

# 岩盤上の赤土等堆積物による着底阻害： サンゴ幼生を用いた検証\*

比嘉彩也香・座間味佳孝・糸洲昌子・久保弘文・熊谷直喜\*\*・山野博哉\*\*

Examinations on Inhibition of Coral Larval Settlement due to Red Soil Sediments on Bedrock\*

Sayaka HIGA, Yoshitaka ZAMAMI, Shoko ITOSU, Hirofumi KUBO, Naoki H. KUMAGAI\*\* and Hiroya YAMANO\*\*

**要旨：**サンゴ礁は、観光・漁業・防災等、多岐にわたって生態系サービスを提供し、人々はサンゴ礁から多くの恩恵を受けている。しかしながら、サンゴ礁を造る造礁サンゴは、気候変動による地球規模のストレスと、陸域からの地域的なストレスにより、急激に衰退していることが指摘されている。また、これらストレスは複合的に作用し、サンゴに負荷を与える。サンゴを保全する気候変動適応策としては、地域的なストレスの軽減がより現実的であり、その適応策を継続することが重要である。本研究では、サンゴへの地域的なストレスのひとつである土壌（赤土等）の流出に着目し、サンゴへの赤土等負荷影響を検証することを目的とした。このため調査地点として、水温環境が同等だが岩盤上の赤土等堆積物量が異なる2地点を選定し、サンゴの生息状況を比較する海域調査を実施した。この結果、高堆積環境ではサンゴの被度と種数がより少ないことが分かった。被度や種数に差が生じる生物的過程として、赤土等の堆積負荷で①サンゴが死滅している、②サンゴの成長が阻害されている、③サンゴ幼生の着底が阻害されている等が想定された。また、海域調査地点の岩盤とサンゴ幼生を用いた水槽実験を実施したところ、赤土等の堆積負荷がサンゴ幼生の着底を阻害することを示す結果が得られた。すなわち、堆積負荷の異なる海域におけるサンゴ被度の差は、サンゴ幼生の着底率の違いが一因であると推測された。

**Key words:** 沖縄県, 気候変動適応策, 赤土等, 堆積負荷, サンゴ, 着底阻害

## I はじめに

### 1. 背景と目的

沖縄県は島を縁取るようにサンゴ礁が発達している。サンゴ礁には多種多様な生物が生息しており、豊かな漁場であるとともに、重要な観光資源でもある。またサンゴ礁には、外洋からの波の力を弱める効果があり、島を守る天然の防波堤としての機能も果たす。このように人々は、多岐にわたる生態系サービスをサンゴ礁から受けている。しかしながら、サンゴ礁を造り出す造礁サンゴ（以下、「サンゴ」という。）は、環境変化に脆弱な動物であり、気候変動による地球規模のストレス（海水温上昇等）や、陸域からの地域的なストレス（土壌流出や富栄養化等）により、急激に衰退していることが指摘されている。また、地球規模のストレスと地域的なストレスは複合的に作用し、高水温と赤土等流出については、サンゴに対して負荷を与えることが実証されている<sup>1)</sup>。サンゴを保全する気候変動適応策としては、地域的なストレスの軽減がより現実的であり、その適応策を継続することが重要である。本県では、陸域からの土壌（赤土等）の流出による川や海などへの悪影響を「赤土汚染」とよび、長年の課題とされている。赤土等の流出は、サンゴへの地域的なストレスの一つであること

からも、赤土等の負荷によるサンゴへの影響を解明する必要がある。

本研究では、赤土等の堆積による負荷を、「赤土等堆積負荷」とよび、赤土等堆積負荷の違いによるサンゴへの影響を、海域調査や水槽実験を通して検証することを目的とした。海域調査では、水温環境が同等だが岩盤上の赤土等堆積物量が異なる2地点を選定し、サンゴの生息状況を比較した。また、調査地点付近の岩盤とサンゴ幼生を用いた水槽実験を行い、赤土等堆積負荷の違いによるサンゴの着底率について比較したので報告する。

### 2. サンゴについて

サンゴはクラゲやイソギンチャクの仲間、刺胞動物に分類される。増殖手段に有性生殖（卵・精子）と無性生殖（出芽・分裂）を有している。図1に有性生殖から無性生殖によるサンゴの発生過程を示す。

受精卵は、受精から3-4日後に幼生になり、海面から海底に移動、岩盤に着底・変態後、骨格を形成する。その後、出芽・分裂等を繰り返すことによって増殖し、群体となる<sup>2,3)</sup>。サンゴの着底幼生期は死亡率が高く、赤土等の影響を受けやすいとされている<sup>4)</sup>。

\* 本研究は、気候変動適応に関する国立環境研究所と地域気候変動適応センター等との共同研究「沖縄県のサンゴ礁生態系への気候変動・地域環境複合影響を軽減するための赤土流出削減指標策定」によって実施した。

\*\* 国立研究開発法人 国立環境研究所

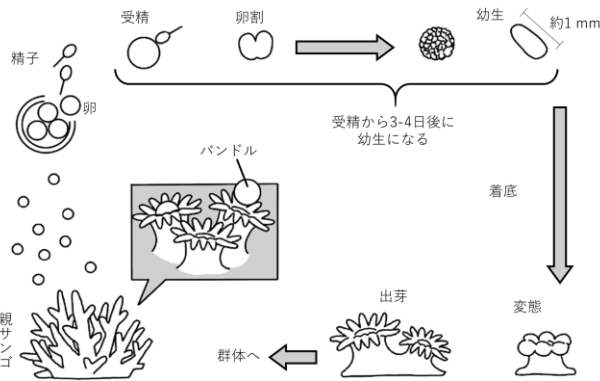


図1. サンゴの発生過程 (大久保<sup>2,3)</sup>を参考に作成)。

## II 方法

### 1. 海域調査について

#### (1) 調査地点

沖縄島中部の西海岸に位置する恩納村山田の海域において、岩盤上の赤土等堆積物が少ない低負荷区と、比較的堆積物が多い高負荷区を選定した(図2)。両地点間の距離はおよそ100mで、いずれの地点にもサンゴの生息していることを選定条件とした。また、隣接した地点を選定することで、水温環境等の堆積負荷以外の環境要因の影響を制限し、サンゴと赤土等堆積の関係の評価をしやすい条件設定とした。

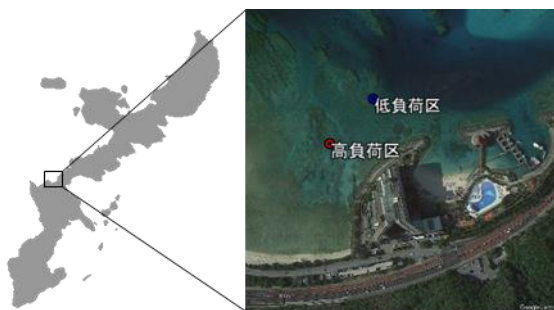


図2. 調査地点 (恩納村山田)。

#### (2) データロガーによる環境計測

両地点に設置した水温ロガーによって連続計測を行った。水温の記録は、Onset社のHOBOペンダントロガーUA-002-64を使用し、2022年5月10日から2023年3月30日の期間において10分間隔で水温を記録した。

#### (3) 岩盤上の堆積物

ハンマーとチゼルを使って、各調査地点の岩盤を剥離した。なお、岩礁破砕行為について、関係機関への許可を得たうえで、作業を実施している。剥離した岩盤の一部は水中で袋に移し、密閉後、陸上に引き上げた。水中での作業を行うにあたり、岩盤から堆積物が落ちないように、細心の

注意を払った。岩盤を当研究所に持ち帰った後、ブラシを用いて岩盤上の堆積物を容器に移した。その後堆積物を、①1,000  $\mu\text{m}$  (1 mm) 以上、②300  $\mu\text{m}$  以上 1,000  $\mu\text{m}$  未満、③75  $\mu\text{m}$  以上 300  $\mu\text{m}$  未満、④75  $\mu\text{m}$  未満でふるい分けをした。赤土等が多く堆積している底質には、最大粒径が100  $\mu\text{m}$ で、粒径20  $\mu\text{m}$ の粒子を多く含む懸濁物質が堆積していたことから、④の粒径75  $\mu\text{m}$ 未満の堆積物に関しては、赤土等の可能性が高い。よって、④に対しては強熱減量法<sup>5)</sup>を用いて、重量当たりの炭酸塩、有機物、その他鉱物等の割合を求めた。赤土等は、その他鉱物等に該当すると仮定した(以下、その他鉱物等を「赤土等」という)。なお、海水由来の塩化物重量が計測されないよう、①~④に分類した後、脱塩処理を行った。

地点間における堆積物量を比較するにあたり、使用した岩盤の投影面積を用いて規格化した。投影面積の算出には、アメリカ国立衛生研究所(National Institutes of Health, NIH)が開発した画像処理ソフト「Image J」を使用し、投影面積あたりの堆積物量を算出した。

#### (4) コドラート調査

低負荷区と高負荷区の岩盤において、サンゴ被度と種数の定量的評価のための1  $\text{m}^2$ のコドラート(方形枠)を5m間隔で6つ、岸から沖に向けて直線上に設置した。なおコドラート調査は、2022年6月9日に実施した。

##### 1) サンゴ被度 (%)

水中カメラを用いてコドラートを上から撮影し、画像からコドラートに占める生きたサンゴの被覆割合(以下、「サンゴ被度」という)を集計した。面積の算出には、画像処理ソフト「Image J」を使用し、画像に写っているコドラート枠の長さでスケールを調整した。

##### 2) サンゴ種数

コドラート内で確認されたサンゴの種数を集計した。外見からのサンゴの同定は、サンゴ種同定の専門的な知識を有する環境コンサルタント会社に委託した。

### 2. 水槽実験について

赤土等堆積負荷の違いにより、サンゴ幼生の着底率に差が見られるか検証するために、海域調査地点の岩盤とサンゴ幼生を用いた水槽実験を実施した。

#### (1) サンプルについて

##### 1) 岩盤

方法1(3)で前述した方法で、調査地点付近から岩盤を採取し、実験を行う養殖施設(次項を参照)に持ち帰った。実験に使用するまでの間は、海水流水下にてエアレー

ションを行い、海の環境に近い状態を維持した。採取した岩盤は、低負荷区・高負荷区いずれも12個で、岩盤表面積の合計が、低負荷区・高負荷区で同程度になるよう選定し、実験に使用した。なお、方法1(3)で堆積物量を測定した岩盤と、水槽実験で使用した岩盤は同一でない。

2) サンゴ幼生

ミドリイシ科ウスエダミドリイシ (*Acropora tenuis*) の幼生を使用した。親群体は恩納村万座海域で養殖されているウスエダミドリイシで、2022年6月3日に放出されたバンドル(卵と精子を含んだカプセル)を採取した。バンドルは、遺伝子が異なる5群体から採取し、恩納村恩納漁港内にあるモズク種苗供給施設にて受精作業を行った。受精作業には30Lと100Lのパンライトを使用し、水質が悪化しないよう毎日換水を行った。受精から3日後には幼生となり、4日後には、岩盤への着底能力があることが確認できた。実験には受精から5日後のサンゴ幼生を使用し、水槽実験も引き続き同施設で実施した。なお当該施設では、雨水や陸水の影響を受けない十分な水深(約20m)から採取した、天然の海水を使用している。

(2) 実験系について

5Lの水槽を6個用意し、それぞれの水槽に低負荷区と高負荷区の岩盤を設置した。低負荷区と高負荷区のそれぞれの岩盤表面積が、同程度になるよう配置しているため、水槽ごとに岩盤の個数は異なる(図3)。水槽に海水を加える際は、岩盤上の堆積物が舞い上がらないようゆっくり加え、調査地点の堆積状況を再現した。その後、すべての水槽にサンゴ幼生を約1,000個体加え、最終的に海水10mL中に約2個体のサンゴ幼生が含まれる密度とした。岩盤への着底が完了するまで一晩静置し、静置している間は、水槽を水浴することによって水温の上昇を防いだ。一晩経過した後、水浴の水位を水槽より高くすることで、止水からかけ流し状態に変更した(図4)。また、各水槽内で海水が滞留するのを防ぐために、エアレーションを行い、この状態で8日間飼育した。エアレーション強度については、懸濁物が舞い上がらないよう、弱めに設定した。



図3. 採取した岩盤：水槽内の左側が低負荷区の岩盤，右側が高負荷区の岩盤。

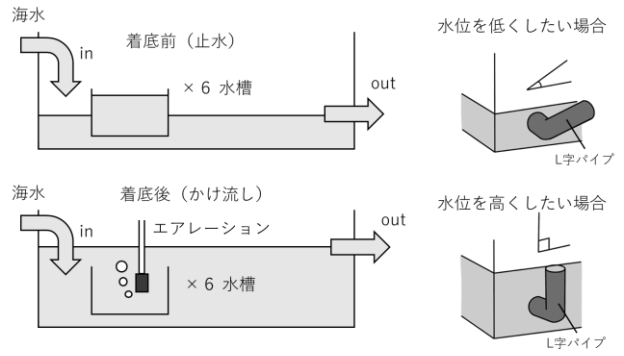


図4. 実験環境の模式図。

水位は、排水口に挿入された、L字パイプの角度を変えることで調整可能である。パイプと地面が平行に近ければ水位は低く、角度が垂直になるほど水位を高くすることができる。

(3) 着底率の算出方法

各岩盤を15×15mmの格子で区切り、格子当たりを占める岩盤への着底の有無を集計した。集計の際は岩盤を水面からゆっくり取り出し、15×15mmの格子を岩盤に重ね、格子内岩盤への着底の有無を観察した。着底後のサンゴは約1mmの大きさのため、ルーペやライトを用いて観察した。集計した結果を元に、各岩盤の着底率(着底枠数/全枠数×100)を算出した。また、一つの枠に対して占める岩盤の割合が5割を満たない場合は、集計から除外して結果を算出した。

III 結果および考察

1. 海域調査について

(1) データロガーによる計測結果

表1に各負荷区における水温測定結果を示す。両地点間での水温差は、最大で2.3℃あり、比較的高負荷区の水温が低負荷区より高い傾向となった。しかし、スチューデントのt検定において、両地点間での水温に有意差は得られなかった(p>0.05)。よって、両地点間におけるサンゴへの水温の影響はほとんどないと考えた。

表1. 各負荷区における水温測定結果。

測定期間：2022/5/10 - 2023/3/30

	低負荷区	高負荷区
平均水温(℃)	25.6±3.4	25.7±3.5
最高水温(℃)	33.5	34.5
最低水温(℃)	19.6	18.9

(2) 岩盤上の堆積物量

調査地点における赤土等堆積負荷量を調べるために、各区の岩盤を剥離後、当研究所に持ち帰り岩盤上の堆積物量

を測定した。堆積物の算出に用いた岩盤の投影面積は、低負荷区の岩盤が 236 cm<sup>2</sup> で、高負荷区の岩盤が 369 cm<sup>2</sup> であった。それぞれの岩盤の堆積物の総量は 3.7 g および 15.6 g で、これら総量を岩盤の投影面積で規格化すると、低負荷区が 15.8 mg/cm<sup>2</sup> に対し高負荷区が 42.2 mg/cm<sup>2</sup> となった。また、堆積物の粒径を①1,000 μm (1 mm) 以上、②300 μm 以上 1,000 μm 未満、③75 μm 以上 300 μm 未満、④75 μm 未満の 4 通りに分類した。岩盤投影面積当たりの堆積物量を図 5 に示す。

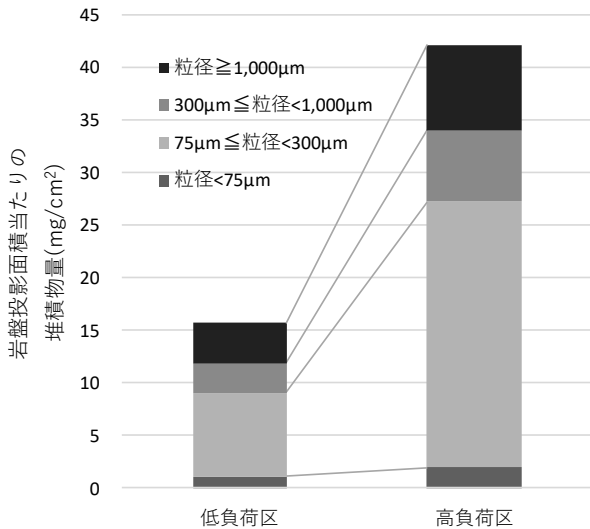


図 5. 各負荷区における岩盤投影面積当たりの堆積物量。

高負荷区は低負荷区と比較して、岩盤上の堆積物量が約 2.7 倍大きかった。また、最も差が大きいのは、粒径が 300 μm 未満 75 μm 以上の堆積物であり、高負荷区は低負荷区の約 3.2 倍であった。75 μm 未満の堆積物については、有機物、炭酸塩、赤土等(その他鉱物等)の割合を算出した。図 6 に各成分の割合、図 7 に割合から算出した各成分別の岩盤投影面積当たりの堆積物量を示す。

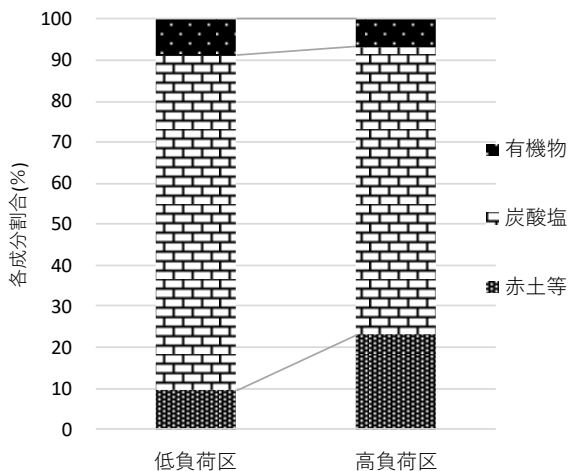


図 6. 粒径 75 μm 未満の堆積物における各成分割合。

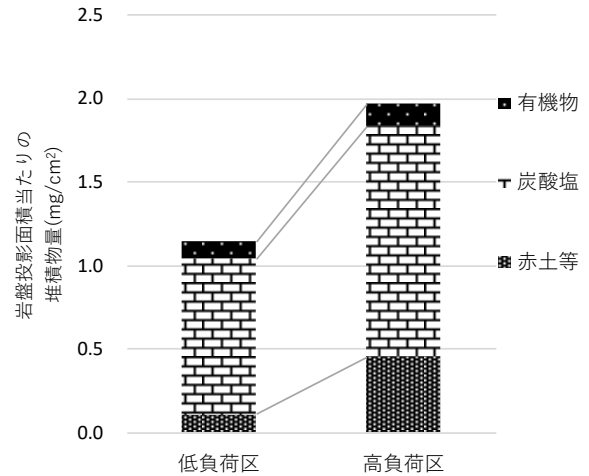


図 7. 粒径 75 μm 未満の堆積物における、各成分別の岩盤投影面積当たりの堆積物量。

図 6 より、高負荷区は低負荷区と比較して、有機物と炭酸塩割合の割合が低く、赤土等の割合が高い結果となった。また図 7 より、高負荷区は低負荷区と比較して、有機物量が 1.3 倍、炭酸塩量が 1.5 倍であるのに対して、赤土等の堆積物量は 4.2 倍であった。この結果から、高負荷区は低負荷区よりも赤土等の堆積負荷が大きい結果となった。

(3) コドラート調査結果

表 2 に低負荷区と高負荷区のコドラート各 6 枚の平均サンゴ被度と、すべてのコドラート内で確認されたサンゴの種数を示す。高負荷区は低負荷区と比較してサンゴ被度が低く、種数も少ない結果となった。これらの差をもたらした生物的過程として、赤土等の負荷によってサンゴが死滅している、またはサンゴの成長が阻害されている、サンゴ幼生の着底が妨げられている等が示唆された。

表 2. 各負荷区におけるサンゴ被度と種数。

	低負荷区	高負荷区
サンゴ被度 (%)	18.3±5.2	2.5±2.0
サンゴ種数	34	13

またサンゴは、種や環境の違いによって様々な形状をとる(図 8)。図 9 に、各区で観察されたコドラート内のサンゴを、形状別に割合で示す。図 9 より、低負荷区は枝状・卓状のサンゴが 7 割を占めたが、高負荷区は、被覆状・塊状のサンゴが 6 割を占めていた。枝状サンゴは比較的赤土等の耐性が低いに対して、塊状サンゴは赤土等の耐性が高いと考えられている<sup>6)</sup>。今回の調査地点においても、既報<sup>6)</sup>のとおり赤土等負荷の低い地点に枝状サンゴが多く、赤土等負荷の高い地点に塊状サンゴが多い結果となった。

地点間におけるサンゴ種数や形状の違いからも、赤土等の負荷によって赤土等への耐性が高い種に偏る等、生物の多様性が低くなることが示唆された。

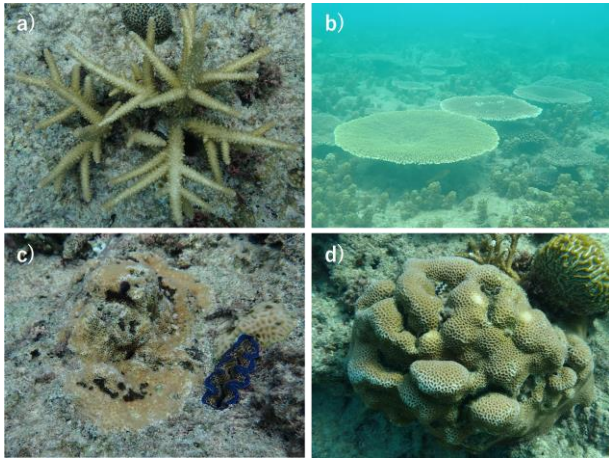


図 8. サンゴの形状 a) 枝状 b) 卓状 c) 被覆状 d) 塊状。

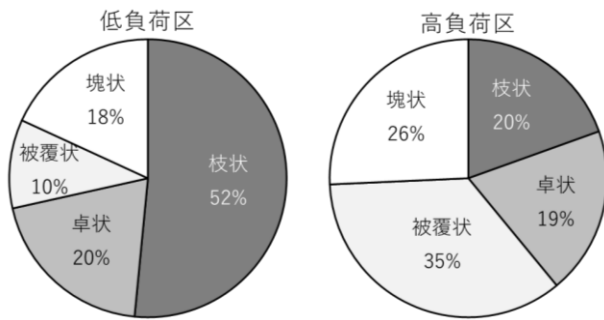


図 9. 各負荷区において確認されたサンゴの形状割合。

## 2. 水槽実験について

各負荷区におけるサンゴ幼生の着底率を、図 10 に示す。低負荷区では 18-100%と、着底率の範囲が均等に広がっていたのに対し、高負荷区では、0-58%の範囲で、20%付近に値が集中していた。データが割合の形式であるため二項分布に従うと仮定した一般化線形モデルを適用し、各負荷区の着底率を推定したところ、低負荷区は 51%で、高

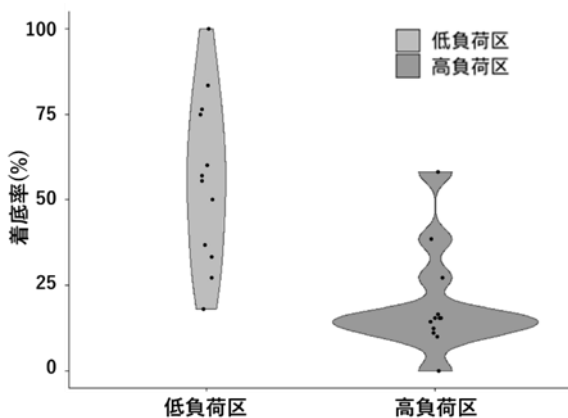


図 10. 各負荷区の岩盤に対する、サンゴ幼生の着底率のバイオリンプロット

負荷区は 24%と推定された。なお、二項分布を仮定しているため、この値は 12 個の岩盤から得られた着底率 12 データの平均値と異なる。着底率の推定モデルについて尤度比検定を行ったところ、低負荷区と高負荷区に着底率は有意に差があり ( $p < 0.001$ )、赤土等の堆積によってサンゴ幼生の着底が妨げられることが示唆された。

## IV まとめ

海域調査地点間で被度や種数に差が生じる生物的過程として、赤土等の堆積負荷でサンゴが死滅している、またはサンゴの成長が阻害されている、サンゴ幼生の着底が阻害されている等が示唆された。また水槽実験より、赤土等の堆積負荷がサンゴ(ウスエダミドリイシ) 幼生の着底を阻害することを示す結果が得られた。すなわち、堆積負荷の異なる海域におけるサンゴ被度の差は、サンゴ幼生の着底率の違いが一因であると推測された。

また、水槽実験の結果から、岩盤上の堆積物を除去することで、サンゴの着底率が高くなる事も示唆されるが、堆積物除去の方法に関しては、既存の生態的群集構造に十分留意すべきである。例えば岩盤上の海藻類には、小型甲殻類や貝類の生息地として、多様性の維持や食物連鎖上の重要な役割を果たしている場合がある。また仮に、岩盤上堆積物を除去しても、赤土等の流出を軽減しない限り、堆積物除去後も赤土等の堆積が繰り返される事が想定される。従って、健全なサンゴ礁を維持するためには、赤土等の流出を防止することが重要である。

## <謝辞>

本研究の実施にあたり、サンゴ幼生の飼育環境の提供や飼育方法等をご教示いただいた銘苅宗和様、銘苅宗一様をはじめ、ご協力いただきました恩納村漁業協同組合、関係者の皆様に心から感謝申し上げます。

## V 参考文献

- 1) Chuki Hong・Hiroya Yamano (2013) Species-Specific Responses of Corals to Bleaching Eventson Anthropogenically Turbid Reefs on Okinawa Island, Japan, over a 15-year Period (1995–2009). PLoS ONE, 8(4):e60952.
- 2) 大久保奈弥 (2016) 概論 サンゴとさんご礁. 生物科学 (上), 67 (4) :194-200.

- 3) 大久保奈弥 (2021) サンゴは語る. 株式会社岩波書店 pp.48-49.
- 4) 波利井佐紀・灘岡和夫 (2003) 環境ストレスとしての赤土懸濁・堆積がサンゴ幼生定着に及ぼす影響. 海岸工学論文集, 50:1041-1045.
- 5) 城間一哲・座間味佳孝・糸洲昌子 (2020) サンゴ礁海域底質中の陸域・海域由来成分について (その1) ～分析手法の比較検討～. 沖縄県衛生環境研究所報,54:44-54.
- 6) 金城孝一・比嘉榮三郎・上原睦男 (2005) 赤土堆積状況とサンゴに及ぼす影響について. 沖縄県衛生環境研究所報,39:63-74.