

## GPS 連続観測による口永良部島火山の 2014 年噴火 10 年前からの地盤変動

斎藤英二<sup>1,\*</sup>・井口正人<sup>2</sup>・松島喜雄<sup>1</sup>

Eiji Saito, Masato Iguchi and Nobuo Matsushima (2015) Ground deformation revealed by GPS observation for 10 years before the 2014 eruption in Kuchinoerabujima volcano. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.66 (5/6), p.103–141, 20 figs, 1 table, 1 Appendix.

**Abstract:** Kuchinoerabujima is a volcanic island, which is located 40 km south of Kyushu, Japan. In recorded history, phreatic or magma-phreatic explosion occurred repeatedly with the dormant period of about 30 years. The recent eruption occurred on August 3, 2014 at the summit crater of Shindake, which is the youngest edifice of the volcano. Various phenomena, such as the increases of volcanic earthquake, ground deformation, magnetic anomaly and discharge rate of volcanic gas have occurred from 1999. These indicate the change of underground condition before the eruption. In order to evaluate the volcanic activity, we conducted continuous GPS observation from 2004 at two stations located at 230 m northwest (SDW) and 480 m south (FDK) of the summit crater of Shindake. The data sampled every 30 seconds are sent to our institute by telemetry system using mobile phone network. For the reference station of GSI (GEONET of Geospatial Information Authority of Japan) which is located at the northwestern foot of the volcano, stations SDW and FDK show the continuous trend of westward movement at the rate of 0.4 cm/year. Intermittent events with sudden increase in the movement overlap these continuous deformations. We have observed the remarkable ground movements (2–4 cm in total) at 4 times; June in 2005, September in 2006, September in 2008 and October in 2010. These events lasted for more than a few months at respective events. They are characterized by the cumulative northwestward and upward movements of station SDW, and the slight southward movement of station FDK. The ground deformations at the summit area are explained by two sources; the intermittent ground deformation indicates the inflation of the source just under the summit crater of Shindake, and the continuous westward movement shows the deeper source which is located south-east of Shindake. The number of the volcanic earthquake increased at the same time of first and second events; however the increase of the seismic activity was sluggish at third and fourth events. The interval between the events had been prolonged gradually and another event of minute movements appeared on the continuous deformation after 2009. The movement due to the shallow source at the crater changed from dilatation to contraction, and another type of the deformations appear after 2013. These phenomena indicate the change of the deformation source condition just before the eruption.

**Keywords:** Volcano, Eruption, Phreatic explosion, Ground deformation, Kuchinoerabujima, GPS

---

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology)

<sup>2</sup> 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター (Kyoto University, DPRI, Sakurajima Volcano Research Center)

\*Corresponding author: E. Saito, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: e.saito@aist.go.jp

## 要 旨

2014年8月3日に噴火した<sup>くちのえらふじま</sup>口永良部島火山の山頂部において、GPS連続観測を噴火直前までの約10年継続して行った。最も近接した観測点は火口までの距離が約230 mであるものの、噴火前1ヶ月間の短期間に前兆を示す変位は捉えられなかった。しかし長期的にみると、全期間で4回、山頂域の膨張を示唆する変位を観測している。それぞれのイベントは数cmの変位に数ヶ月かかる緩慢なものであるが、その変位は累積していった。初期のイベントは明瞭な地震の増加を伴ったが、後期になると地震活動の高まりはほとんど見られなくなった。イベントの間隔は次第に長くなるとともに、2009年頃から長期的トレンドに加えて微少な変動が混在するようになり、この頃から変動のパターンが変化した。詳細な解析により、山頂部の変動は下部地盤の西変位の上に火口浅部の放射状の変動が重なることによって現れていることが明らかになった。2013年からは火口浅部の変動は、膨張からほとんど停止ないし収縮傾向に転じている。さらに山頂部の2観測点に共通の変動が観測されるようになったことから、山頂部のやや深い場所に別の変動源が現れた可能性がある。

### 1. はじめに

2014年8月3日(日)の昼過ぎに鹿児島県の口永良部島火山の新岳が34年振りに噴火した。噴火に先立つ地震活動に特段の変化は観測されなかった(福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台, 2014)。我々は約10年前から火口近傍でGPSの連続観測を実施中であつたので、噴火の第一報を受けてつくばの基地PCからデータやシステムの状況を確認した。火口から数100 m以内の場所で1 cmの変動検出が可能な体制で臨んでいたが、瞬時に変動とわかる変化は見つからなかった。水蒸気爆発の前兆の乏しさを裏付けるものであつた。しかしながら、本観測データを含めたこれまでの地表での物理量の観測によって、長期的には火山活動の高まりを示す兆候が捉えられていた。地震活動については、1990年代中頃から群発がたびたび見られるようになった。1996年と1999年から2000年にかけての2回の顕著な群発地震活動があつたが、これらを挟むGPS繰り返し測量によって山体が膨張していることが明らかになった(井口ほか, 2002)。全磁力の観測結果からは地下の高温化傾向が推定された(神田ほか, 2002)。これらの兆候を踏まえ、繰り返しGPS測量の時間分解能を高め、地盤変動と群発地震活動や火山活動の表面現象との関係を明らかにする目的で2004年から山頂部を含む複数箇所でGPSの連続観測を開始した。その結果、火口浅部で発生する群発地震活動と同期して山体が膨張することや膨張源が火

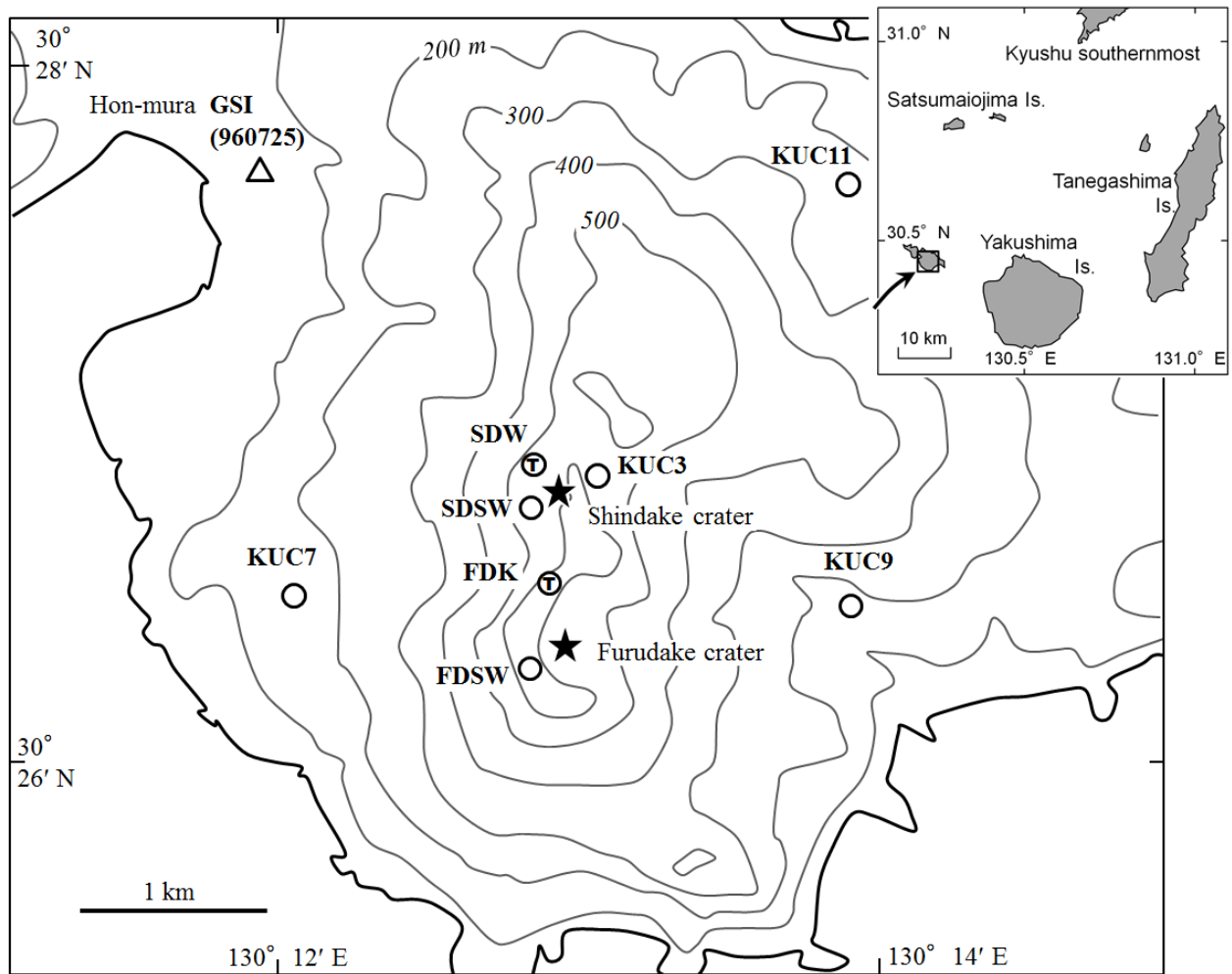
口下300 mの浅所に推定されたことを明らかにした(斎藤・井口, 2006)。そしてその後も同様の現象が繰り返し発生していることがわかつた。このように10年のオーダーでみると、さまざまな現象が観察され、浅部の構造に関する理解も深まりつつあつた。これらの知見は噴火の直前予測に直結するとは限らないが、噴火予測の手がかりとして重要な情報であることに変わりない。本報では、火口近傍において噴火前約10年間続けてきたGPS連続観測の結果を紹介するとともに、主要観測点のデータを公表する。

### 2. 観測方法

GPSの連続観測は、地盤の動きを連続的に追跡するために欠かせない方法である。2004年当時の島内の既存のGPS連続観測点は、京都大学防災研究所附属火山活動研究センター(以下SVO)と国土地理院によるものがそれぞれ1カ所ずつあつた。いずれも火山西麓に1990年代中頃に設置された。新岳山頂部を中心とした変動が生じていることが、繰り返しGPS測量により明らかになっており(井口ほか, 2002)、その結果を受けて、山頂部において連続観測を行い変動の時間分解能を高めることにした。観測点配置を第1図に、設置時期や新岳火口からの距離を第1表に示す。設置したGPS受信機は全て1周波型である。電源として、データロガー方式は太陽電池とバッテリーを組み合わせた独立電源により、テレメータ付きの観測点(SDWとFDK)は隣接するSVOの地震観測施設から電源供給を受けて運用した。SDWとFDKの観測データは、2004年4月から2012年3月までNTT DoCoMo社のmova回線によるダイヤルアップ方式により1日1回、それ以後は同社FOMA網を利用して30秒ごとに産業技術総合研究所つくば第7事業所(以下産総研)内の専用PCで自動回収し、1時間ごとのファイルに対して基線解析処理を行った。基線解析には古野電気(株)のCapWinAutoを用いた。また、火口により近いSDWのデータについては1日1回、火山監視の目的で気象庁に自動転送した。2012年3月以降のSDWの外観と装置の構成を第2図に示す。

山麓の国土地理院の電子基準点は、広域の観測網の一部として変動監視されている。隣接の屋久島と薩摩硫黄島や九州南端部からの相対変位についてみると、2014年末の時点において口永良部島火山の活動と関連した変動は検出されていない(国土地理院, 2015a)。このことから、GPS観測で捉えられるレベルの口永良部島の山体膨張は比較的浅所で起きている現象であることが示唆されると共に、山体の相対変位を調べるための固定点として島内の電子基準点を用いて大きな問題にならないと思われる。

なお、データロガーによる観測点は最終的に6点に達



第1図 観測点の配置。

GPS観測点でT字付きはテレメータ点，白丸はデータロガー点を表す。三角は国土地理院の電子基準点。背景の地形図は国土地理院(2015b)を基に作成した。

Fig. 1 Location map of GPS stations.

Circle with a letter "T" is the station where data are telemetered to Geological survey of Japan. Open circle is the station where data are recorded by data logger. Triangles is GEONET station of Geospatial Information Authority of Japan. Base map was created using Geospatial Information Authority of Japan (2015b).

したが、これらのうちの山麓の観測については、装置の不具合による欠損が最も少ないKUC9の結果のみを示すことにする。

### 3. 2014年噴火の直前の観測値

#### 3.1 噴火発生状況

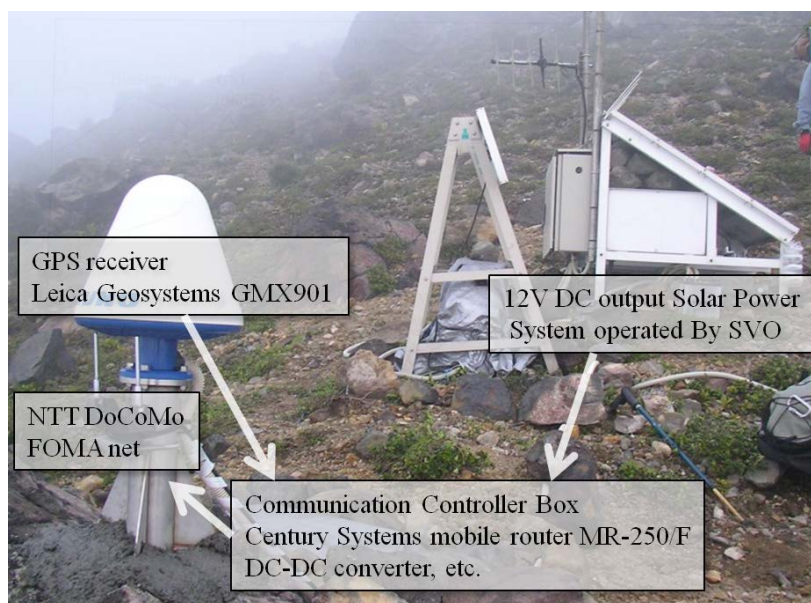
2014年の噴火は、8月3日の12時24分(JST: Japan Standard Time)頃に発生した(福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台, 2014)。本観測におけるつくばへのデータ転送は、FOMA網との接続が確立した状態において30秒ごとに行われており、最後のデー

タはGPS時の12時25分30秒であった。GPS時は1980年1月6日0時を起点としたGPS衛星の時刻であり、閏秒の調整は行われない。JSTあるいは協定世界時には閏秒調整が累積しているため、2014年8月時点でGPS時に対して16秒遅れている(情報通信研究機構, 2015)。したがって最後のデータはJSTでは25分14秒である。噴火によってFOMA回線が切断された時刻を回収用ソフトウェアの画面画像から読み取ったところ、SDWは25分41秒、FDKは同分50秒であった(第3図)。この時刻はPCの時刻と同期しており、PCの時刻はNTP(Network Time Protocol)サーバーに自動同期設定しているため、JSTにほぼ一致している。同島本村港付近に設置された気象庁

第1表 観測点一覧.

Table 1 List of GPS stations.

GPS Station	Direction and Horizontal Distance from Shindake crater	Installation date	GPS Receiver	Comment
SDW	NW 230 m	April 2004	Furuno MG2110 / LeicaGeosystems GMX901	Telemeter
FDK	S 480 m	September 2006	Furuno MG2110 / LeicaGeosystems HMX901	Telemeter
SDSW	WSW 150 m	January 2013	Furuno MG2110	Data logger
KUC3	ENE 260 m	January 2013	Furuno MG2110	Data logger
FDSW	S 960 m	January 2013	Furuno MG2110	Data logger
KUC7	WSW 1450 m	April 2004	Furuno MG2110	Data logger
KUC9	ESE 1670 m	April 2004	Furuno MG2110	Data logger
KUC11	NE 2290 m	April 2004	Furuno MG2110	Data logger
GSI (960725)	NW 2370 m	March 1996		GEONET station by Geospatial Information Authority of Japan

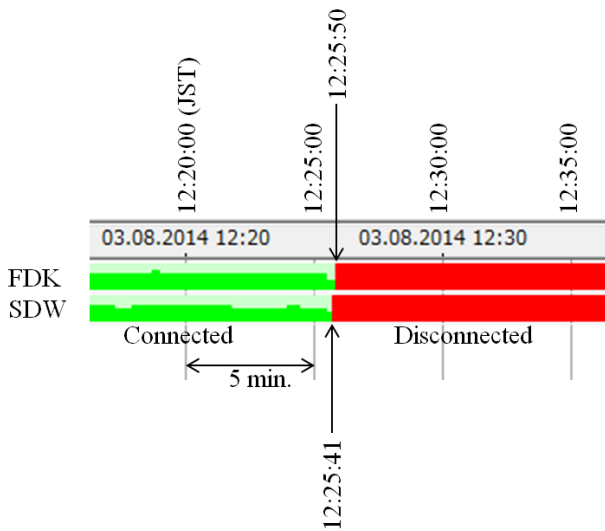


第2図 SDWの外観と装置.

Fig. 2 View of GPS station SDW.

の本村西遠望カメラの画像によると、12時25分45秒のシーンで山頂部を覆う雲の上に噴煙を確認できる(第4図、福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台、2014)。この時刻とFOMA回線の切断時刻が±5秒以内であることから、両観測点はこの噴煙を上げた活動によって損傷を受けた可能性が高い。第4図で明らかなように、噴火時の火口付近の状況は雲によって確認できず、45秒のシーンに記録された噴煙がいつ上昇し

たかはわからない。そこで12時から噴火直前までのGPS電波の受信状態を調べた。第5図の時系列のとおり、12時25分14秒のSDWの最後のデータに明瞭な信号強度の低下が見られた。宇宙航空研究開発機構が公開しているSkyplotプログラムとAlmanacアーカイブデータ(宇宙航空研究開発機構、2015)を用いて12時25分の衛星配置を再現し、12時24分14秒から12時25分14秒までの最後の1分間の信号強度の低下量をその上に濃淡の円で表し



第3図 噴火による通信切断時の回収用ソフトウェアの画面. SDW, FDK共に12時25分40～50秒の頃にFOMA回線が切断された.

Fig. 3 Time schedule of the telemetry system, which shows both the contact with stations SDW and FDK are disconnected from 12:25:41 to 12:25:50.

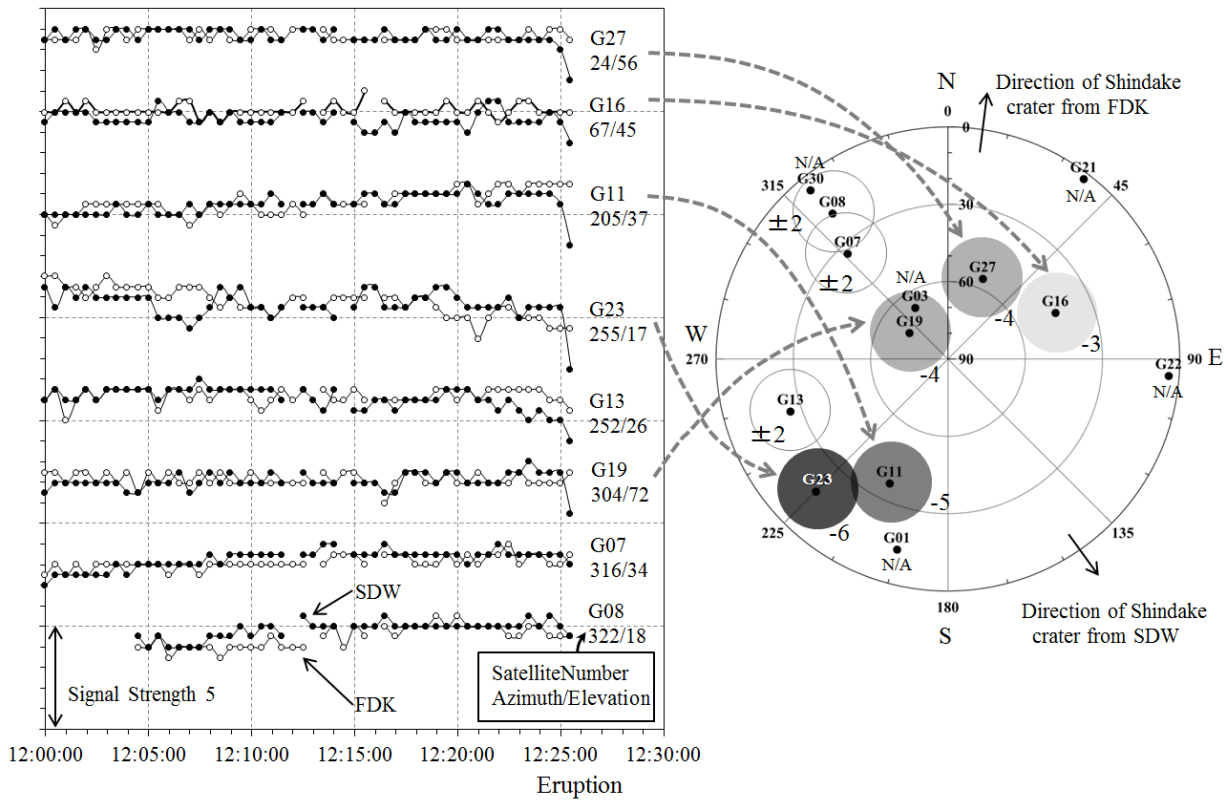


第4図 気象庁の本村西遠望カメラ画像(福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台, 2014).

Fig. 4 Photo image of surveillance camera located at Hon-mura Nishi area (JMA, Fukuoka Regional Headquarters and Kagoshima Meteorological Office 2014).

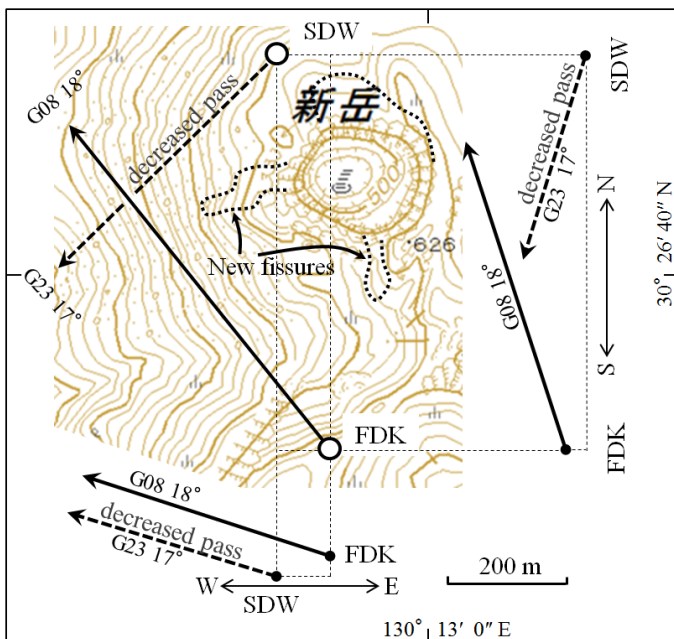
た. 濃いほど大きく信号強度が低下したことを表すが, 信号強度の低下域はSDWの天頂と南西方向に分布する. SDWの南東の火口側は衛星がないためわからないが, 北西側は信号強度が低下していないことから, 受信機側の原因とは考え難い. 噴出物がレドームに不均一に付着したか, 上空に拡散し始めた噴煙分布の一部を表している可能性が高い. いずれにしても, 12時25分14秒の段階で既に噴煙の放出が始まっていたと思われる. 信号強

度が最も大きく低下したのは, SDWから南西方向のG23衛星で仰角は18°と低角である. 第6図はSDWとFDKからそれぞれ8番と23番衛星の方位及び断面仰角を示すが, FDKにおいて8番衛星の信号強度に変化がないこと及び当時の風向が南寄りであったことを考え合わせると, 今回の噴火で形成された西側の割れ目から放出された噴煙が信号強度低下の原因の可能性もある. 今回の観測ではGPS衛星のみの受信機であったが, 類似測位衛星に対応



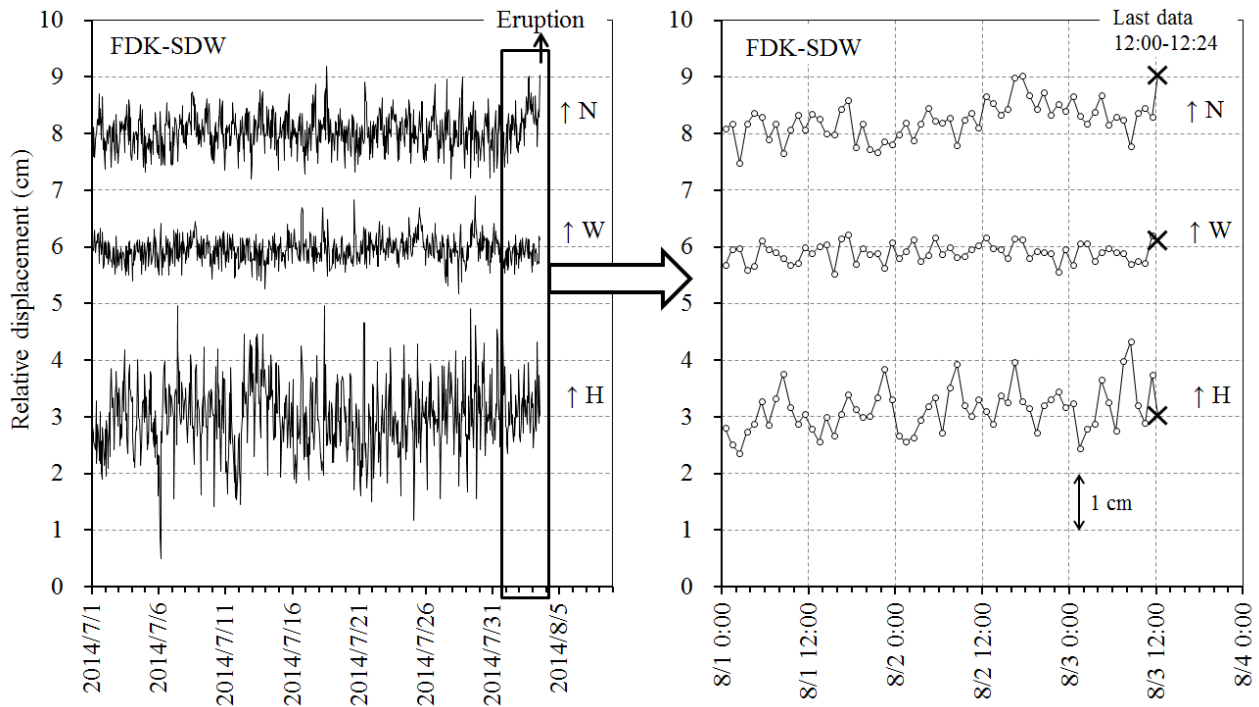
第5図 噴火に伴うGPS衛星の信号強度の変化と衛星配置。  
SDWの最後の観測値は明瞭な信号強度の低下を示す。右図は噴火時の衛星配置図であり、最後の1分間の低下量を円の濃淡で表現している。衛星配置図は宇宙航空研究開発機構(2015)のプログラム及びAlmanacアーカイブデータを用いて作成した。

Fig. 5 Changes of the signal strength of the GPS satellite (left figure) and a satellite constellation diagram (Skyplot; right figure) which shows the location of the satellite when the eruption occurred.  
The signal strength of station SDW was rapidly decreased at the last record. Shading of the circles in Skyplot represents the decrease. Skyplot diagram was created using the program and Almanac archive data of Japan Aerospace Exploration Agency (2015).



第6図 噴火時のGPS衛星方向と観測点配置の関係。  
破線矢印はGPS衛星からの信号強度が最も大きく減衰したG23衛星の方向。背景の地形図は国土地理院(2015b)を使用した。

Fig. 6 Relationship between the location of GPS satellite and the observation site at a time of the eruption. Dashed arrows show the direction of G23 satellites from station SDW which shows the largest decrease of the signal strength. Topographic map of the background uses Geospatial Information Authority of Japan (2015b).



第7図 FDK-SDWの7月1日からの1時間値の3成分相対変化。  
 右は8月1日から噴火までを拡大したものであり、最後の位置を×印で表してある。  
 Fig. 7. Hourly three component relative change of FDK-SDW from July 1, 2014.  
 Right figure is enlargement of the enclosed area of left figure. Cross mark represents the last position.

したGNSS受信機を用いればデータ数を増やすことができるので、雲によって確認できない状況においても噴火の進展に関する情報が得られる可能性がある。

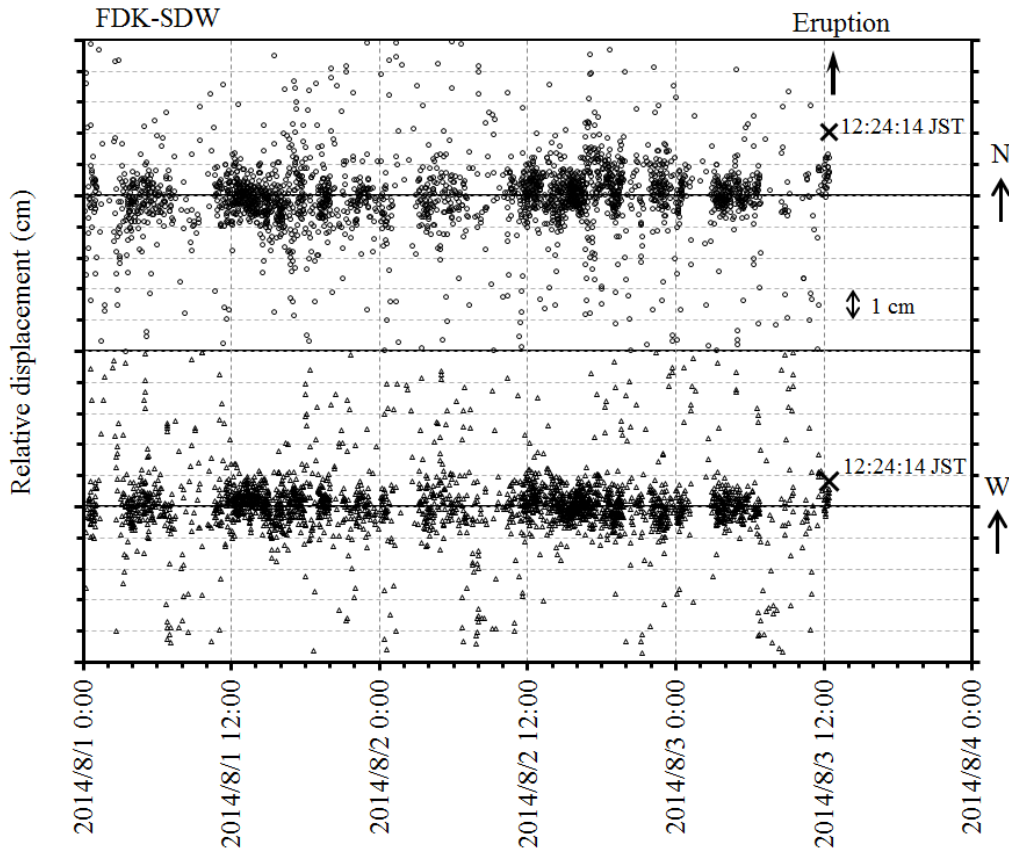
### 3.2 噴火直前の変化

第7図は、2014年7月1日から噴火直前までのFDKに対するSWDの1時間値の時系列である。8月1日から2日の17時頃にかけて数 mm ~ 1 cm 北に動き、その後半量戻してから噴火したが、この北への変化が有意なものかははっきりしない。12時から噴火直前までの平均値である最後の1点が北に変位したように見えることから、RTD (Real Time Dynamic) プログラムを用いて30秒ごとのepoch-by-epoch™解析(Bock *et al.*, 2004)を行って位置変化の様子を確かめた(第8図)。測定値はおおむね1 cmの幅のクラスターを形成しており、噴火直前の12時過ぎのクラスターがそれ以前と比較してずれている様子は見えない。相対位置が得られた12時24分14秒の最後のデータもそれまでのばらつきの範囲を大きく超えるものではなかったが、新岳火口が膨張するセンスである。そこで噴火前約30分間のデータ取得時と同じ衛星配置状態にするために1日当たり4分ずらして8月1日と2日の同時間帯のデータを抽出し、平面軌跡で表してみた(第9図)。この結果からは、3日間でわずかに北にずれ動いた

ように見えるが、その量はばらつきの幅に対して小さく、確実に地盤変動とは言い切れない。噴火発生時頃にN22° Wの方向にずれ動いたように見える変化は、確かな変動と言い切れる量ではない。1時間値の結果を含め、FDK-SDW間においては、7月1日から噴火までに噴火と関係した明瞭な累積変位は見られなかったと判断される。

### 4. 10年間の変動

前項までで噴火の約1ヶ月前から噴火までに顕著な変動が見られなかったことを示したが、10年の時間スケールではさまざまな変化があった。第10図は、SDWとFDK及びGSIを結ぶ3基線各3成分の月平均値を成分ごとに比較したものである。SDWの変位は一貫して累積しており、6 cmの隆起を伴って10年でおおむね北に10 cm、西に8 cm変動した。変位は主に間欠的な変動の累積によるが(以下、間欠的累積変動と呼ぶ)、これらの特徴については後述する。全期間を概観すると、2014年噴火に向けて変位速度が加速するような変化は見られなかった。2009年頃からはSDWの隆起速度がわずかに鈍ったように見るとともにFDKに沈降傾向が見られるようになった。10年の時間スケールで地下の何らかの状態変化が起きていることを示唆している。



第8図 FDK-SDWの8月1日から噴火までの間のepoch-by-epoch<sup>TM</sup>解析による相対位置変化。

Fig. 8 Short period relative displacement of FDK-SDW by epoch-by-epoch<sup>TM</sup> analysis from August 1, 2014 to the onset of the eruption.

#### 4.1 間欠的累積変動の特徴

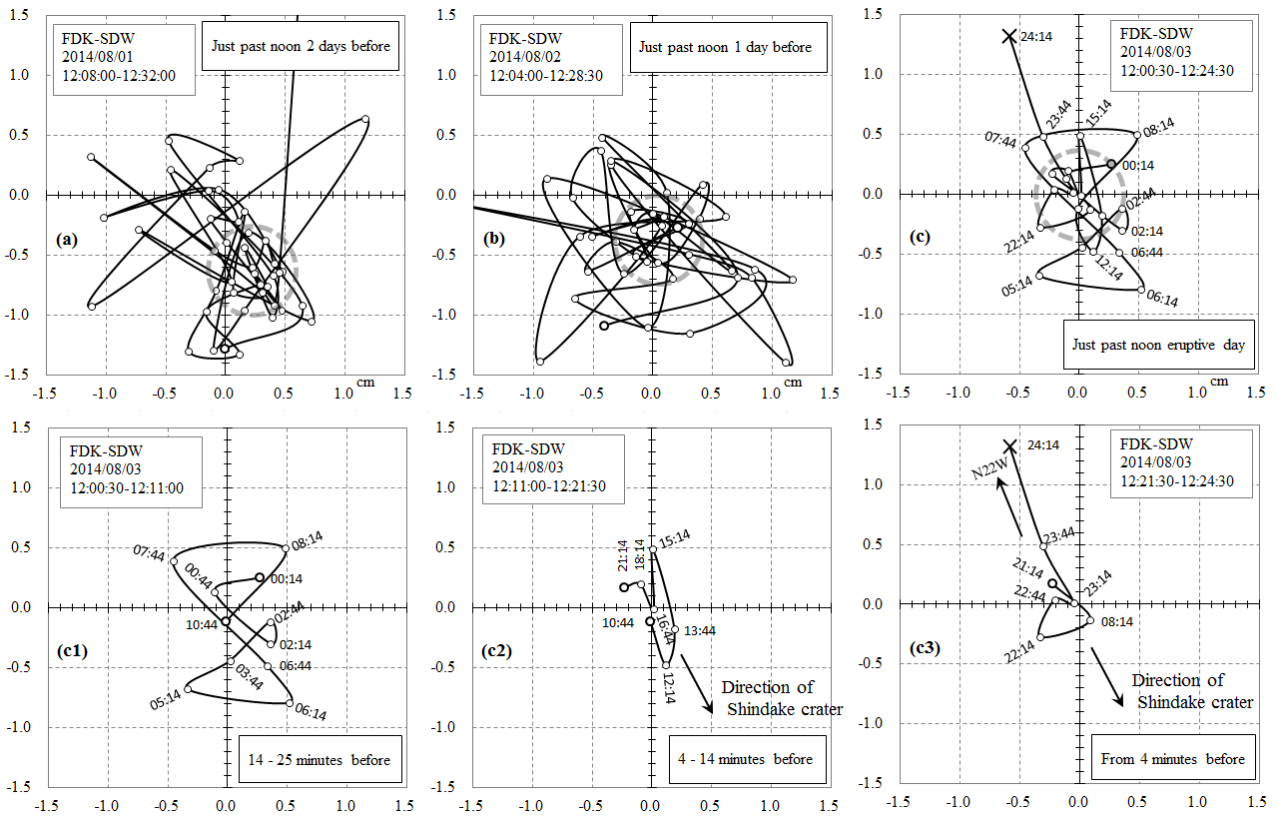
第10図に示したようにSDWの1回の変位が2cmを超える間欠的累積変動が観測期間に4回発生している。それぞれ発生順にイベントⅠ～Ⅳと呼ぶことにする。イベントⅠは2005年1月頃から、イベントⅡは2006年9月頃から、イベントⅢは2008年9月頃から、イベントⅣは2011年3月頃から発生し、それぞれ数ヶ月間続いて緩やかに停止した。変位は累積している。それぞれの間欠的累積変動について、横軸の期間と縦軸の変位幅のスケールを統一して比較した(第11図)。これらから次の特徴が見てとれる。

1. 水平変位の累積値はそれぞれ2.2 cm, 2.5 cm, 3.7 cm, 2.3 cmでイベントⅢが他の1.5～1.7倍で最大の変位を示した。
2. イベントⅠは地震活動の急な上昇と同期して変動が始まり、以後、徐々に減少した。

3. イベントⅡは変動半ばに地震活動のピークが見られ、グラフの期間内の地震数も4回の変動の中で最大であった。
4. イベントⅢのFDK-SDWの変化は非常に滑らかで、ある種の成長曲線を連想させる。
5. イベントⅠとイベントⅣのGSI-SDWの変化は比較的直線的である。
6. イベントⅣの地震活動はイベントⅠからⅢと比較して低調であったが、変動の終盤にいくらか活発化した。

また、山麓のGSIからみた変化と山頂部のFDKからみた変化では、基線長、高低差ともに小さい後者の解像度が高いことのほか、特にイベントⅡとⅢでは変位量に差が見られる。これは主に変動後期にFDKが新岳火口の膨張の影響をわずかながらを受けて一時的に数mm動いたためである。





第9図 FDK-SDWの噴火前3日の水平変位軌跡の比較.

(a) : 8月1日, (b) : 8月2日, (c) : 噴火当日. それぞれ昼頃の約30分間のデータで, 衛星配置が同じになるように時間幅を1日4分ずつずらして選択した. (c1)から(c3)は, (c)の時間幅を細かく分解したものである. 灰色の破線の丸は大まかな集中域を示す. 噴火直前(c)にわずかに北に変位したように見えるが, ばらつきの範囲内である.

Fig. 9 Tracks of the horizontal displacement of FDK-SDW on August 1 (a), August 2 (b) and August 3 (c).

Each figure shows the track during 30 minutes just after the noon. Lower figure shows the tracks during a short period of (c). The dashed circle of gray shows a rough concentration range. Just before eruption (c) appears to have displaced slightly north. However, it is within the range of variation.

## 4.2 間欠的累積変動の間隔

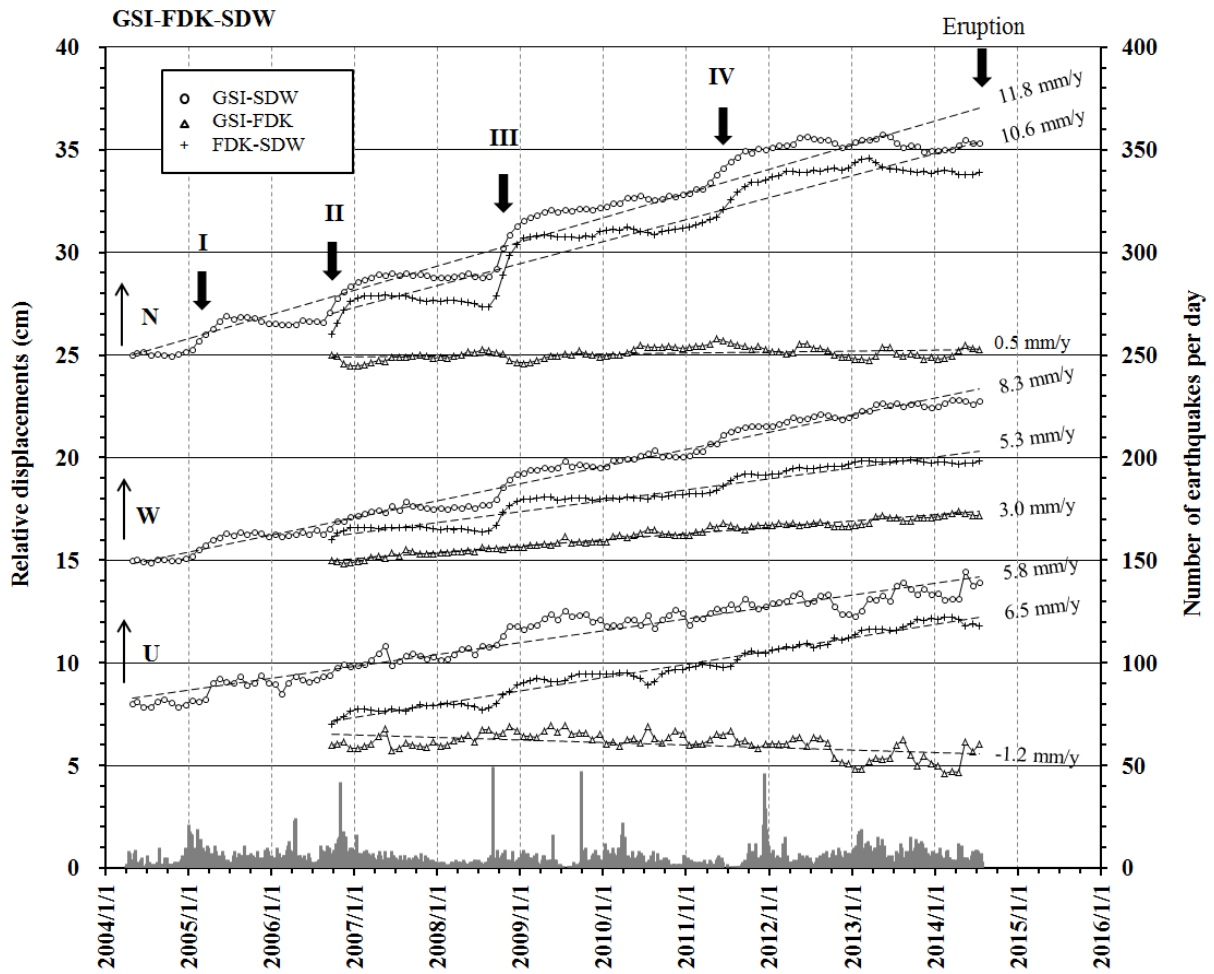
累積変位が最も大きいGSI-SDWの北成分に着目し, 傾き11.8 mm/yの直線をあてはめてトレンドを除去した(第12図). この操作によって, 変位がほとんど進行しない休止期は見掛け上, 右下がりに変化し, 間欠的累積変動は右上への急激な変化として表現されるため, 間欠的累積変動の開始時期がより明瞭になる. この図を基にして間欠的累積変動の始まりから次の間欠的累積変動の始まりまでの月数を読み取った. その結果, イベントⅠ~Ⅱは19ヶ月, イベントⅡ~Ⅲは24ヶ月, イベントⅢ~Ⅳは31ヶ月となった. 2014年8月の噴火をイベントⅤの膨張とすれば, イベントⅣ~Ⅴは39ヶ月となり, SDWにおける間欠的累積変動の間隔は徐々に開いているようである. イベントⅠとⅣの変動開始頃にそれぞれスマトラ島沖地震(2004年12月26日, M9.1)と東北日本太平洋沖地震(2011年3月11日, M9.0)の巨大地震が発生し

ており, 誘発の可能性を否定できない. しかしながら誘発との関わりが見られないイベントⅡ~Ⅲ間と, イベントⅢ~誘発によって早まった可能性のあるイベントⅣとの間隔を比較すると, 明らかに後者が長い. そして最も間隔が開いた後に2014年噴火が起きた.

## 4.3 長期的な傾向変化

### 4.3.1 2009年頃からの変化

イベントⅢまでは間欠的累積変動の開始が明瞭であったが, イベントⅣの変動の開始時期は不明瞭である(第10図). 第12図の破線の丸で示した期間はトレンドに近い非常にゆっくりとした北変位を表している. このような数ヶ月続く変動は2009年より前で1回あったのに対して2009年以後は5回発生した. この内の2回がイベントⅣの前後にあるためにイベントⅣの変動の開始時期が不明瞭になったと考えられるが, 2009年以後に非常にゆっ



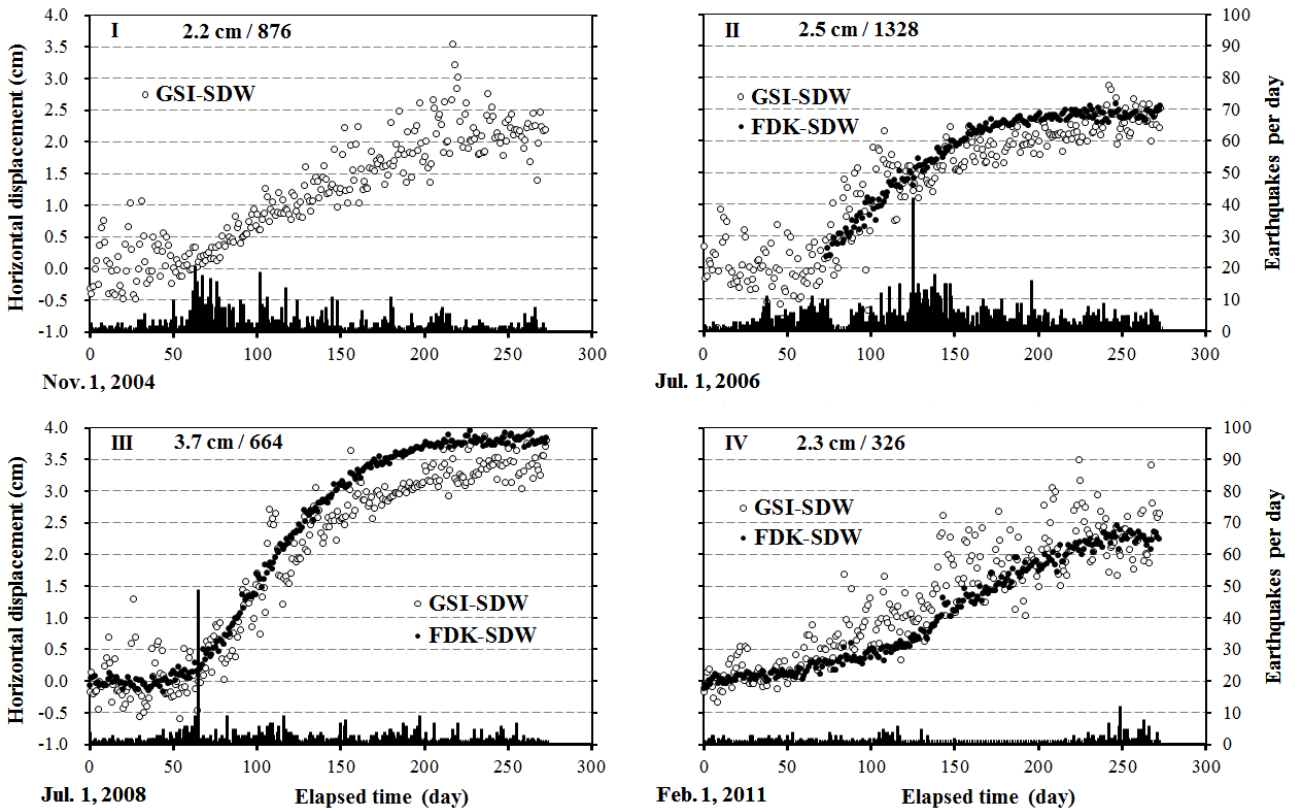
第10図 SDWとFDKとGSIを結ぶ3基線3成分の成分ごとの月平均値の相対変位。  
 イベントIからIVはSDWで捉えられた間欠累積変動である。棒グラフは日別地震数。  
 Fig. 10 Monthly average relative displacements of each component among stations SDW, FDK and GSI.  
 Thick arrows from event I to IV indicate the intermittent cumulative events observed at station SDW. Bar graph shows the daily number of earthquakes.

くりとした北変位が多発するように変化したことは一つの特徴と言える。次に休止期を比較してみる。第12図のT1とT2で示した勾配は、休止期のグラフ上の見掛けの勾配を表したものである。見掛けの勾配のため単位は無視し、ここでは値と標準偏差に着目する。T1の勾配は、2009年11月までに4回あり、これらの平均と標準偏差は $-1.3 \pm 0.2$ であった。それに対してT2は後期側に3回あり、 $-2.5 \pm 0.2$ であった。標準偏差に対して後期側の見掛けの勾配が有意に急なことがわかる。このことは、2009年より後の期間の休止期には相対的に微小な南変位を生じたことを示しており、休止期においても2009年頃を境にした変化が見られる。上下成分については、第10図によると2009年のイベントIIIの変動の前後でSDWは隆起速度が鈍り、FDKも緩やかな沈降が始まったよ

うに見える。2009年までと2010年以後の上下成分の平均変化速度(括弧内はR2)は、SDWでは $+8.0 \text{ mm/y}$  (0.94)から $+3.9 \text{ mm/y}$  (0.69)に、FDKでは $+2.5 \text{ mm/y}$  (0.49)から $-2.9 \text{ mm/y}$  (0.45)に変化した。SDWの減速量は $4.1 \text{ mm/y}$ 、FDKのそれは $5.4 \text{ mm/y}$ となり、上下成分についても2009年頃を境に両点に共通して $4 \sim 5 \text{ mm/y}$ 減速させる成分が加わったとみることができ、その頃に何らかの地下の状態変化があったことが示唆される。

#### 4.3.2 2012年頃からのさらなる変化

SDWとFDKの全期間の変位軌跡(第13図)によると、SDWはおおむね北西に動き続けたが、2013年頃から、それまでの変位方向から明らかに西よりに逸れ、その後は南北成分の動揺が見られた。一方、FDKは観測開始



第11図 間欠累積変動の比較。

グラフのスケールは統一してある。最大変位方向に投影してある。スラッシュで区切られた数値は累積変動量と変動期間内の地震総数である。

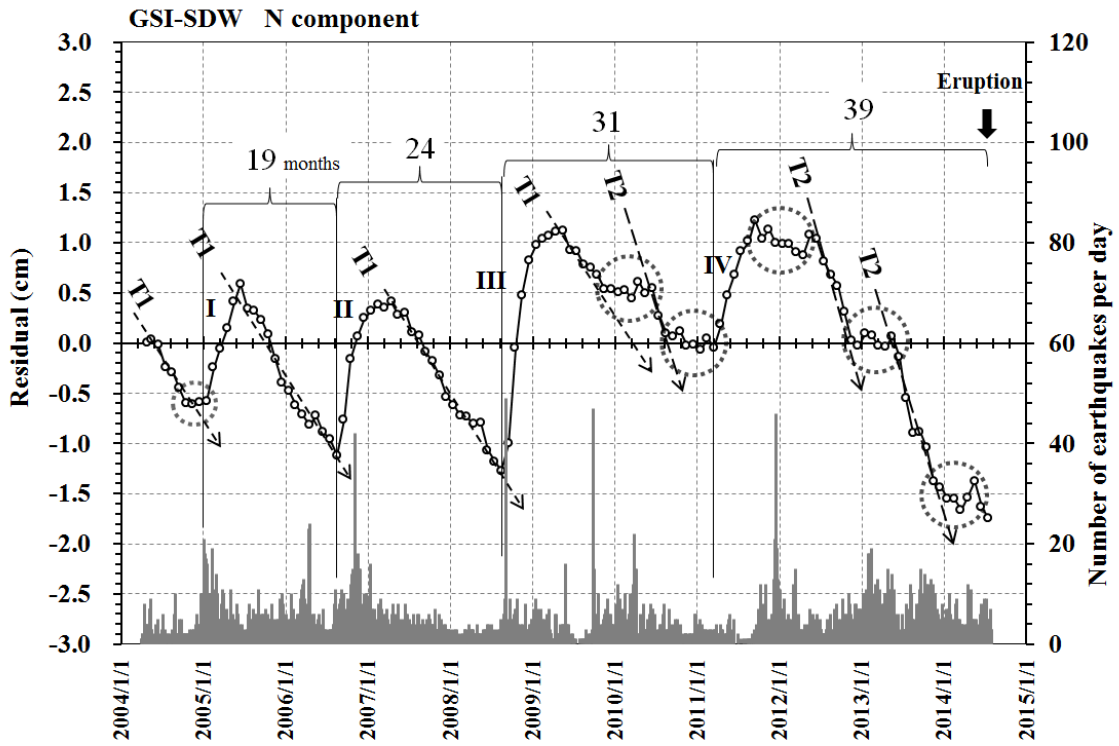
Fig. 11 Comparison of four events showing the intermittent cumulative displacement and associated seismic activities. Graph scales are identical to all figures. Displacements are measured along the maximum displacement direction. Numbers in each figure indicate the total displacement and total number of earthquakes in each period.

から一貫して西向きの変動を継続した。2013年1月に追加した山頂部のデータロガー点の水平変位の様子を第14図に示す。最後のデータは2014年1月までであるが、新岳火口から南側に最も離れたFDSWに対する水平変位は、新岳火口周辺の収縮傾向を示しており、第13図でみられた2013年頃以後の南北成分の動揺の一部を捉えたものと考えられる。

#### 4.3.3 SDWのV/H成分比の変化

新岳火口浅部の膨張源が時間経過と共に浅くなっているかどうかをSDWの鉛直変位Vと水平変位Hの比の時系列で調べた(第15図)。膨張源が浅所に移動することによってSDWの変位ベクトルが変化するならば、この比は小さくなるはずである。作図にあたり次のような前処

理を行っている。SDWの月平均の3成分相対変位量を基にして2004年12月と2012年12月との差をとり、それを2004年4月の初期値とした。これは、初期の相対変位がゼロに近いままで比をとると、初期の変化方向(この場合は縦軸)の分散が極端に大きくなるため、それを防ぐ目的である。初期値に適当なバイアスを設定したことになるが、バイアスが大きいほど振幅が小さく見えてしまうことから、グラフの内の振幅方向の変化量は意味を持たない。この図からは、全期間を通して浅い側に一方的に移動した形跡は見られず、徐々に大きくなる期間とその逆の期間があることが見てとれる。同一傾向の期間を時間経過順にそれぞれStage 1～3とすると、2009年頃のStage 1からStage 2と、2013年頃のStage 2からStage 3の2つの転換点が認められる。これらは前述した2009年



第12図 GSI-SDWの北成分の長期トレンドからの残差と間欠累積変動の間隔。  
破線の丸はトレンドに沿う変動期間を表す。T1とT2は、静穏期の見掛けの勾配を表す。棒  
グラフは日別地震数。

Fig. 12 Residuals subtracting the long-term trend from the north-component of the GSI-SDW, and the time  
intervals among the intermittent cumulative displacements.  
Dashed circles indicate the period in which the displacement varies along the long-term trend. T1  
and T2 show the apparent displacement in quiescence period. Bar graph shows the daily number of  
earthquakes.

頃と2012年頃の傾向変化とおおむね一致し、10年より短い時間スケールの活動の変化が示唆される。

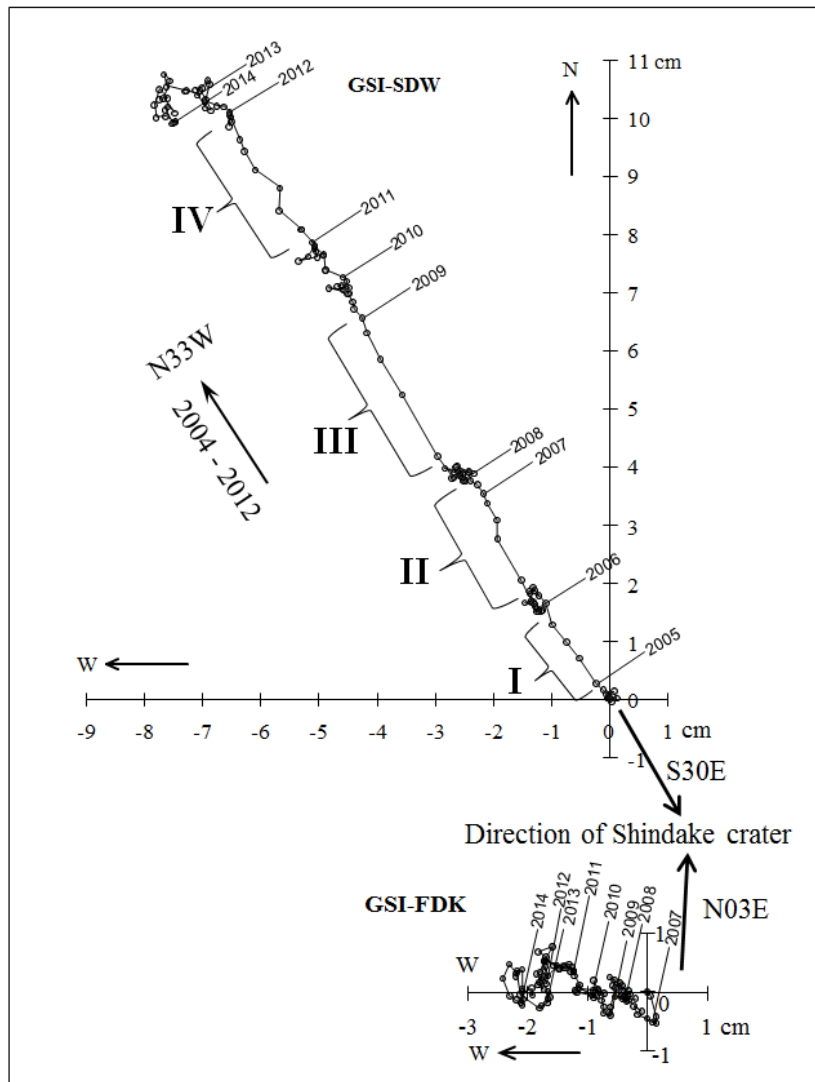
## 5. 考察

### 5.1 間欠的累積変動と浅部の膨張源

新岳火口を囲む繰り返しGPS観測の結果(第16図, 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター, 2014)によると, 変位ベクトルの収束点の水平位置は新岳火口にあり, 火口が放射状に拡大したのは明らかである。深さ方向の情報については, SDWの水平変位と鉛直変位の平均変位速度の成分比から求めた仰角の24°から, この直線を火口側に延長した火口中央位置における比高102mが得られた。SDWと火口底の比高は約90mであるので, 火口底の極浅部が膨張したように見える。変動の時間経

過は, SDWにおいて数cmの変位に数ヶ月を要する緩慢なもので, 一方的に進行して戻らない特徴がある。

Kanda *et al.* (2010) は, 山頂部の浅部に低比抵抗域が山体を覆うように存在していることを示しており, そこにはキャップロックとして働く粘土層などの難透水性地層の存在を指摘している。山頂域で発生する地震のほとんどは, 新岳火口を中心に直径約200m, 標高が約150mから火口底までの高さ約300mの円柱内で発生している(福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台, 2014)。イベントIIの膨張に関わり流体が関与して発生する特徴的な地震が観測されたこと(Hetty *et al.*, 2007), このときに噴気温度の上昇が観測されたこと(平林ほか, 2007), 熱異常域の拡大が観察されたこと(井口, 2007)ならびに地下の温度の高温化を示す地磁気変化も観測されたことから(神田, 2007), 間欠的累積変動は火



第13図 GSIに対するSDWとFDKの全期間の変位軌跡.

Fig. 13 Tracks of horizontal displacement of SDW-GSI and FDK-GSI in total period.

山性流体の上昇によって引き起されたものと考えられる。キャップロック下に存在が想定される熱水域の拡大に伴い、膨張が進行したのではないだろうか。

## 5.2 間欠的累積変動と地震活動との関係

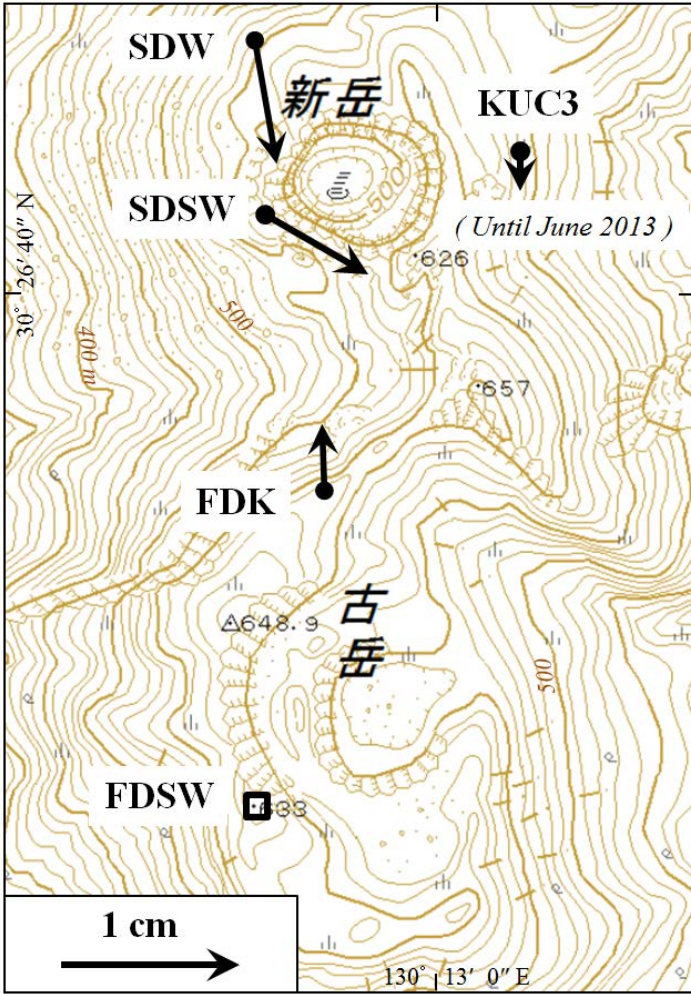
イベント I では変動初期に地震活動が集中し、地震数が増加した。これは剪断破壊を伴って膨張が始まったと解釈できる。しかしながらイベント IV になると初期に目立った地震活動は見られなかった。この間の2回の間欠的累積変動は、それぞれ最大の地震活動と最大の変位量を記録している。それまでの地震活動によって地盤の破壊が進んだため、イベント IV の変動時には流体の流入にもかかわらず地震を伴わなかったのかもしれない。この傾向は、水蒸気噴火の監視観測にとって好ましくなく、実際に2014年噴火に先立つ地震増加は観測されなかつ

た。

間欠的累積変動の回数が増すことで地震が減る傾向は、膨張の原動力が火山性流体の注入によることを示唆している。既存の破壊面は火山性流体の通路となり得るし、滑りをよくするだろう。そのことで地震が起り難くなると思われる。イベント IV の変動の終わりに地震活動の微増があるが、火山性流体の行きつく先の未破壊部分で地震活動が微増したことを表していると考えられる。

## 5.3 イベント III の膨張で推定されること

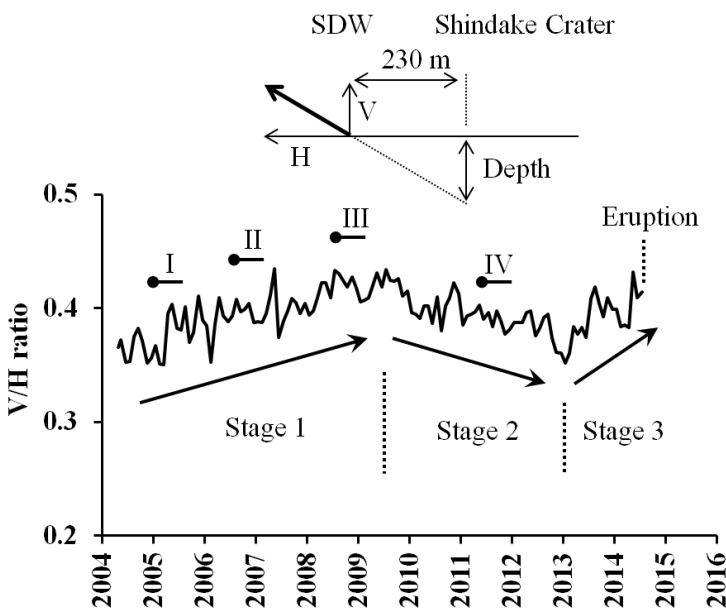
イベント III の間欠的累積変動の FDK-SDW の水平変位の推移は非常に滑らかであり(第17図)、加速期間と減速期間の非対称性からゴンペルツ曲線でフィットさせたところよく一致した。ゴンペルツ曲線は Benjamin Gompertz (1779-1865) が死亡率の人口統計を推定す



第14図 山頂部に追加したデータロガー観測により得られたFDSWに対する変位(2013年2月～2014年1月). わずかな収縮が観測された. 背景の地形図は国土地理院(2015b)を使用したものである.

Fig. 14 Horizontal Displacements around crater relative to station FDSW from February 2013 to January 2014.

Stations SDSW, KUC3 and FDSW are newly installed stations which are operated using data loggers. Slight deflation was observed in this period. Topographic map of the background uses Geospatial Information Authority of Japan (2015b).



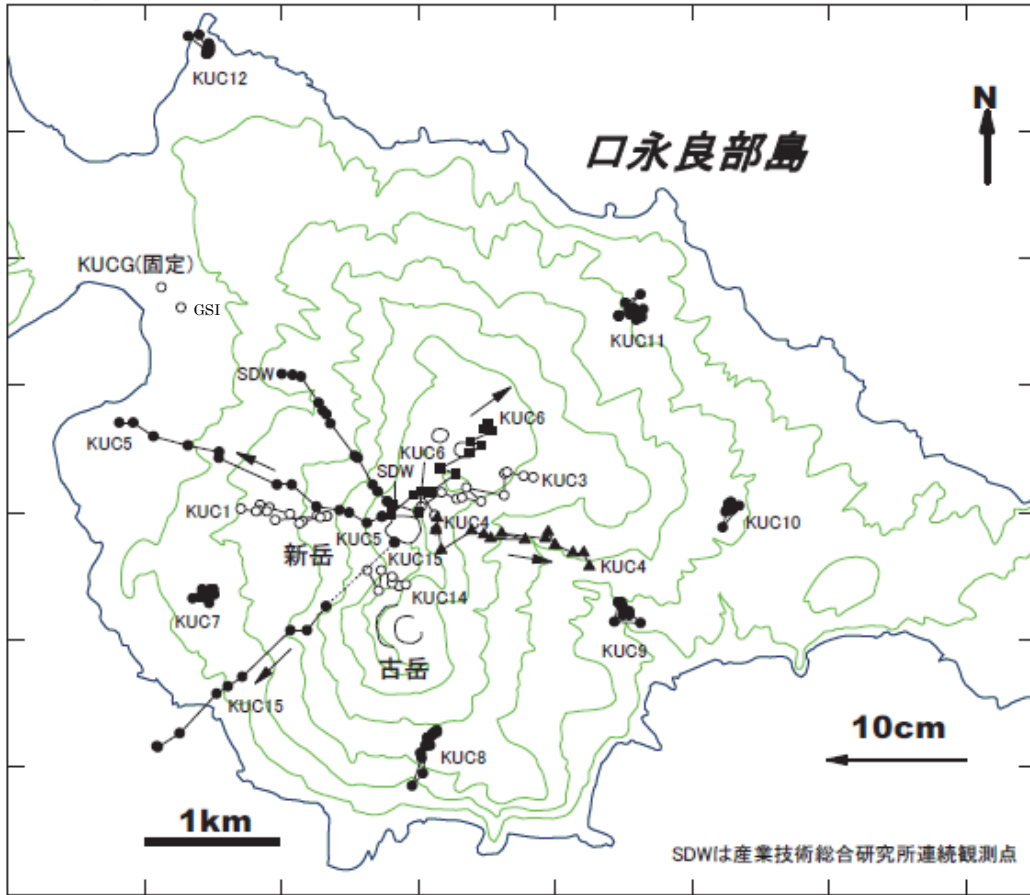
第15図 SDWの水平変位と鉛直変位の成分比の時系列.

I～IVは、間欠累積膨張変動の時期を示す. V/H比は一方向的ではなく、増加と減少が交互に現われた.

Fig. 15 Temporal variation of the ratio of vertical to horizontal displacement observed at station SWD.

I to IV shows the intermittent cumulative displacements. V/H ratio shows the increase and decrease alternately.

水平変位ベクトル(1995年8月～2014年4月)



第16図 繰り返しGPS観測による変位(京都大学防災研究所付属火山活動研究センター, 2014).  
小さい矢印は変位方向を示す.

Fig. 16 Horizontal displacement revealed by the repeated GPS observations (SVO, DPRI, Kyoto Univ. 2014).  
Small arrows indicate the direction of displacement.

る関数として提案したもので(Gompertz, 1825), 現在ではソフトウェアのバグの収束時間の予測に使われ, 動物実験における腫瘍の成長も同曲線によく近似できるとされている(藤田, 1985). 時刻 $t$ における大きさ $x(t)$ が, 成長率を $\alpha$ , 減衰係数を $\beta$ とすると,

$$\frac{dx(t)}{dt} = \alpha x(t) \exp(-\beta t)$$

なる微分方程式で表され, 時刻 $t$ における大きさの増加速度がその時の大きさに比例する部分と, その時間の指数関数の減少率の積で表現される. 厳密解の一般表現は

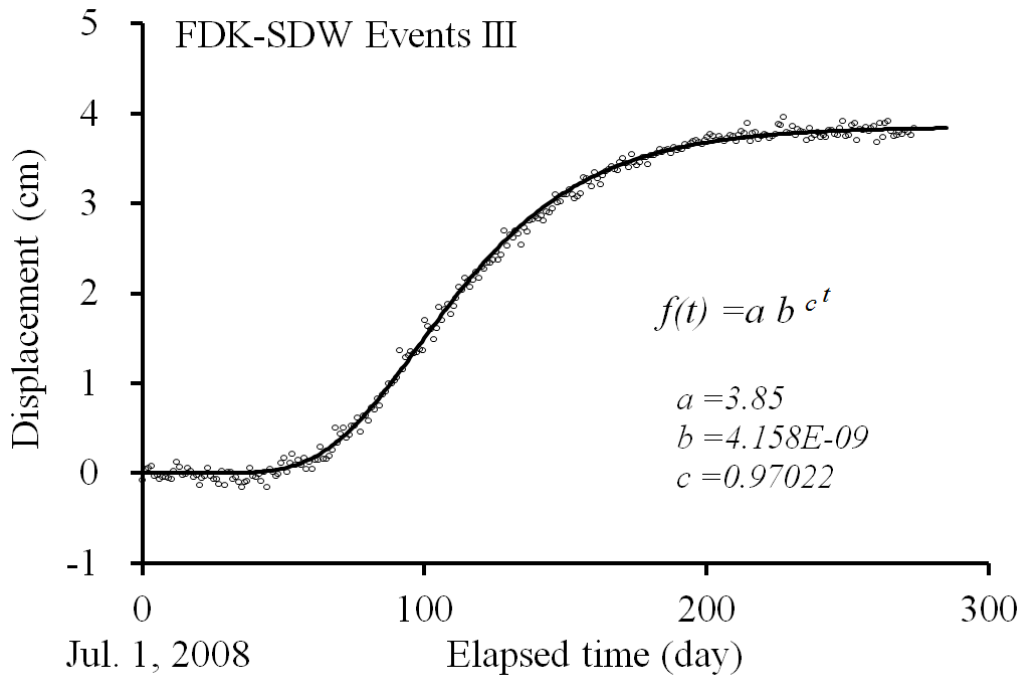
$$x(t) = ab^{c^t} \quad (a, b, c \text{ は定数})$$

である. 変動初期には加速するが, 変動が進むほどブレーキがかかり,  $t \rightarrow \infty$ で $a \max$ に漸近してほぼ停止状態に至る. 変動の推移がこの曲線で近似される物理的意味については今後の研究課題であるが, この曲線から次のよう

な情報が得られる. 変動が5 mmを超えて異常に確信が持たれる時期は9月12日, 加速から減速に向う変曲点は10月7日となる. 第11図のイベントⅢに見られる地震のピークは9月4日, FDKに若干の南変位が現れ始めた時期が変曲点付近であることは, 膨張の時間発展を考える意味で興味深い.

#### 5.4 口永良部島火山の変動源について

新岳火口の南に位置するFDKでは, 8年で約2 cmの西変位が見られる(第10図, 第13図). この変位は新岳火口の等方的な膨張では説明できない. SVOによる繰り返しGPSの結果(京都大学防災研究所付属火山活動研究センター, 2014)によると, 火口縁の変動量に差が見られ, おおむね西側の変位が大きい(第16図). この図には観測開始時期が異なるものが含まれており, 火口からの距離の違いの影響も有り得るが, KUC4とKUC5は同じ測定



第17図 FDK-SDWのイベントⅢの間欠的累積変動時の水平変位とゴンペルツ曲線による近似。

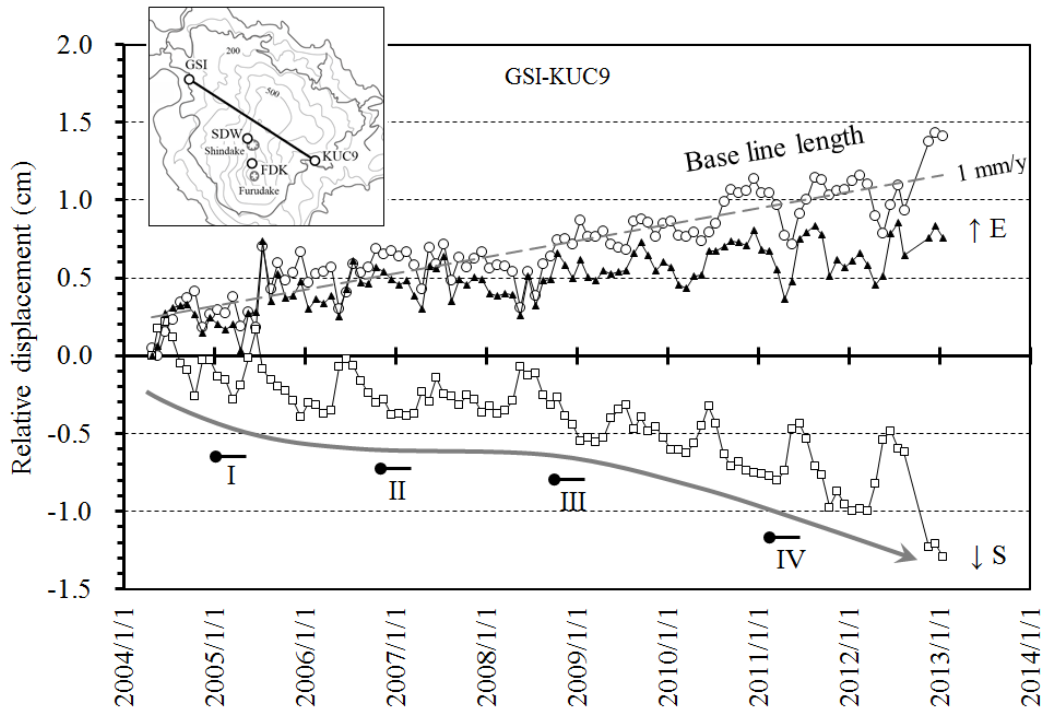
Fig. 17 Horizontal displacement of FDK-SDW at event III of the intermittent cumulative displacements and Gompertz curve approximating the displacement.

期間であるので、その量を比較した。8年当りに換算した火口西側のKUC5の西変位は8.4 cm、東側のKUC4の東変位は4.4 cmであった。東西非対称の変位は、両変位の差の1/2に当たる2 cmの西変位に、両変位の和の1/2に当たる6.4 cmの東西均等な変位が重なったと考えれば説明できる。もしそうであれば、SDWの変位にも西変位が加わっていると考えられ、方向角に影響が出ている可能性があるため確かめた。第13図のSDWの変位軌跡において、2012年まで平均変位方向を求めたところN33°Wであった。新岳火口底中央からSDWの方位はN30°Wより大きめである。N30°Wの方位とSDWの8年間に10 cmの北変位から求めた計算上の西変位は5.8 cmとなり、同期間の観測された西変位の6.6 cmに0.8 cmの西変位が加わったと考えることができる。繰り返しGPS観測の期間が1995年から始まっていて比較期間が異なることや、火口からの各観測点までの距離の違い、膨張中心の水平位置の曖昧さなどを考慮すれば、上述の繰り返し測定結果の火口東西の変位量の違いから推定された2 cmとオーダーは一致すると考えてよいのではないだろうか。口永良部島火山は、古い山体の上に新岳の円頂丘が乗った構造とされており(下司・小林, 2007)、新岳火口浅部の膨張は主に新岳の円頂丘で生じ、それとは別に古い山体自

身が別の変動源によって山頂部付近で西変位を生じていたため、両方の変動が合計されて非対称の変位になった可能性がある。一方、新岳の北を通過して山体を北西-南東に挟むGSI-KUC9は、9年で約1 cm伸びた(第18図)。上述の結果を合わせると、2004年以後の8～9年の間に1～2 cmの割合で動く下部地盤があり、西に動く地盤の上の新岳の円頂丘が別に放射状に膨張していたのだろう。下部地盤の変動源は、新岳～古岳の南北稜線とKUC9の間にあるものと推定される。井口ほか(2002)が山腹観測点を含めた繰り返しGPS結果から推定した膨張源は新岳の東側やや深部にあり、有力な候補である。今回の分析によって下部地盤の変動を分離できる可能性を示したので、井口ほか(2002)の膨張源の位置の推定に際して火口周辺のデータを除くか、火口中央の1カ所に西変位を与えて下部地盤の変動源位置を再推定することでより深部の膨張源の情報が正確に求められる可能性がある。

二つの変動源の可能性を示したので、参考のため茂木モデル(Mogi, 1958)を用いて二つの球状膨張源による変動量試算を行った。この目的は、東側やや深部の変動源によりFDKの西変位とSDWの変位方向の影響を調べることにあり、膨張源の位置や体積変化量に重要な意味がないことは注意されたい。観測データはSDWとFDKの2





第18図 GSI-KUC9の基線長と水平2成分の相対変化。

基線長は1 mm/yで伸び続けた。また、南成分の変化速度は、イベントⅢの頃に増加した。

Fig. 18 Relative change of the baseline length and two horizontal components of GSI-KUC9.

Baseline length of GSI-KUC9 was continued expansion at a rate of 1 millimeter per year. The rate of change of the south-component was increased around the time of events III.

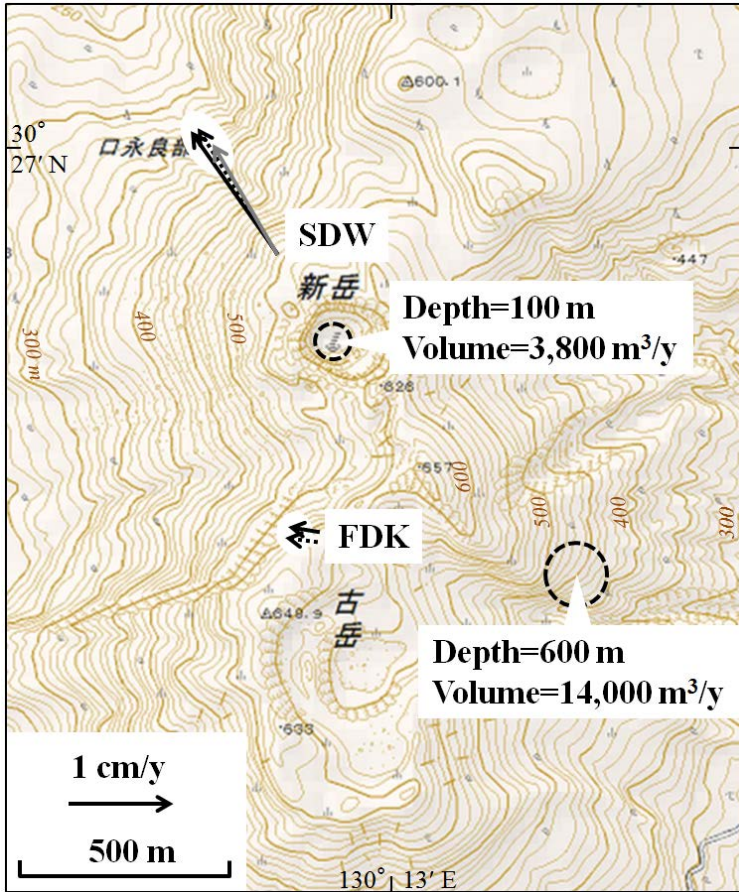
点のみであるので、両点の変位ベクトルに近似する位置に膨張源を固定した。一つ目の膨張源は新岳火口中央で、SDWの変位ベクトルの仰角を参考に深さを100 mとした。FDKに南向きの累積変動がないことから、この膨張の影響はFDKには及ばないものとした。二つ目の膨張源は、SDWの北北西変位とFDKの西変位、さらに京都大学防災研究所付属火山活動研究センター（2014）のKUC8の南南西変位の方向を参考にして新岳火口の南東約800 mの位置とした。このようにしてからSDWとFDKの変位ベクトルにフィットするように両膨張源の体積と二つ目の膨張源の深さを変化させた。結果を第19図に示す。計算変位を破線矢印で、観測値を黒矢印で表してあるが、当然のことながら水平変位はおおむね一致する。SDWにおいて一つ目の膨張源と二つ目の膨張源の差が西成分として加わることが確認できる。山頂部の限られた観測値から複数、あるいは複雑な形状の変動源を推定することは意味を持たないため、ここでは、新岳～古岳を結ぶ稜線の東側のやや深部に何らかの変動源がある可能性と、新岳の放射状の膨張がその上に乗る可能性を示すにとどめる。

### 5.5 2009年頃からの傾向変化の実態 ～噴火5年前～

前項で変位が重ね合わせになっていることを推定した。下部地盤の変動源は、FDKの西成分やGSI-KUC9の時系列からほぼ一定の割合で進行している。したがって、間欠的累積変動を含むSDWの不規則な山体変動は、新岳火口浅部の状態をより大きく反映していることになる。また、2009年頃や2012～2013年を境にしたさまざまな傾向変化は、地下の何らかの状態変化を示唆している。

火山活動が活発化する際に活動の中心が徐々に浅い側に移動することが想像されるが、SDWのV/H比の時系列（第15図）においてそのような傾向は見られず、噴火に近いStage 3でも2年のスパンで見ると逆傾向である。この現象について考えてみる。

第10図によるとSDWは観測期間を通じて隆起しているが、その中でも2009年頃の隆起は一段と目立つ。これは、4回の膨張の中で最大の変位を示したイベントⅢの間欠累積膨張の影響と考えられ、第15図のStage 1とStage 2の転換点はおおむねこの時期に当たる。しかしながらイベントⅢに向けて活動が高まることと膨張源が浅くなることは一致せず、むしろ逆傾向である。4.3.1で述べたようにSDWにおいて2010年以後の静穏期にわずかな南変位が現れるようになったことは、V/H比のHの



第19図 二つの膨張源によって計算されたSDWとFDKの変位ベクトルと観測値の比較。第10図で示したSDWとFDKの平均変位速度に基づく速度ベクトルを黒矢印で示す。破線矢印は二つの球状膨張源による合成変位である。ただし、新岳火口直下の浅い膨張源の影響はFDKに及ばないものとした。灰色の矢印は新岳火口直下の膨張源のみの変位を表す。このシミュレーションで東側深部の膨張源の影響によりSDWに西向きの変位が加わることが示された。背景の地形図は国土地理院の地理院地図(2015b)を使用した。

Fig. 19 Comparison between calculated displacement and observation. Black arrow is the averaged displacement vector observed at stations SDW and FDK (Fig. 10). Dotted arrow is the composed displacement vector of station SDW and FDK calculated from tow dilatant sources. Gray arrow is the displacement vector due to single dilatant source located at Shindake crater. This simulation shows a displacement of west-component by the deeper inflation source of the east side. Topographic map of the background uses Geospatial Information Authority of Japan (2015b).

相対的な縮小傾向を示すとともに、V/H比のVへのバイアスが増加したものと考えられる。すなわち、Stage1ではやや深いところの隆起が続いたが、Stage2では沈降するようになった。山麓間を結ぶGSI-KUC9では、2009年頃を境に南への変動速度が大きくなっており(第18図)、この時期にGSI-KUC9に影響を与えるような深い場所では何らかの状態変化が生じたと考えられる。

### 5.6 2013年頃からの傾向変化 ～噴火1年前～

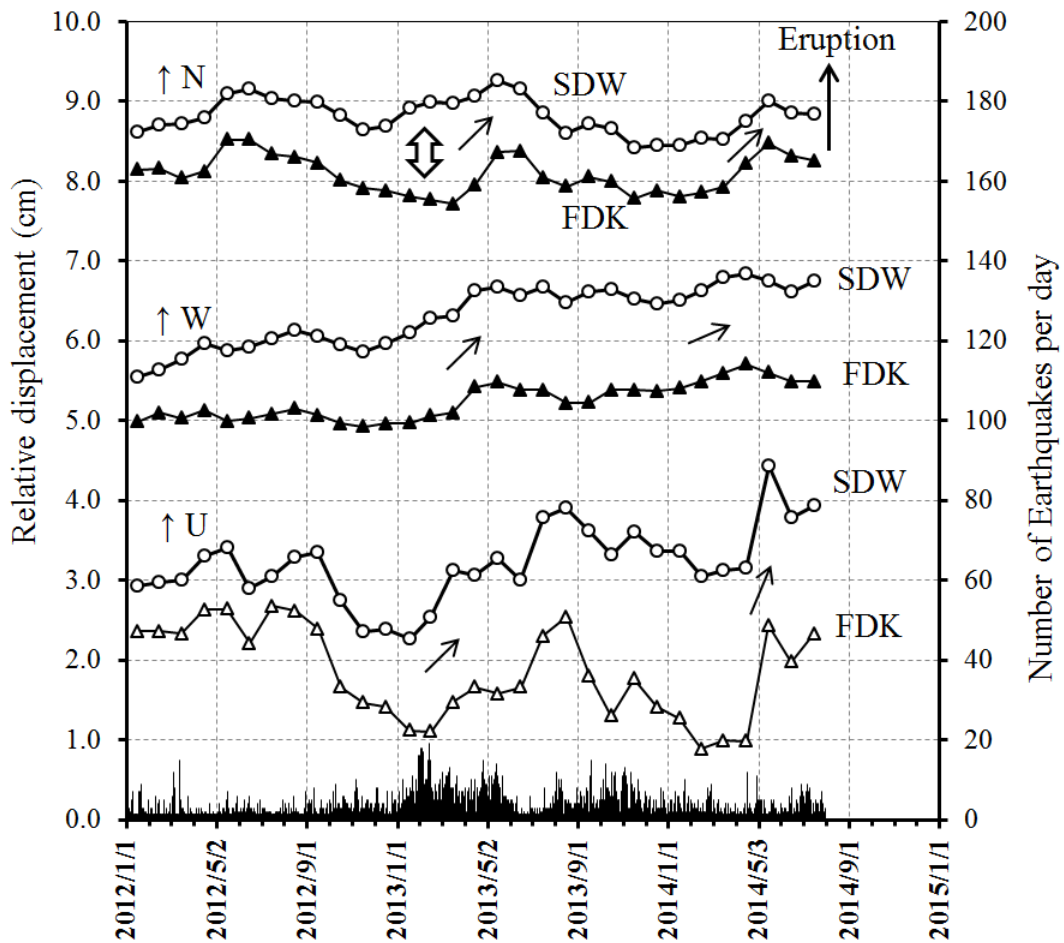
第13図で示した全期間の変位軌跡において2013年頃からそれまでとは明らかに異なる領域に入ったことがわかる。第14図の山頂部のデータロガー観測結果によると収縮傾向も見られた。新岳火口浅部が膨張した場合はSDWの北成分が最も大きく変化するはずであるが、そうならならず、若干の動揺を含みながらも浅部の膨張はほぼ停止していたと見られる。

第20図は2012年から噴火までの成分ごとの時系列である。上下成分の動揺は第10図との比較で明らかのように以前になかった変化である。水平成分以上に変動の識別は難しいが、測定方法は同一であるので、実際の変動を表している可能性はある。2013年初めと2013年中頃、2014年初めの上下動の振幅はこれまでにない大きさ

である。細い矢印で示したところは、SDWとFDKが同期した変化である。この変化は、新岳火口浅部の膨張域だけでは生じない。両点に影響する場所で膨張と収縮が繰り返された可能性があり、変動源の不安定化を意味しているのかもしれない。この期間は第15図のStage3に当たり、V/H比のHがゼロに近づきつつあったと考えられる。噴火前10年のスパンで見ると、2009年頃の活動のピーク、2012年頃からの水平変動の減少、という経過を辿って噴火に至ったことになる。

## 6. まとめ

1990年代中頃より群発地震活動が活発化し、山体膨張も捉えられた口永良部島火山において、山頂部の地盤変動観測を2004年から始めた。2014年8月3日の噴火に伴うような短期(1ヶ月前)の前兆変動は見られなかった。新岳火口直下で発生する群発地震活動を伴うような変動であることを初めて検出した2005年の膨張後、噴火までに類似の膨張を4回捉えた。これらの膨張は、新岳火口直下の熱水系に深部から火山性流体が注入されたことにより生じたものと推定されるが、膨張の繰り返しによって膨張時の地震活動を伴わなくなった。これは新た



第20図 2012年から噴火までの3成分の時系列変化。

片矢印は、SDWとFDKが同じ動きを示した期間、両矢印は、新岳火口浅部で微小な膨張が見られた期間を示す。棒グラフは日別の地震数である。

Fig. 20 Temporal variation of the three components observed at stations SDW and FDK from 2012 to the onset of the eruption.

Single-headed and middle-sized arrow indicates the duration when stations SDW and FDK show the same motion. Double-headed arrow indicates a slightly inflation period in the shallow part beneath the Shindake crater. Bar graph shows the daily number of earthquakes.

な破壊を起こさず既存の破壊面を利用して流体が流動するためと考えられる。このように場合によっては地震活動の高まりを持たずに地盤変動が進行する。2009年頃を境に膨張期と停滞期の境界が不明瞭になった。これは膨張の長期トレンドに沿った数ヶ月続く微小な変動が出現するようになったことによる。SDWにおいて1回の膨張が数cmの間欠的累積変動の間隔は長くなる傾向が見られ、一番長い期間の後に噴火が発生した。FDKの変位が新岳火口の膨張で説明できないことなどから、新岳の東側深部の変動源の存在が示唆された。新岳火口周辺の間欠的累積変動は、火口浅部の膨張源に伴う変動が、これより深部の膨張源に伴う定常的変動に加わったものであ

ると推定される。2008年9月からの3回目の膨張のFDK-SDWの水平変位の時系列は、ゴンペルツ曲線で近似できる。この物理的意味については今後の課題である。噴火前10年間の測定データを付録にまとめたので、今後の水蒸気爆発の予測研究に役立つことを希望する。

謝辞：屋久島町関係者には観測点の選定をはじめ、多くの便宜を図っていただきました。変動検出にあたっては、国土地理院の電子基準点のデータを使わせていただきました。山頂部の作業の安全確保にあたり、京都大学防災研究所附属火山活動研究センターの関係者の皆様には山頂部への立入前に地震活動などの情報を提供いただきま

した。観測点用の支柱の作成に産業技術総合研究所の吉川秀樹氏、設置工事に篠原宏志氏と下司信夫氏に協力いただきました。本論の査読を担当された産業技術総合研究所の大谷 竜氏と落 唯史氏からは原稿の改善に多くの助言をいただきました。記して感謝申し上げます。

## 文 献

- Bock, Y., Macdonald, T., Merts, J., Bock, L. and Fayman, J. (2004) Epoch-by-Epoch<sup>TM</sup> real-time GPS positioning in high dynamics and at extended ranges. [http://www.geodetics.com/publications/14\\_Bock-Epoch\\_by\\_Epoch\\_Real\\_TimeGPS\\_Positioning.pdf](http://www.geodetics.com/publications/14_Bock-Epoch_by_Epoch_Real_TimeGPS_Positioning.pdf) (2015年2月9日参照)
- 藤田哲也(1985) 腫瘍の増殖と成長. 現代病理学大系 9A腫瘍I [別冊], 中山書店, 77-78.
- 福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台(2014) 口永良部島の火山活動解説資料(平成26年8月). 火山活動解説資料(平成26年8月), [http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly\\_v-act\\_doc/fukuoka/14m08/509\\_14m08.pdf](http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/14m08/509_14m08.pdf) (2015年2月9日参照)
- 下司信夫・小林和夫(2007) 口永良部島火山地質図. 火山地質図No.14, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Gompertz, B. (1825) On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **115**, 513-585.
- Hetty, T., Iguchi, M., Tameguri, T. and Yamazaki, T. (2007) Hypocenters, Spectral Analysis and Source Mechanism of Volcanic Earthquakes at Kuchinoerabujima: High-frequency, Low-frequency and Monochromatic Events. 口永良部島火山の水蒸気爆発発生とその後の推移の予測のための実践的研究 研究代表者 井口正人, 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター編, 鹿児島, 9-15. [http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/H18kuc/02\\_hetty.pdf](http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/H18kuc/02_hetty.pdf) (2015年9月14日参照)
- 平林順一・野上健治・大嶋弘光・井口正人(2007) 口永良部島の火山ガス観測. 口永良部島火山の水蒸気爆発発生とその後の推移の予測のための実践的研究 研究代表者 井口正人, 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター編, 鹿児島, 51-56. [http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/H18kuc/10\\_hirabayashi.pdf](http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/H18kuc/10_hirabayashi.pdf) (2015年9月14日参照)
- 井口正人(2007) 空中赤外熱測定による口永良部島新岳周辺の地熱異常域変化の検出. 口永良部島火山の水蒸気爆発発生とその後の推移の予測のための実践的研究 研究代表者 井口正人, 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター編, 鹿児島, 45-50. [http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/H18kuc/09\\_iguchi.pdf](http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/H18kuc/09_iguchi.pdf) (2015年9月14日参照)
- 井口正人・山本圭吾・味喜大介・高山鐵朗・寺石真弘・園田保美・鬼澤真也・八木原 寛・平野舟一郎, 京大防災研(2002) 口永良部島火山における地盤変動. 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター編, 薩摩硫黄島・口永良部島火山の集中総合観測(平成12年8月~平成13年3月), 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター, 鹿児島, 99-108. [http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/iwo\\_kuchi/12.pdf](http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/iwo_kuchi/12.pdf) (2015年9月14日参照)
- 情報通信研究機構(2015) 閏秒の実施日一覧. <http://jjy.nict.go.jp/QandA/data/leapsec.html> (2015年2月9日参照)
- 神田 径(2007) 口永良部島火山の最新の地磁気変化について. 口永良部島火山の水蒸気爆発発生とその後の推移の予測のための実践的研究 研究代表者 井口正人, 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター編, 鹿児島, 37-40. [http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/H18kuc/07\\_kanda.pdf](http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/H18kuc/07_kanda.pdf) (2015年9月14日参照)
- 神田 径・田中良和・宇津木 充(2002) 口永良部島火山における全磁力連続観測. 口永良部島火山における地盤変動, 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター編, 薩摩硫黄島・口永良部島火山の集中総合観測(平成12年8月~平成13年3月), 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター, 鹿児島, 101-119. [http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/iwo\\_kuchi/12.pdf](http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/iwo_kuchi/12.pdf) (2015年9月14日参照)
- Kanda, W., Utsugi, M., Tanaka, Y., Hashimoto, T., Fujii, I., Hasenaka, T. and Shigeno, K. (2010) A heating process of Kuchi-erabu-jima volcano, Japan, as inferred from geomagnetic field variations and electrical structure. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **189**, 158-171.
- 国土地理院(2015a) 国土地理院による火山周辺地域における地殻変動観測の概況. [http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/kazan\\_index.html](http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/kazan_index.html) (2015年2月9日参照)
- 国土地理院(2015b) 地理院地図, Geospatial Information Authority of Japan, GSI Maps, 1/25,000地形図「口永良部島」相当位置の地図画像の一部, <http://maps.gsi.go.jp> (2015年2月9日参照)
- 京都大学防災研究所付属火山活動研究センター(2014) 口永良部島におけるGPS繰り返し観測3/3. 第130回火山噴火予知連絡会資料(その2) 口永良部島, 42, [http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/130/130\\_no02.pdf](http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/130/130_no02.pdf) (2015年2月9日参照)
- Mogi, K.(1958) Relations between the eruptions of various

口永良部島の2014年噴火前10年間の地盤変動（斎藤ほか）

volcanos and the deformations of the ground surface around them. *Bull. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo*, **36**, 99-134.

斎藤英二・井口正人(2006) 口永良部島火山におけるGPS連続観測による気象要素を加味した3次元変位検出. *火山*, **51**. 21-30.

宇宙航空研究開発機構(2015) 準天頂衛星システム(QZSS)みちびきデータ公開ウェブサイト. <http://qz-vision.jaxa.jp/> (2015年2月9日参照)

( 受 付 : 2015年7月6日 受 理 : 2015年9月25日 )

附録 SDW-FDK-GSI間の相対変動  
Appendix Relative displacements of each component between stations

第A1表 GSI-SDW (1/6)  
Table A1 GSI-SDW (1/6)

Table with columns for date (mm-dd), day, and displacement components (dN, dE, dH) in cm and mm for years 2004 through 2029. The table contains a dense grid of numerical values representing relative displacements between stations.

口永良部島の2014年噴火前10年間の地盤変動 (斎藤ほか)

第A1表 GSI-SDW (2/6)  
Table A1 GSI-SDW (2/6)

mm-dd	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	dN	dE	dH
day	day	day	day	day	day	day	day	day	day	day	day	cm	cm	cm
03-01	5948	6048	6148	6248	6348	6448	6548	6648	6748	6848	6948	7048	7148	7248
03-02	6048	6148	6248	6348	6448	6548	6648	6748	6848	6948	7048	7148	7248	7348
03-03	6148	6248	6348	6448	6548	6648	6748	6848	6948	7048	7148	7248	7348	7448
03-04	6248	6348	6448	6548	6648	6748	6848	6948	7048	7148	7248	7348	7448	7548
03-05	6348	6448	6548	6648	6748	6848	6948	7048	7148	7248	7348	7448	7548	7648
03-06	6448	6548	6648	6748	6848	6948	7048	7148	7248	7348	7448	7548	7648	7748
03-07	6548	6648	6748	6848	6948	7048	7148	7248	7348	7448	7548	7648	7748	7848
03-08	6648	6748	6848	6948	7048	7148	7248	7348	7448	7548	7648	7748	7848	7948
03-09	6748	6848	6948	7048	7148	7248	7348	7448	7548	7648	7748	7848	7948	8048
03-10	6848	6948	7048	7148	7248	7348	7448	7548	7648	7748	7848	7948	8048	8148
03-11	6948	7048	7148	7248	7348	7448	7548	7648	7748	7848	7948	8048	8148	8248
03-12	7048	7148	7248	7348	7448	7548	7648	7748	7848	7948	8048	8148	8248	8348
03-13	7148	7248	7348	7448	7548	7648	7748	7848	7948	8048	8148	8248	8348	8448
03-14	7248	7348	7448	7548	7648	7748	7848	7948	8048	8148	8248	8348	8448	8548
03-15	7348	7448	7548	7648	7748	7848	7948	8048	8148	8248	8348	8448	8548	8648
03-16	7448	7548	7648	7748	7848	7948	8048	8148	8248	8348	8448	8548	8648	8748
03-17	7548	7648	7748	7848	7948	8048	8148	8248	8348	8448	8548	8648	8748	8848
03-18	7648	7748	7848	7948	8048	8148	8248	8348	8448	8548	8648	8748	8848	8948
03-19	7748	7848	7948	8048	8148	8248	8348	8448	8548	8648	8748	8848	8948	9048
03-20	7848	7948	8048	8148	8248	8348	8448	8548	8648	8748	8848	8948	9048	9148
03-21	7948	8048	8148	8248	8348	8448	8548	8648	8748	8848	8948	9048	9148	9248
03-22	8048	8148	8248	8348	8448	8548	8648	8748	8848	8948	9048	9148	9248	9348
03-23	8148	8248	8348	8448	8548	8648	8748	8848	8948	9048	9148	9248	9348	9448
03-24	8248	8348	8448	8548	8648	8748	8848	8948	9048	9148	9248	9348	9448	9548
03-25	8348	8448	8548	8648	8748	8848	8948	9048	9148	9248	9348	9448	9548	9648
03-26	8448	8548	8648	8748	8848	8948	9048	9148	9248	9348	9448	9548	9648	9748
03-27	8548	8648	8748	8848	8948	9048	9148	9248	9348	9448	9548	9648	9748	9848
03-28	8648	8748	8848	8948	9048	9148	9248	9348	9448	9548	9648	9748	9848	9948
03-29	8748	8848	8948	9048	9148	9248	9348	9448	9548	9648	9748	9848	9948	10048
03-30	8848	8948	9048	9148	9248	9348	9448	9548	9648	9748	9848	9948	10048	10148
03-31	8948	9048	9148	9248	9348	9448	9548	9648	9748	9848	9948	10048	10148	10248
04-01	9048	9148	9248	9348	9448	9548	9648	9748	9848	9948	10048	10148	10248	10348
04-02	9148	9248	9348	9448	9548	9648	9748	9848	9948	10048	10148	10248	10348	10448
04-03	9248	9348	9448	9548	9648	9748	9848	9948	10048	10148	10248	10348	10448	10548
04-04	9348	9448	9548	9648	9748	9848	9948	10048	10148	10248	10348	10448	10548	10648
04-05	9448	9548	9648	9748	9848	9948	10048	10148	10248	10348	10448	10548	10648	10748
04-06	9548	9648	9748	9848	9948	10048	10148	10248	10348	10448	10548	10648	10748	10848
04-07	9648	9748	9848	9948	10048	10148	10248	10348	10448	10548	10648	10748	10848	10948
04-08	9748	9848	9948	10048	10148	10248	10348	10448	10548	10648	10748	10848	10948	11048
04-09	9848	9948	10048	10148	10248	10348	10448	10548	10648	10748	10848	10948	11048	11148
04-10	9948	10048	10148	10248	10348	10448	10548	10648	10748	10848	10948	11048	11148	11248
04-11	10048	10148	10248	10348	10448	10548	10648	10748	10848	10948	11048	11148	11248	11348
04-12	10148	10248	10348	10448	10548	10648	10748	10848	10948	11048	11148	11248	11348	11448
04-13	10248	10348	10448	10548	10648	10748	10848	10948	11048	11148	11248	11348	11448	11548
04-14	10348	10448	10548	10648	10748	10848	10948	11048	11148	11248	11348	11448	11548	11648
04-15	10448	10548	10648	10748	10848	10948	11048	11148	11248	11348	11448	11548	11648	11748
04-16	10548	10648	10748	10848	10948	11048	11148	11248	11348	11448	11548	11648	11748	11848
04-17	10648	10748	10848	10948	11048	11148	11248	11348	11448	11548	11648	11748	11848	11948
04-18	10748	10848	10948	11048	11148	11248	11348	11448	11548	11648	11748	11848	11948	12048
04-19	10848	10948	11048	11148	11248	11348	11448	11548	11648	11748	11848	11948	12048	12148
04-20	10948	11048	11148	11248	11348	11448	11548	11648	11748	11848	11948	12048	12148	12248
04-21	11048	11148	11248	11348	11448	11548	11648	11748	11848	11948	12048	12148	12248	12348
04-22	11148	11248	11348	11448	11548	11648	11748	11848	11948	12048	12148	12248	12348	12448
04-23	11248	11348	11448	11548	11648	11748	11848	11948	12048	12148	12248	12348	12448	12548
04-24	11348	11448	11548	11648	11748	11848	11948	12048	12148	12248	12348	12448	12548	12648
04-25	11448	11548	11648	11748	11848	11948	12048	12148	12248	12348	12448	12548	12648	12748
04-26	11548	11648	11748	11848	11948	12048	12148	12248	12348	12448	12548	12648	12748	12848
04-27	11648	11748	11848	11948	12048	12148	12248	12348	12448	12548	12648	12748	12848	12948
04-28	11748	11848	11948	12048	12148	12248	12348	12448	12548	12648	12748	12848	12948	13048
04-29	11848	11948	12048	12148	12248	12348	12448	12548	12648	12748	12848	12948	13048	13148
04-30	11948	12048	12148	12248	12348	12448	12548	12648	12748	12848	12948	13048	13148	13248





口永良部島の2014年噴火前10年間の地盤変動(斎藤ほか)

第A1表 GSI-SDW (4/6)

Table A1 GSI-SDW (4/6)

Table with columns for date (mm-dd), dN, dE, dH, and their daily, monthly, and yearly (2004-2014) changes in cm. Includes data for station 21248 and 21428, with some values in meters (m).

第A1表 GSI-SDW (5/6)  
Table A1 GSI-SDW (5/6)

Table with columns: mm-dd, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, dN, dE, dH, dN, dE, dH, dN, dE, dH. Each column contains numerical data for various dates and measurements.

口永良部島の2014年噴火前10年間の地盤変動（斎藤ほか）

第A1表 GSI-SDW (6/6)  
Table A1 GSI-SDW (6/6)

Table with columns: mm-dd, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, dN, dE, dH (cm).

第A2表 GSI-FDK (1/6)  
Table A2 GSI-FDK (1/6)

Table with columns: mm-td, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, dN, dE, dH, dN, dE, dH, dN, dE, dH. Each cell contains numerical values representing geological survey data for various dates from 01-01 to 02-29.

口永良部島の2014年噴火前10年間の地盤変動（斎藤ほか）

第A2表 GSI-FDK (2/6)  
Table A2 GSI-FDK (2/6)

mm-dd	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	dN	dE	dH
	day	day	date	day	day	day	day	day	day	cm	cm	cm
03-01	59.48	-0.2	0.1	-0.9	60.48	-0.6	0.2	-0.3	59.48	-0.8	-0.3	0.8
03-02	60.48	-0.6	-0.1	0.4	61.48	-0.6	0.0	-0.2	60.48	-0.5	-0.5	0.1
03-03	61.48	-0.7	-0.1	0.3	62.48	-0.5	-0.1	0.2	61.48	-0.4	-0.3	-0.7
03-04	62.48	-0.7	0.6	0.0	63.48	-0.5	0.0	0.0	62.48	-0.4	-0.4	0.1
03-05	63.48	-0.9	0.7	-0.9	64.48	-0.4	-0.2	-0.4	63.48	-0.4	-0.9	0.4
03-06	64.48	-0.8	0.6	-0.9	65.48	-0.3	-0.2	-0.4	64.48	-0.8	-0.1	-0.4
03-07	65.48	-0.7	0.3	0.0	66.48	-0.6	0.2	-0.7	65.48	-0.2	-0.7	-1.1
03-08	66.48	-0.6	0.2	-0.3	67.48	-0.3	-0.1	-0.8	66.48	-0.3	-0.6	-0.3
03-09	67.48	-0.7	0.1	-0.8	68.48	-0.5	-0.3	-0.6	67.48	-0.6	-0.4	0.1
03-10	68.48	-0.7	-0.1	-1.1	69.48	-0.5	0.2	-0.9	68.48	-0.1	0.8	0.6
03-11	69.48	-0.7	0.3	0.2	70.48	-0.2	-0.1	1.2	69.48	-0.1	-0.9	-0.3
03-12	70.48	-0.7	0.4	-0.5	71.48	-0.1	-0.4	-0.2	70.48	0.0	-0.8	0.1
03-13	71.48	-0.8	0.4	-0.4	72.48	0.1	-0.8	-0.3	71.48	-0.5	-0.7	-0.7
03-14	72.48	-0.7	0.0	0.2	73.48	-0.3	-0.4	-0.5	72.48	-0.7	-0.4	0.1
03-15	73.48	-0.5	-0.1	-0.5	74.48	-0.4	-0.2	-0.6	73.48	-0.7	-0.4	0.0
03-16	74.48	-0.5	0.3	-1.4	75.48	-0.3	0.1	0.2	74.48	-0.9	-0.2	0.8
03-17	75.48	-0.5	0.0	0.3	76.48	-0.2	-0.2	-0.4	75.48	-0.8	-0.5	0.8
03-18	76.48	-0.6	0.2	-0.1	77.48	0.0	-0.5	-0.1	76.48	0.0	-1.0	-0.4
03-19	77.48	-0.5	0.2	-1.2	78.48	-0.3	0.0	-0.5	77.48	-0.5	-0.4	-0.2
03-20	78.48	-0.4	0.0	-0.7	79.48	-0.4	0.1	-0.7	78.48	-0.4	-0.2	-0.9
03-21	79.48	-0.6	-0.1	0.2	80.48	0.2	-0.4	-0.1	79.48	-0.4	-0.5	-0.7
03-22	80.48	-0.6	0.1	0.1	81.48	-0.1	-0.2	0.0	80.48	-0.2	-1.2	-0.3
03-23	81.48	-0.8	0.0	0.1	82.48	-0.4	-0.1	-0.4	81.48	-0.2	-1.0	-1.6
03-24	82.48	-0.7	-0.3	-0.8	83.48	-0.5	0.2	-0.2	82.48	0.3	-1.1	-0.3
03-25	83.48	-0.9	0.7	-0.3	84.48	-0.6	0.3	0.6	83.48	-0.5	-1.0	-1.1
03-26	84.48	-0.7	0.3	1.8	85.48	-0.5	-0.1	0.3	84.48	-0.6	-0.4	-0.2
03-27	85.48	-0.6	0.1	-0.4	86.48	-0.2	-0.6	0.9	85.48	-0.5	-0.2	0.0
03-28	86.48	-0.6	0.4	0.4	87.48	-0.5	0.0	-0.7	86.48	0.3	-1.5	0.4
03-29	87.48	-0.7	-0.2	-0.6	88.48	-0.1	-0.7	0.1	87.48	-0.5	-0.6	0.4
03-30	88.48	-0.9	0.2	-0.1	89.48	-0.4	-0.3	-0.5	88.48	0.0	-1.1	-1.0
03-31	89.48	-0.7	-0.4	-0.8	90.48	-0.6	0.1	-0.3	89.48	-0.2	-0.6	-0.8
04-01	90.48	-0.7	0.3	-1.8	91.48	-0.4	0.0	0.1	90.48	-0.1	-1.1	-1.1
04-02	91.48	-0.9	0.3	1.3	92.48	-0.3	0.0	-0.2	91.48	-0.6	-0.4	0.1
04-03	92.48	-0.9	0.1	0.3	93.48	-0.4	0.2	0.4	92.48	-0.5	-0.6	0.3
04-04	93.48	-0.6	0.2	0.3	94.48	-0.5	0.1	0.7	93.48	-0.4	-0.5	-0.6
04-05	94.48	-0.6	-0.1	-0.2	95.48	-0.2	-0.2	0.0	94.48	-0.7	-0.5	-0.4
04-06	95.48	-0.5	-0.1	-0.2	96.48	-0.2	-0.2	-0.8	95.48	-0.5	-0.2	0.3
04-07	96.48	-0.7	0.3	-0.2	97.48	-0.4	0.1	-1.0	96.48	-0.5	-0.4	1.6
04-08	97.48	-0.4	0.3	0.1	98.48	-0.1	-0.1	-0.5	97.48	0.0	-1.0	-0.7
04-09	98.48	-0.5	0.3	0.7	99.48	0.0	-0.6	-0.4	98.48	0.0	-0.9	0.1
04-10	99.48	-0.5	0.1	0.4	100.48	-0.2	0.0	-0.1	99.48	-0.3	-0.6	-0.2
04-11	100.48	-0.5	0.0	0.0	101.48	-0.2	0.1	0.1	100.48	-0.1	-0.5	0.3
04-12	101.48	-0.2	-0.1	0.1	102.48	-0.4	-0.2	1.0	101.48	0.0	-0.4	-1.1
04-13	102.48	-0.6	-0.2	-0.4	103.48	-0.2	-0.3	-0.2	102.48	-0.2	-0.5	-0.3
04-14	103.48	-0.6	0.6	0.6	104.48	-0.1	-0.2	-0.8	103.48	-0.6	-0.2	-0.1
04-15	104.48	-0.4	0.2	0.8	105.48	-0.2	-0.3	0.2	104.48	-0.8	-0.0	0.1
04-16	105.48	-0.9	0.2	0.4	106.48	-0.3	-0.5	-1.0	105.48	-0.6	-0.5	1.6
04-17	106.48	-0.5	0.3	0.2	107.48	-0.2	0.0	-1.0	106.48	0.0	-0.4	-0.3
04-18	107.48	-0.4	0.1	-0.6	108.48	-0.8	0.4	0.4	107.48	-0.4	-0.8	-0.7
04-19	108.48	-0.5	0.2	-0.4	109.48	-0.3	0.2	0.2	108.48	-0.2	-0.7	1.0
04-20	109.48	-0.1	-0.6	-0.4	110.48	-0.0	-0.4	-0.2	109.48	-0.6	-1.3	-0.1
04-21	110.48	-0.5	-0.4	-1.0	111.48	-0.2	-0.3	-0.4	110.48	-0.8	-0.4	1.0
04-22	111.48	-0.6	-0.5	-0.6	112.48	-0.2	-0.5	0.7	111.48	-0.5	0.0	0.6
04-23	112.48	-0.4	-0.1	-0.3	113.48	-0.3	-0.7	-0.4	112.48	-0.6	-0.4	1.1
04-24	113.48	-0.7	-0.1	-1.0	114.48	-0.5	0.6	-0.5	113.48	0.1	-1.0	0.2
04-25	114.48	-0.8	0.3	0.5	115.48	-0.2	0.0	0.2	114.48	-0.7	-0.3	-0.4
04-26	115.48	-0.7	0.4	0.5	116.48	-0.4	0.1	0.3	115.48	-0.6	-0.4	0.1
04-27	116.48	-0.1	0.0	2.3	117.48	-0.2	0.0	0.2	116.48	-0.4	-0.3	0.3
04-28	117.48	-0.1	0.1	1.2	118.48	-0.0	-0.4	1.4	117.48	-0.5	-0.6	1.1
04-29	118.48	0.0	-0.1	-0.6	119.48	-0.3	-0.2	-0.1	118.48	-0.4	-0.7	1.1
04-30	119.48	-0.5	-0.5	-1.0	120.48	-0.4	-0.2	0.1	119.48	-0.3	-0.7	0.5





第A2表 GSI-FDK (5/6)  
Table A2 GSI-FDK (5/6)

Table with columns: mm-dd, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, dN, dE, dH. The table contains a dense grid of numerical data points for each date, representing ground surface irregularities in centimeters.





第A3表 FDK-SDW (1/6)  
Table A3 FDK-SDW (1/6)

Table with 20 columns (mm-dd, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014) and 5 rows of data (dN, dE, dH, dN, dE, dH). Each cell contains numerical values with units (cm, day, cm).







第A3表 FDK-SDW (5/6)  
Table A3 FDK-SDW (5/6)

Table with columns: mm-dd, 2006 dN, 2006 dE, 2007 dN, 2007 dE, 2008 dN, 2008 dE, 2009 dN, 2009 dE, 2010 dN, 2010 dE, 2011 dN, 2011 dE, 2012 dN, 2012 dE, 2013 dN, 2013 dE, 2014 dN, 2014 dE, dN cm, dE cm



