

令和元年9月5日現在

機関番号：56301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06400

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) More advanced polarimetric GPR techniques for detecting underground unexploded ordnances

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ポラリメトリック手法を適用させて、従来と比較して圧倒的に上回る不発弾検知性能を実現する超広帯域アンテナを持つ地中レーダを開発することを目的とした。

地中レーダの送信アンテナに対してある角度に埋設された金属パイプからの反射波を受信アンテナで出来るだけ詳細に受信するための最適ポラリメトリック配置条件の導出を電磁界シミュレーションにて行った。金属パイプの埋設角度の検知であれば、0度90度配置ペア受信アンテナの完全ポラリメトリック配置が一番高性能で、45度配置の受信アンテナでも程々の性能が期待できることが明らかとなった。

実環境ではより広帯域な曲線形ボウタイ広帯域アンテナの帯域特性の確認を終了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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。カンボジアやラオスなどがつての紛争地帯に残る不発弾(UXO)や対戦車地雷の人道的除去の試行的取り組みや国際活動に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of advanced GPR techniques for detecting underground unexploded ordnances (UXOs), ultra-wide frequency range antennas and their remarkable polarimetric configuration were developed and determined. The 90 degree and 0 degree received antenna configuration was expected to be the most excellent improvement for both detecting sensitivity and geometry recognition of UXOs. Also the 45 degree or -45 degree received antenna configuration was expected to be a certain improvement in spite of their simple system. More wide frequency range curved bowtie antenna was proposed and their ratio of 3 dB down high and low frequencies was as high as 7.0.

研究分野：工学

キーワード：地中レーダ 計測システム 不発弾 GPR polarimetry UXO

## 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。現在カンボジアで 100 個以上の実地雷を検知する実績を達成した。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 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

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のみが深部にある不発弾の検知に深度性能及び分解能の高次の両立が可能である。本研究は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、広帯域アンテナを有する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。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明らかに明瞭で高分解能であった。また、超広帯域アンテナを有する連続波周波数掃引型地中レーダは、周波数軸処理、逆フーリエ変換、時間軸処理、合成開口処理が可能であり、深度性能や分解能性能を高く維持できる適応範囲は極めて広い。またさらにポラリメトリック手法を適用することでさらなる高性能化が図れることを明らかにした。

( 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。

### **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、指向特性の優れたポ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 1m 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。

### **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ン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 ) 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

最適なポラリメトリックのアンテナ配置を確立するためのシミュレーション環境の内部図を図 1(a)、外見図を図 1(b)のように設計して解析を行った。送受信アンテナは地表面に接して設置され、土壌の深さを 1m とし、土壌の底部、側部、空気中の天部、側部は電磁波が反射しない境界条件を選んでいる。土壌内の深さ 60cm のところに金属パイプを設置した。金属パイプや受信アンテナを回転させることで最適なアンテナ配置条件を探った。

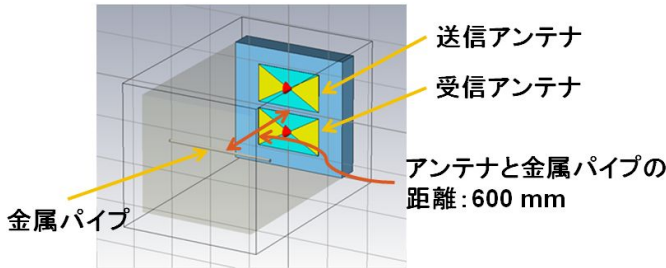


図 1 (a) シミュレーション環境内部透視図

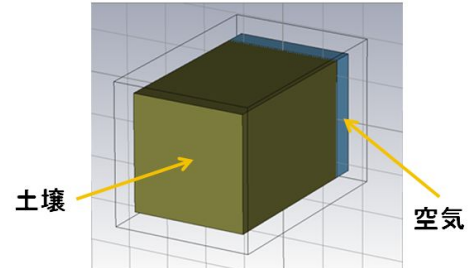


図 1 (b) シミュレーション環境外見図

##### ポラリメトリック(0) (従来、受信アンテナ配置 0°)

ポラリメトリック(0)では、図 2 に示すように送信アンテナに対して受信アンテナを平行(0°)に配置した。

図 3 に示されるように、反射強度は約 0.0003 と比較的高いのに対し、図 4 に示されるように、30° と 150°、60° と 120° といった対称の角度の金属パイプにおいては反射波が変化せず、同一となることが分かった。これでは反射波形から埋設物の角度判定する際に、判定度が低下し、対称の角度を正しく判別するために複数回の計測を行う必要がある。

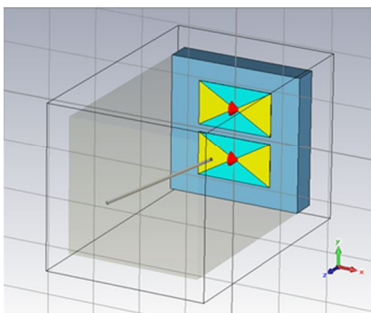


図 2 従来アンテナ配置

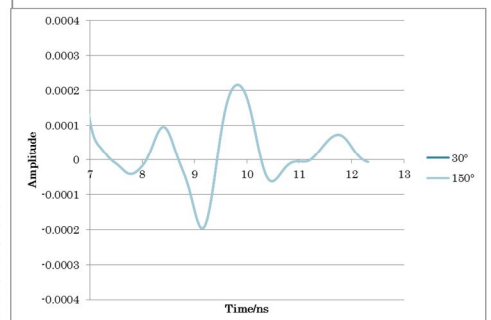
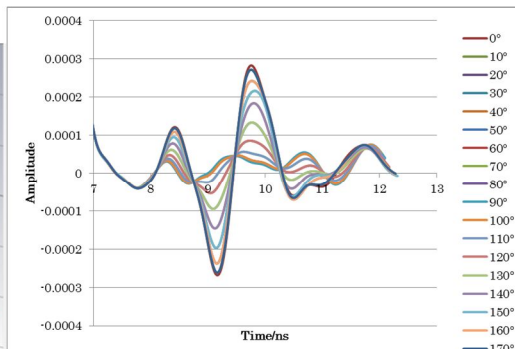


図 3、図 4 ポラリメトリック(0)配置の金属パイプ反射波形

(ポラリメトリック(0)、受信アンテナ配置角 0°) (金属パイプ配置角度: 0° ~ 170°)(配置角度: 30° と 150°)

##### ポラリメトリック(1) (受信アンテナ配置角 45°)

ポラリメトリック(1)では、図 5 に示すように送信アンテナに対して受信アンテナを 45°に配置した。

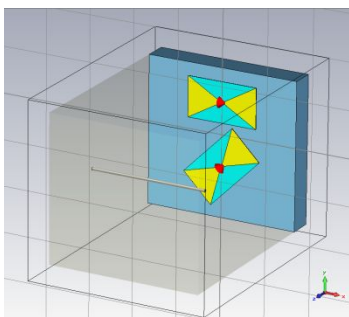


図 5 ポラリメトリック(1)アンテナ配置  
(受信アンテナ配置角 45°)

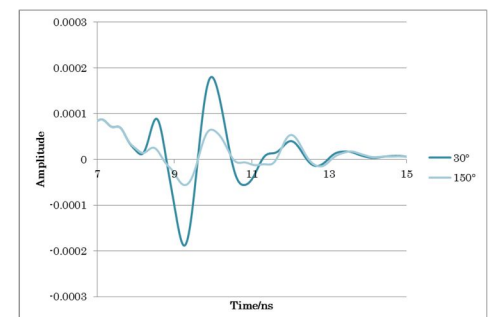
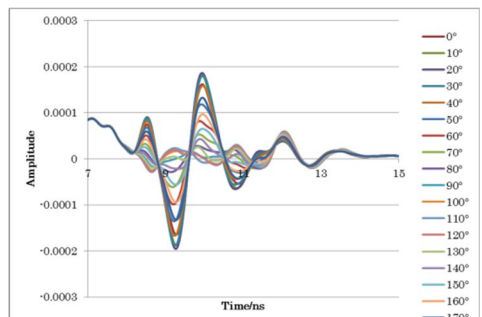


図 6、図 7 ポラリメトリック(1)配置の金属パイプ反射波形  
(金属パイプ配置角度: 0° ~ 170°)(配置角度: 30° と 150°)

ポラリメトリック(0)と同様に、金属パイプを、シミュレータ内の xy 平面上で 0~170°、10°毎に回転させシミュレーションを行った。図6に示されるように、反射強度は約0.0002と比較的高く、図7に示されるように、30°と150°、60°と120°といった対称の角度の金属パイプにおいては反射波が同一とはならないことが分かった。ただし反射波形の形状・傾向は大きくは変わっていない。ポラリメトリック(-1)の(受信アンテナ配置角-45°)の場合の傾向もポラリメトリック(1)と同様であった。

### ポラリメトリック(2) (受信アンテナ配置 90°)

ポラリメトリック(2)では、図8に示すように送信アンテナに対して受信アンテナを90°に配置した。

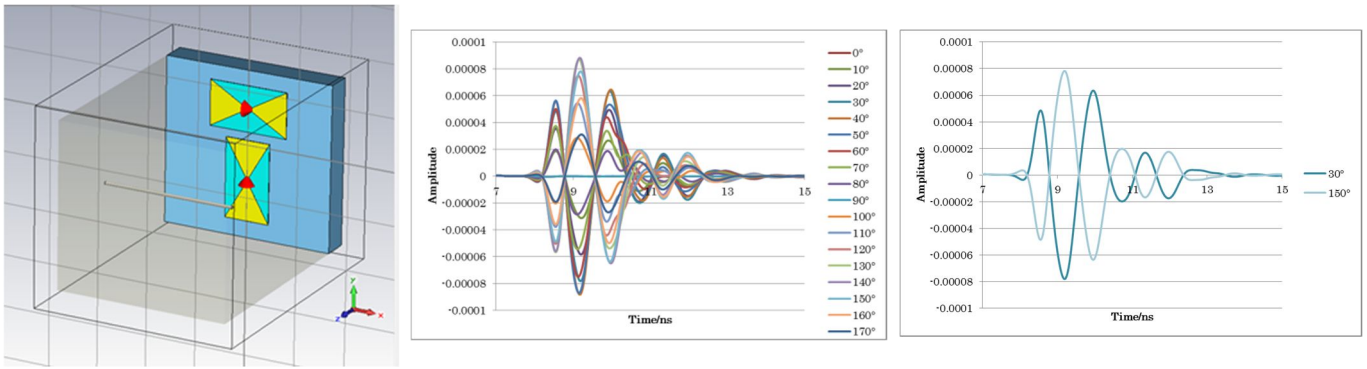


図8 ポラリメトリック(2)アンテナ配置 図9、図10 ポラリメトリック(2)配置の金属パイプ反射波  
(受信アンテナ配置角 90°) (金属パイプ配置角度：0° ~ 170°)(配置角度：30°と150°)

ポラリメトリック(0)、(1)と同様に、金属パイプを、シミュレータ内の xy 平面上で 0~170°、10°毎に回転させシミュレーションを行った。図9に示されるように、反射強度は約0.00009と他に比べて低く、図10に示されるように、30°と150°、60°と120°といった対称の角度の金属パイプにおいては反射波の波形が反転し大きく異なることが分かった。また90°配置の金属パイプでは反射波が検出できないことが分かった。

## (2) 各ポラリメトリック配置方式の比較検討

### ポラリメトリック(0) (従来、受信アンテナ配置 0°)

送受信アンテナの指向性の主軸が平行であるので どの角度に配置された金属パイプに対しても大きな反射強度が得られている。検出感度という点に関しては最も優れているが、30°と150°、60°と120°といった対称の角度の金属パイプにおいては反射波が同一となることから、反射波形から埋設物の角度判定する能力は高くない。ポラリメトリック(0)単独では能力不足と判定された。

### ポラリメトリック(1) (受信アンテナ配置角 45°)

ポラリメトリック(1)では送信アンテナに対して受信アンテナを45°に配置した。どの角度に配置された金属パイプに対してもある程度の大きさで反射強度が得られている。検出感度という点に関してはポラリメトリック(0)に比べ若干劣るが、30°と150°、60°と120°といった対称の角度の金属パイプにおいては反射波が同一とならないことから、反射波形から埋設物の角度判定する能力の向上はある程度期待できる。ポラリメトリック(1)配置単独で簡易的なシステムとしてある程度使いそうである。

### ポラリメトリック(-1) (受信アンテナ配置角-45°)

ポラリメトリック(1)と同様で、反射波形から埋設物の角度判定する能力の向上はある程度期待できる。ポラリメトリック(1)配置単独で簡易的なシステムとしてある程度使いそうである。

### ポラリメトリック(2) (受信アンテナ配置 90°)

送受信アンテナの指向性の主軸が垂直であるので 検出感度という点に関しては最も劣っている。特に受信アン

テナ配置 90°と同じ 90°配置の金属パイプでは反射波が殆ど検出できないというデメリットがある。しかしながら、30°と 150°、60°と 120°といった対称の角度の金属パイプにおいては反射波の波形が反転し大きく異なることが分かった。反射波形から埋設物の角度判定する能力の向上は大いに期待できる。ポラリメトリック(2)配置はデメリットが多く単独では使うことは厳しい。他と併用でデメリットを解消できる可能性がある。

**ポラリメトリック(2) とポラリメトリック(0)の併用**

システムとして大型化、複雑化する欠点はあるが、それぞれのポラリメトリック配置のそれぞれのデメリットを解消し、メリットを活かすことが出来る構成である。従来と変わらない検出感度と反射波形から埋設物の角度判定する能力の向上が期待できる。検出ではポラリメトリック(0)側をメインで使い、埋設物の角度判定時にはポラリメトリック(1)側をメインで両者をうまく併用出来る。

**ポラリメトリック(1) とポラリメトリック(-1)の併用**

システムとして大型化、複雑化する欠点はある。それぞれのポラリメトリック配置のそれぞれのメリット、デメリットが同じなので、併用した場合に特にデメリットを解消することが出来るかの判断が難しい。処理としても両者のポラリメトリック配置の結果を完全に同等で取り扱い、検出、角度判定まで行わなければならない。

**(3) 地中レーダ用アンテナのさらなる広帯域化**

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確立する必要がある。既に従来の正三角形型ボウタイアンテナ(図 11)の性能を上回る五角形型ボウタイアンテナ(図 12)を提案してきた。今回この五角形型ボウタイアンテナをもとに図 13 に示す曲線型ボウタイアンテナを設計し、シミュレーションを行ったところさらに広帯域な結果が得られた。

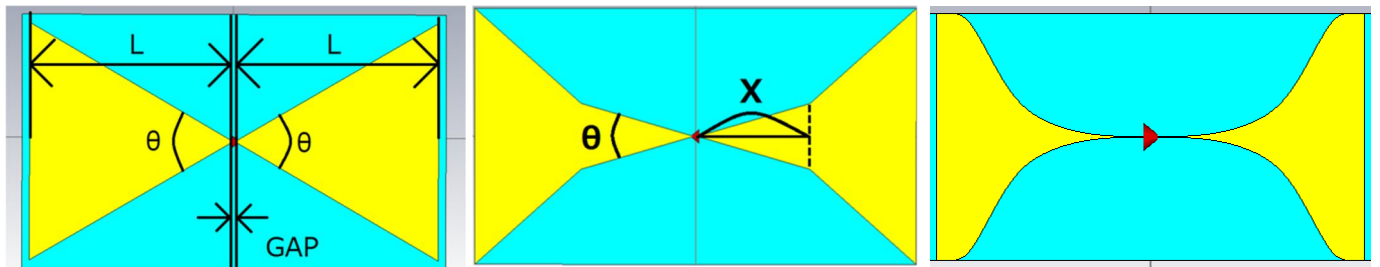


図 11 従来型正三角形ボウタイアンテナ 図 12 既開発の五角形ボウタイアンテナ 図 13 今回開発の曲線形ボウタイアンテナ

表 1 にそれぞれのアンテナ(正三角形、五角形、曲線形)の帯域特性をまとめて比較したもの、図 14、図 15 にそれぞれのアンテナの周波数帯域特性の比較を示す。

曲線形ボウタイアンテナは同一基板サイズで周波数の-3dB 下限周波数と-3dB 上限周波数対-3dB 下限周波数比が優れていることが分かる。

表 1 各アンテナの帯域特性の比較(シミュレーション)

	正三角形ボウタイ アンテナ	五角形ボウタイ アンテナ	曲線形ボウタイ アンテナ
$f_L(-3dB)$ GHz	0.203	0.169	0.161
$f_H(-3dB)$ GHz	1.091	1.153	1.128
BW GHz	0.888	0.984	0.967
$f_H/f_L$	5.382	6.809	7.020



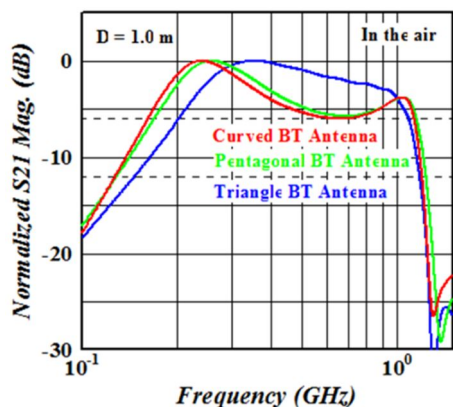


図 14 各アンテナの帯域特性の比較(対数)

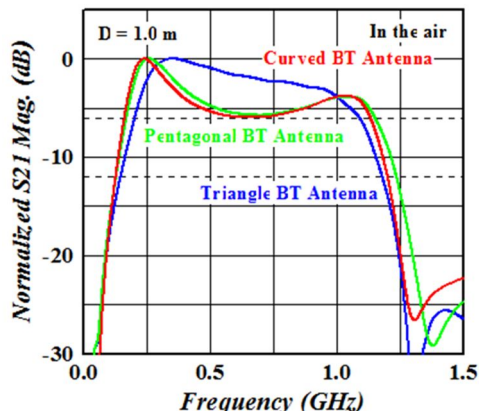


図 15 各アンテナの帯域特性の比較(リニア)

#### (4) まとめ

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なかで、本研究は個別の不発弾にポ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た。まずポリメトリック型のアンテナの配置として、システムとして大型化、複雑化する欠点はあるが、ポリメトリック(90°配置)とポリメトリック(0°配置)の併用が最も高性能化が期待でき、続いてポリメトリック(45°配置)とポリメトリック(-45°配置)の併用、及びポリメトリック(45°配置)である程度の高性能化が期待できそうであることがシミュレーションにより明らかとなった。

またボウタイアンテナとして曲線形とすることでさらに広帯域化が可能であることが明らかとなった。

現在、実際に曲線形ボウタイアンテナを作製し、シミュレーション通りの性能が出ることを確認中であり、その後電波吸収体を詰めたキャビティにおさめてアンテナモジュールが完成する。そのアンテナモジュールを上記ポリメトリック配置に設置することで高性能化の確認が出来る状態となる予定である。今後、アンテナの広帯域化の検証結果やポリメトリック配置による高性能化の検証を行い、その結果を学会で発表する予定である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

城戸 隆, 佐藤源之(東北大学), 「広帯域連続波周波数掃引型地中レーダ」, 物理探査, 第 69 巻, 第 4 号, pp. 269-280, 2016 年 10 月, (査読有り), <https://doi.org/10.3124/segj.69.269> .

〔学会発表〕(計 1 件)

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, 2016 年 3 月 .

#### 6. 研究組織

##### (1) 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: 7 0 3 9 0 9 9 5

##### (2) 連携研究者

佐藤 源之 (Sato Motoyuki)

東北大学・東北アジア研究センター・教授

研究者番号: 4 0 1 7 8 7 7 8