

1.5 SAR 干渉解析による全国の火山の地殻変動監視と検出された火山性地殻変動

1.5.1 はじめに

2006 年 1 月 26 日に H-II A ロケットにより種子島宇宙センターから打ち上げられた陸域観測技術衛星 (Advanced Land Observing Satellite ; 日本名「だいち」以下, ALOS という) は, 地図作成, 地域観測, 災害状況把握, 資源探査, 技術開発を主目的とした地球観測衛星である。軌道は太陽同期準回帰軌道で周期は約 90 分, 高度は 691.65 km (赤道上空) で回帰日数は 46 日である。ALOS には 2 つの光学センサ (PRISM, AVNIR-II) と 1 つのマイクロ波センサ (PALSAR) が搭載されている。

PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping ; パンクロマチック立体視センサ, 以下 PRISM という) は, 地表を 2.5 m の分解能で観測し, 衛星の進行方向に対して, 前方視, 直下視, 後方視の 3 方向の画像を同時に取得することができ, これらの組み合わせにより高精度の数値標高モデル (DSM : Digital Surface Model) の作成に利用される。観測モードは全部で 9 通りあり, 衛星の進行方向の直角方向 (Cross-track direction) に対して鉛直下方向から $\pm 1.5^\circ$ のポインティングが可能である。観測幅は直下視のみの場合は 70 km, 3 方向視モードの場合は 35 km である。

AVNIR-II (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer Type 2 ; 高性能可視近赤外放射計 2 型, 以下 AVNIR-II という) は, ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite ; 地球観測プラットフォーム技術衛星 ; 日本名「みどり」) に搭載された AVNIR の分解能を更に向上させたもので, 可視, 近赤外域の 4 つの観測帯で, 陸域や沿岸域を観測することで, 地域観測などに必要な土地被覆分類図や土地利用分類図などの作成を行う。また, 鉛直下方向から $\pm 44^\circ$ のポインティング機能を有しており, 迅速な災害状況の把握のために活用されている。

PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar ; フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダー, 以下 PALSAR という) は, 我が国最初の SAR 衛星である JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite-1 ; 地球資源衛星「ふよう 1 号」) に搭載された合成開口レーダーの機能・性能を向上させたもので, 高分解能観測モードや, 観測幅を可変することで広い観測幅を確保する観測モード (Scan-SAR) が可能である。また, 垂直偏波と水平偏波を送受信で組み合わせることにより, 対象物の状態を判別する偏波観測モード機能が搭載されている。透過性の良い L バンド波長は, 日本のように森林が多い地域においても高感度の地表面観測が可能であり, コヒーレント性を使った干渉解析による地殻変動観測への有効性が知られている (例えば, 古屋, 2006 や小澤, 2006)。これまでに, 地震時や火山活動に伴う地殻変動検出の例がいくつか報告されている (例えば, 小澤ほか, 2003, Fukushima *et al.*, 2008, Takada *et al.*, 2009 や Ozawa *et al.*, 2011 など)。

気象研究所では, ALOS に搭載されているこれらの観測センサを使い, 火山活動の監視・観測のリモートセンシングのツールとして有効か否かについて検証を試みた。特に PALSAR を使った SAR 干渉解析による地殻変動検出については北方領土を含めた国内活火山周辺の解析を行うとともに, 同じ手法を用いて海外の火山についても解析を行った (海底火山を除く)。

1.5.2 SAR 干渉解析の原理

詳細な理論や処理手法については, 島田 (1999), 藤原・飛田 (1999), Hanssen (2001) や地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2011) などに記載されているが, 以下, 要点について簡単に述べる。まずは干渉解析について述べる前に, SAR の原理について触れる。

SAR による観測の原理は, 衛星の飛行方向 (azimuth あるいは along-track) に対して直行方向 (range あるいは cross-track) の鉛直右斜め下 (line of sight : 視線) の地面側に対してマイクロ波を発射する。この信号は地上からの反射波として

約 5 ミリ秒後に返ってくる。ALOS では、このような信号を毎秒約 2000 回という頻度で繰り返し発射し、同じ繰り返し頻度で受信している。こうして得られた受信信号列を相関処理することで、SAR により観測されたデータが画像となる。なお、SAR 画像の明るさは地面の反射係数に比例し、分解能の大きさは azimuth 方向では衛星のアンテナ長に比例し、range 方向には帯域幅に反比例する。ALOS の場合には、通常観測モードで約 70 km 四方の 10 m 程度の空間分解能を持つ SAR 画像が得られる。また、ALOS に限らず SAR 観測の場合は距離と方向の計測 (range-doppler 観測) の影響から衛星直下の観測はできない。さらに、画像化する際にはレイオーバー、シャドウイング、フォアショートニングなどにより、画像にゆがみが生じるため、地図等に合わせ込み表示する場合には更に補正が必要である。

SAR 画像は振幅と位相で表現されることから、異なる 2 時期に観測された画像について、これらの変化を抽出することが可能である。SAR 干渉解析とは、得られた 2 回の画像データについて正確な位置合わせを行った後、位相の変化を検出することである。

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{def} + \Delta\phi_{orbit} + \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{noise} \quad (1)$$

右辺の各項については次の通りである。

$\Delta\phi_{def}$: 実際の地殻変動による位相差 (変動縞)。

$\Delta\phi_{orbit}$: 衛星軌道のズレによる位相差 (軌道縞)。

$\Delta\phi_{topo}$: 地形標高による位相差 (地形縞)。

$\Delta\phi_{noise}$: その他のノイズ。

実際の解析においては、(1) 式で示したように、2 回の観測時における衛星軌道の不一致や地形誤差を原因とするノイズが含まれている。このため、実際の地殻変動を得る作業は (1) の右辺第 1 項 $\Delta\phi_{def}$ 以外の項について、除去する処理であることを指す。本報告では、データの画像化や上記の処理について、SIGMA-SAR 解析ソフト (Shimada, 1999) を使用し、得られた結果の表示については GMT (Wessel and Smith, 1998) を使用した。

1.5.3 SAR 干渉解析の結果

火山噴火予知連絡会では、衛星データを利用した火山活動の評価及び把握を目的として衛星解析グループ (通称、火山 WG) を平成 18 年 11 月に設置し、気象庁と独立行政法人宇宙航空研究開発機構が「陸域観測技術衛星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協定」を締結し、計画書を策定した上で、火山活動評価等における衛星データの利用方法の調査・研究を実施した。気象研究所からは、「ALOS データを用いた離島火山等のモニタリング」、「PRISM を利用した噴気のマッピングとモニタリング」の 2 課題について登録し、ALOS データを用いた解析を行い、この計画に参加した。なお、本取組は当初実証実験として開始されたが、平成 21 年度に後期利用段階となったことに伴い、個別課題についても各々「ALOS データを用いた全国の活火山の地殻変動モニタリング」、「ALOS データを用いた全国の活火山の噴気マッピングとモニタリング」と変更し継続参加した。しかしながら、平成 23 年度初めに電源システムの故障により ALOS の運用が停止されたことから、平成 24 年度からはアーカイブデータの利用を中心とした共同研究になった。このため、気象庁地震火山部火山課を代表者とし、「SAR を用いた火山活動評価への利用の検討」と題して全国を 5 つの地域に分けて登録し、更に「熱活動や噴気活動の把握、噴出物調査への利用調査」も個別課題登録し、ALOS データを活用した火山活動の評価への利用について検討を行った。

本章では、主に 2 時期のデータを用いた SAR 干渉処理について述べる。ALOS/PALSAR の回帰日数は、先に述べたように 46 日であるが、緊急観測や衛星のメンテナンスなどの影響により、必ずしも該当地域が回帰ごとに撮像されてはならない。気象研究所では、撮像されたデータのうち、干渉処理に影響の大きい垂直軌道間距離 (Bperp) を基準にし、およそ 1 km 以内のペアについて解析を行った。しかしながら、これらのペアにおいても電離層や大気遅延による影響を受けた可能性のある結果も存在する。本報告では、各々の火山地域 (北方領土を含む) における、比較的長期間

のペアについての解析結果を示す。なお、火山活動に伴うと思われる位相差が検出された一部の事例については、得られた地殻変動量から圧力源の推定を試みた。また、海外の火山の事例についてもいくつか解析結果を紹介する。

1.5.4 国内の活火山周辺における SAR 干渉解析

国内の活火山周辺における SAR 干渉解析結果について、Fig.1.5.1 に示す。近接している活火山についてはまとめて結果を示している。その結果、幾つかの火山について火山活動に伴うと思われる位相差が検出された。以下、得られた結果について主な特徴を示す。

アトサヌプリ：山頂の西南西約 2 km 付近において、衛星から遠ざかる方向の位相差が認められた。

十勝岳：62-2 火口において、局所的な衛星に近づく方向の位相差が認められた。

樽前山：山頂溶岩ドームにおいて、局所的な衛星に近づく方向の位相差が認められた。

有珠山：大有珠や西山火口周辺において、衛星から遠ざかる方向の位相差が認められた。

吾妻山：大穴火口周辺において、局所的な衛星に近づく方向の位相差が認められた。

安達太良山：沼ノ平火口周辺において、局所的に衛星から遠ざかる方向の位相差が認められた。

伊豆大島：三原山山頂火口において、局所的に衛星から遠ざかる方向の位相差が認められた。

三宅島：山頂カルデラ周辺において、衛星から遠ざかる方向の位相差が認められた。

硫黄島：島全体が衛星に近づく方向の位相差が認められた。その位相差は海岸付近の方が島の中央部よりも大きいことが分かった。

九重山：星生山付近において、衛星から遠ざかる方向の位相差が認められた。

阿蘇山：中岳周辺において、局所的な衛星に近づく方向の位相差が認められた。

雲仙岳：平成新山周辺において、局所的に衛星から遠ざかる方向の位相差が認められた。

霧島山：新燃岳周辺において、衛星から遠ざかる方向の位相差が認められた。

桜島：島の北側において、衛星に近づく方向の位相差が認められた。

口永良部島：新岳周辺において、局所的な衛星に近づく方向の位相差が認められた。

1.5.5 主な活火山周辺における詳細な SAR 干渉解析結果

Fig.1.5.1 に示した活火山周辺の SAR 干渉結果のうち、幾つかの火山について以下のとおり詳細を示す。

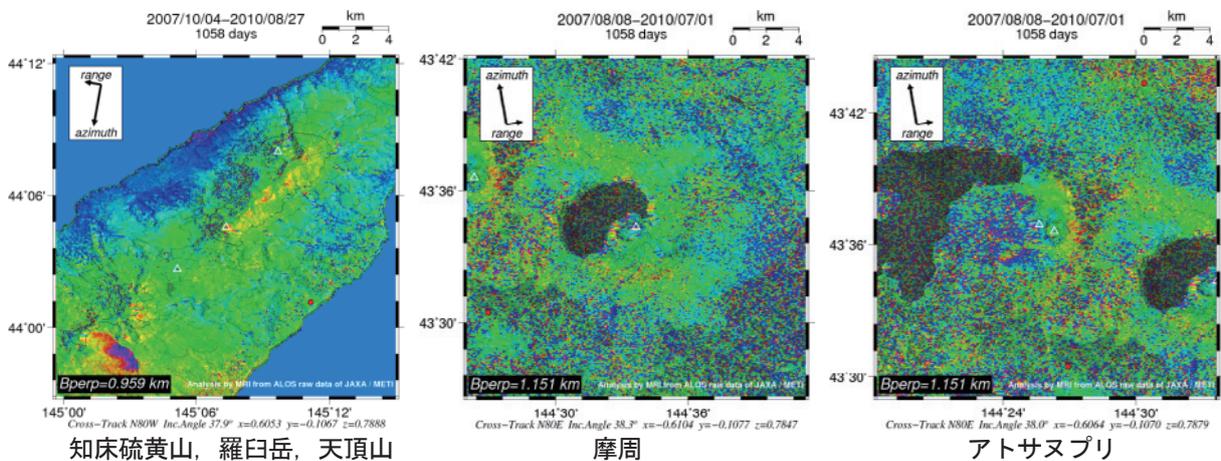


Fig. 1.5.1 SAR interferograms around active volcanoes in Japan.

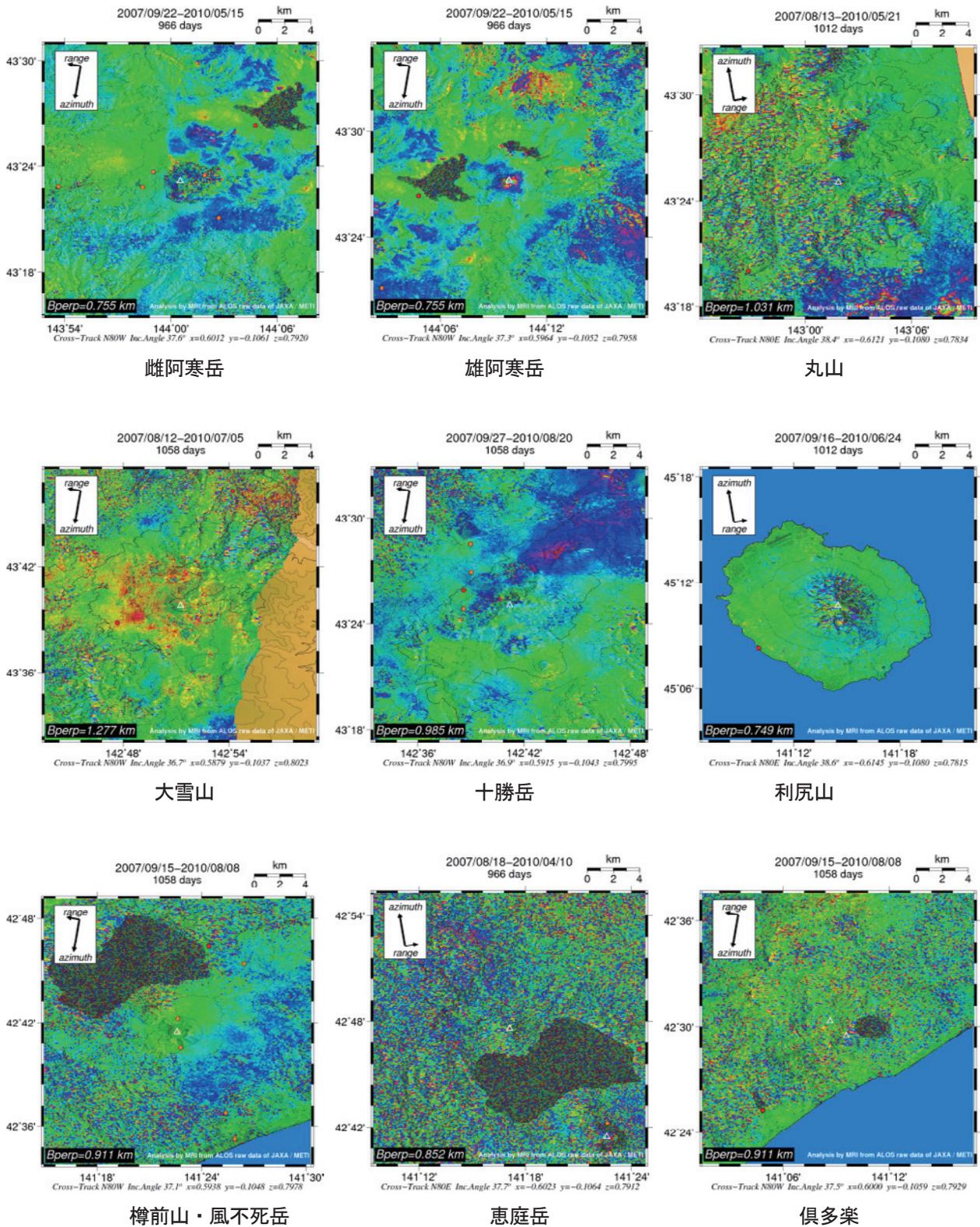


Fig. 1.5.1 (Continued)

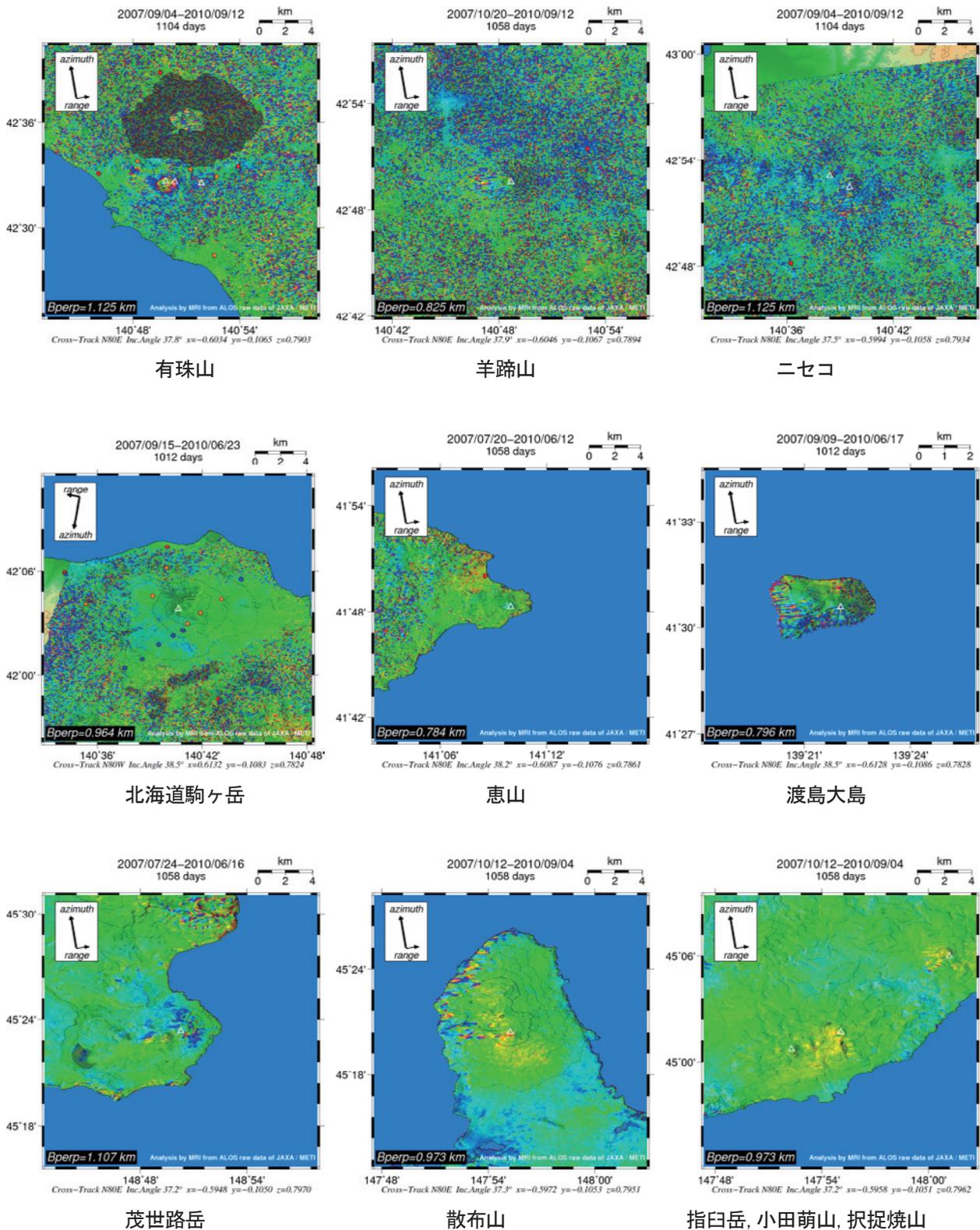


Fig. 1.5.1 (Continued)

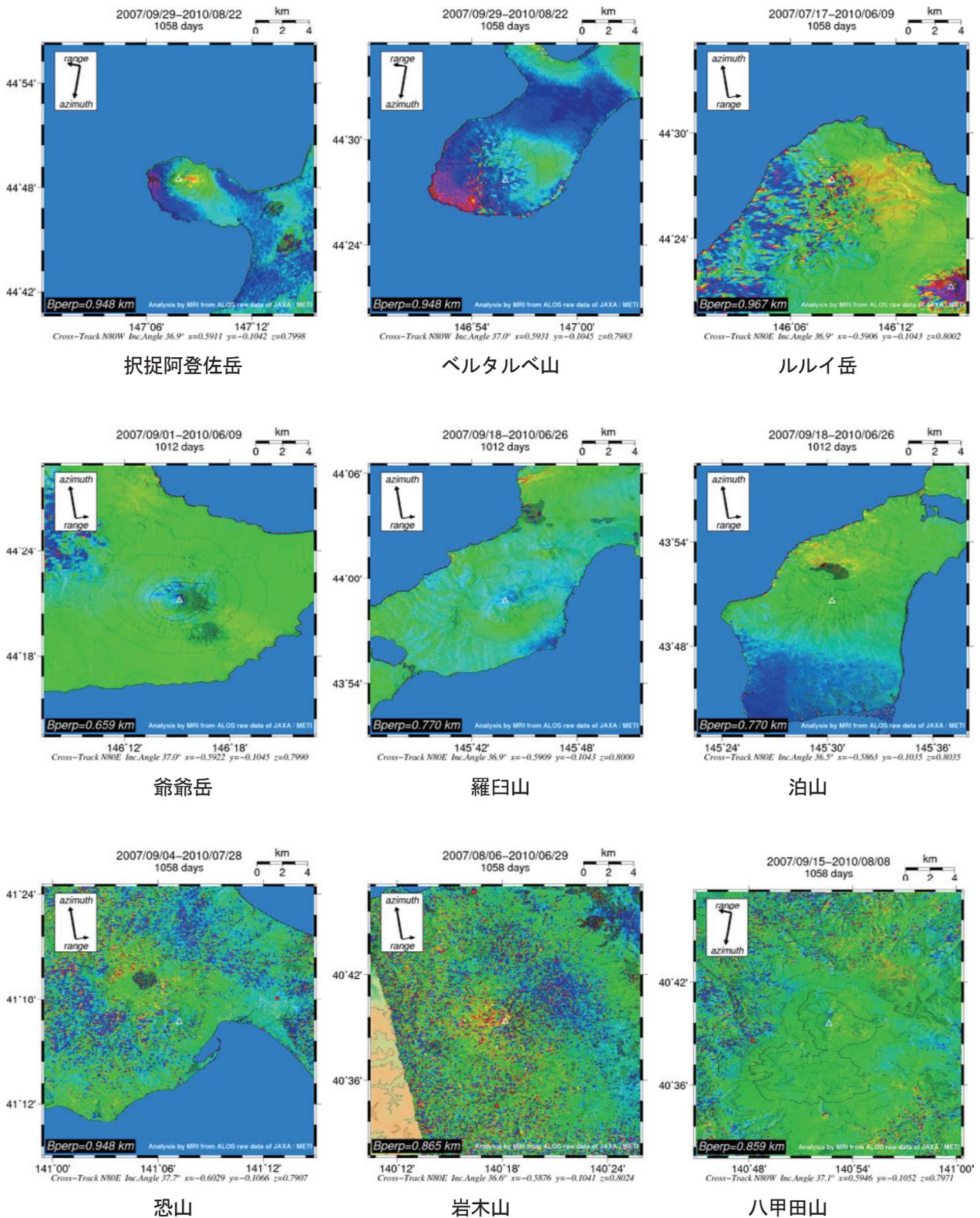


Fig. 1.5.1 (Continued)

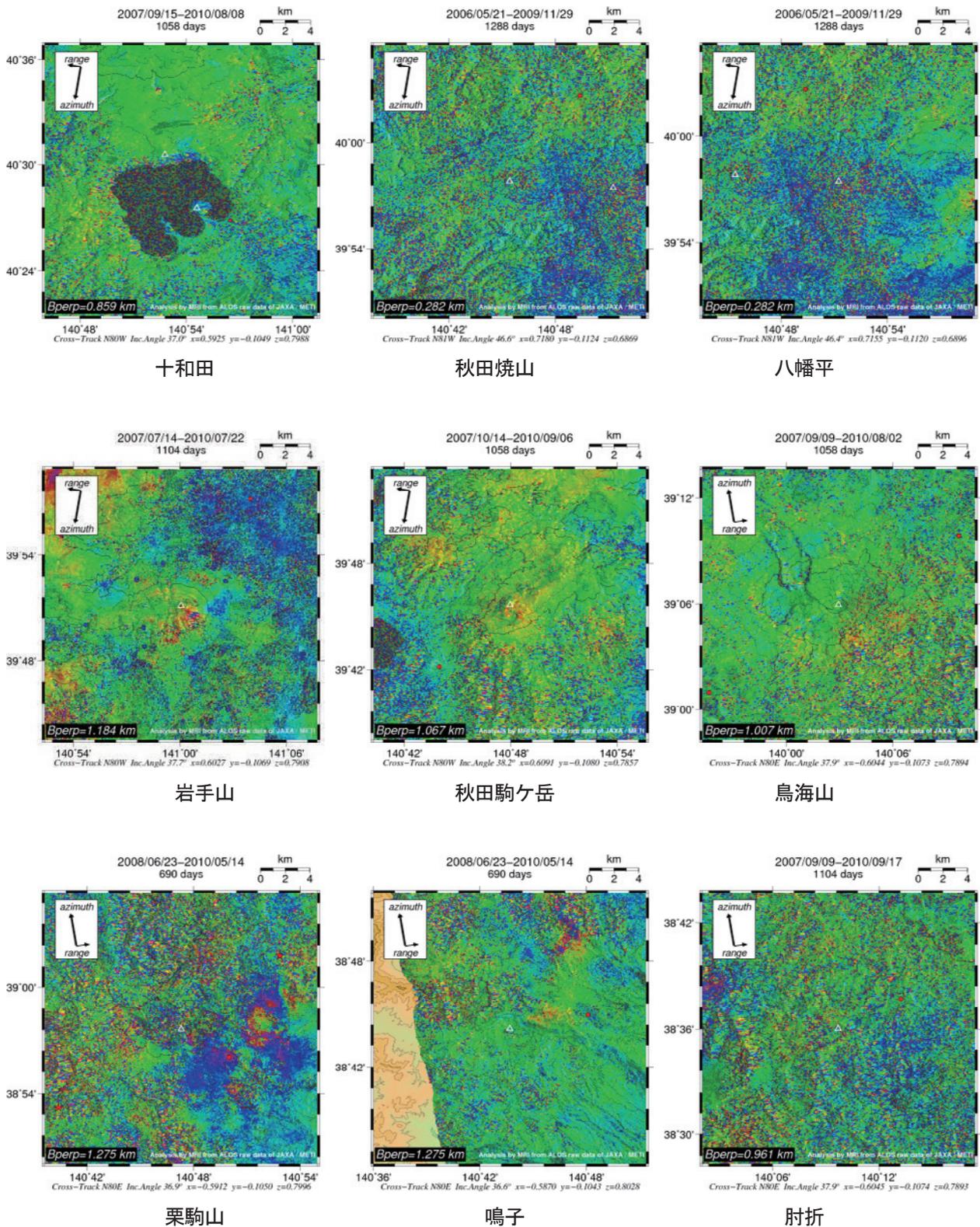


Fig. 1.5.1 (Continued)

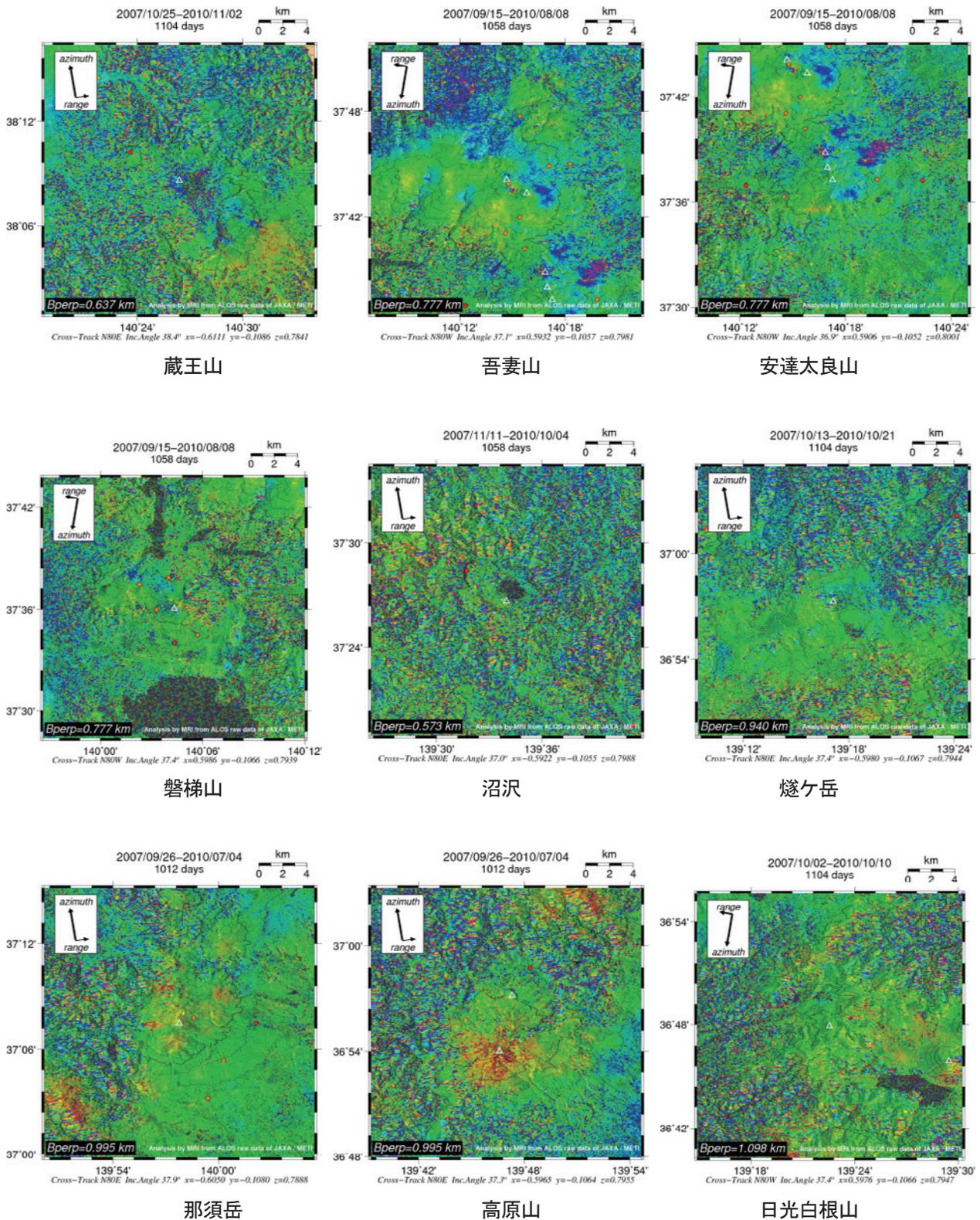


Fig. 1.5.1 (Continued)

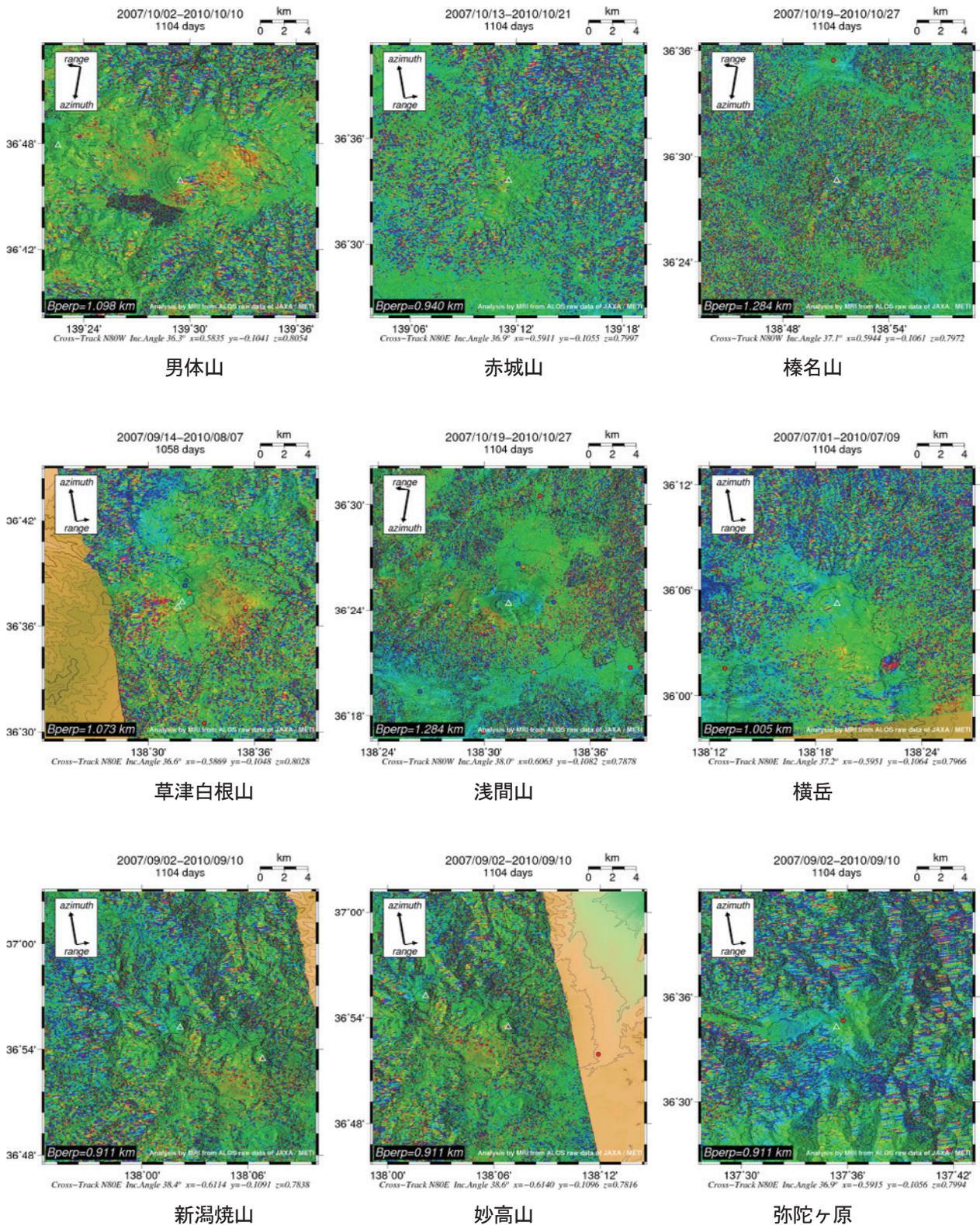


Fig. 1.5.1 (Continued)

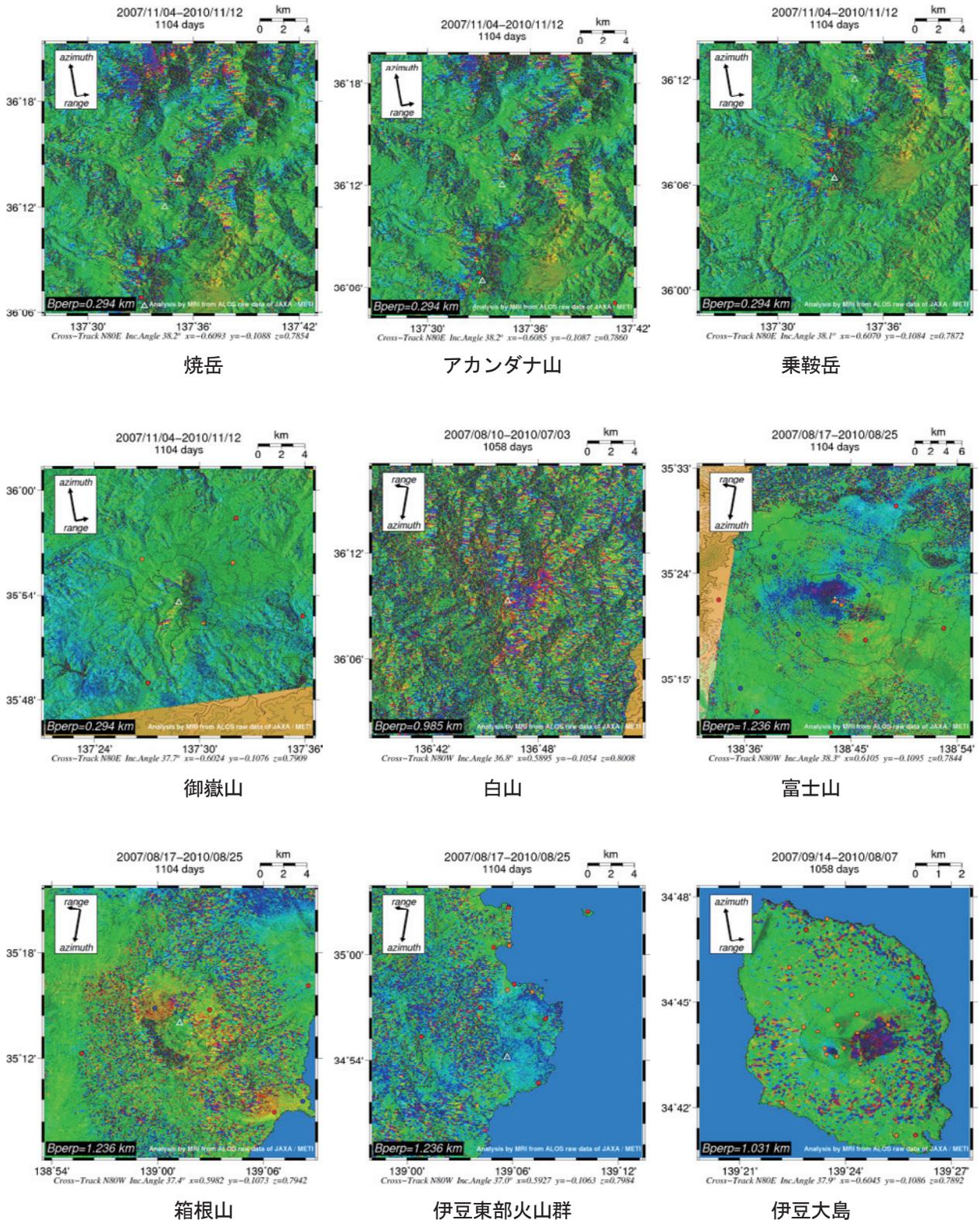


Fig. 1.5.1 (Continued)

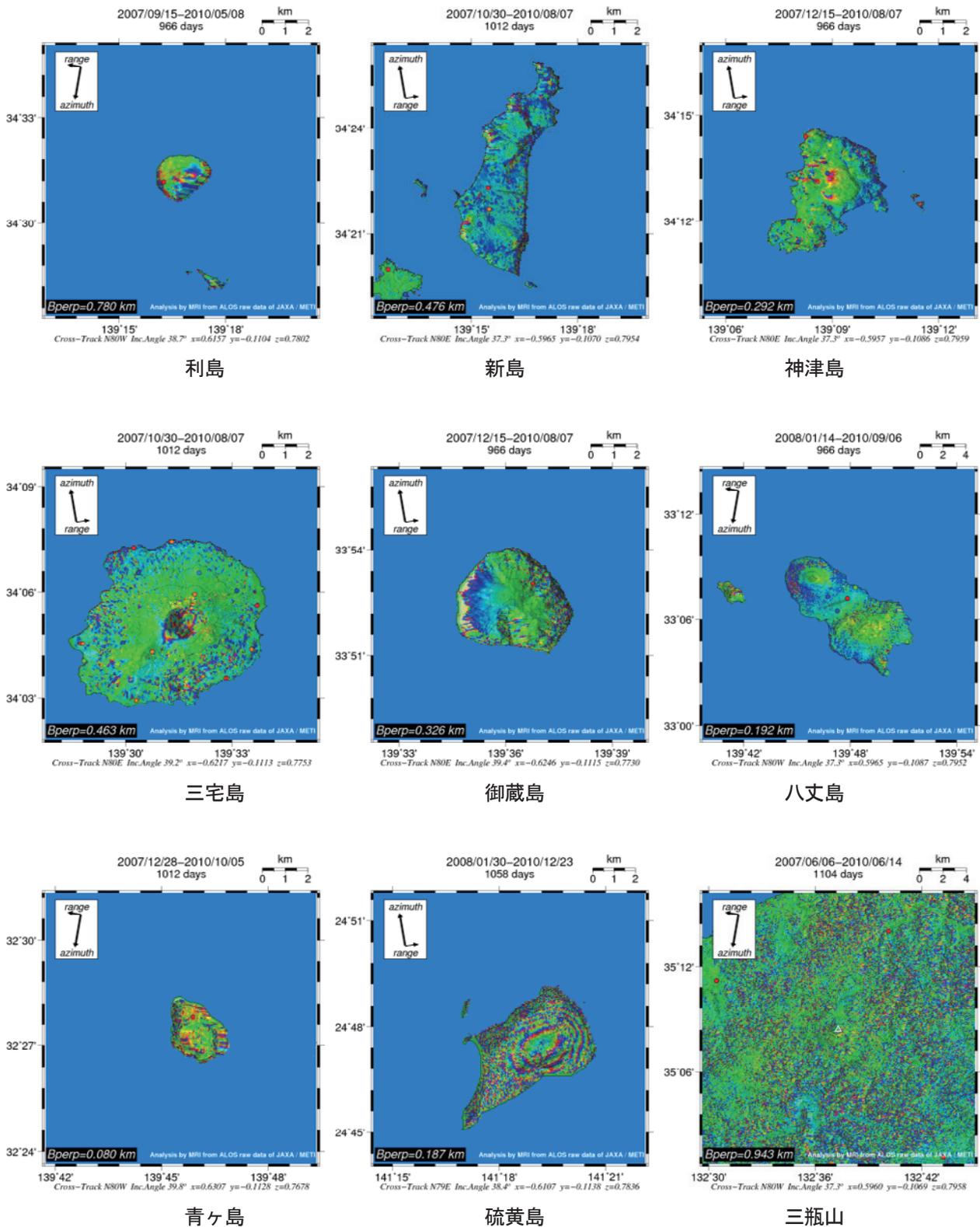


Fig. 1.5.1 (Continued)

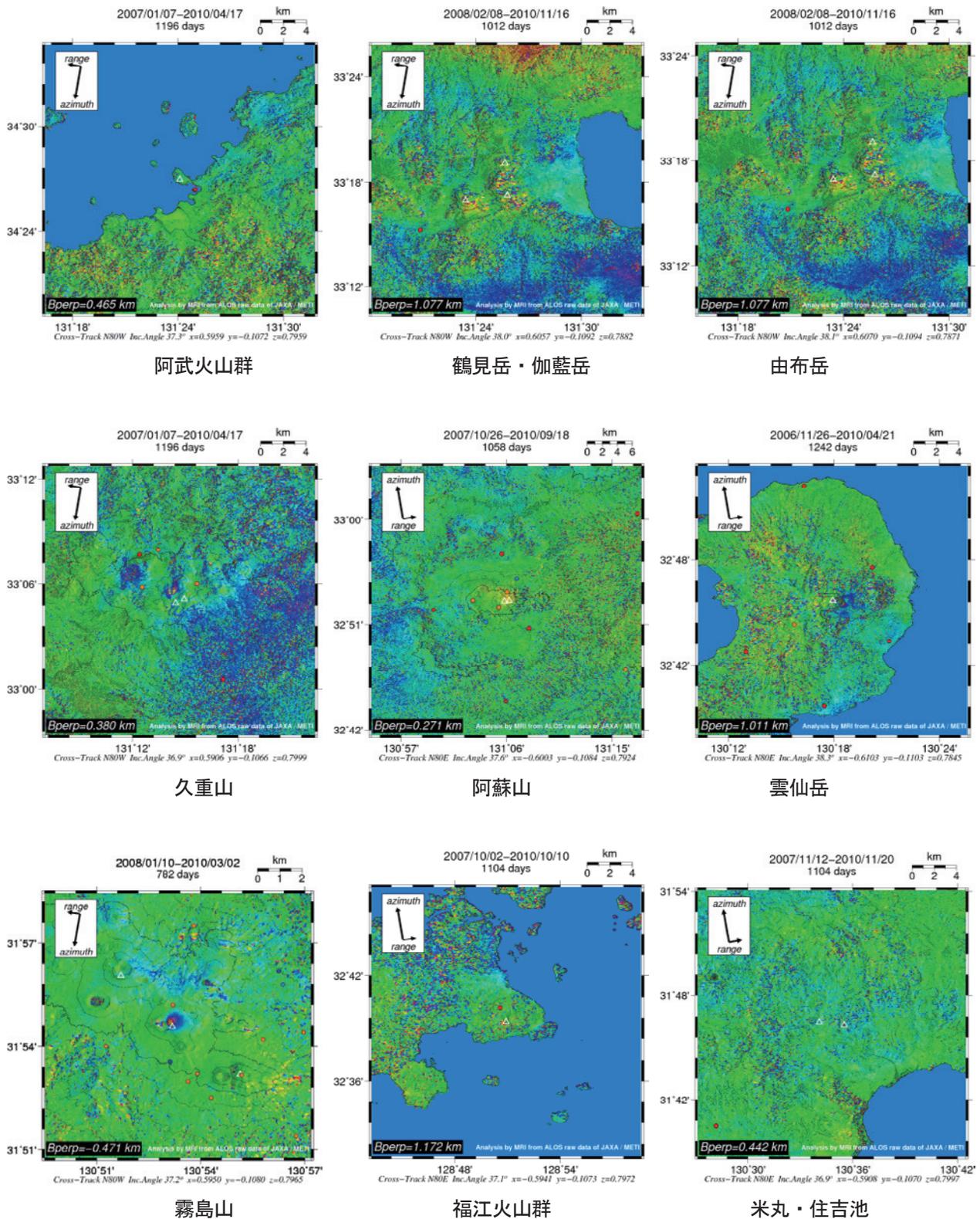


Fig. 1.5.1 (Continued)

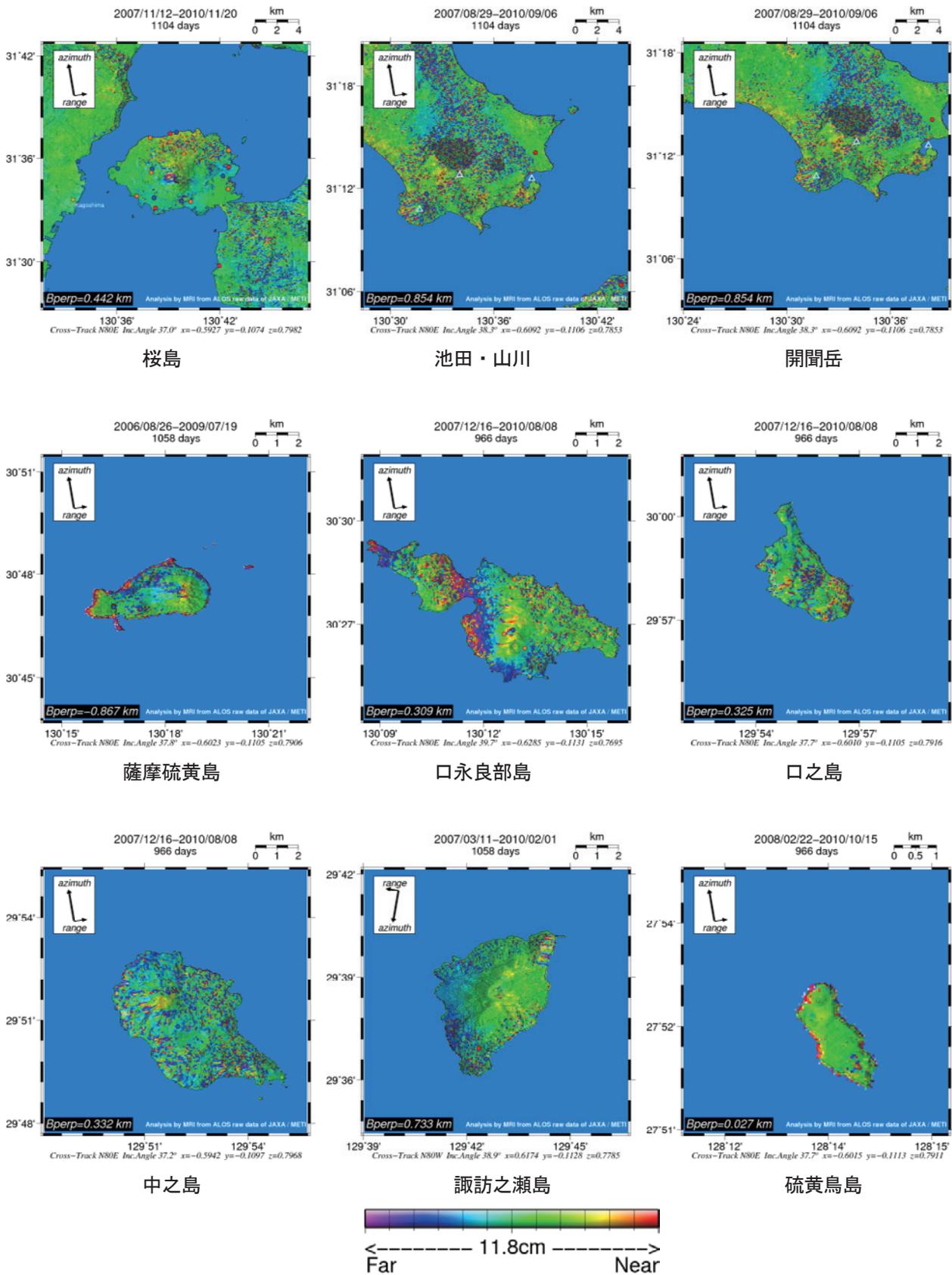


Fig. 1.5.1 (Continued)

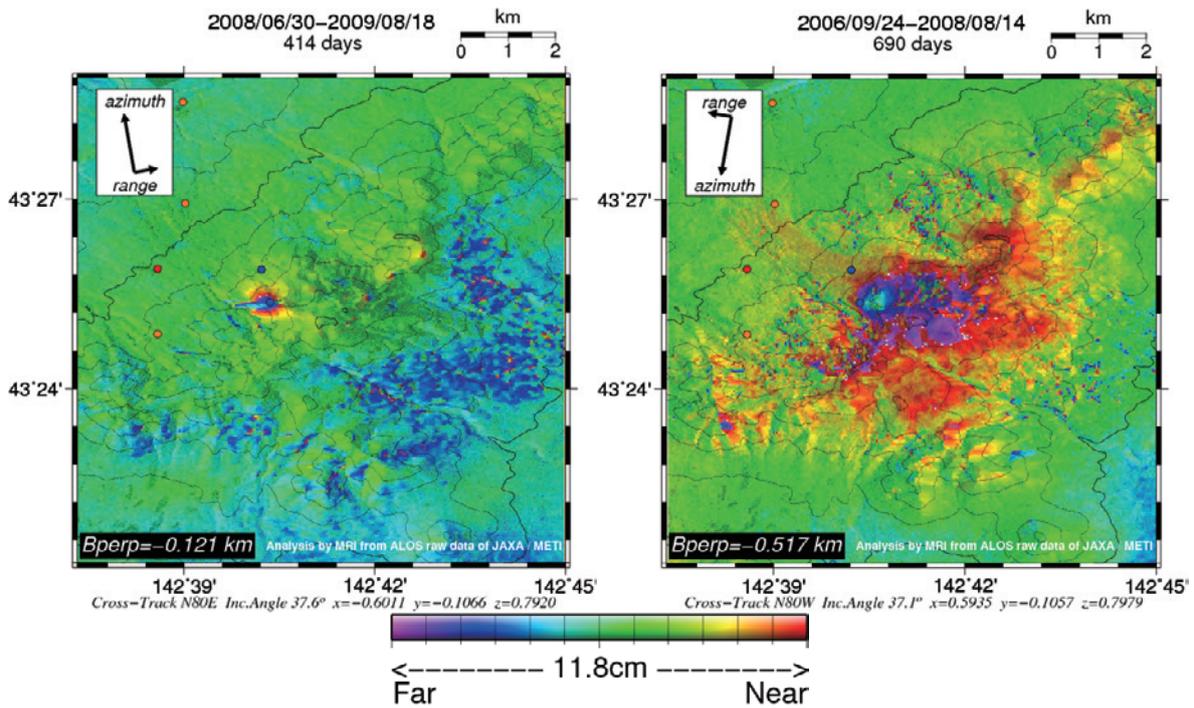


Fig. 1.5.2 SAR interferograms around Tokachidake. Dates and orbits are shown on each image. Symbols in the SAR interferograms: orange circles, red circle and blue circles represent the GPS observation station of JMA, GSI and GSH, respectively.

1.5.5.1 十勝岳

十勝岳では、気象庁ほかによる GPS 観測などにより、2006 年 9 月以降 62-2 火口浅部の膨張を示す結果が報告されている。本報告では、2006 年 9 月 24 日と 2008 年 8 月 14 日の約 2 年間における南行軌道と 2008 年 6 月 30 日と 2009 年 8 月 18 日の約 1 年間における北行軌道の撮像ペアを用いて SAR 干渉解析を行った。その結果、各々の解析結果で 62-2 火口周辺において衛星に近づく方向の位相差が得られ、火山活動に伴うと考えられる局所的な地殻変動が得られた (Fig.1.5.2)。ただし、南行軌道の解析結果には、十勝岳山頂付近全体に大気遅延に伴うと思われる位相差も重畳している可能性があり変位量の取り扱いについては注意が必要である。

1.5.5.2 吾妻山

吾妻山では、2001 年頃から地震活動の活発化と静穏化が周期的に繰り返している。気象庁仙台管区気象台火山監視・情報センターの観測によれば、2002 年以降の山頂を中心とした GPS 観測で、地震活動に同期した膨張と収縮の傾向を示す地殻変動が観測されている (山崎ほか, 2008)。本報告では、2006 年 7 月 6 日と 2008 年 7 月 11 日の約 2 年間の南行軌道における撮像ペアを用いて SAR 干渉解析を行った。その結果、大穴火口周辺において局所的な衛星に近づく方向の位相差 (約 10 cm) を得た (Fig.1.5.3)。

火山用地殻活動解析支援ソフトウェア (福井ほか, 2010。以下, MaGCAP-V という。) を用いた圧力源計算によれば、これら得られた変動量は球圧力源 (Mogi, 1958) を仮定した場合には、大穴火口直下の深さ約 290 m に約 $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ の体積増加量を仮定すれば、説明可能であることが分かった。この結果は、ほぼ同時期に火口周辺で実施された GPS キャンペーン観測から推定された圧力源の水平位置と一致しており、深さ (約 320 m) や体積増加量 (約 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^3$) についても概ね一致していることが分かった。

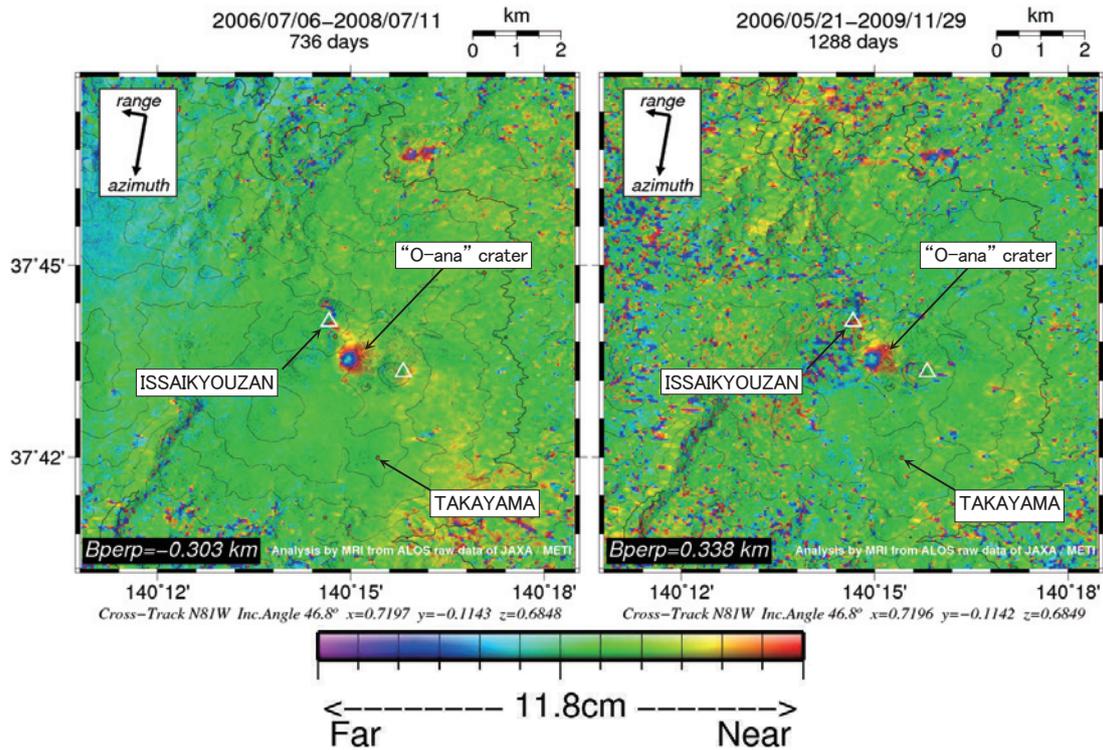


Fig. 1.5.3 SAR interferograms around the O-ana crater of Azumayama. Dates and orbits are shown on each image.

1.5.5.3 霧島山（新燃岳）

霧島山（新燃岳）では2011年1月19日に噴火活動が始まり、26日には本格的なマグマ噴火となった。噴火活動は同年9月を最後に小康状態となっているが、一連の活動により噴火前に山頂火口内に存在していた火口湖は消滅し、溶岩が蓄積している状態である。本報告では、これら一連の火山活動について噴火前と後、更に噴火活動中に撮像された各データを用いて、SAR干渉解析を行った。Fig.1.5.4にこれらの結果を示す。これによれば、噴火前のペアでは、韓国岳から防災科学技術研究所のGPS観測点「万膳」付近までを中心に、北行軌道及び南行軌道ともに衛星に近づく方向に4 cmから5 cm程度の位相差が認められた。これに対し、2011年1月下旬の噴火時を挟むペアでは、やはり同じ場所中心として、北行軌道で最大約6 cm程度、南行軌道で約3 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、1月下旬の噴火以降のペアでは、霧島山の山頂付近において北行軌道で数 cm程度の衛星に近づく方向の位相差が認められた。

これらの結果を用いて、MaGCAP-V（福井ほか，2010）を使った球状圧力源（Mogi,1958）を仮定した圧力源（収縮源）計算によれば、噴火前には、新燃岳山頂の西北西約5 kmの場所において、約6.1 kmの深さで、約 $6.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積増加量を、また噴火後には、ほぼ同じ場所において、約7.2 kmの深さで、約 $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ の体積減少量を仮定することで各々の位相差を説明できることが分かった（Fig.1.5.5）。

また、噴火活動により蓄積された山頂火口内の溶岩の状況については、SAR衛星の観測により得られる強度画像による比較が有効な手段である。火山噴火予知連絡会の衛星解析グループの提案・要求により、噴火直後には多くのデータが取得された。LバンドSARは天候や昼夜に関係なく、対象とした領域の強度画像を得ることができる。また、LバンドSARは噴煙を透過してデータを得ることができるため、噴火時等の緊急時においても火山に近づいて観測するような危険を冒す必要がなく、火山活動に伴う地表面変化の判読に有効である。詳しくは第1.6章で述べる。

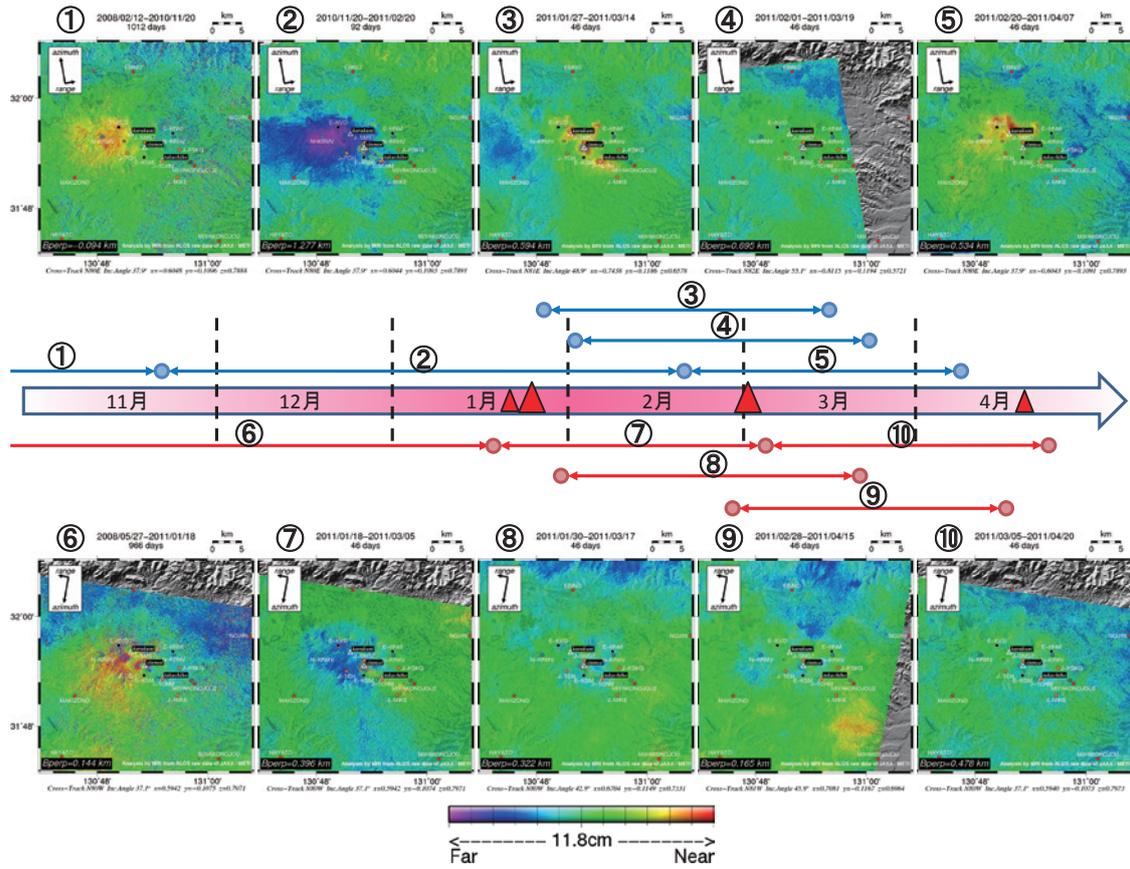


Fig. 1.5.4 SAR interferograms from before and after the eruption of Kirishimayama. Upper images are from ascending orbits and lower images are from descending orbits; orange circles, red circle, blue circles and black circles represent the GPS observation station of JMA, GSI, NIED and ERI, respectively. Time spans represented by each image are shown in the timeline.

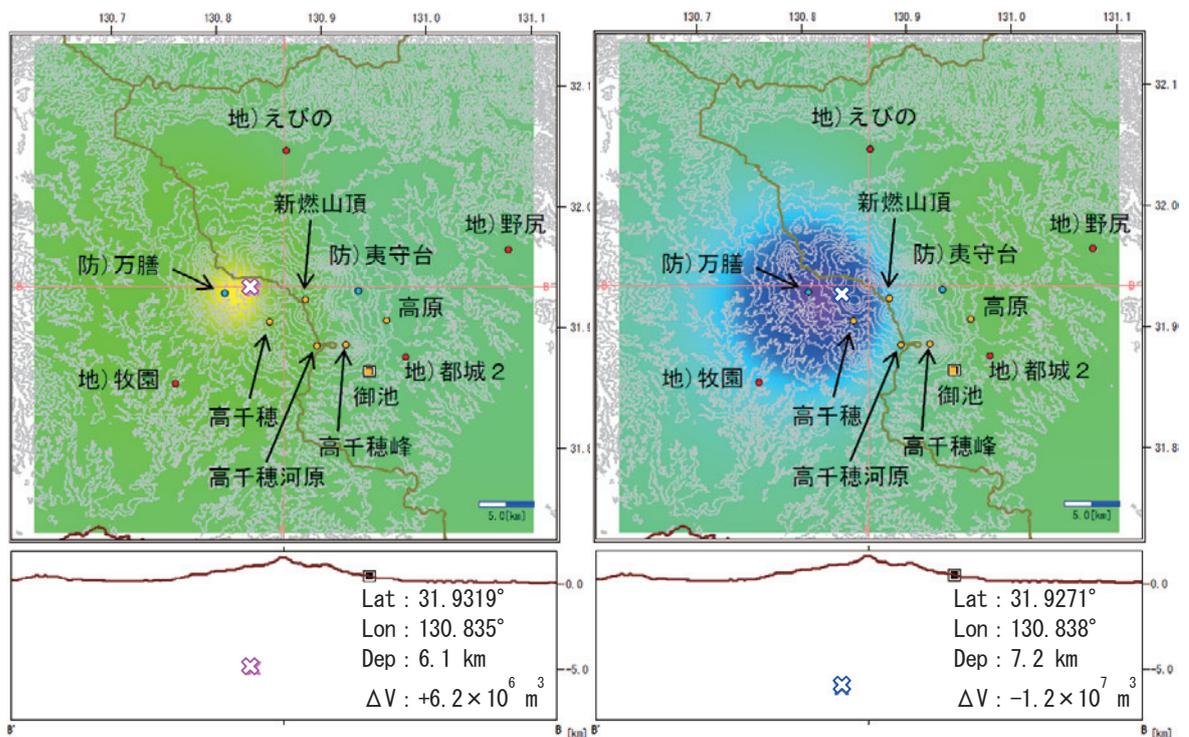


Fig. 1.5.5 SAR interferograms of Kirishimayama modeled using MaGCAP-V software; (left) 12 February 2008 to 20 November 2010 and (right) 20 November 2010 to 20 February 2011. Symbols: same as Fig. 1.5.4.

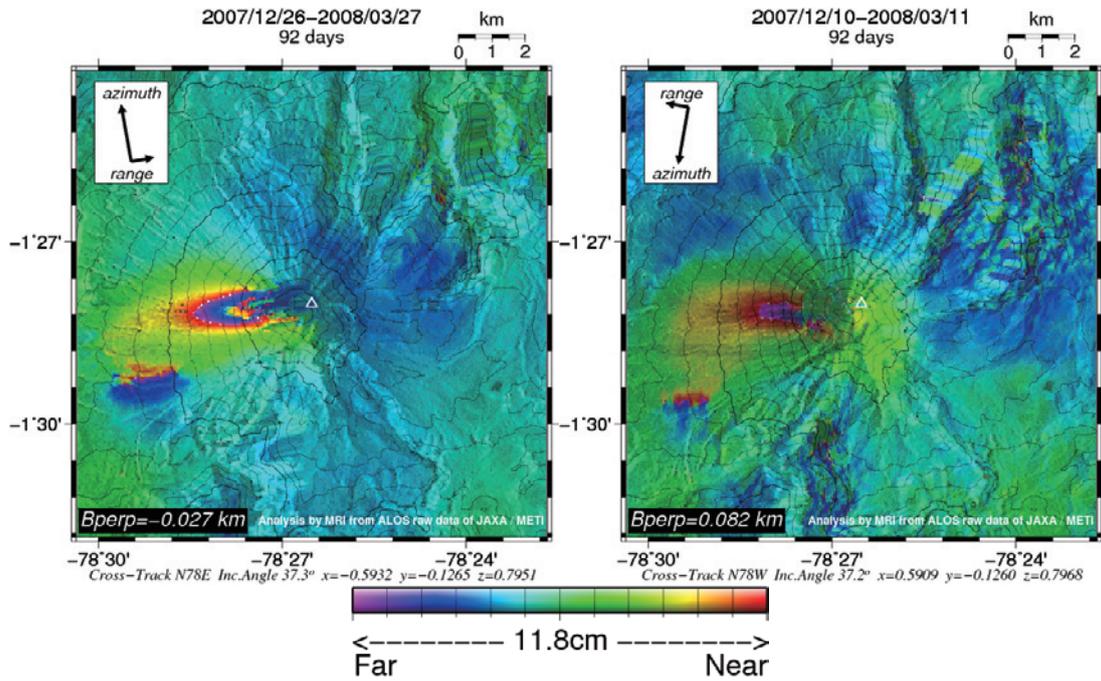


Fig. 1.5.6 SAR interferograms from before and after the February 2008 eruption of Tungurahua, Ecuador.

1.5.6 海外の火山における SAR 干渉解析結果

ALOS は常に太陽同期準回帰軌道に沿って地表を観測していることから、国内のみならず、海外の火山においてもデータが蓄積されている。本研究においても幾つかの火山について解析を行ったので、その結果を以下に示す。

1.5.6.1 Tungurahua 火山 (エクアドル)

南米エクアドルで最も活発な火山のひとつである Tungurahua (トゥングラワ) 火山は、少なくとも 1700 年以降では 13 回の噴火記録が残されており (Simkin *et al.*, 1994), 1999 年 10 月に始まった噴火活動は消長を繰り返しながら、現在もなお活発な活動を継続している。このうち、2007 年 12 月頃から活発化した火山活動は、2008 年 2 月 7 日から 11 日頃に最大となり、Smithsonian weekly reports によれば、噴煙高度は 10,000 m に達し、山頂 (標高 5,029 m) で発生した火砕流は標高 3,500 m 付近まで流下するなど、周辺の住民は避難を余儀なくされた。この噴火を挟むペアにおいて SAR 干渉解析を行ったところ、山頂の東側数 km の範囲にかけて、衛星に近づく方向の明瞭な位相変化が認められた。その位相差は北行軌道において最大約 12 cm であった。また、北域軌道の解析結果よりは不明瞭ではあるが、南行軌道においても噴火前後において約 10 cm 程度の位相変化が検出された (Fig.1.5.6)。

噴火前後において両軌道からの解析結果が得られたことから、Fujiwara *et al.* (2000) の手法を用いて、2.5 次元解析を行った。一般的に、SAR 衛星から得られる位相変化は、衛星進行方向に対して垂直な方向 (レンジ方向) にしか感度を持たない。このため、北行軌道及び南行軌道における各々独立な解析結果を組み合わせることにより、対象域の準上下方向及び、準東西方向の変位量を得ることが出来る。ここで、わざわざ“準”と断った理由は、SAR 衛星は太陽同期準回帰軌道のため、その進行方向は真南北から数度ずれていること、また、ニアレンジからファーレンジ方向まで、対象地点において入射角が異なることから、両軌道からの視線方向で作られる平面は、真の東西方向及び鉛直方向からわずかに傾くためである。

2.5 次元解析により得られた結果を Fig.1.5.7 に示す。これによれば、この噴火活動に伴う地殻変動は準東西方向よりも準上下方向、即ち準鉛直方向に顕著であり、東西方向のプロファイルによれば、山頂付近における地殻変動は、ほぼ鉛直上方向に約 12 cm 程度であることが分かった。

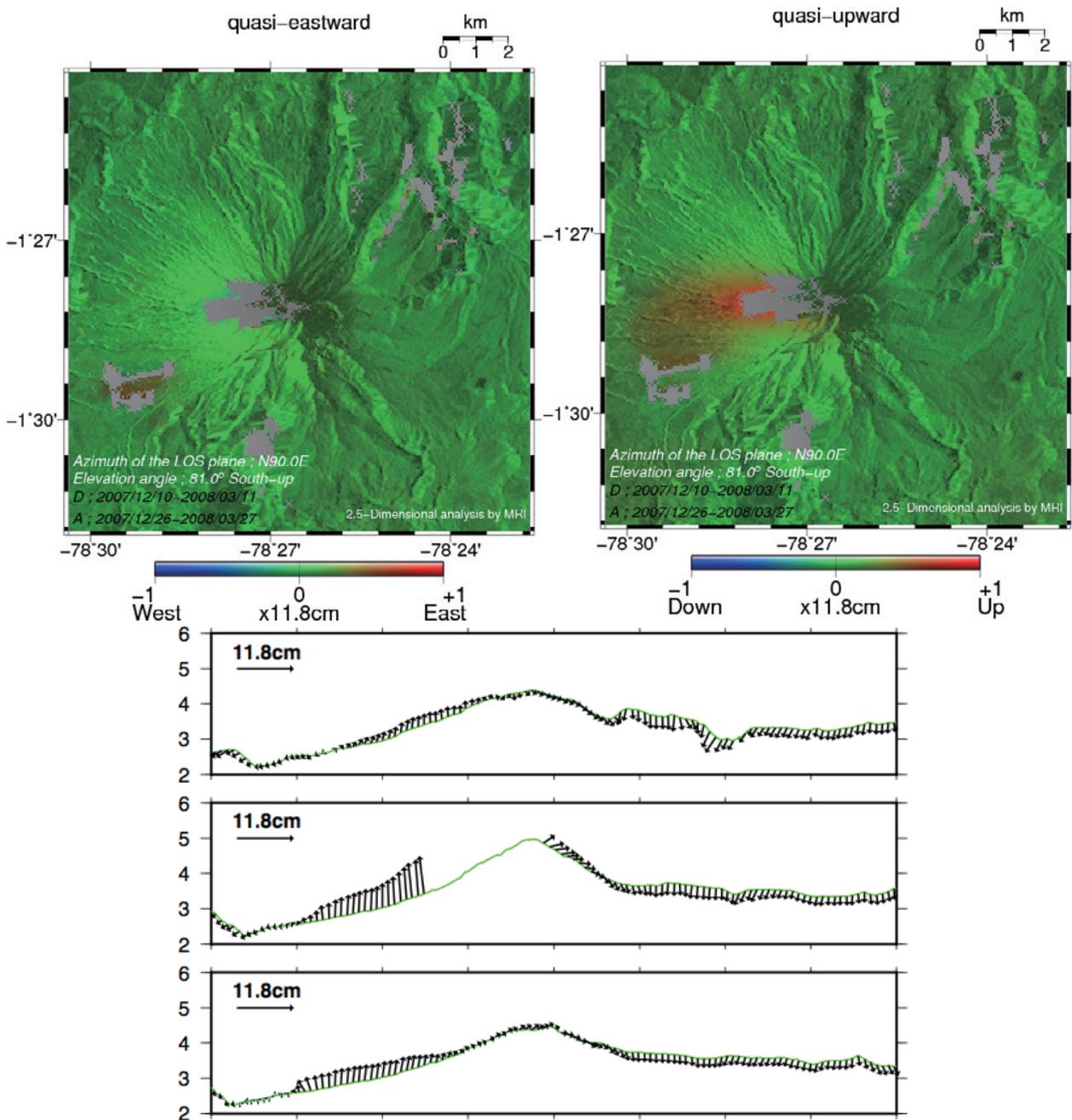


Fig. 1.5.7 2.5-dimensional displacement images of Tungurahua (left figure is quasi-eastward and right figure is quasi-upward) and displacement vectors along profiles 1-3 in the right figure.

1.5.6.2 Eyjafjallajökull 火山 (アイスランド)

アイスランドの南に位置する Eyjafjallajökull 火山 (1666 m) は、2010 年 3 月 20 日に約 190 年ぶりに噴火した。アイスランドは東側のユーラシアプレート、西側の北アメリカプレートに挟まれたプレート拡大境界に位置しており、火山帯や地溝帯と呼ばれる境界を中心に約 30 近くの活火山が点在している火山国である。しかしながら、島の 10% 程度を氷河に覆われていることから、標高の高い火山地域では、常に概ね厚い氷に覆われている点が、日本とは大きく異なる特徴である。これら氷河は基本的に年間を通して融解することはないが、噴火活動が始まった場合には、火山の熱活動により氷河が融解してマグマ水蒸気爆発や氷河バースト (glacier burst) を引き起こし、度々大災害に繋がるおそれがある。今回の噴火活動についても、最初は氷河に覆われていない場所で活動が始まったため、比較的穏やかな噴火形態であったが、4 月 14 日の噴火では活動状況に変化があり噴火形態の様相が急変し、山頂カルデラ内での噴

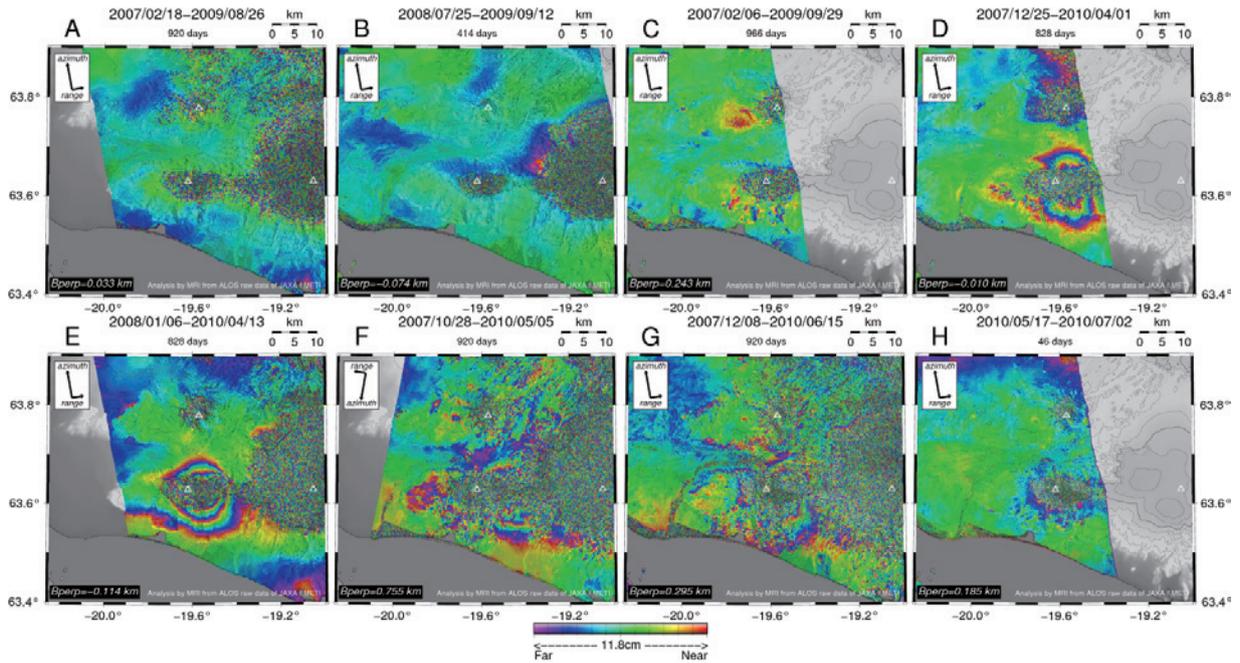


Fig. 1.5.8 SAR interferograms for volcanoes in southern Iceland (white triangles) generated from ALOS/PALSAR data. Interferograms A-C are from image pairs acquired before the eruption, D-G are from image pairs that span the eruption and H is from an image pair acquired after the eruption.

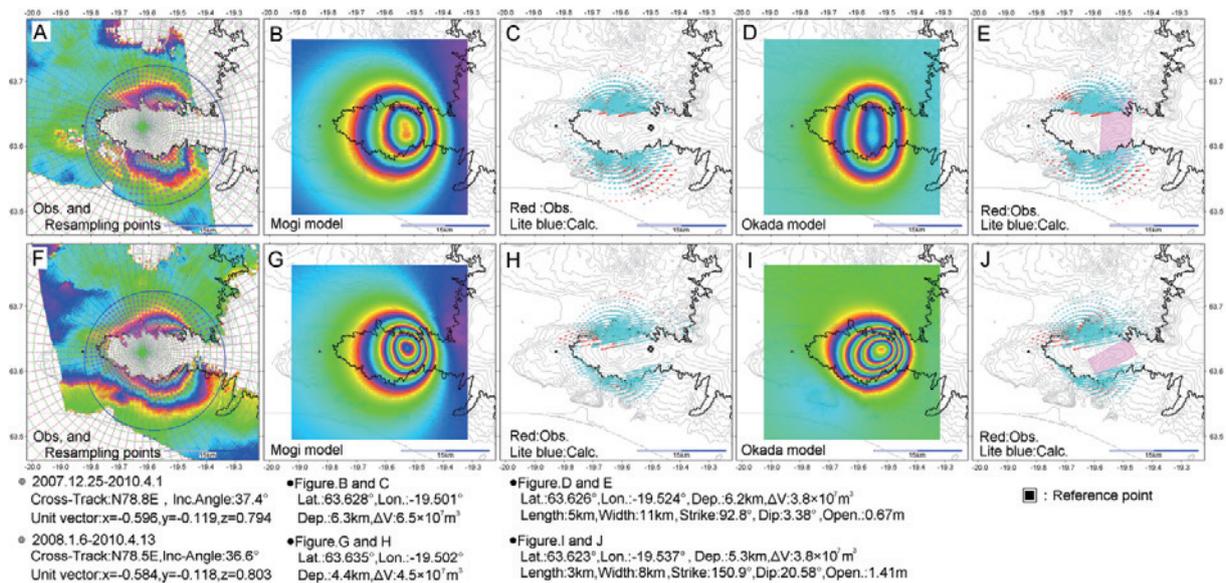


Fig. 1.5.9 SAR interferograms for Eyjafjallajökull, Iceland, modeled using MaGCAP-V software. Images in the top row are derived from interferograms for 25 December 2007 to 1 April 2010, and images in the bottom row are derived from interferograms for 6 January 2008 to 13 April 2010. A and F show resampling points (small magenta circles). B and G show fringe patterns predicted by a Mogi-type point source from Fig. 1.5.9 A and F, respectively. C and H show error distribution vectors; white crosses in black circles indicate pressure source points. D and I show fringe patterns predicted under the assumption of an Okada-type opening source fitted to Fig. 1.5.9 A and F, respectively. E and J show error distribution vectors; pink rectangles indicate opening source points. Thick solid lines show the area masked in the phase-unwrapped images.

Table 1.5.1 Estimated intrusion volumes associated with the April 2010 eruption of Eyjafjallajökull volcano.

Event year	Model	Depth (km)	Volume (m ³)	Opening (m)	Location from summit crater	reference
2010	Mogi	6.3	6.5×10 ⁷	-	east 6 km	Ando (2011; this paper, estimated using Fig. 1.5.8-D)
2010	Sill	6.2	3.8×10 ⁷	0.67	east 5 km	
2010	Mogi	4.4	4.5×10 ⁷	-	east 6 km	Ando (2011; this paper, estimated using Fig. 1.5.8-E)
2010	Sill	5.3	3.8×10 ⁷	1.41	east 4 km	

火となった。この結果、山頂付近を覆っていた氷河と噴出したマグマが接触し水蒸気爆発となり、これに伴う噴煙は高度約 8 km まで上昇し、ヨーロッパ各国の航空機の運行に支障が出るなどの大きな影響が生じた。また、活発な噴煙活動により、直接火口周辺の状況を観測することが困難な状況になった。このため、気象研究所では、火山活動に伴う地殻変動の検出を目的に SAR 干渉解析手法を用いた解析を行った。その詳細については安藤(2011)にゆずるが、ここでは、噴火前後に撮像された SAR データによる地殻変動結果と球圧力源 (Mogi, 1958) 及びシル状圧力源 (Okada, 1985) を仮定した MaGCAP-V による圧力源計算の結果を Fig.1.5.8 及び Fig.1.5.9 と Table1.5.1 に示す。

1.5.6.3 Nyamuragira 火山 (コンゴ民主共和国)

アフリカで最も活発な火山の一つである Nyamuragira 火山は東アフリカ地溝帯西部に位置しているコンゴ東部の活火山である。山頂には直径約 2 km のカルデラが存在しており、これまでに度々山腹割れ目噴火を繰り返している (Simkin *et al.*, 1994)。Smithsonian weekly reports によれば、近年では、1996 年 12 月 1 日から 5 日頃にかけて、及び、2010 年 1 月 2 日から 27 日にかけて噴火活動の記録が残っている。本報告では、前者については JERS-1/SAR を、後者については ALOS/PALSAR のデータを用いて SIGMA-SAR (Shimada, 1999) を使って解析を行った。参照用の地図は SRTM3 (NASA, 2006) を使用し、アンラッピング処理には Ghiglia and Pritt (1998) が提示したプログラムを使用し、アンラッピング時に度々発生するエラーについては mod-unwrap (奥山, 2010) を使用した。

○1996 年 12 月の噴火について

噴火前後の 1996 年 10 月 19 日と 1997 年 4 月 13 日に撮像されたデータを用いて SAR 干渉解析を行った (Fig.1.5.10 左図)。その結果、北側の山腹を中心とした干渉縞が得られ、その位相差は衛星に近づく方向に約 30 cm 程度であった。また、SAR 干渉解析処理の過程で得られるコヒーレンス画像について、噴火前後のペアと噴火後のペア (1997 年 2 月 28 日と 1997 年 4 月 13 日) の結果を比較すると、干渉解析で得られた干渉縞の中心位置から北側に向かって、干渉度の高いエリアが検出された (Fig.1.5.10 右図)。これは噴火に伴う溶岩流の痕跡と考えられ、溶岩の厚さを 3 m と仮定した場合 (Kasahara *et al.*, 1991)、過去の噴火に伴う溶岩噴出量とほぼ同じ 43.7×10⁶ m³ が流出したと見積もられた。

○2010 年 1 月の噴火について

噴火前後のペアとして北行軌道 : 2009 年 12 月 17 日と 2010 年 2 月 1 日, 南行軌道 : 2008 年 4 月 13 日と 2010 年 3 月 4 日, 噴火後のペアとして北行軌道 : 2010 年 2 月 1 日と 2010 年 5 月 4 日, 南行軌道 : 2010 年 3 月 4 日と 2010 年 4 月 19 日について、SAR 干渉解析を行った (Fig.1.5.11)。その結果、山頂の南側の山腹を中心とした干渉縞が得られた。ALOS の場合は北行軌道及び南行軌道からの解析結果が得られることから、Fujiwara *et al.* (2000) で示された 2.5 次元解析を行った (Fig.1.5.12)。その結果、得られた位相差はダイクの貫入を示唆する地殻変動であることが分かった。また、前出と同様の手法を用いて、コヒーレンス画像の比較による溶岩噴出量は 42.6×10⁶ m³ と見積もられ (図 1-5-13)、1996 年 12 月時の噴火活動と同程度の噴出量と推定された。

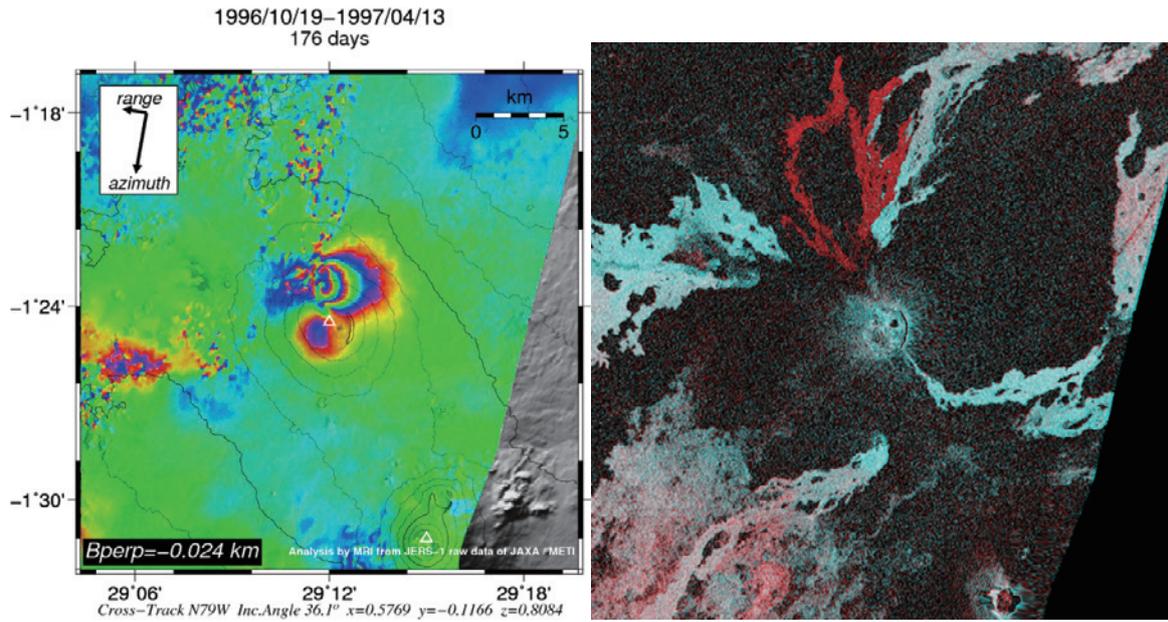


Fig. 1.5.10 SAR interferogram for Nyamuragira volcano, Democratic Republic of the Congo, spanning the eruption of December 1996. The differential coherence image on the right indicates the area of lava flows; color assignments are blue-green for before and after the eruption and red for after the eruption.

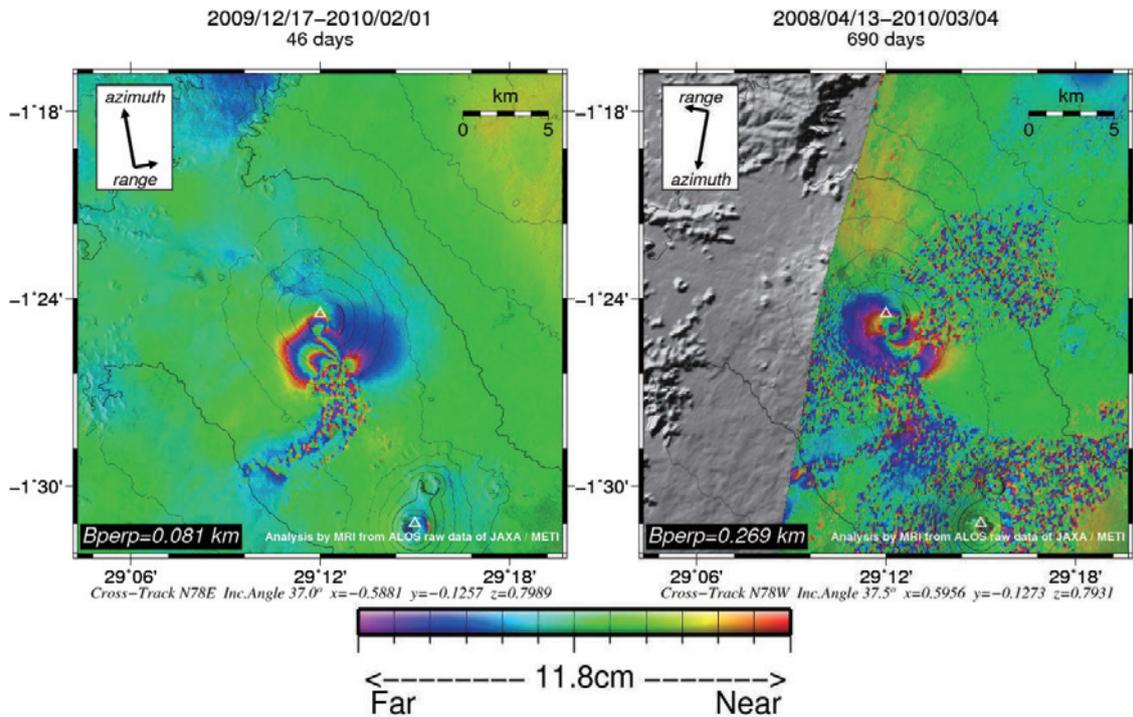


Fig. 1.5.11 SAR interferograms for Nyamuragira spanning the eruption of January 2010 from the ascending orbit (left) and descending orbit (right).

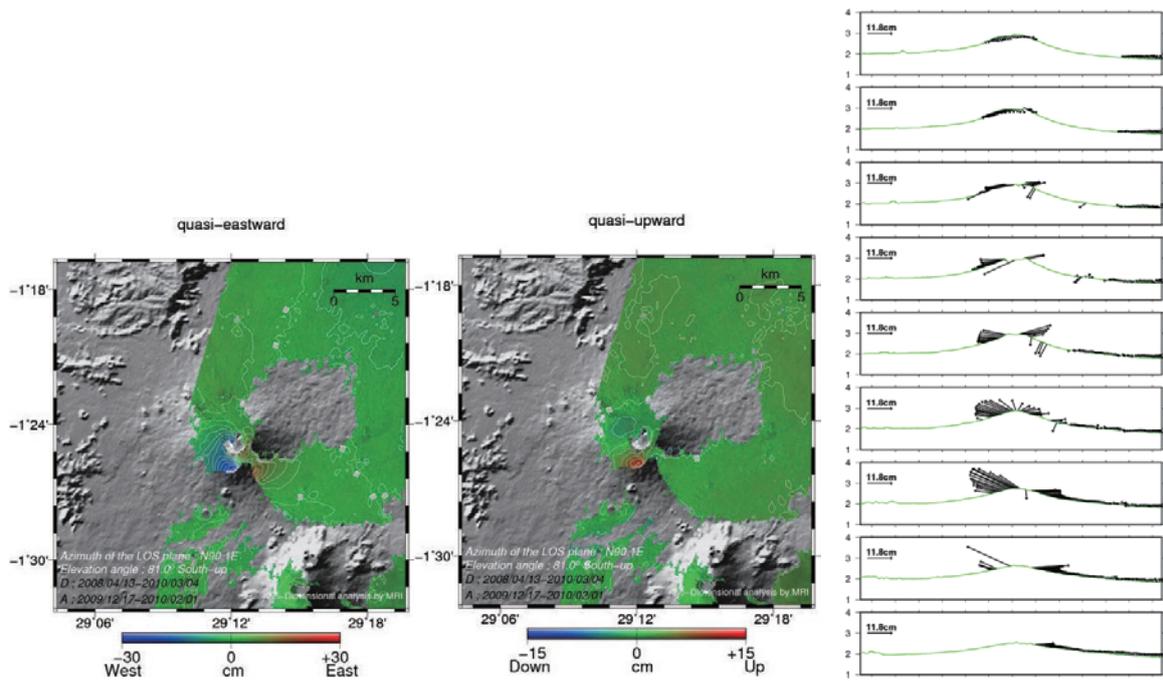


Fig. 1.5.12 2.5-dimensional displacement images of Nyamuragira (left figure is quasi-eastward and center figure is quasi-upward) and displacement vectors along profiles 1–9 in the center figure.

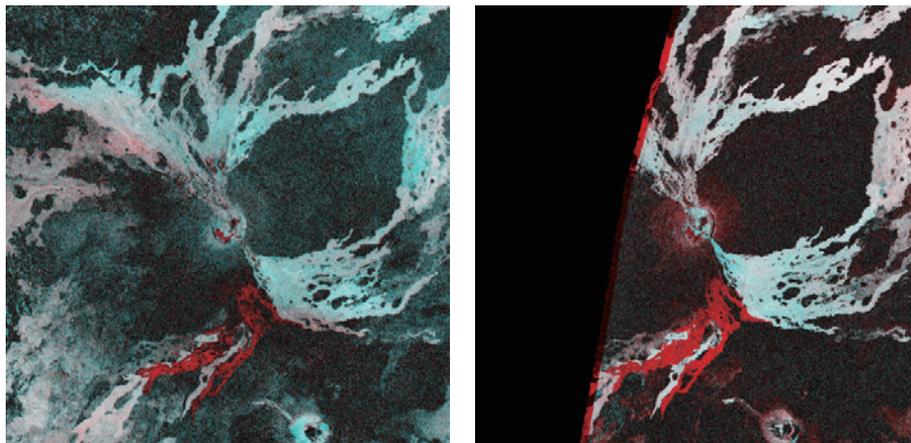


Fig. 1.5.13 Differential coherence images of Nyamuragira representing the eruption of January 2010; color assignments are blue-green for before and after the eruption and red for after the eruption.

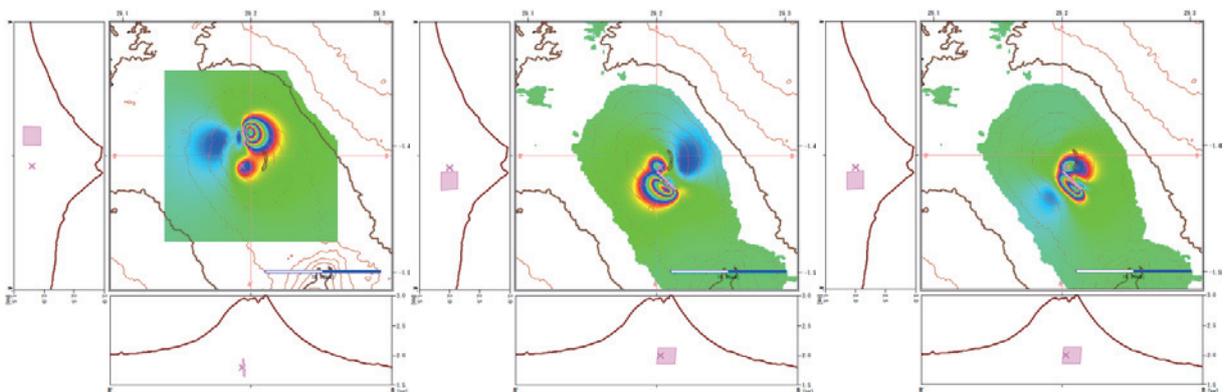


Fig. 1.5.14 SAR interferograms for Nyamuragira modeled using MaGCAP-V software. The left figure spans the eruption of December 1996 and the center and right figures (ascending and descending orbits, respectively) span the eruption of January 2010.

Table 1.5.2 Estimated intrusion volumes associated with the December 1998 and January 2010 eruptions of Nyamuragira volcano.

Eruption (yyyy.mm)	Model	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Depth (km)	Volume (m ³)	Opening (m)	reference
1998.12	Sill	-1.392	29.194	1	1.68×10 ⁶	3.5	Estimated using Fig. 1.5.10
	Mogi	-1.416	29.193	1	5.00×10 ⁵	-	
2010.1	Sill	-1.427	29.208	0.8	1.65×10 ⁶	2.5	Estimated using Fig. 1.5.11
	Mogi	-1.417	29.203	0.9	6.00×10 ⁵	-	

○圧力源及びダイクモデルの推定

1996 年 12 月及び 2010 年 1 月の解析結果から得られた地殻変動データを基に、MaGCAP-V を使ったフォワード法による圧力源及びダイクモデル推定を行った (Fig.1.5.14 及び Table1.5.2)。その結果、深さ約 1 km の場所で 2.5 から 3.5 m の開口量を仮定することで、概ね干渉縞を説明できることが分かったが、コヒーレンス画像の比較から得られた噴出量と比べると 1 桁小さいオーダーとなった。また、2010 年 1 月の噴火活動により得られた北行軌道及び南行軌道の両方の干渉縞を説明するモデルは得られていない。これは両軌道の解析期間が異なり、火山活動の推移によって、同一モデルでは説明できないことが理由かもしれない。

(安藤 忍)

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) に基づいて観測・提供されたものである。また、一部は PIXEL で共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構(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。PALSAR に関する原初データの所有権は経済産業省および JAXA にある。なお、解析には宇宙航空研究開発機構の島田政信博士により開発された SIGMA-SAR を使用させていただいた。アンラッピング処理には Ghiglia and Pritt (1998) によるプログラムを使用した。これらの干渉処理などの過程では、国内火山については国土地理院発行の「数値地図 50m メッシュ (標高)」を、北方領土と一部離島については「SRTM3 (90m メッシュ)」をそれぞれ使用し、地図の作成には Wessel and Smith (1998) による GMT を使用した。また、描画方法などについて北海道大学の奥山哲博士、防災科学技術研究所の宮城洋介博士から多くの助言を頂いた。ここに記して皆様に御礼申し上げます。

参考文献

安藤忍 (2010) : 気象庁火山噴火予知連絡会衛星解析グループ (2009) : 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. 18-33, 116-123.

安藤忍 (2011) : ALOS データを用いた InSAR 解析により捉えられた 2010 年 Eyjafjallajökull 火山噴火に伴う地殻変動. 測地学会誌, 57, 2, 49-59.

小澤拓・宗包浩志・矢来博司・村上亮 (2003), JERS-1 の干渉 SAR により検出された霧島火山群・硫黄山周辺の局所的な地殻変動, 火山, 48, 507-512.

小澤拓 (2006) : 衛星合成開口レーダ干渉法による地震・火山活動に伴う地殻変動の検出. 測地学会誌, 52, 4, 253-264.

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

て. 106pp.

- 島田政信 (1999) : 合成開口レーダー処理. 測地学会誌, 49, 4, 277-281.
- 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, 簡易版堂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.
- 藤原智・飛田幹男 (1999) : 地表変動検出のための干渉 SAR 画像作成技術. 測地学会誌, 49, 4, 283-295.
- 古屋正人 (2006) : 地殻変動観測の新潮流 InSAR. 測地学会誌, 52, 4, 225-243.
- 山崎伸行・近江克也・高木朗充 (2008) : 吾妻山の地震活動に伴う地殻変動. 日本火山学会講演予稿集, B25, 77.
- Fukushima, Y., T. Ozawa and M. Hashimoto (2008) : Fault model of the 2007 Noto Hanto earthquake estimated from PALSAR radar interferometry and GPS data. *Earth Planets Space*, 60, 99-104.
- Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa, M. Tobita, and P. A. Rosen (2000) : 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, 27 (14) , 2049-2052, doi:10.1029/1999GL011291.
- Ghiglia, D. C. and M. D. Pritt (1998) : Two-Dimensional Phase Unwrapping Theory, Algorithms, and Software. Wiley Interscience, 380-387.
- Hanssen, Ramon F. (2001) : Radar Interferometry ; Data interpretation and error analysis. Kluwer Academic Publishers. 308pp.
- Takada, Y., T. Kobayashi, M. Furuya and M. Murakami (2009) : Coseismic displacement due to the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake detected by ALOS/PALSAR : preliminary results. *Earth Planets Space*, 61, e9-e12.
- 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.
- NASA (2006) : <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>
- Okada, Y. (1985) : Surface deformation to shear and tensile faults in a halfspace. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
- Ozawa, T. and H. Ueda (2011) : Advanced InSAR time-series analysis using interferograms of multiple-orbit tracks: A case study on Miyake-jima, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2011JB008489.
- Shimada, M. (1999) : Verification processor for SAR calibration and interferometry. *Adv. Space Res.*, 23, 1477-1486.
- Simkin, T. and L. Siebert (1994) : *Volcano of the World* second edition. Geoscience Press., P.P.47, P.P.142, ISBN 0-945005-12-1.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998) : New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos Trans. AGU*, 79, 579.