火山-2512「熱活動,噴気活動の把握,噴出物調査への利用調査」

PI:気象庁・地震火山部火山課:松森敏幸
CI:地震火山部火山課
CI:気象研究所
CI:地磁気観測所

1.はじめに

気象庁では,熱活動や噴気活動の把握,噴出物調査などによる火山活動評価への衛星データ活用の可 能性を調べることを目的として調査を行っている.現在実施している火山観測に加えて,衛星による広 範囲で面的な観測データを利用することにより,より的確な活動評価ができることが期待される.特に, 観測機器の設置が困難な火山における観測手法として衛星の活用は有益である.

本報告は、「2.噴火に伴う噴出物・噴気等の把握」・「3.現地調査(熱活動・噴気)等との比較・ 検証」で構成されている、「2.噴火に伴う噴出物・噴気等の把握」では、2011年霧島山新燃岳噴火前 後に ALOS で撮影された光学画像及び SAR 強度画像から判読した噴出物・噴気等の状況について報告す る.また、2011年5月に ALOS が運用停止し、その後、後継機が打ち上がっていないことから、Landsat-8 の光学画像を取得し2013年11月~12月にかけて西之島の画像判読を行ったことも同章に含めた「3. 現地調査(熱活動・噴気)等との比較・検証」では、熱活動・噴気等について地上もしくは上空からの 現地調査と ALOS の光学画像との比較・検証を行ったので、結果について報告する.

2. 噴火に伴う噴出物・噴気等の把握

(1)光学センサによる画像判読(霧島山新燃岳)

2011 年霧島山新燃岳噴火前後の火口周辺で撮像された PRISM 及び AVNIR-2 のデータを用いて,噴火前の2事例と噴火後の17事例について火口や地表面変化の判読を試みた.AVNIR-2 データについては,近赤外波長帯を用いた False Color 画像による表現を適用した.なお, PRISM と AVNIR-2 が同時に撮像した事例については, HSV パンシャープン処理を施し,より詳細な画像判読解析も試みた.使用したデータを表1に,結果について図1に示す.

解析の結果から,噴火前の2008年3月及び11月には,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判読できる.一方,大量の降灰や噴石を伴った中規模噴火後の2011年1月31日の 画像からは,山頂火口から噴出する激しい噴煙が確認でき,このために山頂火口内の様子は全く確認で きない状態であった.続く,2月4,5日の画像からも,活発な噴煙活動が継続していることが確認で きるが,その噴出孔は,山頂火口内の中心部及び東寄りであることが判読できる.その後,比較的噴煙 の少ない2月7日の画像によれば,火口湖が存在していた山頂火口内に噴火により噴出した溶岩が蓄積 されていることが分かった.さらに,2月19日の画像から蓄積された溶岩が山頂火口内をほぼ満たし ていることが分かった.また,噴気孔の位置は山頂火口内の北北西,西南西及び南東の3か所が中心で あることが確認できる.この状態は2月26日の画像からも確認できるが,3月以降の画像では,南東 側の火孔を除いて,やや噴気の勢いが弱くなっていることが判読できた.

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
PRISM	83	2955	2008.03.28	2.03	0.0	50.0	1 <sup>-</sup> 1g. 1-
AVNIR-2	83	2960	2008 11 13	2:06	$0.0^{\circ}$	39.0°	Fig. 1-
PRISM	83	2955	2008.11.15				
AVNIR-2	90	2940	2011.01.31	2:19	+27.0°	38.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	74	2980	2011.02.04	1:45	-31.0°	36.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	93	2940	2011.02.05	2:25	+35.0°	40.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	85	2950	2011.02.07	2:08	$+10.0^{\circ}$	39.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	83	2960	2011 02 10	2:04	$0.0^{\circ}$	42.0°	Fig. 1-
PRISM	83	2955	2011.02.19				
AVNIR-2	78	2970	2011.02.26	1:53	-18.0°	43.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	84	2960	2011.03.08	2:05	$+6.0^{\circ}$	$48.0^{\circ}$	Fig. 1-
AVNIR-2	76	2970	2011.03.10	1:48	-25.0°	47.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	95	2930	2011.03.11	2:29	$+40.0^{\circ}$	52.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	98	2920	2011.03.16	2:35	+44.0°	54.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	71	2980	2011.03.17	1:38	-38.0°	$48.0^{\circ}$	Fig. 1-
AVNIR-2	90	2940	2011.03.18	2:18	$+28.0^{\circ}$	53.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	88	2950	2011.03.30	2:13	+20.0°	58.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	83	2960	2011.04.06	2:03	$0.0^{\circ}$	59.0°	Fig. 1-
PRISM	83	2955	2011.04.00				
AVNIR-2	94	2930	2011.04.09	2:26	+38.0°	63.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	86	2950	2011.04.11	2:09	$+14.0^{\circ}$	62.0°	Fig. 1-
AVNIR-2	97	2930	2011.04.14	2:32	+44.0°	65.0°	Fig. 1-

表1 本報告で用いた PRISM と AVNIR-2 のデータ

(2) SAR 強度画像による画像判読(霧島山新燃岳)

ALOS/PALSAR から発射されたマイクロ波は,対象物に到達した際に後方散乱が生じる.その後方散乱 強度の強弱を画像化することで白黒の SAR 強度画像が得られる.これらの変化は,入射するマイクロ波 の波長や偏波,角度に依存しており,特に地表面の凹凸に影響を強く受ける.マイクロ波の入射方向に 対して対象物が垂直あるいは粗い面が卓越していれば後方散乱強度が強く,結果的に明るい SAR 強度画 像が得られる.反対に,マイクロ波の入射方向に対して対象物が平行あるいは滑らかな場合は,前方散 乱強度が強くなり,相対的に暗い SAR 強度画像が得られる.いずれにせよ,天候や噴煙活動に左右され ることなく定常的に観測が可能なため,地表面変化の推移把握が可能である.

2011年霧島山新燃岳噴火について、噴火前後のSAR強度画像解析を行った.使用したデータを表2に, 山頂火口周辺の結果を図2(北行軌道)及び図3(南行軌道)に示す.霧島山新燃岳では,1月26日 に本格的マグマ噴火へ移行した.この噴火活動以前の2010年11月20日(北行画像)及び2011年1月 18日(南行軌道)のSAR強度画像では,山頂火口内に火口湖の存在を示す暗い円形状(図2及び3の の水色破線丸印)が確認できるが,噴火活動後の1月27日(北行軌道)のSAR強度画像では,該当部 分に暗い円形状は確認できない.一般的に,溜め池や河川など比較的表面が穏やかな水面が対象の場合, 前方散乱の強度が強くなりSAR強度画像では暗く表現されるため,1月26日の本格的マグマ噴火の翌 日に暗く表現される領域がなくなったことは,火口湖が消滅したことを示している.さらに,1月27 日の画像では,山頂火口内中央部に,新たに散乱強度の強い箇所が出現していることが確認できた.こ の反射強度の強い部分は,



図1 光学センサ(AVNIR-2及び PRISM)による解析結果(R:band4,G:band3,B:band2)
図中の矢印は衛星進行方向(長)及び撮像方向(短)を示し,丸数字は表1に対応している.また,
各図の下には撮像日(ポインティング角)を記載した.なお, , , はパンシャープン画像
で表示している.

ポインティング角とは,大規模災害等の緊急時に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が でき(最大±44°),最短で2日以内に災害発生の該当地域を撮像することが可能な機能.

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

表 2 本報告で使用した PALSAR データ

その後に得られた光学センサ画像による解析結果も併せて解釈すると,すでにこの段階で溶岩の噴出が 始まっていたと推定できる.その後,1月29日(北行軌道),1月30日(南行軌道)及び2月1日(北 行軌道)の画像解析から,火口内に噴出した溶岩はケーキ状に蓄積され,その大きさは直径約500mま で成長したことが判読できた.

1月 26 日の噴火以降,鹿児島県の協力によるヘリコプターからの上空観測が実施されたが,火口内 に噴煙が充満していることなどから1月31日に海上自衛隊第72 航空隊鹿屋航空分遣隊の協力によるヘ リコプター観測で溶岩の蓄積が確認されるまで,これら一連の火口内の表面変化は可視による観測では できていない.今回の事例は,噴火活動の推移を逐次把握する手段としてマイクロ波による観測が有効 であることを示した一例である.なお,本事例において,気象庁は,衛星による解析結果も根拠にして, 警戒すべき範囲を火口から2kmを3kmに拡大する噴火警報を発表した.

その後,火口内に蓄積された溶岩は,最大直径 600m 程度まで成長し,火口壁の上端付近まで蓄積したことが確認されている.2月中旬以降には,火口内に蓄積されていた溶岩量はやや少なくなり,SAR

強度画像では,幾分陥没した状況が確認できる.さらに3月以降の解析によると,火口内南東縁部に反 射強度の強い箇所(図2及び3中の黄色破線丸印)が確認できるようになり,徐々に明瞭に認識できる ようになった.同時期の光学センサによる画像解析との比較から噴火活動の過程で生じた活発な火孔を 検出したと考えられる.なお,1月26日の本格的マグマ噴火後,山頂火口内に溶岩ケーキが出現して から,3月1日までに合計13回の爆発的噴火が発生しているが,各々の噴火直後に撮像された SAR強 度画像を確認しても表面上に特段大きな変化は認められていない.このため,例えば爆発的噴火により 山頂火口内の溶岩が大量に吹き飛ぶような現象は発生しなかったと推測できる.



図2 ALOS により撮像された SAR 強度画像(北行軌道)

図中の矢印は衛星進行方向(長)及び撮像方向(短)を示し,丸数字は表2に対応している.また, 各図の下には,撮像日(オフナディア角)を記載した.図の水色破線丸印は火口湖,図から に示す黄色破線丸印は火口内南東縁に出現した新しい火孔の位置を示す.

オフナディア角とは,衛星の鉛直直下方向と衛星視線方向との角度.



図3 ALOS により撮像された SAR 強度画像(南行軌道)

図中の矢印及び数字等は,図2と同じ.図の水色破線丸印は火口湖,図から及びからに 示す黄色破線丸印は火口内南東縁に出現した新しい火孔の位置を示す. (3)光学センサによる画像判読(西之島)

2013年11月20日,海上自衛隊及び海上保安庁によって,西之島の南東500mの付近に噴火活動が観 測され,噴火位置には新島が形成された.ALOSの運用が2011年5月で終了し,PRISM,AVNIR-2を用い た火山活動の監視・評価ができなかったため,USGS(アメリカ地質調査所)の衛星画像提供ホームペー ジ(http://earthexplorer.usgs.gov/)から光学衛星であるLandsat-8の画像を入手し,西之島の噴火 に伴う噴出状況の調査を行った.取得したLandsat-8の画像は,2013年11月6日,2013年11月22日, 2013年12月8日,2013年12月24日で,判読した画像の種類は,LandsatLook Image with Geographic Reference(http://landsat.usgs.gov/LandsatLookImages.php)である.ただし,2013年11月22日の 画像では,西之島周辺は雲に覆われていたため,判読に使用することはできなかった.

## <判読結果>

- ・2013 年 11 月 6 日:西之島の南東 500mの海域に新島と思われるものは確認できていない(図4).
- ・2013 年 12 月 8 日:西之島の南東 500mの海域に新島が確認できる.新島は東西に広がっており, 高温域がある(図5).
- ・2013 年 12 月 24 日:西之島の新島の領域が広がり,本島とほぼ接続していることが分かる.また, 新島には高温域が存在しており,噴煙と思われる筋状の雲も確認できる(図6).

以上のことから,Landsat-8の画像から,西之島の噴火活動に伴う新島の形成を空間的に把握し,評価する上で有用な情報が得られることが分かった.西之島の詳細な活動把握には,主に航空機による撮影画像が用いられている.航空機による撮影は,機動性に富んでおり,詳細なデータを得ることができるが,その都度,燃料費等の経費及びフライトの調整が必要である.また,今後,活動が継続していった場合,頻度の高い撮像ができるかは不明であり,爆発的な噴火の場合には飛行機で近づくこともできない.それに比べて,光学及びSAR衛星では,常に一定の回帰周期で撮像を行うため,観測データを安定的に取得することができ,爆発的な噴火であっても撮像することが可能である.今回,Landsat-8を用いて西之島の画像判読を実施したが,Landsat-8の画像は空間分解能が30m(パン画像は15m)と,ALOSに搭載されていたPRISM(3m),AVNIR-2(10m)に比べて分解能が粗い.したがって,もしALOSが運用されていれば,より詳細な火山活動による噴出物等の情報が得られたと考えられる.



図 4 西之島の Landsat-8 画像 (2013 年 11 月 6 日撮像)



図 5 西之島の Landsat-8 画像 (2013 年 12 月 8 日撮像)



図 6 西之島の Landsat-8 画像 (2013 年 12 月 24 日撮像)

3.現地調査等(熱活動・噴気)との比較・検証

噴火時における降灰範囲や噴煙の状況等の衛星画像による把握については,これまでの衛星ワーキン ググループの成果報告でとりまとめられている(たとえば,火山噴火予知連絡会衛星解析グループ, 2009).今回の調査においては,さらに小さいスケールの現象について衛星画像で把握できる可能性に ついての調査を進めた.

調査した結果,気象等の条件の良い場合には噴火活動には至っていない熱活動や噴気活動も把握可能 であった.ただし,光学衛星画像解析のみで熱活動や噴気といった細かなスケールの火山現象を判断す ることは,判読ミス等の要因もつきまとうため,上空からの観測等他の観測データとも照らしあわせな がら判読した方がよい.また,活動の推移を把握するためにはより時間分解能を細かくして,精査して いく必要がある.

以下に地上あるいは上空からの観測結果と AVNIR-2 センサによる光学画像を比較した事例を掲載する. なお,このほかにも噴気活動の比較的活発な雌阿寒岳,十勝岳,吾妻山,口永良部島等についても比較 したが,明瞭な対応は確認できなかった.

## (1) 阿蘇山の事例

阿蘇山では中岳第一火口(図7)の活発な 活動が続いており,その中で火口の南側火口 壁における地熱温度の増減がみられている (図8).このうち2007年後半から2011年頃 にひとつのピークがあり,それに対応する衛 星画像を確認した(図9).その結果,温度上 昇の始まったころに対応する2007年2月8日 の画像では目立たない輝度の高い領域が2008 年11月13日の画像ではかなり輝度が強くなっ ていることが確認できた(図9:中赤矢印).





南側火口壁の温度上昇に対応して水蒸気の放出量が多くなり噴気が濃くなったものと考えられる.また その後の 2010 年 4 月 3 日の画像では,南側火口壁の状況は確認できないものの,湯だまり全体からの

この地図の作成に当たっては、国土地理院の承認を得て、同院発行の基盤地図情報を使用した。

<sup>(</sup>承認番号:平成 23 情使,第 467 号)

噴気量が多くなっている状況が捉えられており,このころの熱活動が 2007 年頃よりも活発になっていることが確認できた(図10).



図8 阿蘇山中岳第一火口の湯だまり表面温度(青)と南側火口壁温度(赤)



図 9 阿蘇山中岳火口の AVNIR-2 センサによる画像 (左から 2007 年 2 月 8 日, 2008 年 11 月 13 日, 2010 年 4 月 3 日)



図 10 阿蘇山中岳第一火口の状況(現地調査による)
上が湯だまりの状況,下が南側火口壁の熱赤外画像
左:2007年2月26日,中:2008年11月13日,右:2010年4月14日撮影

(2) 樽前山の事例

樽前山では山頂の溶岩ドームで高温の状態と活発な噴気活動が観測されている.上空からの観測で確認 できた噴気活動のうちE火口,B噴気孔群,A火口,F噴気孔及びH亀裂からの噴気が2008年8月5日, 2009 年 9 月 23 日の衛星画像で確認できた (図 11,図 12,図 13). この 2 例で噴気活動に変化は認められないが,監視カメラで観測されている噴気の高さについてもこの 2 年間変化は認められていない.



図 11 樽前山の上空からの観測結果

(左図,2008年6月18日山頂南側より撮影.北海道開発局の協力による)と AVNIR-2センサによる画像(右図,2008年8月5日撮影)との比較.



- 図 12 樽前山の上空からの観測結果
  - (左図,2009年10月30日山頂南西側より撮影.北海道開発局の協力による)と AVNIR-2 センサによる画像(右図,2009年9月23日撮影)との比較.



図 13 樽前山火口周辺図.青矢印は上空からの観測時の撮影方向 ( は 2008 年 6 月 18 日, は 2009 年 10 月 30 日) 4.まとめ

本課題では,熱活動・噴気活動・噴出物等について,噴火活動に伴うものと噴火活動には至らないより小さなスケールのものの両方について,衛星画像を用いて火山活動評価に活用できるかの調査を行った.

噴火活動に伴うものとして,2011 年霧島山新燃岳噴火前後の光学画像及び SAR 強度画像による判読を 実施した.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況を把握することができた.また,SAR 強度画像を使った解析では,光学 センサでは観測のできない悪天候や夜間時間帯,更には噴煙活動の活発化した時期にも,刻々と変化す る山頂火口内の状態を把握することが可能であった.これらの得られたデータを活用し,噴火警報の発 表に資する情報として有効利用できることが分かった.

ALOS 運用終了後の 2013 年 11 月に活発化した西之島の南東 500m 付近の噴火活動については Landsat-8 の光学画像を取得し判読したところ,新島の形成を空間的に把握し,評価する上で有用な情報が得られる ことが分かった.もし ALOS が稼働していれば, ALOS 搭載の光学センサ(PRISM・AVNIR-2)は, Landsat-8 よりも高分解能な画像を取得できるため,より詳細は情報を得ることができたと考えられる.

熱活動・噴気等の現地調査と ALOS 画像との比較では,噴火活動には至っていない状態でも,気象等の条件のよい場合には,熱活動や噴気活動の把握が可能であることが分かった.ただし,現地調査のデ ータとも照らしあわせながら判読する必要があるものと考えられる.

謝辞

本解析で用いた,ALOS/PRISM 及び AVNIR-2 データと ALOS/PALSAR level 1.0 データの一部について 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.また,一部の 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.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"をそれぞれ使 用した.Landsat-8 の画像は,USGS(アメリカ地質調査所)の衛星画像提供ホームページ (http://earthexplorer.usgs.gov/)から入手したものである.ここに記してお礼申し上げる.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JAXA の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

火山噴火予知連絡会衛星解析グループ(2009) : 熱活動,噴気活動,噴出物調査及び地形変化検出のための基礎調査,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, 18-24.