

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23651177

研究課題名（和文） 電磁気学的アプローチによる斜面崩壊予測：実斜面検証

研究課題名（英文） Development of Landslide Early Warning Using the Self-Potential Method : In-situ Observation

研究代表者

服部 克巳 (KATSUMI HATTORI)

千葉大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：60244513

研究成果の概要（和文）：本研究において(1)斜面における自然電位データ観測に適したシステムの開発、(2)地下の状態を可視化する自然電位トモグラフィ手法と雑音除去法の開発、(3)実斜面検証のための自然電位観測システムを徳島西井川に新設することを実現した。この結果水文学—地盤工学—電磁気学結合に関する新たな知見と in-situ 条件でのデータ収録を開始することができた。これらの成果は国際誌・国内誌に10件(うち4件査読有)および国内外の学会に34件の研究発表として公表した。

研究成果の概要（英文）：Through this research project, the scientific achievements are as follows: (1) Development of a compact data acquisition system with multi channels and solar battery for in-situ landslide observation of self-potential, (2) Development of self-potential tomography and noise reduction to visualize underground water condition, and (3) Installation of a practical base at Nishi-Ikawa, Tokushima, Japan to monitor self-potential at an in-situ slope. These achievements provide the new findings on hydrological-geotechnical-electromagnetic coupling for landslide processes and accumulation of the in-situ observation data. And they have been reported in 10 scientific papers (4 papers with review) and 34 scientific presentations at international and domestic meetings.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000 円	930,000 円	4,030,000 円

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：自然災害予測・分析・対策

1. 研究開始当初の背景

斜面崩壊は、人命や土地家屋等の財産を一瞬にして奪ってしまう自然災害であり、豪雨や地震などの地殻変動に伴って発生することが多い。日本では斜面崩壊は雨期に多く、人命はもとより、ライフラインや交通要所の遮断により社会基盤や経済にも大きな影響を与える大きな脅威である。本提案では斜面崩壊の過程を正確に把握し、地下水の流動や挙動と斜面崩壊の関係を解明し、斜面崩壊の

簡易な監視・予測技術を創生することが最終目的である。すなわち、早期警戒システムの開発である。

従来行われている水文学的手法での斜面崩壊の監視は、斜面毎に地下水圧や地盤変動を計測する測器を埋設するなど、斜面内部における水や土に生じる変動現象を直接観測しなければならない。そのために井戸等の設備が必要であり、コスト面から必ずしも実用的・効率的な方法ではない。一方、地表付近

にセンサを設置する電位計測は、容易に連続観測が可能である。電位計測により比抵抗分布や土中水分の時空間的変動を可視化することで、従来困難であった土中水分の分布を遠隔的に把握できる可能性が高い。このことは、簡易で有効な斜面監視技術を提供できることを示している。本提案の目的は、水文学、地盤工学、地質学、電磁気学的視点から崩壊前駆現象を整理・融合させ、世界初の電磁気学的手法（自然電位法：受動的な手法で地表の2点間の電位差測定に基づく手法）による簡易な斜面崩壊の監視・予測技術を確立に資する研究を行うことである。

これまでに、研究代表者らは、森林総合研究所の人工降雨斜面崩壊実験設備を利用した崩壊実験によって、水文学的、地盤工学的な斜面崩壊の先駆現象として、崩壊30分前頃から①土壌水分の飽和領域の形成と発達、②浸透流の鉛直方向（雨水の浸透方向）から斜面に沿う方向への変化、③20分前からの土層変位の開始が確認されている(1)。自然電位変動では、①や②は大局的な変動として、③はパルスまたは矩形波として捉えられている。水槽実験から①②は主として界面導電現象（流動電位）が寄与していること、③は地下流動(mass flowあるいはseepage flow)が寄与していることを示唆する結果を得ている。すなわち、自然電位変動は主として界面導電現象で説明できることを示唆している。しかし、in-situ環境である実斜面での検証が必要不可欠である。そこで、本研究では実斜面観測と水槽実験を駆使し、地下水動態と自然電位変動の関係を水文学、地盤工学、地質学、電磁気学的視点から調査研究する。

2. 研究の目的

本研究では水文学、地盤工学、地質学的、電磁気学的視点から崩壊前駆現象を整理・融合し、電磁気学的手法（自然電位法：能動的な手法で地表の2点間の電位差測定に基づく方法）による土砂災害軽減に資する簡易な斜面崩壊の監視・予測技術の調査研究を行う。具体的には室内水槽実験およびin-situ環境である実斜面において、①水文学—地盤工学—電磁気学結合に関する基礎データを蓄積、②自然電位トモグラフィーや雑音除去などデータ解析手法の開発、③解析結果の解釈と斜面崩壊プロセスの理解を進展、④電磁気学的手法による斜面崩壊の予測・監視システムのポテンシャルと問題点の把握、に関する調査研究を行う。自然電位による降雨斜面崩壊監視・予測システム開発に関して実斜面応用による検証を行うことが目的である。

3. 研究の方法

自然電位による降雨斜面崩壊監視・予測システム開発に関して実斜面応用に資する研

究を行うために、(1)斜面における自然電位データ観測に適したシステムの開発、(2)地下の状態を可視化する手法の開発、(3)実斜面への自然電位観測システムの設置の3つの項目について重点的研究を行った。具体的には(1)省電力小型マルチチャンネルデータ収録装置の開発、(2)自然電位トモグラフィーの開発、(3)徳島県三好市西井川実斜面観測点設置である。

4. 研究成果

本研究の主な成果は(1)斜面監視用省電力小型高精度マルチチャンネルデータ収録システムの開発、(2)自然電位トモグラフィーや雑音除去などデータ解析手法の開発、(3)徳島県池田町西井川の実斜面への自然電位連続観測システムの設置の3つにまとめることができる。以下に具体的に記述する。(2)については紙面の都合上、トモグラフィーの開発について記述する。

(1)省電力小型高精度マルチチャンネルデータ収録システムの開発

従来型のデータ収録装置では、チャンネル数、電源、サンプリングレートなど斜面における自然電位観測には向かなかった。そこで48チャンネルの実斜面観測用の高精度マルチチャンネル遠隔データ収録システムを開発した。図1にシステム概要を示す。開発システムは商用電源および太陽電池駆動が可能で、データを拠点となる観測小屋のPCまで無線で転送できるシステムである。地電位差や間隙水圧等が計測できる仕様となっている。具体的には、データ集録部として、ナショナルインスツルメンツ社製のcRIO-9025とcRIO-9113を選定した。cRIO-9025はCPUとメモリが内蔵されたリアルタイムコントローラーであり、cRIO-9113はFPGAチップを内蔵した4スロットモジュール接続可能のシャーシである。リアルタイムコントローラー及びFPGAチップに直接プログラムを書き込むことで、汎用型PCによる制御を必要とせずデータ集録を行うことが可能である。ADコンバータとしてはNI9206を用いる。これは16チャンネルまで測定できる16bit ADC付きモジュールである。太陽電池パネルは三菱社製PV-MX185HAを、バッテリーはGSYUASA製ディープサイクルバッテリーEB-100を選定した。また太陽電池パネルからバッテリーの充電を調整するチャージコントローラーとしてNorth Power社製のTS-MPPT45を用いる。

cRIOの稼働電力は24VDC、約35Wであり、24時間稼働させ続けるために、太陽電池パネル3枚とバッテリー4個が必要である。太陽電池パネルは3枚直列につなぎ、バッテリーは2つつ直列につなぎ、それらを並列に接

続する。太陽電池パネルとバッテリーをチャージコントローラーに接続し、バッテリーの充電を制御する。cRIOは電力が供給された時点で集録が自動開始するようなプログラムとした。これは仮にバッテリーの容量がゼロになったとしても、また充電されればすぐに集録を再開できるようにするためである。

集録プログラムはLabVIEWを用いて作成した。まず、NI-9206に接続した電極から得られるデータをcRIO-9113に内蔵されているFPGAチップで計測し、そのデータをcRIO-9025へと渡し、その中でファイル処理を行う。集録したデータファイルはcRIO-9025のUSBポートに接続したUSBストレージ内へと保存するようにする。これはcRIO-9025の容量が512MBしかないためであり、USBストレージを使うことで長期間のデータ集録を実現することを目指したためである。また、集録中はPCによる制御を行わないため、ユーザー側が任意のタイミングで集録を停止できるように、cRIO-9025に付属しているUser Switchをオンにすることで集録を停止できるようにプログラムした。またPCによる制御を行わないため、従来のようにディスプレイによる動作確認ができない。これを克服し、動作確認や集録の状況を目視で容易に確認できるようにするため、こちらにも付属しているLEDのパターンを用いて稼働状況を確認できるようにした。LEDのパターンによりUSBストレージの容量を目視で確認できるため、USBストレージの交換時期を知ることができ、極力少ない時間のデータ欠測で集録を続けることが可能となった。

千葉大学理学部4号館屋上に開発した収録装置を設置し、長期連続稼働テストを実施しているが、人為的なミス以外ではデータの欠測はない。新しいデータ収録システムは、多少の悪天候条件ではデータの欠測は起こさず、仮にバッテリー残量が0になったとしても再び充電されれば、集録を再開できることが確認された。野外観測点にてデータを安定して蓄積していくための基盤装置が開発できた。

(2)自然電位トモグラフィの開発

自然電位から地下の電荷分布を推定し、地下水動態を推定する手法を開発した。測定さ

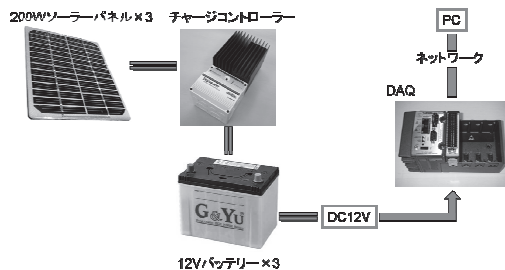


図1 省電力小型高精度マルチチャンネルデータ収録システムの概要

れた自然電位と地下の電荷分布の間には、クーロンの法則 $V = Q / (4\pi\epsilon r)$ が成立している。ここで、 V は電位、 Q は電荷、 ϵ は誘電率、 r は距離である。従って、自然電位による電荷分布の推定は逆問題となる。この逆問題を解くため、線形正則化法であるフィリップス・ティホノフ正則化法を用い、最適解を選択するための客観的評価量として、GCV(Generalized Cross Validation)を使用した。また、推定した電荷分布の評価と地下水動態の関係を調査するため、千葉大の水槽実験システムを用いたシミュレーションと実証実験を行った。

再生領域は砂で敷き詰められた水槽(横180 cm、縦55 cm)とした。その水槽を一辺が5 cmの大きさのピクセルで分割し、各ピクセルの中央の電荷を求めた。その際に、計算条件として水槽外の電荷は0とし、水槽内の誘電率 ϵ は一定とした。まず、GCVを用いたフィリップス・ティホノフ正則化法による電荷分布推定の有効性を調査するため、電荷を2次元ガウス分布とし、モデルデータに誤差を印加し、シミュレーションを行ったところ、仮定した分布がよく再構成され、構築したアルゴリズムの有効性が確認された。次に、疎データへの適用性を調査するため、水槽内に均一に配置した電極数を減じていったところ、電極数が16本では誤差は大きい。電荷のピーク位置と広がり、仮定した分布をよく再構成することがわかった。実データの測定誤差は約10%であるので、このシミュレーション結果により、電極数を16本以上とすれば、実データにおいてもうまく電荷分布推定が行えることがわかった。

次に実データ(水槽実験データ)への応用結果について記述する。水槽システムは、砂(マサ土)が敷き詰められたアクリル製の水槽とその左右に設置された注水量調整タンクから構成されている。左右のタンクから水槽内に注水することができ、また水槽内における水位も測定できるようになっている。水のない状態の水槽に左のタンクから注水し、その時の自然電位と水位を測定するという実験を行った。得られたデータに構築したアルゴリズムを適用し電荷分布の推定を行った。実験開始後の自然電位データを使用して電荷分布を構築したアルゴリズムを用いて再構成した。その結果、水位レベルを境界として、下方(飽和領域)に負の電荷が、上方(不飽和領域)に正の電荷が存在する傾向があることがわかった(図2参照)。また、飽和領域の拡大に伴い、負の電荷の領域が拡大し、正の電荷が流動方向に移動することも分かった。図3は推定した電荷から地下水流を求めた一例で、実験開始20分後の状態を示している。赤および青のベクトルはそれぞれ水槽中の上方および下方への水流を示しており、地下

水面はその境界に位置する傾向にあることがわかる。写真は実験開始直後、20分後、60分後の赤線部のトレーサの様子を示しており、概ね水流と調和的であることがわかる。

以上のことから、地下水動態の推定ができる能力を有する自然電位トモグラフィアルゴリズムを構築できたことがわかった。

(3)徳島県三好市西井川実斜面観測点設置

この地域は中央構造線・三波川帯に位置し、この帯では広い範囲にわたって地すべりが発生している。また、対象の斜面は点紋帯に属しており、構成岩類は主に塩基性片岩と泥質片岩の互層からなっている。この斜面は北西にある工場の建設に当たって、斜面下端を切り出したために斜面崩壊が発生したことが京都大学防災研究所の調査によってわかっている。また、この斜面には同研究所によって伸長計などの斜面を観測するためのセンサーがすでに設置されている。この斜面において2012年7月に電気探査、2012年11月にボアホール探査を行い、2012年12月に定常in-situ観測のための自然電位観測を開始した。

図4に観測点図と電気探査の測線を示す。図中の水色の点線は京都大学によって同定されている斜面崩壊セグメントを示す。斜面方向にLine1(京大センサ測線沿い)および6、斜面を横切る方向にLine2~Line5を設置した。地形的な制約を受けたため測線は斜交している。各測線では電極間隔1mで電気探査を実施したが、Line1,2では電極間隔2mでも実施した。図5に電気探査の結果を示す。電気探査をした範囲には相対的に高比抵抗な領域(300Ωm以上)、中比抵抗な領域(140-300Ωm程度)、低比抵抗な領域(140Ωm以下)が存在する。相対的に高比抵抗な領域は、表層付近に現れており、礫、クラック等の要因が考えられる。相対的に中比抵抗な領域はこの斜面の一般的な比抵抗を表していると考えられ、低比抵抗な領域は土壤水分が多い領域であると考えられる。このことから土壤水分が豊富な領域は表層~3m付近と4~6m付近であることがわかる。一般に、すべり面は土壤水分が豊富な領域とそうでない領域の境界にある傾向があることが知られている。このことを検証するために、line 6上の2点においてパーカッション式ボーリングによるコアサンプリングを行った。

コアの柱状図を図6に示す。地点1では地表から2.4m付近まで表土およびシルトで構成されており、シルト層は風化によって赤みが強くなっていた。その下層には0.5mほど粘土層がみられた。この層はシルト層に比べ、かなり乾燥していた。この粘土層の下はシルト質の角礫層であった。この礫層は主にgranuleとpebbleサイズの礫で構成されており、水分を多く含んでいた。しかし、6-7m付

近では密度が高くなっており、水分量は少なくなっていた。この地点は地点1の1.3mだけ上側斜面となる。地点2では地表から1.7m

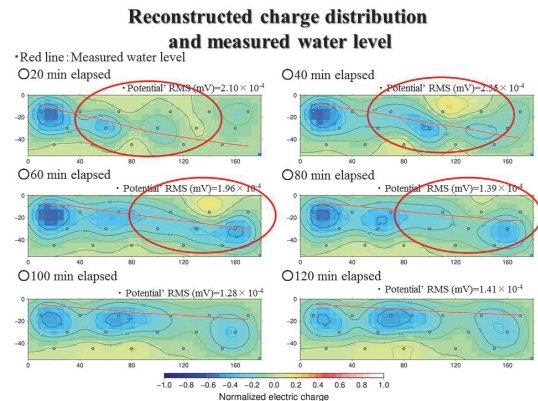


図2 水槽実験データから再構成された電荷分布と水位の関係(図中の赤線が測定された水位)

Comparison estimated Darcy velocity with locus of tracer

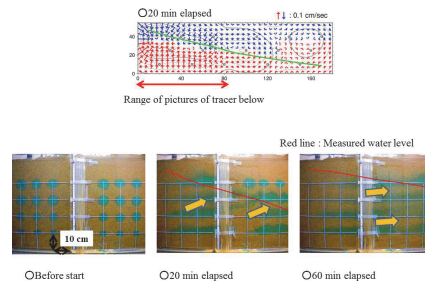


図3 水槽実験データからの再構成された水流とトレーサとの比較(実験開始20分後)

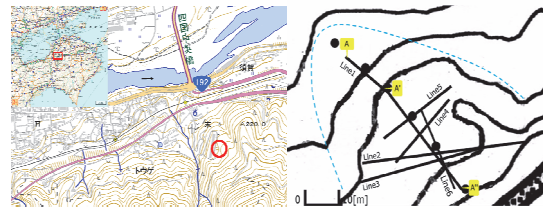


図4 西井川観測点と電気探査の測線

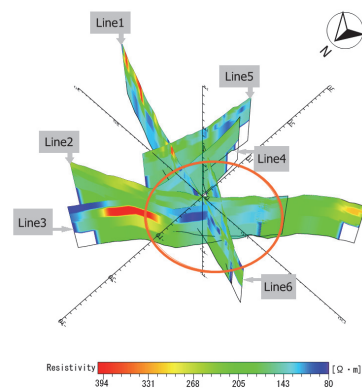


図5 電気探査の結果

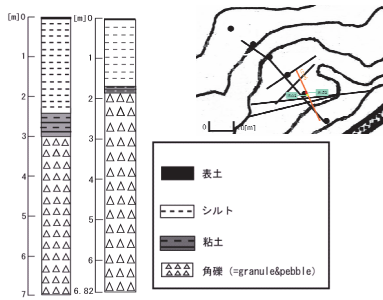


図6 コアサンプルの記述

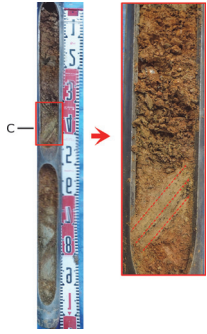


図7 地点2の深さ1~2mのコア中に見られる条線構造を示す(右写真の赤線).

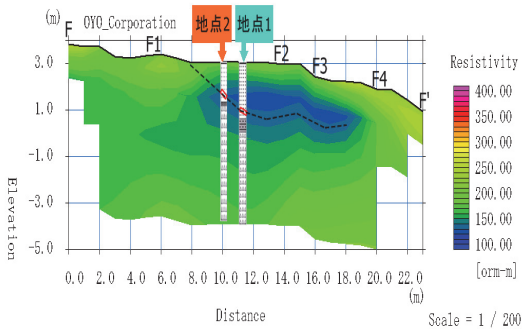


図8 Line 6の電気探査結果とコア試料の比較. コアの条線構造と比抵抗コントラストがよく対応しており, すべり面と推定される.

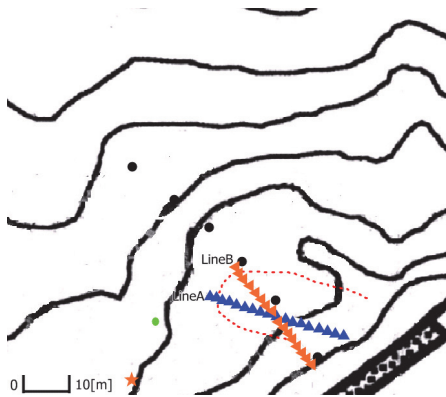


図9 自然電位観測のための電極配置図

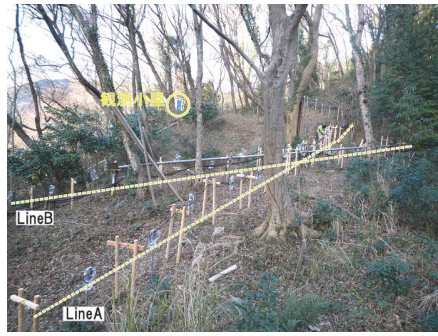


図10 センサ設置後の西井川観測点の写真

ほどまで表土とシルト層になっており, 地点1同様, シルト層は風化によって赤みが強くなっている. この層の下層には粘土層が0.2mほどみられ, さらに下層ではシルト質の角礫層があった. この角礫層は5m付近まで比較的水分を多く含んでいたが, 5m以深では密度が高く, 土中の水分量は少なかった.

図7中の灰色の部分で周囲と異なる構造を持った領域がある. この領域では粒径が小さくなっており, 加えてこれらの領域では, 土層中に構造の傾きと同じ方向に条線が走り, せん断構造が見られ, 淘汰を受けたために変色している(図8参照). これらのことは, この領域を基準に土層が変位している, つまりこれらの領域がすべり面であることを示唆している. ここで前述の電気探査の結果と比較する. 図8のようにコア中の条線構造のあるすべり面の深さと傾きは, 土壤水分が多い領域の深さと傾きに対応する. つまり, 比抵抗断面図の低比抵抗-高比抵抗境界はシルト-粘土層間のすべり面を表す. これをもとに比抵抗断面図にすべり面を描くと破線ようになる. このときすべり面付近の比抵抗はLine6において140Ωm以下であり, すべり面の深さは最大3m程度であると推定できる. 従来の京大防災研の調査では, 6m付近にすべり面があるとされていたが, より小さな斜面崩壊セグメントが発見された. 本事業ではこの新たに発見されたセグメントを対象に自然電位のin-situ観測を実施することにした. 図9に自然電位観測測線LineAおよびBとすべりセグメントを示す. 電極数はLineA, Bそれぞれ17および16個であり電極間隔は1.5mで, 深さは1.0mと1.5mで交互に埋設した. 基準電極はもっとも近い電極から約15m離れた地点の深さ1mに設置した. 図10は観測点の概要を示す写真である. 定常観測は2012年12月より開始した. データは(1)で開発した収録装置に記録される.

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計10件)

- (1) Terajima, T. and Moriizumi, M., Temporal and spatial changes in dissolved organic carbon concentration and fluorescence intensity of fulvic

acid like materials in mountainous headwater catchments. Journal of Hydrology, 479,1-12. 10.1016/j.jhydrol.2012.10.023, 2013, 査読有

- (2)Saito, S., Hattori, K., Kaida, D., Yoshino, C., Han, P., Febriani, F., Detection and reduction of precipitation effects in geoelectrical potential difference data, Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi), 182 (3), 1-8, DOI: 10.1002/ej.22301, 2012, 査読有
- (3)齋藤翔太, 服部克巳, 戒田大至, 吉野千恵, 韓鵬, Febty Febriani, 降雨に伴う地電位差変動の検知と除去の試み, 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌), 131 (9), 738-743,10.1541/ieejfms.131.738, 2011, 査読有
- (4)Saito, S., Kaida, D., Hattori, K., Febriani, F., Yoshino, C., Signal discrimination of ULF electromagnetic data with using singular spectrum analysis - An attempt to detect train noise, Natural Hazards and Earth System Science, 11 (7), 1863-1874, doi:10.5194/nhess-11-1863-2011, 2011, 査読有

(他 6 件)

【学会発表】 (計 34 件)

- (1)K. Hattori, H. Otsubo, T. Yamazaki, T. Terajima, and H. Ochiai, Early Warning of Landslide Based on Landslide Indoor Experiments, Workshop on Electromagnetic Methods in Hazard Monitoring, March 8, 2013, Beijing, China
- (2)H. Otsubo, K. Hattori, T. Yamazaki, The Development of self-potential tomography to estimate the ground water condition, Workshop on Electromagnetic Methods in Hazard Monitoring, March 8, 2013, Beijing, China
- (3)T. Yamazaki, K. Hattori, H. Otsubo, P. Han, T. Terajima, A. Suemine, 2 dimensional electrical resistivity tomography (ERT) at a landslide area in Nishiikawa, Tokushima, Japan, Workshop on Electromagnetic Methods in Hazard Monitoring, March 8, 2013, Beijing, China
- (4)大坪大, 服部克巳, 山崎智寛, A. Tohari, K. Sugianti, 地下水動態推定のための自然電位トモグラフィの開発, 日本大気電気学会第 88 回研究発表会, 2013 年 1 月 9 日-10 日, 東京理科大学, 東京
- (5)山崎智寛, 服部克巳, 大坪大, 吉野千恵, 韓鵬, 寺嶋智巳, 末峯章, 徳島県三好市池田の斜面崩壊地帯における電気探査について, 日本大気電気学会第 88 回研究発表会, 2013 年 1 月 9 日-10 日, 東京理科大学, 東京
- (6)S. Yabe, K. Hattori, H. Otsubo, Development of Solar Battery Based Multi Channel Data Acquisition System for Self Potential Measurements at the In-situ Landslide Site, AOGS - AGU (WPGM) Joint Assembly, August 13-17, 2012, Singapore
- (7)H. Otsubo, K. Hattori, S. Yabe, A. Tohari, K. Sugianti, The Sandbox Experiments to Understand

Coupling Self-potential Condition of Underground Water, AOGS - AGU (WPGM) Joint Assembly, August 13-17, 2012, Singapore

- (8)H. Otsubo, K. Hattori, S. Yabe, H. Ochiai, Y. Okada, Tomomi T., E. Miyahira, B-G. Chae, Q. Huang, Rainfall-induced Landslide Process in Geophysical, Hydraulic, and Geotechnical Parameters by Indoor Experiments, AOGS - AGU (WPGM) Joint Assembly, August 13-17, 2012, Singapore (招待講演)
- (9)宮平永一郎, 寺嶋智巳, 落合博貴, 砂質斜面のセン断破壊に及ぼす地中水流の影響, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 20 日-25 日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉
- (10)大坪大, 服部克巳, 矢部修平, 落合博貴, 岡田康彦, 寺嶋智巳, 宮平永一郎, B.G.Chae, Q.Huang, 人工降雨斜面崩壊実験について, 日本大気電気学会第 86 回研究発表会, 2012 年 1 月 5 日-6 日, 電気通信大学, 東京
- (11)Otsubo, H, Yabe, S, Hattori, K., Tohari, A, Sugianti, K, A sandbox experiment to understand hydrological and electromagnetic coupling, 2011 AGU Fall Meeting, December 5-9, 2011, San Francisco, USA
- (12)Huang, Q, Hattori, K., Chae, B, Development of Early Warning System for Landslide Using Electromagnetic, Hydrological, Geotechnical, and Geological Approaches, 2011 AGU Fall Meeting, December 5-9, 2011, San Francisco, USA (招待講演)
- (13)Hattori, K., Yabe, S, Otsubo, H, Kono, H, Tojo, Y, Terajima, T, Ochiai, H, Self-Potential Approach to Early Warning for Rainfall-induced Landslide, 2011 AGU Fall Meeting, December 5-9, 2011, San Francisco, USA

(他 21 件)

【図書】 (計 2 件)

- (1)寺嶋智巳(分担執筆), 斜面のモニタリング『自然災害と防災の事典』, 丸善出版, 118-121,320pp, 2011
- (2)寺嶋智巳(分担執筆), 『地下水用語集』, 理工図書, 121pp, 2011

【その他】

ホームページ : <http://www-es.s.chiba-u.ac.jp/geoph/ulf/index.html/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
服部 克巳 (KATSUMI HATTORI)
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号 : 60244513
- (2) 研究分担者
寺嶋 智巳 (TOMOMI TERAJIMA)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号 : 50353777
- (3) 連携研究者
末峯 章 (AKIRA SUEMINE)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号 : 00109092