

南極観測船「しらせ」で得られた船上重力データの整備

小西康夫^{1*}・福田洋一^{1†}・野木義史²

Surface ship gravity data obtained on board the icebreaker *Shirase*

Yasuo Konishi^{1*}, Yoichi Fukuda^{1†} and Yoshifumi Nogi²

(2006年7月18日受付; 2006年8月9日受理)

Abstract: A ship-borne gravity survey on board the icebreaker *Shirase* has been continuously conducted since JARE-27 (the 27th Japanese Antarctic Research Expedition); about 17 years of gravity data have been accumulated. Although data obtained from JARE-27 to JARE-33 have already been processed and stored in MGD77 format, data starting with JARE-34 have remained unprocessed. We newly processed the data from JARE-34 to JARE-46 to obtain free-air gravity anomalies. To attain better quality, especially in the long wavelength gravity signals, we also applied drift corrections for all the data sets since JARE-27 by employing satellite derived gravity anomalies as a reference gravity field. This report summarizes the data processing and the status of the surface ship gravity data.

要旨: 砕氷船「しらせ」船上での重力測定は、第27次南極地域観測隊以来、継続実施されており、およそ17年分のデータが蓄積されている。この内、第27次隊から第33次隊のデータについては、すでに処理されたMGD77フォーマットのデータが提供されていたが、第34次隊以降のデータについては、統一的なデータ処理がされないままの状態であった。そこで、今回、第34次隊から第46次隊の間に得られたデータについて新たにデータ処理を実施し、重力異常データを作成した。この際、特に長波長域での重力データの精度向上のため、第27次隊以降のすべてのデータについて衛星高度計による海域重力異常を基準としたドリフト補正を行った。ここでは、これらの処理の概要ならびに得られたデータセットの状況について報告する。

1. はじめに

南極域では厳しい気候条件や地理的な条件のため、重力、地磁気、海底地形など海洋で

¹ 京都大学大学院理学研究科. Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502.

* Present address: NTT データフロンティア. NTT DATA FRONTIER CORPORATION, NTT DATA Shinagawa Bldg. 25F, Konan 1-9-36, Minato-ku, Tokyo 108-0075.

² 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

[†] Corresponding author. E-mail: fukuda@kugi.kyoto-u.ac.jp

の地球物理学的観測データを取得することは容易でない。特に南極大陸に近い海域では観測データが極端に少なく、現在でも観測の空白域が数多く存在する。このため、日本南極地域観測隊（JARE: Japanese Antarctic Research Expedition, 以下、JARE と呼ぶ）では、可能な限り南極域海域でのデータ取得に努めており、砕氷船「しらせ」での船上重力測定、地磁気3成分測定ならびに水深測定を、昭和基地までの往路ならびに復路とも、「しらせ」の航走全行程で実施している（例えば神田, 2005）。

JARE での船上重力測定の試みはかなり古く、最初の試みは砕氷船「ふじ」が就航して間もない第8次隊にまで遡る。しかし、実際に南極海での船上重力測定に成功したのは「ふじ」の時代も終わりに近い第22次隊のことであり（Kasuga *et al.*, 1983）、また、ほぼ定常的に船上重力測定が実施できるようになったのは、「しらせ」の時代となった第27次隊以降のことである（福田, 1995, 2001）。

ところで、「しらせ」で取得された船上重力データの内、第33次隊以前のデータについては、既にデータ処理が施され（Fukuda *et al.*, 1992）、MGD77 フォーマットのデータが提供されていたが、第34次隊以降のデータについては、統一的な処理は行われておらず、測定値がそのままデジタルデータとして保管されていただけで、重力異常としてのデータの提供はなされていなかった。一方、1990年台後半になると、衛星高度計データから推定した海域の重力異常が公開されるようになり（例えば Sandwell and Smith, 1997）、これらの衛星高度計重力は、空間的に比較的長波長の領域では、精度的に船上重力測定より有利であると考えられている。特に、「しらせ」は、南極海での長期間の無寄港航海が強いられること、また、「しらせ」で使用されている NIPRORI 型船上重力計では、センサーとして本来短周期用に開発されていた電磁式サーボ型加速度計を改良して使用しており（Segawa *et al.*, 1988）ドリフト特性が必ずしも良くないことから、寄港地での重力値を用いたドリフト補正を行っていた第33次隊以前のデータについても、衛星高度計データに準拠した再補正が望まれるところであった。

これらの点を考慮し、今回、第34次隊から第46次隊の間に得られた船上重力データについて統一的な処理を行うとともに、第27次隊から第33次隊のデータについても、衛星高度計による重力異常に準拠したドリフトの再補正を実施することで、これまでに得られている「しらせ」による船上重力測定データから、出来る限り均質な精度での重力異常データセットを作成し、MGD77 フォーマットでのデータ提供が可能なように整備を行った。以下では、データ処理ならびに得られた重力データセットの概要について述べる。

2. 船上重力データの処理

2.1. データセット

表1は、第27次隊から第46次隊までの船上重力測定の実施状況をまとめたものであり、また、図1に南緯20度以南の航跡を示す。

表 1 「しらせ」で実施された船上重力測定一覧

Table 1. Summary of surface ship gravity measurements conducted on-board the icebreaker Shirase.

JARE	Type of gravimeter	Positioning system	Remarks
27 (1985-1986)	NIPRORI-I	NNSS	
28 (1986-1987)	NIPRORI-I	NNSS	
29 (1987-1988)	NIPRORI-II	NNSS	Each data has been processed.
30 (1988-1989)	NIPRORI-II	NNSS	
32 (1990-1991)	NIPRORI-II	NNSS	
33 (1991-1992)	NIPRORI-II	NNSS	
34 (1992-1993)	NIPRORI-II	NNSS	Fremantle-Syowa
37 (1995-1996)	NIPRORI-II	GPS	
38 (1996-1997)	NIPRORI-II	GPS	
39 (1997-1998)	NIPRORI-II	GPS	
40 (1998-1999)	NIPRORI-II	GPS	
41 (1999-2000)	NIPRORI-II	GPS	
42 (2000-2001)	NIPRORI-II	GPS	
43 (2001-2002)	NIPRORI-II	GPS	
44 (2002-2003)	NIPRORI-II	GPS	
45 (2003-2004)	NIPRORI-II	GPS	
46 (2004-2005)	NIPRORI-II	GPS	

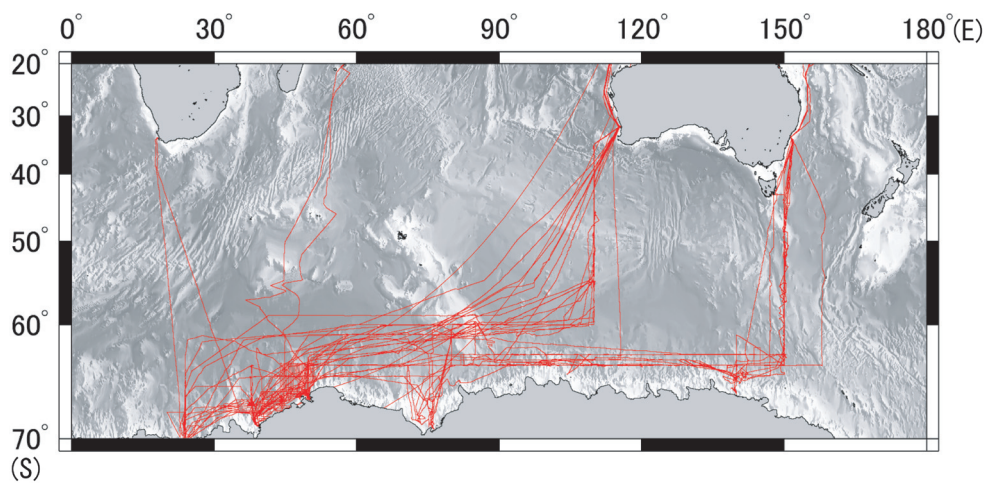


図 1 第 27 次隊から第 46 次隊の「しらせ」の航跡

Fig. 1. Ship tracks of the icebreaker Shirase from JARE-27 to JARE-46.

この内、第 29 次隊では船上重力計が NIPRORI-I から NIPRORI-II に更新されており、また、第 37 次隊では測位システムが NNSS から GPS に変更されている。また、この表以外にも、時代の変遷に伴い、集録装置の改善、記録メディアの変更などが適宜実施されており、隊次ごとに集録されているデータの種類、ファイル形式、フォーマット等に若干の差異が存在している。しかしながら、海域での重力異常（ここではフリーエア異常の意）を求めるために必要となる基本的な測定データは、測定日時、重力測定値、緯度、経度、船速及び方位であり、これらは、どの隊次のデータでも共通に使用することができる。また、重力異常の解析に重要となる水深については、「しらせ」のデータ配信システムを利用し、基本的には重力データと同時に集録されたものを利用しているが、後述するように、一部のデータについては、海上保安庁海洋情報部から提供を受けたものを利用している。

なお、重力データのサンプリング間隔については、NIPRORI-I を使用していた第 27、28 次隊は 2 分（機器のトラブルにより第 28 次隊の後半は 5 分）、第 29 次隊以降は、すべて 1 分サンプリングである。

2.2. 重力データの補正

陸上での重力測定は、重力計を測定点に固定した状態で行われるが、航走する船上での重力測定では、陸上の重力測定と異なったいくつかの特殊性を考慮しなければならない。一つは、船の動揺や振動によって生じる加速度の影響であるが、「しらせ」では周期の速い船体の振動の影響は、重力センサーを二重の防振台上に設置することで、また、船の動揺の影響は、適当な時定数を持つデジタルフィルターを用いることで除去している。この処理は、重力データの集録装置内で行われており、上述の 1 分サンプリングデータは、既にデジタルフィルター処理を経た出力である。

船上での重力測定データ処理で、もう一つ重要なのは、コリオリ力の鉛直成分であるエトベス効果で、その補正量は、 Ω を地球の自転角速度、 v を東向きの船速度、 ϕ を緯度とすると、

$$2\Omega v \cos\phi,$$

で与えられる。ここでの v は船の対地速度であり、エトベス補正を精度良く行うためには、正確な測位データが必要である。例えば、1 mgal より良い精度でエトベス補正を行うためには、対地速度の精度として 0.1 kt (1 kt = 1.852 km/h \approx 30.9 m/min) 程度の精度が要求される。ところで表 1 に示すように、第 34 次隊以前の「しらせ」の測位システムは NNSS であり、GPS による測位システムが使用されるようになったのは第 37 次隊以降である。また、船舶用に使用される GPS の単独測位精度は、数 10 m 程度と考えられるので、これを微分して 0.1 kt の精度を得るためには、測位間隔として 10 分程度の時間が必要であり、GPS 測位データを使用した場合でも、単純に 1 分間隔のサンプリングデータを微分するだけではエトベス補

正に必要な十分な精度は得られない。そこで本研究では、NNSS、GPS いずれの測位データに対しても、エトバス補正量の計算に、船の対水速度及び方位データを組み合わせて船位をベイズ型のスプライン関数で内挿する福田（1989）の手法を用い、精度良い補正を行った。

このようにエトバス補正を施した重力データに対して、緯度補正に正規重力式 1980 を用いフリーエア異常を計算した。

図 2 は、データ処理の例を示したもので、上からエトバス補正量、補正済みのフリーエア異常、水深データの時系列グラフである。図 2 では、海底地形が急激に変化している 13 時から 17 時にかけてフリーエア異常と海底地形の間にきれいな相関が見られ、エトバス補正が良好に施されていることがわかる。

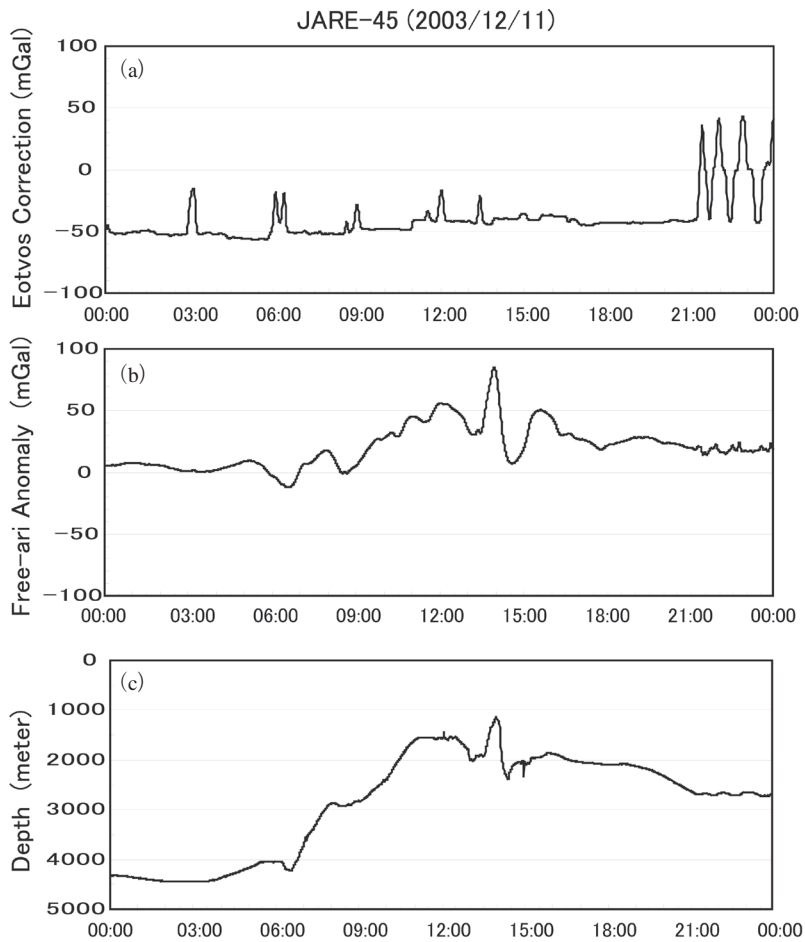


図 2 (a) エトバス補正, (b) フリーエア異常, (c) 水深の時系列プロット例
Fig. 2. A sample of time series plots. (a) Eotvos correction, (b) free-air anomaly, and (c) water depth.

2.3. ドリフトとオフセット補正

船上重力計は相対重力計であるために、重力計のスケール・ファクターならびに測定値のドリフト及びオフセットを何らかの方法で決める必要がある。このうち、スケール・ファクターについては、経年変化はほとんどないと考えられるため、第33次隊以前に実施した寄港地での重力測定値との比較から決められた $0.3282925 \text{ mgal/mV}$ の値を使用した。

一方、ドリフトとオフセットの補正についても、第33次隊以前は、寄港地における重力値に合うように多項式を決める方法がとられていた。しかし、JAREの航海では寄港地から寄港地までの航海日数が非常に長いためドリフト補正の精度が悪く、また、氷海での砕氷航海等で重力値にステップが発生している可能性も残っていた。そこで、今回は、第34次隊以降のデータだけでなく、既に処理済みの第33次隊以前のデータについても、最新の衛星高度計データによる海域の重力異常 $\text{grav. img. 11.1 (1' \times 1' grid)}$ (Sandwell and Smith, 2004) の値を基準とし、最小二乗法を用いてトレンドとオフセットを推定すると共に、両者の比較から重力値にステップが認められる部分については、そのステップ量も見積り補正を行った。

具体的な処理方法としては、衛星高度計重力の1分グリッドデータから「しらせ」の航跡に沿っての重力値を内挿し、船上重力測定データとの差を求め、両者の差を時間の多項式で近似することにより補正量を計算した。なお、その際、多項式のあてはめは、原則として「しらせ」の往路と復路とについてそれぞれ行い、多項式の次数はAIC (Akaike's Information Criterion) が最小となるものを採用した。表2は補正に用いられたパラメーターをまとめたものである。なお、AIC最小の次数が4次以上のものについては、表2では5次以上の係数は省略して示している。表の定数項については、第38次隊以降、あまり大きな変化はなく、このことは、NIPRORI-II 重力計センサーの長期間のドリフトもこの頃になってようやく落ち着いたことを示している。

図3は、ドリフト補正処理の例を示したもので、(a)の赤が船上測定によるフリーエアー異常、青が衛星高度計重力からの内挿値、(b)が両者の差、(c)がステップを補正した重力異常の差と推定したトレンド成分、(d)が補正後のフリーエアー重力異常である。この例の(b)では、船上重力に明らかなステップが認められるが、このような場合には、ステップ量も同時に推定し補正を行っている。

2.4. クロスオーバー補正

上述の通り、各隊次の測定データについて、衛星高度計重力に準拠することにより、ドリフトならびにオフセットを決定することができた。しかし各隊次によって「しらせ」の航跡はわずかずつ異なり、衛星高度計重力についても長波長の誤差が含まれることを考慮し、また、隊次を超えて出来る限り矛盾のないデータセットを得るために、上記の補正後の各年次の重力データに関して、内部及び外部クロスオーバー誤差 (COE: Cross Over Error) を求め、

表 2 ドリフト補正のパラメーター

Table 2. Summary of drift corrections.

JARE	min AIC order	constant mgal	1st mgal/day	2nd mgal/day ²	3rd mgal/day ³	4th mgal/day ⁴
27L1	4	23.211	4.472E-01	-4.058E-01	2.121E-02	-2.980E-04
27L2	4	-2.193	1.014E+00	-1.297E-01	3.955E-03	-3.465E-05
28L1	4	-6.168	-8.823E-01	1.786E-01	-9.013E-03	1.449E-04
28L2	3	11.614	-1.409E+00	4.167E-02	-3.723E-04	
29L1	6	-8.426	-1.407E+01	3.052E+00	-2.776E-01	1.325E-02
29L2	4	82.609	-8.205E+00	1.078E+00	-5.204E-02	7.430E-04
30L1	5	-14.413	4.011E+00	-7.171E-01	7.688E-02	-3.549E-03
30L2	6	-58.495	3.872E+00	5.008E-01	-7.565E-02	3.377E-03
32L1	3	-5.485	-1.517E+00	1.626E-01	-3.339E-03	
33L1	6	-5.783	-4.202E+00	7.074E-01	-4.625E-02	1.763E-03
33L2	4	14.022	3.174E+00	-2.678E-01	6.408E-03	-4.824E-05
34L1	4	130.725	-2.103E+00	3.369E-01	-1.132E-02	1.057E-04
37L1	4	-1053.879	-2.820E+00	1.883E-01	-1.819E-03	-2.315E-05
37L2	5	-1034.503	-9.559E-01	1.566E-01	-8.004E-03	1.388E-04
38L1	8	-899.751	-1.413E+00	7.232E-01	-6.089E-02	1.961E-03
39L1	4	-871.897	-2.332E+00	1.442E-01	8.763E-04	-9.165E-05
39L2	7	-863.664	-4.003E+00	5.832E-01	-3.146E-02	8.082E-04
40L1	2	-869.389	-3.780E+00	2.722E-01		
40L2	4	-876.284	1.081E+01	-2.079E+00	1.427E-01	-3.065E-03
40L3	3	-847.524	-9.370E-01	3.070E-02	-3.757E-04	
41L1	3	-864.046	-2.094E+00	1.677E-01	-2.688E-03	
41L2	4	-852.163	1.294E-01	1.369E-02	-3.458E-03	6.601E-05
42L1	5	-840.729	-4.359E+00	5.663E-01	-2.741E-02	6.481E-04
42L2	4	-812.797	-1.074E+00	6.554E-02	-2.595E-03	2.695E-05
43L1	5	-825.018	-4.191E+00	2.927E-01	-7.619E-03	1.405E-04
43L2	4	-810.867	-3.536E+00	2.783E-01	-8.360E-03	7.657E-05
44L1	5	-834.500	-6.629E-01	2.388E+00	-4.775E-01	3.530E-02
44L2	4	-802.161	-8.607E-01	9.471E-02	-4.192E-03	4.528E-05
45L1	3	-817.643	-1.942E+00	1.695E-01	-2.757E-03	
45L2	4	-796.456	-1.004E+00	1.010E-01	-4.569E-03	5.356E-05
46L1	5	-816.791	3.068E+00	-1.731E+00	1.716E-01	-6.039E-03
46L2	4	-787.949	-1.656E+00	1.313E-01	-4.138E-03	3.744E-05

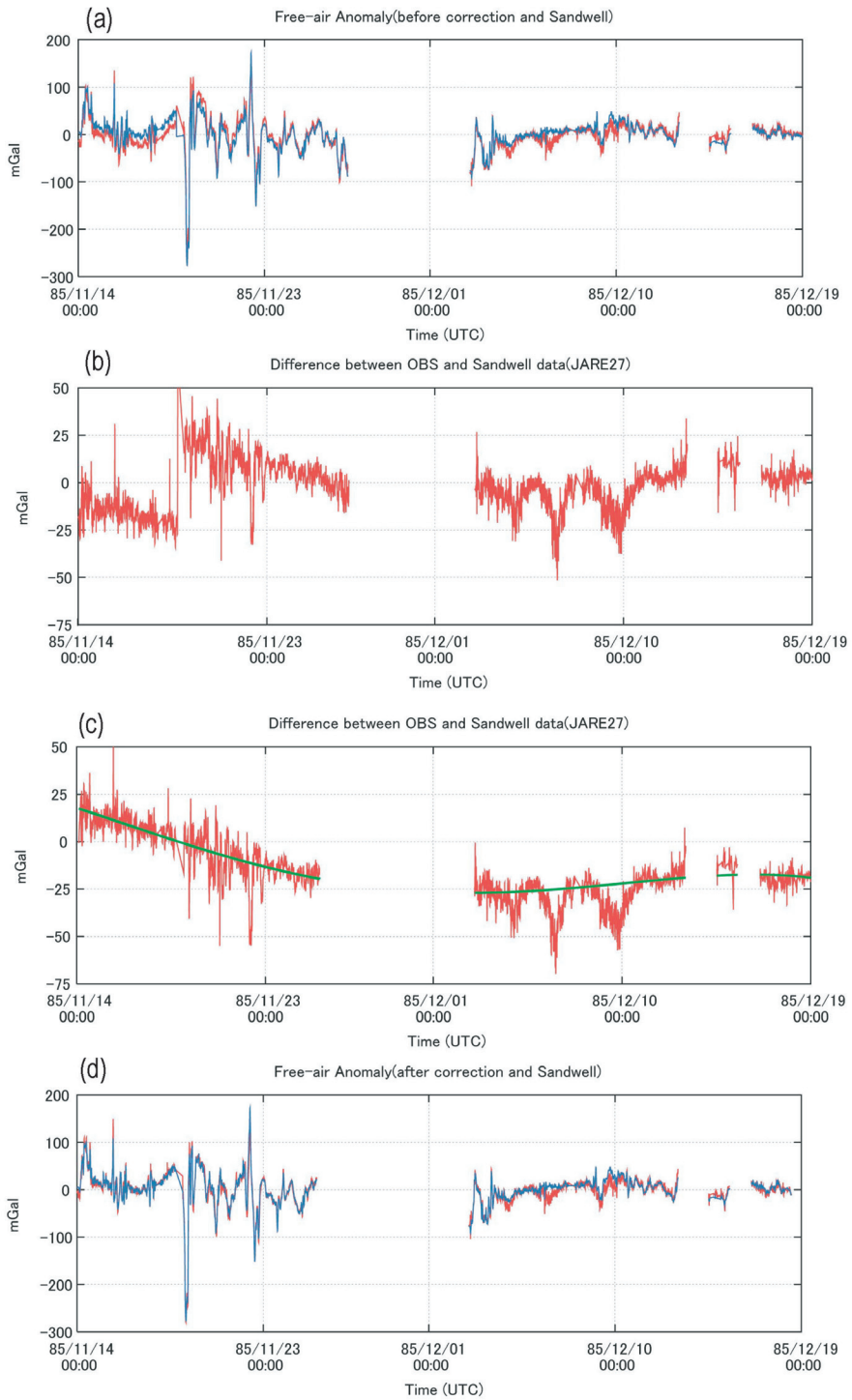


図 3 ドリフト補正の例 (a) - (d) は本文参照

Fig. 3. An example of the drift correction. See text for detailed descriptions for (a) - (d)

COE 全体を最小化するようにクロスオーバー補正を行った。なおクロスオーバー補正については、既にドリフト及びオフセット補正を行った後のデータであるので、補正式としては単純な1次式のモデルで説明できると仮定し (Wessel and Watts, 1988), 最小二乗法で回帰直線を求めて補正を行った。なお, 以上の補正を行った後, さらに値が極端に外れているものやスパイク状の異常値に関しては, 手で除去した。

表3は, クロスオーバー補正前後でのCOEの平均値ならびに標準偏差を示したものである。表3に示すようにクロスオーバー補正後のCOEの平均値はほぼ0となっており, 全体として良好に補正が行われていることを示している。しかしながら, COEの標準偏差については補正後についても数mgalから10mgal程度の値を示しており, よりローカルな海域だけを選んだ場合には1次式モデルで補正しきれない誤差として, COEの標準偏差程度の誤差が残っている可能性を示している。従って, ある海域での重力解析などに際してより精密な議論が必要な場合には, 対象とする領域内で, 再度, ローカルなクロスオーバー補正を行うことが望ましい。

表3 クロスオーバー補正前後の統計量
Table 3. Statistics before and after crossover corrections

JARE	Year	Before correction (external cases)			After correction (external cases)		
		Number of CO points	Means (mGal)	SDs (mGal)	Number of CO points	Means (mGal)	SDs (mGal)
27	1985	333	1.38	8.5	290	0.04	8.29
28	1986	195	-1.88	9.47	222	0.04	11.12
29	1987	409	0.14	8.33	448	0.03	8.61
30	1988	330	0.56	9.43	353	0.02	9.74
32	1990	172	-1.85	10.81	189	0.05	11.19
33	1991	594	-0.2	6.52	592	-0.02	6.41
34	1992	124	-0.97	7.24	124	0.06	6.48
37	1995	628	-1.07	12.62	628	-0.02	12.57
38	1996	449	0.45	9.67	448	-0.02	9.51
39	1997	868	-0.27	10.02	877	0	9.85
40	1998	731	0.69	9.2	736	0.03	9.28
41	1999	808	0.8	7.19	790	-0.01	6.99
42	2000	1255	-0.31	7.42	1254	-0.03	7.27
43	2001	1003	0.42	6.51	1001	-0.02	6.33
44	2002	870	0.56	8.83	870	0	8.69
45	2003	895	-0.38	5.38	898	0.02	5.17
46	2004	1028	-0.39	6.28	1026	-0.01	6.05

3. 重力データセットの詳細

作成した重力データセットは, 使用者の利便性を考えてMGD77フォーマットに準拠して保存した。MGD77は, 海洋地球物理データ交換のための汎用的なフォーマットで, データの種類としては, 水深, 全磁力, 重力及び音波探査に関する情報などが含まれる。通常, 1

クルーズが1つのファイルに対応し、各ファイルは航海情報等が記録されているヘッダーレコードと、観測データが記録されている120バイト長のデータレコード群により構成される。

本研究で作成したデータセットは、隊次ごとに一つのファイルにまとめており、データレコードには各観測時刻における位置、水深、重力の情報が記載されている。ここでの水深データとしては、「しらせ」の音響測深儀で得られたデータにCarter's Tablesを用いて音速度補正を行った値を用いている。なお、第37、38、41、44次隊の水深データに関しては、海上保安庁海洋情報部で別途処理されており、そのデータを利用した。

なお、最終的な重力データセットは、ドリフト補正の基準としてSandwell and Smith (2004)による衛星高度計重力データ (grav. img. 11.1) 利用したが、今後、より高精度な重力基準データが利用できるようになることも想定し、ドリフト補正前のデータファイルについても同様の形式で保存している。これらのデータについては、国立極地研究所のサーバー上にオンラインで保管されており、データ利用の詳細については、野木 (nogi@nipr.ac.jp) まで連絡されたい。

4. データセットの利用例

図4は、今回作成したMGD77フォーマットの重力データセットを利用し、GMT(The Generic Mapping Tools) (Wessel and Smith, 1998) を用いて作図した西エンダビーランド沖の重力異常図である。図4にはSandwell and Smith (2004) による衛星高度計重力異常(左)もあわせて描かれている。図4をみると、大規模な重力異常の構造に関して船上重力と衛星高度計重力はほぼよく一致しているものの、船上重力データの方がより詳細な重力異常の構造

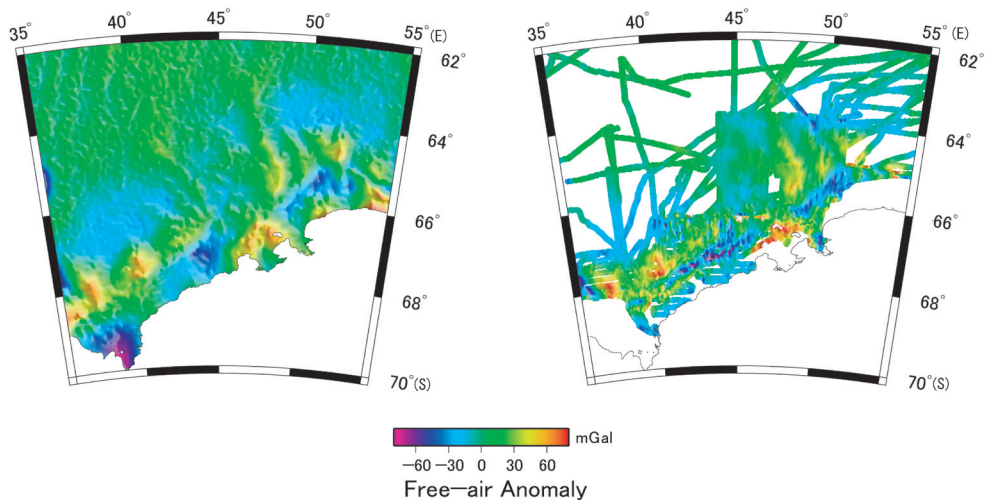


図4 衛星高度計によるフリーエア異常(左)と船上重力測定によるフリーエア異常(右)
 Fig. 4. Comparison between free-air anomalies from satellite altimetry (Sandwell and Smith, 2004; left) and surface ship gravity anomaly (right).

を示していることが読みとれる。たとえば、プリンス・オラフ海岸付近 (67.8°S, 45°E) において、衛星高度計データでは負の重力異常が広がっているが、船上重力データではそのような広がりは見られず、むしろ海岸線に対して平行 (NE-SW 方向) な走行を持つ負の重力異常の構造が見られ、ケーシー湾沖 (66.5°S, 47.0°E 付近) で正の重力異常に分断されているような構造が確認される。また構造のパターンだけでなく、重力異常の振幅についても船上データの方がより大きく、このような詳細構造を見る際には船上重力データが優位であることを示している。なお、この領域内での両者の差の平均値は -0.5 mGal、標準偏差は 12.9 mGalであった。この平均値の差は、表3に示したCOEの値とも整合的であり、また、標準偏差についても大陸沿岸域での衛星高度計データの精度低下を考えると妥当なものと思われる。

5. ま と め

第27次隊 (1986年) から第46次隊 (2005年) までに「しらせ」の船上重力計で取得された17年分の重力測定データの整理及び処理を行い、MGD77フォーマットで提供可能な形に編集した。

重力データセット作成にあたり、最新の衛星高度計データを共通の基準にして補正を行ったことで、未処理のデータだけでなく処理済みとされていたものに関しても、データ中に残されていたステップ等を適正に補正し、より信頼性の高い重力データセットの作成に成功した。今回作成したデータセットが、今後の南極海域での地球物理学的研究に広く利用されることを期待する。

謝 辞

「しらせ」船上での重力測定については、直接重力計の保守観測にあられた隊員はもちろん、各隊の「しらせ」乗員ならびに観測隊員の全面的な協力をいただいている。また、国立極地研究所地圏研究グループをはじめ、多くの関連機関の支持なくしては成し得ないものである。今回データをまとめるにあたり、水深データの一部は、海上保安庁海洋情報部より提供いただいたものである。これら関係各位すべてに、改めて敬意と謝意を表する次第である。

文 献

- 福田洋一 (1989): ベイズ型離散スプラインを用いた船上重力のエトベス補正. 測地学会誌, **35**, 299-305.
福田洋一 (1995): 南極海の重力測定の実況とその問題点. 月刊海洋, **27**, 351-355.
福田洋一 (2001): 南極および周辺海域での重力場研究. 月刊地球, 号外**35**, 130-137.
Fukuda, Y., Segawa, J. and Kaminuma, K. (1992): Determination of the Gravity field around Antarctica using satellite altimeter data and surface gravity data — A review of the recent studies —. Recent Progress in Antarctic Earth Science, ed. by Y. Yoshida *et al.* Tokyo, Terra Sci. Publ., 489-491.
神田啓史 (2005): 第45次南極地域観測隊夏隊報告2003-2004. 南極資料, **49**, 309-336.

- Kasuga, T., Fuchinoue, S., Kaminuma, K. and Segawa, J. (1983): Sea gravity measurements in the Antarctic regions during the 22nd and 23rd Japanese Antarctic Research Expeditions. Mem Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **28**, 81–92.
- Sandwell, D. T. and Smith, W. H. F. (1997): Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry. J. Geophys. Res., **102**, 10039–10054.
- Sandwell, D. T. and Smith, W. H. F. (2004): http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_grav.html
- Segawa, J., Kaminuma, K., Toh, H., Fukuda, Y. and Yang, C. S. (1988) : New ship-borne gravimeter NIPR-ORI Model II installed on board icebreaker SHIRASE. Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.), **32**, 259–276.
- Wessel, P. and Watts, A. B. (1988): On the accuracy of marine gravity measurements. J. Geophys. Res., **93**, 393–413.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1998): New, Improved version of generic mapping tools released. EOS Trans. AGU, **79** (47), 579.