

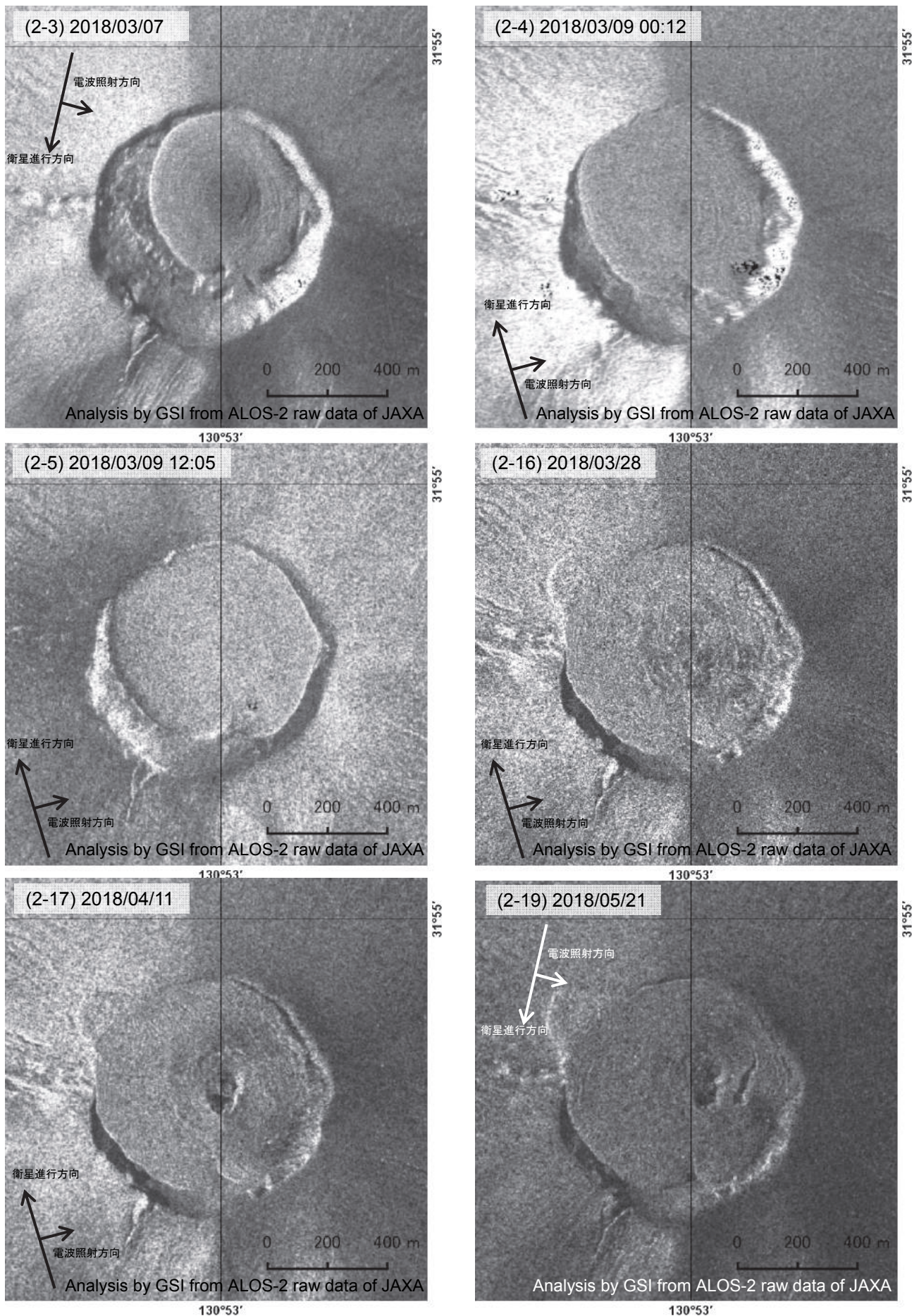


図-8 2018 年 3 月から 5 月までの観測の SAR 強度画像

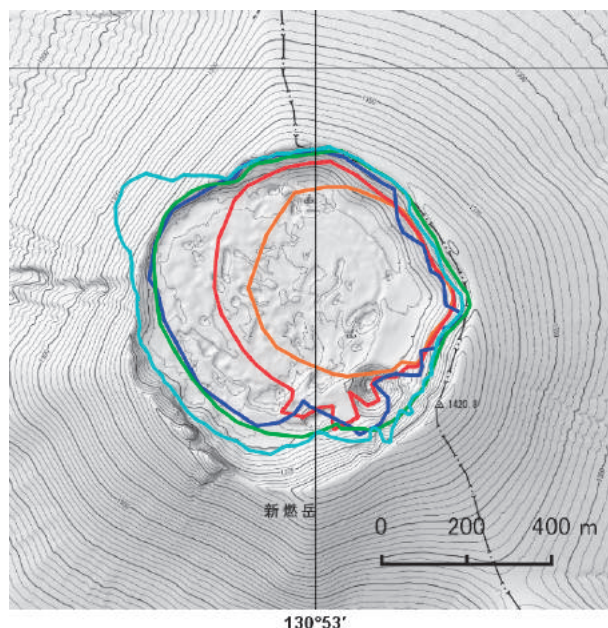


図-9 新燃岳火口の溶岩の範囲の推移

橙線は3月6日、赤線は3月7日、青線は3月9日00時、緑線は3月9日12時、水色線は3月21日のSAR強度画像の判読結果。

5. 2018年4月の硫黄山の噴火

5.1 火山活動の概要

気象庁(2018b)による硫黄山の火山活動の概要を以下に述べる。

2018年4月19日15時39分頃に硫黄山の南側で噴火が発生し、4月20日16時30分頃に硫黄山の西側500m付近で噴気が上がった。4月26日18時15分頃には一時的に噴火が発生した(図-10)。それ以降噴火は発生しなかったが、活発な噴気活動が続いた。

地殻変動観測では、4月19日に噴火が発生した硫黄山の南側及び西側においてみられていた隆起は、4月30日までにはほぼ収まった。

硫黄山の噴火警戒レベルは、4月19日15時55分に2(火口周辺規制)から3(入山規制)に引き上げられ、5月1日14時00分に3(入山規制)から2(火口周辺規制)に引き下げられた。

5.2 解析結果

霧島山の緊急観測は、4月19日の噴火を踏まえ、火山WGは、4月20日の緊急観測を要求した。それ以降も随時緊急観測を要求し、JAXAは4月20日から4月23日までの4日間で6回と非常に高い頻度で緊急観測を実施した。

2018年4月と5月に実施した緊急観測と解析ペアを表-4に示す。この中で(3-3)、(3-4)は通常より解像度が高いスポットライトモードの観測データを用いている。

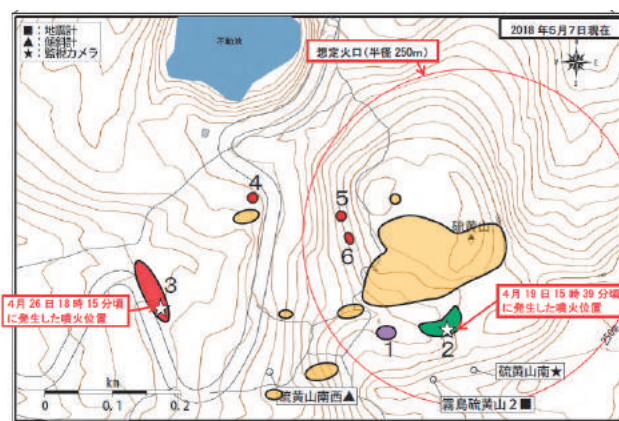


図-10 硫黄山の噴火位置及び主な熱異常域及び観測位置(気象庁, 2018b)

●は、主な熱異常域及び噴気域、●は、4月9日に確認した噴気域及び熱異常域、●及び●は、4月19日の噴火以降に拡大した噴気域。

図-11は、2018年4月23日までの観測データを用いたSAR干渉画像である。これらは4月19日と20日の噴火前後の地表変動を捉えたものである。いずれも硫黄山南部及びその西側で隆起とみられる衛星に近づく変動が見られた。(3-1)の観測は、4月20日に硫黄山の西側で噴気が上がる約16時間前に実施されており、その時点で隆起していたと考えられる。3.2節の(1-1)と同様、干渉SARで顕著な火山活動を事前に察知した例として特筆すべきものである。(3-3)、(3-5)及び(3-6)では、硫黄山の西側の変動が複数の箇所あることを示しており、火山活動が日々変化していることを把握することができた。

図-12は、3月11日、12日から4月22日、23日までのSAR干渉画像を基に2.5次元解析を行い、変動の準上下成分と準東西成分を示したものである。準上下成分では、硫黄山南部及びその西側で隆起がみられ、変動量は硫黄山南部で最大約9cmであった。準東西成分では、硫黄山南部で東西に拡大する変動が見られ、硫黄山周辺で膨張とみられる変動があることが確かめられた。ただし、3月11日から12日までは、変動がないと見なせるのに対し、4月22日から23日までは火山活動が活発な時期で、4月22日、23日の観測の間(約13時間)に発生した変動が、(3-6)にのみ含まれることに注意が必要である。つまり、2.5次元解析の二つの元データ(3月11日から4月22日及び3月12日から4月23日)に含まれる変動は厳密には同じではなく、導出した準上下成分と準東西成分には4月22日、23日の観測の間(約13時間)の地殻変動量を無視した仮定に起因する誤差が含まれる。

図-13は、2018年5月4日までの観測データを用

いた解析の SAR 干渉画像である。(3-8) で硫黄山南部及びその西側でわずかに隆起とみられる衛星に近づく変動が見られる。これは 4 月 19 日、20 日の噴火に伴う変動があったものの 4 月 30 日時点では噴火前の状態に近づきつつあることを示しており、火山活動が活発した後に、沈静化に向かったことを示している。(3-9) で硫黄山南部及びその西側で沈降とみられる衛星から遠ざかる変動が見られる。変動箇所は (3-1) で隆起した箇所とほぼ一致しており、(3-8) の結果と同様、この期間に火山活動が沈静化したことを示している。

5.3 結果の公表とアクセス数

硫黄山の SAR 干渉画像を観測後速やかに解析し、順次国土地理院の web サイトに掲載した。web 掲載回数は 4 月 20 日から 5 月 2 日までで計 4 回で、掲載した画像は 4 枚であった(国土地理院, 2018c)。

硫黄山の西側の隆起を捉えた (3-1) は、噴煙が上がる約 1 時間前の 4 月 20 日 15 時 20 分に公開され、この画像へのアクセス数は同日 17 時までに 7 千件に、同日 21 時までに 1.5 万件に達した。

web サイトに掲載された 4 枚について、観測から公開まで最短 4 時間 30 分、平均約 24 時間を要し、地理院地図のアクセス数は 4 月のみで (3-1) には約 3 万件、(3-3) には約 2 万件であった。

なお、(3-3) はスポットライトモードの SAR 干渉画像として初めて国土地理院の防災関連の web サイトに掲載された事例となった。

SAR 干渉画像で捉えた硫黄山周辺の隆起について、4 月 20 日から 4 月 26 日までに、新聞、テレビ等の各媒体で計 5 回(国土地理院調べ)報道された。

5.4 火山活動評価、災害対応への活用

硫黄山の SAR 干渉画像を国土地理院の web サイトに掲載する際に関係機関に提供した。提供した情報は、気象庁の火山活動解説資料の地殻変動の状況に「だいち 2 号の SAR データを使用した国土地理院の解析によると、4 月 23 日までの観測で硫黄山の南側及びその西側で隆起と考えられる変動がみられていましたが、4 月 30 日の観測では小さくなっています。」と評価され、資料に引用された。さらに 5 月 1 日の噴火警戒レベル 3 から 2 への引き下げに活用された(気象庁, 2018b)。

また、火山噴火予知連絡会にも適宜情報提供し、第 141 回火山噴火予知連絡会では、火山活動評価で「GNSS 観測や SAR 干渉解析では、3 月頃から硫黄山火口浅部の膨張を示す変動がみられました。」と評価された(気象庁, 2018d)。

関係機関に提供しなかった解析結果は、国土地理院内における火山活動の監視に使用した。

表-4 実施された緊急観測と解析ペア一覧

図番号	2 回目 観測年月日*1 [mm/dd hh:mm]	1 回目 観測年月日*1 [yyyy/mm/dd]	取得 間隔 [日間]	パス	観測 モード *2	入射角 [°]	衛星 進行 方向	電波 照射 方向	垂直 基線長 [m]	緊急 観測 要求*3	web 公開*4
3-1	4/20 00:12	2018/03/09	42	130	U2-6	32.1	北行	右(東)	-15	○	4/20
3-2	4/20 12:05	2018/03/09	42	21	U3-13	53.6	南行	右(西)	-35	○	--
3-3	4/21 12:26	2018/03/10	42	24	SPT	22.8	南行	右(西)	+8	○	4/21
3-4	4/21 23:17	2018/03/10	42	122	SPT	60.9	北行	左(西)	-24	○	--
3-5	4/22 23:37	2018/03/11	42	125	U2-8	38.5	北行	左(西)	-9	○	--
3-6	4/23 13:06	2018/03/12	42	30	U3-13	53.2	南行	左(東)	-73	○	--
3-6'	4/23 13:06	2018/03/26	28	30	U3-13	53.2	南行	左(東)	-120	○	4/24
3-7	4/26 23:23	2018/03/15	42	123	U3-14	55.1	北行	左(西)	+18	○	--
3-8	4/30 12:19	2018/04/16	14	23	U2-7	35.5	南行	右(西)	-107	○	5/2
3-9	5/04 00:12	2018/04/20	14	130	U2-6	32.1	北行	右(東)	+36	○	--

*1 観測年月日は日本標準時。2 回目観測は全て 2018 年。1 回目の観測時刻は 2 回目と同じ。

*2 「U」は高分解能 (3m) モードを、「SPT」はスポットライト (1-3m) モードを示す。

*3 「○」は火山 WG から JAXA に緊急観測要求をして実施された観測を示す。

*4 月日は国土地理院の web サイトに掲載された時期を示す。

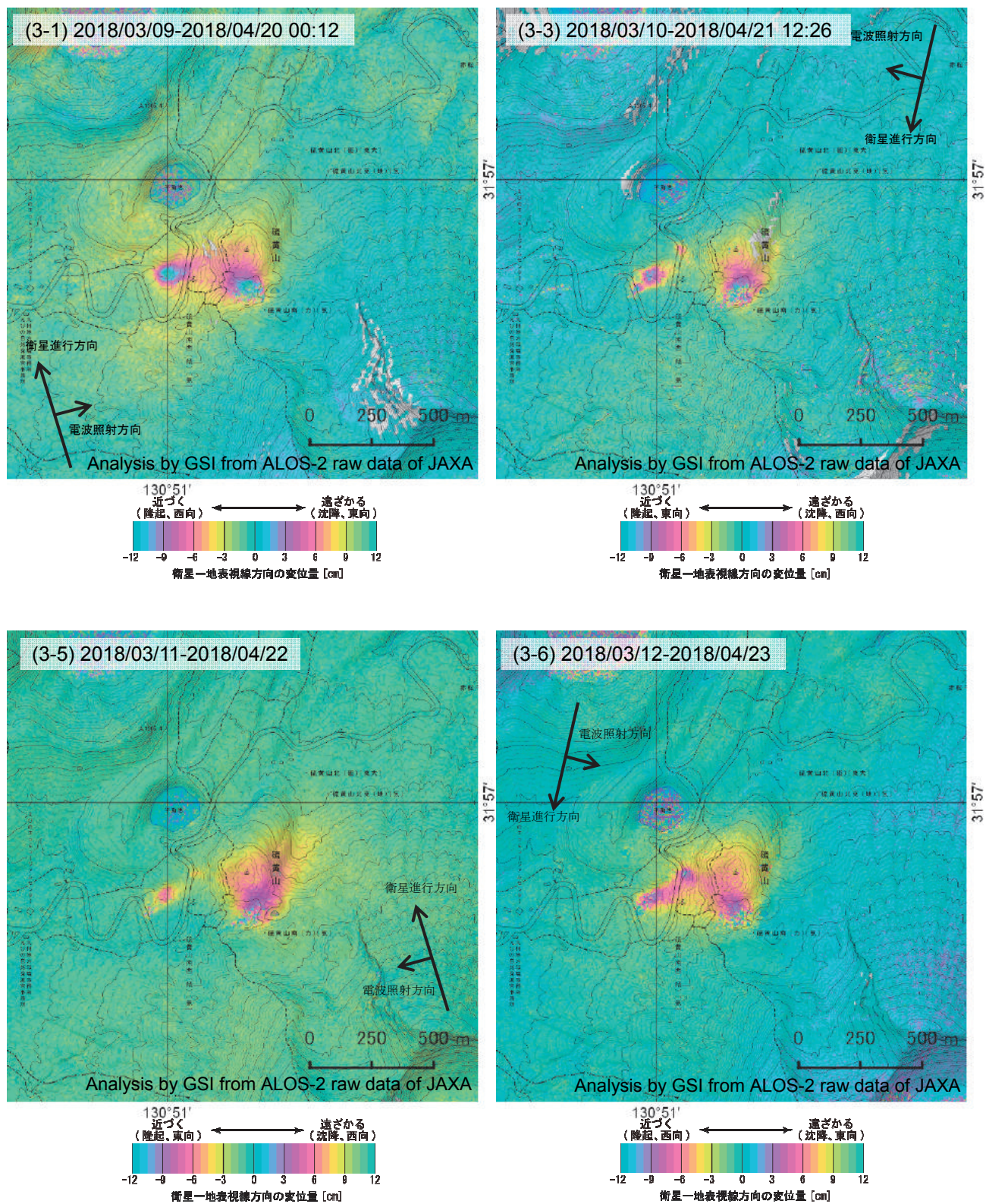


図-11 2018年4月23日までの観測データを用いた解析のSAR干渉画像

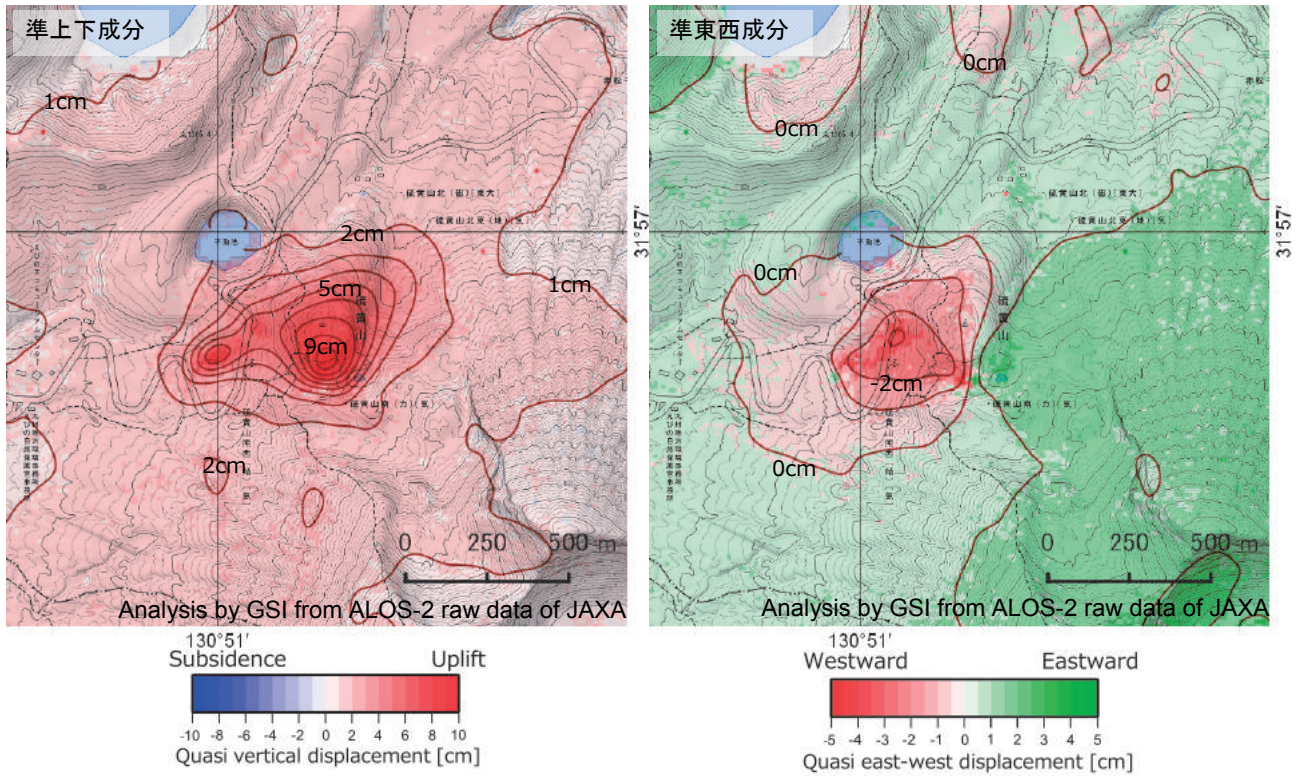


図-12 (3-5) 2018/03/11-2018/04/22 と (3-6) 2018/03/12-2018/04/23 の 2.5 次元解析結果

左：準上下成分 右：準東西成分の変位量 等量線の間隔は 1cm.

※2018/04/22 と 04/23 の間に地表変動があるとみられるので上の図の変動量は実際と異なる場合がある.

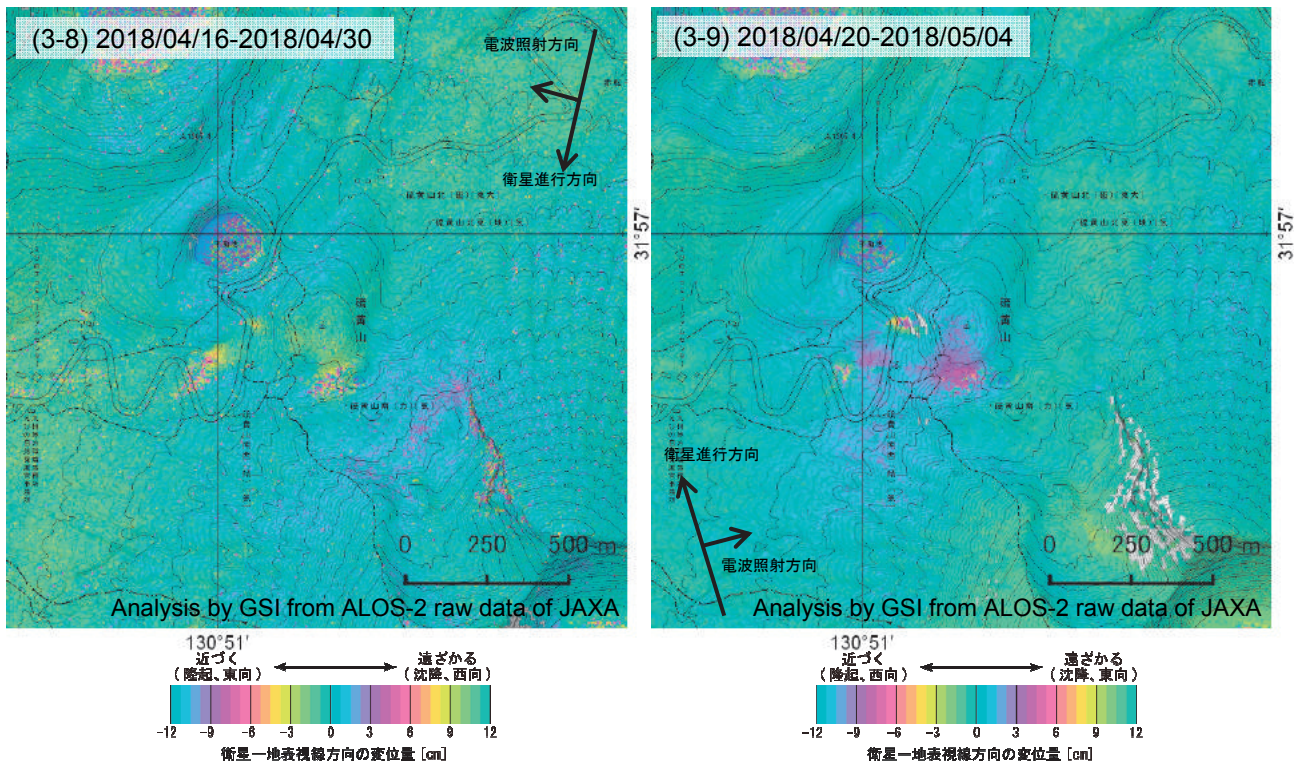


図-13 2018 年 5 月 4 日までの観測データを用いた解析の SAR 干渉画像

6. 議論

6.1 情報提供の迅速化

SAR 干渉画像又は SAR 強度画像を国土地理院の web サイトに掲載するに当たり、観測から掲載まで最短で 4 時間、平均で約 24 時間を要した。今後更に災害対応に活用されるために、より迅速な情報提供をしたい。

そこで、解析時間の短縮を目的とした解析ソフトウェアの改造を実施する予定である。現在のソフトウェアでは、解析ペアの選択や、解析ソフトの立ち上げなどを手動で行っているが、これらを自動化することによって、より迅速に解析結果を得ることが期待できる。また、GPU の利用といった処理システムの改良による解析の高速化も情報提供の迅速化につながるため、今後検討すべき課題の一つである。

また、web サイト掲載の際には、SAR 干渉画像とその画像から得られる変動情報の解釈を含む解説文を付しているが、この解説文の作成に数時間を費やすことがあった。一般向けには従来どおり解説文ができた段階で、SAR 干渉画像とその解説文を情報提供せざるを得ないが、SAR 干渉画像等を見て判断できる専門家向けには国土地理院 (2018d) のように SAR 干渉画像のみを迅速に情報提供することも検討したい。

6.2 先進レーダ衛星 (ALOS-4) への対応

本稿の事例では、霧島山周辺において多くの緊急観測が実施された。その結果、本来観測されるはずだった定常観測はキャンセルされ、当該範囲の変動監視の機会を失うことになった。これは、高分解能モードでは観測幅の関係から一回帰 (14 日) で日本域全てを観測することができず、回帰毎に複数のビームでカバーする必要があるため止むを得ないことである。

だいち 2 号の後継機となる平成 32 年度に打ち上げ予定の先進レーダ衛星 (ALOS-4) では、高分解能モードの観測幅が 4 倍 (約 200km) になる (宇宙航空研究開発機構, 2017)。これにより、一度に観測される面積が増え、定常観測のままで当該箇所を観測できる機会が増える。緊急観測によって観測域がずれる場合も変動監視機会の損失は発生しにくくなる。また、定常観測で任意の地点における観測頻度が増えるため、解析時の 1 回目の観測データが比較的新しいものを用いることができ、干渉性を高められることが期待できる。

一方で、先進レーダ衛星 (ALOS-4) では定常解析で処理すべきデータ量が増大する。SAR 衛星による地表変動の把握を切れ目なく実施していくため、データ処理量の増大に対応した解析システムの構築を先進レーダ衛星 (ALOS-4) 運用時に間に合うように

着実に進めていく必要がある。

6.3 DEHM 更新の重要性

国土地理院は、平成 30 年 3 月 27 日、航空機 SAR による新燃岳周辺の SAR 強度画像を作成した。その結果、新燃岳火口内が溶岩でほぼ満たされ、北西の縁から流出している様子を確認した (図-14)。この観測データから見積もられた新規の溶岩の体積は約 1,600 万 m^3 であった (国土地理院, 2018b)。

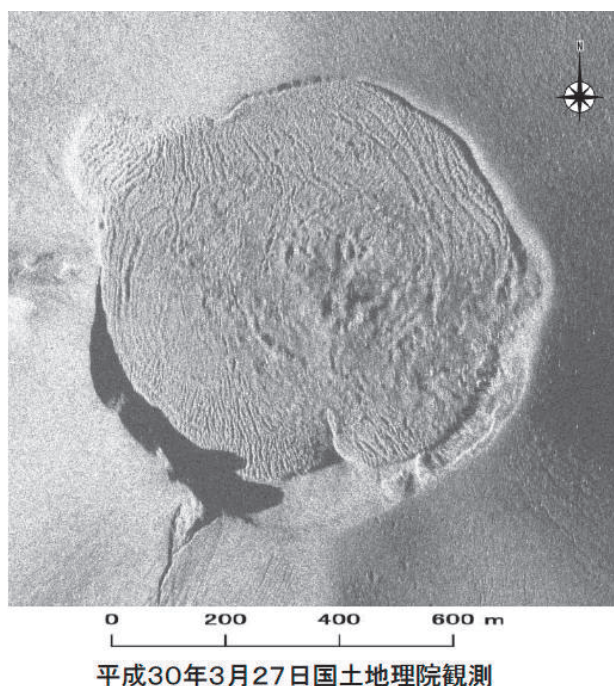


図-14 新燃岳の西側から航空機 SAR で観測した SAR 強度画像 (国土地理院, 2018b)
観測高度約 3,750m, オフナディア角 70°

一方、(2-14) の SAR 強度画像から判読した溶岩の範囲は約 40 万 m^2 であり、溶岩の厚みが様であるとは仮定した場合、溶岩によって約 +40m の標高変化があったことになる。

約 +40m の標高変化は、SAR 干渉解析における誤差要因となる場合がある。解析では、DEHM 中の楕円体高に依存する地形縞を計算し、除去している。DEHM ファイルと実際の地形に乖離がある場合、地形縞の推定が正しくできず、地形縞を除去しても誤差が残ってしまう。例えば、(3-11) では、観測時の標高と DEHM の差が -438m あると、位相 1 周分 (衛星-地表視線方向で約 12cm の変位量) の誤差が含まれる。よって、約 +40m の標高変化があったと仮定すると、SAR 干渉画像には $40/(-438) \times 12 = -1.1\text{cm}$ の誤差が含まれることになる。

そこで、3 月 27 日の航空機 SAR の観測データを基に作成した DSM ファイルを用いて、新燃岳周辺

の DEHM ファイルを作成した。2018 年 4 月以降の新燃岳の SAR 干渉解析においては、この DEHM ファイルを用いることを標準とした。

SAR 干渉解析で用いる DEHM ファイルが実際の地形と整合していない場合、解析結果に誤差を含むことがあるので、今後も大きな地形変化があれば DEHM ファイルを修正する。

干渉 SAR による地殻変動監視は、しばしば複数の平面直角座標系にまたがって行われるため、地形縞の計算に不可欠な DEHM の元となる DEM データは、平面直角座標系よりも広域での総合的な利用に適した経緯度で区分された形式で用意しておくことが望ましい。

7. まとめ

霧島山の新燃岳及び硫黄山の噴火に際し、火山 WG 及び JAXA の対応により、だいち 2 号による緊急観測が非常に高い頻度で実施された。国土地理院は、だいち 2 号の観測データを用いて、SAR 干渉解析や SAR 強度画像の作成を実施し、一連の火山活動に伴う詳細な地表変動や地形変化を時系列に沿って迅速に把握した。

中でも噴火のような顕著な火山活動の前に微小な地表の変動を把握できたことや、スポットライトモードの観測データを用いた SAR 干渉解析による硫黄山における変動を把握したことは、大きな成果であった。また、SAR 強度画像を比較することで航空機 SAR の強度画像と同様に新燃岳火口の溶岩範囲

の推移を把握することができた。

硫黄山、新燃岳のいずれも、GEONET による GNSS 観測だけでは把握が困難な局所的な変動であり、SAR の有効性を示すことができた。

SAR 干渉解析等により顕著な変動情報を得た際は、当該の SAR 干渉画像等を国土地理院の web サイトに掲載した。観測から最短で 4 時間、平均でも約 24 時間で掲載しており、迅速に情報提供ができた。

提供した情報は、火山噴火予知連絡会等で火山活動評価及び噴火警戒レベルの判断に活用された。

今後の課題は、より迅速に解析結果を得るために解析の自動化等を進めること、及び、SAR 衛星による地表変動の把握を切れ目なく実施するために平成 32 年度に打ち上げ予定の先進レーダ衛星 (ALOS-4) の観測データに対応した解析システムの構築を着実に進めていくことが挙げられる。

謝 辞

ここで使用しただいち 2 号の原初データの所有権は JAXA にあります。これらのデータは、だいち 2 号に関する国土地理院と JAXA の間の協定及び火山噴火予知連絡会衛星解析グループの活動に基づき提供されました。数値気象モデルは、「電子基準点等観測データ及び数値予報格子点データの交換に関する細部取り決め協議書」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 30 年 11 月 26 日)

参 考 文 献

- Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa and M. Tobita (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, 27, 2049-2052.
- 気象庁火山噴火予知連絡会 衛星解析グループ (2017) : 火山活動の評価及び噴火活動の把握に関する共同研究成果報告書 (FY26-FY28), <http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/EISEI/201703/report.pdf>, (accessed 28 Jun. 2018).
- 気象庁 (2017) : 霧島山の火山活動解説資料 (平成 29 年 10 月), http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/17m10/505_17m10.pdf, (accessed 28 Jun. 2018).
- 気象庁 (2018a) : 霧島山の火山活動解説資料 (平成 30 年 3 月), http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/18m03/505_18m03.pdf, (accessed 28 Jun. 2018).
- 気象庁 (2018b) : 霧島山の火山活動解説資料 (平成 30 年 4 月), http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/18m04/505_18m04.pdf, (accessed 28 Jun. 2018).
- 気象庁 (2018c) : 霧島山の火山活動解説資料 (平成 30 年 5 月), http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/18m05/505_18m05.pdf, (accessed 28 Jun. 2018).
- 気象庁 (2018d) : 第 141 回火山噴火予知連絡会による全国の火山活動の評価 (別紙 2), http://www.jma.go.jp/jma/press/1806/20c/yochiren180620_2.pdf, (accessed 28 Jun. 2018).
- 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 (2014) : 御嶽山の火山活動に関する対応, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h26-ontake-index.html>, (accessed 28 Jun. 2018).
- 国土地理院 (2015a) : 箱根山の火山活動に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/kikakuchousei/bousaichousei/h27-hakoneyama-index.html>, (accessed 28 Jun. 2018).
- 国土地理院 (2015b) : 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 28 Jun. 2018).
- 国土地理院 (2015c) : 桜島における地殻変動について, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-sakurajima.html>, (accessed 28 Jun. 2018).
- 国土地理院 (2015d) : 阿蘇山の火山活動に関する情報, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h27-asosan.html>, (accessed 28 Jun. 2018).
- 国土地理院 (2017) : 霧島山 (新燃岳) の航空機 SAR 観測について, <http://www.gsi.go.jp/common/000193178.pdf>, (accessed 28 Jun. 2018).
- 国土地理院 (2018a) : 平成 30 年 (2018 年) 霧島山 (新燃岳) の噴火に関する対応, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h30kirishima-index.htm>, (accessed 28 Jun. 2018).
- 国土地理院 (2018b) : 霧島山 (新燃岳) の航空機 SAR 観測について (速報), <http://www.gsi.go.jp/common/000198829.pdf>, (accessed 28 Jun. 2018).
- 国土地理院 (2018c) : 平成 30 年 (2018 年) 霧島山 (えびの高原 (硫黄山) 周辺) の噴火に関する対応, http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h30kirishima_ebino.html, (accessed 28 Jun. 2018).
- 国土地理院 (2018d) : 2018 年 5 月ハワイ島キラウエア火山活動に関する SAR 解析結果, http://www.gsi.go.jp/cais/topic180301-index_00001.html, (accessed 28 Jun. 2018).
- 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, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊 (2016) : 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, 国土地理院時報, 128, 5-12.
- 森下遊 (2016) : GNSS データを用いた干渉 SAR に含まれる空間的長波長誤差の低減, 測地学会誌, 印刷中.
- Morishita, Y., T. Kobayashi, and H. Yarai (2016): Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event in Sakurajima in 2015 by exploiting the right- and left-looking ALOS-2 InSAR, *Geophysical Research Letters*, 43, doi:10.1002/2016GL068293.
- 本岡毅, 勘角幸弘, 鈴木新一 (2016) : 陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2) の概要, *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, Vol. 36, No. 4, 320-327.
- 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, 1, e1-e40.
- 飛田幹男 (2016) : リモートセンシングによる地形・地殻変動把握に関する研究 (第 1 年次), 平成 27 年度国土地理院調査研究年報, 106-107. <http://www.gsi.go.jp/common/000141717.pdf>, (accessed 28 Jun. 2018).
- 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の解析技術に関する研究, 国土地理院時報, 106, 37-49.
- 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」, <http://www.satnavi.jaxa.jp/project/alos2/index.html>, (accessed 28 Jun. 2018).
- 宇宙航空研究開発機構 (2017) : 先進レーダ衛星 (ALOS-4), http://www.satnavi.jaxa.jp/project/senshin_radar/index.html, (accessed 28 Jun. 2018).
- 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.
- 山田晋也, 三浦優司, 山中雅之, 仲井博之, 和田弘人, 攪上泰亮, 上芝晴香, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊 (2016) : だいち 2 号 SAR 干渉解析によって検出された箱根山・大涌谷内の地表変動, 国土地理院時報, 128, 67-75.