

パラオ海溝陸側斜面に露出する石灰岩の 年代と堆積環境 —Dive 293 潜航報告—

北里 洋*¹ 藤岡換太郎*²

パラオ海溝陸側斜面に露出している石灰岩岩体の地質を明らかにし、パラオ群島の構造発達を理解することを目的に潜航を行った。

石灰岩岩体は、水平方向に弱い層理が発達する砕屑性石灰岩である。源岩は礁性石灰岩である。砕屑性石灰岩には深海生有孔虫化石が含まれており、また石灰岩の露頭に挟まるタービダイト層も深海で堆積していることから、この石灰岩岩体が最終的に形成された場所は深海である。石灰岩の年代は、中期中新世である。しかし、石灰岩がパラオ群島あるいはカロリンプレート上の海山のどこで形成され、それがどのように沈降し、どのように崩壊して現在の位置にあるのかについては、まだ不明である。パラオ海溝陸側斜面の詳細な地形調査と更なる潜航調査が必要である。

潜航地点の底質には、CCD 以下の水深であるにも関わらず、保存の良い有孔虫化石が含まれている。また、石灰質殻を持った底生有孔虫類が生息している。これは、基盤を成す岩石が石灰岩であるために間隙水のカルシウム濃度が非常に高くなり、そのために CCD 以下でも石灰質の殻が溶けずにいるのである。

キーワード：パラオ海溝、石灰岩、中期中新世、深海、CCD

Depositional Environment and Geologic Age of Limestone Bodies on the Landward Slope of the Palau Trench

Hiroshi KITAZATO*³ Kantaro FUJIOKA*⁴

In order to elucidate the geology of limestone bodies on the landward slope of the Palau Trench, we dived in the Palau Trench with the submersible "Shinkai 6500".

The limestone bodies are composed of weakly bedded clastic limestone. A brownish gray turbidite layer was interbedded in the limestones. The limestone clasts originated as shallow reefal limestone. The clastic limestone may have been deposited in the deep-sea, however, because lower bathyal benthic foraminifera occur within it. Bathyal

* 1 静岡大学理学部生物地球環境科学科（地球科学教室）

* 2 海洋科学技術センター深海研究部

* 3 Department of Life and Earth Sciences, Faculty of Science, Shizuoka University

* 4 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

benthic foraminifera also occur in a turbidite layer. The limestone bodies were thus ultimately deposited in the deep-sea, though the original clasts were formed in shallow marine environments. However, the tectonic mechanism by which the clastic limestone was deposited on the landward slope of the Palau Trench is still unclear.

Many calcareous foraminiferal fossils occur in samples collected during Dive 293, even though the dive site was located below the CCD. The calcium content of the interstitial water of the sediments may be much higher than in typical marine sediments of the same depth, because of the presence of limestone blocks within the sediments.

Key words : Palau Trench, Limestones, Middle Miocene, Deep-sea, CCD

1. はじめに

パラオ海溝は、フィリピン海プレートの東縁に存在する、伊豆-小笠原、マリアナ、ヤップ海溝のさらに南側に位置している。また、パラオ群島は九州-パラオ古島弧の南端にあたる、古い火山と珊瑚礁の島である。フィリピン海プレート南端部のテクトニクスについての議論は少ない (Weissel and Anderson, 1978; Cardwell *et al.*, 1983)。パラオ島の地質についても、古くは田山 (1936)、江口 (1936) の地形・地質および珊瑚礁の調査があるものの、最近では Johnson and Nakamura (1985) の岩石学的研究と Haston *et al.* (1988) の古地磁気学的研究があるに過ぎない。

パラオ島弧-海溝系の地形と地質については、白鳳丸 KH84-1, 87-3, 92-1 次航海において地形、地質、地球物理の調査が行われた。マルチチャンネル音波探査によるパラオ海溝の陸側の地質断面は、南部では 4,500m 以下に caotic な構造と付加帯の構造が現れていた (Tokuyama *et al.*, 1985; 藤岡・北里, 1994) が、北部では付加帯の構造ははっきりしておらず、土石流堆積物である炭酸塩タービダイトが分布する (Yamamoto *et al.*, 1986)。このように、パラオ海溝の地質構造は一定しておらず、従ってパラオ島弧の構造発達もわからないままであった (藤岡・北里, 1994)。

1994 年に行われた「しんかい 6500」Dive 190 のおりに、藤岡は、水深 6,500m 付近のパラオ海溝南部の陸側斜面に石灰岩岩体が露出しているのを発見した (藤岡・北里, 1994)。CCD 以下の水深である 6,500m で in situ に石灰岩が堆積し、形成されるわけではなく、浅いところで出来た岩体は何らかの構造的変位によって、この水深にまで移動してきたことは明らかである。石灰岩の移動については 3 つの可能性が指摘されている。1) パラオ島弧の浅海で形成された石灰岩が急激な沈降によって現在

の位置まで移動した。2) パラオ島弧の浅海で形成された石灰岩が斜面崩壊によって移動した。3) カロリンプレート上の海山の上に形成された石灰岩岩体が付加された。これらの可能性のうち、もっともらしいものに絞るためには、石灰岩の地質構造、形成年代、堆積環境を明らかにすることが必要である。「Southerncross'95」航海において行われた「しんかい 6500」による潜航 Dive 293 では、上記の目的を明らかにするために、石灰岩岩体に再び潜航した。また、付随的に、CCD 以深の海溝部の底質および底生生物群集の観察を行った。

2. 潜航概要

潜航は、1995 年 10 月 8 日に行った。潜航地点と潜航ルートを図 1, 2 に示す。潜航は、石灰岩岩体を目指して潜入し、石灰岩岩体を観察したのちに 5,531m 地点まで海底に沿って露頭と地形の観察を行った。また、要所で試料を採集した。

着底地点 (6,498m) の底質は石灰岩で、表面には暗灰色の石灰岩破片混じりの泥が数 cm-10cm の厚さで覆っていた。着底地点より、海底に沿って数十 m ほど浅い方に移動すると崩壊した崖の基部に到達した (写真 1)。崩壊面には石灰岩が露出し、表面には無数の条痕が発達していた。崩壊面の上方は急崖で、崖を登ると尾根筋にでた。尾根は平坦な緩斜面であるが、やせており、次の崩壊谷が隣接する。次の谷が、Dive 190 で観察した谷であった。崩壊谷の形態は馬蹄形で、このような崩壊谷は同じ水深に最低 4 つ連続して存在していた (図 3)。いずれの谷も地形は似ており、谷の中には条痕が刻まれていた。石灰岩の露頭は、ほぼ水平方向に弱い層理が発達している (写真 2) もの、おおよそ塊状の表面をしており、所々、ノジュール状の突起がある。ノジュールも層理に沿って分布する。Dive 190 露頭の上方には黒い地層

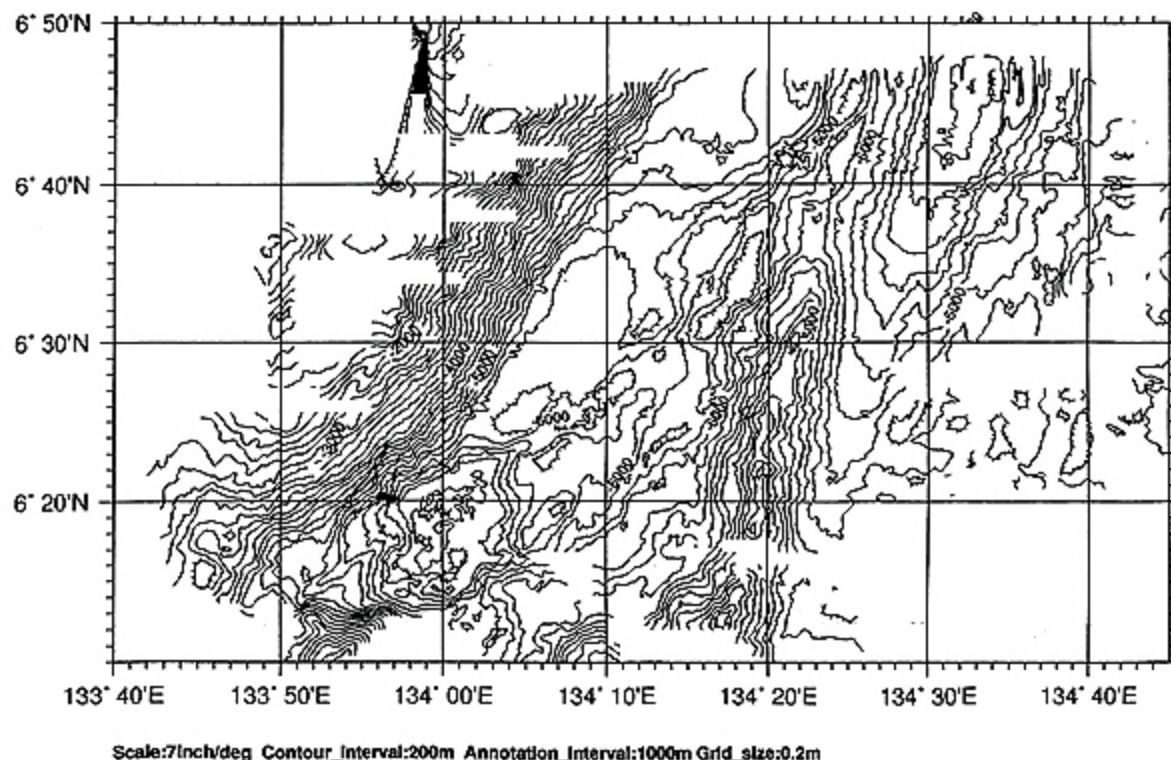


図 1 バラオ海溝南部の Sea Beam Map と Dive 293 の潜航地点。パラオ群島は図の北西方向にある
 Fig. 1 Map showing submarine topography in the southern part of the Palau Trench. Diving track of Dive 293 is drawn in the figure.

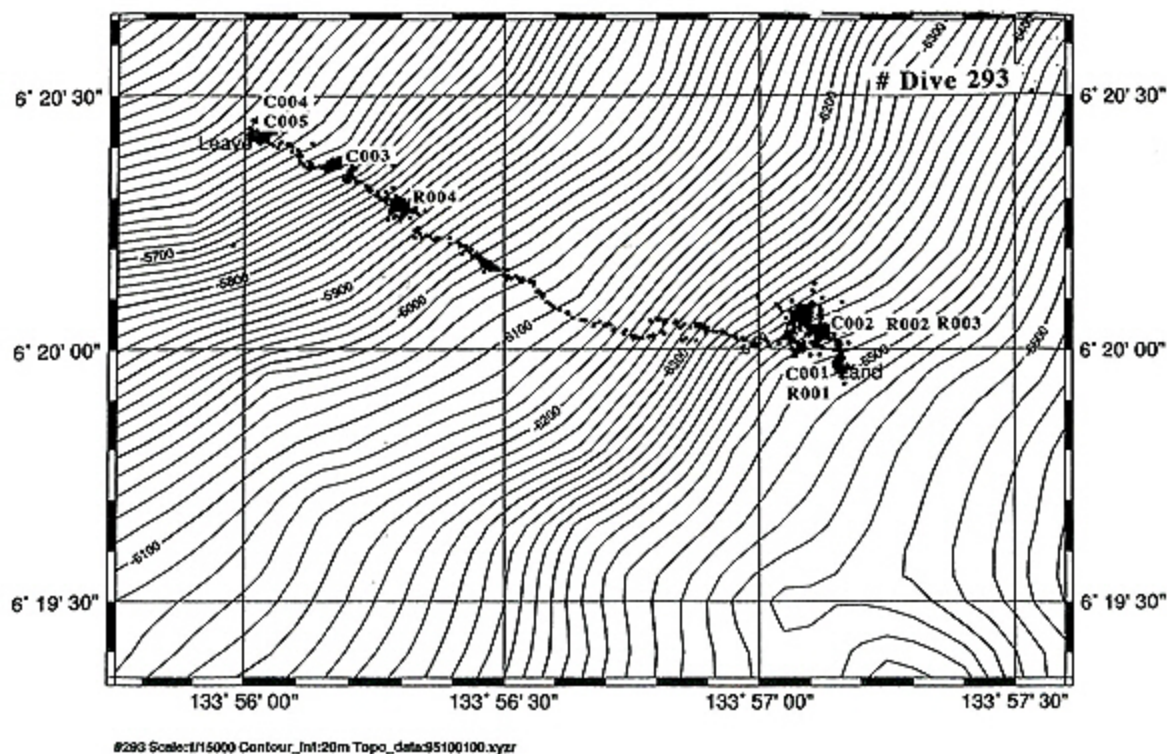


図 2 「しんかい 6500」 航跡図と試料採取地点
 Fig. 2 Map shows diving tracks of Dive 293 and sampling localities.

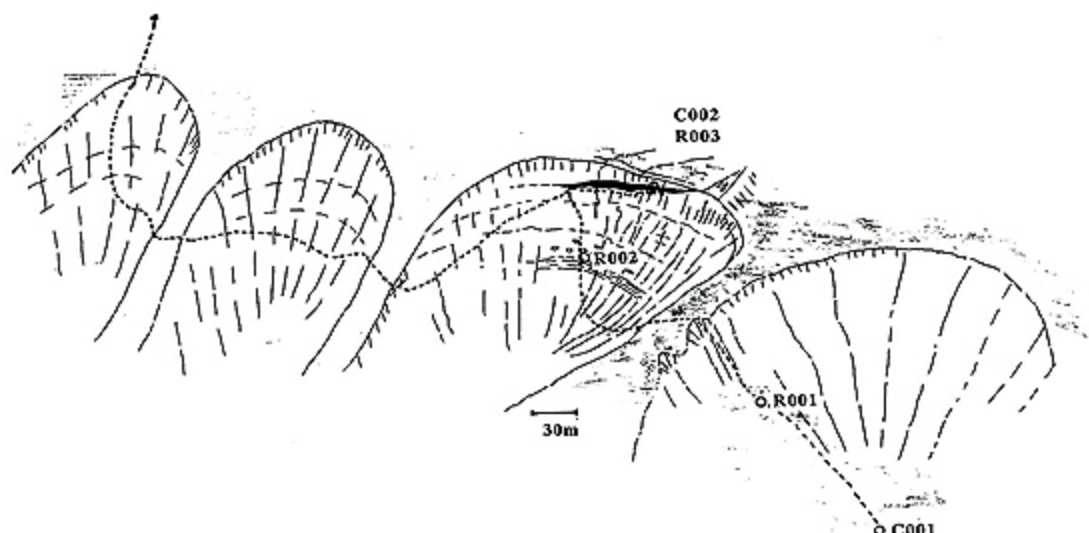


図3 馬蹄形をした崩落地形の鯨観図と潜航コース

Fig. 3 Whale's-eye view sketch shows slumping submarine topography which has horse shoe shapes. Both diving track of Dive 293 and sampling localities are shown in the figure.

が挟在するが、露頭内で左方向にせん滅する。この層は、級化層理が発達した砂と泥から構成されたタービダイトで、細粒の泥質部には多くの石灰質有孔虫化石を含んでいた。なお、石灰岩の崖の一部には、垂直方向の節理が発達した場所もあった。

馬蹄形の崩壊谷列より浅い部分の斜面は緩傾斜であるが、所々に急斜面が現れる。基盤は、親指大の角礫が集合した石灰質の岩石で、おそらく土石流堆積物である。緩斜面では、石灰質岩は所々雪庇のように出っ張っているところがあり（写真4）、表面は泥で覆われていた。急な斜面になると石灰質岩は露頭を形成しており、その表面は常に溶けているために滑らかであった。

この海域の表層の堆積物は暗灰色の泥で、石灰岩および石灰質岩を数cmの厚さで薄く覆っている（写真5）。泥には、葉、茎、根などの陸上植物の破片を多く含んでおり、陸上からの有機物の付加が極めて活発であることを示している。このため、堆積物は栄養分に富んでおり、ナマコ、オヨギゴカイ、クモヒトデなどの底生生物が極めて多く生息している。ある種のナマコは、半遠洋性堆積物中に生痕化石としてよく見られる、渦巻き状の糞を排泄していた。なお、堆積物の厚みが数cmと薄いために、Zoophycosなどの堆積物中に生痕を作る可能性がある内生生物はほとんど分布しなかった。

本潜航では岩石試料4点、コア試料5点の計9個の試料を採集した。R001は崩落崖の下部の転石を採集した。サンゴの破片を核にしてできた石灰藻球と大型有孔虫、

蘇虫、フジツボなどが含まれた礁性石灰岩である。R002は、Dive 190の露頭から突き出したノジュールである。一部が再結晶した碎屑性石灰岩である。R003はその露頭の上に挟まった暗灰褐色のタービダイトである。R004は水深5,809mの地点の雪庇状に出っ張った石灰質岩石を採集した。黄白色の親指大の角礫からなる石灰質岩である。

Push coreは5本採集した。C001、C003、C004、C005は石灰質岩石を薄く覆う泥を採集することを試みたが、C001はすべて流失した。また、C004、005は上部の泥はほとんど流失し、泥の下の石灰質岩石が採取できた。C002は暗灰褐色のタービダイト層を採集した。

表1に、push coreおよび岩石試料に含まれていた有孔虫群集組成を示す。底生有孔虫群は、*Reophax* spp., *Glomospira* spp.などの砂質有孔虫を主体とするが、*Chilostomella* sp., *Fursenkoina* sp., *Cassidulina pacifica*, *Uvigerina proboscidea*そして*Epistominella exigua*などの石灰質の有孔虫も含んでいた。再結晶した浅海性有孔虫も産出する。また、保存の良い浮遊性有孔虫の殻を多く含む。岩石試料からは、再結晶が進んだ浅海性の底生有孔虫の*Cibicides* spp., *Amphistegina* spp.などが産出する。

3. パラオ海溝陸側斜面に露出する石灰岩岩体

3.1 構造と岩相

石灰岩は、6,500mの着底地点から5,500mの離底点ま

species name / sample no.	R002	C002	R003	C003	R004	C004	C005
(benthic Foraminifera)							
Komokiacean				*			*
<i>Allogromia</i> spp.				*			
<i>Adercotryma glomeratum</i>						*	
<i>Alveolophragmium</i> sp.		*		*			
<i>Ammobaculites agglutinans</i>				*		*	*
<i>Ammodiscus</i> sp.						*	
<i>Ammoscalaria</i> sp.				*			
<i>Cystammina</i> sp.							*
<i>Discammina compressa</i>						*	
<i>Eggerella</i> sp.							*
<i>Glomospira charoides</i>				*		*	*
<i>G. gordialis</i>				*			
<i>Haplophragmoides</i> spp.				*		*	*
<i>Hormosira ovicula</i>						*	
<i>Hyperammina</i> sp.			*			*	*
<i>Lagenammina</i> spp.				*		*	*
<i>Lepidolysis</i> sp.				*		*	*
<i>Morulaeplecta</i> sp.				*			
<i>Nodellum</i> spp.				*		*	
<i>Reophax</i> spp.				*		*	*
<i>Resigella</i> sp.				*			
<i>Rhabdammina abyssolum</i>		*	*	*		*	*
<i>Saccorhiza ramosa</i>			*			*	*
<i>Spiroplectammina</i> sp.				*		*	
<i>Technitella</i> sp.				*			
<i>Tosata</i> sp.			*				
<i>Trochammina</i> spp.				*		*	*
<i>Alabaminella</i> cf. <i>weddellensis</i>				*			*
<i>Cassidulina pacifica</i>			*		*		
<i>Chilostomella</i> sp.				*			
<i>Cibicides wuellerstorfi</i>			*		*		*
<i>Cibicides ariminensis</i>			*				
<i>Epistominella exigua</i>				*			*
<i>Favocassidulina fava</i>			*				
<i>Fissurina</i> spp.						*	
<i>Fursenkoina</i> spp.				*			
<i>Globocassidulina subglobosa</i>							*
<i>Gyroldina</i> sp.			*				
<i>Laticarinina pauperata</i>							*
<i>Melonis sphaeroides</i>							*
<i>Oridorsalis umbonatus</i>					*		*
<i>Oridorsalis</i> sp.			*				
<i>Pullenia</i> spp.					*	*	
<i>Sphaeroidina bullioides</i>					*		
<i>Silostomella lepidula</i>							*
<i>Uvigerina proboscidea</i>					*		*
recrystallized <i>Amphistegina</i>			*		*		
recrystallized <i>Cassidulina</i>	*		*				
recrystallized <i>Cibicides</i>	*				*	*	
recrystallized <i>Glandulina</i>							*
recrystallized <i>Heterolepa</i>					*		
recrystallized <i>Operculina</i>	*		*		*		
(planktonic Foraminifera)							
<i>Globigerina</i> spp.			*				
<i>Globigerinoides ruber</i>			*				
<i>Globigerinoides sacculifer</i>			*			*	*
<i>Globigerinella siphonifera</i>			*				
<i>Globorotalia crassaformis</i>			*				
<i>Grt. hirsuta</i>			*				
<i>Grt. menardii</i>			*			*	*
<i>Grt. scitula</i>							*
<i>Grt. tumida</i>			*			*	
<i>Grt. truncatulinoides</i>			*			*	
<i>Neoglobobulimina dutertrei</i>			*			*	*
<i>Ngg. altispira altispira</i>			*			*	
<i>Orbulina universa</i>			*			*	*
<i>Pulleniatina obliqueloculata</i>			*			*	*
<i>Sphaeroidinella dehiscens</i>			*			*	*

表 1 Dive 293 の試料中に含まれている有孔虫の産出リスト

Table 1 Species occurrence list of foraminifera both from push cores and rock samples of Dive 293.

での間に連続して分布する。とくに、6,450m から 6,400 m にかけての水深の部分には、馬蹄形をした崩落崖が等深線に沿って複数分布している。また、緩斜面では数 cm の厚さの暗灰色の泥が石灰岩を覆うが、斜面が急になると石灰岩の崖になる。石灰岩の崖はほぼ塊状の白色の露頭であるが、弱く水平方向の層理が発達する。石灰岩の露頭からは石灰岩が固結したものがノジュール状に突き出しているが、これも水平方向に並んでいる。Dive 190 露頭の上部には、暗灰褐色のタービダイト層が挟まっている。このことについてはすでに報告済みである(藤岡・北里, 1994)。

石灰岩は碎屑性で、親指大から人頭大の角礫が凝集したものである。ただし、露頭が CCD 以下の水深に当たるために、露頭から常に石灰分が溶出しており、塊状に見える。石灰岩には再結晶したサンゴ、蘚虫、大型有孔虫が含まれており、浅海で形成されたものである。

石灰岩に挟在する暗灰褐色の層は、級化層理の発達した turbidite である。そのうち泥岩からは豊富な有孔虫化石を産した(表 1, R003)。底生有孔虫は lower bathyal に特徴的な、*Cibicidoides wuellerstorfi*, *Favosites*, *Rhabdammina abyssolum* などを産し、浅海生有孔虫は石灰岩から洗い出されたとされる再結晶した *Amphistegina* を産するに過ぎない。つまり、この泥岩は、石灰岩堆積時の不整合ではなく、石灰岩が崩壊して再堆積したときに形成されたタービダイト層である。

石灰岩には、一部、節理が発達していた。つまり、地層が形成された後に変形運動を受けていることを示している。

3. 2 地質年代

石灰岩の地質年代は、含まれている微化石から推定した。R002 からは石灰質ナノ化石の *Sphenolithus heteromorphus* と *Cyclocargolithus floridanus* を産出し、CN3-4 (13.6-18.2Ma) である(岡田尚武氏私信)。また、R003 のタービダイト層からは浮遊性有孔虫化石の *Globoquadrina altispira altispira* を産出する。この種の産出年代は N.5-N.20 であり(Bolli and Sanders, 1985)、石灰質ナノ化石の年代と矛盾しない。すなわち、この碎屑性石灰岩の形成年代は中中新世である。ただし、源岩の礁性石灰岩の形成年代については、直接的な年代資料がなく、引き続き検討中である。

3. 3 堆積環境

R001 の礁性石灰岩は、光合成生物を共生させるサンゴ、石灰藻、大型有孔虫類の骨格から構成されており、

浅海性である。また、R002, R004 には再結晶した大型有孔虫化石を含んでおり、これも石灰岩が浅海で形成されたことを示している。しかし、R004 には再結晶した浅海性有孔虫化石のほかに lower bathyal の底生有孔虫化石を含んでおり、石灰岩の角礫を含む碎屑性石灰質岩は深海で形成されたことを示唆する。一方、石灰岩に挟在する暗灰褐色のタービダイト層には lower bathyal の有孔虫化石が含まれており、タービダイトが深海に堆積したものであることを示している。これらの事実から、パラオ海溝の石灰岩岩体は、源岩は浅海性の礁性石灰岩であるものの、その後崩壊して碎屑性石灰岩として深海に再堆積したものと考えることができる。

なお、礁性石灰岩がパラオ群島側にあったのか、カリリプレート上の海山であったのかについてはわからない。礁性石灰岩そのものの年代を知る必要がある。

4. CCD 以下の深さに石灰岩岩体が存在していることによって生物に及ぼす影響について

Dive 293 は、水深 5,500-6,500m にかけての潜航であった。赤道太平洋の炭酸カルシウム補償深度 (CCD) は 4,500-5,000m 付近にあるので (Seibold and Berger, 1996)、この潜航で採集した堆積物中には石灰質の粒子を含んでいないはずである。しかし、表 1 に示すように、どの試料にも保存の良い石灰質有孔虫の殻を含んでいた。また、C003 の試料にはローズベンガルで染まった *Chilostomella* sp. と *Fursenkoina* sp. などの石灰質底生有孔虫がいた。つまり、原形質を持っている (=生きていた) ことを示している。これはなぜであろうか?

Dive 293 の潜航地点には石灰岩岩体が分布している。潜航時に石灰岩の露頭を観察すると、海水よりも密度の高いものが陽炎のように石灰岩から立ち昇っていることがわかる。これは、石灰岩からカルシウム分が海水中に溶け出していることを示す現象である。つまり、石灰岩を覆う堆積物の間隙には、CCD 以下であっても十分なカルシウム濃度を保っている可能性が高い。このような条件では、CCD 以下の深度であっても石灰質の浮遊性有孔虫類の殻は海底に堆積した後も溶けず、また、石灰質の底生有孔虫類も生息しているのである。

5. ま と め

パラオ海溝陸側斜面に露出している石灰岩岩体の地質を明らかにし、パラオ群島の構造発達を理解することを目的に潜航を行った。

石灰岩岩体は、水平方向に弱い層理が発達する碎屑性

石灰岩である。源岩は礁性石灰岩であるが、砕屑性石灰岩には深海生有孔虫化石が含まれており、また石灰岩の露頭に挟まるタービダイト層も深海で堆積していることから、この石灰岩岩体が最終的に形成された場所は深海である。

石灰岩の年代は、中期中新世である。しかし、源岩である礁性石灰岩の形成年代はわからない。

石灰岩がパラオ群島あるいはカロリンプレート上の海山のどこで形成され、それがどのように沈降し、どのように崩壊して現在の位置にあるのかについては、まだ不明な点が多い。パラオ海溝陸側斜面の詳細な地形調査と更なる潜航調査が必要である。

潜航地点の底質には、CCD 以下の水深であるにも関わらず、保存の良い有孔虫化石が含まれており、また石灰質殻を持った底生有孔虫類が生息している。これは、基盤を成す岩石が石灰岩であるために、間隙水のカルシウム濃度が非常に高くなっていることに起因することである。

謝 辞

潜航に際し、「しんかい 6500」運航チーム・「よこすか」乗組員の方々には素晴らしい操船をしていただいた。おかげで、Dive 190 で訪れた石灰岩の露頭に pin-point dive をすることができた。深海研究部堀田宏部長には、航海全般の便宜を図っていただいた。小林和男博士、岩淵洋博士、小寺透、富士原敏也、田村千織、大森琴絵、加藤和浩、有吉正幸の諸氏には、「よこすか」の船上において議論をしていただき、また潜航に際してはさまざまな支援をしていただいた。北海道大学の岡田尚武博士には石灰質ナノ化石の鑑定をしていただいた。Tuebingen 大学の Hans Peter Luterbacher 博士には、石灰岩の堆積相解析をお願いした。これらの方々にお礼申し上げる。

引用文献

- Bolli, H.M. and J.B. Saunders (1985): "Oligocene to Holocene low latitude planktic foraminifera." p 155-262. In: *Plankton Stratigraphy*. Cambridge Earth Science Series. Edited by H.M. Bolli, J.B. Saunders and K. Perch-Nielsen, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Cardwell, R.K., B.L. Isacks and D.E. Karig (1980): "The spatial distribution of earthquakes, focal

mechanism solution, and subducted lithosphere in the Philippine and Northeastern Indonesian Islands." p1-35. In: *The tectonic and geologic evolution of southeast Asian seas and islands*. Geophysical Monograph 23. Edited by D.E. Hayes.

江口元起 (1935): 南洋パラオ島群の珊瑚及珊瑚礁. 東北帝大理地質古生物研報, 16, 1-49.

藤岡換太郎・北里 洋 (1994): パラオ海溝陸側斜面の巨大石灰岩帯の発見とその意義. JAMSTEC 深海研究, 10, 231-242.

Haston, R., M. Fuller and E. Schmidtke (1988): Paleomagnetic results from Palau, west Caroline Islands: A constraint on Philippine Sea Plate motion. *Geology*, 16, 654-657.

Johnson, K. and Y. Nakamura (1985): "Island arc tholeiite series rocks from Palau: Major, trace and rare earth elements." p 298-305. In: *Preliminary report of the Hakuho Maru cruise KH84-1*. Edited by K. Kobayashi.

Seibold, E. and W.H. Berger (1996): *The sea floor. An introduction to marine geology*. 3rd edition. Springer Verlag, Berlin, 356 pp.

田山利三郎 (1936): 地学上から見たヤップ島. 科学, 6, 61-65.

田山利三郎 (1937): パラオ島群の地形, 地質並びに珊瑚礁. 東北帝大理地質古生物研報, 18, 1-67.

Tokuyama, H., T. Asanuma, E. Nishiyama, H. Hatori, H. Chiba, S. Ueno and N. Tomita (1985): "Multi-channel seismic reflection survey." p 282-291. In: *Preliminary report of the Hakuho Maru cruise KH84-1*. Edited by K. Kobayashi.

Weissel, J.K. and R. Anderson (1978): Is there Caroline Plate? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 41, 143-158.

Yamamoto, S., H. Tokuyama, K. Fujioka, A. Takeuchi and H. Ujiie (1988): Carbonate turbidites deposited on the floor of Palau Trench. *Marine Geology*, 82, 217-233.

(原稿受理: 1996 年 7 月 12 日)

(注) 写真は次ページ以降に掲載

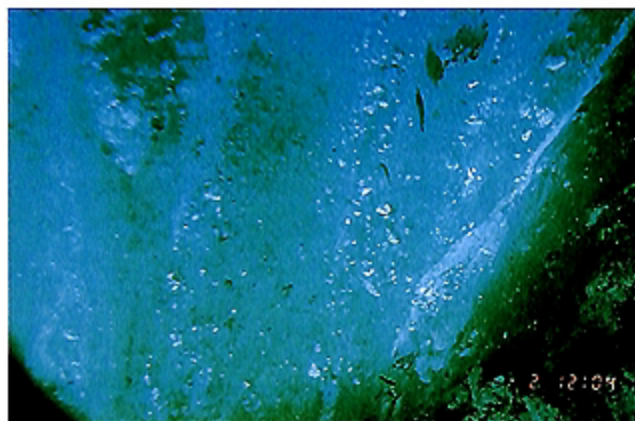


写真 1 馬蹄形をした崩落地形の基部の崖堆積物
Photo 1 Talus deposits at the basal part of horse shoe shaped sliding topography.

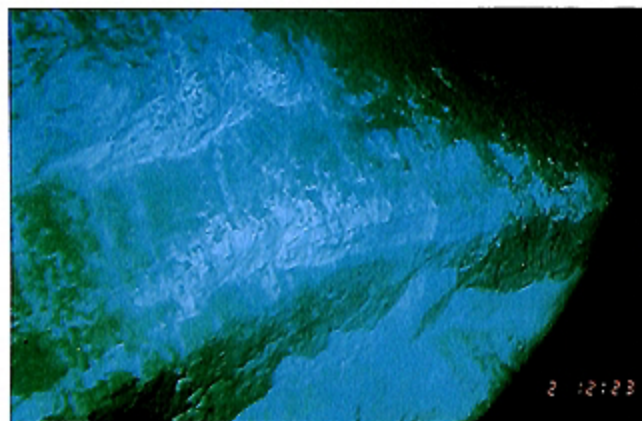


写真 2 弱く成層した砕屑性石灰岩
Photo 2 Weakly bedded clastic limestone.



写真 3 節理の発達した砕屑性石灰岩
Photo 3 Clastic limestone with columnar joints.

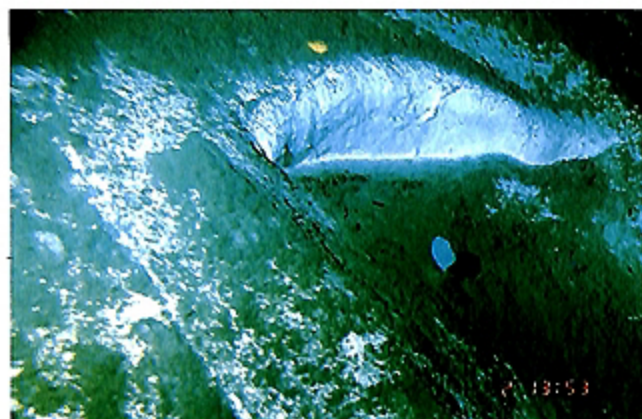


写真 4 雪庇状に突き出した石灰岩の上を泥が覆っている
Photo 4 Brownish gray mud covers on sheltered limestone.



写真 5 泥に覆われた緩斜面。一部に石灰岩が覗いている
Photo 5 Gentle slope is covered with mud. Underlying limestone is partly appeared on the surface.