

# A-10 型絶対重力計で得られた温泉地学研究所の絶対重力値

岩瀬康行\*・江口孝雄\*・鈴木攻祐\*・本多 亮\*<sup>2</sup>・棚田俊收\*<sup>2</sup>

Absolute gravity at Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture measured by  
the A-10 portable absolute gravimeter

by

Yasuyuki IWASE\*, Takao EGUCHI\*, Kousuke SUZUKI\*, Ryou HONDA\*<sup>2</sup> and Toshikazu TANADA\*<sup>2</sup>

## 1. はじめに

箱根火山は日本を代表する活火山であり、50 万年にもわたる長く複雑な噴火の歴史を持っている。これまでも箱根火山域は地質学的(例えば、Kuno, 1950; Hirata, 1996; 平田ほか, 2001)、地震学的(例えば、神藤ほか, 1996; 棚田, 1999; 小田ほか, 2002)、電磁気学的な調査(例えば、Yukutake and Tanaoka, 1960)の他に重力測定(例えば、Yokoyama and Saito, 1965; 平賀ほか, 1970)が行われてきている。箱根火山域の重力基準は富士屋ホテル(位置は図 1 参照)の 979,707.29mgal(奥田ほか, 1962)がある。しかし、測定は 1960 年と古く、また、精度は十分ではない。横山ほか(2002)は 1999 年の重力観測の際に箱根火山域の東端に位置する温泉地学研究所を重力基準点として用いた。このとき、東大地震研究所地震計室の重力基準点における絶対重力 979,788.28mgal を基準として、LaCoste & Romberg G 型重力計による測定により温泉地学研究所の相対重力 979,777.22mgal を得ている。しかし、箱根火山域での絶対重力測定は最近行われていない。特に、温泉地学研究所では過去に絶対重力の測定は行われたことはなく、箱根火山域の重力測定の基準点を確立するためにも温泉地学研究所の絶対重力測定を行うことは重要である。

我々は 2004(平成 16)年 12 月に防衛大学校に整備された米国 Micro-g(現、Micro-g LaCoste)社の可搬型絶対重力計 A-10 を用いて、2006(平成 18)年 7 月 3 日から 9 日にかけて神奈川県温泉地学研究所において絶対重力計測を行った。日本国内での A-10 型絶対重力計の整備は防衛大学校が初めてであり、我々は 2004(平成 16)年 12 月に納入後、約 1 年間にわたり防衛大学校内において断続的に A-10 による絶対重力計測を行い、数千回の落体(コーナーキューブ)の落下(計測方法については後述)に

より 10 $\mu$ gal 程度の精度で絶対重力値を得られることを確認している(平山ほか, 2006)。このような精度で箱根火山域の絶対重力を測定することは今回の測定が初めてであり、以下に報告をする。

## 2. 可搬型絶対重力計 A-10 の概要

A-10 は、直径約 50cm で高さ約 90cm の円筒状の本体(落下槽と下部槽)並びに制御用ユニット、制御用 PC とからなり、総重量は約 100kg である。駆動電源は直流 12V であり、バッテリーを使用することで野外での重力測定も可能である。また、装置の組み立てから測定開始までに要する時間は 1 時間程度であるという特徴を持つ。

可搬型絶対重力計 A-10 の絶対重力計測方法は自由落下方式である。図 2 に A-10 の内部の模式図を示す。A-10 の本体は、自由落下体を入れた落下槽を含む上部ユニットとレーザ光源や干渉計を備えた下部ユニットからなる。下部ユニットは測定時にはスーパースプリングなるバネにより短周期振動を低減させる。また、本体とは別に制御用ユニットと制御用 PC がある。

測定原理は次の通りである。落下槽の高真空円筒容器(真空度  $10^{-6}$ Torr)内で落体(コーナーキューブ)を繰り返し自由落下させる。自由落下する落体の位置は、本体下部のレーザ光源から分離された He-Ne レーザ光を鉛直下方からあて、反射してきたレーザと、上記同一光源から放射された光路一定の基準レーザ光との光学的干渉縞をフォトディテクタにより TTL 計測して求める。時刻計測はルビジウム原子時計(安定度  $10^{-11}$ )を用いる。

重力加速度は付属の専用ソフトウェアにより計算される。落下加速度は落下変位の時間に関する 4 次方程式を最小二乗法によりフィッティングすることにより算出す

\* 防衛大学校地球海洋学科 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

\*2 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 38 巻, 27-30, 2006.

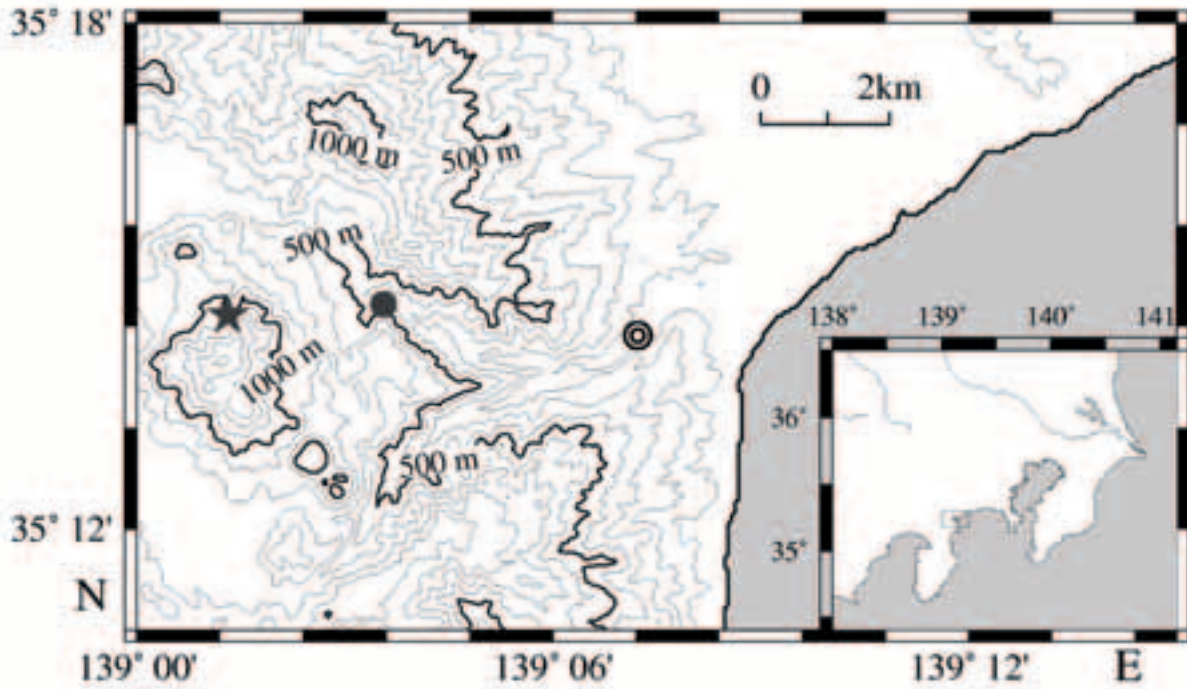


図1 観測点（神奈川県温泉地学研究所）付近の等高線。二重丸は観測点、黒丸は富士屋ホテルの位置を示す。また、星印付近が大涌谷である。

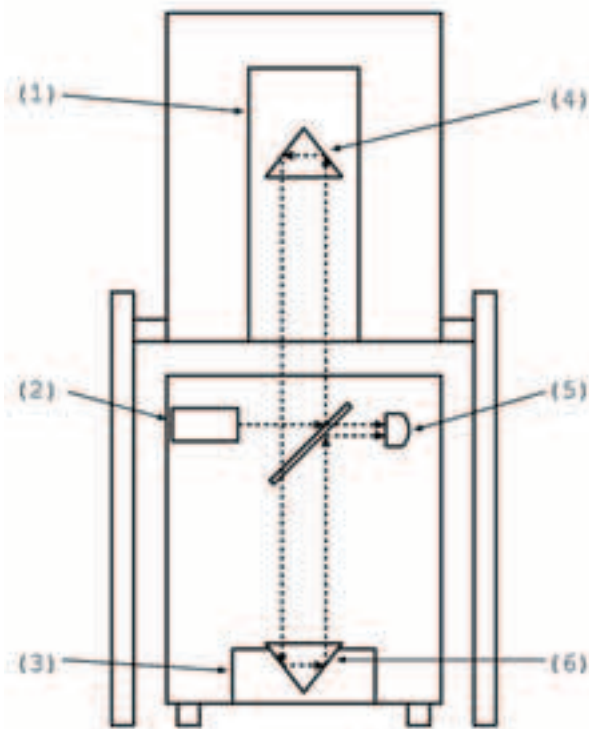


図2 A-10 内部構造の模式図。(1) 落下槽（真空）、(2) レーザ光源、(3) スーパーSpring（振動減衰バネ）、(4) 落体（コーナーキューブ）、(5) レーザ干渉計（フォトディテクタ）、(6) コーナーキューブ（固定反射体）。点線はレーザー光軸を表す。

る。さらに、専用ソフトウェアは固体地球潮汐や海洋潮汐、極移動、気圧による重力補正も同時に行い、絶対重力値を算出する。

計測誤差を小さくするために落下計測数を増やす必要があるが、落下間隔や落下回数などは専用ソフトウェアにより予め設定することで無人計測が可能である。数千回の落下計測数により計測誤差を  $10\mu\text{gal}$  あまりまで小さくすることが可能である。なお、レーザー光には共振器長を変化させることで2つのモードをとることが可能であり、付属ソフトウェアでは両者でそれぞれ計測を行い得られた値の平均値を絶対重力としている。

### 3. 重力計測の概要

神奈川県温泉地学研究所内の地震計室にて2006(平成18)年7月3日から9日にかけて絶対重力計測を行った(写真1)。温泉地学研究所は神奈川県小田原市入生田にある。計測地点は北緯35度14分17.5秒、東経139度7分13.3秒、標高は57メートルである(図1)。落体の落下間隔は3秒で、100回の落下を1セットとし、96セットを1回の計測とした。1セットごとにレーザーのモードは切り替わり、異モードのセット間隔は10分、同一モードのセット間隔は60分である。

計測は3回行った。1回目は7月3日18時22分から行ったが、制御用コンピュータのトラブルにより71セット(終了時7月5日5時27分)しか計測できなかった。



写真1 温泉地学研究所地震計室内のA-10システム。左にA-10本体、右に制御ユニットおよび制御用コンピュータがある。A-10は上部ユニットを支える脚を含めた直径が約50cm、上・下部ユニットを重ねた高さは約90cmである。なお、A-10本体は厚さ3250mmのコンクリートの観測台上に設置した。

た。2回目は7月5日16時52分から7月7日16時7分、3回目は7月7日16時38分から7月9日15時53分に行い、それぞれ96セットの計測データを取得した。

#### 4. 測定結果と議論

図3に3回目の測定の96セット目の落下ごとの絶対重力値を示す。また、図4に観測期間中の2セット(200落下)ごとの平均絶対重力値を示す。これらに示される重力値は固体地球潮汐、海洋潮汐、極移動、気圧による重力補正を行ってある。1回の落下ごとには最大200 $\mu$ gal程度の差が見られるが、1セット(落下数100回)では標準偏差は30 $\mu$ gal、96セット(落下数9600回)では3 $\mu$ gal程度の標準偏差である。

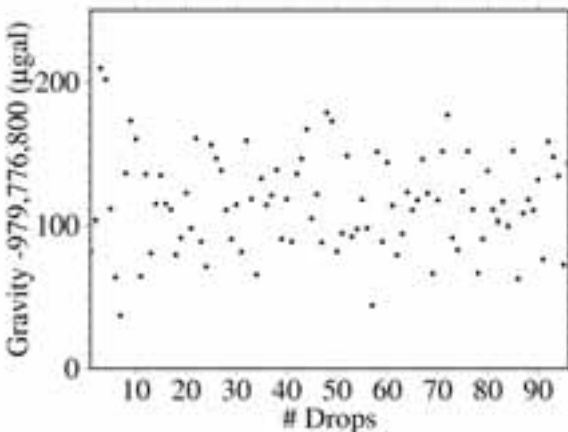


図3 3回目の測定の96セット目の落下ごとの計測重力値。

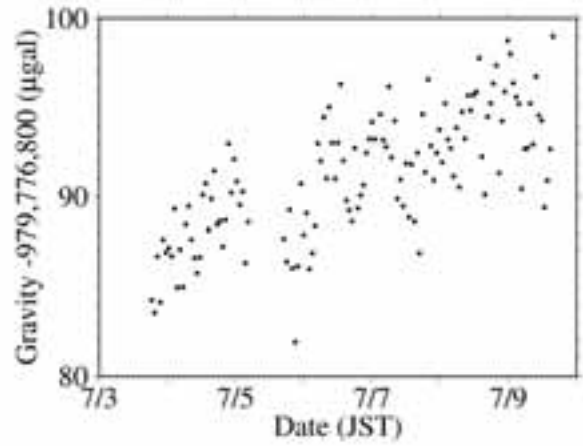


図4 測定期間中の計測重力値。2セットごとの平均値を表示した。

絶対重力値は1回目の測定(70セットまでの計測値を使用)では979,776,888.07( $\pm 2.84$ ) $\mu$ galであった。括弧内はセットごとの計測値の統計的な誤差(標準偏差)である。2回目、3回目の測定ではそれぞれ、979,776,890.33( $\pm 5.08$ ) $\mu$ gal、979,776,893.93( $\pm 3.24$ ) $\mu$ galという結果が得られた。3回の計測の平均は979,776,891.05( $\pm 4.59$ ) $\mu$ galである。機械的な誤差を考慮すると10.5 $\mu$ gal程度の誤差を含む。なお、2回目の計測の標準偏差が他の2回と比べて大きいのは、2回目の測定中に低気圧の通過による降雨があったことが原因と思われる。

今回、我々の測定により得られた絶対重力値は横山ほか(2002)による979,777.22mgalと比べると若干小さいものの同等の値である。測定によって得られた重力値は地下の密度構造や地形質量の影響を含んでいる。これにフリーエア補正、地形補正、ブーゲー補正を施すことで、地下の地質(密度)構造の不均質性を反映するブーゲー異常を求めることができる。ブーゲー異常 $\Delta g$ は

$$\Delta g = g - \gamma + \delta T + (dg/dz - 2\pi G\rho)h$$

で計算できる。ここで、 $g$ は測定された重力、 $\gamma$ は正規重力(地球を回転楕円体と仮定した場合の重力)、 $\delta T$ は地形補正、 $dg/dz$ は重力の鉛直勾配、 $\rho$ は地形密度、 $h$ は標高である。測定点の正規重力を重力式1980(例えば、Hofmann-Wellenhof and Moritz, 2005)から求めると $\gamma = 979,754,005.1\mu$ galとなる。これより地形補正 $\delta T$ を含まない単純ブーゲー異常を計算すると $\Delta g = 35\text{mgal}$ となった。ただし、ブーゲー異常の計算には、 $dg/dz = 308.6\mu$ gal/m、 $\rho = 2300\text{kg/m}^3$ (横山ほか, 2002)を用いた。

図4に示されるように観測期間中を通して重力値の増加傾向が見られ、約6日間に約10 $\mu$ galの重力値の増加が認められる。これは重力計A-10の機械的な計測誤差の可能性もあるが、観測地点付近の環境変化に起因して



いる可能性もある。例えば、田中ほか(2006)は地下水位の変動によっても数  $\mu\text{gal}$  の重力変動が起こることを報告している。我々の観測地点は早川の近傍に位置しており、観測期間中に観測地点の地下水量の変動が生じたことにより、絶対重力値が増加したのかもしれない。この問題は今後、継続して重力測定をすることにより解決できるであろう。

## 5. おわりに

2006(平成18)年7月3日から9日にかけて神奈川県温泉地学研究所にて Micro-g 社製可搬型絶対重力計 A-10 を用いて絶対重力測定を行い、絶対重力 979,776.89mgal を得た。

温泉地学研究所は箱根火山地域の東縁部に位置し、火山活動・火山体の構造を知る上にも重力観測は欠かせない。今回、我々が測定に用いた重力計 A-10 は可搬型であり、比較的短時間に設置、重力測定を行うことが可能であり、数千回の落体の落下により約  $10\mu\text{gal}$  の精度で絶対重力計測が可能である。箱根火山域には富士屋ホテルに重力基準点があるが測定は1960年であり(奥田ほか, 1962)、また、精度は十分ではないので再測定、あるいは新たな基準点を確立する必要がある。さらに箱根火山域の重力測定を継続的に行うことでマグマの移動や地下水の流動を捉えられる可能性がある。今後、温泉地学研究所構内のみならず、大涌谷などの箱根火山中心部、さらには富士山山麓(例えば、山頂や山腹噴火地点周辺)などの地域での絶対重力計測を行うことは箱根火山や富士山地域での長期的な火山活動研究の面でも重要と思われる。

## 参考文献

- 平賀士郎・田島広一・広田 茂・河西正男 (1970) 箱根火山の重力調査(第一報), 温研報告, 1, 33-38.
- 平田大二・山下浩之・萬年一剛・谷口英嗣 (2001) 箱根火山の基盤岩に関する岩石学的研究, 地学雑誌, 119, 420-426.
- Hirata, Y. (1996) Geology and volcanic activity of Hakone volcano, Japan. IBM (Izu-Bonin-Mariana) Arc System Workshop Program with Abstracts, 103-106.
- 平山義人・岩瀬康行・江口孝雄 (2006) 防大における A-10 型絶対重力計による重力測定(序報), 日本地球

- 惑星科学連合 2006 年大会予稿集, D122-P011.
- Hofmann-Wellenhof, B. and Moritz, H. (2005) Physical Geodesy, Springer-Verlag, 403p.
- Kuno, H. (1950) Geology of Hakone volcano and adjacent areas. Part I. J. Fac. Sci., Univ. Tokyo, sec. II, 7, 351-402.
- 奥田豊三・鈴木弘道・実川 顯・田島広一・熊谷直一・阿部悦夫 (1962) ウォルドン重力計による京都箱根間重力比較測定, 日本測地学会誌, 8, 47-58.
- 小田義也・棚田俊收・八巻和幸・伊東 博 (2002) 箱根火山の3次元速度構造と震源の再決定, 物理探査, 55, 145-156.
- 神藤史明・棚田俊收・伊東 博・飯塚 進 (1996) 箱根火山およびその周辺地域の3次元速度構造, 地球惑星科学関連学会 1996 年合同大会予稿集.
- 棚田俊收 (1999) 神奈川県西部地域における地震発生層の厚みについて, 温地研報告, 31, 31-43.
- 田中俊行・浅井康広・青木治三 (2006) 超深地層研究所正馬様用地における絶対重力と地下水量の関係, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会予稿集, D122-P010.
- 横山 泉・棚田俊收・萬年一剛 (2002) 箱根火山地域における捕足的重力測定(1999年), 温地研報告, 33, 1-10.
- Yokoyama, I. and Saito, T. (1965) Preliminary report on a gravimetric survey on Volcano Hakone, Japan. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII, 2, 239-245.
- Yukutake, T. and Tanaoka, I. (1960) Magnetic survey on Hakone Volcano by use of Proton Magnetometer. Bull. Earthq. Res. Inst., 38, 41-54.