

## 「しらせ」船上重力データの再処理

松崎和也<sup>1</sup>・福田洋一<sup>2\*</sup>・野木義史<sup>3,4</sup>Reprocessing of *Shirase* shipborne gravity dataKazuya Matsuzaki<sup>1</sup>, Yoichi Fukuda<sup>2\*</sup> and Yoshifumi Nogi<sup>3,4</sup>

(2014年5月22日受付; 2014年7月14日受理)

**Abstract:** To compile consistent data sets of Japanese Antarctic Research Expedition (JARE) shipborne gravity data, we applied drift and offset corrections to data sets obtained from JARE-27 to -52 by using a new satellite altimetric gravity model as the reference. Konishi *et al.* (2006) had previously conducted drift and offset corrections for data obtained up to and including JARE-46 so that the shipborne data fitted the satellite altimetric gravity data of grav.img.11.1 (Sandwell, 2004). Following the method of Konishi *et al.* (2006), we extracted gravity values from the altimetric gravity model of grav.img.20.1 (Sandwell, 2012) along the ship tracks, and then compared these values with those of the shipborne gravity data. These comparisons revealed large discrepancies near the turning points of the ship tracks, and large drifts and offsets in some of the data sets. We removed data that contained large discrepancies, and applied drift and offset corrections to the remaining data by assuming polynomial functions of time as the drift model. These reprocessed data sets were used for estimating crustal structure near Syowa Station.

**要旨:** 日本南極地域観測隊では「しらせ」船上での重力測定を実施しているが、重力計のドリフトやオフセットにばらつきがあることから、小西ほか(2006)では、第46次隊までのデータについて、衛星高度計データによる海域重力モデルを基準とした補正が行われている。しかし、それ以降の取得データは未補正であり、また、衛星高度計による海域重力モデルも新しくなっていることから、今回、第52次隊までのすべての船上重力データについて再処理を行った。具体的には、未処理だった第47次隊から第52次隊のデータに含まれる異常値を除去した後、第27次隊から第52次隊の全データについて、最近のモデル grav.img.20.1 を基準としてドリフトおよびオフセットの補正を行った。これらの処理の概要について報告するとともに、補正済みデータセットを利用したリュツォ・ホルム湾からアムンゼン湾沖

<sup>1</sup> (現所属 present affiliation): 産業技術総合研究所 (元京都大学大学院理学研究科). National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568.

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> 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, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

<sup>4</sup> 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻. Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

\* Corresponding author. E-mail: fukuda@kugi.kyoto-u.ac.jp

にかけての地殻構造推定結果について述べる。

## 1. はじめに

日本南極地域観測隊 (Japanese Antarctic Research Expedition, 以下, JARE と呼ぶ) では, 日本から南極・昭和基地までの「しらせ」の往復航路上で船上重力測定を実施しており (例えば, 福田, 2001), 第 27 次観測隊 (JARE-27) 以降, ほぼ定常的にデータが取得されている。この間, 重力計や測位システムなどが変更されていることや, また, 相対重力計である船上重力計の測定値に含まれるドリフトやオフセットの補正精度が必ずしも均一でないことから, 統一的なデータの再処理が不可欠である。このため, 小西ほか (2006) では JARE-27~46 で取得されたデータを整理・編集し, 衛星高度計データによる海域重力モデル (以下, 高度計重力と呼ぶ) grav.img.11.1 (Sandwell, 2004) を長波長重力場の基準としてドリフトとオフセットの補正を行った。

しかし, 小西ほか (2006) 以降に取得された JARE-47~52 のデータについては, このような統一的な補正が行われていないため, それ以前のデータとの間に系統的な誤差が含まれる可能性があり, また, 船上重力データの補正の際に長波長重力場の基準として用いた高度計重力についても, 地球重力モデルの高精度化や新しい衛星高度計データの追加により, 近年, より高精度なモデルが利用できるようになっている。このため, 本研究では, JARE-27~52 のすべての船上重力データについて, 新たな高度計重力 grav.img.20.1 (Sandwell, 2012; Sandwell and Smith, 2009) を長波長の基準として, ドリフトとオフセットの補正再計算を行った。この過程で, JARE-46 以前のデータについても, 従来見逃していた異常データなどを除去し, より信頼性の高いデータセットを得た。さらに今回は, これまでの「しらせ」の航跡に沿った MGD77 フォーマットでのデータセットに加え, さまざまな応用の便に供するため, 50°S 以南, 20~70°E の海域について, 1'×1' 格子での重力異常データセットも作成した。以下では, これらのデータ処理とデータセットの概要について述べるとともに, 格子データの利用例として, リュツォ・ホルム湾からアムンゼン湾沖にかけての地殻の厚さを推定した結果について述べる。

## 2. 船上重力データの処理

### 2.1. 「しらせ」船上重力データ

本研究で使用した「しらせ」の船上重力データは, JARE-27~52 の期間で, データが得られていない JARE-31, 35, 36, 50 を除く 22 年分のデータである。表 1 に, この期間の船上重力測定の実施状況を示す。この間, 船上重力計としては, JARE-27~28 で NIPRORI-I, JARE-29~49 で NIPRORI-II, JARE-51~52 では Air-Sea Gravity System II (Micro-g LaCoste, 2014) が使用され, 測位システムについても JARE-27~34 では NNSS, JARE-37~52 で

表 1 「しらせ」船上重力測定の実施状況

Table 1. Summary of gravity measurements made on board Shirase.

JARE	砕氷船	重力計	測位システム	重力データ
27-28	しらせ 5002	NIPRORI-I	NNSS	小西ほか (2006) で補正済
29-34		NIPRORI-II		
37-46				
47-49				
51-52	しらせ 5003	Air-Sea Gravity System II	GPS	未補正

は GPS と更新されている。特に、新しい「しらせ 5003」就航後に使用されている Air-Sea Gravity System II は、センサーのドリフト特性が向上したことなどで、NIPRORI-I/II に比べ測定精度が向上している。また、データ・サンプリング速度も、NIPRORI-II では 1 分間隔であるのに対し、Air-Sea Gravity System II では 1 秒と高速化されている。

ところで、船上重力計は相対重力計であるので、重力の絶対値のずれ（オフセット）や、センサーの経時的な変化に起因する重力値の見かけの変化（ドリフト）についての校正が不可欠である。これらは、通常、重力絶対値が既知である複数の寄港地での測定値を用い補正を行うが、「しらせ」では、寄港地を出港してから次の寄港地に入港するまでに要する期間が長いことや、南極・昭和基地での校正が困難であるため、高精度なドリフト・オフセット補正が難しく、隊次ごとの重力データに差が生じる原因となっている。

図 1 に、今回使用した船上重力測定の航跡につき、小西ほか（2006）で補正の行われている JARE-27~46 を青で、それ以降に取得された JARE-47~52 を赤で示す。また、図 2 には、60°S 以南、20~70°E の昭和基地周辺の海域について、本研究での補正前のフリーエア異常を示す。これらの図をみると、特に小西ほか（2006）以後の JARE-47~52 のデータの一部について、航路交点での値が大きく食い違っていることが確認できるが、これらは上記の寄港地での重力値を用いたドリフトやオフセットの補正が不十分であることを反映している。

## 2.2. 衛星高度計データ

海域の重力データは、船上重力測定以外にも、衛星高度計による海面高測定データから高度計重力を得ることができる（例えば、Sandwell and Smith, 1997）。これは、マイクロ波レーダを用いて計測した海面高をジオイド高と近似して重力異常を計算するもので、船上重力測定のように航跡に沿っての高空間分解能での重力データを得ることは困難であるが、長波長の重力成分としては、例えば EGM96 (Lemoine *et al.*, 1998) のような地球重力モデルが利用

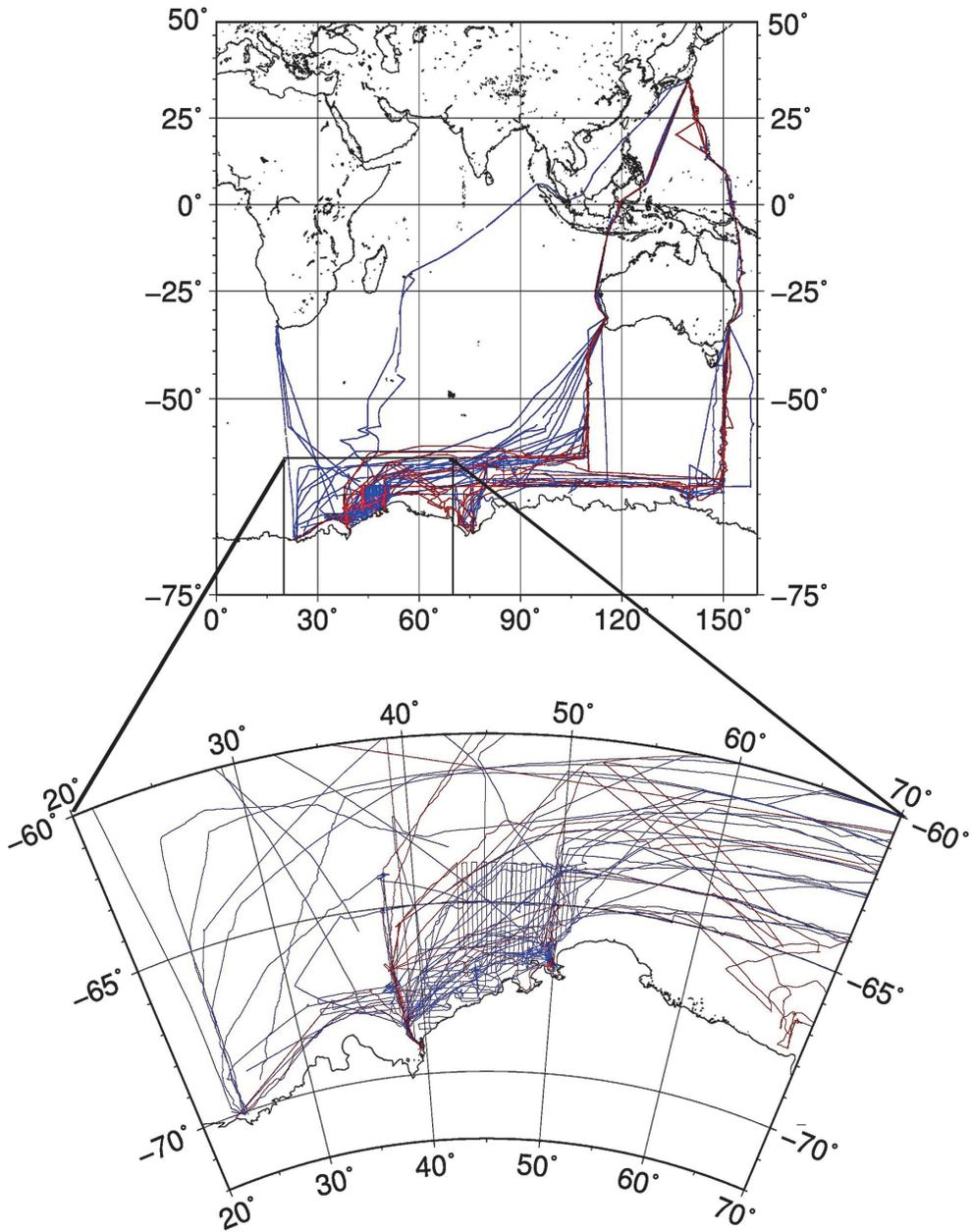


図 1 「しらせ」船上重力測定航跡。青は JARE-27~46 の航跡（小西ほか，2006）を，赤はそれ以降の JARE-47~52 の航跡を示す。  
 Fig. 1. Ship tracks of gravity measurements made on board Shirase. The ship tracks of JARE-27 to -46 (Konishi et al., 2006) are shown as blue lines, and those of JARE-47 to -52 as red lines.

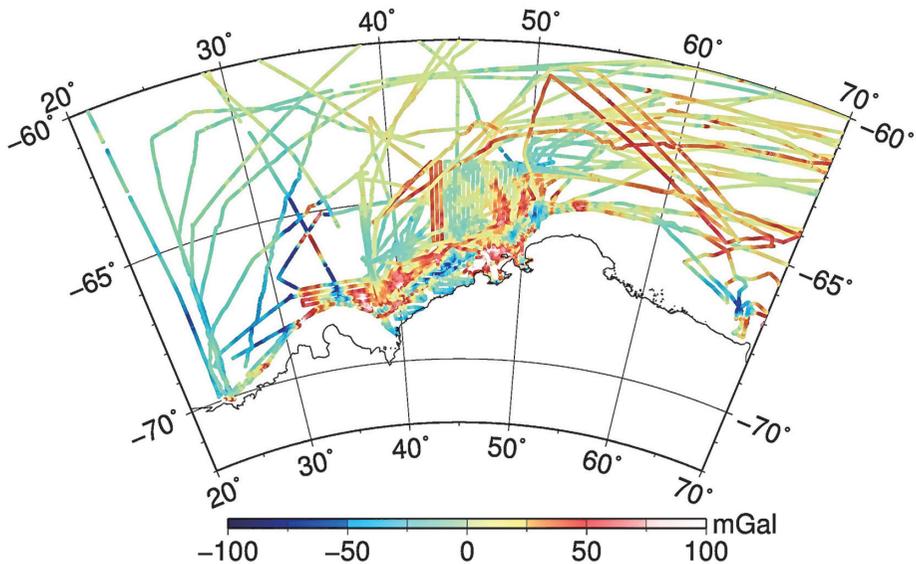


図 2 オフセット・ドリフト補正を行う前のフリーエア重力異常航跡データ  
 Fig. 2. Along-track free-air gravity anomalies before applying offset and drift corrections.

されているため、原理的にドリフトやオフセットを含まない。このため、高度計重力を長波長成分の基準として用いることで、船上重力データのドリフト・オフセット補正を行うことができる。

小西ほか (2006) では、JARE-27~46 のデータの補正に長波長成分として EGM96 を用いた grav. img. 11. 1 (Sandwell, 2004) を採用しているが、その後、高度計重力の長波長成分として、より高精度な EGM2008 (Pavlis *et al.*, 2012) が用いられるようになり、また、衛星高度計のデータとしても CryoSat, Envisat, Jason-1 といった新しいデータが利用され (Sandwell *et al.*, 2013)、いくつかの新しい高度計重力モデルが公開されている。今回は、これらの中から、EGM2008 を長波長成分に用い、上記の新しい衛星高度計データを含む grav. img. 20. 1 (Sandwell, 2012; Sandwell and Smith, 2009) を補正の基準として採用した。

### 2.3. 船上重力データの再処理

JARE-27~46 の船上重力データについては、小西ほか (2006) によって補正・編集されているが、基準となる高度計重力モデルを変更したことから、今回、これらのデータについても同一の方法で再補正することとした。小西ほか (2006) での補正済みデータでは、停船時や異常値は除去され、1 隊次が 1 ファイルとして保存されている。一方、JARE-47~52 のデータは、停船時や異常値も含み、1 日ごとに 1 ファイルで保存されている。このため、JARE-

47~52のデータについては、ファイルを結合したうえで停船時のデータを取り除き、JARE-27~52のすべてのデータについて寄港地から寄港地までの1レグが1ファイルとなるように再編集した。

次に、各レグについて、1分格子で与えられている grav. img. 20.1 のデータから航跡に沿っての値を内挿し、船上重力異常との差を求めた。その際、差が  $100 \text{ mGal}$  ( $10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ ) 以上のデータについて、目視で確認のうえ、異常値と思われるものは除去した。図3は、JARE-51のデータについて、このような測定異常値の例を示したものである。

図4は、JARE-27~52の各レグについて、船上重力値と高度計重力値との差の平均値を示したものである。両者には、空間分解能の違いがあるために必ずしも完全に一致する必要

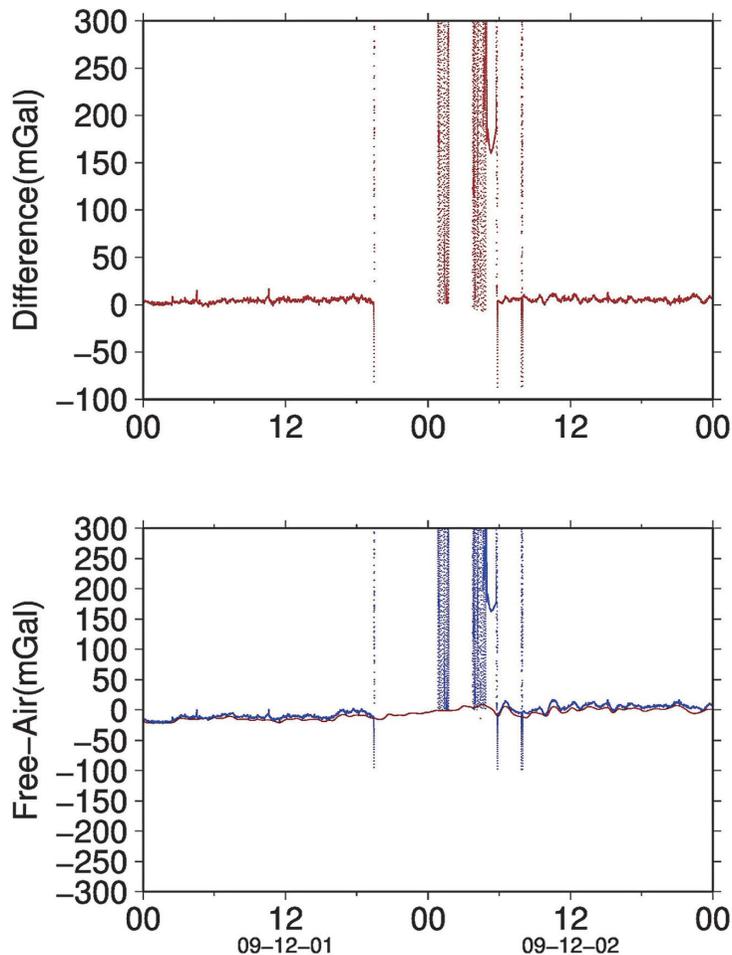


図3 JARE-51での測定異常値の例

Fig. 3. Example of outliers in the JARE-51 data sets.

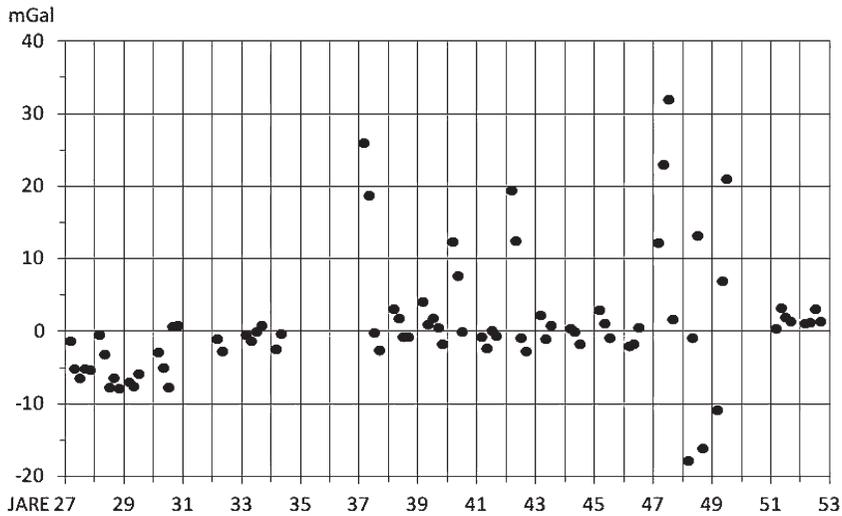


図 4 各レグでの「しらせ」船上重力値と高度計重力値 (grav.img.20.1) との差の平均  
 Fig. 4. Average differences between shipborne gravity (Shirase) and altimetric gravity (grav.img.20.1) for each of the ship legs.

はないが、寄港地から寄港地までの広い海域での差の平均値であるので、ドリフトやオフセット補正が適切に行われていれば、これらの差は 0 に近くなることが期待できる。しかし、JARE-47~49 の差は他に比べ大きくばらついており、補正の必要性が確認できる。また、補正済である JARE-27~46 のデータについても、JARE-37, 40, 42 の一部のレグについて ~20 mGal という大きなばらつきが確認された。一方、JARE-51~52 のデータについては、期待されたとおりオフセットのばらつきも小さく、0~5 mGal というよい結果を示している。

具体的なドリフト・オフセットの補正は、各レグでの船上重力 ( $\Delta g_s$ ) と高度計重力 ( $\Delta g_a$ ) の差 ( $\Delta g_d$ ) が、時間 ( $t$ ) についての 2 次式

$$\Delta g_d = \Delta g_s - \Delta g_a = At^2 + Bt + C \quad (1)$$

であると仮定し、最小二乗法で係数 A, B, C を決定した。なお、これらの係数 A, B, C を求める際には、あてはめ式からの差が 2SD (Standard Deviation) 以上離れた測定値は除外した。

以上により補正されたデータについて、小西ほか (2006) と同様に、隊次ごとのデータファイルを MGD77 フォーマットに準拠して作成した。さらに、50°S 以南、20~70°E の領域について、全期間のデータを用いて、1'×1' グリッドでの平均値のデータセットを作成した。なお、平均値の計算では、各グリッドで平均値から 2SD 以上外れたデータは除外した。その結果、データを 2 点以上含むグリッドでの SD の平均値は 0.49 mGal で、SD が 1 mGal 以下のグリッドが 87%、2 mGal 以下のグリッドが 95% を占めることとなった。

図5は、図2と同様の範囲について、補正後のフリーエア異常をプロットしたものである。図2と比較すると、ドリフト・オフセット補正の結果、航跡の交点での食い違いがほとんどなくなっていることがわかる。

図6および図7は、補正前後での船上重力値と grav. img. 20.1 重力値との差をプロットしたものである。補正前の図6では、JARE-47~52のデータの一部が50 mGal以上食い違っていたものが、補正後の図7では解消されていることが確認できる。一方、補正後の図7にも局所的に重力異常値に大きな差異がみられるが、このうち、海岸線付近の水深の浅い海域では衛星高度計データの精度が著しく低下することが知られており、海岸線に沿った大きな差は grav. img. 20.1 に含まれる誤差を示していると思われる。

### 3. 地殻構造の推定

南極昭和基地周辺のリュツォ・ホルム湾からアムンゼン湾にかけての海域は、 Gondwana 大陸分裂初期の分裂過程や海洋底拡大のテクトニクスが保存されていると考えられているが、取得された地球物理学的データが限られているため、地殻構造やその変動過程はあまりよく解明されていない。そこで、上記で作成したデータセットを利用し、この海域でのモホ面の深さを推定した。

具体的な計算手順としては、補正済みのフリーエア異常と、「しらせ」の測深データを用い、

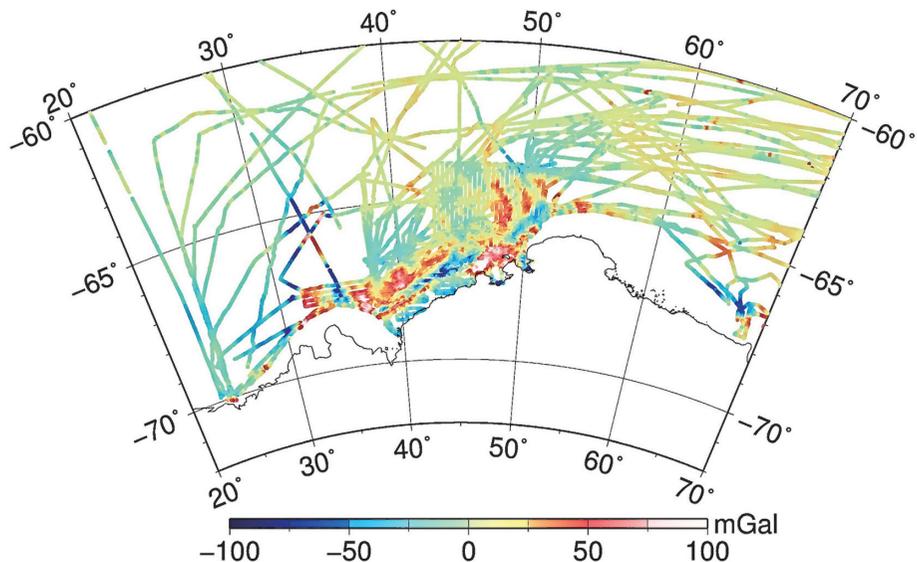


図5 補正後のフリーエア異常

Fig. 5. Free-air gravity anomaly after corrections.

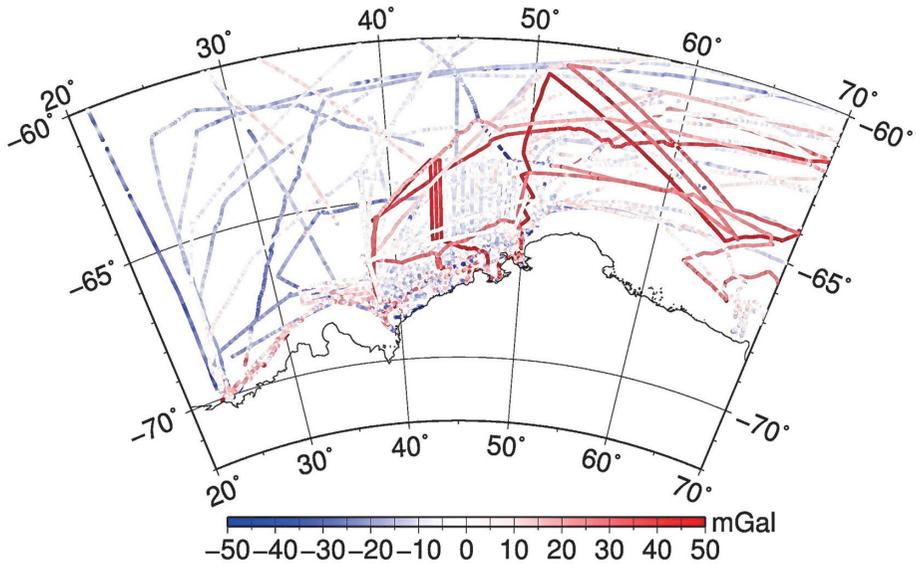


図 6 補正前の船上重力値と高度計重力値の差  
Fig. 6. Differences between uncorrected shipborne gravity and altimetric gravity.

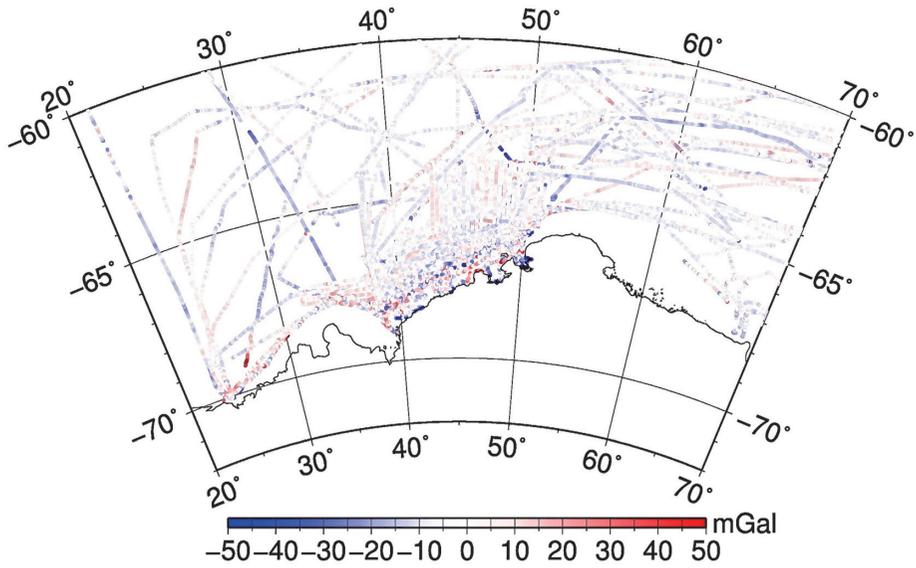


図 7 補正後の船上重力値と高度計重力値の差  
Fig. 7. Differences between corrected shipborne gravity and altimetric gravity.

38.5°E から 50.5°E まで 0.5° 間隔の南北測線に沿ってブーゲー異常のプロファイルデータを作成し、2次元の Talwani 法 (Talwani *et al.*, 1959) で地殻の厚さを推定した。

図 8 は、38.5°E の測線に沿っての推定の様子を示したものである。推定に必要なパラメータとして、地殻およびマントルの密度を、それぞれ  $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $3.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、密度差を  $0.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  に固定、地殻の厚さが大陸—海洋地殻境界でステップ状に変化する簡単な構造を仮定し、ステップの位置と大陸地殻の厚さをフォワードモデリングで求めた。図 8 の上図には、赤線で示した観測値とともに、下図の黒の実線を基準に、薄青、青の一点鎖線で、ステップの境界位置を水平方向に 20 km 刻みに、また、緑、紫、橙の破線で、鉛直方向に 3 km 刻みで変化させた場合の計算結果が示してある。これによると、ステップの水平位置の変化に対しては推定値が大きく変化するものの、ブーゲー異常の振幅の変化そのものは地殻の厚さの差に依存しているため、鉛直方向の位置の変化に対してはあまり影響されないことがわかる。このため、以後は、沖側の海洋地殻の底面の深さを 12 km に固定し、ステップの水平位置と大陸地殻の厚さのみを変化させることとした。なお、今回は地殻とマントルの 2 層構造のみを仮定しているが、実際は海底下に低密度の堆積層などが存在することが考えられ、これらの影響は短波長の相対的に負の異常として表れると予想される。このため、構造を決め

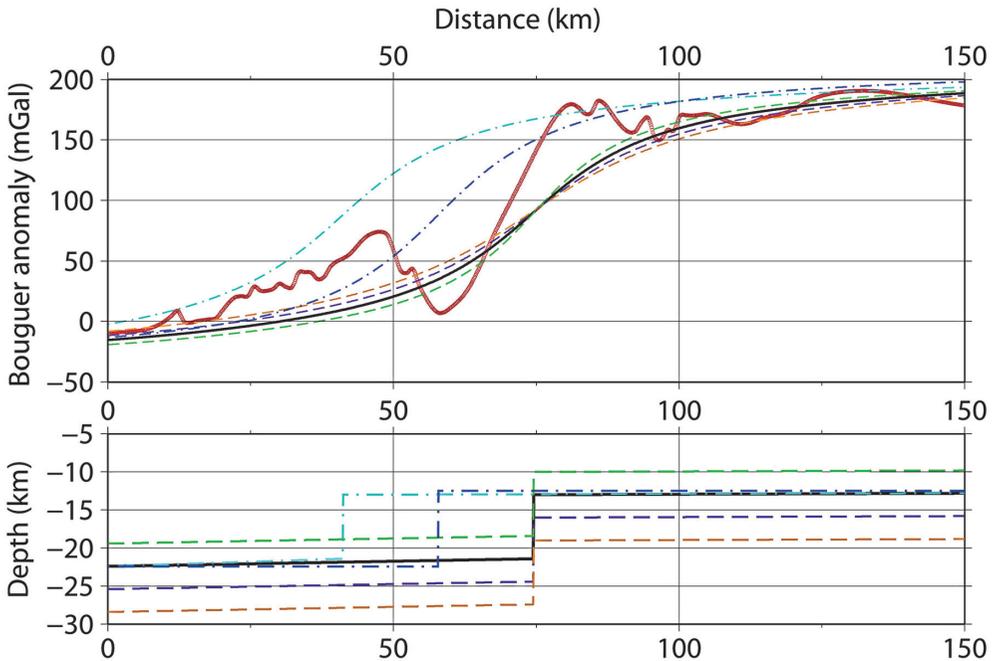


図 8 38.5°E の側線に沿っての地殻構造の推定例。横軸は北向きで原点は 68.87°S

Fig. 8. Example of an estimate of the crustal structure along the 38.5°E profile. The abscissa is pointing north and its origin is 68.87°S.

るにあたっては、ブーゲー異常の計算値が実測値の上端の包絡線にできるだけ一致するようなモデルを採用した。

図9に、以上の方針で得られた結果を示す。図9(a)ではブーゲー異常の測定値(赤)とモデルによる計算値(青)を、また、図9(b)では、推定されたモホ面の形状について、それぞれ38.5°Eから1°間隔での推定結果のみを示している。各プロファイルでの短波長の不一致は、今回は考慮されていない海底下の堆積層の影響、地殻内の不均質などの影響と考えられる。なお、海底下の堆積層の密度を $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と仮定した場合、測定値と計算値の差は50 mGalであり、その厚さは約1 km程度に相当する。

図10は、以上の結果をまとめ、0.5°間隔のすべての測線で地殻の厚さをプロットしたものであり、大陸—海洋地殻境界の位置を赤三角で示している。図10では、大陸—海洋地殻の境界がほぼ海岸線に並行にNE-SW方向に並んでいることがわかる。また、原因については必ずしも明らかでないが、大陸地殻の厚さが西に行くほど厚くなる傾向を示しており、その厚さは38.5–44°Eでは23–22 km、44.5–50.5°Eでは21–19 kmと、東西で2–3 kmの差が生じる結果となった。

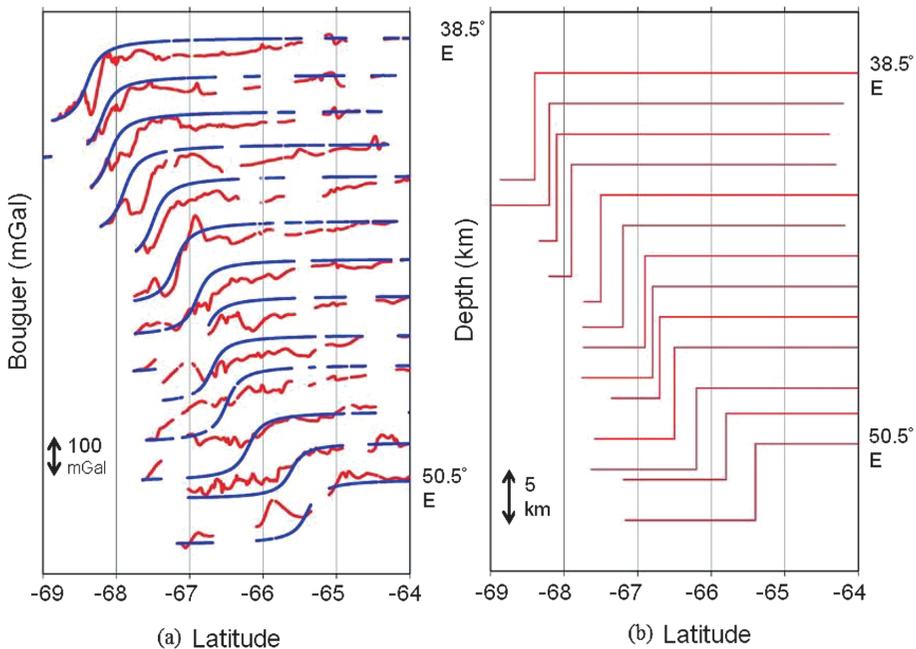


図9 38.5–50.5°Eにかけての地殻構造の推定結果

(a) 実測ブーゲー異常(赤)とモデルによるブーゲー異常(青)、(b)推定された地殻の深さ  
 Fig. 9. Estimated crustal structure from 38.5° E to 50.5° E. (a) Observed Bouguer anomalies (red lines) and calculated Bouguer anomalies (blue lines), (b) estimated crustal depths.

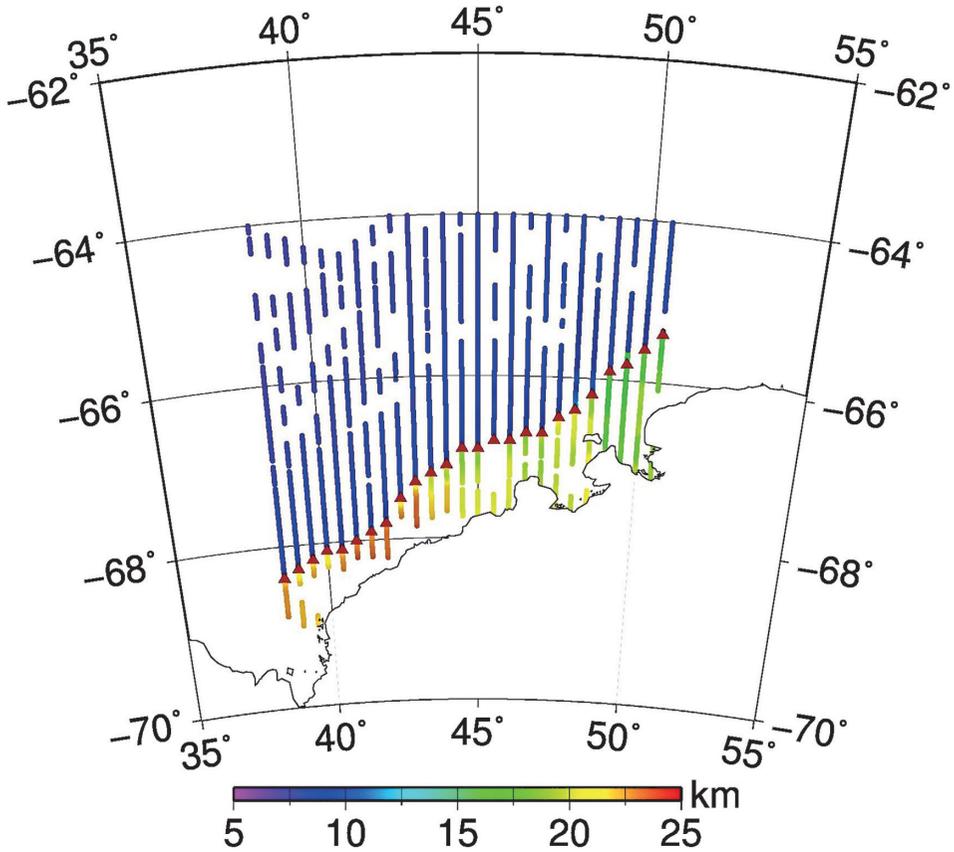


図 10 推定された地殻の厚さ。赤三角は大陸地殻と海洋地殻の境界位置を示す。

Fig. 10. Estimated crustal thickness. Red triangles show the position of the boundary between continental crust and oceanic crust.

大陸地殻は年代が古くなるほど厚くなると考えられるが、この結果は、東に行くほど古いというこの地域の岩体の年代傾向（例えば、Harley and Black, 1997; Shiraishi *et al.*, 2003）とは逆である。本研究の対象域の西側の 30°E 付近には、大陸地殻の一部であると考えられているグンネラス海嶺（Roeser *et al.*, 1996; Saki *et al.*, 1987）が南極大陸から突出しており、この付近を境に初期分裂時の海洋底拡大方向が変わっていたことが指摘されている（Nogi *et al.*, 2004）。これは、大陸地殻であるグンネラス海嶺が初期分裂過程で取り残されたことを示しており、38.5–44°E の厚い大陸地殻は、このような大陸分裂過程等、この地域のテクトニクスと関わりがあることを示唆していると思われる。

#### 4. ま と め

JARE-27~52で「しらせ」で取得された船上重力データについて、最新の海面高重力モデルを基準としドリフトおよびオフセットの補正を行い、均質なデータセットを作成した。また、作成したデータセットを用いて昭和基地周辺海域の地殻構造の推定を行った。

この過程で、未補正であったJARE-47~52のデータについては、特に「しらせ5002」で取得されたJARE-47~49のデータに大きな異常値やドリフト・オフセットの存在が確認できた。一方、「しらせ5003」で取得されたJARE-51~52のデータについては、ドリフト・オフセットともに小さく、良好なデータが取得されている。また、補正済みであったJARE-27~46のデータについても、一部のデータに比較的大きなオフセットやドリフトが残っていたことが確認でき、今回、これらのデータについても補正を行い、より均質なデータセットを作成することができた。

作成したデータセットを用い、38.5~50.5°Eの南北測線について、地殻の厚さを推定したところ、大陸—海洋地殻の境界については、ほぼ海岸線に並行にならぶ構造が得られた。このような単純な構造が得られたことは、データの信頼性を示す一つの指標と考えてよい。一方、大陸—海洋遷移域の地殻の厚さについては、西に行くほど厚くなる傾向を示しており、その原因を探るためには、今後、より詳細な研究が必要である。海岸線に近い海域では衛星高度計データの精度が落ちることから、今後も船上重力データの集積が望まれる。

#### 謝 辞

「しらせ」船上での重力測定については、直接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。これら関係各位に、改めて謝意を表する次第である。

本研究の一部は、JSPS 科研費 (23540494) および極地研究所一般共同研究 (23-33) の助成を受け実施したものである。

#### 文 献

- 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.
- Harley, S.L. and Black L.P. (1997): A revised Archaean chronology for the Napier Complex, Enderby Land, from SHRIMP ion-microprobe studies. *Antarctic Science*, **9**, 74-91, doi:10.1017/S0954102097000102.
- 小西康夫・福田洋一・野木義史 (2006): 南極観測船「しらせ」で得られた船上重力データの整備. 南極資料, **50**, 251-262.
- Lemoine, F.G., Kenyon, S.C., Factor, J.K., Trimmer, R.G., Pavlis, N.K., Chinn, D.S., Cox, C.M., Klosko, S.M., Luthcke, S.B., Torrence, M.H., Wang, Y.M., Williamson, R.G., Pavlis, E.C., Rapp, R.H. and Olson, T.R. (1998): The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96. Greenbelt, NASA Goddard Space Flight Center, NASA/TP-1998-206861.
- Micro-g LaCoste, Inc. (2014): Air-Sea Gravity System II. <http://www.microglacoste.com/airsea.php>.
- Nogi, Y., Nishi, K., Seama, N. and Fukuda, Y. (2004): An interpretation of the seafloor spreading history of the West Enderby Basin between initial breakup of Gondwana and anomaly C34. *Marine Geophysical Research-*

- es, **25**, 221–231, doi:10.1007/s11001-005-1317-0.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. and Factor, J.K. (2012): The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *J. Geophys. Res.*, **117**, B04406, doi:10.1029/2011JB008916.
- Roeser, H.A., Fritsch, J. and Hinz, K. (1996): The development of the crust off Dronning Maud Land, East Antarctica. *Weddell Sea Tectonics and Gondwana Break-up*, ed. by B.C. Storey, E.C. King and R.A. Livermore. London, Geological Society, 243–264 (Special Publication, **108**), doi:10.1144/GSL.SP.1996.108.01.18.
- Saki, T., Tamura, Y., Tokuhashi, S., Kodato, T., Mizukoshi, I. and Amano, H. (1987): Preliminary report of geological and geophysical surveys off Queen Maud Land, East Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Geosci.*, **1**, 23–40.
- Sandwell, D.T. (2004): <ftp://topex.ucsd.edu/pub/archive/grav/grav.img.11.1>.
- Sandwell, D.T. (2012): README.20.1. <ftp://topex.ucsd.edu/pub/archive/grav/README.20.1>.
- 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, doi:10.1029/96JB03223.
- Sandwell D.T. and Smith, W.H.F. (2009): Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. *J. Geophys. Res.*, **114**, B01411, doi:10.1029/2008JB006008.
- Sandwell, D.T., Garcia, E.S., Soofi, K., Wessel, P., Chandler, M.T. and Smith, W.H.F. (2013): Toward 1-mGal accuracy in global marine gravity from CryoSat-2, Envisat, and Jason-1. *The Leading Edge*, **32**, 892–899, doi:10.1190/tle32080892.1.
- Shiraishi, K., Hokada, T., Fanning, C.M., Misawa, K. and Motoyoshi, Y. (2003): Timing of thermal events in eastern Dronning Maud Land, East Antarctica. *Polar Geosci.*, **16**, 76–99.
- Talwani, M., Worzel, J.L. and Landisman, M. (1959): Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *J. Geophys. Res.*, **64**, 49–59, doi:10.1029/JZ064i001p00049.