

豪雨による土砂災害に関連する地質・水文・地形現象と予測における課題

京都大学防災研究所 松四 雄騎

1. はじめに

最近、豪雨が増え、土砂災害が増加していると感じている人が多いのではないだろうか。1990年代にしばしば耳にした渇水の話は、2010年代以降あまり聞かなくなり、その代わりに斜面が崩れた、あるいは土石流が発生した、といった報道をいっそう頻繁に見聞きするようになった。確かに、短時間に強く降る雨や、長い時間をかけて多く降る雨の発生頻度は増大傾向にあり¹⁾、人為起源の気候変動(いわゆる地球温暖化とそれに付随する現象)に伴って、極端な大気現象が生じやすくなりつつあると考えられている。2018年の梅雨期に数日以上の継続時間で西日本全体に大量の雨がもたらされたり、2019年の秋に関東・東北地方に強大な台風が襲来したりして、土砂災害が広い範囲で同時多発的に生じたのは記憶に新しいところだろう。

雨が降ればその排水路である河川の水が増え、洪水が起こるといえるのは直感的に理解できるが、では、雨が降って山が崩れたり、土砂が流出したりするのはどのようなしくみによるのだろうか。山地の多い日本では、斜面と人間社会の距離は必然的に近く、古来、土砂災害を避けるための土地利用の在り方などには経験知が蓄積していた。しかし、さて考えて

みると、現代の一般的な日本人の、土砂災害についてのジオリテラシー(地盤に関する情報を分析・判断するのに要する知識や考察力)は、果たしてどれほどのものだろう。豪雨に起因する土砂災害を防いだし、それによる被害を軽減したりするには、山地の斜面で生じている水と土砂の動態に関する包括的な理解が必要である。ここでは、土砂災害の発生に関連する山地斜面での自然現象を、地質・水文・地形的な観点から概観して、豪雨によって生じる斜面崩壊(図1)の発生機構と予測のための手立てを、長期的・短期的な時間スケールおよび素因と誘因の両面から、多角的な視点で説明することしよう。

2. 山地に降った雨水のゆくえ

日本のような温暖湿潤地域において、地表に到達した降水は、地表や地下を通過し、最終的には、その大部分が河川水となって海洋へと流出する。この水循環の過程で、流域内の多様な場に一時的に水が貯留される。この水貯留量の時間変化が、流域を構成する各地形要素での土砂移動をもたらす。例えば、河道での水貯留量が増えると、流量の増大に伴って河岸や河床が侵食され、そのときの掃流力によって移動させることのできる粒径の砂礫が、河川によっ



図1 表層崩壊(左:2009年山口県防府市)と岩盤崩壊(右:2011年奈良県十津川村)の例

て運搬されることになる。斜面では、地中に貯留される地下水の量が一時的に増え、それがもたらす水圧の効果が重力の作用に加わることによって地盤の破壊が生じる。どこに、どれほど、どのように水が貯留され、流動するかによって、斜面における土砂移動の様態が決まるため、地下に浸みこんだ水の振る舞いを理解することは、豪雨による土砂災害の予測に不可欠といえる。

山地の斜面で、水はどのような挙動をしているだろうか。今日の日本では、大部分の山地斜面に森林が成立しており(図1)、降雨量が少なければ雨水はその多くが樹冠(樹木の葉や枝と幹)に遮断され、蒸発によって大気へと戻る。降雨量が増えるに従い、その割合は小さくなり、雨水は量的な減損をそれほど受けずに地表へと供給されるようになる。一般に、温暖湿潤地域の林床は、リター(落葉・落枝)におおわれ、腐植を含んだ空隙に富む土壌層からなる。その浸透能(地表の水を地中に浸みこませる能力)は高く、地表に到達した降水はおおむね速やかに浸透して地中水となるため、降雨強度が浸透能を上回ったために余剰水が地表を流下する現象(ホートン型地表流)が生じることは稀である。地中水の一部は植物生体に吸収されて蒸散によって失われるが、残りは斜面をおおう土壌層やその下の風化基盤岩の空隙に貯留され(図2)、不飽和状態(媒体中の空隙に空気と水が共存した状態)あるいは飽和状態(空隙が全て水で満たされた状態)で透過し、一部はやがて土壌層の飽和に伴って溢れることで地表を流下する(飽和地表流)か、岩盤からの湧水として地表に復帰して、河川へと排出される。

3. 斜面を構成する要素と地質・水文・地形現象

斜面をおおう土壌層は、山地の基盤を構成する岩石の化学的・物理的風化によって生成した岩片や鉱物破片および粘土、そして風成物等の無機物に、地上生態系由来の有機物が加わってできた土粒子の集合体である。一般に土壌層の厚みは高々1~2m程度であることが多く、これは斜面の長さや高さ比べてごく薄いといえる(図2)。この被覆状態が維持されている所以は、斜面において土壌層の生成と除去がおおむねバランスした状態にあるために他ならない。土壌層は、雨滴侵食や湿潤・乾燥に伴う膨張・

収縮、季節のおよび日周期的な凍結・融解、あるいは倒木に伴う根返りや動物による営巣活動などの生物攪乱によって、緩慢かつ継続的に斜面下方へと移動している。この現象をソイルクリーブ(土壌爬行)とよぶ。ソイルクリーブによって、土粒子は斜面上を輸送され、 10^2 年から 10^3 年の時間スケールで地形的に凸な尾根部から削剥されて凹形の谷部へと集積する。これによって谷頭の凹地に、軟弱な土壌層が時間的にその厚みを増しつつ発達する。

土壌層の下には、化学的風化によって力学的な強度が低下してはいるものの、原位置から移動していない風化基盤岩が存在し、風化帯を形成している(図2)。どのような風化帯が成立するかは、基盤岩種(地質)とその場の 10^4 年から 10^6 年程度の時間スケールでの隆起・削剥史に依存する。長い時間、安定した風化環境に置かれていれば、強く変質した風化帯が、低起伏な地形の下に斜面の比高と同程度かそれ以上の深度にまで厚く発達する。一方、早い速度で隆起し削剥されてきた環境下では、変質程度の小さい風化帯をもつ基盤岩が、大起伏な山岳地形を造り出す。風化基盤岩の水理的・力学的な性質は、まず地質に依存し、付随的に地形の影響も受けて、土壌層と岩盤のいずれが主たる水の貯留・流動の場となるかを左右し、斜面崩壊の様態を決定づける(図2)。ある場所で卓越する土砂移動現象が、土壌層のみが滑落する浅い崩れであるか、岩盤を含む深い崩れとなるかは、誘因である雨の強度や量よりもむしろ、初生的な地質条件のもとで進行してきた岩石の風化と地形の発達の結果として顕在化した斜面崩壊の素

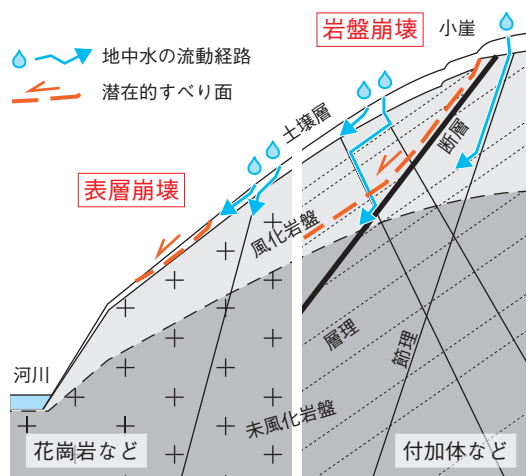


図2 地質ごとに異なる地中水の挙動と斜面崩壊のタイプ

因特性によって決まるのである。

基盤岩の透水性が小さく、それを相対的に高透水性で強度の小さな土壌がおおむね場合(図2左側)、水は深部に容易に浸透せず、地中水は主として土壌層中を斜面傾斜方向に透過して一気に排水され、河川では洪水流出が生じることになる。豪雨時には土壌層中に一時的な飽和帯(宙水)が形成され、不安定となった土塊は、その底部でせん断破壊して急激に滑動する。この様態をもつ土砂移動現象を表層崩壊と呼ぶ(図1左)。表層崩壊の素因となる場の条件をつくり出す地質として、深成岩のうちでは花崗岩や花崗閃緑岩、堆積岩のうちでは割れ目や空隙の少ない緻密な泥質岩や砂泥互層などが挙げられる。一般に、土壌層の排水能は高いが、水貯留容量が小さいため、表層崩壊は大強度・短時間の降雨イベントによって発生する。臨界雨量の目安は、大雑把にいて $> 50\text{mm/h}$ の雨が数時間程度継続するというものであり、その閾値をこえた雨域の中では、多数の斜面が一斉に破壊の条件を満たすため、表層崩壊は群発的に生じることが多い。

一方、風化基盤岩の透水性が高く、その水貯留容量が大きい場合、すなわち岩盤内に亀裂などが多く、そこに多量の水を賦存させうる場合(図2右側)には、雨水は土壌層を鉛直に透過して岩盤内に浸入し、深い地下水を涵養したのち徐々に排水され、河川の基底流出となる。斜面が自重破壊するうえで必要な比高を有する場において、多量の降水浸透によって岩盤内の地下水面が上昇したり、岩盤内に宙水や被圧地下水が発生したりすると、破壊の条件を満たした時点で、岩盤内に存在している断層や層理・節理などの地質的不連続面にそってすべり面が形成され、岩盤崩壊(図1右：表層崩壊と対比的に深層崩壊ともよばれている)が生じる。岩盤崩壊の素因となる地質条件としては、高角節理の多い火山岩類が相対的に強度の小さい岩体になるキャップロック構造や、付加体が基盤を構成し、地質的不連続面が斜面と同じ方向に傾斜する流れ盤などが挙げられる。こうした素因をもつ斜面における風化帯の水貯留容量は概して大きいため、岩盤崩壊は、継続時間が長く総量の多い降雨イベントの末期や雨止み後に発生することが多く、トータルで $> 400 \sim 500\text{mm}$ の雨が数日間降った場合に、その地域内で散発的に生じる。

豪雨を誘因として斜面崩壊が生じる最も基本的な

力学的機構は、表層崩壊でも岩盤崩壊でも変わらない。土壌層および岩盤は、それぞれ比較的均質な粒状体および不均質な多孔体とみなすことができるが、いずれにおいても固相の接触・接合点における粘着力と摩擦力で全体としての力学的な強度を発揮している。固相間には水を貯留しうる間隙があり、そこを満たす流体がもつ圧力を間隙圧という。降水の浸透に伴う固相表面の濡れは粘着力と摩擦力を減少させ、間隙圧の上昇は摩擦力を低下させる。この強度低下の効果により、潜在的すべり面にそうせん断力がせん断強度を上回ってせん断破壊の条件を満たされ、斜面は崩壊する。このように記述すると、あたかも表層崩壊や岩盤崩壊について、既に現象の発生機構が解明されているように思うかもしれないが、これはあくまで単純化されたモデルの描像に過ぎない。実際に地下で生じている過程については、間隙圧の時空間変化や、潜在的すべり面全体にせん断破壊が波及して上載土塊が滑動を開始するしくみ、滑動が始まった後の土塊の運動と間隙圧変動の相互作用など、未だ解明されていない点が多い。

4. 予測への挑戦

斜面崩壊の素因が成立し、誘因が作用して、土壌層や岩盤のせん断破壊が生じるまでの過程をモデル化できれば、土砂災害を予測できる可能性が出てくる。予測には場所・時刻・規模という3つの要素があり、豪雨に起因する斜面崩壊に当てはめてみれば、それぞれ、崩れの発生位置・臨界降雨量・生産される土砂量ということになる。降雨のほうは、短期的にはレーダーによる観測に基づく短時間予報、中・長期的には大気海洋結合モデルを駆使した将来予測が既に展開されているが、雨の受け皿となる斜面での素因と誘因を評価する水文・地形モデリングのほうは、どこまで進展しているだろうか。

表層崩壊については、予測実現への道筋がつつきつつある。先に述べた岩石の風化とソイルクリープによる土壌層の発達、表層崩壊の準備(素因形成)過程と捉えることができる。近年、この過程を定量化するうえで2つの大きな技術的進歩があった。ひとつは航空レーザー測量によって地表面の形状が精緻に得られるようになったこと、もうひとつは、風化基盤岩中に蓄積している宇宙線由来の同位体を分析することで、土壌の生成速度が決定できるように

なったことだ²⁾。これらのデータに基づいて、土壌層の生成・輸送・蓄積のシミュレーションを地理情報システム上で実行できるようになり、表層崩壊の素因となり、かつ、水流動の場の条件となる土壌層の厚みの空間分布を定めることができるようになった³⁾。これに、植物根系の土壌補強効果や、降雨浸透に伴う間隙圧の変動を計算できるモデルをカップリングさせれば、表層崩壊の予測に資するプロセスモデルを作ることができる。こうした決定論的なモデルは、任意の降雨入力に対する応答としての表層崩壊の発生有無の判定や流域からの土砂生産量の算定に用いることができ、臨界降雨量の決定や災害規模の評価・想定に利用できるほか、気候変動に伴う甚大化が懸念される土砂災害の確率論的な将来予測を行ううえでの土台ともなる。

一方、岩盤崩壊については、斜面の内部構造や地下水文過程を具体的に知ることが困難で、どこか一つの斜面を取り上げてみても、どれほどの雨が降れば、そこで崩れが生じるのかを定量的に評価することは、現時点では難しい。ただし、大規模な岩盤崩壊が発生する可能性の高い斜面を検出し、そこでの崩れがどの程度の拡がりとなるかを推測することは、航空レーザー測量によって得られる細密な地形情報の判読によってある程度可能になってきている。これは、深い岩盤中にすべり面を生じて崩れる斜面が、ほぼすべて事前に自重変形しており、地表にその痕跡を微地形として出現させていたことがわかってきたためである⁴⁾。航空レーザー測量が同一斜面に対して複数回行われるケースが増加したことで、発災前後の詳細な地形を比較することが可能になり、豪雨によって実際に発生した岩盤崩壊の滑落崖の周縁部に、斜面下方に開いた眉型の平面形状をもつ特徴的な段差地形(小崖: 図2右側)が事前に出現し、その下方の斜面では餅状のはらみ出しが生じていたことが多くの例で確認されている。1mメッシュ程度の高い空間解像度の地形図上でようやくそれと判読できるこれらの特徴は、長い時間をかけて未成熟なすべり面が岩盤内に伸展し、それにそったせん断変形が進むことで形成されたものと解釈されている。重要なのは、同様の特徴をもつ、未だ崩壊していない斜面が近隣に散在していることだ。岩盤崩壊の発生予測を実現するには、こうした斜面の内部構造をボーリング調査や物理探査などを駆使して調べ、降

雨に対する地下水の応答や自重変形の進行を観測して、地質構造と水文・地形過程の対応関係を探求し、現象を再現できるモデルの構築を急ぐ必要がある。

5. おわりに

人為起源の気候変動に伴う豪雨の強大化・高頻度化によって、人間社会に隣接する斜面の崩壊は今後も頻発していくだろう。土砂災害は、ローカルな現象により局所被害がもたらされるという特徴をもち、それが、ほかの災害事象と決定的に異なる点でもある。その減災は、自助が無ければ実現しない。山地の迫る狭い低地に発展した日本の地方都市では、スプロール現象とドーナツ化現象に伴って居住区が山裾に近づき、斜面崩壊をその給源として土石流が運搬した土砂の堆積によって形成された山麓の沖積錐(土石流扇状地)にも宅地が開発され、土砂災害リスクが高まっている。過去には林地や畑地として使われていた、こうした土砂災害ハザードの高い場を内包する社会に暮らす人々にとって、ジオリテラシーの修得は必須といえる。今日の高度情報化社会にあっては、準リアルタイムで提供される気象情報のほか、地質や地形、そして斜面ハザードに関する多くの有用な情報が整備され、公開されている。これらに主体的にアクセスし、警戒避難につなげられるようなジオリテラシーの教育普及と、研究機関・行政機関・地域住民の間でのリスクコミュニケーションの充実が望まれる。

参考文献

- 1) 気象庁(2020)日本の気候変動2020—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—(<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>)
- 2) 松四雄騎, 2017. 宇宙線生成核種を用いた岩盤の風化と土層の生成に関する速度論—手法の原理, 適用法, 研究の現状と課題—. 地学雑誌 126, 487-511.
- 3) 松四雄騎・外山 真・松崎浩之・千木良雅弘, 2016. 土層の生成および輸送速度の決定と土層発達シミュレーションに基づく表層崩壊の発生場および崩土量の予測. 地形 37, 427-453.
- 4) Matsushi Y., Chigira M., Kosugi K., 2014. Orographic rainfall, deep-seated catastrophic landslides, and landscape evolution: geomorphic hazard assessment in active orogens. Proceedings of INTERPRAEVENT2014 1, 24-32.