桜島火山における絶対重力観測

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***

> * 東京大学地震研究所 **京都大学防災研究所 ***住鉱コンサルタント

要 旨

2009年4月から2010年3月まで,桜島火山の有村観測坑で行った絶対重力の連続観測の概要と結果及びその解釈について述べる。観測期間中に測定誤差を有意に超える,20マイクロガルの重力値の減少が検出された。特に2009年7月頃と,2009年10月頃の2回,10日程度の短期間の内に,それぞれ約10 µgalの急激な減少が発生している。これらの時期は,昭和火口からの火山灰放出の急増期および,南岳からの爆発の時期に対応しており,それぞれの火口に続く火道内でマグマ頭位が上昇したことを強く示唆する。

キーワード: 桜島火山, 絶対重力観測

1. はじめに

桜島火山は2006年に活発な活動を再開し,2009年 の爆発回数は年間500回を超すほどになっている。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、われわれはFG5絶対重力計によ る重力連続観測を継続している。本報告では、2009 年4月以降、2010年3月末までの測定結果を示す。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。

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)。重力計の局舎内の設置場所は2009年4月~ 7月11日の期間はFG5-A点であり、また2009年7月12 日以降の期間ではFG5-B点である(Fig. 2)。移設の 理由には、坑口に近いFG5-A点付近の湿度が高かっ たことがあげられる。なお、LaCoste & Romberg重力 計を用いた計測により、FG5-B点の重力値は、FG5-A 点のそれよりも66 μgalだけ大きいことが判明してい る (Table 2)。そこで以下では、2009年7月12日以降 にFG5-B点で得られた測定データには補正量66 μgal を減じて、FG5-A点における重力値に整約した。

2.2 観測機材及び観測方式

観測には、Micro-g LaCoste社製のFG5絶対重力計を使用した。この重力計は公称精度・確度ともに
1-2µgalである(Niebauer et al., 1995; Okubo et al., 1997)。FG5絶対重力計による観測では、まず、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 3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 µgal 程度である。一方、近隣で土木工事が行われた Table 1 Geographic coordinates of absolute gravity station, ARM (see also Fig. 1).

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



Fig. 1 Location of the absolute gravity station ARM and the active volcanic "Showa vent" 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.

Table 2 Gravity reduction parameters at ARM.

Gravity	Relative gravity	Gravity	Relative gravity
point	on the floor.	gradient.	at H=1.30 [m].
	[µgal]	[µgal/m]	[µgal]
FG5-A	0	-259.0	0
FG5-B	73	-263.9	66

	Before	From July 10	Since
	July 10,	through	Nov. 1,
	2009	Oct.31, 2009	2009
Drops per Set	50	50	50
Set Interval [min]	60	120	60
Nominal Pressure [hPa]		1003.68	
Gravity Gradient [mgal/m]	0.259	0.264	0.264
Barometric Response Factor [µgal/hPa]		0.3	
δ-factors			
DC		1.00000	
Long		1.16000	
Q1		1.15425	
01		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 after Tim	n Package "ETC men and Wenze	GTAB" el (1994)
Ocean Tide Computation	Program after M	m Package "GO atsumoto et al.	TIC"2 (2001)
Earth Model of Ocean Loading Green Function		1066A	
Ocean Tide Model	NAO.99	b after Matsumo (2000)	oto et al.
Polar Motion Data Source	I	ERS Bulletin A	

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。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, 1~10μgal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分もしくは120分のいずれかをとっ

Table 3 Absolute gravity processing parameters.

ている。1日にわたって測定すると,12~24のSet値 (Drop値にして600~2,400)が得られる。これらの1 日平均値の誤差は,0.2~4.0 μgal程度となり,ほぼ公 称精度に見合うものとなる。

なお、一般的には、土壌水分変動及び地下水位変 動などの陸水起源の重力擾乱の補正をすることが望 ましい(Kazama and Okubo, 2009; 風間, 2010)。陸 水モデルに基づく数値シミュレーションは進行中で あるが、本報告執筆時点では、2009年9月までの補正 値しか得られていないので、本報告の全期間にわた って均一な補正をすることができない。また、2009 年4月~9月の期間の陸水起源の重力擾乱値は最大で も3 µgal 程度であり、前述の1日平均値の最大誤差 4.0 µgalと同程度に過ぎない。したがって、4 µgal以 下の変動を問題にしない限り、陸水起源の重力補正 を無視しても差し支えないことが分かる。

Table 4. Employed absolute gravimeters, drop numbers per set, set intervals with remarks on troubles during April 2009 through March 2010.

Observation	Serial #	Drops	Set interval	Remarks
Period		per set	[min]	
Apr. 10, 2009	#212	50	60	Rapid decrease of Laser power (23%/month) during the
– July 11, 2009				whole period.
				Violent variation of 1F voltage $(0.1 - 0.4 \mbox{ V})$ of the Iodine
				stabilized Laser during May 18 through June 19.
				Laser output completely lost during June 19 through June
				25.
				Laser tube was cleaned with alcohol on June 25 to recover
				the power but the laser was unexpectedly locked to the G
				and H energy levels of the iodine hyperfine structure.
July 12, 2009	#109	50	120	Rapid decrease of Laser power during the whole period.
- Sept. 13, 2009				Laser tube was cleaned with alcohol on Aug. 31 to recover
				the power. Yellow-brown stains were found inside the laser
				tube.
				Laser output completely lost since Sept. 13.
Nov. 2, 2009 –	#212	50	60	The gravimeter was installed in a vinyl tent on Nov. 2.
Feb. 12 2010				Data bias of -6.4 μ gal during Nov. 18 through Nov. 26
				from unknown origins.
				The Laser tube was put in a clean bench on Dec. 22 to
				avoid volcanic dust.
				Frequent abort of measurement due to PC/electronics
				troubles since Dec. 23.
				Cleaning of A/D board on Jan. 14 to fix the frequent
				auto-reboot of the PC.
				Data bias of -16.5 µgal during Dec. 30 through Jan. 6 from
				unknown origins. Data bias of -9.3 to -15.4 μ gal during
				Jan. 15 through Jan. 21 from unknown origins.
				Successful measurement rate decreased to <80% since Feb.
				2 most probably due to the dropper fourning to the cart.
Eab 25 2010	#241	50	60	Sticky hearing due to abnormally low Temporature
rev. 23, 2010 Mar 13, 2010	#241	50	00	Sucky bearing due to abnormany low Temperature.
-101a1.15,2010 Mar 30,2010	#100	64	60	
Iviai. 50, 2010-	#109	04	00	

2.3 観測環境と状況

絶対重力計は、清浄な実験室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は, 数か月に1度の割合でさまざまなトラブルが生じた。 その結果、1か月程度の中断期間を2回含むこととな ったが、それらを除けば1年間の連続観測を維持する ことができた(Table 4)。これまで国内各地の火山 (2000年有珠山噴火, 2000年三宅島噴火, 2003年浅 間山噴火など)において絶対重力観測が行われてき たけれども、1年間に延べ5台の重力計を動員するよ うな状況は初めてのことであった。というのも、そ れらは1週間ないし数か月程度の比較的短期間の観 測であったことに加え,大量の火山灰を長期間にわ たって放出するような環境ではなかったので、問題 が顕在化しなかったものと思われる。以下では、こ の観測期間中に体験したトラブルについて記載し, 今後の教訓としたい。

(1) レーザー出力の異常低下

観測期間中のレーザー出力は,約23%/月という速 度で低下した。これは通常の低下率である数%/月を 4倍以上上回る,異常な値である(Fig.3)。その主 たる原因は,観測室内を浮遊する微小な火山灰粒子 が,レーザーや光ファイバー端及び干渉計ミラー等 に付着することであると考えられる。実際,光ファ イバーの一端に粒子の付着を認めたことがあり,こ のときは圧縮空気で吹き飛ばすことによって,事態 の改善が図られたことはその裏付けとなっている。 有村観測坑局舎は,密閉度が高い近代的建築物であ り,観測期間中は10日毎に床の清掃などに努めたこ とを思えば,火山灰の侵入は恐るべきものである。



Photo 1. A FG5 gravimeter installed in a vinyl tent to avoid volcanic dust falling on the interferometer (top). Laser was also guarded against the volcano ash by a clean bench in a vinyl tent. (bottom).



Fig. 3 Laser power against time. Laser power had been lost by 23 % each month until Nov. 2009 when the laser got covered with a clean bench in a vinyl tent (see also Photo 1).



Absolute Gravity Variation DG at FG5-A in the Arimura Vault, Sakurajima.

Fig. 4 Absolute gravity at Sakurajima volcano from April 2009 through March 2010. All the data taken at FG5-B since July 10, 2009 (T=190 days since 2009.January 0) are reduced to those at FG5-A.

また、レーザーチューブ内部に黄土色の錆が発生 するという、予想されない事態も生じている。その 原因には、夏季の落雷停電によってエアコンが停止 した時期に、火口から放出されたSO2が、高温多湿 状態の中で硫酸ミストが生成され、金属部を腐食し た可能性が考えられる。以上のような過酷ともいえ る環境に置かれたため、レーザーチューブの清拭に もかかわらず、2009年7月上旬と同年9月中旬には、 レーザー光の出力が停止し、重力観測が途切れた。

火山灰侵入の軽減方策として,2009年11月上旬に, 室内にビニール・テントを設置した。テント内には, 絶対重力計の主要構成要素であるコーナーキューブ を自由落下させる真空筒,及びレーザー・チューブ を設置した (Photo 1)。レーザー・チューブはさらに, クリーンベンチで囲って保護した (Photo 1)。これ らが功を奏し,2009年11月以降のレーザー出力低減 率は,ほぼ平常値の5%/月に復した (Fig.3)。

(2) 電気・電子部品の誤作動

重力計の制御A/Dボードを装着したPCは, 2009年12月ごろから動作が不安定になるトラブルに 見舞われた。原因は,PC内部のA/Dボード類への火 山灰の付着によるものであった。頑健を誇るDolch社 製PCであっても、火山灰対策を施す必要性を改めて 認識することとなった。

(3) 異常低温による駆動系トラブル

鹿児島における年間最低気温の平年値は4.5℃で あるが、本観測期間中には最低気温が0.1℃となるよ うな寒冷期が続き、エアコンでの温度制御が十分に はたらかない時期が生じた。そのため、真空筒内で 落体を駆動させる機械部(ベアリング)の摩擦が異 常に大きくなるなどして,正常な観測に支障が生じ た。ビニールテント内の温度制御をインテリジェン ト化する必要を認識した。

(3) レーザーの波長ロック不安定性

重力計に使用しているレーザーは,波長を安定化 するのに沃素のエネルギー準位の超微細構造に対応 する吸収線に一致するように,周波数安定化を行っ ている。これにより同時に波長の同定ができること になるが,しかし一時期,この同定が困難な状況が 生じた(Table 3)。原因としては,レーザーチュー ブ周辺の気温が25℃を超えたことが考えられる。エ ネルギー準位を一つ間違えると,計測重力値には 26µgalの系統誤差が生じるので,十分な注意が必要 である。

長期的な重力変動

2009年4月から2010年3月末の期間の、1日平均した 絶対重力変化をFig.4 に示す。1か月以上の長期にわ たる観測の中断が含まれているものの、火山活動が 次第に活発化する時期の重力変動を追跡するという 貴重なデータを得ることができた。観測データには、 測定誤差0.2~4 µgal(2.2節)を超える有意な変化と して、以下が認められる。

- (1) 2009年7月以降(Time > 180 Day)の重力の平 均値は、それ以前の期間の平均値に比べて 10.2 μgal 減少している。
- (2) 2009年10月以降(Time > 315 Day)の重力の

平均値は、それ以前の期間の平均値に比べて
 9.3 μgal 減少している。同年9月~10月にかけての時期にも、約5 μgalの重力減少が生じている。

(3) (1) (2) にみられる重力の減少は、いずれも約10日間程度の比較的短期間に生じている。

Table 3に示すように、観測期間内で延べ5台の絶対 重力計を使用しているので、上記(1)(2)の結論 に対して、測定機相互の系統誤差(器差)の問題を 検討しておくことが必要である。今回の測定では、 各重力計を桜島に設置する直前に、地震研究所の重 力基準点において測定しており、その結果はいずれ もノミナルな重力値と5 µgal 以内で一致していた。 したがって、重力計の確度としては、5/2^{1/2}=3 µgal より良いことが導かれ、メーカー公称確度の2 µgal とも矛盾しない。以上のことから、(1)(2)で認 められた重力変化は、重力計の器差によるものでは ないことが結論される。

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、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、本観測期間中の地 盤上下変動は1cm以下と推定される(京都大学防災研 究所、2010;国土地理院、2010)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p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、

$$g_{H} = \pi G \rho a^{2} \phi / [D^{2} + (H - z_{0})^{2}]^{1/2} - g_{0}$$
(1)
$$g_{0} = \pi G \rho a^{2} \phi / (D^{2} + z_{0}^{2})^{1/2}$$
(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*>>*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。以下 では、この単純なモデルによって、3章で検出された 重力変動を説明することを試みる。

4.1 2009年7月の変動

2009年7月頃から,昭和火口からの火山灰放出が激 増している(京都大学防災研究所, 2010)。したが って,以下では,この時期の重力変動を昭和火口(標 高~800m)内のマグマヘッドの上昇・下降だけを考 えることにする。

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 ρ =2.7 g/cm^3 , ϕ =0.7を採用しても,大き な間違いはないと考えられる。

以上の数値から, $g_H = -9.3 \mu gal$ を得る。この値は 3章で述べた観測値 $-10.2 \mu gal$ と, 誤差の範囲内で ほぼ一致している。

4.2 2009年10月の変動

2009年10月3日には、南岳A火口からの爆発で大量 の降灰があった。したがって、以下では、この時期 の重力変動は南岳A火口(標高~700m)内のマグマ ヘッドの上昇・下降によって説明するのが適当と考 えられる。

4.1節と同様な手順で、D=2,500 m, H=700 m, a=100 m (田中, 私信) という数値が得られ, それらを(1) 式に代入して $g_H = -8.3 \mu gal$ を得る。この値は3章 で述べた観測値 $-9.3 \mu gal$ と, 誤差の範囲内でほぼ 一致している。

5. 結論

2009年7月頃と10月頃に、それぞれ約10µgal の重 力減少を検出した。この結果から、桜島火山のマグ マ頭位の上昇が強く示唆される。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 に謝意を表する。本研究の一部は,平成21年度京都 大学防災研究所一般共同研究「ミューオン・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」(課題番号21G-04),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 支援を受けた。

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.
- 京都大学防災研究所 (2010): 第115回火山噴火予知 連絡会資料
- 国土地理院(2010): 第115回火山噴火予知連絡会資料

- Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A GlobalModel 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.
- 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

Shuhei OKUBO*, Takayuki SUGANO*, Takahito KAZAMA*, Keigo YAMAMOTO**, Masato IGUCHI**, Yoshiyuki TANAKA*, Wenke SUN*, Tetsuro TAKAYAMA**, Mamoru SAKA*, Shigeo MATSUMOTO***

* Earthquake Research Institute, The Tokyo University
 ** Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
 *** Sumiko Consultant Corp.

Synopsis

This manuscript describes how the absolute gravity measurements had been carried out since April 2009 until March 2010. Technical tips for successful measurement are presented from pieces of bitter experience during the period. Observational result clearly shows that significant (~10 μ gal) gravity decrease occurred twice during the period: July 2009 and October 2009. These epochs correspond to the onset of active emission of volcanic ash (July 2009) from the Showa volcanic vent and to the explosion from the Minamidake crater in October 2009 suggesting rise of the magma head in the conduits of the Sakurajima volcano.

Keywords: Sakurajima volcano, Absolute gravity.