

石垣島の現成サンゴ礁浅海域における ナガウニによる堆積物生産

鈴木 倫太郎*

Sediment Production by *Echinometra mathaei* in the Shallow Littoral Zone of Coral Reefs, the Ishigaki Island, Ryukyus, Japan

Rintaro SUZUKI *

Abstract

Sea urchins graze on limestone and at the same time, they also produce sediments by discharging various intakes into the sea bottom of the coral reefs.

This study was done on the Shiraho and Arakawashita reefs, the Ishigaki Island, Ryukyus. There are some differences in reef topographies and sediment composition between the 2 reefs. In this study, the author mainly analyzed the gut contents of *Echinometra mathaei* distributed predominantly within the 2 study reefs.

The result are as follows; 1) *E. mathaei* produces the fine sediment of less than 1 mm in diameter into the sea bottom of the coral reef. The grain size distribution of the gut contents of *E. mathaei* is different from that of bottom sediments near the area inhabited by *E. mathaei*. It is thought that the fine sediment ingested by *E. mathaei* moved from the inhabited area to the other locations by wave and tidal currents. This indicates that *E. mathaei* discharges calcium carbonate accumulated by reef builders and moves to another place. 2) Comparing the results obtained from 2 coral reefsites, the contents ingested by *E. mathaei* change according to geographical zone. The intake of *E. mathaei* contains not only fragments eroding coral limestone but also sediments from the nearby sea floor. 3) There has been no research on the characteristics of intake materials to quantify erosion by *E. mathaei*. The erosion rates reported in the previous research seem to be over estimates than the actual rate. 4) *E. mathaei* yields fine sediments by crushing and discharging coral limestone produced by reef builders. Moreover, it is thought that the sediments from *E. mathaei* have a little influence on the total amount of sediment produced by other organisms in the whole coral reef.

Key words : Coral reefs, bioerosion, sedimentation, gut contents of *Echinometra mathaei*, sediments of coral reef

キーワード : サンゴ礁, 生物侵食, 堆積物生産, ナガウニの摂取物, サンゴ礁堆積物

* 駒澤大学応用地理研究所

* Institute for Applied Geography of KOMAZAWA University

I. はじめに

サンゴ礁では物理的侵食・化学的溶食に加え、生物侵食が主な侵食営力の一つとなっている (Trudgill, 1983)。生物侵食は、浅海域や潮間帯に生息する生物が餌となる岩石表面の藻類などを摂取る行動や、自らの生息場を造るために岩石を削る活動である。サンゴ礁浅海域は、サンゴ礁を構成する石灰岩が多孔質で他の岩石に比べて軟らかく、生物が容易に削ることができるため生物侵食の活発な場所であり、バクテリアから魚類まで多様なスケールの生物が、物理的な削剥や化学的溶解によって石灰岩を侵食する (Glynn, 1997)。これらの生物は、サンゴ礁石灰岩を侵食することにより、ノッチの形成や堆積物生産の一要因となることが Hutchings (1986)、Scoffin *et al.* (1980) などによって指摘されている。

このなかでも、ウニ類は重要な侵食生物として捉えられている。Russo (1980) は、エニウェトク (Enewetok) 環礁においてウニ類である *Echinometra mathaei* と、*Echinostrephus aciculatus* の摂取物から侵食量を求めた。その結果、環礁内の尖礁 (knoll) で年間 1 m^2 あたり 81.0 g 、礁舗 (inner reef flat) では 325.0 g 、環礁外の礁原 (reef flat) 上で 108.0 g の侵食量を推定した。この値はエニウェトク環礁における総侵食量の 28% にあたり、サンゴ礁では重要な侵食営力であることを示した。また、他の熱帯地域においても、ウニ類は重要な侵食生物として報告されている (Glynn *et al.*, 1979; Downing and El-Zahr, 1987; Bak, 1990; Conand *et al.*, 1997, 1998; Peyrot-Claude *et al.*, 2000)。

侵食生物は石灰岩を侵食するだけでなく、侵食した碎屑物を海中に排出するため、堆積物の生産者としての役割も果たす。海綿類は石灰岩の表面を覆い、触手を使って石灰岩を溶かしながら径 $5\text{--}15\text{ mm}$ の穴を掘り込めると同時に、砂~シルトサイズの堆積物を生産することが知られている (Clyde and Williams, 1973)。また、Hunter (1973) は、バルバドスにおいてウニ類であるガンガゼ (*Diadema antillarum*) の体内の摂取物

を分析した。その結果、摂取物は石灰岩を侵食した径 $0.05\text{--}3\text{ mm}$ のペレット、石灰藻、底質の砂などを起源とし、1年間で1個体あたり 755.0 g 、 1 ha あたり 9.7 t の堆積物を生産すると推定した。このように、ウニ類はサンゴ礁域において重要な侵食生物、また堆積物の生産者としての役割を果たしている。

著者は、石垣島白保サンゴ礁海岸における *Echinometra mathaei* (和名：ナガウニ) が摂取・排出する堆積物の組成と、サンゴ礁内における堆積物の比較検討をおこない、*E. mathaei* がサンゴ礁石灰岩を侵食するだけではなく、サンゴ礁内の細粒堆積物を摂取することを明らかにし、「駒澤地理」に公表した (鈴木ほか, 2001)。本論ではその結果を基に、そこでは扱えなかった点と問題点を補足するため全種の *E. mathaei* と、摂取物の起源をより明確に捉えるために、サンゴ礁堆積物の構成が異なる石垣島荒川下海岸における *E. mathaei* の摂取物の分析をおこなった。そのため、研究の手法、一部の結果については、鈴木ほか (2001) に重複する点があるが、お許し願いたい。

II. 調査地域の概要と *E. mathaei* の分布

1) 地域の概要

石垣島は、八重山諸島の東部に位置する面積 222.85 km^2 の島である (図1)。島の周囲には裾礁タイプの現成サンゴ礁が発達するが、東海岸と西海岸でその地形が大きく異なる。東海岸では明瞭な浅礁湖を有するサンゴ礁が見られ、汀線から 1 km 前後の幅で連続性の良い前方礁原が発達する。一方、西海岸では東海岸のように連続した前方礁原が見られず、礁縁は湾入に富む (鈴木ほか, 2001)。本研究では、白保海岸に加え、分帯構造が不明瞭であり礁の規模が小さい石垣島西部の荒川下海岸に調査測線を設定した。白保のサンゴ礁地形は、汀線から礁縁部までが約 800 m であり、南北方向の汀線と平行に明瞭な礁嶺が発達する (図2, 図4a)。また、荒川下のサンゴ礁地形は、陸側で高さ 5 m の明瞭な海食崖に接しており、幅約 50 m の平坦な礁原が見られるのみで、

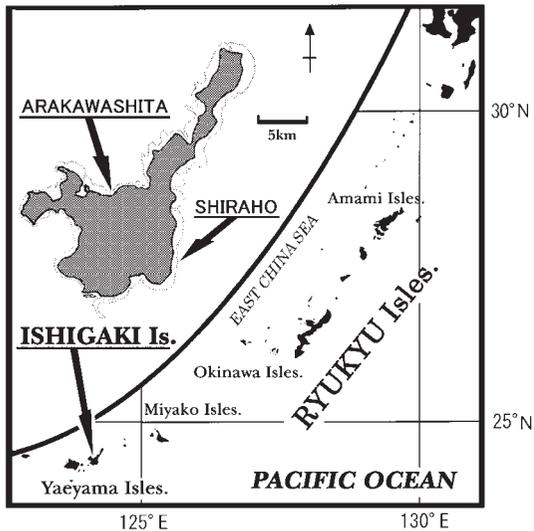


図 1 調査地域位置図。

Fig. 1 Study area of the Ishigaki Island.

浅礁湖をもたない(図3, 図5a)

2) サンゴ礁の地形分帯に伴う *E. mathaei* の分布

対象とした *E. mathaei* は、太平洋南部から日本の太平洋沿岸まで分布し、沖縄のサンゴ礁浅海域では一般的に見られる底棲生物である。Nishihira *et al.* (1991) によって4タイプの種に分類されることが報告されており、*E. mathaei* は海水の塩分や温度および生息場の乾湿の変化に対する耐性が、タイプ別に異なる(Arakaki and Uehara, 1991)。この各タイプの耐性の差により、*E. mathaei* の分布はサンゴ礁地形分帯ごとに異なる。鈴木・菅(2004)は、石垣島白保海岸・荒川下海岸において、サンゴ礁におけるウニ類の分布を地形分帯と関連づけて調査し、地形分帯によつての種・生息密度の分布が異なることを明らかにした。特に *E. mathaei* は、タイプによつて明瞭に分布が偏り、その侵食痕の形状は、礁原上では「溝型」、礁縁で「潜行型」、礁斜面で「垂直型」、浅礁湖・前方礁原内側帯では「不明瞭型」の4形態に分類され、サンゴ礁におけるウニ類

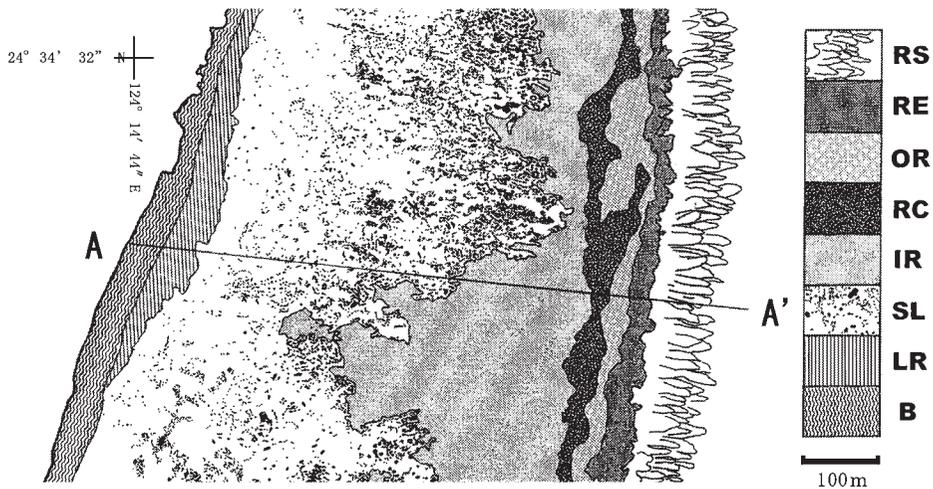


図 2 白保海岸地形分類と、調査測線位置図(A A')。

B: 海浜, LR: 後方礁原 SL: 浅礁湖, IR: 前方礁原内側帯, RC: 礁嶺, OR: 前方礁原外側帯, RE: 礁縁, RS: 礁斜面

Fig. 2 Geomorphological map of Shiraho reef.

B: Beach, LR: Landward Reef Flat, SL: Shallow Lagoon, IR: Inner Reef Flat, RC: Rddf Crest, OR: Outer Reef Flat, RE: Reef Edge, RS: Reef Slope

A A': transect line for survey.

の生物侵食の影響は地形分帯ごとに異なることを示した。この結果を基に、ここでは白保・荒川下における *E. mathaei* の分布を簡略化して述べる。

白保海岸における *E. mathaei* の分布は、地形分帯によって異なる (表 1)。*E. mathaei* type A は、穏やかな海域である浅礁湖・前方礁原内側帯に分布が集中する。*E. mathaei* type A は、パッチ状に分布する礁岩・枝状サンゴの隙間に生息しており、砂礫上には見られない。浅礁湖における平均生息密度は、 1 m^2 あたり 0.6 個体であるが、 1 m^2 あたり 14 個体と局地的に高い場所や、低い場所では 0 個体とばらつきが見られる (図 4d)。これに対し、*E. mathaei* type B・C・D は礁嶺・前方礁原外側帯・礁縁に分布が集中する。礁嶺は

低潮位より上部に位置し、小潮の干潮時でも干出する。ここでは、乾湿・温度・塩分の変化に対する耐性が最も強いタイプ C が最も多く分布する。平均生息密度は 1 m^2 あたり 4.7 個体である。また、前方礁原外側帯では平均生息密度は 1 m^2 あたり 12.6 個体であり、調査測線上で *E. mathaei* の生息密度が最も高い場所である。*E. mathaei* type D は他の地形分帯に比べ、礁縁で最も生息密度が高くなるのが特徴的である。これら礁嶺・前方礁原外側帯・礁縁に分布する *E. mathaei* は礁岩表面に溝や穴を掘り込み、その溝内に生息している。礁斜面に分布するウニ類は *E. mathaei* type B で、生息密度は 1 m^2 あたり 0.8 個体と低い。

荒川下における各地形分帯の *E. mathaei* の分布も、白保同様に地形分帯により異なっている (表 2)。礁原に分布するウニ類は *E. mathaei* type C が卓越し、平均生息密度は 1 m^2 あたり 2.8 個体であるが、礁縁部に近づくほど生息密度は増加する。*E. mathaei* は外洋側に緩やかに傾斜する 100 m 地点より出現し、礁縁に向かうにつれて生息密度が高くなる (図 5d)、礁縁では *E. mathaei* type B・C・D が分布し、平均生息密度は 1 m^2 あたり 12.8 個体と高い。ここでは *E. mathaei* type C が最も優位に見られるが、*E. mathaei* type D の分布は、この礁縁に集中する。礁斜面では広く砂が堆積し、202 m 地点より外洋側では一面砂床が広がる。ここでは *E. mathaei* type A の分布が見られる。平均生息密度は 1 m^2 あたり 0.4 個体と低い。

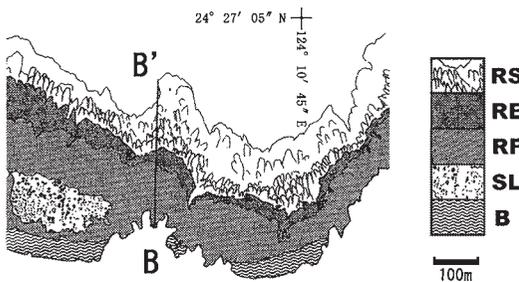


図 3 荒川下海岸地形分類と、調査測線位置図 (B B')。
B: 海浜, SL: 浅礁湖, RF: 礁原, RE: 礁縁, RS: 礁斜面

Fig. 3 Geomorphological map of Arakawashita reef.
B B': transect line for survey.
B: Beach, SL: Shallow Lagoon, RF: Flat Reef, RE: Reef Edge, RS: Reef Slope

表 1 白保海岸における各地形分帯の *E. mathaei* の生息密度と平均殻長。

Table 1 Habitation density and mean diameter of *E. mathaei* in each topographic zone of Shiraho reef.

	Landward Reef Flat	Shallow lagoon	Inner Reef Flat	Reef Crest	Outer Reef Flat	Reef Edge	Reef Slope
<i>E. mathaei</i> type A	-	0.6	2.7	-	-	-	-
<i>E. mathaei</i> type B	-	-	0.1	0.7	1.0	0.5	0.8
<i>E. mathaei</i> type C	-	-	-	3.5	9.3	6.7	-
<i>E. mathaei</i> type D	-	-	-	0.5	2.3	4.3	-
Total	-	0.6	2.8	4.7	12.6	11.5	0.8
Mean test size (mm)	-	31.6	38.4	28.2	26.2	22.8	16.4

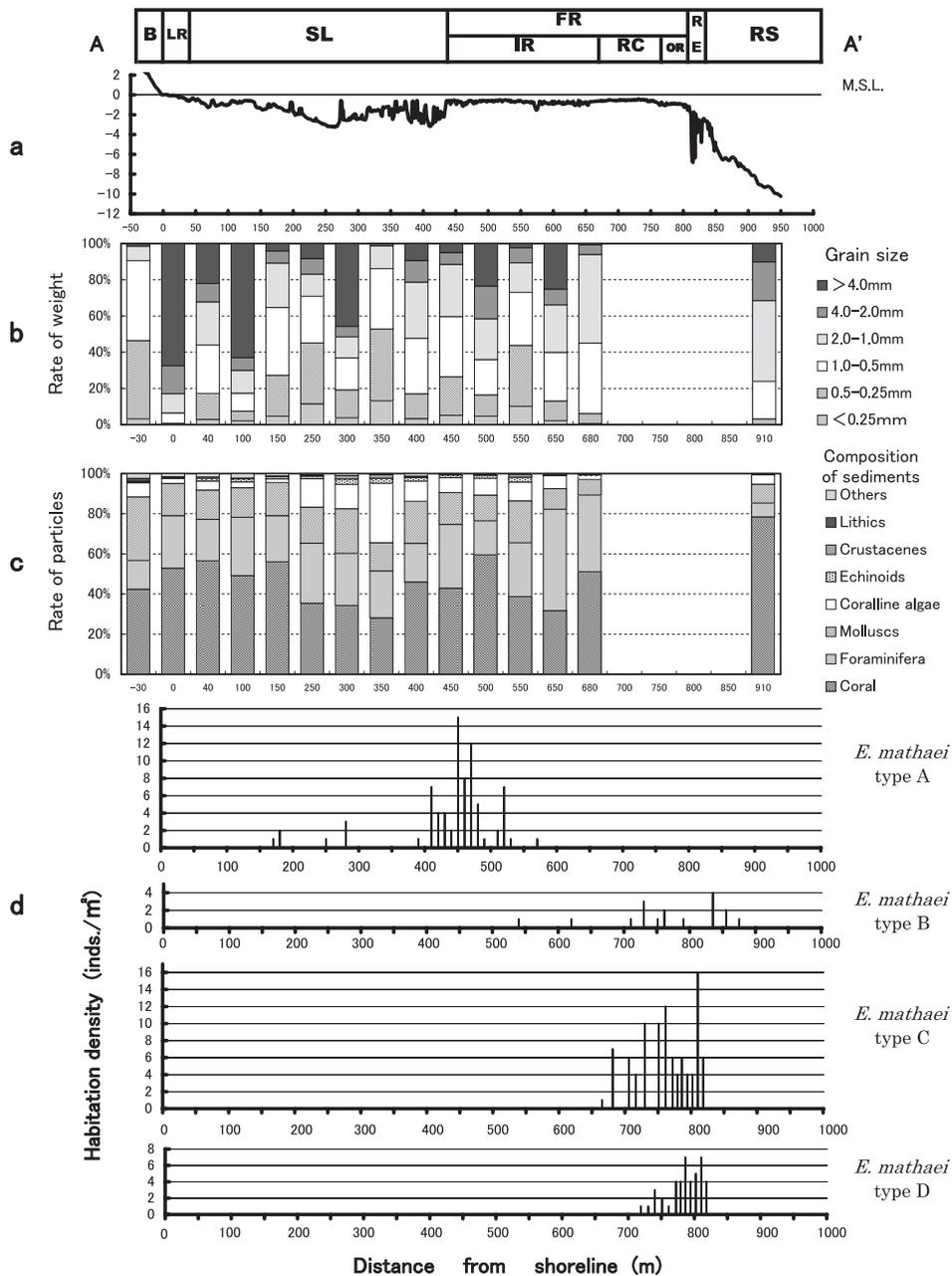


図4 白保海岸における砂質堆積物の構成とウニ類の分布。

B: 海浜, LR: 後方礁原, SL: 浅礁湖, FR: 前方礁原, IR: 前方礁原内側帯, RC: 礁嶺, OR: 前方礁原外側帯, RE: 礁縁, RS: 礁斜面
 a) 白保海岸のA-A'に沿う縦断面図, b) 砂質堆積物の粒度組成, c) 砂質堆積物の構成物質, d) *E. mathaei*の分布

Fig. 4 The composition of the sediment and the distribution of sea urchins on Shiraho reef.
 B: Beach, LR: Landward Reef Flat, SL: Shallow Lagoon, FR: Forward Reef Flat, IR: Inner Reef Flat, RC: Rddf Crest, OR: Outer Reef Flat, RE: Reef Edge, RS: Reef Slope
 a) Topographic profile of Shiraho reef along A-A'. b) Grain size distribution of sediments along the survey line. c) Sediment composition along the survey line. d) Habitation density of *E. mathaei* along the survey line.

表 2 荒川下海岸における各地形分帯の *E. mathaei* の生息密度と平均殻長 .

Table 2 Habitation density and mean test size of *E. mathaei* in each topographic zone of Arakawashita reef.

	Reef Flat	Reef Edge	Reef Slope
<i>E. mathaei</i> type A	-	-	0.4
<i>E. mathaei</i> type B	0.1	1.1	-
<i>E. mathaei</i> type C	2.7	8.6	-
<i>E. mathaei</i> type D	-	3.1	-
Total	2.8	12.8	0.4
Mean test size(mm)	25.2	28.1	22.3

III . サンゴ礁堆積物 *E. mathaei* 摂取物の分析方法

サンゴ礁堆積物・*E. mathaei* 体内の摂取物は、鈴木ほか (2001) の手法を基に以下の通り実施した。

サンゴ礁堆積物は、白保海岸では調査測線に沿い、海浜 (汀線: 中等潮位線より 30 m 地点, 汀線, 後方礁原 (汀線より 40 m), 浅礁湖内 (100 400 m で 6 地点), 前方礁原内側帯 (450 650 m の 4 地点), 礁嶺 (680 m 地点), 礁斜面 (910 m 地点) において採取した。明瞭に砂礫の堆積が見られない前方礁原外側帯・礁縁部は除外した。荒川下海岸では、堆積物が見られる海浜 (汀線より 1 m 陸側地点), 礁斜面 (汀線より 180 260 m での 5 地点) において堆積物を採取した。明瞭な堆積物が見られない礁原・礁縁は除外した。堆積物は、プラスチックケースを用い、表面から 5 cm までの堆積物を抜き取る方法で、各地点において約 400 g を採取した。採取した堆積物は、乾燥させた後に土壤用粒度分析篩を用いて径 0.25 mm 以下, 0.25 0.5 mm, 0.5 1.0 mm, 1.0 2.0 mm, 2.0 4.0 mm, 4 mm 以上の 6 階級に区分した。また実体顕微鏡を用い、径 0.25 mm 以上の堆積物の組成の分類をおこなった (鈴木ほか, 2001)。

本研究では *E. mathaei* が摂取・排出する堆積物の組成を明らかにするため、*E. mathaei* の体内摂取物の分析をおこなった。ウニ類は、摂取した時と同様の粒径の堆積物を、そのまま排出する (Hutchings, 1986)。そのため、本研究では

E. mathaei の摂取物がそのまま堆積物として排出されるものとし、*E. mathaei* 体内の摂取物について分析をおこなった。試料として用いた *E. mathaei* は、調査測線に沿った場所で 2000 年 9 月・2001 年 8 月にタイプごとに各 20 個体、合計 140 個体採取し分析をおこなった。

摂取物の抽出は、採取した *E. mathaei* を解剖し体内の摂取物を取り出した後、有機物を除去した堆積物のみを抽出することを目的とし、図 6 の過程で施した。有機物を除去した堆積物は土壤用粒度分析篩を用い、それぞれの粒度に分けたものを電子天秤で計量した。また、摂取物の組成を、実体顕微鏡を用いて分類した。有機物を除去した摂取物の内容は、有孔虫殻・貝殻片・ウニ棘・石灰藻類・サンゴ片・陸源物質・甲殻類片に分け、そのほか起源が明瞭ではないものについては不明とした。

IV . 結 果

1) サンゴ礁堆積物

1. 白保海岸

白保測線上における堆積物の構成は、地形分帯によって異なる (図 4b, c)。海浜では径 1 mm 以下の比較的細粒の堆積物が 80% 以上を占める。また、構成物 (図 4c) はサンゴ片が最も多く、貝殻片・有孔虫と合わせ約 90% を占める。海浜と接する後方礁原では、径 1 mm 以上の堆積物の割合が増加する。後方礁原は水深が浅く、干潮時にはサンゴ礁石灰岩が露出する場所である。こ

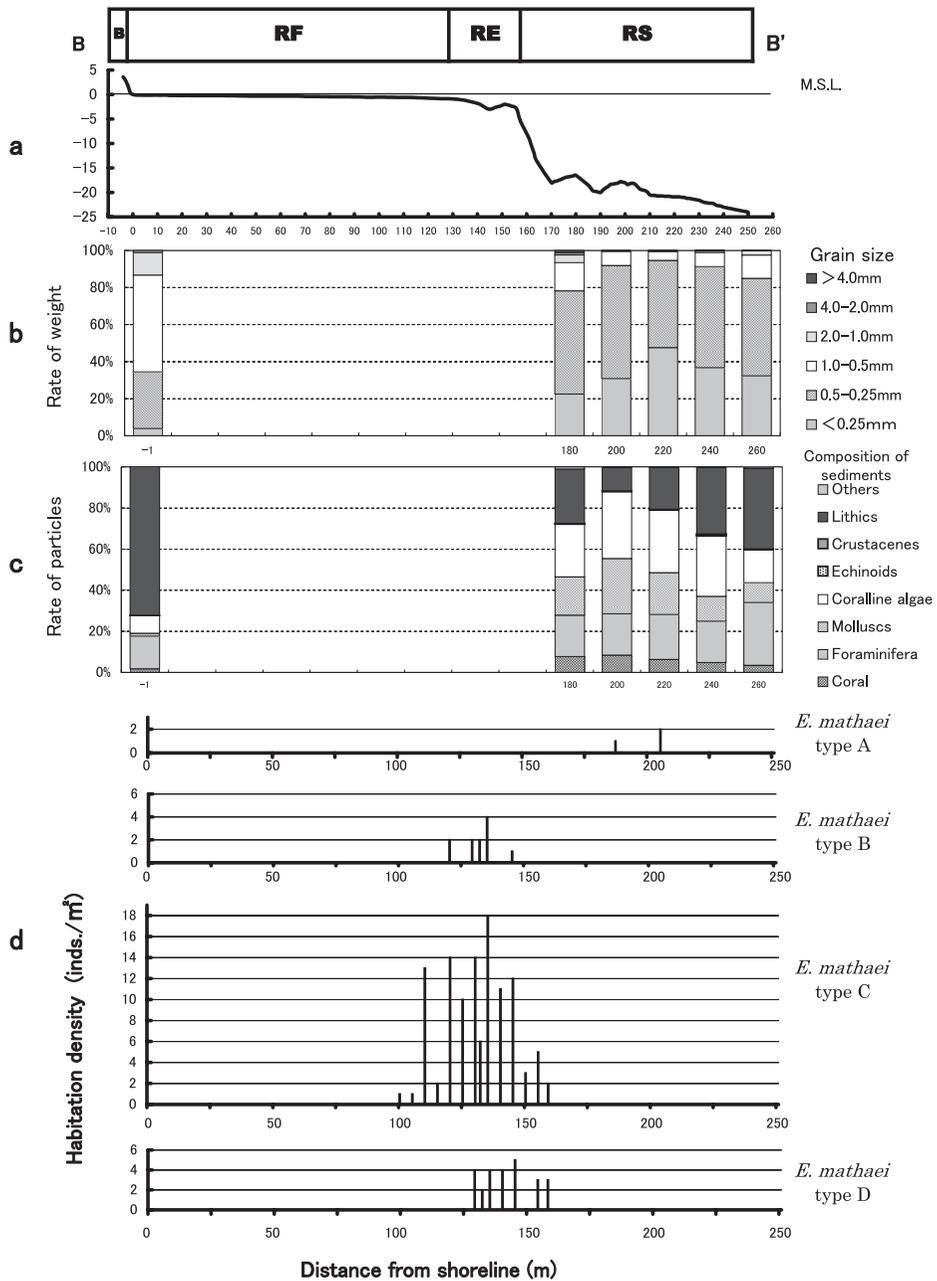


図 5 荒川下海岸における砂質堆積物の構成とウニ類の分布。
 B: 海浜, RF: 礁原, RE: 礁縁, RS: 礁斜面
 a) 荒川下海岸の B B' に沿う縦断面図, b) 砂質堆積物の粒度組成, c) 砂質堆積物の構成物質,
 d) *E. mathaei* の分布

Fig. 5 The composition of the sediment and the distribution of sea urchins on Arakawashita reef.
 B: Beach, RF: Reef Flat, RE: Reef Edge, RS: Reef Slope
 a) Topographic profile of Arakawashita reef along B B'. b) Grain size distribution of sediments along the survey line. c) Sediment composition along the survey line. d) Habitation density of *E. mathaei* along the survey line.

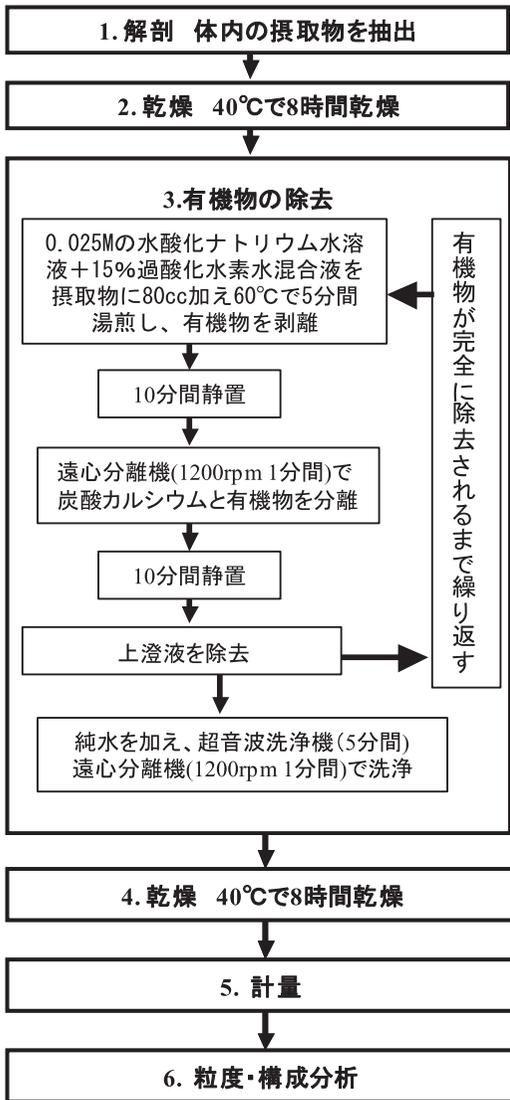


図 6 *E. mathaei* が摂取した内容物の分析方法(鈴木ほか, 2001)。

Fig. 6 Analysis method of gut content in *E. mathaei* (Suzuki et al., 2001)

ここでは満潮時には礁嶺を越えて進入する外洋の波が直接作用する場所であるため、細粒の堆積物が堆積しにくい環境である。浅礁湖では礁原上と異なり、径 1 mm 以下の細粒堆積物が多くを占めるが、場所によって差が見られる。特に 300 m 地点では径 2 mm 以上の粗粒堆積物の割合が増

加するが、ここでは水深が 120 cm と浅く、パッチ状に造礁サンゴ類やサンゴ礁石灰岩が分布する。また水深が深い場所では構成物のサンゴ片が減少し、石灰藻類の割合が増加する。450 m 地点より礁嶺に向かう前方礁原内側帯においても、礁嶺に近づくとともに細粒の堆積物が減少する。ここでは水深が浅く、満潮時には礁嶺を越えた波の影響を受ける場所であるため、粗粒堆積物の割合が増加する。また、礁嶺に近い 650・680 m 地点では、構成物の有孔虫の割合が増加する(鈴木ほか, 2001)。白保海岸における堆積物は、その 99% 以上がサンゴ片や有孔虫などの生物起源の砂であり、陸源物質は認められない。

2. 荒川下海岸

荒川下測線上における堆積物の構成は、海浜・礁斜面において異なる(図 5b, c)。海浜では径 1 mm 以下の比較的細粒の堆積物が 85% 以上を占める。海浜における堆積物の構成は、白保に比べサンゴ片が少なく、岩石片が 75% 以上を占め、その多くは石英粒である。礁斜面においても、径 1 mm 以下の細粒堆積物が 90% 以上を占める。構成物は有孔虫・貝殻片の割合が増加するが、礁斜面においても海浜同様に岩石片の占める割合は高い。荒川下海岸から西方へ 2 km の吉原海岸においても、海浜砂は石英粒を主体とした陸源物質を多く含む(山内, 1990)。この石英粒の供給源は、内陸部の花崗岩山地から吉原海岸東側の小河川から流入する。荒川下海岸においても、南側に花崗岩類から成る於茂登岳(526 m)があり、測線から西側約 400 m には於茂登岳を源にする河川が流入する。そのため、荒川下海岸における陸源物質も、於茂登岳を起源とする石英砂が本海域に流入していると考えられる。このように、荒川下海岸における堆積物の構成は、岩石片の見られなかった白保海岸とは特徴が異なる。

2) *E. mathaei* の体内摂取物

1. 粒径

E. mathaei の体内から抽出した摂取物を計量した結果、個体の殻長が増すほど摂取物内から抽出された岩石片量は増加する(図 7, 8)(鈴木ほか, 2001)。タイプ別で見ると浅礁湖に優位に分布す

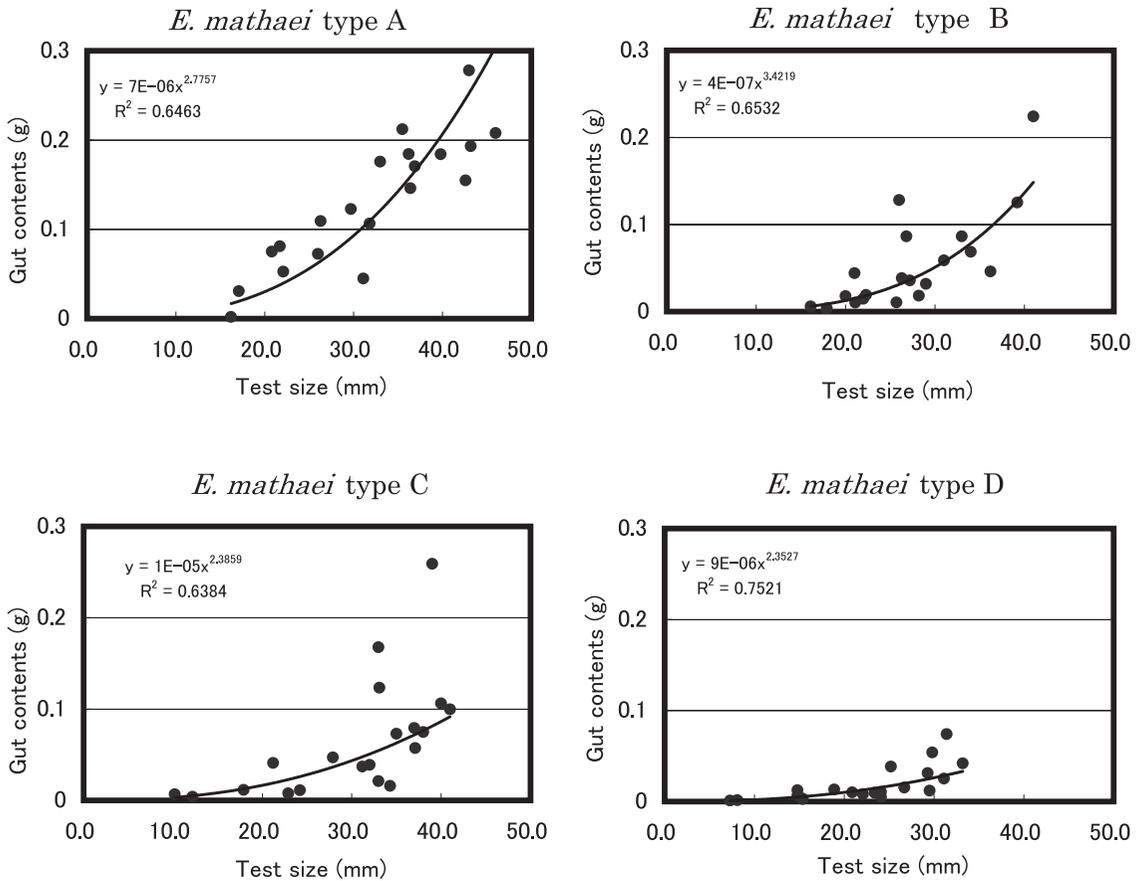


図 7 白保海岸における *E. mathaei* 殻長と摂取物の重量との関係。

Fig. 7 Relationship between test diameter and weight of gut content of *E. mathaei* on Shiraho reef.

る *E. mathaei* type A と、礁原上に布する type B・C・D では、type A が殻長に対して多くの岩片を体内に取り込んでいる。また、type D は荒川下海岸に比べ白保海岸における摂取量が少なく、場所による若干の差が認められる。

各個体が摂取する岩片の粒度組成を図 9, 10 に示す。全ての摂取物は径 4 mm 以下であった。中でも特に径 1 mm 以下の堆積物が全体の約 85% 以上を占め、径 0.25 mm 以下の堆積物が白保では 49.8%, 荒川下では 48.2% と最も高い割合を占める (表 3)。タイプ別では、白保海岸の type C が径 1.0 mm 以上の岩片を多く取り込む傾向が見られ、タイプ別に摂取する堆積物の

粒径に差が見られる。また *E. mathaei* は、個体の殻長によって取り込む岩片の粒径に違いが見られる。径 1.0 mm 以上の粗粒摂取物は、殻長が 20 mm 以上に達した個体において径 2.0 mm 以上の堆積物は殻長 29 mm 以上の個体に見られる。しかしこれらの粗粒摂取物は、殻長の増大に伴った割合の増加傾向は認められない (鈴木ほか, 2001)。

さらに *E. mathaei* が生息する海岸により、摂取物の粒径は異なる。白保海岸では径 1.0 0.5 mm の摂取物が 21.2% と、径 0.25 mm 以下の割合に次いで多い割合となっているが、荒川下海岸では 0.5 0.25 mm の摂取物が 22.2% と、

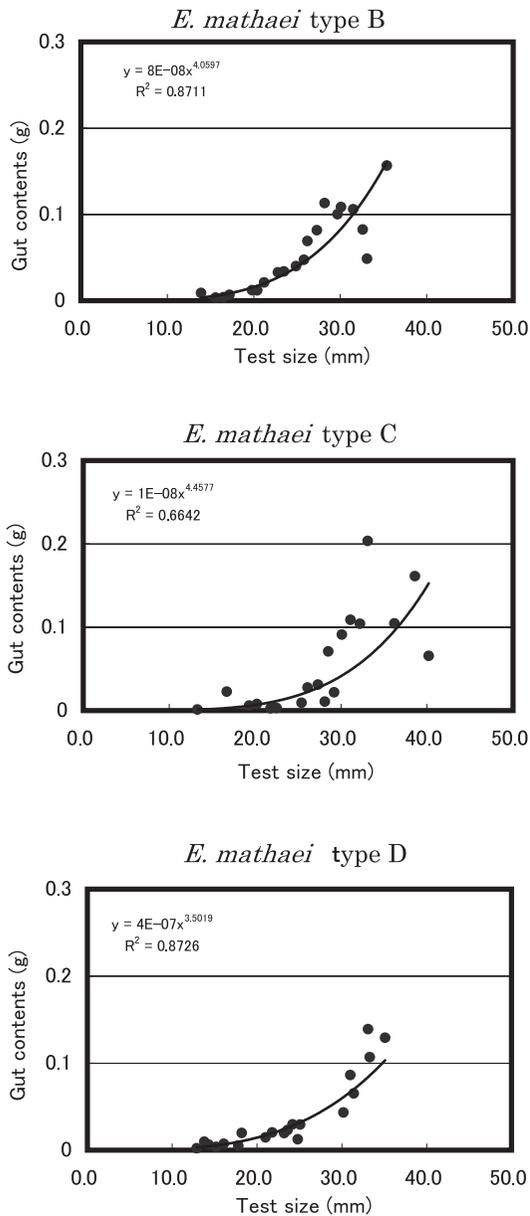


図 8 荒川下海岸における *E. mathaei* の殻長と摂取物の重量との関係。

Fig. 8 Relationship between test diameter and weight of gut content of *E. mathaei* on Arakawashita reef.

0.25 mm 以下の摂取物の次に多い割合となり、白保海岸の *E. mathaei* 摂取物に比べ細粒の岩片を摂取する傾向が見られる。

2. *E. mathaei* の体内摂取物の構成

E. mathaei が摂取する岩片の構成を図 11 に示す。白保海岸における *E. mathaei* の摂取物には陸源物質が全く認められず、構成は全て生物起源のものであった。浅礁湖・前方礁原内側帯に生息する type A と、礁嶺から礁縁に生息する type B・C・D では、摂取物の構成に異なる傾向が見られる。type A では、サンゴ片が 49.2% と最も高く、次いで石灰藻 (20.0%)、有孔虫 (10.3%) となっているが、type B・C・D ではサンゴ片と石灰藻類の割合が減少し、有孔虫の割合が増加する。また、礁縁に分布が集中する type D は、サンゴ片の割合が 34.4% と最も少ない。また、浅礁湖に生息する type A では、礁原上に多く分布する type B・C に比べ、貝殻片・サンゴ片の割合が高い。逆に有孔虫・石灰藻類については、礁原上の type B・C の割合が高く、*E. mathaei* が生息する場所により摂取物の構成が異なることが明らかである。

荒川下海岸では、全てのタイプともにサンゴ片が高い割合を占め、次いで石灰藻類、陸源物質、貝殻片、有孔虫の順となっている (図 11)。礁縁に分布が集中する *E. mathaei* type D は、type B・C に比べてサンゴ片の割合が若干減少し、石灰藻類・貝殻片の割合が増加する傾向が認められた。しかし、*E. mathaei* のタイプ別による摂取物の構成に明瞭な差は認められない。

荒川下海岸と白保海岸の *E. mathaei* の摂取物の構成を比較すると、明瞭な差が認められる。白保海岸ではサンゴ片・石灰藻類が摂取物の 60% 前後を占めるが、荒川下海岸では 80% をサンゴ片と石灰藻類で占める。また、白保海岸では有孔虫が 10.14% を占めるが、荒川下では 0.310% と低い割合となっている。さらに陸源物質は荒川下では 5.6% 認められるが、白保では全ての個体において認められなかった。このように *E. mathaei* の摂取物は、地形分帯・生息する場所の違いによって摂取物の構成が異なる。また、白

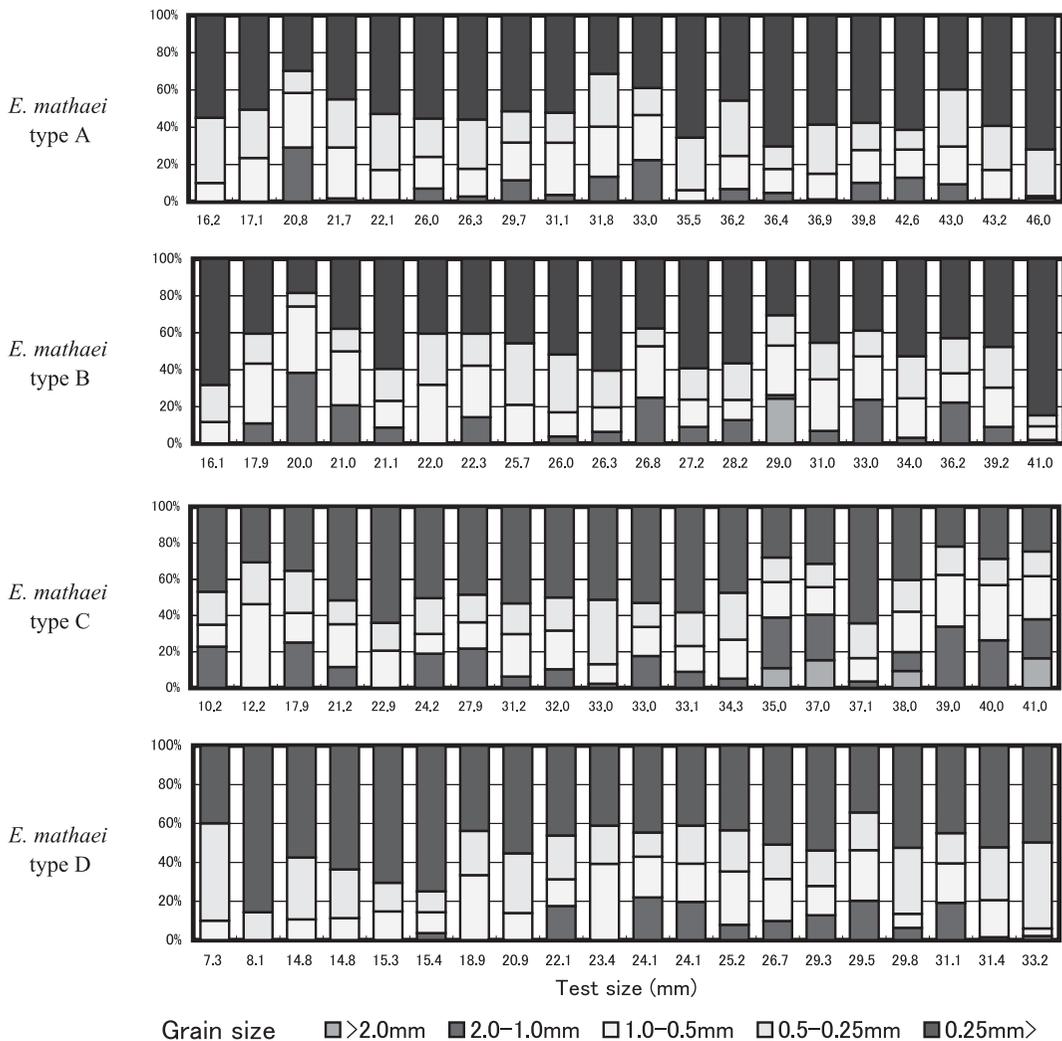


図 9 白保海岸における *E. mathaei* 摂取物の粒度組成 .

Fig. 9 Grain size distribution of gut content from different types of *E. mathaei* on Shiraho reef.

保・荒川下両海岸において、摂取物の構成の殻長による選択的な摂取は認められなかった。

V. 考 察

1) *E. mathaei* が排出する堆積物とサンゴ礁堆積物

鈴木ほか(2001)では、*E. mathaei* の摂取・生産する堆積物は径 1 mm 以下の細粒堆積物が主

であり、サンゴ礁底に堆積する堆積物の粒径には、調和的な傾向は認められなかった。しかし、*E. mathaei* が生息する場所では、*E. mathaei* が生息する溝や穴内に少量の堆積物は見られるが明瞭な堆積物は見られず、*E. mathaei* の分布と堆積物の調和的な関係は認められない。本研究において加えた、白保海岸における *E. mathaei* type D の体内摂取物と、全タイプの *E. mathaei*

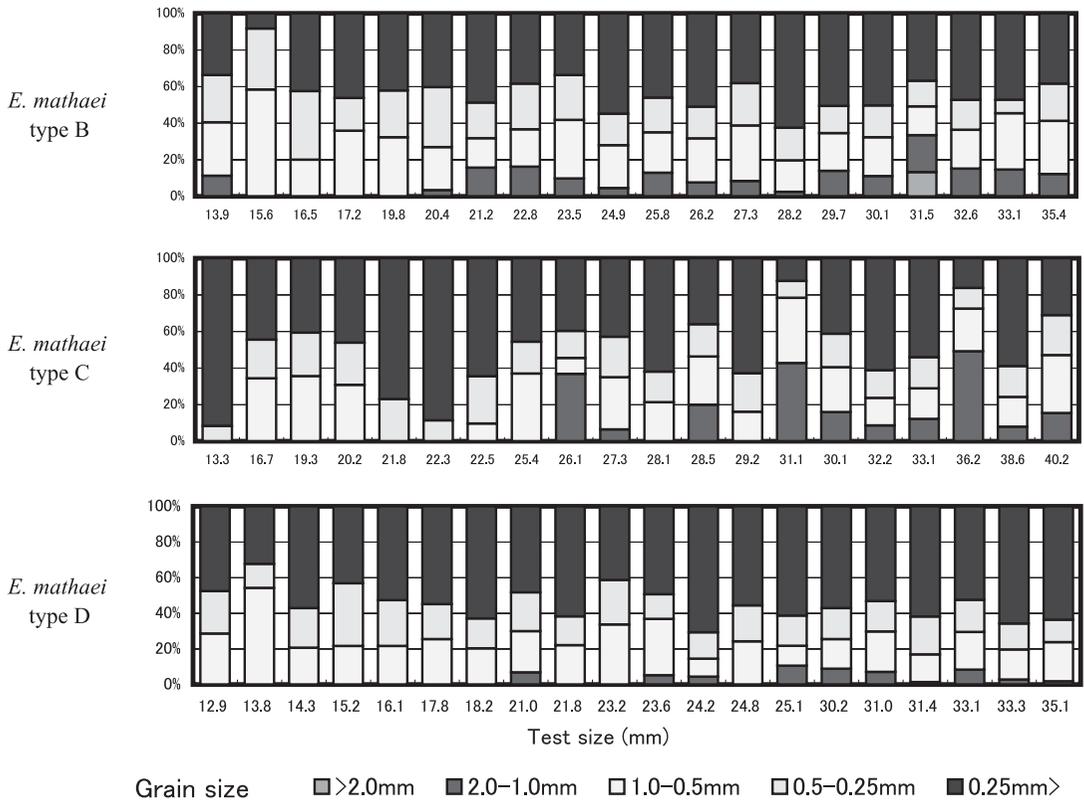


図 10 荒川下海岸における *E. mathaei* 摂取物の粒度組成。

Fig. 10 Grain size distribution of gut content from different types of *E. mathaei* on Arakwashita reef.

体内の径 0.25 mm 以下の摂取物の粒径においても摂取物の構成比に若干の差は認められるが、径 1.0 mm 以下の堆積物が 87.5% を占め、細粒の堆積物を主に生産しており、鈴木ほか (2001) との明瞭な差は認められなかった。

Clyde and Williams (1973) は、ジャマイカの Discovery Bay において海綿の生産するシルトサイズの堆積物の移動について調査し、水深 15 m 付近で生産されたシルト質堆積物は、水深 55 m の外洋側礁斜面に向けて移動することを示した。また、グレートバリアリーフの Lizard 島においてブダイの摂食行動について調査した Bellwood (1995) は、ブダイが侵食した石灰岩は、ブダイが移動することによってサンゴ礁外に排出されることを示した。また Tudhope (1989) は、

グレートバリアリーフのディビス環礁において堆積物の分布と生産について分析し、サンゴ礁内の堆積物は、波による侵食と生物侵食によって環礁外側の reef rim (本論における礁縁に該当する場所) において主に生産されること明らかにした (鈴木ほか, 2001)。

これらは、造礁生物によって生産された炭酸カルシウムが、生物侵食によって生産される堆積物によってサンゴ礁外に移動することを示すものである (鈴木ほか, 2001)。本研究における *E. mathaei* が生産する細粒の堆積物についても、*E. mathaei* の分布、摂取物の粒径と、*E. mathaei* の生息する場の堆積物の粒径は、白保海岸・荒川下海岸ともに一致しない。*E. mathaei* の生息密度が高い礁縁や前方礁原外側帯では、外洋側から

表 3 *E. mathaei* 摂取物の粒度組成 .

Table 3 Grain size compositions of gut content from four types of *E. mathaei*.

		Shiraho					
	>2.0mm	2.0	1.0mm	1.0	0.5mm	0.5	0.25mm >
<i>E. mathaei</i> type A	0.0		7.4		16.5		22.5
<i>E. mathaei</i> type B	0.7		10.0		18.5		16.9
<i>E. mathaei</i> type C	3.8		18.4		20.6		18.3
<i>E. mathaei</i> type D	0.0		6.9		16.8		26.2
All sample	1.0		10.2		17.8		21.2
		Arakawashita					
	>2.0mm	2.0	1.0mm	1.0	0.5mm	0.5	0.25mm >
<i>E. mathaei</i> type A	-		-		-		-
<i>E. mathaei</i> type B	1.3		11.2		23.4		18.2
<i>E. mathaei</i> type C	0.0		18.5		22.1		16.3
<i>E. mathaei</i> type D	0.0		4.4		20.5		16.8
All sample	0.5		12.0		22.2		17.1

の波を直接受ける場所であり, *E. mathaei* の生産する細粒堆積物の一部は, 波や潮流によって生息する場所以外に移動するものと考えられる。このことから, サンゴ礁堆積物と *E. mathaei* が生産する堆積物量とを比較することは不可能であるが, 白保・荒川下海岸においても, *E. mathaei* が生産する細粒の堆積物の一部は海綿やブダイが生産する堆積物同様に, サンゴ礁に蓄積された炭酸カルシウムをサンゴ礁外に排出する役割を果たすものと考えられる。

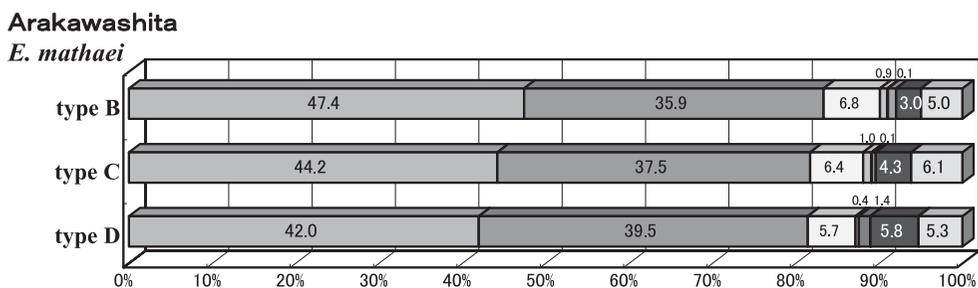
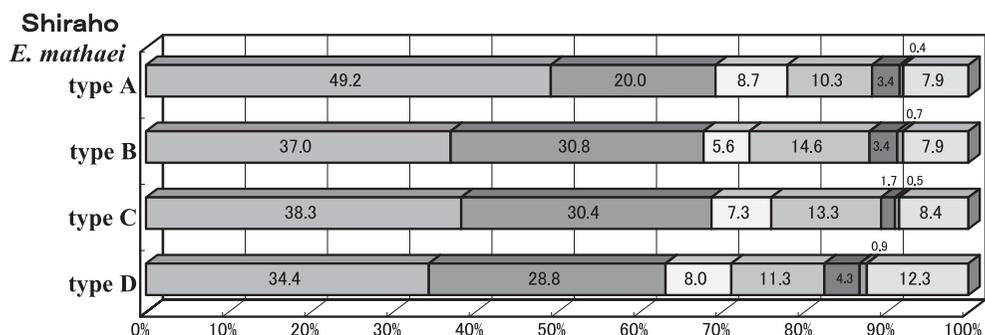
2) *E. mathaei* が排出する堆積物の構成とサンゴ礁堆積物

E. mathaei の摂取物は, 生息する地形分帯によって構成が異なる。鈴木ほか (2001) では, 白保海岸において浅礁湖・前方礁原内側帯に生息する *E. mathaei* type A, 礁嶺・前方礁原外側帯・礁縁に生息する type B・C では, 摂取物の構成に差が認められた。本研究では, これらにより細かい粒度の摂取物の構成を区別し, 礁縁に生息する *E. mathaei* type D の摂取物の分析を加えた。

その結果, 白保海岸における *E. mathaei* の摂

取物はタイプ別に差異は無く, 生息する場所によって摂取物が異なることが明らかである。今回新たに分析を加えた *E. mathaei* type D も, type B・C と生息場所が近いこともあり, これらの間に摂取物の構成に明瞭な差異は認められなかった。

白保海岸では, 浅礁湖内には造礁サンゴ類が分布し, 礁嶺から前方礁原外側帯では石灰藻類や algal turf と呼ばれる糸状藻類が優位に表面を覆う (Takahashi *et al.*, 1985; 中森・井龍, 1990)。それに対し, 造礁サンゴ類が分布する浅礁湖内に生息する type A は砂床の上には生息せず, 枝上サンゴ群体の間や, 礁岩の窪みに身を隠すように生息している。type A はこれらの表面を侵食するため, 摂取物はサンゴ片が type B・C・D に比べて高い割合となることが考えられる。それに対し, type B・C・D は, 礁嶺や前方礁原外側帯に溝を形成して生息する。ここでは造礁サンゴ類の生息は少なく, 石灰藻類の被覆率が高いため, 摂取物内の石灰藻類の値が高くなると考えられる (鈴木ほか, 2001)。



Coral
 Coralline algae
 Molluscs
 Foraminifera
 Echinoids
 Crustacenes
 Lithics
 Others

図 11 白保・荒川下海岸における *E. mathaei* 摂取物の構成。

Fig. 11 Composition of gut content in *E. mathaei* from Shiraho and Arakawashita reefs.

荒川下海岸における *E. mathaei* の摂取物の構成は、礁縁に分布が集中する type D では石灰藻類・貝殻片の割合が若干高くなるが、type B・C とほぼ同様の構成となっている（図 11）。荒川下における *E. mathaei* の生息場所は、タイプによって明瞭な分布差が無く、比較的近い場所に生息しているため、タイプ別による摂取物の構成に明瞭な差が無いと考えられる。ここでの摂取物の構成は白保とは異なり、陸源物質が各個体に含まれることが特徴的である。荒川下海岸は、造礁生物によって形成されたサンゴ礁であるため、*E. mathaei* が石灰岩以外の岩石を侵食し、摂取した可能性は低い。*E. mathaei* から抽出された陸源物質は、荒川下海岸の堆積物に多く含まれており（図 5c）、この堆積物中の陸源物質を摂取したのと考えられる。しかし、荒川下海岸において *E. mathaei* が分布する礁縁・礁原

では、明瞭な堆積物の堆積は見られない。ここに生息する *E. mathaei* は、礁原・礁縁上では溝や穴の中に生息する（鈴木・菅, 2004）。この溝の底部には、ごく少量の堆積物が見られる。この堆積物は、荒川下海岸の海浜・礁斜面には同様の陸源物質が含まれていることから、堆積物が礁原上を移動する際に *E. mathaei* が生息する溝内に入り込み、*E. mathaei* がこの堆積物を摂取するためと考えられる。さらに、荒川下海岸における *E. mathaei* の摂取物は、白保海岸と比べ有孔虫・甲殻類片・貝殻片・ウニ刺の割合がそれぞれ低くなるが（図 11）、荒川下海岸の堆積物の構成も同様に有孔虫・甲殻類片・貝殻片・ウニ刺の割合がそれぞれ低くなる。この点においても、*E. mathaei* はサンゴ礁の堆積物を摂取することが明らかである。

以上のように、*E. mathaei* の摂取物は、堆積物

の組成の異なる海岸で異なり、生息する地形分帯によっても異なる。これらの点から、*E. mathaei* が摂取する堆積物および生産する堆積物は、*E. mathaei* が石灰岩を侵食・摂取することに加え、サンゴ礁堆積物を摂取し、その構成は生息する場所の底質や堆積物の組成の影響を受けることが明らかである。また、*E. mathaei* はタイプによって海水の塩分や温度および生息場の乾湿の変化に対する耐性が異なり、侵食量も異なるが（鈴木，2004），摂取物の構成に関してはタイプ別の差は無く、生息する場に影響すると考えられる。

3) *E. mathaei* の侵食量の指標としての摂取物に関する考察

バルバドスにおいてウニ類の *Diadema antillarum* の体内の摂取物を分析した Hunter (1973) は、摂取物の 57% は基盤を侵食したものであるが、それ以外はサンゴ礁内の堆積物を摂取し、再びサンゴ礁内に排泄することを明らかにした。本研究においても、*E. mathaei* 摂取物のサンゴ片や石灰藻類は、サンゴ礁石灰岩を侵食した岩片である可能性はあるが、サンゴ礁内の堆積物であった可能性もあるため、*E. mathaei* 体内の摂取物において石灰岩を侵食したものが堆積物を摂取したものが判断することは不可能である。しかし *E. mathaei* 体内摂取物の内容は、生息する海域の堆積物の構成に影響を受ける点や、有孔虫・貝殻片・甲殻類片・岩石片など海底の堆積物中に多く含まれるものを摂取している点から、基盤の石灰岩や石灰藻類を侵食するほかにサンゴ礁内の堆積物を摂取し、再びサンゴ礁内に排出することは明らかである。

この *E. mathaei* の摂取物中の炭酸カルシウムは、しばしば生物侵食量の定量化に用いられる。しかし、これらの研究では摂取物の組成についての検討は無く、体内の炭酸カルシウムを全て侵食したものととして侵食量を算出している。そのため、それらの研究で求められている侵食量は、実際の侵食量よりも多く見積もられている可能性が考えられる（鈴木ほか，2001）。

鈴木(2004)は、本研究における結果を踏まえ、*E. mathaei* がサンゴ礁堆積物を摂取しない状況

下において、*E. mathaei* の侵食量の計測を試みた。その結果、白保海岸における *E. mathaei* の侵食量は、季節・タイプ別に異なる。また *E. mathaei* の分布に伴い、各地形分帯における侵食量も異なる。各地形分帯における年間 1 m^2 の侵食量は、後方礁原 0.0 g 、浅礁湖 30.4 g 、前方礁原内側帯 161.2 g 、礁嶺 242.5 g 、前方礁原外側帯 635.1 g 、礁縁 529.6 g 、礁斜面 30.7 g であった。報告されている *E. mathaei* の侵食量の値と比較すると、Russo (1980) ではほぼ同等の侵食量の値である。

Peyrot-Clausade *et al.* (2000) では、レユニオン島とムーレア島において *E. mathaei* を採取し、摂取物内の炭酸カルシウム量から侵食量を求めた。その結果、*E. mathaei* の侵食量は一個体あたり 1 日 0.6 g の炭酸カルシウムを侵食する値となり、鈴木 (2004) が求めた侵食量よりも多い値となっている。また、Dowing and El-Zahr (1987)、Conand *et al.* (1997, 1998) における *E. mathaei* の侵食量の値も、鈴木 (2004) より高い値となっている。これら侵食量の差は、計測された地域の差もあり、一概に分析方法の差であるとは断定できない。しかし、これら先行研究における侵食量は、*E. mathaei* 体内の摂取物が全て石灰岩を侵食したものととして計測されているため、*E. mathaei* の摂取物を考慮した鈴木 (2004) の計測より多い侵食量が見積もられている可能性が考えられる。

4) サンゴ礁内において *E. mathaei* による堆積物生産が果たす役割

井龍ほか (1991) は、本研究の研究対象地域と同海域の白保海岸において、生物によって生産される有機・無機炭素の生産量を求めた。そこでは、サンゴ礁地形における無機炭酸塩の生産量は造礁サンゴの分布が多い場所に比例し、前方礁原内側帯サンゴ群集と、前方礁原外側帯（本研究における前方礁原内側帯、礁縁部に該当する場所）において、それぞれ $2.62\text{ kgCaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ 、 $2.37\text{ kgCaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ と高い値を示す。これは、本研究における *E. mathaei* が高密度に分布する場所と一致する。白保海岸の

前方礁原内側帯における *E. mathaei* type A の分布は礁岩・造礁サンゴ類の骨格部に集中し、砂床や礫が堆積する場所には見られない。また、造礁サンゴ類が多く見られる礁縁部においても *E. mathaei* は高い密度で生息する。そのため、礁縁部では炭酸カルシウムの生産量と生物侵食量ともに高い場所であることが推測される。鈴木 (2004) において求めた前方礁原内側帯・礁縁における年間侵食量 1 m^2 あたり、それぞれ 242.5 g 、 529.6 g であり、サンゴ礁地形における無機炭酸塩の生産量の 9.2% 、 22.3% を *E. mathaei* が侵食する割合となる。このことから、*E. mathaei* はサンゴ礁内における炭酸カルシウムの収支において、造礁生物によって生産・蓄積された炭酸カルシウムの一部を細粒の堆積物に変換する役割を果たすものと考えられる。

また、白保海岸において井龍ほか (1991) は、サンゴ礁堆積物となる有孔虫による炭酸塩生産量を求め、有孔虫による炭酸塩の生産量は、個体数および生産量が最も高い礁嶺において $359\text{ gCaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ であることを示した。同じ礁嶺における *E. mathaei* による年間の侵食量は 1 m^2 あたり 242.5 g であり、有孔虫の生産量の 67.5% である。白保海岸における全堆積物の生産量は不明であり、*E. mathaei* が排出する堆積物量が全堆積物量に占める割合も不明である。そのため、*E. mathaei* が生産する堆積物がサンゴ礁堆積物の構成に影響を与えている具体的な影響については言及できない。この点については、今後の課題として取り組みたい。

VI. ま と め

鈴木ほか (2001) では、白保サンゴ礁において *Echinometra mathaei* type A・B・C の摂取物と堆積物を分析・検討し、本研究では石垣島白保・荒川下海岸において *E. mathaei* 全タイプの摂取物を分析した結果、以下の点が明らかになった。

1. *E. mathaei* はサンゴ礁内において主に径 1 mm 以下の細粒堆積物を生産し、殻長が大きい個体ほど多くの堆積物を生産している。また、*E.*

mathaei の摂取物の粒径は、白保・荒川下海岸においてそれぞれ異なる傾向が見られるが、それぞれの海岸における *E. mathaei* の生息する場の堆積物の粒径とは一致しない。このことから、サンゴ礁浅海域に生息する *E. mathaei* は、石灰岩を侵食すると同時に排出し、潮流や波浪によって生息する場所以外に移動するものと考えられる。

2. 堆積物の異なる海岸において *E. mathaei* の摂取物を分析した。その結果、*E. mathaei* の摂取物は、生息する海岸・地形分帯によってその構成が異なり、サンゴ礁石灰岩を侵食・摂取する以外にサンゴ礁内の堆積物を摂取することが明らかになった。

3. これまで報告された *E. mathaei* による侵食量では、摂取物の構成を考慮した鈴木 (2004) の侵食量より多い侵食量の値が示されている。これらの研究では、*E. mathaei* の摂取物が全て石灰岩を侵食したものと捉えられており、実際の侵食量よりも多く見積もられている可能性が考えられる。

4. *E. mathaei* による堆積物の生産は、造礁生物によって生産・蓄積された炭酸カルシウムを、細粒の堆積物に変換する役割を果たすものと考えられる。堆積物の生産における定量的役割については、今後の課題として取り組みたい。

謝 辞

本稿の作成にあたり、駒澤大学文学部地理学科の小池一之教授、岡山大学教育学部の菅 浩伸助教授には、絶えずご指導を賜りました。*E. mathaei* 摂取物の分析においては、西海区水産研究所石垣支所の施設を使用させて頂き、垂熱帯生態系研究室の澁野拓郎室長にご指導を賜りました。現地調査では、WWF-J サンゴ礁保護研究センターの施設を使用させて頂き、同センター小林 孝氏・安村茂樹氏にご協力頂きました。現地におけるサンプル採取では、小林 都氏・原 美佐緒氏・岩崎孝志氏にご協力頂き、堆積物の分析では当時岡山大学学部生の岩崎 健氏・駒澤大学学部生の工藤聖子氏・国土館大学学部生の木下奉祿氏にご協力頂きました。また、査読者の先生方のコメントにより本論文が改善されました。ここに記し、心より感謝申し上げます。

文 献

- Arakaki, Y. and Uehara, T. (1991) Physiological adaptations and reproduction of the four types of *Echinometra mathaei*. In Yanagishita, T., Yasumaru, I., Oguro, C., Suzuki, N. and Motokawa, T. eds.: *Biology of Echinodermata*. Balkema, 105-112.
- Bak, R.P.M. (1990) Patterns of echinoids bioerosion in two Pacific coral reef lagoons. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **66**, 267-272.
- Bellwood, D.R. (1995) Carbonate transport and within-reef patterns of bioerosion and sediment release by parrotfishes (family Scaridae) on the Great Barrier Reef. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **117**, 127-136.
- Clyde, H.M. Jr. and William, W.S. (1973) Effective rates of sponge bioerosion as a function of carbonate production. *Proc. 2nd. Int. Coral Reef Symp.*, 106-109.
- Conand, C., Chabanet, P., Cuét, P. and Letourneur, Y. (1997) The carbonate budget of a fringing reef in la Reunion island (Indian Ocean) Sea urchin and fish bioerosion and net calcification. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, 953-958.
- Conand, C., Heeb, M., Peyrot-Clausade M. and Fontaine, M.F. (1998) Bioerosion by sea urchin *Echinometra* on La Réunion reefs (Indian Ocean) and comparison with Tiahura reefs (French Polinesia). In Mooi, R. and Telford, M. eds.: *Echinoderms*. Balkema, 609-615.
- Downing, N. and El-Zahr, C.R. (1987) Gut evacuation and filling rate in the rock-boring sea urchin, *Echinometra mathaei*. *Bull. Mar. Sci.*, **41**, 579-584.
- Glynn, P.W. (1997) Bioerosion and coral-reef growth: A dynamic balance. In Birkeland, C. ed.: *Life and Death of Coral Reefs*. International Thomson Pub., 68-95.
- Glynn, P.W., Wellington, G.M. and Birkeland, C. (1979) Coral reef growth in the Galapagos: Limitation by Sea Urchins. *Science*, **203**, 47-48.
- Hunter, I.G. (1973) Sediment production by *Diadema antillarum* on a Barbados fringing reef. *Proc. 1st. Int. Coral Reef Symp.*, 106-109.
- Hutchings, P.A. (1986) Biological destruction of coral reefs. *Coral Reefs*, **4**, 239-252.
- 井龍康文・中森 亨・鈴木 淳・阿部 理 (1991) 琉球列島石垣島のサンゴ礁生態系における有機炭素および無機炭素の生産 . 月刊海洋, **23**, 759-771.
- 中森 亨・井龍康文 (1990) サンゴ礁の地形区分と造礁生物の礁内分布 . サンゴ礁地域研究グループ編 : 熱い自然 . 古今書院, 39-56.
- Nishihira, M., Sato, Y., Arakaki, Y. and Tsuchiya, M. (1991) Ecological distribution and habitat preference of the sea urchin *Echinometra mathaei* on the Okinawan coral reefs. In Yanagishita, T., Yasumaru, I., Oguro, C., Suzuki, N. and Motokawa, T. eds.: *Biology of Echinodermata*. Balkema, 91-104.
- Peyrot-Clausade, M., Chabanet, P., Conand, C., Fontaine, M.F., Letourneur, Y. and Harmelin-Viven, M. (2000) Sea urchin and fish bioerosion on La Reunionn and Moorea reefs. *Bull. Mar. Sci.*, **66**, 477-485.
- Russo, A.R. (1980) Bioerosion by two rock boring echinoids (*Echinometra mathaei* and *Echinostrephus aciculatus*) on Enewetak Atoll, Marshall Islands. *J. Mar. Res.*, **38**, 99-110.
- Scoffin, T.P., Stearn, C.W., Boucher, D., Flydl, P., Hawkins, C.W., Hunter, I.G. and MacGeachy, J.K. (1980) Calcium carbonate budget of a fringing reef on the west coast of Barbados. Part II - Erosion, sediments and internal structure. *Bull. Mar. Sci.*, **30**, 475-508.
- 鈴木倫太郎 (2004) 現成サンゴ礁浅海域におけるサンゴ礁帯状構造に伴う生物侵食 . 駒澤大学大学院人文科学研究科博士論文 .
- 鈴木倫太郎・菅 浩伸 (2004) 石垣島におけるサンゴ礁地形分帯とウニ類による生物侵食 . 地形, **25**, 115-137.
- 鈴木倫太郎・菅 浩伸・岩崎 健 (2001) 石垣島白保サンゴ礁におけるナガウニによる生物侵食と堆積物生産 . 駒澤地理, **37**, 79-92.
- Takahashi, T., Koba, M. and Nakamori, T. (1985) Coral reefs of the Ryukyu Island: Reef morphology and reef zonation. *Proc. 5th. Int. Coral Reef Symp.*, **3**, 211-216.
- Trudgill, S.T. (1983) Measurements of rates of erosion of reefs and reef limestones. In Barnes, D.J. ed.: *Perspectives on Coral Reef*. Brian Clouston Publ, 256-262.
- Tudhope, A.W. (1989) Shallowing-upwards sedimentation in a coral reef lagoon, Great Barrier Reef of Australia. *J. Sediment. Petrol.*, **59**, 1036-1051.
- 山内秀夫 (1990) サンゴ礁海岸の砂 . サンゴ礁地域研究グループ編 : 熱い自然 . 古今書院, 101-107.

(2004 年 6 月 16 日 受付 , 2005 年 2 月 21 日 受理)