

## 平成16年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな		さとう もとゆき		所属研究機関・部局・職		東北大学・東北アジア研究センター・教授	
研究代表者氏名		佐藤 源之		所属研究機関・部局・職		東北大学・東北アジア研究センター・教授	
研究課題名	和文	ポーラリメトリック・インターフェロメトリックレーダによる地雷検知に関する研究					
	英文	Land Mine Detection by Polarimetric and Interferometric Radar					
研究経費	平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計	
16年度以降は内約額 金額単位：千円	25,800	20,200	17,000	9,300	10,900	83,200	
研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職		現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）			
佐藤 源之	東北大学・東北アジア研究センター・教授		電磁波計測	総括、レーダシステム設計、評価実験			
ティモフェイ サバリエフ	東北大学・東北アジア研究センター・助手		信号処理	レーダシステム設計、信号処理アルゴリズム開発			
馮 暉	東北大学・東北アジア研究センター・非常勤研究員		信号処理	レーダ信号処理			
下井 信浩	東京工業高等専門学校・助教		地雷除去技術	地雷検知技術に関する知識供与、赤外線センサと地中レーダの併用			
周 正舒	東北大学・東北アジア研究センター・客員研究員		レーダ信号処理	ポーラリメトリック信号処理			
当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>本研究では新しいレーダ技術であるポーラリメトリ、インターフェロメトリを利用し、これまでのレーダイメージングに代わる技術としてレーダ物標認識法を提案することで、その総合的な技術開発と応用について研究する。これにより、現在のレーダ技術では困難な地下に埋設された地雷の認識技術を確立し、人道的地雷除去に貢献することを目的とする。そのために受信アンテナに小型・軽量・無電源の光電界センサを利用したバイスタティック型地雷検知用小型地中レーダシステムを開発し、地雷認識アルゴリズムの開発、実地検証を行う。</p> <p>開発するレーダ目標認識手法は地雷検知以外にも利用できる汎用技術である。本研究では実用例として地雷検知に加え地下き裂の構造推定、埋設管と地層構造の識別、更に航空機・衛星搭載マイクロ波レーダによる地表の樹種判別などへの応用を検討する。更にレーダ技術の応用としてボアホールレーダ開発と実証実験を行う。</p>							

これまでの研究経過 (研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。)

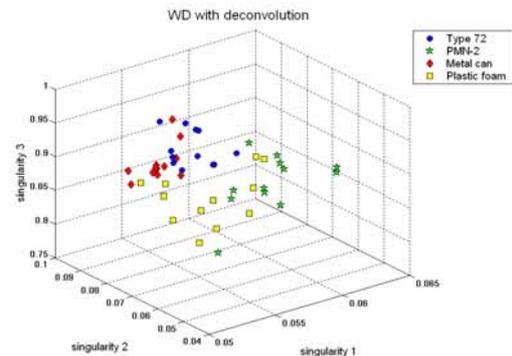
本研究における研究成果を 4 つの項目にまとめる。それぞれはハードウェア・ソフトウェア開発、解析原理研究などの組み合わせにより、相互に深く関している。

### 1. アレイアンテナを利用するグラウンドクラッタ抑圧法

地雷検知を必要とする現場は、一般に非常に粗い地表面をもつと予想している。従って地中レーダ信号には地表面粗さと地中に含まれる砂礫などに起因する媒質不均質性による強いグラウンドクラッタが含まれる。地雷検知ではグラウンドクラッタが、地表面から数 cm に埋設されている地雷からのレーダ反射波をマスクするため、これを適切に除去する必要がある。本研究では、アンテナアレイを使用し、CMP 手法を応用し、地雷からの反射波が有する空間相関性を利用したグラウンドクラッタ抑圧アルゴリズムの開発と高精度イメージング技術を開発した。更に開発した手法の有効性を実験室における実験で実証した。

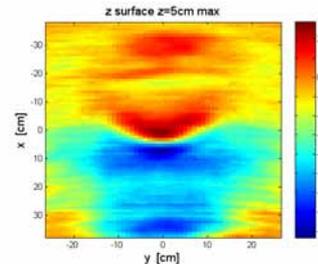
### 2. 地雷認識手法

地雷検知では爆弾や建造物の破片が地雷と同時に検知され、地雷だけを認識するための方法が強く求められている。本研究ではレーダ波の時間一周波数解析に対して特異値分解を適用し、固有ベクトルから反射体の特徴を抽出する方法を提案した。右図は実験で取得した 2 種類の模擬地雷、同一形状の発泡スチロール、金属缶からの反射信号を次元特徴値空間にプロットしたものである。同一形状を有する地雷モデルと発泡スチロールモデルを識別するなど、有効性が確認できた。



### 3. 光電界センサを利用したバイスタティックレーダシステム

地雷検知作業はセンサが地表面に接触することで地雷を誘爆する恐れがあり、センサの小型軽量化が効率的な検知につながる。本研究では軽量・小型で電氣的に受動素子である光電界センサを利用し、バイスタティック型のレーダを構成することを提案した。システムを試作し、評価実験において、砂に埋設された金属球のイメージングに成功した。右図は電波暗室内のレーダシステムと砂に埋設した金属球をイメージングした結果である。



### 4. 偏波特性を利用する地中レーダシステム

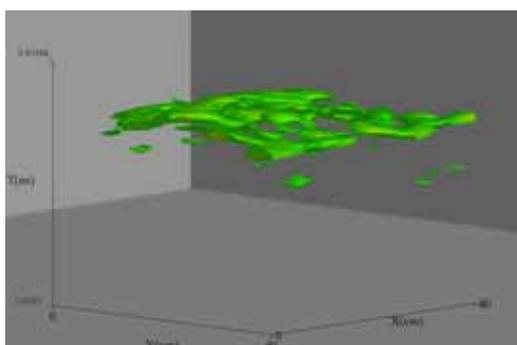
地雷識別の新たな手法として、レーダポーラリメトリの応用を検討している。地雷からの電磁波散乱の基本的な特性を知るために砂に埋設した地雷のレーダ反射を系統的に測定した。また同時に任意の偏波組み合わせを測定可能な地中レーダシステムを実現するために各種のアンテナの開発と評価実験を行った。下図に偏波計測を可能とするビバルディアンテナを基本とした偏波組み合わせアンテナの試作例を示す。



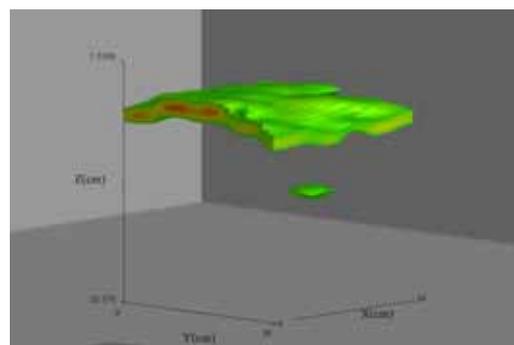
**特記事項** (これまでの研究において得られた、独自性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

### 1.強いグラウンドクラッタ下での地雷から反射波の識別

従来提案されているクラッタ軽減方法は反射波に含まれる地雷からの反射信号を周波数フィルタで強調したり地雷の埋設されていない場所での信号を差し引くことで反射波を強調するなどがあるが、いずれも粗い地表面をもつ現場では十分有効な方法とは考えられない。本研究では単に多数の点でデータを取得し合成することでクラッタを抑制するのではなく、同一地点で送受信間隔を変化させて信号を取得し、空間相関性を利用してクラッタを除去した上で合成開口を行う信号処理手法を提案した。これにより、クラッタ抑制の効果が明確に向上すること、またデータ取得に要する時間を短縮する手法を合わせて提案するなど、実用的に利用できる方法であることに特徴がある。



(a)信号処理前の波形



(b)信号処理後の波形：地表面と埋設地雷が独立して見えている

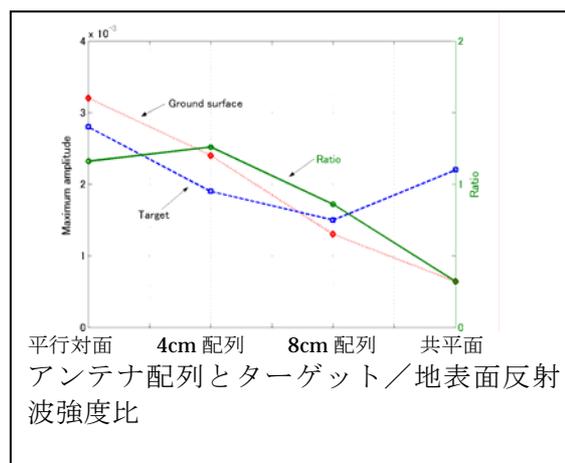
### 2.光電界センサによるバイスタティック地中レーダの実験的実証

地中レーダでは通常電波の地下への浸透率を向上させるためアンテナを地表面に圧着する。しかし地雷検知においては誘爆の危険性からこのような測定は行わない。またアンテナを空中に置くにしても小型・軽量の方が誘爆の危険を軽減できる。本研究で開発中の光電界センサによるバイスタティック地中レーダは以上の条件を満たす理想的なレーダ形態の一つであると考えている。地面に非接触という同様の発想で他の研究機関が行なっている前方監視型のモノスタティック地中レーダでは地表面での反射が強く後方散乱波が微弱であるためほとんど地表面に露出する地雷しか検知できていない。本手法はこうした問題を根本的に解決する方法である。提案した手法は昨年度までの実験で地中に埋設された金属球のイメージングに成功しており、今後より厳しい条件での検討を加える予定である。

### 3.偏波利用による地表面クラッタ抑圧

他方、電波の偏波方向による地表面の反射特性の違いにより、地表面に対して垂直な偏波はブリュースター角の条件を満たすとき、原理的には地表面反射を起こさない。しかし通常のモノスタティックレーダでは送受信アンテナの位置が同一であるためブリュースター角を満足するような測定状態を実現することができない。前述の光電界センサによるバイスタティック地中レーダを用いた実験において、ブリュースター角による反射波抑圧の低減が認められた。

一方、ブリュースター角を満たさない場合についても、地表面反射波の強さは偏波依存性を有している。モノスタティック地中レーダにおいて新たに開発したビバルディアンテナの偏波面を変化させ、地雷からの反射波と地表面反射の強度比を実験的に評価したところ、一定の条件で地表面反射の抑圧効果が見られた。偏波を利用した地表面クラッタ抑圧は、データ取得量を増やすことなく信号の質を向上させる点で、実用上有効な方法である。



**研究成果の発表状況** (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。)

(国際学術雑誌)

- [1] Motoyuki Sato, Yusuke Hamada, Xuan Feng, Fan-Nian Kong, Zhaofa Zeng, Guangyou Fang, GPR using an array antenna for landmine detection, Near Surface Geophysics, 2, February, 2004, 3-9
- [2] Xuan Feng and Motoyuki Sato Pre-stack migration applied to GPR for landmine detection, Inverse Problem (Invited paper, submitted)

(査読付・国際会議プロシーディングス)

- [1] G. Fang and M. Sato, GPR Detection of Landmine by Wavelet Transform, Proceedings of the 6<sup>th</sup> SEGJ International Symposium-Imaging Technology, 2002, 449-454
- [2] Motoyuki Sato, Zhaofa Zeng, Guangyou Fang, Xuan Feng, Stepped-frequency GPR system for Landmine detection, Detection and remediation technologies for mines and minelike targets VIII, Orland, FL, USA, April, 2003, 179-184
- [3] M.Sato, Bistatic GPR system using a passive optical sensor for landmine detection, Detection and remediation technologies for mines and minelike targets VIII, Orland, FL, USA, April, 2003, 161-166
- [4] Motoyuki Sato, Fan-Nian Kong, Zhaofa ZENG, Guangyou Fang, Antenna development and a Stepped-frequency GPR system for Landmine detection, Proc. of 2nd Int. WS on Advanced Ground Penetrating Radar, Delft, Netherlands, May, 2003, 168-171
- [5] Motoyuki Sato, A new Bistatic GPR system using a passive optical sensor for landmine detection, Proc. of 2nd Int. WS on Advanced Ground Penetrating Radar, Delft, Netherlands, May, 2003, 164-167
- [6] Zheng-Shu Zhou and Motoyuki Sato, Ground-based polarimetric SAR systems for environment study, Proc. IEEE AP-S, vol.I, Columbus, OH, USA, June, 2003, 202-205
- [7] M.Sato, Bistatic GPR system for landmine detection using optical electrical field, Proc. IEEE AP-S, Vol.II, Columbus, OH, USA, June, 2003, 207-210
- [8] Motoyuki Sato and Takafumi Koike, Classification of Tree Types by Polarimetric Pi-SAR, Proc.IEEE Int. Symp Geoscience and Remote Sensing, IGARSS2003, Toulouse, France, July, 2003, CD-R
- [9] Motoyuki Sato, Guangyou Fang and Zhaofa Zeng, Landmine detection by a broadband GPR system, Proc.IEEE Int. Symp Geoscience and Remote Sensing, IGARSS2003, Toulouse, France, July, 2003, CD-R
- [10] Motoyuki Sato, Subsurface sensing researches at the Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University, IEEE Geoscience and Remote Sensing News Letter, 128, September, 2003, 15-19
- [11] 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 Detection, Removal and Neutralization of Landmine and UXO, Brussels, Belgium, September, 2003, 548-553
- [12] M.Sato, GPR using Optical Electrical Field Sensor for Landmine Detection, Proceedings of Int. Conf. Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmine and UXO, Brussels, Belgium, September, 2003, 561-567
- [13] M.Sato, A GPR system using passive optical sensor, Technical Digest, 16th Int. Conf.Optical Fiber Sensors, Nara, Japan, October, 2003, 420-423
- [14] 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, October, 2003, 279-283
- [15] Timofei G. Savelyev, Motoyuki Sato, Comparative analysis of UWB deconvolution and feature extraction algorithms for GPR landmine detection, Defense & Security Symposium, 12-11116 April, 2004, Orlando, FL, USA.

(査読無・国内学会論文集)

- [1] Zeng Zhaofa Motoyuki Sato, Development of Wearable-GPR and SAR-GPR for landmine detection, 物理探査学会第106回学術講演会論文集, 2002, 17-20
- [2] 方 広有 佐藤 源之, 類似性評価による地中レーダのクラッタ除去手法, 電子情報通信学会 電磁界理論研究会 信学技報, EMT-02-50  
2002, 27-32
- [3] Zeng, Z., Fang, G., Sato, M., Analysis of Balanced Antipodal Vivaldi Antenna and Its Application for Mine-like Targets Detection, 電子情報通信学会 アンテナ伝播研究会 信学技報, AP2002-13, SAT2002-3, 2002, 13-18
- [4] G. Fang and M. Sato, Simulation of GPR Profiles for Mine-Like Targets Buried in Rough Ground Surface and Clutter Removal by Similarity Measurement Methods, Proceedings of 2002 Asia-Pacific Microwave Conference, 2002, 249-252
- [5] 佐藤 源之 方 広有 曾 昭発, 地中レーダによる地雷検知に関する基礎研究, 電子情報通信学会 アンテナ伝播研究会 信学技報, AP2002-59, 2002, 19-24
- [6] Feng Xuan, Fang Guangyou and Motoyuki Sato, Reduction of surface clutter by an array antenna GPR system for detection of landmine, 物理探査学会第107回学術講演会論文集, Tokyo, May, 2003,
- [7] 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, August, 2003, 7-11
- [8] 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, September, 2003, 41-45
- [9] Xuan Feng and Motoyoyuki Sato, The application of migration to SAR-GPR system for landmine detection, 信学技報, SANE2003-66, September, 2003, 77-82
- [10] 濱田 祐亮, 馮 暉, 小林 敬生, 佐藤 源之, 地雷探査用地中レーダのアンテナ配置に関する検討, 信学技報, SANE2003-67, September, 2003, 83-87