

第2白嶺丸重力データの整備・公開

石原 丈実^{1,*}・小田 啓邦²

ISHIHARA Takemi and ODA Hirokuni (2022) Preparation and release of gravity data collected by R/V Hakurei-maru No.2. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(2), p. 29-48, 16 figs and 2 tables.

Abstract: One-minute interval high-quality gravity data were prepared for the Hakurei-maru No.2 cruises carried out by Geological Survey of Japan from 2000 to 2010. An 8-th order Butterworth low-pass filter with the cutoff frequency of 1/480 Hz (period of 8 minutes) was applied to 1 Hz gravity raw data to make high-resolution free air anomaly data. The RMS CODs (root mean square crossover differences) of the gravity data for the intersecting survey lines are 0.86 mGal for GH00 and GH01 cruises, 1.02 mGal for GH02, GH03, GH04 and GH06 cruises, and 1.30 mGal for GH08, GH09 and GH10 cruises.

It is suggested that the following two factors are the possible sources of 3 to 5 mGal differences observed between the two free air anomalies obtained by Hakurei-maru No.2 and satellite altimetric data, i.e., 1) free air anomaly data collected by Hakurei-maru No.2 have short period anomalies which are not observed in the satellite altimetric data, and 2) the accuracy of altimetric data decreases near the coasts. The gravity data files, which include data after free air gravity anomaly calculation will be released as an open-file report of Geological Survey of Japan.

Keywords: Hakurei-maru No.2, marine geophysical survey, free air gravity anomaly, low-pass filter, data release

要 旨

地質調査総合センター(旧地質調査所を含む)による2000年から2010年の第2白嶺丸の航海に対して1分間隔の均質な重力異常データを整備した。1秒(以下s)間隔の生データにカットオフ周波数1/480 Hz(周期8分)の8次Butterworthローパスフィルターを施すことにより高精度のフリーエア重力異常データを作成した。北海道沖オホーツク海で取得されたGH00・GH01航海, 北海道南方で取得されたGH02・GH03・GH04・GH06航海, そして沖縄島周辺で取得されたGH08・GH09・GH10航海それぞれの重力異常データの互いに交差する測線間の二乗平均平方根交点誤差(RMS COD; root mean square crossover difference)は0.86 mGal, 1.02 mGal, 1.30 mGalである。

航海データと衛星アルチメトリデータの差が3~5 mGalと大きくなっているのは, (1)水深が浅い海域の第2白嶺丸のフリーエア異常データに見られる短波長の異常が衛星アルチメトリでは見られないこと, (2)衛星アルチメトリデータは陸の近傍で精度が低下すること, これら2つが要因とみられる。

航海毎のフリーエア重力異常を計算した重力データ

ファイルを地質調査総合センター研究資料集として公開予定である。

1. はじめに

石原(2021a, b)は旧工業技術院地質調査所による1974年度から1999年度までの地質調査船白嶺丸航海で取得された重磁力データを公開したが, 日本周辺海域の20万分の1の海洋地質図作成プロジェクトは引続き第2白嶺丸(石油天然ガス・金属鉱物資源機構所有)を使用して行われている。第1表に各航海の日程・寄港地, 第1図に測線図を示した。GH00・GH01航海では北海道沖オホーツク海(上嶋ほか, 2007b), GH02・GH03・GH04・GH06航海では北海道南方(上嶋・駒澤, 2011, 2014; 上嶋ほか, 2012a, b), GH08・GH09・GH10航海では沖縄島周辺(小田・佐藤, 2015; 小田, 2018, 2022)の調査を行なった。GH05・GH07航海は海洋地質図作成の航海ではないが八丈島沖と東北沖の海山域等の調査を行なっている(上嶋ほか, 2007a)。これらの航海で取得された船上重力計の生データを公開したところであるが(石原・小田, 2021), さらに, そのデータを用いて計算した重力異常のデジタルデータも公開することにした。

¹ 元産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (Former affiliation: AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

² 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

* Corresponding author: ISHIHARA, T., Email: takemishihara@gmail.com

第1表 第2白嶺丸の北海道周辺, 沖縄島周辺, 東北・八丈島沖航海

Table 1 Hakurei-maru No.2 cruises around Hokkaido and Okinawajima Is. and off Tohoku and Hachijojima Is.

Cruise	Survey area	Period	Port of call and dates
GH00	Off Esashi	2000/08/03-09/01 (30)	08/16-18 Wakkanai
GH01	Off Abashiri	2001/07/04-08/02 (30)	07/17-19 Abashiri
GH02	Off Tokachi	2002/05/29-06/27 (30)	08/14-16 Tokachi
GH03	Off Kushiro and Hidaka	2003/05/29-06/27 (30)	06/11-13 Kushiro
GH04	Off Nemuro and Hidaka	2004/07/12-08/10 (30)	07/25-27 Kushiro
GH05	Off Tohoku and Hachijojima Is.	2005/06/13-07/12 (30)	06/26-29 Funabashi
GH06	Off Hidaka	2006/08/31-09/29 (30)	09/13-15 Muroran
GH07	Off Tohoku and Hachijojima Is.	2007/06/19-07/18 (30)	07/03-05 Onahama
GH08	Okinawajima Is. North	2008/07/28-08/29 (33)	08/12-14 Naha
GH09	Okinawajima Is. South	2009/07/16-08/17 (33)	07/31-08/02 Naha
GH10	Around Kumejima Is.	2010/10/27-11/25 (30)	11/09-11 Naha

2000年の白嶺丸の廃船に伴い、同船に搭載していたLaCoste & Romberg社製のSL2船上重力計を第2白嶺丸に移設して重力測定を実施してきた。本装置は、ビーム型重力計にみられるクロスカップリング補正を不要とするために、センサーが鉛直方向のみに動くように工夫されたストレートライン型の重力計である(LaCoste, 1983; Valliant, 1991)。なお、全ての観測が2000年以降であるため、測位については、精度を100 m程度にまで劣化させるSA (Selective Availabilityという米国国防総省のポリシー)が解除されたGPSデータにより10 m程度の測位精度が得られていると推定される。今回の公開にあたって、重力計のドリフトやフィルターの問題について検討してみた。

2. 船上重力計のドリフトと変換係数

船上重力計のドリフトを表すのにmeter zero (読取値が0のときの仮想的な絶対重力値; Nettleton, 1976)を使う。重力絶対値 g の港での船上重力計の読取値を G とすればmeter zero Z は

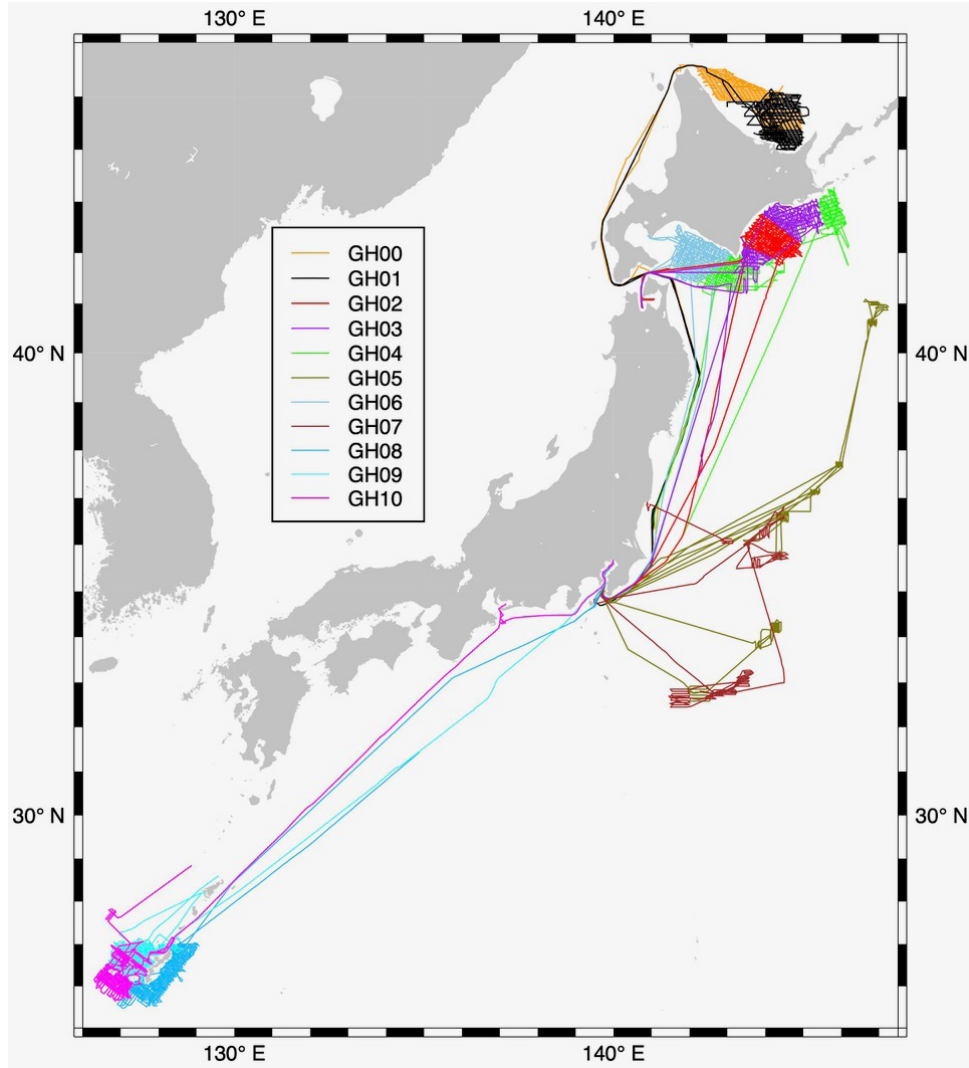
$$Z = g - cG \quad (1)$$

と表せる。ここで c は重力計の読取値をmGal単位に変える変換係数である。船橋港以外の寄港地も含めて重力計

のドリフト値(船上重力計読取値の時間変化)については既に研究資料集725(石原・小田, 2021)にあるが、第2表に再度示し、meter zeroの変化を第2図に示した。変換係数1ではほとんど全ての寄港地でのmeter zeroの値が船橋港での値のトレンドからずれているが、変換係数を0.993とするとほぼトレンド上にのり、よりスムーズなドリフト曲線になった。このため、白嶺丸のデータ処理と同様に全データに対して変換係数 c を0.993として計算することにした(石原, 2021b)。なお、2004年と2005年のmeter zeroの間に約1000 mGalの大きな変化が見られるが、原因は不明である。

3. 重力データの処理方法, 特にフィルター処理

Herring and Hall (2006)はLaCoste & Romberg船上重力計には高周波成分が含まれており、GPSの測位から得られるエトベス補正量を含めて高サンプルレートで取得することにより、よりフィルターがかからない形で短波長の重力異常を再現する可能性について述べている。白嶺丸ではSL2重力計からの10 s間隔の生データに対して時間的にほぼ対称で幅520 sのガウシアンローパスフィルターに近いデジタルフィルターをかけてフィルター出力としていたが(石原, 2021b)、第2白嶺丸では重力計と



第1図 第2白嶺丸の航跡. 航海毎に別の色で示した.

Fig. 1 Track lines of Hakurei-maru No.2 with different colors for different cruises.

GPSの1 s間隔のデータが得られているのでフィルターがよりかからない形の重力計出力とエトベス補正量を求めることを試みた.

第2白嶺丸の重力生データにはフィルター出力と共に、SPRING TENSIONとAVG. BEAM (ビームの上下の位置)の値がある(石原・小田, 2021). これらの値を、それぞれSとBで表すと、重力読取値Gは、以下数式に示すように、SPRING TENSION Sに変換係数 c_0 を乗じ、さらにビームの上下位置Bの時間微分に比例係数Kを乗じた項を加算して補正することで得られる.

$$G = c_0 S + K dB/dt \quad (2)$$

係数Kの値を検討するために、第3図に示すように、重力読取値GからSPRING TENSIONのSに変換係数 c_0 をかけた量を引いた値($G - c_0 S$, 図中青線)と3種類の係数Kの値(20 s, 30 s, 40 s)をビーム上下位置Bの時間微分に

けた値($K \times dB/dt$, 図中3つの赤線)を比較した. 比較の結果, 係数 Kの値が40 sでは観測される振動の振幅が大きすぎ, 20 sでは小さすぎ, 30 sが最適であることがわかった.

重力読取値Gに対応する(エトベス補正を含まない)重力の絶対値 g_0 は出港地の重力絶対値 g_A とその時の重力計の読取値 G_A , 重力計のドリフト項 dt を使えば

$$g_0 = g_A + c(G - G_A - dt) \quad (3)$$

と表せる. フリーエア異常 f は

$$f = g_0 - g_n + d^2 z/dt^2 - g_E \quad (4)$$

となる. ここで g_n は緯度補正, g_E はエトベス補正, $d^2 z/dt^2$ は鉛直加速度である. (2), (3), (4)をまとめると

$$f = c(c_0 S + K dB/dt) + d^2 z/dt^2 - g_E - g_n + g_A - c(G_A + dt) \quad (5)$$

として求めることができる. 第2項の鉛直加速度 $d^2 z/dt^2$ は, 船上重力計は十分長い時間で考えれば海面から一定

第2表 船橋基地及び寄港地でのSL2重力計読取値と重力値・meter zero
Table 2 SL2 readings, gravity values and meter zero at Funabashi and other ports

Port	Cruise	Year	JD [†]	Gravity	Reading	Meter1 [*]	Meter2 ^{**}
FunabashiA	GH00	2000	216	979788.6	4199.2	975589.4	975618.8
Wakkanai	GH00	2000	231	980637.9	5055.4	975582.5	975617.9
FunabashiA	GH00	2000	245	979788.6	4200.5	975588.1	975617.5
FunabashiA	GH01	2001	185	979788.6	4198.0	975590.6	975620.0
Abashiri	GH01	2001	199	980592.7	5007.7	975585.0	975620.1
FunabashiA	GH01	2001	214	979788.6	4198.1	975590.5	975619.9
FunabashiA	GH02	2002	213	979788.6	4199.5	975589.1	975618.5
Tokachi	GH02	2002	228	980390.4	4807.1	975583.3	975616.9
FunabashiA	GH02	2002	242	979788.6	4200.7	975587.9	975617.3
FunabashiA	GH03	2003	149	979788.6	4204.4	975584.2	975613.6
Kushiro	GH03	2003	162	980601.4	5024.9	975576.5	975611.7
FunabashiA	GH03	2003	178	979788.6	4205.7	975582.9	975612.3
FunabashiB	GH04	2004	194	979788.2	4215.4	975572.8	975602.3
Kushiro	GH04	2004	207	980601.4	5035.6	975565.8	975601.0
FunabashiA	GH04	2004	223	979788.6	4216.1	975572.5	975602.0
FunabashiC	GH05	2005	164	979789.4	3195.5	976593.9	976616.3
FunabashiC	GH05	2005	177	979789.4	3198.0	976591.4	976613.8
FunabashiC	GH05	2005	180	979789.4	3196.2	976593.2	976615.6
FunabashiC	GH05	2005	193	979789.4	3196.1	976593.3	976615.7
FunabashiA	GH06	2006	243	979788.6	3198.0	976590.6	976613.0
Muroran	GH06	2006	256	980462.6	3877.4	976585.2	976612.3
Muroran	GH06	2006	258	980462.6	3877.9	976584.7	976611.8
FunabashiA	GH06	2006	272	979788.6	3198.3	976590.3	976612.7
FunabashiC	GH07	2007	170	979788.4	3217.5	976570.9	976593.4
Onahama	GH07	2007	184	980008.8	3438.1	976570.7	976594.8
Onahama	GH07	2007	186	980008.8	3438.6	976570.2	976594.3
FunabashiC	GH07	2007	198	979788.4	3217.4	976571.0	976593.5
FunabashiC	GH08	2008	210	979789.4	3219.5	976569.9	976592.4
NahaA	GH08	2008	225	979113.5	2539.9	976573.6	976591.4
NahaA	GH08	2008	227	979113.5	2540.4	976573.1	976590.9
FunabashiA	GH08	2008	242	979789.4	3219.2	976570.2	976592.7
FunabashiB	GH09	2009	197	979787.9	3249.1	976538.8	976561.5
NahaB	GH09	2009	212	979109.4	2566.7	976542.7	976560.6
NahaB	GH09	2009	214	979109.4	2566.6	976542.8	976560.7
FunabashiB	GH09	2009	229	979787.7	3250.0	976537.7	976560.5
FunabashiA	GH10	2010	300	979788.3	3251.3	976537.0	976559.7
NahaC	GH10	2010	313	979109.7	2568.6	976541.1	976559.1
NahaC	GH10	2010	315	979109.5	2569.8	976539.7	976557.7
FunabashiA	GH10	2010	329	979788.2	3251.8	976536.4	976559.2

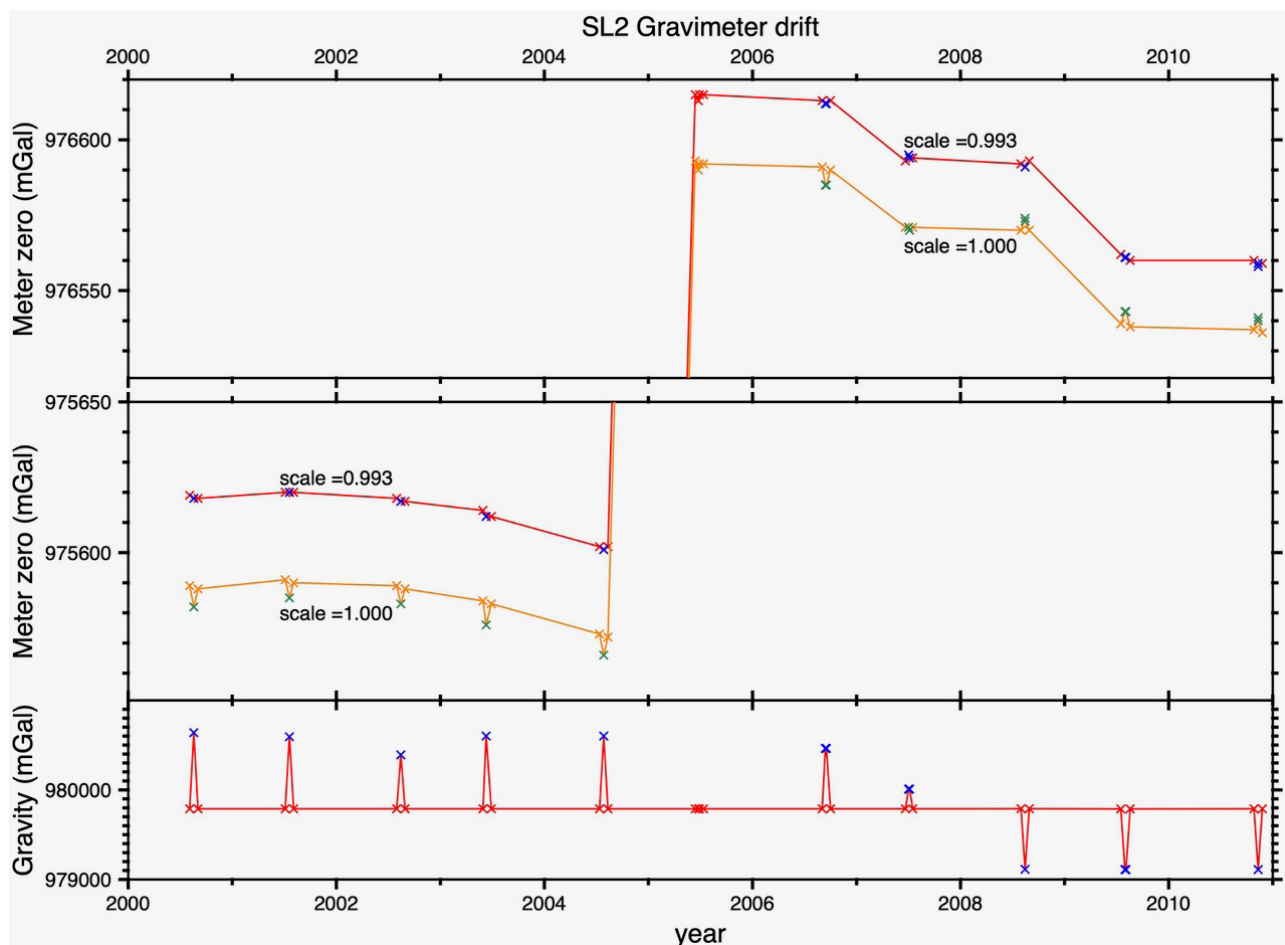
FunabashiA: east wharf A of Funabashi port ; FunabashiB: east wharf B of Funabashi port

FunabashiC: Base of Hakurei-maru No.2 in Funabashi port

NahaA: Urazoe wharf of Naha port ; NahaB: No.3 wharf of Naha Aja New port

NahaC: No. 6-1 wharf of Naha Aja New port

[†] Julian day; *Meter zero for scale =1.0; **Meter zero for scale =0.993.



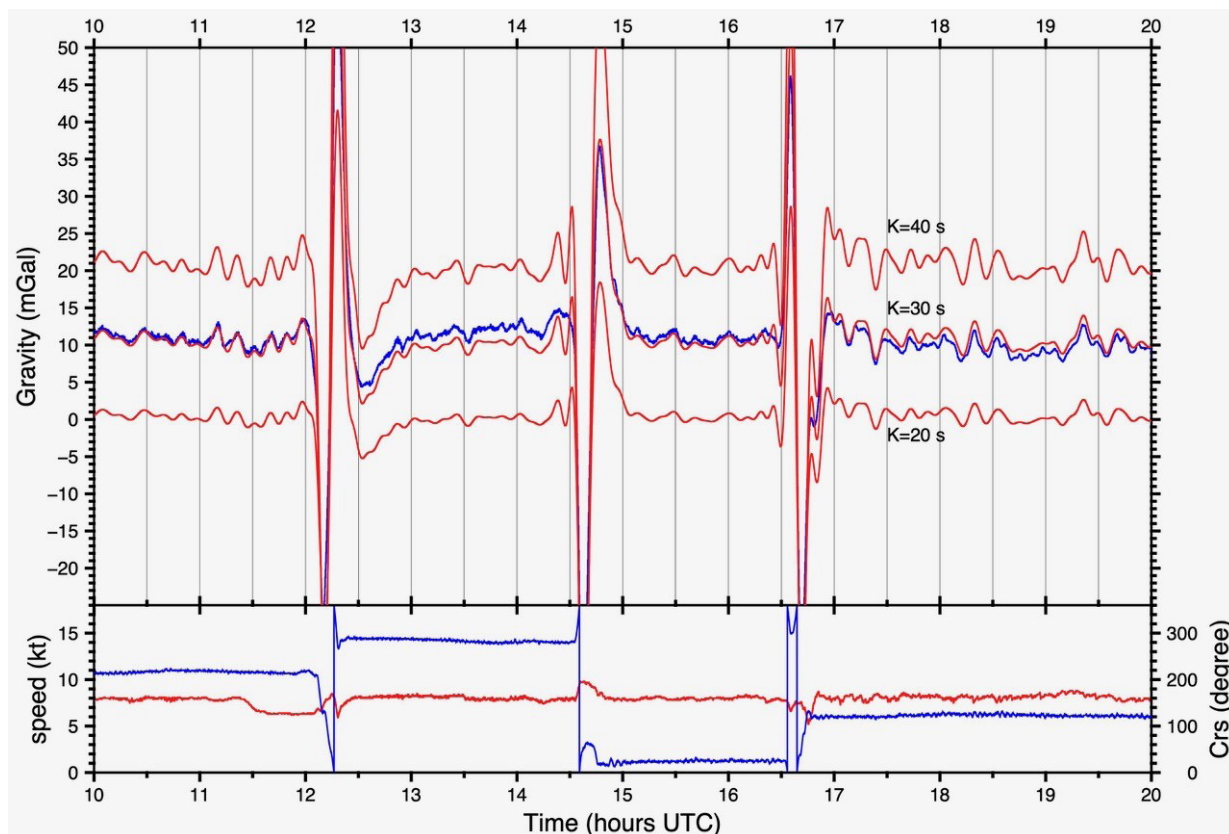
第2図 第2白嶺丸搭載SL2船上重力計のドリフト。下には重力値，上には変換係数0.993の場合のmeter zeroの値を，船橋停泊中は赤色，他の港への入港時は青色のx印で示した。上にはさらに変換係数1の場合のmeter zeroの値を茶色と緑色のx印で示している。

Fig. 2 Drift of the SL2 gravimeter on board Hakurei-maru No.2. Gravity values and meter zero values with the scale of 0.993 at ports are plotted at the bottom and top of each figure, respectively. Values at Funabashi port are shown in red (or brown for meter zero with the scale of 1), while those at other ports are shown in blue (or green for meter zero with the scale of 1).

の高さにあることから，通常この項を無視し，定数の最後の2項および緯度だけの関数でゆっくりと変化する g_n を除き，ローパスフィルターをかけてフリーエア異常を求めている。緯度補正 g_n は1980年の測地基準系に基づく正規重力式(Moritz, 2000)により求めた。エトベス補正 g_E は船の位置データ(緯度・経度)から求められる船速と船の進行方向のデータを用いて計算することができる(Glicken, 1962)。

船上重力計で取得されるデータでは，船の動揺等のノイズがより高周波側に，海底下の地質構造を反映する重力異常がより低周波側にあることを利用して，最適なローパスフィルターを使ってノイズを消して重力異常のみをとりだすことになる(Childers *et al.*, 1999)。第4図にGH06航海で得られたエトベス補正を含まない重力値 g_0 (図の紫線)とエトベス補正 g_E (緑線)のパワースペクトル

を示した。他の航海でもほぼ同じようなパワースペクトルが得られるが，エトベス補正を施した重力データ(図の赤線)は低周波部分ではほぼ一定となっていて0.04 Hz(周期25 s)より高周波部分で大きくなっている。これは船の上下振動によるものと推定される。そこで船の動揺等のノイズを消すローパスフィルターとして，低周波側のある周波数(カットオフ周波数という)を境にして比較的シャープに変化する8次のButterworthローパスフィルター(例えばGubbins, 2004)を採用することにした。具体的には1 s間隔の元データにFFT変換を施し， $1/[1+(f/f_c)^{16}]$ (ここで f は周波数， f_c はカットオフ周波数)をかけてからFFT逆変換によってフィルター適用後のデータが得られる。いくつかの値を試した結果，カットオフ周波数が，1/600 Hz(周期10分)と1/480 Hz(周期8分)では次節で述べる得られたデータの交点誤差の値がほぼ同じであ



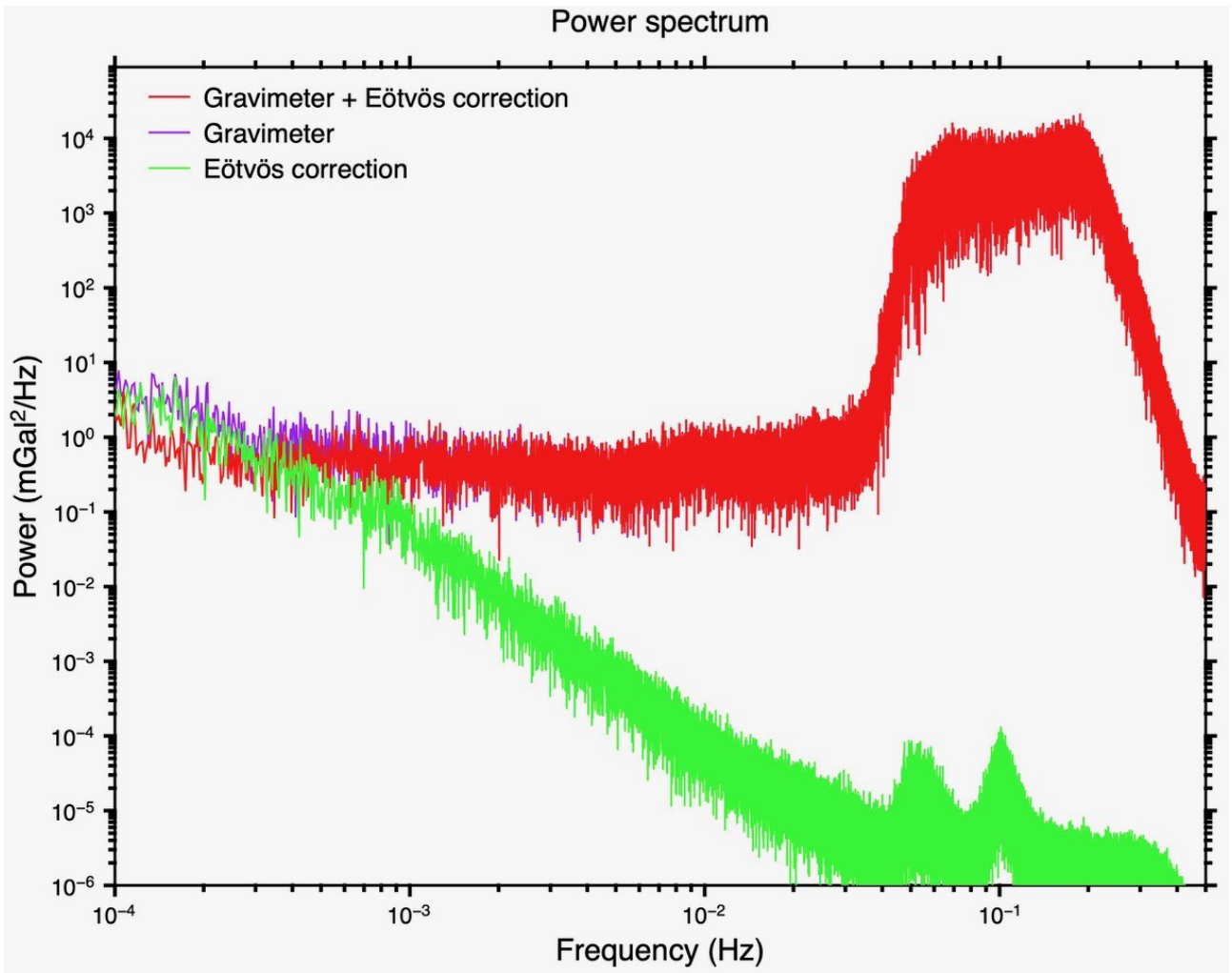
第3図 GH06航海の3回の変針を含む10時間のデータ。上)重力読取値GからSPRING TENSION Sに変換係数 c_0 をかけた量を引いた値(青線)とビーム速度dB/dtに20, 30, 40 sをかけた値(3つの赤線)。下)船速(赤線)と船の進行方向(青線)。
 Fig. 3 Ten-hours long data collected in GH06 cruise including three course changes. Above) Gravity reading G –Spring tension $S \times c_0$ (blue line) and beam velocity dB/dt multiplied by 20, 30 and 40 s (3 red lines). Below) ship's speed (red line) and ship's course (blue line).

るが、1/300 Hz (周期5分)では大きくなることから、カットオフ周波数 f_c として1/480 Hz (周期8分)を採用することにした。第5図にこのフィルターの周波数応答特性を示した。白嶺丸のSL2重力計のデータ処理に用いた時間的にほぼ対称で幅520 sのガウシアンローパスフィルター(石原, 2021b; 図中青線)が周波数とともにゆっくりと減少していくのに比べると、ここで採用した8次のButterworthローパスフィルター(カットオフ周波数1/480 Hz, 図中赤線)は、周期500 s(周波数0.002 Hz)以上の長周期成分は減衰が少なくほぼ元データのまま保存されているがそれより短い周期成分がより大きく減衰していることがわかる。なお、各測線の端では変針に伴い針路に直交する方向に遠心力が働き重力計の鉛直性が保たれなくなり、重力測定値に誤差が生じる。Peters and Brozena (1995)によれば、これは水平方向の加速度の観測値を使って補正できるはずであるが、生データの中にある測線方向と直交方向の水平加速度データを使ってうまく補正することができず、この部分のデータは最終結果から除くこととした。

4. 交点誤差とレベリング補正

第6図にフリーエア異常値の測線間の交点誤差のヒストグラムを示した。ほとんどの変針近くを除いたデータ(青色のヒストグラム)は ± 5 mGalの中に収まっており、RMS COD (root mean square crossover difference)は北海道沖オホーツク海(GH00・GH01航海; 第6図A)と北海道南方(GH02・GH03・GH04・GH06航海; 第6図C)のデータでは1.13 mGal, 沖縄島周辺(GH08・GH09・GH10航海; 第6図D)では1.55 mGalとなった。

さらに交点での誤差を小さくするため、白嶺丸のデータ(石原, 2021b)と同様Ishihara (2015)を簡略化したレベリング補正計算を試みた。この方法では、全ての測線同士が最接近する点(一般には観測点を補間した点で交点を含む)の距離が15 km以下のものについて両者の重力異常値の差を求め、各々の最接近点での距離の関数の重み付きの補正量を与える。それらに測線に沿った時間領域でのガウシアンローパスフィルターをかけて各観測点での補正量を求める。ローパスフィルターの時間幅を小



第4図 GH06航海で取得された重力データとエトベス補正データのパワースペクトル。
 Fig. 4 Power spectra of gravity and Eötvös correction data collected in GH06 cruise.

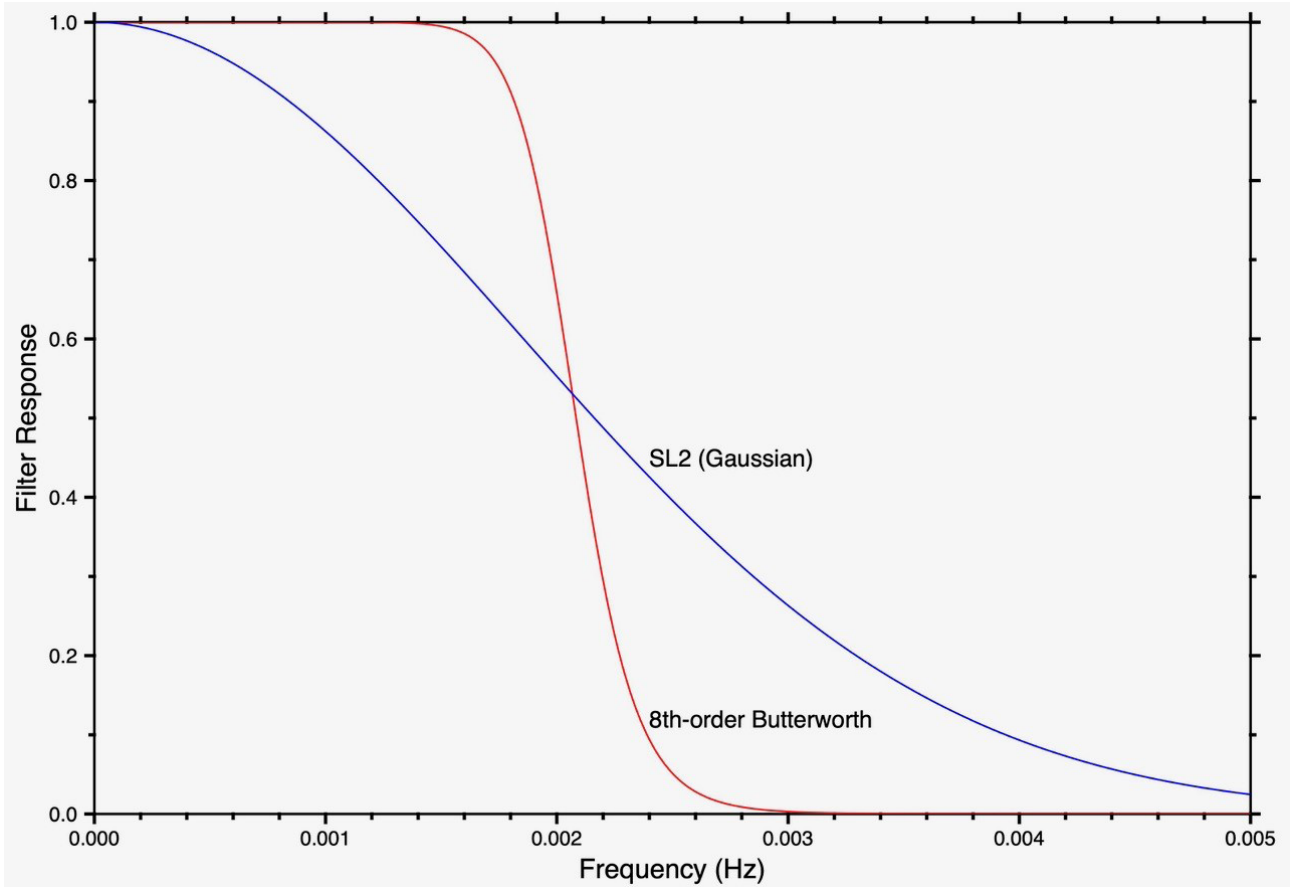
小さくすると最接近点近辺の観測データの重みが増して交点誤差が小さくなるが、実際には存在しない短波長の人為的な異常を作る危険がある。検討の結果、測線の長さより短くならない程度ということでガウシアンローパスフィルターの全長である6 σ 幅(σ はガウス関数の標準偏差)として6時間を採用することにした。オホーツク海のデータに対しては2回の繰り返し補正計算によってRMS CODを0.86 mGalまで小さくすることができたが(第6図Aの下)、他の海域では北海道南方海域で2回の繰り返し計算で1.02 mGal(第6図Bの下)、沖縄島周辺海域で5回の繰り返し計算で1.30 mGal(第6図Cの下)とRMS CODを余り小さくすることができなかった。

5. 重力異常図とアルチメトリによる重力異常との比較

上のようなデータ処理で得られたフリーエア重力異常

データについて、公開されている人工衛星アルチメトリで得られた緯度・経度1分間隔のフリーエア異常のグリッドデータ(Sandwell *et al.*, 2014)と比較してみた。このグリッドデータは海洋の広範囲を十分な密度で均質にカバーする軌道の衛星データから計算されたもので、誤差0.5~2 mGalの精度の良い船上重力計のデータとの比較から精度2 mGal程度と推定されている。

第7図、第8図、第9図は、各々北海道沖オホーツク海、北海道南方、沖縄島周辺のアルチメトリによるフリーエア異常と第2白嶺丸航海で得られたものを比較して示したものである。大きな傾向はよく一致しているが、アルチメトリによるもの(A)は短波長成分が少なくよりスムーズなコンターで示されているのに対して、第2白嶺丸航海で得られたもの(B)は短波長の異常がより多く確認できるとともに、特に重力勾配が大きい部分の勾配と位置が明瞭である。

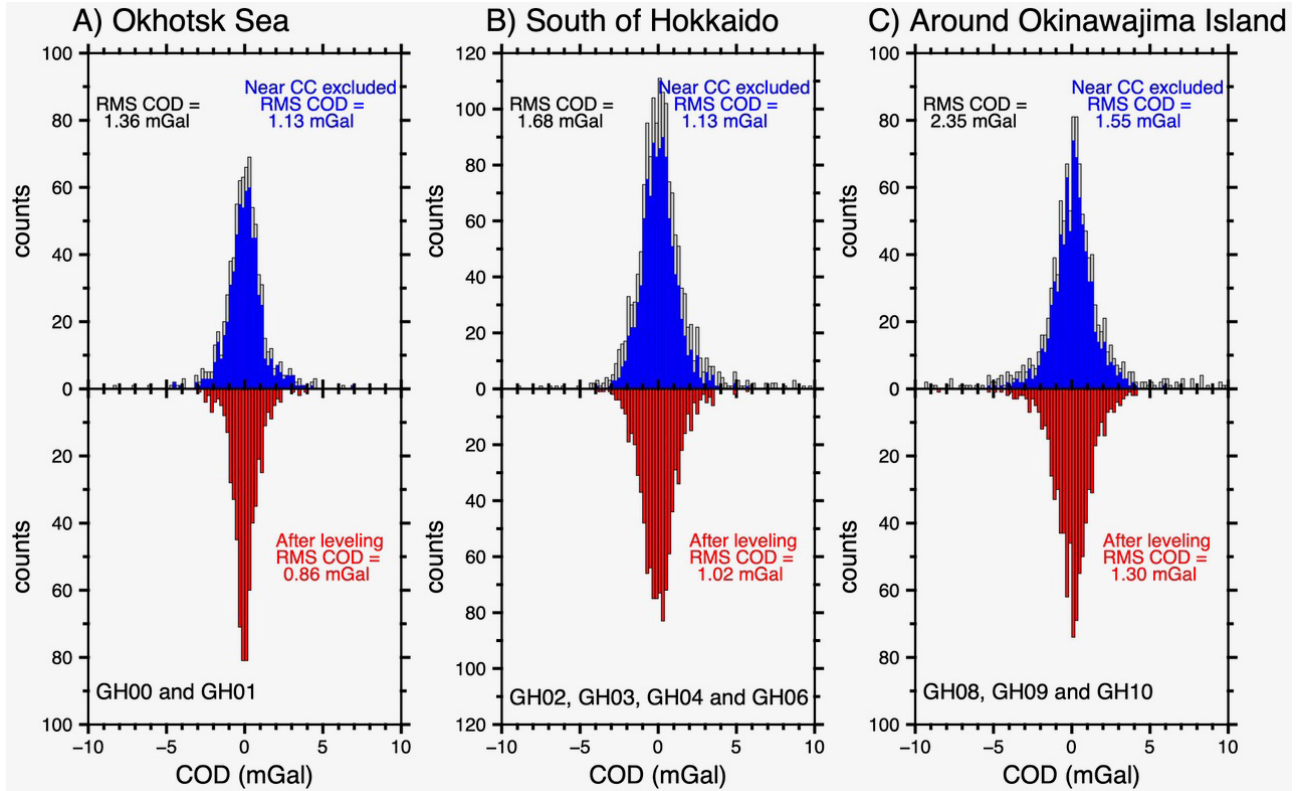


第5図 重力計データのローパスフィルターの周波数応答. SL2 (青線), カットオフ周波数1/480 Hzの8次のButterworthローパスフィルター (赤線).

Fig. 5 Responses of low-pass filters for gravity data. SL2 gravimeter (blue line) and 8-th order Butterworth low-pass filter with a cutoff frequency of 1/480 Hz (red line).

第10図, 第11図, 第12図は, 上記の各々の海域に対して第2白嶺丸航海で得られたデータとアルチメトリのグリッドデータの補間によって求めた同じ緯度・経度の点での値の差の分布である. いずれも(A)はヒストグラム, (B)はこの差の地理的分布, (C)は同じ地域の地形を示したものである. ヒストグラムを見ると大部分が ± 5 mGal以内に入っていて, 最小二乗差として北海道沖オホーツク海(第10図A)と北海道南方(第11図A)では3 mGal程度, 沖縄島周辺の海域(第12図A)では少し大きい値5.45 mGalが得られた. これらのデータの差の原因は, 北海道沖オホーツク海については, 第10図Cに示されるように東部では1000 mを越す深海が広がっているが中部から西部では500 mより浅い大陸棚が広がっていて, 浅いところに重力異常のソースとなるものが存在する可能性がある. そのため船上重力計で得られた重力異常には短波長のものがあるが, アルチメトリデータではこの海域を含めて短波長の異常が見られず, それが差を大きくしている原因と考えられる. 北海道南方(第11図)と沖縄

島周辺(第12図)でも水深が浅いところで2つの重力異常の差が大きい傾向が見られる. さらに海岸線からの距離の影響も考えられる. 陸の近傍では重力異常の差が大きくなる傾向があり, 特に沖縄島の東側ではこの差が正に, 北西側では負に偏っている等, 差が大きくなる傾向が顕著である. これは衛星から海面高度をトラッキングして得られるアルチメトリデータでは, 海岸線の近傍でデータが不連続になるため得られるデータの精度が低下するためと推定される(Sandwell and Smith, 2009). このように, (1)船上重力計のデータがカットオフ周波数1/480 Hz, これは船速10ノット(18.52 km/h)を仮定すると2.5 kmで1/2に減衰するローパスフィルターであるのに対して, 海面高度から重力異常を求めるアルチメトリデータでは波浪のノイズを取り除くため波長14 kmで1/2に減衰するローパスフィルターがかかっており(Sandwell *et al.*, 2013), 船上重力観測で確認可能な水深が500 m以浅の海域の短波長の異常がアルチメトリデータでは分解能不足のために見られないこと, (2)海岸線近傍でアルチメト



第6図 第2白嶺丸航海の測線の交点でのフリーエア重力異常値の差の分布. A) 北海道沖オホーツク海のGH00・GH01航海で灰色ヒストグラム(測線の両端の変針部分を含む場合), 青色ヒストグラム(含まない場合)及びレベリング補正後のヒストグラム(赤色)で各々RMS COD 1.36 mGal, 1.13 mGal及び0.86 mGal. B) 北海道南方のGH02・GH03・GH04・GH06航海で同様に灰色, 青色及び赤色で各々RMS COD 1.68 mGal, 1.13 mGal及び1.02 mGal. C) 沖縄島周辺のGH08・GH09・GH10航海で同様にRMS COD 2.35 mGal, 1.55 mGal及び1.30 mGal.

Fig. 6 Distribution of crossover differences (CODs) of free air gravity anomalies obtained by Hakurei-maru No.2 cruises. A) Data collected in GH00 and GH01 cruises in the Okhotsk Sea off Hokkaido with RMS CODs of 1.36 mGal, 1.13 mGal and 0.86 mGal for the line data including records near course changes (gray histogram), data excluding those records (blue histogram) and data after line leveling (red histogram), respectively. B) Data collected in GH02, GH03, GH04 and GH06 cruises south of Hokkaido with RMS CODs of 1.68 mGal, 1.13 mGal and 1.02 mGal for the gray, blue and red histograms, respectively. C) Data collected in GH08, GH09 and GH10 cruises around Okinawajima Island with RMS CODs of 2.35 mGal, 1.55 mGal and 1.30 mGal for the gray, blue and red histograms, respectively.

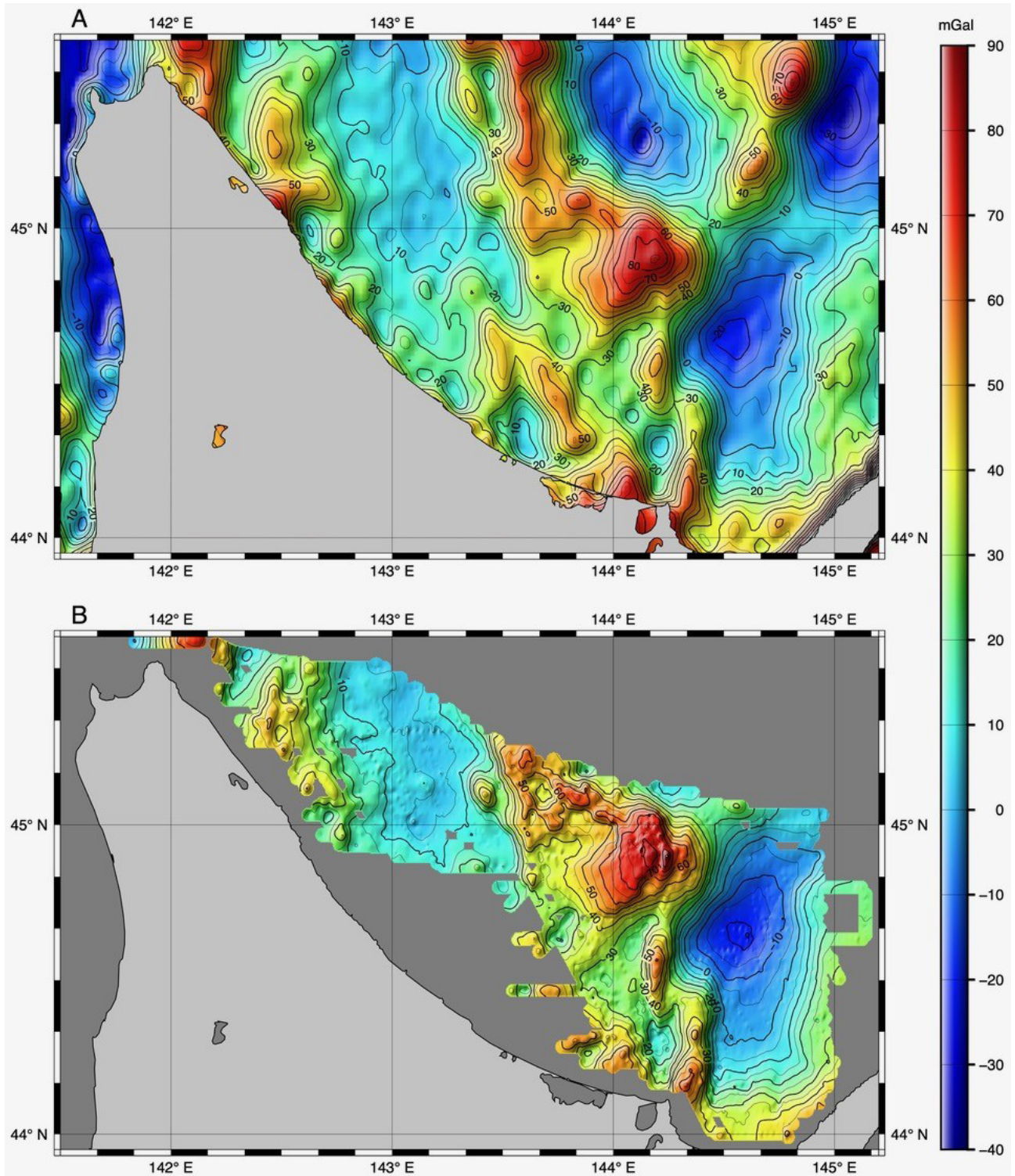
りによるデータの誤差が大きくなること, これら2つの要因が第2白嶺丸によるフリーエア異常とアルチメトリによるものとの差を大きくしていると考えられる. 上で得た第2白嶺丸のデータと, 同じ緯度・経度についてアルチメトリのグリッドデータから補間によって求めた値との差が ± 5 mGal以内のものだけを選んで最小二乗差を計算するとオホーツク海海域で2.26 mGal, 北海道南方海域で2.14 mGal, 沖縄島周辺海域で2.44 mGalとなった. アルチメトリによるフリーエア異常の精度が2 mGal程度だとすればこの程度の差があつてよいと推測される.

以上のように, 船上重力計のデータとアルチメトリのデータの差が大きくなる原因は主に後者の誤差のためと考えられるが, 船上重力計の誤差の影響がある可能性も否定できない. 第13図には例として第2白嶺丸で得

られた北海道沖オホーツク海海域の北西部の東西測線のデータを示した. 測線108(赤線)には10 mGal以下の振動が見られるが, それぞれ2マイル(約3.7 km)離れた南北両隣の測線ではほとんど見られない. 周期10~12分の振動なのでカットオフ周波数1/480 Hz(周期8分)のButterworthフィルターではほとんど減衰しないで残ってしまうが, 公開データにはそのまま残した.

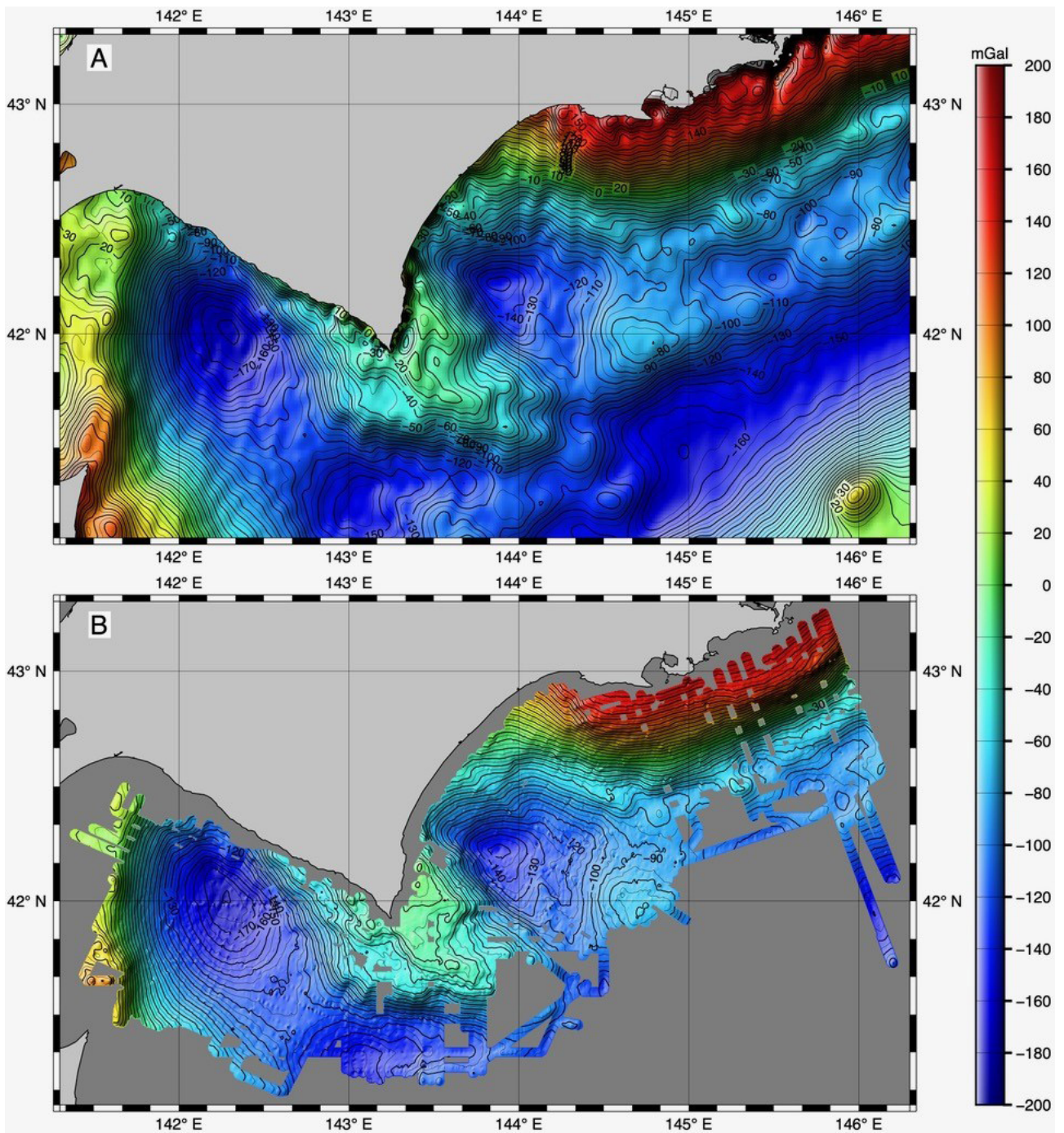
6. 考察

本報告では, Butterworthフィルターのカットオフ周波数を1/480 Hz(周期480 s)としたが, 重力データのパワースペクトルが大きくなる値0.04 Hz(周期25 s)と比べると1/20程度となっている. カットオフ周波数をもう少し大きくとって短波長の重力異常を残すことができる



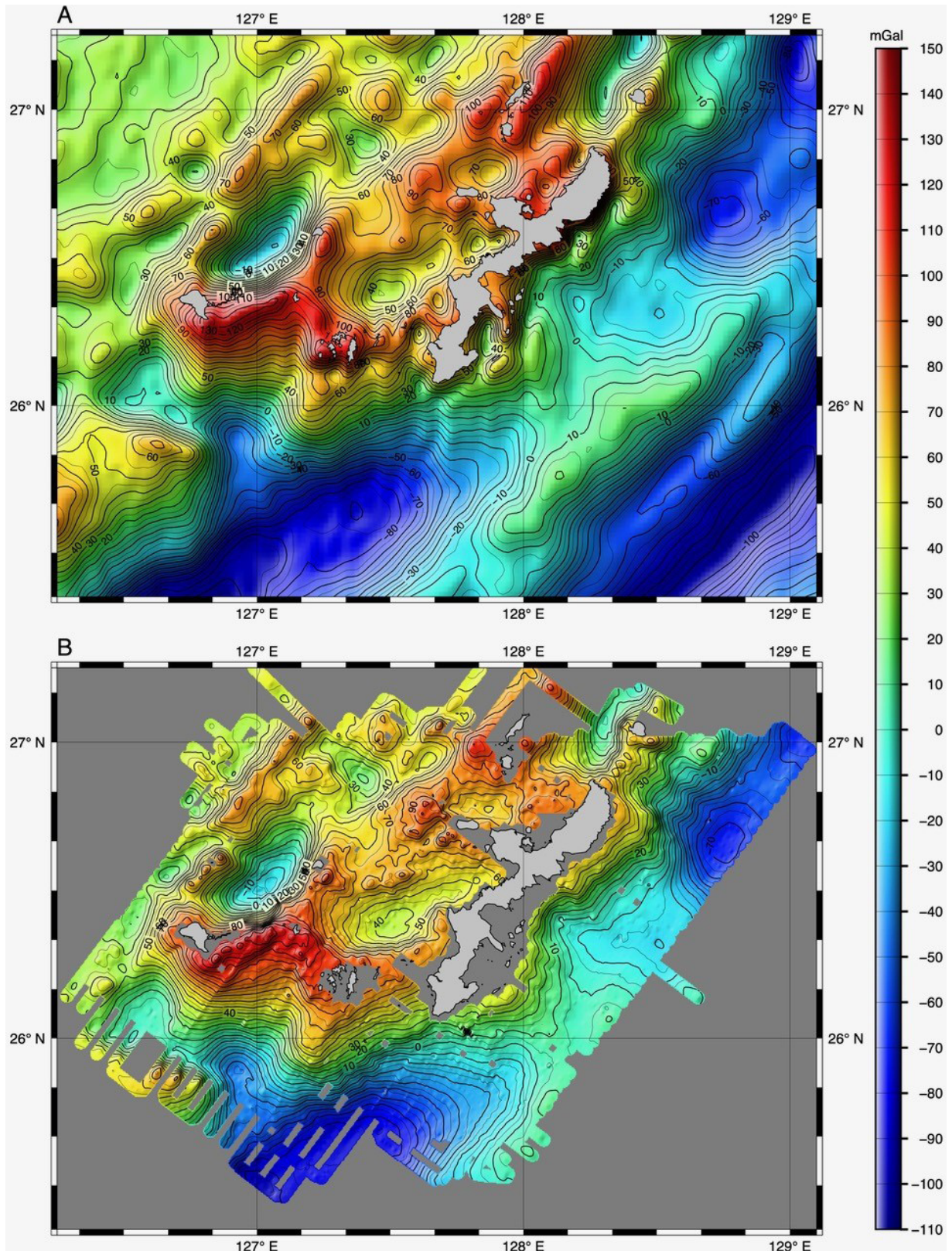
第7図 北海道沖オホーツク海域のフリーエア重力異常。 A) 衛星アルチメトリにより得られたデータ。 B) GH00・GH01航海で取得されたものにローパスフィルターとレベルング補正を施したデータ。

Fig. 7 Free air gravity anomalies in the Okhotsk Sea off Hokkaido. A) Data obtained by satellite altimetry. B) Data collected in GH00 and GH01 cruises after low-pass filtering and leveling correction.



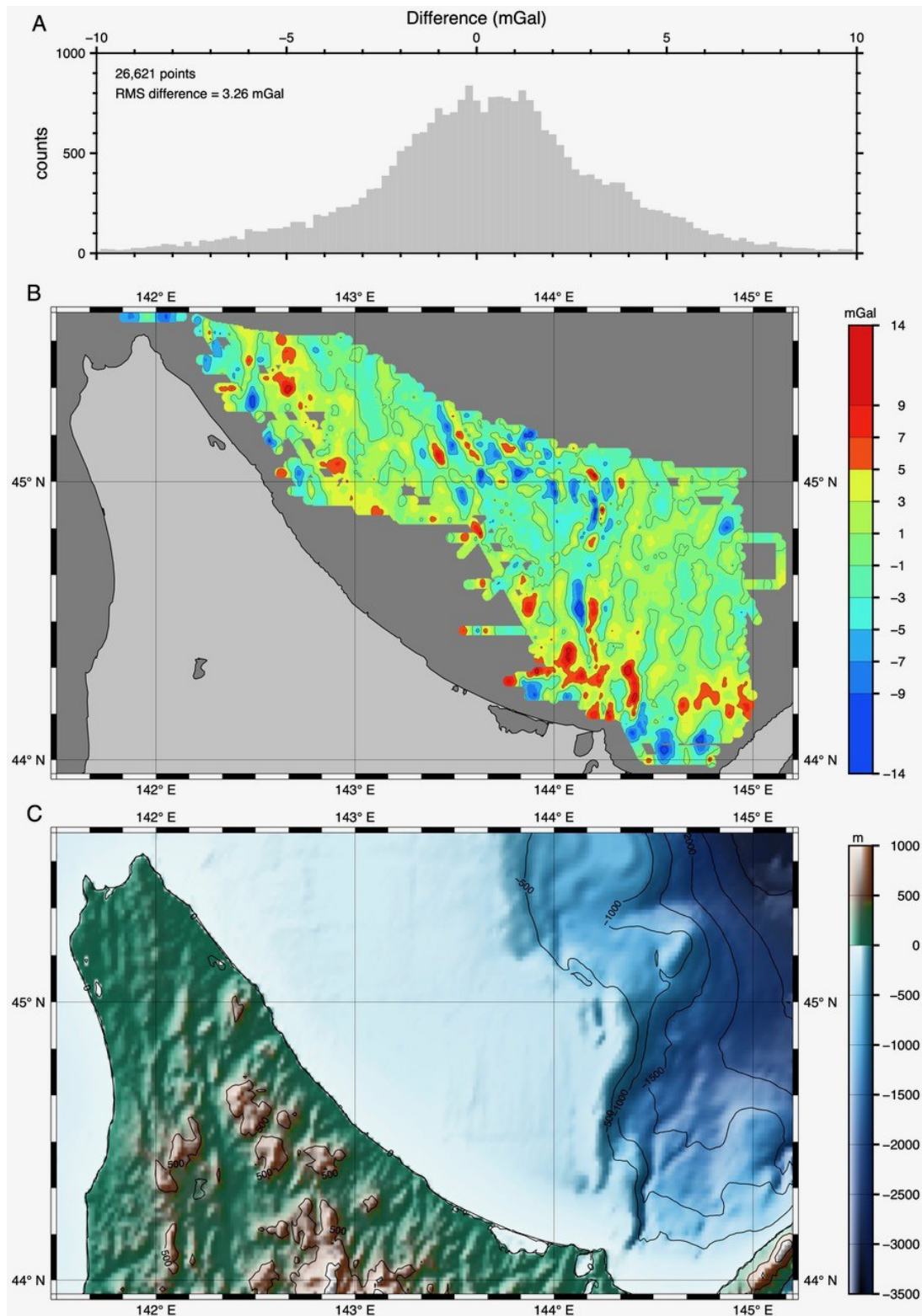
第8図 北海道南方海域のフリーエア重力異常. A) 衛星アルチメトリにより得られたデータ. B) GH02・GH03・GH04・GH06航海で取得されたものにローパスフィルターとレベルリング補正を施したデータ.

Fig. 8 Free air gravity anomalies south of Hokkaido. A) Data obtained by satellite altimetry. B) Data collected in GH02, GH03, GH04 and GH06 cruises after low-pass filtering and leveling correction.



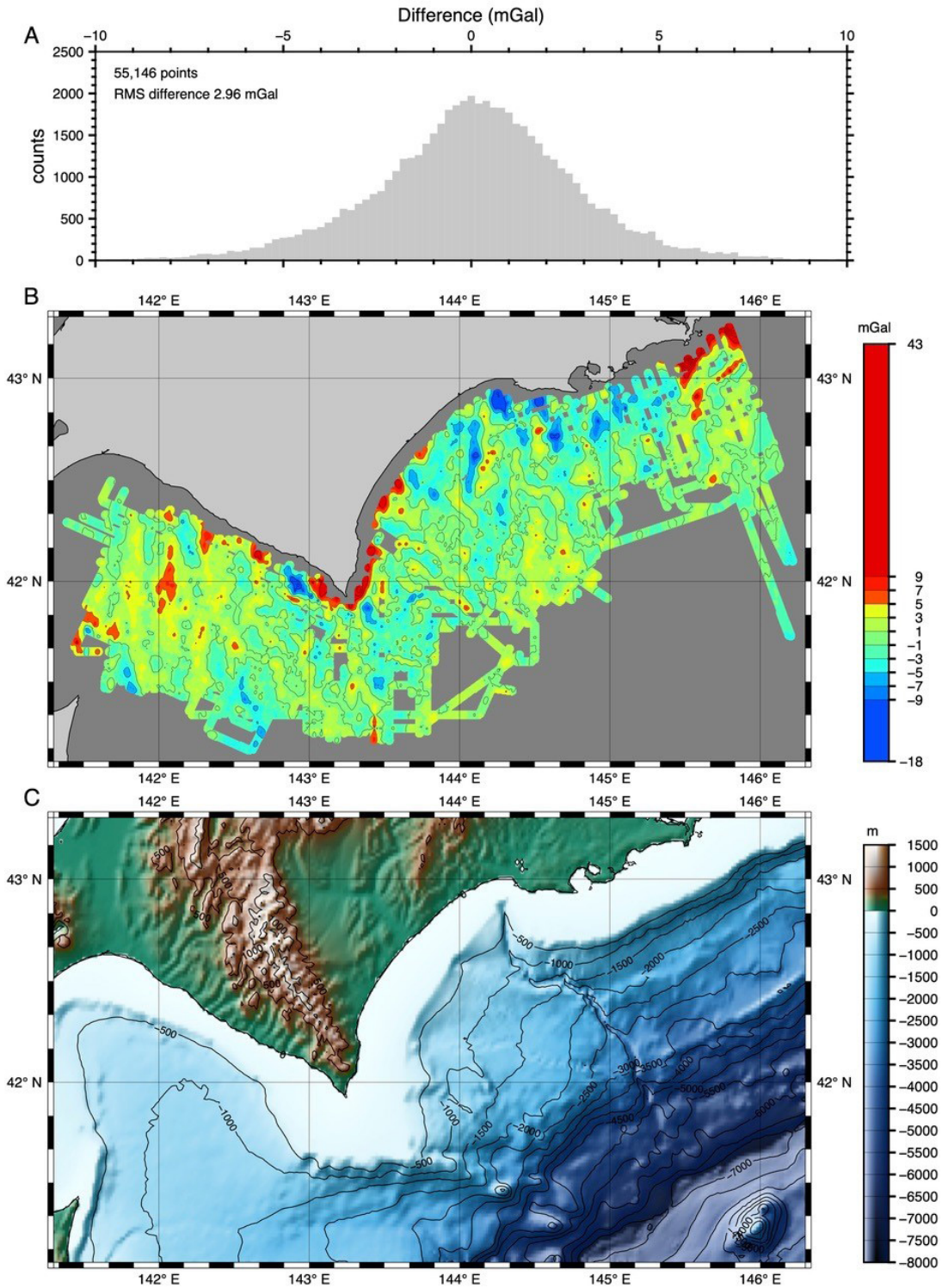
第9図 沖縄島周辺海域のフリーエア重力異常. A) 衛星アルチメトリにより得られたデータ. B) GH08・GH09・GH10航海で取得されたものにローパスフィルターとレベルング補正を施したデータ.

Fig. 9 Free air gravity anomalies around Okinawajima Island. A) Data obtained by satellite altimetry. B) Data collected in GH08, GH09 and GH10 cruises after low-pass filtering and leveling correction.



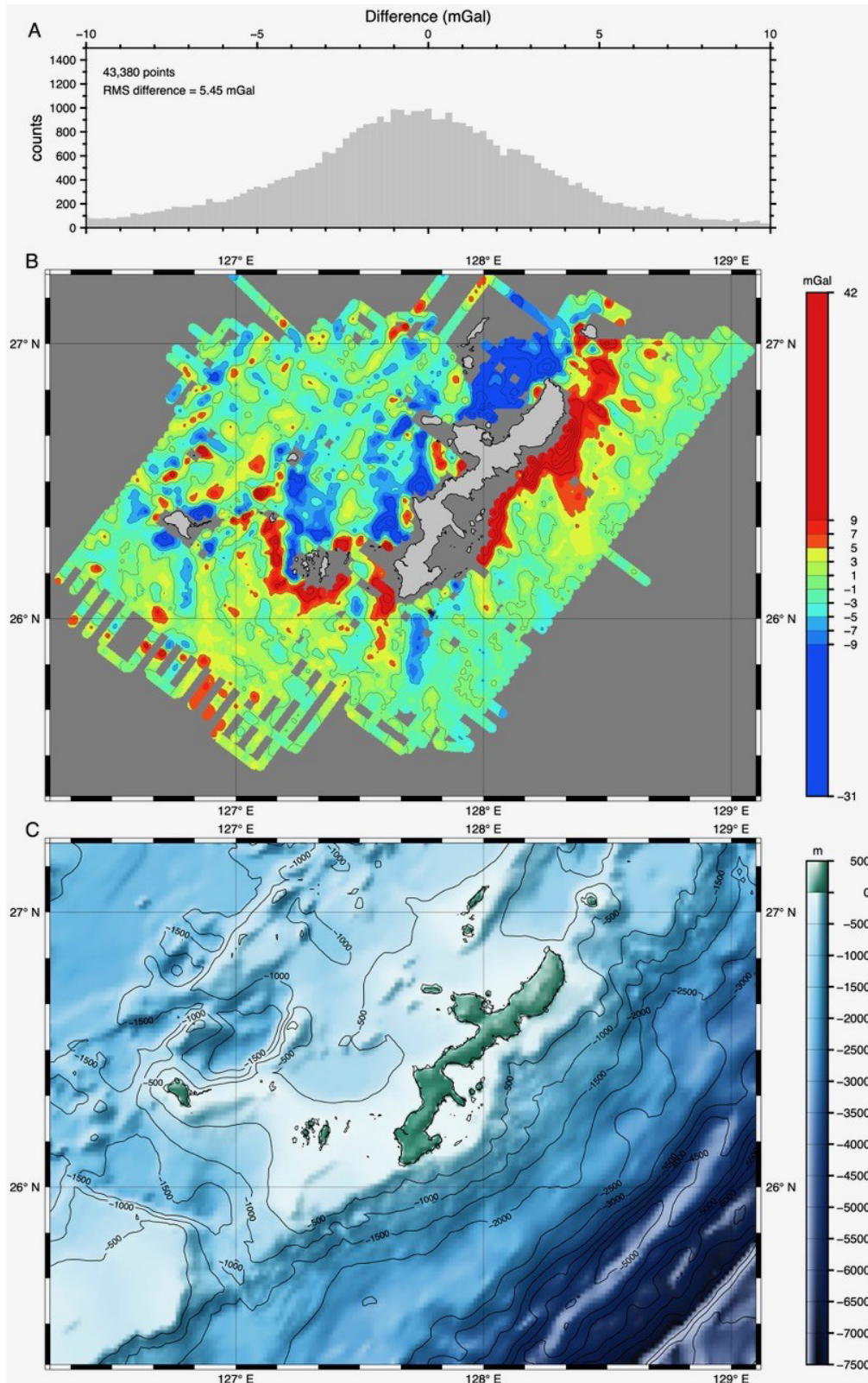
第10図 北海道沖オホーツク海域でGH00・GH01航海で取得されたフリーエア重力異常と衛星アルチメトリにより得られたデータの差の分布. A) ヒストグラム. B) 地理的分布. C) ETOPO1モデル (NOAA National Geophysical Data Center, 2009)による同地域の地形.

Fig. 10 Distribution of free air gravity anomaly differences between data collected in GH00 and GH01 cruises in the Okhotsk Sea off Hokkaido and those obtained by satellite altimetry. A) Histogram. B) Geographical data distribution. C) Topography of the same area from the ETOPO1 model (NOAA National Geophysical Data Center, 2009).



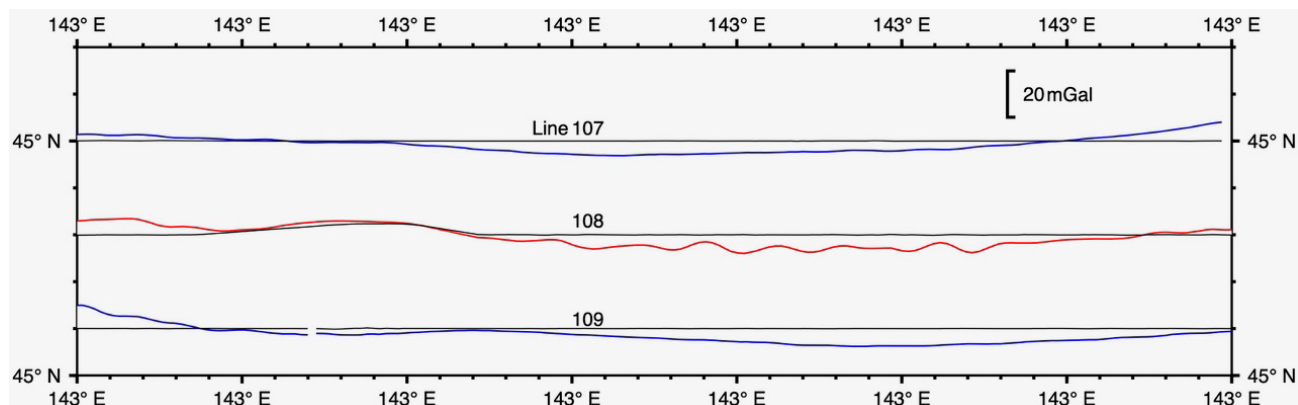
第11図 北海道南方海域のGH02・GH03・GH04・GH06航海で取得されたフリーエア重力異常と衛星アルチメトリにより得られたデータの差の分布. A) ヒストグラム. B) 地理的分布. C) ETOPO1モデル (NOAA National Geophysical Data Center, 2009)による同地域の地形.

Fig. 11 Distribution of free air gravity anomaly differences between data collected in GH02, GH03, GH04 and GH06 cruises south of Hokkaido and those obtained by satellite altimetry. A) Histogram. B) Geographical data distribution. C) Topography of the same area from the ETOPO1 model (NOAA National Geophysical Data Center, 2009).



第12図 沖縄島周辺海域のGH08・GH09・GH10航海で取得されたフリーエア重力異常と衛星アルチメトリにより得られたデータの差の分布。A) ヒストグラム。B) 地理的分布。C) ETOPO1モデル (NOAA National Geophysical Data Center, 2009) による同地域の地形。

Fig. 12 Distribution of free air gravity anomaly differences between data collected in GH08, GH09 and GH10 cruises around Okinawajima Island and those obtained by satellite altimetry. A) Histogram. B) Geographical data distribution. C) Topography of the same area from the ETOPO1 model (NOAA National Geophysical Data Center, 2009).



第13図 オホーツク海海域のGH00航海で取得された東西方向のフリーエア重力異常の3測線のプロファイル図。測線の位置は黒で、測線108の異常値は赤線、測線107と109は青線で示した。

Fig. 13 Three E-W free air anomaly profiles of data collected in GH00 cruise in the Okhotsk Sea. Track lines are shown in black, whereas anomaly values of line 108 are shown in red, and those of lines 107 and 109 are shown in blue.

のではないだろうか。Ishihara *et al.* (2018) は海中曳航体にLaCoste & Romberg社製の海中重力計を搭載して熱水鉱床域での微小な重力異常を検出するのに成功している。重力値を100 Hzで測定し水圧計で精密な深度を40 Hzで測定して鉛直加速度の補正をするなど異なる条件であるが、幅180 sのガウシアンローパスフィルターで重力異常を計算している。船上重力測定でも、GPS干渉測位などを使って船の鉛直方向の位置を精密に測定して鉛直加速度の補正ができればButterworthフィルターのカットオフ周波数を1/480 Hzより大きくすることができる可能性があり、より狭い範囲を高分解能で調査する可能性が広がる。

2000～2010年の航海の重力データはGH05・GH07の航海を除いて重力異常図として既に出版されている(上嶋・駒澤, 2011, 2014; 上嶋ほか, 2007b, 2012a, 2012b; 小田2018, 2022; 小田・佐藤, 2015)。これらはSL2重力計の生データに対して時間的にほぼ対称で幅520 sのガウシアンローパスフィルターに近いデジタルフィルターをかけて得られるデータを使用しており、第5図に示したように重力異常の1/480Hz(周期8分)より長周期の部分も減衰するフィルターがかかっている。同じ海域で両方のデータを比較してみた。第14図A, 第15図A, 第16図Aが各々北海道沖オホーツク海, 北海道南方, 沖縄島周辺の出版されたフリーエア異常図と同じSL2重力計のデジタルフィルターをかけて得られるデータで作成した異常図, 第14図B, 第15図B, 第16図Bが両者の差をプロットしたものである。観測範囲の端など測線の端, 異常値が急変しているところを除くと, 両者の差は各海域の多くで ± 0.5 mGal以内に収まっている。レベリング補正の影響もあって測線に沿う異常が目立つが, それでもほとんどの海域で両者の差は ± 1.5 mGal以内であ

る。今回公開するデジタルデータの方が短波長成分をより多く含む高分解能のデータではあるが, 出版されたフリーエア異常図のように5 mGal間隔のコンター図で示すと両者の違いはほとんどないといえる。

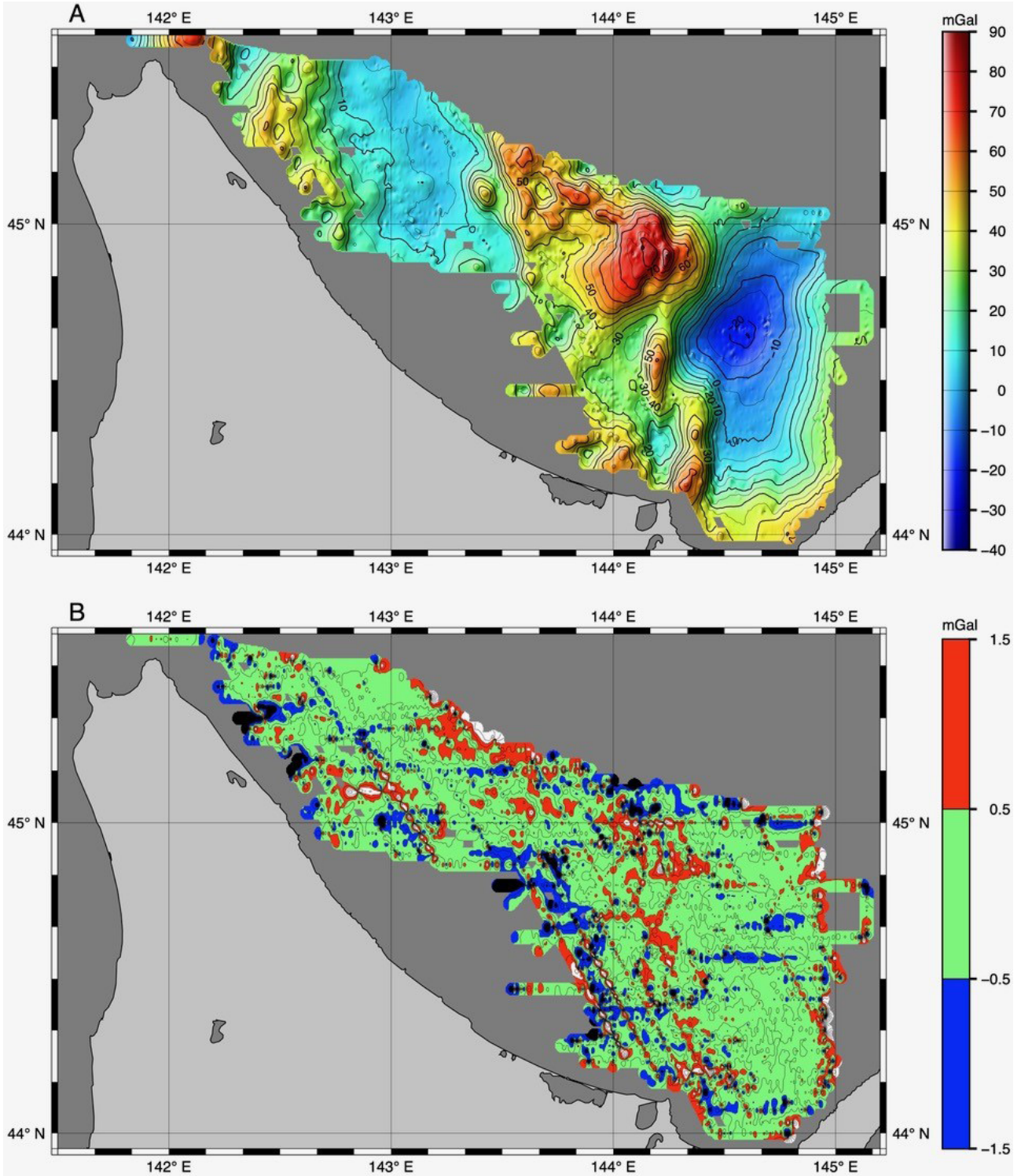
7. まとめ

第2白嶺丸の2000年から2010年までの航海で取得された1 s間隔の重力生データをもとに, 1分間隔の高精度なデータを整備することができた。カットオフ周波数1/480 Hz(周期8分)の8次Butterworthローパスフィルターを適用し, さらにレベリング補正を行った後の北海道沖オホーツク海, 北海道南方, 沖縄島周辺の各海域のデータに対するフリーエア異常のRMS CODは各々0.86 mGal, 1.02 mGal, 1.30 mGalである。

衛星アルチメトリによるデータとの比較では, 水深が浅い海域で航海データに短波長の重力異常が見られること, 衛星アルチメトリデータは陸の近傍で精度が低下すること, これ等2つの原因で航海データと衛星アルチメトリデータの差が3～5 mGalと大きくなっていると推測される。

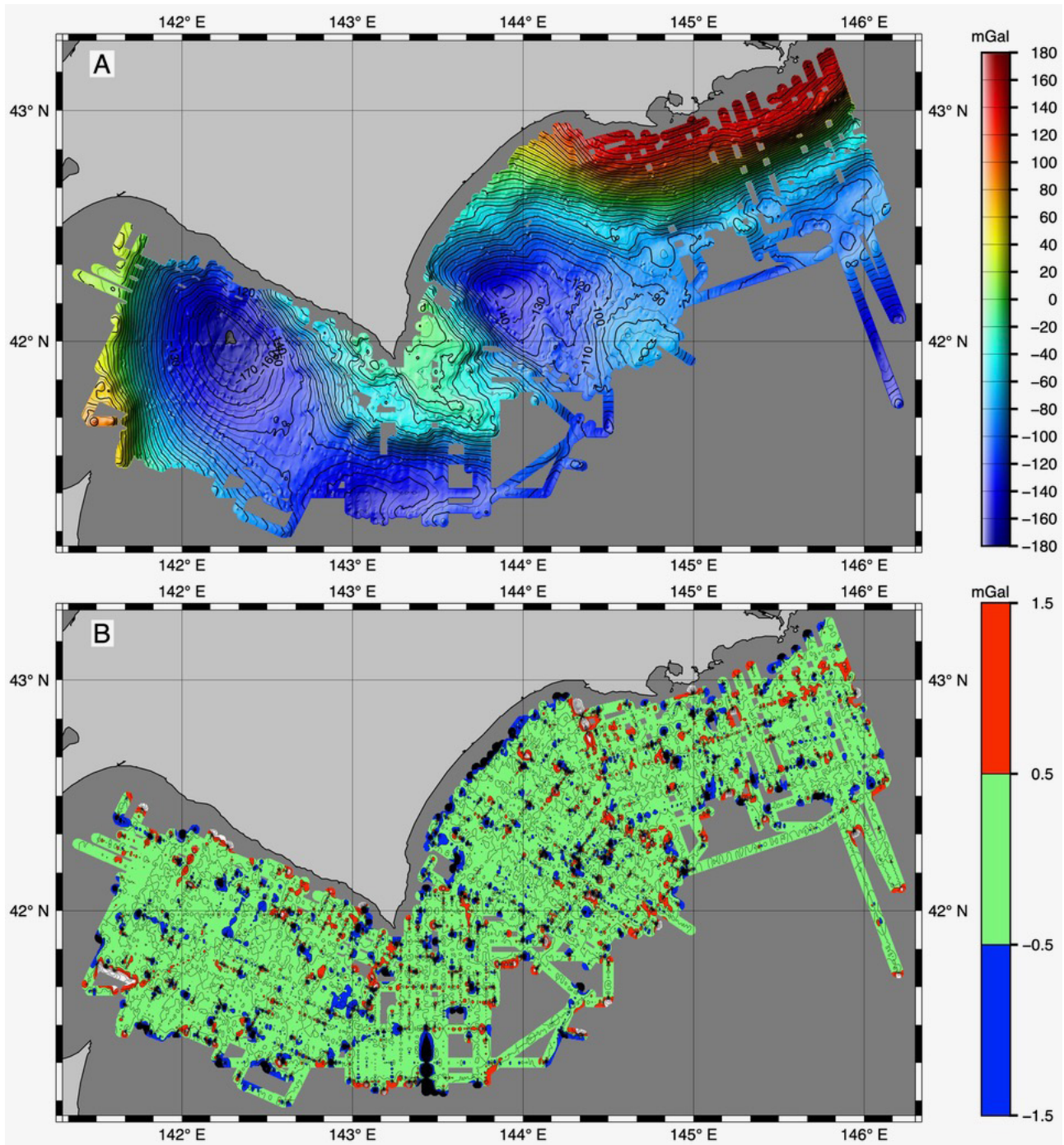
重力データファイルは地質調査総合センター研究資料集として公開予定である。

謝辞: 第2白嶺丸の船上重力計のデータ取得, およびこれまでに出版された重力異常図の作成は, 著者等の他, 上嶋正人・駒澤正夫・山崎俊嗣・佐藤太一の各氏によって行われた。また, 歴代の第2白嶺丸船長をはじめとする乗組員に大変お世話になった。査読者森尻理恵博士から貴重なコメントをいただき本稿を改善することができた。図面の作成にはGMT (Generic Mapping Tools; Wessel *et al.*, 2013)を使用した。



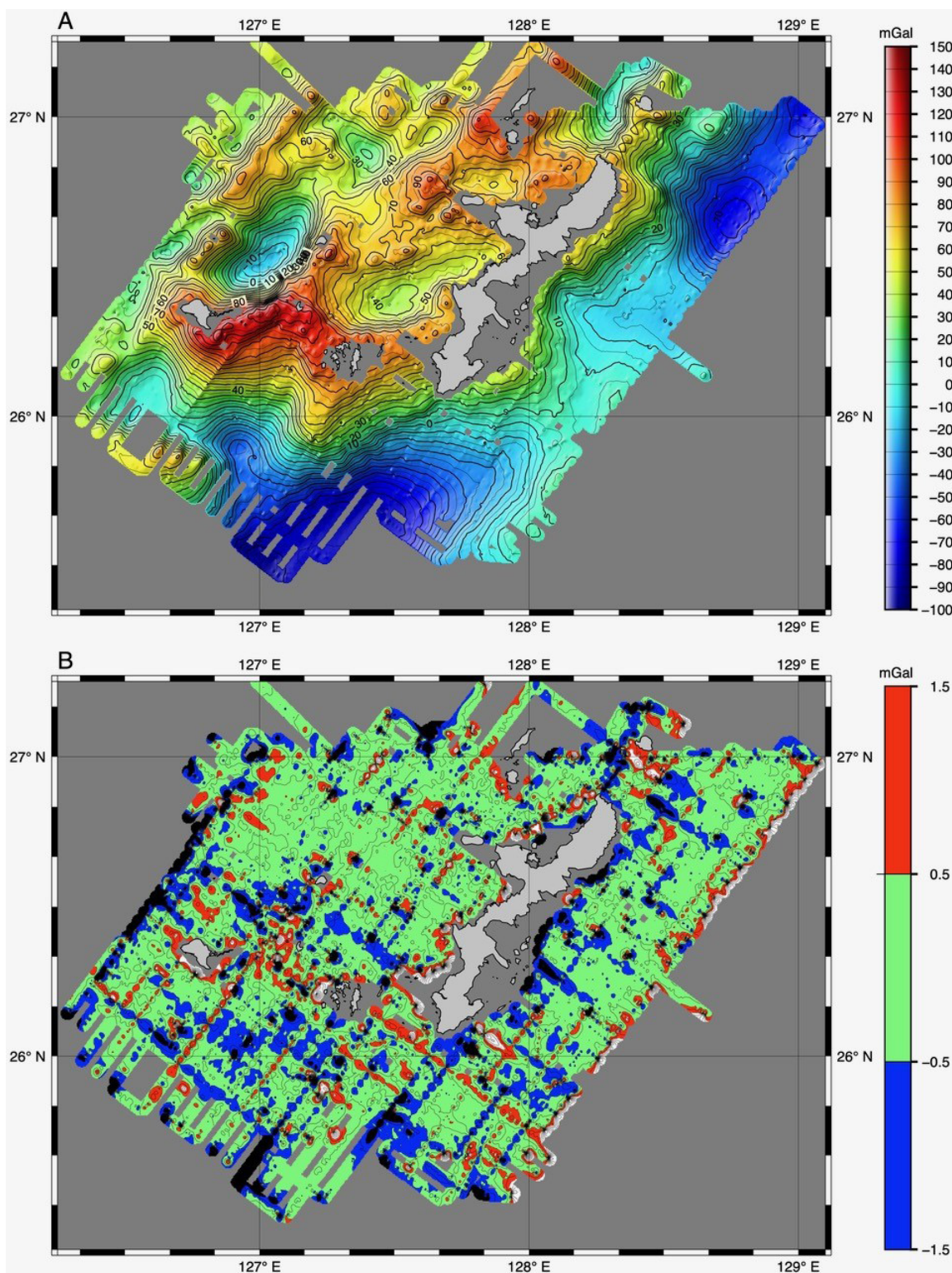
第14図 A) GH00・GH01航海で取得されたSL2重力計のデジタルフィルター出力を使用して作成した北海道沖オホーツク海域のフリーエア重力異常。 B) SL2重力計のデジタルフィルター出力とカットオフ周波数1/480 Hzの8次Butterworthローパスフィルター出力の差の同海域での分布。

Fig. 14 A) Free air anomalies in the Okhotsk Sea off Hokkaido made by using output of digital filter of SL2 gravimeter collected in GH00 and GH01 cruises. B) Distribution of free air gravity anomaly differences in the Okhotsk Sea off Hokkaido between output of the digital filter of SL2 gravimeter data and output of an 8-th order Butterworth low-pass filter with a cutoff frequency of 1/480 Hz collected in GH00 and GH01 cruises.



第15図 A) GH02・GH03・GH04・GH06航海で取得されたSL2重力計のデジタルフィルター出力を使用して作成した北海道南方海域のフリーエア重力異常。 B) SL2重力計のデジタルフィルター出力とカットオフ周波数1/480 Hzの8次Butterworthローパスフィルター出力の差の同海域での分布。

Fig. 15 A) Free air anomalies south of Hokkaido made by using output of digital filter of SL2 gravimeter collected in GH02, GH03, GH04 and GH06 cruises. B) Distribution of free air gravity anomaly differences south of Hokkaido between output of the digital filter of SL2 gravimeter data and output of an 8-th order Butterworth low-pass filter with a cutoff frequency of 1/480 Hz collected in GH02, GH03, GH04 and GH06 cruises.



第16図 A) GH08・GH09・GH10航海で取得されたSL2重力計のデジタルフィルター出力を使用して作成した沖縄島周辺海域のフリーエア重力異常. B) SL2重力計のデジタルフィルター出力とカットオフ周波数1/480 Hzの8次Butterworthローパスフィルター出力の差の同海域での分布.

Fig. 16 A) Free air anomalies around Okinawa Island made using output of digital filter of SL2 gravimeter collected in GH08, GH09 and GH10 cruises. B) Distribution of free air gravity anomaly differences around Okinawajima Island between output of the digital filter of SL2 gravimeter data and output of an 8-th order Butterworth low-pass filter with a cutoff frequency of 1/480 Hz collected in GH08, GH09 and GH10 cruises.

文献

- Childers, V.A., Bell, R.E. and Brozena, J.M. (1999) Airborne gravimetry: an investigation of filtering. *Geophysics*, **64**, 61–69.
- Glicken, M. (1962) Eötvös corrections for a moving gravity meter. *Geophysics*, **27**, 531–533.
- Gubbins, D. (2004) *Time series analysis and inverse theory for geophysicists*. Cambridge University Press, 255p.
- Herring, A. T. and Hall, M. J. (2006) Progress in dynamic gravity since 1984. *The Leading Edge*, **25**, 246–249.
- Ishihara, T. (2015) A new leveling method without the direct use of crossover data and its application in marine magnetic surveys: weighted spatial averaging and temporal filtering. *Earth Planets Space*, 67:11. doi:10.1186/s40623-015-0181-7
- 石原丈実(2021a)白嶺丸重磁力データ. 産総研地質調査総合センター研究資料集, No.714, 産総研地質調査総合センター, 2p.
- 石原丈実(2021b)白嶺丸重磁力データの整備・公開. 地質調査研究報告, **72**, 421–445.
- 石原丈実・小田啓邦(2021)第2白嶺丸重力データ. 産総研地質調査総合センター研究資料集, No.725, 産総研地質調査総合センター, 2p.
- Ishihara, T., Shinohara, M., Fujimoto, H., Kanazawa, T., Araya, A., Yamada, T., Iizasa, K., Tsukioka, S., Omika, S., Yoshiume, T., Mochizuki, M. and Uehira, K. (2018) High-resolution gravity measurement aboard an autonomous underwater vehicle. *Geophysics*, **83**, G119–G135. doi: 10.1190/GEO2018-0090.1
- 上嶋正人・岸本清行・石原丈実(2007a) GH05航海の地形, 及び重力・磁力異常, 地質調査総合センター速報, **40**, 63–75.
- 上嶋正人・小田啓邦・駒澤正夫(2007b) 枝幸沖重力異常図・磁気異常図, 海洋地質図, No. 63 (CD), 産総研地質調査総合センター.
- 上嶋正人・駒澤正夫(2011) 釧路沖重力異常図・磁気異常図, 海洋地質図, No. 73 (CD), 産総研地質調査総合センター.
- 上嶋正人・駒澤正夫(2014) 襟裳岬沖重力異常図・磁気異常図, 海洋地質図, No. 83 (CD), 産総研地質調査総合センター.
- 上嶋正人・山崎俊嗣・駒澤正夫(2012a) 落石岬沖重力異常図・磁気異常図, 海洋地質図, No. 74 (CD), 産総研地質調査総合センター.
- 上嶋正人・山崎俊嗣・駒澤正夫(2012b) 日高舟状海盆重力異常図・磁気異常図, 海洋地質図, No. 77 (CD), 産総研地質調査総合センター.
- LaCoste, L. (1983) LaCoste and Romberg straight-line gravity meter. *Geophysics*, **48**, 606–610.
- Moritz, H. (2000) Geodetic Reference System 1980. *Journal of Geodesy*, **74**, 128–133.
- Nettleton, L. L. (1976) *Gravity and Magnetism in Oil Prospecting*, McGraw-Hill, Inc., 464p.
- NOAA National Geophysical Data Center (2009) ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model. NOAA National Centers for Environmental Information. [Accessed: 2022-6-27]
- 小田啓邦・佐藤太一(2015) 沖縄島北部周辺海域重力異常図・磁気異常図, 海洋地質図, No. 85 (DVD), 産総研地質調査総合センター.
- 小田啓邦(2018) 沖縄島南部周辺海域重力異常図・磁気異常図, 海洋地質図, No. 90 (CD), 産総研地質調査総合センター.
- 小田啓邦(印刷中) 久米島周辺海域重力異常図・磁気異常図, 海洋地質図, No. 92, 産総研地質調査総合センター.
- Peters, M.F. and Brozena, J.M. (1995) Methods to improve existing shipboard gravimeters for airborne gravimetry. *Proceedings of the IAG symposium on airborne gravity field determination*, 39–45.
- Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F. (2009) Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: ridge segmentation versus spreading rate. *Journal of Geophysical Research*, **114**, B01411. doi:10.1029/2008JB006008
- Sandwell, D.T., Garcia, E., Soofi, K., Wessel, P., Chandler, M. 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.
- Sandwell, D.T., Müller, R.D., Smith, W.H.F., Garcia, E. and Francis, R. (2014) New global marine gravity model from Cryosat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structures. *Science*, **346**, 65–67.
- Valliant, H. D. (1991) The LaCoste & Romberg air/sea gravity meter: an overview. *CRC Handbook of Geophysical Exploration at Sea, 2nd Edition, Hydrocarbons*, 141–176.
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F. and Wobbe, F. (2013) Generic Mapping Tools: Improved version released. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **94**, 409–410.

(受付 : 2022年2月15日 ; 受理 : 2022年5月30日)
(早期公開 : 2022年6月28日)