

だいち2号を活用した口永良部島新岳噴火に伴う地表変化の検出  
Detection of surface changes associated with the eruptions of Mt. Shindake  
on Kuchino-Erabujima Island by using ALOS-2 (Daichi-2) data

測地部 三浦優司・和田弘人・仲井博之・山中雅之・  
山田晋也・攪上泰亮・上芝晴香

Geodetic Department Yuji MIURA, Kozin WADA, Hiroyuki NAKAI, Masayuki  
YAMANAKA, Shinya YAMADA, Yasuaki KAKIAGE and Haruka UESHIBA  
地理地殻活動研究センター 矢来博司・小林知勝・森下遊  
Geography and Crustal Dynamics Research Center  
Hiroshi YARAI, Tomokazu KOBAYASHI and Yu MORISHITA

## 要旨

国土地理院では、2015年5月・6月に発生した口永良部島新岳の噴火に際し、陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(以下「だいち2号」という。)で取得した観測データから地表変化と変動の検出を試みた。

2015年5月29日の噴火では、噴火前後の解析結果において、画像の非干渉域が火砕流等によって火山灰に覆われた範囲と概ね一致した。また、噴火前後に島内では主だった地殻変動は見られなかった。噴火前後の画像の比較から、大きな地形変化は新岳火口付近に限られることを確認した。なお、噴火からわずか約3時間後にだいち2号による緊急観測が行われ、29日中に解析結果の情報を防災関係機関に提供した。上記の一連の対応は、発災時にだいち2号のデータを用いて迅速に解析し、防災機関に情報提供するという観測・解析・提供に至る一連の対応の素早さを示したケースといえる。

## 1. はじめに

だいち2号には、合成開口レーダー(以下「SAR」という。)と呼ばれるセンサーが搭載されており、口永良部島の火山活動に対して緊急観測を実施した。SARは、合成開口という技術により空間分解能を高めたマイクロ波レーダーであり、人工衛星や航空機に搭載され、地表を広範囲に観測することができる。また、光学センサーと異なり、雲や噴煙を透過するとともに、昼夜を通して観測することができるため、雲や噴煙に覆われやすい火山での観測に適している。火山が噴火した際には、噴石等によって地上の観測機器が破壊され、噴火後に観測データを取得できなくなる場合が多い。大きな噴火が継続している場合には、安全上の理由から航空機や災害ヘリでの山頂付近での飛行は難しい。災害時の迅速な状況把握の面において人工衛星による宇宙からのSAR観測は重要である。

本稿では、2015年5月29日に発生した口永良部

島新岳での噴火での対応を中心に、だいち2号のSARデータを用いた口永良部島での地表変化と変動を検出する取組について報告する。

## 2. だいち2号

だいち2号は、「だいち」の後継機として宇宙航空研究開発機構(以下「JAXA」という。)により開発され、2014年5月24日に打ち上げられた。だいち2号に搭載されたSARの性能は、多くの点で2011年5月まで運用されただいちと比較して格段に向上している(宇宙航空研究開発機構, 2014)。具体的には、空間分解能が向上し、詳細に地表面の状態を把握することができるようになった。また、回帰日数の短縮や左右両方向の観測が可能になったことにより、観測可能領域が拡大し、災害対応の迅速性が大きく向上した。

本報告の中で解析に使用しただいち2号のSARデータは、国土地理院とJAXA間での協定(国土地理院, 2014a)及び火山噴火予知連絡会衛星解析ワーキンググループ(以下「火山WG」という。)の枠組み(気象庁・火山噴火予知連絡会衛星解析グループ, 2015)に基づいて提供を受けたものがある。

## 3. 地表変化と変動の検出手法

口永良部島の火山活動に伴う地表変化と変動をだいち2号のSARデータを利用して把握するために、干渉SARとSAR強度画像の比較という2つの手法を用いて解析した。

### 3.1 干渉SAR

#### 3.1.1 干渉SARによる地表面変動の検出

国土地理院は、最初の国産SAR衛星である「ふよう1号(JERS-1)」の頃から干渉SARと呼ばれる解析技術(以下「SAR干渉解析」という。)に取り組み、地表面の変動を検出してきた。干渉SARとは、地表の同一地点に対してSAR観測を2回以上実施し、反射波の位相差を計算することによって、地表の変動

量を面的に把握する解析手法である(図-1)。一般的に、人工衛星による干渉 SAR では、一度に数十～数百 km の範囲の変動を、数 m～数十 m の空間分解能で、数 mm～数 cm の精度で検出することができる。

火山活動が活発化し、地下でのマグマやガス・熱水が移動することにより地面は変動する。火山活動に伴う地面の動きを把握するために、GNSS や傾斜計等の地上設置型の観測機器がよく用いられるが、火山周辺は、急峻な地形や積雪のため、観測装置の設置が困難な場合が多い。また、設置に多額のコストがかかることから、火山活動の詳細を把握する上での十分な空間分解能を得にくい。干渉 SAR は、時間分解能の面で GNSS や傾斜計等の地上観測機器には及ばないものの、宇宙から面的に変動情報を取得するため、高い空間分解能で火山活動に伴う地面の変動を取得することが可能であり、地上観測の空白域を補うことができる。

なお、SAR 干渉解析を行うためには、ある地域において 2 回以上の観測が必要である。したがって、発災前後で SAR 干渉解析を実施するには、発災前に同じ観測モードでの観測が実施されていなくてはならない。だいち 2 号の打ち上げ後約 1 年間は、様々な方向及び角度からの観測データを蓄積する、災害用ベースマップ観測期間となっている(JAXA/ALOS-2 プロジェクト, 2016)。今回の口永良部島噴火に伴う対応は、その期間の完了する前に発生したものであり、緊急時に SAR 干渉解析できるデータには限りがあった。なお、災害用ベースマップ整備後は、日本国内(九州・沖縄の極小領域を除く)であれば、発災後 74 時間以内に SAR 干渉解析可能な観測が実施できる。

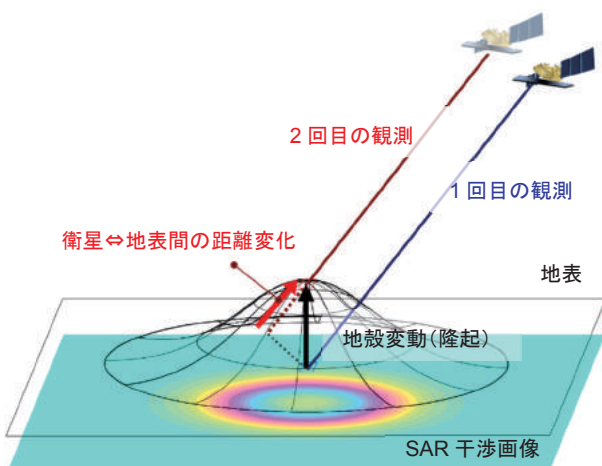


図-1 干渉 SAR の原理 (概略図)

### 3.1.2 SAR 干渉解析での非干渉域

SAR 干渉解析では、降灰や積雪の多い場所において干渉性を得ることができない(以下「非干渉」と

いう。)ことがある。たとえば、2014 年 9 月の御嶽山噴火に伴う SAR 干渉解析結果では、山頂である剣ヶ峰とその周囲に降灰起因と考えられる非干渉域が確認されている(山田ほか, 2015)。今回、5 月 29 日に発生した口永良部島噴火に伴って、非干渉の領域が確認されたため、火山灰の堆積したエリアとの比較を行った。

### 3.2 SAR 強度画像の比較

SAR で得られる情報には、反射された SAR 電波の位相と強度がある。位相の情報は、SAR 干渉解析を行うことにより、地面の変動情報や地表面の変化の情報として活用することができる。それに対して、強度から得られた画像(以下「SAR 強度画像」という。)から地形の変化を読み取ることができる(たとえば、Tobita et al., 2006 ; Kobayashi, 2014)。

時期の異なる SAR 強度画像を重ね合わせることで地形の変化を重ね合わせて判読する加色混合法と呼ばれる手法(RGB 合成ともいう)がよく用いられる。加色混合法では、2 時期のそれぞれの画像に赤系統と青系統の色の階調を割り当てて、画像を合成する。合成後の画像では、2 時期の間で反射の強さに違いがなければ、灰系統の色となるが、反射の強さが大きく異なると、赤・青いずれかの系統に色が偏る。

### 3.3 レーダー座標系と地理座標系

SAR は、原理的に電波を斜め下方に向けて照射するため、レーダー座標系の画像では地形の倒れ込み(フォアショートニング)等による歪みが生じている。地理座標系へ投影するジオコードと呼ばれる処理を解析の最終段階で行うことで、地図と重ね合わせて表示することが可能となる。ジオコードを行うと直感的に理解しやすく、地形の判読を行いやすい。ただ、画像を地形図上に合わせこむため、変換前のピクセルに対して伸長・短縮等の変形が発生し、地形の細部の情報を判読しにくい場合もある。また、既知の標高モデルを使用して投影するため、地形変化等により標高が大きく変わった場合、誤った位置に投影されてしまうおそれがある。よって、状況に応じてレーダー座標系と地理座標系を使い分ける必要がある。

### 3.4 ソフトウェアと補正処理

解析には、国土地理院が開発したソフトウェア「新 GSISAR」を使用した。新 GSISAR はだいちの時代から使用してきたが、並列処理や様々な誤差低減処理機能を実装する等、年々バージョンアップを重ねている。SAR 干渉解析において、地形による干渉縞を除去するための標高データ(DEM)は「GSI10mDE



HMJapan」(飛田, 2009)を使用した. 大気中の水蒸気遅延による誤差を低減するため, 数値気象モデルを用いた対流圏誤差低減処理を適用した(小林ほか, 2014). 衛星の軌道誤差等に起因する長波長の誤差を低減するため, GNSS データを使用した補正(以下「GNSS 補正」という.)を一部の解析結果に適用した(飛田ほか, 2005). なお, GNSS 補正には4点以上のGNSS データが必要であるが, 口永良部島新岳の噴火後にはGNSS 観測点の障害により, 十分なデータを取得できておらず, GNSS 補正を適用していない解析結果も含まれている.

#### 4. 2015年5月の口永良部島新岳噴火前

##### 4.1 2014年8月の口永良部島新岳噴火

2014年8月3日に口永良部島新岳において1980年9月以来の噴火が発生し, 火口縁上800m以上の噴煙が上がった(気象庁, 2014). 口永良部島新岳噴火の約2ヶ月前に打ち上げられたばかりのだいち2号は, 打ち上げ後の初期機能確認運用期間であったが, 噴火による状況把握と推移を確認するため火山WGから観測要求を行った. JAXAでは, 火山WGからの観測要求を受けて, 噴火2日後の2014年8月5日から緊急観測を複数回実施した.

国土地理院では, 2014年8月20日と2014年9月3日に撮像されたデータを用いてSAR干渉解析による地表変位の抽出を行い, 噴火後の変動の確認を行った(図-2). SAR干渉解析の結果から, 2014年8月20日から2014年9月3日までに口永良部島全体としては, マグマ貫入等による大きな地殻変動は生じていないことを確認した. また, 新岳火口周辺の狭い範囲では, 若干の衛星から遠ざかる変動もしくは地形変化があった可能性がある.

本解析は, 国土地理院にてだいち2号のSARデータを用いた最初のSAR干渉解析(サンプルデータを除く)である. だいちと比較して, だいち2号では変動を検出できる空間分解能が格段に向上していること, 高い干渉性を保持していることを確認でき, 今後の観測データの活用に向けた期待を持たせる結果であった. なお, 実施したSAR干渉解析結果については, 火山WG及び火山噴火予知連絡会に報告した(国土地理院, 2014b).

##### 4.2 2015年5月23日の地震(M2.3)

2015年5月23日に口永良部島内のごく浅いところを震源とする地震(M2.3)が発生し, 島内で震度3が観測された. 口永良部島では, 2014年8月に噴火が発生して以降, 二酸化硫黄の放出量も増え, 火山活動の高まりが継続していることが報告されていた(気象庁, 2015). このような状況から, 火山WGでは, だいち2号による緊急観測を要望し, 5月29

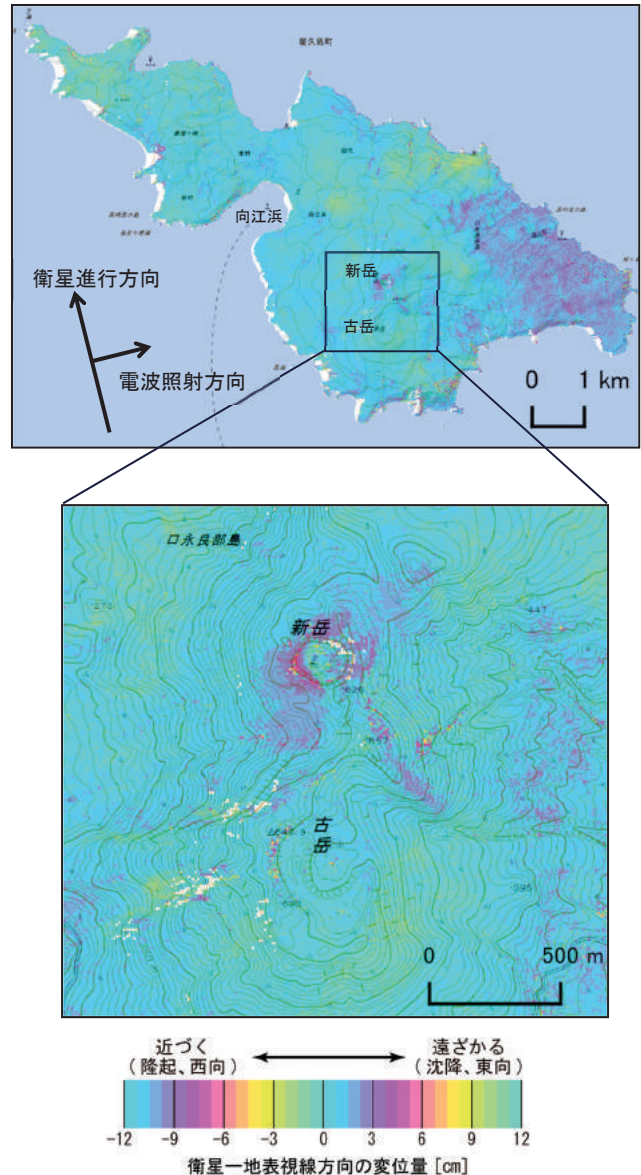


図-2 口永良部島のSAR干渉画像  
(解析期間: 2014/08/20 - 2014/09/03)

日の噴火の2日前にあたる5月27日に観測が実施された.

国土地理院では, 2015年5月27日に撮像されたデータを用いて撮像日当日にSAR干渉解析を行い, それまでに撮像されていた別データの解析結果との比較を行った(図-3).

2014年8月20日から2015年2月4日までのSAR干渉画像では, 新岳火口の南西側において衛星から遠ざかる変動が見られた(図-3上). このことは, 2014年8月の噴火後, 火口周辺において脱ガス等による収縮性的変動が生じていた可能性を示唆している. その後の2015年2月4日から2015年5月27日の解析結果では, 新岳火口周辺において変動は見られていない(図-3下). また, 同期間にて島内での明瞭な変動は, 確認できていない(図-4).

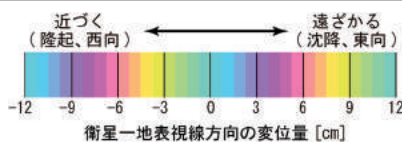
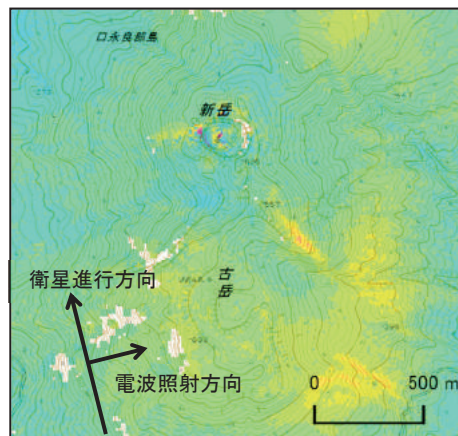
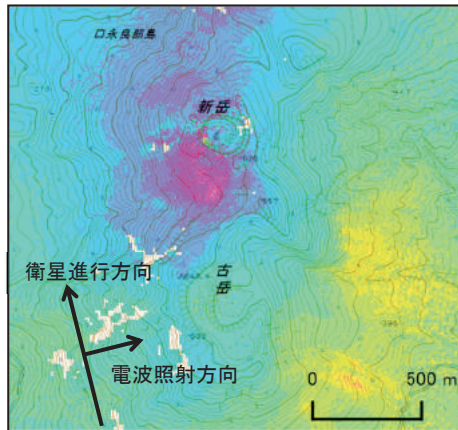


図-3 新岳・古岳周辺の SAR 干渉画像  
 上) 解析期間：2014/09/03 – 2015/02/04  
 下) 解析期間：2015/02/04 – 2015/05/27

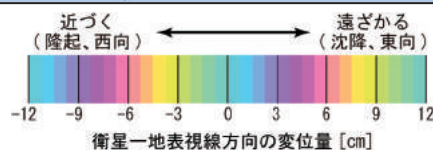
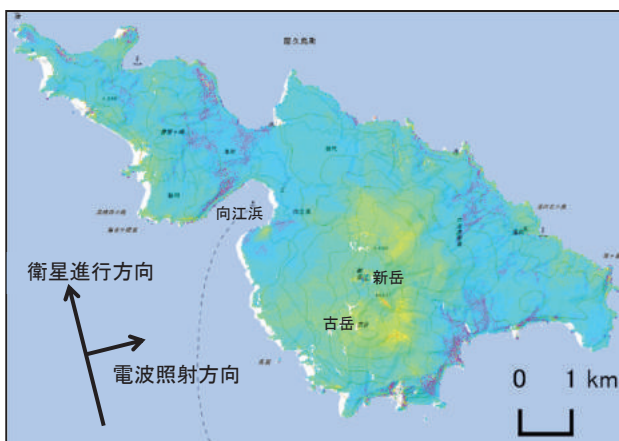


図-4 口永良部島の SAR 干渉画像  
 (解析期間：2015/02/04 – 2015/05/27)

5. 2015年5月・6月の口永良部島新岳噴火

5.1 2015年5月29日の噴火

2015年5月29日9時59分に口永良部島新岳にて爆発的噴火が発生し、黒灰色の噴煙が火口縁上9,000m以上に上がった。この噴火に伴い火砕流が発生し、同日10時7分に口永良部島の噴火警戒レベルは3(入山規制)から5(避難)に引き上げられた。火山WGでは、この噴火の状況を迅速に把握するため、観測要求を行い、噴火から約3時間後の12時53分に1回目の緊急観測が行われた。また、噴火当日の夜である23時43分に2回目の緊急観測が行わ

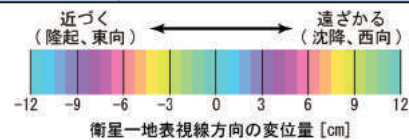
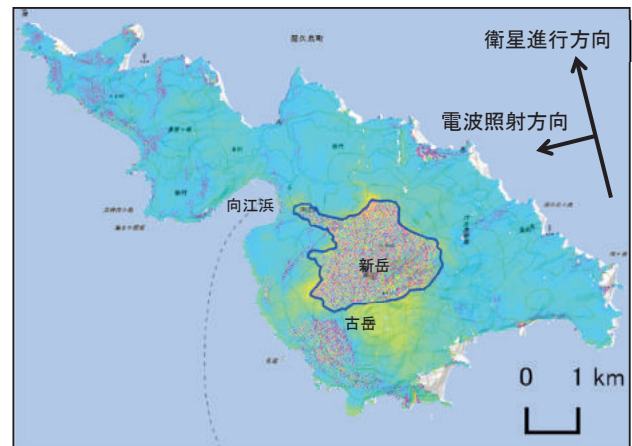
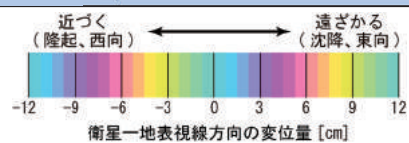


図-5 口永良部島の SAR 干渉画像  
 上) 解析期間：2014/11/14 – 2015/05/29  
 (赤枠：非干渉の範囲)  
 下) 解析期間：2015/01/23 – 2015/05/29  
 (青枠：非干渉の範囲)



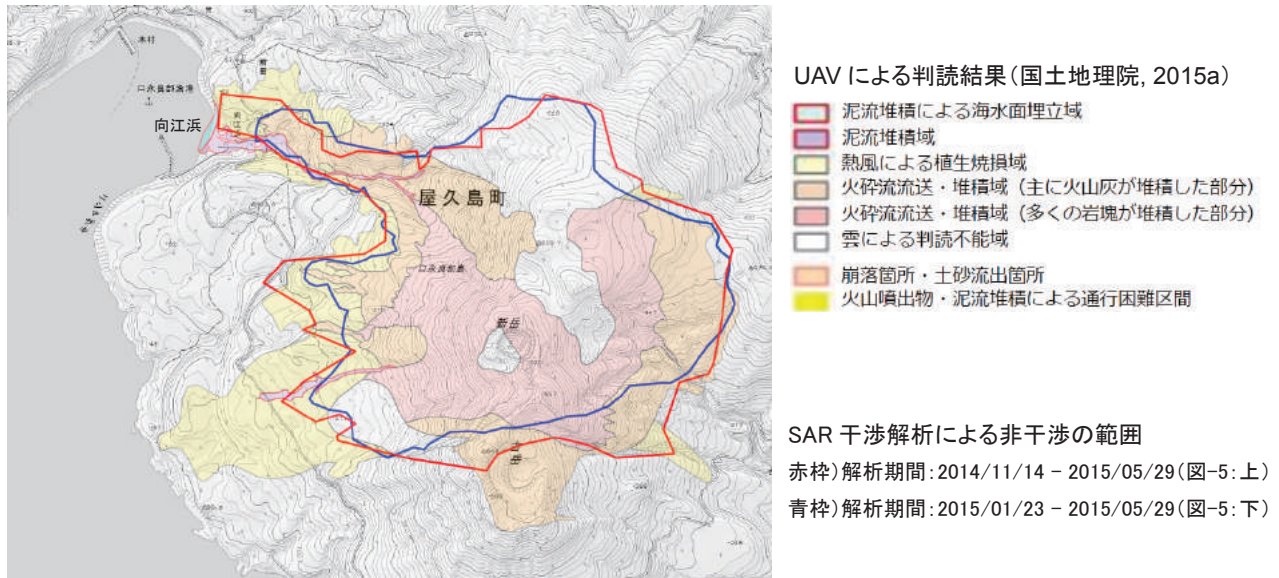


図-6 UAVによる判読結果とSAR干渉解析による非干渉域の比較図

(UAVにより撮影した空中写真の判読結果にSAR干渉解析による非干渉の範囲を重ね合わせた)

れた。先代のだいちの運用時には、発災時にこのような迅速な対応が可能だった例はなかったことから、だいち2号となって劇的に発災時の対応能力が高くなっていることを示した。なお、解析した結果は、随時、国土地理院ウェブサイトで公開した(国土地理院, 2015a)。

2015年5月29日に撮像した画像とそれ以前の撮像画像を使用して実施したSAR干渉解析では、非干渉域が新岳火口を中心に向江浜まで広がっていることを確認した(図-5)。これは、火砕流や降灰によって火山灰が堆積した地域をおおよそ反映していると考えられることから、噴火当日である29日中に国土交通省水管理・国土保全局砂防部、気象庁等の防災関係機関に情報提供した。また、翌日に行われた火山噴火予知連絡会拡大幹事会に上記の解析結果の資料を提出した(国土地理院, 2015b)。

国土地理院では、2015年7月と2015年9月に無人航空機(以下「UAV」という。)により口永良部島の撮影を実施し、火砕流や火山泥流による堆積域を判読した結果を公開している(国土地理院, 2015a)。今回、SAR干渉解析結果から得られた非干渉域とUAVにより得られた写真の判読に基づく火砕流や火山泥流による堆積域との比較を行った(図-6)。

比較したところ、UAVから判読した火砕流流送・堆積域(主に火山灰が堆積した部分・多くの岩塊が堆積した部分)と今回検出された非干渉域は概ね一致しており、だいち2号を利用したSAR干渉解析が、大規模噴火時の火山灰の堆積域等の情報として活用できることを示している。さらに、UAVによる撮影では、新岳山頂部や北側の範囲が雲の影響で判読できていない。SARは、雲や噴煙を透過するため、

噴煙や雲に覆われていても地表面の情報を得ることができる。また、だいち2号は人工衛星であるため、飛行の安全面に配慮する必要がない。このことは、噴火後の迅速な状況把握において大きな利点である。ただし、古岳山頂部では、SAR干渉解析結果では非干渉域となっておらず、UAVから判読した火砕流流送・堆積域の範囲と一致していない。これは、火砕流が新岳の南西側から北西側(向江浜地区)にかけて流下したことから古岳周辺では火山灰の堆積が比較的少なかったこと、古岳周辺には植生がなく、だいち2号の電波の反射強度が比較的強いことから多少の火山灰の堆積であっても干渉性を保持できたことが不一致の要因として考えられる。また、UAVから判読した熱風による植生焼損域は、SAR干渉解析による非干渉域に含まれていないものが多い。これは、だいち2号のSARが木の葉や枝を透過する比較的波長の長いLバンド(1波長:約24cm)であるため、熱風による木の葉の消失といった変化には感度が低いことを示している。

噴火前後の地殻変動については、新岳山頂周辺では、前述した非干渉域となっているため、その場所での変動の有無は分からなかった。また、その他の島内の周辺域では主だった変動は確認されなかった(図-5)。

噴火に伴って口永良部島の地形に変化があったかを確かめるため、噴火前後のSAR強度画像を加色混合法により比較した(図-7, 図-8)。噴火前のSAR強度画像には赤色、噴火後のSAR強度画像には青色を着色して重ね合わせている。火口周辺では噴火後に反射強度が色濃く増加(青色)・減少(赤色)している場所があり、噴火に伴って火口周辺の地形に変化



があったと考えられる。また、新岳周辺に広く見られる赤色は、噴火に伴って反射強度が減少したことを示しており、火山灰の堆積により反射強度が減少したと考えられる。

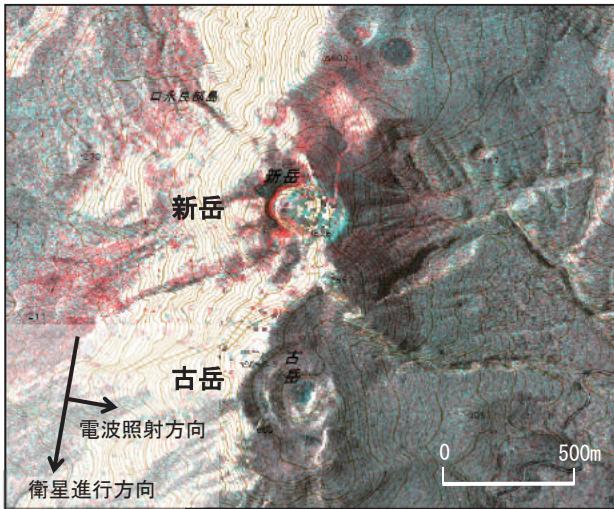


図-7 SAR強度画像の比較(加色混合法:地理座標系)  
赤色:2014/11/14 青色:2015/05/29

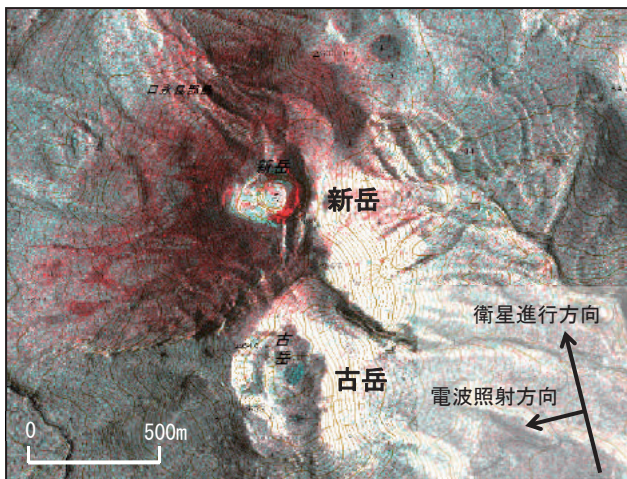


図-8 SAR強度画像の比較(加色混合法:地理座標系)  
赤色:2015/01/23 青色:2015/05/29

### 5.2 2015年5月29日の噴火後

2015年5月29日の噴火後の解析ペアである2015年5月29日から2015年6月12日のSAR干渉解析を実施した。噴火前後の解析で非干渉がみられた新岳周辺の範囲においても干渉が得られ、特段の地面の変動は見受けられなかった(図-9)。新岳周辺では、干渉性が保持され、位相変化も見られなかったことから、2015年5月29日の噴火後から2015年6月12日までに堆積した火山灰の層厚に大きな変化はなかったと考えられる。

2015年5月29日の噴火後、翌月の6月18日・19日にも噴火が発生した。6月18日・19日を挟んだ期間で実施したSAR干渉解析結果では、噴火に伴う非

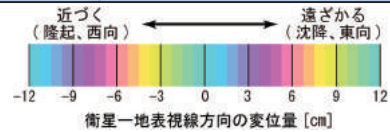
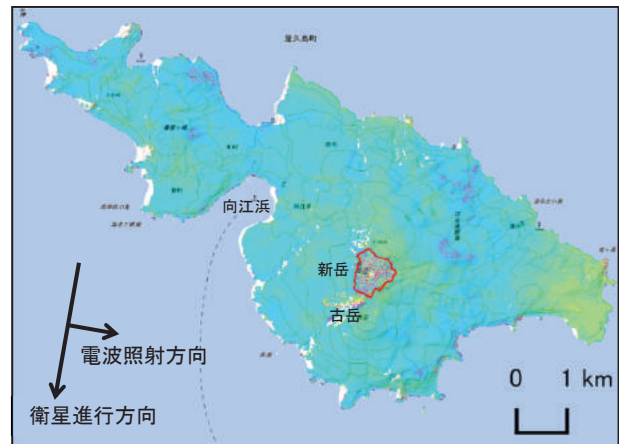
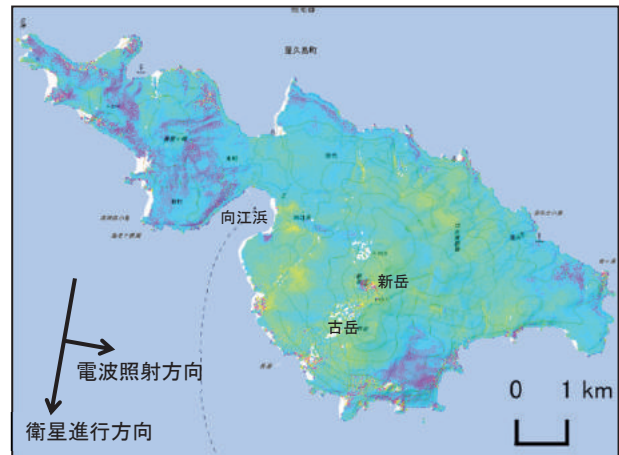


図-9 口永良部島のSAR干渉画像  
上)解析期間:2015/05/29-2015/06/12  
下)解析期間:2015/06/12-2015/06/26  
(赤枠:非干渉の範囲)

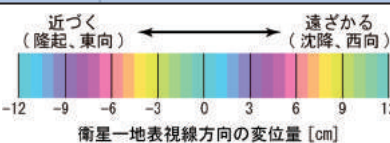
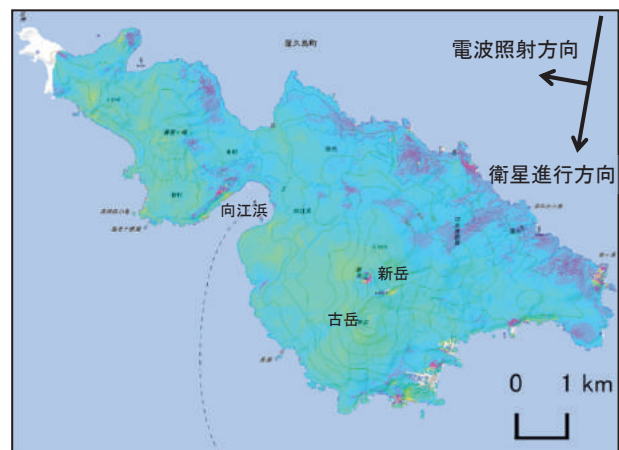


図-10 口永良部島のSAR干渉画像  
(解析期間:2015/09/21-2015/11/30)

干渉域が新岳山頂付近に表れている(図-9)。なお、6月18日・19日の噴火後である2015年9月21日から2015年11月30日のSAR干渉解析結果では、特段の変動は確認されなかった(図-10)。

### 5.3 地理院地図の活用

口永良部島新岳の噴火に伴い解析したSAR干渉画像、SAR強度画像は、地理院地図の上乗せ情報としてウェブサイト上に掲載した(国土地理院, 2015a)。地理院地図は、国土地理院が提供する地図・空中写真・火山土地条件図等と重ね合わせて表示することができ、干渉SARで検出された変動を地形・地質等の情報と併せて確認することができる。なお、地理院地図は、ウェブアプリケーションであるため、特段のソフトウェアをインストールする必要はなく、インターネット環境があれば使用することができ、PCだけでなくスマートフォン等のポータブル端末でも表示可能である。

## 6. まとめ

国土地理院では、2015年5月・6月の口永良部島新岳の噴火に際し、だいち2号の観測データを用いて、SAR干渉解析とSAR強度画像の比較を行った。

2015年5月29日の噴火では、噴火前後のSAR干渉解析結果から火砕流の流れた範囲と概ね一致した非干渉域を検出することで、火山灰等の堆積範囲の推定に有効であることが分かった。また、噴火前後に島内の周辺域で主だった変動がなかったことを確認した。SAR強度画像の比較から、噴火による大きな地形変化は新岳火口付近に限られることを確認し

た。今回、噴火から約3時間後にだいち2号による緊急観測が行われ、解析結果の情報を29日中に防災関係機関に提供した。上記の一連の対応は、だいち2号が発災時に迅速に対応できる運用能力を示したといえる。

だいち2号の定常運用が始まり、国土地理院では日本全国を対象とした解析を実施している。離島の活火山を含めた陸域にある全火山に対して、SAR干渉解析を実施し、随時、火山噴火予知連絡会等の関係機関へ報告している。口永良部島は、火山活動が活発な状態が続いていることから、引き続きだいち2号のデータを用いたSAR干渉解析を実施し、GNSSのデータ等と併せて地表面の変動を確認していく。また、今後も大きな噴火が発生した際には、SAR干渉解析とともにSAR強度画像による地形変化の検出も実施し、防災機関へ情報を提供していく。

### 謝辞

だいち2号の原初データは、火山噴火予知連絡会衛星解析グループ及びだいち2号に関する国土地理院とJAXAの間の協定に基づき提供されました。だいち2号の原初データの所有権は、JAXAにあります。数値気象モデル及び気象庁GNSS観測点のデータは、「国土地理院と気象庁とのオンラインによる防災情報の相互交換に関する協定」に基づき、気象庁から提供されました。この場を借りて、御礼申し上げます。

(公開日：平成28年3月17日)

### 参考文献

- 気象庁(2014):口永良部島の火山活動解説資料(平成26年8月), [http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly\\_v-act\\_doc/fukuoka/14m08/509\\_14m08.pdf](http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/14m08/509_14m08.pdf) (accessed 26 Jan. 2016).
- 気象庁(2015):口永良部島の火山活動解説資料(平成27年5月), [http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly\\_v-act\\_doc/fukuoka/15m05/509\\_15m05.pdf](http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/15m05/509_15m05.pdf) (accessed 26 Jan. 2016).
- 気象庁・火山噴火予知連絡会衛星解析グループ(2015):火山活動の評価及び噴火活動の把握に関する共同研究平成26年度成果報告書, <http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/EISEI/201503/report.pdf> (accessed 26 Jan. 2016).
- Kobayashi, T (2014): Remarkable ground uplift and reverse fault ruptures for the 2013 Bohol earthquake (Mw 7.1), Philippines, revealed by SAR pixel offset analysis, *Geoscience Letters*, 1:7, doi:10.1186/2196-4092-1-7.
- 小林知勝, 石本正芳, 飛田幹男, 矢来博司(2014): SAR干渉解析のための数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減処理ツールの開発, *国土地理院時報*, 125, 31-38.
- 国土地理院(2014a):「だいち2号」に関する国土地理院とJAXAの機関間協定の締結について, <http://www.gsi.go.jp/REPORT/aloskyouteishomei.html> (accessed 26 Jan. 2016).
- 国土地理院(2014b):口永良部島のSAR干渉解析結果について, 第130回火山噴火予知連絡会資料, 69, [http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/130/130\\_no02.pdf](http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/130/130_no02.pdf) (accessed 29 Jan. 2016).
- 国土地理院(2015a):口永良部島の火山活動に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h27-kuchinoerabu-index.html> (accessed 29 Jan. 2016).

- 国土地理院 (2015b) : 火山噴火予知連絡会拡大幹事会資料 (平成 27 年 5 月 30 日開催), [http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/kakudai150530/10\\_chiri.pdf](http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/kakudai150530/10_chiri.pdf) (accessed 29 Jan. 2016).
- JAXA/ALOS-2 プロジェクト (2016) : ALOS-2 基本観測シナリオ (第 1 版) -C 改訂-, [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/obs/scenario/ALOS-2\\_Basic\\_Observation\\_Scenario\\_First-Ed\\_J\\_v00\\_C.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/obs/scenario/ALOS-2_Basic_Observation_Scenario_First-Ed_J_v00_C.pdf) (accessed 26 Jan. 2016).
- 飛田幹男 (2009) : 地殻変動計測のための SAR 画像分析の高度化に関する研究 (第 3 年次), 平成 21 年度国土地理院調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000057644.pdf> (accessed 29 Jan 2016).
- 飛田幹男, 宗包浩志, 松坂茂, 加藤敏, 矢来博司, 村上亮, 藤原智, 中川弘之, 小澤拓 (2005) : 干渉合成開口レーダーの解析技術に関する研究, 国土地理院時報, 106, 37-49.
- Tobita, M., H. Suito, T. Imakiire, M. Kato, S. Fujiwara, and M. Murakami (2006) : Outline of vertical displacement of the 2004 and 2005 Sumatra earthquakes revealed by satellite radar imagery, *Earth Planets Space*, 58, e1-e4.
- 宇宙航空研究開発機構 (2014) : 陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」パンフレット, <http://fanfun.jaxa.jp/countdown/daichi2/files/daichi2.pdf> (accessed 26 Jan. 2016).
- 山田晋也, 森下遊, 和田弘人, 吉川忠男, 山中雅之, 藤原智, 飛田幹男, 矢来博司, 小林知勝 (2015) : だいち 2 号 SAR 干渉解析による御嶽山噴火に伴う地表変位の検出, 国土地理院時報, 127, 11-15.