

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、2015年1月上旬頃から伸びの傾向が見られるほか、2015年8月15日の前後で伸びが見られる。鹿児島(錦江)湾を挟む一部の基線で見られた長期的な伸びの傾向は、2013年6月頃からほぼ停滞していたが、2015年1月上旬頃から伸びの傾向が見られる。

第3図は桜島周辺のGNSS観測点、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3図、第4図とも、上段は最近約3か月間、下段は最近1年間の図で、島内の大きな膨張と始良カルデラの膨張が見られる。

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2015年7月31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、2012年初め頃から反転して収縮傾向となっていたが、2014年初め頃から再び膨張傾向に転じている。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。なお、960720「鹿児島2」の上下変動の計算値は観測値と系統的にずれているが、この観測点は昭和(1946年)溶岩流の上にあり、局所的な圧密沈下を反映していることが原因と考えられる。

第7図は、だいち2号のSAR干渉解析結果である。2015年8月15日以前の解析(a)及び8月15日以降の解析(f)では、ノイズレベルを超えるような変動は見られないが、8月15日を挟む解析(b)～(e)では、南岳山頂火口東側の広い範囲で最大16cm程度の衛星に近づく地殻変動が見られる。

第8図は、観測された地殻変動から推定した変動源モデル(暫定版)である。変動源として矩形の開口割れ目が昭和火口の下に推定され、その水平位置は震源分布と整合している。

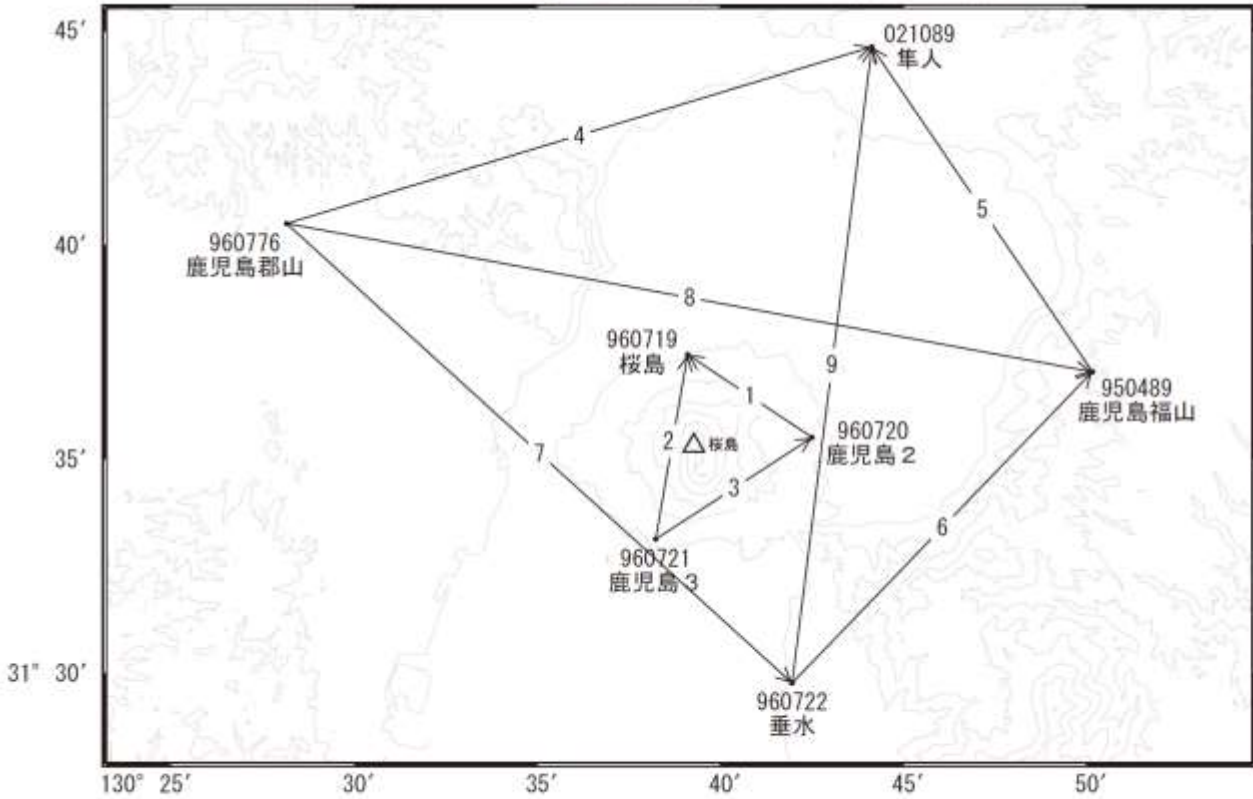
第9図は、異なる観測方向からの干渉SARの結果を利用して行った2.5次元解析結果である。2種類の組み合わせによる解析の結果、上下方向で最大12～14cmの隆起、東西方向で最大11～13cmの東向きの変動量が得られた。

謝辞

ここで使用した「だいち2号」の原初データの所有権は、JAXAにあります。これらのデータは、「だいち2号」に関する国土地理院とJAXAの間の協定に基づき提供されました。

* 2016年1月15日受付

桜島周辺GEONET(電子基準点等)による連続観測基線図

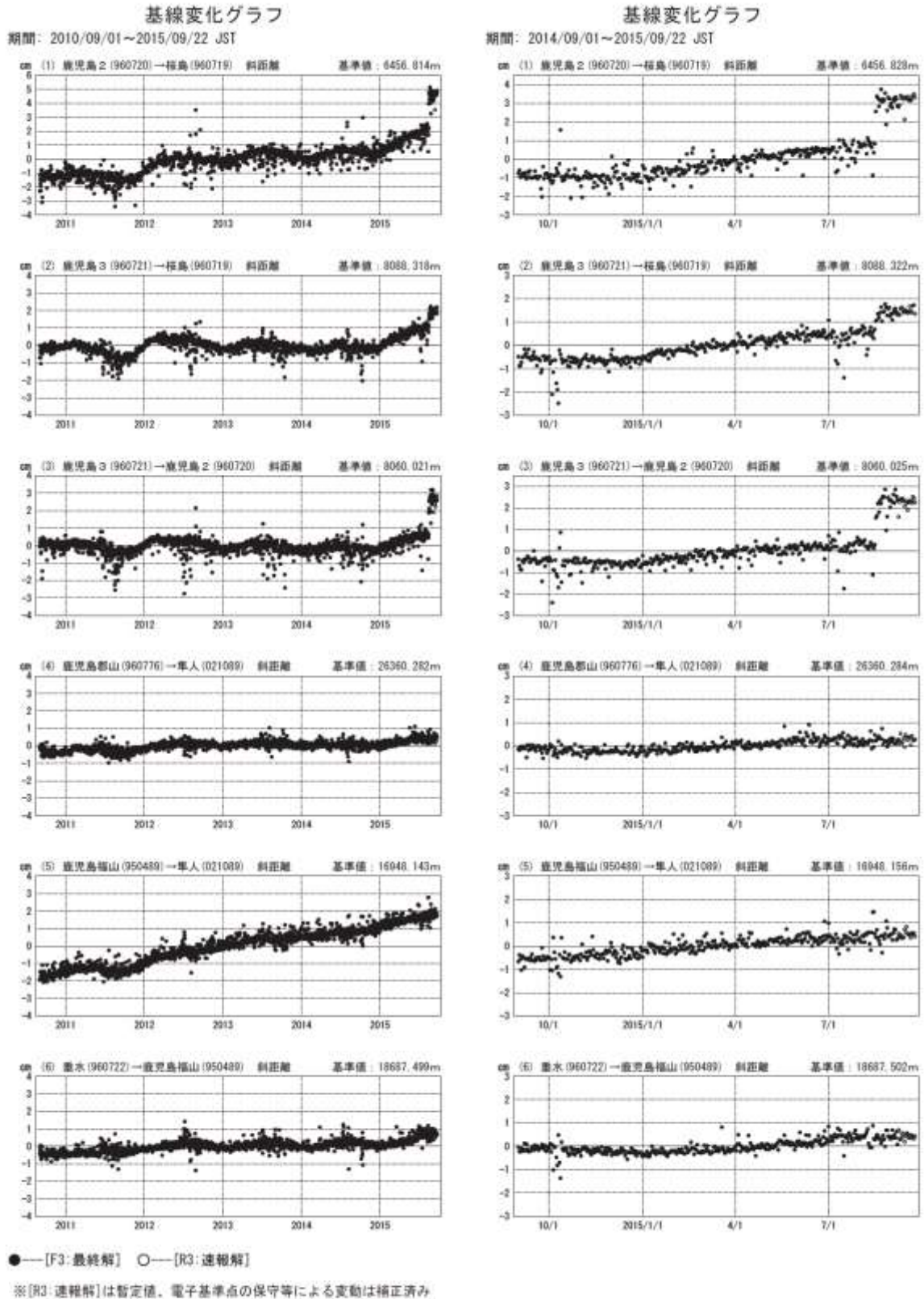


桜島周辺の各観測局情報

点番号	点名	日付	保守内容
950489	鹿児島福山	20120912	アンテナ・受信機交換
960719	桜島	20100310	レドーム開閉・受信機交換
		20121012	アンテナ交換
960720	鹿児島2	20100310	レドーム開閉・受信機交換
		20121012	アンテナ交換
960721	鹿児島3	20100310	レドーム開閉・受信機交換
		20121012	アンテナ交換
960776	鹿児島郡山	20120326	周辺伐採
		20120912	アンテナ・受信機交換
960722	垂水	20120912	アンテナ・受信機交換
021089	隼人	20120912	アンテナ・受信機交換

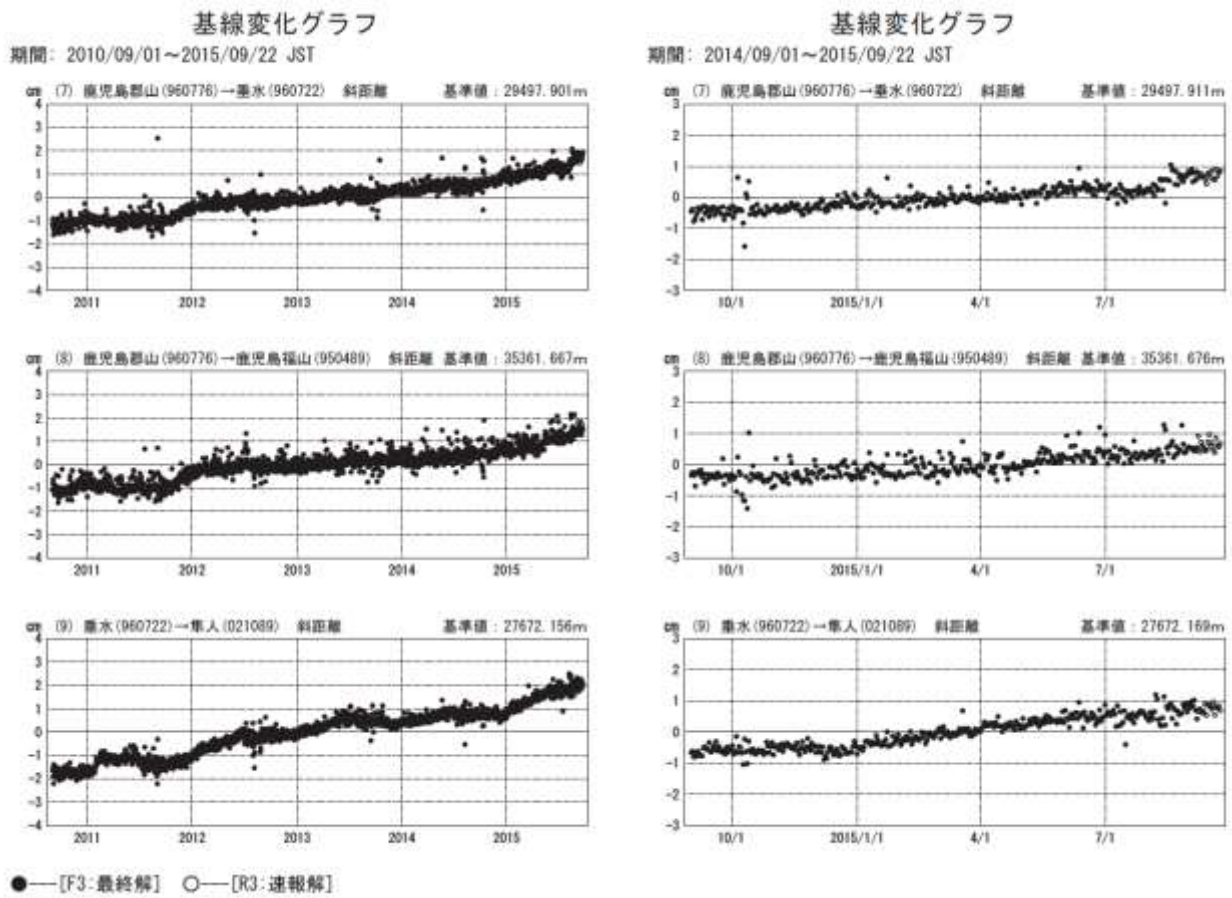
第1図 桜島周辺の電子基準点におけるGNSS連続観測基線図(上段:基線図、下段:保守履歴)

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



第2図(a) 桜島周辺のGNSS連続観測結果(基線長 左列:2010年9月~2015年9月、右列:2014年9月~2015年9月)

Fig.2 (a) Results of continuous measurements of the GNSS around Sakurajima Volcano; Baseline length (left) from September 2010 to September 2015, (right) from September 2014 to September 2015.



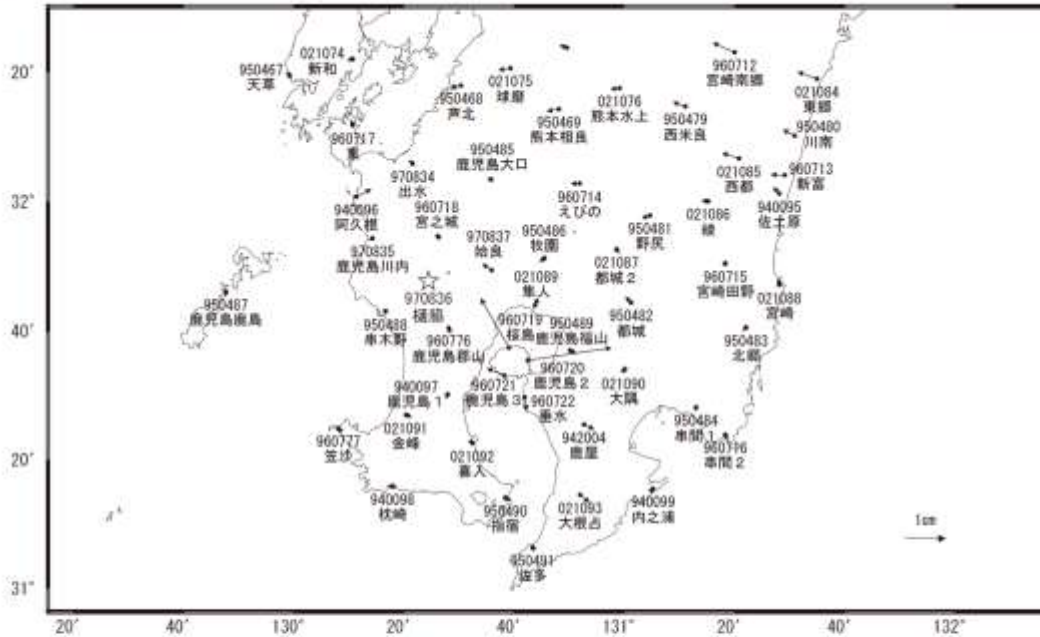
※[R3:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

第2図(b) 桜島周辺のGNSS連続観測結果(基線長 左列:2010年9月~2015年9月、右列:2014年9月~2015年9月)

Fig.2 (b) Results of continuous measurements of the GNSS around Sakurajima Volcano; Baseline length (left) from September 2010 to September 2015, (right) from September 2014 to September 2015.

桜島周辺の地殻変動(水平:3ヶ月)

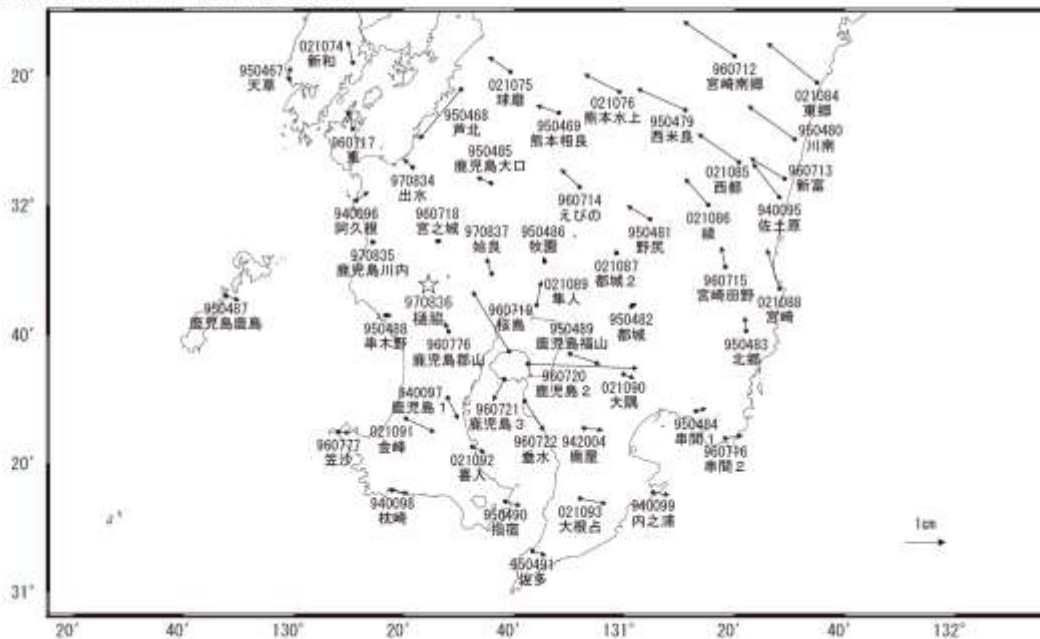
基準期間:2015/06/04~2015/06/13[F3:最終解]
比較期間:2015/09/04~2015/09/13[F3:最終解]



☆ 固定局:種輪(970836)

桜島周辺の地殻変動(水平:1年)

基準期間:2014/09/04~2014/09/13[F3:最終解]
比較期間:2015/09/04~2015/09/13[F3:最終解]



☆ 固定局:種輪(970836)

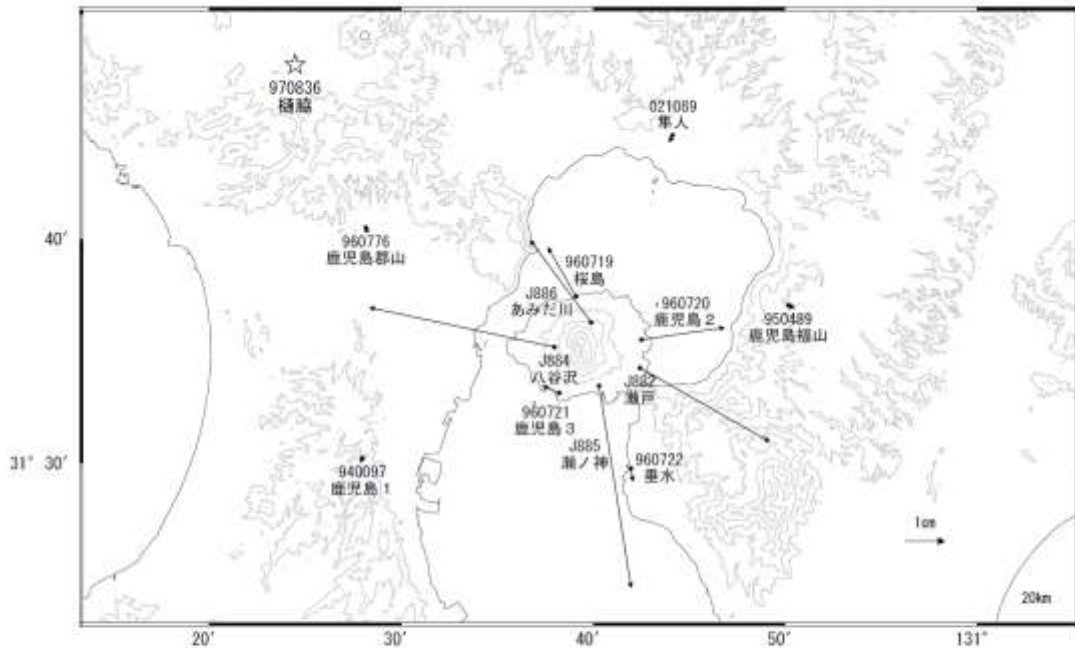
※[R3:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

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:2015年6月~2015年9月、下段:2014年9月~2015年9月)

Fig.3 Horizontal displacements of GNSS stations around Sakurajima Volcano; (upper) from June 2015 to September 2015, (lower) from September 2014 to September 2015.

桜島周辺の地殻変動(水平:3ヶ月)

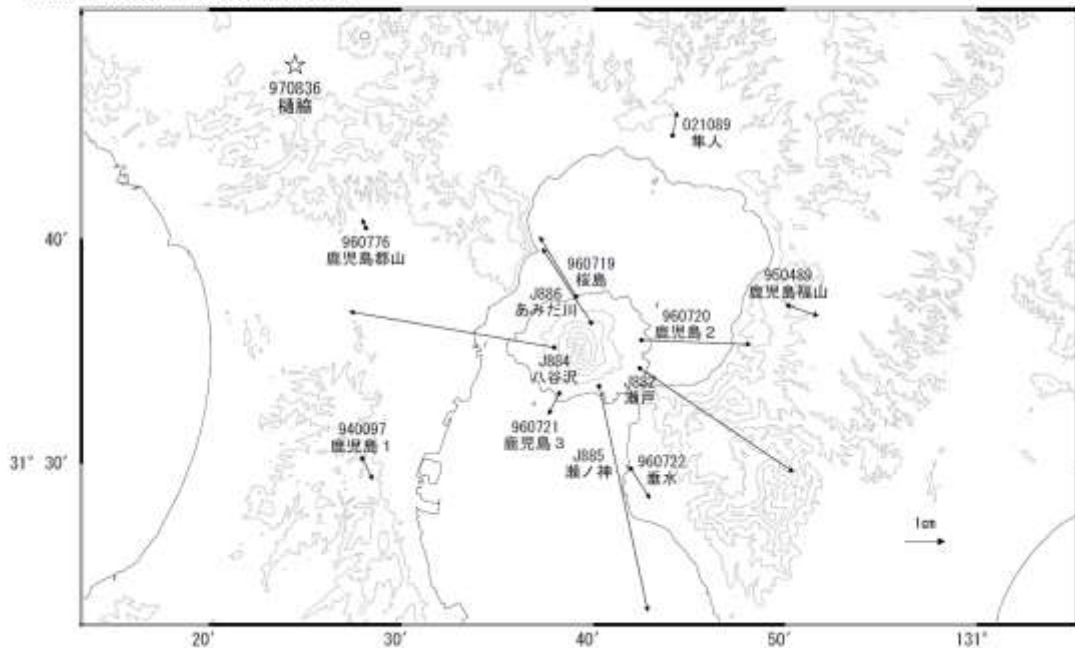
基準期間:2015/06/04~2015/06/13[F3:最終解]
 比較期間:2015/09/04~2015/09/13[F3:最終解]



☆ 固定局: 桜島 (970836)

桜島周辺の地殻変動(水平:1年)

基準期間:2014/09/04~2014/09/13[F3:最終解]
 比較期間:2015/09/04~2015/09/13[F3:最終解]



☆ 固定局: 桜島 (970836)

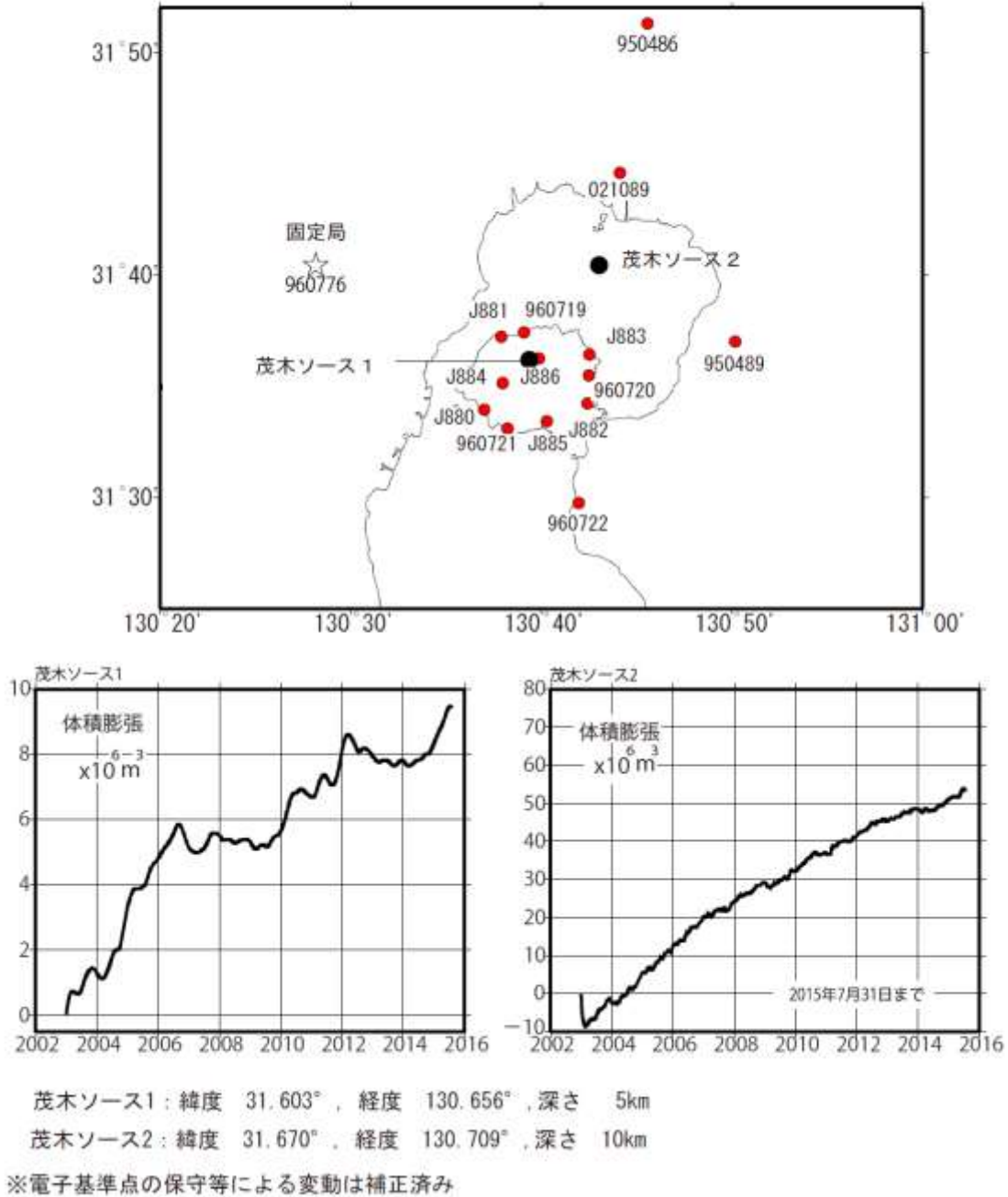
※[R3:速報解]は暫定値、電子基準点の保守等による変動は補正済み

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:2015年6月~2015年9月、下段:2014年9月~2015年9月)

Fig.4 Horizontal displacements of GNSS stations around Sakurajima Volcano by combined analyzing system for GEONET sites and JMA sites; (upper) from June 2015 to September 2015, (lower) from September 2014 to September 2015.

桜島の茂木ソースの位置と体積変化

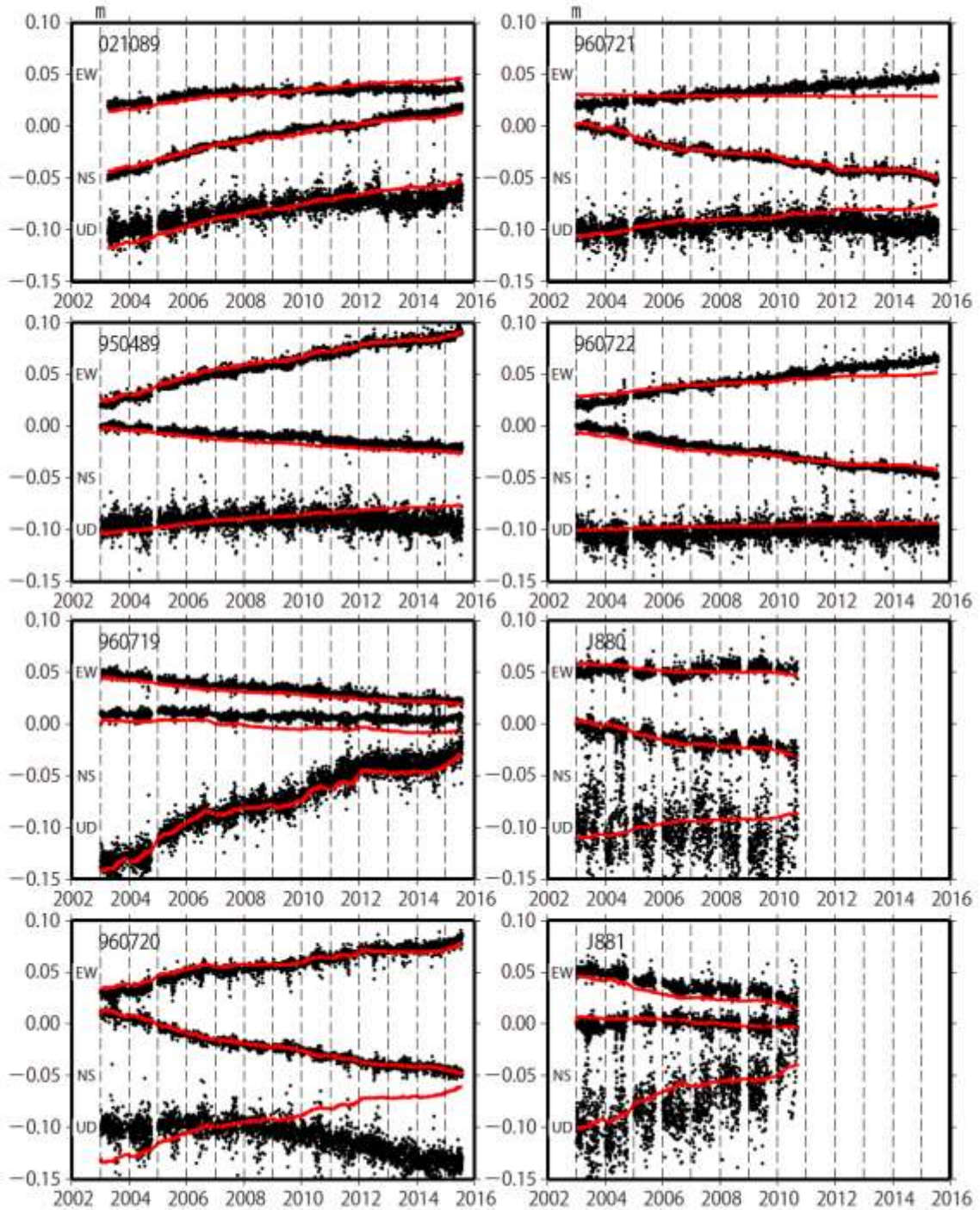
時間依存のインバージョン解析



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

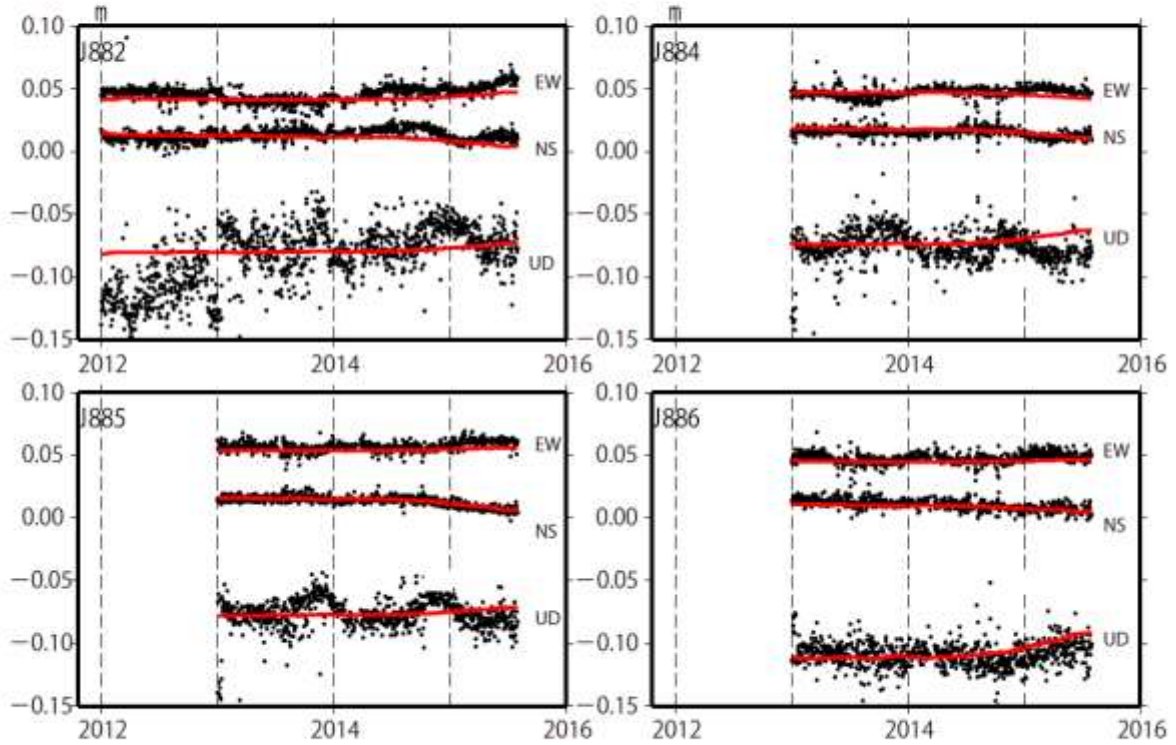


固定局960776. EW, NS, UDは東西, 南北, 上下変動. 周期成分は除いている.
 ※電子基準点の保守等による変動は補正済み

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

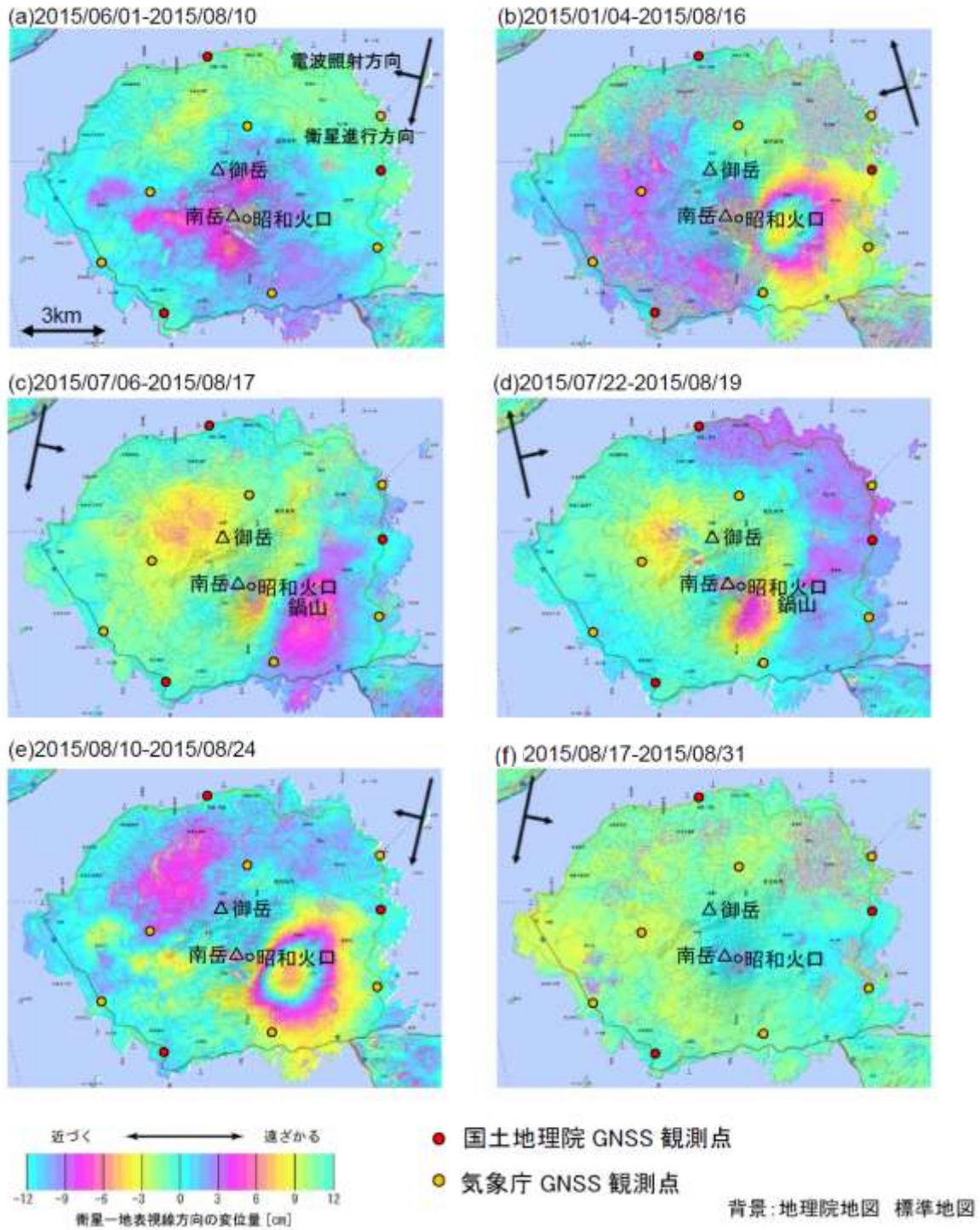


固定局960776. EW, NS, UDは東西, 南北, 上下変動. 周期成分は除いている.
※電子基準点の保守等による変動は補正済み

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).

桜島の SAR 干渉解析結果について



解析: 国土地理院 原初データ所有: JAXA
本成果は、火山噴火予知連絡会衛星解析グループの活動による

第7図(a) 「だいち2号」PALSAR-2による桜島周辺地域の解析結果

Fig.7(a) Interferometric analysis of SAR acquired by ALOS-2 PALSAR-2 around Sakurajima Volcano.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
衛星名	ALOS-2	ALOS-2	ALOS-2	ALOS-2	ALOS-2	ALOS-2
観測日時	2015/06/01 2015/08/10 12:18 頃 (70 日間)	2015/01/04 2015/08/16 23:37 頃 (224 日間)	2015/07/06 2015/08/17 13:06 頃 (42 日間)	2015/07/22 2015/08/19 0:18 頃 (28 日間)	2015/08/10 2015/08/24 12:18 頃 (14 日間)	2015/08/17 2015/08/31 13:06 頃 (14 日間)
衛星進行方向	南行	北行	南行	北行	南行	南行
電波照射方向	右	左	左	右	右	左
観測モード*	U-U	U-U	U-U	U-U	U-U	U-U
入射角(中心)	36.2°	39.7°	52.9°	42.4°	36.2°	52.9°
偏波	HH	HH	HH	HH	HH	HH
垂直基線長	-204m	+61m	+104m	+167m	+154m	+37m
使用 DEM	GSI10m DEHMJapan (飛田, 2009)	GSI10m DEHMJapan (飛田, 2009)	GSI10m DEHMJapan (飛田, 2009)	GSI10m DEHMJapan (飛田, 2009)	GSI10m DEHMJapan (飛田, 2009)	GSI10m DEHMJapan (飛田, 2009)

*U: 高分解能(3m)モード

判読)

- ・ 8月15日を挟む(b)～(e)、桜島の火山活動の活発化に伴う明瞭な変動が見られる。
- ・ 8月15日以前の(a)、及び8月15日以降の(f)では、ノイズレベルを超えるような変動は見られない。
- ・ (b)では、南岳山頂火口の東側の広い範囲で最大16cm程度の衛星に近づく変動が見られる。
- ・ (c)では、南岳山頂火口と鍋山の間を境に、東側で最大6cm程度の衛星から遠ざかる変動が、西側で最大5cm程度の衛星に近づく変動が見られる。
- ・ (d)では、南岳山頂火口と鍋山の間で最大8cm程度の衛星に近づく変動が見られる。
- ・ (e)では、南岳山頂火口の東側の広い範囲で最大16cm程度の衛星に近づく地殻変動が見られる。

解析：国土地理院 原初データ所有：JAXA

本成果は、火山噴火予知連絡会衛星解析グループの活動による

第7図(b) 「だいち2号」PALSAR-2による桜島周辺地域の解析結果

Fig.7(b) Interferometric analysis of SAR acquired by ALOS-2 PALSAR-2 around Sakurajima Volcano.

観測された地殻変動から推定した変動源モデル（暫定版）

観測された地殻変動からは、変動源として矩形の開口割れ目が昭和火口の下に推定され、その水平位置は震源分布と整合している。

だいち2号による干渉解析結果（図1及び図3）と、国土地理院の電子基準点及び気象庁のGNSS観測点で観測された地殻変動量（図5）に基づき、変動源の推定を行った。

変動源のモデルとして、矩形のダイク（開口割れ目）を仮定し、位置（水平・深さ）、形状（長さ・幅・走向・傾斜）、開口量について Simulated Annealing 法により推定を行った。なお、推定にあたって、通常は地形を考慮しない半無限弾性体として解析を行うが、今回は観測された地殻変動量に対して地形の影響が無視できない大きさであることが判明したため、変動量が得られた地点の標高を簡易的に考慮した解析を行った。

観測値と計算値、残差を図4（干渉画像）及び図5（GNSS）に、推定されたパラメータを表1に示す。ダイクの水平位置は震源分布と整合している。なお、ダイクの地表延長は、昭和火口付近を通る。

表1：推定されたパラメータ（位置はダイク中心、深さの基準は標高0m）

経度 (°)	緯度 (°)	深さ (km)	長さ (km)	幅 (km)	走向 (°)	傾斜 (°)	開口量 (m)	体積変化量 (m ³)
130.6672	31.5791	0.80	1.41	0.78	20.0	76.9	1.60	1.76×10 ⁶

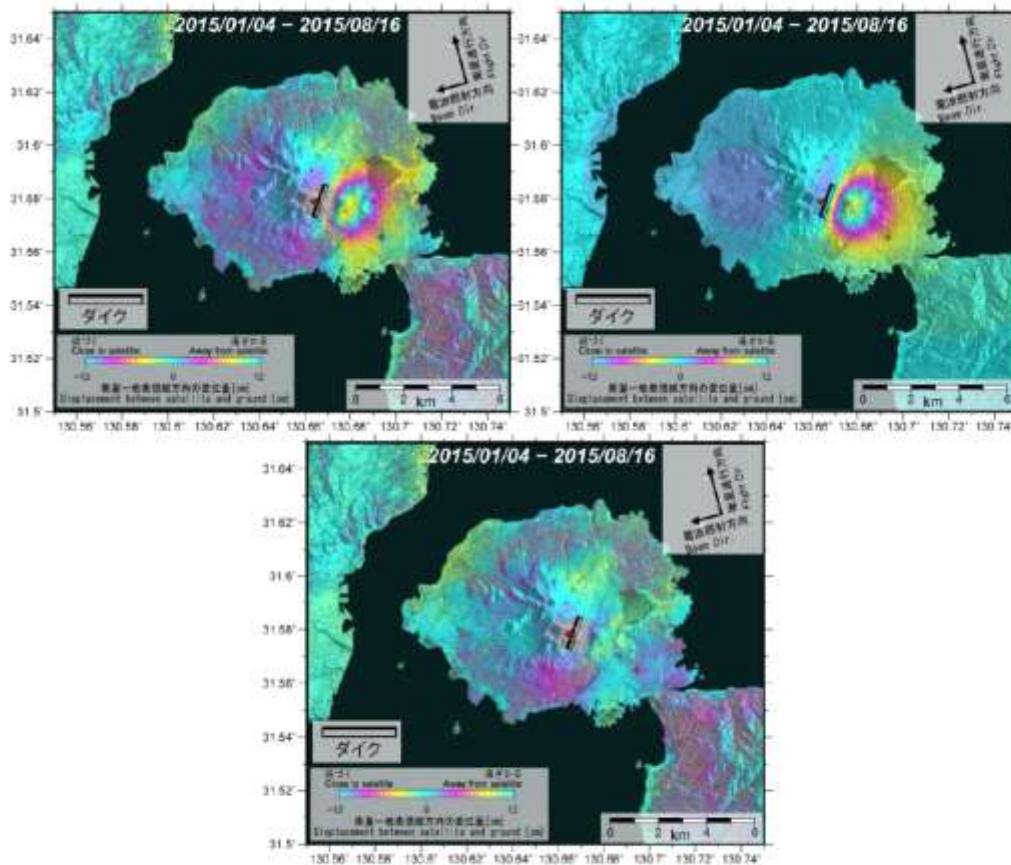


図4-1：（左上）干渉画像（2015年1月4日-2015年8月16日）、（右上）モデルからの計算値、（下）残差

第8図(a) 観測された地殻変動から推定した変動源モデル（暫定版）

Fig.8(a) Models of variation sources that were presumed from observed crustal deformation (Preliminary).

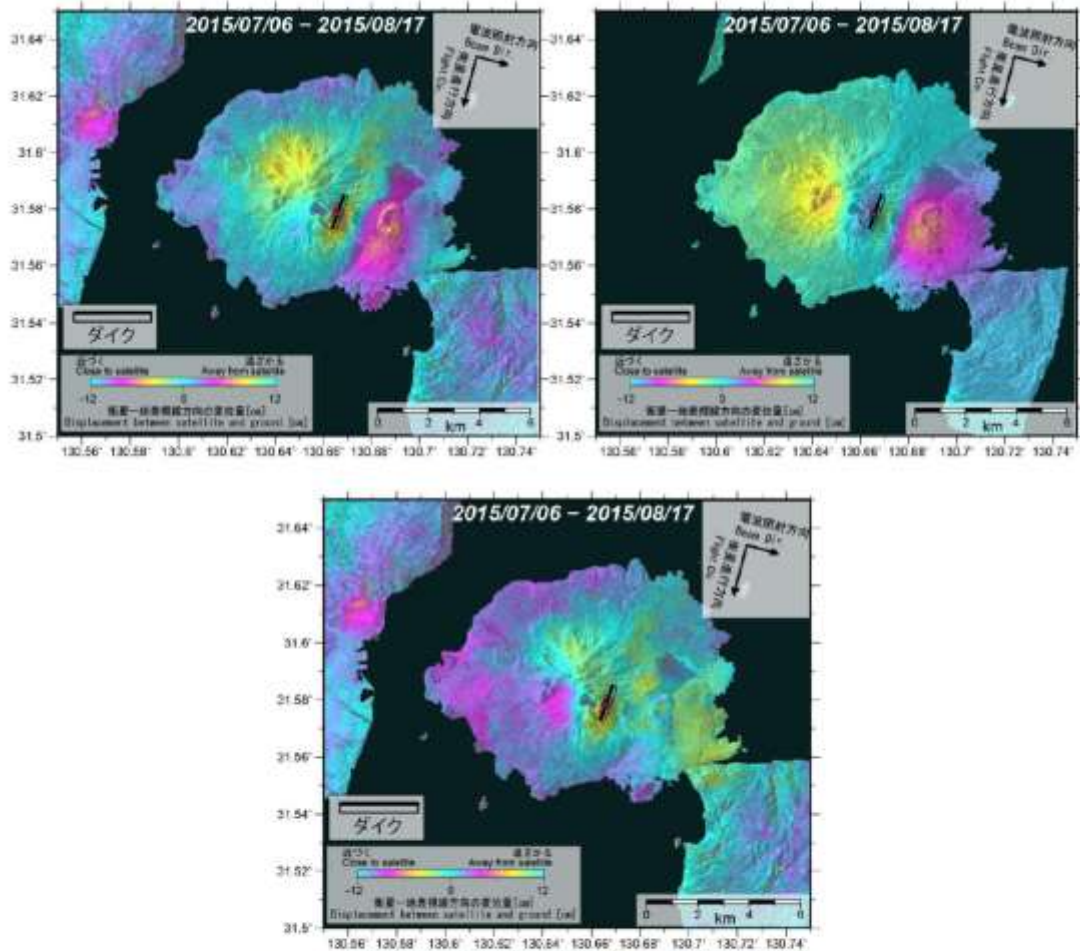


図4-2：(左上) 干渉画像 (2015年7月6日-2015年8月17日)、(右上) モデルからの計算値、(下) 残差

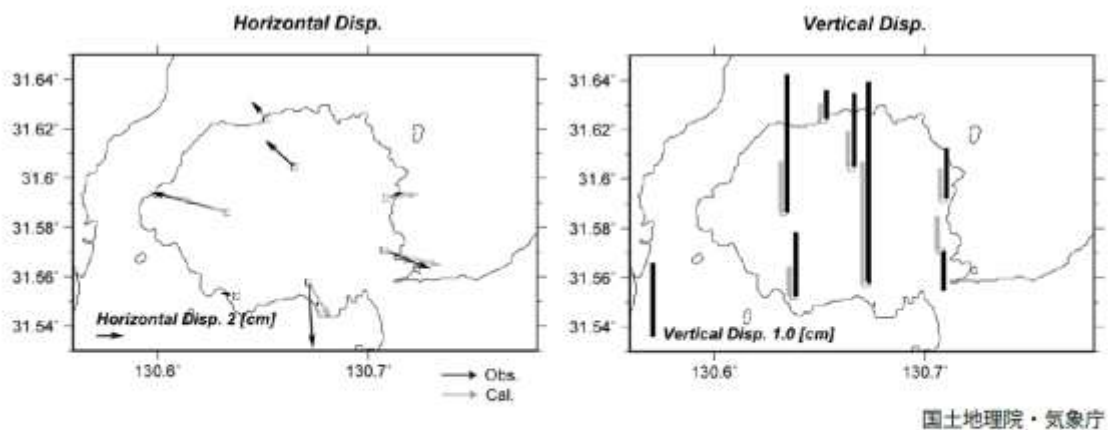


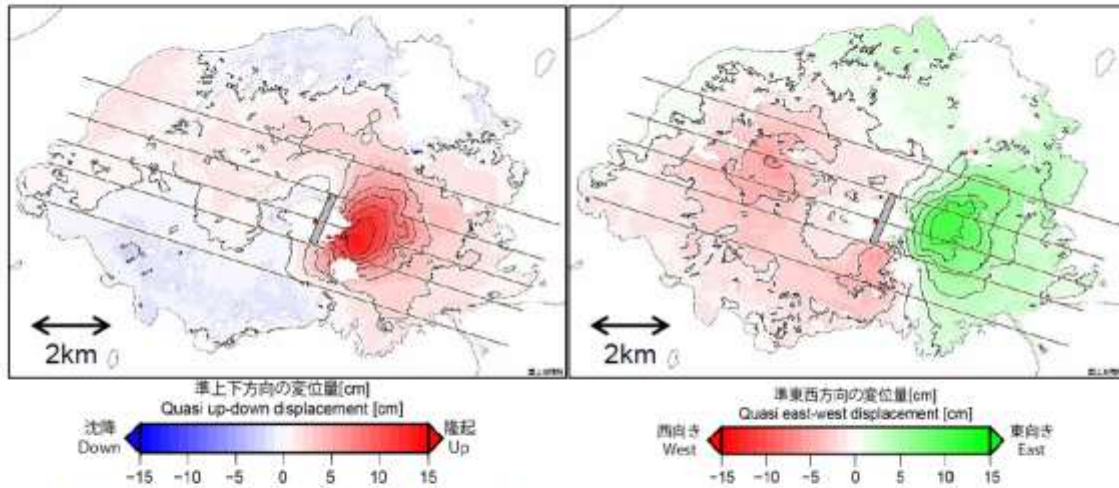
図5：GNSSによる地殻変動観測値とモデル計算値の比較。(左) 水平変動、(右) 上下変動
地殻変動量は、2015年8月1~14日のR3解の平均値を基準として、8月16日0時~17日6時のQ3解の平均値と比較して算出した。

第8図(b) 観測された地殻変動から推定した変動源モデル (暫定版)

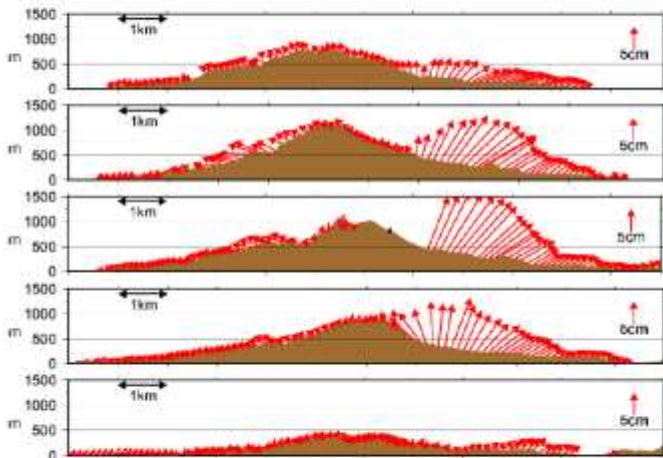
Fig.8(b) Models of variation sources who presumed from observed crustal deformation (Preliminary).

だいち2号による桜島の上下・東西方向の地殻変動

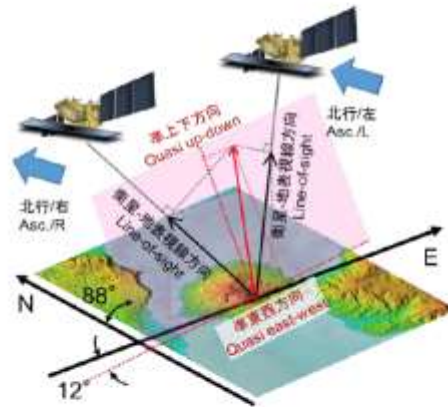
異なる観測方向からの干渉 SAR の結果を利用して 2.5 次元解析を行った。得られた変動量は、上下方向で最大約 14cm (隆起)、東西方向で最大約 11cm (東向き) である。



等量線 (黒実線) は 2cm 間隔。▲は昭和火口、グレー矩形は変動源モデル (ダイク) の位置。
茶実線は変動源モデル (ダイク) に直交する走向の断面図の位置。



変動断面図。上の図が北側。▲は昭和火口の位置。



2.5 次元解析の概念図

使用したデータ

観測日時	2015/07/22-2015/08/19 0:18 頃 (28 日間)	2015/01/04-2015/08/16 23:37 頃 (224 日間)
衛星進行方向	北行	北行
電波照射方向	右	左

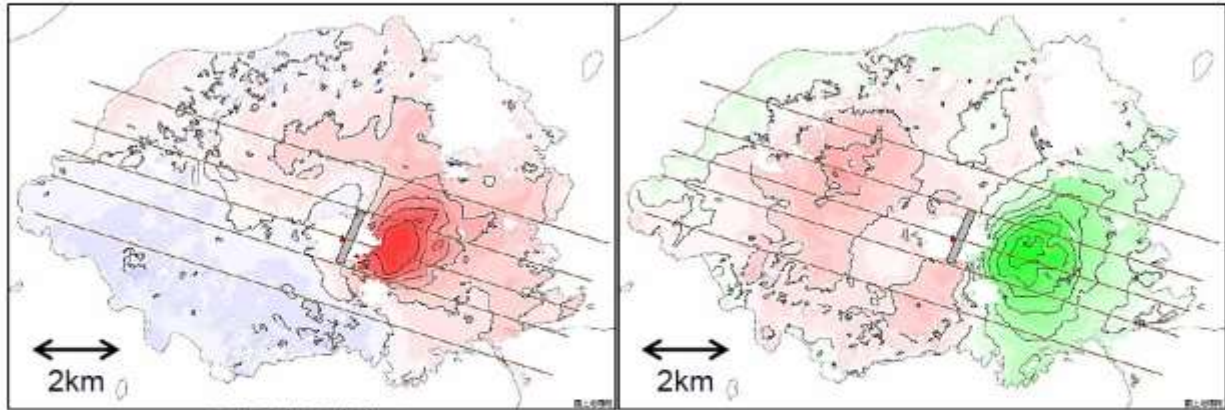
解析：国土地理院 原初データ所有：JAXA

本成果は、火山噴火予知連絡会衛星解析グループの活動による

第9図(a) だいち2号による桜島の上下・東西方向の地殻変動

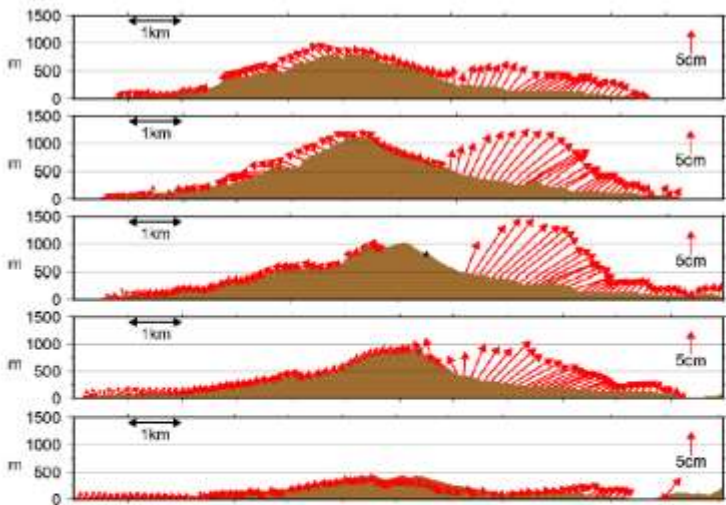
Fig.9(a) Vertical and East-West displacement of crustal deformation in Sakurajima Volcano by ALOS-2.

別の干渉 SAR の結果の組み合わせによる 2.5 次元解析で得られた変動量は、上下方向で最大約 12cm（隆起）、東西方向で最大約 13cm（東向き）である。

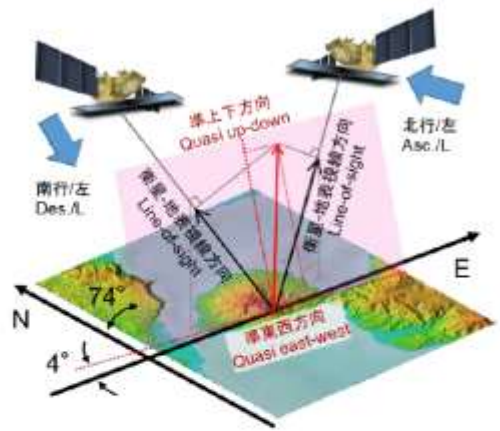


準上下方向の変位量[cm] Quasi up-down displacement [cm] 隆起 Up 沈降 Down
 準東西方向の変位量[cm] Quasi east-west displacement [cm] 東向き East 西向き West

等量線（黒実線）は 2cm 間隔。▲は昭和火口、グレー矩形は変動源モデル（ダイク）の位置。
 茶実線は変動源モデル（ダイク）に直交する走向の断面図の位置。



変動断面図。上の図が北側。▲は昭和火口の位置。



2.5 次元解析の概念図

使用したデータ

観測日時	2015/07/06-2015/08/17 13:06 頃 (42 日間)	2015/01/04-2015/08/16 23:37 頃 (224 日間)
衛星進行方向	南行	北行
電波照射方向	左	左

解析：国土地理院 原初データ所有：JAXA
 本成果は、火山噴火予知連絡会衛星解析グループの活動による

第 9 図 (b) だいち 2 号による桜島の上下・東西方向の地殻変動
 Fig.9(b) Vertical and East-West displacement of crustal deformation in Sakurajima Volcano by ALOS-2.