

深層崩壊の予測

PREDICTION OF DEEP-SEATED LANDSLIDE

地頭菌 隆¹・笹原 克夫²・小杉 賢一朗³・五味 高志⁴・石塚 忠範⁵

Takashi JITOUSONO, Katsuo SASAHARA, Ken'ichirou KOSUGI,

Takashi GOMI and Tadanori ISHIZUKA

¹鹿児島大学農学部（〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24）

E-mail: saboj@agri.kagoshima-u.ac.jp

²高知大学教育研究部自然科学系（〒783-8502 高知県南国市物部乙200）

E-mail: sasahara@kochi-u.ac.jp

³京都大学大学院農学研究科（〒606-8502 京都市左京区北白川追分町）

E-mail: kos@kais.kyoto-u.ac.jp

⁴東京農工大学国際環境農学専攻（〒183-8509 東京都府中市幸町3-5-8）

E-mail: gomit@cc.tuat.ac.jp

⁵独立行政法人事木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

E-mail: t-ishiduka@pwri.go.jp

Key Words: deep-seated landslide, prediction, potential site, frequency, warning

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、2009年台湾高雄県小林村、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。

山地斜面の表土層が崩れる表層崩壊は、国内外の研究によって発生予測手法が確立してきている。一方、基盤岩から崩れる深層崩壊は、表層崩壊より発生頻度が低いこともある、発生メカニズムの解明や予測手法の研究がまだ十分でない。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こともある。深層崩壊による災害を防止・軽減するために、深層崩壊の危険性のある箇所・規模・発生時期の予測と対策を確立することが社会的に強く求められている。

本研究の目的は、深層崩壊の危険性のある箇所・規模・発生時期の予測と対策に必要な、①深層崩壊の発生危険斜面の抽出、②深層崩壊の規模ごとの発生頻度の定量化、③深層崩壊に対する避難基準の策定に関する手法を開発することである。

国土交通省の河川砂防技術研究開発公募制度により「深層崩壊の発生危険斜面抽出手法および避難基準策定手法の開発」(社団法人砂防学会)および「深層崩壊の発生危険斜面の地質的抽出手法の検討」(京都大学防災研究所)が進められている。ここでは、砂防学会の研究の一部を紹介する。

2. 深層崩壊の発生危険斜面の抽出手法の開発

(1) 航空レーザー測量を活用した深層崩壊の前兆現象の抽出手法の開発

ここでは2011年7月19日の台風6号に伴う豪雨により、高知県北川村で群発した深層崩壊のうちの一つである、平鍋地区の深層崩壊について、航空レーザー測量の結果を基に、深層崩壊の前兆現象と見

なせる地形的特徴について検討する。平鍋地区の山腹斜面の崩壊は、幅90m、水平長200m、比高160mにわたり発生した。鉛直方向の最大崩壊深は20m程度である。崩壊脚部から崩壊頂部を見上げる見通し角は36°である。周囲はスギの植林地である。

平鍋崩壊地周辺の地形図¹⁾を図-1に示す。図中の黒線で囲んだ部分が今回の崩壊である。地形図から読み取れる地形的特徴は、尾根上に山頂緩斜面が存在することである。他に大規模崩壊に関連する地形的特徴は読み取れない。

次に崩壊発生前に実施した航空レーザー測量結果から、崩壊地周辺の地形を示したのが、図-2である。航空レーザー測量は国土交通省四国山地砂防事務所により実施されたもので、その結果は1mメッシュのDEMとして整理された。そして標高を色分けし、かつ斜面傾斜をグレーの濃淡で表したELSA MAP（国際航業㈱）で表した。グレーが濃くなるほど斜面傾斜が大きくなることを示すが、このように示された斜面傾斜の変化を見ると、今回の崩壊地周辺には、地形図では判読できなかった遷急線や崩壊跡地が認識できる。崩壊跡地は斜面上部の稜線上の山頂緩斜面の辺縁部(A)に存在するものと、今回の崩壊地の北方に隣接する浅い谷状斜面の内部に存在するもの(B)がある。稜線上の緩斜面は上下2段の遷急線を有している(C)ことから、山体が重力変形し、緩斜面が下方へクリープしていることを示すと考えられる。稜線付近の崩壊跡地(A)はこの変形により生じた大規模な崩壊の痕跡ではないかと推測される。また斜面中腹の崩壊跡地(B)は、上記の大規模崩壊により生産された土砂が、谷状斜面に堆積して形成された崖錐の小規模な崩壊であると推測される。また今回の崩壊にあたる部分を見ると、崩壊したのは小尾根末端に広がる斜面であり、直上の小尾根上には小規模な緩斜面(D)が存在する。崩壊源頭部にあたる部分は急斜面(E)となっていて、中腹部には不明瞭ではあるが、2本の遷急線があり、その下部斜面の傾斜は緩い。これらの遷急線は過去に崩壊が発生した際の崩壊冠頭部であり、その下に崩壊土砂が堆積して崖錐斜面(F)を形成したと考えられる。今回の崩壊は支尾根上の緩斜面直下の急斜面(E)と、その下の緩傾斜の崖錐(F)が崩壊したことがわかる。

このように航空レーザー測量の結果を用いると、地形図では到底抽出できないような微地形も抽出可能であることが判明し、深層崩壊の前兆現象の把握に有効であることが示された。

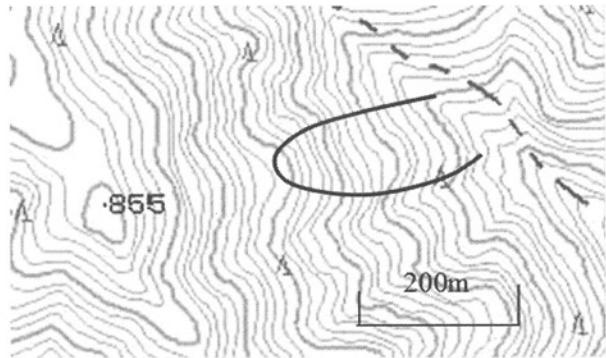


図-1 平鍋崩壊地周辺の地形図¹⁾

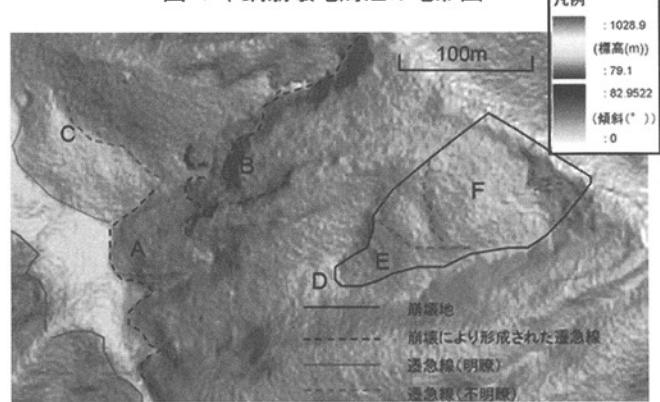


図-2 航空レーザー計測による崩壊地周辺の微地形

(2) 流出・水質データを活用した深層崩壊の発生危険斜面の抽出手法の開発

現在、「深層崩壊の発生の恐れのある渓流抽出マニュアル（案）」²⁾に基づいて、深層崩壊発生の可能性がある渓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大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。上記マニュアルは深層崩壊発生の危険性がある渓流をおもに地形・地質因子から抽出するものである。これに加えて水文因子を取り入れる手法を提案する（図-3）。

方法：渓流縦断方向において渓流水の電気伝導度（EC）測定とGPS測位
必要に応じて、流量、水質（シリカ濃度、イオン濃度等）の測定
時期：低水時に実施
整理：地形図にプロット

流域レベルでの危険度判定

↓
深層崩壊の頻度が高い地域（流域）において渓流流域レベルで危険度を判定
① 相対的にECが高い渓流
② 渓流縦断方向においてECが不連続的に高い値を示す渓流
⇒基岩内に地下水を貯留している流域
⇒水文的因子からみた深層崩壊の恐れのある流域

斜面レベルでの危険度判定

②のECの高い地点において、斜面レベルで危険度を判定
③ ECの高い地点付近の湧水調査（湧水が出ている斜面、湧水の量）
④ 斜面脚部からの湧水が多い斜面を抽出
⇒基岩内に地下水を貯留している斜面
⇒水文的因子からみた深層崩壊の恐れのある斜面

図-3 渓流縦断方向の渓流水調査

a) 流域レベルでの危険度判定

溪流縦断方向において溪流水の電気伝導度（EC）を測定し、その位置をGPSで測位する。ECを地形図にプロットして、①対象地域（流域）内で相対的に溪流水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、その層に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。

b) 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。

c) 溪流水・湧水の調査例

図-3に基づいて、2005年台風14号に伴う大雨によって深層崩壊が発生した宮崎県鰐塚山別府田野川流域（地質は堆積岩類）での調査結果を図-4に示す。流域には溪流水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溪流水ECが不連続的に高い値を示す溪流（a, b）がみられる。深層崩壊は溪流水ECが相対的に高い溪流に位置しているものが多い。



図-4 鰐塚山別府田野川流域における溪流水ECの分布

図-5は溪流水ECの標高分布である。溪流aは標高300～500m間は溪流水ECが低いが、深層崩壊が

発生した標高500～600m間で急激に高くなっている。深層崩壊地から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は上流に向かって溪流水ECが上昇し、源頭部には深層崩壊地が位置している。溪流cは標高400～650m間の溪流水ECに大きな変化はみられなかった。溪流dは標高350～650m間の溪流水ECは低下傾向にある。

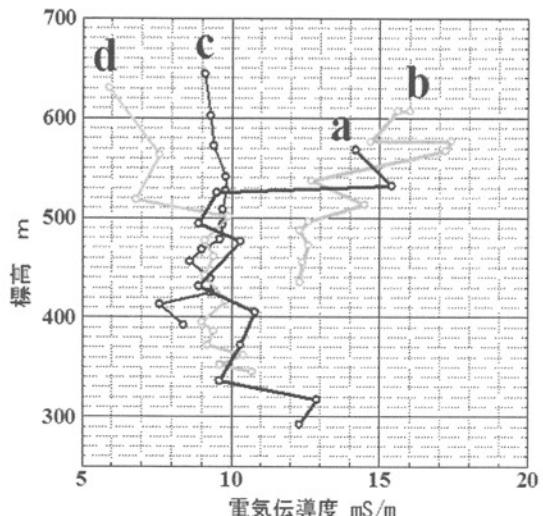


図-5 溪流水ECの溪流縦断方向の分布

図-6は、鹿児島県矢筈岳山体流域（地質は火山岩類）で実施した溪流縦断方向における溪流水ECおよび湧水調査結果である。図において、矢印の太さと向きは湧出量の区分と湧出している斜面の向きであり、□印は湧水ECが特に高かったところ、○印は溪流縦断方向の溪流水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、溪流水ECの変化はその付近で湧出している地下水に起因していることがわかる。さらにその近くには過去の深層崩壊地が分布している。

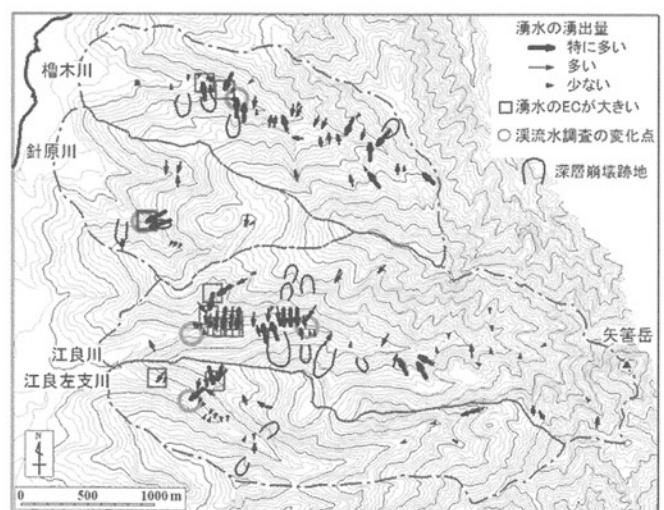


図-6 矢筈岳山体流域における溪流縦断方向の溪流水ECの変化点と湧水分布

3. 深層崩壊の規模ごとの発生頻度の定量化手法の開発

(1) 深層崩壊の規模と頻度の特定

これまでに、深層崩壊の発生場については、表面地形量や微地形情報の解析、周辺の地質条件などの解析が行われてきた。また、地下水流や水質の観測による深層崩壊発生メカニズムと水文プロセスの関係について議論されてきた³⁾。国土交通省砂防部・

(独) 土木研究所では、1868年以降に深層崩壊が発生した122地点の調査および、隆起量などの地形変化履歴等から、1868年以降の降雨・融雪による深層崩壊の平均発生回数と比較し、深層崩壊発生頻度を4段階で評価した⁴⁾。2011年9月に発生した十津川流域での深層崩壊は、同一地域で1889年にも発生しているが、これまでの研究からは同一地域においてどのような規模や頻度で発生しているかについての情報を得ることが難しい。深層崩壊のハード面とソフト面の対策を考える上でも、深層崩壊の規模と頻度の関係を明らかにすることは重要である。本研究では、数100～数1000年オーダーの時間スケールと想定される深層崩壊発生履歴の特定に有効な手法を検討するとともに、流域スケールでの深層崩壊発生規模と頻度の関係を解析する手法について検討する。

(2) 調査地および解析方法と結果

宮崎県宮崎市田野に位置する鰐塚山を源頭とする、別府田野川の上流域を対象とした(図-7)。深層崩壊堆積物中もしくは河岸段丘堆積物中の火山灰層の有無や木片採取の炭素14年代測定法を用いた。さらに、地形上の深層崩壊痕跡を特定するために、2005年の災害直後の鰐塚山付近のLiDAR計測による2m DEMおよび1/8,000の空中写真を用いて、地形解析を行った。さらに、調査対象流域内における過去の深層崩壊の発生場の特徴を解析するために、TOPOTUBEによる地形解析を行った。

鰐塚山うつら谷川上流左支川(以下、アクター川と呼ぶ)では、 320 ± 30 年BPや 340 ± 30 年BP、 50 ± 30 年BP程度の年代の段丘堆積物中の木片が確認できた。また 2940 ± 30 年BPの年代値が得られたサンプルも採取できた。これらの結果は、Akther et al.⁵⁾で得られた年代測定結果とも調和的な結果であった。以上から、本調査流域では、300～400BPおよび3000BP程度で大規模な崩壊が発生し、流路沿いの段丘面堆積地などを形成したことが考えられた。

アクター川周辺における近年の表層崩壊の発生履歴を1946年撮影の空中写真から2005年に深層崩壊

発生前までについて確認したところ、小規模な崩壊はほとんど発生していなかった。一方、アクター川流域の山腹には、深層崩壊跡地があり、過去における深層崩壊の発生経験が示唆された。流域面積が30haのアクター川流域では、300年と3000年にそれぞれ大規模な崩壊現象が起こっていたことから、過去の崩壊痕跡が300年である場合と、3000年である場合をそれぞれ仮定した。2005年の生産土砂量が120万m³であることから、300年を基準とする場合、年平均の侵食量13mmが得られ、3000年を基準とした場合、年平均侵食量1.3mmが得られた(図-8)。今後、時間情報の整理と地形解析を組み合わせた解析により100～1000年オーダーの発生頻度を評価できる可能性が示された。

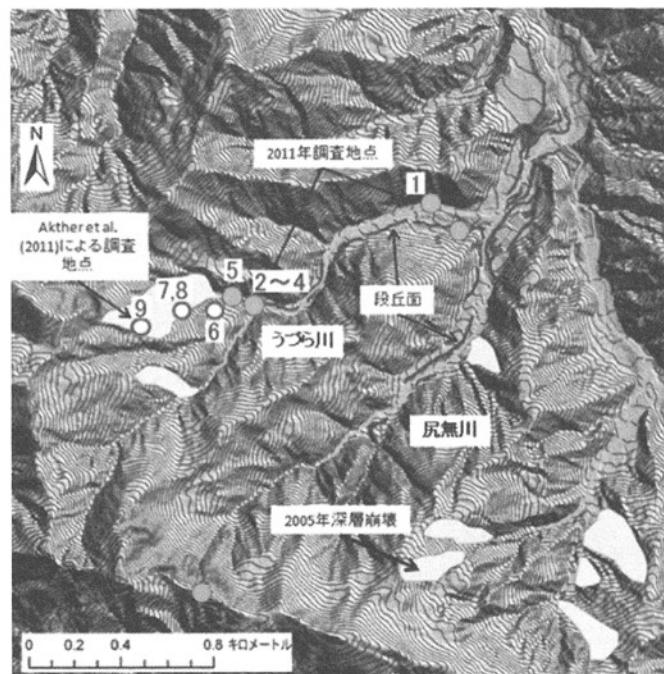


図-7 別府田野川流域の概要

調査は「うつら谷」流域を中心に行った
図中の番号1～6は木片採取箇所

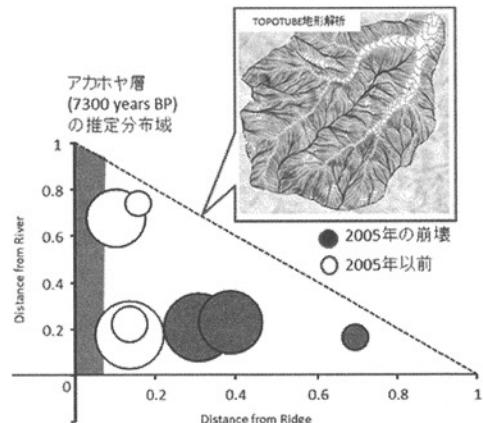


図-8 TOPOTUBE 地形解析結果と過去の深層崩壊発生時期の推定

4. 深層崩壊に対する避難基準の策定手法の開発

(1) 深層崩壊の警戒避難支援のためのセンサー開発

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-9）。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。

湧水センサーは、人家近くの斜面の湧水点に設置して、大雨の際に行政や住民が深層崩壊発生の危険性を判断するひとつの指標を提供するものである（図-9）。たとえば、「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。

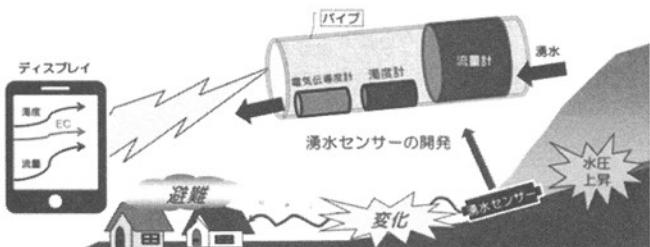


図-9 湧水センサーの提案

(2) 基岩内地下水位変動の予測手法の検討

豪雨に伴う土砂災害の予測に、実効雨量が頻繁に使用されている。中でも、先行雨量の影響を評価するための「長期的な降雨指標」としての半減期 72h の実効雨量と、降雨強度の影響を評価するための「短期的な降雨指標」としての半減期 1.5h の実効雨量の組合せが一般的に用いられている。本項では、実効雨量を用いた基岩内地下水位変動予測手法について検討を行い、実効雨量を深層崩壊予測に応用する場合にどのような半減期を用いれば良いのかについて、定量的な解析を加えた。

解析対象地は、風化花崗岩の母材を有する兵庫県

六甲山の流域（面積 2.1ha；標高 741～874m）である⁶⁾。流域の中下部（標高 784m）に掘削された深さ 25m の調査ボーリング孔内の水位を解析に用いた。解析対象期間は、2005～2011 水文年の観測期間中で最も多雨年であった 2010 水文年（2010 年 2 月 13 日～2011 年 2 月 13 日）である。観測された地下水位（図-10 下パネル）は、降雨ピークに対応した鋭敏なピークを持つとともに、水位のベースラインが夏期にピークとなる緩やかな季節変動を示した。

実効雨量を用いた崩壊発生危険度評価においては、横軸 X に長期的な雨量指標（半減期が長い実効雨量）、縦軸 Y に短期的な雨量指標（半減期が短い実効雨量）をプロットしたスネーク曲線が使用され、プロットが危険ラインを越えた場合に崩壊が発生するとの判断が下される。これは、地下水位 H が次の関係式で表せるとの仮定に基づくものといえる。

$$H = aX + bY + c \quad (1)$$

そこで、観測された基岩内地下水位 H の変動を最も良く再現できるように、(1)式において X, Y の半減期の値 (MX, MY) と、パラメータ a, b, c を最適化した。ただし、降雨と基岩内地下水位の反応には、風化基岩層内の雨水の鉛直浸透等に伴うタイムラグが生ずることが考えられるため、(1)式に代入する X, Y それぞれに DX, DY の時間遅れを仮定し、DX, DY についても最適化を行った。

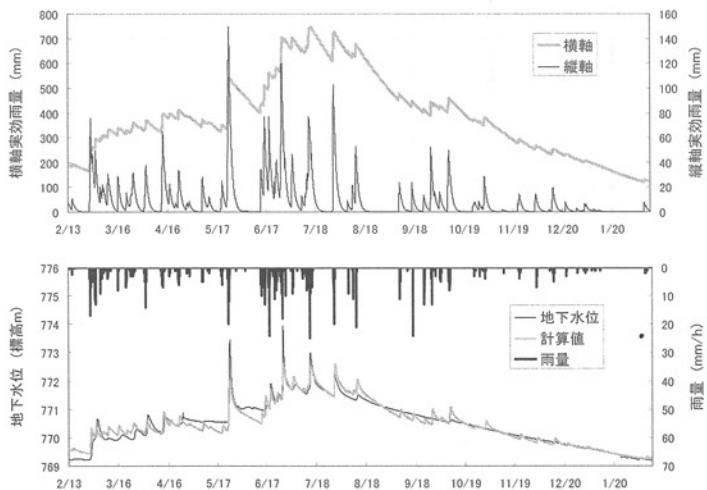


図-10 (上) 半減期 1085.5h および 28h の実効雨量と (下) ハイエトグラフおよび基岩内地下水位変動の観測値と計算値

図-11 の上パネルは、半減期 72h の実効雨量を横軸に、半減期 1.5h の実効雨量を縦軸に取った、従来のスネーク曲線である。各プロットは、その時刻の基岩内地下水位（図-10）の値によって塗り分けてあ

る。縦軸方向に見た場合、プロットの塗り分けには一定の傾向が無いことから、半減期 1.5h の実効雨量は、基岩内地下水位変動との相関がないといえる。一方、横軸に示した半減期 72h の実効雨量が大きいほど、地下水位は高い傾向にあることがわかる。しかしながら、異なる凡例が混在するケースが多く、相関はあまり高くない。

次に(1)式のモデルに従ってパラメータを最適化したところ、横軸半減期は 1085.5h となり、通常の「長期的な雨量指標」として用いられる 72h に比べて非常に大きくなつた。縦軸半減期も 28h と、通常の「短期的な雨量指標」として用いられる 1.5h の 19 倍の値となつた。また、a, b, c, DX, DY の最適値として、それぞれ 4.5, 7.2, 768.7m, 7h, 3h が得られた。このように最適化されたスネーク曲線(図-11 下パネル)では、地下水位に基づく塗り分けが明瞭に区分されており、横、縦軸に示した実効雨量によって基岩内地下水位変動が良好に表現できていることがわかる。

図-10 の上パネルには、最適化された実効雨量の変動を示した。さらに下パネル中には(1)式により計算された地下水位を示した。計算値は実測値と良好な一致を示していることがわかる ($R^2=0.939$)。

以上の様に、適切な半減期を与えた二つの実効雨量を組合わせることによって、基岩内地下水位変動を再現できることがわかり、深層崩壊の予測において実効雨量が有用な降雨指標となる可能性が示された。

5. おわりに

近年、記録的大雨の増加に伴い、深層崩壊が各地で発生している。深層崩壊による災害を防止・軽減するためには、深層崩壊の危険性のある箇所・規模・発生時期の予測手法を確立する必要がある。(社)砂防学会では「深層崩壊の発生危険斜面抽出手法および避難基準策定手法の開発」というテーマで、深層崩壊の危険性のある箇所・規模・発生時期の予測と対策に必要な、①深層崩壊の発生危険斜面の抽出、②深層崩壊の規模ごとの発生頻度の定量化、③深層崩壊に対する避難基準の策定に関する手法の開発を進めている。本論ではこの研究の一部を紹介した。

参考文献

- 1) 国土地理院発行、<http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse2/index.html>, 2012.5.1
- 2) (独) 土木研究所：深層崩壊の発生の恐れのある渓流抽出マニュアル(案)，土木研究所資料，第 4115 号，2008

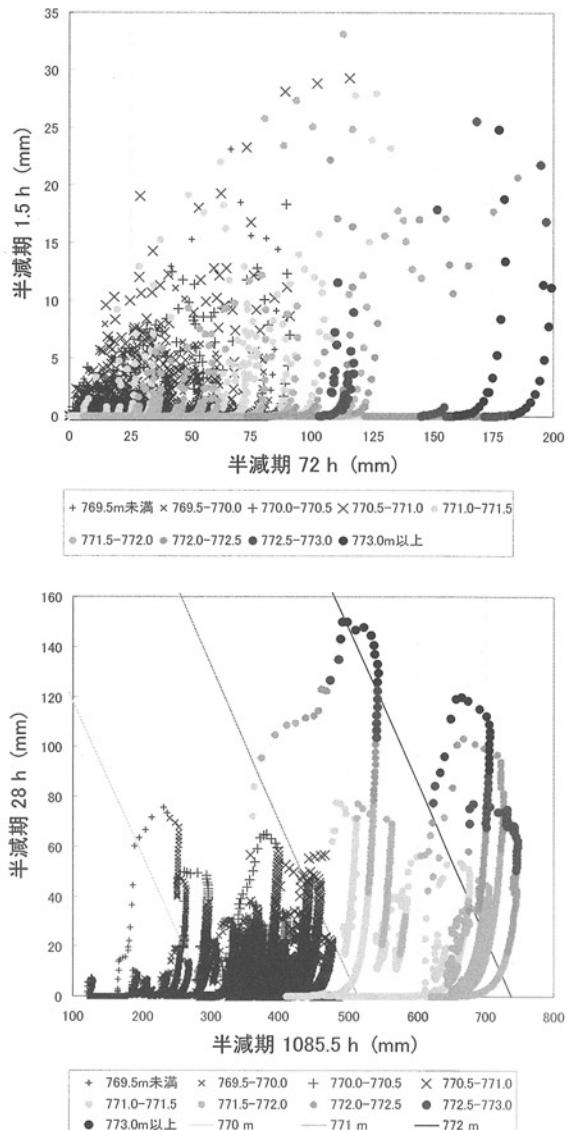


図-11 従来のスネーク曲線と最適化されたスネーク曲線

- 3) 地頭菌隆・下川悦郎・寺本行芳：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), 5-12, 2006
- 4) 国土交通省砂防部・(独) 土木研究所：深層崩壊推定頻度マップ, 2010, http://www.mlit.go.jp/river/sabo/deep_landslide/deep_map.pdf, 2012.5.1
- 5) Akther H., Shimokawa E., Teramoto Y., and Jitousono T. : Geomorphological features and prediction of potential sites for deep-seated landslides on Wanitsuka Mountain, Miyazaki Prefecture, Japan, Journal of Erosion Control Engineering, 63(5), 14-21, 2011
- 6) Kosugi, K., M. Fujimoto, S. Katsura, H. Kato, Y. Sando, and T. Mizuyama, A localized bedrock aquifer distribution explains discharge from a headwater catchment, Water Resources Research, 47, W07530, doi:10.1029/2010WR009884, 2011

(2012. 5. 9 受付)