

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：55401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04206

研究課題名（和文）長・中波帯電波ハーベストによる脳型AI活用土砂災害予知システムに関する研究

研究課題名（英文）Research on Brain-Type AI Utilization for Landslide Disaster Prediction Using Long and Medium Wave Electromagnetic Wave Harvesting

研究代表者

黒木 太司（Kuroki, Futoshi）

呉工業高等専門学校・電気情報工学分野・嘱託教授

研究者番号：30195581

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では中波AMラジオ放送波など常時配信されている中波帯電波を土中に埋めたアンテナで受信し、土壌の含水率を推定する方法を提案した。検討の結果、土中に埋設したアンテナによるAMラジオ波の受信電力はアンテナ周辺の土壌含水率と相関があることが明らかとなった。次にこの手法をシステム化するため、コイルをもとにアンテナを構成し、これを自営通信網であるLoRaWANに組み込み、フィールド試験を実施した。その結果ゲートウェイを中心に半径1～2kmの範囲で土壌含水量をデータを把握することができた。さらに含水土壌上を伝搬する中波の伝搬特性も解析し、伝搬特性を考慮した土壌含水量推定システムを構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した土壌含水率推定システムは電波時計運用に配信されている標準電波や、周波数500～1600kHzのAMラジオ放送波など常時配信されている長・中波帯電波を土中に埋めたアンテナで受信し、その受信情報から土壌の含水率を推定する簡便な手法であり、表層部から深層部にかけて土壌含水率を推定する手法であることが本研究の創造的な点である。また低価格で作成できる点で普及効果が高く、この点に本研究の社会的意義がある。さらに利用する電波の波長が長く、損失性媒質内を伝搬できる利点を有することから土中育成農作物や水中物のセンサや鉱物探査、火山噴火予知などへの派生効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a method to estimate soil moisture using buried antennas that receive long and medium wave electromagnetic waves constantly broadcasted, such as standard frequencies of 40kHz and 60kHz from radio clocks and AM radio broadcast waves ranging from 500kHz to 1600kHz. Our investigation revealed a correlation between received power of AM radio waves by antennas buried in the soil and the surrounding soil moisture content. To systematize this approach, we constructed antennas based on coils, integrated them into the LoRaWAN self-owned communication network, and conducted field trials. As a result, we successfully monitored soil moisture within a radius of 1 to 2 km from the gateway. Additionally, we analyzed the propagation characteristics of medium waves propagating over moist soil, using soil moisture as a parameter, and constructed a soil moisture estimation system considering these propagation characteristics.

研究分野：電磁波システム工学

キーワード：センサ アンテナ センサネットワーク 中波 電波伝搬

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土砂崩れには、地表から数 m 程度の土壌が崩れる表層崩壊と、それ以上の深部が崩落する深層崩壊に分類され、いずれも土壌含水率の上昇や岩盤亀裂部分への地下水侵入などがこれらの崩壊を引き起こす。このような災害を警報するために、高性能気象レーダによるリアルタイム雨量観測や気象衛星による雨雲画像が提供され、レベルごとに警戒警報が発令されている。一方晴天下でありながら何某かの原因で土壌含水量が増加し斜面崩壊が発生したとされる 2018 年 4 月 11 日大分県中津市耶馬溪町、2020 年 2 月 5 日神奈川県逗子の災害にみられるように、土壌含水量は常時観測すべきと考えられる。

一般に土壌含水率を求める方法としては土中に埋め込んだ電極にインパルスを印加して土壌の電気的特性を測定する TDR(Time Domain Reflectometry)方式があるが、計測できる含水量は電極近傍に限定されるため、土砂崩れを誘起するゲル状土壌の含水率を表層・深層部で検出可能な技術開発が待たれている。

2. 研究の目的

土中深部の含水率や地下水の上昇などを把握する従来技術としては、ボーリング施工による地質調査や VLF 探査による水脈調査があるが、前者は大規模工事を必要とし、後者は相当量の水脈検出に限られる。そこで本研究では電波時計運用に配信されている周波数 40kHz・60kHz の標準電波や、周波数 500~1600kHz の AM ラジオ放送波など常時配信されている長・中波帯電波を土中に埋めたアンテナで受信し、その受信情報から土壌の含水率を推定する方法を提案する。このようなアンテナの指向性は周囲媒質である含水土壌の電気的特性(複素誘電率)の影響を受けることから、アンテナの受信電力による土壌含水率推定が期待され、これが本研究の独自な点である。また利用する電波の波長が長く、損失性媒質内を伝搬できる利点を有することから土中育成農作物や水中物のセンサや鉱物探査、火山噴火予知などへの派生効果も期待できる。本研究では土砂災害が頻発する山岳複数個所に IoT 端末を付加した土中アンテナを設置してデータを集約、これを現状の土砂災害ハザードマップと連携させ、地域防災活動に注力したい。

3. 研究の方法

まず土中に線状アンテナやコイルを埋設した場合のセンシング特性について理論・実験的に検討する。中波ラジオ波の地上伝搬特性も解析するが、特に土壌が含水した場合の伝搬特性に関しては過去に解析例が見当たらないことから、含水土壌上の中波伝搬特性に関して新たな検討を行う。

次にセンサで取得したデータを自営通信網でクラウドにアップするための IoT システムを構築する。その際の搬送周波数は 920MHz の UHF 帯になることから、この周波数帯における山岳・森林の伝搬特性把握にも努める。

最後に多量の観測データから中波ラジオ波受信電力と土壌含水率の相関関係を明らかにする。

4. 研究成果

4.1 アンテナセンサの動作

地表対向モノポールアンテナは図 4.1.1 のようにその先端を地表に向けて設置したもので、この指向性は土中に分布していることから、このアンテナで土壌含水の影響を受けた AM ラジオ放送波を受信することが出来る。この計算モデルにおいて土壌含水率を変化させ、図の座標系において $\theta = -120^\circ$ 方向のアンテナ利得を z 軸におけるモノポールアンテナの位置の関数とし、周波数 1MHz で計算した結果を図 4.1.2 に示す。ここでモノポールアンテナの全長は 5m、土壌の複素誘電率は各土壌含水率に対して測定した値を設定した。同図によると、モノポールアンテナを完全に土中に埋めた場合は含水土壌の損失により利得は大幅に劣化する。またモノポールアンテナの給電部分側を空气中に引き出せば、電流最大点が空气中ゆえ土壌損失の影響は軽減され利得は向上することが分かる。図 4.1.3 は土壌含水率に対するこのアンテナの反射係数と $\theta = -120^\circ$ 方向のアンテナ利得の計算値であり、土壌含水率が上昇するにつれてアンテナ利得も増加、このことが AM ラジオ放送波受信電力と土壌含水率に相関がある一因であることが分かった。次に土中コイルが接続しやすいアンテナセンサの構造として、図 4.1.4 に示す同軸状アンテナを検討する。このアンテナは給電線の接地部分と同軸ケーブルの外導体が分離されているので同軸ケーブル外導体外表面がモノポールアンテナとして動作するもので、この時の土壌含水率に対するアンテナの反射係数と $\theta = -120^\circ$ 方向のアンテナ利得の計算値を図 5 に示す。この場合も土壌含水率が上昇するにつれてアンテナ利得は増加し、土壌含水率推定センサとして利用できることが明らかになった。

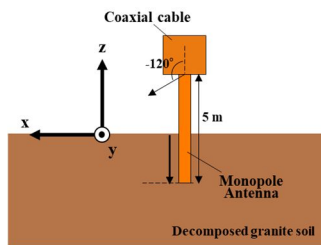


図 4.1.1. 地表対向モノポールアンテナの構造

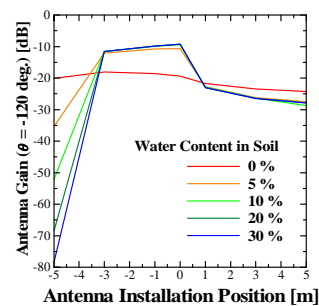


図 4.1.2. モノポール先端位置に対するアンテナ利得の計算値

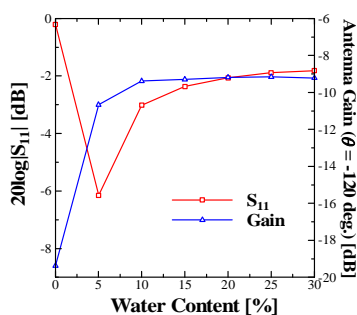


図 4.1.3. 土壌含水率に対するアンテナ利得と $|S_{11}|$ の計算値

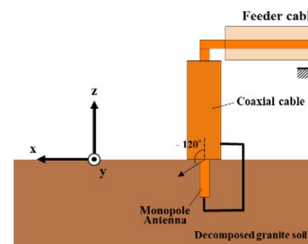


図 4.1.4. 同軸状アンテナの構造

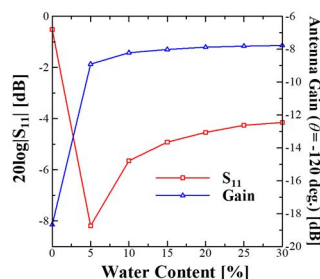


図 4.1.5. 土壌含水率に対するアンテナ利得と $|S_{11}|$ の計算値

4.2 IoT システムの構築

図 4.2.1 にシステム構成の概要図を示す。アンテナでは常時放送している呉地区の NHK 第一放送周波数 1.026MHz を受信しており、受信強度は晴天時-70dBm、雨天時-60dBm 程度でそれぞれ変化する。ヘテロダイン受信機は受信電力-90~-20dBm を直流電圧値 0~400mV に変換する。その後直流電圧値は LoRa で A/D 変換されゲートウェイへ送信される。降雨量計はCool Soft 社 Misol WH-SP-RG を使用しており、これは降雨時に示す機器内の升の傾いた回数で降雨を計測できる。升の裏に磁石とセンサがあり、傾いたときセンサが磁石によって開放から短絡になり通電する回数を LoRa で計測している。温湿度計は DHT11 を使用しており、ヘテロダイン受信機は 15 分に 1 回動作するが、それと同じときに温湿度が計測される。また回路は山中で動作することを考慮し、電源は安価な 12V 20Ah の鉛蓄電池を用いており、3 端子レギュレータで 5V に変換している。この電池でこのシステムは 14 日間動作し、また晴天時が 1 日あればソーラーパネルで充電される。以上のシステムから所得下データはクラウドにアップし、web サイトより Google スプレッドシートが確認できるようにしている。

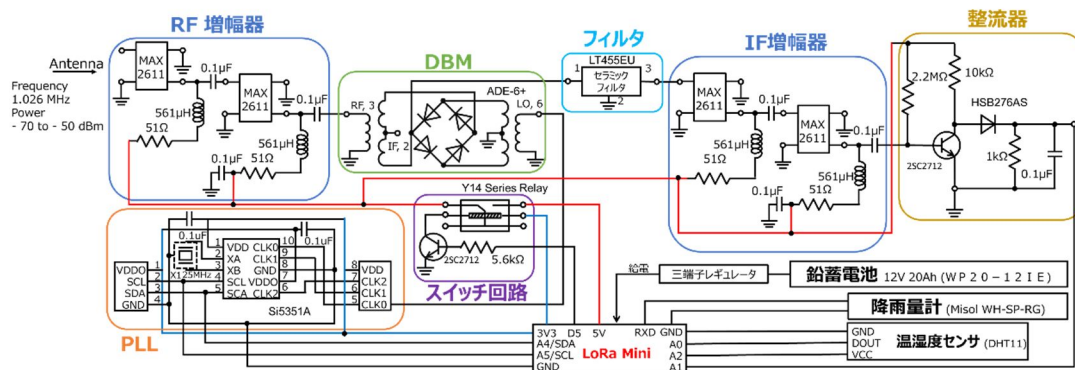


図 4.2.1. IoT システム構成の概要

4.3 IoT システムによる土壌含水率推定

図 4.3.1 は本手法の概要図で同軸状アンテナセンサにコイルを接続し、これを土中に埋設している。この同軸外導体外表面で AM ラジオ放送波を受信し、コイルを通して AM 波電流が受信回路に入力され、受信電力の変化をスペクトラムアナライザで測定することで含水率が推定される。また、土中コイルのインピーダンスが周辺土壌含水状態に対応して変化することから、土壌含水率検知感度が向上する。図 4.3.2 に改善前後のコイルを埋設した際の時系列受信電力と、コイル周辺に埋設した市販 TDR 計による土壌含水率の測定値を示す。改善前のコイルは直径 48mm の塩ビ管に直径 0.50mm の銅線を 660 回巻きつけたものに対して、改善後のコイルは直径 76mm の塩ビ管に直径 0.50mm の銅線を 25 回巻きつけて作成したコイルにトリマコンデンサを接続したものになっており、これは体積含水率 25% 時に AM ラジオ放送波 1.026MHz で共振するように L、C の値を調整したものである。図 4.3.2 からコイルの改善前後でも土壌含水率と受信電力に強い相関性があることが確認できる。ここで図 4.3.2(a)、(b)それぞれの最もレベルの低い受信電力と含水率を基準とし、相対的な受信電力と含水率を算出後、相対受信電力に対する相対含水率のグラフを作成した。図 4.3.3(a)が改善前、図(b)が改善後のコイルを使用した算出結果である。図 4.8.3(a)では近似曲線が非線形であり、相対受信電力が 0dBm から 10dBm 付近の感度が悪かったのに対し、図 4.8.3(b)では近似曲線が線形性を有しており、0dBm から 10dBm 付近の感度が改善されていることが確認できる。

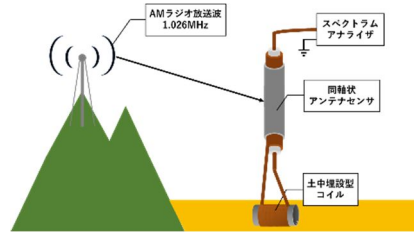
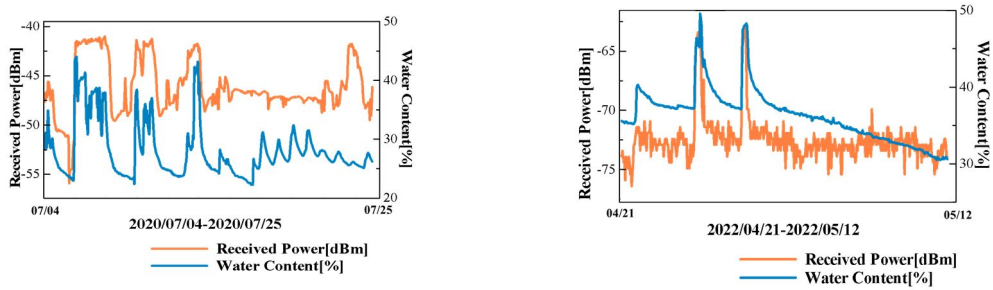


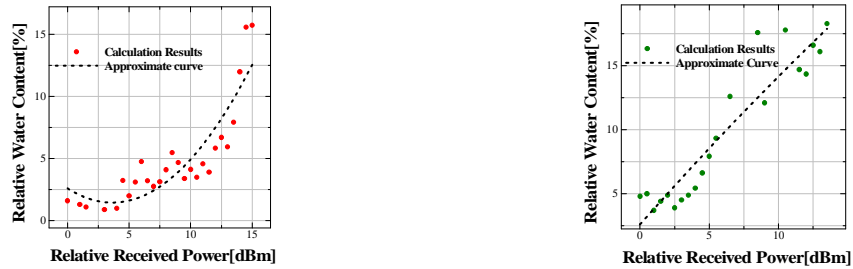
図 4.3.1. システム概要



(a) コイル改善前

(b) コイル改善後

図 4.3.2. 時系列受信電力と土壌含水率の測定値



(a) コイル改善前

(b) コイル改善後

図 4.3.3. 相対含水率に対する相対受信電力の測定値

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 木下拓真、黒木太司、宮本和哉	4. 巻 143
2. 論文標題 土壌含水率推定を目的とした含水土壌の中波帯複素誘電率計測とその表面インピーダンス	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C分冊	6. 最初と最後の頁 776-777
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.143.776	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計35件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 木下拓真、岩城昂琉、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ波受信による土壌含水率推定の検討 (1) アンテナセンサの動作
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下拓真、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ波受信による土壌含水率推定の検討 (2) 地表対向モノポールアンテナ
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩城昂琉、新浜貴翔、坂本雅弥、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ波受信による土壌含水率推定の検討 (3) 含水土壌に埋設した土中コイルの特性
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新浜貴翔、岩城昂琉、坂本雅弥、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ波受信による土壌含水率推定の検討 (4) 共振コイルによる検知分解能向上
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷元統、岩城昂琉、新浜貴翔、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ波受信による土壌含水率推定の検討 (5) 土中コイル接続アンテナセンサによる土壌含水率推定
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮本大哉、黒木太司、宮本和哉
2. 発表標題 山岳地帯における 920MHz帯電波伝搬特性に関する実験的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木下拓真、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ受信土砂災害予測システムを目的とした地表対向アンテナによる土壌含水量推定
3. 学会等名 電気学会 ICT活用スマート技術とその社会実装に関する技術調査専門委員会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷元統、新浜貴翔、岩城昂琉、黒木太司、宮本和哉
2. 発表標題 AMラジオ波受信による土壌含水率の推定
3. 学会等名 電子情報通信学会光応用電磁界計測研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩城昂琉、新浜優貴、宮本大哉、宮本和哉、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ放送波受信土壌含水率推定システムにおける IoTネットワーク構築の 一検討
3. 学会等名 電気学会通信研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒木太司、宮本和哉、三宅正光
2. 発表標題 ICTを活用した防災プロジェクト
3. 学会等名 電気学会通信研究会三委員会合同報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒木太司、宮本和哉、三宅正光
2. 発表標題 地方創生マイクロ波産業新世紀、土砂災害警報システム WiCON発新事業創生への道
3. 学会等名 マイクロウェーブ展2022実践講座
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daiya Miyamoto, Takuma. Kinoshita, Futoshi Kuroki, and Kazuya Miyamoto
2. 発表標題 Influence of Forest in Propagation of UHF Waves for LPWA Wireless Network Applications
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuma Kinoshita and Futoshi Kuroki
2. 発表標題 Water Content Estimation in Hydrous Soil Using AM Radio Broadcasting Waves
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮本大哉、黒木太司、宮本和哉
2. 発表標題 920 MHz帯山岳 - 都市間電波伝搬特性に関する実験的検討
3. 学会等名 電気学会通信研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩城昂琉、宮本大哉、新浜優貴、宮本和哉、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ放送波利用土壌含水率推定における IoTネットワーク構築
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新浜貴翔、岩城昂琉、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ放送波利用土壌含水率推定における土中コイルの一設計
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高松陸、岩城昂琉、新浜優貴、新浜貴翔、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ放送波利用土壌含水率推定に用いるダイカスト製造平面型コイルとその等価回路
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takato Shinhama, Subaru Iwaki, Yuki Shinhama, Daiya Miyamoto, Futoshi Kuroki, and Kazuya Miyamoto
2. 発表標題 Construction of IoT Network for Estimation System of Water Content in Soil by Receiving AM Radio Broadcasting Waves
3. 学会等名 Smart City Symposium 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木下拓真、高松陸、岩城昂琉、岩本孝太、坂本雅弥、黒木太司
2. 発表標題 簡易伝送路モデルによる土中アンテナのAMラジオ波受信特性推定
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮本大哉、木下拓真、岩城昂琉、岩本孝太、坂本雅弥、坂田蒼、宮本和哉、黒木太司
2. 発表標題 伝送路モデルを用いたLPWA無線ネットワークにおける森林の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下拓真、岩城昂琉、内田悠斗、熊原宏征、黒木太司
2. 発表標題 埋め込み型アンテナセンサのAMラジオ波受信特性解析、第1報
3. 学会等名 電気学会 ICT活用スマート技術とその社会実装に関する技術調査専門委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下拓真、岩城昂琉、内田悠斗、熊原宏征、黒木太司
2. 発表標題 埋め込み型アンテナセンサのAMラジオ波受信特性解析、第2報
3. 学会等名 電気学会 ICT活用スマート技術とその社会実装に関する技術調査専門委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuma Kinoshita, Daiya Miyamoto, Subaru Iwaki, Kouta Iwamoto, Masaya Sakamoto, Aoi Sakata, Kazuya Miyamoto, and Futoshi Kuroki
2. 発表標題 Estimation of Propagation Performance Between IoT Terminals and Gateway Using UHF-Bands for Landslides Prediction System
3. 学会等名 2021 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Subaru Iwaki, Kouta Iwamoto, Yuto Uchida, Masaya Sakamoto, and Futoshi Kuroki
2. 発表標題 Coil Antenna Embedded in Ground to Monitor Water Content in Soil for Landslides Prediction System
3. 学会等名 IEEE AP-S and URSI Int. Symp. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daiya Miyamoto, Yuki Shinhama, Takuma Kinosita, Subaru Iwaki, Kouta Iwamoto, Masaya Sakamoto, Aoi Sakata, Kazuya Miyamoto, and Futoshi Kuroki
2. 発表標題 Construction on Wireless Link between IoT Sensor Nodes and Gateway for Landslides Prediction System
3. 学会等名 IEEE AP-S and URSI Int. Symp. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Riku Takamatsu, Subaru Iwaki, Kouta Iwamoto, Masaya Sakamoto, and Futoshi Kuroki
2. 発表標題 Depth Direction Sensitivity of Antenna Sensor Embedded in Ground for Landslides Prediction System
3. 学会等名 IEEE AP-S and URSI Int. Symp. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下拓真、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ波を用いた土壌含水率推定 (1) 含水土壌範囲の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大谷元統、木下拓真、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ波を用いた土壌含水率推定 (2) 含水土壌上の中波伝搬特性
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮本大哉、木下拓真、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ波を用いた土壌含水率推定 (3) UHF帯電波伝搬における森林の影響考察
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩城昂琉、新浜貴翔、坂本雅弥、黒木太司
2. 発表標題 AMラジオ波を用いた土壌含水率推定 (4) 土中コイルアンテナのモデル解析
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒木太司、坂本雅弥、岩城昂琉、岩本孝太、木下拓真、宮本大哉、新浜優貴、坂田蒼、宮本和哉
2. 発表標題 IoTを活用した防災・減災システム
3. 学会等名 電気学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuma Kinoshita and Futoshi Kuroki
2. 発表標題 Estimation of Water Content in Soil Based on Reception of AM Radio Broadcasting Wave Using Antenna Sensor Embedded in Soil
3. 学会等名 Smart City Symposium 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mototsugu Ohtani, Takuma Kinoshita, and Futoshi Kuroki
2. 発表標題 Propagation Characteristics of Medium Frequency Wave on Hydrous Soil for Landslide Prediction System Using AM Radio Broadcasting Wave
3. 学会等名 Smart City Symposium 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daiya Miyamoto, Takuma Kinoshita, and Futoshi Kuroki,
2. 発表標題 Influence of Forest on LPWA Wireless Network in UHF Frequency Bands
3. 学会等名 Smart City Symposium 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Subaru Iwaki, Takato Shinhama, Masaya Sakamoto, and Futoshi Kuroki
2. 発表標題 Analysis of Coil Antenna in Soil for Water Content Estimation System Using AM Radio Broadcasting Wave
3. 学会等名 Smart City Symposium 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 方法、システム、及び、装置	発明者 黒木太司、三宅正光	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022- 35665	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

呉高専ホームページ https://www.kure-nct.ac.jp/ における「呉高専日誌」欄に研究成果を掲載し、広く国民へ研究成果を発信する。

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------