

渓流水・湧水を活用した 土砂災害予測の研究



じとうその たかし
地頭 隆
鹿児島大学農学部 教授

1. はじめに

山崩れは、山地斜面の風化土層や基盤岩が豪雨等で安定性を失い高速度で崩落する現象であり、斜面の表層部に生成された風化土層が雨水の浸透で崩れる表層崩壊や風化した岩盤が深い地下水等の影響で大規模に崩れる深層崩壊などがある。

近年、気候変動等の影響による記録的な大雨の増加に伴って、深層崩壊に代表される深い地下水が関与した大規模な崩壊（以下、「地下水型崩壊」という）が目立っている。地下水型崩壊は、崩壊土砂量が多いため大きな被害をもたらしたり、崩壊土砂が地下水を多量に含んで流動化して広範囲に土石流災害を引き起こしたりする。また、地下水は地中をゆっくり流動するために、雨が止んで長時間経過した無降雨時に崩壊が発生して警戒対応が困難な場合もある。

地下水が集中する地下構造をもつ箇所は、地下水の排水システムが地下侵食等で破壊されたり、排水能力を超える地下水が集中したりすると、地下水圧が上昇して地下水型崩壊発生の可能性が高まることが予想される。

ここでは、九州の火山性地質の地域で発生した地下水型崩壊を対象にして、危険箇所の抽出と警戒対応に関する研究を紹介する。

2. 地下水型崩壊発生の予測手法

図-1は、渓流水や湧水を活用して、地下水の集中という視点で地下水型崩壊発生の危険箇所を段階的に抽出し、さらに危険箇所の湧水を監視して警戒対応を行う提案である¹⁾。

「A 危険渓流の抽出」では、数 km² 未満の小流域を設定して、降雨が一週間以上なかった後に、溪床に基盤岩が露出しているなど、渓流水が伏流していない箇所でも基底流量を測定する（図-2）。この流量を流域面積で除した基底比流量が大きい流域は、地形的分水界より広い水文的分水界に規制された地下水が流域内に流入している可能性があり、地下水型崩壊の恐れのある

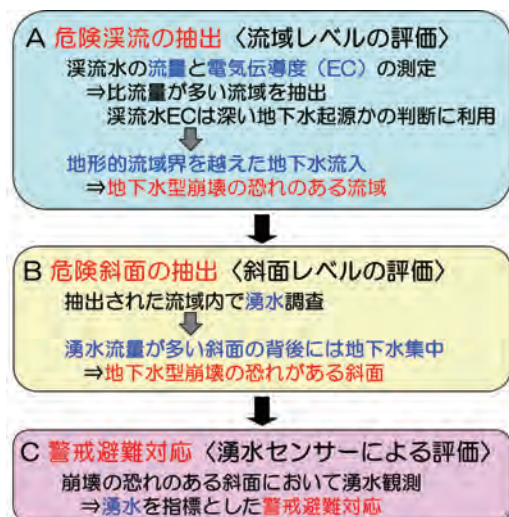


図-1 渓流水・湧水を活用した地下水型崩壊の危険箇所抽出と警戒対応



図-2 渓流の水文調査

る流域として抽出する。また、流量測定時にポータブル電気伝導度計で渓流水の電気伝導度（EC）を測定して渓流水が深い地下水起源かを判断する。ECは渓流水中の溶存イオンの総量であり、地下水が流動する過程で岩石から溶出するイオンを取り込むことから、多量の深い地下水が流出している流域は渓流水ECが高くなる。

なお、渓流水ECは人家、畜産施設などの排水の影響を受けて高い値を示すことがあるため、渓流水が人為的な影響を受けている可能性のある箇所ではシリカ（SiO₂）濃度を活用して影響の有無を判断する。シリカ濃度は地下水が岩石と接触して起こる化学反応によって溶出することから、多量の深い地下水が流出している渓流水はECと同様に高くなる傾向がある。シリカ濃度の測定はEC測定に比べて手順が煩雑であるが、シリカはほとんどが鉱物由来であるために人為的な影響を受けにくいという長所がある。

「B危険斜面の抽出」では、調査Aで抽出した流域において湧水の分布や流量等の調査を行う。湧水流量が多い斜面の背後には地下水が集中する地下構造が推定され、地下水型崩壊の恐れがある斜面と判断する。

以上の方法で深い地下水が集中する流域や斜面の分布図を作成し、地形・地質に基づく危険箇所と組み合わせることで崩壊発生の危険箇所抽出の精度を高める。

「C警戒避難対応」は、調査Bで見いだされた湧水を指標にして地下水型崩壊発生の危険性を判断するものである。そこで、湧水流量をリアルタイムで監視する装置（湧水センサー）を開発した²⁾。湧水センサーは、電極式流量計、変換・記録装置、電源装置、太陽電池、携帯電話伝送装置等から構成される（図-3）。電極式流量計は、塩ビパイプに取り付けた鉛直方向1cm間隔の電極によって測定される水位から流積を求め、流積にマンニング式による流速を乗じて湧水流量を算出する

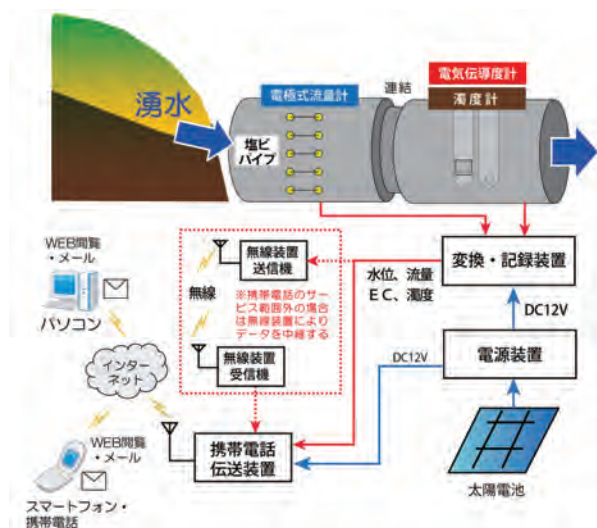


図-3 湧水センサーのシステム構成

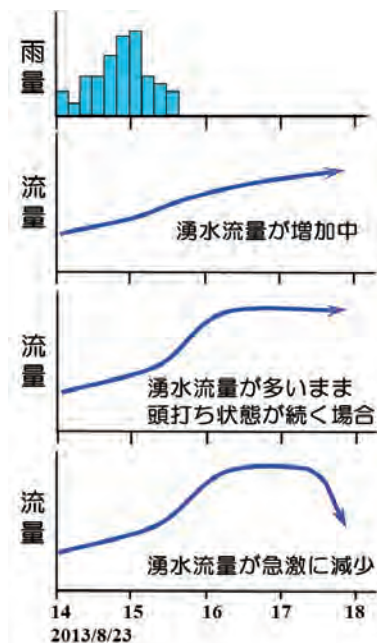


図-4 湧水を指標にした崩壊危険度の評価

装置である。塩ビパイプ径の大きさは設置点の湧水流量で決定する。測定値は携帯電話を使ってリアルタイムでサーバーに送信され、インターネットを介してパソコンやスマートフォンで閲覧できる。

湧水流量から次のような崩壊発生の警戒対応を考えている（図-4）。湧水が増加中の場合は、雨が止んだ後も基岩内の地下水位が上昇中であり、崩壊の危険性が増加中、また、湧水が多いまま頭打ち状態が続く場合は地下水排水システムの能力を超えた地下水が集中している可能性があり、基岩内の地下水位が上昇して崩壊の危険性が継続している。さらに、湧水が急激に減少した場合は山体の地下水排水システムが地下侵食等で破壊された可能性があり、基岩内の地下水位が急上昇して崩壊発生の恐れがある。以上の状況が降雨終了後もみられる時は警戒対応を継続しなければならないと考えている。

3. 地下水型崩壊の危険箇所抽出の事例

3.1 鹿児島県南大隅町の火砕流台地

2010年7月4日～8日、南大隅町船石川流域の火砕流台地縁で崩壊が繰り返し発生した（図-5）。崩壊発生時はほとんど雨が降っていなかったが、発生前の1カ月間に1000mmを超える降雨量があった。崩壊斜面の地質は、亀裂の多い溶結凝灰岩とその下位の非溶結凝灰岩から構成される。崩壊直後、それらの地層境界から多量の湧水がみられたことから、台地上から浸透した雨水は溶結凝灰岩層の亀裂を通して非溶結凝灰岩

層に達し、地層境界を流動して台地周縁から流出していると考えられた。崩壊は、多量の降雨に伴う地下水の集中と地下水圧の上昇、湧水付近の侵食による溶結凝灰岩層の不安定化等で発生した³⁾。

図-6は、火砕流台地周縁の42流域（面積0.001～1.20km²）の比流量と渓流水ECの分布である。台地の北東側と西側に位置する流域は、渓流水ECが通常の河川水より高い10mS/m以上を示して比流量が大きく、水文的分水界に規制された広い範囲の地下水が集中していると考えられる。したがって、これらの流域の台地縁の急斜面（図-6の黒破線付近）は地下水型崩壊発生危険斜面と判断される。2010年と1966年に発生した崩壊はこれらの斜面で発生している。

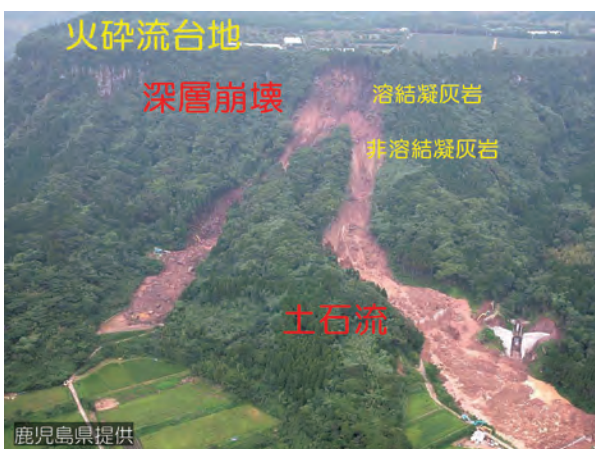


図-5 2010年に鹿児島県南大隅町の火砕流台地縁で発生した崩壊・土石流

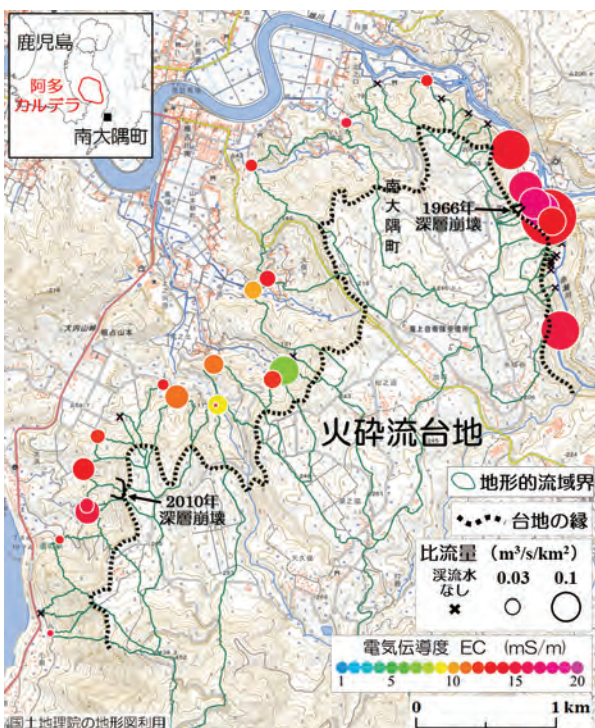


図-6 南大隅町の火砕流台地周縁における地下水型崩壊危険渓流の抽出

3.2 大分県耶馬溪町の火砕流台地

2018年4月、耶馬溪町で降雨がないときに大規模な崩壊が発生し、6名が亡くなった（図-7）。崩壊斜面の地質は、火砕流堆積物とその下位の火山岩類から構成される。火砕流堆積物の溶結部は亀裂が多くて急崖をなしており、その直下には崖錐が発達している。崩壊直後、崩壊地内に湧水がみられ、その付近の岩石は粘土化していた。崩壊は、湧水付近の地下水排水システムの破壊により地下水圧が徐々に上昇、あるいは、湧水付近で長年の侵食により小規模な崩壊が発生、連続して上部の崖錐堆積物とその下位の強風化層が崩壊し



図-7 2018年に大分県耶馬溪町の火砕流台地縁で発生した崩壊



図-8 耶馬溪町の火砕流台地周縁における地下水型崩壊危険渓流の抽出

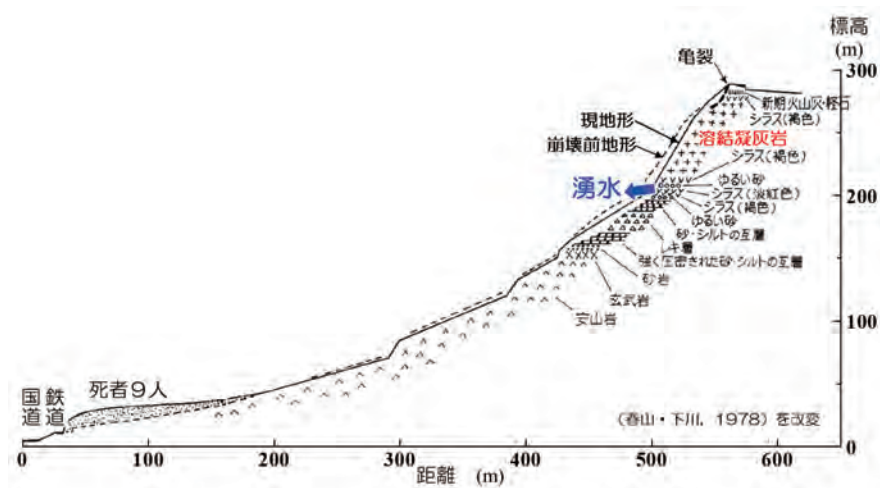


図-9 1977年に鹿児島市竜ヶ水の始良カルデラ壁で発生した崩壊

たと推定された⁴⁾。

図-8は、この火砕流台地周縁に設けた90流域（流域面積0.004～2.07km²）の渓流水の流量とECの分布図である。台地の東側には渓流水ECが高くて比流量が大きい流域が分布しており、台地に浸透した雨水は地下水として台地の東側へ流動していることがわかる。これらの流域のひとつで2018年に大規模な崩壊が発生した。この崩壊地内の標高220m付近から湧出する地下水の流量とECを測定すると、流量0.55L/sec、EC12mS/mであった。湧水付近における地形的流域面積は0.007km²であり、比流量は0.079m³/s/km²となる。この値は90流域の平均比流量0.005m³/s/km²の約16倍である。したがって、湧水付近における水文的流域面積は、地形的流域面積の約16倍と大きく、崩壊した斜面には広範囲の地下水が集中している地下構造が推定される。

3.3 鹿児島県の始良カルデラ

1977年6月、鹿児島市竜ヶ水において、始良カルデラ壁の急斜面が大規模に崩壊し、崩壊土砂が土石流となって下流を襲い、9人が亡くなった（図-9）。崩壊発生時は大雨ではなかったが、発生前の1カ月間に700mm近くの降雨があった。斜面からは湧水があり、その上部の溶結凝灰岩層が崩壊したものであった⁵⁾。

図-10は、始良カルデラ西壁の61流域（面積0.01～0.57km²）の比流量と渓流水ECの分布である。竜ヶ水付近と白浜の北側に位置する流域は、渓流水ECが高くて比流量が大きく、水文的分水界に規制された広い範囲の地下水が集中していると考えられる。竜ヶ水付近の流域において湧水調査を実施した（図-11）。No.32流域は、1977年に地下水型崩壊が発生した流域であり、標高214m付近の溶結凝灰岩の割目から多量の湧水がみられ、湧水の流量とECは0.8L/s、14mS/

mであった。No.32流域の下流端で測定した渓流水の流量とECは0.8L/s、13mS/mであり、流域の基底流量は崩壊地からの湧水に依存していることがわかる。No.32流域の1977年崩壊斜面の背後には地下水が集中する地下構造が推定され、湧水付近の侵食が進んで上部層が不安定になると再び崩壊が起こる可能性がある。No.30流域では、標高197m付近の溶結凝灰岩の割目からの湧水は少なく、標高78m付近の安山岩の割目から多量の湧水が見られた。No.32流域とNo.30流



図-10 始良カルデラ西壁における地下水型崩壊危険渓流の抽出



図-11 竜ヶ水付近の流域における湧水調査

域は隣接しているが、多量の地下水が流出している地層は異なり、地下水を集水する地下構造も異なることが推定され、地下水が関与する崩壊タイプも異なると思われる。

3.4 地下水型崩壊の発生機構

図-12は、九州の火砕流台地周縁、カルデラ壁、火山岩山地で発生した代表的な地下水型崩壊を模式的に

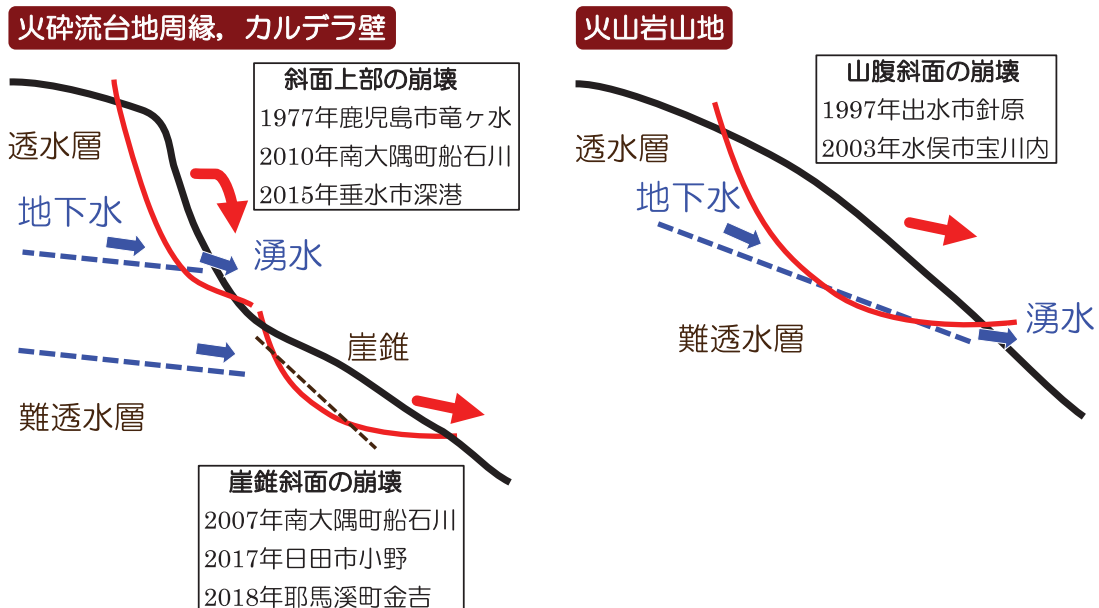


図-12 九州で発生した地下水型崩壊のタイプ

示したものである。火山性地質の地域は、火山活動に伴う堆積物が幾層も重なっており、透水性の不連続な地層構造が特徴的である。このような地域において、深い地下水が集中している箇所では、①地下水排水システムの破壊による地下水圧上昇に伴う風化層からの崩壊、②地下水排水能力を超えた地下水集中による地下水圧上昇に伴う風化層からの崩壊、③湧水箇所の地下水による侵食に伴う風化層の崩壊、④地下水集中により常時飽和している崖錐堆積物の崩壊などのタイプがみられた。タイプ①の排水システムの破壊は、長年の岩石劣化や地下侵食、地震等が考えられる。タイプ②③④は近年の記録的な大雨の増加により発生頻度が増している。タイプ①～④により生産された土砂は、発生場所や地下水量によっては土石流化して下流の広範囲に被害を及ぼす可能性がある。

図-1に示した調査によって地下水集中箇所が抽出されたら、そこで起こりうる崩壊の発生機構を明らかにし、有効な土砂災害対策を検討することが重要であると考える。

4. 地下水型崩壊の警戒避難対応の事例

南大隅町の火砕流台地周縁や始良カルデラ壁において抽出した地下水集中箇所に湧水センサーを設置した(図-13)。これらの地域は透水層と難透水層の互層からなる地下構造を呈し、地層境界を流動した地下水が崩壊発生に関与している。この地下構造に1段タンクモデルを適用して降雨と地下水流出の応答を解析した。タンクモデルの流出孔(湧水)と浸透孔(深部浸透)の係数は湧水センサーの観測データから同定した。



図-13 始良カルデラ壁に設置した湧水センサー

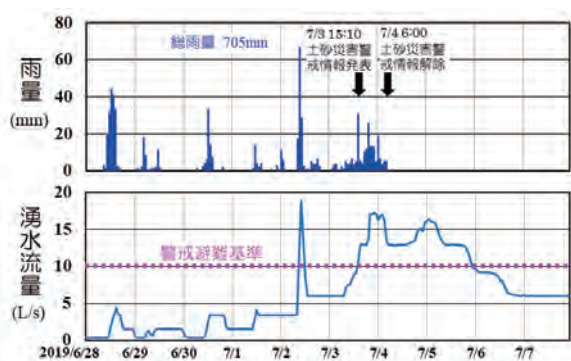


図-14 南大隅町火砕流台地縁の湧水センサーの観測データ

この地下水流出モデルを用いて既往の崩壊発生時の湧水流量を求め、崩壊の警戒避難基準を策定した。

図-14 は、2019年に記録的な大雨に見舞われた南大隅町火砕流台地の湧水センサーの観測データである。南大隅町では、土砂災害警戒情報が7月3日15時10分に発表され、雨が止んだ後の4日6時に解除された。一方、湧水流量も3日に地下水型崩壊の警戒避難基準を超過したが、雨が止んだ後も2日間は超過状態が続いた。地下水型崩壊による土砂災害の警戒には地下水状態を表す湧水流量のような情報も必要である。

これまで蓄積された湧水センサーの観測データによると、雨が止んでから2日程度は湧水流量が多い状態が続いており、地下水型崩壊の警戒対応を継続する時間の目安になると考えている。

5. おわりに

地下水型崩壊発生危険箇所の抽出と警戒避難対応に関して水文学的アプローチによる研究を紹介した。現在、土砂災害発生危険のある区域指定（土砂

災害警戒区域等）は、主に地形条件に基づいている。2012年および2017年の九州北部豪雨の際は、地下水型崩壊が危険箇所として指定されない30度未満の斜面で発生した。地下水集中の水文条件を加えることは土砂災害の危険区域指定の精度を高めることになり、これまでの手法では抽出されなかった危険斜面が抽出できる可能性がある。

一方、豪雨時に土砂災害発生危険の恐れが生じたときに発表される土砂災害警戒情報は、降雨ピークで発生することが多い表層崩壊や土石流を対象としており、地下水型崩壊のように時間差がある崩壊は含まれていない。湧水流量の変化をリアルタイムで把握することは、地下水型崩壊が発生しやすい地域における防災対策に有効である。

最近の土砂災害をみると、明らかに大規模な土砂移動現象が多発している。気候変動等の影響による集中豪雨、局地的大雨、大型台風等の増加に伴って、これまでに経験したことがない大規模な土砂災害の発生リスクが各地で高まっている。降水予測の精度がさらに高まれば、予測される降水量に合わせて土砂災害の警戒区域の範囲や警戒体制のレベルを設定する仕組みも必要になると考えられる。たとえば、「今後400mmを超えるような大雨が予想される」等が発表された場合は、警戒区域や警戒体制を拡大して大規模災害に備える、同時に住民にどのような対応を求めるか、などを具体的に検討する時代に入ったと思っている。そういった具体的な対策に寄与するために、本論で説明した大規模土砂災害を引き起こす地下水型崩壊の発生場と発生時期の予測研究を一層推進する必要があると考えている。

末筆であるが、本論で紹介した研究成果は、当時研究室に在籍していた学生諸氏と実施したものである。ここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 地頭菌隆 (2014) : 渓流水の電気伝導度を用いた深層崩壊発生場の予測、砂防学会誌、66 (6)、p.56-59
- 2) 地頭菌隆・石塚忠範・能和幸範・柳町年輝 (2014) : 深層崩壊警戒対応の湧水センサーの開発、砂防学会誌、66 (5)、p.49-52
- 3) 下川悦郎・小山内信智・武澤永純・地頭菌隆・寺本行芳・権田豊 (2010) : 2010年(平成22年)7月鹿児島県南大隅町で発生した連続土石流災害、砂防学会誌、63 (3)、p.50-53
- 4) 久保田哲也・地頭菌隆・長井義樹・清水収・水野秀明・野村康裕・鈴木大和・山越隆雄・厚井高志・大石博之・平川泰之 (2018) : 2018年4月11日大分県中津市耶馬溪町で発生した斜面崩壊、砂防学会誌、71 (2)、p.34-41
- 5) 春山元寿・下川悦郎 (1978) : 鹿児島市吉野町電ヶ水地区の山地崩壊・土石流災害について、砂防学会誌、30 (4)、p.33-38