

口永良部島火山における最近の地盤変動

— 1995年～2001年 —

井口正人・山本圭吾・味喜大介・高山鉄朗
寺石眞弘・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**

* 北海道大学大学院理学研究科

** 鹿児島大学理学部

要 旨

口永良部島火山において1995年から2001年までGPSおよび水準測量による地盤変動測量を実施した。GPS観測のベンチマークは新岳の火口周辺に6点、新岳・古岳の山麓に6点設置してある。また、新岳の山麓にはGPS連続観測点がある。水準測量路線は新岳の西麓に8kmにわたって設置してある。GPS観測によって1995/96年から2000年の間に山頂火口周辺の地盤の膨張を示す放射状の水平変位ベクトルが得られた。変位量は山頂部の観測点では2-4cm、山麓部では1-3cmであった。一方、1996年から2001年までの上下変動は5mm以下であり、GPS観測により検出された水平変動量と比較して小さいが、新岳火口から最も遠い点を不動点にすると、新岳火口方向が隆起している傾向がみられる。上下変動、水平変動とも1996年から1999年の間に大きな変化が見られ、1999年から2000年には顕著な変化は見られず、2000年から2001年の水平変動はやや収縮傾向にある。1999年8月ごろから火山性地震の発生頻度が増加したが、この地盤変動は1999年の地震活動に連動したものかもしれない。1995/96年から2000年までの水平変位を引き起こした圧力源の位置を求めめるため、茂木モデルを仮定して計算したところ、新岳火口の東500m、深さ海面下100mときわめて浅い場所に求められた。また、体積変化は17万 m^3 と計算された。また、開口割れ目モデルを仮定しても、その圧力源の位置は同様に新岳火口の東500m、深さ海面下500mと浅い場所に求められ、割れ目の走行はほぼ南北、傾斜角は 30° 、体積変化は41万 m^3 となった。この圧力源の位置は、空中磁気測量によって検出された磁気異常のソースの位置と一致し、今回検出された地盤変動は、新岳東側の浅部に存在する熱水溜りの膨張によって引き起こされた可能性がある。

キーワード： 口永良部島、地盤変動、GPS、水準測量、茂木モデル、開口割れ目

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

生じた。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(京都大学防災研究所・東京工業大学工学部・鹿児島大学理学部, 1981)。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

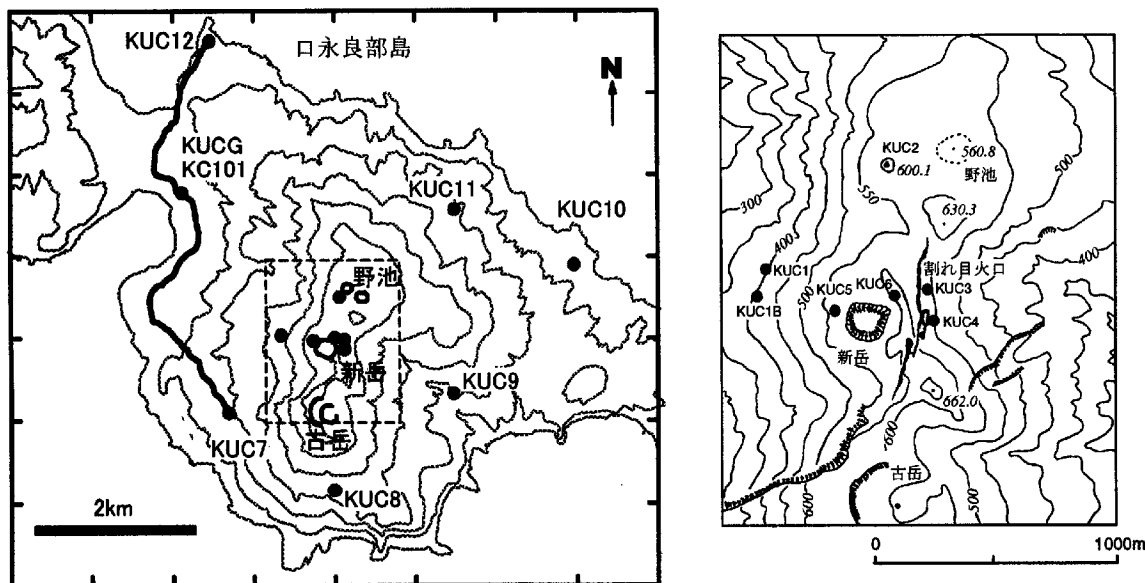


Fig. 1 Location of GPS benchmarks and precise leveling route at Kuchierabujima volcano. Solid circles indicate benchmarks for GPS measurement. The station KUCG is a permanent station of GPS. Curve from KUC12 to KUC7 is a precise leveling route. Right figure is an enlargement of the summit area.

属火山活動研究センターは、新岳火口の西方 0.4km の地点において地震計を設置し、加入電話回線によりデータを伝送することにより(Iguchi, 1991)、火山性地震の観測を行ってきた(京都大学防災研究所, 1992)。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。その後も火山性地震活動の活発な状態が続いている(井口・他, 2001)。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 のベンチマークを、また、1996 年には水準測量のベンチマークを島の西部に設置し、地盤変動の観測を繰り返してきた。2000 年の集中総合観測では GPS および水準測量の再測を行い、1996 年以降の地盤変動から口永良部島火山の活動を評価してみた。

2. 観測

GPS 観測のベンチマークは新岳の火口周辺に 6 点、新岳・古岳の山麓に 6 点設置してある(Fig. 1)。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。GPS 観測は、これまでに 1995 年 8 月、1996 年 3 月、5 月、8 月、1999 年 9 月に実施されており、今回は 6 回目の測定になる。今回の観測は 2000 年 12

月 7 日および 8 日の 18:00 から翌朝 6:00 まで、サンプリング間隔 15 秒で行った。使用した GPS 受信機は、Leica SR399 および 530 である。基線解析には SKI-Pro1.1J 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

水準測量の基準点は、北部の GPS 基準点 KUC12 から、連続観測点 KUCG を経て南西部の KUC7 に至る長さ 8km の路線に配置されている。これまでに、1996 年 5 月、8 月および 1999 年 9 月に測量を行っている。今回の測量は GPS 観測とほぼ同じ時期の 2000 年 11 月 29 日から 12 月 2 日に実施した。使用した測量器材は自動読み取りデジタルレベル(Wild NA3003)およびインバールバーコード標尺(Wild GPCL3)であり、測量における 1km あたりの平均自乗誤差は $\pm 0.48\text{mm/km}$ であった。

3. 結果

3.1 水平変動

Fig. 2 に 1995 年から 2001 年までの連続観測点 KUCG からの斜距離の変化を示した。西側の基準点では、斜距離の変化は小さく検出誤差以下であるが、新岳火口を挟んで反対側に位置する KUC9 では、約 3cm の斜距離の伸びが、KUC11 では約 2cm の伸びが観測された。

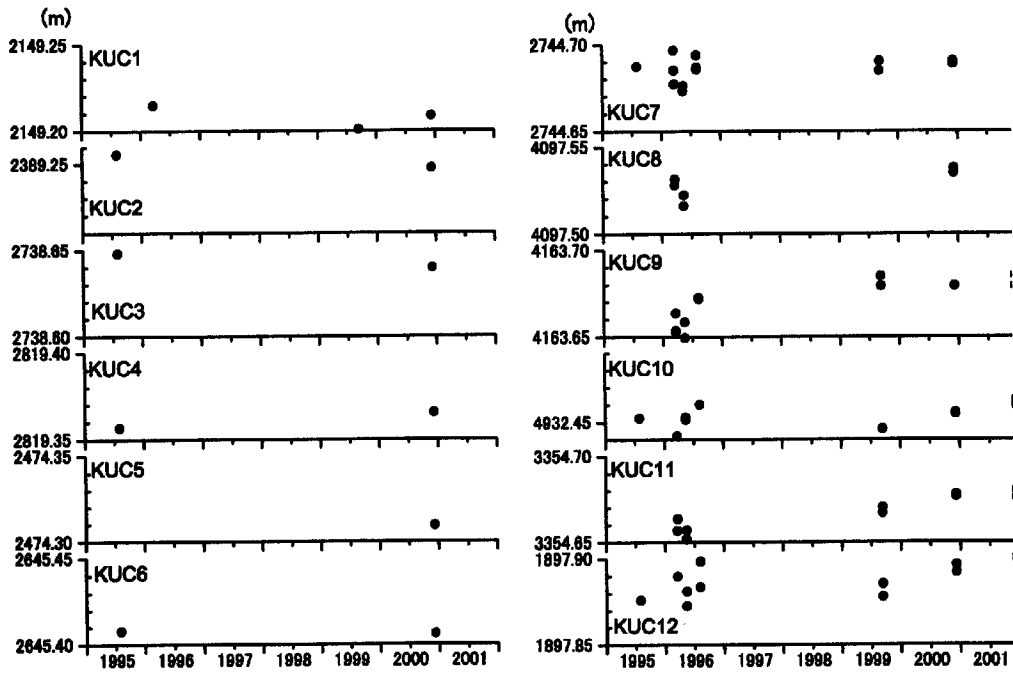


Fig. 2 Slope distance changes. All the distances were measured from the permanent station KUCG

Fig. 3 に 1995/96 年から 2000 年における各ベンチマークの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。

3.2 上下変動

1996 年 5 月を基準とする 1996 年 8 月、1999 年 9 月、

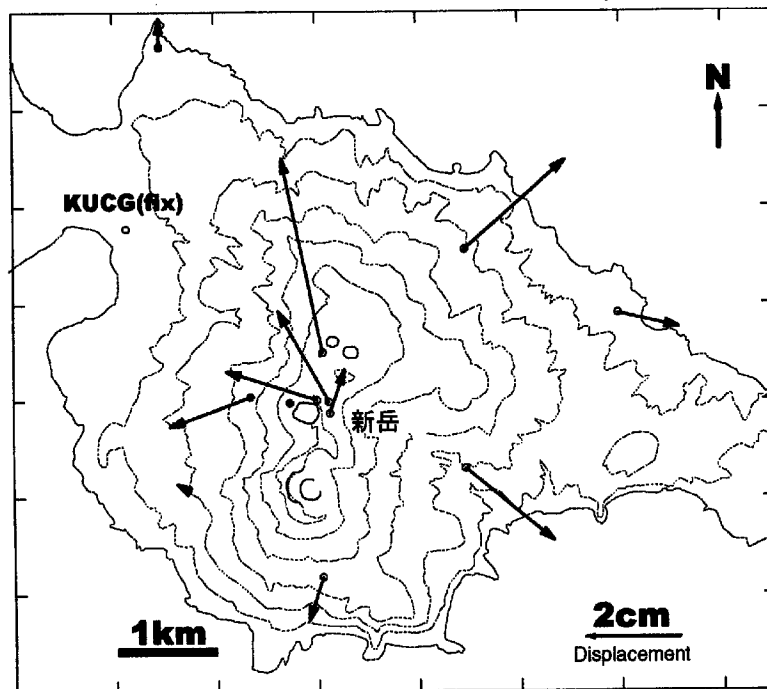


Fig. 3 Horizontal displacement vector from 1995/96 to 2000. All the displacements were referred to station KUCG. First measurements were conducted in 1995 around the summit crater and in 1996 at the flank.

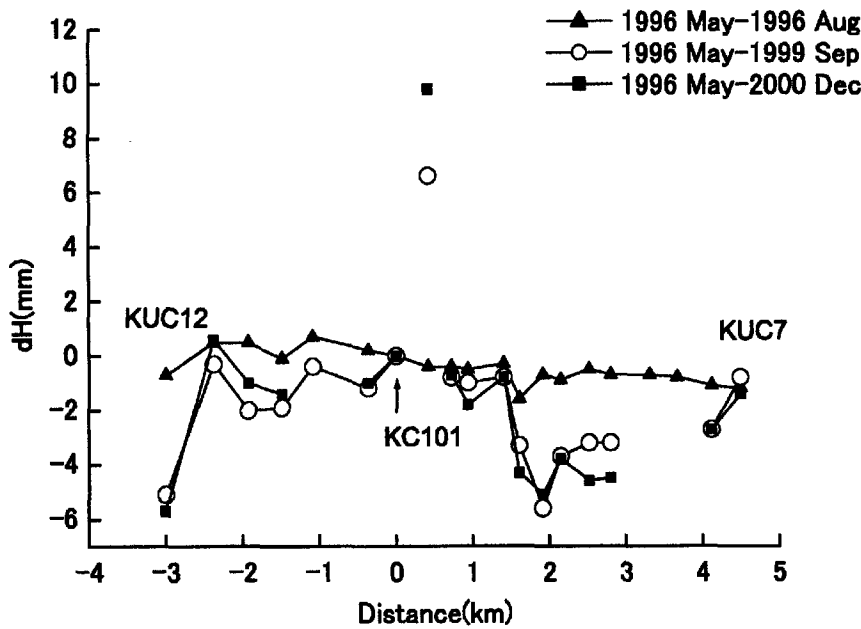


Fig. 4 Vertical displacement at the western flank of Kuchierabujima volcano. The benchmark KC101 is fixed.

2000年12月および2001年12月における上下変動量を Fig. 4 に示した。GPS 連続観測点と同じ場所にある KC101 を不動とする相対変位で示した。初回の1996年5月の測定値と比較すると、上下変動量は、5mm 以下であり、GPS 観測により検出された水平変動量に比較して小さい。このことは、圧力減の深さが非常に浅いことを反映しているのかもしれない。変動量は小さいものの、Fig. 4 において距離 2~5km のベンチマークにおいては新岳に向かって隆起している傾向がみられる。

3.3 地盤変動の時間変化

1997年および1998年には測量を行っていないので、判断が難しいが、水平変動および上下変動とも、変動は主として1996年から1999年/2000年にかけて見られ、2000年12月から2001年12月には顕著な変化は見られない。1999年8月ごろ2000年2月にかけて火山性地震の発生頻度が増加したが(井口・他, 2001)、地盤変動は、この地震活動に連動したのものかもしれない。

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 Δd お

よび上下変動量 Δh 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ベンチマーク KUC6 から東西±5km、南北±5km、深さ-0.5km~5km 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 Fig. 5 に示した。圧力源は新岳火口の東約500m、深さ海面下100mとわけて浅い場所に求められた。また、体積変化は17万 m^3 と計算された。計算された水平変位ベクトルは、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。

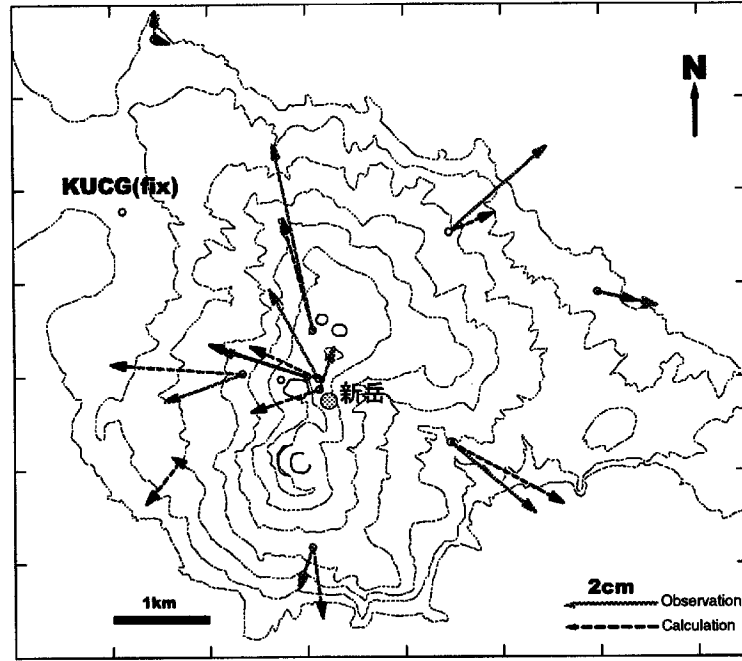


Fig. 5 Location of the pressure source based on Mogi's model. The location is shown by a shaded circle. Solid arrows show horizontal displacements observed during the period from 1995/96 to 2000. Dashed arrows indicate best-fitted theoretical displacement.

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、開口割れ目モデルを用いて、圧力源の位置および体積変化量を再検討してみた。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。

$$u_z = \frac{C_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}q}{S(S+\xi)} - I_3 \sin^2 \delta \right. \\ \left. + \cos \delta \left\{ \frac{\xi q}{S(S+\xi)} - \text{Arctan} \frac{\xi \eta}{qS} \right\} \right]$$

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

$$u_y = \frac{C_1}{2\pi} \left[\frac{-\tilde{d}q}{S(S+\xi)} - I_1 \sin^2 \delta \right. \\ \left. - \sin \delta \left\{ \frac{\xi q}{S(S+\eta)} - \text{Arctan} \frac{\xi \eta}{qS} \right\} \right]$$

ここで、

$$I_1 \equiv \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{-1}{\cos \delta} \frac{\xi}{S+\tilde{d}} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_3$$

$$I_3 \equiv \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{\cos \delta} \frac{\tilde{y}}{S+\tilde{d}} - \ln(S+\eta) \right. \\ \left. + \frac{\sin \delta}{\cos^2 \delta} \left\{ \ln(S+\tilde{d}) - \sin \delta \ln(S+\eta) \right\} \right]$$

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

また、 δ 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 δ 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、

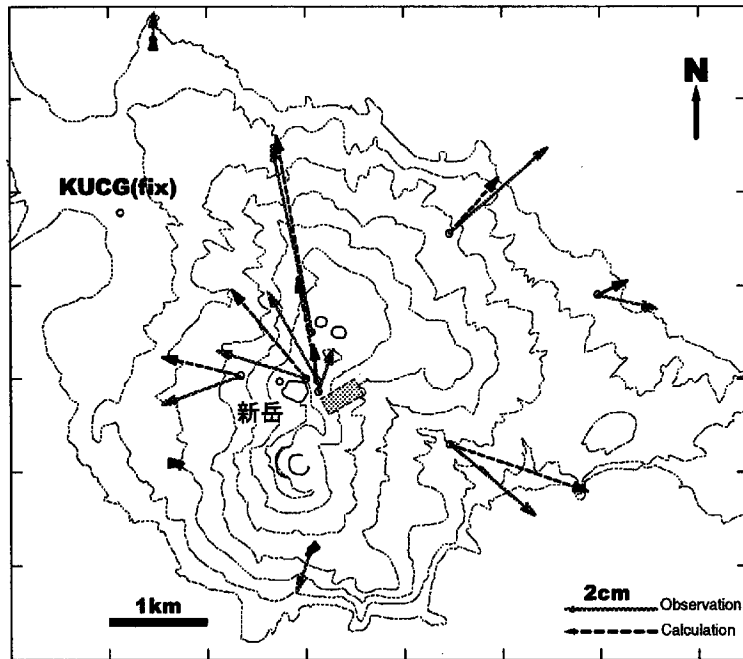


Fig. 6 Location of the pressure source based on tensile crack model. The location is shown by a shaded square. Solid arrows show horizontal displacements observed during the period from 1995/96 to 2000. Dashed arrows indicate best-fitted theoretical displacement.

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

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

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

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

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

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

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。Fig. 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m³となった。

Fig. 7に, 茂木モデルおよび開口割れ目モデルから計

算される水準測量路線上での上下変動を水準測量による測定値とあわせて示した。ベンチマーク KC101 付近から KUC7 にかけて, 茂木モデルでは隆起量が大きくなるのに対し, 開口割れ目モデルでは, 沈降していく。水準測量から検出された上下変動量は小さく, どちらのモデルがより適当であるか判断が難しい。いずれのモデルでも期待される上下変動量は2mm以下であり, 上下変動量が小さいことと矛盾しない。

5. 議論

1995/96年から2000年までの地盤変動を説明するために, 茂木モデルおよび開口割れ目モデルを適用してみたが, いずれの場合でも圧力源の位置は新岳火口東側の海面下数百メートルの浅い場所に求められた。今回の集中総合観測において同時に行われた火口周辺での近接地震観測では, 高周波地震の震源は, 新岳火口の東側にはなく, 西側の海面より浅い標高100~400mの火山体内に集中していることがわかっている(井口・他, 2001)。地盤変動を引き起こす圧力源は, 高周波地震の震源域とは一致しないので, 地震活動が引き金となって地盤変動を引き起こしたとは考えにくい。一方, 空中からの磁気測定によって, 新岳の東側の深さ500m付近に磁気強度の弱い部分があることが示されている(宇津木・田

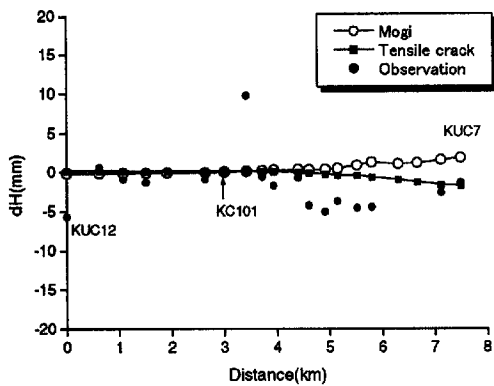


Fig. 7 Theoretical vertical displacement. The values are calculated from source parameters obtained by horizontal displacements in the period of 1995/96-2000, based on Mogi's model (open circle) and tensile crack model (solid square). Solid circles represent observations. All the values are relative to that at KC101 (GPS permanent station).

中・神田, 2002)。今回明らかになった地盤変動のソースは磁気異常のある場所とほぼ一致している。この磁気異常が、浅部の熱水溜りの存在を示唆するものであれば、今回検出された地盤変動は、新岳東側の浅部に存在する熱水溜りの膨張によって引き起こされた可能性がある。

これらの地震、地磁気、地熱などの観測結果を合わせて考えると、新岳火口周辺での熱水の動態は次のように解釈される (Fig. 8)。高周波地震は、新岳火口の西方で発生し、そのメカニズム解は東西伸長の正断層型が得られている。また、震源域は火口の西方において西から東に向かって深くなる傾向がある (井口・他, 2001)。したがって、火口の西側において西から東に傾斜した正断層面に相当する破砕域が推定される。今回の観測から見積もられた開口割れ目の位置は、その延長線上に位置する。空中磁気測量により検出された火口の東側の磁気異常は開口割れ目の位置にほぼ一致し、磁気異常が熱水活動に起因するものとするれば、熱水は、開口割れ目、高周波地震の震源域に相当する破砕域を通過して、火口の西側に上昇しうる。地表面での熱異常が火口の西側から南側に分布すること (井口・鍵山, 2002) は、このことと符合する。1999年の地震活動の活発化とその時期に地盤変動が検出されたことは、熱水活動の活発化に伴い、開口割れ目が開き、その結果、熱水は破砕面に沿って西上方へ移動し、高周波地震の活動を活発化させたものと解釈される。

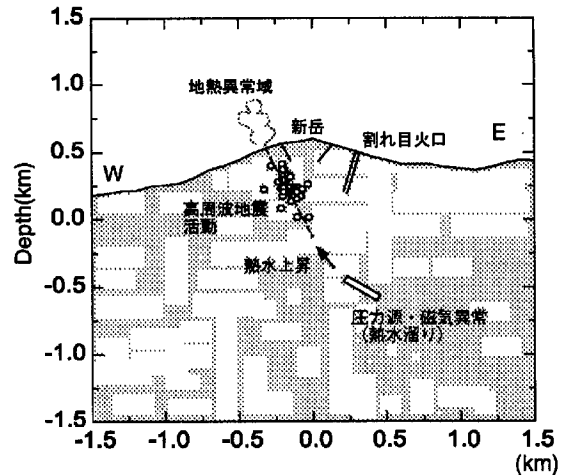


Fig. 8 Hydrothermal structure beneath the summit crater of Shindake. Pressure source corresponds to geomagnetic anomaly suggesting hydrothermal reservoir. Vapor rises up through the fracture zone revealed by hypocentral distribution of high-frequency earthquakes, and reaches at the ground surface, forming geothermal anomaly.

6. まとめ

- 1) GPS 測量によって、1995/96 年から 2000 年までに、新岳山頂の火口付近で 2-4cm、山麓において 1-3cm の水平変位が検出された。一方、上下変動は小さく、北西山麓の水準路線で 5mm 以下であった。
- 2) 茂木モデルと開口割れ目モデルを用いて水平変動量の分布から圧力源の位置を求めたところ、新岳の東約 500m の海面下 500m 以下の浅い場所に求まった。この深さの圧力源から推定される上下変動量は、測定された上下変動量と矛盾しない。
- 3) この圧力源の位置は、空中磁気測量によって検出された磁気異常のソースの位置と一致し、今回検出された地盤変動は、新岳東側の浅部に存在する熱水溜りの膨張によって引き起こされた可能性がある。

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、1999年以前の測量は、江頭庸夫、西 潔、Muhamad Hendrasto、

Subandryo, Agus Solihin の各氏の協力によって行われてきた。

参考文献

井口正人・鍵山恒臣(2002):口永良部島火山における空中赤外熱測定, 薩摩硫黄島火山・口永良部島火山の集中総合観測, pp.一
井口正人・山本圭吾・高山鉄朗・前川徳光・西村太志・橋野弘憲・八木原寛・平野舟一郎(2002):口永良部島火山における火山性地震観測—2000年集中総合観測—, 京都大学防災研究所年報, 第18号B, pp.53-58.
宇津木充・田中良和・神田徑(2002):口永良部島火山における空中磁気測量, 薩摩硫黄島火山・口永良部島火山の集中総合観測, pp.一
京都大学防災研究所(1992):薩南諸島における火山活動(1991年1月~1992年5月), 火山噴火予知連絡会

会報, 第53号, pp.101-107.
京都大学防災研究所・東京工業大学工学部・鹿児島大学理学部(1981):1980年(9月28日)の口永良部島新岳の噴火(概報), 火山噴火予知連絡会会報, 第20号, pp.1-9.
Iguchi, M. (1991): Geophysical Data Collection Using an Interactive Personal Computer System (part 1) -Experimental Monitoring at Suwanosejima Volcano-, Bull. Volcanol. Soc. Jpn., Vol.36, pp.335-343.
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.

Recent Ground Deformation at Kuchierabujima Volcano

Masato IGUCHI, Keigo YAMAMOTO, Daisuke MIKI, Tetsuro TAKAYAMA

Masahiro TERAISHI, Yasumi SONODA, Shigeo FUJIKI

Shin'ya ONIZAWA*, Atsuo SUZUKI*, Hiroshi YAKIWARA** and Shuichiro HIRANO**

* Graduate School of Science, Hokkaido University

** Faculty of Science, Kagoshima University

Synopsis

GPS and precise leveling surveys have been repeated at Kuchierabujima since 1995. GPS benchmarks are installed around the summit crater and at the flank of the volcano. Continuous GPS station is located at the northwest flank. Leveling route is developed at the western flank with 8km length. Horizontal displacements during the period from 1995/96 to 2000 by GPS measurements show radial outward pattern from the summit crater. The horizontal displacements are 2-4 cm near the summit crater and 1-3 cm at the flank. Vertical displacements detected by the precise leveling are less than 5mm during the period from 1996 to 2001. Although the vertical displacements are much smaller than horizontal ones, it seems that the ground toward to the summit crater was inflated. Both of horizontal and vertical deformation occurred during the period from 1995/96 to 1999 and no remarkable deformation was not detected after 2000. The seismicity at Kuchierabujima volcano increased in August 1999. The ground deformation maybe related with increase in seismicity. Location of a pressure source inducing the ground deformation is estimated based on Mogi's model, using horizontal displacement vector from 1995/96 to 2000. It is located 500m east of the summit crater at a shallow depth of 100m beneath the sea level. Volume increase in the source is estimated to be $1.7 \times 10^5 \text{m}^3$. Tensile crack is an alternative model to explain the ground deformation as inferred from the topography of a north-south fissure east of the summit crater. The tensile crack is similarly located 500m east of the summit crater at a shallow depth of 500m beneath the sea level. Strike is north-south and the dip angle of the crack is 30° . Volume increase in the source is estimated to be $4.1 \times 10^5 \text{m}^3$. The location of the pressure source coincides with that of geomagnetic anomaly detected by airborne survey. The ground deformation maybe induced by the inflation of hydrothermal reservoir at a shallow depth east of the summit crater.

Keywords: Kuchierabujima, ground deformation, GPS, precise leveling, Mogi's model, tensile crack