

土石流の特性と土石流災害の対策

奥 田 節 夫*

Some characteristics of debris flow and countermeasures to the debris flow hazard

Setsuo OKUDA

ま え が き

最近の豪雨によってもたらされた被害を原因別に区分すると、水そのものの氾濫によるものと、土石が流出してその破壊作用が加わるものとで被害の様相が著しく異なっている。まず人命損失についてみると、ここ10年間くらいの統計(建設省河川局砂防部資料)によると、豪雨災害全体の死者は年平均約230名くらいで、そのうち土砂災害によるものは55%をしめている。とくに最近の長崎豪雨(1982年)、山陰豪雨(1983年)の例では、死者の80~90%近くが土石埋積によるものである。

一方財貨損失については、同じく最近10年間の調査では年平均1,400億円程度(昭和50年の価格に換算)のうち土砂災害によるものは5%程度にすぎない。すなわち土石流出による被害は、豪雨災害全体のなかで、人命損失をもたらす割合は高く、財貨損失をもたらす割合は低いと言えよう。このような差異をもたらす理由はいろいろ考えられるが、直観的には土砂災害は山麓地帯に多く発生し、そこでは財貨の集中度は都会にくらべて低いが、土石の流動開始点から到達点までの距離が短かく、不意打ち的に襲われる場合が多いためと思われる。これは河川の下流で水位上昇から破堤までに時間的ゆとりのある洪水氾濫と全く異なる被災過程と言えよう。

このように直接に人命損失をもたらしやすい土砂災害について、その原因である土石の移動形態に着目すると、いわゆる山くずれ、崖くずれと称せられる「斜面崩壊」と、主として谷に溜っていた土石が急激に押し出してくる「土石流」とに区別される。実際の豪雨時には、この両者がほとんど同時に発生し、また両

者の混合型、中間型の土石の移動形態が出現することもしばしばある。

被災形態からみると「斜面崩壊」は崩壊発生箇所から数十ないし百メートル程度下流の範囲にわたって直接的被害が限定されることが多いが、「土石流」では谷のなかの発生点から数百メートルないし数キロメートル下流まで谷川沿いに土石が押し出して広範囲に被害を及ぼすことが多い。

いずれにしても「斜面崩壊」と「土石流」は豪雨災害のなかで直接人命を損なう二大元凶であるが、本稿ではとくに筆者の研究対象に近い「土石流」をとりあげて、その発生、流動、停止の諸過程の物理的特性を説明し、ついで土石流の被害を軽減、防止するための科学的対策のあり方について述べる。

土石流現象の特徴

1. 土石流の発生

土石流が、いつ、どこで、どのような形態(規模と流動状況)で発生するかを予測することは、災害科学の基本的課題であり、国内、国外で多くの研究が進められている(片岡 順, 1978)。

土石流の発生は、谷底への土石の蓄積、谷の形状とくに縦断方向の傾斜、および十分な水の供給によることは明らかであるが、これらの要因を定量的に表現し、発生臨界条件を数式化することは容易でない。上述の文献においても、高橋保は単純な無限長直線状斜面をモデルにして、崩壊の発生、流動の継続の臨界条件を導き、さらに水理実験によってその適合性を確かめている。しかし現場での適用については、単純化されたモデル条件と現場の複雑な自然条件との差異、数値的に求めるべき物性定数(C, ϕ 等)の具体的見積り、降雨と谷底での流量量との水文学的対応の複雑さなどの理由で、原理的な臨界条件式を用いて、直接的に実際

* 京都大学防災研究所

の溪流における土石流発生を予測することはできない。

豪雨時の土石流の発生については、谷底の堆積土石に十分な水が供給されて、その場での不安定度が増大して発生する場合のほかに、谷頭あるいは谷壁での斜面崩壊がきっかけとなって発生する場合、また谷壁の小崩壊の滑落土石によって谷の流れが一時的にせき止められ、水位上昇によってその天然堰が決壊して土石流が発生する場合のように、やや二次的な発生条件もあり、局所的な安定度解析のみで土石流の発生を予測することはきわめて困難である。

なお土石流発生の基本条件の一つである谷底の土石の蓄積は、谷への土石の供給と谷からの土石の流出とのバランスで決められるものであり、その収支の算定には、地質、地形、水文、植生などの諸因子に関連した綿密な観測が必要である（諏訪 浩ほか、1983）。

実際に現地で土石流発生条件を確認するための現地計測も諸所で行われており、その成果の一例を図一に示す。この図から、10分間平均雨量のピークが土石流の発生に直接に関連していることが明らかになっている。

ただし、特別に大きな土石流が発生して谷底の土石が大量に流出したあとでは、同じ程度の強雨が降っても土石流は発生せず、谷底の土石の堆積状況の変化が定量的に記述されない限り、水文学的入力からのみで発生を定量的に予測することができないことも明らかになっている。

2. 土石流の流動

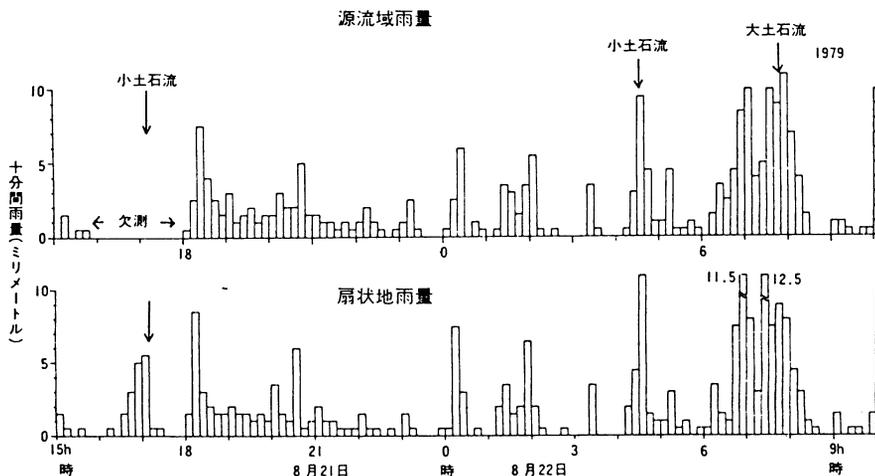
谷中で発生した土石流が谷に沿って流下し、さらに

谷口を出て減速、停止する過程については、水理学、地形学、砂防学などの関連学問分野による研究が進められている。

土石流に限らず、一般に崩壊によって生じた土石の集合態が、高濃度の土石をふくんで、秒速数メートルから数十メートルの大きな速度で、数百メートルから数キロメートルにわたる長い距離を流動し得る理由については、学問的に高い関心が寄せられてきた。そしてある時期には大きな土石塊の下に空気がとじこめられてこれがクッションの作用をするとか、土石塊底面での摩擦熱によって水が水蒸気となり、これが塊を支えるなどの憶測がなされたこともあったが、人工衛星によって月面での大崩壊の痕跡が調べられ、真空中でも地球上に似た長距離の流動が起り得ることが分つてから、そのような解釈は不適當であると思われるようになった。

その結果、最近では Bagnold, R.A (1956) によって提唱された、「ある濃度以上の粒子群の流れでは、内部応力は粒子間の流体の粘性によらないで、粒子群相互の弾性衝突によって決まり、応力の値はある条件の範囲で小さくなる」という「粒子流 (grain flow)」の考え方で説明されるようになった。Takahashi, T. (1980) はさらに水理実験によって模擬土石流の流速分布を調べ、粒子流の考え方が土石流の流動に適用されることを示し、流動物の構成と流速の関係を定量的に求めた。

一方、実際の土石流の動態を観察、記録する手法が、奥田ほか (1977) によって開発されてきたが、その手



図一 焼岳東斜面上々堀沢における十分間雨量と土石流発生(矢印のとき)の関係、(1979年8月21日～22日 観測)

法を用いて最近各地の砂防関係の技術者によって土石流の現地観測が実施されるようになった。そして多くの土石流の動的記録が得られ、理論、実験との比較、検討が可能になり、またその映像のテレビ放映等によって広く国民の間に土石流の恐ろしさに対する認識が高まってきている。

なお筆者らのグループが焼岳東斜面で実施している土石流の現地計測では、単に映像記録のみにかぎらず、センサー群による土石流流速の谷沿いでの場所的变化の測定や、特殊な流速計による特定地点での土石流流速の時間的变化の測定が行われている。これらのほか、土石流の流動にともなう地盤の振動や土石流がダムに衝突するときの衝撃力の計測、さらには流動物の採取による組成の分析など、土石流の組成と運動の関係、土石流が流路や周辺に及ぼす力学的影響など、さまざまな物理的特性を調べる努力がつけられている。

写真-1は焼岳上々堀沢における土石流の動態の一例を示すものであるが、これによって土石流の先端には大きな岩塊群が集中し、その上面は水平にならないで横断方向に大きく傾いているなどの土石流の特徴的な動態が理解される。

このような土石流が下流の居住域を襲うと、まず先頭の岩塊群の衝突によって建造物を破壊し、その後につづく土砂流、泥流で破壊物を埋めつくす被災のパターンも容易に想像されよう。

3. 土石流の停止

土石流が谷から流れ出て扇状地で拡がりながら減速、停止する過程については、とくに土石流の危険域予測の観点から、いろいろな手法による研究が進められてきた(芦田和男, 1982)。

土石流が谷口から出て谷壁による側方の拘束がなくなると、流動幅が側方に拡がってその底面積は増大し、鉛直方向への水の浸透および後続水流の側方離脱によって、土石塊中の水分が減少して流動性が弱まる。さらに流路の勾配が減るので、急テンポに減速が行われ、流路沿いに側方堆積物を残しながら流下しついに停止して集合的な土石流堆(debris flow lobe)が形成される。

われわれが焼岳上々堀沢で観測した結果によると、土石流堆の形状は、先頭に大きな岩塊群が集まって盛り上がった形のままで停止した「盛り上がり型」と、石礫が砂泥中に分散した比較的平たい「平坦型」とに分類されるが、その差異をもたらす原因はいまのところ

ろ余りはっきり分っていない。(諏訪 浩・奥田節夫 1982)

扇状地の発達については、その言葉から扇頂に達した土石がその都度広く放射状に拡がって堆積し、その結果同心円状の等高線をもった地形が出現するように想像される。しかし、われわれの10数年間にわたる観測経験では、個々の土石流は特定方向の狭い堆積領域におさまるが、長い間に多くの土石流堆がat randomにあらゆる方向に等確率的に分散、停止する結果として平均的には同心円状の等高線をもった扇状地が形成されてゆくことが確認された。この結果は水理実験において、谷口からいきなり幅方向に拡がりながら堆積が始まるパターンと明らかに異なっており、両者の差異をもたらす原因の追究が必要である。

なお扇状地に最近出現した土石流堆についてピットを掘って断面を調べてみると、先頭部ほど、また上層ほど大きな岩塊の割合が大きく、いわゆる逆級化(inverse grading)と表層高流速の流速分布との組合せの効果が認められる。

4. 土石流の到達距離(山陰豪雨の実例)

「土石流」あるいは「斜面崩壊」によって生じた集合的な土石塊がどこまで流出、到達するかの予測は、危険域の定量的予測にかかすことのできない課題である。到達距離(runout distance)の予測についても、水理学的方法、確率論的方法などが考えられているが究極的には実測のデータでその適用性を判断することになる。

具体的に崩壊土石の到達距離を表現するには、山麓からの直線的距離をそのまま表示するものと、崩壊源の上端と土石堆積域の下端とを結ぶ見通し線の俯角のtangentをとる無次元表現とがあり、後者の値は土石塊を質点力学的にとり扱ったときの運動経路に沿っての動摩擦係数の平均値に当るので等価摩擦係数と称することがある。

1983年7月の山陰豪雨によって三隅町内に発生した「土石流」と「斜面崩壊」について、空中写真を利用して山麓からの到達距離および等価摩擦係数を求めると(奥田節夫・沖村 孝, 1984)図-2のような結果が得られる。

これらの値は国内の平均的な値^{*}にくらべると長さはやや短かく、等価摩擦係数はやや高い範囲に属するが、

* わが国の多くの土石流に対する等価摩擦係数は到達距離2km以下で0.1~0.4、2km以上で0.1~0.2程度である。

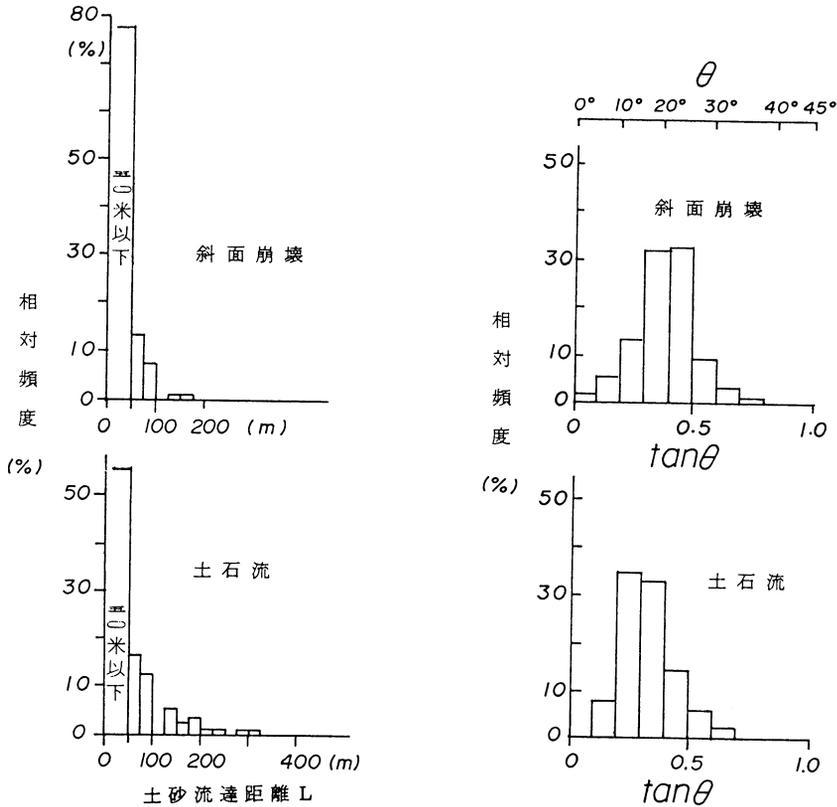


図-2 1983年7月山陰豪雨によって島根県三隅町で発生した「斜面崩壊」および「土石流」の土石流出状況。

Lは山麓からの土砂(砂礫をふくむ)の流達距離(水平投影距離)。

θ は崩壊上端から堆積下端までの見通し俯角($\tan \theta$ は等価摩擦係数である)。

これは三隅町内では狭い谷底の平坦地に流出した土石塊が対岸の山麓に到達して停止した例の多いことによるものであろう。

土石流対策の基本的な考え方

1. 土石流災害防止の諸方策

一般に自然災害は異常な規模の自然現象が人間活動に被害を及ぼすことによって生じるものであり、土石流災害についても、大量の土石が流出して来る場と人間活動の場が山麓でぶつかるために生じるものである。したがって防災の基本原理はこの二つの場を隔離することであり、そのためには土石の運動を制限するか、人間が安全な場へ逃げ出すしかない。

前者は土石流現象そのものの制御を目指す土木工学的なハードな方策であり、後者は人間の避難、産業活動の制限を目指す行動科学、環境科学的なソフトな方

策である。前者すなわち土木工学的な手法としては、土石流の発生自体を抑制するために、山腹に木を植えたり、擁壁を造ったりする、いわゆる「山腹工事」と、発生した土石流の谷間での運動を抑制するために、溪流沿いに砂防ダムをつくったり、導流堤で被害のないところに土石塊を誘導したり、あるいは水と土石の分離を計って流動性を弱めたりするいわゆる「溪流工事」とに分れる。

しかし、より広い流域からみると、山麓で土石の流出をあまり抑止しすぎると、下流への土石の供給量がへり、下流での河床低下、ひいては海岸の侵食を促進するおそれがある。そこで最近では異常な豪雨時に流出して下流に被害をもたらすおそれのある大きな岩塊群のみを阻止し、平常時や中小の洪水時に流れる細粒の土石はそのまま通過させるような、一定の隙間をもった構造物の開発が進められている。

このような土木工学的対策は単独あるいは組合わせて有効に土石流を抑制するように、主として現場経験的な立場からの工夫と改良の努力がつつげられて大いに成果を上げてきている。しかし、全国で数万あるいは数十万に達すると思われる土石流発生の危険のある谷のすべてについて、短期間に理想的な対策工事を行うことは、技術的にも経済的にも到底不可能である。現在すでに土石流発生のおそれのある多くの谷の下流に数百万人の人が住み、また最近交通網が、山間、山麓へ進出、接近しつつある現状をみると、当面、人命の損失防止を最重点の目標とすれば、危険時に危険域から人間が避難することの重要性、現実性が理解されるであろう。

2. 避難対策のあり方

前節で述べたように、人間のほうが土石流危険域から逃げ出す方策すなわち避難行動を効果的に実現してゆくためには、まず学校教育あるいは社会教育を通じて土砂災害の恐ろしさと避難行動の必要性および有効性に対する認識を高めてゆく必要がある。しかし、各地域で住民がすすんで避難行動をおこすには、単なる精神訓話的なよびかけでなく、なるべく具体的に「いつ」、「どこへ」避難すればよいかの情報が地域住民に十分に伝わっていなければならない。そしてその情報の根拠は現在の科学、技術の水準に裏づけされたものでなければならない。そこで概論的ではあるが現段階での危険予測の一般的な手法を簡単に紹介する。

まず「いつ」の問題については、すでに前章1で述べたように、土石流の発生機構に関する学理的研究は近年大いに進展したが、個々の谷への適用には困難な面が多い。そこである地方を平均的な対象として、降雨と土石流発生を経験的に関係づけて危険時期を予測する方法がもっとも広く適用されている。まず全国的な基準で大雨によって重大な災害がおこるおそれのあるときの「大雨警報」の基準は、24時間雨量では西日本150~200 mm、東日本100~150 mm、また1時間雨量では各地とも40~50 mm程度である(島根県は24時間雨量150 mm、1時間雨量40 mm、国土庁編、昭和58年版防災白書による)。しかし同じ県内でも当然地形や地質によって崩壊発生の条件が異なるから、そのためにはより細かい地域別の調査とそのデータにもとづく地域的な基準が必要となる。最近の学術的研究例(道上正規、小橋澄治、1982)では、過去の雨量に一定の重み(過去の雨ほど重みは小さくなる)をかけて積算してゆく有効雨量、あるいは縦方向に何段か重ねたモデ

ルタンク群の特定タンクの水位等に着目して、その値がある臨界値をこえると崩壊災害が発生し始めるような数値的危険時期判別手法がこころみられている。その結果によると、過去に多くの「斜面崩壊」「土石流」の発生事例があり、当時の雨量、災害発生時刻の記録が豊富にある地域では、必要な数値パラメータが適切に決定され、高い確率で発生時期の予測ができることが示されている。降雨にもとづく崩壊災害発生の臨界条件が数値的に設定された地域では、雨量を測りながら自動的に計算を進めてその臨界条件に達すると警報(サイレンなど)を出すような自動警報システムの開発も建設省によってこころみられている。

しかし過去の記録例の乏しい地域では、自然条件の似ている先例のある地域に準じるか、またはもっと広域的な(県単位くらい)基準で避難計画をたてる他はなく、その場合にはさらに安全度のゆとりをみる必要がある、その結果として無駄な避難の回数のふえることは止むを得ないであろう。

つぎに「どこ」が安全かの問題であるが、これについても前章3および4節で述べたように、学理的に解明された停止、堆積の機構がそのまま危険域の予測に役立つわけではない。現在は、水理実験結果にもとづく水理学的手法、Random Walk Modelによる確率論的手法、堆積構造等の過去の痕跡にもとづく地形学的手法など(芦田和男、1982)、それぞれの手法の得失を比較しながら、実際の土石流危険域の予測にとりくんでいる段階と言えよう。ただ経験的には谷沿い方向には数百メートル、数キロメートルにわたって土石が流出することは珍しくないが、谷筋の延長から直角方向(横断方向)には、幅百メートル以上に拡がることは減多におこらないことが知られている。

行政的には、地形的特性と谷の堆積状態とから総合的な判定基準にもとづいて、危険溪流を判別し、ある地域ではこれを公示することも行われているが、現在のところ危険溪流の指定までは行われていても、危険域の具体的な公示までは行われていない。

この点、一応の量的基準のある降水からの危険時期予測にくらべて遅れているように思われるが、現象の本質からみて難しい問題があり、当面は前章で示したような各地域での土石流出範囲の記録を収集、整理して経験的に安全域を見出すことが、現実的な対応策であろう。

実際の避難行動に関しては、警報の発令、その伝達、および住民の受けとり方についてさまざまな問題が

ある。

とくに早期避難については無駄が重なりといわれる「狼少年」のたとえ話にあるような心理的な抵抗が大きいことは否めないであろう。しかし冷静に現実の学術、行政の水準を見つめるとき、早期避難以外に有効な人命損失防止の方法は当面考えられないであろう。

土石流による災害を総合的に防止するためには、科学・技術の進歩による災害発生予測の精度向上、技術的対策の効果増進、行政的指導による避難および土地利用の地域計画の樹立、ならびに地域住民の現状認識にもとづいた自主的防災意識の高揚を、学・官・民の協力によって推進してゆくことが最も必要でありかつ有効であろう。

引 用 文 献

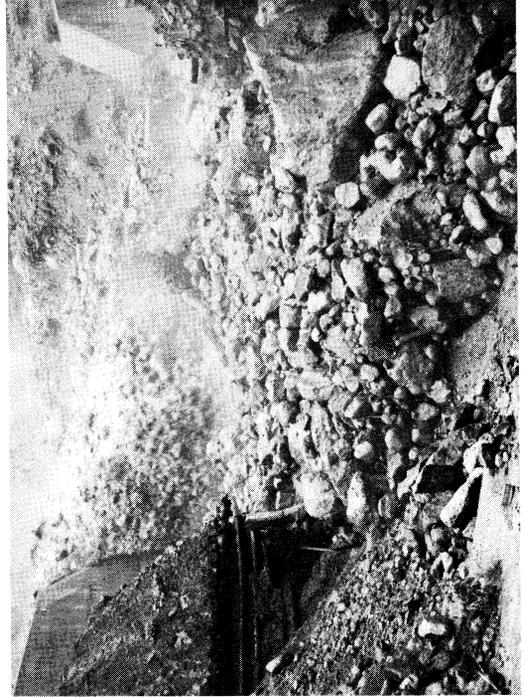
- 芦田和男（研究代表者）（1982）：扇状地における洪水・土砂災害の発生とその防止軽減に関する研究。文部省科学研究費，自然災害特別研究成果，No.A-57-4。
- Bagnold, R. A., (1956) : The flow of cohesionless grains in fluids. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, 249 (1964), pp. 235-297.
- 片岡 順（研究代表者）（1978）：土石流の発生機構に関する研究。文部省科学研究費，自然災害特別研究成果，No. A-53-3。
- 道上正規・小橋澄治（1982）：土石流及び斜面崩壊の予知に関する研究。文部省科学研究費，自然災害特別研究成果，No. A-56-5「集中豪雨の予知と対策」（代表者 高棹琢馬），pp. 55-74。
- 奥田節夫・沖村 孝（1984）：三隅町における崩壊土砂の流走・堆積特性。文部省科学研究費報告「昭和58年7月山陰豪雨災害の調査研究」（代表者 角屋陸），pp. 33-37。
- 奥田節夫ほか（1977）：土石流の総合的観測（その3）。京大防災研年報，No.20, B-1, pp. 237-264。
- 諏訪 浩・奥田節夫（1982）：焼岳上々堀沢扇状地における土石流の堆積構造。京大防災研年報，No.25, B-1, pp. 307-321。
- 諏訪 浩ほか（1983）：焼岳上々堀沢の谷壁と溪床における地形変化過程。京大防災研年報，No.26, B-1, pp. 413-434。
- Takahashi, T., (1980) : Debris flow on prismatic open channel. Jour. Hydraulics Div. ASCE, 106, pp. 381-396.

写 真 説 明

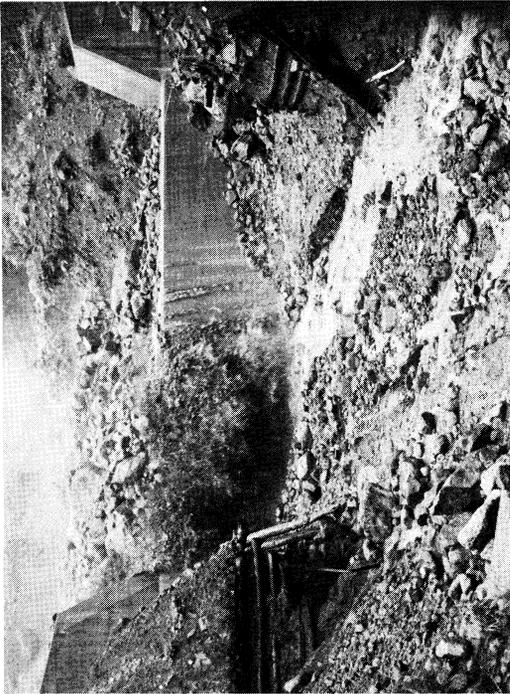
- 写真-1** 1976年8月3日焼岳東斜面上々堀沢を流下する土石流の先頭部。
自動撮影装置で撮られた一連の写真のなかから2秒おきに選んだもの。
二番目の写真の中央に見られる大岩塊の直径は約3m。



3



4



1



2