

令和元年6月14日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06303

研究課題名（和文）状態遷移モデルに基づくレーダ信号処理法とその応用展開

研究課題名（英文）Radar signal processing based on a state transition model and its application

研究代表者

西本 昌彦（Nishimoto, Masahiko）

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・教授

研究者番号：60198520

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、新しい超広帯域レーダ信号処理法の開発とその地中埋設物の探査・識別や構造物非破壊診断への応用を目指すものである。ターゲット識別のための特徴量として提案した位相推移パラメータは、通常の相関係数では識別できない埋設ターゲットに対しても精度よく識別・同定できることを確認した。また、鉄筋コンクリートの腐食モデルを理論的に構築し、これを用いてレーダ応答をシミュレーションすることにより、非破壊診断に対するレーダの適用可能性について理論的に検証した。これらの結果より、開発した手法の有効性が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

埋設物探査・識別や非破壊検査・診断に対して、電磁波レーダは大きく貢献できるポテンシャルを有しているが、その能力はまだ十分引き出されていない。本研究で得られた成果により、地中埋設物探査・識別への応用においては埋設物識別精度の向上が示された。また、コンクリート非破壊検査・診断への応用においてはレーダを用いた腐食度推定の可能性が示された。これはレーダを用いた地中埋設物探査・識別や構造物非破壊検査・診断の可能性を広げるとともに、現場での作業効率の向上が期待できる成果であり、安全・安心な社会基盤整備の観点から社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, novel signal processing methods for ultra-wideband (UWB) radars are developed and their performances are evaluated. First, we proposed the phase shift parameter as a feature for radar target identification and evaluated identification performance of buried objects. From the results, we confirmed that the phase shift parameter was effective for improving the identification performance. Next, in order to check the applicability of UWB radar to nondestructive inspection of reinforced concrete, we theoretically modeled a corroded rebar in concrete and analytically calculated radar responses for some typical cases. Simulation results suggested that corrosion rate can be estimated by checking waveform distortion of radar signatures. From these results, we conformed that the proposed signal processing methods are available and effective for identification of buried targets and nondestructive inspection of reinforced concrete structures.

研究分野：波動信号処理工学

キーワード：レーダ信号処理 地中レーダ 地中探査 非破壊検査 非破壊診断

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在、高度成長期に建設された多くのコンクリート構造物が耐用年数を迎えている。また、比較的最近建設されたコンクリート構造物についても、近年頻発している大規模地震や大型台風などの自然災害による損傷、材料自体の品質劣化、コスト削減や人員不足に伴う施工不良などにより、耐用年数を迎える前に危険な状態となることもある。この膨大な社会インフラの安全性を確保し、長く維持管理していくためには定期的な検査を行うことにより、その劣化状態を把握し、適切にメンテナンスしていくことが肝要である。このため、「構造物の点検・診断」が重要課題であり、構造物を傷つけることなく内部に発生している劣化や変状を定量的に評価できる非破壊検査技術の研究開発が切望されている。弾性波やX線を用いる非破壊検査手法に比べ、電磁波レーダは非接触で深い部分まで検査可能で、検査技師が特別な技術を習得することなく、安全かつ簡便に使用可能な検査・診断法である。しかし、現在のレーダではコンクリート中の鉄筋のおよその位置は検出できるが、鉄筋径の推定はもちろん、はく離や亀裂などの劣化箇所の検出・識別、劣化程度の診断に対しては、まだ難しいのが現状である。

一方、紛争地域の未処理地雷は紛争終了後も一般住民の安全を脅かし続けており、日本には人道的地雷除去に係わる技術的な国際貢献が求められている。地雷探査技術として現在用いられている代表的な手法は金属探知器であるが、プラスチック製地雷の検出も可能な地中レーダ型探知器についても、実用化が進んでいる。しかし、地中レーダではプラスチック地雷でも探知可能であるが、地中や地表面の様々な物体(小石、砲弾片など)からの不要反射のため、地雷と地雷以外の物体の区別が非常に難しい。このため、現在、地雷探査用地中レーダに要求されているのは、地雷と地雷以外の物体を識別するための「高い識別能力」である。しかし、実際には、地表面の粗さ、土壌の損失や不均質性の影響に伴う解像度の悪さのために識別精度は非常に低いのが現状である。これが地雷除去の処理効率を下げる大きな要因の一つである。

### 2. 研究の目的

非破壊検査診断や埋設物探査などに対して、電磁波レーダは大きく貢献できるポテンシャルを有しているが、その能力はまだ十分引き出されていない。このため、研究代表者は、新しい超広帯域レーダ信号処理法の開発と、その構造物非破壊診断や地中埋設物探査への応用を目指すことを最終目標としている。本研究は、先行研究で提案したレーダ信号処理用の状態遷移モデルを用いることにより、信号に含まれる系列情報を有効に利用し、高い識別・同定性能を得ること、および応答信号から得られる様々なパラメータを特徴量とすることにより、精度向上を図ることを目的としている。本研究で開発する手法は、従来の埋設物探査を目的としたイメージング技術とは異なり、ターゲットの識別機能を向上させることを目的とするもので、非破壊診断や埋設物探査の新しい可能性を開くものと考えている。コンクリート非破壊検査技術への応用においては、構造物のメンテナンス精度を向上できるため、安全・安心な社会基盤整備の観点から意義が大きい。地雷除去応用においては、識別・同定性能が向上すれば除去作業の時間が大幅に短縮でき、作業員の肉体的及び心理的なストレスを大幅に低減できる。

### 3. 研究の方法

本研究で取り組んだ次の主要課題について、課題ごとにまとめて説明する。

(1) 識別・同定・診断のための特徴量とその系列情報処理アルゴリズムの検討  
ターゲットを精度よく識別・同定・診断するための特徴量として、先行研究で提案した位相推移パラメータと振幅パラメータを取り上げ、その有効性を検討する。特に、位相推移パラメータがターゲット識別・同定に優れていることを検証する。具体的には、地中埋設物の識別・同定への応用を考えて、地中埋設地雷の探査問題に適用する。これは実験室内で行ったモデル実験のデータを用いて評価する。また、状態遷移モデルを用いた系列情報処理に適した特徴量として、応答波形全体から求めた瞬時周波数と瞬時パワーに基づく特徴量を新たに提案し、その有効性について検討を行う。これは数値シミュレーションによって評価する。

(2) 鉄筋コンクリートの腐食過程の解析および腐食コンクリートのモデル化  
応用分野の一つである鉄筋コンクリートの非破壊劣化診断技術では、まず鉄筋コンクリートの劣化状態とレーダ応答との関係を明確にしておく必要がある。このため、鉄筋コンクリートの腐食過程を解析し、その結果に基づいて腐食状態を単純な構造でモデル化することにより、レーダ応答信号を解析的に求め、腐食状態とレーダ応答波形との関係を明確にする。これにより、レーダを用いた非破壊劣化診断の可能性を理論的に検討する。

(3) 非破壊診断における偏波情報の有効性の検討  
レーダ計測では偏波特性も探査・識別・診断のための有効な情報となる。特に、コンクリート中の鉄筋のような細長い散乱体については、偏波によって散乱特性が大きく異なる。研究代表者はこれまでの研究において単一偏波(E偏波)について解析を行ってきたが、H偏波に対する散乱応答も有効な情報として利用できる。特に、状態遷移モデルを用いる場合、レーダ応答の角度依存性が精度に関係するため、偏波特性の違いは劣化診断に対して有効であると考えられる。このため、H偏波についても同様に理論解析を行い、偏波情報の有効性を明らかにする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 識別・同定・診断のための特徴量とその系列情報処理アルゴリズムの検討

実際に計測した地中埋設物からのレーダ応答を用いて、位相推移パラメータが埋設物の識別・同定に対して有効であることを検証した。図1に、目的のターゲットである(a)Type-72 対人地雷モデルからのレーダ応答と、紛らわしい物体として、ほぼ同じサイズの(b)石、(c)プラスチック円柱、(d)金属ロッド、(e)発泡スチロール塊からのレーダ応答を示す。埋設深度は5cmで、計測は実験室内で行っている。石およびプラスチック円柱は地雷モデルの波形と大きく異なるので、通常の整合フィルタ、即ち波形の相関係数を求めることにより容易に識別することができる。しかし、地雷モデル、金属ロッド、発泡スチロール塊の応答波形は比較的類似しており、相関係数は0.8を越えてしまう。このため、相関係数では識別することができない。これに対して、位相推移パラメータは波形の違いを敏感に捉えるので、識別が可能である。図2に、地雷モデル、発泡スチロール塊、金属ロッドの相関係数と位相推移パラメータの散布図を示す。この図より明らかのように、3種類の埋設物の相関係数はいずれも0.8以上と高く、相関係数では識別・同定は困難であるが、位相推移パラメータを加えることにより明確に区別できることがわかる。この結果により、位相推移パラメータは優れた特徴であることが確認できる。

また、状態遷移モデルを用いたレーダ信号の系列情報を有効に処理するための新たな特徴量として、応答波形全体から求めた瞬時周波数と瞬時パワーを提案した。この瞬時周波数と瞬時パワーの時間推移を時系列データとして状態遷移モデルを適用すれば、音声認識の分野で利用されている隠れマルコフモデルを用いた識別・同定問題として扱うことができる。シミュレーションの結果、まだ十分な精度は得られなかったが、これは状態遷移モデルのパラメータの選び方の起因するものと考えられるため、引き続き検討を行う予定である。

##### (2) 鉄筋コンクリートの腐食過程の解析および腐食コンクリートのモデル化

鉄筋コンクリートの腐食状態とレーダ応答との関係を明らかにするため、まず腐食鉄筋のモデル化を行った。コンクリートの腐食は鉄筋表面に生じた錆びの膨張圧と浸透により、鉄筋周囲コンクリートが変質していくことにより生じる。本研究では、鉄筋表面に生じた錆びが周りのコンクリートに浸透していく状況を拡散方程式を用いて定式化し、これを解析的に解くことにより、鉄筋の周囲に形成された腐食層分布の表現式を導出した。得られた表現式を数値計算することにより、腐食分布が指数関数を含む関数で近似できることを確認し、これに基づいて腐食鉄筋のモデルを構築した。その腐食モデルを図3に示す。また、腐食度と腐食鉄筋の直径、および腐食度と腐食層の厚さの関係を計算し、腐食度ごとのモデルを構築した(図4参照)。このモデルを用いて、図5の入射パルスに対するシミュレーションを行った結果を図6に示す。図6(a)は入射パルス、図(b)~(d)は腐食度0%から30%のときの応答波形である。この結果より、腐食度10%のときは応答波形に大きな歪みはみられないが、腐食度20%以上になると波形の先頭部が歪み、腐食度が大きくなるにしたがって歪みが大きくなることが確認できる。この結果は、20%以上の腐食であれば、レーダで検出可能であることを示しており、コンクリートの非破壊診断へのレーダ応用の可能性を示唆するものである。

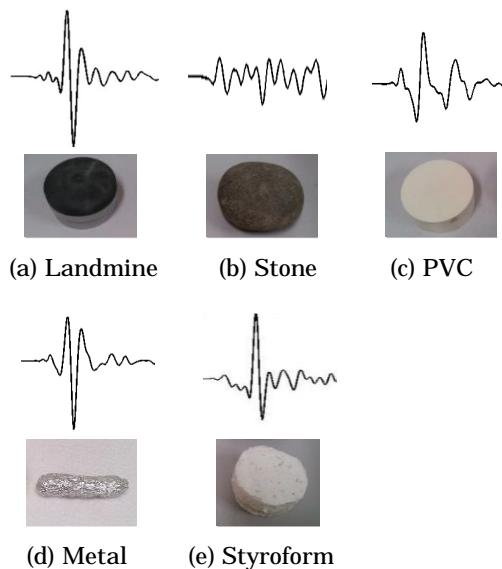


図1. 地雷モデル及び紛らわしい物体からの応答波形(実験値)  
(a) 地雷モデル, (b) 石, (c) プラスチック  
(d) 金属ロッド, (e) 発泡スチロール塊

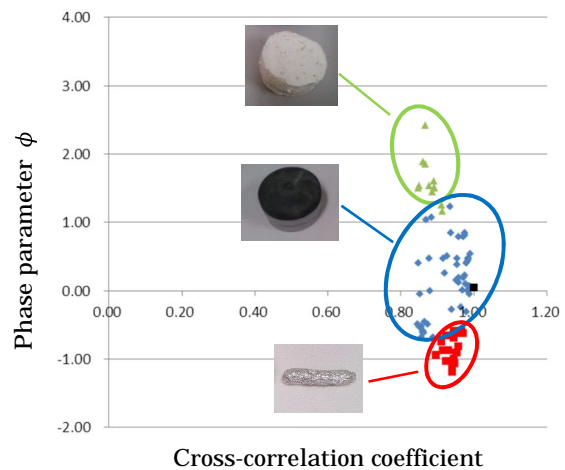


図2. 地雷モデル、金属ロッド、発泡スチロール塊のサンプルデータの相関係数(横軸)と位相推移パラメータ(縦軸)の散布図。

(3) 非破壊診断における偏波情報の有効性の検討

コンクリート中の鉄筋のような細長い散乱体は、偏波によって散乱特性が大きく異なるため、偏波特性は識別・同定・診断のための有効な情報となる。このため、E 偏波と H 偏波の散乱特性の比較を行い、偏波情報を利用した劣化診断の精度向上の可能性について検討を行った。図 7 に腐食度 20% の鉄筋コンクリートからのパルス応答波形の数値計算結果を示す。比較のため、E 偏波の場合の応答波形も示している。この結果より、H 偏波の応答と E 偏波の応答は大きく異なっていることが確認できる。特に、E 偏波の場合は応答波形の先頭部に波形歪みが生じるのに対し、H 偏波では応答波形全体に歪みが現れている。この傾向は腐食度が変わっても現れており、H 偏波のほうが回折波の影響が強いことに起因しているものと考えられる。さらに詳しい検討が必要であるが、H 偏波のほうが波形の歪みが大きく現れ、また、応答波形には偏波によって異なる情報が含まれていることが確認できる。

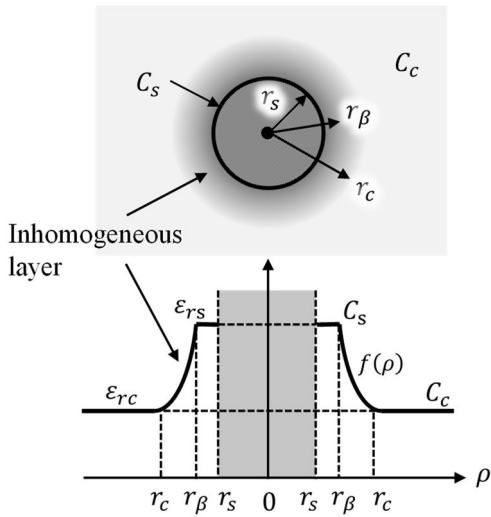


図 3 . 鉄筋コンクリートの腐食分布モデル

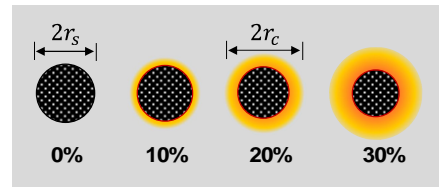


図 4 . 腐食の進行モデル

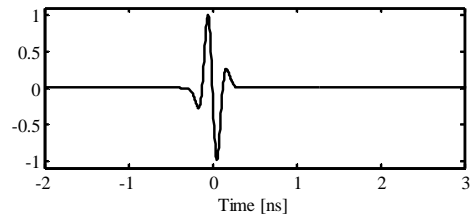
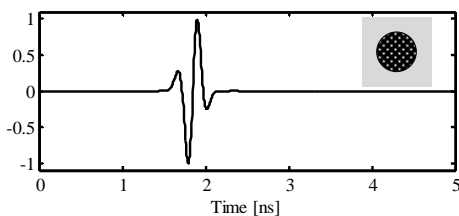
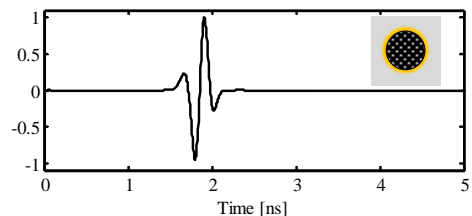


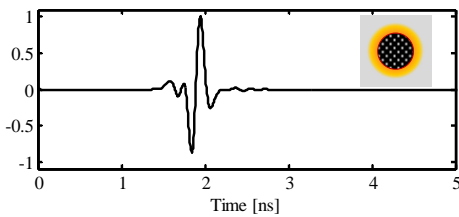
図 5 . 入射パルス (モノサイクルパルス)



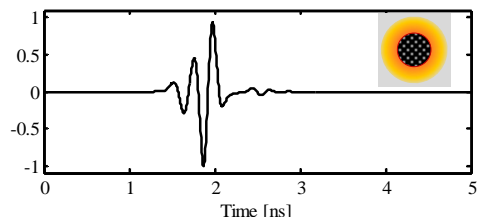
(a) 腐食度 0%



(b) 腐食度 10%

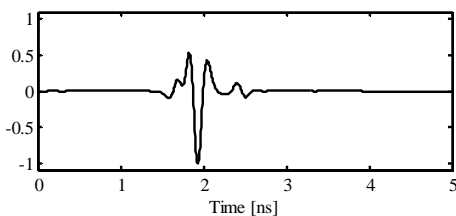


(c) 腐食度 20%

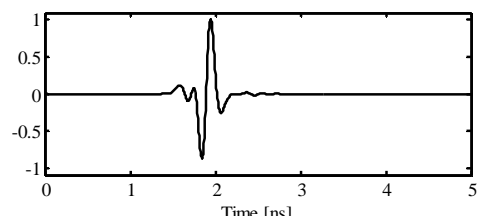


(d) 腐食度 30%

図 6 . 腐食鉄筋コンクリートからの応答波形



(a) H 偏波に対する応答



(b) E 偏波に対する応答

図 7 . 偏波の違いに対する応答波形の変化 (腐食度 20%)

#### (4) 今後の展望

本研究をとおして、提案したレーダ信号処理技術が、地中埋設物探査やコンクリート非破壊診断に応用可能であることを確認した。コンクリート非破壊診断についてはシミュレーションによる検証のみであるため、実際の応用については実験による検証が必要である。これについては、コンクリートや土壌の媒質定数（誘電率、導電率）推定法の実験による検証と併せて、引き続き検討中である。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計12件)

Budiman P.A. Rohman and Masahiko Nishimoto, “GPR Target Signal Enhancement Using Least Square Fitting Background and Multiple Clustering of Singular Values,” Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 83, pp. 123–132, 2019. (査読有)

<http://www.jpier.org/PIERL/pierl83/18.18042804.pdf>

Masahiko Nishimoto, Budiman P.A. Rohman, and Yoshihiro Naka, “Analysis of H-polarized Wave Scattering by a Metal Cylinder Covered with Inhomogeneous Material,” 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2-pages, 2018. (査読有)

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8627716>

Budiman P.A. Rohman and Masahiko Nishimoto, “Estimation of Near-surface Soil Moisture through GPR Signal Processing Based on Multi-scaled Spectral Feature Weighting,” 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), 4-pages. (査読有)

DOI: 10.23919/PIERS.2018.8598023

Budiman P.A. Rohman and Masahiko Nishimoto, “Optimized Reconstruction of GPR Target Signature Using Evolving Sparse Representation,” 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), 4-pages. (査読有) DOI: 10.23919/PIERS.2018.8597877

Budiman P.A. Rohman and Masahiko Nishimoto, “Near-Surface Soil Water Content Estimation Using UWB-GPR Based on Selective Sparse Representation,” Proceedings of 2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), pp.1-5, 2018. (査読有) DOI: 10.1109/SAS.2018.8336717

Masahiko Nishimoto and Yoshihiro Naka, “Analysis of Transient Scattering by a Metal Cylinder Covered with Inhomogeneous Lossy Material for Nondestructive Testing,” IEICE Trans. Electronics, Vol.E101-C, No.1, pp. 44-47, Jan. 2018. (査読有) DOI: 10.1587/transele.E101.C.44

Masahiko Nishimoto, “Parametric Representation of UWB Radar Signatures and Its Physical Interpretation,” IEICE Trans. Electronics, Vol. E101-C, No.1, pp. 39-43, Jan. 2018. (査読有) <https://doi.org/10.1587/transele.E101.C.39>

Masahiko Nishimoto, “Identification of Buried Objects Using Scattering Model Parameters,” Proceedings of 2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), pp. 279-281, 2017. (査読有) DOI: 10.1109/CAMA.2017.8273424

Budiman Putra Asma'ur Rohman and Masahiko Nishimoto, “Ground Clutter Suppression in GPR Using Framing Based Mean Removal and Subspace Decomposition,” Proceedings of 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2017), pp.1-2, 2017. (査読有)

DOI: 10.1109/ISANP.2017.8228854

Budiman Putra Asma'ur Rohman and Masahiko Nishimoto, “Multi-scaled Power Spectrum Based Features for Landmine Detection Using Ground Penetrating Radar,” Proceedings of 2017 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys), pp.83-86, 2017. (査読有)

DOI: 10.1109/ICSIGSYS.2017.7967075

Masahiko Nishimoto and Yoshihiro Naka, “Transient Scattering by a Metal Cylinder with Cylindrically Inhomogeneous Dielectric Material,” Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), pp.359-361, 2017. (査読有)

DOI: 10.1109/COMPEM.2017.7912822

Masahiko Nishimoto and Yoshihiro Naka, “Analysis of Electromagnetic Pulse Responses by a Conducting Cylinder with Inhomogeneous Dielectric Coating,” Proceedings of the 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 3B1-2, pp.564-565, 2016. (査読有)

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7821204>

[学会発表](計10件)

Masahiko Nishimoto, Budiman P.A. Rohman, Yoshihiro Naka, “Estimation of Concrete Corrosion State Using Ultra-Wideband Radar Signatures,” International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2019), 4 pages, July 28 - August 2, 2019 (査読有) (accepted)

Budiman Rohman, Masahiko Nishimoto, Concrete Dielectric Constant Estimation Based on Analytic Signal Peak Ratio of GPR Response for Non-destructive Inspection,” International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS2019), 4 pages, July 28 - August 2, 2019 (査読有) (accepted)

山下拓真, 松永尚基, 西本昌彦, “非破壊診断および目標物探査用超広帯域アンテナセット,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 43, No. 2, pp. 43-46, 2019年1月24日.

西本昌彦, プディマン プトラ A. R., 中良弘, “コンクリート中の腐食金属ロッドからのレー

ダ応答(III) - 散乱応答の偏波依存性の検討 - ”, 電子情報通信学会研究技術報告, EMT2018-45, pp.15-18, 2018年11月15日.

西本昌彦, 中良弘, プディマン プトラ A. R., “コンクリート中の腐食金属ロッドからのレーダ応答(II) - 鉄筋周りの腐食分布のモデリング - ”, 電子情報通信学会研究技術報告, EMT2018-19, pp.69-72, 2018年7月19日.

西本昌彦, プディマン プトラ A. R., “ターゲット識別・診断のための特徴量とその系列情報処理”, 電子情報通信学会研究技術報告, EMT2017-47, pp.31-35, 2017年11月9日.

西本昌彦, 中良弘, “コンクリート中の腐食金属ロッドからのレーダ応答”, 電気学会電磁界理論研資, EMT-17-35, pp.179-183, 2017年1月18日.

西本昌彦, 中良弘, 田邊将之, “不均質媒質で覆われた金属円柱による電磁波散乱”, 電子情報通信学会研究技術報告, EMT2016-58, pp.129-132, 2016年11月17日.

西本昌彦, 中良弘, “損失誘電体層で覆われた導体円柱による電磁波散乱(II)”, 2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-1-9, CD-ROM, p. 9, 2016年9月22日.

Budiman P.A. Rohman, Masahiko Nishimoto, “Multi-scaled spectral features of GPR signals for landmine detection and performance evaluation in some actual situations”, 平成29年度電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集, CD-ROM, 2017年9月27日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

なし