

GB21-2, GB21-3 及び GS21 航海 (トカラ列島周辺海域) における磁気異常観測の概要

佐藤 太一^{1,*}・高下 裕章¹

SATO Taichi and KOGE Hiroaki (2023) Preliminary results of the magnetic anomaly survey around Tokara Islands during the GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 203–209, 3 figs and 2 tables.

Abstract: Geomagnetic surveys were conducted to make a marine geophysical map in the northern part of the Tokara Islands. A total magnetic anomaly map was made based on the observed total magnetic field. In addition, a magnetic anomaly map of the whole Tokara Islands was made together with the total magnetic anomaly calculated from the vector magnetic surveys obtained in the southern Tokara Islands last fiscal year. Magnetic dipole anomalies are observed around the island arc area and several bathymetric highs, presumed to be due to volcanic activity. Geomagnetic and published gravity features suggest that the north-south trending ridge on the western side of the survey area forms the eastern edge of the Okinawa Trough containing igneous activities. A positive magnetic anomaly is observed in a part of this topographic ridge, which is presumed to be due to magnetization caused by surface volcanic activity or a deep-seated magnetic body. On the trough, a positive magnetic anomaly without seafloor bathymetry is observed. Based on the published regional magnetic map, this anomaly is considered part of a magnetic dipole anomaly, suggesting subseafloor magmatic activity.

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

要 旨

トカラ列島北部海域において、海域地球物理図作成を目的とした地磁気観測を実施し、曳航式全磁力計の観測値に基づき全磁力異常図を作成した。また昨年度のトカラ列島南部海域で取得された三成分磁気観測から算出した全磁力異常と合わせてトカラ列島全域の磁気異常図も作成した。島弧の島々及び複数の海底下の地形的高まりではダイポール型磁気異常が見られ、地形との関連から火山活動によるものと推測される。調査海域西側の南北方向に連続する地形的高まりは、地磁気・重力的特徴から火成活動を伴う沖縄トラフの東縁部をなす地形的境界であると考えられる。この地形的高まりの一部では正の磁気異常がみられており、表層の火成活動による起因する磁化によるもの、もしくはより深部の磁化物体によるものと推測される。トラフ底では海底地形を伴わないダイポール型磁気異常の一部と考えられる正の磁気異常が観測され、海底下の火成活動が推測される。

1. はじめに

GB21-2, GB21-3 及びGS21 航海では主としてトカラ列

島周辺海域の北緯28度50分から北緯30度50分、東経128度40分から東経130度20分の範囲、口之島、中之島、臥蛇島、諏訪之瀬島、悪石島、宝島、横当島などの周辺部において、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、3航海での曳航型セシウム磁力計 (G-882型, Geometrics社製) により得られた磁力データの処理方法とその解釈についての報告を行う。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。

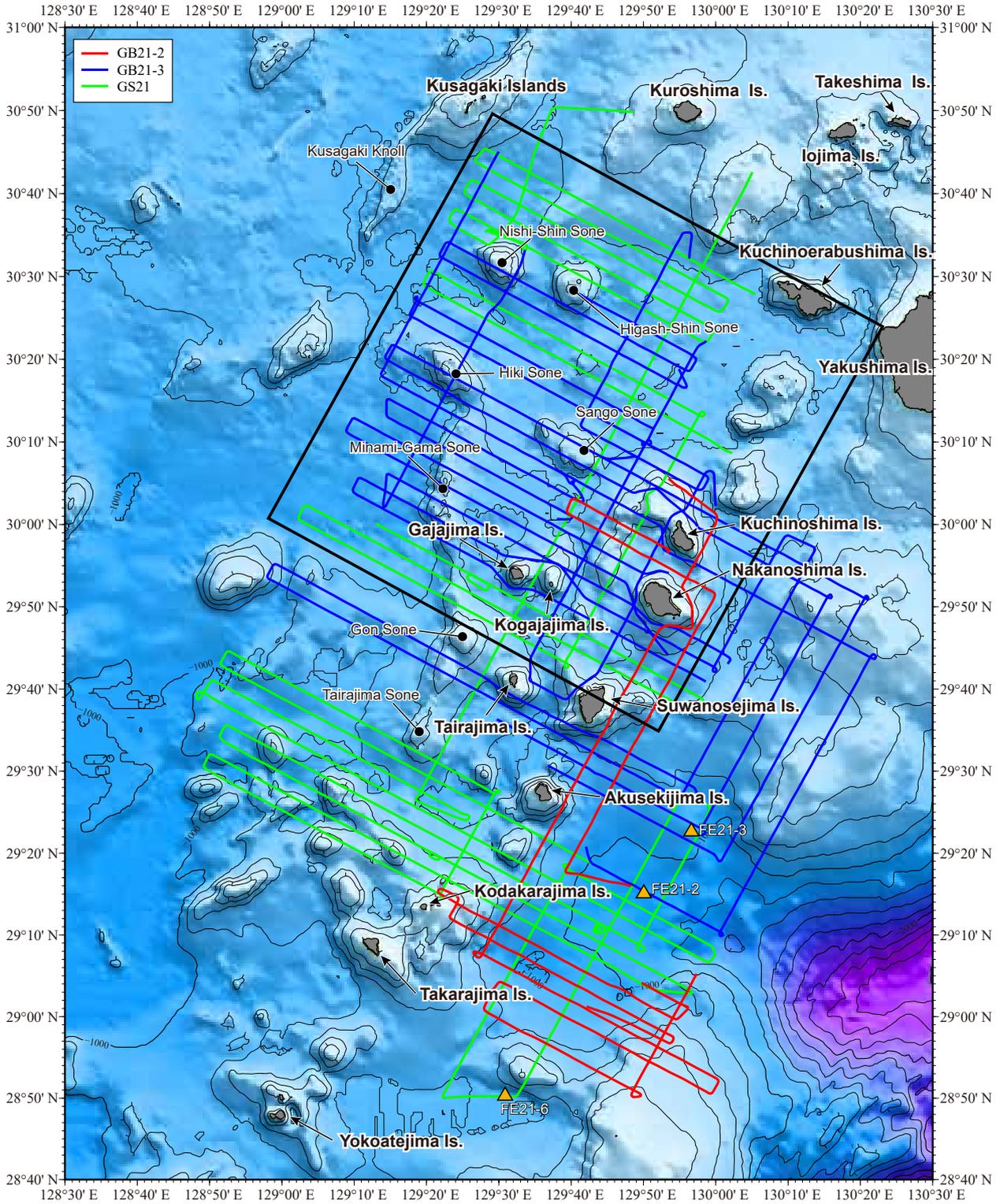
2. 装置及びデータ処理

GB21-2航海 (2021年7月19日–7月20日) 及びGB21-3航海 (2021年10月29日–11月29日) 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。GS21航海 (2021年10月4日–10月23日) では東京海洋大学所有の「神鷹丸」を使用した。船の全長は64.55 m, 幅は12.10 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。

地磁気全磁力観測には産総研所有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

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)

* Corresponding author: SATO, T., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: taichi-sato@aist.go.jp



第1図 GB21-2, GB21-3及びGS21調査航海における磁気異常観測の全測線図。赤線はGB21-2, 青線はGB21-3, 緑線はGS21調査航海の測線を示す。オレンジ色の三角形は区内での8の字航走を実施した位置を示す。地形は500 mメッシュ水深データ(J-EGG50, 日本海洋データセンター(2015))を使用した。

Fig.1 All track lines of magnetic anomaly observations during the GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises. The solid red, blue, and green lines indicate the GB21-2, GB21-3, and GS21 survey lines, respectively. The orange triangles indicate the position of the figure-eight turns in the index map area. Seafloor bathymetry is based on J-EGG50 (Japan Oceanographic Data Center, 2015). The grid interval is 500 m.

第1表 GB21-2, GB21-3, GS21 調査航海における8の字航走一覧.

Table.1 List of figure-eight turns during the GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises.

Site name	Cruise	Date	Time(UT)		Position	
			Start	End	Longitude	Latitude
FE21-1	GB21-2	2021/7/25	22:18:51	22:29:14	30°40.31' N	130°30.12' E
FE21-2		2021/7/28	18:53:30	19:06:14	29°15.06' N	129°50.05' E
FE21-3	GB21-3	2021/11/4	14:20:00	14:33:46	29°22.63' N	129°56.63' E
FE21-4		2021/11/23	17:56:17	18:00:44	30°39.98' N	131°10.01' E
FE21-5	GS21	2021/10/7	21:02:21	21:11:05	30°49.89' N	130°44.87' E
FE21-6		2021/10/14	7:24:14	7:41:18	28°50.29' N	129°30.87' E
FE21-7		2021/10/17	0:24:13	0:40:53	30°12.74' N	130°35.59' E

は船体磁気の影響を避けるために、磁力計を望星丸及び神鷹丸の船尾左舷側から約300 m後方に曳航し、音波探査と同時に曳航観測を行った。GPSからの正確な曳航距離は、望星丸では362.11 m、神鷹丸では329.95 mに相当する。データ収録はGeometrics社のデータ収録ソフト(MagLog)を用いて実施した。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側の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。なお位置情報については、GB21-2及びGB21-3航海では望星丸のGPSデータ、GS21航海では持ち込んだ産総研所有のGPSセンサーからのデータをそれぞれ使用した。MagLog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った。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した。

今回報告する3航海では、地磁気ベクトル観測も実施した。本報告書では結果については記載せず観測状況のみの報告とする。GB21-2及びGB21-3航海では、産総研所有のフラックスゲート型深海三成分磁力計(SFG-2009型、テラテクニカ社製)を使用した。磁力計センサー部は、望星丸ブリッジデッキ後方のウインチルールの屋根部に設置した。地磁気センサー及び船体動揺センサー等のスペックについては高下ほか(2022)を参照されたい。GS21航海では、東京大学大気海洋研究所所有の深海三成分磁力計SDR-1Gを使用した。観測時の時刻調整は収録PCの時計をNTPサーバー(ETS-204, NTPserver 4.0.2)で同期し、そのPCから磁力計の時計を同期することで行った。時刻調整は1~2日に1度実施した。センサー部は神鷹丸のブリッジデッキに設置した。また神鷹丸ではIXBLUE社製光ファイバーコンパスPHINS(Model PAA00011)から船体動揺データを収録した。方位精度0.05度、ロールピッ

チ精度0.01度である。データ出力は0.1~200 Hzで行うことができる。神鷹丸では、船に装備されている5 Hzの出力ポートを利用したため、5 Hzで取得した。設定変更も可能であったが、高い周波数で収録すると、運行上に使用されるほかの機器への通信に対し、位置情報の提供に遅延が生じる可能性があったため、そちらを考慮して変更は実施していない。上述に加えて、本航海では産総研所有のGPS支援慣性航法システム(SFGFOG-20, テラテクニカ社製)を新たに導入し動揺の収録も同時に行った。センサー部は、神鷹丸のコンパスデッキ上に設置した。センサーは船体動揺センサーと2つのGPSを組み合わせたもので、ロール、ピッチ、ヘディングの精度が0.01度、内部のフィルターレートは1000 Hz、さらに産総研所有の三成分磁力計とデータを結合するため8 Hzで出力するように設定されている。各航海では船体磁気係数導出のために、8の字航走観測を実施し、調査海域で合計7回実施した。実施状況を第1表、船体磁気係数は第2表に示す。

続いて、算出された磁気異常に対して、船体磁気の影響を仮定した交点コントロール補正計算(x2sys: Wessel, 2010)を行った。補正前後での交点誤差の標準偏差は4.6 nTから4.0 nTに改善された。さらに上記のレベル補正を経て得られた3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分の全磁力異常グリッドデータを作成した(第2図)。さらに、トカラ列島全域の磁気異常図作成のため、GB21-1及びGK20航海で得られた三成分地磁気観測から算出した全磁力異常値(高下ほか, 2022)を追加した。追加に際しGB21-2, GB21-3及びGS21航海を基準として航海間オフセットを最小化する交点コントロール補正を行った。その結果、補正前後での交点誤差の標準偏差は34.4 nTから21.3 nTに改善された。こちらについてもグリッド間隔1分の全磁力異常グリッドデータを作成した(第3

第2表 GB21-2, GB21-3, GS21 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 the figure-eight turns of GB21-2, GB21-3, and GS21 cruises.

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 _n	σ _s	σ _v
FE21-1	1.0342	0.0848	-0.071	-0.025	1.1891	0.0824	-0.15	0.0472	0.8713	-13447	8468	-17499	61	166	284
FE21-2	1.0387	0.0823	-0.087	-0.018	1.189	0.0529	-0.159	0.0521	0.9386	-12611	10053	-21443	89	204	239
FE21-Merge1	1.0386	0.083	-0.091	-0.027	1.19	0.0986	-0.16	0.0512	0.94	-12356	7503	-21495	83	191	267
FE21-3	1.0438	0.0436	-0.115	0.0207	1.1938	0.048	-0.107	0.0459	0.6692	-11857	9290	-6686	164	115	243
FE21-4	1.0617	0.0256	-0.241	0.0727	1.1723	-0.211	-0.116	0.0493	0.7345	-4467	24130	-10513	557	698	279
FE21-Merge2	1.0401	0.0403	-0.103	0.0341	1.1881	-0.012	-0.113	0.0481	0.7097	-12494	12607	-9020	401	479	261
FE21-5	1.0105	0.0042	-0.599	-0.054	1.118	-0.141	0.0285	0.0487	0.374	21408	9809	19276	780	795	432
FE21-6	1.0694	0.0317	0.1702	-0.043	1.1235	-0.004	0.0491	0.0573	0.5809	-5104	5118	11646	800	280	528
FE21-7	0.9713	-0.025	-1.073	-0.049	1.1191	-0.055	0.06	0.0596	0.6934	38293	7076	8386	686	1446	401
FE21-Merge3	1.0448	0.0215	-0.13	-0.042	1.1239	0.0127	0.062	0.0643	0.7712	5033	4577	5514	924	848	514

図). なおトカラ列島全域の磁気異常グリッドについては交点誤差等に起因すると思われる短波長の磁気異常を抑えるために4 kmのメディアンフィルターを施している. このため, 第2図と第3図では磁気異常の様相が若干異なるが, 第3図を基本として解釈を進める.

3. 結果と考察

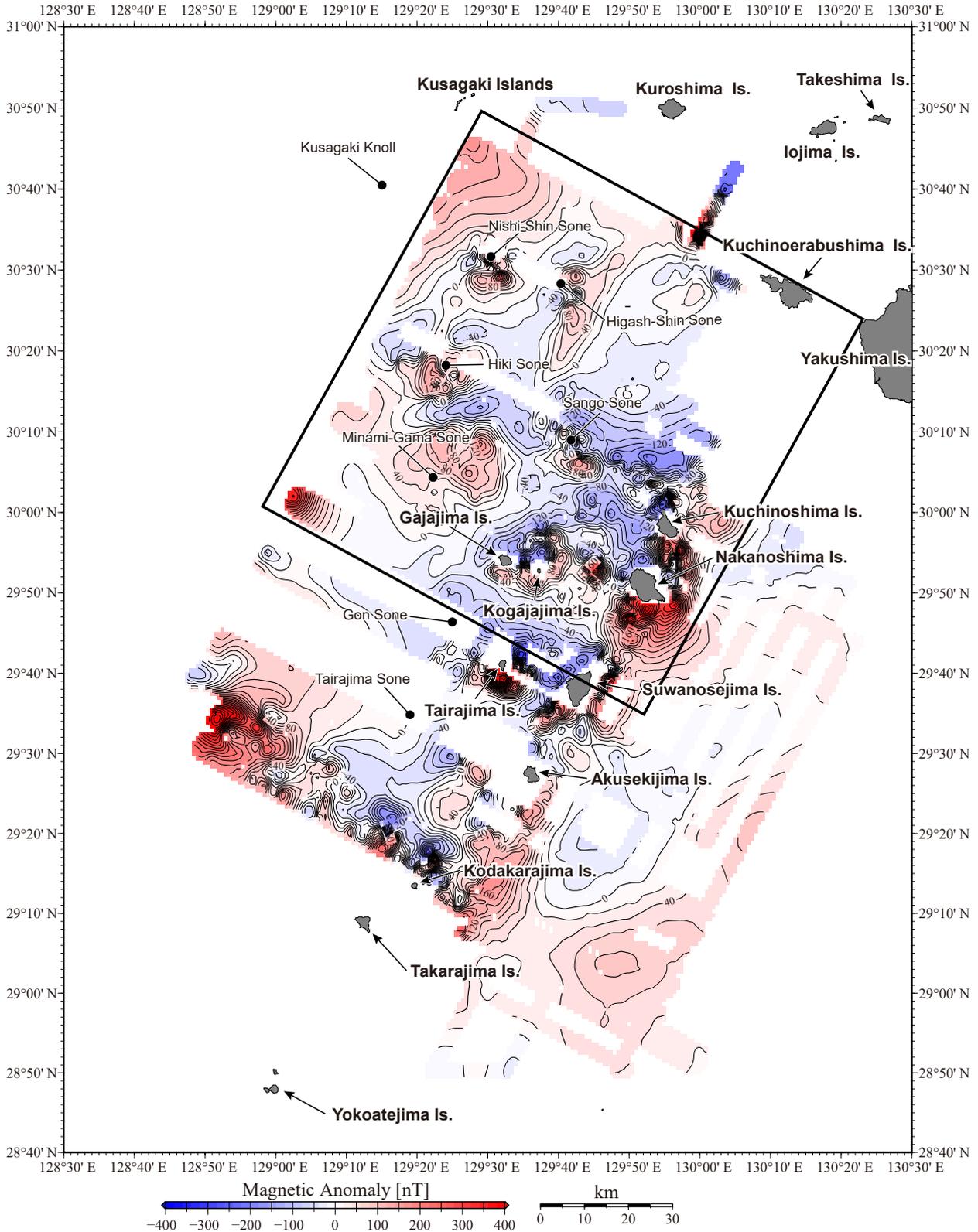
全磁力磁気異常分布の調査範囲は, 高下ほか(2022)による三成分磁気異常から算出した全磁力異常分布と重複が多く, 磁気的特徴についてはすでに報告済みの箇所が多い. このため本論では今回新たに取得された箇所(第3図の四角枠内)であるトカラ列島北部の特徴について記載する.

トカラ列島周辺では南が正で北が負のダイポール型磁気異常が多くみられた. 中之島, 口之島で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10~20 km程度である. 臥蛇島・小臥蛇島は各島に対応するダイポール型磁気異常は顕著でないが, 二島全体としてダイポール型磁気異常の内部に位置しているように見える. これらのダイポール型磁気異常はトカラ列島の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られる. 中之島と小臥蛇島の間にもダイポール型磁気異常が見られた. 火山活動が推測されるが, 限られた海底地形(高下ほか, 2023)からは少なくとも海底火山状の地形は見られない.

トカラ列島より西側のサンゴ曾根, 東新曾根, 西新曾根といった地形の高まりにおいてもダイポール型磁気異常が見られた. 海底地形は限られているものの, 高まりの表面には海丘状の地形がみられることから, 地形磁気異常を伴うことと合わせると, これら高まりが火山活動により形成されたと考えられる. 髯曾根周辺では, 南が正で北が負のダイポール型磁気異常がみられた. 髯曾根の南側斜面には溶岩流上の地形が, 北側及び西側の斜面では海丘状の地形が複数みられることと合わせる(高下ほか, 2023)と, この高まりも火山活動により形成され

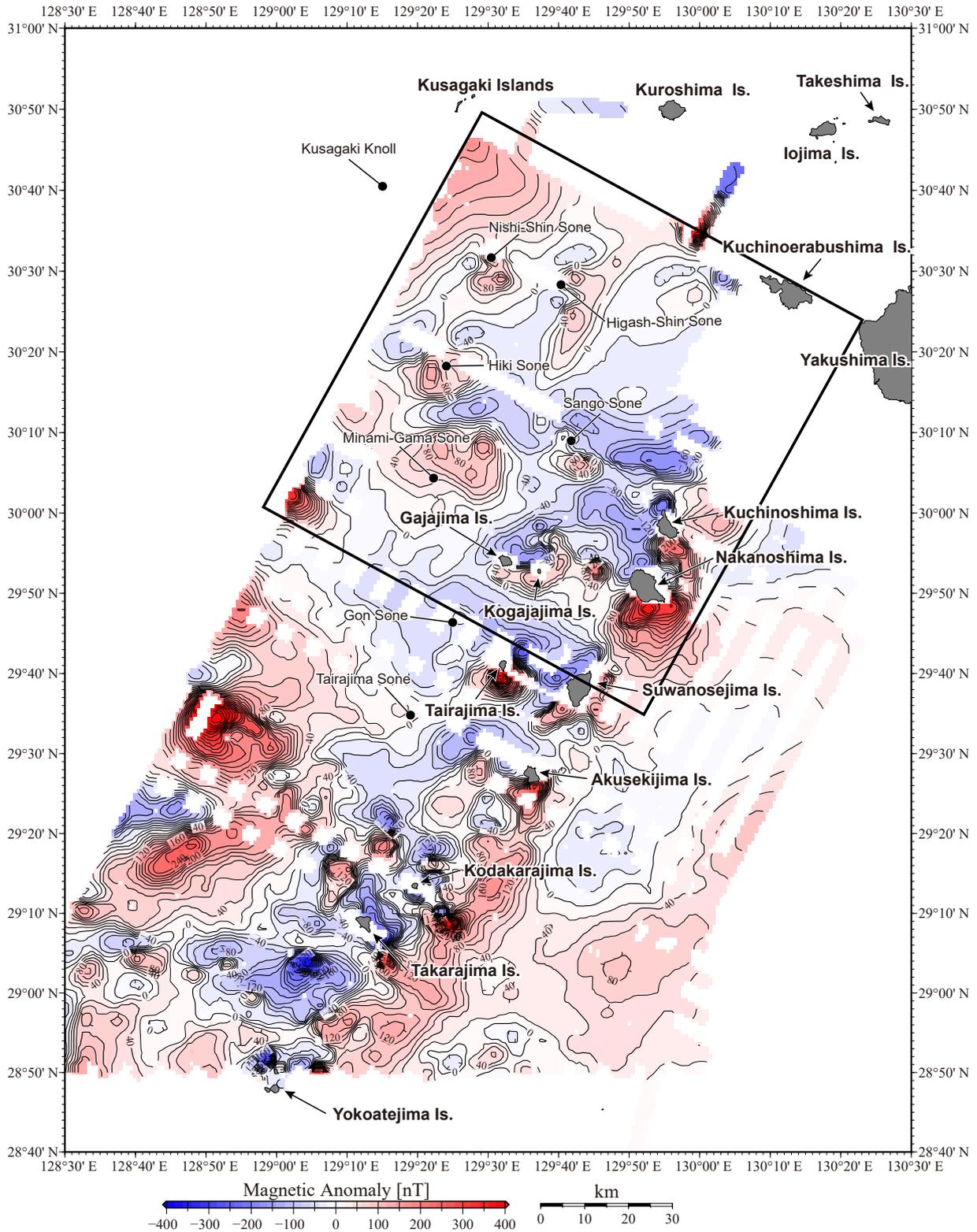
たと考えられる. 南髯曾根周辺では最大約80 nTの正の磁気異常が見られた. この正の異常の北側に磁気異常が見られるためダイポール型磁気異常ともみなせるが, 上述した火山島や海底火山のもつダイポール型磁気異常よりも東西方向に伸びた分布をしている. 南髯曾根は, 南方の権曾根・平島曾根まで連続した南北方向の走向を持つ, 水深350~500 m程度の高まりの一部の北端部に位置する(高下ほか, 2023). 高まりの西側は水深約900 mを平坦な海底となり, 高まりの西側には落差約400 mの崖が形成されている. 南髯曾根では海底火山等の海底地形は見られないが, 権曾根では円礫からなる溶岩塊が採取されている(横瀬ほか, 2010). 加えて広域の磁気異常図(CCOP and GSJ, AIST, 2021)では権曾根では小規模なダイポール型磁気異常が見られる. これらから権曾根での火成活動が示唆される. なお今回の観測では測線の空白域のため対応する磁気異常は検出できていない. 広域のブーゲー異常図に注目すると(日本重力データベースDVD版, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2013), この南北方向の高まりは高ブーゲー異常が特徴的である. 上述した海底地形・地磁気・重力的特徴から, この高まりは沖繩トラフの東縁部境界をなす, 火山活動を含む地形であることが示唆される. 南髯曾根の磁気異常は権曾根のような火成活動によるもの, もしくは陸上に現れていない, より深部の磁化物体に起因するものと推測される. 高ブーゲー異常は基盤深度が浅いことや火山体が存在することで説明可能であろう. 将来的には本プロジェクトで採取された岩石と結果を統合することで, より詳細な議論が可能と考えられる.

東新曾根の東側には, 0~60 nTの正の磁気異常が北東-南西方向に広がっている. 正の磁気異常の南東部には水深600~700 mの海底に比高100 m程度の北東-南西方向の尾根状地形がみられ, その南部では同方向のリニアメントが数本観測される(高下ほか, 2023). 正の磁気異常の位置と尾根状地形の位置は一致していないが, 走向が一致していることから両者の形成は関連があると考



第2図 GB21-2, GB21-3 及びGS21 航海で得られた全磁力磁気異常図. グリッド間隔は1分とした. コンター間隔は20 nTである.

Fig 2 Total magnetic anomaly map integrated by GB21-2, GB21-3, and GS21. The grid space was set to 1 nautical mile, and the contour interval is 20 nT.



第3図 GB21-2, GB21-3, GS21航海で得られた全磁力異常にGB21-1, GK20で得られた三成分磁気異常から算出した全磁力磁気異常を追加した全磁力異常図。グリッド間隔は1分とした。コンター間隔は20 nTである。四角枠は今回新たに取得された箇所を表す。

Fig 3 The integrated total magnetic anomaly map of the north Ryukyu Islands. Total magnetic anomaly calculated from vector magnetic anomaly data of GB21-1 and GK20 are added to the total magnetic anomaly of this study. The grid space was set to 1 nautical mile, and the contour interval is 20 nT. The black rectangle outlines the area reported in this study.

えられる。西新曾根の西側には正の磁気異常が広がっており、西に行くほど値は増加する。この磁気異常は CCOP and GSJ, AIST (2021) では西は草垣海丘、北は草垣諸島まで広がっている。

トラフ内の北緯30度、東経129度付近では、300 nTを超える顕著な正の磁気異常が見られる。調査範囲の端となり十分カバーされていないが、広域の磁気異常 (CCOP and GSJ, AIST, 2021) を参考にすると、ダイポール型磁気異常の一部と考えられる。海底地形を伴わないことから (第1図) 埋没した磁性体に起因すると考えられる。

4. まとめ

トカラ列島北部海域において地磁気観測を実施し全磁力異常図を作成した。さらに昨年度のトカラ列島南部の地磁気データと統合することで、トカラ列島全域の全磁力異常図を作成した。中之島、口之島、臥蛇島、小臥蛇島のトカラ列島の島々及びその西側のサンゴ曾根、東新曾根、西新曾根といった地形的高まりでは複数のダイポール型磁気異常が見られ、地形との関連から火山活動が推測される。より西側の南藁曾根・権曾根・平島曾根と南北方向に連続する地形的高まりは、火山活動を伴う沖縄トラフの東縁部をなす地形的境界であると考えられる。南藁曾根の正の磁気異常は表層の火山活動による磁化によるものか、陸上に現れていないより深部の磁化物体に起因するものと推測される。トラフ底ではダイポール型磁気異常の一部と考えられる正の磁気異常が観測された。海底地形を伴わないことから埋没した磁性体に起因すると考えられる。

謝辞： 今回の調査では、望星丸・神鷹丸の船長をはじめ、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。神鷹丸での三成分磁気観測の際は、東京大学大気海洋研究所の沖野郷子教授と田村千織技官に大変お世話になりました。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), 1–21.

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.

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.

高下裕章・佐藤太一・横山由香・佐藤悠介・三澤文慶 (2022) 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. *地質調査研究報告*, **73**, 211–217.

高下裕章・佐藤太一・鈴木克明 (2023) GB21-2, 3 トカラ列島周辺海域における海底地形観測の概要, *地質調査研究報告*, **74**, 193–202.

日本海洋データセンター (2015) 日本海洋データセンターの現状. *海洋情報部研究報告*, **52**, 123–131.

産業技術総合研究所地質調査総合センター (2013) 日本重力データベース DVD版. 数値地質図 P-2.

Wessel, P. (2010) Tools for analyzing intersecting tracks: The x2sys package. *Computers and Geosciences*, **36**(3), 348–354.

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.

横瀬久芳・佐藤 創・藤本悠太・Mirabueno, Maira Hanna T.・小林哲夫・秋元和實・吉村 浩・森井康宏・山脇信博・石井輝秋・本座栄一 (2010) トカラ列島における中期更新世の酸性海底火山活動. *地学雑誌*, **119**, 46–68.

(受 付 : 2022 年 10 月 31 日 ; 受 理 : 2023 年 9 月 11 日)

