

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2006～2010

課題番号：18106008

研究課題名（和文） 人道的地雷除去のためのレーダ技術とその発展的応用

研究課題名（英文） Radar technology for humanitarian demining and its application

研究代表者

佐藤 源之 (Motoyuki Sato)

東北大学・東北アジア研究センター・教授

研究者番号：40178778

研究成果の概要（和文）：強い不均質性媒質中の埋設物検知のためのレーダ信号処理技術について研究を行った。これを利用して人道的地雷除去を目的とした地中レーダ装置 ALIS を開発し、カンボジアの実地雷原での実証試験において 70 個以上の地雷検知に成功した。本試験は本研究終了後も継続中である。更に次世代の小型レーダ技術としてバイスタティック型レーダによる埋設物検知を行った。またレーダポーラリメトリ技術をボアホールレーダ、GB-SAR、航空機・衛星搭載 SAR などのレーダに対して、特に防災・減災への発展的応用を行った。

研究成果の概要（英文）：We developed image reconstruction algorithm for detection of buried objects in inhomogeneous medium. We used this algorithm in a radar sensor “ALIS” and started the operation test in real mine fields in Cambodia. We have detected more than 70 landmines successfully, and this test is still continuing. Then we developed a bistatic radar for advanced ground penetrating radar. We also applied radar polarimetry technology to borehole radar, GB-SAR, airborne and space borne SAR, especially for disaster mitigation and demonstrated its potential.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 18 年度	20,700,000	6,210,000	26,910,000
平成 19 年度	17,900,000	5,370,000	23,270,000
平成 20 年度	16,600,000	4,980,000	21,580,000
平成 21 年度	15,300,000	4,590,000	19,890,000
平成 22 年度	15,600,000	4,680,000	20,280,000
総計	86,100,000	25,830,000	111,930,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：人道的地雷除去、地中レーダ、GPR、カンボジア、バイスタティックレーダ

## 1. 研究開始当初の背景

世界から地雷を廃絶することを目指したオタワ条約(1997)が発効してから10年以上経過するが、実地雷原に1億個が残ると言われる地雷の撤去は、年月が経過するにつ

れ、難しい環境での検知が求められることが次第に明らかになってきた。我々2002年度より地雷検知を行うための地中レーダを主体とするセンサ開発を行ってきたが、この過程で培ったポーラリメトリ、インターフェロメトリ技術の地雷検知への利用研究

の成果を進展させ、これまでのレーダイメージングを超えたレーダ物標認識法の提案、人間社会のセキュリティ確保のためのレーダ技術の総合的な応用について研究することをめざした。

## 2. 研究の目的

(1) レーダ技術の明確な目標の一つとして人道的地雷除去のために開発するセンサの地雷被災国における現地評価実験を通じた実用化のための開発を行う。更に国連機関 NGO、国際地雷検知装置評価機関などとの協議の上、現地展開をめざす。

(2) 次世代小型軽量レーダ技術として無電源の光電界センサを利用したバイスタティック・レーダシステムの実用化研究を行い、地雷検知、建造物内部検査などへの応用により都市の安全、セキュリティ確保をめざした目標認識アルゴリズムの開発、検証実験を行う。

(3) 開発するレーダ計測手法を地雷検知以外への汎用技術として利用することを検討する。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、地表設置レーダによる防災対策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。

## 3. 研究の方法

(1) 科研費ならびに JST 研究プロジェクトによって開発した地雷検知器 ALIS の改良を続けると共に、地雷被災国での長期貸与により、実地雷原でのデータ取得を行い、研究へのフィードバックを行う。

(2) 光電界センサを利用したバイスタティック型地中レーダを開発し、地雷検知への応用を想定した室内実験を行う。

(3) 地表設置型合成開口レーダ(GB-SAR)ならびにボアホールレーダへポーラリメトリ技術を適用し、新しい解析手法を提案する。また航空機、衛星搭載 SAR への利用を行い、防災・減災技術の開発をめざす。

## 4. 研究成果

### (1) 人道的地雷検知技術

2002 年より、JST プロジェクトならびに継続する科研費などにより研究開発を続けてき

た地雷検知センサ ALIS について、アルゴリズムの改良、カンボジアにおける実地雷原での評価試験で取得される実データを利用した実査的なアルゴリズム検証を続けた。



図1 カンボジア地雷原で稼働する ALIS

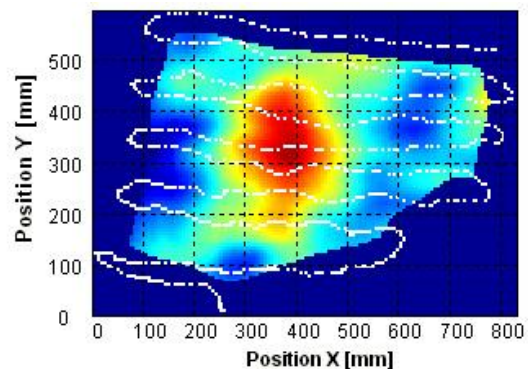


図2 ALIS で可視化した埋設地雷  
(旧ソビエト製 PMN-2、カンボジア地雷原)

東北大学はカンボジア政府の地雷除去機関であるカンボジア地雷除去センター(CMAC)に ALIS の技術評価を申請し、評価試験の後実地雷原での試験使用を開始する認証を得ることができた。2009 年 7 月より CMAC は 2 台の ALIS を利用し地雷除去活動を開始した。地雷除去作業ではソビエト製対人地雷 PMN-2 の検知率が比較的高い。図 2 は 2009 年 7 月 2 日に検知された地雷(PMN-2)の一例である。深度約 10cm に埋設されていた。

カンボジアでは 2009 年 5 月からの作業で既に 70 個以上の地雷を検知した(2012 年 6 月時点) 2010 年 8 月の現地訪問の際、ALIS によって地雷除去が行われた地域を訪問した。2010 年 3 月には除去活動を行っていた場所に現在は稲が植えられていた。地域住民への農地返還による経済復興援助という、人道的地雷除去活動にとって最も重要な目標が

少しずつではあるが達成できていることを感じる事ができた。

ALIS は今後もカンボジアを中心とする現地試験を継続しているが、他の地雷被災国からも多くの問い合わせがあり、今後量産化と現地での実展開を目指した活動を継続していく。

## (2) 新しい GPR 技術の開発

小型・軽量の GPR システム開発のために光電界センサを利用したバイスタティックレーダを開発した。基本的な性能は実験室レベルで実証できた。バイスタティックレーダ特有の入射波により散乱波が覆われる現象を 2次元空間フィルタにより除去し、埋設物の明確なイメージングに成功した。本成果は GPR に留まらず、現在世界的に計画されている複数の衛星を利用したバイスタティック型のリモートセンシングへの利用も期待される。

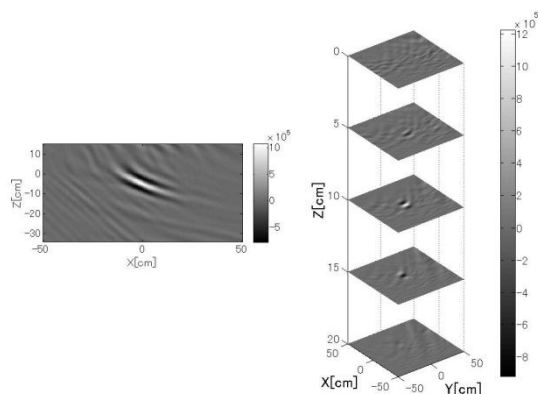


図3 バイスタティックレーダによる埋設模擬地雷の可視化

## (3) レーダポーラリメトリの応用

GPR による地雷検知は、単に地雷形状をイメージとして捕捉するだけでなく、より高度なレーダ技術により効率良く地雷を識別できる可能性がある。このために、レーダの単一の信号 (A-Scan データ) からの特異値分解を利用した特徴抽出により識別法、レーダポーラリメトリを利用した方法について研究を行ってきた。

高度なレーダ技術は、地雷検知以外の方法にも利用が期待できる。本研究では、地表設置型合成開口レーダ (GB-SAR) によるデータ取得を行い、稲の生育状況をレーダポーラリメトリで観察し、偏波の特徴を見出すなど、電波散乱の性質に結びついた学術研究を行ってきた。またこうした研究は、我が国が運

用する地球観測衛星 ALOS に搭載されるポーラリメトリック SAR (PALSAR) の多角的な応用研究に結びつけ、特にレーダポーラリメトリによる定量計測についての研究に発展している。

同様にポーラリメトリックレーダ技術の応用として、井戸に降下させて使用するボアホールレーダにレーダポーラリメトリ技術を導入し、透水性のある地下き裂のキャラクタリゼーションを行えることを実験を含め実証した。

更に、地表設置型合成開口レーダ (GB-SAR) への利用を行い、対象物識別や、壁面透過レーダへの利用なども試みている。この結果は 2011 年 11 月より、宮城県栗原市荒砥沢地区で大規模地滑りに対して継続的なレーダによるモニタリング事業に発展した。

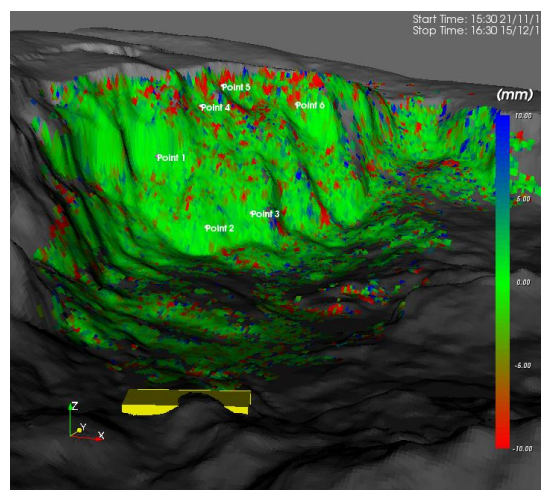


図4 計測した荒砥沢地区崩落面の地表面変位

これらに共通する技術要素は、周波数や周波数帯域により制限を受けるレーダ分解とは異なるレーダポーラリメトリの情報を利用することで、これまでとは異なるレーダ技術を開拓することにある。

航空機・衛星搭載 SAR は減災、防災を目的とする広域計測法として、注目されている。既にインターフェロメトリを利用した地表面変位計測技術は広く知られているが、災害以前のデータを使用せず、災害後のデータだけで地表面判別を行えるレーダポーラリメトリの利用が有用であることを ALOS/PALSAR などを利用して提示した。またこれらの解析と GB-SAR を組み合わせた実証実験を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 27 件)

- [1] Hand-Held GPR Imaging Using Migration for Irregular Data. [IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 4(4), (2011), 799-803] Xuan Feng, , Motoyuki Sato, Cai Liu 査読有
- [2] Fk Filter Designs to Suppress Direct Wave for Bistatic Ground Penetrating Radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 査読有, 48 (3), (2010), 1433-1444 ], Naoki Hayashi and Motoyuki Sato
- [3] Profiling the Rough Surface by Migration. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 査読有, 6 (2), (2009), 258-262, Xuan Feng, Motoyuki Sato, Cai Liu, and Yan Zhang
- [4] 地中レーダ(GPR) 技術と人道的地雷検知への応用. 査読無, CQ 出版社RF ワールド, 4, (2008), 54-63, 佐藤 源之
- [5] 光電界センサ用ビバルディアンテナの最適化によるレーダイメージングの分解能の向上, 電子情報通信学会論文誌B, 査読有, Vol. J91-B No. 3 pp. 281-290, 林直樹、佐藤 源之 (2008)
- [6] 人道的地雷除去のための地雷検知技術の開発. 渋沢栄一記念財団青淵, 査読無, (714), (2008), 佐藤 源之
- [7] Estimation of Hydraulic Property of an Unconfined Aquifer by GPR. Sensing and Imaging, 査読有, 8 (2), (2007), 83-99, Lu Qi, Motoyuki Sato
- [8] A Novel Direction-Finding Algorithm for Directional Borehole Radar. [IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 査読有, 45 (8), (2007), 2520-2528, Takuya Takayama, Motoyuki Sato
- [9] A Novel Directional Borehole Radar System using Optical Electric Field Sensors. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 査読有, 45 (8), (2007), 2529-2535, Motoyuki Sato, Takuya Takayama
- [10] Investigation of Time-Frequency Features for GPR Landmine Discrimination. IEEE Transactions

on Geoscience and Remote Sensing, 査読有, 45 (1), (2007), 118-129, Timofey Grigorievich Savelyev, Luc van Kempen, Hichem Sahli, Juergen Sachs, Motoyuki Sato

[学会発表] (計 103 件)

- [1] Motoyuki Sato, Jun Fujiwara and Kazunori Takahashi, "ALIS evaluation tests in Croatia," SPIE, Defuse & Security Symposium, Orlando, USA, April 15, 2009

[図書] (計 4 件)

- [1] Subsurface Sensing. [Wiley, (2011)] Motoyuki Sato, (執筆担当部分) Chapter 11 pp. 758-771.
- [2] Humanitarian Demining, Innovative Solutions and the Challenges of Technology (執筆担当部分) Chapter 7 pp. 151-174, Vehicle mounted dual sensor: SAR-GPR. [ARS publisher, (2008) 2 月] Motoyuki Sato, Kazunori Takahashi, Takao Kobayashi, Jun Fujiwara and Xuan Feng
- [3] Anti-personal Landmine detection for Humanitarian Demining (執筆担当部分) Chapter 2 Principle of Mine Detection by Ground Penetrating radar. [Springer, (2008) 7 月 pp19-44] Motoyuki Sato
- [4] Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 7 (執筆担当部分) Ch78 Robust Target Discrimination with UWB GPR pp732-739. [Springer, (2007) 6 月] Timofei Savelyev, Takao Kobayashi, Xuan Feng, Motoyuki Sato

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://cobalt.cneas.tohoku.ac.jp/users/sato/index-j.html>

<http://cobalt.cneas.tohoku.ac.jp/users/sato/ALIS.htm>

<http://www.diginfo.tv/2007/10/04/07-0325-r.php>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 源之 (SATO MOTUYUKI)  
東北大学・東北アジア研究センター・教授  
研究者番号：40178778

### (2) 研究分担者

渡邊 学 (WATANABE MANABU)  
東北大学・東北アジア研究センター・専門  
研究員  
研究者番号：10371147

横田 裕也 (YOKOTA YUYA)  
東北大学・東北アジア研究センター・助教  
研究者番号：30581045

Andrey Klovov  
東北大学・東北アジア研究センター・  
教育研究支援者  
研究者番号：40573720

### (3) 連携研究者

城戸 隆 (KIDO TAKASHI)  
東北大学・東北アジア研究センター・  
産官学連携研究員  
研究者番号：70390995

園田 潤 (SONODA JUN)  
仙台高等専門学校・知能エレクトロニクス  
工学科・准教授  
研究者番号：30290696

Zhao Weijun  
東北大学・東北アジア研究センター・教育  
研究支援者  
研究者番号：90534181