ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver.1) の構築
Establishment of New Geoid Model “GSIGEO2011 (Ver.1)”

測地部　兒玉篤郎・宮原伐折羅・河和宏[1]・根本悟
Geodetic Department　Tokuro KODAMA, Basara MIYAHARA, Hiroshi KAWAWA and Satoru NEMOTO
地理地殻活動研究センター　黒石裕樹[2]
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Yuki KUROISHI

要　旨

国土地理院では，衛星測位を用いた測量業務の効率化（スマート・サーベイ・プロジェクト）の一環として，GNSS 測量により 3 級水準測量に相当する標高の決定を可能とする（後藤ほか，2013）ため，高精度なジオイド・モデルの構築を進めてきた．平成 25 年 4 月には，西日本地域について新たなジオイド・モデルを組み入れた「日本のジオイド 2011+2000」を公開した（兒玉ほか，2013）．今回，東日本地域についてもジオイド高データの整備が平成 25 年度に完了したことを受け，一部の離島を除いた全国について新たなジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」を構築したので，報告する．

東日本地域では，平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に伴って大きな地殻変動が生じたため，神奈川県から福井県の県境を南西縁，青森県を北縁とする 1 都 19 県について成果改定が行われた（檜山ほか，2011）．この改定で，基準点の地心三次元位置は，非改定地域では ITRF94（元期 1997 年 1 月 1 日 UT0 時）に，改定地域では ITRF2008（元期 2011 年 5 月 24 日 UT12 時）に準拠した．そのままでは，両地域には異なる元期の間で累積する地殻変動等に起因する不整合が生じるため，南西縁の境界域（神奈川県から富山県の県境を北東縁とする 7 県）において，水平成分（緯度と経度）が滑らかに変化するよう調整することで，地域間の成果における不整合の発生を回避した．一方，高さ成分では，調整は特に加えられず，成果の非改定地域に面する改定地域の電子基準点では楕円体高の改定量が 10cm を超えるものもあり，境界域で有意な不整合が生じている．

ジオイド・モデルは，GNSS 測量から標高を算出する際に，測地成果における地心三次元系の楕円体高を標高（正標高）に変換するために用いられ，楕円体高及び標高の成果と整合する必要がある．ジオイドの起伏は地形と比べ空間的に滑らかであり，混合ジオイド・モデルの構築に先だって，境界域にある楕円体高の成果にみられる 10cm を超える不整合は解消しておくべきである．

そこで，東日本地域のジオイド・モデルを構築するにあたり，まず，成果改定地域と非改定地域の間で，楕円体高成果の内部整合性を向上させるために境界域における電子基準点の楕円体高成果の改定量を滑らかに変化させる調整を行った．つぎに，境界域については調整が加えられた成果を用い，モデル構築の対象域における基準点での楕円体高成果と水準測量による標高成果からジオイド高データを整備した．これらのジオイド高データに対し，最新の日本の重力ジオイド・モデル「JGEOID2008」(Kuroishi, 2009) を適合する手法により，東日本地域のジオイド・モデルを構築した．

また，沖縄島は標高基準が個別に定められた離島であるため，北海道，本州、四国、九州とは独立して，より稠密に分布するジオイド高データを用いてジオイド・モデルを構築した．まず，過去に行われた GNSS 観測データを再計算し，現在の成果に準拠するジオイド高を用意した．つぎに，得られたジオイド高データに対し，「JGEOID2008」をより細かく適合させるため，テンション付きスプライン補間を用いてジオイド・モデルを構築した．

「日本のジオイド 2011」は，構築に用いたジオイド高データと標準偏差 2cm で整合することから，測地成果 2011 と標準偏差 2cm で整合したジオイド・モデルといえる．

1. はじめに

ジオイドは地球の物理的形状として測地学など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．GNSS測量では観測点の地心三次元位置を測定することができ，得られる高さは，ジオイド面を回転楕円体に近似した準拠楕円体面からの高さ（楕円体高）であるため，ジオイドからの高さである標高を求めるには，準拠楕円体からジオイドまでの高さであるジオイド高が必要となる（図-1）．

国土地理院は，水平位置の基準となる三角点等の設置においてGNSS測量から標高を求めることを目

現所属：[1]測地観測センター，[2]中部地方測量部

This document is provided by JAXA.

的として，平成13年から日本全国のジオイド・モデル「日本のジオイド2000」（国土地理院，2003）を整備・公開し，基準点測量の効率的な実施に貢献してきた．

「日本のジオイド2000」には，基盤とした重力ジオイド・モデルが含む誤差をはじめとする様々な誤差が含まれることが指摘されており（兒玉ほか，2013），水準測量の一部をジオイド・モデルを用いたGNSS 測量による標高の決定で代用しようとした場合，このモデルでは必要となる精度を全国的に実現することは難しい．そこで，国土地理院では，3 級水準測量に相当する標高の決定をGNSS測量で可能とするため，GNSS/水準法で計測されるジオイド高と標準偏差で2cm程度で整合する精度を目標として，測地成果2011に準拠した，新たな日本のジオイド・モデルの構築に着手した（兒玉ほか，2012）．

今回，東日本地域のジオイド高データが整備されたことをうけ，一部の離島を除く全国のジオイド・モデルを構築し，平成26年4月に新たなジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」（Ver. 1）として公開した．また，沖縄島についても，既存のジオイド測量から日本測地系 2011 に整合するジオイド高の測量成果を再計算してジオイド・モデルを構築し，あわせて公開を行った．

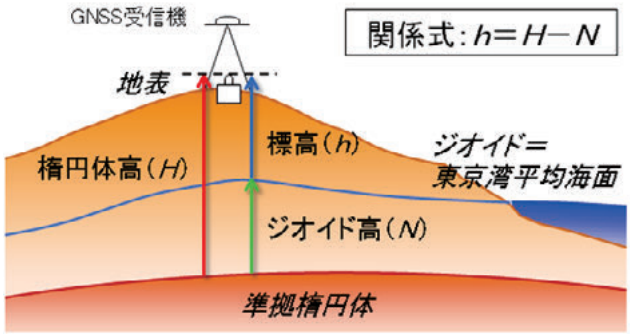


図-1　楕円体高，標高及びジオイド高の関係

2. ジオイド高データの整備

ここでは，北海道・本州・四国・九州（本土4島）のジオイド・モデル構築に用いるジオイド高データの整備について述べる．

2.1 ジオイド高データの整備における課題

国土地理院は，平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震に伴い広域で生じた大きな地殻変動を受け，東日本の広い範囲で基準点成果を改定した．この改定により，東日本の成果改定地域では，基準系として2011年5月24日を元期とするITRF2008系が採用されたが，非改定地域では1997年1月1日を元期とするITRF94系に準拠した測地成果2000が引き続き用いられている．そのため，両地域の間には累積した地殻変動等による成果値のずれがあり，特に改定・非改定地域の境界では，1997年1月1日から2011年5月24日の間に生じた累積の地殻変動等による歪みが含まれている．この歪みを解消するため，電子基準点測量成果の水平座標においては，改定地域南西縁の陸続き境界部にあたる7県を調整領域として，歪量が概ね2ppm以下になるよう，測量成果改定量に調整計算が実施された．調整は，水平成分のみを対象とした．

しかし，高さ成分は，成果の改定／非改定地域をまたぐ隣接電子基準点間の楕円体高の改定量の差が測量法第 34 条に定める作業規程の準則に規定された許容範囲に収まる程度であることから，調整は行われなかった．（檜山ほか，2011）．また，標高については，水準点の改測が，調整領域内の東部等の一部で行われているものの，調整領域の大部分で標高成果の改定は行っていない．そのため，それらの地域では，楕円体高の改定量がそのままジオイド高の変化量となり，成果の改定／非改定地域の境界部では，本来あるべき滑らかなジオイド起伏に対して10cm程度の急激な歪みを持つことになる．

他方，3 級水準測量に相当する標高の決定をジオイド・モデルを用いたGNSS測量で行う場合，電子基準点の楕円体高の成果には，従来の基準点測量と比べ高い整合性が必要となる．そこで，新たなジオイド・モデルの構築では，電子基準点の楕円体高成果に含まれる元期等の違いによる不整合と，それに伴うジオイド高の歪みを解消するため，楕円体高成果についても水平成分と同様に調整を行うこととした．調整の対象領域は水平成分と同じ7県である．

2.2 楕円体高の調整計算

楕円体高の調整は，成果更新量が非改定地域に向かって次第に小さくなるよう調整する．調整領域は，電子基準点「横須賀」，「珠洲」と「大飯」を頂点とする三角形の中にほぼ分布しているため（図-2），「横須賀」を基点とする水平面内の方位角に比例して，「横須賀」と「珠洲」を結ぶ直線から「横須賀」と「大飯」を結ぶ直線に向かって成果更新量が 100% から 0%に縮小するよう調整する手法を採用した．つまり，この手法に必要となる比例係数（調整係数）は，「横須賀」を基点とする「珠洲」の方位角を θ ys，「横須賀」を基点とする「大飯」の方位角を θ yo，

This document is provided by JAXA.

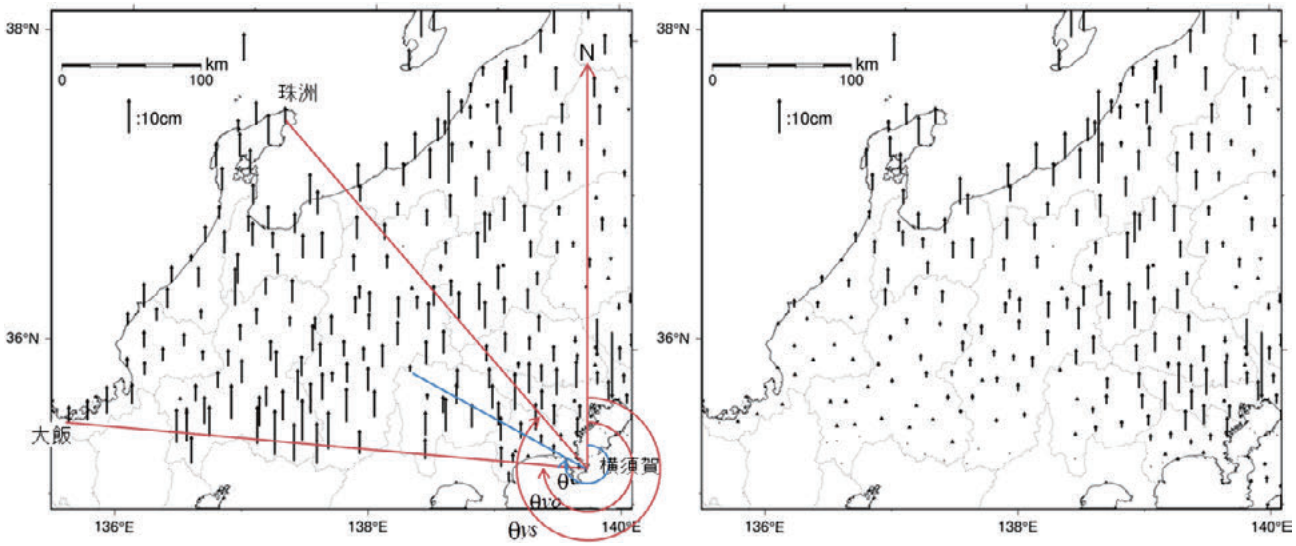


図-2 電子基準点の楕円体高の改定量分布（左：調整前の成果改定量；電子基準点「横須賀」を基点とする各点の方位角が θ，右：調整後の成果改定量；調整地域では北東端から南西端に向かって次第に更新量が小さくなる）

「横須賀」を基点として対象とする電子基準点の方位角を θ とするとき，次式で与えられる．

$$\frac{\theta ys - \theta}{\theta ys - \theta yo}$$

したがって，対象とする電子基準点の調整前，後の楕円体高を，それぞれ H，Hn，調整を行わない場合の楕円体高成果更新量を ΔH とすると，その関係は次の通りとなる．

$$Hn = H - \Delta H \times \frac{\theta\, ys - \theta}{\theta\, ys - \theta\, yo}$$

ただし、

$$\theta \geq \theta ys \rightarrow Hn = H$$
$$\theta \leq \theta yo \rightarrow Hn = H - \Delta H$$

である．

次に，採用した楕円体高の調整が，電子基準点のジオイド高データの整合性に及ぼす効果を調べた．評価には，調整前後の楕円体高から求めたジオイド高データから，3章で述べる手法で混合ジオイド・モデルを作成し，内部整合性を比較する手法を用いた．内部整合性の評価は，ジオイド高データから1点（評価点）を順次外部データとして扱い，その点を除くデータを用いてジオイド・モデルを作成し，そのモデルによって得られる評価点位置におけるジオイド高の値を外部データとしたジオイド高データと比較する，交差検定（Leave one out cross validation：LOOCV）を用いる．

この方法を用いて，調整領域とその非改定地域側の隣接県におけるジオイド高データ（246点）を対象として評価を行った．表-1に，その結果の統計量を示す．表-1では，較差の標準偏差はほぼ同じであるが，負の最大値に，調整によって3cmの改善が認められる．次に，LOOCVにおけるジオイド高の差（ジオイド較差）の絶対値について，調整前後で差をとった空間分布を図-3に示す．調整によってジオイド較差の絶対値が減少した場合が正値（上向き）となる．調整領域では，全体的に差は数mmに収まっているが，西側の境界付近の複数の点で優位な改善が見られ，特に，電子基準点「愛知一宮2」では7.5 cmの改善が認められる．したがって，楕円体高の調整により，境界域のジオイド高データの整合性に有意な改善がもたらされたと結論できる。また，愛知県と岐阜県の境界にある隣接2点「串原」と「愛知豊田」では，調整により5 cm以上の改善が見られる．これは，調整前のジオイド高データに生じていた，これらの点とその周辺との間の系統的な差が，調整によって改善したことを示すと考えられる．

これらの結果から，成果改定の境界域において，電子基準点の楕円体高成果に本節で提案した手法による調整を加えることとした．

表-1 交差検定による調整前，後のジオイド・モデルとジオイド高データとの較差（単位：cm）

	データ数	平均	正の最大	負の最大	標準偏差
調整前	246	0.1	8.7	-10.9	3.0
調整後	246	0.1	8.9	-7.8	2.9

This document is provided by JAXA.

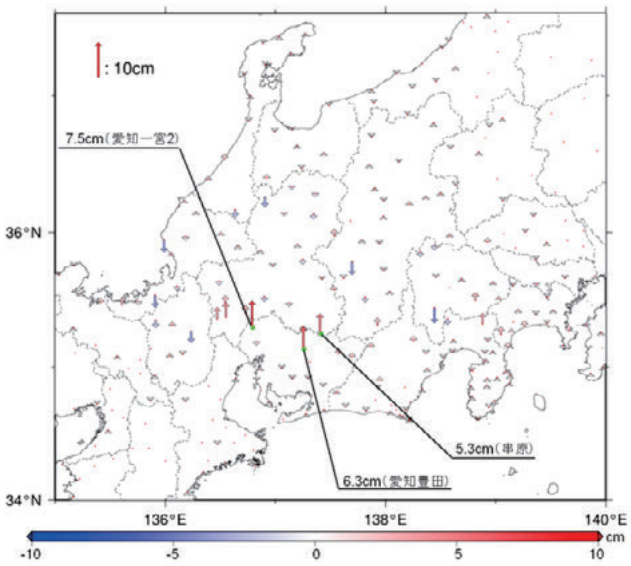


図-3 楕円体高の調整前と調整後のジオイド高データとジオイド・モデルの較差（絶対値）の差

2.3 ジオイド高データの整備

ジオイド・モデルとしては，ジオイド高データ，すなわち標高成果と楕円体高成果に適合すべく構築する．そのため，モデル構築に用いるジオイド高データには，可能な限り内部整合性が高いものを整備することが求められる．

2.3.1 ジオイド・モデル構築に使用するジオイド高データ

ジオイド高データは，各観測点において GNSS 測量による楕円体高成果から，水準測量による標高成果を差し引くことで得られる．構築すべきジオイド・モデルは，GNSS 測量から得られる楕円体高成果から換算される標高値が，水準測量による標高成果と整合する結果を与えられるものである．そこで，ジオイド高データは，現在の楕円体高及び標高の測量成果を用いた．

今回用いたジオイド高データは，電子基準点，水準点等及び験潮場附設 GNSS 連続観測局（P 点）で得られたデータからなる．その分布を図-4 に示す．

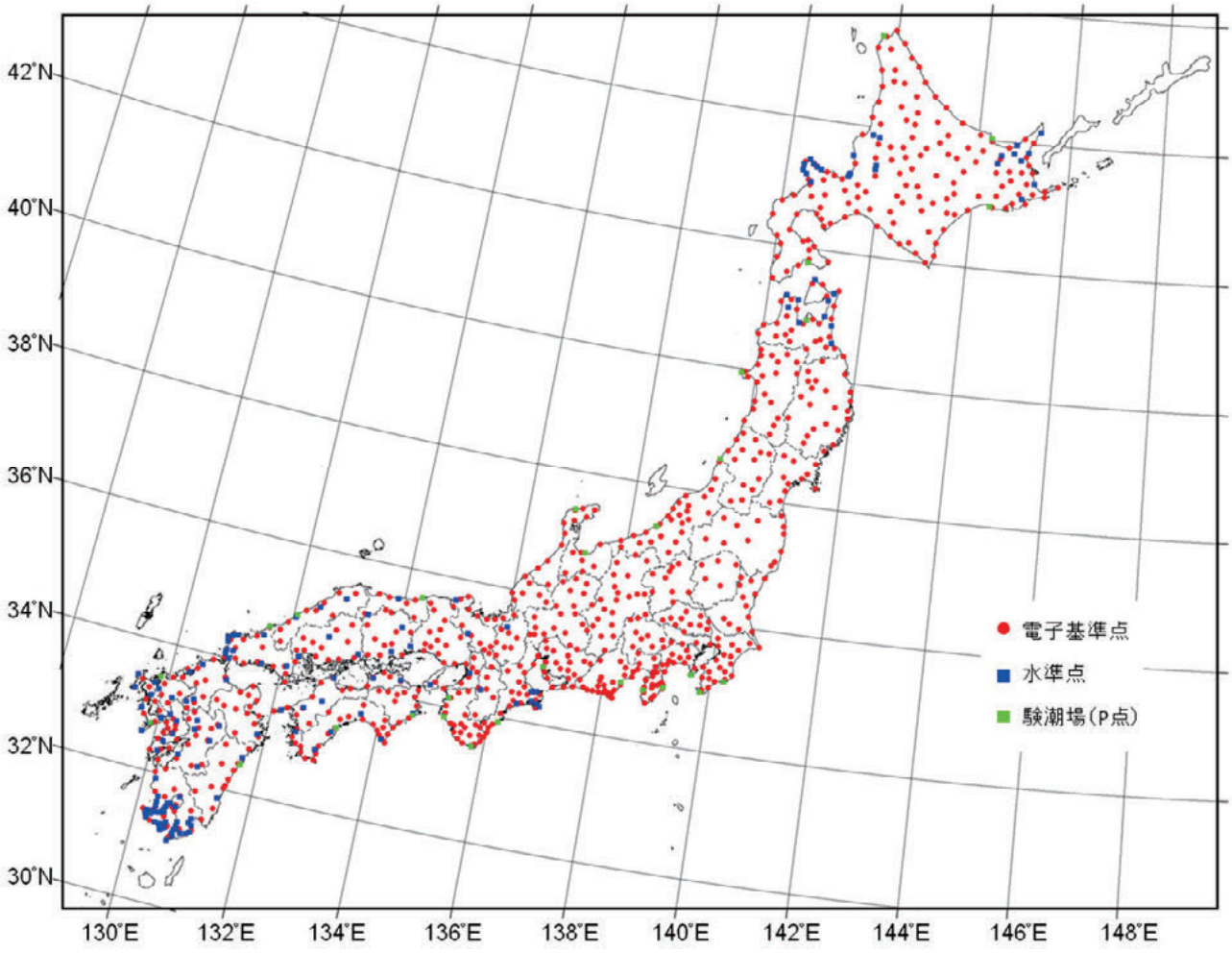


図-4 「日本のジオイド 2011」の構築に使用するジオイド高データの分布

This document is provided by JAXA.

1) 電子基準点のジオイド高データ

電子基準点のジオイド高データには，北海道から九州地方までの地域（一部島しょ部を除く）に分布する 786 点を用いた（図-4）.

国家基準点の測量成果は国土地理院の基準点成果等閲覧サービス（http://sokuseikagis1.gsi.go.jp/）において公開されており，対象とする電子基準点のジオイド高データの算出には，このサービスにおいて平成 26 年 4 月 1 日時点で公開されている楕円体高成果及び水準測量の標高成果を用いた．なお，電子基準点本点（アンテナ底面）のジオイド高を求めるため必要な同位置の標高成果を，水準測量による電子基準点付属標の標高成果と，トータルステーションで測定した付属標からアンテナレドーム・ネジまでの比高，及びレドーム・ネジからアンテナ底面までのレドーム内比高を足し合わすことで求めた.

2) 水準点等のジオイド高データ

全国的に均質なジオイド･モデルを構築するには，全国の陸域で均等に配置されたジオイド高データが必要となる．「日本のジオイド 2000」の構築以後，重力ジオイド・モデル構築に用いられた重力データの空間的密度の不足，海上重力データの精度の不確かさの影響によって「日本のジオイド 2000」の精度不良が懸念される地域を中心とする，電子基準点だけではジオイド高データの空間密度が不十分と考えられる地域で，水準点等において GNSS/水準法による測量によって，全国 156 点のジオイド高データを取得した（図-4）．これらのデータを今回のモデル構築に用いることとした.

これらの水準点等の楕円体高では，周囲の電子基準点との間で GNSS 測量を行い，当該電子基準点の成果を固定した網平均計算に，セミ・ダイナミック補正を適用することで測地成果 2011 に適合する成果を算出してモデル構築に用いた.

3) 験潮場のジオイド高データ

日本の沿岸には，海岸線を網羅する配置で潮位観測施設が設置されている．そのうち，国土地理院及び気象庁の験潮場（気象庁管轄のものは「検潮所」）45 点には，国土地理院が GNSS 連続観測点（P 点）を併設して GNSS 連続観測を行っている．これらの験潮場には，近傍の水準点から付属金属標へ水準測量が行われ，また，付属金属標と P 点のアンテナ架台上面との比高測定も実施され，標高値が得られている．そこで，電子基準点では十分な入力データの密度が得られない地域の空間密度を補うことを目的として，29 点の P 点について，電子基準点成果の計算手法にならい，周囲の電子基準点成果と整合する楕円体高を算出した（森下ほか，2013）（図-4）.

2.3.2 ジオイド高データにおける異常値の除去

今回のジオイド・モデルの構築では，GNSS 測量が 3 級水準測量に相当する標高決定の精度を持つことを達成すべき目標としている．モデル構築の過程において，現在の測地成果に準拠したジオイド高データと最終的なモデルから得られるジオイド高の較差が小さいほど，GNSS 測量による標高決定への適用において，周囲と整合した標高を与えることができる．重力ジオイド・モデルのジオイド高データへの適合処理において，データ点におけるジオイド高較差（再現誤差）が近傍点に比べて異常に大きくずれている点がある場合，そのデータは構築されるモデルの品質に悪影響を及ぼすだけでなく，GNSS 測量による 3 級水準測量に相当する標高決定への適用において，周辺にある基準点の測量成果との間で不整合を生じることになる．そこで、モデルの目標精度を考慮して，ジオイド高較差の異常値を判断する閾値を±8cm とし，第 3 章で述べるモデル構築過程において閾値よりも絶対値が大きな較差を生じたジオイド高データを異常値と判定してモデル構築に用いないこととした.

2.3.1 で準備されたジオイド高データについて，上記の手法を適用し，異常値の判定を行った．その結果，3 点の電子基準点「嬬恋」,「上九一色」,「上士幌 A」が異常値と判定され，モデルから除外されることとなった（図-5）. これらの点のジオイド較差は，閾値よりも絶対値が大きいことに加え，周囲の点における較差と比べて特に大きく乖離があることが特徴である．除外した 3 点について、電子基準点の付属標からアンテナ底面までの比高を再度測定したところ、前回の観測と 5〜9 cm 程度のずれが見られ，今回の観測値を用いるとモデルとの整合性が向上することから，前回観測が誤っており，標高成果が異常であったと判断して電子基準点本点の水準測量による標高成果の停止措置を行った. これらの措置は，当該点を使用して GNSS 測量による 3 級水準測量に相当する標高の決定が行われることで整合性の低い測量が実施されることを防ぐために必要となる.

This document is provided by JAXA.

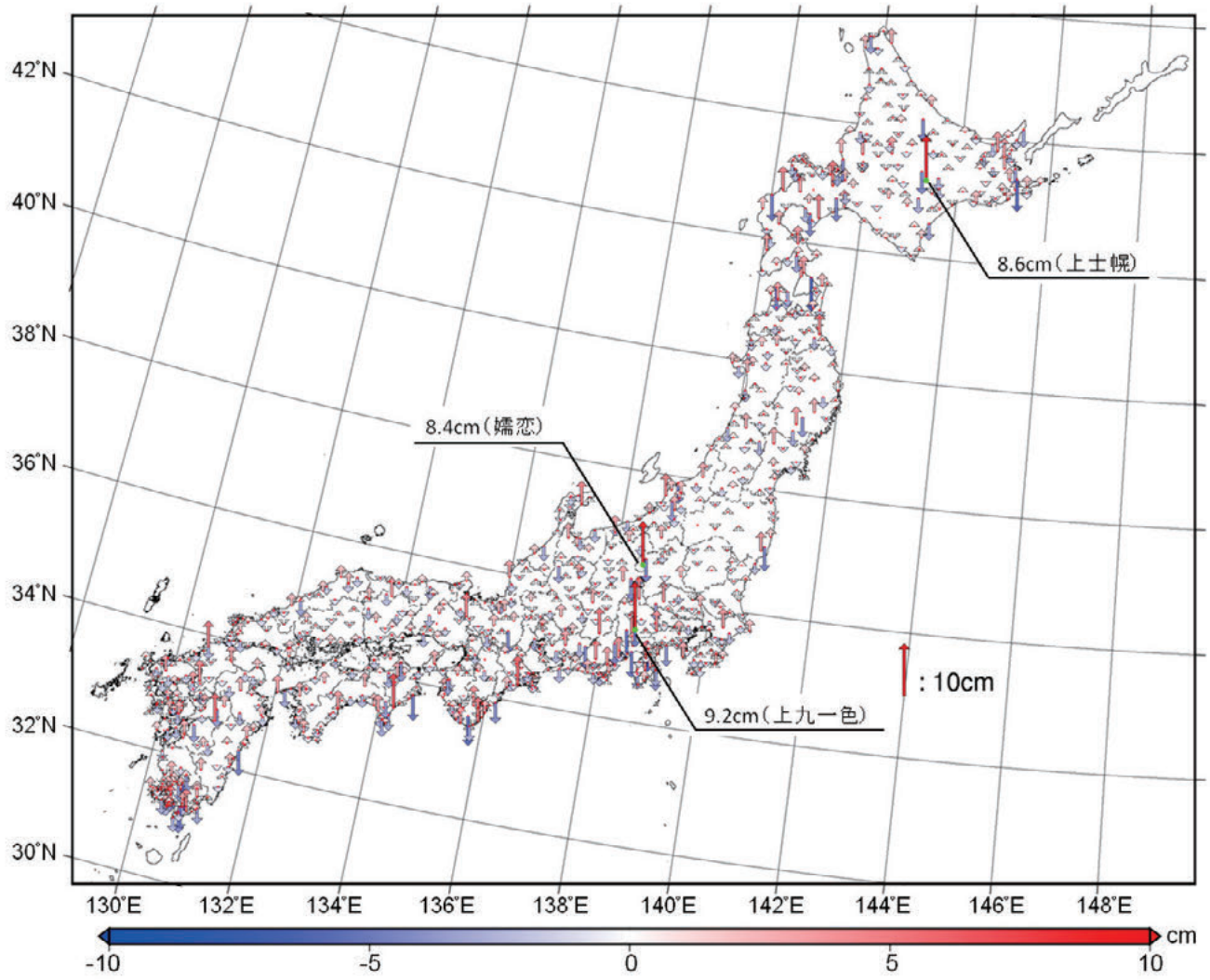


図-5 ジオイド高データとジオイド・モデルとのジオイド高の差

3. 全国のジオイド・モデルの構築

本章では，重力ジオイド・モデル JGEOID2008 を基盤とし，2 章で整備されたジオイド高データに適合させる方法を用いる，一部離島及び沖縄島を除く全国のジオイド・モデルの構築について述べる．

3.1 モデル構築の方法

構築されるべきジオイド・モデルは，測量に用いるという目的からすると，ジオイド高データとして与えられる，測量成果に整合したものであることが必須である．2011 年に行われた電子基準点の成果改定では，東日本の全域についてのみ改定が行われ，それ以外の地域では成果は改定されていないため，両地域における楕円体高の間で準拠する元期の違い，地震に伴う地殻変動等の累積といった，地域的な不整合が生じている可能性があった．しかし，前章の処理によってその問題を解消したことから，全国のジオイド・モデルの構築にあたっては，得られたジオイド高データに対して重力ジオイド・モデルを適合させる処理において，均質等方的な補正手法を用いることができる．そこで，全国のジオイド高データと重力ジオイド・モデルを一括して処理することによって混合モデルを構築することとし，基本的な方針と手法には，すでに構築を完了した西日本地域（兒玉ほか，2013）で用いたものを踏襲することとした（図-6）．まず，基盤となる重力ジオイド・モデル JGEOID2008 と前章で整備したジオイド高データの間でジオイド較差を求め，その長波長成分の系統差を傾斜平面として推定する．次に，推定された傾斜平面成分を除去したジオイド較差の残差を計算し，この較差の残差に対して，最小自乗コロケーション（LSC）法によって較差残差を補正する格子モデルを作成する．この格子モデルを予め除去した傾斜平面成分と合わせて JGEOID2008 に加えることで全国のジオイド高データと重力ジオイド・モデルを適合させ，最終的なジオイド・モデルを構築した．

This document is provided by JAXA.

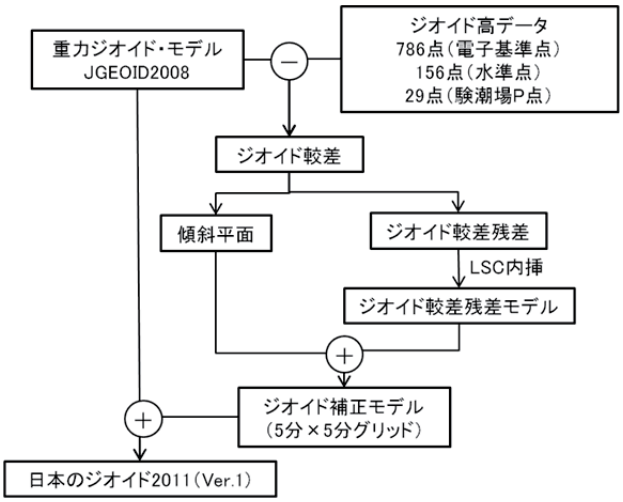


図-6 「日本のジオイド 2011」(Ver.1)（沖縄島を除く）を構築する処理の概念図

「日本のジオイド 2000」の構築では，ジオイド較差について長波長の系統誤差を傾斜平面として推定，除去する処理は行われていない．それは，構築に使用された重力ジオイド・モデル「JGEOID2000」には，重力データの局所的な不足などによる中波長の系統誤差が含まれており，傾斜平面で表現される長波長の誤差の影響が相対的に小さかったためである．

一方，重力ジオイド・モデル「JGEOID2008」ではこの中波長の系統誤差が大きく改善され，また，2.2 における楕円体高の調整により，電子基準点でのジオイド高データは内部整合性が高められ，空間分布に均質性の向上が進められた（兒玉ほか，2013）．これにより，ジオイド高データに基づく，重力ジオイド・モデルの補正で，より細かなモデル推定が可能となり，その場合，傾斜平面で表現される長波長の系統誤差の推定と，それからの残差に対する，分解能を向上させた補正モデル推定が有効な手法と考えられる．そして，内部整合性の向上により，ジオイド補正モデルの作成において，入力データに等方均質の性質を仮定する LSC 法を適用できる．

このようにして策定した戦略に従い，補正モデルに関する具体的な構築方法を考える．始めに，JGEOID2008 と全国のジオイド高データのジオイド高の差を取ると，図-7（左）のような分布を示す．図-7（左）より，日本列島の南西から北西方向に向かってジオイド較差は徐々に減少する傾向を持つ．ジオイド較差の長波長成分について，傾斜平面モデルで最小自乗法による適合を行うと，方位角が 27.26° で最大傾斜率が 0.1ppm と推定され，この傾斜平面からのジオイド較差の残差を求めると，図-7（右）のような分布を示す．重力ジオイド・モデルの構築において十分な重力データがない知床半島においては局所的に系統的な負値の残差がみられ，平面回帰により，負の最大較差は-36.3cm から-47.3cm へと増大しているが，正の最大較差は 49cm から 23.5cm に減少しており，また，知床半島を除けば，ジオイド較差が大きく減少するとともに，局所的に系統的な地区はみられない．

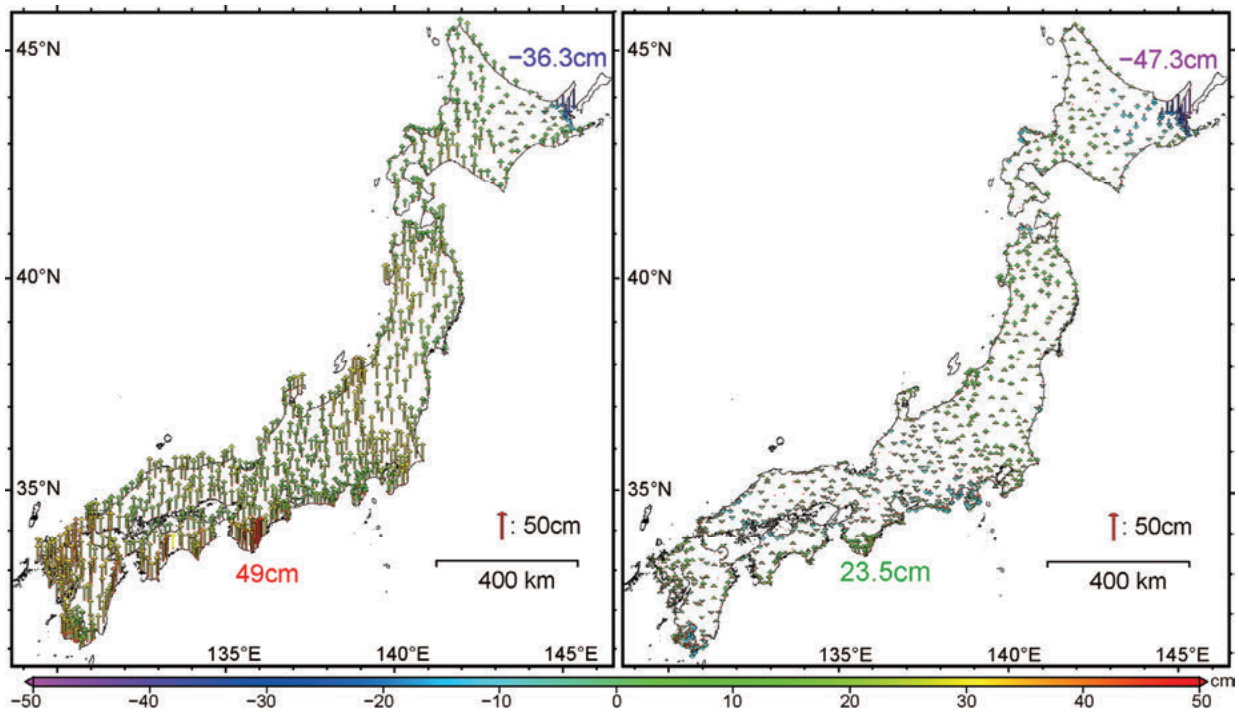


図-7 （左）JGEOID2008 とジオイド高データのジオイド較差，（右）JGEOID2008 とジオイド高データのジオイド較差の残差

This document is provided by JAXA.

次に，ランダムに分布したジオイド高データのジオイド較差の残差に基づき，LSC 法により，ジオイド較差残差の緯度，経度とも 5 分間隔の正規格子モデルを作成する．まず，残差について，同一点同士を含め，全ての 2 点の組み合わせからなる基線をとり，その基線長を角距離 5 分ごとの区間に分けて共分散を算出し，経験共分散を求める（例えば，角距離 0 分の区間は角距離 0 以上 2.5 分未満，角距離 5 分の区間は角距離 2.5 分以上 7.5 分未満となる）．この経験共分散に基づき，それに適合する解析的共分散関数を決定し，LSC 法に用いる．

こうして得られた経験共分散を図-8 に示す．その特徴から，求めるべき解析的共分散関数を良く表現する関数形として，米国における混合ジオイド・モデル構築に使用された（Roman et al.，2010）の指数関数の和による次式の表現を採用した．

$$C(\Psi) = \sum_{i=1}^{n} k_i \cdot \exp\left\{-\left(\frac{\Psi}{\Psi_i}\right)^2\right\}$$

ここでΨは基線の角距離（分），Ψ_iは i 番目の指数関数の相関長を示す角距離（分），k_iはその指数関数の振幅である．今回モデル化に用いる残差は日本列島陸域において細かな空間密度で均質的に分布しているので，角距離 90 分程度以下の区間について経験共分散に適合する関数としてパラメータを決定する．その結果，二つの相関長をもつ関数が推定され，その値は，相関長 26 分で振幅が 0.049m^2 と相関長 47 分で振幅が 0.047m^2 であった．この解析的共分散関数は図-8 に赤線で示されるとおり，角距離 90 分程度以下の区間の区間において経験共分散を非常に良く再現していることが分かる．

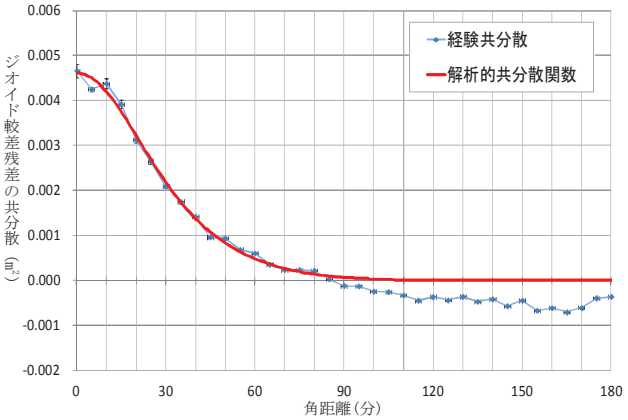


図-8 「日本のジオイド 2011」の構築に用いられるジオイド較差残差の経験共分散と解析的共分散関数

決定した解析的共分散を用いて，ジオイド較差残差を入力値，5 分間隔の正規格子位置における残差を推定すべき量として LSC 法によるモデル推定を行う．この処理は行列表現を用いて次式で表される（例えば，国土地理院，2003）．

$$s = \boldsymbol{C_{sl}}(\boldsymbol{C_{ll}} + \boldsymbol{D_{ll}})^{-1}\boldsymbol{l}$$
$$l_i = N_i - N_{(JGEOID2008)i} - dN_{(plane)i}$$
$$m_s{}^2 = C_0 - \boldsymbol{C_{sl}}(\boldsymbol{C_{ll}} + \boldsymbol{D_{ll}})^{-1}\boldsymbol{C_{ls}}$$

ここで，sは推定すべき残差のベクトル，$\boldsymbol{l}$はジオイド較差残差の観測値ベクトル，$\boldsymbol{N_i}$は i 番目のジオイド高データ，$\boldsymbol{N_{(JGEOID2008)}}$は JGEOID2008 によるジオイド高，$\boldsymbol{dN_{(plane)}}$はジオイド較差に最適適合させた傾斜平面の値である．$\boldsymbol{C_{ll}}$は観測値の共分散行列，$\boldsymbol{C_{sl}}$及び$\boldsymbol{C_{ls}}$は推定値と各観測値間の角距離における共分散行列であり，いずれも点間の角距離に応じて解析的共分散関数から与えられる．C_0は解析的共分散関数の分散であり，観測値の分散と等しい．m_sは推定値の二乗平均平方根（RMS）であり，LSC 法により推定されるモデル値の誤差である．また，D_{ll}は$\boldsymbol{l}$の分散共分散行列であり，この方程式系を安定させる正則化パラメータとして決定しなければならない．

入力値である残差が互いに無相関であると，D_{ll}はその分散を対角成分にもつ対角行列になる．今回用いる残差は互いに無相関かつ均質であるとみなし，D_{ll}の対角成分が全て同じ分散を持つと考える．D_{ll}による正則化は，用いられる分散が大きいほど，入力された残差の空間分布に対し，推定値の変化を抑制する，平滑化を強くかける効果となり，入力値の再現性を低下させるおそれがある．一方，分散が小さすぎると，入力された残差の再現性を高くするが，データの空間配置が疎である部分や細かな変化が大きな場合に，推定値において実際のジオイド較差残差と乖離した過剰な変化を生じる可能性がある．そこで，分散として様々な値を用いた計算を試行錯誤的に行い，入力残差の再現性等を調べて最適なD_{ll}を推定する．

3.2　ジオイド較差補正モデルの作成

前節で述べたように，「日本のジオイド 2011」の構築では，本土 4 島に分布する 971 点のジオイド高データと JGEOID2008 のジオイド高の間にあるジオイド較差の残差を補正するモデルの作成が必要である．補正モデルの作成には LSC 法を用いるが，その際に解析的共分散関数と方程式系を正則化させるD_{ll}を決定しなければならない．

はじめに，解析的共分散関数を決定する．ジオイド較差残差の経験共分散として，一部離島を除く全国，及び成果改定の影響を踏まえて，北海道，東日

This document is provided by JAXA.

本，西日本の地域別に求める．ここで，東日本とは青森から 2.2 で述べた楕円体高の調整領域まで，西日本は平成 25 年度のモデル「日本のジオイド 2011+2000」構築に用いられたジオイド高データの分布域と同じ，楕円体高調整領域の隣接県から九州までである．使用したジオイド高データは，北海道 170 点，東日本 308 点，西日本 493 点に分かれ，その合計が全国の 971 点である．

得られた経験共分散を図-9 に示す．角距離 5 分の区間（約 4.6km～約 13.9km）に含まれる基線の個数は全国 582 個，北海道 41 個，東日本 84 個，西日本 455 個，また，角距離 10 分の区間（約 13.9km～約 23.1km）では全国 1319 個，北海道 148 個，東日本 290 個，西日本 878 個となり，角距離 5 分の基線数と北海道の角距離 10 分のデータ数が必ずしも十分ではない．北海道についての経験共分散が滑らかでなく，大きな減衰を示しているが，それは知床半島周辺に局所的にみられる大きな残差の分布によると考えられ，均質等方的な共分散を示していない可能性がある．一方，全国のものに比べ，東日本と西日本の経験共分散は，全体的に振幅が小さいが，類似した減衰を示している．

全国について経験共分散に適合する解析的共分散関数を求め，得られたパラメータを表-2 に示す．参考として，平成 25 年に公開した西日本のジオイド・モデル構築で求められた解析的共分散関数のパラメータも合わせて示す．後者の共分散は一つの指数関数で表せ，減衰がやや早いのに対し，今回得られた全国の共分散では，解析的共分散関数を適切に表現するために二つの指数関数が必要であった．なお，3.3.1 に詳述するが，地域別の経験共分散に適合する解析的共分散を求め，それを用いて LSC 法により地域別の残差補正モデルを決定し，全国を一括して求めた補正モデルと比較したが，入力データの再現性において有意な優劣が認められなかったため，最終的に，東日本地域のジオイド構築では，全国を一括した補正モデルの作成結果を採用することとした．

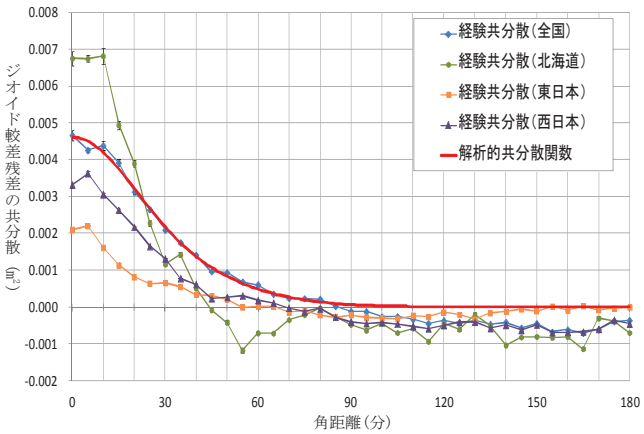


図-9 地域別の経験共分散と決定した解析的共分散関数

表-2 解析的共分散関数のパラメータ

全国	相関長(分)	26	47
	振幅(m^2)	0.049	0.047
(参考) 西日本	相関長(分)	30	
	振幅(m^2)	0.057	

つぎに，求められた解析的共分散関数を用いる LSC 法による補正モデル作成において，最適なD_{ll}を決定する．前節で述べたように，正則行列として同じ分散値を持つ対角行列を仮定するので，ここでは，求めるべき分散値の二乗根について，試行錯誤的に 1cm から 0.5cm 毎の値を適用し，入力値となるジオイド高データの位置において，LSC 法によって推定されるジオイド較差残差の再現誤差を評価する．ここでは，全てのデータを用いた場合の再現誤差（内部評価）と LOOCV による手法を評価に用いる．得られた結果の統計量（平均，標準偏差，正の最大，負の最大）を表-3 に，また，参考として，「日本のジオイド 2011+2000」における西日本地域の結果を表-4 に示す．

D_{ll}は，用いる分散値が大きいほど強い平滑化（空間的に滑らかなモデル化）を与え，入力データの細かな起伏の再現を弱めるが，分散値が小さすぎるとモデルが十分に滑らかにならず，空間的に起伏の大きな入力データ点の近傍で不適切に大きい，異常な振動をもたらす危険性を持つ．そのため，分散値の決定においては，内部評価と LOOCV の評価において再現誤差の標準偏差が最小であるとともに，補正モデルの空間分布に異常な振動を生じないものを選ぶように留意した．

表-3 を見ると，内部評価では，当然，小さな分散値ほど標準偏差と最大較差の絶対値が小さくなっている．一方，LOOCV では分散値の二乗根が 2.0 cm, 2.5cm の場合に標準偏差が最小となり，最大較差の絶対値は 2.0 cm の方がより小さい．また，2.0 cm を用いて作成した補正モデルの空間分布を調べたところ，異常な振動は特に認められなかった．これらに基づき，2.0 cm を最適な分散値の二乗根と判断して採用した．なお，「日本のジオイド 2011+2000」を構築した際には，同様の評価に基づき，2.5cm を採用している．

こうして求めた解析的共分散関数とD_{ll}を用いて作成されたジオイド較差モデルは図-10 のとおりである．図-10 を見ると，図-7(右)に示した JGEOID2008 とジオイド高データのジオイド較差をよく再現していることが分かる．

This document is provided by JAXA.

表-3 全国のジオイド高データについて，異なる分散値を用いた場合のジオイド高の再現誤差の統計量（データ点数:971，単位 cm）

	内部評価				LOOCV			
$\sqrt{D_{ll}}$	平均	標準偏差	正の最大	負の最大	平均	標準偏差	正の最大	負の最大
1.0	0.0	1.62	6.1	-5.6	0.0	2.91	9.6	-12.2
1.5	0.0	1.74	6.5	-6.1	0.0	2.85	9.5	-12.1
2.0	0.0	1.84	6.7	-6.2	0.0	2.82	9.7	-11.7
2.5	0.0	1.92	7.2	-6.6	0.0	2.82	9.8	-12
3.0	0.0	2.00	7.6	-7.1	0.0	2.83	9.9	-13.7

表-4 「日本のジオイド 2011+2000」における西日本地域のジオイド高データについて，異なる分散値を用いた場合のジオイド高の再現誤差の統計量（データ点数:488，単位 cm）

	内部評価				LOOCV			
$\sqrt{D_{ll}}$	平均	標準偏差	正の最大	負の最大	平均	標準偏差	正の最大	負の最大
1.0	0.0	1.76	5	-5.4	0.0	2.72	9.6	-9.4
1.5	0.0	1.85	5.4	-5.7	0.0	2.67	9.4	-8.5
2.0	0.0	1.92	5.7	-5.9	0.0	2.64	9.2	-7.7
2.5	0.0	1.98	6	-6.2	0.0	2.62	8.9	-7.5
3.0	0.0	2.03	6.2	-6.4	0.0	2.62	8.7	-7.4
3.5	0.0	2.08	6.5	-6.6	0.0	2.62	8.5	-7.4
4.0	0.0	2.12	6.9	-6.8	0.0	2.64	8.4	-7.6

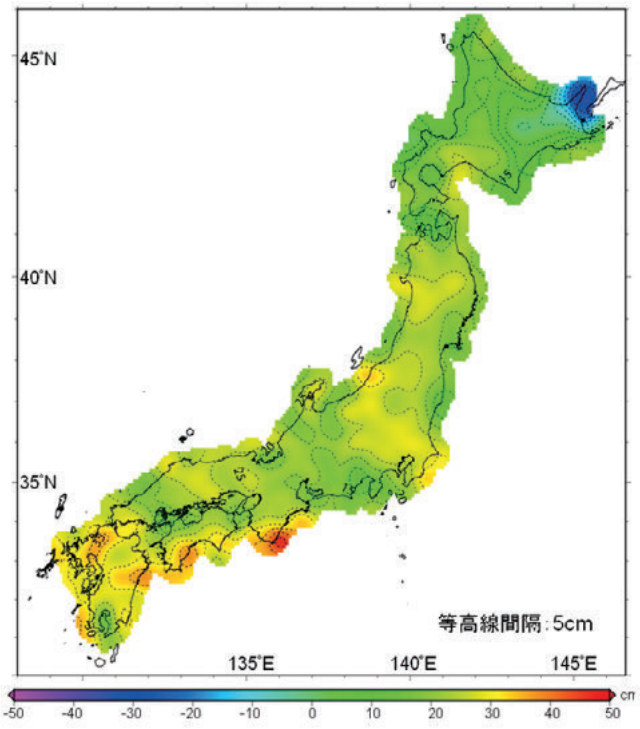


図-10 全国のジオイド較差モデル

3.3 日本のジオイド 2011 の構築

3.1 で述べた方法により，一部の離島を除く全国について，JGEOID2008 に対し，ジオイド較差の平面回帰成分と 3.2 で得られたジオイド較差の残差モデルから作成される補正モデルを加え，全国のモデル「日本のジオイド 2011」（Ver. 1）を構築した．図-11 は，適用範囲となる赤枠内が今回構築した新しいジオイド・モデル，それ以外の部分は従来の「日本のジオイド 2000」を用いた全国のジオイド・モデルを陰影段彩表現したものである．なお，沖縄島については，次章で述べる個別の構築の結果を用いた．

3.3.1 地域別に作成したモデルとの比較

前節で述べたように，ジオイド高較差の残差に関する経験共分散には，地域による差違がみられる．そこで，前節までに述べた全国モデルに対し，北海道，東日本，西日本と地域別に分け，それぞれの経験共分散に適合する解析的共分散関数と正則化パラメータを求めて地域別にジオイド補正モデルを作成し，結果を比較する．

地域別に推定された解析的共分散関数のパラメータ（指数関数の相関長/振幅）は以下のとおりである：北海道は 26 分/0.082m^2，東日本は 15 分/0.036m^2 と 42 分/0.028m^2，西日本は 31 分/0.0575m^2．また，正則化行列の分散値の二乗根と，それらを用いて作成された補正モデルによるジオイド高データの再現性評価の結果は，表-5 に示すとおりである．さらに，比較のため，全国モデルについて，地域別のジオイド高データに同様の評価を行った結果を表-6 に示す．

北海道の地域モデルは，全国モデルに比べると，内部評価では優れているが，LOOCV では劣っている．この結果は，北海道におけるジオイド高データの空間分布が他に比べて疎であり，ジオイド起伏の短波長成分の再現性において，全国モデルの方が地域モデルに比べて優れていることを意味する．この結果からは，北海道のみでモデルを作成するには，データの空間分布が十分でない，という判断もできるため，北海道については，全国モデルを採用する．

東日本の地域モデルは，全国モデルに比べると，内部評価と LOOCV での最大較差で優れているが，LOOCV で評価した際の標準偏差が劣っている．したがって，全国モデルは，一部において較差がやや大きいものの，全体としては再現性が優れている．

西日本については，内部評価で全国モデルの方が優位だが，LOOCV では地域モデルと全国モデルに実質的な差がない．したがって，中国，四国及び九州地方について既に公開ずみである「日本のジオイド 2011+2000」を組み入れた全国モデルを構築しても，実質的な差を生じない．以上から，東日本地域について，全国一括に構築したモデルを採用する．

This document is provided by JAXA.

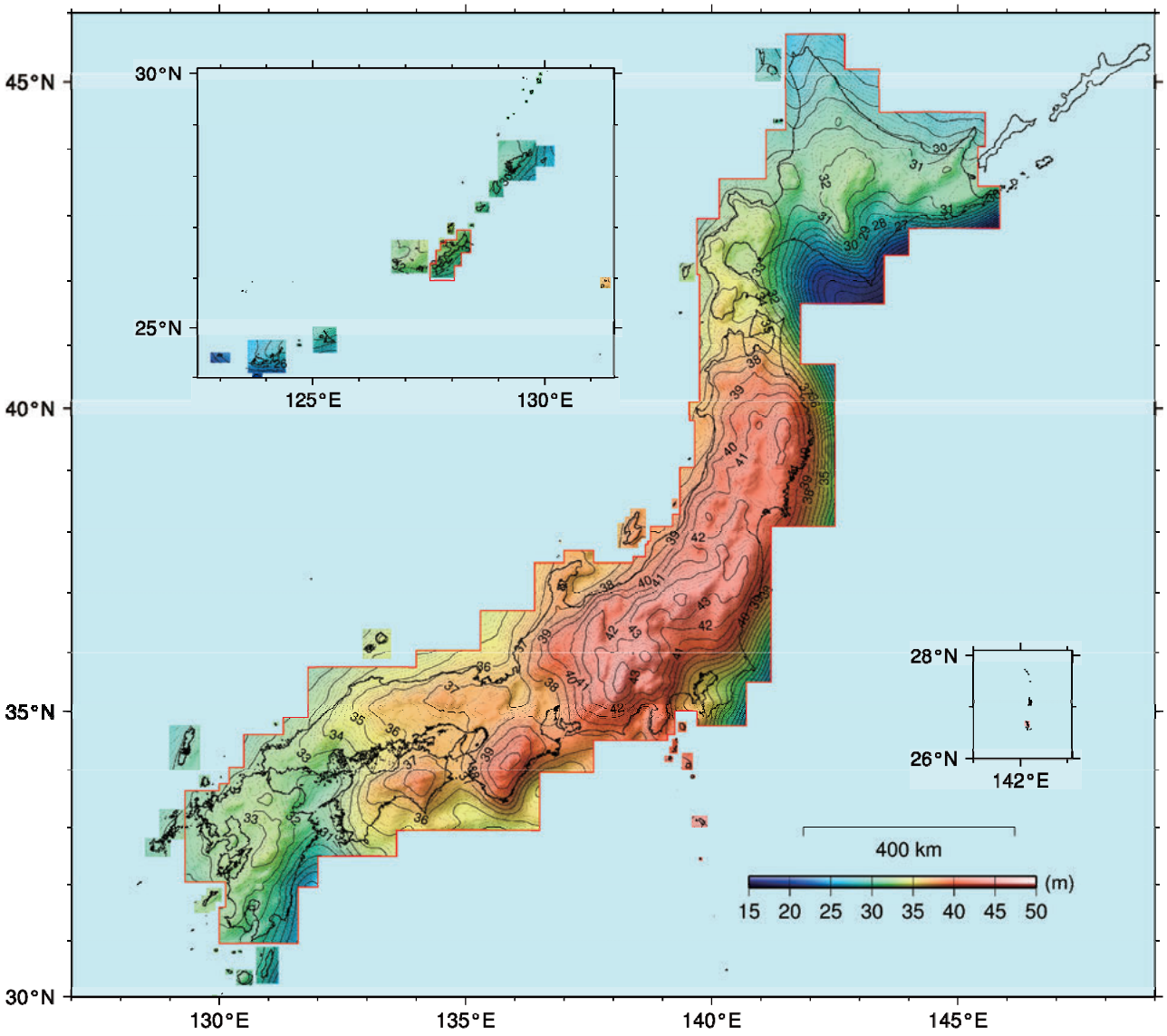


図-11 「日本のジオイド 2011」(Ver. 1) の陰影段彩表現 (等高線の間隔は 0.2m, 適用 : 赤枠内「日本のジオイド 2011」, その他の地域「日本のジオイド 2000」Ver.5)

表-5 地域別モデルについて決定された正則化行列の分散値の二乗根と, ジオイド高データの再現誤差の統計量. (上) 内部評価, (下) LOOCV 法による.

内部評価 (単位 cm)

地域 モデル	$\sqrt{D_{ll}}$	平均	標準 偏差	正の 最大	負の 最大
北海道	2.5	0.0	1.70	4.4	-5.7
東日本	2.5	0.0	1.42	4.2	-5.2
西日本	3.0	0.0	2.07	8.0	-6.5

LOOCV (単位 cm)

地域 モデル	$\sqrt{D_{ll}}$	平均	標準 偏差	正の 最大	負の 最大
北海道	2.5	0.0	3.46	8.4	-12.6
東日本	2.5	0.0	2.69	7.3	-8.9
西日本	3.0	0.0	2.66	10.1	-7.8

表-6 全国モデルにおける地域別のジオイド高データの再現誤差の統計量. (上) 内部評価, (下) LOOCV 法による.

内部評価 (単位 cm)

地域	平均	標準 偏差	正の 最大	負の 最大
北海道	0.0	1.87	4.8	-6.0
東日本	0.0	1.72	4.9	-6.2
西日本	0.0	1.91	6.7	-5.7

LOOCV (単位 cm)

地域	平均	標準 偏差	正の 最大	負の 最大
北海道	0.0	3.38	8.3	-11.7
東日本	0.0	2.63	7.4	-10.6
西日本	0.0	2.67	9.7	-7.8

This document is provided by JAXA.

3.3.2 全国モデルの精度評価

全国モデルについて，モデル構築に使用されたジオイド高データ全 971 点に基づき，ジオイド高の再現性を評価する．まず，入力値の再現性である内部精度を調べた．再現誤差の統計量は，平均 0.0 cm，標準偏差 1.8 cm であり，6.7 cm から - 6.2 cm の範囲に分布した（表-7）．つまり，約 2 cm の標準偏差でジオイド高を再現している．

つぎに，擬似的に独立したデータによる評価を二通りの方法で行う．始めに，ジオイド高データを空間分布ができるだけ均等となる二つのグループに分け，一方のグループをジオイド・モデル構築に使用し，他方のグループを用いてジオイド・モデルの誤差を算出する，2分割交差検定を用いた．グループの分割には，日本列島の細長い形状を考慮し，経度1度幅の帯域ごとに緯度の昇順に並べ替え，その順序の偶数群、奇数群に分ける方法をとった．ジオイド高較差の統計量は，平均値がいずれも0.0cm，標準偏差はそれぞれ2.3 cmと2.4 cmとなった（表-7）．いずれにおいても，内部精度の評価に比べ標準偏差が増大したのは，モデル作成に使用するジオイド高データの半減に伴ってデータの空間密度が減少し，ジオイド起伏の短波長成分の再現性が劣化したことが考えられる．

さらに，LOOCV 法により，ジオイド高データ 971 点全点で評価した．その結果，較差の統計量は，平均 0.0 cm，標準偏差が 2.8 cm であった（表-7）．内部精度の評価に比べ，標準偏差がさらに増大しているが，LOOCV では，評価点のデータだけがモデル作成に使われず，その点近傍における細かなジオイド較差の起伏が，データの除去により一層再現されなくなるため，ジオイド起伏の短波長の再現性が局所的に劣化していることを示唆する．ジオイド・モデルの精度として 2 cm 程度という高い精度を日本列島において求める場合，特に短波長のジオイド高起伏の情報を与えるデータが必要となることを意味している．したがって，全国についてさらに高精度なジオイド・モデルの構築を目指すには，全国を網羅する高精度なジオイド高データを十分な空間密度で確保することが重要である．

2 分割交差検定及び LOOCV は，独立なデータによるジオイド・モデルの評価であるが，最終的なモデル構築に対し，使用する入力データの量と局所的な空間分布を低減するため，ジオイド較差に特に短波長の起伏が含まれている場合には，評価に用いられるジオイド・モデルが最終的なジオイド・モデルに比べ優位に劣化している可能性がある．そのことを考慮すると，それらの検定結果は内部評価の結果と調和的であり，最終的なジオイド・モデルの精度は標準偏差として 2 cm 程度であるとみてよい．したがって，構築された全国のジオイド・モデルは GNSS 測量による標高決定に用いるモデルとして，誤差が 2 cm という目標精度を満たしたジオイド・モデルと言える．

表-7 ジオイド高データと「日本のジオイド 2011」との較差の統計量（単位：cm）

評価手法	内部評価	2 分割交差検定		LOOCV
モデル構築データ	全部	A	B	全部-1
比較データ	全部	B	A	1
比較点数	971	486	484	971
平均(cm)	0.0	0.0	0.0	0.0
標準偏差(cm)	1.8	2.3	2.4	2.8
正の最大(cm)	6.7	9.8	10.8	9.7
負の最大(cm)	-6.2	-8.4	-11.3	-11.7

3.3.3 「日本のジオイド 2000」との比較

ジオイド・モデルの改定地域（東日本地域）について，「日本のジオイド 2011」構築に使用したジオイド高データを基準として，従来のモデルである「日本のジオイド 2000」と新しいモデル「日本のジオイド 2011」を比較する．ジオイド高較差の空間分布を，前者について図-12（左）に，後者について図-12（右）に示す．「日本のジオイド 2000」では，青森県から福井県・岐阜県・愛知県に及ぶ広範囲で，2011 年の成果改定に伴うジオイド高データとの較差が系統的に現れていた．一方，「日本のジオイド 2011」ではそれらは認められなくなり，「日本のジオイド 2011」が基準点成果に，より正しく整合していることが分かる．また，北海道の知床半島，根室半島，積丹半島及び三重県志摩半島の半島部において較差の有意な低減が見られ，特に，根室半島の「根室 2」では 56.5 cm の較差が 1.3 cm に，知床半島にある水準測量固定点では-50.6 cm の較差が-3.3cm になるなど，大幅に改善している．その他の地区として，日高山脈周辺や若狭湾沿岸部などで較差の低減が見られる．「日本のジオイド 2011」は，全国的に均質で標準偏差 2 cm 程度の精度を有しており，局所的に大きな較差を有している「日本のジオイド 2000」に比べ，基準点成果への整合性が全国的に大幅に改善されていることを示す．

図-13 は東日本地域における「日本のジオイド 2011」と「日本のジオイド 2011+2000」の差，つまり，「日本のジオイド 2011」によるジオイド高の改変量を表している．図-13 において較差の減少が著しい地域で改変量が大きいことがわかる．これらは，

This document is provided by JAXA.

JGEOID2008 における重力ジオイド・モデルの精度改善と，半島部において水準点等で密に取得したジオイド高データの追加による精度向上を示している．

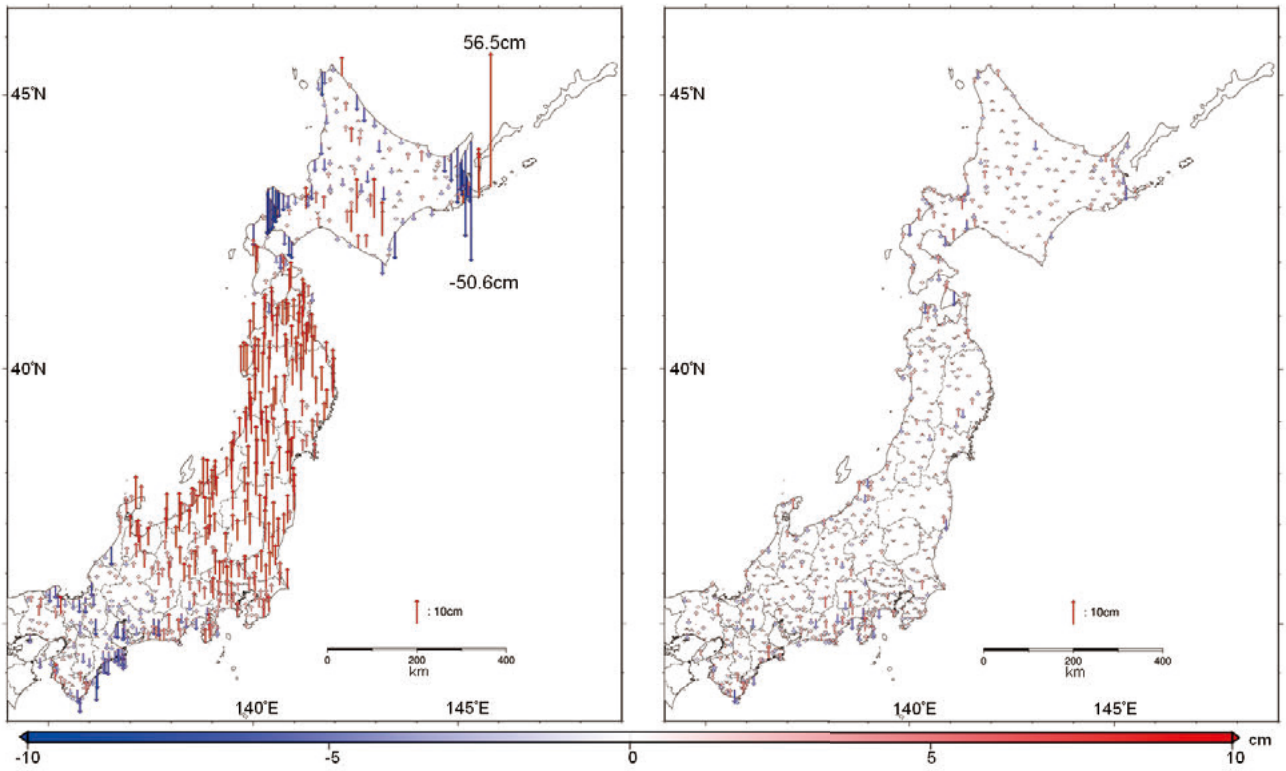


図-12「日本のジオイド 2011」構築に使用したジオイド高データと新・旧のジオイド・モデルのジオイド高の差
（左：日本のジオイド 2000，右：日本のジオイド 2011）

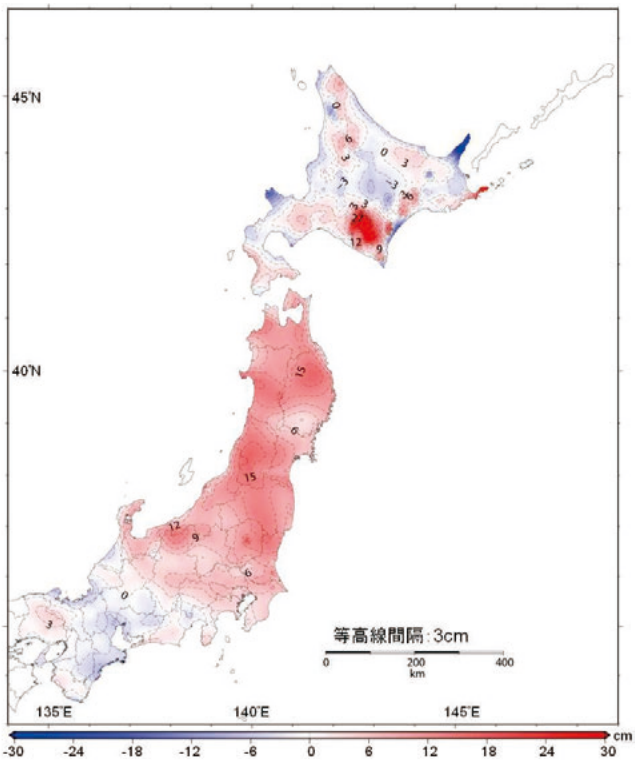


図-13「日本のジオイド 2011」と「日本のジオイド 2000」のジオイド高の差

3.3.4 西日本地域のジオイド・モデルの組み込み

全国の最終的なジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver. 1) は，上述により構築された全国モデルに対し，西日本地域に関しては，平成 25 年度に「日本のジオイド 2011+2000」として更新された西日本地域のジオイド・モデルを組み入れたモデルである．

この最終モデルについて，構築に使用した全 971 点のジオイド高データとジオイド・モデルとの較差は，平均 0 cm，正の最大 8.3 cm，負の最大-6.2 cm，標準偏差 1.9 cm であった．図-14 に，それらの較差の空間分布を示す．正の最大値 8.3 cm と大きくずれているのは電子基準点「東洋」である．この点は，平成 25 年の西日本地域のジオイド・モデル構築にも使用され，そのときのモデルの較差は 4.8 cm であった．今回のモデル構築に際し，同点のジオイド高はレドーム内比高の変更により 3.5 cm 低く改訂された．そのため，使用したジオイド高値は相対的に 3.5 cm 高くなり，同点におけるジオイド・モデルのジオイド較差が 8.3 cm になった．

This document is provided by JAXA.

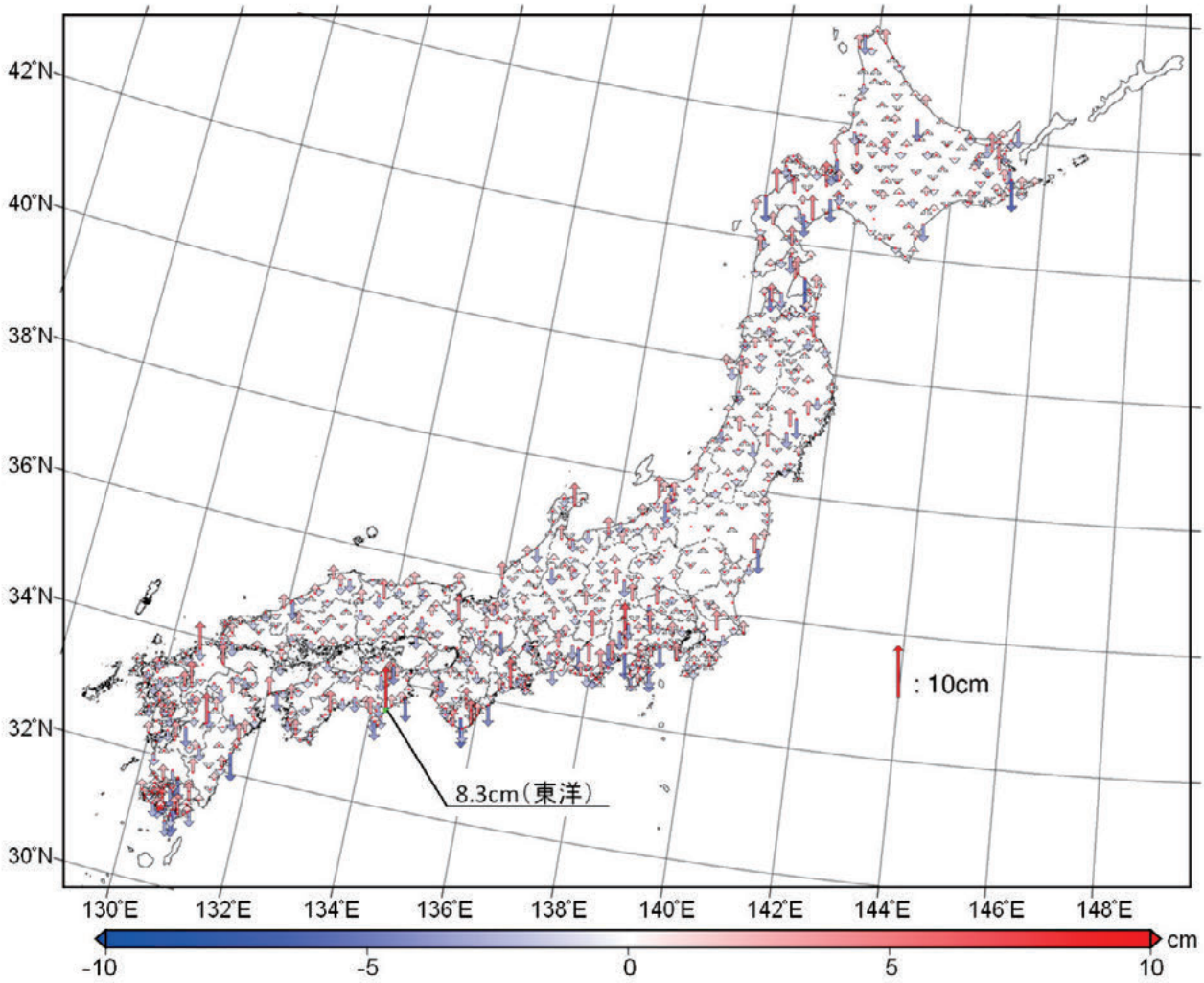


図-14　「日本のジオイド 2011」構築に使用したジオイド高データと「日本のジオイド 2011」のジオイド高の差

図-15 に二つのジオイド・モデル，全国モデルと「日本のジオイド 2011+2000」の差の空間分布を示す．改訂によって，電子基準点「東洋」では較差が増大したものの，それ以外の点ではジオイド高データとジオイド・モデルとの較差は標準偏差 1.9 cm が示すとおりに小さく（図-14），また，組み入れた西日本地域のジオイド・モデルは全国モデルと実質的な差がないうえ（図-15），西日本地域についてジオイド高データを十分に再現している（図-14）．さらに，公表済みの西日本地域のジオイド・モデルは既に当該地域において公共測量等に利用されており，モデルを変更すると実際の測量作業において不要な混乱を生じる可能性がある．そのため，西日本地域においては，平成 25 年度に「日本のジオイド 2011+2000」として更新されたモデルを，今回作成した全国モデルに組み入れ，本土 4 島における最終的な全国モデルとして「日本のジオイド 2011」（Ver. 1）を構築した．

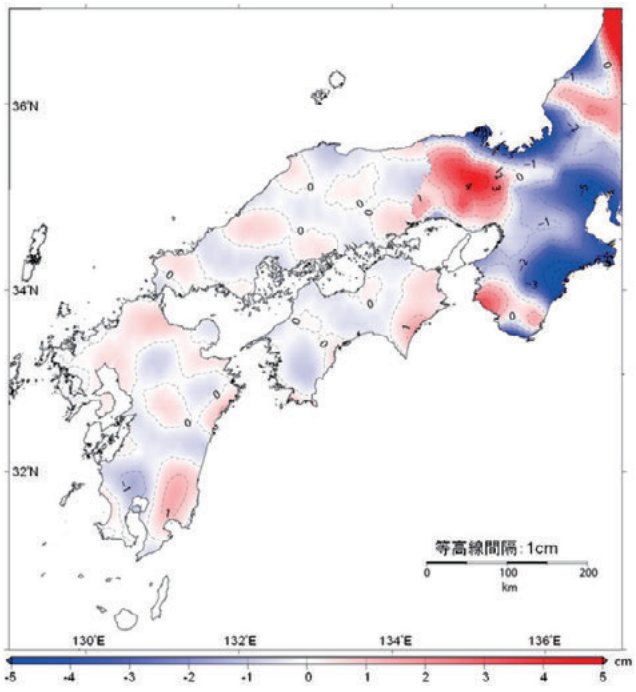


図-15 全国モデルと「日本のジオイド 2011+2000」の差

This document is provided by JAXA.

4. 沖縄島の「日本のジオイド 2011」の構築

本章では，沖縄島とその周辺のジオイド・モデルの構築について述べる．

4.1 構築戦略

沖縄島は本土 4 島から遠く離れ，琉球海溝と沖縄トラフに挟まれた位置にあって細長い形状をしており，ジオイド起伏に中波長での大きな傾斜が想定される．また，重力ジオイド・モデルの構築においては，周囲を全て海域に囲まれているため，周辺海域の重力データの品質がより一層大きな影響をもつことになる．したがって，ジオイド高データに基づいて，LSC 法による重力ジオイド・モデルを補正する手法は，その空間形状から十分なモデル化が困難になることが想定される．そのため，本土 4 島に比べ，より稠密なジオイド高データを収集したうえで，重力ジオイド・モデルについてジオイド較差をより細かく補正する手法を個別に採用することが必要である．

4.1.1 沖縄の「日本のジオイド 2000」における沖縄島のモデル構築の概要

沖縄島では，平成 10 年度にジオイド測量が水準点 21 点で実施されている．それらのデータを用いて，黒石・安藤（2001）が「日本のジオイド 2000」における沖縄島のジオイド・モデルを作成した．そこでは，まず，電子基準点を基準としてジオイド測量による GPS 観測から楕円体高を算出し，その結果と水準測量による正標高からジオイド高データを整備したうえで，それらのジオイド高データに基づき，重力ジオイド・モデル「JGEOID2000」(Kuroishi, 2001) をジオイド高データに適合させるための補正モデルを作成する方法が採られた．

当時，沖縄島内には 7 点の電子基準点があり，3 点（大宜見，宜野座，玉城）は Ashtech 製の GPS 受信機，残りの 4 点（国頭，本部，沖縄石川，知念）では Trimble 製の受信機が使われていたため，電子基準点の楕円体高算出において異機種間バイアスに起因した系統的な楕円体高の誤差が生じている可能性が検討された．そこでは，水準点での楕円体高を算出するにあたり，Trimble 製受信機による電子基準点 4 点を固定して，Ashtech 製受信機による電子基準点 3 点と水準点 21 点の位置について GPS 解析を行う場合と，電子基準点 7 点全てを固定して水準点 21 点の位置について GPS 解析を行う場合の楕円体高が比較された．その結果，電子基準点 4 点を固定した場合に比べ，電子基準点 7 点全点を固定すると，Ashtech 製受信機による電子基準点の楕円体高において，成果値に対する系統差を生じることが確認された．そのため，Trimble 製受信機による電子基準点 4 点のみを固定点とする解析結果が採用された．

つぎに，電子基準点 4 点とジオイド測量点 21 点において得られた 25 点のジオイド高データに基づき，JGEOID2000 のジオイド較差について，テンション付きスプライン補間により格子化したジオイド補正モデルが作成され，JGEOID2000 に付加されたものが沖縄島のジオイド・モデルとして構築された（国土地理院，2003）．

4.2 沖縄島の「日本のジオイド 2011」の構築手法

4.2.1 ジオイド高データ

沖縄島について，下記の合計 38 点をジオイド高データとして使用する．

1) 島内の電子基準点 10 点
2) 平成 10 年度のジオイド測量による水準点 21 点
3) 平成 14 年度の水納島におけるジオイド測量 1 点
4) 平成 19 年度の津堅島・久高島におけるジオイド測量各 3 点

以上のうち，2)と 3)については，当時の解析結果は現在の測地成果 2011 に整合していないため，再解析を行うこととした．また，4)については，沖縄島と異なる標高原点を持っており，その取り扱いに注意が必要である．

以下において，2)〜4)のジオイド高データの整備について報告する．

(1) 平成 10 年度のジオイド測量による水準点 21 点

平成 10 年度に行われた水準点 21 点でのジオイド測量については，「日本のジオイド 2000」の構築に用意されたジオイド高データを，今回のモデル構築にはそのまま使用できない．それは，平成 16 年に電子基準点のアンテナが Trimble 製 TRM29659.0 に統一され，それに伴って電子基準点の架台の高さを架台タイプごとに統一する変更が行われたことで電子基準点のアンテナ底面位置が物理的に移動したからである．そのため，この変更に伴う電子基準点の楕円体高成果を改定し，ジオイド測量データについて再解析を行う必要がある．電子基準点のアンテナ変更については，新たなアンテナ位相特性モデルが作成されており，湯通堂ほか（2005）によって電子基準点の標高改定量が見積もられ，測地成果 2011 の成果が求められている．したがって，電子基準点 10 点については，測地成果 2011 によるジオイド高データが成果として提供されている．

そこで，これらの電子基準点の成果を固定し，水準点 21 点における GPS 観測データの再解析を行って，測地成果 2011 に準拠する楕円体高を算出した．また，水準点 21 点の標高成果は平成 10 年度以降改測されていないことを確認し，楕円体高から標高を差し引いてジオイド高データを作成した．

This document is provided by JAXA.

GPS 観測データの再解析では，以下の手順に従って固定点を選別し，楕円体高値を定めた．

1) 基線解析の固定点として使用する電子基準点は，「日本のジオイド 2000」を参考に，Trimble 製受信機の電子基準点 4 点（国頭，本部，沖縄石川，知念）とする．
2) 固定点となる電子基準点のアンテナ位相特性は，「日本のジオイド 2000」構築時に使用した NOAA の標準モデルではなく，国土地理院が独自に検定を行って作成した GSI モデル（豊福ほか，2009）を使用する．
3) 固定点の電子基準点の楕円体高は，現在の成果値に架台の高さの調整量を差し引いたものとする．

(2) 平成 14 年度の水納島におけるジオイド測量 1 点

沖縄県本部町西方に位置する水納島において，平成 14 年度にジオイド測量が 1 点で行われている．観測には Ashtech 製の GPS 受信機が使用された．そのため，当初，Ashtech 製受信機による電子基準点を固定点とすることを想定した．そのような点のうち電子基準点「玉城」は物理的な傾斜が継続して生じており，観測状況が悪いため現在では廃点となっていること，残りの電子基準点「大宜見」，「宜野座」の 2 点を固定点とすると，水納島の観測点との基線が突き出した形状の網となり，基線長が 25〜30 km と長いことが分かった．また，(1)で得られた水準点 21 点のデータとの整合性を維持するために，Trimble 製受信機の電子基準点を含めた電子基準点 6 点を固定点とすることとし，(1)の 2)〜3)に基づく再解析を行った．

(3) 平成 19 年度の津堅島・久高島におけるジオイド測量各 3 点

沖縄島中城湾の入り口に位置する津堅島と久高島では，平成 19 年度に各 3 点においてジオイド測量が行われた．津堅島が二等水準点 20174，久高島では二等水準点 20177 が標高基準として用いられ，基準が異なっているため，「日本のジオイド 2000」の構築では，島毎にモデルが構築された．その際，各島 3 点でのジオイド高データに対する JGEOID2000 のジオイド較差を求め，その平均値をバイアス値として，JGEOID2000 に補正する方法が採用された．

各島の標高基準は沖縄島と異なっているが，各島最寄りの沖縄島沿岸部にジオイド高データが存在し，各島のジオイド高データがモデル構築において沖縄島に及ぼす影響が小さいと推察されることから，平成 19 年度のジオイド高データをそのまま使用し，沖縄島と一体的にモデル構築することとした．

(4) 使用するジオイド高データの妥当性

ジオイド・モデルの構築の前に，(1)から(3)によって得られたジオイド高データに関して，使用の妥当性を確認する必要がある．ここでは，JGEOID2008 とのジオイド較差の分布を調べた．図-16 は全 38 点におけるジオイド高データと JGEOID2008 のジオイド較差の分布である．

図-16 から，他に比べ，飛び抜けて異なる較差をもつ点はないことが分かる．ジオイド較差は，最大値が電子基準点「糸満」の 1.169 m，最小値が電子基準点「与那城」の南西に位置する観測点で 1.053 m，平均 1.096 m，標準偏差は 2.9 cm であり，全体的に滑らかな空間分布をしている．ただし，「糸満」の北側にある水準点では 1.085cm であり，「糸満」での較差と比較して 8 cm 程小さい．この 2 点は 2 km 程度しか離れておらず，これほど近接した 2 点間での 8 cm 程度の違いは大きい．

また，津堅島の 3 点の較差は 1.053〜1.054 m であり，沖縄島で最寄りである点と整合した値をとり，久高島についても較差は 1.089〜1.093 m であるが，沖縄島で最寄りである電子基準点「知念」は較差が 1.131 m と違いがやや大きい．どちらの島も大きさが沖縄島に比べ小さく，沖縄島と陸続きでないことから，津堅島と久高島のジオイド高データは，標高基準は異なるがジオイド・モデルの構築にそのまま使用してよいと判断する．

次に，電子基準点 10 点のジオイド高データのみを用いて，仮にジオイド・モデルを作成した．その方法は，「日本のジオイド 2000」で採用したものに準拠し，ジオイド高データと JGEOID2008 のジオイド較差について，テンションとして 0.75 を用いたスプライン補間を用いた．図-17 は，こうして作成したジオイド・モデルについて，全 38 点のジオイド高データにおける較差を示している．差が最も大きな点は，電子基準点「糸満」の北側に位置する水準点で -7.6cm であった．これは，上述の「糸満」と当該水準点とのジオイド較差の差によるものである．

電子基準点「糸満」とその北側の水準点のジオイド高データでは，隣接する 2 点でジオイド較差が大きく異なるが，他に検証可能なデータが無いため，どちらが正しいかを判断する情報がない．そのため，ジオイド・モデルの構築には，いずれのデータも使用することにする．その他の点については相互の整合性が高いので，モデルの構築に全て使用することとした．

This document is provided by JAXA.

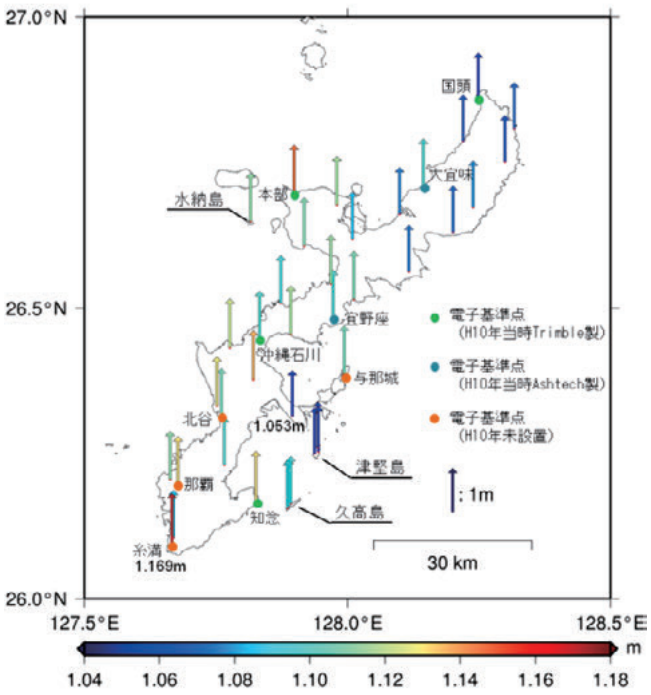


図-16 ジオイド高データと JGEOID2008 の差

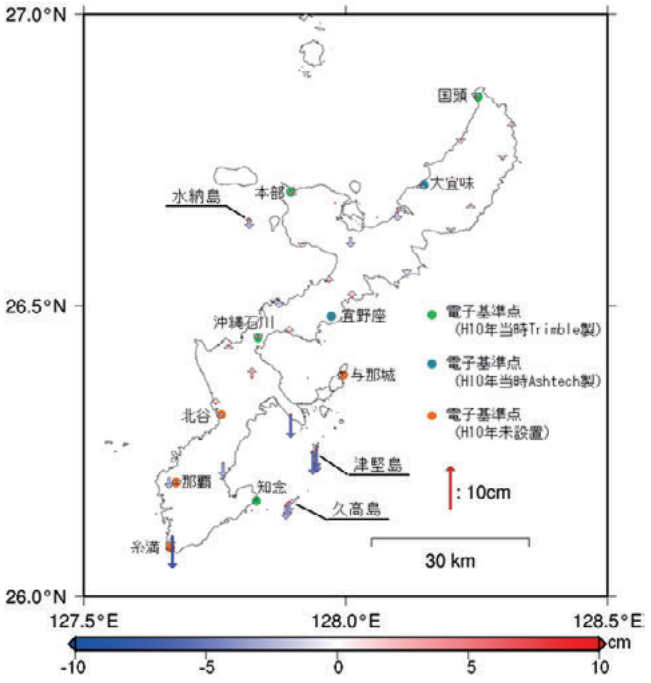


図-17 ジオイド高データと電子基準点のみで構築したジオイド・モデルよるジオイド高との差

4.2.2 沖縄島のジオイド・モデルの決定と精度評価

前節で述べたジオイド高データ 38 点を使用して沖縄島のジオイド・モデルを構築した.

モデルの構築では，ジオイド高データと JGEOID2008 とのジオイド較差を求め，それらを格子化したジオイド補正モデルを作成したうえで，その補正モデルを JGEOID2008 に加えて混合ジオイドモデルを作成する手法を用いる.「日本のジオイド 2000」を作成した際には，GMT の sureface プログラム（Smith & Wessel, 1990）を通常のテンション付きスプライン補間によってジオイド較差を補間する手法を用いたが，今回は，GMT に新たに追加された，グリーン関数を用いてテンション付きスプライン補間を行う greenspline プログラム（Wessel &Bercovici, 1998) を用いてモデルを作成し, 比較検討を行った. greenspline プログラムは，入力データ値やデータの傾斜方向を利用することによって，データの空白域をスプライン補間する際に現れる不必要な発振を押さえる効果があり，不必要なノイズの低減が期待できる.

図-18（左）は greenspline プログラム（オプション -St）を使用して作成した場合のジオイド補正モデル, 図-18（右）は surface プログラムを使用して作成した場合のものである. いずれの場合もテンション値には 0.75 を採用している.

図-18 の両図を比較してみると，右図ではより細かな起伏を含み，ジオイド較差の補正量が急な傾斜をもつ地区があることが分かる. つまり，右図では 1cm 程度の大きさであるが，ジオイドの起伏としては局所的に細かすぎる傾向がみられ，左図の方がより妥当な印象をもつ. surface プログラムを用いた場合にも，テンション値の調整によって同様のモデルが得られる可能性があるものの，今回のジオイド・モデルとしては，greenspline プログラムによるものを実際のジオイド起伏に即したより妥当なモデルと判断して採用することとした.

図-19 は，こうして構築されたジオイド・モデルについて，ジオイド高データとの差の空間分布を表している. 図-19 を見ると，電子基準点「糸満」で正の最大値 4.8 cm，その北側で負の最大値 1.5 cm を取っていることが分かり，近接点においてジオイド較差の差が大きいこの 2 点において，平滑化された補正モデルの作成が行われたことを示している. これら 2 点では再現誤差の正負が反転し，その差が他の点に比べて幾分大きいことは注意すべきであるが, その大きさは，本土 4 島のジオイド・モデルと比べても問題になるものではない. 全 38 点におけるジオイド高の再現誤差は, 平均 0.0 cm, 標準偏差 1.5 cm, 正の最大値 4.8 cm，負の最大値-3.6 cm であった.

以上により，沖縄島における「日本のジオイド 2011」(Ver.1) が構築されたことで，沖縄島においても，GNSS 測量により 3 級水準測量に相当する標高の決定が可能となった.

This document is provided by JAXA.

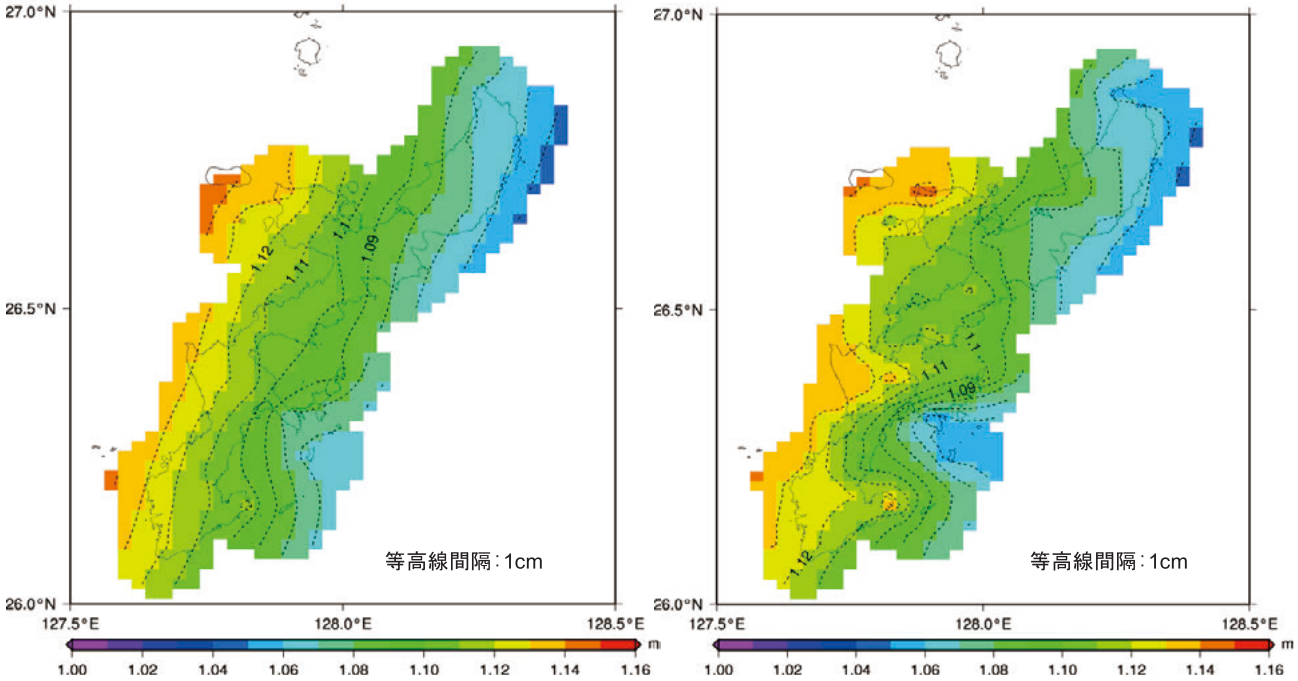


図-18 ジオイド補正モデル（左：greenspline プログラムにより作成，右：surface プログラムにより作成）

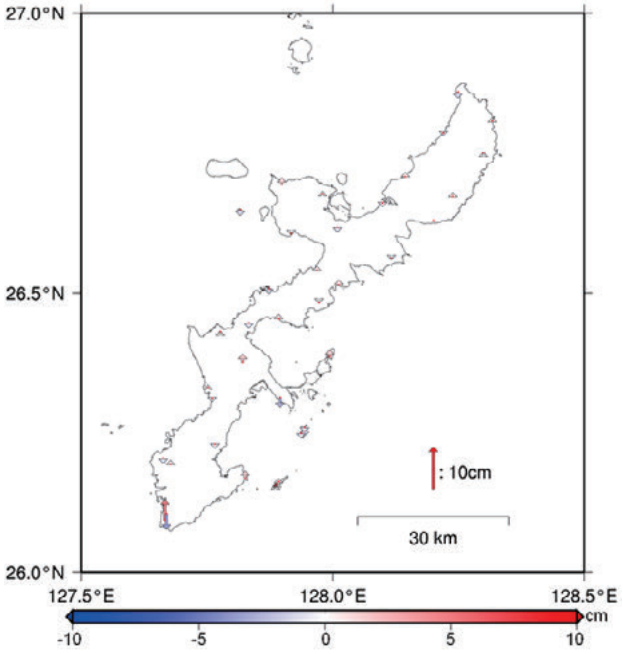


図-19 構築に使用したジオイド高データとジオイド・モデルによるジオイド高の差

4. まとめ

沖縄島を含む全国におけるジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver.1)を構築し，平成 26 年 4 月 1 日に公開した．得られたモデルは，ジオイド高データを用いた評価により，測量成果のジオイド高に対し，標準偏差として 2 cm 程度で再現精度を有している．一部離島を除く全国について，このモデルを用いることで GNSS 測量による標高の決定が 3 級水準測量相当として利用可能となった．

今後，日本全国において GNSS 測量による 3 級水準測量相当の標高決定が可能となるよう，残された島しょ部についても，新たなジオイド・モデルの構築を進めていく予定である．

なお,国土地理院が提供するジオイド・モデルは,測量法第27条第2項及び地理空間情報活用推進基本法第 18 条第 2 項に基づき,以下のホームページより無償でダウンロード可能である．

http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geoid

（公開日：平成 26 年 12 月 15 日）

参 考 文 献

安藤久（2000）：電子基準点標高取り付け作業における GPS 観測について，平成 12 年度測地部技術報告書.
後藤清，林保，飯村友三郎，越智久巳一，日下正明，岩田和美，井上武久，宮本純一，佐藤雄大，河和宏（2013）：測量の効率化・低コスト化を実現－スマート・サーベイ・プロジェクトの取り組み－，国土地理院時報，124 集，65-71.
檜山洋平，山際敦史，川原敏雄，岩田昭雄，福﨑順洋，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，

This document is provided by JAXA.

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 集，55-78.

兒玉篤郎，森下遊（2012）：高精度ジオイド・モデルがもたらす新たな GNSS 測量の可能性 -GNSS 測量による標高決定-，国土交通省国土技術研究会，http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h24giken/ (accessed 24 Sep. 2013).

兒玉篤郎，宮原伐折羅，河和宏，海老名頼利，黒石裕樹（2013）：新しいジオイド・モデル「日本のジオイド 2011+2000」の構築 ―中国・四国・九州地方におけるジオイド・モデルの改定―，国土地理院時報，124 集，73-84.

国土地理院（2003）：測地成果 2000 構築概要，国土地理院技術資料 B5 No.20，127-163.

国土地理院（2013）：GNSS 測量による標高の測量マニュアル（案）.

Kuroishi, Y (2001): A new geoid model for Japan, JGEOID2000. In MG Sideris (Ed.) International Association of Geodesy Symposia 123, Gravity, Geoid, and Geodynamics 2000, Springer, 329-333

Kuroishi, Y. (2009): Improved geoid model determination for Japan from GRACE and a regional gravity field model, Earth Planets Space, 61, 807-813.

黒石裕樹，安藤久（2001）沖縄島のジオイド・モデルの決定について，国土地理院測地部技術報告書.

Kuroishi, Y, H Ando, Y Fukuda (2002): A new hybrid geoid model for Japan, GSIGEO2000. Journal of Geodesy 76, 428-436

Kuroishi, Y., W Keller (2005): Wavelet approach to improvement of gravity field – geoid modeling for Japan, Journal of Geophys. Res., 110, B03402, doi:10.1029/2004JB003371.

森下遊（2011）：ジオイド測量（電子基準点取付観測）の効果的な作業方法について（その 2），国土地理院測地部技術報告書.

森下遊，兒玉篤郎（2013）：P 点データのジオイド・モデルへの取り込みについて，国土地理院測地部技術報告書.

野村勝弘，渡辺政幸，岡村盛司，森田和幸，福﨑順洋 （2007）：GEONET 成果改定と日本のジオイド 2000 について，国土地理院時報，112 集，17-27.

P. Wessel, and D. Bercovici, (1998): Interpolation with splines in tension: a Green's Function Approach Mathematical Geology, Vol. 30, 77-93.

Roman, D. R., Y. M. Wang, J.Saleh, and X. Li, 2010, Final National Models for the United States: Development of GEOID09, Technical Details webpage, National Geodetic Survey, Silver Spring MD 20910: http://www.ngs.noaa.gov/GEOID/GEOID09/GEOID09_tech_details.pdf

豊福隆史，岩下知真子，畑中雄樹，湯通堂亨（2009）：小特集 I GPS 連続観測システム（GEONET）の新しい戦略 - 電子基準点のアンテナ絶対位相特性モデルの構築と評価 -，国土地理院時報，118 集，9-15.

W. H. F. Smith and P. Wessel (1990): Gridding with continuous curvature splines in tension, Geophysics, Vol. 55, 293-305.

湯通堂亨，岩田昭雄，雨貝知美，小島秀基，矢萩智裕，宮原伐折羅，畑中雄樹（2005）：電子基準点の高さについて，国土地理院時報，106 集，21-30.

This document is provided by JAXA.