

新しいジオイド・モデル「ジオイド2024日本とその周辺」の構築 Establishment of New Geoid Model : Geoid 2024 Japan and Its Surroundings (JPGeo2024)

測地部 平岡喜文・菅原安宏・小柳拓真・小川拓真¹・山本康生・古屋智秋²
Geodetic Department HIRAOKA Yoshifumi, SUGAWARA Yasuhiro, KOYANAGI Takuma,
OGAWA Takuma, YAMAMOTO Kousei and FURUYA Tomoaki
地理地殻活動研究センター 松尾功二
Geography and Crustal Dynamics Research Center MATSUO Koji

要 旨

衛星測位を基盤とする標高体系において、標高の基準となる新しいジオイド・モデルの構築を目指して航空重力測量及び地上重力データの再整備を実施した。これらの結果と各機関から提供を受けた地上重力データ及び船上重力データのほか、衛星重力データ、海面高度衛星データ等を加えて、新しいジオイド・モデル「ジオイド2024日本とその周辺」を構築した。

2025年4月1日には、我が国の標高の基準と標高決定の仕組みを、全国の電子基準点で得られる橢円体高と「ジオイド2024日本とその周辺」で得られるジオイド高から決定した標高を基盤とする体系に移行し、国土地理院が管理する基準点の標高成果を改定した。

「ジオイド2024日本とその周辺」は「基準面補正パラメータ」と併せて基盤地図情報サイトから公開され、各種の測量等において、標高の基準として活用される。また、「ジオイド2024日本とその周辺」は陸海の位置情報のシームレスな統合において、地形図の土地の高さと海図の海の深さの地形情報の連結にも貢献できる。

1. はじめに

水の流れと密接に関係する標高は、河川、ダム、道路等の土木施設や上下水道のようなライフラインに係る公共工事のほか、大規模地震後の港湾工事、堤防建設等の復旧・復興事業においても早急に必要とされる情報である。

明治以来、我が国の標高は、国土地理院が全国で水準測量を繰り返すことで決定されてきた。水準測量は80mほど離れた2地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である水準儀を設置し、2地点間の高低差を測定する技術である。水準測量の最大の長所は、ミリメートル精度の高低差を比較的簡単に取得でき、特に、短距離では極めて高い測定精度で高低差が得られることである。しかし、全国の水準測量には10年以上の歳月がかかり、多くの時間と費用を要すといった課題が

あった。また、日本は地殻変動が激しく、全国の測量を実施している間にも地殻変動が生じて標高成果にはその影響が累積する。さらに、水準測量には距離に応じて誤差が累積する特徴があり、日本水準原点から離れるほど標高成果の誤差が大きくなるといった課題があった。そこで、これらの課題を解消するため、2025年4月1日に衛星測位を基盤とする標高体系に移行するとともに、国土地理院が管理する基準点の標高成果を改定した（古屋ほか、2026）。

衛星測位では地球の重心を原点とする観測点の三次元直交座標を測定することができ、得られる高さは、ジオイドを回転橢円体に近似した準拠橢円体面からの高さ（橢円体高）である。このため、橢円体高から標高を得るためには、その地点のジオイドの情報が別途必要となる。ジオイドは地球の物理的形状として測地学等で用いられる基準面であり、地球の重力の等ポテンシャル面のうち、平均海面に最も近いものと定義される。日本では、東京湾平均海面をジオイドと定め、標高0mの基準としている（図-1）。

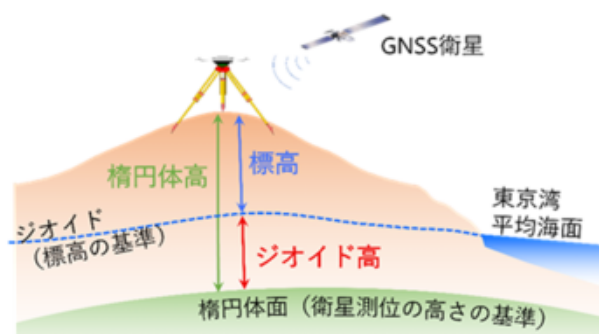


図-1 標高・ジオイド高・橢円体高の関係

水準測量を基盤とする従来の標高体系では、衛星測位で求めた標高が水準点の標高と一致するよう、ジオイド・モデルは水準測量データを使用して構築されていた。しかし、衛星測位を基盤とする標高体系では、水準測量データを使用しない新しいジオイド・モデルが必要となった。そこで、標高の基準と

なる新しいジオイド・モデル「ジオイド 2024 日本とその周辺」(以下「当該モデル」という.)を構築し、2025 年 4 月 1 日に公開した。

本稿では、当該モデルの構築の方法や従来のジオイド・モデルとの違い、衛星測位を基盤とする標高体系における役割を説明する。

2. 新しいジオイド・モデル構築の方針

2.1 水準測量に依存しないジオイド・モデルの採用

従来の「日本のジオイド 2011」(児玉ほか, 2014; 小板橋ほか, 2018)は、GNSS 測量で得られた水準点の楕円体高から水準測量による水準点の標高成果を減じて求められるジオイド高データ(以下「実測ジオイド高」という.)を整備し、これに重力データから構築した日本の重力ジオイド・モデル「JGEOID2008」(Kuroishi, 2009)を適合させる手法により構築されていた。

前述のとおり、全国の水準測量には多くの時間と費用を要し、地殻変動による影響や、距離に応じて累積する誤差の課題があった。そこで、衛星測位を基盤とする標高体系において標高の基準となる新しいジオイド・モデルでは、水準測量による実測ジオイド高を使用せず、重力データのみから構築する重力ジオイド・モデルを採用することにした。

2.2 重力データの再整備

重力ジオイド・モデルの精度は、計算の入力値である重力データの品質に依存する。従来の日本の重力ジオイド・モデルの構築に使用した地上重力データには、山岳域や沿岸域においてデータの空白域が存在するほか、古い重力基準網に基づいた重力値である等の課題があった。そこで、中波長帯の重力データの再整備を目指して、航空機に重力計を搭載して上空から重力値を測定する航空重力測量を実施した(小川ほか, 2026a)。

また、短波長帯の地上重力データの再整備として、日本重力基準網 1975(国土地理院, 1976)の二等重力点の重力値を日本重力基準網 2016(矢萩ほか, 2018)に準拠するように変換し、さらに、地上重力データの空白域において地上重力測量を実施して、地上重力データの偏在を解消した(小川ほか, 2026b)。

これらの重力データのほか、最新の衛星重力データ、海面高度衛星データ等を活用して、これまでの日本の重力ジオイド・モデルよりも高精度な重力ジオイド・モデルを構築することとした。

3. 「ジオイド 2024 日本とその周辺」の構築

3.1 構築の概要

当該モデルは、測量法に基づく土地の測量に適合

するように構築する必要がある。測量法では、位置は平均海面からの高さで表示するとあり、測量法施行令では日本水準原点の原点数値は東京湾平均海面上 24.3900 m と定められている。

一方、重力ジオイド・モデルの計算では重力ポテンシャル数(W_0)を基準面としており、東京湾平均海面とは差があることから、これを補正する必要がある。

また、当該モデルと衛星測位により得られる標高は、実際の地球上における水の流れを表現したものである必要がある。水準測量を基盤とするこれまでの標高体系において、高さのシステムは正標高の一種である Helmert 高が採用されていた(黒石, 2003)。その計算の中では潮汐補正は施されておらず、その場合、測定値は多くのデータの平均と考えるのが妥当であり、自動的に潮汐力の周期成分だけが除去された mean-tide 系が採用されていることになる(福田, 2018)。

mean-tide 系は潮汐力の周期変化成分のみ除去した系であり、mean-tide 系の標高は実際の地球上における水の流れを表現したものに近いものとなる。また、国際測地学及び地球物理学連合(IUGG)においても、2015 年会合の決議として発出された国際高さ基準座標系(IHRF: International Height Reference Frame)の構想(IAIG, 2015)では、地球の永年変形の取扱いは mean-tide 系が推奨されている。これらのことから、標高における地球の永年変形の取扱いは、mean-tide 系とする必要がある。

一方、衛星測位の楕円体高及び計算された重力ジオイド・モデルのジオイド高は、地球の永年変形の取扱いは tide-free 系(全ての潮汐力を除去した系)であり、衛星測位を基盤とする標高体系において mean-tide 系の標高を得るためには、地球の永年変形の取扱いの変換が必要である。

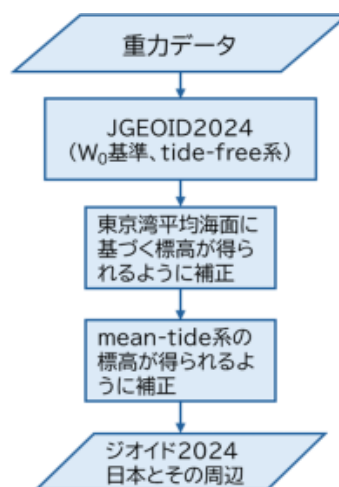


図-2 「ジオイド 2024 日本とその周辺」の構築手順

これらのことから、図-2 に示すように、最初に重力データから重力ジオイド・モデル「JGEOID2024」を計算し、それに東京湾平均海面に基づく標高が得られるための補正量と、mean-tide 系の標高が得られるための補正量を加えることで当該モデルを構築した。

3.2 JGEOID2024 の計算

JGEOID2024 (Matsuo, 2024) は、地上重力データ、船上重力データ、航空重力データ、GOCE 衛星による全 球 ジオ ポ テ ン シ ャ ル モ デ ル GOCONS_GCF2_TIM_R6、海面高度衛星による海洋重力場モデル SIO V32.1 等を用いて計算されたものである。地上重力データは国土地理院のデータのほか、産業技術総合研究所、名古屋大学、金沢大学、北海道大学、金属鉱業事業団（現 エネルギー・金属鉱物資源機構）等から提供を受けたもの、船上重力データは海上保安庁から提供を受けたもの、航空重力データは国土地理院のデータである。

ジオイドの計算方法は、Helmert 重力異常を用いた Helmert 第 2 凝縮法（UNB Stokes-Helmert 法）に基づいている。計算には、混合 Meissl-Molodensky 修正スフェロイドストークスカーネル（FEO カーネル）を用いた remove-compute-restore 法を使用した。

ジオイド高は GRS80 楕円体に準拠しており、重力ポテンシャル数 W_0 値は $62,636,853.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、地球の永年変形の取扱いは tide-free 系とし、北緯 15 度から 50 度まで、東経 120 度から 160 度までを、緯度 1 分間隔、経度 1.5 分間隔とした格子点で整備した。

3.3 JGEOID2024 の精度評価

実測ジオイド高は、GNSS 測量で得られた楕円体高から、水準測量で得られた標高を減じることで求められる。そこで、JGEOID2024 と実測ジオイド高を比較することで JGEOID2024 の精度を確認することとした。2021 年から 2023 年に、全国 3 地区において GNSS 測量及び水準測量を実施し、実測ジオイド高を求めた。測量地区を図-3 に、各測量の観測量及び測量時期を表-1 に示す。

ジオイドは地殻変動に対して安定的であるが、楕円体高と標高は地殻変動による上下変位の影響を大きく受ける。これにより、楕円体高と標高の測量時期が異なると、その間の地殻変動による上下変位が実測ジオイド高に含まれることとなる。この地殻変動の影響を避けるため、GNSS 測量と水準測量はできるだけ近い時期に実施した。GNSS 測量では各点で 6 時間以上観測し、水準測量は一等水準測量に準じて実施した。地球の永年変形の扱いについては、Ekman (1989)の式により、水準測量で得られた標高

を mean-tide 系から tide-free 系に変換し、実測ジオイド高データを tide-free 系で整備した。

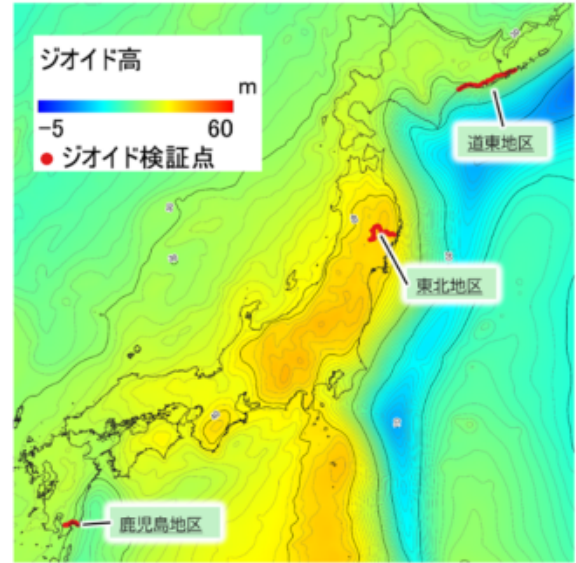


図-3 実測ジオイド高の測量地区

表-1 観測量及び測量時期

地区名	測量種類	観測量	測量期間
道東	GNSS 測量	32 点	2022 年 8 月
	水準測量	約 230 km	2022 年 6～7 月
東北	GNSS 測量	34 点	2021 年 8 月
	水準測量	約 150 km	2021 年 6～8 月
鹿児島	GNSS 測量	16 点	2023 年 2 月
	水準測量	約 60 km	2022 年 10～11 月

精度評価は、実測ジオイド高と JGEOID2024 において、異なる 2 点間のジオイド高の差分（ジオイド勾配）を比較することで実施した（e.g. Smith et al., 2013）。まず、実測ジオイド高のある検証点のペアを作成し、ペアごとの点間距離に応じてグループ分けをする。次に、各ペアにおける実測ジオイド高のジオイド勾配と、ジオイド・モデルのジオイド勾配との較差を求める。最後に、各グループにおけるジオイド勾配較差の RMS 誤差 (RMSE) を式[1]より算出して精度を評価した。各グループにおける RMS 誤差は、検証点 i におけるジオイド・モデルのジオイド高を N_i^M 、実測ジオイド高を N_i^{GL} 、各グループのペア数を n とすると、式[1]で求まる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^n \{(N_i^M - N_j^M) - (N_i^{GL} - N_j^{GL})\}^2} \quad [1]$$

なお、誤差伝播の法則から、ジオイド勾配較差の RMS 誤差を用いてジオイド・モデルの精度を求める

場合、ジオイド勾配が2点のジオイド高を使用しているため、RMS 誤差を $\sqrt{2}$ で割る必要がある(小川ほか, 2026a)。

この評価手法の利点としては、標高の基準面である東京湾平均海面とジオイド・モデルの基準面である W_0 とのズレ等に起因した系統的なバイアスを無視できる点や、ジオイド・モデルの精度の距離依存性を評価できる点が挙げられる。

今回計算した JGEOID2024 のほか、「日本のジオイド 2011」にて使用した重力ジオイド・モデル「JGEOID2008」(Kuroishi, 2009) と全球重力場モデル「EGM2008」(Pavlis et al., 2012) を合わせた三つの重力ジオイド・モデルについて、実測ジオイド高との比較により求めた各ジオイド・モデルの精度を図-4 に示す。

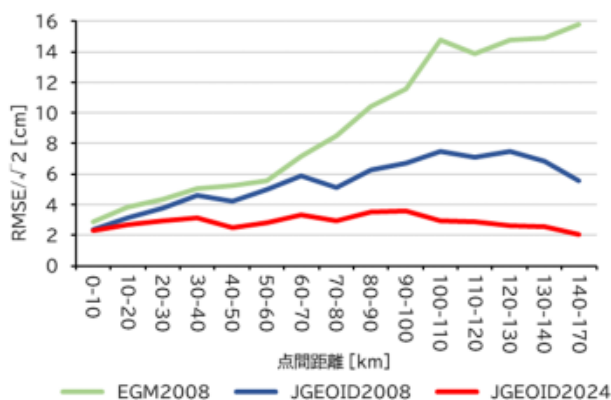


図-4 ジオイド・モデルの精度

三つの重力ジオイド・モデルのうち、日本の航空重力データを使用しているのは JGEOID2024 が唯一となる。一般に、地上重力データや船上重力データの空間波長は 10 km、衛星重力データは 100 km 程度とされ、航空重力データはこれらの重力データの間中となる 20 km～100 km 程度と考えられている。JGEOID2024 では点間距離 50 km 以上から、 $RMSE/\sqrt{2}$ の値が小さくなっており、航空重力データを追加したことによりジオイド・モデルの精度が向上していると思われる。実測ジオイド高との比較により、JGEOID2024 の精度は陸域では 2.8 cm となり、陸域では目標精度としていた 3 cm を達成していることが示された。

3.4 東京湾平均海面に基づくための補正

衛星測位の楕円体高から当該モデルのジオイド高を減じることで、東京湾平均海面に基づいた標高が得られるよう、JGEOID2024 のジオイド高に対してオフセット量を加えた。オフセット量は、写真-1 に

示す日本水準原点と電子基準点「東京千代田」にて測量を実施して決定された。図-5 に、電子基準点「東京千代田」における標高、楕円体高及び JGEOID2024 のジオイド高の関係を示す。

現地では、水準測量により日本水準原点と電子基準点「東京千代田」付属標の間の標高差を求めた。また、トータルステーションを用いた間接水準測量により、付属標と GNSS アンテナ底面間の標高差を求めた。



写真-1 日本水準原点と電子基準点「東京千代田」

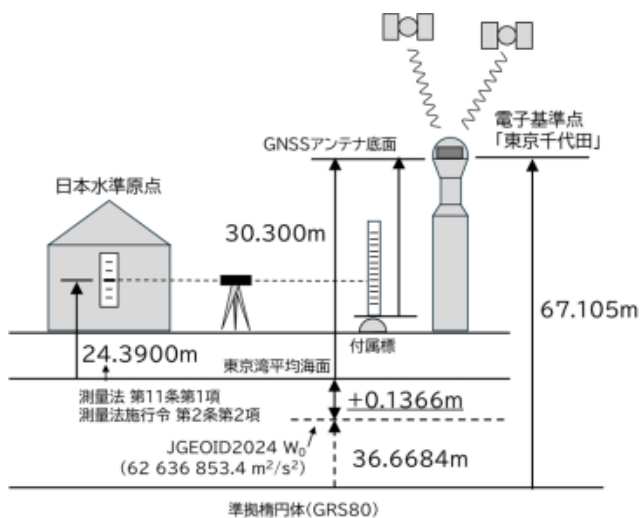


図-5 電子基準点「東京千代田」の高さの関係

その結果、GNSS アンテナ底面の標高として 30.300 m が得られ、GNSS 連続観測からは同位置の 2024 年 6 月 1 日元期の楕円体高として 67.105 m を得た。これにより、GNSS アンテナ底面における実測ジオイド高は、36.805 m となった。

一方、電子基準点「東京千代田」(緯度経度を表-2 に示す)における JGEOID2024 から求めたジオイド高は 36.6684 m である。東京湾平均海面に基づいた

標高とするためには、実測ジオイド高に合わせる必要がある。したがって、このジオイド高の差 0.1366 m をオフセット量として、JGEOID2024 の全域のジオイド高に加えた。

表-2 電子基準点「東京千代田」の緯度経度

北緯	35 度 40 分 37.8311 秒
東経	139 度 44 分 51.5282 秒

ジオイドは重力の等ポテンシャル面であるため、JGEOID2024 の全域に同じ高さのオフセット量を一律に加えると、当該モデルのジオイドが等ポテンシャル面でなくなることが懸念される。この問題については以下のように判断した。

i 点における重力ポテンシャル差は式[2]に示すように、i 点の重力値と高低差の積となる。

$$\Delta V_i = g_i \cdot \Delta h_i \quad [2]$$

地表の重力値は、地球が及ぼす引力と、地球の自転による遠心力の合力であり、各地の重力値は緯度の関数として近似的に表すことができる。そこで、各地の重力値は正規重力式によるものとして、電子基準点「東京千代田」において求めたオフセット量による重力ポテンシャル差は $1.3384 \text{ m}^2/\text{s}^2$ が得られる。次に JGEOID2024 のジオイド高の南端（北緯 15 度）と北端（北緯 50）において、重力ポテンシャル差 $1.3384 \text{ m}^2/\text{s}^2$ に相当する高低差を正規重力式の重力値を使用して計算すると、結果は表-3 に示すとおり、電子基準点「東京千代田」との差は $\pm 0.2 \text{ mm}$ となった。この差は、JGEOID2024 の精度に比べて十分に小さいことから、JGEOID2024 の全域にこの同一のオフセット量を加えても、等重力ポテンシャル面は維持されているといえる。

表-3 重力ポテンシャル差に相当する高低差

場所	正規重力式 1980[m/s ²]	高低差[m]
北緯 50 度	9.81070	0.1368
電子基準点 「東京千代田」	9.79772	0.1366
北緯 15 度	9.78379	0.1364

3.5 mean-tide 系の標高を得るための補正

月や太陽の潮汐力で生じる地球の永年変形の取扱いについて、高さにおける取扱いを図-6 に示す。前述のとおり、JGEOID2024 では、地球の永年変形の取扱いは tide-free 系（全ての潮汐力を除去した系）としている。また、衛星測位により求めた橢円体高

も tide-free 系である。したがって、JGEOID2024 のジオイド高と衛星測位により求めた橢円体高から計算した標高は tide-free 系となる。衛星測位で mean-tide 系（潮汐力の周期変化成分のみ除去した系）の標高を得るには、JGEOID2024 のジオイド高から、tide-free 系の標高を mean-tide 系に変換する補正量を減じることで実現できる。

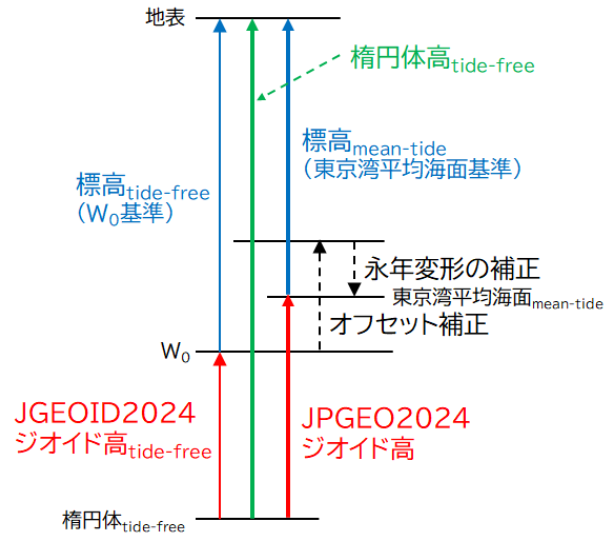


図-6 高さにおける地球の永年変形の取扱い。図中の JPGE02024 は「ジオイド 2024 日本とその周辺」を示す。

Ekman (1989)では、tide-free 系の標高差 ΔH_n と mean-tide 系の標高差 ΔH_m の差を緯度の関数として式[3]を与えている。

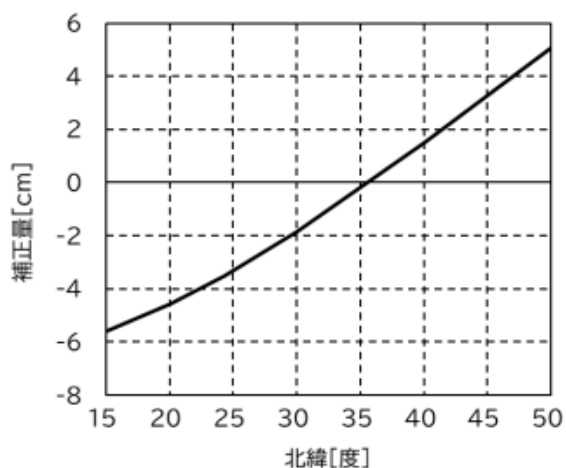
$$\Delta H_m - \Delta H_n = 29.6\gamma(\sin^2 \varphi_N - \sin^2 \varphi_s) \quad \text{cm} \quad [3]$$

$$\gamma = 1 + k - h \quad [4]$$

ここで、 φ_N は求点の緯度、 φ_s は電子基準点「東京千代田」の緯度とした。 γ は減少定数と呼ばれ、式[4]で表される。

k と h は地球の弾性を示す定数であり、ラブ定数と呼ばれる。ラブ定数はIERS Conventions (2010)の($k = 0.30190, h = 0.6078$)とした。

tide-free 系の標高差と mean-tide 系の標高差の差を計算すると、その分布は図-7 となる。差は北海道稚内市（北緯 45 度 20 分）で +3.4 cm、沖縄県石垣市（北緯 24 度 20 分）で約 -3.5 cm となり、電子基準点「東京千代田」では 0 cm となる。

図-7 $\Delta H_m - \Delta H_n$ の分布

3.6 新旧ジオイド・モデルのジオイド高の比較

当該モデルは、図-2 に示すように、最初に重力データから重力ジオイド・モデル「JGEOID2024」を計算し、それに東京湾平均海面に基づく標高が得られるための補正量と、mean-tide 系の標高が得られるための補正量を加えることで構築した。

当該モデルのジオイド高と従来の「日本のジオイド 2011 (Ver.2.2)」のジオイド高の比較を全国で表示したものを図-8 に、離島を除いた各地方を拡大表示したものを文末の別図-1 から別図-5 に示す。

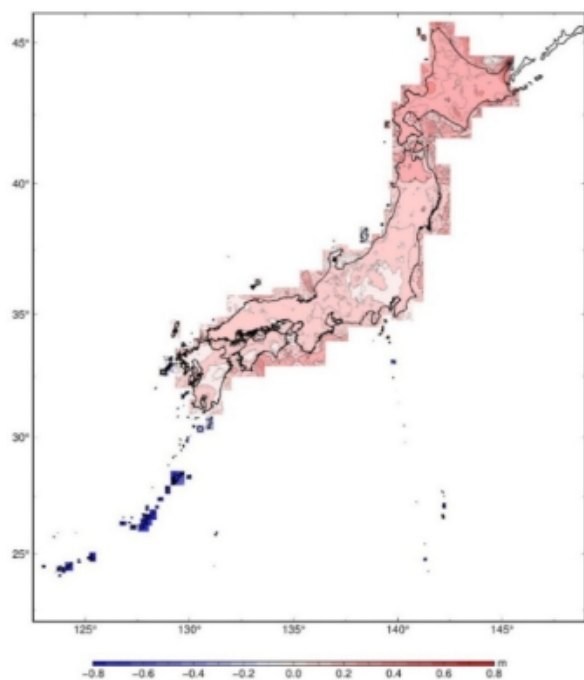


図-8 「ジオイド 2024 日本とその周辺」ジオイド高－「日本のジオイド 2011 (Ver.2.2)」ジオイド高. 等量線間隔：主曲線 5 cm, 計曲線 20 cm.

較差の最大は北海道知床岬で約 70 cm となる。離島を除く陸域では較差の勾配が緩やかとなるが、沿岸部では較差が大きく、勾配も急である。重力ジオイド・モデルの計算において、航空重力データを加えた場合と加えなかった場合の二つを計算し、ジオイド高の較差の分布を表したものを図-9 に示す。新旧ジオイド・モデルのジオイド高の比較において大きな差が現れた知床岬や沿岸海域において、図-9 でも較差が大きい。これは、当該モデルでは航空重力測量データを加えたことで重力データの空白域が解消し、従来のジオイド・モデルよりも精度が向上したことが示唆される。

小笠原諸島や南西諸島では数十 cm から 1 m にも及ぶ負の領域が見られているが、これについては次節で説明する。

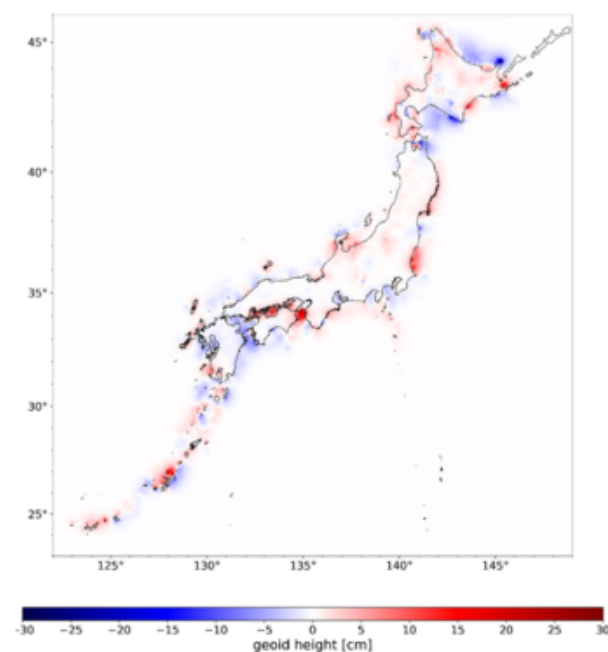


図-9 重力ジオイド高の較差（「航空重力データを加えなかった場合」－「航空重力データを加えた場合」）

3.7 基準面補正量の導入

我が国の高さの基準は測量法により規定されており、原則として東京湾平均海面からの高さ（標高）で表示し、その原点は日本水準原点（東京都千代田区）とすることが定められている。一方、水準測量により日本水準原点と結合できない一部の離島では、測量法第 11 条第 1 項第 3 号ただし書の規定により、標高の原点（以下「原点」という。）として日本水準原点とは異なる原点を定めてきた。このような離島の標高は、東京湾平均海面からの高さではなく、当該離島独自の平均海面を基準とする高さとなる。

前述のとおり、従来の「日本のジオイド 2011」は、

水準測量による標高成果に合うように構築されており、このジオイドは当該離島独自の平均海面と一致していた。一方、当該モデルは、離島を含む日本全域で東京湾平均海面と一致する。前節の図-8 では小笠原諸島や南西諸島にて数十 cm から 1 m にも及ぶ負の領域が見られており、これは東京湾平均海面と従来の離島独自の平均海面との差が現れたものである。

そこで、差が大きい離島では、当該離島の標高の利用用途を考慮して現況に即した標高とするため、衛星測位を基盤とする新しい標高体系では、図-10 に示す基準面補正量（飯尾ほか、2026）を導入した。図-11 に示す日本水準原点とは異なる原点が定められている範囲にて衛星測位により標高を求める際には、衛星測位の楕円体高から当該モデルのジオイド高と合わせて基準面補正量を差し引くことで、当該離島の平均海面を基準とする高さ（標高）を得ることとした。これにより、基準面補正量を導入する離島は、衛星測位を基盤とする標高体系への移行後も測量法第 11 条第 1 項第 3 号ただし書の規定が適用され、原則従来の離島独自の平均海面が維持される。

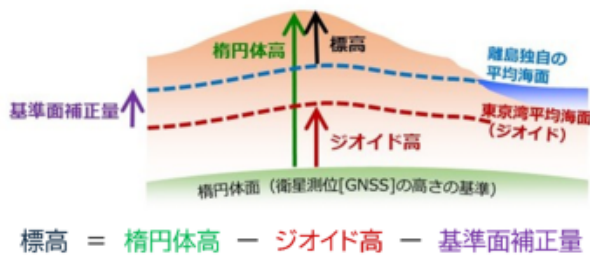


図-10 離島原点を定める離島における高さの関係



図-11 原点が日本水準原点である範囲（青色）と、日本水準原点とは異なる原点の範囲（赤色）

4. 令和 6 年能登半島地震の影響調査

4.1 調査の概要

2024 年 1 月 1 日 16 時 10 分に石川県能登地方の深さ 16 km で M7.6 の地震（最大震度 7）が発生した（気象庁、2025）。

国土地理院は、令和 6 年能登半島地震の発生後、地震に伴う地殻変動を把握するため、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が運用する陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」（ALOS-2）の緊急観測データを用いて解析を実施し、その結果、輪島市西部で約 4 m の隆起、珠洲市北部で約 3 m の西向きの変動等、地震に伴い大きな地殻変動が生じたことが明らかとなった。さらに、能登半島北部沿岸のほぼ全域で、陸地が海側に広がる陸化を検出した（石本ほか、2024）。

この地震による地球の質量分布の変化がジオイド高に影響を及ぼすことが懸念された。地震によるジオイド高の変化量を求めるには、広域の重力変化を取得する必要がある。この地域において航空重力測量を実施して、ジオイド高への影響を調査した。

4.2 航空重力測量の実施

航空重力測量は、2025 年 1 月から 3 月にかけて、北陸地方とその沿岸部において実施した。測量方法や使用する機器は 2019 年から 2023 年の間に実施した全国の航空重力測量（小川ほか、2026a）を踏襲した。航空機には Cessna 社製 208B Grand Caravan を用いた。図-12 に測線図を、表-4 に航空重力測量の仕様を示す。

重力値の精度は、主測線と副測線の交点におけるそれぞれの測線の重力値の較差（クロスオーバー較差）で観測値の再現性を評価しており、調整後のクロスオーバー較差の標準偏差は 3 mGal となった。



図-12 航空重力測量測線図

表-4 航空重力測量の仕様

項目	仕様
測線間隔	主測線：10 km 副測線：42 km
飛行高度	3,000 m (10,000 ft)
対地速度	約 300 km/h

4.3 ジオイド高への影響

地震によるジオイド高への影響については、地震前後の重力データを用いて地震前後の重力ジオイド・モデルを計算して比較する方法がある。しかし、重力ジオイド・モデルは、航空重力データのほか地上重力データ、船上重力データ、衛星重力データ、海面高度衛星データ等を用いて計算しており、この全てについて地震後のデータを整備することは容易ではない。そこで、ここではJGEOID2024を構築した重力データに地震後に取得した航空重力データを加えて、再度、重力ジオイド・モデルを計算し、JGEOID2024と比較することで地震による影響を評価した。地震後の重力ジオイド・モデルのジオイド高とJGEOID2024のジオイド高との較差の分布を図-13に示す。

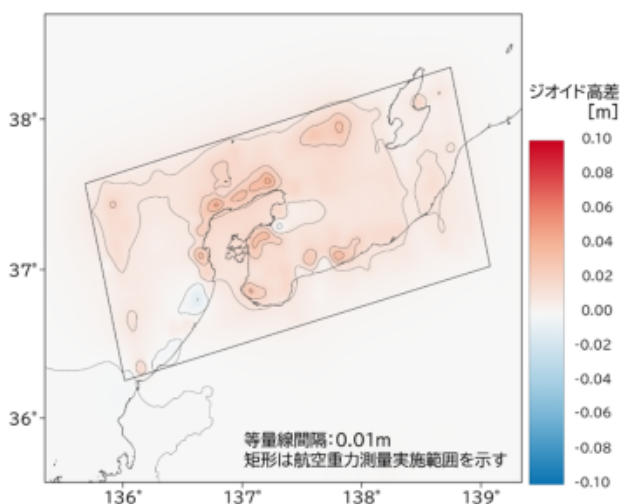


図-13 ジオイド高の較差の分布

陸域におけるジオイド高の較差は2 cm未満となった。一方、沿岸海域では3 cmから4 cmの較差が見られる箇所があり、較差が大きい範囲は東北東－西南西方向に並んでいるように見える。JGEOID2024の計算に使用した地上重力データは、測点間隔が1 km以下の密な重力データである。一方、沿岸海域では陸域ほど密な重力データはない。地震後に実施した航空重力測量では、地震前の全国の航空重力測量から主測線と副測線の入替えたことから、地震後の航空重力測量では、北北西－南南東方向の

重力変化がより細かく捉えられたことで、沿岸海域のジオイド高に差が生じたことが推測される。

地震発生後の航空重力データの追加により、陸域のジオイド高の変化は2 cm未満であり、実測ジオイド高との比較により得られたJGEOID2024の精度3 cmを下回ったことから、地震前のデータを用いて構築した当該モデルを衛星測位の基盤として使用することとした。

5. ジオイド・モデルの提供

当該モデルは地理空間情報活用推進基本法（平成19年法律第63号）第2条第3項で定義される「基盤地図情報」であり、従来と同様に、基盤地図情報サイトから提供することとした。提供するファイルは、格子点のジオイド高を表したISG形式のグリッドデータとGML形式のメッシュデータの2種類とした。

ISG形式は、国際測地学協会の国際ジオイド事業であるInternational Service for the Geoid (ISG)が定めるフォーマット(ISG-format Ver.2.0)(ISG, 2020)である。従来の「日本のジオイド2011」は日本独自のファイル形式(*.asc)であったため、国際的に使用されている標準フォーマットに変更した。

当該モデルでは、国土全域のジオイド高を提供するため、従来の「日本のジオイド2011」から提供範囲を南へ5度、東へ10度拡大して北緯15度から北緯50度まで、東経120度から東経160度までとした。

従来のファイル形式(*.asc)では、格子点のジオイド高を、提供範囲の南西端から始めて北東端が終りとなるよう、経線に沿って規則的に羅列している。格子点のジオイド高の緯度経度は記載しておらず、何番目に記載されたジオイド高であるかを数えることによって緯度経度が判断できるようにしている。これにより、ファイルサイズを縮小することができる。また、必要な場所のジオイド高をプログラムによりランダムアクセスで読み取ることにより、素早く検索することができる。しかし、当該モデルを従来のファイル形式(*.asc)の規則にて作成すると、従来の「日本のジオイド2011」とジオイド高の記載の順番が同じであっても同じ緯度経度にならず、従来のプログラムでは間違えたジオイド高を出力する懸念があった。このため、ファイル形式をISG形式に変更し、ファイル名を従来の“gsigeo”から“JPGeo”に変更することで、従来の「日本のジオイド2011」とは異なることを示すとともに、当該モデルに適合した新しいプログラムを使用するよう促した。ISG形式で提供するファイルを次に示す。

- 1) ジオイド高を記した「ジオイド 2024 日本とその周辺」(JPGeo2024)
- 2) 基準面補正量を記した「基準面補正パラメータ」(Hrefconv2024)
- 3) 同一地点における上記のジオイド高と基準面補正量の二つを足し合わせた値を記したファイル（以下「統合したファイル」という。）(JPGeo2024+Hrefconv2024)

上記の3種類ファイルとも格子点は緯度1分間隔、経度1.5分間隔とした。統合したファイルは、ユーザの利便性のため標高体系移行の経過措置として提供するものであるが、「基準面補正パラメータ」の使用が社会に浸透した際には、提供を終了する予定である。ISG形式の圧縮ファイルには、上記のファイルのほか、説明書及び双一次補間(バイリニア補間)による内挿計算ソフトを同封した。

GML形式は、GIS等で利用する地理的な情報が記載されたXML形式のデータであり、約250mメッシュの中心位置のそれぞれの値を記した。

このほか、当該モデルから任意地点のジオイド高及び基準面補正量を計算するサービスを測量計算サイトから提供した。

6. 新旧ジオイド・モデルの違い

従来の「日本のジオイド2011」と、当該モデルの違いを1)から5)に示す。また、ジオイド高の分布図を図-14及び図-15に示す。

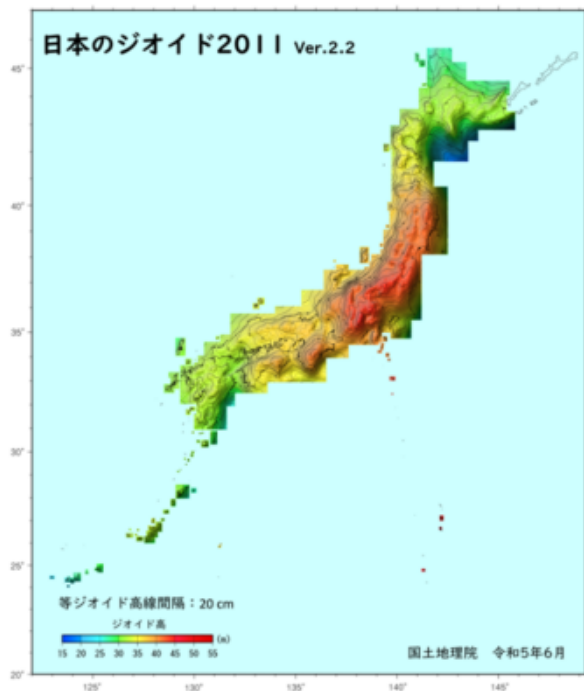


図-14 「日本のジオイド2011(Ver.2.2)」

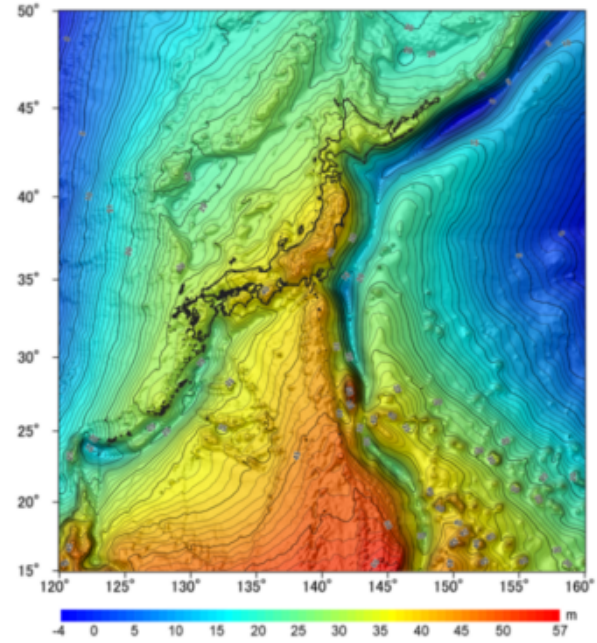


図-15 「ジオイド2024 日本とその周辺」

1) 種類

従来のジオイド・モデルは、実測ジオイド高データに重力ジオイド・モデルを適合させる手法で構築した混合ジオイド・モデルであった。

当該モデルは、重力データのみから構築した重力ジオイド・モデルである。

2) 重力データの分布

従来のジオイド・モデルでは、山間部や沿岸部に重力データが少ない地域又は空白域が存在していた。

当該モデルでは、航空重力データや地上重力データを追加して高密度化を図っている。

3) 提供範囲

従来のジオイド・モデルは、実測ジオイド高が必要であったことから、提供範囲は陸域とその沿岸域に限られていた。

当該モデルは、国土全域の陸海シームレスなジオイド・モデルとなった。

4) ジオイドの定義

従来のジオイド・モデルのジオイドは、離島を除いた地域では東京湾平均海面に一致し、離島では独自の平均海面に一致していた。

当該モデルのジオイドは、全域において東京湾平均海面と一致している。一部離島では、当該離島の現況に即した標高とするため、基準面補正を導入することとした。

5) ファイルフォーマット

従来のジオイド・モデルでは、日本独自のフォーマットであった。

当該モデルでは、国際測地学協会の国際ジオイド事業によって決められている ISG-format version2.0 とした。

7. 「ジオイド 2024 日本とその周辺」の役割

7.1 衛星測位を基盤とする標高体系への移行

従来の標高体系では、図-16 に示すように、日本水準原点からの水準測量により標高を整備してきた。しかし、全国の水準測量には多くの時間と費用を要し、また、地殻変動による影響や、距離に応じて累積する誤差の課題があった。

これらの課題を解消するため、2025 年 4 月 1 日に「衛星測位を基盤とする標高体系」に移行するとともに、国土地理院が管理する基準点の標高を最新の値に改定した。また、改定に伴い、基準点成果表における成果値の名称を、「測地成果 2011」から「測地成果 2024」に変更した（古屋ほか、2026）。



図-16 水準測量を基盤とする標高体系

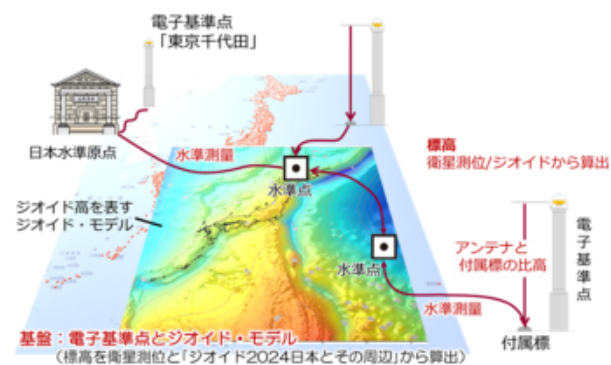


図-17 衛星測位を基盤とする標高体系

衛星測位を基盤とする標高体系では、図-17 に示すとおり、日本水準原点を原点とすることには変わりはないが、全国の電子基準点の衛星測位で得られる楕円体高と当該モデルから得られるジオイド高から求めた標高が基盤となる。つまり、従来の水準点に替わり、電子基準点の標高が標高体系の最上位に位

置づけられ、水準点の標高成果は近傍の電子基準点付属標から水準測量によって求める。当該モデルは衛星測位を基盤とする標高体系において、標高の基準（標高 0 m）を表す重要な役割を担う。

7.2 高さのシステムの移行

水準測量を基盤とするこれまでの標高体系において、高さのシステムは正標高の一種である Helmert 高が採用されていた。正標高はジオイドから各点まで鉛直に測った長さで定義される高さである。水準測量と正標高の関係を図-18 に示す。図中の破線は重力の等ポテンシャル面であり、その高さにおける水平面を示し、それぞれの高さの水準面は一般的には平行にならない。このような場において、A 点から B 点まで水準測量を実施すると、水準面が平行ではないため、水準測量の高低差を足し合わせたものは A 点と B 点の正標高差と一致せず、補正が必要となる。この補正には、地下における重力の平均値が必要になるが、厳密には与えることができず、地下における質量分布など、地下での重力分布に関して仮定を設けて補正する必要がある。Helmert 近似による正標高補正を施したものが Helmert 高である。

一方、全国の電子基準点の衛星測位で得られる楕円体高と当該モデルから得られるジオイド高から求めた標高は、直接、正標高が得られる。また、水準点の標高は、引き続き水準測量で維持されて Helmert 近似による正標高補正が施されるが、既知点とする電子基準点の標高が正標高になることから、水準点の標高も近似的な正標高といえる。このように、衛星測位を基盤とする標高体系への移行により、高さのシステムは従来の正標高の一種である Helmert 高から正標高へと移行する。

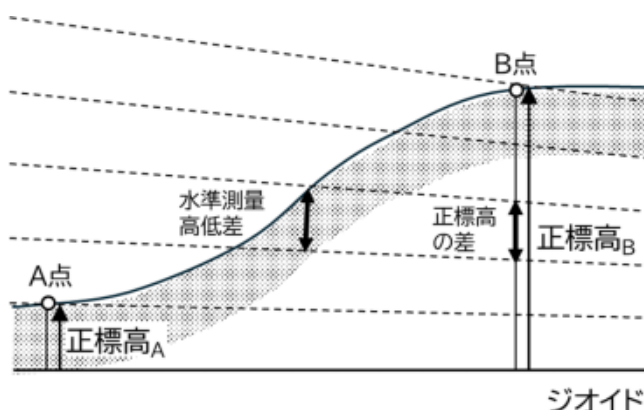


図-18 水準測量と正標高

7.3 地形図の土地の高さと海図の海の深さの基準の違いの把握

土地の高さや地形の起伏等を表した地形図は、土地の測量の基準点に基づいて位置情報が整備されており、重力の等ポテンシャル面を高さの基準面として採用している。高さの基準面は東京湾平均海面のほか、一部の離島では当該離島の独自の平均海面としており、高さはその基準面から鉛直方向に沿って測られた高さとなる。もし、陸や橋でつながる範囲において、高さの基準面を重力ポテンシャルが等しくない複数の平均海面とすると、水準測量にて閉合差が生じて測量が成立しなくなる。

一方、海の深さや海底の起伏等を表した海図では、海の深さの基準面はその地の最低水面としている。その地の最低水面は、その地の平均海面からその地の潮汐の主要4分潮の振幅の和だけ下げた面である（林王, 2024）。最低水面を深さの基準とすることは、海図が船舶航行の安全を図るという立場から作られていることと関係がある（海上保安庁第四管区海上保安本部海洋情報部）。

このように、地形図の土地の高さと海図の海の深さは、どちらも高さ方向の地形情報であるが、図-19に示すように基準面が異なり、その差の量は場所によって異なる。

このような、地形図の土地の高さと海図の海の深さの地形情報における基準面の違いについて、2024年12月に開催された「国連地球規模の測地連携拠点（UN-GGCE）陸海統合ワークショップ」では、陸海の位置情報のシームレスな統合の現状と課題が示されている（UN-GGCE, 2024）。そこで、この課題について、当該モデルを使った基準面の違いの把握方法を考える。

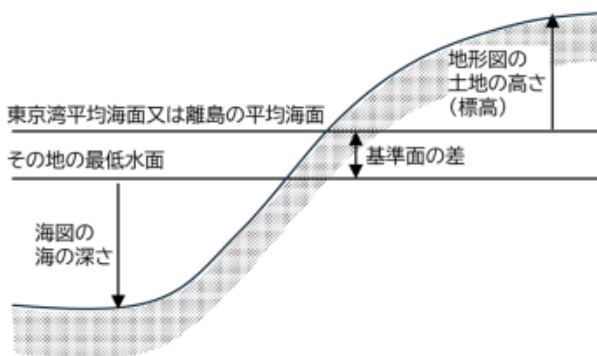


図-19 地形図と海図の基準面の差

地形図と海図の基準面の高さの違いは、双方の基準面を楕円体面からの高さ、すなわち楕円体高で表すことで、容易に把握することができる。衛星測位を基盤とする標高体系において、高さの基盤となる

当該モデルのジオイド高は、土地の高さの基準（標高 0 m）を楕円体高で表したものとなる。また、近年では、海図の海の深さの基準を楕円体高で表す取組が進められており、海上保安庁では水路業務法施行令（平成13年政令第433号）第1条の規定に基づき公示する「平均水面、最高水面及び最低水面一覧表」において、2019年から「最低水面の楕円体高」の掲載を開始した（佐藤, 2025）。

当該モデルのジオイド高と「最低水面の楕円体高」は、どちらも楕円体を基準にしているが、それぞれが採用している楕円体が当該モデルでは GRS80、「最低水面の楕円体高」では WGS84 と異なる。しかし、二つの楕円体原子を比較すると、両者は長半径が同じで、扁平率がほんのわずか異なり、これによる楕円体高の違いは極点で最大となり、わずか 0.1 mm である。そこで、採用する楕円体の違いによる楕円体高には差はないとして、地形図の土地の高さの基準を東京湾平均海面 TP とする場合において、海図の海の深さの基準 CD_i との差は式[5]で表すことができる。

$$CD_i - TP = CDh_i - N_i \quad [5]$$

ここで、 CDh_i は i 点における最低水面の楕円体高、 N_i は当該モデルから求めた i 点におけるジオイド高であり、最低水面の楕円体高からジオイド高を減じることで得た高さは、最低水面の標高となる。

また、地形図の土地の高さの基準を当該離島の独自の平均海面 LP とする場合において、海図の海の深さの基準 CD_i との差は式[6]で表すことができる。

$$CD_i - LP = CDh_i - N_i - Hrefconv_i \quad [6]$$

ここで、 $Hrefconv_i$ は 5.3 に示す i 点における基準面補正量である。GNSS 測量により求めた最低水面の楕円体高から当該モデルのジオイド高と基準面補正量を減じることで得た高さは、最低水面の標高となる。

上記の方法により、「平均水面、最高水面及び最低水面一覧表」に記載の「最低水面の楕円体高」を使用して、地形図の土地の高さの基準と海図の海の深さの基準との差を求めて分布を試作したものを図-20に示す。

この差を考慮して、地形図の土地の高さと海図の海の深さの地形情報を連結することで、陸海シームレスな地形情報を構築することができ、当該モデルは陸海の位置情報のシームレスな統合にも貢献できる。



図-20 地形図の土地の高さと海図の海の深さの基準の違い。最低水面楕円体高は海上保安庁「平均水面、最高水面及び最低水面一覧表（令和6年8月30日現在）」を使用。図には最低水面楕円体高が整備されている地域のための基準の違いを表す。

8. まとめ

衛星測位を基盤とする標高体系において、標高の基準となる新しいジオイド・モデルの構築を目指して航空重力測量及び地上重力データの再整備を実施

した。これらの結果と各機関から提供を受けた地上重力データ及び船上重力データのほか、衛星重力データ、海面高度衛星データ等を加えて、新しいジオイド・モデル「ジオイド2024日本とその周辺」を構築した。その精度は、陸域では2.8 cmとなり、目標精度としていた3 cmを達成した。

2025年4月1日には、我が国の標高の基準と標高決定の仕組みを、全国の電子基準点で得られる楕円体高と当該モデルで得られるジオイド高から決定した標高を基盤とする体系に移行し、国土地理院が管理する基準点の標高成果を改定した。

当該モデルは「基準面補正パラメータ」と併せて基盤地図情報サイトから公開され、各種の測量等において、標高の基準として活用される。また、当該モデルは、陸海の位置情報のシームレスな統合において、地形図の土地の高さと海図の海の深さの地形情報の連結にも貢献できる。

謝辞

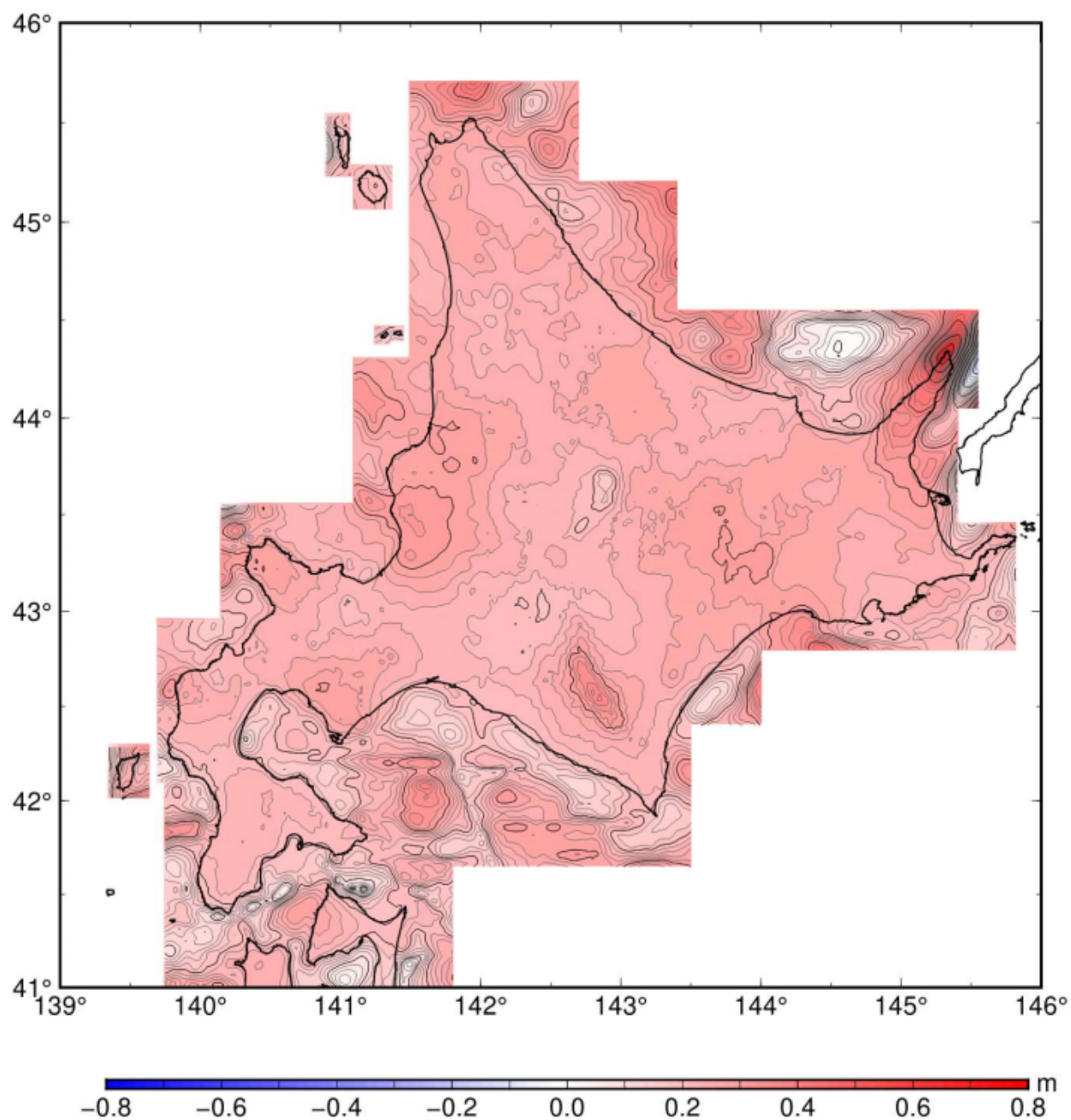
当該モデルの計算には、国土地理院が整備した地上重力データや航空重力データのほか、産業技術総合研究所や名古屋大学、金沢大学、北海道大学、金属鉱業事業団（現 エネルギー・金属鉱物資源機構）等から提供を受けた地上重力データ、海上保安庁から提供を受けた船上重力データ、欧州宇宙機関が提供するGOCE衛星重力データ、スクリップス海洋研究所が提供する衛星海面重力データ等を使用した。ここに記して謝意を表する。

（公開日：令和8年3月16日）

参考文献

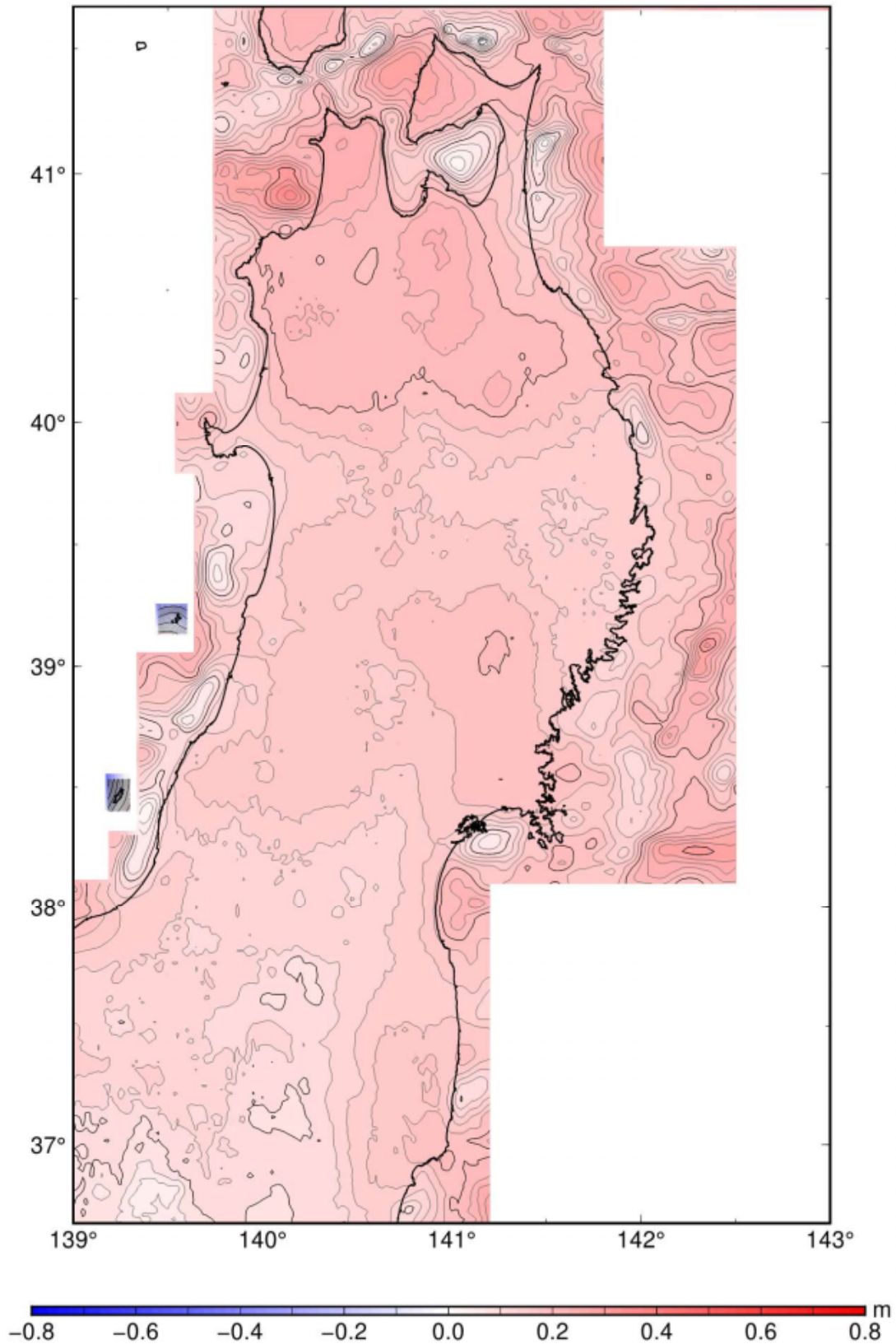
- Ekman, M (1989): Impacts of geodynamic phenomena on systems for height and gravity, Bull. Geodesique 63, 281–296.
- Forsberg, R. (1987): A new covariance model for inertial gravimetry and gradiometry, J. Geophys. Res., 92(B2), 1305–1310.
- 福田洋一（2018）：GGOSと重力場研究，測地学会誌，63，No.2，95–101. doi: 10.11366/sokuchi.63.95
- 古屋智秋，井上武久，針間栄一郎，檜山洋平，岩下知真子，多田直洋，高築晶，山田直輝，田上節雄，吉川忠男，中久喜智一，下平佳朱美，飯尾研人，松原柚季，石川典彦，山下達也，高松直史，宮崎隆幸，橋本繭未，村上真亮，宗包晃子，齋田宏明，影山勇雄，湯通堂亨（2026）：衛星測位を基盤とする標高体系への移行に伴う基準点の標高成果の改定，国土地理院時報，140，1–22. doi: 10.57499/JOURNAL_140_01
- IAG (2015): IAG Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHRs), https://ihrfcc.topo.auth.gr/wp-content/uploads/2024/08/IAG_Resolutions_2015.pdf (accessed 30 Oct. 2025).
- International Service for the Geoid(ISG)(2020) : The ISG-format(version 2.0), https://www.isgeoid.polimi.it/Geoid/ISG_format_v20_20200625.pdf (accessed 12 Nov.2025).
- ISG, c/o Politecnico di Milano, DICA, Geodesy and Geomatics Division (2020): The ISG-format (version 2.0), https://www.isgeoid.polimi.it/Geoid/ISG_format_v20_20200625.pdf (accessed 03 Dec. 2025).
- 石本正芳，服部晃久，三木原香乃，小門研亮，小林知勝（2024）：だいち2号で捉えた令和6年能登半島地震に伴う地殻変動，国土地理院時報，138，17–24. doi: 10.57499/JOURNAL_138_03
- 海上保安庁第四管区海上保安本部海洋情報部：海の深さの基準は？，

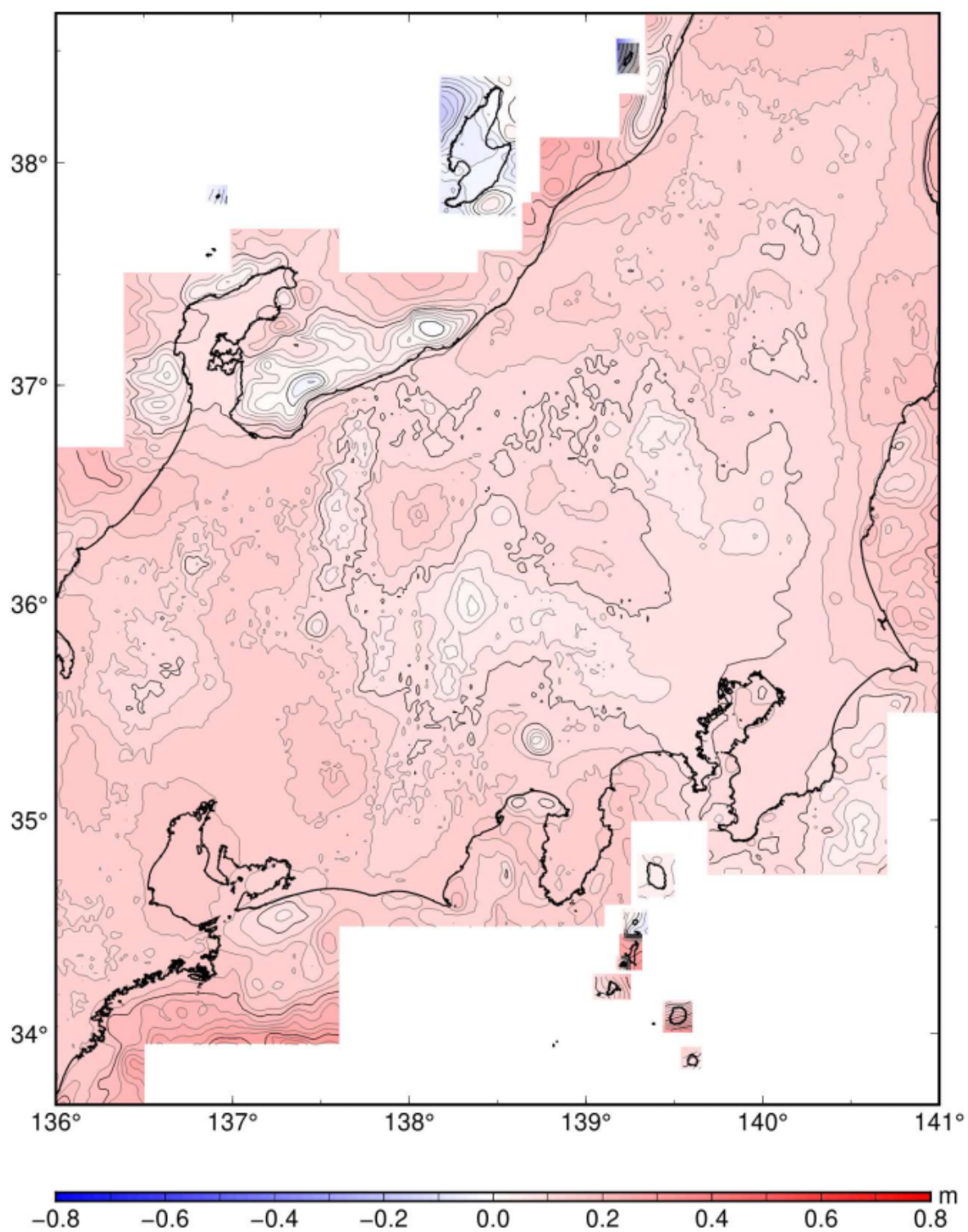
- <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN4/soudan/4soudan.html> (accessed 11 Nov.2025).
- 気象庁 (2025): 令和 7 年 1 月 地震・火山月報 (防災編),
<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/gaikyo/monthly/202501/202501monthly.pdf> (accessed 8 Dec. 2025).
- 兒玉篤郎, 宮原伐折羅, 河和宏, 根本悟, 黒石裕樹 (2014): ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver.1) の構築, 国土地理院時報, 126, 67–85. doi: 10.57499/JOURNAL_126_11
- 小坂橋勝, 小島秀基, 根本悟, 宮原伐折羅, 平岡喜文, 矢萩智裕 (2018): ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver.2) の構築, 国土地理院時報, 130, 1–7. doi: 10.57499/JOURNAL_130_01
- 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. doi: 10.11366/sokuchi1954.22.65.
- 国土地理院: 定常時地殻変動補正サイト, <https://positions.gsi.go.jp/cdcs/> (accessed 2 Oct. 2025).
- 国土地理院: 基盤地図情報ダウンロードサービス (「ジオイド 2024 日本とその周辺」と「基準面補正パラメータ」の提供), <https://service.gsi.go.jp/kiban/app/geoid/> (accessed 13 Aug. 2025).
- 国土地理院: 測量計算サイト (ジオイド高計算 (ジオイド 2024 日本とその周辺)),
<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/geoid/calcul/calcfame.html> (accessed 12 Nov. 2025).
- 黒石裕樹 (2003): 宇宙測地における座標系の取り扱いについて, その 1, 標高基準, 国土地理院時報, 102, 21–32, 2003.
- Kuroishi, Y. (2009): Improved geoid model determination for Japan from GRACE and a regional gravity field model, *Earth Planets Space*, 61, 807–813.
- Matsuo K. (2024): JGEOID2024: the Japanese gravimetric geoid model incorporating nationwide airborne gravity data, *Gravity, Geoid and Height Systems (GGHS) 2024*.
- 小川拓真, 平岡喜文, 菅原安宏, 小柳拓真, 山本康生, 中島正寛, 栗原忍, 吉樂絵里香, 飯尾研人, 富山顕, 加藤知瑛, 兒玉篤郎, 畔柳将人, 大森秀一, 松尾功二, 豊福隆史, 市村和輝, 半田優実, 塩谷俊治, 酒井和紀, 深谷俊太郎 (2026a): 精密重力ジオイド・モデル構築に向けた航空重力測量 (最終報告) - 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, 140, 47–87.
doi: 10.57499/JOURNAL_140_04
- 小川拓真, 菅原安宏, 平岡喜文, 中島正寛, 加藤知瑛, 市村和輝 (2026b): 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, 国土地理院時報, 140, 89–98. doi: 10.57499/JOURNAL_140_05
- 林王弘道 (2024): 海図基準面に係る用語集, 海洋情報部研究報告, 第 62 号.
- 佐藤勝彦 (2025): 験潮作業が要らない水深測量, 海洋調査 (協会報), No.160, 27–32.
- Smith, D.A., Holmes, S.A., Li, X., Guillaume, S., Wang, Y.M., Bürki, B., Roman, D.R. and Damiani, T. (2013): Confirming regional 1 cm differential geoid accuracy from airborne gravimetry: the Geoid Slope Validation Survey of 2011. *J Geod* 87:885–907.
- UN-GGCE International Workshop on the Integration of Terrestrial, Maritime, Built and Cadastral Domains, United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (UN-GGIM) (2024): International Workshop on the Integration of Terrestrial, Maritime, Built and Cadastral Domains "Joining Land and Sea", DRAFT Summary Notes and Decisions,
https://ggim.un.org/UNGGCE/documents/20241001_Concept_Note_UNGGCE_2024.pdf (accessed 13 Nov.2025).
- 矢萩智裕, 吉田賢司, 宮崎隆幸, 平岡喜文, 宮原伐折羅 (2018): 日本重力基準網 2016 の構築, 測地学会誌, 64, 14–25. doi: 10.11366/sokuchi.64.14



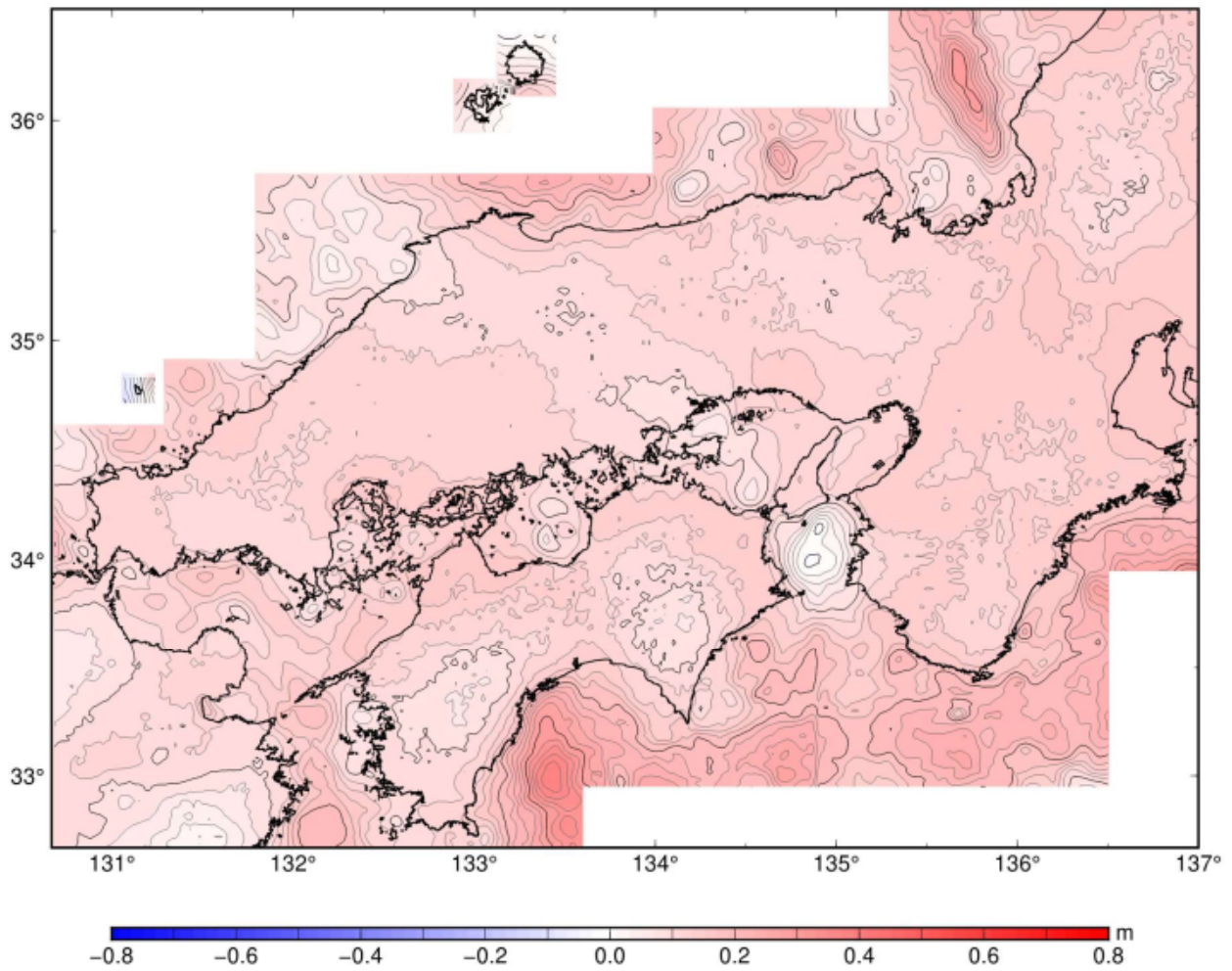
別図-1 「日本のジオイド 2011 (Ver.2.2)」と「ジオイド 2024 日本とその周辺」の比較 (北海道)

「ジオイド 2024 日本とその周辺」ジオイド高－「日本のジオイド 2011 (Ver.2.2)」 ジオイド高
等量線間隔：主曲線 2 cm, 計曲線 10 cm

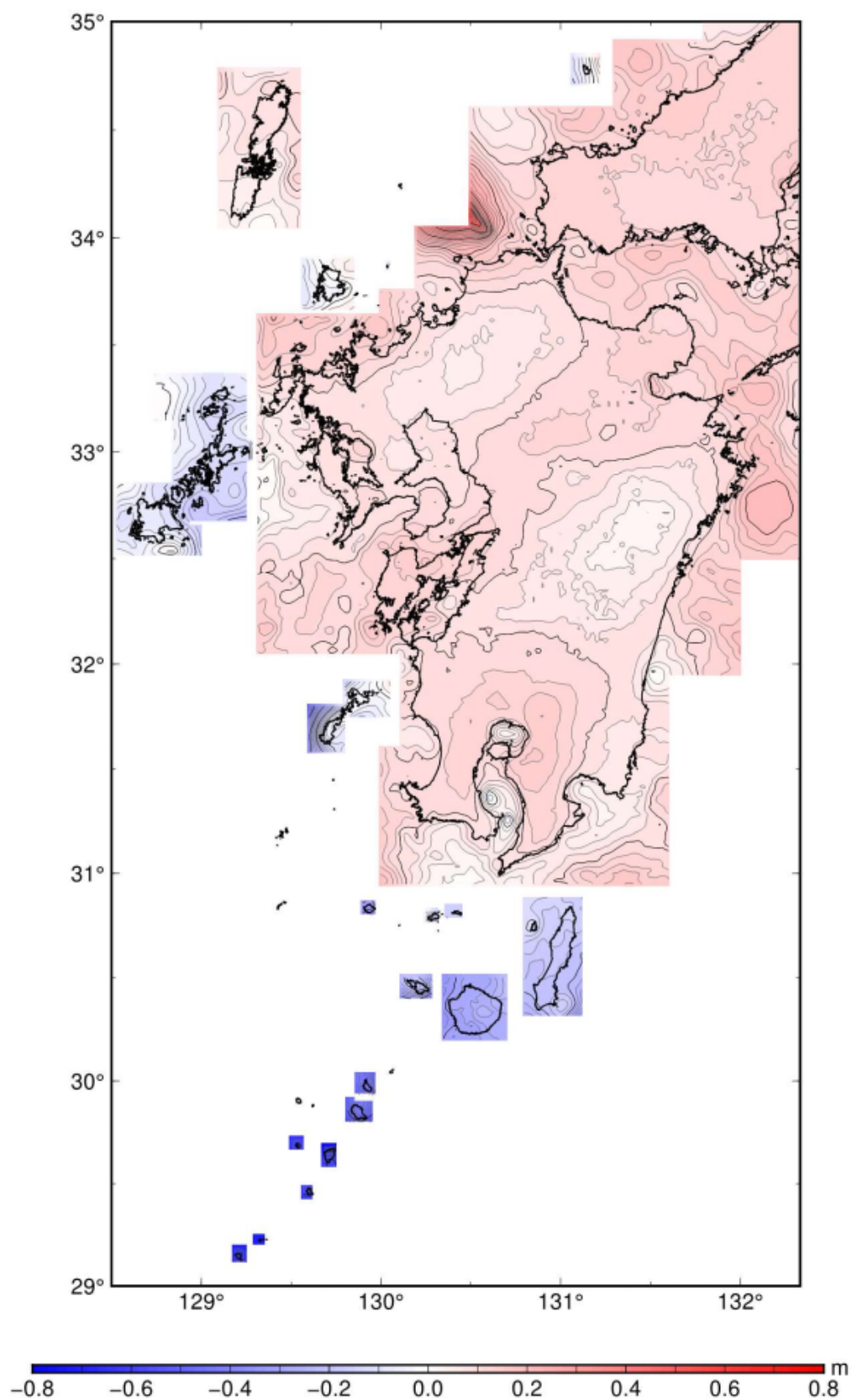




別図-3 「日本のジオイド 2011 (Ver.2.2)」と「ジオイド 2024 日本とその周辺」の比較 (関東・中部)
「ジオイド 2024 日本とその周辺」ジオイド高－「日本のジオイド 2011 (Ver.2.2)」 ジオイド高
等量線間隔：主曲線 2 cm, 計曲線 10 cm



別図-4 「日本のジオイド 2011 (Ver.2.2) と「ジオイド 2024 日本とその周辺」の比較 (近畿・中国・四国)
「ジオイド 2024 日本とその周辺」ジオイド高－「日本のジオイド 2011 (Ver.2.2)」 ジオイド高
等量線間隔：主曲線 2 cm, 計曲線 10 cm



別図-5 「日本のジオイド 2011 (Ver.2.2) と「ジオイド 2024 日本とその周辺」の比較 (九州)
「ジオイド 2024 日本とその周辺」ジオイド高－「日本のジオイド 2011 (Ver.2.2)」 ジオイド高
等量線間隔：主曲線 2 cm, 計曲線 10 cm