地 震 研 究 所 彙 報
Bull. Earthq. Res. Inst.
Univ. Tokyo
Vol. 100 (2025) pp. 1-14

FG5 絶対重力計による重力測定データ
―東北地方，2011-2018 年―

今西祐一 [1)]*

[1)] 東京大学地震研究所

Gravity Data Acquired with FG5 Absolute Gravimeters: In Tohoku Region, 2011-2018

Yuichi Imanishi [1)]*

[1)] Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Abstract

Absolute gravity data in the Tohoku region obtained by Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, over the period 2011-2018 are presented. Three sets of FG5 absolute gravimeters (serial numbers #109, #212 and #241) were used for the measurements. A total of 39 measurements were conducted at six stations over the eight years. These data should be valuable for the study of postseismic crustal deformation after the 2011 Tohoku earthquake (M9.0). Explanations of the stations, measurement methods, and quality of the data are given.

Keywords: absolute gravity measurement, Tohoku region

1. はじめに

地球上の重力加速度は，地球の質量分布を反映した量であり，その空間分布は地球内部の密度に関する情報を持つ．また，地震，地殻変動，火山噴火などによって，重力加速度の大きさは時間的にも変動し，そのことは地下の密度の時間変化を反映する．重力を精密に計測することは，地球内部の構造やダイナミクスを研究する上で，他の観測手段からは独立した情報をもたらすという点において重要である．

地震研究所では，Micro-g Lacoste 社製の FG5 絶対重力計を用いて，各地において重力の測定を行ってきた．FG5 絶対重力計は，真空中で物体を自由落下させた際の経過時間と落下距離を計測することにより，重力加速度の絶対値をおよそ 9 桁の精度で測定する装置である（Niebauer *et al.*, 1995；Okubo *et al.*, 1997）．同一の地点において，FG5 による測定を何年にもわたって繰り返し行うことにより，長期的な地殻変動に関する情報を得ることができる．また，絶対重力計を基準として行う相対重力サーベイ，いわゆるハイブリッド重力測定（大久保，2001；Imanishi *et al.*, 2018；鬼澤・他，2022）は，相対重力測定データに絶対値の情報を付与し，異なる時期に行われた測定の結果を直接比較することを可能にする．さらに，絶対重力測定は，超伝導重力計の感度や機械的ドリフトを検定することにもしばしば用いられる（Francis *et al.*, 1998; Hinderer *et al.*, 2015；今西・他，2024）．

私たちは，地震研究所が過去に実施してきた絶対重力測定のデータを，データ論文の形で順次，出版・公開していきたいと考えている．その第一報として，本論文では，2011 年から 2018 年までの期間に東北地方の 6 か所の地点で行われた測定で得られたデータを出版し，その内容について解説する．これらのデータは，プレート沈み込み帯で発生した巨大地震（2011 年東北地方太平洋沖地震，M9.0）の直後に震源域に比較的近い所で取得された，世界的にも希少な絶対重力データである．これらを活用することにより，大地震発生後の広域的な地殻変動の研究に新たな知見がもたらされることが期待される（高木，2018；Tamura *et al.*, 2023）．

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

2. 測定方法

本論文で扱うデータを取得するために使用された FG5 絶対重力計は 3 セットある．それらのシリアルナンバーは，#109，#212，および#241 である．これらは基本的に同等の機能を持ち，精度・確度も同等である．いずれの装置も，メーカー（Micro-g Lacoste 社）による定期的なメンテナンスを受けており，つねに良好な状態に保たれていた（それでも，測定現場において突発的に不調になることはあった）．装置のセットアップは，一部の例外を除いて，どの測定においても同一の方法で行われた．例外というのは，2018 年の各地点における測定で，レーザーの'F'のピークが用いられたことである．

測定に複数の FG5 が使用されているため，それらによる測定データを比較する際に FG5 自体の個体差（器差）が問題となる場合がある．FG5 の公称確度は 2 μGal であり（1 μGal = 10^{-8} ms^{-2}），比較測定を行うと実際に 1–2 μGal 程度の器差が検出される（今西・他，2021；今西・他，2022）．時間計測に用いられる Rb 原子時計の周波数のずれによる誤差も，器差の一部と見なされる．2018 年より以前，地震研究所では FG5 の器差の管理を厳密に行っていなかった．のみならず，運用上の都合から，異なるセットのパーツを組み合わせて使用することが常態的に行われていた．そのような使い方をした場合，個々の測定における器差は不確定となる．そこで，本論文では FG5 の器差については明示的に扱わないこととし，後述のように特定の年のデータについてのみ，経験的に推定された器差の情報を付記する形とする．なお現在，地震研究所では，絶対重力測定におけるトレーサビリティー（今西・他，2021）の観点から，異なるセットのパーツを混在させて使うことはしていない．

重力値の絶対値の正確さに関して，重力加速度の鉛直勾配の精度が問題になる場合もある．FG5 では，別途測定した鉛直勾配の値をコントローラーに入力するが，それは重力値の推定において既知の量として扱われる．入力した鉛直勾配の値が真の値からずれていると，推定される重力値に誤差が生じる．その影響の大きさは，鉛直勾配の 1 μGal/cm の誤差に対して，重力値に約 7 μGal の誤差が生じるという程度である（今西・他，2023）．鉛直勾配は普通 3 μGal/cm 程度の値だが，これを相対重力計を用いた通常の方法で測定した場合の推定精度はせいぜい 1–2 %程度である（今西・他，2023）．各地点での測定において使用された鉛直勾配の値に 0.03–0.06 μGal/cm 程度の誤差があるとすれば，重力値には 0.2–0.4 μGal の誤差が生じることになる．

さらに，オペレーターによる個人差という問題もある．FG5 は，いわゆるブラックボックス的なものではなく，調整や運転には人間が深く介在し，良質なデータを得るには相当な熟練を要する装置である．レーザー干渉計のアラインメントなど，もっとも微妙な調整を要する場面では特に個人差が出やすく，さらに同じオペレーターであってもまったく同一の状態をつねに実現できるとは限らない．こうした要因により，重力値は 0.1 μGal から最大で 1 μGal 程度，変動する可能性がある．

以上のような要因を合わせると，それぞれの測定で得られた重力値には，最大で 2–3 μGal 程度の不確かさがあると考えられる．

3. 測定地点

Table 1 および Fig. 1 に，本論文で取り扱う，東北地方の絶対重力測定地点を示す．Table 2 には，それぞれの年に各地点において測定が行われた期間と，使用された FG5 絶対重力計のシリアルナンバー（コントローラー／真空チャンバー）を示す．2016 年には 6–7 月と 11 月の 2 回，測定が行われたので，それぞれ '2016 A' および '2016B' と記している．Table 2 で '—' と記されている箇所は，その年にその地点で測定が実施されなかったことを表す．真空チャンバーの '241B' は，FG5 #241 用の予備の真空チャンバーのことである．なお，

Table 1. Locations of absolute gravity stations in the Tohoku region. 'Gradient' means the vertical gradient of gravity acceleration (shown as positive values).

	Hachinohe	Honjo	Esashi	Mizusawa	Sendai		Zao	
					Sendai-A	Sendai-B	Zao-A	Zao-B
Latitude (deg)	40.4799	39.3437	39.1511	39.1333	38.2513	38.2519	38.1361	38.1361
Longitude (deg)	141.5605	140.1675	141.3318	141.1334	140.8446	140.8440	140.4844	140.4844
Height (m)	99.0	95.0	391.5	63.0	127.6	132.0	1240.0	1240.0
Gradient (μGal/cm)	3.208	2.781	2.942	3.064	2.803	3.219	3.553	3.673

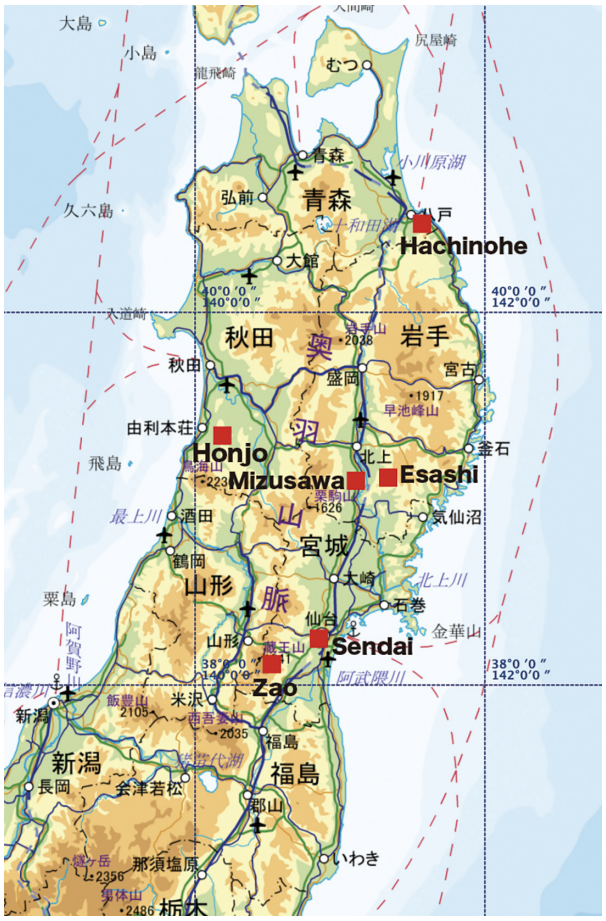

Fig. 1.　Locations of absolute gravity stations in the Tohoku region (red squares). See Table 1 and the main text for details of the stations. The basemap was provided by the Geospatial Information Authority of Japan.

2013 年の測定では，FG5 #212 のコントローラーと FG5 #109 の真空チャンバーの組み合わせであったが，レーザーにはシリアルナンバー#109 のものが使用された．

それぞれの年における測定は，同じ機材を運搬して複数の地点を順に訪問する形で行われた．各地点において，測定は少なくともものべ 3 日間継続することを基本としていた．また，各地点において絶対重力測定が継続している間に，それを基準点とした相対重力サーベイ（ハイブリッド重力測定）が行われた．各地点について，1 年に 1 回の頻度で測定が行われたが，後述のように，2016 年には仙台 A において 2 回の測定が行われた．

Table 1 に掲げた以外に，東北地方の絶対重力測定地点として，女川（宮城県女川市）がある．女川では 2006 年から 2010 年まで毎年，測定が行われていたが，2011 年の震災で測定地点が被害を受け使用不能になった．2011 年以降には絶対重力測定が行われていないので，本論文では扱わない．

以下では，それぞれの測定地点について，簡単に説明する．地点は，北から南へ，緯度の高い順に並んでいる．本論文では，データを利用するために必要な情報だけを記述し，測定を行うための資料（点の記など）は含めない．

3.1　八戸（Hachinohe）

八戸工業大学（青森県八戸市）の構造工学実験棟内に位置する測定地点である．国土地理院の基準重力点（FGS）になっている．この地点における絶対重力測定は，2011 年から 2018 年まで行われた．本論文で取り上げている測定地点の中で，8 年間すべての年に同一の場所に FG5 が設置されて測定が行われたのはここだけである．

3.2　本荘（Honjo）

東北大学の本荘地震観測所（秋田県由利本荘市）である．この地点における絶対重力測定は，2013 年から 2018 年まで実施された．本論文で取り上げている中では唯一の，日本海側に位置する測定地点である．Tamura *et al.* (2023) では，本荘における測定結果が参考資料として掲載され，2011 年東北地方太平洋沖地震後の重力変化が太平洋側と日本海側とで様相が異なることが議論されている．

3.3　江刺（Esashi）

国立天文台・水沢 VLBI 観測所に属する，江刺地球潮汐観測施設（岩手県奥州市）である．国際絶対重力基準網（IAGBN）の点の一つである．この地点における絶対重力測定は，2011 年から 2015 年まで実施された．ここでは 1988 年以来，超伝導重力計（TT70 型，007 号機）による観測が行われていたが，その装置は 2008 年に国立天文台の水沢キャンパスに移設された．2015 年からは絶対重力測定が水沢で行われるように変更され，その年には江刺と水沢の両方で測定が行われた．

3.4　水沢（Mizusawa）

国立天文台・水沢 VLBI 観測所（岩手県奥州市）の地球惑星実験棟である．3.3 項で述べたように，ここでは 2008 年に超伝導重力計による観測が開始された．2017 年に，超伝導重力計が TT70 型の 016 号機にリプレースされた．地震研究所による絶対重力測定は，2015 年から 2021 年まで行われた．そのデータは Tamura *et al.* (2023) において，2 台の超伝導重力計の機械的なドリフトを推定するために活用された．

最近，超伝導重力計（10 K 冷凍機を使用するもの）のデュワーから漏出するヘリウムガスが，近くに置かれた FG5 絶対重力計の Rb 原子時計に影響を与える場合があることが知られるようになった（Mäkinen *et al.*,

Table 2. Date/time (in UTC) of the absolute gravity measurements conducted at the stations in the Tohoku region over the period 2011–2018. In 2016, there were two campaigns in June–July and in November, denoted by '2016A' and '2016B', respectively. Also shown are the serial numbers of the FG5 absolute gravimeters used in the experiments. 'xxx/yyy' denotes the serial numbers of the controllers (xxx) and the dropping chambers (yyy).

Year	Hachinohe	Honjo	Esashi	Mizusawa
2011	June 6 08:09 – June 9 09:15 241/241	—	June 10 07:51 – June 12 23:13 241/241	—
2012	July 9 06:14 – July 12 23:33 109/241B	—	July 2 07:31 – July 3 23:45 109/241B	—
2013	June 19 03:10 – June 20 23:11 212/109	June 24 06:43 – June 26 05:40 212/109	June 21 07:32 – June 23 23:05 212/109	—
2014	June 16 02:25 – June 18 06:41 212/109	June 24 01:52 – June 26 08:38 212/109	June 21 04:05 – June 22 05:52 212/109	—
2015	June 1 01:52 – June 3 08:15 212/109	June 9 01:38 – June 11 23:03 212/109	June 6 04:14 – June 8 04:41 212/109	July 8 08:22 – July 10 05:39 212/109
2016A	June 20 08:25 – June 23 23:37 241/212	June 28 02:01 – June 30 07:40 241/212	—	June 25 03:24 – June 27 06:19 241/212
2016B	—	—	—	—
2017	June 19 03:07 – June 23 03:43 212/109	June 27 01:40 – June 29 23:09 212/109	—	June 24 02:54 – June 26 08:51 212/109
2018	June 18 02:01 – June 21 08:43 109/241B	June 27 00:44 – June 28 23:15 109/241B	—	June 23 02:51 – June 25 06:07 109/241B

Table 2. (Continued)

Year	Sendai		Zao	
	Sendai-A	Sendai-B	Zao-A	Zao-B
2011	May 31 09:07 – June 5 04:47 241/241	—	—	—
2012	July 4 07:04 – July 7 07:56 109/241B	—	—	—
2013	June 27 07:16 – July 1 10:40 212/109	—	July 12 08:04 – July 14 23:21 212/109	—
2014	June 27 10:28 – July 1 08:01 212/109	—	July 6 05:56 – July 8 06:36 212/109	—
2015	June 12 05:54 – June 15 07:40 212/109	—	July 11 02:52 – July 13 04:39 212/109	—
2016A	July 1 10:08 – July 5 22:43 241/212	—	July 11 03:51 – July 12 22:52 241/212	—
2016B	November 4 02:34 – November 5 23:20 212/109	November 6 04:14 – November 8 02:06 212/109	—	—
2017	—	June 30 05:51 – July 3 00:21 212/109	—	July 10 03:39 – July 12 23:33 212/109
2018	—	June 29 09:24 – July 1 09:30 109/241B	—	July 9 04:13 – July 11 06:38 109/241B

2015；今西・他，2024）．水沢で稼働している超伝導重力計は TT70 型なので冷凍機は 10 K タイプだが，絶対重力測定が行われた部屋は超伝導重力計から数枚の壁とドアを隔てた場所（直線距離で約 11 m）であり，Rb 原子時計へのヘリウムガスの影響はなかったと考えている．実際，VLBI 観測に用いられる水素メーザー時計との比較が 2020 年，2021 年に行われたが（今西・他，2021），Rb 原子時計の周波数に異常は認められなかった．

3.5　仙台（Sendai）

東北大学の青葉山キャンパス内，地震・火山噴火予知研究観測センター（宮城県仙台市）である．この場所にはかつて絶対重力測定地点が 2 か所あり，ここでは便宜的にそれらを「仙台 A」，「仙台 B」と表記する．仙台 A は，旧別館地下の地震計室にあり，国土地理院の FGS であった．ここでは 2011 年から 2016 年まで絶対重力測定が行われた．2011 年の震災で被害を受けた旧別館が取り壊されることにともない，2016 年に新しい測定地点として仙台 B が別の建物（B 棟）内に設定された．2016 年 11 月には，仙台 A，仙台 B 両地点において絶対重力測定が行われ，あわせて相対重力測定による接続が行われた．その後，2018 年には新たに A 棟が建設され，そこに重力測定用の基台が作られて国土地理院の FGS が移設された．そこでは地震研究所も 2022 年に絶対重力測定を行っている．

3.6　蔵王（Zao）

東北大学の蔵王観測所（宮城県蔵王町）である．2013 年から 2016 年までは，旧局舎において絶対重力測定が行われた．2017 年に，iGrav 超伝導重力計観測のための新たな局舎が建設され，絶対重力測定地点もそこに移された．ここでは便宜的に，新旧の測定地点の古い方を「蔵王 A」，新しい方を「蔵王 B」と表記する．iGrav による観測は 2024 年まで続けられ，蔵王 B における絶対重力測定も同じ年まで行われた．

iGrav 超伝導重力計は 4 K タイプの冷凍機を装備しており（Warburton *et al.*, 2010），冷凍機が正常に稼働している限りヘリウムガスの漏出はない．したがって，蔵王 B に設置された FG5 の Rb 原子時計への影響はなかったと言ってよい．

4.　データ処理

FG5 で収録されたデータの処理には，ソフトウエア ‘g9’（バージョン 9.120423）を使用した．この論文をまとめるにあたり，すべてのデータを見直し，再処理を行なった．処理方法としては，基本的に g9 のデフォルトの設定に従った．元のデータファイルに入力されていたパラメーターは，後述のレーザーの電圧値以外は変更せず，そのまま使用した．参照する高さは，床面から高さ 130 cm とした．元のデータファイルにあった明らかな設定の誤り（他の地点の潮汐補正が適用されているなど）は修正した．

FG5 のデータ処理において問題となるのが，レーザーのピークの同定である．FG5 のレーザーでは，通常，‘E’ のピークにロックするように設定する．そのように設定しても，自発的に他のピーク（‘D’ や ‘F’）に飛んでしまうこと（ホッピング）がしばしば起きる（Fig. 2）．各ピークの電圧値をコントローラーに入力することで，ロックしているピークを自動的に検出するように設定できるが，時間の経過とともにレーザーの電圧も不規則に変動するので，誤ったピークが検出される場合がある．そのような場合，重力値には 27–28 μGal 程度の系統的な誤差が生じる．ここでは，‘E’のピークの電圧値の時間的変動の様子を見て，検出ができるだけ正しくなるように入力パラメーターを調節したが，電圧の変動が大きい場合には誤検出を完全になくすことは難しい．そのようなケースについては，特記事項として付録に記載した．

データ処理における他の問題は，測定現場で観察された装置の不具合や，オペレーターによるヒューマンエラーなどのイレギュラーな要因を，どのように処理するかという点である．「この時間帯はこの装置が不安定だった」「この測定ではオペレーターの操作ミスがあった」などの問題がしばしば持ち上がるが，そうしたことがらについての判断を事後に客観的な基準で行うことには限界がある．ここでは，ドロップごとのばらつきが明らかに大きい，前後に比べて重力値が明らかに違う，などの時間帯についてはわかる範囲で付録に注釈を記した．また，一部の年，地点において，オペレーターが測定して入力した‘setup height’（lower setup height と upper setup height の合計）に誤りがあった可能性があるが（大久保，私信），それについては修正せず，付録に注釈を記すにとどめた．

5.　データの品質の検証

FG5 絶対重力計およびその後継機種は，重力加速度の絶対値を計測する装置として，世界でデファクト・スタンダードとなっている．現時点において，FG5 を確実に上回る精度・確度を有する絶対重力計というものが存在しないため，FG5 で得られたデータの品質を他の同種の装置との比較によって検証することは原理的に不可能である．複数の FG5 どうしを比較することにより，

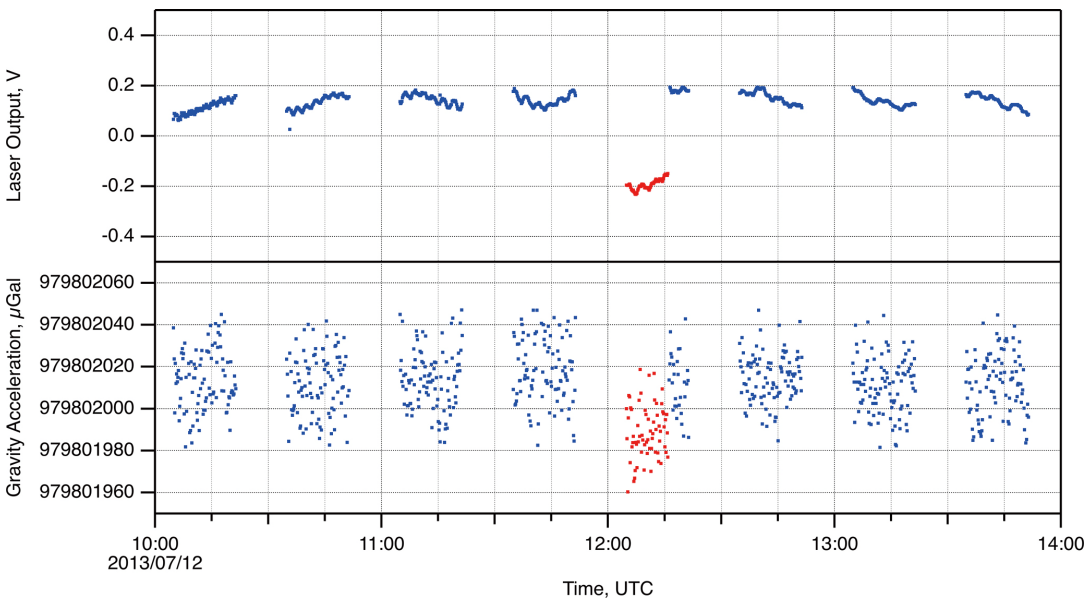

Fig. 2.　Part of the FG5 data acquired at the Zao-A station in 2013, showing the effect of laser hopping. For the normal drops (blue dots), the laser peak is correctly identified as 'E'. For the irregular drops (red dots) from 12:04 to 12:16 (UTC), the laser likely hopped to the 'F' peak, but was misidentified as 'E', resulting in incorrect values of gravity.

いずれか 1 台を基準とした相対的な器差を検定することは可能だが，絶対値がどこまで正しいかについての直接的な情報はその方法では得られない（今西・他，2021；今西・他，2022）.

本論文では，ここで扱っている絶対重力測定データが，品質がほぼ均質であって内部的に矛盾しないことを示すことで，品質の検証に代えることとしたい．絶対重力計には原理的にドリフトがないため，超伝導重力計の機械的なドリフトの検定に用いることができる．Tamura *et al.*（2023）では，超伝導重力計と絶対重力計の記録の差から時間的にほぼリニアなトレンドが明瞭に検出され，そのデータから超伝導重力計のドリフトレートが推定された（Tamura *et al.*（2023）の Fig. 2）．データを直線で近似した際の misfit は 2–3 μGal 程度であり，絶対重力計の公称確度（2 μGal）と同等であった．このことは逆に，Tamura *et al.*（2023）で用いられた絶対重力測定データが，この程度の正確さを有していることを示している．ただし，注意しなければならないのは，2018 年の絶対重力測定データについて，8.6 μGal の系統誤差がある（大きめに出る）として補正がなされていることである．この年の測定では，シリアルナンバー#109 のコントローラーと#241B の真空チャンバーの組み合わせが主に使用された．この系統誤差は，国土地理院において毎年開催されている絶対重力計の比較測定（山本・他，2018）の結果から推定されたものであり（大久保，私信），FG5 としてはやや異例の大きさである．しかし，この補正を適用することによって全体として矛盾のないデータセットになるので，同じ年の他の地点（八戸，本荘，仙台 B，蔵王 B）における測定についても，同じ系統誤差を仮定するのが妥当であると考えられる．

なお，2018 年の各地点における測定では，レーザーの 'F' のピークが用いられた．レーザーのそれぞれのピークに対応する波長は FG5 のコントローラーに記録されており，ロックされたピークが正しく認識されている限り正しい重力値が得られる．したがって，そのような使用法自体には問題はなく，8.6 μGal の系統誤差の原因とはならない．

水沢における絶対重力測定は 2015 年以降に行われたので，2011 年から 2014 年までに各地点で取得されたデータについては，超伝導重力計データとの直接的な比較によって品質の検証をすることはできない．しかし，どの年の測定も，ほぼ同一の方法で実施されたものであり，全体としてデータの品質はほぼ均質であると考えて良いだろう．

6.　データのフォーマット

FG5 のコントローラーは，ドロップごとに，レーザー干渉計のフリンジのデータを記録する．そこには落体が落下する際の，時間と距離の情報が含まれている．これはバイナリーデータであり，専用のソフトウエア（ライセンス制）を用いて処理される．このデータは FG5 のユーザー以外にとっては利用することが難しい

と考えられるので，ここでは，処理の結果として出力されるデータについて説明する．

出力データは3種類あり，いずれもテキストファイルである．1つは，project ファイルである．プロジェクトというのは，同じ設定で測定動作を行う，複数のセット（後述）をまとめたものである．典型的には，1 つのプロジェクトは数時間から数日にわたって継続する．project ファイルには，観測点の情報，装置の情報，データ処理結果のサマリーなどが書かれている．レーザーの各ピークの波長もこのファイルに書かれているので，ピークの誤検出を修正する際にはそれを利用することができる．

2つめは，drop ファイルである．これには，各ドロップで推定された重力加速度や，各種の補正量などの詳細な情報が含まれている．ファイルは tab-delimited 形式で，1 行が 1 回のドロップに対応する．各コラムの意味は，Micro-g Lacoste 社の web ページ

https://microglacoste.com/support/product-manuals/

https://microglacoste.com/product/micro-g-lacostes-g-absolute-gravity-processing-software/

からダウンロードできるマニュアルの中で説明されている．個々のドロップを独立したデータとして扱い，詳細な統計処理を行いたい場合には，このファイルを扱う必要がある．

3つめは，set ファイルである．これには，セットごとの測定結果のサマリーが書かれている．セットというのは，一定の回数（典型的には 100 回）のドロップをまとめたものである．ドロップの間隔を 10 秒または 15 秒，1 セットあたりのドロップ数を 100，セットの間隔を 30 分または1時間と設定するのが，しばしば用いられるやり方である．セットのデータは，重力測定の現場においては装置の状態を把握する上で有用だが，事後のデータ処理においてはそれほど重要というわけではない．

これら3つのファイルは，1つのプロジェクトについて1組，生成される．本論文の公開データは，それぞれの地点，年についてファイルをディレクトリに分けて保存し，全体をまとめて zip 圧縮した形としている．それぞれのファイルの名称は，たとえば

hit20110606 a.project.txt

hit20110606 a.drop.txt

hit20110606 a.set.txt

のようになっている．ファイル名の ‘hit20110606 a’ の部分は，装置のセットアップ時に入力されたプロジェクト名である．この例の場合，‘hit’が地点を表し，‘20110606’が日付（UTC）を表し，‘a’ はその日の中で最初のプロジェクトであることを表す．プロジェクト名のつけ方は，一部の地点で不統一になっているが，混同される恐れはないと考えられるのでオリジナルのままにしている．

一部の測定では，システムの A/D コンバーターの不具合のため，レーザーの電圧値などが正常に記録されていない時間帯がある．代わりに外部のロガーで収録されていたデータもあるが，ここには含めていない．

フリンジのバイナリーデータは，前述のように専用のソフトウエアがないと処理できないが，要望があれば別の方法で配布する用意がある．バイナリーデータの容量は，それぞれの地点，年あたり 100–200 MB 程度である．

7. データの取得

公開データは，UTokyo Repository に登載されている．URL を下記に示す．

https://doi.org/10.15083/0002013414

8. データの利用

本論文で扱ったデータを使用して得られた研究成果を発表される際には，本論文を引用されたい．

9. おわりに

本論文では，東北地方の各地で 2011 年から 2018 年までの期間に得られた絶対重力測定データを扱った．他の地域，他の時期の絶対重力測定データ，および相対重力測定のデータについては，次回以降の報告で順次，扱う予定である．

謝　辞

本論文で扱った絶対重力測定データは，東京大学地震研究所の大久保修平教授（現・名誉教授）のリーダーシップのもと，地震研究所の重力チームが協力して取得したものである．それぞれの測定地点においては，管理者あるいは共同研究者の方より多大なご協力をいただいた．本研究は，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1次および第2次）」の助成を受けたものである．

参考文献

Francis, O., T.M. Niebauer, G. Sasagawa, F. Klopping and J. Gschwind, 1998, Calibration of a superconducting gravimeter by comparison with an absolute gravimeter FG5 in Boulder, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 7, 1075–1078. https://doi.org/10.1029/98GL00712

Hinderer, J., D. Crossley and R.J. Warburton, 2015, Superconducting Gravimetry, in “*Treatise on Geophysics*”, 2nd edition, edited by G. Schubert, Elsevier, pp. 59–115.

https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00062-2
Imanishi Y., K. Nawa, Y. Tamura, H. Ikeda, R. Honda, T. Okuda and M. Okubo, 2018, Combined use of a superconducting gravimeter and Scintrex gravimeters for hydrological correction of precise gravity measurements: a superhybrid gravimetry, in "*International Association of Geodesy Symposia*", Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/1345_2018_31
今西祐一・西山竜一・本多　亮・田村良明，2021，絶対重力計 FG5 #109 と#241 の器差の検定について–東京および富士山における相互比較–，測地学会誌，**67**，18–28. https://doi.org/10.11366/sokuchi.67.18
今西祐一・西山竜一・本多　亮，2022，富士山における 2 台の FG5 による絶対重力測定（2022 年 9 月）―相対重力計検定ラインの構築および FG5 の器差検定―，東京大学地震研究所彙報，**97**，1–11. https://doi.org/10.15083/0002005972
今西祐一，西山竜一，本多　亮，2023，絶対重力計を用いた重力鉛直勾配の測定，測地学会誌，**69**，8–17，2023. https://doi.org/10.11366/sokuchi.69.2
今西祐一・西山竜一・本多　亮・丸藤大樹・名和一成，2024，松代における絶対重力測定との比較による超伝導重力計 CT #036 および iGrav #028 の感度検定，測地学会誌，**70**，13–25. https://doi.org/10.11366/sokuchi.70.13
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. https://doi.org/10.11366/sokuchi1954.47.243
Mäkinen, J., H. Virtanen, M. Bilker-Koivula, H. Ruotsalainen, J. Näränen and A. Raja-Halli, 2015, The effect of helium emissions by a superconducting gravimeter on the rubidium frequency standards of absolute gravimeters, in "*IGFS 2014*", International Association of Geodesy Symposia, vol 144, edited by S. Jin and R. Barzaghi, Springer, 45–51. https://doi.org/10.1007/1345_2015_205
Niebauer, T.M., G.S. Sasagawa, J.E. Faller, R.L. Hilt and F. Klopping, 1995, A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, **32**, 159–180. https://doi.org/10.1088/0026-1394/32/3/004
大久保修平，2001，ハイブリッド重力観測で追う地震・火山活動 – 2000 年三宅島火山活動と伊豆諸島群発地震活動，地震ジャーナル，**31**，47–58.
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. https://doi.org/10.1029/97GL00217
鬼澤真也・西山竜一・今西祐一・大久保修平・安藤　忍・長岡優・島村哲也・平山康夫・石原昂典・松田健助・金子祐也・上田義浩・谷田部史尭・渡邉篤志・安藤美和子・坂下至功，2022，伊豆大島における火山活動の解明と活動評価への適用に向けた合同重力観測，東京大学地震研究所彙報，**97**，13–32. https://doi.org/10.15083/0002006042
高木　悠，2018，地震によって地球内部に生じる粘弾性変形の球対称モデルにおける理論計算，学位論文，東京大学. https://doi.org/10.15083/00077947
Tamura, Y., T. Kazama, R. Nishiyama, K. Matsuo and Y. Imanishi, 2023, Postseismic gravity changes after the 2011 Tohoku earthquake observed by superconducting gravimeters at Mizusawa, Japan, *Earth Planets Space*, **75**. https://doi.org/10.1186/s40623-023-01901-9
Warburton, R.J., H. Pillai and R.C. Reineman, 2010, Initial results with the new GWR iGrav™ superconducting gravity meter, in "*IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2010)*", 22–25 June 2010, Saint Petersburg, Russia.
山本宏章・宮原伐折羅・吉田賢司・菅原安宏，2018，国土地理院の重力測量，国土地理院時報，**131**，21–52. https://doi.org/10.57499/JOURNAL_131_02

(Received April 16, 2025)
(Accepted July 14, 2025)

付　録

1.　各地点における測定の特記事項について

以下に，各地点における絶対重力測定データに関する特記事項について述べる．日時の時刻系は UTC である．

1.1　八戸

2012 年の測定において，7 月 10 日 11 時ごろから 23 時ごろまで，前後の時間帯に比べて重力値が約 7 μGal 大きくなっており，異常があったと考えられる．

2013 年の測定において，setup height は 114.5 mm と記録されたが，正しくは 120.5 mm だった可能性がある．

2014 年の測定において，setup height は 121.5 mm と記録されたが，正しくは 127.5 mm だった可能性がある．6 月 18 日 05:25 以降，重力値が異常である．

1.2　本荘

2014 年の測定において，6 月 25 日 10:52 から 23:28 まで，重力値が異常である．

1.3　江刺

2012 年の測定において，7 月 2 日 07:31 から 07:48 まで（最初のセット），重力値が異常である．

2014 年の測定において，setup height は 135.5 mm と記録されたが，正しくは 141.5 mm だった可能性がある．

1.4　水沢

特記事項なし．

1.5　仙台

2016 年 7 月の測定において，7 月 1 日から 7 月 2 日 23 時までは干渉計ビームの鉛直が大きくずれており（ログノートの記述による），重力値が異常である．

1.6　蔵王

2013 年の測定において，setup height は 124.0 mm と記録されたが，正しくは 130.0 mm だった可能性がある．7 月 12 日 12:04 から 12:16 までのドロップは，レーザーがF'にロックしていたと考えられる．

2016 年の測定において，7 月 11 日 23 時（UTC）までドロップごとのばらつきが非常に大きい（スーパースプリングの動作に異常があったようだ）．期間を通じてレーザーのホッピングが頻発しており，測定当時の状況

を完全に復元してデータを修正することは困難である．

2. 重力加速度の推定値について

本論文で扱った公開データは，ソフトウエア‘g9’から出力されたままのものであり，事後の編集や加工は施されていない．ユーザーは，独自の方法で drop データを処理して，それぞれの年，地点における重力加速度の推定値を評価することができる．本論文の趣旨は，そのために必要なデータおよびメタデータを提供することである．

しかし，「1 つの数値としての重力加速度の測定値だけが知りたい」というニーズもあるだろうと考えられる．そこで，本論文の趣旨からは逸脱するが，筆者が自分の流儀にしたがって drop データを解析して得たそれぞれの年，地点における重力推定値を，参考資料として示すことにする．

解析方法に関して，注釈が必要なのは主に 3 つの点，つまり潮汐の補正，気圧の影響の補正，極運動の効果の補正についてである．

短周期潮汐の補正に関しては，各測定地点に対して，海洋潮汐荷重を計算するプログラムである GOTIC2（Matsumoto *et al.*, 2001）を用いて潮汐パラメーターを計算し，それを用いて理論潮汐を計算して補正をやり直した．‘g9’には Schwiderski モデルなどが内蔵されているが，GOTIC2 で補正をやり直すことにより，重力値に 1 μGal 程度の違いが出る場合がある．なお，6 つの地点のうち水沢については，超伝導重力計観測で決められたより正確な潮汐パラメーターがあるが，他の地点と統一するため，それは使用していない（Tamura *et al.*（2023）で行われたのとは処理方法が異なる）．

長周期潮汐の補正に関しては，それぞれの成分に対して，振幅ファクターを 1.0（DC 成分）および 1.16（DC 以外の各成分），位相をゼロとして理論値を計算して補正をやり直した．

気圧の影響の補正に関しては，他のデータや方法を使わず，‘g9’の出力のままとした．つまり，FG5 に内蔵された気圧センサーが記録した気圧データを用いて，アドミッタンスを 0.3 μGal/hPa として補正した．FG5 の気圧センサーは最大で 1 hPa 程度のオフセットを持ち，しかも周辺温度の影響が大きいことがわかっている．これにより，重力値に 1 μGal 程度かそれ以下の誤差が発生する可能性がある．地震研究所では，2019 年以降，絶対重力測定の際に外部の精密気圧計（Paroscientific 社製）を併用して，より正確な気圧データを用いた補正を行うようにしている．

極運動の効果の補正に関しては，IERS が発表している極位置のデータ（https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php）を使用し，各測定地点に対してデルタファクターを 1.16 として重力変化の時系列データを用意した．それを使って各ドロップの時刻に内挿することで瞬間値を評価し，補正を行った．

前項「1．各地点における測定の特記事項について」に記述した，異常と考えられる時間帯のデータは除外した．地震で乱れている時間帯のデータを一律に除外することはしていない．

以上のようにして処理されたドロップの重力値について，全体の平均値と標準偏差を計算し，平均値から標準偏差の 3 倍以上外れているものを outlier（外れ値）と見なして除外した．

Table A1 から Table A8 に，このようにして得られた，それぞれの年，地点における重力加速度の推定値を示す．重力値は，μGal 単位で，地上 130 cm の高さにおける値として示している．重力値の推定誤差は，有効ドロップの標準偏差を有効ドロップ数の平方根で徐することで評価したものである．本文で述べた系統誤差や setup height の誤りについての補正は，ここでは適用していない．重力値を床面の値に変換する場合には，Table 1 に示されているそれぞれの地点の重力加速度の鉛直勾配を使えばよい．Table A4 に示した水沢の結果は，Tamura *et al.*（2023）に記されているものとわずかに異なるが，これは前述のようにデータの処理方法が異なるためである．

Table A1–A8 に示した結果は，あくまでも一つの処理方法によるものであり，器差などの問題を除けば相対値として首尾一貫しているが，他機関によって測定された絶対重力値とそのまま比較できるものではない．

Table A1. Results of absolute gravity measurements at the Hachinohe station obtained by Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, over the period 2011–2018. Gravity values refer to the height of 130 cm above the floor. Corrections for the instrumental offset (+8.6 μGal in 2018) and possible errors in the setup heights have not been applied (see the main text). 1 μGal = 10^{-8} ms^{-2}.

Year	Effective number of drops	Mean gravity acceleration (μGal)	Standard deviation (μGal)	Standard error of mean gravity acceleration (μGal)
2011	14,382	980342367.731	33.03	0.275
2012	17,683	980342374.442	9.55	0.072
2013	8,740	980342351.794	9.03	0.097
2014	10,115	980342359.870	8.42	0.084
2015	9,590	980342355.068	9.41	0.096
2016A	13,964	980342356.901	22.45	0.190
2016B	—	—	—	—
2017	19,193	980342353.037	15.34	0.111
2018	13,372	980342370.773	13.25	0.115

Table A2. Same as Table A1 but for the Honjo station.

Year	Effective number of drops	Mean gravity acceleration (μGal)	Standard deviation (μGal)	Standard error of mean gravity acceleration (μGal)
2011	—	—	—	—
2012	—	—	—	—
2013	9,350	980151703.606	7.43	0.077
2014	8,354	980151695.959	10.82	0.118
2015	12,183	980151702.146	11.27	0.102
2016A	9,942	980151703.678	10.14	0.102
2016B	—	—	—	—
2017	13,000	980151704.079	6.47	0.057
2018	8,850	980151714.562	14.46	0.154

Table A3. Same as Table A1 but for the Esashi station.

Year	Effective number of drops	Mean gravity acceleration (μGal)	Standard deviation (μGal)	Standard error of mean gravity acceleration (μGal)
2011	12,465	980121359.602	12.24	0.110
2012	7,937	980121357.436	5.36	0.060
2013	12,650	980121344.376	9.22	0.082
2014	9,812	980121325.727	10.31	0.104
2015	8,523	980121334.823	7.80	0.084
2016A	—	—	—	—
2016B	—	—	—	—
2017	—	—	—	—
2018	—	—	—	—

Table A4. Same as Table A1 but for the Mizusawa station.

Year	Effective number of drops	Mean gravity acceleration (μGal)	Standard deviation (μGal)	Standard error of mean gravity acceleration (μGal)
2011	—	—	—	—
2012	—	—	—	—
2013	—	—	—	—
2014	—	—	—	—
2015	8,893	980146211.316	14.19	0.150
2016A	9,557	980146210.842	32.84	0.336
2016B	—	—	—	—
2017	10,687	980146207.872	13.28	0.128
2018	10,224	980146213.239	14.17	0.140

Table A5.　Same as Table A1 but for the Sendai-A station.

Year	Effective number of drops	Mean gravity acceleration (μGal)	Standard deviation (μGal)	Standard error of mean gravity acceleration (μGal)
2011	20,686	980065467.617	32.07	0.223
2012	14,201	980065463.031	15.14	0.127
2013	19,102	980065437.901	17.86	0.129
2014	9,691	980065426.262	15.81	0.161
2015	14,692	980065434.620	12.34	0.102
2016A	9,557	980065436.480	32.84	0.336
2016B	—	—	—	—
2017	—	—	—	—
2018	—	—	—	—

Table A6.　Same as Table A1 but for the Sendai-B station.

Year	Effective number of drops	Mean gravity acceleration (μGal)	Standard deviation (μGal)	Standard error of mean gravity acceleration (μGal)
2011	—	—	—	—
2012	—	—	—	—
2013	—	—	—	—
2014	—	—	—	—
2015	—	—	—	—
2016A	—	—	—	—
2016B	8,748	980064602.403	22.95	0.245
2017	13,000	980064599.505	12.84	0.113
2018	8,856	980064609.292	9.45	0.100

Table A7. Same as Table A1 but for the Zao-A station.

Year	Effective number of drops	Mean gravity acceleration (μGal)	Standard deviation (μGal)	Standard error of mean gravity acceleration (μGal)
2011	—	—	—	—
2012	—	—	—	—
2013	12,536	979802014.433	10.99	0.098
2014	6,836	979802026.114	10.18	0.123
2015	9,907	979802016.962	11.92	0.120
2016A	3,536	979802022.868	6.93	0.117
2016B	—	—	—	—
2017	—	—	—	—
2018	—	—	—	—

Table A8. Same as Table A1 but for the Zao-B station.

Year	Effective number of drops	Mean gravity acceleration (μGal)	Standard deviation (μGal)	Standard error of mean gravity acceleration (μGal)
2011	—	—	—	—
2012	—	—	—	—
2013	—	—	—	—
2014	—	—	—	—
2015	—	—	—	—
2016A	—	—	—	—
2016B	—	—	—	—
2017	13,460	979802025.861	7.78	0.067
2018	10,066	979802038.724	10.61	0.106