

GB21-1 及び GK20 航海 (トカラ列島周辺海域) における磁気異常観測の概要

高下 裕章^{1,*}・佐藤 太一¹・横山 由香^{2,1}・佐藤 悠介^{2,3}・三澤 文慶¹

KOGE Hiroaki, SATO Taichi, YOKOYAMA Yuka, SATO Yusuke and MISAWA Ayanori (2022) Preliminary results of the magnetic anomaly survey around Tokara Islands during the GB21-1 and GK20 cruises. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 73(5/6), p. 211–217, 3 figs, 2 tables.

Abstract: The magnetic observation was observed using shipboard three-component magnetometer (STCM) as a part of an ongoing geological mapping of the southern region of the Tokara Islands region. In this cruise, we used the data of the STCM for the calculation instead of the cesium magnetometer. We tried to conduct the corrections with the existing data Magnetic Anomaly Map of East Asia (CCOP 3rd). As a result, because the data observed by the STCM was very accurate, and the total magnetic anomaly analyzed by this method was almost the same accurate as the cesium magnetometer, and was free from errors at the intersections that usually appear. Therefore, this correction method could improve to also the observation of cesium magnetometers. In the island arc area, many dipole-type magnetic anomalies were observed. With bathymetrical observation, it suggests active volcanism. On the other hand, the trench side was almost flat magnetically. On the trough side, the significant positive magnetic anomalies were observed. This area has a small knoll, but it is not so distinct, which might reflect large-scale igneous activity beneath the seafloor that is not currently visible on land.

Keywords: Tokara Islands, Okinawa Trough, Bathymetry, Magnetic anomaly, Submarine volcano

要 旨

トカラ列島南部海域において、海域地質図作成を目的とした地磁気観測を実施し、三成分磁力計の観測値に基づき全磁力異常図を作成した。全磁力の計算には東・東南アジア磁気異常図改訂版第3版を用いた補正を試みた。フラックスゲート型船上三成分磁力計の観測値が精度よく観測されていたこともあり、曳航型セシウム磁力計と同程度の全磁力値を得ることができた。さらに本手法で解析した結果には、測線交点部のエラーがほぼ存在しなかった。今回試した補正方法はセシウム磁力計の観測等でも応用できると考える。島弧部では多くのダイポール型磁気異常が見られ、地形との関連から活発な火山活動が推測される。一方で海溝側は磁氣的に起伏が小さく島弧部ほど顕著ではなかった。また、トラフ側では正の磁気異常の目玉が見られた。地形的には海丘のような地形があるが、さほど明瞭でないことから考えると海底面に現在現れていない海底下の大規模な火成活動を反映している可能性が考えられる。

1. はじめに

GB21-1 及び GK20 調査航海では主としてトカラ列島周辺海域の北緯28度45分から北緯30度10分、東経128度20分から東経130度00分の範囲、中之島、臥蛇島、諏訪之瀬島、悪石島、宝島、横当島などの周辺海域において、地磁気観測を実施した。両調査航海における観測の全測線を第1図に示す。本報告書では、両航海でのフラックスゲート型船上三成分磁力計により得られた磁力データの処理方法とその一次解析結果についての報告を行う。なお、GB21-1 航海では曳航型セシウム磁力計 (G-882型, Geometrics社製) での全磁力観測は機器不調により実施することができなかった(第2.2.2節にて後述)。結果に基づき海底地形と合わせて調査海域の地下構造等についての簡単な解釈を示す。

2. 装置及びデータ処理

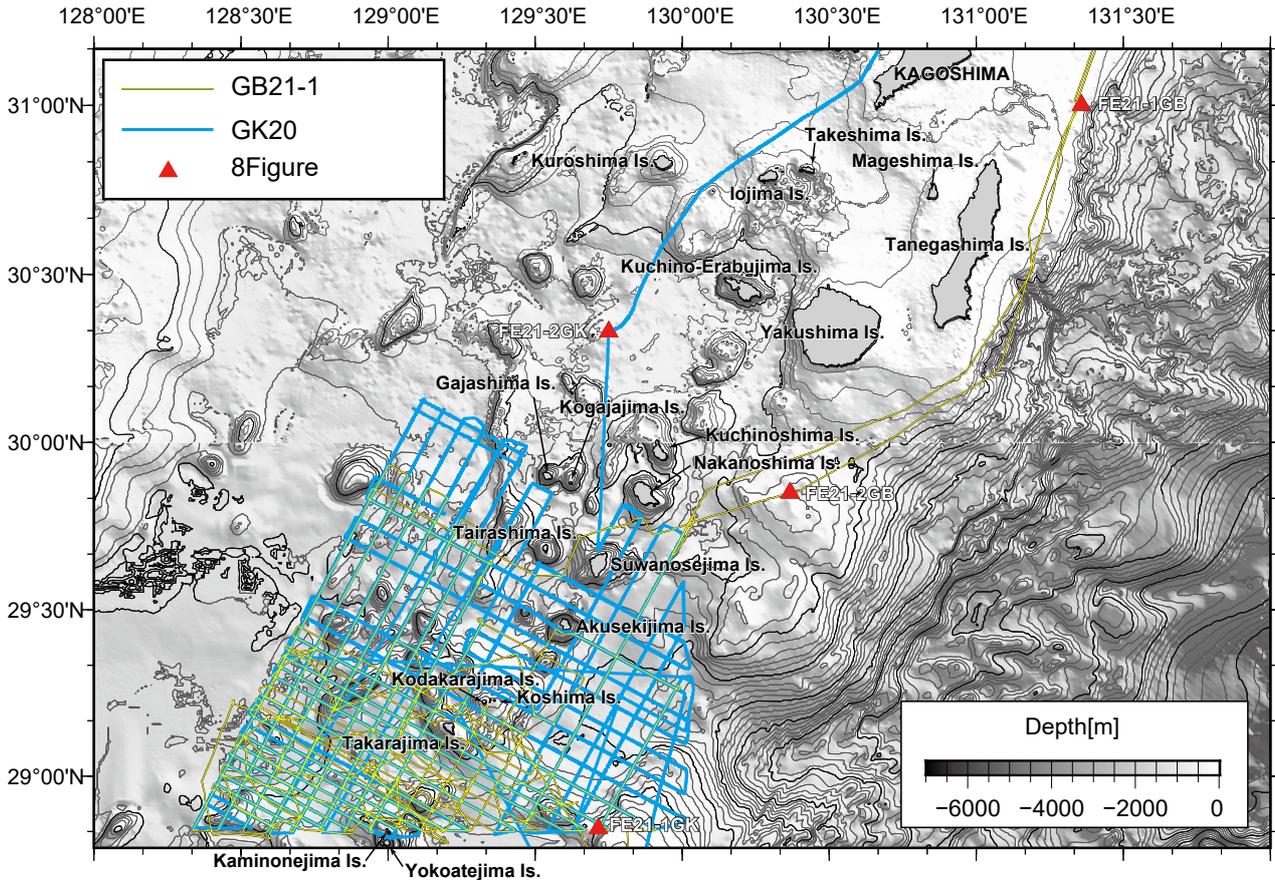
GB21-1 調査航海では東海大学所有の海洋調査研修船「望星丸」を使用した。船の全長は87.98 m、幅は12.80 mである。GK20航海では海洋エンジニアリング株式会社

¹ 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)

² 東海大学海洋学部 (School of Marine Science and Technology, Tokai University)

³ 株式会社 マリン・ワーク・ジャパン (Marine Works Japan, Ltd.)

* Corresponding author: KOGE, H., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: koge.h@aist.go.jp



第1図 GB21-1, GK20調査航海における磁気異常観測の全測線図。黄線はGB21-1, 水色線はGK20の測線を示す。赤三角形は8の字航走を実施した位置。地形は岸本(2000)による250 m統合グリッドを使用した。なお、北緯30度に東西方向に存在する線は地形ではなく、岸本(2000)グリッドにおけるデータ境界である。

Fig.1 All track lines of magnetic anomaly observations during the GB21-1 and GK20 cruise. The yellow and light blue lines indicate the GB21-1 and GK20 survey lines, respectively. The red triangle indicates the position of the figure-8 correction. Bathymetry data was used the 250-m integrated grid (Kishimoto, 2000). The east-west slice line at 30° N is not a topographic feature, but a data boundary.

所有の「第二開洋丸」を使用した。船の全長は72.85 m幅は12.60 mである。以下では各測定装置による観測状況及びそのデータ処理について記載する。

2.1 フラックスゲート型船上三成分磁力計によるベクトル観測とデータ処理

2.1.1. 観測機器及びデータ観測

船上三成分地磁気測定には産総研が所持する深海三成分磁力計(SFG-2009型, テラテクニカ社製)を使用した。磁力計にはフラックスゲートセンサーを用いており、センサーの測定精度は±200 nTである。磁力計の温度安定性は0.5 nT/°Cであり、出力データの分解能は1 nTである。磁力計の座標系は船首方向が+X, 右舷方向が+Y, 船底方向が+Zであり、直交度は±20分以内である。また船の姿勢に関しては、ジャイロの方位は右回頭方向がプラス, ロールは左舷上げ方向がプラス, ピッチは船首下げ

方向がプラスとして固定した。船体動揺データにはマルチビーム音響測深観測(MBES)で使用されている船体動揺船首方位測定装置を用いた。望星丸では地磁気三成分のサンプリング周波数は8 Hz, 船体動揺データおよび位置データは航法装置基準点の位置での船のGPSデータが4 Hz間隔で測定される。また、第二開洋丸では地磁気三成分のサンプリング周波数は8 Hz, 船体動揺データとGPSによる位置データはマルチビーム測深器にて収録されたデータ(.allファイル)内から、動揺センサーデータを抽出したものを使用した。ヘディングは1 Hz, ロールとピッチは100 Hz間隔のデータが得られている。なお、両航海データに用いられたMRU5+は内部の3軸加速度センサーと3軸角速度センサーに基づき、ロールとピッチの絶対値を出力し、また、3軸方向の加速度・速度・相対位置の出力も行う。

三成分磁力計センサー部は、GB21-1調査航海におい

第1表 GB21-1, GK20調査航海における8の字航走一覧.

Table 1 List of figure-8 correction during the GB21-1 and GK20 cruise.

Site name	Longitude (deg.)	Latitude (deg.)	Depth (m)	Date(UT)	Time (UT)	
					Start	End
FE21-1GB	131°21.45'E	31°00.07'N	162	2021/3/7	1:45	2:06
FE21-2GB	130°22.03'E	29°50.98'N	188	2021/3/21	15:15	15:33
FE21-1GK	129°42.91'E	28°50.51'N	427	2020/11/25	2:43	2:56
FE21-2GK	129°45.03'E	30°19.77'N	632	2020/12/1	16:49	16:59

て望星丸ブリッジデッキ後方のウインチルームの屋根部に設置した。またGK20調査航海においては第二開洋丸ブリッジデッキに設置した。両航海では船体磁気係数導出のために、8の字航走観測を調査海域で計4回実施した(第1表)。8の字航走は基本的に舵角15度、8 knot(14.8 km/h)で合計20分、転回角度としては1周半の450度をめどとして実施している。

2.1.2. データ処理

船上三成分地磁気測定で得られる値は地球磁場のほか船体の磁気を含んでいる。そのため、地磁気三成分値を求めるためには船体の磁気の影響を取り除く必要がある。Isezaki (1986)の方法に基づき、8の字航走中に得られる地磁気測定値および船体動揺データから船体磁気係数を出した。さらに、導出した船体磁気係数を用いて観測データの補正を行い、測線上の地磁気三成分値を計算した。また磁気異常値を求める際には、コサインテーパフィルター (bandpass長波長200 kmおよび短波長0.5 km ~ 0.2 kmで0)を適用し、極端な短波長・長波長成分を除去し、さらに国際標準磁場 (IGRF 13th generation; Alken *et al.*, 2021)を差し引くことで磁気異常値を求めた。地磁気全磁力異常はこうして得られた地磁気三成分異常をスカラー量に変換することで算出することが出来る。なお、地磁気は空間変化に加えて時間的にも変動するため、地磁気の日変化の補正を行う必要があるが、今回のような観測システムではデータの精度に対して地磁気日変化の影響は小さいと考えられるので、日変化補正は行っていない。

一般的なフラックスゲート型船上三成分磁力計の強みとして、ベクトル量である地磁気の三成分を測定できること、海況によって磁力計を曳航できない場合も観測可能なこと、測線間隔を密に取れない場合や測線方向にかかわらず磁気異常の変化をとらえることができることなどが知られている。一方で、センサーを船上に置くため船体磁気の影響が大きく、また現状の補正手法で得られる結果は補正が不十分であることが一般的であり、特に曳航型のプロトン磁力計やセシウム磁力計による全磁力観測値と絶対値においてその精度に差がある。ただし、

船上三成分地磁気測定で得られる磁気異常の相対変化は、GK20航海とGB21-1航海とで整合性が取れていることから、レベル補正の実施により、正確な全磁力異常値を求めることが出来ると考えた。

そこで今回はフラックスゲート型船上三成分磁力計から得られた全磁力観測値を東・東南アジア磁気異常図改訂版第3版 (Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia and Geological Survey of Japan, AIST, 2021; 以下CCOP and GSJ, AIST, 2021)を基準にし、レベル補正を実施した。なお東・東南アジア磁気異常図改訂版第3版では複数航海のデータをレベル合わせて、2分間隔のグリッドデータに統合してある。レベル補正の具体的な手順としては以下の2段階の処理を各測線で実施した。まず①2各測線ごとに観測された全磁力と同じプロファイルのCCOP and GSJ, AIST (2021)による磁気異常値の全磁力とを引き算し、差のトレンドを得た。次に②得られたトレンドをもとに観測データからトレンド除去を実施した。処理にはMatlabのdetrendコマンドを用いて計算を行った。この処理結果の議論については第3節で行う。

さらに上記のレベル補正を経て得られた両航海の各測線の全磁力異常値を統合し、GMT (Generic Mapping Tools ver. 6; Wessel *et al.*, 2019)のsurfaceプログラムを用いてグリッド間隔1 kmの全磁力異常グリッドデータを作成した。なお、今回交点ごとの差が非常に小さいため交点補正は実施していない。こちらも第3節で議論を行う。

2.2 セシウム磁力計

2.2.1 観測機器及びデータ観測

地磁気全磁力観測には産総研の曳航型セシウム磁力計 (G-882型, Geometrics社製)を使用した。本調査では船体磁気の影響を避けるために、磁力計を船尾左舷側から約300 m後方に曳航し、音波探査と同時に曳航観測を行った。データ収録はGeometrics社のデータ収録ソフト (MagLog)を用いて実施する。MagLogにはセシウム磁力計から出力される時刻・全磁力・シグナルレベル値・センサー深度データと船の広域GPSデータ (NMEAフォーマット)が約0.1秒間隔で別々に取り込まれる。MagLog

第2表 GB21-1, GK20 調査航海における8の字航走時の地磁気データから算出した船体磁気係数.

Table 2 List of the 12 constants of the ship's induced and permanent magnetic moment from figure-8 correction of GB21-1 and GK20.

Site name	Induced magnetization matrix									Permanent magnetic field			Standard deviation		
	B ₁₁	B ₁₂	B ₁₃	B ₂₁	B ₂₂	B ₂₃	B ₃₁	B ₃₂	B ₃₃	H _{ph}	H _{ps}	H _{pv}	σ _h	σ _s	σ _v
FE21-1GB	1.0393	0.0449	-0.079	0.0252	1.1891	0.0803	-0.148	0.0387	0.8544	-12885	9495	-16874	91	176	286
FE21-2GB	1.0485	0.026	-0.131	0.0591	1.1806	-0.031	-0.164	0.0461	0.9674	-9841	15763	-23744	98	249	222
FE21-1GB& FE21-2GB	1.048	0.0347	-0.124	0.043	1.1852	0.0153	-0.166	0.0439	0.9608	-10280	13231	-23193	237	276	308
FE21-1GK	1.0112	0.1204	-0.173	-0.035	1.1883	0.0594	0.1054	-0.092	0.7477	22153	4944	280	486	643	124
FE21-2GK	1.0075	0.1215	-0.191	-0.034	1.1891	0.0481	0.1036	-0.09	0.7328	23501	5310	1346	598	706	183
FE21-1GK& FE21-2GK	1.0308	0.0954	-0.005	-0.039	1.1946	0.0142	0.1201	-0.11	0.8699	15351	6794	-4659	575	673	210

に取り込まれる2つのデータセットはGeometrics社のデータ描画ソフト (MagMap2000)を用いて結合し、緯度・経度と全磁力値の対応を行う。測定値はケーブル長補正、地磁気の日変化の補正などを経て、国際標準磁場 (IGRF 13th generation ; Alken *et al.*, 2021)を差し引くことで全磁力異常値に換算する。今回はGB21-1調査航海では前述のとおり曳航型セシウム磁力計による全磁力データが得られなかったことから、処理の詳細は省略する。

2.2.2 機器不調に関して

GB21-1調査航海では、前述のとおり曳航型セシウム磁力計による全磁力データが得られなかった。セシウム磁力計の不調が2021年3月7日の観測初日の投入直後に発覚したためである。具体的にはSignal lowが表示され、全磁力の測定が困難な状態に陥った。通信システムのトラブルである可能性を疑い、ケーブルの交換ののち再投入を実施したが症状に変化はなかった。8日は電圧システムの点検のため各接続部の電圧を確認し、電気システムは正常であることを確認した。最終的にデバッグモードで点検を実施したところ通信がほとんど取れていないことが分かった。9日には接続部の掃除を行った後、再度投入したが状態が回復しなかったため観測を断念した。

製造元のGeometrics社での曳航式磁気センサーの点検修理によりRFトランジスタの経年劣化が要因の通信不良であることが分かった。修理では当該部品に加え、犠牲電蝕用垂鉛の交換、Oリングの交換が実施された。航海前には電圧および通信に関して点検を行っていたが、屋内やデッキでは鉄などの磁化された材料を多く含むため、セシウム磁力計が正常に動作している場合でもSignal lowが表示されてしまう。そのため、これまでの点検では今回の通信異常に関しては検知することができていなかった。

このように屋内での点検のみでは不十分であったので、修理から返却されたのち発電施設および遮蔽物のない野外 (国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所波崎海洋研究施設)での点検観測を実施し、正常に動いていることを確認した。その後、修理後実施されたGB21-2

航海において本装置を用いて観測を行った。

3. 結果と考察

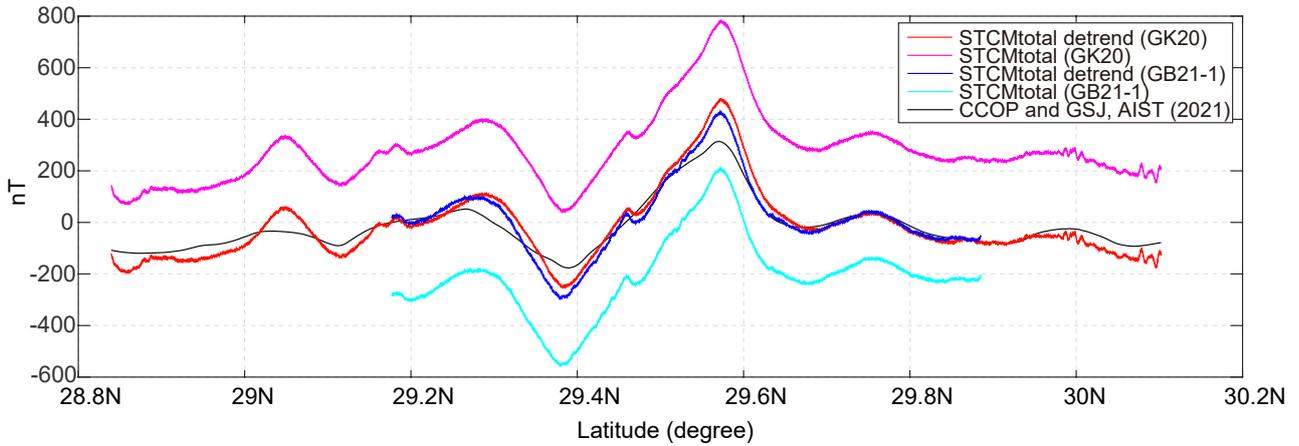
3.1 船体磁気係数

まずGB21-1及びGK20調査航海における8の字航走から算出した船体磁気係数を第2表に示す。8の字航走FE21-1GBにおいては、鉛直成分の標準偏差(σ_v)、右舷成分の標準偏差(σ_s)、船首成分の標準偏差(σ_h)、の順で大きい。8の字航走FE21-2GBでは、右舷成分の標準偏差(σ_s)、鉛直成分の標準偏差(σ_v)、船首成分の標準偏差(σ_h)、の順で大きくなっている。2回の8の字航走FE21-1GBとFE21-2GBを比較すると、標準偏差の大小関係に違いがあるが、おおまかな傾向は一致している。最終的には1回目と2回目の8の字の結果を混ぜて計算を実施した。GK20に関しても第2表にまとめた。こちらは1回目・2回目ともに鉛直成分の標準偏差(σ_v)、船首成分の標準偏差(σ_h)、右舷成分の標準偏差(σ_s)、の順で大きく、また鉛直成分の標準偏差(σ_v)が非常に小さい。こちらも最終的には1回目と2回目の8の字の結果を混ぜて計算を実施した。どちらの結果もB₁₁, B₂₂, B₃₃は1に近く、またその他の成分は0に近い、いわゆる単位行列に近い値が得られており、計算上非常に理想的な係数が得られた。

3.2 三成分磁力計による全磁力異常の精度検証

先述したように三成分磁力計は相対変化をよく測定することはできるが、その絶対値についてはセシウム全磁力計のような精度では求まらない。GB21-1航海ではセシウム磁力計が故障して全磁力データが得られなかったこと、GK20航海では三成分磁力計しか搭載していなかったことから精度の良い全磁力が得られていない。そこで構造を議論する前にまず三成分磁力計で測定されたデータの精度検証を行う。例として、測線1002の結果を示す(第2図STCMtotal, 測線の位置は第1図に示す)。補正前の全磁力異常(STCMtotal)を見るとGK20とGB21-1航海という異なる調査船・異なる時期に取得され導出された全磁力値が同一測線でよく似た相対変化をしていた。

Magnetic anomaly of the Line 1002



第2図 測線1002における全磁力異常の断面. 各データを色分けして示す.

Fig.2 Profiles of the total magnetic anomaly at line 1002.

これはCCOP and GSJ, AIST (2021)による磁気異常値とも整合性がある(第2図中CCOP and GSJ, AIST, 2021). よって両データを補正した全磁力異常値は使用可能と判断した. ただし先述の通り, 各データ間にオフセットが存在することから, 第2.1.2節で説明したトレンド除去・レベル補正が必要である. 今回はCCOP and GSJ, AIST (2021)の全磁力値を基準として処理を行った(第2図STCMtotal detrend).

なお, このように補正前の全磁力異常が精度よく取得された理由としては, 望星丸・第二開洋丸では三成分磁力計の設置位置が良かったことで, 船体磁化係数が精度よく求められていた可能性が高い. これまでの観測は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構所有の海洋資源調査船「白嶺」で行われていたが, 白嶺では高精度での船体磁化係数が求められておらず, 改善のために三成分磁力計の設置位置の移動が毎年行われていた(例えば佐藤・佐藤, 2016). 一方で, 望星丸・第二開洋丸では今後も GB21-1 及び GK20 と同じ設置場所で観測を続ける方が精度よく観測できると考えられる.

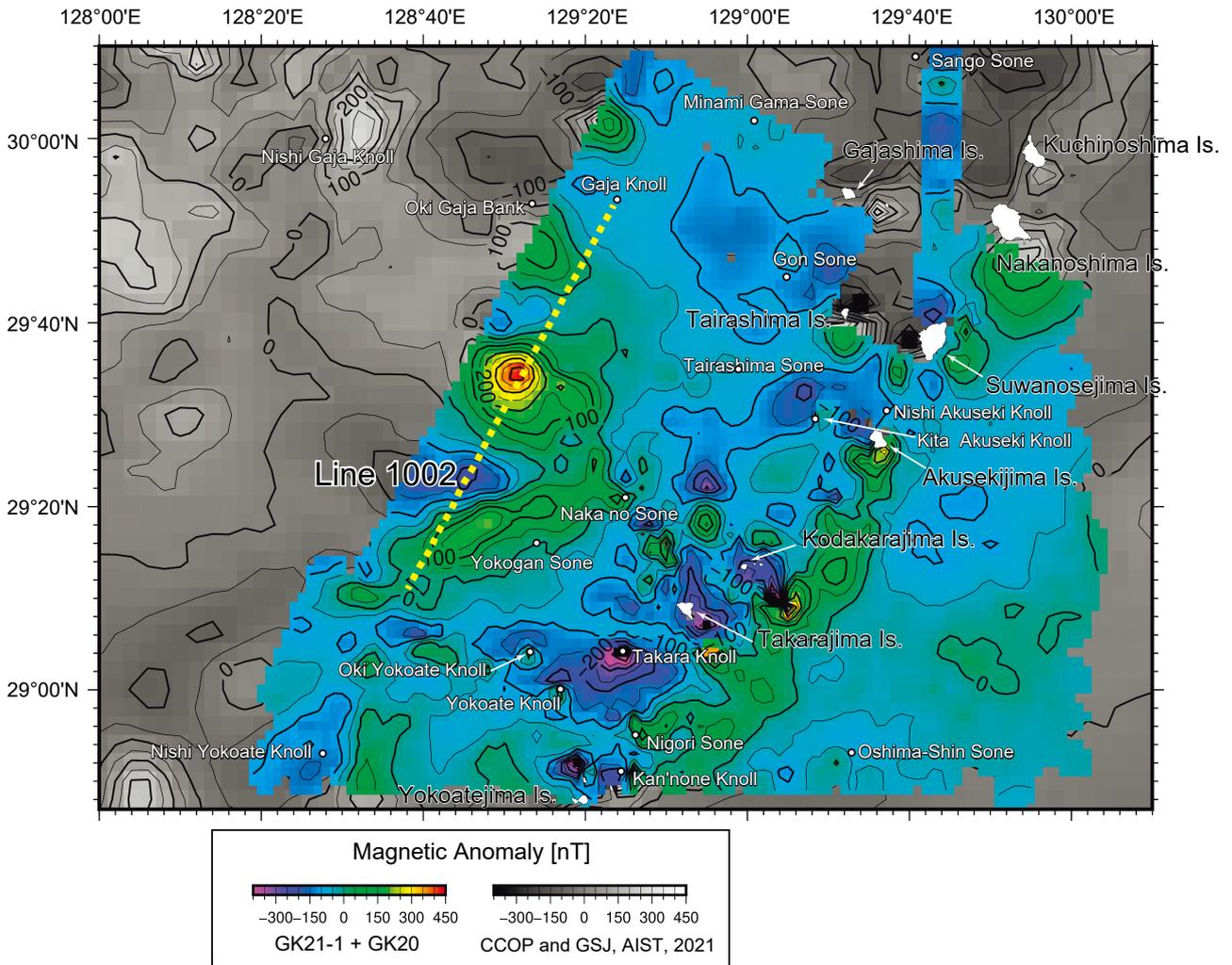
3.3 全磁力異常図

補正を行ったデータから, 間隔1 kmの全磁力異常グリッドデータを作成し, 全磁力異常図にまとめた(第3図). 一般的な磁気異常観測では, 測線の交点近傍部ではほぼ同じ観測値を示すはずが, 位置データの誤差や磁気異常値の時間変化などの影響で, 観測値に差が発生し, 結果として目玉状の磁気異常が発生する(例えばCCOP and GSJ, AIST, 2021). さらに三成分磁力計によるベクトル観測では船体磁化の時間変化(森尻・山崎, 1997など)も観測値に大きな影響を与える. これらはノイズの

一種であるため, 通常はGMTのx2sysパッケージ(Wessel *et al.*, 2019)で補正していたが, 今回は補正前の状態で目玉状の磁気異常がほとんど見られなかった(第3図). 交点のデータが非常によかった理由として, CCOP and GSJ, AIST (2021)のデータに基づいた補正をかけていることに依ると考えられる. 例えば, これまでの観測では2測線の交点部で値がずれている時, どちらの値を真とするかは非常に難しい判断であり, 完全に一致するような補正は難しかった. 今回に関してはCCOP and GSJ, AIST (2021)の全磁力値を基準として補正を行ったことで, 交点部分のデータでも差が発生しないような補正ができていたと考えている. この補正方法はセシウム磁力計の補正でも広く利用できる可能性が高い.

次に海域における磁気分布について述べる.

①島弧に沿って南が正, 北が負のダイポール型の磁気異常が多くみられる. 北から順番に記載する. 諏訪之瀬島, 悪石島などは島を挟んでダイポールが形成されている様子が見られた. 波長は概ね似ており10 kmから20 kmである. 一方でこたから小宝島と宝島周辺でも同様のダイポール型磁気異常が見られるものの島自体は北側の負の異常の中に位置しており, 先述の2つの島とは異なる磁气的構造を持っていることが分かる. また, その北西部に同程度の波長で構成されるダイポール型磁気異常が存在している. 更に南のおきよこあて沖横当海丘と横当海丘ではより小さなスケール(<10 km)のダイポールが形成されている. 上ノかんの根海丘でも小さなスケールのダイポール型磁気異常が見られるものの, これまでみられたダイポール型磁気異常よりも北西-南東方向に形成されている. これらのダイポール型磁気異常はトカラ列島島弧で活発な火山活動(例えば小林, 2008)によって形成されていることが考え



第3図 GB21-1, GK20で得られた全磁力磁気異常図。グリッド間隔は1 kmとした。コンター間隔は50 nTである。背景には東・東南アジア磁気異常図改訂版第3版 (CCOP and GSJ, AIST, 2021) のデータを重ねた。

Fig.3 Total magnetic anomaly map integrated by GB21-1 and GK20. The grid space was set to 1 km. The contour interval is 50 nT. The data of Magnetic Anomaly Map of East and Southeast Asia, Revised Version (3rd Edition, CCOP and GSJ, AIST, 2021) is drawn on the background.

られる。小林 (2008) によると本海域内では口之島、中之島、諏訪之瀬島、悪石島、横当島は過去1万年以内に噴火した火山と考えられており、臥蛇島、小臥蛇島、平島はその山体の風化の様子からそれらより古い数十万年以内の活動と考えられている。臥蛇島、小臥蛇島に関しては今回の観測範囲では十分カバーできていないため、言及することができないが、平島に関しては、新しい火山よりも大きな波長 (>40km) かつコンターの傾斜が緩いダイポール型磁気異常が形成されている。

②海溝側は磁氣的に起伏が小さく、島弧のような顕著なダイポール型磁気異常は存在していない。悪石島の東側に比較的広く負の磁気異常が分布しているが、地形的に海盆部に一致していることから開口部は主に地形形成

と関連していると考えられる。

③トラフ側では横ガン曾根を含む正の磁気異常と、その北側の負の磁気異常がみられ、横ガン曾根の走向に沿ってシャープな正負の境界をなしている。このように磁気異常が非常にシャープに見える箇所は、磁性体が比較的浅い場所に存在している可能性が高い。また平島から西に見て、東経128度50分のところに正の磁気異常の目玉が見られる。この磁気異常に関してはバックグラウンドに描写したCCOP and GSJ, AIST (2021)の結果も踏まえて観察すると北側の負の磁気異常とオフセットでのダイポール磁気異常をなしているように見える。地形的には鋭く直線的な海底谷が形成されている箇所と一致しており、海丘のような地形があるが明瞭ではないこと、か

つ非常に高い正の磁気異常であるので、陸上に現在現れていない海底下の大規模な火成活動を反映している可能性が考えられる。西横当海丘^{にしよこあて}に関しては上ノ根海丘と同様に南北ではない東西方向でダイポール磁気異常が形成されており、このようなダイポールの方向のバリエーションを生むには、異なる時代で火山活動が同一地域で形成されていること、または回転を伴うローカルなテクトニクスが存在していたことが推定される。

4. まとめ

トカラ列島南部海域において地磁気観測を実施し、全磁気異常図を作成した。その際、セシウム磁力計で観測ができなかったため三成分磁力計のベクトル量を基に計算を行った。一般的に三成分磁力計のベクトル値はセシウム磁力計の観測値ほど精度よく求めることができない。そのため、今回の計算には既存のデータ (CCOP and GSJ, AIST, 2021) を用いた補正を試みた。補正の結果、CCOP and GSJ, AIST (2021) との比較から、三成分磁力計で取得したデータが従来の観測と比べても非常に精度よく観測されていたことが明らかになった。さらに今回試みた手法で補正・解析した結果には、通常現れる測線交点部のエラーがほぼ存在しなかった。このような補正方法はセシウム磁力計の観測でも応用できる可能性が高い。

島弧部では多くのダイポール型磁気異常が見られ、地形との関連から活発な火山活動が推測される。一方で海溝側は磁氣的に長周期成分が卓越している。さらにトラフ側では正の磁気異常の目玉が見られた。地形的には海丘のような地形があるが、さほど明瞭でないことから考えると現在海底の表面に現れていない大規模な火成活動を反映している可能性が考えられる。

謝辞： 今回の調査では、望星丸・第二開洋丸の船長をはじめ、乗組員・運用士の方々、乗船研究者の皆様には調査機器の運用やデータ記録に関してご尽力頂きました。望星丸における観測については、特に玉井隆章技術員に大変お世話になりました。また、査読者である森尻理恵氏の有益なコメントにより、本稿は大幅に改善されました。皆様に篤く謝意を表します。

文 献

- Alken, P., Thebault, E., Beggan, C. D., Aubert, J., Baerenzung, J., Brown, W. J., Califf, S., Chulliat, A., Cox, G. A., Finlay, C. C., Fournier, A., Gillet, N., Hammer, M. D., Holschneider, M., Hulot, G., Korte, M., Lesur, V., Livermore, P. W., Lowes, F. J., Macmillan, S., Nair, M., Olsen, N., Ropp, G., Rother, M., Schnepf, N. R., Stolle, C., Toh, H., Vervelidou, F., Vigneron P., and Wardinski, I. (2021). Evaluation of candidate models for the 13th generation International Geomagnetic Reference Field. *Earth, Planets and Space*, **73**, 1–21.
- Isezaki, N. (1986) A new shipboard three component magnetometer. *Geophysics*, **51**, 1992–1998.
- Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia and Geological Survey of Japan, AIST (2021) Magnetic Anomaly Map of East and Southeast Asia, Revised Version (3rd Edition), Digital Geoscience Map P-3, Revised, Geological Survey of Japan.
- 岸本清行 (2000) 海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成：Japan250m.grd. 地質調査所研究資料集, no. 353 (CD).
- 小林哲夫 (2008) 九州南方の離島の火山, *Nature of Kagoshima*, 鹿児島県自然愛護協会, **34**, 11–16.
- 森尻理恵・山崎俊嗣 (1997) 白嶺丸における地磁気三成分測定の実状と問題点. *地質調査月報*, no. 48, 65–77.
- 佐藤雅彦・佐藤太一 (2016) GH15 調査航海における重力異常・磁気異常観測の概要. 板木拓也 (編) 「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成27年度研究概要報告書—奄美大島周辺海域—, *地質調査総合センター速報*, no. 70, 23–34.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F. and Tian, D (2019) The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **20**, 5556–5564.

(受 付 : 2021 年 1 月 14 日 ; 受 理 : 2022 年 7 月 7 日)

