

GB21-3 航海においてトカラ列島北部周辺海域で採取された堆積岩の石灰質微化石に基づく堆積年代と地質学的意義

有元 純^{1,*}・宇都宮 正志¹

ARIMOTO Jun and UTSUNOMIYA Masayuki (2023) Depositional ages of sedimentary rocks obtained from the sea floor around the northern Tokara Islands during GB21-3 cruise, based on calcareous microfossil assemblages, and their geological significance. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 74 (5/6), p. 245–257, 3 figs and 3 tables.

Abstract: Calcareous nannofossil and planktic foraminiferal assemblages were examined to determine the depositional ages of sedimentary rocks obtained during GB21-3 cruise at around the Tokara Islands, northern Ryukyu arc. Depositional ages of examined microfossil-bearing samples are shown to be the Early Pleistocene (Calabrian) or younger. Several samples from the western margin of the Tane–Yaku Spur in the forearc side and from between the Higashi–Shin Sone and Sango Sone in the back-arc side, are correlated with calcareous nannofossil biozone CN14a and/or planktic foraminiferal biozone PT1a, and their depositional ages fall between 1.59 and 0.43 Ma during the Early–Middle Pleistocene (Calabrian–Chibanian). The other younger samples are correlated with calcareous nannofossil biozone CN15, which constrains the depositional ages younger than 0.29 Ma (Middle Pleistocene to Recent). Our observation on lithology and microfossil assemblages imply that the sedimentary rock units which derived the examined samples likely have geological records of volcanogenic sedimentation and tectonic influence on uppermost crustal recycling at the northern Ryukyu arc during the Pleistocene.

Keywords: biostratigraphy, biochronology, Quaternary, Pleistocene, calcareous nannofossil, planktic foraminifera, Tokara Islands, Ryukyu Arc

要 旨

GB21-3航海において北部琉球弧トカラ列島周辺の海底から採取された堆積岩試料について、年代決定に有効な石灰質微化石(石灰質ナノ化石・浮遊性有孔虫)の検討を行った。石灰質微化石の産出が認められた検討試料は全て、前期更新世カラブリアン期以降の堆積年代を示す。前弧側の種子・屋久海脚西縁部から得られた試料の一部、及び背弧側の東新曾根-サング曾根間から得られた試料は、石灰質ナノ化石帯CN14a垂帯もしくは浮遊性有孔虫化石帯PT1a垂帯に対比され、堆積年代は1.59–0.43 Ma(前期-中期更新世)と考えられる。また種子・屋久海脚西縁部で得られた試料の一部は、石灰質ナノ化石帯CN15帯に対比され、堆積年代は0.29 Ma以降(中期更新世以降)に制約される。岩相や微化石群集組成から、これらの試料の由来する地質体は前期更新世以降の北部琉球弧における火山活動やテクトニクスを背景とした堆積作用を記録している可能性が示唆される。

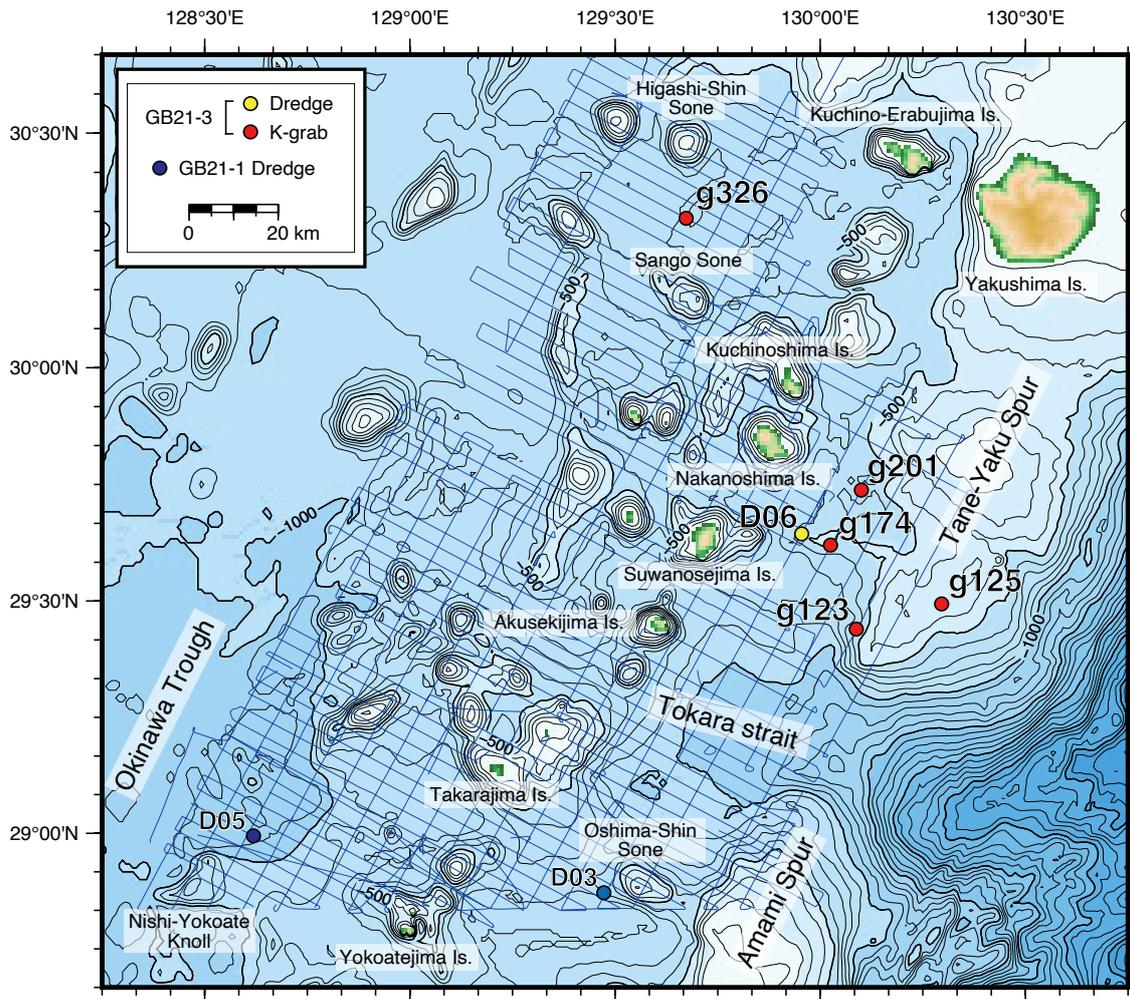
1. はじめに

トカラ列島は、南西諸島北部の屋久島と奄美大島の間に位置する火山島嶼群である。地質学的には新第三系及び第四系の火山岩類あるいは火砕岩類を主体とし、陸域における非火山性の地質体の分布は非常に限られている(中野ほか, 2008)。一方、既存の海域構造探査や大深度掘削の結果から、南西諸島中-南部の陸域・海域に分布する新生界海成堆積岩類に対比しうる地質体が、北部周辺海域の海底下にも分布することが明らかになっている(木村ほか, 1999など)。したがって、トカラ列島周辺地域の新生代における地質構造発達や堆積作用、火山活動などを含めた地史を解明するためには、海域調査による海洋地質情報の集積と、南西諸島周辺における既存研究との比較を通じた統合的解釈が不可欠である。

産業技術総合研究所では2020年度より、トカラ列島海域における20万分の1海洋地質図の作成を目的とした海洋地質調査を実施している。2021年3月に実施され

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: ARIMOTO, J., AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: j-arimoto@aist.go.jp



第1図 試料採取地点図。青の実線は2020–2021年度航走観測時の航跡を示す。

Fig. 1 Sample locality map for this study shown together with ship tracklines (blue) for geophysical surveys during 2020–2021 FY.

たGB21-1航海ではトカラ海峡以南を主な調査対象とし、横当島・宝島周辺の海底からドレッジにより前期–中期更新世(0.9–0.43 Ma)の年代を示唆する堆積岩試料が得られた(第1図; 有元・宇都宮, 2022)。本稿では、同年11月に実施されたGB21-3航海の調査海域であるトカラ海峡以北においてドレッジあるいはグラブ採泥により採取された堆積岩試料を対象として、石灰質微化石群集と堆積年代、その地質学的意義について考察する。

2. 試料と方法

2.1 試料

本研究では、GB21-3航海調査海域における6地点より採取された計10試料の堆積岩試料について検討を行った(第1図, 第1表)。本稿では調査海域の北東から南西にかけて口永良部島–悪石島を結ぶ火山フロント(下司・

石塚, 2007)に対し、東方を前弧側、西方を背弧側と呼称する。諏訪之瀬島東方約20 kmのドレッジ地点D06は、前弧側に連続的な地形的高まりをなす種子・屋久海脚の西縁部に相当する(第1図; 石野ほか, 2023)。ドレッジは北に急傾斜する水深583–503 mの海底を削り取るように実施され、合計約4 kgの垂角礫・亜円礫状岩石試料が得られた。このうち岩相の異なる5試料(D06-02, -08, -15, -16, -19)の堆積岩試料を微化石検討用に選定した(第1表)。D06-02, -08及び-19の3試料は、肉眼観察による船上記載では礫岩とされたが、基質支持で淘汰が悪く概ね砂質である。砂粒子は石英、長石、有色鉱物や黒色・赤色岩片などの碎屑物と有孔虫殻を主とし、D06-02及びD06-19試料には火山噴出物由来と考えられる自形鉱物粒子が含まれる(第2図a)。D06-08試料は黒色の岩片を顕著に含む(第2図b)。粒子間は石灰質あるいは凝灰質

第1表 検討試料のリスト。試料採取位置の座標及び水深は石野ほか(2023)及び鈴木ほか(2023)に従う。岩相の簡易的な記載も合わせて示す(詳細は本文2.1章を参照)。各試料について浮遊性有孔虫(PF)及び石灰質ナノ化石(CN)が認められたものをそれぞれxで示す。ドレッジにより得られたD06系試料の座標と水深は、ドレッジ着底時のものである。

Table 1 List of examined samples. Coordinates and water depths are from Ishino *et al.* (2023) and Suzuki *et al.* (2023). Simplified lithology are also noted. Each sample for which planktic foraminifera and/or calcareous nannofossil are determined is remarked by "x". The location and water depth for D06-series are those when the dredger apparatus set on-bottom.

Type	Sample ID	Latitude	Longitude	Water depth (m)	Lithology	PF	CN
Dredge	D06-02	29°38.6633' N	129°57.3036' E	583	Poorly-sorted tuffaceous sandy conglomerate	x	x
Dredge	D06-08	29°38.6633' N	129°57.3036' E	583	Poorly-sorted sandy conglomerate	x	x
Dredge	D06-15	29°38.6633' N	129°57.3036' E	583	Mudstone	x	x
Dredge	D06-16	29°38.6633' N	129°57.3036' E	583	Muddy sandstone	x	x
Dredge	D06-19	29°38.6633' N	129°57.3036' E	583	Poorly-sorted tuffaceous calcareous sandy conglomerate	x	x
K-grab	g123	29°26.3710' N	130°05.2913' E	605	Bioclastic calcarenite	x	
K-grab	g125	29°29.6034' N	130°17.7445' E	327	Well-consolidated mudstone	-	
K-grab	g174	29°37.2147' N	130°1.5352' E	525	Tuffaceous calcareous muddy sandstone	x	x
K-grab	g201	29°44.2746' N	130°6.0069' E	736	Poorly-sorted pumice-bearing bioclastic calcarenite	x	x
K-grab	g326	30°19.0935' N	129°40.4151' E	548	Tuffaceous calcareous muddy sandstone	x	x

の細粒物質により膠結され、全体として半固結状態である。D06-15及び-16は珪長質鉱物粒子や岩片を主体とする泥岩及び砂岩であり、生物源炭酸塩粒子に乏しい(第2図c)。なおドレッジで得られた試料の採取層準にはある程度の不確実性があるため、1試料あたりひとつかたまりの岩石から必要量を取るようにして、異なる層準の微化石群集が1つの検討試料内に混在しないよう注意を払った(有元・宇都宮, 2022)。

ドレッジ試料に加えて、木下式グラブ採泥器(以下K-グラブと呼称)を用いて採取された、5地点の半固結あるいは固結堆積岩試料(g123, g125, g174, g201, g326)について微化石の検討を行った(第1図, 第1表)。海底カメラによる観察の結果、前弧側の種子・屋久海脚西縁部に位置するg123, g174地点、種子・屋久海脚上に位置するg125地点、及び調査海域北部背弧側の東新曾根とサンゴ曾根の間に位置するg326地点では露頭が確認されたが、同じく種子・屋久海脚西縁部に位置するg201地点の海底は平坦な砂底であり、露頭は確認されなかった(鈴木ほか, 2023)。g123及びg201試料は、有孔虫殻、コケムシ遺骸、軟体動物殻など生物源炭酸塩粒子を主体とし、珪長質鉱物粒子や岩片を含む半固結の石灰砂岩(カルカレナイト)である(第2図d, f)。g123試料には大型底生有孔虫(例えば藤田, 2013)がわずかに認められるが、殻が摩耗し保存状態は極めて悪い。g201試料は淘汰が悪く、細礫サイズの軽石や生砕物粒子を含む。両試料とも石灰質セメントによる空隙の充填は認められず、固結の程度はg123試料でやや強いがg201試料はごく弱い。一方、g174及びg326試料は半固結の石灰質砂岩であり(第2図e)、石灰質あるいは凝灰質の基質による膠結が認められる。g174試料には火山ガラス、g326試料には自形の長石や有色鉱物など火山噴出物由来と考えられる粒子が認められる。g125試料は他試料と異なり、部分的に風化が

進んでいるがよく固結した硬質の泥岩である。

2.2 方法

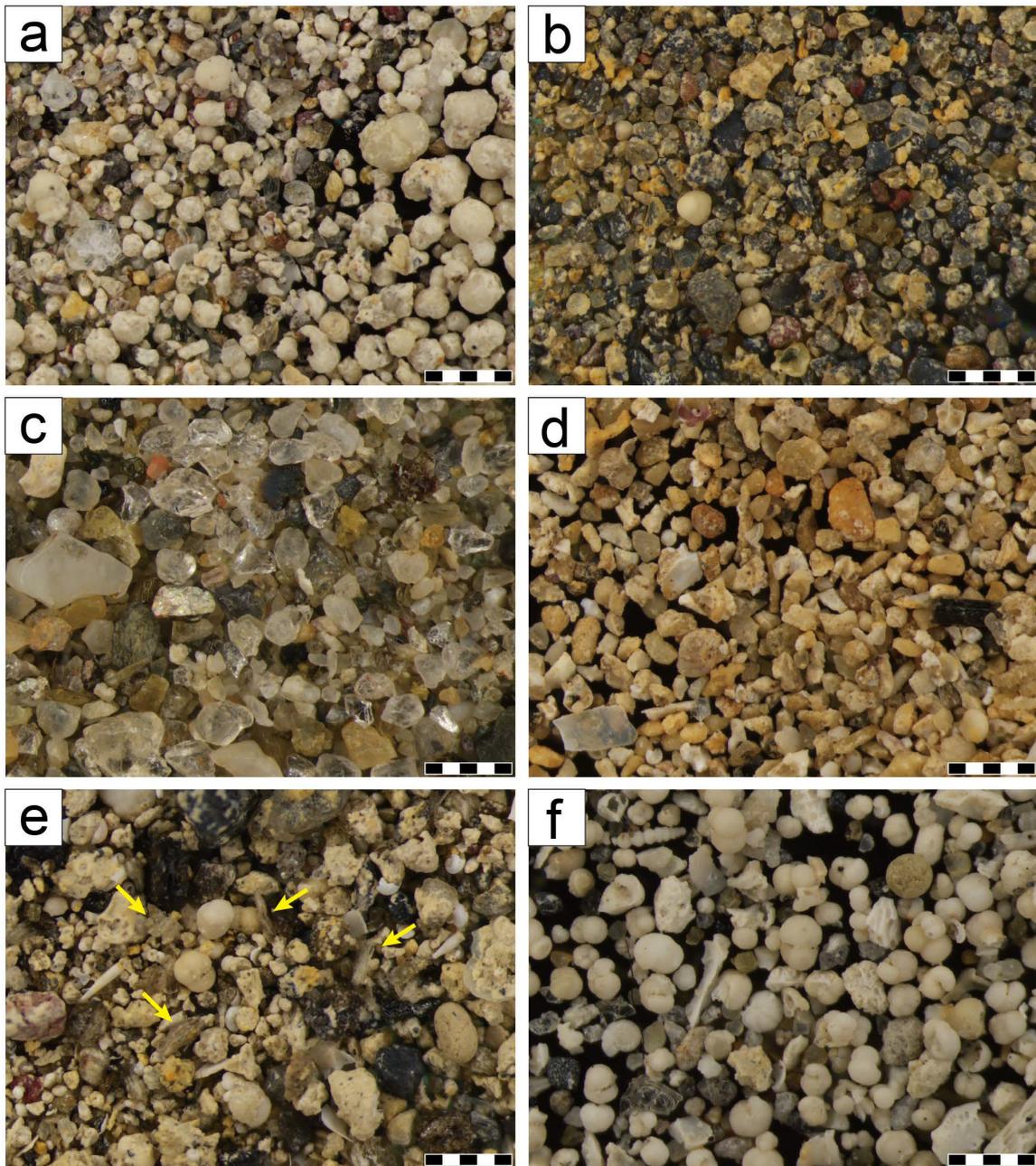
第1表に示した試料について、石灰質微化石群集を検討するため処理、同定を行った。以下、石灰質ナノ化石と浮遊性有孔虫化石に分けて記述する。

2.2.1. 石灰質ナノ化石

計10試料について、新鮮な面から米粒大の量を取り、スミアスライドを作成した後、偏光顕微鏡を用いて1,500倍の倍率で観察を行った。産出量について、0.1 mm²内に観察される平均的な個数が10個より多い場合をAbundant, 1-10個をCommon, 1個未満の場合をFewとして評価した。保存の程度については、溶解または再結晶により同定が困難な個体がおおよそ3割以下の場合Good, 3-6割を占める場合はModerate, 6割よりも多い場合はPoorとして評価した。また一部の試料については走査型電子顕微鏡による観察を行った。水道水で懸濁させた堆積物試料を孔径0.45 µmのメンブレンフィルターでろ過して恒温乾燥機で乾燥後、イオンスパッタ装置(日立ハイテクE-1020)で金-パラジウム蒸着を行った後、走査型電子顕微鏡(日本電子JSM-6390LV)による観察を行った。

2.2.2. 浮遊性有孔虫化石

硬質で残渣化が困難であるg125試料を除く9試料について検討を行った。風化面を極力除いた後1-2 cm大まで砕いた試料の乾燥重量1-6 g程度について、ボロン法(Hanken, 1979)により粒子間の膠結の分解を促進させた。その後、開口径63 µmの篩上で水洗し、40 °Cの恒温乾燥機内で一晩以上乾燥させた。水洗後の砂サイズ粒子になお粘土鉱物の付着が認められた場合、処理の前後で生物源粒子の著しい破損が起きないことを慎重に



第2図 堆積岩試料の代表的な粒子写真(125–2000 μm 画分) ; (a) D06-02, (b) D06-08, (c) D06-16, (d) g123, (e) g174, 矢印は火山ガラスを示す, (f) g201. スケールバーは1 mm.

Fig.2 Representative photos of particles (125–2000 μm fraction) in examined samples; (a) D06-02, (b) D06-08, (c) D06-16, (d) g123, (e) g174, arrows indicate volcanic glasses, (f) g201. Scale bars = 1 mm.

確認した上で、超音波洗浄機(40 kHz)を用いて15秒程度、残渣の洗浄を行った。得られた残渣のうち125 μm 以上のサイズの粒子について適宜分割し、実体顕微鏡下において200個体以上を目安に浮遊性有孔虫化石を抽出した。D06-15及びD06-16については200個体に満たなかったため、処理した残渣に含まれる全ての個体を拾い出した。産出量については、検討画分内の堆積物粒子に

占める浮遊性有孔虫化石の割合を基準として、Dominant (>50%), Abundant (>30–50%), Common (>10–30%), Few (>5–10%), Rare (>1–5%), Present (>0–1%)およびBarren (0%)の7段階で評価した。各試料に含まれる個体の平均的な保存状態は、定性的観察に基づく溶解・破損・着色等の程度によりVery Good, Good, Moderate, Poor, Very Poorの5段階を基本として評価した。抽出

第2表 GB21-3航海で採取された堆積岩試料から産出した石灰質ナノ化石. 産出頻度は次のように示す;A:Abundant (多産), C: Common (普通), F: Few (少産). 保存状態は次のように示す;G: Good (良好), M: Moderate (中程度), P: Poor (悪い). 産出状況は次のように示す;+: 産出が確認された種, R: 再堆積と判断される種. クエスチョンマークは産出の可能性があるが保存状態が悪く同定が困難であることを示す.

Table 2 Distribution chart of calcareous nanofossil identified from GB21-3 samples. Abundance; A: Abundant, C: Common, F: Fw. Preservation; G: Good, M: Moderate, P: Poor. +: present; R: Rework. Question marks indicate possible occurrence with uncertainty due to poor preservation.

Sample ID	D06-02	D06-08	D06-15	D06-16	D06-19	g174	g201	g326
Abundance	A	A	C	A	C	A	A	A
Preservation	P	M	G	G	P	M	G	G
<i>Calcidiscus leptoporus</i> (Murray and Blackman)	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>C. macintyreii</i> (Bukry and Bramlette)								
<i>Coccolithus</i> spp.			+	+			+	+
<i>Discoaster</i> spp.			R	R				
<i>Emiliania huxleyi</i> (Lohmann)			+	+	?		+	
<i>Gephyrocapsa</i> spp. small (<4 μm)	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Gephyrocapsa oceanica</i> Kamptner	+		+	+	?	+	+	
<i>Gephyrocapsa parallela</i> Hay and Beaudry		+			?			
<i>Gephyrocapsa</i> spp. (4-5.5 μm)	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Gephyrocapsa</i> spp. large (>5.5 μm)	+				?	+	R	
<i>Helicosphaera carteri</i> (Wallich)	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Helicosphaera inversa</i> (Gartner)								
<i>Helicosphaera sellii</i> (Bukry and Bramlette)								
<i>Pseudoemiliania lacunosa</i> (Kamptner)	+	+	R	R	+	+	R	+
<i>Syracosphaera</i> sp.						+		
Small placolith (<2 μm)	+	+				+	+	+
<i>Reticulofenestra asanoi</i> Sato and Takayama					?			
<i>Reticulofenestra</i> cf. <i>asanoi</i>		+						
<i>Reticulofenestra</i> spp. (<7 μm)	+	+	+	+		+	+	+
<i>Reticulofenestra pseudumbilicus</i> Gartner (>7 μm)			R	R				
<i>Sphenolithus</i> spp.			R	R				
<i>Umbilicosphaera</i> spp.	+	+	+	+	+	+	+	+
CN zone (Okada and Bukry, 1980)	CN14a	CN14a	CN15	CN15	CN13b-CN15	CN14a	CN15	CN14a

した全ての個体について種レベルまで同定し、種ごとに個体数を計数した。さらに、産出頻度が少ない大型の示準種を取りこぼさないよう、残渣全量の1/4-1/2程度に含まれる180 μm以上のサイズの粒子について検鏡を行った。形態種分類にあたり、mikrotaxデータベース (<https://www.mikrotax.org/pforams>; Young *et al.*, 2017) および当データベースに引用されている各種文献を参照した。*Globorotalia*属の一部の分類に関しては、Rögl (1974) を参考にした。*Neogloboquadrina asanoi*は*Neogloboquadrina atlantica*のシノニム(異名同種)とせず独立種とした。なお2020年度実施のGB21-1航海において、本調査海域の南方に隣接する海域においてドレッジにより採取された下部-中部更新統堆積岩から、*Tenuitella fleisheri*, *Tenuitella iota*, *Tenuitella parkerae*の産出が報告されている(有元・宇都宮, 2022)が、Brummer and Kucera (2022)に従い本稿ではこれらの種を*Tenuitellita*属として扱った。

3. 結果

各試料における産出量、保存状態および産出した種のリストを、石灰質ナノ化石と浮遊性有孔虫化石に分けてそれぞれ第2表と第3表に示す。

3.1 石灰質ナノ化石

検討した試料のうちg123, g125を除く8試料には石灰質ナノ化石が含まれていた(第2表)。全体として12属13種が同定されたほか、長径2 μm未満のプラコリスをsmall placolithとして扱った。*Emiliania huxleyi*, *Pseudoemiliania lacunosa*および*Gephyrocapsa oceanica*は更新統の主な示準化石として重要であるほか、*Reticulofenestra*属と*Gephyrocapsa*属のココリスの長径変化も年代推定において有効である。保存不良な試料では、*Reticulofenestra*属と*Gephyrocapsa*属のココリス中心部を構成するカルサイトの過成長あるいは再結晶化によって、種同定に必要な特徴が不明瞭であったことから、それらをreticulofenestridsとして、ココリスの外形と長径によって種同定と年代制約を試みた。年代推定に直接的に関与しない随伴種としては、*Calcidiscus leptoporus*や*Helicosphaera carteri*などが産出した。

3.2 浮遊性有孔虫化石

検討した9試料の全てから、浮遊性有孔虫化石の産出が認められた(第3表)。乾燥試料単位重量あたりの個体密度は、多くの試料で1 gあたり数千個体のオーダー

第3表 GB21-3航海で採取された堆積岩試料から産出した浮遊性有孔虫化石。産出頻度は次のように示す；D: Dominant (卓越), A: Abundant (多産), C: Common (普通), F: Few (少産), R: Rare (極めて少産), P: Present (稀産), B: Barren (産出なし)。保存状態は次のように示す；VG: Very Good (極めて良好), G: Good (良好), M: Moderate (中程度), P: Poor (悪い), VP: Very Poor (極めて悪い)。種ごとの産出状況は、定量的検討において確認された個体数をアラビア数字で、>180 μmの残渣の定量的検討でのみ確認されたものについて+で示す。

Table 3 Distribution chart of planktic foraminifera identified from GB21-3 samples. Abundance; D: Dominant, A: Abundant, C: Common, F: Few, R: Rare, P: Present, B: Barren. Preservation; VG: Very Good, G: Good, M: Moderate, P: Poor, VP: Very Poor. In the case a species was missed in the quantitative count and only checked by >180 μm-scanning, it is represented by the signature "+".

Sample ID	D06-02		D06-08		D06-15		D06-16		D06-19		g123		g174		g201		g326	
	A	M-P	R	M-P	P	G	P	G	A	M-P	F	VP	F	P	A	M	D	P
<i>Dentoglobigerina venezuelana</i> (Hedberg)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	
<i>Globigerina bulloides</i> d'Orbigny	4	0	0	0	12	2	7	2	7	0	0	0	1	1	3	5		
<i>Globigerina falconensis</i> Blow	32	41	14	14	7	40	7	55	12	41								
<i>Globigerina umbilicata</i> Orr and Zaitzeff	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
<i>Globigerinella calida</i> (Parker)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	
<i>Globigerinella obesa</i> (Boli)	2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	2		
<i>Globigerinella siphonifera</i> d'Orbigny	2	0	2	1	0	3	2	0	2	0	3	2	0	2	0	2		
<i>Globigerinita glutinata</i> (Egger)	7	25	19	4	13	5	23	6	26									
<i>Globigerinoides bollii</i> (Blow)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0		
<i>Globigerinoides conglobatus</i> (Brady)	0	3	1	0	1	6	+	3	+									
<i>Globigerinoides elongatus</i> (d'Orbigny)	1	11	0	0	2	3	4	3	3									
<i>Globigerinoides elongobatus</i> Stainbank, Spezzaferrì, Kroon, de Leau and Rüggeberg	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	+		
<i>Globigerinoides extremus</i> Boli and Bermúdez	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	+		
<i>Globigerinoides kennetti</i> (Keller and Poore)	1	10	1	0	0	6	3	4	3									
<i>Globigerinoides cf. kennetti</i> (Keller and Poore)	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Globigerinoides obliquus</i> Boli	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Globigerinoides ruber</i> (d'Orbigny)	14	16	12	3	23	11	10	15	18									
<i>Globigerinoides tenellus</i> Parker	0	0	0	0	0	0	1	2	2									
<i>Globoconella inflata</i> (d'Orbigny)	7	7	0	0	0	10	11	3	3									
<i>Globoconella pliozea</i> (Hornibrook)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Globoconella puncticulata</i> (Deshayes)	1	6	0	0	0	2	1	5	+									
<i>Globoconella triangula</i> (Theyer)	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Globoquadrina conglomerata</i> (Schwager)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Globoquadrina dehiszens</i> (Chapman, Parr and Collins)	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Globorotalia crassaconica</i> Hornibrook	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
<i>Globorotalia crassaformis</i> (Galloway and Wisler)	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	5	0	0	0		
<i>Globorotalia excelsa</i> Sprovieri and Ruggieri	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0		
<i>Globorotalia hessi</i> Boli and Premoli Silva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Globorotalia menardii</i> (Parker, Jones and Brady)	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Globorotalia pachytheca</i> Blow	+	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
<i>Globorotalia ronda</i> Blow	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Globorotalia scitula</i> (Brady)	2	0	0	0	2	0	1	6	0	0	1	6	0	0	0	0		
<i>Globorotalia tenuithecica</i> Blow	+	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<i>Globorotalia tosaensis</i> Takayanagi and Saito	+	+	+	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	+	+		

(~1,100–7,400個体/g)であったが、D06-08試料でやや低く(620個体/g)、D06-15及びD06-16試料では著しく低かった(<20個体/g)。検討試料の中でD06-15及びD06-16試料に含まれる個体は保存が良く、鋳物の付着などはあるが半透明ガラス質の殻をもった個体が多くを占めた。その他の試料から産する個体の保存状態は概して悪く、溶解の影響は明らかには認められないものの、殻が白濁あるいは黄褐色に着色した個体や、表面の微細構造が部分的に失われた個体などが普遍的に産出した。しかしながら種同定に必要な形質は概ね保たれており、全体として16属64種の浮遊性有孔虫化石の産出が認められた(第3表)。重要な示準種として*Globorotalia tosaensis*及び*Globorotalia truncatulinoides*などが認められたが、いずれも産出は稀であった。年代推定に関与しないが相対産出頻度が比較的高い種として*Globigerina falconensis*, *Globigerinita glutinata*, *Globigerinoides ruber*, *Globoturborotalita woodi*, *Neogloboquadrina incompta*, *Neogloboquadrina dutertrei*, *Pulleniatina obliquiloculata*などが認められた。産出した*Gs. ruber*は全て白色あるいは無色の個体であった。

4. 議論

示準化石の産出に基づく国際標準化石帯との対比について分類群ごとに記述し、検討試料の堆積年代について考察する。石灰質ナノ化石について、Okada and Bukry (1980)による帯区分(CN帯)を適用した。浮遊性有孔虫化石については、Wade *et al.* (2011)による帯区分(PL/PT帯)を用いた。化石帯境界やその他の示準面の数値年代は、原則としてGeologic Time Scale 2020 (Raffi *et al.* 2020)に従った。その他、辻ほか(2005)による房総半島やLam *et al.* (2022)による西赤道太平洋–北西太平洋中緯度域における生層序年代のデータも参考とした。

4.1 石灰質ナノ化石帯

ドレッジ試料D06-02, -08及びK-グラフ試料g174, g326は、示準化石である*P. lacunosa*及び*Gephyrocapsa*属の産出状況から、下部–中部更新統に相当するCN14a亜帯に対比される(第2表)。さらにココリスの長径が5.5 µm以上である大型の*Gephyrocapsa*属(以下*large Gephyrocapsa*と呼称)や年代示準種である*Gephyrocapsa parallela*の産出状況から、層位学的に上下関係があると考えられる3つのグループに分けられる。

グループ1：D06-02及びg174 (CN14a亜帯下部；1.59–1.25 Ma)。これらに含まれる個体はいずれも保存不良であったが、D06-02試料には*large Gephyrocapsa*の産出が認められた。またg174試料についても中央部の過成長あるいは再結晶化が著しい5.5 µm以上の楕円形のreticulofenestridsが確認された。両試料には*large Gephyrocapsa*の初産出層準直下に終産出層準(1.60 Ma)

をもつ(Raffi, 2002) *Calcidiscus macintyreii*が産出しない。この年代の地層に産出する5.5 µm以上の楕円形のreticulofenestridsは一般に*large Gephyrocapsa*であることから、g174試料の楕円形のreticulofenestridsは*large Gephyrocapsa*と推定される。岩相や随伴種の産出状況がD06-02試料と類似することもこの推定を支持する。*large Gephyrocapsa*の産出はCN14a亜帯下部(1.25–1.59 Ma)に制約されることから、これら2試料の堆積年代は1.59–1.25 Maと考えられる。

グループ2：g326 (CN14a亜帯中部；1.25–1.04 Ma)。本試料に含まれる個体は保存状態が良好で、*C. macintyreii*, *large Gephyrocapsa*及び*G. parallela*がいずれも産出しない。*G. parallela*は房総半島上総層群においてMIS30 (1.04 Ma)に初産出層準をもつことが知られており(辻ほか, 2005)、以上より本試料の堆積年代は1.25–1.04 Maに制約される。

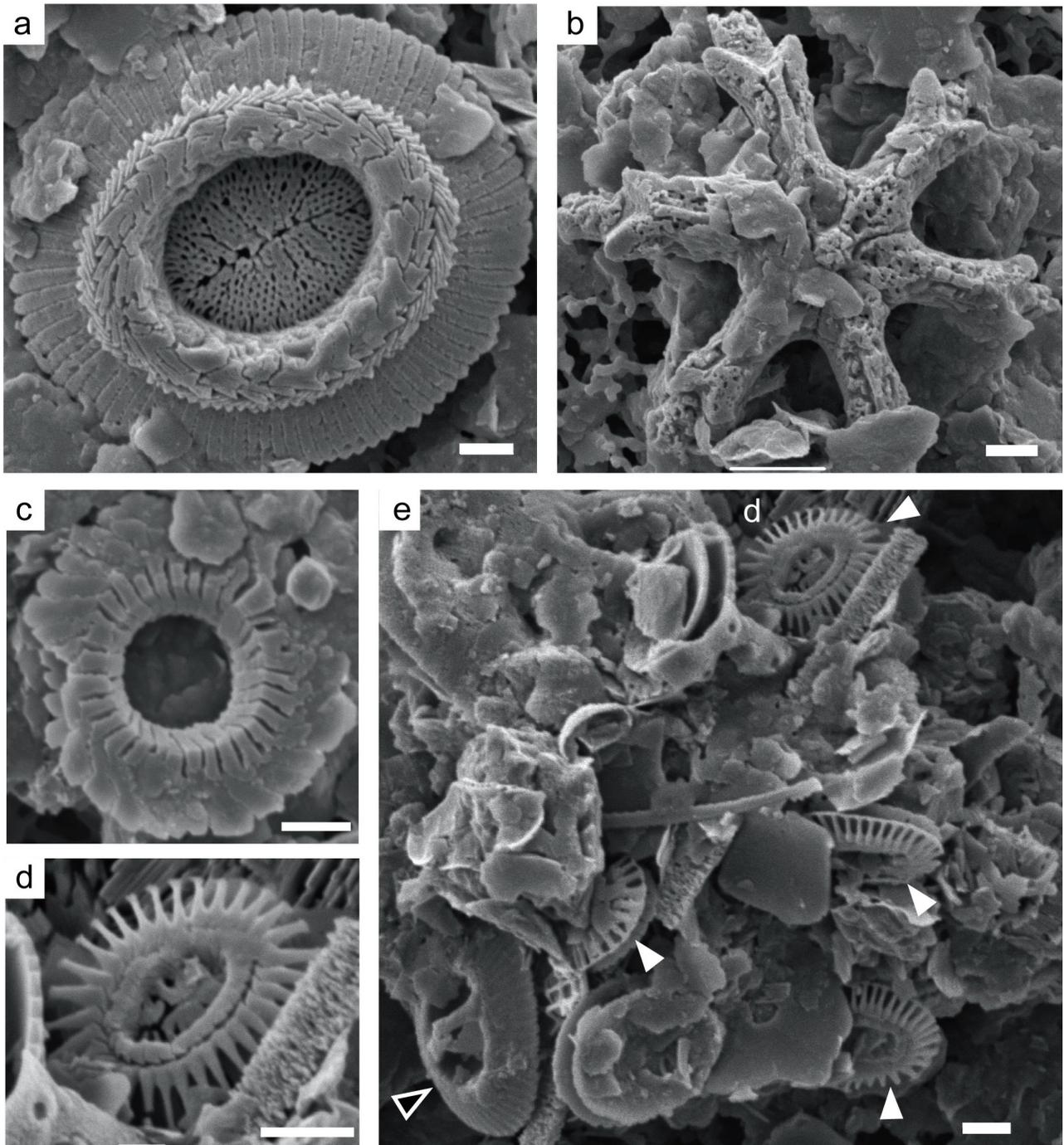
グループ3：D06-08 (CN14a亜帯上部；1.04–0.43 Ma)。本試料に含まれる個体は保存不良であり、reticulofenestridsのココリス中央部の過成長あるいは再結晶化が著しい。本試料からは*G. parallela*の産出が認められ、CN14a亜帯上限(0.43 Ma)に終産出層準をもつ*P. lacunosa*との共産から、本試料の堆積年代は1.04–0.43 Maと推定される。楕円形のreticulofenestridsについては*Reticulofenestra cf. asanoi*として同定し、さらなる年代制約は避けた。

一方、K-グラフ試料g201とドレッジ試料D06-15及びD06-16は*E. huxleyi*を含むことから、同種の初産出層準(0.29 Ma)を下限とするCN15帯に対比される(第2表)。このうちg201試料には*P. lacunosa*と*large Gephyrocapsa*がわずかに含まれるが、*E. huxleyi*の産出と矛盾するため、再堆積による混入と判断される。D06-15及びD06-16試料にはいずれもCN11b亜帯上限(3.82 Ma)とCN12a亜帯下部(3.61 Ma)にそれぞれ終産出層準をもつ*R. pseudumbilicus*と*Sphenolithus spp.*が保存の良い状態で含まれていたほか、CN12帯に終産出層準をもつ*Discoaster*属やCN10b–CN12b亜帯に産出範囲をもつ(Utsunomiya *et al.*, 2021)ことが知られる*Umbilicosphaera patera*も含まれており(第3図)、やはり再堆積による混入と判断される。

ドレッジ試料D06-19に含まれる個体については、ココリス中央部の過成長あるいは再結晶化が著しく、reticulofenestridsの同定やサイズ変化に関する検討も困難であった。第2表ではこのことを示すためクエスチョンマークで表現している。本試料からは4–5 µmの*Gephyrocapsa*属が産出したことから、下部更新統カラブリアン階以上に相当するCN13b亜帯–CN15帯とした。

4.2 浮遊性有孔虫化石帯

検討試料のうちドレッジ試料D06-15及びD06-16を除いて、産出頻度は多くないものの*Gt. truncatulinoides*(あるいは派生種である*Globorotalia pachythea*及び*Globorotalia excelsa*)と*Gt. tosaensis*の共産が認められた



第3図 ドレッジ試料D06-16から産出した石灰質ナノ化石。スケールバーは1 μm。

Fig. 3 Calcareous nannofossils from the dredge sample D06-16. (a) *Reticulofenestra pseudoumbilicus* Gartner, (b) *Discoaster surculus* Martini and Bramlette, (c) *Umbilicosphaera patera* Utsunomiya, Hagino and Tanaka, (d) *Emiliana huxleyi* (Lohmann), (e) sediment aggregates including *Gephyrocapsa oceanica* Kamptner (a black arrow) and *E. huxleyi* (white arrows) coccoliths. Scale bars = 1 μm.

(第3表). *Gt. truncatulinoides*の初産出年代は、西赤道太平洋のオントンジャワ海台で2.3 Ma, 北西太平洋中緯度に位置するシャツキー海台では2.0–2.4 Maとされている (Lam *et al.*, 2022). これらに基づいて北西太平洋にお

る本種の初産出準面の同時性を仮定すると、本海域において *Gt. truncatulinoides* 及び派生種の産出は、検討試料が更新統最下部のジェラシアン階以上に対比されることを示すと考えられる。さらに沖縄島に分布する上

部中新統-下部更新統島尻層群の上部では、標準化石帯PT1a亜帯の下限を定義する*Globigerinoidesella fistulosa*の終産出層準の上位に*Gt. truncatulinoides*の初産出層準が認められ、両種の共産は確認されていない(Natori, 1976; Ujiie, 1985). *Gt. truncatulinoides*及び派生種の産出と*Gsl. fistulosa*の非産出に加えて、終産出層準がPT1a亜帯の上限を定義する*Gt. tosaensis*の産出から、D06-15及びD06-16を除くドレッジ試料とK-クラブ試料はPT1a亜帯(下部-中部更新統)に対比される。これらの試料には、鮮新統に終産出層準をもつ示準種である*Globoturborotalita nepenthes*や*Dentoglobigerina altispira*も認められるが、いずれも再堆積による混入と判断される。

一方、ドレッジ試料D06-15及びD06-16は年代決定に有効な示準種がほとんど産出しなかった(第3表)。上部鮮新統に終産出層準をもつ*D. altispira*が産出しないことからPL5-PT1帯に対比されるとしたが、検討個体数も十分でなく決定的とは言えない。副次的な情報として、他の試料にも共通する随伴種である*N. atlantica*の産出や、相対的な保存状態の良さなどから、これら2試料の堆積年代はPT1a帯に対比される検討試料群と同時代かそれより新しい可能性が示唆される。

4.3 堆積年代と地質学的意義

4.3.1. CN14a/PT1a亜帯：前期-中期更新世

検討試料のうちドレッジ試料D06-02, D06-08及びK-クラブ試料g174, g326については、石灰質ナノ化石と浮遊性有孔虫化石の検討結果に矛盾はなく、堆積年代は前期-中期更新世と推定される。これらの試料はいずれも石灰質ナノ化石帯CN14a亜帯および浮遊性有孔虫化石帯PT1a亜帯に対比されるが、いくつかの有用な示準種の産出状況から層序学的な上下関係を推定することが可能である。

前期更新世後期(カラブリアン期)の年代を示す試料のうち最も古いものはD06-02及びg174試料であり、large *Gephyrocapsa*の産出から1.59-1.25 Maと推定される。両試料の採取地点はともに種子・屋久海脚南西縁部に位置し、地理的に非常に近接している(第1図)ことから、両試料は同一の地質体の近い層準に由来する可能性が高い。この地質体は、沖縄島周辺において島尻層群を不整合に覆い陸源あるいは石灰質碎屑岩を主体とする知念層、及びその上位に部分的に同時異相として形成が開始した礁複合体石灰岩である琉球層群下部(Iryu *et al.*, 2006; 千代延ほか, 2009; 藤田ほか, 2011)と同時代に形成されたと考えられる。また背弧側北部から得られたg326試料は、両試料よりもやや若い堆積年代(1.25-1.04 Ma)が示唆され、本試料の由来層準は琉球層群下部に対比される。

D06-02, g174及びg326試料の特徴は、構成粒子に多少の差異はあるものの、火山噴出物由来と考えられる鉱物粒子を顕著に含むことである。調査海域中央に島列を

なす口之島、中之島、諏訪之瀬島はいずれも活火山であるが、現在活動的でない悪石島や南西方の横当島も含めて、更新世以降現在に至る「第四紀新期火山活動」に関連するとされる(大四, 1992; 横瀬ほか, 2010)。島嶼部を含むトカラ列島周辺海域からは、中期更新世以降の安山岩質あるいは珪長質の火山活動を示す地質試料が多く得られている(横瀬ほか, 2010)のに対し、1 Maより古い前期更新世の初生的な火山岩年代の報告は極めて限られている。これと同時期の堆積年代を示すD06-02, g174, g326試料の由来層準は、いまだ詳しくわかっていない第四紀新期火山活動初期における、陸上・海底火山の形成発達、及びそれを背景とする堆積作用を記録している可能性がある。

D06-08試料は*G. parallela*と*P. lacunosa*の共産によりCN14a亜帯上部に対比され、堆積年代は前期更新世最後期から中期更新世前期(カラブリアン期-チバニアン期)に相当する1.04-0.43 Maと推定される。また本試料は、2020年度実施のGB21-1航海において宝島-横当島周辺海域で採取された下部更新統-中部更新統堆積岩(有元・宇都宮, 2023; 以下GB21-1試料と呼称)と年代的に近い層準に由来すると考えられ、ともに中-南琉球弧に広く分布する琉球層群中部の同時異相と考えられる(有元・宇都宮, 2022)。本試料とGB21-1試料を比較すると、岩相や石灰質微化石の保存状態が大きく異なり、堆積場の違いによる堆積作用や続成過程の違いが想定される。

本研究において検討した下部-中部更新統試料とGB21-1試料に含まれる浮遊性有孔虫化石群集を、有元・宇都宮(2022)の結果に基づいて比較すると、前者における*Neogloboquadrina*属の多産がひとつの大きな違いといえる。特に前者は*N. dutertrei*や*N. atlantica*に代表される大型で頑強な殻をもつ種の産出が特徴的であり、試料によってはやや小さく原始的な種である*Neogloboquadrina acostaensis*の産出頻度もGB21-1試料より明らかに高い。このような*Neogloboquadrina*属の産出状況の違いは、例えば現在の黒潮流域周辺のように特徴的な表層水塊の分布を反映した群集構造の違い(Ujiie and Ujiie, 2000)による可能性がある。またGB21-1試料と比較して本研究の検討試料が全体としてやや古い年代を示し、絶滅種を多く含むことを考慮すると、前期更新世における*Neogloboquadrina*属絶滅種群の衰退に伴う群集変化を反映している可能性もある。一方、このような生物学的背景による群集組成の時空間変化以外の要因として、*Neogloboquadrina*属現生種の殻が溶解など物理的破損に対して比較的強い(例えばParker and Berger, 1971)ことから類推して、再堆積プロセスを経た選択的濃集も考えられる。本研究の検討試料に産出した*N. atlantica*や*N. acostaensis*は後期中新世-前期更新世を特徴付ける絶滅種であり、島尻層群から*N. atlantica*は未報告であるものの*N. acostaensis*の産出は広く確認されている

(例えばUjii, 1985). しかしながら, 特に*N. atlantica*や*Neogloboquadrina inglei*など絶滅種の生層序年代に関する既往研究は日本周辺海域を含む北西太平洋において極めて少なく(例えばDomitsu *et al.*, 2011; Lam and Leckie, 2020), 今後の研究の進展によりトカラ列島周辺海域における前期更新世の群集進化や堆積作用について議論を深めることができるようになることが期待される。

なおK-グラフ試料g123については, 石灰質ナノ化石が非産出であり示準化石による制約は弱いものの, おそらく異地性の大型底生有孔虫化石をわずかに含むことが特徴である。琉球列島の第四系における大型底生有孔虫化石の産出は知念層以上の層準で知られ(藤田ほか, 2011), 層相区分や堆積環境の推定に広く用いられている(Sagawa *et al.*, 2001など)。水深や固結の程度, 海底カメラによる産出の観察から現世・完新統の地質体とは考えにくく, これらのことからg123試料は知念層あるいは琉球層群と同時代の地質体由来し, 堆積年代はカラブリアン期以降の更新世である可能性が高い。

4. 3. 2. CN15帯：中期更新世-現世

ドレッジ試料D06-15及びD06-16は, *E. huxleyi*の産出から石灰質ナノ化石帯CN15帯に対比され, 堆積年代は0.29 Ma以降と推定される。これは浮遊性有孔虫化石の検討結果と矛盾せず, 化石の保存状態が他試料と比べて相対的に良いという観察結果とも整合的である。またこれら2試料には鮮新世の石灰質ナノ化石絶滅種である*Discoaster* spp.及び*Reticulofenestra pseudumbilicus*の再堆積個体が認められることから, 島尻層群相当の鮮新統海成堆積岩体が後背地に露出し第四紀における砕屑物の供給源となったと考えられる。さらにこれらの試料は半固結状態であることから表層堆積物ではないとすると, 島尻層群相当の地質体の削剥は中期-後期更新世のある時期に起こった可能性が高い。このように中部更新統以上であるCN15帯に対比されつつ, 鮮新統由来の再堆積を示唆する石灰質ナノ化石を含む堆積岩・堆積物は, 沖縄島周辺の島棚縁辺の海底からも採取されている(田中, 2010, 2012)。第四紀の琉球弧におけるテクトニックイベントとして, 前期更新世における「島尻変動」(氏家, 1980など)や琉球層群主部形成後の「うるま変動」(沖縄第四紀調査団, 1976など)などが知られる(兼子, 2007; 新城, 2014)が, これらに代表される断続的な島嶼部及び周辺海域の地質構造発達に伴う堆積物の再移動が, 古い地質体のリサイクルによる新しい地質体の形成のメカニズムとなっていると考えられる。

一方, K-グラフ試料g201試料は同様に石灰質ナノ化石帯CN15帯に対比されるが, 浮遊性有孔虫化石群集としてはむしろ下部-中部更新統試料との類似性が認められ, 示準化石の産出状況から明らかに層準として下位の浮遊性有孔虫化石帯PT1a帯に対比される。本試料に含まれ

る個体の殻は不透明白色を呈し, 化石個体と判断されるものが大多数を占めた。以上のような観察結果の説明として, 中期更新世以降の地質構造発達を背景とし, 例えばD06地点やg174地点のようなPT1a帯層準を含む近傍の堆積岩露岩域が削剥され, g201地点に再堆積粒子の大規模な供給がある時点で起きたか, あるいは現在まで継続していることが考えられる。これはg201試料にCN14a帯に産出する石灰質ナノ化石の再堆積個体が認められることから支持される。

以上のように, 本調査海域における検討試料のうち特にCN15帯に対比される前弧側の堆積岩は, おそらく第四紀テクトニクスを背景とした鮮新統-中部更新統下部地質体の削剥と再堆積の影響を強く受けていることが, 石灰質微化石群集から明らかとなった。このように年代示準となる石灰質微化石の網羅的検討は, 地質試料の堆積年代の制約に加え, 堆積粒子の供給源となる後背地の地質体や再堆積プロセスの推定などを通じて地史の解明に大きく寄与するといえる。また, おそらく個体サイズの違いや物理化学的破壊に対する耐性など堆積粒子としての特性が異なることに由来し, 堆積環境や続成過程の違いにより化石の産出状況に時空間的に様々なバリエーションが生じることが想定される。これをふまえ, 本研究のように複数の分類群を用いて多角的に検討することが重要であり, より多くの地質情報を得ることに繋がると考えられる。

5. まとめ

トカラ列島周辺海域の海洋地質図整備を目的として行われたGB21-3航海において, 火山フロント東方(前弧側)及び西方(背弧側)の海底から堆積岩試料が採取された。1地点でのドレッジ及び5地点でのグラフ採泥により得られた石灰質あるいは非石灰質の砂岩, 泥岩など合計10試料について, 石灰質ナノ化石および浮遊性有孔虫化石の検討を行った結果, 保存状態は悪いもののほとんどの試料で産出が確認された。検討試料のうち石灰質ナノ化石を産出しなかったg125試料の地質年代は不明である。それ以外の検討試料は全て, 前期更新世カラブリアン期以降に形成されたと考えられる。さらに示準化石の産出から, 前弧側の種子・屋久海脚西縁付近に位置するドレッジ地点D06及び近傍の採泥地点g174, 並びに背弧側の東新曾根-サンゴ曾根間の採泥地点g326で採取された石灰質砂岩試料は, 石灰質ナノ化石帯CN14a帯及び浮遊性有孔虫化石帯PT1a帯に対比され, 堆積年代は1.59-0.43 Ma(前期更新世カラブリアン期-中期更新世チバニアン期)に制約される。これらの試料層準を含む地質体は, 琉球列島島嶼部に分布する下部更新統知念層あるいは更新統琉球層群の同時異相と考えられる。一方, D06地点で得られた非石灰質砂岩・泥岩試料, 及び同じく種子・屋久海脚西縁の採泥地点g201において採取された石灰砂

岩試料は石灰質ナノ化石帯CN15帯に対比され、堆積年代は0.29 Ma以降(中期更新世チバニアン期-完新世)に制約される。これらの若い堆積年代を示す試料には、鮮新統-中部更新統地質体に由来する石灰質微化石の再堆積個体が認められる。本研究において堆積年代が明らかになった試料層準を含む地質体は、前期更新世の琉球列島周辺海域における「泥の海」から「サンゴの海」への環境変遷(Iryu *et al.*, 2006)や、いまだ多くが知られていない琉球弧北部における前期更新世火山活動、そして第四紀テクトニクスを背景とした、数十万年-百万年程度のスケールにおける地殻表層の物質循環と地質構造発達を議論するうえで重要な役割を果たすと考えられる。

謝辞: GB21-3航海音波探査・採泥調査の各主任である石野沙季研究員・鈴木克明研究員には、本研究に使用した堆積岩試料、及び試料採取地点や航走観測の位置情報、試料の産状に関する情報をご提供いただきました。また粗稿に目を通していただき、堆積作用の解釈などについて議論していただきました。針金由美子主任研究員にはドレッジのオペレーションに関する情報をご提供いただきました。上河内信義船長をはじめとする望星丸の乗組員および東海大学実習生の皆様、また本調査航海の乗船研究者および学生の皆様には、調査の実施に関してご尽力いただきました。査読者である田中裕一郎博士の有益なご指摘により、本稿は改善されました。以上の方々に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 有元 純・宇都宮正志(2022) GB21-1航海においてトカラ列島周辺海域で採取された堆積物および堆積岩の石灰質微化石に基づく年代推定。地質調査研究報告, **73**, 267-274.
- Brummer, G. J. A. and Kučera, M. (2022) Taxonomic review of living planktonic foraminifera. *Journal of Micropalaeontology*, **41**, 29-74.
- 千代延俊・猿渡隼人・佐藤時幸・榎元淳一・井龍康文(2009) 沖縄本島勝連半島に分布する知念層の石灰質ナノ化石生層序。地質学雑誌, **115**, 528-539.
- 大四雅弘(1992) 琉球列島新生代の火山活動と岩石。松本 徕夫教授記念論文集, 49-60.
- Domitsu, H., Uchida, J., Ogane, K., Dobuchi, N., Sato, T., Ikehara, M., Nishi, H., Hasegawa, S. and Oda, M. (2011) Stratigraphic relationships between the last occurrence of *Neoglobobulimina inglei* and marine isotope stages in the northwest Pacific, D/V Chikyu Expedition 902, Hole C9001C. *Newsletters on Stratigraphy*, **44**, 113.
- 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.
- 藤田和彦・千代延俊・溝淵年哉・井龍康文(2011) 沖縄島那覇港沖の海底コアから発見された知念層とその意義。地質学雑誌, **117**, 625-631.
- 下司信夫・石塚 治(2007) 琉球弧の火山活動。地質ニュース, no. 634, 6-9.
- Hanken, N. M. (1979) The use of sodium tetraphenylborate and sodium chloride in the extraction of fossils from shales. *Journal of Paleontology*, **53**, 738-741.
- Iryu, Y., Matsuda, H., Machiyama, H., Piller, W. E., Quinn, T. M. and Mutti, M. (2006) Introductory perspective on the COREF Project. *Island Arc*, **15**, 393-406.
- 石野沙季・針金由美子・三澤文慶・井上卓彦(2023) 2021年度海域地質図航海で行ったトカラ列島周辺海域の反射法音波探査及びドレッジ概要。地質調査研究報告, **74**, 211-230.
- 兼子尚知(2007) 沖縄島および琉球弧の新生界層序。地質ニュース, no. 633, 22-30.
- 木村政昭・Wang Yugang・八木秀憲(1999) 琉球弧海域の海底地質構造および発達史。地質ニュース, no. 543, 24-38.
- Lam, A. R. and Leckie, R. M. (2020) Subtropical to temperate late Neogene to Quaternary planktic foraminiferal biostratigraphy across the Kuroshio Current Extension, Shatsky Rise, northwest Pacific Ocean. *PLoS One*, **15**, e0234351.
- Lam, A. R., Crundwell, M. P., Leckie, R. M., Albanese, J. and Uzel, J. P. (2022) Diachroneity rules the mid-latitudes: A test case using Late Neogene planktic foraminifera across the Western Pacific. *Geosciences*, **12**, 190.
- 中野 俊・下司信夫・小林哲夫・斎藤 眞・駒澤正夫・大熊茂雄(2008) 20万分の1地質図幅「中之島及び宝島」。産総研地質調査総合センター, 1 sheet.
- Natori, H. (1976) Planktonic foraminiferal biostratigraphy and datum planes in the Late Cenozoic sedimentary sequence in Okinawa-jima, Japan. In Takayanagi, Y. and Saito, T., eds., *Progress in Micropaleontology*, American Museum of Natural History, New York, 214-243.
- Okada, H. and Bukry, D. (1980) Supplementary modification and introduction of code numbers to the low-latitude coccolith biostratigraphic zonation (Bukry 1973, 1975). *Marine Micropaleontology*, **5**, 321-325.
- 沖縄第四紀調査団(1976) 沖縄および宮古群島の第四系一とくに“琉球石灰岩”の層序について一。地球科学, **30**, 145-162.
- Parker, F. L. and Berger, W. H. (1971) Faunal and solution patterns of planktonic foraminifera in surface sediments of the South Pacific. In Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, **18**, no. 1, Elsevier, 73-107.
- Raffi, I. (2002) Revision of the early-middle Pleistocene calcareous nannofossil biochronology (1.75-0.85 Ma).

- Marine Micropaleontology*, **45**, 25–55.
- Raffi, I., Wade, B. S., Pälike, H., Beu, A. G., Cooper, R., Crundwell, M. P., Krijgsman, W., Moore, T., Raine, I., Sardella, R. and Vernyhorova, Y. V. (2020) Chapter 29 - The Neogene Period. In *Geologic Time Scale 2020*, Elsevier, 1141–1215.
- Rögl, F. (1974) The evolution of the *Globorotalia truncatulinoides* and *Globorotalia crassaformis* group in the Pliocene and Pleistocene of the Timor trough, DSDP Leg 27, Site 262. Veevers, J. J., Heirtzler, J. R. *et al.*, Initial reports of the Deep Sea Drilling Project, **27**, Washington, U.S. Government Printing Office, 743–767.
- Sagawa, N., Nakamori, T. and Iryu, Y. (2001) Pleistocene reef development in the southwest Ryukyu Islands, Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **175**, 303–323.
- 新城竜一(2014) 琉球弧の地質と岩石：沖縄島を例として. 土木学会論文集A2 (応用力学), **70**, I_3-I_11.
- 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.
- 田中裕一郎(2010) 沖縄本島東西沖で採取された海底堆積物中の石灰質ナンノプランクトン遺骸群集と年代分析. 荒井晃作(編)「沖縄周辺海域の海洋地質学的研究」平成21年度研究概要報告書—沖縄島北西方沖海域—, 地質調査総合センター速報, no. 51, 122–125.
- 田中裕一郎(2012) 沖縄本島周辺海域で採取された海底堆積物の石灰質ナンノ化石による年代分析. 荒井晃作(編)「東シナ海沖縄トラフ海域の海洋地質学的研究」平成23年度研究概要報告書—北部沖縄トラフ海域—, 地質調査総合センター速報, no. 58, 134–135.
- 辻 隆司・宮田雄一郎・岡田 誠・三田 勲・中川 洋・佐藤由理・中水 勝(2005) 房総半島に分布する下部更新統上総層群大田代層と梅ヶ瀬層の高精度堆積年代—石油公団研究井TR-3 コアの酸素同位体比・古地磁気・石灰質ナンノ化石に基づく年代層序—. 地質学雑誌, **111**, 1–20.
- 氏家 宏(1980) 南琉球弧“500 m島棚”の第四紀地史上の意義. 第四紀研究, **18**, 209–219.
- Ujiie, H. (1985) A standard late Cenozoic microbiostratigraphy in southern Okinawa-jima, Japan. II: Details on the occurrence of planktonic foraminifera with some taxonomic annotations. *Bulletin of the National Science Museum. Series C*, **11**, 103–136.
- Ujiie, Y. and Ujiie, H. (2000) Distribution and oceanographic relationships of modern planktonic foraminifera in the Ryukyu Arc region, Northwest Pacific Ocean. *Journal of Foraminiferal Research*, **30**, 336–360.
- Utsunomiya, M., Hagino, K. and Tanaka, Y. (2021) Speciation of extant Umbilicosphaera (Prymnesiophyceae) during the Pliocene. *Marine Micropaleontology*, **169**, 102037.
- Wade, B. S., Pearson, P. N., Berggren, W. A. and Pälike, H. (2011) Review and revision of Cenozoic tropical planktonic foraminiferal biostratigraphy and calibration to the geomagnetic polarity and astronomical time scale. *Earth-Science Reviews*, **104**, 111–142.
- 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.
- Young, J. R., Wade, B. S. and Huber B. T., eds. (2017) pforams@mikrotax. <https://www.mikrotax.org/pforams> (閲覧日：2022年9月22日)

(受付：2022年10月31日； 受理：2023年10月20日)

