

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20510180

研究課題名（和文） 地中ワイヤレス通信を用いた斜面崩壊予知モニタリング用センシングモジュールの研究

研究課題名（英文） Study on sensing module using underground wireless communication for predicting slope failures

研究代表者

田中 克彦（Tanaka Katsuhiko）

立命館大学・総合理工学研究機構・教授

研究者番号：00367997

研究成果の概要（和文）：

豪雨による斜面崩壊を予知するために、土中の水分・水位などの斜面状況のモニタリングシステムが重要である。予知精度の向上を図るために、対象地域における多地点モニタリングと複合センサモニタリングが望まれる。超音波の反射特性を利用した土中水分・水位センシング、初期崩壊を検知する加速度センシング、地温センシング、地中の3次元多地点計測に有効な地中ワイヤレス通信機能で構成した地中埋設型複合センシングモジュールのプロトタイプを開発して、機能評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a prototype of an underground multisensor module for predicting slope failure that comprises an ultrasonic detector for sensing soil moisture and groundwater level, an accelerometer for detecting initial ground movement, soil-temperature sensor, and an underground wireless communication device.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：斜面崩壊

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：斜面崩壊、土砂災害、超音波、センシング、地中ワイヤレス通信

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研究されている。システムの予知精度の向上を図るためには、対象地域において地中の多数の場所と深さで観測する3次元多地点モニタリングと、多くの観測項目を総合的に判断する複合センサモニタリングが重要である。さらに、地中の任意

の場所で観測したデータを地上の基地局に無線で送信するための地中ワイヤレス通信が望まれる。

2. 研究の目的

地中に埋設が容易で、地中の3次元多地点広域モニタリングに有効な複合センシングモジュールとして、超音波を用いた土中水分・水位センサ、加速度センサ、地温センサ、地中ワイヤレス通信デバイスからなるワイ

ヤレスセンシングモジュールを研究する。

3. 研究の方法

(1) 超音波による土中水分・水位センシング技術の研究

これまでに蓄積してきた超音波による水分・水位センシング技術をベースにして、超音波検出器の温度特性補正技術の開発と埋設化のための検出器導波管の短尺化についての検討を行う。

(2) センシングモジュールの開発

超音波による水分・水位センサ、加速度センサ、地中温度センサ、地中ワイヤレス通信デバイスからなるワイヤレスセンシングモジュールのプロトタイプを設計製作する。地中通信デバイスと加速度センサ、温度センサには市販品を用いる。

(3) センシングモジュールの評価

作製したモジュールのセンシング機能と通信機能を評価する。

(4) モジュールの小型化と今後の課題

最後にモジュールの小型化について検討し、今後の課題をまとめる。

4. 研究成果

(1) 超音波による土中水分・水位センシング技術の研究

超音波検出器の温度特性の補正技術

超音波検出器は、超音波送受信用トランスデューサ（周波数 40 kHz、または 95 kHz）と超音波を地中に導波する中空の超音波導波管（長さ 20～30cm、40kHz 用：外径 22mm、内径 18mm、95 kHz 用：外形 32mm、内径 28mm）で構成している。図 1 のように、導波管を地中に垂直に埋設して、上端から送信した超音波が地中下端の地表面で反射するときの反射強度から土中の含水状態を観測し、導波管内を地下水が上昇したときの超音波反射波の伝播時間の減少から地下水位の上昇を観測する。

測定される反射強度と伝播時間は、周囲温度の影響を受けるので、屋外で使用する場合温度特性の補正が必要である。温度補正方法として、以下の 2 方式を考案した。

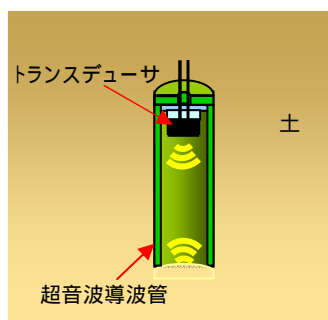


図 1 水分水位検出

ダミーペア方式(図 2)

土中の水分・水位検出用とダミーの温度特性検出用の 2 個の検出器をペアで用いる。水分・水位検出用検出器は、土中の水分、水位の観測データと温度特性を併せて検出する。他方、温度検出用検出器は、導波管下端を密閉して水分水位の影響を受けない構造にしているため、温度特性のみを検出する。そこで、水分・水位検出器で得られた測定値を温度特性用検出器で得られた測定値で割ることにより、温度特性を補正する。この方法で屋外実験において、周囲温度の影響を受けない安定した観測データが得られるようになった。

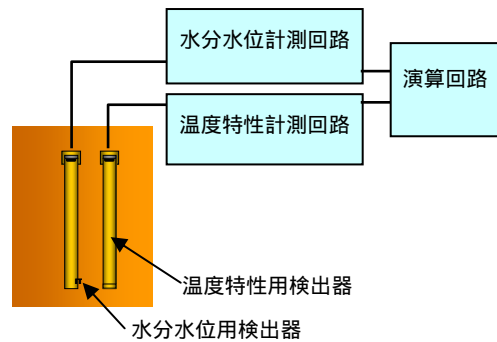


図 2 ダミーペア方式

単管部分反射方式(図 3)

ダミーペア方式は 2 個の検出器を用いるため、検出器のコスト、設置コスト、さらに埋設型センシングモジュール全体の小型化の点で、課題が多い。そこで 1 個の検出器を用いる方式を検討した。導波管の途中に横切るように 2～3mm 程度の細い針を挿入して、伝播する超音波の一部をこの針で反射させ、これより温度特性を得て、ダミー方式と同じように補正処理を行う。この方法でも周囲温度の影響を補正した観測データが得られた。この方法では上記のダミーペア方式の欠点をカバーできるが、水位が針の位置以上に上昇すると測定できない欠点がある。

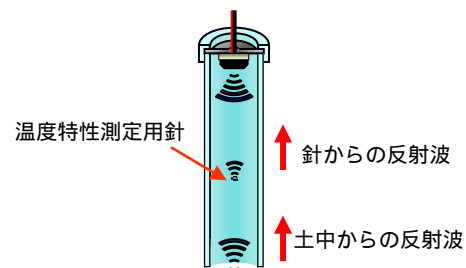


図 3 単管部分反射方式

検出導波管の短尺化

これまでの測定は、検出器を地上から挿入

して検出器頭部を地上に出した露出型で行ってきたため長さ 30cm 以上の導波管を用いていたが、本研究ではモジュールと検出器を一体化して地中に埋設することから、モジュールの小型化に合わせて導波管の短尺化が必要になる。導波管の短尺化には超音波の高周波化が有効である。温度補正にダミーペア方式を用いて、これまでの 40kHz で 20cm までの短尺化が可能で、さらに 190kHz まで上げることにより 5cm までの短尺化が可能になった。単管部分反射方式を用いた場合、途中に挿入した針からの部分反射も測定するため、ダミーペア方式よりも長くなり、95kHz で 20cm がベストであった。

周波数 40kHz、導波管長 30cm の検出器と周波数 95kHz、導波管長 20cm の検出器を用いて、乾燥したまさ土（平均粒径 0.85mm）の表面と浸水した水面で測定したときの反射波形を図 4 に示す。95kHz の高周波においても水分の有無による波形の変化が観測された。

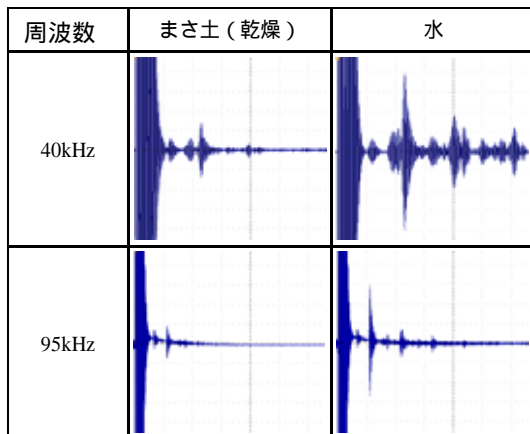


図 4 40 kHz と 95 kHz の反射波形の比較

(2) センシングモジュールの開発

超音波による水分・水位センサ、加速度センサ、地中温度センサ、地中ワイヤレス通信デバイスからなるワイヤレスセンシングモジュールのプロトタイプを設計製作した。

上記の基礎的検討により、水分・水位センサには、設置の容易さとコストの観点から温度補正法に単管部分反射方式を採用し、導波管長 20cm、周波数 95kHz の検出器を採用した。

加速度センサは、当初、斜面崩壊初期におけるモジュールの急激で微小な姿勢変化を検知する目的で、マイクロジェットポンプを用いた動的な高感度ガスフロー型センサの検討も行ったが、その後、一定時間間隔で測定して通信するシステムでは瞬時の姿勢変化をリアルタイムで検出して送信することが困難であると判断して、静的な姿勢変化を検出する方式に変更した。MEMS (Micro electro mechanical systems) 技術を用いて作製した

Si の小型 3 軸加速度センサ KXM52-1050 (図 5) が Kionix 社から市販されているので、これを用いることにした。静電容量型で高感度 (660mV/G) が得られ、外形 5W x 5D x 18H (mm)、体積 0.45cc と十分小型であることから、これを直接回路基板に固定した。

地中温度センシングは当初計画に入れていなかったが、地下水の流入による温度変化の検知が有効であると考えられるので、追加することにした。地中温度測定用センサに白金抵抗体温度計 ETH-5106P (坂田電機 (株)) を用いた。

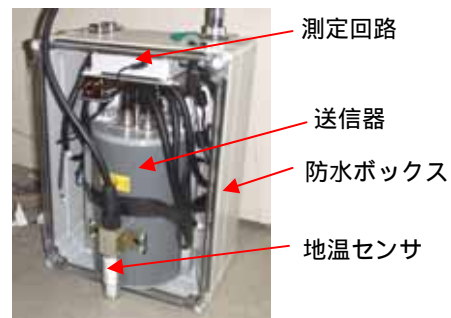
地中通信デバイスには、坂田電機 (株) が開発済みの 8.5kHz の低周波電磁波通信器を利用した。予算範囲内で当初予定していた特注仕様の送受信器を製作することが困難になったため、同社の標準品送信機 TR-063-70 (図 6) と受信機 E0-029 を用いた。電池消費量の観点から、測定頻度と通信頻度を 5 秒



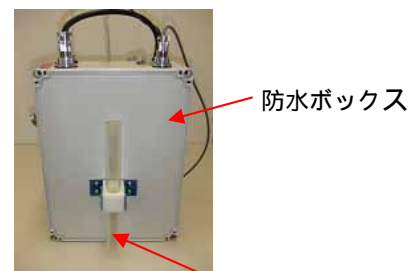
図 5 加速度センサ



図 6 地中送信器



(a)



(b)

図 7 モジュール内部 (a) と概観 (b)

ードの切り替えにした。設計では、平常時 12 時間間隔で測定し、週 1 回のデータ送信で約 620 日稼動する。豪雨時にはモードを切替えて 10 分間隔で測定し、1 時間ごとに送信すると約 82 日稼動できる。

上記の超音波検出器と地中温度計を防水ボックスの外側側面に、加速度センサ、地中通信用送信機、測定回路、バッテリーを防水ボックス内に収納した。金属部品が無線通信の電磁界を乱す恐れがあるため、超音波導波管をポリカーボネート樹脂で作製し、固定ねじもポリカーボネート製を用いて、回路部品や防水コネクタ以外は極力金属製品を避けた。図 7 にモジュール全体の概観写真を示す。

(3) センシングモジュールの評価

超音波による水分・水位モニタリング

導波管長さ 20cm、周波数 95kHz の超音波検出器を土槽内の豊浦標準砂に埋設して、屋内で人工降雨装置により一次元降雨浸透試験を行った。比較のために誘電率水分計を超音波検出器の近くに埋設して、この計測データから土中の体積含水率を算出した。図 8 に超音波検出器で測定した反射強度と伝播時間を、体積含水率とともに降雨経過時間に対する変化として示す。砂は最初乾燥した状態で体積含水率 0% であるが、人工降雨経過約 4 時間で地表からの降雨が検出器に到達して、含水率が上昇し始めた。それに伴い、超音波反射強度も増加し始め、含水率の変化によく対応した変化が観測された。降雨経過 6 時間半前で上部からの人工降雨を終了して、次に土槽の下部から注水して、強制的に地下水位を上昇させた。その結果注水開始から少し遅れて反射強度の増大と地下水位の上昇に伴う伝播時間の減少が確認された。この実験データから、95kHz の高周波検出器を用いても超音波による土中水分の変化と地下水位の上昇をモニタリングできることが示され

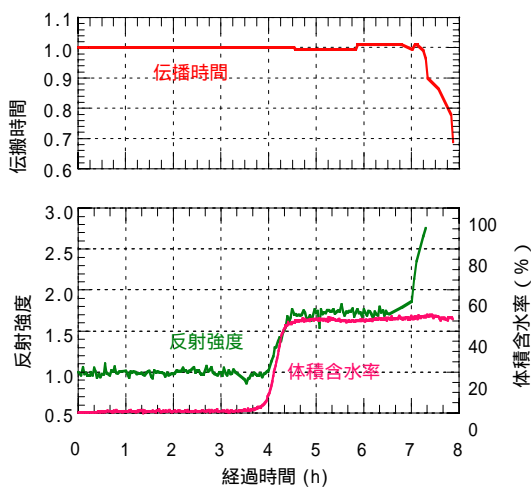


図 8 一次元浸透試験

た。

加速度センシング

設置した加速度センサは 3 軸の姿勢検出が可能であるが、今回はモジュールの通信回線数の関係で垂直方向のみの姿勢変化を調べた。モジュールの傾斜角度に対応した出力が得られ、姿勢検出の機能を確認した。

センシングモジュールの地中通信機能

ワイヤレスセンシングモジュールを大学構内の地中に超音波検出器の先端が地表から 1 m の位置になるように垂直に設置して、8.5kHz の地中ワイヤレス通信機能を調べた。地上で受信器を移動させてデータの収録実験を行った結果、埋設地点から約 25m の距離まで、受信が可能であった。反射強度、加速度、地中温度の各データを 1 時間ごとに自動計測し、1 日 1 回のワイヤレス送信を行って得られた結果の一例を図 9 に示す。期間中目立った降雨がなかったため超音波の反射強度に大きな変化が見られなかった。また、加速度は地中でモジュールの姿勢が安定していたため 12 月 21 日までは一定で、21 日の昼にモジュールを地中から掘り起こして取り出したとき姿勢の変化が観測された。地中温度計は外気で冷えたモジュールを地中に設置したため最初は低温を示したが、その後 1 日ほどで地中の温度に近づいてほぼ一定値を示した。以上よりモジュールのセンシング機能と通信機能を確認できた。

(4) 小型化と今後の課題

本研究ではワイヤレスセンシング機能の実証を目的に試作を行い、小型化については費用の制約により今後の課題にした。そのため、地中通信デバイスの送信モジュールに坂田電機㈱製の標準品 TR-063-70 を使用した。

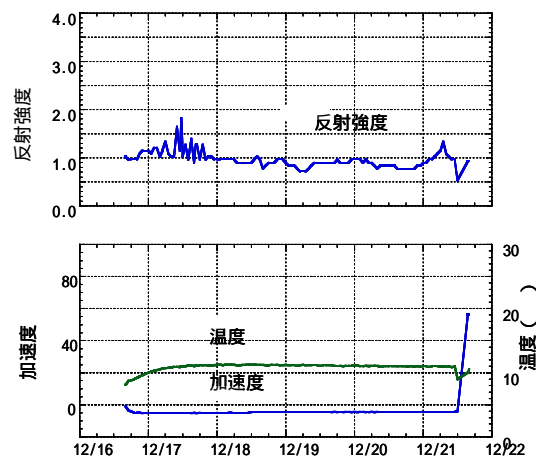


図 9 地中ワイヤレスモニタリング

このモジュールは外形が 16.5×26Hcm と大きい。この中にアンテナ、通信回路、データロガー、バッテリーが内蔵されている。この中でバッテリーにはリチウム電池 34×L62mm を 12 個使用して、これの占める体積が最も大きい。小型化のためにバッテリー容量を少なくすると稼働時間が短くなる。また、アンテナを小さくすると通信距離が短くなる。

上記送信モジュールと超音波測定回路、測定用バッテリー、加速度センサを市販の防水ボックス (30W×19D×38Hcm) に収納したため全体のサイズが大きいものになった。専用の防水ボックス内に送信モジュールと超音波、加速度、温度の各センシング回路を含めて効率的に実装することにより、1/3 以下の小型化が可能である。モジュールの高さはボックスに外付けの超音波水分水位検出器の長さで制限される。現在 20cm までの短尺化を行ったが、測定回路の改良により送信バースト波数を抑えて 10cm までの短尺化が可能になる。

本研究において、ワイヤレスセンシングモジュールのプロトタイプを試作して水分・水位、姿勢、温度の複合センシングと地中ワイヤレス通信の基本機能を確認できた。これにより水分、水位、初期変動、地温変化の 4 項目による総合判断が可能になり、さらに、ワイヤレス通信が可能な距離 50m (半径 25m) の範囲内で地中の 3 次元多地点における観測データの収集が容易になり、斜面崩壊予測精度の向上を期待できる。今後実用化に向けて、小型のモジュールを野外に設置して、現地におけるモニタリング性能の評価を進めていく必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

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, 掲載決定, 査読有.

平岡伸隆, 須田剛文, 平井一弘, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 島村誠, 外狩麻子: 「超音波土中水分・水位計測システムにおける新たな温度補正方法の検討」, 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 2010」講演論文集, 141-144 (2010) 査読有.

Katsuhiko Tanaka, Takefumi Suda, Kazuhiro Hirai, Kazunari Sako, and

Ryoichi Fukagawa: "Monitoring of Soil Moisture and Groundwater Level Using Ultrasonic Waves to Predict Slope Failures", Jpn. J. Appl. Phys., 09KD12-1-09KD12-4 (2010) 査読有

Katsuhiko Tanaka, Takefumi Suda, Kazuhiro Hirai, Kazunari Sako, Ryoichi Fukagawa, Makoto Shimamura, Asako Togari: "Monitoring of Soil Moisture and Groundwater Level Using Ultrasonic Wave for Prediction of Slope Failures", CD-ROM, IEEE Sensors 2009 Conference, 617-620 (2009) 査読無.

須田剛文, 平井一弘, 平岡伸隆, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 島村誠, 外狩麻子: 「斜面崩壊予測のための超音波を用いた地盤内水分状態モニタリング」, 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 2009」講演論文集, 7-12 (2009) 査読有. 須田剛文, 平井一弘, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一: 「斜面崩壊予測のための超音波による土中水分状態モニタリングの検討」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.108, No.410, 117-122 (2009) 査読無.

須田剛文, 平井一弘, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一: 「文化財後背斜面の崩壊予測のための超音波を用いた土中水分状態モニタリング法の開発」, 歴史都市防災論文集 Vol.3, 111-114 (2009) 査読有.

Katsuhiko Tanaka, Van Thanh Dau, Tomonori Otake, Thien Xuan Dinh, and Susumu Sugiyama: "Fabrication of a Gas-Flow Device consisting of Micro Jet Pump and Flow Sensor", Proc. of SPIE on CD-ROM, Smart Structures, Devices, and Systems, Vol. 7268, 726816-1 726816-9 (2008) 査読無.

[学会発表] (計 15 件)

三品健, 平岡伸隆, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一: 「超音波を用いた土中水分水位測定器の埋設・ワイヤレス化」, 平成 23 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2011 年 6 月 12 日, 関西大学(大阪府).

平岡伸隆, 須田剛文, 平井一弘, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 島村誠, 外狩麻子: 「超音波を用いた土中水分水位計測システムの改良」, 第 31 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2010 年 12 月 6 日, 明治大学(東京都).

平岡伸隆, 須田剛文, 平井一弘, 田中

克彦, 酒匂一成, 深川良一, 島村誠, 外狩麻子:「超音波土中水分・水位計測システムにおける新たな温度補正方法の検討」, 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 2010」, 2010年11月12日, 建設交流館(大阪府).

Katsuhiko Tanaka:“Recent studies on ultrasonic applications using PZT transducers”, MEMS Technology and Applications Symposium 2010, 2010年9月17日, Shanghai Jiao Tong University (Shanghai, China). (Invited).

須田剛文, 平井一弘, 平岡伸隆, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 島村誠, 外狩麻子:「斜面崩壊予知のための超音波を用いた地盤内水分状態モニタリング」, 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 2009」, 2009年12月1日, 建設交流館(大阪府).

平井一弘, 須田剛文, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一:「超音波を用いた土壌水分状態・地下水位の屋外モニタリング」, 第30回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム, 2009年11月18日, 同志社大学(京都府).

Katsuhiko Tanaka, Takefumi Suda, Kazuhiro Hirai, Kazunari Sako, Ryoichi Fukagawa, Makoto Shimamura, Asako Togari:“Monitoring of Soil Moisture and Groundwater Level Using Ultrasonic Wave for Prediction of Slope Failures”, IEEE Sensors 2009 Conference, 2009年10月25-29日, Christchurch Convention Centre (Christchurch, New Zealand).

須田剛文, 平井一弘, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 島村誠, 外狩麻子:「斜面崩壊予知のための超音波による土中水分状態モニタリング」, 土木学会平成21年全国大会第64回年次学術講演会, 2009年9月3日, 福岡大学(福岡県).

須田剛文, 平井一弘, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一, 島村誠, 外狩麻子:

「文化財後背斜面の崩壊予知のための超音波を用いた土中水分状態モニタリング法の開発」, 歴史都市防災シンポジウム09, 2009年6月20日, 立命館大学(京都府).

田中克彦, 須田剛文, 平井一弘, 酒匂一成, 深川良一:「斜面崩壊予知のための超音波による地中水分水位モニタリング」第26回強誘電体応用会議, 2009年5月29日, コープイン京都(京都府). Katsuhiko Tanaka, Van Thanh Dau,

Tomonori Otake, Thien Xuan Dinh, and Susumu Sugiyama:“Fabrication of a Gas-Flow Device consisting of Micro Jet Pump and Flow Sensor”, SPIE Symposium on Smart materials, nano- and Micro-smart Systems, 2008年12月11日, Royal Melbourne Institute of Technology (Melbourne, Australia).

平井一弘, 須田剛文, 田中克彦, 酒匂一成, 深川良一:「土砂災害予知のための超音波による水分・水位モニタリング」, 電気学会第25回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2008年10月23日, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県).

〔その他〕

受賞(計1件)

受賞名:地盤工学会関西支部 平成22年度技術賞

受賞者:田中克彦, 深川良一, 酒匂一成, 平岡伸隆, 島村誠, 外狩麻子

受賞日:2011年4月19日

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 克彦 (TANAKA KATSUHIKO)

立命館大学・総合理工学研究機構・教授

研究者番号:00367997

(2)研究分担者

杉山 進 (SUGIYAMA SUSUMU)

立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構・教授

研究者番号:20278493

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)

立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構・特別招聘准教授

研究者番号:20388143