

ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver.2) の構築 Establishment of New Geoid Model for islands in Japan “GSIGEO2011 (Ver.2)”

測地部 小坂橋勝・小島秀基・根本悟¹・宮原伐折羅・平岡喜文・矢萩智裕
Geodetic Department Masaru KOITABASHI, Hideki KOJIMA, Satoru NEMOTO,
Basara MIYAHARA, Yoshifumi HIRAOKA and Toshihiro YAHAGI

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ため、高精度なジオイド・モデルの構築を進めてきた(後藤ほか, 2013)。電子基準点や水準点の上で GNSS 測量から得られた楕円体高から水準測量による標高を差し引くことで得られるデータを整備し、平成 25 年 4 月に西日本地域について新たなジオイド・モデルに更新した「日本のジオイド 2011+2000」を公開し(兒玉ほか, 2013)、平成 26 年 4 月には残りの東日本地域も更新した「日本のジオイド 2011」(Ver.1)を公開した(兒玉ほか, 2014)。

ジオイド・モデルは、GNSS 測量で得られる楕円体高から標高を算出するために用いられるため、測量成果の標高及び楕円体高と整合している必要がある。通常、標高は日本水準原点を起点とした水準測量によって決定されるが、直接水準測量が実施できない離島では、測量法に基づき標高の基準を個別に定めている。また、ジオイド・モデル作成に使用できる楕円体高が整備されている基準点の点数も各島でそれぞれ異なっているため、島ごとに最適なジオイド・モデルを作成する上で個別に補正方法を検討する必要がある。そのような事情により、「日本のジオイド 2011」(Ver.1)では多くの離島のジオイド・モデルが更新されていなかった。

今回、未更新であった離島のジオイド・モデルについて 4 種類のジオイド補正モデルを用意し、島ごとに最適なモデルを適用することで、測地成果 2011 と標準偏差 2cm 以下で整合したジオイド・モデルを構築し、「日本のジオイド 2011」(Ver.1)で公開されている地域と合わせて、「日本のジオイド 2011」(Ver.2)として平成 28 年 4 月 1 日に公開した。本稿ではその詳細について報告する。

1. はじめに

近年、衛星測位の普及に伴い、任意の地点で効率的に三次元位置(緯度・経度・楕円体高)を求めることが出来るようになった。このうち「楕円体高」は、地球を回転楕円体に近似した準拠楕円体面からの垂直高として幾何学的に定義される高さである。

一方、日常生活で使われる高さは、水などの流体が作る静水面(以下「水準面」という。)から重力の方向に沿った距離として物理学的に定義される高さである。そのため、重力の影響が考慮されていない楕円体高は、社会活動における高低を表すものさしとしてそのまま使うことはできない。

一般的には、水準面の中でも特に平均海面を基準とした「標高」が実用的な高さを示すものさしとして用いられる。この標高の基準となる面を「ジオイド」という。日本の場合は、測量法により東京湾平均海面が標高の基準として定められており、日本水準原点を起点とした水準測量によって全国の水準点に標高値を与えることで実現されている。高さの原点となる日本水準原点の標高は、東京湾の霊岸島での潮位観測から求められた平均海面を基準として、そこからの水準測量によって決定されている。

日本では、前述した国内の標高の基準となる東京湾平均海面をジオイドと定めているが、陸地ではそれを延長した仮想的な面がジオイドとなる。ジオイドの高さは、準拠楕円体面からジオイドまでの垂直距離(ジオイド高)で表される。もし、地上のある場所におけるジオイド高をモデルから知ることができれば、GNSS 測量などによって得られるその場所の楕円体高からジオイド高を減ずることによって、標高を得ることが可能となる(図-1)。

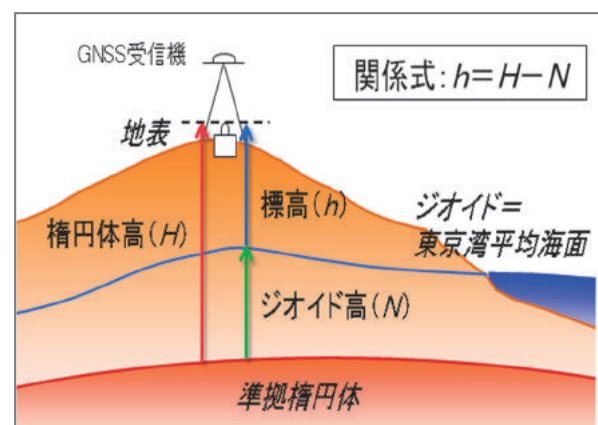


図-1 楕円体高、標高及びジオイド高の関係

国土地理院では、国内の任意の地点におけるジオイド高を与えることを目的としてジオイド・モデル

を構築してきた。平成 15 年から 22 年にかけて順次公開した「日本のジオイド 2000」(Ver.1~Ver.5) (以下単に「日本のジオイド 2000」という。) (安藤ほか, 2002) 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的に構築し、基準点測量の効率的な実施に貢献した。平成 26 年 4 月に公開した「日本のジオイド 2011」(Ver.1) (兒玉ほか, 2014) では、GNSS 観測データを再計

算し、標高との整合性を高めたジオイド高を整備する等の改良によって精度を高め、一部の離島を除く全国で GNSS 測量による 3 級水準測量精度に相当する標高算出を可能とした (兒玉ほか, 2014)。今回、未更新だった離島についても新たなジオイド・モデルを構築し (図-2)、「日本のジオイド 2011」(Ver.1) と合わせた「日本のジオイド 2011」(Ver.2) として、平成 28 年 4 月 1 日に公開した (図-3)。

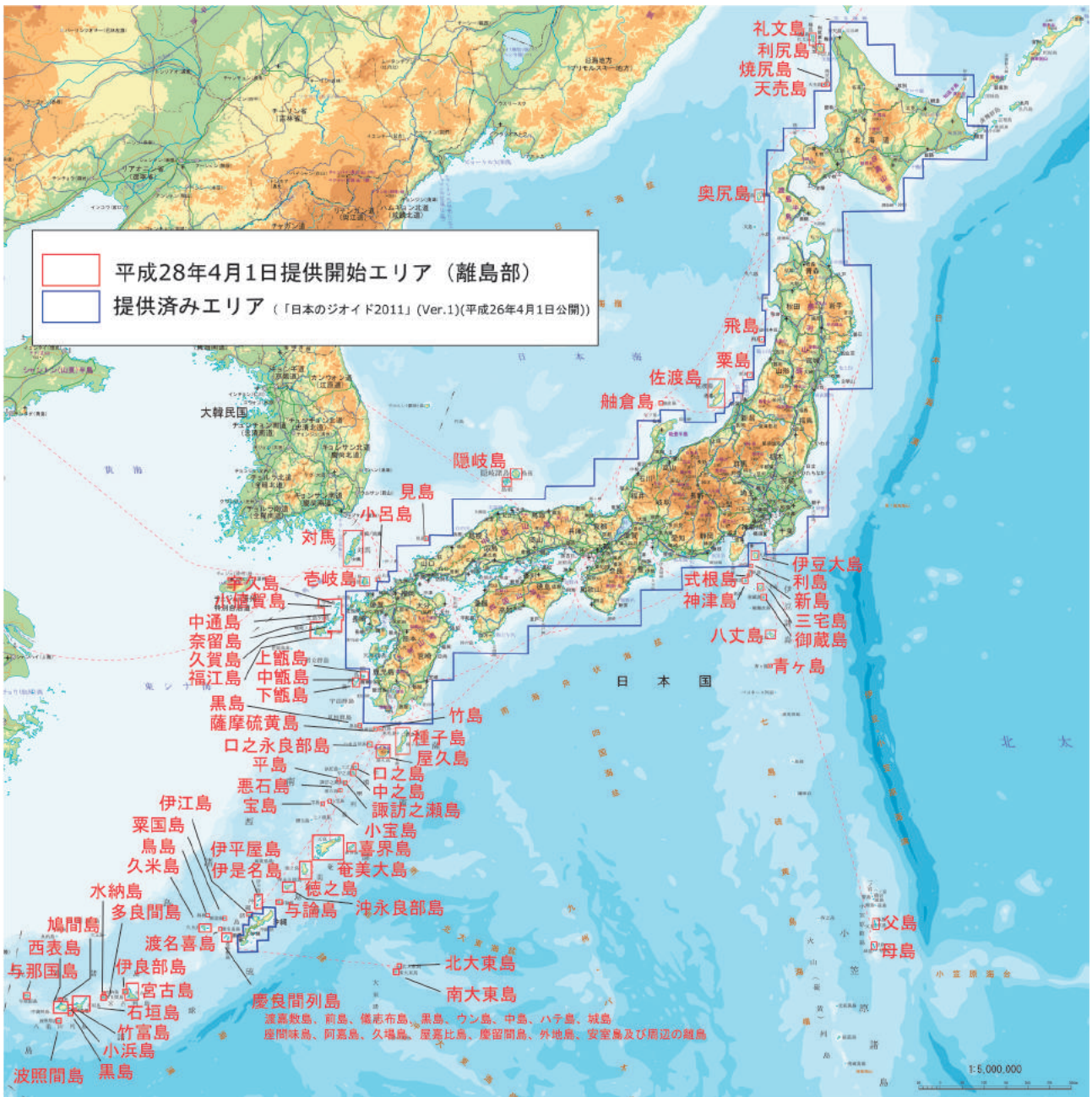


図-2 「日本のジオイド 2011」(Ver.2) で新たにジオイド・モデルを構築した離島一覧

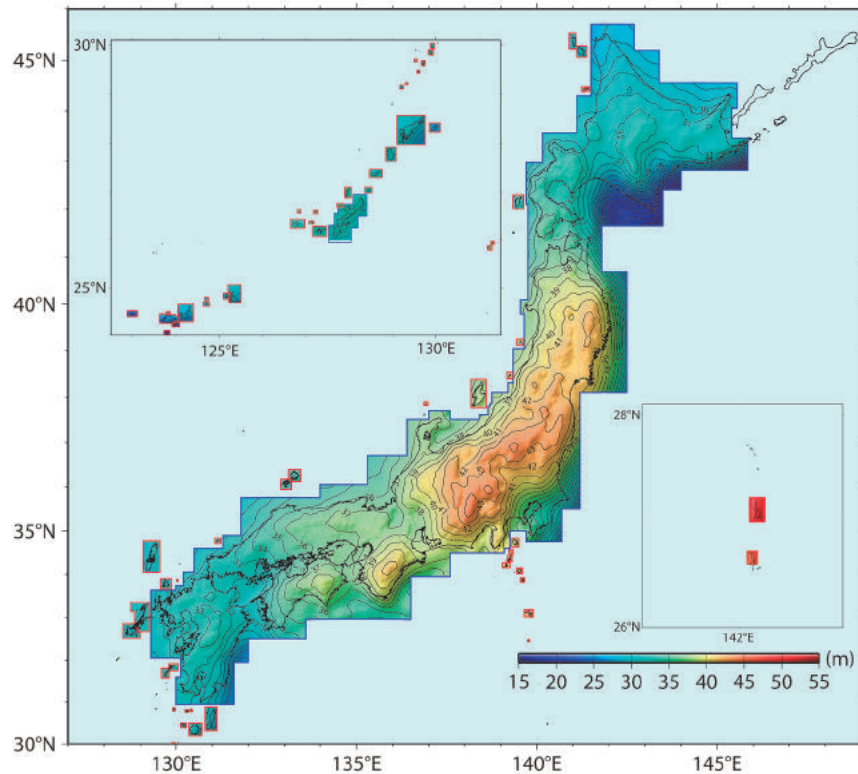


図-3 「日本のジオイド 2011」(Ver.2) (等ジオイド高線間は1m, 適用: 赤枠内「日本のジオイド 2011」(Ver.2) で更新した地域, その他の地域「日本のジオイド 2011」(Ver.1))

2. ジオイド高データの再整備

2.1 再整備における課題

ジオイド・モデルは測量作業で利用されるため、標高及び楕円体高成果に適合させるように構築する必要がある。モデル構築の入力データには、電子基準点や水準点上の楕円体高から標高を差し引くことで得られるデータ（以下「ジオイド高データ」という。）を用いるため、これらの値が測量成果に可能な限り整合していることが求められる。

ジオイド高データを求めるための楕円体高として、電子基準点本点においては、平成 26 年 4 月 1 日時点の楕円体高成果を用いた。また、水準点、電子基準点付属金属標（以下「付属標」という。）及び正式な測量標識標ではない一時的な点（以下「仮点」という。）の楕円体高においては、「日本のジオイド 2000」構築時に取得された GNSS 測量データを再解析した結果を用いた。「日本のジオイド 2000」構築時に算出された楕円体高は、平成 16 年に全電子基準点で実施した楕円体高成果の改定以前の成果値を基準に計算されているため、ジオイド高データに最大約 7cm 程度の乖離があることがわかっており（野村ほか, 2007）、今回の構築でそのまま利用することは適当ではない。そのため、電子基準点以外の観測点については、電子基準点の最新の楕円体高成果を基準として楕円体高の再解析を行った。

2.2 楕円体高の再解析

楕円体高の再解析にあたっては、固定点として用いる電子基準点の楕円体高成果として、再解析時点の直近の値である平成 26 年 4 月 1 日時点の楕円体高成果を採用した。解析ソフトウェアには精密基線解析ソフトである GAMIT・GLOBK (Herring et al., 2015) を使用し、上下方向の解析精度に影響を及ぼすアンテナ位相特性モデルについては、国土地理院が独自に検定を行って作成したモデルを固定点となる電子基準点に適用することで、電子基準点成果との整合性を高めた。

2.3 標高

ジオイド高データの算出には、楕円体高とともに標高の情報が必要となる。水準点及び付属標の標高は、平成 26 年 4 月 1 日時点の値を採用した。また、電子基準点本点の基準となるアンテナ底面における標高は、水準測量によって取り付けられた付属標の標高に、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のネジまでの比高及びレドームのネジからアンテナ底面までの比高を足し合わせることで算出した。さらに、仮点については、高さの測量成果が存在しないため、「日本のジオイド 2000」構築時に水準測量で取り付けられた標高を採用した。

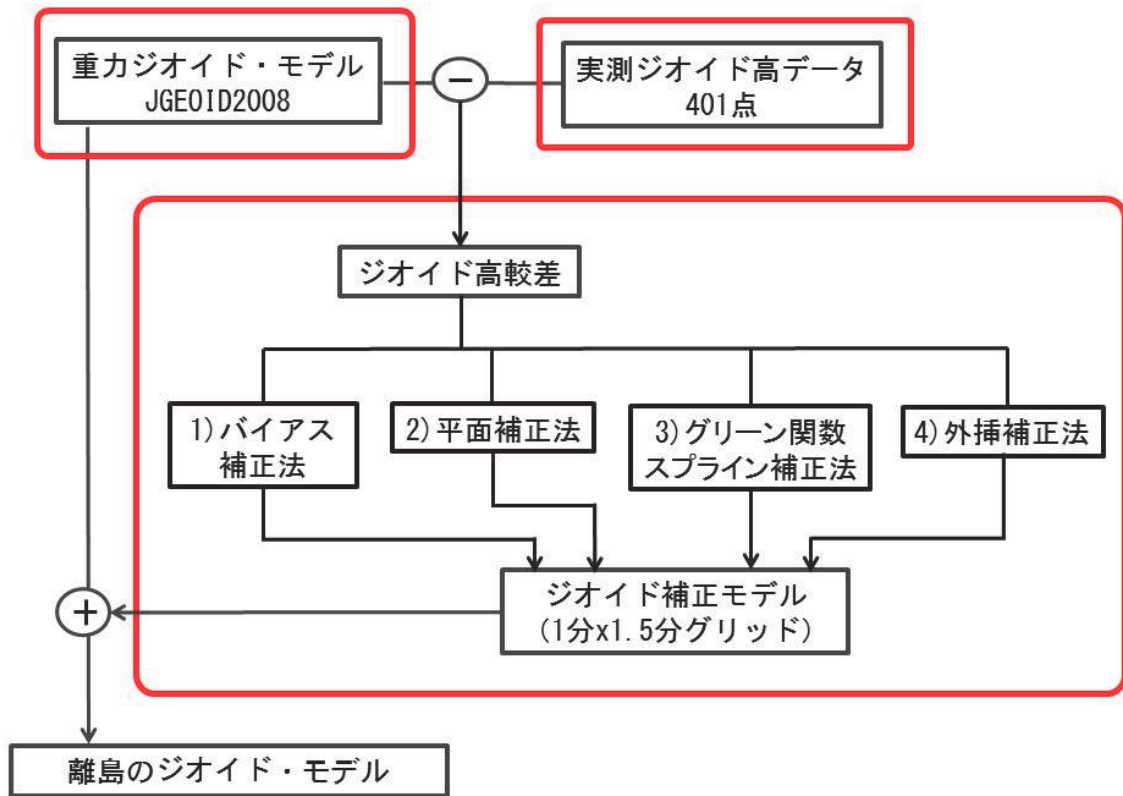


図-4 離島のジオイド・モデル構築の流れ

なお、島ごとに定められた標高の基準が仮点の標高決定以降に改定されていないことを確認している。

3. 離島のジオイド・モデルの構築

3.1 構築手法

離島のジオイド・モデルは、従前のジオイド・モデルの構築時にもベースとしている重力ジオイド・モデル「JGEOID2008」(Kuroishi, 2009)を、ジオイド高データに整合するように補正することで構築した。補正量は、各観測点におけるジオイド高データとJGEOID2008との差であるジオイド高較差を求め、これを空間的に表現するジオイド補正モデルを作成することで見積もった(図-4)。

また、離島の測定の原点は、そのほとんどが測量法第十一条第一項第三号に基づき島ごとに定められている。そのため、今回の離島のジオイド・モデル構築では、島内での標高の整合性を重視し、隣接する離島との距離が短く分離が困難な場合を除き、標高の基準が異なる島は可能な限り独立にジオイド・モデルの構築を行った。さらに、構築するジオイド・モデルの目標精度は、「日本のジオイド2011」(Ver.1)と同様、ジオイド高データとの差が標準偏差で2cm以下とした。

3.2 ジオイド補正モデル

「日本のジオイド2011」(Ver.1)では、北海道、本州、四国、九州(以下「本土4島」という。)に対して、一括して解析的共分散関数を用いた最小二乗コロケーション法(以下「LSC法」という。)を適用することでジオイド補正モデルを構築している。LSC法では、解析的共分散関数の係数を適切に決めるために統計的に有意な数の入力データが必要となる。しかし、多くの離島では最大でも観測点数が5点程度と少ないため、各島それぞれにLSC法を適用してジオイド補正モデルを作成するのは適当ではない。過去に構築した「日本のジオイド2000」では、本土4島に近接する離島についてはLSC法を用いて本土4島と一括でジオイド・モデルを作成する場合もあったが、厳密には多くの離島で標高の基準が本土4島とは異なるため一括して計算するモデルは適切ではない。そのため、今回の構築では4種類のジオイド補正モデルを用意し、島ごとに最適なジオイド補正モデルを適用することとした。

3.3 補正方法

4種類のジオイド補正モデルは、それぞれ、1) ジオイド高較差の分布を一定値で表現するバイアス補正法、2) ジオイド高較差の分布を一様な傾斜平面で表現する平面補正法、3) ジオイド高較差の分布を、グリーン関数を用いたスプライン法で面的に展開して補正量を求めるグリーン関数スプライン補正法、4) 島内にジオイド高データがない場合に隣接する島のジオイド高較差を利用して推定する外挿補正法を採用した(図-5及び表-1)。各手法の詳細を以下に記す。

1) バイアス補正法

観測点が3点に満たない比較的小さな島の場合には、傾斜平面での近似ができないため、ジオイド高較差の算術平均値をバイアス値として一様に加算してジオイド・モデルを構築した。また、観測点が3点以上あったとしても、それらの観測点が線状に並んでいる場合はバイアス補正法を適用している。この補正法は7地区で適用した。

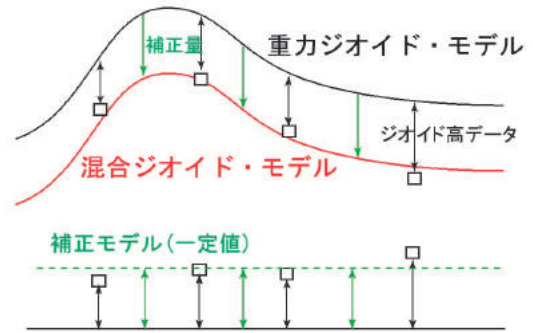
2) 平面補正法

観測点が3点以上ある島の場合には、ジオイド高較差から最小二乗法によって平面のオフセット値及び緯度・経度方向の傾きを決めてジオイド・モデルを構築した。離島の多くは面積がそれほど大きくないことから、ジオイドの空間波長を考えた場合、島内でのジオイドの傾斜を一様な傾斜平面で表現しても影響は小さい。この補正法は48地区で適用した。

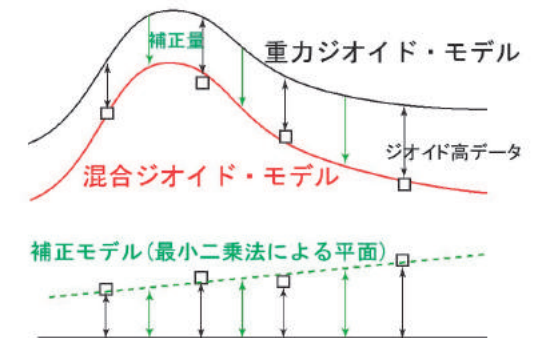
3) グリーン関数スプライン補正法

離島の面積が大きい又は島内の標高差が大きくジオイド高データに何らかの空間的なバイアスが存在すると想定される場合には、単純な傾斜平面の近似ではジオイド高データとジオイド・モデルとの乖離が大きくなる可能性がある(兒玉ほか, 2014)。そのため、グリーン関数を用いたスプライン法により面的に展開することでジオイド高較差を滑らかな曲面に近似した補正モデルを作成し、ジオイド・モデルを構築した。補正モデルの計算には、兒玉ほか(2014)と同様、ハワイ大学が開発したThe Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel et al., 2013) に実装されている補間プログラムを使用している。スプライン法の計算には正則化オプションを使用した。補間によって作成する曲面の空間的な滑らかさを定めるテンション値は、内部評価の統計量(標準偏差、正の最大値、負の最大値)及び一個抜き交差検証(Leave one out cross validation: LOOCV, 例えば地球統計学研究会, 2003)による外部評価の結果から島毎に判断して決めている(兒玉ほか, 2014)。また、補正計算の結果を用いて実際にジオイド補正モデルを描画させた際に、ジオイド高データと著しい乖離がないか確認した。この補正法は5地区で適用した。

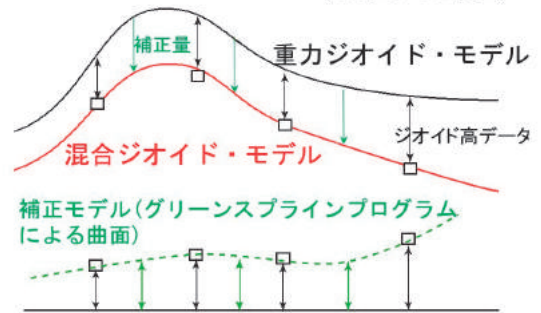
1) バイアス補正法 (7地区/67地区)



2) 平面補正法 (48地区/67地区)



3) グリーン関数スプライン補正法 (5地区/67地区)



4) 外挿補正法 (7地区/67地区)

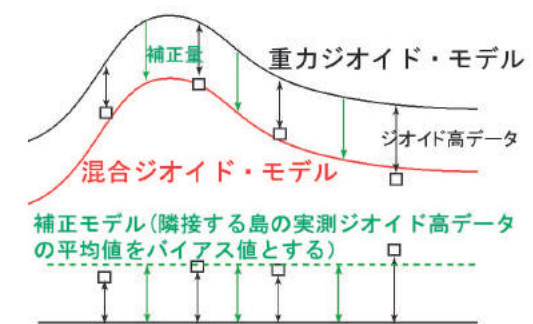


図-5 ジオイド補正モデルの4パターン

4) 外挿補正法

島内に使用できるジオイド高データが無い場合には、隣接する島のジオイド高較差からバイアス値を決め、バイアス補正法により当該島の補正モデルとした。なお、隣接する島にジオイド高データが3点以上あったとしても、当該島のモデル作成にはバイアス補正法を採用している。これは、平面補正法やグリーン関数スプライン補正法では、モデルを外挿した場合、補正面の傾斜によってはその誤差が大きく拡大されてしまう恐れがあるためである。この補正法は7地区で適用した。

4. 離島のジオイド・モデルの精度評価

3.3で述べた補正方法のうち、島内にジオイド高データがある1)~3)の補正法及びそれらを全て合わせた場合について、それぞれジオイド高データと構築したジオイド・モデルによるモデル値との差を計算し、精度評価を行った(図-6及び表-2)。図-6の度数分布の各区間は、横軸の残差値に対して $\pm 0.5\text{cm}$ 以内にある観測点数に対応する。

ジオイド高データからジオイド・モデルによるモデル値を減じた差が正の最大となったのは隠岐島(島根県)内の点で 3.8cm 、負の最大となったのは粟島(新潟県)内の点で -4.0cm であった。また、標準偏差は 1.1cm で、 0cm を中心にほぼ $\pm 2\text{cm}$ の範囲に正規分布しており、目標とした 2cm の精度が達成されていることが確かめられた。

5. まとめ

平成26年4月に公開した「日本のジオイド2011」(Ver.1)で未構築だった離島部のジオイド・モデルについて、4種類のジオイド補正モデルを用意し、島ごとに最適な補正モデルを適用することによって、ジオイド高データと標準偏差 2cm で整合するジオイド・モデルを構築し、「日本のジオイド2011」(Ver.1)と合わせた「日本のジオイド2011」(Ver.2)として平成28年4月1日に公開した。

今回構築した「日本のジオイド2011」(Ver.2)を用いることにより、離島を含む全国でGNSS測量による3級水準測量相当の標高決定が可能となり、測量作業の更なる効率化が期待される。

(公開日：平成30年2月9日)

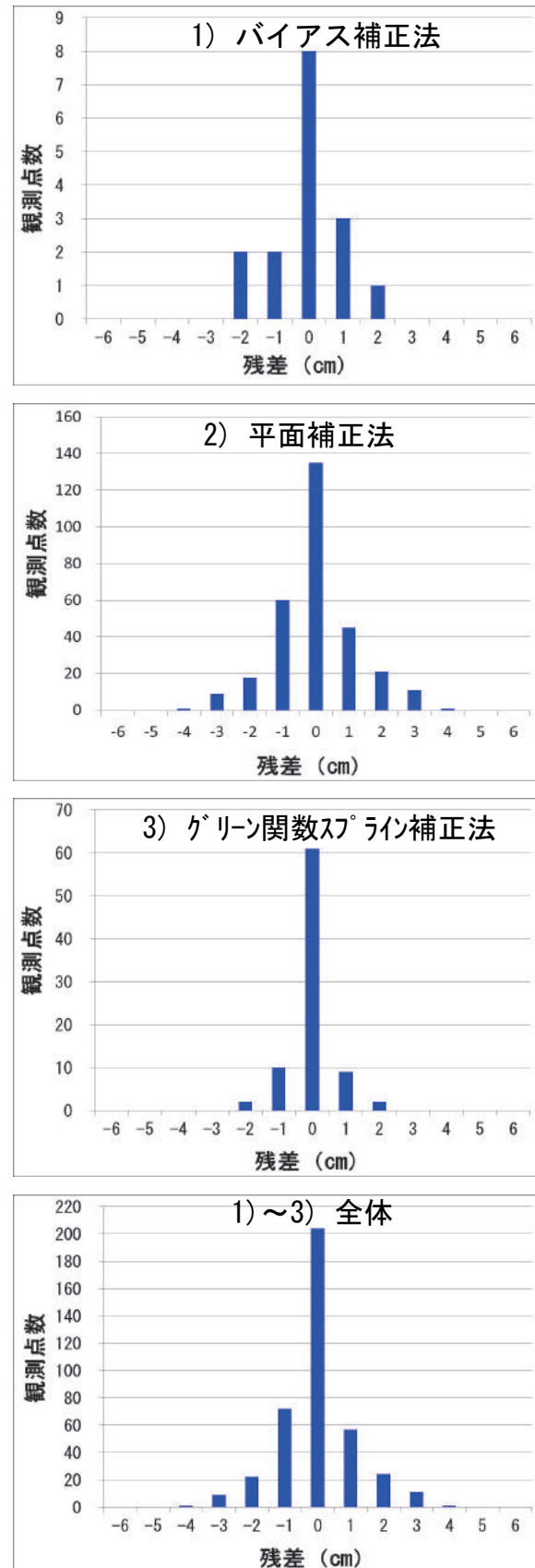


図-6 各補正法におけるジオイド高データとジオイド・モデルとの差の度数分布

表-1 各島で適用したジオイド補正モデル

	地区数	地区名
1)バイアス補正法	7	鳩間島, 新島, 粟国島, 小呂島, 舩倉島, 中之島, 薩摩黒島
2)平面補正法	48	奥尻島, 飛島, 粟島, 隠岐島(島前), 隠岐島(島後), 対馬, 伊豆大島, 三宅島, 福江島, 奄美大島, 喜界島, 中通島, 奄岐島, 沖永良部島, 与論島, 黒島, 石垣島, 西表島, 波照間島, 与那国島, 利尻島, 礼文島, 焼尻島, 天売島, 利島, 式根島, 神津島, 八丈島, 見島, 甌島(上・中), 甌島(下), 渡名喜島, 久米島, 座間味島, 伊江島, 伊平屋島, 北大東島, 南大東島, 伊良部島, 父島, 母島, 青ヶ島, 御蔵島, 薩摩硫黄島, 口永良部島, 諏訪之瀬島, 宝島, 多良間島
3)グリーン関数 スプライン補正法	5	佐渡島, 種子島, 徳之島, 宮古島, 屋久島
4)外挿補正法	7	鳥島, 竹島, 口之島, 悪石島, 平島, 小宝島, 水納島

表-2 各手法で構築したジオイド・モデルの精度評価結果

	1)バイアス補正法	2)平面補正法	3)グリーン関数 スプライン補正法	1)~3)全体
観測点数	16点	301点	84点	401点
標準偏差	1.1cm	1.2cm	0.6cm	1.1cm
正の最大値	2.0cm	3.8cm	2.0cm	3.8cm
負の最大値	-2.0cm	-4.0cm	-2.2cm	-4.0cm

参考文献

- 安藤久, 佐々木正博, 畑中雄樹, 田中和之, 重松宏実, 黒石裕樹, 福田洋一(2002):「日本のジオイド2000」の構築, 国土地理院時報, 97, 25-30.
- 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): 測定の効率化・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, 65-71.
- 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.
- 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.
- 兒玉篤郎, 森下遊, 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, 73-84.
- 地球統計学研究委員会 訳編/青木謙治 監訳(2003): 地球統計学, 森北出版株式会社.
- 野村勝弘, 渡辺政幸, 岡村盛司, 森田和幸, 福崎順洋(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, 17-27.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith (1998): New, Improved Version of Generic Mapping Tools Released, EOS Trans., AGU, 79 (47), 579.
- Kuroishi Y. (2009): Improved geoid model determination for Japan from GRACE and a regional gravity field model, Earth Planets Space, 61, 807-813.
- T. A. Herring, R. W. King, M. A. Floyd, S. C. McClusky(2015): Introduction to GAMIT/GLOBK, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, and F. Wobbe(2013): Improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Am. Geophys. Union, 94, 409-410.