

FDTD シミュレーションによる 地雷探知地中レーダ用アレイアンテナ間隔の最適化

小林 敬生^{1,2} 佐藤 源之²

1. 科学技術振興機構
2. 東北大学東北アジア研究センター

1. はじめに

地雷は、陸上兵力の展開を抑制する安価で効果的な手段として、世界各地の武力紛争・戦争の現場で広く使用されてきた。埋設された地雷は紛争・戦争終結後も長期間にわたりその機能が温存され、平時に移行した後の経済復興活動の重大な妨げとなっている。紛争が終結した地域ではこれら残置地雷の除去が焦眉の急をなす問題となっている。現在世界中で残置されている地雷の総数は $10^7 \sim 10^8$ と見積もられている^{[1][2]}。

埋設残置地雷の探知に最も広く利用されている道具は金属探知器である。金属探知器はその動作原理が単純で扱いが簡単である。また優れた感度を持っているため、熟練者は100%の探知率を誇る。しかし、その一方で感度の高さが災いして、目標とする地雷を1個探知するまでに、周囲に散乱する金属片による誤警報を $10^2 \sim 10^3$ 個も数えるという。このため、金属探知器による埋設地雷探知は非常に効率の悪い作業となっている。

アフガニスタンは今まさにその地雷除去作業が行なわれている国であるが、我々のグループは、日本政府による同国復興支援の一環として人道的地雷除去活動の現場に新しい地雷探知技術を供与する^[3]ことを直接の目的として、地雷探知用の地中レーダ（GPR）を開発している^{[4]~[11]}。開発中のGPRは金属探知器と併用されることを前提としており、地中物体を可視化して探知物体判断のための画像情報を作業者に提供することにより金属探知機単体の地雷探知作業では避けることのできない高頻度の誤警報を大幅に減少させることを目指している。本研究では今年度中に地雷探知GPR実証機の開発・製作を終え、2005年夏には実際に実証機をアフガニスタンへ持って行って現地での試験を行なう予定である。

ところで、通常の技術開発では、その技術が使われるさまざまな条件を想定した実験を行ない、実験結果をもとに設計の最適化を進めて最終的な設計仕様を決める。我々が開発をしているGPRもその例外ではない。しかし、地雷探知GPRの運用条件を特徴づける重要なパラメータである土壌の水分率あるいは、地表面粗さは研究室レベルの実験では制御をすることが事実上不可能なパラメータであるためこれらの影響評価を適切に行なうことができない。そこで、我々は代替手段としてコンピュータによるシミュレーションを行なうこととし、

FDTD法に基づくシミュレーションコードを開発した。FDTD法は時間領域で直接Maxwellの方程式を解くアルゴリズム^[12]で、電磁場の過渡変化の問題を数値的に解く手段として広く応用されている^[13]。

本稿は、開発中の GPR の性能におけるアンテナの影響の評価をした際、実験室実験と並行して行なった FDTD シミュレーションのひとつについて紹介する。

2. 地雷探知 GPR

2. 1 地雷探知 GPR システム

図 1 に開発中の地雷探知GPR実験室モデルのブロック図を示す。この地雷探知 GPR はネットワークアナライザをベースにして作られた超広帯域（30kHz-6GHz）ステップ周波数型レーダである。その大きな特徴はCMP（Common Mid Point）法とDiffraction stacking法^[14]を組み合わせたデータ処理により従来のGPRに比べはるかに鮮明な地中物体の画像を再構成すること^[15]、そして、CMP法適用のために最適化されたアレイアンテナ（図 2）を用いていることである。このアレイアンテナは 3～5 対の送受信アンテナで構成され、アンテナの配置はそれぞれのアンテナ対をアレイ基線中心に関して対称的におくCMP配置となっている。送受信アンテナには広い帯域で良好な特性をもつビバルディアンテナを用いている。

実験室実験では、アンテナ先端位置を平均地表面から数cmの高さの水平面内に保ちつつ 2 次元的に走査し、格子点間隔数cmの各格子点上ですべてのアンテナ対による計測を行なう。得られたデータはまず、各計測点において得られたデータセットについてCMP処理を行ない、その結果得られるCMPデータに対してDiffraction stacking処理を行なって地中の 3 次元画像データを得る^[15]。

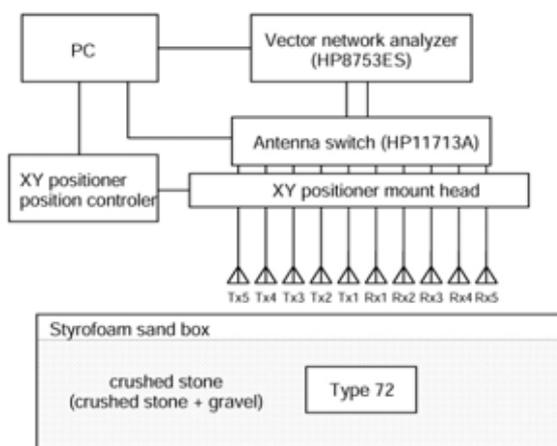


図 1 GPR システムブロック図



図 2 GPR アレイアンテナ



図3 粗い地表面モデル

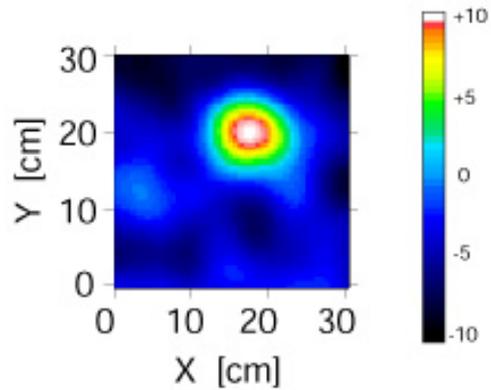


図4 GPR 画像（地中水平断面図）

2. 2 実験室実験

後出のシミュレーション結果との比較のため、実験室実験の結果を簡単に紹介する。

実験は **CMP** アレイアンテナのアンテナ間隔が **GPR** 性能に及ぼす影響を調べることを目的として行なわれた。アレイアンテナは 5 対の送受信アンテナで構成されている。アンテナ間隔を実験パラメータとし、それを 2cm から 5cm まで 1cm 刻みで変化させた。この実験では、40cm×70cm×30cm の発砲スチロール製の箱に碎石を入れて模擬地雷原をつくり、そこに **Type-72** と呼ばれる対人地雷の模型をその上面が平均地表面から約 5cm の深さになるよう水平に埋設した。**Type-72** は直径 78mm、厚さ 40mm の円柱形をしておりアフガニスタンの紛争中最も多く使われた対人地雷のひとつである。この模擬地雷原の 40cm×40cm の範囲を格子点間隔 1 cm で 2 次元走査計測した。

模擬地雷原の地表面は平らな面と粗い面の 2 面を用意した。地表面粗さのパラメータはレーザ距離計による高さ分布の測定から知ることが出来る。粗い地表面（図 3）は、その **RMS** 高さ h_{RMS} が 17mm、相関長 l_{cor} は 20mm であった。

データ処理の結果得られた地中水平断面図の 1 例（アンテナ間隔 4cm、粗い地表面の場合）を図 4 に示す。わずかに歪んだ円形のイメージがはっきりと認められるが、これが **Type-72** 地雷モデルのイメージである。地雷イメージの背景にランダムなクラッタイメージが認められることに注目されたい。これは、ランダムな凹凸をもつ地表面や不均一な地中からの散乱波（クラッタ）の影響である。

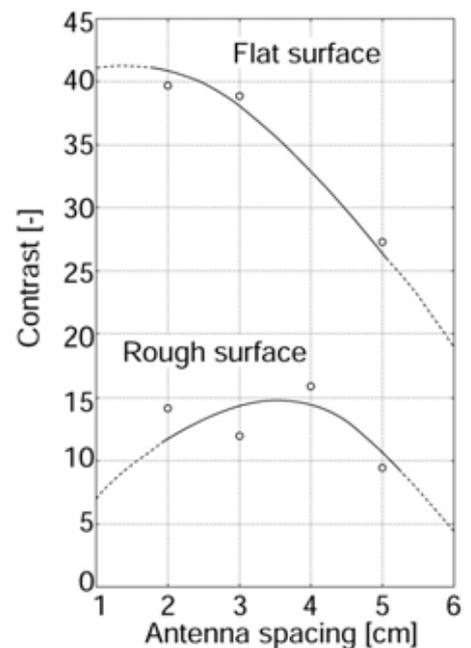


図5 イメージコントラスト

2. 3 GPR 性能評価

本 GPR の性能は背景クラッタイメージに対する目標物イメージ識別の容易さで評価される。この評価を定量的に行なうため目標物イメージピクセル値と背景クラッタピクセル値標準偏差の比をとって評価パラメータとし、イメージコントラストと名づけた。

図 5 に実験で得られた Type-72 のイメージコントラストとアンテナ間隔の関係を表すプロット図を示す。多少バラつきはあるものの、この図より平面地表面についてはアンテナ間隔が 2cm の場合にイメージコントラストが最大となり、粗い地表面についてはアンテナ間隔が 3-4 cm の場合にそれが最大となることがわかる。イメージコントラストが最大となるようなアンテナ間隔がアレイアンテナ間隔の最適値であると判断できるから、この結果からアレイアンテナ間隔には地表面の粗さに応じた最適値があると結論できる。

3. FDTD シミュレーション

3. 1 目的

前項では、GPR 計測の実験結果を紹介し、アレイアンテナ間隔には地表面の粗さに応じた最適値があると結論づけた。粗い地表面の場合にはアレイアンテナのアンテナ間隔の最適値は約 3-4cm である。しかし、実験で用いたランダム粗面は 1 面だけであり、図 5 にプロットされた粗い地表面の場合のイメージコントラストにはランダム現象にみられる結果のバラつきもあるようである。したがって、他にも地表面のランダム粗面を変えて同様の評価をして同様の結論が得られるかどうかを確認する必要がある。このような理由から、前項の実験の追試実験を行なうことを目的として前述したシミュレーションコードを利用して、GPR 計測の 3 次元 FDTD シミュレーションを行なった。

3. 2 モデル

シミュレーション空間は空気（比誘電率 1）と土壌（比誘電率 4）の 2 領域に分けられ領域境界面（地表面）はガウシアンランダム粗面となっている。このランダム面粗さのパラメータは前項の実験で求めた粗さパラメータと同じ値を用いた ($h_{RMS}=17\text{mm}$, $l_{cor}=20\text{mm}$)。このモデルでは更に地下媒質の不均一を表現するために、3 軸不等楕円体の礫（比誘電率 5.3）を地表面と地下に分布させた。礫の大きさの代表値は $40\times 40\times 20\text{mm}$ である。礫と土壌の体積比率は 1 : 1 とした。各礫の寸法と位置はモンテ・カルロ法で決めている。

目標物は Type-72 地雷モデルを模擬する円柱物体（比誘電率 3）で、その寸法は直径 78mm、高さ 40mm である。埋設位置は物体重心が地表平均面から 10cm の深さとなる位置である。図 6 に以上記述したモデルの鉛直断面図を示す。

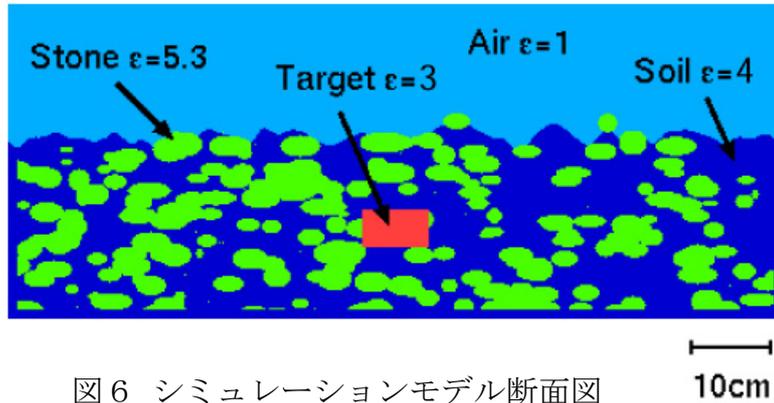


図6 シミュレーションモデル断面図

アンテナは送信アンテナを長さ 34mmのダイポールアンテナとして細線アンテナモデル^[16]とギャップ給電モデル^[17]によりモデル化した。送信アンテナは $\sigma = 75[\text{psec}]$ のガウシアンパルスで励振した。アンテナより送信されたレーダパルスの周波数帯域はおよそ 3~6 GHzと見積もられた。受信アンテナはモデル化せず、受信信号は受信点における電場（アンテナに平行な成分）の値で代表させた。送信アンテナ位置、受信点位置はともに地表平均面上 10cmの位置とした。

FDTD法で実用的な計算精度を得るためにはグリッド間隔の大きさを、問題とする電磁波長の 1/10 以下にする必要がある^[13]。本稿で扱うレーダパルスの周波数帯域は 30kHz-6GHzの範囲であるから、相当する電磁波長は真空中で最短 5cmである。しかし、地下媒質は比誘電率 4 あるいは 5.3 の物質であるから地下を伝搬するレーダパルスの最短波長成分は 25mmないし 22mmとなる。そのため、十分な精度を出すためにはグリッド間隔を 2.2mm以下にする必要があることになる。このような理由から、シミュレーションモデルのグリッド間隔は 2mmとした。

前項の実験室実験を計算機シミュレーションで再現するためには最大探知深度と等価な深度（距離）内のすべての地表面クラッタを考慮に入れる必要がある。地下 15cm を最大探知深度と定めると、アンテナの位置が地表面より 10cmの高さにあることを考慮して、空気中での等価深度は 40 ないし 44cm となる。この最大探知等価深度をカバーするため本モデルではシミュレーション空間の大きさ 100×100×35cm として、500×500×175 グリッドで構成した。

本稿の場合、このシミュレーションで必要としたメモリは 110GB であった。今日の PC の能力は一昔前のスーパーコンピュータ並みで、PC 上で走る FDTD シミュレーションコードも市販されている。しかし、本研究で必要とする莫大なメモリ空間を備えた PC はない。本稿で行なう大規模シミュレーションはスーパーコンピュータでなければ行なえないものである。

さて、シミュレーションでは実験室実験同様、アンテナを 2 次元的に走査し、格子点間隔 1cm の格子点上で GPR 計測を行なう。データ処理についても実験室実験同様に行なう。以下実験室実験と同様の手順で結果を評価する。

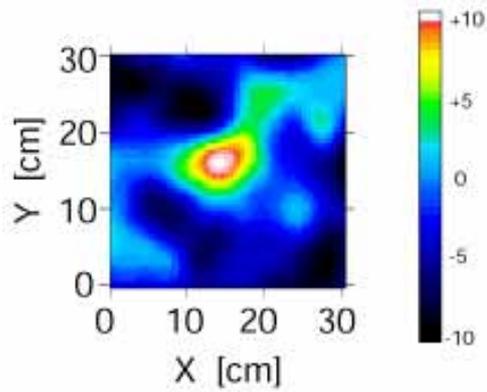


図7 FDTD シミュレーション結果
(アンテナ間隔 3cm. 地中水平断面図)

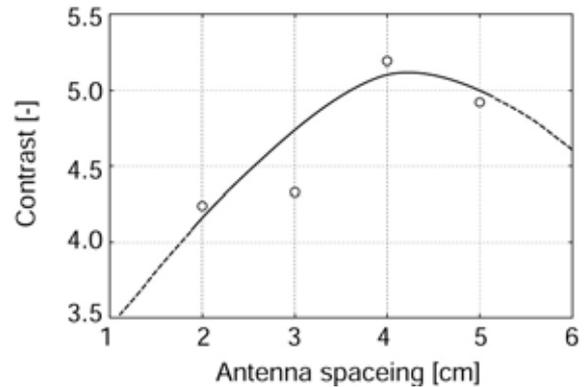


図8 FDTD シミュレーションによる
イメージコントラスト

3. 3 結果

図7にシミュレーションの結果として得られた地下水平断面図の一例を示す。これはアンテナ間隔が 3cm の場合の結果である。画像のほぼ中心に目標物の Type-72 のイメージが確認される。背景のクラッタイメージは図4のそれより強く現れている。地表面からの散乱のみならず、地下の礫による散乱の効果が強いためであるが、これは、シミュレーションで導入した礫の誘電率のコントラストが実験で用いた碎石のそれよりも大きいためであると考えられる。また、送信アンテナがダイポールアンテナであるために送信パルスの周波数帯域が実験で用いたビバルディアンテナのそれよりも小さいことがパルス波形の差異を生じさせ、それも画像に影響を与えている。

図7に例を示したシミュレーション結果についてイメージコントラストを計算しプロットしたものが図8である。イメージコントラストの変化の傾向が実験室実験の結果から得られたもの(図5)と非常によく似ていることが注目される。このシミュレーションの結果では、アンテナ間隔が約 4cm の場合に目標物のイメージコントラストが最大になり、したがって、この 4cm がアレイアンテナ間隔の最適値であると結論できる。

同じランダム粗面パラメータ条件の下、アンテナタイプ、周波数帯域などいくつかの実験パラメータの違いにもかかわらず、このシミュレーションで実験室実験とほぼ同様の結果を得た事実は、アレイアンテナ間隔の大きさには地表面粗さに応じた最適値が存在することを示している。

4. コーディングで遭遇した問題

FDTD 法は Maxwell の方程式が持つ簡潔かつ対称的な構造のおかげでベクトル化・並列化処理に向けたアルゴリズムである。実際、コーディングに際しては殊更コンパイルの最適化を意識しなくともベクトル化率 99%以上、並列化率

90%を達成することはそれほど難しくはなかった。

しかし、実際にシミュレーションを始めると、時々、奇妙な問題に悩まされた。8 並列計算にくらべ 16 並列計算の方が計算に数倍の時間がかかるというものである。不可解なことにこの現象は再現性のない現象で、同条件の計算を行なっても発生する場合と発生しない場合がある。結局、自力での解決は諦めて利用相談室へ行ったのだが、解決法は意外なもので、並列化されている DO ループの繰り返し回数を奇数にするというものであった。コンパイラの癖で時々発生する現象であるとのことだが、コンパイラのバージョンアップの際に解決が望まれる点である。

5. むすび

本稿では、アレイアンテナ間隔が地雷探知 GPR の性能に及ぼす影響を調べる FDTD シミュレーションについて紹介した。FDTD シミュレーションは実験室実験を忠実に模擬するため大規模なものとなった。シミュレーションでは、先立って行なわれた実験で認められたアレイアンテナ間隔最適値の存在が再現された。開発中の実証機ではこの結果をもとにアレイアンテナ間隔が決定されている。

謝辞

本研究は科学技術振興機構のプロジェクト「人道的観点からの対人地雷の探知・除去活動を支援するセンシング技術、アクセス・制御技術の研究開発」として行なわれた。また、本研究の FDTD シミュレーションコードの開発は東北大学シナジーセンターとの共同開発として進められた。

参考文献

- [1] J. MacDonald et al, Alternatives for Landmine Detection, RAND, Santa Monica, U.S., 2003
- [2] 神保哲生、地雷レポート、築地書館、1997
- [3] <http://www.jst.go.jp/kisoken/jirai/index.html>
- [4] M. Sato, Z. Zeng, G. Fang, X. Feng , Stepped-frequency GPR system for Landmine detection, Detection and remediation technologies for mines and minelike targets VIII, Orland, FL, USA, pp.179-184, April, 2003
- [5] M. Sato, G. Fang and Z. Zeng, Landmine detection by a broadband GPR system, Proc. IEEE Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing, IGARSS2003, Toulouse,

France, CD-R, July, 2003

- [6] 小林敬生 佐藤源之, 3次元 FDTD 法による地雷探査用地中レーダの解析, 信学技報, A・P2003-117, pp.7-11, August, 2003
- [7] 小林敬生 馮暉 佐藤源之, アレイアンテナを用いた SAR-GPR の開発, 信学技報, SANE2003-60, pp.41-45, September, 2003
- [8] X. Feng and M. Sato, The application of migration to SAR-GPR system for landmine detection, 信学技報, SANE2003-66, pp.77-82, September, 2003
- [9] M. Sato, T. Kobayashi, Z. Zeng, G. Fang, and X. Feng, High resolution GPR system for landmine detection, Proceedings of Int. Conf. Requirements and Technologies for the Detecion, Removal and Neutralization of Landmine and UXO, Brussels, Belgium, pp548-553, September, 2003
- [10] T. Kobayashi and M. Sato, FDTD simulation on array antenna SAR-GPR for land mine detection, Proceedings of SSR2003:1st Int. Symp. on Systems and Human Science, Osaka, Japan, 279-283, October, 2003
- [11] M. Sato, Y. Hamada, X. Feng, F.-N. Kong, Z. Zeng, G. Fang, GPR using an array antenna for landmine detection, Near Surface Geophysics, 2, February, 2004, 3-9,
- [12] K. S. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 14, pp. 302-307, 1966
- [13] A. Taflove and S. C. Hagness, Computational Electrodynamics 2nd ed., Artech House, Boston, U.S.A., 2000
- [14] Özdoğan Yilmaz, Seismic Data Processing, Society of Exploration Geophysicists, 1987
- [15] M. Sato, Y. Hamada, X. Feng, F. Kong, Z. Zeng, and G. Feng, GPR using an array antenna for landmine detection, *Near Surface Geophysics*, pp7-13, 2004
- [16] K. R. Umashankar, A. Taflove, and B. Beker, Calculation and experimental validation of induced currents on coupled wires in an arbitrary shaped cavity, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 35, pp. 1248-1257, 1987
- [17] S. Watanabe and M. Taki, An improved FDTD model for the feeding gap of a thin-wire antenna, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 8, pp.152-154, 1998