重力と地殻変動連続観測に基づく桜島火山の火道状態の診断

大久保修平1)*・山本圭吾2)・井口正人2)

1) 東京大学地震研究所

2) 京都大学防災研究所

Diagnosis of Conduit State of Sakurajima Volcano Using Continuous Records on Gravity and Crustal Movements

Shuhei Okubo^{1)*}, Keigo Yamamoto²⁾ and Masato Iguchi²⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

²⁾ Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Abstract

Sakurajima is one of the most active volcanoes in the world; 500 to 1,000 explosions have occurred every year since 2009. In particular, significant seismicity (>800 volcano-tectonic earthquakes in 15 hours) and crustal deformations (>10 cm displacement) were observed on Aug. 15, 2015, followed by an unusually long quiescent period since October 2015. The event is attributed to a dyke intrusion (tensile dislocation accompanied by magma injection) beneath the volcano. We compare gravity change $\Delta g(t)$ with strain and tilt records $\varepsilon(t)$ and find two remarkable aspects: (i) ratio $|\Delta g(t) / \varepsilon(t)|$ during dyke intrusion (Aug. 15, 2015) is 20 times smaller than that during the other explosion period; and, (ii) time lag between $\Delta g(t)$ and $\varepsilon(t)$ is negligibly small during dyke intrusion, while it is $\Delta g(t)$ during the other period, exhibiting a significant time lag (~1 day) to $\varepsilon(t)$. These characteristics are explained well from the viewpoint of whether the conduit is open to the free surface or is blocked.

Keywords: Sakurajima volcano, open conduit, gravity change, crustal movements, response function

1. はじめに

桜島火山は 2006 年に活動を再開し,爆発回数は 2009 年は年間 500 回以上,2010 年~2015 年の期間は年間約 1000 回と活発な活動を続けている.この間の 2015 年 8 月 15 日に,800 回を超える A 型地震が発生するととも に,50µrad もの山頂上がりの傾斜変化が僅か 1 日のう ちに生じるというイベントがあった(京都大学防災研究 所,2015;気象庁,2015).このような大規模な地震・地殻 活動は,南岳直下へのダイク貫入をうかがわせるもので あり,噴火警戒レベルが 3 (入山規制)から4 (避難準備) に引き上げられた.また,このイベント直後の 2015 年 10 月以降 2016 年 1 月までは,爆発的噴火が一回も発生 しなくなるという異常なまでに静穏な時期を迎えた(気 象庁,2016).

われわれは,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,絶対重力計による重力 連続観測を2008年4月から継続してきた.本報告では, この時期(2015年8月14日~9月30日)の重力及び歪・ 傾斜の連続観測を比較し,両者の間の応答係数や時間遅 れを見積もる.さらに,これらの量にもとづいて,マグ マの気泡生成や脱ガスを大きく左右し,ひいては火山活 動に大きく影響を与える火道の開口・閉塞状況について 議論を進める(井口,2011; Surono *et al.*, 2012).

2. 重力観測

2-1. 観測点, 観測機材及び観測方式

絶対重力観測は、国土交通省大隅河川国道事務所・有 村観測坑局舎において実施した(Fig. 1, Table 1). 重力 計の設置場所は FG5-B 点である(Fig. 2). 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

*e-mail: okubo@eri.u-tokyo.ac.jp(〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

Table 1. Geographic coordinates of gravity and crustal movement observation stations, ARM and HAR (see also Fig. 1).

Site	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Height (meter)
ARM	31.5601	130.6724	88
HAR	31.5940	130.6333	350



Fig. 1. Locations of gravity and crustal movement observations on Sakurajima volcano. Absolute gravity is measured continuously at ARM, Arimura Crustal Deformation Observation Vault. Strain and tilt monitoring is carried out at HAR by Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. The rectangle denoted as "Dyke" shows the location of the tensile fault proposed by the Geospatial Information Authority of Japan (2015).

計による観測では,まず,真空中を反射鏡が自由落下す 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10~60秒に1回の間隔で50~100回繰返し、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10µgal程度である。一方、荒天・地震で地盤動が大きくなったりした時は、50~100µgal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



Fig. 2. Site description of absolute gravity measurement at Arimura Crustal Deformation Observation Vault. Point FG5-B is occupied for this study. All numbers are millimeters.

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 μgal 程度になる.

本観測においては、1日あたり1,416~4,800回の落下 測定が行われた(Table 3). これらのデータから1日平 均値を導くとき、その統計誤差は、0.2~4.0µgal 程度と なり、ほぼ公称精度に見合うものとなる.

なお、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(風間, 2010). そこで、陸水に関する物理モデルに基づく数値シミュ レーションを行い、降雨後に生じる陸水起源の重力擾乱 を、Kazama and Okubo (2009)の方法によって補正し た.補正に用いたパラメターは Okubo *et al.* (2013)と同 様の値である.

2-2. 観測環境と特記事項

絶対重力計はレーザーや原子時計などの精密部品を用いているため、そもそもが清浄な実験室の運転が前提となっている。そのため、爆発を繰り返す火山近傍のように、微細な火山灰が浮遊する環境で生じる多くの問題を避けるため、重力計はクリーンブース内に設置した(Okubo *et al.*, 2013).ただし、2015年8月16日11:28UT に空調機が停止するという、想定外の新たなトラ

Item	Value/Source					
Nominal Pressure	1003.68 [hPa]					
Gravity Gradient	0.264 [<i>mgal/m</i>]					
Barometric Response Factor	-0.3 [µgal/hPa]					
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	Program Package "ETGTAB" after Timmen and Wenzel (1994)					
Ocean Tide	Program Package "GOTIC2 " 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	IERS Bulletin A					

Table 2. Absolute gravity processing parameters.

ブルが発生した.空調機停止の原因は,わずか1分間の 停電によるものであったが,この空調機の仕様では,復 電しても運転再開は自動では行われない.したがって通 常であれば,人が観測点に出向いて手動で空調機を再稼 働させることにしていた.しかし,このときは,前日の 8月15日以降,桜島の噴火警戒レベルが4(避難準備) に引き上げられ,昭和火口から3km以内にある観測点 への立入りが出来なくなっていたため,長期にわたって 空調停止を余儀なくされた.立入り制限が解除されたの は9月1日07:00UTで,実際に手動で空調を再稼働でき たのは9月2日02:00UTごろとなった.

以上のような事情のため、8月16日~9月1日の約2 週間は、室温が設定値よりも3℃も高くなり、重力計の 傾斜や使用しているレーザーの安定性に影響を及ぼすこ とが懸念された、幸い室温は28℃を超えることはなく、

Observation period	Drops per set	Drop interval	Set interval	
July 26– Aug. 15, 2015	50	[sec] 10	60	
Aug. 15- Aug. 18, 2015	100	10	30	
Aug. 18 – Aug. 21, 2015	58	10	30	
Aug. 21 – Aug. 25, 2015	50	35	30	
Aug. 25- Sept. 30,2015	59	60	60	

Table 3. Details of absolute gravity measurement.

レーザーの動作保証範囲(15°~25°)からの逸脱は小 さかったので、レーザーは安定的に動作した.一方、重 力計を設置している建物は、日射と室内の温度変化とに よって傾斜するため、重力計本体も同じ量だけ傾斜する ことになる.重力計に取り付けた気泡管をWEBカメラ で連日モニターを続けたところ、日々の重力計の傾斜変 動 θ は 7.5″角(~3.6E-5 rad)程度に収まっていた.これ によって生じる見掛けの重力変化は $g\theta^2/2$ で与えられる ので(Micro-g LaCoste, 2006)、この期間の重力計の傾斜 で生じる補正量は 0.6 µgal 程度と見積もられる.これは 前節で導いた重力測定の統計誤差と同程度であるので、 以下の議論では無視することができる.

2015 年 8 月 15 日の地震活動,重力変化,及び地殻 変動とマグマ貫入

3-1. 地震活動

気象庁(2015)によれば、2015年8月14日22時UT ごろからA型地震活動が開始し、16日0時UTごろに はほぼ終息している.震源は昭和火口直下の深さ1~3 kmに集中していることから、3km以深からの物質貫入 がうかがわれる(京都大学防災研究所、2015).1時間当 たりの地震発生数が20を超えるような主要な活動期は、 8月14日23時UTごろから8月15日12時UTごろま でであるから(気象庁、2015)、活動のタイムスケールは 12~13時間といえる.

3-2. 地殻変動と重力変動

京都大学防災研究所ではハルタ山(Fig. 1)において, 傾斜および水平伸縮歪の連続観測を行っている. 歪・傾 斜変動の活動の様子は成分ごとに多少異なるものの, 8 月 15 日 0 時 UT ごろ開始し, 16 日 0 時 UT ごろにはほ ぼ終了している. タイムスケールは概ね 12~24 時間で ある (Fig. 3).

また,同じ期間の重力変動をみると,約15時間のタイムスケールで,5.8±0.4 µgalの重力の急激な減少がみられる (Fig. 3). この重力変動のタイミングやタイムス



Fig. 3. Gravity and crustal movement during the event of August 15, 2015. (top) Absolute gravity at ARM. (bottom) Radial tilt and strain at HAR. Gravity and strain/tilt records show perfect synchronization in the shaded time window.

ケールは、地殻変動や地震活動のそれらと非常に良く一 致している.火山性の地殻活動が急速に始まった時期の 重力変動を最初から最後まで追跡したもので、著者の知 る限り、世界で初めての貴重なデータといえる.

なお、ハルタ山観測点での歪・傾斜はほとんど、降雨 に応答しない.実際、日雨量が50mmを越す豪雨のあっ た2015年9月6日及び同年9月29日の傾斜にも、降雨 の影響と見られるシグナルは認められないので(Fig.4)、 以下では、歪・傾斜に与える降雨の影響は無視して解析 を進める.

3-3. マグマ貫入モデルとその検証

8月のイベントの前後で地表に生じた永久変位は,干 渉 SAR 及び GNSS によって計測されたものが報告され モデル化されている(国土地理院, 2015; Morishita *et al.*, 2016). 2015 年 8 月 15 日の活動については,重力変化, 地殻変動,及び地震活動のすべてについて,開始時期が ほぼ同期し,また変動のタイムスケールも概ね12時間 程度と一致している.これらのことから,単一の原因に よって,これらの変動が生じていると考えられる.もっ とも考えやすいのは,国土地理院(2015)が干渉 SAR お よび GNSS による地表変位を説明するために提示した, 矩形断層の開口(Fig.1)であろう.これによって,地表 面では地殻変動や重力変動が生じることは容易に理解さ れる.また開口の進行で地殻の脆性破壊が生じ,A型地 震の顕著な活動が生じると考えられる.このモデルに基 づいて Okada(1985)の方法で,ハルタ山観測点におけ る傾斜・歪みを計算すると,5microradianの山上がり傾 斜と,10microstrainの火口方向の縮みが期待値として 得られた.これらの値は,観測された10microradianの 山上がり傾斜や,9microstrainの火口方向の縮みとも良

Parameters	Search area	Optimum value	
Density of cavity-filling matter	0.4 - 3.4 g/cm ³	ρ'=2.4±0.5 g/cm ³	
Fault center		31.5791°N 130.6672°E	
Fault length		1.41 km	
Fault width		0.78 km	
Top edge depth		0.4 km	
Dip angle		76.9°	
Strike Angle		N20°E	
Tensile opening		<i>U</i> =1.6 m	
Medium density		$\rho=2.3 \text{ g/cm}^3$	

Table 4. Geometrical and physical parameters representing the dyke intrusion model.

Only density of matter filling the cavity ρ' created by dyke intrusion on August 15, 2015 is estimated to minimize the difference between observed and theoretical gravity changes. Other parameters are fixed to those after Geospatial Information Authority of Japan (2015).

く一致しているので、観測された傾斜・歪みは弾性変形 によるものといえる (Fig. 3).

一方,開口変位を生じる原因としては,地殻内へのマ グマ貫入等が想定されるけれども,広域的な引張応力が はたらいている場で,何らかの原因で地殻が受動的に裂 けて開口することでも,地表変位を説明することはでき る.そこで実際にマグマ貫入があったか否かを検証する ために,開口部を埋めた物質のバルク密度を,重力変動 から見積もってみよう.

均質半無限媒質内で矩形断層上で開口ディスロケー ションが生じたとき重力変化 ∆g は, Okubo (1992) に よって次のように与えられている.

$$\Delta g = GU[\rho T_g(\xi, \eta) + (\rho' - \rho)C_g(\xi, \eta)] - \beta \Delta h \tag{1}$$

ここで *G*, *U*, ρ , β , Δh は, それぞれ, 万有引力定数, 開 口変位量, 媒質密度, フリーエアー重力勾配 (=3.086 µgal/cm), 及び上下変位量をあらわす. また, 矩形断層 の長さ, 幅, 傾斜角, 走向の効果は, 関数 *T_g*, *C_g* 及び Chinnery (1961) の Double vertical || という表記を用い て表現されている. これらのパラメータは, 国土地理院 (2015) の値を採用する (Table 4). すると, 残る未知量 は, 開口部を満たす物質のバルク密度 ρ' だけになる.

実測された重力変化-5.8±0.4µgal に対して,(1)式 を用いて ρ' を決定すると $\rho'=2.4\pm0.5\,\text{g/cm}^3$ と推定さ

Table 5. Theoretical gravity change Δg^{cal} against density of matter filling the cavity ρ' created by dyke intrusion.

ρ' [g/cm ³]	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4
$\Delta g^{ m cal}$	-7.6	-7.2	-6.7	-6.3	-5.8	-5.4	-4.9
$\Delta g^{ m obs}$ – $\Delta g^{ m cal}$	1.8	1.4	0.9	0.5	0.0	-0.4	-0.9

 $\Delta g^{\rm obs}$ is observed gravity change at ARM during the event of August 15, 2015. Unit of gravity is µgal. The dyke is represented by tensile dislocation on a rectangular fault after Geospatial Information Authority of Japan (2015).

れ (Table 5),開口部を満たす物質密度 ρ' が,媒質とし て仮定した密度 $\rho=2.3 \text{ g/cm}^3$ とそれほど変わらないこ とから,深部マグマ溜りの過剰圧によってマグマが押し 出された結果,ダイク貫入に至ったと考えられる.なぜ なら,仮に開口が外部の引張応力が主導したり,熱水と の相互作用が関与していれば, ρ' として 0~1 g/cm³ が 得られると期待されるからである.

4. 火道の閉塞と開口の診断指標

本章では, 歪・傾斜変動に対する重力変動の応答関数 に着目し, 火道が閉塞している場合と, 開口している場 合について期待される, 応答係数と応答時間(時間遅れ) を述べる. この予測に基づいて, 2015年8月~9月の桜 島の昭和火口の閉塞・開口状態の診断を試みる.

4-1. 閉塞した火道の場合

本節では、開口断層面は媒質に密封されていて、断層 面から自由表面に通じる火道がないか、もしくはあって も力学的に閉塞状態にある場合を考える.このときのモ デルとしては、均質半無限弾性体内に断層面が埋め込ま れていて、そこで開口変位が生じたと考えるのが適当で ある.また、均質半無限弾性体の場合には、原点の下の 深さ*d* に置いた微小面積 ΔS の断層の開口によって、地 表面上の水平距離 r の場所に生じる重力変化 Δg や、傾 斜あるいは水平歪の任意成分 ε は、次式でオーダーの見 積りができる (Okada, 1985; Okubo, 1991).

$$\Delta g = O\left(\beta \frac{U\Delta S}{2\pi R^2}\right), \quad \varepsilon = O\left(\frac{U\Delta S}{2\pi R^3}\right). \tag{2}$$

ここで, $R = (r^2 + d^2)^{1/2}$ である. したがって, この場合 の応答係数は

$$\frac{\Delta g}{\varepsilon} = O(\beta \cdot R). \tag{3}$$

となる. 力源が Mogi モデルのように, 球状圧力源で体 積変化 ΔV が生じた場合には, r~d として





Fig. 4. Gravity and radial tilt/strain after the event of August 15, 2015. The top panel shows hydrological disturbance to observed gravity. Gravity change (middle panel) exhibits (1±1) day time lag behind the tilt/strain records (bottom panel). Peaks and troughs are indicated with blue and red rectangles, respectively. Vertical green lines denote explosions from the Minamidake crater.

$$\Delta g = O\!\left(\beta \frac{\Delta V}{\pi R^2}\right)\!\!, \ \, \varepsilon = O\!\left(\frac{3\Delta V}{\pi R^3}\right)$$

であるから(萩原,1977),応答係数は(3)式と同じになる.また,ディスロケーションで生じる準静的な弾性変形を考える限り,断層面や圧力源がどこにあろうとも, 重力と傾斜や歪の時間変化の間の応答時間遅れ *τ* は

$$\tau = 0 \tag{4}$$

となることも明らかである.

2015 年 8 月 15 日~16 日に観測された重力変化は-5.8 µgal であり,傾斜や歪変化は~12,000×10⁻⁹ (Fig. 3) で あるから,応答係数の観測量としては,

$$\Delta g/\varepsilon \sim 0.5 \,\mathrm{gal}$$
 (5)

を得る. この値は, (3) 式に断層から観測点までの距離 として R~2km を代入して得られる 0.6 gal と, きわめ て良く整合している. また, 重力変化と傾斜変化との間 に時間遅れがないこととも一致している. 一般に, (1)~ (4) 式の背後には, 暗黙の仮定「開口断層面は媒質に密封 されていて, 断層面から自由表面に通じる火道がないか, もしくはあっても力学的に閉塞状態にある」があること を思い出すと, 観測される応答係数 (5) 式が (3) 式の予 測値と整合し, かつ, 時間遅れもないことから, 2015 年 8月 15 日~16 日の変動は, 閉塞環境下でマグマ貫入が 生じたと結論してもよいであろう.

4-2. 開口火道系の場合—2015 年 8 月 25 日以降の応 答係数と時間遅れ

2015 年 8 月 15 日のマグマ貫入から 10 日ほど経った 8 月下旬以降の,ハルタ山での昭和火口方向への水平伸縮

重力と地殻変動に基づく桜島火山の火道状態の診断

	C(τ)											
τ (days)	-3.0	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
Tilt	0.42	0.48	0.51	0.53	0.59	0.64	0.66	0.64	0.63	0.61	0.55	0.47
Strain	-0.01	0.09	0.15	0.20	0.28	0.38	0.40	0.40	0.42	0.42	0.41	0.40

Table 6. Cross-correlations $C(\tau)$ between gravity change $\Delta g(t)$ and radial tilt/strain $\varepsilon(t)$ defined by eq. (8).

歪及び傾斜には、100~300 nanostrain/nanaoradian の振 幅の変動が見られはじめた.この歪と傾斜の変動は、ほ ぼ同期していることから (Fig. 4), ノイズではなくて, 火山活動に起因する山体の膨張・収縮を示すシグナルで ある. また,同じ時期について,Okubo et al. (2013) と 同様の陸水パラメータを用いて、地下水起源の重力擾乱 推定値を推定した(Fig. 4). この擾乱推定値を観測され た重力値から差し引くことで、火山活動起源の重力変動 を求めることができる (Fig. 4). こうして求めた補正後 の重力変動と歪・傾斜変動とを比較すると、火口方向の 傾斜と歪みがともに山体膨張のピーク(Fig.4下の赤帯) となった1±1日後に,重力の極小値(Fig.4上の赤帯) が生じていることが分かる. 逆に火口方向の傾斜と歪が 山体収縮のピーク(Fig.4下の青帯)の1±1日後に,重 力の極大値(Fig.4上の青帯)が現れている.これらの 対応の仕方は、4.1節で見た火道閉塞状態とは大きく異 なっている. Fig. 4 の山・谷の振幅比から, 応答係数を 見積もると, εとして傾斜及び歪をとった場合それぞれ について.

$$\Delta g/\varepsilon$$
(傾斜)=10~20 gal, $\Delta g/\varepsilon$ (歪)=40~80 gal, (6)

となる.これらの応答係数は,火道が閉塞しているとき に期待される(5)式の値~0.5 galに対して,20倍以上も 大きくなっている.さらに興味深いことに,重力変動の 地殻変動に対する応答時間遅れは視察により,

$$\tau = 1 \pm 1 \text{ days} \tag{7}$$

であり、弾性変形時に期待される瞬時応答はしていない (Fig. 4). さらに定量的な議論を行うには、 $\Delta g \ge \varepsilon$ の相 互相関関数

$$C(\tau) = \frac{\langle (\varepsilon(t) - \overline{\varepsilon}) \cdot (\Delta g(t + \tau) - \Delta \overline{g}) \rangle}{\sqrt{\langle (\varepsilon(t) - \overline{\varepsilon})^2 \rangle \langle (\Delta g(t) - \Delta \overline{g})^2 \rangle}},$$

$$\overline{\varepsilon} = \langle \varepsilon(t) \rangle, \quad \Delta \overline{g} = \langle \Delta g(t) \rangle$$
(8)

を評価するのが良い.ここで、〈〉は時間平均を表す.ε として傾斜及び歪をとった場合についての相互相関関数 をみると、 τ =0.5~2.0 days のときに相関は最大となっており、(7)式とも一致している(Table 6).また、その値も 0.42~0.66 となり、 $\Delta g \ge \epsilon$ の相関の程度が高いことを裏付けている.

これらの事実は,(3)式と(4)式を導く際においた暗 黙の仮定,すなわち「開口断層面は媒質に密封されてい て,断層面から自由表面に通じる火道がないか,もしく はあっても力学的に閉塞状態にある」,が破綻している ことを意味する.言い換えれば,地下深部の地殻変動力 源から自由表面への通路(火道)が開いている可能性が 高い.

火道が閉塞している場合と開口している場合につい て、地下深部からある一定質量 ΔM のマグマ供給量が あったときに地表に生じる歪・傾斜と重力変化とを、そ れぞれ ($\epsilon^{Blocked}$, $\Delta g^{Blocked}$), (ϵ^{Open} , Δg^{Open}) としよう (Fig. 5). 桜島南岳直下の深さ 5km 程度に想定されて いるマグマ溜りに対して (Iguchi, 2013),地下深部から のマグマ供給があっても、火道が開口していれば、そこ での増圧 ΔP にはごくわずかしか寄与しない、地表に生 じる歪・傾斜は

$$\varepsilon^{Open} \ll \varepsilon^{Blocked} = O\left(\frac{3\Delta V}{\pi R^3}\right) = O\left(\frac{3\Delta M}{\pi \rho R^3}\right) \tag{9}$$

となると期待される.一方,開口火道系では,供給され たマグマのほとんどは,火道内をあまり抵抗を受けるこ となく上昇すると考えられる.そのため,弾性変形で生 じる重力変化は小さく,上昇するマグマが及ぼす直接引 力が Δg^{Open} の主要成分となる.したがって,移動した 質量の重心と観測点の間の高度差を Δz とすると,

$$\Delta g^{Open} = O\left(\frac{G\Delta M}{R^2} \cdot \frac{\Delta z}{R}\right),\tag{10}$$

となる. ここで、Δz ~5 km,及び ρ=3 g/cm³ を (9)~ (10) 式に代入して、応答係数を見積もると

$$\frac{\Delta g^{Open}}{\varepsilon^{Open}} \gg O(\rho G \Delta z) \sim 0.1 \text{ gal}$$
(11)

を得る. 観測された応答係数は(6)式であり,開口火道



Fig. 5. Conceptual models explaining different response functions of gravity change to crustal movements. (a) Blocked conduit. A plug (filled circle) within a conduit blocks the supply of magma from the deep interior. Cumulative overpressure forces tensile opening in the crust as a dyke intrusion (black rectangle) accompanied by small earthquakes (black stars). Elastic dislocation theory is applicable to explain both surface displacement/tilt/strain and gravity. (b) Open conduit. Magma supplied from the deep interior is mostly transported to the free surface through the conduit. The small amount of magma left in the magma chamber at depth around 4–5 km causes much smaller surface deformation.

についての(11)式と整合している.また,このモデルで は、南岳直下の深さ4~5kmにマグマ溜り(Iguchi,2013) で生じた圧力変動によって、地表の歪傾斜は弾性的に即 時応答するけれども、マグマの方は火道を上昇・下降す るのに移動時間を要することから、必ず重力変動には応 答時間遅れが生じる(Fig.5).この時間遅れは(7)式に よれば、1日程度と見積もられる.以上のことから、 2015年8月24日以降は、桜島の火道は開口系に復帰し た可能性が高いといえる.

結論と考察

桜島における絶対重力連続観測により,昭和火口の南 2.1 km にある有村地殻変動観測坑において,2015 年 8 月 15 日の桜島の地殻活動の前後 12~18 時間をかけて, -5.8±0.4 μgal という有意な重力変動が進行したことを 検出した.これは、マグマ貫入の前後の重力変化を 0.5~1 時間毎に切れ目なく追跡した、おそらく世界で初 めての記録である.この時期の重力変化・地表変位から 貫入物質の密度を見積もったところ,2.4±0.5 g/cm³ と マグマの密度としては妥当な結果を得た.

さらに 2015 年 8 月 15 日~9 月 30 日までの重力変動 データを歪・傾斜の連続観測データと比較し,重力の歪・ 傾斜に対する応答係数と応答時間を見積もった.応答係 数と応答時間はそれぞれ,マグマ貫入活動中の 8 月 15~16 日の期間では,0.5 gal 及び 0.0 日となり,古典的 弾性論が適用できる場合に期待される値と整合してい た.これらの事実と,この期間に昭和火口直下の深さ 1~3 km に震源をもつ,地震が多発していたこととを考 え合わせると,桜島の浅部火道系が閉塞したことにより, 深部から供給されたマグマが地殻浅部に貫入したと考え られる.

一方,地殻活動がほぼ終息した8月24日以降の応答 係数と応答時間は、10~80gal及び約1日と、前述の値 とは大きく異なっていた.これらの事実は、昭和火口下 の火道が閉塞していることとは相容れない.すなわち、 開口火道系を強く示唆する結果となっている.実際、深 部から深さ4~5kmに想定されているマグマ溜りへの マグマ供給があっても、閉塞系に比して開口系では、格 段に効率の悪い地殻変動しか生じないと考えられるのに 対し、重力変化の相当部分は質量移動に起因するから、 重力変化のオーダーは変わらない.このため、開口状態 では、地殻変動に対する重力変動の応答係数が非常に大 きくなるのであろう.以上のことから、応答係数及び応 答時間の様子から、火道の閉塞・開口状態の診断ができ る.

謝 辞

観測実施にあたって、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 ただいた.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.匿名査読者からは本稿を改訂する 上で有益なコメントをいただいた.以上の方々に感謝の 意を表す.本研究の一部は、平成26年度京都大学防災 研究所一般共同研究「高速で桜島火山体を上昇するマグ マを、高品位重力連続データ・宇宙線軟成分観測・地殻 変動連続観測で視る」(課題番号26G-02)、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

- Chinnery, M.A., 1961, The deformation of ground around surface faults, Bull. Seism. Soc. Am., 51, 355–372.
- 萩原幸男,1977,伊豆半島の異常隆起を説明する茂木モデルと それに伴う重力変化,地震研究所彙報,52,301-309.
- 井口正人, 2011, はじめに、シンポジウム「開口型火道システム における火山噴火予知を考える」予稿集, http://www.svo. dpri.kyoto-u.ac.jp/110714syukai/23B-01.pdf.
- Iguchi, M., 2013, Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observations, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 1–18.
- 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,196頁.
- 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., 114, B08402, doi:10.1029/2009JB006391.
- 気象庁, 2015, 火山噴火予知連絡会拡大幹事会資料, 桜島 (2015 年8月19日現在), http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/ data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/kakudai 150821/2_jma_sakurajima.pdf.
- 気象庁,2016,火山噴火予知連絡会拡大幹事会資料,桜島(2016 年2月10日現在),http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/ data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/134/134_02-1.

pdf.

- 国土地理院, 2015, 平成 27 年 (2015 年) 桜島の火山活動に伴う 地殻変動, http://www.gsi.go.jp/cais/topic150818-index. html.
- 京都大学防災研究所,2015,火山噴火予知連絡会拡大幹事会資料,http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/ STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/kakudai150821/6_kyodai _sakurajima.pdf.
- 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. Oceanogr., 56, 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, 47, 243–248.
- Micro-g LaCoste, 2006, FG5 Absolute Gravimeter User's Manual, http://www.microglacoste.com/pdf/FG5Manual2007.pdf.
- Morishita, Y., T. Kobayashi and H. Yarai, 2016, Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event in Sakurajima in 2015 by exploiting the right- and left-looking ALOS-2 InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068293.
- Niebauer, T. M., G. S. Sasagawa, J. E. Faller, R. Hilt and F. Klopping, 1995, A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, 32, 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, 611 頁.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 75, 1135–1154.
- Okubo, S., 1991, Potential and gravity changes raised by point dislocations, *Geophys. J. Int.*, **105**, 573–586.
- Okubo, S., 1992, Gravity and potential changes due to shear and tensile faults in a half-space, *J. Geophys. Res.*, **97**, B5, 7137– 7144.
- 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.*, 24, 489–492.
- Okubo, S., T. Kazama, K. Yamamoto, M. Iguchi, Y. Tanaka, T. Sugano, Y. Imanishi, W. Sun, M. Saka, A. Watanabe and S. Matsumoto, 2013, Absolute gravity variation at Sakurajima volcano from April 2009 through January 2011 and its relevance to the eruptive activity of Showa crater, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 58, 153–162.
- Surono, P. Jousset, J. Pallister, M. Boichu, M.F. Buongiorno, A. Budisantoso, F. Costa, S. Andreastuti, F. Prata, D. Schneider, L. Clarisse, H. Humaida, S. Sumarti, C. Bignami, J. Griswold, S. Carn, C. Oppenheimer and F. Lavigne, 2012, The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano A '100-year' event, J. Volcanol. Geotherm. Res., 241–242, 121–135.
- Timmen, L. and H.G. Wenzel, 1994, Worldwide synthetic gravity tide parameters available on Internet, *BGI Bull. Inf.*, 75, 32–40.

(Received September 12, 2016) (Accepted November 29, 2017)