

# 口永良部島火山における GPS 繰返し観測

—1995 年～2006 年—

井口正人・斎藤英二・鈴木敦生

\* 京都大学防災研究所, \*\*産業技術総合研究所, \*\*\*北海道大学大学院理学研究科

## Repeated GPS Measurements at Kuchinoerabujima volcano during the Period from 1995 to 2006

Masato Iguchi\*, Eiji Saito\*\* and Atsuo Suzuki\*\*\*

\* *Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*

\*\* *Geological Survey of Japan, AIST*, \*\*\* *Graduate School of Science, Hokkaido University*

### 1. はじめに

口永良部島火山は、屋久島の西方 14km にある安山岩質の活火山である。記録に残されている最古の噴火は 1841 年である。1933 年から 1934 年にかけては死者 8 名、負傷者 26 名の被害を伴う比較的規模の大きい噴火が発生した。その後、1945 年には新岳東側の割れ目から、1966 年には新岳の火口内から、また 1980 年には、1945 年の噴火と同様に東側の割れ目から水蒸気爆発が発生した。1991 年 12 月には、新岳からの噴煙異常が目視され、それを機に京都大学防災研究所附属火山活動研究センターは、新岳火口の西方 0.4km の地点において火山性地震の観測を行ってきた。1995 年以前は、火山性地震の発生頻度は 20 回/月であったが、1996 年 3～6 月には約 80 回/月と活発化した。1997 年以降、地震活動はしばらく静穏化した。1999 年 8 月ごろから再び活発化し、10 月には 320 回の火山性地震が発生した。それ以降、火山性地震の活動は活発な状態が続き、2003 年 2 月、2004 年 2 月、2005 年 1 月にはそれぞれ、147、227、258 回の火山性地震

が発生した。

京都大学防災研究所では、1980 年の噴火後に測量用の基準点を数点設置したが、地盤変動観測を強化するために 1995 年に新岳を取り囲むように GPS の基準点を設置し、GPS 観測を繰り返してきた。2000 年の集中総合観測において実施した GPS 観測では、新岳を中心とする地盤の膨張的水平変動が検出され、1999 年の火山性地震活動の活発化と関連があるものと推定されている(井口, 2002)。2004 年には産業技術総合研究所と京都大学防災研究所が新岳の北西縁を含む島内 4 箇所に GPS 連続観測点を設置し、2005 年 1 月～6 月の火山性地震の活動期に同期した火口周辺の地盤の膨張を示唆する北西方向への変位を検出した(斎藤・井口, 2006)。

口永良部島では 2006 年 7 月に火山性地震の発生回数が 44 回まで減少したが、8 月に入りモノクロマティック地震が頻繁に発生するようになった(Triasututy et al., 2007, 本報告)。さらに 9 月に入り、新岳北西縁の観測点において 2005 年 1 月～6 月と同様な北西方向への変動が始まった(斎

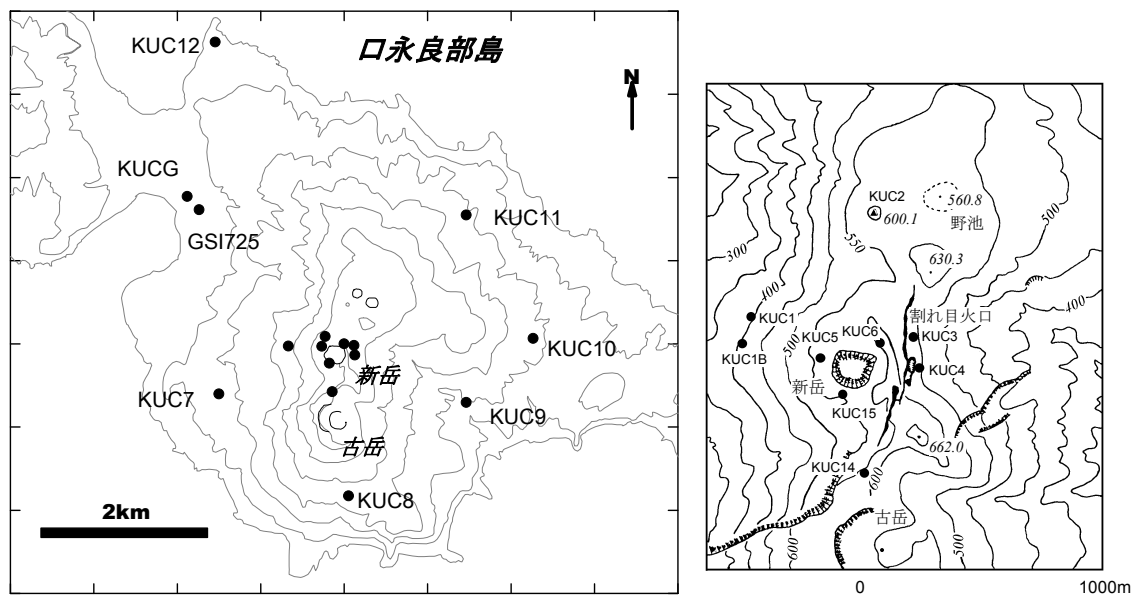


図1. 口永良部島におけるGPSおよび水準測定のベンチマーク配置図. 黒丸はGPSのベンチマーク, KUC7からKUC12までの曲線は水準測量路線を表す. KUCGはGPS連続観測点である. 右図に破線で囲んだ範囲の拡大図を示す. 山頂火口周辺にはKUC1~6が設置されている. KUC2は一等三角点である.

藤・井口, 2007, 本報告). 地盤変動の進行とともに火山性地震の発生回数も増加し, 11月には450回の火山性地震が観測された. GPS連続観測によって, 地盤変動が火山性地震活動の活発化と同期していることが明らかとなったが, 観測点数が不足しているためにその力源の位置の同定には至っていない. 本報告では, 1995年以降繰り返してきたGPS観測のデータを用いて, 地盤変動を引き起こした力源の位置を求めるとともにその体積変化量を見積もった.

## 2. 観測

図1に示すように1995年8月にGPS観測の基準点を新岳の火口周辺に6点(KUC1~6), 新岳・古岳の山麓に6点(KUC7~12)設置した. KUC2は1等三角点である. また, 新岳の山麓にはGPS連続観測点KUCGがある. 2004年4月には基準点をピラーに変更するとともに, 2006年1

月には古岳(KUC14)と新岳南西側の噴気地帯(KUC15)に基準点を増設した. GPS観測は, これまでに1995年8月, 1996年3月, 5月, 8月, 1999年9月, 2000年12月, 2001年12月, 2004年3/4月, 2005年2月, 2006年1月, 2006年12月/2007年2月の11回のキャンペーンを実施した. 2006年12月/2007年2月の観測では, 12月21日から23日までKUC7~12およびKUC1の, 2月6日, 7日にKUC1~6およびKUC7, 9, 11, 14, 15の測定を行った. 測定時間は山麓部では48時間, 山頂部は2時間で, サンプル間隔は15秒とした. 使用したGPS受信機は, Leica SR399およびSR520である. 基線解析にはSKI-Pro2.5Jを使用した. 基線解析の基準とした観測点はKUCGであり, 以下の座標を用いた.

緯度  $30^{\circ} 27' 46.18787''$  N  
 経度  $130^{\circ} 11' 48.27582''$  E  
 標高 69.3755m

水平変位ベクトル(1995年8月/1996年3月~2001年12月)

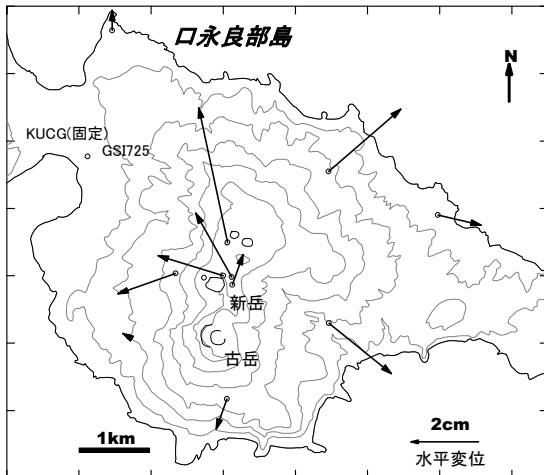


図 2. 1995 年/1996 年から 2000 年までの水平変位ベクトル。

水平変位ベクトル(2005年2月~2006年1月)

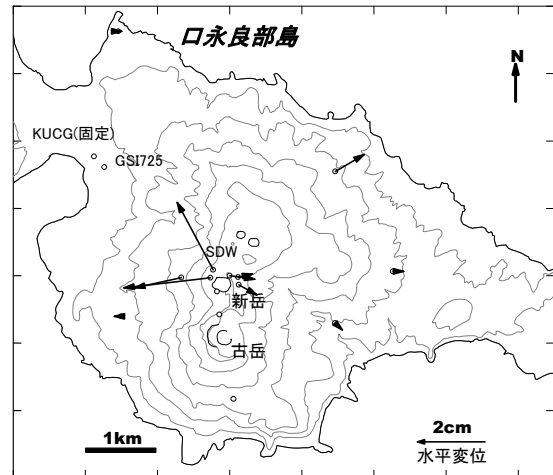


図 4. 2005 年 2 月から 2006 年 1 月までの水平変位ベクトル。

水平変位ベクトル(2004年3月~2005年2月)

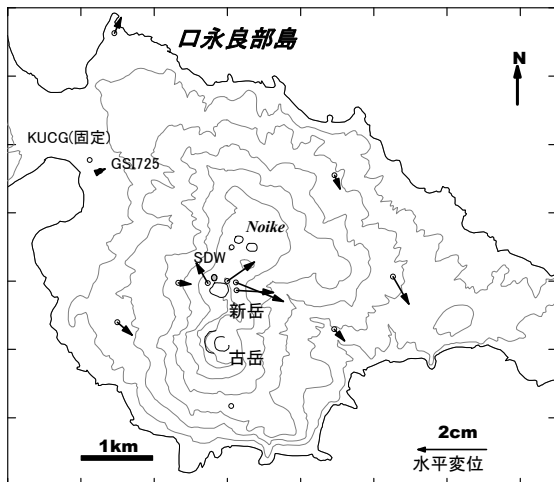


図 3. 2004 年 3 月から 2005 年 2 月までの水平変位ベクトル。

水平変位ベクトル(2006年1月~2006年12月/2007年2月)

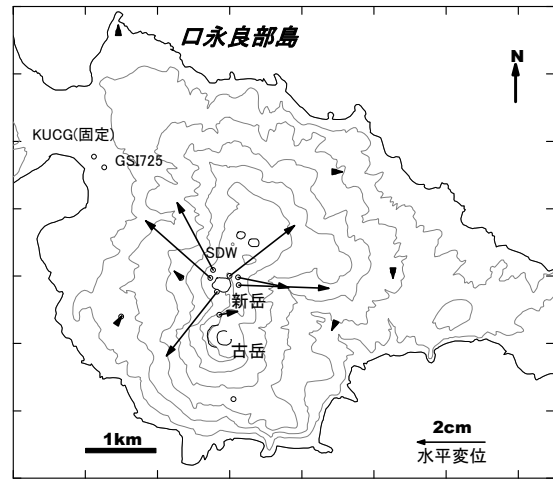


図 5. 2006 年 1 月から 2006 年 12 月/2007 年 2 月までの水平変位ベクトル。

### 3. 結果

図 2 に 1995/96 年から 2000 年までの各基準点における水平変位ベクトルを、連続観測点 KUCG を基準にして示した。山麓部の観測点は 1996 年 3 月、山頂火口周辺の観測点は 1995 年 8 月の測定値からの変位である。山頂部の観測点では、2-4cm の変位が、山麓部では、1-3cm の変位が検出された。新岳火口付近を中心とするほぼ放

射状の水平変位パターンが認められる。

図 3 に 2004 年 3 月から 2005 年 2 月までの期間の水平変位ベクトルを示した。山頂部では火口を中心とした放射状の変位パターンがみられるものの、山麓部では系統的な変動はみられない。

図 4 に 2005 年 2 月から 2006 年 1 月までの水平変位ベクトルを示す。同様に新岳の火口を中心とする放射状の変動パターンが検出される。山麓部でも放射状のパターンは見出すことができる

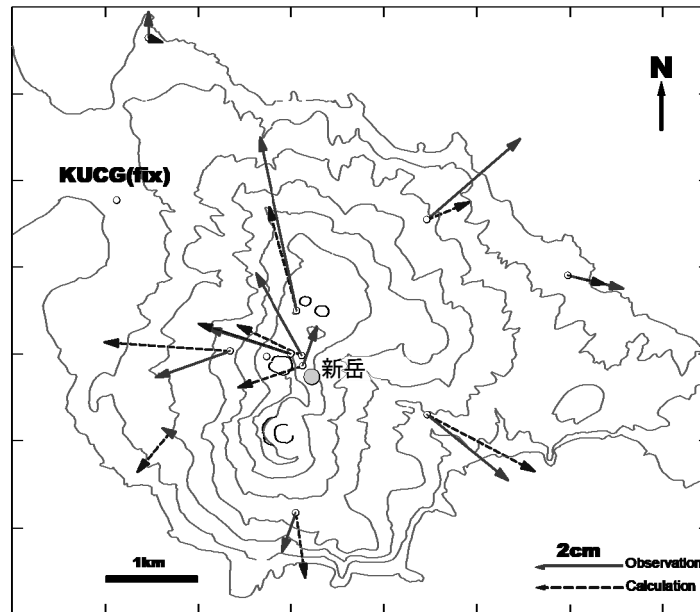


図 6. 茂木モデルを仮定して求めた圧力源の位置。灰色の丸で示した。水平変位ベクトルの実線は 1995 年/1996 年から 2000 年までの観測値、破線は観測値を最もよく説明する理論値を表し、KUCG を基準として示した。

が、山頂部の KUC5 や SDW で 2cm を超える変動があるのに対し、山麓部では 1cm 以下と小さい。

図 5 に 2006 年 1 月から 2006 年 12 月/2007 年 2 月までの水平変位ベクトルを示す。山麓部の観測点の変位は 2006 年 12 月の山頂部の観測点の変位は 2007 年 2 月の測定に基づくものである。この期間では新岳火口周辺の基準点における放射状の変動パターンが非常に明瞭になっており、どの方位に対しても 2cm を超える変動が観測された。火口から離れると急に変動が小さくなり、新岳火口中心から 0.5km の距離にある KUC1 では 0.3cm であった。山麓部では更に小さくなり、水平変位は 0.2cm 以下と計算され、ほとんど変動がないのに等しい。

#### 4. 地盤変動の圧力源の検討

茂木モデルを適用して、圧力源の位置と体積変化を求めた。Mogi(1958)によれば、地殻を半無限弾性体と仮定すると、地下にある半径  $a$  の球状

圧力源内部の静水圧変化  $P$  による地表面のラディアル方向の水平変動量  $\Delta d$  および上下変動量  $\Delta h$  は次のように表される。

$$\Delta d = K \frac{d}{(f^2 + d^2)^{3/2}} \quad (1)$$

$$\Delta h = K \frac{f}{(f^2 + d^2)^{3/2}} \quad (2)$$

ここで、

$$K = \frac{3a^3 P}{4\mu} \quad (3)$$

であり、 $\mu(=\lambda)$  はラメの定数、 $f$  は球状圧力源の深さ、 $d$  は圧力源直上からの水平距離である。

圧力源の位置は新岳火口縁の KUC6 から東西  $\pm 5$ km、南北  $\pm 5$ km、深さ  $-0.5$ km  $\sim$   $5$ km の範囲をグリッドサーチし、測定値と理論値の最小二乗誤差が最小になる場所を求めた。KUCG を不動としたときの 1995/96 年から 2000 年までの水平変位ベクトルの測定値とそれを最もよく説明する理論値を比較して図 6 に示した。圧力源は新岳火口の

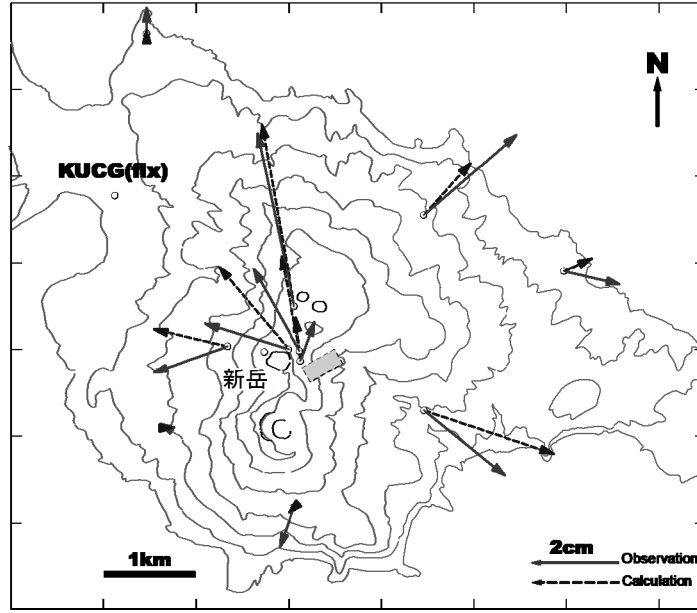


図 6. 開口割れ目モデルを仮定して求めた圧力源の位置。灰色の四角で示した。水平変位ベクトルの実線は1995年/1996年から2000年までの観測値，破線は観測値を最もよく説明する理論値を表し，KUCGを基準として示した。

東約 500m, 深さ海面下 100m(火口下深さ 600m) ときわめて浅い場所に求められた。また，体積変化量は 17 万  $m^3$  と計算された。水平変位ベクトルの理論値は，おおむね測定値と一致しているが，圧力源近傍の点 KUC4 でベクトルの方向が異なっていること，また，西南西山麓の KUC7 では，測定値に比べて理論値が大きく，また，逆に北北東山麓の KUC11 では測定値にくらべ理論値が小さいなど，いくつかの食い違いが見られる。

新岳の東には南北に走行する長さ 700~800m の割れ目が存在し，1945 年および 1980 年にはこの割れ目から噴火が発生している。そこで，開口割れ目モデルでも圧力源の位置および体積変化量を検討してみた。長さ  $2L$ ，幅  $W$  の割れ目が  $x$  方向に  $-L$  から  $+L$  に存在するとき，割れ目の開口に伴う変位量は以下のように表される (Okada, 1985)。記号  $f(\xi, \eta)$  を次のように定義すると，

$$f(\xi, \eta) \equiv f(x+L, p) - f(x+L, p-W) - f(x-L, p) + f(x-L, p-W)$$

地表における変位は以下のように表される。

$$u_z = \left\| \begin{aligned} & \frac{C_1}{2\pi} \left[ \frac{\tilde{y}q}{S(S+\xi)} - I_5 \sin^2 \delta \right. \\ & \left. + \cos \delta \left\{ \frac{\xi q}{S(S+\xi)} - \text{Arc tan} \frac{\xi \eta}{qS} \right\} \right] \end{aligned} \right\|$$

$$u_x = \left\| \frac{C_1}{2\pi} \left[ \frac{q^2}{S(S+\eta)} - I_3 \sin^2 \delta \right] \right\|$$

$$u_y = \left\| \begin{aligned} & \frac{C_1}{2\pi} \left[ \frac{-\tilde{d}q}{S(S+\xi)} - I_1 \sin^2 \delta \right. \\ & \left. - \sin \delta \left\{ \frac{\xi q}{S(S+\eta)} - \text{Arc tan} \frac{\xi \eta}{qS} \right\} \right] \end{aligned} \right\|$$

ここで，

$$I_1 \equiv \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{-1}{\cos \delta} \frac{\xi}{S + \tilde{d}} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_5$$

$$I_3 \equiv \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ \frac{1}{\cos \delta} \frac{\tilde{y}}{S + \tilde{d}} - \ln(S + \eta) \right]$$

$$+ \frac{\sin \delta}{\cos^2 \delta} \left\{ \ln(S + \tilde{d}) - \sin \delta \ln(S + \eta) \right\}$$

$$I_5 \equiv \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \times \text{Arctan} \left\{ \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(S + X) \sin \delta}{\xi(S + X) \cos \delta} \right\}$$

また、 $\delta$  は割れ目の水平からのdip角、 $d$  は深さ、 $C_1$  は開口量である。ただし、dip角  $\delta$  が $\pm 90^\circ$  の時は、

$$I_1 \equiv -\frac{\mu \xi q}{2(\lambda + \mu)(S + \tilde{d})^2}$$

$$I_3 \equiv \frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \left[ \frac{\eta}{S + \tilde{d}} + \frac{\tilde{y}q}{(S + \tilde{d})^2} - \ln(S + \eta) \right]$$

$$I_5 \equiv -\frac{\mu \xi \sin \delta}{(\lambda + \mu)(S + \tilde{d})}$$

となる。また、

$$p \equiv y \cos \delta + d \sin \delta$$

$$q \equiv y \sin \delta - d \cos \delta$$

$$\tilde{y} \equiv \eta \cos \delta + q \sin \delta$$

$$\tilde{d} \equiv \eta \sin \delta - q \cos \delta$$

$$S \equiv \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + q^2}$$

$$X \equiv \sqrt{\xi^2 + q^2}$$

である。

茂木モデルの場合と同じ範囲についてグリッドサーチを行った。また、開口割れ目の方位角、dip角についてもグリッドサーチを行った。新岳東方の割れ目は地表では長さ 700~800m、幅 1~2m であるが、水平変位ベクトルがおおむね新岳火口から放射状のパターンを持っているので、開口割れ目の長さを 700m とすると水平変位ベクトルを説明できない。そこで、長さ、幅とも 100m とした。図 6 に開口割れ目モデルに基づく理論水平変位ベクトルを測定値と比較して示した。開口割れ目の位

置は茂木モデルの等方圧力源と同様に新岳火口の東約 500m に求まった。また、深さは、海面下 500m となった。開口割れ目の Strike の方向は N330° が得られ、走行はほぼ南北方向である。Dip 角は 25° と低角で西から東に傾斜する。この場合の開口割れ目における体積増加は 41 万 m<sup>3</sup> となった。

同様に 2005 年 2 月から 2006 年 1 月までの期間について、グリッドサーチにより圧力源の位置を求めた。圧力源の水平位置は新岳火口の中にあり、その深さは海面上 200m 火口からの深さは 300m と求まった。この深さは斎藤・井口 (2006) が新岳北西縁の観測点の上下成分を含めた 3 次元変動ベクトルの方位から推定した深さとほぼ同じである。体積変化量は 24,000 m<sup>3</sup> と計算された。

2006 年 1 月から 2006 年 12 月/2007 年 2 月までの期間については、力源の水平位置は新岳火口内にあることは明らかである。一方、深さについては、新岳火口中心から 0.5km しかはなれていない KUC1 でも 0.3cm の水平変位しか求められなかったので力源の深さは極めて浅いことが推定できる。計算上の深さはほぼ地表面となる。GPS 繰返し測定の誤差を考慮し、KUC1 の変位を 0.5cm とすると深さ 130m、体積変化量は 6200 m<sup>3</sup> と求められる。2005 年 2 月から 2006 年 1 月までの期間の地盤変動を引き起こした力源の深さ 300m を仮定すると KUC1 の水平変動は 1.2cm と予測されるが、そのような変動は検出されておらず、2006 年 1 月から 2006 年 12 月/2007 年 2 月までの期間の地盤変動の力源は 2005 年 2 月から 2006 年 1 月のそれに比べて明らかに浅くなっている。

## 5. まとめ

- 1) GPS 測量によって、1995/96 年から 2000

年までに、新岳付近を中心とする放射状のベクトルをもつ水平変位パターンが検出された。変動量は新岳火口付近で 2-4cm, 山麓において 1-3cm であった。

- 2) 2004 年以降では、新岳火口周辺に変動が徐々に集中する傾向がみられる。特に、2006 年 1 月から 2006 年 12 月/2007 年 2 月までの期間では、新岳火口を中心とする 2cm 以上の放射状の水平変動パターンが火口周辺では見られるのに対し、0.5km 離れた場所では測定誤差以下の変化であった。
- 3) 茂木モデルを仮定して力源の位置を求めると新岳直下に求まる。その深さは 1995/96 年から 2000 年の期間では 600m, 2005 年 2 月から 2006 年 1 月までの期間では 300m, 2006 年 1 月から 2006 年 12 月/2007 年 2 月までの期間では 130m と徐々に浅くなる傾向が認められた。

## 謝 辞

京都大学防災研究所石原和弘教授には、本研究においてご助言いただきました。口永良部島火山の集中総合観測を実施するにあたり、鹿児島県総務部消防防災課、上屋久町役場および同口永良部島出張所にご協力をいただきました。記してお礼申し上げます。また、これまでの測量は、江頭庸夫、西 潔、味喜大介、福嶋麻沙代、Muhamad Hendrasto, Subandryo, Agus Solihin の各氏の協力によって行われてきた。GPS 受信機は北海道大学大学院理学研究科の大島弘光助教授と京都大学大学院理学研究科の大倉敬宏助教授より拝借した。あわせて御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 井口正人・山本圭吾・味喜大介・高山鉄朗・寺石真弘・園田保美・藤木繁男・鬼澤真也・鈴木敦生・八木原寛・平野舟一郎(2002)口永良部島火山における最近の地盤変動—1995 年～2001 年—, 京都大学防災研究所年報, 第 45 号 B, 601-608.
- Mogi, K.(1958) : Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, 36, 99-134.
- Okada, Y. (1985): Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seis. Soc. Am., 75, 1135-1154.
- 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.
- 斎藤英二・井口正人(2007) 口永良部島火山における GPS 連続観測結果—2004 年 4 月～2006 年 12 月—(本報告).
- Triastuty, H., 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 (in this issue).

