

GB22-1 及び 2 航海（トカラ列島周辺海域）で採取された底生有孔虫群集の概要

長谷川 四郎^{1,*}

HASEGAWA Shiro (2024) Preliminary results on distribution of benthic foraminifera collected during the GB22-1 and 2 cruises around Tokara Islands. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 75 (5/6), p. 249–263, 4 figs and 2 tables.

Abstract: Basic statistics on the occurrence of benthic foraminifera are investigated using sediment samples collected from east and west of the Tokara Islands (from around the Tane-Yaku Spur and the Amami Spur, and from the eastern margin of the Okinawa Trough, respectively) during cruises GB22-1 and -2. Using 47 samples collected from depths of 257 to 1,438 m, I calculated foraminiferal indices such as the benthic and planktic foraminiferal numbers (FN_b and FN_p, respectively), the proportions of three types of test composition of benthic foraminifera, and the proportion of planktic foraminifera relative to the total foraminifera (PF%). These indices were almost constant with water depth throughout the Nansei Islands. Four depth zones, corresponding to previously reported Zones II to V around the Nansei Islands, are recognized based on the depth distribution of characteristic species.

The proportion of agglutinated forms of benthic foraminifera is reduced at depths of ≥ 700 m in the area “East of Spurs”, suggesting that allochthonous calcareous species of shallow-water origin are widely distributed in the sediments. In addition, a reduction in the planktic/total foraminifera (PF%) value is observed at sites dominated by abiotic clastic sediment or allochthonous benthic foraminiferal remains. Both anomalies are likely to have formed under the influence of the strong Kuroshio Current and the topography surrounding each site.

Keywords: benthic foraminifera, Tokara Islands, East China Sea, Northwest Pacific, Recent

要 旨

GB22-1 及び 2 航海によるトカラ列島を東西に挟む海域（種子・屋久海脚-奄美海脚と沖縄トラフ東縁部）の水深 257 m–1,438 m の計 47 地点を選定し、有孔虫群集の産状を表すための基礎統計量として、底生・浮遊性有孔虫数、底生有孔虫の殻質構成比、浮遊性有孔虫率などの有孔虫指標を算出した。それらの水深に伴う変化と、主要種の深度分布にもとづく II 帯から V 帯の群集区分については、これまでに南西諸島周辺で報告されたものに対応する。

膠着質殻種の産出率の異常な低下が海脚東方海域で確認され、浅海起源の異地性遺骸を含む堆積物が広く分布することが示唆される。また、浮遊性有孔虫率の深度分布における異常は、底生・浮遊性の両有孔虫数の特徴から、非生物性碎屑物の増加による底生・浮遊性有孔虫数の相対的減少と、異地性底生有孔虫遺骸の付加による底生有孔虫数の増加が、各地点の周辺の地形に応じた黒潮の強い流れの影響を受けることで生じる。

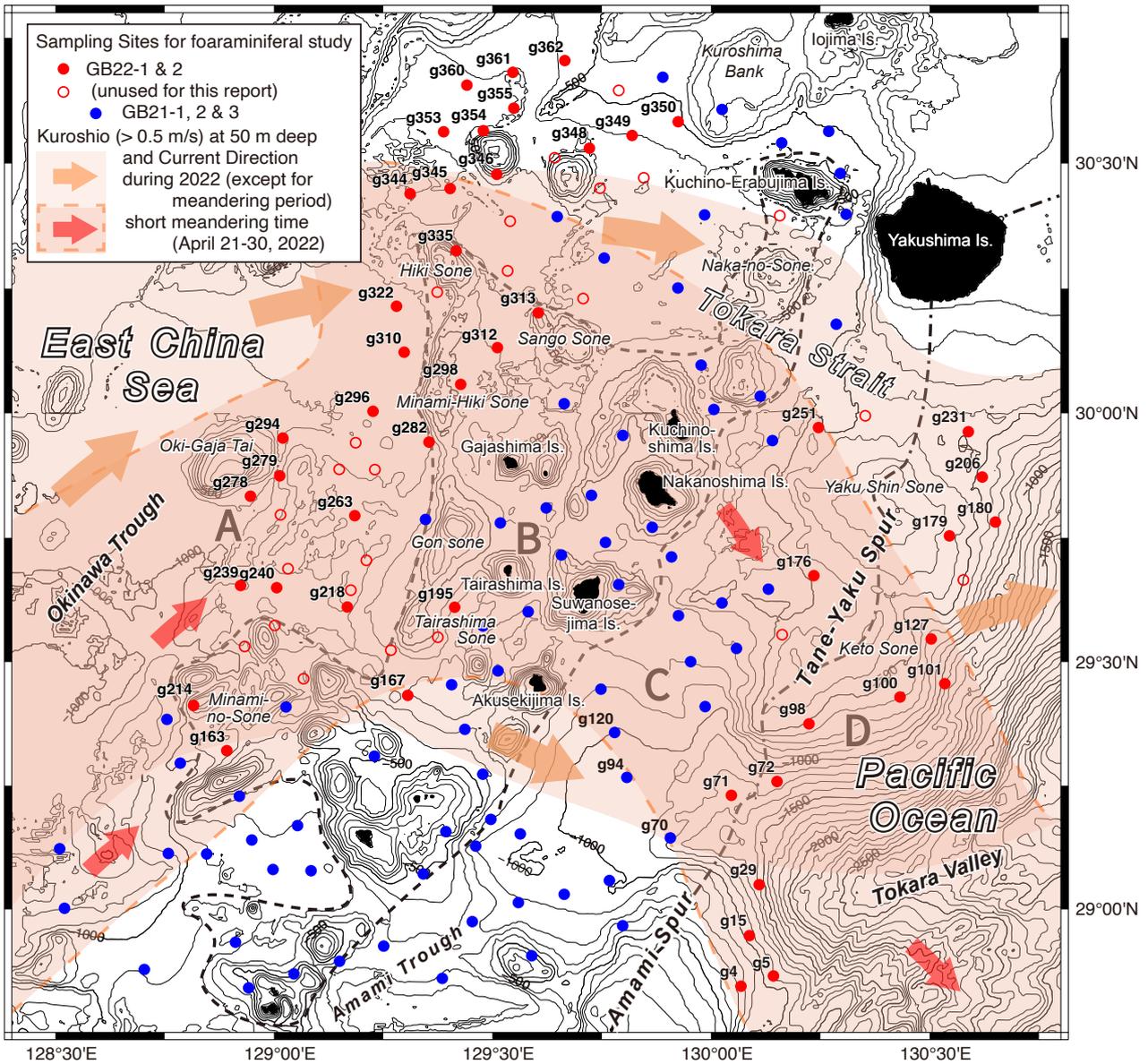
1. はじめに

産業技術総合研究所地質情報研究部門による令和 4 年度の 2 度の望星丸調査（GB22-1 及び 2）により、九州南西方のトカラ（吐噶喇）列島周辺を挟んだ東西の二つの海域にて採取された表層堆積物について、底生有孔虫群集の予察的調査を行った。本調査は令和 3 年度のトカラ列島周辺海域調査（GB21-1, 2 及び 3；井上ほか, 2022；2023）に引き続いて施されたもので、調査海域は GB22-1 航海がトカラ列島東方の種子・屋久海脚と奄美海脚の周辺海域、GB22-2 航海はトカラ列島西部から沖縄トラフに至る海域で実施された（第 1 図）。調査海域の海底地形は、前年度のトカラ列島周辺海域、とくに長谷川（2023）が“トカラ火山群島海域”と仮称した起伏の著しい海域に比べて地形の変化が緩やかな地点が多く、局所的な環境要因の影響が小さい可能性があることから、海洋構造と有孔虫群集の対応関係を理解するのに相応しい海域と期待される。

東シナ海中部の沖縄島西方において、黒潮流軸部の強

¹ 東北大学学術資源研究公開センター総合学術博物館 (Tohoku University Museum, 6-3, Aramaki Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8578, Japan)

* Corresponding author: HASEGAWA, S. Email: shiro@museum.tohoku.ac.jp



第1図 GB22-1及び2航海の底生有孔虫試料採取地点。海域区分 A：沖縄トラフ東縁部，B：トカラ火山群島海域，C：トカラ東方海域，D：海脚東方海域。橙色の範囲・橙色の矢印は黒潮軸部（流速0.5 m/s以上）の2022年の最大変動範囲と流向。図下部の淡色部と赤色矢印は蛇行期（2022年4月21-30日。）の流域と流向（気象庁ホームページ「各種データ・資料/海流に関する診断表，データ/月旬平均海流」（気象庁，2023）を元に，1年分を合成して作成）。海丘等の名称は海底地形の名称に関する検討会（2022）および横瀬ら（2010）による。海底地形は岸本（2000）に基づく。

Fig. 1 Sampling locations for benthic foraminifera research collected during GB22-1 and 2 cruises. Division: A: Eastern margin of Okinawa Trough, B: Tokara Volcanic Islands Area, C: East of Tokara Islands, D: East of Spurs. Orange colored area and arrows: Maximum fluctuation range of fast current (more than 0.5 m/s) of Kuroshio during 2022. Lighter colored area and a red arrow at lower part of the map indicate those of meandering period (April 21-30, 2022). Undersea topographic names are based on Japanese Committee on Undersea Feature Names (2022). Topographic map is based on Kishimoto (2000).

い流れが水深500 m付近にまで及ぶことが、直接測流により確認されている（水野ほか，1991）。また、太平洋に流れ出した黒潮についても、屋久島南東における直接測流により、強い流れは上層600 mに限られるとされている（竹松，1984）。本調査海域の南西部に隣接するトラフ

縁辺域のGB21-3による水深1,000 mを越える調査地点では、表層流の影響がまったく認められていない（長谷川，2023）。一方、トカラ列島付近では多くの地点でカレントリップルが確認されて、起伏に富む海域を抜けた黒潮の強い流れの影響が水深600 mの海底にまで及んでいる

ことを示されており(鈴木ほか, 2023), 有孔虫群集でもその影響が確認されている(長谷川, 2023).

GB22-2 調査海域の西方における沖縄トラフ底はほぼ平坦で, その水深は平島・権曾根の西方で約1,000 m, それより北方に向かうにつれて水深が徐々に浅くなり, 南九州の薩摩半島西方では約700 mとなる. GB22-2 航海が実施された調査海域内の沖縄トラフ東縁部においても, “トカラ火山群島海域”(以下では, 単に“火山群島海域”と略す)の西縁をなす藁曾根から平島曾根に至る海丘列の西側斜面下底の水深が約600–800 mであり, 藁曾根北方の西方に緩やかに傾く平坦面でも, 点在する海山を除いて, 水深は概ね600–800 mである. したがって, GB22-2 調査海域を黒潮の流軸部が通過するものの, 海底の大半にはその流れの影響が及ぶことはないと推定される. そのため, 黒潮の下位に分布する東シナ海北部の中・深層水に関わる有孔虫群集についてデータが得られると期待される. その一方で, 同海域内に点在する海丘等の高まりの周辺部では表層流の下底付近に乱れが生じて, 底質や群集組成に局所的な変化をもたらすことが考えられる.

東シナ海を北上しトカラ列島を通過した黒潮は, GB22-1 調査海域内の屋久島の南方を経て太平洋に流れ出る. 種子・屋久海脚は屋久島から南南西方に約100 km張り出す高まりで, その稜線のほぼ中央に位置する屋久新曾根は水深が138 mであり, その南側には水深300 m以浅のケトウ曾根を始めとするピークが連なる. 屋久新曾根と北側の屋久島との間の鞍部は最大水深が約500 m, 南側のケトウ曾根との間の鞍部は水深約400 mである. したがって, 海脚の高まりは黒潮の流れに対する障壁となり得ることから, 黒潮の底部が稜線を乗り越えることに伴い, その強い流れが海脚周辺の底質や有孔虫群集に大きな影響を及ぼすことが想定される. 黒潮の流れによる同様の効果については, 起伏の著しい火山群島海域においても検討された(長谷川, 2023). しかし, その海域における多数の火山性海丘の集合による著しい起伏とは違って, 種子・屋久海脚は単一の高まりをなしており, 障壁として果たす効果に違いがある可能性もあることから, 海底地形の規模の違いが海底堆積物に及ぼす影響を理解するよい事例となるだろう.

さらに, 種子・屋久海脚の南方は, トカラギャップ(松本ほか, 1996)を隔てて, 奄美大島から北北東へ60 km張り出す奄美海脚の高まりが続く. 両海脚の東側斜面はトカラ海底谷の2,500 mを超える深みに続いており, 西フィリピン海盆の中・深層環境における有孔虫群集の特徴を理解するうえで, 貴重なデータが提供されると期待できる.

産総研地質情報研究部門により南西諸島周辺海域で実施された調査航海に伴い, これまでに有孔虫群集の分布の概要として, 筆者らは群集の基礎的統計量で表される指標と主要構成種の水深に伴う変化の概要を速報として

報告してきた(たとえば, 大井ほか, 2009; 長谷川・内村, 2017; 長谷川, 2020; 2023など). その際の対象は, 一貫して表層堆積物中の生体と遺骸を合わせた全体群集である. 有孔虫の寿命は分類群や生息環境によって異なり, 2週間から1年以上(Boltovskoy and Wright, 1976), あるいは数ヶ月から数年(藤田, 2013)とされる. それに対して遺骸群集は, 長寿命種の年齢を遙かに上回る長期間の集積体であり, その間に生起したであろう環境変化に応じて, 遷移を繰り返した様々な群集を構成した多くの種の遺骸が累積したものである. さらに加えて, それらは海底面下での生物擾乱による攪拌, 底層の流れにより搬出, あるいは海流や重力流などによる異地性遺骸の加入などの影響を被っている.

南西諸島周辺海域の調査航海で得られた有孔虫群集においては, 生体の産出量が少なく, 異地性個体が多い傾向にあることが大井ほか(2009)により報告されており, それ以後の報告では, 保存状態の比較的良い化石や異地性個体と現世の遺骸を区別することなしに, 一括して統計量を算出している. そのため, これにより得られる各試料採取地点の有孔虫群集に関する情報には, 混入した堆積物粒子の起源や粒子の運搬機構に関わる情報が含まれることになる. 長谷川(2023)は, 異地性個体の多い火山群島海域において, 遺骸を構成する殻の粒径や分級の程度をもとに, 異地性個体の起源や運搬過程について考察している. その反面, とくに異地性個体の混入が著しい地点では, 現地性種群に関する情報量が少なく, 生態に関する理解の妨げになる場合もある. そこで, 群集の中から異地性個体を識別し, それを除いて解析することが重要である.

異地性個体の殻は, 現生種遺骸に比べて破損や溶解による変質を受ける機会が多いことから, 殻の保存状態による判別が期待される. しかし, 変質の程度には大きな変異があり, 一方で, 現生種の現地性遺骸であっても, 殻の保存状態はその生息環境により大きな違いがある. そのため, 現地性遺骸と保存状態が良い異地性個体や再堆積した化石とを区別することは必ずしも容易ではない.

そこで, ここでは上述の有孔虫群集に関するさまざまな課題に取り組むための予備調査として, これまでの報告に準じて有孔虫群集の各指標を求めたうえで, 火山群島海域における成果を参照しつつ, 局所的な環境条件に影響される群集組成の変異に関する事例を検討する. 加えて, 調査海域における主要構成種の深度分布を周辺海域と比較検討し, さらに, 各指標から推定される異地性個体の認定について考察する.

2. 調査試料

2.1 試料の採取地点

有孔虫分析に用いる試料は, 種子・屋久海脚と奄美海脚周辺におけるGB22-1航海の水深362 m (St. g179) から

第1表 トカラ列島周辺海域 (GB22-1及び2航海)における有孔虫群集の産状。(底生有孔虫生体個体: + 産出, - 未発見)

Table 1 General outline of foraminiferal assemblages in the seas surrounding Tokara Islands (GB22-1 and 2 cruises) . (Living benthic foraminifera: + present, - absent)

Area	Site	Latitude (N)	Longitude (E)	Water Depth (m)	Cruise GB	Dry Weight (estimated) (g)	Mud Content (%)	Foraminifer No. (/g)		Composition of Benthic Foraminifer Test Wall (%)			Planktic Foraminifera (%)	Pteropoda / Planktic Foram. Ratio	Living Benthic Foraminifera	
								Benthic	Planktic	Agglutinated	Porcellaneous	Hyaline				
East China Sea	A: Eastern Margin of Okinawa Trough	g350	30°34.99'	129°55.02'	549	22-2	34.3	16.6	809	8,058	7.4	4.6	88.0	90.9	0.00	+
		g362	30°42.31'	129°39.07'	596	22-2	25.8	32.6	962	11,857	10.1	3.7	86.2	92.5	0.01	+
		g349	30°33.23'	129°48.95'	611	22-2	31.4	29.0	620	11,781	3.5	0.9	95.6	95.0	0.00	+
		g348	30°31.75'	129°43.12'	621	22-2	44.1	9.2	276	1,183	1.7	1.3	97.1	81.1	0.00	+
		g346	30°28.54'	129°30.38'	659	22-2	71.2	16.2	3,450	12,190	2.5	2.1	95.4	77.9	0.00	+
		g361	30°40.09'	129°32.66'	713	22-2	19.7	82.1	101	2,181	17.6	3.4	79.0	95.6	0.00	+
		g360	30°39.38'	129°26.31'	723	22-2	23.5	57.9	247	11,439	7.4	1.0	91.7	97.9	0.00	+
		g355	30°36.59'	129°32.74'	732	22-2	22.0	26.1	343	8,158	7.6	1.3	91.1	96.0	0.01	+
		g263	29°47.41'	129°10.88'	769	22-2	36.2	25.4	966	28,290	9.5	0.9	89.6	96.7	0.00	—
		g345	30°26.91'	129°24.04'	778	22-2	33.0	27.8	532	33,500	5.7	1.4	92.9	98.4	0.00	+
		g354	30°33.91'	129°28.53'	781	22-2	23.0	71.8	325	8,542	13.3	1.2	85.5	96.3	0.00	+
		g353	30°33.75'	129°23.06'	796	22-2	29.1	57.9	169	20,880	23.3	0.5	76.2	99.2	0.00	+
		g279	29°52.25'	129°00.06'	808	22-2	56.2	23.0	649	34,137	12.6	1.1	86.3	98.1	0.00	+
		g344	30°26.25'	129°18.51'	812	22-2	36.4	18.0	478	8,659	2.5	0.5	97.1	94.8	0.00	—
		g218	29°36.47'	129°09.88'	820	22-2	77.0	15.0	213	6,061	13.6	1.9	84.5	96.6	0.00	+
	g282	29°56.27'	129°21.13'	850	22-2	24.8	85.9	205	5,289	42.3	1.4	56.3	96.3	0.00	+	
	g240	29°38.83'	129°00.16'	869	22-2	21.9	40.0	420	24,435	29.1	0.5	70.5	98.3	0.00	—	
	g322	30°12.75'	129°16.06'	881	22-2	22.9	76.9	163	5,083	33.2	0.5	66.4	96.9	0.00	+	
	g310	30°07.25'	129°17.72'	888	22-2	26.6	92.6	62	1,934	36.6	3.9	59.5	96.9	0.00	+	
	g296	30°00.01'	128°13.37'	891	22-2	32.2	73.4	182	4,880	56.2	0.0	43.8	96.4	0.00	+	
	g239	29°39.02'	128°55.16'	900	22-2	28.1	45.5	588	27,368	24.3	0.5	75.2	97.9	0.00	+	
	g278	29°49.83'	128°56.52'	901	22-2	26.8	81.0	394	11,130	31.6	1.5	67.0	96.6	0.00	+	
	g294	29°56.86'	129°00.97'	916	22-2	25.2	16.8	1,567	17,553	5.6	3.3	91.1	91.8	0.01	+	
	B: Tokara Volcanic Islands	g335	30°19.47'	129°24.91'	257	22-2	46.0	8.1	1,145	1,151	5.8	20.4	73.8	50.1	0.02	—
		g313	30°12.02'	129°36.11'	495	22-2	26.8	11.0	1,968	10,599	3.1	23.0	73.8	84.3	0.02	—
		g298	30°03.35'	129°25.41'	561	22-2	31.9	14.5	1,685	17,075	2.4	7.1	90.5	91.0	0.02	+
		g312	30°07.84'	129°30.49'	615	22-2	36.5	11.8	1,283	16,590	3.9	4.9	91.3	92.8	0.00	+
		g214	29°24.77'	128°48.94'	616	22-2	38.3	14.7	249	3,710	5.9	11.2	82.9	93.7	0.01	+
		g195	29°36.45'	129°24.06'	673	22-2	66.4	7.8	775	3,889	1.5	6.0	92.5	83.4	0.11	—
g163		29°19.22'	128°53.29'	771	22-2	38.3	29.7	542	13,313	13.6	2.3	84.0	96.1	0.00	+	
g167	29°25.83'	129°18.12'	797	22-2	44.8	10.8	271	1,525	0.8	4.2	94.9	84.9	0.01	—		
C: East of Tokara	g176	29°40.45'	130°14.23'	469	22-1	45.6	6.9	598	5,506	2.8	13.1	84.0	90.2	0.25	+	
	g251	29°57.94'	130°15.01'	469	22-1	39.3	5.6	671	3,946	2.4	17.5	80.1	85.5	0.14	+	
	g71	29°13.87'	130°2.73'	1277	22-1	37.5	68.0	182	2,482	67.8	0.0	32.2	93.2	0.00	+	
Pacific Ocean	D: East of Spurs	g179	29°45.14'	130°32.81'	362	22-1	33.1	8.2	1,622	9,394	4.3	13.8	81.9	85.3	0.35	+
		g231	29°57.07'	130°35.78'	476	22-1	36.3	6.8	163	439	8.6	18.4	73.0	72.9	0.14	—
		g98	29°22.57'	130°13.31'	532	22-1	42.8	13.2	307	3,160	4.4	9.8	85.9	91.2	0.03	+
		g206	29°52.36'	130°37.63'	590	22-1	13.8	25.7	3,621	11,752	4.5	7.3	88.2	76.4	0.05	—
		g100	29°25.76'	130°25.67'	606	22-1	30.4	27.2	910	14,220	9.3	2.8	88.0	94.0	0.01	+
		g180	29°47.15'	130°39.12'	682	22-1	36.9	12.6	1,183	7,668	6.1	5.6	88.3	86.6	0.18	+
		g4	28°50.07'	130°03.91'	737	22-1	50.4	9.5	1,169	4,004	1.7	9.6	88.7	77.4	0.11	—
		g127	29°32.96'	130°30.46'	740	22-1	37.1	7.6	398	2,218	5.0	17.8	77.2	84.8	0.08	—
		g5	28°51.84'	130°08.06'	1044	22-1	39.9	24.9	196	9,796	8.4	1.4	90.2	98.0	0.00	—
		g15	28°56.84'	130°05.19'	1070	22-1	30.8	11.9	857	49,621	3.4	0.4	96.1	98.3	0.00	—
		g101	29°27.41'	130°32.22'	1105	22-1	31.4	54.0	671	6,385	15.5	0.0	84.5	90.5	0.02	—
g72	29°15.48'	130°08.98'	1186	22-1	41.6	22.5	104	9,025	21.2	3.4	75.4	98.9	0.00	—		
g29	29°03.03'	130°06.57'	1438	22-1	46.8	26.2	190	4,396	18.0	1.0	81.0	95.9	0.00	+		

1,438 m (St. g29)に至る19地点, およびトカラ列島西部域から沖繩トラフ東縁部におけるGB22-2航海の水深257 m (St. g335)から916 m (St. g294)に至る53地点, 合計72地点で採取された。これらの全地点の試料について, 底生有孔虫の生体識別のためのローズベンガル染色と, 乾

燥重量を算出するための所定の手順で処理したのち, 海域と水深, 含泥率, ならびに, 処理後の試料における構成粒子の粒度・種類などの特性の違いを考慮して, 計47地点を選定して, 有孔虫類の産状を予察的に分析した(第1表)。

本調査海域は太平洋と東シナ海に跨がるが、一般に、両海域の境界は種子島・屋久島から奄美群島・沖縄諸島に至る島列を境界として区分されることから、本稿では種子・屋久海脚と奄美海脚の稜線を境界とする。それにより、GB22-1の試料採取地点は両海脚の東側斜面が太平洋、西側斜面は東シナ海の海域に区分される。ここでは、東側斜面の海域を“海脚東方海域”と呼称することにする。また、西側斜面は、先に長谷川(2023)が火山群島海域を取り巻く東シナ海を便宜的に細分した際の“東側海域”とその南側に続く“南側海域”に相当する。ここでは、両“海域”を併せて“トカラ東方海域”と呼ぶ。一方、GB22-2航海の調査範囲はトカラ火山群島海域の西部から沖縄トラフ東縁部にかけての海域であり、両海域の境界については長谷川(2023)による区分を踏襲する。以下では、海域ごとに試料採取地点の概要を示す。なお、第1図には有孔虫用全試料の採泥位置を示し、本報告に用いた地点にはその地点名を付す。

海脚東方海域：種子・屋久海脚東斜面の水深362 m (St. g179)–1,186 m (St. g72)の9地点、および奄美海脚北東斜面の水深737 m (St. g4)–1,438 m (St. g29)の4地点。

トカラ東方海域：種子・屋久海脚東斜面の水深469 mの2地点、St. g176とSt. g251、および1,277 mのSt. g71の3地点。

火山群島海域：臥蛇島北西における水深257 m (St. g335)–615 m (St. g312)の4地点、および悪石島西方における水深616 m (St. g214)–797 m (St. g167)の4地点。海丘に隣接する地点のほか、海丘から若干離れた緩傾斜の地点が含まれる。

沖縄トラフ東縁部：本調査海域内では、地形的特徴から、おおよそ南・中・北部に細分される。南部の権曾根と平島曾根の西方における、水深769 m (St. g263)–916 m (St. g294)の7地点。水深約600 mから約1,000 mのトラフ底に向かって全体としては南西方向に傾斜する。また、北西端には頂部水深が77 mの沖臥蛇堆が水深約900 mのトラフ底からそびえ立つ。中部の南墓曾根から墓曾根の西方の、水深850 m (St. g282)–891 m (St. g296)の4地点。水深約800–900 mのトラフ底で、海底の起伏は非常に小さい。北部は墓曾根の北方における、水深549 m (St. g350)–812 m (St. g344)の12地点。黒島と黒島堆周辺の水深約500 mから南西方の水深800 mに向けて緩やかに傾斜する平坦面に加え、水深約700 mから聳える2座の海丘（西新曾根と東新曾根）の周辺を含む。

2.2 試料の室内処理

GB22-1および2の両航海で得られた有孔虫分析用試料は、木下式グラブ採泥器によって採取された表層堆積物の表層2 cmの部分で、当初の目標として約30 ml、実際には20–60 mlが分取された。採取試料は直ちに冷蔵保存

され、寄港先から研究室に輸送された。

湿潤状態にある有孔虫用試料の室内処理において、試料の乾燥重量を求めるとともに、併せて有孔虫生体を識別するための染色処理に至る工程を通じて、試料の乾燥を忌避することを目的として、試料中の泥分を分離・回収し、その一定分量の重量を測定して、総重量の推計値を算出した。その処理の手順は長谷川(2023)に記述があることから、以下には、項目のみを列挙する。

1) 泥分の分離、2) 泥分の測定、3) 生体の染色、4) 余分な染料の除去、5) 乾燥重量の算出、6) 含泥率測定、7) 有孔虫個体の抽出、8) 有孔虫個体数の計数。

最後の項目8)では、項目7)で抽出された規定量の有孔虫群について、底生有孔虫の属種を暫定的に同定するとともに、群集の概要を把握するため、底生・浮遊性有孔虫数、底生有孔虫の殻質構成比、浮遊性有孔虫率、翼足類–浮遊性有孔虫比などの基礎統計量の算出を目的として実施する。

南西諸島周辺海域の有孔虫群集には、前述のように、異地性個体が多い傾向にあることから、ここでも長谷川(2023)など従来の報告と同様に、保存状態の比較的良好な化石や異地性個体と現世の遺骸を区別することなしに一括して統計量を算出しており、現世の遺骸の一部として扱う。

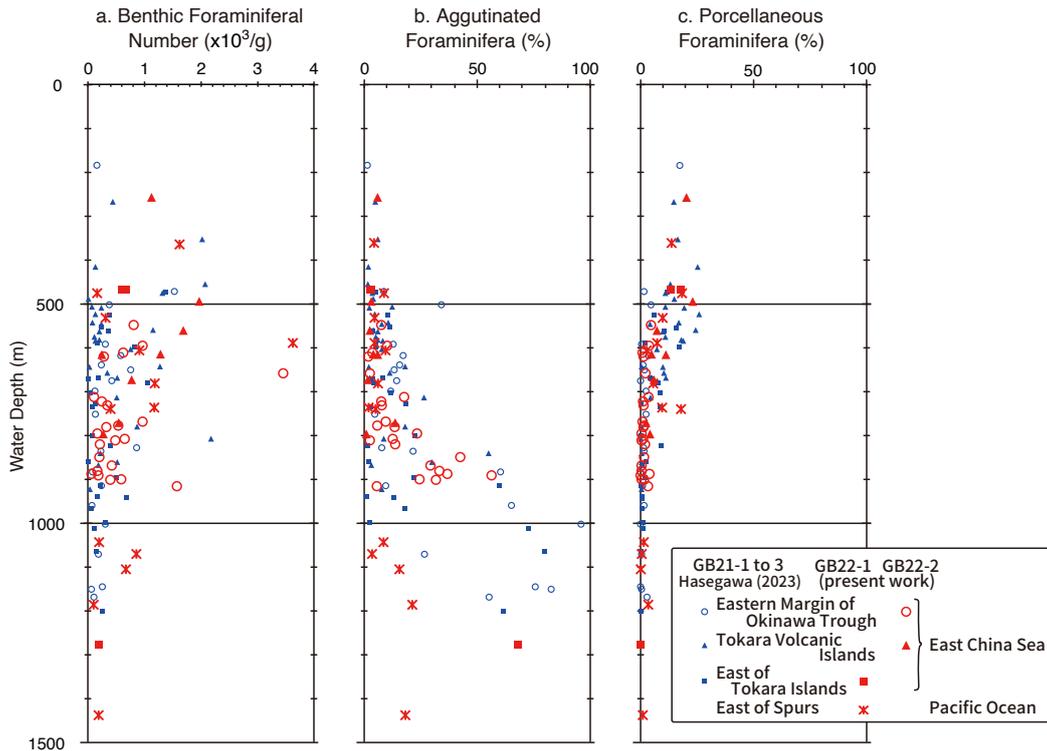
3. 有孔虫群集の基礎統計量

有孔虫群集に関して算出した基礎統計量を第1表に、それぞれの水深に伴う変化を第2図と第3図にまとめて示す。なお、本報告の調査が、令和3年度のトカラ列島を中心とする調査海域を挟む東西の海域で行われたことから、第2図と第3図には、赤色記号で示す本調査のデータに加えて、GB21-1–3航海による長谷川(2023)のデータを青色記号で示す。

3.1 有孔虫数 (Foraminiferal Number)

有孔虫数は単位乾燥重量 (1 g) あたりの、底生種と浮遊性種の有孔虫産出個体数である。底生種の有孔虫数 (底生有孔虫数 benthic foraminiferal number ; FN_b) は62–3,621 個体/gの値を示す。全体としては、水深約450–500 m付近の約2,000 個体/gをピークに、値は水深を増すにつれて減少し、1,000 m以深で300 個体/g以下となる (第2図 a)。しかし、海脚東方海域のSt. g206 (水深590 m) と沖縄トラフ東縁のSt. g346 (659 m) では、3,000 個体/gを超す非常に大きな値を示した。また、海脚東方海域のSt. g15 (水深1,070 m) で857 個体/g、St. g101 (1,105 m) で671 個体/g、沖縄トラフ東縁のSt. g294 (916 m) で1,567 個体/g、など、水深の割に大きい値を示す地点が確認された。

浮遊性種の有孔虫数 (浮遊性有孔虫数 planktic foraminiferal number ; FN_p) は439–49,621 個体/gのパラッキがあるが、全体としては水深約500–1,000 mの範囲で



第2図 トカラ列島周辺海域 (GB22-1及び2航海)における底生有孔虫の産状。GB21-1, 2及び3航海による結果 (長谷川, 2023) を合わせて示す。 a: 底生有孔虫数, b: 磁器質殻種の産出頻度, c: 膠着質有孔虫の産出頻度。

Fig. 2 General outline of benthic foraminifera in the seas surrounding Tokara Islands for GB22-1 and 2 cruises, with results of GB21-1, 2 and 3 cruises (Hasegawa, 2023). a: benthic foraminiferal number; b and c: proportion of porcellaneous (b) and agglutinated (c) taxa in benthic foraminifera.

約10,000個体/g以上の高い値を示す地点が多い(第3図b)。沖縄トラフ東縁海域の権曾根西方と西新曾根西方では、St. g279 (水深806 m)の34,137個体/gを頂点に、20,000個体/gを上回る大きな値を示す地点がある一方で、近隣の地点で9,000個体/gに満たない地点も認められる。また、奄美海脚北東斜面のSt. g15 (水深1,070 m)は、本調査における最大値の49,621個体/gを記録している。

3.2 底生有孔虫殻質構成比

現生底生有孔虫の殻は主に膠着質・磁器質石灰質・ガラス状石灰質によって構成される。産総研の南西諸島周辺調査に伴う大井ほか(2009)以来の有孔虫予備調査では、海底環境の概要を表す指標の一つとして、底生有孔虫群集の殻質構成比が検討されてきた(長谷川, 2023)。

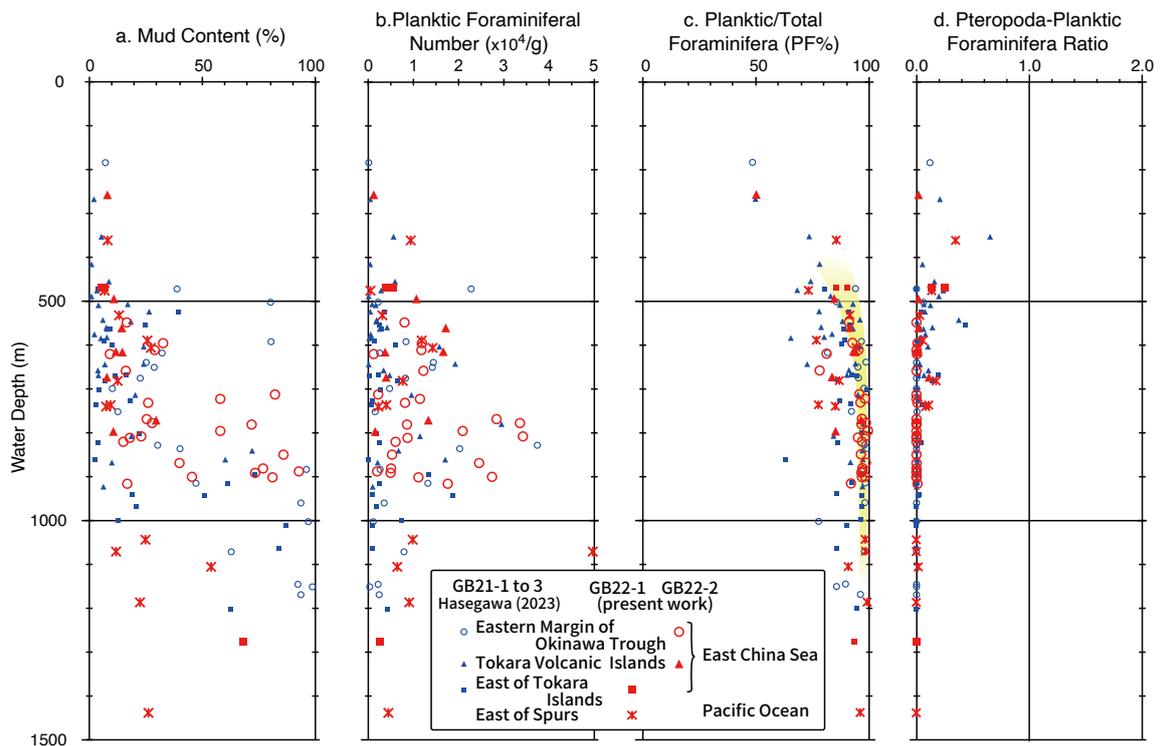
本調査海域において、膠着質殻種の割合は0.8–67.8%まで、地点による大きな差異が認められるが、水深700 m以浅では概ね10%未満の小さい値を示す。それ以深では、とくに沖縄トラフ東縁海域において水深を増すにつれて増加し、850 m以深ではおおむね30%以上となる(第2図b)。また、トカラ東方海域のSt. g71 (水深1,277 m)で

は、本調査における最大値の67.8%を記録している。その一方で、海脚東方海域の水深1,000 m以深では全般的に値が小さく、最大でもSt. g72 (水深1,186 m)の21.2%である。

磁器質石灰質殻種の割合は、水深約600 mを境に、それ以浅で概ね5%以上だが、以深では5%未満となる。とくに水深500 m付近では10%を越える。一方で、南ノ曾根(火山群島海域)の水深616 m (St. g214)で11.2%、種子・屋久海脚東斜面の水深737 m (St. g127)と奄美海脚北東斜面の水深740 m (St. g4)で、それぞれ17.8%と9.6%など、大きい値を示す地点も散見される(第2図c)。

3.3 浮遊性有孔虫率

全有孔虫個体に占める浮遊性有孔虫個体の割合は古水深指標の一つで(Murray, 1991など)、ここでは、長谷川(2023)と同様に浮遊性有孔虫率(PF%)と表記する。本調査の対象地点におけるPF%は、50.1–99.2%の値を示す(第3図c)。本調査の最浅地点である藁曾根北東斜面中部(火山群島海域)のSt. 335 (水深257 m)で50.1%だが、屋久新曾根東斜面(海脚東方海域)のSt. 179 (水深362 m)など水



第3図 トカラ列島周辺海域（GB22-1 及び 2 航海）における浮遊性有孔虫の産状（GB21-1, 2 及び 3 航海による結果（長谷川, 2023）を合わせて示す）。 a: 含泥率の水深に伴う変化, b: 浮遊性有孔虫数 (g), c: 浮遊性有孔虫率 (黄色: 標準的PF%深度分布), d: 翼足類の浮遊性有孔虫に対する比率。

Fig. 3 General outline of planktic foraminifera in the seas surrounding Tokara Islands for GB22-1 and 2 cruises, with results of GB21-1, 2 and 3 cruises (Hasegawa, 2023). a: mud content; b: planktic foraminiferal number; c: planktic/total foraminifera (PF%; yellow belt indicating standard PF% depth distribution), d: ratio of pteropods to planktic foraminifera.

深350 m以深で概ね80 %以上、600 m以深ではほぼ90 %以上となり、水深が増すにつれて増加する傾向が確認される。この深度変化は、後述のように、多くの海域で一般的に確認される傾向とほぼ同様であり(4.2.2項を参照)、第3図cでは黄色の帯で示す。

一方で、その一般的な深度変化に比べ、やや小さい値を示す別の系列が認められた。それは沖縄トラフ東縁部の水深621–916 mの3地点、火山群島海域の水深673–797 mの2地点、ならびに海脚東方海域の水深476–1,105 mの6地点の合計11地点よりなる(第2表)。それらのうち、最浅のSt. g231(水深476 m)は屋久島–屋久新曾根間の鞍部の東部にあたるやや平坦な地形上にあるが、その他の10地点は、いずれも斜面の中部またはその麓に位置する。

3.4 翼足類–浮遊性有孔虫比

アラレ石からなる翼足類(軟体動物)の殻が、方解石からなる有孔虫の殻よりも溶解し易いことから、有孔虫殻の溶解に関する目安になる可能性を意図し、南西諸島周辺海域の調査において、翼足類殻と浮遊性有孔虫殻の産出個体数比(Pteropods/planktic foraminifera ratio; Pt/PF

比)を検討してきた(長谷川・内村, 2017, 長谷川, 2023など)。

本調査海域におけるPt/PF比は、0.00–0.35の値を示す。屋久新曾根東斜面のSt. 179(水深362 m)では0.35の比較的大きい値を示し、水深約500 m以浅の地点では0.1を上回る地点が認められる。また、種子・屋久海脚と奄美海脚の東斜面と火山群島域の水深約650–750 mにおいても0.1を上回る地点が散見される。

3.5 底生有孔虫生体個体

ローズベンガル染色により識別される有孔虫の生体個体の産出は、本報告の調査地点を通じて非常に小さく、群集解析用に定量的に有孔虫殻を摘出した結果では、1地点あたり最大でも2%未満で、未検出の地点も多い。そこで、処理済み試料の半量(最大分割分)について生体個体を調べたところ、生体個体が確認された地点数は32地点、すなわち47調査地点の約68%である(第1表)。なお、表には、産出の有無(+または-)のみを示す。一方、生体個体が検出されない地点は海脚東方海域で8地点、火山群島海域で4地点、沖縄トラフ東縁部

で3地点の合計15地点に達した。この数は、これまでの産総研による西南諸島周辺調査に伴う有孔虫調査を通じてもっとも多く、とくに海脚東方海域では調査地点の約62%に及ぶ。

4. 考察

4.1 底生有孔虫群集の分布と異地性遺骸

GB22-1及び2航海により採取された試料の有孔虫について、今後の詳細な分布と分類学的検討、ならびにそれに基づく群集解析に先立ち、水深に伴う分布の概要と異地性個体の産状について検討する。

本調査海域における有孔虫群集について、組成の水深に伴う変化を概観したところ、長谷川(2023)により報告されたトカラ列島周辺における変化とほぼ共通していることが確認された。長谷川(2023)では、その変化を、本調査海域の南側に隣接する奄美大島周辺海域において識別されたI帯-V帯の5群集(長谷川・内村, 2017; 長谷川, 2018)と比較し、組成の遷移における共通性に基づきII帯-V帯に対応する4群集を確認しており、本調査においても同様の結果が得られた。

この帯区分に用いられた底生有孔虫主要種の一部は、本調査海域において、異地性個体としても確認されるが、その点もまた、長谷川(2023)で指摘されている。それらは、本調査海域の一部も含むトカラ火山群島海域の地形的高所の麓付近を中心に分布しており、その海域を特徴づける起伏に富む海底地形と、そのほぼ全域の表層を通過する黒潮流軸の強流に起因するものと考えられている。それとは対照的に、奄美大島周辺海域では、黒潮は大島の遙か西方の大陸斜面に沿って流れており、強流の直接的影響を受けることは少ない。また、水深の大きな落差は奄美大島・喜界島・徳之島などの周囲に限られており、異地性個体の分布も島嶼周辺と谷状地形の下底部に限られる(長谷川・内村, 2017; 長谷川2018)。

そこで、本稿では、異地性遺骸の影響が小さい奄美大島周辺海域で設定された帯区分(長谷川, 2018)を基準とし、有孔虫群集の中で異地性個体を識別することを念頭において、本調査海域における有孔虫殻の産状を検討する。

奄美大島周辺海域(以下、“奄美周辺”と記し、長谷川(2018)の引用を省略する)でのI帯は水深120 m以浅に分布しており、*Amphistegina*属を主とし、大型の*Calcarina*属、*Baculogypsinoides spinosus*、*Planorbulinella larvata*、*Heterostegina depressa*、*Sphaerogypsina globulus*や、小型の*Textularia*属、*Elphidium*属、*Cibicides*属、*Quinqueloculina*属などで構成される。本調査海域では、I帯に該当する水深の有孔虫分析試料が採取されていない。一方で、火山群島海域のSt. g335(水深257 m)には、後述するII帯の特徴種に加えて、I帯を特徴づける*Amphistegina*属、*Calcarina*属、*Miniacina miniacea*、*Sphaerogypsina globulus*

などの熱帯性大型有孔虫と*Elphidium crispum*などの浅海性種が含まれており、調査海域にも分布する可能性がある。

II帯の水深は、奄美周辺では160 m–350 mの範囲とされる。その群集には*Lenticulina*属、*Asanonella tubulifera*、*Paracassidulina neocarinata*、*Bolivina robusta*、*Glabrata*属、*Quinqueloculina*属、*Triloculina*属、*Triloculinella*属を含み、水深約200 m以深には*Rectobolivina bifrons*、*Heterolepa subhaidingerii*、*Globocassidulina subglobosa*、*Cibicoides*属が加わるとされる。本調査海域では上述のSt. g335(水深257 m)のみが該当し、ほぼ同様の種群が確認されるが、*Asanonella*属と*Glabrata*属は確認されない。また、生体と見なし得るローズベンガルによる染色個体は、これまでに確認されていない。

この試料にはサンゴ、コケムシ、二枚貝、腕足類などを含む生物碎屑性堆積物が含まれる。同地点は火山群島海域北西端暮曾根の北東斜面上部に位置するが、その頂部の水深が108 mであることから、それらの浅海性種群は、現在も頂部付近に分布する可能性がある。また、それらの殻には破損し、再結晶の兆候も見られることから、海底で長時間底層水に晒されたいわゆる“半化石”の可能性もあり、前述したI帯を特徴づける有孔虫種とともに、異地性遺骸として混入したと考えられる。

III帯は*Bulimina marginata*、*Reussella spinulosa*、*Sigmoilina sigmoidea*、*Siphovigerina* spp.などで構成され、奄美周辺の水深380 m–550 mに設定された。本調査海域では、沖縄トラフ東縁部のSt. g350(黒島堆西麓、水深549 m)、火山群島海域のSt. g313(サンゴ曾根北斜面中部、495 m)、トカラ東方海域のSt. g176とSt. g251(屋久新曾根南西斜面および同北西斜面下部、469 m)、および海脚東方海域のSt. g179、g231およびg98(種子・屋久海脚斜面中部、水深362–532 m)で確認される。また、*Cyclammina cancellata*、*Trochammina*属、*Burseolina pacifica*、*Cibicides refulgens*、*Lenticulina*属などで染色個体が確認された。そのほかに、膠着質殻の*Ammolagena clavata*、*Psammosphaera*属、石灰質殻の*Eponides repandus*、*Globocassidulina*属、*Ehrenbergina*属、*Heterolepa subhaidingerii*、*Hoeglundina elegans*なども比較的多く群集に含まれる。

なお、火山群島海域のSt. g313と海脚東方海域のSt. g176、g179、St. g231では、ウニ、コケムシ、二枚貝、サンゴ骨格などの生物碎屑物とともに、石灰質殻の*Amphistegina*属、*Carpenteria*属、*Miniacina miniacea*および膠着質殻の*Gaudryina*属、*Spirorutilus*属、*Textularia*属などの浅海性有孔虫が確認されており、いずれも浅海域から運ばれた異地性遺骸と推定される。加えて、奄美周辺でII帯を特徴づけるとされた*Bolivina robusta*、*Paracassidulina*属、*Cibicoides pachydermus*も各地点で産出するが、試料採取地点がいずれも斜面の中・下部に位

置ることから、少なくともそれらの一部は異地性の可能性がある。

また、上述した屋久新曾根周辺の3地点 (St. g176, St. g179, St. g231) の有孔虫殻には、白色で透明感のある新鮮な個体のほかに、殻が黄色に変色した個体も含まれる。同様の変色個体は奄美大島周辺海域からも報告されており、その水深もおもに500 m以浅で、本海域との共通性が高い(長谷川・内村, 2017; 長谷川, 2018)。

IV帯は *Anomalinoidea glabratus*, *Ehrenbergina histrix*, *Gyroidinoidea neosoldanii*, *Parrelloidea bradyi* などで構成され、奄美周辺の水深600–1,000 mに設定された。また、水深800 m以深では、*Melonis pompilioides*, *Oridorsalis umbonatus* などが加わるとされる。本調査海域では、沖縄トラフ東縁部の水深596 m (St. g362)–869 m (St. g240) の16地点、火山群島海域の水深561 m (St. g298)–797 m (St. g167) の計6地点、および海脚東方海域の水深590 m (St. g206)–740 m (St. g127) の5地点が該当する。生体と見なし得る染色個体としては、*Cribrostomoides* 属、*Lagenammina* 属、*Nodulina dentaliniformis*, *Rhabdammina cylindrica*, *Reophax* 属などの膠着質殻種、および *Burseolina pacifica*, *Dentalina emaciata*, *Discanomalina semipunctata*, *Gyroidinoidea neosoldanii*, *Hoeglundina elegans*, *Melonis pompilioides*, *Sphaeroidina bulloides* などが多くの地点で確認される。なお、火山群島海域では、5地点中2地点 (St. g312, g 214) においてのみ生体が確認された。

IV帯に相当する地点の有孔虫遺骸群集は、褐色–淡褐色に変色した個体で占められることが多い。その反面、変色の程度に差異があり、白色で透明感のある新鮮な個体とも漸移的であることから、やや長い期間海水と接触する間に酸化物質などが殻表面に沈着したことによることも考えられ、現地性遺骸の可能性もある。

一方、明らかに異地性と見なされる粒子が、海丘斜面の麓にあたる数地点で確認された。たとえば、沖縄トラフ東縁部のSt. g348 (東新曾根北麓, 水深621 m) の大型有孔虫 *Carpenteria* 属や *Cibicides* 属、*Elphidium* 属などの浅海生種群、火山群島海域のSt. g195 (平島曾根東麓, 673 m) ではサンゴ、コケムシなどを含む生砕性粗粒砂、海脚東方海域のSt. g4 (奄美海脚北麓, 737 m) 橙色に変色したサンゴ、巻貝、コケムシ、およびSt. g206 (屋久新曾根北東斜面, 590 m) のサンゴなどである。さらに、沖縄トラフ東縁部のSt. g279 (沖臥蛇堆東麓, 808 m) とSt. g346 (西新曾根南麓, 659 m) には海緑石が殻内部に詰まった有孔虫個体が確認された。

V帯はIV帯の深海部に分布する *M. pompilioides*, *O. umbonatus* に加えて、石灰質殻の *Pullenia bulloides* のほか、*Reophax* 属、*Rhabdammina* sp., *Marsipella* 属、*Rhizammina* sp. など多様な膠着質殻のタクサで構成され、奄美周辺では水深1,000 m以深に設定された。本調査海域では、沖縄トラフ東縁部の水深881 m (St. 322)–916 m (St. g294)

の6地点、トラフ東方海域の水深1,277 m (St. g71)、および海脚東方海域の1,044 m (St. g5)–1,438 m (St. g29) の5地点が該当する。すなわち、沖縄トラフ海域におけるV帯の上限水深は他の海域に比べて浅いように見える。しかし、GB21-1調査により、トカラ東部海域にあたるSt. g145 (915 m) とg91 (808 m) でV帯に該当する群集が確認されていることから(長谷川, 2023)、両海域における帯境界の差異は大きくないと見なされる。

染色個体としては、沖縄トラフ東縁部海域とトカラ東部海域の全地点 (g322, g310, g296, g239, g278, g294, およびg71) で *Lagenammina* 属、*Lituotuba lituiformis*, *Reophax* 属、*Rhabdammina abyssorum*, *Textularia* 属、*Bulimina aculeata*, *Globocassidulina subglobosa* など確認された。一方海脚東方海域では、St. g29においてのみ *Ceratobulimina jonesiana*, *Fissurina* 属、*Recurboides* 属、*Saccorhiza ramosa* などの産出が確認された。

V帯に相当する地点の有孔虫遺骸群集には、IV帯に見られるような褐色に汚染された個体は希で、白色で透明感のある個体が多い。しかし、沖縄トラフ東縁部のSt. 239 (沖臥蛇堆南方, 水深900 m) では、例外的に、褐色に汚染された有孔虫殻が確認される。また、明らかに異地性と見なされる *Amphistegina* 属、*Cibicides* 属、*Elphidium* 属などの浅海性のタクサが、V帯に相当する沖縄トラフ東縁部のSt. g294 (916 m)、および海脚東方海域の多くの地点 (St. g5, g.15, g72, g29) で確認された。

4.2 有孔虫群集の基礎統計量指標とその異常値

有孔虫群集の各基礎統計量は、値自体とそのバラツキの程度において、水深の増加に伴う変化が見られる。その変化パターンには、南西諸島周辺の海域全般にわたり共通性の高いことが、産総研の一連の調査に伴う分析により確認されてきた(大井ほか, 2009; 長谷川・内村, 2017; 長谷川, 2020など)。本報告の調査海域においても同様の傾向はあるものの、一方で、第3節で記したように、基本統計量の一般的な変化傾向から逸脱する異常な値を示す地点も確認されている。中でも、特定の海域の水深1,000 m以深で膠着質殻種の割合がとくに小さいこと(第2図b)、また、水深600 m以深で浮遊性有孔虫率(PF%)の小さい値を示す地点が各海域に散見されること(第3図c)などが注目される。以下では、有孔虫群集に確認されたそのような“特異な値”が生じる要因について、おもに周囲の地形的特徴と堆積物の特性との関係から検討する。

4.2.1 膠着質殻種

底生有孔虫群集の中で膠着質殻種が占める割合は、沿岸汽水域を除く通常の海域では全般的に小さく、水深約700 mより深海に向かうにつれて増加する傾向にある(長谷川, 2023)。沖縄トラフ東縁部の水深850 m (St. g282)

-901 m (St. g278) の7地点では24-56 %の中間的な値をとるが、その海域で最深の採取地点St. g294 (水深916 m) では例外的に小さい5.6 %を示した。その地点は沖臥蛇堆 (頂部水深77 m) の北東麓に位置し、底質は含泥率が16.8 %で、浮遊性有孔虫殻を多く含む細-中粒砂よりなり、前項 (4.1) で示した浅海性底生有孔虫種やサンゴ、コケムシなど、浅海性生物の遺骸が含まれる。それらは、黒潮流軸部の通過経路にあたる沖臥蛇堆周辺の位置からの推定として、常に強流に晒される堆頂部の浅海域を起源とする異地性遺骸と考えられる。一方の7地点のうち、とくにSt. g294に比較的近い5地点 (St. g282, g322, g310, g296, g278) は、ほぼ平坦な海底にあって (第1図)、底質は含泥率が73-93 %のシルトであり、おもに浮遊性有孔虫殻よりなる砂分を含む。これらの地点では浅海域起源の異地性粒子が確認されておらず、St. g294とは対照的に静穏な海底環境であり、黒潮に伴う強い流れの影響が水深800 m超の深海底にまでは及ばないことを示唆する。

本調査海域で膠着質殻種の割合が最大の67.8 %となるSt. g71 (水深1,277 m) は、トカラ東方海域に位置する (第2図b)。また、同地点に近接するGB21-2航海の3地点、St. g120, St. g94およびSt. g70 (水深1,012-1,201 m) でも、同様に60 %以上の高い値が報告されている (長谷川, 2023)。加えて、今回のSt. g71を含むトカラ東方海域の各地点では、生体 (染色個体) が確認され、石灰質殻の保存状態の良好な個体も多い一方で、異地性と見なし得る浅海性種の遺骸が含まれないことも再確認された。

一方、トカラ東方海域の東側に位置する海脚東方海域では、膠着質殻種の割合がSt. g72 (水深1,186 m) の21.2 %を最大として、V帯に相当する他の4地点でいずれも18.0-3.4 %と極めて小さい値を示す。種子・屋久海脚南端の斜面上にあるSt. g72では、多産する石灰質殻種のほとんどが破損または変色した個体で、少数ながら *Carpenteria* 属、*Cibicides lobatulus* などの浅海性種の遺骸も含まれる。同海脚東斜面のSt. g101では、浅海域からの明確な異地性遺骸は含まれないが、白濁した小型個体が非常に多い。また、St. g5, g15およびg29の3地点は奄美海脚末端の北東側斜面に位置しており、群集に灰褐色に変色した個体や白濁した個体が多く、*Amphistegina* 属や *Elphidium* 属 など浅海性タクサの遺骸を伴う。なお、以上のいずれの地点でも、染色個体は確認されていない。

St. g71とSt. g72は、ともにトカラギャップ内の、互いに隣接した試料採取地点であるが、海底地形に基づく海域区分では、St. g71が種子-屋久海脚の南西側にあって、トカラ東方海域に相当するのに対し、St. g72は同海脚の南東側で、海脚東方海域にあたる (第1図)。両地点の底生有孔虫群集は、予備調査において、ともにV帯を特徴づける膠着質殻種を含み、主要構成タクサに大きな差異は認められない。その反面、群集に含まれる石灰質殻種

の保存状態に上述のように明瞭な違いが認められる。このような底生有孔虫群集の産状を総合すると、底生有孔虫によるV帯の群集は、膠着質殻種が卓越するトカラ東方海域では、石灰質殻種の保存状態も良好で、おもに現地性個体で構成される。それに対し、膠着質殻種の割合が非常に小さい海脚東方海域では、群集に保存不良の石灰質殻種が多く含まれ、一部には明確な浅海性種の遺骸を伴うことから、本来なら深海底で優勢になる膠着質殻種が、多量に混入した異地性個体により希釈され、見かけ上、産出頻度が低下したものと考えられる。

なお、異地性個体の供給源としては、膠着質殻種の割合が10 %未満である水深700 m以浅の海底が考えられる。さらに、調査海域において確認される異地性遺骸の中で、明確に浅海性と認定し得る種の頻度はさほど大きくない。このことは、再堆積により混入した堆積物粒子の多くが、より深い水深、たとえば上部漸深海帯またはそれ以深 (約200 m以深) を起源とする可能性を示唆するといえる。

4.2.2 浮遊性有孔虫率と有孔虫数

浮遊性有孔虫率 (PF%) は浮遊性有孔虫の全有孔虫に対する相対比であり、堆積物中に含まれる浮遊性種と底生種の量比を表す。浮遊性種はおもに外洋域の表層部に生息するのに対し、底生種は沿岸汽水域から深海底にまで棲息しており、海洋では通常、陸棚中部から漸深海帯上部付近で種数・個体数ともに多くなる。そのため、PF% は一般的には沿岸域から沖合の深海域に向かって増加している (Brasier, 1980)。本調査海域を含むトカラ列島周辺海域においても、これと同様の“標準的”なPF%の深度分布が第3図cにおける赤色の点群の密集領域 (黄色の帯で示す) として確認された。それに加えて同図には、3.3項で示したように、“標準”より5-20 %程度小さい値の11地点が“標準”とほぼ並走するような深度変化を示す。一方、GB21-1-3航海によるトカラ列島付近の概査地点 (青色記号) では、標準よりもさらに大きく外れる異常なPF%値が確認されて、異常な群集組成が形成される環境要因について検討されている (長谷川, 2023)。そこで本稿では、PF%の“標準”からの逸脱がさほどではなく、しかも、多少まとまりのある深度変化を示す上述の11地点について、堆積環境との関連性などを検討する。

浮遊性有孔虫率は、一定量の堆積物中における浮遊性種と底生種それぞれの個体数をもとに算出される。そこで、本調査で概査を行った各地点の底生および浮遊性有孔虫数 ($FN_b \cdot FN_p$) を両対数軸で示すと、PF%の等値線は並行線で表される (第4図)。上述した11地点 (番号①-⑪で示す) はいずれも92 %未満の領域 (図の右下半部) にプロットされるが、それらの分布範囲には、右上 (有孔虫数 $FN_b \cdot FN_p$ が共に大) から左下 (共に小) まで幅がある。それらを、仮に第1-3群の3群に区分し、各々の特性を検討する (第2表)。

第2表 トカラ列島周辺海域 (GB22-1 及び2航海) における PF%の異常な減少を示す地点 (第1表より抜粋).

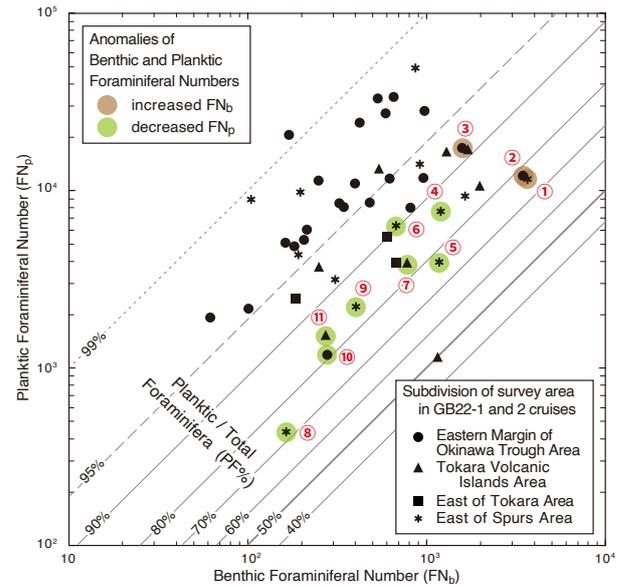
Table 2 Sites showing abnormal decrease in proportion of planktic foraminifera (PF%) in the seas surrounding Tokara Islands (GB22-1 and 2 cruises) . (Data extracted from Table 1).

Group	Site & No. on Fig.	Water Depth	Planktic/Total Foraminifera (%)	Foraminiferal Number (N/g)		Area
				FN _b	FN _p	
1	St. g206 ①	590	76.4	3,621	11,752	D
	St. g346 ②	659	77.9	3,450	12,190	A
	St. g294 ③	916	91.8	1,567	17,553	A
2	St. g180 ④	682	86.8	1,183	7,668	D
	St. g4 ⑤	737	77.4	1,168	4,004	D
	St. g101 ⑥	1,105	90.5	671	6,385	D
	St. g195 ⑦	637	83.4	775	3,889	B
3	St. g231 ⑧	476	72.9	163	439	D
	St. g127 ⑨	740	84.8	398	2,218	D
	St. g167 ⑩	797	84.9	271	1,523	B
	St. g348 ⑪	621	81.1	276	1,183	A

第1群の3地点は、底生・浮遊性有孔虫数 (FN_b・FN_p) ともに大きな値を示す。とくに屋久新曾根北東斜面のSt. g206と西新曾根南斜面のSt. g346は、FN_bが3,000個体/gを超え、周囲の水深が同程度の地点 (St. g179; St. g350, g362など) の2-4倍である。また、両地点とは水深の異なる沖臥蛇堆北東麓のSt. g294でもFN_bは周囲の地点 (St. g296, g322など) よりも倍以上も高い。その反面、いずれの地点でもFN_pは周囲の地点と同程度の値を示す。

第1群の各地点は含泥率が13-17%で、St. g206は淘汰の良い中粒砂、St. g346は中粒砂、St. g294は細-中粒砂よりなり、地点によりサンゴ、コケムシなどの遺骸を含む。底生有孔虫群集はおもにIV帯の種よりなるが、次のようなI帯に多いタクサも含まれる。St. g206ではCibicides属、Elphidium属などのガラス状石灰質殻種、St. g346では磁器質殻のTriloculina属、Vertebralina属、St. g294でも磁器質殻のHauerina属、Quinqueloculina属などであり、いずれも浅海域から運ばれた異地性遺骸と見なされる。また、St. g206では生体 (染色個体) は確認されず、浮遊性有孔虫には殻の保存状態が悪く、暗褐色に変色した化石個体が含まれるのに対し、St. g346とSt. g294では底生種の生体が確認され、浮遊性有孔虫殻には、淡褐色に変色した個体が多い。以上の3地点に混入した異地性の生物遺骸の起源は、それぞれの地点に隣接する地形の高まりの、水深がI帯相当の浅海域にあると見込まれる。

I帯 (120 m以浅) の水深におけるPF%は、該当する試料採取地点がないトカラ列島周辺海域では確認できないものの、隣接する奄美周辺海域で概ね20%以下と報告されている (長谷川, 2018)。それに対し、IV帯に相当する水深600-1,000 mにおける標準的な値は90%以上であることから、第1群のようなIV帯の水深に相当する地点では、底生有孔虫の割合が非常に小さい。そのため、I帯起源の遺骸を含む碎屑物が加わった場合、底生有孔虫数が相対的に増加することが予想される。



第4図 トカラ列島周辺海域 (GB22-1 及び2航海) の調査地点の底生有孔虫数と浮遊性有孔虫数の両対数グラフ。浮遊性有孔虫率 (PF%) を等値線で示す。PF%の異常を示す地点には着色した円と番号 (第2表参照) を付す。

Fig. 4 Double logarithmic plot for selected sites on planktic and benthic foraminiferal numbers in the seas surrounding Tokara Islands for GB22-1 and 2 cruises. Inclined lines indicate contour of planktic/total foraminifera (PF%). Numerals with colored circle (1 to 11; see Table 2) indicate sites of PF% anomalies.

第2群の4地点における有孔虫数はFN_bが600-1,200個体/g、FN_pが3,000-8,000個体/gであり、ともに第1群の値より小さい。また、周辺で水深が同程度の地点と比べると、屋久新曾根東方斜面のSt. g180は、やや南方のSt. g100に比べてFN_bが3/4、FN_pは約1/2である。また、奄美海脚北東斜面のSt. g4と平島曾根北東麓のSt. g195については、長谷川 (2023) の第1表をもとに、それぞれGB21-2-g26 (トカラ東方海域の水深681 m) とGB21-3-g264 (トカラ火山群島海域の651 m) と比較したところ、FN_pがg26の約2/3、また、St. 195のFN_pはg264の約1/3であるが、一方で、底生有孔虫数 (FN_b) はいずれの地点においてもほぼ同等の値であることが確認された。なお、ケトウ曾根南東斜面のSt. g101については、近隣に同等の水深で有孔虫数を比較できる調査地点がないものの、その値は他の3地点の値の範囲内に収まる。

以上の4地点のうち、St. g180とSt. g4はともに含泥率が約10%で、前者は細粒砂、後者は中-粗粒砂、また、水深1,105 mのSt. g101は含泥率が54%の砂質シルトであるが、いずれの地点においても砂粒分はおもに浮遊性有孔虫殻と碎屑物で構成され、淘汰度が比較的よい。また、前2地点は水深が700 m前後で、底生有孔虫群集は

Ⅲ-Ⅳ帯を特徴づける種よりなり、St. g180には膠着質殻種に生体個体が確認される。その一方で、600 mを超す水深にしては磁器質石灰質殻種の割合がやや高く、さらに、翼足類、サンゴ、コケムシなどの遺骸も産出するなど、浅海域から混入した異地性遺骸が多く含まれる。一方、水深1,105 mのSt. g101については、浮遊性有孔虫殻の多くが細粒砂サイズの幼体で、白濁した小型個体が非常に多い。

以上の3地点は、St. g4が奄美海脚、他の2地点が種子・屋久海脚の東斜面にある。その両海脚は太平洋側に向けて通過する黒潮の流れに対向する障壁の位置にあることから、厚さが500 mに及ぶ黒潮はその障壁を乗り越え、あるいは浅所を迂回すると想定されるが、その際には局所的に強い水流が形成される可能性がある。そのため、とくに沈降過程にある浮遊性有孔虫遺骸は水流による吹き分け効果で選別されて、障壁の下流側では、地点によって異なる粒径分布の堆積物が形成されると推定される。

第2群に含まれるSt. g195は平島曾根の東麓に位置しており、底質は含泥率が7.8%で、火山砂、浮遊性有孔虫、その他の生物碎屑物よりなる淘汰の良い細-中粒砂である。底生有孔虫群集はⅢ-Ⅳ帯の種群よりなるが、磁器質石灰質殻種の割合がやや高く、また翼足類遺骸が比較的多く、サンゴ、コケムシの遺骸を含むことなど、St. g180およびg4との類似点が多い。その一方で、浮遊性有孔虫殻は細-中粒砂サイズと、やや小さめであること、膠着質種の比率が小さく、生体個体が確認されないことなどの相違点も少なからずある。St. g195の西側には、平島曾根から藝曾根へと南北に連なる嶺があり、沖縄トラフの東縁をなす(第1図)。大陸棚縁辺に沿って東シナ海を北東に流れる黒潮は、その南北方向の嶺の西方海域において流向を東方に転じることから、平島曾根の北東麓に位置するSt. g195には、嶺を乗り越えた黒潮が到達することになる。その位置関係は、黒潮とその障壁となる種子・屋久海脚の東斜面の場合と似た状況にあるが、その反面、黒潮が乗り越える障壁の規模が小さく、障壁の手前にトカラ列島のように著しく起伏に富む海底地形が存在しないことなどの大きな違いもある。海脚東方海域の3地点とトカラ火山群島海域のSt. g195の間の有孔虫群集に関する共通性や海底地形に見られる相違は、黒潮の流れに及ぼす海底地形の影響を探求するうえでの重要な視点になりうる。

第3群の4地点における有孔虫数は、 FN_b が150-500個体/g、 FN_p が400-2,300個体/gで、ともに第1・2群の値より遙かに小さい。たとえば、St. g231では水深が同程度のSt. g251に比べて、 FN_b が約1/4、 FN_p は1/12に過ぎない。また、St. g167では近隣のSt. g163に比べて、 FN_b は約1/2、 FN_p は約1/9である。ほかの2地点、St. g127とSt. 348も同様で、いずれの地点においても有孔虫数は、近隣の同

水深における標準的な値と比べると、 FN_b は標準よりも1/4-1/2、 FN_p は1/6-1/12である。

これらの4地点の中でもっとも浅い地点St. g231は、屋久島-屋久新曾根間の鞍部の東側に位置し、そこを黒潮流軸の強流部がほぼ恒常的に通過している。そのうえ、その水深476 mは黒潮の厚さ(約500 m)よりも浅いことから、その付近の海底は常に強流の影響を被る浸食または無堆積の場の可能性がある。同地点の堆積物は含泥率6.8%の粗粒砂で、石英粒、軽石粒を含む碎屑物と浮遊性有孔虫殻を主とする生碎屑物などで構成される。底生有孔虫群集はおもにⅢ帯を特徴づける種よりなるが、小型の個体は非常に少ない。また、*Amphistegina*属、*Cibicides*属、*Pararotalia*属、*Siphogenerina*属などの浅海生タクサの破損あるいは変質した個体が比較的多いが、これらは明らかな異地性個体であり、この地点付近に遺骸が付加されていることを示す。一方、粗粒碎屑物は屋久島あるいは種子・屋久海脚の岩石に由来すると推定されるが、おそらくは共に供給されたであろう細粒碎屑物は強流によって運び去られ、結果として残留した堆積物であろう。有孔虫数の著しい低下もまた、底生・浮遊性有孔虫殻の多くが、強流によって運び去られたことにより残されたものと推定される。

St. g231を除く第3群の3地点もまた、黒潮の中軸部が通過する範囲内またはそれに隣接する位置にある。その水深は600-800 mで、強流の直接的な影響を受けることはないものの、周辺の浅海域は強流に晒されることが想定される。St. g127は、St. g231と同じ種子・屋久海脚の東側に位置するが、同海脚南部のケトウ曾根と屋久新曾根との間を南東に下る谷の内部にある。同地点の試料は含泥率が7.6%の中-粗粒砂で、砂粒分はおもに浮遊性有孔虫殻と碎屑物により構成される。また、底生有孔虫群集はⅢ-Ⅳ帯を特徴づける種よりなり、磁器質石灰質殻種の割合が多く、さらにサンゴ、コケムシ、翼足類などの遺骸も含まれるなど、上述した第2群のSt. g4(水深737 m)との類似点が多く、周囲の浅海域から流入する多くの異地性遺骸が含まれると考えられる。

他の2地点においても、異地性遺骸の混入が確認される。St. g167は火山群島海域の南西部、五号曾根東方の海盆の縁にあたる水深797 mに位置する。その地点は五号曾根の麓からはやや離れているが、北側の平島曾根との間の堆積物は含泥率が10.8%の中粒火山砂よりなり、底生有孔虫群集がⅣ帯を示すが、生体個体は検出されず、化石と推定される変質の進んだ*Cibicides lobatulus*および*Carpenteria balaniformis*の遺骸が確認された。また、St. g348は沖縄トラフ東縁部の東新曾根北東麓の水深621 mに位置する。堆積物は含泥率が9.2%の軽石粒を含む細-中粒火山砂よりなる。底生有孔虫群集にはⅣ帯を示す群集の中に*Elphidium crispum*、*C. lobatulus*、*C. balaniformis*などの浅海性種が含まれる。東新曾根は黒潮流軸部の縁

辺に接しており(第1図), 強流の影響を受けて頂部(水深117 m)周辺の浅海域で巻き上げられた生物遺骸が, 北東麓のSt. g348など堆周辺の斜面下部で再堆積する可能性は小さくない。

以上の第3群の各地点では有孔虫数が底生と浮遊性ともに小さいが, とりわけ水深の浅いSt. g231の周辺では, 底層にまで及ぶ黒潮の強い流れのために, 碎屑物粒子が定着しにくい環境にあると推察される。そのため, 生物遺骸を含むSt. g231の堆積物は, 局所的な凹所に沈積することで搬出を免れて残留したものと考えられる。それに対し同地点を除く他の3地点は水深が600 mを超えており, 黒潮の強い流れが直接には及ぶことがなく, 重力流によって周辺の浅海域から異地性遺骸を含む碎屑物粒子が流入する場にあると推定される。

しかし, これらの3地点と同様に浅海起源の遺骸群集が含まれる第2群の各地点では, 浮遊性有孔虫数が減少する一方で, 底生有孔虫数の変化は小さい。それに対し, 第3群の各地点では, 有孔虫数が浮遊性・底生ともに著しく減少しており, その要因として, 有孔虫を除く生物遺骸や非生物性碎屑物の増加に伴う希釈の効果が考えられる。実際に, 海脚東方海域の2地点では生物碎屑物が, また, St. g167(火山群島海域)とSt. g348(沖縄トラフ東縁部)では火山碎屑物が多く含まれており, それらの付加により, 堆積物中に占める有孔虫遺骸の割合を相対的に減少した可能性は十分にある。ただし, その他にも, 遺骸が運搬される過程で被る, 殻の破壊や溶解の影響など, 考慮すべき要素はあり得ることから, さらなる検討が必要である。

以上の, 有孔虫数にもとづいて区分された3群と供給される碎屑物の関連性について, それぞれの地点の地形との関係からその意味を確認する。屋久新曾根東方の3地点のうち, g206, g180, g127はそれぞれ第1, 2, 3群に該当する。St. g206は屋久新曾根-屋久島間の鞍部の南東端にあたり, その水深590 mは鞍部を通過する黒潮軸流の影響を強く受ける水深であり, 細粒な碎屑物ほど堆積し難い。St. g180(水深682 m)は屋久新曾根の東方で, 黒潮の流向からは外れた島陰にあたり, 堆積物が比較的沈積しやすい位置にあるといえる。また, St. g127(水深740 m)は屋久新曾根南方の谷の内部にあり, 同曾根側とケトウ曾根側からの供給により, 3地点の中で比較的多くの有孔虫遺骸が集積すると考えられる。

また, 沖縄トラフ海域の沖臥蛇堆北東麓のSt. g294(水深916 m)と西新曾根南麓のSt. g346(水深659 m)は第1群に含まれる。両地点は, ともにトラフ底から聳え立つ独立した海丘であり, そこに供給される碎屑物の起源はそれぞれの海丘の浅海部にほぼ限定されるため, その量も多くはなり得ない。それに対し, St. g346に隣接するSt. g348(水深621 m)は東新曾根の北東麓にあるが, 第3群

に含まれる。同地点の北側は黒島堆から南西側に広がる緩斜面の末端に接していることから, 黒島堆の北東側に隣接する鬼界カルデラ・薩摩硫黄島などの火山碎屑物が斜面を経て流入している可能性があり, 有孔虫遺骸の希釈をもたらしたとも考えられる。

以上に示した事例から, 本調査海域において確認されるPF%の異常な低下は, 黒潮の流れが, 水深と起伏の著しい地形に応じて, 局地的に多様な形で影響を及ぼすことにより起きたことが推察される。具体的には, 有孔虫殻以外の生物碎屑物や火山碎屑物を含む碎屑物の増加と, それによる底生および浮遊性有孔虫数($FN_b \cdot FN_p$)の相対的減少, ならびに, 浅海域起源の有孔虫遺骸が異地性遺骸として付加することにより生じる深海底での FN_b の増加が, 地点ごとの条件の違いに応じて生じたと考えられる。

一方で, 異常を示す11地点のうち, 最浅地点のSt. g231と最深地点のSt. g101については, 異なる要素が加わる。すなわち, St. g231は屋久島南方の水深476 mにあり, 中粒砂や生物遺骸が確認されることから, 第3群のほかの地点と同様に, 異地性遺骸の流入が考えられる反面, 黒潮流軸部の強い流れの影響を常に受けて, 堆積物の多くが失われている可能性がある。また, St. g101はケトウ曾根南東斜面の水深1,105 mにある砂質シルトで, 底生有孔虫には中粒砂サイズの個体も含まれるが, 浮遊性種は細粒砂サイズの幼体が多く, 強流により選別され, 遠距離を運ばれた小型個体の集合群集と推定される。

なお, 火山群島海域を中心とした先のKB21-1-3航海の報告(長谷川, 2023)では, PF%の異常を示す地点として, 火山群島海域のSt. g288(水深584 m, PF%: 65.2%)とSt. g269(644 m, PF%: 72.4%), トカラ東方海域のSt. g43(水深861 m, PF%: 62.9%), および沖縄トラフ東縁部のSt. g162(水深1,003 m, PF%: 77.5%)の4地点が報告された。これらのうち, St. g269とSt. g43では, 底生・浮遊性ともに有孔虫数が極端に小さく, 有孔虫殻は粗粒砂サイズに良く淘汰されている。この両地点では, ともにカレントリップルが報告されており(鈴木ほか, 2023), 底層の強い流れによる堆積物粒度の選別で, 有孔虫殻の多くが消失したものと理解される。それに対し, St. g162は有孔虫数が FN_b は310個体/g, FN_p は1,071個体/gで, 本報告のSt. g167に近い値を示すものの, 水深が深く, 膠着質殻種の割合が非常に大きい群集であり, St. g167とはまったく異なる。その地点については石灰質殻が溶解されるような環境が想定されるが, その実態の解明は今後の課題の一つである。また, St. g288は FN_b が131個体/g, FN_p は246個体/gであって, 底生群集については本報告における最小の有孔虫数を示すSt. g231に匹敵するが, 浮遊性群集はその約1/2で, 大きく減退しており, その要因については今後の検討課題として残されている。

5. おわりに

GB22-1及び2航海によりトカラ列島を東西に挟む、東側の種子・屋久海脚と奄美海脚、および西側の沖繩トラフ東縁部の海域より得られた有孔虫群集について、分布の概要を検討するために、水深257 m–1,438 mの計47地点を選定し、基礎統計量として算出した底生・浮遊性有孔虫数、底生有孔虫殻質構成比、浮遊性有孔虫率、翼足類–浮遊性有孔虫比の分布を検討し、その水深に伴う変化が南西諸島周辺海域を通じて認められることを確認した。トカラ列島周辺海域の底生有孔虫群集には異地性遺骸が多量に含む可能性のあることから、異地性個体が比較的少ないと見込まれる奄美大島周辺海域の帯区分を基準にして、調査海域の群集の深度変化を比較検討した。

膠着質殻種の産出率の異常値の地理的分布から、種子–屋久海脚と奄美海脚の東側斜面域において異地性遺骸が広く分布することを確認した。また、浮遊性有孔虫率の深度分布における異常値に着目し、底生・浮遊性の両有孔虫数の特徴から、浮遊性有孔虫率の異常は、有孔虫殻以外の火山砕屑物や生物砕屑物を含む砕屑物の増加と、それによる底生および浮遊性有孔虫数の相対的減少と、異地性底生有孔虫遺骸の付加による底生有孔虫数の増加が、地点ごとに、異なる条件下で生じたと推定される。なお、これらの異常は、明らかに異地性と認定される少数の個体の混入では説明ができない。むしろ、それらの個体を遙かに上回る数の異地性遺骸が混入している可能性が示唆される。

トカラ列島周辺海域は、北西太平洋の亜熱帯から温帯に遷移する生物地理学的にも重要な海域である。有孔虫の異地性遺骸は現生種の生態を掌握するうえでの妨げになることから、それを識別し、対照から除くためには、その実態を把握する必要がある。その反面、生態が知られた有孔虫の異地性遺骸は、潜在的にその供給源に関する情報を保持することから、異地性個体の分布はそれを動かす営力を追究する手段ともなりうる。異地性個体の挙動を堆積学的なプロセスとして理解することは、タフオミーの視点から意義深いことといえる。その点で、多くの海底火山による複雑な海底地形と、そこを通過する黒潮により、遺骸の運搬・再堆積が頻繁に起こるトカラ列島周辺海域は、興味深い実験場といえる。

さらに、本稿で主な対象とした異地性遺骸を含む本調査地域の堆積物は、石灰質有孔虫の殻を多く含む細–中粒砂で、沖繩島南方から奄美大島北方に至る海域に広く分布するRyukyu Sand Sheet (Nishida *et al.*, 2022) とほぼ同質と考えられ、その一部にあたる可能性がある。また、その堆積物には、地点により堆積岩片、火山岩片、火砕物、生砕物などが含まれ、有孔虫遺骸と同様、局所的にそれぞれの起源の特性が反映されていることから、コンターライトとして広域に分布する砂層の起源や流動の実

態解明に向けて、有効な手段を提供すると期待される。

謝辞：本研究の機会を与えてくださった産業技術総合研究所地質情報研究部門海洋地質研究グループの方々、並びに試料採取に際しご尽力いただいた研究員及び望星丸の乗組員の方々に深く感謝いたします。また、また、同グループの有元 純博士から査読者としても、多くの有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

文献

- Boltovskoy, E. and Wright, R. (1976) *Recent Foraminifera*. R. W. Junk b.v., The Hague, 515p.
- Brasier, M.D. (1980) *Microfossils*. George Allen and Unwin, London, 193 p.
- 藤田和彦 (2013) サンゴ礁海域に分布する大型底生有孔虫の生態. 日本サンゴ礁学会誌, **15**, 57–77.
- 長谷川四郎 (2018) 奄美大島西方海域の底生有孔虫群集 (予報). 板木拓也 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成29年研究概要報告書—石垣島・奄美大島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 75, 109–116.
- 長谷川四郎 (2020) 八重山列島周辺海域の底生有孔虫群集 (予報). 井上卓彦 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」令和元年度研究概要報告書—石垣島・西表島・与那国島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 80, 106–114.
- 長谷川四郎 (2023) トカラ列島周辺海域における底生有孔虫群集の概要 (予報). 地質調査研究報告, **74**, 301–314.
- 長谷川四郎・内村仁美 (2017) 奄美大島周辺海域の底生有孔虫群集 (予報). 板木拓也 (編) 「沖繩周辺海域の海洋地質学的研究」平成28年度研究概要報告書—宮古島周辺海域—, 地質調査総合センター速報, no. 72, 85–91.
- 井上卓彦・天野敦子・板木拓也 (2022) 巻頭言：鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質—2020年度調査航海結果—. 地質調査研究報告, **73**, 193–196.
- 井上卓彦・板木拓也・天野敦子 (2023) 巻頭言：鹿児島県トカラ列島周辺の海洋地質—2021年度調査航海結果—. 地質調査研究報告, **74**, 187–191.
- 海底地形の名称に関する検討会 (2022) 承認された海底地形. 海上保安庁, <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOKAI/ZUSHI3/topographic/JCUFN/jcufn.html>. (閲覧日：2023年7月8日)
- 気象庁 (2023) 旬平均海流. 気象庁, 各種データ・資料, 海洋の健康診断表, 海流に関する診断表, https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyoo/jun/current_HQ.html. (閲覧日：2023年4月19日)
- 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).
- 水野信二郎・川建和雄・金子 新・長浜智基 (1991) 東シナ海における黒潮の直接測流結果(III)—海洋における熱および運動量フラックスの計測法に関する開発研究(第1報)一. 九州大学応用力学研究所所報, no. 71, 1-18.
- 松本 剛・木村政昭・仲村明子・青木美澄 (1996) 琉球弧のトカラギャップおよびケラマギャップにおける精密地形形態. 地学雑誌, **105**, 286-296.
- Murray, J. W. (1991) *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. Longman Scientific & Technical, Harlow, 397p.
- Nishida, N., Itaki, T., Amano, A., Katayama, H., Sato, T., Stow, D. and Nicholson, U. (2022) Anatomy and dynamics of a mixed contourite sand sheet, Ryukyu Island Arc, northwestern Pacific Ocean. *Marine Geology*, **444**. doi:10.1016/j.margeo.2021.106707
- 大井剛志・小柳満佐子・長谷川四郎 (2009) 沖縄本島周辺海域の底生有孔虫群集(予報). 荒井晃作(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成20年度研究概要報告書—沖縄島東方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 46, 138-144.
- 鈴木克明・板木拓也・片山 肇・兼子尚知・山崎 誠・有元 純・徳田悠希・千徳明日香・清家弘治 (2023) トカラ列島周辺海域の底質分布とその制御要因. 地質調査研究報告, **74**, 259-286.
- 竹松正樹・光易 恒・本地弘之・川建和雄・大楠 丹・栖原寿郎・高橋 清・水野信二郎・金子 新・山形俊男・小寺山 亘・高雄善裕・増田 章・草場忠夫・馬谷紳一郎・長浜智基・石井秀夫・肥山 央 (1984) 直接測流結果からみた黒潮の構造と変動 —総合ブイシステムによる海洋計測法の開発研究(第5報)一. 九州大学応用力学研究所所報, **60**, 403-413, 1984-09, 九州大学応用力学研究所. doi:10.15017/4743741
- 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 : 2024年1月19日 ; 受 理 : 2024年9月26日)

