

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：56301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04084

研究課題名（和文）ポラリメトリックにより検知性能を高めた不発弾除去のためのレーダ技術の開発

研究課題名（英文）Development of radar technology for removal of unexploded ordnance with improved detection performance by polarimetric

研究代表者

城戸 隆（Kido, Takashi）

新居浜工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：70390995

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：様々な状態で埋設される不発弾に対応するため、広帯域なレーダ・アンテナに対しポラリメトリック手法を適用させることで、圧倒的な不発弾検知性能を実現する地中レーダ技術を開発することを目的とした。

大気環境及び土壌面設置状態で七角直線形ボウタイ広帯域アンテナの最適形状をシミュレーションにより決めること、さらにそれに基づいた七角形ベース曲線形ボウタイ広帯域アンテナがより広帯域（高H/L比）であることを実証することに主眼を置き、形状を追い込むことで、従来を上回る高性能の地中レーダ用アンテナ技術を獲得し、成果を学会で発表することが出来た。実環境にて性能検証するための送受信アンテナモジュールを評価している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カンボジアやラオスなどかつての紛争地帯や最近ではウクライナなどの紛争地帯には対人地雷だけでなく不発弾（UXO）や対戦車地雷もいまだに除去されずに多くが残されたままとなり、対人地雷による被害者と同程度の被害者を不発弾が作り出しており、こうした被害者を出さないためにも不発弾の検出、除去は喫緊の課題である。

不発弾除去のため十分な性能のレーダ技術の開発が望まれているなかで、様々な状態で埋設される不発弾に対応するため、広帯域なレーダ・アンテナ・ユニットに対しポラリメトリック手法を適用させて高性能化することで、圧倒的な不発弾検知性能を実現する地中レーダ技術を開発することを目的としている。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project was to develop a ground-penetrating radar technology that achieves overwhelming unexploded ordnance detection performance by applying a polarimetric method to a wide-band radar antenna in order to respond to unexploded ordnance buried in various conditions.

By focusing on determining the optimal shape of the heptagonal linear bowtie broadband antenna by simulation under the atmospheric environment and soil surface installation conditions, and demonstrating that the heptagon-based curved bowtie broadband antenna based on it has a wider bandwidth (higher H/L ratio), we have acquired high-performance ground-penetrating radar antenna technology that exceeds that of conventional methods. I was able to present my results at an academic conference. Now we are evaluating transmitting and receiving antenna modules to verify their performance in a real environment.

研究分野：電磁波応用計測

キーワード：地中レーダ 地雷 不発弾 ベクトルネットワークアナライザ ボウタイアンテナ 電磁波 土壌

1. 研究開始当初の背景

カンボジアやラオスなどかつての紛争地帯や最近ではウクライナなどの紛争地帯には対人地雷だけでなく不発弾 (UXO) や対戦車地雷もいまだに除去されずに多くが残されたままとり、対人地雷による被害者と同程度の被害者を不発弾が作り出している。対人地雷については東北大学のグループが開発した合成開口レーダ機能を有する地中レーダ、及び金属探知機とセンサ位置追跡システム用の画像センサを複合化したハンドヘルド地雷検知器 ALIS が実地雷源において大きな成果を上げ、効率的な除去の目処が立ちつつある。少し前にはカンボジアで 100 個以上の実地雷を検知する実績を達成し、最近ではウクライナに複数台のハンドヘルド地雷検知器 ALIS が提供されて実紛争領域で活躍中である。これは世界中で唯一、大学発の技術が実地雷検知に利用された成果である。

不発弾や対戦車地雷は対人地雷に比べより深部にあることが多く、対人地雷の検知に特化されたパルスレーダを搭載したハンドヘルド型 ALIS では十分対応出来ない。パルスレーダは構成が簡単のためレーダの小型化が可能であるが、パルス幅や帯域幅が固定されるため、深度性能や分解能性能の適応範囲は限定される。被害の多さから不発弾除去のための十分な性能のレーダ技術の開発が望まれている。

2. 研究の目的

ウクライナのみならず、カンボジアやラオスなどには対人地雷だけでなく不発弾 (UXO) もいまだに除去されず、多くが残されたままとっている。対人地雷については東北大学のグループが開発した地中レーダ ALIS が実地雷源において大きな成果を上げ、効率的な除去の目処が立ちつつあるが、より深部にある不発弾については ALIS でも対応出来ない。このため、不発弾除去のため十分な性能のレーダ技術の開発が望まれている。超広帯域アンテナを有する連続波周波数掃引ポラリメトリック適用型地中レーダは深部にある不発弾の探知に対し、深度検出性能及び分解能の両者の最適化の可能性が先行研究で明らかになっている。大気中に比べ高周波帯域で減衰の大きい地中を伝搬する電磁波を用いる地中レーダでは、使用する周波数領域 (周波数窓) の制限から、広帯域性能の指標は -3dB 周波数幅 ($\text{BW} = f_H - f_L$) より H/L (f_H/f_L) 比が特に重要である [1]。

本研究は従来のアンテナに比較し超広帯域性能を有するアンテナを開発するとともに、個別の不発弾にポラリメトリック手法を適合させて高性能化することで、従来のパルスレーダと比較して圧倒的に上回る不発弾検知性能を実現する地中レーダを開発することを目的としている。

3. 研究の方法

これまで、 $35\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ の容積の広帯域アンテナユニットを有する比較的コンパクトな連続波周波数掃引型地中レーダを開発し、 2.5 m を超える深さの検知性能を有することを示した [2]。さらに広帯域のレーダデータを周波数軸処理及び時間軸処理を行うことで深度の性能と分解能の高次両立が可能であることを実証した。高性能化して得られたレーダ画像は市販のパルス型地中レーダのレーダ画像に比べ同等か明らかに明瞭で高分解能であった。これまでアンテナについてはある程度の広帯域化が図られてきたが、予備調査により更なる広帯域化が可能であることが判明したので、今年度は特に地中レーダ用途でより重要度の高いアンテナの広帯域性能の指標である H/L (f_H/f_L) 比の向上を最優先目標とした。

(1) 本研究では研究者がこれまで基礎的な開発を行ってきた実績に基づき以下のシステムの完成を目標に掲げる。

① 不発弾検知のためのポラリメトリック適用型超広帯域アンテナ技術の確立

広い帯域で整合特性、位相特性、指向特性の優れたボウタイアンテナを用い、コンパクトでありながら深さ 30 cm 以下の比較的浅い対人地雷から 1 m 以上の深さの不発弾や対戦車地雷の探知に対応するとともに、十分な分解能を確保できる超広帯域アンテナ技術を確立する。

② 不発弾検知連続波掃引ポラリメトリック適用型レーダ技術・ハードウェアの確立

コンパクトなシステムを実現するため多チャネルハンドヘルド型ベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いてポラリメトリック適用電磁波ベクトル計測を行う構成によりレーダ測定を行う不発弾検知のための連続波掃引ポラリメトリック適用型レーダ技術・ハードウェアを確立する。新居浜高専仕様の広帯域アンテナの動作周波数に合わせて最適掃引周波数範囲を決定する。

4. 研究成果

(1) ボウタイアンテナ形状の最適化

・ 大気環境下での予備的シミュレーション

図 1 の (a) に従来技術である三角形ボウタイアンテナ (BTA)、(b) に前回報告の五角形 BTA、(c) に新規報告の直線七角形 BTA、(d) に新規報告の曲線七角形 BTA の形状の比較を示す。今回報告の七角形 BTA を配したシミュレーション環境を図 2 に示す。シミュレーションは同一の

BTA 対で構築し、1 [m] 間隔で対向するように配置した。またアンテナ以外の計算空間を空気の比誘電率 1.0 に設定し、最終的に十分に収束した各数値を結果とした。

従来の銅箔面が正三角形の BTA や前回報告[3] の五角形 BTA と比較し、1 アンテナ当たり最大値から 3[dB] 低下する周波数帯域幅(-3dB BW)をより広帯域にするすること、及び、低い周波数でも使用可能とするため、-3dB BW の上限周波数と下限周波数の比 (以降 H/L 比) を大きくすることを目標としている (図 3)。今回事前計算で好結果の得られた直線七角形 BTA を設計し、図 1 (c) に示す各辺の長さ L_{1-3} 、中心角 θ の最適化を試みた。現状最良の L_{1-3} を選び、H/L 比の θ 依存性を評価したところ、中心開き角 θ が 8° 近傍で、前回報告の五角形 BTA の 6 台を大きく超える 7.5 程度の H/L 比を得た。図 4 と表 1 に各 BTA の S21 伝搬利得の周波数特性と各パラメータを比較した結果を示す。

BTA の形状最適化を試み、今回新規に七角形 BTA を設計し、三角形や五角形 BTA の H/L 比を大幅に超える 7 台の H/L 比を得た。今後 BTA の形状を確定し、H/L 比の上限を見極める予定である[5]。

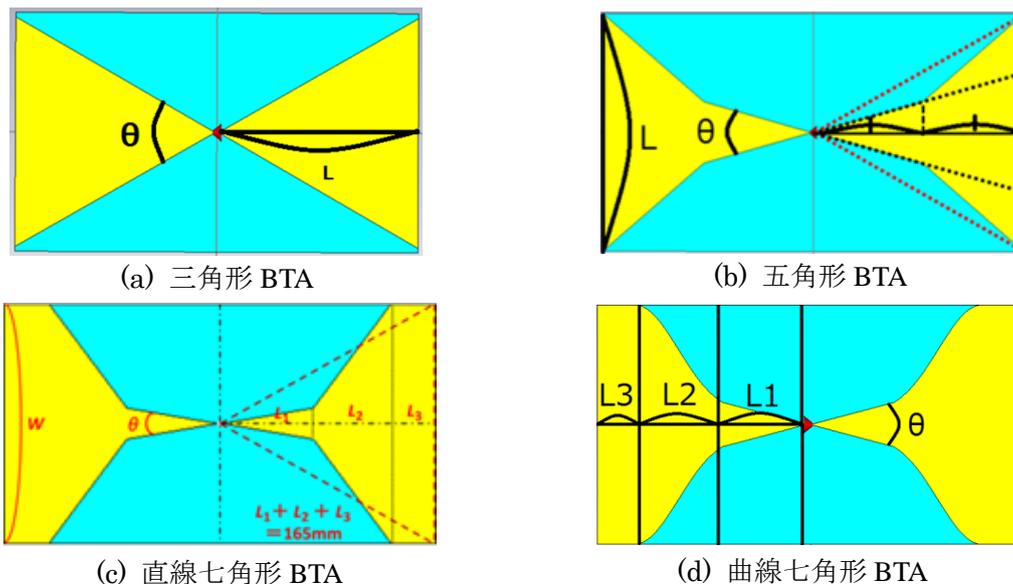


図 1 各種形状のボウタイアンテナの形状比較

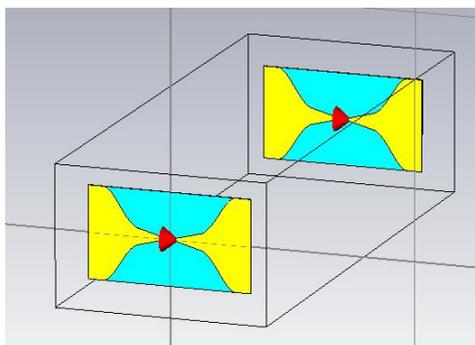


図 2 七角形 BTA 対を配置したシミュレーション環境

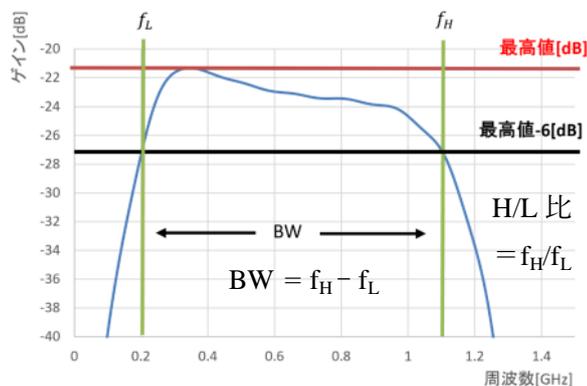


図 3 S21 ゲイン周波数依存性、BW、H/L 比

表 1 アンテナ形状と周波数帯域幅及び H/L 比 (大気中)

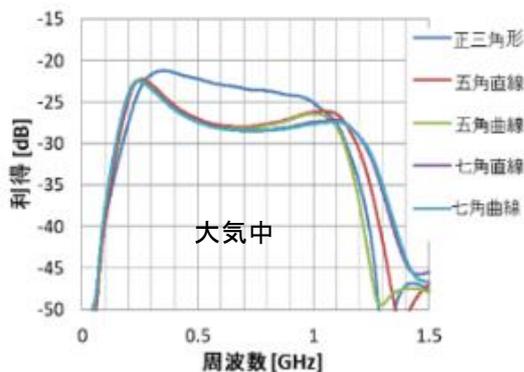


図 4 各アンテナの S21 利得の周波数特性

形状	f_L [GHz]	f_H [GHz]	BW [GHz]	H/L 比
正三角形	0.2028	1.0912	0.8884	5.382
五角直線	0.1693	1.1530	0.9837	6.809
五角曲線	0.1598	1.1068	0.9670	6.925
七角直線	0.1576	1.1767	1.0191	7.466
七角曲線	0.1567	1.1784	1.0217	7.519

・地面上設置環境下での本格的シミュレーションとアンテナ形状の最適化

今回報告の土壤面に七角形 BTA を配したシミュレーション環境を図 5 に示す。シミュレーションは同一の BTA 対で構築し、1 [m] 間隔で配置した。BTA 対の間に土壤の領域を設定し、2 つの BTA をそれぞれ囲むように空気の領域を設定した。土壤の領域とモデル周辺の空間で信号の反射が起こるのを防ぐため、反射率を 0 と設定するだけでなく、モデル周辺の計算空間は比誘電率を 3.0 に設定した。これは土壤における比誘電率と同様の値である。

1 アンテナ当たり最大値から 3[dB] 低下する周波数帯域幅(-3dB BW) をより広帯域にするすること、及び、低い周波数でも使用可能とするため、-3dB BW の上限周波数と下限周波数の比 (以降 H/L 比) を大きくすることを目標としている。

上述の大気環境下での予備的シミュレーションで得られた銅箔面が三角形の BTA、五角形 BTA と七角形 BTA に前述の比誘電率 3.0 の典型的な土壤の領域などを設定し、図 5 の構成でシミュレーションを行った。その結果を表 2 にまとめて示す。この時の図 6 に示す七角形 BTA の寸法は、(a) 35 mm、(b) 60 mm、(c) 70 mm、(d) 7.6 度である。

大気中に比べ土壤面設置においては、周波数帯域幅や H/L 比の数値は全体的に低下するものの、相対的には大気中と同様に三角形 BTA や五角形 BTA に比べ、七角形 BTA が最も周波数特性に優れていることが確認できた。そのため、土壤面設置状態での七角形 BTA の形状の最適化を目指す。

大気中での最適化で上記既存の七角形 BTA よりも良い周波数特性を得ていた形状を、土壤面での最適化においても適応を試みた。現状は (c) を 72.5 mm とし、中心開き角度 (d) の値を変化させた。その結果を表 3 に示す。

今回初めて総合的に土壤面設置の BTA の性能検証を行い、それに引き続き土壤面設置での BTA の形状最適化を試み、土壤面設置の七角形 BTA の H/L 比をある程度改善することができた。本研究での BTA は地中の埋設物探索などに使用する用途ではあるが、空中で最適化された七角形形状を土壤に対応させると、表 4 に示すように三角形形状のアンテナに比べ性能は向上した。そのため、今後は空中、土壤面、両方の側面からアンテナの形状を模索し、周波数特性の向上を図るのがよいと思われる[4]。

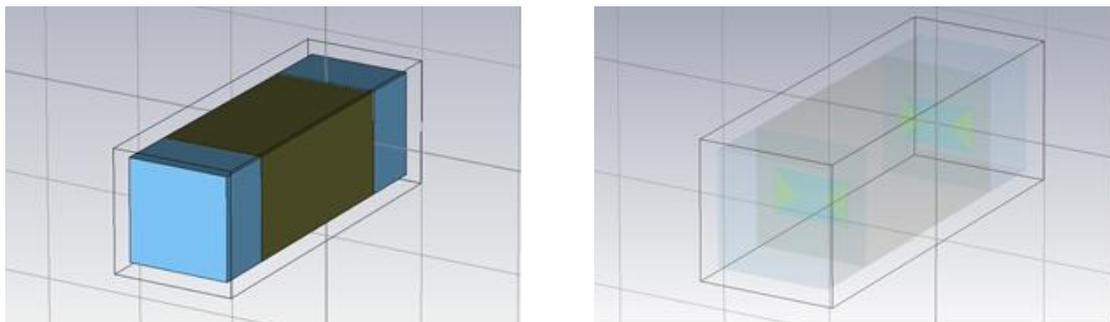


図 5 土壤面設置状態の七角形 BTA 対シミュレーション環境 (右) とその内部透過図 (左)

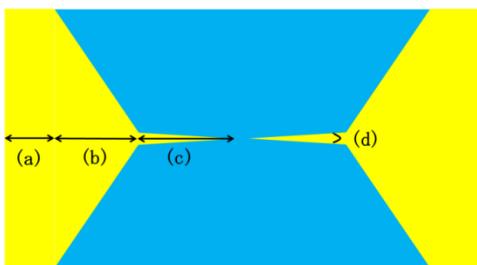


図 6 七角形ボウタイアンテナの正面図

表 2. 土壤面設置の三角形、五角形、七角形 BTA の性能

形状	BW [MHz]	S21 _{peak} [dB]	H/L 比
三角形 BTA	549.4	-17.56	4.020
五角直線	651.1	-19.73	5.966
七角直線	663.0	-20.24	6.363

表 3. 土壤面設置七角形 BTA の周波数特性の開き角 (d) 依存性 ((c) 72.5 mm)

θ (d) [degree]	BW [MHz]	S21 _{peak} [dB]	H/L 比
7.6	549.4	-20.30	6.396
6.0	672.8	-20.59	6.647
5.0	679.5	-20.81	6.813
4.0	679.5	-20.81	6.813

表 4. 土壤面設置の三角形、五角形、七角形 BTA の性能のまとめ (研究成果中の最高値)

形状	BW [MHz]	S21 _{peak} [dB]	H/L 比
三角形 BTA	549.4	-17.56	4.020
五角直線	651.1	-19.73	5.966
七角直線	679.5	-20.81	6.813

(2) 研究用パラメトリック適用型レーダシステムの開発

・七角形アンテナ指向性シミュレーション

アンテナ配置角度を変えることによる peak 値の変化、帯域幅の変化も限りなく少ないと言える。このことから、七角形ボウタイアンテナの角度を変化させても peak 値、帯域幅はともに変化が少ないことがわかった。そのため、地中レーダとして、地中方向へ電磁波を放出する際、アンテナが放出する電磁波は空気中に分散してしまうため指向性を持たせる必要があることが確認された。

・研究用地中レーダシステムの製作

地中レーダシステムを作成する際、アンテナが放出する電磁波が空気中に分散してしまうことを防ぐため、扇形の銅板でアンテナを覆い、空気中に電磁波が分散することを抑える必要がある。そこで、扇形の銅板のシールドを作製し、電磁波の放射に指向性を持たせた。図7の右に使用した七角形ボウタイアンテナと、図7の左に作成したシールドを示す。この七角形ボウタイアンテナは片方が送信用、もう一方は受信用である。このシールドの中に、電磁波が大気側へ放射しないよう図8に示すように遮断材（電波吸収体）を入れた。

七角形ボウタイアンテナと、遮断材を入れたシールドをコネクタでつなぎ、アクリル板に固定することで、アンテナシステムの完成とした（図9）。



図7 内蔵するボウタイアンテナと作成したシールド

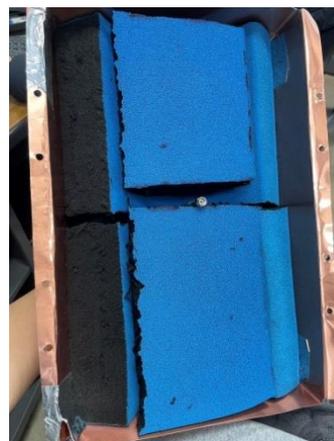


図8 遮断材の充填の様子

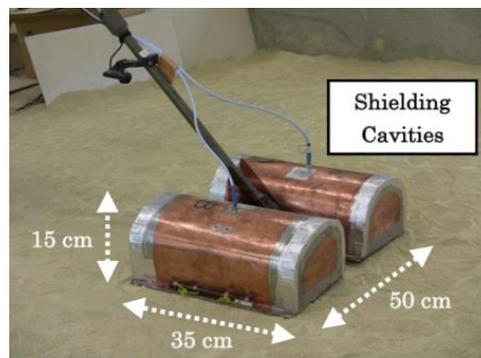
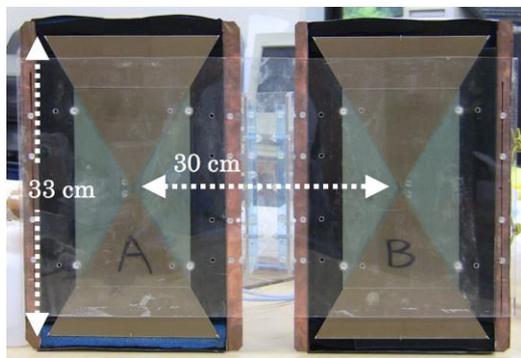


図9 完成したアンテナシステム（底部と側面）

参考文献

- [1] 河端洋人、城戸 隆、佐藤源之、電磁界シミュレータを用いた広帯域アンテナの周波数特性改善、平成 28 年電気学会全国大会（東北大学）、A103-C1：計測技術 計測基礎、1-027、第 1 分冊 p. 37（2016.3）
- [2] 城戸 隆・佐藤源之、広帯域連続波周波数掃引型地中レーダ、BUTSURI-TANSA, Vol. 69, No. 4 (2016) pp. 269-279
- [3] 橋口 渉、城戸 隆、佐藤 源之、“改良型地中レーダ用アンテナの試作及び評価,”電気関係学会四国支部連合大会, 第 7 分野 計測(I), Sept. 2019.
- [4] 高田 悠佑、城戸 隆、地中レーダ用超広帯域アンテナシステムの性能検証, 令和 6 年度 電気・電子・情報関係学会 四国支部連合大会発表予定、2024 年 9 月

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計 1 件）

- [5] 香川 礼都、白石 琉馬、城戸 隆、電磁界シミュレータを用いた広帯域アンテナの周波数帯域特性の改善, 令和 5 年度 電気・電子・情報関係学会 四国支部連合大会 講演論文集, 7 - 12、2023 年 9 月。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 香川 礼都, 白石 琉馬, 城戸 隆
2. 発表標題 電磁界シミュレータを用いた広帯域アンテナの周波数帯域特性の改善
3. 学会等名 令和5年度 電気・電子・情報関係学会 四国支部連合大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	香川 礼都 (Kagawa Raito)	新居浜工業高等専門学校・電子制御工学科 (56301)	
研究協力者	白石 琉馬 (Shiroishi Ryoma)	新居浜工業高等専門学校・電子制御工学科 (56301)	
連携研究者	佐藤 源之 (Sata Notoyuki) (40178778)	東日本国際大学・エジプト考古学研究所・客員教授 (31604)	

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
---------	---------