# 近距離レーダとその応用
## ―地球環境、防災、遺跡、地雷―

東北大学　東北アジア研究センター 教授　佐藤（さとう）　源之（もとゆき）

## 1. はじめに

レーダは通常は遠くの対象物を計測するが、近距離レーダは文字通りレーダ装置に近い物体を対象とする。電波における距離は使用する電波の波長に対する相対値で定義されるが、SAR（合成開口レーダ、Synesthetic Aperture Radar）に代表されるイメージングレーダでは計測対象の方位方向（アジマス）の広がりとレーダから計測対象までの距離（レンジ）の比率が電波入射角の変化幅になり、イメージングのアルゴリズムに影響する。つまり近距離レーダは対象物に対する見込み角が大きいことが一つの指標となる。

リモートセンシングで用いられる衛星搭載SARは計測対象から非常に離れて運用されるのに対し、本稿では近距離レーダとしてGB-SAR（地表設置型合成開口レーダ、Ground Based SAR）とGPR（地中レーダ、Ground Penetrating Radar）技術の紹介と最近の話題を取り上げる。

## 2. GB-SAR

アンテナの放射ビーム幅は、アンテナ開口が大きいほど鋭くなる。高分解能のレーダイメージを得るためには大きな開口のアンテナが必要であるが、小さなアンテナを航空機、衛星に搭載し、移動しながらレーダ反射波を記録し計算機上で仮想的なアンテナを合成することで、高分解能を実現するのがSAR技術である。

同じ原理を利用してGB-SARは、レーダアンテナを2m程度の長さの地表に固定されたレールの上を移動してデータを取得し、SAR画像を構成する。GB-SARは定点観測が可能であるから、地滑りなど災害が予想される場所に立ち入ることなく連続的に計測できる特長を持つ。更に繰り返し計測に干渉SAR技術を利用することで、地表面の数mm以下の変位をリアルタイムで計測できる。

総務省関東総合通信局は2012年度に「17GHz帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討会」[1] において、防災対策などに多数の需要が見込まれるGB-SARが土砂災害や地滑りなどの危険箇所の観測や人工構造物の老朽化に伴う変位・振動観測などへの活用が期待されるとして利用を促進する報告書をまとめた。また特定実験試験局として17GHz帯の周波数がGB-SAR用に一時期指定され、東北大学でも制度を利用した実験局を運用した。

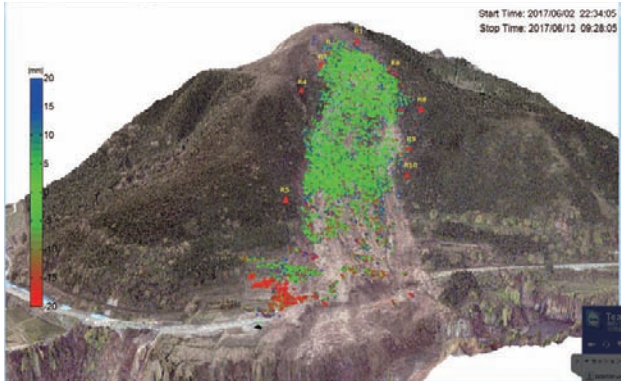
東北大学東北アジア研究センターは宮城県栗原市と連携し、2008年岩手・宮城内陸地震によって発生した同市荒砥沢地区において2011年11月から現在に至るまでGB-SAR連続モニタリングを継続中である[2] [3]。計測したデータはリアルタイムで処理し、通常を超える地表面の変位が認められた場合、関係者に電子メールが届く仕組みを作りあげた。また、変位の状態はインターネットを通じてwebにアクセスすることで、どこからでも確認が可能である。このように東北大学では自治体と連携したGB-SARによる地滑り早期警報システムの7年以上にわたる運用経験を持っている。

2016年4月の熊本地震によって崩落した南阿蘇村立野地区の大規模な地滑り地帯でもGB-SARによるモニタリングが適切と考え、熊本大学、情報通信研究機構（NICT）と協力し**写真1**に示すGB-SARを設置した。**図1**は同地点で観測された干渉SARによる変位分布である。現在同地区では災害復旧工事が行われているが、GB-SARによる変位データは国交省や現場作業者などの関係者にリアルタイムで早期警報を提供している[4]。

GB-SARはここで述べた地滑りモニタリング以外に、橋梁、ダムなどのインフラ計測にも応用できる。東北大学では羽田空港の舗装面の健全調査にも利用を試みた。

これらのGB-SARシステムは17GHz帯で300MHzの周波数

■写真1. 南阿蘇村立野地区に設置したGB-SAR装置




■図1. GB-SARで観測した干渉SARによる地表面変位分布（南阿蘇村立野地区）

帯域を利用した実験試験局として運用している。干渉SARでは例えば17GHz帯では波長約2cmの1/100程度の精度の位相変化から変位を検知できるが、大気の湿度、温度状態による電波伝搬の影響で実際の対象物変位より大きな大気の影響が現れることがある。GB-SARの運用で最も大きな課題は大気補正であり、研究が進められている分野である。

## 3. GPR

GPRは我が国において1980年代から道路下の埋設管検知などの分野で導入が始まったが、最近10年ほどの間にGPRデータのPCによるデータ処理や表示技術が格段に進歩したため応用が拡大している。さらに、舗装道路の検査、空洞検知、コンクリート構造物とコンクリート内部の鉄筋検知などで急速な導入が進んでいる。本稿では、最近の話題として地雷検知、遺跡調査へのGPRの応用を紹介する。

東北大学では電磁誘導センサ（EMIセンサ、金属探知機）とGPRを組み合わせた地雷検知センサALIS（エーリス：Advanced Landmine Imaging System）を開発してきた[5]。人道的地雷除去は、現場の状況に応じて幾つもの手法を組み合わせて利用されている。大型機械を利用して、地面を叩くことで地雷を強制的に爆破する「機械除去」技術は飛行場など無人で広域な除去には適するが、農村などでは利用できない。地雷検知には金属探知機を利用し、対人地雷に含まれる微小な金属を捜す手法が広く利用されてきた。機械除去を行った場所では、作業後に金属探知機などによる確認作業が義務付けられている。爆薬の臭いを検知する地雷犬も有力な検知手法であるが、運用費用が高い。現状では地雷検知技術として金属探知機が地雷検知に最も一般的に利用されているが、金属探知機は地雷以外の金属片にも反応するため、掘り出し作業に無駄な時間を要している。そこで、金属探知機に埋設物の形状を認識できるGPRを併用する「デュアルセンサ」が地雷検知効率を上げる手法として期待されている。2000年頃より我が国も含め多くのグループがGPRの地雷検知利用を試みたが、地雷原の土壌ではGPRの検知画像が強いクラッタを受けるため、実際の利用は容易ではないことが明らかになった。

東北大学が開発するデュアルセンサALISの最大の特長は、GPR信号を合成開口レーダ処理（SAR、マイグレーション）により埋設物の画像化を行うことでクラッタの軽減を図る点にある。操作者は、ALISの金属探知機を利用して地中の金属を検知したら、ALISのGPR機能を利用しSAR処理後の画像信号から地雷の有無を判断する。ハンドヘルド型センサでSAR処理機能を持つGPRセンサは、世界でALISのみである。地雷は通常20cm程度までの浅い深度にあるが直径10cm以下であるため、GPRとしては高分解能が要求される。ALISは800MHz−2GHzの周波数帯域を利用している。

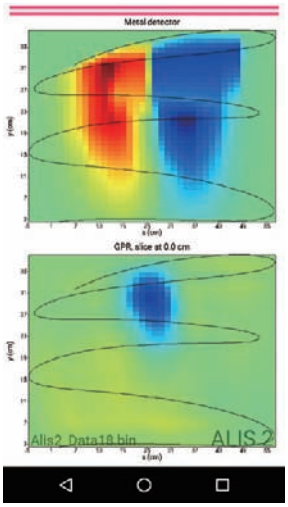
我々はALISプロトタイプを利用してクロアチア、カンボジアの実地雷原で地雷除去を実践してきた。2009年7月からCMAC（カンボジア地雷除去対策センター）がALISを用いて行った評価試験で検知された対象物は15,621個である。2台のALISを利用し、総計254,867㎡の範囲で地雷除去活動が実施された。この中で総計82個の対人地雷がALISによって検知され、そのほとんどが旧ソビエト製対人地雷PMN-2であった。

ALISで取得したデータはPCに保存されている。またCMAC隊員は、全ての金属片を掘り出す作業を行うが、すべての地雷を含む金属片以外の埋設物体を記録し、写真を撮っている。また作業員がALISのデータを見て、地雷の可能性の有無の判断を記録している。こうしたGPRを含むデータは世界で唯一の実地雷を記録したGPRデータであり、貴重な研究資料でもある。

総計15,621個の金属反応の中で3,522個は実際には金属片であるのに地雷として作業員によって報告されている。また12,081個は金属片をALISによって正しく金属片として識別し、82個の地雷は全て正しく地雷として識別された。この識別率の高さはデュアルセンサが金属探知機より効率が高いことの証である。

実地雷原で長期間にわたり実証試験を重ねてきたALISソフトウエアを搭載する実用型ALISが2017年末に完成した。**写真2**に概観を示すとおり、その形状や、重量が3kgしかないことなど従来の金属探知機と変わりがなく、現場への導入が容易である。信号処理はWi-FiでAndroidを搭載したタブ

■写真2. カンボジアで活躍する地雷検知センサALIS




■図2. ALISで画像化した地雷（上：金属探知機、下：GPR）

レットPCに送られ、SARを含む信号処理を行いカラー液晶表示する。

図2にALISが画像化した地雷を示す。操作者はこのデータを確認して、地雷の有無を判断する。ALISは2019年1月より、カンボジア地雷除去センター CMACによって本格運用が開始された。

石構造を主体とする遺跡ではGPRによる探査が非常に有効であり、1980年代から我が国でもGPRによる遺跡探査が積極的に進められてきた。遺跡調査用のGPRはおおよそ200MHz−1GHzの周波数帯域を利用する。

我々は、電波応用工学を専門とする立場から、ボアホールを利用した深部計測、送受信に多数のアンテナを利用するMIMO型GPR「やくも」による広域計測、高精度位置計測システムによる3DGPR遺跡調査のような先進的で特殊なGPR技術を導入する研究を進めている[6]。また東日本大震災の経験から、復興支援ならびに次の震災に備えた研究開発を行ってきた。

貴重な遺跡が国から文化財に指定されると、原則として発掘調査は許可されない。GPRは全く新しい遺構を発見するのはそれほど得意ではないが、(1) 掘れない遺跡の学術調査、(2) 掘る前に中身を知ることで遺跡を保護、(3) 保護の計画立案、などで重要な役割を果たすことが期待できる。

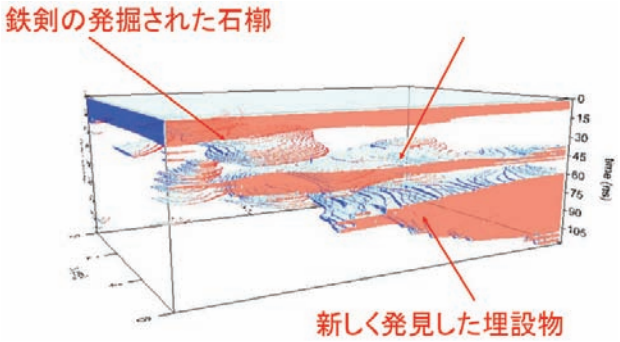
東北大学は全国各地で遺跡調査にGPRを利用する研究を行ってきたが、埼玉県さきたま古墳では奥の山、鉄砲山、稲荷山で精密な計測を行ってきた。3次元形状の古墳の頂点付近で精密な計測を行う必要がある場合、巻き尺で測線を設定する従来手法では正確な計測が望めない。そこで我々はレーザ測量機を併用し、レーダアンテナの移動する位置を正確に記録することで、GPRデータの3次元表示が可能となることを示した。これにより鉄砲山古墳の中腹にある石室入り口付近の形状を古墳表面から立体視することができた。また国宝の鉄剣が出土した稲荷山古墳では、現状の頂上から3m程度の深さに新たな埋蔵物が存在することをGPRで示した[7]。

## 4. GPRと電波法

GPRのアンテナは空気と土（誘電体媒質）が接する半無限境界面の近傍に置かれ電波を送信するため、媒質が強く影響する。FDTD（差分時間―時間領域法）による電磁界シミュレーションにより、媒質から1/10波長程度の高さに地面と平行に置かれたダイポールアンテナからの放射電界は、空気と誘電体の境界面に沿って発生する伝播モードにより、空中より媒質中に大きな電力を送信すること、またアンテナが境界面から1/3波長以上離れると、この現象が急激に消滅することを見いだした[8]。また通常のGPR装置のアンテナは上面にシールドを設けている。これは空中への放射を抑制するだけでなく、地上物からの反射波を押さえること、外来雑音を遮蔽することなどの役割を持つ。

周波数帯域幅が1GHzにも及ぶGPRは通常の無線局として運用するのは難しく、現状では微弱無線局の電界強度以下で使用されている。微弱無線局は電波を発する機器が他の無線機器に影響を与えることがないことを前提とし、機器から放射される電波の電界強度の許容値を定めている。総務省告示第百七十二号「著しく微弱な電波を発射する無線局の電界強度の測定方法を定める件」の要点は、

1. 床面が金属で他の5面が電波吸収体で構成される電波暗室内で計測を行う。




■図3. GPRで可視化したさきたま古墳群稲荷山古墳の内部

2. 被測定装置を高さ1.5mの非金属の回転台の上に置く。
3. 受信アンテナを被測定物から3m離し、受信電界強度が最大になるように設置する。

地表面付近に置かれたアンテナの放射特性とアンテナシールドにより、GPRから放射される電力のごく一部しか空中へは漏洩しないが、電波法に従うとGPRの信号強度は空中に装置が置かれた場合の最大強度で規定される。これはGPRが実際に空中に漏洩する電界強度と大きな隔たりがある。

一方で、電波法では人の生体内に植え込まれた状態または一時的に留置された状態でのみ使用する無線設備については、その外部における電界強度が3mの距離における電界強度に補正した値が、微弱無線局のレベルより低いものであれば、無線局の免許を受ける必要が無いという特例がある。こうした観点から、GPRの空中への放射電波強度は土のような誘電体の上で計測することが適切であると考えている。FCCでは既にこうした特例を設けてGPRの運用を規定しており、またITU勧告においても同様の計測方法が推奨されている。

自由空間における遠方目標に対するレーダシステムの検知能力はレーダ方程式で規定されるが、GPRは地中媒質中の近距離にあるターゲットを目標とするため、伝搬減衰と地中媒質の不均質性に起因するクラッタに大きく規制される。強いクラッタ環境下では出力を上げても信号に対するクラッタの比は一定だから検知深度の向上は期待できない。つまりGPRにおいて大きな出力は性能向上につながらない。さらに、GPRでは目標物が移動しないから計測に時間を要しても問題がない。通常は人が歩く程度の速度で計測を行う場合、連続して移動しても平均化を行いながら十分な距離密度でデータを取得できる。こうしたことから、GPR電波は出力を極限まで絞ることで他のシステムに影響を与えない設計が可能である。GPRが電波法を遵守しながら有効に利用することについて装置設計と法制度整備の両面から検討することが、近距離レーダの社会要請を満たしていくためにも重要であると考えている。

## 5. おわりに

5Gに利用される種々の通信技術は、アンテナ指向性制御やMIMO技術などレーダ技術と本質的に非常に類似している。こうした状況はレーダ装置の低廉化につながり、近距離レーダの普及にも貢献すると期待している。本稿では近距離レーダの技術概要と、最近の話題を幾つか取り上げた。本稿で取り上げた以外にも、空港の乗客安全確認装置、自動車の追突防止などに近距離レーダの用途は急速に拡大し、今後も近距離レーダ技術の発展は続くと考えている。

［2018年10月4日　情報通信研究会より］

### 参考文献


［1］ ホームページ 「17GHz帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用技術に関する調査検討会」報告書 http://www.soumu.go.jp/main_content/000217150.pdf

［2］ 高橋 一徳、松本 正芳、佐藤 源之（2012）「地上設置型合成開口レーダによる女川町津波被害地と栗原市崩落地の観測」物理探査学会第126回学術講演会講演論文集 pp.195-198.

［3］ K.Takahashi, M.Matsumoto and M.Sato(2013)“Continuous observation of natural-disaster affected areas using ground-based SAR interferometry” IEEE .Se. Topics. Applied Earth Observations and Remote Sensing vol. 6, no.3, pp. 1286-1294.

［4］ 佐藤 源之、鄒 立龍、菊田和孝　南阿蘇村立野地区におけるGB-SARによる地滑りモニタリング、Proceedings of the International Meeting on Eruptive History and Informatics No.2, 2017.

［5］ Motoyuki Sato, Introduction of the advanced ALIS：Advanced Landmine Imaging System, SPIE 10628, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXIII, 106280V（30 April 2018）；doi：10.1117/12.2303966

［6］ 佐藤 源之、金田 明大、高橋 一徳「地中レーダーを応用した遺跡探査　GPRの原理と利用」東北大学出版会 2016

［7］ 「稲荷山古墳に真のあるじ?」朝日新聞　2016年12月30日

［8］ 佐藤 源之、高橋 一徳、麻谷 由香、飯塚 泰「媒質近傍に置かれたアンテナからの電磁波放射―地中レーダへの応用―」信学技報 vol.115, no.141, EMT2015-20, pp.65-70, 2015年7月.