

富士山周辺の精密相対重力測定

里村幹夫¹・渡辺みのり¹・大久保修平²・楠本成寿³・植木貞人⁴

Precise relative gravity measurements over Mt. Fuji

Mikio SATOMURA¹, Minori WATANABE¹, Shuhei OKUBO²,
Shigekazu KUSUMOTO³ and Sadato UEKI⁴

Abstract Many low-frequency earthquakes were observed under Mt. Fuji from October 2000 to May 2001, and it was pointed out that the volcanic activity of Mt. Fuji might increase.

In order to monitor the volcanic activity, we performed precise relative gravity measurements over Mt. Fuji area by using LaCoste & Romberg gravimeters since 2002, and investigated temporal change of gravity over Mt. Fuji for three years.

The number of the low-frequency earthquakes has decreased since June 2001, and no significant gravity temporal changes were observed, however the data obtained form an important data base to investigate the future volcanic activity of Mt. Fuji.

Key words: precise relative gravity measurement, Mt. Fuji, volcanic activity, gravity temporal change.

はじめに

2000年10月から12月と2001年4月から5月にかけて、富士山山頂のやや東北側の深さ10~15kmの領域を中心に低周波地震が非常に多く発生した(防災科学研究所, 2002)。2000年10月から2001年7月の10ヶ月間に観測された低周波地震の数は、過去21年間の観測数に相当するものであった。

火山の地下で発生する低周波地震は、地下のマグマの動きが関係していると考えられる。活動的な火山の火口付近で低周波地震の多発がよく観測されているため、富士山の地下でもマグマの活動が高まって、噴火につながる可能性が心配された。

そこで、富士山の活動をモニターするために、2002年

に、富士山西側の朝霧の富士教育訓練センター(Asagiri)、富士山南側の裾野市富士山資料館(Susono)、および、富士山東側の富士山測候所御殿場基地(Gotenba)において重力の絶対測定を実施する(Okubo *et al.*, 2002)とともに、2002年から2004年までの3年間にわたって、毎年富士山周辺での精密相対重力測定を行った。

同様の重力測定は、富士山北側の山梨県環境研究所(Kankyo-ken)での絶対測定を含む富士山周辺での相対測定が2001年5月から国土地理院によって開始されていた(国土地理院, 2004)ので、今回の測定点の選定にあたっては、できるだけデータを共有できるように国土地理院の測定点を参考にした。

今回、我々が実施した相対重力測定の数値を整理を行ったので、報告する。

¹静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市駿河区大谷 836

¹Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan
E-mail:semsato@ipc.shizuoka.ac.jp (M.S.)

²東京大学地震研究所, 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

²Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032 Japan

³東海大学海洋学部海洋資源学科, 424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

³Department of Marine Mineral Resources, School of Marine Science and Technology, Tokai University, 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka, 424-8610 Japan

⁴東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター 980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6

⁴Research Center for Prediction of Earthquake and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 6-6 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8578 Japan

重力測定

測定地点は、できるだけ国土地理院が精密重力測定を実施していた測定点と同一地点を選んだが、精密重力測定に適さないと考えられる水準点や測定点が発見できなかった点については、隣接する水準点等で測定を行った。今回測定した測定地点を図1、各地点の緯度、経度、標高を表1に示す。

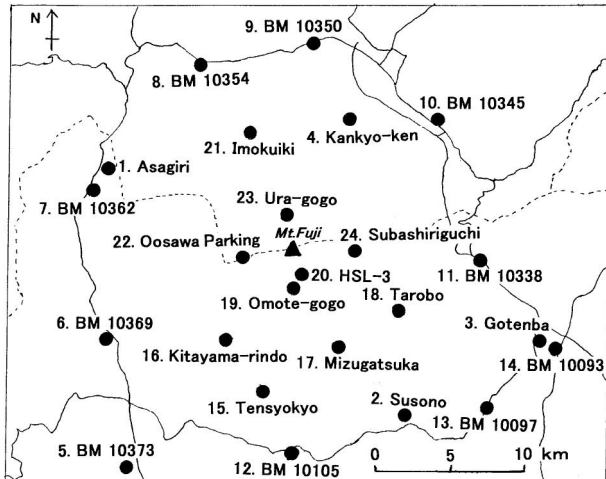


図1 富士山周辺の重力測定点の位置。

Fig.1 Positions of the gravity stations around Mt. Fuji.

表1 重力測定点の位置

Table 1 Descriptions of the gravity stations

No.	Name	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Height (m)	Remarks
1	Asagiri	35.413	138.595	902	Absolute measurement station
2	Susono	35.259	138.810	890	Absolute measurement station
3	Gotenba	35.294	138.930	475	Absolute measurement station
4	Kankyo-ken	35.451	138.765	1030	Absolute measurement station (by G.S.I)
5	BM 10373	35.238	138.614	159	
6	BM 10369	35.297	138.598	444	
7	BM 10362	35.405	138.588	879	
8	BM 10354	35.476	138.662	990	
9	BM 10350	35.485	138.742	905	
10	BM 10345	35.446	138.829	981	
11	BM 10338	35.353	138.867	795	
12	BM 10105	35.240	138.736	663	
13	BM 10097	35.265	138.872	543	
14	BM 10093	35.300	138.934	459	
15	Tensyo-kyo	35.270	138.718	1001	
16	Kitayama-rindo	35.300	138.680	980	
17	Mizugatsuka	35.299	138.773	1550	
18	Tarobo	35.327	138.807	1290	
19	Omote-gogo	35.331	138.736	2390	
20	HSL-3	35.331	138.736	2400	
21	Imokuiki	35.446	138.698	1210	
22	Oosawa Parking	35.367	138.695	2020	
23	Ura-gogo	35.388	138.735	2290	
24	Subashiriguchi	35.359	138.781	1980	
25	Shizuoka Univ	34.967	138.432	65	Reference station of the measurements

測定期間は、2002年からの3年間で、2002年9月17日～10月1日、2003年10月31日～11月2日と2004年1月8日～9日、2004年11月12日～23日であった。2004年1月8日～9日の測定は2003年10月と11月に測定できなかった点の測定を補充したものであるため、ここでは2004年1月のデータを2003年のデータの一部として取り扱った。

測定に用いた重力計はLaCoste & Romberg重力計G型で、同一測定地点において1日に往路と復路の2回測定をする「往復測定」を実施するとともに、可能な限り2往復以上の測定をする点も設けるようにした。また、測定には毎年2台以上の重力計を用いた。2002年はG-581, G-705, G-822の3台、2003年と2004年はG-822, G-875の2台であった。

データ解析

重力計の定数は、製作会社から与えられた定数をもとに、この研究以前にそれぞれの重力計で実施された検定により求められた補正係数を乗じた。それらの係数は、G-581は1.00017, G-581は1.00021, G-822は1.00062, G-875は1.00015である。しかし後述するように、検定が実施されていてもなお重力計ごとの定数には差があり、今回の測定結果をもとに、新たに補正係数を決め直した。

また、各測定地点において、測定時に計器高を測定し、

フリーエア勾配の $0.3086 \mu\text{gal}/\text{mm}$ を用いて計器高を補正した。

地球潮汐の補正は、中井 (1997) による地球潮汐の計算式を用い、潮汐定数は 1.16 とした。海洋潮汐の補正には、潮汐モデルとして NAO99b モデルと NAO99Jb モデル (Matsumoto *et al.*, 2000) を用い、GOTIC2 (Matsumoto *et al.*, 2001) により短周期潮 16 分潮と長周期潮 5 分潮の補正を行った。

重力計のドリフトは、測定を実施している 1 日の間は時間に対して 1 次とし、各測定日のドリフト勾配、測定当日の基準点での重力計の誤差を含まない読み、各点の基準点からの重力差を未知数として、1 年間のデータをあわせて最小二乗法により求めた。なお、重力計の読み取り値とびが生じたと考えられる場合は、1 日の中でもその時点でドリフト勾配を変えた。

異常データの検出

今回の測定は、高度差が大きく、気圧や気温の影響などにより、読み取り値の精度の低下が起こっている。また、測定に先立って重力計のレベルの調整等は行ったが、それでもなお重力計の調子がよくなかったときもあり、一部の測定では電源ケーブルのコネクターの接触不良により、恒温槽の温度が低下することもあった。そこで、往復測定や他の重力計から得られた値との比較から、異常データの検出を行った。

その検出に当たり、重力計の定数の違いによる影響を避けるため、同じ測定点の 3 年間の平均値と、それからの各重力計による測定値との差を重力計ごとに図 2 に示す。

重力計の定数に計器による差がなければ、この図で直線近似した傾きが 0 になるが、各重力計の傾きは、G-581 は 0.00085 、G-705 は -0.00030 、G-822 は -0.00025 、G-875 は 0.00002 であった。そこで、以前の検定により求められた定数にさらに、G-581 には 0.99915 、G-705 には 1.00030 、G-822 には 1.00025 、G-875 には 0.99998 を乗じた値を用いた。

ドリフトを補正した後の残差が $50 \mu\text{gal}$ 以上でかつ往復差が $100 \mu\text{gal}$ 以上のもは異常データであると定義し、それらを除くことにした。その際、往復の 2 回の測定値だけしかないときは 2 つの値のどちらが異常値であるのかの判断は難しいが、そのような場合は他の重力計の値と比較し、取り除いた後の重力値が他の重力計で測定した重力値に近くなる測定値のほうを正しい値とした。

このような検討により異常データを抜いた後のデータをもとに、図 2 と同様の関係を調べることで、再度重力計定数の検討を行った。その結果、検定後の定数に乗ずる補正値を G-581 は 0.99918 、G-705 は 1.00027 、G-822 は 1.00025 、G-875 は 1.00002 とすることにした。

絶対重力測定値をもとにしたの重力計定数の検討

以上の重力計定数の検討は、測定した重力値の平均を基準値としたため、基準値にも、重力計定数の影響が含まれる。そこで、2002 年に Okubo *et al.* (2002) により測定された朝霧絶対重力点、裾野市立富士山資料館、富士山測候所御殿場基地と、国土地理院 (2004) により測定された山梨県環境研究所の絶対重力測定値をもとに、重力計定数をさらに検討した。

相対重力測定で得られた 4 点の絶対測定点の重力差を、

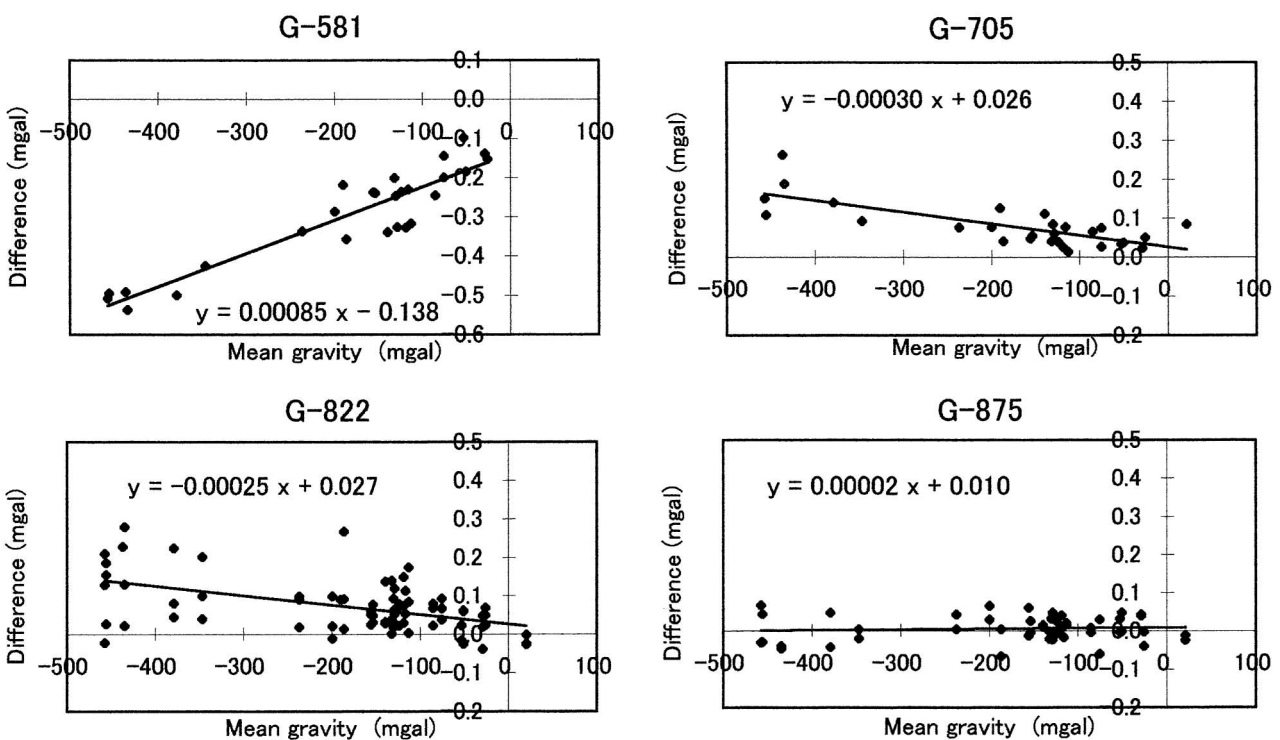


図 2 基準点 (Shizuoka Univ.) からの重力差と 4 台の平均からの差の関係。これから重力計ごとの補正値を求めた。
 Fig. 2 Relationship between the mean gravity difference from Shizuoka Univ. and the difference from the mean value of the four gravimeters. Correction factors of the scale constants were obtained from these relationship.

絶対測定で得られた重力値と比較したところ、その1次近似直線の傾きは1.00034となった。そこで、絶対重力測定で得られた値を正しいものとして、前項で求めた重力計の定数にさらに0.99966を乗じた。その結果、今回は製作会社から与えられている定数に、G-581は0.99905、G-705は1.00010、G-822は1.00051、G-875は0.99983を乗じた値を用いることになった。

基準点の決定

今回の測定は相対重力測定であるため、重力の時間変化を考えるときには、基準点を決める必要がある。測定回数の多い地点や室内などで外的影響が少ない地点が、より精度よく測定ができていると考えられるので、そのような点を基準点の候補とした。候補として検討した点は、静岡大学理学部工作センター (Shizuoka Univ.)、朝霧絶対重力点 (Asagiri)、山梨県環境研究所 (Kankyo-ken)、裾野市立富士山資料館 (Susono)、富士山測候所御殿場基地 (Gotenba)、BM10093、BM10373の7点で、それぞれを基準点とした場合の各測定地点の3年間の重力変化を調べた。

その結果、静岡大学理学部工作センターや山梨県環境研究所では、多くの地点が同じような変化の傾向を示した。これは、基準点とした測定点での変化が大きいため、他の地点の重力変化に影響を与えてしまったため

あると考えられる。

そこで、全体に特定の傾向が見られない、BM10373を基準点として重力差を整理することとした。この点は、静岡大学から測定に出かける際にもっとも近い点で、測定回数も多い地点である。

以後の結果はすべてBM10373を基準点として考察する。

結果

今回得られたBM10373からの重力差を表2に示す。また、各測定地点の3年間の変動を図3に示す。

大沢パーキング、裏五合、須走口、表五合といった富士山の山頂付近の標高の高い地点で大きな変化が見られた。また、多くの地点では増加の傾向がみられた。標高の高い地点では、標準偏差が大きい地点もあったが、とくに精度の悪い測定値をのぞいたこともあり、平均すると精度は標準偏差で約40 μ galであった。

考察

富士山での重力変化の状況を調べるために、1年間の重力変化をみてみると、2002年～2003年の1年間の変化は、富士山の山頂の南東側に増加が多くみられる。逆に、北西側では、減少が多くみられ、山頂付近では大きな減少がみられる。また、2003年～2004年の1年間の変化は、

表2 BM10373を基準点としたときの重力差 (単位: mgal)
Table 2 Gravity differences from BM 10373 (unit in mgal)

No.	Name	2002			2003		2004	
		G822	G581	G705	G822	G875	G822	G875
1	Asagiri	-132.146	-132.201	-132.137	-132.089	-132.159	-132.129	-132.144
2	Susono	-124.064	-124.178	-124.096	-124.067	-124.108	-124.056	-124.091
3	Gotenba	-29.184	-29.282	-29.231	-29.221	-29.262	-29.291	-29.252
4	Kankyo-ken	-139.729	-139.755	-139.650	-139.728	-139.717	-139.620	-139.715
5	BM 10373	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	BM 10369	-53.095	-53.153	-53.109	-53.139	-53.130	-53.155	-53.143
7	BM 10362	-128.875	-128.933	-128.883	-128.868	-128.934	-128.886	-128.910
8	BM 10354	-130.182	-130.273	-130.161	-130.157	-130.216	-130.194	-130.211
9	BM 10350	-113.187	-113.306	-113.208	-113.165	-113.184	-113.222	-113.226
10	BM 10345	-118.631	-118.798	-118.683	-118.663	-118.681	-118.681	-118.691
11	BM 10338	-85.495	-85.656	-85.502	-85.535	-85.576	-85.522	-85.577
12	BM 10105	-75.483	-75.595	-75.538	-75.512	-75.606	-75.468	-75.528
13	BM 10097	-50.784	-50.845	-50.766	-50.758	-50.790	-50.739	-50.754
14	BM 10093	-26.149	-26.252	-26.169	-26.171	-26.255	-26.197	-26.246
15	Tensyokyo	-153.556	-153.658	-153.588	-153.514	-153.606	-153.586	-153.575
16	Kitayama-rindo	-155.573	-155.698	-155.639	-155.585	-155.659	-155.654	-155.646
17	Mizugatsuka	-236.842	-236.953	-236.857	-236.859	-236.867	-236.822	-236.826
18	Tarobo	-199.630	-199.697	-199.615	-199.650	-199.611	-199.584	-199.573
19	Omote-gogo	-455.752	-455.811	-455.762	-455.777	-455.783	-455.664	-455.721
20	HSL-3	-457.239	-457.292	-457.182	-457.287	-457.246	-457.102	-457.146
21	Imokuiki	-186.609	-186.730	-186.646	-186.619	-186.713	-186.672	-186.688
22	Oosawa Parking	-379.062	-379.037	-378.962	-379.046	-379.053	-378.867	-378.967
23	Ura-gogo	-434.515	-434.585	-434.484	-434.601	-434.607	-434.380	-434.616
24	Subashiriguchi	-346.876	-346.946	-346.871	-346.782	-346.895	-346.747	-346.883
25	Shizuoka Univ.	20.601		20.610	20.516	20.517	20.519	20.522

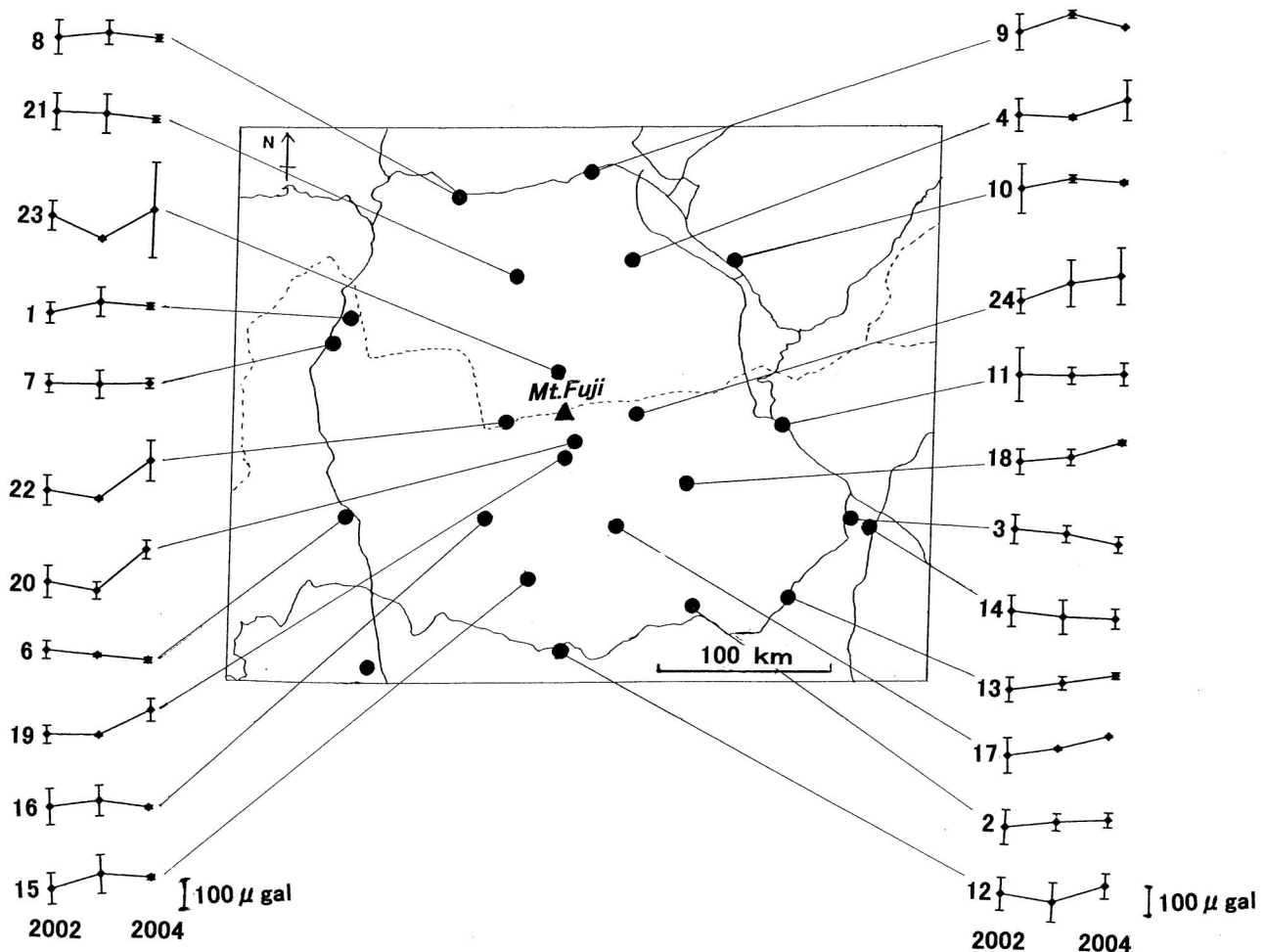


図3 BM10373を基準点としたときの3年間の見かけの重力変化。

Fig. 3 Apparent gravity change, for three years, from the gravity value at BM 10373.

山頂付近では増加が多くみられるが、山頂から離れた地点では、減少が多くみられる。

2002年～2003年の重力変化と2003年～2004年の重力変化を比較してみると、山頂の南東側ではどちらも増加がみられる。また、2002年～2003年は全体的に減少した地点が多いが、2003年～2004年は増加した地点が多くみられる。また、増減のセンスが変わった地点も多くある。

3年間の重力測定値から富士山における重力変化の全体的な傾向をみると、増加の傾向がみられた。しかし、最大で $57\mu\text{gal}$ の増加であり、今回の測定精度を考慮すると、有意な変動とは言いがたい。また、高度の低い地点では減少の傾向がみられた。

まとめ

今回、LaCoste & Romberg G型重力計を用い、2002年から富士山での重力測定を行った。ばらつきの大い測定値を省いた結果、その精度は標準偏差で $40\mu\text{gal}$ 程度であった。

BM10373を基準点とした場合、2002年～2003年には全体に減少の傾向がみられ、2003年～2004年には増加の傾向がみられた。また、富士山の山頂付近ほど、大きい

増加がみられた。しかし、特に有意といえるような重力の時間変化は得られなかった。これは、2002年以降富士山の顕著な活動が見られなかった（産業技術総合研究所地質調査総合センター、2004）ことと調和的である。

また、今回の測定結果は、活火山である富士山の将来の活動に備えた重力測定観測網として重要である。

謝辞

この測定を始めるにあたっては、国土地理院の平岡喜文氏に国土地理院で実施している重力測定点の記をいただいた。また、測定に当たっては、富士教育訓練センター、裾野市富士山資料館、富士山測候所御殿場基地および山梨県環境研究所の皆様にお世話になるとともに、東京大学地震研究所の孫文科、古谷正人の両博士、松本滋夫氏、静岡大学理学部の宮川昌彦、浅井健一、洲崎貴之、石川淳子の各氏らの協力を得た。海洋潮汐補正のためのGOTIC2の使用方法にあたっては、国立天文台水沢観測所の松本晃治博士に助言をいただいた。また、静岡大学の新妻信明教授には原稿を読んでいただいて有益な意見をいただいた。感謝の意を表す。なお、この研究は2002年度～2004年度の東京大学地震研究所共同研究プログラム（一

般共同研究 2002-G-09, 2003-G-11, 2004-G-19) の援助を受けた。

引用文献

- 防災科学技術研究所 (2002), 富士山の低周波地震と傾斜変動. 火山噴火予知連絡会会報, **79**, 95-100.
- 国土地理院 (2004), 富士山における重力変化. 火山噴火予知連絡会会報, **86**, 33-34.
- Matsumoto K., Sato T., Takanezawa T., & Ooe M. (2001), GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **47**, 243-248.
- Matsumoto K., Takanezawa T. & Ooe M. (2000), Ocean tide models developed by assimilating TOPEX / POSEIDON altimeter data into hydrodynamical mode: a global model and a regional model around Japan. *Journal of Oceanography*, **56**, 567-581.
- 中井新二 (1979), 実用的な起潮汐力計算プログラム. 緯度観測所彙報, **19**, 124-135.
- Okubo S., Furuya M., Sun W., Matsumoto S., Watanabe H., Satomura M. & Ueki S. (2002), Grand design for the hybrid gravity network around the Mt. Fuji volcano. *Abstract, International Symposium on Geodesy in Kanazawa*, I20.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2004), 富士山の山体変動観測 (2003年10月～2004年1月). 火山噴火予知連絡会会報, **87**, 10-12.