

平成 30 年 5 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02831

研究課題名(和文) 界面動電現象を利用した地下水環境の新たなモニタリング手法の確立と減災技術への展開

研究課題名(英文) Establishment of a new monitoring method on subsurface hydrological processes by the electro-kinetic phenomena and its development to disaster mitigation

研究代表者

寺嶋 智巳 (Terajima, Tomomi)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：50353777

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：「自然電位を斜面崩壊の予測技術に実装できるか」に関する知見を得るために、実斜面における自然電位・地下水・地盤変位の観測を行ってきた。その結果、地盤変位は連続総降水量と線形関係が見られ、一義的には降水量に規制されていることが明らかとなった。

一方、自然電位の変動は、降水量に規定された地盤変位の直接的な原因となる地下水動態(浸潤前線の通過や飽和帯の形成・成長)を良く表すことがわかった。ただし、観測期間中は斜面が崩壊するまでには至らなかったため、室内実験で明らかとなっていた「崩壊の前兆と思われる自然電位の異常変動」までは観測できなかった。

研究成果の概要(英文)：To obtain the novel knowledge related to “Whether self-potential(SP) is available to predict the landslide timing?”, we have observed SP, subsurface water, and soil displacement in a real slope. Soil displacement was linearly correlated with the successive precipitation until the onset of soil displacement, indicating that soil displacement was mainly controlled by the corresponding precipitation. The SP variation exhibited well the subsurface water behavior (e.g., the passage of wetting front and the formation and growth of saturated zone in the slope, which was the direct cause for soil displacement). However, because the soil displacement was relatively small and has never linked to the landslide occurrence during the observation period, we could not measure the spike-like extraordinary changes in SP provided just prior to the landslide occurrence although the changes have been obvious in the indoor rainfall-landslide experiment.

研究分野：斜面水文環境学

キーワード：斜面崩壊予測 自然電位 界面動電現象 浅層地下水

1. 研究開始当初の背景

近年、気候変動により高強度の降雨の発生が世界的に増加し、人命や財産の損失を回避する減災システムを早急に整備することが緊急の課題となっている。たとえば、2013年の伊豆大島や2014年の広島における土砂災害では、避難指示・勧告の発令に関する「客観的な基準」の提示が強く求められた。

土砂災害環境を規定する因子のうち、斜面内部における水圧変動(界面動電現象として発生する自然電位の変動に大きく関わる)は災害発生の「時」を決定する最重要因子である。したがって、災害の発生予測には水圧変化の連続観測が不可欠である。

そのため、浅層地下水のモニタリングでは、水環境を計測する多数のセンサーを設置してデータを取得するのが一般的である。しかし、このような手法はコストや維持・管理、多量なデータ解析の観点において効率的とは言えない。また、電気探査(比抵抗計測)により相対的な地下水分量の分布を可視化することもできる。しかし、電場を与えることで水環境場の静的状態が破壊されること、連続観測が困難であることから、地下水の時空間変動までを可視化する手法としては成立し難い。

さて、本申請研究の開始に先立ち、我々が行った水および自然電位の変動に関する室内降雨崩壊実験では、電位変動には水圧のトレンドからは発見あるいは予測できない「崩壊の前兆現象(異常電位)」が現れた。この原因は、水圧が点のデータであるのに対し、電位は基準電極との間で生じる現象をすべて捉えている(すなわち、空間情報を含むデータである)ため、その間で地盤変動に関わる何らかの水環境の変化が生じると、電位変動として確実に認識できるからである。すなわち、斜面における自然電位の計測は地下水の動態および土砂災害環境の可視化にきわめて有効な手法になり得ることがわかっている。

そこで、従来の手法(水環境を計測するセンサーを多数設置する)に対し、より簡易なシステムで観測が可能になる自然電位を用いることにより、「地下水動態を容易に可視化するための新たな手法を確立する」とともに、それを「土砂災害環境の可視化技術(地盤災害の発生予測)へと発展させる」という着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、以下の□、□を主要な目的として研究を行うこととした。

- 実際の斜面における地下水の動態を簡易かつ高精度に把握するため、自然電位を用いた新たな地下水環境モニタリング技術を確立する。そのため、実際の斜面で水・地盤・電位の変動を計測して検証を行うとともに、リアルタイムモニタリングのためのトモグラフィシステムを開発する。
- 野外検証により得られる水・地盤・電位

変動の因果関係をベースとして、上記で確立した地下水環境モニタリング技術を土砂災害環境(特に、豪雨時における斜面変動)の監視技術へと応用・展開する。すなわち、平常時の電位や斜面変動発生の前兆現象となる異常電位のモニタリングとモデル化を通して、土砂災害の発生環境を可視化するための「科学的な意味を有する技術」を確立する。

3. 研究の方法

本研究では、地下水動態のリアルタイムモニタリング手法と、その手法を発展させた土砂災害環境の監視技術の創出に対する、「自然電位計測」の有用性を検証する。そのため、下記項目A~Cについて研究を実施する。

- A: 室内実験での成果(地下水動態のモニタリングに対する電位計測の有用性)を実際の斜面において検証する
- B: 水・地盤・電位の視点を融合した実際の斜面に対する地下水環境モニタリング手法の確立
- C: 上記を発展させた、斜面災害の早期警戒システムの開発(本申請では、主に土砂災害環境の可視化技術の創出)

4. 研究成果

本研究では、「自然電位を実際の斜面崩壊発生時刻の予測技術に実装できるか」に関する知見を得るために、徳島県三好市にある西井川地すべり地において、地盤構造の把握、浅層地下水および斜面地盤の変位、自然電位動態についての観測を行ってきた。以下に、新たに得られた知見と成果を述べる。

(1) 地盤構造

水・地盤・電位変動の素因となる観測斜面の地盤構造について把握した。ボーリングコアの色彩変化を利用した風化度(水酸化鉄の分布)の判別、広範な地盤構造を探るための能動的電気探査、浅層地下水の動態を探るための1m深地温計測、により;

- (コアの色彩変化より) 当該地すべり地の深度10mまでの土層構造は崩積性土砂がほとんどを占めるが、その風化態様は色彩変化により4つのセグメントに区分され、それぞれのセグメントにおいて上部褐色帯(水酸化鉄濃集:酸化状態)と下部黒色帯(還元状態)に区分できる
- (能動的電気探査より) 当該地すべり地には土塊が残存している斜面(観測対象斜面)と、すでに崩落が生じ移動可能な土砂が存在していない斜面(当該地すべり地の東方斜面)がある
- (コアの色彩変化および能動的電気探査より) 電位の3次元分布は、深度2.5~3m付近に比抵抗の小さな層が存在し、これがボーリングコアで見られた浅層部分の副次すべり面に一致していること
- (地温計測より) 地すべりの地盤内を脈

流として流動し、より深部からの地下水の流入も存在している

ことが判明した。これらにより、当該地すべり地の基本的な地盤・電位特性を把握することができ、地下水および電位計測を行うための前提となる水・地盤環境の基礎知見を得ることができた。

(2) 地盤変位

地盤傾斜計を設置して、深度間隔および時間間隔共にこれまでに行われていない詳細な観測（深度50cm間隔、計測時間2時間間隔）を行った。その結果、

- 微小な地盤変位が示した各風化セグメントの境界で生じる
- 主に深度1m以内の地盤では地盤の乾湿に伴い様々な変動（下方変位、膨張、収縮など）を示す
- 観測期間を通して、主に深度6.5mが大きく変位しており、この深度が本観測斜面の主要なすべり面になっている

ことが判明した。1970～80年代においては、主要すべり面は深度10m付近にあると報告されていることから、現在はより浅い地点がすべり面として機能していることになる。過去40年間で主要すべり面の深度が4mほど浅くなった原因は現時点で明確ではないが、1980年代当時から現在までの間に施された地すべり対策工事（斜面末端部への擁壁・蛇籠等の設置）により、より深部のすべりが停止することで地盤の動態変化が生じたことも一因であると思われる。

現在の主すべり面である6.5m深での地盤変位量は連続総降水量（無降水期間が24時間以上の間隔を開けない）と線形関係が見られた。しかし、長期間乾燥（API-7=0：無降水期間が1週間以上続いた）後に高強度（10mm/hおよび総降水量40mm以上）の降雨があった場合、総降水量に対する地盤の変位量は湿潤時と比べて小さくなる傾向にあった（すなわち、乾燥していると地盤変位を発生し難い）。冬期間の強度の低い降水（10mm/h以下）時に地盤が変位する場合には、降水量に対する変位量が相対的に大きくなり、上記の線形関係からずれることも判明した。これらのことは、

- 地盤は一義的には降雨量に規制されて変位している
- 変位が生じる前の先行土壌水分量が、その変位に参与した降雨量・地盤変位のしきい値に大きく影響している（同程度の降水量でも、降雨イベント前に乾燥状態が続いたときは、変位を生じにくい）
- 冬季に変位量が相対的に大きくなるのは、水温の違いによる水の粘性が地盤変位に関わっている可能性がある（低温により粘性が大きいため、地盤変位を生じ留ための応力が大きくなりやすい）

ことを意味している。

これら水および地盤の観測を通して、自然電位変動との因果関係の考察を行うための前

提となる土壌水分状態や地盤変位の特性についての情報（以下の（3）に関わる）および新たな知見（特に など）が得られた。

(3) 水・電位の変動

観測対象とした斜面における自然電位の変動は、室内降雨崩壊実験と同様に地下水の動態と良く対応しており、

- 実斜面においても「浸潤前線の通過」、
「飽和帯の形成・成長」の過程を捉える
ことができ、自然電位の観測が実斜面の
地下水動態の把握に有効であること

が判明した。しかし、観測期間中に斜面全体が目視可能なレベルで移動を生じ崩壊が発生するような相対的に大きな地盤変位が生じなかったことから、室内実験では捉えることができた「崩壊の前兆」と思われる自然電位の崩壊直前異常変動を観測することはできなかった。このことから、定量的な因果関係の把握に基づく崩壊発生と電位現象の科学的理解のためには、

- 実斜面を模したより不均質な土層モデル（層厚、層構造、土砂粒径などの異なり）に基づいた室内降雨崩壊実験を行うことで、野外観測では再現不明であった現象に対する基礎データを補完できる事例を増やすとともに、水・地盤・電位変動に関するより多くの基礎知見を蓄積しておくこと

が、次の課題（今後の展望）として当該研究の深化のために重要であると思われた。

そこで、当初の計画にはなかったが、実際の斜面での水・地盤・自然電位の変動を補完する目的から、最終年度に、上下2層（上部緩詰め、下部密詰め）の不均質モデル斜面を作成して室内降雨崩壊実験を実施し、計測・解析を行った。その結果、

- 電位動態が、1層均質モデルと同様に地下水の動態（浸潤前線の到達、飽和帯の形成と成長、崩壊発生の前兆と思われる直前異常変動）を良く表すことを確認した。

しかし、斜面崩壊の態様は斜面下部から上部へ向けて順次崩壊を発生する「進行性崩壊」の形を取り、「上・下部斜面ともに一気に崩壊」した1層均質モデルとは異なった。このような崩壊態様（地下水流動と地盤変動の関係）の違いが自然電位変動に及ぼした影響については現在、鋭意解析中である。

(4) 総括

以上、～ の成果、特に、室内実験用のモデル斜面だけではなく、実際の斜面（地すべり地）においても簡易な電位計測により地下水動態（土砂災害環境）を精度良く再現できることが判明したことは、これまで世界的にも報告例が少なく、極めて貴重な成果であると言える。

これら一連の成果を通して、現在は土砂災害環境をより簡易に可視化するためのトモ

グラフィックシステムの開発に着手しており、ほぼ完成の域に達している。それとともに、技術の高精度化と水・電位間の科学的因果関係の解明に取り組みながら、「自然電位把握手法およびその可視化方法」に関する「特許申請」を予定している。

以上のように、本申請研究では、必ずしも自然電位による斜面災害監視技術の一般化と普及にまで到達（技術が完成）したわけではないが、土砂災害の発生環境を可視化して早期警戒システムを構築する手法が成立しつつあることから、当初の研究目的の8割以上が達成できたものと考えている。

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）

〔雑誌論文〕（計3件）

Yamazaki, T., Hattori, K., Kaneda, H., Sakai, H., Izumi, Y., Terajima, T., Development of Monitoring System to Understand Preparation Processes of Rainfall-Induced Landslides Estimation of Slip Surface and In-Situ Observation using Electromagnetic Methods, Journal of Electronics and Communications in Japan, 査読有, 100, 3-11, 2017
DOI:10.1002/ecj.11967

Furuva, G., Suemine, A., Honda, J., Wang, G., Inoue, M., Groundwater flow behavior at landslide area on crystalline schist mountains, Advancing culture of living with landslides; Proceedings of the 4th World Landslide Forum, Ljubljana, Slovenia, Vol.2, M. Mikoš et al. (eds.), Springer, 査読有, pp.301-308, 2017
DOI:10.1007/978-3-319-53498-5.

山崎智寛、服部克巳、金田平太郎、酒井英男、泉吉紀、寺嶋智巳、自然電位法を用いた降雨による斜面崩壊過程の監視の試み：電磁気学的手法を用いた実斜面におけるすべり面の推定と実斜面観測システムの構築. 電気学会論文誌、査読有、A136、No.5、297-303、2016
DOI:10.1541/ieejfms.136.297

〔学会発表〕（計31件）

【2018年】

Terajima, T., Is monitoring the electro-kinetic phenomenon in slopes available to predict the shallow landslide initiation?; Kyoto Univ.-KIGAM (Korea) International Seminar, 2018
寺嶋智巳、砂質モデル斜面で発生する崩壊と安定解析（□）すべり面設定下での解析と地中水流の影響、京都大学防災研究所年次発表会、2018

福井宏和、寺嶋智巳、砂質モデル斜面で発生する崩壊と安定解析（□）崩壊のタイミングとすべり面の形成過程. 京都大学防災研究所年次発表会、2018.
長谷川雅俊、古谷元、寺嶋智巳、王功輝、服部克巳、浅野志穂、落合博貴（2018）：崩壊土砂債が時における土層変形計測の試み、日本応用地質学会北陸支部平成29年度研究発表会、2018
井原潤、古谷元、末峯章、王功輝、浅井和由、地すべり土塊内の流動地下水の動態 - 平常1m深地温の実測値と推定値からの検討 - ,日本応用地質学会北陸支部平成29年度研究発表会、2018

【2017年】

福井宏和、寺嶋智巳、浸透力が人工砂質斜面の表層崩壊に及ぼす影響. 地形成学連合2017年度研究発表会、2017

Huang, Q., Hu, K., Hattori, K., Probability tomography and wavelet analysis of self-potential data, JpGU-AGU Joint Meeting, 2017

Huang, Q., Hu, K., Hattori, K., Probability tomography and wavelet analysis of self-potential data, 4th International Workshop on Earthquake Preparation Process, Observation, Validation, Modeling, Forecasting - (IWEP4), 2017

Huang, Q., Hu, K., Hattori, K., Probability tomography and wavelet analysis of self-potential data and possible application in landslide monitoring, IAG-IASPEI, 2017

Hattori, K., Terajima, T., Ochiai, H., and Huang, Q., Self-potential approach to develop the early warning system for rainfall-induced landslide, 中国地球科学連合学術年会, 2017

Hattori, K., Yamazaki, T., Terajima, T., Huang, Q., Development of Self-Potential Tomography for Early Warning System of rainfall induced Landslides: Electro-kinetic Effects and Sandbox Experiments, AGU Fall Meeting, 2017

石川彩香、吉野千恵、服部克巳、寺嶋智巳、浅野志穂、自然電位法を用いた斜面下の地下水動態の推定:水槽実験と室内人工降雨水路実験. 日本大気電気学会第96回研究発表会、2018

井原潤、古谷元、末峯章、王功輝、井上護、多層地温測定による地すべり土塊内の流動地下水観測, 第56回日本地すべり学会研究発表会講演集、日本地すべり学会、2017

古谷元、末峯章、王功輝、連続地温計測による地すべり地における流動地下水の動態観測, シンポジウム ー地すべり変動に影響を及ぼす地下水ー、日本地すべり学会、2017

後藤忠徳、日本における地殻比抵抗構造

データベースの構築へ向けて、平成 28 年度 Conductivity Anomaly 研究会、2017

【2016 年】

寺嶋智巳、服部克巳、山崎智寛、後藤忠徳、界面動電現象のモニタリングは崩壊発生タイミングの予測にどこまで使えるか、京都大学防災研究所年次発表会、2016

後藤忠徳、寺嶋智巳、山崎智寛、服部克巳、徳島県三好市地すべり斜面における比抵抗トモグラフィー、京都大学防災研究所年次発表会、2016

山崎智寛、服部克巳、寺嶋智巳、徳島県西井川地すべり斜面における自然電位モニタリング、京都大学防災研究所年次発表会、2016

古谷 元、王 功輝、末峯 章、寺嶋智巳、1 m 深地温計測による西井川地すべりの流動地下水脈の連続観測、京都大学防災研究所年次発表会、2016

山崎智寛、服部克巳、寺嶋智巳、自然電位観測による斜面地下水動態の監視法の開発：地下水流動に伴う自然電位変動と自然電位トモグラフィー、JpGU、2016

- ②① Yamazaki,T., Hattori,K., Terajima,T., The self -potential variation induced by groundwater flow and the self-potential tomography, JpGU, 2016
- ②② Yamazaki,T., Hattori,K., Terajima,T., Self -potential changes induced by water flow under ground, International Workshop on Earthquake Preparation Process - Observation, Validation, Modeling, Forecasting -, Chiba University, Chiba, Japan, 2016
- ②③ Yamazaki,T., Hattori,K., Kaneda,H., Yoshino,C., Sakai,H., Izumi,Y., Terajima,T., Development of monitoring system to understand preparation processes of rainfall-induced landslides, International Workshop on Earthquake Preparation Process - Observation, Validation, Modeling, Forecasting -, Chiba University, Chiba, Japan, 2016
- ②④ Hattori,K., Yamazaki,T., Terajima,T., Q. Huang,Q., Self-Potential Monitoring for Ground Water Condition: Electro-kinetic Effect and Self-Potential Tomography, EMSEV Workshop, Lanzhou, China, 2016
- ②⑤ Hattori,K., Yamazaki,T., Terajima,T., Electromagnetic Changes Due to Electro-kinetic Effects: Sandbox Experiments, 日本地震予知学会、2016
- ②⑥ 井上 護, 古谷 元, 末峯 章, 王 功輝, 本田純也、連続地温測定に基づく地すべり土塊内における流動地下水脈の動態に関する一考察、日本応用地質学会北陸支部平成 27 年度研究発表会、2016

- ②⑦ 後藤忠徳・寺嶋智巳・山崎智寛・服部克巳、徳島県三好市地すべり斜面における比抵抗トモグラフィー、物理探査学会第 134 回学術講演会、東京、2016

【2015 年】

- ②⑧ Hattori,K., Yamazaki,T., Terajima,T., Visualization of Groundwater Motion Using Self-Potential Tomography for Indoor Rainfall-Induced Landslide Experiment, JpGU, 2015

- ②⑨ 山崎智寛、服部克巳、寺嶋智巳、地下水動態に起因する自然電位変動と自然電位トモグラフィー、日本大気電気学会研究発表会、2016

- ③⑩ 古谷 元、末峯 章、本田純也、王 功輝、結晶片岩地すべりにおける豪雨時の地下水挙動と土塊内部構造、日本地すべり学会、2015

- ③⑪ Furuva,G., Suemine,A., Honda, J., Wang,G., Relationship between Groundwater Flow and Internal Structure of Landslide Mass by Combined Geophysical Survey Method, 10th Asian Regional Conference of IAEG, 2015

【その他】(計 3 件)

【論文】

山崎智寛、服部克巳、寺嶋智巳、電磁界を用いた自然災害軽減のための観測・予測・解析技術調査専門委員会編、電磁界を用いた自然災害軽減のための観測・予測・解析、電気学会技術報告、査読無、第 1389 号、pp.38、2016

山崎智寛、服部克巳、寺嶋智巳、地下水動態に起因する自然電位変動と自然電位トモグラフィー、日本大気電気学会誌、査読無、第 88 巻、10-1、18-19、2016

山崎智寛、服部克巳、寺嶋智巳、人工降雨斜面崩壊実験における自然電位トモグラフィーを用いた地下水動態推定の試み、日本大気電気学会誌、査読無、第 86 巻、9-1、35-36、2015

【国際セミナー、レクチャー】

Hattori,K., Terajima,T., H. Ochiai, Q. Huang, Self-Potential Approach to Develop the Early Warning System for Rainfall-induced Landslide. Special Seminar, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, China, 2018

Hattori,K., Terajima,T., Ochiai,H., Huang,Q., Self-Potential Approach to Develop the Early Warning System for Rainfall-induced Landslide. Special Seminar, Beijing University, Beijing, China, 2017

Hattori,K., Application of Geophysics to Natural Hazard. Special Lecture at Pertamina University, Jakarta, Indonesia, 2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺嶋 智巳 (TERAJIMA Tomomi)
京都大学防災研究所・准教授
研究者番号：50353777

(2) 研究分担者

服部 克巳 (HATTORI Katsumi)
千葉大学大学院理学研究科・教授
研究者番号：60244513

古谷 元 (FURUYA Gen)
富山県立大学工学部・講師
研究者番号：80378926

後藤 忠徳 (GOTO Tadanori)
京都大学工学部・准教授
研究者番号：90303685

松浦 純生 (MATSUURA Sumio)
京都大学防災研究所・教授
研究者番号：10353856

(3) 連携研究者

王 功輝 (OH Kouki)
京都大学防災研究所・准教授
研究者番号：50372553