

2017年の南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化

Tilt and Strain Change Before and After the Explosion at Minami-dake, Sakurajima, in 2017

堀田耕平⁽¹⁾・井口正人

Kohei HOTTA⁽¹⁾ and Masato IGUCHI

(1) 富山大学大学院理工学研究部

(1) Graduate School of Science and Engineering for Research, University of Toyama

Synopsis

Deformation source associated with each eruption at Sakurajima have been estimated beneath Minami-dake for each eruption. Deformation sources for mid-long term magma intrusion event were estimated beneath Aira caldera, Kita-dake and Minami-dake. A new observation tunnel was installed at Komen in August 2016. On November 13, 2017, an explosion with an infrasound occurred at Minami-dake at 22:07. Ground deflation was accompanied and kept for approximately five hours. Most tilt vectors showed radial pattern of deflation at Minami-dake, whereas that at Komen showed deflation at northern part of Sakurajima. We modeled the tilt and strain change except Komen. At first, we modeled the deflation based on the Mogi model. A deflation source was located beneath Minami-dake. Directions of observed and calculated tilt vectors were slightly different at western and northern stations. We then applied a sill model. A sill was located between Minami-dake and Kita-dake. Magma may migrate wider area than it has been considered during each eruption at Sakurajima. This sill model cannot explain tilt change at Komen. There might be a local displacement around Komen.

キーワード: 桜島火山, 南岳爆発, 地盤変動, 傾斜ひずみ

Keywords: Sakurajima volcano, Explosion at Minami-dake, ground deformation, Tilt and Strain

1. はじめに

桜島火山における個々の噴火に伴う変動源は、これまで南岳下に想定されてきた。1993年ごろまで続いた南岳爆発期の南岳噴火では南岳下深さ 2~6 km bsl (below sea level) に推定された (Ishihara, 1990)。また、2006年に再開し、2009年秋以降活発化した昭和火口における噴火では南岳下深さ 0~1.5 km bsl に推定された (Iguchi et al., 2013)。収縮量は、南岳噴火では $10^3 \sim 10^5 \text{ m}^3$ と推定されたのに対して、昭和火口噴火では $10^2 \sim 10^4 \text{ m}^3$ と南岳噴火に比べて 1 オーダー

小さい量として推定されている (Iguchi et al., 2013)。

一方, Hotta et al. (2016) は, 2011年秋~2012年春の半年に及ぶマグマ貫入・放出過程の地盤変動源を南岳下深さ 0.7 km bsl, 北岳下深さ 3.3 km bsl, 始良カルデラ下深さ 9.6 km bsl にそれぞれ推定し, 各変動源の体積の時間変化を推定した。さらに, 火山性微動エネルギーから火山灰放出量を推定する手法 (Iguchi, 2016) と DRE (Dense Rock Equivalent) 密度 2500 kg/m^3 からマグマ放出体積の時間変化を推定し, マグマを始良カルデラから北岳下, 南岳下, そして火口へと順に移動する非圧縮性流体と仮定して変動

源間のマグマ移動モデルを構築した。その結果、2011年11月中旬に始良カルデラへのマグマ貫入が開始したと同時に始良カルデラから北岳下へのマグマ貫入量が増加し、それから1か月後の2011年12月中旬に北岳下から南岳下へマグマ貫入量と火口からのマグマ放出量が増加し、噴火活動が活発化したことが分かった。このように、北岳下の変動源は噴火活動のバッファ的な役割を果たしており、中長期的な噴火活動において重要であることを示した。

2016年8月、桜島北東部の高免に観測坑道（KMT）が新設され、桜島北東部における傾斜ひずみ観測が強化された（Fig. 1）。2017年3月25日18:03、昭和火口において8ヶ月ぶりの噴火が発生したが、噴火の1時間前から地盤の収縮が開始し、噴火後も1時間半にわたり継続した。この収縮継続時間はこれまでの噴火に比べ長く、既存の観測坑道に加えて新設された高免観測坑道の傾斜ひずみデータから、我々は個々の噴火による収縮が南岳下だけでなく北岳下にまで及んでいる可能性を示唆した（堀田・井口、2017）。一方、2017年11月13日22:07には、南岳において空振を伴う爆発が発生した。この爆発の2日前から開始した収縮は、爆発後は急激な収縮となり、徐々に収縮率を減衰させながら約5時間にわたって継続した。この南岳爆発に伴う収縮は、2017年3月25日の昭和火口噴火以上に規模が大きいものとなった。本研究では、個々の噴火のマグマ移動範囲を明らかにするために、2017年11月13日南岳爆発に伴う傾斜ひずみ変化をモデル化した。

2. 2017年11月13日南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化

Fig. 1に本研究で用いた観測点の分布を示す。国土地理院の有村観測坑道（AVOT）と京都大学のハルタ山（HVOT）・高免観測坑道の水管傾斜計と線形ひずみ計のデータに加えて、気象庁の横山（A）・あみだ川（F）ボアホール傾斜計のデータを使用した。観測坑道の水管傾斜計は南岳火口方向とそれに直交する方向、線形ひずみ計は水管傾斜計と同様の2方向に加え斜辺方向に設置されている。水管傾斜計の感度は $0.056 \text{ V}/\mu\text{rad}$ であり、線形ひずみ計の感度は $0.056 \text{ V}/\mu\text{strain}$ である。また、気象庁のボアホール傾斜計は南北方向と東西方向に設置されている。感度は $0.02 \text{ V}/\mu\text{rad}$ である。アナログ・デジタル分解能はいずれも24 bitである。

Fig. 2に2017年11月5～14日の傾斜ひずみデータを示す。2017年11月13日南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化の特徴について述べる。爆発の6日前（11月7日）から地盤の膨張が検出され始めた。こ

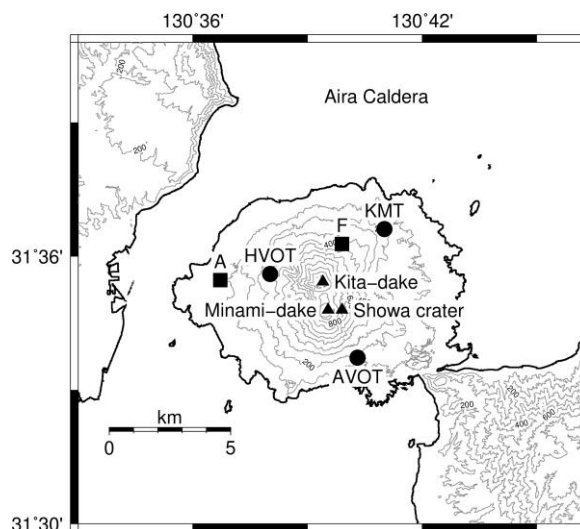


Fig. 1 Distribution of stations used in this study. Solid circles represent Arimura (AVOT), Harutayama (HVOT) and Komen (KMT) observation tunnels. Solid squares represent borehole tiltmeters of Japan Meteorological Agency at Yokoyama (A) and Amida-gawa (F). Solid triangles represent summit craters of Minami-dake and Kita-dake, and Showa crater.

の膨張は、爆発の2日前（11月11日）から収縮に転じた。11月13日22:07の爆発に伴って急激な収縮が検出され、徐々に収縮率を減衰させながら約5時間にわたって継続した。このように、地盤収縮の継続期間が3日近くと、従来の噴火に比べて長いという特徴がある。特に、爆発後約5時間にわたって収縮が継続したのは、爆発の約1時間後からストロンボリ式噴火が継続したことによるものである。

Fig. 3に11月13日22:07～14日3:00の傾斜ベクトルを示す。これまでの個々の噴火では南岳下に変動源が推定されてきた。今回の噴火でも、南岳を中心とした放射状の沈降傾向があるが、高免観測坑道では桜島北部沈降と、ほかの観測点とは大きく異なる傾向を示している。そこで、ここでは高免観測坑道を除いた4観測点のデータについてモデル化を行った。

3. 解析・結果

3.1 Mogiモデル

これまで、桜島における個々の噴火に伴う地盤変動の変動源はMogiモデル（Mogi, 1958）に基づいてモデル化されてきた（Iguchi et al., 2013）。ここでモデル化を行う4観測点の傾斜データについてもおおむね南岳を中心とした放射状の沈降を示していることから、まずはMogiモデルを適用した。地形の影響は、各観測点の標高を変動源の深さに足すことで補正した（Williams and Wadge, 1998）。傾斜またはひずみの

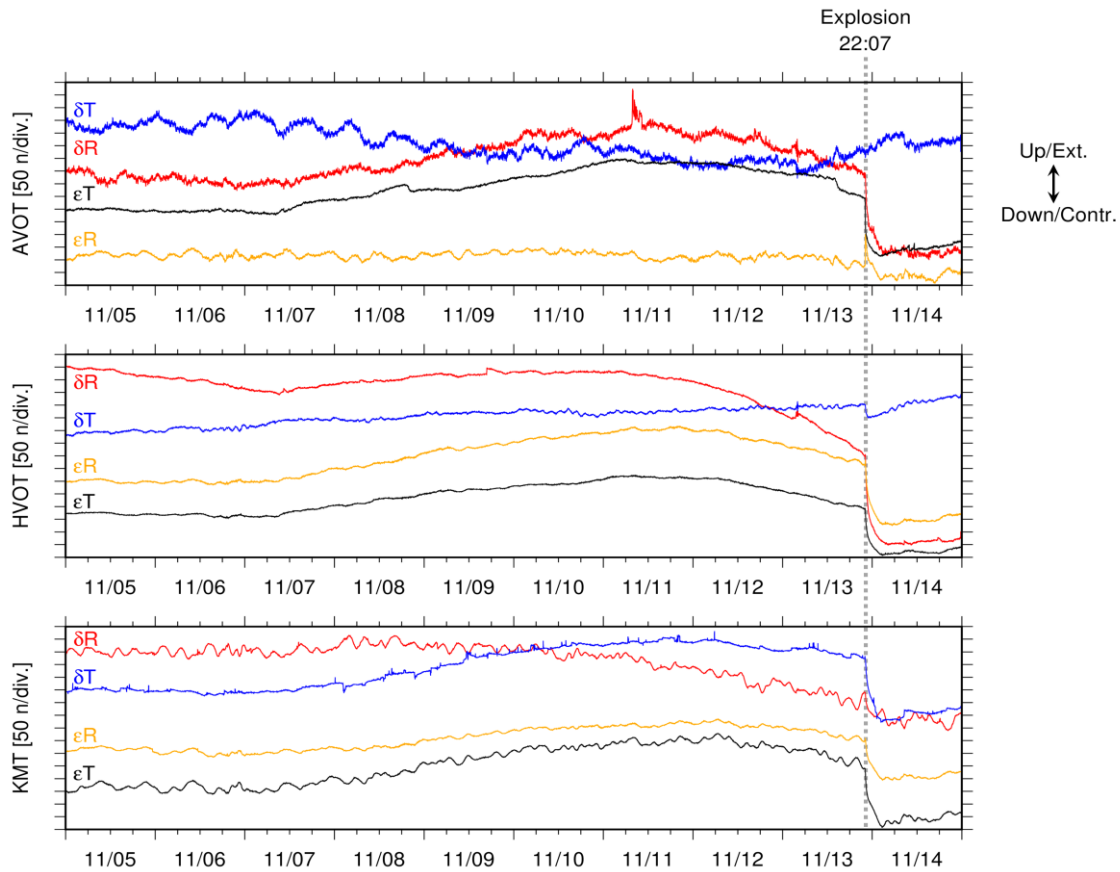


Fig. 2 Tilt (δ) and strain (ϵ) records at each observation tunnel during the period of November 5–14, 2017. The radial (R) component is positive toward the summit crater of Minami-dake, and the tangential (T) component is positive in the direction rotated clockwise by 90° from the radial component, respectively. The gray dashed line represents the onset of explosion at Minami-dake on November 13, 2017.

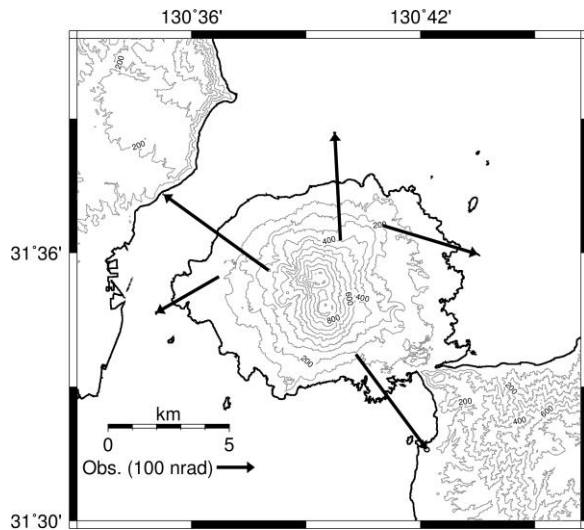


Fig. 3 Tilt vectors during the period from November 13, 2017 22:07 to 3:00 of the following day. Error ellipses are 1σ .

観測値と計算値の差を観測誤差で割ったものを 2 乗

し、それらをすべて足し合わせた評価関数を最小にする最適な変動源の水平位置・深さ・体積変化量をそれぞれグリッドサーチにより推定した。

結果を Fig. 4 に示す。南岳下深さ 4.4 km bsl に収縮源が得られた。体積減少量は 13.8 万 m^3 であった。この結果は位置・体積減少量ともに従来の南岳噴火における変動源 (Ishihara, 1990) とほぼ同様である。この収縮源は、南岳を中心とした放射状の沈降をおおむね説明できている。また、ひずみの極性も観測値と計算値ですべて一致している。一方、桜島西部や北部の傾斜計 (気象庁横山・あみだ川) ではやや傾斜方向に食い違いがあり、この食い違いの特徴から、変動源が南岳より北側にまで広がっている可能性が示唆される。

3.2 シルモデル

浮力により地下から上昇したマグマは、地殻密度とマグマの密度がバランスする深さまで到達したところで浮力を失い、マグマだまりとなって蓄積されると考えられるここで、地殻の構造が水平な層状に

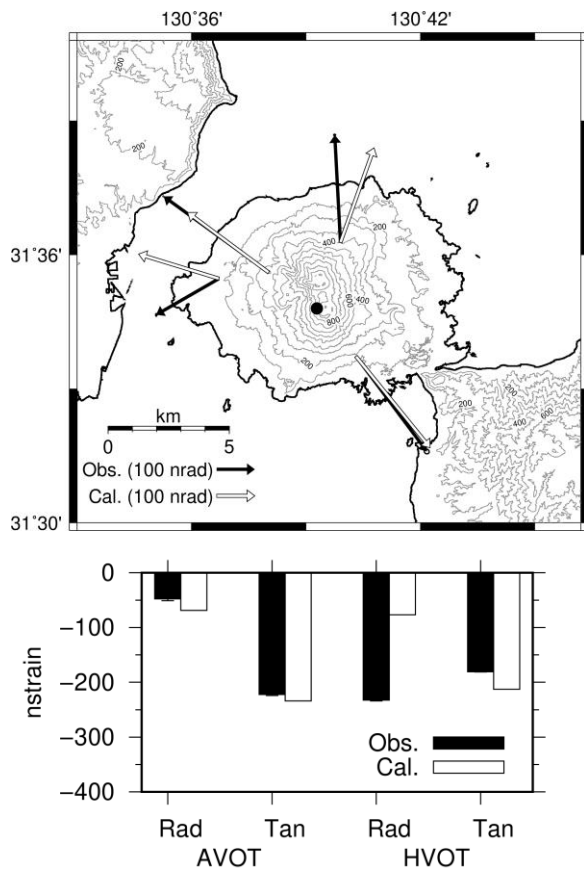


Fig. 4 (top) Location of obtained Mogi source (the solid circle) and comparison of observed (black) and calculated (white) tilts. Error ellipses are 1σ . (bottom) Comparison of observed (black) and calculated (white) strain changes. Error bars are 1σ .

なっていると仮定すると、密度が同一となる層は水平に広がっており、したがって、蓄積されたマグマは水平なシル状に広がっていくと考えられる。そこで、シルモデルの適用を試みた。傾斜ひずみ変化の計算には、Okada (1992) の矩形断層モデルの変位計算プログラムDC3Dを用いた。傾斜角は 0° 、走行は北向きと仮定し、幅・長さが等しい正方形のシルを適用した。Mogiモデルと同様に、最適なシルの中心の水平位置・深さ・辺の長さ・閉口量をそれぞれグリッドサーチ法により推定した。

結果をFig. 5に示す。一辺の長さが2.3 kmのシルが南岳～北岳にかけて得られた。深さは7.7 km bslであった。閉口量は5 cmで、これは体積減少量 26.5万m^3 に相当する。深さはMogiモデルの場合に比べて深く、体積減少量も倍となった。また、わずかではあるものの桜島西部や北部の傾斜計でみられた傾斜方向の食い違いが改善している。また、ひずみ変化の極性についても観測値と矛盾しない。

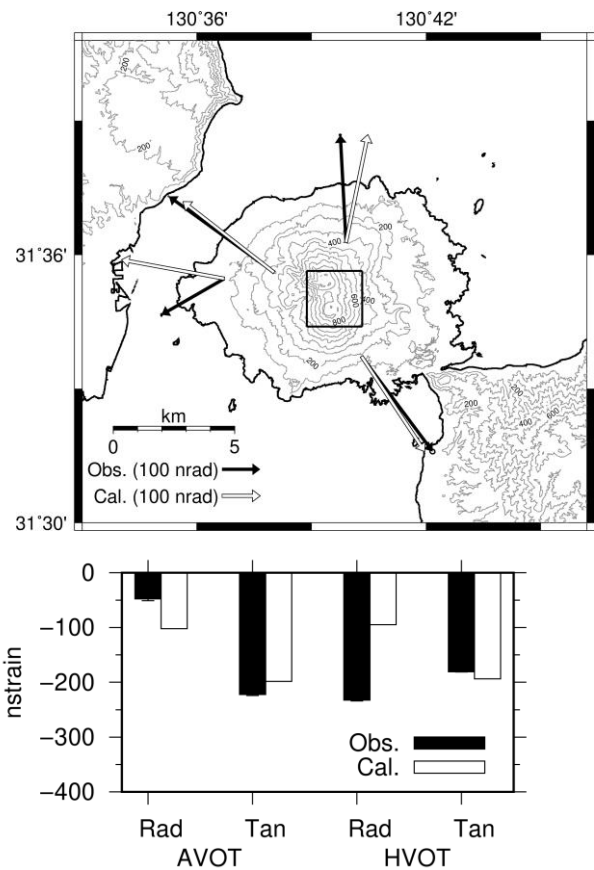


Fig. 5 Same as Fig. 4 for the sill model. The square represents location of obtained sill.

4. 議論

2017年11月13日南岳爆発に伴う変動に対してMogiモデルを適用したところ、南岳下深さ4.4 km bslに収縮源が得られ、その収縮量は $13.8 \times 10^5 \text{ m}^3$ であった。収縮源の位置と深さはこれまでの南岳噴火の際に推定された収縮源 (Ishihara, 1990) とおおむね同様のオーダーであった。一方、Okada (1992) の矩形断層モデルに基づく水平なシルモデルを適用したところ、変動源が南岳～北岳にまたがって広がっており、深さはMogiモデルの場合に比べて深く、体積減少量も倍となった。また、桜島西部や北部の傾斜計でみられた傾斜方向の食い違いが改善した。この結果から、個々の噴火に伴う変動源は、南岳下だけではなく北岳下まで広がっている可能性が示唆される。

一方、このシルモデルでも高免の傾斜変化を説明することができない (Fig. 6)。この桜島北東部付近は、Fig. 7に示すように2011年秋～2012年春をはじめとした中長期的なマグマ貫入期において南東方向の変位が卓越している。今回の南岳爆発でも、中長期的なマグマ貫入期の変位と同様の南東方向に傾斜ベクトルが向いている。桜島北東部では、この方向への地滑り的な変動やブロック変動のような局地的な

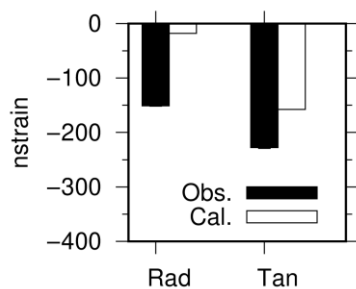
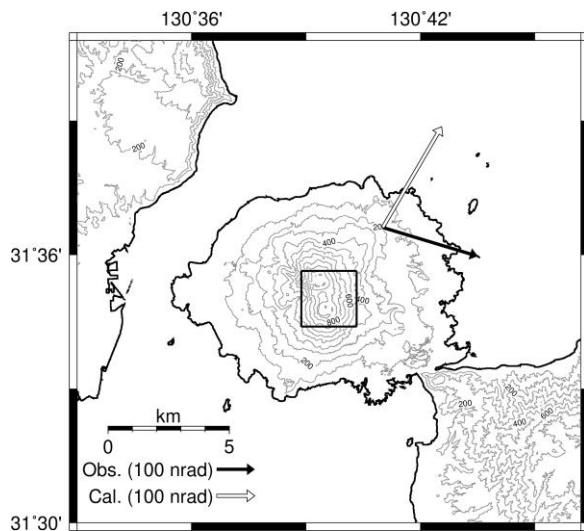


Fig. 6 Comparison of observed and calculated tilt (top) and strain change (bottom) at KMT for the obtained sill model.

変動が生じているのかもしれない。

5. おわりに

本研究では、2017年11月13日南岳爆発に伴う傾斜ひずみ変化を解析し、変動源を推定した。得られた見知は次のとおりである。

- 1) 2017年11月13日の南岳爆発に前駆・付随する膨張・収縮の継続時間は、全体で1週間程度と、これまでの噴火でみられてきたもの比べて長いという特徴がある。
- 2) 個々の噴火に伴う変動源は、南岳下だけでなく北岳下にまで広がっている可能性がある。個々の噴火におけるマグマの移動範囲はこれまで考えられてきた以上に広く分布している可能性があり、今後解析例を増やして検証していくことが重要である。
- 3) 桜島北東部では、南東方向の地滑り的な変動やブロック変動のような局地的な変動が生じているかもしれない。

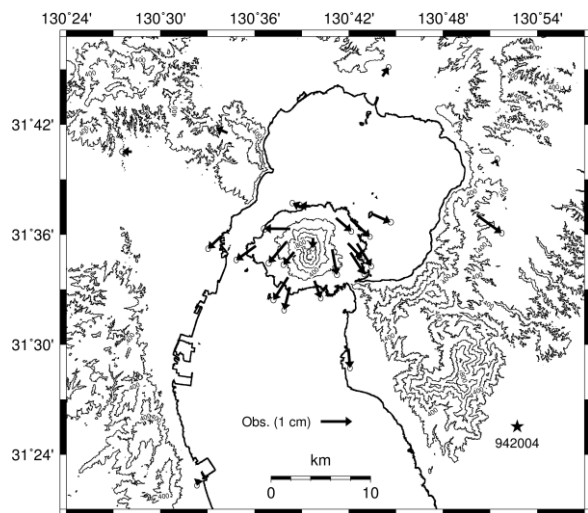


Fig. 7 Horizontal displacement relative to GNSS Earth Observation Network (GEONET) station 942004 (solid star) during the period from October 2011 to March 2012 (Hotta et al., 2016).

謝 辞

本研究では、国土交通省の GEONET データと同九州地方整備局大隅河川国道事務所の有村観測坑道の傾斜ひずみデータ、気象庁の横山・あみだ川ボアホール傾斜計のデータをそれぞれ使用させていただいた。

参考文献

- 堀田耕平・井口正人 (2017) : 2017年3月25日南岳噴火に前後する傾斜ひずみ変化, 日本火山学会2017年秋季大会予稿集, P058.
- Hotta, K., Iguchi, M., Ohkura, T., Yamamoto, K. (2016): Multiple-pressure-source model for ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan – Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data –. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 310, pp. 12-25.
- Iguchi, M. (2016): Method for Real-Time Evaluation of Discharge Rate of Volcanic Ash – Case Study on Intermittent Eruptions at the Sakurajima Volcano, Japan –, *Journal of Disaster Research*, Vol. 11 (2), pp. 4-14.
- Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S., Nakao, S. (2013): Characteristics of Volcanic Activity at Sakurajima Volcano's Showa Crater During the Period 2006 to 2011, *Bulletin of Volcanological Society of Japan*, Vol. 58, pp. 115-135.
- Mogi, K. (1958): Relations between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground

- Surfaces around them. Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 36, pp. 99-134.
- Okada, Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82 (2): pp. 1018-1040.
- Williams, C.A., Wadge, G. (1998) The effects of topography on magma chamber deformation models: Application to Mt. Etna and radar interferometry. Geophysical Research Letters, Vol. 25 (10) 1549-1552.

(論文受理日 : 2018年6月13日)