

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0102

研究課題名（和文）人道的目的レーダのコロンビア現地展開のためのアンテナ工学的アプローチ

研究課題名（英文）Antenna Engineering for Humanitarian Demining Radar in Colombia

研究代表者

佐藤 源之（Sato, Motoyuki）

東北大学・東北アジア研究センター・名誉教授

研究者番号：40178778

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：ALISは電磁誘導センサ（EMI sensor, 金属探知機）と地中レーダ（GPR）を組み合わせ、手動でセンサを走査し、位置情報と合わせて取得した2つのデータから地下の可視化を行う。GPRデータに対して合成開口レーダ処理（SAR processing）を施すことで、3次元画像の再構成を行うとともに、クラッタ除去を行う。本研究では国立大学、現地NGOであるCCCMとALISの利用検討を進め、赤道直下の現地地雷原を訪問して実地での実験を繰り返し現地に適用した手法を開発した。この結果ODAによるコロンビア陸軍工兵部隊の人道的地雷除去チームに対してALISの供与が決定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水分率の高い土壌、またゲリラが作製した不定形な爆発物を対象とするコロンビア独特の人道的地雷除去へのALISの適用性の向上は電波工学的な意義が高い。一方、こうした一連のコロンビア現地における研究開発を、人道的地雷除去活動を行うコロンビア陸軍の工兵部隊に説明を何回か行ってきた。その結果、コロンビア陸軍からコロンビアにおける人道的地雷除去活動にALISを使用したいという要望があげられ、日本大使館などとも協議した結果、日本政府からの無償支援としてALISをコロンビア陸軍に供与することが決まった。これは科研費による研究活動がODAに結びついた極めて稀な事例である。

研究成果の概要（英文）：ALIS combines an electromagnetic induction sensor (EMI sensor, metal detector) and a ground penetrating radar (GPR), and visualizes the underground from two sets of data acquired by manually scanning the sensor and combining it with location information. Synthetic aperture radar processing (SAR processing) is performed on the GPR data to reconstruct a 3D image and remove clutter. In this research, we have been examining the use of ALIS with the National university and a local NGO CCCM, and have visited a local minefield directly under the equator to conduct repeated field experiments and developed methods that can be applied to the field. As a result, it has been decided to provide ALIS to a humanitarian mine clearance team of the Colombian Army Engineers Corps through ODA.

研究分野：電波応用工学

キーワード：GPR 地中レーダ 人道的地雷除去 コロンビア 合成開口レーダ ODA

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者佐藤は合成開口レーダ(SAR)を環境計測、減災・防災技術へ応用する研究を行ってきた。地雷検知用地中レーダ(GPR)と金属探知機を複合したデュアルセンサ地雷検知装置 ALIS を佐藤らは開発しカンボジア政府に2台のシステムを供与、2009年以來80個以上の地雷を検知・除去し、25ha以上の農地を農民に返還した。ALISは単なるGPRではなく、SARを利用したイメージングに特長をもつ。実践的なSARの研究を行う過程で、現在利用しているレーダ・イメージングが人間の感覚的なセンシングに比べ非常に劣ることを感じ、CSやスパーアレイなど新しいレーダ技術の積極的な導入について研究を進めている。

地雷除去にデュアルセンサを導入する研究は、米、英陸軍が進める軍事的地雷除去技術を除き、東北大学の我々が世界で唯一達成しており、その成果は国際学会でも認知されている。我々はこれまでカンボジアを対象として研究を進めてきたが、学術的な支援を国立大学から得られるコロンビアを第2の実践フィールドとして選定し、地雷ならびに土壌の電気的な性状を学術的に明らかにしながら地雷除去活動に結びつけていく。

### 2. 研究の目的

コロンビアでは50年以上にわたり反政府勢力「コロンビア革命軍(FARC)」がゲリラ活動に多数の爆発物を利用してきた。2010年に就任したサントス大統領はゲリラ組織との和解を進め、FARCを合法的な政党とし内紛を終結させた。その業績にはノーベル平和賞が贈られた。しかし大量に国内に残された地雷、爆発物は交通や経済復興の妨げとなっている。

我国はカンボジアなどの地雷被災国における地雷除去活動に対して、技術的、経済的支援を行ってきた。現在コロンビアは地雷対策の支援対象国となっており、毎年数億円の資金援助をODAとして実施している。

カンボジアやアフガニスタンなどでは、政治的な理由から紛争中に使用された地雷は中国、旧ソビエトなどの工場生産された規格品である。工業製品である地雷には少量の金属部品が使用されている。これに対してコロンビアでは反政府ゲリラ組織が、プラスチック製パイプや農業用窒素肥料を利用して自家製の地雷・爆発物を多数製造し使用してきた。これらの地雷・爆発物は金属が全く使用されていない物もあり、金属探知機を利用した従来の検知法は役に立たない場合がある。そこで非金属爆薬も検知可能なデュアルセンサの導入が意義を持つ。しかし特殊な爆発物はコロンビアでなければ入手することができず、現地での詳細な研究を行わなければ新しい地雷検知用センサの導入は実効をあげることができない。

### 3. 研究の方法

本研究において、まず図1に示すペットボトルに窒素肥料を充填し、起爆装置をつけた即席爆弾(IED)を模擬したモデルを製作し、コロンビア・ボゴタ市にあるロス・アンデス大学 Bustemante 教授の協力を仰ぎ ALIS による検知実験を同大学設備を利用して行った。図2は砂槽に模擬 IED を埋設する状況である。この結果、図3に示すように金属探知機、GPR ともに良好な画像化が行えることを確認した。特にペットボトルが縦に埋設された状況でも GPR は画像化に成功している。

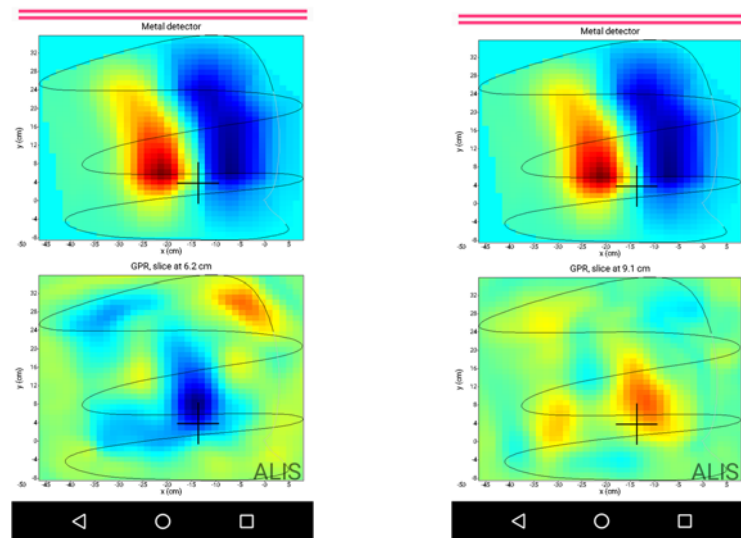


図1 模擬即席爆弾



図2 埋設状況 (ロス・アンデス大学)





(a) Image at 6.2cm      (b) Image at 9.1cm

図3 ALISによる模擬IEDの画像化

GPRでは電波が地中を伝搬するため、地中媒質の電気的特性を正確に把握することが、精度の高い地中イメージング技術につながる。地雷検知に使用する金属探知機は土壤の磁性と探知性能の関係が理解されているが、GPRに関しては土壤影響を考慮する研究が未だ行われていない。2002年–2006年、研究代表者佐藤は、EU（ヨーロッパ連合）の技術標準を定めるCENが進める、地中レーダの地雷検知への利用に関する標準の作成委員会に参加し、その成果はCEN workshop agreement CWA 14747-2 “Humanitarian mine action - Test and evaluation - Part 2: Soil characterization for metal detector and ground penetrating radar performance”として公表されている。しかしこの報告がされた2008年当時、人道的地雷除去に使用されるGPR装置は十分な実績をあげておらず、GPRの利用に関しては技術基準を策定できなかった。我々は地雷原での現地計測を踏まえ、土壤の電気的特性の空間的分布を統計量として記述し、土壤モデルを構築することが重要だと考えている。また土壤の計測手法、性状評価法も確立しなければならない。今後こうした実績に基づき、新たな国際標準を定めることができれば、同一手法を他の地雷被災国に適用していくことが可能となる。

本研究では地雷原での実計測とコロンビア国立大学に既に整備されているアンテナ計測施設や土壤の電気的性質の分析装置などを利用し、土壤ならびに地雷の物理的性質を明らかにした上で土壤統計モデルを構築し、それに従ってコロンビア国内の典型的な土壤を数種類集めたテストレーンを構築する。土壤は主として検疫の問題から国外への持ち出し、日本への持ち込みは法律的に非常に難しい。またテストレーン構築には少なくとも10トン以上の土壤が必要であり、日本への持ち込みは不可能である。

#### 4. 研究成果

一方、コロンビア国内でのALISの実利用を進めるため、コロンビアのNGO組織CCCMと協力し、CCCMが実際に地雷除去を行う現場付近の土壤に、爆発物を模擬した物体を埋設し、ALISデータを取得した。このデータを解析し、ALISの土壤に対する適応性を調べた。

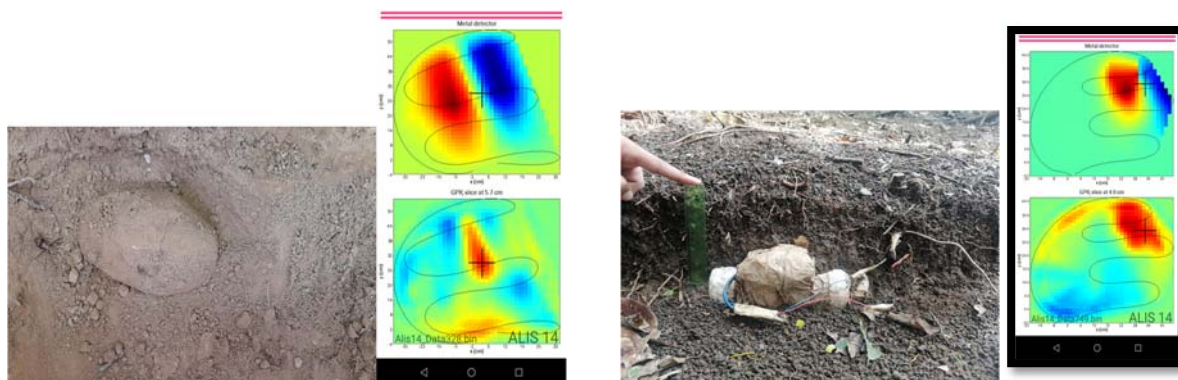


図4 CCCMと地雷原で実施したALIS試験

GPR を利用する対人地雷の検知は過去 20 年間で世界の数グループが研究を進めてきているが、いずれも 2 次元の垂直断面図(B スキャン)を表示するに留まり、我々が行う 3 次元表示(C スキャン)を行えるセンサは他に無い。しかし実際の地雷原は不均質性の高い土壤であるため、電波伝搬速度が一定ではないため再構成された画像データは埋設物の形状から歪むことは避けられない。

図 4 は 2022 年 4 月に佐藤、石川がコロンビア南部のプトマジョ地域の地雷原を訪問し、地雷原の土壤で ALIS の評価試験を行った様子である。これに続き、コロンビア国内の数ヶ所で異なる土壤条件において CCCM と実施した評価試験の一部を図 5 に示す。

図 6 は、砂槽に埋設した PMN-2 模擬地雷について ALIS で取得した GPR データに対して土壤内の電波伝搬速度を変化させた場合の SAR 処理による 3 次元画像の差異を示している。速度の変化は、埋設物の深度に直接かかわるが、再構成された画像そのものに対する歪はさほど大きくない。しかし、コロンビアの地雷原で実際の土壤について同様の操作をした場合、画像そのものが大きく変化することが確認できた。土壤の水分率は誘電率の変化だけでなく減衰率に大きな影響を与えるがこの効果が実験室の実験では再現できておらず、さらに検討が必要であると考えられる。



手りゅう弾 (アリポロ市)

IED (サンミゲル市)

図 5 ALIS によって画像化したコロンビア各地の地雷原で検知された爆発物

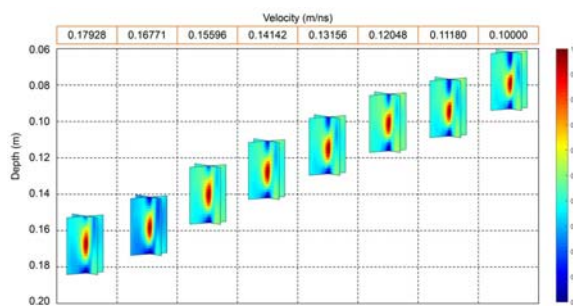


図 6 SAR 処理で仮定する土壤内電波伝搬速度の違いによる 3 次元画像

Geophysics, 2022. (本研究成果公表論文)

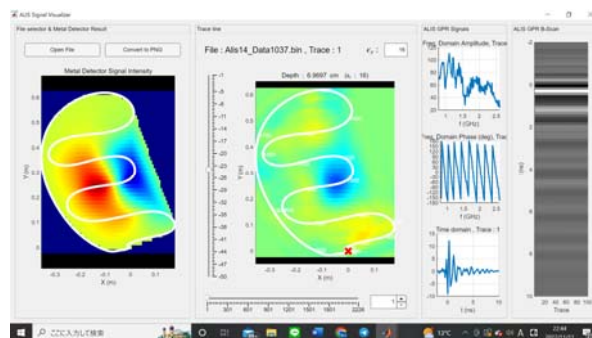


図 7. ALIS データを解析用 MATLAB コードの画面

また、こうした状況を反省し ALIS でデータ取得直後にデータを解析するための MATLAB コードを開発した。

2024 年 3 月 コロンビアを訪問し、国立大学、現地 NGO である CCCM と ALIS の利用に関する討議を行った。またコロンビア陸軍工兵部隊の人道的地雷除去チームに対して ALIS の使用方法、データの解釈法を指導した。

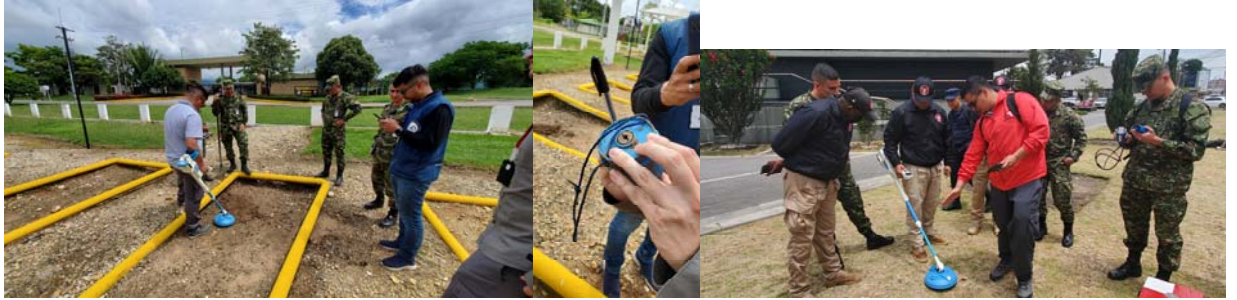


図8 Tolemaida 訓練施設における ALIS の試用 図9 CCCM 隊員によるコロンビア陸軍隊員の ALIS 操作指導

こうした一連のコロンビア現地における研究開発を、人道的地雷除去活動を行うコロンビア陸軍の工兵部隊に説明を何回か行ってきた。その結果、コロンビア陸軍からコロンビアにおける人道的地雷除去活動に ALIS を使用したいという要望があげられ、日本大使館などとも協議した結果、日本政府からの無償支援として ALIS をコロンビア陸軍に供与することが決まった。これは科研費による研究活動が、現地での社会問題を解決するための実装に直接に結びつき、ODA による日本政府からの機材供与が行われるという極めて稀な成功事例と考えている。

本研究採択後に行ったコロンビアでの研究活動

- (1) 2019年4月 コロンビア国立大学 Vega 教授と情報交換、国際共同研究を日本学術振興会へ申請
- (2) 2019年9月 コロンビア国立大学において、IEEE (米国電子情報通信学会) AP-S (アンテナ伝播部会) 主催の地雷検知技術に関するワークショップ開催
- (3) 2019年9月 コロンビアで活動する NPO 団体と ALIS 運用について個別協議
- (4) 2019年9月 CCCM と草の根無償への応募に関する協議を開始
- (5) 2019年10月 科研費国際共同研究強化(B)「人道的目的レーダのコロンビア現地展開のためのアンテナ工学的アプローチ」が採択される。
- (6) 2020年2月 コロンビア向け ALIS 準備、輸出許可取得。
- (7) 2020年6月 CCCM と在コロンビア日本大使館に対して草の根無償への申請
- (8) 2020年4月以降 新型コロナウイルスのため、渡航が制限されるため、ALIS を輸送業者に委託してコロンビアへ輸出するための申請、輸出許可期限延長手続きなどを実施。
- (9) 2021年4月 ALIS がボゴタの CCCM 事務局に到着
- (10) 2021年5月12日 国立大学、CCCM メンバーと ALIS 使用法に関する第1回 web 会議開催
- (11) 2021年8月 草の根無償による ALIS のコロンビアでの運用に関して、現地日本大使館、東北大学、CCCM が web 会議などで準備を遂行。
- (12) 2022年4月 佐藤がボゴタ訪問。国立大学、CCCM メンバーと ALIS 使用法について討議。CCCM と南部プトマジョにおける地雷除去現場訪問、ALIS の試験データ取得。
- (13) 2022年4月 コロンビア陸軍 CENAM (Army division against explosive ordnance) Research and Development Director に ALIS のコロンビアにおける活動を紹介。同席した technical advisor to the Mine Action Center (OACP) から、トレマイダ試験場において ALIS 評価試験を行うことを勧奨される。
- (14) 2022年4月 在コロンビア日本大使館訪問。高杉大使らと情報交換。
- (15) 2022年11月 佐藤がコロンビア訪問、Putomayo での現地運用調査、Tolemaida 訓練施設で陸軍人道的地雷除去部隊に ALIS のデモンストレーションを行う
- (16) 2023年6月 陸軍人道的地雷除去部隊員16名が東北大学訪問、ALIS 技術の説明。
- (17) 2023年12月 陸軍人道的地雷除去部隊員10名が東北大学訪問、ALIS 技術の説明。
- (18) 2024年3月 ボゴタで佐藤が陸軍人道的地雷除去部隊において ALIS の実地説明  
日本大使館訪問、ALIS の進捗について高杉大使らに説明  
大使館において CCCM メンバーを含め草の根無償に関する情報交換

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Zejun Dong, Xuan Feng, Haoqiu Zhou, Lilong Zou, Motoyuki Sato	4. 巻 12(4)
2. 論文標題 3D Migration Depth Focus Velocity Analysis of Hand-Held Ground Penetrating Radar	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geosciences	6. 最初と最後の頁 178
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/geosciences12040178	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 佐藤源之	4. 巻 vol.123, no.236
2. 論文標題 カンボジア、コロンビアにおける人道的地雷除去活動のためのGPR	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Tech. Rep.	6. 最初と最後の頁 30-35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Motoyuki Sato, Yoshitaka Morita	4. 巻 1
2. 論文標題 Ground Surface Clutter Suppression for GPR	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 [Proceedings, IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/APS/URS147566.2021.9703927	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tomohiro Kondo、Kazutaka Kikuta, Motoyuki Sato	4. 巻 19
2. 論文標題 Ground Surface Reflection Compensation for Hand-Held GPR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LGRS.2020.3036671	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Motoyuki Sato, Sead Vrana, Arnold Schoolderman
2. 発表標題 Accelerating Mine Clearance by Introducing a User-Friendly and Cost-Effective Dual Sensor Detector in Humanitarian Demining Operations
3. 学会等名 Mineaction 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Motoyuki Sato
2. 発表標題 Humanitarian Landmine Clearance by GPR in Mine Affected Countries
3. 学会等名 International Conference on GPR 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 源之
2. 発表標題 Image Reconstruction and Processing Algorithm of GPR for Humanitarian Demining Sensor ALIS
3. 学会等名 International Workshop Advanced Technologies for Detection of Landmines and Improvised Explosive Devices (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 源之
2. 発表標題 ALIS Development and Activities Demonstration of Operation
3. 学会等名 第4回对人地雷禁止条約（オタワ条約）検討会議（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 佐藤 源之(分担)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 331
3. 書名 Explosives Detection	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学 佐藤 源之 研究室 <a href="http://magnet.cneas.tohoku.ac.jp/satolab/satolab-j.html">http://magnet.cneas.tohoku.ac.jp/satolab/satolab-j.html</a> 地雷除去センサALIS <a href="http://magnet.cneas.tohoku.ac.jp/satolab/alis/">http://magnet.cneas.tohoku.ac.jp/satolab/alis/</a>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石川 潤  (Ishikawa Jun)  (10453797)	東京電機大学・未来科学部・教授    (32657)	
研究分担者	菊田 和孝  (Kikuta Kazutaka)  (70801249)	東北大学・東北アジア研究センター・助教    (11301)	
研究分担者	齋藤 龍真  (Saito Ryuma)  (10967706)	東北大学・東北アジア研究センター・助手    (11301)	



## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	泉 佑太  (Yuta Izumi)  (50915197)	室蘭工業大学・大学院工学研究科・助教    (10103)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会	開催年
International Workshop Advanced Technologies for Detection of Landmines and Improvised Explosive Devices	2019年～2019年

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ボスニア・ヘルツェゴビナ	Federal ministration of Civil Protection			
オランダ	TNO			
カンボジア	Cambodian Mine Action Centre			
コロンビア	国立大学(コロンビア)	Campa Colombiana Contra Minas	ロス・アンデス大学	