

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（続報）

Investigation of a Ground Deformation Model With a Pressure Source Resembling the Shape of the Low S-wave Velocity Region Beneath the Aira Caldera

味喜大介・筒井智樹・井口正人⁽¹⁾

Daisuke MIKI, Tomoki TSUTSUI and Masato IGUCHI⁽¹⁾

(1) 鹿児島市

(1) Kagoshima City

Synopsis

We calculated the ground deformation due to a polyhedron pressure source resembling the geometry of the low S-wave velocity region beneath the Aira caldera, using a FEM model. This model is considered to be more compatible with recent seismological findings than conventional models such as the Mogi model. Calculated displacements are consistent with GPS and leveling survey observations as well as would be expected from the Mogi model. The area of crustal deformation is narrower when the pressure source has a vertical shape. On the other hand, the estimated magma supply to the Aira caldera, using the polyhedral pressure source model, is 10-20% larger than that assuming the Mogi model.

キーワード: 始良カルデラ, 地盤変動, 圧力源形状, 低S波速度領域

Keywords: Aira caldera, ground deformation, pressure source geometries, low Vs region

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20 km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), 茂木モデル (Mogi, 1958) を用いた圧力源解析の結果, 始良カルデラ中央部の深さ数 kmから10数 kmに圧力源の存在が示されている. 味喜ら (2021) は, 2017年から2019年の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11.2 km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.

一方, 最近の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) は地震波トモグラフィーから始良カルデラ下の深さ15 kmに低S波速度領域の存在を明らかにし, その領域にメルトの存在を示唆した. また, 始良カルデラ中央部の深さ13.6 kmに地震波の反射面の存在が示されている (筒井ら, 2021). これらの研究では, 茂木モデルによる圧力源の存在する深さ10 km付近には顕著な低地震波速度領域や反射面はみられない.

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

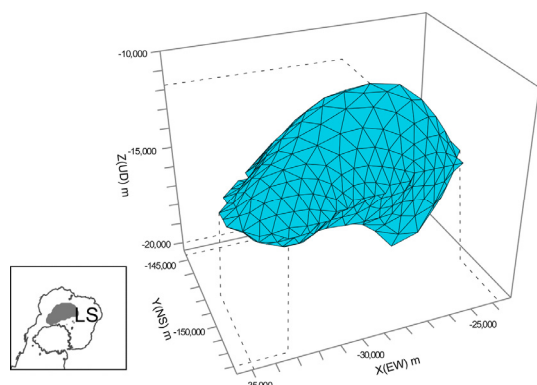


Fig. 1 A pressure source beneath Aira caldera used in ground deformation model.

地盤変動モデルにおいて、圧力源の位置や形状を現実的なマグマだまりのイメージに近づけることは、始良カルデラ地下におけるマグマの供給・蓄積量をより精密に推定するうえでの課題となっている。これまでに我々は、地震学的にメルトの存在が示唆される深さ15 km付近に水平方向に長軸をもつ扁平な回転楕円体圧力源によっても観測された地表変位を説明できることを示した(味喜ら, 2022)。さらに、味喜ら(2023)は、圧力源モデルを地震学的なマグマだまりのイメージにより近づけるため、為栗ら(2022)が示した低S波速度領域の形状を模した多面体を始良カルデラ下の地盤変動圧力源としたモデル計算を行い、2017年から2019年に観測された地表変位を説明可能であることを示した。本稿では、2019年11月以降に観測された地表変位を用いて味喜ら(2023)と同様のモデル計算を行った結果を報告する。

2. 有限要素法モデル

有限要素法の計算にはFlexPDE7(米国PDE Solution社)を用いた。計算領域は、水平方向に始良カルデラ中央部から東西南北にそれぞれ60 km(図1左下図の範囲)、深さ方向は海拔-50 km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地形データ(国土地理院, 2021; 海上保安庁, 2002)を用いそれ以外の領域では海拔0 kmとした。媒質には、地震波速度構造(Onoら, 1978)を参考に深さにより剛性率の異なる水平成層構造を用いた(Table 1)。

始良カルデラ下の圧力源(以下、LS)には、為栗ら(2022)の深さ10, 15および20 kmのS波速度を按

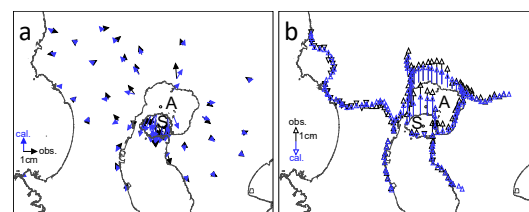


Fig. 2 Ground deformation around Aira caldera during 2019 – 2022 (black arrow), shown with calculated value using Mogi model (blue arrow). black arrow: horizontal displacement from GNSS observation, gray arrow: vertical displacement from leveling survey (Kyushu Electric Power Co., Inc., 2020), A, S: location of Mogi sources

分して2.45 km/s以下の領域を抽出し、極端な凹凸を平滑化した多面体(Fig. 1)を用いた。圧力源LSの体積は約190 km³になる。また桜島南岳直下の深さ7.8 kmに半径200 mの球形で体積変化量 -4.0×10^6 m³の圧力源(以下、S)をおいた。圧力源Sの位置および体積変化量は次に述べる茂木モデルによる圧力源解析で得られたものと同じである。

有限要素法の計算では、これらの圧力源の表面にある内部圧力を与え、Hookeの法則に従って節点の変位を算出した。そのうえで、FlexPDE7の最適化機能を用いてモデル計算による地表の変位と観測値の残差二乗和が最小になる圧力源LSの内部圧力を探索し、その時の体積変化量と地表変位を求めた。観測値は、2019年11月から2022年11月までのGNSS測位による水平変位60点と水準測量による鉛直変位126点(九州電力株式会社, 2023)を用いた(Fig. 2)。この観測値を用いて味喜ら(2021)と同様に2圧力源茂木モデルによる圧力源解析を行ったところ、位置を固定しない圧力源(以下、A)は始良カルデラ中央部(Fig. 2のA)の深さ11.7 km、体積変化量 15.7×10^6 m³に求められた。圧力源Aの水平位置は圧力源LSの中央部に近い。

3. 結果と考察

圧力源LSを用いたモデル(以下、LSモデル)によって計算された地表変位をFig. 3に示す。桜島南部に圧力源Sの影響が認められるが、全体的には水平変位・上下変位ともに始良カルデラ近傍では等値線が

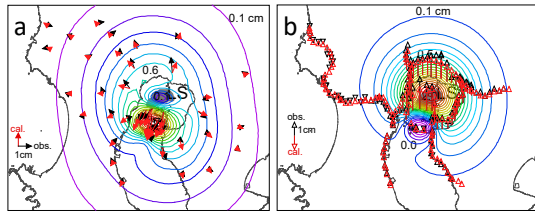


Fig. 3 Horizontal (a) and vertical (b) displacements on ground surface.

black arrows: observed; red arrows and contour lined: calculated by LS model.

やや東西につぶれた形状を示す。

モデル計算値 (図3の赤矢印) の観測値 (図3の黒矢印) に対する二乗平均平方根残差はLSモデルが水平変位について5.0mm, 上下変位について2.8mmであり, 茂木モデルから得られた水平変位について4.2mm, 上下変位について2.3mmとほとんど異ならず, 2019年11月以降の観測期間についても観測値を概ね再現できることがわかった。また, 圧力源LSの体積変化量は $18.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ と求められ茂木モデルから推定される $15.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ より約20%大きい。

Fig. 4は, 観測点におけるLSモデルおよび茂木モデルの予測値の差を示したもので, 赤い点はLSモデルのほうが観測値との残差が小さいことを示す。全体としてモデル間の予測値の差は数mm程度で小さく, LSモデルから得られた地盤変動観測点における予測変位は, 茂木モデルによるものと類似しているが, 始良カルデラ周縁部の上下変位ではLSモデルの残差が茂木モデルより小さい傾向が顕著で, カルデラの南北方向と東西方向で変位量が異なることがよく再現されている。

このように, 地震学的にメルトの存在が示唆される領域の位置や形状を模した圧力源を用いたLSモデルは, 味喜ら (2023) と異なる観測期間においても始良カルデラ周辺の地盤変動を茂木モデルと同程度に再現可能であることがわかった。今後, 媒質の物性にも最近の地震学的な知見を反映させるなどの形で圧力源モデルをより現実的なものにする試み続ける必要がある。

4. 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。

始良カルデラ地下の地盤変動圧力源モデルを最近の地震学的知見とより整合性の高いものにする試みとして, 低S波速度領域の形状を模した多面体圧力源 (LS) をおいたときの地表の変位量を有限要素法を用いて算出し, 2019年11月~2022年11月の観測値

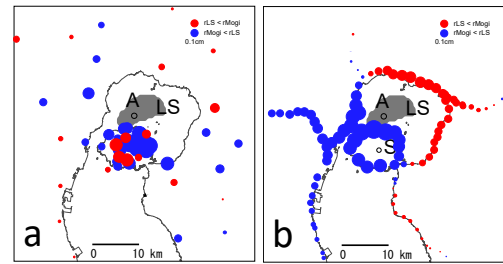


Fig. 4 Differences of residual between LS and Mogi models. Horizontal (a) and vertical (b) displacements are shown.

LS, A, S.: location of pressure sources.

および茂木モデルによる予測値と比較した。

このモデルから予測される地表変位は茂木モデルによるものと類似しているが, 始良カルデラ周縁部, 特に鹿児島湾北岸および東岸の上下変位は茂木モデルによる計算値より観測値に近い。

圧力源LSの体積変化量は茂木モデルより20%程度大きい。

謝 辞

本稿は, 令和5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・園田忠臣・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 (2023) 国土地理院九州地方測量部公共測量成果, 令4九公第430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.
- 味喜大介・筒井智樹・井口正人 (2022): 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, 京都大学防災研究所年報, 第65号B, pp. 42-47.
- 味喜大介・筒井智樹・井口正人 (2023): 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 (続報), 京都大学防災研究所年報, 第66号B, pp. 96-99.
- 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: 2024年8月30日)