

1.4 噴火準備期における伊豆大島の相対精密重力測定

噴火準備期における伊豆大島の相対精密重力測定

高木朗充*・福井敬一・山里 平 (気象研究所地震火山研究部)
 藤原健治** (大阪管区气象台)
 加治屋秋実** (大島測候所)

* 現所属：文部科学省 研究開発局 地震・防災研究課

** 現所属：気象庁地震火山部火山課

Relative Precise Gravity Survey at Izu-Oshima Volcano in the Eruption Preparation Period

by

Akimichi Takagi^{1*}, Keiichi Fukui¹, Hitoshi Yamasato¹, Kenji Fujiwara^{2**} and Akimi Kajiji^{3**}

1. *Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan*

2. *Osaka District Meteorological Observatory, Osaka, Japan*

3. *Oshima Weather Station, Oshima, Tokyo, Japan*

*Present affiliation: *Earthquake and Disaster-Reduction Research Division, Research and Development Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Tokyo, Japan*

**Present affiliation: *Volcanological Division, Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan*

(Received August 7, 2009; Accepted March 5, 2010; Published September 2, 2010)

Abstract

In order to investigate the magma accumulation process of Izu-Oshima Volcano in the eruption preparation period, we conducted 14 relative microgravity surveys from 2004 to 2009. The gravity changes tend to decrease near the northern margin of the summit caldera, and rates of negative gravity changes reached as much as 0.015 mgal/year. Assuming the Mogi model, we estimated the pressure increase at a depth of 3.65 km with increasing volume of $7.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$, which could account for the observed data. However, the uplift rate calculated with the estimated increasing volume would be five times as large as the observed uplift rate by the GPS network, so these estimated parameters cannot explain both gravity changes and uplift changes simultaneously.

Izu-Oshima Island could be a volcano having an extraordinary magma accumulation system that cannot be expressed as a simple physical model. More accurate microgravity survey with the uplift observation should be conducted in the future to clarify the magma accumulation system of this complicated volcano.

1. はじめに

重力観測によって火山活動に伴う変化が捉えられたという報告は、例えばエトナ、マヨン、三宅島など数多い(山本・他, 1998; 古屋・他, 2001; Jentzsch *et al.*, 2001; 大島・他, 2003; Jousset *et al.*, 2003; Carbone *et al.*,

2007 等)。地表における重力変化は、地下の密度構造の変化や質量の移動に伴って生じる。このため噴火活動に伴うマグマの移動や大規模な構造変化が生じた場合、地表では重力変化が観測される場合がある。上述の重力変化の報告例の多くは、噴火活動前後に観測されている。しかし噴火活動期をさむ噴火準備期には顕著な重力変化は観測されないものの、火山体直下でマグマの蓄積が行われている場合には、地下の密度構造はわずかながら変化するため、精密な重力測定を継続すればこれを検知できるはずである。

伊豆大島火山は 20 世紀以降これまで約 30 年間隔で

Corresponding author: Akimichi Takagi

Earthquake and Disaster-Reduction Research Division, Research and Development Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology – Japan

E-mail: atakagi@mext.go.jp

ほぼ周期的に噴火活動を繰り返してきた（川辺, 1991 等）。前回 1986 年の噴火後も地下ではマグマ蓄積が継続していると考えられ、このことは地殻変動観測からも定量的に評価されている（高木・他, 2008）。我々は、重力変化からマグマ蓄積過程を検知する目的で、2004 年から精密相対重力観測を開始した。これまでの 5 年間で 14 回の観測が実施されたので、ここまでのデータのとりまとめを行い、明らかになったことを報告する。

2. 観測

2.1 観測点

伊豆大島では、国土地理院（GSI）が一等重力点と水準点を整備し、数年に 1 回重力測定を実施している。また東京大学地震研究所（ERI）も島内に水準点網を構築している。1986 年の噴火活動前後にこれらの測点で重力観測が実施され、大久保・他（1988）は噴火前後で数十～マイナス数十 μgal の変化が生じたことを報告している。また、著者のひとりもこれらの測点において別に観測を行い、 $-100 \mu\text{gal} \sim +50 \mu\text{gal}$ の変化を報告している（小泉・他, 1988）。

我々は、過去の観測成果を参照することができるよう、これまでの観測成果と同様に国土地理院の重力点及び水準点、東京大学地震研究所の基準点を引き続き利用することとし、これに加え、国土地理院の電子基準点、気象庁（JMA）および気象研究所（MRI）の GPS 観測点での重力観測も新たに加えた。重力変化量の適切な推定には、測点において上下変動を把握する必要があるが、これらの点では水準観測や GPS 観測により地殻変動観測が実施されているため、推定のための補正に利用が可能である。

Fig. 1 に観測点配置を示す。白い丸（○）は元町の大島測候所地震計室の基台に据え付けられた一等重力点 FGS を示す。重力測定はここを固定点として行った。黒色の丸（●）、四角形（■）、三角形（▲）はそれぞれ、国土地理院の水準点及び電子基準点、東京大学の基準点、気象研究所及び気象庁の GPS 観測点を示す。5 年間の観測期間中に測点の亡失、あるいは観測点の移設等により観測を中止あるいは休止した点がある。これらはシンボルと観測点名を小さく標記した。Table 1 に観測点の座標等の詳細を示す。ここに観測点移設に伴う観測点名の変更についても記す。気象研究所の GPS 観測点は繰り返し観測から連続観測点に順次移行したことに伴い、重力測定点も 8 点で移設が必要となった。これにより中止あるいは休止した観測点名の最後には添え字 \circ を加えた。のべ 51 の観測点で測定を実施したが、現在実施している点は 38 点である。Table 1 中、星印を添えた測点が現在中止または休止したものである。

なお、1986 年噴火後の 1992 年に大島測候所が津倍付から元町家の上に移設したことに伴い、一等重力点 FGS も同様に移設された。これまで、移設前の FGS を固定点にした観測に基づく多くの報告がなされているが、本報告は移設後の FGS を固定点にしたものである。

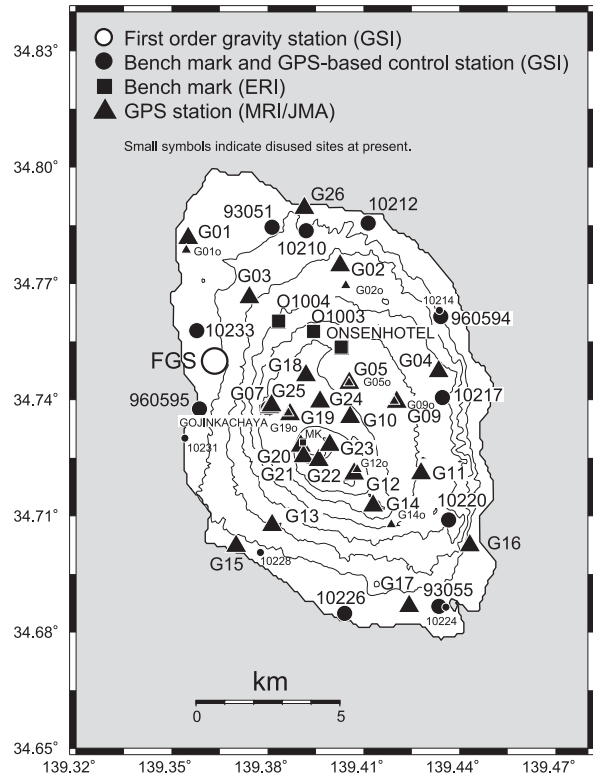


Fig. 1 Distribution of the gravity stations on Izu-Oshima Island. The large open circle denotes a reference station of the microgravity survey. This station is named FGS and is a first-order gravity station installed by the Geographical Survey Institute of Japan (GSI). Solid circles denote bench marks and GPS-based control stations (GSI). Solid squares indicate bench marks installed by the Earthquake Research Institute, Tokyo University (ERI). Solid triangles denote GPS stations installed by the Meteorological Research Institute and the Japan Meteorological Agency (MRI-JMA). Topographical contour interval is 100 m.

2.2 重力計

重力観測における測定精度は、重力計を同時に複数台使用することで向上させることが可能である。我々は LaCoste & Romberg D-type #109（以下、D109）、Scintrex CG-3M #454（以下、CG3）、及び Scintrex CG5 #033（以下、CG5）の 3 台の相対重力計を使用した（ただし 2008 年 2 月までは前者の 2 台のみ）。このうち D109 は著者のひとりが 1985～1988 年に伊豆大島の重力測定に使用したものである（小泉・他, 1988）。CG3 及び CG5 はサーボ機構を採用した自動重力計である。D109 は測定分解能が 1 桁高い（ $0.1 \mu\text{gal}$ ）が、繊細な機械式重力計であるため精度を高めるために、取り扱いには小泉・他（1988）とほぼ同様に、様々な細心の注意を払った。測定は期間を通して高木が行った。なお、重力固定点 FGS でダイヤル値を 175.0 にリセットして行った。

2.3 測定

測定は複数台の重力計で同時に行った。自動重力計の CG3 と CG5 は 1 秒サンプリングで 60 回測定を 3 セット（各セットの間隔は 30 秒）実施した。測定ルートは

Table 1 Description of gravity stations. Stations with an asterisk are currently unused.

Site	Latitude			Longitude			Altitude (m)	Note
	(deg)	min	sec)	(deg)	min	sec)		
GSI-FGS	34	45	0.0	139	21	48.0	76.0	大島測候所. 大島一等重力点.
GSI-GOJINKACHAYA*	34	44	16.3	139	22	48.3	557	御神火茶屋
GSI-10210	34	47	1.0	139	23	31.0	80.2	岡田川の道. 二等水準点
GSI-10212	34	47	8.0	139	24	40.8	24.7	泉津秋之原. 二等水準点
GSI-10214*	34	45	47.0	139	26	1.0	78.6	泉津福重. 二等水準点
GSI-10217	34	44	26.1	139	26	4.4	348.7	泉津原野. 二等水準点
GSI-10220	34	42	32.3	139	26	11.3	321.7	差木地余川. 二等水準点
GSI-10224*	34	41	11.3	139	26	8.4	69.3	差木地沖ノ根. 二等水準点
GSI-10226	34	41	5.5	139	24	14.5	29.5	差木地ゴーノ一. 二等水準点
GSI-10228*	34	42	2.1	139	22	39.4	58.7	野増上山. 二等水準点
GSI-10231*	34	43	48.2	139	21	14.5	13.5	野増. 二等水準点
GSI-10233	34	45	28.2	139	21	28.0	40.9	元町馬の背. 二等水準点
GSI-93051	34	47	4.2	139	22	52.6	97.4	岡田長坂. 電子基準点「大島1」
GSI-93055	34	41	12.0	139	26	0.5	75.9	差木地沖ノ根. 電子基準点「大島2」
GSI-960594	34	45	41.2	139	26	2.5	100.8	泉津津福重. 電子基準点「大島3」
GSI-960595	34	44	15.4	139	21	30.9	46.9	元町下高洞. 電子基準点「大島4」
ERI-ONSENHOTEL	34	45	12.8	139	24	10.5	498.4	温泉ホテル
ERI-O1003	34	45	27.5	139	23	39.3	440.5	湯場
ERI-O1004	34	45	37.0	139	23	0.0	300.2	大丸山
ERI-MK*	34	43	44.4	139	23	27.5	672.0	三原山火口縁
MRI-G01	34	46	54.0	139	21	18.2	19	「北の山」. GPS連続点. 2009/2からG01oを変更.
MRI-G01o*	34	46	42.9	139	21	16.0	25	「飛行場南」. GPS繰り返し点
MRI-G02	34	46	28.5	139	24	9.0	224	「BT点」. GPS連続点. 2005/3からG02oを変更.
MRI-G02o*	34	46	9.9	139	24	15.5	270	「峠野水池」. GPS繰り返し点
MRI-G03	34	45	58.7	139	22	26.9	188	「旧測候所」. GPS連続点(JMA)
MRI-G04	34	44	50.1	139	26	0.0	328	「奥山砂漠」. GPS繰り返し点
MRI-G05	34	44	39.4	139	24	19.6	481	「裏砂漠北東」. GPS連続点. 2008/7からG05oを変更.
MRI-G05o*	34	44	39.8	139	24	19.1	480	「裏砂漠北東」. GPS繰り返し点
MRI-G07	34	44	16.7	139	22	49.7	558	「御神火茶屋」. GPS連続点(JMA)
MRI-G09	34	44	21.7	139	25	12.7	439	「裏砂漠東」. GPS連続点. 2008/7からG09oを変更.
MRI-G09o*	34	44	22.6	139	25	10.0	437	「裏砂漠東」. GPS繰り返し点
MRI-G10	34	44	7.6	139	24	20.4	535	「櫛形山北」. GPS連続点
MRI-G11	34	43	15.4	139	25	40.2	403	「差木地検知網」. GPS連続点
MRI-G12	34	43	15.0	139	24	25.0	686	「白石山」. GPS連続点. 2008/7からG12oを変更.
MRI-G12o*	34	43	19.3	139	24	28.3	662	「白石山」. GPS繰り返し点
MRI-G13	34	42	27.2	139	22	52.5	180	「間伏林道」. GPS繰り返し点
MRI-G14	34	42	45.3	139	24	46.4	615	「二子山VORTAC」. GPS連続点. 2007/7からG14oを変更.
MRI-G14o*	34	42	27.9	139	25	6.6	415	「二子山」. GPS繰り返し点
MRI-G15	34	42	7.9	139	22	11.9	32	「野増」. GPS連続点
MRI-G16	34	42	8.3	139	26	35.2	37	「筆島」. GPS繰り返し点
MRI-G17	34	41	12.0	139	25	26.7	42	「差木地」. GPS連続点(JMA)
MRI-G18	34	44	46.5	139	23	30.8	555	「鎗端」. GPS連続点
MRI-G19	34	44	10.1	139	23	12.7	553	「A点」. GPS連続点. 2005/10からG19oを変更.
MRI-G19o*	34	44	11.9	139	23	10.8	548	「表砂漠」. GPS繰り返し点
MRI-G20	34	43	41.0	139	23	24.8	675	「三原神社」. GPS連続点. 2009/2からERI-MKを変更.
MRI-G21	34	43	31.2	139	23	27.9	703	「三原新山」. GPS連続点
MRI-G22	34	43	27.6	139	23	45.1	702	「三原火孔南」. GPS連続点
MRI-G23	34	43	41.7	139	23	57.4	733	「剣ヶ峰」. GPS連続点
MRI-G24	34	44	21.9	139	23	46.5	531	「B火口東」. GPS連続点
MRI-G25	34	44	18.5	139	22	52.1	557	「御神火展望台」. GPS繰り返し点
MRI-G26	34	47	21.9	139	23	28.8	3.3	「岡田港」. GPS連続点

FGS を基点とする往復相対測定とした。測定ルートは島の海岸沿いと内陸に分けて行った。

海岸沿いの測定のうち、北岸ルートは大島西部のFGSを基点とし、主に海岸沿いを通る都道208号線沿いに岡田を經由し、大島東部で折り返す。南岸ルートも同様に波浮を經由し大島東部で折り返す。折返し点は観測開始当初からしばらくは固定されていなかったが、島の南東部の二子山(G14)にGPS、自動光波測距装置等の地殻変動観測のための局舎を設営したため、2007年7月以降はG14を北岸ルート及び南岸ルートの折返し定點とした。

内陸部の測定はFGSを起点とし、都道207号線でカ

ルデラ外輪北部まで登り、カルデラ内及び三原山經由で御神火茶屋に至るルートである。都道207号線のカルデラ外輪北部までの登山ルート沿いの測点は、大久保・他(1988)や小泉・他(1988)によって1986年噴火前後の観測結果が報告され重要な位置づけにある(例えば、O1004、O1003、ONSENHOTEL等)。内陸ルートは測点数が多いという理由もあり、2006年7月以降は、登山ルートとカルデラルートに分けて実施した。折返し点はともにGOJINKACHAYAであったが、ここでの測定が困難となったため、2008年11月からはこの近傍のG07に変更した。

これまで14回行った観測の履歴をTable2に示す。

Table 2 History of microgravity surveys.

Date	Route	Number of stations	Turning point	Instrument	Observer
2004/3/30	Southern coast	11	10220	D109, CG3	A.Takagi, K.Fukui
2004/3/31	Inland	12	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, K.Fukui
2004/4/1	Northern coast	9	10220	D109, CG3	A.Takagi, K.Fukui
2004/7/27	Southern coast	16	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, K.Fujiwara, T.Yamamoto
2004/7/28	Circuit along the coast	10		D109, CG3	A.Takagi, K.Fujiwara, T.Yamamoto
2004/11/9	Inland	13	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, K.Fujiwara
2004/11/10	Southern coast	14	G04	D109, CG3	A.Takagi, K.Fujiwara
2004/11/11	Northern coast	7	G04	D109, CG3	A.Takagi, K.Fujiwara
2005/3/9	Northern coast	8	G09	D109, CG3	A.Takagi, K.Fujiwara
2005/3/10	Inland	9	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, K.Fujiwara
2005/3/11	Southern coast	4	G16	D109, CG3	A.Takagi, K.Fujiwara
2005/10/25	Inland	8	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, K.Fukui
2005/10/26	Southern coast	9	G11	D109, CG3	A.Takagi, K.Fukui
2005/10/27	Northern coast	10	G11	D109, CG3	A.Takagi, K.Fukui
2006/7/11	Northern coast	5	G04	D109, CG3	A.Takagi, H.Yamasato, H.Kuroki
2006/7/12	Southern coast	10	G04	D109, CG3	A.Takagi, H.Yamasato, H.Kuroki
2006/7/13	Climbing	11	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, H.Yamasato, H.Kuroki
2006/7/14	Caldera area	6	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, H.Yamasato
2007/3/16	Northern coast	7	960594	D109, CG3	A.Takagi, K.Fukui
2007/3/19	Southern coast	13	960594	D109, CG3	A.Takagi, T.Sakai
2007/3/22	Caldera area	7	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, T.Sakai
2007/7/23	Climbing	6	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, S.Ando
2007/7/24	Southern coast	12	G14	D109, CG3	A.Takagi, S.Ando
2007/7/25	Caldera area	8	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, S.Ando
2007/7/26	Northern coast	10	G14	D109, CG3	A.Takagi, S.Ando
2007/12/11	Southern coast	7	G14	D109, CG3	A.Takagi, K.Fukui
2007/12/16	Northern coast	11	G14	CG3	A.Takagi, K.Fukui
2007/12/19	Climbing	7	GOJINKACHAYA	D109, CG3	A.Takagi, K.Fukui
2008/2/24	Southern coast	9	G14	D109, CG3	A.Takagi, H.Yamasato
2008/2/25	Northern coast	7	G14	D109, CG3	A.Takagi, H.Yamasato
2008/2/26	Climbing	8	GOJINKACHAYA	CG3	A.Takagi, H.Yamasato
2008/7/25	Caldera area	7	GOJINKACHAYA	D109, CG3, CG5	A.Takagi, H.Yamasato
2008/7/26	Southern coast	8	G14	D109, CG3, CG5	A.Takagi, H.Yamasato
2008/7/27	Northern coast	8	G14	D109, CG3, CG5	A.Takagi, H.Yamasato
2008/7/28	Climbing	8	GOJINKACHAYA	D109, CG3, CG5	A.Takagi, H.Yamasato
2008/11/13	Southern coast	8	G14	D109, CG3, CG5	A.Takagi, K.Fukui
2008/11/14	Caldera area	8	G07	D109, CG3, CG5	A.Takagi, K.Fukui
2008/11/15	Northern coast	10	G14	D109, CG3, CG5	A.Takagi, K.Fukui
2008/11/16	Climbing	9	G07	D109, CG3, CG5	A.Takagi, K.Fukui
2009/2/20	Special round trips	3	G01	D109, CG3, CG5	A.Takagi, S.Ando
2009/2/21	Mt.Mihara	6	G07	D109, CG3, CG5	A.Takagi, S.Ando
2009/2/22	Caldera area	8	G07	CG3, CG5	A.Takagi, S.Ando
2009/2/23	Northern coast	6	G14	D109, CG5	A.Takagi, S.Ando
2009/2/24	Inland	8	G07	D109, CG3, CG5	A.Takagi, K.Fukui, S.Ando
2009/2/26	Climbing	6	G14	D109, CG3, CG5	A.Takagi, K.Fukui, S.Ando
2009/6/21	Mt.Mihara	7	G07	D109, CG3, CG5	A.Takagi, K.Fukui, T.Shimbori
2009/6/22	Southern coast	8	G14	D109, CG3	A.Takagi, K.Fukui, T.Shimbori
2009/6/23	Northern coast	8	G14	D109, CG5	A.Takagi, K.Fukui, T.Shimbori
2009/6/26	Caldera area	9	G07	D109, CG5	A.Takagi, K.Fukui, T.Shimbori



Fig. 2 Measuring microgravity with gravity meters at G22 on Mt. Miharayama, on January 14, 2006.

測点数は 4 ルートとも 10 点程度である。各ルートにおける測定数には起点と折返し点も含む。天候等の状況により復路に測定ができなかった測点の数も含まれているが、解析処理には往路、復路とも測定した点のみを使用した。

なお、大島測候所の廃止が 2009 年 10 月に予定されており、固定点としていた FGS が廃点となる可能性が生じたため、代替点の候補として 960595 を選定し、2008 年 11 月からは起点測定を FGS と 960595 の両点で行った。

各測点では、重力測定値の補正に使用するための機械高（基準点からの高さ）、大気圧を測定した。Fig. 2 に測定風景の写真を示す。

3. 測定結果

最終的な相対重力値を算出するために使用するデータの条件は、2 台以上の重力計による、往復測定値があるものとし、それ以外は除外した。次に測定値に機械高補正、気圧補正、潮汐補正、ドリフト補正、及び降水補正を行った。機械高補正はそれぞれの重力計に対して測定した機械高にフリーエア勾配 (-0.3086 mgal/m) を乗じた値を差し引いた。気圧補正は、測点で計測した現地気圧と標準気圧 1013.25 (hPa) との相対差に補正係数 $-0.0003 \text{ (mgal/hPa)}$ を乗じた値を差し引いた。潮汐補正は固体潮汐と海洋潮汐を計算するプログラム GOTIC2 (Matsumoto *et al.*, 2001) を用いた。1066A 地球モデル (大久保・遠藤, 1983) に基づく Green 関数を選択し、Tamura (1982) のポテンシャルを考慮し、50 m メッシュで計算した。降水の重力に及ぼす影響は、渡辺・他 (1990) が拡散モデルによる手法を提案している。渡辺・他 (1990) は、1987~1989 年の 13 回の重力測定値を用い、伊豆大島を直径 10 km の円盤に近似し、その周辺で水位ゼロという境界条件の下で最適の拡散係数を求めた。小論においても、それと同じ拡散係数 $0.2 \text{ m}^2/\text{sec}$ を用い、同様に降水の重力に

及ぼす影響を補正した。なお、日降水量は大島測候所 (FGS) のデータを用いた。

以上の補正処理後、バネ振り子に起因するドリフト補正を行った。往路と復路の重力測定値の差を測定間隔の時間に対してプロットし、そのドリフト勾配を最小自乗法で求めた。往復の測定時間中はこのドリフト係数で重力値が直線的に変化していると仮定してドリフト補正を行う。しかし、運搬時あるいはケースの出し入れの際の重力計に与えられたショックによるテア (データのとび) があると、このドリフト勾配は直線にのらない。直線から大きくはずれた場合にはドリフト補正することが困難である。近似直線の R-2 乗値が概ね 0.75 より小さい場合のデータは採用しないこととした。

これらの処理を施した後、2 台以上のデータがある場合の FGS を固定点とする相対重力値の単純平均を各点の最終重力値とした。Fig. 3 に最終重力値が 2 回以上存在する 42 地点の最終重力値の時系列図を示す。測定精度の目安を、往路と復路の測定値の平均値からの較差と、複数台の重力計による測定値の標準偏差の和とし、Fig. 3 のエラーバーに示した。

なお、自動重力計では測定時間中の重力値の標準偏差も自動的に算出される。60 秒 \times 3 回の測定で得られた標準偏差の平均は $0.02 \sim 0.2 \text{ mgal}$ の範囲に収まることが多いが、時に 0.4 mgal にも達するときがあった。これは大島が海洋上にあるため強い波浪のある時に測定した場合には、重力値に大きなノイズとして重畳するからである。内陸の観測点は比較的波浪ノイズは少ないが (例えば、G18、G24、G25 等)、海岸沿い、とりわけ外洋に面した南西海岸沿いの波浪ノイズは、定常的に大きかった (例えば、93055、G15、G17 等)。

Fig. 3 を見ると、測点によっては明らかな重力値の経年変化を示す観測点があることに気づく。より適切な評価を行うために、最終値が 3 年以上にわたってのべ 5 回以上存在する 22 測点を選び、うち 18 測点を示したものが Fig. 4 である。局地的に顕著な地殻変動が知られている三原新山周辺の測点 4 点 (G05、G22、G24、G25) は除外した。最終重力値を時間に対して線形近似した直線と、その変化速度及び推定量の 1σ の標準偏差も示した。データのばらつきも大きくデータ数も十分とはいえない測点もあるが、5 年という短期間において経年変化が見て取れる測点もある。その特徴は、内陸のカルデラ北部周辺の測点ほど重力値は減少し (ONSENHOTEL、O1003、O1004 等)、そこから離れる測点ほど増大する (G01o、93055 等)。重力値は地殻変動により隆起することで減少する。よってこの結果は、一次近似的にはカルデラ北部周辺が相対的に隆起していることを示しているのかもしれない。これらの結果を Table 3 に示す。

4. 圧力源推定

地殻変動観測によって伊豆大島では経年的な膨張が観測されている (高木・他, 2008)。変動パターンは時

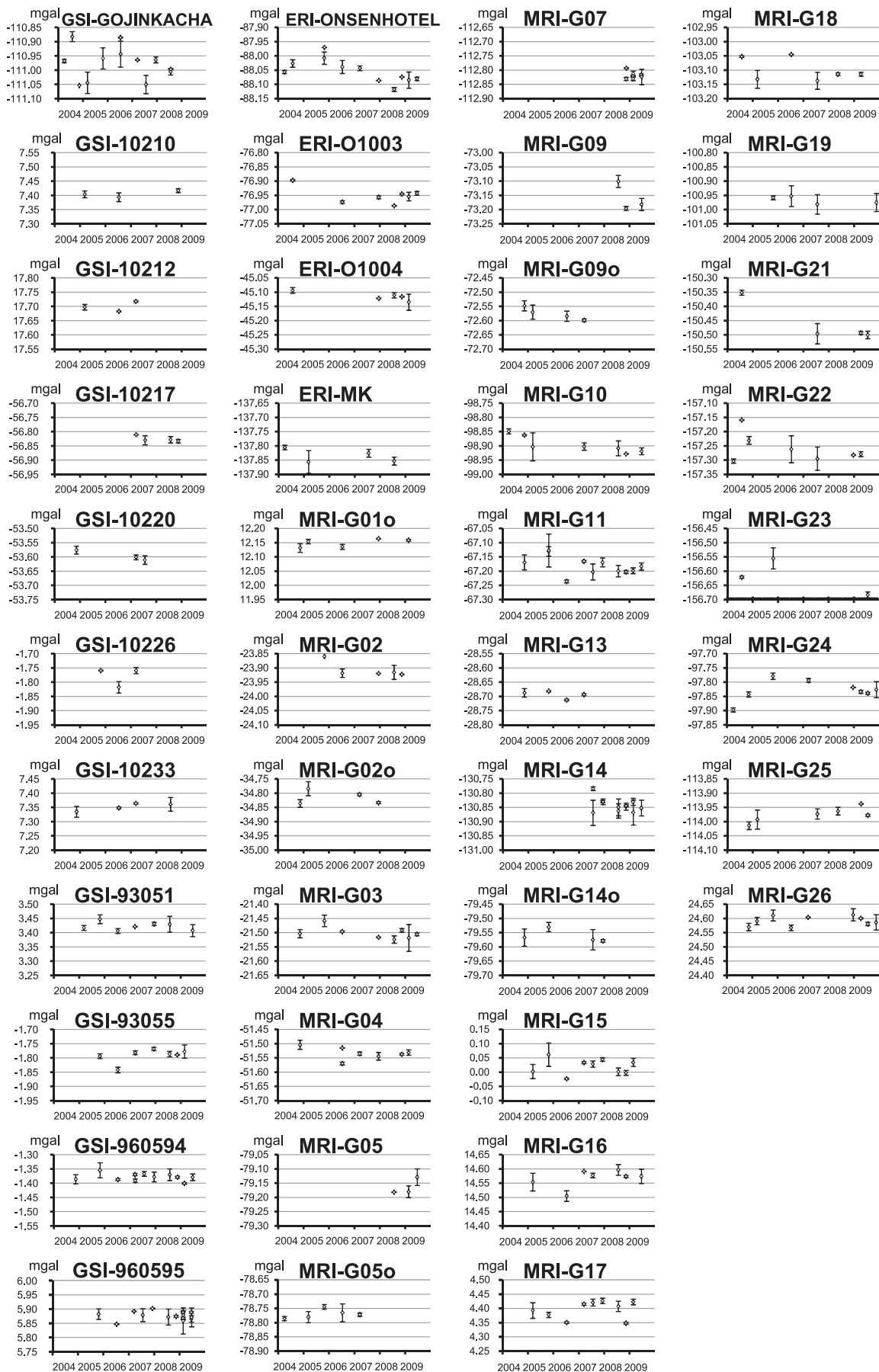


Fig. 3 Gravity changes of all stations referenced to FGS.

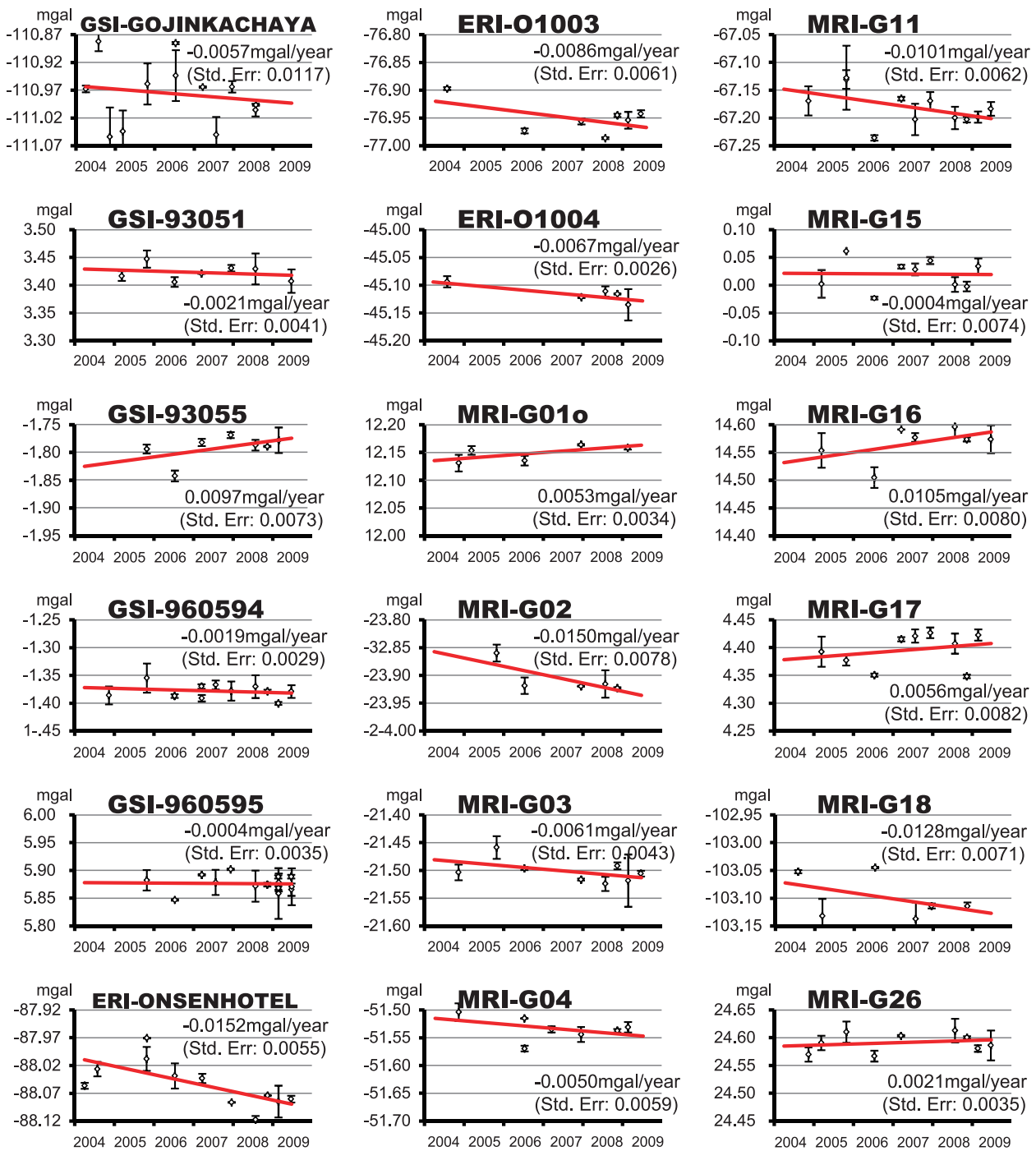


Fig. 4 Averaged gravity change rates with Std. Error (1σ) at the major stations except stations on and around Mt. Miharayama, referenced to FGS.

間空間的に複雑であり、これを単純なモデルで説明することは困難であるが、等方的な膨張性の変動から一次近似的には球状圧力源を仮定することで問題はない。そこで、以下、伊豆大島の変動を単一の球状圧力源で生じたものと仮定して解析する。

一般に地下で周辺密度と異なる物質が充填された時、地表面では地殻変動が観測されるとともに、重力変化も観測される。萩原 (1977) は茂木モデル (Mogi, 1958) を基に、球状圧力源により弾性体の地表で生じ

る重力変化の理論式を示した。

重力変化 δg は、以下の 4 つの成分の総和からなる。

1. 測点が隆起することによって変化するフリーエアーの成分 δf
 2. 密度の異なる球の体積変化による成分 δg_0
 3. 隆起した質量による成分 δg_1
 4. 球殻が膨張することにより周辺の弾性体に生じる密度変化による成分 δg_2
- いま万有引力定数を $G (= 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2})$ 、フ

Table 3 Averaged gravity change rates with Std. Error (1σ) at the major stations except stations on and around Mt. Miharayama, referenced to FGS.

Site	Initial survey	Last survey	Total number of measurements	Averaged gravity changes with Std. Error (1σ) [mgal/Year]
GSI-FGS	2004/3/31	2009/ 6/26	96	0.0000
GSI-GOJINKACHAYA	2004/3/31	2008/ 7/28	11	-0.0057 ± 0.0117
GSI-93051	2005/3/9	2009/ 6/23	7	-0.0021 ± 0.0041
GSI-93055	2005/10/26	2009/ 2/26	7	0.0097 ± 0.0073
GSI-960594	2004/11/11	2009/ 6/23	11	-0.0019 ± 0.0029
GSI-960595	2005/10/26	2009/ 6/26	14	-0.0004 ± 0.0035
ERI-ONSENHOTEL	2005/10/25	2009/ 6/21	10	-0.0152 ± 0.0055
ERI-O1003	2004/7/27	2009/ 6/21	7	-0.0086 ± 0.0061
ERI-O1004	2004/7/27	2009/ 2/24	5	-0.0067 ± 0.0026
MRI-G01o	2004/11/11	2009/ 2/20	5	0.0053 ± 0.0034
MRI-G02	2005/10/27	2008/11/15	5	-0.0150 ± 0.0078
MRI-G03	2004/11/9	2009/ 6/21	8	-0.0061 ± 0.0043
MRI-G04	2004/11/10	2009/ 2/22	8	-0.0050 ± 0.0059
MRI-G11	2004/11/10	2009/ 6/23	11	-0.0101 ± 0.0062
MRI-G15	2005/3/11	2009/ 2/26	9	-0.0004 ± 0.0074
MRI-G16	2005/3/11	2009/ 6/23	7	0.0105 ± 0.0080
MRI-G17	2005/3/11	2009/ 2/26	9	0.0056 ± 0.0082
MRI-G18	2004/7/27	2009/ 6/21	9	-0.0128 ± 0.0071
MRI-G26	2004/11/11	2009/ 6/23	9	0.0021 ± 0.0035

フリーエア勾配を C_f (mgal/m)、球殻内部に充填された物質の密度を ρ_0 、周辺弾性体の密度を ρ 、ラメ定数を λ 、 μ とする。地表面から深さ D にある球殻が等圧膨張し、球状圧力源の体積変化量が δV となったとき、地表面の圧力源直上からの水平距離 r における重力変化の成分は、萩原 (1977) からそれぞれ以下の通りに表せる。

$$\delta f = \frac{3\delta V C_f}{4\pi} \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \quad (1)$$

$$\delta g_0 = G\delta V(\rho_0 - \rho) \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \quad (2)$$

$$\delta g_1 = \frac{G\delta V\rho(\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \quad (3)$$

$$\delta g_2 = -\frac{G\delta V\rho\mu}{\lambda + \mu} \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \quad (4)$$

これらの総和 δg は以下のような簡単な形に表せる。

$$\begin{aligned} \delta g &= \delta f + \delta g_0 + \delta g_1 + \delta g_2 \\ &= \left\{ \frac{3C_f}{4\pi} \delta V + G\delta V\rho_0 \right\} \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (5)$$

このうち中括弧内の第 1 項は δf に相当し、茂木ソースに基づく隆起によるフリーエアの寄与分であり、第 2 項はそれ以外の寄与分の総和である。中括弧の外の項は圧力源と測点の位置関係による減衰項を意味する。これを見てわかるように、 δg は四つの項が地殻変動に伴うフリーエア寄与分と球殻内の物質が体積膨張した質量に伴う重力変化の寄与分の和だけの簡単な式で表されることがわかる。

伊豆大島の変動に茂木モデルを適用し、我々が得た 18 測点の重力変化速度を式 (5) にあてはめ、格子点探索法により残差自乗和が最小になるような圧力源の緯度、経度、深さ D 、体積変化量 δV の最適解を推定した。フリーエア勾配 C_f は -0.3086 mgal/m、球殻内の密度 ρ_0 を 2.67×10^3 kg/m³ とした。位置の探索格子間隔は 0.05 km、体積変化量の探索格子間隔は 0.1×10^6 m³/year とし、測点の標高差による補正も行った (福井・他, 2003)。求まった圧力源パラメータは、カルデラ縁北部 (34.7523 °N、139.4078°E、ONSENHOTEL の南 150 m、東 450 m) の海拔下 3.65 km で、体積変化速度は 7.6×10^6 m³/year であった。重力変化速度の残差の標準偏差は、0.0042 mgal/year であった。Fig. 5 に、圧力源の最適値として推定された場所を星印で示す。また、各観測点の重力変化速度に 1σ の標準偏差を考慮して計算される、推定圧力源の誤算分布を黒い影の領域で示す。誤差範囲は広く、深さは海拔下 1 ~ 8 km にも及ぶが、水平位置はカルデラ北縁部周辺であることがわかる。

Fig. 6 には、圧力源の位置の他、FGS を固定とした各測点 (丸印) における重力変化速度と、圧力源から期待される地表面における重力変化速度の面的な分布も示した。暖色系が正、寒色系が負を示す。また、Fig. 7 には推定された圧力源からの水平距離に対する 18 測点の重力変化速度の観測値 (白いシンボル) と、見積もられた圧力源パラメータから期待される計算値 (黒いシンボル) を示す。局地的に顕著な地殻変動が知られているため解析には除外した、三原新山周辺の測点 4 点 (G05、G22、G24、G25) についても参考のためプロットした。

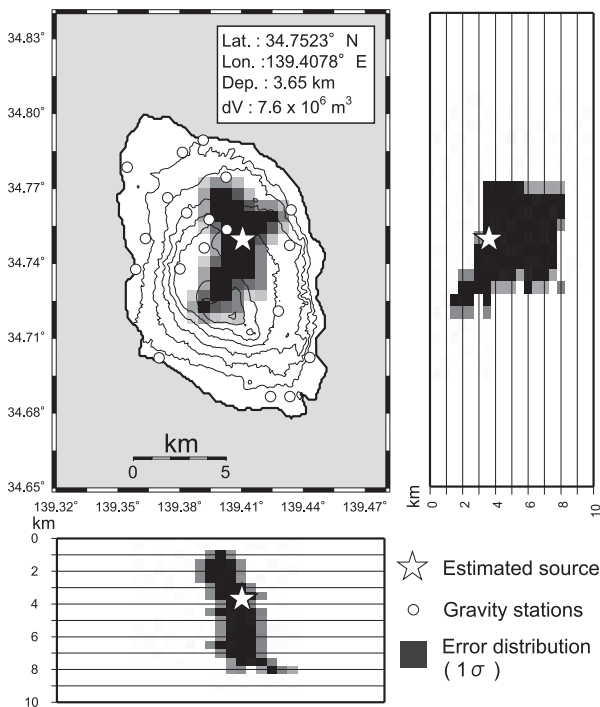


Fig. 5 Estimated pressure source based on the Mogi model using gravity change rates referenced to FGS. An asterisk denotes an estimated source at a depth of 3.65 km. The shadowed and hatched area indicates the error distribution of the estimated source with 1σ standard deviation.

5. 考察

重力観測により推定された圧力源は、これまで地殻変動観測で報告されてきている推定値（例えば、高木・他（2008）では深さ 5 km、体積変化量 $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ ）と比べると、深さは約 1 km 浅く、水平位置は若干東寄りとなったが概ね一致している。しかし、体積変化量 $7.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ は過大見積もりされており、深さとのトレードオフもあるが 4 倍程度大きい。重力観測による茂木モデルを仮定した圧力源推定値は、式(5)を見てもわかるように、括弧内の第 1 項の上下変動によるフリーエアーの寄与に大きく支配される。たとえば、括弧内第 2 項の球殻内密度の寄与に比べると、第 1 項の寄与はその - 4 倍以上となる（式(6)）。

$$\frac{\delta f}{(\delta g_0 + \delta g_1 + \delta g_2)} = \frac{3C_f \delta V}{4\pi G \delta V \rho_0} = \frac{3C_f}{4\pi G \rho_0} = -4.13 \quad (6)$$

このことは、若干正確さを欠く表現ではあるが、「マグマが地下の球殻内に充填されることによって観測される重力の増加量よりも、膨張して地表面が隆起することによる重力の減少量の方が 4 倍以上大きい」ことを意味する。

FGS（大島測候所）では GPS 連続観測を実施している。また推定圧力源に最も近い ONSENHOTEL におい

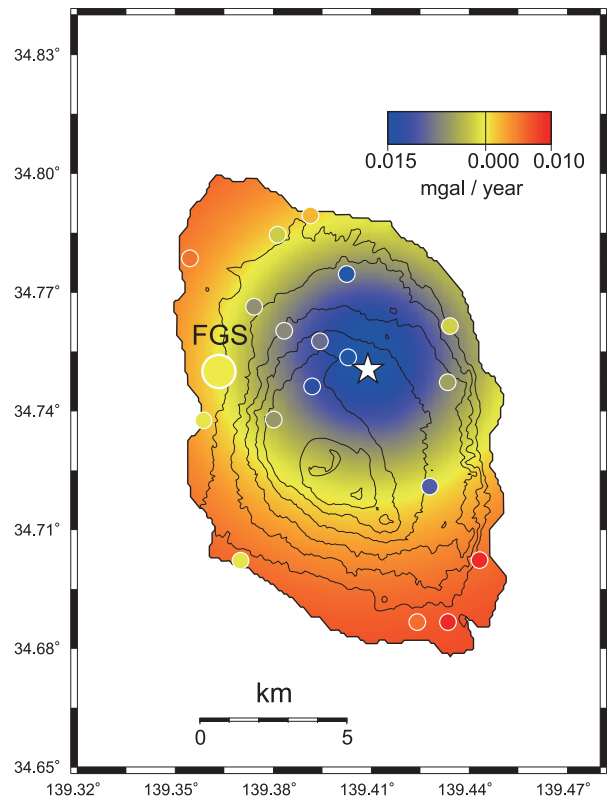


Fig. 6 Estimated pressure source based on the Mogi model using gravity change rates referenced to FGS. An asterisk denotes an estimated source at a depth of 3.65 km. Colored circles indicate observed gravity change rates according to the color palette. Color distribution on the land surface represents the calculated gravity change rate with estimated source parameters.

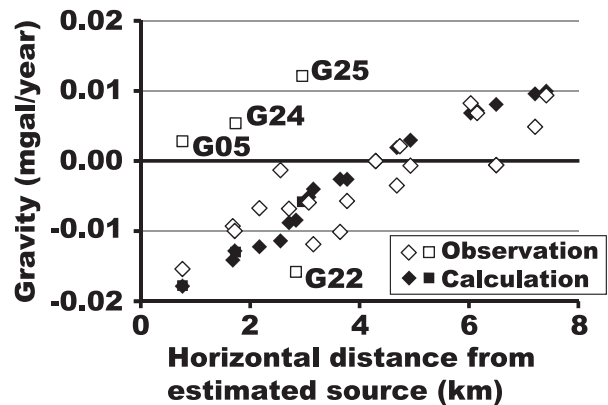


Fig. 7 Observed gravity change rates (open symbols) and calculated gravity change rates with estimated source parameters (solid symbols) including the four stations on and around Mt. Miharayama that were not used for source estimation.

ても 2007 年 3 月から GPS 観測を開始した。FGS を固定した ONSENHOTEL の高さの相対変化を Fig. 8 に示す。観測期間は 2 年余りにすぎないが平均的な隆起速度は 0.021 m/year であった。推定された圧力源パラメータを用いて ONSENHOTEL で期待される隆起速度を計

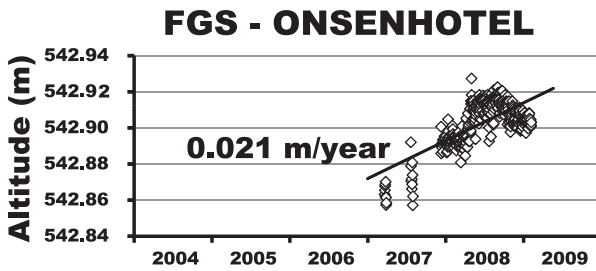


Fig. 8 Temporal altitude change at ONSENHOTEL station referenced to FGS by GPS observation. Averaged altitude change rate is 0.021 m/year.

算すると 0.103 m/year となり、GPS で観測された量の約 5 倍という大きな量となる。仮に推定された体積変化量が 5 倍程度過大見積もりされていると考え、 δV は推定された大きさの 1/5 程度がもっともらしいと推測される。

式(7)は式(5)の一部を変形したものである。

$$\delta g = \left\{ \frac{3C_f}{4\pi} + G\rho_0 \right\} \delta V \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \quad (7)$$

中括弧内第 1 項がフリーエアの寄与項、第 2 項が球殻内の密度の寄与項である。 δV を 1/5 としたうえで、重力観測で得られた量 δg を説明することは可能であろうか。 $\rho_0 = 2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の場合の括弧内の二項の比は -4:1 であった (式(6))。 δV を 1/5 とした場合には、その比を -4:-11 とすれば式(7)の δg を説明することが可能になる。このことは ρ_0 の 11 倍の密度の物質が消失し、しかも膨張するということになるが、これは現実的ではない。

活動的な火山では火山性の脱ガス活動によってマグマの質量が減少する。仮に脱ガスによって、前述の「 ρ_0 の 11 倍の密度の物質が消失したこと」と等価なことが地下の圧力源付近で起こっていると仮定してガスの放出レートを計算すると、その量は $4.5 \times 10^{10} \text{ kg/year}$ となる。日換算で 120,000 ton/day であり、この量は三宅島 2000 年噴火後の最盛期の二酸化硫黄ガスの噴出レートに匹敵する (Kazahaya et al., 2004)。顕著な脱ガス活動のあった三宅島ではそれに伴う山体の収縮を伴っていた。また伊豆大島では噴煙活動は低調であり、脱ガスで重力データと隆起データを説明することは困難である。

伊豆大島では、1986 年噴火以前にも繰り返し重力観測のいくつかの結果が報告されている。これらは、短期間的な例外はあるものの (井上・他, 1972)、おおむね経年的に内陸部の重力値は相対的に減少しているという観測結果である。小泉・他 (1986) によると、1979 年から 1985 年の観測値は島の周縁に比べて内陸部で相対的に重力値が減少していることを報告している。例えばカルデラ付近 (本報告の GOJINKACHAYA) では 0.12 mgal もの減少が観測された。この重力変化速度は、我々の観測結果と同程度である。ただしこれら

の報告では、高さの変化についての観測成果については触れられていない。

このように、内陸部で最大 0.015 mgal/year 程度の重力減少は 1986 年噴火以前から現在まで継続的に見られているが、これに見合う隆起量は観測されていない。このことは、伊豆大島の地殻変動や重力変化は、単一圧力源や弾性的な振る舞いで説明するよりも別の複雑なメカニズムで説明することを検討する必要性を示唆する。このためには、更に精密な重力データの蓄積の他に、高精度の高さ変化のデータ蓄積を待たなければならない。

6. まとめ

伊豆大島の噴火準備期におけるマグマ蓄積過程を知るためのひとつの手段として、2004 年から 2009 年の間に 14 回の相対重力観測を実施した。その結果、カルデラ北部を中心に最大で 0.015 mgal/year の相対的な重力値の減少が見られた。茂木モデルを仮定して圧力源を推定したところ、海拔下 3.65 km で $7.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ の体積膨張があれば説明できることがわかった。しかし、この圧力源パラメータで期待される地表の隆起量は GPS で観測された結果よりも 5 倍も大きく、重力変化と地殻変動を同時に説明することはできない。また圧力源球殻内の密度の設定の仕方でも対応できる範囲から逸脱していた。

このような重力変化量分布は 1986 年噴火以前にも報告されている。観測された重力変化分布とそれに基づいて推定されたマグマ蓄積速度が正しいとすれば、観測された隆起速度は蓄積速度から期待される量を説明できない。このことは、伊豆大島は地殻変動や重力変化を単一圧力源や弾性的な振る舞いで説明することが困難な、マグマ蓄積過程の複雑な火山であることを示唆するのかもしれない。これらを解明するためには、更に精度の高い重力観測データ、及び測地データの蓄積が今後も必要である。

謝辞

本観測では多くの方の協力を得て行われた。安藤忍氏、坂井孝行氏、新堀敏基氏、山本哲也氏、黒木英州氏、浅沼光輝氏には観測にご協力頂いた。また大島測候所の多くの職員には全面的に支援して頂いた。国土地理院には電子基準点、重力点、水準点を利用させて頂いた。東京大学地震研究所には基準点を利用させて頂いた。大島町及び大島警察署には、カルデラ内における観測にご配慮を頂いた。また、2 名の匿名の査読者の建設的なご意見により、本稿は大きく改善された。編集委員の林豊氏には有意義なご指摘を頂いた。ここに記してみなさまへ感謝の意を表します。

参考文献

- Carbone, D., G. Currenti and C. Del Negro, 2007: Elastic model for the gravity and elevation changes before the 2001 eruption of Etna volcano, *Bull Volcanol*, **69**, 553-562.
- 福井敬一・坂井孝行・山本哲也・藤原健治・高木朗充・中禮正明, 2003: 標高補正茂木モデルの有用性とその限界, *日本火山学会講演予稿集*, **35**.
- 古屋正人・大久保修平・田中愛幸・孫 文科・渡辺秀文・及川 純・前川徳光, 2001: 重力の時空間変化でとらえた三宅島 2000 年火山活動におけるカルデラ形成過程, *地学雑誌*, **110**, 2, 217-225.
- 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, *東京大学地震研究所彙報*, **52**, 301-309.
- 井内 登・加納克巳・藤井陽一郎, 1972: 大島における重力変化の研究(II), *測地学会*, **18**, 104-111.
- Jentzsch, G., R. Punongbayan, U. Schreiber, G. Seeber, C. Volksen and A. Weise, 2001: Mayon volcano, Philippines: change of monitoring strategy after microgravity and GPS measurements from 1992 to 1996, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, **109**, 219-234.
- Jousset, P., H. Mori and H. Okada, 2003: Elastic models for the magma intrusion associated with the 2000 eruption of Usu Volcano, Hokkaido, Japan, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, **125**, 81-106.
- 川辺禎久, 1991: 伊豆大島火山の岩石学的発達史, *火山*, **36**, 297-310.
- Kazahaya, K., H. Shinohara, K. Uto, M. Odai, Y. Nakahori, H. Mori, H. Iino, M. Miyashita and J. Hirabayashi, 2004: Gigantic SO₂ emission from Miyakejima volcano, Japan, caused by caldera collapse, *Geology*, **32**, 5, 425-428.
- 小泉岳司・福井敬一・橋本徹夫・干場充之・清野政明・里村幹夫, 1988: 伊豆大島における重力変化 - 1985 年 11 月～1988 年 5 月-, *火山*, **33**, 291-303.
- 小泉岳司・吉田明夫・石川有三・澤田可洋・井内 登, 1986: 伊豆大島における重力測定 - 1985 年 11 月-, *気象研究所研究報告*, **37**, 271-280.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa and M. Ooe, 2001: GOTIC2: a program for computation of oceanic tidal loading effect, *Jour. Geod. Soc. Jpn.*, **47**, 243-248.
- Mogi, K., 1958: Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **36**, 99-134.
- 大久保修平・遠藤 猛, 1983: 荷重変形の Green 関数の偏微分係数 (演旨), *地震学会講演予稿集*, 1983, **2**, 189.
- 大久保修平・渡辺秀文・田島広一・沢田宗久・坂下至功・横山 泉・前川徳光, 1988: 1986 年伊豆大島噴火前後の重力変化, *東京大学地震研究所彙報*, **63**, 2, 131-144.
- 大島弘光・前川徳光・植木貞人・武田嘉人, 2003: 北海道の火山およびその周辺地域における精密重力測定: 北海道駒ヶ岳, *北海道大学地球物理学研究報告*, **66**, 101-110.
- 高木朗充・山里平・福井敬一・坂井孝行・安藤 忍・加治屋秋実・加藤幸司, 2008: GPS 時間変化から推定する圧力源パラメータ 伊豆大島への適用, *日本地球惑星科学連合 2008 年大会予稿集*, V151-024.
- Tamura, Y., 1982: A computer program for calculating the tide-generating force, *Publ. Int. Latit. Obs. Mizusawa*, **16**, 1-20.
- 渡辺秀文・大久保修平・坂下至功, 1990: 降水の重力におよぼす影響評価 - 拡散モデル, *日本火山学会秋季講演予稿集*, **56**.
- 山本圭吾・高山鉄朗・石原和弘・大島弘光・前川徳光・植木貞人・沢田宗久・及川 純, 1998: 桜島および始良カルデラ周辺における重力変化, *京都大学防災研究所年報*, **41B-1**, 153-160.

噴火準備期における伊豆大島の相対精密重力測定

高木朗充*・福井敬一・山里 平 (気象研究所地震火山研究部)
 藤原健治** (大阪管区気象台)
 加治屋秋実** (大島測候所)

噴火準備期における伊豆大島火山のマグマ蓄積過程を明らかにするため、2004 年から 2009 年に 14 回の相対精密重力測定がなされた。重力変化は山頂カルデラ北縁を中心に減少する傾向であり、重力減少速度は最大で 0.015 mgal/year であった。茂木モデルを仮定して圧力源パラメータを求めると、観測データを説明できるパラメータとして、 $7.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ の体積膨張する海拔下 3.65 km の深さの圧力膨張源が見積もられた。しかし見積もられた体積膨張から計算される隆起速度は GPS による観測値の 5 倍にもなり、これら見積もられた膨張源のパラメータは、重力と隆起の変化を同時には説明することはできない。伊豆大島火山は単純な物理モデルで示すことができない複雑なマグマ蓄積系を有する火山であるのかもしれない。このような複雑な火山のマグマ蓄積系を明らかにするためには、隆起量の観測とともにさらなる高精度の微小重力観測を今後も継続する必要がある。

* 現所属：文部科学省 研究開発局 地震・防災研究課

** 現所属：気象庁地震火山部火山課