

御嶽山周辺の地殻変動*

Crustal Deformations around Mt. Ontakesan Volcano

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

第 1 図、第 2 図は、御嶽山周辺における GEONET による GPS 連続観測結果である。第 1 図上段に御嶽山を取り囲む基線の配置を、下段に図中に表示されている観測点の整備の履歴を示した。第 2 図はそれぞれの基線における辺長変化の時系列である。左側に最近約 9 年間、右側に約 1 年間の拡大して示してある。山体を囲むそれぞれの基線で、2006 年末から 2007 年初めにかけて山体付近の地震活動と同期して伸びの傾向が見られていたが、2007 年春以降は火山活動に伴うものとみられる基線長の変化もなく経過していた。2014 年 9 月 27 日の噴火前後に顕著な地殻変動は見られない。

第 3 図は、御嶽山周辺の水平変動ベクトル図である。最近 3 か月間の噴火を挟む期間及び最近 1 年間の噴火前の期間において、山体の膨張・収縮を示すような顕著な変動は見られない。

第 4 図は、9 月 28 日と 29 日に撮影した光学写真による斜め写真から作成した地図に重ねられる正射画像である。記載の URL や地理院地図で公開されている。

第 5 図は、9 月 29 日と 30 日に実施した航空機搭載合成開口レーダー観測の観測コースである。下の写真は、同時に撮影した斜め写真である。

第 6 図は、航空機 SAR の画像である。

第 7 図は、これらの SAR 画像、斜め写真の他、5 m メッシュ DEM 等のデータを用いて、火口の位置を比較的正確に求めたものである。赤は噴煙が確認された火口、黄色は噴煙が確認されなかった（噴火前にはなかった）新たな窪みである。

第 8 図は、GNSS の精密な解析結果である。観測後の 2、3 週間後に IGS から提供された GNSS 最終暦を使用して、再解析した結果である。ノイズレベルが下がり、数ミリメートルの地殻変動が見えやすくなった。御嶽山を挟む、1 番の高根 - 王滝間の基線の時系列と、2 番の落合唐谷 - 田の原間の基線の時系列を掲載した。横軸の 1 目盛が 1 月。9 月上旬頃から両方の基線でごくわずかな基線の伸びが見られる。F3 最終解は 10 月 4 日までだが、10 月 5 日以降の速報解を含めると、9 月下旬頃から停滞の傾向が見られる。2007 年の時と異なり、このような基線の伸びは、この 2 基線で見えない。ただし、このような基線変化は地殻変動の他、気象擾乱等でも生じることがある。過去にも同様な気象擾乱によるものとみられるみかけの変化があった。たとえ地殻変動のシグナルであったとしても、ノイズレベルと同程度なので、「ごくわずかから基線の伸び」の原因が、山体の膨張であったかどうかは、これらのデータだけから断定することはできない。

第 8 図(a)は、SAR 干渉解析結果である。ALOS-2 の噴火前後の SAR 画像の干渉解析を行った。噴火口の南西側で、1 km 程度の広がりのごく狭い領域において位相変化が検出された。最大で約 10cm の衛星に近づく変位である。また、深いところでのマグマ等の活動に起因した地殻変動は検出されていない。

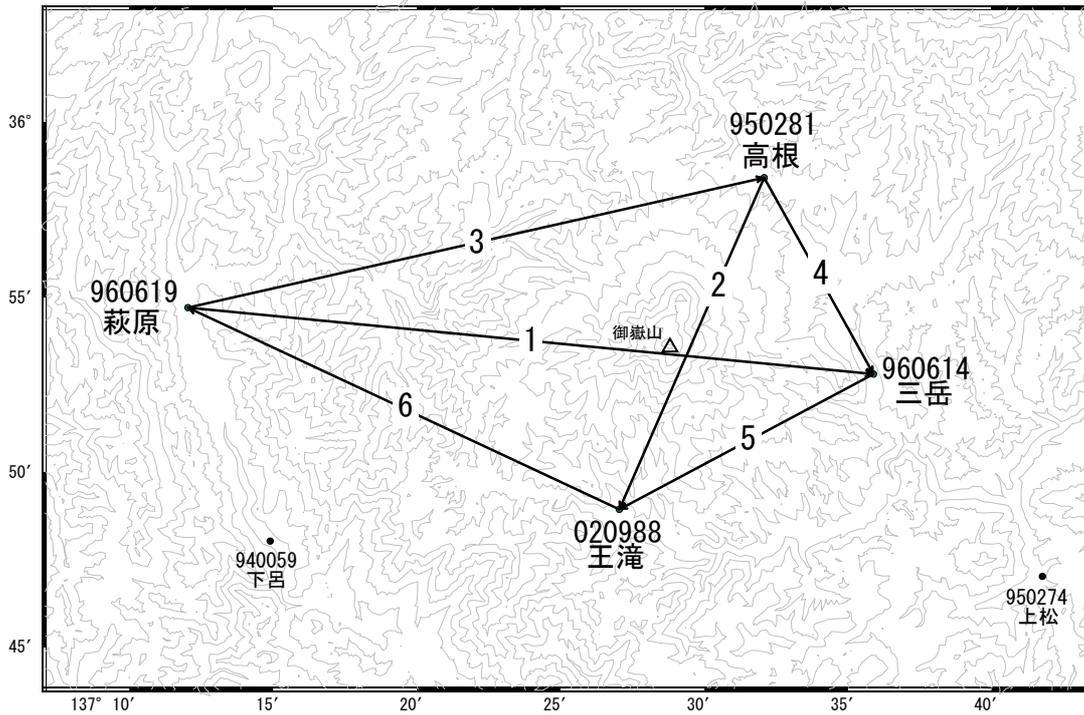
第 8 図(b)は、火口近傍の位相変化の原因を探るため(1)地下の変位源を推定した結果である。変位源の形状にかかわらず、変位源の深さは浅い位置に推定される。ここでは、変位源として矩形の開口クラック 1 枚を仮定している。開口クラックの位置は国土地理院による火口配列に強く拘束

* 2014 年 12 月 17 日受付

した。気象庁の傾斜計（田の原）で観測された噴火前後の傾斜量を図から読み取った値も推定に用いた。残差は小さく、干渉している領域のシグナルはほぼ説明できている。

第8図(c)において、火口近傍の位相変化の原因として、他に（2）に地すべり、（3）火山灰の堆積を検討したが、これらによる可能性は低いことがわかった。

御嶽山周辺GNSS連続観測基線図



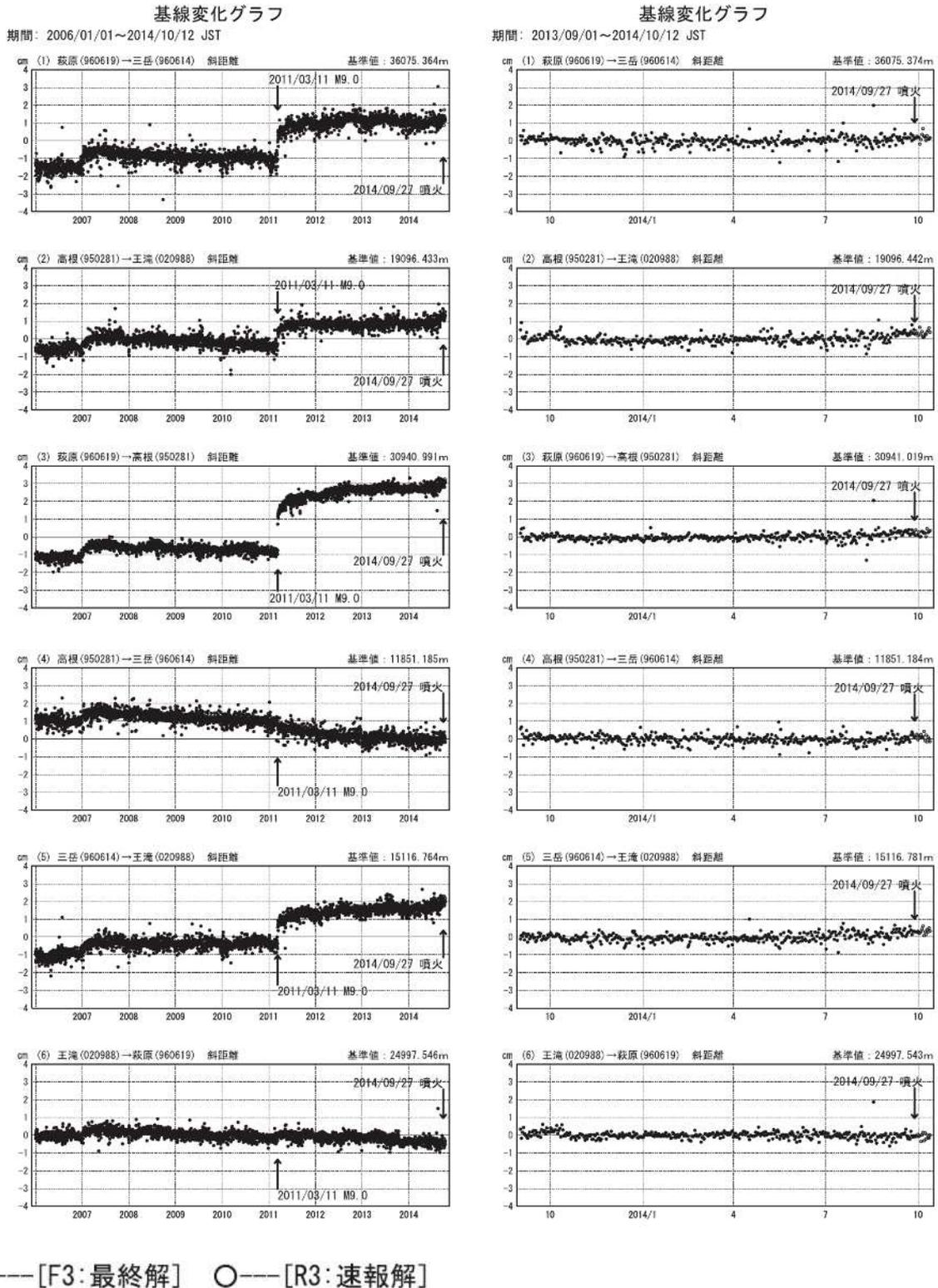
御嶽山周辺の各観測局情報

点番号	点名	日付	保守内容
020988	王滝	20040212	ピラー改造
		20121004	アンテナ・受信機交換
950281	高根	20030530	アンテナ・受信機交換
		20121130	アンテナ・受信機交換
960614	三岳	20030220	アンテナ・受信機交換
		20100113	受信機交換
		20121003	アンテナ交換
960619	萩原	20030312	アンテナ交換
		20090528	アンテナ交換
		20100113	受信機交換
		20100220	受信機交換
		20100309	受信機交換
		20100310	レドーム開閉
		20100326	レドーム開閉
20120821	アンテナ交換		

※[R3:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

第1図 御嶽山周辺の電子基準点におけるGNSS連続観測基線図(上段左:基線図、下段:保守履歴)

Fig.1 (upper) Baseline map of continuous GNSS observation at GEONET sites around Ontakesan Volcano. ; (lower) History of site maintenance,



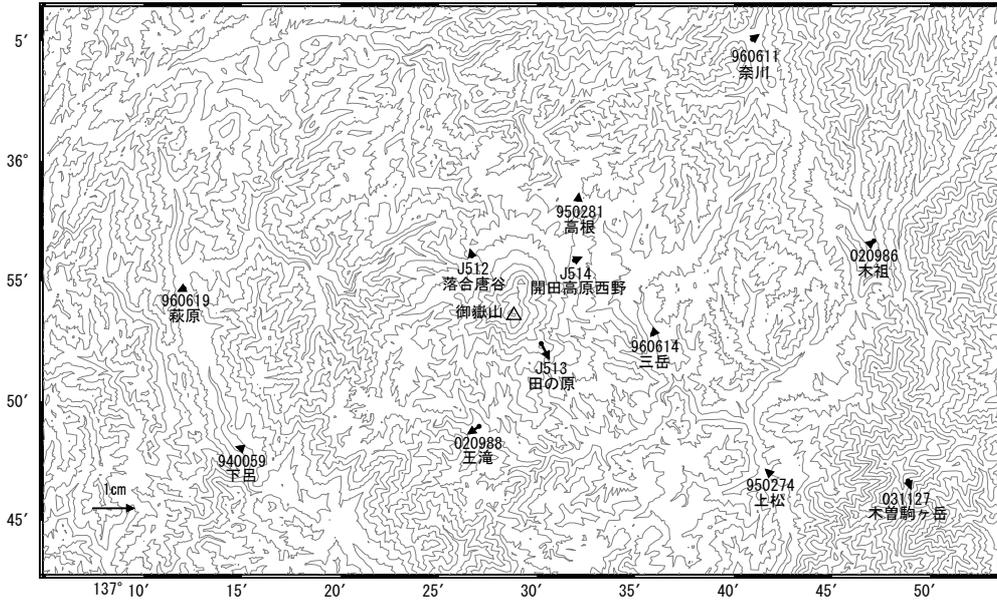
※[R3:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

第 2 図 (a) 御嶽山周辺の電子基準点における GPS 連続観測結果(時系列) (左列: 2006 年 1 月 ~ 2014 年 10 月、右列: 2013 年 9 月 ~ 2014 年 10 月)

Fig.2 (a) Results of continuous GNSS observation at GEONET sites around Ontakesan Volcano; (left) from January 2006 to October 2014, (right) from September 2013 to October 2014.

御嶽山周辺の地殻変動(水平:3ヶ月)

基準期間:2014/07/01~2014/07/10[F3:最終解]
比較期間:2014/10/01~2014/10/10[R3:速報解]

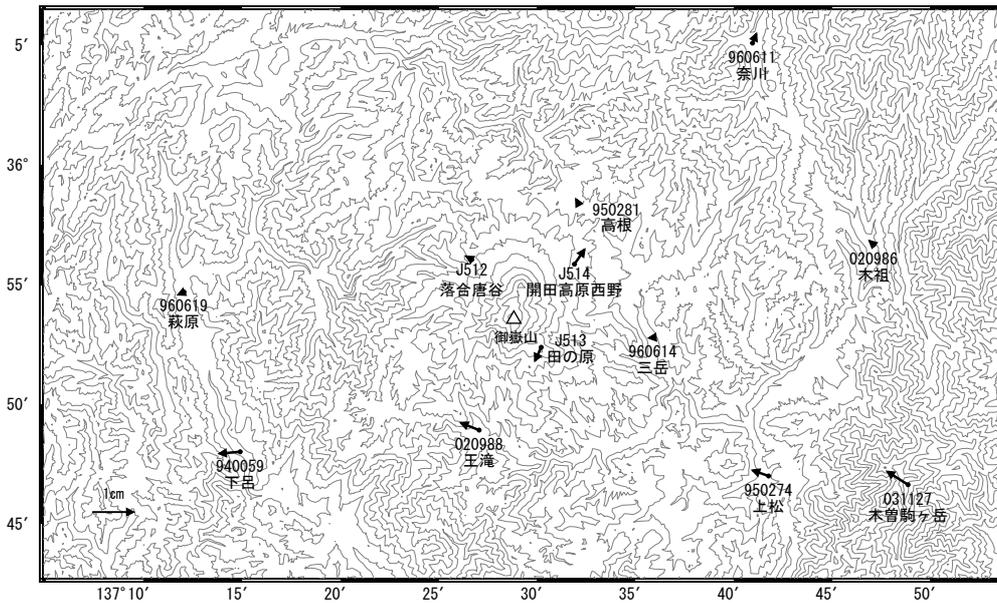


☆ 固定局:白鳥(950282)

国土地理院・気象庁

御嶽山周辺の地殻変動(水平:1年)

基準期間:2013/10/01~2013/10/10[F3:最終解]
比較期間:2014/10/01~2014/10/10[R3:速報解]



☆ 固定局:白鳥(950282)

国土地理院・気象庁

観測局情報

点番号	点名	日付	保守内容
J512	落ち唐谷	20131107	解析方法の変更によるオフセット補正
J513	田の原	20131106	新設(J510田の原より移転)
J514	開田高原西野	20131107	新設(J511開田高原西野より移転)

※[R3:速報解]は暫定値、電子基準点の保守、移転等による変動は補正済み

第3図 GEONET 観測による御嶽山周辺の水平変動ベクトル図(上段:2014年7月~2014年10月、下段:2013年10月~2014年10月)

Fig.3 Horizontal displacements around Ontakesan Volcanoby GEONET observation ; (upper) from July 2014 to October 2014, (lower) from October 2013 to October 2014.

御嶽山における正射画像の作成及び航空機搭載型合成開口レーダ(航空機 SAR) の観測

1. 正射画像の作成

国土地理院では、御嶽山周辺において平成 26 年 9 月 28 日、29 日に斜め写真の撮影を実施し、正射画像をホームページで公開した。今回作成した正射画像は、一般的に垂直写真から作成した同じ分解能の正射画像よりも位置精度が悪い。

<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h26-ontake-index.html>

1) 9 月 28 日正射画像



撮 影 日 平成 26 年 9 月 28 日
公 開 平成 26 年 9 月 28 日
技術資料 C1-No. 443

2) 9 月 29 日正射画像



撮 影 日 平成 26 年 9 月 29 日
公 開 平成 26 年 9 月 29 日
技術資料 C1-No. 443

第 4 図 御嶽山における正射写真の作成と航空機 SAR 観測

Fig.4 Orthophotos and airborne SAR in Ontakesan Volcano.

2. 航空機搭載型合成開口レーダ（航空機 SAR）の観測

Xバンド（送信中心周波数：9.65GHz）の航空機 SAR を用いて、御嶽山火口部周辺の観測を実施し、観測成果として反射強度画像を作成した。

1) 観測諸元

- (1) 観測日 : 2014 年 9 月 29 日（16 時～17 時） コース 1S、2S、3S、4S
9 月 30 日（10 時～11 時） コース 3S、4S、5S
- (2) 観測高度 : 5,200m（全コース進行方向左側を観測）
- (3) オフナディア角 : 75°
- (4) 偏波 : 水平送信/水平受信

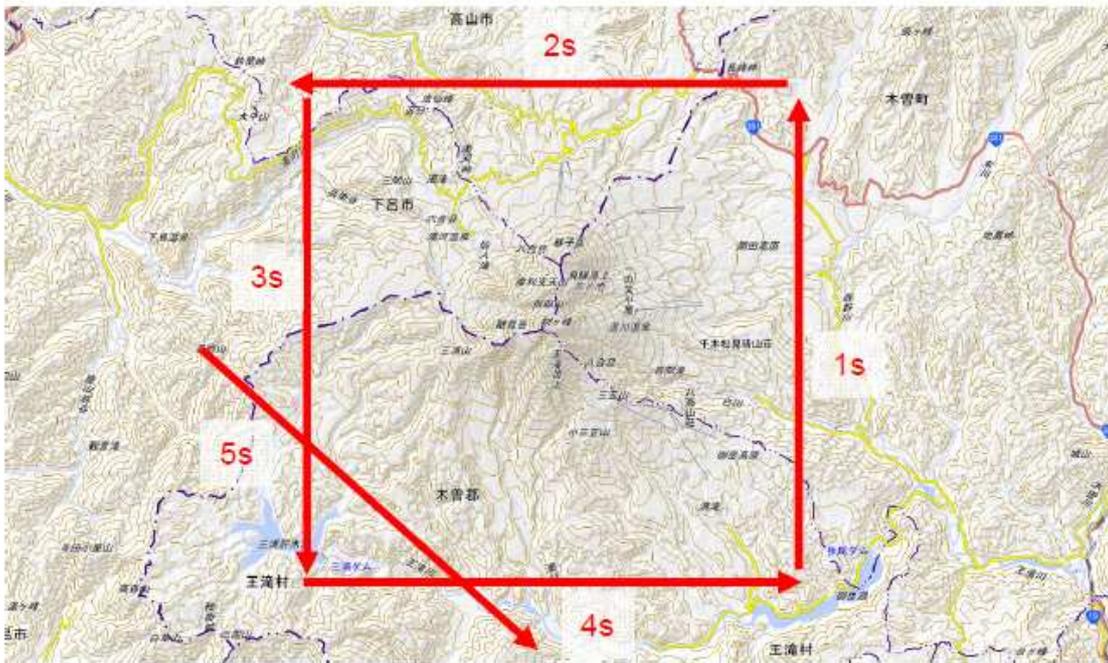


図 1 観測コース（5コース）



写真 1 観測時の御嶽山山頂付近の斜め写真（左：9月29日、右：9月30日）

第 5 図 御嶽山における航空機搭載型合成開口レーダ（航空機 SAR）の観測

Fig.5 Observation of airborne synthetic aperture radar in Ontakesan Volcano.

2) 観測成果

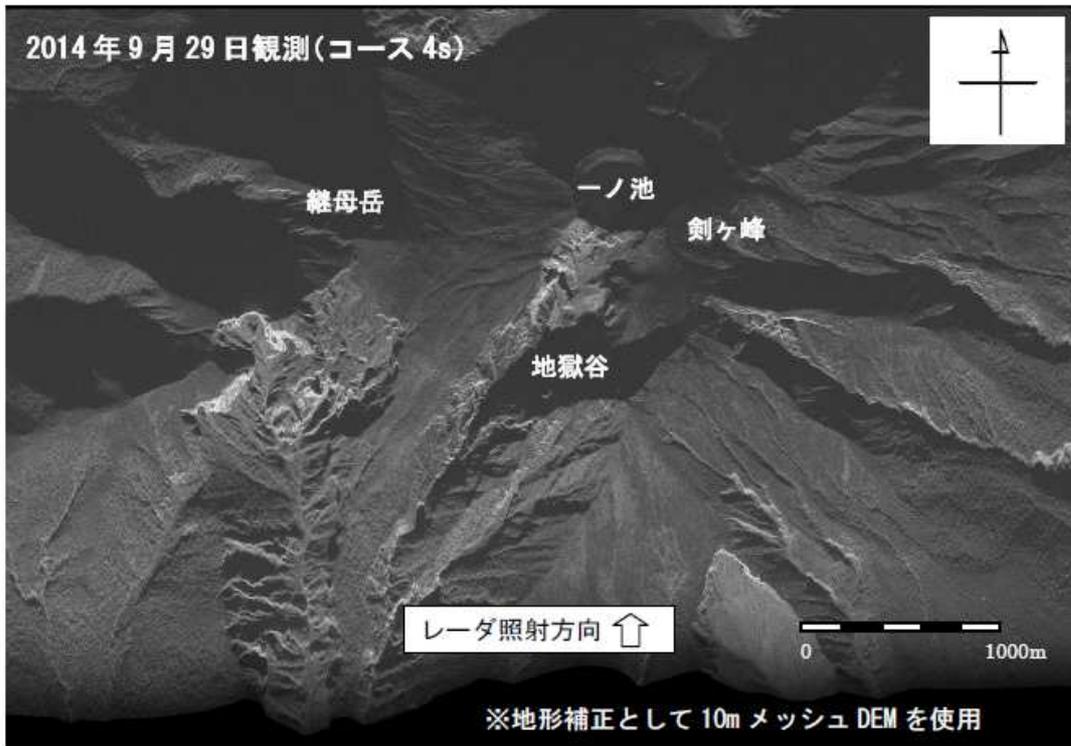


図2 9月29日観測の反射強度画像

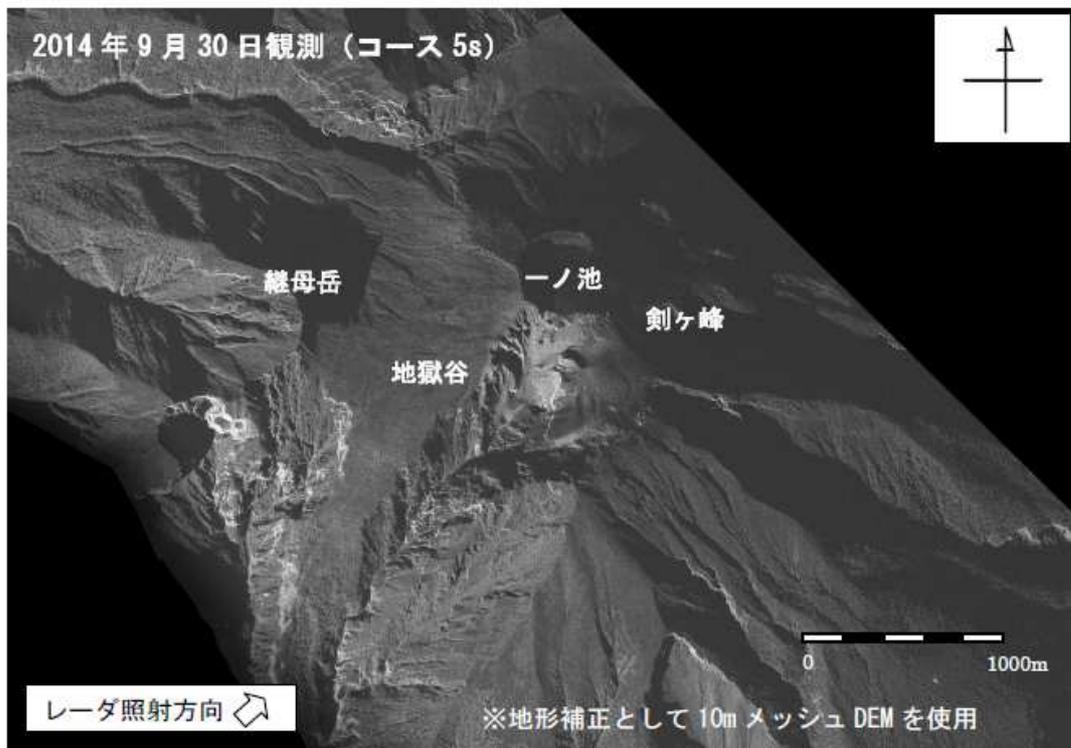


図3 9月30日観測の反射強度画像

第6図 観測成果(航空機 SAR の画像)

Fig.6 Image of airborne SAR.

3) 噴火口の推定

今回、御嶽山地獄谷周辺の噴煙が上がっている範囲について、航空機 SAR の反射強度画像(9 月 29 日、30 日)をもとに噴火口を判読しその位置を特定した。図 4 の赤色枠で示した箇所は噴火口と推定したものの、また黄色枠で示した箇所は噴火前の地形と比較して窪んでいることが確認できた箇所であるが、噴煙が確認できなかったことから噴火口の可能性があるものとして整理した。判読には航空機 SAR の反射強度画像の他に手持ちカメラによる斜め写真、噴火前の平成 25 年に作成された 5m メッシュ DEM など各種資料を使用した。なお、9 月 30 日の斜め写真では噴火口の可能性があるもののうち A の付近からの噴煙が確認できる。他の推定火口については 28 日以降の斜め写真では噴煙を確認することはできていない。

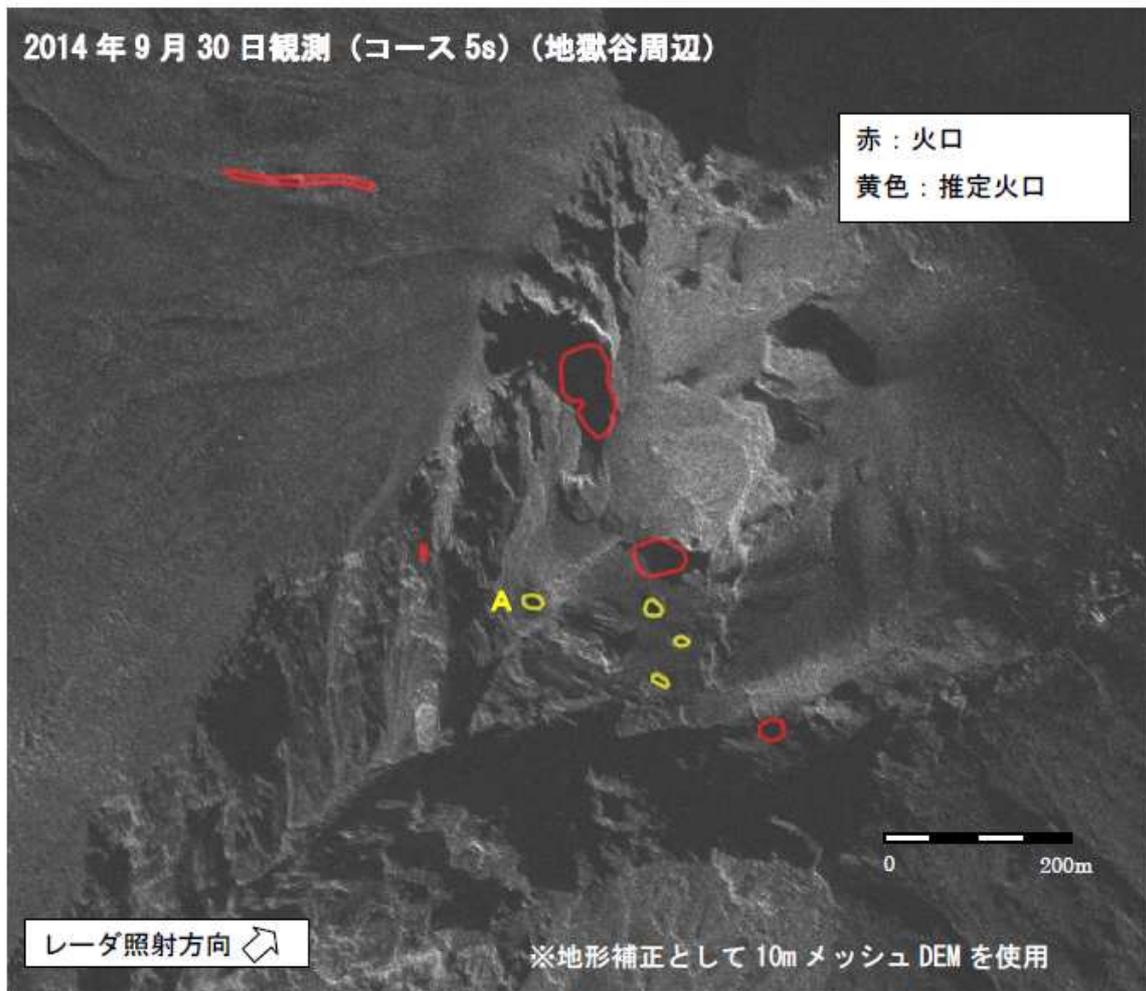


図 4 9 月 30 日観測の反射強度画像と判読により推定された噴火口

今後、航空機 SAR より作成した標高データを用いて、既存の標高データと比較等を行い、SAR 観測データの活用の可能性を検討する。

第 7 図 火口の推定

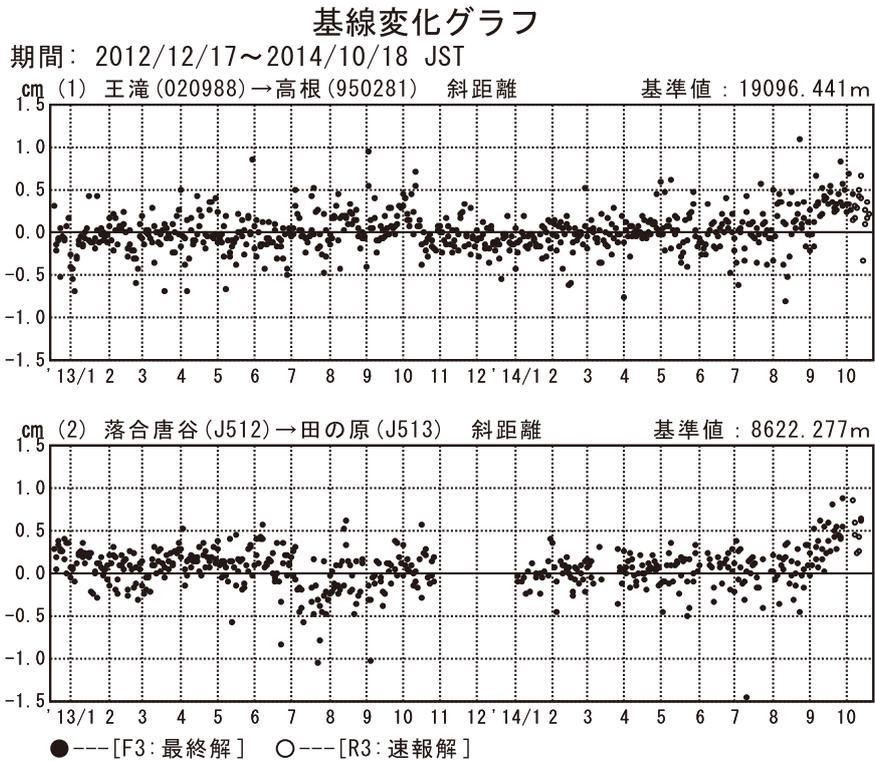
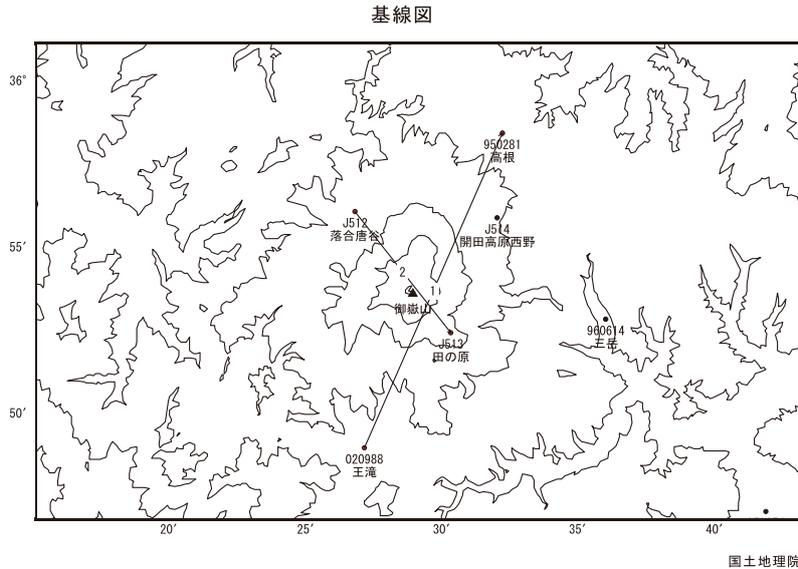
Fig.7 Estimation of crater.

GNSS の精密な解析結果

10月中旬に得られた測位衛星の最終暦^{注1}を使用した精密な解析(最終解)による基線変化グラフには、9月上旬頃から御嶽山を挟む基線でごくわずかな基線の伸びが見られます^{注2}。10月5日以降の速報解^{注1}を含めると、9月下旬頃から停滞の傾向が見られます^{注2}。

注1: GNSS衛星の位置を示す軌道暦の内、最も精密な最終暦は観測の2から3週間後にIGS(International GNSS Service)から提供されます。これを使用した測位解が最終解です。また、観測の2日後に提供される速報暦による測位解が速報解です。

注2: 基線変化は、山体膨張等による地殻変動の他、気象擾乱等でも生じます。気象擾乱等による見かけの変化は1cmを超えることもあり、ミリメートルレベルの地殻変動監視には十分な検討が必要です。



第8図 GNSS の精密な解析結果

Fig.8 Results of precise GNSS analys in Ontakesan Volcano.

御嶽山の SAR 干渉解析結果について

<解析>

2014年9月27日に噴火した御嶽山について、噴火前後にALOS-2/PALSAR-2が撮像したデータを用いてSAR干渉解析を行った。それぞれの観測日時、観測モード、オフナディア角、観測軌道等の詳細は表1に示すとおりである。

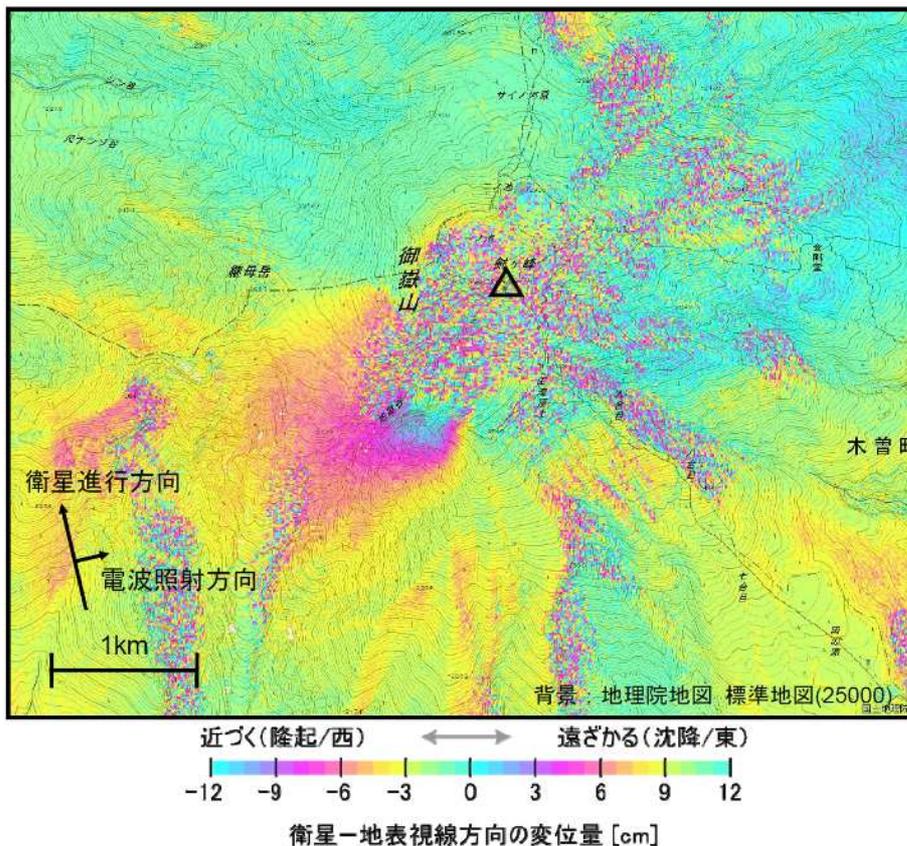
地形縞の除去には、10mデジタル楕円体高モデルを用い、2パス法で解析を行った。基線値の再推定による軌道残存縞の除去、大気誤差については標高の一次関数近似による低減処理を行った。

表 1 解析に用いたデータの諸元

衛星名	ALOS-2
観測日時 (JST)	2014/08/18 23:58 - 2014/09/29 23:58
観測モード/偏波	高分解能(3m)/HH
軌道/観測方向	北行/右
ワザン角	46.8°
垂直基線長	+ 97 m
使用 DEM	GSI10mDEHMJapan (飛田, 2009)

<結果>

解析の結果、噴火口近傍の南西側で、1km 程度の広がりのごく狭い領域において位相変化が検出された。位相変化が地表変位によるものとする、最大で約 10cm の衛星に近づく変位となる。それ以外では、広範囲にわたる位相変化は見られず、地下数 km よりも深いところでのマグマ等の活動に起因した地殻変動は検出されていないと考えられる。



第 8 図(a) 「だいち 2 号」PALSAR による御嶽山周辺地域の解析結果

Fig.8(a) Interferometric analysis of SAR acquired by ALOS-2 PALSAR-2 on Ontakesan Volcano.

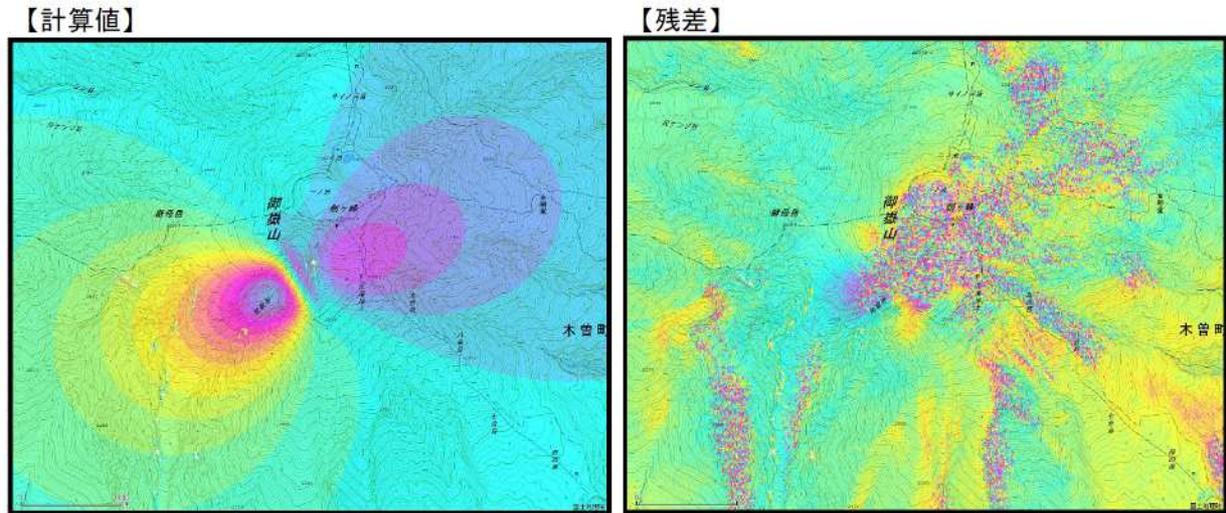
<考察>

SAR 干渉解析により検出された噴火口近傍の位相変化については、(1) 地下の変位源による地殻変動、(2) 地すべりによる地表変位、(3) 火山灰等の堆積による位相変化、が原因の候補として挙げられる。それぞれの可能性について検討を行った。

(1) 地下の変位源による地殻変動

噴火口近傍で検出された位相変化は、1km 程度のごく狭い領域に限られることから、地下の変位源による地殻変動の場合、その変位源は非常に浅い位置にあると予想される。

変位源として矩形の開口クラック 1 枚を仮定し、Simulated Annealing 法によりパラメータ推定を行った。観測位相と計算位相の残差二乗和が最小となる解を最適解とした。なお、残差二乗和の計算の際に、変動域の変位の重みを大きくし、大気の影響や地形を考慮していない影響を抑えることを目的に、山頂域から各計算点の距離の二乗の逆数を重みとした。開口クラックの位置は国土地理院による火口配列に強く拘束し、走向角 140-150°、断層長 0.3-0.5km、傾斜角 0-90° (南東傾斜)、開口量 0-2m の範囲で探索を行った。また、気象庁の傾斜計 (田の原) で観測された噴火前後の傾斜量を図から読み取った値も推定に用いた。なお、地形 (標高) の効果は考慮していない。推定されたパラメータ、計算される位相変化量および観測位相からの残差を以下に示す。検出された位相変化がほぼ説明できていることが分かる。



Lon.	Lat.	Depth	Length	Width	Strike	Dip	Open
137.477°	35.888°	0.76km	0.5km	1.3km	150°	84.6°	0.45m

(断層の中央位置で定義。断層上端の深さは 0.1km)

第 8 図(b) 「だいち 2 号」 PALSAR-2 による御嶽山周辺地域の解析結果

Fig.8(b) Interferometric analysis of SAR acquired by ALOS-2 PALSAR-2 on Ontakesan Volcano.

(2) 地すべり

地表面での変位の原因としては、上記の地下の変位源によるものの他に、地すべりによる地表変位が考えられる。

地すべり変位による位相変化の場合、地すべりブロックの境界域での位相勾配が大きいという特徴があるが、今回得られた位相変化の空間分布はそのような特徴を示していない。また、噴火口周辺に地すべり地形は見られない。これらのことから、噴火口近くで検出された位相変化は、地すべりの可能性は低いと考えられる。

(3) 火山灰の堆積による位相変化

SAR 干渉解析で検出される位相変化の原因として、地表面が変位することによる位相変化の他に、火山灰の堆積による位相変化の可能性が考えられる。火山灰の堆積による位相変化の可能性を指摘した報告としては、霧島新燃岳の噴火に伴う降灰領域における位相変化（防災科学技術研究所、2011）やアナタハン島において降下火山灰の層厚と一致する位相変化の検出（松島ほか、2010）がある。

SAR 干渉解析において、干渉が得られるためには散乱特性が保存されることが必要であり、例えば松島ほか（2012）では、火山灰が地形の起伏を保持したまま堆積する状況を考え、噴火口から離れた場所での降下火山灰の堆積を想定している。しかし、今回捉えられた変位領域は噴火口に近く、火砕流による横方向からの堆積が想定され、地形が保存されない可能性が高い。したがって、今回捉えられた噴火口周辺の位相変化が、火山灰の堆積による可能性は低いと考えられる。

以上の検討から、SAR 干渉解析で検出された位相変化は、地下の非常に浅い位置の変位源による地殻変動である可能性が高いと考えられる。活動の推移を把握するために、今後も継続的な観測が必要である。

(謝辞)

本解析で使用した PALSAR-2 データは、防災利用実証実験の火山 WG を通じて提供されたものである。PALSAR-2 原初データの所有権は JAXA が有する。

第 8 図(c) 「だいち 2 号」PALSAR による御嶽山周辺地域の解析結果

Fig.8(c) Interferometric analysis of SAR acquired by ALOS-2 PALSAR-2 on Ontakesan Volcano.