

1.6 SAR データによる霧島山新燃岳噴火時の火口地形等の変化

1.6.1 はじめに

2006 年 1 月 24 日に種子島宇宙センターから打ち上げられた ALOS (だいち) は、災害監視や地図作製等を目的に全地球規模で観測が行われている陸域観測技術衛星である。この陸域観測技術衛星 Advanced Land Observing Satellite (日本名: だいち, 以下 ALOS) は、2 つの光学センサ (PRISM, AVNIR-2) と 1 つのマイクロ波センサ (PALSAR) を搭載しており、その主な諸元は Table 1.6.1 の通りである。2.5 m の高分解能を持つ PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) は、パナクロマチック立体視センサと呼ばれ、前方視, 直下視, 後方視の 3 方向のデータを組み合わせることで高精度の地形データを取得することが可能である。また、10 m の分解能を持つ AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2) の光学センサは、可視から近赤外域までの 4 つの観測波長帯を有しているため、これらの組み合わせにより土地被覆分類図などの作成が可能である。AVNIR-2 で得られたデータは、波長帯の組み合わせによりカラー画像で表示できることから、その画像は直感的に理解することができるが、PRISM で得られたデータとパンシャープン処理を行うことで、擬似的な高分解能カラー画像を得ることも可能である。一方、PALSAR (Phased Array-type L-band Synthetic Aperture Radar) は、マイクロ波センサ特有の性質から斜め上空から観測する必要があり、得られた画像は光学センサと違い、画像化しても直感的には理解しにくい。しかしながら、天候や昼夜の時間帯に左右されることなく対象地域のデータを取得できる能動型センサであるため、観測時における制約が少ない。特に、マイクロ波の特徴の 1 つであるコヒーレント (可干渉) 性の高さを利用した SAR 干渉解析は、衛星と地上の間の距離変化を数 cm の精度で検出することが可能であり、地殻変動観測に非常に有効な手法である (地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2011)。

2011 年 1 月 19 日、鹿児島・宮崎県境に位置する霧島山新燃岳で始まった噴火活動は、26 日には約 300 年ぶりの本格的なマグマ噴火に移行し、28 日には山頂火口内において溶岩が噴出し蓄積、その後山頂火口内に生成された溶岩ケーキは直径 600 m の大きさまで成長した。「ALOS データによる火山活動の評価及び噴火活動の把握に関する共同研究」について JAXA と協定を締結している火山噴火予知連絡会の衛星解析グループ (通称: 火山ワーキンググループ) は、霧島山新燃岳における一連の火山活動を受けて、霧島山周辺における ALOS 緊急観測を提案し、直ちに山頂周辺における観測計画が立てられ撮像が行われた。

一般的に、火山活動を評価する上で地殻変動の推移を把握しモニタリングすることは非常に重要である。また、活発な噴煙活動を伴うような火山活動の初期には目視による観測が困難な場合が多い。前者については、有効な手段のひとつとして GPS (Global Positioning System) による観測が挙げられるが、観測を行うためには、あらかじめ対象と

Table 1.6.1 Characteristics of ALOS sensors.

Sensor	Wavelength (μ m)	Spatial Resolution (m)	Swath Width (km)	Pointing Angle (degree)
PRISM	0.52 to 0.77	2.5 (at Nadir)	70 (Nadir only) 35 (Triplet mode)	-1.5 to +1.5 (Triplet Mode, Cross-track direction)
AVNIR-2	Band1:0.42 to 0.50 Band2:0.52 to 0.60 Band3:0.61 to 0.69 Band4:0.76 to 0.89	10 (at Nadir) 20 (at -44 or +44)	70 (at Nadir) 160 (at -44 or +44)	-44 to +44
PALSAR	Chirp Bandwidth (MHz)	Range Resolution (m)	Observation Swath (km)	Incident angle (degree)
Fine mode	28 14	7 to 44 14 to 88	40 to 70	8 to 60
Polari metric	14	24 to 89	20 to 65	8 to 30

なる地表に受信機を設置する必要がある、噴火開始後に火口近傍に多点展開するのは容易ではない。後者については、これまで航空機などを使った観測が一般的であった。しかし、この方法は天候などに大きく左右され、やはり火口近傍の状態を逐一把握することは容易ではなかった。このため、気象研究所では、これらの欠点を補うことの出来る可能性のある ALOS の各センサによる観測データを用いて、噴火前後の霧島山（新燃岳）周辺における解析を行った。今回の一連の噴火が始まった 2011 年 1 月 19 日以降、ALOS が衛星の電力異常で停止した同年 4 月 22 日までの間に、光学センサについては 36 回、SAR センサについては 28 回の撮像機会があった。このうち光学センサについては、天候や噴煙などの影響により火口周辺の観測ができなかった事例を除く 17 回について、また SAR データについてはすべてのデータについて解析を行ったので、これらの画像の判読結果について以下に述べる。

1.6.2 光学センサによる画像判読解析

ALOS には 2 つの光学センサが搭載されている。光学センサはその性質上、マイクロ波センサと異なり、日中のみ観測可能である（夜間も観測可能であるが、光源がないため実質的に画像として認識できない）。このため、光学センサの観測は ALOS の軌道上、南行軌道のみでの観測となる。PRISM は前方視、直下視、後方視の 3 方向の観測が可能であるが、これらの組み合わせによる観測モードが 9 通り存在し、どの観測モードを使うかについては、JAXA のオペレータにより制御されている。一方、AVNIR-2 は、4 つの波長帯を同時に使用して観測することにより、画像処理の段階でこれらの組み合わせにより、その目的に応じたカラー画像を得ることが可能である。また、大規模災害などの緊急時には、衛星の進行方向に対して 90 度の方向にカメラを向けることのできるポインティング機能（最大鉛直下方向から±44°）を使い、最短で 2 日以内に災害発生後の該当地域を撮像することが可能である。

霧島山（新燃岳）周辺において 2008 年 3 月から 2011 年 4 月中旬までに撮像された PRISM 及び AVNIR-2 のデータを Table 1.6.2 に示す。先に述べた通り、AVNIR-2 データは波長帯の異なる 4 つのセンサを有しているので、各データを合

Table 1.6.2 AVNIR-2 and PRISM data used in this study.

Sensor	Path	Frame	Date and Time (UTC)		Pointing angle	Sun Angle Elevation	Memo
AVNIR-2	83	2960	2008.03.28	2:05	0.0°	56.0°	Fig.1-①
PRISM	83	2955					
AVNIR-2	83	2960	2008.11.13	2:06	0.0°	39.0°	Fig.1-②
PRISM	83	2955					
AVNIR-2	90	2940	2011.01.31	2:19	+27.0°	38.0°	Fig.1-③
AVNIR-2	74	2980	2011.02.04	1:45	-31.0°	36.0°	Fig.1-④
AVNIR-2	93	2940	2011.02.05	2:25	+35.0°	40.0°	Fig.1-⑤
AVNIR-2	85	2950	2011.02.07	2:08	+10.0°	39.0°	Fig.1-⑥
AVNIR-2	83	2960	2011.02.19	2:04	0.0°	42.0°	Fig.1-⑦
PRISM	83	2955					
AVNIR-2	78	2970	2011.02.26	1:53	-18.0°	43.0°	Fig.1-⑧
AVNIR-2	84	2960	2011.03.08	2:05	+6.0°	48.0°	Fig.1-⑨
AVNIR-2	76	2970	2011.03.10	1:48	-25.0°	47.0°	Fig.1-⑩
AVNIR-2	95	2930	2011.03.11	2:29	+40.0°	52.0°	Fig.1-⑪
AVNIR-2	98	2920	2011.03.16	2:35	+44.0°	54.0°	Fig.1-⑫
AVNIR-2	71	2980	2011.03.17	1:38	-38.0°	48.0°	Fig.1-⑬
AVNIR-2	90	2940	2011.03.18	2:18	+28.0°	53.0°	Fig.1-⑭
AVNIR-2	88	2950	2011.03.30	2:13	+20.0°	58.0°	Fig.1-⑮
AVNIR-2	83	2960	2011.04.06	2:03	0.0°	59.0°	Fig.1-⑯
PRISM	83	2955					
AVNIR-2	94	2930	2011.04.09	2:26	+38.0°	63.0°	Fig.1-⑰
AVNIR-2	86	2950	2011.04.11	2:09	+14.0°	62.0°	Fig.1-⑱
AVNIR-2	97	2930	2011.04.14	2:32	+44.0°	65.0°	Fig.1-⑲

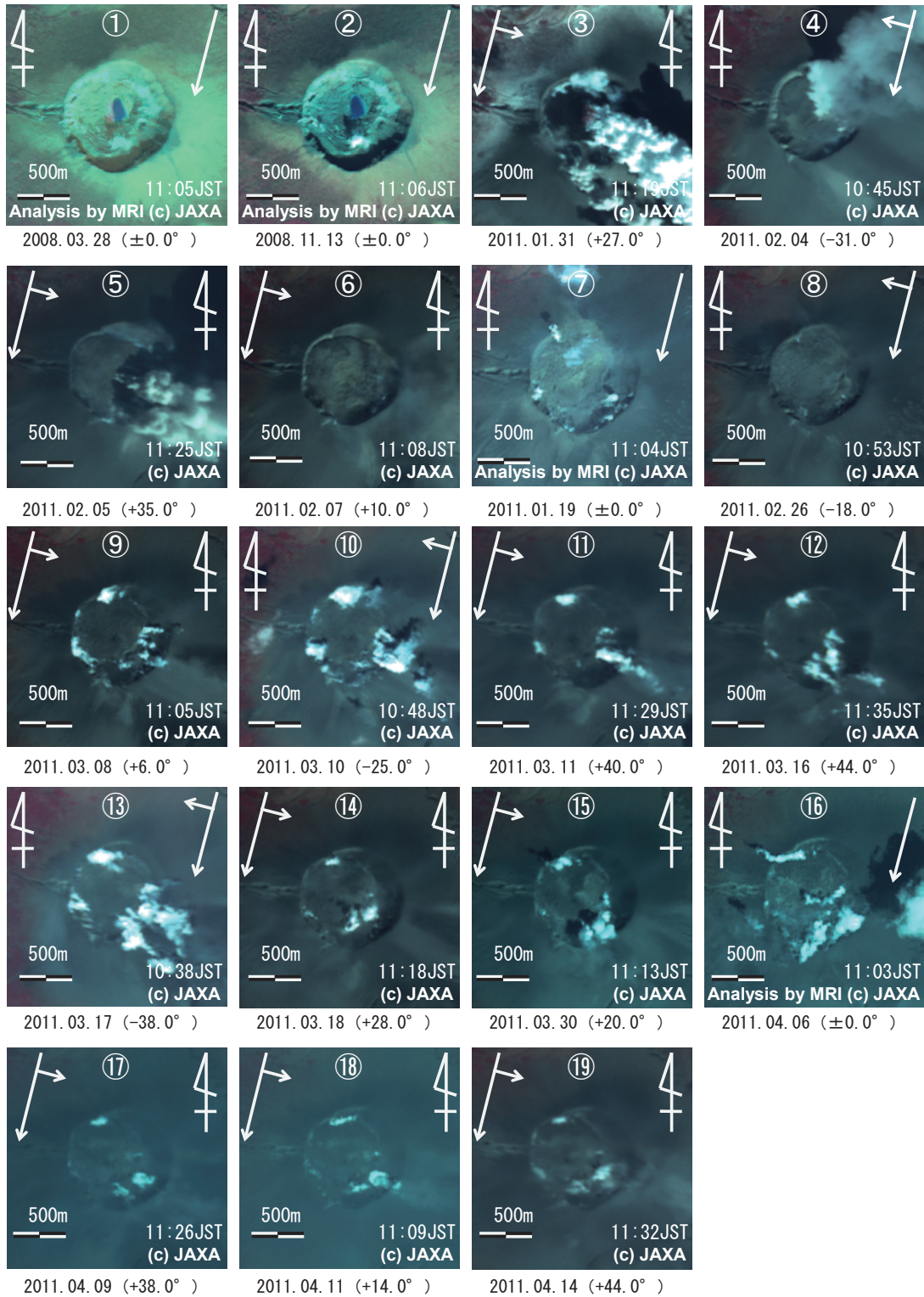


Fig. 1.6.1 Satellite images of Shinmoe-dake in the descending orbit from AVNIR-2 and PRISM data. The circled numbers correspond to entries in Table 1.6.2. Numbers in parentheses after the dates indicate the pointing angle. Images are false-color composites of AVNIR-2 bands 4, 3, and 2.

成処理することによりカラー画像で表示することができ、得られた画像は人が直感的に理解することが可能である。また、その画像は単独でも 10 m の解像度を有しているため、十分に画像判読に耐え得るが、本報告では、噴火前と噴火後について各々 2 時期のデータに対して、HSV パンシャープン処理を適用し、新燃岳周辺の詳細な画像判読についても試みた。HSV パンシャープン処理とは、マルチスペクトル画像 RGB (赤, 緑, 青) を HSV (色相, 彩度, 明度) に変換した後、V (明度) 成分を高分解能データ (PRISM) に置換し、再び RGB に逆変換処理する手法であり、詳細な衛星画像判読に有効な手段の一つである。なお、これらの処理には汎用ソフト ENVI (Ver 4.4) を使用した。また、AVNIR-2 データについては近赤外波長帯を使用した False Color 画像 (R:band4, G:band3, B:band2) による表現方法を用いた。これらの結果を Fig.1.6.1 に示す。

2008 年 3 月及び 11 月に撮像された画像には、霧島山 (新燃岳) の山頂火口内において、火口湖の存在が明瞭に確認できるが、大量の降灰や噴石を伴う中規模噴火に移行した後の 2011 年 1 月 31 日に撮像された画像では、山頂火口から噴出する激しい噴煙が確認できる一方で、この噴煙のために山頂火口内の様子は確認できない状態となった。さらに、2 月 4、5 日の画像からも、引き続き山頂火口から噴煙が激しく上がっている様子を確認できるが、その主な噴出孔は、山頂火口の中心部と火口東部分に位置していることが判読できた。さらに、2 月 7 日の画像からは山頂火口において徐々に溶岩が蓄積されていることが判読でき、噴火前に存在していた火口湖は完全に消滅していることが分かった。また、2 月 19 日の画像からは、蓄積されていた溶岩が山頂火口内をほぼ満たしている様子が確認でき、噴気の位置については、山頂火口の北北西、西南西、南東の 3 か所が中心となっていることが判読できた。この状態は 2 月 26 日に撮像された画像ではさほど明瞭ではないが、3 月前半に撮像された画像では、2 月上旬と比べて幾分勢いは弱くなったものの、噴煙の噴出場所の状況に大きな変化はない。3 月後半から 4 月にかけての画像についても、引き続き 3 か所から噴煙が出ていることが確認できるが、南東側の火口が一番活発な噴煙活動を伴っており、西南西の火口については、噴気程度に弱まっていることが判読できた。

1.6.3 SAR 強度画像による画像判読解析

PALSAR を使って得られる SAR 強度画像は、衛星から発射されたマイクロ波が対象物で反射する後方散乱強度に比例して、明暗の画像が得られる。これら後方散乱強度の変化はマイクロ波の波長、入射角、偏波に依存しており、特に地表面の凹凸の影響を強く受ける。すなわち、マイクロ波の入射方向に対して対象物が滑らかであれば、前方散乱成分が強くなり、得られる画像は暗くなるが、逆に対象物に粗い面が卓越していれば、後方散乱成分が強くなるため、結果として明るい画像が得られることになる。

Fig.1.6.2 (北行軌道) 及び Fig.1.6.3 (南行軌道) に噴火前後における SAR 強度画像を示した。また、各々の撮像日時及びオフナディア角などを Table 1.6.3 に示す。1.6.2 章で触れたように、1 月 26 日に始まった本格的なマグマ噴火以前には、新燃岳山頂火口内に火口湖が存在していた。ため池や河川など、比較的表面が穏やかな水面にマイクロ波が入射した場合、一般的に後方散乱は弱くなり、画像化した時には暗く表現される。この事実を裏付けるように、Fig.1.6.2 及び Fig.1.6.3 からも噴火前の 2010 年 11 月 20 日 (北行軌道) 及び 2011 年 1 月 18 日 (南行軌道) の SAR 強度画像においては、山頂火口内に火口湖の存在を示す暗い円形の部分が確認できる。しかし、本格的なマグマ噴火後の 1 月 27 日 (北行軌道) の SAR 強度画像では、その部分が確認できず、火口湖が消滅していることが判読でき、中央部には新たに反射強度の強い部分が出現していることが確認できた。これは光学画像等の解析結果も併せて解釈すると、この段階で、火口の中心部分から溶岩の噴出が始まったことを示す結果と考えられる。さらに、2 日後の 1 月 29 日 (北行軌道) の画像では、その大きさが徐々に拡大していることが確認でき、1 月 30 日 (南行軌道) 及び 2 月 1 日 (北行軌道) の画像判読からは、火口内に埋められた溶岩ケーキの直径は約 500 m の大きさまで成長したことが判読できた。この期間中、火山噴火予知連絡会の衛星解析グループからの提案により、可視センサによる緊急観測が実施されたが、火山活動の推移変化に伴う活発な噴煙活動のために、火口内及び周辺の詳細な可視画像は得られていない (例えば、Fig.1.6.1 の③)。また、例えば 1 月 26 日の鹿児島県防災ヘリコプターの協力による観測でも、火口内が噴煙で充満していることが原因で火口内の詳細については不明と報告されてお

Table 1.6.3 PALSAR data used in this study.

Orbit (A:北行, D:南行)	Path	Frame	Date and Time (UTC)		Off-nadir angle	Mode	Memo
PALSAR-A	424	620	2010.11.20	13:45	34.3°	FBD	Fig.2-①
	428	620	2011.01.27	13:53	43.4°	FBS	Fig.2-②
	420	630	2011.01.29	13:35	21.5°	FBS	Fig.2-③
	431	610	2011.02.01	13:59	47.8°	FBS	Fig.2-④
	423	630	2011.02.03	13:42	30.8°	FBS	Fig.2-⑤
	426	620	2011.02.08	13:48	38.8°	FBS	Fig.2-⑥
	421	630	2011.02.15	13:37	25.8°	FBS	Fig.2-⑦
	432	610	2011.02.18	14:00	50.0°	FBS	Fig.2-⑧
	424	620	2011.02.20	13:43	34.3°	FBS	Fig.2-⑨
	427	620	2011.02.25	13:50	41.5°	FBS	Fig.2-⑩
	422	630	2011.03.04	13:39	28.8°	FBS	Fig.2-⑪
	428	620	2011.03.14	13:51	43.4°	FBS	Fig.2-⑫
	420	630	2011.03.16	13:34	23.1°	PLR	Fig.2-⑬
	431	610	2011.03.19	13:58	47.8°	FBS	Fig.2-⑭
	424	620	2011.04.07	13:42	34.3°	FBS	Fig.2-⑮
PALSAR-D	73	2980	2011.01.18	1:43	34.3°	FBS	Fig.3-①
	71	2980	2011.01.30	1:39	38.8°	FBS	Fig.3-②
	74	2970	2011.02.04	1:45	30.8°	FBS	Fig.3-③
	66	2990	2011.02.06	1:28	47.8°	FBS	Fig.3-④
	77	2970	2011.02.09	1:51	21.5°	FBS	Fig.3-⑤
	69	2980	2011.02.11	1:34	43.4°	FBS	Fig.3-⑥
	64	2990	2011.02.18	1:23	50.0°	FBS	Fig.3-⑦
	67	2990	2011.02.23	1:30	46.6°	FBS	Fig.3-⑧
	70	2980	2011.02.28	1:36	41.5°	FBS	Fig.3-⑨
	73	2980	2011.03.05	1:42	34.3°	FBS	Fig.3-⑩
	65	2990	2011.03.07	1:25	49.0°	FBS	Fig.3-⑪
	68	2980	2011.03.12	1:31	43.4°	FBS	Fig.3-⑫
	71	2980	2011.03.17	1:38	38.8°	FBS	Fig.3-⑬
	77	2970	2011.03.27	1:50	21.5°	PLR	Fig.3-⑭
	69	2980	2011.03.29	1:33	41.5°	FBS	Fig.3-⑮
	67	2990	2011.04.10	1:28	46.6°	FBS	Fig.3-⑯
	70	2980	2011.04.15	1:35	41.5°	FBS	Fig.3-⑰
	73	2980	2011.04.20	1:41	34.3°	FBS	Fig.3-⑱

り、目視による火口内の状況把握は、その後の1月31日の海上自衛隊第72航空隊鹿屋航空分遣隊ヘリコプターの協力による観測まで、天候不良などの影響も含め観測できていない。これらの事実は、火山噴火の発生時に火口あるいはその周辺を詳細に把握する手段として、噴煙などを透過して地表の状態を観測できる SAR センサによる観測手法が非常に有効な手段であることを示している。なお、気象庁はこれらの解析結果をもとに火口からの警戒区域を 2 km から 3 km に拡大する噴火警報を1月31日1時35分に発表した。その後、山頂火口内に蓄積された溶岩は最大直径 600 m 程度までに成長し、火口壁の上端近くまで埋め尽くされたことが確認されている。また、2月中旬以降の画像では、山頂火口内に蓄積された溶岩の表面において不均質さが目立つようになり、2月上旬に火口壁近くまで蓄積されていた溶岩量はやや少なくなり、画像からは火口縁と比べて火口内が陥没しているように見える。さらに、3月以降の画像からは、火口内南東縁部に反射強度の強い部分が確認でき、光学画像の結果と併せて解釈すると、おそらく噴火活動の過程で生じた火孔を検知していると考えられる。この火孔は3月以降、最も活発な噴気活動を行っているひとつであり、その火孔については、3月中旬の SAR 強度画像ではかなり明瞭に確認でき、4月にかけての画像についても判読するとその大きさは徐々に大きくなっていることが確認できる。なお、気象庁福岡管区気象台地震火山課火山監視・情報センターによれば、溶岩

蓄積が確認されて以降、2月上旬を中心に3月1日まで爆発的噴火が計13回の発生が報告されているが、爆発的噴火直後に撮像された SAR 強度画像では、山頂火口内の画像に大きな変化はなく、例えば、蓄積された溶岩が大きく吹き飛ばされるなどの現象は発生していないと考えられる。

2011年3月16日には、ALOS の特徴の一つであるポラリメトリモードによる観測も行われた。一連の噴火活動前の2009年6月10日に撮像された画像と同一範囲の画像との比較を Fig.1.6.4 に示す。ポラリメトリ解析は衛星から送信される水平偏波 (H) と垂直偏波 (V) のマイクロ波を用いて、対象物で反射されるマイクロ波の偏波やその散乱強度により、受信される反射波から対象物の表面状態を判読し、対象域の分類を行う解析手法である。ALOS の場合、一度の撮像で衛星におけるマイクロ波の送受信の組み合わせにより4通りのデータが得られる。すなわち、送信受信の順に HH, HV, VH, VV である。得られた観測データを2回散乱, 体積散乱, 1回散乱の成分に分け、各々の成分を

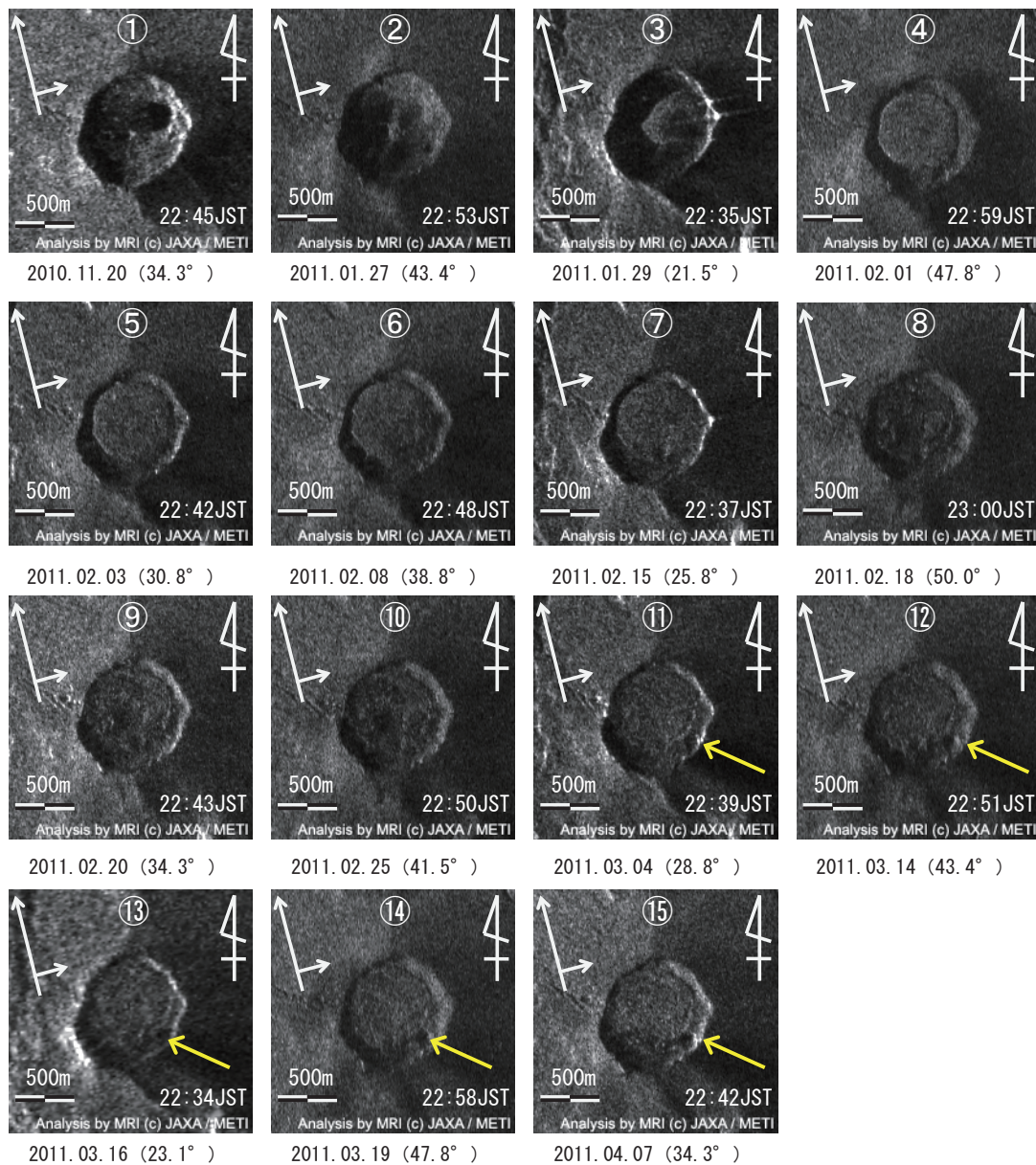


Fig. 1.6.2 SAR amplitude images for Shinmoe-dake in the ascending orbit from PALSAR data. The circled numbers correspond to entries in Table 1.6.3. Numbers in parentheses indicate the off-nadir angle, the difference between the nadir direction from the satellite and the slant range direction. Yellow arrows indicate the new hole in crater rim.

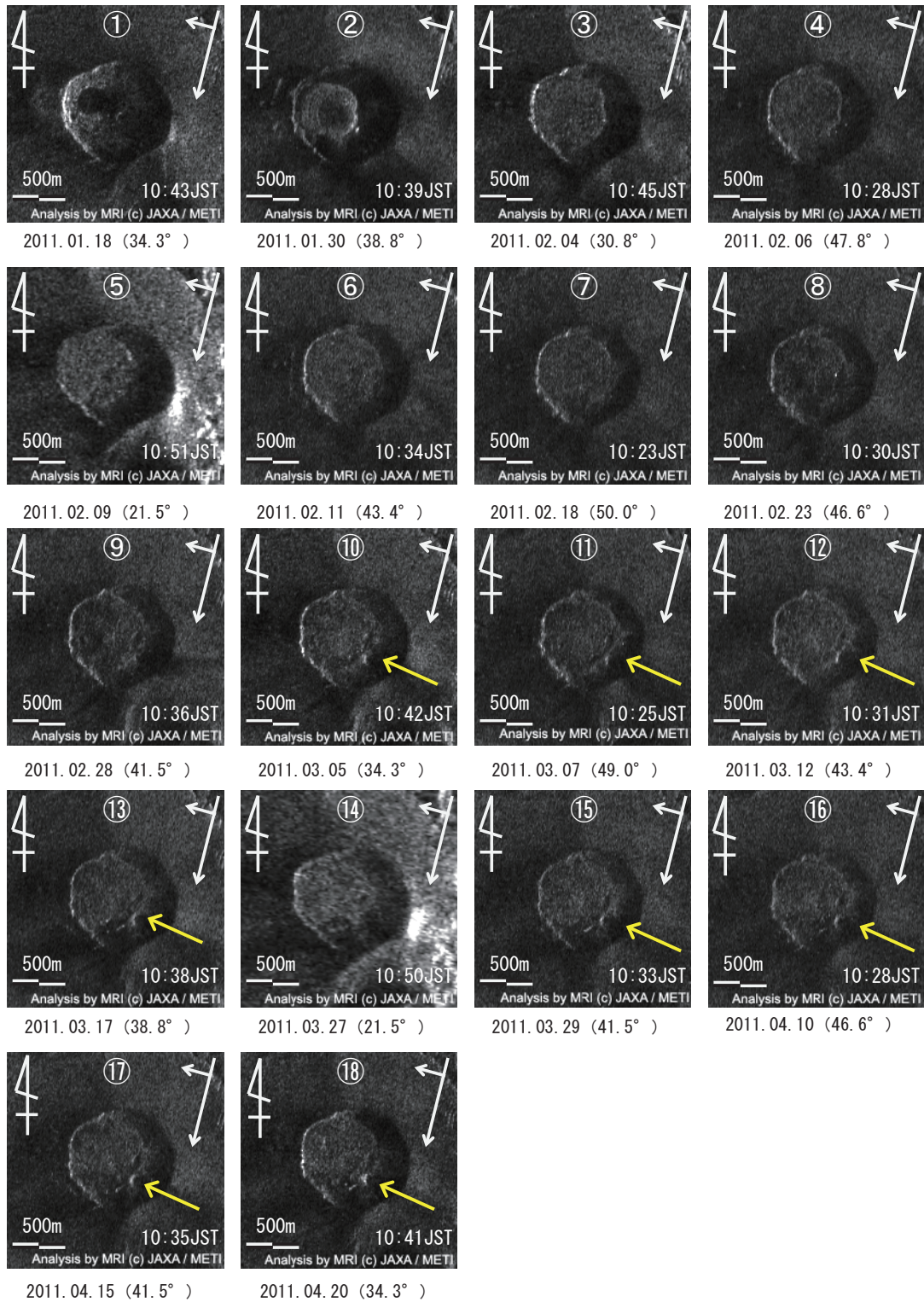


Fig. 1.6.3 SAR amplitude images for Shinmoe-dake in the descending orbit by PALSAR data. See Fig. 1.6.2 for details.

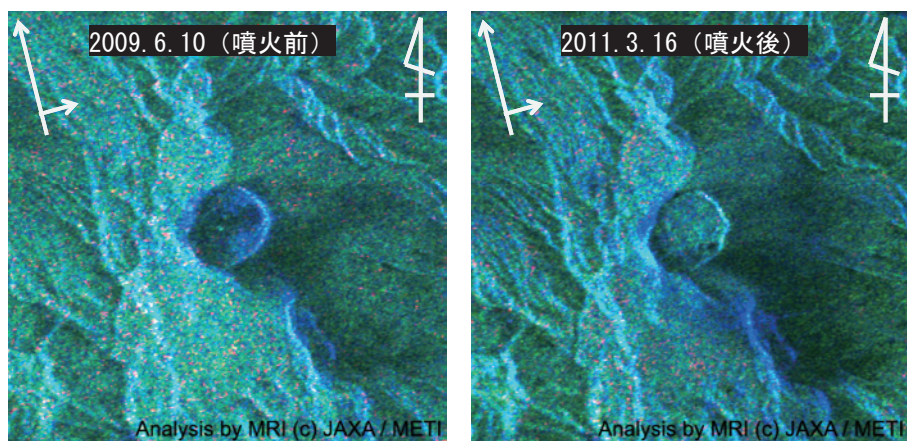


Fig. 1.6.4 SAR polarimetric image of Shinmoe-dake in the ascending orbit from PALSAR data. The colors are composed of red for double bounce scattering, green for volume scattering and blue for surface scattering.

RGB に割当ててカラー合成画像化 (Pauli カラー合成) することで対象域における散乱強度の違いを表現することができる。Fig.1.6.4 に示した通り、画像範囲中のほとんどの部分で体積散乱を示す緑色が検出され、植生域が広く分布していると解釈できる。しかし、噴火後の山頂火口の南東側では、噴火前に比べて 1 回散乱を示す青色の部分が増大しているのが分かる。これは、噴火活動に伴った降灰による影響で、表面の状態に変化が起きたためと考えられる。なお、噴火前の画像においても尾根沿いを中心に同様の 1 回散乱の部分を検出されているが、これは比較的植生の少ない状態 (例えば登山道など) を示していると考えられる。また、噴火前の山頂火口内では、火口湖の存在のため全反射を示す黒色の部分が確認できるほか、その周辺においては、非植生域が原因と考えられる青色の部分が目立つ。これに対して、噴火後の画像からは溶岩の蓄積により火口湖が消滅し、体積散乱を示す緑色の部分に変化していることが確認できた。もちろん、溶岩が蓄積した直後の火口内において、植生があるとは考えられないことから、これらの変化は、蓄積された溶岩の表面が粗い状態であることや表面付近の誘電率が低いことが原因で、結果的に体積散乱を起こしていると考えられる。

1.6.4 まとめ

噴火活動が活発な状態の場合には、現地観測は危険を伴うため、衛星などを使ったリモート観測が有効な手段である。本報告では、2011 年 1 月に噴火した霧島山新燃岳について、ALOS の各センサを使った解析について取りまとめた。光学センサを使った解析では、得られたデータを合成表示することで、高解像度のカラー画像で山頂火口周辺の詳細な状態を把握することができた。しかしながら、光学センサによる観測は太陽光の反射を利用することから悪天候や夜間時間帯、更には噴煙活動の活発化時などには万能な手法ではない。このように火口内を目視出来ない場合には、PALSAR センサの観測による SAR 強度画像データを用いることで、刻々と変化する山頂火口周辺の状態を把握することが可能であることが分かった。実際に今回の一連の噴火活動の初期には、PALSAR データによって山頂火口における溶岩の蓄積の変化を捉えることができたり、山頂火口内に新しく生じた火孔についても検知することができた。これらの得られたデータは噴火警報の発表に資する情報として有効利用できるということが分かった。

(安藤 忍)

謝辞

本解析で用いた ALOS/PALSAR level 1.0 データは、PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) で共有しているものであり、宇宙航空開発研究機構 (JAXA) と東京大学地震研究所との共同研究契約

により JAXA から提供されたものである。また、ALOS/PRISM 及び AVNIR-2 データと一部の ALOS/PALSAR level 1.0 データについては火山噴火予知連絡会が中心となって進めている防災利用実証実験（火山 WG）に基づいて、JAXA にて観測・提供されたものである。ALOS/PRISM 及び AVNIR-2 データに関する原初データの所有権は JAXA にある。PALSAR に関する原初データの所有権は経済産業省及び JAXA にある。PALSAR の解析には、JAXA の島田政信氏により開発された“SIGMA-SAR”を、ALOS/PRISM 及び AVNIR-2 データの解析については、ENVI (Ver.4.7) をそれぞれ使用した。ここに記してお礼申し上げます。また、今回の霧島新燃岳噴火に際しては、緊急観測及び FTP サーバを使った観測データの即時提供など多大な御協力を頂いた。関係者の皆様に深く感謝する。

参考文献

- 国土地理院 (2012) : 霧島山周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, 108, 197-220.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2011) : 合成開口レーダーによる地震活動に関連する地殻変動観測手法について.106pp.
- 福井敬一・安藤忍・高木朗充・鬼澤真也・新堀敏基・山里平・大須賀弘 (2010) : 火山用地殻変動解析支援ソフトウェアの開発 (3) -EDM, InSAR データ解析機能, 簡易版動的解析機能の組み込み, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集, SSS014-P02.
- 防災科学技術研究所 (2012) : 2011 年霧島山 (新燃岳) 噴火に対応した地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, 108, 221-226.
- 松島健・田部井隆雄・渡部豪・加藤照之・中田節也・森田裕一・前野深・渡邊篤志・及川純 (2008) : 北マリアナ諸島アナタハン火山における測地観測, 日本火山学会 2008 年秋季大会予稿集, P59, 150.
- Mogi, K. (1958) : Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. Bull Earthquake Res Inst., 36, 99-134.
- Shimada, M. (1999) : Verification processor for SAR calibration and interferometry. Adv. Space Res., 23, 8, 1477-1486.