UNIVERSITY OF WEST LONDON
The Career University

UWL REPOSITORY

repository.uwl.ac.uk

Displacement and bibration monitoring by GB-SAR

Sato, Motoyuki, Zou, Lilong ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5109-4866, Nico, Giovanni and Kikuta, Kazutaka (2019) Displacement and bibration monitoring by GB-SAR. The IEICE Transactions on Communications, J102-B (11). pp. 844-852. ISSN 0916-8516

10.14923/transcomj.2019APP0003

This is the Published Version of the final output.

UWL repository link: https://repository.uwl.ac.uk/id/eprint/6735/

Alternative formats: If you require this document in an alternative format, please contact: open.research@uwl.ac.uk

Copyright:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

Take down policy: If you believe that this document breaches copyright, please contact us at open.research@uwl.ac.uk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

THE IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS (JAPANESE EDITION)

電子情報通信学会 B 論文誌

通　信

VOL. J102-B NO. 11
NOVEMBER 2019

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。
なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられている。

通信ソサイエティ

一般社団法人 電子情報通信学会

THE COMMUNICATIONS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

GB-SAR (地表設置型合成開口レーダ) による変位・振動計測*

佐藤　源之[†a)]　　鄒　立龍[†]　　ジョバンニ ニコ[††]　　菊田　和孝[†]

Displacement and Vibration Monitoring by GB-SAR*

Motoyuki SATO[†a)], Lilong ZOU[†], Giovanni NICO[††], and Kazutaka KIKUTA[†]

あらまし　Ku バンド（17GHz 帯）で動作する地上設置型合成開口レーダ (GB-SAR) の応用について紹介する．例えば GB-SAR を 1 台設置することで 400m × 400m の範囲の地表面変位を 0.2mm の精度で計測可能である．我々は社会実装の実例として，宮城県，熊本県における地滑り計測を行い早期警戒情報を発するシステムを構築し数年にわたり運用してきた．加えて GB-SAR による空港舗装面の変位や鉄橋の振動計測が行える事を実証した．更に MIMO レーダの利用により，数 Hz の振動計測が可能なことを示す．

キーワード　GB-SAR，SIP インフラ，社会インフラ，地滑り，MIMO レーダ，振動計測，変位計測

1. まえがき

自然災害，社会インフラの維持・管理に関して遠隔計測の応用が期待されている．これにより計測対象に対して直接センサを設置する必要がなくなり，広範囲を短時間で計測可能となる．これは費用の節減だけでなく，問題が発生する可能性のある位置を特定できない場合にもモニタリングが可能となることを意味する．遠隔計測は光波，音波，電波などの手法がとられるが本論文では安全性と応用の広さで注目を集めるマイクロ波を利用したレーダ計測を取り上げる．

衛星あるいは航空機に搭載された合成開口レーダ (SAR) は，マイクロ波を利用したリモートセンシングセンサとして地球環境計測，建造物，土木構造物など社会インフラの計測に広く利用されている．また同じ対象物を繰返し計測し，SAR 画像間の位相差から対象物表面の微小な変位を計測する干渉 SAR の手法は地震，火山，台風などの自然災害発生時に地滑り検知など被災状況を把握する手段として実用化されている．更に地下空洞によって発生した広域の地盤沈下などを検出する方法としても干渉 SAR は利用されている．

地表設置型合成開口レーダ (Ground Based Synthetic Aperture Radar：GB-SAR) はレーダ装置を地表面に固定して利用する合成開口レーダシステムであり，最近 10 年ほどで各種の応用事例が紹介されてきている [1]～[3]．GB-SAR は衛星，航空機搭載の SAR と計測原理は同じであるが，定点観測を行う点が異なり，その特長を活かして近年 GB-SAR の実用化は防災，社会インフラモニタリングなどの分野で応用が進んでいる．本論文では，東北大学が実践してきた GB-SAR による地滑り計測，空港舗装体計測，橋梁振動計測などの結果を示す．また現在我々が開発している MIMO 型 GB-SAR を用いた SAR2 次元画像での振動計測手法について紹介する．

2. GB-SAR システム

2.1 GB-SAR システムの開発

GB-SAR は地表に固定したレールの上をレーダアンテナを移動させながら取得したデータに対して合成開口レーダ信号処理（SAR 処理）を施すことで 2 次元 SAR 画像を得る．定点における連続計測に特徴があり，繰り返し計測で SAR 干渉処理を行うことで地表面など反射体の微小な変位を検知できる [1]．

衛星，航空機搭載 SAR ではプラットホームの高速移動によって発生するドップラ周波数を利用してアジマス方向の画像化処理を行うが，GB-SAR ではアンテナの移動速度が遅い，あるいはアンテナは静止して

† 東北大学東北アジア研究センター，仙台市
Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University, 41 Kawauchi, Aoba-ku, Sendai-shi, 980–8576 Japan
†† イタリア学術会議応用数学研究所，イタリア
Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per le Applicazioni del Calcolo, Italy
a) E-mail: Motoyuki.sato.b3@tohoku.ac.jp
* 本論文は，システム開発・ソフトウェア開発論文である．
DOI:10.14923/transcomj.2019APP0003

 ⓒ一般社団法人電子情報通信学会 2019

計測を行うため，ドップラ周波数は利用できない．そこで一般的には時間領域でのバックプロジェクションを原理とする画像再構成を利用している．

衛星，航空機搭載 SAR では合成開口長に制限がないため，アジマス分解能が対象物までの距離と無関係である．しかし GB-SAR では合成開口長はアンテナが移動するレールの最大幅で規制されるため，理想的な SAR のアジマス分解能は実現できず，距離依存性をもつ．実際にはアンテナの放射パターンや S/N 比の制約によって分解能が決まる．

また繰り返し計測を行ったデータに対して干渉処理を行うことで実用的には計測波長の 1/100 の精度で変位計測が実現できる．現在周波数利用許可が得やすいため世界中の GB-SAR で標準的に利用されている 17GHz 帯での変位計測精度は 0.2mm に相当する．我々も実フィールドにおいてこの精度が実現でることを実証した [1].

我々は 1997 年頃より対象物の 3 次元計測，レーダポーラリメトリの応用など学術的な観点からの基礎的な GB-SAR の研究を進めてきた [4]．また世界的にも幾つかのグループが研究を進め，2005 年に佐藤は国際会議 IEEE IGARSS において GB-SAR の特別セッションを設けた．

一方，2005 年頃より商用の GB-SAR 装置が入手できるようになり，我が国においても数台の GB-SAR が導入され，地滑りや火山計測に利用されている [1]〜[3]．総務省関東総合通信局では GB-SAR の実用化に向けた周波数利用に関して「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」を 2012 年度に実施した [5]．17GHz 帯は欧州などでも GB-SAR に利用されており，我が国においても他の目的との周波数干渉などの問題は無く，また地滑りなどへの応用としても適した周波数であるとの結論を得ている．

GB-SAR は我が国において，地滑りなど土砂災害に帯する防災，減災のためだけでなく，大規模な構造物の変位や振動を遠隔計測できる特長を活かし今後活用されるべきだと考えている．

GB-SAR 計測を従来土木施工管理などで利用される手法と比較した場合の特長は以下のとおりである．

1) GPS，ひずみ計，傾斜系など従来のセンサは離散的な位置の変位計測しかできないが，GB-SAR はレーダ視野内の全ての位置の変位を面的に捉えることができる．

図 1　宮城県・荒砥沢に設置した GB-SAR システム
Fig. 1　GB-SAR system installed at Arato-zawa, Miyagi.

2) 斜面で変位が起こりそうな位置をあらかじめ特定する必要ながない
3) センサの設置が危険な場所でも遠隔地から計測が可能である．
4) レーザ計測と比較して，霧などの天候の影響を受けにくい．
5) 現状ではレーザ計測より遠隔の計測が可能である．

通常干渉 SAR 計測では繰り返し計測において振幅変動が少ない点をコヒーレント散乱点 (CS) として抽出し，CS の位相変動のみを干渉データとして利用する．我々は少ない画像から複素振幅を利用して CS を高精度・高速に抽出するアルゴリズムを提案している [3].

2.2　実開口レーダ

現状の GB-SAR は，レーダ装置をレール上を移動させながらデータ取得を行うため，レーダ装置のパルス繰返し周波数 (PRF) が高くとも，1 枚の SAR 画像を再構成するために必要なデータを取得するために 10 秒程度を要する．したがって，10 秒より早い周期で振動する対象物の計測はできない．

一方，レーダ装置そのもの PRF は数 kHz にも達するので，GB-SAR 用のレーダを合成開口レーダではなく実開口レーダとして利用することで，対象物の振動計測への利用が行える．この場合，2 次元の SAR 画像を再構成することはできないが，レーダのレンジ方向の分解能は維持される．例えば周波数帯域幅 $B = 300$ (MHz) をもつレーダのレンジ分解能は

$$\Delta R = c/2B = 0.5m \qquad (1)$$

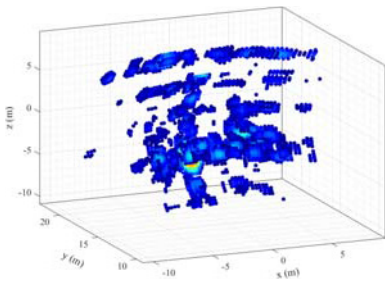


図 2　MIMO 型 GB-SAR で得られた 3 次元 SAR 画像 [6]
Fig. 2　3D SAR image obtained by a MIMO GB-SAR system [6].

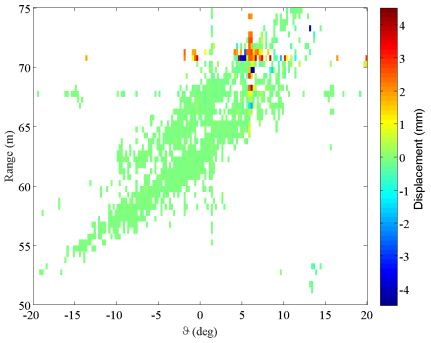
（ただし c は光速）と与えられる．つまりレーダ反射位置を装置からの視線方向で 50cm の分解能で識別できれば，その位置の振動を数百 Hz まで計測することが可能であり，我々は鉄橋の振動計測に利用した．

2.3　MIMO レーダ

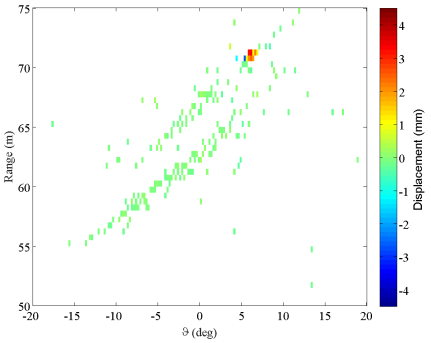
我々は多素子アンテナを電子スイッチで切り替え SAR 計測を実現する MIMO 型 GB-SAR の基礎実験を行っている [6]．MIMO は大容量の通信方式として注目されているが，レーダにおいてはイメージングの分解能を高めるために利用できる．MIMO 型 GB-SAR ではアンテナ素子間隔が最高周波数に対して半波長を越えた場合にも素子配列の最適化を行うことでグレーティングローブに起因する SAR 画像での虚像を抑制することができる．

図 2 は研究室で試作した MIMO 型 GB-SAR 装置によるコンクリート建物の壁面の計測例である [6]．アンテナを 2 次元にアレー配置することで，3 次元の SAR 画像を取得することができる．従来の機械的にアンテナを動かす GB-SAR 計測では，アンテナを 2 次元的に移動するために計測に長時間を要したが，MIMO 型 GB-SAR では短時間で計測が可能となる．この実験に使用した送受信装置は商用のベクトル・ネットワークアナライザは，データ取得速度が遅いため本実験では数秒に 1 枚しか画像が得られないが，同様の送受信装置を使い，アンテナを 2 次元で移動しながらデータを取得し同等の精度の画像を得るためには，データ取得間隔をナイキスト定理で定まる半波長以下，この場合では 1cm 程度とする必要があるためデータ取得には数時間を要する．またアンテナ間隔はアンテナの物理的な大きさより狭める必要があり，従来手法ではそもそもレーダ装置を実現することができない．

(a)　計測対象のダムと設置した反射鏡
(a) A reflector set on the dam



(b)　従来手法による変位計測
(b) Displacement by conventional method



(c)　コンプレッシブセンシング(CS)による変位計測
(c) Displacement by Compressive Sensing(CS).

図 3　干渉 SAR によるダムの変位計測 [8]
Fig. 3　Displacement obtained by In-SAR [8].

2.4　コンプレッシブセンシング (CS)

アンテナ素子を半波長を越えた間隔で配置したアレーで計測したデータからグレーティングローブによる虚像を抑制しながら高分解能のイメージングを行うために現在我々はコンプレッシブセンシング (CS) の概念を導入した信号処理手法の開発を行っている [7], [8]．

図 3 は，ダムの貯水量が変化した場合の，ダム壁面の変位量を GB-SAR で計測した結果である．図面はレーダ装置からの方位角 θ と距離の 2 次元表示であ

り，色は距離方向の変位量を示している．レーダの正面に向かってダム全体が斜めに位置するため，強い反射点が図では斜めの帯状に分布している．図 3 (b) には従来手法での SAR 画像に干渉処理を施したのに対し，図 3 (c) ではコンプレッシブセンシング (CS) によって SAR 画像を再構成した上で干渉を計測している．コンプレッシブセンシング (CS) の利用によって画像のアジマス方向の解像度が圧倒的に高まることにより，基準のために設置した反射鏡の位置が図 3 (c) では高精度に定まっていることがわかる．GB-SAR では画像全体から対象の 2 次元構造における反射点を特定できるが，校正を目的として反射鏡を設置している．

2.5 大気補正

干渉 SAR 計測では波長オーダでの精度の位相計測を行う必要がある．17GHz で波長が約 2cm の場合，干渉 SAR で計測する百分の一波長分の電波伝搬時間は 1ps 程度であるからこれ以上の安定した位相精度の計測が求められる．

ところが電波が伝搬する大気は湿度，温度，気圧などの条件で電波伝搬速度が変化することが知られている．干渉 SAR では大気中伝搬経路における伝搬速度の大気の状態による変化は計測対象が数百 m 程度の距離であっても，無視できない影響を与えることが理論的また実験結果から明らかになっている．このため実用的に干渉 SAR 計測によって変位推定を行う場合，大気補正のアルゴリズムは重要である．

GB-SAR 計測においては CS（コヒーレント散乱点）の位相変化のレンジ方向分布から大気中伝搬速度が一様であると仮定して速度を推定し，大気補正を行っている．しかし現状で使われている大気補正の手法には各種の問題があり，また火山計測のように観測対象までの距離が大きい場合に特にその影響が顕著であることが知られている．現在我々のグループでは計測地点での気象情報を利用した大気補正の手法につて検討を進めている．

一方で通常の衛星 SAR データを利用して干渉 SAR イメージを作成する場合，計測間隔が長いとその間の対象物変化量が大きく，干渉位相が π 以上変化することによって位相ラッピングの現象が観測される．GB-SAR では観測間隔を狭めることが容易にできるからこうした現象を防ぐことができるなど，従来の SAR 処理とはやや異なる面も存在する．

2.6 周波数利用

2012 年度に総務省関東総合通信局は 17GHz 帯 (Ku バンド) の周波数の GB-SAR への利用適合性という観点で他の無線局との干渉などがないことを確認し，GB-SAR への利用を促す報告書をまとめた [5]．Ku バンドは実用化が先行した欧州で標準的に利用されてきた周波数であるが，地滑りなど植生に覆われていない地面や，ダムや橋梁など比較的大きな構造物の表面を計測する場合，干渉 SAR において変位が 0.2mm 程度の高分解能で計測できる点で有用であると考える．しかし SAR 計測の観点からは通常の SAR と同様，L バンド，S バンド，C バンド，X バンドなど他の周波数帯域での利用も異なる目的に対して望まれる．

例えば植生に被覆されている場所の地表面経に計測では植生を透過できる L バンドの利用が有効だろうと思われる．また植生自体を計測する上では X バンド周辺が適切ではないかと思われるが，こうした周波数による特性は通常の衛星計測などと同じ状況である．しかし現状では他の無線設備との両立の点で Ku バンド以外の周波数利用例はあまりないのが現状である．

2.7 多偏波計測

送受信電波を直交する 2 偏波，例えば垂直と水平，あるいは右旋と左旋のような組み合わせで計測する，いわゆるポーラリメトリ計測を行う事ができれば，利用する周波数を拡大することなく，計測対象の割れ目など表面状態，水分率の変化など単一偏波では計測不能な多様な情報を取得できる．

3. 地滑りモニタリングへの応用

我々は研究室内での GB-SAR 実験に続き，実用規模での計測実験として 2008 年岩手・宮城内陸地震，2016 年熊本地震で発生した大規模土砂災害に対して 17GHz 帯 GB-SAR による長期モニタリングを開始し，早期警戒情報の発信など社会実装を目指した研究を行っている．

3.1 栗原市荒砥沢

我々は岩手・宮城内陸地震によって発生した宮城県栗原市荒砥沢地域を対象として 2 次災害防止のための崖面モニタリングに図 1 に示す GB-SAR (イタリア・IDS 社製) を導入した [1]．本計測は東北大学と栗原市が締結した地滑り地域のモニタリングに関する協定に基づいて実施している．現地では 2011 年 11 月から連続計測を継続しており，GB-SAR による地滑り計測手法の有効性を検証する土砂崩れの様子をリアルタイムで連続モニタリングできるシステムを完成させ，図 4 に示すような変位図面を常時モニタリングできる．

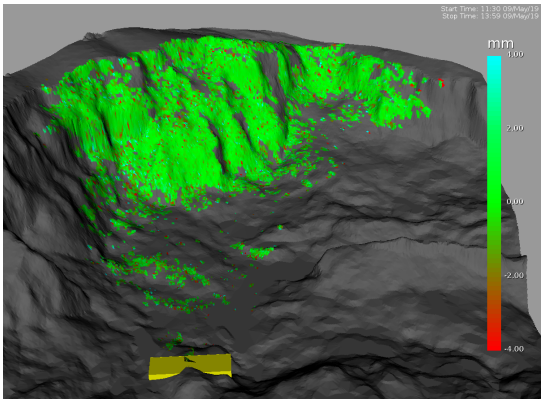


図 4　栗原市荒砥沢の地滑り干渉 SAR 画像
Fig. 4　In-SAR image at Arato-zawa.

図 5　南阿蘇村立野地区に設置した GB-SAR
Fig. 5　GB-SAR system installed at Minami-Aso.

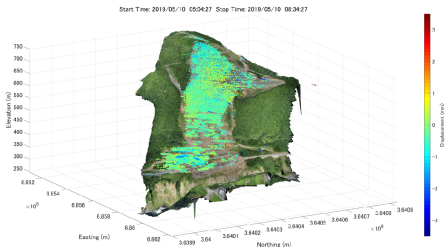


図 6　南阿蘇村立野地区に設置した干渉 SAR 画像
Fig. 6　In-SAR image at Minami-Aso.

図 4 は表面のレーダからの視線方向の変位量を色で表現しており，緑色は変位無し，青はレーダから遠ざかる方向，赤は近づく方向に地表面が変位したことを示している [6]．本計測ではレーダ装置から計測対象とする崖面まで約 500m，計測範囲は縦方向 100m，横方向 500m 程度である．

GB-SAR による地滑りモニタリングが住民や作業の安全を確保するために有効な事例は国内外で数多く見られる半面，GB-SAR が長期的に実際のモニタリングに用いられた実例は非常に限られている．

本計測は栗原市役所と協力し現場に高品位ビデオカメラを設置して斜面を監視している．一方 GB-SAR は 5 分間隔の計測データから干渉 SAR 画像を作成し，しきい値を超える変位が時間あたりに起きた場合，自動的に関係者に電子メールが送られるシステムを構築している．ただしこれまでの警告は小規模な土砂の崩落や積雪によるものがほとんどである．

荒砥沢の大崩落計測地点は地震によって山体が 800m 移動し，その隙間に現れた崖面である．このため，表面に移動するような土砂が堆積しておらず，表面の変位などはほとんど計測されていない．こうした状況の変化も，広域を一度に計測できる GB-SAR によってはじめてもたらされる知見である．本地域は今後立ち入り規制の緩和などが計画されており，現場の保全や立ち入りの安全確保のためモニタリングを今後 3 年間程度継続する予定である．

3. 2　南阿蘇村立野

2016 年 4 月熊本地震では南阿蘇村で大規模な地滑りにより国道，橋梁が被災し，現在復興作業中である．我々は東北大学災害科学国際研究所，熊本大学くまもと水循環・減災研究教育センター，情報通信研究機構と協力し，南阿蘇村立野地区に図 5 に示す 17GHz 帯，周波数帯域 300MHz の GB-SAR (オランダ・Meta Sensing 社製) を設置し 2017 年 1 月より復興工事の安全確保のための地滑りのモニタリング実証実験を行っている [2]．

ここで設置したレーダ装置は GB-SAR としては世界で初めてフルポーラリメトリ計測が可能なシステムである．干渉 SAR を目的とした計測では偏波情報を直接は使用していないが，偏波情報を利用した地表物の識別を行い，偏波情報の細密な利用を検討している．

図 6 は本地区で計測した干渉 SAR 画像の一例である．図中の色は計測した変位量を示している．斜面下部で青い箇所は，重機が移動しているために発生した変位であり，崩落した斜面全体では，一定方向への動きがわずかではあるが計測されている．本地域では 2018 年 9 月時点で，崩落地域の下部で道路の修復のための有人工事が行われていた．現状では作業員が目視で斜面の異状を確認しながら作業を行っているが，霧などにより視界が得られない場合，安全確保ができないので作業は中止している．GB-SAR による連続計測を行うことでこうした問題も解決できる．

本計測は国交省九州地方整備局熊本復興事務所が進める復興事業の一部として現場作業の安全確保のために利用されている．

4. インフラモニタリングへの応用

4.1 羽田空港舗装体計測

GB-SAR は老朽化が問題となっている社会インフラの維持管理技術としても応用が広いと考えている．我々は羽田空港において空港舗装面の表面変位を計測することで舗装体内部の状況をモニタリングできることを実証するための実験を行った [9], [10]．

空港では滑走路，誘導路，駐機場のアスファルト舗装体が内部で損傷する事例が報告されており，航空機運航の安全確保のため金属棒で舗装体表面を叩く打音検査が行われている．こうした検査作業の効率化を図るため，我々は GB-SAR を利用した広域計測を提案し，図 7 のように羽田空港の航空局庁舎の屋上に GB-SAR 装置を設置し，誘導路を中心とする範囲の計測を行った．

図 8 に計測した GB-SAR の強度画像を示す．レーダ波は平滑な滑走路面に水平近い角度で入射するため，反射強度は極めて弱い．対向する国際線ターミナルビルからは強い反射波が得られている．図 9 は航空機の荷重による舗装面表面の変位状態である．航空機の運用の少ない夜間と多数の航空機が移動する昼間で変位の挙動が異なることを実験的に見いだした．赤線は打音検査で健全が確認された箇所，青線は異状の可能性がある箇所であり，差異が見られる．我々の知る限り，空港を含む舗装面の振動を GB-SAR で計測した実例はこれまでない．空港の環境は大気の状態が非常に不安定であり，安定した計測を実現するためには，より高度な大気補正手法が必要であると考えている．

我々の研究では，GB-SAR で検知した舗装体表面に異状が見られた地点を地中レーダ (GPR) を用いて舗装対内部を精査することで，広域計測と精密計測を有機的に結合することを目指している．空港舗装体の GB-SAR による計測は大規模な社会インフラを計測する一例であるが，道路，ダムなど同様に広い面積を一度に計測する目的に GB-SAR は適していると考えている．

4.2 橋梁計測への応用例

現在実用化されている GB-SAR 装置の PRF は数 kHz であるので，レーダ装置を GB-SAR ではなく実開口レーダを利用することで数 Hz 程度までの周波数における構造物の振動計測が可能である．計測可能な周波数はレーダ装置の PRF に依存する．実開口レーダでは SAR のように対象物の形状をレーダ画像から直接は認識できず，レーダからの 1 次元の視線方向距離 (Slant Range) から計測位置を特定する必要がある．例えば図 10 に示す橋梁計測ではレーダを橋梁の

図 7　羽田空港に設置した GB-SAR
Fig. 7　GB-SAR system installed at Haneda airport.

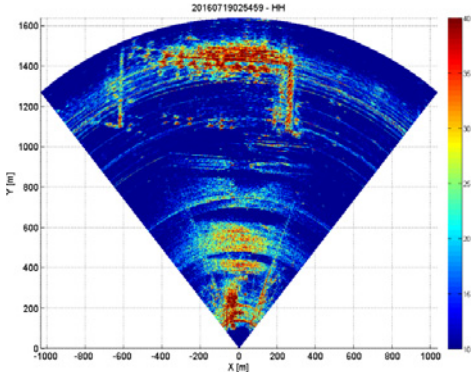


図 8　羽田空港の GB-SAR 強度画像
Fig. 8　Intensity image of GB-SAR at Haneda airport.

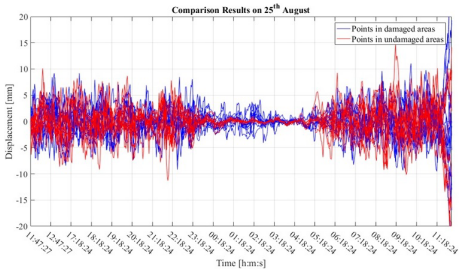


図 9　羽田空港誘導路面の表面変位
Fig. 9　Displacement at Haneda airport taxiway.

図 10　鉄道橋梁に設置したレーダ装置
Fig. 10　Radar system installed near a bridge.

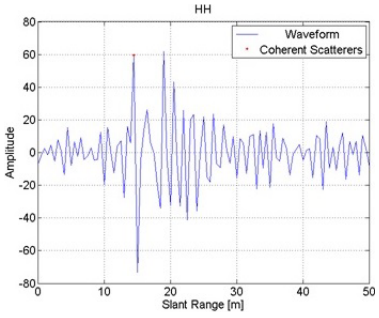


図 11　Slant Range に対するレーダ波形
Fig. 11　Radar signal along slant range.

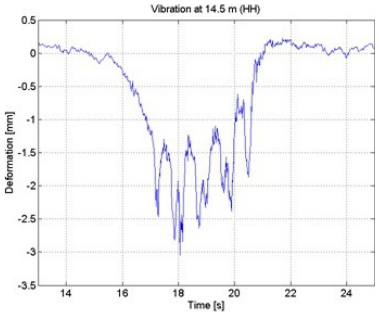
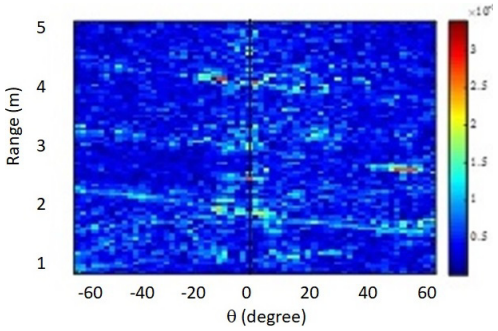


図 12　レーダの干渉から求めた変位
Fig. 12　Time lapse displacement by radar.

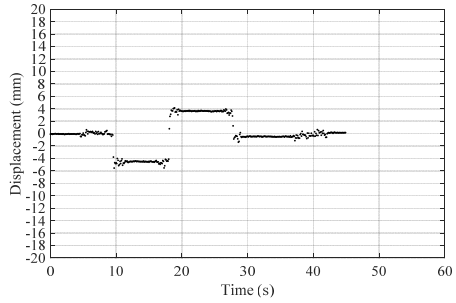
下面に照射し，Slant Range と橋梁構造の対応を単純につけられるように工夫している [11].

図 11 にレーダ反射時間を Slant Range に変換したレーダ波形を示す．レンジ方向の分解能は 50cm 程度であるが，図 10 で見られる橋梁の写真と比較して，強い反射点は橋梁の構造体を識別していると考える．こ

(a)　MIMO 型 GB-SAR 用一次元アレイアンテナ
(a) 1-D array antenna for MIMO GB-SAR



(b)　SAR 画像
(b) SAR image



(c)　抽出点の振動波形
(c) Vibration signal

図 13　MIMO 型 GB-SAR による振動計測
Fig. 13　Vibration measurement by MIMO GB-SAR.

こで安定した振幅を示す位置を CS として抽出した点を図の中に示す．この地点について，レーダの位相情報から干渉を計算し，変位に換算したのが図 12 である．この図は Slant Range 方向の目標物の振動に伴う変位を計測している．

図 12 は 4 両編成の電車が通過した際のデータであるが，車両通過に伴う車軸が計測地点を通過する様子が正確に読み取れる．こうした振動計測は Slant Range から多数の計測点を抽出すれば同時に多数の振動計測

を行うことができる．

4.3 MIMO GB-SAR による振動計測

我々は MIMO-SAR を使い SAR 計測での直接振動計測システムを開発した．図 13 は MIMO 型 GB-SAR 用一次元アレーアンテナである．この装置では 4-8GHz で高速送受信機とスイッチを利用しているため，毎秒 100 枚以上の SAR データが取得可能である．

図 13 (b) に本装置で取得した SAR 強度振幅画像例を示す．色は反射強度に対応する．室内の 2 次元的な SAR イメージングが行われているが，室内ではレーダ分解能以下の多数の反射点があるため個別の反射体判別がやや難しい．明確な反射点を得るため中央付近に置いた反射鏡を意図的に振動させ，そのときの中心付近にイメージされている反射鏡の位置で，干渉位相から求めた変位量を図 13 (c) に示す．2cm 程度移動した反射鏡の位置が現れていると同時に，反射鏡を移動したときに生じる細かな振動が明瞭に捉えられている．

5. むすび

本論文では GB-SAR 研究の動向を説明した後，GB-SAR を利用した地滑り，インフラ計測の事例を紹介した．栗原市や南阿蘇村における GB-SAR による地滑り計測事業は地震など自然災害からの復興を支援する活動であるとともに，日本全国で発生する地滑りに対する防災・減災のための社会実装実験と捉えている．こうした GB-SAR の実用的な利用例は，世界的に見てもほとんど実例がないと考えている．

一方社会インフラのモニタリング技術は今後我が国において非常に重要な技術となりうると考えている．ダムや橋梁などの計測に加え，空港舗装路への適用は世界で初めての結果である．

更に MIMO 型 GB-SAR の導入は，現状の GB-SAR がもつ計測頻度の低さを補う手法であり，従来型の GB-SAR に加えて実装例を増やしながら実用化を推進していく [12].

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金 (A) 26249058 並びに戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：NEDO）によって実施されました．荒砥沢計測については栗原市，立野計測については熊谷組，橋梁計測にあたっては JR 東日本コンサルタンツ (株) の協力をいただきました．また土木施工管理については安藤ハザマ中谷匡志博士に助言をいただきました，ここに感謝いたします．

文　献

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

[2] 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,” 国際火山噴火史情報研究集会講演要旨集，pp.84–96, 2018.

[3] 高橋一徳，松本正芳，佐藤源之，“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, 2012.

[4] Z. Zhou, M. Boerner, and M. Sato, “Development of a ground-based polarimetric broadband SAR system for noninvasive ground-truth validation in vegetation monitoring,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sensi., vol.42, no.9, pp.1803–1810, 2004.

[5] http://www.soumu.go.jp/soutsu/kanto/stats/

[6] W. Feng, J.-M. Friedt, G. Nico, and M. Sato, “Three-dimensional ground based imaging radar based on C-band cross-MIMO array and tensor compressive sensing,” IEEE Geosci. Remote Sensi. Lett., under review.

[7] W. Feng, L. Yi, and M. Sato, “Near range radar imaging based on block sparsity and cross-correlation fusion algorithm,” IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens., vol.11, no.6, pp.2079–2089, 2018.

[8] W. Feng, G. Nico, and M. Sato, “GB-SAR interferometry based on dimension-reduced compressive sensing and multiple measurement vectors model,” IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol.16, no.1, pp.70–74, Jan. 2018.

[9] L. Zou and M. Sato, “An advanced algorithm for surface deformation monitoring of an airport taxiway by GB-SAR,” 信学技報，EMT2016-89, 2017.

[10] http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/kadai/k07-15.pdf

[11] 佐藤源之，鄒　立龍，ジョバンニ ニコ，“地表設置型合成開口レーダ (GB-SAR) によるインフラモニタリングに関する基礎実験,” 信学技報，AP2016-179, 2017.

[12] G. Nico, G. Cifarelli, W. Feng, and M. Sato, “ Measurement of pier deformation patterns by ground-based SAR interferometry: Application to a bollard pull trial,” IEEE J. Ocean. Eng., vol.43, no.4, pp.822–829, Oct. 2018.

（2019 年 1 月 16 日受付，5 月 10 日再受付，
7 月 12 日早期公開）

佐藤　源之　（正員：フェロー）

1980 東北大・工・通信卒．1985 同大大学院工学研究科博士課程了．同大工学部助手，助教授を経て現在，同大東北アジア研究センター教授．2008-2011 東北大学ディスティングイッシュトプロフェッサー．1988-1989 ドイツ連邦地球科学資源研究所客員研究員．電磁波応用計測，人道的対人地雷検知除去の研究などに従事，開発した ALIS はカンボジア地雷除去活動で活躍中．工博．2014 Frank Frischknecht Leadership Award (SEG) 受賞．2017 本会喜安善市賞受賞．2015-2016 電磁界理論研究専門委員会委員長．IEEE Fellow，電気学会会員．

鄒　　立龍　（正員）

2009 中国·吉林大学·地球物理学卒．2012 同大学院修士課程了．2016 東北大・環境科学研究科博士課程了．Ph.D．東北大学東北アジア研究センター助教を経て産総研研究員．GB-SAR，信号処理に従事．

ジョバンニ ニコ

1998 イタリア・バリ大学博士課程了．Ph.D．イタリア学術会議応用数学研究所研究員．2017 東北大学東北アジア研究センター客員教授．IEEE Senior Member．

菊田　和孝　（正員）

2012 東京大学・工卒．2017 同大大学院工学系研究科博士課程了．現在，東北大学東北アジア研究センター助教，地中レーダ，電磁波信号処理の研究に従事．