

赤土中のリン酸含有量の違いによるウスエダミドリイン着底率の比較*

比嘉彩也香・久保弘文**・糸洲昌子・座間味佳孝***・南雲春馬・久高友誠・
熊谷直喜****・篠原隆一郎****・中田聡史****・山野博哉*****

Comparison of Settlement Rates of the coral *Acropora tenuis* Based on Differences in Phosphate Content in Red Soil *

Sayaka HIGA, Hirofumi KUBO**, Shoko ITOSU, Yoshitaka ZAMAMI**, Haruma NAGUMO, Tomomasa KUDAKA,
Naoki H. KUMAGAI****, Ryuichiro SHINOHARA****, Satoshi NAKADA**** and Hiroya YAMANO*****

要旨：近年の研究では、海底の底質中に蓄積されたリン酸が海水中に溶出し、稚サンゴの骨格形成を妨げているとの報告がある。本研究では、リン酸含有量の異なる赤土が堆積した環境を実験水槽で再現し、赤土中のリン酸含有量の違いが、サンゴの着底率および骨格形成に及ぼす影響を比較した。その結果、赤土中のリン酸含有量の違いによって、着底率や骨格形成に明確な差は見られなかった。着底率に関しては、赤土のリン酸含有量の違いに関係なく、基盤上面に赤土が物理的に堆積することで、着底率が著しく低下した。

Key words: 沖縄県, 気候変動適応, 赤土等, リン酸塩, サンゴ, 着底阻害, 骨格形成

I はじめに

沖縄県は島の沿岸に沿って、サンゴ礁が発達しており陸から外洋までの間をサンゴ礁がつないでいる。海水の透明度は高く、遠浅に発達したサンゴ礁の景観は、多くの人々を魅了する。サンゴ礁を造る造礁サンゴ（以下、「サンゴ」という。）は、複雑な立体構造を生み出し、生物の隠れ場所や住処を提供する。また、サンゴが放出する粘液は糖タンパク質が主成分であり、魚や動物プランクトン、小型の底生動物に栄養を供給する¹⁾。そのためサンゴが生息する環境には、多種多様な生物が存在している。しかしながら、近年の気候変動による海水温の上昇は、サンゴに深刻な影響を及ぼしている。海水温が上昇すると、サンゴと共生している褐虫藻の喪失や、褐虫藻が持つ色素が壊れることで、サンゴ骨格が白く透けて見える「白化」現象が起こる。白化が長期間続くと、褐虫藻からの栄養供給が減少し、サンゴは死滅する。

また、気候変動の影響は、海水温の上昇だけでなく、雨の降り方にも変化を及ぼしている。文部科学省および気象庁によると、沖縄地方の大雨（3時間降水量 80 mm 以上）の回数が増加しているとの報告²⁾があり、大雨の回数が増加することで、陸からの土壌流入が増加し、海洋生態系へ悪影響を及ぼすことが懸念される。さらに、陸からの影響は、大雨に伴う土壌流入だけでなく、生活排水から供給される過剰な窒素やリンによる海の富栄養化も挙げられる。

沖縄の海は、窒素やリンといった栄養塩の濃度が低く、

貧栄養である。そのため、貧栄養的な水質環境を維持することは、サンゴ礁生態系を良好に保つために重要である。近年では、海水中の栄養塩だけでなく、海底の底質中に蓄積し一部溶出したリン酸（以下、「蓄積リン」という。）についての研究も注目されている。飯島らの研究によると、蓄積リンが高濃度の環境で飼育された稚サンゴは、低濃度の環境よりも骨格形成が阻害される結果が得られている。この要因として、リン酸塩が炭酸カルシウムに吸着しやすい性質を持っているため、底質から溶出したリン酸塩の一部が、サンゴの炭酸カルシウム骨格形成を妨げていることが示唆されている³⁾。

サンゴ礁の底質は、有孔虫や貝、サンゴ等が死んだ後に残る石灰質の骨格が主である。しかしながら、地域によっては陸域から赤土等が流入し、海底に堆積している。赤土等の主成分は、酸化鉄や酸化アルミニウムであり、これらはリン酸と結合しやすい性質を有している。土壌に吸着したリン酸は、塩分や pH の上昇と共に溶出しやすくなるため⁴⁾、赤土に吸着されたリン酸は、海水中で溶出しやすくなる。したがって、リン酸を多く吸着した赤土等が海へ流入し堆積すると、底質から溶出するリン酸の量が増えることが予測される。

図 1 にサンゴの発生過程を示す。サンゴが骨格形成を開始するのは、プラヌラ幼生が着底・変態してから数日後の初期段階である。底質中の蓄積リンが高い場合、着底時に底質から溶出したリン酸の影響を受け、着底率や後の骨格形成に影響を及ぼす可能性がある。したがって本研究では、

* 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。

** 琉球大学博物館 *** 沖縄県環境保全課 **** 国立研究開発法人 国立環境研究所 ***** 東京大学

リン酸の含有量が異なる赤土を準備し、これら赤土が堆積した環境を実験水槽（以下、「水槽」という。）で再現した。リン酸含有量の異なる赤土が堆積している環境下において、サンゴの着底率および骨格形成に違いがあるか比較したので報告する。

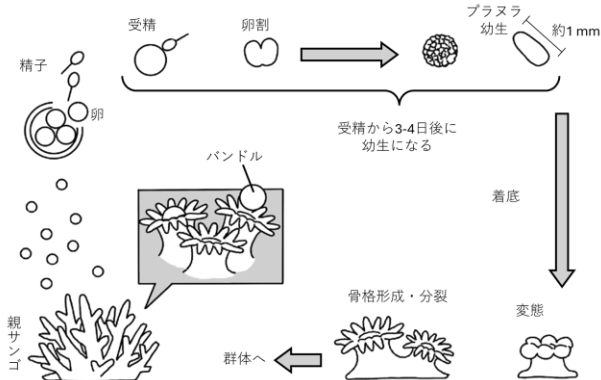


図1. サンゴの発生過程（大久保^{5, 6)}を参考に作成）。受精から3-4 日後にプラヌラ幼生になり、海面から海底に移動、岩盤に着底・変態後、骨格を形成する。その後、分裂を繰り返すことによって増殖し、群体となる。

II 方法

1. 実験に用いたサンプルについて

(1) サンゴのプラヌラ幼生

2023 年 6 月 17 日、恩納村万座海域で養殖されているミドリイシ科ウスエダミドリイシ (*Acropora tenuis*) 5 群体に、海中でビニール袋をかぶせ、バンドル（卵と精子を含んだカプセル）を採取した。採取したバンドルは、恩納村恩納漁港内にあるモズク種苗供給施設の水槽に移動し、受精作業を行った。この時選定した群体は、色の異なる褐色と紫色で、遺伝子の異なる群体を交配させている。なお、受精から3 日後の6 月 20 日にはプラヌラ幼生となり、遊泳行動が確認され、発生が順調に進んでいることが確認できた。

(2) 赤土試料

実験に用いた赤土試料（以下、「赤土」という。）は、恩納村役場担当者立ち合いのもと、2021 年 10 月 29 日に恩納村恩納の圃場より採取した。沖縄県では、赤土等流出源の約 8 割が農地由来と推計している⁷⁾。したがって本研究では、恩納村海域に流入する赤土の代表として、恩納村の圃場を選定した。採取した赤土は、目合い 75 μm のふるいでふるった後、乾燥器で 105℃ 2 時間乾燥させ、以下の操作に使用した。

赤土にリン酸を吸着させるために、10 g の赤土にリン酸態リンの標準溶液 1000 ppm（関東化学株式会社）を超純水で 10 倍希釈した溶液（100 ppm）を 70 mL 加え、攪拌した。対照区に使用する赤土については、リン酸態リンの標準溶液の代わりに、70 mL の超純水を使用した。25℃の室温で一晩浸漬したのち、上澄みを捨て、湿試料を 50 mL の遠沈管複数本に移した。遠沈管を、25℃ 3000×g の条件で 10 分遠心分離をした後、上澄みを捨て、超純水を加えて攪拌後、先述の条件で再び遠心分離を行った。この操作を計 3 回繰り返すことで、赤土に吸着されなかった余剰のリン酸態リンを取り除いた。これら湿試料を、105℃で 2 時間乾燥させた後、重量を測定し、実験に使用した。以降、リン酸態リンの標準溶液に浸漬した赤土を「リン付加赤土」と呼び、超純水に浸漬した赤土を「無添加赤土」と呼び分けることとする。

2. リン酸の分析について

(1) リン酸含有量 塩酸抽出

マッフル炉にて 550℃ 2 時間加熱した赤土 0.1 g に、1 mol/L 塩酸を 10 mL 加え、16 時間振とうし、リン酸を抽出した。遠心分離により底質を沈殿させ、GF/F ガラス繊維ろ紙で濾過し、超純水で希釈した後、モリブデンブルー法で分析した。

(2) 蓄積リン前処理方法

安元⁸⁾を参考に、下記操作を行った。無添加赤土およびリン付加赤土各 6 g をそれぞれ 50 mL の遠沈管に移し、精密ろ過海水（UF 膜（RS50-S8）により 0.2 μm 以上の粒子を除去した海水）を 15 mL を加えた。30℃下で 72 時間、振とうさせた後、遠心分離により底質を沈降させた。遠沈管内の上澄み液を、孔径 0.2 μm のセルロースアセテートメンブレンフィルターを用いてろ過した。ろ液は、超純水で 50 倍希釈した後、モリブデンブルー法にてリン酸の分析を行った。

3. 実験系について

(1) 着底用基盤

着底には、海水由来のマグネシウム系固化剤（マグホワイト）を材質とする基盤（2.9 cm×5.9 cm）を使用した。プラヌラ幼生を基盤に着底させるには、基盤にサンゴ藻が生成する変態誘引物質が付着している必要がある。そのため、基盤はあらかじめ恩納村万座海域のサンゴ養殖場付近の海底に沈め、変態誘引物質を付着させ、プラヌラ幼生が着底できる状態とした。

(2) 飼育環境

水槽は、容量 900 mL 直径 10.5 cm 高さ 11.4 cm 蓋つきのプラスチック製容器を使用した。海水は、恩納村万座沖からくみ上げた無ろ過の海水を使用し、各水槽の海水量は 700 mL に統一した。水槽の蓋に 5 mm の穴を開け、プラスチックジョイント（ニッソーAQ-96）と内径 4 mm、外径 6 mm のシリコンチューブを取り付け、エアープンプに接続した。海水中の酸素量が低下しないように、水面から約 1 cm の深さにシリコンチューブが届くように長さを調節し、一方のプラスチックジョイントと接続することで各水槽へエアレーションを施した（図 2）。また、シリコンチューブにコックを取り付けることで、各水槽のエアレーション強度を調整し、基盤に堆積した赤土が攪拌しない程度にエアレーションの強さを統一した。水温が 24℃ に保たれるよう、室内の空調を管理した。

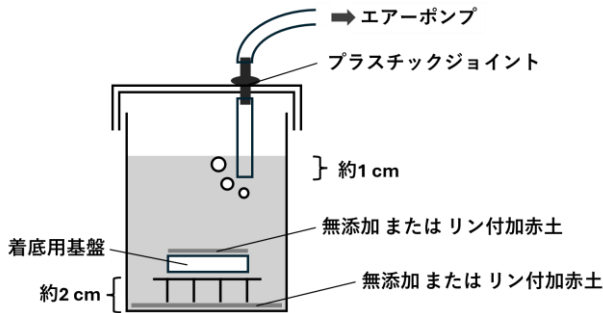


図 2. サンゴ幼生の着底実験に用いた水槽のイメージ図。

(3) 実験区

実験区は、無添加赤土区(n=3)、リン付加赤土区(n=3)、リン付加海水区(n=1)の 3 つを設定した（図 3）。

無添加赤土区およびリン付加赤土区は、赤土濃度を 4 段階（0, 0.2, 0.4 および 0.8 mg/L）とし、基盤上に堆積した赤土は、それぞれ 0, 1.4, 2.7 および 5.4 mg/cm² となった。水槽を準備するための具体的な操作方法については、「(4) 試験操作」にて後述する。

リン付加赤土区においては、リン付加赤土から海水中にリン酸が溶出するため、事前に海水中のリン酸濃度を測定し、飼育期間中におけるリン酸の濃度を調べた。海水中に溶出するリン酸濃度は、赤土堆積量 0, 1.4, 2.7 および 5.4 mg/cm² に対し、それぞれ <0.1 (定量下限値), 1.0, 1.9 および 3.9 μmol/L であった。着底率および骨格形成への影響が、赤土に吸着したリン酸によるものか、海水中に溶出したリン酸によるものかを考察するために、リン付加海水区では、赤土を加えず海水中のリン酸濃度が 0, 1.0, 1.9 および 3.9 μmol/L になるよう、リン酸標準溶液を用いて濃度を調整した。ただし、リン付加海水区のみ、n=1 とした。

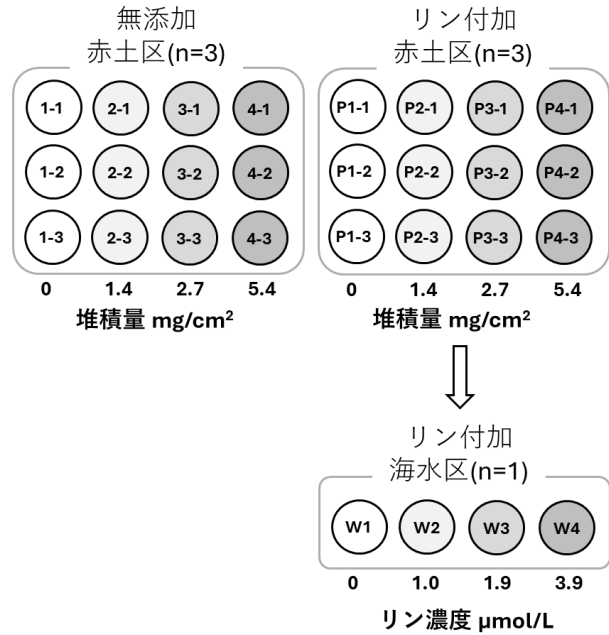


図 3. サンゴ幼生の着底実験に用いた実験区の模式図。

(4) 試験操作

ひとつの水槽に 1 枚の着底用基盤を配置し、水槽の約 2/3 の高さまで海水を加えた。この時、基盤はプラスチック製の台の上に乗せ、水槽底面から約 2 cm 浮かせている。水槽底面から浮かすことで、水槽の底に堆積した腐敗物からの影響を受けにくくしている。この水槽に赤土を加え、ピペティングにより赤土を懸濁させた。各水槽に加える赤土の量は、0, 140, 280 および 560 mg で、1 晩静置することで基盤へ赤土を堆積させた。静置後、赤土はすべて基盤および水槽の底に堆積し、水槽内が懸濁していないことを確認した。

各水槽に対して、プラヌラ幼生を 50 個体ずつ加えた。プラヌラ幼生を水槽へ移す際は、駒込ピペットを使用した。ピペットの先端が細い場合、排出時にプラヌラ幼生が物理的なストレスを受ける。そのため、プラヌラ幼生が通過するために十分な太さ（内径約 7 mm）に先端を調整した駒込ピペットを使用した。また、プラヌラ幼生を水槽へ移す際は、基盤上に堆積した赤土を巻き上げないように、慎重に操作した。最終的に水槽の海水が 700 mL になるよう、海水を追加し、すべての水槽の海水量を統一した（図 2）。

(5) 着底率の集計について

水槽へプラヌラ幼生を移した日(2023 年 6 月 24 日)を実験開始日とし、実験開始から 5 日後の 6 月 29 日に着底数を集計した。基盤の側面や裏面への着底もあったが、堆積

した赤土に対する影響を評価するため、全数 50 個体に対して、基盤上面に着底した個体のみを集計した。なお、観察には、実体顕微鏡(Nikon SMZ800)やデジタルカメラ(OLYMPUS TG-6)のマクロ機能を用いた。なお、水槽へのプラヌラ幼生の投入から、着底数を集計するまでの 5 日間は、水槽の水替えは実施していない。

(6) 骨格の観察について

実験開始から 41 日後(2023 年 8 月 4 日)に、すべての稚サンゴを純水で脱塩し、基盤ごと冷凍保存した。なお水替えは、着底数集計以降から、約 2 日に 1 回の頻度で実施した。このとき、基板上に赤土が堆積した状態を維持するため、水槽の約上半分の上澄みについてのみ水替えを行った。新たに海水を加える際は、基盤上に堆積した赤土を巻き上げないように、慎重に操作した。冷凍保存したサンプルは、後日解凍し、有効塩素 0.8-1.3 %の次亜塩素酸ナトリウムでタンパク質を分解した。乾燥器で水分を取り除いた後、骨格の撮影を行った。骨格の撮影には、SEM(走査型電子顕微鏡 VE-9800 KEYENCE)を使用した。

サンゴの飼育期間および実験スケジュールについては、図 4 に示す。

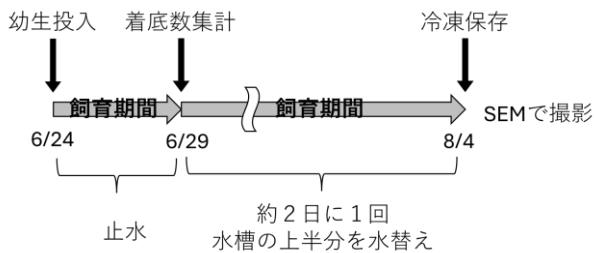


図 4. サンゴの飼育期間と実験スケジュール。

Ⅲ 結果および考察

1. 赤土のリン酸含有量および蓄積リンについて

塩酸抽出による赤土中のリン酸含有量を測定した結果、無添加赤土が $6.0 \mu\text{mol/g dry}$ 、リン付加赤土が $14 \mu\text{mol/g dry}$ となった(表 1)。リン付加赤土 1 g に吸着されたリン酸は、無添加赤土 1 g よりも $8 \mu\text{mol}$ 多い結果となった。赤土 10 g に対して添加したリン酸は $226 \mu\text{mol}$ であるため、本条件における吸着率は 35 %であった。

蓄積リンの濃度は、無添加赤土が $0.27 \mu\text{mol/L}$ 、リン付加赤土が $37 \mu\text{mol/L}$ となった(表 1)。過去に、恩納村沿岸で蓄積リンの分析を実施した際、調査地点における最高濃度が $32 \mu\text{mol/L}$ であったことから⁹⁾、本試験用に調整したリン付加赤土の蓄積リン濃度は、実環境でも存在し得る濃度と言える。

表 1. 各赤土のリン酸濃度について。

	無添加赤土	リン付加赤土
リン酸含有量 ($\mu\text{mol/g dry}$)	6.0	14
蓄積リン ($\mu\text{mol/L}$)	0.27	37

2. 着底率について

図 5 に無添加赤土区およびリン付加赤土区の着底率を示す。基盤に堆積した赤土量の増加に伴い、基盤上面へのプラヌラ幼生の着底率は減少した。赤土堆積量 5.4 mg/cm^2 の条件下においては、無添加赤土、リン付加赤土共に、着底した個体はゼロとなった。堆積量や使用している基盤など、飼育条件は異なるが、波利井らが報告した赤土堆積下での着底率の比較と同様の傾向¹⁰⁾が見られた。一方で、無添加赤土とリン付加赤土の違いによる着底率に明確な差は確認されなかった。

図 6 にリン付加海水区におけるサンゴ幼生の着底率を示す。基盤へ赤土が堆積している環境下においては、堆積量に応じて着底率が著しく減少したが、リン付加海水区においては、着底率の著しい減少は見られなかった。これは、

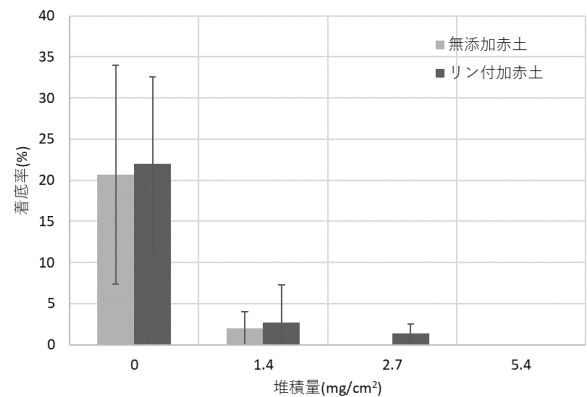


図 5. 赤土の堆積量に応じたサンゴ着底率の違い。エラーバーは標準偏差を示す。

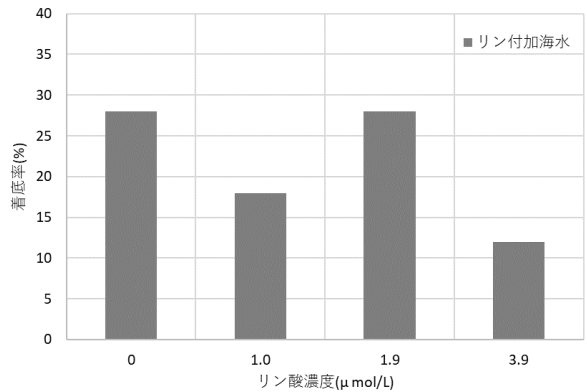


図 6. リン酸付加海水区におけるリン酸濃度に応じたサンゴ着底率の違い。

着底率の変化が、水質の違いよりも基盤への赤土堆積量の物理的な違いに依存している可能性が考えられる。

海水中のリン酸濃度の増加に伴い、サンゴ幼生の着底率が減少しているかどうかについては、実験条件が $n=1$ であるため、統計的な検証は困難であった。なお図 5 のとおり、対照区（赤土堆積量 0 mg/cm^2 ）における着底率は $21 \pm 13\%$ であり、リン酸濃度の変化に応じた着底率は、当該範囲に含まれる結果であった。したがって、本実験では海水中のリン酸濃度に応じて着底率が変化するかは明らかでなか

った。水質の影響を評価するには、さらなる検証が必要である。

3. 骨格について

着底から 41 日後の骨格を図 7 に示す。SEM で撮影した画像の比較からは、いずれの条件においても、骨格に明確な差は確認されなかった。

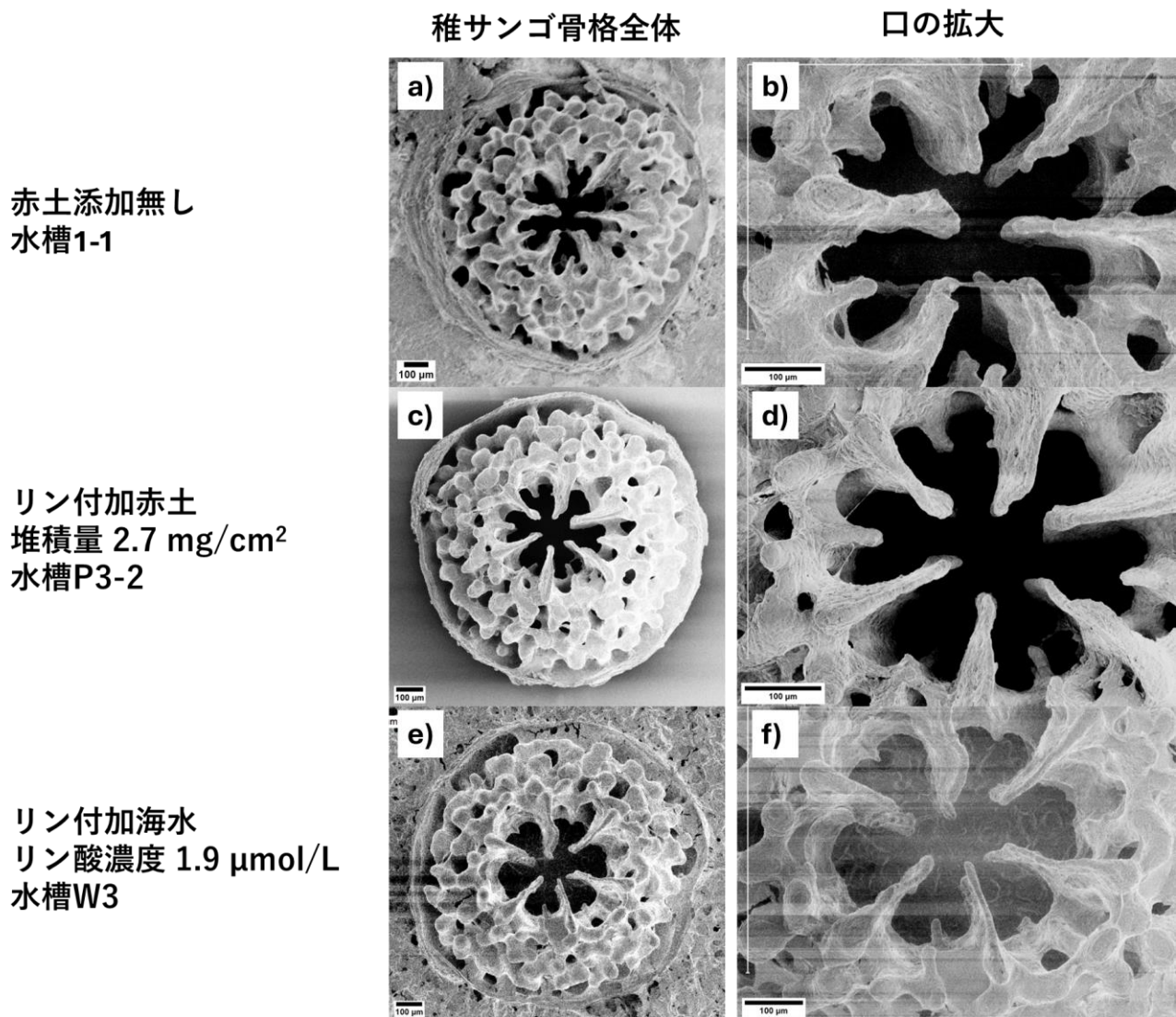


図 7. 走査型電子顕微鏡（SEM）で撮影したサンゴ骨格の画像。上段 a) b) は赤土を添加していない水槽，中段 c) d) はリン付加赤土が 2.7 mg/cm^2 堆積した水槽，下段 e) f) は海水中のリン酸濃度を 1.9 μmol/L に調整した水槽である。リン酸濃度 1.9 μmol/L は、リン付加赤土が 2.7 mg/cm^2 堆積した場合に相当する、海水中のリン酸濃度である。各条件において、着底から 41 日経過した後の骨格画像で、左 a) c) e) が稚サンゴの骨格全体，右 b) d) f) に口の拡大を示す。スケールバーはいずれも 100 μm である。

Ⅳ まとめ

リン酸含有量の異なる赤土が堆積している環境下で、サンゴの着底率および骨格形成に違いがあるか比較した。

1) 着底率について

赤土中のリン酸含有量の違いによって着底率に明確な差は見られなかった。赤土のリン酸含有量の違いに関係なく、基盤上面に赤土が堆積することで、着底率が著しく低下した。これは、波利井らによる赤土堆積下での着底率の比較と同様の傾向¹⁰⁾であり、サンゴの新規加入にあたり、プラヌラ幼生の着底が岩盤上堆積物の物理的影響を受けることが示唆された。しかしながら、赤土から溶出したリン酸の影響については、実験条件が $n=1$ であるため、統計的な検証は困難であった。水質の影響を評価するには、さらなる検証が必要である。

2) 骨格形成について

赤土中のリン酸含有量の違いによって骨格形成に明確な差は見られなかった。着底時に底質から溶出したリン酸の影響を受け、着底後の骨格形成に影響を及ぼす可能性は低いことが示唆された。

多くのサンゴの産卵期は5月から6月であり、梅雨期に重なる。そのため、サンゴの新規加入を促す観点からも、海に赤土等を流入させないことが重要である。さらに、気候変動の影響による大雨の増加が懸念されていることから、陸域における赤土の流出防止対策の強化が求められる。

<謝辞>

本研究の蓄積リン分析に用いた、精密ろ過海水および骨格撮影のための SEM は、沖縄県水産海洋技術センターより借用しました。本研究の実施にあたり、蓄積リンの分析手法や実験環境について詳細に教えてくださった北里大学の安元剛様、産業技術総合研究所の井口亮様、飯島真理子様に、心より感謝申し上げます。また、本実験で使用し

た、サンゴ幼生について、バンドル採取から受精作業および飼育方法等をご教示いただきました銘苅宗和様、銘苅宗一様に深く感謝申し上げます。ご協力いただきました恩納村漁業協同組合、恩納村役場、沖縄ダイビングサービス Lagoon 様をはじめとする関係者の皆様に、心から感謝申し上げます。

Ⅴ 参考文献

- 1) 中嶋亮太・田中泰章 (2014) サンゴ礁生態系の物質循環におけるサンゴ粘液の役割—生物地球化学・生態学の視点から—。日本サンゴ礁学会誌, 16 : 3-27.
- 2) 文部科学省及び気象庁 (2025) 日本の気候変動 2025—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—(詳細編) p.113.
- 3) Mariko Iijima *et al.* (2021) Phosphate bound to calcareous sediments hampers skeletal development of juvenile coral. *R. Soc. Open Sci.* 8 : 201-214.
- 4) 田中勝久 (1994) 沿岸・河口域のリン循環過程におよぼす土壌物質の影響。南西水研報 (Bull. Nansei Natl. Fish. Res. Inst.), 28 : 73-119.
- 5) 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.
- 6) 大久保奈弥 (2021) サンゴは語る。株式会社岩波書店 pp.48-49.
- 7) 沖縄県環境部環境保全課 (2023) 沖縄県赤土等流出防止対策基本計画。沖縄県, p.30.
- 8) 安元純 (2022) 島嶼特有の水循環とリン酸塩負荷がサンゴの石灰化機構に及ぼす影響。科学研究費助成事業研究成果報告書, 2-3.
- 9) 糸洲昌子・比嘉彩也香・久保弘文・座間味佳孝・熊谷直喜・山野博哉 (2023) 恩納村沿岸底質における蓄積リン分布について。沖縄県衛生環境研究所報, 57 : 121-124.
- 10) 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.