「日本のジオイド2000」の構築
Development of New Japanese Geoid Model, ' GSIGEO2000'

測地部　安藤　久・佐々木正博
Geodetic Department　Hisashi ANDOU, Masahiro SASAKI
測地観測センター　畑中雄樹・田中和之・重松宏実
Geodetic Observation Center
Yuki HATANAKA, Kazuyuki TANAKA, Hiromi SHIGEMATU
地理地殻活動研究センター　黒石裕樹
Geography and Crustal Dynamics Research Center　Yuki KUROISHI
京都大学大学院理学研究科　福田洋一
Department of Geophysics, Graduat School of Science, Kyoto University
Yoichi FUKUDA

要　旨

国土地理院が進めてきた測量法の改正では，測地基準系が変更され三角点の位置座標がbesselからGRS80へ，水準点標高も正規正標高から正標高へと，それぞれシステムが変更され，新しい基準点体系での基準点測量成果「測地成果2000」が生まれる。

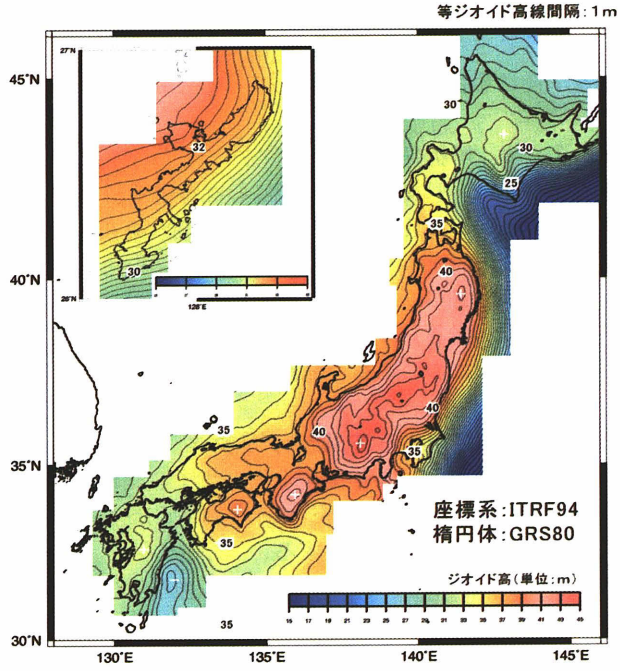
また，新しい基準点測量成果には，楕円体への変換のため基準点のジオイド高が標記されることとなった。これにともない，新基準点体系に適合する全国をカバーしたジオイド・モデルを作り，ジオイド高成果を提供する必要が生じ,「日本のジオイド2000」を構築した。

1．はじめに

現在，ジオイド・モデル作成にはジオイド測量データ（GPS／水準測量によるジオイド高データ）を使用し，重力ジオイド・モデルをジオイド高データに適合させるよう補正を行う手法を用いている。

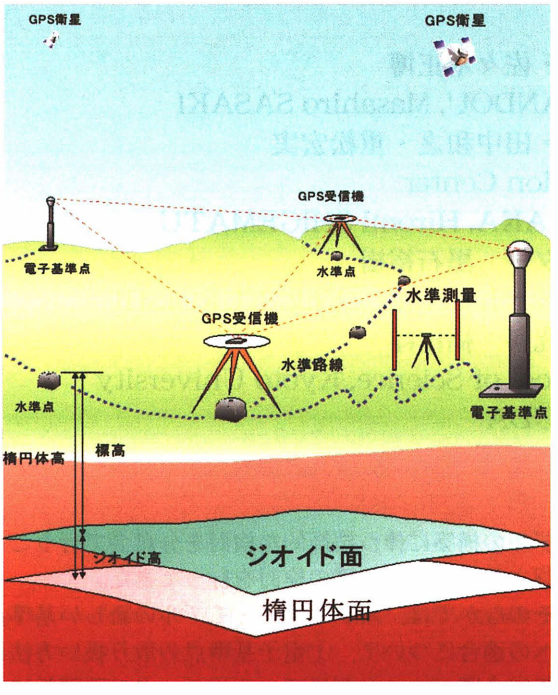
測地部では「日本のジオイド96」の作成に使用した約850点のジオイド測量データをもっており，新しい基準点体系に適合するジオイド・モデルを作成するには，このジオイド測量データを新基準点体系に変更することが必要である。具体的には，新しい測地基準系では，ITRF94座標系におけるＧＲＳ80楕円体となるためジオイド高データもそれに準じる必要がある。また，水準点標高成果も正標高へとシステムが変更されるため，ジオイド測量データにおいても水準点データは新しい正標高による水準点標高が必要となる。測地部では，新しいジオイド・モデル構築に関する検討を進めてきた。平成11年度に実施された第一回研究連絡会議において，「ジオイド高に関する技術検討分科会」が設置され，分科会では研究開発５カ年計画にある「高精度ジオイド・モデルの構築」を推進することを目的とし，当面新ジオイド・モデルの構築に伴う技術的な検討を分科会で行うことが確認され，計算手法等の検討を行ってきた。

そのなかでは，新ジオイド・モデルの新しい基準点体系への適合について，①電子基準点の取り扱い方法について②全国ジオイド測量でのGPSデータの再解析について③新水準システムでの改算による水準点標高の算出ついて等の検討が行われ，新しい測地基準系に適合したジオイド測量データを算出することとした。また，最新の重力ジオイド・モデルを使用すること，ジオイド測量データとの最適化作業においてもプログラムの改良等を行い，新しい測地基準系に適合したジオイド・モデルを構築すること等が決定した。



図－１　「日本のジオイド2000」等ジオイド高図

本報告では，検討分科会に基づき実施したジオイド・モデル構築作業を報告する。



図－２　ジオイド測量の概念

２．ジオイド測量データの変更

２．１　GPSデータの再解析

測地部では1995年に全国で約850点でのジオイド測量（GPS／水準測量）を実施した。作業は，水準点上でのＧＰＳ観測を行うことにより，直接水準点上のジオイド高を求めるものである。

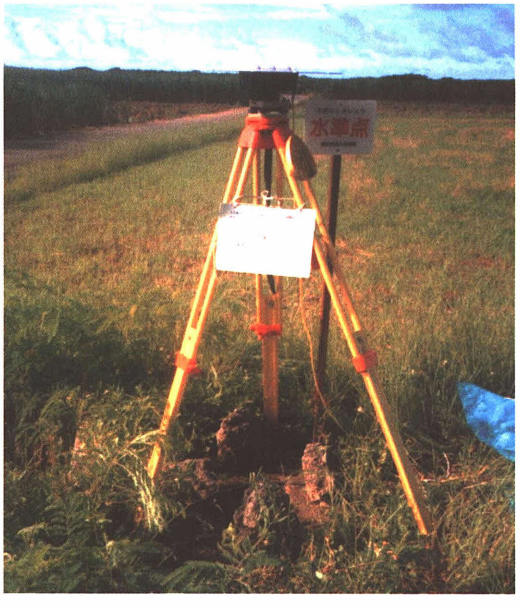
このＧＰＳデータを以下の手法により再解析し，新測地基準系に適合した座標を算出することとした。

２．１．１　解析ソフト

再解析には，「測地成果2000における電子基準点成果」（越智：1999）算出に使用した，永年潮汐等を指定する項があるGPS解析ソフト「GAMIT」（学術用基線解析ソフト）とし，GLOBK（学術用調整計算ソフト）で調整計算（平均計算）することとした。また，解析設定及び解析の制限についても「測地成果2000」と同じとした。

２．１．２　使用するGPS観測データ

1) ＧＰＳ観測値は1995年実施全国ジオイド測量GPSデータ，1995年以降実施したジオイド測量GPSデータ及び電子基準点データを使用する。
2) ＧＰＳデータ解析の際，長距離の基線が解析されるような各セッションへの電子基準点の追加は，精度を下げる恐れがあるため，電子基準点から半径50kmの範囲に含まれる電子基準点の観測データを使うこととした。ただし，各セッションの解析でRMSが大きく，解析が不良となる場合は電子基準点データを省くこととした。
3) 大きく変動していると思われる電子基準点は使用しないこととした。そのため，電子基準点における１年間の上下方向のベクトル変動量を計算し，変動量の大きな電子基準点を調査した。
4) 1995年全国ジオイド測量を実施した平成７年度は，COSMOS点（93番台電子基準点）はJST15時から12時間の夜間にあたる時間帯での観測しか行っていないため，日中観測されたジオイド測量データとの解析ができないことから，COSMOS点とGPS水準網との取り付け観測を実施することとした。そのため，平成７年度の観測点のうち水準点上で直接観測している点及び作業管理写真から現在も偏心点が存在している点を選び５時間～８時間のGPS観測を実施した。

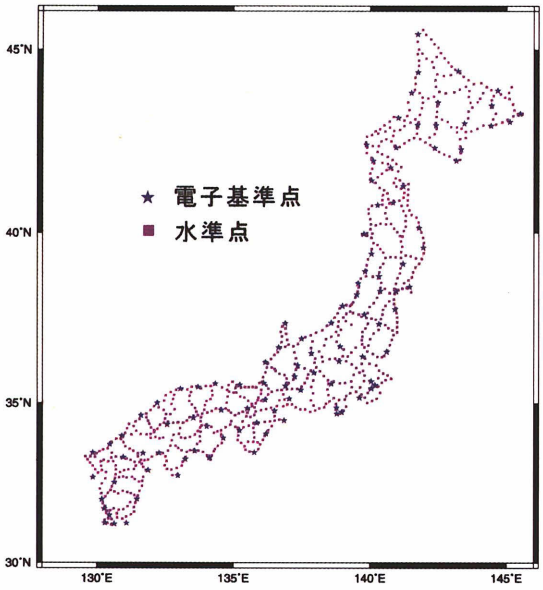


写真－１　ジオイド測量GPS観測風景

２．１．３　GPS解析の方法及び制限

1) 衛星の暦情報は，精密暦(IGS精密暦)を使用
2) 解析時間等は，全国ジオイド測量データについては15秒間隔の３時間データ，最小仰角15度とした。それ以降のジオイド測量については，各セッションにおける最大同時観測時間を使用し，観測間隔30秒，最小仰角15度とした。
3) 各セッションの解析結果におけるRMSの制限を0.3以内を標準とした。解析不能，大きく制限を超過，調整計算不能なセッションについては，①分割解析する②観測間隔の変更等行うこととした。ただし，上記①，②等行っても改善されないが，GLOBKフリー解が良好（残差０）なら採用した。この状況は特に，１セッションに５台以上のGPS受信機を使用したセッション

に多く見られた。受信機が増えることで解析距離が長くなったことが原因と考える。



図－3　ジオイド測量配点図

2．1．4　GLOBKによるGPS基線解析の調整計算

GPS調整計算は，GPS基線解析結果の誤差を調整することと，既知点の成果で観測網を固定して，未知点の座標を求める計算のことであり，以下のとおり行った。

1) 各セッションのGLOBKによる既知点を0とするフリー計算を実施
2) 地区毎に1)で求めたすべてのセッションのフリー解を統合し，フリー計算を実施
3) 各地区のフリー解を統合し，全国のフリー計算を実施
4) 全国のフリー解から電子基準点を既知とし，固定計算を実施する。ただし，既知点を固定する際0.001mの自由度を与える。以上により未知点（水準点）の座標を導く。

以上の再解析の過程をへて108点の電子基準点を既知とした844点のジオイド測量観測点の座標を算出した。

2．1．5　GPS再解析の精度評価

再解析結果の精度評価のため以下の検証作業を実施した。なお，この検証結果については（安藤・重松：2000）で報告済みである。

1) 同一測点において複数の観測を実施し，重複して解析結果がある測点での比較検証では，20点の重複点でジオイド高の比較が標準偏差約4cmの結果を得た。
2) 北海道及び和歌山地方において全国ジオイド測量観測点での改測による再解析値との比較検証では，楕円体高の比較で標準偏差約3cm弱の結果となった。

検証結果はほぼ良好な解析結果が得られたことになる。

2．2　ジオイド測量観測点における標高の算出

ジオイド測量観測点の標高算出は，測地第三課の協力により次の方法により実施した。

改算は，「2000年度平均成果」と同じシステムにより，東京原点による1点固定とした重力値を用いた正標高計算とした。データは，全国水準点改測データにより全国ジオイド測量実施年である1995年に一番近い観測値を用いて改算した。また，復旧点等の履歴を調査し，移動量の調整を行い，ジオイド測量観測点の水準標高を決定した。

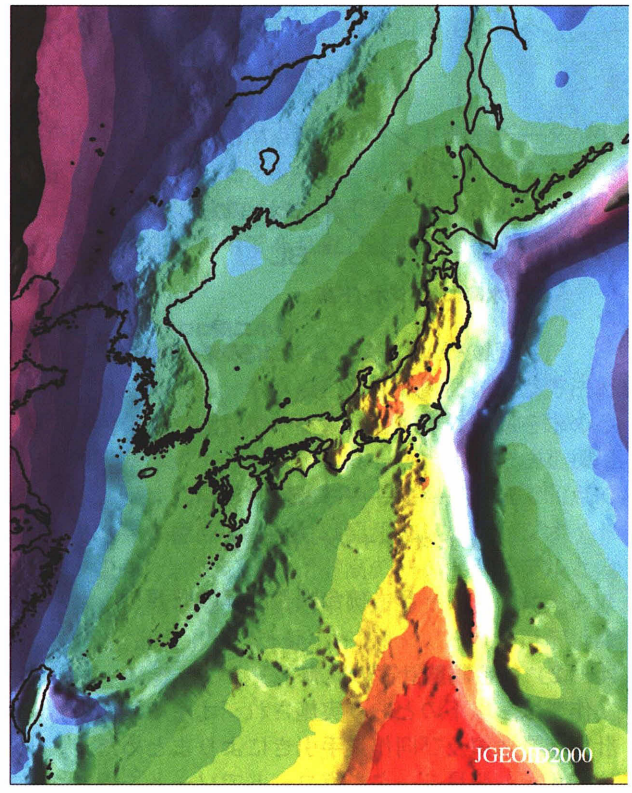
なお，GPS観測点が偏心している点については，全国ジオイド測量時の偏心点比高をそのまま使用した。

2．3　ジオイド高の計算

上記により決定したジオイド測量観測点での楕円体高及び標高により日本列島のジオイド高844点を算出し，重複する観測点の20点分を削除し，新しい基準点体系に適合したジオイド高データ824点を算出した。

3．重力ジオイド・モデルの概要

新しいジオイド・モデル作成では，重力ジオイド・モデルが必要である。新しいジオイド・モデル作成では最新の重力ジオイド・モデル「JGEOID2000」を使用することとした。この重力モデルの概要は，以下のとおりである。



図－4　重力ジオイド・モデルイメージ図

1) 基礎となる全地球ポテンシャルモデル：EGM96
2) 基準測地系：GRS80/ITRF94
3) 計算手法：球面近似ストークス積分
4) 陸上重力データ：約244,000点
5) 海上重力データ：約578,000点
6) 標高データ：国土数値情報250mメッシュ標高データ
7) ジオイドデータ：GRS80楕円体によるジオイド高（経度1.5分×緯度1分のグリッドデータ）

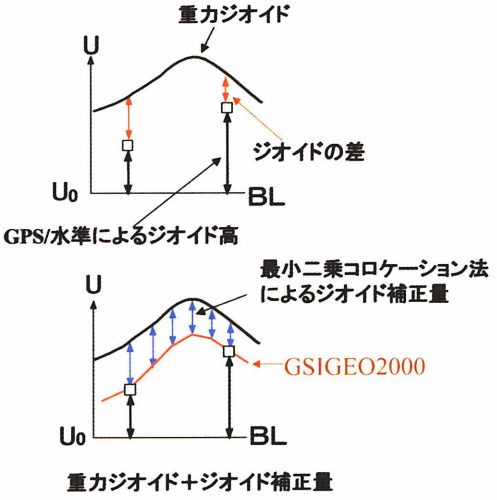
4．統合調整計算による新ジオイド・モデルの計算

統合調整計算とは，重力ジオイド・モデルをGPS／水準によるジオイド測量データに適合させるよう補正する計算である。この計算により，グローバルな重力ジオイド・モデルをローカルな日本の新しい測地基準系にあわせることができる。

4．1　プログラムの作成及び改良（黒石：2001）

計算及び手法は「日本のジオイド96」に使用した統合調整計算プログラムと同じであるが，新しいジオイド作成では，特に以下の作成及び改良及び追加を行った。

1) 日本列島全域が計算できるように計算範囲の拡大
2) 経度3分×緯度3分のグリッドデータから経度1.5分×緯度1分のグリッドへの変更
3) データ削除及び追加のプログラムの作成
4) データフォーマットの変更
5) 内挿プログラムの改良

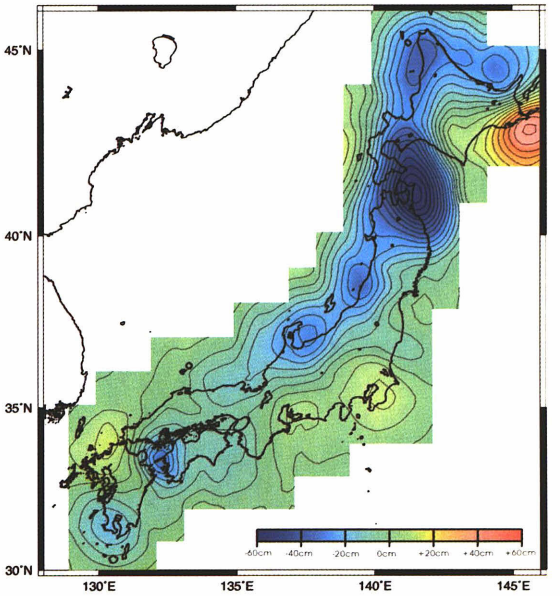


図－5　統合調整計算の概要

4．2　統合調整計算の実施

作業は，以下のとおり実施されジオイド測量統合調整計算作業要領及び同作業手引きによりまとめた。

1) ジオイド測量データを点コードでソートを行い，重複点のチェック，全点ファイル，奇数点ファイル，偶数点ファイルを作る。



図－6　重力ジオイドに対する補正量

2) 全点ファイル，奇数点ファイル，偶数点ファイルそれぞれの，ジオイド測量データ点における重力ジオイド高とのジオイド高較差データ（直接ジオイド高－重力ジオイド高）を作成する。
　＊重力ジオイド高については，重力ジオイド・モデルから補間法にて求める。
3) 全点ファイルのジオイド較差データ全点と4ブロックに分割したデータから経験共分散を5分ごとに求める。
4) 経験共分散に対し，解析関数モデルの共分散関数モデルを図示しながら求める。
5) 全点ファイル，奇数点ファイル，偶数点ファイルそれぞれ，上記4)の共分散関数モデルを用いて，ジオイド高較差データから最小二乗コロケーション法による内挿を行い，ジオイド較差グリッド（経度10分×緯度10分）とその誤差グリッドを作成する。
　＊ジオイド較差グリッド（経度10分×緯度10分）が重力ジオイドの補正グリッド・モデルとなる。
6) 重力ジオイド・グリッドに対し，全点ファイル，奇数点ファイル，偶数点ファイルそれぞれの補正グリッド・モデルを加えジオイド・グリッド・モデル（経度1.5分×緯度1分）を作成する。
7) 奇数点ファイル，偶数点ファイルによるジオイド・グリッド・モデル（経度1.5分×緯度1分）を比較し，精度確認を行う。
8) ジオイド測量データと上記6)のジオイド・グリッド・モデル（経度1.5分×緯度1分）の比較を行う。ただし，異常と思われる観測点データが確認された場合データを削除し，再度手順を追う。今回は，824点から8点削除し，816点のデータを使用した。
9) 上記5)において，ジオイド測量データの誤差推定の項を0.10mから0.20mの値で試算を行い，最良な値を決定する。今回は，上記8)の比較により較差のＳＤが最

小だった0.13mを使用した。

10)モデル作成作業は，上記6)で終了だが，このデータには離島域のデータが含まれている。日本列島全体をカバーするよう計算範囲を広げたため，高さの基準が違う日本列島周辺の離島域まで計算されている。したがって，この地域のデータを削除することとした。

5．離島ジオイド・モデル

新測量法施行時（2002.4予定）に提供する新ジオイド・モデルには日本列島周辺及び沖縄島周辺の主だった島についてカバーされるよう準備を進めているが，現段階では沖縄島のジオイド・モデル（黒石・安藤：2001）しか完成していない。離島毎に違う島の形状，ジオイド起伏，重力データ，ジオイド測量データ量等を考慮して作成する必要がある。

6．精度検証

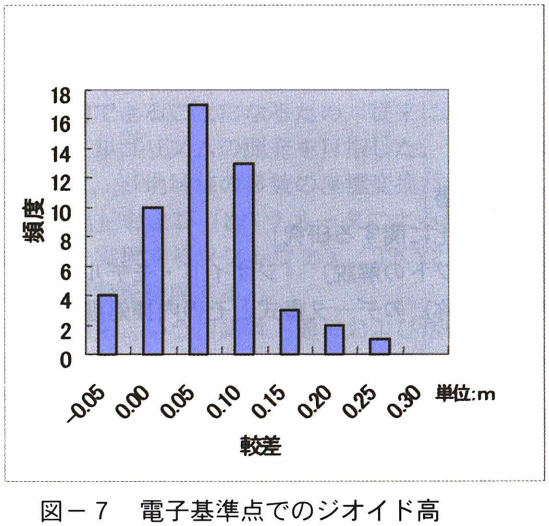
6．1　ジオイド測量データと新ジオイド･モデルの比較

ジオイド測量データ816点における新ジオイド・モデルでのジオイド高の較差の標準偏差4.0cmであった。最大は根室半島の点で＋23.8cm，最小は佐田岬半島の先端の点で－35.8cmの較差を生じた。

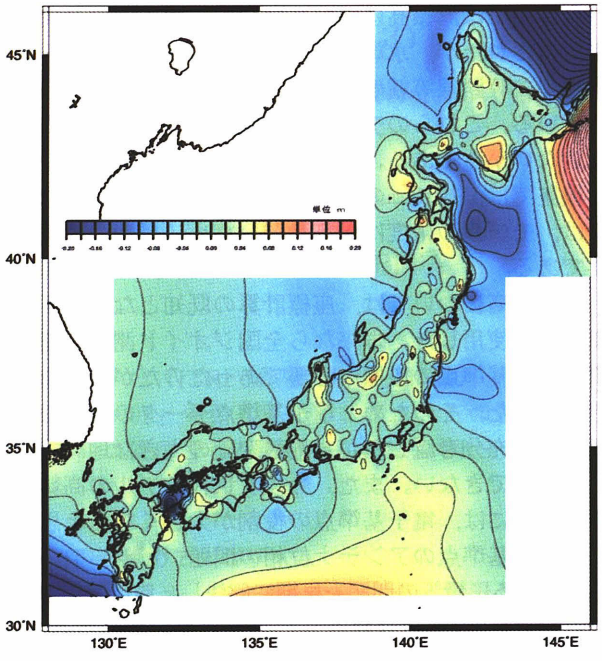
6．2　半島部の検証

6．2．1　ジオイド測量データの無い半島

新ジオイド・モデルにおいてジオイド測量データの無い半島部については，その付け根地域のジオイド測量データに影響されて，実際のジオイド傾斜を反映されてない心配がある。そのため平成12年度に大隅半島最先端佐多岬において潮位データ使用した検証作業を実施した。（安藤：2001）また，平成13年度には北陸地方測量部の協力により能登半島において二等水準点を使用した検証作業を実施した。その結果大隅半島ではモデル値との較差約15cm，能登半島では約10cmの結果を得た。また、能登半島では水準成果の検証もできた。



図－7　電子基準点でのジオイド高と新モデルの較差



図－8　ジオイド測量―新ジオイド・モデル

6．2．2　ジオイド測量データと新モデルとの較差が大きな半島

根室半島及び佐田岬半島ではジオイド測量データと新モデルとで大きな較差が生じた。そこで，13年度に佐田岬半島において検証作業を実施した。検証結果は現在解析中であり後日技術報告書を作成する予定である。

6．3　瀬戸内地域の検証

瀬戸内地方は，小島が点在しジオイド測量データが少なく重力ジオイド・モデルの調整が不確実な地域である。そこで，平成13年度瀬戸内地域で検証作業を実施した。検証結果は現在解析中であり後日技術報告書を作成する予定である。

6．4　電子基準点でのジオイド高による検証

ジオイド測量では，水準点上でGPS観測を行う方法とは別に楕円体高が既知である電子基準点の標高を求めることで電子基準点上のジオイド高を算出する方法を採用している。平成12年度作業において北海道地域で50点での電子基準点の標高の取り付け観測を実施し，ジオイド高データを得た。このジオイド高データと新モデルとの比較検証を実施した。検証結果は新モデルとの較差の標準偏差6cm，最大＋25.4cm最小－3.9cmであり，再解析に使用した＋94番台の電子基準点（1994年設置）では±4cmに収まっていた。

7．まとめ

ジオイド測量によりジオイド高を精度良く求めるには，時系列を統一する必要がある。

今作業では，標高については全国ジオイド測量実施時に改算されたが，水準定期改測路線からはずれた一等水準点，二等路線等精度保証のできない水準点を今回使用している。これらのデータを使用しないと全国をカバーできないからである。能登半島での二等水準点を使用した検証では，約10cmの較差であったが，このような地域では，モデルの精度は保証し難いため，早期の改測が必要である。

楕円体高については，座標計算の既知となる電子基準点成果を使用した。本来なら全国ジオイド測量実施時期での電子基準点の座標が必要であったのだが改算までできなかった。そのため，電子基準点データの使用では地殻変動等充分考慮したが，地殻変動の大きな地域では決して安心できない。また，今後次世代モデルの高精度化を進めるには，電子基準点の役割が大きくなると思われる。電子基準点のアンテナ位相の問題，ピラーの種類の違いによる影響等の問題を早期に解決し，電子基準点データを有効に活用したい。

離島に関しては，水準点のある島については，ジオイド測量もほぼ終了しており今後追加する予定である。また，水準点の無い離島については，潮位データを利用した高さ決定によりジオイド測量を進めている。しかし，高さの基準の違いが精確に把握できておらず，離島部のモデルにギャップを生じる問題もある。

今後は，半島部，山岳部等精度に問題があると思われる地域の検証，離島地域のモデルの最適化等調査，研究を進め，高精度なジオイド・モデル作成をめざしたい。

参考資料

越智(1999)：技術報告書「電子基準点成果の計算作業に関する技術報告書」

安藤・重松(2000)：平成12年度調査研究年報「ジオイド高決定の高精度化に関する研究」

黒石(2001)：技術報告「ジオイド・グリッド・ファイルに対する処理ソフトの解説」「ジオイド・モデルの部分更新処理とそのモデルの作成手順」「日本のジオイド2000（仮称）のデータ書式とその内挿処理プログラムの説明」

黒石・安藤(2001)：技術報告書「沖縄島のジオイド・モデルについて」

安藤(2001)：技術報告書「日本のジオイド2000比較検証（大隅半島南部地区における験潮データによる比較）」