

C-band 衛星 SAR による熊本地震変状解析と 構造物監視に向けた検討

岩城 英朗¹・鳴海 智博²・横島 喬²

¹ 正会員 清水建設株式会社 技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17）
E-mail: iwakih@shimz.co.jp

² 非会員 清水建設株式会社 技術研究所（ 同上 ）

近年の自然災害における変状解析で利用が進められている衛星 SAR 観測データを、平成 28 年熊本地震における変状解析に適用した。現在国内では、L-band 衛星 SAR が解析に多く用いられているが、本報では、より短波長の C-band 衛星 SAR による解析を行った。異なる 2 回の衛星 SAR 観測データの差分を求める干渉 SAR 解析を用いて、熊本地震直後の地盤変位が最大約 2 メートル東方であったことを求め、併せて以降は大きな変位は認められないことがわかった。また、複数の衛星 SAR 観測データの強度画像から、橋りょうなどの構造物からの反射を確認することができ、地震前後で阿蘇大橋周辺の反射強度分布が異なることを確認したが、衛星 SAR の平面分解能の限界から、構造物の変状解析には至らなかった。

Key Words: C-band Satellite SAR, kumamoto earthquake, structure monitoring

1. はじめに

近年の地震、噴火および豪雨などによる水害や斜面崩落などの自然災害の変状解析に、人工衛星搭載型合成開口レーダー(衛星 SAR)のデータ利用が進められている。

我が国は現在、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の手により、陸域観測技術衛星「だいち 2 号」(ALOS-2)を運用しており、同衛星に搭載されているフェイズドアレイ方式 L-band 合成開口レーダー(PALSAR-2)で取得したデータを用いたさまざまな解析が行われつつある。しかしながら、これらのデータの取得および利用は容易ではなく、限られた分野でのデータ利活用にとどまっているのが現状である。

そこで本報では、データの入手が研究・教育用途においては比較的容易で、かつデータ処理を行うソフトウェア群も併せて整備されつつある、欧州宇宙機関(ESA)の地球観測計画(コペルニクス計画)で運用されている衛星「センチネル-1」(Sentinel-1)で取得した C-band 衛星 SAR データを用いて、平成 28 年熊本地震前後の地盤等の変状解析を行い、併せて橋りょうなどの構造物の監視に同観測データを用いることができるか検討を行った結果を示す。

2. C-band 衛星 SAR による変状解析

衛星 SAR とは、図-1 に示すように人工衛星から電磁波(マイクロ波)を放射し、その反射波をアンテナで受信することで、衛星と地表の距離および反射強度を求め、地表面の観測を行う機器である。現在各国で運用されている衛星 SAR は表-1 に示すように、用いている周波数帯(波長)、および衛星運用の方式により得られるデータに違いがある。

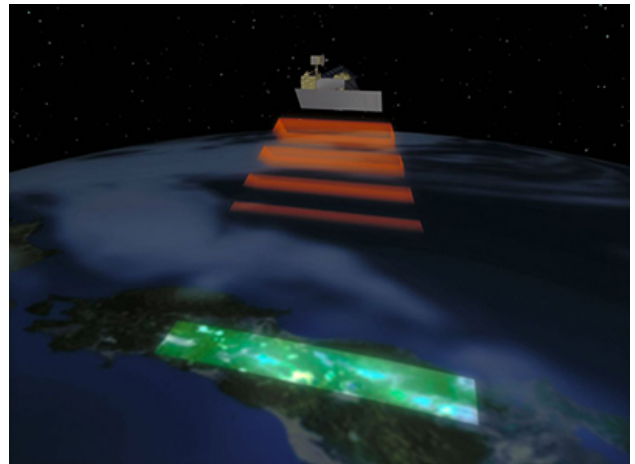


図-1 衛星 SAR による観測の概念図(JAXA HP より)

(1) 衛星 SAR で得られるデータ

L-band 衛星 SAR を搭載する ALOS-2 と、本報告で用いる C-band 衛星 SAR を搭載する Sentinel-1 の主な諸元および観測パラメータを表-2 に示す。ALOS-2 および Sentinel-1 のいずれも、上記のように地表面の状況を、地表からの反射波の強さと、衛星から地表までの距離から取得するが、実際は衛星から地表までの距離は、反射波の位相情報 ($-\pi \sim \pi$) として観測するため、衛星 SAR に用いるマイクロ波の波長が短いほど、距離測定に精度に優ることが期待できる。また、地表面の平面分解能は、衛星から放射する電磁波のビーム径、走査方式およびアンテナの性能、さらに一度の観測で取得する範囲(面積)等で左右される。

表-1 衛星 SAR で用いる波長帯と主な人工衛星

名称	波長	主な人工衛星
P-band	~65cm	(米)AIRSAR(※航空機搭載型 SAR)
L-band	~23cm	(日)ALOS/ALOS-2
S-band	~10cm	(露)Almaz-1
C-band	~5cm	(加)RADARSAT(欧)Sentinel-1
X-band	~2cm	(欧)TerraSAR-X, COSMO-SkyMed
K-band	~1.2cm	非公開(軍事用)

表-2 主な衛星 SAR の諸元と運用

名称	ALOS-2	Sentinel-1
運用機関	JAXA	ESA
軌道投入	2014 年	2014 年
波長帯	L-band	C-band
観測幅	50km(※1)	250km(※2)
地上分解能	5m×5m	5m×20m
衛星高度	628 km	693km
ビーム入射角	8~70°	29.1~46°
軌道	極軌道	極軌道
回帰	14 日	12 日

(※1)高分解能モードの場合

(※2)IW モードの場合

(2) 干渉 SAR による変状解析

また、災害発生前後の変状解析などを行うためには、2 回以上の複数回にわたり観測した衛星 SAR データ(データセット)の差分から、位相差、強度差、および干渉度(コヒーレンス)などの分布を求める必要がある。この処理を干渉 SAR 解析という。

a) 位置の補正、衛星軌道の向き

複数回の衛星 SAR データは、図-2 に示すように各々の衛星軌道およびデータ取得範囲の差があることから、干渉 SAR 解析を行う前に、それぞれのデータの間で位置合わせ等の補正を行う必要がある。

さらに、極軌道で地球上空を周回している衛星(たと

えば表-2 の両衛星)では、たとえば本報のように熊本地域の観測を行う際に、南極から北極方向の軌道(ASCENDING 軌道)と、北極から南極方向の軌道(DSCENDING 軌道)の双方で観測を行うことができるが、軌道が異なるデータ間では干渉 SAR 解析および前処理(位置合わせ等)を行うことが困難であるため、解析を行う前にデータ間の軌道に違いがないか、留意する必要がある。

b) 位相の重畳み

干渉 SAR で得られた位相差は、データ間の衛星から地表面への距離差に変換できる。しかし、衛星 SAR に用いる波長(表-1)を超える変位がデータ間に起こった場合は、実際の変位が波長分に重畳まれるラッピングが生じ、実際の変位量よりも小さい値を示すという課題がある。

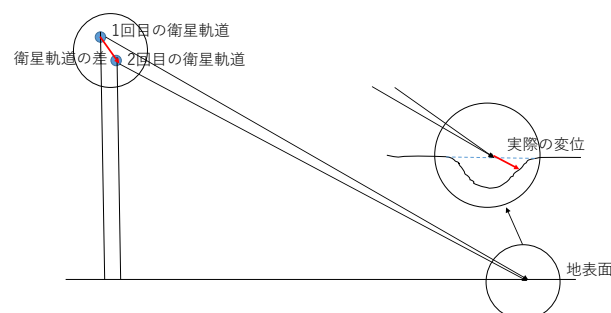


図-2 干渉 SAR 解析の概念図

(3) 衛星 SAR データの入手とデータ処理

Sentinel-1 の C-band 衛星 SAR データは、研究・教育用途での使用においては、データ取得のためのアカウント取得を含め、ESA コペルニクス計画のポータルサイト(<https://scihub.copernicus.eu/>)から無料で行うことができる。また、取得したデータを処理し、干渉 SAR 解析等を行うためのソフトウェアや技術資料も、同サイト経由で取得できる。

また、上記の干渉 SAR 解析において生じる位相の重畳みの課題に対しても、周囲のピクセル値から重畳みを除く(アンラッピング)方法および ESA 外で作成されたソフトウェアの入手設定方法について参照することができる。

3. C-band 衛星 SAR による熊本地震変状解析

(1) 衛星 SAR データセットの取得

上記で示した ESA ポータルサイトから、熊本地震前後のデータセットを表-3 に示す通り取得した。なお、表-3 のデータセットは、図-3 に示す衛星軌道の向きの違いにより区別し、データ①と②、およびデータ⑤と⑥

を地震発生前後の干渉 SAR 解析に用い、データ③、④および⑦、⑧については地震発生後の経過観測に主に使用した。

表-3 干渉 SAR 解析に用いたデータセット

データ名	観測日時 (時刻は UTC)	軌道
①	2016年4月8日9時	ASCENDING
②	2016年4月20日9時	ASCENDING
③	2016年5月14日9時	ASCENDING
④	2016年6月7日9時	ASCENDING
⑤	2016年3月27日21時	DESCENDING
⑥	2016年4月20日21時	DESCENDING
⑦	2016年5月14日21時	DESCENDING
⑧	2016年6月7日21時	DESCENDING



(a)データ①～データ④の観測域



(b)データ⑤～データ⑧の観測域

図-3 熊本地震前後の衛星 SAR データ観測

(2) 熊本地震前後の地盤変状解析

図-4 は表-3 のデータ①とデータ②を、ESA から取得した SAR 解析ソフトウェア SNAP を用いて位置合わせと干渉 SAR 解析を行い、さらに熊本地域の標高データにマッピングを行った結果を、GIS ソフトウェア Google Earth にマッピングした位相差画像である。

同図では、熊本地震の主因となったと思われる日奈久断層帯および布田川断層帯の周囲に、地震前後に地表面の変位が見られたことを示す干渉縞模様が確認できる。干渉縞は両断層の周囲の広い地域にみられ、さらに干渉縞の間隔 (周期) が非常に細かいことから、地震発生前後で C-band の波長を超える大きな地盤変動が起こったと考えられる。

さらに、衛星軌道が異なる (逆向きの) データ⑤とデ

ータ⑥についても同様に干渉 SAR 解析を行い、図-4 の結果と合わせアンラッピングと GIS マッピングを行った結果、図-5 に示すように、布田川断層帯北部、すなわち熊本空港周辺地域において、最大約 2.5m の変位 (衛星と地表面との距離の差) が生じていることがわかった。なお、この変位量を、衛星 SAR 観測を行った際の衛星位置から換算すると、衛星軌道から直角方向 (概ね東向き) に最大約 2m の変位が発生したと推定できる。一方、データ⑤とデータ⑥の間の干渉 SAR 解析およびアンラッピング処理の結果からは、布田川断層帯および日奈久断層帯南側には大きな変位域を確認することはできなかった。これは、データ⑤とデータ⑥の観測角 (ビーム入射角) は東方に約 30 度であることから、熊本地域の東方に位置する阿蘇山の影響を受けた可能性がある。

なお、図-5 以降のデータ②、③、④およびデータ⑥、⑦、⑧のデータ間で干渉 SAR 解析およびアンラッピング処理を行った結果、地表面に大きな変位は見られなかった。

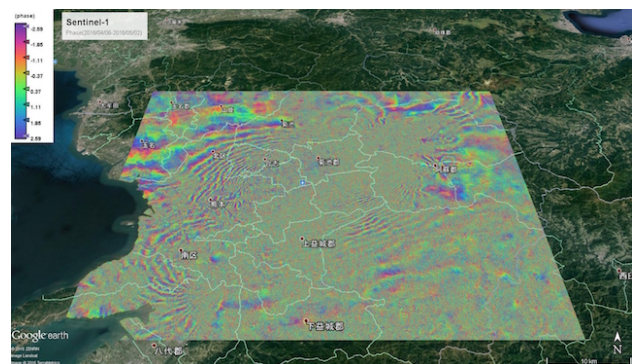


図-4 熊本地震前後の干渉 SAR 解析結果

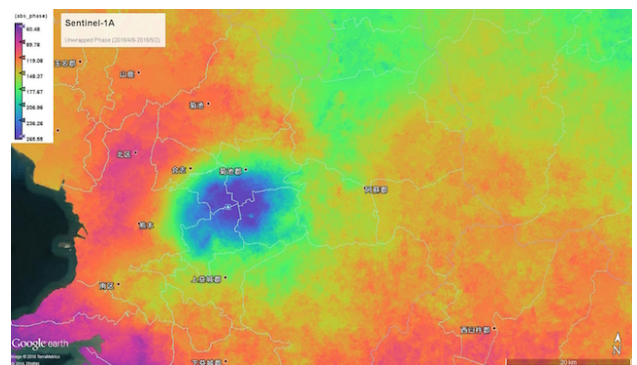
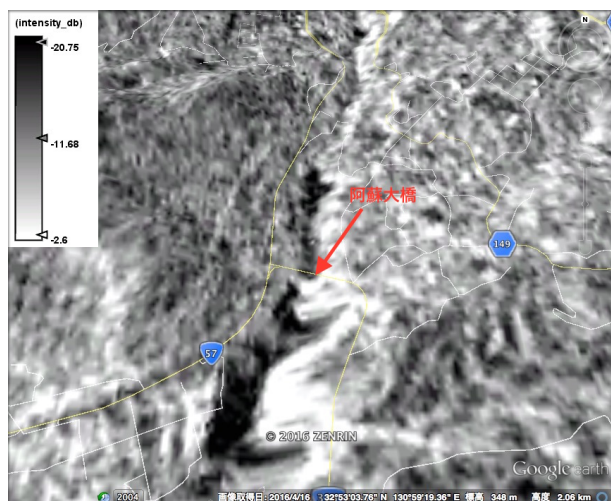


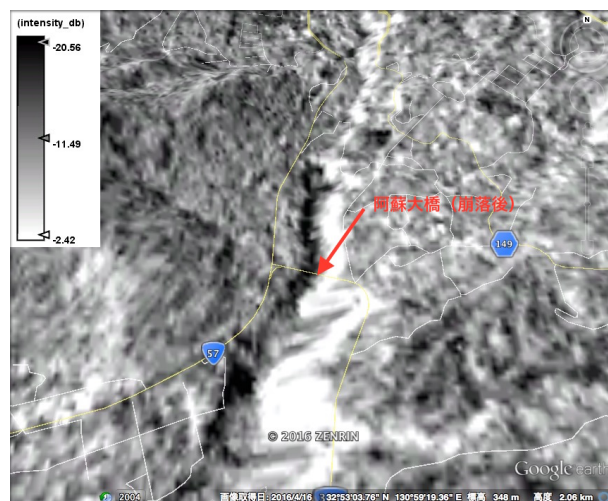
図-5 熊本地震前後の地表面の変位

4. 構造物監視に向けた検討

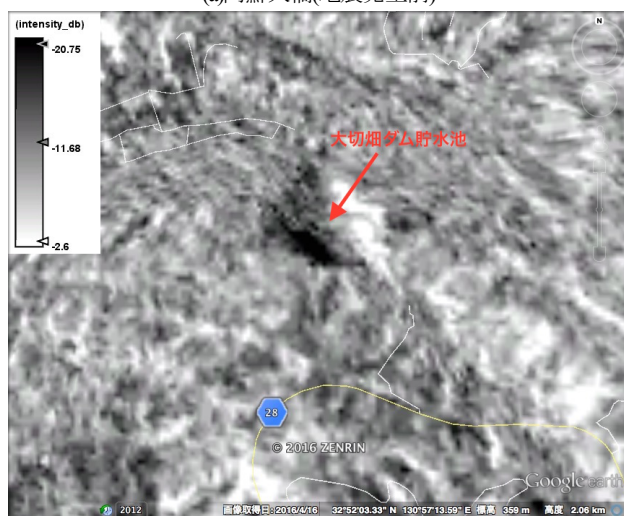
前述のように L-band 衛星 SAR より波長が短い C-band 衛星 SAR で観測したデータは、より高い距離分解能を有することが期待できる。図-6 はデータ①およびデータ②の各々の反射波の強さを dB 変換し、さらに GIS マッピングした画像であり、地震発生前には阿蘇大橋およ



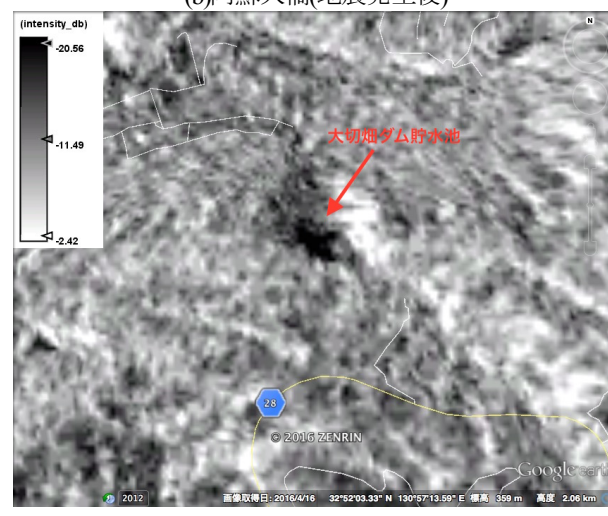
(a)阿蘇大橋(地震発生前)



(b)阿蘇大橋(地震発後)



(c)大切畑ダム貯水池 (地震発生前)



(d)大切畑ダム貯水池(地震発後)

図-6 衛星 SAR 反射波強度画像からの構造物監視の検討例

び大切畑ダム貯水池からの反射波が確認できるが、地震発生後は阿蘇大橋からの反射波は確認できない。大切畑ダム貯水池の変化から貯水量に変化があった可能性があるが、同図からダム堤体に変状が生じたかどうかを推定することは難しい。これらは、本報で用いた衛星 SAR 観測データは、いずれも地上分解能(解析処理した画像における 1 画素(1 ピクセル)の大きさ)が $5\text{m} \times 20\text{m}$ と比較的粗く、橋りょうなどの構造物からの反射波は数ピクセル程度に限定されることに起因している。

もし仮に、C-band 衛星 SAR より短波長の X-band 衛星 SAR を用い、高い地上分解能での観測を行うことができれば、衛星 SAR 強度から構造物の確認を容易に行うことができる可能性が高いが、構造物の経時変化を監視するためには、干渉 SAR 処理の際、前述の波長重畳みの課題が残る。なお、狭小な範囲でアンラッピング処理を誤りなく行うためには、短期間で衛星 SAR 観測を繰り返し行う必要があるため、現状の衛星 SAR の運用では構造物の継続監視には課題が多いと考えられる。

5. まとめ

本報では、比較的容易にデータ入手ができ、かつ解析ソフトウェア等が整備されつつある Sentinel-1 衛星に搭載された C-band 衛星 SAR 観測データを用いて熊本地震における変状解析を試みた。

その結果、地震発生前後の大きな地盤変動を布田川断層帯北側で確認することができ、その変位量は既報と概ね一致したが、断層帯南側については、衛星軌道に起因する問題か地盤変状を確認することはできなかった。

また、熊本地震発生前後の衛星 SAR 強度画像の差から、阿蘇大橋の崩落を確認することはできたが、大切畑ダム堤体の変状などを推定することは、衛星 SAR データの地上分解能の限界から困難であった。

これらから、Sentinel-1 衛星の C-band 衛星 SAR 観測データを用いた変状解析は、地盤変状など大きな範囲で発生した事象については有効と考えられるが、構造物の監視については課題が残る結果となった。

ただし、本報で用いた解析ソフトウェアおよび解析手順は、L-band 衛星 SAR および他の衛星データについても同様に適用することが可能であるため、今後は他の衛星 SAR についても解析を行い、適用性について検討を行う予定である。また、複数の観測データを時系列にまとめそれらの傾向を分析する時系列 SAR 解析についても今後取り組んでいきたいと考えている。

謝辞：Sentinel-1 衛星の観測データの取得および解析においては、(一財)リモートセンシング技術センターの古田竜一博士に多大な助言をいただいた。ここに記し謝意を表したい。

参考文献

省略

DEFORMATION ANALYSIS AND TRIAL STUDY FOR STRUCTURAL MONITORING USING C-BAND SAR IMAGING CONSTELLATION FOR KUMAMOTO EARTHQUAKE

Hideaki IWAKI, Tomohiro NARUMI and Toru YOKOSHIMA

Deformation analysis and trial study for structural monitoring using C-band synthetic aperture radar (SAR) for Kumamoto Earthquake is described. C-band SAR data is expected to excel at distance (phase) resolution to conventional L-band SAR data. Major ground surface displacement before/after Kumamoto Earthquake is confirmed by interferometric SAR analysis. However, structural movement is not able to evaluated due to the limitation of ground resolution by C-band SAR.