

## 基岩地下水位変動の解析と深層崩壊発生時刻の予測について

京都大学大学院農学研究科  
同 上

○小杉 賢一朗 (兼 JST), 正岡 直也  
糸数 哲, 水山 高久

### 1. はじめに

土砂災害の警戒・避難を適確に実施する上で鍵となるのは、①適切な雨量指標の選定方法、ならびに②適切な崩壊発生限界雨量線 (CL) の設定方法だと考えられている。①については、先行雨量の影響を評価するための長期的指標として積算雨量が、降雨強度の影響を評価するための短期的指標として時間雨量が、永年用いられてきた。その後、斜面内部の雨水貯留量をタンクモデルで評価した土壌雨量指数が提案され、長期的指標として広く使用されるようになってきている。一方、先行雨量と降雨強度の影響を単一のパラメータ (半減期) により調節できる実効雨量についても、多くの検討が加えられてきた。②に関しては、長期的な雨量指標と短期的な雨量指標をそれぞれ横・縦軸とするグラフ上で、安全・危険領域を過去の崩壊実績に基づき直線で区分する方法が永年用いられてきた。その後、ニューラルネットワークを用いた非線形の CL が提案され、判別精度や客観性の向上が図られている。

既往研究では、対象エリア内の崩壊発生・非発生実績に基づく解析を行い、崩壊発生降雨と非発生降雨の判別精度を向上させることに主眼がおかれてきた。すなわち、予測の「捕捉率」を最大に「空振率」を最小にするのに最適な、雨量指標の選定方法と CL の設定方法を提示することが目的とされてきた。しかしながら、崩壊の発生・非発生は、対象エリア内に存在する個々の斜面の勾配、風化深度、力学強度、水文特性といった素因にも大きく依存することから、同一の雨量指標と CL で全ての崩壊を説明することはできない。

そこで本研究では「深層崩壊を予測するのに最適な雨量指標と CL は、対象エリア内の個々の斜面毎に異なっている」との考えに基づき、崩壊発生危険雨量について新たな検討を試みた。なお、ここでの議論は、理論的に深層崩壊に限ったものではなく、降雨に伴う斜面崩壊全般に適用できるものである。

### 2. 方法

降雨に伴う斜面崩壊の最も大きな誘因の一つとして、土層内や基岩内の地下水位が既往最大値を超過して上昇することが考えられる。ここで小杉ら (2013, 2014) は、「2 種類の実効雨量の冪数を説明変数とする重回帰モデル」を提案し、種々の斜面で観測された地下水位変動を良好に再現できることを示している。しかしながら同時に、最適な半減期の値は 3.1~1400 h の範囲に分布して斜面毎に大きく異なっており、その値を推定する方法が大きな課題として残されている。そこで本研究では、「全ての斜面は最適な半減期を持つ 2 種類の実効雨量により崩壊発生の有無が説明されるが、半減期の値は斜面毎に異なり、現時点では未知である」と考えることにする。その結果、崩壊発生の必要条件は「いずれかの半減期を持つ 2 種類の実効雨量の組み合わせが既往最大値を超過すること」と考えることができる。以上の考察に基づき、本研究では「あらゆる半減期を持つ 2 種類の実効雨量の組み合わせについて既往最大値超過を判定する手法」を、捕捉率 100% の、現時点では最も理に適った手法として提案する。

既往最大値超過の判定は、図-1 に示したスネーク曲線図を用いて行う。まず、対象とする降雨イベントが発生する直前までの長期時間雨量データを用いて、半減期がそれぞれ  $M_1$ ,  $M_2$  (ただし  $M_1 \geq M_2$  とする) の 2 種類の実効雨量  $X(M_1, t)$ ,  $X(M_2, t)$  を算定し、 $X(M_1, t)$  を横軸に  $X(M_2, t)$  を縦軸にとりてスネーク曲線図を描く。このスネーク曲線図上で「既往最大値超過」は、以下の 4 つのケースに分類される。まず、スネーク曲線図上に  $X(M_1, t) = X_{max}(M_1)$  ( $X(M_1, t)$  の既往最大値) と  $X(M_2, t) = X_{max}(M_2)$  ( $X(M_2, t)$  の既往最大値) の 2 本の直線を引くことによって作られる領域 B は、 $X(M_1, t)$  が単独で既往最大値を超過しているケースに相当する。また領域 C は、 $X(M_2, t)$  が単独で既往最大値を超過しているケースを表している。更に領域 D は、 $X(M_1, t)$  と  $X(M_2, t)$  の両方が、それぞれの既往最大値を超過しているケースである。さらに領域 A は、「 $X(M_1, t)$  と  $X(M_2, t)$  のそれぞれが、単独では既往最大値を超過していないが、両者の組合せでみると既往最大値を超過しているケース」を表している。一方領域 N は、「既往範囲内」を表している。当該降雨イベント中のスネーク曲線の軌跡を図-1 に重ねることによって既往最大値超過を判定することができる。以上の解析を、 $M_1$ ,  $M_2$  を種々の値に設定して行うことで、あらゆる半減期の実効雨量の組み合わせに関して既往最大値超過の状況を調べ上げた。

提示した手法の検討は、紀伊半島を中心に甚大な被害をもたらした 2011 年の台風 12 号を対象として行った。図-2 は、多くの深層崩壊が発生した奈良県十津川村のほぼ中央に位置する気象庁アメダス風屋観測所の雨量データである。降雨は約 5 日間継続し、総雨量は 1360 mm に達した。図中には、風屋観測所を中心とする半径 20 km 圏内の深層崩壊 (発生時刻が精度良く特定されている 12 箇所) につ

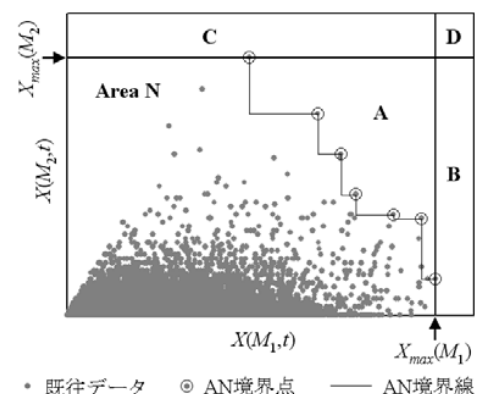


図-1 スネーク曲線図

いて、奈良県 (2013) と千木良ら (2012) から引用した発生時刻を示している。深層崩壊は降雨後半に多発していることがわかる。

### 3. 結果

図-3 中の各パネルでは、横軸と縦軸に示した半減期  $M_1$ ,  $M_2$  の組み合わせによるスネーク曲線図において、紀伊災害の各時刻におけるプロットが、図-1の領域 A~D もしくは領域 N のいずれに存在しているかを、それぞれの領域に対応するシンボルで表している。降雨イベント開始から 9/2 12:00 までは、いずれの  $M_1$ ,  $M_2$  の組み合わせについてもスネーク曲線は領域 N に存在していた (図は省略)。9/2 13:00 になると、 $M_1=3000$  h,  $M_2=81.3$  h のスネーク曲線図上で「領域 A」が記録され、既往最大値の超過が初めて発生した (図-3a)。

その後、9/2 20:00 にかけて、既往最大値超過を示す  $M_1$ ,  $M_2$  の組み合わせが次第に増加した (図-3b~f) が、全て「領域 A」であり、単独の実効雨量での超過は起きていなかったことがわかる。単独の実効雨量による既往最大値超過が初めて発生した 9/2 21:00 には、既に多くの  $M_1$ ,  $M_2$  の組合せで既往最大値超過を表す領域 A, B, D が記録されていた (図-3g)。このように 2 種類の実効雨量を組合わせた解析では、1 種類の実効雨量でみた場合よりも 8 時間も前から、既往最大値超過を検出できていた。9/2 22:00 になると、半減期 17.3~48.6 h および 1070~3000 h の実効雨量が単独で既往最大値を超過し、領域 A~D のいずれもが多数出現した (図-3h)。更に 9/3 1:00 には  $M_1 \geq 6.18$  h の全範囲が領域 B もしくは D となり (図-3i)、深層崩壊が発生した 9/3 19:00 から 9/4 16:00 にかけて、同様の状況が継続した (図-3j~l)。但し、既往最大値超過が最も激しかった 9/4 3:00 でも、 $M_2 \leq M_1 \leq 2.20$  h では領域 N となっており (図-3k)、半減期が短い実効雨量の組合せによる既往最大値超過は起きていなかったことがわかる。

以上より、深層崩壊に関しては、半減期が大きな 2 種類の実効雨量を組合わせることによって、見落としのない危険度判定を行うことができると考えられた。

### 引用文献

千木良ら (2012), 応用地質, 52(6), 222-230 ; 小杉ら (2013), 砂防学会誌, 66(4), 21-32 ; 小杉ら (2014), 砂防学会誌, 66(3), 3-14 ; 奈良県 (2013) <http://shinsouhoukai.sakura.ne.jp/top.html>

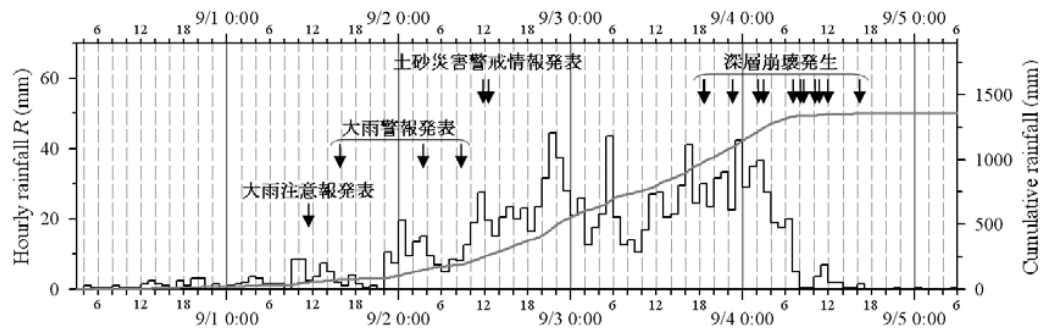


図-2 2011年台風12号時の雨量データ

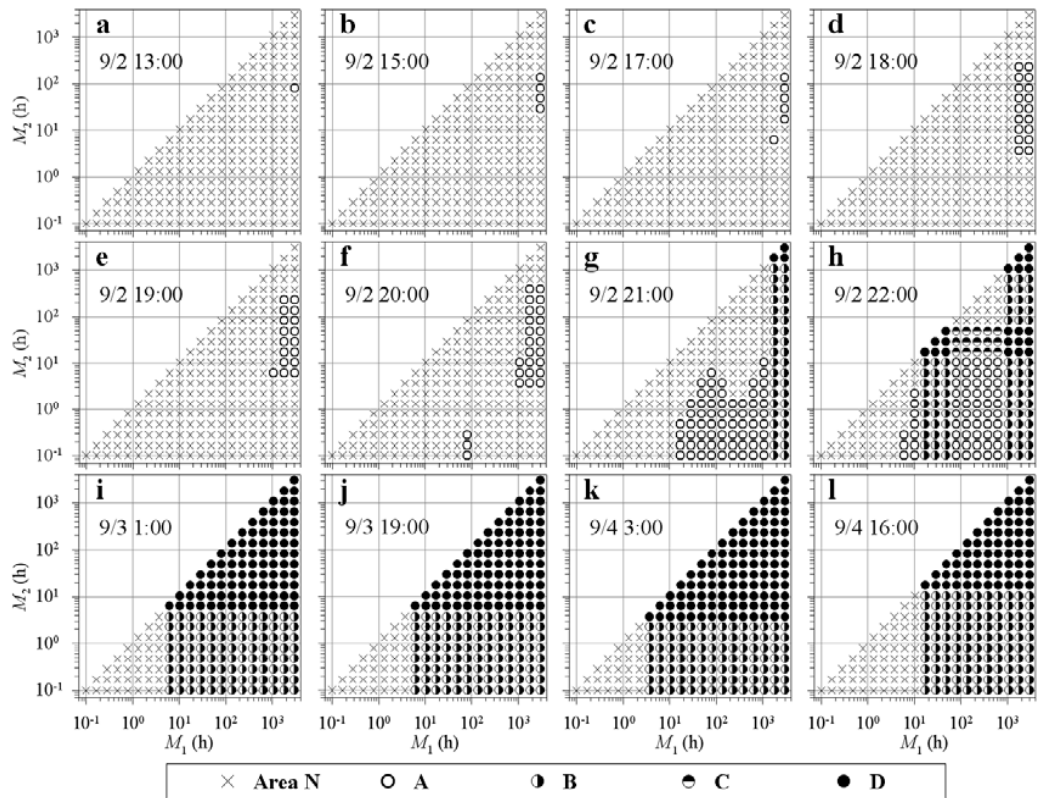


図-3 2種類実効雨量による既往最大値超過判定