

桜島周辺の地殻変動*

Crustal Deformations around Sakurajima Volcano

国土地理院

Geospatial Information Authority of Japan

第1図、第2図(a)、(b)は、桜島周辺におけるGNSS連続観測結果である。第1図上段に基線の配置を、下段に各観測点の保守の履歴を示した。第2図(a)、(b)は基線長の時系列グラフで、左列に最近約5年間の時系列を、右列に最近約1年間の時系列を示した。島内の基線の(1)「鹿児島2」-「桜島」、(2)「鹿児島3」-「桜島」、(3)「鹿児島3」-「鹿児島2」では、2013年2月頃からわずかな伸びの傾向が見られていたが、同年7月から停滞またはわずかな縮みの傾向が見られる。始良カルデラを挟む基線では、長期的な伸びの傾向が続いていたが、2013年6月頃から停滞気味である。

第3図は、桜島周辺のGNSS観測点における水平変動ベクトル図である。第3図上段の最近約3か月間の図では、顕著な変動は見られない。第3図下段の最近1年間の図では、始良カルデラでは膨張傾向が確認できる。

第4図は、桜島島内のGEONETと、気象庁によるGNSS観測点のデータを統合解析した水平変動ベクトル図である。第4図上段は最近約3か月間の変動を示したものである。明瞭な変動傾向は確認できない。下段の最近1年間の図でも、同様に明瞭な変動傾向は確認できない。

第5図、第6図は、これらのGNSS観測データに基づき、時間依存のインバージョン手法により、変動源を茂木ソースと仮定して体積の増減を時系列的に推定した結果である。第5図は桜島島内の変動源(茂木ソース1)と始良カルデラの変動源(茂木ソース2)の2つの変動源を仮定した場合の2014年2月1日までの体積変化時系列の推定結果である。第5図の上段は推定に用いた観測点の配置と仮定した変動源の位置図である。下段左の桜島島内の変動源(茂木ソース1)は、2011年9月以降は膨張傾向が推定されているが、2012年初め頃からは反転して収縮傾向となっている。2013年2月頃からの体積増加と7月頃からの体積減少が見られる。始良カルデラの変動源(茂木ソース2)は、速度に若干の変化はあるものの、長期的に膨張を続けてきたが、2013年6月頃から体積膨張が停滞気味である。この推定結果は、桜島直下の変動源は活動状況に関連して増減がある一方、始良カルデラの変動源では継続的にマグマ蓄積が進んでいたが、最近では鈍っていることを示すものと考えられる。第6図(a)、(b)は、推定された膨張源の変動による各観測点の地殻変動の計算値と、観測値を比較した時系列グラフである。

第7～10図は、6年ぶりに行った京都大学、九州大学との共同の水準測量の結果である。第7図東側の曾於(そお)市を基準とすると霧島市、垂水(たるみず)市では1、2cmの隆起、桜島北部で4cm前後の隆起が見られる。桜島東部では、局所的な沈降が見られる。

第8図の西側の路線では北側隆起、島内の路線では中心側で沈降が見られる。

第9図は、水準測量の網平均後の上下変動の分布図である。桜島北部で隆起、桜島東部の昭和(1946年)溶岩流上で局所的な沈降が見られる。

第10図は、水準測量結果から推定した茂木ソースの体積変化量である。ソースの位置は第5図の

* 2014年3月28日受付

GNSSによる推定と同じにした。茂木ソース1の0.3百万 m^3 増加、茂木ソース2の27百万 m^3 増加は、GNSSによる推定と整合的である。

第11図(a)に、航空機搭載型合成開口レーダの2013年9月の撮影コース(図1)を示した。

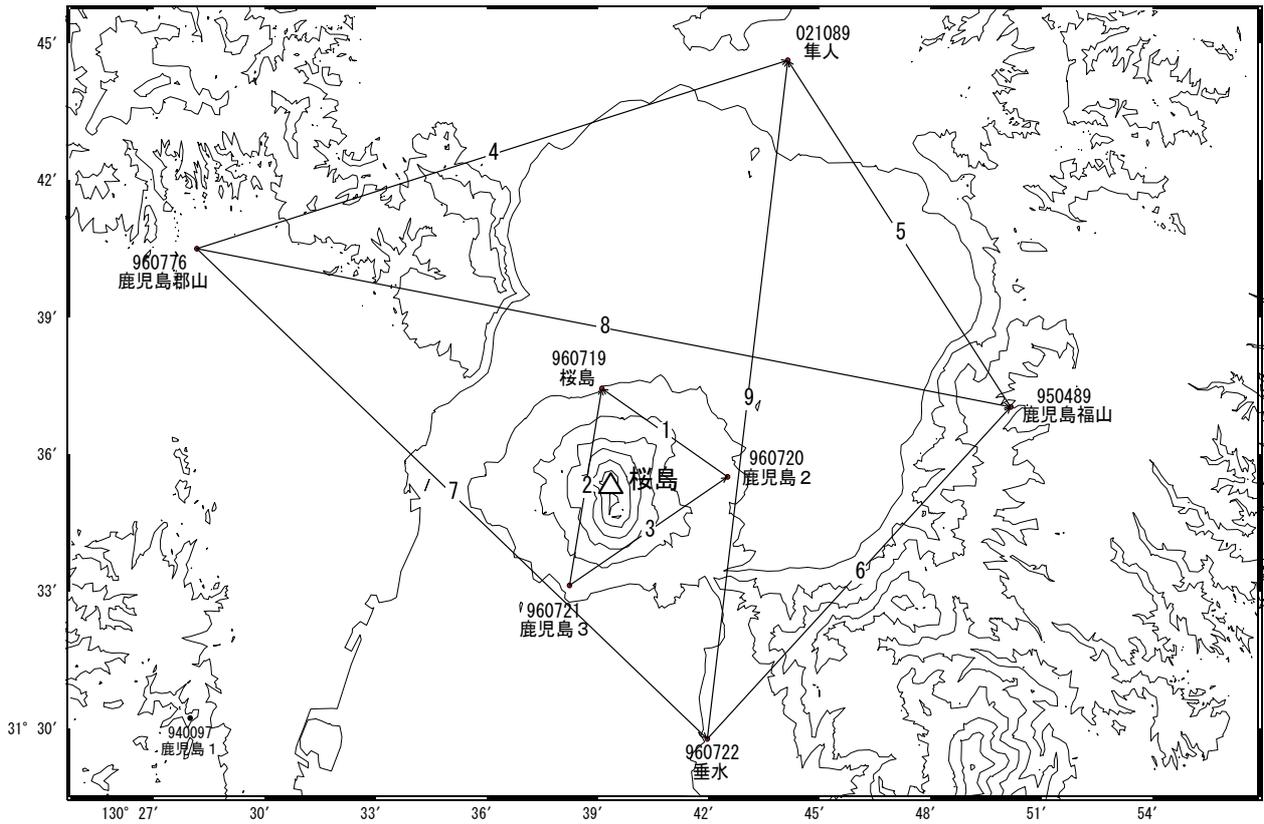
第11図(b)の上段は反射強度画像(図2)、下段は干渉処理により抽出した標高データ(図3のカラー表記部分)である。

第11図(c)の左の反射強度画像(図4)では、昭和火口西壁部において(オレンジの枠で示したように)明るい領域が拡大している。これは、新たに物質が現れた、もしくは粗度が増加した可能性が考えられる。

第11図(d)は、2012年に対する2013年の標高変化を色で示したもの(図6)で、赤で示したプラスの標高変化は、南岳東壁や昭和火口の北壁で見られ、マイナスの標高変化は昭和火口の南西壁で見られる。

第11図(e)の上段は、2011年に取得した航空機レーザデータと、2012年の航空機SARの比較により、標高変化を色で示したもの(図7)で、下段は、2011年の航空機レーザデータと、2013年の航空機SARの比較(図8)である。両図とも5m程度の精度で標高変化は捉えられている。レーザとレーダのそれぞれの長所・短所を活かして、標高変化を知ることができそうである。

桜島周辺 GNSS連続観測基線図



桜島周辺の各観測局情報

点番号	点名	日付	保守内容
960719	桜島	20100303	レドーム開閉・受信機交換
		20121027	アンテナ交換
960720	鹿児島2	20100303	レドーム開閉・受信機交換
		20121026	アンテナ交換
960721	鹿児島3	20070911	アンテナ交換
		20100303	レドーム開閉・受信機交換
		20121026	アンテナ交換
021089	隼人	20120926	アンテナ・受信機交換
960776	鹿児島郡山	20120326	周辺伐採
		20120925	アンテナ・受信機交換
960722	垂水	20120927	アンテナ・受信機交換
950489	鹿児島福山	20120926	アンテナ・受信機交換

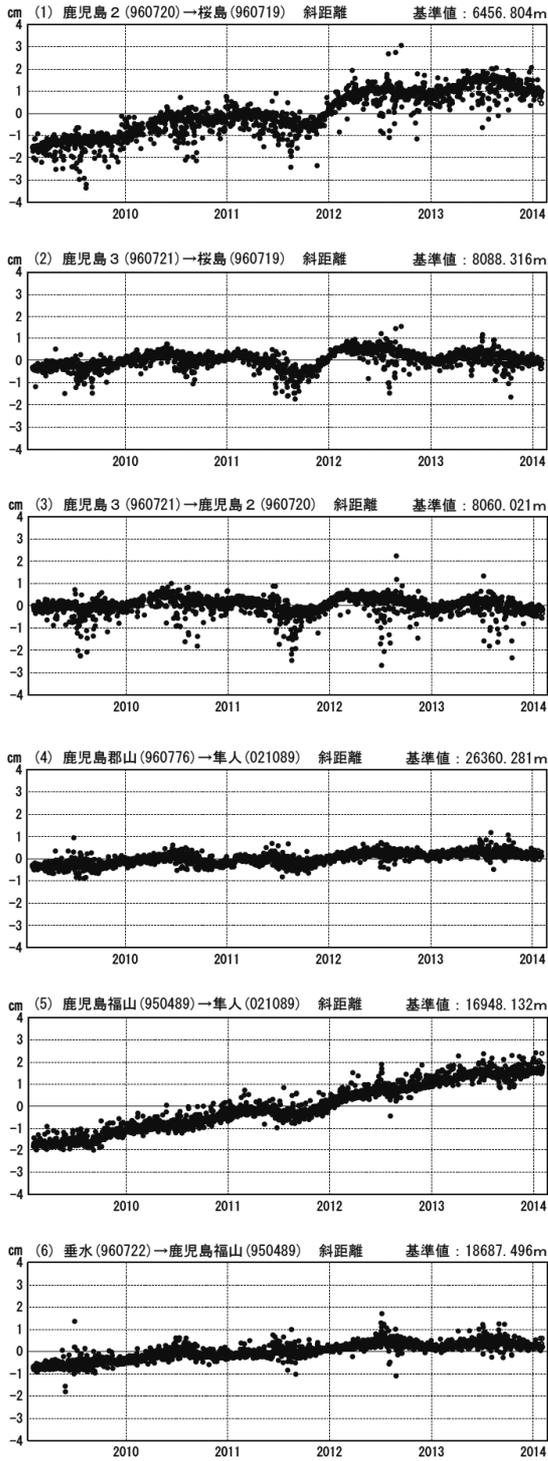
※[R3:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

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

Fig.1 Site location map of the GNSS continuous observation network around Sakurajima Volcano; (upper) Site location map, (lower) History of site maintenance.

基線変化グラフ

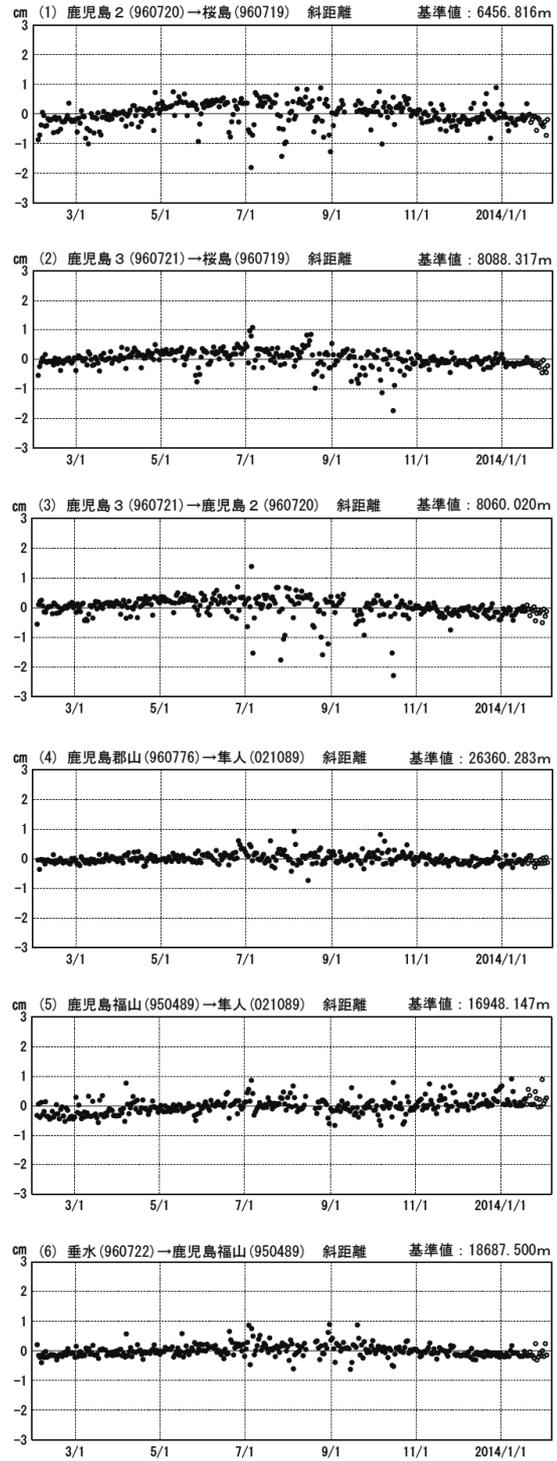
期間：2009/02/01～2014/02/02 JST



●—[F3:最終解] ○—[R3:速報解]

基線変化グラフ

期間：2013/02/01～2014/02/02 JST



国土地理院

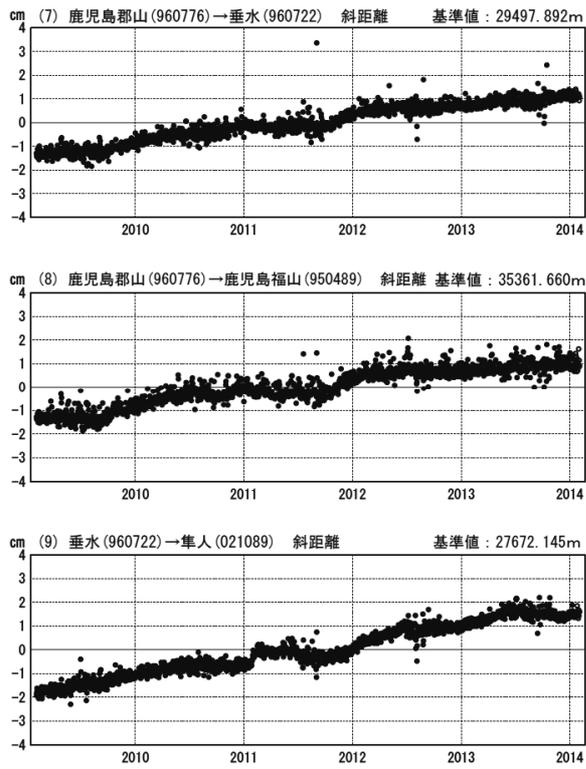
※[R3:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

第2図(a) 桜島周辺のGNSS連続観測結果(基線長 左列:2009年2月～2014年2月、右列:2013年2月～2014年2月)

Fig.2 (a) Results of continuous measurements of the GNSS around Sakurajima Volcano; Baseline length (left) from February 2009 to February 2014, (right) from February 2013 to February 2014.

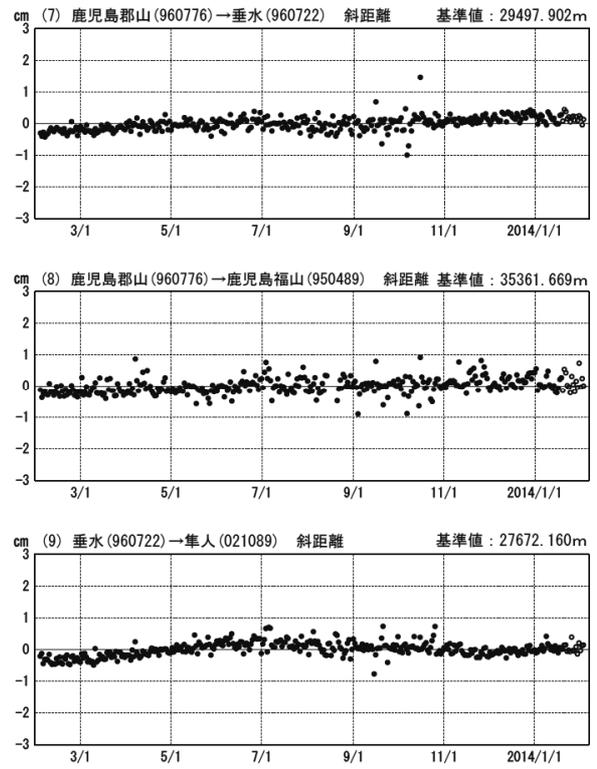
基線変化グラフ

期間：2009/02/01～2014/02/02 JST



基線変化グラフ

期間：2013/02/01～2014/02/02 JST



●—[F3:最終解] ○—[R3:速報解]

国土地理院

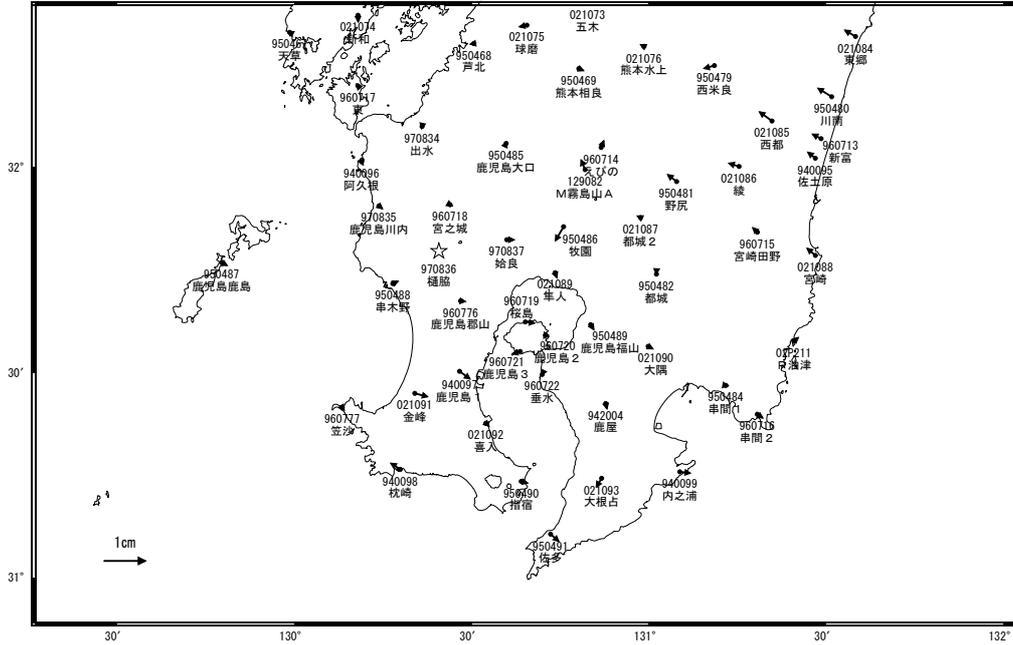
※[R3:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

第2図(b) 桜島周辺のGNSS連続観測結果(基線長 左列：2009年2月～2014年2月、右列：2013年2月～2014年2月)

Fig.2 (b) Results of continuous measurements of the GNSS around Sakurajima Volcano; Baseline length (left) from February 2009 to February 2014, (right) from February 2013 to February 2014.

南九州の地殻変動(3ヶ月)

基準期間:2013/10/09~2013/10/18[F3:最終解]
 比較期間:2014/01/09~2014/01/18[F3:最終解]

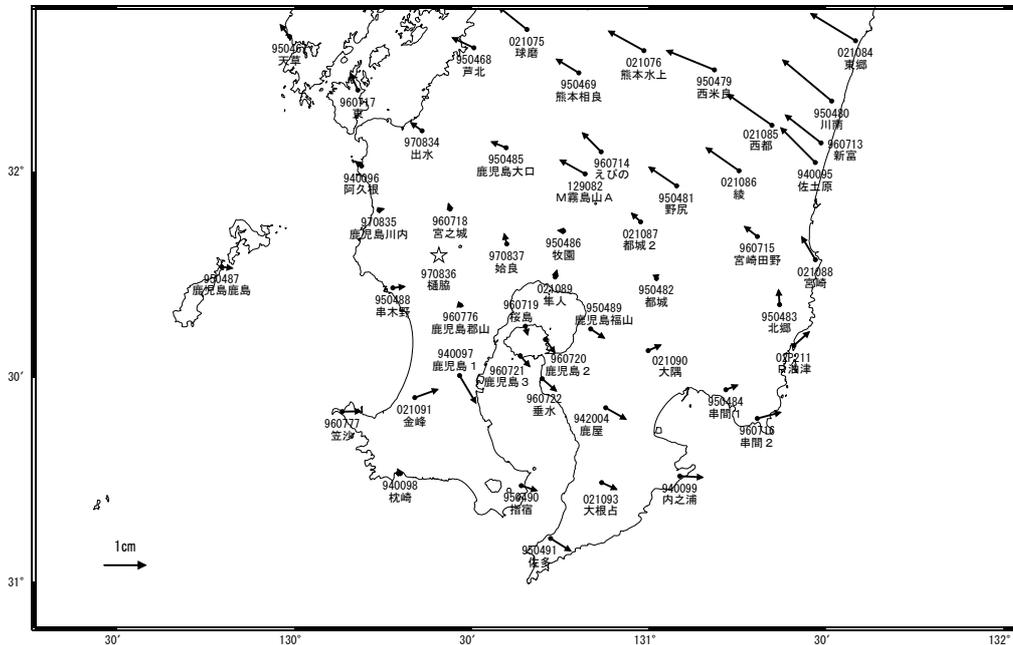


☆ 固定局:種子島(970836)

国土地理院

南九州の地殻変動(1年)

基準期間:2013/01/09~2013/01/18[F3:最終解]
 比較期間:2014/01/09~2014/01/18[F3:最終解]



固定局:種子島(970836)

国土地理院

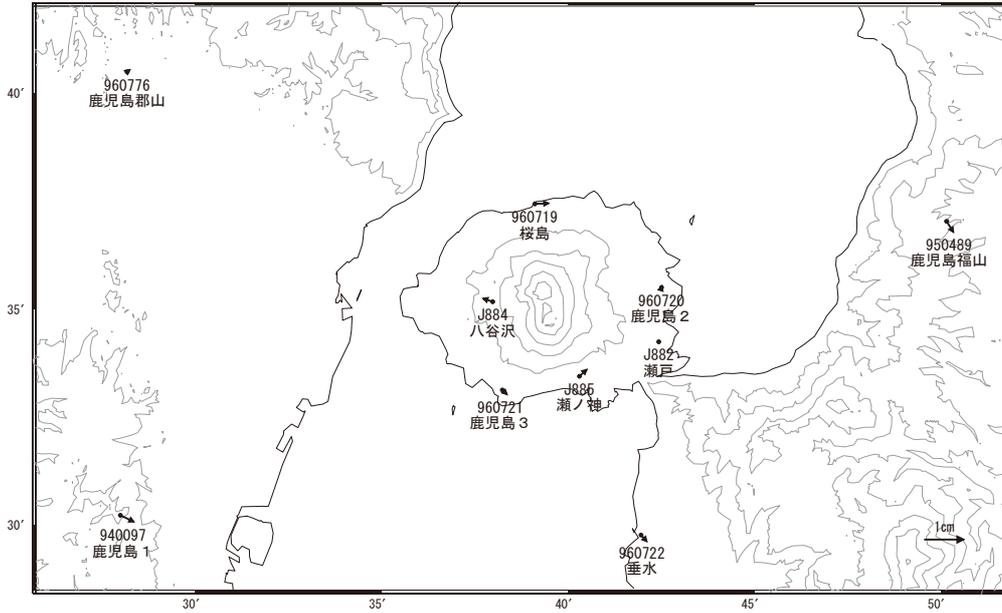
※ 電子基準点の保守等による変動は補正済み

第3図 桜島周辺におけるGNSS観測点の水平変動ベクトル図(上段:2013年10月~2014年1月、下段:2013年1月~2014年1月)

Fig.3 Horizontal displacements of GNSS stations around Sakurajima Volcano; (upper) from October 2013 to January 2014, (lower) from January 2013 to January 2014.

桜島周辺の地殻変動（3ヶ月）

基準期間:2013/10/05~2013/10/14[F3:最終解]
 比較期間:2014/01/05~2014/01/14[F3:最終解]

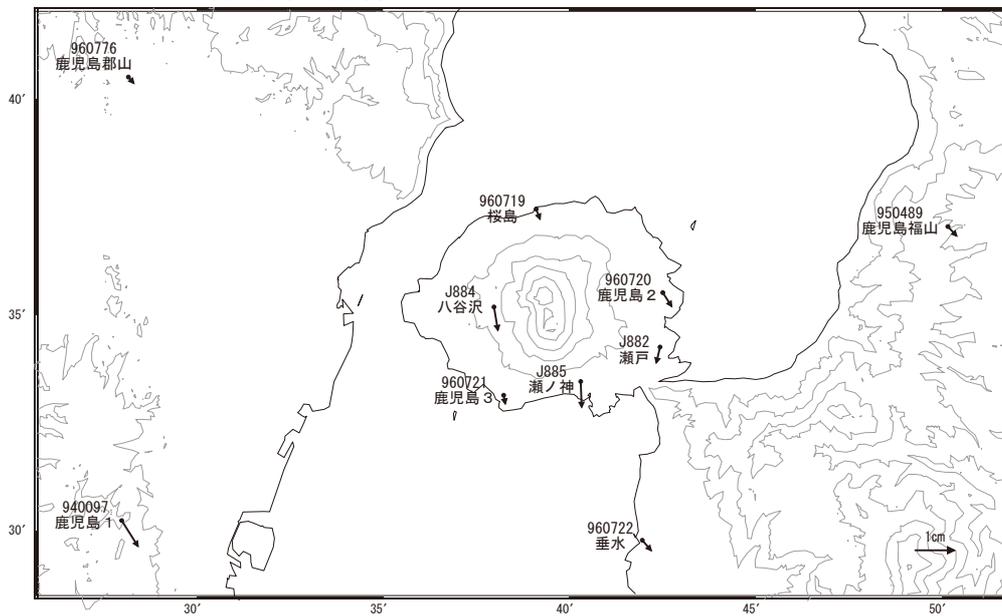


☆ 固定局:樋脇(970836)

国土地理院・気象庁

桜島周辺の地殻変動（1年）

基準期間:2013/01/09~2013/01/18[F3:最終解]
 比較期間:2014/01/09~2014/01/18[F3:最終解]



☆ 固定局:樋脇(970836)

国土地理院・気象庁

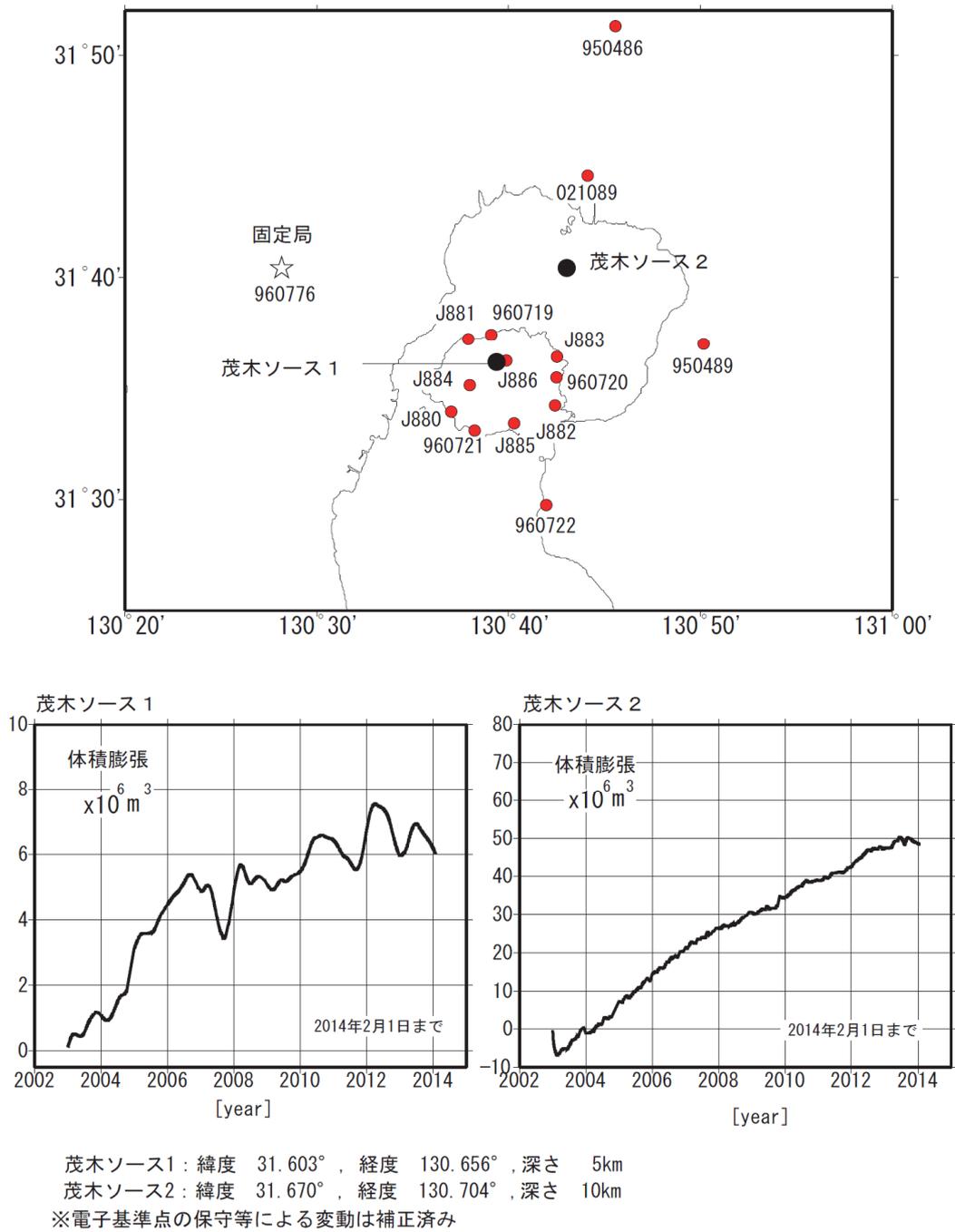
※ 電子基準点の保守等による変動は補正済み

第4図 桜島におけるGNSS連続観測点(国土地理院・気象庁観測点統合解析による)水平変動ベクトル図
 (上段:2013年10月~2014年1月、下段:2013年1月~2014年1月)

Fig.4 Horizontal displacements of GNSS stations around Sakurajima Volcano by combined analyzing system for GEONET sites and JMA sites; (upper) from October 2013 to January 2014, (lower) from January 2013 to January 2014.

桜島の茂木ソースの位置と体積変化

時間依存のインバージョン解析

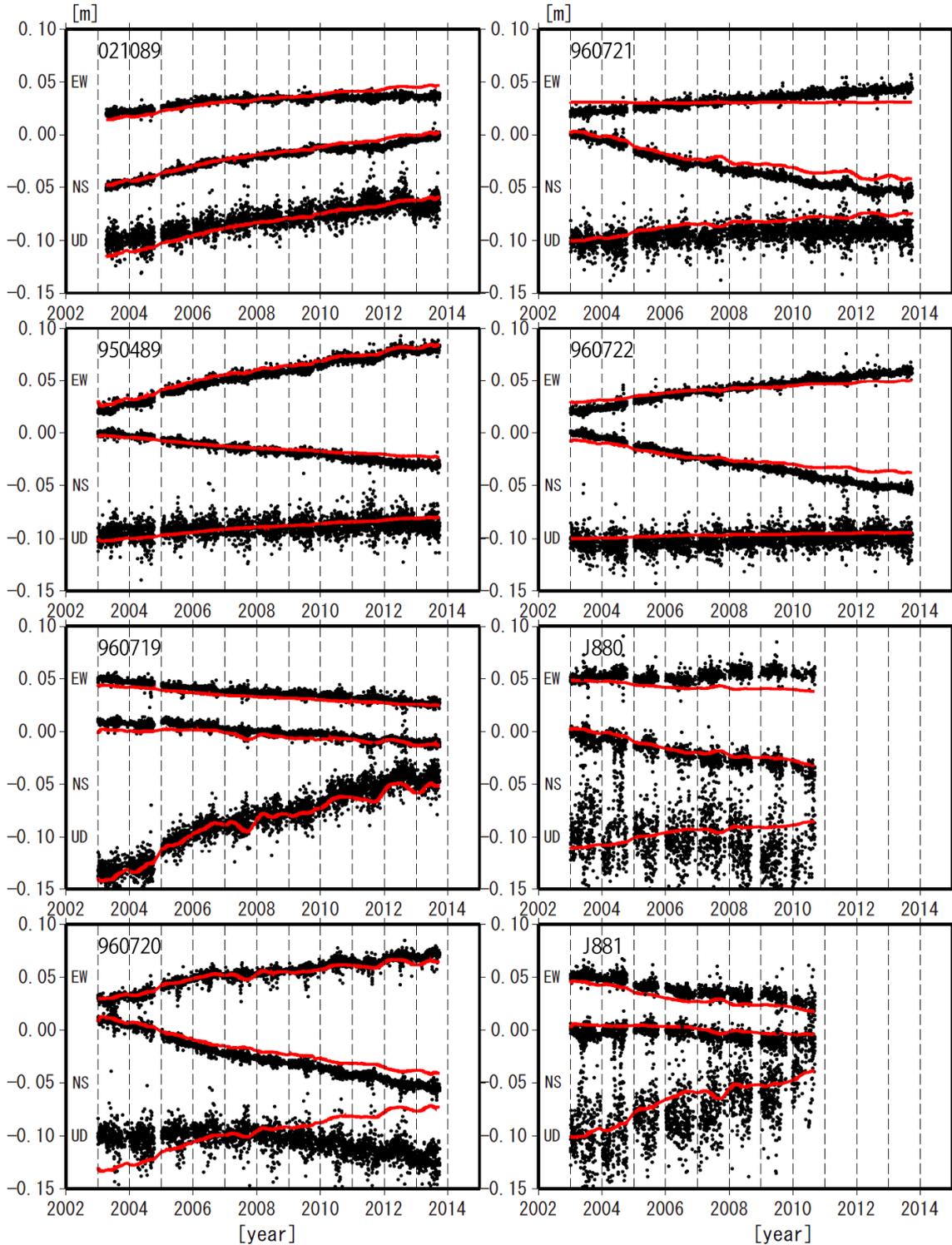


第5図 時間依存インバージョンの手法による桜島の変動源の体積変化推定・茂木ソース2つを仮定(上段:推定に用いた観測点(赤点)の配置と茂木ソースの位置(黒丸)、下段左、推定された茂木ソース体積の時間変化・桜島直下、下段右:推定された茂木ソース体積の時間変化・始良カルデラ深部)

Fig.5 Estimation of the volume change of Mogi-source by the time dependent inversion method, assuming two Mogi sources; (upper) distribution of GNSS observation sites (red dots) used for the inversion and Mogi-sources (black circles), (lower left) Time series of estimated volume, Mogi-source under the summit of Sakurajima volcano, (lower right) Time series of estimated volume, Mogi-source under the Aira caldera.

桜島周辺の観測点の座標時系列（黒丸）と計算値（赤線）

時間依存のインバージョン



固定局960776. EW, NS, UDは東西, 南北, 上下変動. 周期成分は除いている.

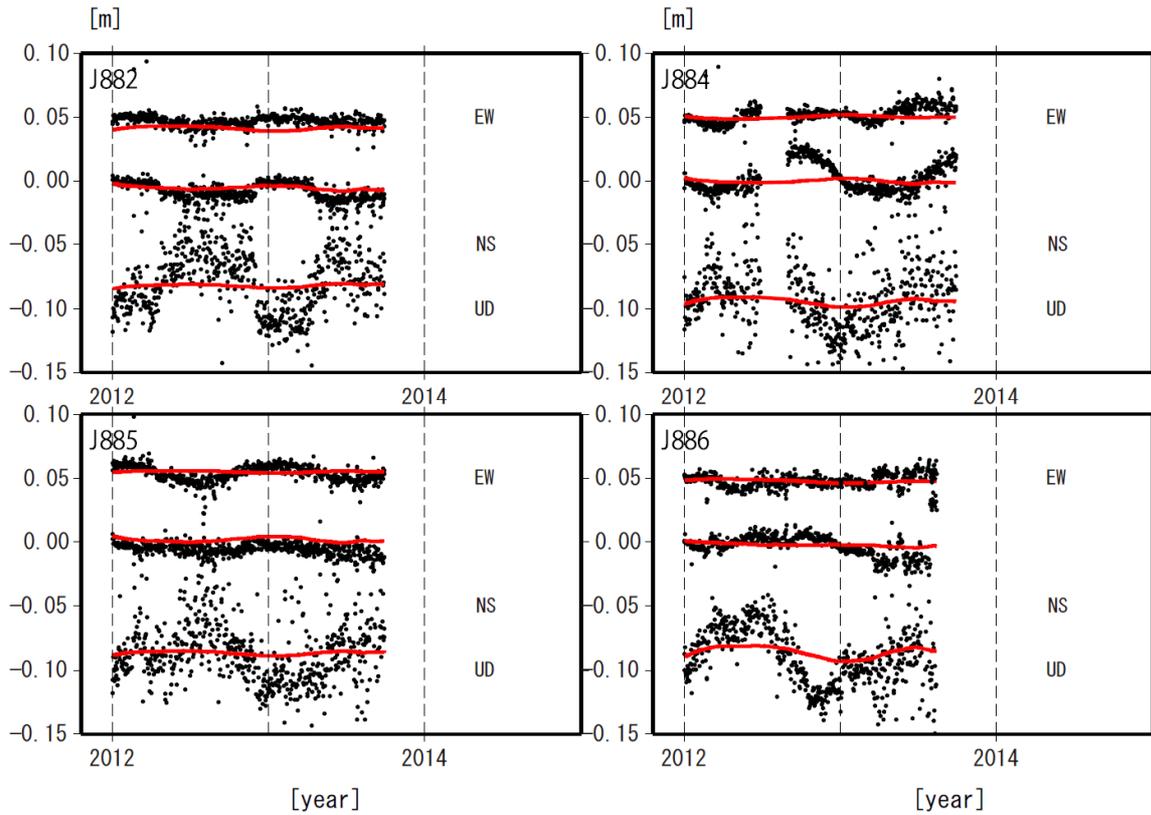
※電子基準点の保守等による変動は補正済み

第6図(a) 推定された茂木ソースによる地殻変動計算値(赤実線)と観測値(黒点)の比較

Fig.6(a) Comparison of calculated deformation from the estimated Mogi-source (red lines) and observed deformation (black dots).

桜島周辺の観測点の座標時系列（黒丸）と計算値（赤線）

時間依存のインバージョン



固定局960776. EW, NS, UDは東西, 南北, 上下変動. 周期成分は除いている.

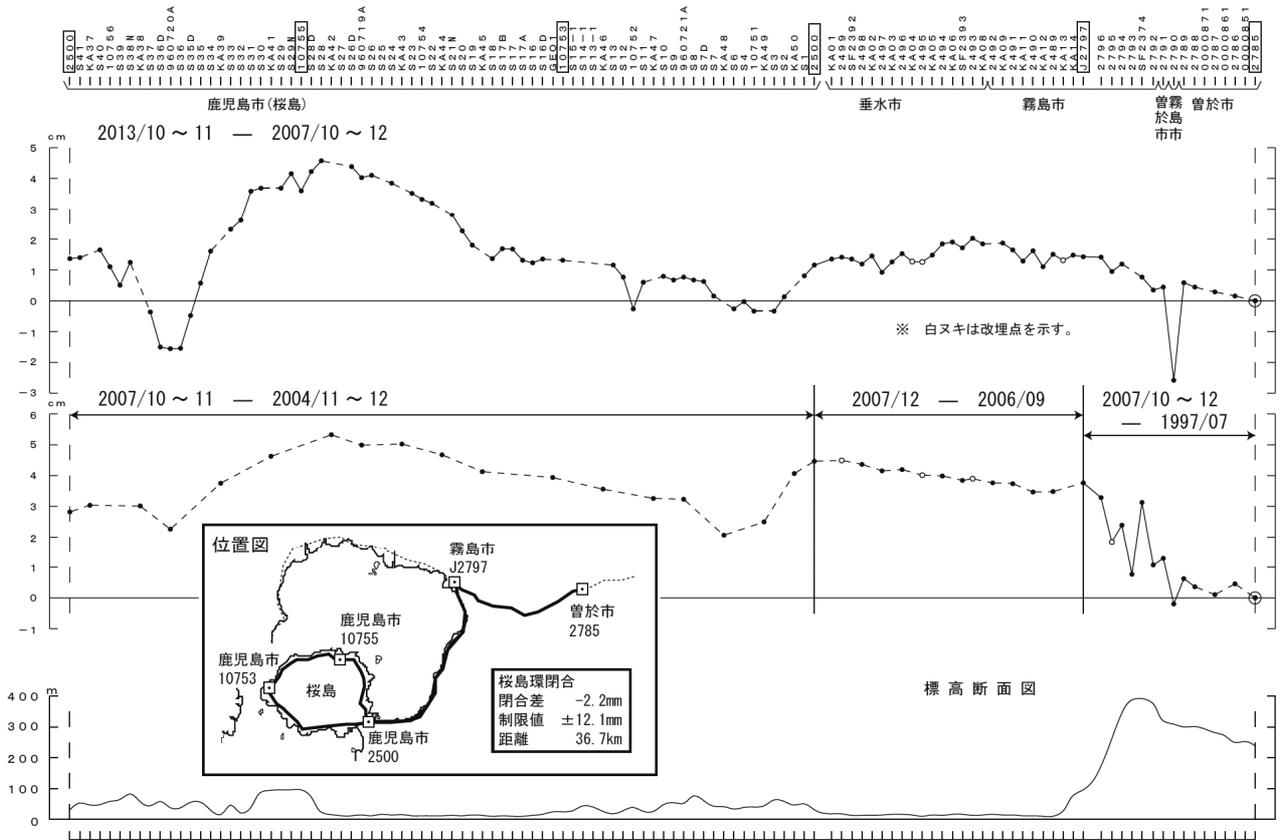
※電子基準点の保守等による変動は補正済み

第6図(b) 推定された茂木ソースによる地殻変動計算値(赤実線)と観測値(黒点)の比較

Fig.6(b) Comparison of calculated deformation from the estimated Mogi-source (red lines) and observed deformation (black dots).

鹿児島市（桜島）～曾於市間の上下変動

曾於市に対して桜島北部、垂水市および霧島市で隆起が見られる。



※2013年の2500～J2797間、2007年の2500～2788間の観測は京都大学・九州大学による。

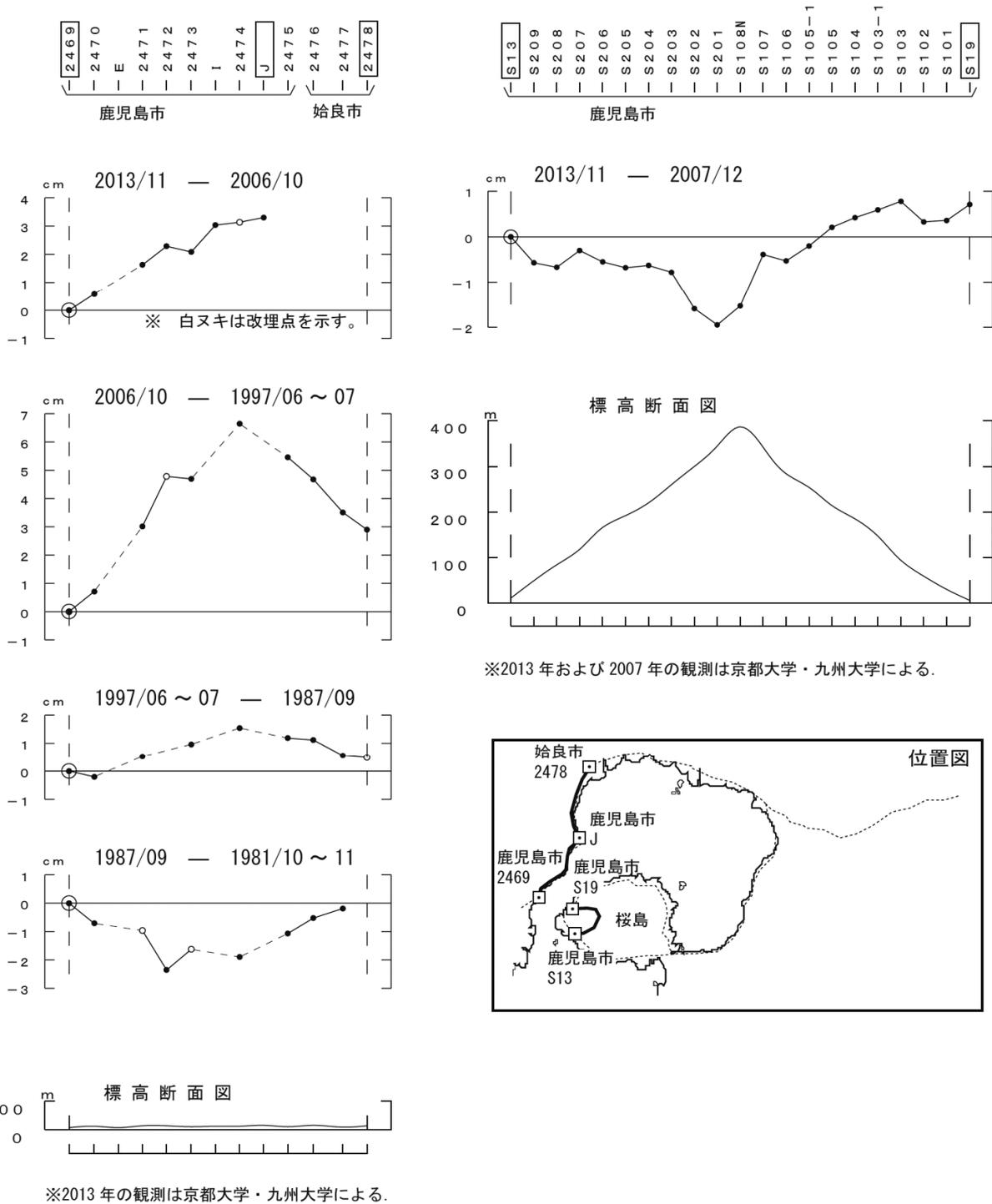
国土地理院・京都大学・九州大学

第7図 水準測量による鹿児島市（桜島）～曾於市間の上下変動

Fig.7 Results of leveling survey from Kagoshima city(Sakurajima Volcano) to Soo city.

鹿児島市～始良市間、桜島西部の上下変動

2469に対して北側で隆起が見られる。桜島の中心側で沈降が見られる。

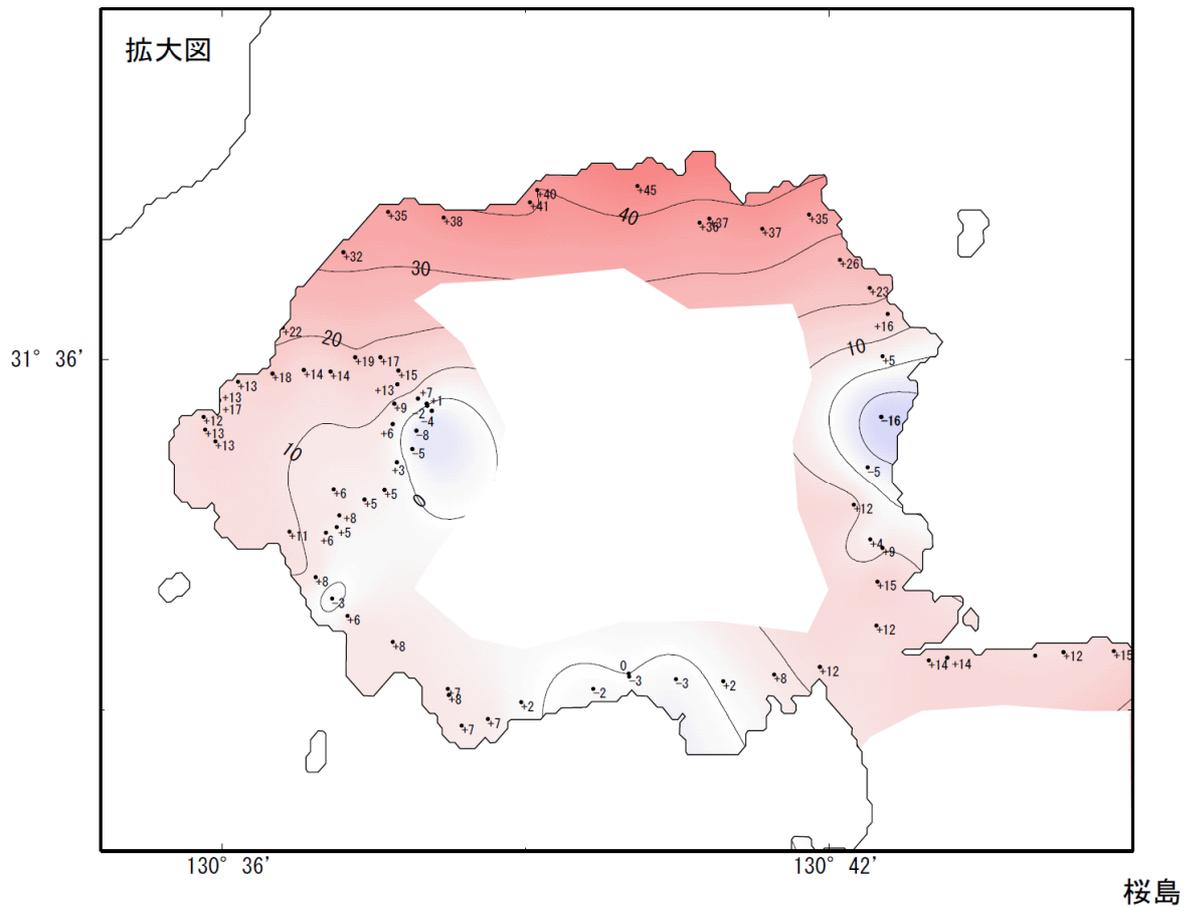
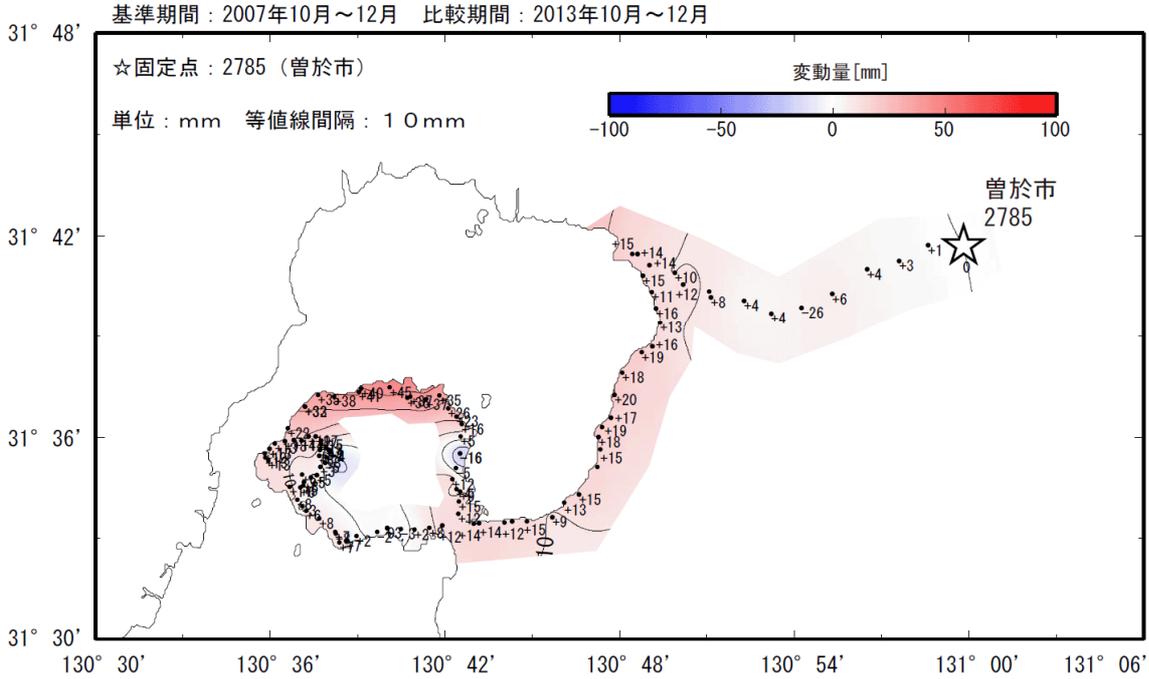


第8図 水準測量による鹿児島市～始良市間、桜島西部の上下変動

Fig.8 Results of leveling survey from Kagoshima city to Aira city, and western Sakurajima Volcano.

水準網平均による桜島周辺の上下変動

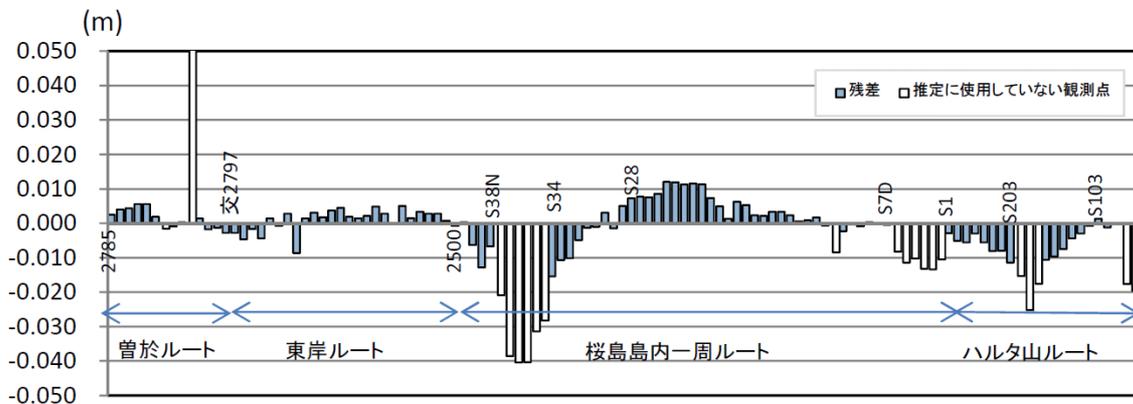
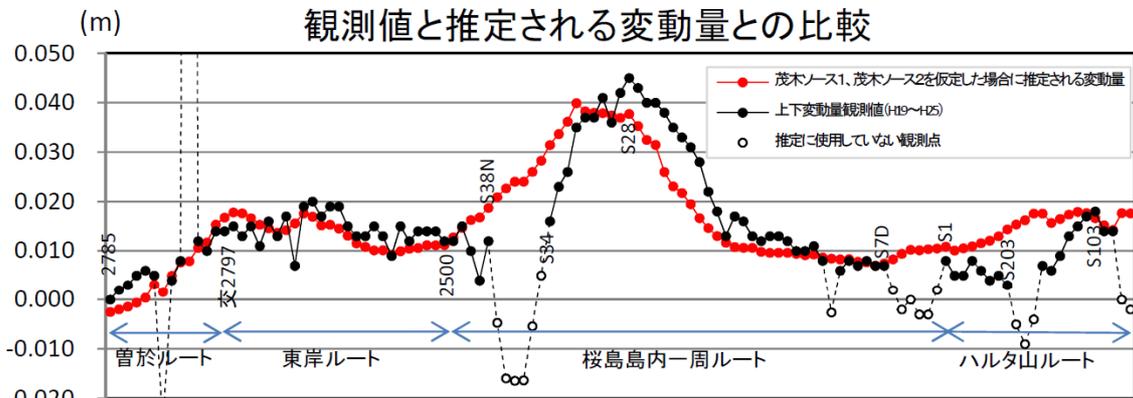
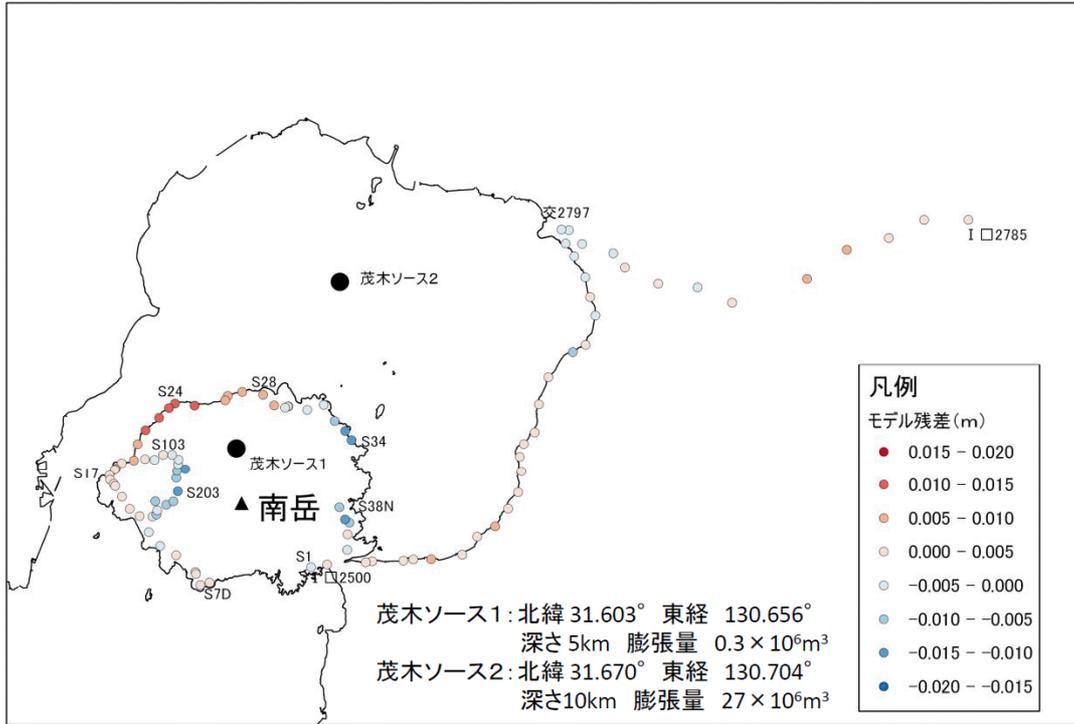
桜島北部で隆起が、桜島東部の一部にわずかな沈降が見られる。



第9図 水準網平均による桜島周辺の上下変動

Fig.9 Vertical movement by leveling net adjustment around Sakurajima Volcano.

上下変動量から推定した茂木ソースの体積変化量
(H19~H25)



※観測は国土地理院・京都大学・九州大学による。

桜島

第10図 上下変動量から推定した茂木ソースの堆積変化量

Fig.10 Estimation of the volume change of Mogi-source by vertical movement.

桜島における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、桜島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及び標高データを作成した。

1. 観測諸元

- 1) 観測日 : 2013年9月19日（AM9～12時）
- 2) 観測高度 : 4,000m（全コース 進行方向左側を観測）
- 3) オフナディア角 : 65°
- 4) 偏波 : 水平送信/水平受信

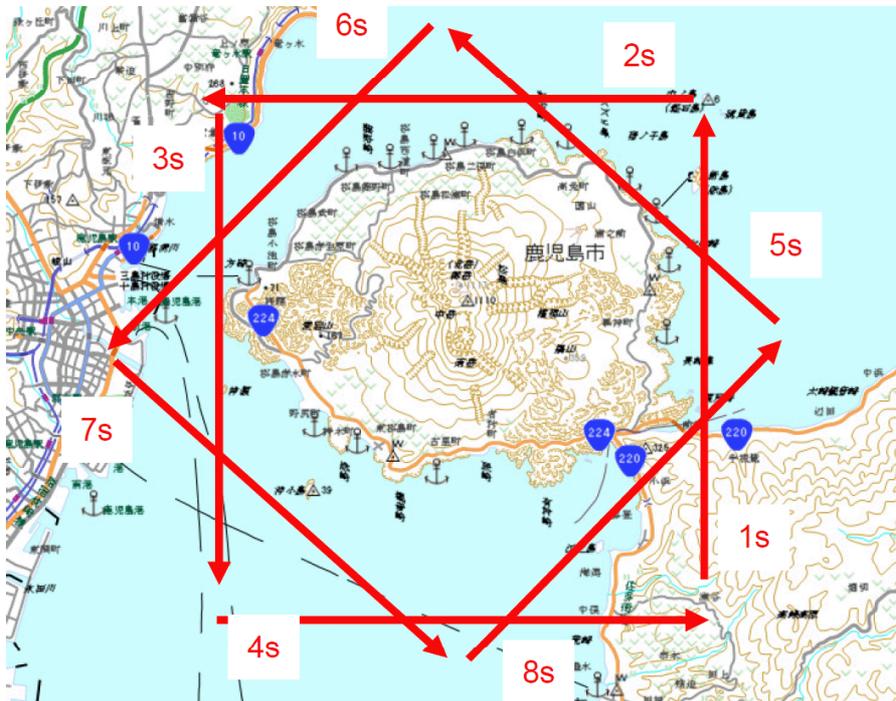


図1 観測コース（8コース）



写真1 桜島山頂付近（晴れ：山頂付近に小雲点在）

第11図(a) 桜島における航空機搭載型合成開口レーダ（航空機SAR）の観測、観測コース

Fig.11(a) Observation of aircraft SAR around Sakurajima Volcano, observation course.

2. 観測成果

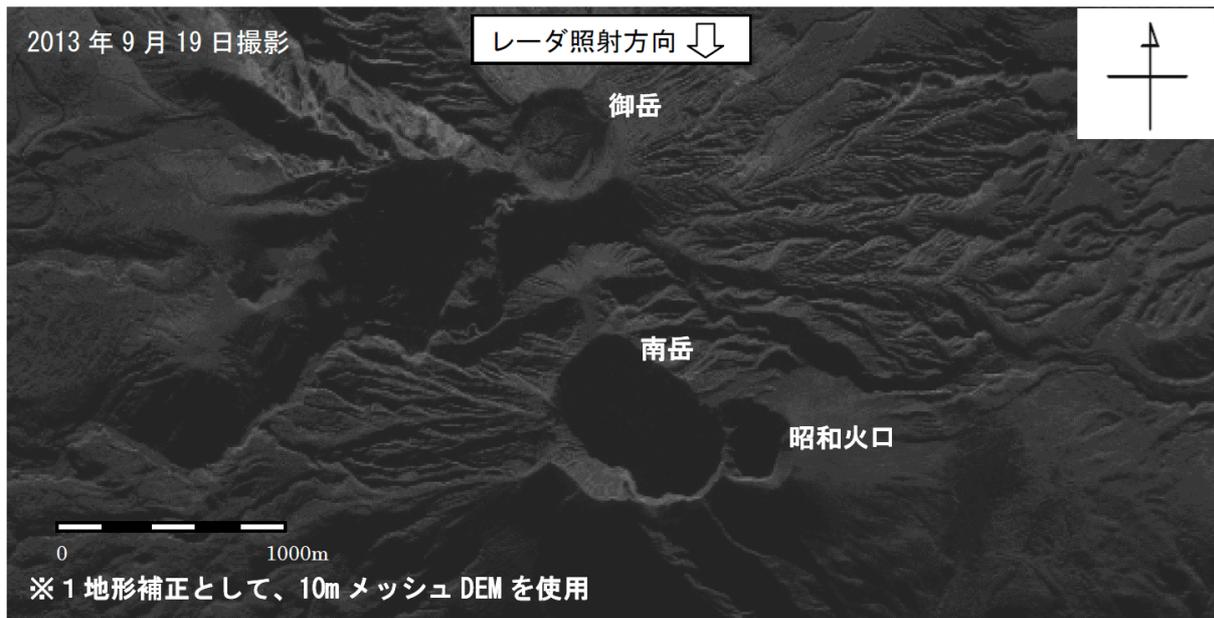


図2 反射強度画像（コース 2s からの観測）

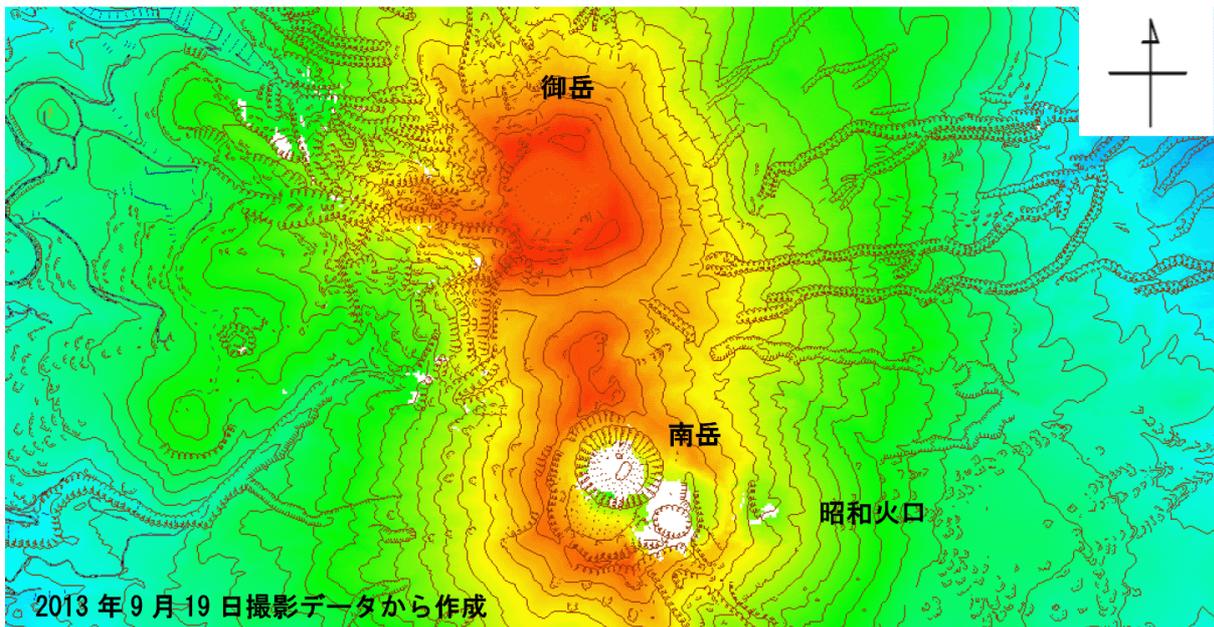


図3 標高データ

（航空機 SAR から取得した標高データと既存等高線（計曲線）の重ね合わせ）

第11図(b) 桜島における航空機搭載型合成開口レーダ（航空機SAR）の観測、観測成果

Fig.11(b) Observation of aircraft SAR around Sakurajima Volcano, observation results.

3. 既存データとの比較

今回、観測した航空機 SAR データと 2 つの既存データ（2012 年に観測した航空機 SAR データ、2011 年に観測した航空機レーザデータ）を比較し、経年変化の把握を試みた。

まず、航空機 SAR から作成した反射強度画像（2013, 2012）を比較すると、昭和火口西壁部において明るい領域が拡大しており、新たに物質が現れた、もしくは粗度が増加した可能性が考えられる。

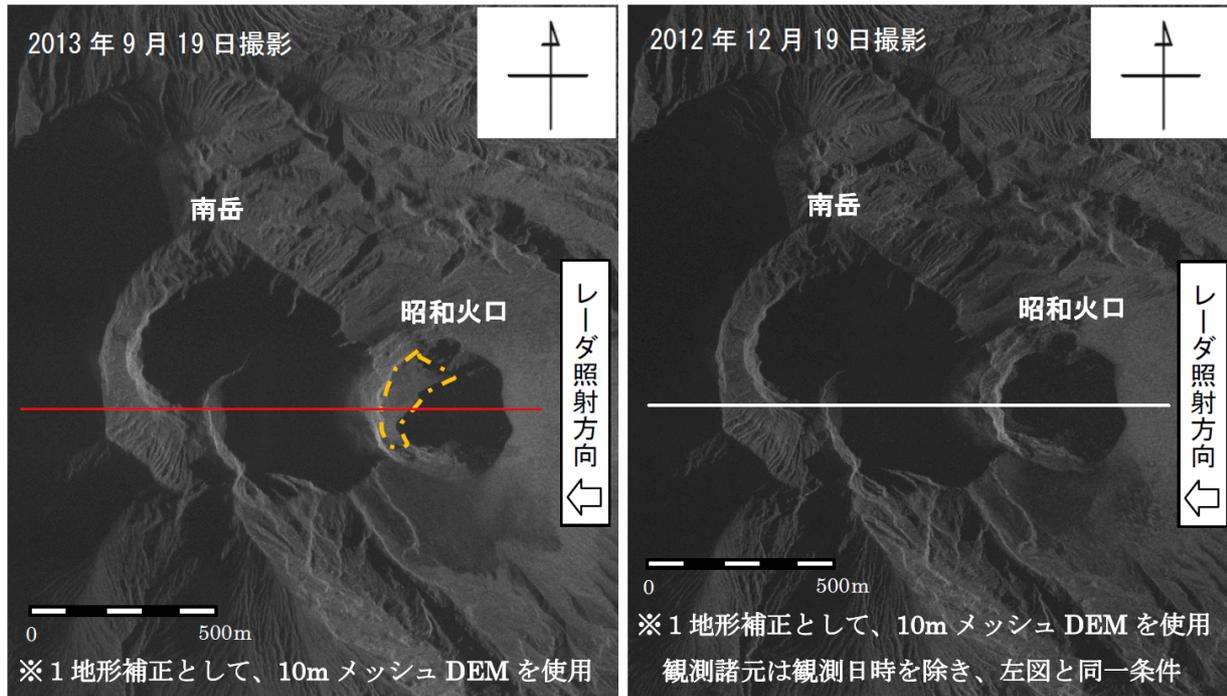


図4 反射強度画像（コース 1s からの観測）

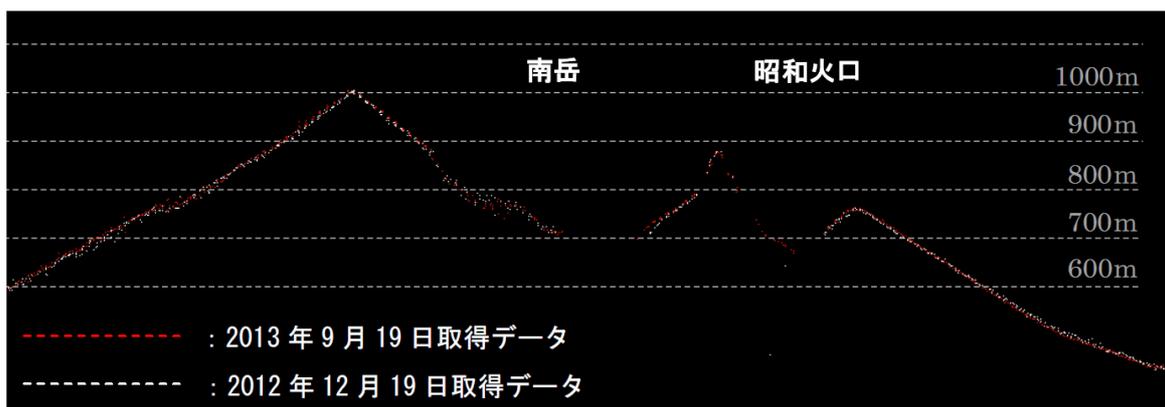


図5 標高データ断面図（コース 1s~4s のデータから作成）

第11図(c) 桜島における航空機搭載型合成開口レーダ（航空機SAR）の観測、既存データとの比較

Fig.11(c) Observation of aircraft SAR around Sakurajima Volcano, comparison with existing data.

次に航空機 SAR から作成した標高データ (2013, 2012) を比較した。南岳や昭和火口、昭和火口の南斜面、斜面の尾根谷部に 5m 以上の変化が生じていることが確認できたが、航空機 SAR から作成した標高データは急峻な地形変化をうまく捉えられない傾向があるため、南岳及び昭和火口の縁部、斜面の尾根谷部については誤抽出である可能性が高い。つまり、2012 年～2013 年の間に変化が生じたと思われるのは、南岳東壁部、昭和火口北壁部、昭和火口南西壁部、昭和火口南斜面となる。

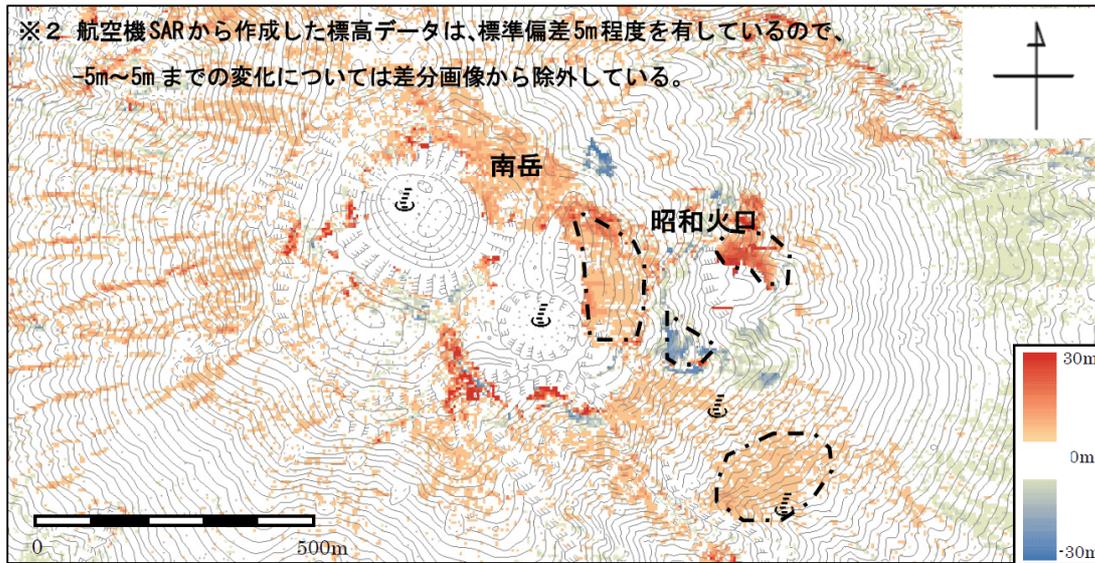


図6 地形標高データの差分画像
(航空機 SAR から作成した標高データ (2013) と標高データ (2012) を比較)

第11図(d) 桜島における航空機搭載型合成開口レーダ (航空機 SAR) の観測、既存データとの比較
Fig.11(d) Observation of aircraft SAR around Sakurajima Volcano, comparison with existing data.

また、航空機 SAR から作成した標高データ (2013, 2012) を 2011 年に観測した航空機レーザデータ^{※3}と比較することにより、2011 年からの地形変化の把握も行った。

その結果、2011 年から 2013 年の間に南岳東壁部や昭和火口東斜面で面的に標高が高くなっており、南岳南壁部や昭和火口南西及び南東壁部では低くなっていることが確認できた。これは航空機レーザデータ (2012, 2011) の比較結果においても同じ傾向であることが確認されており、航空機レーザ測量と同様に地形形状の把握に航空機 SAR を用いることが可能といえる。

さらに、航空機 SAR による観測では、噴火が続いている場合にも火口上空を飛行せずに標高データを取得できるという優位性を持っている。

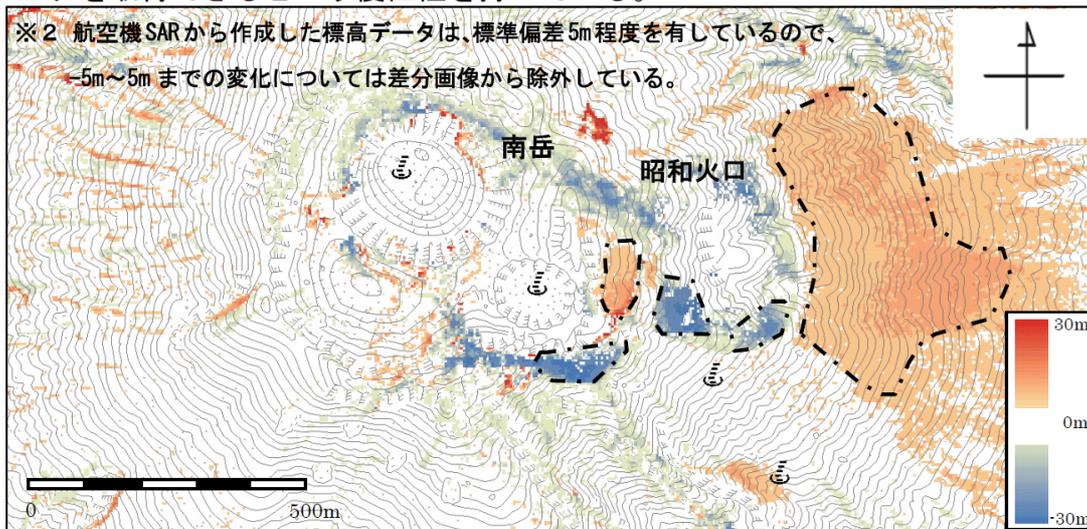


図7 地形標高データの差分画像

(航空機 SAR から作成した標高データ (2012) と航空機レーザで取得した標高データ (2011)^{※3}を比較)

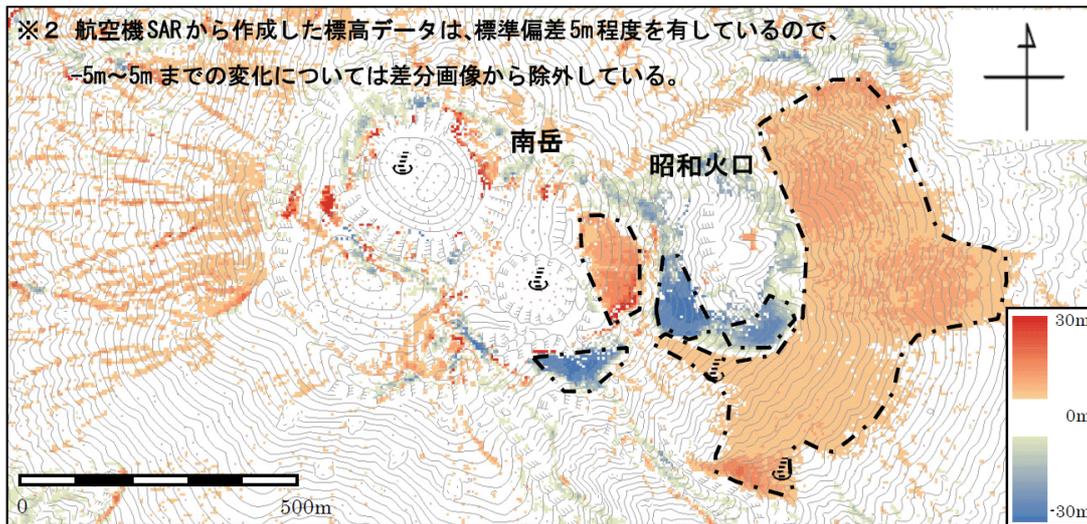


図8 地形標高データの差分画像

(航空機 SAR から作成した標高データ (2013) と航空機レーザで取得した標高データ (2011)^{※3}を比較)

※3 国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所が取得した航空機レーザ標高データ

第11図(e) 桜島における航空機搭載型合成開口レーダ (航空機SAR) の観測、既存データとの比較

Fig.11(e) Observation of aircraft SAR around Sakurajima Volcano, comparison with existing data.