

富士山頂における絶対重力測定

大久保修平¹⁾・高木朗充²⁾・新谷昌人¹⁾・松本滋夫¹⁾・福井敬一²⁾・孫文科¹⁾
おおくぼしゅうへい・たかぎあきみち・あらやあきと・まつもとしげお・ふくいけいいち・
そんぶんか

¹⁾東京大学地震研究所, ²⁾気象庁気象研究所

英文タイトル・氏名・所属

An absolute gravimeter climbs to the top of Mt. Fuji,
Shuhei OKUBO¹⁾, Akimichi TAKAGI²⁾, Akito ARAYA¹⁾, Shigeo MATSUMOTO¹⁾, Keiichi
FUKUI²⁾, and Wenke SUN¹⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, University of Tokyo

²⁾ Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

要旨

これまで相対重力計によってしか重力値が与えられていなかった富士山頂に、絶対重力計を運び上げて初めての絶対重力測定を行った。得られたデータは、フィリピン海プレートのサブダクションモデルの検証や、富士火山の中長期的な火山活動のモニタリングにとって、重要な拘束条件を与えるものと期待される。

1. はじめに

1990年代までは、富士山の重力測定には、ウォルドン重力計やラコステ・ロンバーグ重力計などの相対重力計を用いて随時行われてきた (Yokoyama and Tajima 1960, 横山泉・田島広一 1960, 里村ほか 1991)。絶対測定はきわめて困難な時代であったから、地殻活動・火山活動が静穏であると考えられる地域に不動点を仮定し、そこからの相対測定によって、重力の時空間変化を求めていくのが普通のスタイルであった。しかし、これが望ましい状態でないことは、測定者自身が十分に認識していた。なぜなら、仮不動点とされた点の絶対重力値が本当は Δg だけ時間変化していれば、観測網全体の重力変化値が Δg のバイアスをこうむることになるからである。したがって、マグマの蓄積過程などを質量変化の面から捉えようとする重力測定の目的にとって、このバイアス混入の可能性は実に困った問題点であった。幸い1990年代になってFG5絶対重力計が商品化され、相対重力計測と

組み合わせたいわゆるハイブリッド重力測定が行われるようになった(大久保ほか, 2001)。これによって初めて、火山研究において重力観測が果たしうるポテンシャルが開花したといっても過言ではないだろう。実際、ハイブリッド重力測定が、2000年三宅島火山活動において果たした役割が、このことを実証している(古屋ほか, 2001)。

このような観測手法が次第に成熟したちょうど2000年12月には、山頂直下で低周波地震が多発するというイベントが発生した。これを機に、富士山のハイブリッド重力観測を実施する必要性が痛感されるようになった。2001年に国土地理院が山麓の富士吉田市において絶対測定を行ったのを皮切りに、2002年には東大地震研・東北大学・静岡大学が山頂を取り囲む山麓3箇所(御殿場、裾野、朝霧高原)で実施している。それらの絶対観測点を基点として相対測定も実施され、いわゆるハイブリッド重力観測網が構築されたのである(Okubo et al. 2002)。

2003年の時点で、前述のような各機関の努力で富士山の観測体制が整いつつあったのは事実であるが、その一方で観測の空白域が残っていることもまた事実であった。それは言うまでもなく、山頂である。富士山における地球科学観測の歴史をひもとくと、ほとんどすべての書物に次のような記載がある。曰く、「東京大学の外国人教師メンデンホールは、1880年に田中館愛橋ら学生をともなって、富士山頂において振り子による重力測定をおこなった」と(Mendenhall, 1881)。以来、Yokoyama and Tajima(1960)や里村ほか(1991)による相対重力測定はおこなわれたものの、富士山頂における絶対測定の報告はなされていないようである。その理由は富士山自体の火山活動が低調であったために地球科学者の関心を引かなかったことと、過酷な自然環境のもとでの観測実施には大きな困難がともなうことが挙げられる。本稿では、2003年夏に地震研究所・気象研究所の合同チームによって、富士山頂において始めて実施された絶対重力測定について報告する。

2. ロジスティックス

富士山頂のような特殊な環境での観測については、観測データもさることながら、観測実施までに遭遇したロジスティックな問題とその解決法を述べておくことが、後続研究者の参考になると思われる。それらについて、以下にやや詳細に述べることとする。

(2-1) 輸送

現在、絶対重力計として広く用いられているのは、米国 micro-g 社製の FG 5 絶対重力計である。モデルによって多少違いはあるが、本体重量 200~300 kg でそのほか付属品を含めると 500 kg ほどになる。この重力計一式を安全かつ確実に山頂に輸送するというのが最初の難関である。当初考えた手段はヘリコプターであったが、運航が天候に大きく左右されることや登山者への危険回避にかかるコスト(通行制限)を考えるとためられるものがあつた。幸いなことに山頂測候所庁舎等への物資輸送のため、夏季には麓の御殿場からブルドーザーが運航している。積載荷重も十分であるし、台風でも来ない限り運航できるということが決め手となり、絶対重力計の輸送もブルドーザーによることとした(図

1).

当然ながらブルドーザーによる輸送中は、機材に激しい振動が加わることを覚悟しなくてはならない。とくに絶対重力計はレーザー光の干渉を用いて落下距離を測定するので、振動によってレーザー光を干渉させるときの光軸がずれることが懸念される。実際に振動の程度を確かめるために、本観測に先立つ予備観測の際にブルドーザーに体験乗車してみたところ、人間が座席から跳ね上がることもあった。つまり、上下方向の加速度として1Gを超える場合もあることがわかった。そこで衝撃緩和を目的として、APC エアロスペシャル社の緩衝スプリングを購入し、観測機材に固定する方式をとった(図2)。また、重力計部品のうち、バネが使われているスーパースプリング(除震装置)については、人間が膝に抱えて搬送することとした。また、内部に落下物体(コーナーキューブ)という可動部のある真空落下筒は、万一の損傷に備え、代替品も同時に輸送することとした。

(2-2) 低圧環境対策

よく知られているように標高3776mの富士山頂は、地上気圧の2/3という低圧環境である。このような環境になると、人間が高山病にかかるのと同様に、パソコンやレーザーも変調をきたす。特にノート型のハードディスクでは障害が現れやすい。実際、筆者の一人が持参したノートパソコンにはアクセスエラーが生じて、システムの起動ができなかった。FG5絶対重力計でもノートパソコンが使われているので、万一に備え、これを15,000フィートまで動作保証のある外国メーカー(Dolch社)のものに交換した。耐衝撃性にも優れているこのメーカーの製品を、予備観測の際に山頂に運び上げて動作確認をした。

また、気圧の減少は、レーザーの出力の低下をもたらす(図3)。これはおそらく、平地と高地ではレーザーチューブの管内・外の気圧差が異なるため、気圧差による管の弾性変形の度合いが変化し、最適な発振条件が擾乱をうけるためであると考えられる。今回の測定時にも、山頂でのレーザー出力は平地の2/3程度に低下した。もちろん、平地に戻ればまた、出力は元のレベルに回復した。ともあれ、レーザーを山頂でチューニングしているだけの時間的余裕はないので、干渉光の振幅が低下しても十分な電気信号が得られるように光電素子を鋭敏なものに交換することで対応した。

(2-3) 対雷対策

富士山には比較的頻繁に落雷がある。実際、われわれの観測の4ヶ月ほど前にも山頂測候所庁舎が被雷し、測定器に被害がでたとのことであった。突然の雷に対処するために、電源は耐雷トランスを経由することにした。われわれが重力観測している期間中は、山頂庁舎では有人の気象観測が行われており、時々刻々の雷雲の移動について知ることができたので、安全のため雷雲が近づくと測定は直ちに中断した。

3. 測定および結果

(3-1) 概要

重力測定は2003年8月末に、東大地震研究所と気象庁気象研究所の共同研究として実施された。山頂の富士山測候所庁舎内電源室の一隅を借りて、絶対重力計 FG5 (大久保ほか2001) を用いて測定を実施した(図4)、絶対測定データを取りまとめた結果、有効総データ数 4959、標準偏差 14.2 マイクロガルの好成績で、山頂測候所庁舎内の絶対重力値が定まった(図5 a)(表1)。表1をみると、重力鉛直勾配が 0.489 mgal/m と平地での値 0.31mgal/m よりも 60% も大きいことが目を引く。これは、地形の影響が顕著にあらわれているからである。また、図5 b の時系列データに示すように、絶対重力データには、振幅 5 マイクロガル程度の微弱な海洋潮汐シグナルがみてとれる。これは測定が、確度は別にしても、極めて高い精度で測定が行われたことを示している。測定値の時系列を、Matsumoto et al.(2001)による理論海洋潮汐と比較すると、ある程度の一致がみられることもその証左である。とはいえ、両者の一致は完全ではない。それは測地学的には非常に興味深い問題であるが、本稿は主として火山学の読者を想定しているので、ここでは追究しないこととする。

さてこの絶対重力点を基準に、山頂の「剣が峰」三角点をラコステ重力計による往復精密測定(相対測定)を実施した。その結果から、「剣が峰」三角点の重力値として 978865.398 ミリガルという結果を得た。

(3-2) これまでの観測研究との比較

三角点「剣が峰」の周りはガサガサの溶岩でできており、数十年の年月を経ると標石が露出してしまふ。標石と大地の固定が怪しくなるので、そのようなときには低下改埋といって、標石の埋設をやり直すのが通例である。したがって、「同じ三角点」での重力測定であっても、同一場所での測定とは限らないことに注意が必要である。また、時代によって重力の国際基準系(ポツダム系や IGSN71 系)が変遷しているのも、そのことにも留意すべきである。表2に富士山頂の三角点「剣が峰」の履歴ならびに測定結果の報告を時間順に示す。富士山頂気象レーダの設置・撤去および火口周辺の崩落等による地形変化など、周囲の質量分布変化について十分な吟味が必要ではあるが、従来の測定もその確度を考えると今回の測定値に一致しているといえる。とはいえ、今回の測定値と比較して時間変化を議論するにはいずれも精度不足であることは、いかんともしがたい。

4. 考察と結論

今回の絶対測定によって得られたデータは、今すぐの役には立たないかもしれない。しかし 10 年~100 年後に再測するときになって重大な意味をもち、その価値は時間とともに増していくことは想像に難くない。具体的には、フィリピン海プレートのサブダクションモデルの検証や、富士火山の中長期的な火山活動のモニタリングにとって、重要な拘束条件を与えるものと期待される。山麓の全データに匹敵する重要性を山頂データは持っているといっても過言ではないだろう。

今回の測定を通じて痛感したこととして、標石が万一亡失したり、改埋されたりしても大丈夫のように、周囲に代替となる重力点の確保が挙げられる。今回の測定では、富士山火口周辺の「富士白山」三角点をそのような代替点とした。これについては、別報に記載する予定である。

謝辞。

山頂測候所庁舎内での観測については、気象庁富士山測候所所長福島農次、技術課長海野幸男（平成 14 年度）、同稲葉和弘（平成 15 年度）、同技術専門官吉見英史の各氏をはじめとする測候所の職員の方々の全面的なバックアップをいただいた。また山里平氏をはじめ気象庁東京管区気象台の諸氏からも有形・無形のご支援をいただいた。京都大学生存圏研究所研究員青山雄一氏には、ブルドーザーによる輸送について情報提供をいただいた。以上の方々にあわせてお礼を申し上げる。本研究の一部は、平成 15 年度東京大学地震研究所一般共同研究「富士山頂におけるハイブリッド重力測定」(2003-G-09 代表者 高木朗充)によって実施した。

参考文献

- 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, No. 2, 217-225,
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa, and M. Ooe (2001): GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, J. Geod. Soc. Japan, 47, 243-248,
- Okubo, S., M. Furuya, W. Sun, S. Matsumoto, H. Watanabe, M. Satomura and S. Ueki (2002): Grand Design for the Hybrid Gravity Network around the Mt. Fuji Volcano, Abstract of the International Symposium on Geodesy in Kanazawa, I20.
- Mendenhall, T.C.(1881): Measurements of the force of gravity at Tokio and on the summit of Fujinoyama, Memoirs of the Science Department of Tokio Taigaku, No.5, 1-17.
- 大久保修平・黒石裕樹・町田守人・平岡喜文(2001): 御前崎における絶対重力測定, 月刊地球, 号外, 33, 89-96.
- 里村幹夫・田中俊行・益永雅博・中野進・新藤剛・三尾有年・鈴木洋(1991): 富士山頂における GPS と重力の測定, 第 76 回日本測地学会講演要旨集, 29-30.
- Yokoyama I. and H. Tajima (1960): A gravity survey on volcano huzi, Japan by means of a Worden gravimeter, Geofisica Pura e Applicata, 45, 1-12.
- 横山泉・田島広一(1960): 富士山頂の重力値と山体の平均密度, 測地学会誌, 6, No. 1, 12-13.

図のキャプション

図 1：ブルドーザによる機材運送．(a)梱包状況 (b) ブルドーザー車中（5合目付近）から望む富士山頂．ブル道が延々と続く．

図 2：(a)防振用アイソレー取り付け状況 (b)拡大図．

図 3：レーザー出力と気圧の関係．平地の東京での出力に対する相対値は，気圧とともに低下するので，信号強度を確保するためには富士山頂でも対応が必要となる．

図 4：富士山頂測候所における FG5 重力計設置状況（左手）と測候所職員．

図 5：絶対重力測定の結果．(a)平均値のまわりのヒストグラム．横軸の単位は **microgal**．
(b)海洋潮汐補正前の測定値の時系列()とモデルによる予測値（実線）の比較．



図 1：ブルドーザによる機材運送．(a)梱包状況 (b)ブルドーザー車中（5合目付近）から望む富士山頂．ブル道が延々と続く．



図 2 : (a)防振用アイソレー取り付け状況 (b)拡大図 .

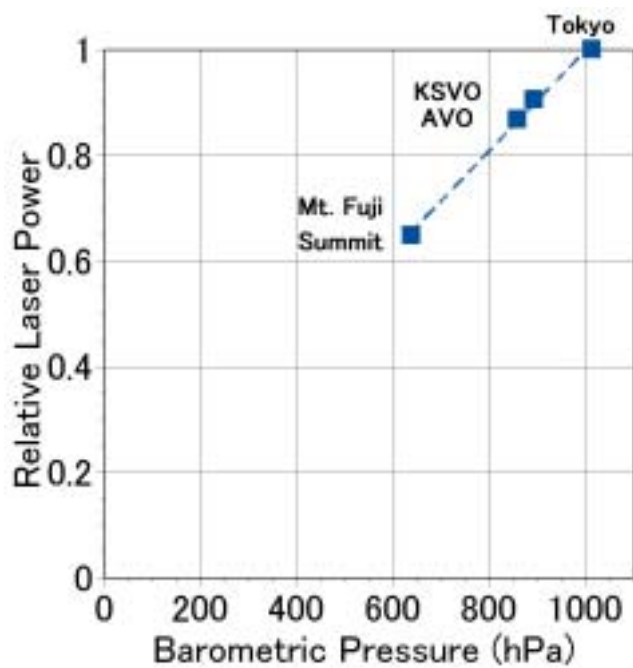


図3：レーザー出力と気圧の関係．平地の東京での出力に対する相対値は，気圧とともに低下するので，信号強度を確保するためには富士山頂でも対応が必要となる．



図4：富士山頂測候所における FG5 重力計設置状況（左手）と測候所職員。

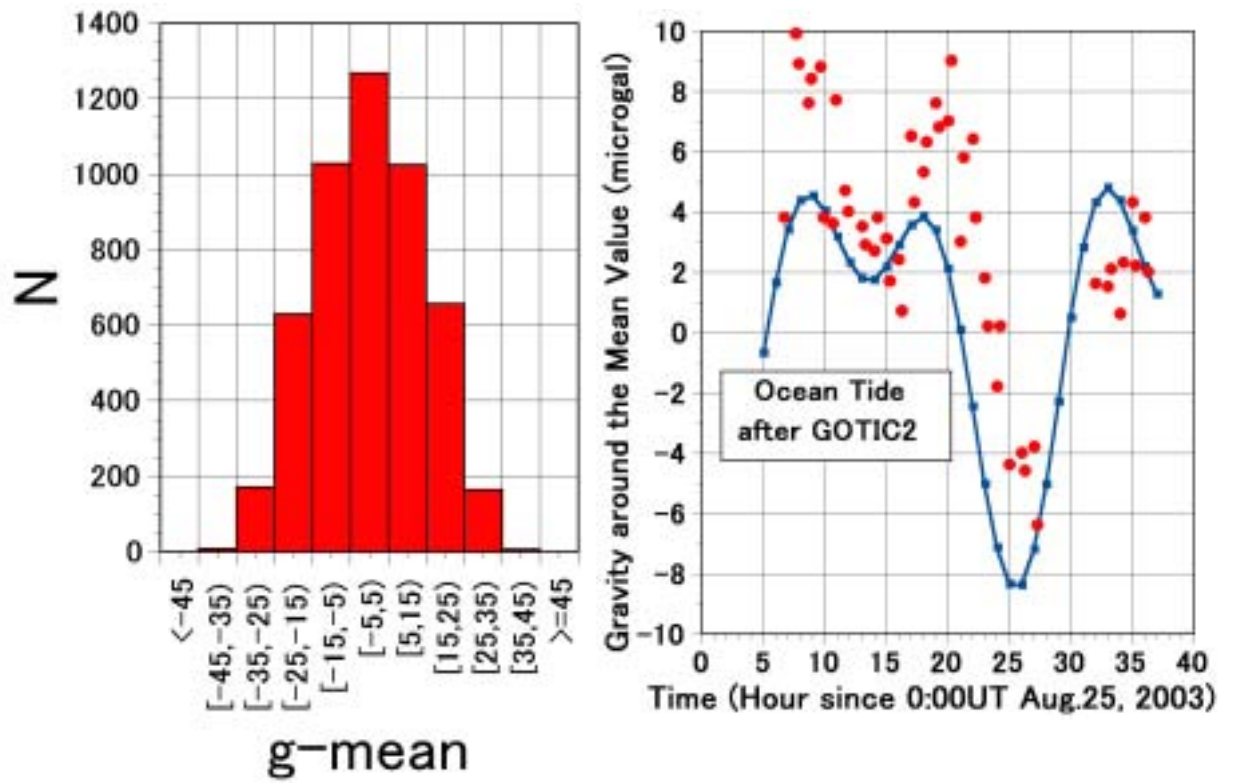


図5：絶対重力測定の結果．(a)平均値のまわりのヒストグラム．横軸の単位は microgal ．
 (b)海洋潮汐補正前の測定値の時系列()とモデルによる予測値(実線)の比較．

表 1 . 富士山頂における絶対重力測定の概要 .

場所	富士山頂測候所 4 号庁舎電源室西端
使用機材	FG5#212
期間	2003 年 8 月 25 日 3UT ~ 8 月 26 日 11UT
有効落下数	4,959
重力値 (床上 130cm)	978867.6569 ± 0.00020 [mgal]
標準偏差	0.01426 [mgal]
重力鉛直勾配	0.489 [mgal/m]
標準気圧	634.64 [hPa]
気圧補正	アドミッタンス 0.0003 mgal/hPa として補正
固体潮汐	デルタファクターは 1.164 (ただし永久潮汐は 1.0)
極潮汐	IERS Bulletin A. . デルタファクターは 1.164
海洋潮汐補正	GOTIC2 による

表 2 . 富士山頂の三角点の履歴ならびに重力測定史

(年月)	できごと
1880.8	メンデンホールほか, 振り子を用いた, 東京の重力値との比較重力測定) (Mendenhall, 1881). 測定場所は不明.
1926	三角点「剣が峰」の新設 H=3776.29m.
1957.8	Worden 重力計による相対測定(Yokoyama and Tajima, 1960). g=979876.9 mgal (Potsdam 系) @H=3776.29 m.
1962.9	「剣が峰」三角点の低下改埋 ($\Delta H = -0.66\text{m}$).
1964.10	富士山レーダーの設置.
1991.9	LaCoste & Romberg 重力計による相対測定(里村ほか, 1991). g=978865.41 mgal (IGSN71 系) @H=3775.63 m. GPS 測量と直接水準測量も同時に実施.
2001	富士山レーダーの解体・移設.
2003.8	最初の絶対重力測定(本研究). 絶対重力点からの精密相対測定によって, 「剣が峰」三角点の重力値 978865.398 mgal