

## 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 Pressure Source Geometries Using Finite Element Method for Ground Deformation at Around Aira Caldera II

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 a polyhedron pressure source, resembling the shape of the low S-wave velocity region beneath 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. The ground surface displacements obtained by the model calculation were in good agreement with the observed values.

**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.

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). 今回, 圧力源形状をより地震学的なマグマだまりのイメージに近づけるため, 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ったので報告する.

#### 2. 有限要素法モデル

有限要素法の計算にはFlexPDE7(米国PDE Solution

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

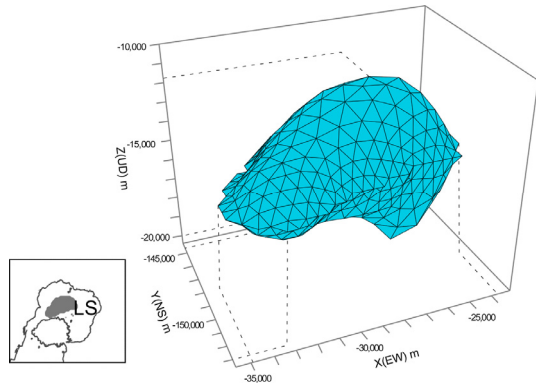


Fig. 1 A pressure source beneath Aira caldera used in ground deformation model.

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 km<sup>3</sup>になる。また桜島南岳直下の深さ3.6 kmに半径200 mの球形で体積変化量-0.8×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>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味喜ら (2021) で得られた茂木圧力源と同じである。

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

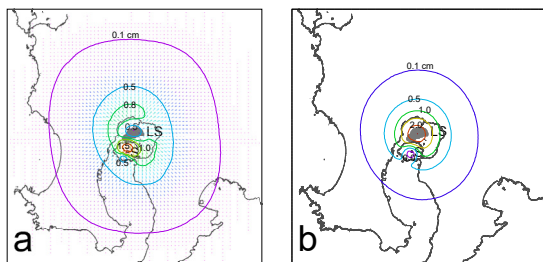


Fig. 3 Horizontal (a) and vertical (b) displacements on ground surface calculated by FEM model. LS, S: location of pressure sources.

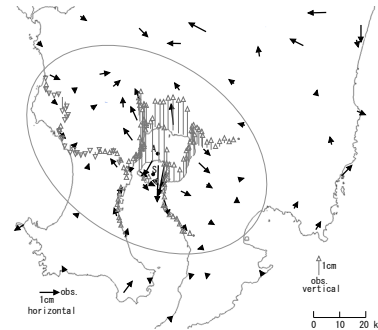


Fig. 2 Ground deformation around Aira caldera during 2017 – 2019 (after Miki et al., 2021).

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

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、味喜ら (2021) で用いたものと同じ、2017年から2019年までのGNSS測位による水平変位49点と水準測量による鉛直変位130点 (九州電力株式会社, 2020) を用いた (Fig. 2の楕円で囲んだ範囲内)。

### 3. 結果と考察

上記の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・上下変位ともに等値線が同心円に近い形状を示す。同心円の中心の水平位置は味喜ら (2021) による茂木圧力源の位置 (Fig. 2のA)

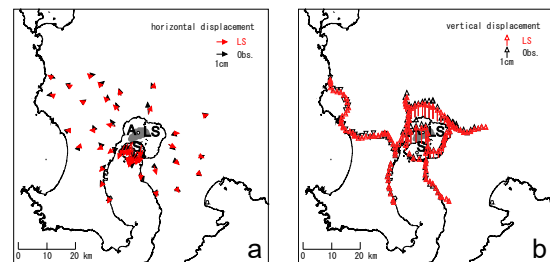


Fig. 4 Comparison between calculated and observed ground deformation. Horizontal (a) and vertical (b) displacements are shown.

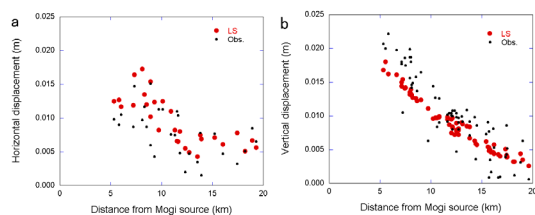


Fig. 5 Calculated and observed ground deformation plotted versus distance from Mogi pressure source (A in Fig. 2). Horizontal (a) and vertical (b) displacements are shown.

とほぼ一致するが、茂木モデルによる予測変位の等値線が円形であるのに対し今回のモデルではやや南北に伸びた形になっている。

地盤変動観測点におけるモデル計算で得られた地表変位の計算値と観測値の比較をFig. 4に示す。水平変位・上下変位ともに計算値と観測値はおおむね合致している。計算値と観測値の残差二乗和は、味喜ら（2021）の茂木モデルによる圧力源解析とほぼ同じ値をとる。圧力源の体積変化量は、 $18.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ と求められ、茂木モデルから推定されるものより2割程度大きい。

Fig. 5は、始良カルデラ中央部から約20 km以内の地盤変動観測点について、地表変位のモデル計算値と観測値を茂木モデルによる圧力源（Fig. 2のA）からの距離に対してプロットしたものである。ただし、圧力源Sの影響が大きい桜島南岳近傍の観測点は除いて示した。水平変位、上下変位ともにモデル計算値は観測値の距離に対する出現パターンを概ね再現できていることがわかる。特に上下変位において、始良カルデラ縁近傍に相当する距離12 kmから15 km付近では、モデル計算値に全体的な変化のトレンドに沿うものとそれよりやや大きい別のトレンドがみられるが、同様の傾向が観測値にも認められる。これは圧力源が球体や回転楕円体のように軸対象でないことの効果と考えられる。使用した観測点全体の残差二乗和は $54 \text{ cm}^2$ と味喜ら（2021）が同じ観測データから茂木モデルによる圧力源解析を行ったものと同程度ではあるが、上記のように今回のモデルは圧力源近傍の地表変位をより正確に再現できる可能性がある。

今回のモデル計算は、始良カルデラ下において地震学的にメルトの存在が指摘されている領域全体が圧力源として作用することを想定したものであり、地震学的なマグマだまりのイメージとの乖離は小さいと言える。これまで述べたように、そのようなモデルにおいても地表変位の観測結果を説明可能であることが示された、

圧力源の体積変化量は茂木モデルを仮定した場合

より大きく見積もられた。これはLS圧力源が茂木モデルによる圧力源よりも深い位置にあることの効果だと考えられる。

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を続ける必要がある。

#### 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、始良カルデラ下の低S波速度領域の形状を模した多面体圧力源（LS）を設け、その全体が圧力源として作用したときの地表の変位量を有限要素法モデルによって算出した。

このモデルから予測される地表変位は、観測された地表変位と概ね一致し、始良カルデラ周縁部においては非軸対象な変位の出現パターンを再現することができた。これはこのような圧力源モデルによって始良カルデラ周辺の地盤変動を説明可能であることを示す。

圧力源LSの体積変化量は茂木モデルによる推定値より20%程度大きい

#### 謝 辞

本稿は、令和4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.
- 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.
- 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 : 2023年8月31日)