

2003年7月水俣市集川で発生した土石流の ピーク流量の推定

PEAK DISCHARGE OF THE DEBRIS FLOW IN MINAMATA CITY
ON JULY 20, 2003.

高岡 広樹¹・橋本 晴行²・朴 埼璨²・池松 伸也¹・城戸正一郎¹・疋田 誠³
Hiroyuki TAKAOKA, Haruyuki HASHIMOTO, Kichan PARK,
Shinya IKEMATSU, Shoichiro KIDO and Makoto HIKITA

¹九州大学 大学院工学府 都市環境システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²九州大学 大学院工学研究院 環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³鹿児島工業高等専門学校 土木工学科 (〒899-5193 鹿児島県始良郡隼人町真孝1460-1)

1. はじめに

2003年7月20日未明, 熊本県水俣市において, 局地的な集中豪雨により河川の氾濫や斜面崩壊, 土石流が市内各地で発生した. 特に, 水俣川流域の宝川内集地区では20日4時20分頃, 続いて深川新屋敷地区では4時30分頃それぞれ崩壊・土石流が発生した. その結果, 前者の集地区の集落では死者15名を, 後者では4名の死者を出す大きな災害となった.

著者らは, 宝川内集地区において, 災害発生後の7月24日および8月1日に現地調査を行い, 土石流の流下した流路に沿って写真撮影や流路横断面の簡易測量などを行った. さらに防災関係機関より災害資料を収集した. 本報告は宝川内集地区で発生した土石流の特性, 特にピーク流量について調べたものである.

2. 降雨と災害の状況

7月20日の集中豪雨によって土石流の発生した水俣市

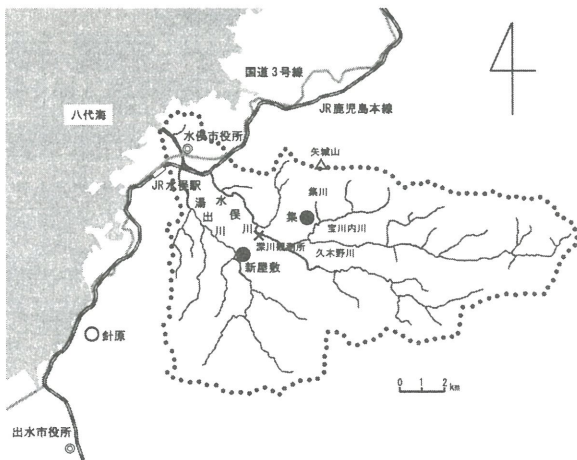


図-1 水俣川流域

宝川内集地区および深川新屋敷地区の位置を図-1に示す(●印). 同図には1997年に土石流が発生した出水市針原地区(○印)も示している. 今回, 甚大な被害を被った宝川内集地区は, 水俣川水系宝川内川とその支川集川の合流点付近に位置している. 集川は流域面積1.14km²の土石流危険渓流である. この上流右岸斜面が崩落し, 土石流化し集川を流下した. 写真-1は崩壊と土石流が流下した痕跡の全体状況を示す.

図-2は7月19日21時から7月20日12時までの水俣



写真-1 集川における崩壊・土石流の流下・堆積状況
(株)パスコ2003年7月21日撮影

市内中心部および深川観測所(図-1 中×印)におけるハイトグラフを示している。なお、棒グラフは深川観測所における時間雨量を、×印は水俣市内中心部の時間雨量を示している。20日1時55分に水俣市を含む芦北地方に大雨洪水警報が発令された。市内中心部では、最大時間雨量は4時から5時の間で57mm/hを記録し、連続累加雨量は20日0時から7時までの間で185mmであった。しかしながら、深川観測所ではさらに強い降雨が発生し、最大時間雨量は4時から5時の間で91mm/hを記録するとともに、連続累加雨量は20日0時から7時までの間で323mmにも達した。

その結果、4時20分頃宝川内集地区で、4時30分頃深川新屋敷地区でそれぞれ斜面崩壊による土石流が発生した。非常に強い降雨だったにもかかわらず、行政も住民も土石流の発生を予見できなかった。水俣市の避難勧告は土石流発生から約1時間後の5時20分のことであった。市役所の調査では、流域内で約74箇所にもぼる崩壊が発生したもようである。

図-3は深川観測所における水俣川の水位の変化を示している。降り始めから約2時間後の20日2時頃から徐々に水位が上昇し、最大雨量91mm/hを記録した4時から5時頃には6mを越えていた。このため下流の鶴田橋では流木による橋梁の閉塞が発生し、橋桁を越えた氾濫水は付近で浸水被害を発生させた。

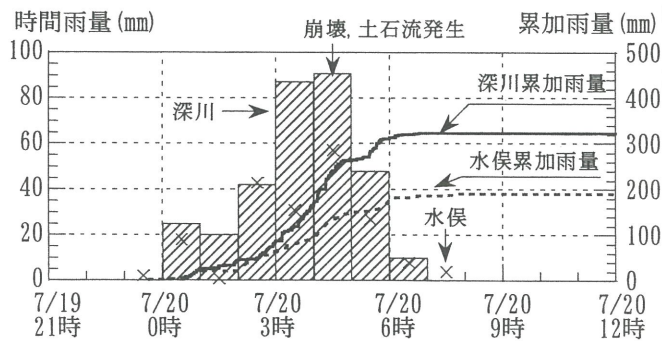


図-2 降雨の状況

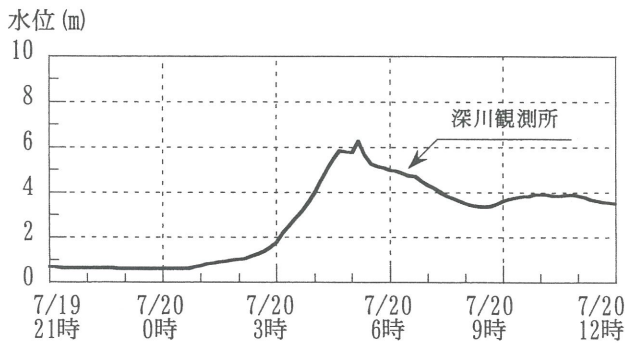


図-3 水俣川の水位変化

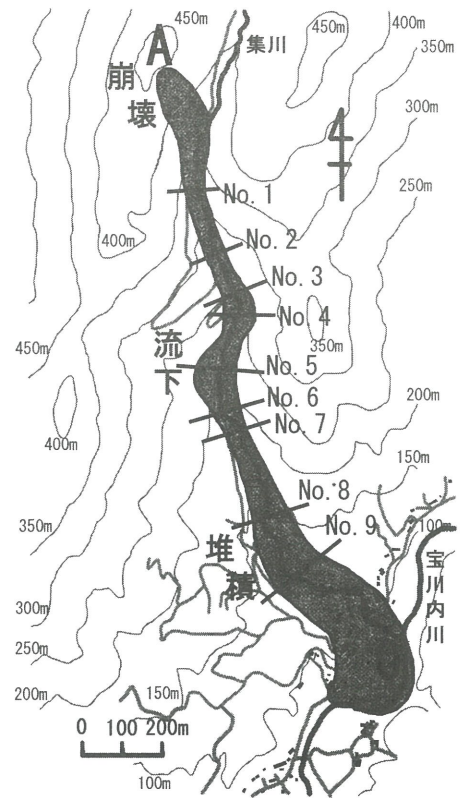


図-4 土石流の流下状況の平面図

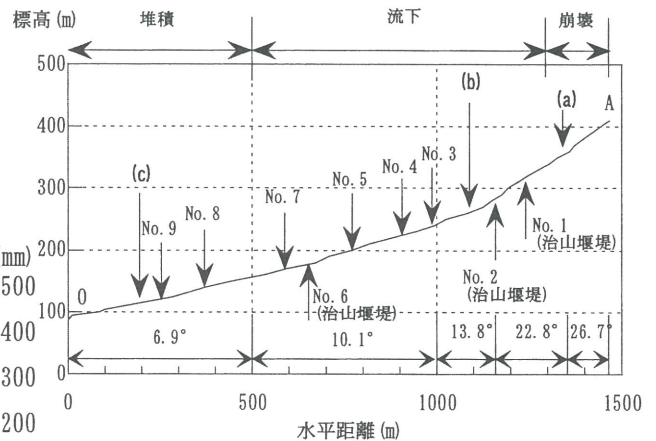
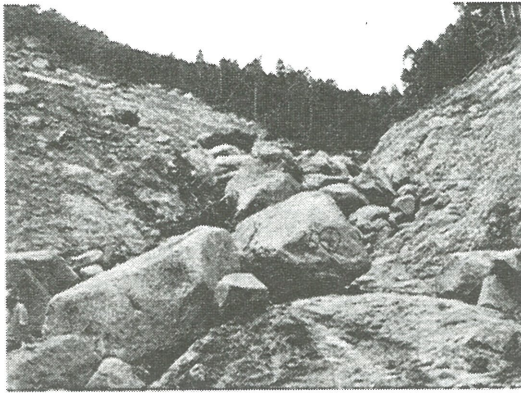


図-5 流路の縦断面図

3. 土石流の発生・流下・堆積状況

図-4は集川において土石流が流下した流路の平面図を示している。図中の灰色の部分には土石流の発生・流下した範囲を示している。また図-5は土石流の流路中央に沿って2500分の1の地形図より縦断面図を求めたものである。両図において、崩壊の源頭部をA点とし、集川と宝川内川との合流点を0点とした。その間約1.5kmである。No.1-9は、流路の横断形状を測定した位置を示す。

写真-2は土石流の発生・流下・堆積の各代表的な地点における河道状況を示す(図-5中(a), (b), (c))。



(a) 崩壊地直下



(b) 土石流の流下区間 (流路中央から上流方向を望む)



(c) 土石流の堆積区間 (流路中央から下流方向を望む)

写真-2 崩壊地直下および土石流の流下・堆積区間の河道状況

図-6 (a) に簡易測量により測定した No. 1~9 における流路の横断面図を示す。図中には水位の痕跡も示している。また、2500 分の 1 の地形図より、同じ測定場所における横断面図を求めたものが図-6 (b) である。

まず、図-5 の縦断面図より勾配を求めると、崩壊付近の河道では約 22° 、流下域では $10\sim 14^\circ$ 、堆積域では約 6° であった。

崩壊は集川の右岸側で発生しており、災害後の調査では、まだ崩壊土砂と倒木が崩壊斜面に残留しているのが見ら

れた。現地調査によると、崩壊後の斜面勾配は約 35° であった。崩壊の規模は、幅 $80\sim 100\text{m}$ 、斜面長約 170m 、最大崩壊深 $15\sim 20\text{m}$ 、崩壊土量 $5\sim 10\text{万}\text{m}^3$ と推定されている^{1), 2)}。97 年出水市針原川の土石流の場合、崩壊の規模は最大幅約 80m 、斜面長約 190m 、最大崩壊深約 30m 、崩壊土砂量約 $13\text{万}\text{m}^3$ と推定されており^{3), 4)}、集川の崩壊規模は針原川のそれより若干少ないものと考えられる。

崩壊地直下の集川の河床勾配は約 22° である。その周辺の河道には直径 4m にも及ぶ巨礫が多く堆積していた (写真-2 (a))。崩壊土砂は一部土砂を斜面や河道に堆積させながらも土石流化し、 $22^\circ\sim 14^\circ$ の河道 (No. 1~3) を一気に流下したのと考えられる。

その後、河道は湾曲区間 (No. 4~7 地点) となり、右・左に湾曲しながらそれぞれ左・右岸側において比高 13.6m 、 13.3m も水位を上昇させている。この区間では河道勾配は平均約 10° 、局所的には No. 7 地点で 9° となっている。図-6 (a)、(b) において林道を基準として比較すると、土石流流下域では河床や側岸の侵食が顕著であることが分かる (写真-2 (b))。特に上流付近では岩盤の露出も見られた。3 基の治山堰堤 (No. 1, 2, 6) はいずれも破壊されていた。

下流端 (0 点) から約 500m の区間は平均約 6° の勾配を示し、土砂堆積、特に巨礫の堆積が顕著であった (写真-2 (c))。No. 8 地点は局所的に約 5° の河道勾配を示し、堆砂末端となっている。図-6 (a)、(b) の比較から、No. 9 付近では、大きいところで 8m 程度堆積しているのが分かる。この付近は河道が左にカーブしているため、土石流は、その直進性と堆砂による河床上昇のため、その表層部分を右岸側の高台に乗り上げて流下していき、高台の住家をも破壊している。一方、残りの本体部分は河道内を流下して行ったものと考えられる。土石流の規模は、高台の住宅が被災するほど大きかったものと言える。

さて、97 年出水市針原川で発生した斜面崩壊による土石流は、建設されたばかりの砂防ダムにおいて、樹木が枝をつけたままの状態です砂とともに捕捉されていた。一方、ダムより下流では流木となった樹木が樹皮も枝も剥ぎ取られた状態で散在していた。従って、崩壊土砂は崩壊後、ダムより上流では平均勾配 7.3° の河道において流水・雨水とあまり混合することなく極めて高濃度の状態で流下し、ダムより下流では平均勾配 4.1° の扇状地上を、ダムや池に湛水していた水と混合して比較的低濃度の状態で泥流型土石流として流下したのと考えられている⁵⁾。

今回、水俣市集川で発生した土石流は、勾配 $22^\circ\sim 9^\circ$ の河道を侵食しながら一気に流下し、勾配 6° の河道にお

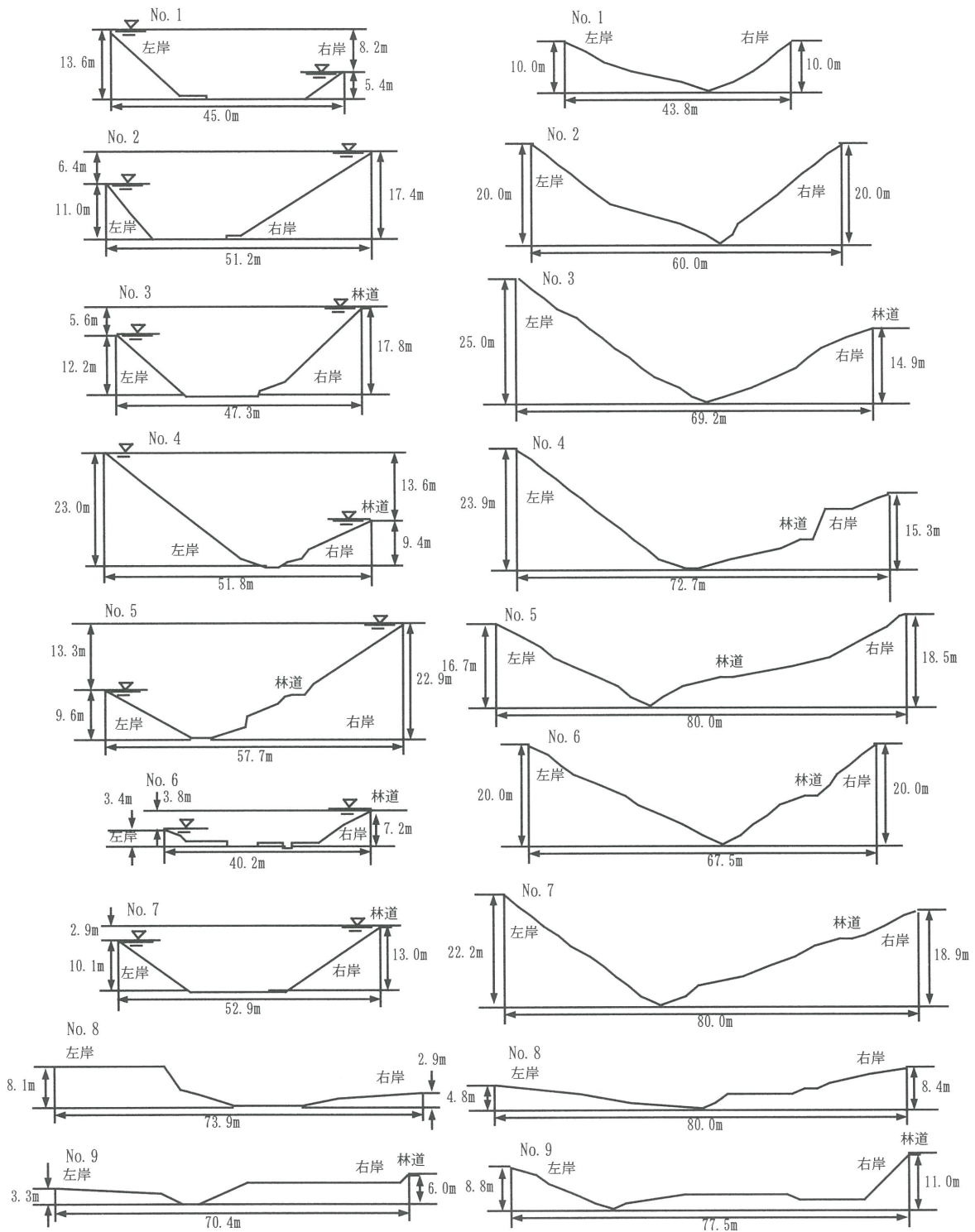


図-6 (a) 災害後の流路横断面図

図-6 (b) 災害前の流路横断面図

いて巨礫を多く堆積させながら氾濫している。その流動機構については4章で後述するが、明らかに砂礫型土石流であったと考えられる。従って、出西市針原川土石流とは距離的には近く、ともに崩壊起原の土石流ではあるが、質的な点において両者は異なっているものと考えられる。

4. ピーク流量の推定

図-6 (a) の実測の痕跡水位を用いて、ピーク流量の推定を行った。ピーク流量の推定には流速係数を用いる方法や湾曲部の水位差を用いる方法などがある。以下にそれらについて述べる。

(1) 流速係数を用いる場合

等流と仮定し流速係数を用いて断面平均流速、ピーク流量を推定した。その際、流速係数 v/u_* の値をどのように評価するかが問題となってくる。

橋本らは、土石流や泥流など非粘性粒子の高濃度流の挙動を統一的に表すことのできる無次元量として

$N_R \equiv \frac{R}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ を導入した^{7), 8)}。ここに、 R : 径深、 d : 平均粒径である。また、 ρ_t は流れの密度で、 C : 流下時の土砂濃度、 σ : 粒子の密度、 ρ : 清水の密度として、 $\rho_t = \sigma C + (1-C)\rho$ である。また $F(C)$ は濃度の増加関数であり、 C_* : 土砂の最密充填濃度として、 $F(C) = \frac{(C/C_*)^2}{1-C/C_*}$ である。

流れの無次元量 N_R が小さいと粒子間応力が卓越し典型的な砂礫型土石流となり、 N_R が大きくなると乱流混合が卓越し泥流型土石流となることが知られている。水路実験により求めた流速係数を無次元量 $N_R \equiv \frac{h}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ により整理したものが図-7 である^{7), 8)}。ここで、実験水路は広長方形水路として近似できるので、 $R=h$ である。広範な条件下で行われた実験結果は、単一の量 N_R によりうまく整理されているのが分かる。そこで、集地区における実測断面において径深 R として平均値 $R=7.85m$ 、 $\sigma/\rho=2.65$ 、 $C_*=0.7$ とし、濃度 C をパラメータとして無次元量 N_R をプロットしたものが図-8 である。代表粒径として $d=0.2\sim 0.5m$ とすると、 $N_R=10\sim 50$ となり典型的な砂礫型土石流の領域にあることが分かる。その結果、図-7 より流速係数は $v/u_* \approx 2\sim 5$ となることが推測される。

以上の考察により、流速係数 $v/u_* = 2\sim 5$ として流量を算定した結果が表-1 である。精度上の問題はあがるが、No. 1 を除いて土石流の平均流速 $v \approx 8\sim 23m/s$ 、ピーク流量 $Q_p = 4000\sim 12000m^3/s$ 、平均的に $Q_p \approx 7000m^3/s$ と推定される。

一方、現地観測に基づく土石流の流速係数と流量との関係を図-9 に示す^{9), 10)}。上で推測された流量 $Q_p = 4000\sim 12000m^3/s$ を用いて流速係数を推測すると大略 $v/u_* = 3\sim 10$ となる。この推測値は、図-7, 8 より得られた $v/u_* = 2\sim 5$ の値とは大きくはずれることはなく、表-1 の推算流量はほぼ妥当な値と判断される。

一方、現地観測に基づく土石流の流速係数と流量との関係を図-9 に示す^{9), 10)}。上で推測された流量 $Q_p = 4000\sim 12000m^3/s$ を用いて流速係数を推測すると大略 $v/u_* = 3\sim 10$ となる。この推測値は、図-7, 8 より得られた $v/u_* = 2\sim 5$ の値とは大きくはずれることはなく、表-1 の推算流量はほぼ妥当な値と判断される。

(2) 湾曲部の水位差を用いる場合

土石流が湾曲部に流れ込むと左右岸で水位差を生じる。その水位差の最大値を次式で推定することが提案されている¹⁰⁾。

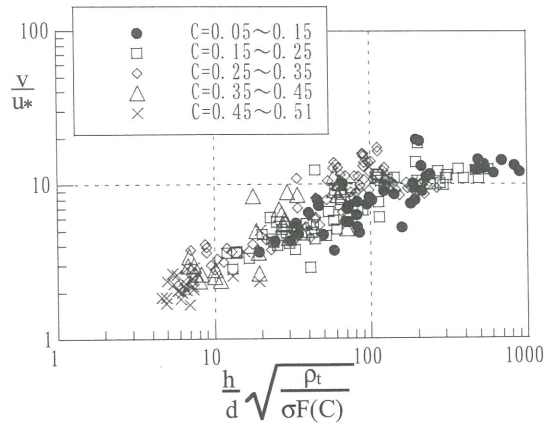


図-7 流速係数の水路実験結果^{7), 8)}

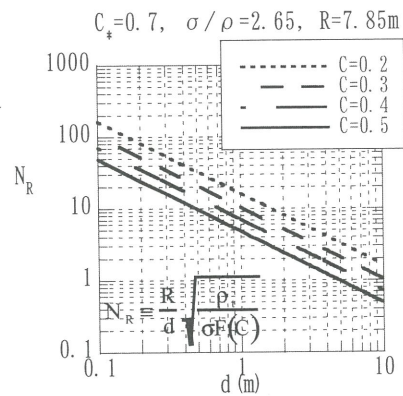


図-8 無次元量 N_R と平均粒径 d との関係

表-1 流路の横断面積とピーク流量

横断面	断面積 A (m ²)	勾配 θ (°)	潤辺 s (m)	径深 R (m)	流速係数 v/u_*	平均流速 v (m/s)	ピーク流量 Q_p (m ³ /s)
No. 1	309	14.0	52.8	5.9	2~5	7.4~18.6	2300~5800
No. 2	467	16.6	62.3	7.5	2~5	9.2~22.9	4300~11000
No. 3	465	14.0	59.3	7.8	2~5	8.6~21.6	4000~10000
No. 7	588	9.0	58.3	10.1	2~5	7.9~19.7	4600~12000

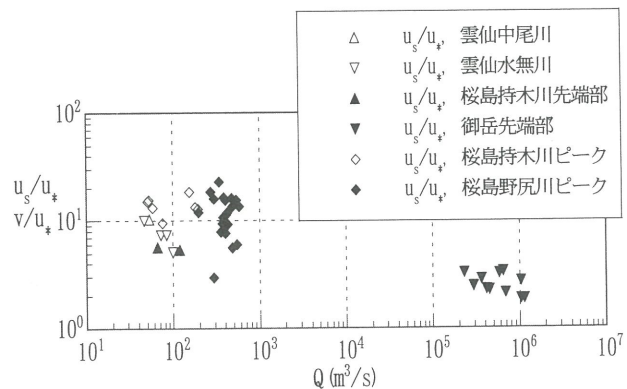


図-9 現地観測に基づく土石流の流速係数と流量との関係^{9), 10)}

$$\Delta h = \alpha \frac{v^2 b}{g r_c} \quad (1)$$

ここに、 α : 係数、 Δh : 水位差 (m)、 v : 平均流速 (m/s)、

表2 流下痕跡から推定した湾曲部の平均流速とピーク流量

横断面	曲率半径 r_c (m)	流路幅 b (m)	水位差			平均流速 v (m/s)	ピーク流量 Q_p (m ³ /s)
			痕跡高さ		Δh (m)		
			左岸 (m)	右岸 (m)			
No. 4	75	51.8	23.0	9.4	13.6	13.9	5140
No. 5	100	57.7	9.6	22.9	13.3	15.0	6240

b : 流路幅 (m), g : 重力加速度 (=9.8m/s²), r_c : 曲率半径 (m) である。ここで、流路幅 b , 水位差 Δh は図-6 (a) の結果を用いた。空中写真より流路中央の曲率半径 r_c を求めた。また、式 (1) 中の α の値は 1 から 10 までの範囲を考える必要があるが¹¹⁾、ここでは $\alpha=1$ とする。式 (1) を用いて平均流速 v , ピーク流量 Q_p を求めた結果を表-2 に示す。土石流の流速は $v=13.9\sim 15.0$ m/s, $Q_p=5140\sim 6240$ m³/s と推定される。この推測値は表-1 の推測値と比較して小さくなっている。これは、粒径 d や曲率半径の評価などに問題があるものと考えられる。しかしながら両者は、大きくはずれておらず、概ね推測値は妥当な値と考えられる。

5. おわりに

2003 年 7 月 20 日宝川内集地区で発生した土石流について現地調査を行い、土石流が流下した流路の横断面を測定した。さらに、この断面を用いて、高濃度流の挙動を規定する無次元量 $N_R \equiv \frac{R}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$ を求めるとともに、等流条件下でピーク流量を推定した。その結果、集川の土石流は典型的な砂礫型土石流であったことが推定された。またピーク流量は $Q_p=4000\sim 12000$ m³/s, 平均的に $Q_p \approx 7000$ m³/s と推定された。

謝辞

本調査に際して、国土交通省九州地方整備局、熊本県砂防課、同県防災消防課、水俣市役所には被害状況などの種々の災害資料を、気象庁福岡管区気象台には降雨データをそれぞれ提供していただいた。熊本大学工学部北園芳人教授には資料収集において多大の便宜を図っていただいた。著者の一人は、(社)土木学会・(社)地盤工学会「九州地方豪雨災害合同調査団」(団長 九州大学教授 善功企)の一員として調査を行った。また本研究は、一部、文部科学省科学研究費補助金特別研究促進費「2003 年 7 月九州豪雨災害に関する調査研究」(研究代表者 九州大学助教授 橋本晴行)の補助のもとに行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷口義信:2003 年 7 月九州地域豪雨災害調査報告(速報)-水保土砂災害-, 砂防学会誌, vol. 56, No. 3, pp. 31~35, 2003.
- 2) 橋本晴行・北園芳人・守田治:2003 年 7 月九州豪雨災害について, 自然災害科学, vol. 22, No. 2, pp. 159~165, 2003.
- 3) 下川悦郎・地頭園隆・小川滋:出水市・針原川土石流災害, 平成 9 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1997 年 7 月梅雨前線停滞に伴う西日本の大災害に関する調査研究(代表者 下川悦郎), pp. 19~30, 1998.
- 4) 岩松暉:1997 年 7 月鹿児島県針原川土石流災害, 自然災害科学, vol. 16, No. 2, pp. 107~112, 1997.
- 5) 橋本晴行・平野宗夫・疋田誠・Kichan Park:出水市針原川で発生した土石流の流動・堆積特性, 平成 9 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1997 年 7 月梅雨前線停滞に伴う西日本の大災害に関する調査研究(代表者下川悦郎), pp. 77~85, 1998.
- 6) 橋本晴行・平野宗夫:泥流の抵抗則に関する研究, 水工学論文集, 第 39 卷, pp. 495~500, 1995.
- 7) Haruyuki Hashimoto and Muneo Hirano: A FLOW MODEL OF HYPERCONCENTRATED SAND-WATER MIXTURES, Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of First International Conference, ASCE, August 7-9, pp. 464~473, 1997.
- 8) 橋本晴行:土石流の流動機構について, 第 20 回混相流シンポジウム講演論文集(招待講演), pp. 61~68, 2001.
- 9) 橋本晴行・平野宗夫・Kichan Park:現地観測に基づく土石流の抵抗則に関する研究, 第 17 回日本自然災害学会学術講演会, pp. 125~126, 1998.
- 10) 朴 琦瑛:山地流域における豪雨時の土砂流出と氾濫解析に関する研究・九州大学博士論文, 2004.
- 11) 水山高久・上原信司:湾曲水路における土石流の挙動, 土木技術資料, 23-5, pp. 15~20, 1981.
- 12) 芦田和男・高橋保・新井宗之:土石流の調節制御に関する研究(2)-流路湾局部における土石流の流動-, 京都大学防災研究所年報, 第 23 号 B-2, pp. 251~263, 1980.

(2004. 6. 18 受付)