

弟子屈における絶対重力測定 (2019 年および 2020 年)

今西祐一¹⁾*・西山竜一¹⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所

Absolute Gravity Measurements at Teshikaga in 2019 and 2020

Yuichi Imanishi¹⁾* and Ryuichi Nishiyama¹⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

Absolute gravity measurements were conducted at the Teshikaga Observatory, Hokkaido University in 2019 and 2020, with the main purpose of providing temporal gravity changes for calibrating the instrumental drift of the Superconducting Gravimeter iGrav #17. Temporal drift of the Rubidium clock for the absolute gravimeter was also measured and taken into account in determining gravity acceleration. The final estimates of the mean gravity value at Teshikaga were 980 518 908.41 μGal (2019) and 980 518 906.56 μGal (2020).

Keywords: absolute gravity measurement, superconducting gravimeter, instrumental drift, calibration, Teshikaga

1. はじめに

超伝導重力計 (Goodkind, 1999 ; Hinderer et al., 2007) は、極低温の環境下での磁気浮上に基づく相対重力計であり、きわめて高い感度と安定性を持つ。機械的なスプリングを用いた重力計に比べると非常に小さいとはいえ、超伝導重力計にもドリフトがあり、観測データから長期的な重力変化を詳細に議論する際に問題になる場合がある。超伝導重力計のドリフトは、多くの個体では時間的に線形であるか、または非常に長い時定数 (典型的には数年程度) をもった減衰する指数関数の形をとることが知られている (Van Camp and Francis, 2007)。いずれにしても、運転開始から長時間が経過した超伝導重力計のドリフトは、実際上、時間的に線形であると見なすことができる。このドリフトを正確に検定するために一般的に用いられる方法は、同じ地点において絶対重力計による測定を複数回実施し、超伝導重力計の記録と比較することである。それに加えて、絶対重力計との比較により、相対重力計としての超伝導重力計の感度を検定することもできる (Imanishi et al., 2002)。

2018 年 11 月、産業技術総合研究所が所有する超伝導重力計 (iGrav, 17 号機) が、北海道大学弟子屈観測所に設置され、重力連続観測が開始された (名和・他, 2019)。

この観測の目的は、北海道東部のカルデラ火山地帯における地下の密度変化をとらえ、火山活動の予測に資するデータを取得することである (e.g. Okubo et al., 2013)。そのような目的にとって、重力記録に含まれる機械的なドリフトは、できるだけ正確に補正されることが望ましい。

このような目的から、私たちは、2019 年、2020 年の二度にわたり、弟子屈観測所において絶対重力測定を実施した。絶対重力計は、超伝導重力計とは異なり、通常は機械的なドリフトはないものと見なされる。しかし、個体による系統差 (器差) が、数マイクロガル (μGal) 程度には存在することが知られている ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ms}^{-2}$)。器差の影響をなくすため、この二回の測定では同一のシリアル番号の装置を使用した。それでもなお、内蔵している原子時計の経年的なずれによって、微小な系統誤差が生じる可能性がある (望月・他, 2018)。そこで、二回の測定の前後に、独立したクロックと比較することにより、絶対重力計の原子時計の校正も実施した。本稿では、これらの測定の結果について述べる。

2. 弟子屈における絶対重力測定

北海道大学弟子屈観測所 (北緯 43.4855 度, 東経

* e-mail: imanishi@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

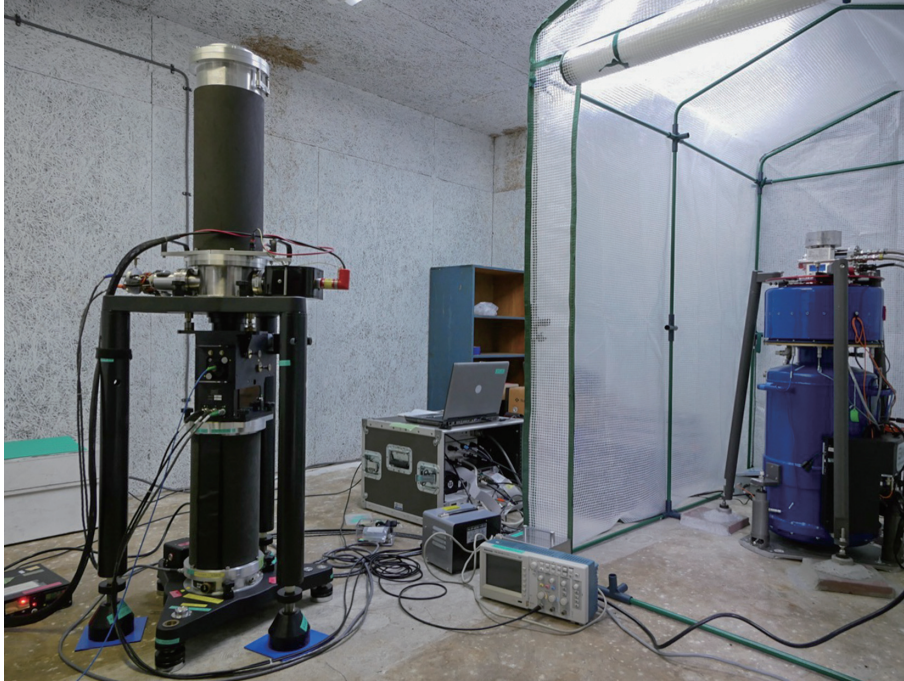


Fig. 1. Parallel observation with Absolute Gravimeter FG5 #241 (left) and Superconducting Gravimeter iGrav #17 (right) installed at Teshikaga Observatory, Hokkaido University in September 2020.

144.3992 度, 標高 201 m) における絶対重力測定は, 2019 年 9 月 11 日から 12 日, および 2020 年 9 月 29 日から 10 月 1 日にかけて行った. 2019 年の測定では, 当初は 3 日間の測定を予定していたが, 台風の接近による影響のため期間を短縮し, 測定を行った時間は約 13 時間にとどまった. 2020 年の測定では, 3 日間, 約 37 時間の測定を行った. 使用した絶対重力計は, 地震研究所所有の FG5 (241 号機, Micro-g Lacoste 社製) である. 重力加速度の鉛直勾配は $-2.530 \mu\text{Gal}/\text{cm}$ とした (名和・他, 2018). Fig. 1 に, 2020 年の測定の様子を示す.

超伝導重力計観測点に絶対重力計を持ち込んで測定を実施する場合, 測定データの補正に関して, 特別な事情が以下の二点について生じる. 一つは, 潮汐の補正に関してである. 絶対重力計の制御用コンピューターには, 潮汐補正をモデルによって計算するソフトウェアが内蔵されているが, それでは必ずしも精度が十分ではない. 超伝導重力計観測点では, その地点で実際の重力観測から求められた潮汐の振幅・位相のパラメーターが既知であるので, それを使用してより正確な補正をすることができる. このことにより, 内蔵ソフトウェアを使用する場合と比べて, 最大で数 μGal 程度の差が生じる場合がある. もう一つは, 大気圧の補正についてである. 重力は大気圧の変化の影響を受け, その大きさを示すアドミッタンスは約 $0.3 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$ である (気圧が高くなると

重力が小さくなる). 絶対重力計 FG5 は, この効果の補正を行うために, 内蔵された気圧計によって気圧変化を記録している. しかし, この気圧計は非常に高精度なものというわけではなく, 気圧値に無視できないオフセットをもつ場合がある. 超伝導重力計観測点では, 気圧の影響の補正のために高精度気圧計を設置していることが多く, そのデータを使用することにより気圧補正を高精度化することができる. なお, 弟子屈観測所では, 超伝導重力計観測のために高精度気圧計を設置するということも行われていない. そこで, 2020 年の測定においては, Paroscientific 社製の高精度気圧計 1000-16B (地震研究所所有) を持ち込んで, 気圧データを別途収録するようにした.

Table 1 に, 2019 年および 2020 年の測定結果をまとめる. また, Fig. 2 に, 各年の測定値のヒストグラムを示す. 重力加速度の値は, 絶対重力計を設置した床面の高さに直してある. 上述のように, 潮汐補正については超伝導重力計観測から決められたパラメーターを使用している. 気圧補正には, 2019 年については絶対重力計に内蔵された気圧計のデータを使用し, 2020 年については高精度気圧計 1000-16B の記録を使っている. いずれの年についても, 測定値は正規分布に従うと見なすことができ, 標準偏差を測定数の平方根で除することによって平均値の標準誤差を推定することができる. 一回ごとの測

定の標準偏差は、2019年および2020年で大きな違いはないが、有効測定回数の違いにより、2020年の平均値の標準誤差は2019年のおよそ半分となる。

2020年の測定において、絶対重力計に内蔵された気圧計と高精度気圧計1000-16Bの記録を比較したのがFig. 3である。2つの気圧計は、おおむね同じ気圧変化を記録しているが、絶対値に0.7-0.9hPa程度のオフセットがあり、それが時間的に変化していることがわかる。この時間変化は、絶対重力計に内蔵された気圧計の、周囲の温度変化にともなうドリフトであると考えられ(1000-16Bは温度補正がなされている)、平衡に達したあとのオフセットは0.70hPaである。このオフセットの値は、2019年7月に神岡(岐阜県)において同じ装置の組み合わせにより重力測定を実施した時に見られた値とほぼ同一である。弟子屈観測所において、1000-16Bは内蔵気圧計より約0.3m高い位置に置かれていたが、それによる気圧の差(約0.03hPa)を考慮すれば、内蔵気圧計のオフセットは0.67hPaとなる。1000-16Bは、Paroscientific社製高精度気圧計の相互比較により、系統誤差が0.01

hPa程度かそれ以下であることが確認されている(今西, 未発表データ)ので、ここでは誤差がないものとして扱う。上述のデータ処理では、1000-16Bの記録を気圧補正に用いているが、かりに絶対重力計に内蔵された気圧計の記録を用いたとすれば、0.67hPaにアドミッタンス0.3 μ Gal/hPaを乗じた0.20 μ Galの差が重力値に生じることになる。別の言い方をすると、2019年の測定時にも内蔵気圧計に同じ大きさのオフセットがあったと仮定すれば、2019年の重力測定値から0.20 μ Galを減じるべきだということになる。その場合、2019年の測定の平均値は980518908.88 μ Galとなる。

3. 絶対重力計のルビジウムクロックの検定

今回の重力測定に使用した絶対重力計FG5(241号機)は、これまでに3度、メーカー(Micro-g Lacoste社)に

Table 1. Results of absolute gravity measurements at Teshikaga Observatory, Hokkaido University in 2019 and 2020.

	2019	2020
Number of Drops	4,370	12,907
Mean Gravity Value (μ Gal)	980 518 909.08	980 518 907.17
Standard Deviation (μ Gal)	18.6	15.2
Standard Error of the Mean (μ Gal)	0.28	0.13

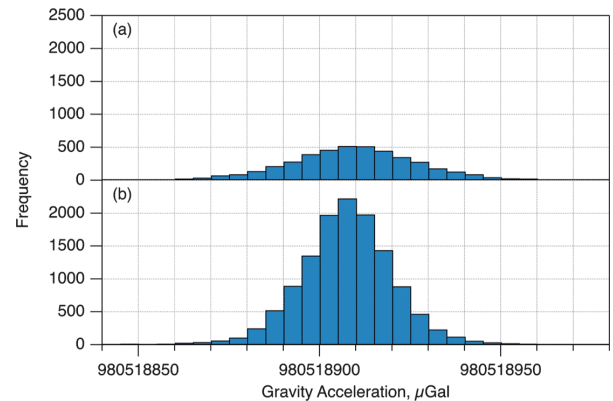


Fig. 2. Histograms of absolute gravity measurements obtained with FG5 #241 at Teshikaga Observatory. (a) September 2019, (b) September 2020.

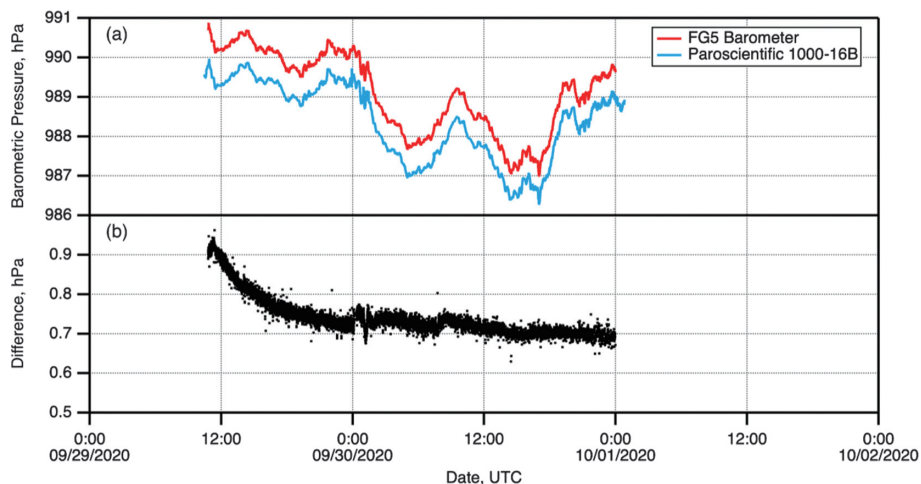


Fig. 3. Recordings of barometers at Teshikaga Observatory in 2020. (a) Comparison between built-in barometer for FG5 #241 and Paroscientific 1000-16B barometer. (b) Difference between readings of the two barometers.

よるルビジウムクロックの周波数の検定がなされている。それらの結果は、2014年2月には9999999.99240 Hz, 2015年12月には9999999.99065 Hz, 2018年10月には9999999.98580 Hz(いずれも誤差は不明)であった。2018年10月以降は、測定データの処理を行うソフトウェア(“g software”)において、最後の検定値(9999999.98580 Hz)が設定されている。この値は、理論上のクロック周波数である10 MHzからわずかにずれているが、装置に固有の定数として扱われ、それを意図的に変更しない限り、重力加速度の推定は正しく処理される。かりに経年変化によって周波数がこの値からずれることがあれば、同ソフトウェアが出力する重力値に系統的な誤差が生じることになる。

メーカーによる検定のほかに、FG5(241号機)のクロックの検定は、2019年と2020年に一度ずつ行われている。2019年4月には、地震研究所の屋上において、GPSに同期したクロックとの比較を行った。その結果は、 $9999999.983662 \pm 0.000023$ Hzであった。また、弟子屈での重力測定の直後にあたる2020年10月2日に、次の重力測定地点として訪れた国立天文台水沢 VLBI 観測所において、水素メーザー原子時計との比較を行った。その結果は、 $9999999.982698 \pm 0.000010$ Hzであった。

以上のクロック周波数の検定結果を、時間経過として表すと、Fig. 4 のようになる。これらの結果は、同一の周波数基準に対して同一の方法で得られたものではないので、単純に比較することはできない。しかし、クロック周波数が長期的に低下している傾向は見えてとることができる。弟子屈における2019年と2020年の重力測定値を比較する際にも、2018年のメーカーによる検定から時間が経過するほど、系統的なずれが大きくなっていると考えることができる。

加速度は(長さ)/(時間)/(時間)の次元を持つことからわかるように、クロック周波数の相対的な誤差は、結

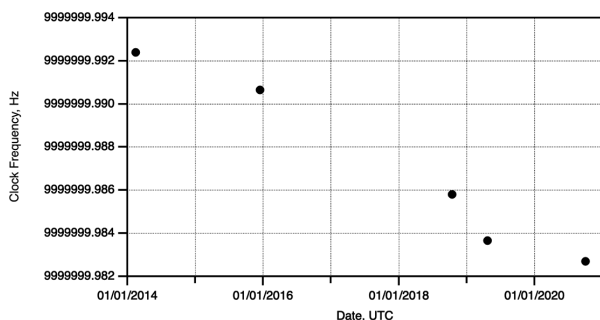


Fig. 4. Calibration results of the Rubidium clock for FG5 #241.

果的に得られる重力加速度の測定値に2倍の相対誤差を生み出す。クロック周波数が設定値より低いということは、重力加速度を大きく見積もってしまうことになる。2019年9月の測定時には、Fig. 4のデータから内挿して、クロック周波数が9999999.98340 Hz だったと仮定する。そうすると、設定されている周波数(9999999.98580 Hz)との相対誤差は 2.4×10^{-10} となる。したがって、重力加速度の推定値には 4.8×10^{-10} の相対誤差があることになる。また、2020年9月の測定時には、水沢における検定結果をそのまま使えば、クロック周波数の相対誤差は 3.1×10^{-10} なので、重力加速度の相対誤差は 6.2×10^{-10} となる。

以上のように評価した原子時計のずれによる系統誤差を、前節で述べた弟子屈観測所における重力加速度の測定値(平均値)に対して補正すると、最終的な推定値は2019年は $980518908.41 \mu\text{Gal}$, 2020年は $980518906.56 \mu\text{Gal}$ となる。標準偏差および標準誤差の推定については、補正の必要はない。

4. 議 論

本研究では、約1年のインターバルを隔てて、弟子屈観測点において二回の絶対重力測定を実施した。測定結果に対して、気圧の影響およびクロック周波数のずれに関連して、それぞれ大きさが $1 \mu\text{Gal}$ 以下の補正を追加で施した。最終的な測定結果として、2019年9月に比べて、2020年9月は、 $1.85 \mu\text{Gal}$ だけ重力加速度が小さいという結論を得た。これは、同一のオペレーターが同一のシリアル番号の絶対重力計を使用し、潮汐の補正に超伝導重力計からのパラメーターを使用し、なおかつ原子時計の狂いを考慮に入れたものである。一般に、絶対重力計FG5の確度としては、 $2 \mu\text{Gal}$ という数値がしばしば引用される(Okubo et al., 1997)。ここで得られた $1.85 \mu\text{Gal}$ という相対変化の大きさは $2 \mu\text{Gal}$ を下回るが、Table 1に示した平均値の標準誤差を考慮すれば、時間変化という意味ではロバストなものであると考えられる。今後も、1年に1回程度の頻度で同地点において重力測定を行い、超伝導重力計のドリフト検定に資するデータを取得する計画である。

弟子屈観測所に超伝導重力計が設置されるより以前の2017年9月に、絶対重力計FG5(産業技術総合研究所所有、217号機)による絶対重力測定が実施されている(名和・他, 2018)。このときの結果(床面における)は、 $980518902.59 \mu\text{Gal}$ であった。これと比較すると、本研究の結果は、 $5.8 \mu\text{Gal}$ (2019年)および $4.0 \mu\text{Gal}$ (2020年)だけ大きい。異なる時期に異なるシリアル番号の装置を

使って得られた絶対重力測定結果どうしを $1 \mu\text{Gal}$ のオーダーまで比較できるためには、器差の校正のみならず、装置のオペレーションやデータ処理方法などの標準化が十分になされていることが必要であり、そのあたりが絶対重力測定関連分野における今後の課題の一つである。

本研究によって得られた、弟子屈における約 $2 \mu\text{Gal}$ の重力変化の原因や、この結果に基づいた超伝導重力計 (iGrav, 17号機) のドリフトの検定などについては、山佳・名和 (投稿中) によって詳しい分析・議論がなされるはずである。

謝 辞

弟子屈観測所における絶対重力測定にあたっては、名和一成 (産業技術総合研究所), 岡田和見 (北海道大学), 本多 亮 (山梨県富士山科学研究所) の各氏の協力をいただきました。絶対重力計のルビジウムクロックの検定に際しては、田村良明氏 (国立天文台水沢 VLBI 観測所) の協力をいただきました。本研究は、JSPS 科学研究費 20K04093, 東京大学地震研究所共同利用 (2019-B-05), および文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画 (第2次)」の助成を受けたものです。

参考文献

Goodkind, J.M., 1999, The superconducting gravimeter, *Rev. Sci. Instr.*, **70**, 4131-4152.
Hinderer, J., D. Crossley and R.J. Warburton, 2007, Gravimetric

- Methods – Superconducting Gravity Meters, in “Treatise of Geophysics”, edited by G. Schubert, 66-122.
Imanishi, Y., T. Higashi and Y. Fukuda, 2002, Calibration of the superconducting gravimeter T011 by parallel observation with the absolute gravimeter FG5 #210 – a Bayesian approach, *Geophys. J. Int.*, **151**, 867-878.
望月一磨・名和一成・鈴山智也, 2018, 重力観測点におけるルビジウム発振器の周波数測定, *測地学会誌*, **63**, 187-191.
名和一成・池田 博・岡田和見・高橋浩晃・岡 大輔, 2019, iGrav 型超伝導重力計 (#017) の道東カルデラ火山地域への移設: 苫小牧から札幌・南新川を経て弟子屈へ, *北海道大学地球物理学研究報告*, **82**, 19-24. <http://doi.org/10.14943/gbhu.81.11>
名和一成・宮川歩夢・山崎 雅・望月一磨・高橋浩晃・大藪真子・岡田和見・岡 大輔・岡崎紀俊・本多 亮, 2018, 道東カルデラ火山地域における絶対重力測定, *北海道大学地球物理学研究報告*, **81**, 11-16. <http://doi.org/10.14943/gbhu.82.19>
Okubo, S., Y. Tanaka, S. Ueki, H. Oshima, T. Maekawa and Y. Imanishi, 2013, Gravity variation around Shinmoe-dake volcano from February 2011 through March 2012 – Results of continuous absolute gravity observation and repeated hybrid gravity measurements, *Earth Planets Space*, **65**, 1-10.
Okubo, S., S. Yoshida, T. Sato, Y. Tamura and Y. Imanishi, 1997, Verifying the precision of a new generation absolute gravimeter FG5 – Comparison with superconducting gravimeters and detection of oceanic loading tide, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 489-492.
Van Camp, M. and O. Francis, 2007, Is the instrumental drift of superconducting gravimeters a linear or exponential function of time?, *J. Geod.*, **81**, 337-344.

(Received December 9, 2020)

(Accepted January 13, 2021)