

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14747

研究課題名(和文) 岩盤風化に伴う渓流水質の変化に着目した深層崩壊の発生時期予測手法の開発

研究課題名(英文) Development of method for hazard prediction of deep-seated landslide based on stream water chemistry affected by bedrock weathering

研究代表者

堀田 紀文(Hotta, Norifumi)

東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・准教授

研究者番号：00323478

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：山体内部における深層崩壊の潜在すべり面の形成が渓流水質の変化に現れるとの作業仮説のもと、深層崩壊の発生時期予測手法の開発を目的として、深層崩壊発生危険箇所が特定されている台湾で水質サンプルの取得と分析・解析を行った。渓流水は地質によらず、一般的な浅層地下水と同様のCa-HCO<sub>3</sub>型であった。ECおよびSiO<sub>2</sub>濃度は、集水面積の増大に伴う収束が見られた。多くの深層崩壊危険地が分布するChaochou層(潮州層)では、EC-Si 関係に明確な負の相関が見られた。岩石の化学組成が一様であれば得られない結果であり、特有の不均質性に由来する地下水流出特性が深層崩壊の発生に影響する可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：Based on the hypothesis that formation of a potential slip surface in the base rock layer can be detected through changes of stream water chemistry, we collected water samples and analyzed to develop a method for hazard prediction of deep-seated landslide in Taiwan where potential landslide areas have been identified. Regardless of geological setting, most of the water was Ca-HCO<sub>3</sub> type, which is common for shallow groundwater. EC and SiO<sub>2</sub> concentration showed convergence with increasing watershed size. There was a significant negative relationship between EC and Si for the water samples from the Chaochou Formation, where the potential landslides were concentrated, while the correlation was positive for water from other geologies. The negative correlation can occur if there is an uneven distribution of layers with preferential ground water flow inferring that the combination of EC and Si could be effective for determining the risk of the potential landslides.

研究分野：砂防工学

キーワード：深層崩壊 基岩風化 水文過程 渓流水質

### 1. 研究開始当初の背景

深層崩壊は発生時に甚大な被害をもたらすだけでなく、大量の不安定土砂の供給を通して下流域に長期にわたって大きな影響を及ぼす。気候変動に伴う大規模降雨イベントの増加が深層崩壊の頻度の上昇や大規模化に繋がることが懸念され、その対策は急務と言える。ここで、深層崩壊対策を実施するには事前の発生予測が不可欠である。

深層崩壊の発生地点の予測についてはこの数年で大きな進捗があった。過去の実績や地形条件に基づいた予測手法や、山地流域での縦断方向の渓流水質の変化から深層崩壊の潜在的なすべり面を予測する手法が提案され、潜在的な深層崩壊発生場はある程度絞り込める状況となった。しかしながら、発生時期の予測については、発生頻度や誘因となり得る降雨規模についての研究はあるものの、数十年～数百年に一度の頻度で生じる深層崩壊の具体的な発生時期の推定手法は現状では存在しない。

表層崩壊のすべり面は降雨中に短時間で形成され、地すべりのすべり面は既存である。一方、深層崩壊では、地下部の岩盤風化によるすべり面形成に時間を要する。水文・水質研究分野で蓄積された知見を適用することで、潜在的な深層崩壊発生斜面の地下で生じている風化の進行に伴う水質変化を検出できる可能性がある。深層崩壊の危険度分類を行うことで、施工に時間を要するハード対策を緊急度・危険度が高い地域で計画的に遂行可能となり、危険区域・影響範囲が広い深層崩壊に対応した避難場所の再設定や集落移転などのソフト対策の整備が可能になると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究は、深層崩壊の発生時期予測手法の開発を最終的な目的とする。既往研究による結果は、深層崩壊のすべり面が時間をかけて形成される過程で、周辺の水文プロセスの変化とそれに伴う渓流水質の変化が生じることを示唆する。近年、水質データに立脚した種々の流出プロセス解析が実施されている。それらの解析から得られる滞留時間や基岩風化、地下水動態に関する情報を基に、潜在的なすべり面の発達度を評価し、深層崩壊発生場の危険度を分類することで、深層崩壊発生時期の予測を対策に反映可能な精度で行うというのが本研究の目的であり、以下によって達成される。

- (1) 深層崩壊発生時期推定に利用可能な指標・トレーサーの検出
- (2) 上記指標・トレーサーの同一流域内での空間変動(：深層崩壊検出の空間解像度)の検討
- (3) 深層崩壊発生場における基底流出中の水質の多点比較とそれに基づく危険度分類

### 3. 研究の方法

日本と同様に深層崩壊の被害が甚大な台湾では、早くから全国的に航空レーザー測量に基づく DEM (数値標高モデル) の整備が進められ、近年それを用いた深層崩壊の発生地点の予測が実施された。図1は、本研究開始時点までに得られた、2005年に取得された DEM 上での微地形条件の判読に基づく潜在的な深層崩壊 (PLA: Potential Landslide Area) の分布 (左図：469箇所) と、2005年以降実際に発生した深層崩壊の位置図 (右図：42箇所) である。驚くことに、2005年以降の深層崩壊のほぼ全てが、PLA の推定結果に一致した。この結果は、深層崩壊の発生位置の推定精度が現状の技術レベルで十分高いという点で本研究の前提条件が満たされることを意味する一方で、他に多くの PLA が存在するという点で発生時期の予測という本研究の目的の重要性を支持する。そこで本研究では、図1に示された、既に抽出された PLA が多く存在する台湾中南部の荖濃渓流域と旗山渓流域を主な調査地とし、支川の合流点付近や湧水点など、渓流水質に特徴が現れやすい点で採水を実施した。2015-2017年の3年間で、同一地点での複数回の採水を含めて、約700サンプルを取得した。

サンプルは 0.45 $\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターでろ過した後、簡易 EC 計 (HORIBA, B-711) を用いて EC を測定した。また、無機イオン濃度 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) 濃度をイオンクロマトグラフィー (島津, LC-10A) で、 $\text{SiO}_2$  濃度をモリブデンイエロー法で測定した。また  $\text{HCO}_3^-$  濃度は陽イオンの電荷の合計から陰イオンの合計を差し引くことで求めた。

観測地点の集水域・傾斜は、30 $\times$ 30m の数値標高地図 (JAXA 提供) と Arc GIS (ESRI 社) を用いて算出した。同様に、地質図に基づき各採水点の地質も求めた。採水点によって定義される集水面積の 80% を占める地質をその集水域の代表地質とし、1種類の地質が 80% を超えない場合はその他として取り扱った。

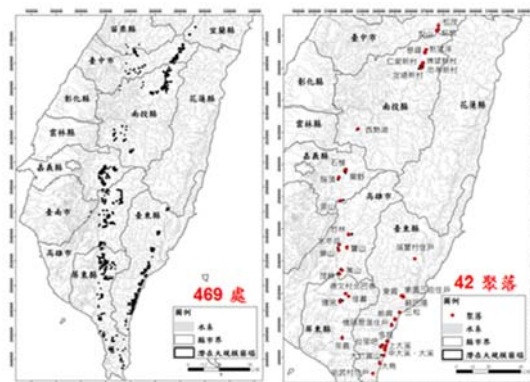


図1 台湾中部・南部・東部での潜在的な深層崩壊 (左図) と 2005年以降に実際に発生した深層崩壊 (右図) の分布 (成功大学防災センター内部資料より)

#### 4. 研究成果

##### (1) 渓流水質の季節性

本研究では、基底流出の水質の差異に着目するため、基本的には無効雨期間に採水を行うこととした。しかしながら、先行降雨の影響や水文プロセスの季節性の影響を受け、基底流出の水質が時間的に変動する可能性がある。そこで、データの精度／信頼性の担保の観点から、まず同一地点で複数回の採水を実施した箇所において、渓流水質の季節性を検討した。図2は、2016年5月の観測値に対する2015年9月および2016年2月の観測値の値を比較した例である。雨の多い夏期と少ない冬期のデータを含み、採水時流量の季節変化は大きい、採水時期による水質の差は小さい。このことは、渓流水質によるPLAの検出という本研究の方針を支持する結果と言える。以降の検討では採水時期の区別を行わない。

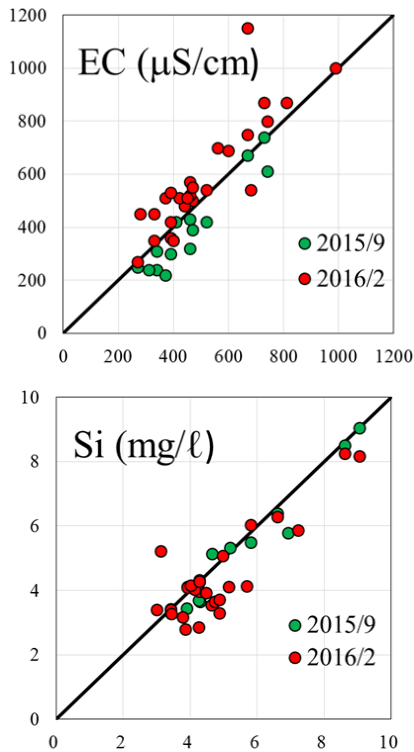


図2 採水時期の違いによる渓流水質の比較

##### (2) PLAの分布と地質

図3に、PLAと採水点の位置を示す。3年間で8回の現地調査を実施し、流域内や付近にPLAが存在する200弱の地点を含む約500地点での採水を実施した。

図4に示す通り、PLAの多くはChaochou層（潮州層）と呼ばれる中新世中期のレンズ状砂岩を含む頁岩・粘板岩層に区分される地質上に多く存在していた。Chaochou層の台湾に占める割合は6.0%（勾配20度以上では9.6%）であるが、PLAのうち約40%（個数割合：242/602、2017年現時点での値）がChaochou層に集中的に存在していた。深層崩壊に地質条件が及ぼす影響は大きい。以降はChaochou層と他の地質とで結果を区別する。

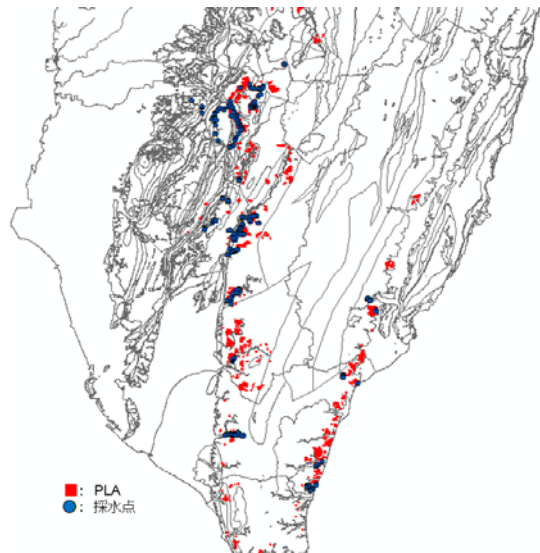


図3 PLAの分布と採水点の位置

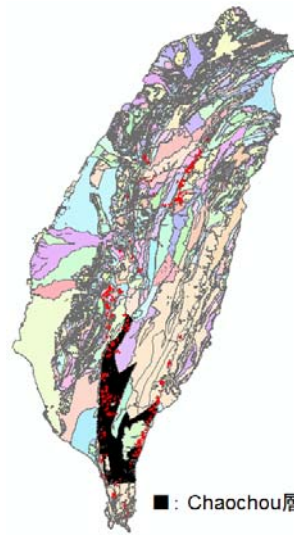


図4 台湾の地質区分とPLA分布（赤色部）

##### (3) 渓流水質

図5に示すpiper diagramから分かる通り、大半の渓流水は、地表水・浅層地下水に一般的なCa-HCO<sub>3</sub>型を呈し、深層地下水に特徴的なNa-HCO<sub>3</sub>型は見られなかった。したがって、対象流域の渓流水のイオン濃度は、地表付近の鉱物の風化過程によって主に形成されると考えられる。

図6には、渓流水中で濃度が高かったイオン（Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>）のイオン濃度（ $\mu\text{mol/l}$ ）のEC（ $\mu\text{S/cm}$ ）との関係を示した。渓流水のECは58~1210  $\mu\text{S/cm}$ （平均値は500  $\mu\text{S/cm}$ ）と降雨のEC値（概ね30  $\mu\text{S/cm}$ ）を大きく上回り、ECとイオン濃度の間には正の相関関係があった。Chaochou層の渓流水のECは、Na<sup>+</sup>との関係のみ $r^2$ 値が0.4にとどまったが、その他のイオンとの関係では $r^2$ 値は0.6以上であった。したがって、渓流水中のECは、鉱物の風化過程に由来する溶存イオン濃度を代表していると考えられる。



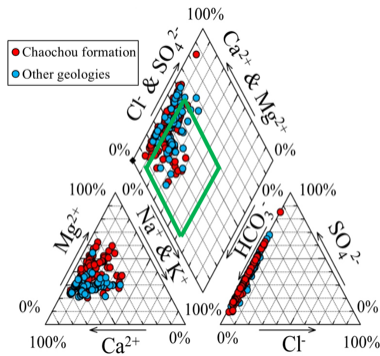


図5 パイパーダイアグラム

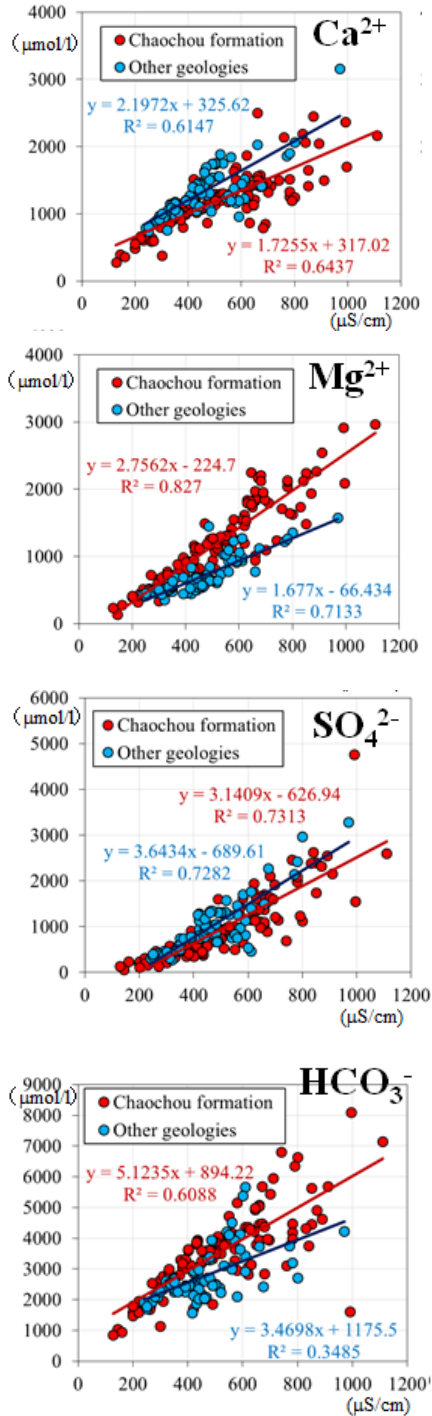


図6 ECと各イオン濃度の関係

#### (4) Chaochou 層における水質の特徴

図7は、ECとSiO<sub>2</sub>濃度の関係を示したものである。Chaochou層でのみ、両者の間に負の相関が見られた。SiO<sub>2</sub>は鉱物に由来し、風化と関係してその濃度の変動が生じると考えられる。また、ECは溶存イオンの合計と正の相関を有する。前節で見たように、研究対象地では鉱物の風化によってECが大きな影響を受けると考えられることから、基本的には、地下水-鉱物間の化学反応が進めば、両方の値が高くなる筈（：正の相関）である。Chaochou層において見られた負の相関はどのように理解すれば良いのだろうか？

この結果は、Chaochou層の岩石の化学組成の不均質性を反映したものと考えられることができる。Chaochou層では、SiO<sub>2</sub>が多く溶出するが他イオンの溶出が抑制されてECが低い層がある一方で、SiO<sub>2</sub>がほとんど無いが他イオンの溶出が顕著でECが高い層があり、それぞれに選択的な流れが生じつつ、ある程度の集水面積内で地質構造に対応したそれらの混合が生じているという仮説をたてることができる。事実、砂岩由来の土壌と粘板岩由来の土壌に降雨を供給・浸潤させようえて、流出した土壌水の分析を実施したところ、それぞれ、SiO<sub>2</sub>が高いがECが低い、SiO<sub>2</sub>が低いがECが高いという、図7のエンドメンバーになり得る結果が生じた。

現時点においてEC-SiO<sub>2</sub>の逆相関と深層崩壊の発生しやすさとの関連は不明瞭である。しかしながら、深層崩壊の危険度が高いChaochou層でのみこのような関係が見られたとは、地質特有の岩石の不均質性に由来する地下水流出特性が深層崩壊に大きく影響する可能性を示唆している。そこで、EC-SiO<sub>2</sub>関係を、採水点の集水面積内のPLAの面積率で区別してみた(図8)。同じEC値に対して、湧水は渓流水よりSiO<sub>2</sub>濃度が高く、ECとSiO<sub>2</sub>濃度の関係が流出経路の情報を反映することを示唆する結果が得られた。渓流では、PLAの割合が高くなるほどEC-SiO<sub>2</sub>関係が上にシフトしているように見える。すべり面の形成による流出経路の発達、従来試みられていたような、ECやSiO<sub>2</sub>濃度の単一の水質指標で表現することが出来ず、EC-SiO<sub>2</sub>関係現れる地質固有の流出システムの発達として理解できる可能性が示された。

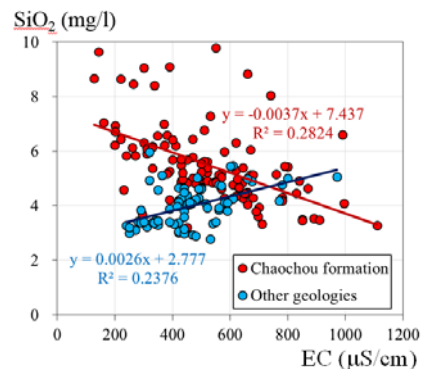


図7 ECとSiO<sub>2</sub>濃度の関係

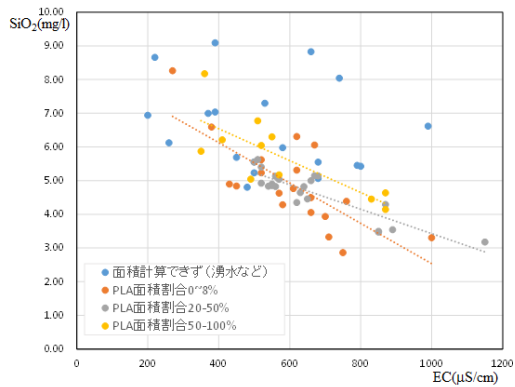


図8 Chaochou 層における EC-SiO<sub>2</sub> 関係  
(集水域内の PLA 面積率によって区別)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計5件)

- ① Yamakawa Y, Egusa T, Hotta N, Oda T, Tsai YJ, Lee SP. A risk evaluation method for deepseated landslide based on stream water chemistry. The 4th Slope Tectonics Conference, Kyoto, Japan, 14-15 October 2017.
- ② 江草智弘, 堀田紀文, 山川陽祐, 小田智基, 地頭菌隆, 勝山正則, 李心平, 蔡元融. 台湾の深層崩壊危険地域における渓流水質特性. 平成29年度(公社)砂防学会定時総会並びに研究発表会, 奈良県春日井国際フォーラム(奈良県奈良市), 2017年5月24-25日
- ③ 堀田紀文, 江草智弘, 山川陽祐, 小田智基, 地頭菌隆, 勝山正則, 蔡元融, 李心平. 渓流水質に基づく深層崩壊の危険度評価の試み. 第128回日本森林学会大会, 鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市), 2017年3月26-29日
- ④ 江草智弘, 堀田紀文, 山川陽祐, 小田智基, 李心平, 蔡元融. 台湾の深層崩壊危険値における渓流水質調査. 日本地すべり学会第55回研究発表会, 高知県立県民文化ホール(高知県高知市), 2016年8月23-24日
- ⑤ 谷口未峰, 山川陽祐, 経隆悠, 堀田紀文, 山中勤, 岸和央. 南アルプス付加体堆積岩山地における基岩湧水の降雨応答特性. 平成28年度(公社)砂防学会定時総会並びに研究発表会, 富山県民会館(富山県富山市), 2016年5月18-19日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堀田紀文 (Hotta, Norifumi)  
東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授  
研究者番号: 00323478

### (2) 研究分担者

地頭菌隆 (Jotozono, Takashi)  
鹿児島大学・農学部・教授  
研究者番号: 50145455

小田智基 (Oda, Tomoki)  
東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教  
研究者番号: 70724855

### (3) 連携研究者

山川陽祐 (Yamakawa Yosuke)  
筑波大学・生命環境系・助教  
研究者番号: 20611601

### (4) 研究協力者

李心平 (Lee, ShingPing) 台湾成功大学  
蔡元融 (Tsai, Yuan-Jung) 台湾成功大学