

国土地理院の重力測量
Gravity Measurements in Geospatial Information Authority of Japan

測地部 山本宏章¹・宮原伐折羅²・吉田賢司³・菅原安宏²
Geodetic Department Hiroaki YAMAMOTO, Basara MIYAHARA,
Kenji YOSHIDA and Yasuhiro SUGAWARA
地理地殻活動研究センター 宮崎隆幸⁴
Geography and Crustal Dynamics Research Center Takayuki MIYAZAKI

要 旨

国土地理院は、高精度で安定した重力値を提供するとともに国際的に合意された基準に基づく日本の重力基準網の構築を目的として、全国で絶対重力測定及び相対重力測定を実施している。1993年にはFG5絶対重力計を導入し、2001年からは絶対重力測定の国際標準との整合性を担保するために、FG5絶対重力計の国内比較観測を行うとともに、測定及びデータ処理手法の高度化を検討してきた。このように測定誤差を極力除いて安定した重力値を求める手法を迫及し、重力測量の精度及び信頼性を保っている。2016年には、こうした重力測量の結果を用いて「日本重力基準網2016(JGSN2016)」を構築した(吉田ほか, 2018)。

本稿では、高精度で信頼性のある測定を達成するための機器及び測定方法、並びに重力基準網の根幹である重力点の現状とその維持・管理の方針を解説するとともに、国土地理院のこれまでの重力測量の実績を報告し、今後の課題と展望を議論する。

1. はじめに

国土地理院は、国際的な合意に基づいて重力値を与える重力の基準「国際重力基準網1971(IGSN71: The International Gravity Standardization Net 1971)」(Morelli et al., 1974)に準拠した、「日本重力基準網1975(JGSN75: The Japan Gravity Standardization Net 1975)」(国土地理院, 1976)を構築し、日本に正確な重力値を与える基準として1976年に公表した。JGSN75は国内に重力値を与える基盤として広く活用されてきたが、構築時に国内で絶対重力測定の実績がなく、その重力値は海外から相対重力測定を通じて決定した値であったため、国内で信頼できる絶対重力測定を行って重力の基準を構築することが長く課題であった。そこで、国土地理院は、絶対重力測定に基づいた高精度な重力の基準を国内に展開することを目的として、JGSN75の公表後も高度化が進む機器及び技術を重力測量に取り入れてきた。国土地理院の重力測量は絶対重力計と相対重力計を用いて行うが、いずれもマニュアルに従うだけでは期待する精度の測定は難しく、機器の原理と構造を十

分に理解した上で、環境に起因する重力変化を適切に処理して初めて期待する精度が得られる。また、重力計は精密機器の集合であるため、各々の機器の適切な取り扱いが不可欠である。さらに、重力は様々な要因で一様でない変化をするため、様々な補正と化成処理を施して標準的な状態での値とすることで初めて比較が可能となる。測定技術及び処理手法は常に開発が進むため、測定の高度化に有効な技術は随時検証して導入し、また、補正・化成処理についても常に高度化を検討することで、重力値の品質の確保と向上に努めている。

本稿では、国土地理院の重力測量の測定方法、重力網の物理的な基盤である重力点の現状、さらに重力測量の実績を解説することで、重力測量の技術と成果の活用を容易にし、重力測量の更なる高度のための基盤構築に向けて今後の課題と展望を議論する。

2. 国土地理院の重力測量

国土地理院は、その場所の重力加速度を直接測定する絶対重力測定とあらかじめ重力値がわかっている基準点から重力の相対的な差を測定する相対重力測定の双方を実施している。絶対重力測定は主に基準重力点(FGS: Fundamental Gravity Station)で、相対重力測定は、主に一等重力点(GS: Gravity Station)で行っている。本章では、まず絶対重力測定、続いて相対重力測定について、原理、測定機器、測定方法及び精度確保のための校正・検定の詳細を述べる。

2.1 絶対重力測定

重力の絶対値は、真空中の物体の落下距離(位置) z と経過時間 t を測定することで求めることができる。これらの関係は v_0, z_0 を時刻 $t=0$ の初速度、初期位置とすると式(1)となる。正確な z_0 と v_0 をあらかじめ求めることは難しいため、自由落下中の3か所で z と t を測定して重力値 g とともに未知数として解くことで求める。3か所の測定点で位置 (t_1, t_2, t_3) と時間 (z_1, z_2, z_3) を測定すると、式(1)から重力値 g は式(2)となる。

国土地理院が絶対重力測定で用いるFG5絶対重力計(以下「FG5」という。)は、自由落下式で鉛直

現所属: ¹九州地方測量部, ²地理地殻活動研究センター, ³企画部, ⁴測地観測センター

に自由落下する試験落体の位置と時間を約 20cm にわたって計測して 1 回の落下の重力値 g を最小二乗法により決定する。

$$z = z_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (1)$$

$$g = \frac{2\{(z_3 - z_1)(t_2 - t_1) - (z_2 - z_1)(t_3 - t_1)\}}{(t_3 - t_1)(t_2 - t_1)(t_3 - t_2)} \quad (2)$$

一方、国土地理院が最初に導入した GA60 絶対重力計 (以下「GA60」という.) (Sakuma, 1971) は、投げ上げ式で、鉛直に投げ上げた物体が行う放物線運動を利用して重力値を測定する (図-1)。物体の速度 v は、式 (3) で表され、最高点 a に達した際の速度 $v_a = 0$ となることから、式 (3) に式 (4) を代入して式 (5) が得られる。

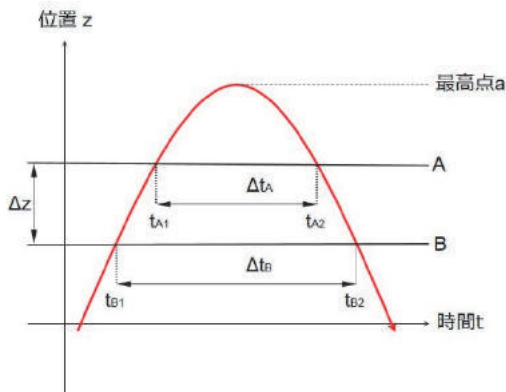


図-1 投げ上げた物体の放物運動

$$v = v_0 - gt \quad (3)$$

$$v_0 = gt_a \quad (4)$$

$$v = g(t_a - t) \quad (5)$$

物体がある場所を通過する速度は上昇と下降で同じであることから、測定点 A 及び B を通過する物体の速度をそれぞれ v_A , v_B , 上昇する際に点 A を通過した時間を t_{A1} , 下降する際の時間を t_{A2} , その間に要した時間を Δt_A , 同じく上昇する際に点 B を通過した時間を t_{B1} , 下降する際の時間を t_{B2} , その間の時間を Δt_B , AB 間の距離を Δz とすると (図-1), 物体の位置を表す式 (6) と前述の速度を表す式 (5) から式 (7) が導かれ, ここから式 (8) の重力値 g が求められる。

$$z = z_a - \frac{1}{2} g(t - t_a)^2 \quad (6)$$

$$2g\Delta z = v_B^2 - v_A^2 = \frac{1}{4} g^2(\Delta t_B^2 - \Delta t_A^2) \quad (7)$$

$$g = \frac{8\Delta z}{(\Delta t_B^2 - \Delta t_A^2)} \quad (8)$$

投げ上げ式では, 式 (8) が示すように 2 点の測定で重力値を求めることができるため, 距離がわかっている 2 点で物体が上昇時及び下降時に通過した時間を測定することで重力値を求めることができる。GA60 の導入時には, 距離 Δz を約 0.648mm と設定して, 約 500 点の通過点間で 1 回の投げ上げに 500 組の重力値を求めていた (村上・太島, 1981)。

2.1.1 機器と測定方法

絶対重力測定では, 前節で述べたように正確な時間と距離から重力値を求める。FG5 では, 距離はヨウ素安定化 He-Ne レーザ (以下「He-Ne レーザ」という.) で, 時間はルビジウム周波数標準器 (以下「Rb 原子時計」という.) で測定する。精度の良い測定は, 落下槽中の空気を十分に除去して落下を安定させ, 微弱な地盤動を除去して初めて可能となる。

(1) 距離と時間の測定

He-Ne レーザは, 国際度量衡委員会 (CIPM: Comité International des Poids et Mesures) が勧告するメートルの定義を実現する周波数安定化レーザの一つで, 波長が 633nm, 不確かさ (3σ) が 1×10^{-9} の測長用の光源である (松本, 2000)。レーザ共振器にヨウ素を配置して発振波数をヨウ素分子の吸収線に固定することで非常に安定した発振周波数を与える。He-Ne レーザは, 計量トレーサビリティの標準計測器に使われる高精度なレーザで, 計量法では, 2009 年 7 月まで国立研究開発法人産業技術総合研究所 (以下「産総研」という.) の He-Ne レーザを長さの国家標準 (特定標準器) と定めていた (瀬田, 1998)。

国土地理院では, 初期の数箇月を除いて Model 100 Iodine-Stabilized He-Ne laser (米国 Winters Electro-Optics 社製) を用いている。このレーザは, 波長が 633nm, 出力が 100~125 μ W, 周波数安定度が 2.5×10^{-11} で, 国際度量衡局 (BIPM: Bureau International des Poids et Mesures) が製造, 校正したヨウ素セルを用いている。国土地理院は, 概ね 3 年に一回, FG5 の装置一式を製造元の米国 Micro-g Lacoste 社に送ってメンテナンスを実施しているが, その際にレーザ周波数も検定して正確なレーザ波長を維持している。レーザ波長は, 15~25 $^{\circ}$ C で正確に維持される。

一方, 時間の測定では Rb 原子時計を用いる。Rb 原子時計は, ルビジウム原子の安定した固有周波数に水晶発振器の発振周波数を同期させた高精度な周波数標準 (時計) で, 長期安定度は 10MHz \pm 0.0005Hz/

月程度である。国土地理院は、1993～2006 年には FG5 の電源供給部に内蔵の Rb 原子時計 (Microsemi Corporation 社製 X72 ルビジウム発振器) を使用していた。しかし、国立天文台水沢観測センター (現国立天文台水沢 VLBI 観測所) において絶対重力測定を実施した際、重力点近傍の超電導重力計のヘリウムガスの影響で Rb 原子時計の周波数が変化して測定値に理論潮汐と明瞭な乖離が生じたため、ヘリウムガスの影響を受けない場所に設置できる外付けの Rb 原子時計 (Stanford Research Systems 社製 PRS10 型 Rb 周波数標準器, 以下「PRS10」という。) を 2007 年に導入した。2008 年には GPS 信号を受信して GPS 時刻に同期することで Rb 原子時計の中長期の周波数安定度を改善した。また、2014 年には、カタログ値で $10\text{MHz} \pm 0.0003\text{Hz/月未満}$ の長期安定度を持つ Chronos ルビジウム原子周波数基準発振器 (米国 TIMELORD 社製) を導入した。Rb 原子時計の周波数検定は、年度当初に VLBI (Very Long Baseline Interferometry; 超長基線電波干渉法) で用いる水素メーザ周波数標準器の周波数比較で 1 波長のずれに要する時間を測定して国土地理院が実施している。

FG5 では、マイケルソン干渉計の原理で距離と時間を測定して重力値を求める (図-2)。He-Ne レーザが発射したレーザ光は、まず $1/2\lambda$ 波長板を通過する。 $1/2\lambda$ 波長板は、入射光の偏光面に $\pi=\lambda/2$ の位相差を与える光学素子で、波長板の軸に方位角 θ° の光が入射すると、偏光面の電界の振動方向を $2 \times \theta^\circ$ 回転するため、レーザ光を物理的に回転させることなく偏光面を回転できる。回転角は、レーザ光が方位角 45° で入射した場合に最大で 90° となる。レーザ光は続いてアイソレータ (レーザ光の反射による逆方向の入射光を遮断してロックが外れないようにする光学素子) を通過する。次にレーザ光はビームスプリッタで強度の等しい二つのレーザ光に分けられ、一方は光を検出すると電流・電圧を発生する受光素子 (Avalanche Photo Diode, 以下「APD」という。) へ直接導かれ、もう片方は自由落下コーナーキューブ (以下「落体」という。) から参照用コーナーキューブを経由して同じく APD に導かれる。前者及びビームスプリッタで分かれる前のレーザ光を参照ビーム、後者を試験ビームと呼ぶ。ここに自由落下コーナーキューブが落下すると、落下に伴って試験ビームと参照ビームの位相が連続的に変化してフリンジ (干渉縞) が生じる。二つのビームの位相が一致するとフリンジが最大 (APD の出力が最大) に、位相が逆になると打ち消し合って 0 (APD の出力が 0) になる (図-3)。

FG5 は、Rb 原子時計を用いて APD の出力が最大となる時間を測定し、レーザ光の波長を距離の基準として落体の落下距離 z と経過時間 t を測定する。

落体は、約 20cm を 0.2 秒で落下し、その間に約 600 組の Z と T の測定が得られる。これらの測定に、重力鉛直勾配や光の速度などを補正し、式 (1) から最小二乗法により一回の自由落下の絶対重力値を求める。なお、最適なフリンジ出力は APD に依存するため、国土地理院では出力を 2016 年までは 300～400mV に、それ以降は 2.5～4.0V に調整しており、範囲外にある場合は干渉計内部のミラーで調整する。

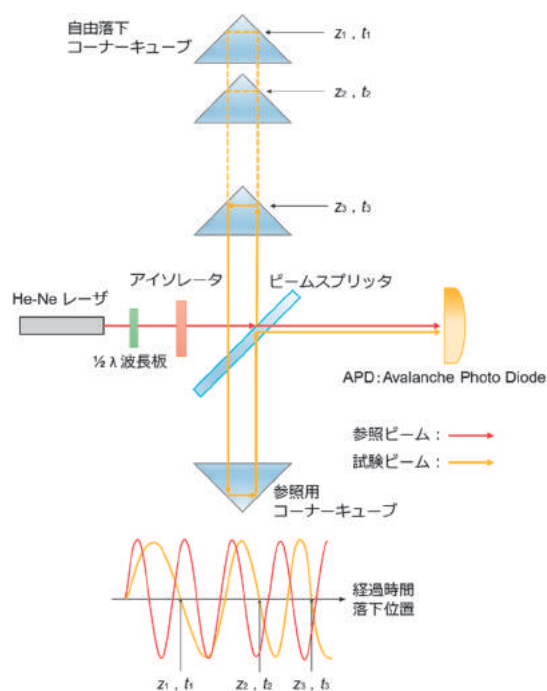


図-2 FG5 で用いるマイケルソン干渉計の概要

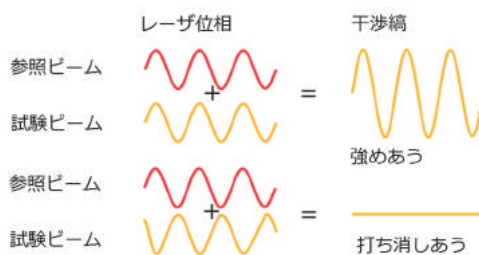


図-3 干渉縞 (フリンジ) 発生の様式図

(2) 落下槽の排気

FG5 で測定した重力値は、落下槽内に空気が残っていると空気抵抗によって落下が遅くなり実際より小さくなる。残留空気による抵抗は、物体が上昇すると重力値を大きくし、落下すると小さくするため、投げ上げ式の GA60 では上昇と落下で相殺されるが、落下式の FG5 では残留空気の影響を極力除くため、ターボ分子ポンプとイオンポンプを用いて排気を行っている。槽内の気圧が大気圧に近い場合、ターボ分子ポンプで空気の粗挽きを行う。また、槽内に水蒸気がある場合は、槽を加熱し、水蒸気を蒸発させ

る。槽内の真空度が $3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 以下に達したら、イオンポンプを用いて概ね $1 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 程度の真空度まで排気する。イオンポンプは振動も騒音も生じないため、測定を妨げずに稼働でき、また、12V 蓄電池で電源供給することで槽内の真空度を保持したまま運搬が可能で、測定点に到着後に排気が不要なため、作業の効率を改善できる。このほか、残留空気の影響をさらに取り除くため、落体をドラッグフリー槽（写真-1）という容器に格納して落下させている。落体をこの容器ごと駆動ベルトで持ち上げ下方に加速することで、落体が浮き上がって容器との間に約 3mm の隙間が生じ、残留空気の影響が除かれる。

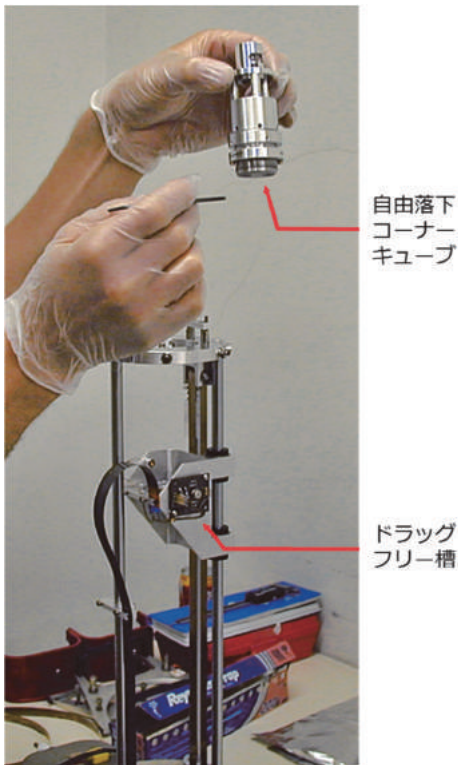


写真-1 FG5 の試験槽内部。2003 年、製造元の技術者によるメンテナンス中に撮影。

(3) 地盤振動の軽減

地盤振動は、重力測定の精度を劣化させる主要因の一つで、特に絶対重力測定では可能な限り取り除く必要がある。FG5 は、固有周期 30~60 秒（カタログ値）の主スプリングと支持スプリングからなるスーパースプリングを用いて地盤の振動を補償しており、主スプリングの先端には支持容器に格納された参照用コーナーキューブが吊り下げられている（図-4）。スーパースプリングは干渉計とは一体で設置するが、落下槽で生じた振動が伝わらないように落下槽とは分離している。支持容器は、サーボ機構を持ち、支持容器の相対運動を装置底部の電磁コイルで打ち消すことで地盤の鉛直方向の動きを補償する。

なお、サーボ機能を効果的に稼働するには、測定時の温度を一定に保つ必要がある。

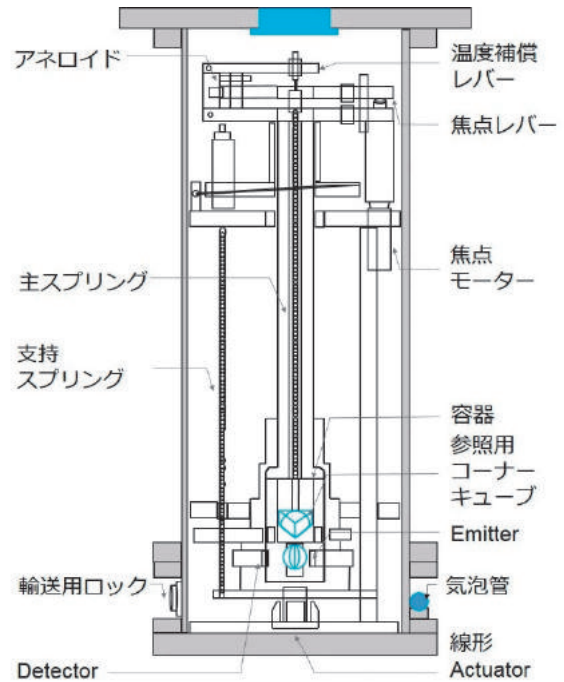


図-4 スーパースプリングの模式図

(4) 干渉計と落下槽の鉛直性確保

距離の測定に用いる He-Ne レーザは、干渉計内部のビームスプリッタで分離され、試験ビームは落下槽内の落体へ進む。このレーザ光路が自由落下の方向と一致しない場合、レーザ光の波長に見かけ上のずれが生じて測定値に誤差を生じる。測定の際は、干渉計と落下槽が接触しないように設置するが、干渉計と落下槽を鉛直に設置してレーザ光路の鉛直性を確保する必要がある。干渉計から入射する試験ビームと落体の落下の方向は、落下槽に備えられた気泡管を合わせることで概ね一致させ、さらに精密な調整のためにアルコールアライメントを行う（図-5）。

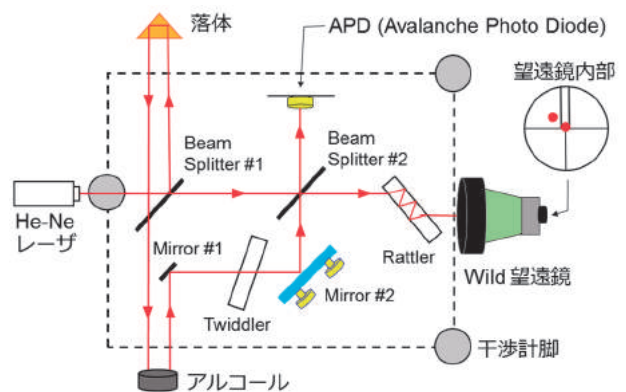


図-5 アルコールアライメントの原理と干渉計内部。望遠鏡内部の光点（赤丸）を一致させる。

アルコールアライメントは、落体が落下槽の下にある状態で干涉計の下部にアルコールを入れた容器を設置して干涉計の Wild 望遠鏡を覗き、干涉計の脚を調整して望遠鏡内に映った試験ビームと参照ビームの光点を一致させて試験ビームの鉛直性を確保する作業である。調整は地盤動がない環境では容易だが、日本では人間が感じない程度の人工的な地盤動が頻繁に生じているため、振動によるアルコールの揺らぎが望遠鏡内部の試験ビームの揺らぎを生じて調整が困難になる。レーザ光路が自由落下の方向とずれた場合、レーザ光の波長が大きく測定され、重力の測定値は見かけ上小さくなる (図-6)。

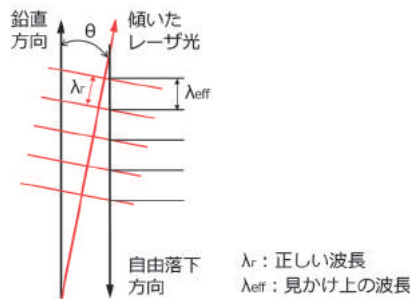


図-6 レーザの鉛直性と波長の関係

鉛直から θ 傾くとレーザ光の波長は概ね θ 大きくなるため、例えば、調整不足で約 9 秒の傾きが生じると測定値は約 $1\mu\text{Gal}$ 減少する。この誤差は、測定中に継続する系統誤差となるため、アルコールアライメントの調整には、細心の注意が必要である。

(5) 測定方法

設置を確認した後、FG5 付属のソフトウェアで自動制御を行って絶対重力測定を開始する。制御には、導入から 2003 年頃までは「Olivia」を用いたが、その後、「g」を用いている。「g」は製造元により度々更新され、現在は Version 9.0 である「g9.0」を使用して FG5 の制御と重力値の計算処理を行っている。

FG5 の測定では、ドラッグフリー槽の 1 回の落下に約 0.2 秒、落下したドラッグフリー槽を駆動ベルトで持ち上げて次の測定が可能となるまでに約 2 秒を要する。原理的には 5 秒に 1 回の測定が可能だが、駆動ベルトの磨耗等による消耗や地盤動の影響を避けるためには、経験上、一定以上の間隔を空ける必要がある。導入時は落下間隔を 10 秒としたが、1996 年頃からは間隔を 15 秒、落下 160 回を 1 セットとして 40 分の連続測定を行った後、測定を 20 分間停止して次のセットを開始する測定方法とした。2001 年には、上記の測定方法で 24 セットを行った 24 時間を 1 セッションとし、標準的な総観測数を 6 セッションと定めた基準重力測量作業規程 (案) を整備した。この規程 (案) に従い、観測期間中の 7~10

日間に、約 20,000 回以上の有効落下数を得ている (吉田ほか, 2018)。絶対重力測定では、測定環境による地盤振動、地下水や降雨の影響など、現時点で測定値から取り除くことが難しい様々な誤差要因があるため、数多くの測定を統計的に平均化して誤差を除いた絶対重力値を得ることを目的に、多くの測定数を標準としている。

2.1.2 重力鉛直勾配を用いた重力値の化成計算

FG5 の約 20,000 個の重力データを用いて絶対重力値を求める計算では、固体地球潮汐、極運動、大気圧及び器械高は「g9.0」を、海洋潮汐は「GOTIC2」 (Matsumoto et al., 2001) を用いて影響を補正する。さらに、補正後のデータに統計処理を施して最終的な重力値を求める (吉田ほか, 2018)。その後、重力値を物理的に参照可能とするため、重力鉛直勾配を用いて基準重力点上に化成する。本項では、重力鉛直勾配の測定について述べる。

(1) 重力鉛直勾配の概要

国土地理院が公表する重力値は、利用者が重力測定の際に参照可能とするため、重力点の金属標上面 0.0m の値としている。一方、FG5 の測定では、落下槽の中に収められた落体の最高点 (落下開始位置)、すなわち基準重力点の直上約 1.30m の高さでの重力値が得られる。そのため、重力値を公表する際には、重力値を基準重力点の金属標上面 0.0m に化成する必要がある。正規楕円体がつくる正規重力は地球上で一定と仮定され、重力鉛直勾配は、 0.3086mGal/m となるが、実際の重力鉛直勾配は周囲の質量の不均質を反映して重力点ごとに異なる。そこで、基準重力測量では、主にスプリング式のラコスト G 型重力計 (以下「ラコスト重力計」という。) を用いて全ての基準重力点上で重力鉛直勾配を測定している (写真-2)。



写真-2 ラコスト重力計による重力鉛直勾配の測定風景 (2003 年京都 C)。重力点直上 1.20m で観測。

(2) 重力鉛直勾配の測定方法と計算

重力鉛直勾配の測定は、2 台以上のラコスト重力計を用いて重力計毎に 2 セット以上行う。1 回の測定では、読定単位 0.001mGal で 1 視準 1 読定を 2 回行って平均値を求める。読定値の較差の許容範囲は、0.010mGal である。この測定を下は基準重力点上の 0.00m、上は基準重力点を通る鉛直線の直上 1.20m で行い、下→上、上→下の 1 対回を 5 回で 1 セットとして 2 セット以上を行う。また、下、上それぞれの測定後には相対重力計の器械高を mm 単位で測定し、フリーエア勾配で器械高を補正する。補正計算は、後述の重力鉛直勾配計算プログラムで行う。

重力鉛直勾配には、地球潮汐補正を行う必要がある。国土地理院は、GA60 で使用していた HP-BASIC 用プログラムを MS-DOS 用に改良した Fortran プログラムをもとに独自に開発、改修した「Gvg_dos12」を計算に用いている。「Gvg_dos12」では、「TIDEG」(Tamura, 1982) を用いて地球潮汐を補正し、相対重力計に固有のスケールファクター (以下「SF」という。) を加味してセット毎の平均値と標準偏差を計算し、最終的に 1 セットの測定回数と標準偏差を重量とした平均値を基準重力点の重力鉛直勾配としている。

(3) 重力鉛直勾配の測定精度

基準重力点の重力値はラコスト重力計で測定した重力鉛直勾配を用いて金属標上に化成するため、公表する重力値の精度は、ラコスト重力計の測定精度に依存する。カタログによる FG5 の測定精度は、FG5 間の整合で 2 μ Gal、確度は、振動が少ない場所での測定では 3.75 分間で 1 μ Gal とされている (山本ほか, 2018)。一方、ラコスト重力計の 1 回の測定の精度は 30 μ Gal 程度で、絶対重力計と比較すると 1 桁程度低い (宮原ほか, 2018)。

実際に、1995～2016 年 2 月の間に FGS で実施した重力鉛直勾配測定の平均値の標準偏差の度数分布を図-7 に示す。なお、地殻変動や火山に伴う重力変化の検出を目的とした繰り返し測定は除く。

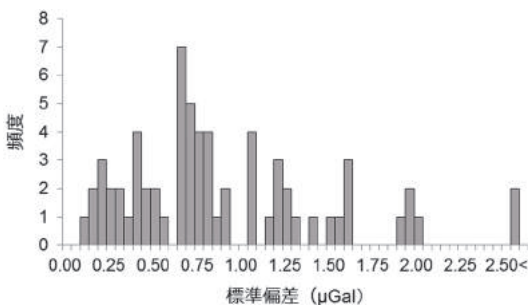


図-7 重力鉛直勾配の平均値の標準偏差分布 (ラコスト重力計)

各基準重力点では、FG5 の測定精度を可能な限り維持するため、重力鉛直勾配測定の測定セット数を定め、複数台のラコスト重力計の測定から重力鉛直勾配を計算し、その値を用いて基準重力点の金属標上面 0.0m の重力値を求めている。この測定には最低 1 日を要し、目視による測定を繰り返すため大変な労力を伴うが、図-7 では、半数近くが標準偏差 1 μ Gal を超えており、FG5 の測定精度をラコスト重力計の測定で維持することの難しさが分かる。

このように、基準重力点では FG5 の精度で測定しても、ラコスト重力計の精度で得た重力鉛直勾配を用いて重力点上 0.0m に化成するため、利用者が参照する重力値の精度は数 μ Gal となってしまう。こうした理由から、公表している基準重力点の重力値は 0.01mGal 単位となっている。FG5 の測定精度を維持した状態で重力値を基準重力点金属標上に化成する手法及び機器の導入が課題である。

(4) 重力鉛直勾配が重力値に及ぼす影響

国土地理院が 1995～2016 年 6 月に実施した基準重力測量では、7 点の基準重力点で 3 回以上の繰り返し測定を実施している。繰り返し測定において、重力鉛直勾配の測定値のばらつきが重力値に及ぼす影響を長岡 FGS の測定から見積もった。

表-1 に長岡 FGS で実施した 4 回の繰り返し測定の結果を示す。長岡 FGS では、2004 年 8 月に基準重力測量を実施した直後の 10 月に平成 16 年新潟県中越地震が発生したため、翌 5 月に地震に伴う重力変化の把握を目的に 3 回目の測定を実施した。重力鉛直勾配の測定値は、2008 年 10 月の測定で最大、2004 年 8 月に最少で、較差は 0.2157 μ Gal/cm である。

表-1 長岡 FGS の重力鉛直勾配

測定年月	測定値 μ Gal/cm	標準偏差 μ Gal	備考
1997 年 9 月	-3.0280	0.80	2004 年 10 月
2004 年 8 月	-3.0282	0.54	新潟県中越地震
2005 年 5 月	-2.9596	1.97	2007 年 7 月
2008 年 10 月	-2.8125	1.25	新潟県中越沖地震

一方、FG5 の器械高 (干渉計の基準面から落体の基準面までの高さ) は、機器毎に若干異なり、その差は最大 3mm 程度である。また、各測定点で FG5 を設置する際、干渉計と落下槽を完全に分離するために三脚で落下槽を持ち上げることで生じる設置時の差は最大 2mm 程度である。これらから、FG5 では、測定毎に絶対重力値の測定位置 (高さ) に最大 5mm 程度の差が想定される。

設置時の測定位置に生じる差 5mm によって重力鉛直勾配の差が重力値に与える影響は、長岡 FGS の場合、 $\pm 0.10785\mu$ Gal となる。これは、FG5 の測定

精度と比べて非常に小さく、同一点で重力の時間変化を把握する場合は、FG5の測定精度を十分に生かした比較が可能であることが分かる。一方、長岡FGSで重力鉛直勾配を用いて重力値を測定位置から約1.30m下方の基準重力点の金属標上面0.0mに化成した場合、重力鉛直勾配の差が重力値に与える影響は、 $28.041\mu\text{Gal}$ となる。これは、FG5の測定精度に対して無視できない大きさの誤差であるため、FG5間で重力値を比較する際には、測定位置での値を用いることが望ましい。

(5) 重力水平勾配の測定

絶対重力の測定中は基準重力点上にFG5を設置するため、基準重力点を出発点とする相対重力測定はできない。そこで、1995年から現在まで、測定中には基準重力点周辺に仮点(Temporary Point, 以下「TP」という。)を設置し、TPと近隣の一等重力点間の相対重力測定を行っている。TPと基準重力点間の相対重力測定は、3台のラコスト重力計を用いて10往復程度行い、重力計毎の重力差(重力水平勾配)を求めている(図-8)。図-8の赤のFGS(A)では、絶対重力の測定中にはFGS(A)の上にラコスト重力計を設置できないため、TP(A)を設け、近隣のGS(a)～(c)及びFGS(B)の金属標直上で相対重力測定を行う。次に、赤のFGS(B)で絶対重力を測定する時は、TP(B)を設け、近隣のGS(b)、GS(c)及びFGS(A)の金属標上で相対重力測定を行う。なお、JGSN2016の構築では、TPは、一等重力点と同様に独立した重力点として扱い網平均計算を行っている(吉田ほか, 2018)。

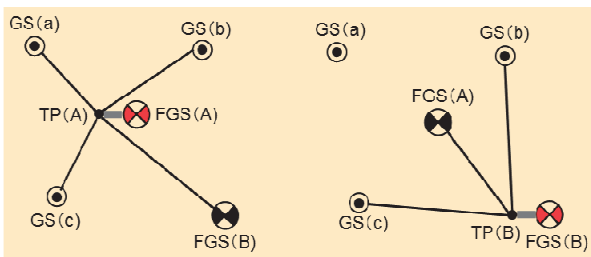


図-8 TPと基準重力点(FGS)との関係

2.1.3 FG5の国内比較観測

(1) FG5国際比較観測の目的と経緯

国土地理院の3台のFG5(#104, #201及び#203)は、機器固有の系統誤差を検証して絶対重力値の信頼性を確保するため、相互比較観測によって国際観測と整合性を確認している。絶対重力計の国際相互比較観測は、1987年8月の第19回国際測地学・地球物理学連合(IUGG: International Union of Geodesy and Geophysics)総会で構成組織の国際測地学協会(IAG: International Association of Geodesy)が、絶対

重力計の従来の国際比較で判明した可搬型絶対重力測定装置の系統誤差について誤差要因の調査の必要性を認識したことを受け、1989年にBIPMが決議した第3回の国際比較観測から始まった(IAG Resolutions, 1987)。国土地理院は当時、GA60を所有していたため、1989年にIAGから参加要請があったが参加できず、日本からは国立天文台水沢観測センターの可搬型絶対重力計の2号機が参加した(Boulanger et al., 1991)。国土地理院は、1994年BIPMと協議し、GA60及びFG5をBIPMへ輸送して国際比較測定を実施した(山本ほか, 2018)。

(2) FG5国内比較観測への呼びかけ

国土地理院は、絶対重力測定の国際標準との整合性を確保する必要性は認識していたが、1994年以降は絶対重力計の国際比較観測(ICAG: International Comparison of Absolute Gravimeters)に参加していない。一方、目的や要求精度は異なるが、FG5を保有する国内機関が増えてきたことから、地盤が安定した場所で同時に複数のFG5が設置できる測定環境として国民宿舎「つくばね」(茨城県石岡市, 図-9)の第一小ホールを借用して、2002年2月、国土地理院、東京大学地震研究所、京都大学大学院理学研究科、産総研地質調査総合センターの4機関、5台のFG5を用いて初の国内比較観測を実施した。これを契機に、国内のFG5保有機関の参加のもと、2015年4月まで国内比較観測を継続した。



図-9 「つくばね」の位置(FG5国内比較観測の会場)

比較観測の開始時には、ICAGに参加したFG5が比較観測に参加していなかったため、国土地理院は2002年9月、産総研質量力標準研究室において国土地理院のFG5#104と同研究室のFG5#208の比較観測を実施した。FG5#208はFG5#213とともに2001

年の ICAG に参加している。観測は、地盤が軟弱でノイズが大きい環境を考慮して主に週末に行い、FG5 の位置を入れ替えた測定は実施しなかったが、2 回の比較測定の平均値の較差は $3\mu\text{Gal}$ と良い整合性が得られた。この測定を通じて間接的に ICAG との整合性が確認された。

国内比較観測と ICAG の整合性の確認には、定期的な比較が必要なため、2002 年 2 月以降も 2015 年 4 月まで年 1 回の国内比較観測を実施した。2005 年からは、ICAG に参加した FG5#213 が国内比較観測に参加し、ICAG との整合性を確認できるようになった。FG5#213 は 2001 年 8 月、2005 年 9 月、2009 年 9 月及び 2013 年 11 月に ICAG に参加しており (Francis. O.et al., 2014), $-3.7\mu\text{Gal}$ 以内で国際比較参照値と整合している。

(3) FG5 国内比較観測の方法

「つくばね」の国内比較観測では、第一小ホール (図-10) に 5 点の観測点 A~E 点を直線上に配置し、各機関の FG5 を重複しないように設置して、各点で概ね 24 時間測定した後、順次 FG5 をほかの点に入れ替え測定した。また、重力値の計算に用いた諸元情報は表-2、測定重力値を A 点に化成するための点間重力差は表-3 のとおりである。点間の重力差の推定では、FG5 間の器差が無視できないため、ほかの 4 台の FG5 を用いて A~E 点で測定した重力値を用いて、2002 年 2 月の国内比較観測の際に FG5#104 で測定した A~E 点の重力値を基準に、FG5 間の器差と A~E 点間の重力差を最小二乗法により推定して求めた (平岡ほか, 2001 ; 西ほか, 2002)。

表-2 「つくばね」国内比較観測の諸元情報

位置情報	北緯 : 36 度 13 分 57 秒 (36.2325N) 東経 : 140 度 07 分 26 秒 (140.1239E) 標高 : 315m ※位置情報は 1/5 万地形図から読定
データ取得設定	1 セットあたりの落下数 : 120 回 落下間隔 : 10 秒 セット間隔 : 30 分
器械高の化成	床面直上 1.30m に化成 (G118 の測定値) 重力鉛直勾配 : $-3.371\mu\text{Gal}/\text{cm}$
固体潮汐δファクター	計算ソフト標準値 (ただし、永久潮汐については 1.0) DC : 1.000000, LONG : 1.160000 Q1 : 1.154250, O1 : 1.154240 P1 : 1.149150, K1 : 1.134890 N2 : 1.161720, M2 : 1.161720 S2 : 1.161720, K2 : 1.161720 M3 : 1.07338, M4 : 1.03900
気圧補正	アドミッタンス : $0.3\mu\text{Gal}/\text{hPa}$ 標準大気圧 : 975.98hPa ※標準大気圧は、IAG/IUGG 決議(1992 年)による式 $P_n = 1.01325 \times 10^5 \times (1 - 0.0065 \times H/288.15)^{5.2559}$ hPa
極運動補正	IERS Bulletin A
海洋潮汐補正	Schwiderski 11 分潮

表-3 観測点間の重力差

測点	A点との差 / μGal	標準偏差 / μGal
B	-6.3	0.3
C	-13.2	0.3
D	-22.8	0.3
E	-28.0	0.4

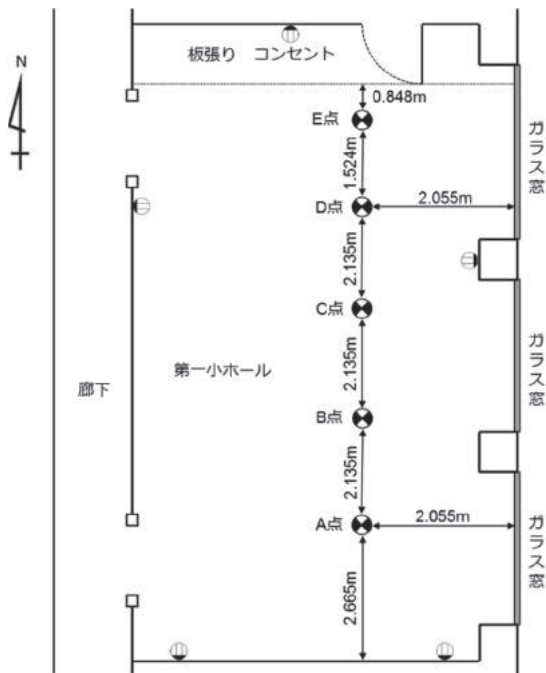


図-10 「つくばね」第一小ホール見取り図

(4) FG5 国内比較観測の成果

2002 年 2 月~2015 年 4 月に測定に参加した FG5 と機関を表-4 に、全ての測定結果を表-13 に示す。表-13 の重力値は、表-3 の点間の重力差を加味して A 点に化成した重力値である。また、参照値は測定日における A 点の平均重力値で、偏差は平均値からの差を表す。当初は、偏差の平均が $5\mu\text{Gal}$ 以上の FG5 が多いが、2004 年以降は、観測数や FG5 の台数が少ない時期はあるものの、偏差の平均が $5\mu\text{Gal}$ を超える FG5 は少なく、各機関の FG5 は $\pm 5\mu\text{Gal}$ 以内で整合していることが確認できる。

次に、ICAG に参加した FG5#213 の測定平均値を参照値とした、各機関の FG5 の偏差を表-14 に示す。測定日により偏りはあるが、参照値と各 FG5 の整合性は良く、特段の器差等は見られない。2009 年 4 月では、表-13 に示した FG5#213 の偏差の平均が $5.7\mu\text{Gal}$ と大きいため、表-14 では、ほかの FG5 の偏差が大きくなっている。

表-4 国内比較観測の参加機関

重力計	保有機関名称
FG5 #104	国土地理院
FG5 #109	東京大学地震研究所
FG5 #201	国土地理院
FG5 #203	国土地理院
FG5 #210	京都大学理学研究科
FG5 #212	東京大学地震研究所
FG5 #213	産総研 (計量標準総合センター)
FG5 #217	産総研 (地質調査総合センター)
FG5 #241	東京大学地震研究所
A10 #017	九州大学工学研究院

図-11 に A 点の重力値の時間変化を示す。当初 4 回の観測では±10μGal 程度ばらつくが、2004 年 4 月～2009 年 4 月の 5 年間は約 2μGal 以内で変化が小さい。重力値は、2009 年 4 月～2011 年 4 月の 2 年間に 12.8μGal 増加し、その後減少して最後の 2 年間は安定している。重力値が急増した 2 年間には、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (以下「東北地方太平洋沖地震」という。) が発生している。

国内比較観測は 2002 年に開始され、2015 年 4 月までの 14 年間に延べ 16 回、国土地理院を含む 5 機関 6 部門、9 基の FG5 と 1 基の A10 型絶対重力計 (Micro-g LaCoste 社製、以下「A10」という。) が参加した。実施場所の「つくばね」第一小ホールは、重力測定用の施設ではなく、昼夜間の気温差を避けるために空調に加えて窓ガラスに暗幕を付けて温度管理を行う、アース棒を直接地中に埋め込み安定化電源へ接地するといった措置が必要であった。一方、宿泊が可能で、夜間の連続測定中も観測者が容易に状況を確認できる利点もあった。

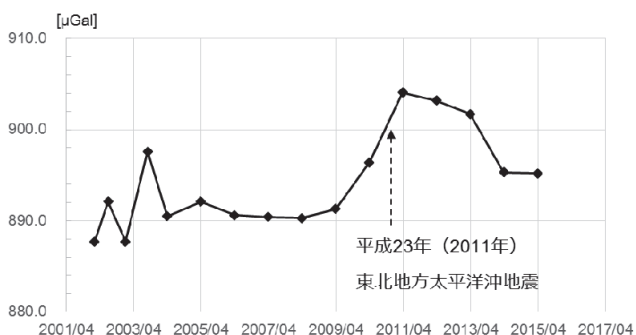


図-11 「つくばね」第一小ホール A 点の重力変化

(5) 石岡測地観測局重力測定室

2016 年 4 月以降は、国土地理院が茨城県石岡市に整備した石岡測地観測局で絶対重力計の国内比較観測を実施している。同施設には、6 台の FG5 を同時に測定できる重力測定専用の基台を備えた重力測定室が設けられている (図-12)。

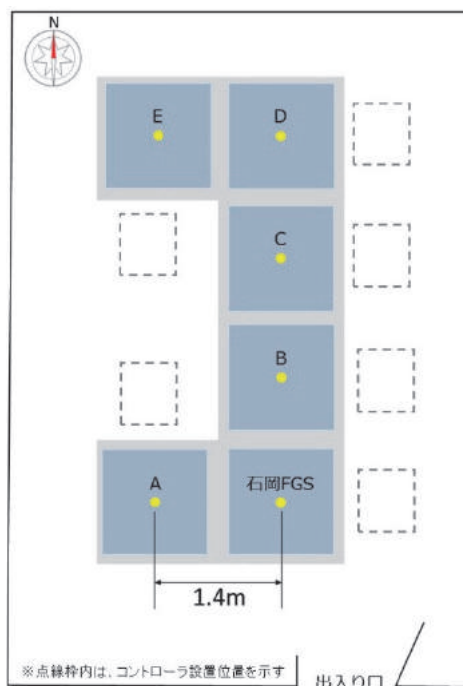


図-12 石岡測地観測局重力測定室見取り図

絶対重力測定に必要な Rb 原子時計の校正には、VLBI が用いる水素メーザ周波数標準器の信号を使用できる。また、2015 年 5 月に 6 つの基台の一つに基準重力点金属標 (石岡 FGS) を設置し、施設の屋根の施工前に 1 日間の GNSS 連続観測を、2016 年 4 月に VLBI 観測点を基点とする一等水準測量を実施して正確な位置と標高を決定した。重力鉛直勾配は 2016 年 4 月、ラコスト重力計 2 台 (G-83 及び G-118) を用いて測定した。こうした環境を活かして国内の重力基準の整合性を確保するため、国土地理院は 2016 年 4 月から石岡測地観測局で絶対重力計国内比較観測を継続している。観測の緒元情報を表-5 に、2016～2017 年の比較観測の結果を表-15 に示す。

表-5 石岡測地観測局国内比較観測諸元情報

位置情報	北緯: 36 度 12 分 33 秒 (36.2092N) 東経: 140 度 13 分 06 秒 (140.2183E) 標高: 114.1953m
データ取得設定	1 セットあたりの落下数: 120 回 落下間隔: 10 秒 セット間隔: 30 分
器械高の化成	基台直上 1.30m に化成 重力鉛直勾配: -3.6739μGal/cm
固体地球潮汐補正パラメータ/計算プログラム	WAHR-DEHANT-ZSCHAU/ ETGTAB 計算ソフトの標準値 (ただし、永久潮汐は 1.0)
気圧補正	アドミッタンス: 0.0003mGal/hPa 標準気圧: 999.61hPa
極運動補正	IERS Bulletin A
海洋潮汐補正	Schwiderski 11 分潮

2.2 相対重力測定

相対重力測定では、重力値自体は測定できないが、2地点の重力差が測定できる。水準測量と同様に、相対重力測定も1番目の重力点から出発して複数の重力点の間を往復測量する方法、環を形成して出発点に戻る方法がある。相対重力測定では、 i 番目の重力点の重力値 g_i について、 $g_i - g_1$ は測定できるが、測定を開始した点の正確な重力値 g_1 がわからない限り g_i を求めることはできない。相対重力測定は、正確な重力値が得られている点を基準に、相対重力計を使って点間の重力差を測定して重力値を求める方法である。本節では、相対重力測定の機器、測定方法及び検定について述べる。

2.2.1 機器と測定方法

(1) ラコスト重力計による一等重力測量

国土地理院は、JGSN75 構築後もラコスト重力計（写真-3）を主力に相対重力測定を実施している。1970年からは、一等重力測量で3台のラコスト重力計を用いた測定方法を確立した。1983年までの一等重力測量は、複数の重力点を数日間かけて往復する往復観測で行い、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ （ A は基準とする重力点、 B, C は観測点.）というように、往観測と復観測が複数の観測日にまたがっていた。この方法では、点間の距離によらず作業期間が短縮できる一方、往復で観測日や観測時間が異なるため、時間の経過に伴うラコスト重力計のスプリングの短期的な伸び（以下「ドリフト」という。）の量を把握することが難しい。このため、1984年以降は、点間の距離が長い路線では、一等水準点を路線に含めて点間を短くし、1日で往復できる路線を構成して一等重力測量を行った。これは、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ というように1日で基準点に閉塞する方法である。また折り返しの C 点では往観測と復観測の間で60分以上経てから観測を再開する方式とした。これにより、潮汐効果が異なるため往観測と復観測で独立した観測結果が得られる。さらに、往観測と復観測の観測時間がほぼ等しくなるように観測しドリフトを線形と仮定すると、往復を平均することで各読定値に含まれるドリフト量は等しくなり、重力差を求める際に読定値の差を取ることでドリフトを消去できる。測定は、現在も同様の方法で行っている。

一等重力測量は、1991年度に1回目の全国観測が終了した。その後は、絶対重力測定の本格化に伴い、基準重力点と一等重力点の往復観測で重力網を維持する測定方法となった。FG5による定常的な絶対重力測定を開始した2000年からは、基準重力測量と同時に一等重力測量を計画的に行い、2007年に1回目の観測を終了するまで8年間に延べ140点で一等重力測量を実施した。2007年以降については、維持

管理を含め第3章で述べる。



写真-3 ラコスト重力計（手前）と運搬ケース（奥）

(2) ラコスト重力計による二等重力測量

二等重力測量では、1~2台のラコスト重力計を用いて、読定を1観測2回に減らすことで1日の測定点を増やし、1983年の北海道地方の作業を最後に全国の一・二等水準路線での二等重力測量が終了した。また1970年頃からは、重力測量の空白域を補うことを目的に、三角点で重力測量を実施した。測定点は、天測点を中心に半径がそれぞれ3km未満に6点、3~7km未満に7点、7~16km未満に8点、その他の地域では100km²に1点の密度で選定した。観測は、一等重力点から三角点を数点経由して一等重力点に戻る片道観測で行った。1976年頃からは、国内の重力測定点の空白域をできるだけ少なくするため、経度6分、緯度4分のメッシュ（北海道は経度7.5分、緯度5分。ただし片道3時間以上を要する地域は除く。）に1点以上の密度で測定を行って重力データを蓄積し、重力ジオイドの作成に活用された。また、離島・島嶼部でも二等重力測量を行い、1978年頃から離島での作業を「海上重力測量」とした。その後、1994年の長崎県対馬を最後に、離島及び空白域の高密度化を目的とした重力測量は終了した。なお、二等重力測量については、第3章で補足する。

(3) SCINTREX 社製重力計による相対重力測定

国土地理院は、JGSN75を構築以降、全ての一等・二等重力測量をラコスト重力計で実施している。一方、1987年、カナダのSCINTREX社が相対重力計CG3（以下「CG3」という。）を開発した。CG3は、電源を投入すれば自動測定し、内部メモリにデータを記録することができる。パネル操作一つで、1秒

ごとにデータを測定し、内蔵メモリに記録したデータを外部出力できるうえ、衝撃に強く、クランプ（移動時などにスプリングを固定する操作）が不要で、携帯性もラコスト重力計と遜色がない。CG3 では、融解水晶のスプリング錘を吊るし、錘の変位を可変容量センサーで検知して錘の位置を常に一定にすることで、そのフィードバック電圧をデジタル信号に変換した測定値を内蔵メモリに記録し、同時にディスプレイに表示する。測定間隔は1秒単位で設定可能で、設定した測定時間が経過すると測定平均値と標準偏差を計算する。測定レンジは約7,000mGalとラコスト重力計と同じく地球上の重力差を網羅できる。

1991年10月、国土地理院は、器差等の重力計の課題の検証、測定の信頼性の向上を目的に、CG3を試験的に導入した。導入当初のCG3の分解能は0.01 mGalであったが、1993年1月、ソフトウェアのバージョンアップで0.005 mGalに向上した。一等重力測量作業で実施したラコスト重力計との比較試験観測の結果は以下である（都筑・山本，1993）。

- 1) 20路線のうち1路線で往復差の制限(0.05 mGal)を超過。ラコスト重力計と有意な差はない。
- 2) ドリフト量は0.017 mGal/時間で、ラコスト重力計の約5倍。
- 3) 測定精度は平均0.0094 mGalで、ラコスト重力計3台(0.0056~0.0094 mGal)より若干低い。

CG3は、分解能が0.005 mGalと低いため、重力測量に使用せず、南極観測用には2台のCG3-M（分解能0.001 mGal）を購入し、南極地域の相対重力測定に使用したが、一等重力測量での使用実績はない。

2006年3月、CG3-Mの機能強化機種であるCG5（分解能0.001 mGal、測定レンジ8000mGal、記録容量は4MB、フィードバック電圧信号（6Hz）の出力可能など、（写真-4））を2台購入し、南極地域の相対重力測定のほか、国内の一等重力測量や重力計検定作業で試験的に使用している。CG5は、自動測定ができることから、ラコスト重力計と比べて測定技術の習熟を要せず観測者の負担が軽減できるが、稀に測定値が安定せず、再測定が生じる問題がある。

2015年の筑波山点検線での検定作業から、この原因がCG5の内部恒温槽の温度の低下にあり、さらに温度低下は、電源供給用の二つの内部蓄電池の切り替えが機能しない時に生じやすいことが判明した。そこで、2016年2月、紀伊半島地区において、ラコスト重力計1台に替えてCG5（No.3000900049）を使用した一等重力測量を実施した。その結果を表-6に示す。測定は、60秒サンプリングを1測定とし、1観測点で3測定を実施した。22路線のうち、人工振動が激しい1路線では測定値がばらついて観測できず、1路線ではテア（スプリングの不規則な変化）

が発生し往復差が0.05mGalを超過した。残りの20路線は、ラコスト重力計2台の平均重力差と比べ、較差は最大0.033mGal、最小-0.001mGalと良好な整合性を得た。観測の最終日には、筑波山点検線と同様に、CG5の内部温度（単位 mGal/deg MK）が不安定となり、1測定の較差が作業規程（案）で定める制限0.01mGalを超過して3観測点で10回程度の再測が発生した。図-13に、再測時の重力値と内部恒温槽温度の関係を示す。



写真-4 CG5による測定風景

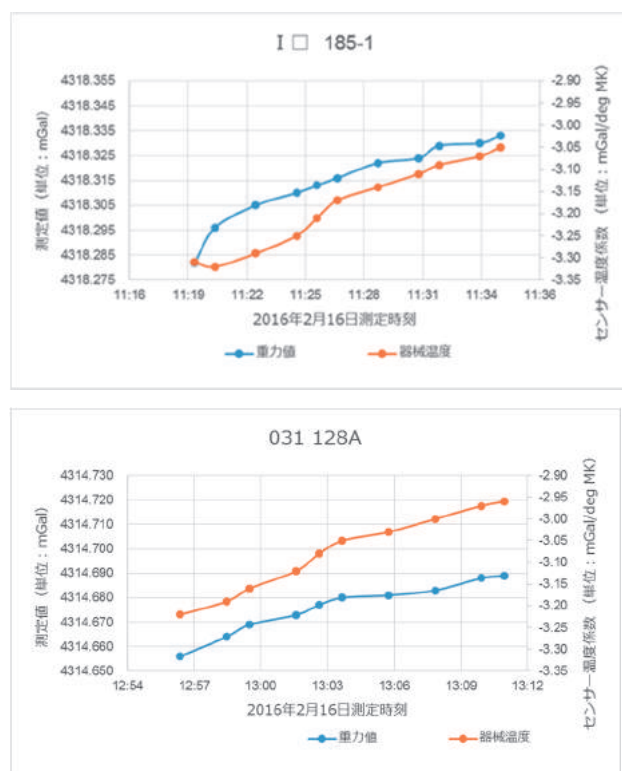


図-13 重力測定値とCG5器械温度（地球潮汐は補正済）

表-6 CG5 (No.3000900049) を用いた紀伊半島地区の一等重力測定の平均計算 (単位: mGal)

観測日 2016年	観測点	重力計		CG5	平均値	較差①	較差②
		G-83	G-118				
02/16	基41→9220	-1.758	-1.767	-1.765	-1.763	0.009	-0.002
	9220→9217	-5.278	-5.269	-5.283	-5.277	0.014	-0.010
02/17	古座(付)→4987	14.377	14.390	14.374	14.380	0.016	-0.010
	4987→4989	2.149	2.110	2.107	2.122	0.042	-0.023
	4989→基41	-1.334	-1.309	-1.289	-1.311	0.045	0.033
02/18	基33→和歌山GS	0.683	0.688	0.689	0.687	0.006	0.003
	和歌山GS→交271	-0.301	-0.307	-0.308	-0.305	0.007	-0.004
	交271→和歌山(付)	-18.558	-17.322	-17.304	-17.313	0.018	0.018
02/19	奈良GS→1399	-1.354	-1.364	-1.345	-1.354	0.019	0.014
	1399→1402	18.758	18.733	18.739	18.743	0.025	-0.006
	1402→京都加茂(付)	-1.290	-1.287	-1.296	-1.291	0.009	-0.008
02/20	4770→4771	-0.959	-0.955	-0.901	-0.957	0.004	
	4771→尾鷲(付)	-0.690	-0.698	-0.689	-0.692	0.009	0.005
02/24	167-037→167-033	2.464	2.366	振動大			
	167-033→鳥羽GS	5.694	5.709	5.700	5.701	0.015	-0.001
	鳥羽GS→鳥羽(付)	-5.503	-5.497	-5.511	-5.504	0.014	-0.011
02/25	1483→津GS	0.388	0.369	0.411	0.389	0.042	0.033
	津GS→1446	-0.609	誤記	-0.632	-0.621	0.023	-0.023
	1446→津(付)	1.977	誤記	1.983	1.980	0.006	0.006
02/26	岐阜GS→交185	1.061	1.072	1.048	1.060	0.024	-0.019
	交185→185-1	-0.169	-0.160	-0.150	-0.160	0.019	0.015
	185-1→岐阜A(付)	-3.630	-3.626	-3.656	-3.637	0.030	-0.028

※ 斜線は、テアのために除外した測定。平均値は、重力計3台の平均値。較差①は、重力計3台の最大値-最小値。較差②は、ラコスト重力計2台の平均値とCG5の差。

測定開始直後に温度が上昇すると、測定重力値も0.01mGalを超える幅で同様に上昇を続け、内部温度が-3.0℃を超えて上昇幅が小さくなると、測定重力値も0.01mGal程度の範囲で安定した。CG5の内部温度が安定するまでには15分以上を要した。内部温度が不安定になる原因は特定できていないが、こうした不安定な測定値は採用できず、CG5を使用するのであれば、引き続きCG5の特性を調査して理解する必要がある。表-6が示すように、CG5は、安定時にはラコスト重力計と同程度の結果が得られるうえ、サンプリング周波数6Hzの内部データ4成分(重力、傾斜2成分、内部温度)を記録、出力できるので、測定時に高周波の重力データを連続して記録・蓄積し解析することができる。

2.2.2 重力値の計算

相対重力測定の読定値には、補正が必要である。まず、製造元が提供するSFの定数表(図-14)を使い、読定値を重力差に換算する。

また、読定値を測定点上の値に化成するための器械高補正、読定時の大気圧補正及び固体・海洋潮汐補正を行う。補正後の値から地点間の重力差を計算する際に、往復測定に要した時間からドリフト量を推定し補正する。これら一連の処理は、国土地理院

が開発したプログラムを用いて行う。このほか、テアの処理や器械間の重力差の整合性の確認などを行い、点間の重力差を決定している(吉田ほか, 2018)。

CALIBRATION TABLE FOR G-1049
MILLIGAL VALUES FOR LACOSTE & ROMBERG, INC. MODEL G GRAVITY METER

COUNTER READING*	VALUE IN MILLIGALS	FACTOR FOR INTERVAL	COUNTER READING*	VALUE IN MILLIGALS	FACTOR FOR INTERVAL
000	000.00	1.02151	3600	3680.18	1.02430
100	102.15	1.02137	3700	3782.61	1.02441
200	204.29	1.02129	3800	3885.05	1.02452
300	306.42	1.02123	3900	3987.50	1.02462
400	408.54	1.02122	4000	4089.97	1.02471
500	510.65	1.02122	4100	4192.44	1.02480
600	612.78	1.02123	4200	4294.92	1.02488
700	714.91	1.02125	4300	4397.40	1.02498
800	817.03	1.02129	4400	4499.89	1.02506
900	919.15	1.02134	4500	4602.41	1.02514
1000	1021.30	1.02140	4600	4704.92	1.02522
1100	1123.44	1.02147	4700	4807.44	1.02531
1200	1225.58	1.02153	4800	4909.98	1.02538
1300	1327.74	1.02159	4900	5012.51	1.02546
1400	1429.90	1.02166	5000	5115.06	1.02552
1500	1532.06	1.02173	5100	5217.61	1.02558
1600	1634.23	1.02182	5200	5320.17	1.02562
1700	1736.42	1.02191	5300	5422.73	1.02565
1800	1838.61	1.02201	5400	5525.30	1.02567
1900	1940.81	1.02213	5500	5627.87	1.02567
2000	2043.02	1.02226	5600	5730.43	1.02567
2100	2145.25	1.02239	5700	5833.00	1.02566
2200	2247.49	1.02252	5800	5935.57	1.02565
2300	2349.74	1.02265	5900	6038.13	1.02563
2400	2452.00	1.02278	6000	6140.69	1.02562
2500	2554.28	1.02290	6100	6243.26	1.02557
2600	2656.57	1.02303	6200	6345.81	1.02550
2700	2758.87	1.02316	6300	6448.36	1.02536
2800	2861.19	1.02329	6400	6550.90	1.02522
2900	2963.52	1.02342	6500	6653.42	1.02507
3000	3065.85	1.02355	6600	6755.93	1.02503
3100	3168.22	1.02368	6700	6858.43	1.02475
3200	3270.58	1.02381	6800	6960.90	1.02458
3300	3372.97	1.02393	6900	7063.36	1.02438
3400	3475.35	1.02406	7000	7165.80	
3500	3577.75	1.02418			

*Note: Right-hand wheel on counter indicates approximately 0.1 milligal
03-03-1994
DLP
Reading Line: 2.50 Temperature: 53.7 C

図-14 製造元提供の定数表の例。器械毎に100mGal毎のSF(スケールファクター)が与えられている。

2.2.3 相対重力計の検定

相対重力計はスプリングに固有の誤差である SF があるため、ラコスト重力計では製造元から定数表が与えられている。この影響は、重力差の大きい測定点間の測定では測定精度を大きく超えるため、ラコスト重力計を保有する機関では、正確な補正量を求めることが重要な課題である（中川ほか，1977）。

(1) 東京－柿岡（筑波）検定線

国土地理院は 1988 年まで、年度当初に東京－柿岡間及び柿岡－筑波山間の重力検定線で主に SF の決定を目的に検定作業を実施した。路線は、東京 GS－火の見（千葉県松戸市）－三等三角点青山（千葉県我孫子市）－八坂神社（茨城県牛久市）－柿岡 GS（一筑波 GS, 国土地理院のつくば市移転後に追加）、柿岡 GS－柿岡地磁気観測所－つつじが丘－一等三角点筑波山の 2 路線で、東京 GS－柿岡 GS（一筑波 GS）間では 1988 年まで毎年実施した（図-15）。

この検定線の重力差は約 200 mGal で、緯度や標高の差ではなく関東地方の重力異常分布から生じている。国内で観測できる最大の重力差約 1,700mGal に対して、検定路線の重力差は僅かであるが、一・二等重力測量の際に 1 日の測定で得られる重力差は概ね 200 mGal 以内であるため、検定には十分である。また、複数のラコスト重力計を使用して重力差を求めて結果を比較することで相対的に定数の誤差を見積もることが可能で、この重力検定線による検定作業は、一等重力測量にとって有用であった。



図-15 ラコスト重力計の検定路線

(2) 日本検定線

国土地理院は、1989 年、国際重力網と結合した国

内重力網の確立を目的に、GA60 を用いて北海道から沖縄まで全国 10 点の絶対重力値を決定し、全国を縦断する「日本検定線」を設定した（図-16）。



図-16 GA60 による基準重力点及び日本検定線

1992 年までの 4 年間に、延べ 7 回（1989 年は全国を 1 回、それ以降は東日本と西日本に分けて毎年実施）の検定作業を実施した。検定では、測定データに対して、 δ ファクター 1.20 とした理論潮汐補正、線形ドリフト補正及び器械高補正を行い、GA60 で測定した絶対重力値から SF を求めた。表-7 に、各年の測定から求めた SF 示す。なお、SF は、基準重力差 $= f \times \text{測定重力差} + b$ の式で表すモデルを用いて推定した。ここで f は SF、 b は観測点における測定の系統誤差である。テアの推定は、年によって異なる。

表-7 から G118 及び G223 では 1×10^{-5} の精度で安定した SF が推定されたことが分かる。G553 及び G554 は、検定の間重力計の修理を実施しており、修理の前後に 1×10^{-4} 程度の有意な差が生じたが、その後 1×10^{-5} 程度の再現性を示した。修理を実施した重力計では SF が変化するため、新たに SF を決定する必要があり、後述の筑波山検定線で点検を行って SF を求めて重力測量に使用している。

検定では、羽田 GS－千歳 GS 間、伊丹 GS－鹿児島空港－那覇空港間は航空機、それ以外は自動車で重力計を輸送した。長距離の輸送に伴い重力計によってはテア等が発生し、これをモデルで除去、補正したが年度毎にばらつきが大きい。航空機輸送時の気圧応答、自動車による輸送、周期誤差等が原因と

表-7 日本検定線で求めたファクター（1989～1992年）

重力計	測定年 定数	1989年	1990年	1991年	1992年
G83	1.00221 ^{*1}				1.002154 ± 7.3×10 ⁻⁵
G118	1.00254	1.002607 ± 1.0×10 ⁻⁵	1.002695 ± 2.7×10 ⁻⁵	1.002652 ± 2.5×10 ⁻⁵	
G223	1.00300	1.000312 ± 0.6×10 ⁻⁵	1.000390 ± 2.4×10 ⁻⁵	1.000372 ± 2.2×10 ⁻⁵	
G553 ^{*2}	1.00059		1.000709 ± 2.7×10 ⁻⁵	1.000803 ± 2.1×10 ⁻⁵	1.000817 ± 1.8×10 ⁻⁵
G554 ^{*2}	1.00057		1.000505 ± 2.8×10 ⁻⁵	1.000308 ± 1.7×10 ⁻⁵	1.000394 ± 2.3×10 ⁻⁵
G564	1.00048	1.000400 ± 1.6×10 ⁻⁵	1.000359 ± 4.8×10 ⁻⁵		
G590			1.000526 ± 12.4×10 ⁻⁵		
CG3 ^{*3}				1.000089 ± 3.4×10 ⁻⁵	1.000506 ± 3.9×10 ⁻⁵

※1：修理前のSFは1.0005，修理後は筑波山点検線の値を暫定的に使用。

※2：1989～1990年に修理を実施後，1990年の測定を実施。

※3：1992年の東日本の観測後にバージョンアップしたため，西日本の測定値のみを使用。

考えられるが，航空機への重力計の持ち込みの際の特別料金など，経費が高く，国内で測定する重力差であれば，SFを日本検定線から個別に求めずとも，網平均計算の中で最小二乗法により推定すれば必要な精度が得られることが判明したため，現在は，日本検定線によるSF決定の作業は行っていない。1992年以降は，2009年に南極観測に携行したCG5を除き，日本検定線でSFを決定する作業は実施していない。

(3) 筑波山点検線

日本検定線でSFの決定作業を行っていた1989年4月，国土地理院は従来の東京－柿岡間の検定路線に代わる新たな「筑波山点検線」を設定した(図-17)。1～9の各測点に直径約3cmの真鍮製の鉤を設置し，10は一等三角点「筑波山」とした。点検線の重力差は，1989年4月，1990年2月，同年4月，1991年1月，同年4月の計5回の測定によって定め，5回の測定値から点間の重力差を計算して，1993年6月に筑波山点検線の重力差を決定した。

測定は5台のラコスト重力計(G118, G223, G553, G554及びG564)で行い，G83は多くの観測で往復差が0.05mGalを超えたため，計算から除いた。計算では，δファクターを1.20とした理論潮汐補正とフリーエア勾配を使用した器械高補正を行った。一方，複数の測定において，線形ドリフト補正を行った際に，点間の標準偏差が大きくなり，テアが発生した可能性の高いことが示唆されたため，ドリフト補正は行っていない。その代わりとして，重力差を往と復の片道観測に分けて隣接測点間の重力差を求めた際に，重力計毎の標準偏差が0.01mGalを超える測定値については，テアなど大きな乖離が生じたとして除去した。また，重力計のSFは，前述の日本検定線で1989～1990年に実施した検定から求めた表-8の値を使用した。



図-17 筑波山点検線位置図

こうして算出した重力計毎の点間の重力差から重力計の標準偏差を重量として平均値を計算し，筑波山点検線の重力差の成果(表-9)とした。なお，この重力差は2018年3月現在も使用している。

(4) 筑波山点検線の検証

筑波山点検線は，現在も年度当初の重力計の点検，

ラコスト重力計の修理後の点検に使用しているが、成果を定めてから 23 年が経過したことから、2007～2013 年の結果（図-17 の 1, 3, 7 及び 8 の 4 点）を用いて、筑波 FGS とつくばね C 点の絶対重力値を基準とした重力網平均計算を行って値を検証した（表-10）。網平均計算による重力値は、従来の成果と比較して絶対値で最大-0.016mGal の差を生じたが、相対的な重力差に大きな差はなく、この点検線が点間重力差の検定を目的とした路線であることを考えると実用に十分な精度で、これまでの検定は妥当であったと言える。しかし、表-10 の値は筑波 FGS のみを基準に求めたため、JGSN2016 との整合が確認できておらず、今後は、JGSN2016 に準拠した絶対重力値による成果の構築が課題である。

表-8 筑波山点検線で用いた重力計の SF（スケールファクター）

重力計	スケールファクター (SF)
G118	1.002683 ± 2.2×10 ⁻⁵
G223	1.000368 ± 2.2×10 ⁻⁵
G553	1.000709 ± 2.7×10 ⁻⁵
G554	1.000505 ± 2.8×10 ⁻⁵
G564	1.000386 ± 3.7×10 ⁻⁵

表-9 筑波山点検線成果表

測点名	重力差(mGal)	標高(m)
1 宝安寺	0.000 ±	28
2 三角点下	-7.819 ± 0.003	75
3 鳥居	-15.912 ± 0.005	115
4 火の見	-26.269 ± 0.005	165
5 駐車場	-41.974 ± 0.009	242
6 道路東側下	-54.855 ± 0.009	310
7 料金所	-76.325 ± 0.010	415
8 つつじが丘駅	-100.997 ± 0.011	530
9 女体山駅	-174.386 ± 0.014	825
10 一等三角点	-191.277 ± 0.015	876

表-10 筑波点検線の重力網平均計算結果（筑波 FGS 及びつくばね C 点を固定）

点名	網平均計算結果 [mGal] ※3	①点間重力差 [mGal]	②従来の重力差 [mGal]	①-② [mGal]
筑波FGS※1	979951.222			
1：宝安寺	979961.146	0.000	0.000	0.000
3：鳥居	979945.218	-15.928	-15.912	-0.016
7：料金所	979884.826	-76.320	-76.325	0.005
8：つつじが丘	979860.134	-101.012	-100.997	-0.015
つくばねTP	979906.398			
つくばねC※2	979906.334			

※1：重力値は JGSN2016 の値（吉田ほか，2018）。

※2：2014 年の国内比較観測の平均値（FG5#104, #213）。C 点直上 0.0m への化成には重力鉛直勾配-3.371μGal/cm を使用。

※3：網平均計算では SF（スケールファクター）を推定。

2.2.4 相対重力計の気泡管の調整

ラコスト重力計の錘の動きは、アイ・ピースを覗いた際にクロスヘア（図-18 の太い黒線）の動きとして観察できる。国土地理院は、クロスヘアを用いた眼視法と呼ばれる測定方法で測定を行っている。アイ・ピースの視野内には、目盛りが付され、測定ダイヤルを一定方向に回してクロスヘアを重力計毎に定められた目盛り線（Reading Line, 以下「R.L.」という。）に合致させ（図-18）、合致したカウンターの数値と測定ダイヤルの数値から値を読み取る単純な操作で測定を行う。そのため、ラコスト重力計の測定精度は、錘に取り付けられた梁と R.L.の測定時の状態で決まる。

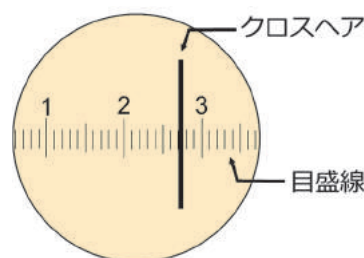


図-18 アイ・ピースの視野内. R.L.=2.7 の場合、測定ダイヤルを回してクロスヘアの左端を R.L.の 2.7 に合致させる。

図-19 にラコスト重力計の概略図を示す。ラコスト重力計は、重力計を水平に設置するためにロングレベルとクロスレベルの二つの気泡型水準器を持ち、測定は調整ノブを用いて重力計を水平に設置してから開始する。二つの気泡型水準器の気泡を予め正確に調整しておくことで、二つの気泡を中心に合わせ、クロスヘアを決められた R.L. に合わせる作業によってラコスト重力計の錘に取り付けられた梁と目盛り線の一つの水平面上に設置することが可能となる。この事前の調整が十分でないと測定誤差を生じる（志知，1985）。

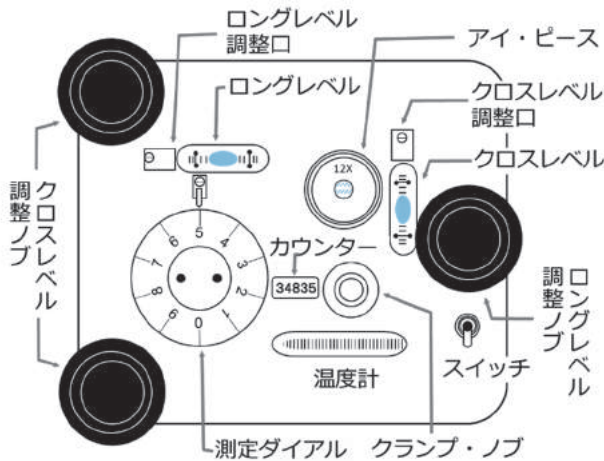


図-19 ラコスト重力計の概略図 (上面から見た場合)

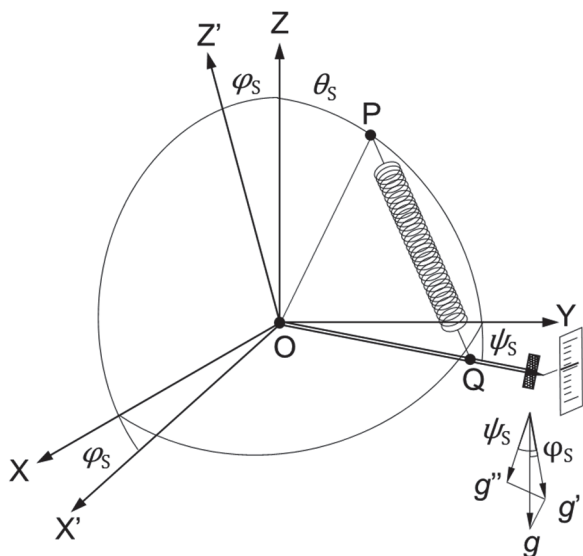


図-20 ラコスト重力計の錘の模式図 (志知, 1985).

図-20 にラコスト重力計の内部模式図を示す。X 軸及び Y 軸は水平面、Z 軸は鉛直方向を示し、ラコスト重力計の筐体の各方向は「r」を付して示す。

θ_0 を最適姿勢におけるオフセット角とし、Y' 軸は錘の回転軸と指定された R.L. を結ぶ方向、OQ 方向とする。ロングレベル方向に θ_s 、クロスレベル方向に水平から ϕ_s だけ傾いているとし、 ψ_s は錘が水平面からずれている角とすると、式 (9) が成り立つ。

$$\psi_s = \theta_s - \theta_0 \tag{9}$$

ψ_s は重力計のロングレベル方向の設定誤差になる。一方、クロスレベルの気泡を用いて重力計を設置した際に、重力計の筐体がクロスレベル方向に ϕ_s だけ傾いていた場合、 ϕ_s はそのまま重力計のクロスレベル方向の設定誤差になる。この時、アイ・ピースの中で観察されるクロスヘアは、錘が測定した

い g ではなく、その分力である g'' で釣り合った状態になる。そして錘の回転軸は OX' ではなく OX となる。ラコスト重力計には衝撃緩衝バネがあるため、重力計が傾いても回転軸が OX に固定されない。 ϕ_s が十分に小さい場合、支点 O、P 及び Q は、ともに一つの鉛直面内に設定されるため、図-20 のように設定された重力計の姿勢では、 g'' を測定してしまい、 g と g'' の差が測定誤差 Δg_s となる。この関係は式 (10)、式 (11) で表され、添字 s を省略して Δg を式 (12) で表す。

$$g' = g \cos \theta_s \tag{10}$$

$$g'' = g' \cos \psi_s = g \cos \phi_s \cdot \cos(\theta_s - \theta_0) \tag{11}$$

$$\Delta g = \frac{1}{2} g [\phi^2 + (\theta - \theta_0)^2] \tag{12}$$

式 (12) は、実際に測定される測定値が、本来測定されるべき真の測定値に対してどれだけ小さくなるかを表している。式 (12) をロングレベル及びクロスレベル方向毎に表すと、式 (13) 及び式 (14) となる。

$$\Delta g_\phi = \frac{1}{2} g \phi^2 \tag{13}$$

$$\Delta g_\theta = \frac{1}{2} g (\theta - \theta_0)^2 \tag{14}$$

国土地理院では、1987 年度当初から、人工ノイズが少ない筑波山麓で志知が考案した検定台 (志知, 1985) を用いてラコスト重力計の気泡管の検定を行っている。また、相対重力測定測量では、常に検定台を携行し、測定した重力差に疑義が生じた場合等に作業地で検定を行っている。検定台はアルミ製で、ラコスト重力計を載せる台と、台を傾けるためのマイクロメーター付きの支え棒に分かれる (写真-5)。

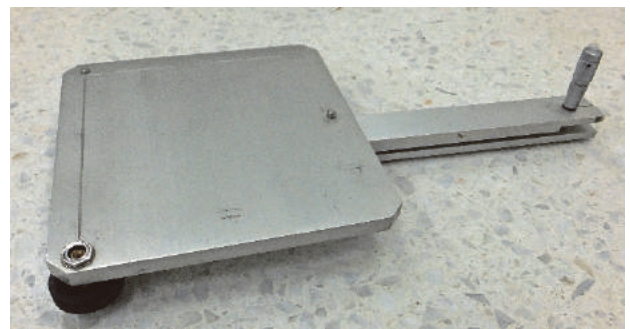


写真-5 ラコスト重力計検定台 (アルミ製)。重力計を載せる台 (左) 及び傾斜台 (右、先端はマイクロメーター)。傾斜台は分離が可能。

マイクロメーターの1目盛は、ラコスト重力計に1秒角（約 $5 \times 10^{-3} \text{mm/m}$ ）の変化を与える。検定はクロスレベル、ロングレベルそれぞれ行う。最初に、重力計を検定台に載せ、マイクロメーターの目盛0で重力計の気泡管の気泡が中心となるよう設置する。その後、重力計には触れず、マイクロメーターを1目盛ずつ回して重力計を傾け、読定を繰り返す。図-21に2007年4月に行ったG553のクロスレベル検定の結果を示す。赤線はクロスレベル調整前の読定結果で、気泡管の気泡が中心にある時に重力計の読定値は最小、マイクロメーターが60の時に最大となり、その後減少している。放物線は式(14)の曲線で、放物線の中心軸と気泡管の気泡の中心が一致するのが正しい設置状態である。図の赤線では、一致が悪いため、調整が必要である。調整は、読定値が最大となった位置で、クロスレベルの調整口のカバーを開け、気泡管の六角ネジを用いて気泡が中心となるよう行う。青線は、調整後の検定の結果で、クロスレベルの気泡が中心にある時、読定値が最大で放物線の中心軸と一致している。

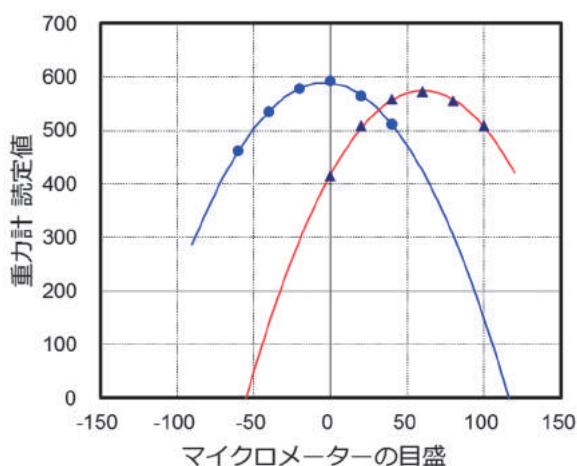


図-21 ラコスト重力計 G553 のクロスレベル点検調整グラフ。赤がクロスレベル調整前、青が調整後。

ラコスト重力計の気泡管の1目盛は、約60秒角（ 0.3mm/m ）に相当し、これは工作用水準器と同程度で測量用には十分でない。さらに気泡管の気泡の幅は温度変化するため、これらの特性を理解して測定を行う必要がある。また、実際のラコスト重力計のクロスヘアは、重力計毎に見え方が異なり、端がぼける、濃さが一定でないなど、図-18のように鮮明ではないため、重力計毎の特性を理解して観測者が最も測定しやすいR.L.とクロスヘアの合わせ方を定めることで高精度な測定を実現している。

3. 国土地理院の重力インフラ

3.1 重力点

国土地理院は、2016年3月現在、基準重力点32点及び一等重力点62点、計94点を設置して重力点の維持管理を行っている（図-22）。基準重力点は、概ね200km間隔で、地盤が堅固な、交通、波浪等による地盤振動が少なく、高さの変化が把握しやすい場所に設置している。また、基準重力測量では、基準重力点上にFG5を設置するため、十分な空間と電源の確保が必要で、温度管理が可能な室内に選定する。一方、一等重力点は、概ね100km間隔で全国を網羅するように配置している。基準重力点と同じく安定した場所に設置しているが、相対重力測定に必要な空間は小さく、また屋外でも測定は可能である。



写真-6 一等重力点の形状。写真上：箱根GS。1959年設置。写真左下：松代GS。1984年設置。写真右下：名古屋GS。2013年設置。いずれも2015年撮影。

国土地理院は、1952年に重力測量を開始するとともに重力点（写真-6）の設置を開始した。設置開始当初は、点間距離や設置密度などに基準はなかった。また、重力点は、現在は測量法施行規則第一条に定める金属標であるが、当初は中心に突起がある金属標が主流で、箱根GS（富士屋ホテル特別展示室内）など国際的に登録された重力点では特別な金属プレートが設置されている。さらに1955年に中央気象台長（現気象庁長官）から国土地理院に測候所の高さと重力の測定が要望されたことを受け、一等重力点の多くは、地方気象台、測候所等の地震計室に設置している。このほか、大学の要請を受けて大学の施設内に設置している。

国土地理院の一等重力測量では、正標高の算出を目的として重力点以外に一等水準点等で測定を実施している。また、二等重力測量では基本基準点（三

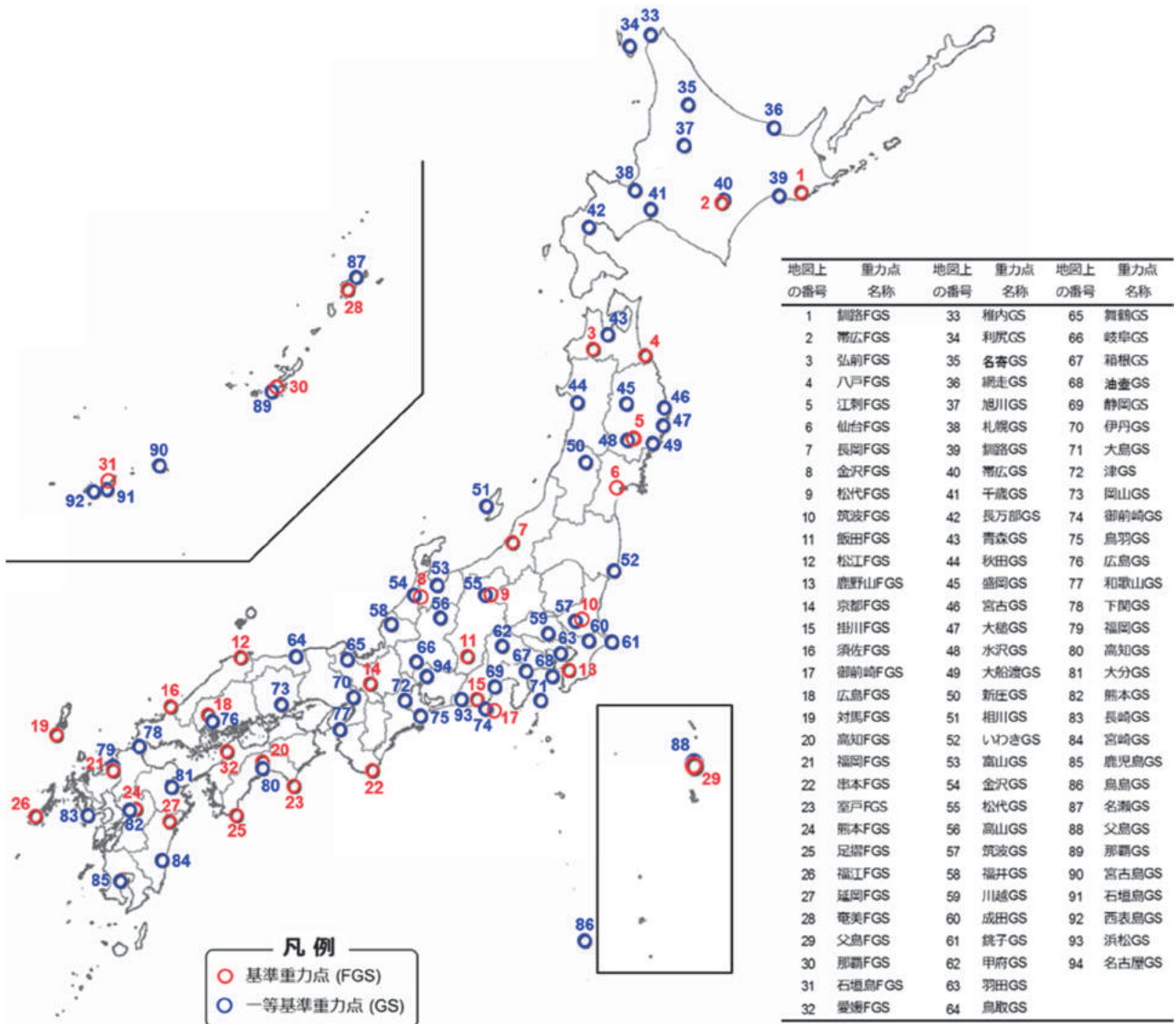


図-22 国土地理院の基準重力点 (FGS 32 点) 及び一等重力点 (GS 62 点) の配点図 (2016 年 3 月現在)

角点及び水準点), 公共基準点等で測定を実施した。こうした既存の基準点を用いた重力測定では, 延べ約 19,000 点 (1967 年からラコスト重力計で測定した点数) の基準点で測定を実施した。これらは, 主に陸域の高密度な重力分布の把握を目的として二等重力測定で実施された。これにより, 高密度な重力分布が把握され, 空間補間を用いて任意の場所で機器校正等に実用上十分な精度で重力値の推定を行う重力値推定計算サービスの提供が可能となった。

(<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/gravity/calc/gravity.pl>) さらに, 重力ジオイドを計算する際の重力データベースに利用されたほか, 重力異常の計算に用いられ, 日本重力異常図 (余色立体図) (国土地理院技術資料 B1-No.28, 2000) 等の提供に貢献した。

3.2 重力点の維持管理

基準及び一等重力点の設置場所は, 測定環境の安

定性, 効率的な測定を可能とするアクセスの良さ, 長期運用を可能とする安定貸与などから決めているが, 多くの一等重力点は, 気象庁や大学など重力値を必要とする機関の要請を受けて設置してきた。気象庁では液注型水銀気圧計の機器校正, 大学では様々な測定の基準に重力値を必要としていたが, 国土地理院が 2000 年に重力値の推定計算サービスの WEB 提供を開始したことで, 機器の校正に必要な程度の精度であれば, 任意の地点の重力値を簡単に推定できるようになったため, 重力点の設置が必須でなくなった。さらに, 1996 年に気象庁測候所の無人化が開始され, 大学では施設の改修に伴う重力点の移転要請が増えたことなどから, 継続が困難になってきた。

そこで, 国土地理院は, 2008 年頃から電子基準点付属標に重力値を与える一等重力測定を開始した。前述の気象庁や大学近傍の電子基準点を優先し, 付

属標上で相対重力測定を実施している。重力は、測定点の位置、特に高さが変わると変化するため、地下や周辺の質量の分布の変化によって重力に変化が生じたかどうかを判断するために重力点の正確な位置の把握が重要である。電子基準点は、国土地理院のGNSS連続観測システム(GEONET)によって位置とその変化が正確に把握されており、また半数以上の点で水準測量が行われ標高が求められていることから、付属標で重力を測定することで、正確な位置が把握された重力の基準を与えることができる。また、国土地理院の施設であるため移転の要請が少なく、一般にアクセスが容易な場所にあるため重力点を利用しやすい。国土地理院は、2017年3月31日現在、128点の電子基準点付属標で相対重力測定を行い、JGSN2016に準拠した重力値を得ている。また、2014年からはCG5を用いた付属標直上の重力鉛直勾配の測定を試験的に実施している(写真-7)。

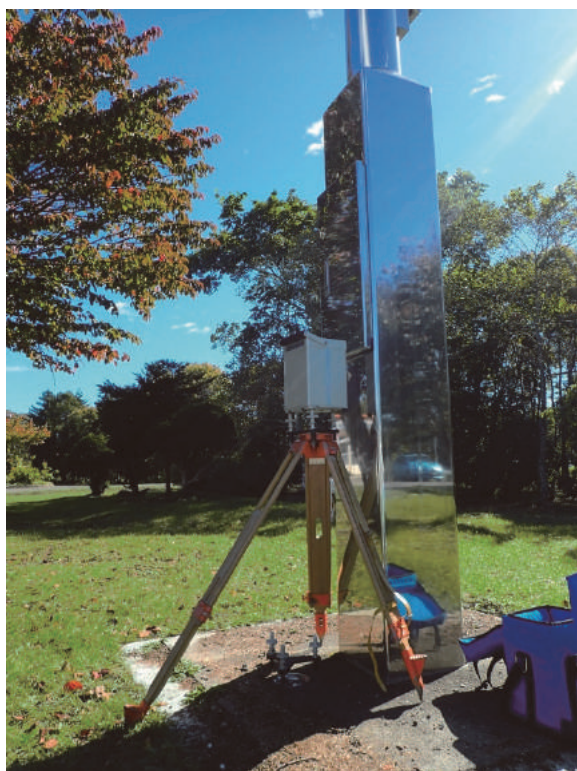


写真-7 電子基準点付属標(根室3)上でのCG5による重力鉛直勾配測定。2015年撮影。

3.3 重力点の位置決定

重力の測定精度の向上に伴い、重力点の位置情報(緯度、経度及び標高)の精度も向上が必要となっている。従来は、重力点の位置は2万5千分1地形図から読み取っていたが、近年の重力基準網では、水平位置の精度は最低でも1/100分(15m)以内、同様に標高も0.1m(30 μ Gal相当)以内が必要とされるため、2008年から基準及び一等重力点において

GNSS測量及び水準測量を開始している。2017年3月現在、基準重力点26点、一等重力点31点で位置決定作業が完了している。

4. 国土地理院の重力測量の実績

4.1 絶対重力測定の実績

国土地理院が1995年に熊本FGSで国内初の絶対重力測定の観測を開始してから2017年3月までの23年間に、国内で延べ73回(筑波FGS、御前崎FGS及び掛川FGSはそれぞれ1回とする)、37点の基準重力点で絶対重力測定を実施した(表-16)。絶対重力測定の精度は測定環境に大きく依存し、単観測あたりの標準偏差は安定した地盤上では小さいが、沿岸では波浪、専用基台のない点では人工ノイズのために大きくなるため、基準重力点は地盤が安定し、温度管理が可能な施設に設置する必要がある。絶対重力測定の精度は、FG5の性能向上に加え、国土地理院が20数年で培った技術や国内のFG5所有機関の増加に伴う経験の蓄積によって、導入当初と比べて徐々に改善されている。

国土地理院は、1993~2005年に海外5か国、11か所で絶対重力測定を実施した(表-11)。地殻変動があまりない大陸での測定では、海洋潮汐による重力の微小な時間変化を検出するなど、FG5の公称精度に近い安定した成果を得るとともに、同じFG5で測定重力差が数 μ Galで一致するなど同一機器での重力値の再現性も確認した。このほか、南極・昭和基地の重力点IAGBN(A)#0417点で1996~2015年(第36~56次隊)の21年間に5回の観測を実施した(菅原ほか、2018)。

4.2 相対重力測定の実績

国土地理院が1952年に一等重力測量を開始してから、基準重力点における一等重力測量相当の測量及び1979年に開始した水準点における一等重力測量相当の測量を含め、延べ2,018回の一等重力測量が実施された。二等重力測量は、同じく1952年から延べ31,770回を実施している。使用した重力計は、GSI型重力振子、ノースアメリカンAG1重力計、ウォルドン重力計及びラコスト重力計である(山本ほか、2018)。各々の重力計による測定の実績は、GSI型重力振子では1952~1978年に延べ50回、ノースアメリカンAG1重力計では1952~1964年に延べ10,734回、ウォルドン重力計では1959~1964年に延べ844回、ラコスト重力計では、1962~2016年に延べ22,244回である。以上から、1952~2016年に国内において実施した相対重力測定の総数は、延べ33,853回である。これらに加えて、南極観測隊として、第2次~55次に延べ1,686回、1965~1973年及び2003年に海外での国際観測として延べ17回の測

表-11 国土地理院の海外での FG5 絶対重力測定一覧

国	測定場所	観測年月	FG5 No.	重力値 [μgal]	標準偏差 [μgal]	測定数
オーストラリア	Mt. Stomlo	1996年02月	#104	979 549 923.0	15.0	13,354
	"	1996年02月	#201	979 549 923.5	12.0	22,959
	Tidbinbilla	1996年02月	#104	979 576 117.5	13.0	10,197
	Mt. Pleasant	1996年02月	#104	980 423 666.2	27.0	14,905
大韓民国	水原市	1999年12月	#203	979 918 775.4	11.5	14,346
中国	武漢	2003年02月	#201	979 339 729.5	9.5	25,241
	南寧	2003年02月	#201	978 745 966.6	10.1	28,124
	北京	2004年02月	#104	980 106 455.9	16.0	11,973
	香港	2005年03月	#203	978 755 644.6	—	21,529
マレーシア	クアラルンプール	2003年06月	#201	978 028 576.5	21.5	18,052
	コタキナバル	2004年06月	#201	978 112 550.5	—	34,193
フィリピン	マニラ	2005年11月	#203	978 370 556.2	24.0	5,750

注) 気圧, 潮汐及び極運動補正の後, 相対重力計で決定した重力鉛直勾配を用いて重力点上に化成. 使用ソフトウェア及び統計処理手法は, JGSN2016 と異なる.

定を実施している.

4.3 地震・火山活動に伴う重力変化の検出

4.3.1 絶対重力測定による重力変化の検出

絶対重力測定の観測を本格的に開始した 1995 年以降, 国土地理院は, FG5 を用いて, 仙台 FGS で 4 回, 釧路 FGS ほか 8 点で 3 回, 新十津川 FGS ほか 12 点 (筑波, 御前崎及び掛川 FGS は除く) で 2 回の繰り返し測定を実施した (表-16). 繰り返し測定は, 基準に用いる重力値の時間変化の把握を主な目的としているが, 地震に伴う重力変化の把握にも活用されている.

(1) 十勝沖地震に伴う重力変化

平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震 (2003 年 9 月, マグニチュード 8.0) 後の 2004 年 3 月には, 帯広 FGS で 2 回目の絶対重力測定を行った (国土地理院, 2004b). この地震では, 北海道の広い範囲で地殻変動が観測され, 特に襟裳岬周辺で変動が大きく, 電子基準点「広尾」で東南東に 98cm の水平変動, 電子基準点「大樹 2」で 28cm の沈降が観測された (国土地理院, 2004a). 帯広 FGS では, 地震を挟んで 1998 年 6 月～2004 年 3 月の 5 年間に約 $20\mu\text{Gal}$ の重力増加が観測された. この増加量は, FG5 の測定精度から見て有意な変化で, フリーエア勾配を仮定すると約 7cm, ブーゲー勾配を仮定すると約 10cm の沈降に相当する. この地域では海側の太平洋プレートが陸側のユーラシアプレートに沈み込む定常的な地殻変動が起きており, 重力変化には, この変動に起因する変化も含まれる. 地震による重力変化を理論的に説明するには, 震源近傍における地震前後の重力変化の空間分布を網羅する必要があるが (大久保,

2006), FG5 による絶対重力の繰り返し測定が比較的容易になったとはいえ, 現象を説明する妥当なモデルの構築に必要なデータの取得はいまだ難しく, 重力変化を説明するモデルは構築できていない.

(2) 新潟県中越地震及び中越沖地震に伴う重力変化

平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震 (2004 年 10 月, マグニチュード 6.8) 及び平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震 (2007 年 7 月, マグニチュード 6.8) の前後では, 長岡 FGS で絶対重力測定を実施した. 新潟県中越地震では, 2004 年 8 月～2005 年 5 月に $7.6\mu\text{Gal}$ の重力減少を検出した. この値はフリーエア勾配を仮定すると約 2.5cm, ブーゲー勾配を仮定すると約 3.8cm の隆起に相当する. 電子基準点が捉えた地殻変動から推定した震源断層モデルでは, 長岡 FGS の隆起量は 1.5cm で重力変化と調和的である. 新潟県中越沖地震では, 2005 年 5 月～2008 年 10 月に $7.3\mu\text{Gal}$ の重力減少を捉えた. この値はフリーエア勾配を仮定すると約 2.4cm, ブーゲー勾配を仮定すると約 3.7cm の隆起に相当する. 震源断層モデルから長岡 FGS の沈降は約 0.9cm と推定され, 重力変化と整合しない. ただし, 長岡 FGS の北から北東の水準点で地震の震源域に向かって隆起が大きくなる傾向が見られることから, 中越地震の後に震源断層深部延長上で余効すべりが生じたと仮定すれば (国土地理院, 2008, 2009), これらの隆起と重力変化は説明できる.

(3) 駿河湾地域における重力変化の監視

国土地理院は, 駿河湾地域の重力変化の監視を目的に, 東京大学地震研究所と共同で 1996～2017 年に延べ 65 回 (うち国土地理院 42 回) の絶対重力測

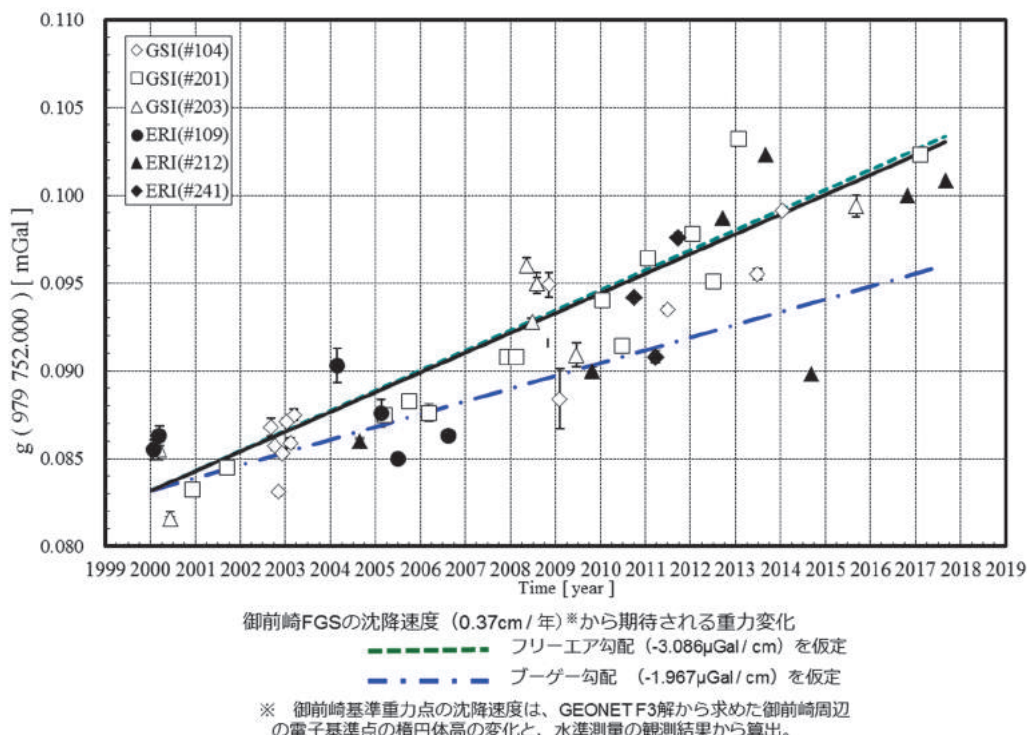


図-23 御前崎 FGS の重力変化 (2000 年 1 月～2017 年 9 月)。重力値は全て御前崎 FGS 金属標上 1.30m の値。

定を行い、把握した重力変化を地震予知連絡会に報告している (図-23)。測定は、国土地理院の 3 台の FG5 (#104, #201, #203)、東京大学地震研究所の 3 台の FG5 (#109, #212, #241) で行い、ばらつきは大きいですが、沈降速度と調和的な重力値の増加傾向が得られている。

(4) 岩手山周辺における重力変化の監視

岩手山では、1997 年 12 月末に山体西側の浅部で地震活動が始まり、1998 年 2 月頃には長周期地震を含む地震活動の活発化に伴う地殻変動が観測され、同 6～7 月に火山活動がピークに達した。国土地理院は、1998 年 8 月、岩手山の地下マグマの挙動の把握を目的に測定を開始し、2000 年 5 月までに 6 回の FG5#203 による絶対重力測定及び岩手山周辺 8 か所での相対重力測定 (図-24) を行った。9 月 3 日に岩手県内陸北部地震 (M6.1) が発生したため、9 月 11 日から再度絶対重力測定を行い、地震前後で -6.2 μ Gal の重力変化を検出した (図-25)。

国土地理院は、火山活動の活発化に伴い、岩手山周辺に臨時の GPS 観測点を増設するとともに、自動測距・測角装置を設置して観測体制を強化し (平井, 2000)、地球資源衛星「ふよう 1 号 (JERS-1)」の合成開口レーダー (SAR) の干渉処理から岩手山周辺の地殻変動を検出した (国土地理院, 1999)。これらの地殻変動から変動の直接の要因はマグマ活動ではないとの結論を得たため (西村ほか, 2000)、地震前

後の重力変化が岩手県内陸北部地震で説明し得るか、東京大学地震研究所と共同で地殻変動モデルに基づいて地震による重力変化の評価を試みた。矩形断層上で一様なすべりを仮定した断層モデルで重力変化を求め、重力変化からマグマ貫入による直接的な引力効果を除き、測定値とモデル推定値を比較した (町田ほか, 2000)。絶対重力測定、相対重力測定の双方がモデル推定値と観測誤差の範囲内で整合し、重力変化は 2 枚の断層モデルで定量的に説明された (Tanaka et al., 2001)。

(5) 東北地方太平洋沖地震に伴う重力変化

東北地方太平洋沖地震に伴い、電子基準点「牡鹿」(宮城県石巻市) が東南東に約 5.4m、約 1.1m 沈降するなど、広域で大きな地殻変動が観測された (水藤ほか, 2011)。国土地理院は、地震前後の重力変化の把握を目的に、2011～2012 年に青森県、岩手県、宮城県、秋田県、山形県、福島県、茨城県及び千葉県で基準重力測量及び一等重力測量を実施した。絶対重力測定は、弘前、八戸、江刺、仙台、筑波及び鹿野山 FGS で、一等重力測定は、ラコスト重力計 3 台を用いて青森、秋田、盛岡、大槌、大船渡、水沢、新庄、山形、仙台、いわき、成田、銚子及び勝浦 GS で実施した。また、10 か所の電子基準点付属標及び 9 か所の一等水準点で相対重力測定を実施した。地震前の重力値は、2005、2006 及び 2010 年の測定に対して JGSN2016 の試算を行っていたため、地震後



図-24 岩手山周辺の重力測定地点

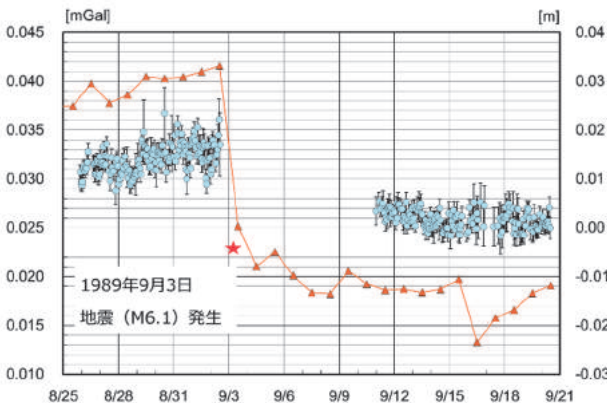


図-25 地震前後の絶対重力値(丸)及びM寄木-M田沢湖のGPS基線長(三角)の時間変化。

の重力値も同様に処理を行って同じ条件で比較した。図-26に主な観測点の重力変化を示す。

重力値は、地震後に太平洋沿岸部で増加、内陸で減少する傾向が見られる。また、房総半島で増加、下北半島で減少している。

東北地方太平洋沖地震では、地殻変動に伴って重力点の位置も大きく変動した。3点の基準重力点(八戸、江刺及び仙台FGS)で2008年から順次GNSS観測及び水準測量によって位置情報(緯度・経度・標高)が得られていたため、地震前後の上下方向の地殻変動と重力変化の双方が得られた。通常、標高が低くなると重力値の増加が想定されるが、これら全ての観測点で重力値が減少しており(表-12)、従来から指摘されていたとおり地震に伴う重力値の変化は標高の変化だけでは説明できず、地下の質量移動

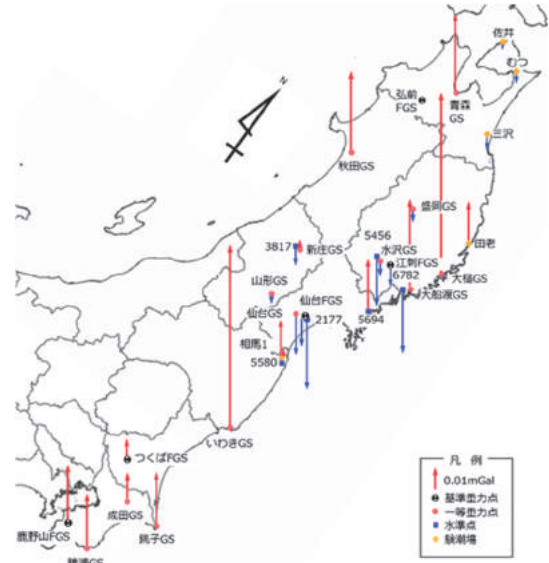


図-26 東北地方太平洋沖地震に伴う重力変化

表-12 基準重力点の重力変化と標高の変化

基準重力点	標高の変化量 [m]	実測重力値の変化 [μGal]	標高の観測方法
八戸FGS	+0.015	-16.8	直接水準
江刺FGS	-0.203	-3.0	GPS
仙台FGS	-0.173	-9.6	直接水準

など他の要因が示唆される。

(6) 東北地方太平洋沖地震の余効変動に伴う重力変化

東北地方太平洋沖地震では、余効変動に伴う重力変化を把握するため、仙台FGSで2016年5月に絶対重力測定を行った。地震後の2011年8月に実施した測定と比較すると重力は25.6μGal減少していた。仙台FGSから西へ約7.9kmの電子基準点「仙台」は、約5年間の余効変動で12.9cm隆起しており、この値にブーゲー勾配を仮定すると重力変化は25.4μGalと推定され、測定された重力変化と調和的である。これは電子基準点の隆起が、地下の岩石の膨張など地下での質量変化に起因せず、岩石自体が密度を変えず高さが変化したことを示唆している。

4.3.2 相対重力測定による重力変化の検出

国土地理院は、絶対重力計の導入前から相対重力計による重力変化の検出を試みており、二等重力測量では、全国の重力分布の把握に加え、重力の時間変化を把握するための測定を行った。

(1) 伊豆大島の重力変化

相対重力測定によって重力変化を検出した代表的な事例は、1950頃から伊豆大島で国土地理院と地質

調査所（現産総研地質調査総合センター）及び東京大学地震研究所が行った測定である。国土地理院は、長周期重力変化の検出を目的に島内に40点の重力点を設け、1963年11月～1972年2月に4回の測定を実施した。1967年以降伊豆大島は、火山口付近を中心に重力の増加傾向が見られ、マグマの上昇傾向が報告されている（井内ほか、1972）。1979年には、島を周回する水準路線を設置し、2台のラコスト重力計（D29, G118）による重力測量を実施した。1986年11月に大島の三原山が噴火した際には、12月及び翌1～2月に3台のラコスト重力計（G83, G223, G564）を用いて水準点、検潮所及び数点の三角点に2回の測定を行った。測定では、大島GSと筑波FGSの間で環を形成した路線に往復測定を行って1979年以降の重力変化を把握した（村上・吉田、1987）。重力変化は、水準測量による上下変動と一致が良く、相関係数は -0.173 ± 0.024 mGal/mとフリーエア勾配より有意に小さい。測定からは、島の北西・南東部の沈降域（重力増加域）と北東・南西部の隆起域（重力減少域）が把握され、重力変化を沈降域の地下に開口割れ目が生じて岩脈が貫入したモデルで説明した。また、上下変動が小さい範囲で見られた重力の減少は、地下のマグマだまりで生じたマグマの下降で説明している。

(2) 房総半島南部の重力分布

国土地理院は、1989～1991年に第4次基本測量長期計画に基づいて、鴨川地溝帯の北断層及び南断層に挟まれた地域の地下構造の推定を主目的に房総半島南部で重力測量を行った（秋山ほか、1992）。測定点を1kmメッシュに1点とし、1台のラコスト重力計で重力値が既知の点から未知の点へ往復測定を行った。国家基準点では密度が足りないため公共基準点や独立標高点を含む961点で測定を行い、房総半島南部の重力異常図を作成した（秋山ほか、1992）。重力異常図からは、鴨川南断層の正断層地形が明瞭に読み取られ、鴨川北断層との地溝帯では、低密度の堆積層にも関わらず、高い重力異常を示す地域が見られたため、地溝帯の地下深部に高密度の岩体の存在が推定された。この作業は、重力異常分布の把握を目的に国土地理院が実施した唯一の測定で、房総半島南部の約950km²の測定に3年間を要した。

5. 重力測量の展望

国土地理院は、国際的な基準に基づいて全国に正確な重力値の基準を与えるため、1952年から現在まで重力測量を継続してきた。この間、重力計の高度化、測定技術の進歩に伴い、重力測量の精度は向上しており、これを活かして2016年に高精度な日本の重力基準網JGSN2016を構築した。JGSN2016の

精度は20 μ Gal程度で全国に重力の基準を与えており、従来のJGSN75と比べて約5倍の精度を達成した。精度の向上は、重力計の性能向上はもとより、測定に携わる機関の連携による測定方法の継続的な高度化、検定路線を使った相対重力計の検定及び絶対重力計の国内比較観測を通じて達成されている。

重力計は精密機器の集合で、正確に取扱わないと信頼性が下がる。機器には操作手順書があるが、高精度な測定を行うためには、手順書に従うだけでなく、技術の習熟と機器の特性への十分な理解が必要である。また、現行の重力計はいずれも海外製で、不具合の対応に時間を要するため、国土地理院は、国内関係機関と情報を共有し、自ら不具合に対処する体制の構築に努めている。些細な事例でも情報共有することで、知見の蓄積、ひいては重力値の信頼性の確保が可能となるため、この取組は今後も継続していく。

FG5による測定、国内比較観測を通じて、国内で信頼度の高い重力の絶対値を得ることが可能となったが、FG5は測定の感度が高いため、信頼性の高い測定には、地盤振動の除外、安定化電源・安定温度の供給、一定の測定時間の確保が必須である。また、微小なシグナル検出のためには、陸水擾乱や周囲の地形変化がない測定環境が望ましい。今後も安定した重力の基準値を提供するためには、安定した環境で一定期間の測定を実施するとともに、繰り返し測定による重力の時間変化の把握が必要である。

正確な重力値の基準を維持するためには、繰り返し測定による正確な重力変化の把握が必要であるが、測定に要するリソースを考慮すると、測定の効率化に加え、効率の良い測定の計画が必要である。重力は場所により異なった時間変化を示すため、全国一様に等間隔で繰り返し測定を行うことは効率的でなく、例えば、GEONETで地殻変動の累積が大きい地域、変動速度が急激に変化した地域など、重力の時間変化が大きい地域を特定して選択と集中を行う必要がある。その際に、絶対重力測定と相対重力測定を効率的に組み合わせることも必須である。電子基準点は、測定時のアクセスが容易で全国を網羅しており、また、地殻変動と重力変化の双方の基準となり得るため、電子基準点付属標での重力測定は今後も継続すべきである。

一方、可搬性は高いが精度が低い相対重力測定の効率を改善するためには、近年実績が増えている可搬型のA10の導入が効果的である。A10はFG5と比べて精度は1桁低いが、野外で観測可能な絶対重力計で、スプリング式の相対重力計で不可避のドリフトやテア、周期誤差やSFといった誤差がなく、測定者の負荷軽減が期待できる。電子基準点で効率的に絶対重力測定を実施できるA10の導入は、効率

的に高精度な重力測量を実現する機器として、一等重力測量への導入が効果的である。

JGSN2016 の実現によって、高精度な絶対重力値へのアクセスが可能となった。今後は、高精度でアクセスが容易な国内の重力の基盤を着実に維持管理することが課題である。重力の時間変化を効率的に監視することで、重力変化の累積による重力基準網の更新時期を適切に見極め、最適な測定計画を策定し、効率的な重力基準の維持・管理に努めていく必要がある。

6. まとめ

国土地理院は、国内に重力値の正確な基準を与えるため、国際標準と整合した高精度な新しい重力基準網 JGSN2016 を約十数 μGal の精度で達成した。この重力基準網は、国土地理院が 1950 年代に開始した重力測量において、時代とともに高度化する重力計を導入して信頼性の高い重力値を提供する取組を重ねてきたことで実現された。重力測量では必ず誤差が生じるため、国土地理院は、誤差軽減の取組を常に継続しており、様々な試行錯誤を重ね、測定の高精度化を達成してきている。相対重力計の検定路線や気泡管の検定などは現在も精度維持の根幹となる技術である。国土地理院が 1995 年に国内で初め

て導入した FG5 は、今では多くの国内機関が所有し、国内比較観測を通じて互いに整合性が確保され、高精度な絶対重力測定の基盤として JGSN2016 の実現を可能とした。高精度な重力測定は、正確な重力の基準の維持に不可欠である。国土地理院は、引き続き、さらに安定した高精度な測定を達成するための取組を継続するとともに、時間変化する重力を効率的に把握して今後も安定した重力値の基準を提供するために、測定の効率化にも取り組んでいく。

謝 辞

気象庁及び大学等の機関には、重力測量の実施において、重力点の設置、施設の借用を含め、様々な御協力をいただいた。国立研究開発法人産業技術総合研究所、東京大学、京都大学、公益財団法人地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所、大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所には、絶対重力計の国内比較観測の実施に御協力をいただいた。国民宿舎「つくばね」には、17 年間にわたる施設の使用に御協力をいただいた。記してここに感謝いたします。

(公開日：平成 30 年 12 月 27 日)

表-13 「つくばね」第一小ホールにおける国内比較観測の測定結果

測定年月	重力計	A		B		C		D		E		偏差の 平均 μGal
		g	偏差 μGal	g	偏差 μGal	g	偏差 μGal	g	偏差 μGal	g	偏差 μGal	
2002/02 参照値 887.7μGal	FG5 #104	892.0	4.3	892.9	5.2	892.9	5.2	891.6	3.9	892.5	4.8	4.5
	FG5 #201			892.0	4.3	892.9	5.2	893.2	5.5			5.0
	FG5 #210			886.4	-1.3	886.1	-1.6					-1.5
	FG5 #212	880.4	-7.3			880.2	-7.5	880.3	-7.4			-7.4
	FG5 #217	883.8	-3.9			884.0	-3.7					-3.8
2002/07 参照値 892.1μGal	FG5 #104	892.6	0.5							897.6	5.5	3.0
	FG5 #201			895.1	3.0			896.0	3.9			3.5
	FG5 #210			890.4	-1.7			891.8	-0.3			-1.0
	FG5 #212					888.5	-3.6					-3.6
	FG5 #217	892.1	0.0							884.7	-7.4	-3.7
2003/01 参照値 887.7μGal	FG5 #201	899.7	12.0			891.2	3.5	892.9	5.2			6.9
	FG5 #203	894.8	7.1	894.2	6.5			894.3	6.6			6.7
	FG5 #210			875.3	-12.4	857.1	-30.6					-21.5
	FG5 #212	878.8	0.1			890.0	2.3					1.2
2003/09 参照値 897.6μGal	FG5 #201	905.5	7.9	902.2	4.6	893.5	-4.1	899.4	1.8	904.7	7.1	3.5
	FG5 #203	900.6	3.0	896.0	-1.6	898.8	1.2	905.5	7.9	899.7	2.1	2.5
	FG5 #210	896.7	-0.9	891.3	-6.3	897.6	0.0	891.3	-6.3	902.1	4.5	-1.8
	FG5 #217	893.3	-4.3	893.1	-4.5	894.5	-3.1	886.8	-10.8	899.0	1.4	-4.2
2004/04 参照値 890.5μGal	FG5 #104									890.7	0.2	0.2
	FG5 #201	895.4	4.9	890.6	0.1	891.5	1.0	893.8	3.3			2.3
	FG5 #212			887.8	-2.7	889.8	-0.7					-1.7
	FG5 #217	889.8	-0.7			885.1	-5.4					-3.1
2005/04 参照値 892.1μGal	FG5 #109					886.1	-6.0	888.5	-3.6			-4.8
	FG5 #201	893.5	1.4	893.0	0.9							1.2
	FG5 #203	890.8	-1.3	896.1	4.0							1.4
	FG5 #210			887.3	-4.8	893.0	0.9					-1.9
	FG5 #213							892.3	0.2	888.6	-3.5	-1.6
FG5 #217	894.9	2.8							900.8	8.7	5.8	
2006/04 参照値 890.6μGal	FG5 #201	891.3	0.7			889.9	-0.7					0.0
	FG5 #203			890.5	-0.1							-0.1
	FG5 #213	895.7	5.1	891.7	1.1							3.1
	FG5 #217			884.7	-5.9	890.5	-0.1					-3.0
2007/04 参照値 890.4μGal	FG5 #109			889.5	-0.9	883.2	-7.2					-4.1
	FG5 #201	888.5	-1.9	890.2	-0.2							-1.1
	FG5 #213					896.5	6.1	893.7	3.3			4.7
	FG5 #217	894.7	4.3					887.1	-3.3			0.5
2008/04 参照値 890.3μGal	FG5 #104	891.6	1.3			890.1	-0.2					0.5
	FG5 #201	891.6	1.3	890.4	0.1							0.7
	FG5 #213			887.6	-2.7	890.5	0.2					-1.3
2009/04 参照値 891.3μGal	FG5 #109			887.2	-4.1	891.8	0.5					-1.8
	FG5 #201	888.2	-3.1	888.5	-2.8							-2.9
	FG5 #203	890.9	-0.4							884.6	-6.7	-3.5
	FG5 #213					894.6	3.3	899.3	8.0			5.7
FG5 #217							888.1	-3.2	899.4	8.1	2.5	
2010/04 参照値 896.4μGal	FG5 #201	894.9	-1.5	895.6	-0.8							-1.1
	FG5 #210			895.2	-1.2	899.2	2.8					0.8
	FG5 #213					892.7	-3.7					-3.7
	FG5 #217	898.3	1.9					898.6	2.2			2.1
2011/04 参照値 904.1μGal	FG5 #201	903.6	-0.5	901.6	-2.5							-1.5
	FG5 #210			904.5	0.4	907.8	3.7					2.0
	FG5 #213					904.9	0.8	904.3	0.2			0.5
	FG5 #217	900.4	-3.7									-3.7
	FG5 #241							906.0	1.9			1.9

2012/04 参照値 903.2 μ Gal	FG5 #201	903.9	3.9	905.2	5.2				4.5	
	FG5 #213					893.0	-7.0	900.4	0.4	-3.3
	FG5 #217	899.8	-0.2					905.5	5.5	2.6
	A10 #017			893.2	-6.8	899.1	-0.9			-3.9
2013/04 参照値 901.7 μ Gal	FG5 #104			904.7	3.0	900.9	-0.8			1.1
	FG5 #201	898.1	-3.6	900.3	-1.4					-2.5
	FG5 #213					897.9	-3.8	898.2	-3.5	-3.6
	FG5 #217	906.2	4.5					907.0	5.3	4.9
2014/04 参照値 895.3 μ Gal	FG5 #104			896.5	1.0	899.0	3.5			2.3
	FG5 #210							896.4	0.9	0.9
	FG5 #212	894.2	-1.3	893.7	-1.8					-1.6
	FG5 #213					893.2	-2.3			-2.3
2015/04 参照値 895.2 μ Gal	FG5 #104	899.0	3.8							3.8
	FG5 #203			895.9	0.7			901.0	5.8	3.3
	FG5 #210								897.0	1.8
	FG5 #212	894.8	-0.4							-0.4
	FG5 #213	894.2	-1.0			889.3	-5.9			-3.5
	FG5 #217			893.7	-1.5			891.9	-3.3	-2.4

※ 下線で示した重力値は、観測不備のため、参照値の計算から除外。下線で示した偏差の平均は、5.0 μ Gal を超えた FG5。灰色は国土地理院保有の FG5。橙は産総研計量標準総合センター保有の FG5。FG5 の所有機関は、以下のとおり。
#104,#201 及び#203：国土地理院，#109,#212 及び#241：東京大学地震研究所，#210：京都大学理学研究科，#213：産総研（計量標準総合センター），#217：産総研（地質調査総合センター），A10#017：九州大学工学研究院

表-14 FG5#213（ICAGに参加）の測定平均値を参照値とした各FG5の偏差

測定年月	重力計	A		B		C		D		E		偏差の 平均 μ Gal
		g	偏差 μ Gal	g	偏差 μ Gal	g	偏差 μ Gal	g	偏差 μ Gal	g	偏差 μ Gal	
2005/04 参照値 890.5 μ Gal	FG5 #109					886.1	-4.4	888.5	-2.0			-3.2
	FG5 #201	893.5	3.0	893.0	2.5							2.8
	FG5 #203	890.8	0.3	896.1	5.6							3.0
	FG5 #210			887.3	-3.2	893.0	2.5					-0.3
	FG5 #213							892.3	1.8	888.6	-1.9	
	FG5 #217	894.9	4.4							900.8	10.3	7.4
2006/04 参照値 893.7 μ Gal	FG5 #201	891.3	-2.4			889.9	-3.8					-3.1
	FG5 #203			890.5	-3.2							-3.2
	FG5 #213	895.7	2.0	891.7	-2.0							
	FG5 #217			884.7	-9.0	890.5	-3.2					-6.1
2007/04 参照値 895.1 μ Gal	FG5 #109			889.5	-5.6	883.2	-11.9					-8.8
	FG5 #201	888.5	-6.6	890.2	-4.9							-5.8
	FG5 #213					896.5	1.4	893.7	-1.4			
	FG5 #217	894.7	-0.4					887.1	-8.0			-4.2
2008/04 参照値 889.1 μ Gal	FG5 #104	891.6	2.6			890.1	1.1					1.8
	FG5 #201	891.6	2.6	890.4	1.4							2.0
	FG5 #213			887.6	-1.4	890.5	1.5					
2009/04 参照値 897.0 μ Gal	FG5 #109			887.2	-9.8	891.8	-5.2					-7.5
	FG5 #201	888.2	-8.8	888.5	-8.5							-8.6
	FG5 #203	890.9	-6.1							884.6	-12.4	-9.2
	FG5 #213					894.6	-2.4	899.3	2.3			
	FG5 #217							888.1	-8.9	899.4	2.4	-3.2
2010/04 参照値 892.7 μ Gal	FG5 #201	894.9	2.2	895.6	2.9							2.5
	FG5 #210			895.2	2.5	899.2	6.5					4.5
	FG5 #213					892.7	0.0					
	FG5 #217	898.3	5.6					898.6	5.9			5.7

2010/04 参照値 892.7μGal	FG5 #201	894.9	2.2	895.6	2.9						2.5
	FG5 #210			895.2	2.5	899.2	6.5				4.5
	FG5 #213					892.7	0.0				
	FG5 #217	898.3	5.6					898.6	5.9		5.7
2011/04 参照値 904.6μGal	FG5 #201	903.6	-1.0	901.6	-3.0						-2.0
	FG5 #210			904.5	-0.1	907.8	3.2				1.6
	FG5 #213					904.9	0.3	904.3	-0.3		
	FG5 #217	900.4	-4.2								-4.2
	FG5 #241							906.0	1.4		1.4
2012/04 参照値 900.4μGal	FG5 #201	903.9	3.5	905.2	4.8						4.2
	FG5 #213					893.0	-7.4	900.4	0.0		
	FG5 #217	899.8	-0.6					905.5	5.1		2.3
	A10 #017			893.2	-7.2	899.1	-1.3				-4.2
2013/04 参照値 898.1μGal	FG5 #104			904.7	6.7	900.9	2.9				4.8
	FG5 #201	898.1	0.1	900.3	2.3						1.2
	FG5 #213					897.9	-0.1	898.2	0.2		
	FG5 #217	906.2	8.2					907.0	9.0		8.6
2014/04 参照値 893.2μGal	FG5 #104			896.5	3.3	899.0	5.8				4.5
	FG5 #210							896.4	3.2		3.2
	FG5 #212	894.2	1.0	893.7	0.5						0.8
	FG5 #213					893.2	-2.3				
2015/04 参照値 891.8μGal	FG5 #104	899.0	7.3								7.3
	FG5 #203			895.9	4.1			901.0	9.3		6.7
	FG5 #210									897.0	5.3
	FG5 #212	894.8	3.0								5.3
	FG5 #213	894.2	2.5			889.3	-2.5				3.0
FG5 #217			893.7	2.0			891.9	0.1		1.1	

※ 下線で示した重力値は、観測不備のため、参照値の計算から除外。下線で示した偏差の平均は、5.0μGal を超えた FG5。灰色は国土地理院保有の FG5。橙は産総研計量標準総合センター保有の FG5。FG5 の所有機関は、以下のとおり。
#104,#201 及び#203：国土地理院，#109,#212 及び#241：東京大学地震研究所，#210：京都大学理学研究科，#213：産総研（計量標準総合センター），#217：産総研（地質調査総合センター），A10#017：九州大学工学研究院

表-15 石岡測地観測局国内比較観測結果

測定年月	重力計	FGS		A		B		C		D	
		g μGal	S.D. μGal	g μGal	S.D. μGal	g μGal	S.D. μGal	g μGal	S.D. μGal	g μGal	S.D. μGal
2016/04 重力値 979 951.000 μGal	FG5 #203	282.4 ± 0.20	10.4					279.7 ± 0.16	9.1		
	FG5 #210					277.2 ± 0.26	13.2				
	FG5 #213	276.5 ± 0.14	7.6	276.1 ± 0.19	10.1					267.3 ± 0.25	14.7
	FG5 #217			277.9 ± 0.16	10.8					265.6 ± 0.19	11.2
	FG5 #225 FG5 #241					282.8 ± 0.19	19.1				
2017/04 重力値 979 951.000 μGal	FG5 #201	277.4 ± 0.12	13.0			278.1 ± 0.09	9.0				
	FG5 #210					278.5 ± 0.25	21.6	271.0 ± 0.14	14.6		
	FG5 #212	275.9 ± 0.13	13.5								
	FG5 #217							272.6 ± 0.17	17.9	261.0 ± 0.20	11.8
較差(μGal)		1.5		1.8		5.6		8.7		6.3	

※ FG5 の所有機関は、以下のとおり。#104,#201 及び#203：国土地理院，#109,#212 及び#241：東京大学地震研究所，#210：京都大学理学研究科，#213：産総研（計量標準総合センター），#217：産総研（地質調査総合センター），A10#017：九州大学工学研究院

表-16 国土地理院がFG5で実施した絶対重力測量の一覧

番号	基準重力点 点名	観測年月	1回目観測 [μgal]		2回目観測 [μgal]		3回目観測 [μgal]		4回目観測 [μgal]		重力差 [μgal]	重力変化 [μgal/year]	鉛直勾配 [μGal/mm]	金属標上の 重力値 [μgal]
			重力値	標準 偏差	重力値	標準 偏差	重力値	標準 偏差	重力値	標準 偏差				
1	稚内	1回目：2007年08月 2回目：1996年06月 3回目：2007年06月	980 626 713.4 980 495 124.9	90.70 20.17	980 495 132.6	18.47						0.7	-0.29602	980 627 098.2
2	新十津川	1回目：1998年06月 2回目：2007年09月 3回目：2013年08月	980 634 348.1	21.63	980 634 356.3	51.17	980 634 361.4	16.1			13.3	0.9	-0.30490	980 634 757.8
3	釧路	1回目：1998年06月 2回目：2004年03月 3回目：2007年07月	980 418 665.2	35.53	980 418 682.2	15.67	980 418 681.0	29.6			15.8	1.8	-0.30483	980 419 077.3
4	帯広	1回目：2006年06月 2回目：2010年06月	980 400 283.4	14.27	980 400 282.0	11.98					-1.4	-0.3	-0.31079	980 400 686.0
5	函館	1回目：2006年09月 2回目：2012年06月	980 260 796.2	13.06	980 260 801.6	11.04					5.4	0.9	-0.31578	980 261 212.1
6	弘前	1回目：2010年10月 2回目：2011年09月 3回目：2012年06月	980 342 381.3	17.38	980 342 364.4	44.28	980 342 363.6	17.7			-17.7	-10.6	-0.32161	980 342 781.7
7	八戸	1回目：2007年10月 2回目：2011年10月	980 121 367.7	9.26	980 121 355.3	9.64					-12.4	-3.1	-0.28936	980 121 731.5
8	江刺	1回目：2005年07月 2回目：2010年11月 3回目：2011年08月	980 065 474.5	18.16	980 065 481.7	15.52	980 065 460.1	38.71			-21.6	-30.7	-0.29032	980 065 837.5
9	仙台	4回目：2016年06月							980 065 434.5	12.26			-0.28930	
10	筑波	1回目：2012年06月 2回目：1998年03月 3回目：2010年03月	979 950 840.0 979 428 439.9	33.66	979 428 456.9	24.64					17.0	1.4	-0.34714	979 951 222.0
11	父島	1回目：2006年01月 2回目：2008年12月 3回目：2012年07月	979 690 311.8	110.49	979 690 321.0	34.98	979 690 339.4	54.5			27.6	4.2	-0.37259	979 690 823.8
12	鹿野山	1回目：1996年04月 2回目：2014年01月		49.50									-0.26635	979 725 540.3
13	掛川												-0.25954	979 752 441.8
14	御前崎													

番号	基準重力点 点名	観測年月	1回目観測 [μgal] 重力値 標準 偏差	2回目観測 [μgal] 重力値 標準 偏差	3回目観測 [μgal] 重力値 標準 偏差	4回目観測 [μgal] 重力値 標準 偏差	重力差 [μgal]	重力変化 [μgal/year]	鉛直勾配 [μGal/mm]	金属標上の 重力値 [μgal]
15	飯田	1回目：2004年11月 2回目：2004年09月	979 666 587.3 17.05						-0.29231	979 666 967.3
16	金沢	1回目：2004年08月 2回目：2005年05月 3回目：2008年09月	979 845 820.8 38.68 979 931 094.4 32.89	979 931 090.7 24.32	979 931 087.4 13.5		-7.0	-1.7	-0.28125	979 846 114.7
17	長岡	1回目：1997年08月 2回目：2003年11月 3回目：2004年11月	979 772 695.7 7.20	979 772 706.6 59.13	979 772 685.7 6.4		-10.0	-1.4	-0.23247	979 772 987.9
18	松代	1回目：2003年08月 2回目：2009年06月 3回目：2016年02月	979 794 444.1 20.09 979 735 013.5 9.16	979 735 022.7 18.14			9.2	1.4	-0.27928	979 735 385.8
19	松江	1回目：1995年10月 2回目：2003年05月	979 707 312.6 51.00	979 707 306.7 34.51			-5.9	-0.8	-0.27797	979 707 668.1
20	串本	1回目：2002年11月 2回目：1996年08月 3回目：2002年08月	979 616 121.8 10.43 979 618 668.3 14.90	979 618 680.6 13.27			12.3	2.0	-0.33554	979 616 646.8
21	京都 (京都C)	1回目：1996年09月 2回目：2000年01月	979 729 047.4 25.43 979 470 255.3 31.47						-0.33964	979 729 488.9
22	岡山	1回目：2009年10月 2回目：2014年09月	979 589 205.5 8.26	979 589 217.7 16.11			12.2	2.5	-0.36758	979 589 695.6
23	広島	1回目：2014年06月 2回目：2009年01月 3回目：2010年07月	979 597 330.5 8.09 979 669 544.2 8.64	979 669 548.0 11.35			3.8	0.7	-0.22898	979 669 845.7
24	須佐	1回目：1997年07月 2回目：2001年07月 3回目：2010年07月	979 614 165.0 16.82	979 614 166.4 11.91	979 614 175.0 6.2		10.0	0.8	-0.28551	979 614 546.2
25	高知	1回目：1995年11月 2回目：2016年07月	979 511 243.9 103.30						-0.32250	979 511 663.2
26	足摺	1回目：2001年11月 2回目：2013年09月	979 465 253.3 14.34	979 465 262.2 14.73			8.9	0.7	-0.27696	979 465 622.2
27	愛媛									
28	室戸									
29	福岡									
30	熊本									
31	延岡									

番号	基準重力点 点名	観測年月	1回目観測 [μgal]		2回目観測 [μgal]		3回目観測 [μgal]		4回目観測 [μgal]		重力差 [μgal]	重力変化 [μgal/year]	鉛直勾配 [μGal/mm]	金属標上の 重力値 [μgal]
			重力値	標準 偏差	重力値	標準 偏差	重力値	標準 偏差	重力値	標準 偏差				
32	始良	1回目: 1997年07月	979 430 994.3	40.25	979 430 993.0	13.62	979 431 006.1	8.8	11.8	0.8	979 431 460.8			
		2回目: 2001年09月												
		3回目: 2012年09月												
33	福江	1回目: 2011年02月	979 564 182.1	6.17	979 095 589.7	39.90	979 005 604.5	19.5	0.0	979 095 955.7				
		1回目: 2012年02月	979 226 616.4	8.24										
34	奄美	1回目: 2013年09月	979 625 037.2	10.96	979 005 585.0	9.12	979 006 034.7	1.8	-0.28154	979 095 955.7				
		2回目: 2011年11月	979 095 589.4	22.34										
35	対馬	1回目: 2013年09月	979 625 037.2	10.96	979 005 585.0	9.12	979 006 034.7	1.8	-0.28154	979 095 955.7				
		2回目: 2011年11月	979 095 589.4	22.34										
36	那覇	1回目: 2001年01月	979 095 589.4	22.34	979 005 585.0	9.12	979 006 034.7	1.8	-0.28154	979 095 955.7				
		2回目: 2011年11月	979 095 589.4	22.34										
37	石垣島	1回目: 2001年01月	979 095 589.4	22.34	979 005 585.0	9.12	979 006 034.7	1.8	-0.28154	979 095 955.7				
		2回目: 2011年11月	979 095 589.4	22.34										

※ 重力値の補正処理は、吉田 (2018) のとおりに実施。金属標直上の重力値の内、太字は JGSN2016 の重力値。下線は JGSN2016 に含まない重力値。掛川 FGS は 処理ソフトウェアが古く、統計処理を行っていないため参考値。仙台 FGS の 4 回目の測定は、東北地方太平洋沖地震後に実施したため、重力差には、直前の前回との差を示した。また、鉛直勾配も 4 回目測定時に新たに観測した。

参考文献

- 秋山忠之, 杉原和久, 川本利一, 木村勲, 藤原智, 都筑三千夫, 黒石裕樹 (1992) : 房総における重力異常調査, 国土地理院時報, 75, 50-52.
- 東敏博, 土井浩一郎, 早河秀章, 風間卓仁, 太田晴美, 大藪伸吾, 羽入朋子, 岩波俊介, 青山雄一, 澁谷和雄, 福田洋一 (2013) : 南極昭和基地における絶対重力計 FG5 による重力測定と重力経年変化, 測地学会誌, 59, 2, 37-43.
- Boullanger, Yu. D et al., (1991) : Results of 3rd International Comparison of Absolute Gravimeters in Sèvres 1989, Bull. D'inform., BGI, 68, 24-44.
- 平井英明 (2000) : 岩手山における機動観測, 国土地理院時報, 93, 1-11.
- 平岡喜文, 木村勲, 大久保修平, 古屋正人, 東敏博, 福田洋一 (2001) : 絶対重力計 FG5 の相互比較, 日本測地学会第 96 回講演会要旨集, 161-162.
- IAG Resolutions (1987) : RESOLUTIONS adopted by the International Association of Geodesy, VOEUX, 275-281.
- 井内登, 加納克巳, 藤井陽一郎 (1972) : 大島における重力変化の研究 (II), 測地学会誌, 18, 104-111.
- 加藤照之, 津村建四朗 (1980) : 潮位記録から推定される日本の垂直地殻変動 (1951~1978), 東京大学地震研究所彙報, 54, 3, 559-628.
- Koji Matsumoto, Tadahiro Sato, Takashi Takanezawa and Masatsugu Ooe (2001) : GOTIC2 : A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, 測地学会誌, 47, 243-248.
- 国土地理院 (1976) : 日本重力基準網 1975 の設定, 測地学会誌, 22 (2), 65-76.
- 国土地理院 (1999) : 人工衛星の合成開口レーダーによって捉えた岩手山の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 61, 86-90.
- 国土地理院 (2004a) : 北海道地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 71, 135-138.
- 国土地理院 (2004b) : 帯広における絶対重力測定, 地震予知連絡会会報, 72, 96-97.
- 国土地理院 (2008) : 北陸・中部地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 80, 374-379.
- 国土地理院 (2009) : 北陸・中部地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 81, 483-489.
- 国土地理院 (2013) : 東海地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 89, 184-225.
- 国土地理院 (2016) : 東海地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報 95, 187-235.
- 町田守人, 木村勲, 小菅俊宏, 安藤久, 豊田友夫, 田中愛幸, 大久保修平 (2000) : 岩手山周辺における重力観測, 国土地理院時報, 93, 19-27.
- 松本弘一 (2000) : 長さ標準の現状と課題, 精密光学会誌, 66, 11, 1671-1674.
- 宮原伐折羅, 吉田賢司, 山本宏章, 松尾功二, 宮崎隆幸, 宗包浩志 (2018) : 国土地理院の重力測量の展望—新たな観測技術と重力基準の将来像—, 国土地理院時報, 131, 95-108.
- Morelli, C., C. Gantar, T. Honkasalo, R. K. McConnell, J. G. Tanner, B. Szabo, U. Uotila and C. T. Whalen (1974): The International Gravity Standardization Net 1971 (I.G.S.N.71), Publ. Spec., 4, Bull. Geod., 1-194.
- 村上亮, 太島和雄 (1981) : 可搬型絶対重力計について, 国土地理院時報, 53, 35-40.
- 村上真幸, 吉田義一 (1987) : 伊豆大島における水準重力測量の結果, 国土地理院時報, 66, 5-12.
- 中川一郎, 里村幹夫, 福田洋一, 中井新二, 瀬戸孝夫, 太島和雄, 井内登, 萩原幸男, 田島広一, 井筒屋貞勝, 柳沢道夫, 花田英夫, 友田文好, 藤本博巳, 古田俊夫, 大川史郎 (1977) : ラコスト重力計 (G 型) の定数検定, 測地学会誌, 23, 2, 63-73.
- 西久美子, 平岡喜文, 木村勲, 大久保修平, 古屋正人, 松本滋夫, 福田洋一, 東敏博, 杉原光彦 (2002) : 絶対重力計 FG5 の相互比較 (2), 日本測地学会第 98 回講演会要旨集, 173-174.
- 西村卓也, 村上亮, 飛田幹男, 中川弘之, 鷺谷威, 多田堯, 菅富美男, 藤咲淳一, 田村孝, 佐藤博行, 藤原智 (2000) : 岩手山の火山活動及び岩手県内陸北部の地震 (M6.1) の地殻変動と火山活動が地震を誘発した可能性について, 国土地理院時報, 94, 21-30.
- Olivier Francis, Henri Baumann and all the participants (2014) : International Comparison of Absolute Gravimeters, Final report, CCM.G-K2 Key Comparison, 1-31.
- 大久保修平 (1994) : 地震および火山噴火によって生じる重力とポテンシャルの変化—ディスロケーション理論に基づく定式化, 測地学会誌, 40, 1, 1-16.
- 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.
- 大久保修平 (2006) : 重力変動と地殻変動, 測地学会誌, 52, 4, 245-252.

- Sakuma, A. (1971): Recent developments in the absolute measure of gravitational acceleration, Nat. Bur. Stand. (U.S.), Spec. Publ., 343, 447-456.
- 瀬田勝男 (1998) : 長さ標準の不確かさ, 計測と制御, 37, 5, 318-321.
- 志知龍一 (1985) : 重力計の原理と特性および調整法, 名古屋大学理学部附属地震予知観測地域センター, 1-60.
- 菅原安宏, 宮原伐折羅, 吉田賢司, 山本宏章, 福田洋一 (2018) : 南極地域における国土地理院の重力測量—地球規模の重力場測定への貢献—, 国土地理院時報, 131, 109-121.
- 水藤尚, 西村卓也, 小沢慎三郎, 小林知勝, 飛田幹男, 今給黎哲郎, 原慎一郎, 矢来博司, 矢萩智裕, 木村久夫, 川元智司 (2011) : GEONET による平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地震時の地殻変動と震源断層モデル, 国土地理院時報, 122, 29-37.
- Tamura, Y. (1982) : A computer program for calculating the tide-generating force, Publ. Int. Latitude Obs. Mizusawa, Vol. 16, No. 1, p. 1-20.
25.
- Tanaka Y, Okubo S, Machida M, Kimura I and Kosuge T (2001) : First Detection of Absolute Gravity Change Caused by Earthquake, Geophysical Research Letters, 28, 15, 2979-2981.
- 都筑三千夫, 山本宏章 (1993) : SCINTREX 社製重力計 CG3 の特性について, 国土地理院時報, 77, 14-18.
- 山本宏章, 宮原伐折羅, 吉田賢司, 菅原安宏, 松尾功二, 宮崎隆幸 (2018) : 国土地理院の重力測量の歴史—観測技術と重力基準の変遷—, 国土地理院時報, 131, 1-19.
- 吉田賢司, 矢萩智裕, 平岡喜文, 宮原伐折羅, 山本宏章, 宮崎隆幸 (2018) : 日本重力基準網 2016 (JGSN2016) の構築, 国土地理院時報, 131, 53-93.