

5. サンゴ産卵ファームづくりの関連技術

前章において、効率的にサンゴ産卵ファームを創出するために活用が強く推奨される技術を紹介しているが、サンゴ産卵ファームの幼生供給効果をより高めるために参考となる技術を本章では紹介、説明する。

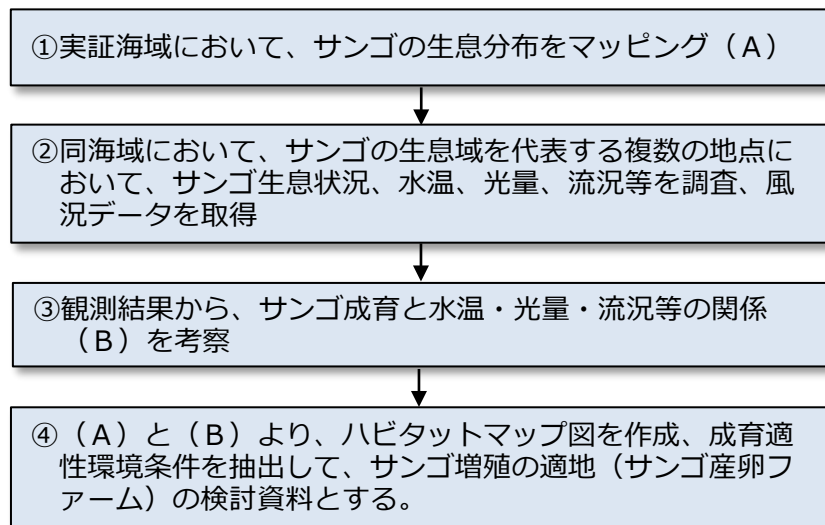
5. 1 ハビタットマップの高度化技術

実証海域において、サンゴが成育する箇所の適地条件との関係を分析し、ハビタットマップを作成し、サンゴ産卵ファームの適地の検討資料とするものである。今回のハビタットマップは、水温や流況のほかに、サンゴの成育に関連する光量子や濁り、付着藻類などの生息環境を調査し、それら環境因子を踏まえたハビタットマップの高度化を行った。

【解説】

1) 調査・作成手順

サンゴ増殖を行う対象海域において、サンゴの生息分布をマッピング（A）し、同海域において、サンゴの生息域を代表する複数の地点において、サンゴ生息状況、水温、光量、流況を観測し、水温・光量・流速の分布図（B）を作成する。（A）と（B）を比較し、ハビタットマップ図を作成、成育適性環境条件を抽出して、サンゴ増殖の適地（サンゴ産卵ファーム）の検討資料とするものである。



図Ⅱ.5-1 ハビタットマップの作成フロー

なお、ハビタットマップとは生物の生息場所とその環境条件を地図上に統合したものである。

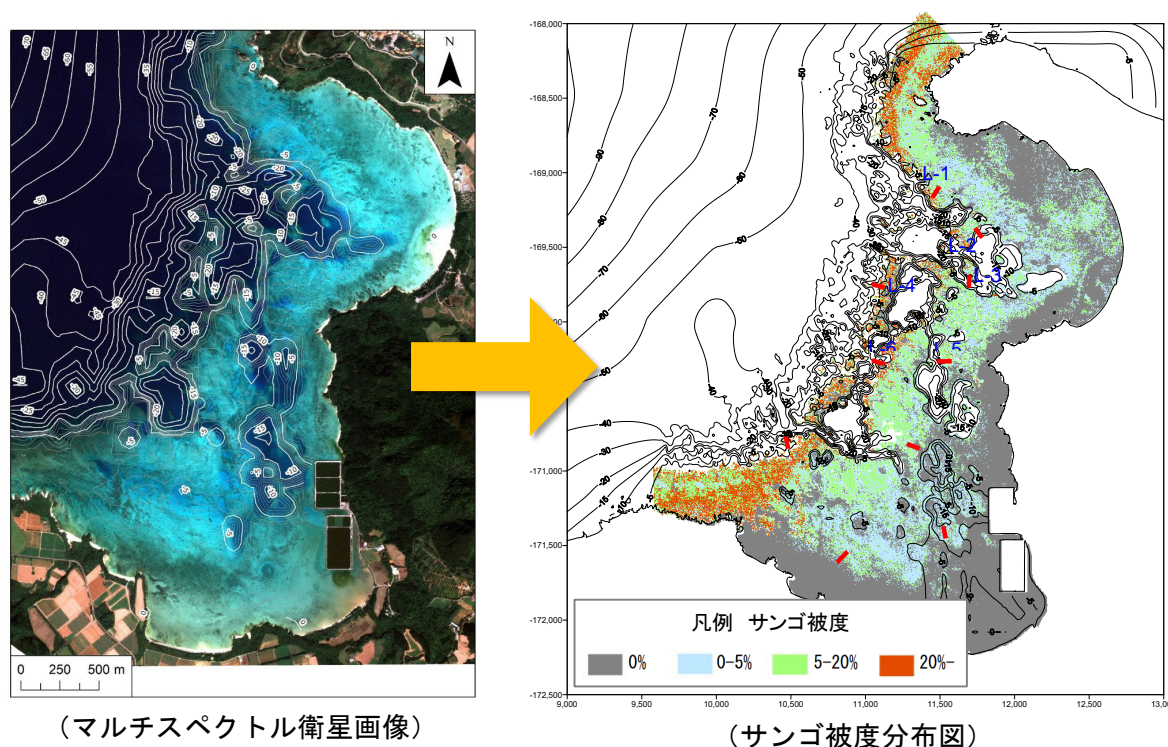
今回のハビタットマップの検討では、水温、光量子、流況等の環境要因のデータは、海域の代表地点に絞った観測データを使用している。一方、サンゴの生息条件について、サンゴ礁の地形の複雑さから、環境要因（水温、光量子、流況等）も複雑に変化するため、海域において環境要因の分布図を作成するための調査データを取得するためには多

大な労力を要する。そのため、地点を絞った観測データから、観測地点におけるサンゴの成育状況と生息環境要因のデータの関係性を考察することによって、サンゴの成育に適しているエリアを区分して、ハビタットマップを作成したものである。

2) ハビタットマップの作成（沖縄沿岸海域の例）

(1) サンゴの生息分布のマッピング

マルチスペクトル衛星画像（2018年2月19日撮影，50cm解像度）を入手し、底質、サンゴ被度観察結果データをもとに、サンゴの被度分布を解析して、サンゴの生息分布をマッピングする。



図Ⅱ.5-2 サンゴ生息分布のマッピング

【参考】

「衛星画像によるサンゴ被度分布解析手法」についての詳細は下記 URL より入手可能である。

改訂 有性生殖によるサンゴ増殖の手引き（平成 31 年 3 月） 水産庁漁港漁場整備部 第Ⅲ編 2. 【技術ノート 2】衛星画像によるサンゴ被度分布解析手法

https://www.jfa.maff.go.jp/j/seibi/attach/pdf/sango_tebiki-12.pdf

(英語版) A guidebook for coral propagation through asexual reproduction—revised version (2019)

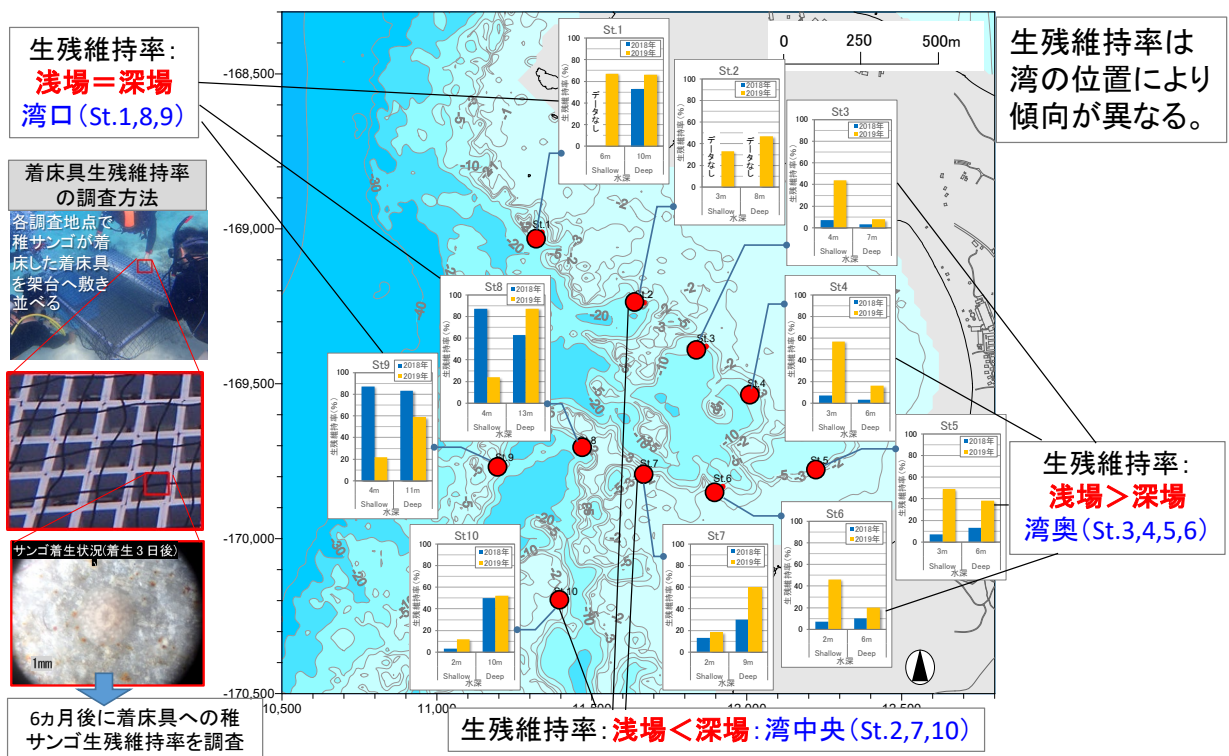
<https://icriforum.org/coralrestoration/>

(2) サンゴの成育状況、水温・光量・流速等のデータ取得

① サンゴの成育状況

サンゴ増殖海域におけるサンゴの成育状況を把握するために生息状況の調査を行う。調査は対象海域の浅い場所と深い場所、湾口、湾奥と広域にわたって行うことが望ましい。調査方法は、下図に示す稚サンゴの生残維持率を把握する調査のほか、天然サンゴの被度を調査する方法がある。

図Ⅱ.5-3 に示す崎枝湾での事例では、2018年及び2019年に種苗生産した稚サンゴが着底した着床具を、湾内10地点の「浅場」、「深場」に設置し、6ヵ月後の着床具への稚サンゴ生残維持率の傾向を把握したものである。



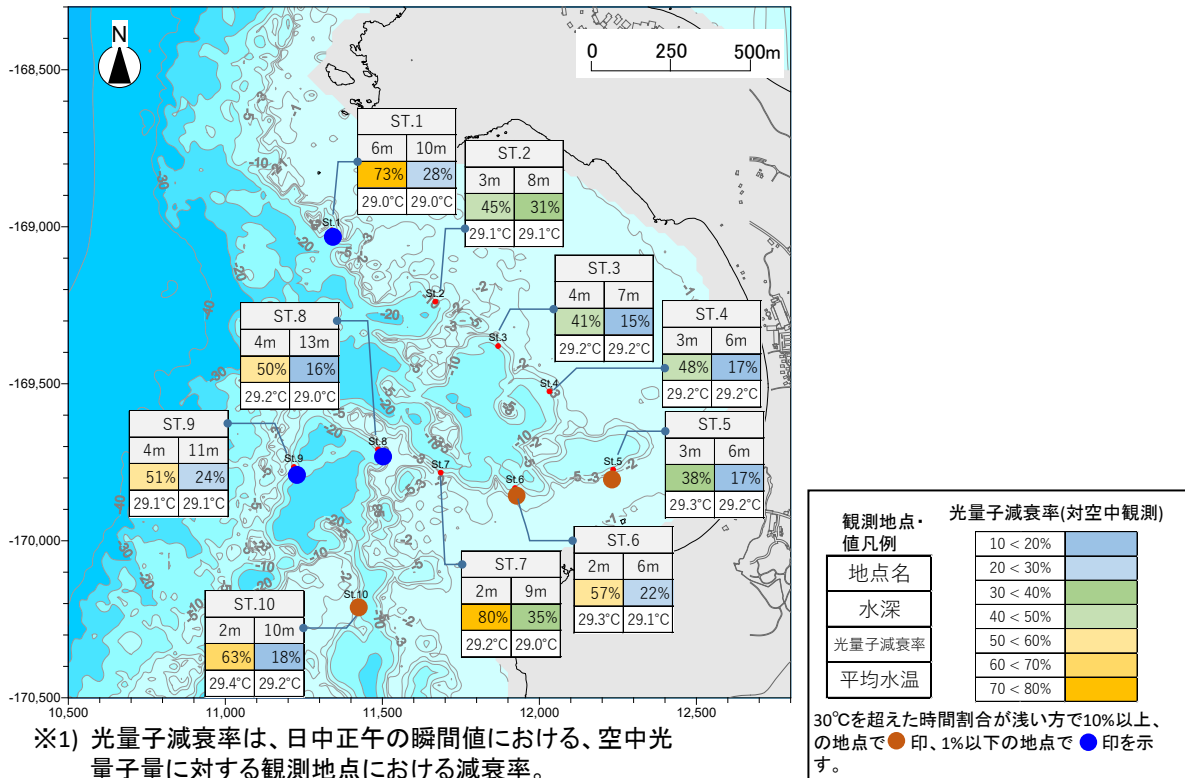
図Ⅱ.5-3 サンゴの生息状況（稚サンゴの生残維持率）の調査結果

② 水温、光量子

対象海域において、サンゴの生息状況を調査する地点において、水温計及び光量子計を用いて、サンゴの成育条件としての水温、光量子の観測を行う。観測時期は、サンゴの白化が懸念される夏季の高水温期に1ヶ月程度以上、連続観測を行うことが望ましい。

図Ⅱ.5-4の崎枝湾の事例では、水温は、夏季の高水温期に平均30°Cを超える地点は少なく、浅い場所では、相対的に湾奥部の地点で一時、30°Cを超える割合が多かった。

光量子減衰率は、崎枝湾では水深10mを超えると約20%となった。



- ※1) 光量子減衰率は、日中正午の瞬間値における、空中光量子量に対する観測地点における減衰率。
- ※2) 水温は、約3週間連続観測の平均値を示す。

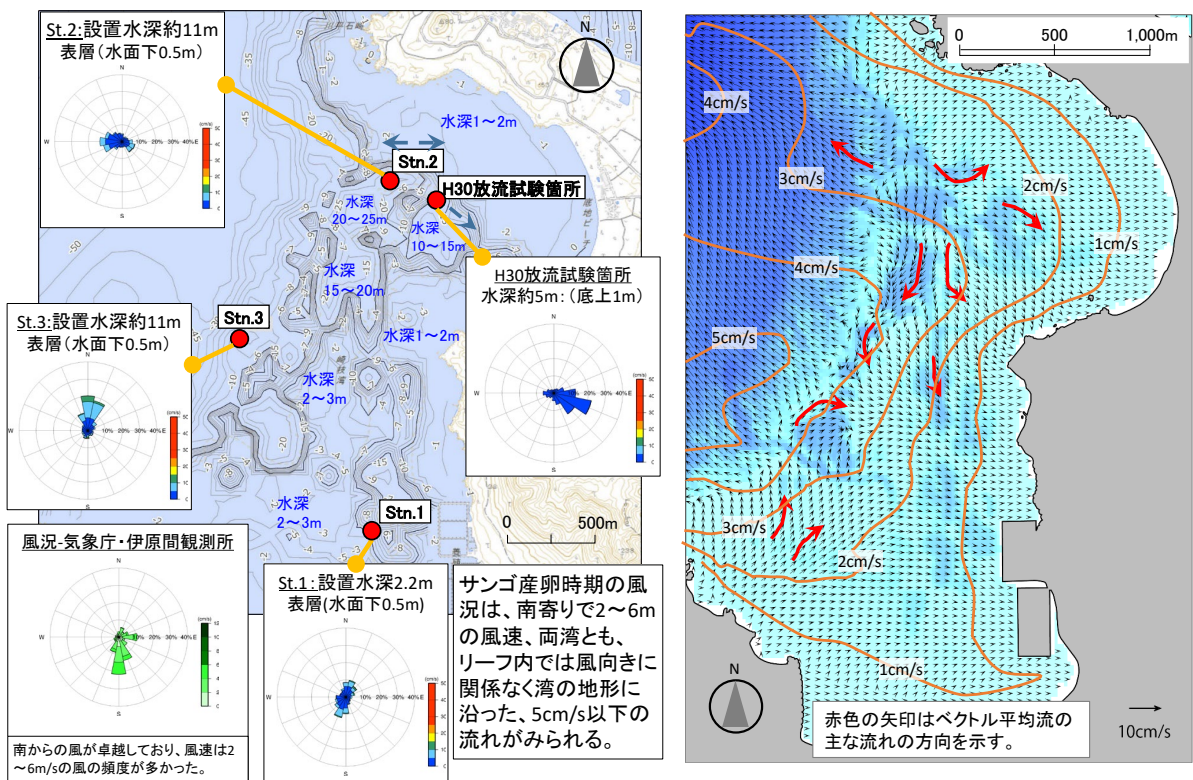
図Ⅱ.5-4 水温・光量子の分布図

③ 流況の把握

対象海域の流況を把握するため、代表的な地点、例えば湾口、湾奥、浅い場所、深い場所において流向・流速計を用いて、流向・流速データを取得する。

図Ⅱ.5-5の左側に示す崎枝湾の事例では、サンゴ産卵時期の風況は南寄りで2~6mの風速、リーフ内では風向きに関係なく、湾の地形に沿った5cm/s以下の流れがみられた。

また、流況観測結果に基づき再現性を検証した流動シミュレーション（Ⅱ編4章4節を参照）によって、湾内の流況を把握した結果を、図Ⅱ.5-5の右側に示す。リーフ内では日平均スカラー平均流は3cm/s以下で、流向が複雑に変化し、一部流れのベクトルの収束域がみられた。



(風況と流況観測結果)

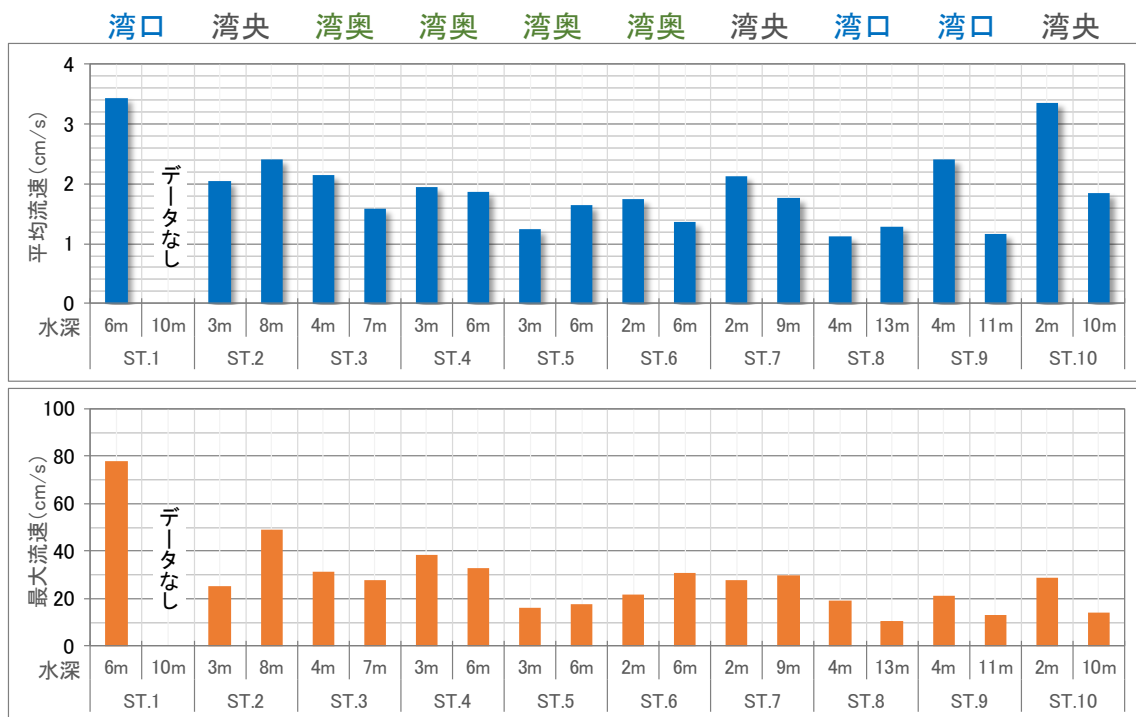
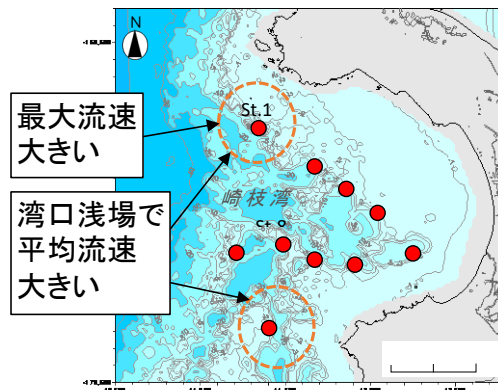
(流動シミュレーションによる湾内平均流)

※サンゴ産卵、幼生浮遊期の海面下2mの日平均流況分布

図Ⅱ.5-5 流況の分布図

流速データの観測期間は、台風等の高波浪で流れが速くなる時期、つまり、強い流れによって、砂礫が移動し、サンゴが破壊される可能性がある時期を含み、シミュレーションで対象海域の流れ場を再現するために、大潮を含む2週間程度以上観測することが望ましい。

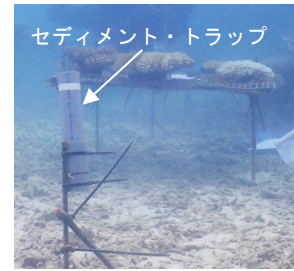
図Ⅱ.5-6の崎枝湾の事例は、夏季の台風通過時のデータ含む流速データである。平均流速は、湾口部 St.1 および湾央部 St.10 の浅場で大きい傾向が見られた。最大流速は湾口部の St.1 の浅場で大きい傾向が見られた。



図Ⅱ.5-6 流速調査結果

④ 海中の濁り（沈降物堆積量）

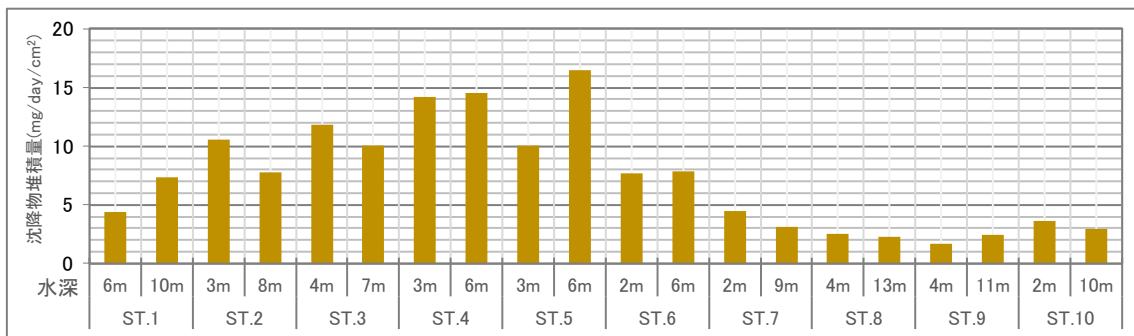
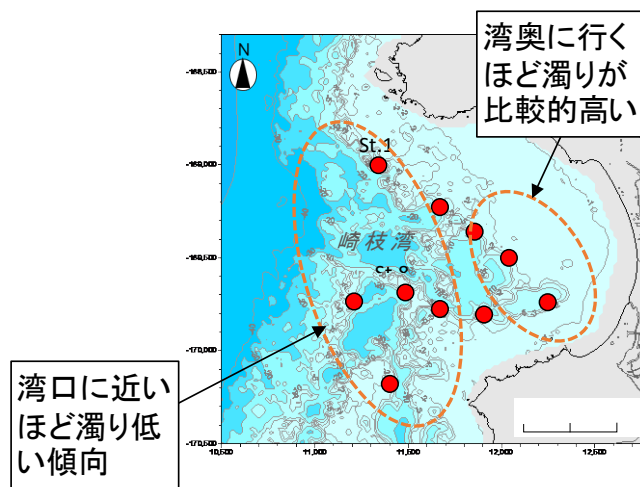
海中の濁りはサンゴの成育に影響を与えるため、海中の濁りを把握することが望ましい。海中の濁りを把握するには、採水によるSS（懸濁物質）の調査、自記式濁度計による濁度の観測及び、セディメント・トラップ（図Ⅱ.5-7）による懸濁物質等の沈降物堆積量の調査を実施する。



図Ⅱ.5-7 セディメント・トラップの事例

本事例では、約1ヶ月間のセディメント・トラップによる調査による沈降物堆積量の調査結果について示す。

堆積物量は湾奥部の地点で湾口、湾央部より多い傾向が見られた。なお、水深による堆積量の差は見られなかった。



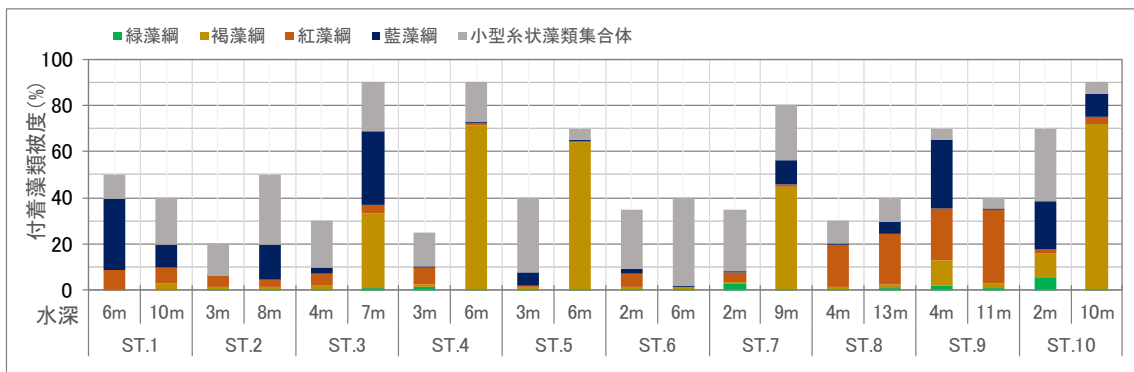
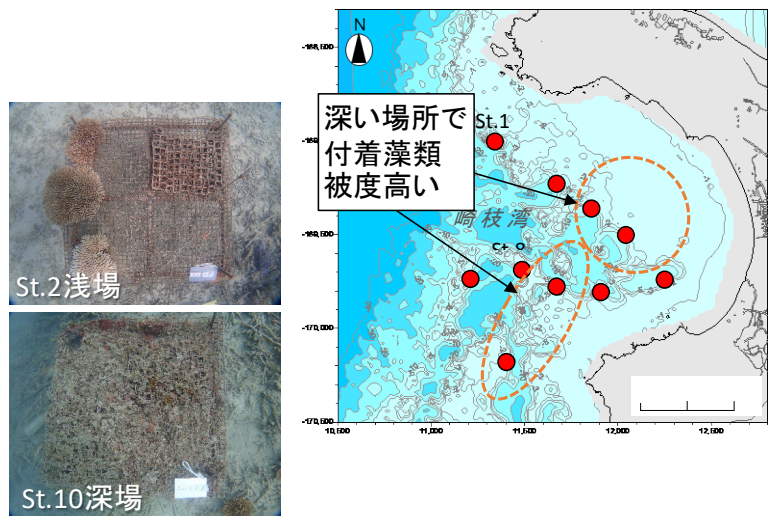
図Ⅱ.5-8 沈降物堆積量調査結果

⑤ 付着藻類

サンゴの着生基盤に付着藻類があると、サンゴ幼生の着生が困難となる。また、着生後のサンゴの成育にも阻害要因となる。そこで、海域の付着藻類の状況について把握しておくことが望ましい。

崎枝湾の10箇所の浅場、深場に設置した1m×1mの簡易基盤上で付着藻類を調査した事例を図Ⅱ.5-9に示す。

付着藻類の被度は湾奥のSt.3,4及び湾央のSt.7,10の深場で被度80%と高く、褐藻綱（ウミウチワ等アミジグサ科が主体）が優占していた。



図Ⅱ.5-9 付着藻類調査結果

(3) サンゴ育成と水温・光量・流況等の関係の考察

前項までの調査及び観測結果に基づき、サンゴの育成と水温、光量等との関係を考察する。

以下では、崎枝湾における稚サンゴの生残状況（サンゴの育成）と個別の環境因子との関係を考察した。

【崎枝湾全体】

- ・稚サンゴの生残を決定するような環境因子は見つからなかった。水深（水温）との関係が有意であったが、水温は概ね 0.2°C 程度の僅かの差であり、見かけ上の現象と考えられた。

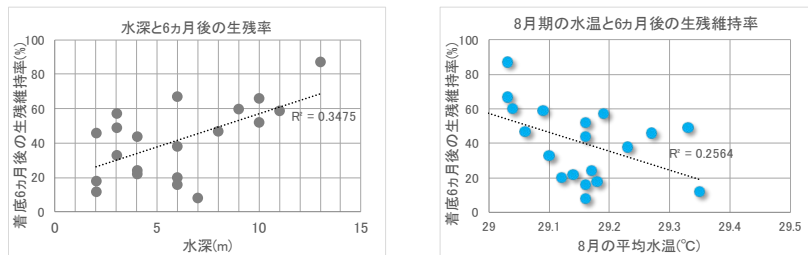


図 II.5-10 サンゴの生残維持率と水深(左)、水温(右)の関係(崎枝湾全体)

【崎枝湾口部、湾中央部】

- ・水温および光量子(≒水深)と稚サンゴ生残に関係性がみられ、水深が深いほうが生残は良い傾向がみられた。

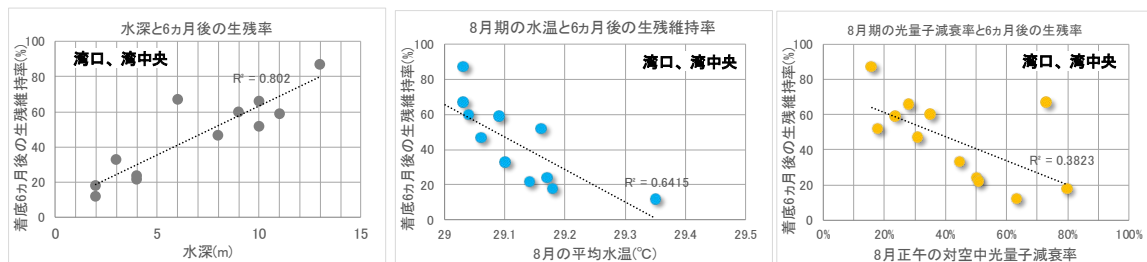
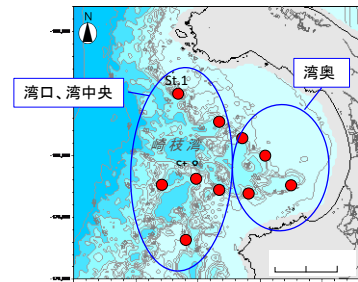


図 II.5-11 サンゴの生残維持率と水深(左)、水温(中)、光量子(右)の関係(崎枝湾口部、湾中央部)

【崎枝湾奥部】

- ・稚サンゴ生残率は光量子(≒水深)との有意な関係がみられた。湾口・湾中央とは逆に、水深の浅いほうが生残は良くなる傾向が見られた。
- ・原因としては、付着藻類被度が影響している可能性が示唆された。

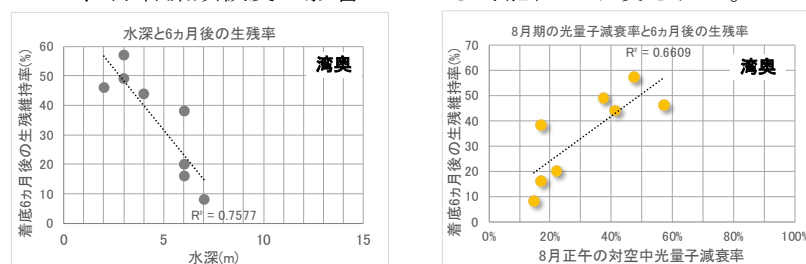
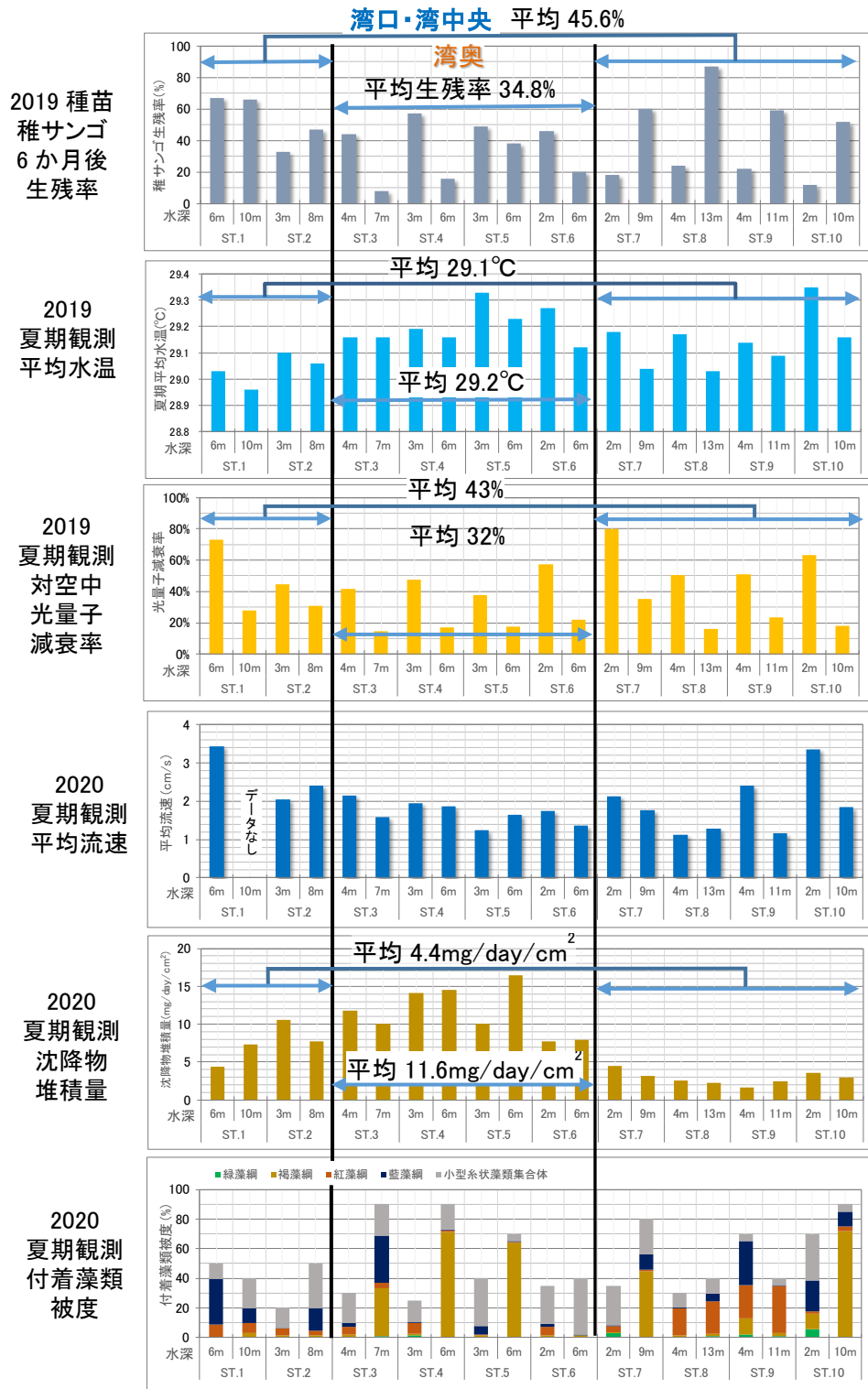
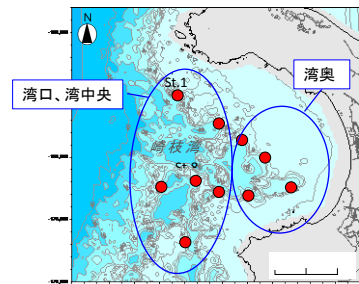


図 II.5-12 サンゴの生残維持率と水深(左)、光量子(右)の関係(崎枝湾奥部)



図Ⅱ.5-13 稚サンゴの生残と環境因子の比較



(4) ハビタットマップ作成及びサンゴ産卵ファームの検討

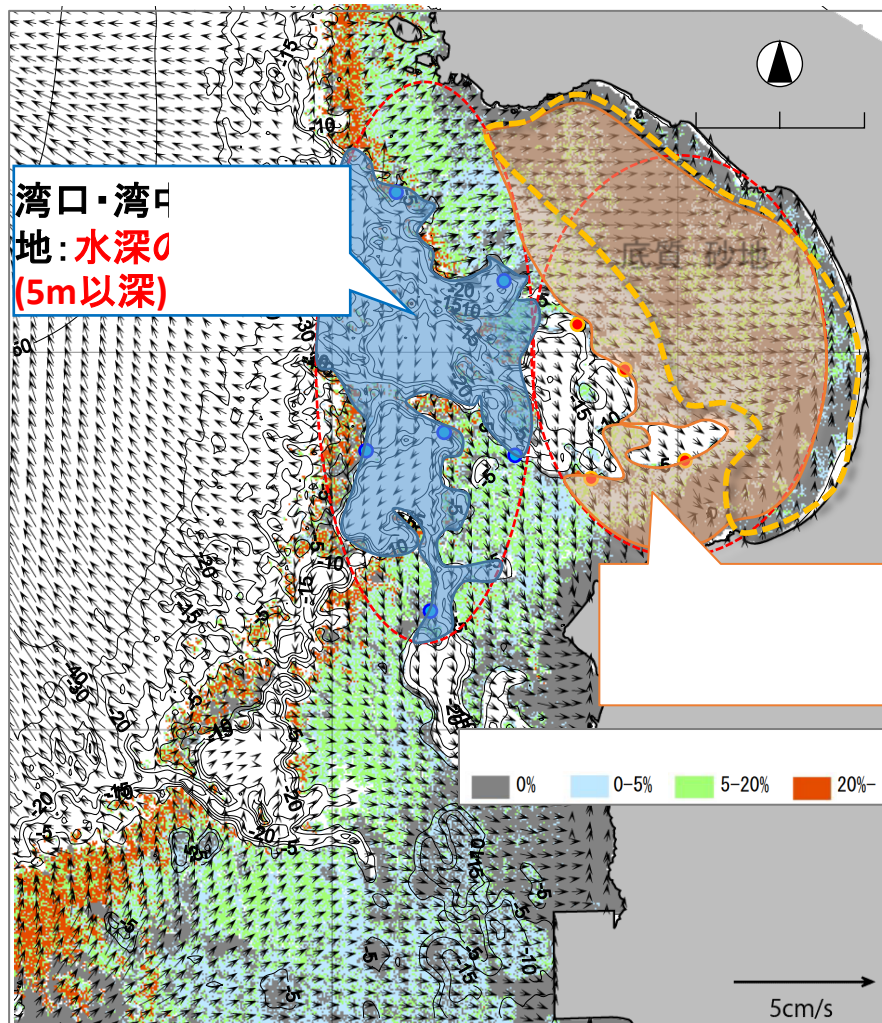
前項のサンゴ成育と成育環境の因子の考察により、ハビタットマップを作成する。
沖縄沿岸域の石垣島崎枝湾のハビタットマップの事例を図Ⅱ.5-14に示す。

崎枝湾では水温、濁り（濁りに起因する光量子）がサンゴの成育に影響していると考えられ、流速は、サンゴの成育には関連しないと考えられた。

サンゴの成育条件の良い場所は、濁りの低い湾口・湾中央部では水深が4-5mより深い場所、濁りの比較的高い湾奥は5mより浅い場所であった。

したがって、崎枝湾の湾奥部でサンゴ産卵ファームを計画する場合は、水深5mより浅く、サンゴ被度が低下している場所がサンゴ産卵ファームの適地となる。

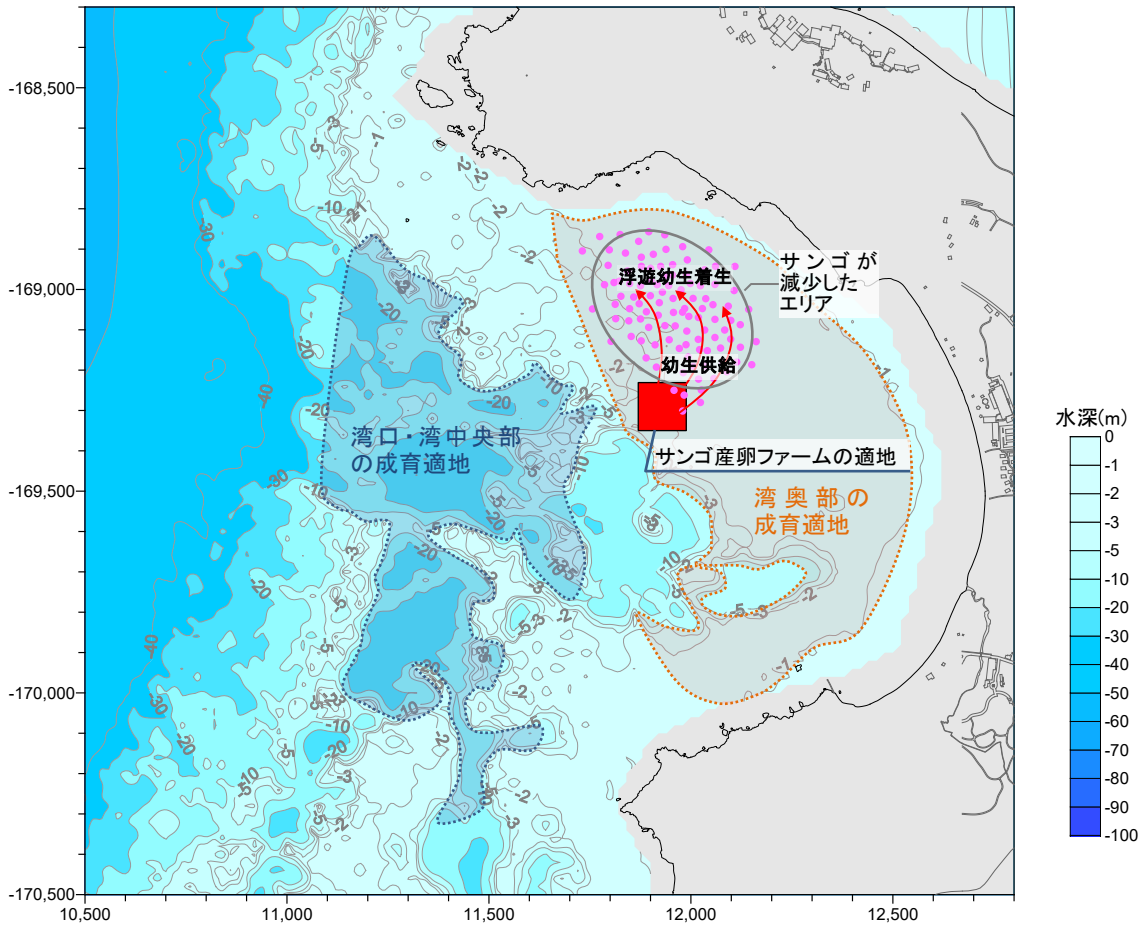
ただし、砂地盤である場合、着生基質の準備と巻上げによる濁り防止のため、着床・育成基盤の整備が必要である。



図Ⅱ.5-14 ハビタットマップ（沖縄沿岸域：石垣島崎枝湾の事例）

また、サンゴ産卵ファームは、周辺のサンゴが減少したエリアにサンゴ幼生を供給できる場所である必要がある。

従って、Ⅱ編 4 章 4 節に示した面的拡散シミュレーションの浮遊幼生移動モデルの手法を用いて、サンゴ産卵ファームの適地を選定する必要がある。



図Ⅱ.5-15 ハビタットマップにおけるサンゴ産卵ファームの適地のイメージ

5. 2 AIによるサンゴ被度計測技術

リモコンボートに搭載した水中カメラによる撮影とAIを組み合わせ、潜水調査より迅速にサンゴ種分類や被度を計測する技術を開発した。

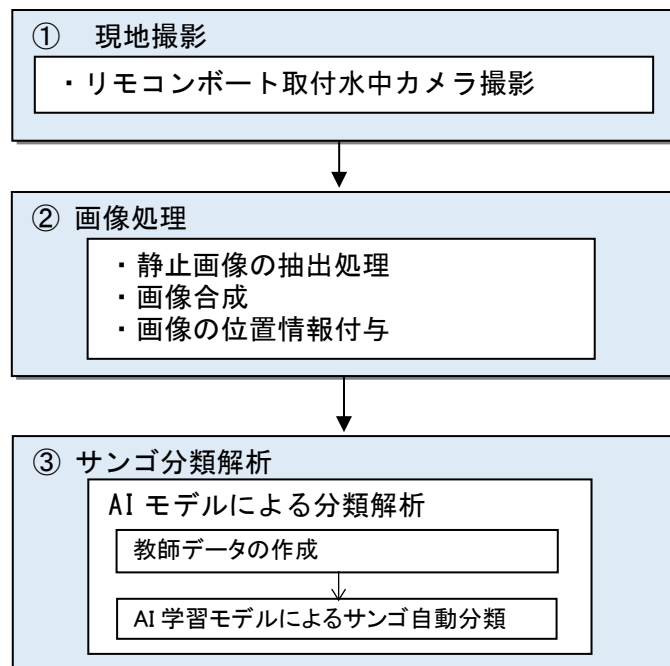
【解説】

1) 背景・目的

従来、サンゴ礁の調査はダイバーによる潜水調査などが行われてきたが、遠隔離島など現地調査の頻度・期間に制約がある地域では、短期間でサンゴの被度を測定できる手法が求められる。そこで、リモコンボートに水中カメラを取り付け、海底面を撮影した動画から、AIモデルによってサンゴの種を計測・分類する手法の技術の開発を行った。

2) 調査・解析の流れ

調査・解析の全体的な流れは図Ⅱ.5-16に示すとおり、「①現地撮影」、「②画像処理」、「③サンゴ分類解析」の3つの工程に区分される。各工程の調査・解析手法については、次章に示すとおりである。



図Ⅱ.5-16 調査・解析の流れ

3) 調査・解析手法

(1) 現地撮影

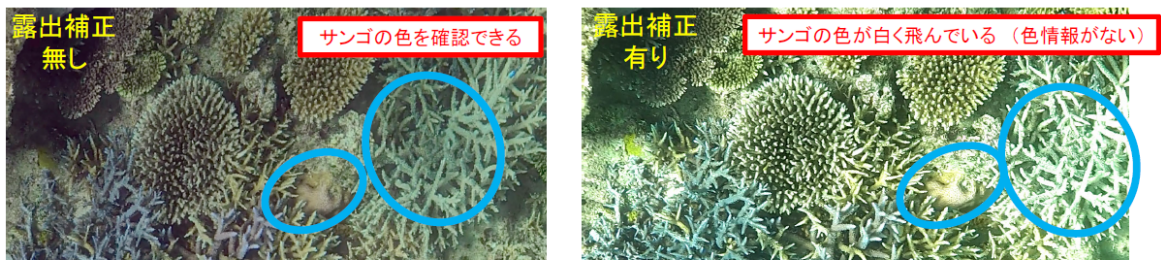
現地撮影は、短時間に広域を詳細に調査するために、リモコンボート（図Ⅱ.5-17）に水中カメラを取り付け、海底面を動画で撮影する。潜水士による撮影よりも速いスピードで撮影が可能であり、0.04ha（幅 2m×延長 100m×2 測線）の撮影は約 0.1 時間、1 日（7.5 時間）あたり約 3ha の撮影が可能となる。これは、潜水士による水中ビデオ撮影と比較して、約 80%の作業時間の短縮に相当する。ただし、波の影響により船体が左右に揺れる中での撮影となるため、以下の点に留意する必要がある。



図Ⅱ.5-17 リモコンボートと撮影状況

【撮影時の留意事項】

- ・船の航行条件：波浪が静穏であり、干潮時を避けること。
- ・カメラ性能：手振れ補正機能を備えた高性能カメラ（GoPro, Inc. 製 GoPro HERO など）を使用することで、60 フレーム/秒で撮影された動画から切り出した画像でもブレの少ない鮮明な画像取得が可能となる。
- ・撮影時のカメラ設定：自動露出補正無しで撮影を行う。補正無しの画像は全体的に暗めの色調となるが、色飛びが抑えられ、サンゴの色情報を捉えることができる（図Ⅱ.5-18）。
- ・リモコンボートの運用制約：操縦者から 800m 以内の範囲が計測可能域となる。



図Ⅱ.5-18 露出補正無し、ありの画像比較

(2) 画像処理

撮影した水中動画は、サンゴ分類を可能にするため、画像処理を行う。まず、動画から静止画像を切り出し、リモコンボートの測線方向に画像を合成し、平面図を作成する。

画像合成には一般的に「オルソ化」と「モザイク化」の2手法があり、SfMソフトウェア(Pix4Dmapper等)を用いて3次元データを作成する「オルソ化」は、正確な位置情報を付与できる利点がある。しかし、リモコンボートの撮影動画を用いて3次元データを作成すると、作成された画像は表面が刷毛でなめたような状態となり、サンゴの枝形状など細部の判読が困難となる問題が生じた。そこで、本検討では、隣り合う画像を合成してつなぐ方法である「モザイク化」の手法を採用した。画像処理には市販の画像解析ソフトウェア(PhotoDirector等)を使用し、位置情報はリモコンボートの測線に基づき幾何補正を行った。モザイク化によりサンゴの局所的な形状が明瞭に捉えられ、図Ⅱ.5-19に示すスギノキミドリイシの抽出結果では、オルソ化画像では長い枝状のスギノキミドリイシはぼやけた状態となり、AI解析による抽出が困難であったのに対し、モザイク化画像では鮮明に捉えられ、正確な抽出が可能となった。

なお、モザイク化した画像では撮影時の光条件や映り込みによって色調の差異が生じるため、以下の点にも留意する必要がある。



2019年(浦底湾)2分類



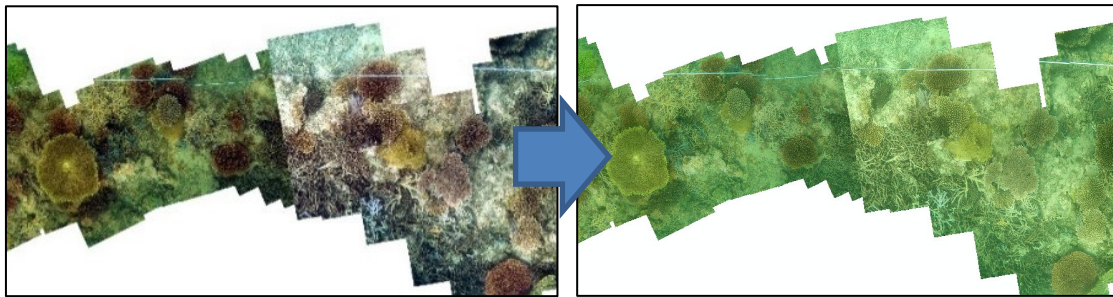
2020年(浦底湾)2分類

図Ⅱ.5-19 スギノキミドリイシの抽出結果の例
(左：オルソ化を使用、右；モザイク化を使用)

【画像処理の留意事項】

- ・画像の標準化：データの特徴を明確にするため、画像の前処理として「標準化」を行う(特徴量の分散を1に変換する処理)(図Ⅱ.5-20)。

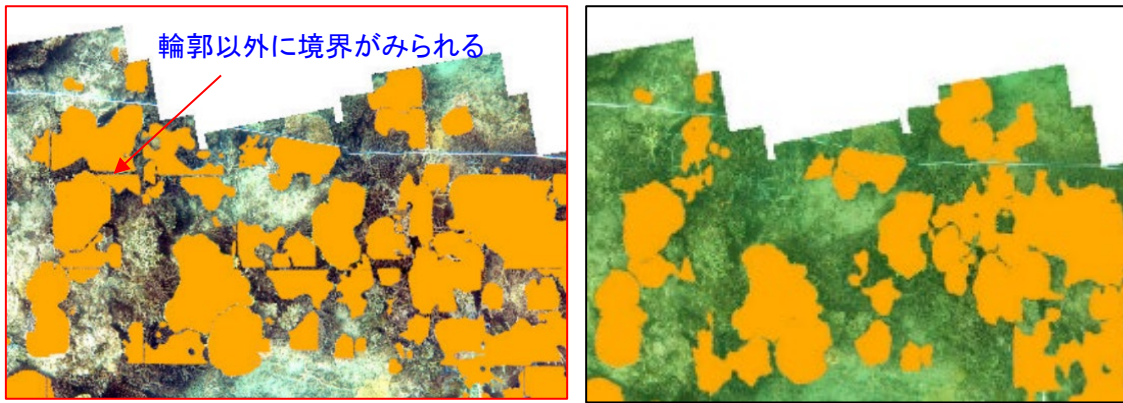
なお、画像の前処理には標準化のほかに「色調補正」もあるが、色調補正を行った画像は人の目にはサンゴの判別がしやすくなる一方で、サンゴと非サンゴとの色調差(画像の有する情報量)が減少し、AIによる解析には不向きであった(図Ⅱ.5-21)。



標準化前

標準化後

図Ⅱ.5-20 画像の前処理の工夫（標準化）



色調補正

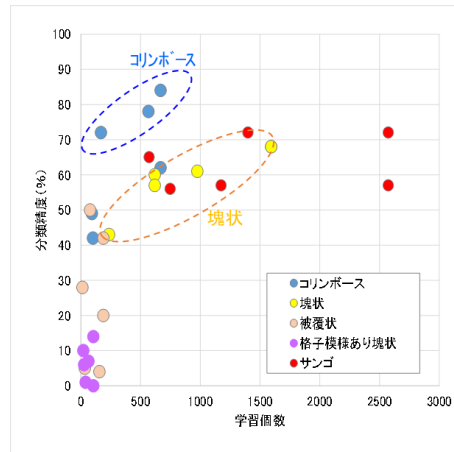
標準化

図Ⅱ.5-21 サンゴ抽出結果の例
（左：色調補正、右：標準化）

(3) サンゴ分類解析

本検討で使用したAIモデルは、物体領域を抽出するインスタンスセグメンテーション手法を用いた。これは、画像上の「どこに」「どんな形で」対象物が存在するかを領域として抽出する方法であり、今回はその手法の一つMask R-CNNモデルにより行った。

AI解析において最も労力を要し、かつ解析精度に大きく影響する工程が、教師データの作成である。どんな教師データを作成し、学習させるかによって、モデルの解析精度は大きく左右される。必要とされる教師データの数は、対象物の種類や使用する画像の品質によって異なり、どれだけの数が必要といった決まりはないが、参考として、本検討で作成した教師データ数と分類精度との関係を図Ⅱ.5-22に示す。なお、コリンボース状のサンゴに比べて、塊状のサンゴは大きさや形状が多様であることから学習が難しいと考えられる。

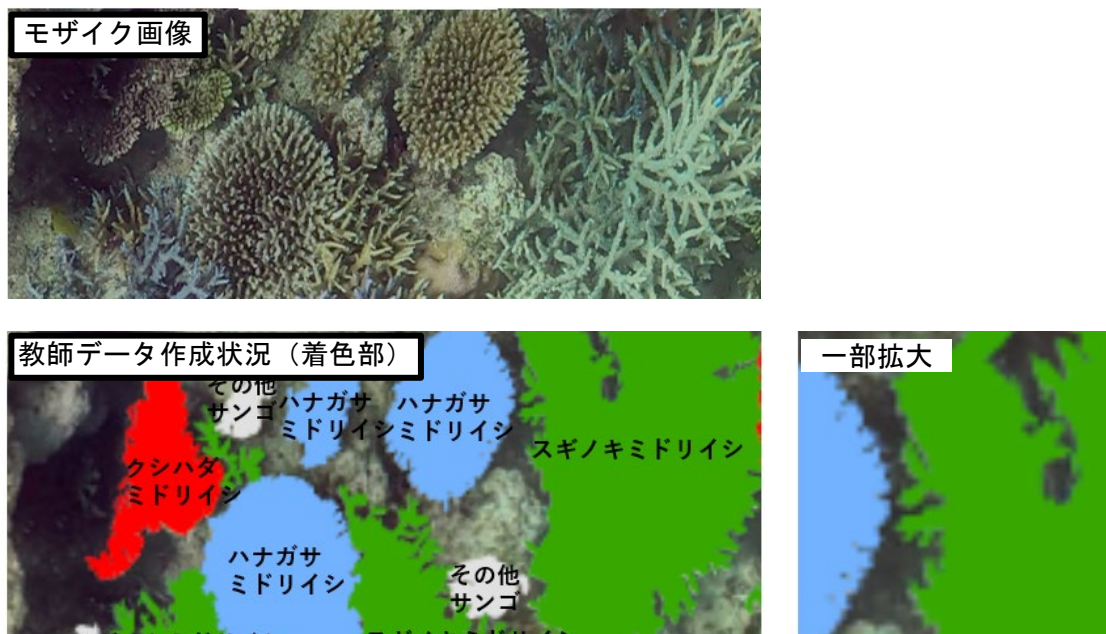


図Ⅱ.5-22 教師データ数と分類精度の関係

教師データの作成イメージを図Ⅱ.5-23に示す。本検討ではシルエットからもサンゴ種の判別が可能となるよう、サンゴの輪郭を明確に捉えた学習データを作成した。

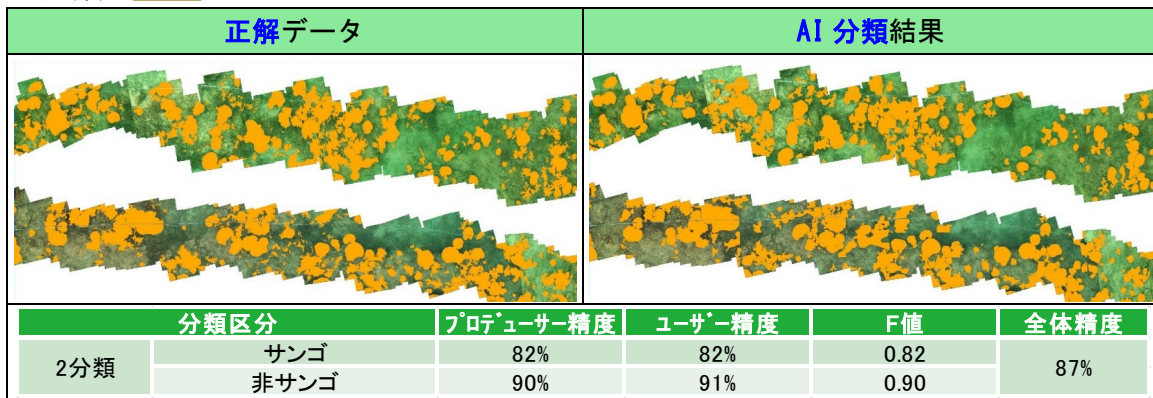
また、AIモデル構築のトレーニングのためのデータセットの提供もおこなっているので、参考とされたい。

図Ⅱ.5-24には沖縄海域におけるAI解析結果を示す。分類精度(F値)は、2分類においてサンゴ0.82、非サンゴ0.90、形状別分類においてコリンボース状0.85が得られている。



図Ⅱ.5-23 教師データの作成イメージ

2分類 ■ サンゴ



形状別分類 ■ 樹枝状 ■ コリンボース状 ■ テーブル状

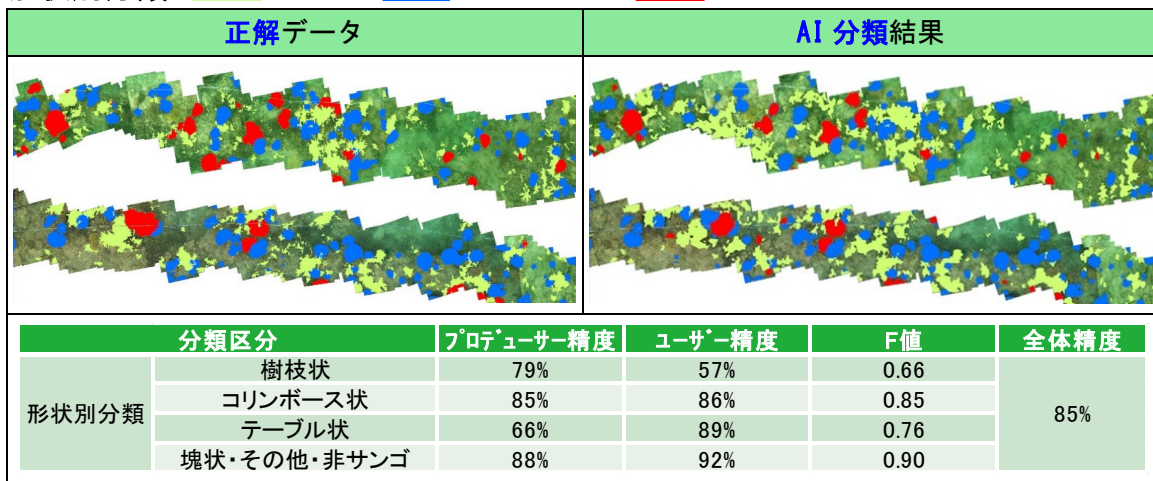


図 II. 5-24 AI モデルによるサンゴ解析結果（沖縄海域：2 分類、形状別分類）

【AI 解析の留意事項】

色味によって生死が違うサンゴは、AI において誤分類が生じる可能性が高い。本検討では、死サンゴを教師データとしてモデルに追加し、分類精度の向上が図られた(図 II. 5-25)。

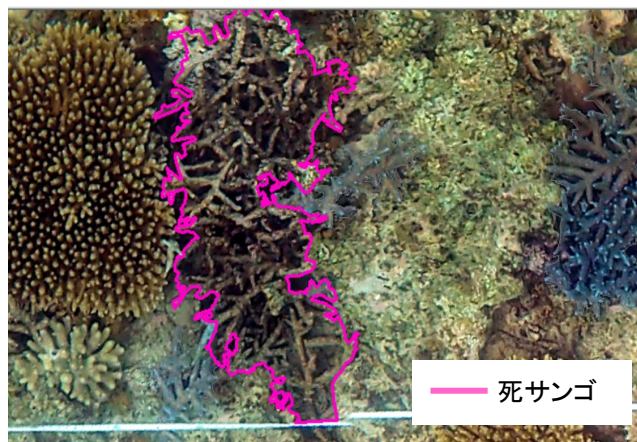


図 II. 5-25 死サンゴの教師作成イメージ

本検討の AI 解析において使用した AI モデル及びハードウェアの性能情報について、参考までに以下に示す。

【AI モデル】

モデル	特徴
Mask Scoring RCNN (2019)	本モデルは、対象物体の検出と領域推定を行うインスタンスセグメンテーション手法。物体を検出してからその領域を推定するため、背景における誤検出が少ないことや、物体単位の領域推定精度が高いことが特徴になる。 同様のインスタンスセグメンテーションモデルはいくつかあり、代表的な Mask RCNN を使用した。

【ハードウェアの性能情報】

項目	性能情報
OS	Ubuntu 20.04.3
CPU	AMD EPYC 7302P 16-Core
GPU	NVIDIA RTX A5000 (×2 枚)
メモリ	64GB

【AI 解析全般の留意事項】

AI 解析を取り巻く技術は日進月歩で進化している。そのため、解析に用いるモデルや手法、関連ツールについては、最新の情報を確認し、レビューしていく必要がある。

【コラム】リモートセンシング技術を活用したサンゴ情報の把握

1 リモートセンシングによる観測の意義

サンゴ礁の分布等については、従来、マンタ法やスポット潜水による目視観察で行われてきたが、近年では人工衛星や航空機、ドローンを活用したリモートセンシングが導入されている。これらの技術は、一度に広範囲を観測できる点や、アクセスの困難な遠距離島でも定期的なデータ取得が可能であることから、モニタリングの極めて有効な手段となっている。

さらに最新の取組では、空からの観測に加え、水中カメラを搭載したリモコンボート等を活用した効率的な計測手法が確立された。これにより、潜水士による従来の水中撮影と比較して、作業時間を短縮するなど、広範囲を詳細かつ迅速に把握することが可能となっている。

2 多様なリモートセンシング技術の特性

表1に、各リモートセンシング技術により取得可能な情報を示す。目的に応じて、「広域を俯瞰する視点（衛星・航空機）」と「詳細を把握する視点（リモコンボート等）」を使い分けることが重要である。

表1 リモートセンシング技術を用いた情報の把握

区分	広域リモートセンシング	近接リモートセンシング	従来型現地観測（参考）
情報取得手法	人工衛星/航空機 ・ドローン	リモコンボート (水中カメラ)	潜水目視/深淺測量
取得情報	広域の画像・水温・地形	詳細なサンゴ被度・種構成	ピンポイントの生物相・地形
基質（底質）	△（広域的）	◎	△（局所的）
サンゴ被度	△（広域的）	◎	△（局所的）
サンゴ種構成	×～△ ※△：低空撮影を行った場合	○	◎
利点	一度に広範囲を定期観測可能	潜水士の作業時間を短縮し、迅速に把握	確実な種特定が可能

注）表中記号の凡例 ◎：詳細把握可能、○：把握可能、△：概略把握可能、×：把握不可

3 AI 技術による解析の高度化と展望

取得された膨大な画像データの解析においても、深層学習（ディープラーニング）モデルの活用による自動分類技術が飛躍的に進化している。水中画像のみならず、衛星画像やドローン画像とAIを組み合わせた様々な技術の活用が期待される。

リモートセンシングとAI技術の組み合わせは、従来の潜水調査を補完し、より効率的で精度の高いサンゴ礁の管理を実現する有力な手法となる。



AIによるサンゴ状態判別
(教師作成例)

5. 3 高水温耐性サンゴ種苗生産技術

0 歳齢の稚サンゴを高水温に暴露して選抜することにより、高水温耐性を持つサンゴ種苗を生産することが可能である。今後、遺伝的特性に着目し、高水温耐性 DNA マーカーを用いた DNA マーカー育種の技術開発が期待されるが、ここではその手順を示した。

【解説】

近年、地球温暖化の進行に伴い海域の水温上昇が頻発し、亜熱帯・熱帯域では広範囲でサンゴの白化や大規模な斃死が繰り返し発生している。一方で、異常高水温の海域にもサンゴが生息していることや、高水温でも白化せずに生き残る群体が存在することが知られている。これらの耐性要因としては、高水温耐性を示す共生褐虫藻や特定のバクテリアの関与、あるいはサンゴ自体の遺伝的特性などが考えられ、さまざまな研究が進められている。しかし、現時点では高水温耐性の要因は明確には解明されていない。

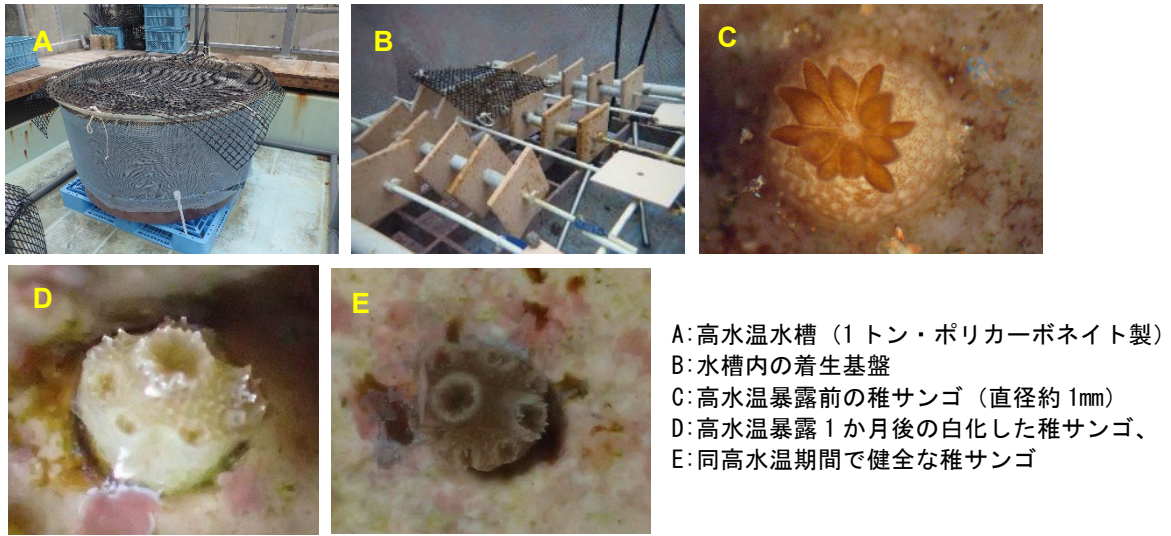
ここでは、高水温耐性をもつサンゴ種苗を生産する技術の開発を目的として実施した「高水温暴露による稚サンゴの選抜実験」の成果を紹介する。あわせて、サンゴが本来備える遺伝的特性を活かした高水温耐性種苗生産（いわゆる DNA マーカー育種）について、その考え方や進め方を解説する。

1) 高水温選抜による育種

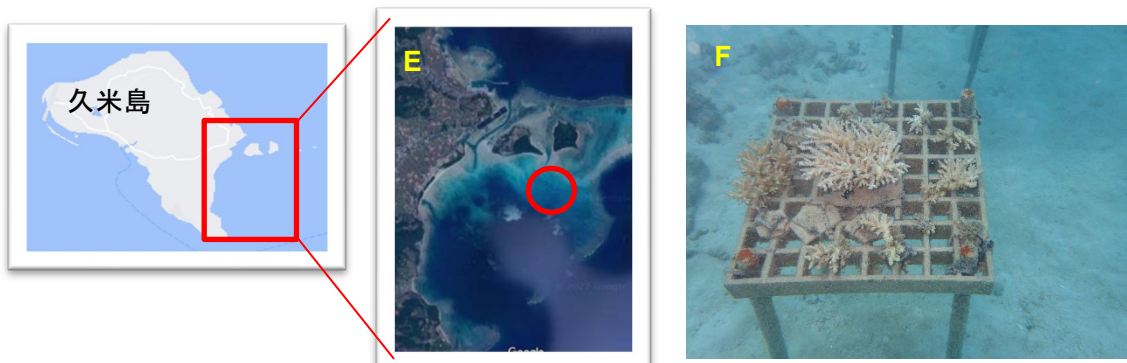
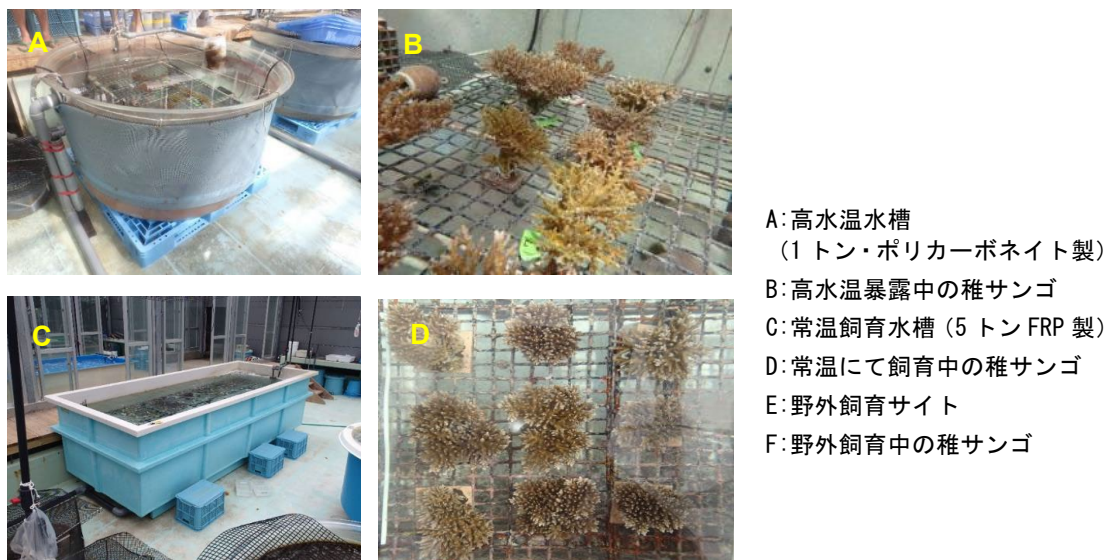
2019 年に有性生殖法で種苗生産したウスエダミドリイシの稚サンゴを、同年に 0 歳で高水温（31.5℃）にて約 2 か月間飼育し、高水温に対して耐性を持つ群体を選抜した（図 II.5-26）。その後、1～4 歳齢の時点でこれらの群体を用いて、選抜時と同様な条件下で高水温に暴露したところ（図 II.5-27）、いずれ年齢においても選抜群体が高水温耐性を維持していることが検証された（表 II.5-1）。特に、4 歳齢の時点では、群体の直径は産卵可能サイズ（生物学的最小形）の 15cm を超えており成体となっていることから、これ以降において生態的な特徴が大きく変化することなく、高水温耐性も維持されると思われる。

また、選抜群体が海域の環境に適応可能かどうかを調べるために、2022 年より久米島の海域において継続的に飼育を行ったところ（図 II.5-27）、年間の生残率は 80%以上を示し、水槽内で飼育しているサンゴの生残率と有意な差はなかった（表 II.5-2）。

これらのことから、高水温耐性稚サンゴを生産する技術として、0 歳齢稚サンゴの高水温暴露による選抜は有効な手段であることが判明した。今後は、高水温で選抜した群体から有性生殖法により生産した次世代のサンゴが高水温耐性を維持しているかを検証するとともに、この手法を高水温耐性サンゴの育種（品種改良）に活用するために、更なる技術開発が期待される。



図Ⅱ.5-26 稚サンゴの高水温暴露選抜



図Ⅱ.5-27 3歳齢サンゴの高水温暴露および常温飼育、野外飼育状況

表Ⅱ.5-1 高水温選抜群体の高水温再暴露実験

	2020年 (1歳齢)			2021年 (2歳齢)			2022年 (3歳齢)			2023年 (4歳齢)		
	群体数		生残率	群体数		生残率	群体数		生残率	群体数		生残率
	開始時	終了後		開始時	終了後		開始時	終了後		開始時	終了後	
	7月	9月	7月	11月	7月	9月	9月	10月				
水槽内高水温	205	204	99.5%	25	17	68.0%	10	6	60.0%	10	9	90.0%
水槽内常温	93	75	80.6%	41	23	56.1%	15	13	86.7%	13	13	100%

※実験には、0歳齢で高水温により選抜した群体を用いた。水槽内高水温の試験区においては、各年齢で再度高水温に暴露した。一方、水槽内常温試験区では、常温の水温で飼育した。

※いずれの年齢においても、両試験区間で統計的な有意差は見られなかった (Fisher 確率検定, $p>0.05$)。

表Ⅱ.5-2 高水温選抜群体の海域飼育実験

	生残群体数(生残率)		
	2022年7月	2022年9月	2023年9月
海域飼育	17 (100%)	16 (94.1%)	14 (82.4%)
水槽内常温	15 (100%)	13 (86.7%)	13 (86.7%)

※両試験区間で統計的な有意差は見られなかった (Fisher 確率検定, $p>0.05$)

2) 遺伝的高水温耐性を利用した種苗生産 (DNA マーカー育種¹⁾)

近年、サンゴ自体が遺伝的に高温耐性を持つ可能性が注目されている。Barshis *et al.* (2013), Dixon *et al.* (2015) 等により、高水温下で特定の遺伝子が発現することが報告されている。また、高水温にサンゴを暴露することによって選抜した高水温耐性を持つ親サンゴから生産した稚サンゴを、海域に移植することによりサンゴ群集の高水温に対する再生能力を高めようというアイデアも発案されている (Humanes, 2021)。

そこで、本技術開発では2018年度よりウスエダミドリイシ (*Acropora tenuis*) を用い、

- ① サンゴの遺伝的特性が高水温耐性に関与しているか
- ② 高水温耐性群体がどのようなDNAの特徴をもつか

を調べている。得られた成果をもとに、遺伝的特性を活用した種苗生産 (DNA マーカー育種) の技術開発を進めている。以下に研究の基本的な流れを示す (図Ⅱ.5-28)。

- A) 野外より採集したサンゴを高水温に暴露し、群体ごとに高水温耐性を判別
- B) 高水温耐性DNAマーカーの開発のため、高水温耐性を判別した群体を用いて、高耐性・低耐性サンゴに特有の遺伝的変異の探索
- C) 高水温耐性を判別した親群体由来の配偶子を用いて生産した稚サンゴの高水温暴露

¹ DNAマーカーとは、生物のDNAの特定の場所にある、遺伝的な性質や個体を識別するための「目印」となるDNA配列のことである。また、DNAマーカー育種とは、DNAマーカーを目印として、病気耐性、高水温耐性、高成長速度などの望ましい形質を持つ生物を選抜・交配・飼育する技術のことであり、従来の好ましい形質を持った個体を有性生殖法で掛け合わせて継代飼育する育種方法と比べて、時間と労力を大幅に削減できるという利点がある。

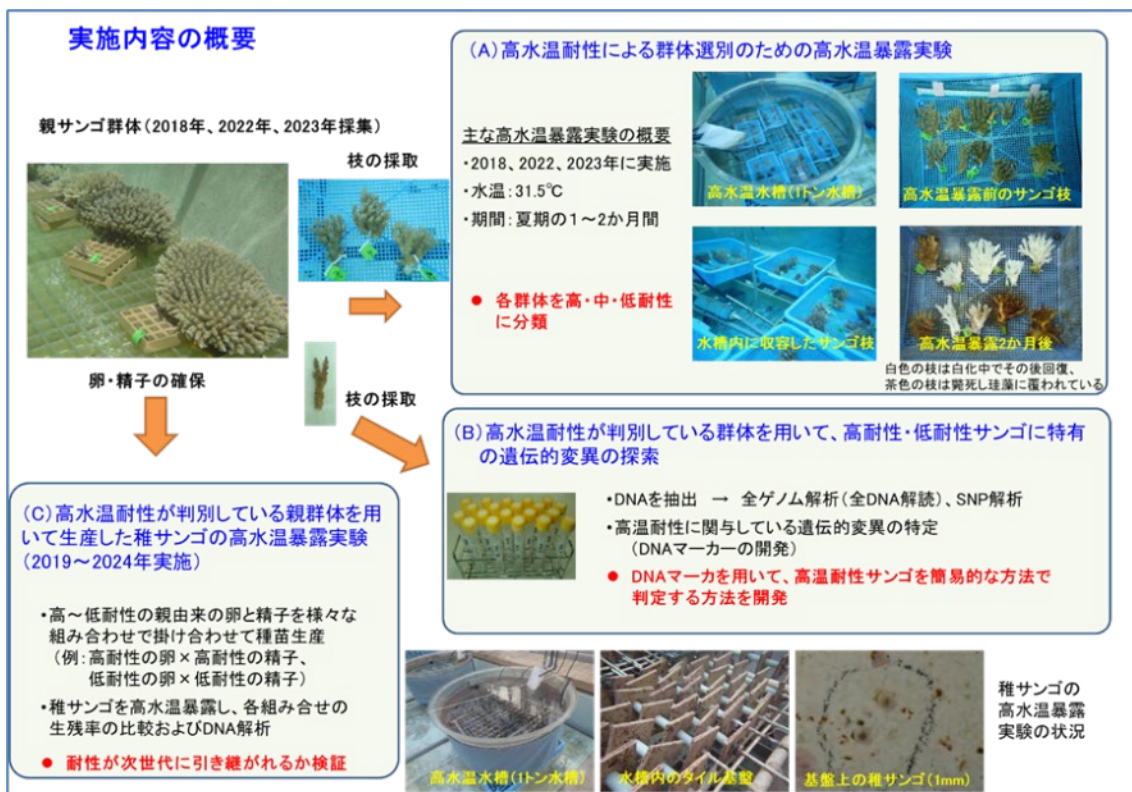


図 II . 5-28 高水温耐性への遺伝的特性の関与の検証に関する研究手順

本技術開発で実施した DNA マーカー開発の手順は以下のとおりであった。

① DNA²抽出

各群体より、枝の一部を折り取って CHAOS (カオス) で固定する。CHAOS は、グアニジンチオシアン酸、グアニジン塩酸塩、尿素、界面活性剤等を含み、細胞を壊す力が強い。そのため DNA や RNA を抽出する際に使われる溶液である。サンプルを含む溶液から、タンパク質除去、DNA 沈殿、DNA 溶解等の作業を経て DNA を抽出する。

② 全ゲノム解析

抽出した DNA において、全ゲノム (すべての DNA) の塩基配列を読み取る。

(判読した塩基配列の例: GCTAGGGCCTA)

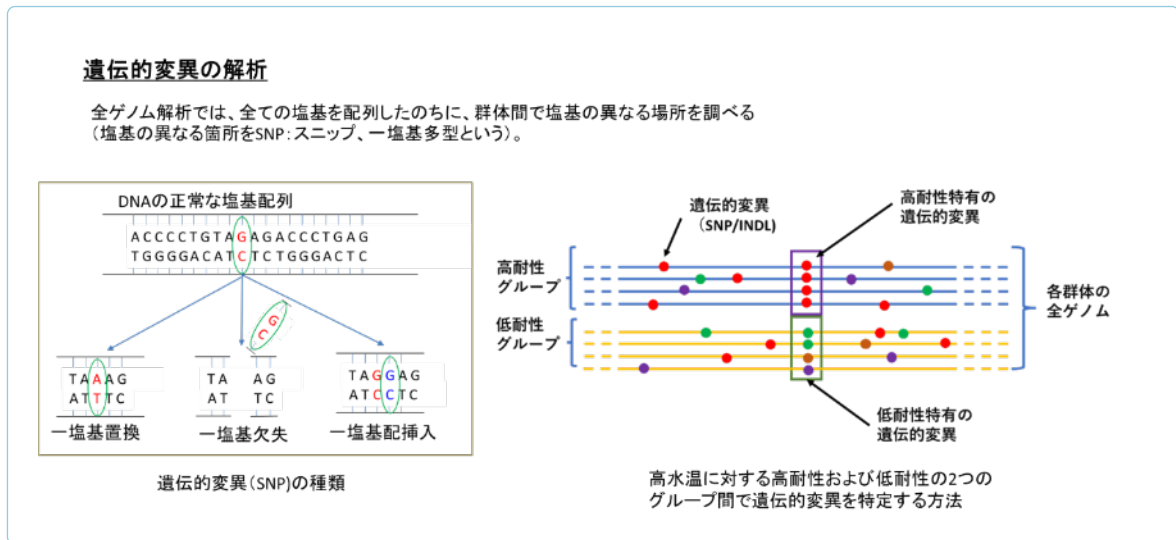
③ 遺伝的変異の解析 (図 II . 5-29)

DNA 配列の特定位置で個体間に塩基の違いが生じることがあり、これを SNP (スニップ、Single Nucleotide Polymorphism、一塩基多型) という。SNP の種類は、一塩基置換 (塩基が他の種類の塩基と置き換わったもの)、一塩基欠出 (一つの塩基対が失われたもの)、一塩基挿入 (一つの塩基対が加えられたもの) の 3 つがある。例えば、多くの個体が C を持つ位置に一部の個体が G や T を持つことがある。これを SNP と呼ぶ。この 1 塩基の違いが、個体間の体質の違いや病気のかかりやすさ、薬の効果の違いなどに関係がある

² 生物の細胞核には染色体が存在する。ウスエダミドリイシでは 14 対 28 本の染色体があり、DNA はタンパク質と一緒に折りたたまれて染色体を形成している。DNA は二重らせん構造を持ち、2 本の鎖が塩基対を形成している。塩基はアデニン (A)、チミン (T)、グアニン (G)、シトシン (C) の 4 種類で、A は T、G は C と結合する。この塩基の並び順こそが遺伝情報の本体であり、各個体の遺伝的特性を決定する設計図となっている。ウスエダミドリイシの全ゲノムは、約 9 億の塩基対からなる。

と考えられている。DNA の数百～数千塩基に 1 つ程度の頻度で SNP が発生し非常に多く存在する。

本技術開発では、高水温暴露した親サンゴを高耐性と低耐性の 2 つのグループに分けて全ゲノムを比較し、高耐性のグループの群体だけが共通して持つ SNP を特定した。この SNP を高水温耐性 DNA マーカーの候補とした。



図Ⅱ.5-29 遺伝的変異 (SNP : 一塩基多型) の探索方法

これまでのところ、遺伝学的研究 (SNP 解析) では、DNA マーカー候補 (高耐性を持つサンゴが特異的に持つ DNA 塩基配列の特徴) が見付き、現在その確からしさを検証している。また、高水温耐性が親から子に引き継がれるかどうかを検証するために、高水温に対して耐性の異なる親の卵と精子を様々な組み合わせで交配して生産した稚サンゴを高水温暴露し、生残率を比較する実験を継続している。

これらの研究の成果は、遺伝情報を利用した品種改良法 (DNA マーカー育種とも呼ばれる) の基礎となるものであり、更なる研究成果の蓄積により、より簡便に高水温耐性を持つ群体を判別する手法や、効率的に高水温耐性稚サンゴを有性生殖法によって生産する技術の確立が期待される。

5. 4 リスキニング技術

リスキニング技術とは、サンゴの群体同士が同一遺伝子であれば融合する性質を利用したサンゴの増殖技術である。

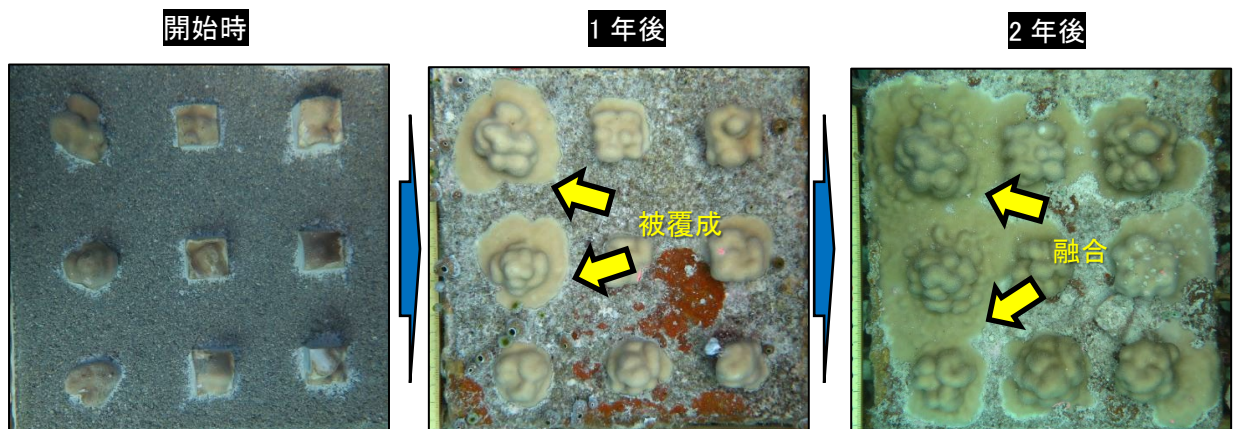
【解説】

1) リスキニング技術

一般的にミドリイシ属は、立体的な樹枝状の骨格を形成するものが多く、成長も速いため、特に水産涵養の面で利点がある。そのため、これまで本事業ではミドリイシ属を対象として、有性生殖を活用したサンゴ増殖技術を開発してきた。しかし、ミドリイシ属は成長が速いものの高水温などの環境変化には弱いことが知られている。沖ノ鳥島海域の調査実績では、高水温の影響と考えられるミドリイシ属の減少が確認されている。

一方、塊状の骨格を形成するハマサンゴ属やトゲキクメイシ属等のサンゴは、高水温などの環境変化に強い傾向があり、沖ノ鳥島海域の増殖対象種とすることの重要性が指摘されている。しかし、ハマサンゴ属等の塊状の骨格を形成するサンゴは、ミドリイシ属に比べて成長が非常に遅いため、サンゴ幼生を供給してサンゴ礁を回復させるには数十年単位の期間を要すると推察され、有性生殖を活用した増殖技術には適していないと考えられる。

皮膚の再生という意味であるリスキニング (Reskinning) 技術 (M. Forsman et al. 2015) は、遺伝子が同じ断片 (クローン) が融合することに着目し、成長の遅いハマサンゴ属等の塊状サンゴ類を小さく断片化 (小片化) し、天然の岩盤や人工構造物等の基盤にパッチ状に植え付け、各小片が水平方向に成長し融合することで、サンゴ群体を早期に再生するものである (図Ⅱ. 5-30 参照)。本技術を活用し、サンゴ増殖礁や防波堤の消波ブロックなどの人工構造物にサンゴの小片を移植し成長させることで、人工構造物全体をサンゴ群体で被覆することができ、人工構造物の景観の向上が期待される。



図Ⅱ. 5-30 リスキニング技術のイメージ
(重村ら 2022)

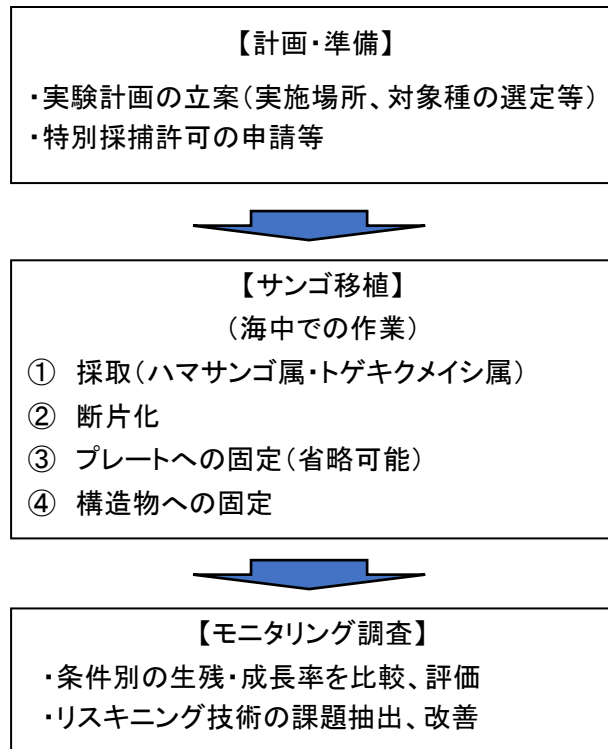
2) 事例紹介

(1) 作業手順と方法

本事業で実施している、石垣島及び沖ノ鳥島での実証試験について紹介する。

ハマサンゴ属、トゲキクメイシ属を対象として、リスクニング技術を用いたサンゴ増殖を実施する上で、最適な作業手順と方法を検討した。

リスクニング技術の実証試験の作業フロー及び各作業項目の詳細内容を図Ⅱ.5-31、表Ⅱ.5-3に、実証試験の作業状況を図Ⅱ.5-32に示す。



図Ⅱ.5-31 実証試験の作業フロー

表Ⅱ.5-3 リスキニングの手順と方法

項目	リスクニングの方法
① 採取	・潜水士により防水電動カッターや石鋸等を用いて、ハマサンゴ属やトゲキクメイシ属の各群体から人力で群体の一部を採取する。
② 断片化	・採取したサンゴを、群体表面を約 5cm ² 角に電動カッターや石鋸等で断片化し、小片を複数作成する。
③ プレートへの固定	・コンクリート製の 1 辺 20cm のプレートに、充填目地材等を用い、それぞれの断片間の間隔を約 3cm で固定する。 ※小片を直接構造物へ固定する場合は、この作業を省略する。
④ 構造物への固定	・小片及びプレートを、実験海域に設置されている人工構造物へ充填目地材等により固定する。

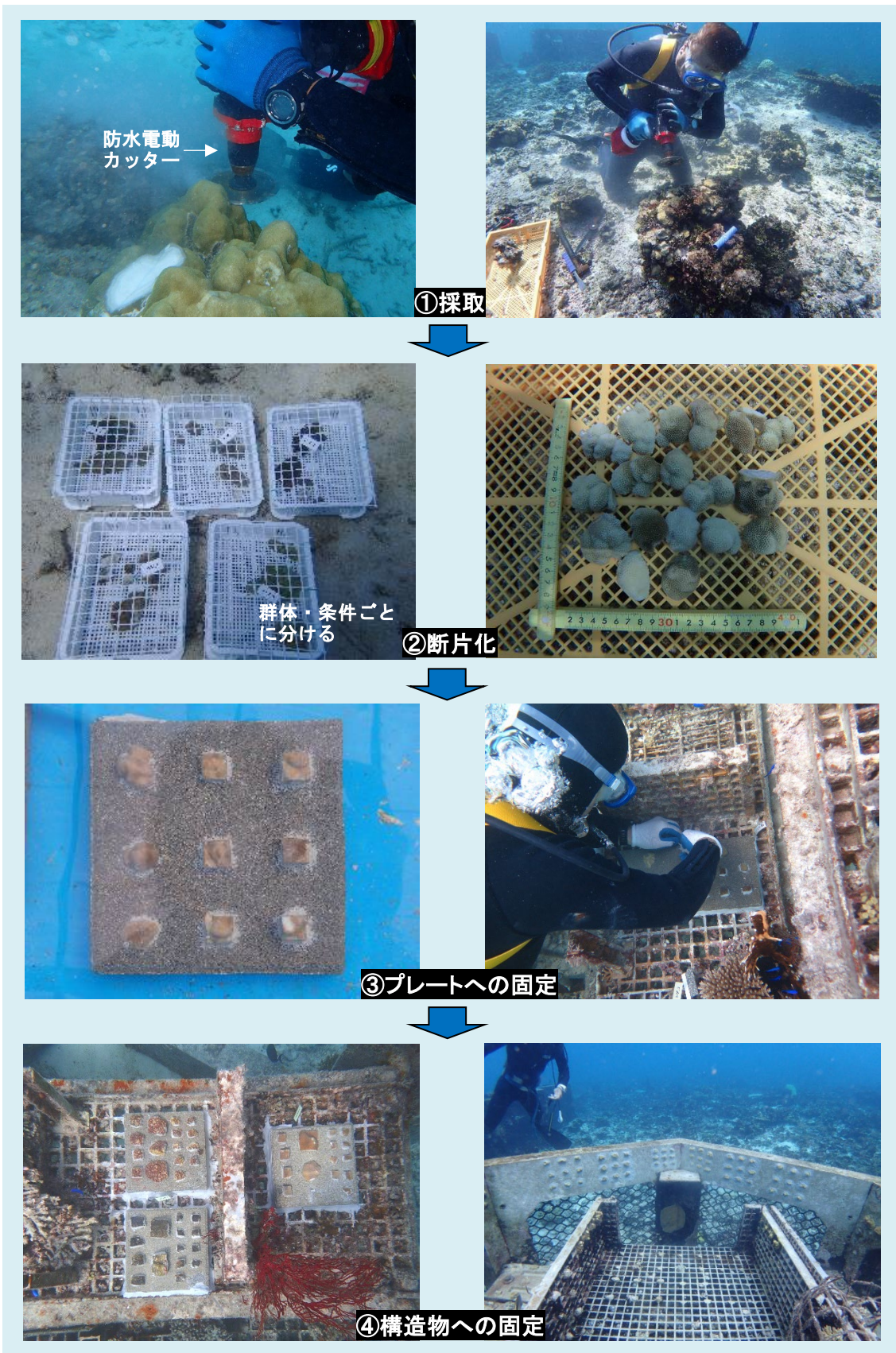
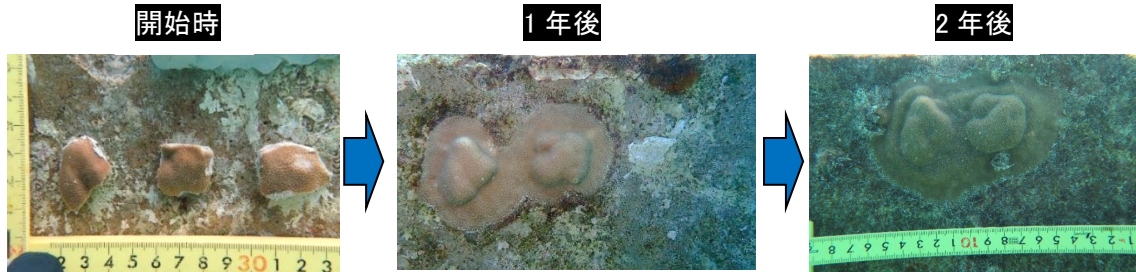


図 II. 5-32 実証試験の作業状況

(2) 石垣島での実施状況

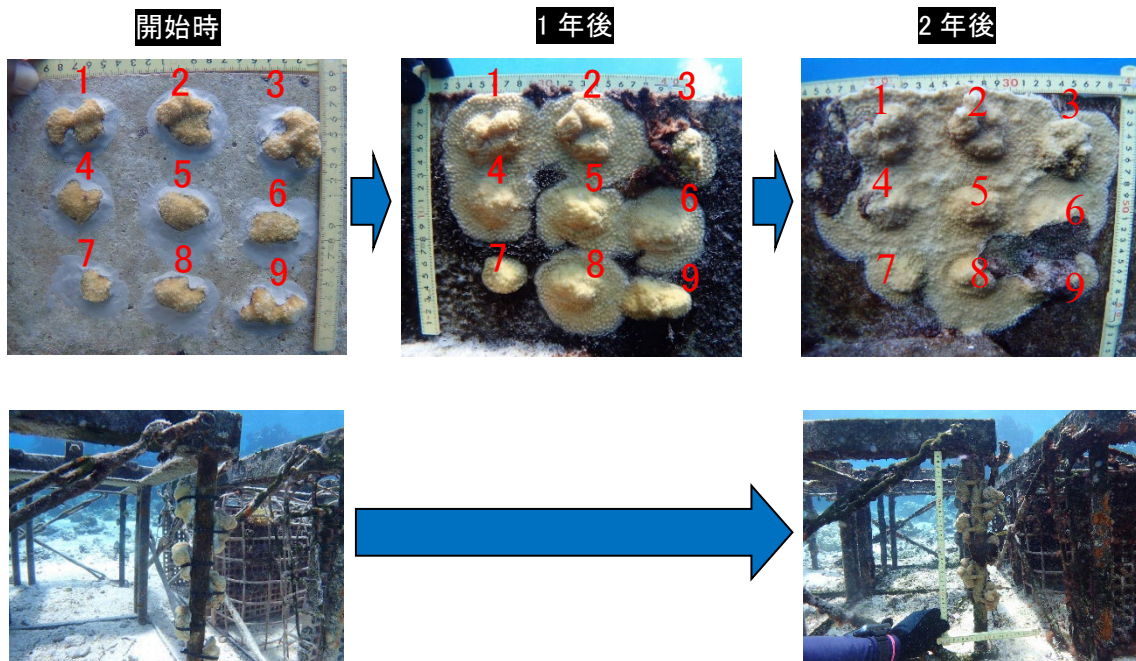
石垣島の陸上施設や小浜島南海域に設置しているサンゴ増殖実証試験基盤で実施し、小片が融合して面的に成長している様子が確認された（図Ⅱ.5-33 参照）。



図Ⅱ.5-33 小片の成長状況（石垣島）

(3) 沖ノ鳥島での実施状況

沖ノ鳥島の礁池内に設置している中間育成施設やサンゴ幼生着生・育成実証基盤で実施し、石垣島と同様に小片が融合して面的に成長している様子が確認された。また、結束バンドで固定した小片も自力で付着し、成長している様子が確認された（図Ⅱ.5-34 参照）。

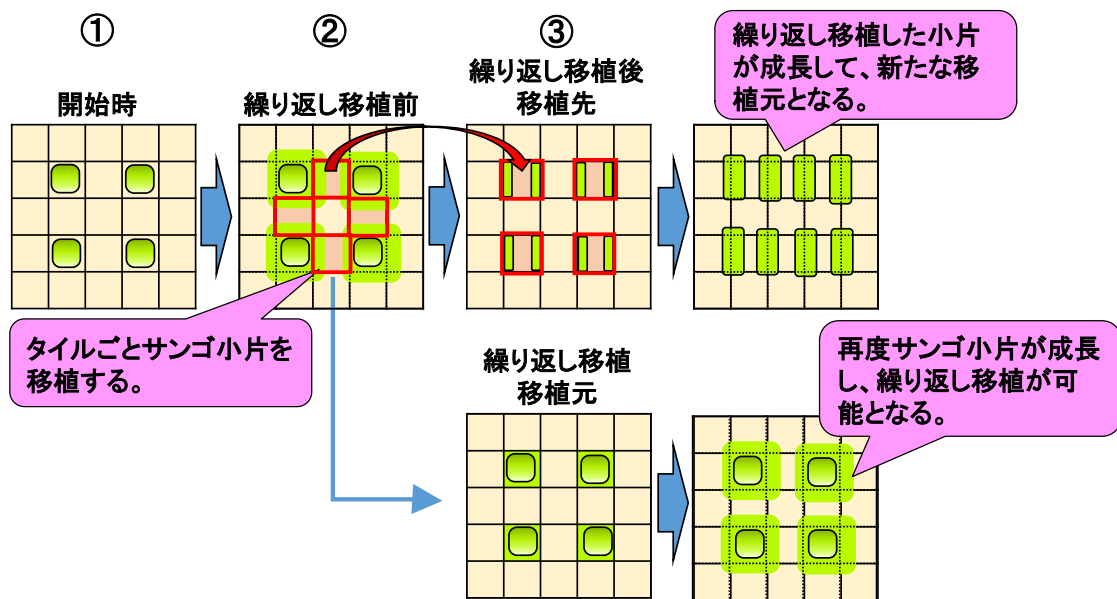


図Ⅱ.5-34 小片の成長状況（沖ノ鳥島）

3) サンゴ小片を繰り返し移植するリスクニング技術について

(1) 手法紹介

現在のリスクニング技術では、実施する度に天然のサンゴ群体から、新たな小片を採取する必要がある。そのため、リスクニング技術を活用してサンゴを増殖させようとするたびに、自然のサンゴ群体に損傷を与えることになる。そこで、自然のサンゴ群体への影響を低減することを目的としてサンゴ小片を繰り返し移植するリスクニング技術を開発実験中である。ここでは一例として、タイルを活用した手法について説明する。繰り返し移植するリスクニング技術のイメージを図Ⅱ.5-35に、内容を表Ⅱ.5-4に示す。



図Ⅱ.5-35 繰り返し移植するリスクニング技術のイメージ

表Ⅱ.5-4 繰り返しリスクニングの手順と方法

項目	繰り返しリスクニングの方法
① 開始時	・サンゴ小片を移植したタイルを、人工構造物や水槽等に設置する。
② 繰り返し移植前	・サンゴ小片が成長して覆われたタイルを選定して、タイルごと繰り返し移植を実施する。
③ 繰り返し移植後	・繰り返し移植を実施した後も、サンゴ小片が成長した際に、繰り返し移植を実施する。継続して繰り返し移植を実施することで、指数関数的にサンゴの面積を増やすことが可能である。

(2) 目標面積に対する増殖計画

サンゴ小片を繰り返し移植する際には、①使用する種、群体、②実施場所、③開始面積、実施期間、目標面積の計3項目を設定し、実施計画を立案する。

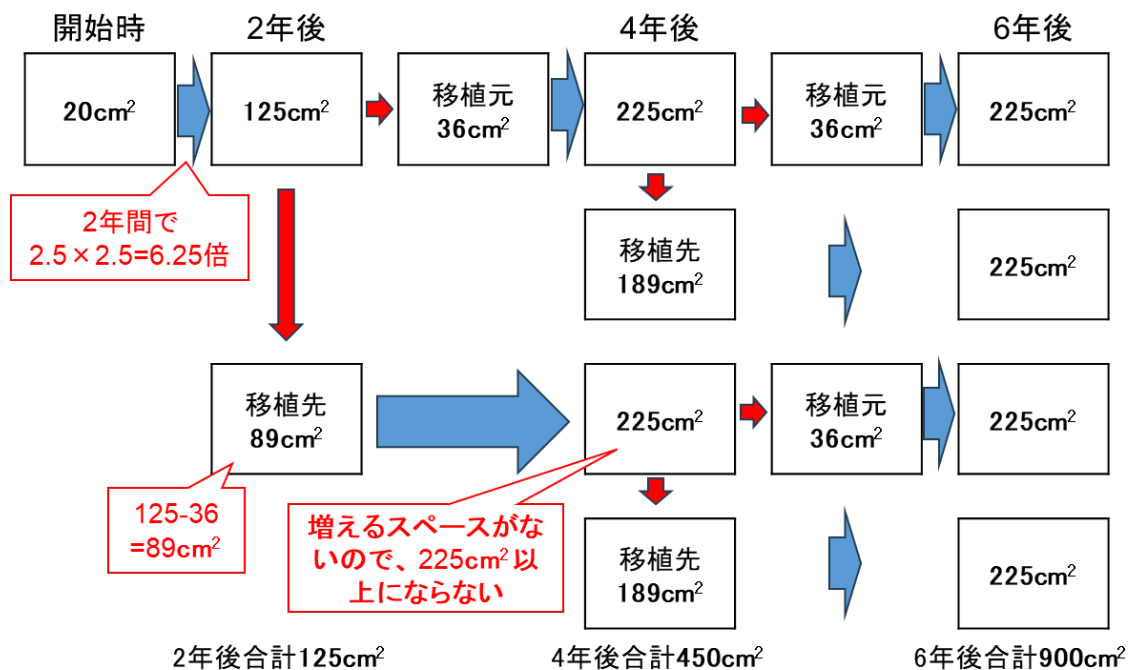
使用する種、群体については、リスクニングに不向きな種が実証試験で確認されており、同じ種でも群体によって生残率や成長に差がみられているため、予め使用候補とする群体から小片を採取して1年程度の実証試験を行って適性を確認しておくことが望ましい。

実施場所については、事前にリスクニングに適した環境であることを確認しておく。タイルを使用する場合、タイル間の隙間がサンゴの被覆拡大に影響するため、充填剤等で隙間を埋める。

開始面積については、採取元のサンゴ群体に影響を及ぼさない規模で設定し、サンゴを被覆させる範囲（目標面積）に対して実施期間を検討する。繰り返し移植するリスクニング技術を活用したサンゴ面積の推移について、実証試験の結果をもとに図Ⅱ.5-36に示す条件で検討した結果を図Ⅱ.5-37に示す。

設置方法の条件は、9cm²のタイルを25枚敷き詰めたものを1セットとし、1セットあたり5cm²の小片を4個設置するとした。開始面積を20cm²とした場合、小片数が4個、セット数が1個、使用するタイル全体面積が225cm²（25個×9cm²）、繰り返し移植時に移植元として残る面積が36cm²になる。

開始から2年後には、面積が6.25倍の125cm²になる。繰り返し移植は89cm²することができ、移植元に36cm²残る。これを繰り返すことで、4年後にはサンゴ合計面積が450cm²、6年後にはサンゴ合計面積が900cm²になる。



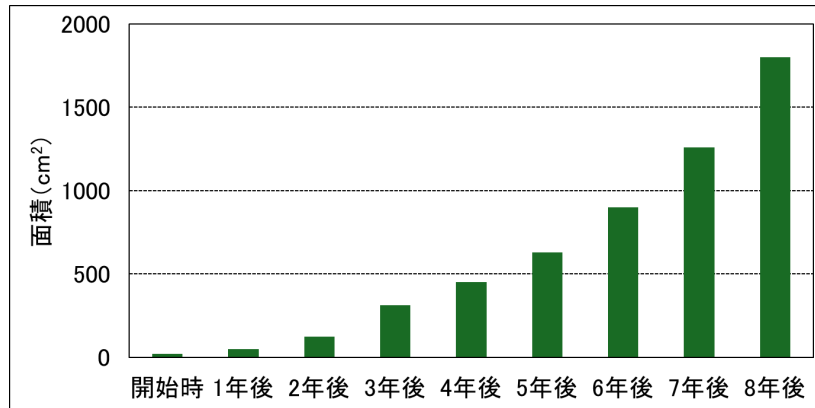
※1：実証実験の条件および結果に基づくイメージである。小片の成長率は1年で2.5倍成長するとした。

※2：計算上全小片同様な成長率とし、死亡については考慮していない。

※3：各段階のサンゴの面積はタイル面積を越えない条件として算出した。

※4：青矢印：サンゴの成長 赤矢印：繰り返し移植を示す。

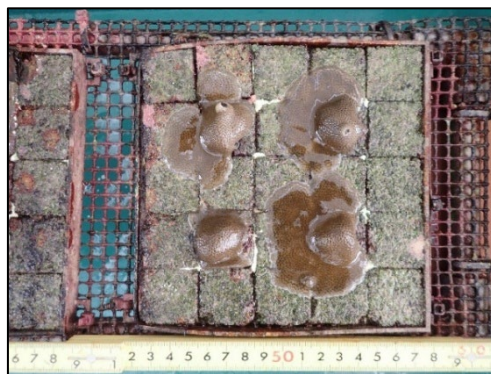
図Ⅱ.5-36 サンゴ面積推移の計算条件



- ※1：開始時に9cm²のタイルを25枚敷き詰めた225cm²を1セットとし、1セットあたり5cm²の小片を4個(20cm²)設置するとした。
- ※2：繰り返し移植を3回実施するとし、その場合のタイル面積は225cm²→450cm²→900cm²→1800cm²となる。
- ※3：小片の成長率はモニタリング結果を参照し、1年で2.5倍成長するとした。(この成長率は実験条件とした1辺2~3cm程度の小片が5~6cm程度になるまでの値であり、小片サイズが大きくなると成長率の値は小さくなると考えられる。)
- ※4：計算上全小片同様な成長率とし、死亡については考慮していない。

図Ⅱ.5-37 サンゴ面積推移の検討結果

なお、サンゴ小片が成長する方向は、図Ⅱ.5-38に示すように偏りが生じる傾向がみられたことから、成長範囲を確認しながら小片採取を行うことが望ましい。



図Ⅱ.5-38 成長に偏りがみられるサンゴ小片

5. 5 シェーディングとオニヒトデ対策

幼生供給基地におけるサンゴの生残率を高める対策として、白化には遮光（シェーディング）、オニヒトデには侵入防止対策があげられる。

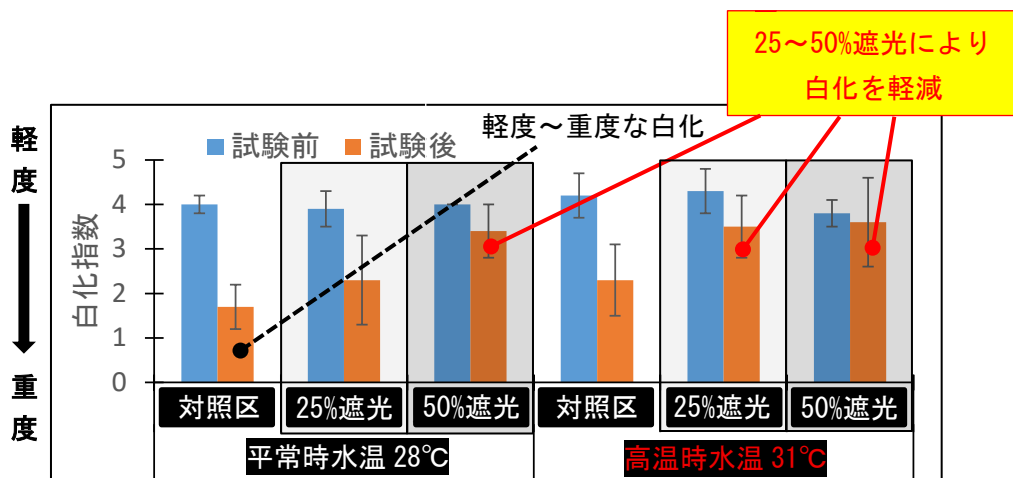
【解説】

幼生供給基地から持続的にサンゴ幼生を供給するには、攪乱因子から親サンゴを守ることが重要である。サンゴに対する攪乱因子として、顕著な白化現象、大発生したオニヒトデによる捕食が挙げられる。これらに対する対策として、白化には遮光（シェーディング）、オニヒトデには侵入防止対策が有効である。

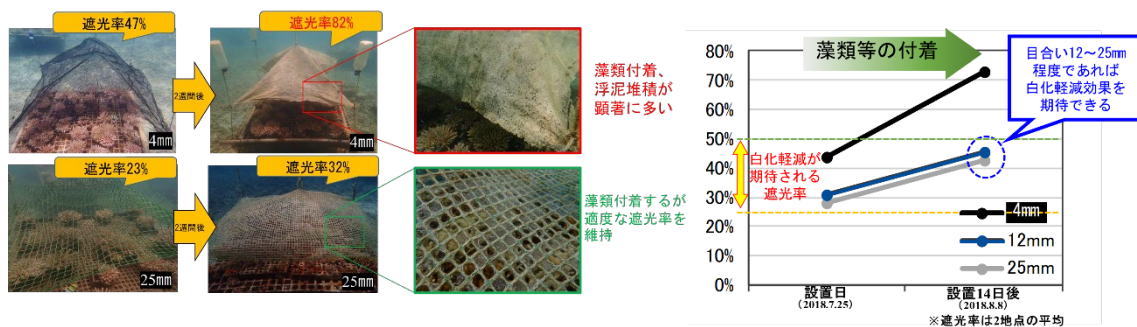
1) 遮光（シェーディング）による白化対策

高水温による白化現象では、高水温と強光の両方がサンゴと共生藻を損傷することが知られている。人的管理が可能なサンゴの白化対策としては遮光（シェーディング）手法が有効と考えられている他、深場へサンゴを移動する水深移動手法がある。

沖ノ鳥島産のウスエダミドリイシ (*Acropora tenuis*) の稚サンゴを用いた水槽実験の結果を図Ⅱ.5-39 に示す。遮光率 25～50%であれば白化の軽減または抑制効果があることが確認された。海域では、長期間設置していることで遮光ネットに藻類が付着するため、長期的に最適な遮光率が維持される目合いを観察した結果を図Ⅱ.5-40 に示す。遮光率 25～50%程度となる目合いは 12～15mm 程度であることが分かった。



図Ⅱ.5-39 水槽実験における試験前後の白化指数



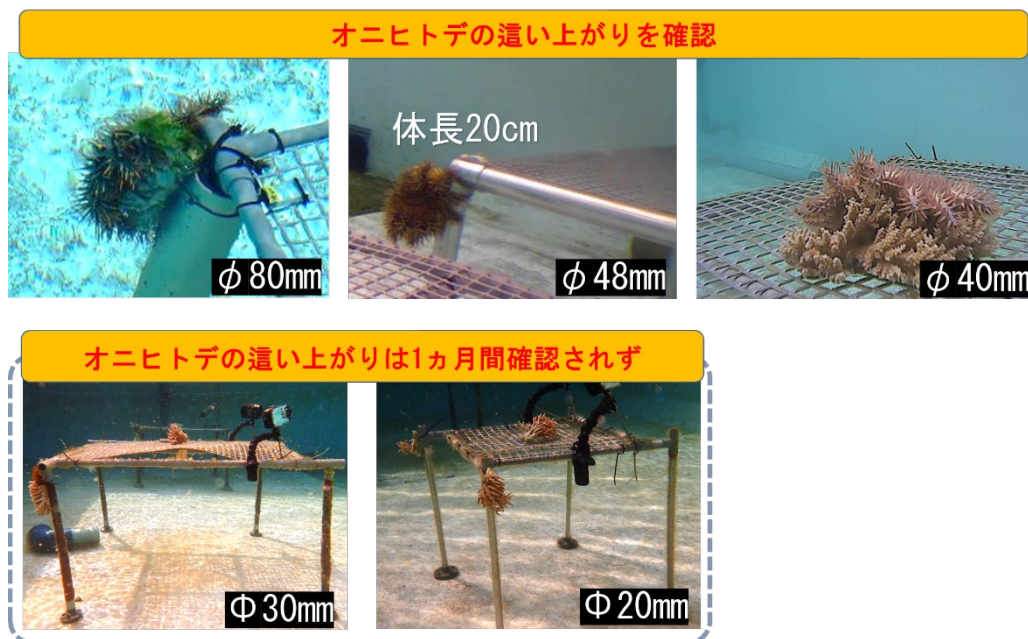
図Ⅱ.5-40 遮光ネットの目合いと遮光率の関係

2) オニヒトデ侵入防止対策

幼生供給基地は健康状態が良好な親サンゴが密集しているため、オニヒトデにとっては格好の餌場となる。食害を防ぐには幼生供給基地へのオニヒトデ侵入を防止することが重要である。

棚型の人工基盤に活用できる知見として、異なる径の管状部材を用いたオニヒトデの這い上がり防止効果を検証する実験を行った。実験の結果、脚部の径が30mm以下であればオニヒトデの這い上がりに対して防止効果があることが示唆された(図Ⅱ.5-41参照)。幼生供給基地の架台の脚部の径を30mm以下で作成することで食害の影響を軽減できる可能性がある。

(Nakamura S et al 2022年 ICRS 口頭発表)



図Ⅱ.5-41 パイプ径ごとのオニヒトデの這い上がり確認結果

引用文献

- Alasdair J. Edwards, James Guest, Shai Shafir, David Fisk, Edgardo Gomez, Baruch Rinkevich, Andrew Heyward, Makoto Omori, Kenji Iwao, Rommi Dizon, Aileen Morse, Charlie Boch, Sandrine Job, Lucia Bongiorno, Gideon Levy, Lee Shaish, Susan Wells, (2007). Reef Rehabilitation Manual, Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia, 166p
- Barshis DJ, Ladner JT, Oliver TA, Seneca FO, Traylor-Knowles N, Palumbi SR (2013) Genomic basis for coral resilience to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(4), 1387-1392
- Dixon GB, Davies SW, Aglyamova GV, Meyer E, Bay LK, Matz MV (2015) Genomic determinants of coral heat tolerance across latitudes. *Science*, 348(6242), 1460-1462
- 土木学会水理公式集改訂小委員会編, 水理公式集 [2018 年度版], 土木学会, 東京, 625.
- 服田昌之・岩尾研二・谷口洋基・大森信 (2003) 種苗生産. 大森信 (編) サンゴ礁修復に関する技術手法—現状と展望—. 環境省自然環境局, 東京, 13-25
- Humanes A, Beauchamp EA, Bythell JC, Carl MK, Craggs JR, Edwards AJ, Golbuu Y, Lachs L, Martinez HM, Palmowski P, Paysinger F, Randle JL, van der Steeg E, Sweet M, Treumann A and Guest JR (2021) An Experimental Framework for Selectively Breeding Corals for Assisted Evolution. *Frontiers Marine Science*, 8:669995. doi: 10.3389/fmars.2021.669995
- Iwao, K., Wada, N., Ohdera, A., & Omori, M. (2014). How many donor colonies should be cross-fertilized for nursery farming of sexually propagated corals? *Natural Resources*, 5(10), 584-591.
- 環境省水・大気環境局 (2021) 瀬戸内海環境保全特別措置法施行規則第 4 条第一項の事前評価について (令和 3 年 9 月 30 日環水規発第 2109301 号通知).
- Kaiming He, Georgia Gkioxari, Piotr Dollár, Ross Girshick (2017) Mask R-CNN. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 2961-2969.
- 北田英之 (2002) 阿嘉島周辺に生息するウスエダミドリイシの群体あたりの産卵数. *みどりいし*, 13, 26-29
- 公益社団法人全国漁港漁場協会, 漁港・漁場の施設の設計参考図書 2023 年版, 全国漁港漁場協会, 879p
- Levitan, D. R., Fukami, H., Jara, J., Kline, D., McGovern, T. M., McGhee, K. E., & Swanson, C. A. (2004). Mechanisms of reproductive isolation among sympatric broadcast-spawning corals of the *Montastraea annularis* species complex. *Evolution*, 58(2), 308-323.
- Mumby, P. J., Ortiz, J. C., & Wolff, N. H. (2024) Allee effects limit coral fertilization success. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 121(50): e2413233121.
- Nakamura S, Tamura K, Go Suzuki, Yonezawa Y, Kanyama T, Nakase S, Yamazaki M (2022)

- Sustainable coral restoration by establishing in situ "artificial spawning hotspots". 15TH International Coral Reef Symposium, A-1423, 口頭発表
- 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
- National Marine Fisheries Service. (2015). Recovery Plan for Elkhorn Coral (*Acropora palmata*) and Staghorn Coral (*A. cervicornis*). National Oceanic and Atmospheric Administration. 167 p.
- Omori M (2005) Success of mass culture of *Acropora* corals from egg to colony in open water. *Coral Reefs*, 24, 563
- Petersen D, Hatta M, Laterveer M, Bergen van D (2005) Ex situ transportation of coral larvae for research, conservation, and aquaculture, *Coral Reefs*, 24, 510-513
- 重村太一・栖原有里・田村圭一・鈴木豪・完山暢・首藤敦 (2022) リスキニング手法の最適条件の検討. 日本サンゴ礁学会第 25 回大会講演要旨集, 119
- 水産総合研究センター (2012) ,サンゴ礁生態系修復マニュアル —有性生殖によるサンゴ増殖技術—, 134p
- 水産庁漁港漁場整備部, (2019) ,改訂 有性生殖によるサンゴ増殖の手引き, 水産庁, 東京, III-4-III-13
- 水産庁 漁港漁場整備部 (2023) , 漁港施設等における気候変動適応策の設計に係る手引き (暫定版) , 水産庁, 79p
- Suzuki G, Okada W, Yasutake Y, Yamamoto H, Tanita I, Yamashita H, Hayashibara T, Komatsu T, Kanyama T, Inoue M, Yamazaki M (2020) Enhancing coral larval supply and seedling production using a special bundle collection system "coral larval cradle" for large-scale coral restoration. *Restoration Ecology*, 28(5), 1172-1182
- Teo, S. L. M., & Todd, P. A. (2018). Sperm limitation and fertilization success in the scleractinian coral *Platygyra sinensis*. *Marine Ecology Progress Series*, 595, 101-114.
- 横浜市公害対策局「水質汚濁・土壌汚染に係る環境影響評価、指導・審査マニュアル」1985年
- Zac H. Forsman, Christopher A. Page, Robert J. Toonen and David Vaughan (2015) Growing coral larger and faster: micro-colony-fusion as a strategy for accelerating coral cover. *Peer J*, 3, e1313
- Zhaojin Huang, Lichao Huang, Yongchao Gong, Chang Huang, Xinggang Wang (2019) Mask Scoring R-CNN. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 6409-6418.