

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に調整することで、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狀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

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。

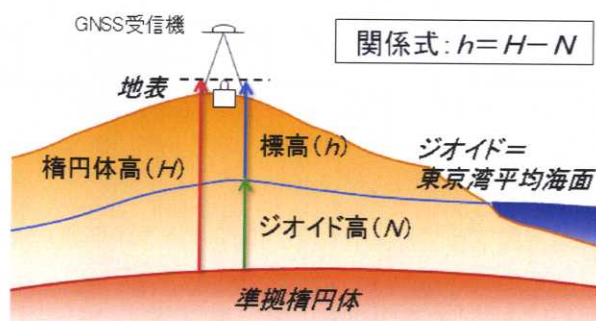


図-1 楕円体高、標高及びジオイド高の関係

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も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、この手法に必要な比例係数(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} 、

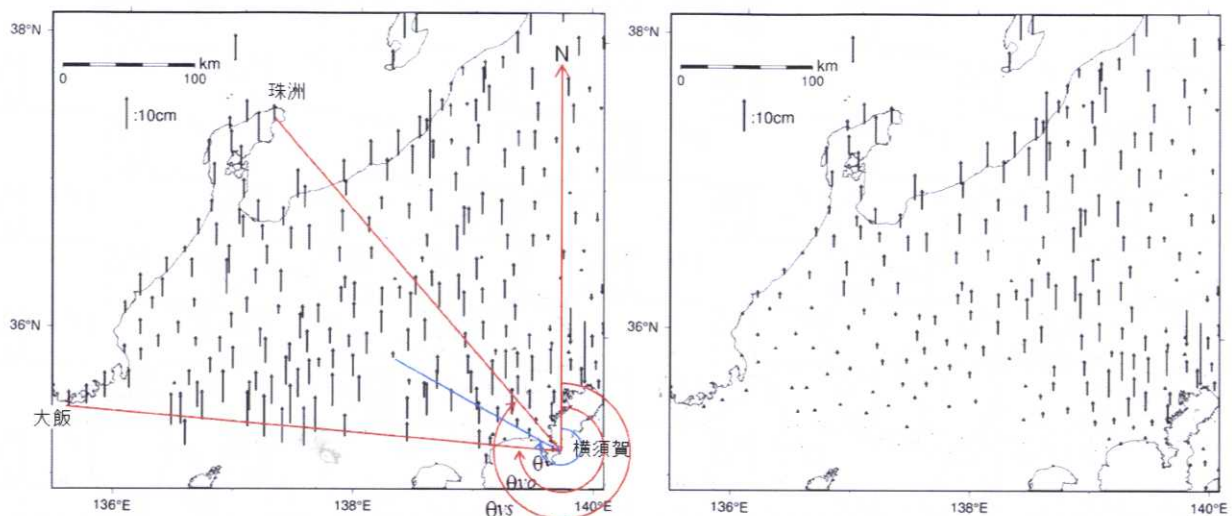


図-2 電子基準点の楕円体高の改定量分布 (左: 調整前の成果改定量; 電子基準点「横須賀」を基点とする各点の方位角が θ , 右: 調整後の成果改定量; 調整地域では北東端から南西端に向かって次第に更新量が小さくなる)

「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、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 , H_n , 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。

$$H_n = H - \Delta H \times \frac{\theta_{ys} - \theta}{\theta_{ys} - \theta_{yo}}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \theta \geq \theta_{ys} &\rightarrow H_n = H \\ \theta \leq \theta_{yo} &\rightarrow H_n = H - \Delta H \end{aligned}$$

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值(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れた改善が見られ、特に、電子基準点「愛知一宮2」では7.5cm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5cm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

