

## 土石流を観る，測る

諏訪 浩（防災研究所）

### はじめに

防災研究所を退職するというので、話をさせていただいた。この40年、山崩れや土石流など、土砂災害をもたらす現象の研究に従事してきた。とくに土石流の現地観測に深くのめり込むことになったので、このような題目でお話しをさせていただいた。以下の一文は、当日の話に加筆したものである。

### 飛騨川バス事故

1968年8月、飛騨川バス事故があった。18日夕刻、名古屋を出て乗鞍へ向け、国道41号を北上していたバス20台の車列が、豪雨の中、崖崩れで立ち往生した。そこに土石流が発生して、2台のバスが巻き込まれて飛騨川に転落し、乗客乗員104名の方が亡くなった。私は3回生。クラブ（合唱団）が夏合宿を8月下旬に高山で予定していて、その責任者だった。高山線が使えなくなった、と国鉄から連絡を受けた。それで、団体旅行予約を、富山まわりに変更することにした。国道41号は間もなく開通したので、国鉄がダメならバスでと思い、予約をとろうとしたが、バス会社はどこも事故発生箇所を通るような運行を引き受けてくれなかったからである。

この事故を報じる数日前の新聞紙面を開いた。土石流による災害に目を向けた最初であった。しかし、後期の授業が始まる頃には、事故のことは脳裏からすっかり消えていた。翌年4回生の夏、防災研で土石流の研究を本格的に進めようとしている研究室があるのを知った。前年の飛騨川バス事故のことを思い出した。土石流の勉強をしてみたいと思った。大学院へ進み、その願いが実現することになった。地形土壌災害研究部門（写真1）を率いておられた奥田節夫先生がリーダーとなって始められた焼岳土石流観測である。1967年8月羽越豪雨災害、68年8月飛騨地方豪雨災害、69年8月北陸豪雨災害、と土石流による災害がたて続いていた。しかし、土石流について、発生、流動、氾濫などの特性がほとんど解っていなかった。観測が必要であった。



写真1 地形土壌災害部門建物の前で。1969年ごろ

### 焼岳土石流観測

焼岳は溶岩円頂丘でできた火山である。明治大正年間には比較的頻繁に噴火を繰り返している。大正4年の噴火で流出した土砂は梓川を堰き止めて湖を出現させた。大正池であ

る。最近の噴火は、1962年の水蒸気爆発だ。その噴火を契機に、上々堀沢（国土地理院発行地形図には峠沢と表記）では、まとまった雨があると、土石流が頻発するようになった。噴火から既に8年を経ていた当時も、土石流が繰り返していた。それで、この沢で観測を始めることになった（図1）。観測は建設省の工事事務所との共同であった。私は修士の1回生。現場監督は横山康二さんだった。横山さんのユニークなアイデア発案と、それを実現する力のすごさに圧倒された。横山さんの存在なしには、この観測は成り立たなかった。私はそのような教育環境の中で、土石流の勉強を始めることになった。地形土壌の先輩や後輩、さらには他学部、他大学の学生、院生の参加を得て、焼岳での観測研究は進展し、陸水学的、地形学的、あるいは砂防学的に貴重な成果をもたらすことになった。奥田教授が1988年に退官されて以降、焼岳に加えて、雲仙普賢岳の水無川（1991-1999）、中国雲南省の蔣家溝（1991-1998）、中国西藏自治区の古郷溝（1992-1993）、インドネシアのジャワ島ムラピ火山（1991-1994）、スメル火山（2000-2006）、カラコルム山中のフーシェ谷（2000）などで土石流を観測することができた。



図1 焼岳上々堀沢の観測斜面と作業の様子

場所が異なると土石流の起こり方も顔つきも違う、というところもあったが、普遍的な特性もみとめられた。また、同一の谷でありながら、特性が著しく異なる土石流が起こることもあった。多様性の中に普遍性を見出すことも大事である。土石流の制御や減災を意図するとき、土石流の多様性と普遍性を認識できているか否かは、対応を大きく左右する。そのような多様性と普遍性の一端を、以下お話しする。

### 土石流の発生

土石流は降雨あるいは融雪、融氷、地震、火山噴火などで起こるが、降雨で起こる事例が圧倒的に多い。観測の対象となるのは、降雨で起こる土石流であって、それ以外は、観測でとらえるのはかなり難しい。焼岳でも、降雨で起こる土石流が対象である。焼岳のように、山腹斜面が火砕流など火山砕屑物でできている場合には、斜面の浸透能が大きいので、中小の雨では斜面に水流が現れることは希である。しかし、強雨があると表面流が現

れ、溪床の不安定な土砂が巻き込まれて流れだす。土砂と水が混ざり合っ、土砂濃度が大きな流れとなる。焼岳での土石流の起こりかたである。従って、土石流は短時間の強雨に即応して起こる（図2）。

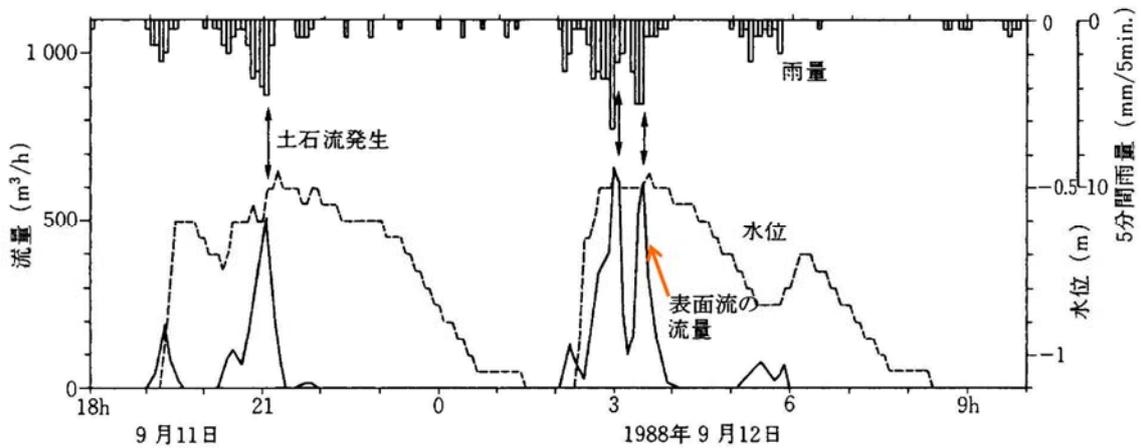


図2 強雨，地下水位，表面流の経過と，土石流の発生（矢印で示す）

一方これとはかなり異なることもある。例えば、2006年7月19日早朝、長野県岡谷市とその周辺で、土石流が多発し、災害になった。それから間もなくのこと、川崎一朗さんと何かで一緒したとき、氏から次のように尋ねられた。岡谷で大雨があったとき、立山でも同じように大雨になったのに、土石流は起きていないようだ。どうしてだろう、というものである。実は焼岳が位置する長野岐阜県境付近でも、その時、岡谷とほとんど同じ大雨に見舞われていた。しかし、焼岳では土石流は起きなかった。ところが、上々堀沢の北へ1kmしか離れずに隣接する玄文沢では、土石流が発生し、谷出口の沖積錐に立地するヘリポートや上高地の下水処理施設が被災した。何故このようなことが起きたのか（図3）。



図3 玄文沢の土石流

玄文沢流域では、斜面が主として花崗閃緑岩の風化土層で出来ていて、斜面の浸透能は大きくない。しかし、大雨が長時間にわたって繰り返したため、相当量の雨水が地中へしみ込み、土層中の間隙水圧を上昇させて斜面崩壊を引き起こした。いっぽう岡谷周辺の山地は、凝灰角礫岩の風化土層がローム層で覆われる構造であるため、斜面の浸透能は、玄文沢と同様、大きくない。しかし、大量の雨水が地中へしみ込み、玄文沢と類似のプロセスで崩壊が起きたと推定される。降雨は長時間にわたったが、降雨強度は大きくなかったため、焼岳や立山では、土石流の発生源となりうる斜面に特段の表面流は現れなかった。それで、土石流が起こることはなかった、と推定される。すなわち、箇々の流域の地質や土質、地形、森林植生などが関与するため、短時間の降雨強度と、長時間にわたる降雨履歴の組み合わせが、崩壊や土石流の発生を規制している。

ちなみに、玄文沢での土石流は、1979年8月22日豪雨以来のことであった(図3右下の写真)。その時の豪雨で、岐阜県上宝村枔尾が土石流に見舞われ、集落が被災し、県道を通行中の乗用車が巻き込まれて3名の方が亡くなっている。

### 土石流の流動

土石流の流動特性は、さまざまな機器を用いて、流れの形態、材料特性、運動、ハイドログラフを測ることで徐々に明らかになってきた。ここで、実際の流れをビデオで見ていただいた。はじめは上々堀沢の土石流、つぎは、インドネシア・ジャワ島のスメル山の斜面を流れ下る土石流、三つ目は中国雲南省の蒋家溝で繰り返す土石流である。いずれも谷の出口付近の観測点を通過するところなので、土石流はそれぞれ典型的な流動形態を見せている。すなわち、流れ先頭部への質量集中が著しくて、段波の形態を呈している。

蒋家溝のものは巨礫が目立たないが、ほかの2例では巨礫が多量に含まれていて、先頭部へ集積しているのが特徴的である。このように巨礫が集積した段波先頭部は巨礫ダムと呼ばれる。巨礫の集積で形成されるダムを先頭に押し立てながら駆け下って来る、というイメージである。先頭部では、石礫相互の衝突が流動の特性を強く支配しているが、続く背面から尾部にかけては巨礫の濃度と粒径が減少し、より細粒の岩屑と水の混合物、すなわち泥の乱流特性が流れの特性を決めている。これに対し、蒋家溝の土石流では、先端のごく限られた部分には強い乱れが認められるものの、背面から尾部にかけては層流が支配的である。レイノルズ数は小さく、このタイプは粘性土石流と称している。土石流ハイドログラフの一例を図4に示す。この図の元データを用いると、土石流の縦断形と構造、巨礫の分布の様子を図5のように描くことが出来る。流れ先端の一例を写真2に示す。

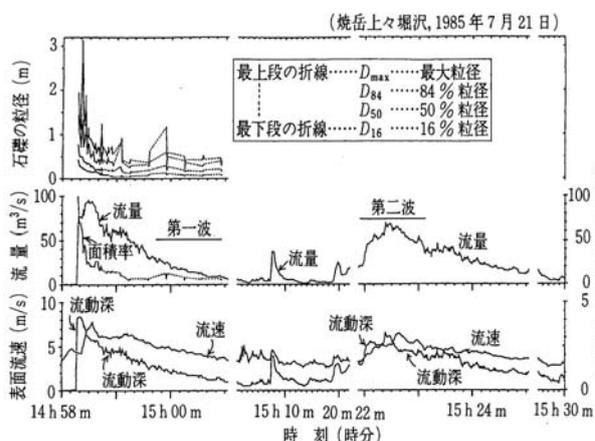


図4 土石流のハイドログラフ

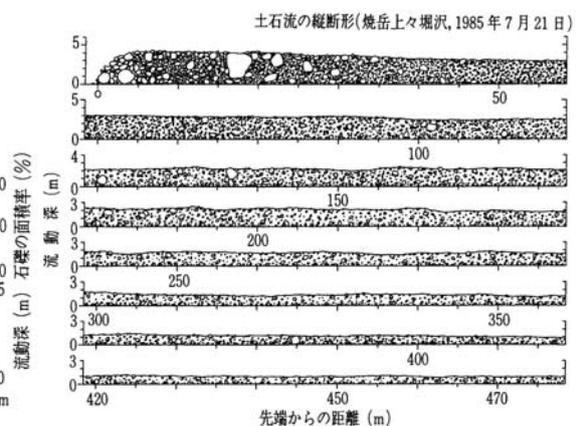


図5 第一波土石流の縦断面

もしも、観測現場に実際に居合わすと、次のような状況を経験することになる。まず、ジェット戦闘機が超低空で飛来するときに耳にするような轟音が徐々に近づく。流れがそばを通過するときは地響きがする。はじめてだと、恐怖を覚えるほどである。轟音や地響きで土石流の接近を察知して逃げて命拾いした、という事例もあるが、多くの場合、豪雨の激しい雨音に掻き消され勝ちで、接近を察知するのは容易でない。

土石流による地盤振動は、弾性波探査のピックアップ、あるいは地震計を用いて計測することができる。図6は、土石流の流量が大きいほど、振動加速度振幅は大きくなること、また、土石流の体積が大きいほど、加速度振幅の時間積分が大きくなることを示している。したがって、地盤振動を測ることによって、土石流の流量や体積を推定できる。これら2つの関係のうち、前者は運動量と力積の関係で、後者は流れの損失エネルギーと地盤中へ放射される弾性波エネルギーの関係で理解することができる。流れの位置エネルギー損失の大半が境界摩擦と内部摩擦で熱に換わるが、一部は轟音となって大気中へ、また弾性波となって地盤中へ放射されている。弾性波へのエネルギー変換効率を調べると、 $10^{-3}$ のオーダーである。地震の場合には、解放される岩盤の歪みから弾性波へのエネルギー変換効率は $10^{-1}$ ないし $10^{-2}$ オーダーだそうだ。それと比べると、かなり小さい。土石流が地表を流れ下る現象であることを考えると、これはリーズナブルだ。

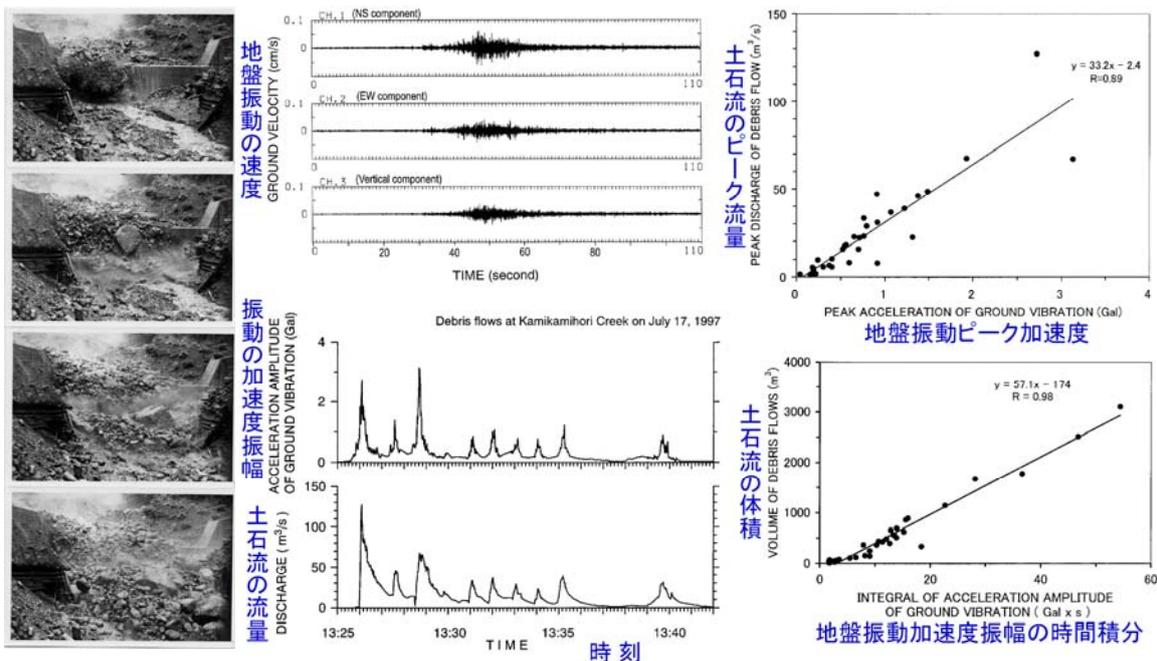


写真2

上々堀沢を流れ下る土石流

図6 土石流に伴う地盤振動とハイドログラフの関係

### 土石流の氾濫堆積

土石流は谷筋に沿って流れ下り、谷の出口付近に氾濫堆積する。この繰り返りで沖積錐すなわち土石流扇状地ができる。したがって沖積錐は土石流の墓場である。そこに道路や鉄道、集落が立地していると、土石流が起これば被災を免れることは難しい。人的被害だけは出さないようにしたいものである。図7に上々堀沢扇状地の様子を示す。右側は1978年から1997年までの間に氾濫堆積した土石流の分布である。左下の写真は、真新しい土石流堆積の一例である。堆積形状は、右側分布図の凡例のうち、盛り上がり型土石流堆の特徴を呈している (swollen lobes と記す)。流動時の巨礫ダムがそのままフリーズしたように

見える。

一般に、谷出口より下流まで溝状の地形、すなわち扇頂溝が発達している場合には、土石流はその中を流下し、扇頂溝の下流端付近で氾濫堆積する。側方の拘束条件が無くなるためである。氾濫堆積が繰り返すことで、扇頂溝の下流端の位置は、扇頂すなわち谷出口に向け、遡上してゆく。遡上が扇頂付近に達すると、土石流は行き場を失い、それまでとは異なる向きに流れようとする。すなわち、それまでとは異なる方向に、扇頂溝が新たに形成される。一波の土石流が氾濫堆積する領域は、扇頂溝の末端付近のごく一部分である。しかし、長期的に見れば、土石流がこのように何度も繰り返すことによって、土砂堆積は全域に行き渡ることになり、扇状の沖積錐が形成・維持されている。

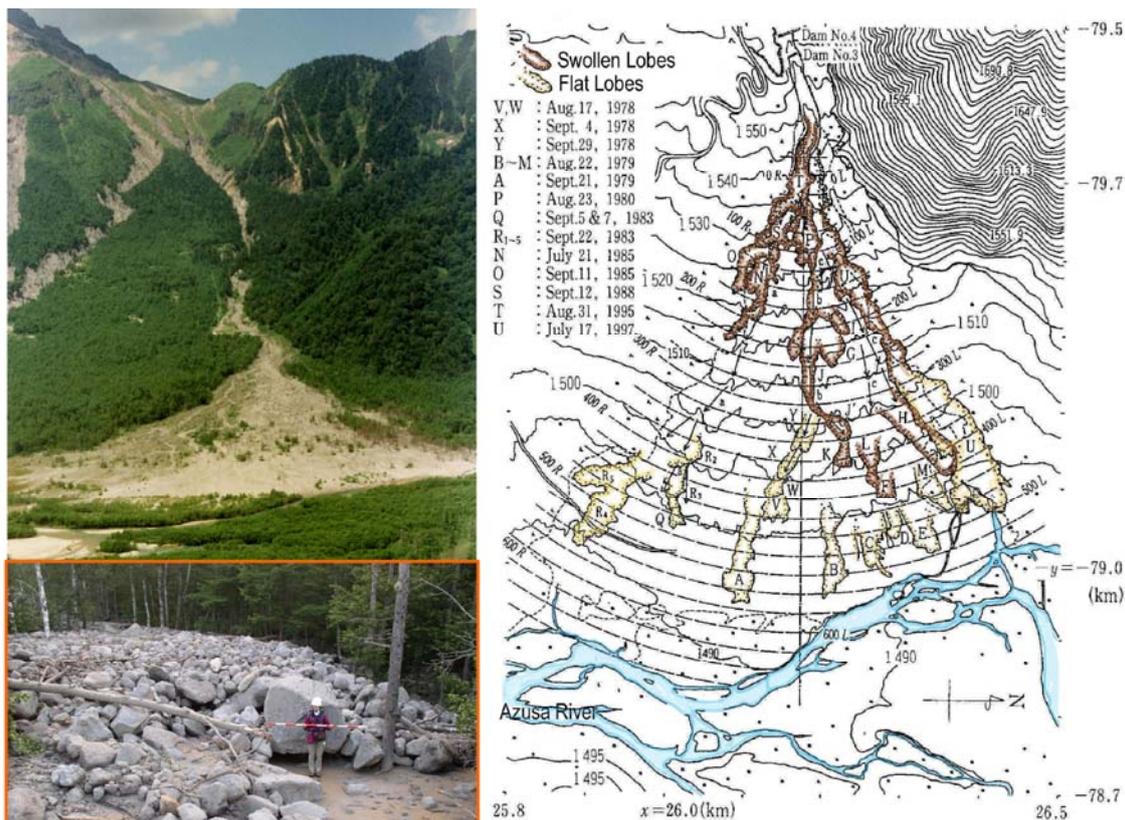


図7 上々堀沢扇状地と土石流の氾濫堆積状況

### 身近にも土石流

この話をしている同窓会の会場は理学部6号館301号室である。この6号館の地下には土石流の氾濫堆積で出来た地層が眠っている。この事実は、京都大学文化財総合研究センター(旧埋蔵文化財研究センター)の発掘調査の過程で明らかにされている(富井 眞, 2005)。土石流が起きたのは今から2500年ほど前、すなわち弥生前期のことだそうだ。図8左下の写真は、厚さ2mほどの、その土石流堆積層に含まれていた巨礫をバックホーが運び出すところを示す。現在では、白川は谷出口で南流するが、当時は西方、高野川のほうへ向けて流れていたと報告されている。吉田キャンパスは白川の沖積錐の上に立地している。今出川通りを銀閣寺の交差点から出発すると、自転車だと、こがなくても百万遍まで到達するわけだ。

京都の市街地が、東に連なる花崗岩と堆積岩からなる山塊、東山に隣接するまでに拡大して久しい。東山の斜面はおおむね急峻であり、風化の進んだ表土層は不安定で、地震や

大雨の際、崩れやすい。最近では、例えば 1972 年 9 月 16 日の音羽川土石流災害を挙げることができる。この日、20 号台風がもたらす豪雨のため、白川の北に隣接する音羽川の流域で崩壊が多発した。とくに“かまくら”と呼ばれる地点では地すべり性崩壊が起きて、大量の土砂が川筋を堰き止めた。しかし間もなく、これが流動化して土石流となり、沖積錐へ押し出している（図 9）。沖積錐は既に宅地に利用されていたため、住宅多数が被災したうえ、死亡一名、重軽傷数名の人的被害を生じた。我が地球物理学教室の先生宅が被災し、我々学生院生が土砂の掻き出しに汗を流す場面もあった。



図 8 理学部 6 号館敷地の埋蔵文化財調査の様子。富井 眞氏提供の写真と図に一部加筆

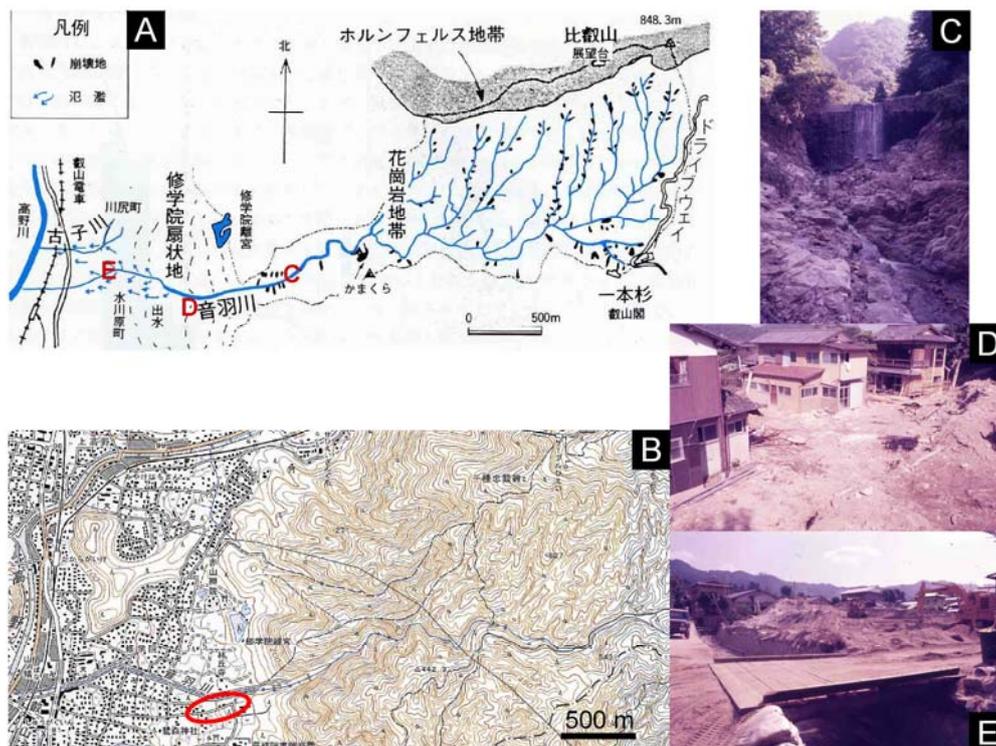


図 9 音羽川土石流災害の様子。写真 C, D, E の位置を図 A 中に示す

## あとがき

昨年 2009 年 7 月、山口県下で豪雨があり、崩壊が多発して土石流による災害となった。防府市だけで 14 名の方の命が失われている。たとえば、真尾地区では特別養護老人ホームが土石流に見舞われて、7 名の方が亡くなった。特別養護老人ホームは、谷出口に形成された沖積錐の上に建てられていた。くり返すが、沖積錐は土石流や土砂流によって形成された土地である。2000 年に新しい土砂災害防止法が公布されて以降、全国的に調査が行われ、危険な地区は土砂災害警戒区域、あるいは特別警戒区域に指定されている。真尾地区のこの沖積錐も 2008 年 3 月に警戒区域に指定されていた。しかし当事者らはそのことを認識していなかった。出水の異常に気付いて、谷から続く排水路へ見回りに出かけているが、避難が間に合わず、惨事を招くことになった。

研究の進展により、土砂災害につながるハザードの実態やメカニズムはかなり明らかになった。対策のための構造物や警戒避難のための方策整備も向上している。しかし土石流による人的被害は後を絶たない。被災事例によって原因は多様である。しかし、どの事例でも、いわゆる“正常化の偏見”が介在しているように思われる。被災の前に崩壊や土石流の予兆が姿を現していることが多い。人は異常に気付くが、それをより危険な事態の予兆とは思わない。例えば住宅脇の水路から水があふれ出すのに気付くと、その異常事態と闘いつづけ、なかなか避難しようとしなない。危機が迫っているとは思わないため、逃げ遅れて命を落とすことになる。異常を無視あるいは過小評価するという“正常化の偏見”の克服が課題の一つである。楽観的でいられるというのは人間の特技であり、普段の生活においては役立つことのほうが多い。人間の長所でもある。災害研究も地球科学も、人間社会が地球の営みの中で如何に持続してゆくべきか、持続してゆけるかということを考えるときに役立つものでもあるはずだが、必ずしもそのようになっていない。大きなギャップがある。埋めるための工夫や研究が行われている。

## 関連文献

- 片田敏孝 (2008) 地域住民と共に築く土砂災害対策, (財) 砂防・地すべり技術センター広報 sabo, 95, 2-6.
- Lavigne, F. and Suwa, H. (2004) Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia, *Geomorphology*, Vol.61, 41-58.
- Marchi, S., Arratano, M. and Deganutti, A. M. (2002) Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps), *Geomorphology*, 46, 1-17.
- Okano, K., Suwa, H. and Kanno, T. (2011) Characterization of debris flows by rainstorm condition at a torrent on the Mount Yakedake volcano, Japan, *Geomorphology*, in press.
- 音羽川学習副読本編集委員会 (1993) 比叡山音羽川物語, 京都府土木建築部, 88p.
- Scholz, C.H.(1990) *The mechanism of earthquakes and faulting*, Cambridge University Press, p.331.
- Suwa, H., Okano, K. and Kanno, T. (2011) Forty years of debris-flow monitoring at Kamikamihorizawa Creek, Mount Yakedake, Proc. 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, in press.
- Suwa, H., Mizuno, T. and Ishii, T. (2010) Prediction of a landslide and analysis of slide motion with reference to the 2004 Ohto slide in Nara, Japan, *Geomorphology*, 124(3-4), 157-163.
- Suwa, H., Okano, K. and Kanno, T. (2009) Behavior of debris flows monitored at the test slopes in the Kamikamihorizawa Creek, Mount Yakedake, Japan, *International Journal of Erosion Control Engineering*, 2(2), 33-45.

- Suwa, H., Mizuno, T. Suzuki, S., Yamamoto, Y. and Ito, K. (2008) Sequential processes in a landslide hazard at a slate quarry in Okayama, Japan, *Natural Hazards*, 45(2), 321-331.
- Suwa, H. and Nakaya, S. (2007) Two catastrophic debris avalanches triggered by rainstorms in Japan and Philippines, *Proc. 4th Inter. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment* ed. by Cheng-lung Chen & Jon J. Major, Millpress Science Publishers, 341-351.
- 諏訪 浩 (2006) フィリピン・レイテ島で 2006 年 2 月 17 日に起きた地すべり災害, *自然災害科学*, 25(1), 83-97.
- Suwa, H. (2003) Repetition of debris flows on sunny days at a torrent in Karakorum, *Proc. 3rd Inter. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment* ed. by D. Rikkenmann & G. Wiecezorek, Balkema, 1025-1035.
- Suwa, H., Akamatsu, J. and Nagai, Y. (2003) Energy radiation by elastic waves from debris flows, *Proc. 3rd Inter. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment* ed. by D. Rikkenmann & G. Wiecezorek, Balkema, 895-904.
- Suwa, H., Yamakoshi, T. and Sato, K. (2000) Relationship between debris-flow discharge and ground vibration, *Proc. 2nd Inter. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment* ed. by G. Wiecezorek & N. Naeser, Balkema, ISBN 90 5809 149 X, 311-318.
- Suwa, H. and Yamakoshi, T. (1999) Sediment discharge by storm runoff at volcanic torrents affected by eruption, *Zeitschrift für Geomorph. N. F., Suppl.-Bd. 114*, 68-88.
- Suwa, H. and A. Sumaryono (1996) Sediment discharge by storm runoff from a creek on Merapi Volcano, *Jour. Japan. Soc. Erosion Control Engineering*, Vol.48, Special issue, 117-128.
- Suwa, H. and S. Okuda (1988) Seasonal variation of erosional processes in the Kamikamihori Valley of Mt. Yakedake, Northern Japan Alps, *CATENA, Suppl. 13*, pp.61-77.
- Suwa, H. (1988) Focusing Mechanism of Large Boulders to a Debris-Flow Front, *Trans. Japan. Geomorph. Union*, 9(3), pp.151-178.
- Suwa, H. and S. Okuda (1983) Deposition of debris flows on a fan surface, Mt. Yakedake, Japan, *Zeitschrift für Geomorphology, Suppl.-Bd.46*, pp.79-101.
- Thouret, J-C, Lavigne, F., Suwa, H., Sukatja, B. and Surono (2007) Volcanic hazards at Mount Semeru, East Java (Indonesia), with emphasis on lahars, *Bulletin of Volcanology*, 70(2), 221-244.
- 富井 眞 (2010) 先史時代の自然堆積層の検討による大規模土砂移動の頻度試算 — 京都市北白川追分町遺跡を中心として —, *自然災害科学*, 29(2), 163-178.
- 富井 眞 (2005) 京都白川の弥生時代前期末の土石流: 京都大学構内遺跡調査研究年報 2000 年度, 京都大学埋蔵文化財研究センタ, 225-262.
- Verkataraman, A. (2002) Macroscopic seismological parameters of subduction zone earthquakes (Chapter 4 and Figure 4.7). In PhD Thesis by A. Verkataraman, Investigating the mechanics of earthquakes using macroscopic seismic parameters. California Institute of Technology, Pasadena, California: 74-145.
- Yamakoshi, T. and Suwa, H. (2000): Post-eruption characteristics of surface runoff and sediment discharge on the slopes of pyroclastic-flow deposits, Mount Unzen, Japan, *Trans. Japan. Geomorph. Union*, 21(4), 469-497.
- 矢守克也 (2009) 災害情報のダブル・バインド, *災害情報*, 7, 28-33.  
など.