

# 桜島火山における絶対重力観測 (3)

大久保修平\*・田中愛幸\*・山本圭吾\*\*・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

2011年7月から2011年11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解析結果について述べる。2011年の梅雨期以降の重力変動を、2010年のそれと比較することができたおかげで、2010年7月から11月の顕著な重力変動には、火山活動起源のシグナルが含まれていることがわかった。

**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年と2011年には年間約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、2011年7月末以降、2011年11月末までの測定概要を述べ、2009年4月～2011年11月までの長期的な重力変動を示す。なお、2011年7月以前の観測については、大久保ほか(2010, 2011)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, Table 1)。重力計の設置場所は、2011年1月～2011年11月の期間にはFG5-B点である(Fig. 2)。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#109(2011年7月30日～11月28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を、Table 2にまとめておく(日本測地学会 1994; Matsumoto et al., 2000; Matsumoto et al., 2001; Timmen and Wenzel, 1994)。

本観測では、上述の自由落下測定を10秒に1回の間隔で50~100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。2011年の夏季以降に、観測点の極近傍で水位観測井の掘削工事が行われたので、この時期には昼間の観測を停止した。

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

Table 1 Geographic coordinates of absolute gravity station, ARM (see also Fig. 1).

Latitude (degree)	Longitude (degree)	Height above mean sea level (meter)
31.56005	130.6724	80



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

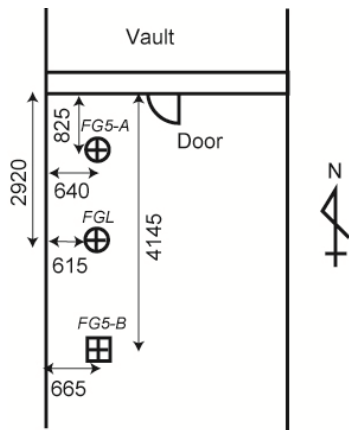


Fig. 2 Site description of the absolute gravity station ARM. Metal markers are placed on FG5-A and on FG-L. All the numbers are in millimeters.

値, 1~10 $\mu$ 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。1日にわたって測定すると、24個のSet値（Drop数にして1,200）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  $\mu$ 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

Table 2 Absolute gravity processing parameters.

	From Mar 30, 2010 through Jan.30, 2011	From Jan.30, through Mar 17, 2011
Drops per Set		50
Set Interval [min]		60
Nominal Pressure [hPa]		1003.68
Gravity Gradient [mgal/m]		0.264
Barometric Response Factor [ $\mu$ gal/hPa]		0.3
$\delta$ -factors		
DC		1.00000
Long		1.16000
Q1		1.15425
O1		1.15424
P1		1.14915
K1		1.13489
N2		1.16172
M2		1.16172
S2		1.16172
K2		1.16172
Solid Earth Tide Computation	Program Package "ETGTAB" after Timmen and Wenzel (1994)	
Ocean Tide Computation	Program Package "GOTIC"2 after Matsumoto et al. (2001)	
Earth Model of Ocean Loading Green Function	1066A	
Ocean Tide Model	NAO.99b after Matsumoto et al. (2000)	
Polar Motion Data Source	IERS Bulletin A	

で観測すると、さまざまなトラブルが生じる。実際に2009年度に経験した多くのトラブルは、大久保ほか (2010) に詳述されている。それらを踏まえて、前年の2010年の観測では総合的な対策を施した結果、1日程度の欠測があるものの、それを除けば約1年間の連続観測を維持することができた。しかし2011年は、2011年東北地方太平洋沖地震と2011年新燃岳噴火への対応のため、観測機材が不足する事態に陥った。そのため、桜島での観測を一時休止するのやむなきに至った。また、観測再開後も機械トラブル

Table 3. Employed absolute gravimeters, drop numbers per set, and set intervals with remarks on troubles in 2011.

Observation period in 2011.	Serial #	Drops per set	Set interval [min]	Remarks
– Feb 25.	#241	50	60	Normal operation.
March – July 30				2011 Tohoku-oki earthquake (M=9.0) on Mar. 11. Gravimeter uninstalled in late March.
July 31– Aug.27	#109	50	60	Reinstallation with FG5#109. Large error arose from drilling of a well near-by.
Aug.24 – Sept. 20				Troubles on a PC board, loose cart-belt and laser.
Sept. 21–Sept. 26	#109	50	60	Normal operation.
Sept. 27–Nov. 04	#109	100	60	Night shift operation (19:00-07:00 JST) to avoid noise of drilling a well near-by.
Nov. 02–	#109			Troubles on a vacuum pump, laser, and a PC board.

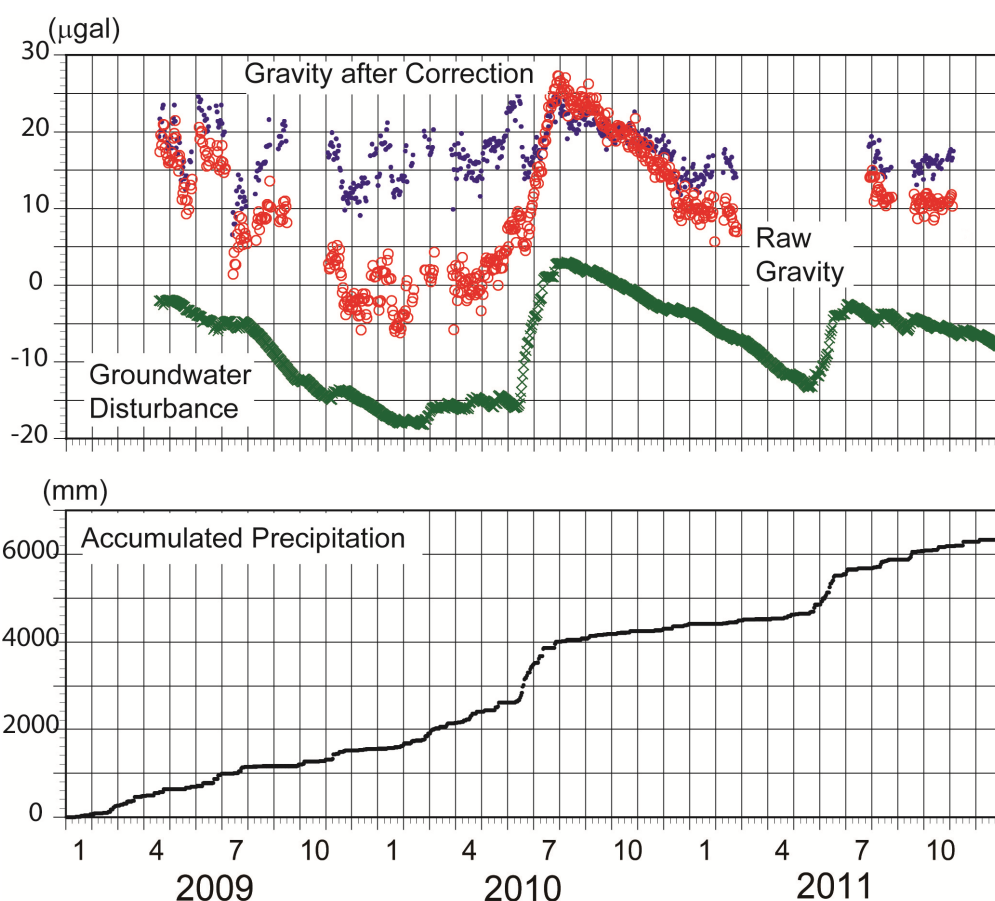


Fig. 3. (Top) Absolute gravity (minus 979,437,796  $\mu\text{gal}$ )(open circles) and groundwater disturbance (symbol  $\times$ ) computed with the algorithm of Kazama and Okubo (2009). Solid circles stand for the gravity corrected for the disturbance. (Bottom) Accumulated precipitation since Jan. 1, 2009.

が、三か所で連鎖し、2011年12月以降の観測ができなくなった。総計すると、欠測期間が6か月に及んだ (Table 3)。

## 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2011年11月初めの期間について、1日平均した絶対重力変化をFig. 3 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。

前報 (大久保ほか 2011) では、2010年7月～同年11月までの4か月間の単調な重力変動が、地下水擾乱によるものであるか、それとも桜島火山活動のシグナルであるのかについて確定的なことが言えなかった。実際、Fig. 3をみると、この期間の重力擾乱の推定値も、 $-1.5 \mu\text{gal}/\text{month}$ と単調減少を示しているから、地下水流動のパラメータの調整をすれば、実測された $-3 \mu\text{gal}/\text{month}$ という重力減少を説明できそうにも見えたからである。

2011年と2010年のそれぞれの梅雨期の、降雨量と重力変動とを比較すると、興味深い事実が見つかる (Fig. 3) . 2011年6月の1か月間の累積雨量900mmは、2010年5月中旬からの1か月の累積雨量1200mmと比べて25%小さいだけであるのに、豪雨期終了後の3か月間の重力変動の様相は、かなり異なっている。2011年には、梅雨後の重力 (地下水による擾乱補正後の値) に単調減少が見られないのである。このことから、2010年の顕著な重力変動の約半分は、地下水起源であるものの、残りの半分は火山活動起源であることが、強く示唆される。

## 3. 火山活動との対比およびモデル化

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。

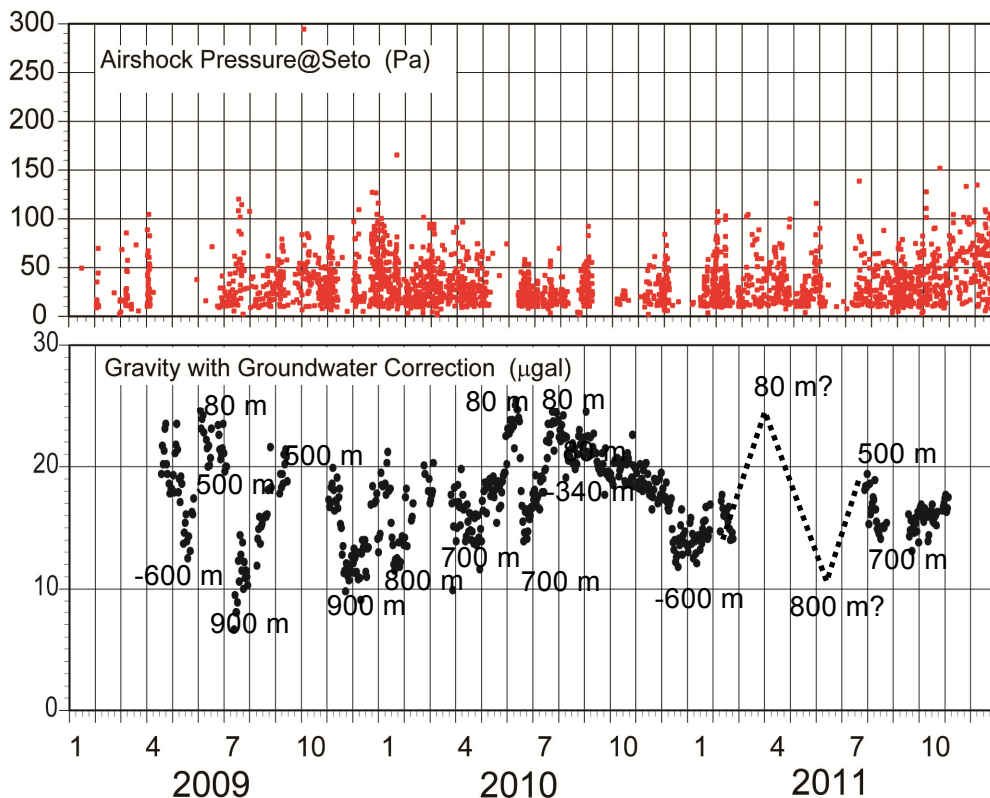


Fig. 4. (Top) Amplitude of air pressure impulses associated with explosions of Sakurajima. (Bottom) Absolute gravity (minus 979,437,796  $\mu\text{gal}$ ) with groundwater correction. Estimated magma head heights above mean sea level (-750 m to +900 m) are also shown. No gravity data is available from March through July, 2011.

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)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、 $D=2,000$  m、 $H=800$  m、 $z_0=80$  mと与えられる。また、火口火道径はミュージオンラジオグラフィーから、 $a=80$  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 $\rho=2.7$  g/cm<sup>3</sup>、 $\phi=0.7$ 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 $\sim 800$ 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. 4)。

### 3.1 2011年3月～7月末の変動

2011年2月末の頭位は、-350mと見積もることができ一方、2011年3月～5月中旬の期間は、爆発回数が比較的多いことから、マグマ頭位は、少なくとも6月ごろまでは上昇傾向にあると推測される(Fig.4)。2011年7月末の重力値から、7月末のマグマ頭位は500mもしくは-350mと推定されるが、頭位が低い方の-450mは、前述のことから、解として不適と考えられる。したがって、2011年7月末の頭位は500mと考えられる。(Fig. 4)。

### 3.2 2011年7月末～11月初旬の変動

この時期は重力値もほぼ一定であることから、頭位は500～700mと安定して、高い位置にあり、爆発回数もそれに伴って多くなったとみられる。

## 4. 結論

2009年4月から2011年11月にかけて、昭和火口から

2km離れた有村においては、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た。2011年の観測期間は、東北地方太平洋沖地震の影響や、機材不調のため、欠測が6か月を超えた。しかし、2011年の梅雨期以降の重力変動を、2010年のそれと比較することができたおかげで、2010年7月から11月の顕著な重力変動には、火山活動起源のシグナルが含まれていることがわかった。

## 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、石原和弘所長をはじめとする教職員諸氏には、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、及び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.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan, *J. Oceanography*, Vol. 56, pp. 567–581.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe (2001): GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, *J. Geod. Soc. Japan*, Vol. 47, pp. 243–248.
- 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.
- 日本測地学会(1994): 現代測地学, 文献社, pp. 611

- 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, 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.
- Timmen, L., and H. G. Wenzel (1994): Worldwide synthetic gravity tide parameters available on Internet, *BGI Bull. Inf.*, 75, 32-40.

### **Absolute Gravity Observation at Sakurajima Volcano (3)**

Shuhei OKUBO\*, Yoshiyuki TANAKA\*, Keigo YAMAMOTO\*\*, 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 in 2011. Gravity variation data are presented for the period from April 19, 2009 through November 02, 2011. The observational result clearly shows significant ( $\sim 30 \mu\text{gal}$ ) gravity variation. Hydrological simulation reveals that at least the half of the change is attributable to groundwater disturbance. Gravity increase from the middle of May 2011 to the middle of June 2011 is interpreted in terms of falling of the magma head in the conduit of Sakurajima. The interpretation is consistent with the sudden decrease of number of explosions from the Showa crater.

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