

航空機 SAR による霧島山（新燃岳）の火口地形観測 Observation of Volcanic Crater of Mt. Kirishima (Shinmoedake) by Airborne SAR

測図部 下野隆洋¹・南 秀和²・西井康郎³・大野裕幸³・渡部金一郎³

Topographic Department
Takahiro SHIMONO, Hidekazu MINAMI, Yasuo NISHII,
Hiroyuki OHNO and Kinichiro WATANABE

要 旨

霧島山（新燃岳）では、2011年1月26日に発生したマグマ噴火以降2月11日までに10回の爆発的噴火が発生した。その間も継続的に噴煙が立ち上っており、火口付近の地形把握を目的とした鉛直空中写真の撮影が困難な状況であった。

そこで、噴煙等が上がっている状況下でも地表面の観測が可能な合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar. 以下、「SAR」という。）を国土地理院所有の防災・測量用飛行機（セスナ 208B. 以下、「くにかぜⅢ」という。）に搭載し、2月1日及び2月7日の2度にわたって観測を実施した。この時期はマグマが火口内に噴出していた頃であり、噴出したマグマ量を定量的に求める手段として SAR による観測が期待されていたところでもあった。実際に観測データを解析したところ、火口にできた溶岩は最大 590m×560mの矩形の角を丸めたような形であり、噴火によって生じた火口内堆積物の量は約 1,900 万立方メートルであるとの結果が得られた。

1. はじめに

SAR は、航空機や人工衛星に搭載されたアンテナから電波を照射し、地表の物体等にぶつかって散乱された電波を受信することによって地表の状況を観測する能動センサである。SAR で一般的に使用される電波（マイクロ波）は雲や噴煙等を透過する性質を持っているため、雲や雨などの天候及び噴煙等に左右されずに観測を実施することが可能である。

国土地理院では、航空機搭載型合成開口レーダー（以下、「航空機 SAR」という。）を平成8年度から平成9年度にかけて調達し、国土管理、地図作成、災害状況把握等に関する調査研究（小荒井ほか、2000；飯田ほか、2002；小井土ほか、2006b）及び火山噴火に伴う火口地形観測（浦部ほか、2005；小井土ほか、2006a）を実施してきた。1月下旬から2月上旬にかけて複数回の爆発的噴火を生じるなど、霧島山（新燃岳）の噴火活動が活発化したことから、これまでの経験を踏まえて火口付近の観測を複数回行い、再生画像及び DEM データの作成及び解析によって溶岩の寸法及び火口内の堆積物量の変化量を定量的に捉え、火山噴火予知連絡会による火山活動の

状況判断のための資料として取りまとめた。本稿では、それらの結果を報告する。

2. 観測概要

2. 1. 使用機材

観測には、国土地理院が所有する航空機 SAR 機材一式及び「くにかぜⅢ」を使用した。国土地理院が所有する航空機 SAR の仕様を表-1に、それを「くにかぜⅢ」に搭載した様子を図-1に示す。

国土地理院の航空機 SAR は、アンテナ及び本体装置の寸法・重量及び設置条件の都合上、平成21年度末まで運行されていた国土地理院の測量用航空機「くにかぜⅡ」には搭載できなかったため(林, 2010),

表-1 航空機 SAR の仕様

| | |
|---------|-----------------------------|
| 中心周波数 | 9,555GHz (Xバンド) |
| 帯域幅 | 100MHz |
| 観測モード | 2次元/3次元 |
| 量子化ビット数 | 4ビット/8ビット (3次元モード時は4ビット) |
| 偏波 | 水平送信/水平受信 (HH) |
| オフナディア角 | 55度 ~ 75度 |
| 観測幅 | 約5km (3次元4ビットモード時) |
| 分解能 | アジマス: 1.5m レンジ: 1.5m |



図-1 航空機 SAR を搭載した「くにかぜⅢ」

本田航空株式会社が所有していた航空機（セスナ208）に搭載して観測を実施してきた。当時は、航空機に搭載した4台のGPSアンテナで受信した信号を解析することにより、SAR解析に必要な航空機の位置姿勢情報を導出していたが、GPSの計測精度の関係上、SAR解析において十分な精度の位置姿勢情報を得るには限界があった。

そこで、測量用アナログ航空カメラRC30に取り付けるため平成17年度に購入したGPS/IMU装置（Applanix社製POS/AV510）を用いて航空機SARの解析に必要な位置姿勢情報を取得することとし、「くにかぜⅢ」の調達に合わせて航空法に定める耐空検査等の手続きを行い、平成22年度より運用を開始した。これにより、SAR解析におけるエラーの減少、干渉処理におけるコヒーレンス（干渉のしやすさ）の向上などが図られ、解析の質が向上した。

2. 2. 観測諸元

霧島山（新燃岳）の火山活動の活発化に伴い、火口を中心とする半径4km圏内の入山規制（2月1日午前11時20分に「半径3km」から「半径4km」に拡大）が気象庁から発表されていた。

そのため、霧島山（新燃岳）の観測を実施するにあたっては航空機運行の安全性を考慮し、各コース

表-2 航空機 SAR 観測諸元

| | | |
|---------|----------------------------|----------------------------|
| 観測日時 | 2011年2月1日 11:47 ~ 13:07 | 2011年2月7日 11:45 ~ 13:52 |
| 観測モード | 3次元4ビット | 3次元4ビット |
| 観測方向 | 8方向 | 8方向 |
| オフナディア角 | 約70度 | 約70度 |
| 飛行高度 | 約4,250m | 約4,250m |
| 水平距離 | 約8.5km | 約8.5km |

※水平距離：コースから火口中心までの距離



図-2 航空機 SAR 観測コース

と火口中心までの水平距離を8km以上確保することとして、飛行高度を4,250m、レーダーのオフナディア角を70度に設定した。また、斜め方向に電波を照射して観測を行うSARにおいて避けることのできない現象であるレーダーシャドウ（地形等の影響により電波が到達しない場所に現れるデータ欠損）の影響を最小限にするため、火口付近を取り囲むように8本の直線コースを設定した。観測は、2月1日11時47分から13時07分までの間及び2月7日11時45分から13時52分までの間の2回実施した。観測諸元を表-2に、観測コースを図-2に示す。なお、1回目のSAR観測日の朝には1月27日以降4度目となる爆発的噴火が発生しており、2度目の観測日以前の2月3日には9度目の爆発的噴火が、観測後の2月11日には10回目の爆発的噴火が発生している。

3. SAR 再生画像の作成及び計測

2月1日及び2月7日に観測した各日8コースのSARデータの画像解析を行うことにより、コースごとの再生画像を作成した（図-3）。

再生画像の作成にあたっては、ルック数（ノイズ低減処理時のパラメータ。数字が大きいほどノイズ低減効果は大きい、空間分解能は低下する。）をア

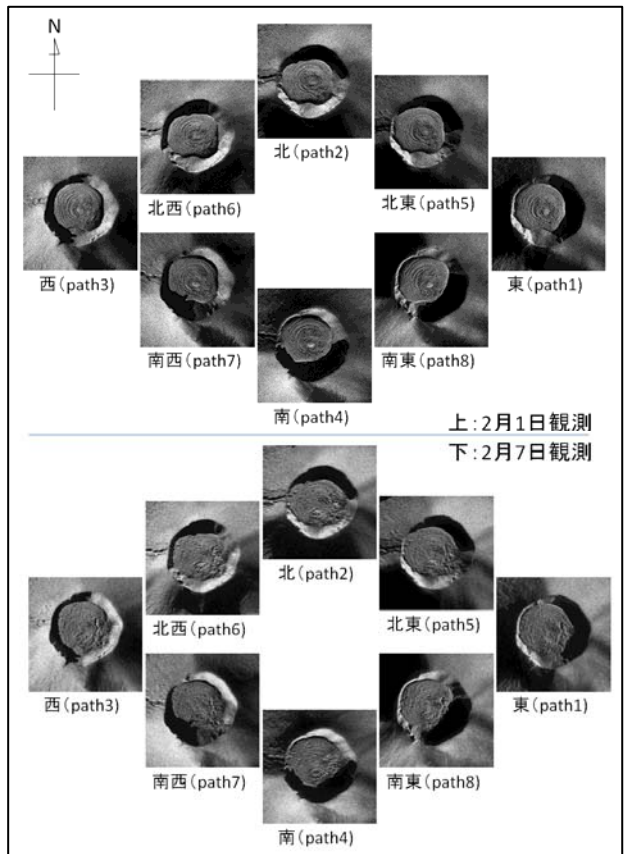


図-3 SAR 再生画像

ジマス4×レンジ1に設定したため、アジマス分解能は約1.5m、レンジ分解能は約1.6mとなった。再生画像の地上画素寸法は1.25mである。なお、今回の画像再生においてはDEMを用いた地形補正は行っておらず、火口付近の標高値である1,400mを基準面として一律に投影している。そのため、斜め方向に向けて電波を照射するSARの原理上、作成した再生画像は地形による歪みを含むものとなっている。

航空機SAR観測と同時刻にデジタル一眼レフカメラによって撮影された斜め写真（図-4）から分かるとおり、SAR観測時には火口付近から噴煙が上がっていたが、図-3のSAR再生画像では8方向全てで噴煙の影響を受けずに火口付近の様子を捉えられている。特に、火口内部の南側は2月3日頃まで常に水蒸気や噴煙に遮られており光学画像による溶岩形状の把握ができない状況であったが、SAR再生画像では火口内部まで明瞭に写っている。

このSAR再生画像を用いて計測を行ったところ、火口内の溶岩は最大590m×560mの矩形の角を丸めたような形であることが分かった（図-5）。この時期は溶岩が火口内に盛んに噴出し、急速にサイズが大きくなっていった時期であり、気象庁の発表によるとSAR観測前日の1月31日の溶岩寸法は直径約500mであった（気象庁, 2011）。また、図-5より、2月1日から2月7日にかけて火口内溶岩の寸法は大きく変化していないものの、2月1日の画像で確認できる溶岩の年輪状模様が2月7日には不明瞭になり、溶岩の形状も2月1日に比べて全体的に丸く平らになっていることが確認できる。

溶岩規模の計測結果については、2月1日に報道発表を行った斜め写真による判読結果（図-6；国土地理院, 2011a）とおおむね一致する結果であった。なお、SAR再生画像による溶岩の計測結果については2月2日に報道発表を行った（国土地理院, 2011b）。



図-4 斜め写真（2月7日11:45 南東側上空より撮影）

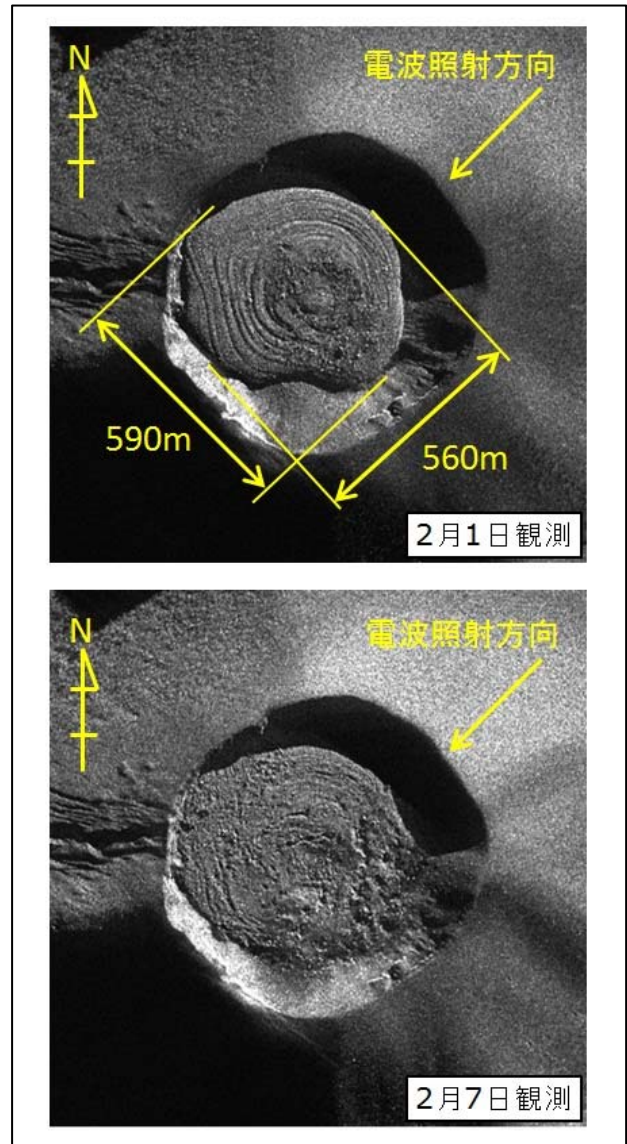


図-5 SAR再生画像（path5拡大）

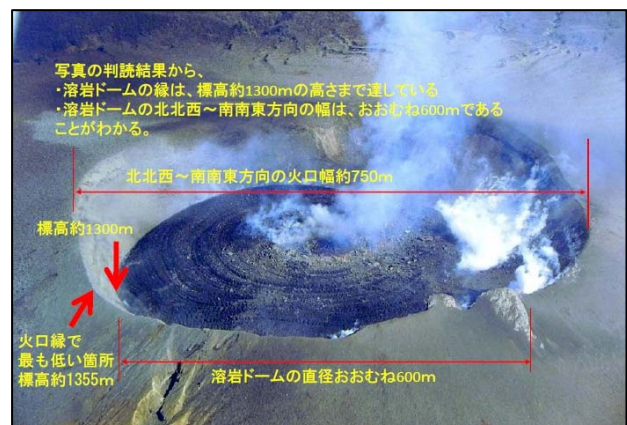


図-6 斜め写真判読結果

4. DEMの作成及び解析

4. 1. DEM作成

SARの特徴の一つとして、干渉SARによるDEMの作成が可能であることが挙げられる。干渉SARとは、わずかに異なる軌道から観測された2つのSARデータの位相差を分析することにより、地表面の形状を表す数値標高モデル(DEM)や地殻変動を抽出する手法である。国土地理院の航空機SARは、「くにかぜⅢ」のドア開口部に62cm離して設置した2つのアンテナ(図-1参照。上:送受信アンテナ,下:受信専用アンテナ)で電波を同時に受信することができるため、シングルパス干渉SAR(1回のフライトで同時に取得されたデータペアを用いて行う干渉SAR)によるDEM作成が可能である。

今回は、2月1日及び2月7日に観測した各日8コースの干渉SAR用データペアを用いて2.5mメッシュDEMを作成した。これらのDEMにはレーダーシャドウに起因する標高値欠損部が多く含まれるため、8方向の観測データそれぞれから作成されたDEMを合成することによって図-7に示す両日の最終的なDEMを作成し、火口地形解析に使用した。(以下、2月1日観測分のDEMを「2月1日DEM」、2月7日観測分のDEMを「2月7日DEM」という。)

火口地形の変化を把握するために必要な噴火前のDEMとして、2009年に観測された航空レーザ測量によるDEM(以下、「レーザDEM」という。)を使用した。なお、当該データは国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所より提供されたものである。このレーザDEMのオリジナルのメッシュサイズは5mであったことから、補間処理を行って2.5mメッシュに変換したものを解析処理に利用した。

4. 2. DEM解析

レーザDEM及び噴火後の航空機SAR観測で得られた2月1日DEM及び2月7日DEMの差分を計算することにより、火口内地形の変化量(火口内に堆積している溶岩等と推定される物質の高さ及び容積)を導出した。その結果を図-8及び図-9に示す。

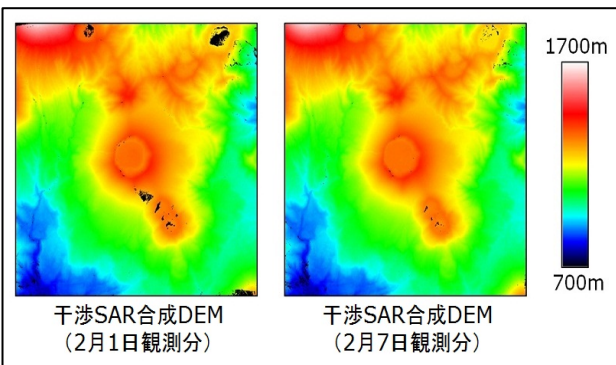


図-7 干渉SAR合成DEMによる段彩図

図-8及び図-9より、噴火後の火口底の高さは噴火前と比較して最大100m~110m程度上昇していることが分かる。また、2月1日から2月7日ま

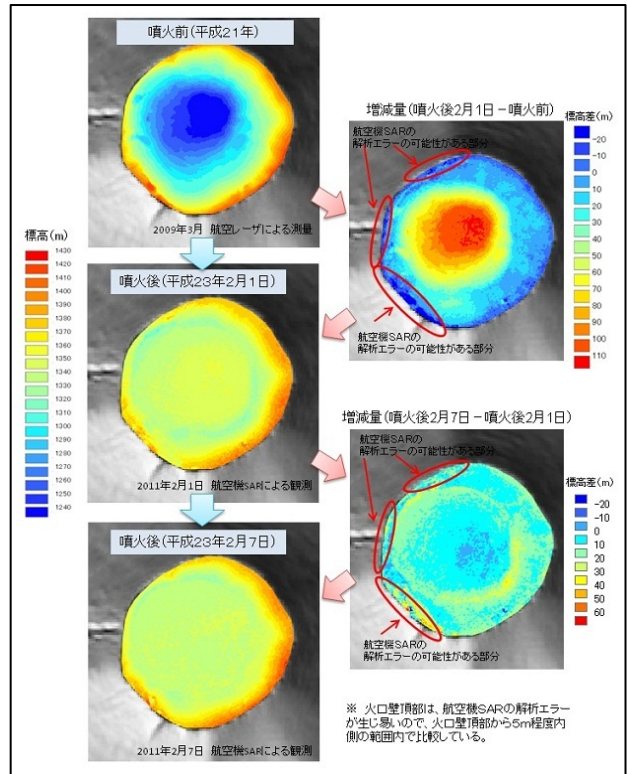


図-8 噴火前後の火口内の標高値変化

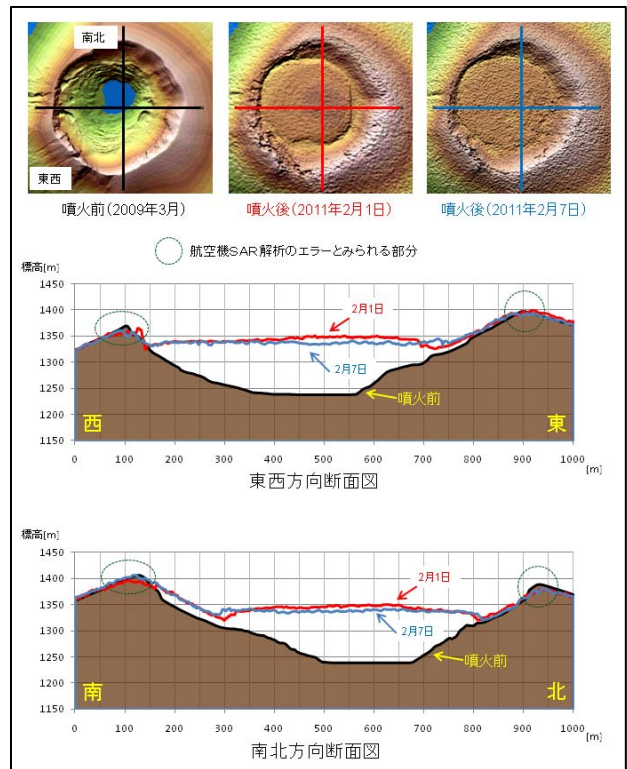


図-9 噴火前後の火口付近断面図

での間に複数回の爆発的噴火があったものの、火口内地形はさほど変化していないことも分かる。これらの DEM を使用して噴火によって生じたと思われる火口内堆積物の量を計算したところ、約 1,800 万立方メートル（±100 万立方メートル程度の誤差を含む）であることが分かった。これらの解析結果は、2 月 15 日に開催された第 118 回火山噴火予知連絡会に資料として提出した。なお、本解析に使用した 2 月 1 日 DEM 及び 2 月 7 日 DEM は速報として得られたものであり、高さ方向に 5 m～10m 程度の誤差を含む可能性がある。

4. 3. DEM の高精度化と再解析

前節では速報値として得られた DEM を用いて計算した火口内堆積物量について述べた。その後、SAR 干渉処理のエラーがより少なくなるようパラメータを再調整することにより、速報値より高精度な最終版の DEM を作成し、それを用いて火口内堆積物量の再計算を行った。その結果を図-10 に示す。

図-9 と図-10 を見比べると、速報値 DEM において火口縁付近に生じていた航空機 SAR 解析のエラーと見られる異常値が最終版 DEM では見られないことが分かる。この最終版 DEM 及びレーザ DEM を用いて前節で行った解析を再度実施したところ、噴火後の火口底の高さは噴火前と比較して最大 100m～110m 程度上昇していること及び 2 月 1 日から 2 月 7 日までの間に火口内地形はさほど変化していないことが分かった。また、噴火によって生じた火口内堆積物の量は約 1,900 万立方メートルであるとの結果が得られた。このことから、速報値 DEM を用いた解析結果はおおむね正確であることが確認された。なお、航空機 SAR データから作成した DEM の高さ方向の精度は 2 m～4 m であり（浦部ほか，2005），航空レーザ測量と同等の精度が得られるものではないことから、再解析結果にも同様の誤差が含まれている点には留意が必要である。

5. まとめ

今回、数年ぶりに運用が再開された国土地理院所有の航空機 SAR を用いて、火山活動が活発化した霧島山（新燃岳）の火口地形観測を 2 度にわたって実施し、再生画像及び火口周辺の 2.5m メッシュ DEM を作成した。また、それらを解析することにより、今回の噴火に伴って出現した溶岩は最大 590m ×

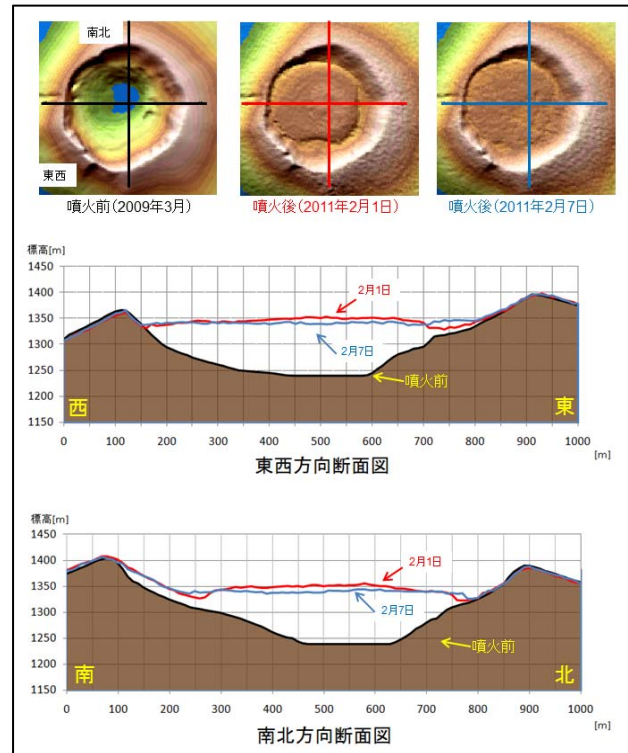


図-10 噴火前後の火口付近断面図（再解析）

560mの矩形の角を丸めたような形であること、火口底の標高がおよそ 100m～110m 上昇したこと及び火口内堆積物の量が約 1,900 万立方メートルであることが分かった。

航空機 SAR は、デジタル航空カメラ等の光学センサでは状況把握が困難な状況下でも地表面の様子を観測可能な能動センサである。理論的には天候及び時刻を問わずに SAR 観測が可能であるものの、機体のドアを開け放した状態で飛行することから、雨天時の離着陸及び観測経路中に雲の存在する場合の飛行ができないという制約が存在する。また、夜間等の有視界飛行ができない状況下では、航空関係の規制により図-2のようなコースでのフライトが困難である。これらの制約のうち前者については、アンテナ部を覆うレドームドアを製作して設置することにより解決可能であり、これによって更に臨機応変に観測が実施できるようになると考えられる。

今後も、地形変化を伴う火山噴火等が発生した場合には、航空機 SAR を用いて観測を行い、火口地形の状況把握を実施していく予定である。

参考文献

- 飯田洋，渡辺信之，佐藤潤，小荒井衛（2002）：高分解能 SAR を利用した災害状況把握，国土地理院時報，99，49-56。
 浦部ぼくろう，渡辺信之，村上亮（2005）：航空機搭載型合成開口レーダ（航空機 SAR）による浅間山火口内

- の観測, 国土地理院時報, 107, 15-20.
- 気象庁 (2011): 霧島山 (新燃岳) の噴火警戒レベル 3 (入山規制) を切り替え, http://www.jma.go.jp/jma/press/1101/31a/kirishimayama_20110131.pdf (accessed 15 Aug. 2011).
- 小荒井衛, 茂木公一, 渡辺信之, 岡谷隆基, 山田陽子, 松尾馨 (2000): 国土地理院における航空機 SAR 研究, 国土地理院時報, 94, 31-37.
- 小井土今朝己, 笹川啓 (2006a): 航空機搭載型合成開口レーダ (SAR) による災害情報把握に関する調査研究 (第2年次), 平成17年度国土地理院調査研究年報, 83-84.
- 小井土今朝己, 田中宏明 (2006b): Ku バンド航空機 SAR 画像による判読調査, 日本写真測量学会平成18年度年次学術講演会発表論文集, 249-250.
- 国土地理院 (2011a): 新燃岳の溶岩ドームが直径約 600mに成長~4回目の爆発的噴火後の火口の状況をくにかぜⅢから撮影~, <http://www.gsi.go.jp/kibanjoho/kibanjoho61000.html> (accessed 15 Aug. 2011).
- 国土地理院 (2011b): 新燃岳の溶岩ドームの規模は 590m×560m, <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/kirishima-hodo0202.html> (accessed 15 Aug. 2011).
- 林孝 (2010): 測量用航空機「くにかぜⅢ」の概要と役割, 国土地理院時報, 120, 125-130.