



Title	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 : 北海道駒ヶ岳および樽前山
Author(s)	前川, 徳光; 大島, 弘光; 植木, 貞人; 山脇, 輝夫; 鬼澤, 真也; 清水, 洋; 高山, 鉄朗
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 62, 61-77
Issue Date	1999-03-25
DOI	10.14943/gbhu.62.61
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/14279">http://hdl.handle.net/2115/14279</a>
Type	bulletin (article)
File Information	62_p61-77.pdf



[Instructions for use](#)

## 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

— 北海道駒ヶ岳および樽前山 —

前川 徳光

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター

大島 弘光

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

植木 貞人・山脇 輝夫

東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究センター

鬼澤 真也

東京大学地震研究所

清水 洋

九州大学理学部島原地震火山観測所

高山 鉄朗

京都大学防災研究所火山活動研究センター

(1999年1月25日受理)

## **Microgravity Survey in and around Active Volcanoes in Hokkaido, Japan — Mt. Komaga-take and Mt. Tarumae —**

Tokumitsu MAEKAWA

Usu Volcano Observatory,

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science Hokkaido University,

Hiromitsu OSHIMA

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University,

Sadato UEKI, Teruo YAMAWAKI,

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,

Graduate School of Science, Tohoku University,

Shinnya ONIZAWA

Earthquake Research Institute, Tokyo University,

Hiroshi SHIMIZU

Shimabara Earthquake and Volcano Observatory, Kyushu University,

Tetsuro TAKAYAMA

Sakurajima Volcano Research Center,

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

(Received January, 25, 1999)

We have carried out the microgravity survey in and around Komaga-take and Tarumae volcanoes for prediction of an eruption and studying volcanic processes. The results are summarized as follows :

(1) Gravity changes in and around Komaga-take volcano during the period from 1993 to 1997 are classified into three groups. The gravity changes related to the minor eruption on 5 Mar. 1996 are observed at stations on the mountain slope and on the southwestern mountain foot. The gravity at these station decreases before the eruption and it increases after the eruption. Analyzing these gravity changes according to Mogi's model, the depth of pressure source is estimated ranging from 2.5 km to 3.6 km beneath the 1929 crater.

(2) Gravity changes in and around Tarumae volcano are characterized by the advance of gravity decrease in, which suggest the inflation of the volcanic edifice. It is revealed that the gravity changes are explained by one pressure source at 11.2 km deep or at 10 km deep, or by the superimposition of the shallow pressure source at 5.4 km deep over the deep pressure source at 10 km deep from the analysis of gravity changes due to Mogi's model.

## I. は じ め に

重力変化を検出し、地下でのマグマの動きをとらえるために国内外の活動的な火山において精密重力測定が行われている。国内の活動的な火山での精密重力測定は、主に噴火予知研究の一貫として組織的・系統的に進められ、近年では1991年-1995年の雲仙火山の噴火活動に伴う興味ある重力変化が検知されている(植木ほか, 1995)。

精密重力測定のほか噴火予知研究では水準測量などの他の測地学的観測にも勢力的に取り組み、桜島などの幾つかの火山ではマグマ溜まりに対比される圧力源が明らかにされるとともに、適切な測地学的観測により地下でのマグマの動きを検知することができることも示された(石原, 1998)。

北海道内には1977年~1982年に噴火活動を行った有珠山, 1988年~1989年に噴火した十勝岳のほかにも大噴火の記録をもつ駒ヶ岳や樽前山などの火山が存在する(Fig. 1)。1929年の大噴火からおよそ70年が経過した駒ヶ岳では, 1996年3月5日に小規模水蒸気爆発が発生し, マグマ噴火への兆しが見え始めた。一方, 樽前山は1978年~1979年の小噴火を最後に表面上は静穏な状態を続けているが, 1909年の大噴火から90年が経過しようとしている。

このような状況のなか北海道地域の火山集中総合観測として, 駒ヶ岳および樽前山の活動現況を評価し, 活動予測のための基礎データを整備することを目的に, GPS 測量を主とした測地観測が計画され, 精密重力測定もその一項目として実施された。

本論では今回の測定結果を整理し, これまでの測定結果(前川ほか, 1996)と比較して両火山における重力変化について検討した。また, 萩原(1977)より重力変化が導びかれている茂木モデルを用いて定量解析を行ない圧力源の位置の推定を試みた。

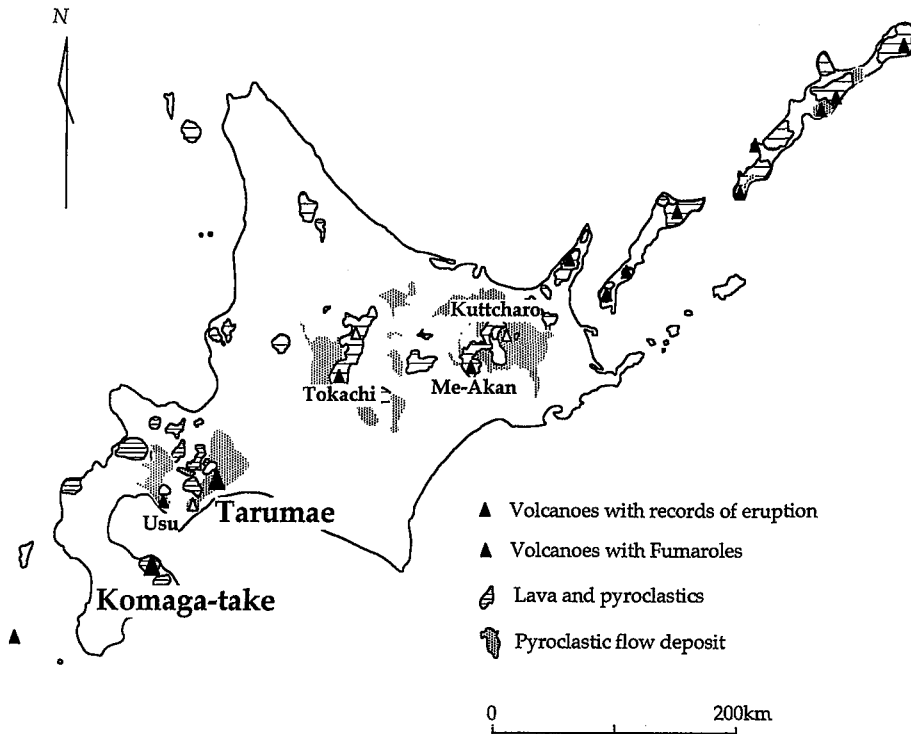


Fig. 1. Location of Mt. Komaga-take and Mt. Tarumae.

## II. 駒ヶ岳

### 1. 測定

測定は1997年6月25日～27日にかけて実施した。測定点はFig. 2に示した既設点の中から空間的な配置と測定環境を考慮して選んだ8点と新たに設けた3点のほか、函館一等重力点およびBMJ 18を加えた13点である。使用した重力計はLaCoste & Lomberg重力計G31, G375, G682, G891, G100およびScintrex CG-3M型自動重力計S235の6台である。

測定はすべて往復測定とし、測定値には地球潮汐補正、器高補正、ドリフト補正を行った。しかし、補正係数が未知であることからLaCoste重力計の測定値に対するスケール定数とペリオディックエラーの補正(Valliant, 1991)は実施しなかった。

各測定点の重力値については重力計ごとに求められた測定基準点からの重力差の単純平均を各点の重力値とした。Table 1に函館一等重力点を仮不動点として求めた各点の重力値をこれまでの成果と合わせて示した。また、測定精度の目安として平均値からの最大隔差も示した。今回の測定では今までに較べて多くの重力計を使用した。最大較差は0.028 mgalとこれまでの測定と大差ない。これはLaCoste重力計の測定値に対するスケール定数とペリオディックエラーの補

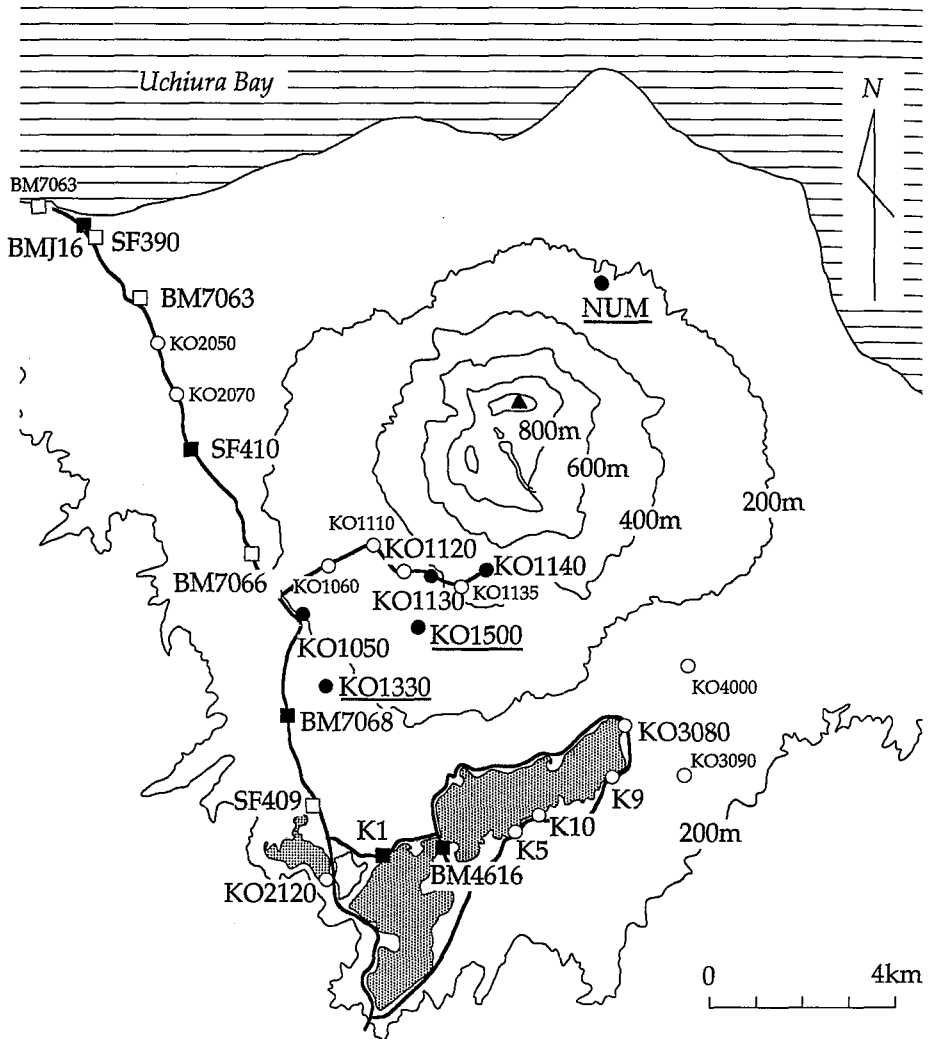


Fig. 2. Location map of gravity stations in and around Komaga-take volcano.

正を施していないことが主たる原因と考えられる。測定精度としては、これまでと同様に $\pm 0.030$  mgal程度を見込まなければならない。

## 2. 重力変化

精密重力測定網が設置された1987年9月以降、重力測定は1993年11月、1996年3月と1996年6月に実施され、今回で4回目の測定となる。

1993年11月の測定は、1993年7月12日の北海道南西沖地震に伴って駒ヶ岳周辺地域でも道路陥没など顕著な地盤変動が現れたことから、この地盤変動に伴う重力変化を明らかにし、各測定点の重力値を再決定するために行われた。1996年3月の測定は、3月5日の小規模水蒸気爆発に

**Table 1.** Results of the microgravity survey in and around Komaga-take volcano

Site	Latitude	Longitude	Height	1987	1993	1996	1996	1997
				Sep. 13 -Sep. 17	Nov. 23 -Nov. 26	Mar. 20 -Mar. 22	Jun. 29 -Jun. 13	Jun. 25 -Jun. 27
				m	mgal	mgal	mgal	mgal
BMJ19	42° 06.22'	140° 34.89'	6.82	-9.834	-9.366		-11.259	-11.241
BM5967	42 06.56	140 33.54	15.02	-8.597				
SF390	42 06.03	140 35.01	18.56	-11.942	-11.497	-11.511	-11.515	
BM7063	42 05.35	140 35.72	47.25	-16.530	-16.059	-16.067	-16.070	
KO2050	42 04.70	140 36.06	70.78	-19.797				
KO2070	42 03.63	140 36.52	133.68	-30.824	-30.393			
SF410	42 02.43	140 37.01	166.80	-38.232	-37.815	-37.837	-37.828	-37.838
BM7066	42 03.21	140 37.42	179.31	-40.683	-40.246	-40.265	-40.287	
KO1050	42 01.86	140 38.24	192.90	-46.361	-45.942		-45.961	-45.955
BM7068	42 00.59	140 38.04	159.27	-36.288	-35.832	-35.839	-35.853	-35.856
KO2100	42 00.06	140 38.24	159.78	-35.114	-34.669		-34.690	
SF4092050	41 59.53	140 38.38	161.62	-32.843	-32.401	-32.423	-32.421	
KO2120	41 58.71	140 38.38	163.44	-28.651	-28.217	-28.242	-28.241	
K1	41 58.95	140 39.42	130.36	-20.900	-20.468	-20.467	-20.485	-20.502
BM4616	41 59.03	140 40.29	130.64	-22.179	-21.742	-21.738	-21.760	-21.772
K5	41 59.26	140 41.49	130.15	-19.274	-18.706	-18.716	-18.747	
K9	41 59.93	140 42.91	130.39	-12.565	-12.147	-12.139	-12.165	
K10	41 59.41	140 41.76	130.52	-18.612				
KO3080	42 00.55	140 43.33	130.54	-13.461	-13.051	-13.034	-13.081	
KO3090	41 59.88	140 44.00	137.25	-9.744				
KO4000	42 01.33	140 44.43	83.34	-3.253				
KO1060	42 02.11	140 38.20	198.95	-48.027				
KO1110	42 02.51	140 39.20	289.82	-64.515				
KO1120	42 02.37	140 39.61	329.80	-71.866	-71.435 (-71.477)		-71.461	
KO1130	42 02.29	140 40.36	392.05	-80.718	-80.276 (-80.329)		-80.307	-80.303
KO1135	42 02.24	140 40.51	430.03	-86.434				
KO1140	42 02.42	140 41.05	486.60	-97.198	-96.740 (-96.787)		-96.758	-96.779
KO1330	42 00.76	140 38.74	170.00					-38.280
KO1500	42 02.08	140 40.25	380.00					-77.462
NUM	42 05.28	140 43.04	290.00					-53.626
BMJ18	41 53.04	140 41.08	65.60				-7.537	-7.545
Hakodate FGS	41 48.80	140 45.40	35.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Maximum Deviation					0.027	0.043	0.023	0.028
Gravimeter				G31	G31	G31	G31	G31
				G458	G375	G375	G375	G375
				G791				G682
								G891
								G1009
							S235	

|| : relocate of bench mark

( ) : Measured by one gravimeter

伴う重力変化を確認する目的で行われ、小噴火から約2週間後の3月20日～22日にかけて実施された。この時の測定は積雪下であったために、駒ヶ岳山腹のKO1120, KO1130とKO1140ではG31のみの測定となった。さらに、小噴火後の重力変化を追跡するために1996年6月にも測定が実施された。

北海道南西沖地震を含む1987年9月～1993年11月の間の重力変化は既に前川ほか(1996)により報告されていることから、ここでは1993年以降の重力変化を扱うことにする。重力変化の検討にあたっては、前川ほかが仮不動点としたBMJ19が移設されたことから、函館一等重力点を仮不動点として採用した。

Fig. 3には、1929年火口から測定点までの水平距離を縦軸にとって重力値の経年変化を図示した。図に区分したように1993年6月～1996年6月の間の重力変化は3つのパターンに分けられる。小規模爆発直後の1996年3月を境として重力減少から重力増加に転じる変化パターン(A)は、駒ヶ岳山腹の測定点とSF409およびKO2120で認められる。1996年3月から重力減少の傾きが大きくなるパターン(B)は、大沼湖畔のK5およびBMJ19からBM7068に至る国道に沿って設けられているSF410を除く水準点で観測された。1996年3月を境に重力増加から重力減少に転じる変化パターン(C)は、大沼のまわりに設置されているK5を除く測定点で認められる。

これらのパターンのうち重力減少から重力増加に転じるパターン(A)については、1929年火口下に圧力源の存在が示唆するように重力減少量、重力増加量とも1929年火口からの距離とともに小さくなり(Fig. 4)、水蒸気爆発前の重力減少は小規模水蒸気爆発に先行する圧力源の増圧による隆起として、その後の重力増加は爆発およびそれに続く噴気活動に伴う圧力源の減圧による沈降として定性的に解釈することができる。

これに対して、(B)、(C)のパターンでは、測定点近傍に原因があると考えられる。変化パターン(B)については、測定点が駒ヶ岳岩層なだれ堆積物あるいは沖積層の分布域(勝井ほか, 1989)に設置されていることから原因として地盤沈下を考えることができる。しかし、圧力源の減圧に伴う沈降が想定される1996年3月～1996年6月の期間の重力変化は地盤の隆起を意味する重力減少が観測され、沈降と地盤沈下による重力増加が期待されることと矛盾する。(C)のパターンについては、大沼湖畔の測定点で観測されることから、大沼の水位変動を反映している可能性もある。しかし、KO3080での1996年3月～6月の間の0.047 mgalの重力減少を水位変化で説明しようとする1 m以上の水位低下が必要になることから疑問が残る。

1996年6月以降についてみると、パターン(A)を示す測定点のうちKO1140では僅かに重力増加を示すが、他の2点は再び重力減少に転じた。パターン(B)、(C)を示した測定点でも重力減少となったが、その傾きは1996年3月～6月の期間よりも小さい。

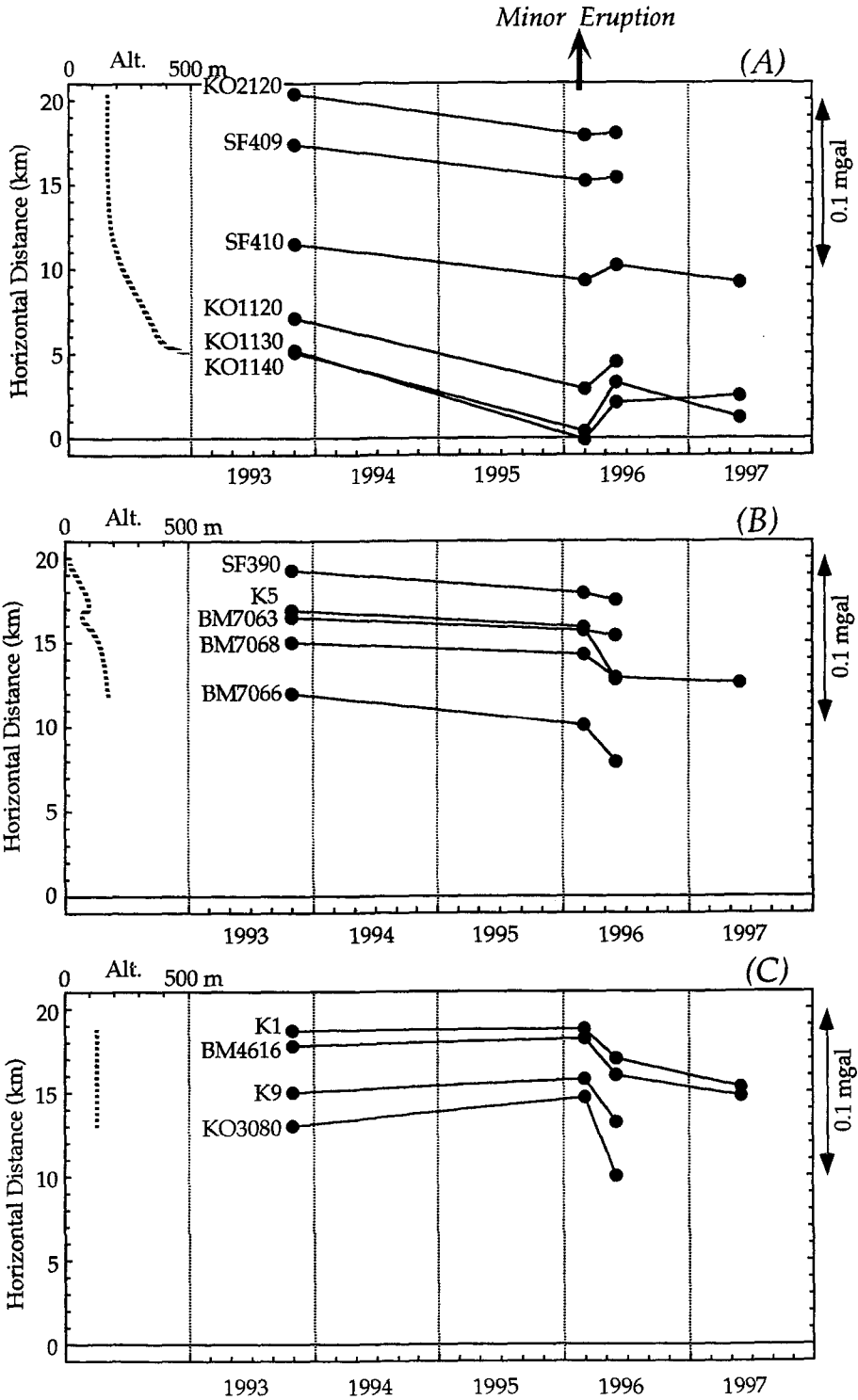


Fig. 3. Secular changes in gravity at each station. Gravity values are referred to Hakodate FGS.



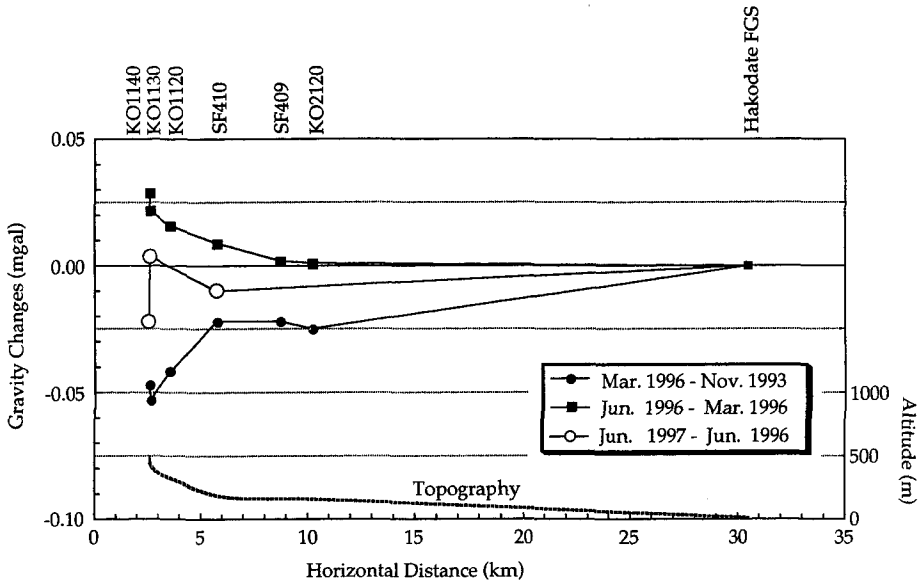


Fig. 4. Gravity changes plotted against the horizontal distance from the 1929 crater.

### 3. 圧力源の推定および考察

半無限等方均一弾性体内部の深さ  $D$  のところにある半径  $a$  の球状圧力源で密度  $\rho_m$  の物質の移動により  $\Delta P$  の圧力変化が生じたとき、圧力源の直上から距離  $r$  の地表面で観測される比高変化  $\delta h$  および重力変化  $\delta g$  は次式で与えられる (萩原, 1977).

$$\delta h = \frac{(\lambda + \mu)}{2\pi(\lambda + \mu)} a^3 \Delta P \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \quad (1)$$

$$\delta g = \left\{ -\beta + \frac{2\pi G \rho_m (\lambda + \mu)}{\lambda + 2\mu} \right\} \delta h \quad (2)$$

ここで、 $\lambda$ 、 $\mu$  はラメ定数、 $\beta$  は重力鉛直勾配、 $G$  は万有引力定数である。また、圧力源直上 ( $r=0$ ) での重力変化を  $\delta g_0$  とすると重力変化  $\delta g$  は、

$$\delta g = \delta g_0 \frac{1}{\left\{ (r/D)^2 + 1 \right\}^{3/2}} \quad (3)$$

$$\delta g_0 = \left\{ -\beta + \frac{2\pi G \rho_m (\lambda + \mu)}{\lambda + 2\mu} \right\} \left\{ \frac{\lambda + 2\mu}{2\mu (\lambda + \mu)} a^3 \Delta P \frac{1}{D^2} \right\} \quad (4)$$

と書き表せる。

重力変化と比高変化のデータがある場合には、(2)式より圧力変化  $\Delta P$  を生じさせた物質の密度が推定できる。

駒ヶ岳山腹の水準路線では数度の測定により比高変化がとらえられている(森ほか, 1997)。しかし、水準測量と重力測定との実施時期が異なり比高変化と重力変化を比較できないことから、

ここでは重力変化のみを用いて解析を行う。

まず、火口からの距離に対して重力変化がなめらかな小噴火後の1996年3月～6月の期間について、圧力源の深さと圧力源直上での重力変化量を最小二乗法により求めた。Fig. 5の下図に示すように計算値と観測値はよく適合し、圧力源の深さが $3.6 \pm 0.7$  km、 $\delta g_0$ が $0.053 \pm 0.006$  mgalと求められた。

同様に小噴火前の1993年11月～1996年3月の間の重力変化について解析すると (Fig. 5の上図)、圧力源の深さは $9.4 \pm 1.8$  kmと小爆発後のそれよりも深く求まった。ここで、山頂の1929

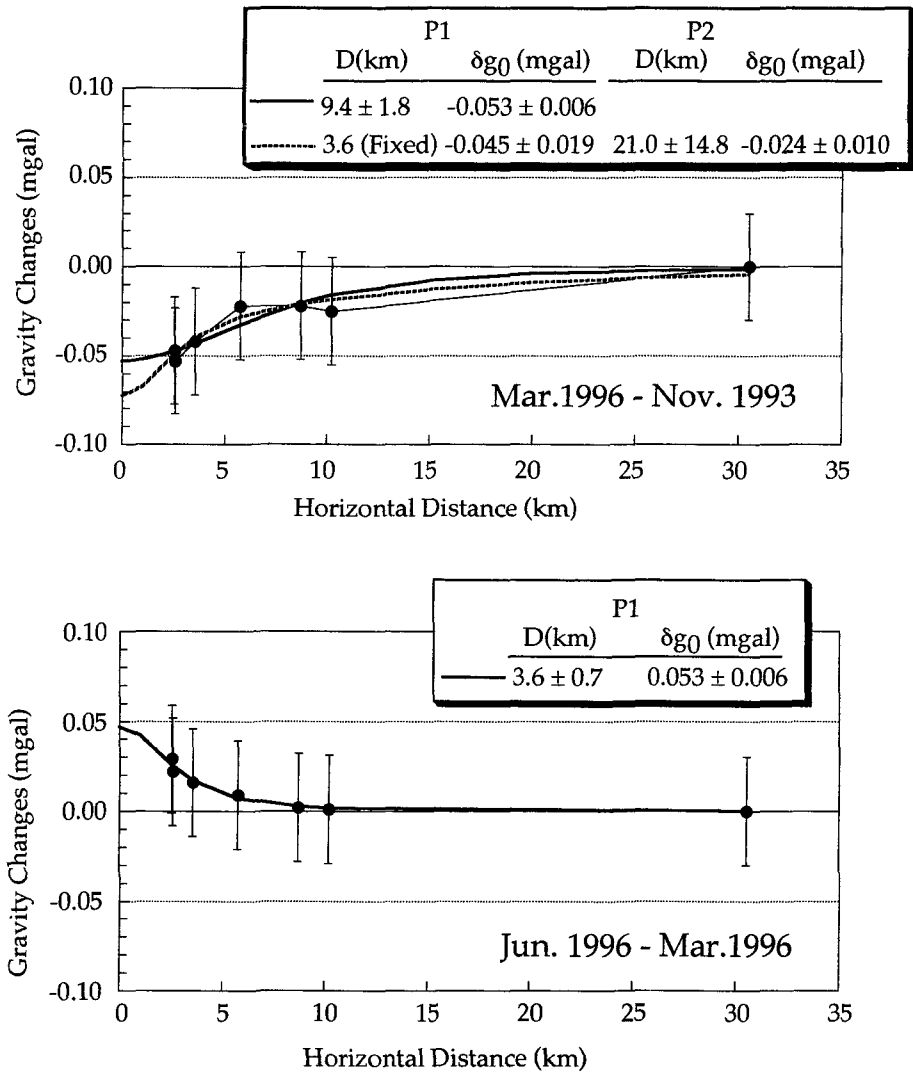


Fig. 5. Comparison between observed values and theoretical curve due to the Mogi's model.

年火口から 10 km 以内にある測定点の重力変化に注目すると、1996 年 3 月～6 月の重力変化が反転しているように見える。そこで 2 つの圧力源（浅部圧力源と深部圧力源と呼ぶ）を 29 年火口直下におき、浅部圧力源の深さを 3.6 km に固定して解いてみた。浅部圧力源に起因した直上での重力変化量  $\delta g_0$  は  $-0.045$  mgal と、その絶対値は 1996 年 3 月～6 月の重力変化から求められたそれにほぼ等しい。この結果は噴火に伴う地殻変動の Inflation-Deflation モデルと調和し、1993 年 11 月～1996 年 3 月の間に浅部圧力源に蓄えられた圧力が小爆発後の 1996 年 3 月～6 月の間にほぼ開放されたと考えられる。一方、深部圧力源については、深さ  $21.0 \pm 14.8$  km と誤差が大きく確実なことは言えない。しかし 1929 年の大噴火に伴う沈降が広範囲に及んでいることから (Mogi, 1958)、その存在は間違いないだろう。1996 年 6 月～1997 年 7 月の重力減少が浅部圧力源の増圧によるものなのか、深部圧力源の増圧によるものなのか、あるいは両者が重畳したものなのかという問題も含め、この深部圧力源については広域的なデータを用いて検討する必要がある。

### III. 樽 前 山

#### 1. 測 定

測定は 6 月 30 日～7 月 2 日にかけて Fig. 6 に示す 8 点で実施した。測定点は苫小牧の TG01 を起点として苫小牧-支笏湖線から登山道に沿って設けられている 7 点と TG40 と TG50 の間に新たに設置した 1 点である。これらに加えて、仮不動点としている TG01 の広域的、局所的な地盤変動に伴う重力変化を監視するために札幌 FGS との結合も行った。使用した重力計、測定方法および測定値に施した各種補正とも駒ヶ岳の場合と同じである。Table 2 には今回の測定で得られた TG01 に対する各重力点の重力値とこれまでの測定結果をまとめて示した。今回の測定の最大較差は  $0.027$  mgal と、これまでの測定と大差なく、測定精度は  $\pm 0.030$  mgal 程度と見込まれる。

#### 2. 重力変化

Fig. 7 に各点の重力変化の推移を示した。TG01 のみ札幌 FGS を、他は TG01 を仮不動点としている。

まず仮不動点とした TG01 の重力変化についてみると単調な重力増加が認められる。その量は測定精度内におさまり有意な変化ではない。やや古い資料になるが、国土地理院の水準測量成果 (1993) によると TG01 に隣接する水準点 BM7306, BM7305 では 1985 年～1991 年の間に  $-12.4$ ,  $-9.4$  mm の沈降が観測されている。この期間の沈降率で 1983 年から現在まで沈降が続いていると仮定し、重力の鉛直勾配  $3.086$  gal/cm を用いて重力変化をもとめると、約  $9 \mu\text{gal}$ ,  $7 \mu\text{gal}$  の増加となる。これらの値は観測量には及ばないが、TG01 の重力増加はこの沈降を反映している可能性が高い。

苫小牧-支笏湖線沿いの 2 点では、変動は見られるものの、全体的には僅かに減少傾向が認め

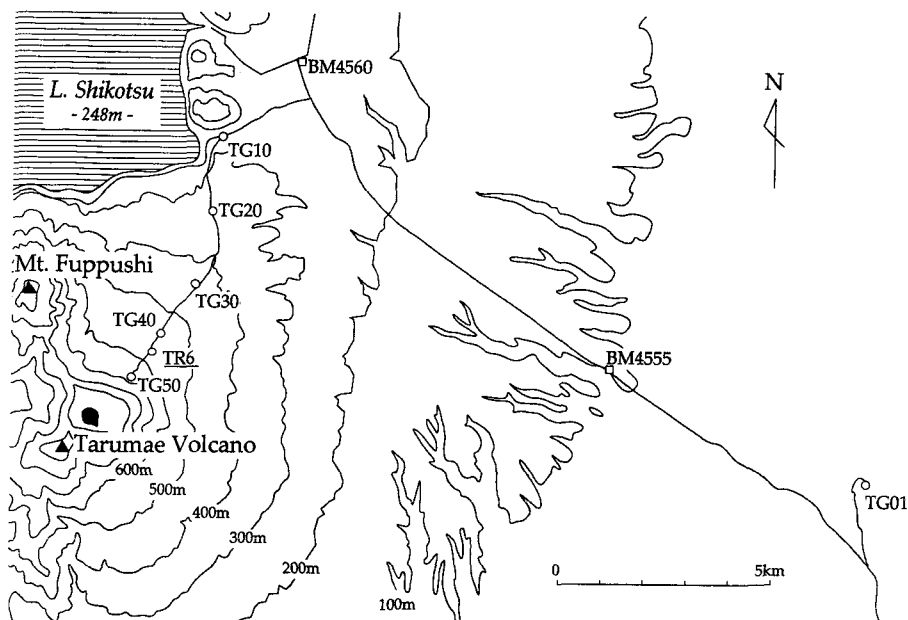


Fig. 6. Location map of gravity stations in and around Tarumae volcano.

Table 2. Results of the microgravity survey in and around Tarumae Volcano

Site	Latitude	Longitude	Height	1983	1989	1992	1997
				Sep. 6 -Sep. 8	Oct. 23 -Oct. 26	Nov. 24 -Nov. 26	Jun. 30 -Jul. 2
			m	mgal	mgal	mgal	mgal
TG50	42° 41.60'	141° 23.78'	660.	-99.241	-99.239	-99.268	-99.334
TG40	42 42.30	141 24.08	550.	-72.073	-72.058	-72.104	-72.138
TG30	42 42.90	141 24.90	440.	-49.272	-49.288	-49.318	-49.339
TG20	42 43.83	141 24.92	340.	-30.687	-30.672	-30.693	-30.749
TG10	42 44.76	141 25.06	290.	-12.221			
BM4560	42 45.68	141 26.36	246.38	-9.770	-9.779	-9.814	-9.812
BM4559	42 44.58	141 27.32	222.52	-15.776			
BM4558	42 43.78	141 27.99	200.78	-15.605			
BM4555	42 41.85	141 31.80	106.37	-14.926	-14.955	-14.953	-14.987
BM4554	42 41.21	141 33.96	86.82	-12.958			
BM4553	42 40.61	141 34.25	71.02	-10.962			
TG01	42 40.40	141 36.25	48.00	0.000	0.000	0.000	0.000
TR6	42 41.98	141 23.86	590.00				-81.955
Sapporo FGS	43 04.3	141 20.7	15.	61.792		61.784	61.773
Maximum Deviation				0.030	0.031	0.029	0.027
Gravimeter				G31	G31	G31	G31
				G375	G851	G375	G375
							G682
							G891
							G1009
						S235	

|| : Lost or relocate of bench mark

られる。同様に、山頂ドームから 5 km 以内にある登山道に沿いの TG20 から TG50 でも全体的に重力減少を示しているが、1989 年～1992 年の間を境にして重力減少率が增大しているように見える。山頂ドームからの水平距離に対する重力変化 (Fig. 8) でみると、1983 年～1989 年の期間では明らかではないが、1983 年～1992 年の期間では重力減少量が山頂に向かって増大する傾向が顕著になり、1983 年～1997 年の期間には更に進行しているのが分かる。この山頂方向に重力減少量が增大する変化パターンは山頂火口原下に存在する圧力源の増圧による山体膨張を唆する。さらに、この変動パターンが 1989 年～1992 年の間を境に明瞭になってきたことはそれまでに較べて圧力源の増圧が加速されたことや、登山道沿いの測定点で重力減少率の増大が認められることは圧力源の深度が浅くなったことを想定させる。

### 3. 圧力源の推定および考察

解析には上下変動が広域に及んでいることも考えられることから札幌 FGS を基準とした重力変化を用い、地盤沈下の影響が想定された TG01 については隣接した 2 つの水準点の沈降量を線形補間した値の平均値を用いて地盤沈下の影響を補正した。

重力変化は 1989 年～1992 年を境に登山道沿いの測定点で重力減少率が增大する傾向を示すことから、1983 年～1992 年と 1992 年～1997 年の 2 期間に分けて圧力源の深さや圧力源の直上での重力変化量を最小二乗法により求めた。なお、圧力源は山頂ドームの直下にあると仮定した。結果を Fig. 9 に示す。

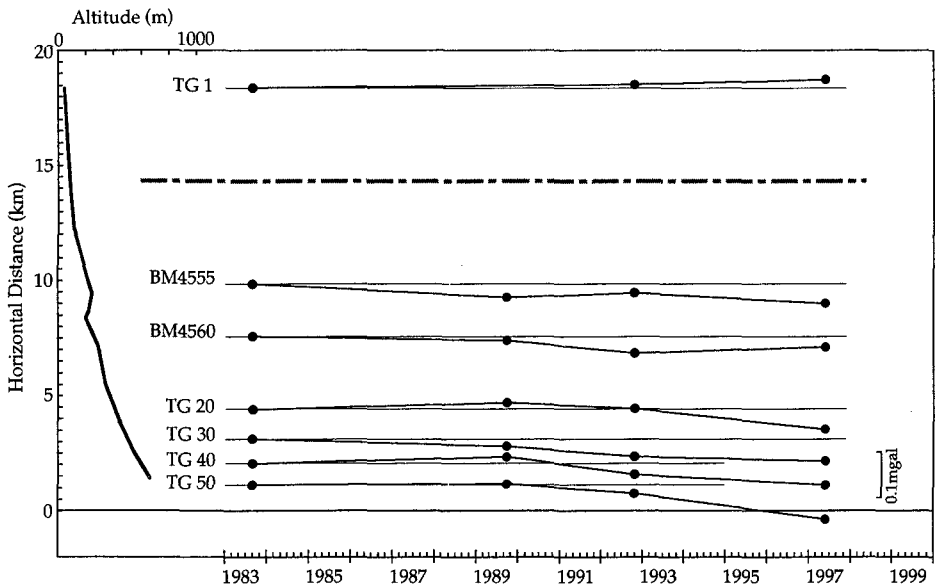


Fig. 7. Secular changes in gravity at each station. Gravity values at TG01 are referred to Sapporo FGS, and those at other stations are referred to TG01.

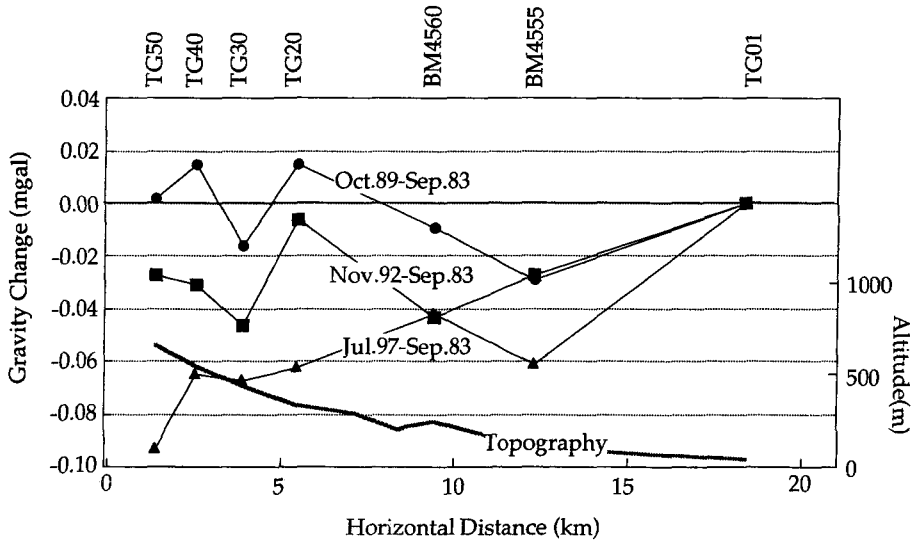


Fig. 8. Gravity changes plotted against the horizontal distance from the summit dome.

1983年～1992年の期間(A)について求められた圧力源の深さは  $19.9 \pm 17.1$  km と誤差が著しく大きい。そこで、圧力源の深さを 5 km, 10 km に固定して  $\delta g_0$  のみを求めた。 $\delta g_0$  の誤差は深さ 10 km のほうが 5 km に較べて小さく、計算値も全体的に観測値を説明しているように見える。一方、1992年～1997年の期間(B)では圧力源の深さは  $5.7 \pm 3.6$  km と求められた。この深さは1983年～1992年の期間で推定された深さ 10 km に較べて浅く、1989年～1992年の間に境に圧力源の深度が浅くなったという想定を支持する。その一方で、前期間で推定された圧力源の深さ 10 km でも観測値を説明できるように見える。これにほぼ等しい深度は、1983年～1997年の間の重力変化から圧力源の深さと直上での重力変化量を求めた場合(C)にも得られた。また(C)には1983年～1992年の期間に推定された圧力源による重力変化と1992年～1997年のそれを重ね合わせて示した。太実線は圧力源の深さが 10 km から 5.7 km と浅くなった場合を、太破線は両期間を通して圧力源の深さを 10 km とした場合である。圧力源の深さが 10 km から 5.7 km と浅くなった場合の計算値は、観測値との差異がやや見られるが、ほぼ観測値を説明している。両期間を通して圧力源の深さが 10 km とした場合の計算値もよく観測値と適合し、1983年～1997年の間の重力変化を解析した場合の計算値(細線)にはほぼ一致する。測定誤差が大きく測定点も少ないことから、これら3つの圧力源モデル—深さ 10 km あるいは 11.2 km と推定される1つの圧力源により、また深さ 10 km と 5.7 km に推定された2つの圧力源の重ね合わせ—のうち、いずれが適切であるか判断することは難しい。

ここまでの解析で圧力源モデルを特定することはできなかったが、圧力源の圧力変化がマグマの移動によると仮定して、各期間における圧力源内のマグマ量の変化を見積もり、マグマ供給過

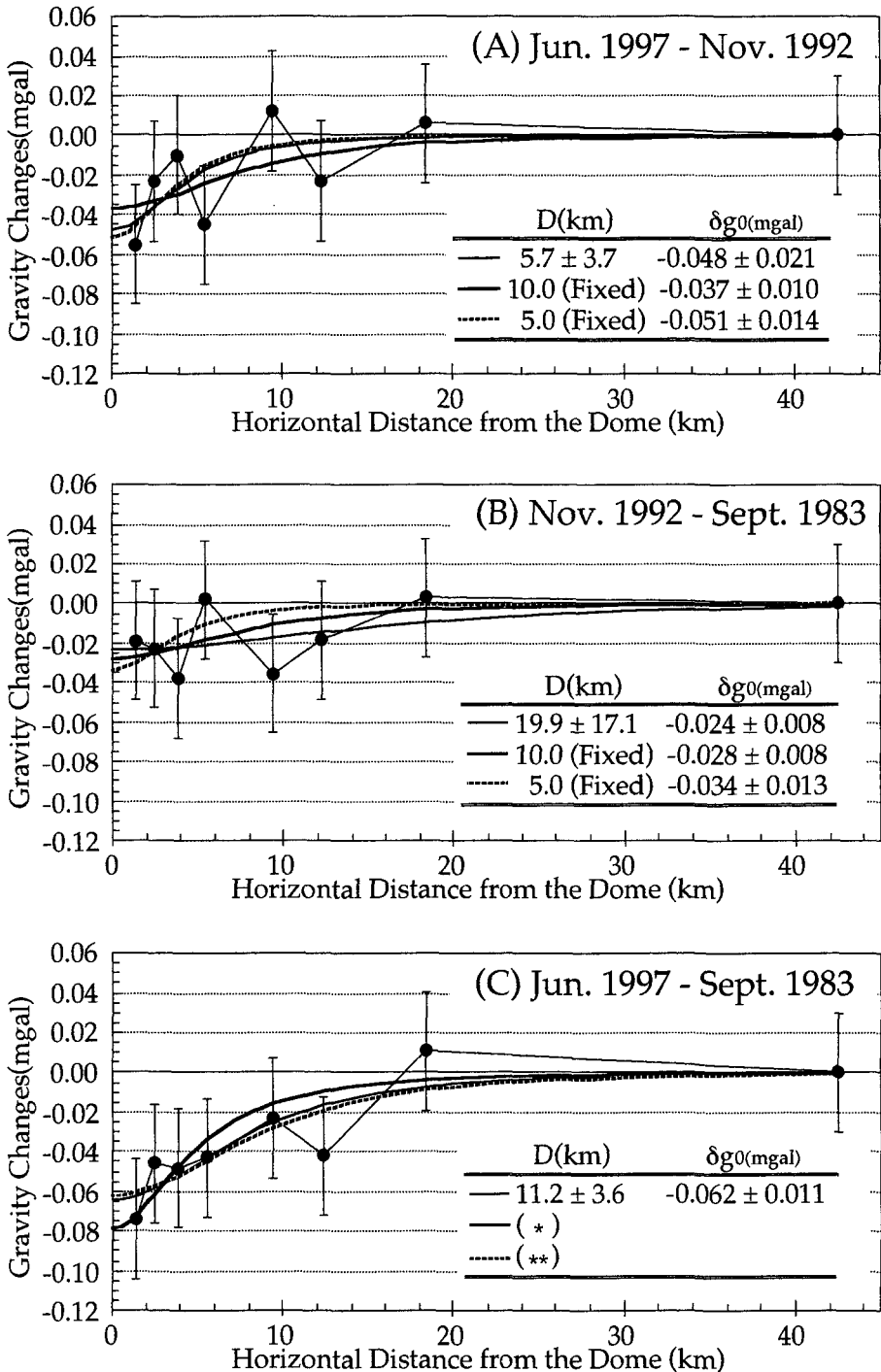


Fig. 9. Comparison between observed values and theoretical curve calculated from the Mogi's model. (\*) Superimposition of gravity changes due to the shallow pressure source at 5.7 km deep and the deep pressure source at 10 km deep. (\*\*) Superimposition of theoretical gravity changes for Sept. 1983-Nov. 1992 and for Nov. 1992-Jun. 1997 due to one pressure source at the depth of 10 km.

Table 3. Mass changes in the pressure source and magma supply rate

period	Depth of the pressure source	Gravity change on the surface just above the pressure source	Mass changes in the pressure source	Magma supply rate
	(km)	$\delta g_0$ (mgal)	$\Delta M$ ( $\times 10^{10}$ kg)	$\Delta m$ ( $\times 10^{10}$ kg/y)
Sept. 1983 -Jun. 1997	11.2 $\pm$ 3.6	-0.062 $\pm$ 0.011	34.0 $\pm$ 16.1	2.5 $\pm$ 1.2
Sept. 1983 -Nov. 1992	10.0 (Fixed) 5.0 (Fixed)	-0.028 $\pm$ 0.008 -0.034 $\pm$ 0.013	12.2 $\pm$ 3.7 3.7 $\pm$ 1.5	1.3 $\pm$ 0.4 0.4 $\pm$ 0.2
Nov. 1992 -Jun. 1997	5.7 $\pm$ 3.7 10.0 (Fixed)	-0.048 $\pm$ 0.021 -0.037 $\pm$ 0.010	6.7 $\pm$ 5.8 16.0 $\pm$ 4.5	1.5 $\pm$ 1.2 3.5 $\pm$ 1.0

程について検討する。  $\lambda = \mu$  と仮定し、圧力源内のマグマ変化量を  $\Delta M$  とすると、(4)式より圧力源直上での重力変化  $\delta g_0$  は

$$\delta g_0 = \left\{ -\beta + \frac{4\pi G \rho_m}{3} \right\} \left\{ \frac{3}{4\pi D^2} \frac{\Delta M}{\rho_m} \right\} \quad (5)$$

と書ける。マグマの密度  $\rho_m$  を  $2500 \text{ kg/m}^3$  として、得られた圧力源直上での重力変化  $\delta g_0$  から(5)式より見積もられたマグマ変化量を Table 3 にまとめて示す。いずれの場合も圧力源内のマグマの量は増加し、圧力源内へマグマが供給されている。この結果はマグマ供給過程として次の3つケースを想定させる。

最初は1983年～1997年の全期間を通してマグマの供給率を一定とした場合である。この場合の圧力源の深さは11.2 km と3つのケースのなかで最も深く、マグマ供給率は  $2.5 \times 10^{10} \text{ kg/年}$  である。この供給率で、1909年の噴火活動以降からマグマ溜まりへのマグマの供給が続いていたと仮定すると、現在までに蓄積されたマグマの量は  $2.5 \times 10^{12} \text{ kg}$  となる。この量を Katsui et al. (1981) によりまとめられた歴史噴火の噴出物量と比較すると、1909年の噴火活動で出現したドームの質量  $5 \times 10^{10} \text{ kg}$  (密度  $2500 \text{ kg/m}^3$  を仮定) の約45倍、1667年の降下火砕物の質量  $3.1 \times 10^{12} \text{ kg}$  (密度  $1000 \text{ kg/m}^3$  を仮定) にほぼ等しい。

次は1983年～1992年と1992年～1997年の期間の圧力源の深さが10 km で変化しないケースである。この場合には、マグマ供給率は  $1.3 \times 10^{10} \text{ kg/年}$  (1983年～1992年) から  $3.5 \times 10^{10} \text{ kg/年}$  (1992年～1997年) と1992年を境にして約3倍に増大する。この程度の変動ではマグマ供給量は時間的に一定とも言えるが、マグマ噴火に先行するマグマ溜まりへのマグマ供給は時間的に変動している可能性も示唆される。前のケースと同様にして、現在までに蓄積されたマグマの量を見積もると  $1.2 \times 10^{12} \text{ kg}$  となり、この値は1667年の噴出物量の3割強にあたる。

最後は2つの圧力源を考えたケースである。1983年～1992年の期間の深さ10 km の深部圧力源へのマグマ供給率は  $1.3 \times 10^{10} \text{ kg}$ 、1992年以降の期間に深さ5.7 km にある浅部圧力源へ供給されたマグマ供給率は  $1.5 \times 10^{10} \text{ kg}$  と、両者はほぼ等しい。このことは、渡辺(1998)が提案した伊豆大島のマグマ供給系モデルと同様に、1992年までは深部圧力源にマグマが蓄積していたが、その後は深部圧力源に供給される量にほぼ等しいマグマが深部圧力源から浅部圧力源に供給され



始めたことを想定させる。このケースでは、1667年の噴出物量の3割強にあたる $1.2\sim 1.3\times 10^{12}$  kgのマグマが現在までに両圧力源に蓄積していると推定される。

これらのケースでは地下深部からのマグマの供給を仮定したが、閉鎖したマグマ溜まり内で冷却により揮発性成分が分離し、圧力増大を引き起こすというモデルも提案されている (Teit et al., 1989)。比高変化と重力変化を組み合わせることにより圧力変動を引き起こした物質の同定も可能なことから、このモデルを含め、圧力源の位置を同定し現在の樽前山で進行しているマグマ供給過程をより詳細に検討するためには、他の測地学的データと合わせた解析が必要である。

#### IV. ま と め

LaCoste & Lomberg 重力計5台, Scintrex 重力計1台を用いて、北海道駒ヶ岳および樽前山において、精密重力測定を実施し、既存データと合わせて重力変化について検討した。結果は以下のようにまとめられる。

駒ヶ岳および周辺地域の1983年11月～1997年6月の間の重力変化は、1996年3月の小規模爆発前後の重力変化から3つのグループに分けられた。このうち、小規模爆発に関連があると想定される重力変化は駒ヶ岳山腹および南西山麓の狭い範囲に分布する測定点に限られた。これらの測定点で観測された重力変化から茂木モデルを用いて圧力源の位置を推定すると、1929年火口直下の3.6 kmの深さと求められた。また、確実なことは言えないが、深部圧力源の存在も想定された。

樽前山では山頂隆起を示唆する重力減少が進行し、特に山頂ドームから5 km以内にある測定点では1989年～1992年の間を堺として重力減少率の増大傾向が認められた。重力変化を茂木モデルで解析すると、この期間の重力変化は深さ10 kmまたは11.2 kmと推定された一つの圧力源、あるいは深さ10 kmと5.7 kmに推定された二つの圧力源の重ね合わせて説明できることが分かった。また、圧力源の増圧が準定常的なマグマ供給による圧力源内のマグマ蓄積量の増加であると仮定すると、1909年大噴火から現在までに蓄積されたマグマの量は、1909年の噴火活動で出現したドームの質量 $5\times 10^{10}$  kgを大きく上回り、 $1.2\sim 2.5\times 10^{12}$  kgと見積もられた。

石原のレビューによると、桜島を始めとする4つの火山では地殻変動データから複数の圧力源が推定されている。一つは深さ5～10 kmの範囲にある主たるマグマ溜まりに対応する深部圧力源であり、他は火山体下の5 km以浅にある副マグマ溜まりともいえる浅部圧力源である。これらの火山と同様に、駒ヶ岳と樽前山でも深部圧力源と浅部圧力源の存在が示唆された。噴火の直前予知の観点からは浅部圧力源の変動を監視する必要があるが、中～長期的な活動予測の観点からは主マグマ溜まりに対応する深部圧力源の変動監視が重要になる。このためには、まず広域的な側地観測に基づいて深部圧力源の位置を明らかにし、適切な監視網を構築しなければならない。また、マグマ噴火に先行するマグマの蓄積や移動をより詳細に議論するには、重力測量と水準測量あるいはGPS測量を組み合わせた解析により、圧力変動を引き起こした原因の特定も必要である。

謝 辞 重力測定の実施にあたっては、国土地理院北海道地方測量部、函館海洋気象台および北海道大学農学部苫小牧演習林の協力を賜った。記して厚くお礼申し上げます。

#### 文 献

- 石原和弘, 1997. 火山観測による噴火の仕組みの理解, 火山, **42**, 445-458.
- 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 報, **52**, 301-309.
- Katui Y., I. Yokoyama, H. Watanabe and H. Nurozumi, 1981. Field excursion guide to Usu and Tarumae volcanoes and Noboribetsu spa, Volc. Soc. Japan, pp. 64.
- 勝井義雄, 鈴木健夫, 曾屋竜典, 吉久康樹, 1989. 北海道駒ヶ岳火山地質図, 地質調査所.
- 国土地理院, 1993. 一等水準点検束成果収録, 国土地理院技術資料 B3-No. 36, **36**, p. 75.
- 前川徳光, 宮町宏樹, 大島弘光, 石原和弘, 1996. 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. 北大地球物理学研究報告, **59**, 119-135.
- Mogi K., 1958. Relations between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground surface around them. Bull. Earth. Res. Inst., **36**, 99-134.
- 森 濟, 鈴木敦生, 前川徳光, 岡田 弘, 1977. 北海道駒ヶ岳 1996 年 3 月 5 日の小噴火前後の地殻変動. 北大地球物理学研究報告, **60**, 121-130.
- Tait S., C. Jaupart and S. Vergnolle, 1989. Pressure, gas content and eruption periodicity of a shallow, crystallising magma chamber, Earth and Planet. Sci. Letter, **92**, 107-123.
- 植木貞人, 清水 洋, 前川徳光, 宮町宏樹, 須藤靖明, 吉川 慎, 渡辺秀文, 石原和弘, 浜口博之, 1995. 雲仙火山の噴火に伴う重力変化. 昭和新山生成 50 周年記念国際ワークショップ 1995 小論文・要旨集, 198.
- Valliant, D., 1991. Gravity meter calibration at LaCoste and Romberg. Geophysics, **56**, 705-711.
- 渡辺秀文, 1998. 伊豆大島火山 1986 年噴火の前兆過程とマグマ供給システム, 火山, **43**, 271-282.