

研究ノート

日本周辺における海域ジオイドモデルの決定[†]

笹原昇^{*1}, 矢沼隆^{**2}, 矢吹哲一朗^{**3}

Determination of Marine Geoid model around Japan.

Noboru SASAHARA^{*1}, Tetsuichiro YABUKI^{**2} and Takashi YANUMA^{**3}

Abstract

We determined the precise marine geoid model, by "remove-restore technique" which is the gravimetric method. The long wavelength reference of CG 03 (Forste et al., 2005) which is the degree-360 expansion of the global geopotential model was removed from the local gravity anomalies which contain the ship borne gravity data observed by the Hydrographic and Oceanographic Department. The residual gravity anomalies were converted to geoid undulations using Fourier Stokes Formulas (1 D FFT) with the modified kernel.

Comparison of the new marine geoid model with Geographical Survey Institute geoid model (gsigeo 2000 Ver.3.1) gives the standard deviation of 0.178 m.

1 はじめに

水深測量により海図を作成してきた海洋情報部にとってジオイドは海洋調査を行うために重要な基準であり、また、海流などの海洋循環モデルを考察する上でも必要不可欠なものである。海洋情報部では Ganeko (1980) が、人工衛星の軌道解析から求められた 22 次の全球重力ポテンシャルモデル (以後、GGM: Global Gravity potential Model とする) である GEM-10 と船上重力測定で得られた局所的な重力値のブロック平均されたデータから、日本周辺の海域ジオイドを計算した。その後、作成されたジオイドモデルとしては Fukuda (1990) や黒石 (2000) などのように、観測・解析技術などの向上によって高精度になったものがある。

ここでは、より高精度なジオイドモデルを求めるため、CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload: Reigber et al., 2001) と GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment; Center for Space Research, 2003) が複合された 360 次の GGM、海洋情報部に蓄積された船上重力データ、衛星海面高度計 (Sandwell and Smith, 1997) による重力データを用いてジオイドを決定した。

本稿では、重力によるジオイド決定手法と構築された北西太平洋における「海域ジオイドモデル」について紹介する。

[†]Received December 15, 2005; Accepted February 28, 2006

*1 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

**2 株式会社パスコ Pasco Corporation

**3 海洋調査課 Hydrographic Survey Division

2 ジオイド決定作業

(1) 決定手法「remove-restore 法」

ジオイド面上に重力異常データが全球かつ均等に存在していれば、そのデータのストークス積分によりジオイド高を計算することができる (Heiskanen and Moritz, 1967.). しかし、地球表面上には観測困難な場所が多数あり人工衛星が出現するまでは全球的なデータは存在しなかった。一方、人工衛星を用いたデータは地表面とのデータと比べ細かな重力変化成分を求めることが困難である。これらデータの長所・短所を補うため、あらかじめ既知の成分 (ジオイドの長波長成分) を除き、未知の成分のみ (ジオイドの短波長成分) を計算する。この手法は「remove-restore 法」と呼ばれ、以下の式のように長波長成分に GGM による重力値、短波長成分に地表面での重力観測データを用い、地表重力異常値から GGM 重力異常値を除去 (remove) したものをストークス積分し、その後 GGM ジオイド高を復元 (restore) している。

$$\begin{aligned} N &= \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_A \Delta g_{ggm} \cdot 10^{-5} S(\psi) d\sigma \\ &\quad + \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_C (\Delta g_F - \Delta g_{ggm}) \cdot 10^{-5} S(\psi) d\sigma \\ &= N_{ggm} + \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_C (\Delta g_F - \Delta g_{ggm}) \cdot 10^{-5} (\psi) d\sigma \end{aligned} \quad (2.1)$$

N : N_{ggm} : GGM ジオイド高 (m) Δg_{ggm} : GGM 重力異常値 (mgal) Δg_F : 地表重力異常値 (Faye 異常: mgal)

R : ジオイド計算点における正規楕円体の地心距離 (m)

γ : 正規重力 (ms^{-2}) A : 積分領域 (全球)

C : 積分領域 (地表データがある局所域)

$$S(\psi) = \frac{1}{s} - 4 - 6s + 10s^2 - (3 - 6s^2) \ln(s + s^2) \quad (2.2)$$

$S(\psi)$: ストークス関数 ψ : ジオイド計算点と積分計算点との角距離 (度) s : $\sin(1/2\psi)$

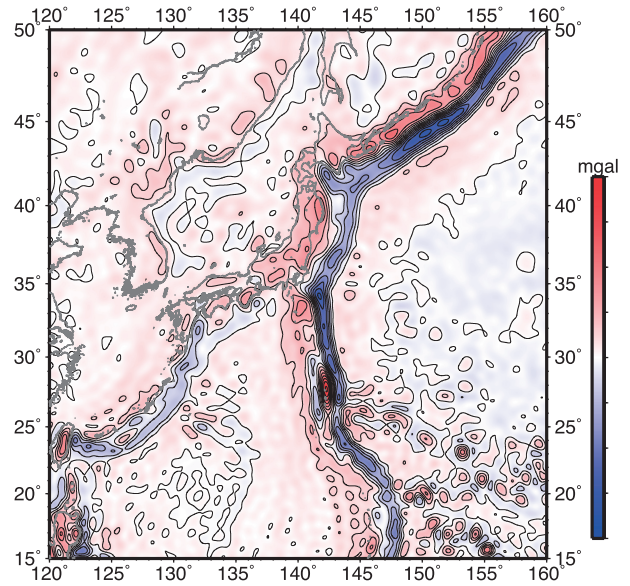


Fig. 1 Gravity anomaly of CG 03 around Japan.

また、 Δg_F は Faye 異常と呼ばれフリーエア異常値に大気質量補正と地形補正を加えてある。

(2) 重力データ

・GGM 重力異常値

球面調和関数係数セットである EIGEN-CG 03 を用いた。これは GFZ (GeoForschungs Zentrum: 地球科学研究所, ドイツ) により CHAMP (860 日間観測データ) と GRACE (376 日間観測データ) のデータを用い作成された 360 次の重力ポテンシャルモデルである (Forste et al., 2005). GGM のジオイド高をソフトウェア Gravsoft (Tscherning, 1994) の geocol により計算し、これをジオイド高の近似値として geocol により GGM による重力異常値を求めた。

・船上重力データ

笹原・他 (2005) によって精度検証・誤差補正をされた船上重力データに以下の大気質量補正を加えた (黒石, 2000).

$$AC = 0.8658 - 9.727 \cdot 10^{-5} H + 3.482 \cdot 10^{-9} H^2 \quad (2.3)$$

AC : 大気質量補正值 (mgal) H : 標高 (m)

Fig. 2 に日本周辺で実施された海上重力測定

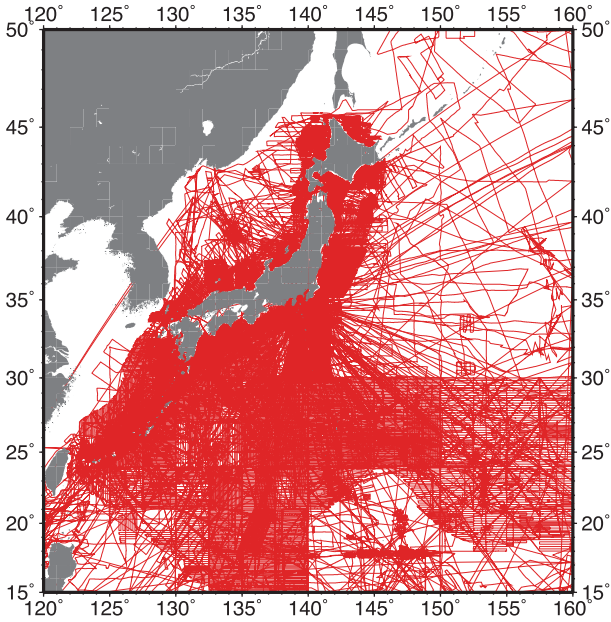


Fig. 2 Track lines of ship-borne measurements.

観測線，Fig. 3にそのデータによる重力異常図（精度検証・誤差補正実施前）を示す。

・陸上重力データ

日本重力（産業技術総合研究所，2004）のブーゲ異常値（地形質量密度 2.67 g/cm^3 ）グリッドデータを用いた。このデータは完全ブーゲ異常値でブーゲリダクション・フリーエアリダクション・地形補正が既に加えられており，ここでは，Faye 異常値とするため除去された地形質量による引力（ブーゲリダクション）を元データに戻す操作を行った（Heiskanen and Moritz, 1967.）。

$$A_B = 2\pi \cdot G\rho H = 0.1119H \quad (2.4)$$

A_B ：ブーゲリダクション (mgal) H ：標高(m)

ρ ：地形質量密度 (2670 kg/m^3)

G ：万有引力定数 ($6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)

この (2.4) 式による引力をグリッドデータに加え，(2.3) 式による大気質量補正を行った。

・衛星海面高度計による重力データ（以後，アルティメータ重力とする）

ジオイド計算領域において船上重力データが均等に存在しないため，空白域を他の重力データに

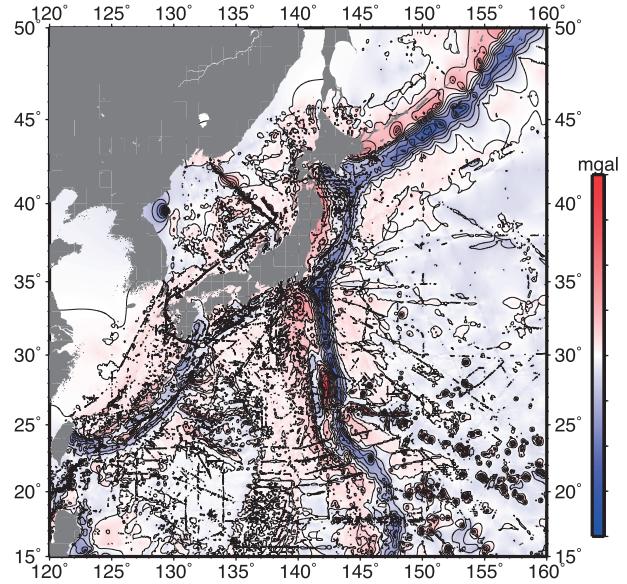


Fig. 3 Gravity anomaly around Japan derived from ship-borne measurements (before the evaluation and compensation).

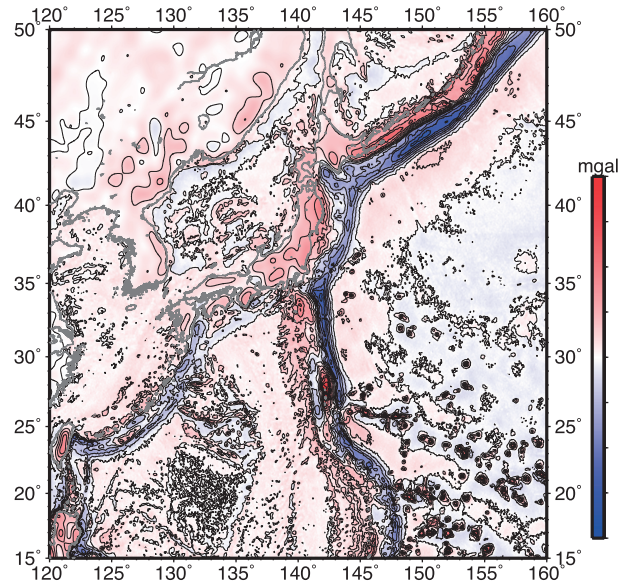


Fig. 4 Gravity anomaly around Japan derived from altimeters (Sandwell and Smith, 1997).

より補間しなければならない。この補間用データには Sandwell と Smith (1997) によって衛星海面高度計の海面高度データを逆ベニング・マイナス積分処理により重力データに変換した 1 分格子間隔のデータセット（以後，Sandwell v11.1 とする）を用いた。このセットに (2.3) 式による大気質量補正を行った。Fig. 4にこのアルティメータ重力異常値の分布図を示す。

・海陸混合重力データ

上述した船上・アルティメータの海上重力と陸上重力データを混合し、そのデータを GMT(Wessel and Smith, 1998) の blockmedian により 1 分格子間隔でブロック平均し、GMT の surface によりテンション 0.75, 格子間隔 1 分でスプライン補間をした. Fig.5 にこの混合重力異常値データの分布図を示す.

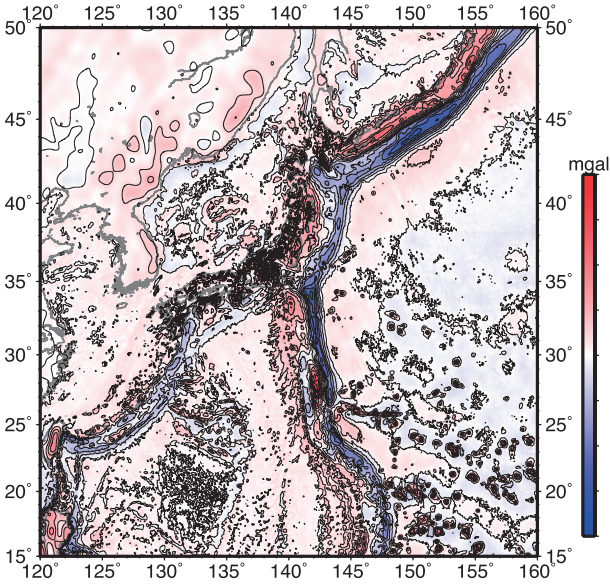


Fig.5 Gravity anomalies around Japan derived from sea- and land-gravity.

(3) ジオイド計算

・ストークス積分

前述した海陸混合重力データから GGM 重力異常値を除去した残差値ををストークス積分することになるが、計算時間の短縮と厳密なストークス積分のため、以下の式による 1 次元フーリエ変換 (FFT) を計算法に用いた (Haagmans et al., 1993). 実際の計算では重力異常値は格子データとなるため、残差ジオイド高は格子点ごとに求め、経緯度方向の格子間隔ごとに存在する残差重力異常による残差ジオイド高への影響を総和する.

$$N = \frac{R\Delta\phi\Delta\lambda}{4\pi\gamma} f_1^{-1} \left\{ \sum_{\phi=\phi_1}^{\phi_n} f_1 \left(S(\Delta\lambda_{pq}) f_1 \left(\Delta g_q^{res} \cdot 10^{-5} \cos\phi q \right) \right) \right\}$$

$$(2.5)$$

p : 残差ジオイド高計算点 q : p における残差ジオイド高への残差重力異常の影響を計算する格子点

N : 残差ジオイド高 (単位 m, p にある残差重力異常による影響は含まない) γ : 正規重力 (ms^{-2})

R : p における正規楕円体の地心距離 (m)

$\Delta\phi$: 緯度方向の格子間隔 (度) $\Delta\lambda$: 経度方向の格子間隔 (度)

$\Delta\lambda_{pq}$: 経度方向の p と q との角距離 (度)

$\phi_1 \sim \phi_n$: 緯度方向の計算区間

Δg_q^{res} : q での Faye 重力異常値と GGM によるものとの残差 (mgal) Φq : q での緯度 (度)

f_1^{-1} : 逆一次元 FFT f_1 : 一次元 FFT

(2.4) 式ではジオイド計算点自身 ($\phi = \phi p$ $\Delta\lambda_{pp} = 0$) が特異点となるため計算せず、代わりに以下の式の値を (2.4) 式 N に加える.

$$N_p = \frac{R\Delta g_p^{res} \cdot 10^{-5} \sqrt{\Delta\phi \cdot \Delta\lambda \cos\phi_p}}{\gamma \sqrt{\pi}} \quad (2.5)$$

N_p : p での残差重力異常値が残差ジオイド高に与える影響量

Δg_p^{res} : p での残差重力異常値 (mgal) ϕ_p : p での緯度 (度)

FFT の計算には FFTGeoid (University Technologies International Inc., 2004) を用いた.

・ストークス関数

重力データにおいて短波長成分の切断誤差や残差値に含まれる長波長成分誤差の解析値への影響を低減するため以下の修正されたストークス関数 (Featherstone, 2003) を用いた.

$$\tilde{S}_p^L(\psi) = \begin{cases} S_p^L(\psi) - S_p^L(\psi_0) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_0, \\ 0 & \text{for } \psi_0 < \psi \leq \pi \end{cases} \quad (2.7)$$

$$S_P^L(\psi) = \begin{cases} S_P(\psi) - \sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{2} t_k(\cos\psi_0) P_k(\cos\psi) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_0, \\ 0 & \text{for } \psi_0 < \psi \leq \pi \end{cases} \quad (2.8)$$

$$S_P(\psi) = S(\psi) - \sum_{n=2}^P \frac{2n+1}{2n-1} P_n(\cos\psi) \quad (2.9)$$

$$\sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{2} t_k(\cos\psi_0) e_{nk}(\cos\psi_0) = Q_n(\cos\psi_0) - \sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{2} e_{nk}(\cos\psi_0) \quad \text{for } 2 \leq n \leq L \quad (2.10)$$

$$e_{nk}(\cos\psi_0) = \int_{\psi_0}^{\pi} P_n(\cos\psi) P_k(\cos\psi) \sin\psi \, d\psi \quad (2.11)$$

$$Q_n(\cos\psi_0) = \int_{-1}^{\psi_0} S(\psi) P_n(\cos\psi) \, d\psi \quad (2.12)$$

$S(\psi)$: ストークス関数 ψ : ジオイド計算点と積分計算点との角距離 (度) ψ_0 : キャップサイズ (度) P_n : n 次のルジャンドル陪関数

Featherstone (2003) に基づき, $P=L=20$, $M=360$ とした.

・間接効果補正

ストークス積分を行うためにはジオイドの外側にある質量を内側に圧着する必要があるため計算の後に, この圧着で生じた重力ポテンシャル変化を補正しなければならない. このため, (2.1) 式によって求められたジオイドに以下の式の値を加え修正をする.

$$\delta N = \frac{-\pi \cdot G \rho H^2}{\gamma} \quad (2.13)$$

G : 万有引力定数 ($6.673 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$)

ρ : 地形質量密度 (2670kg/m^3) H : 標高 (m)

γ : 正規重力 (ms^{-2})

・スケール決定

ジオイドとは重力場において一定の重力ポテン

シャル値を持つ面をさすが, 実際の地球に最適なポテンシャルと正規楕円体や GGM で用いるものとの間には差異がある. このため, 実際の地球に最も合致するジオイドを求めるにはポテンシャルの違いによるジオイド高の補正を行う必要がある. また, 地心重力定数によっても差異が生じ, これらの補正值は以下の式によって求められる (Heiskanen and Moritz, 1967).

$$\xi_0 = \frac{(GM - GM_0)}{R\gamma} - \frac{(W_0 - U_0)}{\gamma} \quad (2.14)$$

GM : 実際の地球に最も合致する地心重力定数 ($398600441.8 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-2}$)

GM_0 : 正規楕円体 (GRS 80) の地心重力定数 ($398600500.0 \times 10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-2}$)

W_0 : 実際の地球に最も合致する重力ポテンシャル

($63636855.69 \text{m}^2 \text{s}^{-2}$)

U_0 : 正規楕円体 (GRS 80) の重力ポテンシャル ($63636860.85 \text{m}^2 \text{s}^{-2}$)

R : ジオイド計算点における正規楕円体 (GRS 80) の地心距離 (m) γ : 正規重力 (ms^{-2})

最適な重力ポテンシャル等に Bursa et al. (1999) のものを用い, 補正值は約 -40cm となる. また, 国土地理院モデル (gsigeo 2000 Ver. 3.1; 安藤・他, 2002) と比較するため, 最適値と EGM 96 (国土地理院長波長モデル; Lemoine et al., 1997) との補正值 (約 -40cm) も求めた.

3 結果

上述した CG 03 による重力データを長波長成分, 船上重力・アルティメータ重力・陸上重力の混合重力を CG 03 により差し引いた残差データを短波長成分とし, 修正関数と 1 次元 FFT によるストークス積分を行った. また, 間接効果補正・スケールの補正を行い, その結果を Fig. 6 に示す.

データ諸元は以下のとおり。

正規楕円体	GRS 80
領域	15 – 52 N 120 – 160 E
格子間隔	1 分
ストークス積分の cap size	0.6 度
Tide system	non-tide
Geoid 高	
最小値	-11.7 m
最大値	55.7 m
平均値	24.1 m
s.d.	14.2 m

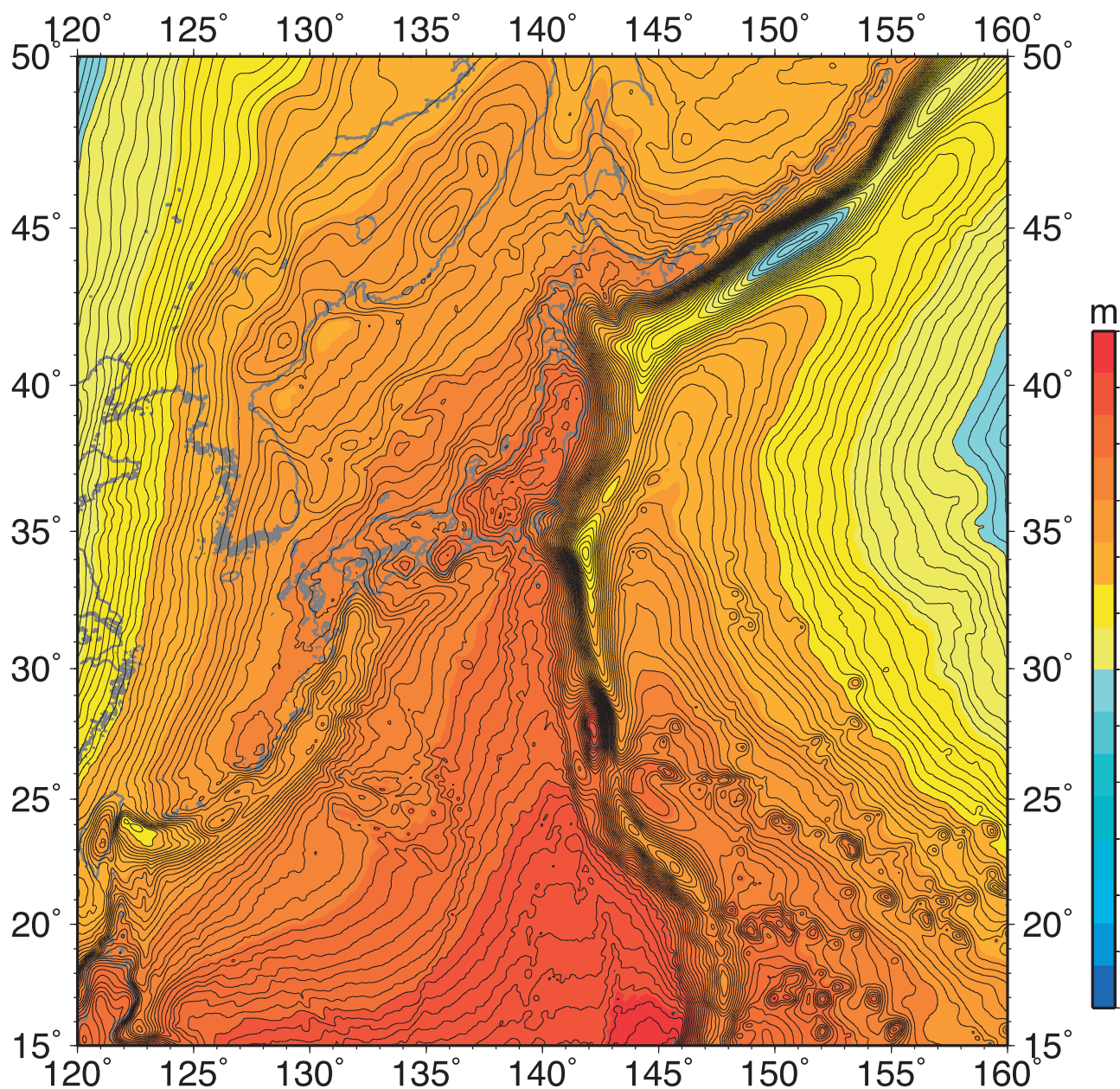


Fig. 6 Geoid undulation around Japan in this work. Contour interval is 1 m.

4 議論

決定されたジオイドモデルの精度評価するため、国土地理院ジオイドモデル (gsigeo 2000 Ver. 3.1; 安藤・他, 2002) との比較を行った。その方法は、験潮所のベンチマーク (水準点) 約 600 箇所 (北海道・本州・四国・九州) の経緯度にて新モデルと地理院モデルによるジオイド高を求め、その較差をとった。なお、両モデルのスケールを整合させるため、第 3 節・スケール決定で述べた最適値と EGM 96 との補正值を地理院モデルに加えてある。統計は平均 -0.059 m, 標準偏差 0.176 m となり、較差分布図を Fig. 7 に示す。

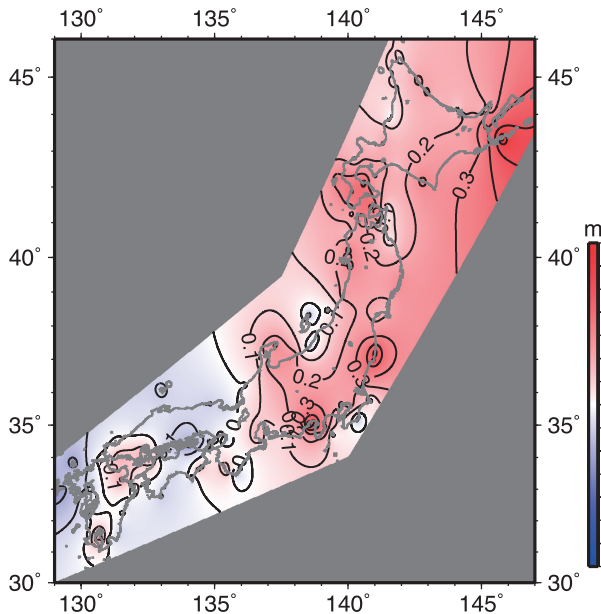


Fig. 7 Difference of geoid between this work and G.S.I. at the coast in Japan.

Fig. 7 をみると北海道から中部地方までの較差は正であり、中国・四国・九州地方はほぼ零で負の傾向にあることがわかる。これは本研究で採用している長波長モデル (GGM) と地理院が採用したものとの違いを示唆している可能性がある。

また、解析結果の検証のため、計算条件として cap size を変えた場合の結果と地理院モデルとの差異を Fig. 8 に示す。Fig. 8 ではオリジナルストークス関数の結果も示してあるが、明らかに修正ストークス関数の方がオリジナルのものより解

析結果の標準偏差が小さくなっていることがわかる。標準偏差はストークス積分の cap size 0.6 度付近で最小となる。

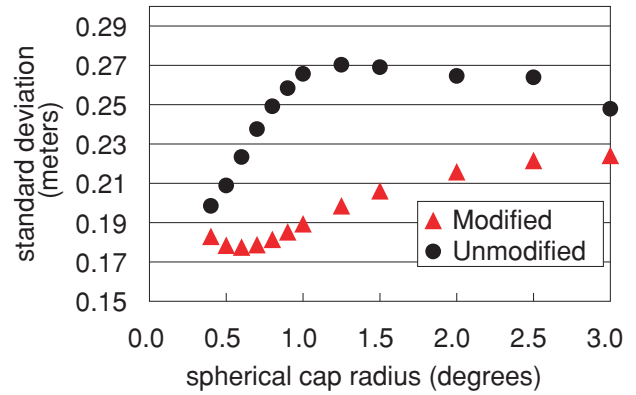


Fig. 8 Standard deviation of difference of geoid between this work and G.S.I., in case of change the cap sizes.

5 おわりに

本研究は、北西太平洋海域の船上重力データの評価と補正の結果 (笹原・他, 2005) を利用し、人工衛星の成果も用いて最も適切なジオイドモデルを構築するための諸手続きを議論したものである。

今後の課題としては、地理院モデルとの較差について要因を検証し海域と陸域のジオイドの整合性を保つことや、本モデルを用いた海洋循環モデルの精度検証の試み、船上重力データの高精度化などが挙げられる。

最後に、本研究による海域ジオイドモデルを構築には、海洋情報部をはじめとする船上重力観測に携わった方々やジオイド研究者の方々が為しえた成果が必要不可欠であり、その弛まぬ努力に深く感謝いたします。

本稿ではスクリップス海洋研究所のアルティメータデータ (Sandwell and Smith, 1997), GFZ の全球重力ポテンシャルモデル CG 03 (Forste et al., 2005) や KMS の GRAVSOFT (Tscherning, 2006), GMT (Wessl and Smith, 1998), 国土地理院のジオイドモデルを使用させていただきました。

要 旨

最新の重力観測衛星データにより解析された重力ポテンシャルモデルと海洋情報部に蓄積された船上重力データを用いて、日本周辺の北西太平洋海域ジオイドモデルを構築した。

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.
- Bursa, M., J. Kouba., M. Kumar, A. Muller., K. Radej, S. A. Ture (1999), GEODAL GEOPOTENTIAL AND WORLD HEIGHT SYSTEM, *Studia geophysica et Geodaetica*, **43** (4), 327-337.
- Center for Space Research, The University of Texas at Austin (2003), *GGM 02 Notes*, Retrieved November, 2004, from <http://www.csr.utexas.edu/grace/gravity/>
- Featherstone, W.E. (2003), Software for computing five existing types of deterministically modified integration kernel for gravimetric geoid determination, *Computers & Geosciences*, **29**, 183-193.
- Förste, C., F. Flechtner, R. Schmidt, U. Meyer, R. Stubenvoll, F. Barthelmes, R. König, K. H. Neumayer, M. Rothacher, Ch. Reigber, R. Biancale, S. Bruinsma., J.-M. Lemoine, and J. C. Raimondo (2005), A New High Resolution Global Gravity Field Model Derived From Combination of GRACE and CHAMP Mission and Altimetry/Gravimetry Surface Gravity Data, EGU General Assembly 2005, Vienna, Austria, 24-29, April 2005, Retrieved May, 2005, from http://www.gfz-potsdam.de/pb1/op/grace/index_GRACE.html
- Fukuda, Y. (1990), Precise Determination of Local Gravity Field Using both the Satellite Altimeter Data and the Surface Gravity Data, *Bull. Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo*, **28** 133.
- Ganeko, Y. (1980), New Determination of a Marine Geoid Around Japan, *Report of Hydrographic Researches*, **15**, 71-170.
- Haagmans, R., Min, E. and M. Gelderen (1993), Fast evaluation of convolution integrals on the sphere using 1 D FFT, and a comparison with existing methods for Stokes' integral, *manuscripta geodaetica*, **18**, 227-241.
- Heiskanen, W. and H. Moritz (1967), *Physical Geodesy*, W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Lemoine, F.G., D.E. Smith, L. Kunz, R. Smith, E.C. Pavlis, N.K. Pavlis, S.M. Klosko, D.S. Chinn, M. H. Torrence, R.G. Williamson, C.M. Cox, K.E. Rachlin, Y.M. Wang, S.C. Kenyon, R. Salaman, R. Trimmer, R.H. Rapp, R.S. Nerem (1996), The Development of the NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model, International Association of Geodesy Symposia volume 117 Gravity, Geoid and Marine Geodesy International Symposium Tokyo, Japan, September 30-October 5, 1996.
- 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*, **46** (1), 1-20.
- Reigber, C., H. Luhr, P. Schwintzer, (2001), Announcement of Opportunity for CHAMP, Reference Documents, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- Sandwell, D.T., and W.H.F. Smith (1997), Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry, *Journal of Geophysical Research*, **102** (B 5), 10339-10554.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2004), 日本重力 CD-ROM 第 2 版. (承認番号 63500-A-20060125-003 号)
- 笹原昇, 塩原健, 矢吹哲一朗 (2006), 船上重力データの精度評価, *海洋情報部技報*, **24**, 89-93.
- Tscherning, C.C. (1996), GRAVSOFT—A SYSTEM FOR GEODETIC GRAVITY FIELD MODEL-

LING, Retrieved May, 2004, from <http://cct.gfy.ku.dk/gravsoft.txt>

University Technologies International Inc.
(2004), FFTGEOID-Geoid Determination Software, Retrieved May, 2004 from <http://www.uti.ca/0184.htm>

Wessel.P. and W.H.F.Smith (1998), New improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 579.