

桜島火山における絶対重力観測（2）

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*

* 東京大学地震研究所

**京都大学大学院理学研究科

***京都大学防災研究所

要 旨

2010年1月から2011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詳細と、2010年1月から2011年1月までの解析結果について述べる。昭和火口から2km程度しか離れていない有村における重力は、地下水補正前で約30マイクロガル、地下水補正後でも15マイクロガルの変動を示した。特に2010年5月中旬～6月中旬には、マグマ頭位の低下を示唆する重力増加が観測され、爆発回数の急減期と良い対応を示した。

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年には約900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、2010年4月以降、2011年3月中旬までの測定概要と、2010年1月～2011年1月までの解析結果とを示す。また、後日の詳細な解析に資するため、観測状況についてやや詳しく記述する。なお、2010年3月以前の観測については、大久保ほか(2010)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、2010年4月～2011年3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 μgal 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 (2010年3月29日から2011年1月29日まで)及び#241 (2011年1月29日から3月17日まで)を使用した。この重力計の公称精度・確度はともに1-2 μgal 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回もしくは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回数、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 μgal 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 μgal 以上になることもある。

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.

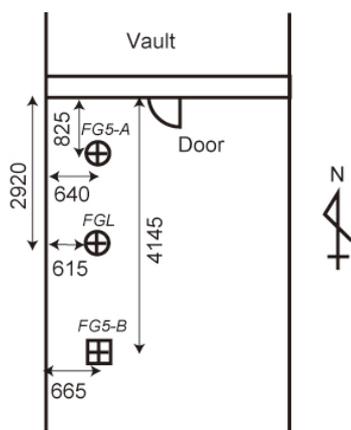


Fig. 2 Site description of the absolute gravity station ARM. Metal markers are placed on FG5-A and on FG-L. All the numbers are in millimeters.

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 μ 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1,200~1,536) 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 μ gal程度となり、ほぼ公称精度に見合うものとなる。

Table 2 Absolute gravity processing parameters.

	From Mar 30, 2010 through Jan.30, 2011	From Jan.30, through Mar 17, 2011
Drops per Set	64	50
Set Interval [min]		60
Nominal Pressure [hPa]		1003.68
Gravity Gradient [mgal/m]		0.264
Barometric Response Factor [μ gal/hPa]		0.3
δ -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	

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。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、今回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。

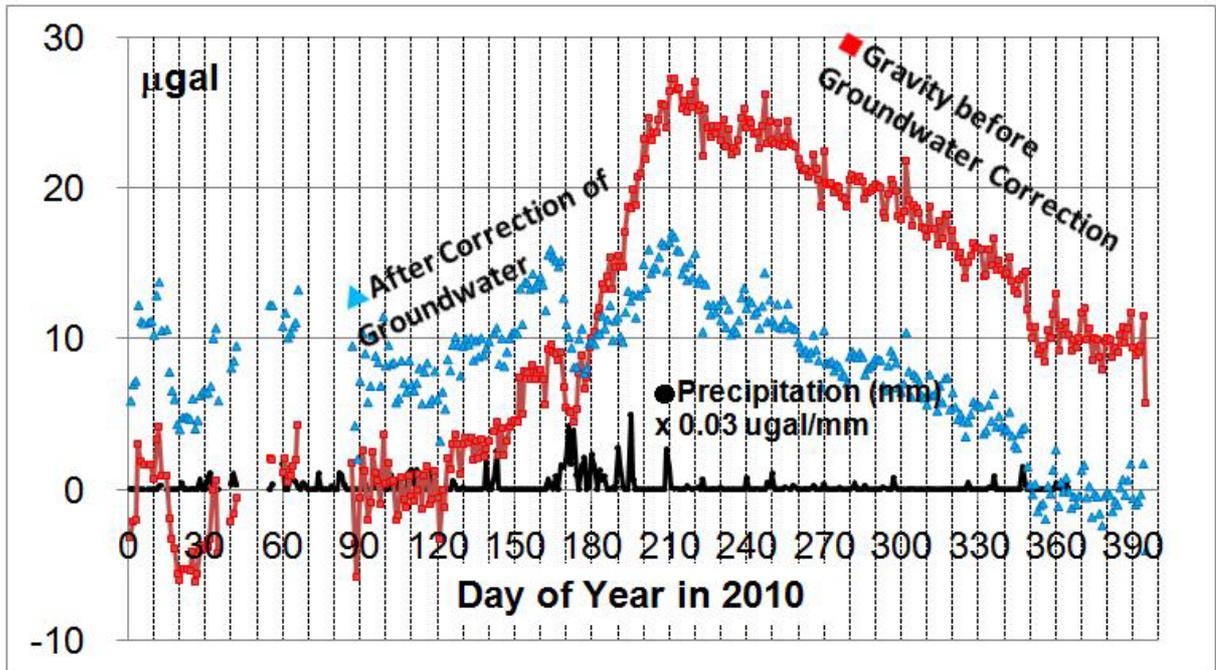


Fig. 3 Absolute gravity (minus 979,437,796 μgal) and daily precipitation at Sakurajima volcano from Jan. 2010 through Jan 2011 (■: Raw data without correction of groundwater disturbance. ▲: Data with groundwater correction. ●: Daily precipitation (mm) \times 0.03 microgal/mm).

2.4 陸水の及ぼす重力擾乱補正

ひとたび、台風や集中豪雨などで数百mmの累加雨量があるときなどは、10マイクロガルを超える重力擾乱が生じることも珍しくはない。2004年浅間噴火においても、10月に2回の台風でそれぞれ約300mmの豪雨を観測し、実際にそれぞれにステップ上の重力変化が生じている (Kazama and Okubo 2009)。この重力擾乱を適正に補正することは、長期にわたる火山活動の推移予測を行う上で極めて重要となる。

これまでも、降雨に対する重力変動を経験的な数値モデル (タンクモデル) で補正することがおこなわれてきた。その補正は一定の成果をあげているものの、汎用性に欠けているうえに物理的裏付けに欠けているという難点があった。Kazama and Okubo (2009)では、地表付近の不飽和帯の土壌水分と、それより深部の被圧地下水層の水頭を、陸水移動の方程式から導いている。その結果は30日程度より長いタイムスケールでの再現性については課題が残るものの、それより短い短期再現性については満足できるものである。以下では、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。これにより、通常の降雨ならば1~2マイクロガルの精度で補正が可能と見込まれる。

3. 長期的な重力変動

2010年1月から2011年1月末の期間の、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。しかし、その一方で年通算日 (DOY) 210 以降の長期的な重力減少傾向は、補正の有無にかかわらず一定である。これが真の火山起源の変動によるものなのか、それともDOY 165-195に見られるような1か月の累積雨量が1,000mmという豪雨後では、数十日を超える時間スケールでの地下水流動シミュレーションが精度を失ってくることによるのかは、今後の検討課題である。

4. 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。

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 ϕ の円柱内を、密度 ρ 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、

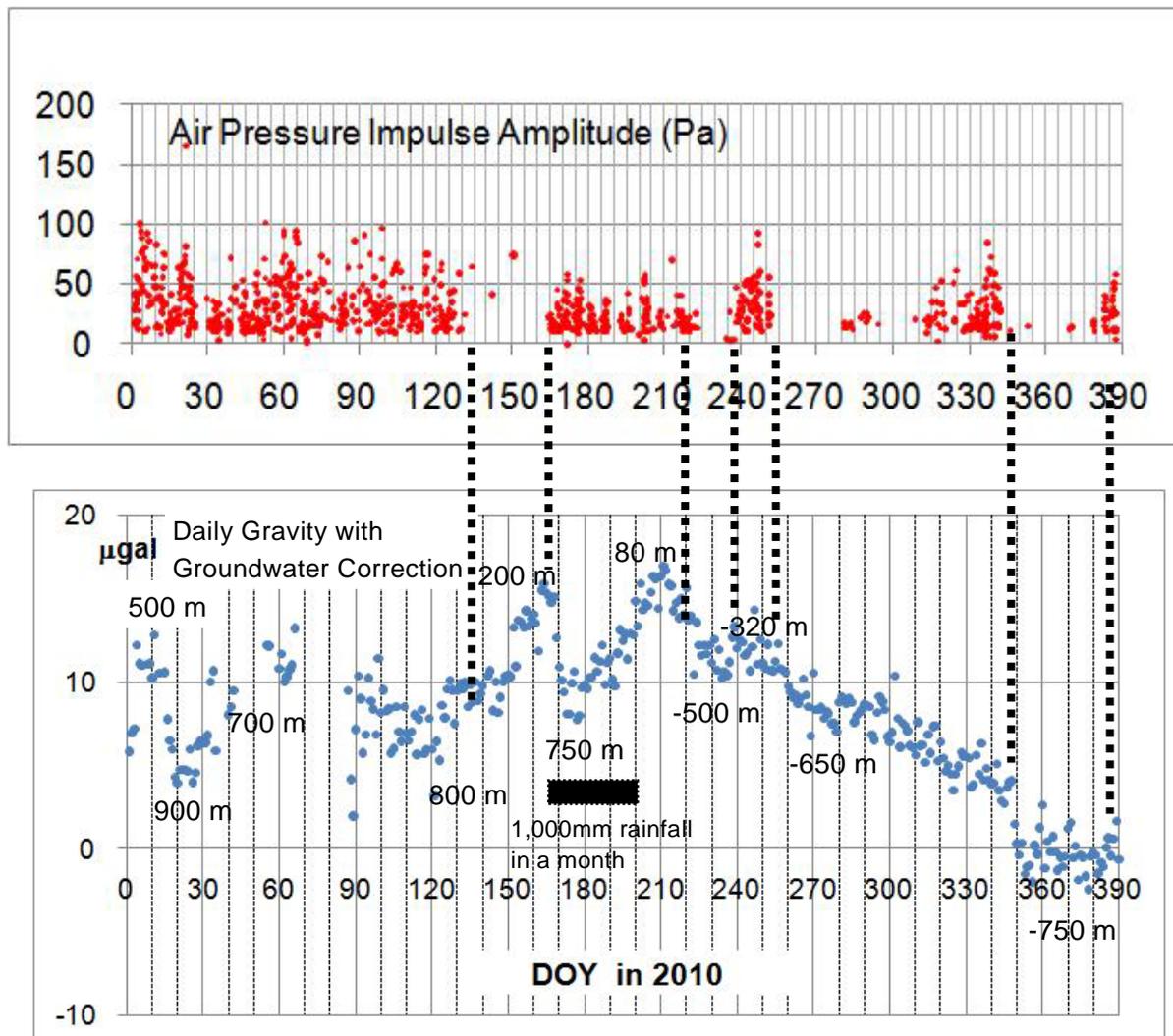


Fig. 4. (Top) Amplitude of air pressure impulses associated with explosions of Sakurajima. (Bottom) Absolute gravity (minus 979,437,796 μgal) with groundwater correction. Estimated magma head height above mean sea level (-750 m to +900 m) is also shown. Heavy rainfall was recorded during DOY 165-195.

$H=800\text{ m}$, $z_0=80\text{ m}$ 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. 4)。

4.1 2010年1月中旬～5月中旬(DOY 1-135)の変動

この期間には、マグマヘッドは標高500～900mと比較的高い位置にあったと推定された(Fig. 4)。爆発回数は多少の消長をとまなうものの、基本的には活発な時期であり、マグマヘッドが高い位置にあることと整合している。

4.2 2010年5月中旬～6月中旬(DOY 135-165)の変動

2010年5月(DOY 135)ごろからの約1か月間のマグマ頭位は、800mから200mまで急降下していると推定された。このことは火道内でのマグマを押し上げる駆動力の低下が示唆される。実際、これに対応して、昭和火口からの爆発回数も急激に減少している(Fig. 4)。

4.3 2010年6月中旬～7月中旬(DOY 165-195)の変動

この時期は1か月で1,000mmもの累積雨量があったため、陸水起源の重力擾乱が十分に除去できていない可能性がある。そのため、マグマ頭位の推定値750m～80mには、大きな誤差が含まれている可能性がある。

4.4 2010年7月中旬以降(DOY 195-)の変動

前述の豪雨の影響で信頼度は低いですが、それでも頭位が次第に低下しているように見える。この時期は山体収縮が観測された時期であり、深部マグマだまりの減圧によるものの可能性がある。

5. 結論

2010年1月から2011年1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。特に2010年5月中旬～6月中旬には、約5マイクロガルの重力増加が観測され、爆発回数の急減(活動の一時的静穏化)と良い対応を示し

た。この結果から、桜島火山のマグマ頭位の下降が強く示唆される。また2010年9月～2011年12月中旬まで重力減少が継続し、その量は約10マイクロガルに及んだ。大まかな火道モデルを用いて、マグマの火道内昇降による重力変化を見積もった結果、観測データをほぼ説明可能であることがわかった。今後は、地殻変動データ、地下水擾乱補正などを進め、さらに解析をすすめることが必要と考えられる。

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、平成22年度京都大学防災研究所一般共同研究「ミュオン・ラジオグラフィーと高品位重力連続観測で、桜島火山体内マグマ移動を診る(II)」(課題番号22G-07)、及び文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)「宇宙線ラジオグラフィーと高品位化した重力連続観測で、マグマの火道内昇降を診る(課題番号20244071)」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. Klopping (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, 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.
- 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 (2)

Shuhei OKUBO*, Takahito KAZAMA**, Keigo YAMAMOTO***,
Masato IGUCHI***, Yoshiyuki TANAKA*, Takayuki SUGANO*, Yuichi Imanishi*,
Atsushi WATANABE*, Mamoru SAKA*

* Earthquake Research Institute, The Tokyo University

** Graduate School of Science, Kyoto University

*** Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Synopsis

This manuscript describes how the absolute gravity measurements had been carried out since April 2010 until March 2011. Gravity variation data are presented for the period from January 1, 2010 through January 31, 2011. 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