

深層崩壊の予測と地域防災力の向上

農学部 地頭 藺 隆・寺本 行芳・和田 大祐・田淵 陽介・中島 希

1. はじめに

近年、記録的な大雨の増加に伴い、深層崩壊が各地で発生している。たとえば、1997 年鹿児島県出水市針原、2003 年熊本県水俣市宝河内、2005 年九州山地や鰐塚山地、2010 年鹿児島県南大隅町や奄美大島、2011 年紀伊山地や四国山地などがあげられる。また 2011 年東北太平洋沖地震でも深層崩壊が発生した。

表層崩壊は、発生頻度が高いこともあって研究が進み、予測や対策が確立してきた。しかし、深層崩壊は発生メカニズムの解明や予測手法の研究が十分でない。深層崩壊は崩壊土砂量が多いために被害が大きくなる場合が多く、また崩壊土砂が土石流となったり、天然ダムを形成したりする。深層崩壊による土砂災害を防止・軽減するためには、崩壊の発生メカニズムを解明するとともにその発生予測手法の確立が必要である。

本研究の目的は、深層崩壊発生予測手法を開発することである。ここでは、深層崩壊発生の予測に渓流水や湧水を活用する手法の提案と検証を行う。

2. 深層崩壊発生場の予測

現在、「深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル（案）」（土木研究所，2008）に基づいて、深層崩壊発生の可能性がある溪流を抽出する作業が進められている。既往の深層崩壊研究によると、多くの深層崩壊地で多量の地下水流出がみられる。基岩内に地下水を貯留している斜面は、大雨や地震によって深層崩壊が発生する危険性が高いと考えられる。上記マニュアルは深層崩壊発生の危険性がある溪流をおもに地形・地質因子から抽出するものである。図 2.1 は、これに加えて水文因子を取り入れる手法を提案したものである（地頭 藺ら，2012）。

(1) 流域レベルでの危険度判定

溪流縦断方向において渓流水の電気伝導度（EC）をポータブル電気伝導度計で測定し、その位置を GPS で測位する。EC は渓流水中の溶存イオンの総量の指標であり、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ために、地下水の湧出点付近の渓流水は EC が高くなる。EC を地形図にプロットして、①対象地域（流域）内で相対的に渓流水 EC が高い溪流と、②溪流縦断方向において EC が不連続的に高い値を示す溪流を抽出する。①や②に該当する溪流は、流域内に深層風化した地層が存在し、そこを滞留した地下水が多量に流出していると推定される。これらの溪流は深層崩壊発生の危険性が高い流域と判断される。

(2) 斜面レベルでの危険度判定

前項②の溪流において、EC が高い地点付近の湧水調査を行う。調査項目は、湧水点の位置、湧水が出ている斜面、湧水量である。斜面脚部から多量の湧水がみられる斜面は基岩内に地下水を貯留していると推定され、水文因子からみた深層崩壊発生の危険性のある斜面と判断される。

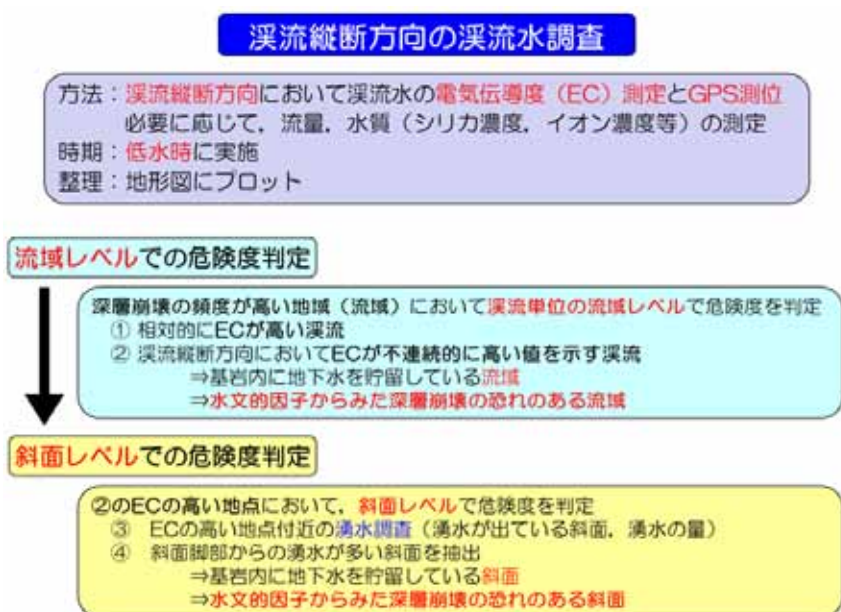


図 2.1 溪流縦断方向の渓流水調査（地頭 藺ら，2012）

3. 火山岩地域における調査例

鹿児島・熊本・宮崎の三県の境界付近には肥薩火山岩類と呼ばれる火山噴出物が分布している。この地域では、1972 年宮崎県えびの市、1997 年鹿児島県出水市、2003 年熊本県水俣市および鹿児島県菱刈町（2008 年に大口市・菱刈町は合併して伊佐市）などの深層崩壊が発生している。

1997 年 7 月 10 日、鹿児島県出水市の針原川流域で深層崩壊が発生した（図 3.1）。崩壊した土砂は土石流となり下流の集落を襲い、死者 21 名という大きな被害をもたらした。降り始めから災害発生までの総雨量は 401mm、最大日雨量は 275mm であった。針原川流域の地質は、輝石安山岩と輝石安山岩質凝灰角礫岩からなる。崩壊の規模は、最大幅約 80m、長さ約 190m、最大崩壊深約 30m、崩壊土砂量約 13 万 m³であった。

針原川が位置する矢筈岳西側山体において、渓流水や湧水の調査を実施した。図 3.2 は溪流縦断方向の渓流水 EC の分布である。渓流水 EC がある標高で変化する溪流がある。一例として江良川（図 3.3）を取り上げる。江良川では、図 3.4 に示すように、標高 140m 付近で渓流水 EC が急激に増加しており、この付近の斜面内に貯留されている地下水が溪流に集中して流出していることを示している。江良川流域には中下流域に深層崩壊跡地が空中写真から判読され（図 3.3）、さらにその脚部には厚い堆積土砂が観察される。また中流域には溪流を横断する方向にリニアメントが判読される。このような地形・地質構造の特徴と渓流水 EC の変化地点がよく対応しており、何らかの因果関係が考えられる。

図 3.5 は、矢筈岳西側の 4 流域で調査した湧水の分布である（地頭菌ら、2006）。図において、矢印の太さと向きは湧出量の大小と湧出している向きであり、□印は湧水 EC が特に高かったところ、●印は渓流水 EC の変化点である。●印の周辺には湧出量が多く、また EC の高い湧水が分布しており、渓流水 EC の変化はその付近で流出している地下水に起因していることがわかる。

流域の湧水調査は面的な調査であるために多大な労力を要するが、溪流縦断方向の渓流水調査は線的な調査であり比較的容易にできる。したがって、溪流縦断方向の渓流水調査で変化点を見出して、その変化点周辺の湧水調査を実施し、湧出している斜面を抽出する方法が効果的である。

溪流縦断方向における渓流水 EC の変化点とその周辺の湧出量が特に多い湧泉位置および湧出している斜面位置から地下水が貯留されている斜面を抽出した（図 3.5 内の水色）。この斜面は水文因子に基づく深層崩壊の発生危険斜面と判断される。



図 3.1 針原深層崩壊（1997 年 7 月 12 日撮影）

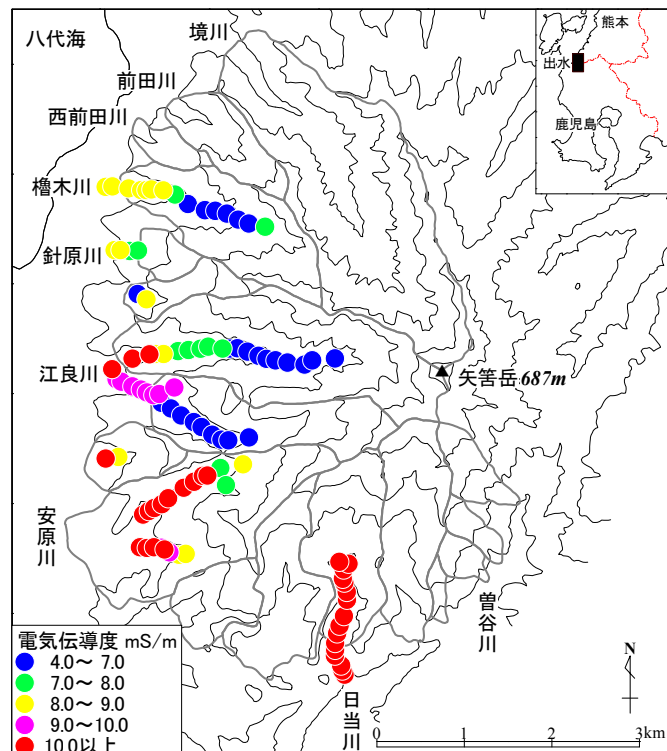


図 3.2 矢筈岳山体における渓流水 EC の分布

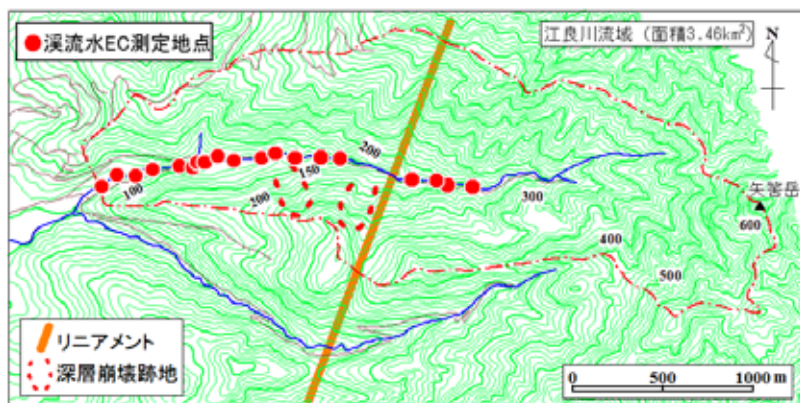


図 3.3 江良川流域の地形と渓流水 EC 測定地点
(地頭菌ら, 2000)

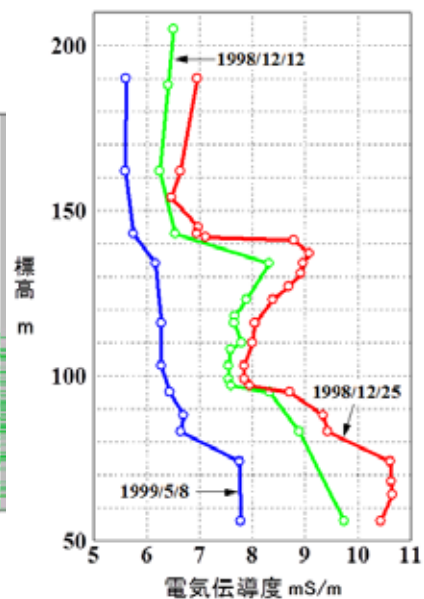


図 3.4 江良川における渓流水 EC の標高分布
(地頭菌ら, 2000)

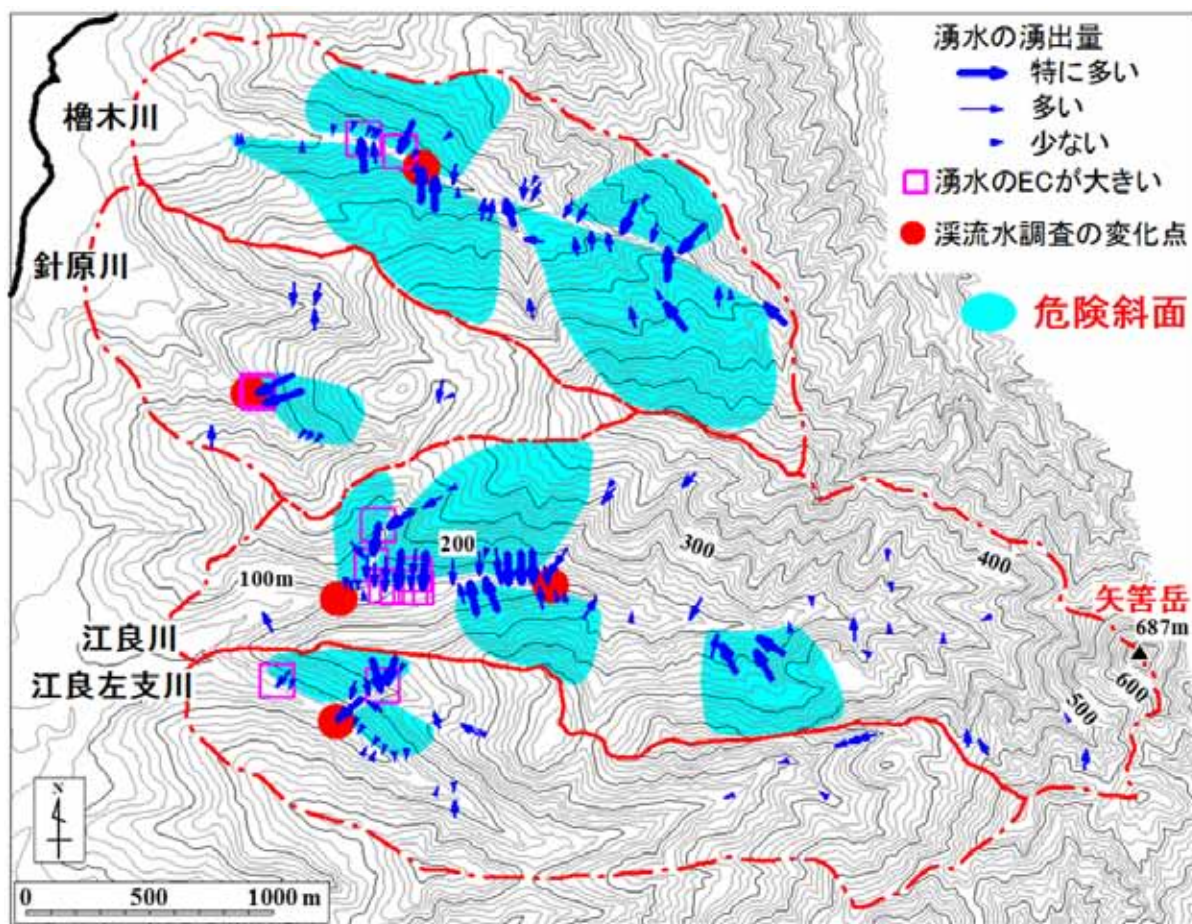


図 3.5 湧水分布と深層崩壊発生危険斜面の抽出 (地頭菌ら, 2006)

4. 鰐塚山地における調査例

2005年9月台風14号によって、宮崎県内は総雨量1321mmを観測するなど、記録的な大雨となった。宮崎県南部の鰐塚山に位置する別府田野川(びゅうたのがわ)流域では複数の深層崩壊が発生した(図4.1)。鰐塚山の地質は古第三紀の砂岩・頁岩互層からなる。

別府田野川流域を対象に溪流縦断方向の溪流水 EC を測定した(図4.2)。別府田野川流域には EC が相対的に高い溪流(a, b, e)と低い溪流(c, d)が分布している。さらに、溪流縦断方向において EC が不連続的に高い値を示す溪流(a, b)がみられる。2005年に発生した深層崩壊は、EC が相対的に高い溪流に位置しているものが多い。溪流水 EC の分布は、溪流単位の流域レベルでの深層崩壊発生の危険度判定の指標のひとつになると考える。しかし、図4.2内のf付近の溪流には pH9 の冷鉱泉が確認され、溪流水 EC が 44 mS/m と極端に高いところがあった。このような溪流では別の因子での確認が必要である。

図4.3は、図4.2内のa～d溪流について、溪流縦断方向の溪流水 EC の標高分布を示したものである。溪流a(2011年12月16日測定)は、標高約300mから標高約500mにかけて EC が低下していくが、2005年深層崩壊が発生した標高500m～600m間で急激に高くなっており、深層崩壊跡地から EC の高い地下水の流出が続いていることがわかる。溪流b(2011年12月24日測定)は、標高約450mから標高約600mにかけて EC が上昇する傾向がみられる。標高600m付近の滝により上流は調査できなかったが、源頭部には2005年深層崩壊跡地が位置している。溪流c(2012年2月5日測定)は、標高400m～650m区間の EC に大きな変化はみられなかった。それより上流は滝が連続して調査できていない。溪流d(2012年1月21日測定)は、標高350m～650m区間の EC は低下傾向にある。それ以上は溪流水が伏流していた。



図 4.1 鰐塚山の深層崩壊と土石流
(2005年12月22日撮影)

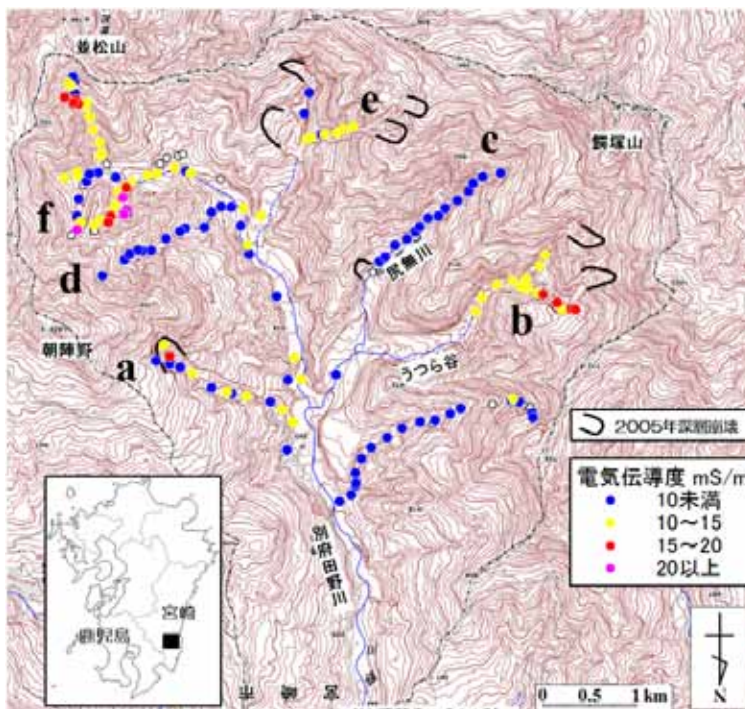


図 4.2 鰐塚山別府田野川流域における溪流水 EC の分布
(地頭菌ら, 2012)

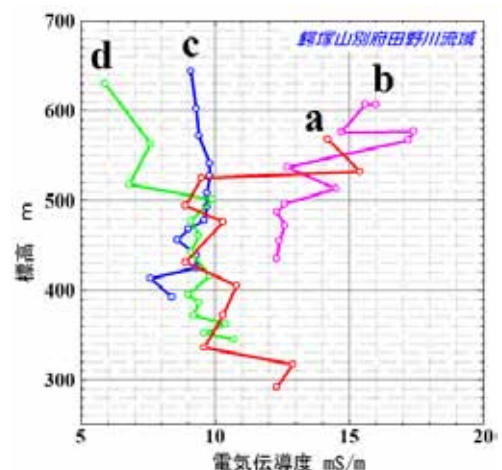


図 4.3 鰐塚山別府田野川流域における
溪流水 EC の標高分布
(地頭菌ら, 2012)

5. 九州山地における調査例

1963年8月17～18日に熊本県球磨郡五木村横手谷で深層崩壊が発生した（図5.1）。総雨量は1052mm，最大日雨量は575mmであった。崩壊の規模は，崩壊面積8.5ha，崩壊土砂量約30万 m^3 である。崩壊地の地質は苦鉄質火山岩類・石灰岩・チャート・泥質岩からなり，葉片状構造を呈している。地形は斜面上部から尾根にかけて緩やかであり，尾根部には古い滑落崖とみられる段差が存在していた（下川・岩松，1985）。

横手谷川流域を対象に溪流縦断方向の溪流水ECを測定した（図5.2）。深層崩壊が発生した横手谷川左支川の溪流水ECは本川および南側溪流に比べて高い値を示した。図5.3は，横手谷川左支川の溪流縦断方向の溪流水ECの標高分布である。深層崩壊跡地からはECが高い多量の湧水があり，これが横手谷川左支川の溪流水ECが高い原因である。

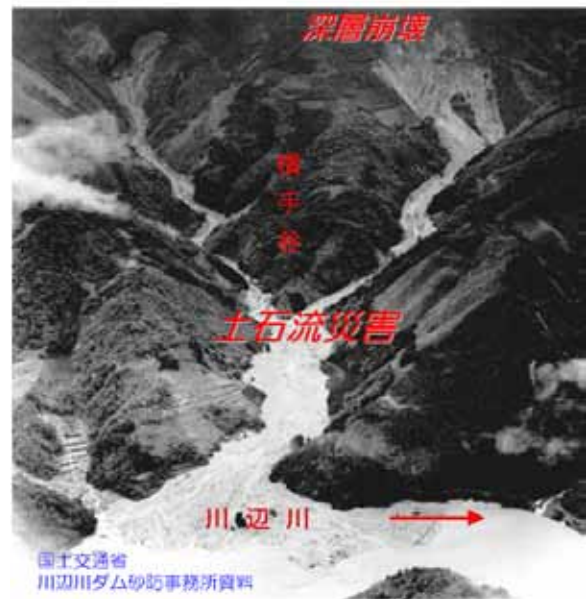


図 5.1 横手谷の深層崩壊と土石流

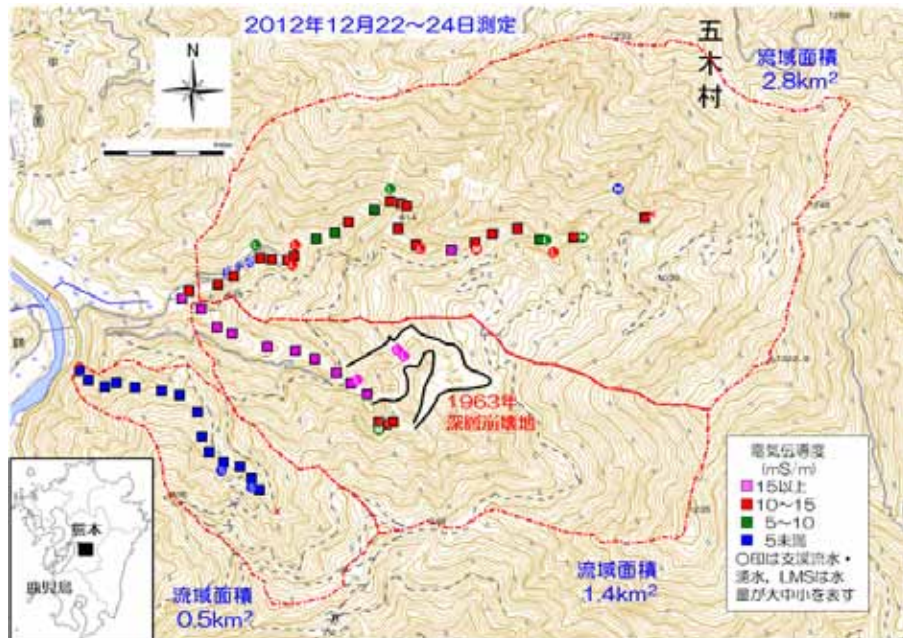


図 5.2 横手谷川流域における溪流水 EC の分布

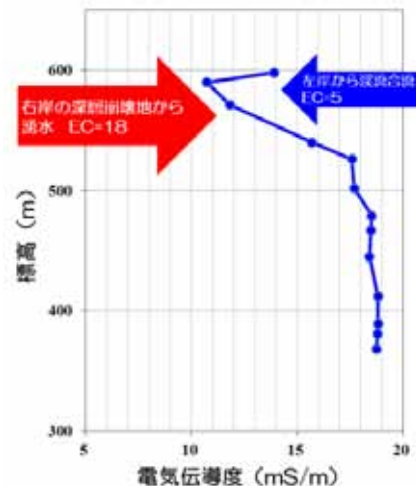


図 5.3 深層崩壊が発生した横手谷川左支川における溪流水・湧水 EC の標高分布

6. 紀伊山地における調査例

2011年9月の台風12号は、3日10時前に高知県東部に上陸し、ゆっくり北上を続けて3日18時頃に岡山県南部に再上陸、中国地方を北上して4日未明に山陰沖に達した。台風を取り巻く雨雲や湿った空気の流れ込みにより、紀伊半島、四国地方東部、中国地方東部を中心に記録的な大雨となった。この大雨によって紀伊半島では何十箇所でも深層崩壊が発生した。

深層崩壊が発生した紀伊半島のいくつかの流域で溪流縦断方向の溪流水 EC を測定した。ここでは、和歌山県田辺市熊野（いや）川流域と奈良県五條市長殿谷流域の調査結果を示す。

(1) 熊野川流域

和歌山県田辺市熊野川流域で発生した深層崩壊は、崩壊土砂が土石流となって住家を襲い、3名の犠牲者を出した（図6.1）。深層崩壊の規模は、幅約400m、長さ約700m、崩壊土量410万 m^3 であった（松村ら、2012）。崩壊斜面の地質は古第三紀の砂岩・泥岩である。

図6.2は熊野川流域の溪流縦断方向の溪流水 EC の測定結果である。深層崩壊跡地からは EC が高い多量の湧水が確認された。



図 6.1 熊野川流域の深層崩壊

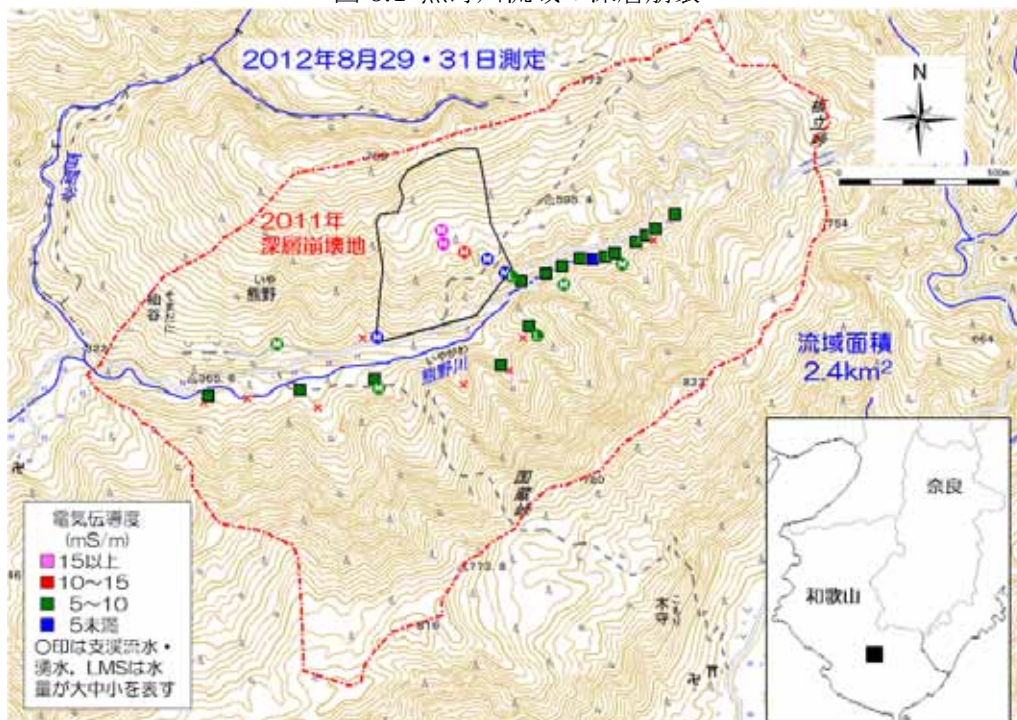


図 6.2 熊野川流域における溪流水 EC の分布

(2) 長殿谷流域

図 6.3 は、奈良県五條市の赤谷と長殿谷で発生した深層崩壊である。長殿谷流域で発生した深層崩壊の規模は、幅 250~300m、長さ 480~660m であった。滑落崖付近には赤茶色の砂岩が確認され、その下部には泥質岩が露出している。崩壊地に向かって右側は泥質岩、左側は砂岩であった（松村ら、2012）。崩壊土砂は対岸まで達し、天然ダムを形成した。

図 6.4 は、長殿谷流域の溪流縦断方向の溪流水 EC および右岸・左岸斜面からの支溪流水・湧水 EC の測定結果である。長殿谷流域の左岸側からの支溪流水・湧水 EC は相対的に高い値を示している。長殿谷流域の左岸側の尾根付近には明瞭な線状凹地が確認され、その原因が岩盤クリープとすると地下深くまで破碎された地層を流れた地下水が左岸側からの支溪流水・湧水の EC を高めている可能性がある。

図 6.5 は、溪流縦断方向の溪流水 EC および右岸・左岸斜面からの支溪流水・湧水 EC の標高分布を示したものである。溪流水 EC は深層崩壊地の直下で高くなっており、深層崩壊地から EC の高い地下水が流出していることが考えられるが、天然ダムによって確認はできなかった。また、標高 550m 付近では左岸・右岸からの支溪流水・湧水の EC が高くなっている。今後、地質構造等との関係も検討したい。



図 6.3 長殿谷流域と赤谷流域で発生した深層崩壊

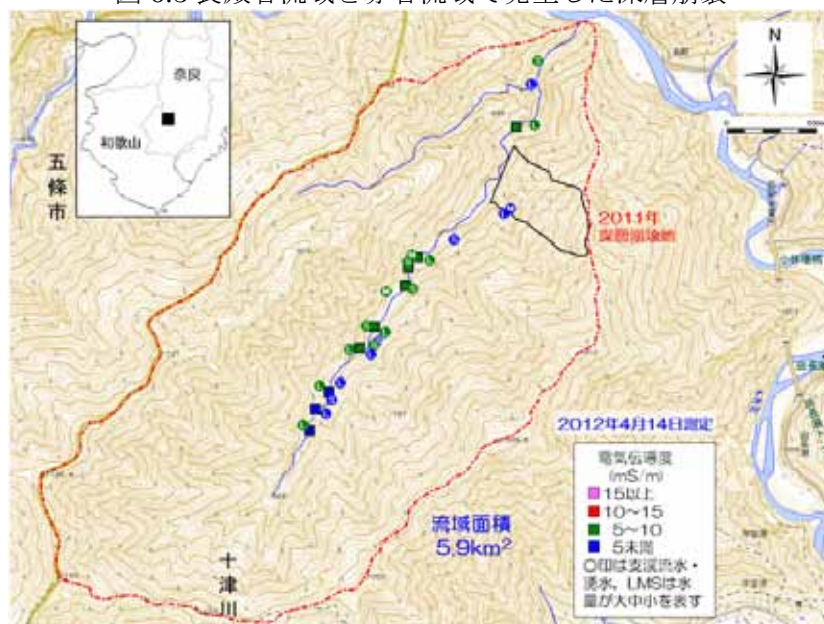


図 6.4 長殿谷流域における溪流水 EC の分布

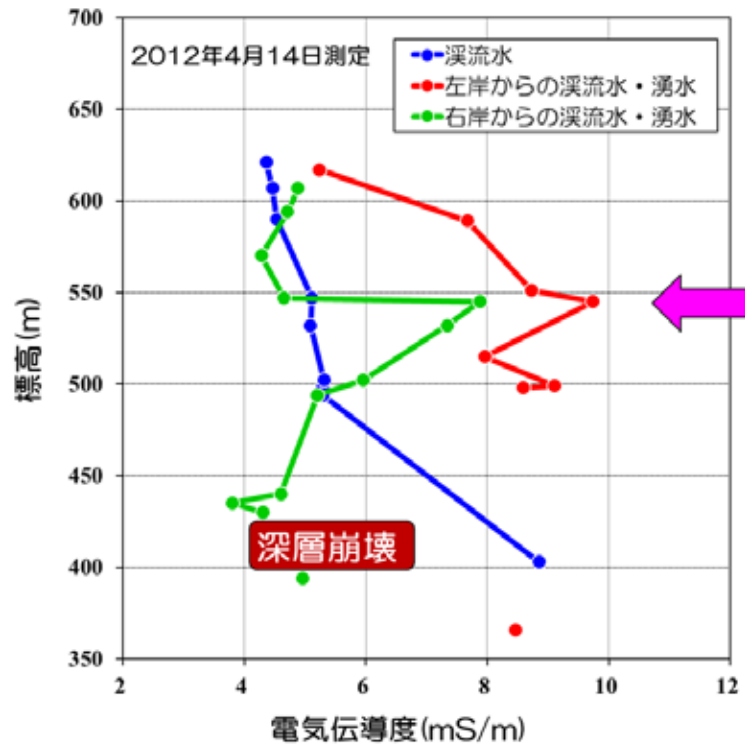


図 6.5 長殿谷流域における渓流水・湧水 EC の標高分布

7. 渓流水調査の今後の検討と注意点

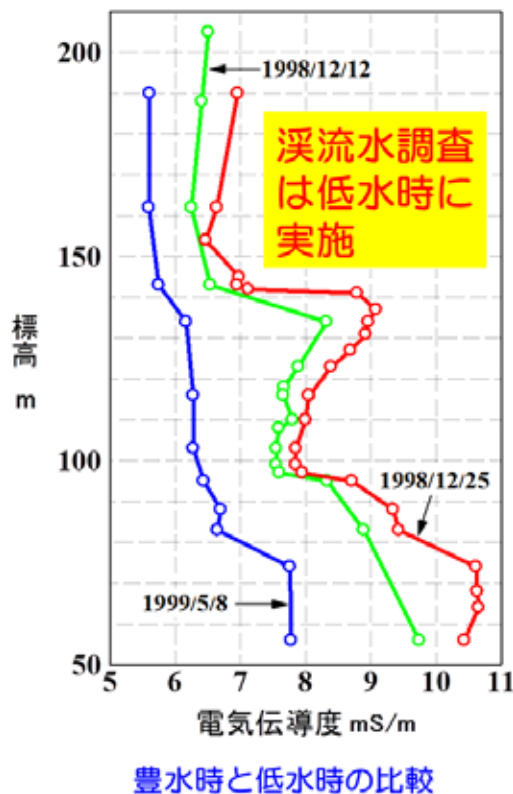
渓流縦断方向の渓流水調査において EC 測定は広範囲の調査に有効である。簡単に測定できる渓流水 EC を地形図にプロットし, EC が相対的に高い溪流や溪流縦断方向で大きく変化する溪流を絞り込んでから専門家が詳細な調査を行う手順を提案したい。また渓流水 EC 測定とデータ整理を効率化するために, EC 計と GPS を一体化させた装置の開発を提案したい (図 7.1)。

渓流水 EC 測定の注意点として, 渓流水調査は EC が大きくなる渓流水が少ない時期に行うことが効果的である (図 7.2)。また, 渓流水 EC は, 人家, 農地, 畜産施設などからの排水の影響を受ける場合があり, このような流域ではイオン濃度測定等によるチェックが必要となる (図 7.2)。



EC計・GPS・データロガーを一体化した装置
 ボタンひとつで位置・ECを記録⇒地形図にプロット
 渓流水調査の簡易化, データ整理の迅速化

図 7.1 渓流縦断方向の渓流水 EC 測定の提案 (地頭菌ら, 2012)



- EC測定は容易だが、農地、畜産施設の排水の影響を受ける
- 流量測定、シリカ濃度、イオン濃度等を用いたチェックが必要

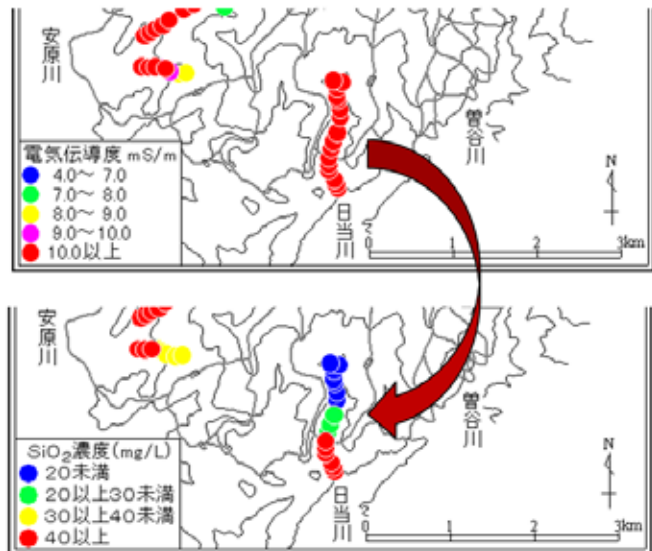


図 7.2 渓流水調査の注意点

8. 湧水データを用いた深層崩壊発生の警戒避難の検討

深層崩壊発生の危険性が確認された箇所では、できるだけ早く深層崩壊に対する警戒避難体制の充実が望まれる。斜面脚部における湧水は基岩内の地下水の状態を反映しており、この湧水の変化を指標にして深層崩壊発生の危険性を判断する装置（湧水センサー）を提案する。湧水センサーは、流量計、電気伝導度計、濁度計を組み合わせたものであり、湧水点に設置しやすいようにパイプ型の構造をしている（図 8.1）。データは無線で送信して、湧水の流量・電気伝導度・濁度の変化は液晶パネル（携帯電話、スマートフォン）に表示し、湧水が増加中か、減少中か、EC・濁度が急激に変化していないかなど、視覚的にわかるようにしたい。流量・電気伝導度・濁度の変化図から「湧水流量が増加中→斜面基岩内の地下水位が上昇中と判断→雨が止んでいても警戒避難は解除しない」、「湧水流量の急激な減少や湧水濁度・電気伝導度の変化→地下水排水システム破壊・不調の可能性→すぐに避難」のような、深層崩壊に対する警戒避難の支援を考えている。

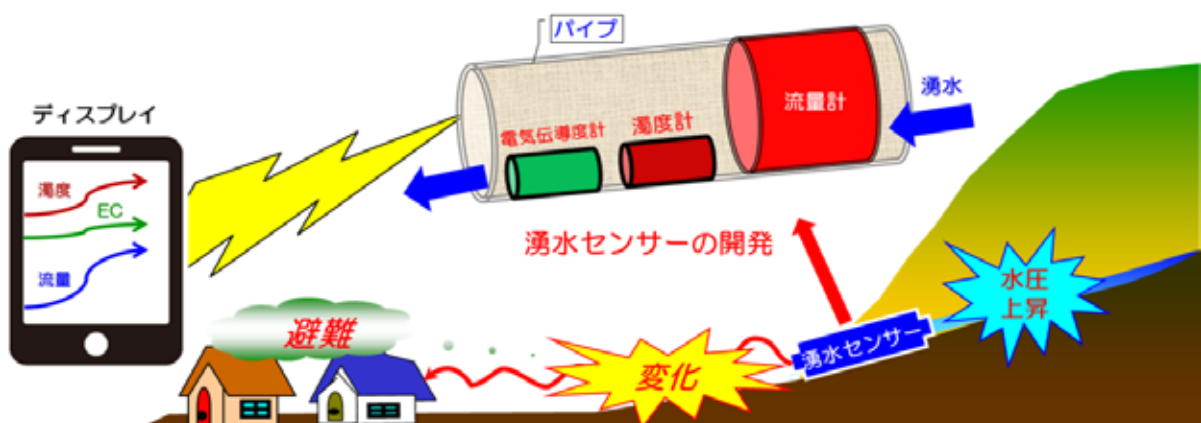


図 8.1 湧水センサーの提案（地頭菌ら，2012）

9. おわりに

近年、記録的な大雨の増加に伴い、深層崩壊が各地で発生している。深層崩壊の発生機構は複雑で多様であり、また不明な部分も多い。現在、「深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル（案）」（土木研究所，2008）に基づいて、深層崩壊発生の可能性がある溪流を抽出する作業が進められ、その成果が公表されてきている（国土交通省・土木研究所，2010，2012）。これからの成果はおもに地形・地質因子から抽出するものである。本論では、地形・地質因子に加えて、渓流水や湧水などの水文因子を取り入れる提案と検証を行った。

今後、さらに絞り込んだ深層崩壊発生の危険性のある斜面の抽出手法の確立、深層崩壊の警戒避難支援のためのセンサー開発を進め、深層崩壊に対する地域防災力の向上につなげたい。

参考文献

- 独立行政法人土木研究所（2008）：土木研究所資料 深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル（案），p.1－21
- 地頭菌隆・下川悦郎・寺本行芳（2000）：南九州の火山地域における崩壊の水文地形学的検討，地すべり，36(4)，p.14－21
- 地頭菌隆・下川悦郎・寺本行芳（2006）：深層崩壊発生場予測法の提案－鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして－，砂防学会誌，59(2)，p.5－12
- 地頭菌隆・下川悦郎・寺本行芳・和田大祐・田淵陽介（2012）：深層崩壊発生予測に関する調査法の提案，平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集，p.644－645
- 下川悦郎・岩松暉（1985）：九州山地におけるクリープ性崩壊について，昭和 60 年度砂防学会研究発表会概要集，p.194－197
- 松村和樹ほか（2011）：2011 年台風 12 号による紀伊半島で発生した土砂災害，砂防学会誌，64(5)，p.43－53
- 国土交通省・独立行政法人土木研究所（2010）：深層崩壊に関する全国マップについて
http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000252.html
- 国土交通省・独立行政法人土木研究所（2012）：深層崩壊に関する溪流（小流域）レベルの調査について
http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000552.html