川課、朝倉市より種々の資料を、(株)パスコからは航空写真の提供をいただいた。本研究は土木学会「2017年九州北部豪雨災害調査団」（団長島谷幸宏九州大学教授）の調査の一環として実施されたものである。また、本研究の一部は、平成29年度科学研究費（課題番号：16K18160、代表：永野博之）のもとに実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡管区気象台：災害時気象資料，平成29年7月12日。
- 2) H. Nagano, H. Hashimoto and T. Miyoshi : One-dimensional model of landslide-induced debris flow with woody debris, Proceedings of the 35th IAHR World Congress, CD-ROM, 2013.
- 3) 橋本晴行：土砂の移動現象とそのメカニズム，ながれ29, pp.193-202, 2010.
- 4) 国土交通省【川の防災情報】：<http://www.river.go.jp>.
- 5) 国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービス，<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>（2017年7月20日閲覧）。
- 6) 国土地理院：地理院地図（電子国土Web），<http://maps.gsi.go.jp/>（2017年8月2日閲覧）。
- 7) Rusyda, M.I., Hashimoto, H., Ikematsu, S. & Sakada, K.: Characteristics of woody debris deposition during the Yabe River Flood in Yame City, Japan: Northern Kyushu Flood Disaster in July, 2012, Proc. of the 12th Int. Symp. on River Sedimentation, pp.1989-1996, 2013.
- 8) 楠達正和，赤野久志，ムハマド イスラミ ルシダ，池松伸也，永野博之，橋本晴行：2013年7月島根県津和野名賀川流域で発生した流木氾濫に関する調査，第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp. 103-108, 2014.
- 9) 高岡広樹：高濃度流れによる河道侵食と土砂流出に関する研究，九州大学博士論文，2006.
- 10) H. Takaoka, H. Hashimoto and M. Hikida : Simulation of landslide-induced debris flow-The Atsumari debris flow disaster in Minamata City, Japan, Debris-Flow Hazards Mitigation, 2007.

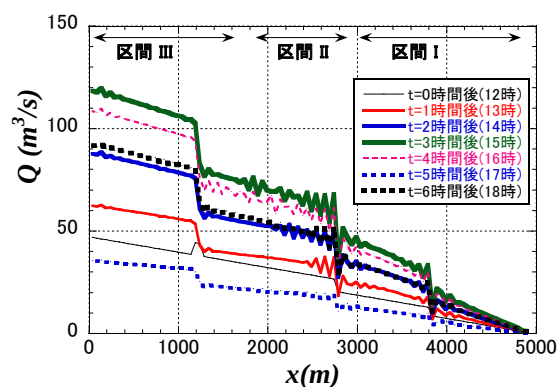


図-7 流量の縦断変化

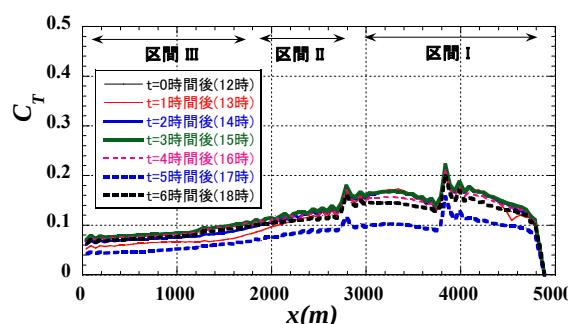


図-8 流砂濃度の縦断変化

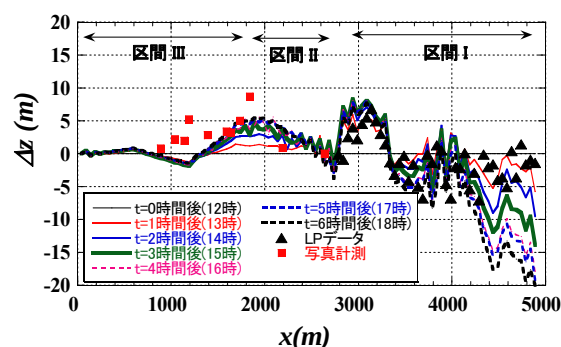


図-9 流路床変動高の縦断変化

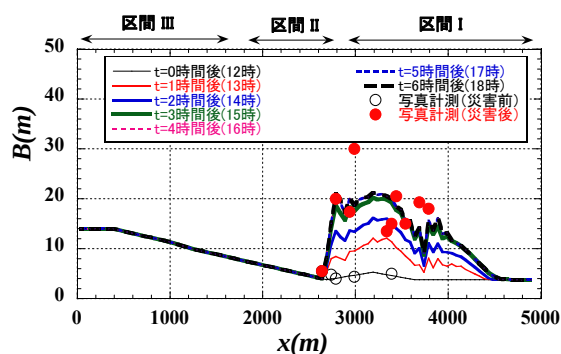


図-10 流路幅の縦断変化

- 11) 橋本晴行，朴崎瑛，池松伸也，田崎信忠：急勾配移動床水路における種々の流砂形態に対する統合的流砂量式，水工学論文集，第47巻，pp.571-576, 2003.

(2018. 4. 3受付)