

# 高精度ジオイド・モデルがもたらす新たなGNSS測定の可能性 -GNSS測量による標高決定-

兒玉 篤郎・森下 遊

国土地理院 測地部 物理測地課 (〒305-0811 茨城県つくば市北郷1番)

GNSS測量により測定される高さは楕円体高である。これを標高へ変換するには、ジオイド高が必要であり、ジオイド高を算出するためのデータセットがジオイド・モデルである。現在、国土地理院はジオイド・モデル「日本のジオイド2000(ver.5)」を提供しているが、現状ではGNSS測量とジオイド・モデルにより得られる標高は、水準測量による標高の代用として用いるには精度が十分ではない。国土地理院では、標高を求める測量の効率化を図るため、公共測量や工事測量で実施している水準測量の一部を、GNSS測量で代用が可能となるよう、高精度なジオイド・モデルの構築作業を進めるとともに、標準的な測量手法を検討している。

キーワード GNSS測量, ジオイド・モデル, ジオイド高, 標高, 楕円体高

## 1. はじめに

日常生活における高さの認識は、重力の影響を受けて、水が高いところから低いところに流れるという経験からきている。地球の形を精密に扱う測地学の表現を使えば、水が流れない高さの等しい面は、重力によるポテンシャルの等しい面（等ポテンシャル面）であり、その基準としては、全球の7割を占める海洋の平均面（平均海面）に最も近い等ポテンシャル面であるジオイドと呼ばれる面がとられ、陸地においてもそれを延長した面が高さ0mということになる。ジオイドは重力によって定められるため、地形の起伏や地殻構造の不均質による地球の引力分布の乱れによって、凹凸を持っている。

このようなジオイドなる面は、海においても目に見える形で現れてはいないため、多くの国において、特定地点の平均海面位が高さの基準として用いられている。日本では東京湾平均海面がその基準として採用されている。日本の標高は、国会議事堂の近くに設置されている日本水準原点における東京湾平均海面からの標高が潮位観測と水準測量に基づいて定められ、それを基準として全国に整備された水準測量網に属する水準点の標高を与えることで構成されている。

一方、GNSS測量の普及により、任意の測点における緯度・経度・楕円体高を効率的に求めることが可能となった。しかし、「高さ」の位置情報については、実利用の面で東京湾平均海面を基準とした、いわゆる「標高」が必要とされている。

そこで、国土地理院はGNSS測量で標高を算出するために必要なジオイド・モデルを整備して、国内の任意の地点におけるジオイド高を取得することを可能とし、GNSS測量によって得られる楕円体高から標高への変換を容易にした（図-1）。なお、現在の日本のジオイド・モデルを「日本のジオイド2000」と呼び、2003年に公開したver.1で北海道、本州、四国、九州、沖縄を整備した。その後、有人離島への整備を進め、2010年のver.5で、有人の離島を含め日本国内におけるジオイド・モデルの整備は完了した。

「日本のジオイド2000」は、三次元的位置の基準となる三角点等の設置においてGNSS測量だけから標高を与

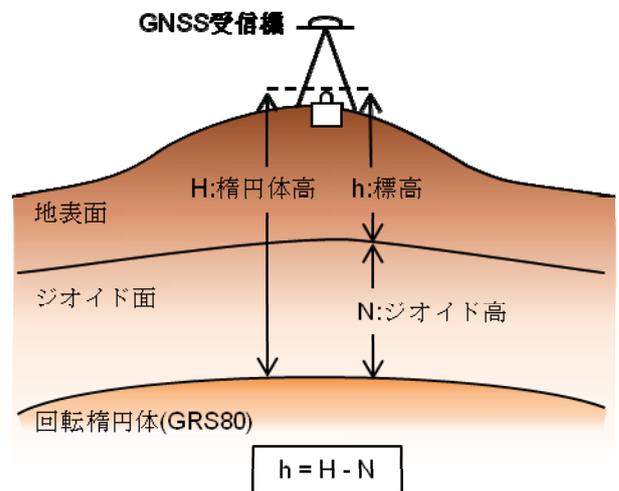


図-1 楕円体高、標高及びジオイド高の関係図

えることを目的として開発されたものであり、基準点測量の効率的な実行に大きく寄与した。しかし、用途をさらに拡大し、ジオイド・モデルをGNSS測量に適用することで水準測量を代用しようと考えた場合、このモデルでは精度が十分ではない。

国土地理院では、「日本のジオイド2000」の精度評価及び高精度なジオイド・モデルの構築のため、これまで電子基準点付属標におけるジオイド高データを取得しており、西日本地方において新たなジオイド・モデルの試作を行った<sup>1)</sup>。その結果、「日本のジオイド2000」に含まれる誤差は軽減され、公共測量や工事測量で実施している水準測量の一部を、GNSS測量とジオイド・モデルから求まる標高で代用できる可能性が出てきた。

今回は、その成果報告と新たなジオイド・モデルを利用したGNSS測量による標高決定の可能性について報告する。

## 2. 「日本のジオイド2000」とその誤差

### (1) 「日本のジオイド2000」の構築

「日本のジオイド2000」は、陸域と海域において稠密に得られている重力データからなる重力ジオイド・モデル (JGEOID2000) と、全国の水準点816点におけるGNSS/水準法によるジオイド高のデータ (以下、ジオイド高データという。) によって構築される。その概要は、まず全国におけるジオイド高データと短波長成分をよく復元する重力ジオイド・モデル (JGEOID2000) により求まる重力ジオイド高の較差 (ジオイド較差) を求める。次に、求めたジオイド較差から共分散関数を推定し、その共分散関数を用いて最小二乗コロケーション法 (LSC) によりジオイド較差を内挿することで、中・長波長成分に卓越したジオイド補正モデルを得る。ここで、重力ジオイド・モデルとジオイド補正モデルを組み合わせることで、日本のジオイド・モデル「日本のジオイド2000」を構築する<sup>2)</sup> (図-2)。

### (2) 「日本のジオイド2000」の誤差

平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震の前までに取得してきた電子基準点付属標638点におけるジオイド高データと「日本のジオイド2000」を比較すると、全国的に数cm、局所的には数十cmの差が存在することが分かる (図-3)。

この差は、主に「日本のジオイド2000」に含まれる誤差を反映したものであり、その要因としては重力ジオイド・モデル構築時の重力データの不足による誤差<sup>3)4)</sup>、データ分布の不均一による誤差、ジオイド高データ取得のためのGNSS測量の観測時間<sup>5)</sup>や基線解析手法<sup>6)</sup>に起因する誤差、電子基準点標高成果改定に伴う誤差<sup>7)</sup>及びLSC内挿誤差があることがわかっている。なお、データ

分布の不均一による誤差とは、作成に使用したジオイド高データは水準点で取得しているために全国に等分布となっておらず、データの空白域があるために生じる誤差である。

## 3. 高精度なジオイド・モデルの試作

2.(2)で述べた誤差要因を除去・軽減したデータを用いることで、より高精度なジオイド・モデルを作成することができる。そこで、最新の重力ジオイド・モデル (JGEOID2008) 及び2.(2)で「日本のジオイド2000」の精度評価に使用した電子基準点付属標638点におけるジオ

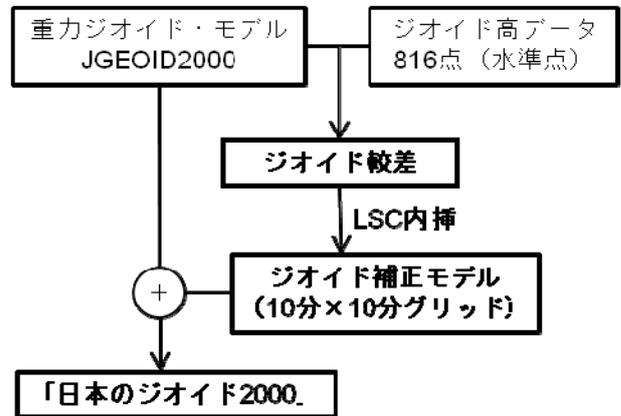


図-2 「日本のジオイド2000」の構築の流れ

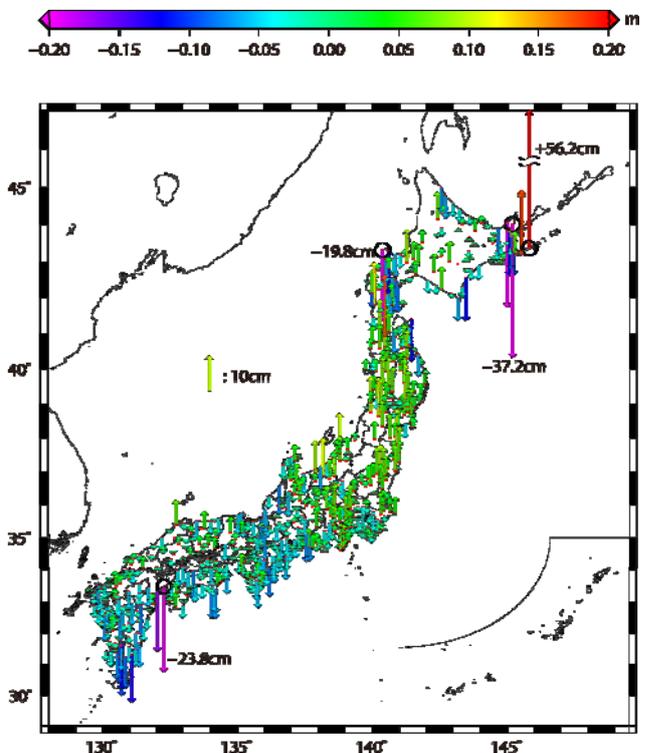


図-3 電子基準点付属標におけるジオイド高データと「日本のジオイド2000」の差

イド高データを用いて、ジオイド・モデルの試作を行った。

JGOIED2008は、重力データの追加や解析手法の改良により、JGEOID2000に含まれていた系統誤差の軽減が報告されている<sup>3)4)</sup>。また、使用したジオイド高データは、現在のジオイド測量作業要領に適合したGNSS観測及び基線解析を行っているデータとし、異常点の除去を行い電子基準点の成果に強く拘束されたデータを使用した。ただし、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の前までに取得してきたデータを用いている。

また、試作の過程で、いくつかの技術的な検討を行い、「日本のジオイド2000」構築時の計算手法に改良を加えた。

#### 4. 試作したジオイド・モデルの評価

まず、今回の試作では東日本及び北海道地方のジオイド高データが不足しているため（図-3）、西日本について評価を行った。その結果、試作したジオイド・モデルでは、「日本のジオイド2000」に含まれていた誤差は大きく減少した。内部評価の結果、標準偏差は1.9cmとなり、「日本のジオイド2000」の4.0cmから向上した。ジオイド・モデルとモデル構築に使用したジオイド高データとの較差も、「日本のジオイド2000」では最大で35cmを超えていたが、試作モデルでは10cm以内となった（図-4、図-5）。

#### 5. ジオイド・モデルを利用したGNSS測量による標高決定

##### (1) 利用者の要望

国土地理院は、地理空間情報や関連するサービスの利用者が抱える課題を調査し、業務改善と地理空間情報の活用推進に資することを目的として、利用者ニーズの調査を行っている。

その中の一つとして、標石基準点の維持管理に関する調査を公共測量の測量計画機関（地方公共団体等）及び測量作業機関（業務受注会社）に対して行った。その結果、水準点の配置について、アンケート調査を行った測量作業機関67社中42社から「足りない」との回答があり、その多くが「山間部での工事測量で不足している」との意見であった。さらに、そうした際の対処として、基本及び公共基準点等の標高やジオイド補正により援用している場合があることがわかった。

##### (2) ジオイド・モデルの利活用

前項(1)で述べたように、水準点の増設の要望は多い。

しかし、水準点の新設には、水準測量を実施する必要があるため、多くの経費と時間を費やす。そのため、ジオイド・モデルを利用し、経費と時間を節約できるGNSS測量による高精度な標高決定が求められている。

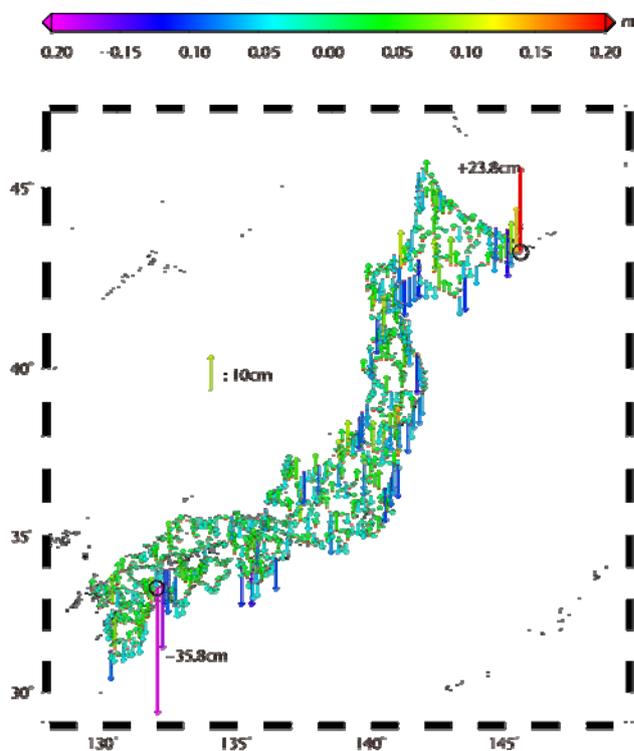


図-4 「日本のジオイド2000」構築に使用した水準点上のジオイド高データと「日本のジオイド2000」の差

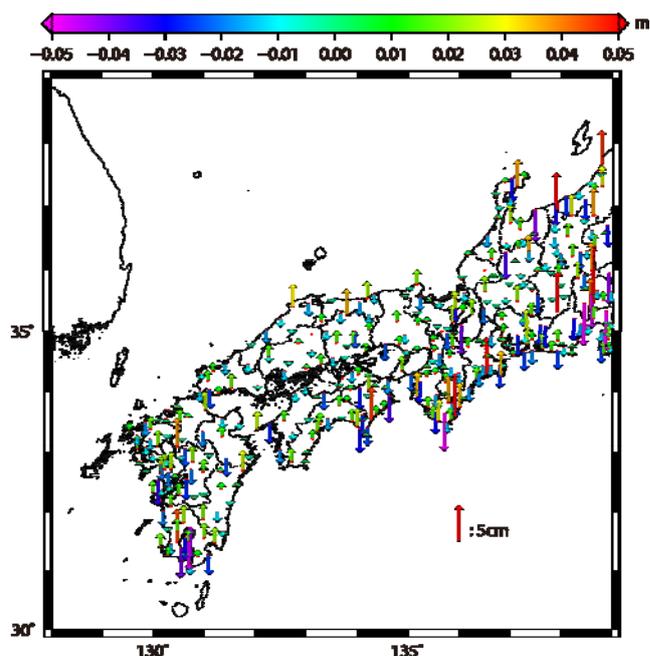


図-5 試作モデル構築に使用した電子基準点付属標のジオイド高データと試作モデルの差（西日本地方）

現在、国土地理院では高精度なジオイド・モデルの利用法の一つとして、工事や測量等における作業地域内に水準点がない場合に、基準となる点の標高決定作業についての利用を検討している。

## 6. まとめと今後の課題

今回の試作モデルの評価は、現在のジオイド・モデル「日本のジオイド2000」より高精度なジオイド・モデルになったことを有意に示した。これを受けて、国土地理院では、2012年度末には、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による影響がほとんど見られなかった中国・四国・九州地方において、ジオイド・モデルの更新を検討している。

### (1) ジオイド・モデル更新にむけて

#### a) ジオイド・モデルの評価

新たに高精度なジオイド・モデルに更新し、GNSS測量による標高決定を可能とするには、そのモデルについて評価を行い、水準点成果との整合性を把握する必要がある。そのため、国土地理院では、対象地区の一部の水準点についてGNSS観測を行い、試作したジオイド・モデルの精度評価を実施する。評価を行う水準点は、観測年が新しいもので、試作モデルの入力データから離れている地域、これまでの評価で低精度であった地域や半島部から選定する。また、評価に使用したデータは、新たなジオイド・モデルに取り込み、再度評価を行う予定である。

#### b) 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改定の影響

今回試作したモデルは、西日本のみの評価であるが、入力データには全国の電子基準点のジオイド高データを使用している。これは、ジオイド・モデルは面的に連続したグリッドデータであり、今後更新していく東日本地域と滑らかに接合させるため、また、中・長波長成分の誤差を除くためである。しかしながら、今回の試作モデルでは、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前のジオイド高データを使用しているため、成果改定の影響を加味していない。

成果改定により、測地成果は測地成果2000から測地成果2011へと変わった<sup>9)</sup>。これにより成果改定地域においては、電子基準点の成果改定量と水準点の成果改定量の違いから、「日本のジオイド2000」とGNSS測量から求まる標高は水準点成果の標高と10cm程度の不整合が生じている(図-6)<sup>9)</sup>。この不整合を、新たなジオイド・モデルで解消しようとする、成果改定地域と非改定地域の境界で急激な変化をもつジオイド・モデルとなる。今後は、境界部でのこの段差をどのように解消するか検討が必要である。

#### c) ジオイド・モデルを用いたGNSS測量による標高決定

高精度なジオイド・モデルへの更新は、その利用方法を確立しなければ、測量作業にもたらす効果はほとんどない。そこで、国土地理院は、ジオイド・モデルを用いたGNSS測量による標高決定手法を検討し、高さ方向を精度よく測量する方法を示したマニュアルの整備を目指している。

#### d) ジオイド・モデルの更新スケジュール

国土地理院は、2012年度中に中国・四国・九州地方におけるジオイド・モデルの更新を目指しており、2013年度には、北海道から近畿地方について更新を計画している。

### (2) 高精度なジオイド・モデルの維持・管理

前項(1)b)で述べたように、ジオイド・モデルは基準点の成果改定の影響を受ける。よって、ジオイド・モデルの精度を維持するには、大地震等により基準点の成果改定が行われた場合は、その改定量がジオイド・モデルにどのくらい影響を与えるか試算し、補正する必要がある。

一方、大地震発生後は、地域の復興・復旧のため改定された電子基準点等の成果が、早期に求められる。実際に昨年度の地震での対応では、電子基準点の成果は5月に改定を行い、復興に大きく貢献した。また、三角点及び水準点等の標石基準点の成果については、10月に改定が行われた。

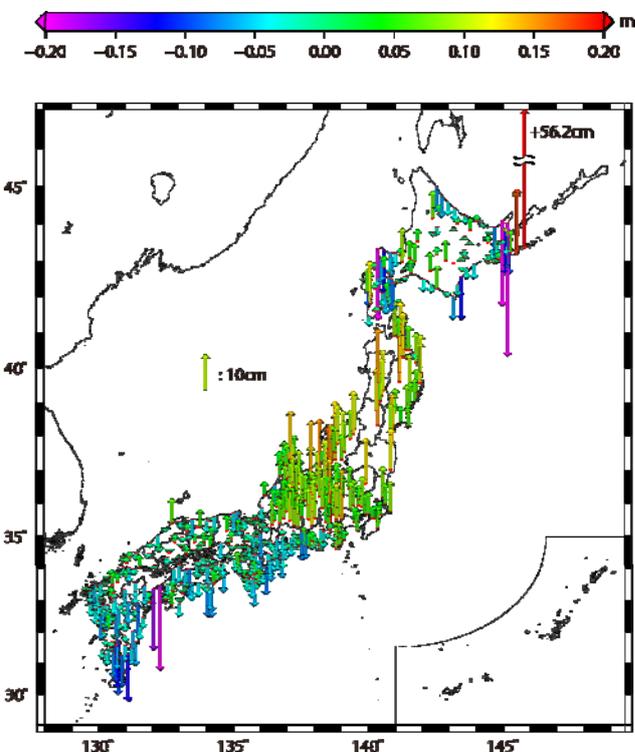


図-6 成果改定後の電子基準点付属標におけるジオイド高データと「日本のジオイド2000」の差

高精度にジオイド・モデルを維持し、水準点の標高と電子基準点を含むGNSS測量とジオイド・モデルにより決定された基準点の標高との間で高い整合性を保つためには、成果改定と同時にジオイド・モデルの改定も行う必要がある。2.(1)で述べた通り、ジオイド・モデルの作成には、GNSS/水準法によるジオイド高データ、つまり、同点におけるGNSS測量成果と水準測量成果が必要となる。そのため、ジオイド・モデルの更新速度が成果改定時期に影響する。

今後、大地震等により成果が改定される際には、復旧復興に貢献するためにジオイド・モデルの更新を迅速に行うことが求められる。

### 参考文献

- 1) 森下遊(2011)：新たなジオイド高データを使用したジオイド・モデルの試作，国土地理院測地部技術報告書。
- 2) 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.
- 3) Kuroishi, Y., W Keller (2005): Wavelet approach to improvement of gravity field – geoid modeling for Japan, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 110, 1-15.
- 4) Kuroishi, Y. (2009): Improved geoid model determination for Japan from GRACE and a regional gravity field model, Earth Planets Space, 61, 807-813.
- 5) 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。
- 6) 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.
- 7) 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 集，17-27.
- 8) 檜山洋平，山際敦史，川原敏雄，岩田昭雄，福崎順洋，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，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，29-37.
- 9) 兒玉篤郎，森下遊(2012)：測量成果改定に伴うジオイドへの影響評価，第 22 回国土地地理院技術報告会。