

日本周辺海域における衛星海面高度計による重力異常データの比較

笹原 昇

Comparison of marine gravity datum derived with satellite altimeter in the Japanese waters.

Noboru SASAHARA*

1 はじめに

海洋情報部において、特定研究「人工衛星による海面変動・重力場の解析手法に関する研究」(平成15～17年度)が行われており、その概要は、衛星重力データから海面での重力を求め、北西太平洋海域の高精度ジオイドモデルを構築し、そのモデルから力学的海面高分布を求めることである。最終的には、これらジオイドモデルや力学的海面高分布により、実海面高(ジオイド高+力学的海面高+海洋潮汐変動)を正確に求め、海上3次元測位の高さ方向の精度検証(海底地殻変動観測への貢献)や大規模な海流変動の仕組みの解明(漂流予測システムへの貢献)を目標としたい。

上述した目的以外にも、ジオイド、すなわち、平均水面は、水深の基準となるものであり、水深測量によって海図を作成する海洋情報部にとっては、非常に重要な数値であった。従来、水深の基準値としての平均水面は、潮汐観測により偏在する各観測点で決定するが多かったが、本研究では、北西太平洋海域において均一な計算点密度で平均水面(ジオイド)を決定しなければならない。均一な計算点密度のジオイドの決定方法の1つにストークス積分(我如古, 1994a)を含むremove-restore法(黒石, 2000)があり、その計算には全地球表面上において均等に存在する重力異常値が必要とされ、それは、全球重力ポテンシャルモデル(以後、GGM: Global Gravity potential Modelとする)によっても得られる。GGMは、通常、重力ポテンシャルの球面調和関数(斎藤正徳, 1994)の係数で表され、後述するア

ルティメータデータと地球表面の測定データなどを組み合わせたEGM96 (NASA, 1998) やGGM02 (GRACE Gravity Model 2002 Combined; Center for Space Research, 2003) と呼ばれるGRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment; 財団法人リモートセンシング技術センター, 2003) 重力観測衛星による観測データと高次成分にEGM96によるデータを組み合わせたものがある。

remove-restore法は、ストークス積分を空間波長における長波長成分と短波長成分に分けて行い、長波長成分にはその精度が高いGGMによる重力異常値を用いることが多い。短波長成分には船上測定などによる重力データを用いるが、その測定密度は、対象領域によっては均等に分布しておらず、データには測定方法などの誤差によるバイアスやトレンドが内在する。remove-restore法による高精度なジオイドモデル決定には、偏在する船上重力データを補間しそのバイアスやトレンドを検証するため、船上重力より汎地球・高密度に存在し、かつ、GGMより短波長成分を持つ重力データが必要となる。そのデータとしては、衛星海面高度計から求められた重力異常データセットが挙げられる。

この重力異常データは、衛星軌道を飛行する人工衛星に搭載された衛星海面高度計(マイクロ波レーダ高度計、以後アルティメータとする)により、直接、測定された海面高をジオイド高に変換後、ジオイド高そのものの逆ストークス積分(我如古, 1994b)やジオイド高の垂直線偏差の逆ベニング・マイネス積分(Sandwell, 1992)をすることにより得られる。

本稿では、高精度海域ジオイドモデル構築のため必要と思われるアルティメータによる重力異常データについて、現在、Webから入手できるデータを紹介し、その統計的違いを明らかにする。

2 衛星海面高度計による海上重力データ

(1) KMS02

KMSは、Kort-og Matrikstyrelsen (KMS: デンマーク国家測量, 地籍局, コペンハーゲン) により, ERS-1 と GEOSAT アルティメータデータを組み合わせ、計算された重力異常データセットである。

(Featherstone, 2002)

KMS02は、ERS-1 と GEOSAT データの組合せ法や調整法を改善したことにより、前年度のデータセットである KMS01 と比較して、沿岸部付近のデータ精度が向上している。(Andersen et al., 2003)

KMS02の算出手法は、remove-restore法であり、まず、アルティメータで直接測定された海面高を、海洋潮汐モデル AG95.1 (Anderson-Grenoble, Version 95.1; Shum, et al., 1997) によりジオイド高に変換し、EGM96のジオイド高と整合するよう調整する。(AG95.1は、TOPEX/POSEIDONなどのデータからKMSが作成した海洋潮汐モデルである) 次に、このジオイド高の短波長成分(調整後のジオイド高から長波長成分であるEGM96のジオイド高を取り去ったもの)をLSC法(Least Square Collocation 最小二乗コロケーション法; 福田, 1994)によりメッシュ化し、逆ストークス積分処理により重力異常値(短波長成分)を求める。最後にこの重力異常データにEGM96による重力異常値(長波長成分)を戻す操作を行う。

KMS02は、2分メッシュで提供され、ftpサイト(ftp.kms.dk/GRAVITY)からダウンロード可能である。

(2) GMGA01

GMGA01は、National Chiao Tung University(国立交通大学, 台湾)により、SEASAT, GEOSAT, ERS-1 と TOPEX/POSEIDON の各アルティメータデータを組み合わせて作成された重力異常データ

セットである。

GMGA01の算出手法もremove-restore法であり、アルティメータの海面高をNOAAによる海面形状モデルと海洋潮汐モデルCSR 3.0 (Shum, et al., 1997) を用いてジオイド高に変換し、衛星軌道に沿ったジオイド高勾配により、ジオイド高の垂直線偏差を求める。(CSR3.0はCenter for Space Research, University of Texas: テキサス大学宇宙研究センターによりTOPEX/POSEIDONなどのデータから作成された海洋潮汐モデルである) 次に、不規則に分布する垂直線偏差データをLSC法によりメッシュ化し、これらからジオイド高垂直線偏差の長波長成分(EGM96によるもの)を差引き、逆ベニング・マイネス積分処理により重力異常値(短波長成分)に変換する。最後にこの重力異常データにEGM96による重力異常値(長波長成分)を戻す操作を行う。

(Hwdng and Hsu, 2002; Featherstone, 2002)

GMGA97は、2分メッシュデータで提供され、ftpサイト(<http://gps.cv.nctu.edu.tw>)からダウンロードできる。

(3) Sandwell v11.1

Sandwell v11.1は、Scripps Institute of Oceanography (米国スクリプス海洋研究所, カリフォルニア)により、ERS-1, TOPEXとGEOSATの各衛星海面高度計データを組み合わせて作成された重力異常データセットである。

Sandwell v11.1の算出手法もremove-restore法であり、アルティメータの海面高を海洋潮汐モデルCSR3.0により補正し、不規則に分布するデータをスプライン補間によりメッシュ化する。このメッシュデータからEGM96によるジオイド高を差引き、逆ベニング・マイネス積分により重力異常値に変換後EGM96による値を戻す。(Sandwell and Smith, 1997; Featherstone, 2002)。

Sandwell v11.1は、1又は2分メッシュデータで提供され、ftpサイト(<http://topex.ucsd.edu/pub/>)よりダウンロード可能である。

3 再メッシュ化・陸上領域データマスク

(1) 再メッシュ化

Sandwell v11.1は 1 分メッシュ、KMS02とGMGA01は 2 分メッシュであり、また、Sandwell v11.1のデータも各零分に位置していないため、各アルティメータ重力異常データを同一サイズのメッシュにする必要がある。本稿では、単に統計的比較のため、スプライン補間であるGMT v3のsurfaceコマンド(テンション0.25)を用い、1分メッシュに再メッシュ化した。(Wessel and Smith, 1998)

(2) 陸域データマスク

海域における重力異常データのみの比較を行うため、以下の作業により陸域をマスクした。まず、GMT v3のgrdlandmaskコマンドにより海域データを1、陸域データを0としたgrdデータファイルを作り、このデータと各アルティメータ重力異常データをGMT v3 grdmathコマンドにより乗算した。次にgrdlandmaskによるgrdデータ(海域0、陸域

999.9)を作り、乗算されたデータと加算した。(Wessel and Smith, 1998)

4 比較・検証

日本周辺海域(北緯15°から北緯50°、東経120°から東経160°)における各アルティメータ重力異常データの統計値をTable.1, Sandwell v11.1とGGM02C(200次以上をEGM96係数とした360次)の分布図をFig. 1に示す。Fig. 1をみるとアルティメータとGGM02Cによる重力異常データに含まれる空間波長成分の違いがわかり、アルティメータのものがより短波長成分が多く含まれている。

各アルティメータとGGM02Cによる重力異常データの差分の統計値をTable. 2, Sandwell v11.1の差分分布図をFig. 2に示す。Table. 2からGMGA01と比べて、KMS02とSandwell v11.1の差分の最大・最小値が小さいことがわかる。

各アルティメータ重力異常データの差分の統計値をTable. 3に示す。海域の差分はほとんどゼロの

Table.1 Statistics of the altimeter-derived and GGM02C marine gravity anomalies in the Japanese Waters.

data set	total data point	minimum (mgal)	maximum (mgal)	mean (mgal)	s.t.d.(mgal)	r.m.s.(mgal)
KMS02	4201202	-318.045	388.137	3.843	49.954	50.102
GMGA01	4201202	-318.04	397.404	3.88	50.037	50.187
Sandwell v11.1	4201202	-319.856	394.267	3.839	50.079	50.23
GGM02	4201202	-324.388	354.523	4.028	46.773	46.946

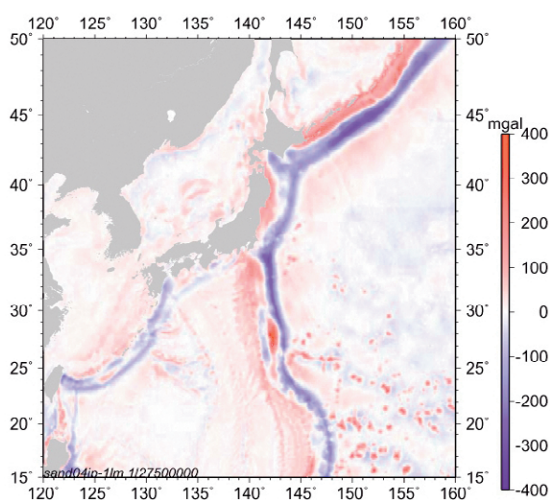
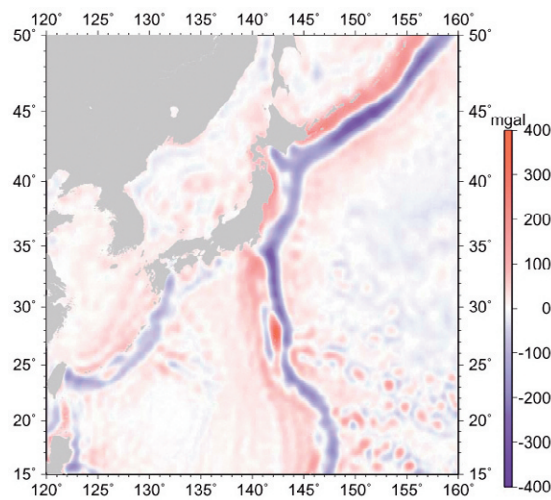


Fig.1 (a) Marine gravity anomalies of Sandwell v11.1 in the Japanese Waters.



(b) Marine gravity anomalies of GGM02C in the Japanese Waters.

Table.2 Statistics of the differences between GGM02C and the altimeter-derived marine gravity anomalies in the Japanese Waters.

data set	total data point	minimum (mgal)	maximum (mgal)	mean (mgal)	s.t.d.(mgal)	r.m.s.(mgal)
GGM02C-KMS02	4201202	-200.142	149.748	0.185	17.484	17.485
GGM02C-GMGA01	4201202	-300.79	256.887	0.149	17.198	17.199
GGM02C-Sandwell v11.1	4201202	-208.501	127.685	0.139	17.44	17.441

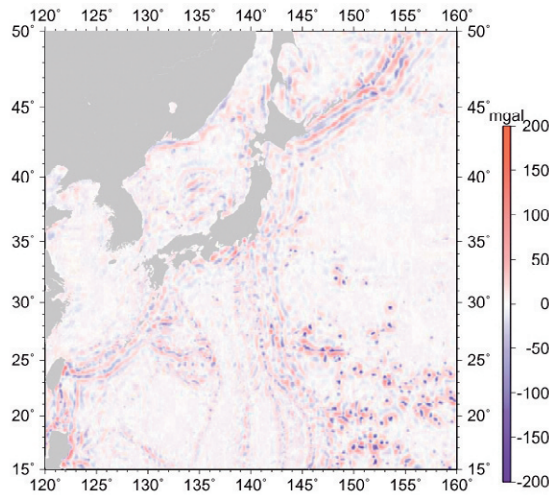


Fig.2 Differences between marine gravity anomalies from GGM02C and KMS02.

Table.3 Statistics of the differences of marine gravity anomalies among KMS02, GMGA01 and Sandwell v11.1 in the Japanese Waters.

data set	total data point	minimum (mgal)	maximum (mgal)	mean (mgal)	s.t.d.(mgal)	r.m.s.(mgal)
GMGA01-KMS02	4201202	-258.377	286.24	0.037	5.415	5.415
GMGA01-Sandwell v11.1	4201202	-258.18	297.593	-0.009	5.557	5.557
KMS02-Sandwell v11.1	4201202	-83.153	94.618	-0.046	4.253	4.253

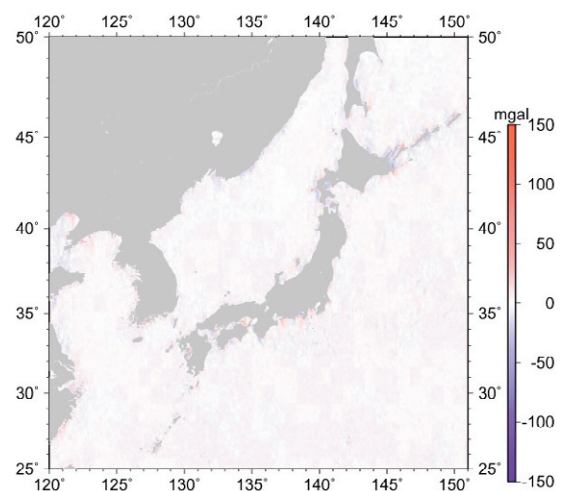
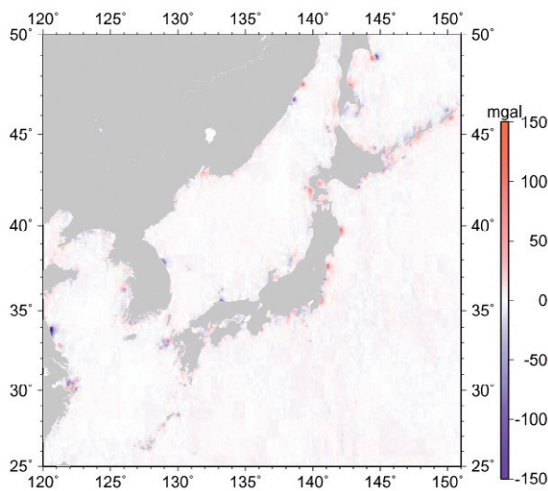
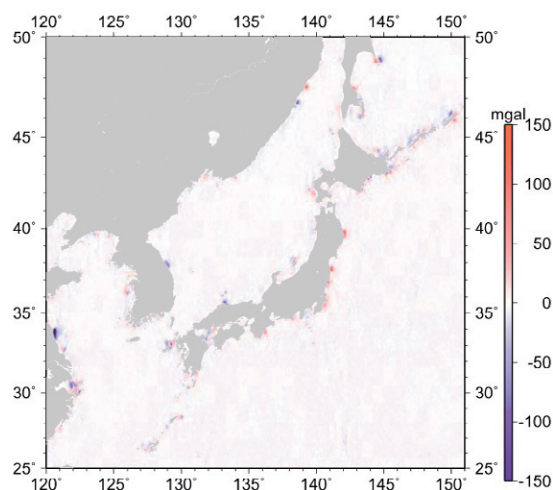


Fig.3 (a) Differences between marine gravity anomalies from KMS02 and GMGA01.

(b) Differences between marine gravity anomalies from KMS02 and Sandwell v11.1.



(c) Differences between marine gravity anomalies from GMGA01 and Sandwell v11.1

ため、日本列島沿岸部に着目した分布図（北緯25°から北緯50°，東経120°から東経151°）をFig. 3に示す。Table. 3, Fig. 3とも，GMGA01とKMS02, Sandwell v11.1の重力異常データの差分が大きいことを示している。

以上の結果のみを踏まえると，GMGA01と比較してKMS02とSandwell v11.1は良く整合し，よりGGM02Cに近いものと考えられる。

参 照 文 献

Andersen, O. B., Knudsen, P., Kenyon, S., and Trimmer, R. (2003), KMS2002 Global Marine Gravity Field, Bathymetry and Mean Sea Surface. Poster, IUGG 2003, Sapporo, Japan, June 30-July 11, 2003.

Center for Space Research, The University of Texas at Austin (2003), *GGM02 Notes*, Retrieved November, 2004, from <http://www.csr.utexas.edu/grace/gravity/>

Hwang, C. and Hsu, H-Y. (2002), Marine gravity anomaly from satellite altimetry: a comparison of methods over shallow waters, International Workshop on Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography: Summer Lecture Series and Scientific Applications, Wuhan, China,

September 8-13, 2002.

Featherstone, W.E. (2002), Comparison of different satellite altimeter-derived gravity anomaly grids with ship-borne gravity data around Australia, *Proceedings of GG2002*, Thessaloniki, <http://olimpia.topo.auth.gr/GG2002/SESSION4/session4.html>

福田洋一 (1994), A- 2 - 5 最小二乗コロケーション法, 現代測地学, 日本測地学会, 482-489.

我如古康弘 (1994a), 2.3 重力と地球科学現象 2.3.1 重力の意味と処理方法, 現代測地学, 日本測地学会, 70-83.

我如古康弘 (1994b), 8.5 海面の起伏～船は山を登る, 現代測地学, 日本測地学会, 408-412.

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.

NASA (1998), EGM96 The NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model, *NASA Technical paper, TP-1998-206861*, Retrieved May, 2004, from <http://cddis.gsfc.nasa.gov/926/egm96/nasa-tm.html>

斎藤正徳 (1994), A- 2 - 7 球面調和解析, 現代測地学, 日本測地学会, 494-504.

Sandwell, D.T. (1992), Antarctic marine gravity field from high-density satellite altimetry, *Geophysical Journal International*, 109, 437-448.

Sandwell, D.T., and Smith, W.H.F. (1997), Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry, *Journal of Geophysical Research*, 102 (B 5), 10339-10554.

Shum, C.K., Woodworth, P.L., Andersen, O.B., Egbert, G.D., Francis, O., King, C., Klosko, S.M., Le Provost, C., Li, X., Molines, J-M, Parke, M.E., Ray, R.D., Schlax, M.G., Stammer, D., Tierney, C.C., Vincent, P., and Wunsch, C.I. (1997), Accuracy assessment of recent ocean tide models, *Journal of Geophysical Research*, 102 (C11), 25173-25194.

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

財団法人リモート・センシング技術センター(2003),
総覧 世界の地球観測衛星－2003年版－.