

屋久島周辺におけるジオイド・モデルの構築について Development of Hybrid Geoid Model Around YAKUSHIMA in Japan

測地部 野村勝弘・渡辺政幸・吉川忠男・森田和幸¹

Geodetic Department

Katsuhiko NOMURA, Masayuki WATANABE, Tadao KIKKAWA and Kazuyuki MORITA

要 旨

国土地理院では、離島部のモデルを順次決定し「日本のジオイド 2000」に追加公表している。

日本周辺の重力ジオイド・モデル JGE0ID2000 に陸上重力データを追加した改良重力ジオイド・モデルを基盤に GPS/水準法によるジオイド高データを適合して地形起伏の急峻な屋久島周辺のジオイド・モデルを構築した。

屋久島周辺のジオイド・モデルの構築は、重力ジオイド・モデルに陸上重力データを追加した改良重力ジオイド・モデルの評価を行った後、1) ジオイド・モデル作成に使用するジオイド高データの検討（屋久島周辺 4 島の解析範囲を変えたジオイド高データの評価）、2) GEONET 成果の改定前・後の成果値を用いて解析したジオイド高データと改良重力ジオイド・モデルの比較より最適なモデル構築の検討を行った。

1. はじめに

日本列島は、複雑なプレート収束境界からなり地形や地殻構造が激しく、日本周辺の重力ジオイド・モデル JGE0ID2000 (Kuroishi, 2001c) は複雑な形状をしている (図-1)。

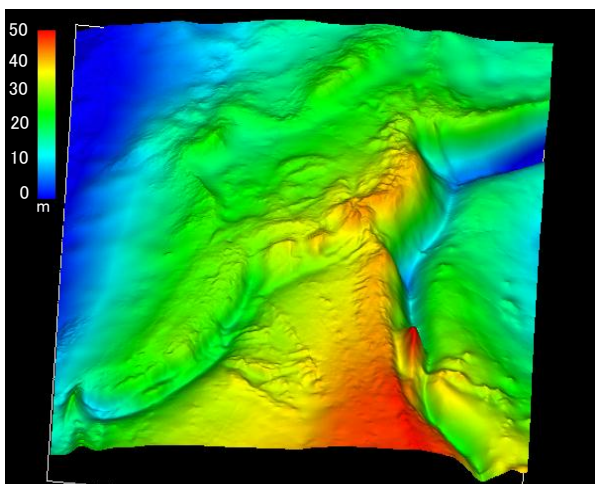


図-1 重力ジオイド・モデルの段彩陰影島瞰図
(Kuroishi, 2001c)

屋久島周辺は、世界最大の潮流である黒潮が流れ海洋から大気へ熱供給が活発であり、海面高変

動の激しい地域である。このため、地球システムとして力学的基準面であるジオイドの波長領域や傾斜に大きな変動をもつ可能性が考えられる。

国土地理院では、離島部のジオイド決定にあたり、本土からの距離、周辺海域の地形起伏と地質環境、重力ジオイド・モデルの品質、局所的な重力場の起伏等を考慮し高い空間密度でジオイド測量を行いジオイド・モデルの構築に取り組んでいる。

離島部では、地域的な重力場や地形起伏が異なるため、重力ジオイド・モデルの品質やジオイドの起伏が異なり、稠密に分布した GPS/水準法によるジオイド高データを用いてジオイド・モデルの決定手法の工夫と精度評価を行い作成している。黒石 (2001) による沖縄島のジオイド・モデルの構築は、測地成果 2000 に準拠した標高基準面位置としてジオイド高データを精密に決定するため、基線解析は楕円体高の決定精度を重視した再解析を行い、ジオイド高データだけに基づく場合と重力ジオイド・モデルに対する補正ジオイド高データを用いた場合について、異なるデータ格子化の方法を検討しジオイド・モデルを決定した。

また、屋久島と類似する地形起伏を持つ日本海の背弧側の縁海に位置する利尻島は、礼文島を含めず利尻島だけでジオイド・モデルを決定した。

屋久島は、地形起伏が急峻で他の離島と比較して山体質量密度の影響が大きい離島であるため、重力ジオイド・モデルに陸上重力データを追加して改良した重力ジオイド・モデル (以下、「改良重力ジオイド・モデル」という。; 黒石ほか, 2004) を基盤とし GPS/水準法によるジオイド高データを適合して屋久島周辺のジオイド・モデルを作成した。

本稿では、評価手法として、陸上重力データを追加し改良した重力ジオイド・モデルの評価を行い、2004 年 7 月に GEONET システムの高精度化に伴い、GEONET 成果の改定前と改定後の成果値よりジオイド・モデルの絶対的な標高基準面位置を与えるジオイド測量点のジオイド高データの評価を行った。

これら 2 種類のジオイド高データと屋久島周辺の離島 (屋久島, 種子島, 口永良部島及び薩摩硫

黄島)の解析範囲を変えてジオイド補正モデルを評価基準としてジオイド・モデルを構築した。

さらに、構築された屋久島周辺4島のジオイド・モデルと GEONET 成果改定後の成果値よりジオイド高データの評価を行い、標高決定精度を考察した。

2. 屋久島周辺の重力ジオイド・モデルの改良

2.1 陸上重力データの追加

屋久島周辺における、重力ジオイド・モデルの精度向上と陸上重力データの希薄な山体質量密度の改良効果を把握するため、実測による陸上重力データの追加を行い重力ジオイド・モデルの改良を行った(黒石ほか, 2004)。

図-2(a)に屋久島周辺の重力ジオイド・モデルと図-2(b)に屋久島周辺の改良重力ジオイド・モデルのデジタル標高モデル(DEM)データ分布図を示す。

また、表-1に屋久島周辺の重力ジオイド・モデルの陸上重力データと改良重力ジオイド・モデルで追加された陸上重力データを示す。

屋久島周辺における陸上重力データは、種子島で24点の均等な重力データの分布となっている。

一方、屋久島は12点存在しているが東側のかなり偏在した地域に分布しており主に沿岸道路沿いの11点と中腹部における荒川ダム周辺の1点に過ぎない。

陸上重力データの追加は、国土地理院(GSI)や産業技術総合研究所地質調査総合センター(GSJ)の総数302点の陸上重力データを使用した。

屋久島の追加した陸上重力データは、GSIが山体に沿って重力測量を稠密に行った28点とGSJの190点を使用した。

さらに、種子島は、BA復刻点83点(GSJによる陸上重力データCD-ROMのブーゲー異常グリッドから復元利用された擬似点データ)を使用した。

これら陸上重力データを追加したことにより、屋久島周辺の重力ジオイド・モデルが大幅に改善された。

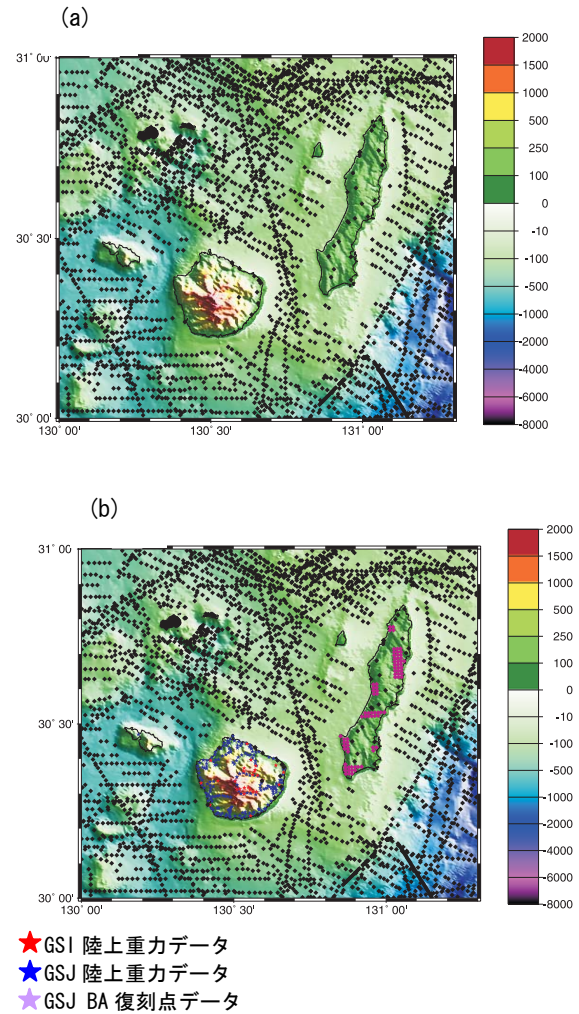


図-2 (a) 重力ジオイド・モデルに使用された屋久島周辺の陸・海上重力データの分布。
(b) 改良重力ジオイド・モデルに使用された屋久島周辺の陸・海上重力データの分布。
カラーバーの数値単位はm。
(黒石ほか, 2004)

表-1 重力ジオイド・モデルと改良重力ジオイド・モデルの陸上重力データ(黒石ほか, 2004)

	重力ジオイド・モデル(重力点数)	改良重力ジオイド・モデル(重力点数)
屋久島	12点	190点(GSJ) & 28点(GSI)
種子島	24点	83点(GSJ BA復刻点)
口永良部島		1点
合計	36点	302点

陸上重力データを追加し重力の地形補正を施したブーゲー異常グリッド図を図-3に示す。

屋久島の中央部付近に低重力の中心が見られ西端部に高重力のブーゲー異常を示していることがわかった。

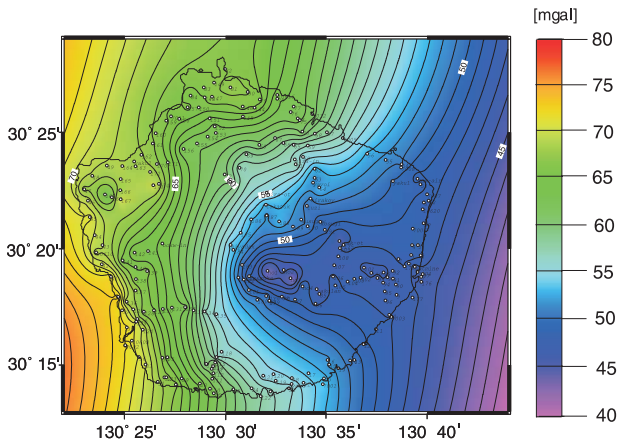


図-3 屋久島のブーゲー異常グリッド図
(コンター間隔は 1 mgal) (黒石ほか, 2004)

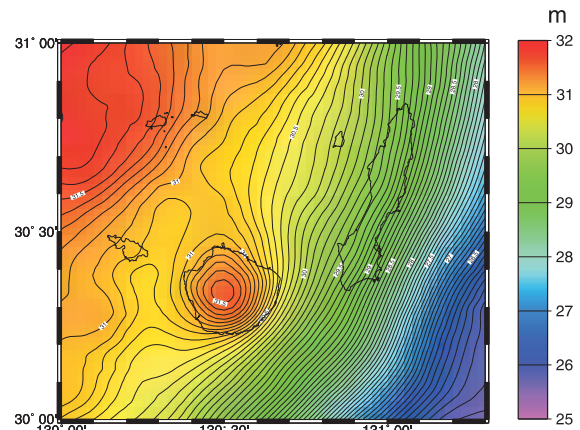


図-4 屋久島周辺の重力ジオイド・モデル
(コンター間隔は 0.1m) (黒石ほか, 2004)

2. 2 陸上重力データを重力ジオイド・モデルへ追加する手法

屋久島周辺における陸上重力データを重力ジオイド・モデルへ追加する手法は、黒石ほか (2004) による。

全球重力ポテンシャル・モデル EGM96 を参照重力場とする remove-restore 法により局所残差重力場を 1次元フーリエ変換 (球面近似 FFT 法) で Stokes 積分公式に入力する方法であり、この手法により改良重力ジオイド・モデルを構築した。

2. 3 重力ジオイド・モデルと改良重力ジオイド・モデルの比較

屋久島周辺における重力ジオイド・モデルを図-4に示す。また、陸上重力データを追加した改良重力ジオイド・モデルを図-5に示す。起伏の少ない種子島と異なり屋久島は、ジオイドの形状が山体に沿って変化していることがわかる。

また、屋久島と口永良部島との間に重力ジオイド・モデルの起伏があり、モデルの改良により起伏が詳細にわかった。

図-6に重力ジオイド・モデルと陸上重力データを追加した改良重力ジオイド・モデルとの残差ジオイド (Residual geoid) の分布図を示す。

屋久島は、陸上重力データの稠密化により島の西端部に 20cm 以上の正の補正による改善がみられ、種子島は、南端部で 5 cm 程度の正の補正がある。

屋久島の残差ジオイドにおける傾斜は、ほぼ東西方向の傾斜を持つことが確認できた。

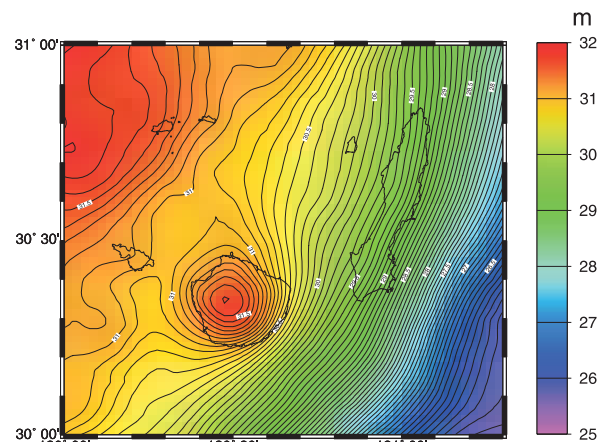


図-5 屋久島周辺の改良重力ジオイド・モデル
(コンター間隔は 0.1m) (黒石ほか, 2004)

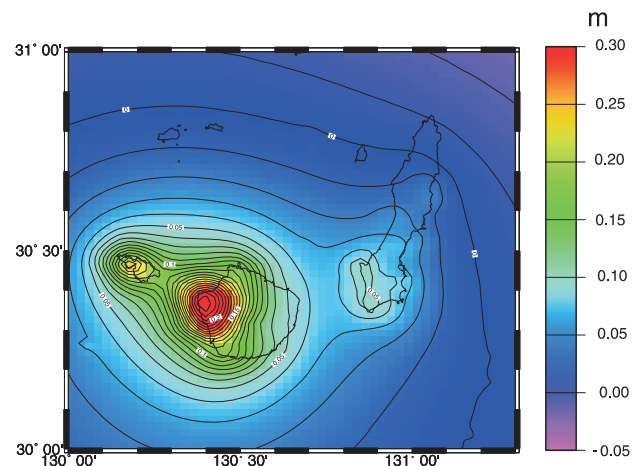


図-6 屋久島周辺の改良重力ジオイド・モデルに対する残差ジオイドの分布図
(コンター間隔は 0.01m) (黒石ほか, 2004)

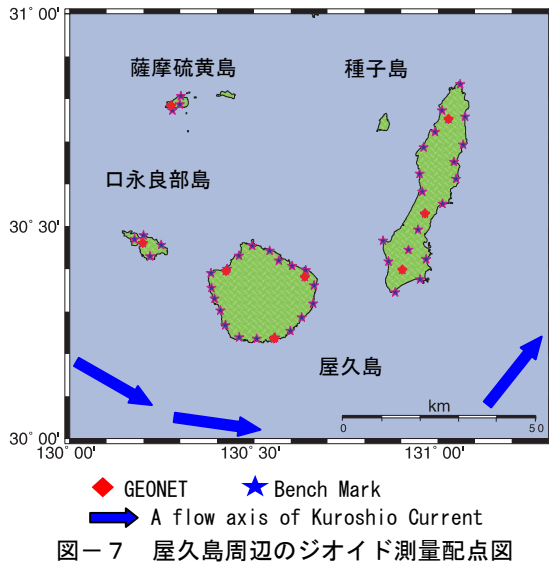
3. 屋久島周辺のジオイド高データ

3. 1 ジオイド測量の再解析

重力ジオイド・モデルの絶対的位置を評価するため、屋久島周辺の測地成果 2000 に適合するジオ

イド高データを算出するため、ジオイド測量を行った。

屋久島周辺のジオイド測量は、図-7に示すように、種子島は2001年にジオイド測量点21点、屋久島は2002年に22点、口永良部島は2005年に5点、薩摩硫黄島は2005年に4点実施した。



屋久島周辺の GEONET は以下のとおりである。

屋久島及び種子島の GEONET は、改造前は Ashtech 製の GPS 受信機・アンテナや Trimble 製の受信機・アンテナが混在していた。

改造後は、Trimble 製の Dorne&MargolinT 型のチョークリングアンテナに全て統一された。畑中(2006)や湯通堂ほか(2005)では、この改造によって GEONET の鉛直座標値に数 cm~10cm 程度の系統的な較差が生じる可能性があることを報告している。

口永良部島及び薩摩硫黄島のジオイド測量は、GEONE 改造後の Trimble 製の受信機・アンテナを用いてジオイド測量が行われた。

基線解析は、NGS のアンテナ位相特性モデルを使用しセッション毎に近傍の GEONET 成果値を固定し解析 (ITRF94 座標系-epoch1997, GRS80 楕円体, non-tidal システム) を行い、網平均計算を行った。

網平均計算は、GEONET の成果値を 0.001m で強く拘束した計算を行った。

解析ソフトウェアは、離島モデル作成で使用された GAMIT ver. 10.04/GLOBK ver. 5.06.1 を採用した。

離島の標高決定は、簡易驗潮より平均海水面を決定し離島の標高原点を定め、水準測量から標高をもとめ Helmert の正標高補正を行い、標高成果

を算出した。

3. 2 屋久島及び種子島の楕円体高成果の比較

評価基準の一つとして、ジオイド測量で得られた屋久島及び種子島の GPS データを使用して、GEONET 成果の改定前・後の成果値を固定した解析結果より楕円体高成果の比較を行った。

屋久島及び種子島における GEONET 成果改定後の成果値を固定した解析は、GPS 観測した当時のアンテナ位相特性を考慮し成果改定前の基線解析で得られた結果を用いて、GEONET 成果を改定後の成果値に固定して GLOBK による網平均計算を行いジオイド測量点の成果を求めた。

なお、GEONET を固定した計算方法は、3. 1 節と同様である。

GEONET 成果改定前・後における楕円体高成果の較差統計 (表-2)、GEONET 成果改定前・後の成果値を固定した楕円体高成果の較差分布図 (図-8 (a), (b)) を示す。

表-2 GEONET 成果改定前・後における楕円体高成果の較差統計

Point Number	Mean (cm)	SD (cm)	Maximum (cm)	Minimum (cm)
22	-1.7	0.8	0.1	-2.5
21	-9.0	2.4	-4.9	-14.5
43	-5.3	4.1	0.1	-14.5

(上段) 屋久島だけによる楕円体高成果の較差

(中段) 種子島だけによる楕円体高成果の較差

(下段) 屋久島と種子島による楕円体高成果の較差

屋久島だけで比較した場合、ジオイド測量点 22 点の楕円体高成果が 0.1cm~-2.5cm の範囲で変化し平均較差は-1.7cm である。この較差分布を図-8 (a)に示す。全体的に滑らかな較差分布であることがわかった。

また、屋久島と種子島で比較した場合、ジオイド測量点 43 点の楕円体高成果が 0.1cm~-14.5cm の範囲で変化し平均較差は-5.3cm である。この較差分布を図-8 (b)に示す。屋久島は滑らかな較差分布であるが、種子島の中部から南部にかけて較差が大きく、屋久島と種子島との楕円体高成果の較差に約 7.0cm~8.0cm の系統的な較差が生じていることがわかった。

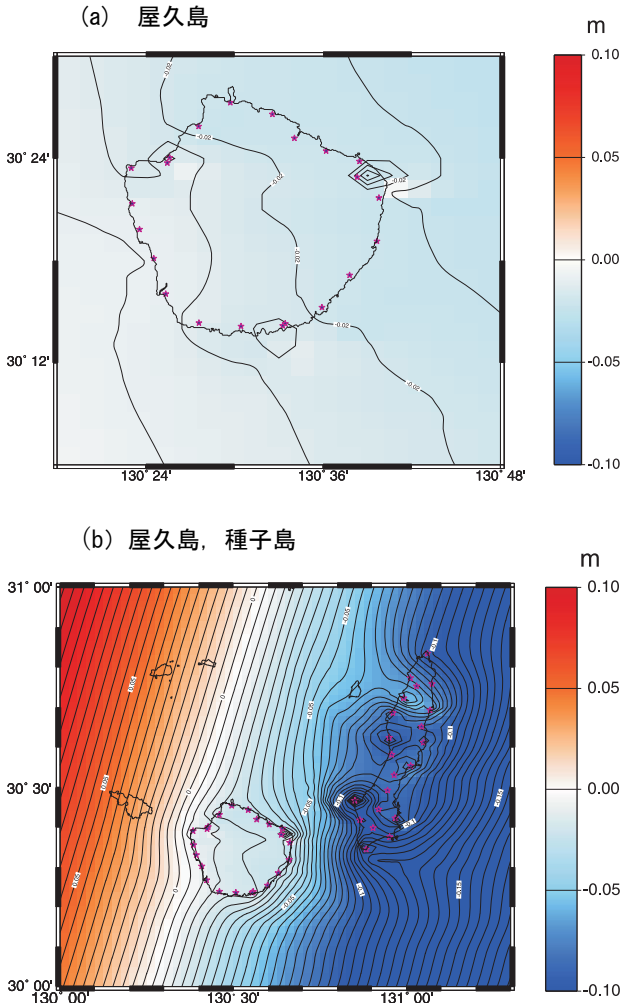


図-8 GEONET 成果改定前・後の成果値を固定した楕円体高成果の較差分布図 (コンター間隔は5mm)

4. ジオイド・モデル構築に使用するジオイド高データの検討
 4.1 改良重力ジオイド・モデルとジオイド高データの比較

屋久島周辺における最適なジオイド高データを評価し誤差を低減した最適なジオイド補正モデルを構築するため、改良重力ジオイド・モデル及びジオイド高データ(屋久島及び種子島ではGEONET成果の改定前の成果値と改定後の成果値)を使用して、屋久島周辺4島で解析範囲を変えた場合の比較を直接的較差または傾斜平面回帰によって精度評価を行った。

重力ジオイド・モデルとジオイド高データの間に含まれる中・長波長誤差を傾斜平面で近似しその傾斜平面を最小二乗法で推定、除去して求めた残差ジオイドは、短波長成分を近似すると考える。

表-3は、改良重力ジオイド・モデルと屋久島周辺4島のジオイド高データの解析範囲を変えた

離島グループと GEONET 成果改定前・後における直接的較差及び平面回帰後の較差統計を示す。

表-3 改良重力ジオイド・モデルと屋久島周辺4島のジオイド高データの較差統計

Model	Raw difference			De-trended difference		
	Mean(cm)	SD(cm)	Range(cm)	Tilt(ppm)	SD(cm)	Range(cm)
[1] YAKUSHIMA						
A	0.9	1.9	6.2	1.3	1.4	5.8
B	-0.8	1.9	5.5	1.3	1.7	6.0
[2] YAKUSHIMA, TANEGASHIMA						
A	0.4	2.2	9.6	0.7	2.0	9.8
B	-4.9	5.0	18.4	2.6	2.8	12.9
[3] KUCHINOERABUJIMA						
B	10.0	2.0	4.9	2.7	4.1	2.0
[4] SATSUMAIWOJIMA						
B	-8.4	1.6	3.7	18.9	0.5	0.9
[5] YAKUSHIMA, KUCHINOERABUJIMA						
A	2.6	4.0	14.9	2.3	1.9	9.4
B	1.0	4.2	15.5	2.6	2.0	9.2
[6] YAKUSHIMA, TANEGASHIMA, KUCHINOERABUJIMA						
A	1.4	3.6	18.3	1.3	2.4	12.9
B	-3.5	6.4	28.4	2.8	2.9	12.8
[6] YAKUSHIMA, TANEGASHIMA, SATSUMAIWOJIMA						
A	-0.3	3.2	14.6	0.4	2.7	10.6
B	-4.9	4.9	18.4	1.6	3.4	16.0
[7] YAKUSHIMA, TANEGASHIMA, KUCHIERABU, SATSUMAIWO						
A	0.7	4.4	23.4	0.5	4.1	20.6
B	-3.6	6.1	28.4	2.1	3.9	18.7

上記 A 及び B は、屋久島及び種子島において、
 A: GEONET 成果改定前の成果値で解析されたジオイド高データを使用した較差,
 B: GEONET 成果改定後の成果値で解析されたジオイド高データを使用した較差,
 [number]: 屋久島周辺4島の離島のグループ番号。

4.1.1 ジオイド高データと改良重力ジオイド・モデルの相関分布

図-9 (a)~(d)は、重力ジオイド・モデルと改良重力ジオイド・モデルとの残差ジオイドと屋久島周辺のジオイド高データ及び改良重力ジオイド・モデルのジオイド較差における相関分布を示す。

図-9 (a), (b)は直接的な相関を, (c), (d)は平面回帰後の相関を示す。

図-9 (a), (c)は、屋久島、種子島については GEONET 成果改定前の成果値を、口永良部島、薩摩硫黄島については改定後の成果値を用いて解析したジオイド高データ。

図-9 (b), (d)は、屋久島、種子島、口永良部

島及び薩摩硫黄島について GEONET 成果改定後の成果値に固定した解析によるジオイド高データ。

図-9 (a) の GEONET 成果改定前の直接的な相関分布は、相関係数が 0.50 を持ち、回帰直線の傾斜が 0.755 である正の相関を示す。赤枠で囲まれたデータ分布は、周辺離島と比べ口永良部島、薩摩硫黄島におけるジオイド較差が大きく、改良重力ジオイド・モデルとジオイド高データとのジオイド較差は口永良部島及び薩摩硫黄島で最大約 20cm 程度あることがわかった。

一方、青枠で囲まれたデータ分布は、重力ジオイド・モデルに陸上重力データが追加されたことにより、屋久島の西端部に改良効果が認められた。

図-9 (b) の GEONET 成果改定後の直接的な相関分布は、0.65 の相関係数をもち回帰直線の傾斜が 0.702 である正の相関を示し(a) と比べ種子島のジオイド高の較差が約 7.0cm~10.0cm 程度ずれていることがわかる。これは種子島における GEONET システムの改造に伴う位相特性のモデル誤差に起因した楕円体高成果の系統的な較差によるものと考えられる。

また、種子島と口永良部島で最大約 30.0cm 程度の較差が生じていることがわかった。

4. 1. 2 傾斜平面回帰による解析範囲を変えたジオイド高データの選択

図-9 (c) 及び(d)における平面回帰後の相関分布と改良重力ジオイド・モデルとジオイド高データとの平面回帰後の較差統計量 (図-10) から、解析範囲を変えたジオイド高データの選択を行う。

図-10 の横軸は、解析範囲を変えた各離島グループ番号を示す。縦軸は傾斜平面で近似した傾斜率と平面回帰後の標準偏差を示す。

また、GEONET 成果改定後の成果値で解析したジオイド高データと改良重力ジオイド・モデルの平面回帰後のジオイド較差分布図を図-11 (a)~(d) に示す。

図-9 (c) 及び(d)から、重力ジオイド・モデルとジオイド高データの間に含まれる中・長波長誤差を傾斜平面で近似すると、屋久島周辺 4 島による解析では、口永良部島と薩摩硫黄島、あるいは種子島でそれぞれ約 10.0cm 程度の短波長成分の誤差があることがわかり、図-11 (a)~(d) のように離島の解析範囲が増えるに従い約 20cm 程度の短波長成分のギャップが局所的に屋久島周辺の離島に含まれることがわかる。

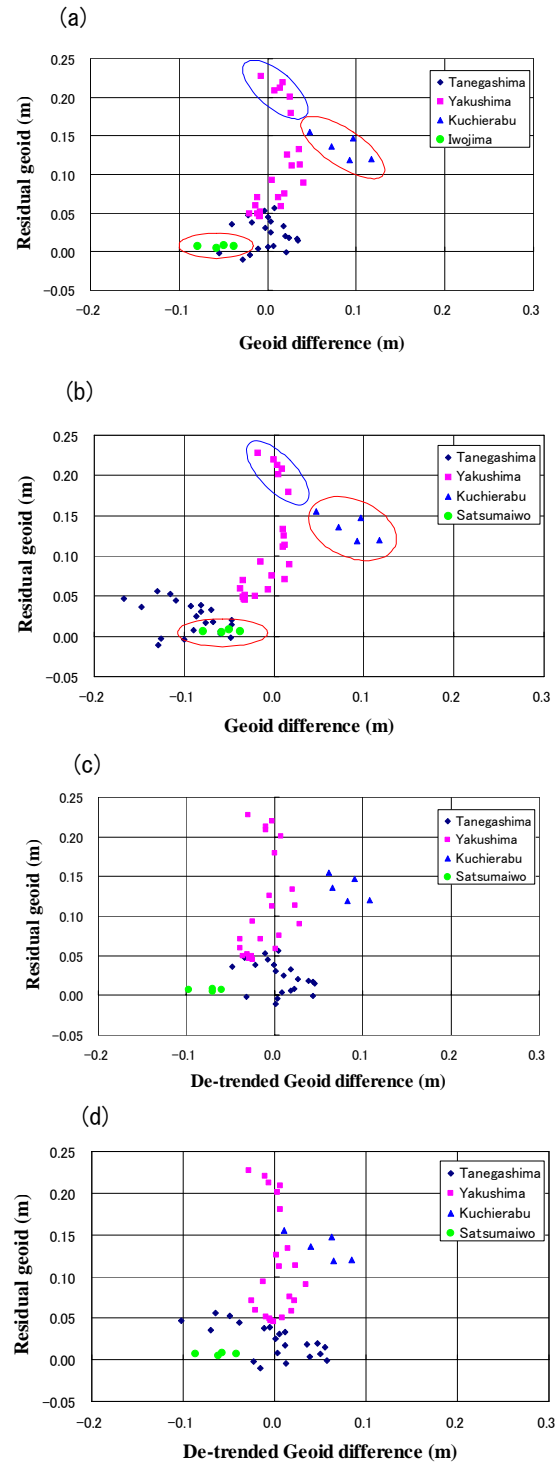


図-9 重力ジオイド・モデル及び改良重力ジオイド・モデルとの残差ジオイドとジオイド較差との相関分布

(a), (b)は直接的な相関分布, (c), (d)は平面回帰後の相関分布,

(a), (c)は屋久島, 種子島では GEONET 成果改定前の成果値,

(b), (d)は屋久島, 種子島では GEONET 成果改定後の成果値.

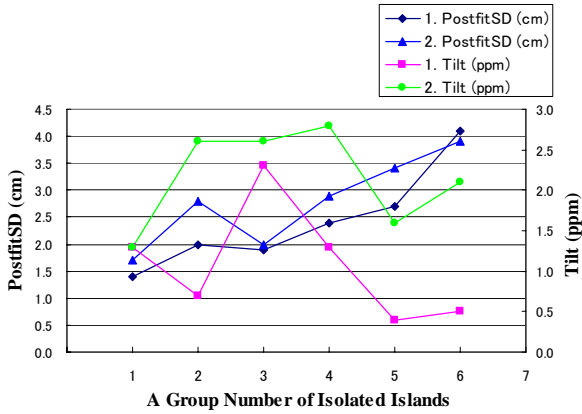


図-10 解析範囲を変えた改良重力ジオイド・モデルとジオイド高データの平面回帰後の較差統計量

1と2のtiltは傾斜平面近似した傾斜率, 1と2のPostfitSDは平面回帰後の較差の標準偏差を表す.

1はGEONET 成果改定前, 2はGEONET 成果改定後, の成果値を用いて解析したジオイド高を用いている.

(離島のグループ名)

- 1: 屋久島 2: 屋久島, 種子島 3: 屋久島, 口永良部島
- 4: 屋久島, 種子島, 口永良部島
- 5: 屋久島, 種子島, 薩摩硫黄島
- 6: 屋久島, 種子島, 口永良部島, 薩摩硫黄島

また, 図-10 から離島の解析範囲を増やすと, 傾斜率は低減されるが短波長の精度である標準偏差は低下する傾向がわかる. このことは, 屋久島周辺の海域は稠密なジオイド高データがない, もしくは等間隔に含まれていないことにより, 短波長成分の誤差として含まれるものと考えられる.

屋久島周辺の解析範囲の評価から, それぞれ離島毎のジオイド高データを用いて離島単体でジオイド・モデルを構築する手法が, 短波長成分の誤差を低減するモデルと考えられる.

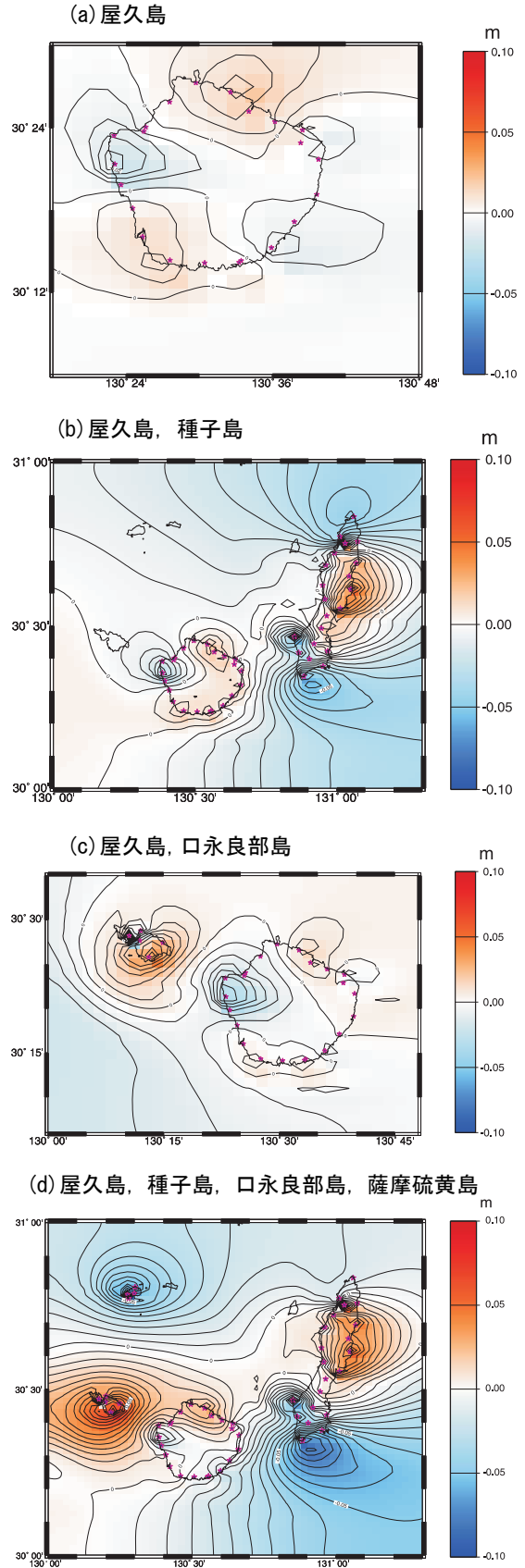
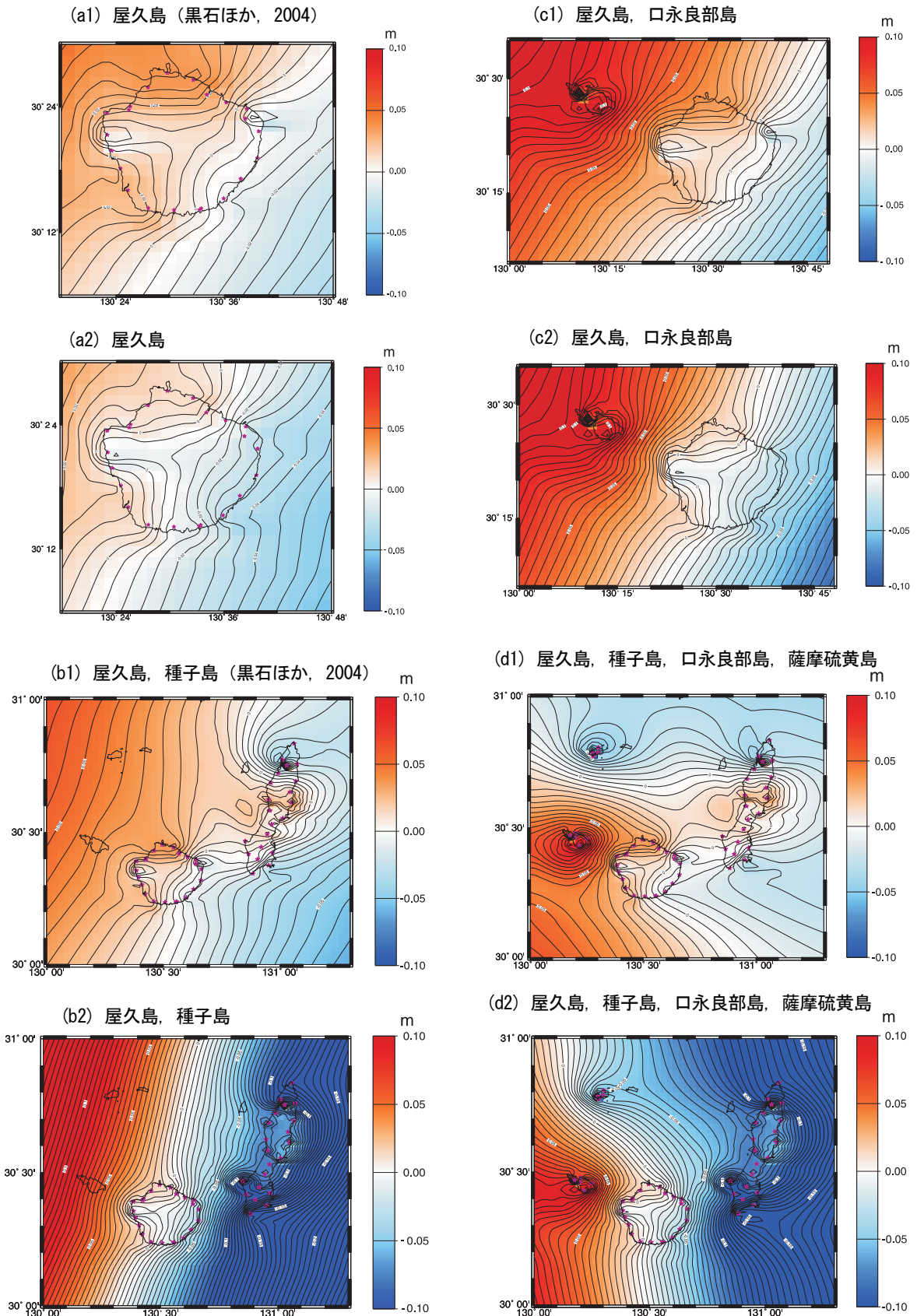


図-11 GEONET 成果改定後の成果値で解析したジオイド高データと改良重力ジオイド・モデルの平面回帰後のジオイド較差の分布図 (コンター間隔は5mm)



図一12 GEONET 成果改定前・後の成果値で解析したジオイド高データと改良重力ジオイド・モデルのジオイド較差の分布図 (コンター間隔は5mm)

図表番号 *1は GEONET 成果改定前の成果値, *2は GEONET 成果改定後の成果値で解析されたジオイド高データ.

4. 1. 3 GEONET 成果を変えたジオイド高データの選択

GEONET 成果改定前・後の成果値より解析された楕円体高成果の較差は、屋久島で約 2.0cm, 屋久島と種子島で約 7.0cm~8.0cm の系統的な較差が生じていることがわかった。

GEONET 成果改定前・後の成果値より解析されたジオイド高データから、改良重力ジオイド・モデルを用いることにより最適なジオイド高データの選択を行った。

図-12 は、GEONET 成果改定前・後の成果値で解析したジオイド高データと改良重力ジオイド・モデルのジオイド較差の分布図を示す。表-3 より改良重力ジオイド・モデルと屋久島周辺4島のジオイド高データの GEONET 成果改定前・後の較差統計から、屋久島だけのジオイド高データを使用した場合は、GEONET 成果が改定された影響はほとんど見られない。図-12(a1)及び(a2)による比較から、改定後の成果値で解析したジオイド高データを用いた場合、ジオイド較差が滑らかであることがわかった。

解析範囲を変えた離島グループは、3.2節による GEONET 成果が改定された影響を含む楕円体高成果の較差が大きい種子島が含まれることにより、図-12(b1)~(d2)のように GEONET 成果改定前の成果値で解析されたジオイド高データを用いた場合より較差が大きくなっている。また、図-9(c)及び(d)の平面回帰後の残差ジオイドとジオイド較差との相関分布や図-11(b)及び(d)の平面回帰後のジオイド較差の分布図から、種子島において短波長成分の誤差が大きいことがわかる。

ただし、屋久島付近では成果改定後の方が、ジオイド較差が滑らかであることがわかる。

以上の結果より、屋久島においては GEONET 成果改定後の成果値で解析したジオイド高データを用いた場合、中・長波長誤差を低減した滑らかなモデルが構築できることがわかった。一方、種子島は、GEONET 成果改定による楕円体高成果の較差が大きく、屋久島との較差が約 7.0cm~8.0cm 程度の不整合があるため、それぞれ単独で作成する手法がより良い方法であることがわかった。

4. 2 ジオイド高データとジオイド較差の比較

屋久島周辺の GPS/水準法によるジオイド高データは、屋久島だけでも GEONET 成果改定前・後の成果値に関わらず 30.4m~31.3m の範囲で変動し約 1.0m の幅がある。

一方、表-3 よりジオイド高データと改良重力ジオイド・モデルとのジオイド較差は、屋久島は 0.062m~0.055m, 屋久島と種子島は 0.096m~

0.184m のジオイド較差の範囲がある。

ジオイド高データの変動範囲はそれぞれ約 6.3%, 3.7% あり、データを内挿により格子化する場合、ジオイド高を直接格子化するよりジオイド較差を用いる方がジオイドの誤差が少なく滑らかなジオイド・モデルを作成することができる。

5. 屋久島周辺のジオイド・モデルの決定

屋久島周辺のジオイド・モデルの決定は、ジオイド較差を内挿により格子化を行い、ジオイド補正モデルを作成し改良重力ジオイド・モデルに適合させる手法とした。

屋久島周辺は、すでに GEONET 成果改定前の成果値で解析されたジオイド高データを用いて、本土のジオイド高データと一括して LSC 法により構築されている種子島は、中・長波長誤差を低減した滑らかなジオイド較差や GEONET 成果改定後の成果値に準拠させるにおいて、GEONET 成果改定後の成果値で解析したジオイド高データを用いて、各離島毎に作成する手法が最適であることがわかった。

離島のジオイド・モデルは「日本のジオイド 2000」の本土地域と同様に緯度間隔 1 分、経度間隔 1.5 分の格子間隔におけるジオイド高グリッドデータである。内挿による格子化は、テンション付きスプライン補間を使用した。また、エイリアシングの除去のため blockmedian を用いた。テンションパラメータは、黒石 (2001) より 0.75 を使用し離島における稠密なジオイド測量点におけるデータより格子化を行った。

テンション付きスプライン補間は、データの示す 2 次元曲面とその境界条件により内挿による曲面を推定しテンションにより振動を押さえ補間の誤差は入力データの間隔に大きく依存しているため、改良重力ジオイド・モデルや離島のジオイド高データの分布域が等間隔ではない場合、補間関数の振動解の影響を受け補間曲線が波打つ場合がある。

これら補間の誤差が、屋久島周辺4島で評価したジオイド較差の分布図から、離島の陸域以外の海域に対してジオイド誤差の推定は有効でないことがわかった。

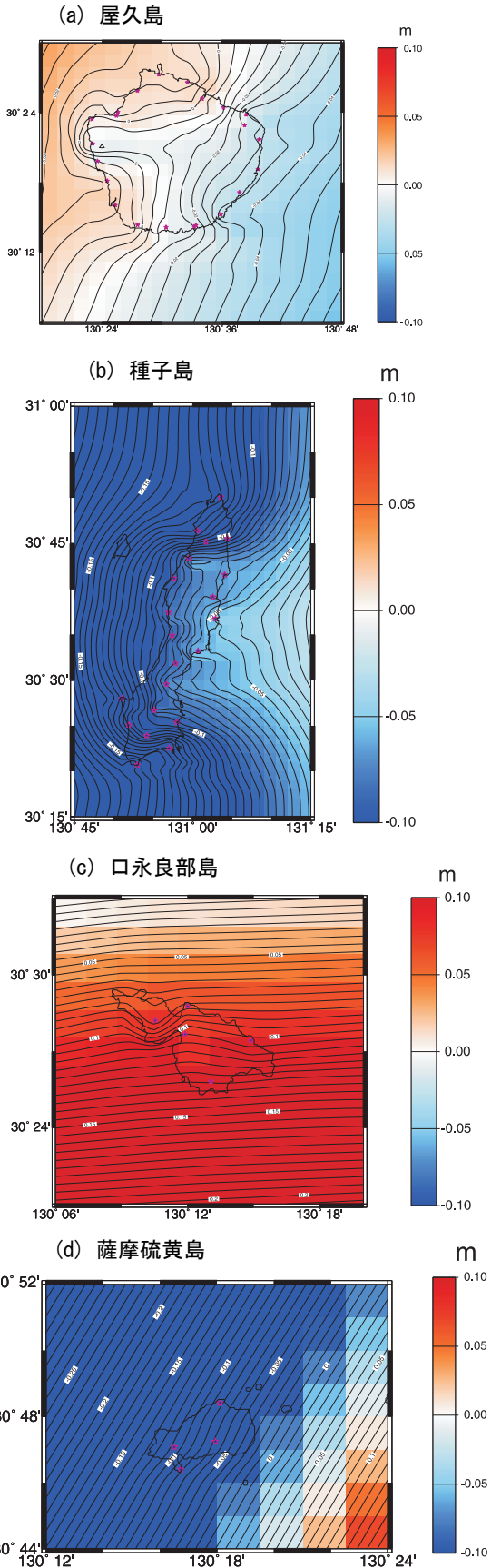


図-13 GEONET 成果改定後の成果値を用いて決定したジオイド補正モデル (コンター間隔は5mm)

5. 1 改良重力ジオイド・モデルを用いたジオイド補正モデルの評価

GEONET 成果改定後の成果値を用いた屋久島周辺のジオイド高データと改良重力ジオイド・モデルから、それぞれ離島独自にジオイド補正モデルを求めた。図-13に屋久島、種子島、口永良部島及び薩摩硫黄島のジオイド補正モデルを示す。(b) 種子島、(c) 口永良部島及び(d) 薩摩硫黄島の補正モデルは、図-12のように他の離島も含めて作成した場合より、明らかに短波長成分の誤差が低減されておりジオイド較差が滑らかであることがわかる。これら、ジオイド補正モデルを用いて屋久島周辺のジオイド・モデルを作成する (図-14)。

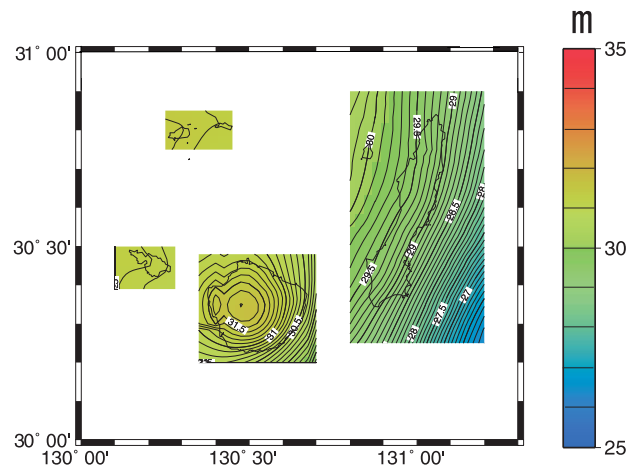


図-14 屋久島周辺のジオイド・モデル

5. 2 屋久島周辺のジオイド・モデルの精度評価

改良重力ジオイド・モデルに対するジオイド補正モデルの内挿精度を評価するため、モデル構築に用いたジオイド測量点のジオイド補正モデルとジオイド高データとの較差を表-4に示す。

屋久島周辺の離島ジオイド・モデルの内挿精度は、1.0cm以下の精度であることがわかる。

屋久島周辺のジオイド・モデルの精度を評価するため、表-5のように独立したデータによる評価を行った。評価は、屋久島周辺4島におけるそれぞれのジオイド測量点のデータセットを2組の均等な点コード順に並べた偶数及び奇数のデータセットに分割し、一方のデータセットでモデルを作成し、もう一方のデータセットによるジオイド高と比較する方法で、2組の独立したジオイド高より評価を行った。

その結果、すでに構築されている種子島を除き、屋久島、口永部島及び薩摩硫黄島におけるジオイド・モデルは約2.0cm程度の較差があると考えられる。また、種子島におけるジオイド高成果は、

GEONET 成果改定により約 7.0cm 程度の系統的な較差が含まれる可能性があり、種子島のジオイド・モデルの精度は、本土のジオイド・モデルと同様に約 10cm 以内にあると考えられる。

表-4 改良重力ジオイド・モデルをジオイド補正モデルで適合して構築したジオイド・モデルの内挿精度

Tension 0.75	Mean(cm)	SD(cm)	Range(cm)
屋久島	0.1	0.8	4.6
種子島	0.0	0.7	2.7
口永良部島	0.0	0.3	0.8
薩摩硫黄島	0.2	0.2	0.5

表-5 屋久島周辺 4 島における 2 組の独立したジオイド測量点データを用いた較差統計

Data.set (Model)	Data.set(G/L)	total	Mean(cm)	SD(cm)	Range(cm)
YAKUSHIMA					
Model A	B	11	1.4	1.9	5.5
Model B	A	11	-0.7	2.2	6.4
TANEGASHIMA					
Model A	B	11	-1.9	4.4	13.2
Model B	A	10	1.4	2.9	9.7
KUCHINOERABUJIMA					
Model A	B	2	3.3	1.5	2.1
Model B	A	3	-2.1	0.9	1.7
SATSUMAIWOJIMA					
Model A	B	2	2.2	0.6	0.9
Model B	A	2	-2.8	1.3	1.8

6. まとめ

モデル構築は、日本周辺の重力ジオイド・モデルに陸上重力データを追加した改良重力ジオイド・モデルをもとに、GPS/水準法によるジオイド高データを用いて屋久島周辺のジオイド・モデルを構築した。

その評価基準は、重力ジオイド・モデルに陸上重力データを追加前と追加後の評価を行った後、ジオイド・モデル作成に使用するジオイド高データを検討し（解析範囲を変えた屋久島周辺 4 島のジオイド較差の比較）、GEONET 成果を改定前と改定後の成果値によるジオイド高データを用いて、改良重力ジオイド・モデルとの比較から誤差を低減したジオイド補正モデルを決定し、これを改良重力ジオイド・モデルに適合して屋久島周辺のジオイド・モデルを作成した。

その結果、屋久島周辺のジオイド・モデルの決定は、地形起伏の急峻な屋久島の改良重力ジオイ

ド・モデルをもとに、短波長成分の誤差を低減するため離島独自のジオイド高データによる個別決定を行うこと、GEONET 成果改定後の成果値によるジオイド高データを用いることによって、重力ジオイド・モデルとの比較より中・長波長誤差が低減された滑らかなジオイド較差となり、誤差を低減したジオイド補正モデルとなる。このジオイド補正モデルを改良重力ジオイド・モデルに適合することにより、最適な屋久島周辺のジオイド・モデルの決定を行った。

また、これらの手法が、重力場の傾斜の激しい地域に対する方法として最適なものと考えられる。

屋久島周辺のジオイド・モデルの標高決定精度は、現在の GEONET 成果改定後の成果を用いておりほぼ 10cm 以内の精度であることが確認された。

離島のジオイド・モデルの構築手法は確立されている訳ではなく、周辺海域の地形起伏と地質環境、海面の力学的基準面の影響、重力ジオイドの傾斜やその品質等に影響されるため、これらを考慮しながら検討する必要がある。

現在、日本周辺の陸・海域の局所重力データの稠密な追加と、海洋観測衛星による海面高度計データを用いた人工衛星アルチメトリーによる海域重力場モデルを統合構築された重力ジオイド・モデルより高精度な重力ジオイド・モデル JGE0ID2004 が構築されている (Kuroishi and Keller, 2005)。

また、重力観測衛星 CHAMP (CHALLENGING Mini-Satellite Payload) や GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), GOCE (Gravity field and Ocean Circulation Explorer) と言った衛星重力ミッションにおけるグローバルな地球重力場の時間変動成分を重力衛星の観測から抽出できるようになり、長波長のジオイド・モデルの構築が近年にない精度で現実のものとなりつつある。

さらに、双子重力衛星 GRACE 観測データによる海域のジオイド・モデルへの応用が期待されるが陸域に対してははまだ重力測量による観測が有効であり、屋久島のような地形起伏が急峻で重力データの希薄な地域に対するジオイド・モデルのさらなる高精度化には重力測量が望まれる。

離島ジオイドを含む局所的なジオイド・モデルを精密に決定するため、海域ジオイド・モデルの精密決定と同時に、陸上重力データと高精度なジオイド測量データを稠密に取得する必要がある。

地球システムとしての海洋の力学的基準面であるジオイドを精密に決定することは、測地測量に対する精度向上はもちろん地球ダイナミクスにおける変動予測を可能として行くものと考えられ

る。

謝 辞

本論をまとめるにあたり、地理地殻活動研究センター黒石裕樹宇宙測地研究室長の多大なご指導を頂きました。また、内閣府参事官付計画担当の

檜山洋平氏（当時、物理測地課重力係）には、ブーゲー異常計算のご協力を頂きました。

屋久島周辺の重力ジオイドの改良は、産業技術総合研究所地質調査総合センターで測定されたデータを多数使用させていただきました。

ここに記してご協力の謝意を表します。

参考文献

- Kuroishi, Y. (2001a) : An improved gravimetric geoid for Japan, JGE0ID98, and relationship to marine gravity data, *Journal of Geodesy*, 74, 745-755.
- Kuroishi, Y., H. Ando, Y. Fukuda (2001) : A new hybride geoid model for Japan, GSIGEO2000. *Journal of Geodesy*, 76, 428-436.
- Kuroishi, Y., H. Denker (2001b) : Development of improved gravity field models around Japan. IAG Symposia, 123:MG Sideris (ed) , Gravity, Geoid, and Geodynamics 2000, 317-322.
- Kuroishi, Y. (2001c) : A new gravimetric geoid model for Japan, 重力ジオイド・モデル. IAG Symposia, 123:MG Sideris (ed) , Gravity, Geoid, and Geodynamics 2000, 329-333.
- Kuroishi, Y., W Keller (2005) : Wavelet approach to improvement of gravity field - geoid modeling for Japan, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESERCH*, 110, 1-15.
- Nakagawa, H., K. Wada, T. Kikkawa, H. Shimo, H. Ando, Y. Kuroishi, Y. Hatanaka, H. Shigematsu, K. Tanaka, and Y. Fukuda (2004) : Development of a New Japanese Geoid Model, "GSIGEO2000", *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, Vol.49, 1-10.
- Wessel, P., Smith, W.H.F. (1991) : Free software helps map and display data, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, 72, pp. 441, 445-456.
- 安藤久, 佐々木正博, 畑中雄樹, 田中和之, 重松宏美, 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*, 第 97 集, 25-30.
- 黒石裕樹 (2000) : 日本のジオイドの重力手法による精密決定, *測地学会誌*, 第 46 卷, 第 1 号, 1-20.
- 黒石裕樹 (2001) : 沖縄島のジオイド・モデルの決定について, *国土地理院技術報告書*.
- 黒石裕樹, 檜山洋平, 森田和幸, 渡辺政幸 (2004) : 屋久島における重力ジオイドの改良モデルの決定, *日本測地学会第 102 回講演会要旨*.
- 黒石裕樹 (2005) : 日本周辺の絶対的ジオイド・モデルの構築に関する研究 (第 1 年次), *平成 16 年度調査研究年報*, 197-198.
- 黒田次郎, 高畑嘉之, 松島成佳, 福田洋一 (1997) : LSC 法による GPS/水準測量と重力ジオイドの統合, *国土地理院時報*, 第 87 集, 1-3.
- 測地成果 2000 構築概要編集委員会 (2003) : 測地成果 2000 構築概要, *国土地理院技術資料 B-5 No. 20*.
- 野村勝弘, 黒石裕樹, 渡辺政幸, 森田和幸, 板橋昭房 (2006a) : 改良された重力ジオイド・モデルを基盤モデルとした屋久島および南薩地域における混合ジオイド・モデルの検討, *日本地球惑星科学連合 2006 年合同大会予稿集*, D122-P005.
- 野村勝弘, 渡辺政幸 (2006b) : 屋久島周辺のジオイド・モデルの決定について, *国土地理院技術報告書*.
- 畑中雄樹 (2006) : 地球センサーとしての GPS 連続観測網の高度化—GPS 観測量に含まれるシグナルとノイズの分離—, *測地学会誌*, Vol, 52, No. 1, pp. 1-19.
- 湯通堂亨, 岩田昭雄, 雨貝知美, 小島秀基, 矢萩智祐, 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*, 第 106 集, 21-30.