

## 土石流研究の現状と今後の方向

水山高久\*

はじめに

土石流研究は、「幻の土石流」と言われた時代からずいぶん進歩したが、数年前から壁にぶつかっていると見える状態にあるかもしれない。

土石流対策の実務を進めてゆくのに必要な基本的な情報はかなり蓄積され、土石流の堆積氾濫だけでなく土石流の発生から堆積までのシミュレーションがある程度可能なところまで、研究は進んでいる。研究が進まないと感じる原因は何であろうか。土石流のビデオ映像はかなり蓄積され、表面流速などの情報は増えたが、地すべり研究で地下の情報が十分入手できないように、土石流の内部は不明であるし、実際の土石流の発生、堆積の様子は未だに観測されていない。それに対応するように、平衡状態の土石流の流れに関する研究は進んだが、土石流の発生機構、堆積機構についてはまだ仮説的な研究にとどまっている。

人工的に土石流を発生させることを含めて、集中した現地調査、現地実験が現在の壁を越えてゆくために必要であるように思う。ここでは、土石流の流動機構、発生、堆積の現状と課題をまず整理し、その後、ハード対策、ソフト対策に関わる研究開発の現状と課題についてかなり独断的に述べてみることにする。

### 土石流の流動機構

平成15年9月、スイスのダボスで第3回の土石流に関する国際研究集会が開催された。その報告は、砂防学会誌に詳しいが<sup>1)</sup>、台北で開催された第2回から3年経ったが目だった進展はなかったように思う。土石流の流動機構に関する研究の代表的なものとして、江頭ら<sup>2)</sup>によるものと高橋ら<sup>3)</sup>によるものがある。これらの中身には触れないが、さらなる進

展のためには、より精密な計測を伴う実験や観測が必要な状況にある。

水深方向に砂礫が十分分散するいわゆる土石流は、溪床勾配が約15度以上の区間と土石流の先頭部にしか見られず、土石流災害が発生する溪床勾配が10度以下の土石流扇状地では、土石流の本体部分の流れは土砂流（掃流状集合流動）である。したがって、最近の土石流研究の主な対象は、上記の研究者や高濱ら<sup>4)</sup>の最近の研究のようにこの部分にある。筆者は、土石流先頭部の巨礫や流木が集中する縦断的に三角形のいわゆるフロント部分の動きに興味を持っており、扇状地上での土石流の停止堆積、首振り現象、家屋の破壊などをさらに進んで検討するためには、この研究が必要であると考えている。

これまで土石流の流動機構の進展をもたらしたものは実験水路での研究であるが、世界中のほとんどの研究が、幅5cmから30cm程度の類似したサイズの水路と、類似した粒径の砂礫を使って行われてきた。実際の土石流は、その100倍以上大きく実験は十分自然現象を説明していない可能性がある。

例えば、実験水路では勾配が緩くなるとそれに応じて敏感に土砂濃度が減少し勾配変化部に土砂が堆積するが、実際はもっと堆積しにくいのではなかろうか等といった点である。最近、江頭らは流れのスケールが大きくなると、流す土砂と流される土砂の境界の粒径が大きくなるのではという興味深い議論を始めている。このような研究を受けて、実際の土石流を対象に、または人工的に土石流を発生させて確認すべき項目が明らかになると期待される。それを受けて、現在かなりマンネリ化している現地土石流観測が次の段階に進むことになろう。

ここで思い出したが、中国四川省の成都の中国科学院山地災害環境研究所には、世界最大の循環式土石流実験水路があるが、最近はどのような使われ方をしているのだろうか。水路が作られた報告はあり、筆者も20年くらい前に実際に見学したがその水

\* 京都大学大学院農学研究科教授

路による研究成果はその後見たことがない。

### 土石流の発生

土石流の発生形態として、

- ①崩壊土砂が崩れ落ちる間に連続的に土石流に変化する。
- ②崩壊土砂が谷の流れを塞ぎ止め天然ダムを形成して、これが決壊する時に土石流となる。
- ③急勾配の溪床に堆積した土砂上の流量が大きくなって土石流が発生する。
- ④大雨や地震によって発生した大規模な崩壊が連続的に土石流になる。
- ⑤火山噴火で新しく山腹斜面に火山灰が堆積して、少量の降雨でも土石流が発生する。
- ⑥火山噴火で（おそらく火砕流によって）山頂付近の積雪や氷河が急激に融けて土石流（泥流）が発生する。
- ⑦火口湖の水が噴火や大雨で溢れ出し土石流が発生する。
- ⑧氷河湖が決壊して鉄砲水（glacier lake outburst flood）となる。
- ⑨人造のダムが決壊してその水によって土石流が発生する。
- ⑩ダム湖に崩壊土砂が飛び込んで水が溢れ土石流となる。  
などがある。

上記のうち、②から⑩は、水の供給され方による分類で、土石流になりうる十分急な勾配の溪床に土石流の材料となる土砂が存在していることが条件であるが、土石流が発生することについては理解しやすい。④の大規模崩壊は、斜面の地下に存在するであろう水によってなんとなく理解される。

さて、①であるが、豪雨終了後の土石流が発生した溪流の調査で、多くの場合に上流部に崩壊地が認められ、崩壊が発生して溪床の土砂を巻き込んで土石流になったと説明されることが多い。しかし、その斜面勾配、堆積土砂厚さに対して土質力学的な安定解析を適用すると、安全率1.0で崩壊したのでは土石流になるのに十分な水が存在しないことになる。したがって、見かけ上の安全率1.0を下回っても斜面は崩れずにいて、表土層が飽和し表面流が発生するようになってはじめて崩壊するとか、表層土砂中にはパイプが存在したりして空隙率がかなり大

きく崩壊が発生するときには体積が減少しながら土石流になるなどの説明を試みている。

これらについては十分説明ができていない。特に、多くの土石流の発生が降雨の終わりごろ（実効降雨量が最大になる）ではなく、10分から1時間程度の雨量強度が最大になる時間に対応しているのも、そのような早い応答を説明するのはさらに難しい。これを説明しようと、上述のパイプ流出や最近では早い岩盤流出などの研究が進められている。これは、崩壊発生の説明にも共通した問題である。（財）砂防・地すべり技術センター（以降STCと略記）砂防技術研究所による比抵抗値の連続観測も期待される手法の一つである。また水山ら<sup>5)</sup>の、崩壊や土石流が発生するような小さな流域（溪流の源頭部）での流量観測、流出解析もこれを説明しようとする試みの一つである。

このように、土石流発生後に土石流の発生機構を議論することは難しいが、崩壊地を見て安易に崩壊が土石流になったと説明されることが多く、それで無理やり納得しようとしているように見える。平成9年の針原川の土石流では、明らかに何度かの崩壊があった<sup>6)</sup>。平成15年の水俣の土石流では土石流発生前の流量が多かったようである。斜面下部の侵食や、天然ダムなど土石流発生機構についていろんな考え方ができそうなのに、河道閉塞の痕跡はない、したがって「大規模な崩壊が発生して土石流になった」と簡単に済ませようとしているように見える。

後述する土石流に対する警戒避難の基準雨量は、土石流発生形態が種々ありうるにもかかわらず、若干の改良はあるものの長年一種類の手法が用いられてきた。最近それではまずいのではないかという研究が、STCで行われつつある。土石流の発生に関してはまだ十分明らかになっていないので、先入観にとらわれ過ぎることなく、謙虚な態度で現地調査、資料分析がなされることが望まれる。

### 土石流のハイドログラフ

前節で述べたように土石流の発生形態は種々あり、ある土石流危険溪流を取り上げてみてもいくつか考えられる。したがって、土石流のピーク流量さらにはハイドログラフ（流量の時間的変化）となると、雨量を想定しても推定することは難しい。

桜島などの活火山では、ある程度以下の雨量につ

いては、一般的な流出解析手法で雨量から流量を推定し、これに土砂濃度を考慮して流量が推定できる場合があるが<sup>7)</sup>、これは例外的である。崩壊や、土石流発生は一種の破壊現象を伴うと考えられ、決定論的に推定することには限界がある。したがって、「土石流対策指針（案）」（平成元年版）ではある程度の精度で推定が可能な総流出土砂量（上限）を対象に土石流対策捕捉工（えん堤）の貯砂容量で対応する計画となっている。

しかし、土石流のハイドログラフ、粒径の時間的変化が推定できれば、より効果的な透過型砂防えん堤の導入が可能となる。したがって、与えられた流域に、ある想定される雨がある時、いつ、どのような土石流が発生するかを推定することは、この分野の研究において常に課題であり、目標である。実務的な割り切りは別として、挑戦は継続されなければならない。

現地での実際の観測データは、ビデオカメラの性能の向上とともに蓄積されてきた。ほとんどが谷の出口の映像で発生源の映像は未だにないが、限られたこれらのデータを種々の方向から解析すべきである。土石流ピーク流量と土石流の総量の間には直線的な関係があるがバラつきが大きい。目安の値を得るにはよいが、一般化して使うのは危険である。ややもすると、大きめの推定式を作成して「安全側だ」

と納得したりもする。土石流対策の構造物は扇状地上の建物、土地利用の合間をぬって設置しなければならないので、安全側過ぎるのは適当ではない。データを見ると、比例係数は、流域面積または総流量が小さくなると大きくなるように思える。

土砂濃度、粒径の時間的変化に関する観測の試み、ビデオ映像からの判読は、以前の方が盛んであった（図1）<sup>8)</sup>。これらの時間的変化の観測データの必要性は、対策工の高度化とともに高まっており、再びチャレンジすべき項目のように思う。

土石流は、多くの場合1回の土石流中に最大のピーク流量のもの他、何波かの土石流が含まれている（図2）<sup>9)</sup>。現在、土石流の堆積シミュレーションやハード対策の検討は、1回の土石流波形を対象に行われている。一般にはそれでよいと思うが、何波かあること（分かれること）が危険な方に影響する場合があるかもしれないので、何波か連続したときにはどうなるかをそれぞれの検討時に考えておいてほしい。

### 土石流の堆積

土石流の堆積は、土石流災害の発生場での現象であり、災害発生機構の解明のためにはもっと研究されなければならない。発生した土石流において、土砂と水の混合物は減速するとともに巨礫など一部は

堆積しながら、水と細粒土砂はさらに下流に流下する。その様子が観察されたり、ビデオに撮られたりした例は少なく（昭和53年白田切川、平成5年焼岳上々堀沢などを除いて）、全体像は未だによく分かっていない。

一般に土石流の後半は土砂濃度が減少する。流量的には小さいが流出は継続する。この水によって堆積した土石流の土砂は急速に侵食され、さらに下流に運ばれて再び堆積する。したがって、土

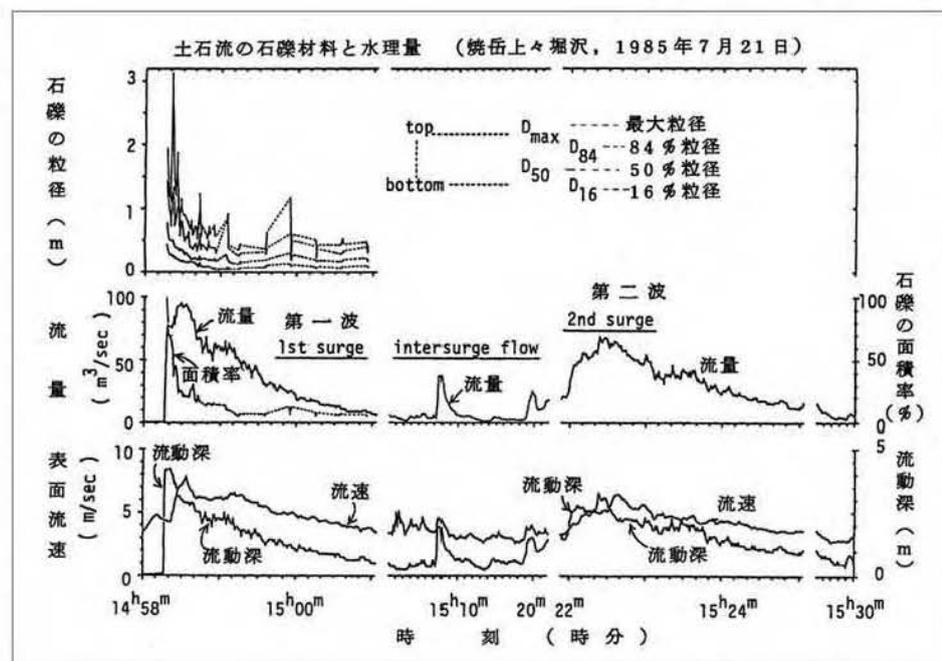


図1 焼岳上々堀沢の土石流ハイドログラフ、粒径10cm以上の石礫の濃度および粒径特性値<sup>8)</sup>（1985年7月21日）

土石流発生直後に災害地を訪れてもすでに堆積物の一部が侵食されている。その結果、多くの場合土石流発生前の流路が現れていることが多い。水路実験で土石流の堆積を研究した例はいくつかある。そこでは、先頭部に大きい礫が集中して流下してきた土石流が扇頂部（谷の出口）の勾配が緩くなり、横断方向の拘束（側壁）がなくなるところで急速に堆積する。その様子は、平衡流砂量式を用いた河床変動計算でよく説明される<sup>10)</sup>。

しかし、実際の土石流は実験よりも停止堆積しにくいように見える。桜島の野尻川などを、先頭部に巨礫が集中した状態で土石流が流下するビデオ映像があるが、河床勾配は、1/15（3.8度）である。また、災害調査から経験的に土石流の本体（礫分）は、勾配3度まで達することが知られているが、実験水路では勾配が10度を下回ると掃流状集合流動が顕著となり、流れの先頭部は段波状ではあるが土石流とは言い難い。実際の土石流では細粒土砂が含まれていて分かりにくいのかもかもしれないが、スケールの影響があるように思える。

そこで、木曾川左支川の滑川にある大型の砂防えん堤上流などで、土石流の堆積過程がビデオカメラで記録され解析されることを期待している。実際の渓流で、源頭部に人工的に水を供給して土石流を発生させ、土石流の堆積する状況をヘリコプターから観察するような現地実験がなされるべきだと思う。

### 土石流対策

土石流対策は、土石流捕捉工（砂防えん堤）などの構造物による方法（ハード対策）と警戒避難システムや土地利用の規制など構造物によらない方法（ソフト対策）に分けて議論されることが多いので、ここでも分けて議論する。

### ハード対策

代表的な構造物は、土石流捕捉工である。かつては（筆者が学生のころ）、土石流を蒸気機関車のように考え、巨

礫さえ堆積させればよい、掃流に変えればよいと考えられていた。そのため、掃流区域の砂防えん堤と同様に土石流に対しても満砂後の土砂調節効果を期待したこともあった。現在は巨礫だけでなく、土石流全体を砂防えん堤の貯砂容量で捕捉するのがよいと認識が変わった。砂防関係の技術者全員の認識が変わったことを期待するのだが、「3基30%」（1基の砂防えん堤で計画流出土砂量の30%程度以上を処理し、一つの渓流に砂防えん堤を3基程度配置するという基本方針）といった土砂調節時代の用語を今でも耳にすることがあり、心配になることもある。

国土技術政策総合研究所がイタリアとの共同研究として、コンクリートスリット砂防えん堤を土石流対策に用いる研究を行ったために、流砂系の流す砂防えん堤の思想と重なって、それが土石流対策の方向のように思われた時期があった。国土交通省砂防部保全課から原則として土石流対策としてコンクリートスリット砂防えん堤は採用しないという事務連絡が出ているが、まだ混乱が残っているように思え

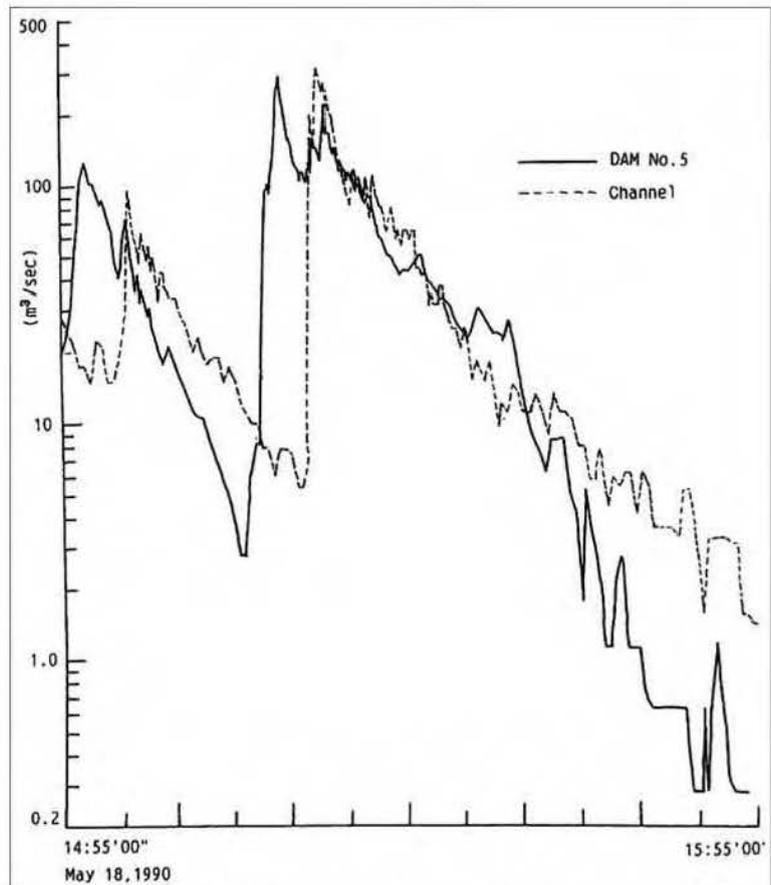


図2 桜島野尻川の土石流ハイドログラフ、第5号砂防えん堤および野尻川流路地点<sup>9)</sup>（1990年5月18日）

る。

土石流捕捉工は、土石流発生時に貯砂容量が確保されていなければならない。土石流の発生頻度は一般の土石流危険渓流では、50年から300年に1回程度と低く、その他の年はほとんど土砂流出もないので、不透過型えん堤でもそれほど頻繁に除石をしなければならぬとは思わないが、堆砂状態の点検が必要となる。砂防は、新しい砂防えん堤の建設に忙しかつたので、日常的な点検などの管理業務に慣れていない。また、自然環境保全の認識が高くなるにつれて、渓流を砂防えん堤によって分断することに批判が高まった。

平時の環境保全と土石流発生時の安全を両立させるものとして、鋼管製の透過型砂防えん堤がある。ところが、20年前の土石流危険渓流の最下流（保全対象の直上流）は不透過型という、鋼管製透過型砂防えん堤導入時の原則がまだ生き残っている。これは、当時の透過型が巨礫を対象としたものになっていたことが原因であるが、最近は最下流に設置することを前提とした、土石流発生時には限りなく不透過型として機能する透過型えん堤も開発されてきており、土石流対策は原則として透過型という考え方が定着するものと考えられる。

ただし、最下流の砂防えん堤に達する流れは、最初は土石流であっても、後半は掃流状集合流動から掃流に近いものに変化すると考えられ、どのような粒径に対して開口部の大きさを決めるべきかは現在も問題である。その意味では、現在、最下流型といわれている構造物も上部は開口部が広すぎる場合があるかもしれない。上部の開口部はかなり安全側に狭いほうがよいと思う。

さらに、鋼管製の透過型砂防えん堤もコンクリートスリット砂防えん堤も同じ透過型と考える砂防技術者もまだおられる可能性があり、丁寧な解説が必要と思われる。

土石流対策の構造物を設計する場合、土石流が構造物に与える力が問題となる。土石流の力は、便宜的に流体としての力と、土石流に含まれる礫の衝突による力に分けて議論されてきた<sup>11)</sup>。そろそろ総合的に評価されてもよく、個別要素法などの解析方法の進展が期待される。土石流の力は、土石流衝撃力と呼ばれることがあり、これが構造技術者の誤解を生む原因となっている。衝撃力なら緩衝すればよいと緩衝材の開発に向かってしまう場合がある。同様

の傾向が崩壊土砂でも見られる。土石流に関する認識を高めて、より合理的な構造物が開発されることが期待される。

#### ソフト対策

土石流が発生する可能性のある、いわゆる土石流危険渓流が調査されてきた。谷の定義や、15度5ha、人家5戸以上など、ハード対策の事業量調査と混同した調査からスタートしたが、現在は準ずる渓流も合わせればほぼ全数を把握している。さらに、平成13年の広島豪雨災害を契機としたいいわゆる「土砂災害防止法」は、行政サービスとして行ってきた危険渓流の調査と表示、危険区域の調査と表示、警戒避難情報に法的根拠を与えた。今は、この土砂災害防止法に基づく警戒区域、特別警戒区域の設定、公表をできるだけ速やかに行う必要がある。

筆者は都道府県の予算が厳しくなる中で、作業が進まず法律が宙に浮いた状態になることを恐れている。その先に検討を必要とするのは、十数万箇所の土石流危険渓流の土石流発生危険度の判定であろう。これは従来のa、b、cといった区分ではなく、土石流発生基準雨量で表現されるのが望ましいが、過渡的には多変量解析などによる相対的危険度の表示もありうると考えられる。

基準雨量も、土砂災害防止法の中の警戒避難体制の整備の一部として位置づけられる。現在、気象庁と連携作業が試行中である。気象庁の土壌雨量指数と砂防が進めてきた基準雨量の技術的な調整・合体も作業されているようなのでその結果を待ちたい。ただ、本文の土石流の発生節で述べたように、土石流の発生形態はいくつかあるので、それを意識した基準に向かう必要がある。すでに主張しているように、現行の基準の発生非発生を議論しているパラメーターは別々の現象に対応するもので、右下がりの直線（CL）で分離しようとするのは無理があるし、適当でない。また、短時間降雨予測情報の土石流予警報への導入は進みつつあると思うが、「精度が悪い」などの批判で逆行することのないように願いたい。

工事中の安全のためや、土石流が頻発する渓流で使用される土石流検知センサーについて触れておく。いまだにワイヤーセンサーが多く採用されているように見える。ワイヤーセンサーは、振動センサーに比べて誤作動は少ないが、連続して発生する土

石流を検知できない。土石流の規模に関する情報も入手できるので、当然、振動センサーが主流になるべきである。近々、土木研究所から振動センサーの設置に関するマニュアルが出ると聞いているので、それに期待している。

### 「自らの命は自ら守る」

従来からの土石流危険渓流、土石流危険区域の指定、平成14年の土砂災害防止法によって、住民は危険な場所に住んでいることを知っていることが前提となってゆく。何でも行政に頼った時代は終わった。地方自治体は財政が厳しく、住民はハザードマップなどの防災情報を生かしてうまく住まわなければならない。まずは、安全なところに住むのであるが、すでに危険区域に住んでいる場合にも、「耐土石流住宅（仮称）」への改良や耐土石流塀などによる耐土砂災害化、土砂災害時に命だけは守る「サバイバルルーム（仮称）」などの採用がありうると思う。行政側からではなく、住民側からの技術開発が必要である。

### 土石流とともに流出する流木

最後に残ってしまった。ハード対策のところでは記述すべきであったが、現在、土石流対策と流木対策は意識して別の事業として動かししている。しかし、対象となる場が同じであり、流木の多くは土石流に伴って流出するので、土石流危険渓流内においては流木対策を土石流対策の中に組み入れて議論したほうがよさそうである。現在、河川砂防技術基準の改定とそれに伴う手引き等の整備が進められているところなので、その作業の進展に期待したい。

### あとがき

ここまで一応、土石流研究の現状と課題を網羅的に書いたつもりであるが、大事な何かを忘れていたような気がする。個々については、分担して執筆することになっているのでそれを読んでいただきたい。

### 【参考文献】

- 1) 山越隆雄、池田暁彦、水山高久；第3回国際土石流災害防止会議に出席して、砂防学会誌56-4,2003、p.55-60
- 2) 江頭進治、宮本邦明；土石流のメカニズム、ジオテクノート12、土石流、第4章、2003,p.41-78
- 3) 高橋保、里深好文；石礫型及び乱流型土石流の一般理論とその実用モデル、砂防学会誌55-3、2002,p.33-42
- 4) 高濱淳一郎、藤田裕一郎、近藤康弘；一次元モデルによる土石流のシミュレーション、水工学論文集42、1998、p.919-924
- 5) 水山高久、恩田裕一、加藤祐子、田井中治、岡本正男；流出特性による土石流発生危険度の判定調査、砂防学会誌54-5、2002,p.46-49
- 6) 山田孝、南哲行、小山内信智、水野秀明；1997年7月10日に鹿児島県針原川で深層崩壊に起因して発生した土石流の流下・堆積実態、砂防学会誌51-1、1998,p.46-54
- 7) 欧国強、小橋澄治、水山高久；土石流ハイドログラフの予測……渾水溝を例として……、砂防学会誌45-4,1992,p.3-8
- 8) 諏訪浩；土石流の発生と谷地形の変化、奥田節夫教授退官記念シンポジウム、災害地形学最前線、1988,p.95
- 9) T.Mizuyama, K.Kamei, Untung Budi Santosa, S.Kobashi; Change in debris flow discharge rate at the Nojiri River, 砂防学会誌45-3、1992,p.26-27
- 10) 水山高久、下東久巳；土石流氾濫シミュレーション、土木技術資料27-8,1985、p.3-9
- 11) 水山高久；砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点、砂防学会誌32-1,1979,p.40-43