

# 桜島火山における絶対重力観測（4）

大久保修平\*・山本圭吾\*\*・田中愛幸\*・井口正人\*\*・今西祐一\*・渡邊篤志\*・坂守\*

\* 東京大学地震研究所  
\*\*京都大学防災研究所

## 要 旨

2012年3月から2013年3月まで、桜島火山の有村観測坑で行った絶対重力連続観測の概要と結果について述べる。得られたデータからマグマ頭位を推定したところ、頭位の上昇期には爆発頻度が高く、逆に下降期には爆発頻度が低下する傾向が明らかになった。2012年7月24日の南岳噴火の前後の重力データから、マグマの上昇速度が約300 m/hと見積もられた。

**キーワード:** 桜島火山, 絶対重力観測, マグマ頭位

## 1. はじめに

桜島火山は2006年に活動を再開し、2009年の爆発回数は年間500回以上、2010年以降は年間約1000回と活発な活動を続けている。山体下から火道内にかけてのマグマの移動を重力観測から推定するため、FG5絶対重力計による重力連続観測を2008年4月から継続して行っている。本報告では、2012年3月以降、2013年3月末までの測定概要を述べ、2009年4月～2013年3月までの長期的な重力変動を示す。なお、2012年3月以前の観測については、大久保ほか(2010, 2011, 2012)を参照されたい。

## 2. 観測状況

### 2.1 観測点

絶対重力観測は、国土交通省大隅河川国道事務所・有村観測坑の局舎において実施した (Fig. 1)。重力計の設置場所はFG5-B点である (大久保ほか, 2012)。以下では同点直上130cmにおける重力値に整約する。なお測定データから補正量66  $\mu\text{gal}$ を減じることにより、FG5-A点直上130cmにおける重力値に変換することができる。

### 2.2 観測機材及び観測方式

観測には、Micro-g LaCoste社製のFG5絶対重力計

シリアル番号#212 (2012年3月23日～9月18日)及び#109 (2013年2月1日～)を使用した。この重力計の公称精度・確度はともに1-2 $\mu\text{gal}$ である (Niebauer et al., 1995; Okubo et al., 1997)。FG5絶対重力計による観測では、落体が真空中を自由落下するたびに得られる重力値 (Drop値) に、気圧補正・固体潮汐補正・海洋潮汐補正・極潮汐補正が施される。これらの測定データの補正や処理にかかわるパラメータは、大久保ほか(2012) に述べられている。

本観測では、上述の自由落下測定を10秒に1回の間隔で50~64回繰返して、Set と称する1つの重力測定値の集合を得ている。Setに含まれる落下測定の回数を、Drop数と呼んでいる。補正後のDrop値のばらつ



Fig. 1 Location of the absolute gravity station ARM, "Showa Crater" and "Minamidake Crater" on the Sakurajima volcano.

Table 1. Employed absolute gravimeters, drop numbers per set, and set intervals with remarks on troubles.

Observation period	Serial #	Drops per set	Set interval [min]	Remarks
March 22, 2012	#212	50	60	Reinstallation .
March 23– May 19, 2012	#212	50	60	Normal operation
May 20-Sept 18, 2012	#212	50	60	Normal operation, but with large ground noise arising from debris control work near-by.
Sept 19, 2012– Jan.30, 2013				Stop operation due to instrument troubles.
Jan 31, 2013	#109	64	60	Reinstallation.
Feb. 1, 2013–	#109	64	60	Normal operation.

きを表わす標準偏差は、地盤振動が小さい時で10  $\mu\text{gal}$  程度である。一方、近隣で土木工事が行われたり、荒天・地震で地盤動が大きくなったりした時は、50~100  $\mu\text{gal}$  以上になることもある。2012年の5月下旬~9月の時期は、観測点の近傍で土石流対策の砂防工事が行われた。そのため、この期間の昼間のデータのノイズレベルは、夜間よりも5~20倍以上も高く

なっている。

セット内のデータ (=Drop値の集合) から異常値を除いて平均した値をSet値と称し、これが以下の議論の基本的データとなる。したがってSet値の誤差としては、前述の標準偏差をDrop数の平方根で除した値、1~10 $\mu\text{gal}$ 程度になる。本観測においては、一つのセットと次のセットとの時間間隔は、60分とした。

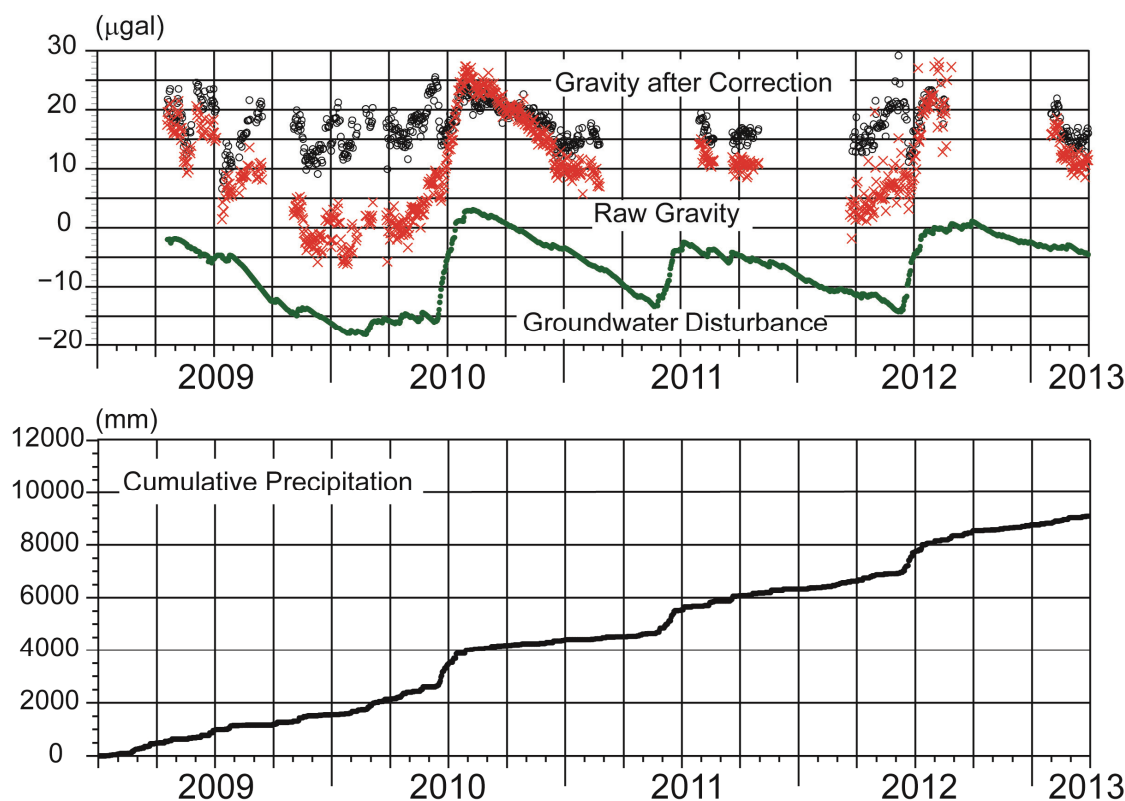


Fig. 2. (Top) Absolute gravity (minus 979,437,796  $\mu\text{gal}$ )(solid circles) and groundwater disturbance (symbol  $\times$ ) computed with the algorithm of Kazama and Okubo (2009). Open circles stand for the gravity corrected for the disturbance. (Bottom) Cumulative precipitation since Jan. 1, 2009.

1日にわたって測定すると、24個のSet値（Drop数にして1,200~1,440）が得られる。したがって、1日にわたって平均した重力値の誤差は0.3~2.0  $\mu\text{gal}$ 程度となり、ほぼ公称精度に見合うものとなる。

### 2.3 観測環境と観測状況

絶対重力計は、清浄な実験室内での運転が前提となっているため、噴火活動中の火山近傍での環境下で観測すると、さまざまなトラブルが生じる（大久保ほか 2010）。機械的なトラブルに加えて、諸般の事情により、2012年9月から2013年1月までの約5か月間は、欠測期間となった（Table 1）。

### 2.4 陸水の及ぼす重力擾乱補正

前報までと同様に、Kazama and Okubo (2009)の方法により、陸水モデルに基づく数値シミュレーションを行い、土壌水分が与える重力擾乱の補正を施した。2009年4月から2013年3月末までの期間について、1日平均した絶対重力変化をFig. 2 に示す。地下水擾乱の補正をする前の変動幅が約30マイクロガルであったものが、補正後には約15マイクロガルと半減していることがわかる。したがって、地下水擾乱補正は一定の効果があることは確認された。

### 3. 火山活動との対比

絶対重力変動を用いて火道内マグマ頭位変化を推定することは、大久保（2005）によって浅間山2004年噴火時に試みられた。そこでは顕著な地殻変動をおこすことなく、鉛直柱状の火道をマグマが上昇・下降するというモデルに基づき、絶対重力変化からマグマ頭位変化を推定している。桜島火山において行われているGPS連続観測によれば、本観測期間中の重力観測点における地盤上下変動は1cm以下と推定されるので、同じモデルを適用することができる。

このようなポテンシャル場の逆問題では一般的に解が一意に定まらないことが知られている。しかし、ある特定の時点でのマグマ頭位を決めることが出来れば、マグマ移動時の質量保存則の助けを借りて、その前後の期間におけるマグマ頭位を重力変動データから推定することができる。まず、半径  $a$ 、当初の空隙率 $\phi$ の円柱内を、密度 $\rho$ のメルトが標高0から $H$ まで上昇したとしよう。円柱内の空隙がすべて満たされたときに生じる重力変化 $g_H$ は、

$$g_H = \pi G \rho a^2 \phi / [D^2 + (H - z_0)^2]^{1/2} - g_0 \quad (1)$$

$$g_0 = \pi G \rho a^2 \phi / (D^2 + z_0^2)^{1/2} \quad (2)$$

と見積もられる。ここで、 $G$ は万有引力定数、 $D$ は火道中心から重力観測点までの水平距離、 $z_0$ は重力観測点の標高である。通常、 $D \gg a$ であるので、(1)(2)

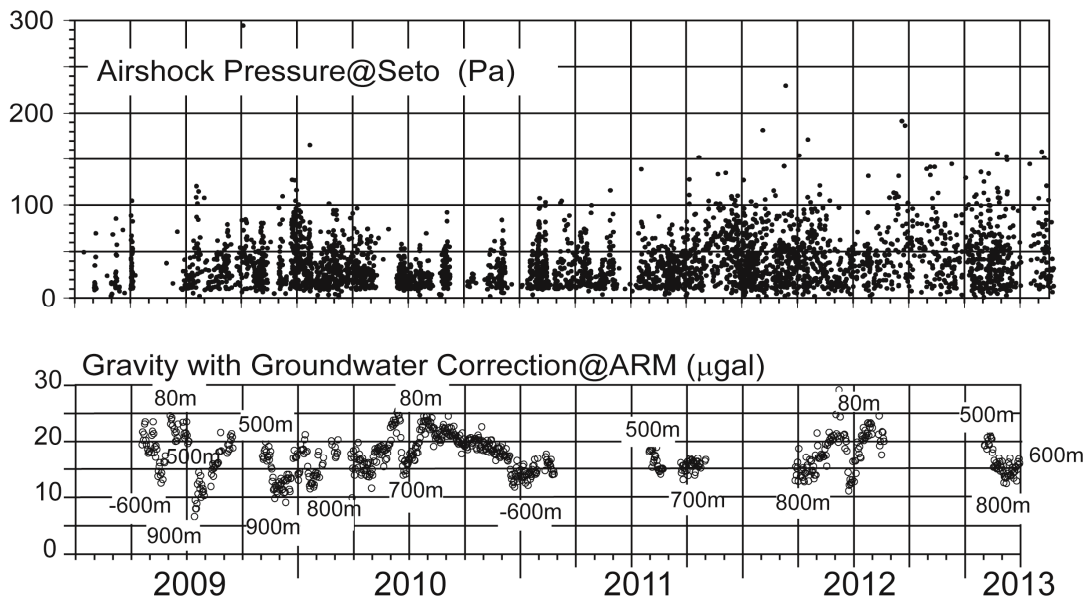


Fig. 3. (Top) Amplitude of air pressure impulses associated with explosions of Sakurajima. (Bottom) Absolute gravity (minus 979,437,796  $\mu\text{gal}$ ) with groundwater correction. Estimated magma head heights above mean sea level (-750 m to + 900 m) are also shown.

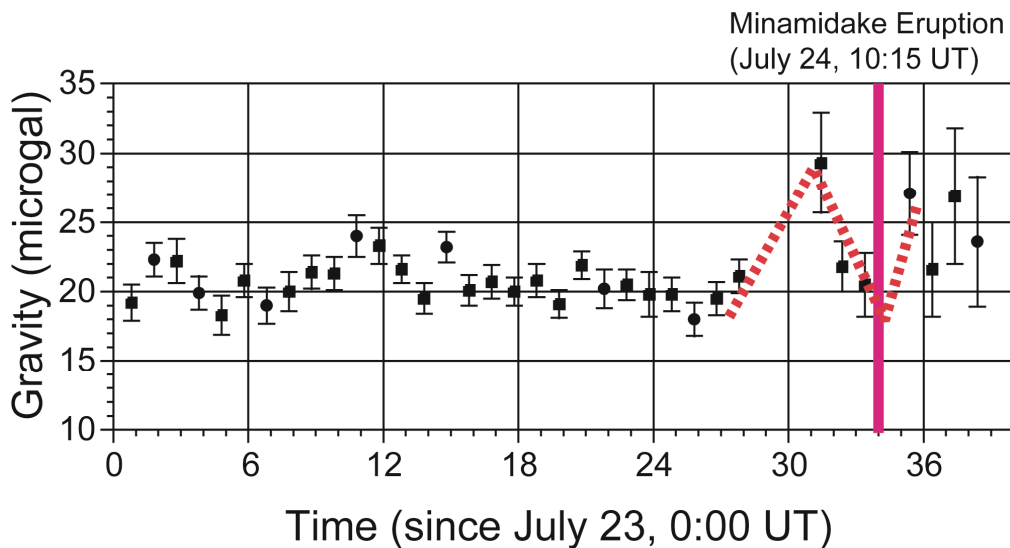


Fig. 4. Absolute gravity (minus 979,437,796  $\mu\text{gal}$ ) just before and after the Minamidake eruption on July 24, 2012. Magma transport from the deep ground to the level of gravimeter causes gravity increase while further rising of the magma head brings about gravity decrease.

式ではいわゆる線質量近似が用いられている。重力変化を与える (1) 式のパラメータのうち、 $D$ 、 $H$ 、 $z_0$  は昭和火口と観測点の位置情報から、 $D=2,000\text{ m}$ 、 $H=800\text{ m}$ 、 $z_0=80\text{ m}$  と与えられる。また、火口火道径はミュオンラジオグラフィーから、 $a=80\text{ m}$  と見積もられる (田中, 私信)。メルト密度と空隙率は、物質定数  $\rho=2.7\text{ g/cm}^3$ 、 $\phi=0.7$  を採用しても、大きな間違いはないと考えられる。以下では、昭和火口 (標高 $\sim 800\text{ m}$ ) に通じる火道内のマグマヘッドの上昇・下降によって、重力変動が生じると考えて、マグマ頭位を推定し、それと火山表面現象との対応を考察する (Fig. 3)。

### 3.1 2012年3月～8月末の変動

2012年3月末には800mであった頭位は、その後2012年5～7月にかけて80mまで低下している。ちょうどこの時期の爆発頻度が低調になっていることに対応している (Fig.3)。

2012年7月24日の南岳噴火については、興味深いデータが得られている (Fig. 4)。噴火の8時間前から3時間前にかけて重力の増加と、噴火の直前3時間にかけての減少である。マグマは、Fig.4の27時頃から31時頃にかけて深部 ( $\sim 2\text{ km}$ 程度) から標高80m (絶対重力計の標高) まで上昇し、その後さらに約3時間かけて南岳火口 (標高1000m) に到達したと考えられる。上昇速度は約300m/hということになる。噴火後の数時間のデータは地盤動が大きくなっているため

に明瞭ではないが、それでも増加傾向にある。

### 3.2 2013年2月初旬～3月末の変動

2013年2月初めに500mであったマグマ頭位は3月初旬に800mまで上昇したものの、その後、3月下旬にかけて600mまで低下している。頭位が上昇している期間は爆発頻度が高く、下降している時期は頻度が低くなる傾向がみてとれる (Fig.3)。

## 4. 結論

昭和火口から2km離れた有村における絶対重力観測を2013年3月末まで継続した。地下水補正前で約30マイクロガル、地下水補正後でも15マイクロガルの重力変動が観測され、これらからマグマ頭位を推定した。頭位の上昇期には爆発頻度が高く、逆に下降期には爆発頻度が低下する傾向が明らかになった。

2012年7月24日の南岳噴火の前後の重力データから、この爆発に関与したマグマの上昇速度が約300m/hと見積もられた。

## 謝 辞

観測実施にあたっては、国土交通省大隅河川国道事務所には有村観測坑局舎利用につき、格別の便宜を図っていただいていることに心から感謝する。また、京都大学防災研究所桜島火山観測所の教職員諸

氏には、絶対重力観測の維持について、多大のご支援をいただいたことに謝意を表す。本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)「火山と断層の3D診断学—宇宙線透視と高品位重力観測の連携による新展開(課題番号23244092)」による援助を受けた。

### 参考文献

風間卓仁 (2010): 重力観測データに含まれる地下水擾乱の水文学的モデリング～火山体マグマ移動の高精度なモニタリングを目指して～, 博士学位請求論文, 東京大学, pp. 196.

Kazama, T., and S. Okubo (2009): Hydrological modeling of groundwater disturbances to observed gravity: Theory and application to Asama Volcano, Central Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, B08402, doi:10.1029/2009JB006391.

Niebauer, T. M., G. S. Sasagawa, J. E. Faller, R. Hilt and F. Klocking (1995): A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, Vol. 32, pp. 159–180, doi: 10.1088/0026-1394/32/3/004.

Okubo, S., S. Yoshida, T. Sato, Y. Tamura and Y. Imanishi (1997): Verifying the precision of a new generation absolute gravimeter FG5 — Comparison with

superconducting gravimeters and detection of oceanic loading tide, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 24, pp. 489–492.

大久保修平 (2005): 重力変化から火山活動を探る—観測・理論・解析—, *火山*, Vol. 50, pp. S49–S58.

大久保修平・菅野貴之・風間卓仁・山本圭吾・井口正人・田中愛幸・孫文科・高山鐵朗・坂守・松本滋夫 (2010): 桜島火山における絶対重力観測, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究(地震及び火山噴火予知観測研究計画 課題番号1809, 2009年)」, 京都大学防災研究所火山活動研究センター刊, pp. 65–71.

大久保修平・風間卓仁・山本圭吾・井口正人・田中愛幸・菅野貴之・今西祐一・渡邊篤志・坂守(2011): 桜島火山における絶対重力観測(2), 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究(地震及び火山噴火予知観測研究計画 課題番号1809, 2010年)」, 京都大学防災研究所火山活動研究センター刊, pp. 55–60.

大久保修平・風間卓仁・山本圭吾・井口正人・田中愛幸・菅野貴之・今西祐一・渡邊篤志・坂守(2012): 桜島火山における絶対重力観測(3), 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究(地震及び火山噴火予知観測研究計画 課題番号1809, 2011年)」, 京都大学防災研究所火山活動研究センター刊, pp. 65–70.

### Absolute Gravity Observation at Sakurajima Volcano (4)

Shuhei OKUBO\*, Keigo YAMAMOTO\*\*, Yoshiyuki TANAKA\*, Masato IGUCHI\*\*, Yuichi Imanishi\*, Atsushi WATANABE\*, Mamoru SAKA\*

\* Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

\*\* Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

### Synopsis

This manuscript describes how the absolute gravity measurements had been carried out at Sakurajima volcano. Gravity variation data are presented for the period from March 23, 2012 through March 31, 2013. Magma head height in a conduit leading to Showa/Minamidake craters is estimated from the gravity variation using a simple line mass model. We find rising of the magma head is accompanied by frequent explosions. Analysis of the gravity data before and after the Minamidake explosion on July 24, 2012 revealed that magma rose in the conduit with a rate of 300 m/h.

**Keywords:** Sakurajima volcano, Absolute gravity, Magma Head