

火山-2513「航空機及び衛星搭載 SAR による火山の監視と変化抽出について」

P I : 宇宙航空研究開発機構・地球観測研究センター：島田政信

C I : 宇宙航空研究開発機構・地球観測研究センター：大木真人

C I : 防災科学研究所・地震火山研究部：宮城洋介

1. 概要

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は本研究において、二つの観測手段を用いて日本の火山の幾つかと外国の火山についてその時間的变化や状況を観測してきた。一つは、衛星搭載合成開口レーダである、Advanced Land Observing Satellite (ALOS) / PALSAR であり、もう一つは航空機搭載 SAR (Pi-SAR-L2) である。SAR の特徴は全天候性であり、活動期には、光学センサでは噴煙の為に観測することのできない火山 (火口) 内部の状況の把握ができるという点、二時期の差分干渉処理により火口の隆起、沈降が把握できる点に強みを持つ。又、衛星 SAR は非常に安定した軌道から干渉処理が実施できる利点があるものの、SN が低い、あるいは分解能に難があるという弱点がある。それに対して、航空機 SAR は高い分解能 (広い帯域幅)、非常に大きな SN、多くの偏波情報、更には、任意方向に設定できる飛行コースにより、衛星観測の補強が可能であり、両者の組み合わせにより、火山観測の強化が期待できる。過去 3 年間に ALOS は機能しなかったが JAXA が協定を締結するイタリア国の X-band SAR Cosmo-Skymed (CSK)、ドイツ国の TerraSAR-X を使用することができた。本報告では、衛星と Pi-SAR-L2 を用いた時系列 SAR データとその応用による火山観測について言及した。

報告事例としては、1) 西之島誕生と変遷、2) 新燃岳の火口の変遷、3) 桜島昭和火口の変遷、4) インドネシア国ガマラマ火山、5) PALSAR によるマヨン火山観測、6) Pi-SAR-L2 の干渉機能について、である。

2. 西之島誕生と変遷

2013 年 11 月 20 日 16 時ごろ、東京から南に約 1000km、小笠原諸島の父島から西に約 130km の位置にある西之島の近海において、直径 200m 程度の新島が出現し、噴火活動に伴う黒色の噴煙を上げている様子が海上保安庁の観測によって確認された。これ以降、活発な噴火活動及び複数の火口からの溶岩流によって新島の面積は拡大しており、12 月 26 日 9 時ごろには西之島と新島が一体化した事が確認された。この島の誕生以降、JAXA は島の変遷を注視すべく、イタリア国の CSK に観測を要請し、1m の分解能を有するスポットライトモードにおいて観測することができた。JAXA は、2014 年 1 月 15 日に航空機搭載 L バンド合成開口レーダ 2 (Pi-SAR-L2: Polarimetric and Interferometric Airborne Synthetic Aperture Radar L-band 2) より、西之島付近の観測を行い、その後の新島の活動状況を確認した。この結果から、島は、依然として成長していることが確認された。

CSK

CSK は 2013 年の 12 月に合計 5 ショットを観測することができた。すべてスポットライトモードであり、偏波は HH、周波数は X バンドである。20 日の間に新島が大きく成長し、最後に西の島と合体することがわかる。(図 1)

Pi-SAR-L2

2014 年 1 月 15 日に観測したもので、ポラリメトリ画像の為にカラー画像として捕らえられる。新島

部分がより緑色に見えるのは、表面がごつごつしている為と思われる。(図2)

なお、両画像ともに、全天候性の為に雲の影響は受けないが、反面、噴煙の状況はわからない。

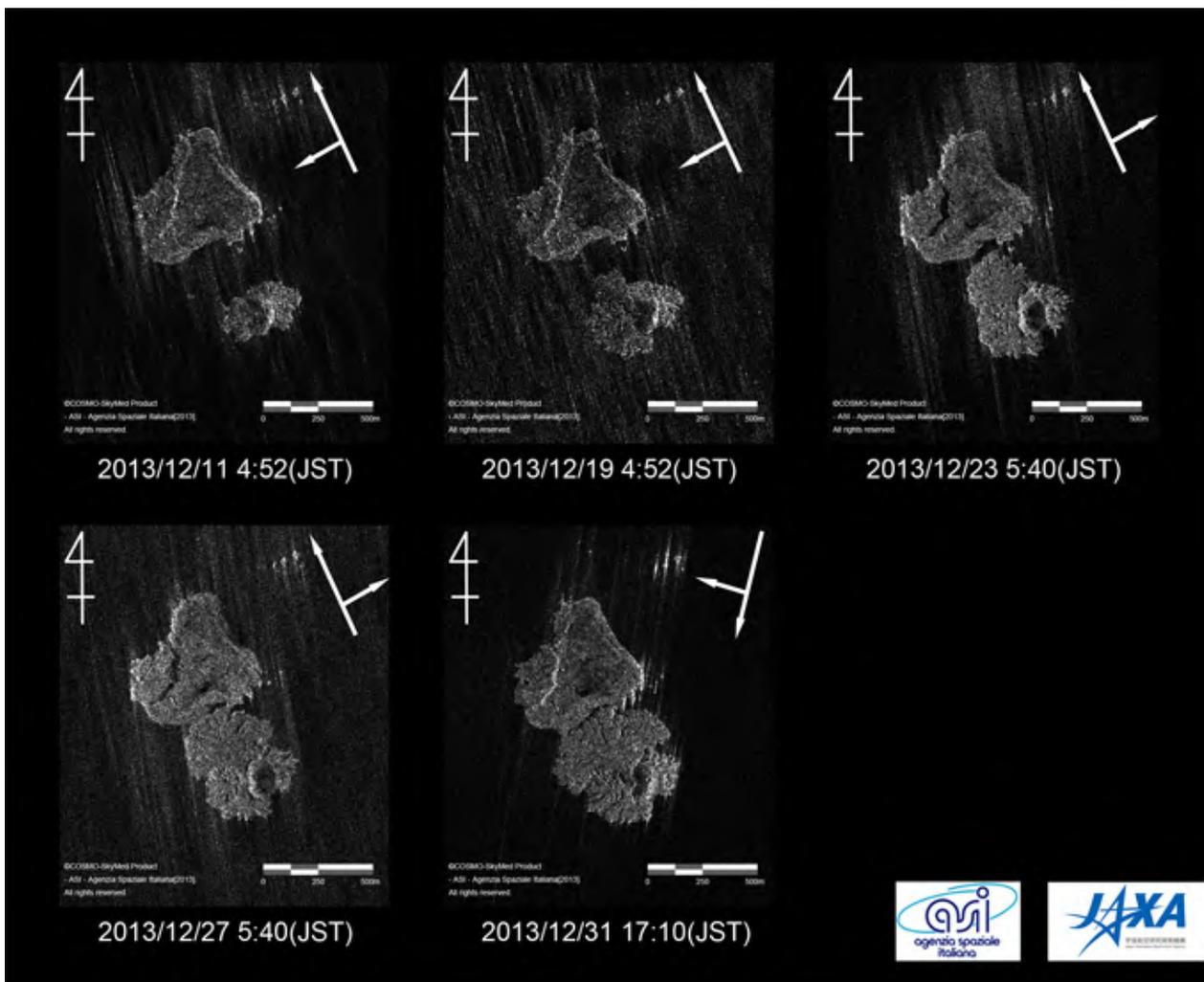


図1 CSKによる西之島の観測と変遷図

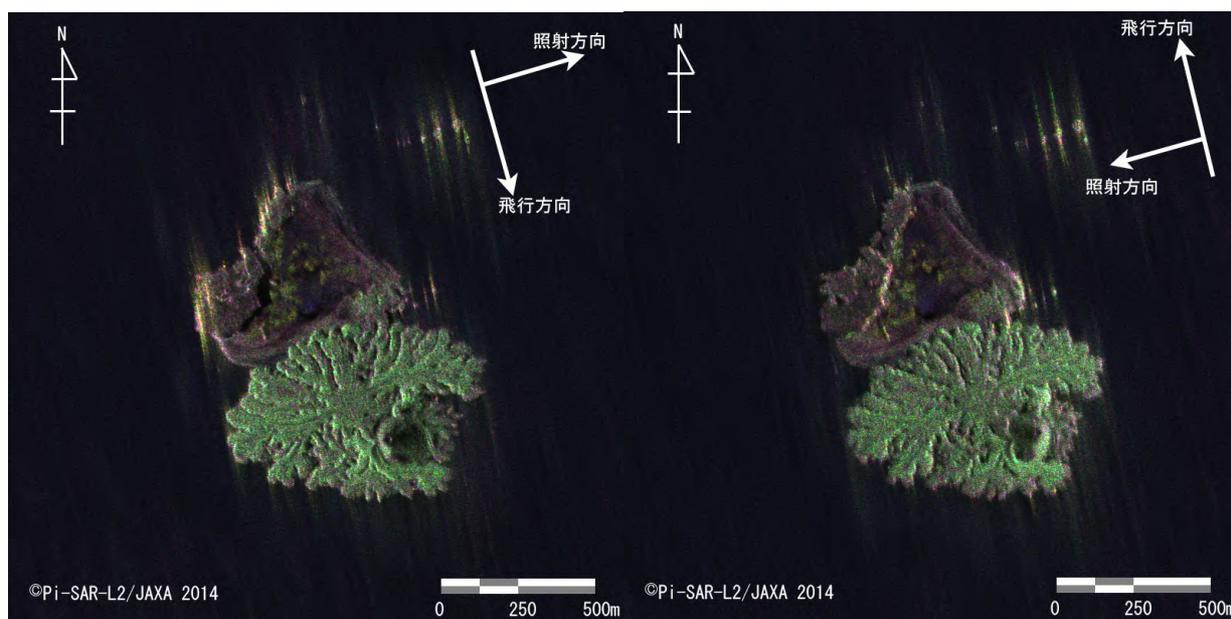


図2 Pi-SAR-L2による西之島の観測

3. 新燃岳の変遷

2011年1月、鹿児島県と宮崎県の県境にある霧島山・新燃岳で噴火活動が始まった。1月19日の小規模なマグマ水蒸気爆発から、1月22日の小規模な噴火を挟んで、1月26、27日にはより規模が大きく爆発的な準プリニー式噴火に移行し、それ以後はブルカノ式噴火を繰り返した。これは、1959年噴火以来52年振りの爆発的噴火であり、1822年以来189年振りのマグマ噴火であった。噴火の規模としては、これまでで最大とされる享保噴火（1716-1717年）以来の大きさであった。この噴火活動に対し、ALOSに搭載されたセンサ（PRISM, AVNIR-2, PALSAR）、ドイツのX-band SAR衛星TerraSAR-X、航空機搭載合成開口レーダ（Pi-SAR-L2）を用いた観測研究を行った。

光学センサ（ALOS/AVNIR-2, PRISM）

ALOS搭載の光学センサであるAVNIR-2とPRISMによって、噴火後の噴煙が流れる様子（図3）や、火口内の変状（図4, 5）を検出することができた。

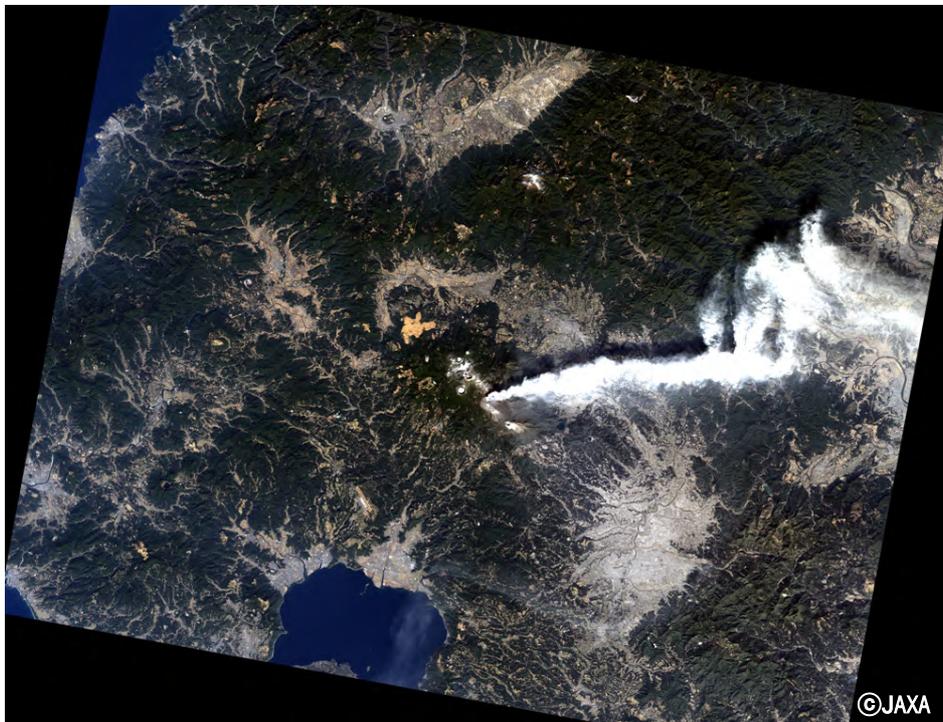


図3 噴火後の2011年2月4日にALOS/AVNIR-2によって観測された画像。
霧島山・新燃岳より東北東に向かって流れる噴煙が確認できる。

噴火前の画像（図4左）には火口底に火口湖が見られたが、噴火後の画像（図4右）には、2011年1月27日から火口内に蓄積された溶岩を確認することができる。



図4 ALOS/AVNIR-2 と PRISM データを用いたパンシャープ画像。
 (左：噴火前) 2008 年 11 月 13 日, (右：噴火後) 2011 年 2 月 19 日に観測された。

また、噴火前の 2007 年 5 月 11 日と噴火後の 2011 年 2 月 19 日に取得された PRISM データを用いて、数値標高データ (Digital Surface Model, 以下 DSM) を作成した。この噴火前後の DSM の差分から、2011 年 1 月 27 日以降新燃岳火口内に噴出した火口内溶岩による火口底の隆起量と溶岩の体積を推定した (図 5)。これによると、2011 年 2 月 19 日時点での火口内における最大隆起量は 133m で、火口内溶岩の体積は $2.2 \times 10^7 \text{m}^3$ であると見積もられる。ただしこれは火口内溶岩表面に積もった火山灰等の火山碎屑物の体積も含んでいると考えられ、火口内溶岩のみの体積は若干小さいと考えられる。

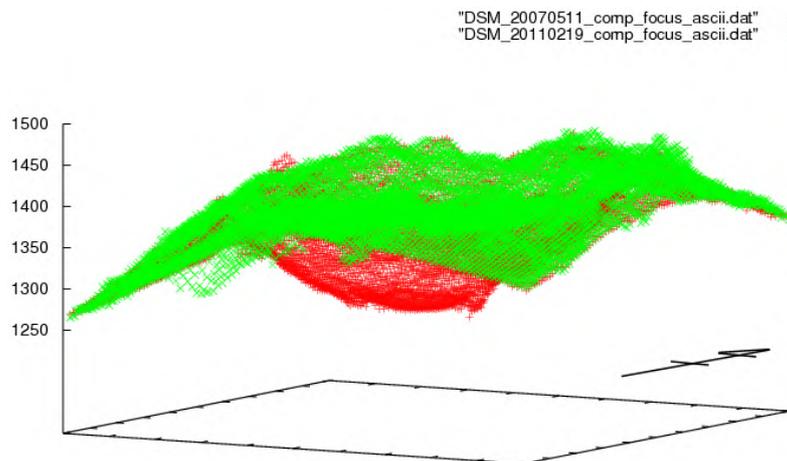
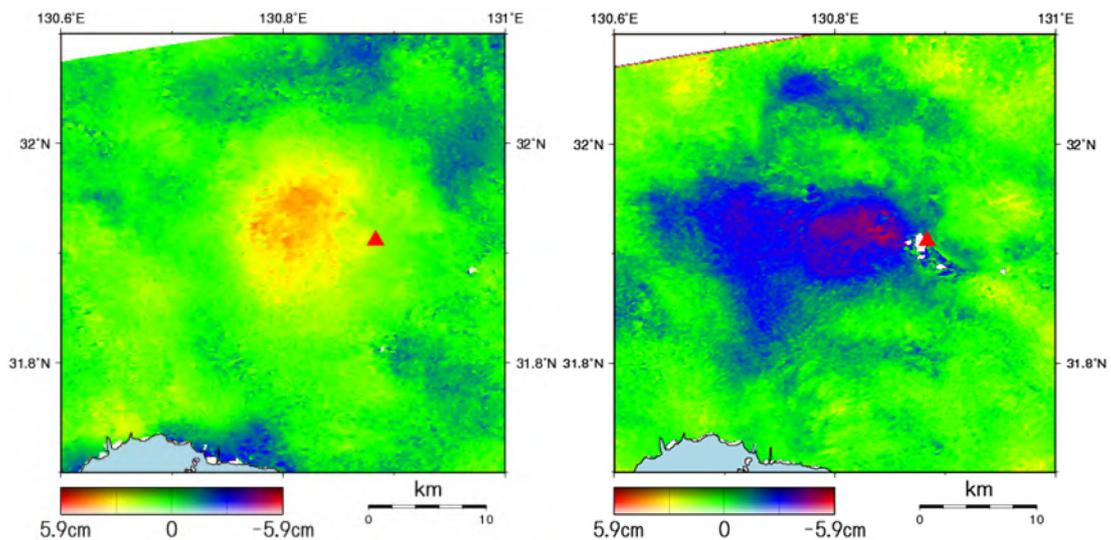


図5 ALOS/PRISM データから得られた噴火前後の DSM の比較。
 赤は噴火前、緑は噴火後の地表面を示す。

ALOS/PALSAR

次に、噴火前後に取得された PALSAR データを用いた差分干渉解析 (DInSAR 解析) より、2011 年噴火に伴う地殻変動が検出された (図 6)。変動のパターンは、噴火前の期間 (2010 年 2 月 17 日-2010 年 11 月 20 日) に山体の膨張 (図 6 左)、噴火を挟んだ期間 (2010 年 11 月 20 日-2011 年 2 月 20 日) に山体の収縮 (図 6 右) を示す。変動の中心は、新燃岳火口から約 5km 西北西にあり、噴火前、噴火中両期間

とも変わらなかった。これは、同一のマグマ溜りが場所を変えずに膨張と収縮を起こしたと考えられる。このマグマ溜りが球状であると仮定すると[Mogi, 1958]、噴火に伴った体積変化量は $1.2 \times 10^7 \text{m}^3$ であると見積もられる。これは、噴火直前と噴火直後の膨張期を含んだ期間の体積減少量であるため、過小評価していると考えられる。PRISM/DSM によって見積もられた噴出溶岩の体積と PALSAR/DInSAR によって見積もられたマグマ溜りの体積減少量を比較すると、やや噴出溶岩の体積の方が大きい、オーダーレベルでは調和的である。このことから、2011 年新燃岳噴火に伴って、地下マグマ溜りでは 10^7m^3 規模の体積変化が起こったことが分かった。



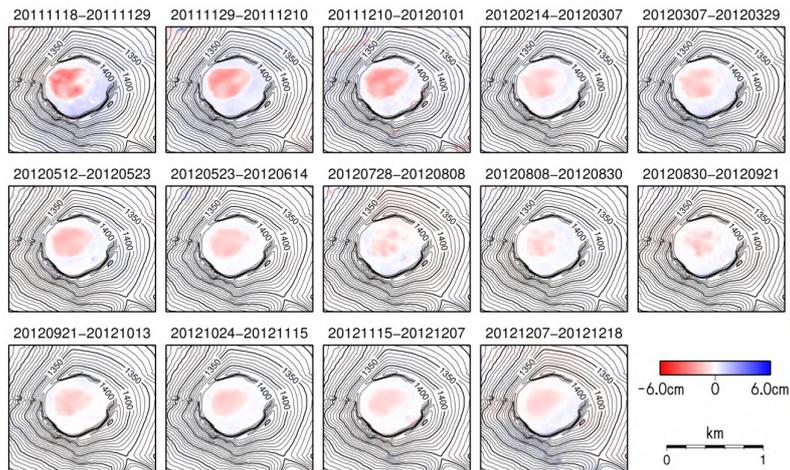
(C)JAXA, METI analyzed by NIED

図 6 噴火前後の ALOS/PALSAR データを用いた DInSAR 画像。赤い三角は新燃岳の位置を示す。
 (左) 噴火前ペア (2010 年 2 月 17 日-2010 年 11 月 20 日) と (右) 噴火を挟んだペア (2010 年 11 月 20 日-2011 年 2 月 20 日)。

TerraSAR-X

2011 年 5 月の ALOS 運用停止後は、JAXA-DLR 間で結ばれている共同研究協定に基づき、ドイツの X-band SAR 衛星である TerraSAR-X (以下 TSX) によるモニタリングを継続した。TSX の強度画像比較の結果、2011 年 5 月以降火口内溶岩表面に顕著な変状は見られなかった。しかし、DInSAR 解析の結果 (図 7)、2011 年 11 月以降継続して起こる火口内溶岩表面の地殻変動が検出された (2011 年 11 月以前は火口内が干渉せず、地殻変動があったかは不明)。

検出された地殻変動は衛星と地面の距離が縮むものであり、北行軌道、南行軌道両方で同様のパターンを示すことから、主に隆起を示していると考えられる。この隆起の原因として、火口内溶岩の継続的な増加が考えられる。この火口内溶岩の増加は 2014 年 1 月現在も継続しているが、その増加レートは指数関数的に小さくなってきている。



(C)JAXA, METI analyzed by NIED

図7 2011年11月から2012年12月までの、11日もしくは22日周期で得られたTSXデータ(北行軌道)を用いたDInSAR解析の結果。なお、比較のため変動量は11日周期に規格化してある。赤い領域が衛星-地面間の距離短縮を示しており、隆起を表す。

航空機 SAR (Pi-SAR-L2) による観測

8月、10月、3月にわたって観測を実施した結果、後述のTerra-SAR-Xによる新燃岳観測結果と同様、火口内溶岩の表面全体にわたって小さな火孔(もしくは噴気孔)が多数生じ、表面に凹凸が見られた。(図8参照)

- 2012年8月9日 新燃岳・桜島 リピートパス
- 2012年10月5日 新燃岳 4パス
- 2013年3月10日 新燃岳・桜島 リピートパス

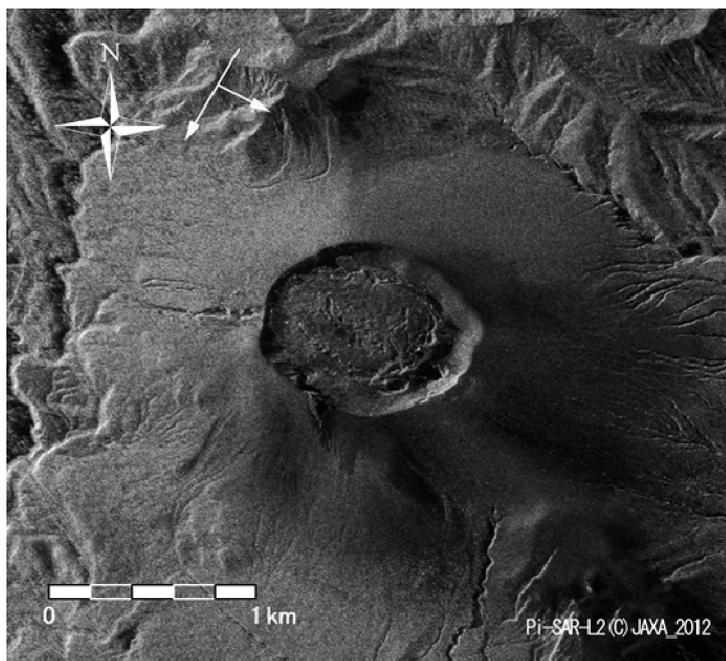


図8 2012年8月9日14:58頃(JST), 入射角約40°, HH偏波, オルソ未補正

4. 桜島昭和火口の変遷

桜島の火山活動は継続しており，JAXA ではCSK を用いて火口内の変化を継続観測している．CSK は上述したように，イタリアの宇宙機関が運用する X-band SAR 衛星であり，JAXA と締結した共同研究を用いて観測運用を行っている．添付は，CSK がこれまでに観測してきた桜島全体の画像（昇交軌道を4枚，降交軌道を6枚，図9）を表示したものである．特に昭和火口だけを拡大して，付録に掲載した．詳細はそちらを参照願いたい．

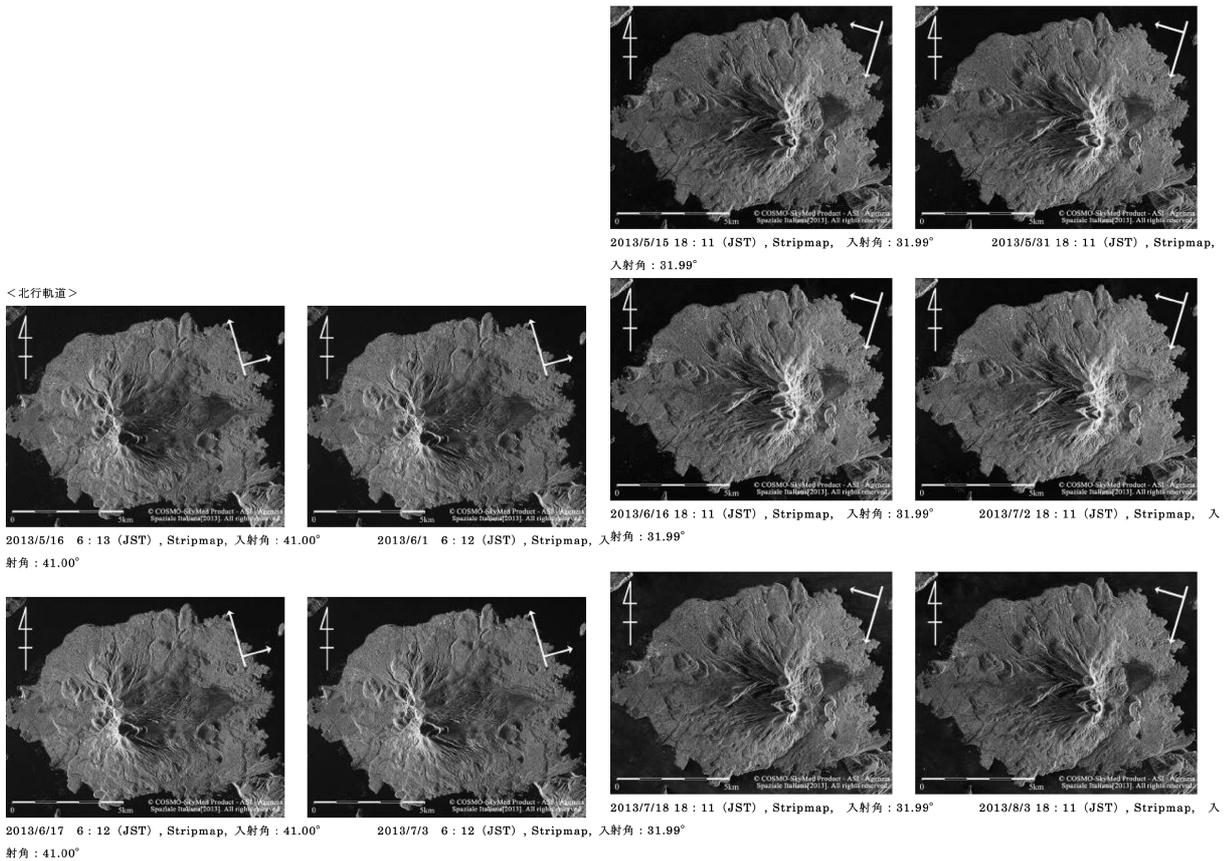


図9 CSK の観測した桜島全体画像

5. インドネシア国ガマラマ火山

JAXA は 2012/7～2014/3 の間，インドネシア科学技術省と航空機搭載 L-band SAR を用いた共同研究を実施している．目的は，インドネシアにおける，森林，災害，船舶，地図作成の分野における L-band SAR の有効性確認である．これら 4 項目は特にインドネシアにおいて，観測と検出が強く要請される分野である．災害に関しては，インドネシア国の要請は，2012年3月に噴火を始めたガマラマ火山の観測であった．航空機実験が実施されたのは，それから約5ヶ月後の8月8日であり，そのときには火山噴火は終了していた為に，Pi-SAR-L2 の画像が被災地の減災につながるということにはなかった．しかしながら，8月8日の2方向からのガマラマ火山の観測は，火口の状況の把握に役立つ情報であり，詳細な地形図との共用で，災害時の応用に貢献できそうである．合わせて，近年 Polarimetry の活用で土石流後の把握がすすんでいる，そのような手法の活用により溶岩流後の検出に役立つ可能性を見ることができた．

図10は二方位から見た Pi-SAR-L2 の画像であり，左が従来の R-G-B 3色合成，右が HH-VV の相関図であり，山頂の白いところが表面散乱で（つまり植生が無い）相関性が高いことを示す．

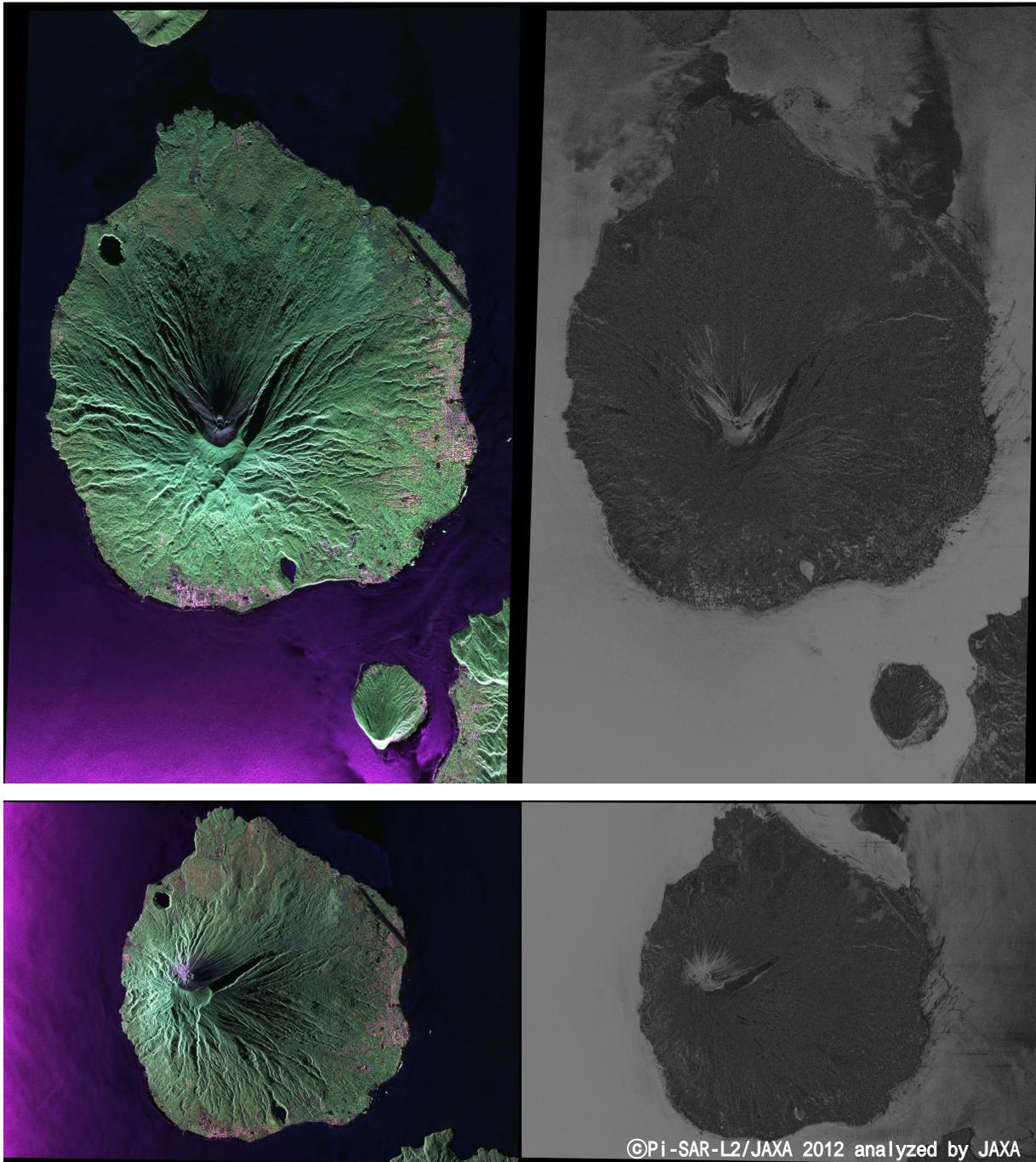


図 1 0 ガマラマ火山の HH-VV 相関図 (裸地に感度が高い)

6. マヨン火山

本例は共同研究の契約期間内での解析ではないが、外国で発生した火山活動の一例を紹介する。フィリピン・ルソン島東部に位置するマヨン火山は高さ 2463m の成層火山であり、過去 17 世紀から 21 世紀までの 400 年に 50 回噴火している活火山である。つい最近では、2013 年に噴火があり、5 人の死傷者がでたばかりである。2009 年 12 月 14 日に火山活動が活発化し、同 20 日に溶岩の噴出が確認されている。火山噴火により、地形の変化、マグマの流出が生じる。地形の変化は、火山内部のマグマの排出に伴い生じ、精密計測が出来れば今後の火山活動や噴火に対する見通しを得ることが可能になる。図 1 1 は、マヨン火山の噴火に伴う SAR 画像の時間変化を示したもので、赤い筋が溶岩の噴出に伴い SAR 画像が暗く見え、噴火前-噴火後の画像重ね合わせの結果的に赤く表

現されたところである。また、差分干渉画像では干渉性と位相変化量を示す。干渉性は、二時期の画像の違いを明示的に示しており、噴火により、火山灰の堆積や溶岩の流出により干渉性の劣化が筋状に現れている。又、位相変化画像では山の西側で隆起状の特徴が見られており、噴火と関係がありそうである。

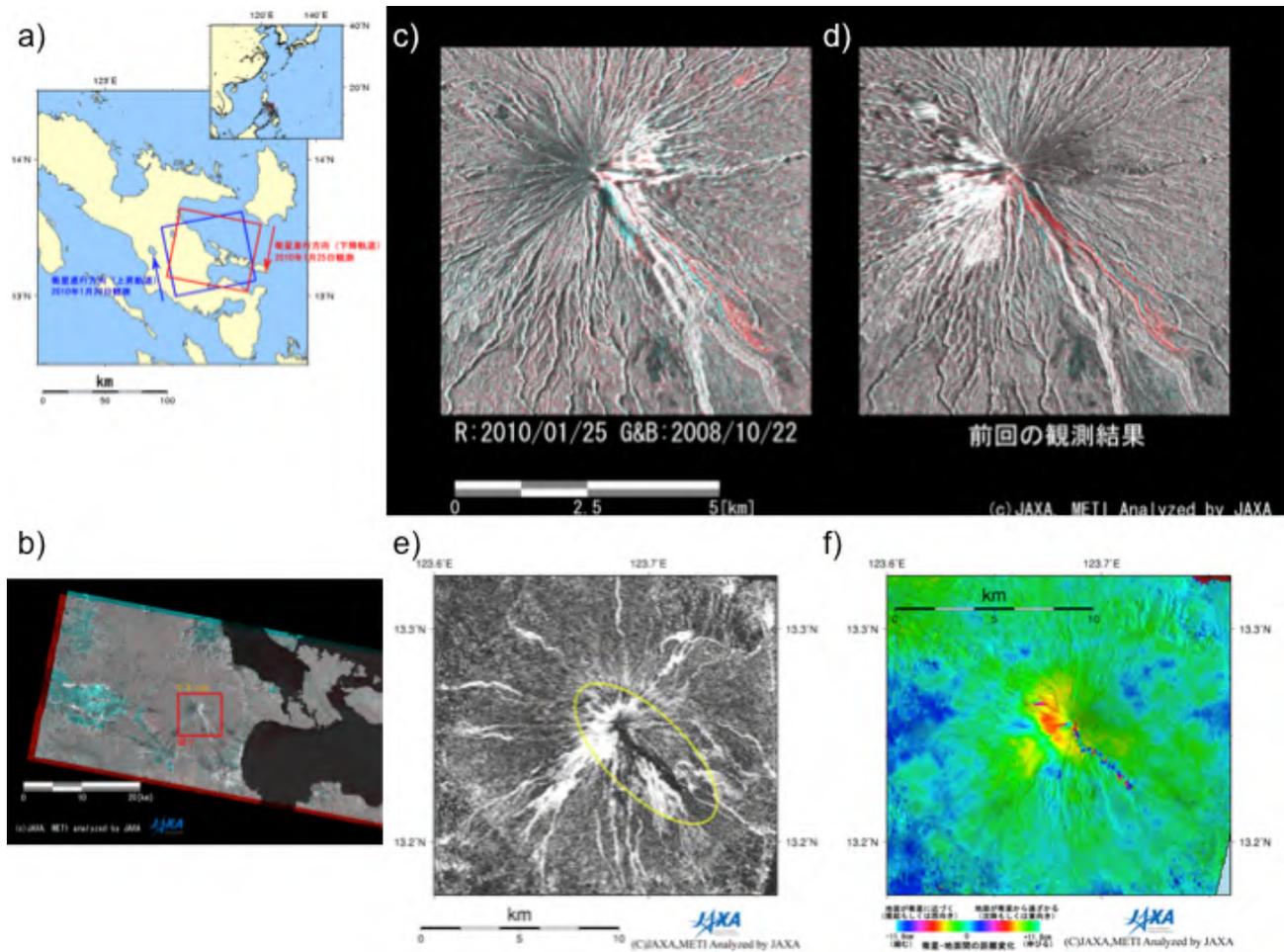


図 1.1 マヨン山噴火に関連した PALSAR 画像。a) はマヨン火山の位置を、b) は PALSAR の画像を、c) 2010 年 1 月 25 日の画像と前回観測画像との変化を赤色で、d) は前回画像である 2008 年 10 月 22 日の観測画像、e) 干渉性画像、f) 変位（位相差）画像を示す。

7. Pi-SAR-L2 の干渉性

Pi-SAR-L2 は 2012 年に開発され、以降、日本各地を中心に環境監視に使用されている。特に、災害監視は有効な観測対象であり、火山領域もその一部を占めている。前節で紹介したように、干渉機能が火山監視の一つの技術要求である。航空機を用いた繰り返し干渉は、航空機飛行経路が衛星のように直線でない為に、安定して干渉させるのが困難である。又、技術的に挑戦できるところでもある。現在、本件を開発中である。火山観測に関して注目すべき成果は得られていないが、本節で開発の現状を紹介する。図 1.2 は Pi-SAR-L2 で苫小牧を観測した時の干渉画像の一例である。観測は、2012 年 4 月 17 日に実施した。このように干渉性は非常に高い。ただ、問題は、干渉性に場所的な濃淡が見られることである。これは、マッチングが一様でないことを言っている。また、得られた DEM も非常に明瞭で、高い分解能が確認できる。現在は、比較的平坦地形での干渉を行っているが、将来的には山岳地形へ拡張をしてゆきたい。

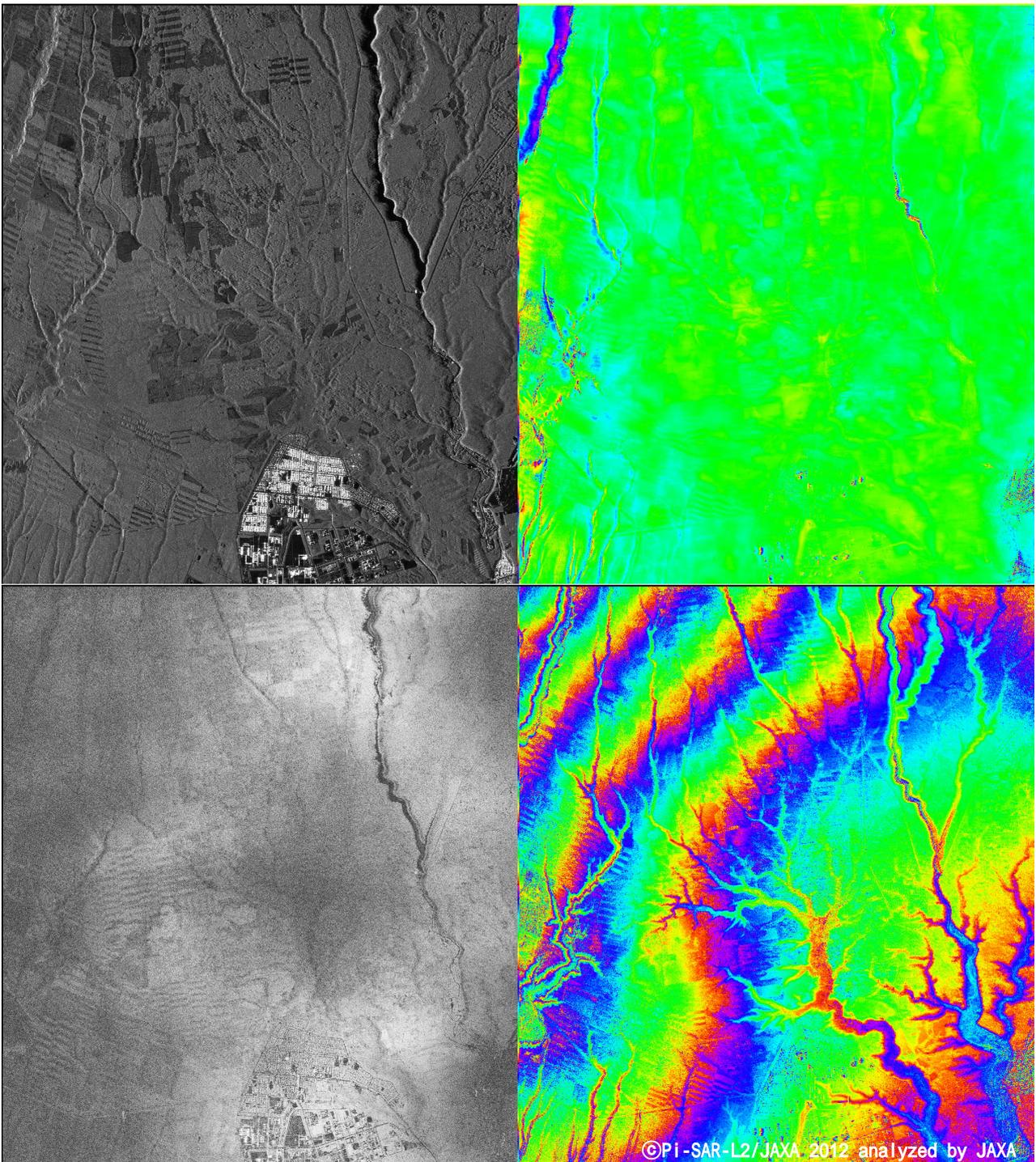


図 1.2 左上：HH 偏波の振幅画像，右上：地殻変動，左下：コヒーレンス，右下：地形情報（DEM）

8. まとめ

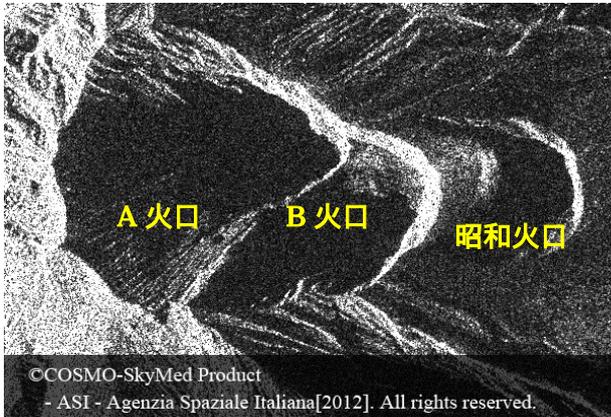
JAXA は過去の 3 年間で ALOS (PALSAR, AVNIR-2, PRISM), Pi-SAR-L2, CSK, TSX 等の複数の観測機器を用いた火山監視を行ってきた。これらの成果を高精度化しながら, ALOS-2 のデータ等を取り込んだ火山監視に応用して行きたい。

付録

COSMO-SKYMED の火口内拡大画像の時系列表示

1 . COSMO-SkyMed 観測 昭和火口拡大図

<北行軌道>



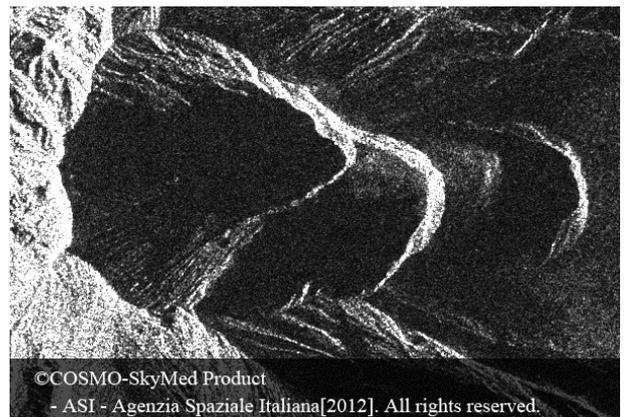
2012/6/30 6:15 (JST), Stripmap, 入射角 : 41.00m



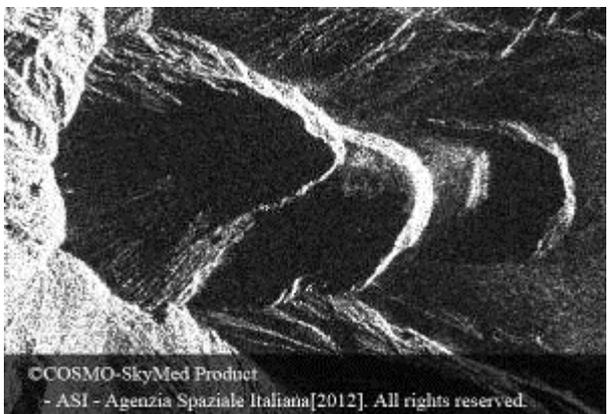
2012/7/16 6:15 (JST), Stripmap, 入射角 : 41.00m



2012/8/1 6:15 (JST), Stripmap, 入射角 : 41.00m



2012/9/2 6:15 (JST), Stripmap, 入射角 : 41.00m



2012/9/18 6:15 (JST), Stripmap, 入射角 : 41.00°



2012/10/20 6:14 (JST), Stripmap, 入射角 : 41.00°



2012/11/5 6 : 14 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °



2012/12/7 6 : 14 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °



2012/12/23 6 : 14 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °



2013/1/8 6 : 14 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °



2013/1/24 6 : 13 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °



2013/2/9 6 : 13 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °



2013/5/16 6 : 13 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °



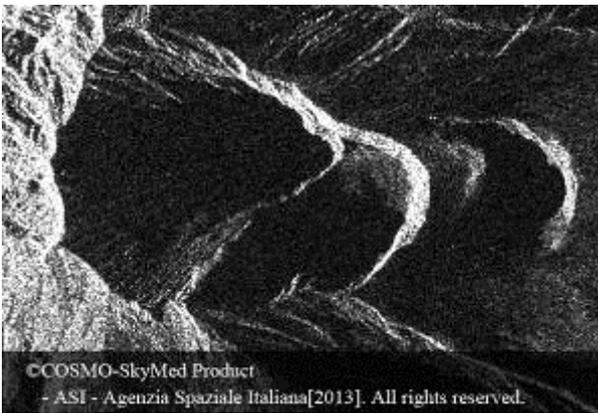
2013/6/1 6 : 12 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °



2013/6/17 6 : 12 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °



2013/7/3 6 : 12 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °



2013/9/21 6 : 12 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °

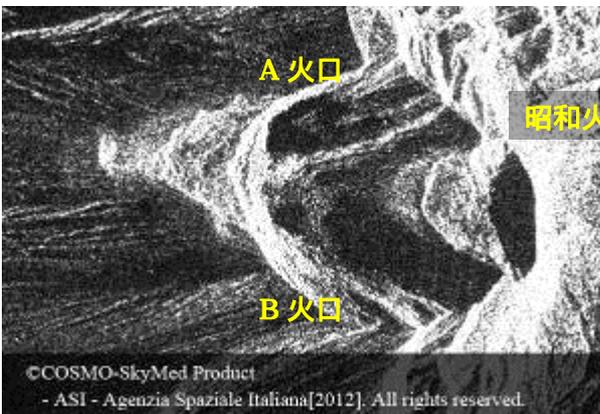


2013/10/23 6 : 12 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °

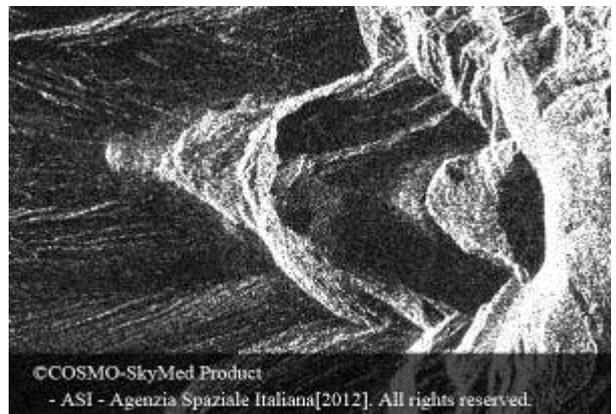


2013/12/26 6 : 11 (JST) , Stripmap, 入射角 : 41.00 °

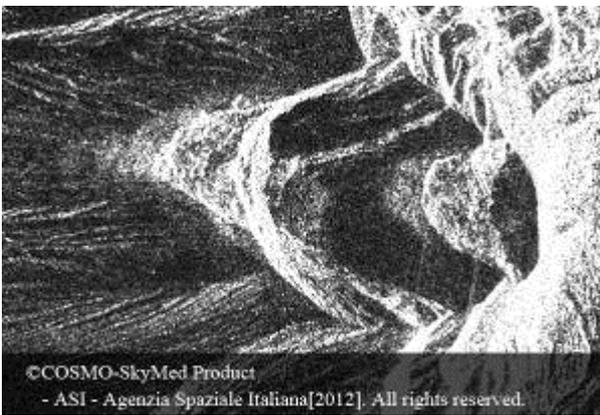
<南行軌道>



2012/9/17 18 : 13 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2012/10/3 18 : 13 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2012/11/4 18 : 13 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2012/11/20 18 : 12 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



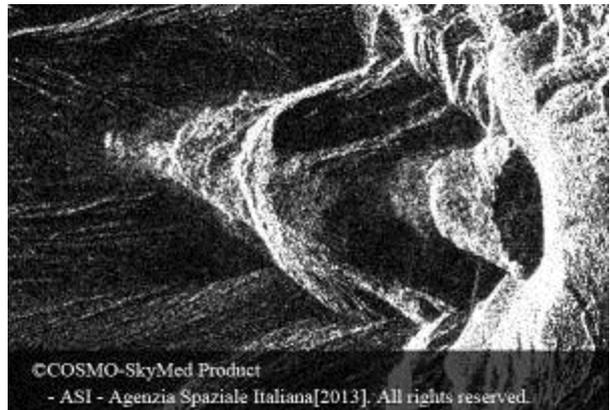
2012/12/6 18 : 12 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/1/23 18 : 12 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



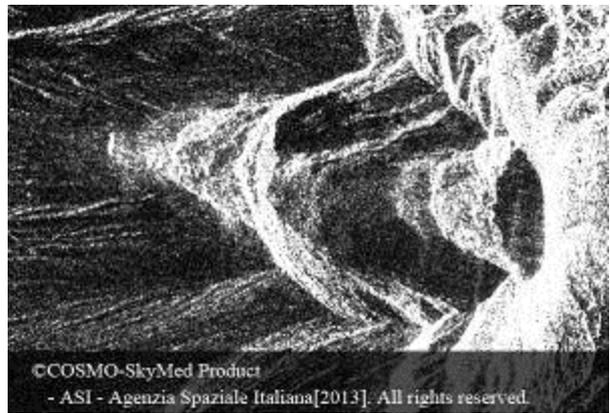
2013/2/8 18 : 12 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/5/15 18 : 11 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



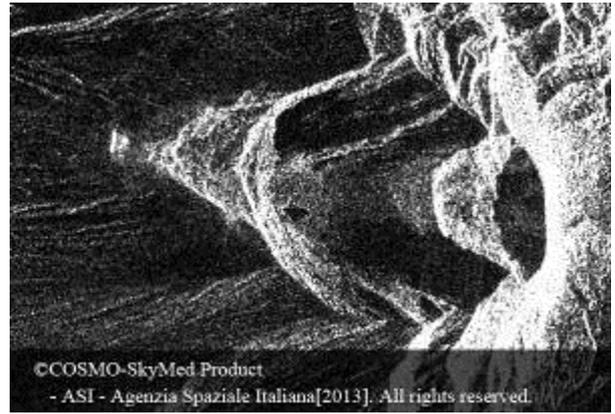
2013/5/31 18 : 11 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



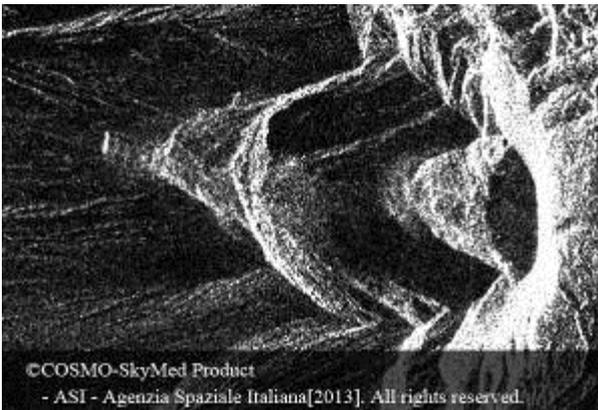
2013/6/16 18 : 11 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



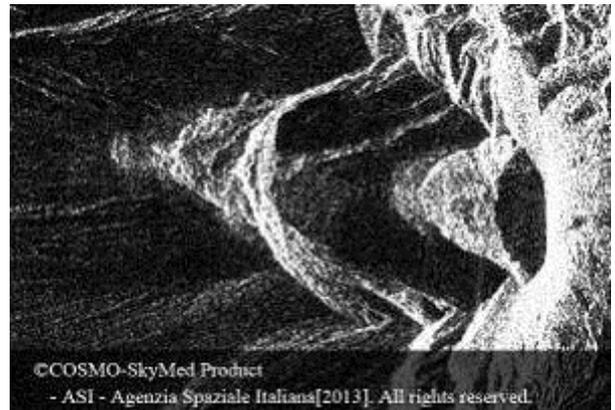
2013/7/2 18 : 11 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



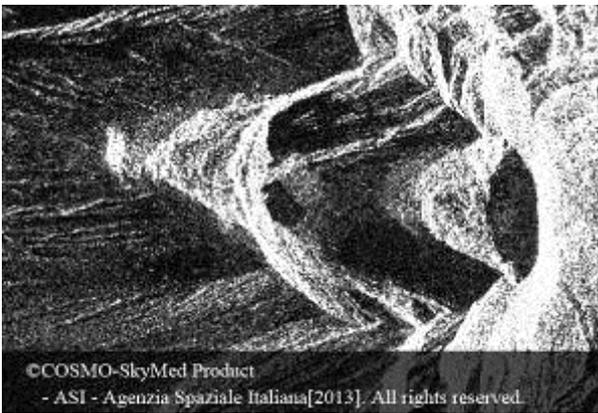
2013/7/18 18 : 11 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/8/3 18 : 11 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/8/19 18 : 11 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/9/4 18 : 10 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/9/20 18 : 10 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/10/6 18 : 10 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/10/22 18 : 10 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/11/23 18 : 10 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/12/9 18 : 10 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °



2013/12/25 18 : 10 (JST) , Stripmap, 入射角 : 31.99 °