

1986年伊豆大島火山噴火に伴う重力変化*

東京大学地震研究所**

北海道大学理学部***

1. はじめに

伊豆大島において、重力変化の検出を目的とした測定は、1950-51年の三原山噴火以後数回実施されている(飯田他¹⁾、井上他²⁾、井内他³⁾、藤井⁴⁾)。しかし、これらの測定時には、地震研究所が設置した数点以外には島内に水準点がなく、上下変動が不明なために、検出された重力変化を定量的に議論することは困難であった。

1979年に国土地理院によって大島を一周する水準点が設置されたのを機会に全島の精密重力測定網が設置され、1983年の伊豆大島集中総合観測に際して再測がなされた(田島他⁵⁾)。この間の重力変化量は、火山活動が静穏であったことに対応して、精度限界と同程度の小さな量であった。

1986年11月15日三原山の噴火が始まり、21日には三原山北麓カルデラ床で割れ目噴火が発生し、火口は外輪山を越えて北西山腹まで延びた。さらに12月18日には再度三原山火口で小規模噴火が発生した。この割れ目噴火に際しては、全島的大規模な地殻変動が起り、1986年12月下旬に実施された国土地理院の島内一周水準測量や、地震研究所が実施した山頂に至る路線の水準測量結果によると、最大数十cmにおよぶ隆起・沈降が生じている。⁶⁾⁷⁾ 噴火後、上記重力網に数点を追加して、1986年12月21日~30日および1987年3月26日~31日の期間に測定を実施した。これらの結果および1983年以後の重力変化について報告する。

2. 測定法・測定地点

測定にはLaCoste & Romberg G型重力計を用いた。この重力計を用いて $10 \mu\text{gal}$ 程度の精度で重力の時間変化を検出するためには細心の注意が必要である。今回の測定では特に以下の点に留意した。

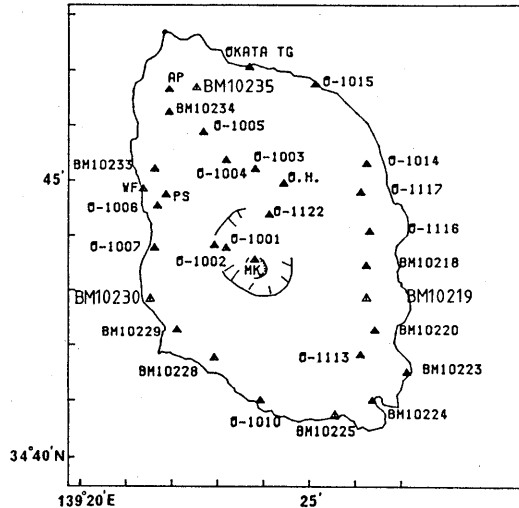
- (a) 重力計のうち少なくとも2台は、前回の測定に用いたものと同一のものを使った。一般に重力計には固有の器差(較正定数の誤差、ペリオディックエラー等)があり、それが測定値に系統誤差をもたらす。同一の重力計を用いれば、ある地点の重力の時間変化を調べるときには、この系統誤差は共通因子として除くことができる。1983年の測定では4台の重力計(北大G 31・G 375、地震研G 210・G 581)が用いられているが、今回は、1986年12月はG 31, G 581, G 705(地震研)、1987年3月はG 581, G 705を使用した。G 210, G 375は器械不調や老朽化のため、使用しなかった。
- (b) 1983年と同様に往復測定を行い、往復差を測定精度の目安のひとつとした。
- (c) 測定開始の前日に重力計の検定を行い、十分に調整した。⁸⁾ 調整法は大略、志知によった。我々の経験では、重力計の気泡管の狂いが数十秒角あることは珍しくなく、調整せずに測定した場合には、数十 μgal の測定誤差を生じる。

* Received Sep. 3, 1987

** 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

- (d) 大島島外の熱海市網代にある国土地理院の水準点 (BM9330) を重力の不動点と仮定して、大島島内の重力変化を求めた。
- (e) 島内の重力測定の基点を元町小学校に改めた。1983年までの測定では元町埠頭を基点としているが、この点は海水のしぶきを受けるなどで、測定環境が必ずしも良くなかった。測定点の分布を第1図に、その緯度・経度・標高を第1表に示す。



第1図 重力測定点の分布。記号については第1表を参照。

Fig.1 Location of the gravity observation sites
For abbreviations, see Table 1.

3. 測定結果

地球潮汐定数を1.2とし、往復測定にドリフト補正を施して求めた各点の相対重力値を第2表に示す。海洋潮汐補正や気圧補正等を行っていない。1983年の測定については、元町小学校を基点とするように再計算した。基点とした元町小学校の重力の時間変化は、大島島外にあるBM-9330を不動点と仮定することにより見積った。

4. 重力変化

1983年5月、1986年12月および1987年3月の3回の測定結果から各期間の重力変化を求めるに際し、1983年の測定結果の精度が若干低いこと、噴火に伴う地下構造の変化以外の噴出物や地形変化による二次的影響が含まれることを考慮し、噴火に伴う変化と噴火後の変化に分けて議論をする。

第1表 重力点の緯度・経度・標高

Table 1. Location of the observation sites.

Site	Longitude (deg min)	Latitude (deg min)	Altitude (m)
BM-9330	139 5. 87	35 2. 74	6. 30
BM-10218	139 26. 26	34 43. 50	342. 09
BM-10219	139 26. 23	34 42. 91	338. 26
BM-10220	139 26. 38	34 42. 34	322. 11
BM-10223	139 27. 06	34 41. 52	20. 86
BM-10224	139 26. 33	34 40. 99	69. 52
BM-10225	139 25. 45	34 40. 78	33. 67
BM-10228	139 22. 89	34 41. 81	57. 73
BM-10229	139 22. 12	34 42. 32	97. 50
BM-10230	139 21. 64	34 42. 86	89. 41
BM-10233	139 21. 66	34 45. 27	41. 12
BM-10234	139 21. 97	34 46. 26	55. 69
BM-10235	139 22. 70	34 46. 65	84. 13
BM-O-1001	139 23. 31	34 43. 84	537. 88
BM-O-1002	139 22. 97	34 44. 06	557. 10
BM-O-1003	139 23. 77	34 45. 28	440. 50
BM-O-1004	139 23. 17	34 45. 42	300. 02
BM-O-1005	139 22. 59	34 45. 86	170. 05
BM-O-1006	139 21. 62	34 44. 60	32. 44
BM-O-1007	139 21. 61	34 43. 88	16. 98
BM-O-1010	139 23. 92	34 41. 03	24. 83
BM-O-1014	139 26. 25	34 45. 38	113. 10
BM-O-1015	139 25. 13	34 46. 80	17. 50
BM-O-1113	139 26. 11	34 41. 86	208. 06
BM-O-1116	139 26. 28	34 44. 07	344. 21
BM-O-1117	139 26. 11	34 44. 78	322. 27
BM-O-1122	139 24. 25	34 44. 55	487. 77
MK	139 23. 72	34 43. 66	672. 03
MOTOMACHI-PS	139 21. 85	34 44. 79	60. 00
MOTOMACHI-WF	139 21. 36	34 44. 90	5. 00
OKATA-TG	139 23. 68	34 47. 18	3. 26
ONSEN-HOTEL	139 24. 38	34 45. 01	498. 40
OSIMA-AP	139 21. 93	34 46. 65	40

Abbreviations.

PS: Primary School. WF: Wharf. BM: Benchmark.
 TG: Tide Gauge Station. Ap: Airport.

第2表 元町小学校を基点とした各点の相対重力値。単位 mgal.

Table 2. Relative gravity with respect to MOTOMACHI-PS. Unit is in milligal.

	1983 May		1986 December			1987 March		
	G-31	G-581	G-31	G-581	G-705	G-31	G-581	G-705
MOTOMACHI-PS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BM-9330	-23.473	-23.547	-23.558	-23.577	-23.574	-23.566	-23.576	-23.668
MOTOMACHI-PS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BM-10218	-56.122	-56.138	-56.193	-56.189	-56.160	-56.191	-56.219	-56.165
BM-10219						-55.681	-55.701	-55.673
BM-10220	-57.209	-57.268	-57.236	-57.262	-57.233	-57.265	-57.301	-57.249
BM-10223	12.453		12.465	12.442	12.463	12.473	12.442	12.477
BM-10224	-5.948	-5.957	-5.978	-5.995	-5.971	-6.006	-6.004	-5.963
BM-10225	-1.884		-1.936	-1.937	-1.917	-1.951	-1.966	-1.918
BM-10228	-10.366	-10.370	-10.382	-10.431	-10.383	-10.385	-10.435	-10.384
BM-10229	-16.918	-16.915	-16.917	-16.950	-16.917	-16.920	-16.950	-16.913
BM-10230						-13.427	-13.453	-13.403
BM-10233	3.794	3.752	3.741	3.760	3.777	3.755	3.761	3.777
BM-10234			4.204	4.194	4.198	4.209	4.199	4.205
BM-10235						0.550	0.565	0.550
BM-O-1001	-100.522	-100.608	-100.532	-100.627	-100.572	-100.563	-100.641	-100.583
BM-O-1002	-115.431	-115.469	-115.448	-115.512	-115.469	-115.505	-115.528	-115.485
BM-O-1003	-79.814	-79.899	-79.890	-79.939	-79.880	-79.913	-79.945	-79.904
BM-O-1004	-48.606	-48.651	-48.647	-48.675	-48.623	-48.664	-48.686	-48.644
BM-O-1005			-19.864	-19.895	-19.853	-19.871	-19.890	-19.858
BM-O-1007	7.572	7.585	7.547	7.530	7.532	7.543	7.526	7.537
BM-O-1010	-5.718	-5.766	-5.803	-5.812	-5.790	-5.812	-5.813	-5.793
BM-O-1014	-8.981	-9.021	-9.111	-9.150	-9.127	-9.108	-9.145	-9.127
BM-O-1015	15.417	15.410	-15.365	15.342	15.358	15.367	15.346	15.351
BM-O-1113	-31.368	-31.422	-31.404	-31.427	-31.427	-31.423	-31.443	-31.416
BM-O-1116			-59.545	-59.615	-59.573	-59.567	-59.631	-59.608
BM-O-1117	-53.918	-53.965	-83.055	-54.093	-54.048	-54.057	-54.101	-54.071
BM-O-1122			-83.846	-83.915	-83.854	-83.874	-83.925	-83.880
MK			-137.061	-137.106	-137.051	-137.114	-137.155	-137.104
MOTOMACHI-WF	10.394	10.367	10.353	10.369	10.386	10.346	10.376	10.388
OKATA-TG			21.086	21.059	21.085	21.049	21.043	21.064
ONSEN-HOTEL	-91.467	-91.524	-91.527	-91.610	-91.537	-91.546	-91.603	-91.555
OSIMA-AP			6.856	6.833	6.831			

第3表 BM-9330を不動点と仮定したときの各点の1983年5月~1986年12月の期間における重力変化。 ϵ は測定誤差の推定値。単位mgal.

Table 3. Cravity Change Δg from May 1983 till Dec. 1986 assuming the gravity at BM-9330 was constant. ϵ is the estimated error. Unit is in milligal.

Site	Δg		ϵ		Weighted mean	
	G-31	G-581	G-31	G-581	$\overline{\Delta g}$	$\overline{\epsilon}$
BM-9330	-	-	0.04	0.025	0.000	0.01
MOTOMACHI-PS	0.052	0.052	-	-	0.052	0.01
BM-10218	-0.019	0.001	0.02	0.02	-0.009	0.01
BM-10220	0.025	0.058	0.02	0.01	0.047	0.01
BM-10223	0.064		0.02		0.064	0.02
BM-10224	0.022	0.014	0.01	0.01	0.018	0.01
BM-10225	0.000		0.02		0.000	0.02
BM-10228	0.036	-0.009	0.01	0.03	0.025	0.01
BM-10229	0.053	0.017	0.01	0.01	0.024	0.01
BM-10233	-0.001	0.060	0.02	0.01	0.040	0.01
BM-O-1001	0.042	0.033	0.025	0.01	0.036	0.01
BM-O-1002	0.035	0.009	0.025	0.01	0.016	0.01
BM-O-1003	-0.024	0.012	0.025	0.01	0.002	0.01
BM-O-1004	0.011	0.028	0.02	0.02	0.020	0.01
BM-O-1007	0.027	0.003	0.02	0.02	0.012	0.01
BM-O-1010	0.033	0.006	0.01	0.05	-0.027	0.01
BM-O-1014	-0.078	-0.077	0.01	0.01	-0.077	0.01
BM-O-1015	0.000	-0.016	0.01	0.01	-0.008	0.01
BM-O-1113	0.016	0.047	0.01	0.02	0.026	0.01
BM-O-1117	-0.085	-0.076	0.01	0.01	-0.081	0.01
MOTOMACHI-WF	0.011	0.054	0.04	0.01	0.045	0.01
ONSEN-HOTEL	-0.008	-0.034	0.04	0.01	-0.029	0.01

噴火に伴う重力変化(1983年5月~1986年12月)

基点とした元町小学校の重力の変化量は, BM-9330を不動点と仮定すると, G31によれば85 μ galの増加, G581によれば30 μ galの増加となった。第3表に示した測定誤差 ϵ の逆数を重みとした荷重平均52 μ gal増を, 元町小学校での重力変化量として議論をすすめる。

G31, G581について, 噴火前後の重力の時間変化を第3表に示す。この値は, 第2表の1986年12月と1983年5月の重力の差に前述の52 μ galを加えたものになっている。

表中の推定誤差 ϵ は, 1983年の測定誤差と1986年12月の誤差とを比較して大きい方とした。それぞれの測定誤差は以下のようにして見積った。

- 同一時期に複数回測定された重力点(1986年12月の全点と1983年の一部の点)については, その再現性をもって測定誤差とする。
- 一回の往復測定しか行わなかった点では次式で定義する量 ϵ_1 をもって測定誤差とする。 $\epsilon_1 = \max$ (往

復差, 2回の片側測定として計算した重力値の差) / 2。

一回の往復測定中にテアが起った場合には, 路線のどこかある点を境にして往復差にステップ状変化が現れる。そのようなステップ量が往復差として期待されている測定点で, 実際には小さな往復差しか現れないとすれば, かえってその点での測定が不良であることになる。このように往復差だけでは精度の目安とならない場合がありうる。このときには, 基点との重力差を往路と復路について求め, その2つの値の差をとればステップ量が見積られる。 ϵ_1 の定義式はこのような意味をもっている。

(a), (b)いずれの場合でも, 測定精度は $10 \mu\text{gal}$ よりは良くなり得ないとした。ただし, ドリフトが大きき場合には $20 \mu\text{gal}$ とした。これらの値は, 重力計の読み取りの際の偶然誤差を考慮するためのものである。このようにして見積った推定誤差の逆数を重みとする荷重平均値 $\Delta \bar{g}$ とその誤差 $\bar{\epsilon}$ を第3表に示す。平均誤差 $\bar{\epsilon}$ は次式

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{2} \epsilon^{31} \epsilon^{581} / (\epsilon^{31} + \epsilon^{581})$$

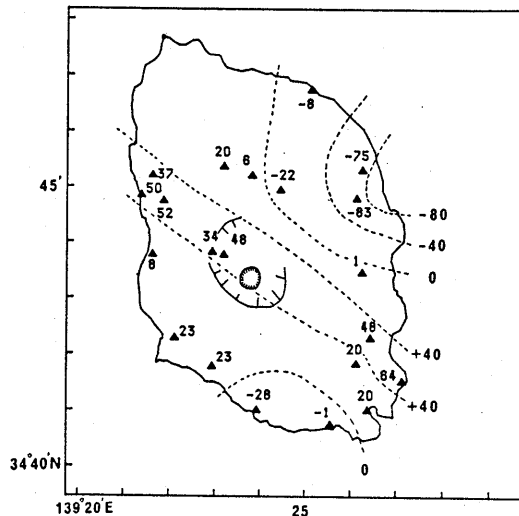
により見積った。ただし, ϵ^{31} , ϵ^{581} はそれぞれG 31, G 581による推定誤差である。

測定された重力変化には, 地下構造の変化とは直接には結びつかない成分が含まれている。それらを列挙すると,

- (a) 地表に噴出した溶岩やスユリアが及ぼす引力
- (b) 測定点周囲の地形変化から生じる重力変化

などが考えられる。(a)の効果は噴出物の分布図に基づいて計算した。(b)の効果の推定は, 噴火前と後の標高データから, それぞれ重力の地形補正值 Δg_1 , Δg_2 を計算し, その差 ($\Delta g_2 - \Delta g_1$) によって行った。

以上のようにして求めた二次的重力変化値と, それを補正した重力値とを第4表に示す。補正後の Δg



第2図 1983年5月~1986年12月の期間の重力変化。元町小学校での重力変化量を $52 \mu\text{gal}$ と見積っている。単位 μgal 。

Fig.2 Gravity change from May 1983 till Dec. 1986 assuming the gravity change at Motomachi PS is $52 \mu\text{gals}$. Unit is in μgal .

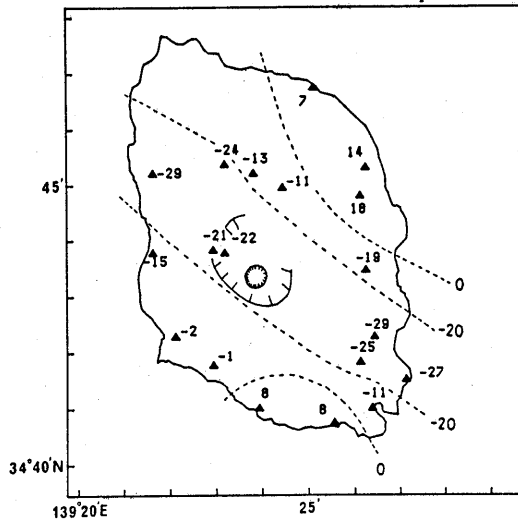
第4表 噴出物(溶岩, スコリア)および地形変化による重力変化に対する補正值と補正後の重力変化(1983年5月~1986年12月)。単位 μgal 。

Table.4 Corrections to the gravity change. Lava and Scoria denote gravitational attractions by erupted matters. TCC means correction for topographic change. Unit is in μgal .

Site	Lava	Scoria	TCC	Corrected gravity change
BM-9330	0	0	0	0
BM-10218	1	10	-1	1
BM-10220	0	0	2	+48
BM-10223	0	0	0	+64
BM-10224	0	0	3	+20
BM-10225	0	0	-1	-1
BM-10228	0	0	-1	+23
BM-10229	1	0	-1	+23
BM-10233	1	0	-3	+37
BM-O-1001	12	0	0	+48
BM-O-1002	2	0	16	+34
BM-O-1003	1	0	4	+6
BM-O-1004	1	0	-1	+20
BM-O-1007	1	0	-4	+8
BM-O-1010	0	0	-1	-28
BM-O-1014	1	0	2	-75
BM-O-1015	0	0	0	-8
BM-O-1113	0	0	-6	+20
BM-O-1117	1	0	-2	-83
MOTOMACHI-PS	1	0	-2	+51
MOTOMACHI-WF	1	0	-4	+50
ONSEN-HOTEL	0	0	7	-22

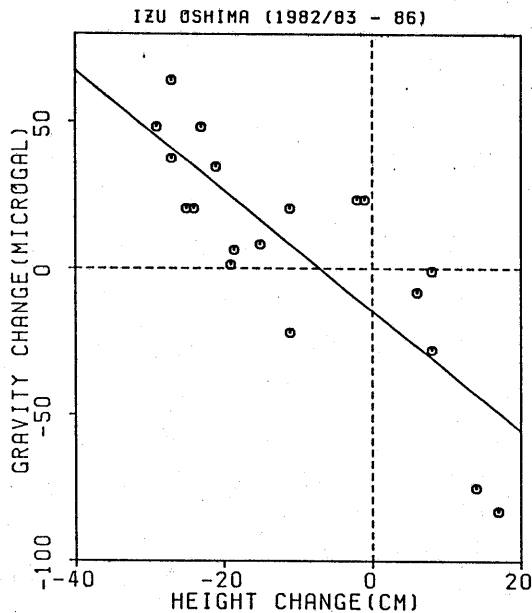
の分布を第2図に示す。特にBM-10218付近は、厚さ20~30cmのスコリア(みかけ密度0.9程度)におおわれていたので、そのブーゲー補正量は約 $10\mu\text{gal}$ と大きな値になった。

1983年5月から1986年12月末までに生じた重力変化の大部分は伊豆大島の噴火に伴うものと考えられる。第2図に示した Δg の分布は伊豆大島の北西-南東方向を軸とする対称性をもっている。このような重力変化の分布は、第一近似的には地盤の上下変動 Δh で説明できる。第3図に、国土地理院および地震研究所による水準測量の成果をコンパイルしたものを示す。重力変化 Δg と上下変動 Δh のパターンはきわめて良い一致をみせている。しかしながら、直線関係を最小2乗法であてはめて求めた $\Delta g/\Delta h$ は $-2.0\mu\text{gal}/\text{cm}$ となり、フリーエア勾配 $-3.086\mu\text{gal}/\text{cm}$ からは大きくはずれている(第4図)。上下変動に伴って密度約 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ の物質が移動したことになる。



第3図 伊豆大島における1982/1983年~1986年12月の期間の上下変動分布(国土地理院および東京大学地震研究所による)。単位cm。基準点は岡田検潮所。

Fig.3 Vertical deformation on Izu-Oshima island.(after Geographical Survey Institute and Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo). Unit is in cm. Reference point is Okata TG.



第4図 1983年5月~1986年12月の期間における各点の上下変動と重力変化。直線は最小2乗法で求めたもの。

Fig.4 Relation between elevation and gravity changes. Solid line is determined from the least squares fitting.

噴火後の重力変化 (1986年12月~1987年3月)

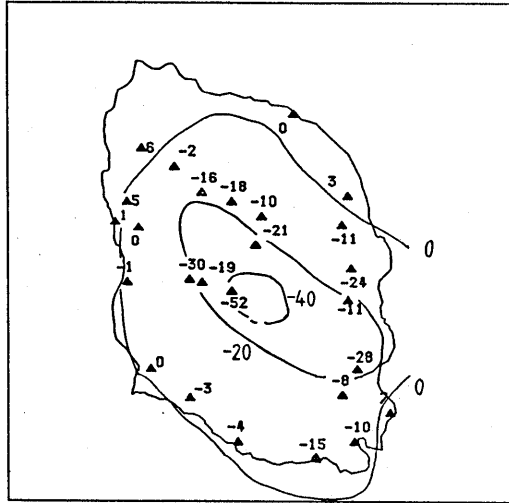
この期間は、各重力計の測定精度がほぼ $10\mu\text{gal}$ 程度であったので、3台の重力計による重力変化量の単純平均によって時間変化を求めた。第5表および第5図に結果を示す。山頂部を中心に数十 μgal の重力減少が生じている。水準測量によれば、この期間の上下変動量はたかだか数cmであるので、マグマの drain back を示唆する。

第5表 BM-9330を不動点と仮定したときの各点の1986年12月~1987年3月の期間における重力変化。単位はmgal.

Table 5. Gravity change from Dec. 1986 till Mar. 1987 assuming the gravity at BM-9330 was constant. Unit is in milligal.

Site	G-31	G-581	G-705	Mean
BM-10218	0.002	-0.030	-0.005	-0.011
BM-10220	-0.029	-0.039	-0.016	-0.028
BM-10223	0.008	0.000	0.014	0.007
BM-10224	-0.028	-0.009	0.008	-0.010
BM-10225	-0.015	-0.029	-0.001	-0.015
BM-10228	-0.003	-0.004	-0.001	-0.003
BM-10229	-0.003	0.000	0.004	0.000
BM-10233	0.014	0.001	0.000	0.005
BM-10234	0.005	0.005	0.007	0.006
BM-9330	-0.008	0.001	0.006	0.000
MK	-0.053	-0.049	-0.053	-0.052
MOTOMACHI-PS	0.000	0.000	0.000	0.000
MOTOMACHI-WF	-0.007	0.007	0.002	0.001
O-1001	-0.031	-0.014	-0.011	-0.019
O-1002	-0.057	-0.016	-0.016	-0.030
O-1003	-0.023	-0.006	-0.024	-0.018
O-1004	-0.017	-0.011	-0.021	-0.016
O-1005	-0.007	0.005	-0.005	-0.002
O-1007	-0.004	-0.004	0.005	-0.001
O-1010	-0.009	-0.001	-0.003	-0.004
O-1014	0.003	0.005	0.000	0.003
O-1015	0.002	0.004	-0.007	0.000
O-1113	-0.019	-0.016	0.011	-0.008
O-1116	-0.022	-0.016	-0.035	-0.024
O-1117	-0.002	-0.008	-0.023	-0.011
O-1122	-0.028	-0.010	-0.026	-0.021
OKATA-TG	-0.037	-0.016	-0.021	-0.025
ONSEN-HOTEL	-0.019	0.007	-0.018	-0.010

GRAVITY CHANGE (Dec.1986 - Mar.1987).
UNIT= MICROGAL



第5図 1986年12月～1987年3月の期間における重力変化。
単位 μgal 。

Fig.5 Gravity change from Dec. 1986 till Mar. 1987.
Unit is in μgal .

5. おわりに

第3表, 第2図と第5表, 第5図に示した重力変化は, BM-9330が不動点であると仮定して求めたものであった。この仮定を以下で吟味する。

BM-9330近傍の伊東市では, 1980年頃から隆起が続いており, 重力値も年間 $10\mu\text{gal}$ の減少を続けている。しかし幸いなことに, BM-9330における重力値は, 1983年2月から1985年2月までの期間にわずかに $4\mu\text{gal}$ しか増加していない¹⁰⁾, 1985年2月から1987年3月までの間も $5\mu\text{gal}$ の増加にとどまっている(井筒屋貞勝 私信)。したがって, 1983年5月から1987年3月までの間の重力変化は最大で $9\mu\text{gal}$ と見積られる。重力測定の精度が最良で $10\mu\text{gal}$ 程度であることを考えれば, BM-9330を重力の不動点と考えてよいことがわかる。

参 考 文 献

- 1) 飯田汲事・早川正巳・片寄邦之(1952):伊豆大島三原火山における重力測定ならびにその時間的变化。地質調査所報告, 152号
- 2) 井上 登・藤井陽一郎・木沢 綏(1968):大島における重力変化の研究(I), 測地学会誌, 13, 146-150.
- 3) 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), 測地学会誌, 18, 104-111.
- 4) 藤井陽一郎(1975):伊豆大島における重力変化, 伊豆大島三原山の集中観測(1974年6月), 36-45.
- 5) 田島広一・沢田宗久・横山 泉・前川徳光・渡辺秀文(1985):伊豆大島における重力の精密測定(1983年5月), 伊豆大島集中総合観測報告, 53-62.
- 6) 国土地理院(1987):伊豆大島における測地測量, 噴火予知連会報, 39, 97-103
- 7) 東京大学地震研究所(1987):伊豆大島火山における水準測量, 噴火予知連会報, 38,
- 8) 志知龍一(1985):重力計の原理と特性および調整法, 名古屋大学理学部付属地震予知観測地域センター。
- 9) 遠藤邦彦・千葉達朗・宮地直道・隅田まり・宇野リベカ・宮原智哉・太刀川茂樹(1987):伊豆大島1986年噴火の経緯と噴出物, 月刊地球, 9, 452-459.
- 10) 萩原幸男・田島広一・井筒屋貞勝・長沢 工・村田一郎・大久保修平・遠藤 猛(1985):最近10年間の伊豆半島の重力変化, 測地学会誌, 31, 220-285.