

「だいち」により観測された霧島山新燃岳山頂火口の地形変化

および霧島山周辺の地殻変動について*

The geomorphic change of the Summit Crater and the ground deformation around Shinmoe-dake, Kirishima Volcano, Revealed by ALOS Data

気象庁気象研究所 *

Meteorological Research Institute, JMA

1. はじめに

2011 年 1 月 26 日に約 300 年ぶりの本格的なマグマ噴火を開始した霧島新燃岳について、陸域観測技術衛星「だいち」による緊急観測が、火山噴火予知連絡会の衛星解析グループの提案により行われた。気象研究所では、これらのデータを使い、霧島新燃岳の噴火前後における衛星画像判読および SAR 干渉解析を行ったので、結果について以下に述べる。

2. 使用データ

判読・解析に用いた PALSAR（合成開口レーダ）および PRISM・AVNIR-2（パンクロマチック立体視センサー・高性能可視近赤外放射計 2 型）のデータについては第 1 表および第 2 表のとおりである。

第 1 表 本研究で使用した PALSAR データ

Table1. 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.1-①
	428	620	2011.01.27	13:53	43.4°	FBS	Fig.1-②
	420	630	2011.01.29	13:35	21.5°	FBS	Fig.1-③
	431	610	2011.02.01	13:59	47.8°	FBS	Fig.1-④
	423	630	2011.02.03	13:42	30.8°	FBS	Fig.1-⑤
	426	620	2011.02.08	13:48	38.8°	FBS	Fig.1-⑥
	421	630	2011.02.15	13:37	25.8°	FBS	Fig.1-⑦
	432	610	2011.02.18	14:00	50.0°	FBS	Fig.1-⑧
	424	620	2011.02.20	13:43	34.3°	FBS	Fig.1-⑨
	427	620	2011.02.25	13:50	41.5°	FBS	Fig.1-⑩
	422	630	2011.03.04	13:39	28.8°	FBS	Fig.1-⑪
	428	620	2011.03.14	13:51	43.4°	FBS	Fig.1-⑫
	420	630	2011.03.16	13:34	23.1°	PLR	Fig.1-⑬
	431	610	2011.03.19	13:58	47.8°	FBS	Fig.1-⑭
	424	620	2011.04.07	13:42	34.3°	FBS	Fig.1-⑮

* 2011 年 7 月 19 日受付

* 安藤 忍

PALSAR-D	73	2980	2011.01.18	01:43	34.3°	FBS	Fig.2-①
	71	2980	2011.01.30	01:39	38.8°	FBS	Fig.2-②
	74	2970	2011.02.04	01:45	30.8°	FBS	Fig.2-③
	66	2990	2011.02.06	01:28	47.8°	FBS	Fig.2-④
	77	2970	2011.02.09	01:51	21.5°	FBS	Fig.2-⑤
	69	2980	2011.02.11	01:34	43.4°	FBS	Fig.2-⑥
	64	2990	2011.02.18	01:23	50.0°	FBS	Fig.2-⑦
	67	2990	2011.02.23	01:30	46.6°	FBS	Fig.2-⑧
	70	2980	2011.02.28	01:36	41.5°	FBS	Fig.2-⑨
	73	2980	2011.03.05	01:42	34.3°	FBS	Fig.2-⑩
	65	2990	2011.03.07	01:25	49.0°	FBS	Fig.2-⑪
	68	2980	2011.03.12	01:31	43.4°	FBS	Fig.2-⑫
	71	2980	2011.03.17	01:38	38.8°	FBS	Fig.2-⑬
	77	2970	2011.03.27	01:50	21.5°	PLR	Fig.2-⑭
	69	2980	2011.03.29	01:33	41.5°	FBS	Fig.2-⑮
	67	2990	2011.04.10	01:28	46.6°	FBS	Fig.2-⑯
	70	2980	2011.04.15	01:35	41.5°	FBS	Fig.2-⑰
	73	2980	2011.04.20	01:41	34.3°	FBS	Fig.2-⑱

第2表 本研究で使した AVNIR-2 と PRISM データ

Table2. 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	02:05	0.0°	56.0°	Fig.3-①
PRISM	83	2955					
AVNIR-2	83	2960	2008.11.13	02:06	0.0°	39.0°	Fig.3-②
PRISM	83	2955					
AVNIR-2	90	2940	2011.01.31	02:19	+27.0°	38.0°	Fig.3-③
AVNIR-2	74	2980	2011.02.04	01:45	-31.0°	36.0°	Fig.3-④
AVNIR-2	93	2940	2011.02.05	02:25	+35.0°	40.0°	Fig.3-⑤
AVNIR-2	85	2950	2011.02.07	02:08	+10.0°	39.0°	Fig.3-⑥
AVNIR-2	83	2960	2011.02.19	02:04	0.0°	42.0°	Fig.3-⑦
PRISM	83	2955					
AVNIR-2	78	2970	2011.02.26	01:53	-18.0°	43.0°	Fig.3-⑧
AVNIR-2	84	2960	2011.03.08	02:05	+6.0°	48.0°	Fig.3-⑨
AVNIR-2	76	2970	2011.03.10	01:48	-25.0°	47.0°	Fig.3-⑩
AVNIR-2	95	2930	2011.03.11	02:29	+40.0°	52.0°	Fig.3-⑪
AVNIR-2	98	2920	2011.03.16	02:35	+44.0°	54.0°	Fig.3-⑫
AVNIR-2	71	2980	2011.03.17	01:38	-38.0°	48.0°	Fig.3-⑬
AVNIR-2	90	2940	2011.03.18	02:18	+28.0°	53.0°	Fig.3-⑭

AVNIR-2	88	2950	2011.03.30	02:13	+20.0°	58.0°	Fig.3-⑮
AVNIR-2	83	2960	2011.04.06	02:03	0.0°	59.0°	Fig.3-⑯
PRISM	83	2955					
AVNIR-2	94	2930	2011.04.09	02:26	+38.0°	63.0°	Fig.3-⑰
AVNIR-2	86	2950	2011.04.11	02:09	+14.0°	62.0°	Fig.3-⑱
AVNIR-2	97	2930	2011.04.14	02:32	+44.0°	65.0°	Fig.3-⑲

3. 結果

・ SAR 強度画像による判読(第 1 および 2 図)

PALSAR は雲や噴煙を透過し、対象物の表面状態を観察することができる。噴火前の 2010 年 11 月以降について、霧島山新燃岳周辺における北行軌道(第 1 図)および南行軌道(第 2 図)からの SAR 強度画像を示す。第 1 図によれば、1 月 27 日に確認された溶岩ドーム(第 1-2 図)は成長し、2 月 1 日には火口内が溶岩でほぼ満たされた(第 1-4 図)。その後、火口内の溶岩蓄積量や形状に特段の変化は認められなかった(第 1-5、6 および 7 図)が、2 月 18 日以降の画像では、わずかに火口内が凹んでいるように見える(第 1-8、9 および 10 図)。また、3 月 14 日以降では火口内の南東部分において小さな凹みが確認できる(第 1-11 図、12 および 13)。第 2 図によれば、一連の噴火活動が開始する前日には、火口湖が確認できる(第 2-1 図)が、1 月 30 日には溶岩の蓄積が確認され(第 2-2 図)、その後、2 月の中旬まで火口内の溶岩蓄積量や形状の変化は認められなかったが、2 月 23 日の画像では、火口内表面の不均質さが目立つようになった。さらに 3 月に入ってから火口内の南東部において反射強度の強い部分(新しい噴気孔に相当)が確認できた(第 2-10 図以降)。

・ 光学センサを用いた解析(第 3 図)

噴火前後に撮像された霧島山新燃岳周辺における画像について、AVNIR-2 の近赤外バンドを使ったフォールスカラー画像を作成した。また、PRISM との同時観測の場合にはパンシャープン処理を行い高分解能のカラー画像を作成し、判読を行った。2 月上旬までは噴煙活動が活発なため、山頂火口内の状態は不明瞭であったが、中旬頃の画像からは溶岩が蓄積されている状態が判読できた。また、3 月以降の画像からはおもに 3 か所から噴煙が放出されている事が確認でき、中でも南東火口縁からの噴煙がもっとも活発であることが確認された。これらの結果は SAR 強度画像の解析結果と調和的である。

・ SAR 干渉解析結果(第 4 図)

一連の噴火前における SAR 干渉解析結果(第 4-1 図)からは、北行軌道(パス 424、オフナディア角 34.3°)および南行軌道(パス 73、オフナディア角 34.3°)において、韓国岳の西南西約 5 km の場所(防災科学技術研究所の GPS 観測点「万膳」付近)を中心に最大 4 ~ 5 cm 程度の衛星に近づく方向の位相差が認められた。

一方、噴火を挟んだ SAR 干渉解析結果(第 4-2 図)からは、同じく北行軌道(パス 424、オフナディア角 34.3°)および南行軌道(パス 73、オフナディア角 34.3°)において、やはり韓国岳の西南西約 5 km の場所を中心に、北行軌道では最大 5 ~ 6 cm 程度、南行軌道では最大 3 cm 程度のそれぞれ衛星から遠ざかる方向の位相差が検出された。

また、活発な噴火活動を繰り返していた 1 月下旬以降に得られた SAR 画像を用いて干渉解析を行った(第 4-3 図)。本格的マグマ噴火となった翌日(1 月 27 日夜)に撮像された北行

軌道（パス 428、オフナディア角 43.4° ）を用いた一回帰後との干渉解析（第 4-3-5 図）では、新燃岳を中心に 3～4 cm の衛星に近づく方向の位相差が、また火口の西側（牧園と万膳の間付近）では 1～2 cm の衛星から遠ざかる方向の位相差がそれぞれ認められた。続いて、1 月 30 日昼に撮像された南行軌道（パス 71、オフナディア角 38.8° ）における一回帰後との干渉解析（第 4-3-6 図）では、新燃岳山頂周辺において 1～2 cm 程度の衛星から遠ざかる方向の位相差が認められた。また、2 月 1 日夜に撮像された北行軌道（パス 431、オフナディア角 47.8° ）における一回帰後との干渉解析（第 4-3-7 図）では位相差はほとんど認められない。

それ以降に撮像されたデータと一回帰後との干渉解析結果では、2 月 20 日と 4 月 7 日のペアにおいては韓国岳周辺において衛星に近づく方向の 2～3 cm 程度の位相差が認められる（第 4-3-9 図）が、それ以外の干渉ペアにおいては山頂付近で衛星から遠ざかる方向の位相差が認められた。

なお、掲載した解析結果は大気などによる位相遅延ノイズ除去を行っていないためこれらの影響を含む可能性があることに注意が必要である。

・噴火前および噴火を挟んだ SAR 干渉解析結果を用いた圧力源の推定（第 5 図）

2008 年 2 月から 2010 年 11 月（噴火前）および 2010 年 11 月から 2011 年 2 月（噴火前後）の北行軌道の SAR 干渉解析結果（第 4-1-1 図および第 4-2-3 図）を使い、MaGCAP-V（福井ほか、2010）を用いた圧力源推定を行った。球状圧力源（Mogi, 1958）を仮定し計算を行った結果、韓国岳の西北西約 5 km の位置に、噴火前は深さ約 6 km、 $6.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積増加量で、噴火後は深さ約 7 km に $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ の体積減少量でそれぞれ位相変化を説明できることが分かった。

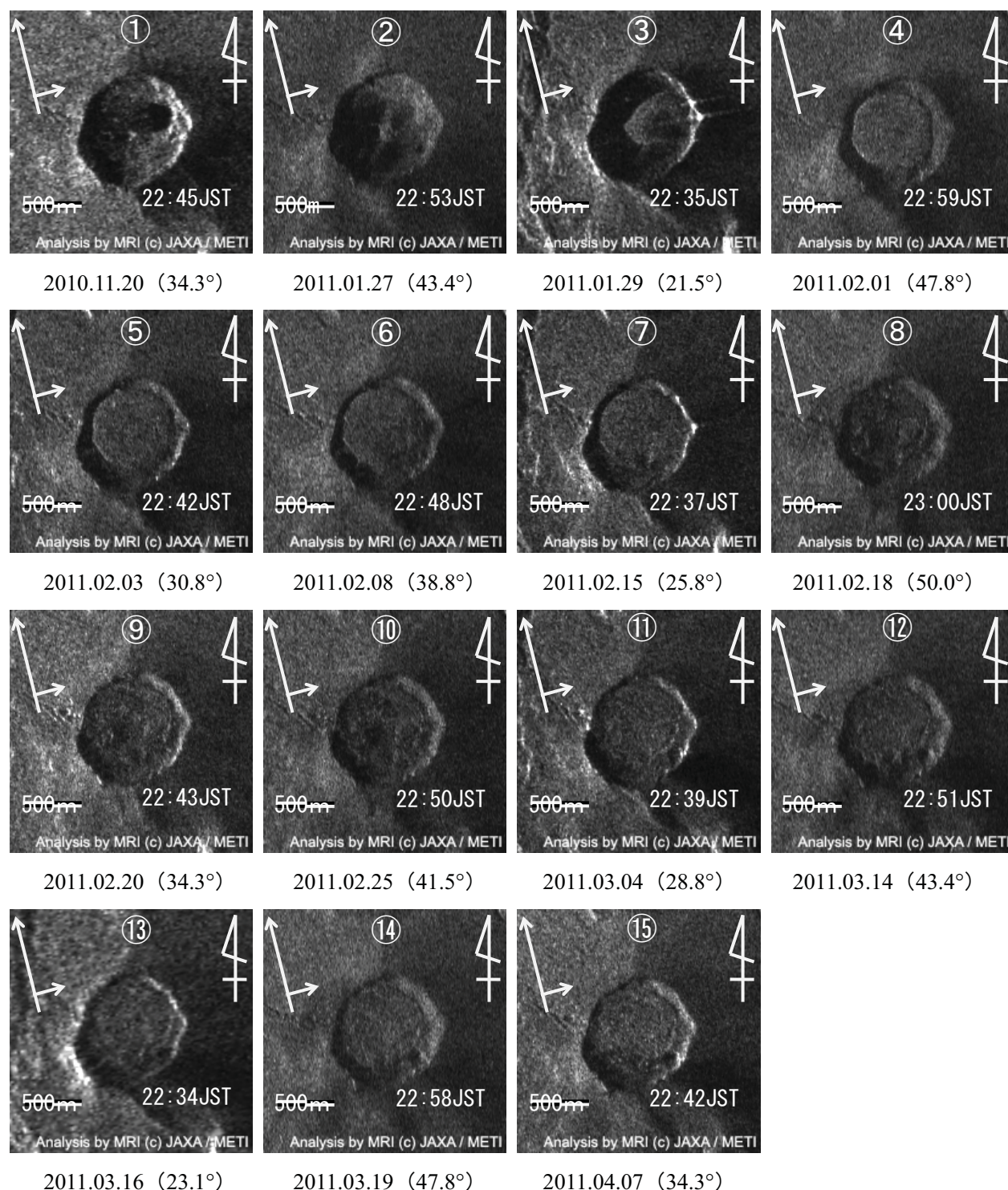
謝辞

本解析で用いた PALSAR データの一部は、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、宇宙航空開発研究機構（JAXA）にて観測・提供されたものです。また、一部は PIXEL で共有しているものであり、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す。AVNIR-2 および PRISM に関する原初データの所有権は JAXA にあります。PALSAR に関する原初データの所有権は経済産業省および JAXA にあります。PALSAR の解析には、JAXA の島田政信氏により開発された『SIGMA-SAR』を、光学画像については ENVI（Ver. 4.7）をそれぞれ使用しました。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、緊急観測および FTP サーバを使った観測データの即時提供など多大なご協力を頂きました。関係者の皆さまに感謝いたします。

参考文献

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.

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.

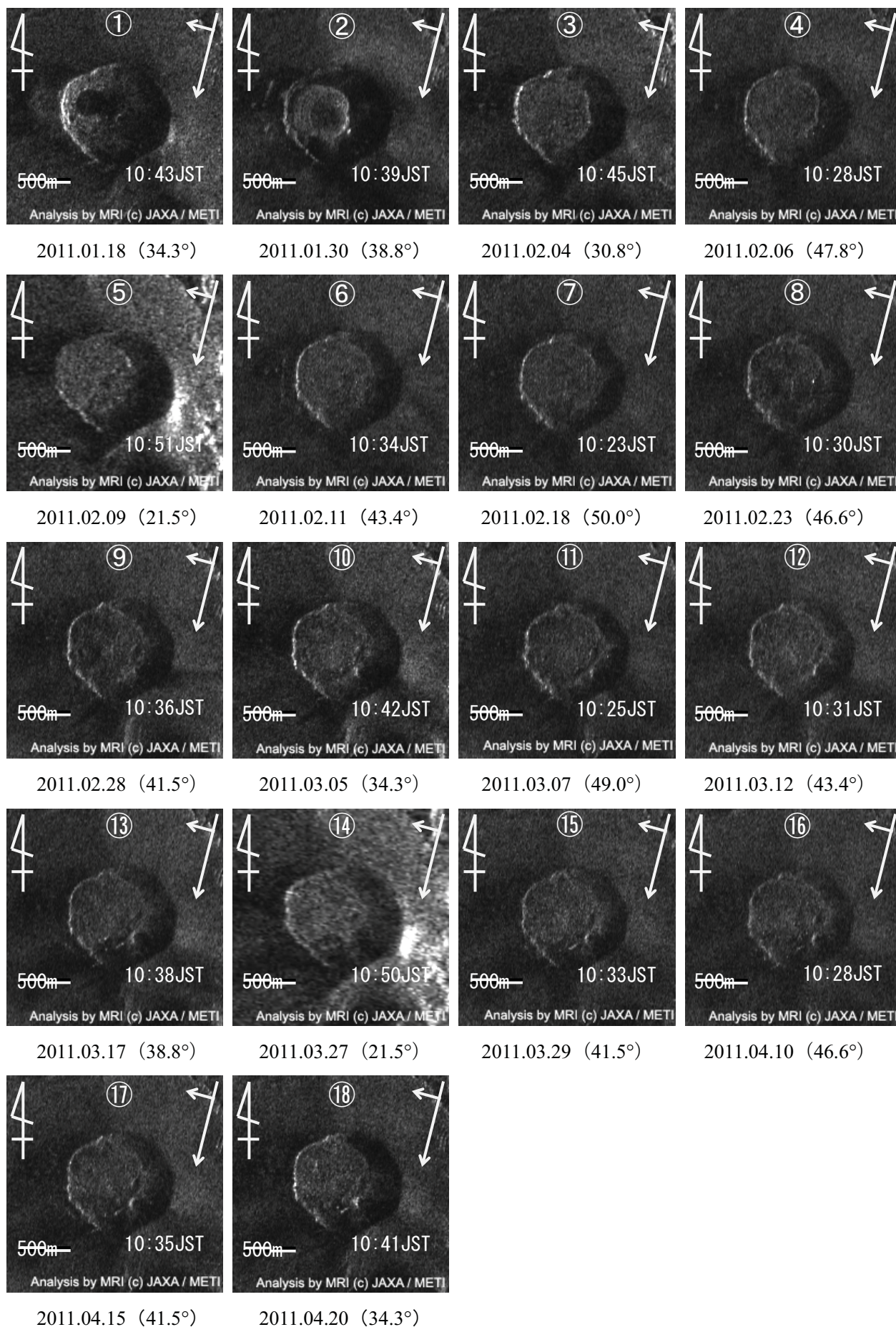


第 1 図 ALOS/PALSAR による SAR 強度画像解析結果 (北行軌道)

図中の数字は表 1 に対応する。また図下のカッコ内の数字はオフナディア角を示す。オフナディア角とは衛星鉛直下方向とレーダ照射方向との間の角度を意味する。

Fig.1 SAR amplitude images in the ascending orbit by ALOS/PALSAR

Numbers indicate PALSAR data in Table1. Numbers in parentheses indicate the off-nadir angle. The off-nadir angle indicates between the nadir direction from satellite and the slant range direction.

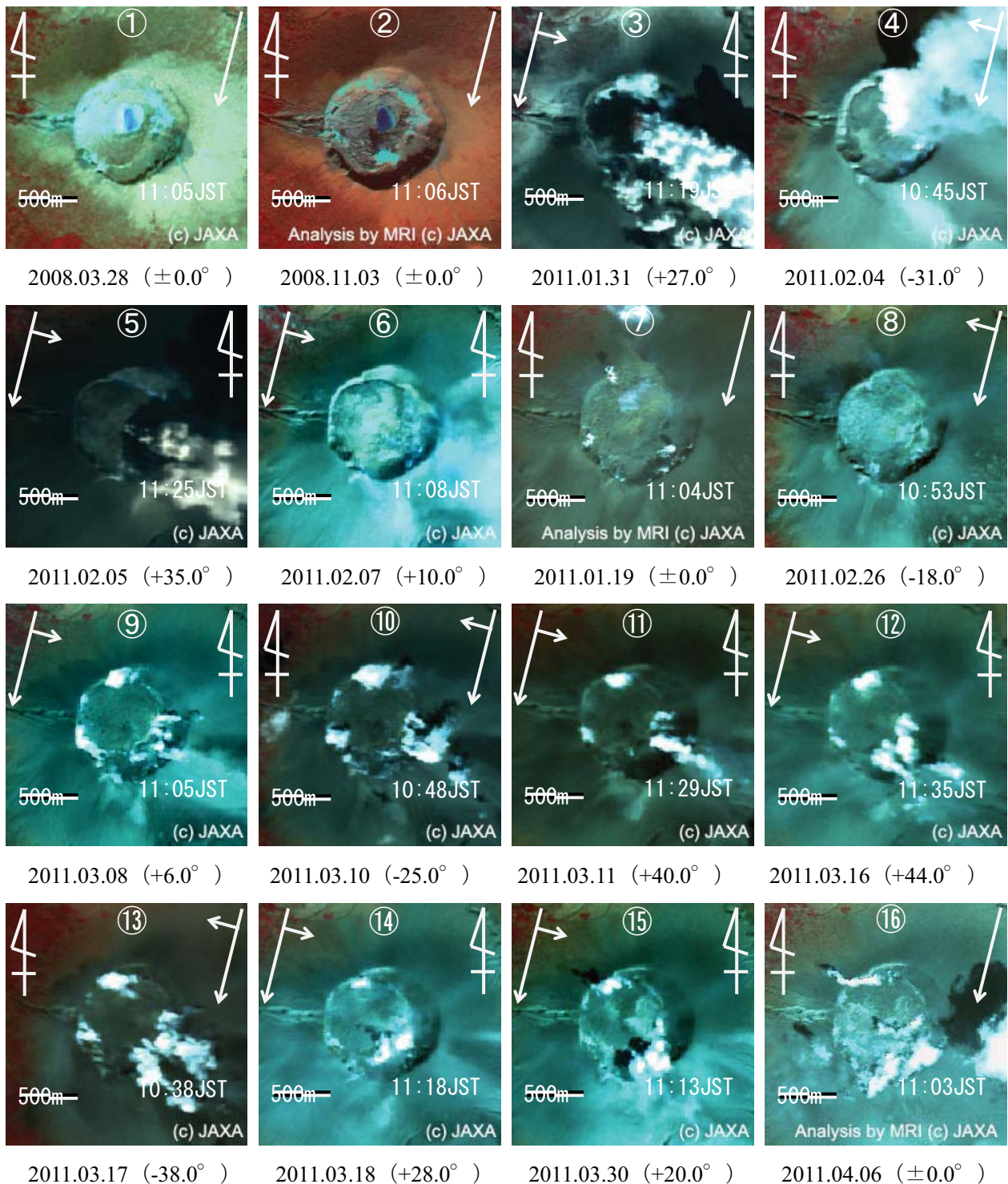


第 2 図 ALOS/PALSAR による SAR 強度画像解析結果 (南行軌道)

図中の数字は表 1 に対応する。また図下のカッコ内の数字はオフナディア角を示す。オフナディア角とは衛星鉛直下方向とレーダ照射方向との間の角度を意味する。

Fig.2 SAR amplitude images in the descending orbit by ALOS/PALSAR

Numbers indicate PALSAR data in Table1. Numbers in parentheses indicate the off-nadir angle. The off-nadir angle indicates between the nadir direction from satellite and the slant range direction.





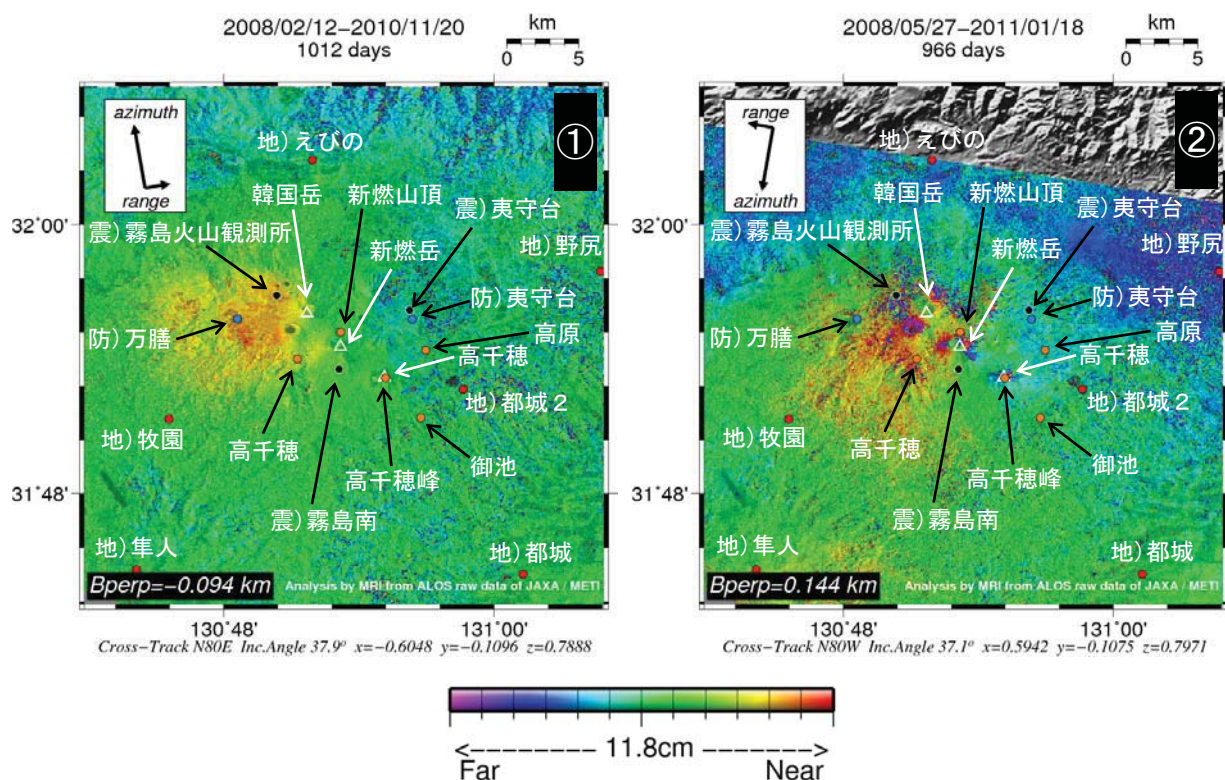
2011.04.09 (+38.0°) 2011.04.11 (+14.0°) 2011.04.14 (+44.0°)

第3図 ALOS/AVNIR-2 および PRISM による画像解析結果

図中の数字は表2に対応する。また図下のカッコ内の数字はポインティング角を示す。ポインティング角とは衛星進行方向に直行する方向の衛星直下からの角度（AVNIR-2 では最大±44 度）を意味する。なお、各画像はフォールスカラーで表示している。

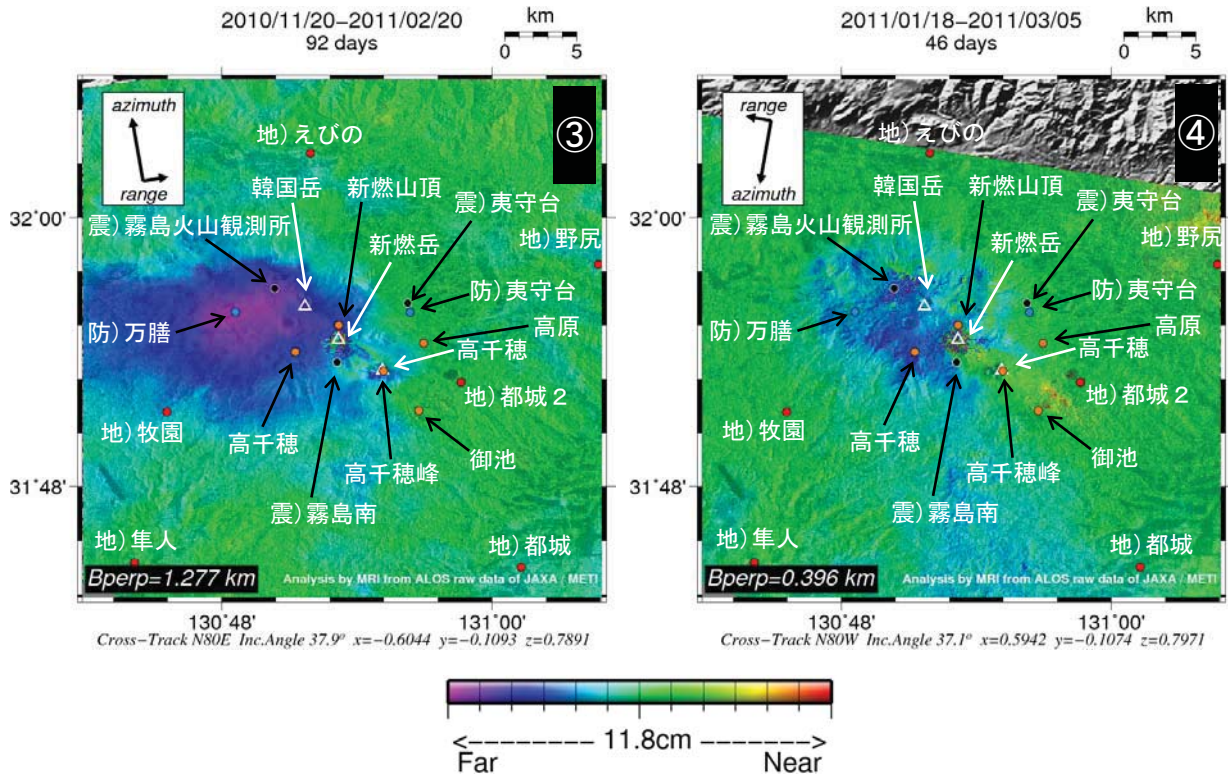
Fig.3 SAR amplitude images in the descending orbit by ALOS/PALSAR

Numbers indicate AVNIR-2 and PRISM data in Table2. Numbers in parentheses indicate the pointing angle. The pointing angle of AVNIR-2 has from -44.0 to +44.0 degree. Each images are a false color composite of AVNIR-2 bands 4, 3, and 2.



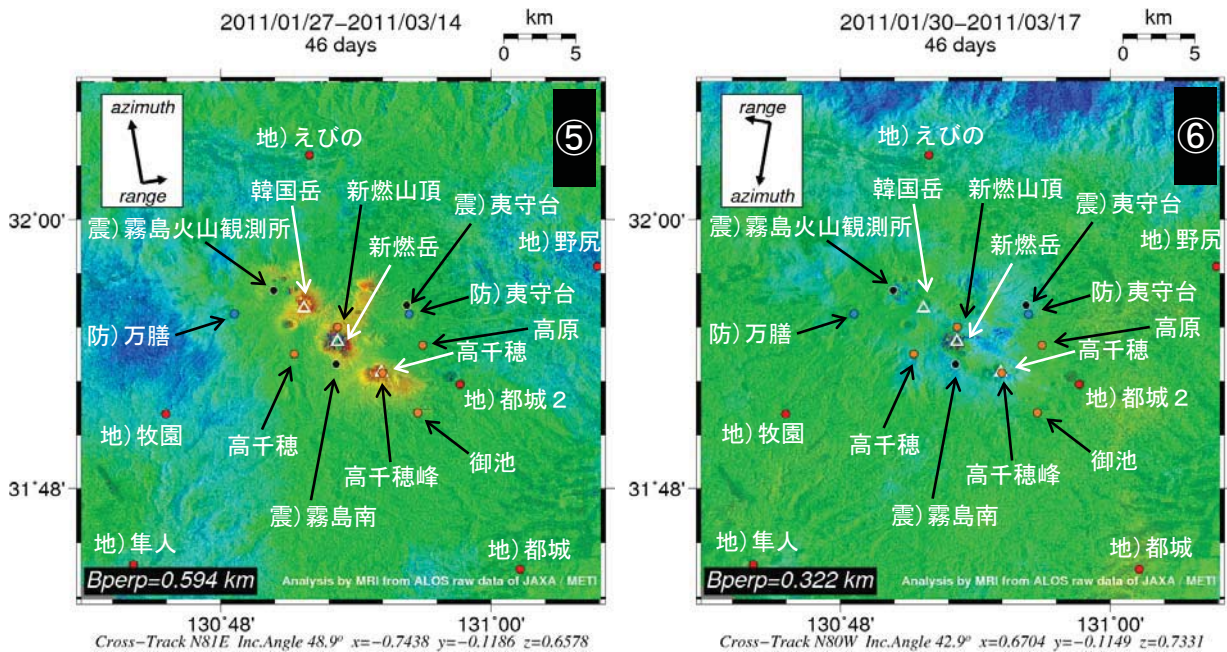
第4-1図 ALOS/PALSAR による1月下旬噴火前におけるSAR干渉解析結果(①:北行軌道、②:南行軌道)

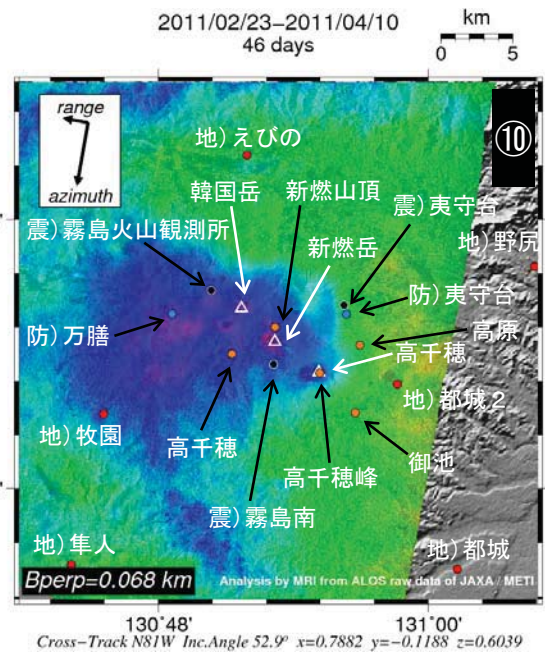
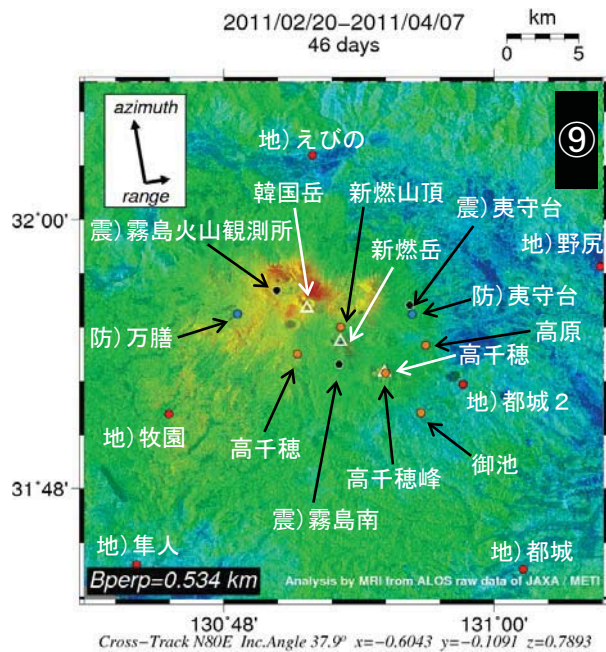
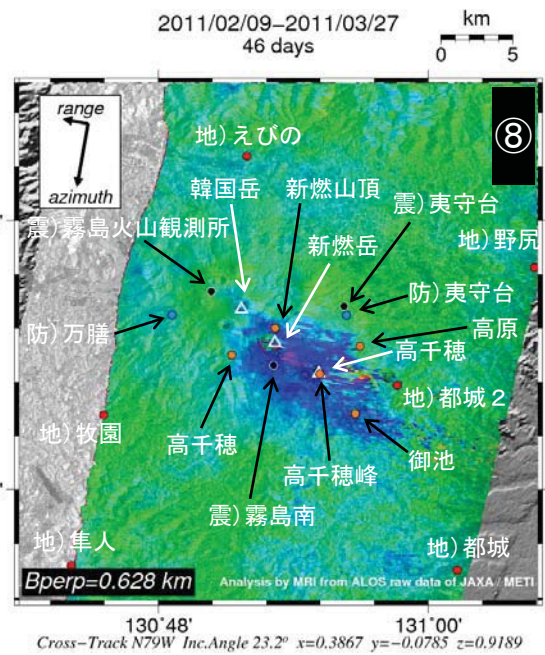
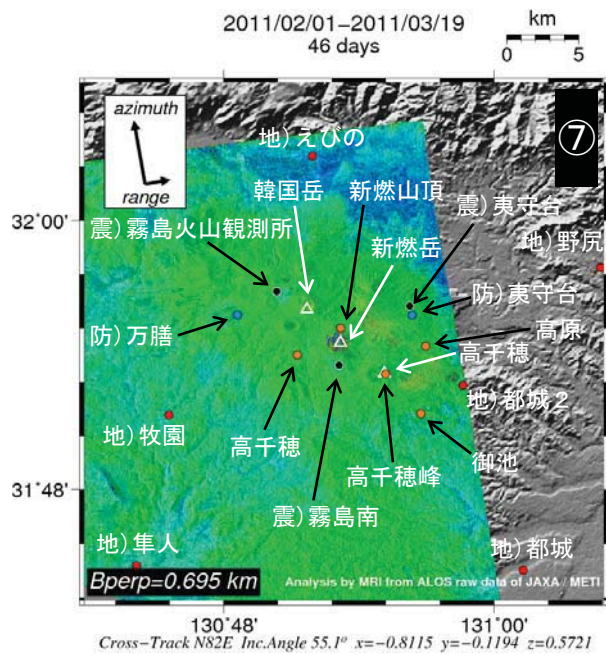
Fig.4-1 SAR interferograms generated from the ALOS/PALSAR before the eruption in late January (①:Ascending orbit, ②:Descending orbit)

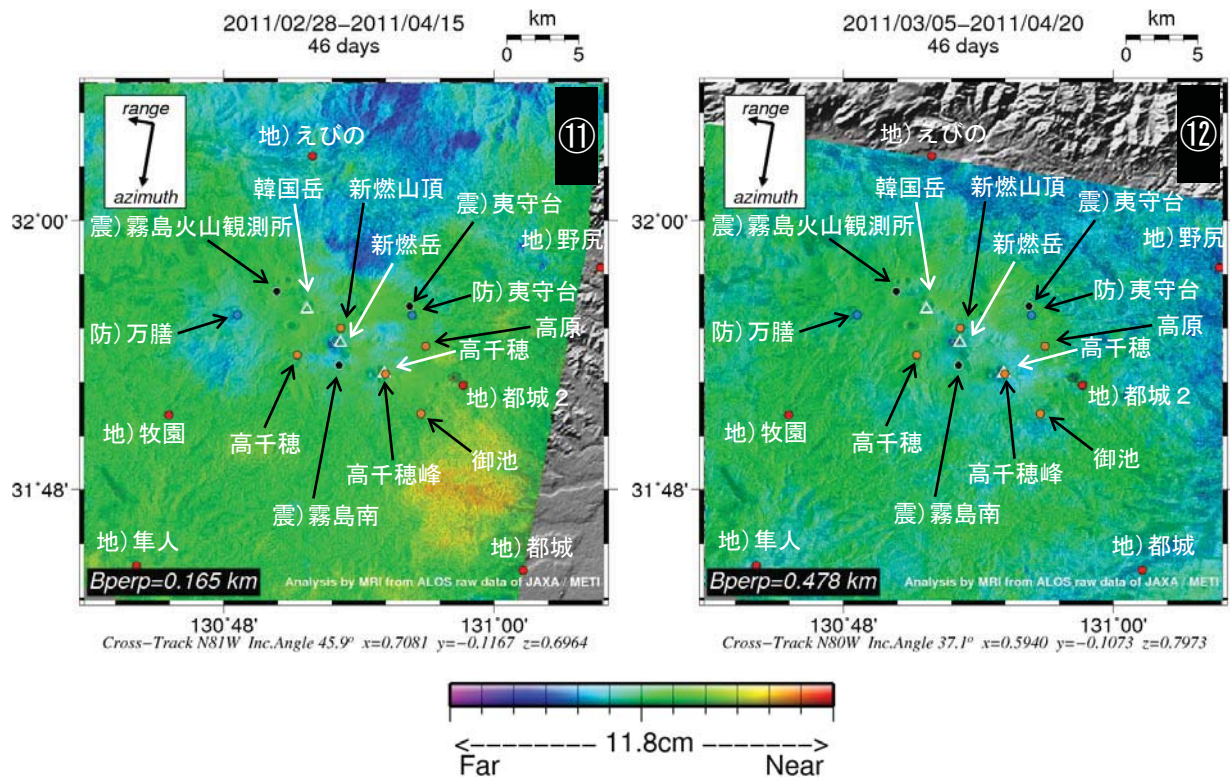


第4-2図 ALOS/PALSARによる1月下旬噴火前後におけるSAR干渉解析結果(③:北行軌道、④:南行軌道)

Fig.4-2 SAR interferograms generated from the ALOS/PALSAR before and after the eruption in late January (③:Ascending orbit, ④:Descending orbit)

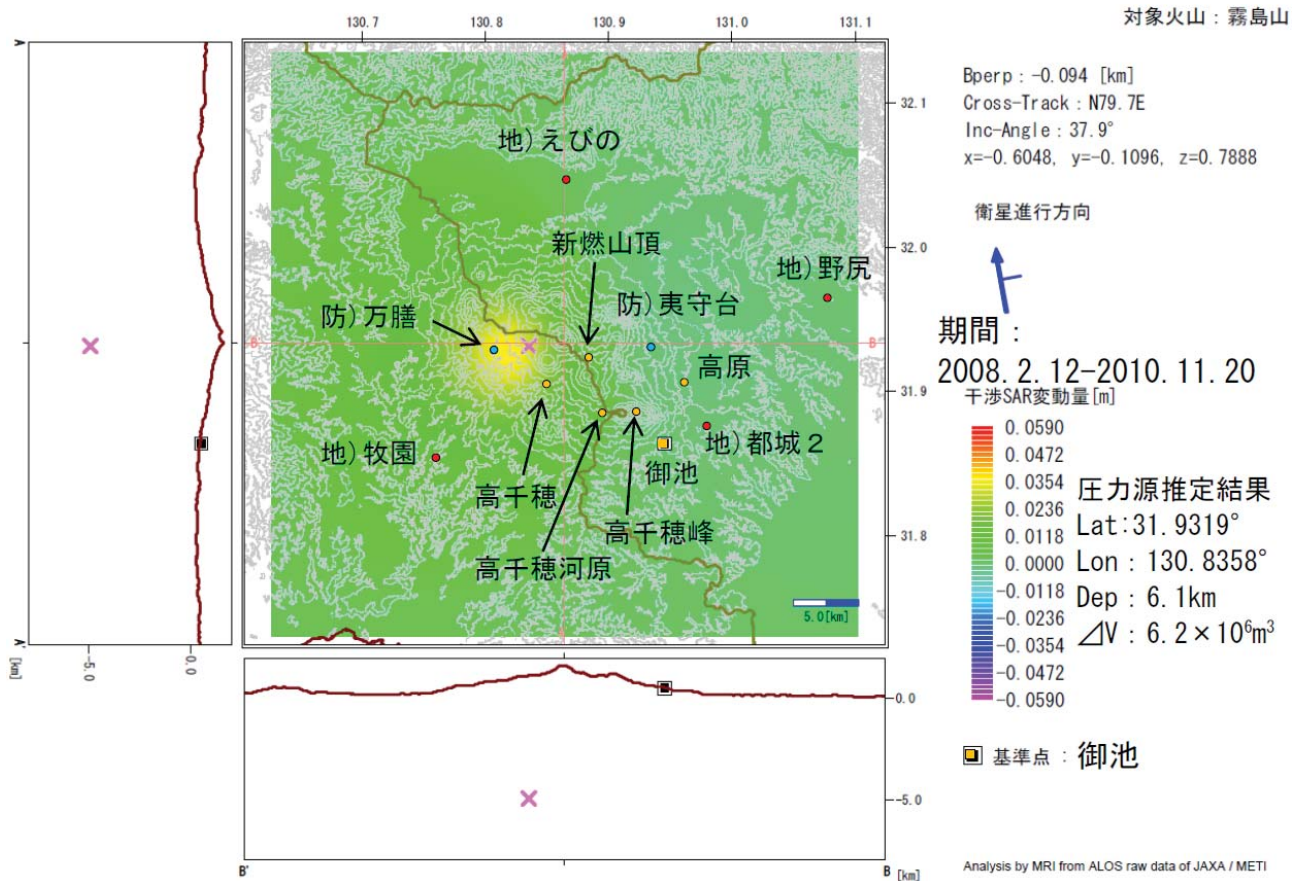






第4-3図 ALOS/PALSARによる1月下旬噴火後におけるSAR干渉解析結果(⑤⑦⑨⑪:北行軌道、⑥⑧⑩⑫:南行軌道)

Fig.4-3 SAR interferograms generated from the ALOS/PALSAR after the eruption in late January (⑤⑦⑨⑪:Ascending orbit, ⑥⑧⑩⑫:Descending orbit)

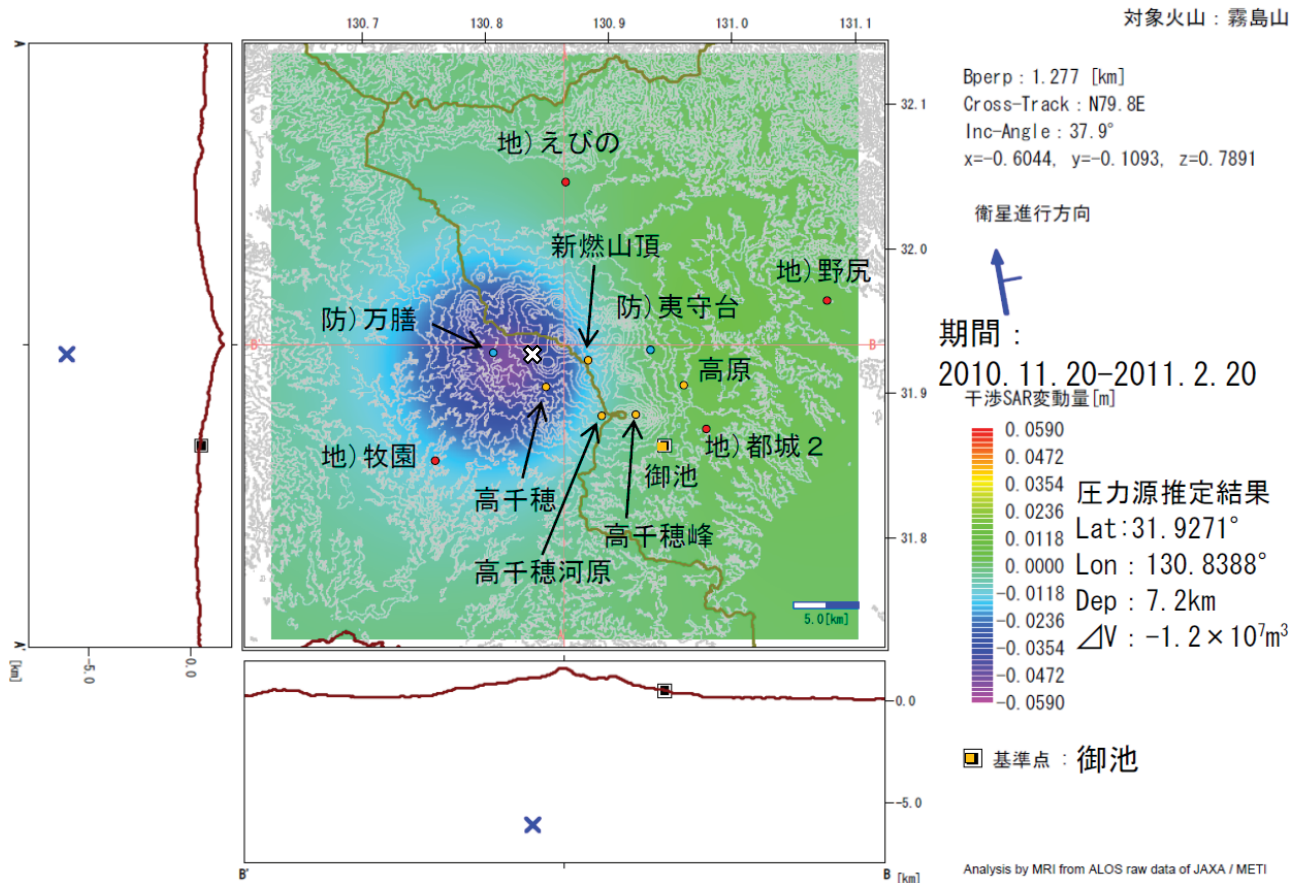


第5-1図 球状圧力源を仮定した霧島山新燃岳噴火前における圧力源推定

2008年2月から2010年11月の北行軌道（第4-1-1図）のデータを使い，MaGCAP-V（福井ほか，2010）を用いた圧力源推定を行った．球状圧力源（Mogi，1958）を仮定し計算した結果，韓国岳の西北西約5kmの深さ約6kmに $6.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積増加量で位相変化を説明できることがわかった．

Fig.5-1 Pressure Source of point calculated for Fig.4-1-1 of InSAR result

According to SAR interferogram generated from the ALOS/PALSAR before the eruption, and when a Mogi-type point source was assumed, the estimated volume of inflation was about $6.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ at 6 km depth by MaGCAP-V (K.Fukui et.al.,2010).



第5-2図 球状圧力源を仮定した霧島山新燃岳噴火前後における圧力源推定

2010年11月から2011年2月の北行軌道（第4-2-3図）のデータを使い、MaGCAP-V（福井ほか，2010）を用いた圧力源推定を行った．球状圧力源（Mogi, 1958）を仮定し計算した結果，韓国岳の西北西約5kmの深さ約7kmに $1.2 \times 10^7 \text{m}^3$ の体積減少量で位相変化を説明できることがわかった．

Fig.5-2 Pressure Source of point calculated for Fig.4-2-3 of InSAR result

According to SAR interferogram generated from the ALOS/PALSAR before and after the eruption, and when a Mogi-type point source was assumed, the estimated volume of deflation was about $1.2 \times 10^7 \text{m}^3$ at 7 km depth by MaGCAP-V (K.Fukui et.al.,2010).