

日本重力基準網 2016 (JGSN2016) の構築 Establishment of the Japan Gravity Standardization Net 2016 : JGSN2016

測地部 吉田賢司¹・矢萩智裕・平岡喜文・宮原伐折羅²・山本宏章³
Geodetic Department Kenji YOSHIDA, Toshihiro YAHAGI, Yoshifumi HIRAOKA,
Basara MIYAHARA and Hiroaki YAMAMOTO
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、全国に等しく正確な重力値を与えることを目的として重力点を設置し、正確な標高を決定する際の重力補正、質量・力・トルクなど計測の国家計量標準の検定、地下構造探査等のための重力測定のための基準等、社会や科学で広く活用される重力値を提供している。

重力基準網は、重力点のネットワークからなる重力の基盤で、国際的な取り決めに準じた正確な重力値を利用者に与える役割を果たしている。1976年に整備した日本の重力基準網「日本重力基準網 1975」は、公表から約 40 年が経過し、その間に生じた地殻変動等によって重力値の変化が累積したために、場所によっては日本重力基準網 1975 と実際の重力分布の間に 0.1mGal に達する乖離が生じている。そこで、最新の測定に基づく信頼性の高い重力値を広く社会に提供することを目的に、「日本重力基準網 2016」を 2017 年 3 月 15 日に公表した。日本重力基準網 2016 は、FG5 絶対重力計を用いて全国 34 か所に基準重力点を設けるとともに、ラコスト G 型重力計を用いて全国 262 か所に一等重力点（水準点等に取り付けた分を含む）を設けて空間密度を補い、全国を約 70km の平均間隔で網羅する重力値の基準を実現した。その精度は基準重力点で 0.006mGal、一等重力点で 0.019mGal と見積もられ、JGSN75 と比べて 1 桁高い精度となっている。

1. はじめに

重力基準網は、国際的な取り決めに準じた重力値を利用者に与える重力の基盤で、物理的に参照が可能な重力点のネットワークで構成される。現在、国際的に用いられる重力値の基準は、国際測地学・地球物理学連合 (International Union for Geodesy and Geophysics, 以下「IUGG」という.) が 1971 年にモスクワの第 15 回総会で採択した、「国際重力基準網 1971 (The International Gravity Standardization Net 1971, 以下「IGSN71」という.) (Morelli et al., 1974) である。IGSN71 は、世界 494 都市 1,854 の重力点で構成され、10 個の絶対重力測定、約 1,200 個の重力

振子の測定及び約 12,000 個の相対重力計の測定結果を解析することで、地球の実用上の全範囲で 0.1mGal の精度を達成した (Suzuki, 1974; 鈴木, 1976)。

日本では、1976 年、IGSN71 に国内の重力測定を加えて「日本重力基準網 1975 (The Japan Gravity Standardization Net 1975, 以下「JGSN75」という.)」を構築した (国土地理院, 1976)。JGSN75 は、IGSN71 を構成する重力点 10 都市 16 点を含む、国内 110 都市 122 点で構成され、精度は、絶対値では IGSN71 に準じる 0.1mGal 程度、相対値では標準偏差で 0.035mGal とされた。更に、GA60 型絶対重力計 (Sakuma, 1971) を用いて 1985~1990 年に行った測定との比較では、精度 0.1mGal と推定された (Kuroishi and Murakami, 1991)。JGSN75 は、公表から 40 年以上にわたって、日本国内で重力値に公式な基準値を与える基準網として、質量・力・トルク等の計量分野の検定、地下の重力探査など広く用いられてきた。

JGSN75 は、長い間、広く国内の重力値に基準を与えてきたが、近年、更に高い精度で重力値を測定できる技術が普及してきた。1990 年代初頭に開発された Micro-g LaCoste 社の FG5 絶対重力計 (以下「FG5」という.) は、真空中で試験落体を自由落下させ、その落下距離と要した時間を精密に測定することで安定して重力の絶対値の測定が可能で、国際比較観測で性能を確認することにより、 μ Gal の精度で国際的に整合した絶対重力測定が可能となる (測地部, 1997)。国土地理院では、1993 年に 1 台、1995 年に 2 台の計 3 台の FG5 を導入し、高精度な重力値の測定を継続している。

また、日本列島は地殻活動が極めて活発なため、地震に伴う地盤変動や火山のマグマの移動による地下の質量の移動で重力値が時空間的に変化することが知られている。こうした変化に伴って、JGSN75 が定める重力値は、実際の重力分布と年々乖離が大きくなっていった。例えば、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.) では、東北地方の太平洋岸で 0.1mGal を超える重力変化が、平成 28 年 (2016 年) 熊本地震 (以

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

下「熊本地震」という.) では、震源断層近傍で 0.05mGal を超える重力変化が観測されている。このように、JGSN75 が提供する重力値では、地下の状態の推定など高精度な重力値を必要とする利用者の要望に応えられない可能性があった。

また、GNSS 測量で簡便に標高を求めるためには、標高の 0 を定めた正確なジオイド・モデルが必須であるが、その構築には重力に影響されるジオイド起伏を正確に表現するための全国の稠密な重力データが必要となる。国土地理院は、重力データに GNSS 測量や水準測量等を加味して全国のジオイド・モデルを構築し、GNSS による基準点測量のほか、公共測量の一部の水準測量でも標高の決定に利用できる環境を整備している(兒玉ほか, 2014)。しかし、精度を改善し、利活用を更に広げるためには、ジオイド起伏を詳細に表現した更に精密なジオイド・モデルの構築が不可欠である。重力の等ポテンシャル面のひとつであるジオイドを精密に表現するためには、互いに整合した精密な重力データを全国均一に整備する必要がある。

以上を踏まえ、最新の測定に基づく信頼性の高い重力値を広く社会に提供することを目的として、国土地理院は新たに「日本重力基準網 2016 (The Japan Gravity Standardization Net 2016, 以下「JGSN2016」という.)」を構築し、2017 年 3 月に公表した。JGSN2016 は、絶対重力測定を実施した全国の基準重力点 34 点及び相対重力測定を実施した一等重力点(水準点等に取り付けを含む) 262 点で構成されている。

JGSN2016 の構築では、国土地理院が従来から実施してきた重力測定を高度化するために、1) 国際比較観測に基づく FG5 のトレーサビリティの確保、2) GNSS 測量及び水準測量による重力点の位置情報の高精度化、3) 潮汐等の解析パラメータの統一による測定データ処理の整合性の向上、4) 最新の観測を用いた重力変化の反映、5) 網平均計算における最適な誤差パラメータの推定等、様々な改善を行った。

JGSN2016 の重力値の不確かさの評価では、網平均計算で推定した重力値が実測値をどれだけ再現するかについて実測値と推定値の残差から内部評価を行うとともに、実測値に一個抜き交差検定(Leave-One-Out Cross Validation, 以下「LOOCV」という.)を行うことで評価した。これらの評価結果では、JGSN2016 の精度は、基準重力点で 0.006mGal、一等重力点で 0.019mGal であった。また、計測機器の性能を生かした高精度な測定では、重力値を基準値として用いる際に重力の時間変化が無視できない、という指摘が利用者からあったため、絶対重力測定の測定値に関しては、公表する重力値に測定時期の情報を付与することとした(別表-1)。

2. JGSN2016 構築の方針と役割

重力基準網を構成する重力点の重力値は、理想的には、利用者が必要とする精度と時間分解能で重力場の空間分布を表現できることが望ましい。更に、重力点の空間配置は、地域の代表的な重力値を与えるために十分な密度を満たすよう設置する必要がある。しかしながら、実際にはこのような高精度かつ高時間分解能な測定を可能とする重力計はこれまでほとんど存在しなかった。最近では、絶対重力計と超伝導重力計(0.1nGal の公称精度で連続測定が可能な相対重力計)を組み合わせる高精度な連続測定を行っている事例もあるが、こうした長期的な連続観測を十分な数で全国に展開することは非常に困難である。そのため、国土地理院では、安定した場所を選点して一定期間継続して絶対重力測定を行い、得られた絶対重力値を基準に周辺の重力点に対して相対重力測定を行って重力値の高密度化を行う手法を用いている。これらの測定は、いずれも測定の時期が異なるため、同一の基準日を設けて同じ時期の重力値を決定することはできない。そこで、信頼できる全ての測定を網平均計算処理し、測定を行った期間全体で最も整合する重力値を求め、基準となる重力値を定めることとした。

こうして定めた重力値は、国内で計量や資源探査など社会や科学の分野で広く活用されるとともに、国際的にも地球の形状、特に物理的な高さである標高を定めるための重要な基盤である。地球の形状とその変化を求めるための重力測定は、1890 年代後半から国際測地学協会(International Association for Geodesy, 以下「IAG」という.)の主導で行われてきた。2000 年代の半ばになると、VLBI や GNSS 等が普及し、宇宙測地技術を用いた地球形状の把握が進んだため、2013 年に札幌で行われた第 23 回の IUGG 総会において、IAG は、それらの技術を統合して地球の形状と変化を継続して観測する、全地球統合測地観測システム(Global Geodetic Observing System, 以下「GGOS」という.)を提唱し、現在、様々な測地観測が GGOS のもとで相互に連携している。地球の重力がおよぶ空間を表現した重力場は、地球の形状と時間変化を知るために不可欠な基盤となる情報であるため、重力測定は、GGOS の根幹観測の一つに位置づけられている(Plag and Pearlman, 2009)。日本で測定される重力値が、こうした地球全体の形状の把握において適切に役割を果たすためには、国内の重力測定に基準値を与える日本の重力基準網が国際標準に整合している必要がある。JGSN75 は、IGSN71 に準拠することで国際的な取り決めに整合した重力基準網を整備してきたが、GNSS をはじめとする宇宙測地技術の急速な進歩に伴って地球の形状と変化の高精度な把握が進んだため、測位の

精度と釣り合う高い精度での重力場の把握が求められている。IGSN71 では、こうした要求を満たせないことから、IAG は 2015 年プラハの第 26 回 IUGG 総会において、“地球規模の絶対重力基準系の構築”を決議した (IAG, 2015)。決議では、絶対重力計の国際比較に基づいて、測定方法や補正方法等の重力基準網の構築に関する標準を取りまとめ、IGSN71 に代わる新たな重力基準網の作成が採択された。これを受け、日本の重力基準網にもさらなる精度向上が求められていた。

現在最も信頼が高い国際的に認められた重力測定のトレーサビリティは、メートル条約のもと、国際度量衡局 (BIPM: Bureau International des Poids et Mesures) の後援で概ね 4 年ごとに実施されている絶対重力計の国際相互比較 (International Comparison of Absolute Gravimeters, 以下「ICAG」という。) に基づいている。これは、各国の計量機関が主体となつて行う FG5 を中心とした絶対重力計の並行観測による国際比較観測で、参加した機器が一定の範囲内で整合することをもって絶対重力計のトレーサビリティを確認している。日本からは、産業技術総合研究所計量標準総合センター (以下「計量標準総合センター」という。) が所有する FG5 (#213) がこの比較に参加して国際的に機器の整合を確認している。国土地理院では、この FG5 (#213) と比較観測を行い、所有する FG5 が国際標準と整合することを確認することで、国内の重力測定に用いる機器のトレーサビリティを確保することとした。これにより、日本の重力基準網を構成する重力点で実施する測定において、国際的に精度が確認された機器と同程度の不確かさで行われたと見なすことができる。

3. JGSN2016 構築の手法

3.1 使用した測定機器及びデータ

JGSN2016 は、FG5 を用いた絶対重力測定で重力値を決定した基準重力点 34 点及び主にラコスト G 型重力計 (LaCoste-Romberg 社製、以下「ラコスト重力計」という。) を用いた相対重力測定で重力値を決定した一等重力点 (水準点等に取り付けた分を含む) 262 点で構成される (別図-1)。

絶対重力測定は、国土地理院が所有する 3 台の FG5 (#104, #201, #203) で行った。国土地理院では、FG5 の校正を目的に、計量標準総合センターをはじめとする国内の機関と連携して年 1 回の国内比較観測を実施している。計量標準総合センターの FG5 (#213) は定期的に ICAG に参加しており、2013 年の第 9 回の観測 (ICAG2013) では、その器差は、標準偏差が $1.9\mu\text{Gal}$ 、正の最大較差が $+1.7\mu\text{Gal}$ 、負の最大較差が $-3.7\mu\text{Gal}$ であった (Francis et al., 2014)。このように国際観測と整合を確認した FG5 (#213)

と国土地理院の 3 台の FG5 を国内で比較観測して整合を確認することで、JGSN2016 の構築に使用した機器の精度を確認している。

相対重力測定は、国土地理院が所有する 3 台のラコスト重力計 (G-83, G-118, G-554) で行った。ラコスト重力計の校正は、毎年 1 回、年度の当初に筑波山の点検線で実施し、器械の性能が要求精度を満たすことを確認している (山本ほか, 2018)。

JGSN2016 の構築では、2002~2016 年に実施した FG5 による絶対重力測定及びラコスト重力計による相対重力測定で得られたデータを用いた。測定はこれらを組み合わせたハイブリッド重力測定 (大久保, 2001) を中心に実施した。測定を行った地区名と測定年を表-1 に示す。

表-1 JGSN2016 の構築に使用したデータの測定年

地 区	絶対	相対	地 区	絶対	相対
稚 内	2007	2007	松 江	2003	2003
新 十 津 川	2007	2007	串 本	2009	2009
釧 路	2013	2013	京 都	2003	2003
帯 広	2007	2007	近 畿	-----	2004
函 館	2010	2010	岡 山	2002	2002
弘 前	2012	2012	広 島	2002	2002
八 戸	2012	2011	足 摺	2014	2014
江 刺	2011	2011	愛 媛	2014	2014
仙 台	2011	2011	室 戸	2014	2014
東 北	-----	2006	福 岡	2010	2010
筑 波	2012	2006	熊 本	2016	2016
鹿 野 山	2012	2005 2012	延 岡	2013	2013
御 前 崎	2014	2005 2013	始 良	2012	2012
飯 田	2004	2004	福 江	2011	2011
金 沢	2004	2004	奄 美	2012	2012
長 岡	2008	2004	対 馬	2013	2013
		2005 2008	那 覇	2011	2011
松 代	2004	2003	石 垣 島	2011	2011

東北及び近畿地区は、近傍に基準重力点がないため隣接地区から相対重力測定を実施。

3.2 構築手順

JGSN2016 は、以下の手順に従って構築した。

- 1) 絶対重力測定で基準重力点の重力値を測定
- 2) 相対重力測定で一等重力点と基準重力点及び一等重力点間の重力差を測定
- 3) 基準重力点の重力値を固定した網平均計算で一等重力点の重力値を推定

図-1 に構築の流れを示す。左列に絶対重力に関する

る処理，右列に相対重力に関する処理の流れを示している．絶対及び相対重力測定のいずれにおいても，各測定点の重力値を計算する際には，固体地球潮汐及び海洋潮汐に起因する重力変化を考慮して潮汐の影響を除いた状態の重力値に補正する必要がある．固体地球潮汐及び海洋潮汐の影響は，測定点の位置によって異なるため，補正に先立って重力点の高精度な位置情報（緯度，経度，標高及び楕円体高）が必要となる．

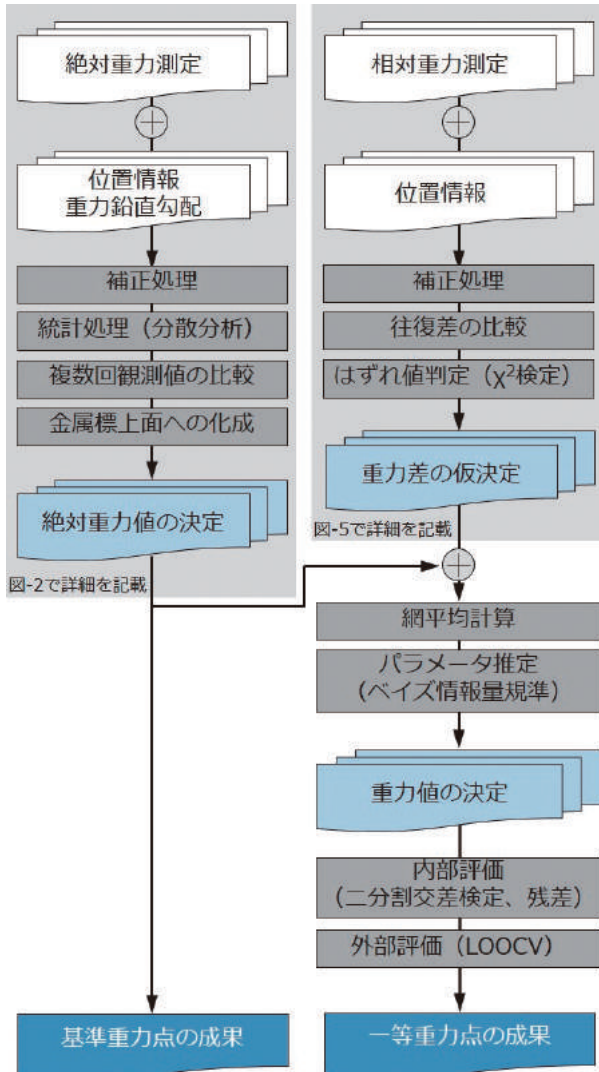


図-1 JGSN2016 構築の流れ

絶対重力測定の補正処理では，まず，g9.0 (Micor-g LaCoste, Inc., 2012) を用いて測定値から固体地球潮汐，気圧及び極運動による変動を除き，次に，GOTIC2 (Matsumoto et al., 2001) を用いて海洋潮汐による変動を除く補正を行う．更に，FG5 では，膨大な測定値の時系列を平均して最確値を定めるため，外れ値の処理を行う．そのためにはレーザー出力，落下の開始位置及びスーパースプリングの状態等，機器の状態データに照らして機器の動作，測定状態

を確認し，これらの異常に起因する外れ値を取り除く．次に，分散分析を用いて統計的に外れ値を処理し，重力値の最確値を算出する．更に，異なる時期に複数回の測定を実施している測定点では，測定値を比較し整合性を確認することで，最適な重力値と測定時刻を採用する．

最後に，測定点の重力の鉛直勾配を用いて器械位置（金属標上面 1.30m）から基準重力点（金属標上面 0.0m）へ化成を行って重力値を確定する．

相対重力測定では，まず，測定されたばねの伸び（読定値）と相対重力値の間の非線形性を補正する換算定数表（Counter Table，以下「CT」という．）を用いて読定値を重力差に換算した後，固体地球潮汐及び海洋潮汐補正，金属標上面への器械高の化成，大気圧補正，ドリフト（測定中の時間経過に伴うスプリングの伸び）補正及びスケールファクター（重力値の変化に対するスプリングの伸びの線形応答係数，以下「SF」という．）による補正を行う．補正処理後には，外れ値の処理を行う．まず，往復測定の測定値にテア（強い衝撃などの際に発生するスプリングの急激な伸び）の影響や誤読定がないことを確認するため，器械ごとに測定値の往復差を比較する．次に，3 台のラコスト重力計で器械ごとの重力差の整合性を確認するため χ^2 検定を用いて外れ値を除き，測定点間の重力差を仮決定する．重力差の最確値は，網平均計算で推定する．

網平均計算では，基準重力点の絶対重力値を与点とした上で，SF，ドリフト及び周期誤差（重力の読定値に対する器械の応答特性）を推定パラメータとして，最小二乗法によって最適なパラメータを推定し，一等重力点等の重力値を決定する．SF の分割数や周期誤差の次数など器械特性を適切に表現するモデルを選択するために，ベイズ情報量規準 (Bayesian Information Criterion, 以下「BIC」という． Schwarz, 1978) を用いて最適な推定パラメータの組合せを決定した．

JGSN2016 の構築では，重力値の不確かさを評価するため，内部評価及び LOOCV を行い，重力測定の再現性を評価した．構築の各段階で新たに導入した手法や重力値の評価手法及び結果は，次章以降で詳述する．

4. 絶対重力測定のデータ処理

基準重力点の絶対重力値には，幅広い用途に対応できる高い確度と精度が求められる．測定値は，潮汐や極運動等の測定時の地球の状態，測定点周辺の地盤振動，陸水の分布等，様々な条件で変化するため，可能な限り測定条件を等しくした上で多数の測定を行い，真の値に近くばらつきの小さい重力値を得る必要がある．これを実現する流れについて，

図-1 の左列で示した絶対重力測定データの処理の詳細を図-2 に示す。

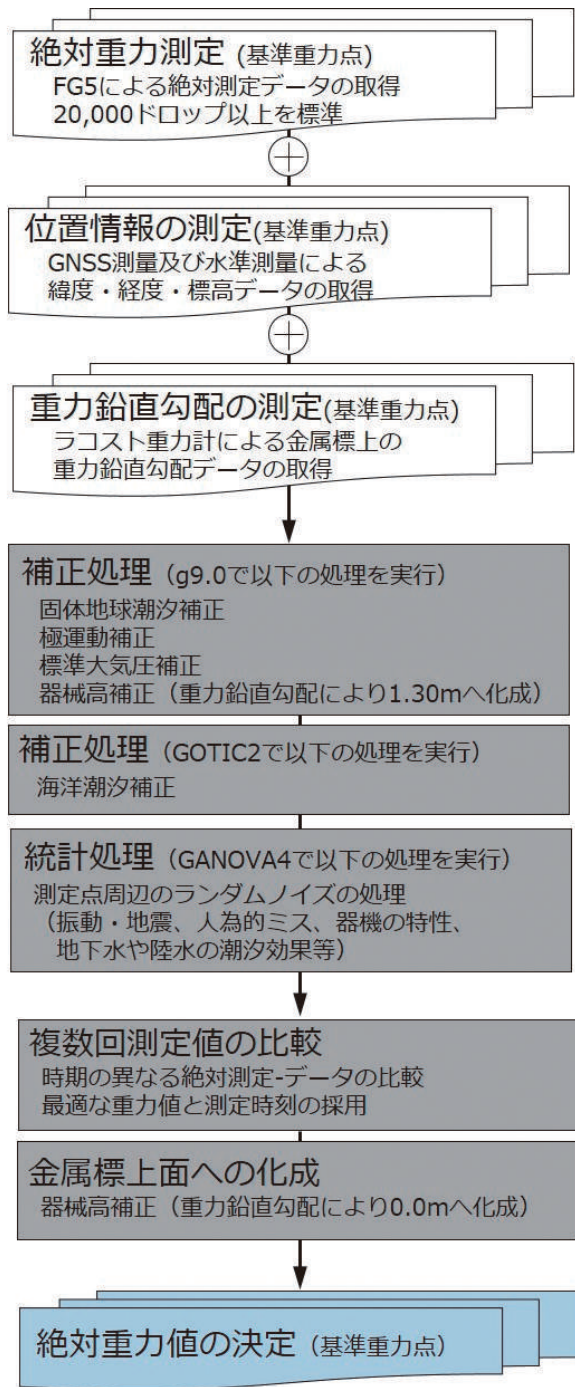


図-2 絶対重力測定データの処理の流れ

補正処理のうち、潮汐をはじめとした地球の形状や状態の変化の影響、具体的には、固体地球潮汐及び海洋潮汐、極運動並びに標準大気圧については、理論と測定から適切なモデルが構築されているため、十分な精度で補正が可能である。一方、観測点の周辺環境に起因するばらつきを適切に補正するには、原因となった環境の変化を十分な精度で把握する必

要がある。しかし、こうした外部データは取得が困難なため、現状ではランダムなノイズとして扱わざるを得ず、可能な限り多くの測定値に対して統計的な平均処理を行うことでノイズの影響の少ない最確値を求めている。測定機器の不調、設定及び設置誤差並びに突発的な振動等のノイズがデータに含まれると誤差が大きくなるため、平均処理するデータでは、明らかに品質の悪い誤差を含んだ測定、すなわち外れ値を統計的に処理して除去した。

最後に、重力値を誰でも容易に使用できるようにするため、物理的に参照可能な点、すなわち基準重力点の金属標上面の高さへと化成する。測定した高さから金属標上面への化成するために、絶対重力測定時に基準重力点上で重力鉛直勾配を測定し、その値を用いて、器械高（金属標から見たFG5の測定位置の高さ）分の重力差を測定結果に加味している。

4.1 測定の回数

FG5の測定値には、機器の設置や調整時に生じる誤差、振動など周辺環境によるノイズ、地下水や陸水の潮汐の影響等が含まれる。これら全ての影響を適切に除くことは難しいため、こうした測定値のばらつきを統計的に平均して信頼性の高い値を取得することを目的として、統計的に外れ値を処理するために十分な数の測定を測定点ごとに行っている。具体的には、一つの測定点で7~10日間に20,000回以上のドロップ（落体の自由落下）を行い、測定データを取得することを標準に測定している。データは、測定期間中に連続して得られるが、極運動に関する補正情報が1日ごとに異なるため、補正処理は測定日ごとに行っている。

4.2 測定点の位置情報

変動を続ける地球において基準値とする重力値を算出するためには、測定値を標準的な状態の地球、すなわち時間変化を平均した状態の地球における値に化成する必要がある。そこで、国土地理院の重力測定では、国際測地学協会第18回総会の決議（IAG resolution, 1983; Rapp, 1983）を受け、基準に用いる重力値は潮汐の影響のうち時間変化成分と潮汐力の永年成分は除去するが、固体地球の永年変形は保存するゼロ潮汐系（zero-tide system）で定義することとした。潮汐による時間変化を重力の測定値から取り除くための理論潮汐の補正計算には、測定点の正確な位置情報（緯度、経度及び標高）が必要となる。JGSN2016では、従来用いていた観測点の位置情報を精査し、現時点で最も信頼できる位置情報を使用した（山本ほか, 2018）。JGSN2016の構築で用いた位置情報の測量方法を表-2に示す。

表-2 位置情報の測量方法と点数（括弧内は分解能）

	測量方法 (精度)	基準 重力点	一等 重力点
経緯度	GNSS 地上偏心 (0.001 秒)	13 点	11 点
	GNSS 屋上偏心 (0.01 秒)	12 点	23 点
	地理院地図 (0.5 秒)	9 点	49 点
標高	水準 (0.001m)	22 点	66 点
	GNSS 及び水準 (0.01m)	8 点	2 点
	地理院地図等 (0.3m)	4 点	15 点

※日本周辺における 1 秒の距離は 25~30m 程度

※一等重力点のうち水準点等に取り付けた点を除く

屋外では GNSS 測量で容易に正確な位置情報が得られるが、屋内で正確な位置情報を付加するには、各測点で最適と思われる測量方法を選択する必要がある。約 5 割の重力点では、水平位置 0.01 秒位（≒ 0.3m）で実測ができたが、実測できなかった重力点では、国土地理院のウェブ地図（以下「地理院地図」という。）で計測した。標高では、約 8 割の重力点において 0.001m 位で直接水準測量を行い、直接水準測量が困難な点では、GNSS 測量と水準測量の組み合わせ、若しくは地理院地図で計測した。

4.3 測定重力値に対する補正

4.1 で得られた測定重力値に対して、4.2 の位置情報を用いて理論若しくは経験的モデルを適用した補正を行う。固体地球潮汐、極運動、標準大気圧、器械高は、g9.0 で補正し、海洋潮汐は後述する平均処理と同時に GOTIC2 を用いて補正を行う。

4.3.1 固体地球潮汐及び海洋潮汐補正

固体地球潮汐補正とは、月と太陽が測定点に及ぼす重力場、それに起因する地球の変形による質量の再配分、測定点位置の変化に起因する重力変化を取り除く補正である。計算は、g9.0 に組み込まれた ETGTAB (Wenzel, 1996) を用いて行い、その際に弾性モデル（ラブ数モデル）には Wahr-Dehant-Zschau (Dehant, 1987; Dehant and Zschau, 1989; WAHR, 1981) を採用し、潮汐ポテンシャルを調和分析によって約 1,200 の分潮にわけて分潮群（主要分潮）ごとに表-3 に示した δ ファクター（潮汐ポテンシャルに対する地球の弾性応答の係数）と位相を与え、それらの寄与を合計する間接的な方法で計算した。

表-3 主要分潮に対する δ ファクターと位相

主要分潮	δ ファクター	位相の進み
DC	1.000000	0.0000
Long	1.160000	0.0000
Q1	1.154250	0.0000
O1	1.154240	0.0000
P1	1.149150	0.0000
K1	1.134890	0.0000
N2	1.161720	0.0000
M2	1.161720	0.0000
S2	1.161720	0.0000
K2	1.161720	0.0000
M3	1.07338	0.0000
M4	1.03900	0.0000

基準系の分類は、基準とする状態の地球において潮汐の影響をどのように扱うかによって異なり、重力やジオイドでは、潮汐の影響を全て除去した non-tidal geoid/gravity, 時間変動成分と潮汐力の永年成分は除去するが固体地球の永年変形は保存する zero tide geoid/gravity, 潮汐と固体地球の変形のうち時間成分だけ除去して永年成分を保存する mean tide geoid/gravity の 3 通りに分類できる (黒石, 2000). 間接的な方法では、永年潮汐成分 (DC) の δ ファクターに採用する値によって、基準系における潮汐の扱いが異なるが、JGSN2016 では、 δ ファクターの永年潮汐成分を 1.0 と設定した。これは、永久潮汐力のうち質量の再配分と観測点の変位の寄与を補正しないことに相当するため、zero tide geoid/gravity に準拠し (黒石, 2000), 前述の IAG 決議に準拠する。

海洋潮汐補正は、海水の移動による重力変化と海洋荷重による地殻の沈み込みの効果を取り除く処理である。海洋潮汐の補正に用いた GOTIC2 では、海水の移動による重力変化と海洋荷重による地殻の変形の影響を詳細な海洋メッシュを用いて積分計算することでその影響を精密に計算する (Matsumoto et al., 2001). 海洋潮汐モデルには、日本周辺の詳細な潮汐データを同化した国立天文台の NAO99b & NAO99Jb (Matsumoto et al., 2000) を用いた。このモデルは日本測地系に準拠しているため、世界測地系に準拠した測定点の経緯度を日本測地系に変換して処理する。なお、g9.0 の海洋潮汐補正のメッシュデータは、解像度が低く日本の海岸域に特徴的な海洋潮汐の影響を再現できないこと、GOTIC2 の固体地球潮汐の分潮データは、分潮数が少ないことから、ここでは使用していない。

4.3.2 極運動補正

地球の自転軸は、地球の形状軸に対して 10m 程度

ずれて運動する。これを極運動という。極運動によって測定点の自転軸からの距離が変化することで、測定点における遠心力が変化し重力場も変化する。地球の極運動は、宇宙測地技術を用いた観測で精密に把握されており、その運動を記述したものが地球姿勢パラメータ (Earth Orientation Parameters, 以下「EOP」という。) である。

国土地理院では、重力測定で極運動補正を行う際に、国際地球回転・基準系事業 (IERS : International Earth Rotation and Reference Systems Service) が Bulletin B (Petit and Luzum, 2011) として公表する EOP を用いている。EOP は、測定中も日々変化するため、測定終了後に日ごと (UTC0~24 時) にデータを分割して、解析セッションを再定義し、セッションごとに EOP を更新して補正を行っている。極運動による重力値の補正值 $\delta_g \mu\text{Gal}$ は、式 (1) で与えられる。ここで、 ω は地球の自転速度 (rad/s)、 a は赤道半径 (m)、 φ と λ は測定点の緯度と経度 (rad)、 x と y は EOP のうち極位置のずれ (rad) である。

$$\delta_g = -2 \times 1.164 \times 10^8 \omega^2 a 2 \sin \varphi \cos \varphi (x \cos \lambda - y \sin \lambda) \quad (1)$$

4.3.3 標準大気圧補正

大気圧の重力に対する影響は、大気の質量による直接的な引力効果と、気圧荷重の変化で固体地球が変形して生じる荷重効果の二つである。その重力変化の応答係数は、超伝導重力計による実測に基づいて、 $-0.3 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$ と推定されている (IAG, 1983)。JGSN2016 では、測定時の気圧 P に対する気圧変化の補正值 C_p (μGal) を式 (2) から求めた。なお、標高 H (m) の測点での標準大気圧 P_n (hPa) は、国際重力局 (BGI : International Gravimetric Bureau) の勧告式から式 (3) を採用した (IGC-WG II, 1988)。

$$C_p = +0.3 \times (P - P_n) \quad (2)$$

$$P_n = 1.01325 \times 10^3 (1 - 0.0065 \times H / 288.15)^{5.2559} \quad (3)$$

4.3.4 重力鉛直勾配と器械高補正

FG5 の測定では、落下槽中の落体の最高点 (落下開始位置) での重力値が求められる。FG5 の器械高は、金属標上面から見たこの最高点の高さで、器械の設置状況や器械固有の構造の違いに起因して数 mm から数 cm オーダーで異なる。通常、FG5 は、器械高が異なることによる補正量を最小限にするために測定の際に落体の最高点が概ね 1.30m となるよう設置し、重力値は金属標から 1.30m の高さに化成して器械高補正は行わない。

一方、国土地理院では地上での正確な重力値の提供を目的としていることから、利用者が物理的に参照できるように、基準重力点の金属標上面 (0.0m) における重力値を必要とする。そのため、地上から概ね 1.30m 分の重力を化成しなければならない。

一般的に、化成に用いる重力鉛直勾配は相対重力計を用いて各点で測定するため、測定誤差を含む可能性がある。勾配を測定する高さ (器械高) をほぼ等しくすることでその誤差の影響を軽減することができるが、化成する比高が大きいほど誤差が拡大する可能性があるため、金属標における重力値が必要な場合に限りこの補正を行う。

重力鉛直勾配は、正規楕円体上での正規重力では $0.3086 \text{mGal}/\text{m}$ となる。しかし、実際の重力鉛直勾配は周辺の質量の分布を反映して点ごとに異なるため、絶対重力測定時には、毎回、金属標上の高さの異なる 2 点 (0.00m 及び 1.20m) でラコスト重力計を用いて重力差を測定し、その点における重力鉛直勾配を算出して器械高補正に用いている。基準重力点の重力値の測量成果は、このように各点で実測した重力鉛直勾配を用いて器械高分の重力値を化成した値となっている。

4.4 外れ値の判定と平均処理

国土地理院の FG5 による重力測定では、160 ドロップを 1 セットとして、125 セット (=20,000 ドロップ) 以上の測定数を標準としている。これは、測定値が正規分布に従うと仮定した場合に、4.3 節の補正で除去できない人工ノイズ等の重力値の変化を平均処理により軽減するために統計的に必要な測定回数である。このように測定値の時系列に対して、統計処理で外れ値を除去した上で平均処理を行った。

4.4.1 分析の前提条件と実際の測定

絶対重力測定の平均処理では、まずセット内の重力値のばらつきを指標に各セットの採否を判断した上で、次に複数セット間のばらつきが有意かどうか分散分析の手法で判断して外れ値の判定を行った。ここでは各セットの分散が等しいことが前提条件となるが、実際には各セットの分散は等しいとは限らない。具体的には、測定点近傍の道路交通量の変化で振動ノイズが変わるため、昼は分散が大きく、夜間は小さくなる。また、測定点の気温が変わるとスーパースプリングの特性が変わるため、地盤の揺れを吸収する効果が低下して分散が大きくなる。他にも遠方地の地震波が測定点に到達する際に分散が大きくなるといった例が挙げられる。

4.4.2 代表的な分散の決定

4.4.1 で述べたとおり、FG5 では、全測定点で各セ

ットの分散が全て等しい測定を行うことは難しい。そこで完全な等分散性は追及せず、測定全体の代表的な分散の値を求めてそれに基づいて分散分析を行っている。そのためにはまず、地震や周辺の交通量の変化で突発的に極端に大きな分散を生じたセットを除外する必要がある。このようなセットを含むと、測定全体の代表的な分散が非常に大きく推定され、分散分析の判断基準に不適切となるためである。そこで、「分散が極端に大きい少数のセットを除外すれば、分散は平均的な値に収束して外れ値はごく少数になる」という仮定に基づいて以下の手順をとることとした。

手順①：測定全体の誤差平方和 S_e を採用ドロップ数 n と採用セット数 a の差で除することで測定全体の平均的なばらつきを示す分散 V_e を計算すると、 V_e 、 S_e は、式 (4)、式 (5) で表される。ここで、第 i セットの j 番目の測定重力値を y_{ij} とし、それぞれの添字の和をドット、その平均を上付きのバーで表す。ただし、第 i セットのドロップ数は r_i 、全セットのドロップ数 $n = \sum_i r_i$ とする。

$$V_e = S_e / (n - a) \quad (4)$$

$$S_e = \sum_{i,j} (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (5)$$

手順②：測定全体で最も分散の大きいセットを暫定的に外れ値とする。

手順③：暫定の外れ値を除いて V_e を再計算する。

手順④：手順③の処理の前後で V_e を比較する。

手順⑤：外れ値処理後に V_e が 2% 以上改善すれば暫定の外れ値としたセットをそのまま外れ値と確定する。改善が 2% 未満になるまで手順①～④を繰り返す。改善が 2% 未満であれば暫定の外れ値を採用値に戻して処理を終了する。ただし、採用数が全体の 80% 以下になった場合は強制的に繰り返しを終了する。

手順⑥：手順①～⑤で分散の大きいセットを除いたデータに対して分散分析を行う。

FG5 の測定値は、4.3 で示した様々な補正の後でも 2~3 μ Gal 程度の振幅で揺らぐことがある。陸水の潮汐の影響が主な原因と推察されるが、明確には解明されていない。こうした揺らぎは、測定値が平均値に対称な分布に従うと仮定すると多くの測定値を平均することで小さくできるため、手順⑤では、

こうした揺らぎを外れ値と判定しないよう経験的に閾値を 2% に設定した。

4.4.3 分散分析

4.4.2 の処理で分散の極端に大きなセットが除外されたとして、各セットの重力値の平均値は等しいと仮定する式 (6) を帰無仮説 H_0 とする。このとき、 H_0 のもとで測定全体の残差の平方和 S_r は式 (7) で表され、更に S_r は式 (8) のように複数セット間のばらつきを S_A とし、同じ条件下でのばらつきを表す級内平方和 S_e (又は誤差平方和) に分解される。ここで S_A 、 S_e は式 (9)、式 (10) である。

$$H_0 : \bar{y}_{1.} = \bar{y}_{2.} = \dots = \bar{y}_{a.} \quad (6)$$

$$S_r = \sum_{i,j} (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (7)$$

$$S_r = S_A + S_e \quad (8)$$

$$S_A = \sum_i r_i (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 \quad (9)$$

$$S_e = \sum_{i,j} (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (10)$$

S_A と S_e は独立で、それぞれ自由度 $v_A = a - 1$ 、 $v_e = n - a$ の χ^2 分布に従う。よって H_0 のもとで、式 (11) の F は、自由度 v_A 、 v_e の F 分布 $F(v_A, v_e)$ に従う。

$$F = \frac{S_A / v_A}{S_e / v_e} \quad (11)$$

JGSN2016 で用いた外れ値判定では、有意水準は統計検定において一般的に用いられる 5% とした。 H_0 が正しければ、同じ条件で多くの測定を実施、すなわち検定統計量 F を数多く用意した場合、それらの F 値が F 分布の上側 5% で $F_{0.05}(v_A, v_e)$ を上回るものの割合は 5% となり、統計的には起こりにくい現象といえる。そうした起こりにくい F 値が算出された場合には H_0 は棄却すべきと判断され、統計量 F 値が $F_{0.05}(v_A, v_e)$ より大きくなったとき、帰無仮説 H_0 は棄却されて、少なくとも一つのセットの平均重力値は他のセットの平均重力値と異なるという対立仮説 H_1 が間接的に示唆される。逆に F 値 $\leq F_{0.05}(v_A, v_e)$ となるとき、こうした F 値は 95% の確率で十分

に生じ得る現象となり、 H_0 が採択される。ただし、この手順で判定できるのは、複数セットの平均重力値に有意な較差があるかどうかのみであるため、この手順を再帰的に実行して複数の外れ値を判定する。つまり、セットの平均値から F 値を計算し、もし F 値 $> F_{0.05}(v_A, v_e)$ となって H_0 が棄却された場合は、全体の平均値からの較差が最も大きいセットを外れ値として除外した上で再度 F 値を計算する。これを F 値 $\leq F_{0.05}(v_A, v_e)$ となるまで繰り返し、残ったセットの平均重力値から全体の最確値と標準偏差を算出する。

4.4.4 最確値の算出

上述の手順で各セットの平均重力値に対して外れ値判定を行い、最終的に採用するセットを確定する。重力の最確値の算出は、採用した全てのセットをセットごとの採用測定数を重量に平均して求める。セットごとの平均重力値を g_i とすると、重力の最確値 G は式 (12) となる。この値は、測定全体の約 20,000 ドロップのうち、採用と判定した全てのドロップの等重量平均と等しい。

$$G = \sum_{i=1}^a r_i g_i / n \quad (12)$$

4.5 複数回測定結果の比較

絶対重力測定は、FG5 を用いて 1993 年から全国 34 か所の基準重力点で行い、その内 25 か所では複数回の測定を行っている (別表-2)。既に述べたとおり、重力は時空間的に変化するため、時期が異なる複数回の測定は一致しない。そこで、重力の時間変化と測定の信頼性を評価するため、25 点の基準重力点での複数回測定の結果を比較した。比較は、器械高補正の誤差を最小限にするため金属標上面 1.30m に化成した重力値で行い、器械高補正に用いる重力鉛直勾配は、絶対重力測定の際に測定した値を使用した。

絶対重力測定の測定間隔は、基準重力点ごとに異なるため、単純に重力差で比較することはできない。そこで、重力差を測定間隔で除した年間あたりの重力変化量で比較する。

東北地方太平洋沖地震の影響で重力値が大きく変化した基準重力点は、基準重力点「八戸」(八戸 FGS。以下、基準重力点名は「点名 FGS」と表記する。)、江刺 FGS、仙台 FGS 及び鹿野山 FGS の 4 点で、地

震を挟んだ期間で $-30.7 \sim +4.2 \mu\text{Gal}/\text{年}$ 相当の重力変化が見られた。また、熊本地震時には、熊本 FGS において地震の前後で $+13.2 \mu\text{Gal}/\text{年}$ 相当の重力変化が見られた。一方、 $\pm 1.0 \mu\text{Gal}/\text{年}$ 以下の小さな重力変化量を示す基準重力点は 25 点中 11 点で全国ほぼ均一に存在する。年間重力変化量が $-1.7 \sim +3.1 \mu\text{Gal}/\text{年}$ の中程度の範囲にある 7 点のうち、帯広 FGS、父島 FGS 及び広島 FGS の 3 点では、最初の測定が FG5 導入当初の 1996~1998 年に実施されており、機器及び測定手法が発展途上で、最適な測定手法を試行錯誤した際の誤差が含まれる可能性が高く、比較には適さない。残り 4 点のうち、長岡 FGS は 2004 年及び 2007 年に新潟県で生じた 2 回の地震による変動を含み、足摺 FGS 及び串本 FGS は南海トラフの海溝型地震の想定震源域に近い地殻変動の影響が大きく、石垣島 FGS は周期的なスロースリップが観測されている地域にあたるため、いずれも地殻変動に起因した重力変化が大きいことが想定される。

筑波 FGS 及び御前崎 FGS では、年間数回程度の継続した測定により、僅かな継続した重力変化が把握されているため、最確値を別途算出している (4.6 及び 4.7 で解説)。

JGSN2016 では、これらの比較から、地殻変動等の影響を最小限にするため、現在の重力場に最も整合的と考えられる最新の測定値を採用することとした。また、絶対重力測定を実施した基準重力点では、別表-1 のとおり、最新の測定値に測定時刻を付与して成果値を公開している。

4.6 筑波 FGS における複数回測定結果の比較

1979 年 4 月、国土地理院構内の重力測定棟地下 1 階に筑波 FGS が設置されて以来、筑波 FGS では、日本全国の基準重力点の基準となる継続的な重力測定、測定技術向上、絶対重力計の機器調整等を目的として、年間数回から十数回の測定を実施しており、他の基準重力点と比べ圧倒的に多くの測定値が蓄積されている。2011 年 4 月以降の筑波 FGS における絶対重力値の時系列変化を図-3 に示す。

筑波 FGS 周辺では、農業用水用の地下水の汲み上げによる地盤の上下変動 (飛田ほか, 2004) に起因した重力値の季節変化が確認されており、複数回の絶対重力測定の結果は一致しない。また、2011 年以降は季節変化に加えて年々重力値が減少する傾向も見られている。

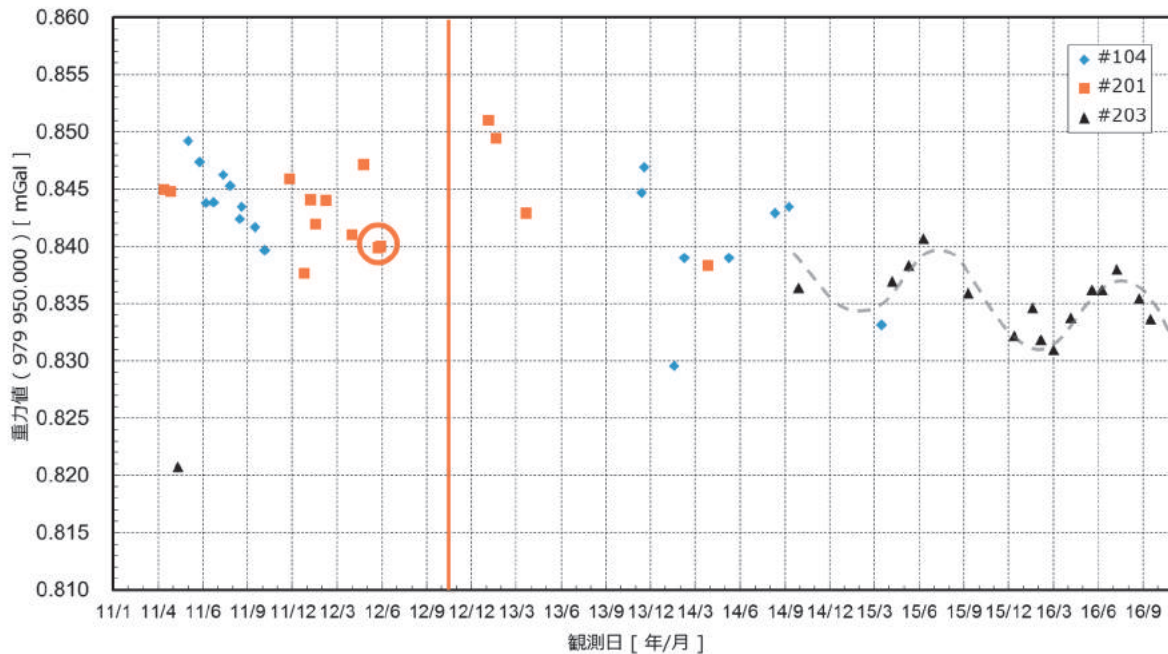


図-3 筑波 FGS の絶対重力値の時系列変化. 橙の丸印は筑波 FGS における JGSN2016 の成果値 (2012 年 6 月の値), 橙の縦線は重力鉛直勾配の測定日 (2012 年 10 月), 点線は 2014 年 9 月～2016 年 9 月の FG5 (#203) の測定に対する重力変化の近似曲線.

重力値の季節変化は, 前述の地下水位の季節変化に伴う地盤の上下変動に起因すると考えられ, 特に 2015 年 3 月以降の測定ではその傾向が明瞭である. 6～7 月にかけて重力が 4～5 μ Gal 上昇し, 2～3 月にかけて重力が減少する. この傾向は, 周辺の電子基準点の GNSS 解析結果から得られた地盤の上下成分の季節変動と整合的である. 一方, 2011 年以降の重力減少は, 東北地方太平洋沖地震後の余効変動に伴う地盤の隆起で説明できる. 同じく周辺の電子基準点の観測から得られた, 地震後から 2016 年 1 月までの累積上下変動量は約 6.3cm の隆起であった. FG5 の複数回の測定では, 筑波 FGS の重力値は 10 μ Gal 減少しており, 筑波 FGS の周辺地形を考慮したブーゲー勾配 0.1820mGal/m (筑波 FGS の重力鉛直勾配の測定値 0.2939mGal/m からブーゲー板を加味した勾配 0.1119mGal/m を減じたもの) を用いると, この減少は約 5.5cm の隆起に相当することから, 観測された重力変化は GNSS の隆起量と整合的である.

このように, 筑波 FGS では高頻度な絶対重力測定, 近傍の GNSS 連続観測及び地下水位の測定に基づいて重力値及び地盤の上下変動の時間変化が詳細に把握できるため, 重力変化の原因を考察可能である. 一方, 得られた重力変化は振幅が大きく基準とする重力値には適さないため, 現実の重力場を表現しつつ, 高精度な重力値を与える観点から, JGSN2016 では以下の条件を踏まえて 2012 年 6 月の測定結果を筑波 FGS の成果値とした.

1) 重力変化が大きい東北地方太平洋沖地震後の

測定であること.

- 2) 筑波 FGS と結合する近隣の重力点との相対重力測定と同時期の測定であること.
- 3) 絶対重力値と重力鉛直勾配をほぼ同時期に測定したこと.

4.7 御前崎 FGS における複数回測定結果の比較

将来的な南海トラフの海溝型地震の発生が懸念されている駿河湾地域において, 重力変化の監視を目的に, 1996 年に東京大学地震研究所 (ERI) と共同で御前崎 FGS での絶対重力測定を開始し, 2016 年 11 月までに延べ 63 回 (国土地理院 41 回) の測定を実施した (山本ほか, 2018) (図-4).

御前崎 FGS では, ばらつきは大きいながらも重力値の増加傾向が見られており, 増加は 16 年間で約 17 μ Gal に達する. この重力変化は, 4.7 の筑波 FGS と同様, 沈降速度から想定される重力変化率と調和的である. 実測値から推定した重力変化率 (図-4 の黒の実線) は約 1.11 μ Gal/年で, 沈降速度から理論的に推定した重力変化率 (図-4 の橙の一点鎖線) の約 1.11 μ Gal/年とほぼ等しい. ただし, ブーゲー勾配は, 御前崎 FGS で実測した重力鉛直勾配 (-2.545 μ Gal/cm) を用いて推定し, 御前崎の沈降速度を 7.78mm/年と仮定 (加藤・津村, 1979) した.

筑波 FGS と同様に現実の重力場との乖離を最小限にしつつ, 精度よく重力網を決める観点から, 4.7 と同様の条件に合致する 2014 年 1 月の測定結果を御前崎 FGS の成果値とした.

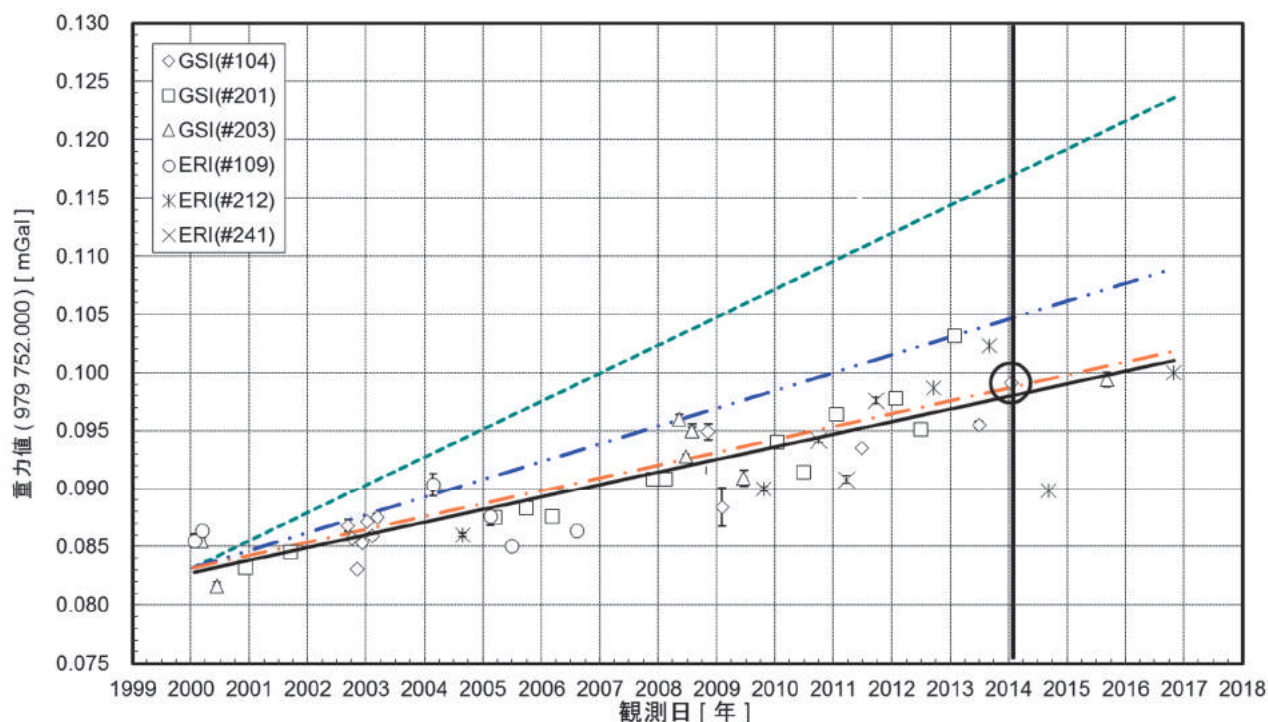


図-4 御前崎 FGS の絶対重力値の時系列変化。黒丸は御前崎 FGS での JGSN2016 の成果値 (2014 年 1 月の値)、黒の縦線は重力鉛直勾配の測定日 (2014 年 1 月)。黒の実線は実測値から推定した重力変化の近似直線、橙の破線は、御前崎 FGS での実測重力鉛直勾配に基づいてブーゲー勾配を仮定し、御前崎の沈降速度から重力変化を推定した近似直線、青の破線はブーゲー勾配を $-1.967\mu\text{Gal}/\text{cm}$ と仮定した重力変化の近似直線、緑の点線はフリーエア勾配を $-3.086\mu\text{Gal}/\text{cm}$ と仮定した重力変化の近似直線。

5. 相対重力測定データの処理

ラコスト重力計を用いた測定による相対重力データにも、潮汐や大気圧等の測定時の地球の状態や重力計の器械特性の個体差に起因する影響が含まれる。前者は、絶対重力測定と同様に理論及び経験的なモデルで補正を行う。後者は、網平均計算を行う際に、重力値と同時に器械ごとの補正量を最小二乗法により推定して最確値を決定する。

相対重力測定では、補正処理を行う前に、重力計ごとにあらかじめ決定された CT と SF を用いて、読定値を重力値へ換算する必要がある。CT は、スプリングの伸び量 (読定値) から重力値への換算定数を与える表で、スプリングの伸びに対する重力値の非線形応答を補正する。補正後の読定値は、重力値に対して線形の応答を示すが、応答のスケールは一致しない。そこで、SF を用いて、スプリングの伸びと重力の応答を一致させる補正を行う。更に、後続の測定で重力値を物理的に参照可能な値とするために、測定した高さ (錘 (Mass) の中心) から重力点上面の高さへ化成する必要がある。正規楕円体上での正規重力に対する重力鉛直勾配 $0.3086\text{mGal}/\text{m}$ を用いて、器械高の補正を行い、器械高の違いで測定ごとに生じる影響を取り除く。

次に、絶対重力測定と同様に、潮汐や大気圧などの影響を理論及び経験的なモデルを用いて補正する。これらの処理によって、測定値を同じ基準で比較可能な重力値へ変換する。図-1 の右列の前半に示した相対重力測定データの処理の流れについて、図-5 に詳細を示す。

5.1 測定データの取得

測定点上でラコスト重力計により測定した値は、重力値の差ではなく読定値である。読定値は、別の測定点で得た読定値との差を取り除き、各種補正及び化成処理を施すことではじめて意味のある重力差となる。本稿では、相対重力測定における二つの測定点の組み合わせを基線と呼び、これに対応する重力差を基線値と呼ぶ。相対重力測定では、基線を構成する測定点で測定を行って基線値を求めている。

各測定点での測定は、信頼性と冗長性を担保するため、3 台のラコスト重力計で行い、時間に伴うスプリングの伸びや電源電圧の変化による恒温槽内のスプリングの伸びの影響を最小限に抑えるため、1 日で測定できる範囲の測定点間で閉合する往復観測を基本として測定を行っている (例えば、観測点 A 及び B 間の相対重力測定は、 $A \rightarrow B \rightarrow B \rightarrow A$ のような

観測を日帰りを実施). また, 折り返しの観測点ではおおむね1時間の観測間隔を設けてデータの独立性に配慮している. この測定方法では, 1基線に対して2(往復)×3(台)=6個の基線値が得られる.

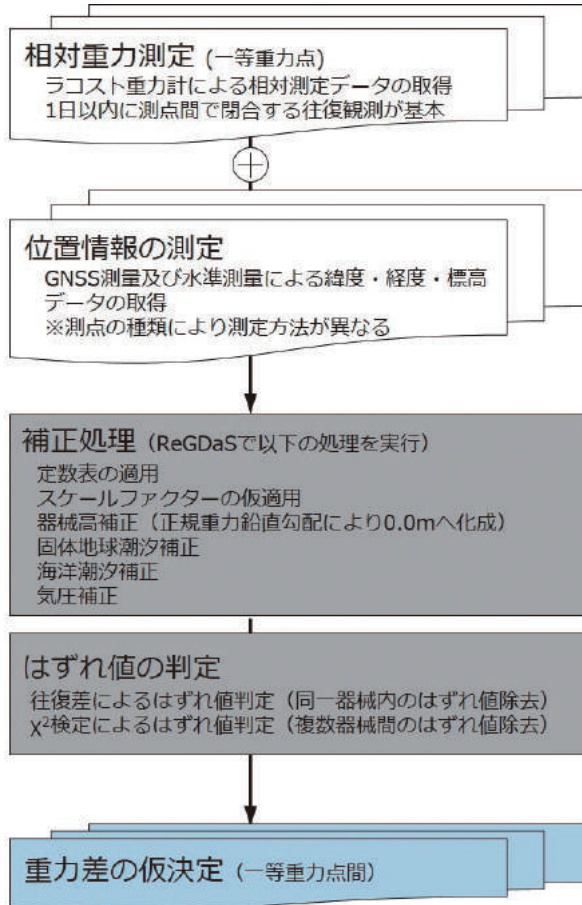


図-5 相対重力測定データの処理の流れ

5.2 読定値に対する補正

相対重力測定読定値には, 器械の個体特性に応じた補正とともに, 理論及び経験モデルを用いた補正と化成を行う. これらを効率的に実施するために, 国土地理院では既存の固体及び海洋潮汐補正プログラムを組み込み, 処理を自動化して相対重力値を計算するソフトウェア (Relative Gravity Data Analysis System, 以下「ReGDaS」という.) を開発した. ReGDaSでは, 後述の網平均処理の入力データを自動出力する機能を実装し, 入力データの作成を効率化して人的ミスの排除に努めている.

5.2.1 換算定数表の適用

ラコスト重力計は, 温度による弾性係数の変化が小さいエリンパー合金製のスプリングを用いた相対重力計で, その伸びから相対的な重力差を測定する. スプリングの伸び量を重力値に換算する係数は, スプリングの伸び量すなわち読定値に依存する CT と

読定値に依存しない SF に分けられる. 上記の関係から換算係数 $k(r)$ は, 式 (13) で表される.

$$k(r) = SF \times CT(r) \quad (13)$$

ここで, $CT(r)$ は CT から得た換算定数である. $CT(r)$ は読定値 r の関数で, 製造者が重力計ごとに検定を行って決定している. 製造者の CT には, 読定値 100 ごとの目盛間隔で各区間の定数とその区間までの積算値が与えられている.

測定者は, あらかじめ正確な重力値の差が得られている 2 点間で校正を行って $CT(r)$ を適用後の読定値を最も良く説明する SF を決定する. ただし, 製造者が $CT(r)$ を決定した当時はまだ FG5 が開発されていなかったため, 現在提供されている $CT(r)$ には μGal 精度の信頼性はない. そこで, JGSN2016 では, 網平均計算の際に測定地域ごとに SF を推定することで $CT(r)$ の不正確さを補っている. 具体的には, 南北に長い日本列島では緯度による重力差が大きく, 測定地域によって使用する $CT(r)$ と換算率が異なることから, 高緯度と低緯度地方に 2 分割してそれぞれ SF を推定することで $CT(r)$ の不正確さの軽減を図っている.

ここで, 読定値から重力差を求める式を示す. 微小な重力差 Δg は, それに対応する読定値の差 Δr と換算係数 $k(r)$ から式 (14) で表すことができ, これを積分することで, 測定による重力差 g を求めることができる (式 (15)).

$$\Delta g = k(r) \times \Delta r \quad (14)$$

$$g = SF \int_{r_1}^{r_2} CT(r) dr \quad (15)$$

ただし, r_1, r_2 はそれぞれ基線の始点及び終点における読定値である. ここで式 (15) は, 式 (16) の形に分解でき, 換算定数表において読定値 r が含まれる区間の最小値を R とすると (換算定数表は 100 区切のため, 例えば, $r=2654.320$ なら $R=2600$), 0 から r までの積分値を $S(r)$ としたとき, R までの積分値は式 (17) で表される. なお, R から r の間の $CT(r)$ は一定なので, 重力差は式 (18) で表される.

$$\frac{g}{SF} = \int_0^{r_2} CT(r) dr - \int_0^{r_1} CT(r) dr \quad (16)$$

$$S(R) = \int_0^R CT(r) dr \quad (17)$$

$$\frac{g}{SF} = CT(r_2)(r_2 - R_2) + S(R_2) - CT(r_1)(r_1 - R_1) - S(R_1) \quad (18)$$

式 (18) が示すように、重力差を求める式 (15) の積分は、線形補間に帰着される。製造者の CT では、読定値 100 ごとに CT(r) と S(R) が与えられているため、CT(r) を線形補間して読定値から重力差を求めている。

5.2.2 器械高補正

器械高補正は、測定点の重力値を後続作業で物理的に参照可能な値とするため、測定した高さから重力点の高さへ重力値を化成する処理である。具体的には、ラコスト重力計の錘 (Mass) の重心位置と重力点の金属標上面の高さの差 (器械高) を計測し、正規楕円体上での正規重力に対する重力鉛直勾配 0.3086 mGal/m (以下「標準値」という。) を用いて、高さの差を重力差に変換する。測定時の器械高を IH m とすると補正量 h mGal は、式 (19) となる。

$$h = 0.3086 \times IH \quad (19)$$

ただし、実際の重力鉛直勾配は周辺の地形、地下構造や陸水の影響を受けて測定点ごとに異なり、その振幅は最大で ± 0.1 mGal/m 程度におよぶ。そのため、器械高補正に標準値を用いると、実際の重力鉛直勾配と標準値の差に器械高 IH を乗じた分だけ誤差が生じる。点ごとに重力鉛直勾配を測定すれば、器械高は正確に補正されるが、作業負荷が増え重力測定の高密度化が難しくなる。そこで、JGSN2016 では、 IH をできるだけ小さくするため、重力点から約 5cm 程度の高さに位置する、ラコスト重力計の筐体底面を器械高の基準面として点ごとに重力鉛直勾配が異なることで生じる誤差の軽減に努めている。器械高に用いる基準面は、本来、重力を測定した位置、すなわち錘 (Mass) の中心にするべきだが、器械ごとにこの位置を正確に測定することは物理的に不可能で、更に錘が重力計の筐体底面の近くに設置されていることから、高さ約 25cm の重力計筐体の上面ではなく高さ約 5cm の底面を基準面とした。なお、重力鉛直勾配は測定点上下の質量の偏りの影響を受けるため、経験的には山地の頂上付近で大きく、谷、地下及びトンネル内で小さい。

5.2.3 固体地球潮汐及び海洋潮汐補正

絶対重力測定と同様に、相対重力測定でも、固体地球潮汐補正には ETGTAB、海洋潮汐補正には GOTIC2 を用いて潮汐の補正処理を行う。

5.2.4 極運動補正

相対重力測定では、作業が日帰りの閉合観測で極運動の周期に比べて十分に短く、測点間の差分をとることで極運動の影響はほぼ相殺されるため、極運動補正は行わない。

5.2.5 標準気圧補正

絶対重力測定と同様に、相対重力測定でも 4.3.3 で記述した手法で点ごとに標準大気圧での気圧補正を行う。

5.2.6 磁場の影響を考慮した測定時の方位

ラコスト重力計に使われるエリンバー合金製のスプリングは、強磁性体のため測定時の重力計の向き (磁方位) によって測定値が変化する。磁場の影響による測定値のばらつきを最小限に抑えるため、重力計をおおよそ磁北の向きに合わせて測定を行う。

5.2.7 スケールファクターの適用

5.2.1 で既に述べたとおり、SF とはスプリングの伸びを重力差に換算するための換算係数 $k(r)$ のうち、線形応答のスケールリングに相当する。SF を乗じることで、CT(r) を用いて換算した読定値差を mGal 単位の重力差に調整する。相対重力測定では、過去の測定から経験的に推定した SF を用いて重力差の仮計算を行い、往復較差と器械間較差から乖離の大きい測定がないかを判定する外れ値の検定を行っている。JGSN2016 では、網平均計算の際に SF の最適値を推定パラメータとして重力値と同時に推定している。

5.2.8 ドリフト補正

測定中にスプリングが時間変化することで生じるドリフトの補正では、一般には重力差の往復測定の差分と測定時刻の差を用いて単位時間あたりのドリフト量を推定することが多い。しかし、JGSN2016 では、異常な測定値がドリフトとして推定されてパラメータに吸収され、正常な観測と見分けがつかなくなる状況を避けるために、往路と復路の点間移動時間をほぼ同じと見なし、網平均計算前の往復差による外れ値判定及び χ^2 分布による重力差の採用判定では、ドリフトは考慮していない。一方、網平均計算では精密に基線の重力差を決定するため、器械ごとにドリフト値の最確値を未知パラメータとして推定している。

5.2.9 周期誤差

ラコスト重力計には、測定ダイヤルの回転をスプリングに伝える機構があり、その歯車の器械的な中心が物理的な回転の中心から僅かにずれることで読定値に周期的な誤差が生じる。これを周期誤差と呼

び、ダイヤルの回転数に応じて7種類の周期的な変化が生じることが知られている。また、製造番号に応じて歯車の組み合わせが異なるためその振る舞いは2系統に分類される(表-4)(Harrison and Lacoste, 1978; Becker, 1981)。

表-4 周期に対するダイヤル回転数(周期誤差)

製造番号 周期	G-457 以下	G-458 以上
1	1.00	1.00
2	3.94	3.67
3	7.88	7.33
4	35.47	36.67
5	70.94	73.33
6	603.00	1100.00
7	1206.00	2200.00

周期誤差は、周期に対するダイヤル回転数(読定値)のみが示されているため、補正するためには各周期における誤差の位相と振幅を器械ごとに別途検定する必要がある。器械 k の i 番目の周期に対する振幅、位相及び周期をそれぞれ $A_i^k, \varphi_i^k, f_i^k$ とすると、器械 k の周期誤差 δO^k は、式(20)で表される。ただし、 r はその観測におけるダイヤル回転数の読定値である。

$$\delta O^k = \sum_{i=1}^7 A_i^k \sin 2\pi \left(\frac{r}{f_i^k} + \varphi_i^k \right) \quad (20)$$

式(20)は、推定する A_i^k, φ_i^k について線形でないため、三角公式で式(21)に変形する。ここで A_i^k, φ_i^k と S_i^k, C_i^k には式(22)及び式(23)の関係がある。

$$\delta O^k = \sum_{i=1}^7 A_i^k \left\{ S_i^k \sin \left(\frac{2\pi r}{f_i^k} \right) + C_i^k \cos \left(\frac{2\pi r}{f_i^k} \right) \right\} \quad (21)$$

$$A_i^k = \sqrt{(S_i^k)^2 + (C_i^k)^2} \quad (22)$$

$$\tan 2\pi \varphi_i^k = \frac{C_i^k}{S_i^k} \quad (23)$$

6.2 で後述するように実際の推定の際には式(21)の f_i^k を表-4の値に設定して S_i^k, C_i^k を推定する。推定される周期誤差は各々数 μGal と微小であるが、こ

の各周期の周期誤差の振幅が合成されることで、数 $10\mu\text{Gal}$ に及ぶ系統誤差に達する場合がある。このため、適切な値が推定できるのであれば、補正が望ましい。ただし、事前の器械検定によって各周期の妥当な周期誤差を決定するためには、以下が不可欠であるため、現実には非常に困難である。

- 1) 大きな重力値差(理想的には 100mGal 程度)がある非常に精度の良い複数の重力検定基線
- 2) ラコスト重力計の S/N の限界程度に精密な相対重力測定

そこで JGSN2016 では、重力値を最小二乗法により推定する際に周期誤差をモデルの推定パラメータの一つに組み込むことで、重力値の推定に対する周期誤差の影響を軽減した。実際、周期誤差補正を適用した場合、6.5.4 で述べるように多くの基線で器械間の基線値のばらつきが平均化されている。これは周期誤差を重力値と同時に推定することの有効性を示していると考えられる。

5.3 外れ値の判定

相対重力測定では、日帰り測定点間の往復観測を実施し、各基線で重力計ごとに往路と復路の測定を比較して観測の良否を判断する。ここでは、基線の往復観測の差(復観測-往観測)のばらつきと外れ値判定の指標を示す。

5.3.1 往復差による外れ値の判定

図-6に、ラコスト重力計3台(G-83, G-118, G-554)を用いて2005~2013年度に6地区で行った合計271個の測定の読定値について往復観測の差の度数分布を示す。度数分布は正規分布に近いが、僅かに正の偏りが見られる。同じデータについて、測定時刻差との関係をプロットすると、時刻差が大きくなるほど往復観測の差が正に偏り、ドリフトの影響で重力値が増加する傾向が見られた(図-7)。そこで、読定値の差と測定時刻差の関係からこのドリフト係数を最小二乗法により約 $0.8\mu\text{Gal}/\text{時}$ と推定し、この値を用いて往復観測の差をドリフト補正すると、度数分布はより正規分布に近い形となった(図-8)。

この分布の不偏標準偏差は $26\mu\text{Gal}$ で、確率密度関数に平均0、標準偏差26の正規分布を仮定すると、約95%の観測が 2σ ($52\mu\text{Gal}$) 以内となる。これを踏まえて、計算の簡便性を考慮して往復観測の較差の採用基準を式(24)とした。

$$-50 + t < g_2 - g_1 < 50 + t \quad (24)$$

ただし、 g_1, g_2 はそれぞれ往観測、復観測の基線の重力差 (μGal)、 t は観測時刻差(時)であり、そ

それぞれ小数点以下を切り捨てるものとする。

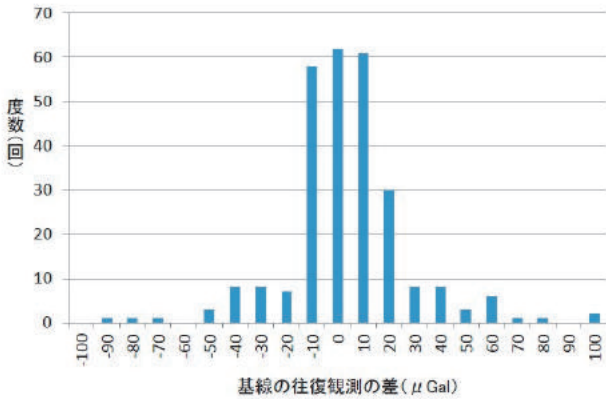


図-6 基線の往復観測差の度数分布。

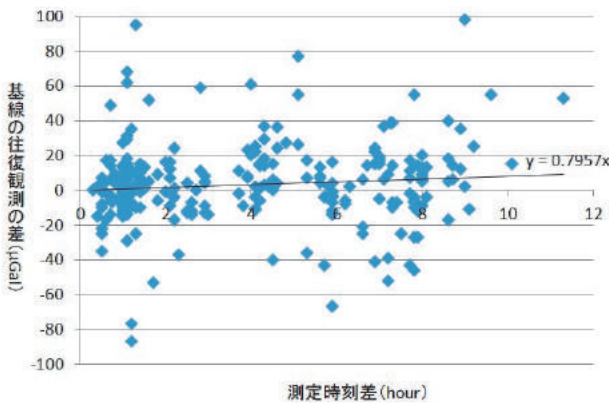


図-7 測定時刻差と基線の往復観測の差の関係

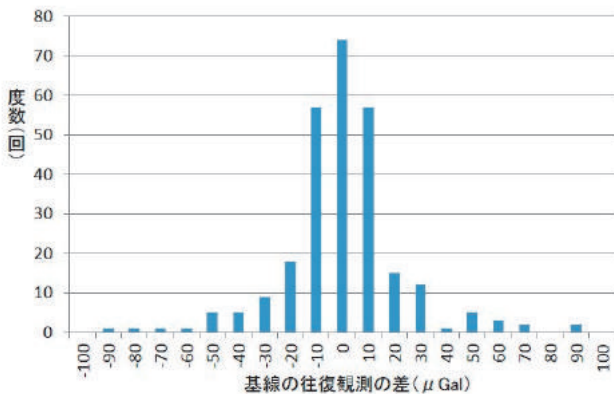


図-8 ドリフトを考慮した基線の往復観測の度数分布

5.3.2 χ^2 検定による外れ値の判定

5.3.1 では、同一器械による測定点間の往復観測の差を比較して整合しない測定を除く判定基準を示した。実際の測定では、器械ごとで往復観測の差が整合しても、器械間の測定に大きな較差が生じることがあるため、ラコスト重力計の標準的な器械間のばらつきを仮定して、そこからの逸脱の程度が統計的

に有意であるかどうかを χ^2 検定で判定することで外れ値の検出を行うこととした。

重力計 3 台を用いてある測定点間で往復観測を行う場合、重力差には基本的に六つの測定値（重力計 3 台×往復観測）が得られる。その測定値が正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従うと仮定すると、基線の測定値を x_i 、平均値を \bar{x} としたときに、不偏分散 s^2 は式 (25) となり、式 (26) は自由度 $n-1$ の χ^2 分布に従う。

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \tag{25}$$

$$(n-1) \frac{s^2}{\sigma^2} \tag{26}$$

このとき、正確な測定が行われた場合の母分散 σ^2 を経験的に見積もって実際の測定値のばらつきと比べることで、基線の測定値の分散が統計的に起こりうるかを判断して外れ値判定を行う。

母分散 σ^2 は、①読定の不確かさ：10 μ Gal、②周期誤差の不確かさ：15/ $\sqrt{2}$ μ Gal、③SFの不確かさ：0.00020 の条件で見積もった。ここで、読定の不確かさは、ある測定点での 1 台の重力計の 3 回の読定値の制限 (10 μ Gal) から見積もり、周期誤差の不確かさは、最大で 30 μ Gal 程度 (Völgyesi, 2007) とされているため、その振幅 15 μ Gal を $\sqrt{2}$ で除して平均した値から見積もり、SFの不確かさは、過去に推定した SF、JGSN2016 の SF 及び地域ごとに推定した SF のばらつきから経験的に見積もってそれぞれ設定した。上記の条件を用いて、式 (27) から母分散 σ^2 を見積もると、自由度 5 の有意水準 5% の χ^2 分布は $\chi^2(5, 0.05) = 11.07$ であるから、不採用とする s の範囲は、式 (28) から求められる。ただし、 Δg は式 (14) から求めた概算重力差で、単位は μ Gal として判定を実施する。

$$\sigma^2 = 10^2 \times 2 + \left(\frac{15}{\sqrt{2}}\right)^2 \times 2 \tag{27}$$

$$s^2 > 11.07 \times \frac{\sigma^2}{5} + (0.0002 \times \Delta g)^2 \tag{28}$$

例えば、概算の重力差が 180mGal の基線で 6 つの基線値の不偏標準偏差が 80 μ Gal となった場合、母分散 $\sigma^2=1721$ 、不採用にするべき s の範囲は、 $s > 61\mu$ Gal となるため、同一基線での器械間の較差が 61 μ Gal 以内を満たす測定を採用値とすることとなる。この例では、不偏標準偏差 80 μ Gal の測定は、

正確な測定が行われた場合の分散の見積もりと比較して統計的検定の観点から有意水準 5%の条件で棄却される。これは測定者の誤読やスプリングへの不可抗力的な振動など何らかの原因で不適切な測定値が生じたと考えられるため、平均値 \bar{x} との差が最も大きい基線値を削除して同様の手順で再び不偏分散を評価する。これでも不偏分散が改善しない場合は、残りの測定値に同じ処理を行う。一般の χ^2 検定では σ を仮定して χ^2 を計算し、 χ^2 分布と比較して仮定の妥当性を論じるが、この判定では、逆に σ を基準としてデータの良否を判断する手法を用いた。

6. 網平均計算

網平均計算では、基準重力点で絶対重力測定によって求めた重力値を固定し、一等重力点での相対重力測定による重力差を用いて最小二乗法で一等重力点の重力値を決定する。その際に、BICを用いて、SF、ドリフト係数、周期誤差等のパラメータについて最適な組合せのモデルを選択する。図-1の右列の下部に示した網平均計算の処理の流れについて、図-9に詳細を示す。

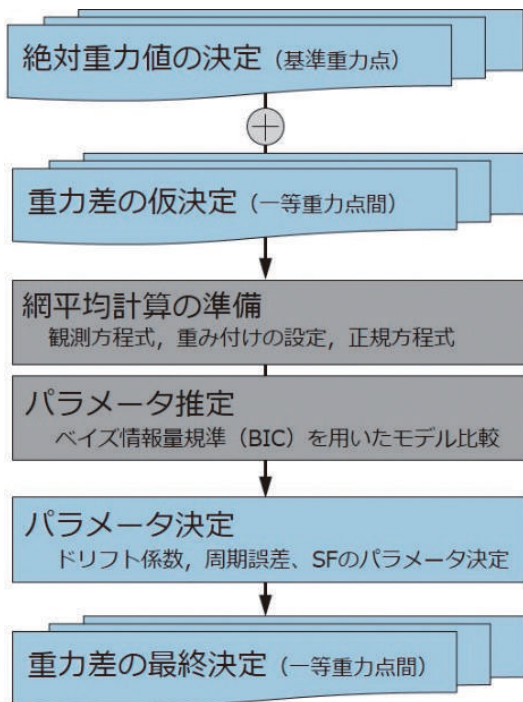


図-9 網平均計算処理の流れ

6.1 観測方程式

相対重力測定では、CTを用いて換算した重力値に補正を行って2点間の重力差を求める。網平均計算では、この重力差と基準重力点の絶対重力値を用いて、最小二乗法により重力値、SF、ドリフト係数及び周期誤差の最確値を求める。

相対重力測定のデータ処理では、過去の測定から

経験的に最適と判断したSFを用いて仮計算を行い、測定値の良否を判断している。一方、最終的な網平均計算の際には新たにSF、周期誤差及びドリフト係数を推定するため、観測量には、ラコスト重力計の読定値に上記以外の補正を施した値を用いる。厳密には、SFを乗じてからそれ以外の補正を行う手順と、それ以外の補正を行ってからSFを乗じる手順で推定値が異なってくるため、本来は先にSFを乗じるべきであるが、SFは経験的に1に非常に近い値であることが知られているため、今回の推定の精度では手順を入れ替えたことで生じる誤差は無視できる。

観測点*i*における観測量を O_i とし、先験的に与える概算重力値を g'_i 、最確重力値を g_i とすると、補正量 δg_i との間には、式(29)の関係がある。器械*k*のドリフト係数を δd_k とすると、起点*i*及び終点*j*の基線値 $g_j - g_i$ について、式(30)の関係が成り立つ。ただし、 t_{ij} 、 v_{ij} はそれぞれ観測時刻差(時)及び残差である。

$$g_i = g'_i + \delta g_i \quad (29)$$

$$\begin{aligned} SF \times \{(O_j - O_i) - \delta d_k t_{ij} + v_{ij}\} \\ = (g'_j + \delta g_j) - (g'_i + \delta g_i) \end{aligned} \quad (30)$$

更に観測量 O_i は、周期誤差の効果 δO_i と周期誤差を補正した値 O'_i に分けると式(31)となる。実際には、式(30)は周期誤差を補正した O'_i に成り立つ関係であるため、 O_i を O'_i に読み替えて、式(31)及び式(32)となる。

$$O_i = O'_i + \delta O_i \quad (31)$$

$$\begin{aligned} (O_j - O_i) - (\delta O_j - \delta O_i) - \delta d_k t_{ij} + v_{ij} \\ = \frac{(g'_j + \delta g_j) - (g'_i + \delta g_i)}{1 + \delta sf} \end{aligned} \quad (32)$$

ただし、SFは1に近い数であるため $SF = 1 + \delta sf$ とした。 δ の付く変数は通常 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ オーダーの微小量であるため、式(32)の右辺の分母は、式(33)で近似できる。また、 δ の付く変数同士の積は高次の微小量で無視できるため、式(34)のように変形できる。これがJGSN2016の網平均計算における観測方程式である。

$$(1 + \delta sf)^{-1} \cong (1 - \delta sf) \quad (33)$$

$$v_{ij} = \delta g_j - \delta g_i + \delta d_{ktij} - (g'_j - g'_i)\delta sf + (\delta O_j - \delta O_i) - \{(O_j - O_i) - (g'_j - g'_i)\} \quad (34)$$

式 (34) の δ の付く変数は推定する量, δ の付かない変数のうち O は観測量, g' は先験的に概算値を与える量である. δ の付く変数の係数について計画行列 A を作り, 定数部分について定数ベクトル L を作ると, 式 (35) となる. ただし, X は推定パラメータのベクトル, V は残差ベクトルである.

$$V = AX - L \quad (35)$$

式 (33) では近似式を用いているため, 実際の計算では先験的に与える量を逐次更新しながら反復計算を行う必要がある. 今回の解析では, 6.5 で解説するモデルで 2 回の反復計算を行い, 各点の重力値は約 $2\mu\text{Gal}$ 以内に収束した.

6.2 周期誤差

周期誤差は, 式 (21) で示したとおり, 七つの周期の振動の重ね合わせで表現される. このうち, 表-4 の第 5 周期までの各周期に対して, 式 (21) の係数 S_i^k , C_i^k を推定する. 第 6 及び 7 周期の係数を推定するには, 100mGal 以上の重力差に対する測定データが多数必要であるが, 実際の相対重力測定では 100mGal 以上の重力差がある基線値が少ないため, 確からしい係数を推定することは難しい. また, こうした大きな重力差をもつ測定値は, SF の推定にも大きく影響するため, 長周期の周期誤差と SF を同時に推定した場合, 両者の分離は困難である. そのため, 今回の推定では, 第 6 及び 7 周期の係数は推定せず, 第 5 周期までを推定することとした.

6.3 重み付けの設定

測定値に対する重み付け (重量) は, 重力差, 観測時刻差及び相対重力計の測定レンジ等に依存する可能性があるが, 今回の推定では, 経験的に各ラコスト重力計の観測のばらつきの特性が支配的と判断し, 器械ごとに重量を設定した. 重量は, 器械ごとに算出した測定値の不偏分散に基づいて算出する必要があるため, なるべく同じ条件で測定した数多くの測定値が必要となる. そこで, 相対重力計の検定のために毎年測定を実施している筑波山点検線 (山本ほか, 2018) で 2005~2013 年度の 7 年間に行った測定結果を用いて, 各器械の重力差に対して 5.3.2 の χ^2 分布による外れ値の判定を適用したうえで, 重力差の不偏標準偏差を計算した (表-5).

表-5 の各区間で重力差及び測定レンジに依存した不偏標準偏差の顕著な傾向の変化は見られなかったため, 不偏標準偏差の代表値として器械ごとの平均値を採用した. 最も不偏分散の小さい G-118 の値を単位重量あたりの分散 σ_0^2 とすると, 他の器械 i の重量を式 (36) で表せるため, G-83, G-118, G-554 の各器械の重量 P_i をそれぞれ 0.3765, 1.0000, 0.2916 と定めた.

$$P_i = \sigma_0^2 / \sigma_i^2 \quad (36)$$

表-5 筑波山点検線における重力差と各器械の不偏標準偏差 (単位: mGal)

区間	重力差	G-83	G-118	G-554
A	-15.912	0.019	0.007	0.021
B	-60.413	0.010	0.015	0.017
C	-24.672	0.015	0.005	0.012
不偏標準偏差の平均値		0.014667	0.009000	0.016667
重量		0.3765	1.0000	0.2916

6.4 正規方程式

正規方程式は, 相対重力測定の測定点間の重力差ごとに立てる. 式 (35) のもとで, 推定パラメータベクトル X について式 (37) を解くと, 正規方程式は式 (38), 標準偏差は式 (39) となる.

$$A^t P A X = A^t P L \quad (37)$$

$$X = (A^t P A)^{-1} A^t P L \quad (38)$$

$$M = \frac{V^t P V}{q - r}$$

$$m_o = \sqrt{M} \quad (39)$$

$$m_{x_i} = m_o \sqrt{Q_{ii}}$$

ただし, q を観測方程式の数, r を推定パラメータ (重力差, ドリフト係数, SF, 周期誤差) の数, m_o を単位重量あたりの標準偏差, Q_{ii} を $(A^t P A)^{-1}$ 行列の i 番目の対角成分とする. これらにより, 推定パラメータの最確値及び一等重力点の重力値の標準偏差を算出した.

6.5 情報量規準を用いた最適なモデルの選択

観測データを説明する最適なパラメータ化について考える. 特性が類似した複数のパラメータは, 存在する系統的な誤差を全て表現したとしても原理的

に適切に分離できない場合がある。一方、原理的には一つの変数でパラメータ化すべき現象であっても、複数の変数を用いてパラメータ化することで、他の要因による系統誤差がうまく表現され、現象が適切に表現される場合もある。真のモデルの探索には限界があるため、実際に処理する際には、観測量を適切に説明するパラメータ群の設定が重要である。

観測量を説明するためにパラメータの数を増やせば、推定に用いたデータセットに対するモデルの説明能力は高くなる。しかし、データには必ずノイズが含まれるため、それらのパラメータはノイズを表現している可能性があり、その場合には他のデータセットを適切に説明できないモデルとなる。このような、パラメータ数の増加に伴うある観測データに対する説明能力の向上と、他の未知データに対する予測能力のバランスを判断する理論的裏づけを与え、最適なモデルを選択する指標として情報量規準がある。JGSN2016 では、比較的シンプルなモデルを選択する傾向があるベイズ情報基準 (BIC) を採用した。

6.5.1 ベイズ情報量規準 (BIC)

BIC は最適なモデルを選択するために一般的に使用される指標で、式 (40) で定義される。

$$BIC = -2 \ln \left[\prod_n (f(x_n | \theta)) \right] + k \ln(n) \quad (40)$$

ここで、 n は標本数、 k は母数 (パラメータ数)、 $f(x_n | \theta)$ はパラメータ θ が指定されたときの確率変数 x の条件付確率密度関数である。第 1 項はモデルと測定値とのフィッティングが良く、観測数が多いほど小さな値となる。第 2 項は罰則項と呼ばれ、推定パラメータを増やしてフィッティングの自由度を上げるほど大きくなる。BIC では、値が小さいほど良いモデルとされ、二つの項の大小から、未知のデータに対する予測能力と用いたデータに対する説明能力のバランスを判断してモデル選択を行う。

今回の計算では、ノイズが正規分布 $N(0, m_0^2)$ に従うと仮定して、6.1 の観測方程式の導出で用いた式 (34) を用いて式 (40) が条件付確率分布となる。

$$f(L_{ij} | X, m_0^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0^2}} \exp \left[-\frac{(v_{ij})^2}{2m_0^2} \right] \quad (41)$$

ただし、 L_{ij} は式 (34) の第 5 項以降をあらわし、正規方程式の定数ベクトル L を形成する部分である。

式 (41) の指数部分を行列で表記すると、 i 番目の基線に対して式 (42) となり、自然対数をとって全ての基線の和をとると BIC は式 (43) となる。最終的にこの値が小さくなるモデルを探索する。

$$f(L_i | X, m_0^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_0^2}} \exp \left[-\frac{(L - AX)_i^2}{2m_0^2} \right] \quad (42)$$

$$BIC = \ln(2\pi m_0^2) + \frac{1}{m_0^2} (L - AX)^t (L - AX) + r \ln q \quad (43)$$

6.5.2 モデル選択の方針

モデル選択の際には、はじめに、器械の特性、実際の測定データ及び理論的実証からある現象の有無を総合的に判断し、その現象が存在すると判断した場合には、測定データに対する最適なパラメータ群を BIC で評価して決定する。表-6 に今回のモデルで検討したパラメータの組み合わせと BIC の関係の主なものを示す。各パラメータの詳細は次節以降に記載する。

6.5.3 ドリフト係数の設定

ラコスト重力計の特性と図-7 に示した測定時間差と往復観測の関係から、ドリフトは相対重力測定の間物理現象として生じていると判断して、観測方程式に推定パラメータとして組み込んだ。ドリフト係数は、1 往復観測ごとに推定する、若しくは全ての測定に対して器械ごとに一つのドリフト係数を推定する選択肢があるため、いずれが適切かを判断する必要がある。1 往復観測ごとに推定する場合、パラメータ量は増加するが、個々の測定で異なった係数のドリフトが生じてもその違いを推定できる可能性がある。ただし、ドリフト以外の原因で生じた時間変化を全てドリフト係数で説明してしまい、誤った重力値を推定する危険性もある。器械ごとにドリフト係数を一つ推定する場合、器械に対して各々一つのドリフト係数が決まるため、推定パラメータ数は圧倒的に少なくなる。しかし、ドリフト量が個々の測定で大きく異なる場合には、全ての測定を適切に説明する値が推定できず、誤差の大きい重力値を推定してしまう可能性がある。

ドリフト係数を 1 往復観測ごとに推定すると、BIC は、他の場合よりも大きくなり、パラメータ数の増加に見合うだけは減少しない。これは、1 往復観測ごとにドリフト係数を推定すると、モデルが測定データに過剰にフィットし、各々の測定に含まれるノイズまで表現してしまうためと考えられる。ドリフ

ト係数を推定しない場合に BIC は最小となるが、器械ごとにパラメータを一つに推定した場合との差は小さく、かつドリフトは物理現象として生じていると判断されることから、「器械ごとに一つのドリフト係数を推定する」ことが妥当と判断した。

表-6 評価した主なパラメータの組み合わせと BIC

モデル番号	ドリフト係数※	周期誤差	SF	標準偏差 (μGal)	BIC
1	測定ごと	0	1	22.393	-1587.4
2	測定ごと	5	1	21.245	-1550.0
3	0	0	1	21.019	-4534.0
4	0	0	2	20.534	-4583.6
5	0	0	5	20.367	-4547.2
6	1	0	5	20.383	-4528.6
7	1	3	2	20.317	-4502.8
8	1	4	2	20.335	-4475.0
9	1	5	2	19.657	-4515.6
10	1	5	5	19.562	-4465.8
11	1	5	15	19.137	-4347.9

「測定ごと」は 1 往復観測ごとにドリフト係数を推定、「1」は器械ごとに推定、「0」は推定しない。

6.5.4 周期誤差パラメータの設定

周期誤差は、5.2.9 で示したとおり器械の物理的構造の特性から存在する。しかし、周期誤差が測定値に与える影響は数 μGal と非常に小さいため、ラコスト重力計の過去の測定から判断すると、測定のみに基づいて、周期誤差の影響のみを測定値から適切に抽出して補正することは非常に難しい。一方、国内外の機関から周期誤差が数十 μGal に達して無視できないという報告もある（例えば Völgyesi et al., 2007）。そこで、網平均計算に使用しなかったある 17 基線に対して、網平均計算で推定した周期誤差の振幅と位相を用いて、補正を行った場合と行わない場合で基線値の標準偏差の比較を行った（表-7）。

周期誤差の補正で器械間の基線値のばらつきが改善された基線を水色で、補正でばらつきが増加した基線を橙色で、変わらない基線を白色で示す。補正によって全体のばらつきは若干増加するが、標準偏差が最も大きかった四つの基線（3、4、5、14 番）でばらつきが小さくなったことがわかる。逆にもともと標準偏差が小さい基線は補正で標準偏差が大きくなっており、周期誤差を推定することで器械間のばらつきが平均化されたことが伺える。

更に、全ての基線で周期誤差の補正効果を検証するため、網平均計算で周期誤差を推定した場合としない場合で基線値の標準偏差の比較を行った。補正を行わない場合と行った場合の標準偏差の度数分布

を図-10 に示す。

表-7 周期誤差補正の有無による標準偏差の違い

基線番号	補正無し (μGal)	補正あり (μGal)
1	11	12
2	10	12
3	15	11
4	19	17
5	21	20
6	10	16
7	7	15
8	9	15
9	10	11
10	6	6
11	9	17
12	7	8
13	10	12
14	22	18
15	10	9
16	7	12
17	10	10
	11	13

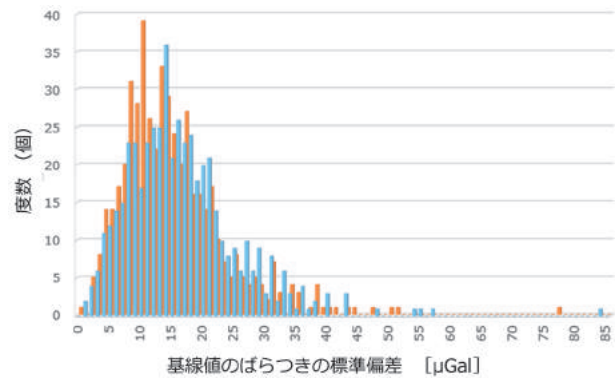


図-10 基線ごとの重力差のばらつきの度数分布（水色：周期誤差の推定なし、橙色：推定あり）

全体の標準偏差が 16.6μGal から 14.9μGal に改善するとともに、ばらつきが平均より大きい基線では、約 68%でばらつきが小さくなったのに対し、ばらつきが平均より小さな基線では、約 50%でばらつきが大きくなった。これは、周期誤差の推定によってばらつきが平均化されるとともに、ばらつきの小さな基線で生じるばらつきの増加に比べて、ばらつきが大きい基線に対する改善の効果のほうが大きいことを示唆している。周期誤差を補正することで全ての基線のばらつきが改善されるわけではないが、器械間のばらつきが大きな基線で改善の効果がある点が

重要である。この結果から、周期誤差が測定データに系統的な影響を及ぼしていることが確認されたため、網平均計算で周期誤差を推定することで器械間のばらつきを改善できると判断した。

次に、周期誤差の七つの周期のうち、どの周期まで推定を行うか判断する必要がある。長い周期に対応する周期誤差は、大きな重力差を持つ基線で測定を行ってはじめて検出が可能となる。こうした基線は非常に少ないうえ、SFの決定でも重要なため、長い周期の周期誤差をパラメータとして推定すると、SFと周期誤差の分離が難しくなる。そこで、BICを用いて推定すべき周期の数を評価した。表-6の「周期誤差」の列は、推定する周期の数を示している。0は推定しない場合で、周期誤差を推定しない場合にBICが最小となるが、上記の検討から、周期誤差は測定に影響を及ぼす大きさで生じていると判断したため、周期誤差を推定するモデルのうちBICが最小となる第5周期まで推定するモデルが最適と判断した。なお、6.2で述べたように第6及び7周期については推定しない。これらから、今回の網平均計算では、本節の評価とあわせて、「器械ごとに一つのドリフト係数を推定し、周期誤差を第5周期まで推定する」こととした。

6.5.5 スケールファクターの設定

相対重力測定では、製造者が提供するCTの値を使用してスプリングの非線形応答成分を補正しているが、5.2.1で述べたとおり、この値は実際の換算定数と乖離がある可能性がある。そこで、この値の乖離を、読定値の変化に応じてSFに緩やかな変化が生じることとして複数のSFを推定し、換算定数の誤差をSFの変化として吸収することとした。実際、日本全国の基線を地域に分割して地域ごとにSFを推定すると、 10^{-4} の桁で地域ごとに異なる値が得られることから、CTの値と実際の換算係数との乖離が示唆される。このSFの違いは、100mGalの基線値に対して地域によって10 μ Galの桁で差が生じることに相当する。本来は、CTの値と整合した正確なSFの値を全ての地域で用いることが望ましいが、CTの正確な値を改めて検定するには、重力差の大きな基線で膨大な労力と時間を要する測定を行う必要がある。そこでJGSN2016では、相対重力測定時の読定レンジに応じてSFを分割して推定することとした。

まず、全ての測定から各器械について最大読定値と最小読定値を抽出し、その差を推定するSFの数に等分してそれぞれの読定区間ごとにSFを推定することで、最適なSFの分割数について検討する。推定する区間の数はBICで決定した。表-6の「SF」の列は、推定したSFの区間数である。周期誤差を

推定せず器械ごとに一つのドリフト係数を推定した場合、BICは器械ごとにSFを二つ推定するモデルで最小となる。周期誤差とドリフト係数を変えても同様であるため、「SFは二つの地域に分けて推定する」こととした。

6.5.6 推定パラメータの最確値

今回の測定を最も整合的に説明するモデルは、ドリフト係数は器械ごとに一つ、周期誤差は第5周期まで、SFは高緯度側と低緯度側の二つとした表-6の9番のモデルである。このモデルを用いて重力差、SF、ドリフト係数、周期誤差の最確値を最小二乗法により推定した。JGSN2016の網平均計算に使用した重力点と基線の配置を別図-1に、主要な推定パラメータの最確値を表-8に示す。ドリフトの単位は μ Gal/時、周期誤差の単位は各周期のsin(cos)係数を μ Galで示している。

表-8 推定パラメータの結果

推定パラメータ		G-83	G-118	G-554
ドリフト		0.001794	-0.000005	-0.000911
SF(高緯度)		1.002025	1.002621	1.000304
SF(低緯度)		1.002464	1.002595	1.000248
第1周期	sin	-0.004	-0.001	0.002
	cos	0.000	-0.002	0.001
第2周期	sin	-0.002	0.005	0.001
	cos	-0.001	0.001	0.003
第3周期	sin	0.001	0.006	-0.005
	cos	0.001	0.001	0.004
第4周期	sin	-0.001	0.000	0.002
	cos	0.002	-0.001	-0.007
第5周期	sin	0.000	0.001	0.000
	cos	-0.001	-0.001	0.000

7. 重力基準網と独立して計算した重力値

7.1 主な離島の重力測定と成果計算

沖縄本島や石垣島など南西諸島の重力点は、本州の重力点と1日で相対重力計による往復観測が可能のためJGSN2016の網平均計算に組み込んでいる。一方、小笠原諸島の父島及び母島は、船で約25時間の移動を必要とすることから、物理的に1日での往復測定ができず、信頼できる精度で結果を得ることが難しいため、重力網に結合することができない。

そこで、父島に基準重力点を設置し、小笠原諸島の中で重力網を組み、各重力点の重力値を算出した(別図-2, 別表-3)。測定方法はJGSN2016に準拠し、パラメータもJGSN2016の網平均計算時に決定した値を使用した。

7.2 電子基準点付属標の重力測定と成果計算

基準重力点及び一等重力点の多くは屋内に設置されている。これらの点は天候によらず安定した測定が可能である一方、測量標識の維持管理が建物の維持管理に左右される。特に、一等重力点の多くは、重力値が過去に気圧計の検定に利用されていたこと及び地盤動が小さいことから、気象庁（旧測候所及び地方气象台）の地震計室に設置された経緯がある。近年、建物の老朽化や耐震化に伴う建替工事、また無人化に伴う規模縮小のため、気象庁施設内の一等重力点は次々と移点や廃点をしている。重力値は時空間的に変化するため、変化の把握には同じ場所での繰り返し測定が重要だが、移点や廃点により維持が難しくなっている。また、室内の重力点では、位置情報の測定にあたって障害が多く、観測の際に管理者の許可が必要となるためアクセスも不便である。

これらの課題を解決する方法として、2008年度から一等重力点の最寄りの電子基準点付属標に重力値を付与する相対重力測定を開始した。電子基準点はGNSS 測量により三次元の高精度な位置情報を常に監視しており、そこに重力値を付与することで、幾何学的な位置情報と物理学的な重力値が関連づけられ、新たな標高体系の構築、更新及び維持管理に寄与することが期待できる。同時に、電子基準点は高さ方向の変動量を常に監視できることから、重力値の時間変化が高さの変化に起因するものか、地下構造の変化に起因するものかの判断においても活用が期待できる。

この測定の一部は、JGSN2016 として成果計算されているが、多くは一等重力点等からの突き出し路線による相対重力測定で重力値が算出されている。その地理的分布を別図-2に、重力値を別表-3に示す。なお、突き出し路線の相対重力測定の計算には、JGSN2016 の計算時に決定したパラメータの値を使用した。

8. 精度評価

重力値及び基線値について残差の標準偏差による内部評価及び LOOCV による外部評価を行い、JGSN2016 の重力値の推定の不確かさを評価した。

8.1 絶対重力測定の評価

絶対重力測定によって得られる基準重力点の重力値の不確かさは、FG5 の測定の不確かさと、重力値を金属標上面へ化成する際の不確かさとの和として見積もられる。まず、FG5 の測定の不確かさは、機器の公称精度による測定の不確かさが $2\mu\text{Gal}$ 、国際比較観測の器差の標準偏差が $1.9\mu\text{Gal}$ であるから、誤差伝播の法則からこれらの二つの不確かさを合わせて $2.8\mu\text{Gal}$ となる。次に、FG5 で観測される金属

標上面 1.3m の重力値を、重力鉛直勾配を用いて金属標上面 0.0m に化成処理する際の不確かさが $1.0\mu\text{Gal}$ である。この両者から、基準重力点（金属標上面 0.0m）の絶対重力値の不確かさは、誤差伝播の法則から $3.0\mu\text{Gal}$ と見積もられる。

国土地理院では、年1回絶対重力計の国内比較観測を実施し、所有する各 FG5 が同程度の正確さを有することを確認している（山本ほか, 2018）。これにより、国土地理院が日本全国で絶対重力測定を実施する際に、トレーサビリティを確保した FG5 を用いて、全ての点で同程度の不確かさで測定が実施される。各測定点における絶対重力値の1ドロップあたりの標準偏差を別表-1に示す。点によってばらつきが異なる主な原因は、地盤環境に起因するノイズと考えられる。例えば、車両の往来等の人工的な振動や、降雨、地震、火山等の自然活動に伴う振動である。これらのノイズの除去には、本来は異なる時期に複数回の測定を行い、先行研究（風間ほか, 2014）に従って降水等の陸水擾乱を補正して重力値を確定することが理想であるが、実際には労力やコストから高精度な測定を頻繁に実施することは難しく、また、正確な陸水擾乱補正に必要な測定時の正確な気温、湿度、日照時間、土壌水分量等を過去に遡って得ることも困難である。そのため JGSN2016 では、可能な限り多くの絶対重力測定を実施して統計的な平均処理を行うとともに、最も新しい重力測定から最確値を求め時刻情報も付加した。

8.2 相対重力測定の評価

8.2.1 内部評価

網平均計算に含まれる一等重力点（水準点等への取り付けを含む）全 181 点について、各点の実測値と推定値の標準偏差は全て $11\mu\text{Gal}$ 以内で、 $10\mu\text{Gal}$ を超える点は4点であった（別表-1）。網平均計算で推定した重力値の推定標準偏差の度数分布を図-11に示す。

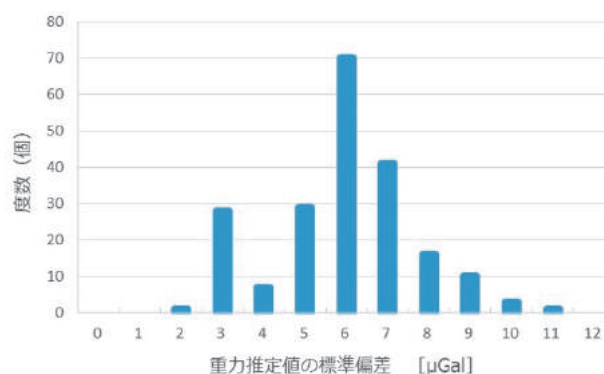


図-11 JGSN2016 の一等重力点等 181 個の推定重力値の標準偏差の度数分布

10 μ Gal を超過した 4 点は、一等重力点「利尻」(北海道)、一等水準点 11036-1 (青森)、電子基準点「上対馬」付属金属標(長崎)、電子基準点「若松」付属金属標(長崎)であった。これらは全て突き出し路線の先端に位置する。突き出し路線では、一つの基線のみから重力値が推定されるため、他の測定結果から不確かさを検証することができない。突き出し路線では、観測数が他の基線に比べて半数しかないため残差が大きくなったと考えられる。

8.2.2 LOOCV による外部評価

網平均計算で推定した重力値及び基線値の外部評価として、絶対重力測定で値が求められている各々の基準重力点に対する LOOCV、相対重力測定で値が求められている各々の基線に対する LOOCV を行った。

8.2.2.1 基線値の外部評価

基線値に対する LOOCV では、網平均計算の入力データセットから評価対象とする基線値の一つ除いて網平均計算を実行し、重力値をはじめとする推定パラメータを決定する。推定したパラメータを用いて網平均計算から除外した基線値を計算して実測値との差を求め、モデルの推定能力を外部評価する。これを全ての基線に対して行い、実測値との差を分散で表現した。この分散値を CV (Cross Validation) 値とすると、基線の観測数を n 、推定パラメータ数を m 、計画行列から a 番目の行を除いた $n-1$ 行 m 列の行列を A^a 、定数項ベクトル L から a 番目の成分を除いた $n-1$ 行 m 列の行列を L^a とし、 A^a と L^a から推定したベクトルを X^a と書けば、CV 値は式 (44) で表される。評価の結果、JGSN2017 では、CV 値の平方根(標本標準偏差)は 18.4 μ Gal となった。

$$CV = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \{L_{\alpha} - (AX^{-\alpha})_{\alpha}\}^2 \quad (44)$$

8.2.2.2 推定した重力値の外部評価

網平均計算によって得られた基準重力点等の重力値を絶対重力測定と比較することで、不確かさを評価した。網平均計算で固定点とした基準重力点のうち、評価対象とする基準重力点 1 点を除いて網平均計算を実行し、この基準重力点の重力値を相対重力測定のデータから推定する。推定した重力値と実測の絶対重力値との差から推定した重力値の不確かさを外部評価した。全ての基準重力点に対して同じ処理を繰り返して、実測値と推定値の差について標本標準偏差を求めると、16.5 μ Gal となった。

8.2.2.3 重力値の不確かさの見積り

8.2.2.2 では、本来利用できるはずの基準重力点のデータを用いずに行う評価であるため、利用できるデータを用いて行った実際の網平均計算と比べると、若干厳しい評価結果となる。そこで、ここでは、8.2.2.1 で行った基線値の外部評価を用いて、もう少し実際の重力基準網に近い重力値の不確かさを見積もる。

重力点の重力値の不確かさ σ_l は、基線値を求めた相対重力測定の不確かさ σ_r と、相対重力測定の起点とした重力点の不確かさ σ_a をあわせて、式 (45) で見積もることができる。

$$\sigma_l = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_a^2} \quad (45)$$

路線に含まれる基線の数が多いほど不確かさは大きくなるが、JGSN2016 では一つの路線に含まれる基線の本数は最大で 6 であるので、両端が基準重力点で間に 5 点の一等重力点等がある場合(図-12)を考えて A 点の不確かさを見積もる。

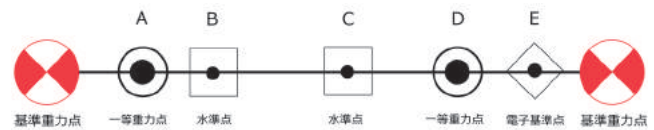


図-12 JGSN2016 での重力網の構成例

JGSN2016 では、ある基線に対する標準的な相対重力測定の数は 6 個であるため、8.2.2.1 から基線値の不確かさを 18.4 μ Gal とすると、 σ_r は、

$18.4/\sqrt{(6-1)}=8.2\mu\text{Gal}$ と見積もられる。基準重力点の重力値の不確かさは、8.1 から 3 μ Gal とする。

A 点の重力値は、端点の基準重力点の重力値に A 点に至るまでの基線値を足すことで各々得られる重力値を平均すれば得られる。この関係を誤差伝播の法則へ適用すれば式 (46) となり、A 点の重力値の不確かさは、10.3 μ Gal と見積もられる。JGSN2016 で標準的な路線では、基準重力点の間に 1 点の一等重力点等がある場合で、基線が 2 つ含まれるため、同様の計算により不確かさは 8.7 μ Gal になる。

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{1}{4}(6\sigma_r^2 + 2\sigma_a^2)} = 10.3 \quad (46)$$

以上から、路線の網の形にもよるが、JGSN2016 では、実用的な重力値の不確かさは 10 μ Gal 程度であると見積もられる。

8.3 パラメータの評価 (分割交差検定)

8.1 及び 8.2 では、測定点ごとに重力値の不確かさを評価したが、ドリフト、SF 及び周期誤差についても重力値と同時に推定するため、これらも同様に評価する必要がある。そこで、測定データを二つのグループに分け、グループごとに推定したパラメータの整合性を確認する 2 分割交差検定で評価を行った。

JGSN201 では、ラコスト重力計の読定値に応じて南北二つに分けた地域に対してそれぞれ SF を推定したことから、評価においても、同じ地域分けとすることで、分割の境界、推定した SF の妥当性を評価した。測定の実施地区を単位として、同時期に測定した地区が別のグループとならないよう分割を行い、南北の境界は、ラコスト重力計の最大読定値と最小読定値の差を元にその中間の読定値を示す測定から定めた。図-13 に分割の境界線を示す。

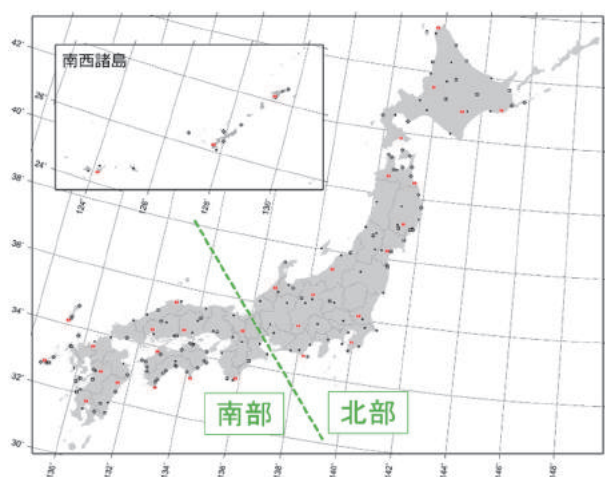


図-13 測定データ分割の境界線

パラメータの推定は、1420 個 (北部 685 個、南部 735 個) のデータ (基線値) を用いて、ドリフト係数=1 (器械に対して一つ)、SF=1 (器械に対して一つ)、周期誤差=5 (第 5 周期まで) に対して実施した。表-9 に、6 章で求めた最適なパラメータ、南北に分割したデータからそれぞれ推定したパラメータ及びそれらの差を示す。

ドリフト係数は、南北ではほぼ同じ値が求められた。G-118 では、係数の南北差が 0.9 μ Gal/時と比較的大きいため、1 日の往復観測間で 10 時間以上の時間差があるとドリフトの不確かさによる重力値の差が 9 μ Gal を超えて影響が無視できなくなる。一方、G-83、G-554 では南北の差は小さいため、日帰りで閉合する通常の相対重力測定では、ドリフトの不確かさの影響は小さい。SF の推定値は、事前に予測したとおり南北で値が異なる。G-83 では、南北で 3/10000 を超える差が生じており、これは 100mGal の重力差に対し、0.030mGal (=30 μ Gal) の差が生じることに相

当する。G-118、G-554 では南北の差は減少するが、最も小さい G-554 でも 100mGal の重力差に対し 5 μ Gal 程度の差を生じる。

表-9 南北 2 分割したデータによるパラメータの推定値

推定パラメータ		北部	南部	南北差	
DR	83	1.5	1.3	0.2	
	118	0.8	-0.1	0.9	
	554	0.2	-0.1	0.3	
SF	83	1.002348	1.002016	0.000332	
	118	1.002576	1.002621	-0.000045	
	554	1.000263	1.000228	0.000035	
PE	83	sin1	1	-3	4
		cos1	-2	2	-4
		sin2	-1	-3	2
		cos2	-1	0	-1
		sin3	2	1	1
		cos3	1	1	0
		sin4	1	0	1
		cos4	1	3	-2
	118	sin1	-2	-2	0
		cos1	-4	-1	-3
		sin2	5	3	2
		cos2	0	2	-2
		sin3	3	6	-3
		cos3	-1	1	2
		sin4	1	1	-2
		cos4	1	-5	6
	554	sin1	3	2	0
		cos1	1	0	3
		sin2	6	0	1
		cos2	6	0	6
		sin3	-2	-9	7
		cos3	-5	5	-1
		sin4	3	-1	4
		cos4	-18	-3	-15
		sin5	0	-2	2
cos5	7	-3	1		

DR (ドリフト) は μ Gal/時、SF (スケールファクター) は単位なし、PE $\sin i$ ($\cos i$) (周期誤差) は、ラコスト重力計 G-83、G-118 及び G-554 の第 i 番目の周期の \sin (\cos) 係数を μ Gal で示す。

周期誤差は、本来は南北ではほぼ同じ値 (相関係数

1) となることが理想であるが、南北の推定値の間の相関係数は 0.21 で、相関は弱い。相関が小さい原因としては、長い周期ほど推定の際に SF と周期誤差を分離することが難しいため、適切な推定ができていないことが想定される。第 5 周期の周期誤差を SF と分離して正しく推定するためには、およそ 70mGal 以上の重力差を持つ基線データが有効であるが、そのようなデータは 1420 個中 263 個(全体の約 18.5%)しか存在せず、検定ではデータを二分割することで更にデータ数が減り、推定が不安定になる。一方、第 5 周期を除いて第 4、第 3、第 2 周期までの推定値相関係数を求めると、それぞれ 0.23, 0.25, 0.40 となり、小さい周期ほど相関係数が大きくなる。これは南北のそれぞれのデータから求めた周期誤差のパラメータが小さい周期ほど整合する傾向を示している。南北いずれも推定された各周期の振幅の大きさは μGal レベルで、推定値に極端に大きな差は生じない。長周期の周期誤差を妥当に推定するためには、2 分割したデータでは数が十分でなく、全てのデータセットを用いてようやく妥当な推定が可能となるデータ数が確保されることが想定される。

SF を除くパラメータの推定値は、データを分割しても大きくは変わらない。SF の推定値は、最終的な網平均計算において南北に分割して推定した二つの値にそれぞれ整合する。周期誤差では、推定パラメータの数に対して用いることができるデータの数が多い可能性はあるため、期待したような強い相関関係は認められないが、データの少ない長周期の周期を除くことで弱い相関が見られた。この結果では、網平均計算によって得られたドリフト係数、周期誤差、SF の値は入力データに大きく依存することなく一定の再現性があり、妥当と考えられる。

8.4 JGSN75 との比較

JGSN2016 に含まれる重力点のうち、JGSN75 構築後に移点や再設等による人工的な位置の変化がない 26 点及び重力点の位置は変わったが取付け観測によって重力値の相互関係が明確である 46 点の計 72 点では、JGSN75 の重力値との比較が可能である(図-14, 別表-1 及び別表-2)。

重力差は、全体的に負に偏る(上矢印: 重力値が減少)傾向が見られ、平均値は -0.04mGal 、正の最大値は岩手県宮古市の一等重力点「宮古」で $+0.07\text{mGal}$ 、負の最大値は新潟県佐渡市の一等重力点「相川」で -0.11mGal である。

JGSN75 と JGSN2016 の間で、測定手法や解析手法等の条件が全て同じであれば、これらの重力差は、両者の構築時期の間に生じた重力変化とみなせるが、実際には、構築手法に起因した重力基準網自身の誤差が含まれる。特に JGSN75 では、当時の測定精度

の限界もあり、網全体に 0.1mGal 程度の不確かさが想定される。一方で、図-14 では、地殻変動に起因すると想定される重力変化も認められる。例えば、東北地方太平洋側で見られる正の重力差は、東北地方太平洋沖地震の際に広域で生じた地盤の沈降に伴う重力値の増加による影響と考えられる。また、南海トラフ沿いの太平洋沿岸部(室戸岬、足摺岬、館山等)で周辺より重力差の減少が小さいのは、プレートの沈み込みに伴う沈降によって重力値が増加したためと考えられる。

一方、九州地方で得られた重力差は、地殻変動の累積から想定される重力変化と傾向が大きく乖離している。これは、JGSN75 を構築する際に、それまでの重力基準網であったポツダム重力系(Suzuki, 1974; Borrass, 1911)との重力値の系統的誤差を解消するために導入した補正量に起因して JGSN75 が系統誤差を含んでいる可能性がある。この補正量は、九州地方では -14.0mGal としているが、国内の他地域では -13.8mGal としており、 0.2mGal の差がある(国土地理院, 1976)。当時の測定精度では問題ならなかったと考えられるが、近年の測定精度の向上によって、九州地方の補正量に系統誤差が含まれていた可能性が示唆されることとなった。

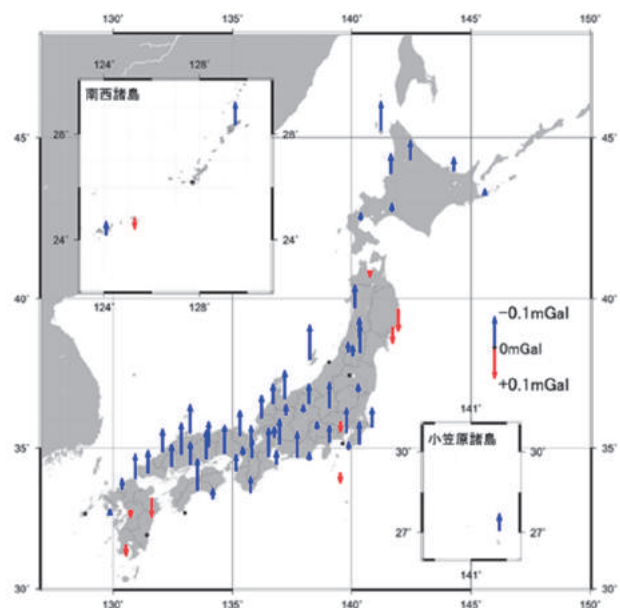


図-14 JGSN2016-JGSN75 の差(重力差の減少を上向き、増加を下向きで表現)

9. まとめ

FG5 絶対重力計による絶対重力測定を根幹とし、ラコスト重力計による相対重力測定で高密度化することによって、基準重力点 34 点及び一等重力点等 262 点(移点や廃点等により、公表時の点数は基準重力点 32 点、一等重力点は 231 点)で全国を約 70km

の平均密度で網羅する, 日本の重力基準網「日本重力基準網 2016 (JGSN2016)」を構築した. 構築においては, 国際標準とのトレーサビリティを確保した絶対重力計の使用, GNSS 測量による重力点の位置情報の高精度化, 潮汐等の解析パラメータの整合性の向上, 最新の絶対及び相対重力測定を反映した重力値の採用, 網平均計算における最適なパラメータの検証等, 測定及び解析の過程において様々な改善を行うことにより, おおよそ基準重力点で $6\mu\text{Gal}$, 一等重力点等で $19\mu\text{Gal}$ 程度の精度を達成した. JGSN2016 の構築により, 日本全国において国際標準に整合した精度の良い重力値を使用することが可能となる.

全国の重力点は, 以下に示す様々な分野で利用さ

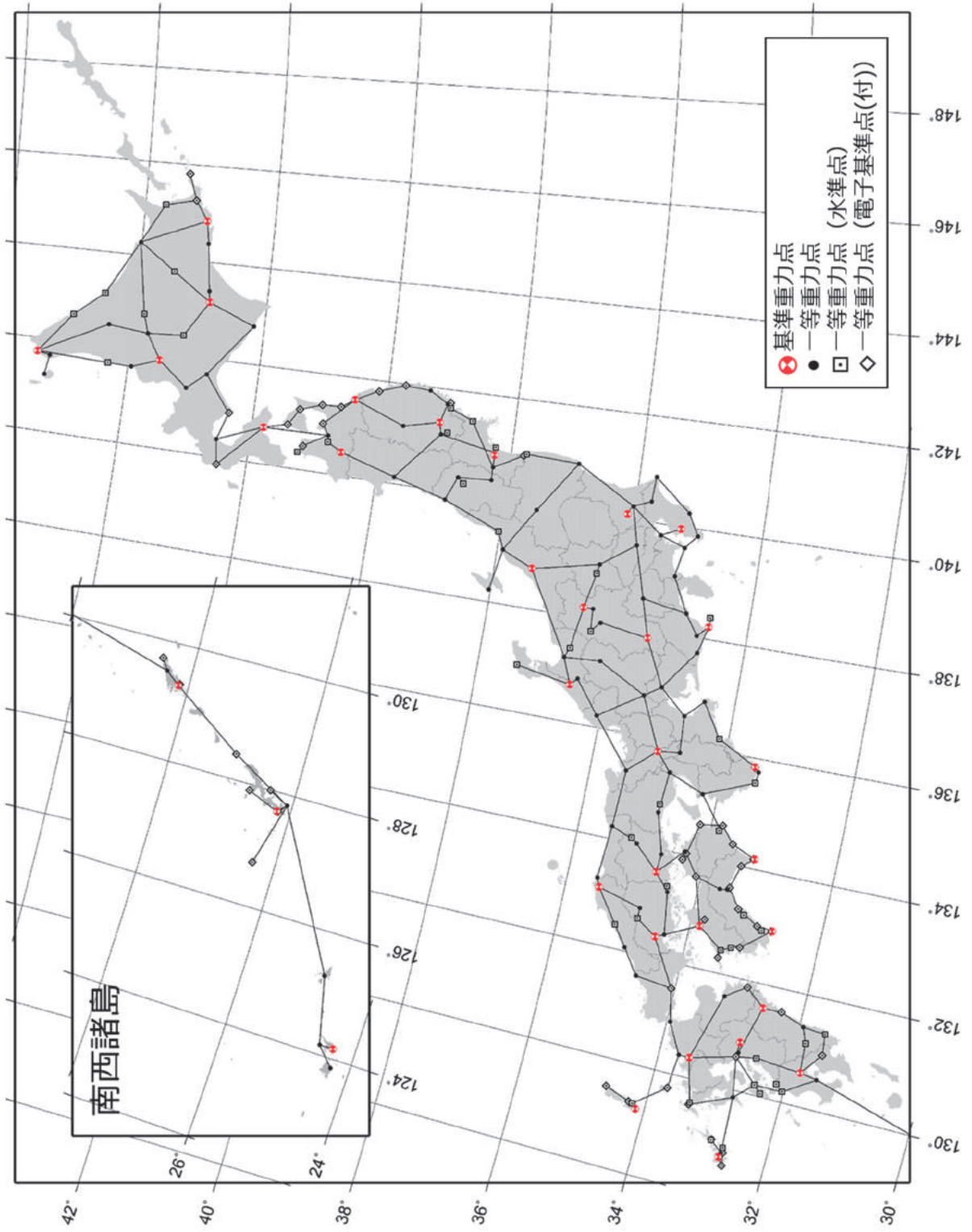
れている. ①地球の形状の決定 (ジオイド・モデルの構築), ②重力分布による地下構造の推定 (鉱物資源等の物理探査, 活断層等の推測等), ③地殻変動と地震に関する研究 (重力の時間変化の把握等), ④地球の弾性応答に関する研究 (地球潮汐, 地球回転等), ⑤標高決定や計測機器の補正 (はかり, 気圧計及び水準測量の重力補正等), ⑥他の手法による重力測定との結合 (航空及び衛星重力の基準, 超伝導重力計の校正等). JGSN2016 は, 従前の重力基準網と比べて高精度な重力基準を日本全国に等しく展開しており, 今後の更なる活用が期待される.

(公開日: 平成 30 年 12 月 27 日)

参 考 文 献

- Becker, M (1981): Results of circular error studies with LaCoste and Romberg gravimeters, *Bull. B. G. I.* 49, 72-94.
- Borrass, E (1911): Bericht über die relativen Messungen der Schwerkraft mit Pendelapparaten in der Zeit von 1808-1909, über ihre Darstellung im Potsdamer Schweresystem, *Verh. 16 allg. Konf. internat. Erdmess.* London and Cambridge, 1909, Teil 3, Berlin, pp. 280.
- Dehant, V, Zschau, J (1989): The Effect of Mantle Inelasticity On Tidal Gravity: A Comparison Between the Spherical and the Elliptical Earth Model, *Geophysical Journal International*, Vol97, 549-555.
- Dehant, V (1987): Tidal parameters for an inelastic Earth, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 49, 97-116.
- Harrison, J. C. and L. J. B LaCoste (1978): The measurement of surface gravity, *Proc. 9th GEOP Conf. OSU Report*, 280, 239-243.
- International Association for Geodesy (1983): Standard Gravity Corrections System, *Bull. B. G. I.* 53, 214.
- International Association for Geodesy (2015): IAG Resolution (No.2) for the establishment of a global absolute gravity reference system, http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf (accessed at March 26, 2016).
- International Gravity Commission-Working Group II (1988): IAGBN Absolute Gravity Observation Data Processing Standards and Station Documentation, *Bull. d'Inform. BGI*, 63, 51-57.
- 加藤照之, 津村建四朗 (1979): 潮位記録から推定される日本の垂直地殻変動 (1951~1978), *地震研究所彙報*, 54 (3), 559-628.
- 風間卓仁, 山本圭吾, 福田洋一, 井口昌正人 (2014): 相対重力データに対する陸水擾乱補正の重要性: 桜島火山を例に, *測地学会誌*, 60 (2), 73-89.
- 兒玉篤郎, 宮原伐折羅, 河和宏, 根本悟, 黒石裕樹 (2014): ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver.1) の構築, *国土地理院時報*, 126, 67-85.
- 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.
- 黒石裕樹 (2000): 日本のジオイドの重力手法による精密決定, *測地学会誌*, 46 (1), 1-20.
- 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.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, *Journal of Oceanography*, 56, 567-581.
- Micro-g LaCoste, Inc. (2012): g9 User's Manual, <http://www.microglacoste.com/pdf/g9Help.pdf> (accessed at March 26, 2016).
- 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.
- O. Francis, H. Bauimann and Participants (2014): International Comparison of Absolute Gravimeters, final report, 1-31.

- 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.
- Petit, G., Luzum, B.J., (eds.), 2011, "IERS Conventions (2010)," IERS Technical Note 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, in print. See also <http://tai.bipm.org/iers/conv2010> or <http://maia.usno.navy.mil/conv2010>.
- Plag, H. and M. Pearlman (Eds.) (2009): Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020, Springer Verlag Berlin, Doi: 10.1007/978-3-642-02687-4.
- Rapp, R.H (1983): Tidal gravity computations based on recommendations of the standard Earth Tide Committee, Bulletin d'Informations Marees Terrestres, 89, 5814-5819.
- Sakuma A. (1971): Recent developments in the absolute measure of gravitational acceleration, Nat. Bur. Stand. (U.S.), Spec. Publ., 343, 447-456.
- Schwarz G (1978). Estimating the dimension of a model. The annals of Statistics, 6(2), 461-464.
- 測地部 (1997) : 新しい日本重力基準網の構築, 国土地理院時報, 87, 13-20.
- Suzuki, H. (1974): Establishment of the Gravimetric Network in Japan, Bulletin of the Geographical Survey Institute, 20, 1-150.
- 鈴木弘道 (1976) : 国際重力基準網 1971 と日本重力基準網 1975, 測地学会誌, 22 (2), 112-129.
- 飛田幹男, 宗包浩志, 海津優, 松坂茂, 黒石裕樹, 眞崎良光, 加藤敏 (2004) : つくば市周辺の地下水位と地盤の季節変動, 測地学会誌, 50 (1), 27-37.
- Völgyesi, L.; Földvály, L.; Csapö, G (2007): Improved processing method of UEGN-2002 gravity network measurements in Hungary, Dynamic Planet - Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools, 130, 202-207. ISBN 978-3-540-49349-5.
- WAHR, J.M (1981): Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth, Geophys. J.R. astr. Soc., 64, 677-703.
- Wenzel, H.-G (1996): The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30, Bulletin d'Informations Mareés Terrestres, 124, 9425-9439.
- 山本宏章, 宮原伐折羅, 吉田賢司, 菅原安宏, 宮崎隆幸 (2018) : 国土地理院の重力測量, 国土地理院時報, 131, 21-52.
- Kuroishi, Y. and M. Murakami (1991): Results of Absolute Gravity Measurements by Geographical Survey Institute (III), Bulletin of the Geographical Survey Institute, 36, 21-31.



別図-1 網平均計算時の基線図

別表-1 JGSN2016 の重力値等 (網平均計算に含まれる点)

Fundamental Gravity Station: 基準重力点

Station	Abbr ^{※1}	Latitude (° ' ")	Longitude (° ' ")	Height (m)	G value(0m) ^{※2} (mGal)	S.D (μGal)	Date ^{※3}	G gradient (μGal/cm)	Remarks
Wakkanai 稚内	WKN	45° 23' 26.30"	141° 42' 48.60"	24.94	980 627.098	90.7	2007/08/09	-2.9602	廃点
Shintotsukawa 新十津川	SNT	43° 31' 43.69"	141° 50' 40.92"	82.79	980 495.553	18.5	2007/06/11	-3.2358	
Kushiro 釧路	KSR	43° 02' 14.07"	144° 50' 54.04"	2.73	980 634.758	16.1	2013/08/02	-3.0490	
Obihiro 帯広	OBH	42° 52' 25.00"	143° 10' 07.00"	76.88	980 419.077	29.6	2007/07/09	-3.0483	
Hakodate 函館	HKD	41° 49' 00.84"	140° 45' 11.61"	34.56	980 400.686	11.8	2010/06/08	-3.1079	廃点
Hirosaki 弘前	HRS	40° 35' 17.47"	140° 28' 24.59"	50.90	980 261.212	11.0	2012/06/06	-3.1578	
Hachinohe 八戸	HCN	40° 28' 47.64"	141° 33' 37.69"	99.02	980 342.782	17.7	2012/06/13	-3.2161	
Esashi 江刺	ESS	39° 09' 03.81"	141° 19' 54.53"	391.29	980 121.732	9.6	2011/10/06	-2.8930	
Sendai 仙台	SND	38° 15' 04.78"	140° 50' 40.93"	127.40	980 065.838	38.7	2011/08/03	-2.9032	
Nagaoka 長岡	NGO	37° 25' 26.00"	138° 46' 36.00"	58.97	979 931.453	13.6	2008/10/01	-2.8126	
Kanouzan 鹿野山	KNO	35° 15' 18.75"	139° 57' 21.53"	351.24	979 690.824	54.5	2012/07/26	-3.7259	
Tsukuba 筑波	TKB	36° 06' 14.11"	140° 05' 12.96"	21.03	979 951.222	44.3	2012/06/24	-2.9388	
Matsushiro 松代	MTS	36° 32' 39.00"	138° 12' 12.00"	408.88	979 772.997	6.5	2004/11/22	-2.3247	
Iida 飯田	IID	35° 30' 04.00"	137° 49' 57.00"	467.04	979 666.978	17.1	2004/11/27	-2.9231	
Omaezaki 御前崎	OMZ	34° 36' 13.57"	138° 13' 31.98"	6.19	979 752.442	44.3	2014/01/27	-2.5954	
Kanazawa 金沢	KNZ	36° 32' 52.00"	136° 42' 25.00"	85.35	979 846.124	38.8	2004/09/14	-2.2604	
Kyoto-C 京都 C	KYC	35° 01' 50.00"	135° 46' 59.00"	59.79	979 707.676	34.5	2003/05/15	-2.7797	
Kushimoto 串本	KSM	33° 31' 12.69"	135° 50' 10.87"	25.67	979 735.386	10.0	2009/06/05	-2.7928	
Okayama 岡山	OKY	34° 40' 48.00"	133° 34' 15.00"	511.57	979 616.652	10.3	2002/11/20	-4.0387	廃点
Matsue 松江	MTE	35° 29' 13.00"	133° 03' 59.00"	8.38	979 794.854	21.6	2003/08/09	-3.0747	
Hiroshima 広島	HRM	34° 28' 54.00"	132° 23' 46.00"	230.69	979 619.123	13.2	2002/08/30	-3.3554	
Muroto 室戸	MRT	33° 14' 53.03"	134° 10' 40.68"	10.14	979 669.846	10.3	2014/06/28	-2.2898	
Ehime 愛媛	EHM	33° 51' 04.42"	132° 46' 29.67"	30.84	979 597.729	8.1	2014/06/16	-3.0621	
Ashizuri 足摺	ASZ	32° 44' 08.82"	132° 58' 32.92"	125.27	979 589.697	17.4	2014/09/10	-3.6758	
Tsushima 対馬	TSM	34° 08' 09.01"	129° 12' 23.90"	384.82	979 625.388	10.1	2013/09/11	-2.6966	
Fukuoka 福岡	FKO	33° 31' 52.32"	130° 22' 32.07"	66.62	979 614.546	6.2	2010/07/28	-2.8551	
Nobeoka 延岡	NBO	32° 37' 00.70"	131° 34' 37.86"	165.37	979 465.622	14.7	2013/09/24	-2.7696	
Aira 始良	AIR	31° 49' 25.27"	130° 36' 00.31"	279.29	979 431.461	8.8	2012/09/17	-3.4979	

Kumamoto	熊本	KMM	32° 50' 07.81"	130° 52' 15.50"	184.32	979 511.944	20.6	2016/08/08	-3.2513
Fukue	福江	FKE	32° 43' 03.41"	128° 45' 25.49"	72.19	979 564.453	6.2	2011/02/24	-2.0859
Amami	奄美	AMM	28° 09' 26.01"	129° 17' 59.36"	15.52	979 226.857	8.4	2012/02/27	-1.8526
Naha	那覇	NAH	26° 12' 26.83"	127° 41' 12.52"	21.10	979 095.955	39.9	2011/11/15	-2.8154
Ishigakijima	石垣島	ISG	24° 20' 11.90"	124° 09' 52.76"	6.68	979 006.035	21.7	2011/11/25	-3.3090
First order Gravity Station: 一等重力点									
Station	Abbr ^{※1}	Latitude (° ' ")	Longitude (° ' ")	Height (m)	G value(0m) ^{※2} (mGal)	S.D (mGal)	Difference ^{※4} (mGal)	Remarks	
Wakkanai	稚内	WKN	45° 24' 55.00"	141° 40' 42.00"	3.05	980 642.539	0.007	-----	
Rishiri	利尻	RSR	45° 14' 46.78"	141° 13' 53.00"	69.00	980 669.639	0.010	-0.09	
Nayoro	名寄	NYR	44° 21' 53.01"	142° 27' 39.94"	95.45	980 574.036	0.005	-0.06	
Abashiri	網走	ABS	44° 01' 05.77"	144° 16' 46.87"	37.39	980 589.096	0.005	-0.04	
Asahikawa	旭川	ASH	43° 45' 27.70"	142° 22' 22.25"	114.48	980 531.383	0.005	-----	
Rumoi	留萌	RMI	43° 56' 48.00"	141° 37' 57.00"	24.20	980 560.833	0.006	-0.06 廃点	
Kushiro	釧路	KSR	42° 59' 10.01"	144° 22' 41.27"	-0.91	980 603.000	0.007	-----	
Obihiro	帯広	OBH	42° 55' 21.00"	143° 12' 44.00"	38.95	980 418.152	0.006	-----	
Urakawa	浦河	URK	42° 09' 43.58"	142° 46' 37.14"	28.41	980 324.849	0.006	----- 廃点	
Chitose	千歳	CTS	42° 47' 08.91"	141° 40' 49.63"	24.40	980 421.545	0.006	-0.02	
Sapporo	札幌	SPR	43° 04' 20.15"	141° 20' 29.66"	15.21	980 477.542	0.005	-----	
Oshamanbe	長万部	OSH	42° 30' 30.11"	140° 22' 23.68"	5.62	980 421.884	0.006	-0.02	
Aomori	青森	AOM	40° 49' 19.17"	140° 46' 07.23"	3.37	980 311.070	0.005	+0.01	
Morioka	盛岡	MRO	39° 41' 55.00"	141° 09' 57.00"	153.83	980 189.624	0.005	-----	
Akita	秋田	AKT	39° 43' 45.51"	140° 08' 11.65"	27.87	980 175.729	0.005	-0.07	
Ohtsuchi	大槌	OTC	39° 21' 05.57"	141° 56' 04.26"	2.86	980 251.561	0.007	-0.07	
Ohfunato	大船渡	OFN	39° 03' 55.46"	141° 42' 52.36"	36.70	980 210.671	0.006	+0.05	
Mizusawa	水沢	MZS	39° 06' 42.00"	141° 12' 13.00"	123.00	980 168.722	0.005	-----	
Sakata	酒田	SKT	38° 54' 32.00"	139° 50' 37.00"	3.36	980 071.512	0.006	-0.03 廃点	
Shinjyou	新庄	SNJ	38° 45' 27.00"	140° 18' 45.00"	100.73	980 060.076	0.007	-0.06	
Sendai	仙台	SND	38° 15' 04.74"	140° 50' 40.90"	127.39	980 065.796	0.003	-0.03	
Yamagata	山形	YMG	38° 14' 51.00"	140° 20' 58.00"	168.33	980 014.834	0.006	-0.09 廃点	
Iwaki	いわき	IWK	36° 56' 52.44"	140° 54' 11.89"	4.15	980 008.492	0.005	-0.02	
Aizuwakamatsu	会津若松	AIZ	37° 29' 18.84"	139° 54' 38.42"	211.75	979 912.943	0.006	0.00 廃点	

Kyoto	京都	KYT	35° 01' 50.00"	135° 46' 59.00"	59.79	979 707.675	0.003	-0.07	基準重力点 ^{※5}
Itami	伊丹	ITM	34° 47' 31.00"	135° 26' 22.00"	15.42	979 703.462	0.005	-0.02	
Himeji	姫路	HMJ	34° 50' 23.00"	134° 40' 15.00"	38.98	979 730.078	0.007	-0.09	廃点
Okayama	岡山	OKY	34° 39' 39.00"	133° 54' 59.00"	-1.00	979 711.445	0.006	-0.09	
Tsuyama	津山	TUY	35° 03' 54.00"	134° 00' 34.00"	146.33	979 719.719	0.006	-0.08	廃点
Tottori	鳥取	TTR	35° 29' 17.00"	134° 14' 18.00"	8.00	979 790.561	0.006	-----	
Sakaininato	境港	SMT	35° 32' 40.00"	133° 14' 06.00"	2.00	979 807.981	0.006	-0.09	廃点
Hamada	浜田	HMD	34° 53' 47.00"	132° 04' 15.00"	19.55	979 747.641	0.007	-0.07	廃点
Susa	須佐	SUS	34° 37' 39.00"	131° 36' 17.00"	3.07	979 729.496	0.007	-----	基準重力点 ^{※5}
Yamaguchi	山口	YGC	34° 09' 38.00"	131° 27' 17.00"	17.04	979 658.808	0.006	-0.07	廃点
Hiroshima	広島	HRM	34° 22' 20.00"	132° 27' 57.00"	0.95	979 658.589	0.007	-0.07	
Miyoshi	三次	MYS	34° 48' 20.00"	132° 51' 06.00"	156.00	979 676.879	0.006	-0.10	廃点
Fukuyama	福山	FYM	34° 26' 49.00"	133° 14' 51.00"	1.92	979 689.327	0.007	-0.07	廃点
Takamatsu	高松	TKM	34° 19' 06.42"	134° 03' 15.96"	9.00	979 698.814	0.006	-----	
Kouchi	高知	KOC	33° 33' 25.34"	133° 32' 01.16"	-0.69	979 625.624	0.008	-0.10	
Kouchi	高知	KOC	33° 40' 35.92"	133° 31' 00.37"	824.57	979 470.600	0.008	-----	基準重力点 ^{※5}
Matsuyama	松山	MTY	33° 50' 37.00"	132° 46' 40.00"	33.56	979 595.746	0.005	-----	廃点
Shimonoseki	下関	SMN	33° 56' 56.00"	130° 55' 36.00"	0.12	979 675.280	0.006	-0.08	
Fukuoka	福岡	FKO	33° 35' 54.55"	130° 22' 35.26"	31.51	979 628.563	0.004	-0.03	
Ohita	大分	OIT	33° 14' 10.60"	131° 37' 10.46"	5.10	979 541.834	0.006	+0.06	
Miyazaki	宮崎	MYZ	31° 56' 18.44"	131° 24' 51.26"	9.36	979 429.491	0.006	0.00	
Kumamoto	熊本	KMM	32° 49' 00.89"	130° 43' 40.06"	22.81	979 551.635	0.005	+0.02	
Nagasaki	長崎	NGS	32° 44' 01.00"	129° 52' 06.00"	23.70	979 588.017	0.005	-0.01	
Kagoshima	鹿児島	KGS	31° 33' 18.74"	130° 32' 55.11"	4.58	979 471.208	0.006	+0.03	
Fukue	福江	FKE	32° 41' 42.00"	128° 49' 37.00"	26.00	979 574.163	0.008	0.00	廃点
Naze	名瀬	NAZ	28° 22' 46.94"	129° 29' 44.92"	3.70	979 250.327	0.006	-0.07	
Naha	那覇	NAH	26° 12' 26.83"	127° 41' 12.52"	21.09	979 095.918	0.003	0.00	
Miyakojima	宮古島	MYJ	24° 47' 41.00"	125° 16' 41.00"	38.74	978 997.658	0.005	+0.03	
Ishigakijima	石垣島	ISG	24° 20' 11.90"	124° 09' 52.76"	6.67	979 006.021	0.003	-0.04	
Iriomotejima	西表島	IRO	24° 17' 03.07"	123° 52' 53.57"	14.02	979 012.229	0.007	-----	

Coequal First order Gravity Station: 一等重力点相当 (水準点, 電子基準点付属標)

Station	Abbr**1	Latitude (° ' ")	Longitude (° ' ")	Height (m)	G value(0m)**2 (mGal)	S.D (mGal)	Remarks
交 38	J38	44° 55' 00.9813"	142° 35' 14.1540"	5.7017	980 631.084	0.006	
交 39	J39	44° 28' 20.9667"	143° 07' 14.5700"	5.0782	980 596.103	0.006	
基 74	F74	44° 18' 21.5099"	141° 39' 12.4780"	39.2306	980 563.399	0.006	
基 76	F76	43° 50' 50.5507"	142° 46' 15.9450"	341.4712	980 451.248	0.006	
交 8162	J8162	43° 12' 44.7100"	142° 25' 16.2600"	245.6364	980 443.215	0.006	
7645	7645	43° 41' 37.0300"	145° 06' 46.1600"	3.0231	980 597.144	0.007	
交 46	J46	43° 27' 57.1200"	143° 44' 17.7900"	205.6539	980 505.328	0.005	
交 16	J16	42° 49' 15.4004"	141° 39' 01.2051"	13.6757	980 431.009	0.006	
11036-1	11036-1	41° 15' 15.3496"	140° 20' 52.6634"	54.7700	980 353.332	0.010	
5962	5962	40° 48' 36.7377"	140° 38' 36.4114"	24.3664	980 284.008	0.006	
6782	6782	39° 00' 49.5203"	141° 38' 14.1172"	1.3136	980 207.818	0.007	
5694	5694	38° 39' 13.7085"	141° 26' 42.5356"	17.4056	980 178.211	0.006	
2177	2177	38° 14' 52.7023"	140° 53' 23.7028"	21.7053	980 103.492	0.006	
交 3817	J3817	38° 45' 48.1680"	140° 17' 58.1395"	97.6635	980 061.427	0.009	
5456	5456	39° 07' 59.6490"	141° 08' 47.2182"	50.2765	980 153.253	0.009	
5695	5695	38° 40' 01.7186"	141° 26' 29.4028"	29.6318	980 175.388	0.009	
基 63	F63	38° 01' 13.2633"	139° 23' 16.2148"	32.9981	980 010.236	0.006	
3523	3523	36° 25' 51.1417"	139° 00' 13.0204"	197.5066	979 804.090	0.006	
基 17	F17	37° 24' 19.9443"	136° 54' 01.7389"	3.4603	979 982.017	0.007	
825	825	36° 38' 46.7282"	137° 12' 28.3128"	24.5969	979 856.915	0.005	
基 58	F58	36° 14' 34.2530"	137° 57' 21.4146"	609.5500	979 648.129	0.007	
5580	5580	37° 45' 47.1403"	140° 56' 38.1032"	7.0172	980 093.728	0.007	
基 23	F23	34° 50' 24.7536"	134° 37' 21.2723"	40.0560	979 722.716	0.007	
基 45	F45	33° 52' 26.8851"	134° 36' 40.6510"	18.0792	979 646.591	0.007	
基 41	F41	33° 28' 31.2483"	135° 46' 23.0047"	3.3314	979 740.236	0.005	
4770	4770	34° 08' 34.1762"	136° 13' 28.4366"	10.2301	979 717.925	0.006	
1032	1032	35° 03' 36.3569"	134° 02' 01.8728"	91.7209	979 733.768	0.007	
1620	1620	34° 27' 09.5824"	133° 15' 21.0269"	5.3938	979 688.978	0.006	
基 30	F30	35° 07' 17.6947"	132° 26' 53.9868"	110.1829	979 744.825	0.006	廃点

													重力測定後移点
2331		2331	34° 48' 18.7848"	132° 51' 09.0774"	155.2359	979 676.979	0.006						
3254		3254	33° 21' 27.4058"	129° 34' 38.8439"	31.4993	979 613.991	0.006						
4313		4313	32° 27' 43.4645"	130° 11' 03.7718"	5.1353	979 564.652	0.005						
附 24		A24	32° 01' 02.3585"	130° 11' 27.5820"	2.5555	979 520.936	0.007						
TUSIMA01		-----											
10535		10535	34° 12' 19.3300"	129° 17' 24.8100"	3.225	979 714.680	0.006						
10604		10604	32° 41' 27.3600"	128° 50' 14.9200"	11.668	979 575.916	0.006						
10604		10604	32° 53' 16.4100"	129° 01' 18.5700"	2.264	979 595.233	0.008						
4314		4314	32° 26' 45.7614"	130° 11' 56.0706"	2.5733	979 569.703	0.006						
準基 2406		SF2406	32° 01' 53.7162"	130° 12' 08.2610"	31.2782	979 511.340	0.009						
2382		2382	32° 31' 55.0920"	130° 39' 57.9930"	8.2022	979 548.518	0.006						
基 48		F48	31° 51' 06.0000"	131° 08' 02.0000"	135.7855	979 445.639	0.006						
9154		9154	31° 36' 05.9626"	131° 22' 36.4809"	6.3994	979 433.535	0.007						
交 4569		J4569	33° 27' 31.3359"	132° 25' 36.0041"	2.6899	979 602.733	0.006						
附 22		A22	33° 20' 00.8461"	133° 14' 38.0960"	3.8864	979 621.830	0.008						
交 4631		J4631	32° 59' 35.8748"	132° 55' 53.2869"	7.9721	979 599.204	0.006						
基 44		F44	33° 13' 06.1997"	132° 33' 51.6874"	10.4258	979 585.384	0.007						
1880		1880	32° 51' 29.4776"	130° 48' 31.5815"	60.4987	979 547.713	0.006						
根室 3(付)		960512A	43° 13' 55.5968"	145° 15' 32.2159"	37.246	980 677.362	0.007						
根室 2(付)		950119A	43° 22' 00.6917"	145° 48' 04.0552"	13.100	980 682.183	0.009						
室蘭(付)		940018A	42° 22' 27.1943"	140° 56' 32.6699"	105.422	980 423.717	0.006						
瀬棚(付)		940017A	42° 27' 02.6703"	139° 51' 27.5998"	35.997	980 473.244	0.006						
佐井(付)		950150A	41° 27' 19.0680"	140° 52' 49.8593"	13.694	980 383.423	0.007						
今別(付)		960534A	41° 11' 06.2575"	140° 29' 26.7609"	4.186	980 333.302	0.008						
むつ(付)		940024A	41° 18' 02.7681"	141° 12' 47.7743"	18.566	980 357.305	0.008						
平内 A(付)		091175A	40° 55' 16.1273"	140° 59' 24.8381"	26.819	980 329.194	0.006						
六ヶ所(付)		950152A	40° 58' 05.6905"	141° 22' 04.6788"	19.019	980 365.781	0.008						
三沢(付)		960539A	40° 40' 35.0014"	141° 22' 34.3740"	45.404	980 302.679	0.007						
久慈(付)		940027A	40° 08' 00.3876"	141° 47' 20.7557"	47.762	980 322.415	0.007						
田老(付)		020906A	39° 44' 20.2159"	141° 58' 12.8445"	6.555	980 290.462	0.007						廃点
大船渡(付)		950171A	39° 01' 25.5675"	141° 44' 23.6064"	60.586	980 206.359	0.008						
相馬 1(付)		940038A	37° 48' 02.4180"	140° 54' 29.2163"	25.145	980 088.290	0.006						

古座(付)	031113A	33° 31' 12.3133"	135° 50' 02.9223"	74.986	979 725.054	0.006	
平戸(付)	950459A	33° 21' 43.9158"	129° 32' 13.2453"	135.819	979 587.895	0.006	
石田(付)	950458A	33° 44' 33.5883"	129° 44' 04.9944"	91.378	979 631.775	0.006	
美津島(付)	950457A	34° 16' 05.5214"	129° 18' 41.3973"	7.670	979 722.050	0.009	
上対馬(付)	950456A	34° 39' 19.9840"	129° 28' 55.4357"	32.298	979 751.614	0.011	
若松(付)	960692A	32° 53' 08.2478"	129° 01' 34.8138"	24.357	979591.735	0.010	
福江(付)	950462A	32° 40' 09.7792"	128° 50' 35.2307"	114.769	979 552.857	0.007	
玉之浦(付)	960698A	32° 38' 03.3757"	128° 37' 09.6897"	3.789	979 579.422	0.007	
東郷(付)	021084A	32° 18' 58.4620"	131° 34' 58.8874"	50.676	979 472.562	0.006	
大分佐伯(付)	940090A	32° 55' 28.5156"	131° 52' 34.9721"	4.381	979 532.362	0.006	
大隅(付)	021090A	31° 33' 52.5623"	130° 59' 53.8901"	91.594	979 444.762	0.006	
瀬戸内(付)	960733A	28° 08' 15.3220"	129° 19' 13.6018"	2.32	979 226.960	0.007	
笠利(付)	960730A	28° 29' 13.9799"	129° 41' 36.8438"	7.05	979 242.295	0.008	
与論(付)	950495A	27° 01' 55.8801"	128° 25' 56.3349"	83.469	979 175.909	0.005	
那覇(付)	021096A	26° 11' 40.5126"	127° 40' 39.4705"	2.945	979 097.807	0.007	
本部(付)	950496A	26° 41' 41.3143"	127° 53' 54.4152"	33.192	979 158.938	0.009	
具志川(付)	960743A	26° 20' 52.1998"	126° 44' 20.9305"	7.088	979 170.175	0.007	
与那城(付)	021094A	26° 23' 10.8765"	127° 59' 37.2294"	15.707	979 088.904	0.007	
高知田野(付)	950444A	33° 25' 40.0463"	134° 00' 25.7055"	3.529	979 650.287	0.006	
徳島海南(付)	950424A	33° 37' 06.5988"	134° 22' 19.2709"	9.205	979 659.840	0.006	
高知(付)	940083A	33° 31' 44.9583"	133° 34' 41.7570"	29.300	979 621.531	0.007	
阿南 2(付)	950422A	33° 49' 48.8789"	134° 40' 04.0822"	5.389	979 648.844	0.006	
鳴門(付)	960673A	34° 10' 18.5253"	134° 36' 18.1099"	0.750	979 670.863	0.007	
高松(付)	940080A	34° 17' 09.6949"	134° 01' 26.0725"	37.742	979 685.550	0.006	廃点
坂出(付)	021045A	34° 19' 33.2887"	133° 53' 57.7923"	3.225	979 702.514	0.009	
伊方(付)	940086A	33° 28' 08.4491"	132° 16' 52.2254"	154.609	979 581.743	0.009	
豊浜(付)	950428A	34° 04' 05.0660"	133° 38' 51.0846"	17.607	979 653.250	0.006	
愛媛川内(付)	950433A	33° 47' 47.3652"	132° 54' 41.9148"	132.417	979 586.617	0.007	
土佐清水(付)	940085A	32° 45' 20.6703"	132° 57' 59.0945"	35.035	979 609.004	0.007	
宇和島(付)	960681A	33° 10' 39.3092"	132° 32' 37.5394"	145.306	979 557.873	0.008	
中土佐 2(付)	960683A	33° 19' 36.8724"	133° 13' 42.4751"	2.318	979 621.920	0.008	

大方(付)	950448A	32° 59' 28.4474"	132° 59' 57.2164"	20.226	979 600.728	0.008
熊本(付)	950465A	32° 50' 31.5636"	130° 45' 53.2573"	54.359	979 553.361	0.004
始良(付)	970837A	31° 49' 26.6320"	130° 35' 58.5458"	277.439	979 431.961	0.007
長崎 2(付)	021068A	32° 46' 05.9266"	129° 57' 32.1965"	57.918	979 566.954	0.009

※1 各点の測点名の略語を示す.

※2 金属標上 0m における重力値

※3 基準重力点 : 連続する測定の日付の最終日の日付

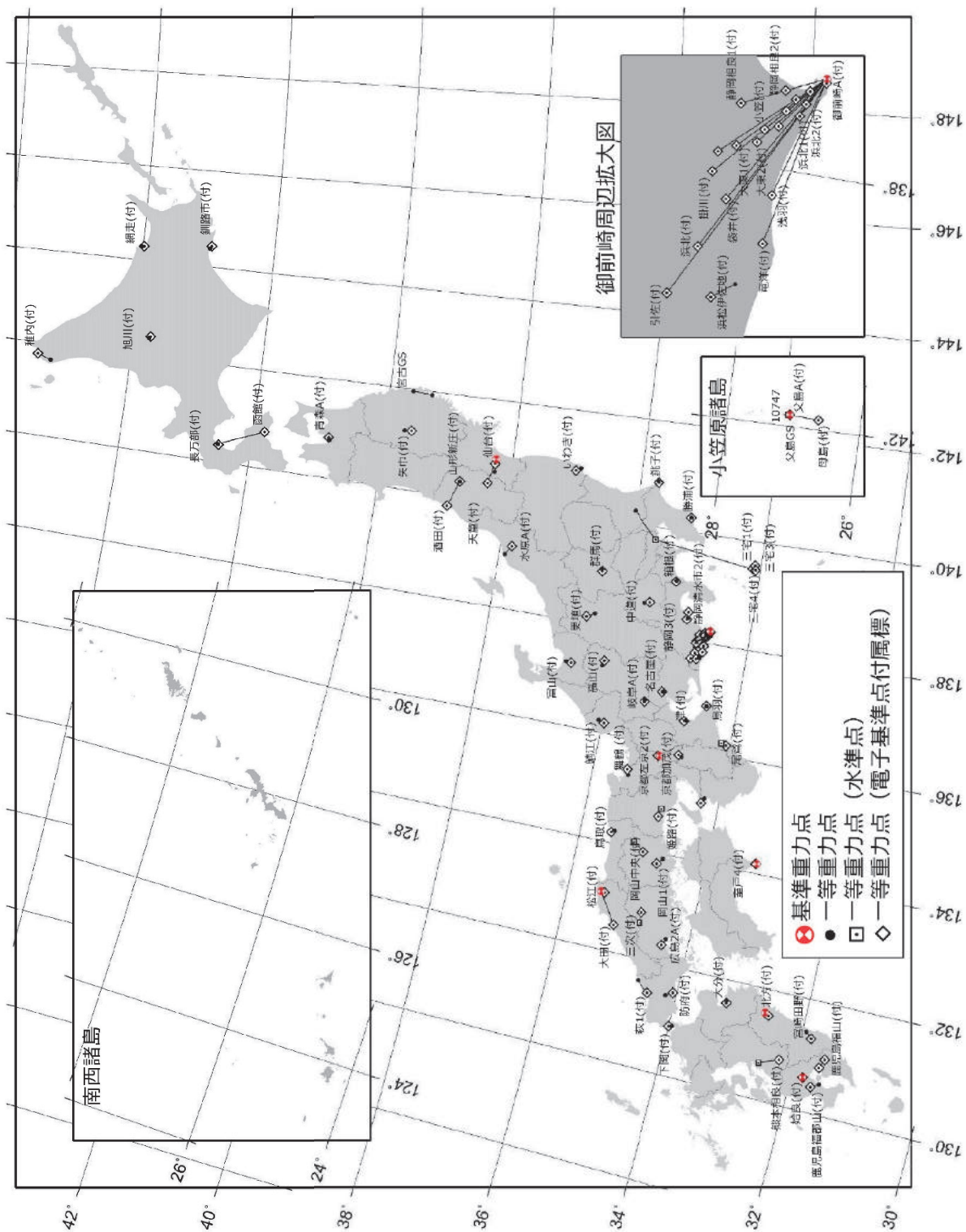
※4 JGSN2016 - JGSN75 の差を示す

※5 JGSN2016 では一等重力点と同等の扱いで相対重力測定のみを実施

別表-2 基準重力点における複数回の測定結果 (金属標上 130.0cm の重力値で比較)

Station	First		Second		Difference (μ Gal)	G change rate (μ Gal/year)	Date		Remarks
	G value (μ Gal)	S.D (μ Gal)	G value (μ Gal)	S.D (μ Gal)			First	Second	
Shintotsukawa 新十津川	980 495 124.9	20.2	980 495 132.6	18.5	+7.7	+0.7	1996/06/12	2007/06/11	
Kushiro 釧路	980 634 348.1	21.6	980 634 361.4	16.1	+13.3	+0.9	1998/06/09	2013/08/02	
Obihiro 帯広	980 418 665.2	35.5	980 418 681.0	29.6	+15.8	+1.8	1998/06/23	2007/07/09	
Hakodate 函館	980 400 283.4	14.3	980 400 281.9	11.8	-1.5	-0.4	2006/06/15	2010/06/08	
Hirosaki 弘前	980 260 796.2	13.1	980 260 801.6	11.0	+5.4	+0.9	2006/09/20	2012/06/06	
Hachinohe 八戸	980 342 381.3	17.4	980 342 363.6	17.7	-17.7	-10.6	2010/10/21	2012/06/13	
Esashi 江刺	980 121 367.7	9.3	980 121 355.9	9.6	-11.8	-3.0	2007/10/29	2011/10/06	
Sendai 仙台	980 065 474.5	18.2	980 065 460.1	38.7	-21.6	-30.7	2005/07/07	2011/08/03	
Nagaoka 長岡	979 931 094.4	32.9	979 931 087.4	13.6	-7.0	-1.7	2004/08/03	2008/09/30	
Kanozan 鹿野山	979 690 311.8	110.5	979 690 339.4	54.5	+27.6	+4.2	2006/01/30	2012/07/26	
Matsushiro 松代	979 772 695.7	7.2	979 772 694.5	6.5	-1.2	-0.2	1997/08/22	2004/11/19	
Kyoto-C 京都 C	979 707 312.6	51.0	979 707 314.3	34.5	+1.7	+0.2	1995/10/18	2003/05/12	
Kushimoto 串本	979 735 013.6	10.0	979 735 022.7	18.1	+9.1	+1.3	2009/06/05	2016/02/21	
Hiroshima 広島	979 618 668.3	14.9	979 618 687.1	13.2	+18.8	+3.1	1996/08/26	2002/08/27	
Muroto 室戸	979 669 544.2	8.6	979 669 548.0	10.3	+3.8	+0.7	2009/01/27	2014/06/28	
Ashizuri 足摺	979 589 205.5	8.3	979 589 219.3	17.4	+13.8	+2.8	2009/10/24	2014/09/10	
Fukuoka 福岡	979 614 165.0	16.8	979 614 175.0	6.2	+10.0	+0.8	1997/07/22	2010/07/25	
Nobeoka 延岡	979 465 253.3	14.3	979 465 262.2	14.7	+8.9	+0.7	2001/11/12	2013/09/24	
Aira 始良	979 430 994.3	40.3	979 431 006.1	8.8	+11.8	+0.8	1997/07/15	2012/09/17	

Kumamoto	熊本	979 511 243.9	103.3	979 511 520.8	20.6	+276.9	+13.2	1995/11/12	2016/08/08
Naha	那覇	979 095 589.4	22.3	979 095 589.4	39.9	0.0	0.0	2001/01/29	2011/11/15
Ishigaki	石垣	979 005 585.0	9.1	979 005 604.5	21.7	19.5	+1.8	2001/01/16	2011/11/25



別図-2 JGSN2016 の網平均計算に含まれない重力点の配点図

別表-3 JGSN2016の網平均計算に含まれない重力点の重力値等 Fundamental Gravity Station: 基準重力点
Fundamental Gravity Station: 基準重力点

Station	Abbr	Latitude (° ' ")	Longitude (° ' ")	Height (m)	G value(0m) (μGal)	S.D (μGal)	Date	G gradient (μGal/cm)	Remarks
Chichijima	CCJ	27° 04' 02.93"	142° 11' 41.68"	46.68	979 428 908	24.6	2010/03/03	-3.4714	

First order Gravity Station: 一等重力点

Station	Abbr	Latitude (° ' ")	Longitude (° ' ")	Height (m)	G value(0m) (mGal)	S.D (mGal)	Difference (mGal)	Remarks
Chichijima	CCJ	27° 05' 32.00"	142° 11' 28.00"	2.51	979 439.622	-----	-0.05	父島 FGS を基点に計算
Miyako	MYK	39° 38' 50.00"	141° 57' 56.00"	45.25	980 270.402	-----	+0.07	大槌 GS を基点に計算
Nwmuro	NMR	43° 19' 51.52"	145° 35' 08.60"	26.56	980 683.245	-----	-0.01	廃点
Miyakejima	MYK	34° 07' 27.00"	139° 31' 19.00"	36.00	979 800.474	-----	+0.03	廃点
Nagoya	旧 NGY	35° 09' 06.00"	136° 58' 19.00"	46.19	979 732.469	-----	-0.08	移点
Hamamatsu	旧 HMM	34° 42' 25.00"	137° 43' 21.00"	33.06	979 734.513	-----	-0.08	移点

Coequal First order Gravity Station: 一等重力点相当 (水準点, 電子基準点付属標)

Station	Abbr	Latitude (° ' ")	Longitude (° ' ")	Height (m)	G value(0m) (mGal)	S.D (mGal)	Reference Point	Remarks
10747	10747	27° 05' 38.0000"	142° 11' 30.0000"	2.017	979 440.085	-----	父島 FGS	
父島 A(付)	052007A	27° 04' 03.0864"	142° 11' 42.1240"	49.250	979 428.200	-----	父島 FGS	
母島(付)	960603A	26° 38' 06.5481"	142° 09' 45.9694"	32.165	979 284.938	-----	父島 FGS	
稚内(付)	940001A	45° 24' 10.7994"	141° 45' 01.5512"	42.643	980 627.188	-----	稚内 GS	
網走(付)	960505A	43° 59' 19.6644"	144° 17' 35.8830"	36.274	980 579.524	-----	網走 GS	
旭川(付)	960508A	43° 44' 18.6951"	142° 24' 34.5614"	139.038	980 514.074	-----	旭川 GS	
釧路市(付)	940010A	42° 57' 47.7264"	144° 25' 54.9575"	34.837	980 598.293	-----	釧路 GS	
長万部(付)	950140A	42° 29' 39.6825"	140° 21' 15.1148"	10.228	980 420.916	-----	長万部 GS	
函館(付)	94022A	41° 49' 33.8808"	140° 44' 52.1894"	43.433	980 399.280	-----	長万部 GS	
青森 A(付)	010844A	40° 50' 03.8321"	140° 48' 37.9510"	5.510	980 328.320	-----	青森 GS	
矢巾(付)	950166A	39° 35' 47.6204"	141° 10' 19.6178"	104.669	980 197.129	-----	盛岡 GS	
山形新庄(付)	940033A	38° 45' 30.9255"	140° 19' 07.5531"	135.596	980 053.588	-----	新庄 GS	
酒田(付)	940032A	38° 53' 40.5447"	139° 48' 31.9000"	7.704	980 070.987	-----	新庄 GS	
仙台(付)	091179A	38° 15' 27.8603"	140° 45' 17.0526"	165.501	980 052.995	-----	仙台 GS	

天童(付)	940035A	38° 19' 51.6651"	140° 21' 57.9863"	119.557	980 028.107	-----	仙台 FGS
水原 A(付)	111186A	37° 49' 20.0576"	139° 13' 00.7188"	8.001	979 976.833	-----	新潟 GS
いわき 2(付)	970800A	37° 01' 06.4087"	140° 50' 30.0444"	25.306	980 028.544	-----	いわき GS
群馬(付)	020955A	36° 23' 43.2456"	139° 01' 00.1502"	132.098	979 819.379	-----	前橋 GS
更埴(付)	020984A	36° 31' 24.9539"	138° 07' 15.4200"	361.602	979 776.843	-----	松代 GS
富山(付)	950249A	36° 38' 03.6098"	137° 11' 42.7465"	31.280	979 854.508	-----	富山 GS
高山(付)	940058A	36° 08' 09.5603"	137° 20' 52.4746"	766.279	979 634.553	-----	高山 GS
銚子(付)	93022A	35° 43' 34.8633"	140° 50' 14.0792"	22.370	979 864.771	-----	銚子 GS
中道(付)	940048A	35° 35' 25.1991"	138° 34' 59.8920"	340.209	979 680.675	-----	甲府 GS
鯉江(付)	960579A	35° 58' 07.9957"	136° 11' 05.9461"	11.858	979 830.380	-----	福井 GS
岐阜 A(付)	031128A	35° 24' 18.4861"	136° 43' 43.4792"	8.946	979 743.082	-----	岐阜 GS
舞鶴(付)	960641A	35° 28' 55.9730"	135° 24' 57.0031"	4.607	979 791.124	-----	舞鶴 GS
鳥取(付)	021014A	35° 31' 47.5164"	134° 11' 42.9814"	2.899	979 790.561	-----	鳥取 GS
松江(付)	970074A	35° 26' 01.9688"	133° 03' 31.1544"	29.880	979 787.482	-----	松江 FGS
勝浦(付)	93041A	35° 09' 57.2444"	140° 16' 04.9061"	89.464	979 798.000	-----	勝浦 GS
箱根(付)	93068A	35° 14' 43.8646"	139° 02' 57.6440"	552.955	979 683.532	-----	箱根 GS
静岡清水市 2(付)	950296A	34° 59' 11.4049"	138° 30' 56.4589"	9.260	979 730.282	-----	静岡 GS
静岡 3(付)	93081A	34° 59' 25.8936"	138° 22' 41.8920"	18.799	979 741.271	-----	静岡 GS
静岡相良 1(付)	93091A	34° 45' 27.9450"	138° 08' 12.8830"	165.846	979 712.994	-----	御前崎 FGS
掛川(付)	93052A	34° 47' 09.4012"	138° 01' 03.0956"	50.515	979 734.442	-----	御前崎 FGS 廃点
静岡相良 2 (付)	960623A	34° 40' 39.9010"	138° 10' 58.6602"	107.025	979 725.516	-----	御前崎 FGS
大東 1(付)	93093A	34° 42' 54.9325"	138° 03' 12.7474"	13.304	979 727.186	-----	御前崎 FGS
小笠(付)	960622A	34° 40' 47.7102"	138° 05' 53.8471"	7.619	979 730.901	-----	御前崎 FGS
引佐(付)	93050A	34° 50' 07.1891"	137° 40' 20.4006"	36.000	979 754.576	-----	御前崎 FGS
袋井(付)	93096A	34° 45' 19.4151"	137° 54' 40.5780"	11.422	979 728.885	-----	御前崎 FGS
浜北(付)	93097A	34° 47' 34.2177"	137° 47' 30.4753"	19.398	979 748.985	-----	御前崎 FGS
浜松伊左地(付)	970821A	34° 45' 07.3410"	137° 40' 50.7803"	41.744	979 738.525	-----	浜松 GS
浅羽(付)	93095A	34° 40' 13.4934"	137° 56' 14.7790"	4.830	979 719.354	-----	御前崎 FGS
竜洋(付)	93098A	34° 40' 18.7768"	137° 49' 24.2985"	3.667	979 723.101	-----	御前崎 FGS
名古屋(付)	960630A	35° 10' 06.3052"	136° 57' 56.8814"	52.317	979 732.128	-----	名古屋 GS
津(付)	940064A	34° 45' 32.4152"	136° 30' 08.2605"	3.583	979 716.340	-----	津 GS

京都左京 2(付)	960643A	35° 03' 11.2979"	135° 46' 23.8624"	70.204	979 709.718	-----	京都 FGS
京都加茂(付)	950334A	34° 44' 49.1236"	135° 51' 50.9447"	43.410	979 720.762	-----	奈良 GS
姫路(付)	960762A	34° 51' 50.8537"	134° 39' 34.7689"	26.722	979 728.913	-----	基 23
岡山中央(付)	950393A	34° 58' 57.1624"	133° 57' 39.1201"	160.646	979 711.596	-----	1032
岡山 1(付)	021028A	34° 44' 17.1055"	133° 48' 01.5648"	26.859	979 707.820	-----	岡山 GS
大田(付)	950386A	35° 11' 09.4326"	132° 30' 26.3160"	35.470	979 769.238	-----	松江 FGS
三次(付)	960663A	34° 48' 41.7837"	132° 51' 05.6394"	159.128	979 676.112	-----	2331
三宅 1(付)	93059A	34° 07' 15.8581"	139° 30' 13.8783"	45.143	979 802.685	-----	筑波 GS
三宅 3(付)	960599A	34° 05' 37.5348"	139° 33' 42.3578"	34.549	979 781.617	-----	筑波 GS
三宅 4(付)	960600A	34° 04' 32.7979"	139° 28' 43.7002"	31.412	979 792.940	-----	筑波 GS
浜岡 1(付)	93094A	34° 38' 34.4546"	138° 07' 45.4573"	17.094	979 733.107	-----	御前崎 FGS
浜岡 2(付)	960625A	34° 38' 04.3655"	138° 09' 32.5435"	20.291	979 737.383	-----	御前崎 FGS
御前崎 A(付)	091178A	34° 36' 11.3329"	138° 12' 54.8894"	46.340	979 742.070	-----	御前崎 FGS
鳥羽(付)	940065A	34° 27' 55.3793"	136° 51' 04.0641"	37.142	979 725.061	-----	鳥羽 GS
尾鷲(付)	940066A	34° 03' 38.3902"	136° 11' 54.1047"	14.862	979 716.284	-----	4770
和歌山 (付)	950369A	34° 16' 17.2748"	135° 03' 57.5281"	46.178	979 671.651	-----	和歌山 GS
広島 2A(付)	071157A	34° 23' 49.3790"	132° 20' 23.3182"	179.296	979 615.880	-----	広島 GS
萩 1(付)	950407A	34° 26' 23.4832"	131° 24' 59.5288"	16.171	979 685.736	-----	須佐 FGS
防府(付)	950412A	34° 03' 26.0534"	131° 31' 50.9253"	6.657	979 657.661	-----	山口 GS
下関(付)	940079A	33° 59' 47.6079"	130° 54' 49.0742"	38.112	979 664.152	-----	下関 GS
室戸 4 (付)	031122A	33° 15' 58.0361"	134° 10' 41.1875"	245.704	979 615.184	-----	室戸 FGS
大分(付)	960709A	33° 13' 42.3618"	131° 34' 46.1333"	70.256	979 527.624	-----	大分 GS
北方(付)	960711A	32° 33' 25.3995"	131° 31' 50.4270"	88.792	979 477.528	-----	延岡 FGS
熊本相良(付)	950469A	32° 14' 19.2371"	130° 48' 09.4592"	156.015	979 463.692	-----	2382
宮崎田野(付)	960715A	31° 50' 31.5808"	131° 18' 22.7071"	137.554	979 419.978	-----	宮崎 GS
姪良(付)	970837A	31° 49' 26.6320"	130° 35' 58.5458"	277.439	979 431.962	-----	姪良 FGS
鹿児島郡山(付)	960776A	31° 40' 30.3552"	130° 28' 10.0182"	167.529	979 445.310	-----	鹿児島 GS
鹿児島福山(付)	950489A	31° 37' 02.5518"	130° 50' 09.7970"	414.834	979 396.895	-----	大隅(付)
父島 A(付)	052007A	27° 04' 03.0864"	142° 11' 42.1240"	49.250	979 428.200	-----	父島 FGS
母島(付)	960603A	26° 38' 06.5481"	142° 09' 45.9594"	32.165	979 284.938	-----	父島 FGS
H地頭方 1(付)	98H004A	34° 37' 54.1562"	138° 11' 22.5495"	14.42	979 744.077	-----	御前崎 FGS

H比木 1(付)	98H007A	34° 39' 18.3511"	138° 09' 58.2232"	25.01	979 739.485	-----	御前崎 FGS
H細谷(付)	98H025A	34° 47' 22.7220"	137° 58' 09.5609"	41.25	979 736.089	-----	御前崎 FGS
H下平川 2(付)	98H016A	34° 42' 17.3751"	138° 05' 09.7930"	8.10	979 734.417	-----	御前崎 FGS
H下朝比奈 2(付)	98H010A	34° 40' 11.7973"	138° 08' 08.9206"	48.24	979 729.380	-----	御前崎 FGS
H下板沢(付)	98H023A	34° 45' 09.8022"	138° 02' 16.6684"	57.63	979 724.836	-----	御前崎 FGS