

新しい標高体系の構築に向けた 精密重力ジオイドの開発

松尾 功二¹

¹国土地理院 地理地殻活動研究センター 宇宙測地研究室 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

日本の標高は、水準測量により維持管理されているが、全国規模の水準測量には膨大な時間と費用を要する。そこで、国土地理院では衛星測位技術と重力ジオイド・モデルによる効率的な標高の維持管理手法への移行を検討している。本研究ではそのために必要な精密重力ジオイド・モデルの開発を行った。重力データの更新と解析手法の高度化の結果、現行のモデルと比べ、約40%の精度向上が達成された。しかし、現在と同等の精度で実用的な標高値を維持管理するためには重力データの量と精度が不十分である。このため、航空重力測定を実施して重力データの拡充と精度向上を図り、重力ジオイド・モデルを高精度化することが不可欠である。

キーワード 標高, 衛星測位, 重力, ジオイド, 航空重力測定

1. 日本の標高体系について -現状と課題-

標高とは、地球の平均海面から重力の方向に沿って測った高さのことである。我が国における位置の表現は測量法（昭和24年法律第188号）第十一条（測量の基準）で「位置は、地理学的経緯度及び平均海面からの高さで表示する。」と規定されている。経緯度は単純にものさしを当てるように幾何的に表現されるものであるが、標高は、幾何的な手法だけでは直接計測することはできない。

冒頭の標高の定義は、より正確には、標高は、地球の重力ポテンシャルが等しい面（つまりその面上では水の流れは生じないような面）を基準とした重力ポテンシャル差を高さとして計測した値であり、基準面として便宜的に平均海面と一致する面をとる、とも定義される。この平均海面に最も一致する重力の等ポテンシャル面をジオイドと呼ぶ。ここで言う平均海面とは一般的に地球全体の平均海面を指すが、実用上の都合から、標高体系の定義はそれぞれの国によって異なっており、多くの場合、その国に隣接する湾や海域の平均海面と一致する重力等ポテンシャル面を、地域的なジオイドと定めている。日本の場合、東京湾の平均海面を地域的なジオイドと定め、標高0mの基準としている。

明治時代に我が国の近代測量が始まってから現在に至るまで、標高は水準測量によって計測されてきた。水準測量とは、2点に標尺を垂直に立て、その中間に標尺の目盛を読み込むための装置（水準儀）を置き、2点間の

高さの差（比高）を計測する技術である。水準測量の最大の長所は、ミリメートル精度の比高を比較的簡単に取得できることである。特に、短距離であれば極めて高い計測精度が簡単に得られる。また、水準測量は海岸に設置された験潮場を起点に、気泡管水準器を用いて水平面と鉛直に（重力の方向に沿って）比高を計測することから、標高をほぼ直接的に得ることができる。一方、水準測量の最大の短所は、基準となる場所から離れるに従って多大な労力と時間、そして費用を要することである。これは、1日で測定できる距離が4km程度であることと、1班の作業員が4名以上（安全管理者を含めると5名）必要であることに起因する。また、計測する距離が長くなるに従って計測誤差の累積（累積誤差）によって精度が低下するという性質も持つ。

国土地理院はこれまで、全国をいくつかのブロックに分けて水準測量を実施し、約10年間をかけて全国の標高改測を繰り返し実施してきた。しかしながら、予算や人員が縮小する中、今後もこれまでと同様な標高体系の維持管理を続けていくことは困難になりつつある。加えて、全国改測のような長距離路線の測定では、累積誤差の影響が特に大きく、広域で見た場合、標高にゆがみが生じやすいという手法上の課題も依然存在し続けている。そのため、現在、水準測量に代わる新たな標高体系の整備および維持管理手法が求められている。

2. 人工衛星を用いた標高決定手法

近年、人工衛星を用いた宇宙からの地球計測技術が目覚ましい進展を遂げている。特に、人工衛星から地表の位置を計測する衛星測位技術（Global Navigation Satellite System, GNSSと略される）の発展・普及は際立っている。現在では、測地測量分野に留まらず、スマートフォンやカーナビといった日常生活でもごく当たり前になり測位デバイスが組み込まれており、誰もが正確な位置を短時間で容易に得ることが可能となった。その利便性の高さは広く認知されており、現在では、アメリカのGPSに加えて、ロシアのGLONASS、ヨーロッパのGalileo、中国のBeidou（北斗）、そして日本の準天頂衛星システム（QZSS、衛星名は「みちびき」）等、多くの国が独自の衛星測位システムを所有している。

衛星測位で得られる位置は、地球を仮想的に単純な回転楕円体に近似した地球準拠楕円体を基準とする幾何的な位置である。経緯度は、地球準拠楕円体を基準とする純粋な幾何的情報であるため、衛星測位で直接測ることができる。一方、標高は、ジオイドを基準とし、地球重力の影響が反映されているため、衛星測位では直接測ることができない。

衛星測位で得られる高さは、一般的に楕円体高と呼ばれる。地球準拠楕円体面とジオイドとの間には、最大で100mの乖離があるため、楕円体高ではジオイドからの高さを表現することができない。その上、楕円体高には地球重力の影響が反映されていないため、楕円体高を標高として実生活に利用すると、水が標高の低いところから高いところに流れるという現実的な感覚とは相反する事態が起こりうる。楕円体高を実用的な標高に変換するには、基準面をジオイドに投影し直すとともに、地球重力の影響を考慮する必要がある。それを可能とする物理量が、ジオイド高である。

前述のとおり、ジオイドとは、平均海面に最も一致する地球重力の等ポテンシャル面である。ジオイドは、地球の不均質な質量分布・密度構造に起因する複雑な重力分布を反映して、緩やかながらも凸凹している。その起伏の大きさは、地球準拠楕円体を基準として、地球全体で見ると-100mから+80mであり、日本全体（海域含む）で見ると+10mから+50mである。つまり、衛星測位で得られる楕円体高をそのまま標高と読み替えた場合、場所によっては数十mの誤差が現れてしまう。

ジオイドは、地球の海面を仮想的に陸地の内部へと延長したときの海面の形状を表すもので、その勾配は、重力の強さと方向を表す。したがって、ジオイドを高さの基準とすることで、平均海面に準拠させるとともに、重力の影響を反映させることができる。そこで、予め地球準拠楕円体を基準としたジオイドの起伏（ジオイド高）を与えておけば、楕円体高からジオイド高を差し引くこ

とで、衛星測位の結果から直接標高を得ることができる。図-1に、標高、楕円体高、ジオイド高の関係を示す。

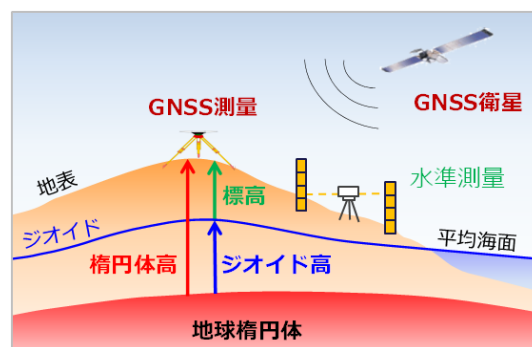


図-1 標高、楕円体高、ジオイド高の概念図

3. 衛星測位とジオイドに基づく新たな標高体系

前章において、標高が、楕円体高とジオイド高の差分で得られることを示した。楕円体高は、衛星測位によって短時間で容易に得ることができる。また、ジオイド高は、後に詳しく述べるとおり、重力データから予め計算することができる。これらを組み合わせることで、水準測量よりも簡便に標高を得ることができる。すなわち、衛星測位とジオイドを用いて標高を計測することで、水準測量が抱える技術的な弱点（多大な労力と時間、そして費用を要すること、計測する距離に連動して累積する誤差が発生すること）を回避し、日本の標高体系を効率的かつ均質に整備し維持管理することが可能となる。

衛星測位とジオイドに基づく新たな標高体系（以下「GNSSジオイド」という。）の利点として、主に以下の4つが挙げられる。

1) 全国を衛星測位で監視するためのインフラが既に整備済みである

国土地理院は、1990年代初頭からGNSS連続観測局である電子基準点の整備を全国に展開しており、2017年現在、日本列島上に約20km間隔で約1300点の観測局を設置している。このGNSS連続観測網をGEONET（GNSS Earth Observation NETWORK）と呼び、日本の精密な経緯度の決定や、地震活動等に伴う地殻変動の監視、GNSSを用いた測量作業の効率化・高精度化を実現している。GEONETは楕円体高も計測しているため、この施設をそのまま標高体系の維持管理に活用することができる。

2) 地殻変動を迅速に把握することができる

これはGEONETを活用することで得られる利点である。GEONETは常時観測を行っており、地震等に伴う地殻変動を瞬時に捉えることができる。例えば、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の際には、最大約1.2mの地面の上下変位が生じた。地殻変動の全体像を把握するため、

水準測量による再測には約7か月を要したが、GEONETは僅か数日ではほぼ全ての観測点の上下変動を把握することができた。また、2016年に発生した熊本地震の場合でも、水準測量による再測には約4か月を要したが、GEONETは僅か数日で計測結果を得ることができた。

なお、地震に伴う地殻変動ではジオイドの形状も変化するが、ジオイド高の変化は楕円体高の変化に比べて僅かである。例えば、2011年の東北地方太平洋沖地震の場合、楕円体高の変化が最大で約1.2mであったが、ジオイド高の変化は僅か1cm程度であった¹⁾。衛星測位で計測される高さの変化は標高ではなく楕円体高であるが、地殻変動を把握する目的であれば楕円体高の変化のみを考慮して問題ない。

3) 精度が距離に依存しない

水準測量は、起点から終点までの計測距離に応じて誤差が累積し、全国路線のような長距離では大きな誤差が生じる。一方、GNSSジオイドについては、そもそも累積誤差の問題は生じない上、日本の場合、約20km間隔で電子基準点が利用可能であることから、最寄りの電子基準点を参照して測位を行うことで、誤差を小さく保つことができる。そのため、国家規模の標高体系といった広範的な高さを扱う場合においては優位性を持つ。

4) 利便性が高い

GNSSは今や、スマートフォンやカーナビといった一般的なデバイスにも搭載され、測量分野に留まらず幅広いユーザーを擁している。標高体系をジオイド基盤とすることで、いつでも・どこでも・誰でも標高を計測・利用することが可能である。

このように、GNSSジオイドは様々な利点を有するが、現状での課題としては、GNSSジオイドによる標高決定精度が、水準測量と比べるとやや不十分である点が挙げられる。水準測量による標高体系の誤差は、基準である東京湾から遠く離れた北海道で約4.5cmであるが、全国平均で見ると約2.5cmである²⁾。一方、GNSSジオイドによる標高の精度は、GNSS測量による楕円体高の精度とジオイド・モデルによるジオイド高の精度に依存する。前者は、様々な解析戦略の高度化の結果、現在では1cmを達成しているのに対し、後者の精度は全国平均で約8.4cmであり、両者を合わせると現状のGNSSジオイドの標高誤差は約10cmに達する。

一見して明らかなように、GNSSの楕円体高に比べ、ジオイドの誤差が圧倒的に大きい。そのため、現状ではGNSSジオイドの標高誤差は、主にジオイド・モデルに帰するもので、GNSSジオイドをもとに水準測量と同等の標高体系を構築するには、ジオイド・モデルの高精度化が必要不可欠となる。

4. 日本のジオイド・モデルについて - 現状と課題 -

ジオイド・モデルは、地上重力測定や衛星重力観測で取得した重力データを元に数値計算を行うことで構築することができる。この手法で得られたジオイド・モデルを重力ジオイド・モデルと呼ぶ。現行の重力ジオイド・モデルである「JGEOID2008」³⁾は、約27万点の地上重力データと2002年に打ち上げられた重力観測衛星GRACEの衛星重力データ、そして約58万点の船上重力観測および海面高度観測による海上重力データが使用されている。

現行のモデルには、以下の3つの技術的な課題がある。

1) 地上重力データの基準系が古い

地上の重力測定には、絶対重力測定と相対重力測定があり、絶対重力測定は全国約30箇所で行われ、これらを起点に相対重力測定で相対的な重力値が計測される。絶対重力測定で計測された観測点を基準重力点、これをもとに精密な相対重力測定で計測された観測点を一等重力点と呼び、国土地理院によって1952年から観測網の整備が行われている。現行のモデルで使用されている重力データは、JGSN75 (the Japan Gravity Standardization Net 1975) という40年以上も前に整備された基準系に準拠している⁴⁾。重力値は、地殻変動や地表・地下質量の再分配によって時々刻々と変化するため、これを基準とする重力データには40年以上の重力較差が内包されていることになる。国土地理院は、1990年代から絶対重力値の更新作業を進め、2017年3月に新しい重力基準系JGSN2016を公開した⁵⁾。既存の地上重力データを新しい基準に変換することで、約40年間の重力値の乖離を解消することができる。ただし、地上の重力測定ができない山間部や沿岸域が重力データの空白域となり、モデルの精度を著しく落とす要因となっている。

2) 衛星重力データが古い

現行のモデルでは、2002年にアメリカとドイツが共同で打ち上げた重力観測衛星GRACEのデータが使用されている。GRACE衛星は、打ち上げ当時は、従来の衛星重力観測の常識を覆す革新的な衛星であったが、2009年になると、その性能を更に上回る重力観測衛星GOCEが欧州宇宙連合によって打ち上げられた。GOCE衛星の精度は、地球重力場の静的な状態の観測においては、GRACE衛星を圧倒するものであり、GRACE衛星は空間分解能約100kmまでの帯域でジオイド高に換算して約20cmの誤差が生じるが、GOCE衛星の場合、空間分解能約100kmまでの帯域ならば約2cm程度の誤差である⁶⁾。図-2に、GRACE衛星とGOCE衛星から計測した日本周辺の重力分布図を示す。GRACE衛星は、縦縞ノイズと呼ばれる計測システムの設計に依存した特有の誤差の影響を強く受け、縞状の誤差が重なっているが、GOCE衛星は、これを改善するための特別なセンサー（3軸直交型の加

速度計)を搭載しており、その結果、より精緻な重力分布図を描き出すことに成功している。GOCEデータを導入することで、重力ジオイドの長波長帯域の成分に大きな改善が期待される。

3) 重力データの処理手法に改善の余地がある

重力データからジオイド高を算出するには、地上で測った重力値をジオイド上の重力値に変換するという処理が必要となる。これを重力化成と呼び、重力ジオイドを計算するうえで最も重要な処理の1つである⁷⁾。現行モデルでは、ヘルマート第二凝縮化成と呼ばれる手法で重力化成が施されている。この処理を施すには、地形の起伏を表す数値標高モデル (Digital Elevation Model, 以下「DEM」という。)が必要不可欠となり、現行モデルでは、250mメッシュのDEMが使用されている。国土地理院は2008年4月に、より詳細な10mメッシュのDEMを公開している。これを用いることで、より厳密な重力化成処理を施すことができ、重力ジオイドの高精度化が期待できる。さらに、詳細なDEMを利用すれば、地形の引力で生じる短波長の重力成分をモデル計算によって推定することができる。これを残差地形モデルと呼び、このモデルを導入することで重力ジオイドの空間分解能と精度を高めることができる⁸⁾。

また、重力データの結合処理も重要な計算過程の1つである。重力データには、地上で測られたものと衛星から測られたものがあり、それぞれ得意とする空間帯域と精度が異なる。そのため、精密な重力ジオイドを計算するには、異なる方法で計測された重力データを、それぞれの特徴を考慮しながら最適に結合する必要がある。現行モデルでは、単純な結合手法⁹⁾が用いられているが、現在、より厳密な物理測地理論に基づく結合手法¹⁰⁾が提案されている。重力データの結合手法の改良により、重力ジオイドの高精度化が期待できる。

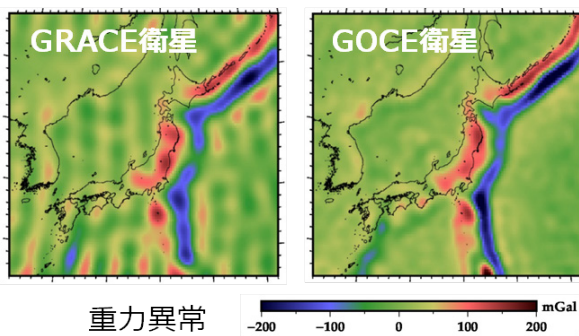


図2 GRACE衛星とGOCE衛星で計測した日本とその周辺の重力異常のマップ

5. 新たな重力ジオイド・モデルの開発

本研究では、前章で挙げた技術的な課題に取り組み、日本の重力ジオイド・モデルの更なる高精度化に臨んだ。地上重力データの基準系については、古い基準系 (JGSN75) から最新の基準系 (JGSN2016) へと更新した。衛星データについては、GOCE衛星を含む最新の衛星重力データおよび海上重力場モデルを導入した。重力データの処理手法については、10mメッシュのDEMを用いた重力化成処理の高度化と残差地形モデルの導入、そして重力データの結合処理の高度化を行った。以上の改良により新たに構築した日本の重力ジオイド・モデルを図-3に示す。また、表-1に新旧のモデル間のデータ・解析手法の違いをまとめる。なお、ジオイド計算の際に使用した各種計算式については、Matsuo et al. (2016)¹¹⁾を参照されたい。

新たな重力ジオイド・モデルの精度評価を行うために、まず、971点の水準点において、GNSS計測により楕円体高を算出し、楕円体高と標高との差をとることでジオイド高を求めた。このようにして求めたジオイド高を実測ジオイドと呼ぶ。実測ジオイドは、計測に水準測量を伴うことから観測点数は限られてしまうが、現状では重力ジオイドよりも精度が良い。そのため、実測ジオイドを重力ジオイドの精度検証の基準として用いることは妥当である。次に、重力ジオイドと実測ジオイドとの比較検定を行った。重力ジオイドと実測ジオイドの差分をとり (図-4)、その標準偏差を計算する。新旧の重力ジオイドと実測ジオイドとの標準偏差を表-2に示す。この標準偏差が、一般的に重力ジオイドの精度を表すものである。その結果、旧モデルでは8.44cmであったのに対し、新モデルは5.21cmとなった。すなわち、重力データの更新と解析戦略の高度化によって3.23cmの精度向上が達成された。これはおおよそ40%の精度向上とも言える。各改良と精度向上の大まかな内訳は、重力データの更新によって約2cmの向上、解析戦略の更新によって約1cmの向上であった。

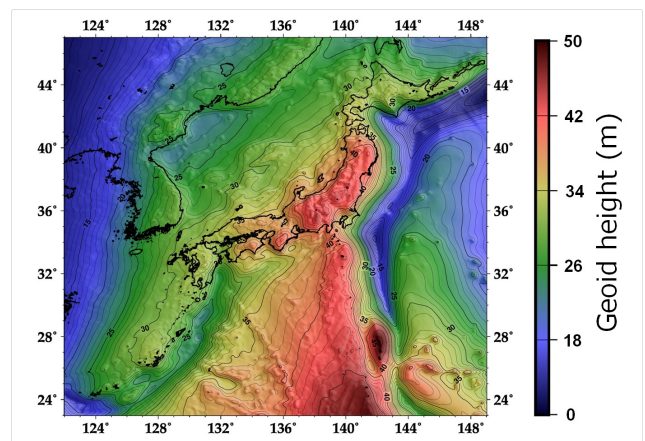


図3 新たに構築した重力ジオイド・モデル

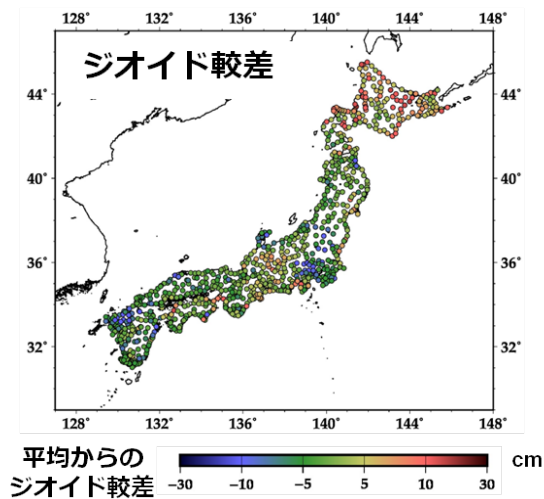


図4 重力ジオイドと実測ジオイドの差

表-1 新旧の重力ジオイド・モデルのデータと解析手法の比較

	JGEOID2008	本研究
地上重力基準系	JGSN75	JGSN2016
衛星重力データ	GRACE衛星	GOCE衛星
海上重力データ	KMS02モデル	DTU15モデル
数値標高モデル	250m	10m
重力化成	ヘルマート第二凝縮化成	ヘルマート第二凝縮化成
重力結合	Meissl法	FEO法
残差地形モデル	未使用	使用

表-2 新旧の重力ジオイド・モデルの精度の比較

	JGEOID2008	本研究
標準偏差	8.44 cm	5.21 cm

6. 航空重力測定の必要性

本研究により、重力ジオイドの精度を大きく向上させることに成功した。しかしながら、まだ十分な精度とは言えない。新たな重力ジオイドをもとに標高体系を構築した場合、GNSS楕円体高の誤差を合わせて、おおよそ6cmの精度を持つ標高体系を築くことができるものの、現在の水準測量による標高体系の精度が、約2.5cmであることから、これと同等とするには、重力ジオイドの精度を更に2-3cm向上させる必要がある。現在の利用可能な重力データのみでは、これ以上大きな精度向上を達成することは難しいだろう。解析戦略の高度化には未だ余地があるが、それでも期待できる精度向上は精々1cm程度と推測される。つまり、今以上の精度向上を達成するためには、重力データの拡充と精度向上が必要不可欠である。

ある。

図4によると、北海道の石狩・空知・網走・十勝地方、東海地方の富士山周辺、中央アルプス等において、重力ジオイドと実測ジオイドの差（ジオイド較差）が特に大きいことが分かる。すなわち、特にこれらの地域において、地上重力データの欠如により重力ジオイドの精度が悪い。図-5に、3km²に含まれる重力データの測点数の分布図を示す。この図からわかるように、北海道で空白域が広く、ジオイド較差も10cmを超える場所が多い。これらの領域における重力データの空白を埋めることが、新たな標高体系に移行するための必須の課題となる。重力測定は機動性の高い観測手法であるが、これらの空白域は深い植生に囲まれていたり標高が高いため、地上からではデータを広範的に取得することは極めて難しい。

また本研究では、約28万点の地上重力データを使用しているが、そのうち国土地理院が計測したものは約1万6千点で、残りの約26万点は大学や企業から提供を受けたものである。国土地理院による重力測定は、重力基準網の構築が目的で、念入りの品質検定によって高い精度が確保されている。一方、大学や企業による重力測定は、断層調査や資源探査が主な目的で、データの質よりも量が重視されたため、十分な品質検定が行われていない。そのため、多くの地上重力データは、計測誤差によって十分な精度を有していない可能性がある。

加えて、使用した地上重力データの大部分は、主に1990年代以前に計測されたものである。当時はGNSS測量を容易に行えるものではなく、観測点の位置は一般的に、目視による地図の読み取りによって決められていた。観測点の位置情報は、地上重力データの処理に必要な不可欠となるもので、この情報の不正確さが重力ジオイドの誤差となっている可能性もある。

これらの問題を解決する有効な手法が、航空機を用いた重力測定である。これは航空機に重力計と位置を測るGNSS受信機を搭載し、陸域とその周囲を等間隔に飛行することで重力を計測する手法である。航空重力測定は、世界の様々な国で既に実施され、目覚ましい成果を挙げている。インドネシア、モンゴル、ネパール、マレーシア、フィリピンなど元来重力データが乏しい国から、アメリカ、ニュージーランド、デンマーク（グリーンランド）といった測地学の先進国でも航空重力測定が実施され、GNSSとジオイドを基盤とする標高体系への移行が着々と進められている。

航空重力測定は、地球上あらゆる地域の重力データを、短時間で高密度かつ均質に取得することができる。また、GNSSによってセンチメートル精度で観測位置を計測する。つまり、航空重力測定によって、重力データの拡充と精度向上を同時に図ることができる。

日本は、四方を衝突し合う大陸・海洋プレートに囲まれ、世界でもとりわけ複雑な重力ジオイド構造を有する国である。精度3cmの重力ジオイドを達成するには、航

空重力測定の実施が不可欠である。

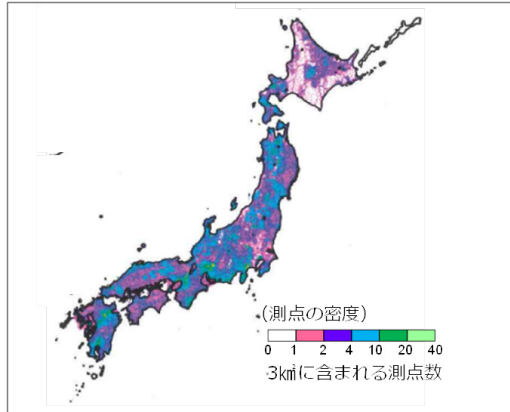


図-5 重力データ測点数の分布

7. まとめ

明治以来の仕組みである水準測量による標高体系は、日本の正確な標高を与える重要な社会インフラであるが、水準測量による全国規模の測定には多大な労力と時間、そして費用を要する。そのため、活発な地殻活動で定期的な改測を必要とする我が国にとって、標高体系の維持管理が困難になりつつある。国土地理院では、標高体系の効率的かつ長期的な維持管理を可能とするために、衛星測位とジオイドを基盤とする新たな標高体系への移行を検討している。国土地理院が全国に展開する電子基準点を活用することで、災害後もすぐに標高を算出し、迅速な復旧・復興作業が可能となる標高体系が構築される。しかしながら、衛星測位とジオイドによって水準測量と同等の精度を持つ標高体系を構築するには、ジオイド・モデルの高精度化が解決すべき必須の課題となる。本研究は、重力データの更新と解析戦略の高度化により、日本の重力ジオイド・モデルの高精度化に臨んだ。その結果、現行のモデルである「JGEOID2008」と比べ、約3cmの精度向上を達成し、約5cmの精度を持つ新たな重力ジオイド・モデルを構築することに成功した。しかし、水準測量により構築された現在の標高体系と同等の精度で

標高値を得るためには、この重力ジオイド・モデルの精度を更に2-3cm向上させる必要がある。新たな重力ジオイド・モデルの誤差の要因は、主に重力データの欠如に帰するため、更なる高精度化には重力データの拡充と精度向上が必要不可欠となる。このためには、航空重力測定を速やかに実施し、これに基づく新たな標高体系の移行に向けた適切な準備を進めることが不可欠である。

謝辞：重力ジオイドの構築には、産業総合研究所や名古屋大学、金沢大学、北海道大学、旧金属工業事業団（現JOGMEC）等から提供を受けた地上重力データと、欧州宇宙連合が提供するGOCE衛星重力データ、デンマーク工科大学が提供する衛星海面重力データを使用している。ここに記してお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Matsuo & Heki (2011) : Coseismic gravity changes of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake from satellite gravimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 38 (7), L00G12.
- 2) Imakiire & Hakoïwa (2004) : JGD2000 (vertical) -The New Height System of Japan-, *Bulletin of the GSI*, vol.51.
- 3) Kuroishi (2009) : Improved geoid model determination for Japan from GRACE and a regional gravity field model, *Earth Planet Space*, 61, 807-
- 4) 山本宏章ほか：国土地理院の重力測量の歴史-観測技術と重力基準の変遷-, 国土地理院時報, 投稿中.
- 5) 吉田賢司ほか：日本重力基準網 2016 の構築, 国土地理院時報, 投稿中.
- 6) 宮原伐折羅ほか：国土地理院の重力測量の展望- 測定技術と重力基準の将来像-, 国土地理院時報, 投稿中.
- 7) Heiskanen & Moriz (1967) : *Physical Geodesy*, San Francisco W. H. Freeman and Company.
- 8) Forsberg (1984) : A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modeling. OSU Report, Dept. of Geodetic Science and Surveying, Ohio State U., Columbus, USA..
- 9) Featherstone WE, Evans JD, Olliver JG (1998) : A Meissl-modified Vanicek and Kleusberg kernel to reduce the truncation error in gravimetric geoid computations. *Journal of Geodesy* 72(3), 154-160.
- 10) Meissl, P. (1971) : Preparations for the numerical evaluation of second-order Molodenskii-type formulas. Report 163, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, OH, 72pp.
- 11) Matsuo et al. (2016) : Development of a New Gravitational Geoid Model for Japan, proceedings of FIG Working Week 2016.