

有珠山 2000 年噴火活動に対する緊急重力測定

—絶対重力観測網の構築と噴火前後の重力変化—

古屋正人^{1)*}・大木裕子¹⁾・大久保修平¹⁾・前川徳光²⁾・大島弘光²⁾・清水 洋³⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所

²⁾ 北海道大学理学研究科

³⁾ 九州大学理学研究科

Urgent Gravity Measurements for the Eruption of Usu Volcano in 2000

—Construction of Absolute Gravity Network and the Co-eruptive and Post-eruptive Gravity Changes—

Masato Furuya^{1)*}, Yuko Ohki¹⁾, Shuhei Okubo¹⁾, Tokumitsu Maekawa²⁾,
Hiromitsu Oshima²⁾ and Hiroshi Shimizu³⁾

¹⁾ E.R.I., University of Tokyo

²⁾ Graduate School of Science, Hokkaido University

³⁾ Graduate School of Science, Kyushu University

Abstract

After the eruption of Usu volcano, Japan, on 31 March, 2000, we carried out microgravity measurements around Mt. Usu. Comparing the gravity values acquired by previous measurements in June 1993, we detected significant gravity changes presumably associated with the magma movement. The largest change detected as of May 2000 was $-820\mu\text{gal}$ at the southern rim of the summit. Both gravity and height changes were successfully reproduced by prescribing a shallow inflation source and a deeper deflation source at depths of 2,000 and 3,000 meters, respectively. Total intruded mass flux is estimated to be 3.6×10^{10} kg.

We constructed an absolute gravity network consisting of three sites around Toya lake, and precisely determined absolute gravity values. Moreover, from 16 May to 29 June, we took continuous absolute gravity measurements at Usu volcano observatory, and detected a significant post eruptive gravity change. The absolute gravity continued to decrease by $10\mu\text{gal}$ until around 25 May when it began to increase. After that, the absolute gravity gradually recovered to $10\mu\text{gal}$ for one month. We can interpret the inferred post-eruptive gravity changes as a continuing crustal uplift followed by a commence of the land subsidence.

Key words: gravity change, volcanic eruption, absolute gravimetry, point source

1. はじめに

2000年3月31日に噴火した有珠山の周辺では顕著な地殻変動が進行したことが、GPS (Global Positioning System), 水準測量, EDM (Electro-Optical Distance Measurement), セオドライト, 航空写真測量, SAR

(Synthetic Aperture Radar) によって明らかにされた。航空写真測量によると、西山火口付近は、水平で北方へ20m, 上下には60mもの隆起が観測された(国土地理院, 2000)。これら変形の観測量を、重力変化の観測データと組み合わせることで、地下の質量分布変化に対

* e-mail: furuya@eri.u-tokyo.ac.jp

Table 1. Location of dMeasurement Sites

Site	Longitude(deg min)	Latitude(deg min)	Altitude(m)
UVO	140 50.8	42 33.4	138
OJH	140 48.4	42 33.9	105
TLS	140 47.7	42 36.4	95

Table 1: Abbreviations. UVO: Usu Volcano Observatory of Hokkaido Univ., OJH: Toya Lake Onsen Junior High School, TLS: Toya Lake Station of Hokkaido Univ.

する情報を得ることが期待できる (e.g., Jachens and Eason, 1980; Okubo and Watanabe, 1989; Yokoyama, 1989; Battaglia *et al.*, 1999).

有珠山の周辺で行われた 2000 年噴火前の最後の精密重力測定は、1993 年 6 月である (前川, 大島 1993). われわれは 2000 年の噴火を受けて、新たに絶対重力観測網を構築するとともに、前回 1993 年の観測点における精密重力測定を行って、噴火前後の重力変化を求めた。さらに 5 月 14 日以降は、北海道大学有珠火山観測所で絶対重力の連続測定も行い、噴火後の重力変化を調べた。本稿では、(1)絶対重力観測網の構築とその絶対重力値についての記述、(2)噴火前後の重力変化の報告とその物理的解釈、(3)2000 年噴火以降の絶対重力変化の報告の 3 点を目的とする。

2. 絶対重力観測網の構築

地震火山活動に伴う重力変化の測定では、従来は相対重力計による測定値のみが用いられてきた。すなわち、各測定点のうち必ず一つは、絶対重力値が変化しないと仮定された固定点であり、測定結果として得られるものは固定点からのずれだけで、絶対値には任意性があった。しかし、地震火山活動域においては固定点の絶対重力値が一定であるという保証はなく、とりわけ震源や火山口に近いところでは変化しているほうがむしろ自然である。また、測定データのモデリングにおいては、各点の絶対重力値の変化が計算されるにも拘わらず、従来の測定では相対重力値の変化しか分からず、理論計算と測定データの直接比較ができなかった。

近年、Micro-G solution 社の可搬型絶対重力計 FG5 が開発され、絶対重力値を 1 マイクロガルの精度で測定できるようになった (Niebauer *et al.* 1995). 地震研究所の重力グループは FG5 (serial number 109) を用いて、地震や火山活動に伴う絶対重力値の変化を報告してきた (Yoshida *et al.* 1999; Okubo *et al.* 2000). 絶対重

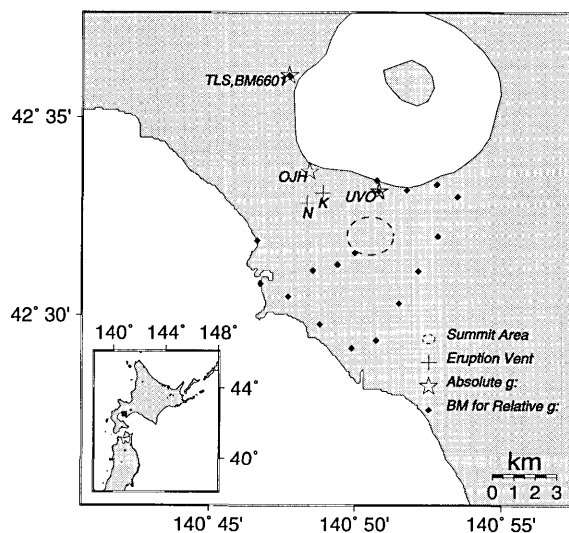


Fig. 1. Measurement sites. Small dots are used for relative gravity measurements. BM6601 is a fixed point for the conventional microgravity survey. Absolute gravity measurements were carried out at three sites. TLS (Toya Lake Station), OJH (Toya Onsen Junior High School), and UVO (Usu volcano Observatory). Two eruption vents, Nishiyama and Kompirayama, are denoted as N and K. The summit area indicated by a dashed line is roughly the location of the former eruption vents at Mt. Usu.

力計と相対重力計を併用した、絶対値の任意性を含まない重力測定をわれわれは「ハイブリッド重力測定」と呼んでいる。

有珠火山においても、噴火に伴うマグマ物質の移動や噴火後の火山活動の推移を重力データからも捉えたいという動機で、2000 年 5 月 10 日から有珠火山の周辺の 3 個所で絶対重力測定を行い、5 月 14 日以降は、北海道大学有珠火山観測所の重力基準点で絶対重力の連続測定を行った。表 1 に 2000 年 5 月に構築された絶対重力観測網の緯度、経度と標高を示した。図 1 には、各観測点の位置を示してある。相対重力測定については大部分の測

Table 2. Absolute gravity measurement

Site	Measurement dates	Absolute gravity (μgal)	Standard deviation (μgal)	Effective drops (count)	Vertical gradient ($\mu\text{gal}/\text{cm}$)
UVO	May 10-12, 2000	980436487.1 \pm 0.7	64.2	8157	3.09
OJH	May 12-14, 2000	980442887.0 \pm 0.2	20.8	11152	2.66
TLS	May 14-16, 2000	980423007.7 \pm 0.9	79.2	8060	3.29

定点は国土地理院の水準点であり、実際に 2000 年 5 月の我々の重力測定とほぼ同時期に国土地理院による水準測量も行われた (国土地理院, 2000)。

表 2 に、各絶対重力観測点の重力値の詳細について掲げた。なお、絶対重力計 FG5 では、真空筒の高さ 130 cm における絶対重力値が測定されるが、これを床面の重力値に換算するために重力の鉛直勾配値が必要となる。これを求めるために、各観測点において LaCoste & Romberg 重力計 2 台 (G875, G876) を用いた繰り返し測定を行い、得られた値を表 2 に併せて掲載した。また、固体地球潮汐、極潮汐、気圧補正、海洋潮汐補正が施されている; 前 3 者は FG5 に附属の補正機能を利用し、海洋潮汐は GOTIC2 によって見積もった (Matsumoto *et al.*, 2000)。有珠火山観測所での絶対重力の連続測定結果については後述する。

3. 2000 年噴火後の重力測定—2000 年 5-6 月—

3.1 測定の概要

相対重力測定では、1993 年 6 月には LaCoste & Romberg 重力計 3 台 (G9, G31, G375)、2000 年 5 月には 4 台 (G375, G875, G876, G1009) を用いた往復測定を行い、潮汐補正、計器高補正、周期誤差補正、気圧補正、磁気方位補正、ドリフト補正のあとで基準点にたいする相対重力値が得られる。測定精度の目安として相対重力値の往復差が得られる。これは、原理的には全てゼロになるべき量である。

測定した各点の緯度、経度および各重力計の測定値 ($g_9, g_{31}, g_{375}, g_{875}, g_{876}, g_{1009}$) と往復差 ($\epsilon_9, \epsilon_{31}, \epsilon_{375}, \epsilon_{875}, \epsilon_{876}, \epsilon_{1009}$) を表 3 (1993 年 6 月の測定) および表 4 (2000 年 5 月の測定) に示した。図 1 に示したのは、2000 年 5 月時点の測定点の分布である; 1993 年時の測定点全てでの再測定は 2000 年 5 月時点では出来なかった。前述のように相対重力の測定点の大部分は、国土地理院の水準点であるが、そのほかに北海道大学で独自に有珠山の山頂へ至る道沿いに測定点を設けてある。2000 年 5 月の測

定では、南外輪へ至る 3 点 (表 3, 4 の BMU5, BMU8, BMU10) での測定を行った。また、西山火口近くにも水準点は存在しており、1993 年の測定値はあるものの (表 3 の BM6598, BM6596)、2000 年 5 月の段階では測定がなされていない。

3.2 2000 年噴火前後の重力変化—1993 年 6 月と 2000 年 5 月—

本節では 2000 年噴火の前と後での重力変化について述べる。前川・大島 (1993) による精密重力測定は、同種の重力計三台 (G09, G31, G375) によるものである (表 3 参照)。G09, G31 は老朽化しているため、本稿で報告する測定の際には用いられなかった。各重力計に固有の系統誤差を避けるために、ここでは G375 の一台から得られた噴火前後の重力変化を報告する。他の三台の重力計 (G875, G876, G1009) によるデータは、2000 年噴火直後から今後どのように重力値が推移するかをモニターする際に使用される。

1993 年当時には絶対重力測定は行われていなかったため、従来通りに固定点 (重力の不動点) を設定する必要がある。ここでは洞爺湖西岸に位置する北海道大学水産学部附属の臨湖実験所前にある BM6601 という点を固定した (図 1)。国土地理院による水準測量の結果によれば、噴火前後のこの地点の隆起量は 2.2 mm であり (図 3)、重力変化は非常に小さいと考えられるので妥当な仮定といえよう。図 2 に示したのが 1993 年 6 月からの重力変化である。

山頂部の南外輪へ至る山頂ルートの 3 点で見られる -212 から $-820 \mu\text{gal}$ におよぶ著しい減少が特徴的である。この 3 点にとどまらず、ほぼ全ての測定点で重力値は減少しており、付近一帯の地表の隆起を強く示唆している。図 3 のように、2000 年 5 月の測定の際には、国土地理院によって水準測量がなされており、その結果と併せても、伊達市、壮瞥町一帯の隆起は確かに起こっていたことが確認できた。得られた噴火前後の重力変化データと国土地理院による水準測量による高さ変化データ

Table 3. Relative Gravity Measurement in June 1993

Site	Longitude (deg min)	Latitude (deg min)	g_{375} (mgal)	ϵ (mgal)	g_{31} (mgal)	ϵ (mgal)	g_9 (mgal)	ϵ (mgal)
[Jun 16. 1993]								
BM6601	140 47.7	42 36.3	0.000	0.016	0.000	-0.031	0.000	0.017
BM6598	140 49.2	42 33.7	-7.819	-0.005	-7.876	0.075	-7.803	0.044
BM6596	140 47.9	42 32.8	-10.178	0.008	-10.206	0.025	-10.149	0.025
BMJ6	140 46.6	42 32.2	0.802	0.002	0.758	-0.005	0.795	0.011
[Jun 17. 1993]								
BM6601	140 47.7	42 36.3	0.000	0.012	0.000	-0.003	0.000	-0.038
BM1054	140 50.7	42 33.7	-9.436	0.022	-9.410	-0.007	-9.389	-0.046
BM1053	140 51.7	42 33.2	-7.725	0.022	-7.728	0.006	-7.616	-0.109
BM1052	140 52.8	42 33.3	-7.995	-0.006	-8.008	-0.022	-7.944	-0.012
BM1051	140 53.5	42 33.3	-2.680	0.017	-2.686	-0.007	-2.647	-0.009
BM1050	140 52.8	42 32.3	-6.309	0.002	-6.316	0.018	-6.266	-0.007
BM1049	140 52.1	42 31.4	-9.091	0.012	-9.070	-0.002	-9.020	-0.006
BM1048	140 51.5	42 30.6	-8.163	-0.008	-8.170	-0.005	-8.103	-0.012
BM1047	140 50.6	42 29.7	-8.233	0.006	-8.224	0.025	-8.168	-0.021
[Jun 18. 1993]								
BM6601	140 47.7	42 36.3	0.000	0.025	0.000	0.230	0.000	0.013
BMUVO	140 50.8	42 33.4	-20.474	0.008	-20.472	0.232	-20.417	-0.002
T-7	140 51.0	42 33.3	-12.253	-0.002	-12.234	0.241	-12.206	-0.005
GIH3-5	140 51.9	42 32.9	-16.375	-0.003	-16.370	0.241	-16.335	-0.023
GIH3(N)	140 51.6	42 32.6	-33.031	0.004	-33.026	0.238	-32.966	-0.029
GIH2	140 51.9	42 32.2	-37.354	0.009	-37.234	0.068	-37.308	0.004
BMU101	140 50.3	42 33.3	-121.519	0.000	-121.407	-0.004	-121.535	-0.007
[Jun 19. 1993]								
BM6601	140 47.7	42 36.3	0.000	0.010	0.000	0.664	0.000	-0.007
BMJ6	140 46.6	42 32.2	0.818	0.014	1.333	0.001	0.834	0.011
BMU5	140 48.6	42 31.4	-20.223	0.018	-19.706	-0.014	-20.154	0.040
BMU8	140 49.4	42 31.6	-66.257	0.009	-65.763	-0.023	-66.278	0.003
BMU10	140 50.0	42 31.9	-103.449	0.011	-102.953	-0.004	-103.390	-0.012
BMU17	140 51.0	42 34.0	-117.988	0.005	-117.496	0.012	-117.983	-0.018

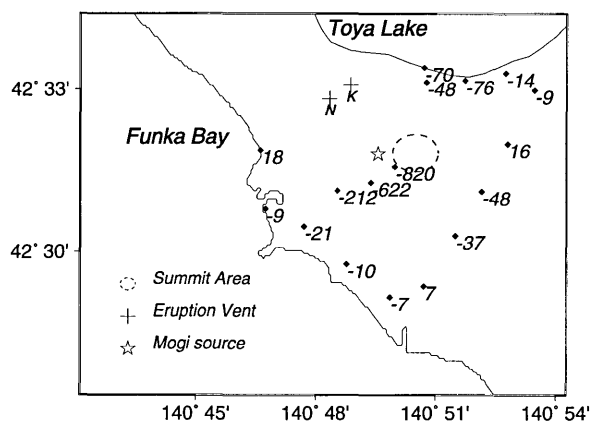


Fig. 2. Gravity changes (unit in μgal) from June 1993 to May 2000. Two eruption vents, N and K, and former summit eruption vents at the area of Mt. Usu are indicated. The star represents the estimated horizontal location of the deflation source of both gravity and height changes.

が、噴火活動に伴う圧力源によるものと考え、茂木モデル (Mogi, 1958) を適用して、2000年噴火前後のマグマの移動に関する物理量について推定する。茂木モデルは元々は水準データに適用されたものであるが、これを重力変化に適用するための定式化は Hagiwara [1977] によってなされた。すなわち高度変化を δh 、重力変化を δg とすると次のようになる;

$$\delta h = \frac{1-\nu}{\pi} \frac{D}{(r^2+D^2)^{1.5}} \delta V, \quad (1)$$

$$\delta g = \left(-\beta + \frac{\pi G \rho'}{1-\nu} \right) \delta h. \quad (2)$$

ここで δV , D , ν は体積変化, 圧力源の深さ, ポアソン比である。また β , G , ρ' は、フリーエア勾配 ($3.086 \mu\text{gal}/\text{cm}$ で一定とした), 万有引力定数, 流入 (または流出) した物質の密度である。

Table 3. (Continued)

Site	Longitude (deg min)	Latitude (deg min)	g_{375} (mgal)	ϵ (mgal)	g_{31} (mgal)	ϵ (mgal)	g_9 (mgal)	ϵ (mgal)
[Jun 19. 1993]								
BM6601	140 47.7	42 36.3	0.000	0.010	0.000	0.664	0.000	-0.007
BMJ6	140 46.6	42 32.2	0.824	0.016	0.998	0.017	0.815	-0.001
BMU6	140 49.3	42 30.7	-13.143	0.009	-12.944	-0.025	-13.115	0.002
BMU11	140 50.3	42 31.2	-38.091	-0.003	-37.891	0.003	-38.066	0.012
[Jun 22. 1993]								
BM6601	140 47.7	42 36.3	0.000	0.017	0.000	0.064	0.000	0.042
BMJ6	140 46.6	42 32.2	0.809	0.002	0.828	0.019	0.821	0.037
BM7193	140 45.8	42 31.1	-0.839	0.000	-0.848	0.017	-0.834	0.063
BM7194	140 47.7	42 30.8	-1.749	-0.001	-1.726	0.027	-1.735	0.044
BM7195	140 48.8	42 30.1	-12.927	-0.009	-12.868	-0.046	-12.871	0.008
BM7196	140 49.9	42 29.5	-9.354	-0.005	-9.307	-0.050	-9.301	0.007
BM7197	140 50.8	42 29.0	-9.014	0.001	-8.978	-0.014	-8.975	-0.012
[Jun 23. 1993]								
BM6601	140 47.7	42 36.3	0.000	0.004	0.000	0.018	0.000	0.016
NRM	140 50.3	42 32.9	-106.384	0.016	-106.316	0.035	-106.339	0.004
CR-4	140 50.2	42 32.7	-109.378	0.021	-109.342	0.038	-109.344	0.010
USN	140 50.2	42 32.6	-124.276	0.019	-124.234	0.028	-124.261	0.018
TP	140 50.1	42 32.5	-152.729	-0.005	-152.690	0.012	-152.740	0.026
USG	140 50.1	42 32.5	-152.784	0.006	-152.743	0.028	-152.784	0.019
OGG	140 50.3	42 32.3	-154.137	-0.017	-154.070	-0.012	-154.136	-0.009
OUG	140 50.5	42 32.4	-170.132	0.006	-170.084	-0.007	-170.094	-0.015
[Jun 24. 1993]								
BM6601	140 47.7	42 36.3	0.000	0.012	0.000	0.018	-	-
43TP	140 50.4	42 33.5	-47.416	0.000	-47.392	-0.010	-	-
[Jun 25. 1993]								
BM6601	140 47.7	42 36.3	-	-	0.000	0.012	0.000	0.016
BMUVO	140 50.8	42 33.4	-	-	-20.485	-0.042	-20.408	0.008
T-7	140 51.0	42 33.3	-	-	-12.246	-0.037	-12.210	0.031
GIH3-5	140 51.9	42 32.9	-	-	-16.407	-0.040	-16.317	-0.009
GIH3(N)	140 51.6	42 32.6	-	-	-33.053	-0.078	-32.957	-0.006
GIH2	140 51.9	42 32.2	-	-	-37.314	0.030	-37.317	0.017
BMU101	140 50.3	42 33.3	-	-	-121.500	-0.004	-121.511	0.008

まず単一の茂木ソースを想定して、その水平位置（緯度と経度）、深さ、体積変化の計4つのパラメータと推定した。そのために最小化する量は次式Lである；

$$L = \sum_{i=1}^{17} \left(\frac{\delta g_i^{obs} - \delta g_i^{calc}}{\sigma_g} \right)^2 + \sum_{i=1}^{24} \left(\frac{\delta h_i^{obs} - \delta h_i^{calc}}{\sigma_h} \right)^2 \quad (3)$$

規格化に用いた σ_g , σ_h には、それぞれ $40 \mu\text{gal}$, 20 mm を仮定した。この非線形の最小二乗法によるパラメータ推定には、Simplex 法 (Press *et al.* 1988) を用い、複数の初期値の設定によって解の収束性を確かめた。重力、水準データの不確定さは、それぞれ $40 \mu\text{gals}$, 20 mm とした。密度 ρ' は、後述のように推定できなかったため $2,300 \text{ kg/m}^3$ に固定した。得られたパラメータは表5の上段に示し、この値に基づいた計算値と観測値を図4に

示した。推定された力源の水平位置は西山の南東約 2 km ほどの地点である。両者を比較すると、重力、水準測量データともに説明できない部分が残っており、表5の reduced χ^2 (1 自由度あたりの χ^2) の値を見ても、まだ改善の余地はあると考えられる。水準測量データを見ると、水平距離の大きな測定点では計算値が観測値を系統的に上回る傾向が見られる。すなわち、求められた単一の膨張力源では遠方での隆起量が大きくなりすぎてしまう。この傾向を抑えるために、さらに深いところに減圧源をおけばよいと考え、水平位置は同じにして、さらに二つのパラメータ（深さと体積変化）も併せて推定した。得られたパラメータは表5の下段に示し、図5に計算値と観測値を併せて載せた。単一茂木ソースの図4のとき

Table 4. Relative Gravity Measurement in May 2000

Site	Longitude (deg min)	Latitude (deg min)	g_{375} (mgal)	ϵ (mgal)	g_{875} (mgal)	ϵ (mgal)	g_{876} (mgal)	ϵ (mgal)	g_{1009} (mgal)	ϵ (mgal)
[May 11. 2000]										
OJH	140 48.4	42 33.9	0.000	0.033	0.000	-0.030	0.000	-0.029	0.000	0.015
BMJ6	140 46.6	42 32.2	8.864	-0.006	8.879	-0.038	8.848	-0.038	8.838	0.025
BM7193	140 45.8	42 31.1	7.196	-0.004	7.212	-0.028	7.187	-0.028	7.178	0.014
BM7194	140 47.7	42 30.8	6.278	-0.007	6.292	-0.036	6.270	-0.036	6.266	0.024
BM7195	140 48.8	42 30.1	-4.889	-0.008	-4.866	-0.001	-4.850	-0.001	-4.889	0.006
[May 13. 2000]										
TLS	140 47.7	42 36.4	0.000	0.016	0.000	-0.031	0.000	-0.031	0.000	0.045
BM6601	140 47.7	42 36.3	1.672	0.020	1.683	-0.020	1.677	-0.020	1.703	-0.060
BM1047	140 50.6	42 29.7	-6.549	0.008	-6.513	-0.005	-6.490	-0.005	-6.491	0.046
BM1048	140 51.5	42 30.6	-6.523	0.001	-6.547	0.014	-6.525	0.014	-6.530	0.019
BM7196	140 49.9	42 29.5	-7.684	-0.010	-7.664	-0.032	-7.637	-0.031	-7.644	0.006
BM7195	140 48.8	42 30.1	-11.261	-0.007	-11.243	0.005	-11.205	0.005	-11.224	-0.040
[May 15. 2000]										
UVO	140 50.8	42 33.4	0.000	0.050	0.000	0.024	0.000	-0.003	0.000	0.078
BM1054	140 50.7	42 33.7	12.091	0.017	12.099	-0.020	12.104	-0.025	12.060	0.051
BM1053	140 51.7	42 33.2	13.796	0.009	13.798	-0.027	13.785	-0.012	13.770	0.025
BM1052	140 52.8	42 33.3	13.588	0.013	13.587	-0.027	13.588	-0.017	13.770	0.025
BM1051	140 53.5	42 33.3	18.907	0.022	18.903	-0.013	18.917	-0.034	18.867	0.042
BM1050	140 52.8	42 32.3	15.304	0.010	15.314	-0.014	15.275	-0.019	15.278	0.035
BM1049	140 52.1	42 31.4	12.458	-0.012	12.490	-0.008	12.460	0.012	12.438	0.039
BM1048	140 51.5	42 30.6	13.397	-0.009	13.410	0.006	12.381	0.023	13.389	-0.006
[May 15. 2000]										
UVO	140 50.8	42 33.4	0.000	0.038	0.000	0.019	0.000	-0.034	0.000	0.090
BMU5	140 48.6	42 31.4	1.141	0.028	1.152	-0.015	1.169	-0.034	1.121	0.020
BMU8	140 49.4	42 31.6	-45.309	-0.005	-45.326	-0.005	-45.331	-0.039	-45.438	0.026
BMU10	140 50.0	42 31.9	-82.705	-0.012	-82.736	-0.021	-82.735	0.002	-82.771	-0.015

Table 4: Abbreviations. BM: Bench Mark. UVO: Usu Volcano Observatory of Hokkaido University. OJH: Toya Lake Onsen Junior High School. TLS: Toya Lake Station of Hokkaido University.

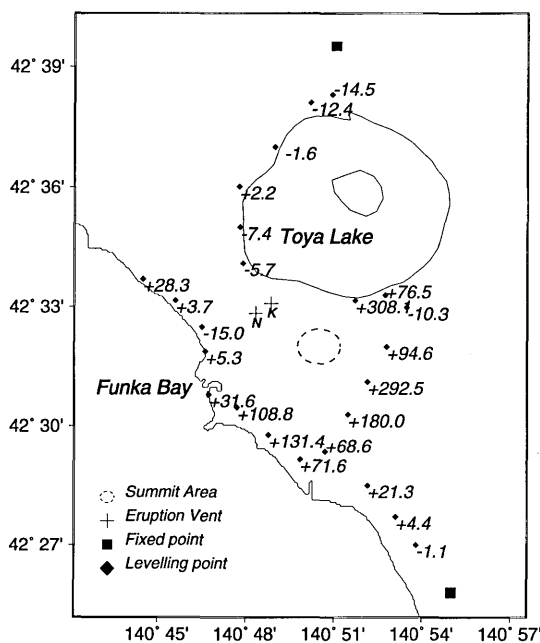


Fig. 3. Height changes (unit in milli-meter) of leveling points of Geographical Survey Institute, Japan; results shown above are reproduced from the web site, <http://www.gsi.go.jp/WNEW/LATEST/USU/level/uslevel01.htm>. The measurement period of the levelling survey spans from May 14 to May 19, 2000, which roughly coincides with the micro-gravity survey. Two eruption vents, N and K, and former summit eruption vents at the area of Mt. Usu are indicated. Two fixed points are shown.

Table 5. Estimated parameters for “Mogi” sources

Source	Location (Longitude) (deg. min. sec.)	Location (Latitude) (deg. min. sec.)	Depth (m)	Volume Change (m ³)	Reduced χ^2
Single Inflation	140 50 1±7	42 31 59±6	1179±50	2.18±0.30×10 ⁷	3.90
Shallow Inflation	140 49 57±6	42 32 4±5	1950±40	8.80±0.20×10 ⁷	1.31
Deep Deflation	—	—	2993±100	-7.22±0.10×10 ⁷	

Table 5: Optimum parameters for the two models. One is based only on a single inflation source, and the other assumes both inflation and deflation source at the same horizontal location.

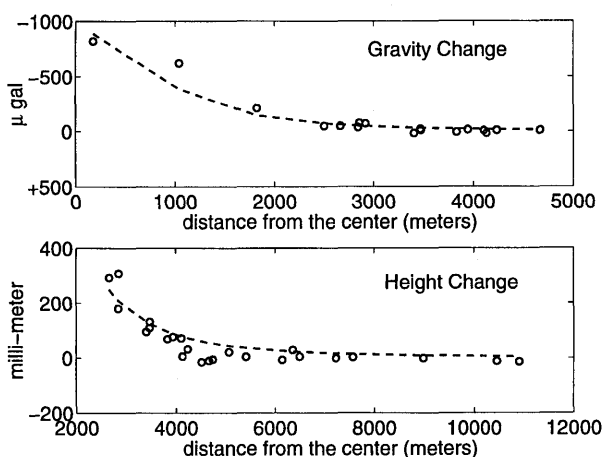


Fig. 4. Changes in gravity (μgal) and height (mm). Circles represent measurement values, while the dashed lines are theoretical values based on a single inflation source. Horizontal axis represents horizontal distance from the inferred position of inflation source to each measurement site.

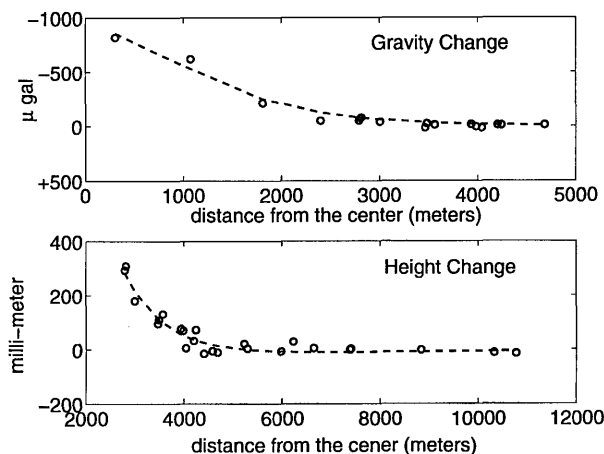


Fig. 5. Changes in gravity (μgal) and height (mm). The theoretical changes are derived by prescribing a shallower inflation source and a deeper deflation source.

よりも両者はよく一致するようになり、reduced χ^2 の値からも当初の χ^2 分布の仮定が a posteriori に保証されたといえる。

重力、水準測量データともに利用できる 12 点を用いて、単一ソースモデルを仮定し、(2)式に基づいて $\delta_g - \delta_h$ の勾配を求めると、推定される密度 ρ' は非現実的に大きな値となる。しかし、密度を $2,300 \text{ kg/m}^3$ に仮定して計算される重力変化と測定された重力変化の違いは誤差の範囲内である。また二重ソースを仮定した場合でも、密度 ρ' を上記の最小 2 乗法における未知数とした場合には解が得られなかった。

3.3 2000 年噴火以降の重力変化—絶対重力連続測定の結果—

5 月 14 日以降は、長期化する火山活動に伴って重力値がどのように時間変化するかを測定するために、金毘羅

山火口から 2 km 離れた北海道大学有珠火山観測所において絶対重力の連続測定を行った。絶対重力計は基本的には無人運転としながらも、水平度の確認等は一週間に一度以上の頻度で行った。

絶対重力測定は一回のドロップに 15 秒かかり、各ドロップごとに絶対重力値が得られるが、これらを幾つかまとめたものをセットとよぶ。当初は 1 セット 100 ドロップを 30 分間隔で行っていたが、表 6 に示したように長期化傾向を見る目的で、途中からはドロップ数を減らしたり、セット間隔を伸ばした。図 6a に、得られた各セットの絶対重力値の時系列を示した。図 6b には、選ばれた絶対重力値を平滑化したものと海洋潮汐による理論重力変化を示した。この理論計算には、GOTIC2 (Global Ocean Tide Correction program) を用いた (Matsumoto *et al.*, 2001)。ここから明らかのように、ノイズを除去された図 6b の観測値に見られる振動の大半

Table 6. Details of Absolute Gravity Measurement at Usu Volcano Observatory

Period	Drops/Set	Set interval (min.)	Standard deviation for each set (μgal)
14 May - 16 May	100	30	3.5
16 May - 31 May	50	60	6.5-9.0
1 June - 29 June	50	120	4.0-0.0

Table 6: Each drop takes 15 seconds and delivers the absolute gravity value for the shot, whose standard deviations range from 20 to 120 μgal . Statistically meaningful absolute gravity values are derived by collecting a number of shots as one set. Operators can set up how many drops form one set and what time interval is appropriate for each set. The standard deviations tabulated above represent those for each set's absolute gravity value.

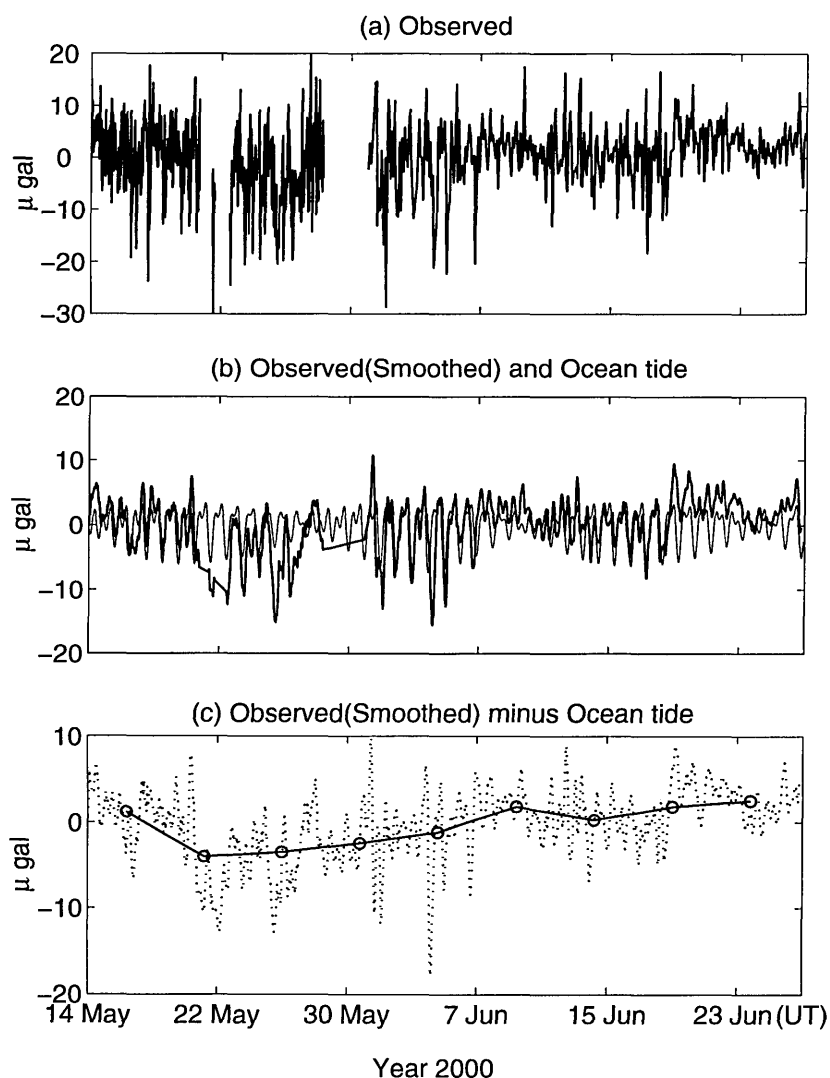


Fig. 6. (a) Observed absolute gravity values for each set. (b) Smoothed observed absolute gravity (thick) and computed gravity change due to ocean tide (thin). (c) Smoothed observed absolute gravity minus ocean tidal gravity changes is shown with dotted line. To illustrate the change with a precision of $1\mu\text{gal}$, set values for a five-day period were averaged to obtain one representative value with a circle. The fluctuations around the inferred absolute gravity at UVO are shown (see Table 2). Unit is in μgal .

は、海洋潮汐による重力変化である。さらに $1\mu\text{gal}$ の精度で長期的な傾向を見るために、図 6b で海洋潮汐による効果を取り除いた残差時系列を図 6c に点線で示し、それを 5 日間毎に区切って各 5 日間の絶対重力値を平均して得られた重力変化が図 6c の実線である。欠測区間の値は線形内挿して求めた。長期的な傾向としては、5 月 22 日頃まで $5\mu\text{gal}$ 以上の減少傾向が見られたあと、1 ヶ月後の 6 月下旬までに再び元のレベルにまで増加する傾向が明瞭に読みとれる。図 6c は、噴火後も継続していた地表の隆起（重力の減少）が 5 月 22 日頃を境に沈降（重力の増加）に転じたものと解釈することができる。この解釈は、2000 年噴火以降、国土地理院によって複数回行われた水準測量の結果（国土地理院、2000）からも指示される。すなわち、2000 年 5 月から 6 月にかけては既に沈降が開始していたことが示されている。

4. 議 論

噴火前後の重力変化

3.2 節のモデリングで想定した膨張源と減圧源は、山頂へ至る路線や有珠山の裾野での重力変化や高さ変化を説明するためのものである。これだけでは、数 10 m 以上の隆起や数 m の水平方向の地殻変動が報告されている火口近くの変動は説明することはできない。 10^7 m^3 オーダーの体積の流入で、このような大きな地殻変動を説明するためには、深さ 200 m 程度の浅い力源が必要であろう。しかしそのような浅い力源（或はダイクなどの矩形断層）の影響は 1 km も離れれば大きく減衰するため、3.2 節での測定データには影響を及ぼさない。言い換えれば、火口付近でのごく浅い力源の他に、本稿で推定したような力源を、水平位置でみて火口から離れたところに想定しなければならないことを示している。

有珠山の 2000 年噴火をもたらしたマグマは、当初は山頂での噴火をめざして上昇しはじめたが、2 km 程度の深さでそれ以上は上昇できなくなり、現在の火口周辺である西山や金毘羅山の地下浅部に移動したことを示しているのかもしれない。

噴火後の絶対重力変化

3.3 節では、噴火後の絶対重力の時間変化が明瞭に捉えられた。6 月 29 日までは、5 月 14 日とほぼ同じ絶対重力値にまで回復している。しかし水準測量によれば、沈降は少なくとも 9 月までは継続していたようであり（国土地理院、2000）、その後でさらに増加していたことが考えられる。

6 月 29 日で測定を停止したのは、2000 年 6 月末に始まった三宅島の火山活動での重力観測のために絶対重力

計を持ち出さざるを得なかったためである。しかし、国立大学総合観測班では小型の絶対重力計 FG5L (#2) を購入し、今後、引続き絶対重力の連続測定を行う予定である。火口に近いところに絶対重力測定点が設けられたことで、相対測定も用いた「ハイブリッド重力測定」が可能になり、周辺での重力の時空間変化が一層高精度にモニターできるであろう。

5. ま と め

有珠山の 2000 年 3 月 31 日の噴火を受けて、緊急重力測定を 5 月に行った。噴火前後の重力変化は一様に減少を示しており、最大で有珠山の南外輪の点における $-820\mu\text{gal}$ であった。点力源モデルを用いて重力変化と高さ変化データを同時に説明するためには、西山南東 2 km 地点の深さ約 2 km と約 3 km に膨張源と収縮源をおけばよい。このモデルから計算される流入したマグマの総質量は密度を $2.3 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ とすると表 4 下段から $3.6 \times 10^{10}\text{ kg}$ となる。

2000 年噴火後の測定においては、絶対重力測定網も構築し、洞爺湖周辺の 3 地点における絶対重力値を精密に決定した。5 月 16 日以降は、北海道大学の有珠火山観測所において、絶対重力の連続測定をその後 1 ヶ月以上にわたって行った。その結果、 $10\mu\text{gal}$ ほどの減少を 5 月 25 日頃まで継続したあと、測定を中断した 6 月 29 日までに $10\mu\text{gal}$ ほど増加していたことが判明した。これは周辺の上下変化が 6 月に入ると沈降を示していたことと調和的である。

6. 謝 辞

北海道大学水産学部の上田宏助教授をはじめとする洞爺湖臨湖実験所の方々、洞爺湖温泉中学校の方々には、絶対重力測定のため一方ならぬ御協力をいただいた。御礼申し上げます。また、国土地理院による水準測量データを利用させて頂いた。測定およびデータ公表にあたって関係各位に謝意を表す。

京都大学防災研究所の石原和弘教授には、本稿の初稿を読んで頂き有益なコメントを頂いた。また 2 名の匿名査読者のコメントも改訂に際して有益であり、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- Battaglia, M., C. Roberts, P. and Segall, 1999, Magma intrusion beneath Long Valley caldera confirmed by temporal changes in gravity, *Science*, **285**, 2119–2122.
Hagiwara, Y., 1997, The Mogi model as a possible cause of the crustal uplift in the eastern part of Izu Peninsula

- and the related gravity change, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **52**, 301-309.
- Jachens, R.C. and G.P. Eaton, 1980, Geophysical observations of Kilauea volcano, Hawaii, 1. Temporal gravity variations related to the 29 November, 1975, M=7.2 earthquake and associated summit collapse, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **7**, 225-240.
- 国土地理院, 2000, 有珠山周辺の水準測量による上下変動, 第85回火山噴火予知連絡会資料, 28.
- 前川徳光・大島弘光, 1993, 有珠山およびその周辺の重力変化, 日本火山学会秋期大会講演予稿集, 88.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa and M. Ooe, 2000, GOTIC2: a software for computation of oceanic tidal loading effect, presented at the 14th International Symposium on Earth Tides, Aug. 28-Sept. 1, 2000, Mizusawa, Japan.
- Mogi, K., 1958, Relations between the eruptions of various volcanoes and deformations of the ground surfaces around them, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **36**, 99-134.
- Niebauer, T.M., Sasagawa, G., Faller, J.E., Hilt, R. and F.J. Klopping, 1995, A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, **32**, 159-180.
- Okubo, S. and H. Watanabe, 1989, Gravity change caused by a fissure eruption, *Geophys. Res. Lett.* **16**, 445-448.
- Okubo, S., Y., Tanaka, Y., M., Machida, I., Kimura, T., Kosuge, H. Ando and T. Toyoda, 2000, Detection of Absolute Gravity Change Caused by Earthquake, presented at IAG International Symposium on Gravity, Geoid and Geodynamics 2000, July 31-August 4, 2000, Banff, Canada.
- Press, W.H., B.P. Flannery, S.A., Teukolsky and W.T. Vetterling, 1988, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press.
- Yokoyama, I., 1989, Microgravity and height changes caused by volcanic activity: four Japanese examples, *Bull. Volcanol.*, **51**, 333-345.
- Yoshida, S., G. Seta, S. Okubo and S. Kobayashi, 1999, Absolute gravity change associated with the March 1997 earthquake swarm in the Izu Peninsula, Japan, *Earth Planets Space*, **51**, 3-12.

(Received December 4, 2000)

(Accepted April 15, 2001)