

## 2.1.2 霧島山における GPS 観測

### 2.1.2.1 はじめに

特別研究「火山活動評価手法の開発研究」において力学的シミュレーション手法を用いた地殻変動等の火山活動評価手法の開発とそしてそれを具体的な火山で適用する観測的研究を2本の柱として研究を進めた。観測的研究においてはシミュレーション手法の検証用の地殻変動、地磁気観測データを取得することを目指して、霧島山にGPS、傾斜および地磁気観測網を新設した。本節ではGPS観測について述べる。

### 2.1.2.2 観測点と観測方法

近年の霧島山の火山活動は新燃岳と御鉢で発生しており、気象庁では主に両火山の監視を目的として2001年2月に霧島山周辺3地点でGPS連続観測を開始した。我々はこの観測網を補完し、より火山に近い4点および観測が手薄な北側の観測点1点を選定し、1周波GPS受信機を用いた連続観測を実施するとともに、御鉢および新燃岳山頂部合計15地点で年4回繰り返し観測を実施した。

Fig. 2.1.2.1に観測点配置図を、Table 2.1.2.1に観測点名、観測点コード、観測点座標などを、Fig. 2.1.2.2に観測履歴を示す。これらの図表には気象庁観測点も記している。気象庁が2001年に整備した観測点は商用電源、固定電話回線が使用できる場所が選定され、御池 GJ01（御鉢火口の南東4.1km）ではTrimble社製二周波GPSが、新湯 GJ02（新燃岳火口の西南西3.0km）、高原 GJ03（御鉢火口の東北東5.3km）では古野電気社製1周波型GPS観測装置MG2110が利用されている。2003年4月には商用電源、固定電話回線を利用できない場所にも設置可能な機動観測用のGPS観測装置が高千穂峰 GJ04（御鉢火口の東1.0km）、中岳 GJ05（新燃岳火口の南東1.6km）、皇子原 GJ06（GJ03に近く Fig. 2.1.2.1には図示していない）の3箇所に追加整備された。気象研究所では2002年3月に太陽電池と携帯電話で連続観測、データ伝送が可能なGPS観測装置を高千穂河原 GC01（御鉢火口の西1.2km）、矢岳登山口 GC04（御鉢火口の北東2.6km）に、2003年3月に太陽電池と衛星携帯電話で連

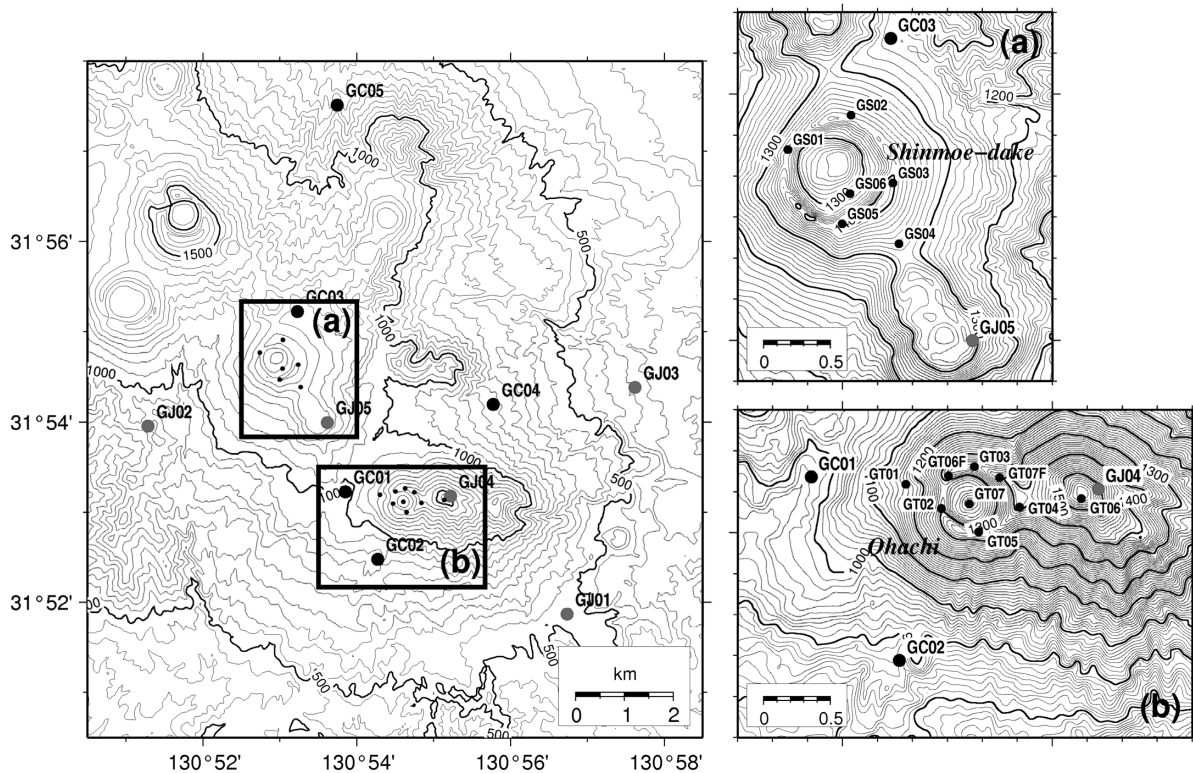


Fig. 2.1.2.1 Location map of the GPS observation points on Kirishima volcano. The large black circles denote continuous observation sites installed by MRI, the gray circles denote continuous observation sites installed by JMA, and the small circles denote the campaign observation points.

Table 2.1.2.1 Locations of the GPS observation points on Kirishima volcano.

Station name	Station CODE	Latitude [deg N]	Longitude [deg N]	Height [m]	Remarks	Installation date	
Continuous GPS observation site managed by MRI							
高千穂河原	Takachiho-gawara	GC01	31. 88712	130. 89752	981	Mar. 2002	
荒襲	Araso	GC02	31. 87468	130. 90452	872	Mar. 2003	
新燃山頂	Shinmoe	GC03	31. 92043	130. 88827	1263	Mar. 2003	
矢岳登山口	Yadake	GC04	31. 90479	130. 93183	735	Mar. 2002	
夷守林道	Hinamori	GC05	31. 95857	130. 89579	756	Mar. 2003	
Continuous GPS observation site managed by JMA							
御池	Miike	GJ01	31. 86439	130. 94556	525	Dual-frequency GPS	Feb. 2001
新湯 (高千穂)	Shinyu	GJ02	31. 89925	130. 85478	938		Feb. 2001
高原	Takaharu	GJ03	31. 90641	130. 96028	334		Feb. 2001
高千穂峰	Takachiho-no-mine	GJ04	31. 88632	130. 92031	1507	Mobile station	Apr. 2003
中岳	Nakadake	GJ05	31. 89998	130. 89366	1324	Mobile station	Apr. 2003
皇子原	Oujibaru	GJ06	31. 90641	130. 96028	335	Mobile station	Apr. 2003
Campaign GPS observation point on Shinmoe-dake							
新燃リム西	Shinmoe W rim	GS01	31. 91289	130. 87898	1349		Aug. 2001
新燃リム ERI 北東	Shinmoe NE rim	GS02	31. 91522	130. 88400	1376	Installed by ERI	Aug. 2001
新燃リム ERI 南東	Shinmoe SE rim	GS03	31. 91063	130. 88734	1400	Installed by ERI	Aug. 2001
中岳分岐	Nakadake branch	GS04	31. 90651	130. 88782	1326		Aug. 2001
新燃リム南	Shinmoe S rim	GS05	31. 90786	130. 88329	1400		Nov. 2002
新燃火口底	Shinmoe crater bottom	GS06	31. 90991	130. 88391	1302		Sep. 2003
Campaign GPS observation point on Ohachi							
御鉢西斜面	Ohachi W slope	GT01	31. 88663	130. 90503	1158		Aug. 2001
御鉢リム西	Ohachi W rim	GT02	31. 88497	130. 90783	1289		Aug. 2001
御鉢リム北	Ohachi N rim	GT03	31. 88781	130. 91046	1357		Aug. 2001
御鉢リム東	Ohachi E rim	GT04	31. 88508	130. 91404	1404		Aug. 2001
御鉢リム南	Ohachi S rim	GT05	31. 88338	130. 91081	1322		Sep. 2002
高千穂峰	Takachiho-no-mine MRI	GT06	31. 88564	130. 91895	1554		Sep. 2003
御鉢火口底	Ohachi crater bottom	GT07	31. 88529	130. 91007	1205		Sep. 2003
御鉢リム北西	Ohachi NW rim	GT06F	31. 88722	130. 90839	1313	Installed by FDMO	Jun. 2004
御鉢リム北東	Ohachi NE rim	GT07F	31. 88711	130. 91244	1384	Installed by FDMO	Jun. 2004

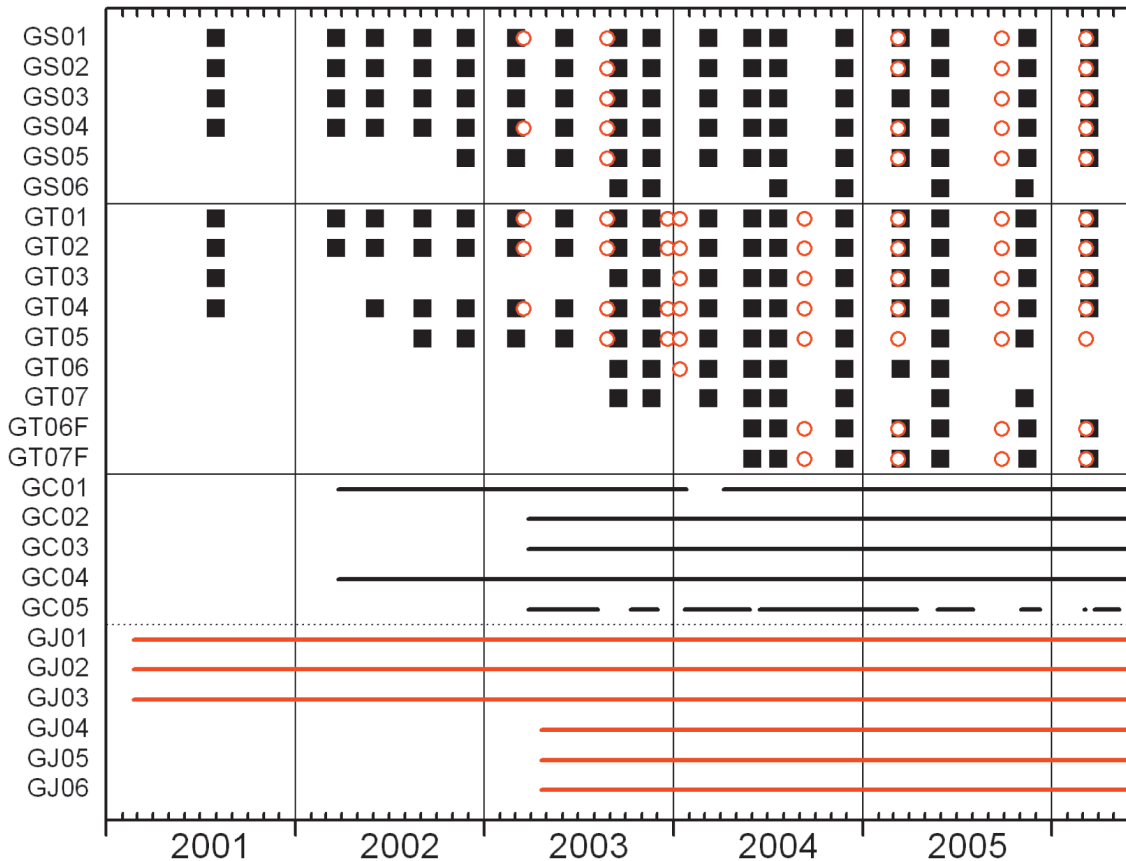


Fig. 2.1.2.2 Historical table of GPS observations at Kirishima volcano. The black lines and squares indicate observations by MRI, and the red lines and circles indicate observations by JMA.



Photo 2.1.2.1 Continuous GPS observation site on Kirishima volcano installed by MRI.

続観測，データ伝送が可能なGPS観測装置を荒襲GC02（御鉢火口の南南西1.3km），新燃岳山頂部GC03（新燃岳火口の北北東1.1km），夷守GC05（新燃岳火口の北北東5.3km）に設置した。いずれも古野電気社製一周波GPS受信機（MG2110）を利用したシステム（藤原・他，2002）である。気象研究所連続観測点の状況をPhoto 2.1.2.1に示す。設置場所の状況は2.1.1項に記した。GC05以外は1m角のコンクリート基礎に3mあるいは2.5mの鋼製の標柱を建てその先端にレドームをかぶせたGPSアンテナを設置した。GC01，GC04の観測標柱の高さは3m，GC02，GC05の高さは2.5mである。新燃岳山頂部GC03観測点は人力だけで設営するため次のような方法で行った。一辺約1mの三角形の鉄板（運搬時は3つに分割）を数十cm深に埋め込んで基礎とし，これを長さ約1mの鉄杭で固定し，補強金具を取り付けた中心部に，地上高1mになるような鉄パイプを通し，その先端にレドームをかぶせたGPSアンテナを設置した。衛星携帯電話の外部アンテナも同様の方法で設置した。太陽電池パネルは長さ数十cm程度の鉄板に支柱を建て鉄杭で固定した。データ収録制御装置やバッテリーはプラスチックコンテナに収納した。データ収集は古野電気社製の専用ソフトウェア使用し，気象研究所から1日2回ないし3回定期的に観測点システムを呼び出すダイヤルアップ方式によって行い，自動的に基線解析を行った。但し，夷守観測点GC05は通信環境が悪く，現地でデータ回収を行った。このため，欠測となる期間が度々生じた（Fig. 2.1.2.2参照）。この観測点の南側30mほどの距離にある1本の高木が衛星通信に悪影響を与えていた可能性があり，次項でも述べるようにGPS観測にも悪影響を与えた可能性がある。GC01観測点は2003年1月23日から4月5日の間欠測となった。これは人為的に観測標柱が倒されたためである。再設置に伴い，受信機の位



Photo 2.1.2.2 Campaign GPS observation point on Kirishima volcano.

置が南方向に約19mm，東方向に約4mmに移動したが，上下方向の変化は認められなかった（Fig. 2.1.2.3参照）。

GPS 繰り返し観測は2001年8月に観測点の選定・設営を行いつつ新燃，御鉢両火山各4地点で行った。その後，順次観測点を追加し，2004年6月には新燃岳6点，御鉢9点合計15点となった（Fig. 2.1.2.1, Table 2.1.2.1, Photo 2.1.2.2）。新燃岳火口縁北東部のGS02，南東部のGS03は地震研究所霧島火山観測所，御鉢火口縁北西および北東のGT06F，GT07Fは福岡管区気象台が設営した観測点である。繰り返し観測点は岩塊にドリルで穴をあけ，そこにねじを切った真鍮棒を差し込み，エポキシ系接着剤とセメントで固着させたものである。繰り返し観測で使用しない時は袋ナットなどでねじ山を保護している。観測には連続観測点と同じ1周波型GPS受信機MG2110を使用した。電源は単一アルカリ電池4本からなる外部電源を利用した。繰り返し観測における受信機の設置回収は，1日目に御鉢，2日目に新燃岳の観測点への受信機設置，3日目，4日目に御鉢，新燃岳の受信機回収という日程で行い，各観測点でおおむね48時間のデータを取得し，24時間程度は新燃岳と御鉢で同時にデータが取得できるようにした。サンプリング周期は30秒，マスク角は15度とした。

初年度を除き，年4回の頻度で観測を実施した。2003年からは福岡管区気象台によって同じタイプの受信機を利用して観測が行われており，本報告ではこの観測結果も利用した。Fig. 2.1.2.2の上部に繰り返し観測の履歴を示す。黒四角が気象研究所による観測，赤丸は福岡管区気象台による観測である。アクセスが困難な新燃岳，御鉢火口底，御鉢南観測点では悪天のため受信機が設置できなかった時も多い。2003年12月に発生した御鉢における土砂噴出活動（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台，2003；筒井・他，2005）に際しては，2003年12月，2004年1月に福岡管区気象台による臨時観測が行われた。

### 2.1.2.3 観測結果

#### (1) 連続観測結果

Fig. 2.1.2.3に連続観測点について矢岳登山口 GC04を固定点として基線解析した南北、東西方向の変位(a 図)、上下方向の変位 (b 図)、基線長変化 (c 図) の時系列を示す (2006年5月12日まで)。b 図には各観測点と GC04との標高差を付記している。解析には古野電気社製基線解析ソフトウェアを用い、30秒サンプリング1時間分のデータを用いて時間値を求め、これを日平均した。GC01の中ほどのギャップは観測標柱の建て替えに伴う不連

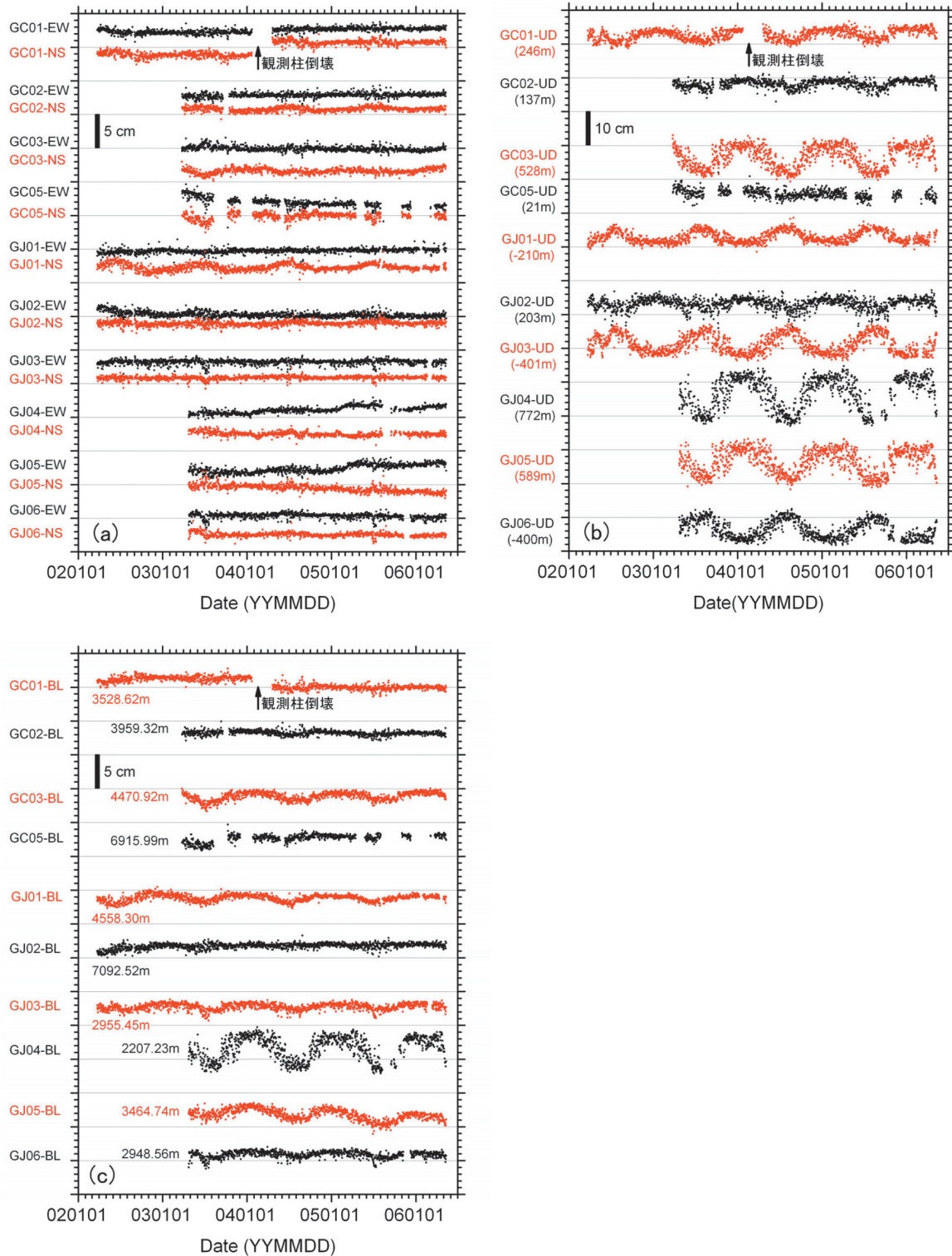


Fig. 2.1.2.3 Time series of the change of (a) east-west (black dot) and north-south (red dot) components of horizontal distance, (b) vertical distance, and (c) baseline lengths observed by continuous GPS points, from March 2001 to May 2006. The reference point is GC04.

続である。水平成分、基線長の解析結果には標準偏差3 mm程度、上下成分は標準偏差の10mm前後の短周期の変動と季節変化成分が重畳している。上下成分の季節変化は水平変位の季節変化よりも大きく10cm以上になる地点もある。この季節変化が生じるのは対流圏遅延の補正が不十分なことが一因であり、GC03やGJ04、GJ05のように観測点標高が基準点よりも高い地点は冬季に大きく、逆にGJ03やGJ06のように標高の低い地点は冬季に小さくなっている。また、基線長が短く、標高差も大きいGJ04は基線長にも顕著な季節変化を示す。水平成分、基線長で見ると、GC03の2006年に入ってからの変動、GC05の東西成分の減少、GJ04、GJ05の2005年初めからの変動が比較的目立つが、他は解析誤差を越える変動は認められない。GJ04、GJ05は機動観測点のため三脚を利用した簡易な設置方法をとっていることや標高差が大きいこともあり、観測上の問題によって生じている可能性もある。GC05は、前項で述べたようにこの地点の通信環境が悪かったことと同じ原因によっているのかもしれない。GC03については観測上の問題は特段見当たらず、火山活動に起因した変動であると考えられる。

2003年12月から2004年3月にかけて御鉢で、2006年2月1日に新燃岳で傾斜変動を伴った火山性微動が発生したが、GPS観測ではこれに対応した短期的な変動は認められなかった。

## (2) 繰り返し観測結果

Fig. 2. 1. 2. 4に矢岳登山口GC04を固定点として基線解析した東西 (a 図)、南北 (b 図)、上下方向の変位 (c 図)、基線長変化 (d 図)の時系列を示す。ここでは連続観測点データについても、繰り返し観測と同じ期間のデータを用いて同様に解析した結果を示している。この図で赤色の線は新燃岳周辺の観測点の結果、黒色の線は御鉢周辺の観測点の結果、青色の線は周辺観測点の結果を示している。白抜きの印は連続観測点の結果を示している。連続観測の結果と同様に繰り返し観測でも上下成分には大きな季節変動が含まれ、GPSデータから地盤の上下変動があったのかどうか評価するためには季節変化成分を補正するなどして除去する必要がある。

2003年3月、2005年3月、2006年3月に気象研究所が実施した繰り返し観測に対し、2週間以内に福岡管区気象台による観測も行われた。両者の基線解析結果を比較すると、近接した時期に行われた2回の観測の差は東西方向で3 mm以下、南北方向で5 mm以下、基線長で3 mm以下、上下方向では一部の観測点を除き数mmから15mmであった。従って、季節変化成分を除けば、水平成分では数mmを越える変動を捉えることができる。

この時系列図で新燃岳上の観測点における2005年11月～2006年3月の変動が目立つ。この期間の新燃岳周辺の変位分布 (Fig. 2. 1. 2. 5)を見ると、各観測点の水平変位ベクトルは新燃岳火口から放射状に伸びており、火口下に膨張源があると読み取れる。断面図では膨張源から放射状に広がるような変動は見えていないが、これは季節変化の影響が大きいためである。基線長変化で見るとGS01やGS02では2004年頃から変動が始まっているように見える。

季節変化成分を除去した新燃岳および御鉢の長期的な地殻変動の様子を見るため、2004年4月から2006年3月までの11回の繰り返し観測結果 (うち1回は御鉢でのみ観測) から推定した変位速度の分布を Fig. 2. 1. 2. 6、Fig. 2. 1. 2. 9の赤矢印で示す。新燃岳では火口直下での膨張、御鉢では火口直下で収縮する変動が見える。これら変動源の解析結果については次項で述べる。

### 2. 1. 2. 4 新燃岳、御鉢における地殻変動源

MaGCAP-V (1.5節)を用いて新燃岳、御鉢におけるGPS観測データの水平変位ベクトルを標高補正茂木モデル (1.4節)に当てはめ変動源の位置、大きさを推定した。標高補正茂木モデルで求められる変動源の大きさに関するパラメータは体積変化量  $\Delta V = \pi a^3 \Delta P / \mu$  ( $a$ は圧力源半径、 $\Delta P$ は圧力源に加えられた圧力変化量、 $\mu$ は剛性率)であるが、以下の図では、 $\Delta P$ を推定された深さにおける静水圧とおいて求めた球状圧力源の半径を用いて図示している。 $\mu$ は筒井・他 (1996)によって求められた表層のP波速度2.1km/sとポアソン比0.25から3.4GPaとし、静水圧の計算には霧島山における重力探査によって推定された表層密度 $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  (小林・他, 1995)を用いている。

Fig. 2. 1. 2. 6は2004年4月から2006年3月までの期間における10回のくり返し観測データから推定した新燃岳

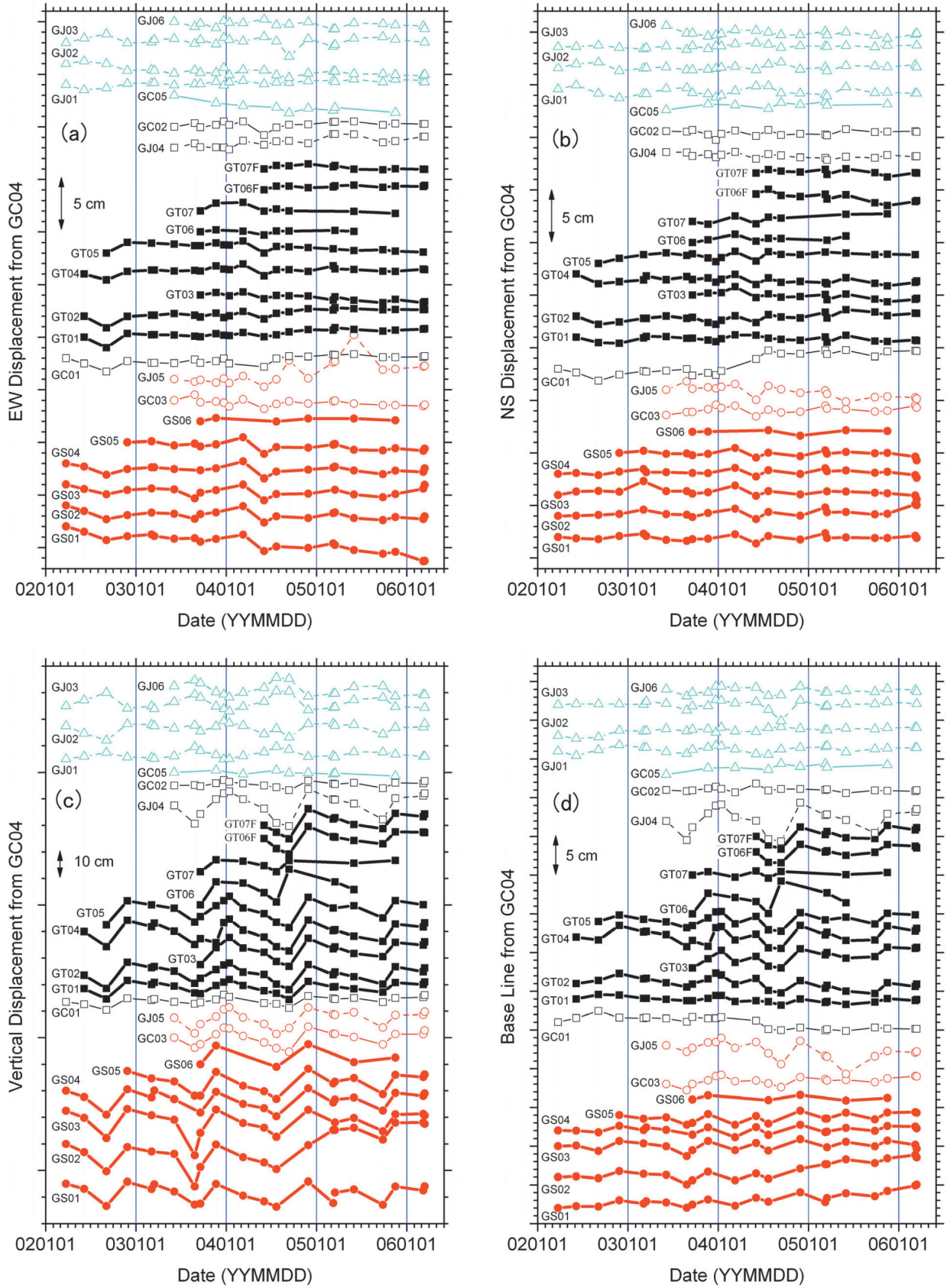


Fig. 2.1.2.4 Time series of the change of (a) east–west components, (b) north–south components of horizontal distance, (c) vertical distance, and (d) baseline lengths revealed by campaign GPS observations from March 2001 to March 2006. The reference point is GC04. The red lines indicate the results at Shinmoe-dake; the black lines indicate the results at Ohachi; and the blue lines indicate the results around Kirishima volcano.

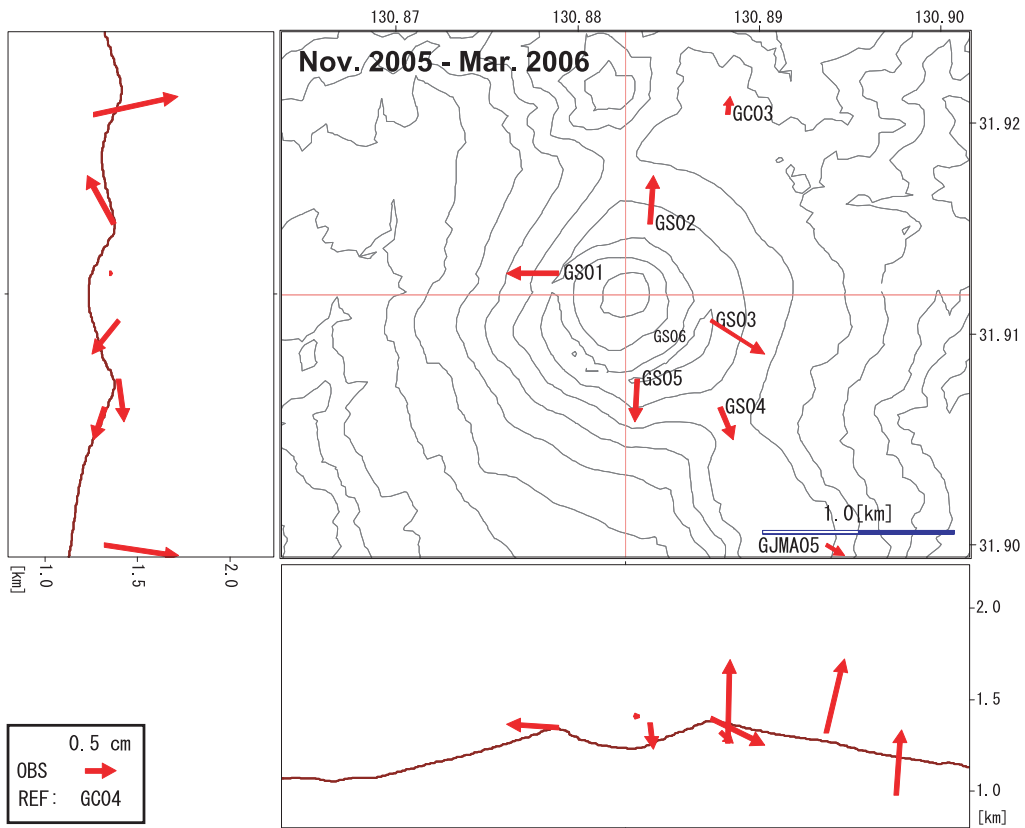


Fig. 2.1.2.5 Displacement vectors detected by repeating GPS measurements observed at Shinmoe-dake between November 2005 and March 2006.

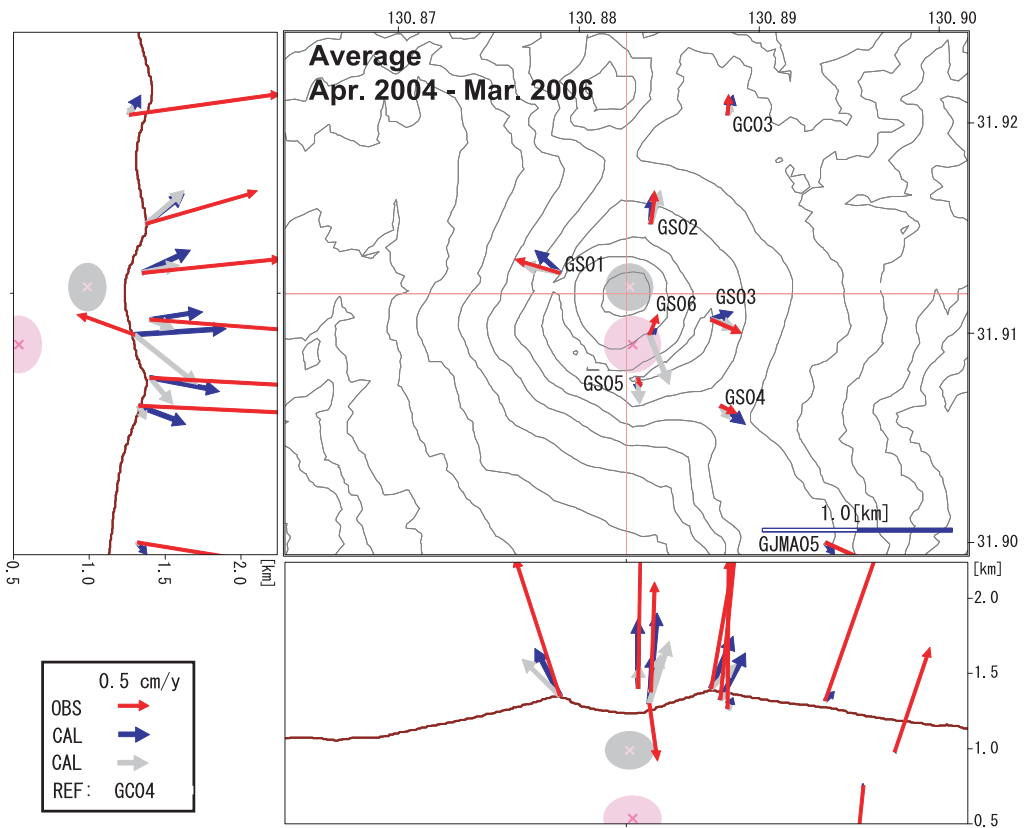


Fig. 2.1.2.6 Displacement velocity vectors estimated by repeating GPS measurements observed at Shinmoe-dake from April 2004 to March 2006 (red arrows) and displacement vectors estimated by the modified Mogi model from the observed horizontal components (blue arrows). Gray arrows indicate the displacement vectors estimated from the observed horizontal components except GS06. Pink and gray circles indicate the estimated pressure sources from which were calculated the data indicated with blue and gray arrows.



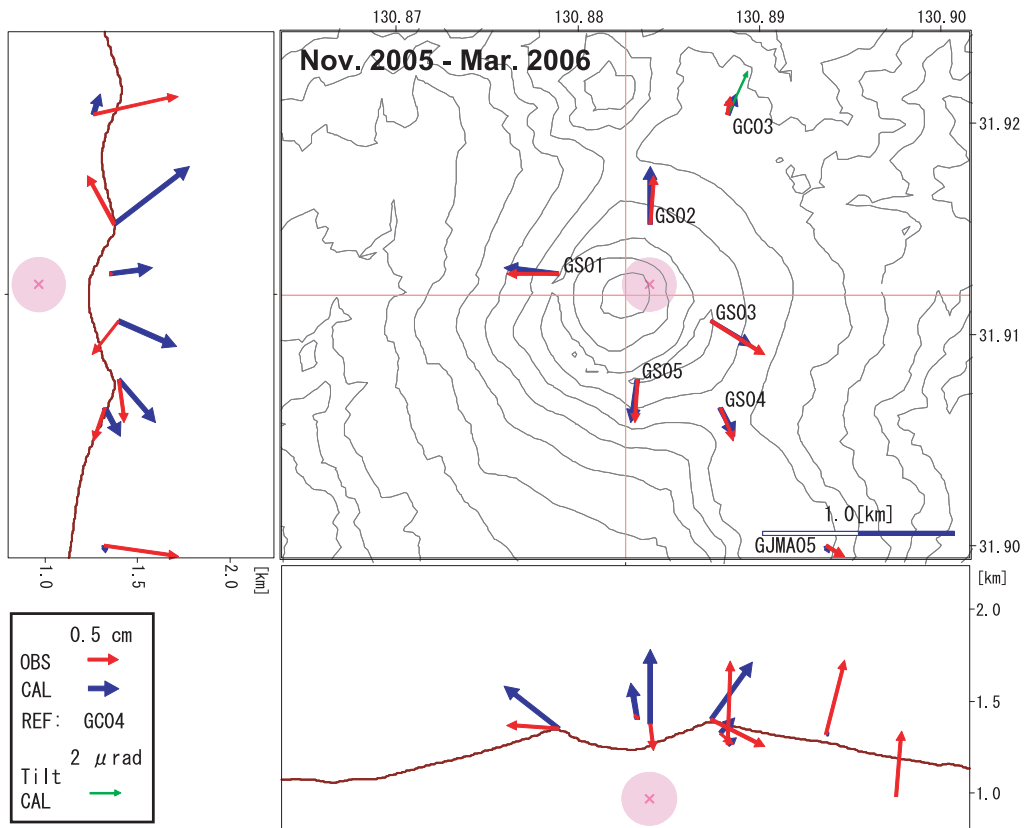


Fig. 2.1.2.7 Displacement vectors detected by repeating GPS measurements observed at Shinmoe-dake between November 2005 and March 2006 (red arrows). Estimated displacement vectors by the modified Mogi model from the observed horizontal components (blue arrows). The estimated pressure source is indicated with a pink circle. The tilt change produced at GC03 by the pressure source is indicated with a green arrow.

周辺の変位速度分布（赤矢印）と標高補正茂木モデルを当てはめて求めた推定値（青矢印）である。上下成分の季節変化がある程度除去され、平面分布図のみならず、断面図でも、新燃岳火口下から放射状に広がる変動が見えている。この観測データから標高補正茂木モデルのパラメータ推定を行う際、新燃岳火口底 GS06 のデータを使用するかどうかによって推定されるパラメータはかなり異なるが、標高500から1000mにおいて、年間1～4万 m<sup>3</sup>の体積増加があると推定される（GS06を使用した場合、火口南部、標高540m、1年当たりの体積変化量は3.8×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>、GS06を使用しない場合、火口中心の下、標高990m、1年当たりの体積変化量は9.9×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>と求められる。Fig. 2.1.2.6では各々、桃色、灰色の円で変動源を図示している）。

Fig. 2.1.2.7は2005年11月と2006年3月の観測から求めた新燃岳周辺の変位分布（赤矢印）と標高補正茂木モデルを当てはめて求めた推定値（青矢印）である。変動源は火口直下標高970m、 $\Delta V = 1.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ と推定される。この体積変化量と前述した2年間のデータから求めた体積変化率とを比較すると2年間の平常的な変動源はGS06を使用して推定した圧力源（標高540m）の方が妥当だと思われる。両者で変動源の深さは約500m異なっているがこの違いは有意とは言えないであろう。この体積変化によって新燃岳山頂部傾斜観測点では3.1 μrad 北北東下がりの傾動が生じることになる（Fig. 2.1.2.7

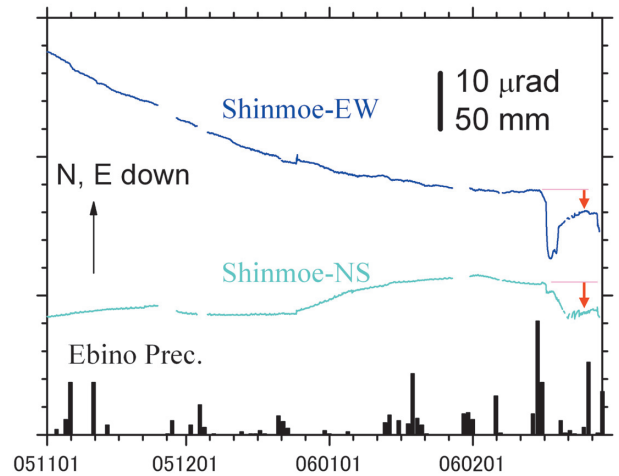


Fig. 2.1.2.8 Tilt records at Shinmoe stations on Kirishima volcano (same site as GC03) and daily precipitation at Ebino. The tilt data was plotted at 30 min intervals from November 2005 to 28 February 2006.

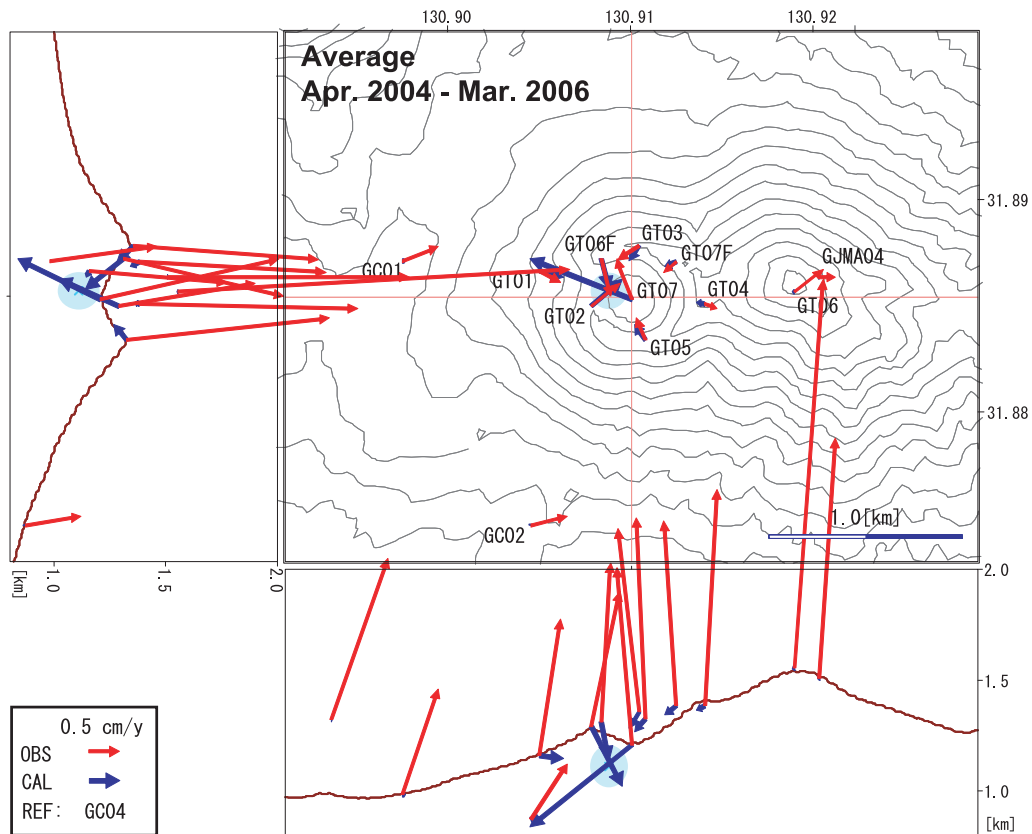


Fig. 2.1.2.9 Displacement velocity vectors estimated by repeating GPS measurements observed at Ohachi from April 2004 to March 2006 (red arrows). Displacement vectors estimated by the modified Mogi model from the observed horizontal components (blue arrows). The estimated pressure source is denoted with a light blue circle.

の緑色の矢印)。Fig. 2.1.2.3のGPS連続データを見るとGC03のNS成分は2006年1月頃から増大している。Fig. 2.1.2.8に示す新燃山頂部観測点の傾斜変化も2005年12月20日から北下がり動き始め、日雨量102mmを記録した2006年2月15日までに約7  $\mu$  rad変化している。この傾斜変化とGPSで観測された変動が同じ時期に発生しており興味深い。しかし、この観測点の傾斜計は日降水量100mm以上の降水により西向きの傾動を示した後、元の値に戻る変化を示し (Fig. 2.1.2.7のEW成分における2月20日前後の凹状の変化)、降水とともにトレンドに変化が生じることも多く (2.1.3項参照)、同じ原因によるものであるかどうかは定かではない。

Fig. 2.1.2.9は2004年4月から2006年3月までの期間における11回のくり返し観測データから推定した御鉢周辺の変位速度分布と(赤矢印)と標高補正茂木モデルを当てはめた推定値(青矢印)である。変動源として水色の円で示した標高1110m(御鉢火口底から140mの深さ)に $\Delta V = 2.4 \times 10^3 \text{ m}^3$ の体積減少(減圧源)が推定される。

圧力源がその大きさに比して浅い場所にある場合、圧力源の深さは浅く推定される(1.3.3項参照)。また、火口地形の効果によって火口縁での変動量は大きくなり、圧力源は浅く推定されてしまう(1.2.2項参照)。これらのことを考慮すれば、新燃岳や御鉢における実際の変動源はより深い場所に存在すると思われる。おそらく海水面付近に存在すると考えるのが妥当であり、変動源は帯水層への熱水の注入による体積増加あるいは過熱蒸気の放出による減圧によっていると想像される。新燃岳の変動源は増圧で、御鉢は減圧であったことは新燃岳よりも御鉢の噴煙活動が活発であることに関係しているのかもしれない。

### 2.1.2.5 おわりに

本研究終了後、気象研究所が設営したGPS連続観測点は福岡管区气象台に移管され、引き続き火山監視業務に活用されている。2007年分までの新燃岳山頂部観測点のデータを用いた解析や2007年9月、1年振りに実施された繰り返し観測によって、新燃岳における2006年からの膨張傾向は明瞭になってきており(気象庁, 2007),

その変動源の位置は新燃岳火口の下、標高500~1000mと推定されている。

(福井 敬一)

## 謝辞

東京大学地震研究所霧島山火山観測所増谷文雄氏には同研究所が設営した観測点の位置についてご教示頂くなど、新燃リム ERI 北西および新燃リム ERI 南東観測点の利用に便宜を図って頂いた。GPS 繰り返し観測点の地点選定について鹿児島地方気象台のご協力を頂いた。GPS 繰り返し観測について(株)古野電気の、GPS 連続観測点の整備・設置について(株)古野電気、(有)新興電気商会のお世話になった。以上の方々に、ここに記して感謝致します。

## 参考文献

- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台, 2003: 火山活動解説資料(平成15年12月17日)霧島山(御鉢).
- 藤原健治・田中圭介・北川貞之・潟山弘之・松島功・内田直邦・中禮正明・徳永規一・増成友宏, 2002: 有珠山周辺に展開した準リアルタイム GPS 観測システムについて. 火山, 47, 695-698.
- 気象庁, 2007: 霧島山. 第108回(平成19年10月16日)火山噴火予知連絡会資料
- 小林茂樹・志知龍一・西仲秀人・渡辺秀文・鬼澤真也, 1995: 霧島山および周辺カルデラにおける稠密重力測定. 地震研究所彙報, 70, 103-136.
- 筒井智樹・他(69名), 1996: 人工地震探査による霧島火山群の地震波速度構造-はぎとり法による解析-. 火山, 41, 227-241.
- 筒井正明・富田克利・小林哲夫, 2005: 霧島・御鉢火山における2003年12月以降の噴気活動と明治~大正時代の火山活動. 火山, 50, 475-489.