

1. はじめに

金属探知器は、現在最も普及している地雷探査装置であり、アフガニスタンでは既に 2000 台以上が稼働しています。アフガニスタンでは国連組織である UNMACA (アフガニスタン地雷対策センター) が金属探知器による地雷除去活動を NGO を組織的に運営することで地雷除去訓練、除去作業を行っています。金属探知器は軽量・簡便で比較的短期の訓練で利用できます。現状の作業では金属を検知したとき探知機が発する音を聴いて地雷の位置を推定しますが、金属の周囲でも反応するため正確な埋設位置を推定するには熟練が必要です。

最新の金属探知器は、プラスチック地雷に含まれる微細な金属を検知することが可能ですので、地下 10cm 程度までに埋設されている地雷はほぼ 100% 検知可能です。ところが、地雷除去地域では爆弾の破片、釘など地雷以外の金属片が多数土壌に含まれるため、金属探知器が検知する 1000 個の異常信号のうち本当の地雷は 1 個程度にすぎないという報告もなされています。従って、実際地雷検知の問題は多数の誤信号からどうやって本物の地雷を見分けるかにあります。

金属探知器と並んで地雷検知への利用が有望視されている探査方法が、地中レーダ (Ground Penetrating Radar : GPR) です。GPR は埋設されたパイプ検知等に実用化されており、一般の GPR は信号を画像化するため容易に埋設物を検知できるから金属探知器ほどの熟練も必要としません。しかし、既存の GPR 装置は地雷検知のために大幅な改良が必要であり、現在までにアフガニスタンで実用的に地雷検知に利用されている GPR はありません。

2. 金属探知器と地中レーダの原理と複合利用

金属探知器は、10kHz 程度の交流電流を送信コイルに流して交流磁界を地中に発生させます。この交流磁界は地中の金属など導電性物質の内部にファラデーの電磁誘導の原理によって渦電流を発生させます。この渦電流が 2 次的に発生する誘導磁界を受信コイルが検知することで金属の有無を判断するものです。

一方、地中レーダは 1GHz 以上の高周波電磁波パルスを送信し、地中物体から反射された電波を受信アンテナで捉えることで、地中に埋設物が存在する事を探知する手法です。(地中を伝搬する電磁波は、土壌の誘電率と異なる物質が存在する場合に反射します。) 電波の反射は強度の差はあるものの、金属、非金属を問わず発生します。

金属探知器で 100% の金属を探知したうえで、一つずつの金属が地雷であるか否かについて地中レーダを利用して識別しようとするのが本プロジェクトの基本思想です。2 つの手法の特長を活かし、検知作業の信頼性を金属探知器で保ちながら地中レーダによる識別で効率を向上させることを目指します。

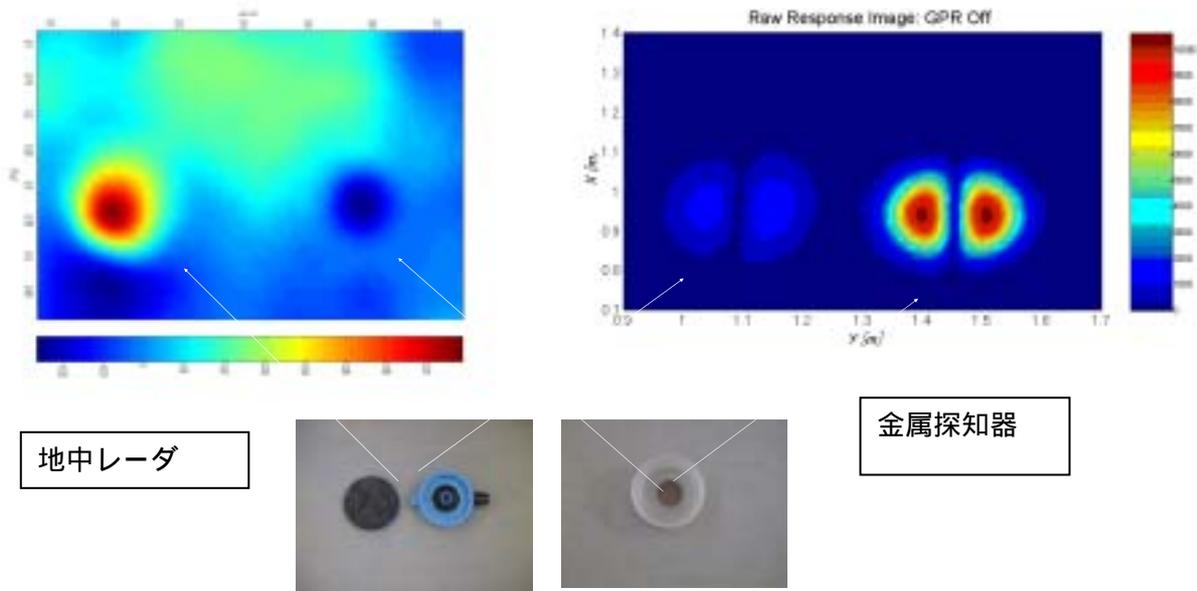


図 1 金属探知器と地中レーダの応答

3. 地雷検知用 GPR の技術的難しさ

ガス管などを検知するのと比較して地雷検知特有の技術的な問題があるため、本プロジェクトでは全く新しい GPR を開発しています。難しさの一つは、対人地雷は形状が小さく、材質のプラスチックや TNT 火

薬は土壌と類似した電気特性をもつために反射が弱いという点です。また、地雷が浅い位置に埋められているため地表面の反射波と紛れてしまう上、不均質な土壌から起こるランダムな散乱（クラッタ）が地雷の反射を覆ってしまいます。更に、土質や水分量が場所によって違うため土壌条件は一定ではないという問題もあります。

こうした問題を解決するため、本プロジェクトではハードウェアとして広帯域、高速なデータ取得可能な装置開発、ソフトウェアとしてランダムな散乱による影響を低減する手法の技術開発に取り組みました。特に、多数のアンテナを並べたアンテナアレイを移動しながらデータを取得し、コンピュータ上で信号処理して画像化する手法は衛星リモートセンシングで利用されている合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar : SAR)と同一技術であるため、開発装置を SAR-GPR と名付けました。

4 . SAR-GPR の実用化

SAR-GPR を実用化するため以下の研究を行ってきました。

1. 広帯域 GPR 用アレイ・アンテナの開発
2. 粗い土壌に適用する可視化アルゴリズムの開発
3. 送受信小型ネットワークアナライザの開発
4. 現地での使用法の検討



図2 SAR-GPR を搭載する小型車両



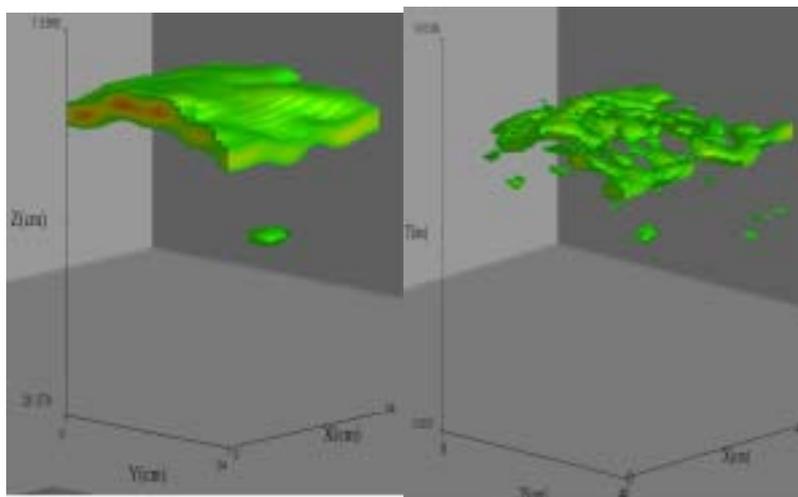
図3 SAR-GPR の評価実験

SAR-GPR はクラッタ除去のためにアンテナを多数並べたアレイ・アンテナを利用します。また、新たに開発したビバルディアンテナは、10MHz-4GHz の広帯域性を有する上、平面形状であるため製作が容易であり、多数のアンテナをアレイ配置するのに適しています。

クラッタはアンテナに対してランダム信号なのに対し、人工物である地雷からの反射は空間的相関性が強いという特徴があります。つまり、送受信アンテナの位置を変えても一定した反射信号が受信できますので、多くのアンテナ位置と送受信アンテナの組み合わせで取得した信号をコンピュータ上で合成して3次元イメージが合成できます。本プロジェクトで開発した信号処理技術は、地震波を使って石油を探索するために開発された手法を応用し、改良を加えたものです。従来の GPR 研究でこれほど積極的に信号処理を利用した例はありません。



図4 地中レーダテスト中の SAR-GPR アンテナ



(a)生波形

(b)SAR-GPR 波形

図5 SAR-GPR で取得した地中レーダ波形

レーダ装置本体には、ベクトルネットワークアナライザと呼ばれる高周波用計測器を利用します。従来のベクトルネットワークアナライザは重量が 30kg 以上あり、屋外では使用できない精密電子機器でしたが、今回は、重量 3kg 以下の小型・携帯型のベクトルネットワークアナライザを新たに開発しています。更に、小型でありながら計測の高速化を極限まで追求しており、地雷除去作業の高速化を可能にします。本計測器は広帯域の高周波計測に適しており、地雷検知用 GPR だけではなく、今後、通信機器、IT 機器の開発、研究、メンテナンスにも応用が期待できます。

開発した SAR-GPR 装置は小型車両のセンサアームに装着して使用しますが、センサ自体の特性を精密に評価するため、図 4 に示す機械的にセンサを動かす X-Y ステージで実験を行っています。図 5 に SAR-GPR で取得した地中レーダ波形をそのまま表示したもの（生波形）と SAR-GPR で信号処理した波形を比較して示します。信号処理によって、地表面からのクラッタと埋設されたプラスチック地雷が明確に分離して検知できることがわかります。実際の SAR-GPR は、金属探知器と連動して検知作業を行います。

5 ハンドヘルド型地雷可視化装置 (ALIS)

更に我々の研究グループでは小型車両搭載センサを開発した技術を活かし、地雷除去作業員が手動で使用できるハンドヘルド型探知機(ALIS)を開発しています。ALIS では地中レーダと金属探知機のセンサを一体化します。図 6 に示すように ALIS の操作は従来の金属探知器のそれと変わりありません。しかし探知機の持ち手部分には小型カメラを装着し、センサの位置を追従し作業員が右目に着けたモニター画面に映します。その映像に重ねて探知機が確認した地雷の位置を表示します。探知機の情報、無線で別の場所にあるパソコンに送られて画像処理され、水平断面図や立体図に再現、従来のハンドヘルド型の欠点であった、探知機の音から地雷の位置を経験的に探すのではなく、画像を見ながら判断することで除去作業の信頼性を格段に向上させます。図 7 は地雷除去作業員が見る ALIS の出力画像です。誰にでも埋設地雷の位置が簡単に認識できます。



図6 ハンドヘルド型センサ ALIS の構造

図7 地雷除去作業員が見る ALIS の出力画像