

GNSS観測による始良カルデラ下へのマグマ供給率の推定

Estimate of Magma Supply Rate Beneath Aira Caldera, Kyushu, Japan; Inferred from GNSS Observation

味喜大介・筒井智樹・井口正人

Daisuke MIKI, Tomoki TSUTSUI and Masato IGUCHI

Synopsis

We applied a composite analysis of spherical pressure source at around Aira caldera, Kyushu Japan. Horizontal displacements obtained from GNSS observations and vertical displacements from leveling survey, during 2017 to 2019, were used for the analysis. A volume increase source of $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ was estimated at a depth of 11.2 km near the central part of Aira Caldera. The volume change during the last 10 years was calculated based on the location of the source and change in horizontal distance of a baseline which crosses the central part of Aira caldera. The amount of magma supplied to Aira caldera was estimated by adding the amount of volcanic ash ejected from Sakurajima volcano, to volume change of pressure source. Estimated magma supply during the last 10 years are $70 \times 10^6 \text{ m}^3$ and $93 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectively, assuming equivalent densities of 2.5 g/cm^3 and 1.0 g/cm^3 . The average magma supply rate is close to the $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ obtained in previous studies. This suggests that the magma reservoir beneath Aira caldera has been stable for a long period and magma supply to the reservoir has continued up to the present.

キーワード: 始良カルデラ, GNSS, マグマ供給率

Keywords: Aira caldera, GNSS, magma supply rate

1. はじめに

始良カルデラは29 cal ka (奥野, 2002) に起こった巨大噴火によって形成されたカルデラで, 鹿児島湾北部に位置し, 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, それぞれの観測結果から始良カルデラ中央部の深さ10km付近に茂木モデル (Mogi, 1958) による圧力源が示されて (例えば江頭ら, 1998a, b; Kriswati and Iguchi, 2003; 井口ら, 2008; Yamamoto et al., 2013) あり, 桜島火山への主なマグマの供給源となるマグマだまりの存在が考えられている. これらの研究では, 観測点は始良カルデラ中央部から概ね20km以内に分布して

おり, GNSSや水準測量などの単独の観測手法の結果を用いて圧力源解析が行われている.

桜島火山の活動と密接に関連すると考えられる始良カルデラ下のマグマだまりにおけるマグマの供給, 蓄積および移動の状況の変化は, 周辺の地盤変動に反映されると考えられる. 始良カルデラ周辺の地盤変動をより詳細に把握するため, 近年, 我々は, 始良カルデラ周辺の比較的広い範囲においてGNSS観測網の拡充を進めている. 今回, 我々は, より広範囲のGNSS測位による水平変位と, 同時期に実施された水準測量による上下変位を統合する形で茂木モデルを用いた圧力源解析を行い, 圧力源における体積変化を見積もった. また, 得られた圧力源の位置を用いて, 始良カルデラを東西に横切るGNSS基線長の変化から最近10年間の圧力源における体積変化を見積もり, それに桜島から放出された火山灰量を加える

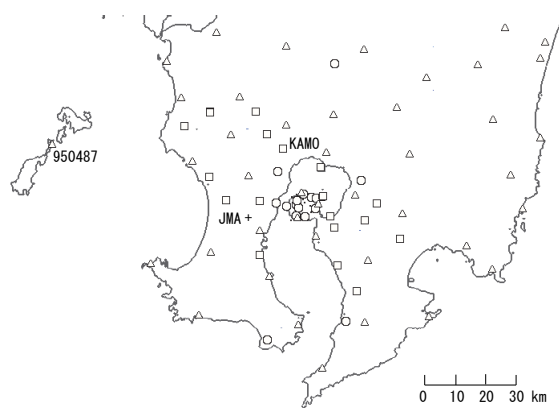


Fig. 1 Distribution of GNSS stations. Stations belonging to Kyoto Univ. (circles, squares and dots) and GSI (triangles). +: Kagoshima Meteorological Office, JMA

ことで始良カルデラ下へのマグマ供給量を推定した。

2. 始良カルデラ周辺の地盤変動

2.1 GNSS基線解析と気象補正

水平変位を求めるために使用したGNSS観測データは、京都大学が展開するGNSS観測点52点と始良カルデラ中央部から概ね60km以内に位置する国土地理院の電子基準点43点 (Fig. 1) において、2017年1月1日から2019年12月31日の間に得られた、観測期間が2年を超えるものである。これらについて、始良カルデラ中央部から西方約90kmに位置する電子基準点950487を固定点として各観測点を結ぶ基線解析を行い、各観測点の日毎の位置を決定した。基線解析にはLeica Geo Office ソフトウェアを使用した。基線解析は、精密歴使用、GPS L1およびL2のみ使用、30秒サンプリング、カットオフ角15°、電離層モデル・対流圏モデルとも”computed model”，という条件で行っ

た。

基線解析で得られた各観測点の日々の位置から、平均値から10cm以上も異なるような極端な値を除外した上で、さらに2 σ フィルターによって外れ値を除外した。外れ値を除いた後の観測点の日々の位置に対して、水蒸気圧を用いた気象補正 (斎藤・井口, 2006) を適用した。補正には鹿児島地方気象台 (Fig. 1の+) における水蒸気圧の1日値 (気象庁, 2021) を用いた。Fig. 2はKAMO観測点 (位置はFig. 1を参照) の例を示したもので、補正前の位置の東西成分と上下成分は、水蒸気圧との間に直線的な関係が認められ (fig. 2a), 季節変動を示している (fig. 2b) が、Fig. 2cにみられるように、補正によって、季節変動は概ね解消し、観測点の位置は時間に対して直線的に変化している。

2.2 水平変位の算出とテクトニックな変動および霧島火山の影響の補正

気象補正後の各観測点の水平位置は時間に対して直線的な変化を示したことから、水平位置の時間変化の傾きを求め、2017年1月1日から2019年12月31日までの3年間の水平変位に換算した。

得られた水平変位をFig. 3の黒矢印に示した。なお、Fig. 3においては見やすさのため桜島内の一部の観測点を省略して表示している (以下の図も同様)。Fig. 3の水平変位をみると、南九州が反時計回りに回転するような変動が卓越しており、これは渡部・田部井 (2004)やTakayama and Yoshida (2007)が指摘したようなテクトニックな定常的変動によるものと考えられる。それでも霧島火山や始良カルデラおよび桜島の近傍では、周辺と異なる傾向がみられ、火山性地盤変動を反映していると考えられる。

始良カルデラ周辺の火山性地盤変動を検出するにはそれ以外の要因による変動を補正する必要がある。Takayama and Yoshida (2007) は水平変位の南北および東西成分を、それぞれ緯度および経度の2次多項式

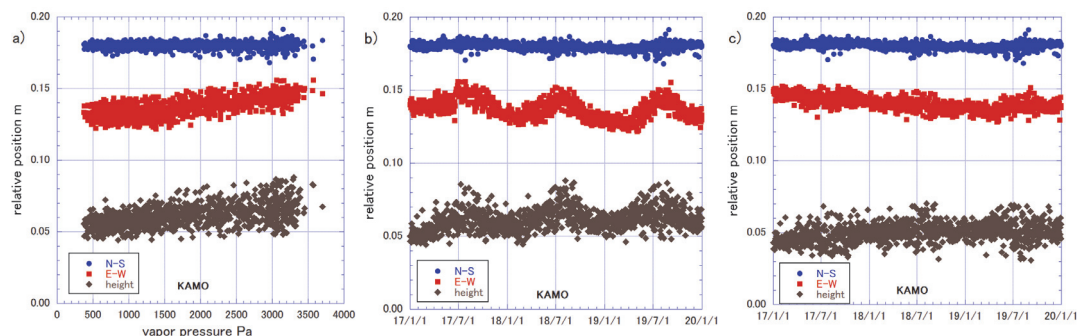


Fig. 2 An example of atmospheric correction.

a: relation between uncorrected position and vapor pressure; b, c: time variation of uncorrected and corrected position, respectively.

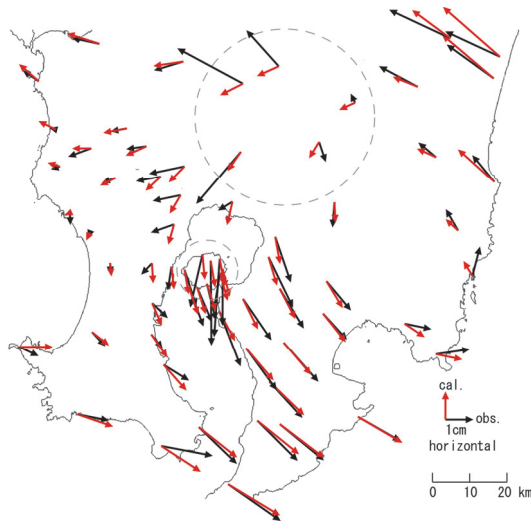


Fig. 3 Horizontal displacement of GNSS stations. black arrow: Observed, red arrow: expected from tectonic model.

で表現した．ここでは，変位の南北および東西成分 (T_x , T_y) を，緯度および経度の固定点（電子基準点 950487）との差 ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$) の3次多項式，

$$T_x = \sum_{n=1}^3 (a_{1n}\Delta\phi^n + b_{1n}\Delta\lambda^n) + c_1$$

$$T_y = \sum_{n=1}^3 (a_{2n}\Delta\phi^n + b_{2n}\Delta\lambda^n) + c_2$$

に近似することでテクトニックな定常的変動（Fig. 3の赤矢印）を求めた．近似の際，火山性地殻変動の影響が強いと考えられる霧島周辺および桜島内（Fig. 3の点線内）の観測点は除いた．

Fig. 3に示した観測された水平変位からテクトニックな定常的変動を除いたものがFig. 4の黒矢印で

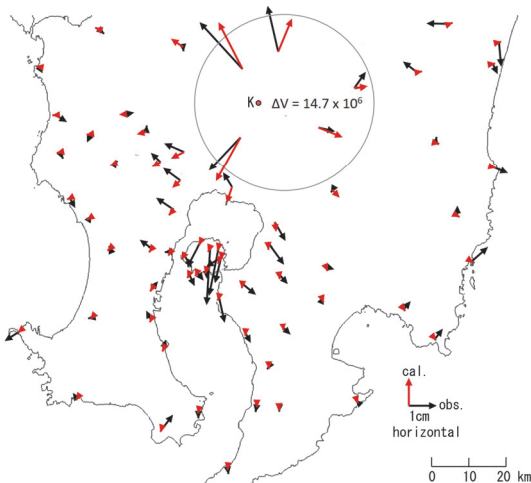


Fig. 4 Horizontal displacement of GNSS stations. black arrow: after reduction for tectonic movement, red arrow: expected from Mogi source located under Kirishima Volcano complex (K).

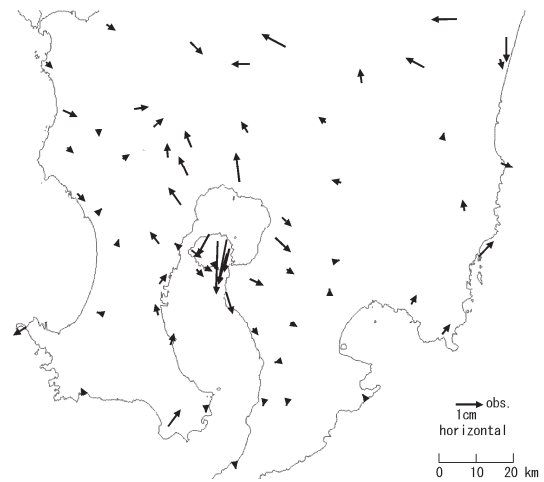


Fig. 5 Horizontal displacement of GNSS stations after reductions for influence of tectonic movement and activity of Kirisima volcano complex.

ある．始良カルデラ周辺と，霧島火山周辺で変位が比較的大きいことがわかる．特に霧島火山周辺では放射状の変位を示している．これは霧島火山の活動に起因するものと考えられ，始良カルデラおよび桜島の火山活動に起因する地盤変動を検出するためにはこの影響を除く必要がある．

そこで，茂木モデルを用いて，圧力源を気象庁（2018）が求めた位置（水平位置：31.9345°N，130.8109°E，Fig. 4のK，深さ：海拔 -7150m）に固定し，霧島火山周辺の5観測点（Fig. 4の円内）の水平変位データから圧力源の体積変化量を求めたところ $14.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ の増圧が得られた．この増圧源から期待される水平変位（Fig. 4の赤矢印）を補正值として定常的変動を補正した後の水平変動から減じた．

上記のようにテクトニックな定常的変動および霧島火山の影響を補正した後の水平変位をFig. 5に示す．補正後の水平変位は始良カルデラ中央部から約25kmの範囲で放射状に伸長するパターンが認められる．

2.3 水準測量による上下変位

上下変位データとして，GNSS観測による水平変位とほぼ同時期をカバーする，2016年11月および2019年11月に公共測量として実施された水準測量結果（九州電力株式会社，2020）を用いた．Fig. 6に水準測量路線の端点である2436，2785，021092A，2514を不動点とした上下変位を示す．始良カルデラ周縁部に近づくにつれて隆起が大きくなる傾向が顕著である．なお，前節の霧島火山下の圧力源による上下変動量は圧力源に最も近い水準点でも約1.6 mm と小

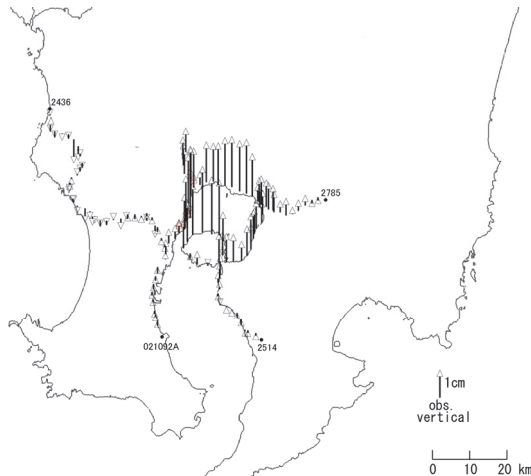


Fig. 6 Vertical displacement from leveling survey (Kyushu Electric Power Co., Inc., 2020).

さいため、霧島火山の影響の補正は行っていない。

以下では、Fig. 5 に示したGNSS観測による水平変位とFig. 6 に示した上下変位を統合する形で茂木モデルによる圧力源解析を行った結果を示す。

3. 圧力源解析

圧力源解析では圧力源モデルとして2個の圧力源を仮定した茂木モデルを適用する。使用したデータは、水準測量による上下変位データ130点と、水準測量路線近傍 (Fig. 7の楕円内) のGNSS観測による水平変位データうち近隣の観測点と極端に異なる変位を示した地点を除いた56点である。今回得られた地盤変動をみると、桜島南岸部の変位量が水平変位、上下変位ともかなり小さくなっており (Fig. 5, Fig. 6), 一つの圧力源のみではこのような特徴を説明することは困難である。先行研究においても、水準測量による地盤の上下変動を説明するため、始良カルデラ下の他に桜島南岳直下にもう一つの圧力源が推定されている (Yoshikawa, 1961; 江頭, 1988など)。ここでも同様に、始良カルデラ下の圧力源に加えて桜島南岳直下にもう一つの圧力源を持つモデルを仮定した。すなわち、一つの圧力源については位置 (東西、南北、深さ) および体積変化量を未知としもう一つの圧力源については、水平位置を桜島南岳 ($31^{\circ}34'50''\text{N}$, $130^{\circ}39'30''\text{E}$) に固定し、深さおよび体積変化量を未知とした。これらの未知量を、水平変位および鉛直変位の残差平方和を最小にするようグリッドサーチによって決定した。グリッドサーチにおいては、一つめの圧力源の水平位置について始良カルデラの中心から東西南北それぞれに20kmの

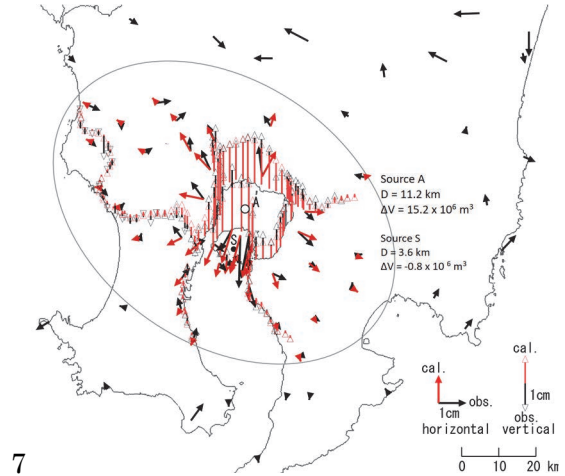


Fig. 7 Horizontal and vertical displacement around Aira caldera.

black arrow: observed, red arrow: expected from Mogi sources, A, K: location of Mogi sources

範囲を0.1km 間隔で、2つの圧力源とも圧力源の深さについて海面下0km から20km までを0.1km 間隔で、体積変化量を0から $1 \times 10^3 \text{ m}^3$ 間隔で $\pm 20 \times 10^6 \text{ m}^3$ まで、を探索範囲とした。

圧力源解析の結果をFig. 7に示す。始良カルデラ中央部 ($31^{\circ}40'03''\text{N}$, $130^{\circ}41'04''\text{E}$, Fig. 7のA) の深さ11.2 kmに $\Delta V = 15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ の増圧源、桜島南岳直下 (Fig. 7のS) の深さ3.6 kmに $\Delta V = -0.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ の減圧源が得られた。これらの圧力源による変位は、始良カルデラ周辺の放射状の伸長や、始良カルデラ周縁の隆起、また、桜島南岸部の小さな変位など観測された変位の特徴を概ね再現しており、推定された圧力源が妥当であることを示している。

4. 始良カルデラ下へのマグマ供給量の推定

GNSS基線MAKI-YOSIは始良カルデラ中央部を東西方向に横切っている。圧力源の位置が変化せず、MAKI-YOSI間の水平距離の変化 (Fig. 8) が始良カルデラ下の圧力源の体積変化のみによるものと仮定することで茂木モデルによる圧力源における体積変化量を求めることができる。ここでは前章で求めた始良カルデラ中央部 (Fig. 8の地図の赤丸) の圧力源の位置を用いて体積変化量を求めた。さらに、求めた体積変化量に桜島火山の噴出物量を加えることで始良カルデラ下へのマグマ供給量を推定することができる。

桜島火山の噴出物量は、鹿児島県が実施している降灰量観測の結果 (鹿児島県, 2021) から、江頭・石

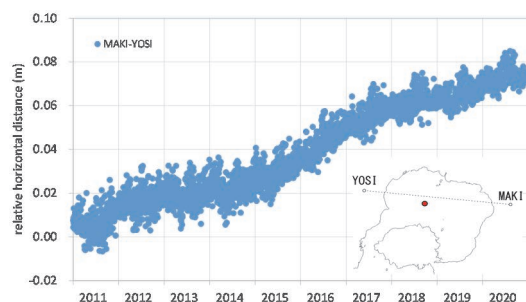


Fig. 8 Daily Change in Horizontal distance of baseline MAKI- YOSI.

原(1979), Eto (1989, 2001) の方法を用いて, 月毎の噴出物の総重量を推定した. 噴出物の重量を圧力源におけるマグマの体積に換算する際に仮定する密度(以下ではDRE換算密度)は $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ がよく用いられる(例えば江頭・他, 1998a)が, 降下火砕物に含まれない揮発成分の寄与を考えるとDRE換算密度はより小さい値をとるほうが適切かもしれない. ここでDRE換算密度として $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ および $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ とした場合のマグマ供給量を求めた.

上記の方法で求めた, 2011年から2020年までの10年間について月毎の圧力源の体積変化量, 桜島火山からの噴出量および圧力源へのマグマ供給量をFig. 9に示す. 始良カルデラ下の圧力源の体積の増加率は, 時期により異なっており, 例えば, 増加率の大きい2015年8月から2017年7月までは $11.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$, 増加率の小さい2017年7月から2019年5月までは $1.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ である. また, 桜島火山の噴火活動が比較的活発な2015年半ばごろ以前は体積増加率が全体として低く, それ以降の桜島火山の噴火活動が比較的静穏なときは高い傾向が認められる. このような桜島火山の活動状況と圧力源の体積の変化率の関係は先行研究(例えば, 江頭・他, 1998a, b)でも指摘されている. 2011年から2020までの10年間においても, 圧力源の体積は時期によって変化率が増減するものの, 期間を通じて増加を続けており, 平均の増加率は $5.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ である.

また, 始良カルデラ下に供給されたマグマの累積量も増加を続けており, 10年間の累積マグマ供給量はDRE換算密度を $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ および $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ としたとき, それぞれ, $73 \times 10^6 \text{ m}^3$ および $97 \times 10^6 \text{ m}^3$ と見積もられた. これを1年あたりのマグマ供給に換算すると, これまで知られている $0.8 \sim 1 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{yr}$ (加茂・石原, 1980; Ishihara, 1981) と同等の値になる.

最近10年間の始良カルデラ下の圧力源の位置や圧力源へのマグマ供給率が先行研究で得られたものに類似していることは, 始良カルデラ下のマグマだま

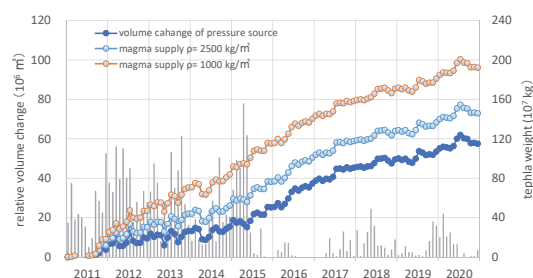


Fig. 9 Monthly cumulative variation of volume change of pressure source (dots), magma supply (circles); and monthly amount of volcanic ejecta from Sakurajima volcano (bars).

りが少なくとも桜島の1914年の噴火以降の長期にわたって安定して存在しており, そこへのマグマ供給も継続していることを示唆している. 特に桜島火山の活動が静穏な2015年8月以降においても圧力源の体積は増加を続けており, 始良カルデラ下ではマグマの蓄積が進行していると考えられる.

味喜・小林 (2016) は桜島南岳が活動を始めた約 4.5 cal ka 以降の桜島火山の噴出物量を求め, 桜島安永噴火以降の240年間の噴出物量が 3.5 km^3 DREにおよび, 桜島南岳の活動期間を通じて最も活動的な時期であることを指摘した. これを平均的な噴出率にすると $1.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{yr}$ となり, 単純な比較はできないものの, 上で求めた始良カルデラ下へのマグマ供給率に近い. このことは, 現在のような始良カルデラ下へのマグマ供給が数百年間継続していることを示しているのかもしれない.

5. まとめ

本稿では, 始良カルデラ周辺において広範囲のGNSS測位による2017年から2019年までの水平変位と, ほぼ同時期に実施された水準測量による鉛直変位を統合する形で茂木モデルを用いた圧力源解析を行った. また, 得られた圧力源の位置を用いて, 始良カルデラを東西に横切るGNSS基線長の変化から最近10年間の圧力源における体積変化を見積もり, それに桜島から放出された火山灰量を加えることで始良カルデラ下へのマグマ供給量を推定した.

GNSS測位による水平変位にはテクニクな定常的変動および霧島火山周辺の局所的変動が認められ, これらを補正した後の水平変位には始良カルデラ中央部から約 25km の範囲で放射状に伸長するパターンが認められる. また, 水準測量による鉛直変位には始良カルデラ周縁部に近づくにつれて隆起が大きくなるパターンが認められる.

2つの圧力源を仮定した茂木モデルを用いた圧力源解析の結果、始良カルデラ中央部の深さ11.2 kmに体積変化量 $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ の増圧源、桜島南岳直下の深さ3.6 kmに体積変化量 $-0.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ の減圧源が得られた。

2020年までの10年間に始良カルデラ下に供給されたマグマの量は、降下火山灰のDRE換算密度を 2.5 g/cm^3 および 1.0 g/cm^3 としたとき、それぞれ、 $73 \times 10^6 \text{ m}^3$ および $97 \times 10^6 \text{ m}^3$ と見積もられた。

これらは、始良カルデラ下のマグマだまりが長年にわたって安定して存在し、現在に至るまでそこへのマグマ供給が継続していることを示唆しており、始良カルデラ下ではマグマの蓄積が進行し続けていることを示すと考えられる。

謝 辞

本稿は、令和2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(1988)：桜島火山周辺における地盤変動—1982年～1985年—，第6回桜島火山の集中総合観測，pp. 15-19。
江頭庸夫・石原和弘(1979)：桜島火山周辺における火山灰の降下堆積状態，火山，第24巻，pp. 88。
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。

鹿児島県(2021) 鹿児島県ホームページ，
URL:<http://www.pref.kagoshima.jp/bosai/sonae/sakurajima/index.html>
気象庁(2018)：第141回火山噴火予知連絡会資料，pp. 26。
気象庁(2021)：気象庁ホームページ，URL:
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>。
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。
加茂幸介・石原和弘(1980)：地盤変動から見た桜島の火山活動，桜島地域学術調査協議会研究報告，鹿児島県，pp. 19-28。
斎藤英二・井口正人(2006)：口永良部島火山におけるGPS連続観測による気象要素を加味した3次元変位検出，火山，第51巻，pp. 21-30。
味喜大介・小林哲夫(2016)：桜島火山・南岳の形成過程—溶岩の古地磁気学的年代と噴出量の推定からの考察—，火山，第61巻，pp. 237-252。
渡部豪・田部井隆雄(2004)：南西諸島のGPS速度場とサイスモテクトニクス。地震，第57巻，pp. 1-10。
Eto, T. (1989)：An estimation of the amount and the dispersal of volcanic ash-falls ejected by summit eruptions at Sakurajima Volcano, Proceedings, Kagoshima International Conference on Volcanoes 1988, pp. 448-451。
Eto, T. (2001)：Estimation of the amount and dispersal of volcanic ash-fall deposits ejected by vulcanian type eruption, Rep. Fac. Sci. Kagoshima Univ., Vol. 34, pp. 35-46。
Ishihara, K. (1981): A quantitative relation between the ground deformation and the volcanic materials ejected, Abstract 1981 IAVCEI Symposium - Arc Volcanism, pp. 143。
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。
Takayama, H. and A. Yoshida (2007): Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET data. J. Geophys. Res., Vol. 112, B06413。
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.
- Yoshikawa, K. (1961): On the crustal movement accompanying with the recent activity of the volcano Sakurajima (Part 1), Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 48, pp. 1-15
- (論文受理日 : 2021年8月31日)