

精密重力ジオイド・モデル構築に向けた地上重力データの再整備 Improvement of Land Gravity Data for the Development of a New Precise Gravimetric Geoid Model in Japan

測地部 小川拓真¹・菅原安宏・平岡喜文・中島正寛
Geodetic Department OGAWA Takuma, SUGAWARA Yasuhiro,
HIRAOKA Yoshifumi, NAKASHIMA Masahiro
企画部 加藤知瑛
Planning Department KATOH Chiaki
北陸地方測量部 市村和輝
Hokuriku Regional Survey Department ICHIMURA Kazuki

要 旨

国土地理院は、全国に等しく正確な重力の基準を与えることを目的として重力点を設置し、水準測量にて正確な標高を決定する際の重力補正や重力ジオイド・モデルの構築に活用しているほか、計量機器の校正、地下構造の把握等、測量や社会、科学の分野にて広く活用される重力加速度の値を提供している。

2017 年には基準重力点及び一等重力点のネットワークからなる重力の基盤「日本重力基準網 2016」を構築し、公開した。しかし、日本重力基準網 2016 は、一つ前の重力基準網「日本重力基準網 1975」の二等重力点（約 13,000 点）を含んでおらず、二等重力点の重力値は日本重力基準網 2016 に準拠していない状態にあった。精密重力ジオイド・モデルの構築のためには重力データを再整備する必要がある、この二等重力点の重力値を最新の基準網へ準拠することが急務であった。

そこで、地上重力データを再整備するため、二等重力点を日本重力基準網 2016 に準拠するように変換し、さらに重力データの空白域にて重力測量を実施して、地上重力データの偏在を解消した。そして、これらの重力データを合わせて「JGSN2016 地上重力データ」として整備し、精密重力ジオイド・モデルの構築等に使用したほか、2024 年には国土地理院のホームページ上で公開した。

1. はじめに

重力基準網は、国際的な取決めに準じた基準となる重力加速度の値（以下「重力値」という。）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。日本では、1976 年に「日本重力基準網 1975」（The Japan Gravity Standardization Net 1975, 以下「JGSN75」という。）

を構築し、公開した（国土地理院、1976）。JGSN75 は基準重力点 6 点、一等重力点 116 点と、全国の三角点及び水準点で測量した二等重力点約 13,000 点で構成され、「国際重力基準網 1971」（The International Gravity Standardization Net 1971）（Morelli et al., 1974）に準拠した重力値が整備された。以降、約 40 年にわたり、これらの重力点は国内の重力基準としてその役割を果たしてきたが、こ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、場所によっては JGSN75 と実際の重力分布の間に乖離が生じていた。これを解消し、最新の測定に基づく信頼性の高い重力値を提供することを目的に、国土地理院は 2017 年に「日本重力基準網 2016」（以下「JGSN2016」という。）を構築し、公開した（吉田ほか、2018）。JGSN2016 は、基準重力点 31 点、一等重力点 228 点で構成され（2025 年 3 月時点）、日本の重力基準として活用されている。しかし、JGSN2016 では JGSN75 にあった二等重力点を含んでおらず、二等重力点の重力値は JGSN2016 に準拠していない状態にあった。

国土地理院では、GPS、準天頂衛星システム等を使用した衛星測位によって、いつでも、どこでも簡単に正確な標高が分かる社会の実現を目指しており、その基盤となる高精度なジオイド・モデルを構築している。高精度なジオイド・モデルを構築するには、高品質の重力データを高密度に整備する必要がある。そこで、地上重力データの再整備として、JGSN75 の二等重力点の重力値を JGSN2016 に準拠するように変換し、また、重力データの空白域において重力測量を実施して地上重力データの偏在を解消した。そして、これらの重力データを合わせて「JGSN2016 地上重力データ」として整備し、精密重力ジオイド・モデルの構築等に使用したほか、2024 年には国土地理院のホームページ上で公開した。

なお、これまでの間に、二等重力点の測量標に使

用していた三角点及び水準点の移転や廃点が多くあり、現在、二等重力点は物理的に参照が可能な重力測量（相対重力測定）の基準点としての役目を終えていることから、以降、本稿では「旧二等重力点」と表記する。

2. 再整備した地上重力データの概要

再整備した地上重力データには二つのものがある。一つ目は、JGSN75 の旧二等重力点を JGSN2016 の重力値に変換するパラメータを作成するために重力測量を実施した 256 点及び作成したパラメータを用いて変換した 13,162 点である。二つ目は、地上重力データの配点密度が小さい地域等において、国土地理院が重力測量を実施した 560 点である。JGSN2016 地上重力データはこれらを合わせた 13,978 点からなる。

3. 変換パラメータを使って変換した重力データ

3.1 変換パラメータの作成

JGSN75 準拠の重力値を JGSN2016 準拠の重力値にする方法としては、①JGSN2016 準拠の重力点を既知点として重力測量によって再測量する方法、②JGSN2016 準拠の重力点を既知点にして過去の相対重力測定結果から網平均計算により改算する方法、③JGSN75 と JGSN2016 の両系に準拠した重力点の重力値から系間の重力差を求め、空間補間することで JGSN2016 準拠の重力値に変換するパラメータを作成して改算する方法が考えられる。①の方法は、JGSN75 公開から現在までの地殻変動等による重力変化も含めて JGSN2016 に準拠した重力値を取得することが可能であるが、約 13,000 点の旧二等重力点を再測量するには膨大な人的・時間的リソースが必要となる。②の方法は、再測量をせずに JGSN2016 準拠の重力値を得ることができる。しかし、約 50 年以上前の膨大な観測データを再整理する必要がある、改算には多くの労力と時間が必要である。③の方法は、変換パラメータを構築するのに必要な最低限の重力測量をするだけで実現できる。さらに、この方法は旧二等重力点のみならず、その他の機関が持つ JGSN75 準拠の重力データも JGSN2016 準拠の重力データに改算することが可能と考えられる。以上の理由から、③の方法を採用し、変換パラメータを用いて JGSN2016 準拠の重力値を求めることとした。変換パラメータの作成手順を図-1 に示す。

変換パラメータの作成には、JGSN75 と JGSN2016 両系に準拠した重力点の重力値が必要となる。

JGSN2016 の一等重力点のうち 85 点は両系に準拠した重力値を持つが、一等重力点の配点間隔は約 100 km であり、旧二等重力点を変換するのに十分な空間分解能を持つパラメータを構築することができない。そこで、現存する旧二等重力点のうち、測量当時と現況が変わっていないと考えられる 256 点において重力測量を実施し、両系の重力値を持つ重力点の空間密度を向上させた。重力測量の詳細については 4 章で述べる。

図-2 に両系の重力値を持つ一等重力点及び旧二等重力点（合計 341 点）における JGSN2016 と JGSN75 の重力差の分布を、図-3 に重力差のヒストグラムを示す。JGSN2016 は JGSN75 に比べ平均で 0.03 mGal 小さい結果となった。これは、吉田ほか（2018）で報告された両系の差（-0.04 mGal）と整合的である。この両系の重力差は、JGSN75 構築から JGSN2016 構築までの間の地殻変動等によって生じた重力変化だけでなく、基準網の構築手法の違いや、JGSN75 構築当時の測量の精度の限界によって生じた誤差に起因すると考えられる。

上記の重力差を通常クリギング法で空間補間することで JGSN2016 変換パラメータを作成した（図-4）。作成した変換パラメータは、一部離島を除く日本全国をカバーし、0.1 度間隔のグリッドデータになっている。

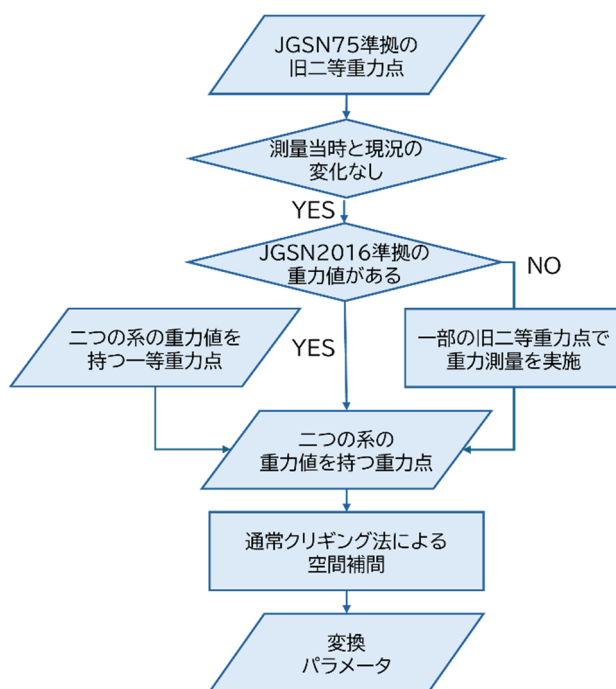


図-1 変換パラメータの作成手順

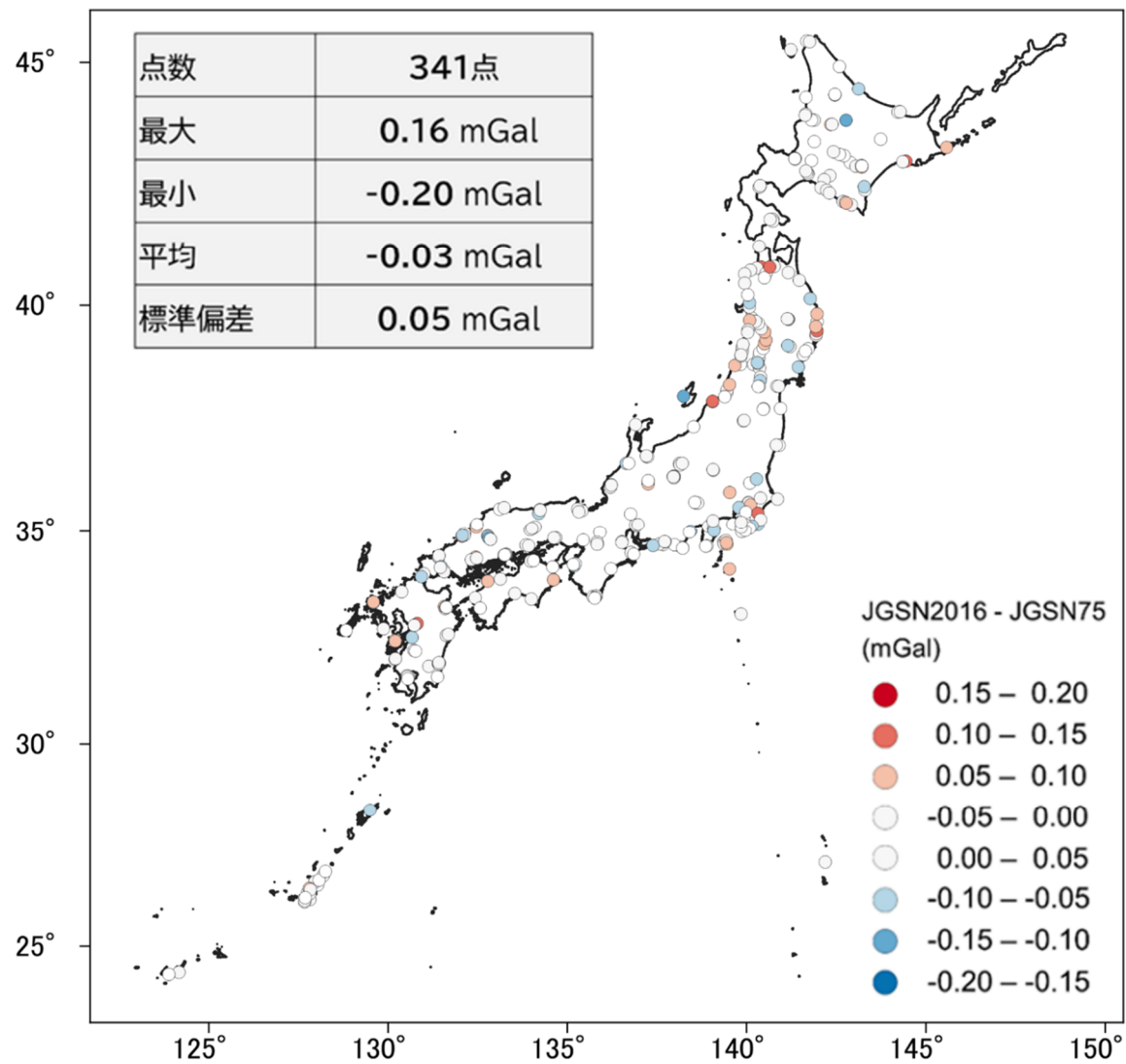


図-2 JGSN2016 と JGSN75 の重力差の分布

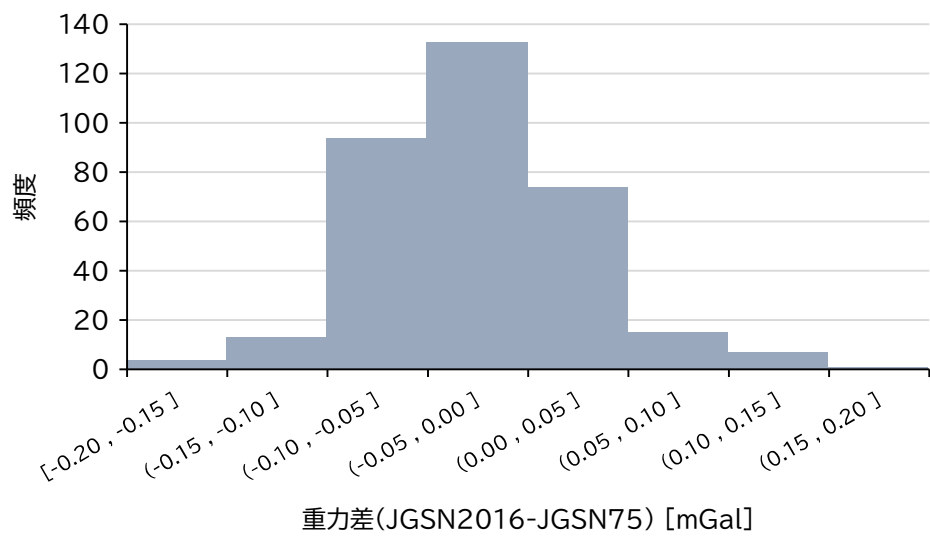


図-3 JGSN2016 と JGSN75 の重力差のヒストグラム

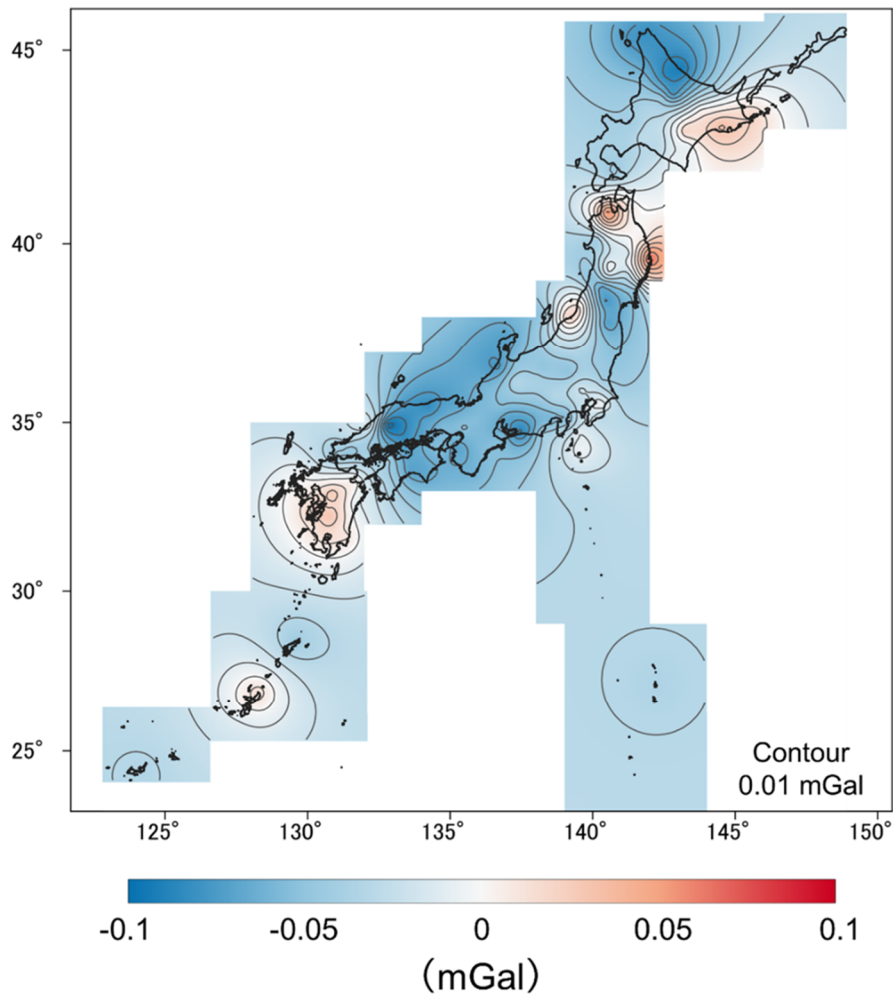


図-4 作成した変換パラメータ

3.2 変換パラメータの評価

一個抜き交差検定（以下「LOOCV」という。）を用いて、JGSN2016 変換パラメータの精度評価を実施した。

LOOCV では、変換パラメータの作成に用いた入力データセットから評価対象とする測点一つを除いて変換パラメータを作成し、変換パラメータの変換量と測点の JGSN75 の重力値から変換値を求め、JGSN2016 の実測重力値を比較した。これを変換パラメータの作成に用いた入力データセット 341 点で繰り返すことで、変換パラメータの推定能力を外部評価した。

LOOCV の結果、変換した重力値 $g_{conv,i}$ と JGSN2016 実測重力値 $g_{JGSN,i}$ の差は平均 0.00 mGal、標準偏差 S が 0.04 mGal となった（図-5）。なお、標準偏差は式 1 により求めた。平均値が 0.00 mGal

と、変換値と実測値の間にはバイアスは見られない。また、JGSN75 の絶対値としての精度は 0.1 mGal 以下（国土地理院，1976）であり、変換パラメータによる変換後の JGSN2016 準拠の重力値の精度は、変換パラメータの標準偏差を加味しても、主目的である精密重力ジオイド・モデルの構築に必要な精度を満たしている。これにより、JGSN2016 変換パラメータを旧二等重力点に適用し、JGSN75 と JGSN2016 の間にあったバイアスを除くことで、13,162 点の旧二等重力点を JGSN2016 に整合させることが可能となった。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (g_{conv,i} - g_{JGSN2016,i})^2}{N}} \quad (N = 341) \quad (1)$$

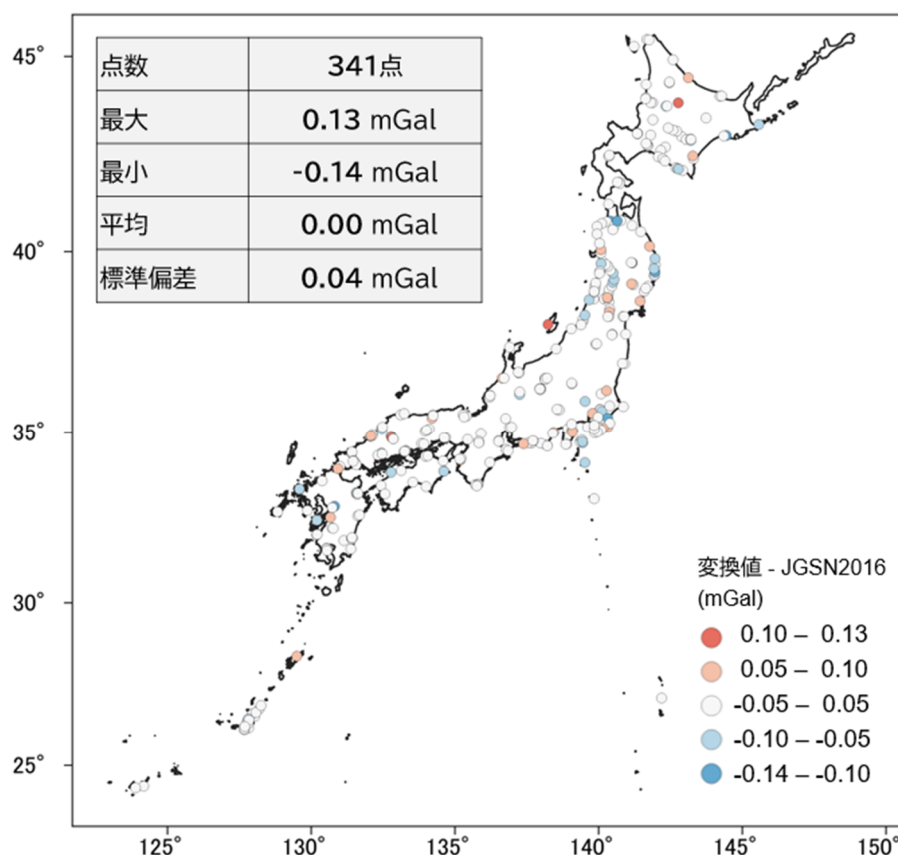


図-5 LOOCV による変換パラメータの精度評価

3.3 旧二等重力点の位置情報の整理

旧二等重力点は測量標に三角点や水準点が使用されており、その位置情報は測地成果 2011 とはなっていない。このため、JGSN2016 変換パラメータを旧二等重力点に適用する前に、旧二等重力点の位置情報の現状を整理する必要があった。

旧二等重力点の位置情報は、測量標が三角点の場合、緯度経度は日本測地系の成果であり、標高は測量当時の値のままであった。測量標が水準点の場合、緯度経度は測量当時の地図読み取りの値であり、標高は昭和 44 年度平均成果であった。

今回、まず全ての旧二等重力点の緯度経度を TKY2JGD (飛田, 2001) によって世界測地系に変換した。次に、旧二等重力点の測量標が重力測量当時の位置に現存している場合は、基準点成果等閲覧サービス上の基準点コードと照らし合わせて、位置情報を測地成果 2011 の成果値に置き換えた。ただし、基準点成果等閲覧サービス等で移転、再設等の履歴がある場合、重力測量の位置と現在の測量標位置が異なっているため、測地成果 2011 の成果値へ置き換えないこととした。また、移転、再設等の履歴がない場合でも、旧二等重力点の位置情報が、測量標の測地成果 2011 の成果値と極端に異なっていた場合

は、移転や再設等の疑いがあると判断し、測地成果 2011 の成果値へ置き換えないこととした。

測量標の測地成果 2011 の成果値との比較に当たっては、以下の点に注意した。三角点では、日本測地系から測地成果 2000 に移行する際、一～三等三角点は改測又は計算簿まで遡った改算で緯度経度が改定されているため、成果表と TKY2JGD による変換値は完全には一致せず、標高は平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う改定 (檜山ほか, 2011) や、平成 26 年度三角点標高改定 (小門ほか, 2014) が反映されていない。水準点では、測地成果 2011 の成果値の水平位置の多くは、地図読み取りではなく、GNSS 測量による水平位置決定作業で求められている。また、昭和 44 年度平均成果は、地震等に伴う改定が反映されていないだけでなく、標高の種類が現在採用している正標高ではなく正規正標高である。よって、移転や再設等を判断する水平位置や標高の差のしきい値は、成果改定量の最大値 (国土地理院, 2003, 2011) や 5 万分 1 地形図の精度、TKY2JGD の精度を基に設定した。

別表 1～3 に標高や水平位置の差のしきい値、図-6 に旧二等重力点の位置情報の整理手順を示す。パラメータ変換した旧二等重力点 13,162 点のうち、測

量標が現存すると判断した点は 7,292 点、移転、再設等がされたと判断した点は 5,870 点となった。測地成果 2011 の成果値へ置き換えなかった 5,870 点の位置情報は、過去の成果改定量等を考慮して、緯度経度を 1 秒単位、標高を 0.1 m 単位とした。

3.4 JGSN75 の JGSN2016 への変換

現存していると判断した点は、位置情報を測地成果 2011 に置き換えた後に、全ての旧二等重力点に対して JGSN2016 変換パラメータを適用して JGSN2016 準拠の重力値に変換した。

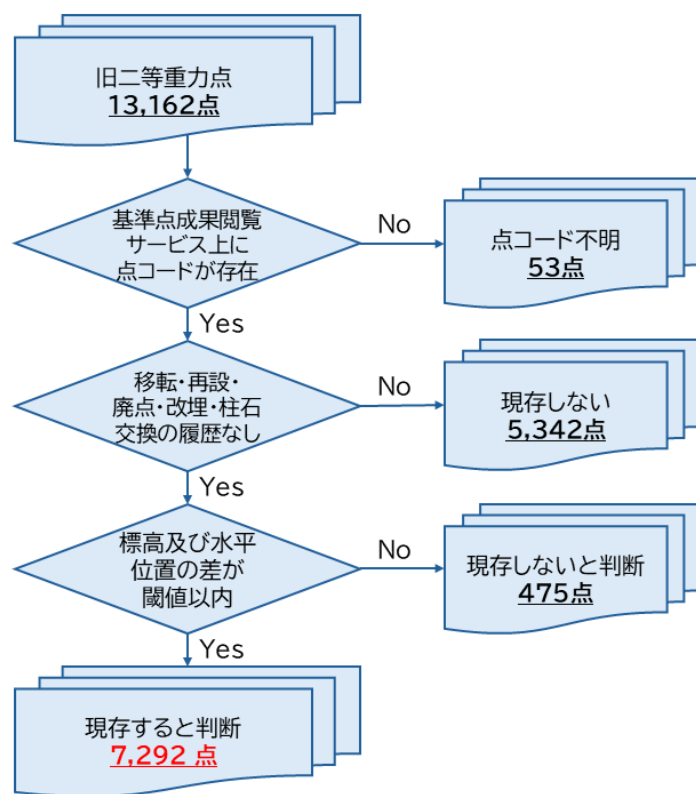


図-6 旧二等重力点の位置情報の整理手順

4. 重力測量によって得た重力データ

この重力測量の目的は二つある。一つは変換パラメータを作成するため、もう一つは精密重力ジオイド・モデル構築に際し地上重力データを高密度化するためである。

4.1 変換パラメータを作成するための重力測量

変換パラメータを作成するに当たり、2013 年から 2022 年にかけて、現存している旧二等重力点 256 点で重力測量を実施し、JGSN2016 に準拠した重力値を求めた。この旧二等重力点は、全ての点において測量標に水準点を使用していた。重力測量には LaCoste Romberg 社製のラコスト G 型重力計 G83, G118, G554 と SCINTREX 社製の相対重力計 S/N300200022, 300900049 のうち 2 台以上を使用し、既知点である基準重力点又は一等重力点と未知点である旧二等重力点の間を 1 日の間で往復する測量と

した。一部離島では、一等重力点が 1 点しかないため、同一の重力点を始点と終点にして環となるように測量した。

JGSN2016 と同様の方法で重力値を計算し、JGSN2016 に準拠した重力値を求めた。

4.2 地上重力データを高密度化するための重力測量

精密重力ジオイド・モデルの構築に使用することを目的として、2021 年度から 2023 年度に地上重力データの配点密度が小さい地域や航空重力測量（栗原ほか、2022）が未実施の離島において重力測量を実施し、JGSN2016 に準拠した重力値を求めた（図-7）。

父島、母島、南大東島及び北大東島は、航空重力測量の拠点となる飛行場から遠く離れており、費用対効果の観点から航空重力測量を実施せず、地上の重力測量を実施して、重力データの高密度化を図っ

た。また、地上重力データの配点密度の小さい北海道札幌市周辺では、一等重力点を起点に 2 km 間隔で重力データを取得した。八丈島、南大東島及び北大東島には JGSN2016 に準拠した一等重力点が存在しないため、一等重力点を設置した。各離島に設置した一等重力点を起点に重力測量を実施し、各離島内に約 2 km 間隔で重力データを取得した。

地上重力データの高密度化のための重力測量は、一部は三角点や水準点等の測量標上で測量しているが、多くは測量標がない場所で測量している。このため、重力測量のほか、GNSS 測量も併せて実施して、測地成果 2011 に準拠した位置情報を取得した。

一等重力点の設置では LaCoste Romberg 社製のラコスト G 型重力計 G83, G118, G554 を使用し、既知点である基準重力点又は一等重力点と未知点である新点の間を往復する測量とした。地上重力データの高密度化のための重力測量には上記のラコスト G 型重力計のほか SCINTREX 社製の相対重力計 S/N300200022, 300900049 を使用し、同一の重力点を始点と終点にして環となるように測量した。

一等重力点の設置、地上重力データの高密度化のための重力測量ともに JGSN2016 と同様の方法で重力値を計算し、JGSN2016 に準拠した重力値を求めた。

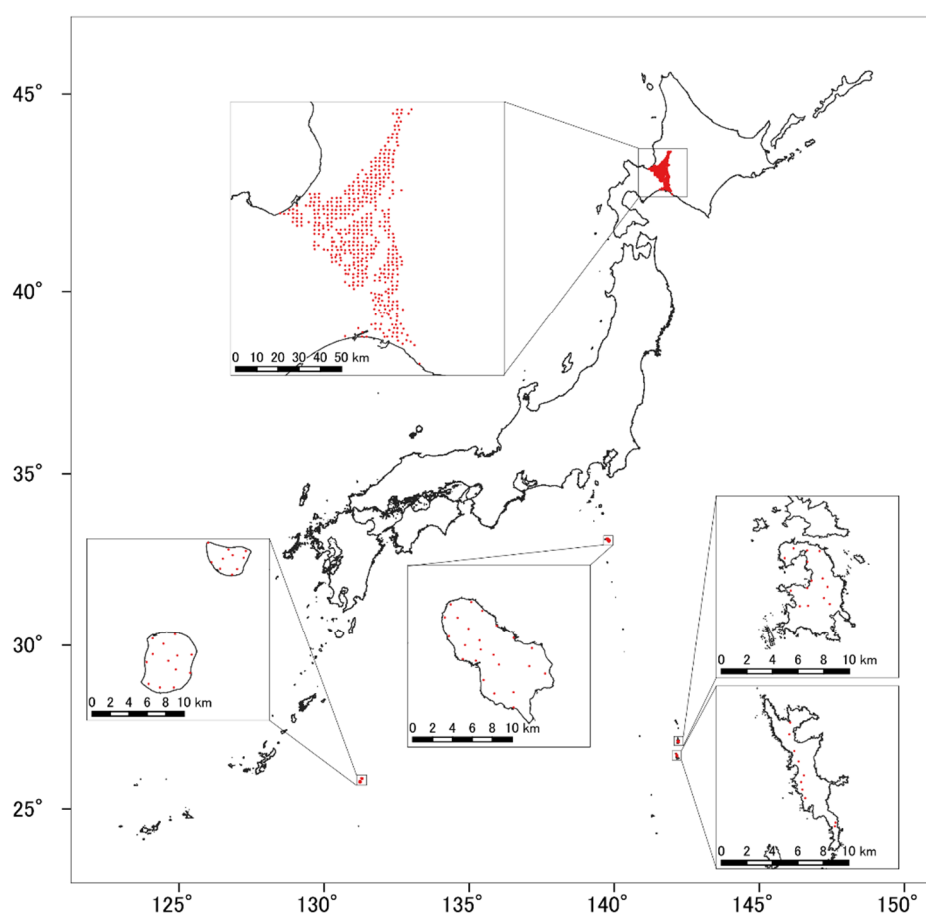


図-7 重力データの高密度化（赤点は重力測量実施箇所を示す）

5. JGSN2016 地上重力データの公開

JGSN75 の旧二等重力点の重力値を JGSN2016 に変換するパラメータを作成するために重力測量を実施した 256 点、変換パラメータを用いて改算した旧二等重力点 13,162 点及び地上重力データの配点密度が小さい地域等において重力測量を実施した 560 点のデータを合わせた合計 13,978 点の重力データを、JGSN2016 地上重力データとして整備し、2024 年 3

月 27 日に国土地理院ホームページ上で公開した。図-8 に JGSN2016 地上重力データの配点位置を示す。

旧二等重力点の測量標に使用した三角点及び水準点では、重力測量当時からこれまでの間に移転や廃点となったものが多くあり、現在は物理的に参照が可能な重力測量（相対重力測定）の基準点としての役目を終えていることから、測量標の基準点コード、点名等は削除した。位置情報について、旧二等重力

点のうち位置情報を測地成果 2011 に変換しなかった点は、緯度経度を度分秒(1秒単位)とし、標高は0.1 m 単位で表記した。それ以外の点では、緯度経度を度分秒(0.01秒単位)、標高を0.01 m 単位とした。重力値は現在公開している基準重力点及び一等重力点の成果表と同じ0.01 mGal で表した。

6. まとめ

精密重力ジオイド・モデルの構築に必要な重力データを再整備するため、JGSN75 準拠の重力値をJGSN2016 準拠の重力値に変換するパラメータを作成し、JGSN75 の旧二等重力点を JGSN2016 準拠の

重力値に改算した。これにより、JGSN2016 に準拠した重力データの空間密度が飛躍的に向上した。また、地上重力データの空白域や航空重力測量の範囲外にて重力測量を実施し、地上重力データの偏在を解消した。

今回整備した JGSN2016 地上重力データは、国土地理院にて新たに構築したジオイド・モデル「ジオイド 2024 日本とその周辺」や国土地理院が提供している「重力値推定計算サービス」等の計算に使用している。今後、物理探査分野等においても広く利用されることを期待する。

(公開日：令和 8 年 3 月 16 日)

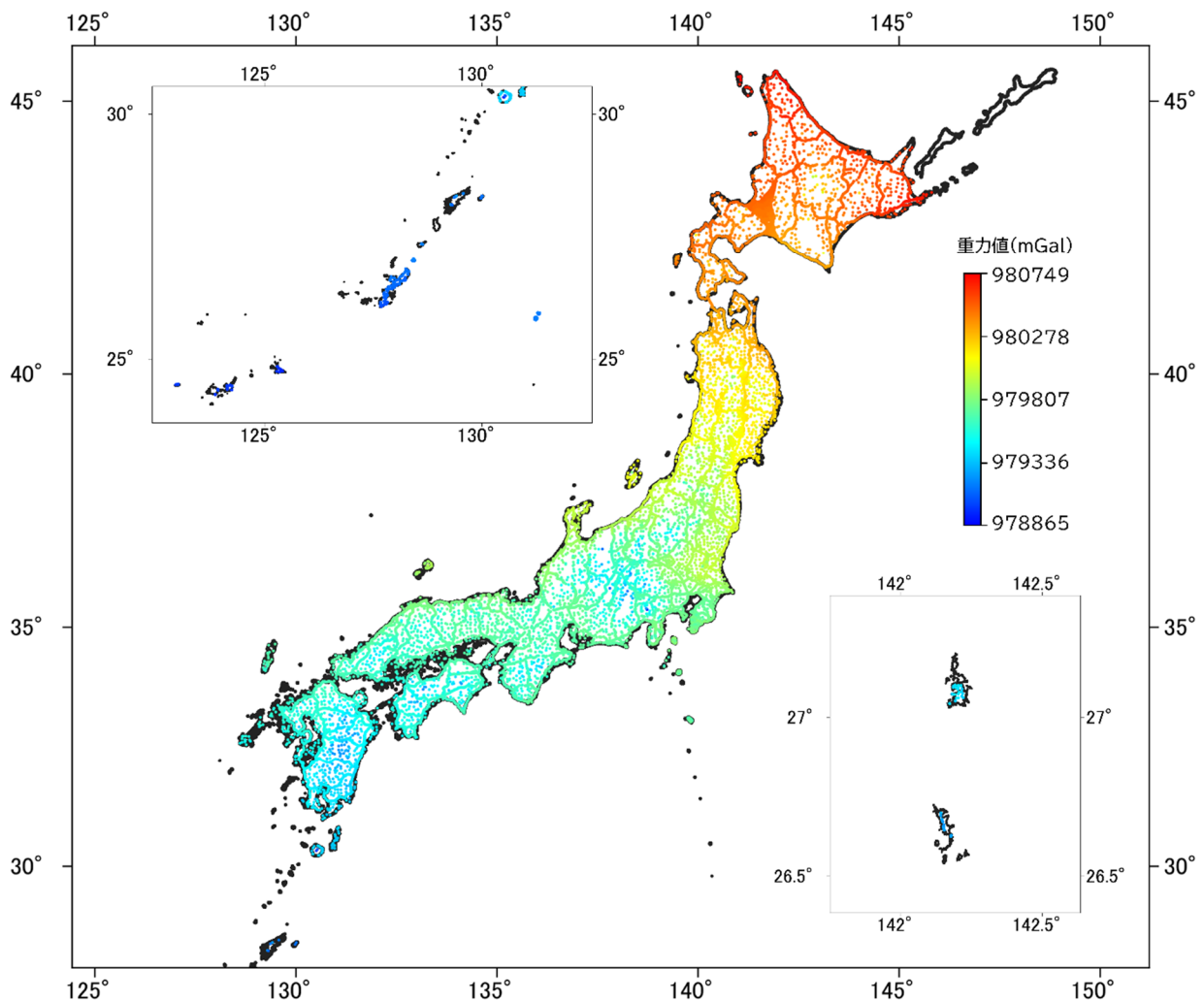


図-8 JGSN2016 地上重力データの配点図

参 考 文 献

- 檜山洋平, 山際敦史, 川原敏雄, 岩田昭雄, 福崎順洋, 東海林靖, 佐藤雄大, 湯通堂亨, 佐々木利行, 重松宏実, 山尾裕美, 犬飼孝明, 大滝三夫, 小門研亮, 栗原忍, 木村勲, 堤隆司, 矢萩智裕, 古屋有希子, 影山勇雄, 川元智司, 山口和典, 辻 宏道, 松村正一 (2011): 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う基準点測量成果の改定, 国土地理院時報, 122, 55–78. doi: 10.57499/JOURNAL_122_06
- 小門研亮, 佐藤雄大, 松村泰敬, 影山勇雄, 山際敦史 (2014): 三角点の標高成果改定 – 水準点と一層整合した標高成果の公表 –, 国土地理院時報, 125, 105–114. doi: 10.57499/JOURNAL_125_15
- 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 (2003): 測地成果 2000 構築概要, 国土地理院技術資料, B-5, 20.
- 国土地理院 (2011): 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う三角点及び水準点の測量成果の改定値を公表 (10 月 31 日から提供開始), <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun60011.html> (accessed 27 Jul. 2022).
- 栗原忍, 大森秀一, 兒玉篤郎, 畔柳将人, 半田優実, 吉樂絵里香, 飯尾研人, 中島正寛, 飯塚康裕 (2022): 精密重力ジオイド・モデル構築に向けた航空重力測量 (中間報告) – 信頼性の高い標高を誰もが利用できる社会を目指して –, 国土地理院時報, 135, 1–31. doi: 10.57499/JOURNAL_135_01
- 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.
- 飛田幹男 (2001): 世界測地系移行のための座標変換ソフトウェア"TKY2JDG", 国土地理院時報, 97, 31–57.
- 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. doi: 10.57499/JOURNAL_131_03

別表 1 水準点の標高の差のしきい値

	標高の差のしきい値(m)
北海道	0.30
青森県	0.31
岩手県	1.01
宮城県	1.39
秋田県	0.40
山形県	0.40
福島県	0.80
茨城県	1.63
栃木県	1.37
群馬県	1.18
埼玉県	1.32
千葉県	1.34
東京都	1.19
神奈川県	1.21
山梨県	0.14
長野県	0.27
新潟県	0.21
北陸地方（新潟県を除く）	0.16
中部地方	0.62
近畿地方	0.19
中国地方	0.12
四国地方	0.35
九州地方	1.33
沖縄県	0.10

別表 2 三角点の標高の差のしきい値

	標高の差のしきい値(m)
東北地方 茨城県	2.34
その他	0.94

別表 3 水準点及び三角点の水平位置の差のしきい値

	水平位置の差のしきい値(m)
水準点	148
三角点	5.97