

# 衛星 SAR による平成 28 年熊本地震における 地盤変状解析と構造物監視に向けた検討

岩城 英朗 鳴海 智博 横島 喬  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

## Study of structural monitoring and ground surface movement in 2016 Kumamoto earthquake based satellite SAR data analysis

Hideaki Iwaki, Tomohiro Narumi and Takashi Yokoshima

近年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地盤変状解析に適用し、あわせて構造物のモニタリングに向けた検討を行った。現在国内では L-band 衛星 SAR の観測データが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 を用いた解析を行った。異なる 2 回の衛星 SAR 観測データの差分を求める差分干渉 SAR 解析を用いて、熊本地震前後一年間にわたる地盤変位を求め、同地域の電子基準点観測値の変化と概ね等しい傾向であることが確認できた。また、複数の衛星 SAR 観測データから、橋りょうなどの構造物からの散乱波を確認することができ、熊本地震で崩落した阿蘇大橋周辺の散乱波強度の変化などから、大規模構造物の監視に対する本観測の有用性を確認することができた。

Deformation analysis and trial study for structural monitoring and ground surface monitoring using C-band synthetic aperture radar (SAR) before and after Kumamoto Earthquake is described. C-band SAR data is expected to excel at distance (phase) resolution to conventional L-band SAR data. It is confirmed that ground surface displacement before and after Kumamoto Earthquake by differential interferometric SAR (DInSAR) analysis. Also, sever structural deformation is detected from reflected intensity image and MTC analysis. However, small structural movement is not able to estimate due to the limitation of ground resolution.

### 1. はじめに

近年、電波や光（赤外線や可視光）を用いて地球を観測する人工衛星の観測データの活用が注目されている。その中でも、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が 2014 年に運用を開始した陸域観測技術衛星「だいち 2 号」(ALOS-2)などに搭載されているレーダー（人工衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR））を用いた地球観測は、人工衛星の軌道上から電波（マイクロ波）を地表に向けて広範囲に照射し、その散乱波を衛星に搭載された大型のアンテナで移動しながら捉えることで、地表の凸凹などの変化を広域かつ高い分解能で観測することが可能なため、災害時の状況把握や、構造物の変状検知、さらに農業分野など様々な分野で分析、解析が行われつつある<sup>2)</sup>。

衛星 SAR の観測データを用いた既往の研究として、例えば 2014 年 11 月に発生した長野県北部地震前後の ALOS-2 観測データを用いて地表面の変位を求め、現地の被災状況と比較を行った中埜らの研究<sup>3)</sup>や、2001 年 3 月に Hintze Ribeiro centennial 橋（ポルトガル）で発生した主桁崩落事故に対し、崩落以前の衛星 SAR（欧州宇宙機構 (ESA) が運用した ERS-1/2）の観測データから、崩落の予兆となる異常変位を捉えた Sousa らの研究<sup>4)</sup>などが挙げることができる。

その一方で、実際に衛星 SAR の観測データを分析、解析を行うための課題は少なくない。

まず、衛星 SAR の観測データの入手は現状容易とは言い難い。観測データのアーカイブ（これまでに観測を行った地域および観測日時などのリスト）と、今後の観測計画は原則的に非公開であるため、ある地域や構造物に対して衛星 SAR の観測

データを用いた分析、解析が可能か否かといった事前検討すら困難を伴う。

また、衛星 SAR の観測データは概ね有償で、かつ高額であるため、たとえば観測対象の長期の挙動を捉えることを目的として、多数の観測データを入手し解析を行おうとする場合、データの取得だけでも莫大なコストを費やすことになる。さらに、観測データの分析に用いることができる解析ソフトウェアは限られており、概ね高額である。

さらに、衛星 SAR の観測データを取得して、そのデータを用いて分析、解析した成果の解釈、たとえば解析結果の精度評価を行う手法は未だ確立しているとは言い難く、既存の測量成果やセンサ等を用いた計測結果との比較も容易ではない。すなわち、衛星 SAR の解析成果の確からしさ、ひいては衛星 SAR 自体の有用性を示すことが難しい。

そこで本報では、衛星 SAR の観測データが、広域の状況監視において有用であり、さらにインフラ構造物のモニタリングに対して可能性があることを示すために、平成 28 年熊本地震前後の、熊本地域における地表面の変状解析を行い、さらに同地震における構造物の被災を、同衛星の観測データの解析から抽出する検討を試みた結果を示す。なお、これらの解析、検討には、欧州宇宙機構 (ESA) の地球観測計画 (コペルニクス計画) のもとで現在運用している地球観測衛星 Sentinel-1<sup>5)</sup> の観測データを主に用いた。

## 2. 概要

Sentinel-1 の観測データは、研究開発などの非商用および商用を問わず、ESA コペルニクス計画のポータルサイト<sup>5)</sup> から、アーカイブ検索と観測データの入手を無償で行うことができる。同衛星の運用イメージを図-1 に、ALOS-2 との比較を併記した主要諸元を表-1 に示す。

Sentinel-1 が用いる電波 (マイクロ波) の波長帯 C-band (波長  $\lambda \approx 6\text{cm}$ ) は、ALOS-2 が用いる L-band ( $\lambda \approx 24\text{cm}$ ) よりも波長が短く、高分解能な観測が期待できる反面、地表の森林などの植栽に対しては乱反射を起こし、正確に地表変位を捉えることが難しいとされているため、解析において留意する必要がある。また、Sentinel-1 の観測幅 (約 250km) は、ALOS-2 の観測幅 (約 50km) と比べ広域な観測を一括して行える反面、地上分解能は ALOS-2 に比べて劣る 5m×20m に留まる点を注意する必要がある。

衛星 SAR の観測データは通常、地表から受信した散乱波を処理して図-2 に示すように画像化した SLC (Single Look Complex) 形式で分析に供され、その 1 画素は、散乱波の強度と位相を含む複素振幅データとして保存されている。

地表や構造物の変状を捉えるためには、2 回以上の異なるタイミングで取得した複数の観測データに対し、衛星軌道の差の補正や、ノイズの除去等を行った差分を求め、強度差、位相差  $\phi$  ( $-\pi \sim \pi$ ) および干渉度 (コヒーレンス) を抽出する差分干渉解析法 (Differential Interferometric SAR : DInSAR) を用いる。

差分干渉解析で求めた位相差に、衛星 SAR が使用している波長を乗じると、衛星から地表の距離差 (すなわち変位) に換算することができるが、この波長を大きく超える変状が生じた場合、変位量は位相差 ( $-\pi \sim \pi$ ) の内で折り返されてしまうため、実際の値より小さい値を示す結果となる。この場合は、観測範囲の中で位相の折り返し (ラッピング) が生じた箇所を抽出し、その補正処理 (アンラップ処理<sup>6)</sup>) を行うことで実際の変位が推定できる可能性がある。

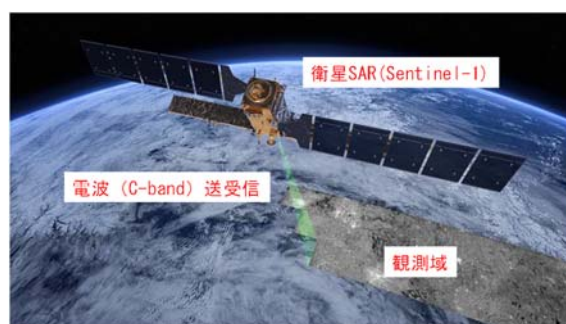


図-1 衛星 SAR による観測の概念図 (ESA HP<sup>5)</sup> に加筆)

表-1 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
使用波長帯	L-band	C-band
観測幅	50km(※1)	250km(※2)
地上分解能	3m×3m	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
回帰周期	14 日	12 日
周回数	207 回	175 回

(※1) 高分解能モードの場合

(※2) IW (Interferometric Wide Swath)モードの場合

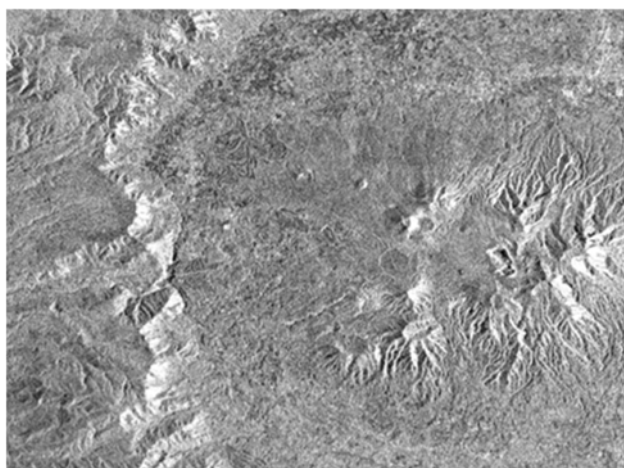


図-2 衛星 SAR による観測データの例(散乱波強度画像)  
(2016年4月20日：九州阿蘇外輪山周辺)

差分干渉解析およびアンラップ処理を行うソフトウェア(SNAPおよびsnaphu)は、Sentinel-1 観測データと同様に前述のポータルサイトの経由で入手し、図-3 に示す手順に沿って解析を行った。

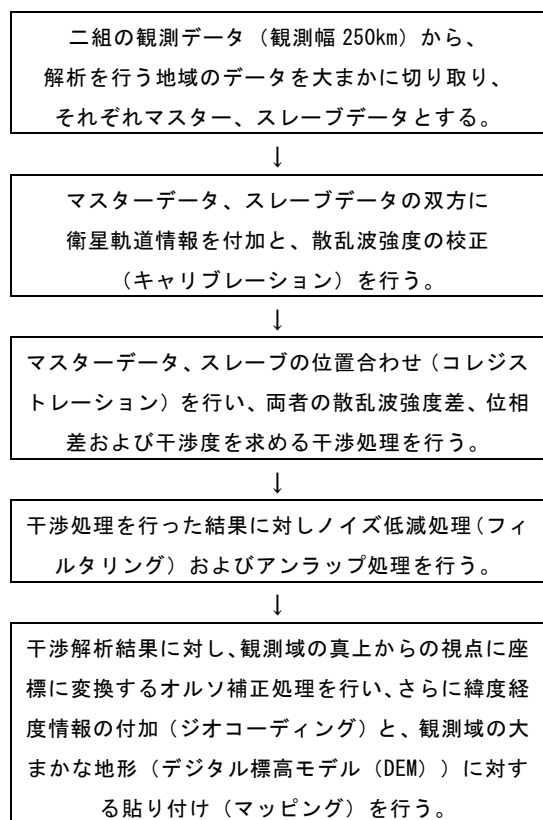


図-3 衛星 SAR の解析フロー

衛星 SAR の観測データの解析成果は、表-2 に示す国土地理院が設置運用している熊本地域における電子基準点の日々の変動値(F3 データ)を東西方向および上下方向に換算した経過と比較し、

さらに、熊本地震本震前後における構造物周辺の強度差、コヒーレンス、および位相差などの違いと、構造物の被災状況とを比較した。

表-2 衛星 SAR 解析成果と比較する電子基準点

名称	経度	緯度
長陽	130.9962E	32.8707N
熊本	130.7647E	32.8421N
千丁	130.6455E	32.5464N
矢部 A	130.9871E	32.6751N

### 3. 衛星 SAR による地盤変状解析

#### 3.1 衛星 SAR 観測データの取得

表-1 に示すとおり、Sentinel-1 の回帰周期は12日であり、その1周期の間に Sentinel-1 は地球を175周回する。熊本地域に対しては175周回の間通常3回の観測を行っており、これらの観測のうち、差分干渉解析に適するデータセットを表-3 に示すとおり取得した。なおこれらは衛星が地球を周回する156番目の軌道(path156)で、熊本地域においては図-4 に示すように南極から北極に向かって移動する北向き(ASCENDING)軌道である。なお、表-1 に示した ALOS-2 は表-2 の期間で23回の観測を行っているが、そのほとんどが地震発生後に実施されたものである。

表-3 解析に用いた観測データ

	観測日		観測日
①	2015/05/08	⑮	2016/07/13
②	2015/06/01	⑰	2016/08/06
③	2015/06/25	⑳	2016/08/30
④	2015/07/19	㉑	2016/09/23
⑤	2015/08/12	㉒	2016/10/17
⑥	2015/09/29	㉓	2016/11/10
⑦	2015/10/23	㉔	2016/11/16
⑧	2015/11/16	㉕	2016/11/28
⑨	2016/01/03	㉖	2016/12/10
⑩	2016/01/27	㉗	2016/12/22
⑪	2016/02/20	㉘	2017/01/03
⑫	2016/04/08	㉙	2017/01/15
⑬	2016/04/20	㉚	2017/01/27
⑭	2016/05/02	㉛	2017/02/08
⑮	2016/05/14	㉜	2017/02/20
⑯	2016/06/07	㉝	2017/03/04
⑰	2016/07/01	㉞	2017/03/16



図-4 Sentinel-1(path156)の観測域<sup>5)</sup>

### 3.2 差分干渉解析の実施

表-3の観測データ(34データ)に対し、時系列に沿って2組の観測データを抽出し、差分干渉解析を行った。平成28年熊本地震の本震前後、および地震後の解析結果(強度差、位相差および干渉度)を図-5に例示する。

図-5(b)に示す本震前後の位相差において、等高線上の縞模様が確認できる。これは、縞模様の向きにほぼ直交する方向の2カ所の電子基準点「熊本」および「矢部A」の間の位相差(図-6)が示すとおり、地震前後の地表の大きな変動が、波長( $\lambda \approx 6\text{cm}$ )に折り畳まれた結果であり、国土地理院が熊本地震本震直後に公開したALOS-2の観測データを用いた差分干渉解析結果<sup>8)</sup>と傾向

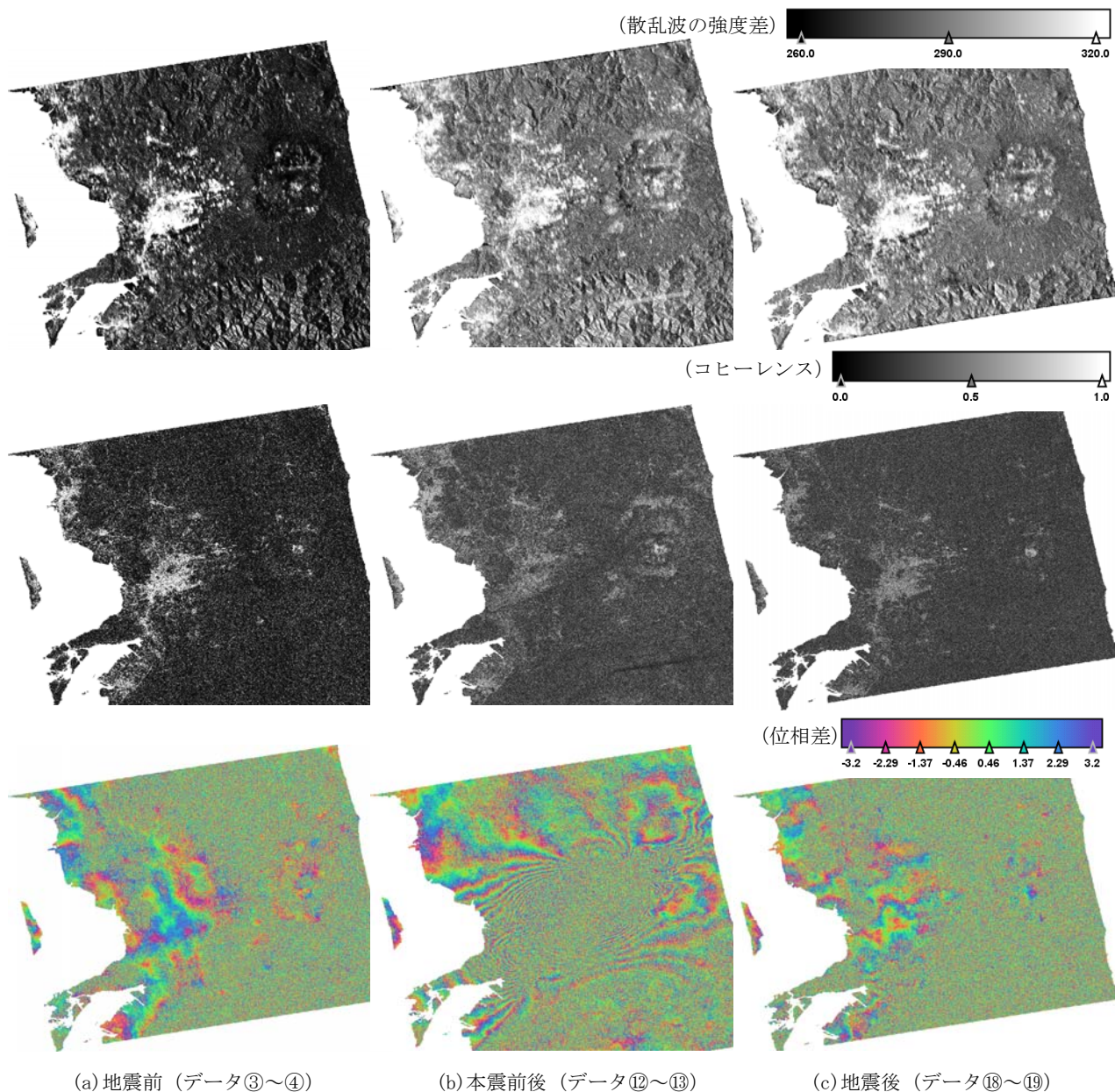


図-5 熊本地震前後における衛星 SAR 差分干渉解析結果

は等しい。そこで図-5(b)の結果から本震前後の地表の変動量を推定するために図-7、図-8に示すようにアンラップ処理<sup>6)</sup>を試みた。

図-8に示す地表変位の最大値は約2.5mで、衛星SARの電波の平均入射角(33.6°)を用いて水平方向(概ね東西方向)の変位に換算すると約1.3mとなり既往の報告(例えば<sup>8)</sup>)とほぼ等しい。しかし電子基準点「矢部A」近傍における解析結果と同点における変位量は大きく異なっている。

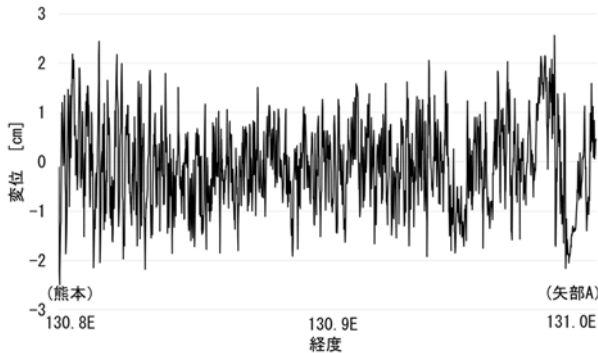


図-6 電子基準点「熊本」～「矢部A」間の位相差

### 3.2 差分干渉解析成果の評価検討

前項の差分干渉解析で求めた位相差から、表-3に示す熊本地域の電子基準点近傍における変位を抽出し、さらに衛星電波の入射角を用いて東西方向および上下方向の変位を求めた。電子基準点の日々の変動量(F3データ)に対しても同様に、東西方向と上下方向の変位を求め、図-9に示す通り比較した。各々の変位の基準日は、表-3に示すデータ①(2015年5月8日)とし、衛星SAR

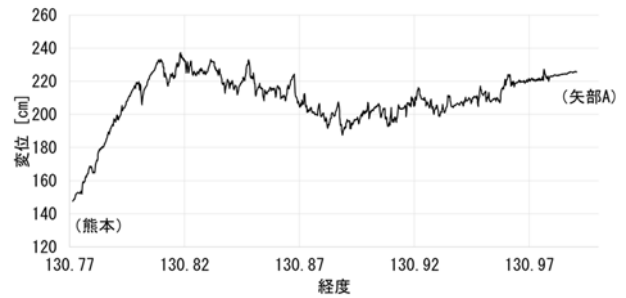


図-8 電子基準点「熊本」～「矢部A」間の地表変位

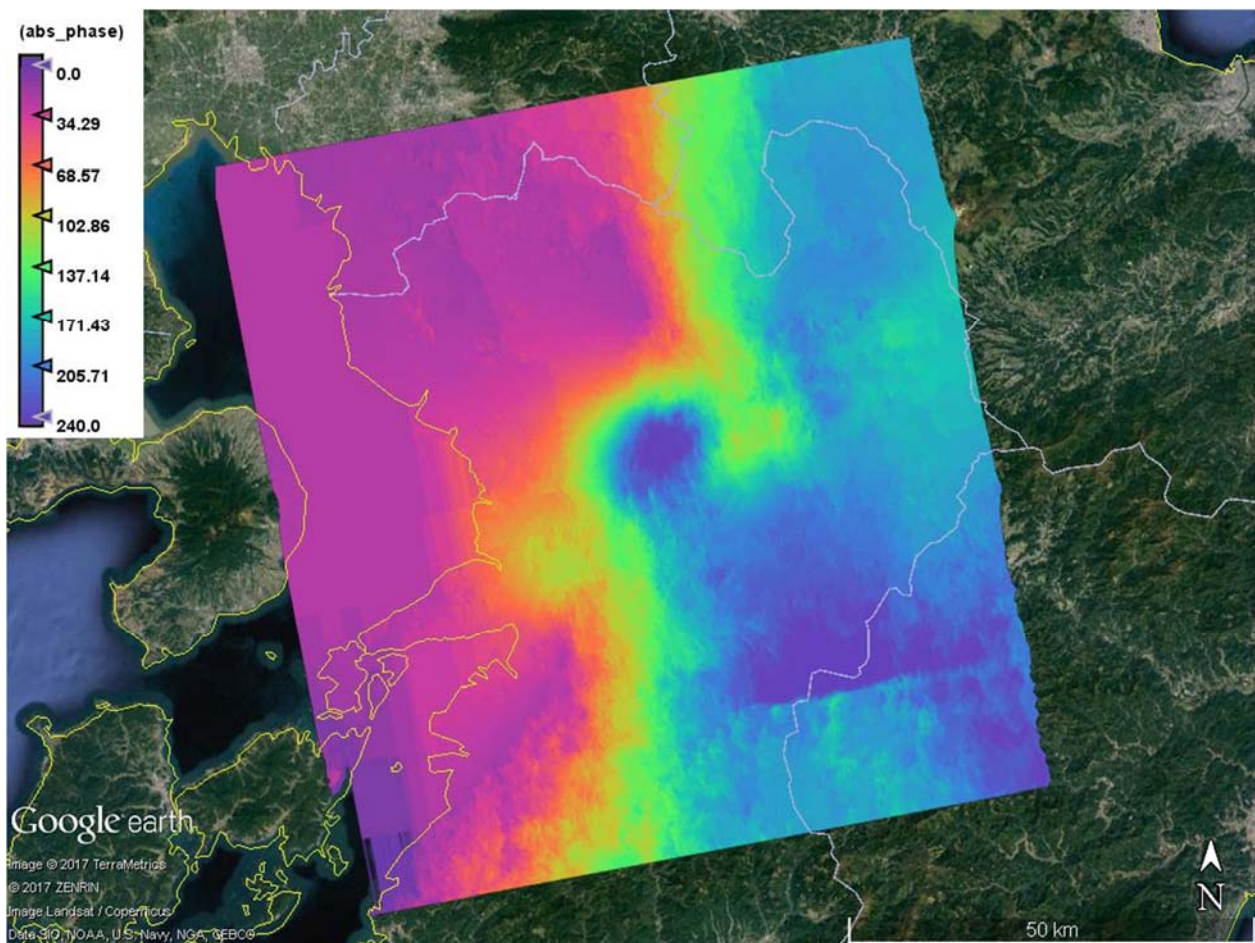
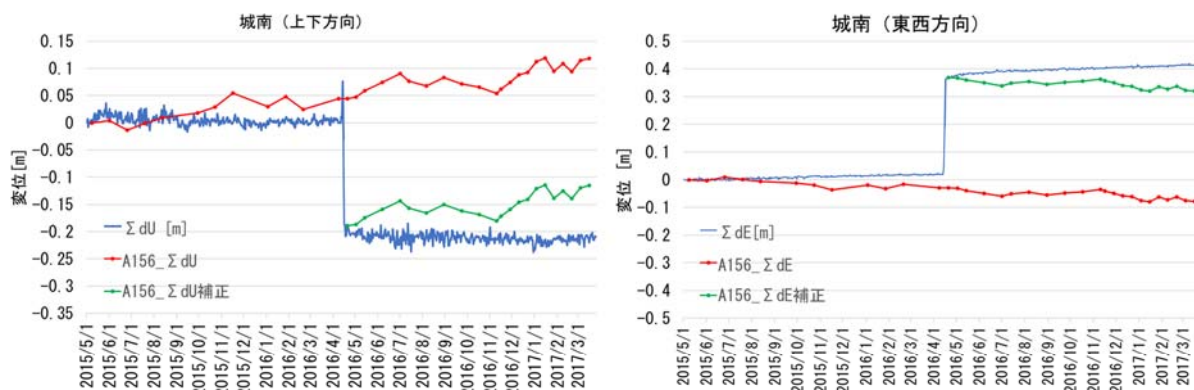


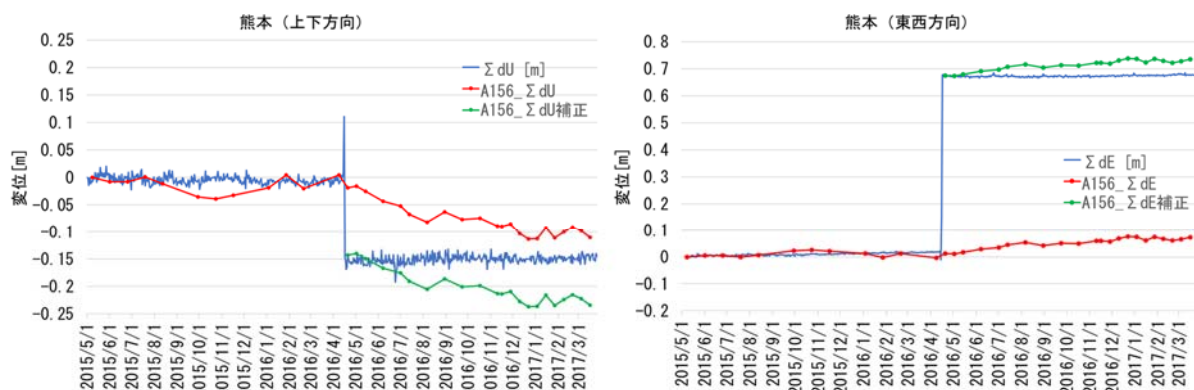
図-7 本震前後(データ⑫～⑬)の位相差データに対しアンラップ処理を行った結果  
(Google Earth上に貼り付け)

の成果においては、前項に示すとおり地震後の大きな変位の推定結果と、地震後の実地観測等で得られた地表の変位との間の差が大きいことから、データ⑬（2016年4月20日）時点での電子基準点の変動値を改めて基準とした。この結果、電子基準点「城南」「熊本」においては、上下方向および東西方向のいずれも電子基準点の変位の推移と、衛星 SAR 解析結果の推移はいずれも同様の傾向で、その差は地震前後の約2年間にわたりほぼ

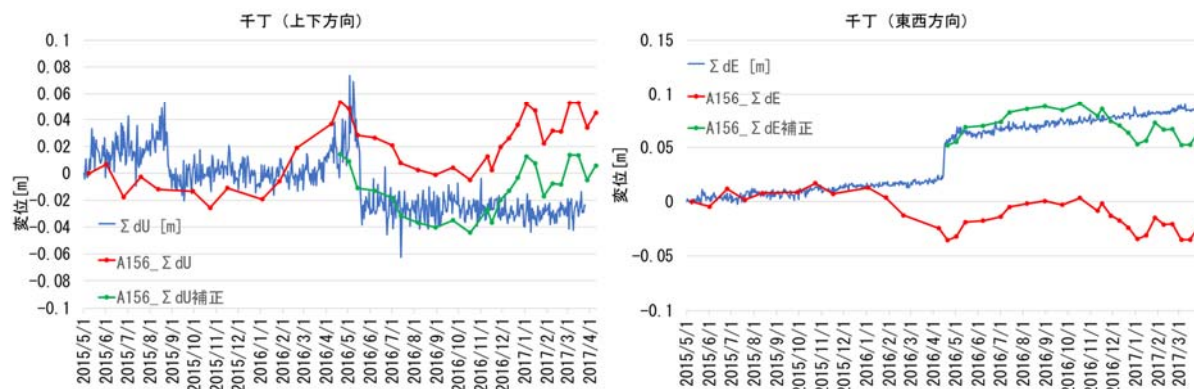
10cm 以内となっている。電子基準点「千丁」においては、電子基準点の計測値においても、特に上下方向のばらつきが大きい。これは電子基準点「千丁」の設置位置が水田に囲まれており、水田への引水などに伴う地盤の高さ変動が大きいためである。図-9に示すように、衛星 SAR の解析結果との相関が良いとは必ずしも言えないが、双方の差は上記2点と同様に10cm 以内にとどまっている。



(a) 電子基準点「城南」



(b) 電子基準点「熊本」



(c) 電子基準点「千丁」

図-9 衛星 SAR 解析結果と電子基準点 F3 データから求めた変動値との比較

## 4. 衛星 SAR による構造物のモニタリング

### 4.1 被災した構造物のモニタリング

前節で行った衛星 SAR の差分干渉解析結果から、熊本地震で被災した構造物（阿蘇大橋および大切畑ため池）近傍における地震前後の散乱波強度画像を図-10 に示す。図-10(a)阿蘇大橋（橋長約 200m）においては、地震前の強度画像では橋の主桁とみられる明瞭な散乱点が認められ、地震後は同位置での散乱点が消失している。熊本地震本震における同橋の崩落により、明瞭な散乱点が消失したと考えられる。さらにこれらの強度画像から、阿蘇大橋の位置を示す画素から散乱波強度を抽出すると、地震前が 44.0[dB]に対し、地震後は 31.2[dB]であった。

一方、図-10(b)大切畑ため池においては、地震前後の画像からはため池の水位変化に伴う散乱波強度が低い範囲の違いが認められるが、ダム堤体など周囲の構造物の変状を強度画像から確認することはできない。ため池周囲の画素から散乱波強度を抽出すると、地震前が 34.4[dB]で、地震後は

34.1[dB]であり、強度差はほぼ無かった。これらの結果から、Sentinel-1 の地上分解能を超える規模の構造物の大きな変状については強度画像の変化あるいは散乱波強度の変化から捉えることができるが、比較的小規模な変化については、強度画像の変化のみでの視認は難しい。

そこで、地震前後の強度画像および干渉度を、

地震前の強度画像： 赤 (Red)

地震後の強度画像： 緑 (Green)

両データの干渉度： 青 (Blue)

にそれぞれ割り振り合成すると、

反射物の滅失： 赤 (Red)

反射物の出現： 緑 (Green)

森林など： 黄 (Yellow)

都市部など： 青 (Blue)

のように示される MTC 解析<sup>9)</sup> (Multi Temporal Coherence) を本震前後の観測データ (データ⑫~⑬) に対し行った結果を図-11 に示す。その結果、図-12 に示す通り、図-10(a)阿蘇大橋付近で構造物の滅失を表す赤色の範囲を確認することができる。

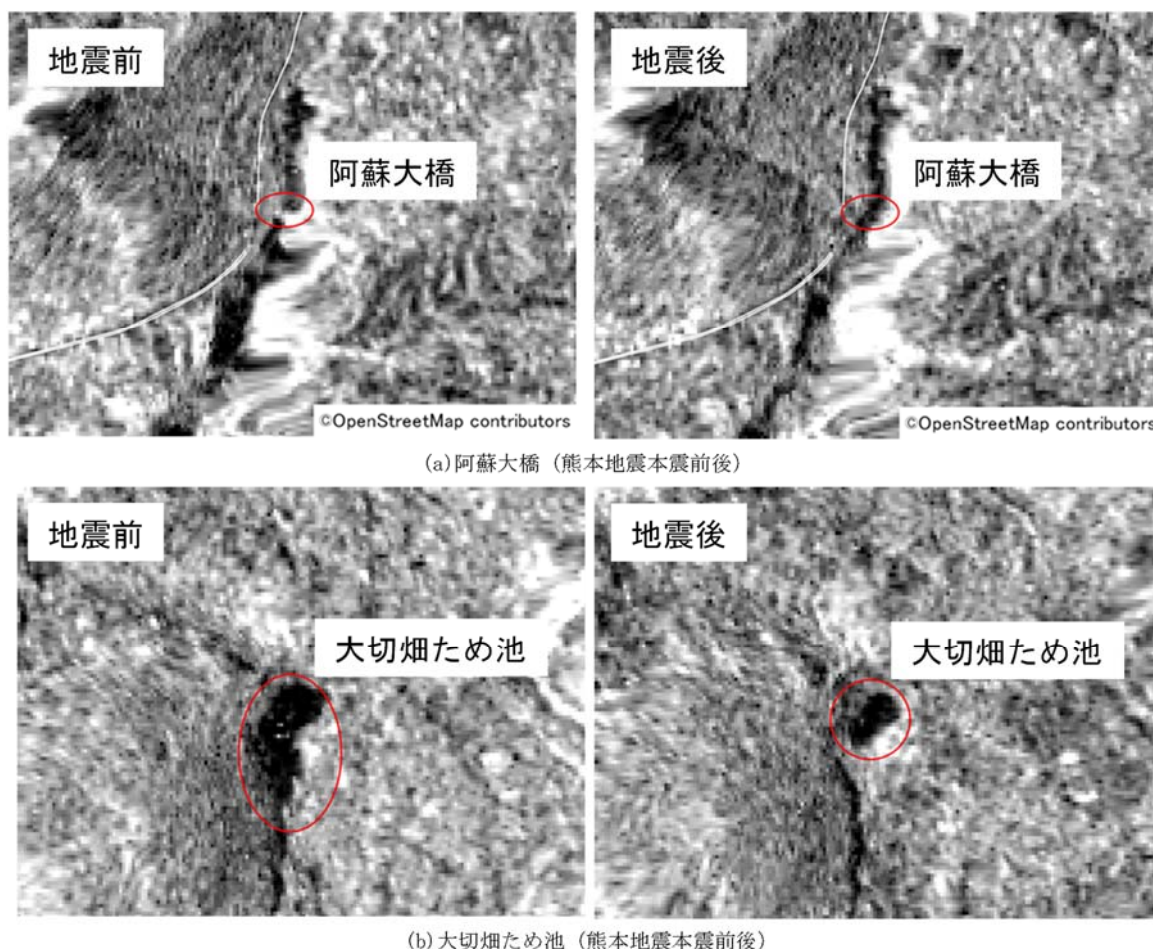


図-10 構造物の熊本地震本震前後における構造物に対する衛星 SAR の観測結果 (散乱波強度)

## 4.2 被災建造物の抽出

さらに図-11の解析画像の中で、建造物の滅失を示す赤色画素が集中している箇所を抽出を行ったところ、図-13のように長さ約35m(7画素)に亘る範囲の赤色部が認められた。これは熊本城類当御門付近の石垣の位置であり、同石垣は熊本地震本震により石垣を構成する1200個以上の岩が崩落したことが報告されている。

## 5. まとめ

本報では、平成28年熊本地震前後の約2年間にわたる衛星SAR観測データを用いた差分干渉解析およびMTC解析を通じて広域地表監視および建造物のモニタリングへの試行を行った。

これまで長期間の解析に供するデータ取得には高額なコストを要した衛星SARの観測データに対し、無償で取得できるSentinel-1衛星のデータを用いることにより、広域な範囲の地表の状態監視を長期間にわたり定期的かつ継続して行うことができることを示した。衛星SARの基本的な解析手法である差分干渉解析を用い熊本地域の地表監視を行ったところ、熊本地域の電子基準点の観測値の推移とほぼ同様の傾向を示しており、衛星SARの観測データおよび解析手法が広域地表監視において有用であることを示すことができた。

ただし、建造物のモニタリングにおいては、Sentinel-1衛星の観測データは、建造物を見分けるための地上分解能が5×20m程度にとどまることから、阿蘇大橋の崩落など大規模建造物の大きな変状を確認するに留まった。差分干渉解析の結果をRGB分光して得られるMTC解析を用いても、熊本城内の石垣崩落などの大規模建造物あるいは広い範囲に亘る建造物の大きな変状のみを捉える結果となった。

しかし、本報の解析手法および手順は、衛星SARの波長あるいはプラットフォーム(衛星の種別)に限定されるものではないため、今後は地上分解能が高い商用X-band衛星SAR、あるいは対象地域にもよるがALOS-2を用いた解析を行うことができ、当社建設現場などへ適用も可能となると思われる。

また、本報で試行した建造物のモニタリングについても、地上分解能が高い衛星SARのデータを用い、散乱波強度、あるいは差分干渉解析における干渉度の変化を捉えることで建造物の微小な変化を捉えることが出来る可能性もある。これらを今後の課題としたい。

## 謝辞

Sentinel-1観測データの所有権は欧州宇宙機構(ESA)にあり、解析、図化等の処理をSNAP<sup>9)</sup>、snaphu<sup>9)</sup>およびQGIS<sup>10)</sup>等のソフトウェアを用いて行った結果を示した。なお、Sentinel-1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>

- 1) 畚野信義：合成開口レーダー，日本リモートセンシング学会誌，Vol.1, No.1, pp.49-93, 1981.
- 2) だいち2号ソリューションブック，宇宙航空研究開発機構第一衛星利用ミッション本部，2014.
- 3) 中埜貴元、飛田幹男、中島秀敏、神谷泉：干渉SARで捉えた2014年11月22日長野県北部を震源とする地震に伴う地表変位，活断層研究，Vol.43, pp.69-82, 2015.
- 4) J. J. Sousa and L. Bastos: Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Vol.13, pp.659-667, 2013.
- 5) <https://scihub.copernicus.eu/>
- 6) C. W. Chen and H. A. Zebker: Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, pp.1709-1719, 2002.
- 7) <http://terras.gsi.go.jp/>
- 8) <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>
- 9) Boccard ほかほか: Multitemporal SAR Coherence Analysis: Lava flow monitoring case study, 2015 IEEE Intl. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015.
- 10) <http://www.qgis.org/ja/site/>



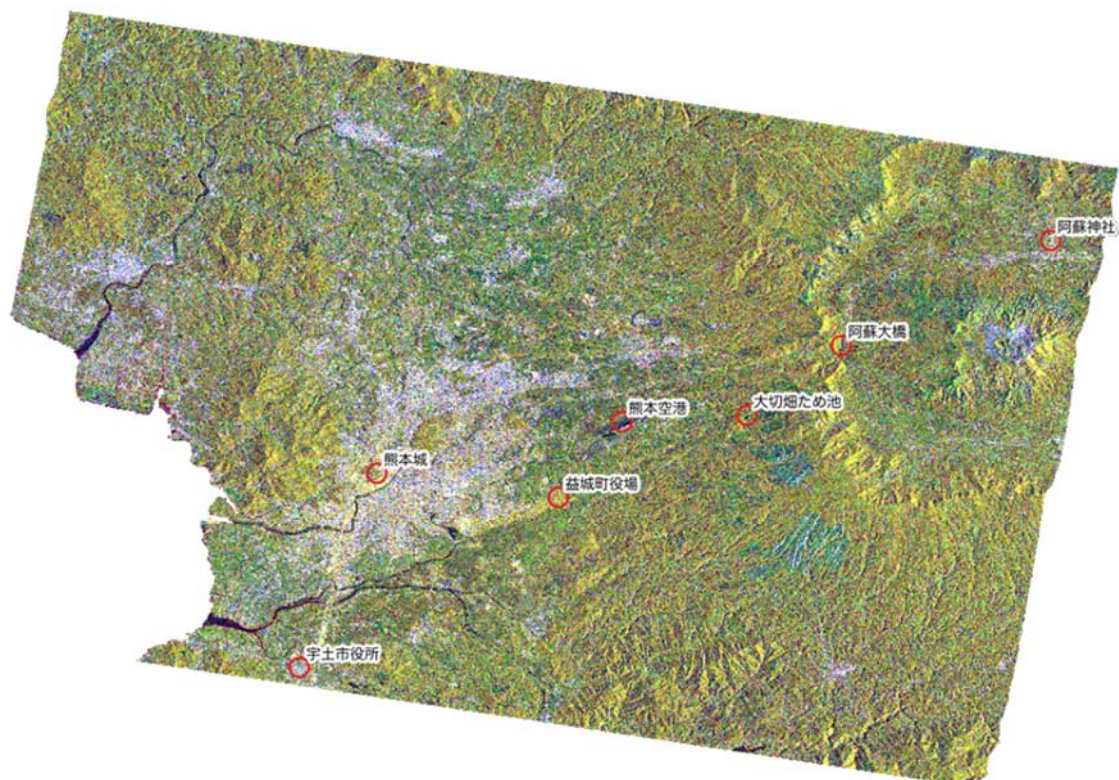


図-11 熊本地震本震前後の衛星 SAR 観測データを用いた MTC 解析結果

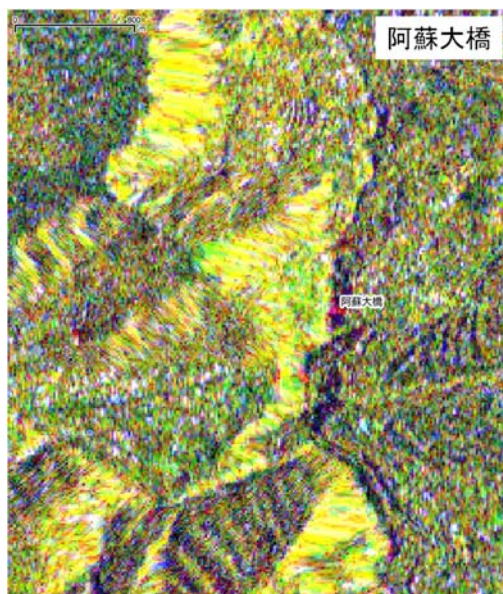


図-12 MTC 解析による阿蘇大橋周辺の画像

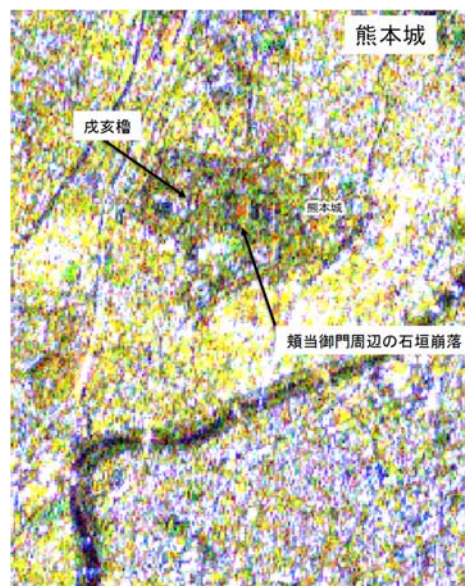


図-13 MTC 解析による被災箇所抽出例