

始良カルデラ周辺の地盤変動に関する 有限要素法モデルを用いた圧力源形状の検討

Investigation of Pressure Source Geometries Using Finite Element Method for Ground Deformation at Around Aira Caldera

味喜大介・筒井智樹・井口正人

Daisuke MIKI, Tomoki TSUTSUI and Masato IGUCHI

Synopsis

We calculated the ground deformation due to differently shaped rotational ellipsoidal pressure sources beneath the Aira caldera using a FEM model. Deeper horizontal pressure sources seem to be consistent with the observed data, as well as that expected from the Mogi pressure source. However, the variation of residual sum of square is small to decide a certain oblateness value of horizontal pressure sources.

キーワード: 始良カルデラ, 地盤変動, 圧力源形状

Keywords: Aira caldera, ground deformation, pressure source geometries

1. はじめに

鹿児島湾北部に位置する始良カルデラは29 cal ka (奥野, 2002) の巨大噴火によって形成され, 直径約20kmの陥没地形を成している. 現在も活発な火山活動を続ける桜島火山は, 始良カルデラ南部に成長した後カルデラ火山である.

始良カルデラおよび桜島周辺では, GNSSや水準測量などによる地盤変動観測が行われ(例えば江頭ら, 1998a, b; Kriswati and Iguchi, 2003; 井口ら, 2008; Yamamoto et al., 2013; 味喜ら, 2021), それぞれの観測結果から始良カルデラ中央部の深さ10km付近に圧力源の存在が示されている. これらの研究においては圧力源として茂木モデル(Mogi, 1958)を用いている. 味喜ら(2021)は, 2017年から2019年の期間について, 始良カルデラ中央部から概ね60km以内のGNSS観測による水平変位と水準測量による上下変位を用いて桜島南岳直下および始良カルデラ下の2つの茂木圧力源を仮定した圧力源解析を行い, 始良カルデラ中央部の深さ11.2kmに $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ の増圧源, 桜島南岳直下の深さ3.6 kmに $-0.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ の減圧源を得た. 圧力源の体積変化は始良カルデラ下のマグマだまりにおけるマグマの蓄積過程を反映していると

考えられている.

地震学的な研究からは始良カルデラ周辺の地下構造に関する知見が蓄積されつつある. 為栗ら(2022)は始良カルデラ下の深さ15kmに低S波速度領域の存在を明らかにした. また, 始良カルデラ中央部の深さ13.6kmに地震波の反射面の存在が示唆されている(筒井ら, 2021). 一方で, これらの研究では, 深さ10km付近には顕著な低地震波速度領域や反射面はみられず, 地盤変動観測から得られた圧力源の深さとは必ずしも一致しない.

茂木モデルは均質媒質中の球形圧力源を仮定したものであるが, 非球形の圧力源形状や媒質の非均質性を導入することで, 始良カルデラ地下の圧力源モデルを地震学的な地下構造の特徴とより整合性の高いものにするには, 始良カルデラ下におけるマグマの供給・蓄積過程を把握するうえでの課題となっている. また, それにより圧力源における体積変化量の推定精度の向上が期待できる.

今回, 我々は, 始良カルデラ地下に扁平率の異なる回転楕円体圧力源をおいたときの地表の変位を有限要素法を用いて算出し, 圧力源の形状による地盤変動の出現パターンの差異, また観測された地盤変動との整合性について検討した.

2. 有限要素法モデル

有限要素法の計算にはFlexPDE7を用いた。計算領域の大きさは、始良カルデラ中央部 (31°38'58" N, 130°41'58" E) から水平方向に東西南北に60km, 深さ方向に海拔-50kmまでとした。モデル上端の形状は、陸域と鹿児島湾内については既存の地形データ (国土地理院, 2021; 海上保安庁, 2002) を基に作成した地形データ (始良カルデラ周辺で約100mメッシュ、最も遠方では500mメッシュ) を用いそれ以外の領域では海拔0kmとした。節点数は、最大の節点間隔を4 kmとしてFlexPDE7の自動分割機能を使用した結果、試行したモデルによって異なるが2万前後であった。

圧力源として、始良カルデラ下と桜島南岳直下に2つの圧力源を設定した。これらの圧力源の中心の水平位置は味喜ら (2021) で得られた始良カルデラ下 (31°40'03" N, 130°41'04" E, Fig. 1のA) および桜島南岳直下 (31°34'50" N, 130°39'30" E, Fig. 1のS) とした。さらに、桜島南岳直下の圧力源については、中心の深さ3.6km, 半径200 mの球形で体積変化量 $-0.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ として固定し、始良カルデラ下の圧力源を回転軸が鉛直な回転楕円体とした。モデル計算では2つの圧力源表面にある内部圧力から求められる圧力源表面での変位を与え、Hookeの法則に従って地表の変位を算出した。今回行ったモデル計算では、以下に述べる条件下で、始良カルデラ下の圧力源の鉛直半径/水平半径比が異なるいくつかの場合について、FlexPDE7の最適化機能を用いてモデル計算による変位とFig. 1に示した灰色の楕円内の観測値との残差二乗和が最小になる体積変化量を探索した。

まず、媒質としてポアソン比 0.25, 剛性率 30 Gpaの均質弾性体を仮定したモデル計算を試みた。始良カルデラ下の圧力源の深さを味喜ら (2021) で得られた11.2km, 水平半径を500mとし、鉛直半径/水平半径比が異なるいくつかの場合についてモデル計算を行った (以下では試行1と呼ぶ)。

次に、始良カルデラ下の深さ13.6kmに地震波の反射面が存在する (筒井ら, 2021) こと、また、始良カルデラ下のS波低速度域が深さ10kmにはみられず、深さ15kmの広い領域に存在する (為栗ら, 2022) を考慮して、始良カルデラ下の圧力源の上面を深さ13.6kmに固定し、水平半径を2000m, 6000mとした。

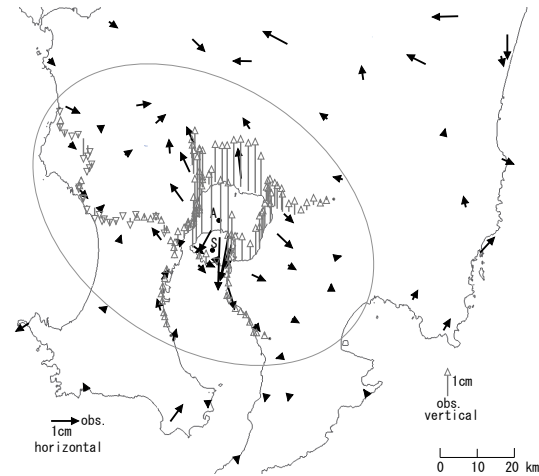


Fig. 1 Ground deformation around Aira caldera during 2017 – 2019 (after Miki et al., 2021). black arrow: horizontal displacement from GNSS observation, gray arrow: vertical displacement from leveling survey (Kyushu Electric Power Co., Inc., 2020), A, S: location of Mogi sources

また、媒質に地震波速度構造 (Ono et al., 1978) を参考に深さにより剛性率の異なる水平成層構造 (Table 1) を導入した。ここでも、鉛直半径/水平半径比が異なるいくつかの場合についてモデル計算を試行した (以下では試行2と呼ぶ)。

3. 結果

Fig. 2に試行1における地表変位の計算結果の例を示す。水平変位, 上下変位ともに、始良カルデラ下の圧力源の鉛直半径/水平半径比が小さいほど最大の変位量が大きく、変位のおよぶ範囲が狭い傾向が認められる。圧力源形状が球形の場合の地表変位の出現パターンおよび圧力源の体積変化量は茂木モデルの解析解 (味喜ら, 2021) とよく一致する。圧力源形状が上下方向に小さい扁平な形状の場合は、残差二乗和, 圧力源の体積変化とも球形の場合よりやや小さい値をとり、圧力源形状が球形から縦長になるにつれて残差二乗和, 圧力源の体積変化ともに大きくなるのがわかった。

試行2でも試行1と同様に始良カルデラ下の圧力源の鉛直半径/水平半径比が小さいほど変位のおよぶ

Table 1 Modulus of rigidity used in FEM models.

Depth (km)	<0	0-4	4-8	8-12	12-	16-	20-	24-	28-	32-	36-	>40
Modulus of rigidity (GPa)	12.7	18.5	27.1	29.1	32.1	34.7	37.5	40.3	43.3	46.4	49.7	58.5

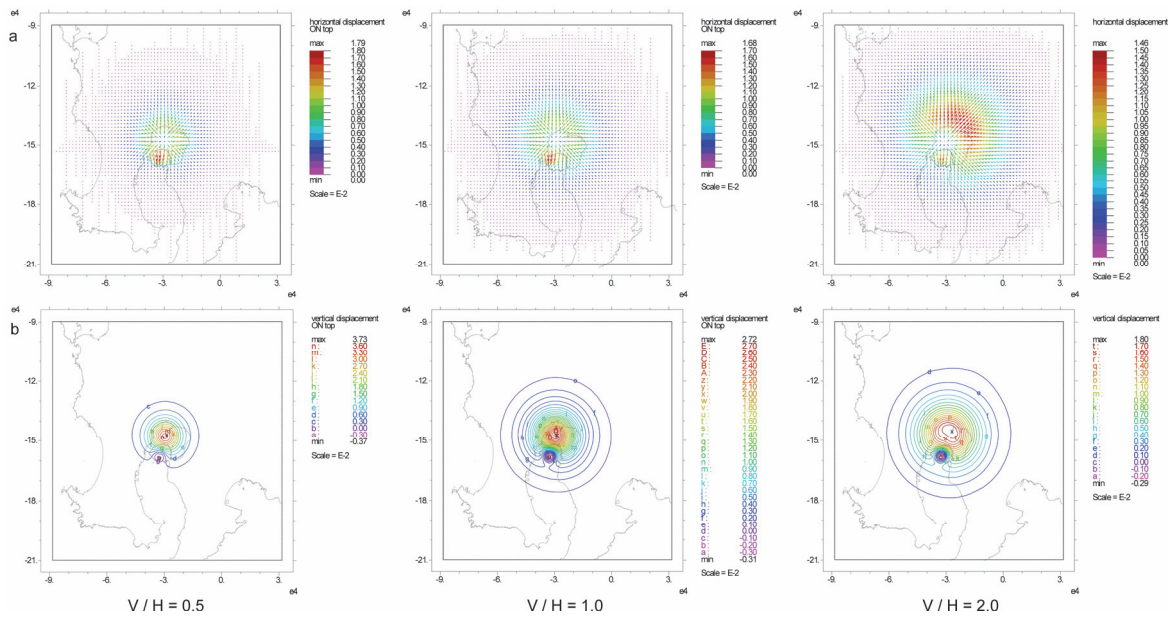


Fig. 2 Examples of Ground deformation calculated by FEM model assuming isotropic medium. horizontal (a) and vertical (b) displacement, b: vertical displacement. vertical/horizontal ratios of radius of pressure source ellipsoid are 0.5 (left), 1.0 (center), 2.0 (right).

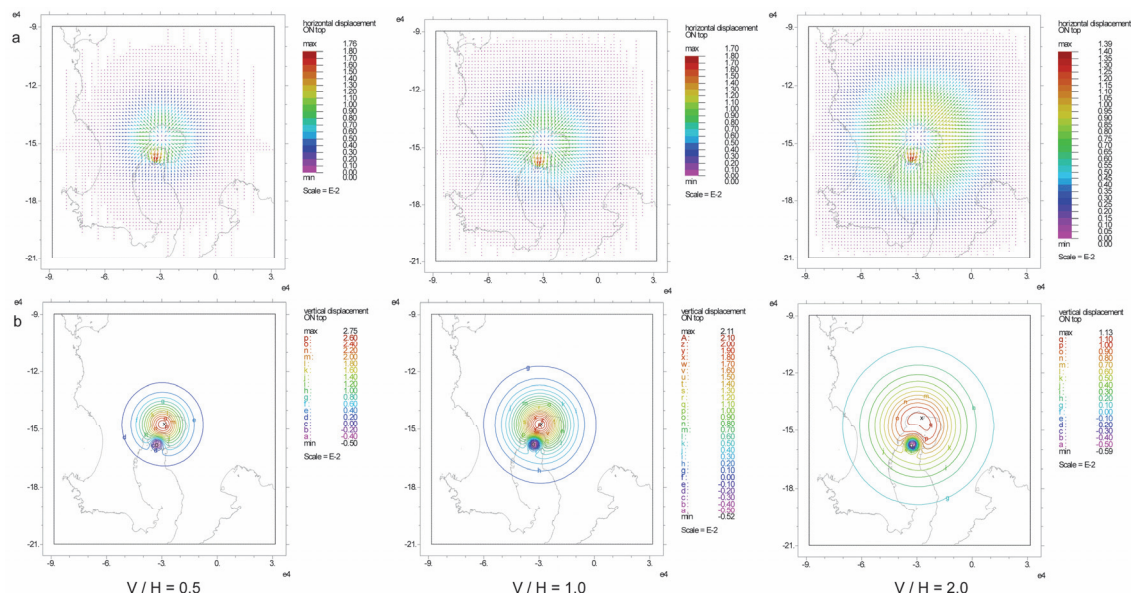


Fig. 3 Examples of Ground deformation calculated by FEM model assuming stratified medium. horizontal (a) and vertical (b) displacement. oblateness (vertical/horizontal ratio of radius) of pressure source ellipsoid are 0.5 (left), 1.0 (center), 2.0 (right) .

範囲が小さい傾向が認められる (Fig. 3) . Fig. 3は圧力源の水平半径を2000mとした時の例であるが、圧力源の水平半径が6000mの場合も同様の傾向を示した。

Fig. 4は圧力源の水平半径を2000mとしたときの、地盤変動観測点の変位の計算値と観測値を始良カルデラ下の圧力源の中心からの水平距離を横軸にとって比較したものである。水平変位、上下変位ともに、

始良カルデラ下の圧力源の形状が扁平であるほうが全体として変位の変化のパターンが観測値に近づく傾向が見られる。特に、上下変位において、桜島北岸部 (圧力源からの距離が8km程度以内) の観測点で圧力源形状が球形から縦長になるほど計算値と観測値との差が大きい。

このような特徴は、圧力源の鉛直半径/水平半径比に対する計算値と観測値の残差二乗和の変化 (Fig.

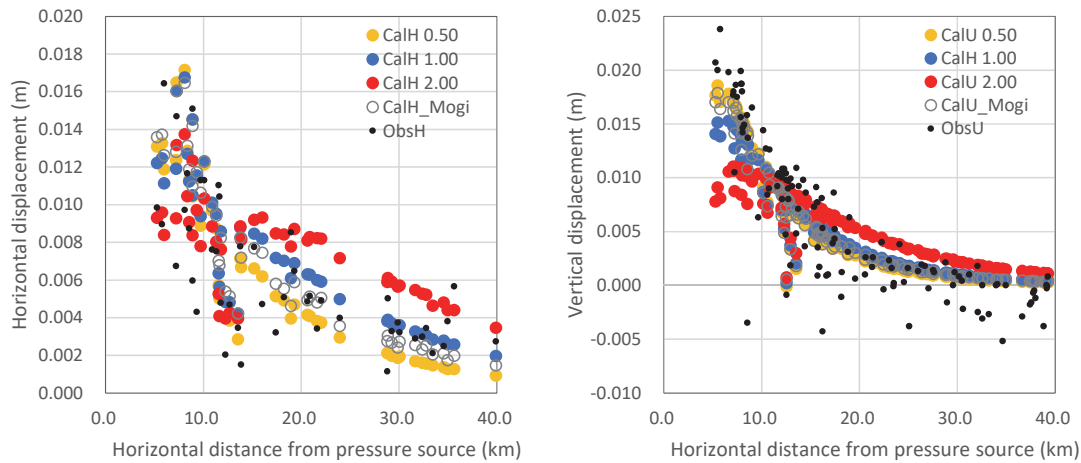


Fig. 4 Comparison of ground deformation at GNSS stations and levelling benchmarks among that calculated by FEM models assuming stratified medium and observed.

horizontal (left) and vertical (right) displacement are shown by dots (observed) and colored circles (FEM Model). Displacement values calculated from Mogi model (white circles) are also shown.

5 右図) にも反映されている。圧力源の形状が縦長から扁平になるにしたがって残差二乗和は小さくなり、鉛直半径／水平半径比が0.5より小さい領域では茂木モデルの解析解から得られたものよりやや小さい概ね一定の値をとる。残差二乗和が最小になる時の圧力源の体積変化量 (Fig. 5 左図) も、圧力源の形状が縦長から扁平になるにしたがって小さくなり、鉛直半径／水平半径比が0.5より小さい領域で概ね一定になることは同様であるが、その値は茂木モデルの解析解から得られたものより2割程度小さい。Fig.5は圧力源の水平半径を2000mとした時の例であるが、圧力源の水平半径を6000mとした場合は、圧力

源の体積変化量は、鉛直半径／水平半径比が0.5より小さい領域で茂木モデルの解析解から得られたものとはほぼ同じかやや小さい値になった。

4. 考察

回転楕円体圧力源による地表変位を有限要素法で計算した結果は、圧力源形状が鉛直半径の短い扁平な形状をとるほど地表に変位のおよぶ範囲が狭くなることを示した。このような地表変位の出現パターンは、圧力源の深さや水平半径の異なる試行1と試行2いずれでも同様に認められることから、回転楕円体

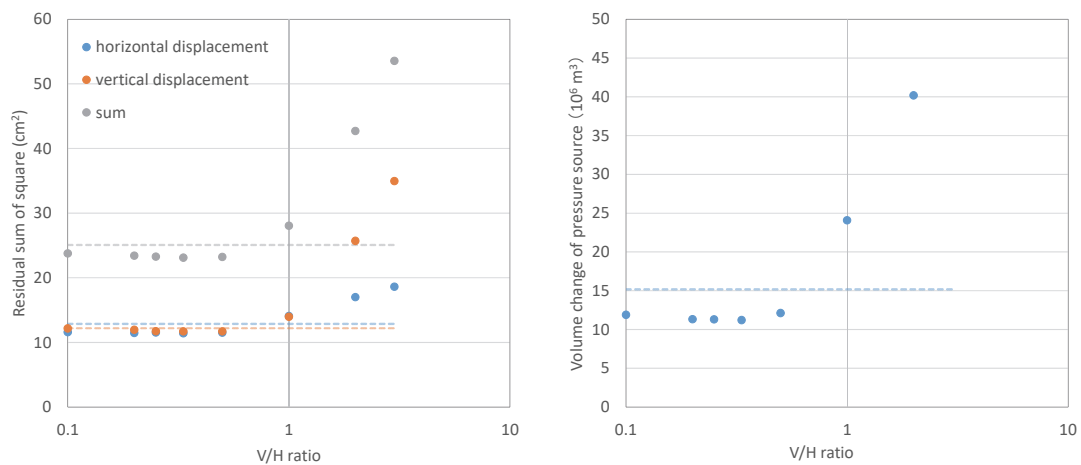


Fig. 5 Residual sum of square (left) and volume change (right) of pressure source beneath Aira caldera, vs oblateness of pressure source, calculated by FEM model. Dashed lines are value from Mogi model (Miki et al., 2021).

圧力源による地表変位の一般的な特徴を表していると考えられる。計算された地表変位とGNSS観測および水準測量による観測値の残差は圧力源が扁平な形状の場合のほうが小さくなることがわかった。このことから、圧力源形状が縦長や球形よりも扁平であるほうが観測値をよりよく説明できるといえる。また、試行2のモデルは地震学的な知見を考慮して茂木モデルから推定されるよりも深い位置に圧力源を設けたものであるが、このようなモデルでも圧力源形状を扁平とすると、地表の地盤変動を茂木モデルと同程度には観測値を説明できることがわかった。

しかし、鉛直半径／水平半径比が0.5より小さいときの地表変位の計算値と観測値の残差二乗和の変化はわずかで、残差二乗和の値から最適な鉛直半径／水平半径比を決定することは難しい。これは、圧力源に近く地表変位が大きいと考えられる領域が海域であるために地盤変動観測点が存在しないことも要因になっていると考えられる。原子力施設等防災対策等委託費（火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究）において設置を予定している海底地盤変動観測装置から得られる観測データはこの問題に寄与することが期待される。

試行2の圧力源の水平半径を2000mとした場合と6000mとした場合では、残差二乗和を最小にする圧力源の体積変化量は圧力源が扁平な時に概ね一定となることは共通しているが、その値は圧力源の水平半径が2000mの場合と6000mの場合ではやや異なる。始良カルデラ下のマグマの蓄積の状況をより精密に把握するには、さらに位置や形状の異なる圧力源についても検討を進める必要がある。

5. まとめ

ここまで述べたことをまとめると以下ようになる。

始良カルデラ地下に縦横比の異なる回転楕円体圧力源をおいたときの地表の変位量を有限要素法によって算出した。

モデルから予測される地表変位は、圧力源形状が縦長から扁平になると、最大の変位量が大きく、変動の及ぶ範囲が狭くなる。

計算値と観測値の残差二乗和は、圧力源形状が縦長や球形よりも扁平な時のほうが小さくなり、茂木モデルから期待されるより深い位置に扁平な圧力源を仮定したモデルは、茂木モデルと同程度に観測値と合致する。

圧力源の鉛直半径／水平半径比が0.5程度より小さい領域では残差二乗和の変化はわずかで、残差二乗和だけから最適な縦横比を判断することは現状で

は難しい。今後、設置予定の海底地盤変動観測装置から得られる観測データはこの問題に寄与することが期待される。

残差二乗和を最小にする始良カルデラ下の圧力源の体積変化量は、圧力源形状が扁平になるにつれて減少し、圧力源の鉛直半径／水平半径比が0.5程度より小さく領域で概ね一定になるが、圧力源の大きさによって異なる値をとる。今後さらに位置や形状の異なる圧力源についても検討を進める必要がある。

謝 辞

本稿は、令和3年度原子力施設等防災対策等委託費（火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究）の成果の一部です。また、水準測量データは国土地理院九州地方測量部公共測量成果（九州電力株式会社）を使用しました。記して感謝いたします。

参考文献

- 井口正人・高山鐵朗・山崎友也・多田光宏・鈴木敦生・植木貞人・太田雄策・中尾茂・前野直・長尾潤・馬場幸二・大重吉輝・放生会正美(2008)：桜島および始良カルデラ周辺におけるGPS観測，第10回桜島火山の集中総合観測，pp. 53-62.
- 江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・Muhamad Hendrasto・味喜大介・園田忠臣・木股文昭・宮島力雄・松島健・内田和也・八木原寛・王彦賓・小林和典（1998a）：桜島火山周辺における水準測量結果について—1991年12月～1996年10月—，第9回桜島火山の集中総合観測，pp. 15-29.
- 江頭庸夫・高山鐵朗・園田忠惟・山本圭吾（1998b）：桜島火山周辺における光波測量結果—1992年1月～1996年12月—，第9回桜島火山の集中総合観測，pp. 31-37.
- 奥野充（2002）：南九州に分布する最近3万年間のテフラの年代学的研究，第四紀研究，Vol. 41，pp.225-236.
- 海上保安庁（2002）：「沿岸の海の基本図」シェープファイル，販売元：(財)日本水路協会海洋情報研究センター。
- 九州電力株式会社（2020）：国土地理院九州地方測量部公共測量成果，令1九公第268号。
- 国土地理院（2021）数値標高モデル(10mメッシュ)，国土地理院ホームページ，URL: <https://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>
- 為栗健・八木原寛・筒井智樹・井口正人（2022）：高分解能な3次元速度構造解析による始良カルデラ下

- のイメージング, 火山, 第67巻, pp. 69-76.
- 筒井智樹・為栗健・井口正人 (2021) : 人工地震記録による始良カルデラ西部の地殻内S波地震反射面の推定, 火山, 第66巻, pp. 71-81.
- 味喜大介・筒井智樹・井口正人 (2021) : GNSS観測による始良カルデラ下へのマグマ供給率の推定, 京都大学防災研究所年報, 第64号B, pp. 101-107.
- Kriswati, E. and Iguchi, M. (2003): Inflation of the Aira caldera prior to the 1999 eruptive activity at Sakurajima volcano detected by GPS network in south Kyushu. *Ann. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 46B, pp. 817-826.
- Mogi, K. (1958): Relation between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, Vol. 38, pp. 99-134.
- Ono, K., Ito, K., Hasegawa, I., Ichikawa, K., Iizuka, S., Kakuta, T., and Suzuki, H. (1978): Explosion Seismic Studies in South Kyushu Especially Around the Sakurajima Volcano, *J. Phys. Earth*, 26, Supplement, S309 - S319.
- Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K., Nakamoto, M. (2013): Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996 - 2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol. 58, pp. 137-151.

(論文受理日 : 2022年8月31日)