

斜面水文学の視点から見た2013年10月の 台風26号による伊豆大島の斜面崩壊

Hydrological Aspects to Shallow Landslide Occurrence in Izu-Oshima Island, Triggered by a Heavy Rainfall of Typhoon 26th on October 15-16, 2013

寺嶋智巳・松四雄騎・八反地 剛⁽¹⁾

Tomomi TERAJIMA, Yuki MATSUSHI, and Tsuyoshi HATTANJI⁽²⁾

(1) 筑波大学生命環境系

(1) Faculty of Life and Environmental Sciences, Univ. Tsukuba

Synopsis

Typhoon 26th attacked Izu-Oshima Island, 120 km south west of central Tokyo, on 15 to 16 October, 2013. A heavy rainfall of which the total amount for 24 hrs was 824 mm (but effective rainfall for the landslide occurrence was about 400 to 500 mm) was supplied to slopes composed of volcanic deposits. Specifically at the slopes located at 2 km east of Motomachi town (Kandachi area), shallow landslides which apparently showed a particular feature, about 1 m deep but a few hundred meter wide, were caused during this heavy rainfall. The sliding surfaces were located just on an impermeable loess layer which is at about 1 m deep in soils and deposited between the Y1 (in 1777) and Y2 (in 1684) eruptions. Sandy-muddy debris flows subsequent to the landslides killed 36 peoples and three have been missing yet. In the presented paper, to understand roughly the cause of the landslides, we show the real features of the landslides and examine the hydrological conditions at the slopes, which linked directly to the landslides induced by this heavy rainfall.

キーワード: 難透水性レス, 火山性堆積物, 宙水, 豪雨, 斜面水文

Keywords: impermeable loess, volcanic deposit, perched groundwater, heavy rainfall, slope hydrology

1. はじめに

2013年10月15日から16日にかけて, 台風26号により関東から東北の太平洋岸を中心に, 多量の降雨がもたらされた. 特に, 伊豆大島元町 (Fig. 1) にある気象庁アメダスでは, 15日午前8時30分の降り始めからの総降雨量が824 mm (継続時間21時間50分) という豪雨を記録した.

この豪雨により, 16日午前2時過ぎ頃から西部の元町付近や北東部の泉津付近を中心に各所で斜面崩壊

(表層崩壊) や道路法面の崩落が発生した. 特に, 元町・神達地区周辺では, 崩壊に引き続いて発生した土砂流出により, 36名が死亡, 3名が行方不明 (2014年7月時点) という人的被害と, 家屋の全壊71棟, 大規模半壊15棟, 半壊25棟, 一部損壊92棟 (非住家を除く) という物的被害が生じた (広報おおしま臨時第4号, 2013より抜粋; Photo1参照)

各所で発生した崩壊のうち, 元町・神達地区の上部斜面で発生した崩壊 (Photo 1(a), Photo 2(a)北側, およびPhoto 2(b)の崩壊) は, 崩壊深 (崩壊土層厚)



Fig. 1 Location and topographic maps of Izu-Oshima Island.

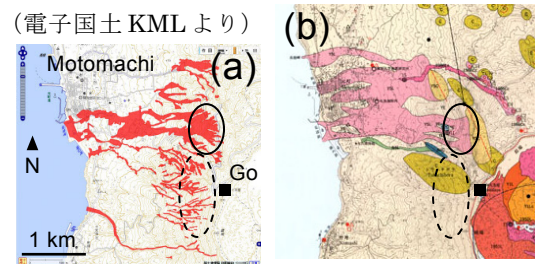


Fig. 2 Location of the landslides and debris flow area (red area in (a)) and the geological map edited by Geological Survey of Japan (b). Pink area in (b) shows the Motomachi lava flow. Go: Gojinka-chaya



Photo 1 Residential and physical damages by sandy-muddy debris flows subsequent to the shallow landslides

に比べ崩壊幅が数百メートル以上に及んだため、当初、表層崩壊としてはきわめて特異な形状であると考えられていた。また、御神火スカイライン最上位付近 (Photo 2(a)の水平矢印；稜線近くに見られる水平な線) を源頭部とする崩壊が多数見られたため、崩壊の直接の原因が道路建設にあるのではないかという指摘もなされていた。さらに、崩壊発生域および土砂の流動域が14世紀に噴出した元町溶岩 (Y5溶岩：小山・早川，1996) の分布域と極めてよく一致していたため (Fig. 2)，当初、多くの専門家がこの溶岩を不透水層と考え、「崩壊メカニズムは溶岩の上に堆積している透水性の良い火山噴出物 (火山灰やスコリア) が不透水性の溶岩との境界で滑り落ちたものである」と指摘していた。しかしながら、溶岩は冷却時における収縮割れ目等の透水構造が顕著に発達し、局所的には不 (あるいは難) 透水性を示したとしても、地層全体のスケールでは決して不 (難) 透水層にはならないのが一般的である。また、崩壊深 (すべり面の深さ) が1 m程度と浅かったことから、地表から数メートル以上も下層 (深部) に存在する元町溶岩が降雨浸透水の遮蔽層となる (溶岩上面まで降雨が浸透して、そこで宙水を形成する)

ことで、その上部の火山性降下堆積物を崩壊させる直接的な原因になったとは、土層の水文特性的にも降雨浸透水の到達時間的にも、当初の段階から到底考えられない状況であった。

今回の斜面災害は多量の降雨が供給されたことによりもたらされたことに疑いはない。そこで、本報では、まず、崩壊の現状を正確に把握・記載することに重点を置き、その上でさらに、斜面水文学の視点に基づいて斜面土層の内部における雨水の動態を推測し、崩壊の発生に至った原因を検討・報告することとしたい。

2. 斜面災害の諸相

2.1 元町付近における過去の斜面災害

伊豆大島の過去の土砂災害記録は、元町付近に限ると以下の2件だけである (1933年にもあったという話がある)。

- (1) 1958 (1858の記載ミス?) 年5月28日の大雨による災害 (東京都, 1983) : 斜面崩壊により土石流が発生し、18名が死亡。崩壊した斜面は不明である。
- (2) 1958年9月26日～27日の狩野川台風 (大島町,

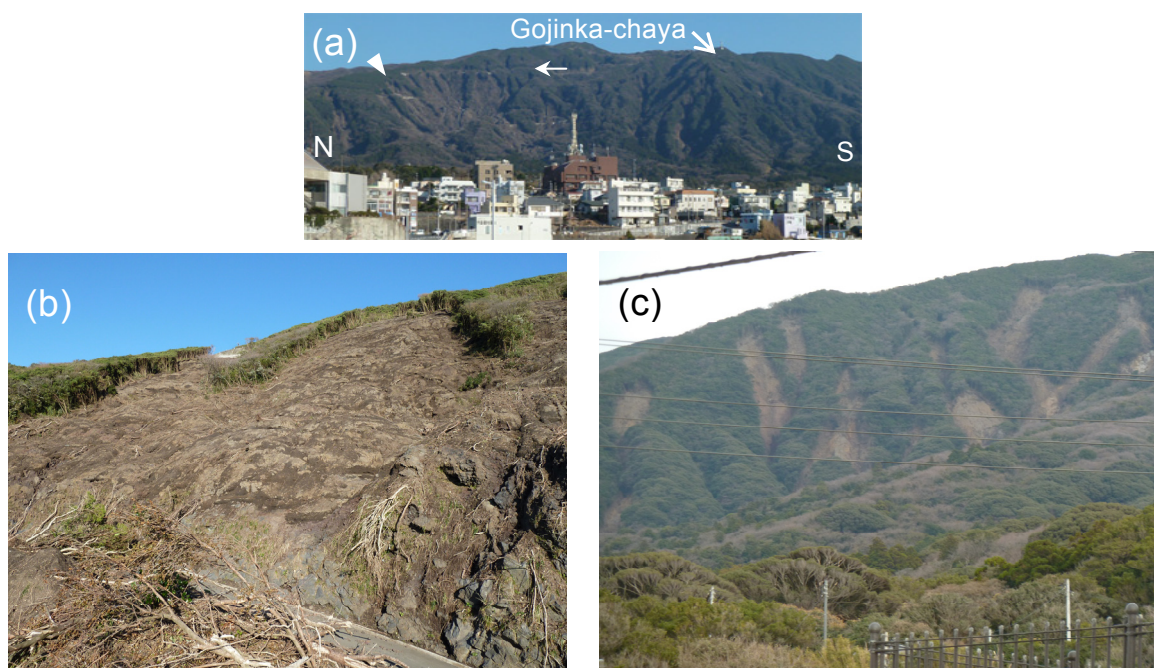


Photo 2 Shallow landslides induced at slopes near Motomachi town in Izu-Oshima Island (a); taken from the Motomachi port. The landslides of several hundred meter wide (b) appeared extensively at the left half (north side) of (a) and the narrow landslides of several ten meter wide at gully heads (c) were conspicuous at the right half (south side) of (a). A white triangle in (a) shows the position of the landslides caused in 1958.

2000)：総降雨量420 mmの雨により斜面崩壊が発生し、土石流により1名が死亡、1名が行方不明、53名が重軽傷を負った。災害発生時までの累積降雨量（実効雨量）はおよそ380 mmであったと言われている。住民の話、情報、当時の写真を勘案すると、このときに崩壊した斜面は、今回の幅の広い崩壊地の北端付近（Photo 2(a)の白抜き三角印）と思われる。

このように、伊豆大島における土砂災害記録は有史以来残存する火山災害記録に比べてきわめて少なく、住民は「火山性の堆積物で覆われているため水はけがよい（伊豆大島では、火山災害はあっても土砂災害はほとんどない）」と信じていたということから、豪雨による土砂災害に対する知見の集積が少なく無防備であったことが被害を大きくした一因になったものと言える。

2.2 降雨状況

気象庁アメダスデータ（大島元町：Fig. 3）によると、最大時間降雨強度は120 mm/h（16日午前3時から4時；Fig. 3の青ライン）で、うち降雨強度50 mm/h以上が6時間継続（15日午後11時から16日午前5時まで）した。累積降雨量（Fig. 3の赤ライン）は崩壊発生直前の16日午前2時までで460 mm、多くの崩壊が発生した直後の午前3時までで578 mmであった。崩壊源頭部の標高に近い御神火茶屋の降雨量は元町アメダスよりおよそ1～2割減である。したがって、崩壊発

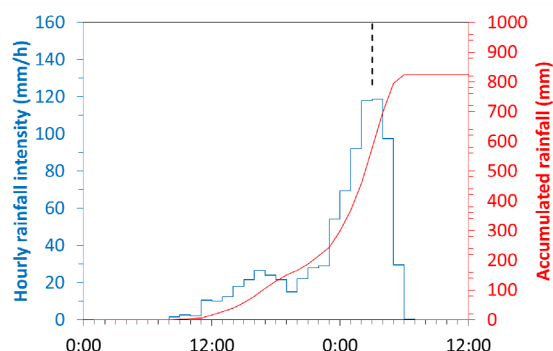


Fig. 3 Rainfall on 15 – 16 October, 2013, based on the data collected at the AMeDAS station of the Japan Meteorological Agency at Motomachi, Izu-Oshima.

生までに神達地区上部の崩壊斜面に供給された累積降雨量（実効雨量）は400～450 mm程度と推測され、1958年災害（狩野川台風）時の実効雨量380 mmと大きく変わらない。すなわち、当該斜面では崩壊発生の可能性を判定するためのしきい値として、累積雨量400 mm付近が最大危険度の基準値になり得るだろう。

2.3 崩壊の形状

最大の被害を受けた神達地区の上部斜面では、幅数百メートルにも及ぶ表層崩壊が発生した（Fig. 2



Photo 3 Head of a landslide (a) and a tension crack (between the white arrows) near the landslide scarp (b).

の実線円内, Photo 1(a), および Photo 2(b)). しかし, その南方 (御神火茶屋直下のスコリアやその他火山性降下堆積物を主体とする斜面) ではガリーの源頭部における幅数十メートル程度の表層崩壊であった (Fig. 2 の破線円内および Photo 2(c)). すなわち, 必ずしも神達地区上部のような幅の広い崩壊が主体であったというわけではない.

現地踏査によれば, 神達地区上部斜面の崩壊地の傾斜は 30 度程度であり, その形態はおおまかに以下の 4 タイプに区分できる (Fig. 4).

- A タイプ: 道路 (御神火スカイライン最上部) より上部の斜面が数十メートル以下の狭い幅で崩壊を発生し (Photo 3(a)), 崩壊土砂が道路上で停止しているケース. 御神火茶屋直下の幅の狭い崩壊 (Fig. 2(a) の破線円内および Photo 2(c)) はこのタイプまたは以下の B タイプに含まれる. なお, 滑落崖より上部の斜面には土層変位により形成されたと思われる落差 1 m 以内の階段状の地形 (潜在滑落崖; Fig. 5 の A6~A1 の間や Photo 3(b) の矢印) がみられ, 斜面が不安定化している様子が窺える.
- B タイプ: 道路より上部の斜面が狭い幅で崩壊を発生したのは A タイプと同様であるが, 崩壊土砂が道路を越流して流下し, 下流部へ流出したケース.
- C タイプ: 道路より上部の斜面が狭い幅で崩壊を発生して道路を越流して流下し, かつ道路より下部の斜面で見かけ上, 幅の広い崩壊が発生しているケース.
- D タイプ: 道路より上部の斜面には崩壊が発生しておらず, 道路より下部の斜面だけで幅の広い崩壊が発生しているケース. 滑落崖が道路に接している場合と道路からは数メートル以上離れている場合がある (C タイプの場合も同様).

2.4 崩壊斜面の土層構造

御神火スカイラインより上部にある崩壊源頭部

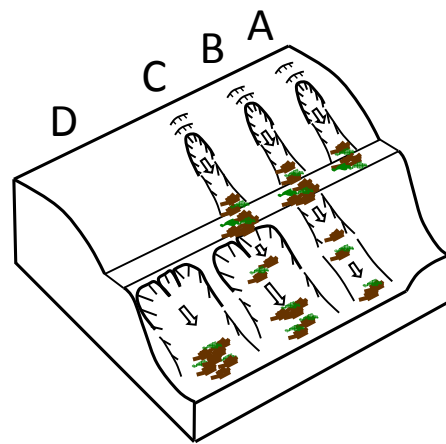
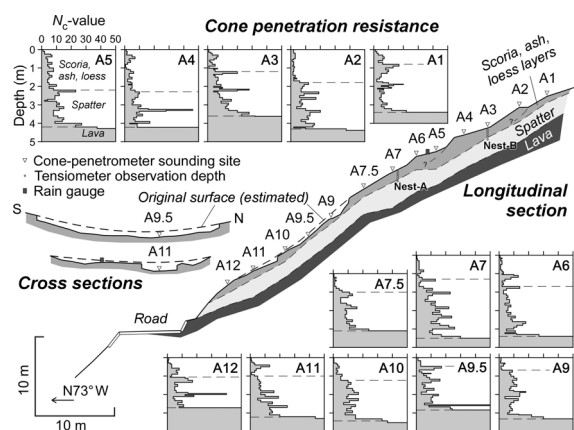


Fig. 4 Classification of the landslide features near Motomachi town.

(Photo 3 ; Fig. 4 の C タイプに相当) で斜面土層の断面調査 (簡易貫入試験等) を行った (Fig. 5). その結果, 地表から溶岩までは約 4 m, スパターまでは約 2 m であり, それらの上部に堆積している火山灰やスコリアの層厚はおおよそ 2 m であることが判明した. 滑落崖は Fig. 5 の A7.5 と A9 の間にある.

土壌硬度 (Fig. 6 左) はスコリアで低下する傾向が見られるが, すべり面は深度 90 cm 付近のレス (火山活動が静穏な時期に堆積した風成の土層; 小山・早川, 1996) とその上位のスコリアの境界に存在し, 崩壊した物質はこのレスより上位の火山性降下堆積物 (スコリア, 火山灰, レス等のソフトな部分) である. すべり面は樹木根茎が密に分布する範囲 (30~40 cm 以浅) より深いところに存在している. 伊豆大島全域ではすべり面深度の平均は 75 cm (最深で 140 cm 程度) である. すなわち, 溶岩上面をすべり面としているわけではないため, 元町溶岩が崩壊の発生を引き起こした直接の原因ではない.

一方, 斜面が崩れた後の下流部への土砂流下過程



においては、溶岩地形の滑り台効果（崩壊土砂の流下範囲では元町溶岩により相対的に平坦な地形が形成されていた）により災害の規模（崩壊のみかけの幅、土砂の流下幅、土砂の流下速度、流走距離）が拡大したと思われる。

Fig. 6 Soil hardness and profile at the landslide scarp shown in Phot 3 and Fig. 5. Sliding surface was located between the orange and red dashed-lines.

果たしたのか？（あるいは、土砂の流動に関わったのは浅層地下水だけで、深層地下水は関わっていなかったのか？）

しかしながら、伊豆大島における地下水動態は水資源（生活・産業用水としての機能）や火山噴火の視点からの研究が多く（たとえば、田口・安原，1987；高橋ほか，1988；高橋ほか，1991など），土砂災害の視点からの研究はほとんどなされてこなかったのが現状である。そこで、以下本報では、これまでに取得済みのデータを利用して、主に崩壊発生メカニズムに直接的に関わる上記①についての検討を行うこととしたい。

3. 斜面土層の水文特性と浅層地下水の動態

3.1 斜面土層の透水性

Fig. 6 に示した滑落崖の断面において、斜面土層を

Table 1 Classified saturation hydraulic conductivity of the soils

Depth (cm)	Sat. hydraulic conductivity K_s (cm/s)	in terms of hourly rainfall amount (mm/h)	Stratigraphy
0 - 50	2.5×10^{-2}	900.0	Alternation
50 - 80	4.2×10^{-3}	151.2	Ash
80 - 90	1.0×10^{-2}	360.0	Scoria
90 - 100	5.0×10^{-4}	18.0	Loess
110 - 115	1.8×10^{-5}	0.65	Loess
700 - 800	$> 3.2 \times 10^{-4}$ (minimum value)	> 11.5 (minimum value)	Lava (boring)

深度 5 cm 毎に鉛直不攪乱でサンプリングし、透水試験（定水位および変水位）を行った。Table 1 に各サンプルの飽和透水係数（算術平均値；オーダーレベルで階級化）を示す。

斜面土層のうち、スコリアや火山灰は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/sec（降雨量に換算して 100～1000 mm/h 程度）であり透水性は良好であるのに対して、深度 1 m 付近にあるレスでは $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/sec（降雨量に換算して 1～18 mm/h 程度）と透水性が悪くなっている。そのため、当該降雨によりもたらされた雨水はこのレスより深部にはほとんど浸透できなかったものと考えられ、レスの上部に宙水（地下水位）が生じ、表層崩壊へ連鎖したものと推察される。

一方、ボーリング調査によると、元町溶岩は透水性が最も低いところで 10^{-4} cm/sec（降雨量に換算して十数mm/h程度）であり、多くの個所は計測時に多量の逸水が生じ測定値を取得することが困難であった。後期更新世の古期大島層群の溶岩では 10^0 cm/sec（降雨量に換算して36,000 mm/h程度）という報告もあることから（今泉ほか，1984），当初の想定通り、降雨浸透水により溶岩上で広範囲に宙水が生じた可能性はほとんどあり得なかったと言える。

3.2 浅層地下水の動態

現時点で、土層サンプルの水文・土質データがすべて得られているわけではないので、簡易化と迅速な可視化のために、取得済みのデータ（Table 1 等）だけを用いて鉛直一次元の浸透計算を行った。より詳細な 2 次元または 3 次元計算は、土層サンプルの詳細な物理・水理特性が得られた後に行う予定である。

鉛直一次元計算では鉛直浸透が生じている不飽和状態、すなわち、宙水（地下水位）が生じる直前までは比較的正確に計算できる。しかし、飽和した後は浅層地下水の斜面傾斜方向に沿った流動（側方流動）が生じることもあるので、必ずしも計算値と同じ状態で実際の地下水位が上昇しているとは限らないことに注意が必要である。

計算結果を Fig. 7 に示す。宙水が現れたのはすべり面深度に相当する深度 90 cm のところだけで、崩壊が発生した 16 日午前 2 時から 3 時にかけては、地表面近くまで地下水が上昇していた状況が示されている。災害 3 日後の 10 月 19 日に現地調査を行ったが、Fig. 6 の滑落崖より上部の斜面には地表流が発生した痕跡（下草の水流流下方向への連続した倒れ込みなど）を観察できたことから、災害当日は地表面近くまで飽和していた可能性が高い。

計算上、斜面内部に宙水が発生したのは 15 日午後 8 時であり、そこまでの総降雨量はおおよそ 165 mm で

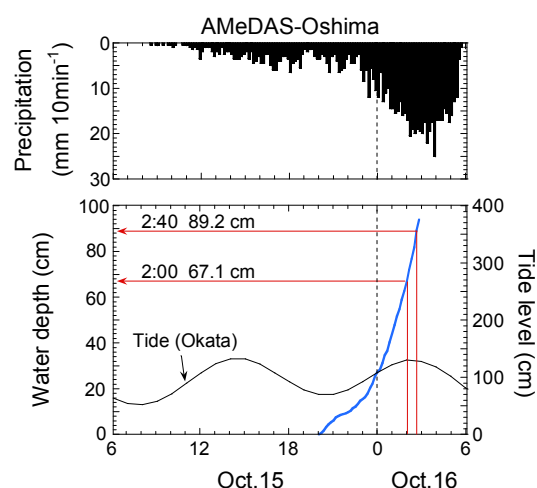


Fig. 7 Change in subsurface water table at 90 cm deep in the soil shown in Fig. 6. This data was obtained from the vertical one dimensional calculation for the rainwater percolation.

あった。したがって、総降雨量が 165 mm に達するまでは、表層崩壊の発生確率は極めて低かったと考えられる。すなわち、少なくとも連続降雨量で 150 mm という値は表層崩壊の発生確率が上昇し始める最初のしきい値になると考えることができそうである。

3.3 地下水圧の変化

鉛直一次元の浸透計算では、深度 90 cm で宙水が生じたという結果が得られた。そこで、実際に宙水が生じるのかどうか、また、生じるとしたらどの層位であるかを調べるため、当該崩壊の源頭部にある未崩壊斜面にテンシオメータを埋設して圧力水頭（水圧）の計測を行った（Photo 4）。結果を Fig. 8 に示す。P1 および P2 は、それぞれ Fig. 5 の A7（滑落崖直上）および A3（A7 より 10 m ほど尾根側へ上がった地点）に対応している。

Fig. 8 の見方を簡潔に述べると、

- ① 圧力水頭（水圧）が 0 kPa 未満の負値（負圧）のときは、土層内部が不飽和状態で鉛直浸透または蒸発散が生じている。
- ② 圧力水頭が 0 kPa のときは大気圧と釣り合っており、飽和して宙水（地下水位）が発生した状態である。
- ③ 圧力水頭が 0 kPa 以上の正值（正圧）のときは、ほぼその水圧に相当する水位が出現している状態である。大まかに言うと、kPa は 10 倍すれば水深（cm）に相当する。すなわち、1 kPa のときはおよそ 10 cm の水深（または、その水深に相当する水圧がある）と考えればよい。
- ④ 圧力水頭が -5 kPa 未満では、重力による鉛直方向へ



Photo 4 Tensiometers to measure the pressure head in soils at P1 shown as A7 in Fig. 5. Depth of the measurement is 25, 55, 85, 115, and 145 cm.

の排水が停止する（水が土粒子間の間隙に吸着される）ので、それ以上の水圧の減少は蒸発や植物の根からの吸水によるものである。

Fig. 8によると、観測期間中はほとんどの深度で0 kPa未満の不飽和状態が継続したが、P2の2014年3月5日（深度25 cmおよび55 cm；連続降雨量62.4 mm）と4月3～4日（深度55 cmおよび145 cm；連続降雨量140 mm）の2回で宙水（圧力水頭0 kPa以上）が発生した。特に、3月5日のP2の深度55 cm（赤ライン）は最大で約1 kPaとなり、およそ10 cm程度の水深が出現したことを示している。斜面の場所により対応する火山性降下堆積物の深度が若干異なるので、P1とP2でもそうであるように、浸透計算に用いた斜面での結果（Fig. 7）とは必ずしも完全に一致しないが、連続降雨量が150 mmを超えていなくても宙水の発生があることが明らかになった。ただし、3月5日（連続降雨量64.2 mm）は、降雨量換算にして60～100 mmに相当する積雪が融雪した直後の降雨である。すなわち、3月5日の降雨時に地中に保持された水量としては150 mm程度の降雨量に相当したのかもしれない。

以上より、浸透計算においても観測においても、連続降雨量 150 mm 付近が表層崩壊の発生確率が上昇し始める最初のしきい値になると考えることに無理はないであろう。ただし、今回崩壊した斜面が再度崩壊する可能性については、現在では場の条件（斜面にある土の構造）が被災前と大きく異なっているので、「今後、どれだけの雨量までなら安全なのか」についてはより広範な調査が必要である。

4. おわりに

災害発生から6ヶ月間という短期間の調査であるが、これまでに様々な事実が判明してきた。そのう

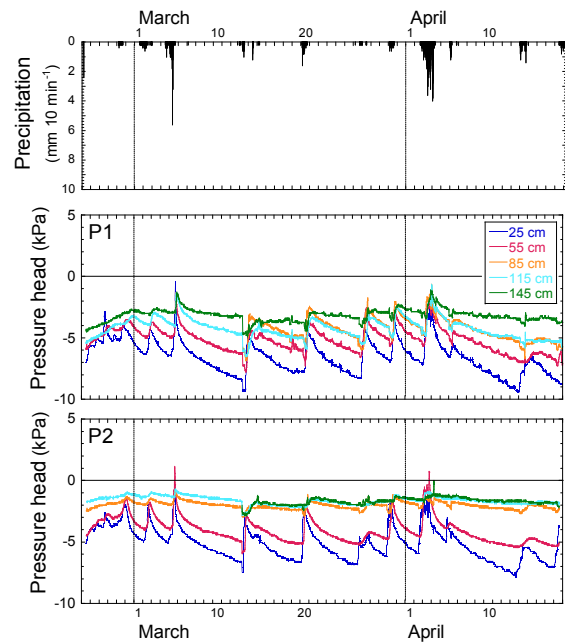


Fig. 8 Changes in pressure heads in the slope. Locations of P1 and P2 correspond to A7 (Nest A) and A3 (Nest B) in Fig. 5, respectively.

ち斜面水文学の視点から言及できること、現在思うことをまとめると、以下の通りである。

- ①伊豆大島の斜面の多くは崩壊を発生した元町・神達地区の上部斜面と同様な火山性降下堆積物で覆われている。したがって、伊豆大島内のどこにおいてもほぼ同様な崩壊現象が生じる可能性は高い。すなわち、連続降雨量が150 mmを超えると土層の浅部に宙水が発生することで表層崩壊の発生確率は高まっていき、連続的に400 mm以上の累積降雨量となれば地下水位が上昇し、傾斜が30度以上あるような斜面であれば、島内のどこでも高い確率で崩壊が発生すると思われる。
- ②元町・神達地区上流部では、崩壊した斜面のさらに上部にある未崩壊斜面においてクリープ（斜面がゆっくりと滑る現象）により生じたと思われる階段状の地形（潜在滑落崖）が尾根近くにまで何段も存在している。このことは、すでに斜面の変動が生じている（次回の崩壊が準備されている）ことを意味している。降雨時（特に、連続降雨量が150 mmを超えたとき）には、これらすでに変動を発生している（一時的に停止している）未崩壊斜面の崩落に対して厳重な監視が必要である。
- ③今回の災害時に計測された総降雨量は800 mm（元町）や600 mm（御神火茶屋付近）であるが、これは降雨が停止する16日午前6時過ぎまでの総量であり、同日午前2時頃から群発した表層崩壊は、この値よりも少ない累積降雨量で生じたことは明

らかである。したがって、連続降雨量 800 mm や 600 mm を避難基準や降雨確率計算の指標値として用いるのは正しくない。基準の最小値（崩壊発生確率の上昇開始）を連続降雨量 150 mm 付近、最大値（最大危険度）を同 400 mm 付近として、今後の全島的な斜面災害対策を検討していくべきである。

- ④表層崩壊に関与した水も土も、その現象は地下の極めて浅いところで生じたものである。表層崩壊を発生させるような土層の浅部における飽和した地下水の流れは一般的には降雨時にのみ生じるものであり、当該斜面におけるその成長過程は道路（御神火スカイライン）のあるなしにかかわらず難透水層であるレスにコントロールされている。また、Fig. 4 の C や D タイプのように道路より下流側の斜面で幅の広い崩壊が発生している場合があるが、滑落崖が道路に接しておらず（数メートル以上離れている）、道路外への溢水も生じていないケースも多々見られる。したがって、御神火スカイラインが今回の崩壊発生に及ぼした影響（たとえば、地下水脈を切ったことで地下水の流れが変わり崩壊に繋がったのではないか、道路からの溢水により崩れたのではないか、等々）は小さかった（道路の有る無しに関わらず崩れた）と考えるのが合理的である。

- ⑤元町溶岩は不透水層ではない。したがって、当初、マスコミ等で多くの専門家が指摘していた「溶岩が直接の原因となって崩壊が発生した（不透水層である溶岩の上面に浸透した水が滞留し、その上に堆積している土砂がすべり落ちることで崩壊が発生した）」という結論は明らかな誤りである。「1. はじめに」で述べたように、我々（斜面水文学的に）は当初から溶岩不透水説を排除した上で検証を行っていた。斜面災害の専門家であれば、「溶岩は透水構造を有するのが一般的である」という認識があつて然るべきだからである。斜面災害の場の条件（素因）を判断する基礎としての地質学的な知識が欠落しているのはゆゆしき事態である。ましてや、人命が失われているような災害発生時に関連事項でマスコミ・メディア等へ出演する際には、知識不足による事実誤認をベースとした軽率な論評や解説を行うべきではない。

謝 辞

本調査・研究は、環境省と東京都の許可を受け、伊豆大島住民および大島町役場の方々のご理解・ご協力の下で行ったものである。また、観測機材の設置、土層のサンプリング、水文データの取得は、京都大学理学研究科大学院生の柴崎達也君、大澤 光君、および筑波大学・生命環境学群地球学類4年生の竹田尚史君、青木慎弥君に助力いただいた。これらの方々にここに記し、併せて謝意を表する。

なお、本報は文部科学省・平成25年度特別研究促進費研究「平成25年台風26号による伊豆大島で発生した土砂災害の総合研究」（研究代表者・東畑郁生）により行った調査・研究に準拠している。

参考文献

- 今泉真之・菅原利夫・山本昭夫・稲本暁 (1984) : 伊豆大島の地下水. 日本地質学会講演要旨, 91, p483.
大島町 (2000) : 東京都大島町史 pp.761-766.
広報おおしま臨時第4号 ; 2013年12月1日発行.
小山真人・早川由紀夫 (1996) : 伊豆大島火山カルデラ形成以降の噴火史. 地学雑誌, 105巻2号, pp.133-162.
田口雄作・安原正也 (1987) : 伊豆大島における地下水水位等の連続観測. 地質調査所月報, 38巻11号, pp.705-717.
高橋正明・阿部喜久男・野田徹郎・安藤直行 (1988) : 伊豆大島の地下水質の地球化学的観測. 火山, 33巻, 伊豆大島噴火特集号, S290-S296.
高橋正明・阿部喜久男・野田徹郎・風早康平・安藤直行・遠藤秀典・曾屋龍典 (1991) : 伊豆大島における地下水温の高温化. 火山, 36巻4号, pp.403-417.
東京都 (1983) : 東京都の島嶼地域における災害に関する総合調査報告書.

(論文受理日 : 2014年7月14日)