

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23510230

研究課題名(和文) 斜面崩壊予知のための超音波による土中水分水位広域モニタリングシステムの研究

研究課題名(英文) Study on monitoring system of soil moisture and groundwater levels using ultrasonic wave to predict slope failures

研究代表者

田中 克彦 (Tanaka, Katsuhiko)

立命館大学・総合科学技術研究機構・教授

研究者番号：00367997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：豪雨時に土中の水分量や地下水位などの斜面状況をモニタリングして、事前に斜面崩壊を予知するシステム技術の開発が望まれている。これまでに超音波反射特性を利用した安価で簡便な水分・水位測定法を提案し、基礎技術を蓄積してきた。本研究では、これを野外広域モニタリングシステムで実用化するために多チャンネルのモデルシステムを構築してフィールド実験を行い、実用化の課題を抽出した。主な課題として落雷事故と、現地地盤の土粒子形状不均一による特性ばらつきを取り上げた。落雷事故に対して避雷措置を行った。また、不均一形状の土の上にほぼ均一な豊浦砂を敷くことにより、反射強度の再現性と水分変化に対する応答性を改善した。

研究成果の概要(英文)： We have previously investigated a measurement method of soil moisture and groundwater level using ultrasonic wave for predicting slope failure. To apply this method to a practical field monitoring, we fabricated a multichannel monitoring system and tried to use this system in field tests, and pointed out the problems. Thunderbolt protection and detecting method for inhomogeneous soil particles were developed to use this system in a practical field monitoring. For inhomogeneous coarse-grained soils, covering the detecting surface with a homogeneous fine soil such as Toyoura sand was effective to obtain repeatable data for wetting and drying cycles.

研究分野：斜面崩壊

キーワード：豪雨斜面崩壊 モニタリング 超音波 水分 水位

1. 研究開始当初の背景

豪雨によって引き起こされる斜面崩壊を事前に予知して避難勧告を出すために、土中の水分水位などの斜面状況を観測するモニタリングシステムが重要である。申請者らはこれまでに簡便で安価に土中の水分と水位をモニタリングする手法として、超音波導波管を用いた独自の方法を提案し、基礎技術の蓄積を行ってきた。この方法は土中に中空の超音波導波管を挿入し、超音波の反射強度で土中の水分状態、反射波の伝播時間で水位を測定するものである。これまでの基礎実験は室内降雨実験に加え、野外では特定の1地点におけるポイントの測定で評価してきた。今後この技術を野外の広域多地点モニタリングシステムに展開して実用化を進めるためには、野外の実証実験において課題を抽出し、改良を加えて、システムの信頼性の向上を図る必要がある。

2. 研究の目的

これまでに蓄積した基礎技術を基にして、野外広域モニタリングのモデルシステムを構築し、実地盤で試験運用する。これにより、実用化における課題の抽出と改良を行って、超音波計測による野外広域モニタリングシステムの有用性を検証し、基盤技術を確立する。

3. 研究の方法

(1) 多地点モニタリングのモデルシステムの開発

野外の多地点計測用に8ch自動測定器を設計・試作する。埋設型検出器についても検討する。

(2) 野外モニタリング実験による評価と課題抽出

上記試作したモデルシステムを用いて野外モニタリング実験を行い、実用化の課題を抽出する。

(3) 上記課題の対策

上記野外実験において抽出した課題をもとに測定器とシステムの改良を行う。

(4) 野外モニタリング実験による再評価

改良した測定器とシステムを用いて、野外モニタリング実験を行い、再評価する。

4. 研究成果

(1) 多地点モニタリングのモデルシステムの開発

①8ch 超音波水分水位測定器の開発

多地点計測用に8chの水分水位自動計測器を設計・試作した。データロガーとしてパソコンを使用した。8ch2台の接続により16chに拡大できるように設計した。

②埋設型検出器の開発

これまで深さに応じて長さの異なる検出器導波管を用いて、上部の検出部を地上に露出するように導波管を埋設していた。今回多深度の測定に向けて図1のように長さ1~3

mの中空ケーシングパイプを挿入し、その中に長さ一定(今回50cm)の埋設型検出器を落とし込む方式を提案した。これにより導波管内を伝播する超音波の減衰量がほぼ一定になり、測定範囲が揃って測定器の設計負担が少なくなり、測定誤差も小さくなった。この方式で地中に完全に埋設出来るが、実験ではメンテナンスの便宜上ケーシングパイプの上部と配線を地上に露出して設置した。

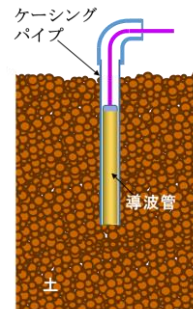


図1埋設方法の改良

(2) 野外モニタリング実験による評価と課題抽出

試作した上記計測器を用いて、まずは地下水脈の分布が既知の滋賀県南部田上山地の不動寺水文試験地において8chのモニタリング実験を行った。検出器の設置の様子を図2に示す。超音波検出器のほかに、比較のために水分測定用のテンシオメータと水位計を併せて設置した。2012年の秋から冬にかけて行った地下水位の測定結果を図3に示す。超音波検出器ch7とch8の伝播時間から算出した地下水位は比較用水位計5と同様の水位変化を示し、降雨による地下水脈の形成が確認された。



図2 不動寺モニタリング実験の様子

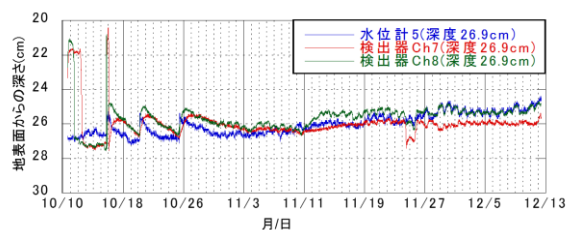


図3 地下水位の測定結果 (不動寺)

この実験において、以下の課題を抽出した。

①落雷事故

2回の落雷事故に遭遇し、測定器とパソコンを破損し、大半のデータを喪失した。

②測定値のばらつき、再現性

導波管先端における地中検出面の土粒子形状が不均一であり、また降雨による浸水の繰り返しで検出面の状態が変化するため、反射強度の定量的評価が難しく、定性的評価しか出来ない。

(3) 上記課題の対策

①落雷事故対策

超音波測定器を設計しなおした。測定容量と費用の関係からチャンネル数を5chに減らした。各チャンネル個々の検出器と測定器本体に避雷器を設置して、落雷対策を行った。

上記設計しなおした5ch測定システムを評価するために、防災科学技術研究所(筑波)で人工降雨実験を行った。実大人工斜面(横幅9m、高さ4.5m、斜面7m、層厚1m)に3段に分けて超音波検出器5個、比較用の圧力式水位計、テンシオメータなどを設置して、降雨開始から崩壊までの水位の経時変化を測定した。測定結果を図4に示す。中段の超音波検出器ch3と下段のch5の検出器で下から85~95cmの位置にそれぞれ水位が検出され、水脈の形成が確認された。また中段のch4でも下から20~30cmの位置で水位が検出された。これらの水位変化はテンシオメータで測定した水位変化と良好な一致を示した。これより測定器と5ch測定システムの水位計測の有効性を確認した。

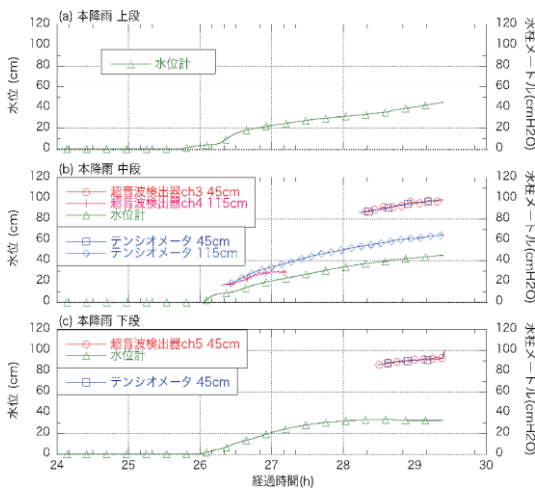


図4 実大人工斜面に於ける降雨実験

②測定値のばらつき対策と再現性の改良

現地のまさ土などの土は土粒子形状のばらつきが大きい。そこでまず屋内実験において、土粒子形状のばらつきが少ない豊浦砂(図5(a))とばらつきが大きいまさ土(図5(b))に対して、注水による浸透過程と注水後の乾燥過程を繰り返し行い、超音波反射強度のばらつきと変化を調べた。

図6に実験結果を示す。豊浦砂の場合、異なる場所に設置した2個の検出器(No.1、No.2)の超音波反射強度がほぼ同じであり、また注水と乾燥の繰り返しによる反射強度の変化もはっきり現れ含水状態の変化が観測されている。これに対して、まさ土の場合、



図5 豊浦砂(a)とまさ土(b)

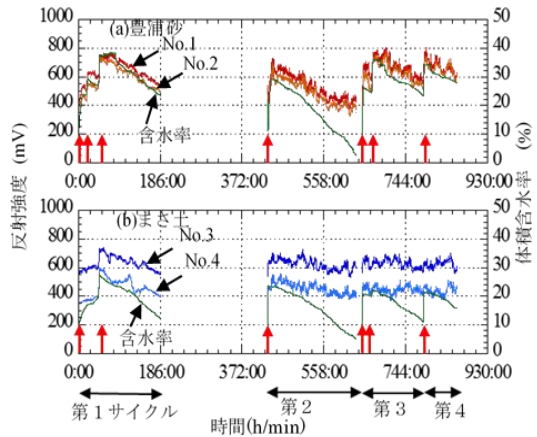


図6 豊浦砂(a)とまさ土(b)に対する注水-乾燥繰り返し実験の結果

異なる場所に配置した2個の検出器(No.3、No.4)の反射強度間のばらつきが大きい。また繰り返しにより反射強度の変化が次第に小さくなり、含水状態の変化を観測できなくなる。これは浸水・乾燥の繰り返しにより細粒土が移動して検出面が平坦化されるためと考えられる。そこで対策としてまさ土の上にばらつきの小さい豊浦砂を厚さ約5mm程度敷いて、検出面の均一化を図った(図7)。

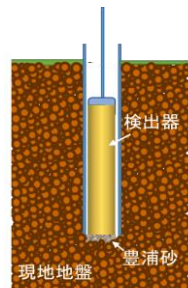


図7 豊浦砂による検出面の均一化

(4) 野外モニタリング実験による再評価

上記対策を踏まえて、京都市東部山麓に位置する清水寺後背斜面でモニタリング実験を行った。検出器の設置箇所を図8に、設置の様子を図9に示す。

超音波検出器は最初斜面のM地点で横方向に5個(深さ20cm、40cm、60cm、80cm、1m)設置し、その後斜面縦方向P1-M-P2に沿って5個(深さP1から順に87cm、163cm、147cm、198cm、244cm)を増設して、合計10chとした。また比較のために水分検出用テンシオメータと水位計を併設した。この測定箇所は以前に地温測定によって地下水脈の形成が確認されているところである。

図9の写真にM地点の各検出器と測定ボックスを示している。このモニタリング実験では、避雷器対策の効果に加え、雷雨の発生そのものが先の不動寺地区に比べて少ないこともあって、その後落雷事故が発生していない。

モニタリングの実験結果を3期に分けて図10~図12に示す。

①第I期:2014/5/17-7/26

M地点で横に配置した5深度の検出器を用いて、現地の土中掘削面をそのまま検出面と

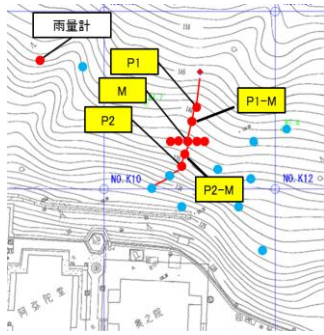


図8 清水寺後背斜面の検出器設置箇所



図9 検出器設置の様子(M地点)

して反射強度を測定した。図10に深さ20cmと40cmの測定結果を示す。降雨が観測されていても超音波反射強度が全く応答していない。これは先の屋内基礎実験の結果と同様に、浸水により細粒子で反射面が平坦化されたためと考えられる。

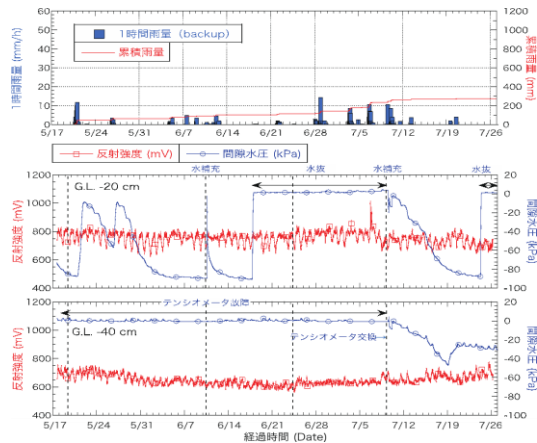


図10 清水寺モニタリング実験 (I期)

②第II期：2014/7/29-9/14

M地点で、現地の土中掘削面の上に豊浦砂を厚さ5mm程度敷いて反射強度を測定した実験結果を図11に示す。降雨に対応して各深さの地点で反射強度の応答が見られ、また降雨の繰り返しにも対応していることから、豊浦砂を敷く効果を確認できた。

③ 第III期:2014/12/1-2015/3/20

斜面の縦方向に配置した5点で(P1、P1-M、M、P2-M、P2)で地下水位の発生をモニタリングして、地下水脈の探査実験を行った。こ

の実験では特に地下水位を観測するためにケーシングパイプとして周囲に細孔を多数形成したストレナ管を用いた。これにより、導波管の下端より上部に位置するストレナ部分に地下水路が存在すると水位を検出できる。図12に測定結果を示す。通常の降雨でP1地点とP1-M地点において地下水路の形成が観測され、降雨量が多いときはP2地点でも地下水の存在が観測された。この結果は先の地温測定によって検出された地下水

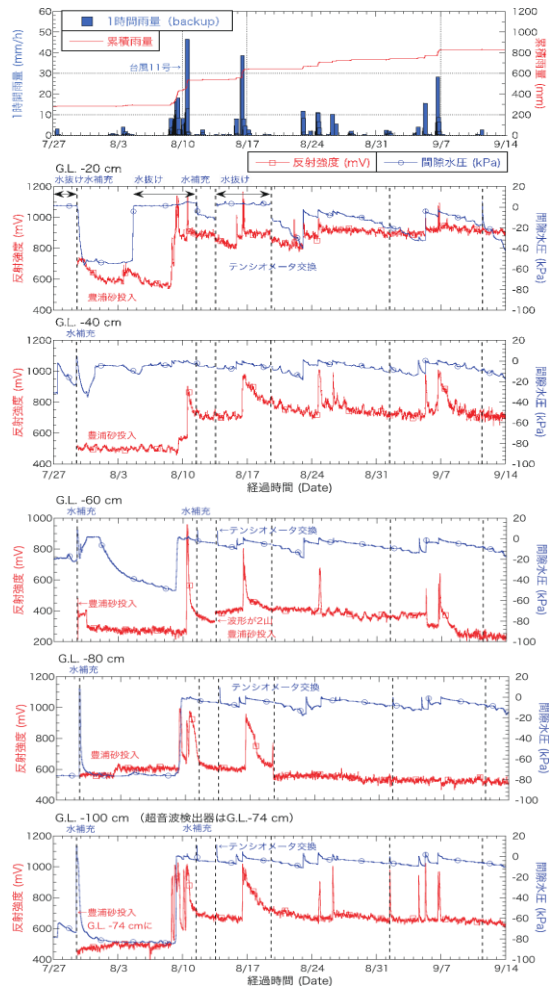


図11 清水寺モニタリング実験 (II期)

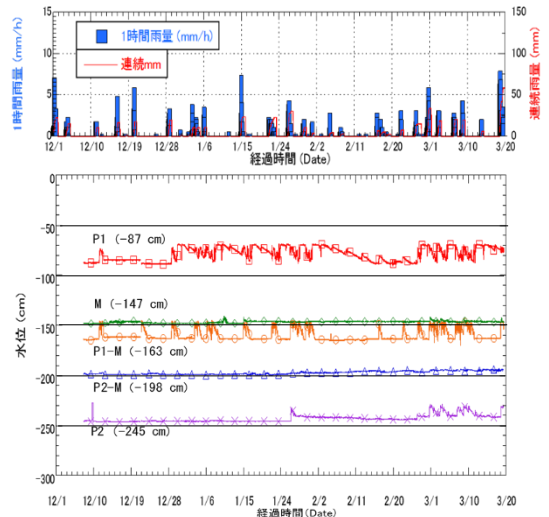


図12 清水寺モニタリング実験 (III期)

脈と一致した。

(5) 透水試験

当初の計画には入れていなかったが、地下水位計測実験において、超音波測定システムを原位置透水試験に応用できることが分かり、その基礎実験を行った。本測定器でピエゾメータ法及びチューブ法により透水係数を $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{m/s}$ の範囲で測定できた。実地盤の測定に使用するためには、自動測定による測定範囲の拡大が課題である。

(6) 成果のまとめと今後の課題

本研究により、野外多地点モニタリングの実用化の課題として、落雷対策と地中検出面の安定化対策を抽出した。落雷対策として避雷構造の測定機器を開発した。検出面の安定化対策として、まさ土の上に土粒子形状の揃った豊浦砂を敷くことにより検出面の均一化を図り、降雨の繰り返しによる土中水分の変化を検出できることを確認した。また、多地点における水位変化の観測により地下水脈の探査に有効であることを確認した。当初 16ch の多地点モデルシステムを予定していたが、落雷事故により計測器を再設計したため、費用と測定器容量の関係で 10ch の計測に変更した。一連のモデルシステムの実験により、モニタリング手法の有用性を実証し、野外広域モニタリング試験に展開するための基盤的技術を確立できた。今後さらに長期間にわたるデータを蓄積して、信頼性の向上を図っていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- ① 平岡伸隆, 中野峻也, 田中克彦, 藤本将光, 深川良一, 外狩麻子, 岩佐直人: 「超音波土中水分量測定における反射強度と体積含水率の相関性に関する研究」, 歴史都市防災論文集, Vol. 8, 131-138 (2014) (査読有)
- ② 中野峻也, 平岡伸隆, 亀田拓馬, 田中克彦, 藤本将光, 深川良一, 外狩麻子, 岩佐直人: 「超音波による土中水分量計測の定量評価に関する研究」, Kansai Geo-Symposium 2014 論文集, 217-222 (2014) (査読有)
- ③ Nobutaka Hiraoka, Takeshi Mishina, Takehiro Kurohara, Katsuhiko Tanaka, Kazunari Sako, Ryoichi Fukagawa, Asako Togari, Hiroyuki Morishima, and Makoto Shimamura: “Monitoring of Soil Moisture and Groundwater Level Using an Embedded High-frequency Ultrasonic Detector for Prediction of Slope Failures”, Proc. 15th International Conference on Experimental Mechanics, 2627-1-6 (2012) (査読無)
- ④ Katsuhiko Tanaka, Nobutaka Hiraoka, Takeshi Mishina, Kazunari Sako, Ryoichi Fukagawa, Asako Togari, Hiroyuki Morishima, Makoto Shimamura: “Monitoring of Soil Moisture and Groundwater Level Using Partially Embedded and Completely Embedded Ultrasonic Detectors to Predict Slope Failure”, Procedia Engineering, Vol. 5, 371-374 (2011) DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.092 (査読無)
- ⑤ 三品健, 平岡伸隆, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 外狩麻子, 森島啓行, 島村誠: 「土中水分水位測定のための埋設型超音波検出器の小型化に関する検討」, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2011 論文集, 11-14 (2011) (査読有)
- ⑥ Nobutaka Hiraoka, Takefumi Suda, Kazuhiro Hirai, Katsuhiko Tanaka, Kazunari Sako, Ryoichi Fukagawa, Makoto Shimamura, Asako Togari: “Improved Measurement of Soil Moisture and Groundwater Level Using Ultrasonic Waves”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50, 07HC19-1 - 19-5 (2011) DOI: 10.1143/JJAP.50.07HC19 (査読有)

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① 田中克彦, 平岡伸隆, 中野峻也, 亀田拓馬, 藤本将光, 深川良一: 「斜面崩壊予知のための超音波土中水分水位計測の改良」, 第 32 回強誘電体応用会議, 2015 年 5 月 23 日, コープイン京都(京都府・京都市)
- ② 平岡伸隆, 中野峻也, 田中克彦, 藤本将光, 深川良一, 外狩麻子, 岩佐直人: 「超音波土壌水分測定手法による土壌乾湿繰り返し過程の計測」, 砂防学会平成 27 年度研究発表会, 2015 年 5 月 20 日, 栃木県総合文化センター(栃木県・宇都宮市)
- ③ 中野峻也, 平岡伸隆, 亀田拓馬, 田中克彦, 藤本将光, 深川良一, 外狩麻子, 岩佐直人: 「超音波による土中水分量計測の定量評価に関する研究」, Kansai Geo-Symposium, 2014 年 11 月 21 日, 大阪市立大学(大阪府・大阪市)
- ④ 田中克彦: 「豪雨斜面崩壊予知のための超音波による土中水分水位モニタリング」, センシング技術応用研究会(招待講演) 2014 年 6 月 25 日, 島津製作所(大阪府・大阪市)
- ⑤ 中野峻也, 平岡伸隆, 黒原雄大, 田中克彦, 藤本将光, 深川良一: 「超音波測定システムを用いた湿潤～乾燥繰り返しプロセスにおける土中水分評価」, 平成 26 年度土木学会関西支部学術講演会, 2014 年 5 月 31 日, 大阪産業大学(大阪府・大東市)
- ⑥ Nobutaka Hiraoka, Takehiro Kurohara, Shunya Nakano, Katsuhiko Tanaka, Masamitsu Fujimoto, Ryoichi Fukagawa: “Fundamental study on monitoring of soil moisture and groundwater level

using ultrasonic waves”, The 4th Vietnam/Japan Joint Seminar on Geohazards and Environmental Issues, March 12, 2014, Ho Chi Minh City University of Technology, Ho Chi Minh (Vietnam)

- ⑦ 黒原雄大, 平岡伸隆, 中野峻也, 田中克彦, 藤本将光, 深川良一:「超音波を用いた原位置透水試験法の検討」, 電子情報通信学会超音波研究会, 2013年11月12日, 金沢工業大学, (石川県・金沢市)
- ⑧ Nobutaka Hiraoka, Takehiro Kurohara, Shunya Nakano, Katsuhiko Tanaka, Masamitsu Fujimoto, Ryoichi Fukagawa: “Permeability Test in Single Borehole Using Ultrasonic Wave”, The 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (ISEM 2013), Nov. 6, 2013, 仙台市戦災復興記念館 (宮城県・仙台市)
- ⑨ 黒原雄大, 平岡伸隆, 三品健, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一:「超音波による水分・水位モニタリングにおける導波管形状の反射波への影響」, 平成24年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2012年6月9日, 神戸市立工業高等専門学校 (兵庫県・神戸市)
- ⑩ Nobutaka Hiraoka, Takeshi Mishina, Takehiro Kurohara, Katsuhiko Tanaka, Kazunari Sako, Ryoichi Fukagawa, Asako Togari, Hiroyuki Morishima, and Makoto Shimamura: “Monitoring of Soil Moisture and Groundwater Level Using an Embedded High-frequency Ultrasonic Detector for Prediction of Slope Failures”, 15th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM15), July 23, 2012, Porto (Portugal).
- ⑪ Katsuhiko Tanaka, Nobutaka Hiraoka, Takeshi Mishina, Kazunari Sako, Ryoichi Fukagawa, Asako Togari, Hiroyuki Morishima, Makoto Shimamura: “Monitoring of Soil Moisture and Groundwater Level Using Partially Embedded and Completely Embedded Ultrasonic Detectors to Predict Slope Failure”, Eurosensensors XXV, Sep. 5, 2011, Athens (Greece).
- ⑫ 三品健, 平岡伸隆, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 外狩麻子, 森島敬行, 島村誠: 「土中水分水位測定のための埋設型超音波検出器の小型化に関する検討」, 地盤工学会関西支部「地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2011」, 2011年11月11日, 建設交流館 (大阪府・大阪市)
- ⑬ 平岡伸隆, 三品健, 黒原雄大, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 外狩麻子, 森島敬

島村誠:「超音波による土中水分・水位モニタリング検出器の埋設化」, 電気学会第28回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 2011年9月26-27日, タワーホール船堀 (東京都)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 透水試験装置及び透水試験方法
発明者: 田中克彦, 深川良一, 藤本将光, 平岡伸隆

権利者: 学校法人立命館

種類: 特許

番号: 特願 2013-193946

出願年月日: 2013年9月19日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計1件)

名称: 土中水分水位検出装置及びこれを用いた斜面崩壊予知システム

発明者: 田中克彦, 深川良一, 島村誠, 外狩麻子

権利者: 学校法人立命館, 東日本旅客鉄道株式会社

種類: 特許

番号: **5476528**

出願年月日: 2009年8月25日

取得年月日: 2014年2月21日

国内外の別: 国内

[その他]

展示会: イノベーションジャパン 2011

題名: 超音波式土中水分水位モニタリング技術

発表者: 田中克彦

発表日: 平成23年9月21日, 22日

場所: 東京国際フォーラム

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 克彦 (TANAKA KATSUHIKO)

立命館大学・総合科学技術研究機構・教授
研究者番号: 00367997

(2) 研究分担者

深川 良一 (FUKAGAWA RYOICHI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 20127129

酒匂 一成 (SAKO KAZUNARI)

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 20388143

藤本 将光 (FUJIMOTO MASAMITSU)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号: 60511508