

土 石 流 調 査

奥 田 節 夫

§ 1 土石流調査の意義

わが国においては、土石流の発生が毎年多大の被害をもたらしており、その実態を明らかにするために諸種の調査、研究が進められてはいるが、いまだに解明されていない問題が数多く残されている。

土石流は一般に交通の不便な山間域に、しかも豪雨時に発生するために直接に観察される機会が少く、またさまざまな因子がくみ合った複雑な現象であって理論的解析も困難である。したがって研究の手法としては、模型実験によって、物理的諸条件を単純化してこれをコントロールしながら小規模な土石流現象を発生させて観察し、その結果について流体力学的な解析をこころみることが有効な手かかりと考えられ、最近このような実験がこころみられている。

しかしながらこれらの模型実験手法の効果を裏づけるには、実際の土石流について十分定量的な測定を行ない、模型と実物の間の相似則の確立に努力しなければならない。

さらに災害の防止という観点に立つと、単純化された前提のもとでの土石流の水理学的研究と併行して、さまざまな条件のもとで発生する現実の土石流を直接に観察し、その発生の機構、流動の形態、流走の限界などを十分検討して、被害の防止、軽減をはからねばならない。

すなわち現実の土石流に対する直接的な観察、計測は模型水路内の土石流に対する水理学的考察と相補なって、土石流現象の全貌を正しく把握し、土石流災害を防止するために欠くことの出来ない手法である。

§ 2 従来の土石流調査

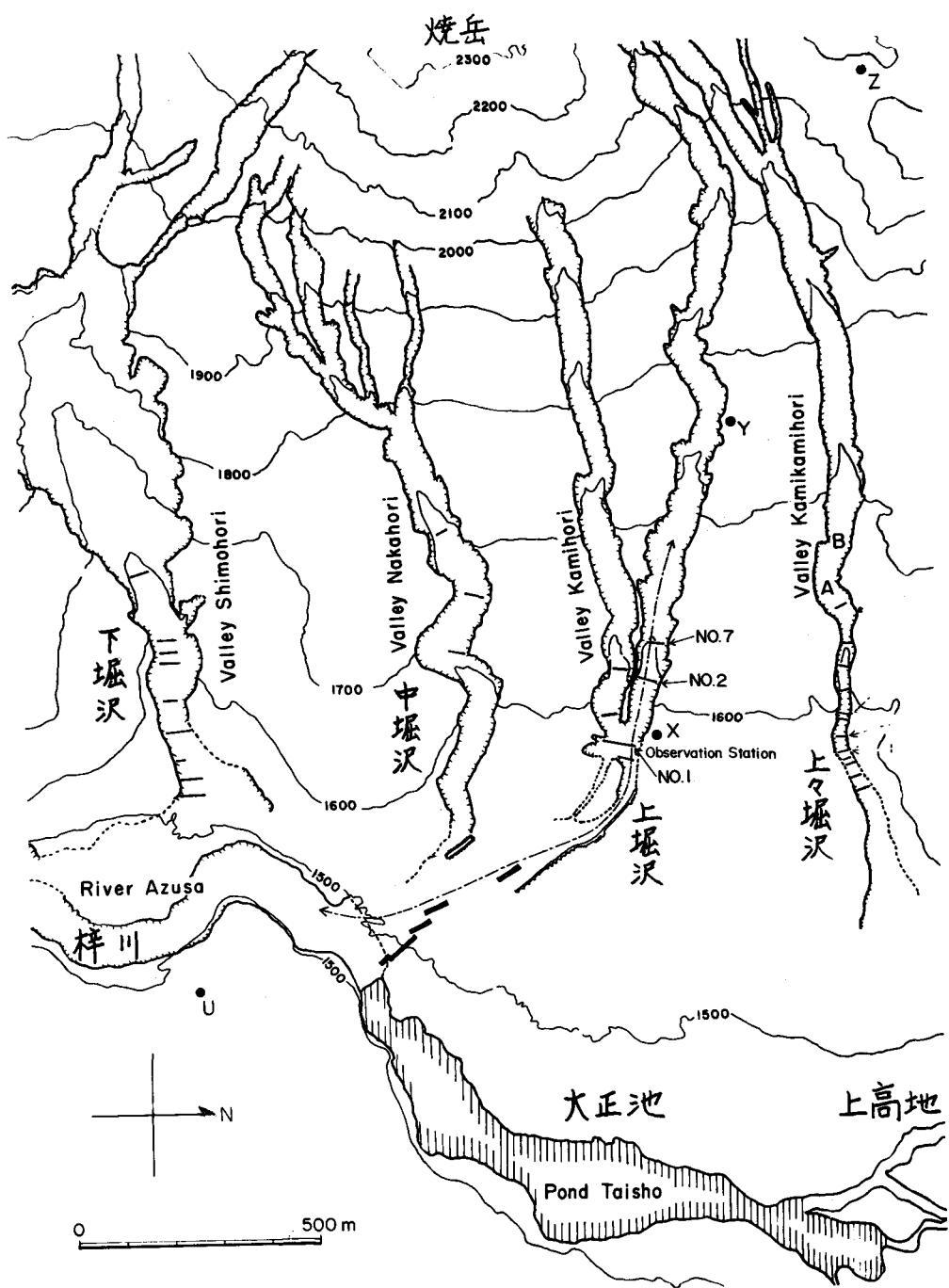
一般的な土石流の研究の経過については大同¹⁾によってまとめられているが、とくに土石流の現地調査の歴史的経過についてはあまりつまびらかではない。

しかし多くの他の災害現象の場合と同じように、限られた地域の少数の住民の個人的体験から、次第に社会的な問題としてとりあげられ、被害調査、復旧計画のための調査の段階を経て、さらに災害を未然に防止するための研究的調査が行われるようになって来たものと考えられる。

それにともなって、調査の方法も、土石流の被害者、目撃者から経験を聞いてまとめる段階から、発生後の測量、情況撮影、発生域の空中写真による平面的記録など次第に新しい手法、技術がとり入れられつつある。

しかし最近においても、特殊な例を除いて土石流の現地調査の大部分は砂防関係の行政機関によって行われ、土石流発生前後の微地形と堆積状況の変化から、土石流の洗掘、堆積作用を調べ、土砂の移動量を算定することに重点がおかれていた。ただしその目標は単に被害の実状を認識する段階から、土石流発生の機構を知り、被害範囲を推定しようとする研究的段階まで発展している。

1) 大同淳之：土石流に関する基礎的研究，京大学位論文（1970）



図一 焼岳東麓土石流調査域（記号類は本文内で説明）

たとえば建設省の最近の「土石流に関する研究」調査実施要領²⁾によると、土石流の被害軽減を目的とした砂防工事の重要性がとりあげられ、土石流の発生を防止する直接工事に対しては、土石流の発生場所と規模の推定が必要であり、また土石流の流下をくいとめる間接工事に対しては、堆積をもたらす溪床勾配、溪床幅の指定が必要であることを指摘して、後に述べるような具体的な調査法が説明されている。

外国における最近の土石流調査の現状については、とくに筆者自身詳しく調べてはいないが、関連した学術雑誌の論文内容や、最近渡航した研究者の見聞談によると、スイス、ソビエトのコカサス地方、アメリカの西部山岳地帯などに日本の土石流に類似した災害がよく発生しているようであるが、特別に目新しい調査法が適用されてはいないようである。

§ 3 土石流調査の目標と方法

土石流の現地調査は、単なる被害の実状調査から研究的な調査まで、さまざまな目的に応じた各種の調査方法が用いられているが、ここでは主として災害科学の研究的な立場から必要と思われる土石流調査法の現況と問題点を指摘する。

(i) 地形測量

周知のごとく流域の地形的特性と土石流の間には相互に密接な関連があり、土石流の発生要因としての地形的特徴と土石流による洗掘、堆積の作用を定量的に表現するために、地形測量は欠くことの出来ない調査の一つである。

具体的には土石流の発生前後に地形測量を行ない、その比較によって洗掘、堆積域の分布、土石移動量の算定を行なうことが多いが、ほとんどの土石流発生域でこの調査は実施されている。

また、最近では地上踏査の困難な山間域の測量を、空中写真によって行なう場合がふえているが、空中写真によると、単に図化して地形の幾何学的表現を行なうのみでなく、過去の土石流による段丘や扇状地の発達、巨礫の面的な散布状態、水の流出に関係のある土地利用形態など、写真判読によって多くの有益な情報を得ることが出来る。

とくに土石流発生地の下流に湖沼や貯水池がある場合には、この水域の深淺測量を行なって水底に堆積した土砂量を求めることが出来る。

(ii) 堆積状況調査

溪流における堆積の状況は、土石流発生の重要な因子であり、また土石流の発生によって堆積状況は大きく変化するから、その調査は非常に重要な意義を有する。

この項目については前述の建設省の土石流調査実施要領でも重点的にとりあげられ、具体的な方法が示されている。これによると最大礫に対する限界掃流力と流路の掃流力の比 $(U_{c*}/U_*)^2$ の値が2をこえるかどうか、また堆積物の分級がすすんで層状構造を呈しているかどうか、で土石流区域（土石が一ように混じて集合的に運搬される区域）と掃流区域（土砂が水によって個別的に掃流される区域）とを区分している。

この方法を実際に適用する場合には、いろいろな問題点が残されているが、ともかくも統一的な方法で多くの溪流で調査した結果が整理されるならば、土石流と堆積状況に関する一般的な性質が見出される可能性がある。

なお堆積状況調査の技術的問題としては、一定区域内の礫の直径分布を写真記録から自動的に求め

2) 建設省河川局砂防課、土木研究所砂防研究室、「土石流に関する研究」調査実施要領（昭和45年6月）

る方法、とくに浅い堆積層の鉛直構造を弾性波探査、電気抵抗探査、ボーリングを併用して求める方法が工夫されつつある。

(iii) 水文要素調査

特定の流域の土石流発生の機構を知り、発生時期を予察するためには、発生の直接誘因である降雨（または融雪）と発生の関連を定量的に求めておかねばならない。

一般的に土石流発生地では降水の流出が異常で、少々雨が降ってもすぐに溪流に水が流出せず、土石流発生の直前または発生にともなって急激に流量がふえる所謂「鉄砲水」的な流出形態をとる場合が多いようである。

また降雨と土石流の発生も短期間のピーク雨量に支配されて出現する場合（焼岳³⁾の観測例）、豪雨から数日おくれてパイピング現象にともなって出現する場合（湯川多枝原谷の例）などがあるから、降雨については連続的な記録が必要である。

また流域内になんかの高度差がある場合には、雨量計の配置に特別な注意を要する。さらに溪流の水位観測には水位の変動が激しいこと（数分間で数mの変動がある）、礫が流れて測器を破かいし易いことなどに留意しなければならない。

土石流発生流域の異常な水の流出機構を調べるためには、流域の代表的な地点での地中水分布を測る必要があろう。

また溪流によっては融雪水の流入や、溪床上の積雪状態が直接に土石流の発生に関連することも考えられるから、積雪、融雪の状況の調査が必要な場合もあろう。

(iv) 土地利用形態の調査

土石流の災害に関連する因子としては上述の自然環境的な要素以外にも、地域の土地利用形態、たとえば植生の人為的变化や地形の人工的変形が、水収支や地盤抵抗力の減少などを通して影響を及ぼすから、慎重な検討を要する。

最近南木曾地方の土石流災害地を対象として行われた国土問題研究所⁴⁾の調査はそのような因子までふくめて、人文地理的あるいは災害史的な資料調査を併用した例であり、とくに山林伐採のあり方と土石流災害の関係が論じられている。

(v) 土石流の動態調査

以上の調査はいずれも土石流発生地域で発生の前後のある期間にわたって実施可能な方法であり、これらの調査結果にもとづいて、ある程度流動中の土石流の状態を推定することが出来る。

しかし具体的に水理学的な実験や解析のデーターと比較し、とくに防止工法の計画をたてるためには、流動中の土石流の実態を直接に観察することが一番望ましい。

このような従来の調査法の欠陥をおぎない、土石流の動態を総合的にとらえようとするところみは、近年諸所で着手されつつあるが、ここで項を改めて主として筆者達のグループが行なって来た研究調査法を中心にして説明する。

§ 4 土石流の動態の計測

土石流の動的状況の直接観察についても、従来全く行われていなかったわけではない。たとえば、昭和36年4月新潟県新井市猪野山における土石流の土木研究所新潟試験所員による8ミリシネ撮影、あるいは昭和44年8月立山カルデラ内常願寺川源流における土石流の立山砂防工事事務所員

3) 釣谷，五十嵐：河床縦断形の変動－常願寺川の変動について－，新砂防，78，PP. 25～36（昭・46・2）

4) 国土問題研究所：南木曾災害総合調査報告書（昭46）

によるビデオカメラ撮影など、貴重な動態の記録が得られている。

しかしながらこのような撮影記録は観測者が非常な危険をおかしたり、あるいは偶然の機会に遭遇して得られたもので、その資料自体は非常に貴重なものであるが、調査方法自体は一般的に適用可能なすぐれた方法とはいえない。

土石流の動態は諸要因によってまちまちであり、今後各地で多くの観察記録を集積して科学的成果が得られるものであって、非常に特殊な条件下でしか実現出来ないような調査法では成果が期待出来ない。

したがって、あらかじめ周到な計画と準備のもとに観測者の安全を十分に確保し、偶然のチャンスにあまり頼らずに、必要な観測対象を確実にとらえる方法を開発しなければならない。

このような目的意識にもとづいて、防災研究所の土石流に関連の深い分野の研究者が集って討議し、組立てて現地テストをこころみて来た土石流の総合的計測システムについてつぎに説明する。

このシステムの目標は、土石流の発生、流下、停止の過程を一貫して追跡し、将来水理模型実験との対比によって相似則の検討をこころみ、また数値的シミュレーションに用いる諸係数の値を定めるために必要な諸量をめもれなく計測し、さらに発生の予測に必要な水文諸要素もあわせて観測しようとするものである。

また土石流が一般に山間の僻地で悪天候時に発生することから、観測員の安全と計測の確実化のために、出来るだけ観測を自動化、遠隔制御化し、しかも保守作業を軽減するようにつとめた。

つぎに各計測対象の特徴とそれに応じた測定法について説明を加える。

(i) 流動状況の観察

土石流が流動しているときの形状は、一般に先端に巨礫をとりこんでカマボコ状の盛り上り部をもち、その後に多数の礫をふくんだ濃い泥流がつづくが、流路の状況、とくに障害物（砂防ダムなど）の通過などによって非常に変形することが多い。したがってその観察記録は連続的、立体的であることが理想であるが、この条件を総合的にみたし得る特殊なカメラは入手困難であるから、各種のカメラの組合せ配列（モノカメラ、ビデオカメラ、写真測量用カメラなど）で間に合わせねばならない。

またとくに土石流が夜間に発生する場合や、土石流発生時に霧が立ちこめやすいことなどを考えると、撮影範囲の露光条件や照明方法に特別の工夫を要する。

また土石流がカメラの視野に入っているときに撮影が自動的に行われるようにしておかねばならない。

(ii) 流速の測定

土石流の流動を表現する流速としては、先端盛り上り部が流下して行くいわゆる *front velocity* と、構成物質の個々の粒子が流れる *mass velocity* とを区別して測定しなければならない。

front velocity は距離のわかった二点間を先端が通過する時間から平均的に求められ、実際には(i)の撮影記録あるいは直接の肉眼観察によっても容易に測定される。しかし自動的に流路のいろいろな位置での速度を求めたい場合には、通過予定路にあらかじめ数多くの検知線を設置しておき、その線を先端が通過する時刻の記録を自動的に行えばよい。

mass velocity の測定は水流速ならば流速計を用いればよいが、土石流では巨礫などの通過でたちまち破かいされるから特殊の工夫を要する。

流況の撮影記録からの算定も可能であるが、泥流の速度とその中で掃流されている礫（礫の方が映像として確認されやすい）の速度とは必ずしも一致しないから、適当な標識物（色素など）を投入してこれを追跡することが望ましい。

(iii) 流動物質の採取

流動物質の塑性特性は土石流の動態を大きく支配するので、その特性を調べるため流動物質を採

取しなければならない。しかし土石流の発生時に流れに近接して直接採取することは非常に危険であり、また精巧な自動採水器のような器機を配置してもたちまち破かいされるおそれが多い。したがって現実には既設の砂防ダムなどを利用して、ある規模の土石流が通過するときに、あらかじめ設けられた穴に流動物がトラップされるようにして後でこれを取り出す方法が考えられる。

土石流の盛り上り部が通過した後の濃泥流部は先端とかなり構成物が違うが、先端通過後は危険度ははるかに減少するので、長い柄のついた器ですくいとることも可能である。

採取した物質の分析項目としては、見掛け比重、含水比、粒度分布、粘性、コンシステンシー限界などがあげられるが、流動中の状態と、採取後放置静止して水と固体粒子の分離が起った状態とでは物性の差が現われるから、その測定値に注意を要する。

(iv) 礫の移動

流動物質中でもとくに巨礫はその輸送機構に未解明の点が多いので、その流動形態の詳しい観察が要求される。土石流の発生前に流路の特定区域で巨礫をペンキで色塗りしておくと、その地点での掃流力の大きさの目安が付き、また流動中も判別しやすい。とくに露光が不足しがちなときは螢光塗料をぬっておいて照明することも識別に有利であろう。

(v) 水位

土石流発生前後の溪流の水位は、発生に関連の深い鉄砲水的出水の実態を調べるために極めて重要な要素であるが、通常的水位計は土石流の通過で簡単に破かいされるので、特殊な観測法を考えねばならない。

たとえば水面上から超音波を用いて水面位置を求めたり、堅固な構築物（砂防ダムなど）の通水部に目盛をつけて水位変動を撮影記録する方法が考えられ。

(vi) 雨量

土石流の発生条件を調べるためには、雨量観測は絶対に必要であるが、高度差の大きい山岳斜面での雨量の正確な観測には特別の注意を要する。またとくに雨量のピークと土石流の発生時刻の対応をみるためには、雨量計自記紙の時間目盛をたびたびチェックし、また流速測定用検出線などを利用して土石流の発生時を正確に記録しなければならない。

(vii) 衝撃圧

土石流の流路におかれた構築物に作用する衝撃圧の測定は構築物の安全や、土石流阻止物の設計にとって重要な資料であるが、あまり測定された先例はない。

とくに瞬間的な全力の変化を記録するには、動的歪計の利用が考えられるが、単に最大圧力の目安を知るには雪崩の研究などに利用されている圧痕計の利用も便利であろう。

§ 5 土石流調査の実際

以上の各節で従来行われていた土石流に関連した地形、堆積状況についての調査と、最近行われるようになった土石流の動態の直接観察法について一般的な説明をこころみた。しかし土石流発生の現場では、上述の調査を全面的に実施することは予算的にも、技術的にも困難な場合が多く、それぞれの現場で重点的な項目をえらんで調査を行ない。その成果を互いに検討して次第に総合的な調査法を確立しつつある段階と云えよう。

この時点でわれわれが最近建設省松本砂防工事事務所と協力して、焼岳東麓でこころみている土石流の現地計測の実情を未完成のままで紹介することも、それなりに意義があると云えよう。

焼岳東麓は山頂付近の火口から噴出した安山岩質の溶岩および角礫をふくむ泥灰の厚い堆積層でお

おわれており、図1に示す4つの沢から、毎年数回にわたって土石流の形で多量の土砂が大正池および梓川本流に流れこんでおり、わが国における土石流の頻発地帯の一つである。

またこれらの沢では毎年砂防工事が行われ、現地への器材の運搬、電源の利用、観測員の滞在が便利なることもこの流域を観測対象地としてえらんだ理由にあげられる。

われわれは昭和45年夏に最北域にある上々堀沢をえらんで予備的な観測を行なった。⁵⁾

このときは図1内のA地点を撮影対象域にえらんで、カメラ類(16ミリシネ、35ミリ定時間隔撮影カメラ、ビデオカメラ)を設置し、B地点に検出線を張っておいてこれが土石流によって切断されると自動的に撮影が行われるようにした。この装置でビデオカメラ(撮影継続時間が一番長い)によって土石流の流下状況は捕えたが、濃霧のために明瞭な映像は得られず、流下速度(5 m/s)が算定されるにとどまった。しかし別にさらに下流で二度にわたって観測員が土石流を直接観察する機会を得、また部分的に8ミリシネカメラでその動態を記録することが出来た。

昭和46年夏には、文部省の科研費の助成と松本砂防工事事務所の積極的協力を得て、基本的な計測システムをつくり、上堀沢で現地テストをすることが出来たので、主としてその内容と成果について説明する。

観測流域にえらんだ上堀沢は図1に示すように一号堰堤(Na.1と図中に記入)より上流では二つに分岐しているが、左支について観測を行なった。この沢は流路延長約2.5 km、流域面積約0.7 km²、平均勾配28/100で下流は扇状地の右端沿いに流路工に導かれ、大正池をさけて梓川本流に流れこんでいる。

つぎに主要な計測内容を§4の項目順に説明するが、装置の実際と観測された土石流の動態は、スライドと映画によって紹介する。

(i) 流動状況の観察、記録

図1のNa.1とNa.7の間の左岸沿いにカメラ類をそれぞれの目的に従って図2に示すように配置し、(ii)で述べる流速測定用回路の一部を利用して、土石流が発生したら自動的に撮影が始まるようにした。

とくに土石流の流下中の立体的な形状を記録するために、測器舎製の写真測量用カメラ2台をNa.1とNa.2の中間点付近左岸に設置し、その視野に土石流の先端が到着したら、同時にシャッターが自動的に切れるようにした。

このカメラはガラス乾板しか使用出来ず、短時間に連続的に撮影することは出来ないで、将来はフィルムを使用して連続撮影の可能なカメラの開発と利用を計画している。実際に昭和46年9月6日朝に土石流が発生したときは午前5時

すぎで暗かったために、撮影回路は順調に働いたが露光不足で映像は得られなかった。その後明るくなってから、つづいて数回発生した土石流については、ビデオカメラと手持ちカメラでその動態を撮影、記録することが出来た。

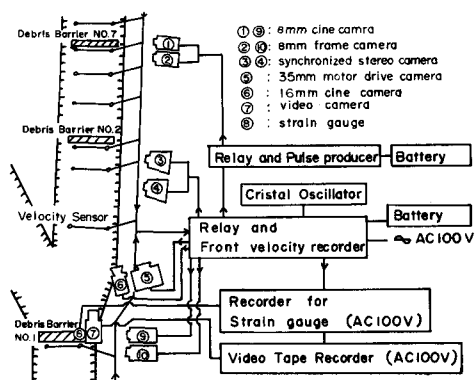


図-2 土石流計測システム器械配置概要

(ii) 流速の測定

土石流の発生が夜間であったり、濃霧をともなったりすると、映画記録から流速を求めることは困難であるから、相互距離のわかっている隣接検知線を土石流先端が通過する時間から平均的な front velocity を求める方法を採用した。

図1の ←————→ 印の範囲に多数の検知線（センサーと称する）を溪流横断方向に張っておき、その切断時刻を発振回路を利用した電磁カウンター（写真1参照）で記録するようにした。センサーは普通の降雨流出位では切れないように溪床面から50cm位の高さに張り、またこの流速測定回路の一部は(i)のカメラ類のシャッター作動にも利用した。

9月6日早朝の土石流発生時には、この回路は大体満足に作動し、発生時刻、センサー間の平均流速の測定に役立ったが、一部センサーは一度切断した後、切り口で線端が再接触して測定を不能にした場合が生じた。

(i)(ii)の回路のコード以外の発振部、記録部は全部No.1の近くの観測室に集めて管理しやすくした。

このセンサーを利用した方法およびビデオカメラの映像記録から求めた front velocity の値は図3にまとめて記入されている。

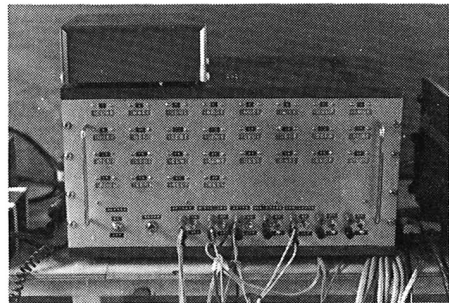


写真1 土石流流速測定用電磁カウンター

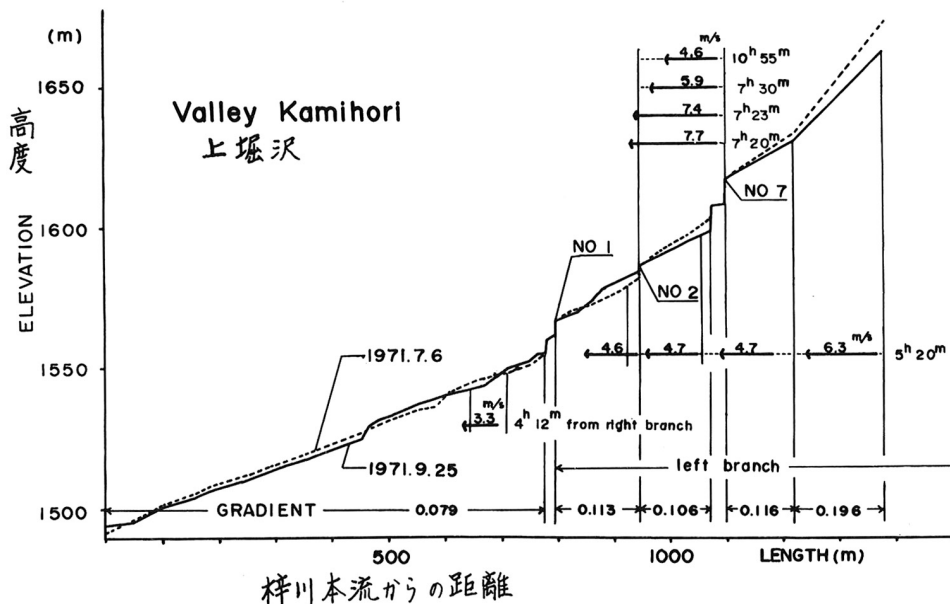


図-3 上堀沢の溪床縦断面と1971年9月6日に発生した土石流の front velocity の測定値

(i)(ii)の方法を通じての共通の欠陥は、いずれもセンサーの切断によって動作が始まるが、一度土石流が発生して通過した後は、つぎにセンサーを張り直す（張りかえに1日位かかる）までは全く動かすことが出来ないという点である。実際には9月6日のように数波の土石流が発生する可能性がある

から、この二回目以後のものは見逃すことになる。この欠陥をおぎなうようなセンサーの改良もいろいろ工夫されている。

なおmass velocity の測定は今回は予定しなかった。

(iii) 流動物質の採取

今回は図4に示す位置に1号堰堤に鉛直な穴をうがち、これに鉄製の採取筒（直径12cm、高さ15cm、上端開口）を入れておいて、この堰堤を土石流がのりこえて土砂がこの筒にトラップされたら、筒をとり出して中の採取物を別の容器に移しかえた。採取はうまく行われたが、それまでの豪雨で容器に水が入っていたから、流動物質の性質がそのまま保存されたかどうか疑わしい。

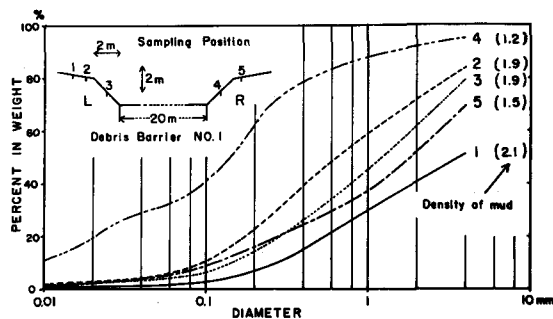


図-4 一号堰堤における採泥位置と土石流先端泥の密度、粒度分布

適当なキャップを筒にかぶせておいて雨水の流入を防ぎ、土石流通過時にそのキャップが流されて土砂が入るようにしておくべきである。

なお採取土砂の簡単な分析結果は図4中に記入されている。

土石流の先端通過後の濃い泥流は大体流れが一定して巨礫も掃流されないの、堰堤横の安全な足場のところでくみとることが出来た。

(iv) 礫の移動

No.2付近の巨礫（径1m以上位）100ヶにペンキを塗布して2種に色分けしておいて、土石流発生後の移動先を探したが、わずかに3ヶしか発見されなかった。

その発見場所からみて、ほとんどの礫は下流全域にばらまかれ、梓川本流まで到達したものもかなりあるであろう。

(v) 水位

水位の測定は1号および7号の副堰堤のそでにペンキで目盛りを描いておき、土石流発生時に対岸から8ミリシネカメラのコマどり撮影を行なうようにしたが、前述のように午前5時すぎの暗いときに発生したので記録は得られなかった。

(vi) 雨量

雨量計は図1内のX、Y、Z地点に設置し、またU地点の松本砂防焼岳出張所管理の雨量計の記録も利用した。

とくにX地点には一分間雨量の測れる雨量強度計も設置した。

9月5日9時から9月6日9時までのU, X, Y, (Zは故障)における総雨量はそれぞれ282, 301, 341ミリで高度とともに増加する傾向がみられた。

とくに土石流の発生の予知の手がかりとするために、降雨の時間的変化と土石流の発生時刻をくらべてみると、図5に示すように10分間雨量のピーク(8~9ミリ/10分)と土石流の発生に強い関連のあることが認められた。

(1時間雨量との対応はあまりよくなかった)

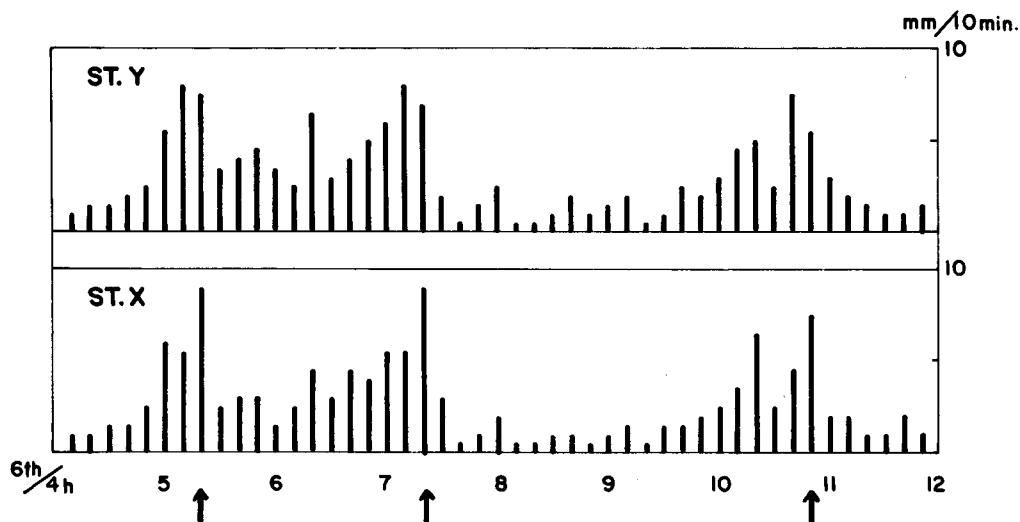


図-5 雨量計X, Y(位置は図-1参照)における10分間平均雨量と土石流発生時刻(←印)の関係
(1971年9月6日焼岳東麓上堀沢)

(vi) 衝撃圧

1号堰堤の左所で上流面に松本砂防工事事務所備品の歪計をうめこみ、自動記録がとれるようにした。

9月6日の第1回の土石流の発生で衝撃の記録はとれたが、そのまま土砂にうづまってつづいて記録することは出来なかった。衝撃力の絶対値は歪計の Calibration が終わっていないのでまだ求められていない。

(vii) 土石流による洗掘と堆積

この調査はとくに土石流の動態そのものの研究ではないが、数回の土石流が観察された9月6日の前後に溪流の地形測量が行われており、とくに発生直後の堆積状況も観察したので簡単にふれておく。

縦断測量の結果は図3に示すように上流では大きな洗掘がおこり、下流では広い範囲に堆積が生じているが、その中間域では洗掘と堆積が交互に生じているところが見られる。とくに本流から500mのところに出現した溪床断面の不連続変化点では、集中的に巨礫(直径2m以上)が停止して堰とめたような状態になっており、ここで流動形態が急変ったことが想像される。

以上述べて来たように、われわれの計測システムも、前の方に述べた理想的なものから、程遠い状態であるが、一応部分的には成果が認められた面もあるので、あえて紹介した次第である。

なお松本砂防工事事務所では焼岳での試験的計測の経験⁶⁾にもとづいて、さらに大規模で全自動化を
目ざした土石流計測システムを浦川上流に設置しており、今後の記録成果が期待される。

最後にあたって、土石流の実態をさらに総合的に把握し、有効な防止対策を立てるために、各地で
の調査、研究が、地質、地形、気象、水文、水理、砂防などの諸分野の研究者の協力によって強力に
推進されることを期待する。

以 上

6) 松本砂防工事事務所：浦川土石流調査，新砂防，8 2，PP. 24~29，（昭 47.1）