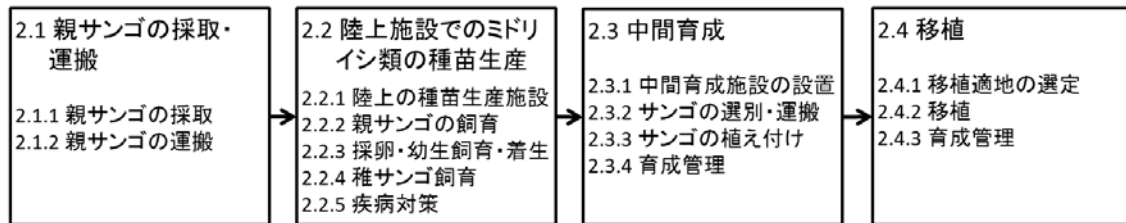


2. 陸上施設での種苗生産によるサンゴ面的増殖技術

陸上施設での種苗生産は、海象条件に左右されず安定した種苗生産を行うことが可能である。

以下に、沖ノ鳥島での実証事例を基にして、種苗生産から移植までのサンゴ面的増殖技術の一連の作業について解説する。沖ノ鳥島におけるサンゴ面的増殖技術の作業フローは図Ⅱ.2-1に示す通りである。



図Ⅱ.2-1 沖ノ鳥島におけるサンゴ面的増殖技術の作業フロー

2. 1 親サンゴの採取・運搬

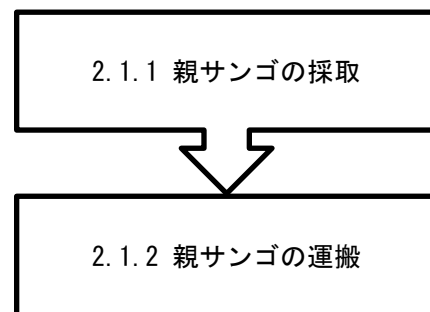
親サンゴの採取は事前に計画を立て、健康かつ産卵直前の親サンゴを、種苗生産に必要な群体数（できれば6群体以上）を決めて採取する。また、採取した親サンゴは、状態を確認しながら丁寧に大型船舶へ運び込み、光、水温、流れ等に留意した適切な飼育管理で、陸上の種苗生産施設まで運搬する。

【解説】

沖ノ鳥島は、孤立性、隔絶性の強い島であるため、その海域に生息するサンゴが沖縄本島沿岸等に生息するサンゴと遺伝的に異なる可能性があり、遺伝的攪乱に注意する必要がある。また、沖ノ鳥島の場合は、地理的な条件と厳しい波浪条件により、サンゴの管理が難しい。

これら2つの要因から、沖ノ鳥島においてサンゴ面的増殖を行う場合には、親サンゴを採取して沖縄本島等の沿岸まで運搬して、陸上の種苗生産施設で種苗生産を行い、できた種苗を沖ノ鳥島まで運搬して中間育成した上で移植する必要がある。親サンゴや種苗生産したサンゴの運搬には、沖縄本島等の沿岸と沖ノ鳥島との間の航行と作業員の寝食が可能な居住空間を確保できる性能があつて、加えて礁内の作業用として小型船舶数隻とサンゴを運ぶための水槽が搭載可能な大型の作業船（以下、大型船舶）が必要となる。

親サンゴの採取・運搬のフローは、図Ⅱ.2-2のとおりである。



図Ⅱ.2-2 親サンゴの採取・運搬

2. 1. 1 親サンゴの採取

親サンゴの採取は、採取時期や採取群体のサイズ、採取数を事前に計画し、採取対象の親サンゴにストレスを与えないよう丁寧に採取する。また、採取後は直ちに運搬せず、海域で一旦仮置きをして、採取によるストレスの緩和を図る。

【解説】

1) 親サンゴの採取計画の策定

採取時期は、表 I. 1-2 (第 I 編 1.2 サンゴの生活史を参照) を目安に、産卵期の直前を設定する。

採取する親サンゴを選ぶ際には、健康で成熟したサンゴであり、かつ運搬が容易なサイズでもある長径 30cm 程度を選ぶとよい。該当サイズのサンゴが無い場合は、より大きな群体の一部を採取することもある。サンゴの成熟状況は、群体の一部を切断し、ポリプ内に産卵直前のピンク色の卵を有しているかどうかで判断できる(図 II. 2-3)。

採取群体数については、多くのミドリイシ属が雌雄同体で他家受精であるため、種類毎に少なくとも遺伝的に異なる(クローンではない)2群体以上が必要である。ただし、群体のサイズ、健康状態等によっては、受精率が低くなる場合もあるため、群体数とあわせて親サンゴの状態にも注意が必要である。Iwao et al. (2014) は、水槽中に親サンゴが6群体あれば、受精率は90%以上を概ね確保できると報告しており、沖ノ鳥島の事例では、対象種3種類(ウスエダミドリイシ、*Acropora globiceps*、*A. sp. aff. divaricata*) ごとに6群体以上の親サンゴを採取した。



図 II. 2-3 サンゴの切断面
(ピンク色が産卵直前の卵)

2) 親サンゴの探索

親サンゴの探索は、サンゴ分布調査を参考に対象種が分布するおおよその場所を想定し、その場所を基点にして探索を開始する。探索時には、船上に採取用の器具および運搬用の容器を携帯しておき、対象種を発見した場合は、発見場所の海底の状況の写真を撮影するとともに、GPS による位置出しを行い、成育状況について気づいた点を水中ノートに記録する。

3) 親サンゴの採取

親サンゴに直接ストレスを与えないように、ハンマーとタガネを用いてサンゴの基部から採取する。ただし、骨格の折れやすい種類(*A. sp. aff. divaricata* 等)は、石切り用鋸を用いて基部を切断して採取する。採取作業時は、人体の熱の影響を低減するため、手袋を着用しサンゴに素手で触れることは避ける。親サンゴの採取道具および採取状況を図 II. 2-4 に示すとおりである。



採取道具



ハンマー・タガネによる採取



石切り用鋸による採取



採取したサンゴ群体

図Ⅱ.2-4 親サンゴの採取状況

4) 採取後の親サンゴの仮置き

採取した親サンゴは、効率的に作業を進めるため、また採取による損傷等の状態を確認するため、しばらくの間は採取場所の近傍に仮置きしておく。沖ノ鳥島の事例では、1～2日間仮置きしている。

仮置き場所は、荒天時でも波浪の影響が小さく、周辺にサンゴが分布する場所を選定する。このような場所がない場合には、波浪でサンゴ群体が移動・動揺しないように、平らな安定した基盤を用意し、基盤にサンゴを結束バンドやロープ等で固定する（図Ⅱ.2-5）。また、サンゴ群体をかじる魚やオニヒトデ等の食害動物、強い光の影響を回避するため、仮置き場所を食害防止ネットや遮光ネットで覆って保護をする。仮置き期間中は、粘液を出す頻度、触手の伸長状況や白化の有無を観察し、良好な状態のサンゴを運搬対象とする。なお、状態が悪いと判断されたサンゴは、水中エポキシ樹脂接着剤を使用して採取場所へ戻す。



図Ⅱ.2-5 親サンゴの仮置き

5) 必要な資材・機材

表Ⅱ.2-1 に示す資材・機材を準備し、作業の規模に応じて必要な作業員を配置する。

表Ⅱ.2-1 親サンゴの採取に必要な資材・機材

項 目	資 材 ・ 機 材
探索・採取	小型船舶、潜水器材、水深計、水中時計、水温計、GPS、ハンマー、タガネ、石切り用鋸、水中カメラ、水中ノート、手袋など
仮置き	潜水器材、安定した基盤、結束バンド、ロープ、食害防止ネット、遮光ネット、水中エポキシ樹脂接着剤、手袋など

2. 1. 2 親サンゴの運搬

採取した親サンゴは、小型船舶で仮置き場から大型船舶まで運搬し船上水槽に入れて、陸上の種苗生産施設まで長距離運搬する。長距離運搬中は、光、水温、流れ等に留意した適切な飼育管理を行う。

【解説】

1) 仮置き場から大型船舶までの運搬

仮置き場において親サンゴの良好な状態を確認し、ビニール製の緩衝材で包み、親サンゴの寸法よりもひとまわり以上大きい蓋付きの密閉容器の中に入れ、海水に浸した状態で空気に曝さずに小型船舶まで運搬する。小型船舶に積込み後、容器を遮光ネットで覆い、適宜散水しながら大型船舶まで運搬する。



密閉容器へのサンゴ収容



潜水士による小型船舶までの運搬



小型船舶



運搬中の遮光（小型船舶）

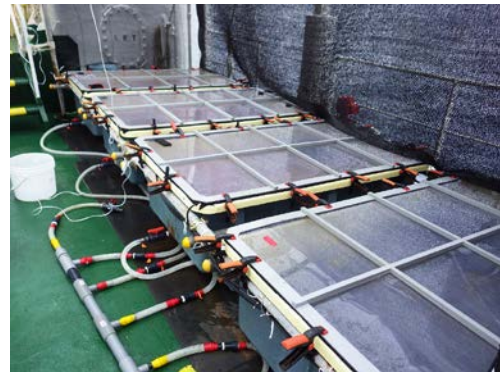
図Ⅱ.2-6 親サンゴの船舶までの運搬

大型船舶上には、親サンゴ運搬用飼育水槽（図Ⅱ.2-7）を設置する。設置にあたっての主な留意点を以下に示す。

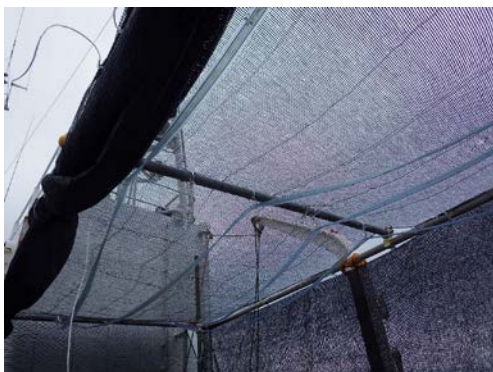
- ①水槽は、複数の親サンゴを間隔に余裕がある状態で収容でき、かつ水温変化をなるべく緩やかにするため水量を多く保持できる、適切な規模のものを使用する。沖ノ鳥島の事例では、水槽は1 t 水槽（W845×L1565×H450mm）を使用し、水槽1槽につき長径30cm程度の親サンゴを6～8 群体収容した。
- ②船舶の揺動による水槽内の海水流出を防止するため、水槽に透明な蓋を取り付ける。水槽と蓋の隙間に防水性のクッションテープを貼り、蓋をクリップ等で固定するなどして、水槽を密閉する。
- ③屋外に設置する場合は、強い光の影響や水温上昇を抑制するため、水槽を遮光ネットで覆う。運搬日数が数日間であれば、光量が採取場所より低くても問題はない。
- ④屋外に設置する場合は、水槽内の水温上昇を抑制するため、散水ホースを取り付けて、雨天時以外は水槽に蓋をした状態で常時散水する。
- ⑤サンゴは呼吸等のために流れを必要とするため、水槽内に流水ポンプを設置する。
- ⑥海水を流入して水槽の換水ができるように、外海水を汲み上げる揚水ポンプおよびポンプ用のホースを準備する。



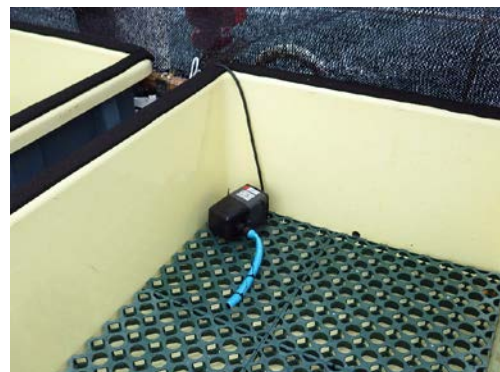
①船上水槽（全景）



②蓋・クリップ



③遮光ネット・④散水ホース



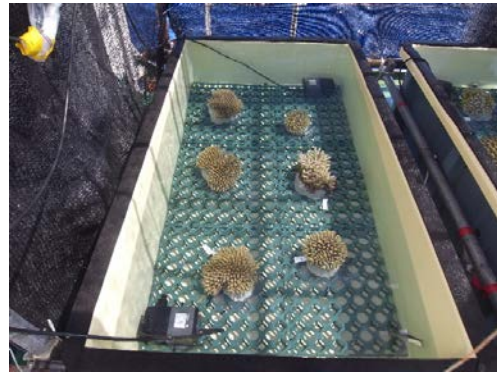
⑤流水ポンプ

図Ⅱ.2-7 船上水槽の設備

上記の船上水槽に親サンゴを搬入する際は、事前に水槽に海水を満たしておく。収容時に密閉容器の蓋を一部分開け、容器ごと飼育水槽に入れて水温を馴致させる（図Ⅱ.2-8）。水槽と容器の水温に差がなくなったら容器から親サンゴを取り出し、転倒を防止するため水槽内に設置した固定用資材（プラスチック製）に親サンゴを固定する（図Ⅱ.2-9）。作業時は、人体の熱の影響を低減するため、手袋を着用するなどして親サンゴに素手で触れることは避ける。



図Ⅱ.2-8 水温馴致の状況



図Ⅱ.2-9 親サンゴ収容状況

2) 長距離運搬中における親サンゴの飼育管理

沖ノ鳥島から沖縄本島等の沿岸域までの長距離運搬には数日を要するため、運搬中は親サンゴの飼育管理として表Ⅱ.2-2 に示す作業項目を実施し、作業の実施回数や時間、作業時の状況などを記録する。

水槽内は、運搬元の海域の水温から次第に運搬先の海域の水温に合わせていくように、海水交換を行いながら水温を調整する。運搬中は連続的に清浄な外海水を得ることが難しいため、定期的に停船し、外海水を揚水ポンプで汲み上げて水槽の 1/3 量を目安に海水交換をする。ただし、急激に水槽内の水温を変化させないため、水槽内の水温と汲み上げ海水との水温差を計測して、1 回あたりの交換量や 1 日あたりの交換回数を調整する方がよい。沖ノ鳥島の事例では、海水交換は 1 日に 3 回以上行った。なお、船舶の揚水システムには、海水に殺菌用塩素を混入する場合があるので、その場合は、別途揚水ポンプを用意して清浄な外海水を汲み上げる必要がある。

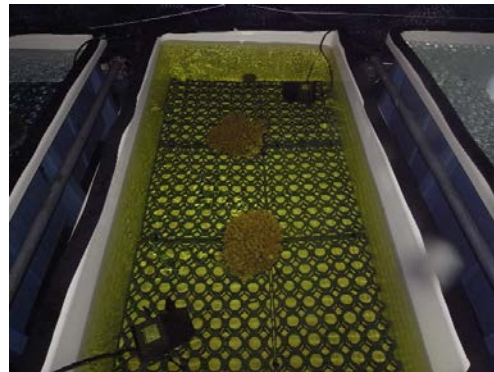
海水交換時には、親サンゴの状態を確認・記録する。親サンゴに白化や粘液放出等の異常が確認された場合は、即座に海水流入を停止し、親サンゴの様子を注意深く観察する。一部の親サンゴに白化や粘液の放出等の異常が確認された場合は、それらを予備水槽に隔離し観察する。状態が改善しない場合には、疾病対策として水産用薬剤（ニフルスチレン酸ナトリウム）を投与し薬浴する（図Ⅱ.2-10）。観察時に底面や海水中有機物等の堆積物が確認された場合は、スポイト等により個別に吸引排出を行う。

表Ⅱ.2-2 船上飼育の作業

項目	実施頻度	備 考
海水交換	3 回/日	1 回につき 1/3 の水量を換水
稚サングの観察	3 回/日	写真撮影を実施
水温確認	3 回/日	適宜実施
散 水	常時（24 時間）	雨天時は実施しない
水槽の掃除	換水時に適宜実施	有機物等が確認された場合



水産用薬剤



隔離した親サングの薬浴

図Ⅱ.2-10 水産用薬剤による親サングの薬浴

3) 必要な資材・機材

表Ⅱ.2-3 に示す資材・機材を準備し、作業の規模に応じて必要な作業員を配置する。

表Ⅱ.2-3 親サングの運搬に必要な資材・機材

項 目	資 材 ・ 機 材
仮置き場から大型船舶までの運搬	小型船舶、潜水器材、手袋、密閉容器（直径 30cm 以上の蓋付きバケツ等）、緩衝材、遮光ネットなど
親サングの飼育管理	水槽、水槽用の透明蓋、クッションテープ（防水性）、蓋留め用クリップ、サング固定用資材（水槽内の底敷き）、結束バンド、単管やぐら、遮光ネット、撒水ホース、揚水ポンプ、揚水ポンプ用ホース、流水ポンプ、水温計、野帳・筆記具、水産用薬剤（ニフルスチレン酸ナトリウム）、スポイト、手袋など

2. 2 陸上施設でのミドリイシ類の種苗生産

他地域から持ち込んだ親サンゴは、水槽にて適切な飼育環境下で飼育する。これらの親サンゴが産卵した卵を用いて種苗生産を行うが、卵の受精は適切な精子密度と受精時間で行う必要がある。卵は産卵から約4日後に着生できる状態の浮遊幼生となるので、着生・変態を誘引するバクテリアや石灰藻が付着した着床具に幼生を着生させ、稚サンゴへと変態させる。稚サンゴは、水槽において適切な飼育環境下で飼育する。

【解説】

1) 陸上施設でのサンゴ種苗生産の手順

サンゴの有性生殖には放卵放精型と幼生放出型（幼生保育型）がある。放卵放精を行うサンゴの陸上施設を用いた種苗生産の基本的な作業手順は以下のとおりである。

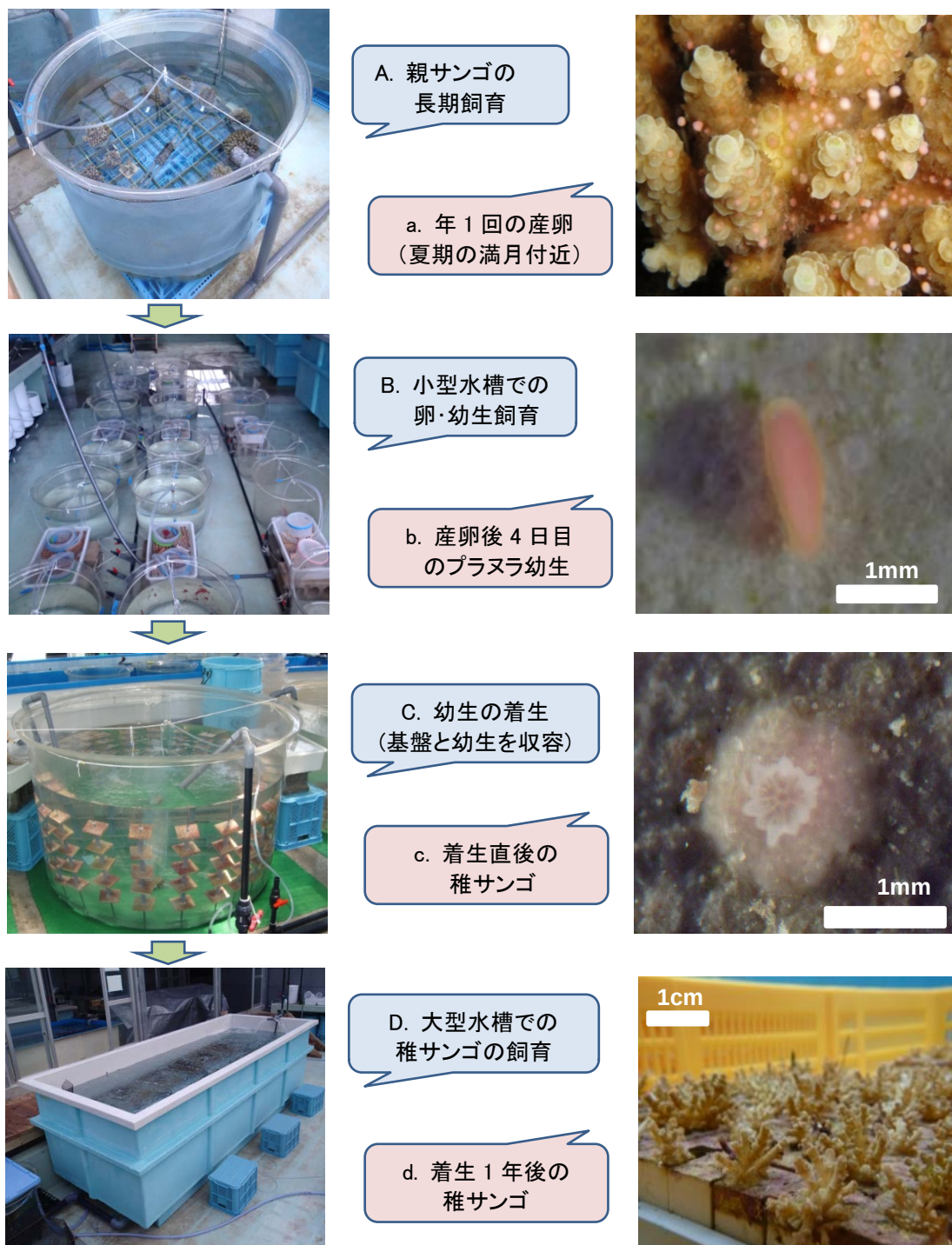
有性生殖により種苗を確保するためには、海域から採取した親サンゴを陸上の種苗生産施設で長期間飼育し、産卵させる必要がある（図Ⅱ.2-11、A）。種により産卵月は異なるが、親サンゴの産卵は、基本的には年に1回、夏期の満月付近において行われる（図Ⅱ.2-11、a）。ただし、海域では、各サンゴ群集が同調して産卵を行うことが一般的であるが、水槽内では、水槽間ならびに同じ水槽で飼育している群体間でも、産卵日が数日ずれるケースが多々見られる。

産卵された卵と精子を採集し、受精させた後、受精卵を小型水槽に収容し飼育を開始する（図Ⅱ.2-11、B）。受精卵は、約2日後に幼生となり約4日後には着生可能な幼生となる（図Ⅱ.2-11、b）。着生可能かどうかは、幼生が棒状となって、水槽の底面に垂直に引っ付こうとする行動を示すことにより判断できる。

幼生が着生可能な段階になったら、着床具を収容してある着生用水槽に幼生を入れて着生を行わせる（図Ⅱ.2-11、C）。着床具には、予め表面に着生誘引バクテリアを付着させるため、約1か月間海域に浸漬しておく必要がある。着生用水槽内の幼生は、収容後すぐに基盤へ付着し、徐々に変態し約2日後には稚サンゴとなる（図Ⅱ.2-11、c）（写真は着生3日後の稚サンゴ。骨格が形成され始めている）。着生期間は、基盤の状態により異なる。数か月間海域に浸漬し、多量の石灰藻やバクテリアが付着している着床具では、幼生は2日程度で着生を完了するが、2週間程度の浸漬で石灰藻やバクテリアが少ない場合には、着生完了まで1週間程度を要する場合がある。

着生完了後、稚サンゴの付いた着床具を大型水槽へ移し、適切な環境のもとで稚サンゴの飼育を行う（図Ⅱ.2-11、D）。稚サンゴ飼育期間中の生残率を高めるためには、後述のように、光の量、水温、水流などの水槽内の環境を適切な状態に保つ必要がある。水槽内では、約1年間稚サンゴを飼育し、約1歳齢の稚サンゴは直径約15mmに成長する（図Ⅱ.2-8、d）。

ミドリイシ属サンゴはほとんどの種が放卵放精型であることから、上記の手法にて種苗生産ができる。また、ハナヤサイサンゴ等の幼生放出型のサンゴについては、放出された幼生はすでに着生能力を持っていることから、上記の着生用水槽に幼生を収容する段階以降の手順において種苗生産することができる。



図Ⅱ.2-11 有性生殖法によるサンゴ種苗生産の作業手順

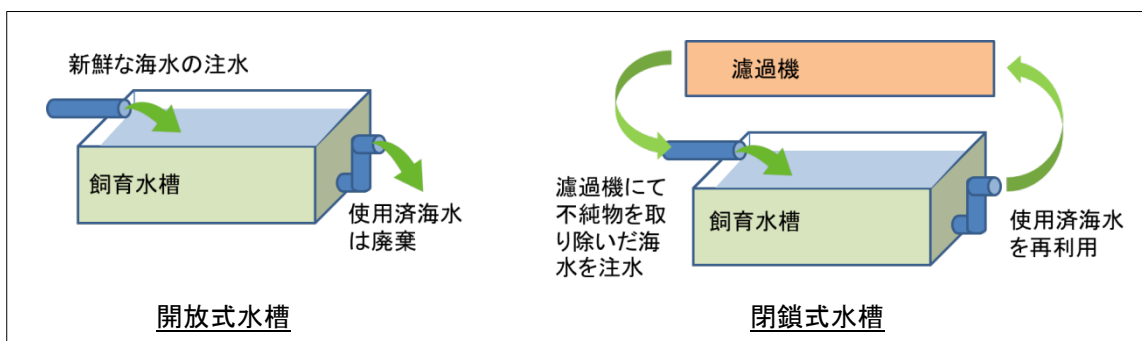
2) 開放式および閉鎖式水槽について

開放式とは、常時海水を水槽内に注水し、飼育水を交換する方法である(図Ⅱ.2-12、A)。この方法では、清浄な海水が常時利用できるため水質の管理は比較的容易であり、また設備に係る費用は低い。しかし、多量の海水を必要とするため、施設の設置場所は、揚水が

容易である沿岸地域に限定される。水産有用種の種苗生産においては開放式水槽が多く用いられている。また、水族館では、沖縄の美ら海水族館がこの方式を用いている。

閉鎖式とは、水槽に入れた海水をろ過器等により浄化しながら使用する方式である（図Ⅱ.2-12、B）。海水の交換をまったく行わない方法を完全閉鎖式と呼ぶが、多くの場合、定期的に飼育水の一部を新しい海水に交換している。また、天然海水と人工海水を混ぜて使う場合も少なくない。海水浄化および循環のための設備と維持に経費がかかる。周辺に海がない都会や清浄な海水が近傍より汲み上げられない水族館の場合はこのタイプ的水槽を用いている。

サンゴは、水質に非常に敏感な生物であるため、常に飼育海水を清浄な状態に保っておく必要がある。また、大量種苗生産を行う際には、設備の初期投資や維持費を低く抑えるとともに、これらの機材の管理の手間を少なくする必要がある。このため、サンゴの飼育や種苗生産には開放式的水槽を用いることが望ましい。



図Ⅱ.2-12 開放式および閉鎖式水槽の仕組み

2. 2. 1 種苗生産施設

サンゴの種苗生産は、海水および光に関して適正な飼育環境条件を確保できる施設で行うとともに、必要な資材・機材ならびに適正な人員数を確保したうえで実施する必要がある。

【解説】

以下に種苗生産施設の設置条件を示す。

1) 立地条件

サンゴの飼育には清浄で水温の日較差（日最高水温と日最低水温の差）が小さい海水を大量に要する。また、サンゴは共生褐虫藻が行う光合成より多くの栄養を得ている。このため、種苗生産施設は、水質汚染および一日の水温変動が少ない海域の沿岸地であり、かつ水槽に十分に光が入るような場所に設置することが望ましい。

さらに、サンゴの産卵日と時刻は光の影響を受ける可能性があるため、なるべく施設の周辺に人工的な光源（街灯や建物の照明など）がない方がよい。難しい場合には、遮光カーテン等で光を遮る工夫が必要である。

2) 必要設備

(1) 取水設備

親および稚サンゴを開放式水槽にて飼育する場合、換水率を高め、飼育水槽の水温の日較差をより小さくすることにより生残率が向上する傾向がある（**適正な換水率については、第Ⅱ編 2.2.2 親サンゴの飼育 1) 飼育条件および 2.2.4 稚サンゴ飼育 2) 稚サンゴの飼育条件を参照**）。このため、取水設備（汲み上げポンプ、配管）の設計・設置にあたっては、適正な換水率と使用する水槽の容量、ならびに損失水頭（送水中における配管内での水圧の低下）から海水の汲み上げ量を計算し、十分な量の海水が確保できるように留意する。

なお、十分な換水を行えない場合は、チラー、地下浸透海水やヒーターを用いて水温の温度管理を行う方法がある。

(2) エアレーション設備

親・稚サンゴの飼育水槽の海水は、以下の目的のために適切に循環させる必要がある。水槽の海水を循環させるには、一般的にエアレーションやポンプを利用するが、前者のほうが効率的に淀みの少ない水流を作ることができる。

- ⑦ 海水が淀むことにより悪性細菌が増えることを防ぐ
- ⑧ サンゴ自体に適切な水流を当て、不要物を取り除き、新陳代謝を促す
- ⑨ 光の揺らぎをつくって水中照度を下げ、直射日光によるストレスを軽減する

(3) 建屋

卵および幼生の飼育は、風雨を防ぐことができ、また太陽光が直接入らない室内で行う必要がある。卵と幼生の飼育水槽の換水率は低いため、太陽光や風雨により水温が急激に変化しやすい。水温の変化が大きくなると、卵および幼生の生残率が低くなる傾向がある。

親・稚サンゴの飼育は屋外でも可能であるが、台風対策や作業のし易さから、屋内に水

槽を設置することが望ましい。サンゴ飼育には十分な光量の確保が必須であることから、建屋の屋根や壁はポリカーボネイトなどの透明な材質とする。簡易的な飼育施設として、ビニールハウスも利用可能である。

(4) 飼育水槽

親・稚サンゴ飼育には、耐久性や使い勝手を考慮すると、ポリカーボネイト製円形水槽や FRP 水槽が適している。コンクリート製水槽も利用可能である。

水槽の容量が大きい方が生残率は良くなる傾向があるが、大きすぎると水槽管理の作業が行いにくくなり、また感染症が発生した場合に被害が大きくなるため、1～5 トン程度の容量の水槽が適している。

稚サンゴの種苗生産数や飼育期間によって施設の規模は異なるが、以下に 1 歳齢の稚サンゴを 2、3 万群体生産する能力を持つ施設の一例を示す（表Ⅱ. 2-4、図Ⅱ. 2-12）。

表Ⅱ. 2-4 サンゴ種苗生産施設の一例

【所在地】	沖縄県島尻郡久米島町真謝 500-1（沖縄県海洋深層水研究所内）
【敷地面積】	飼育施設 348m ² 、ラボ兼倉庫 82m ²
【使用可能海水量】	表層水 年間 261,486 トン（取水口水深 15m）
【主な設備】	親サンゴ飼育水槽（1 トン円形 FRP 製、3 面） 親サンゴ飼育水槽（1 トン円形ポリカーボネイト製、5 面） 稚サンゴ飼育水槽（5 トン FRP 製、L400×W150×D100cm、5 面） 稚サンゴ飼育水槽（3.5 トン FRP 製、L520×W160×D35cm、1 面） 配水およびエアレーション用配管一式



屋内の親サンゴ飼育水槽群



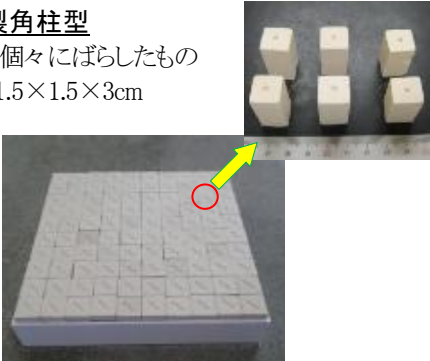
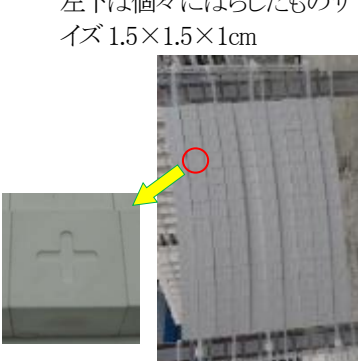
屋内の稚サンゴ飼育水槽群

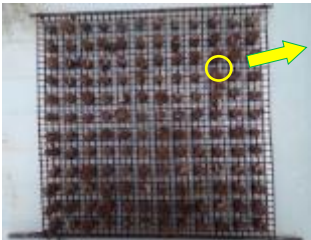
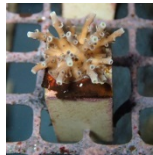
図Ⅱ. 2-12 種苗生産施設内部

3) 必要機材

種苗生産にて実施する A) 親サンゴ飼育、B) 採卵、幼生飼育、C) 幼生の着生、D) 稚サンゴの飼育の作業ごとに必要となる機材及び資材ならびに使用目的を表Ⅱ. 2-5 に示す。

表Ⅱ.2-5 種苗生産用機材および資材一覧

機材、資材		使用目的
A) 親サンゴ飼育		
円型水槽（ポリカーボネイトおよびFRP製1トン等）		親サンゴ飼育水槽
エア・ストーン		水流の発生
遮光ネット		光量の調整
水中ヒーター		冬期の水温の調整
 1トン円型ポリカーボネイト水槽  1トン円型 FRP 水槽  水中ヒーター		
B) 採卵、幼生飼育		
円型水槽（ポリカーボネイト製30～100L）		卵・幼生の飼育水槽
掬い網（メッシュネット）（100μm目合）		洗卵・換水時の卵・幼生の回収
プラスチック製カップ（200ml～5L）		卵・幼生の一時収容や運搬
ガラス器具（ピペット、ビーカー、スライドグラス等）		卵・幼生の観察や計数
 ポリカーボネイト 円形水槽  掬い網（メッシュ ネット）100μm目合  プラスチック ・カップ類  ガラス器具類 （ビーカー、時計皿、 ピペット、スライドグラス）		
C) 幼生の着生		
水槽（円型ポリカーボネイト製1トン、角型500L等）		幼生着生水槽
着床具（陶器製タイル、角柱等）		幼生を着生させる基盤
掬い網（メッシュネット）（100μm目合）		換水時の幼生の回収
エア・ストーン		水流の発生
プラスチック製カップ（200ml～5L）		幼生の運搬や各水槽への分配
【陸上施設での種苗生産用着床具の例】 陶器製角柱型 右上は個々にばらしたものの サイズ1.5×1.5×3cm  プラスチック製角柱型 左下は個々にばらしたもののサ イズ1.5×1.5×1cm  陶器製平板タイル型 素焼きのタイル サイズ10cm角 厚さ5mm 		
※角柱型の着床具は個々を分離できることから、水槽内ではまとめて収容することによりスペースを節約し、移植時はばらすことにより各サンゴの間隔を空けて植付けることができる。平板型着床具は、顕微鏡下で観察がしやすいので、各種の試験を行う際に便利である。		

D) 稚サンゴの飼育	
水槽 (FRP 製 5 トン等)	稚サンゴ飼育水槽
着床具収容具 (着床具ホルダー)	水槽内で着床具を保持
遮光ネット	光量の調整
 5トン FRP 製水槽  プラスチック・ネットを 加工した着床具ホルダー  着生から数か月間は、各着床具を密着させて飼育し、サンゴの成長に伴い、プラスチック・ネット製着床具ホルダーへ収容(水槽スペースの有効利用)	
E) 共通品	
実体顕微鏡、生物顕微鏡	卵・精子・幼生・稚サンゴの観察
数取器	卵・精子・幼生・稚サンゴの計数
測定器 (光量子、塩分、溶存酸素、pH、栄養塩類など)	水槽内環境の確認、水質の検査
水温計、水温ロガー	水温観察、記録

4) 人員

作業段階ごとの必要人員数を確保する。1 歳齢の稚サンゴを 2、3 万個生産する場合は以下の人員が必要となる。

- | | | |
|----------------------|------------|-----------|
| ① 機材や計画等の準備 (4、5 月) | 研究員 1 名、 | 作業員 1 名 |
| ② 採卵～着生までの作業 (6～8 月) | 研究員 2、3 名、 | 作業員 1 名 |
| ③ サンゴ飼育 (9 月～翌年 5 月) | 研究員 1 名、 | 作業員 1 名 |
| ④ 稚サンゴの搬出 (6 月) | 研究員 1 名、 | 作業員 3、4 名 |

2. 2. 2 親サンゴの飼育

親サンゴの飼育において重要な環境要因は、水温、光、水流の状態である。長期間の飼育と毎年の産卵を可能とするため、過去の試験によって明らかとなった適切な飼育環境で親サンゴの飼育を行う。

【解説】

1) 飼育条件

(1) 水温

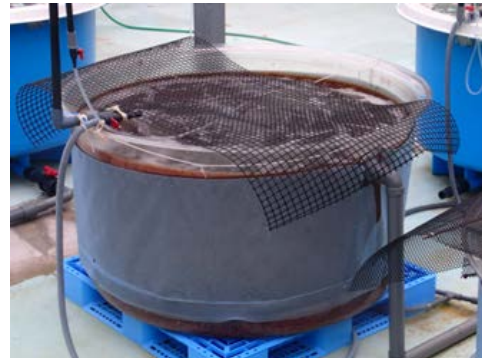
飼育海水温が 30℃を超えると飼育中のサンゴが白化する場合があるので、この水温以下で飼育する必要がある。水槽内の月平均水温を沖ノ鳥島産サンゴについては 24～30℃、沖縄産サンゴでは 22～30℃とすることにより、サンゴを概ね健全に保ち、毎年産卵させることが可能である。サンゴの状態が悪いときは、夏期には冷却装置 (チラー) や地下浸透海水、冬期には水中ヒーターを用いて、冷却・加温することで状態が改善される場合もある。

また、水温の日較差は1℃以内が好ましく、沖縄で1～5トン水槽を用いて飼育する場合、注水の海水温が一定であれば、12回転/日で水温の日較差を1℃以内にすることができる。

(2) 光量

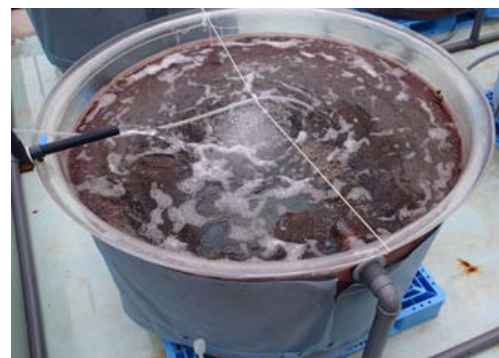
水槽内の光量は、冬期には空中光量の約1/3、夏期には約1/4となるように遮光ネットを用いて、晴天時の正午付近における光量子量が $400\sim 500\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度になるように調整する(図Ⅱ.2-13)。飼育サンゴに白化の傾向が見られた場合、光量を少なくすると改善する場合がある。

また、強光の環境下でも、水中で光の揺らぎがあれば、サンゴ体内の共生褐虫藻の光合成の能力が低下しないことが報告されている(Nakamura and Yamasaki 2008)。飼育水槽の水面を波立たせて、サンゴに直射日光が当たり続けないようにすることが必要である。



図Ⅱ.2-13 親飼育水槽の遮光方法の一例

目合20mmのプラスチックで水槽の上面を覆って遮光。この方法で約30%の減光が可能である。水槽側面は、目合2mmのモジ網で囲い、直射日光の入射量を制限する。



図Ⅱ.2-14 親飼育水槽(1トン円型ポリカーボネイト水槽)における強エアレーション

(3) 水流

エアレーションにより水流を発生させることで、水槽内の海水を万遍なく循環させる(図Ⅱ.2-14)。流速は10～20cm/秒程度が望ましい。また、水面を波立たせることで、強い光を和らげることができる。

2) 競合生物対策

海藻の繁茂を防ぐため、藻食性の貝類(タカセガイ稚貝、カンギクガイ成貝、タカラガイ類成貝など)および藻食性魚類(アイゴ類、ハギ類など)を水槽に収容するとよい(図Ⅱ.2-15)。1トン水槽への収容数は、基本的に貝類は数百個体、魚類は1,2個体とするが、藻類の付着状況によって数を調整する。これらの貝類や魚類が摂食できない藻類(藍藻、褐藻、緑藻など)や付着生物(ヘビガイ類、ゴカイ類、付着性二枚貝など)は、手作業で取り除く必要がある。イソギンチャク類の駆除には、ミズレチョウチョウウオが有効である。



左から、タカセガイ、ハナビラ
ダカラ、カンギクガイ

アミアイゴ

ミゾレチョウチョウウオ

図Ⅱ.2-15 藻類・イソギンチャク駆除に用いる貝類および魚類

3) 水槽管理

水槽の底面に堆積する沈殿物は、水槽内の水質を悪化させたり、サンゴにも堆積し、サンゴの共肉を壊死させる場合がある。このため、上記の付着生物の除去に加えて、週1回程度、水槽の底掃除を行う必要がある。

屋外水槽の場合は、台風時に強風によってゴミや砂が水槽に多量に入り込むことがあるので、水槽を遮光ネットで強固に覆ったり、台風一過後直ちに底掃除を行ったりする必要がある。台風や大雨時に急激に塩分が低下したり、取水に多くの浮泥が混ざる場合は、海域の取水場所を変更することも検討したほうがよい。

2. 2. 3 採卵・幼生飼育・着生

サンゴの受精には精子密度を $10^5 \sim 10^7/\text{ml}$ に保つことと、受精時間を長くする必要がある。また、卵割を始めた胚は壊れやすいため静穏な状態で飼育する。産卵後4日目には幼生は着生能力を有するため、この時期に着床具を水槽に入れて着生させる。幼生は1日か2日で着生して、稚サンゴに変態する。着床具には、着生を誘引するバクテリアや石灰藻を事前に付着させておくことが不可欠である。

【解説】

1) サンゴの生殖生態

多くのミドリイシ類は雌雄同体で他家受精なので、種苗生産には、サンゴ種ごとに、少なくとも遺伝的に異なる（クローンではない）2 群体以上から得られた卵と精子が必要である。少ない群体数を用いた場合でも高い受精率を得られることがあるが、確実に 100% に近い受精率を得、また、稚サンゴの遺伝的多様性を高めるためには、より多くの群体を用いたほうがよい。Iwao et al. (2014) は、6 群体以上から得た卵と精子を用いて受精させることにより、遺伝的多様性を高めて、95% 以上の高い受精率が得られると報告している。

一般的にサンゴは、夏期(5月中旬～8月)の満月付近に産卵を行う(図Ⅱ.2-16、Ⅱ.2-17)。サンゴ種によって概ね産卵する月は決まっている。産卵日は、各海域(同様な環境を持つ一定海域)によって異なり、同一海域内では同調する傾向がある。しかし、産卵日を特定することは、現時点では難しい。なお、産卵誘発方法は Hayashibara et al. (2004) により開発されているが、親サンゴにダメージを与えるので、利用の際には注意が必要である。

産卵の時刻は、概ねサンゴ種ごとに決まっている(例えば、ウスエダミドリイシは 19:30

頃、ツツユビミドリイシは 22:00 頃) (林原 1995、Fukami et al. 2003)。産卵に要する時間は約 30 分間である。

サンゴは 1 つのポリプから複数の卵を産卵する。ハマサンゴ類やキクメイシ類のサンゴは、卵が分かれた状態で放出するが、ミドリイシ類の多くは、卵と精子をまとめた“バンドル”と呼ばれる塊にして放出する(図Ⅱ.2-18)。ミドリイシ類のバンドルには、10 粒程度の卵が含まれている(北田 2002)。産卵の 1~2 時間前に、ポリプの口の部分でバンドルが出かかった状態になり(バンドル・セットと呼ばれる)(図Ⅱ.2-19)、産卵間近であることが目視で容易に観察できる。

ミドリイシ類のサンゴの受精では、精子濃度が $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$ 個体/ml で受精率が高まる傾向があり、 1×10^6 個体/ml で最も高くなる(Nozawa et al. 2015)。卵を受精させる時には、精子濃度が低くならないように注意が必要である。精子数は、血球計算盤を用いて計数できる。



図Ⅱ.2-16 ツツユビミドリイシの産卵



図Ⅱ.2-17 産卵終了後のウスエダミドリイシ
水面にピンク色のバンドルが浮遊



図Ⅱ.2-18 ウスエダミドリイシのバンドル



図Ⅱ.2-19 *Acropora globiceps* のバンドルセット

2) 事前準備

サンゴ幼生を着生させるためには基盤(以下、着床具)が必要である。着床具は、稚サンゴの飼育・移植方法や移植場所の環境や地形に適したものを選択する(表Ⅱ.2-5)。

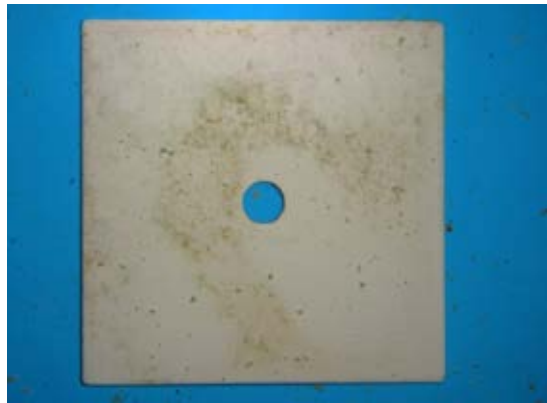
サンゴの幼生は、石灰藻やバクテリアによって着生と変態を誘発されることが分かって

いる (Morse DE et al. 1988, Morse ANC et al. 1996, Negri et al. 2001, Tebben et al. 2015, 加藤ほか 2016)。着生・変態を誘引するバクテリアを付着させるため、着床具を海域の浅瀬に浸漬しておく (図Ⅱ. 2-20、A)。より長期間着床具を浸漬したほうが幼生は短時間で着生・変態を行い、また着生率 (着生個体数/収容幼生数) が高くなるが、付着生物が多くなり着床具の洗浄に手間がかかる。このため、着床具の浸漬期間は1~2か月が適切である。

浸漬する海域としては、着床具の表面への浮泥や砂の堆積が少ない、礫が堆積している場所や岩盤の上などが良い。着床具は、幼生を着生させる直前から数日前に海域から着床具を引き上げて、表面に付着した藻類やゴカイ等をブラシ等を用いて除去するが、あまり強くブラッシングするとバクテリアフィルムもこすり取られてしまうので、少し微細藻類が残る程度の状態にすることが望ましい (図Ⅱ. 2-20、B)。



礫の上に置いて浸漬した角柱型着床具



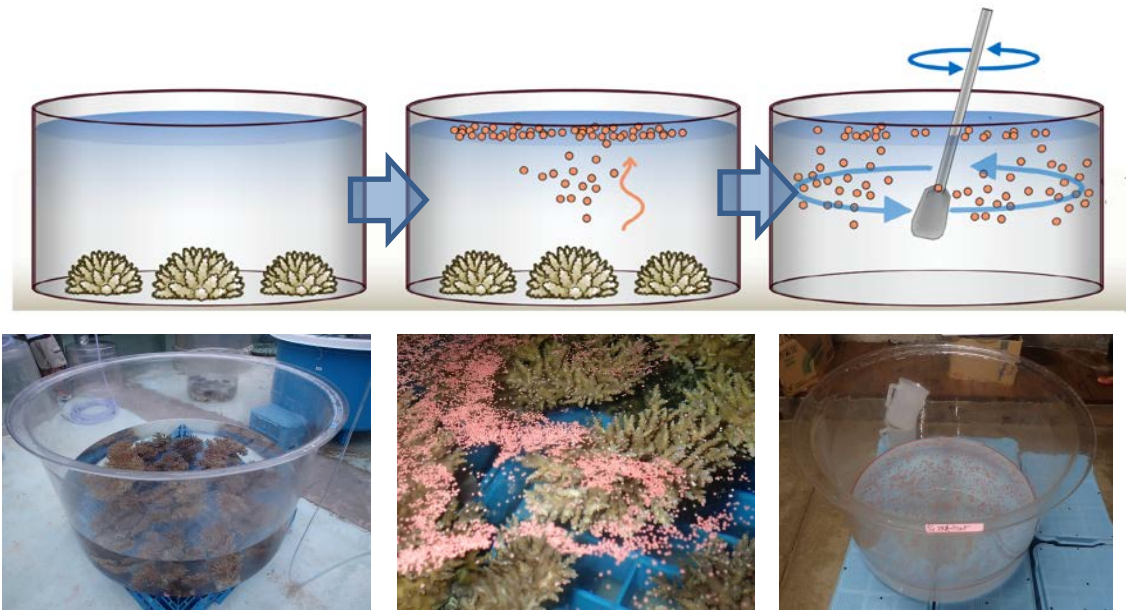
2か月間の浸漬後、洗浄したタイル型着床具

図Ⅱ. 2-20 着床具の海域への浸漬

3) 採卵から着生までの作業手順

(1) 採卵および受精

ポリプの口部にバンドル・セットが認められた親サンゴ群体は、一つの水槽にまとめて収容し、産卵させる (図Ⅱ. 2-21)。産卵後、親群体を水槽から取り出し、バンドルをピペットやヘラをつかって水中でばらして受精させる。この方法では、親サンゴの産卵数が少ない場合は、精子濃度が低くなってしまうことがあるので、水槽内の水量は多すぎないように注意する。受精時間は約1時間とする。



バンドル・セットした群体を水槽に収容

水槽内での産卵が行われバンドルが水面に浮上

産卵終了後、親群体を水槽から取り出し、海水を攪拌してバンドルを壊し、卵を受精させる

図Ⅱ.2-21 サンゴの採卵および受精の手順

(2) 卵・幼生の飼育

受精後、受精卵を 100 μm 目合の掬い網に入れて、清浄な海水で洗卵した後、100L ポリカーボネイト水槽等の飼育水槽へ収容する。

サンゴの卵は受精膜が形成されないため、卵割が始まるまで受精したかどうかは分からない。ミドリイシ属のウスエダミドリイシ、ツツユビミドリイシ、クシハダミドリイシ等では、受精後 2～3 時間で受精卵の卵割が始まる。卵割を始めた卵は細胞が分離してバラバラになりやすいため、上記の作業は卵割が始まるまでに終了しなければならない。飼育水槽に収容後は、なるべく振動などを与えないようにする。また、受精率の観察は、受精後 3 時間以降に行う。

卵は胚の時期を経て幼生へと発生するが、この期間の飼育には、開放式の水槽（換水率 4 回転/日程度）を用いることにより換水作業の手間が省ける（図Ⅱ.2-22）。卵や胚は水面に浮かんでいるので、水槽の底付近から排水することにより、水槽外に出る卵や胚の量はわずかである。しかし、産卵の翌日の夜くらいには幼生となり浮遊するため、夜間は止水し、昼間は排水口に設けた掬い網に出てきた幼生をカップで掬い上げて随時水槽へ戻す。100L ポリカーボネイト水槽を用いて開放式で飼育する場合、収容する受精卵数は 5 万粒程度を目途とする。これより多い卵を収容すると、水槽の壁面に胚が張り付いて斃死したり、胚同士が癒着してしまうケースが多くなる。幼生の飼育は、常温下で一般的には産卵後 4 日目まで行う。

水槽での幼生飼育について、服田ほか（2003）は、「小規模な実験研究の目的であればボウルを用いて飼育することが可能で、1 日 1 回以上の頻度で、ピペットを用いて幼生を新しいボウルに移すことで状態の良い幼生を維持することができる」とし、その際の幼生飼育密度は 2,000 個体/L 以下が望ましいとしている。一方、100L ポリカーボネイト水槽などのより大型の水槽を用いてかけ流し式で幼生飼育を行う場合、飼育海水を清浄な状態に

保つためには、幼生密度を 500 個体/L 以下にした方が良い。

簡易的な卵・幼生の飼育方法としては、止水状態の水槽で飼育し、1 日 1 回、掬い網を用いて換水する方法もある。



図 II.2-22 卵・幼生の開放式飼育水槽

A : ビニールチューブの給水管、B : 塩ビ製排水口、C : 目合 100 μ m の掬い網

(3) 着生

産卵後 4 日目には、幼生は、水槽の底面に垂直に立ったり、底面をホッピングしたりして着生場所を探す行動を示すようになるので、この時点で着床具への着生を行わせる。

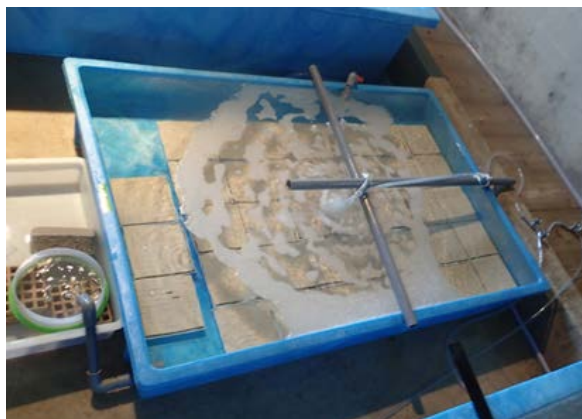
着生水槽（1 トン・ポリカーボネイト水槽など）には予め着床具をセットしておき、そこへ幼生を収容する（図 II.2-23）。ただし、水温が高いと胚の発生や幼生の成長が早くなり、幼生の着生・変態の時期が早くなる場合もある。その際には、産卵後 3 日目の幼生を着生水槽に収容する。

幼生の着生率は、サンゴ種や着床具の状態により異なるが、概ね 50～60% である。また、着床具に幼生を 1 個体/cm² 以上の密度で着生させると大量斃死が発生する場合がある。適正着生密度と着床具上の着生可能面積、着床具数、着生率の乗算によって、水槽へ収容する幼生数を決める。着生の 1 日目は少なめに幼生を収容し、着生状況を観察しながら翌日以降に幼生を追加することで、適切な個体数を着床具に着生させることができる。

着生期間中は、概ね 1 回転/日の割合で換水を行う。換水方法は、開放式水槽で幼生を飼育する際に用いた方法と同様である。



タイル着床具を串刺しにして収容



角柱型着床具を底面に敷いて収容



基盤に着生し、幼生から
稚サンゴへ変態中の状態



変態が完了し、骨格を
形成し始めた稚サンゴ

図Ⅱ. 2-23 着床具を収容した着生水槽および着生直後の稚サンゴ

2. 2. 4 稚サンゴ飼育

十分に骨格を形成した稚サンゴを稚サンゴ飼育水槽に移す。飼育中は、好適な飼育環境を維持するとともに、水槽内に発生する藻類の繁茂を防ぐため、藻食性の生物を水槽で混養する。

【解説】

1) 稚サンゴ飼育水槽への移動

稚サンゴが十分に骨格を形成した段階で（概ね着生開始の4日～1週間後）、稚サンゴ飼育水槽に移して飼育を始める。

2) 稚サンゴの飼育条件

(1) 水温

沖縄において、屋外水槽で稚サンゴを飼育すると、水温は夏期には約30℃、冬期は約20℃になるが、そのような環境下でも飼育は可能である。また、水温30℃であっても、水温が一定であれば飼育できる。稚サンゴは急な水温の変化によって斃死することがあるので注意が必要である。例えば、台風の前後の数日間に2℃以上水温が変動したり、1日の最高最低の水温差が1℃以上となるようなケースである。

飼育中の水温が30℃を超えると稚サンゴの生残率が下がる傾向があるので、そのような

場合には、冷却装置等により海水の冷却を検討すべきである。また、沖ノ鳥島のような沖縄より低緯度海域に生息するサンゴの種苗生産を行う場合は、冬期に飼育海水を加温した方が、稚サンゴの生残率は良い傾向が見られた。沖ノ鳥島由来の稚サンゴの場合、現地の最低月平均水温である 24℃を下回らないように、投げ込み式の棒状チタンヒーターを用いて飼育海水を加温した。

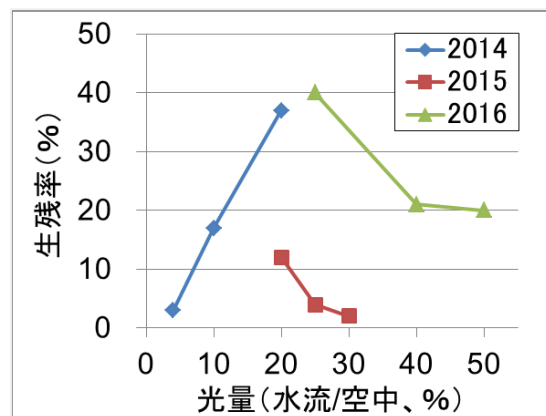
(2) 光量

光量の調整は、親サンゴの場合と同様に、遮光ネットを用いて行う（図Ⅱ. 2-24）。同じ遮光ネットを用いていても、季節によって日の傾きが異なることにより遮光率が変わってくるので、夏期は冬期より遮光率の高いネットを用いる必要がある。

2014 年から 2016 年にかけて実施した、光量と稚サンゴの生残率の関係についての試験結果を図Ⅱ. 2-25 に示す。この試験結果から、稚サンゴ飼育水槽内の最適な光量は、空中の光量の約 20%であることが分かった。この条件下の水槽では、晴天の正午付近における光量子量は $300\sim 400\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度であった。



図Ⅱ. 2-24 稚サンゴ飼育水槽の遮光状況
(遮光率約 50%の防風ネット)

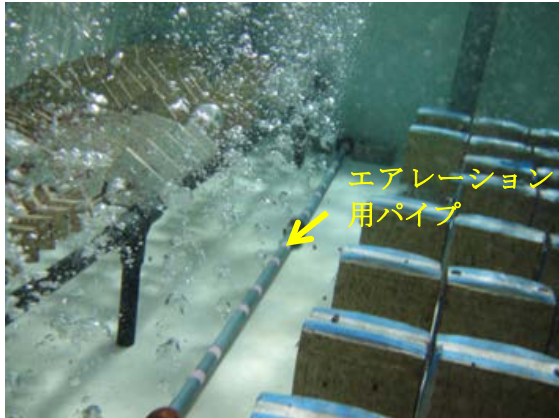


図Ⅱ. 2-25 光量子量と着生後約 6 か月の稚サンゴ（ウスエダミドリイシ）の生残率の関係

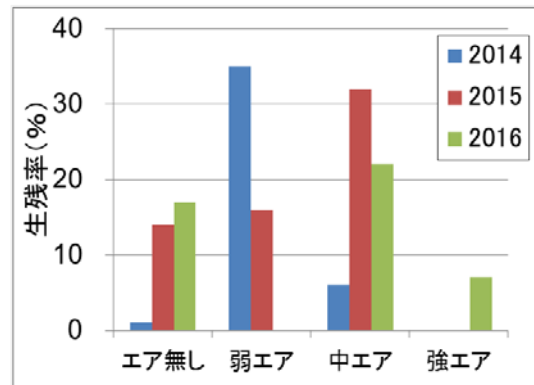
(3) 水流

水槽の底面に設置した小穴を設けた塩ビ管を通してエアレーションを行って水流を起こす（図Ⅱ. 2-26）。

エアレーションの強弱と稚サンゴの生残率の関係は、2014 年から 2016 年にかけての試験で明らかにした。稚サンゴの生残率は、弱から中のエアレーションの時に生残率が高くなる傾向が見られた（図Ⅱ. 2-27）。そのときの稚サンゴの周囲の流速は 3～5cm/秒程度であったことから、この程度の流速が適正であると考えられた。



図Ⅱ.2-26 稚サンゴ飼育水槽内のエアレーションの状況



図Ⅱ.2-27 流速と着生後約6か月の稚サンゴ（ウスエダミドリイシ）の生残率の関係

(4) その他の飼育条件

飼育水槽の大きさについては、100L および 1.4、3.5 トンの水槽を用いて飼育試験を行ったところ、大容量の方が稚サンゴの生残がよい傾向が見られた。しかし、日常的な底掃除や稚サンゴの収容などの作業のやり易さ、また飼育海水を水槽内で淀みなく循環させることを考慮すると、1～5 トン程度の水槽容量が適切だと考えられる。特に 5 トン水槽は水温が安定し、作業がしやすいことから適正な大きさである。

3) 競合生物対策

親サンゴの飼育の場合と同様に（第Ⅱ編 2.2.2 親サンゴの飼育 2）競合生物対策を参照）、海藻とイソギンチャクの駆除のため、藻食性の貝類（タカセガイ稚貝、カンギクガイ成貝、タカラガイ類成貝など）および藻食性魚類（アイゴ類、ハギ類など）、ならびにイソギンチャクを捕食するミゾレチョウチョウウオを水槽に収容する必要がある。5 トン水槽への収容数は、基本的に貝類は 1,000 個体程度、魚類は 1, 2 個体とするが、藻類の付着状況によって数を調整する。これらの貝類や魚類が摂食できない藻類や付着生物は手作業で取り除く。上述の魚類と貝類は、稚サンゴに傷を与えたり、稚サンゴを捕食したりしないので、稚サンゴを大型水槽に移すと同時に一緒に収容しても問題はない。

4) 水槽管理

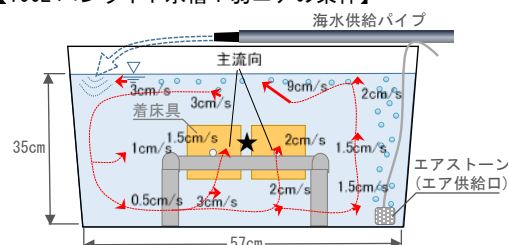
これも親サンゴの場合と同様に、週 1 回程度、水槽の底面の掃除が必要である。

【コラム】稚サングの適正飼育環境試験における水流測定

稚サングの適正な飼育環境を把握するため、水流と生残率の関係について試験を実施した(第Ⅱ編 2.2.4 稚サング飼育 2)稚サングの飼育条件(3)水流)。水流の強さは、エアレーションの強弱によって調整している。ここでは、上記試験において実施した水流測定結果の詳細を示す。

- ① 水槽内の流れの分布状況の把握：試験で用いている 100L パンライト水槽内(図 1 上)では、生残率の良かった弱エアの場合、赤い矢印と破線で示すように、流速が変化しながら、水面でエアレーションと海水の供給方向の流れが見られ、着床具周辺の流向(主流向)は底面から水表面に向かう、弱く循環するような流れがみられた。同じく、実際に稚サングを飼育している 5 トン水槽内(図 1 下)の弱エアの条件では、流速が変化しながら水槽の水表面中央から側壁方向に向かい、着床具周辺の主流向は下向きとなるような、水槽の片側で循環するような流れがみられた。このことから、稚サングが着生している着床具周辺では、流向と流速は局所的に変化しており、乱れた流れが存在することが確認された。

【100L パンライト水槽：弱エアの条件】



【5 トン水槽：弱エアの条件】



※流向・流速は着床具と平行の横断面方向で表示。
(図の奥行き方向は考慮していない。)

図 1 水槽内の流向・流速分布

- ② 着床具近傍の流速測定：稚サングが着生してい

る着床具に流れが当たる位置(図 1 の★印の位置)で x、y、z 方向平均流速の合成値を測定したところ、100L パンライト水槽で生残率の高かった弱エアの条件では 3cm/秒程度であった(表 1)。稚サングの大量種苗生産に用いている 5 トン水槽においても、エア量を変えて測定したところ 0.73~7.57cm/秒と測定された。現在 5 トン水槽では、弱エア(表 1 中の平均流速 5cm/s 程度)の条件で種苗生産を実施しており、比較的高い生残率となっている。

表 1 水槽内着床具近傍の平均流速測定結果

ケース		エア吐出量 (ℓ/秒)	x,y,z 方向平均流速の 合成値 $\bar{U}$ (cm/秒)
パンライト 100L 水槽 (試験水槽)	強エア	0.094	6.95
	弱エア	0.024	2.54
	エアなし	—	3.06
5 トン水槽 (稚サング飼育水槽)	強エア	3.57	7.57
	弱エア	1.29	5.32
	エアなし	—	0.73

※流速・流向の測定は、実験室用電磁流速計 [JFE アドバンテック社製・ACM3-RS、
流速分解能 0.1cm/秒、測定精度 ± 0.5 cm/秒 or $\pm 2\%$] を用いた。

以上、試験及び飼育水槽における着床具近傍の流速を明らかにしたが、水槽内の流れは一定ではなく、局所的に流向・流速が変化していた。別途、染料を用いた濁度計測の実験では、乱れた流れによって起こる拡散現象が確認され、水槽内の流れは(平均流速・流向で代表される)移流と、拡散に支配されていることがわかった。すなわち、適正な稚サングの飼育環境を把握するには、水槽内の乱れ(拡散状況)の度合いについて留意する必要があると考えられた。

2. 2. 5 疾病対策

親サンゴが飼育中に病気に罹り斃死したり、組織の壊死により群体のサイズが小さくなってしまう場合がある。稚サンゴにおいては、病気により大量斃死が発生することもある。病気は細菌によるものである。より良い環境で飼育することにより、サンゴを健康な状態に保ち、病気を予防することが重要である。罹患した場合は、抗菌剤を用いて治療を行う。

【解説】

1) サンゴの疾病

(1) 親サンゴの疾病

飼育中の親サンゴに、病気（RTN：Rapid tissue necrosis）が発生して、群体全体が斃死、あるいは部分的な罹患により親サンゴが産卵可能なサイズより小さくなってしまいう場合がある（図Ⅱ.2-28）。

病原体は、サンゴの組織に常在する菌種（*Vibrio harveyi*、*V. coralliilyticus*、*Vibrio* sp. 新種、未発表）であると考えられている。サンゴが何らかのストレスを受け、体調が悪くなったときに、これらの細菌が病気を引き起こすのではないかと想定される（Luna et al. 2007）。



白い部分が疾病により組織が
壊死・消失した箇所



疾病部分の拡大写真
(組織の壊死と剥離が見られる)

図Ⅱ.2-28 RTNに罹患したサンゴの状況

(2) 稚サンゴの疾病

稚サンゴの飼育期間中に、大量斃死が発生する場合がある。数日のうちに、一つの水槽内の稚サンゴがほぼ全滅してしまうケースもある。

罹患サンゴからの細菌の採集および感染実験から、*Thalassobius mediterraneus*が大量斃死を引き越す可能性があることが分かっている。また、本菌種は、健全な稚サンゴの組織内にも分布していることから、日和見感染を引き起こす病原体であるものと推察される。

稚サンゴの大量斃死は、着床具の一部で発生した斃死が、連鎖的に同一着床具上の近隣の稚サンゴへ広がり、その後、着床具全体や水槽の他の着床具へ広がっていく。このことから、大量斃死には細菌が関与していることが疑われる。

2) 疾病対策

(1) 予防

親・稚サンゴの両方の飼育において、病気を発症させないためには、飼育サンゴを健全な状態に保っておくことで重要である。このためには、「2. 2. 2 親サンゴの飼育」で述べた飼育条件および水槽管理を適正に行い、飼育環境の好適な状態にする必要がある。また、水質の悪化や塩分の低下により、飼育サンゴが罹患する場合も考えられる。このため、上記の水槽管理に加え、定期的および大雨などの環境の急変時に、水質検査（塩分、リン、窒素等）を実施し、異変が見られた場合には、原因究明と適切な対処を行う。

(2) 治療

① 親サンゴの治療

以下の薬剤において、病原体 *Vibrio* sp. に対する感受性が認められている。

- ・ニフルスチレン酸ナトリウム
- ・アンピシリン
- ・オキシリン酸
- ・フロルフェニコール

これらの薬剤は水産生物用として市販されているが、その薬剤を用いて親サンゴを薬浴し、臨床試験を実施したところ、一部の罹患サンゴにおいて、治癒や斃死までの期間の延長が見られ、一定の効果は見られた。しかし、疾病が止まらず斃死する場合も多く、2016年の事例では、治癒率は約40%にとどまっている。より有効な薬剤の探索と処方が必要である。

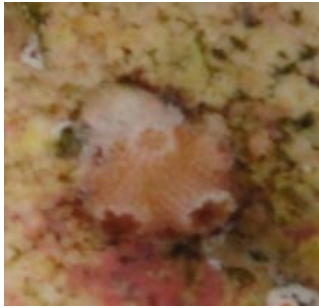
また、RTNは他の群体への感染が速いので、病気のサンゴを見つけたら、直ちに隔離する必要がある。

② 稚サンゴの治療

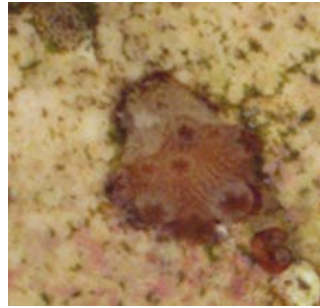
以下の薬剤において、病原体 *T. mediterraneus* に対する感受性が認められている。

- ・ニフルスチレン酸ナトリウム
- ・アンピシリン

親サンゴの場合と同様に、これらの水産生物用薬剤を用いて薬浴し、毒性試験および臨床試験を実施したところ、毒性は認められなかったものの、治癒率は40%と低かった（図Ⅱ.2-29）。また、5トン等の大型水槽で大量斃死が発生した場合、薬剤を水槽へ投入し、その後1～4時間止水として治療を行うが、斃死の進行を抑えることができるのは概ね半数のケースであった。また、治療後の再発も多々見られ、薬剤だけで完全に斃死を止めることは難しかった。飼育環境の改善等により、罹患による斃死の発生を防ぐことが先決であり、薬剤は緊急時等に補助的に使用すべきと思われる。



罹患直後の群体



薬浴後に治癒した群体
(左写真と同群体)



薬浴後に斃死した群体

図Ⅱ.2-29 罹患した稚サンゴの状態

【コラム】高温耐性共生褐虫藻のサンゴ種苗生産への活用の検討

サンゴは、海域の高水温が数週間続くと白化してしまい、群体の色が真っ白、あるいは淡いパステルカラーになる。白化とは、サンゴの体内に共生している褐虫藻が、高水温等のストレスによりサンゴの体内から抜け出してしまうか、体内で死んでしまい、本来褐虫藻の存在によって茶色がかかった色をしているサンゴが白っぽくなってしまうことである。さらに、この高水温が長期間続くと、白化したサンゴが死んでしまうことがある。近年、熱帯・亜熱帯海域では、海域の高水温が頻繁に発生し、最近では、2015 年、2016 年と続けて世界各地のサンゴ礁海域でサンゴの大規模な白化が報告されている。オーストラリアのグレートバリア・リーフや沖縄の石西礁湖において、広い範囲でサンゴが白化によって斃死したことは記憶に新しい。

このような状況の中、サンゴの高水温耐性に関して多くの研究が行われている。その中のいくつかの研究は、共生褐虫藻の高温耐性に着目している。褐虫藻は、現在 9 つの系統（クレード A～I）に分類されている。Hoegh-Guldberg et al. (2007) および Baker et al. (2008) は、サンゴ体内の共生褐虫藻のクレードの違いによって、サンゴ自体の高水温耐性に違いが生じることを示唆している。また、高温耐性があるとされているクレード D の褐虫藻を多く持つサンゴは、1～1.5℃高い高水温耐性を持っていたとの報告もある (Berkelmans and van Oppen 2006)。

そこで、クレード D の褐虫藻を利用して、高温耐性を持つ稚サンゴを種苗生産する技術を開発することを目的として、ウスエダミドリイシを用いていくつかの試験を実施し、以下の結果と考察が得られた (依藤ほか 2014, 2015, 2016, Yorifuji et al. 2017)。

- ①初期稚サンゴを水温 32℃で飼育したところ、5-6 ヶ月齢ではクレード D のみを持つ群体が増加した。
- ②1.5 歳齢まで 30℃で飼育したサンゴにおいても、同様の傾向が見られた。
- ③上記②のサンゴを常温もしくは 30℃で長期間飼育した試験では以下の結果が得られた。
 - ・いずれの水温条件においても 2 歳齢以降のサンゴからはクレード C・D のみが見られ、1.5 歳齢頃まで見られていたクレード A が検出されなくなった。
 - ・高水温下での飼育期間が長いものほどクレード D のみを保持する割合が増加した。
 - ・さらに、高水温下での飼育期間が長いものは、常温下での飼育に移行した場合もクレード D を維持し続ける傾向が見られた。

閉鎖式水槽内でクレード D のみを与えた稚サンゴは高温耐性を持つことが知られている (Abrego et al. 2012, Yuyama et al. 2016)。今回の試験は開放式水槽で行われ、高水温時には自然の海水から稚サンゴが選択的にクレード D を取り込み高温耐性を持つことが明らかにできた。また、高水温時に成体のサンゴが白化した後に、他のクレードからクレード D に褐虫藻を入れ替えることにより高温耐性を持つのではないかという“白化適応仮説 adaptive bleaching hypothesis”と呼ばれている仮説がある (Buddemeier et al. 2004)。今回の試験では、稚サンゴにおいてこの仮説が成り立つことが証明された。

通常ミドリイシ属のサンゴにおいては、稚サンゴの時期には様々なクレードの褐虫藻を持ち、成体になるにつれて、ある特定タイプの褐虫藻だけを持つように変化していくことが知られている (波利井 2012)。沖縄近海のミドリイシ成体は通常クレード C 褐虫藻を持つが、今回の試験から、高水温によってより高水温耐性のあるクレード D に変化し、高水温曝露の期間が長いほど、成体においてもその変化が不可逆になる可能性が考えられた。

今後は、これらの知見を基に、クレード D 褐虫藻を持つサンゴ種苗を効率的に生産する技術

の開発を進めるとともに、これらの種苗を海域へ移植した後も高温耐性を持ち続け、海域での高水温に耐えることができるのかどうかを検証していく必要がある。

一方、サンゴ群体自体の高温耐性とこれに関する遺伝子についての研究も行われている（例えば、Barshis et al. 2013, Dixon et al. 2015）。また、遺伝的に高温耐性を持つサンゴを生産し移植する試みもある（Mascarelli 2014, van Oppen et al. 2015）。

2. 3 中間育成

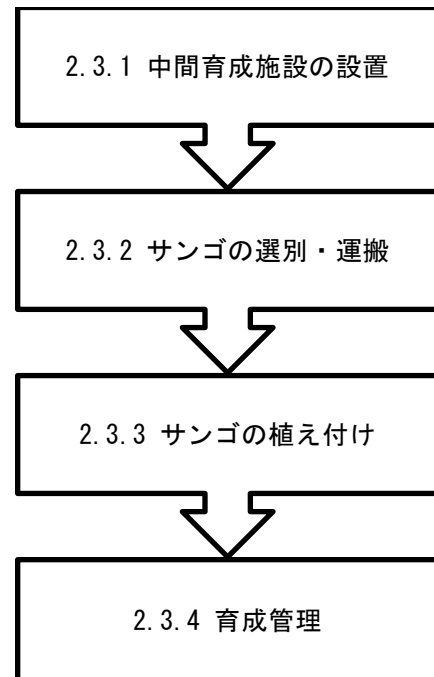
海域での中間育成では、現地に設置したコンクリート製中間育成施設に、陸上の種苗生産施設より運搬した稚サンゴを植え付けて、移植適正サイズとなるまで育成管理を行う。

【解説】

サンゴは、サイズが小さいほど移植後の成長率が高いが、生残率が低いため、移植適正サイズに成長させてから予定海域へ移植する必要がある。中間育成には、図Ⅱ.2-30に示す中層網の方法、あるいはカキ養殖のように筏養殖の方法等で行われている（【コラム】中間育成を伴う無性生殖を利用した種苗生産と移植のサンゴ増殖技術を参照）が、沖ノ鳥島のように育成管理のしにくい場所では、厳しい波浪条件下でも安定性に優れたコンクリート製中間育成施設を設置して行う。



図Ⅱ.2-30 中層網による中間育成
Rinkevich (2006)



図Ⅱ.2-31 中間育成の作業フロー

沖ノ鳥島における中間育成の作業フローは図Ⅱ.2-31のとおりである。あらかじめ中間育成施設を設置した上で、陸上の種苗生産施設から育成の良好な稚サンゴを選別し、これを運搬する。運搬されたサンゴは、状態を確認しながら中間育成施設に植付ける。また、その後は、モニタリングやメンテナンスを行い移植適正サイズとなるまで育成管理する。

2. 3. 1 中間育成施設の設置

波浪条件の厳しく管理し難い場所では、長期的にサンゴの育成阻害要因の影響を受けにくいコンクリート製中間育成施設を設置する。

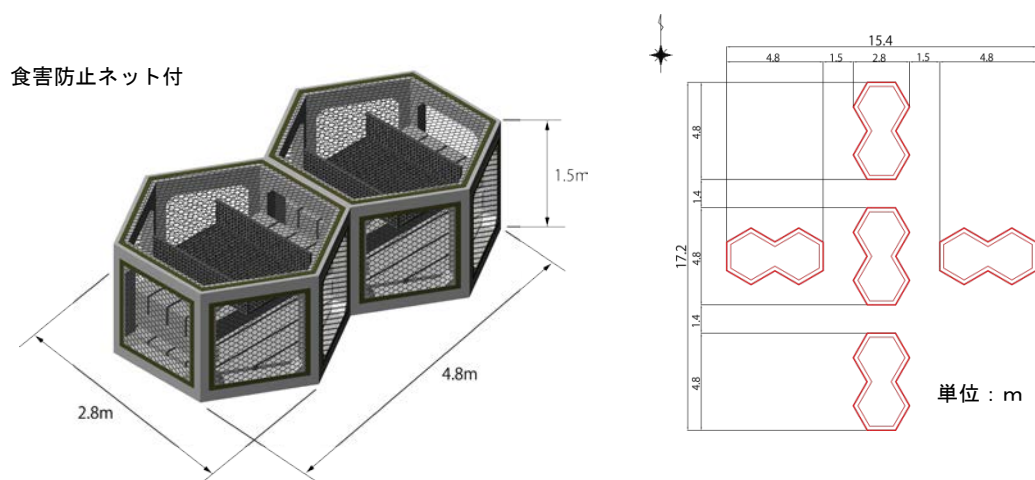
【解説】

サンゴの生残・育成のためには、安定した基盤が必要であり、中間育成するための基盤が不足している場合はコンクリート製中間育成施設を設置する必要がある。

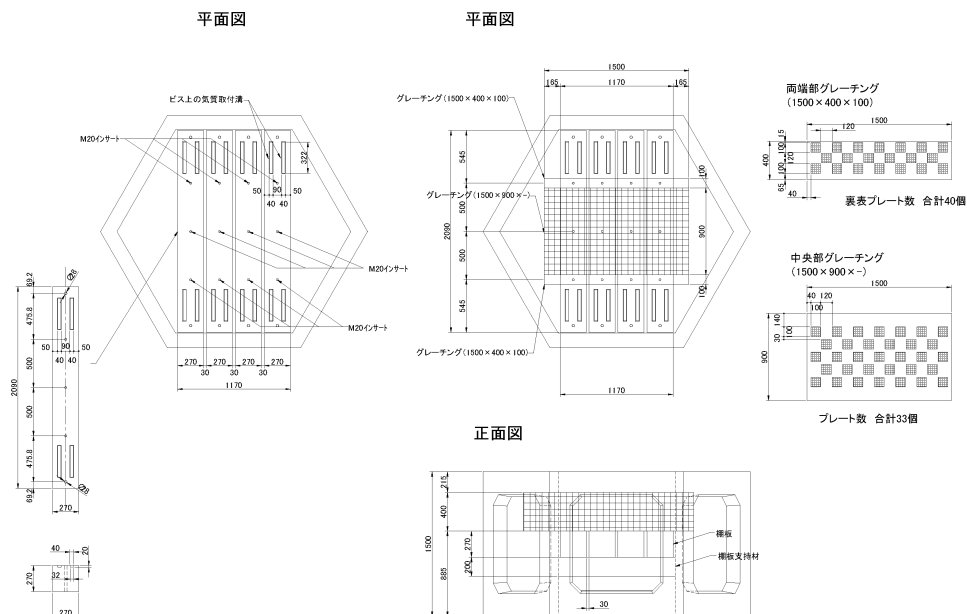
コンクリート製中間育成施設を設置するにあたっては、周辺環境に配慮するとともに、設置後の移植時期を考慮した工程管理が必要である。また、関係省庁への書類の提出や

届出、その他必要な書類の提出が必要となるので、余裕のある施工計画を策定しておくことが望ましい。また、施工方法については、藻場礁等の着定基質の設置を参考にすることができる。ただし、中間育成施設を設置する礁内は、水深が浅く、所々に暗礁が存在することが想定されるため、途中で瀬取り（航路上で水深が浅くて大型の船が入って来られない場合に、小型の船に荷物を移し替えて運搬すること。）を行わざるを得ないことがある。したがって、施工計画では、船団構成、使用する作業機械、人員配置、航路設定などについて入念に行う必要がある。

沖ノ鳥島の事例では、調査で明らかとなったサンゴの生残・育成にとって必要な機能を持つように工夫した中間育成施設（図Ⅱ.2-32）を設置している。



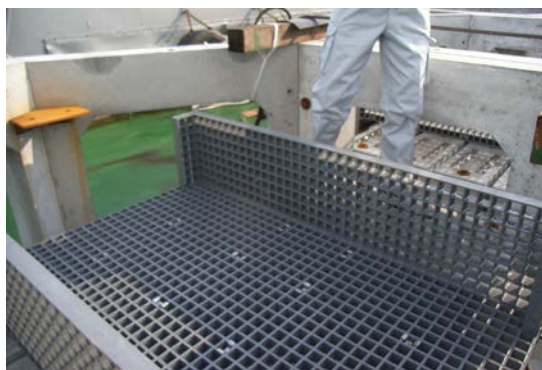
図Ⅱ.2-32 沖ノ鳥島の中間育成施設の姿図と配置図



図Ⅱ.2-33 沖ノ鳥島の中間育成施設の構造図

沖ノ鳥島の間育成施設で工夫した点は下記のとおりである。

- 強い流れに対して自重で安定させる構造とする。
- 移設や増設も可能な組立式とし、部材はボルトで取り付けて水中でも分解が可能な構造とする。
- 植付け面は、通水性および浮泥の堆積防止のため格子構造とする（図Ⅱ.2-34）。
- 砂礫の移動や漂砂の影響を軽減するため、底面から 50cm 以上の高さに植付け面を設ける（図Ⅱ.2-35）。
- 魚類による食害を防止するため、天端部と側面にネットが取り付けられる構造とする（図Ⅱ.2-36）。
- 植え付け作業がしやすいように、ネットの着脱を可能とし内部空間を広く確保する（図Ⅱ.2-37）。



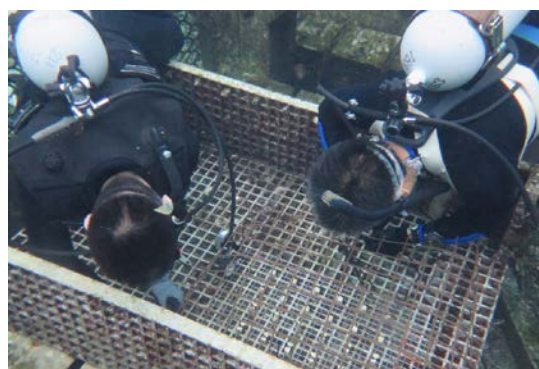
図Ⅱ.2-33 通水性と浮泥堆積防止の格子



図Ⅱ.2-34 高い位置の植付け面



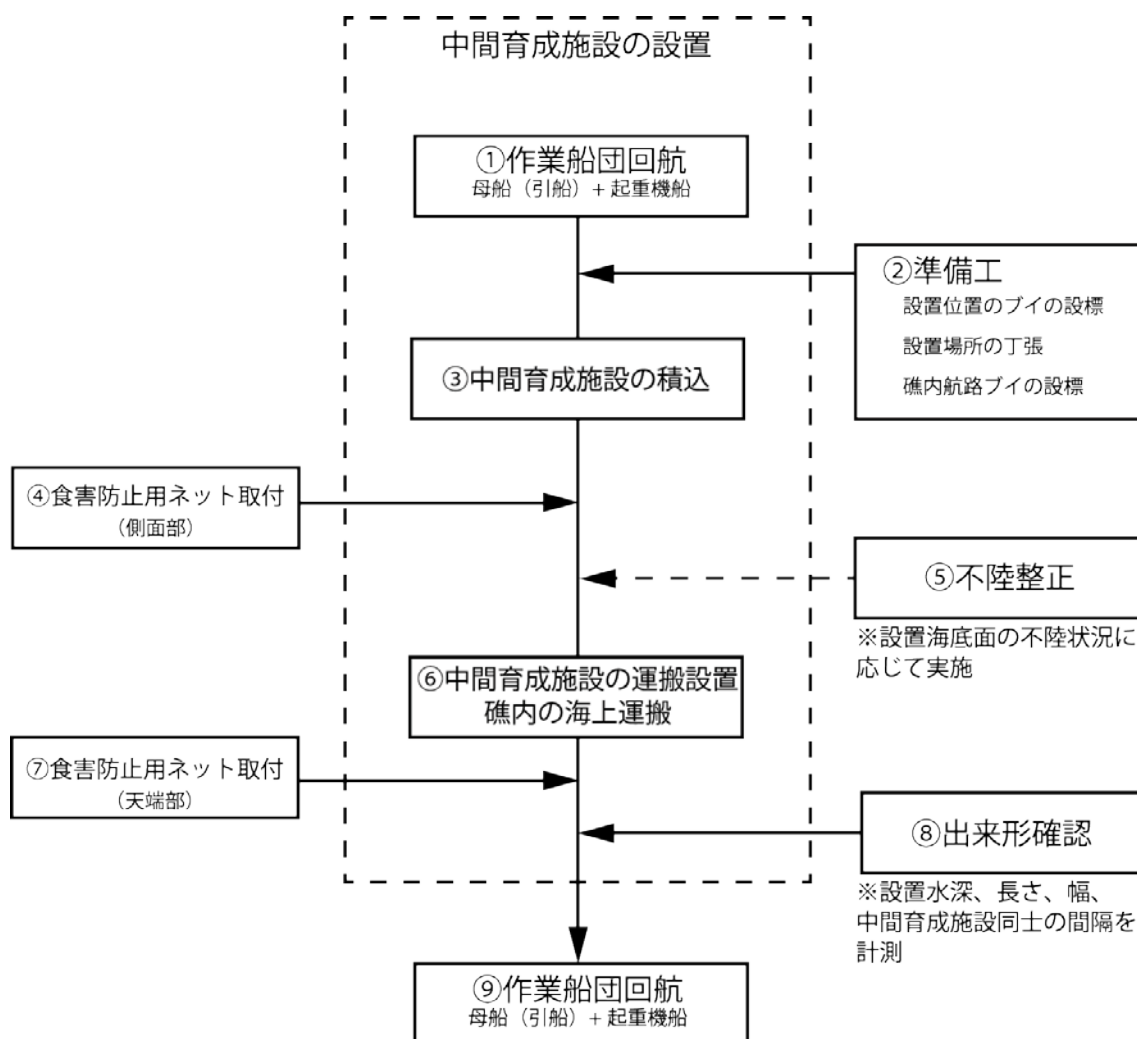
図Ⅱ.2-35 食害防止用ネット



図Ⅱ.2-36 広い内部空間

沖ノ鳥島での施工に関しては、礁内が浅く、所々にノル（凸状地形）が存在することから、喫水の浅い小型の自航式起重機船（260t、1,000PS）を調達し、事前に航路上と設置個所に竹旗を設標した。これにより、起重機船の移動や中間育成施設の設置をスムーズに行うことができる。

施工フローは図Ⅱ.2-38 に示すとおりである。



図Ⅱ.2-38 沖ノ鳥島の中間育成施設の施工フロー



図Ⅱ.2-39 沖ノ鳥島の中間育成施設工事の作業状況

2. 3. 2 サンゴの選別・運搬

種苗生産した稚サンゴを選別し、船上水槽で飼育管理しながら沖ノ鳥島まで運搬し、現地に仮置きして植え付け先の環境に馴致させる。

【解説】

1) 選別

種苗生産した稚サンゴに対して状態の確認を行い、植え付けに使用できる稚サンゴを選別し、大量運搬するための梱包作業を行う。

使用する資材は、使用前に海水で洗い、サビ、破損、汚れ等がないことを確認する。なお、稚サンゴへ悪影響を与える可能性があるため、洗剤の使用は避ける。

梱包前の確認として、目視観察により稚サンゴの状態の確認を行い、観察時に白化や粘液の放出等の状態悪化がみられる稚サンゴを取り除く（図Ⅱ.2-40）。また、付着生物や藻類など、運搬中に稚サンゴに悪影響を与える可能性のある生物をピンセット等で除去する。作業時は、稚サンゴに素手で直接触れて人体の熱がストレスにならないように、手袋を着用するなどして選別作業を行う。

健全な稚サンゴは、通水性のある運搬容器に梱包する。沖ノ鳥島の事例では、梱包用の塩ビ製台座（特注品）に健全な稚サンゴを敷き詰め、メッシュ状のカゴに塩ビ製台座を収納し、結束バンドで固定した（図Ⅱ.2-41）。この方法により、1カゴあたりに稚サンゴ約200個を収容した。



梱包用の資材



稚サンゴの選別

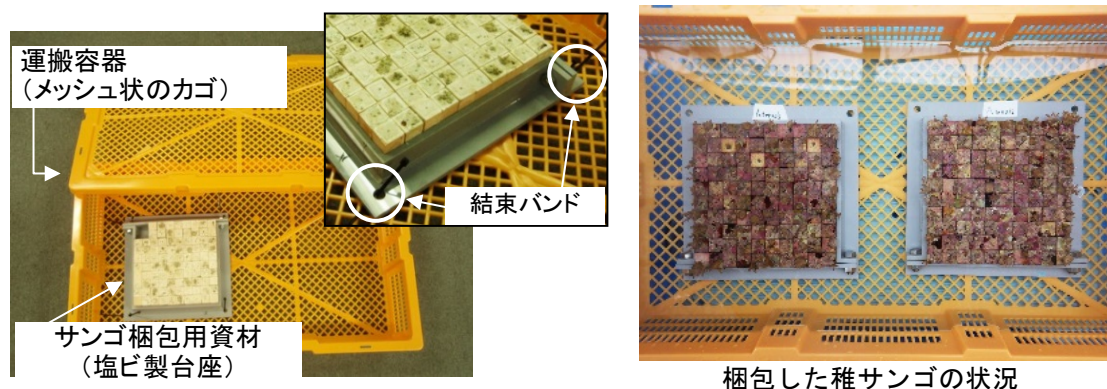


健全な稚サンゴ



不健全な稚サンゴ

図Ⅱ.2-40 稚サンゴの状態確認・選別



図Ⅱ.2-41 稚サンゴの梱包例

稚サンゴの選別・梱包にあたっては、表Ⅱ.2-6 に示す資材・機材を準備し、作業の規模に応じて必要な作業員を配置する。

表Ⅱ.2-6 選別・梱包に必要な資材・機材

項 目	資 材 ・ 機 材
選別	野帳・筆記具、ピンセット、手袋など
梱包	通水性のある運搬容器（蓋付きのメッシュ状カゴ等）、サンゴ梱包用資材（塩ビ製の台座等）、結束バンド、ピンセット、手袋など

2) 運搬

(1) 陸上の種苗生産施設から港までの運搬

梱包した稚サンゴは、発泡スチロール箱等の容器に海水に浸した状態で収容し、大型船舶が停泊する港まで運搬する（図Ⅱ.2-42）。大型船舶上には、稚サンゴ運搬用飼育水槽を準備する（第Ⅱ編.2.1.1 親サンゴの採取を参照）。稚サンゴの船上水槽への収容は、稚サンゴを極力空气中に曝さないようにし、速やかに行う。運搬容器が水槽内で動揺する恐れがある場合は、水槽内に設置した固定用資材に運搬容器を固定する。

沖ノ鳥島の事例では、1回につき最大約6,000個の稚サンゴを運搬した。大型船舶（約500t）には、1t水槽（W845×L1565×H450mm）を4槽設置し、水槽1槽あたり運搬カゴ（200群体/カゴ）を8カゴ収容した。

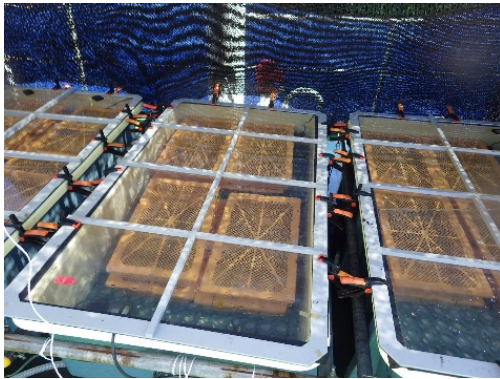


図Ⅱ.2-42 港までの稚サンゴの運搬

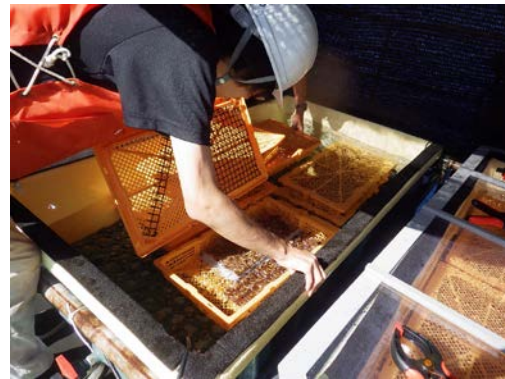
(2) 長距離運搬中における稚サンゴの飼育管理

稚サンゴを大型船舶により沖ノ鳥島まで運搬するには数日を要するため、運搬中は船上水槽で稚サンゴを飼育管理する必要がある（図Ⅱ.2-43）。

稚サンゴの飼育管理方法は、基本的に沖ノ鳥島から沖縄まで親サンゴを運搬する際の飼育管理方法と同様である（第Ⅱ編.2.1.2 親サンゴの運搬を参照）。



船上水槽への収容状況

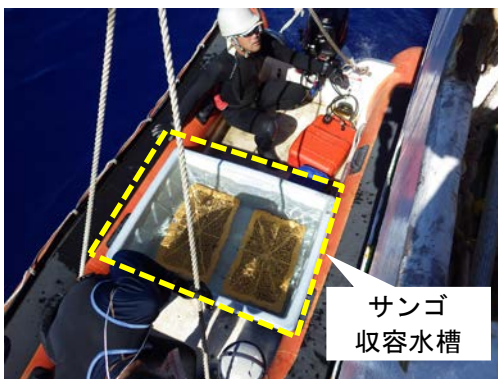


状態確認

図Ⅱ.2-43 稚サンゴの飼育管理

(3) 中間育成施設までの運搬

沖ノ鳥島に到着後、船上水槽から小型船舶に稚サンゴを積替え、中間育成施設まで運搬する（図Ⅱ.2-44）。小型船舶での運搬中は、稚サンゴは海水に浸した状態にして、遮光ネット等で遮光し、運搬が長距離の場合はバケツで適宜散水や海水交換を行う。



小型船舶への稚サンゴ積み込み



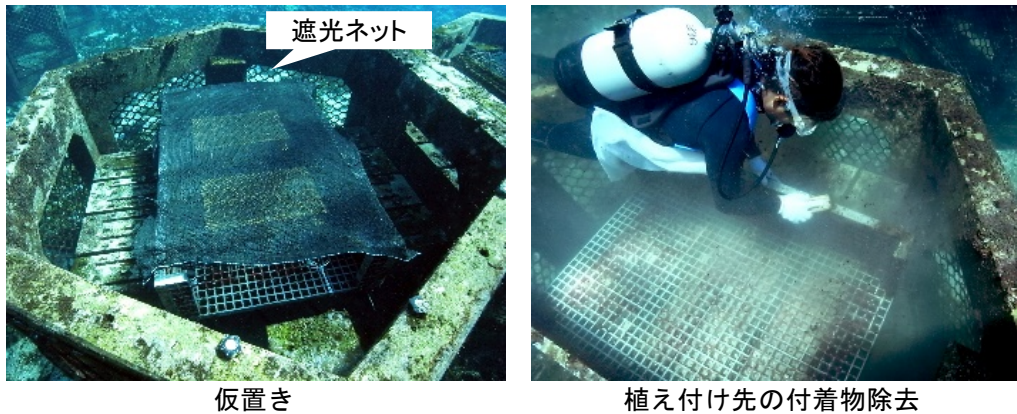
小型船舶での稚サンゴ運搬

図Ⅱ.2-44 稚サンゴの中間育成施設までの運搬

(4) 仮置き

効率的に作業を進めるため、稚サンゴは運搬後に中間育成施設内で仮置きする。仮置き中は、稚サンゴの運搬容器は波浪等の外力により転倒・移動しないようにロープで固縛し、強光の場合は遮光ネットを取り付けて遮光する（図Ⅱ.2-45 左）。

稚サンゴの仮置き中に、植え付け先の海藻等の付着物を、ブラシ等を用いて除去する（図Ⅱ.2-45 右）。



図Ⅱ.2-45 稚サンゴの仮置きと付着物除去

稚サンゴの運搬にあたっては、表Ⅱ.2-7に示す資材・機材を準備し、作業の規模に応じて必要な作業員を配置する。

表Ⅱ.2-7 運搬に必要な資材・機材

項 目	資 材 ・ 機 材
陸上の種苗生産施設から港までの運搬	サンゴ収容容器（発泡スチロール箱等）、運搬車など
長距離運搬中における稚サンゴの飼育管理	水槽、水槽用の透明蓋、クッションテープ（防水性）、蓋留め用クリップ、サンゴ固定用資材（水槽内の底敷き）、結束バンド、単管やぐら、遮光ネット、撒水ホース、揚水ポンプ、揚水ポンプ用ホース、流水ポンプ、水温計、野帳・筆記具、水産用薬剤（ニフルスチレン酸ナトリウム）、スポイト、手袋など
中間育成施設までの運搬	小型船舶、潜水器材、サンゴ収容水槽、遮光ネット、バケツなど
仮置き	ロープ、遮光ネットなど
付着物除去	ブラシ、ワイヤーブラシ、スクレーパーなど

2. 3. 3 サンゴの植え付け

稚サンゴを中間育成施設へ植え付ける際は、様々な成育阻害要因の影響を低減するための植え付け方法で行い、作業時に稚サンゴにストレスを与えないように留意する。

【解説】

稚サンゴは仮置き後、中間育成施設への植え付けを実施する。

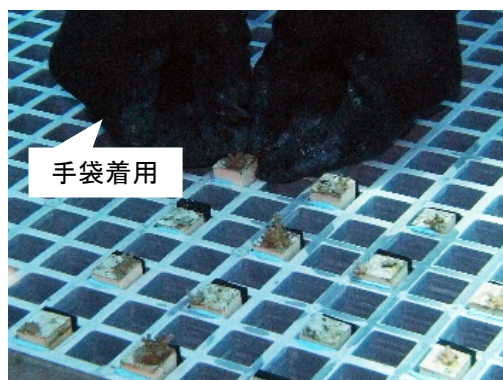
稚サンゴの植え付け場所は、付着物除去を行った中間育成施設の格子構造部とする。

稚サンゴの植え付け方法は、堆積物の影響低減のため、稚サンゴの着生面が海底面に対して垂直方向になるように植え付ける。また、高波浪による消失を防ぐため、植え付けには水中エポキシ樹脂接着剤を使用する。

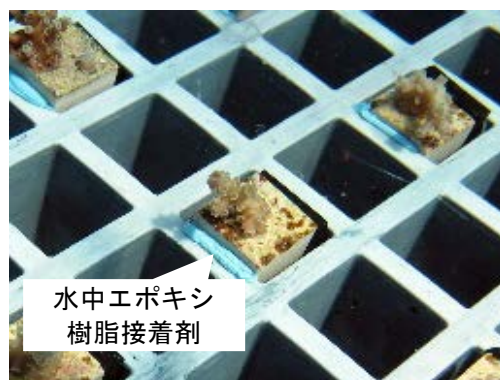
植え付けた稚サンゴには、食害防止ネットを取り付ける。ネットの目合いは、サンゴを齧る大型魚類の侵入を防ぎ、かつ付着物による目詰まりを起こさない6cmとする。

植え付け作業にあたっての主な留意点を以下に示す。

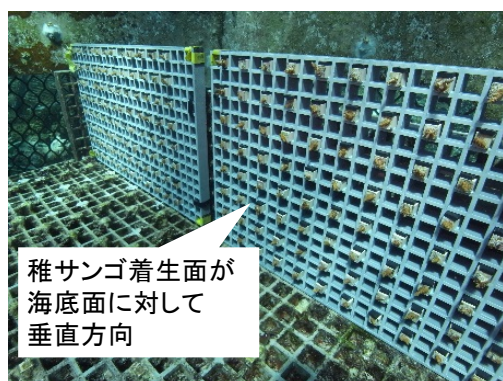
- 植え付け時に稚サンゴの状態確認を行い、白化等の状態悪化がみられる稚サンゴを取り除く。
- 作業時には、稚サンゴを素手で直接触れないように、手袋を着用する。
- 水中エポキシ樹脂接着剤を取り扱う際には、接着剤を可能な限り稚サンゴに付着させないように留意する。



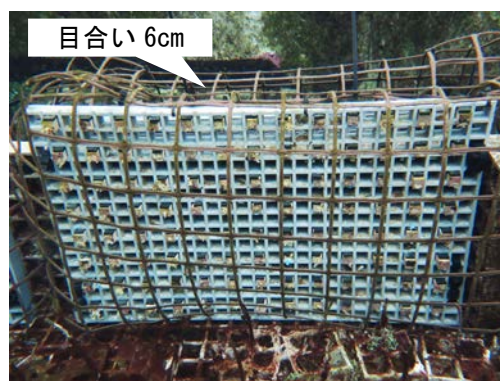
植え付け作業



植え付けした稚サンゴ（近景）



植え付けした稚サンゴ（遠景）



食害防止ネット

図Ⅱ.2-46 稚サンゴの植え付け

沖ノ鳥島の事例では、稚サンゴ付着床具（1.5cm×1.5cm×3.0cm）を、片側にゴム板を挿し込み、もう片側は水中エポキシ樹脂接着剤で補強して、2cm マスの格子にはめ込むようにして固定した。このように固定すると、移植時にサンゴを取り外しやすいという利点がある。また、水中エポキシ樹脂接着剤は主剤と硬化剤の2つを海中で混合することで使用できるものであるため、混合が容易なガン式接着剤充填機（特注品、図Ⅱ.2-47）を使用することで効率よく植え付けを行うことができ、作業効率は約 200 個/人日であった。



図Ⅱ.2-47 ガン式接着剤充填機

稚サンゴの植え付けにあたっては、表Ⅱ.2-8 に示す資材・機材を準備し、作業の規模に応じて必要な作業員を配置する。

表Ⅱ.2-8 植え付けに必要な資材・機材

項 目	資 材 ・ 機 材
稚サンゴの 植え付け	手袋、水中エポキシ樹脂接着剤など
食害防止ネットの 取り付け	食害防止ネット（目合い6cm）、結束バンドなど

2. 3. 4 育成管理

中間育成施設へ植え付けた稚サンゴに対し、定期的にモニタリングを行い、サンゴの生残・成長状況や、サンゴに影響する周辺環境の変化を把握する頻繁な管理が難しい場合は、機器観測等による方法が有用である。問題が確認された場合は、必要に応じて育成管理を行い適切に対応する。

【解説】

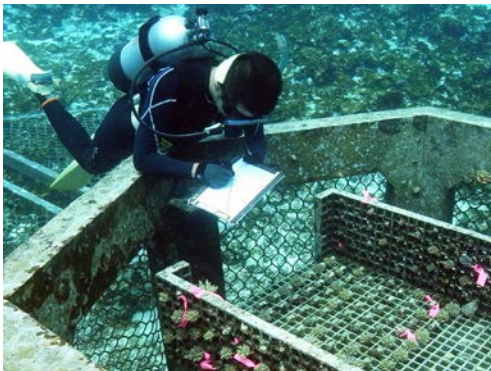
1) モニタリング

(1) 中間育成施設内のモニタリング

中間育成施設へ植え付けたサンゴに関するモニタリング項目は、表Ⅱ.2-9に示すとおりである。これらの状況を経年的に確認し、どのような環境条件で、生残率や成長率が向上するかを確認し、以降の植え付け手法等に反映させることが重要である。

植え付けしたサンゴの本数が多い場合は、全数を把握するのに多大な労力を必要とするため、全数の一部をモニタリング対象に設定する。

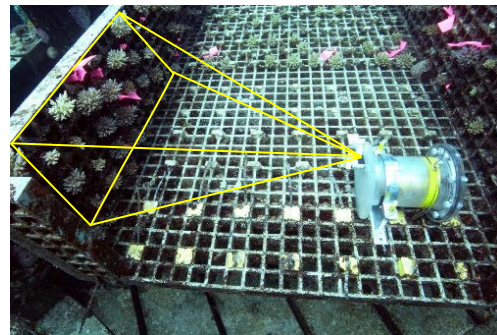
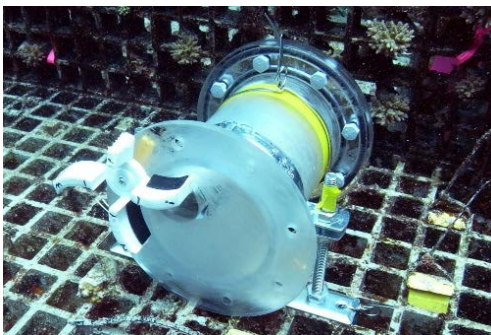
沖ノ鳥島では頻繁な管理が難しいため、サンゴや周辺状況をより詳しく把握したい場合は、機器等を用いて調査期間外に観測・観察ができる方法を用いるとよい。例えば、小型メモリ式水温計を用いて中間育成場所の水温の連続観測を行う方法（図Ⅱ.2-49）や、インターバルカメラによるサンゴの長期連続撮影により植え付けたサンゴの死亡・消失時期や成育阻害要因の概略を把握する方法（図Ⅱ.2-50、詳細はコラムを参照）がある。



図Ⅱ.2-48 サンゴのモニタリング



図Ⅱ.2-49 メモリ式水温計の設置



図Ⅱ.2-50 長期インターバルカメラによるサンゴの連続撮影

表Ⅱ.2-9 植え付けたサンゴのモニタリング項目

項目・内容		方法
①生存・死亡状態の観察（群体の生残状況の把握）		
a．生存	群体全体が生存している	目視観察
b．部分死亡	群体のうち、一部分が生存している（観察時に可能な範囲でその程度を把握することが望ましい。）	
c．全部分死亡	白化して骨格のみ、骨格が消失	
②成育状態の観察（群体の健全度の把握）		
a．健全	正常な外観色、粘液なし、触手を伸長	目視観察
b．弱っている	外観色が薄い、粘液あり、群体の一部に藻類の付着あり	
c．死亡	＊) 生存・死亡状況の死亡と同等	
③群体サイズの計測（成長量の把握）		
a．長径	生きた部分の長さ	簡易計測
b．面積	生きた部分の被度・面積	目視観察、画像解析※
④食害状況の観察（食害防止ネットの効果の確認）		
a．魚類	骨格が齧られた、折られた痕跡	目視観察
b．貝類	共肉部が消失した痕跡、周辺に貝類確認	
c．ヒトデ類	同上	
⑤藻類の被覆状況の観察（競合生物からの保護対策の検討）		
a．被覆なし	藻類被覆なし	目視観察
b．部分被覆	一部分が被覆されている（観察時に可能な範囲でその程度を把握することが望ましい。）	
c．全部分被覆	全被覆	
⑥観測（成育環境の把握）		
a．水温	水温変動（特に夏季の高水温期）の確認	機器連続観測

※成長量の把握は、サンゴの成長に問題がないか即時に把握するため、基本的には現場で確認可能な目視観察や簡易計測を行うとよい（画像解析について、第Ⅲ編技術ノート1 中間育成中のサンゴの成長面積の簡易算定手法を参照）。

モニタリングにより確認された課題は、得られたデータをもとに、植え付けや育成管理の手法に対し必要に応じて改善を加えていく。

改善にあたっては、以下に示す内容について検討する。

- 植え付けたサンゴの種類と生残率・成長量の関係
- 食害状況（食害防止ネットの効果）と生残率・成長量の関係
- 藻類の被覆状況と生残率・成長量の関係
- 水温変動と生残率・成長量の関係

(2) 周辺海域のモニタリング

周辺海域の天然サンゴの増減等の生息状況の変化を把握することにより、植え付けたサンゴの生残・成長の変化が、植え付け手法によるものか、周辺環境の変化によるものかを判断する。

周辺海域の天然サンゴの増減等の生息状況や水温等の生息環境の変化を把握する調査としては、サンゴの分布調査や環境調査を実施するとよい。具体的なモニタリング項目は表Ⅱ.2-10に示すとおりである（第Ⅰ編 2.2 現況把握を参照）。

調査方法については潜水目視観察が一般的であるが、衛星画像や航空写真、水中ビデオの画像解析による方法で代替することも可能である。サンゴの種類、食害、環境要素に関する調査は、可能な限り熟練したダイバーによる潜水目視観察や水温連続観測により行う。

これらの調査結果より、対照区とした海域のサンゴの分布状況や生息環境の変化の有無を確認する。

表Ⅱ.2-10 周辺海域のモニタリング項目

環境要素等	確認項目	調査方法
サンゴの 生息状況	天然サンゴの被度・種類 食害状況の推移	潜水目視観察 画像解析※
水温	場所や水深別の経時的な水温変化 水温データから経年的な DHW の推移	水温連続観測
気象・海象	台風の経路・勢力 波浪・流況	気象庁観測データ、 波浪・流況観測
食害動物	サンゴ礁内の食害動物の種・個体数の推移	潜水目視観察
競合生物	サンゴと競合する海藻類の被度の推移	潜水目視観察、 画像解析※

※サンゴの被度や競合する海藻類の被度について、写真やビデオ撮影から把握することも可能である（画像解析については、第Ⅲ編 技術ノート3 水中ビデオ画像によるサンゴ自動判読手法を参照）。

2) 植え付けたサンゴの育成管理

沖ノ鳥島においては、頻繁な育成管理の実施が難しいため、植え付けたサンゴの種類、水温の変動、食害防止ネットの適切な目合いに関しては、モニタリング結果より植え付けたサンゴの生残率・成長量との関係を解析して、次の植え付けや育成管理までに対策を検討することで順応的に管理する。

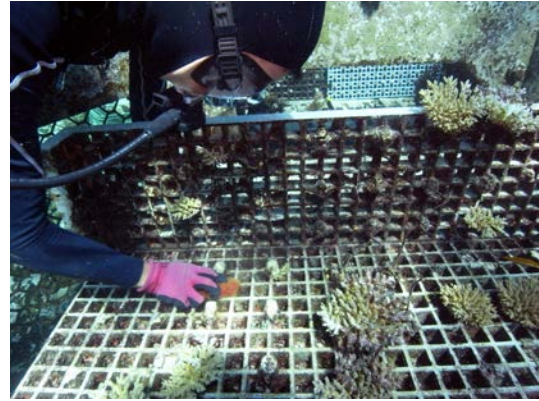
ここでは、モニタリング時に現場で対応できる管理について示す。

(1) 死亡サンゴの除去

サンゴは死亡して腐敗すると、周囲の水質悪化や病気の蔓延等を招く恐れがあるため、死亡したサンゴは必ず除去する。群体の一部に状態悪化や死亡がみられる場合は、その一部の枝状骨格を折るなどしてできるだけ除去することが望ましい。

(2) 付着生物の除去

サンゴやその周辺が海藻などの付着物に覆われている場合は、サンゴを傷つけないようにブラシやピンセット等で確実に除去する（図Ⅱ.2-51）。



図Ⅱ.2-51 植え付けたサンゴ周辺の付着物除去

(3) 食害防止ネットの点検

サンゴの食害が確認され、取り付けした食害防止ネットの破損や消失が確認された場合は、ネットを交換もしくは修繕・補強する。

稚サンゴの育成管理にあたっては、表Ⅱ.2-11 に示す資材・機材を準備し、作業の規模に応じて必要な作業員を配置する。

表Ⅱ.2-11 植え付けたサンゴの育成管理に必要な資材・機材

項 目	資 材 ・ 機 材
付着生物の除去	ブラシ、スクレーパー、ピンセットなど
食害防止の点検	取替え用の食害防止ネット（目合い6cm）、結束バンドなど
死亡サンゴの除去	タガネ、ハンマーなど

【コラム】長期インターバルカメラを用いた移植サンゴの解析

長期インターバルカメラ（図1）を用いることにより、サンゴについて経時的な変化を確認し、生残率の低下時期の把握と、サンゴの死亡と環境因子との関係についての推察が可能になった。

従来のサンゴの現況調査や移植サンゴのモニタリングでは、年に数回程度のスポット的な調査が行われるが、沖ノ鳥島のような遠隔地では頻繁なモニタリングの実施が難しいため、詳細なサンゴの死滅・消失時期や原因が特定できず、的確な対応策が検討できない場合が多い。そこで、連続撮影が可能な長期インターバルカメラを用いて、1時間間隔で1年間、沖ノ鳥島に植え付けたサンゴを撮影し、撮影画像から生残・成長過程について解析を試みた。

撮影の結果、サンゴの枝状骨格が開始後2ヶ月間に徐々に消失していく過程を確認し（図2、図4）、同期間中にサンゴ周辺を遊泳する中型魚類を多数確認した。そのほか、期間中は高水温を記録しており、勢力の強い台風の通過もみられた（図3）。

サンゴはストレス下で粘液放出量を増加させるため（中嶋・田中 2014）、撮影対象のサンゴは高水温や台風の影響でストレスを受けて衰弱したことで粘液放出量を増加させ、粘液に誘引された魚類の食害を受けたものと推察している。

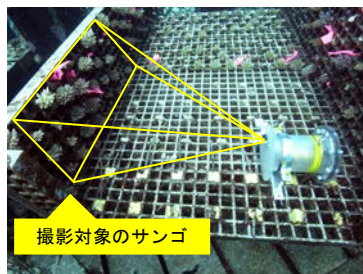
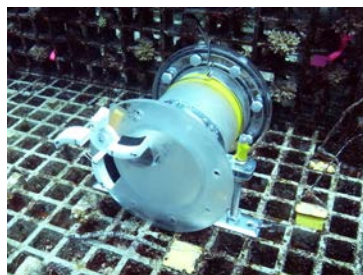


図1 長期インターバルカメラ設置状況

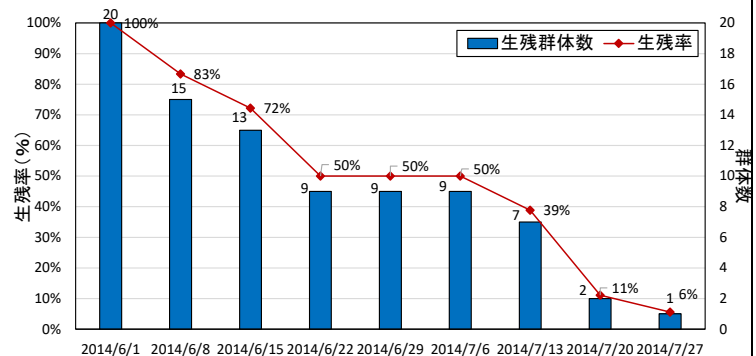


図2 サンゴの2ヶ月間の週別生残率と生残群体数

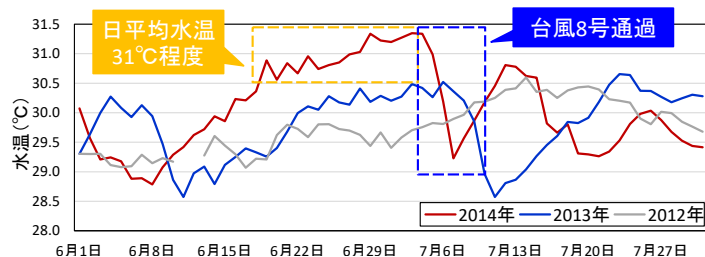


図3 2ヶ月間の水温変動（3ヶ年分の比較）

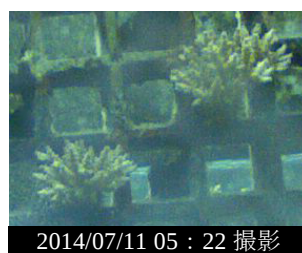


図4 撮影画像例（左：全景 右：枝状骨格の消失時）

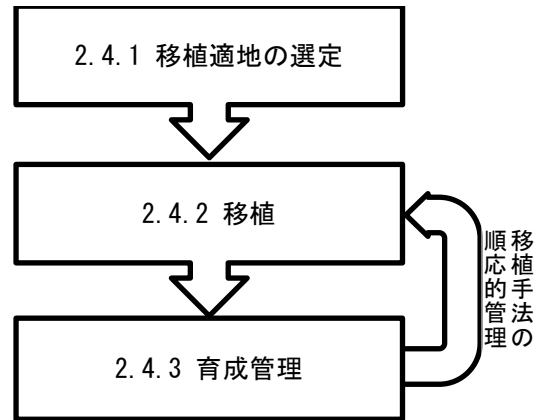
2. 4 移植

移植適地を選定した上で、中間育成施設内で育てたサンゴを移植する。また、移植したサンゴの成長や生残率を高めるため、定期的に育成管理を行う。

【解説】

サンゴ面的増殖技術の移植は、移植場所がサンゴの育成に適した場所であること、移植したサンゴが産卵し、幼生が広範囲のサンゴ礁に着生してサンゴ礁の修復・再生につながることを求められる。そのため、サンゴの移植適地を現地調査や可能な範囲で数値シミュレーション技術を活用して選定する。

また、移植後は、サンゴが産卵可能なサイズに成長するまでを目安にモニタリングを行い、移植したサンゴの成長と育成環境、作業効率等を把握し、課題や改善点がある場合には、順応的に移植方法の見直すなどの対応を行う。さらに、モニタリング時に可能な範囲で藻類除去等の定期的なメンテナンスを行い、移植したサンゴの育成管理を行う。これらの移植作業のフローは、図Ⅱ.2-52に示すとおりである。



図Ⅱ.2-52 移植の作業フロー

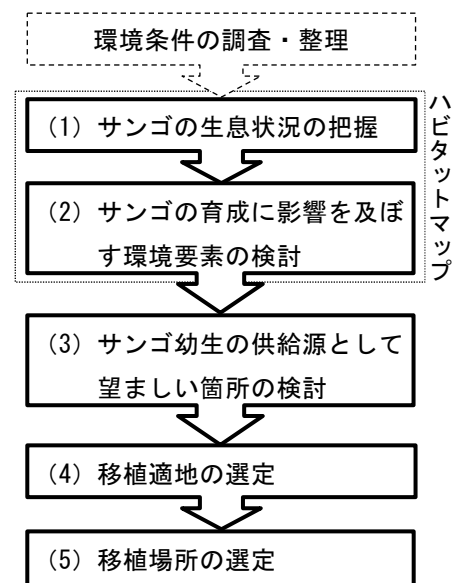
2. 4. 1 移植適地の選定

移植するサンゴが、健全な状態で成長するとともに、その後産卵によって幼生が広範囲のサンゴ礁に着生し、サンゴ礁の修復・再生につながる場所を適地として選定する。

【解説】

サンゴの育成適地の選定は、図Ⅱ.2-53のフローにより行う。

(1)～(3)の工程における調査・検討にあたっては、表Ⅱ.2-12に関する項目を調査しておく必要がある。



図Ⅱ.2-53 移植適地選定フロー

表Ⅱ.2-12 遠隔離島におけるサンゴの適地選定に関する調査・解析項目

環境条件	調査・解析項目
(1) サンゴの生息状況の把握	
サンゴ分布	サンゴ被度
サンゴ種類	代表地点※の主なサンゴ種類
(2) サンゴの育成に影響を及ぼす環境要素の検討	
地形・基盤	サンゴ礁内の水深及び基盤の状況
水温	代表地点における水温
波浪・流況や砂礫の移動	サンゴ礁内の波浪・流況状況や砂礫の移動
食害動物	サンゴ礁内の食害動物（オニヒトデ、貝類、魚類）の状況
(3) サンゴ幼生の供給源として望ましい箇所を検討	
サンゴ供給源	流況や拡散の状況から発生したサンゴ幼生が、サンゴ礁外への流出よりもサンゴ礁内により多く着生できる箇所

(1) サンゴの生息状況の把握

サンゴ分布は、対象海域のサンゴ被度を整理する。また、サンゴ種類については、代表地点※の主なサンゴ種類を把握する。

サンゴの生息状況から、対象海域の中で被度が比較的高い場所や低い場所の位置と、移植対象種が分布する場所を確認する必要がある。

サンゴ被度の把握にあたっては潜水目視観察やマンタ法、ROV 調査が一般的であるが、衛星画像や航空写真の画像解析により広域のサンゴ被度を把握する手法（片山ほか 2014）（第Ⅲ編 技術ノート2 衛星画像によるサンゴ被度分析解析手法を参照）で代替することも可能である。

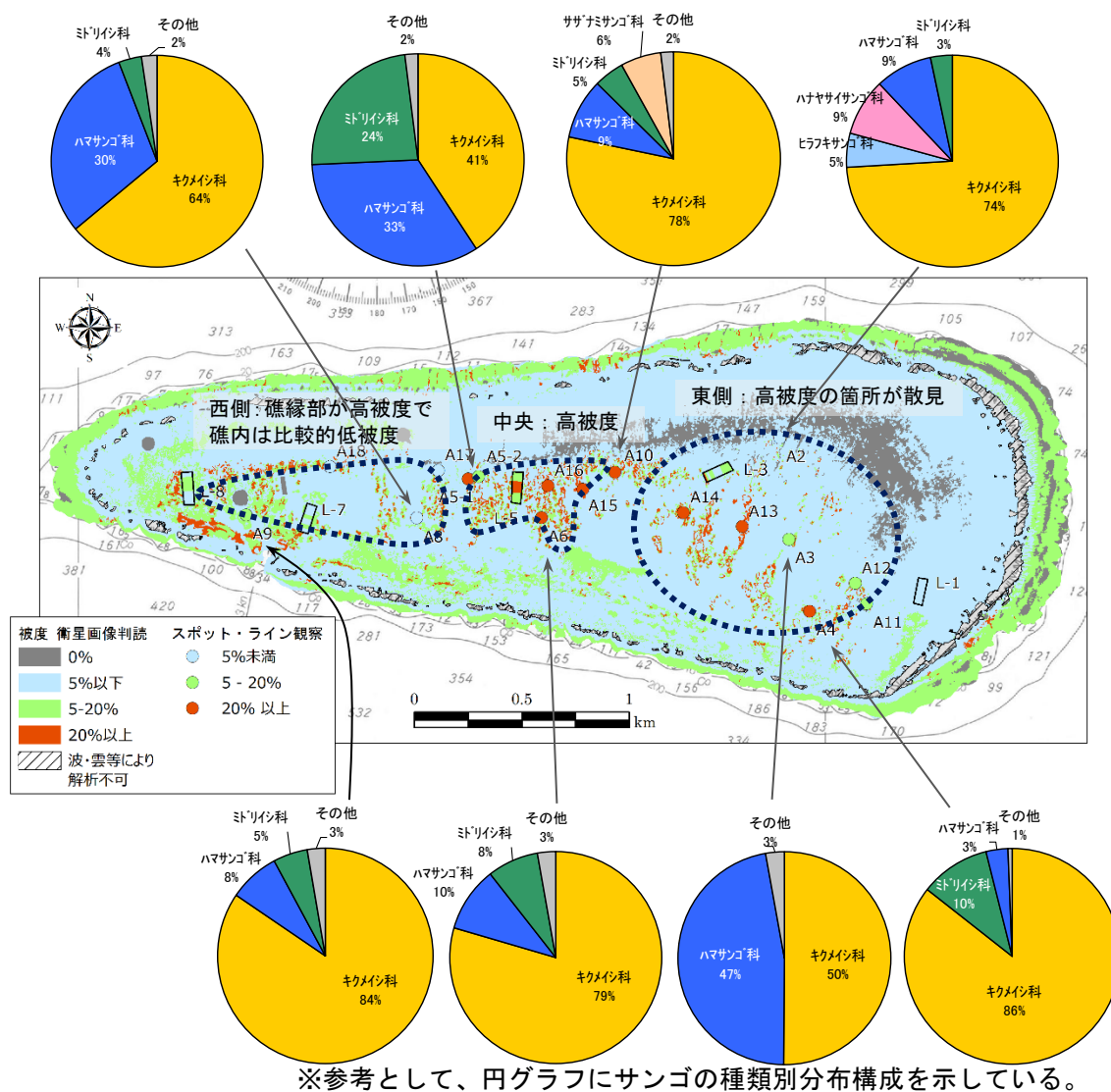
画像解析による手法は、詳細な地形情報等が得られないものの、サンゴ被度を面的に把握することが可能である。さらに、古い年代の画像を解析することにより、サンゴ分布の変遷を把握することも可能である。

潜水目視観測による手法は、熟練ダイバーが、潜水調査によりベルトトランセクト調査、またはスポットのコドラート調査を複数地点で実施する手法がある（第Ⅰ編 2.3 現況把握を参照）。潜水調査は、未測領域が生じるものの、調査箇所については、サンゴの被度、サンゴ種類、食害の有無、海藻類の繁茂状況等の情報を詳細に取得することが可能である。

以前はサンゴが高密度で分布していた場所で、分布したサンゴが移植対象種である場合、サンゴ分布が衰退した要因を解決できれば、移植適地となる可能性が高い。よって、サンゴ分布や生息種に関する過去の潜水目視観察結果や地元漁業者等のヒアリング情報、衛星画像解析による分布域の変遷を解析することで、移植適地や移植種を検討する上で有効な情報を得ることができる。

沖ノ鳥島の事例では、衛星画像解析と潜水目視観察を実施し、図Ⅱ.2-54 に示すとおり、サンゴ被度は、礁内中央部で20%を超える高被度となっており、次いで礁内東側が高被度となっている。本事業の移植対照であるミドリイシ属は、礁内中央部に多く、礁内西側、東側も分布していることを確認している。

※代表地点は、対象海域の広さ、サンゴ分布を参考に、サンゴが多い箇所・少ない箇所、海域の調査地点の偏りが極端にならない箇所を数地点設定する。代表地点は、後述するサンゴの育成に影響を及ぼす環境要素の特性やその違いに応じて、地点数を設定する。



図Ⅱ.2-54 衛星画像解析と潜水調査より作成したサンゴ分布図（沖ノ鳥島）

（基図に海上保安庁 海図 W49 使用）

表Ⅱ.2-13 サンゴ被度の目安

	被度 0%		被度 <5%		被度 5～25%
	サンゴは 無い		サンゴは 極くまばら		サンゴはま ばら

	被度 25～50%		被度 50～75%		被度 >75%
	サンゴより海底面の方が多い		海底面よりサンゴの方が多い		海底面がほとんど見えない

(2) サンゴの育成に影響を及ぼす環境要素の検討

遠隔離島において検討する必要があるサンゴの育成に影響を及ぼす環境要素の調査方法と絞り込みの考え方について解説する。

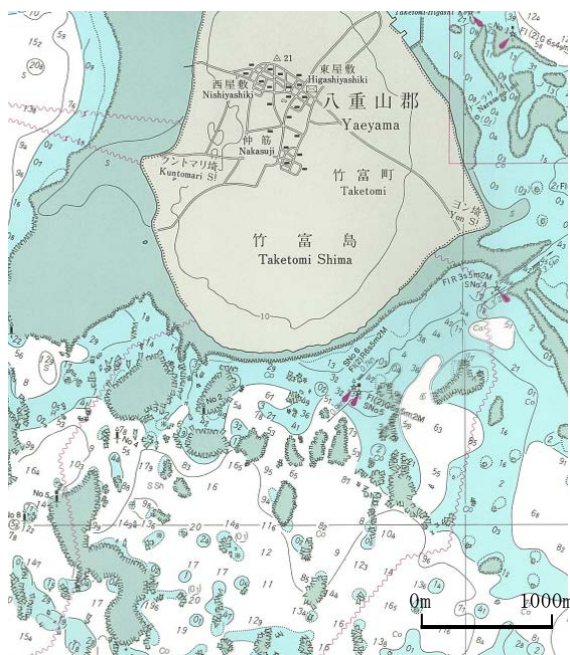
① 地形

地形は、サンゴ礁内の水深について把握する。

取得したデータから、対象海域におけるサンゴの移植が可能な基盤と、移植対象サンゴの好適水深帯の有無を把握する。

水深は、一般的に、日本水路協会発行の海図やその他機関の水深図等の既存資料を入手して利用する。沖縄沿岸では、縮尺の大きな海図も存在し、基盤の分布も把握できるため利用可能である。既存資料が存在しない場合には深淺測量や航空写真測量、航空レーザー測量等のリモートセンシング技術による計測を行う（図Ⅱ.2-55 参照）。

適地の判断については、移植可能な水深と基盤の有無から判断するが、ミドリイシ属のサンゴは、砂礫の移動や濁りの影響、水温や光量の影響を受けやすいため、移植基盤は、現地のサンゴ分布水深を確認の上、砂礫移動の影響を受けにくい高さを有し、かつ、水温や光量の影響を低減できる低潮時の海水面下から 1m 以下の水深を有する箇所を選択することが望ましい。



縮尺の大きな海図の事例
(海上保安庁 海図 W1285 使用)



リモートセンシングにより詳細な地形を
把握した事例

図Ⅱ.2-55 地形の把握を行う図面の事例

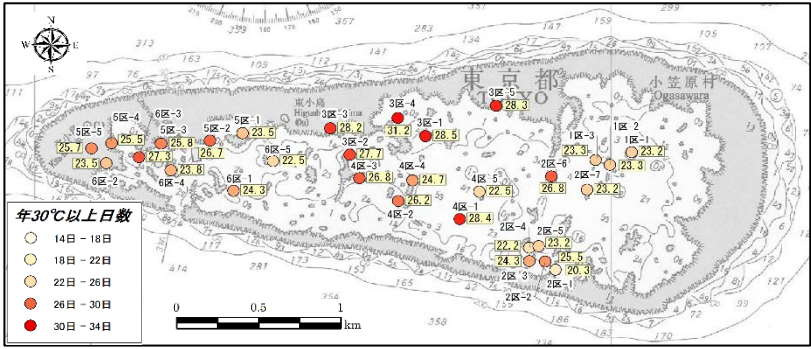
② 水温

サンゴは海水温が 30℃を超える状態が数週間続くと白化現象を起こす等、水温が育成状況に影響を与えることから、水温情報は必要である。対象海域で天然サンゴが健全に生育している水温を把握し、移植条件の判断材料とする。

水温は、高水温になる時期を中心に対象海域の代表地点で、水深別に水温連続観測を実施する。

高水温による白化現象の指標値として、NOAA（米国海洋大気庁）が、衛星によって得られた海面水温データから、白化の警告予報値（DHW）を提案している（【コラム】白化指標としての DHW（週積算高水温）の評価を参照）。

沖ノ鳥島の事例では、礁内中央から西側で 30℃を上回る頻度が高い地点が多く、水深別では表層が底層より高温であることを確認した（図Ⅱ.2-56）。



図Ⅱ.2-56 沖ノ鳥島における水温分布の例
(2007～2013 年の水温 30℃を超えた日数の年平均値)
(基図に海上保安庁 海図 W49 使用)

③波浪・流況と砂礫の移動

波浪・流況と砂礫の移動は、代表地点の潜水目視観察による海底面の観察から砂礫の移動を推察する手法や、代表地点の波浪・流況観測や面的な数値シミュレーション結果から、波高や流速、シーلز数^(注)等を把握することにより確認する。これらからサンゴに破損・ストレスを与える条件や、サンゴの生息に適した条件を検討することができる。

サンゴを破損する波浪・流況やそれに伴う砂礫の移動を把握するためには、まず、潜水士により直接海底の状況を把握する簡易の手法が挙げられる。現地の海底面がなめらかな場合は、砂礫移動が高頻度に発生し海底面を削っている可能性が考えられる。

次に、高波浪時の代表地点における波浪・流況の現地観測結果から波浪・流況を把握するか、可能な範囲で現地観測結果と数値シミュレーションを用いて面的な波浪場を推算し、波浪・流況を把握する方法がある。

沖ノ鳥島の事例では、これらの結果から最大流速やシーلز数を把握し、サンゴを破損する波浪・流況やそれに伴う砂礫の移動の程度を確認した。サンゴへの影響の程度は、現地のサンゴ被度に対する最大流速やシーلز数の分布の関係を相対的に確認して適正な場所を判断した。以下に、波浪場の数値シミュレーション手法（表Ⅱ.2-14）とシーلز数の計算方法について示す。

注：シーلز数：土砂移動のし易さを表す無次元パラメータであり、本来サンゴ礫の移動を表すものではないが、サンゴ礫は土砂と類似した移動をするものとして、シーلز数を指標として用いた。

表Ⅱ.2-14 波浪場の数値シミュレーション手法の例

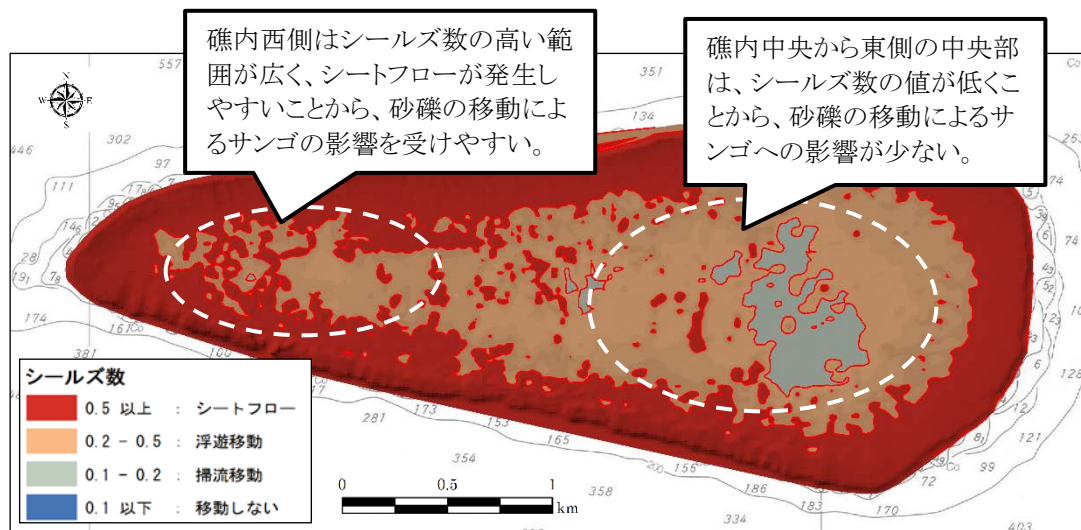
概要	必要データ	再現性	考慮する条件
対象海域の特性によりモデルを選定する。エネルギー平衡方程式による波浪場の予測が一般的。	地形（日本水路協会発行の海図やその他機関の水深図）、沖波（気象庁 GPV データ、現地観測結果）	波浪の現地観測結果との比較等により確認。	サンゴを破損する波浪条件では、高波浪時の波浪条件を利用する。 サンゴの生息に適した波浪条件では、平常時（通年の有義波エネルギー平均等）の波浪条件を利用する。

注）GPV データ：Grid Point Value データ

$$\text{シーلز数} : \phi = \frac{\tau_b}{\rho R g D} \quad \begin{array}{ll} \tau_b : \text{底面せん断力} & \rho : \text{海水密度} \\ g : \text{重力加速度} & R : \text{底質の水中比重} \\ & D : \text{底質の粒径} \end{array}$$

一般的に、シーلز数（ ϕ ）と底質移動の関係は、以下の傾向が見られる。
 $\phi < 0.1$: 移動しない、 $0.1 < \phi < 0.2$: 掃流移動、 $0.2 < \phi < 0.5$: 浮遊移動、 $0.5 < \phi$: シートフロー

沖ノ鳥島の事例では、1年確率波におけるシーلز数の分布状況は、図Ⅱ.2-57に示すとおりである。礁嶺部や礁内西側は、砂礫移動による影響が特に大きい可能性が考えられる。



図Ⅱ.2-57 沖ノ鳥島における砂礫の移動（シーلز数）の影響分布図の事例

計算条件：1年確率波（沖波 5～7m）、底質粒径 1mm

（基図に海上保安庁 海図 W49 使用）

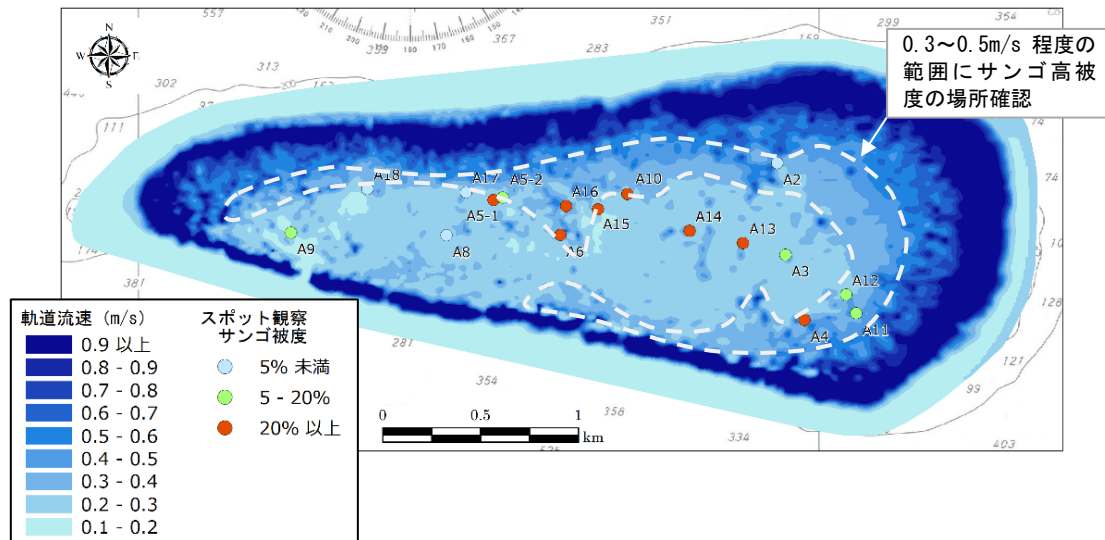
なお、サンゴの生息に適した波浪・流況を把握するためには、平常時の代表地点における現地観測結果から流速を把握するか、又は現地観測結果と数値シミュレーションを用いて面的な流動場や波浪場を推算し流速を把握する方法がある。沖ノ鳥島の事例では、文献（青田ほか 2004、新保ほか 2013）を踏まえて、これらの結果から平均流や軌道流速※を把握し、サンゴの生息状況との関係から、サンゴの生息に適した波浪・流況の分布域を補足的に判断している。以下に、軌道流速の計算方法を示す。

※軌道流速：波により発生する水中の往復流

$$\text{軌道流速} : u = \frac{\pi H}{T \sinh(2\pi k h / L)} \quad \begin{array}{lll} H : \text{波高} & T : \text{周期} & h : \text{水深} \\ k : \text{波数} (2\pi/L) & L : \text{波長} & \end{array}$$

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

沖ノ鳥島の事例では、有義波エネルギー平均の軌道流速の分布状況とサンゴ分布を重ね合わせると、軌道流速が 0.3～0.5m/s を呈する範囲にサンゴが高被度で分布し、0.5m/s 以上の礁縁部や、0.3m/s 以下の礁内東側中央部では、サンゴ被度は比較的低下する傾向がうかがえる（図Ⅱ.2-58）。



図Ⅱ.2-58 沖ノ鳥島における水深1mの流速分布図の事例

計算条件：軌道流速（有義波エネルギー平均）

（基図に海上保安庁 海図 W49 使用）

④食害動物

移植適地の選定に際しては、サンゴに影響を与えるオニヒトデや魚類等の分布と天然サンゴの食害状況を把握することが必要である。

潜水目視観察により、代表地点の天然サンゴの食害状況を把握し、移植条件の判断材料とする。

サンゴに影響を与える代表的な食害動物は、表Ⅱ.2-15 に示すとおりであり、オニヒトデ、シロレイシガイダマシ属、ブダイ類などが挙げられる。

沖ノ鳥島では、オニヒトデやシロレイシガイダマシ属等の魚類以外の食害動物の分布は確認されなかった。一方、ブダイ等のサンゴをかじる種や、チョウチョウウオ科の分布は偏り無く広く確認されたため、移植時の食害防止対策を実施することとした。

なお、沖ノ鳥島での移植後のビデオ撮影では、ハクセイハギが移植サンゴをかじっている様子が撮影されている。

表Ⅱ.2-15 代表的なサンゴに影響を与える魚類やその他動物

和名	サンゴ影響	和名	サンゴ影響
魚類		イソギンポ科	
チョウチョウウオ科		セダカギンポ	サンゴ食
イッテンチョウチョウウオ	サンゴ食	ブダイ科	
ウミズキチョウチョウウオ	サンゴ食	アミメブダイ	かじる種
スミツキトノサマダイ	サンゴ食	カンムリブダイ	かじる種、サンゴ食
トノサマダイ	サンゴ食	ブダイ類	かじる種
ハナグロチョウチョウウオ	サンゴ食	モンガラカワハギ科	
ミカドチョウチョウウオ	サンゴ食	ゴマモンガラ	かじる種
ミスジチョウチョウウオ	サンゴ食	クマドリ	かじる種、サンゴ食
ミナミハタテダイ	サンゴ食	キヘリモンガラ	かじる種
ヤリカタギ	サンゴ食	カワハギ科	
アケボノチョウチョウウオ	サンゴ食	ハクセイハギ	かじる種、サンゴ食
アミチョウチョウウオ	サンゴ食	アミウマツラハギ	かじる種、サンゴ食
ゴマチョウチョウウオ	サンゴ食	テングカワハギ	サンゴ食
スダレチョウチョウウオ	サンゴ食	ニザダイ科	
セグロチョウチョウウオ	サンゴ食	ニセカンランハギ	かじる種
チョウチョウウオ	サンゴ食	モンツキハギ	かじる種
トゲチョウチョウウオ	サンゴ食	クログチニザ	かじる種
フウライチョウチョウウオ	サンゴ食	サザナミハギ	かじる種
ミゾレチョウチョウウオ	サンゴ食	フグ科	
スズメダイ科		サザナミフグ	かじる種、サンゴ食
アツクチスズメダイ	サンゴ食	ミソレフグ	かじる種、サンゴ食
インガキスズメダイ	サンゴ食	コクテンフグ	かじる種、サンゴ食
ルリメシガキスズメダイ	サンゴ食	ワモンフグ	かじる種、サンゴ食
インダイ科		モヨウフグ	かじる種、サンゴ食
インガキダイ	かじる種	ゴマフキンチャクフグ	かじる種、サンゴ食
ベラ科		その他食害動物	
カンムリベラ	かじる種	オニヒトデ	サンゴ食
クロベラ	サンゴ食	シロレイシガイダマシ属	サンゴ食
大型ベラ類	かじる種	ヒメシロレイシガイダマシ	サンゴ食
ハゼ科		トゲレイシガイダマシ	サンゴ食
コバンハゼ	サンゴ食		

注) かじる種とは、岩礁の藻類等を食べる行動の中で、サンゴもかじり取ることが知られている種である。

出典：岩尾（2010）、神田（1996）、西平（1995）

(3) サンゴ幼生の供給源として望ましい箇所の検討

サンゴ幼生の供給源として望ましい箇所の検討においては、対象海域にサンゴ幼生が止まる率が高くなる場所を選定する。

選定は、移植したサンゴがその後産卵し、幼生がどのように流れて分散し対流するか数値シミュレーションを用い予測する。その方法は、表Ⅱ.2-16 に示す流動モデルにより海域の流動を再現した上で、オイラー・ラグランジュ法に乱数を用いて拡散効果を考慮した幼生拡散モデルで幼生の移動を予測する手法を用いる。

予測条件は以下のものが参考にできる。

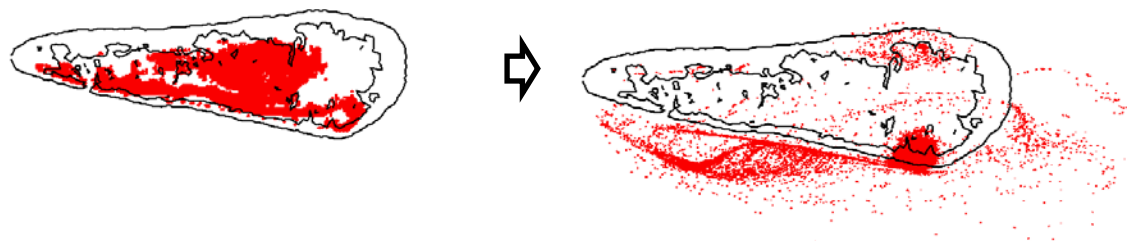
- 計算 0 日目の幼生（仮想粒子の初期配置）は、サンゴが分布する場所から放出する。
- 幼生が着底行動を起こす 4～5 日目の間の対象海域内に存在する幼生を確認する。

表Ⅱ.2-16 サンゴ幼生の流れる方向を試算する方法の例

モデル	概要	必要データ	再現性	考慮する条件
流動モデル	対象海域の特性によりモデルを選定する。潮汐流、海流、波浪流、吹送流等を加味したモデルが一般的。	地形（日本水路協会発行の海図やその他機関の水深図）、風況（気象庁アメダス、現地観測結果）、潮位（気象庁、現地観測結果）	潮流調査に基づく潮流楕円や JCOPE データ等との比較等により確認。	移植対象種の産卵時期に合わせた流動条件とする。 <i>Acropora tenuis</i> であれば、5～6月頃の風況条件を考慮する。
幼生拡散モデル	オイラー・ラグランジュ法に乱数を用いて拡散の効果を考慮した手法。幼生が着底行動を起こす期間までを経時的に追跡することができる。	海底基質の分布情報（日本水路協会発行の海図や現地調査結果等）、サンゴの被度、サンゴ幼生の大きさ、密度条件	幼生の移動調査、幼生加入量調査による。	放卵放精型サンゴは、産卵後数日間浮遊後、プラヌラ幼生となり着底するため、モデルでは、着底行動を起こす期間の位置を確認する。 プラヌラ幼生を放出する保育型の場合は、産卵直後から位置を確認する。

注) JCOPE : Japan Coastal Predictability Experiment

沖ノ鳥島の事例では、図Ⅱ.2-59 に示すとおり、礁内東側から発生する幼生ほど礁内に残る可能性が高いと予測されている。吹送流や潮流の影響により、ほとんどの幼生が礁外へ流出するが、一部の幼生が礁内東側を中心に残留することが窺える。また、このような計算では、海域で代表される海流や吹送流の異なる複数の条件を考慮して、幼生の残留状況を確認している（白木ほか 2014）。

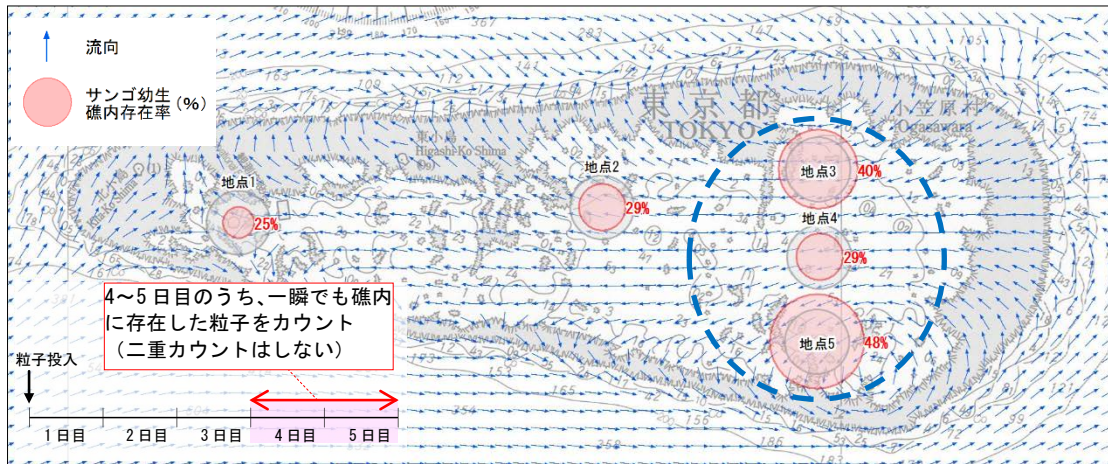


計算 0 日目：サンゴの分布上に
仮想粒子（幼生）を配置

計算 4 日目：仮想粒子（幼生）の分布状況

図Ⅱ.2-59 幼生拡散モデルの計算事例（沖ノ鳥島）

また、図Ⅱ.2-60は、礁内5地点から幼生を放出・拡散させた場合の地点別におけるサンゴ幼生の礁内存在率をピンクの円で示したものである。この結果から、青点線で示す礁内東側から幼生を放出させるほど、幼生が礁内に留まる可能性が期待できることから、サンゴ幼生の供給源としては東側が適地であることが窺える。



図Ⅱ.2-60 沖ノ島における各地点の産卵4~5日目に礁内に存在する幼生の割合

(基図に海上保安庁 海図W49使用)

(4) 移植適地の選定

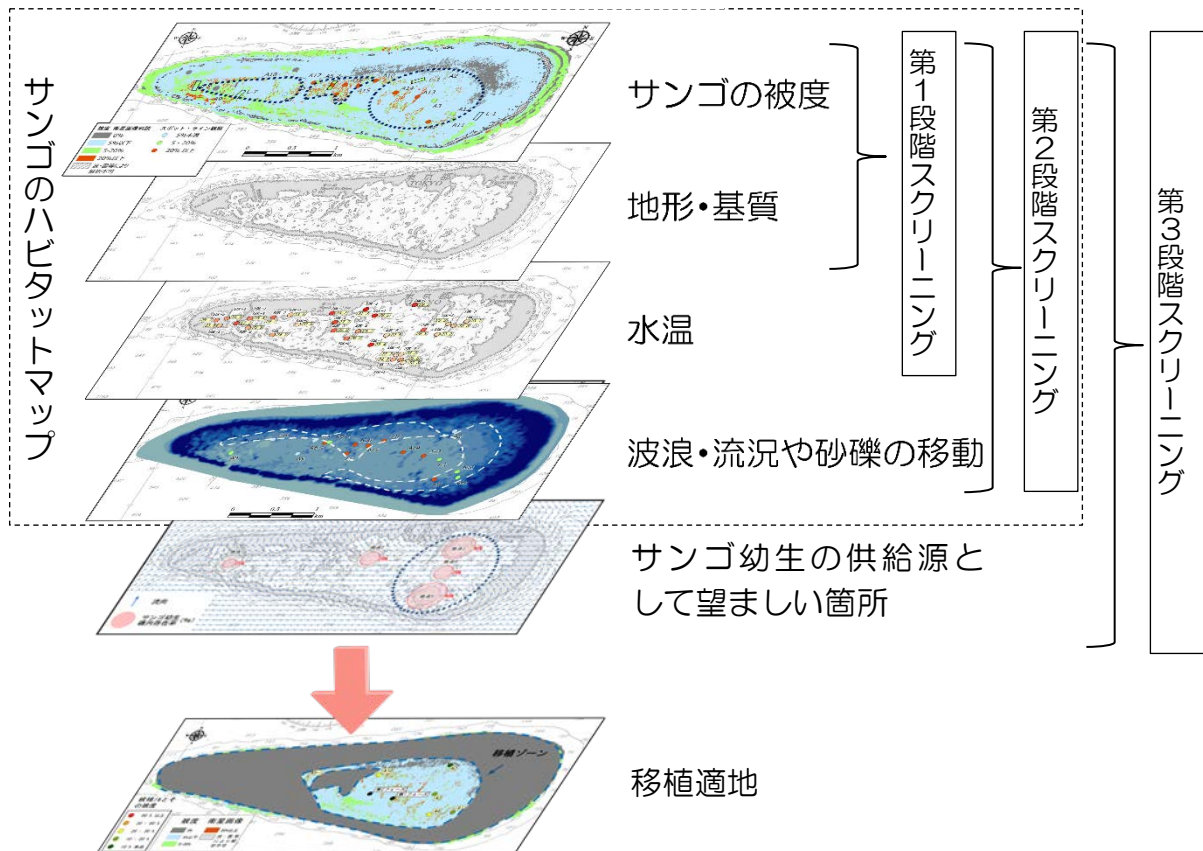
移植適地は、対象海域の特性や移植の目的を踏まえ、環境要素の適否を総合的に勘案しながらスクリーニングし選定する。特に、サンゴの増殖においては、「サンゴの生息状況」、「サンゴの育成に影響を及ぼす環境要素」、「サンゴ幼生の供給源として望ましい箇所」を考慮して移植適地（ゾーン）を絞り込むことが望ましい。

図Ⅱ.2-61の沖ノ島島の事例では、第1段階のスクリーニングとして、「サンゴ分布」と「地形・基盤」を考慮した。ここで、サンゴが比較的高被度で、移植に適した基盤と水深帯が多い地点を絞り込んだ。その結果、礁内中央のサンゴ被度が最も高く基盤も多く、次いで、東側のサンゴ被度が高く、基盤も散在していた。よって、礁内中央から東側に絞り込んだ。

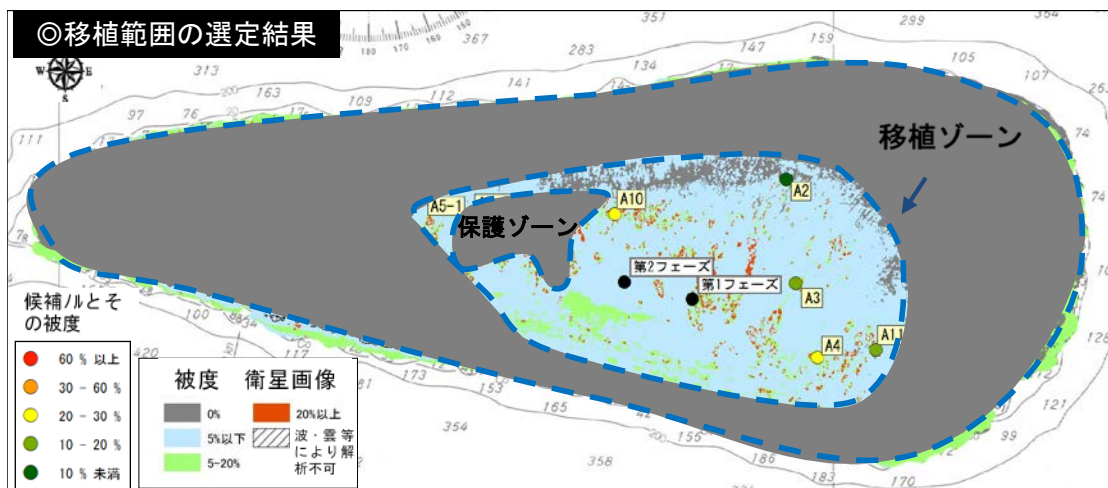
第2段階のスクリーニングとして、上記で絞り込んだゾーンに、「水温」、「波浪・流況や砂礫の移動」、「食害動物」等の環境要素を必要に応じて考慮した。なお、「サンゴ分布」と「サンゴの育成に適した環境要素」を考慮した図面は、サンゴのハビタットマップと言われている。砂礫の移動は、前述のシールズ数から礁嶺部と礁内西側においてサンゴへの影響が大きいことが示唆され、サンゴの育成に適した波浪・流況も礁内中央～東側に比較的に広く分布していた。よって、第2段階のスクリーニングも礁内の中央～東側となった。

第3段階のスクリーニングとして、上記で絞り込んだゾーンに、「サンゴ幼生の供給源として望ましい箇所」の条件を用いて絞り込んだ。これにより、サンゴの育成が可能で、移植後の再生産も期待できる移植適地が絞り込まれる。サンゴ幼生の供給源としては、礁内東側から発生する幼生が礁内に留まる可能性が高いため、移植適地としては、礁内中央から東側と定めた。ただし、礁内中央の一部は、移植しなくても自然にサンゴの生息・再生産が期待されるゾーンと判断し、サンゴを保護するゾーンとした（図Ⅱ.2-62）。

スクリーニング



図Ⅱ.2-61 移植適地の絞り込み概念図



図Ⅱ.2-62 移植適地選定結果（沖ノ島島）（片山ほか、2014）

（基図に海上保安庁 海図 W49 使用）

(5) 移植場所の選定

移植場所の選定は、移植適地の選定において絞り込んだ海域（範囲）より、実際に移植可能な移植場所と移植可能な面積を検討する。

移植を行う基盤の選定では、サンゴ被度分布と基盤の有無を考慮しながら移植場所候補を抽出する。その上で、その移植場所候補に対して、現地調査を実施し、具体的な情報を取得する。移植場所の選定の考え方は以下に示す通りである。

- 移植可能なスペースが存在する基盤を選定する。（2）①地形・基質で述べたように、砂礫移動の影響を受ける海底面直上と低潮時の海面直下（海面から1m）はサンゴの移植に適さないため、その範囲を除外した部分で移植スペースを確保する必要がある。また、他の付着生物が多く分布していない場所であれば移植面積を多く確保できる（図Ⅱ.2-63）。なお、遠隔離島の沖ノ鳥島では海底面から1m以下は、砂礫の移動が大きな箇所として移植をしていない。
- 天然サンゴの被度が極端に低い場所や、対象種が生息していない場所は避ける。これにより、移植サンゴの生残も期待できる。

沖ノ鳥島の事例では実証試験における小規模な移植であったことから、移植可能面積は以下の方法で概算した。

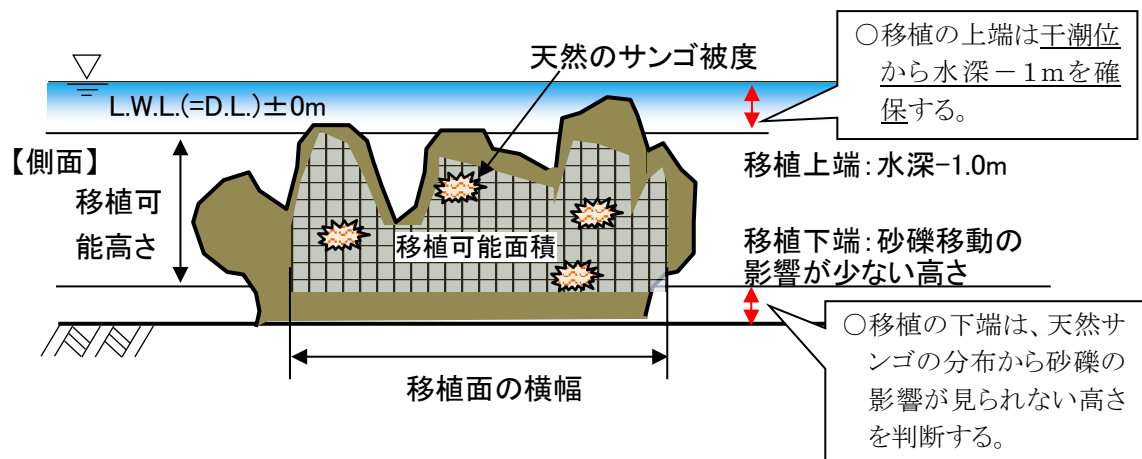
$$\text{移植可能面積} = \text{移植面の横幅} \times \text{移植可能高さ} \times (1 - \text{天然サンゴの被度}/100)$$

現地調査では、移植場所において潜水土による潜水目視観察を行うことが望ましが、場合によっては水中ビデオ画像によるサンゴ自動判読（第Ⅲ編 技術ノート3 水中ビデオ画像によるサンゴ自動判読手法を参照）により具体的な情報を得ることもできる。観察項目は表Ⅱ.2-17に示すとおりである。

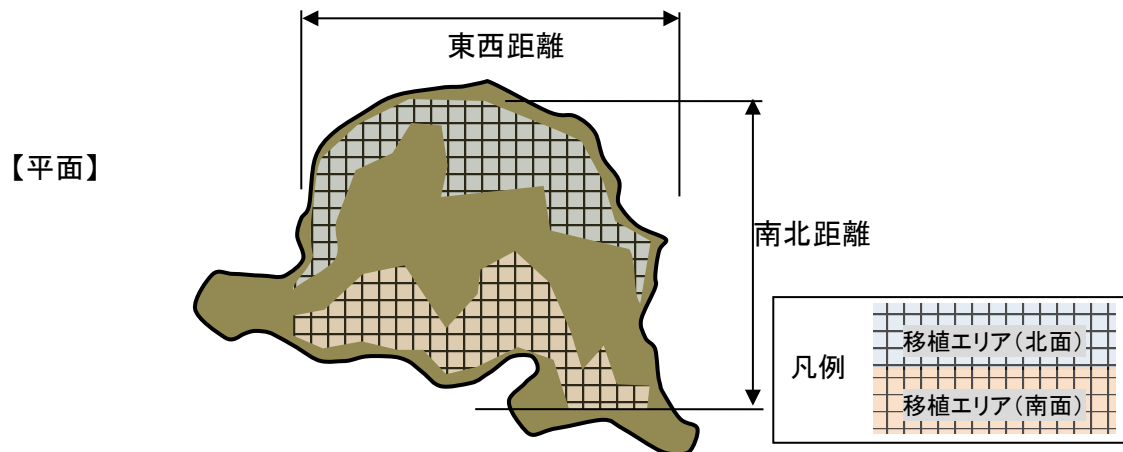
表Ⅱ.2-17 移植場所の選定に関する調査項目

項目	概要	調査方法
移植基盤の諸元	位置、水深、基盤の形状	潜水目視観察（水中ビデオ判読でも可）
サンゴやその他生物	サンゴの被度、群体数、白化の状況、海藻や食害動物の状況	

沖ノ鳥島の事例では、ノル（凸状地形）全体のサンゴ被度が10～20%で、東西・南北の長さが約10～50m、高さが3～4.5mの3箇所のノル（凸状地形）を移植場所として選定した。



移植可能面積＝移植面の横幅×移植可能高さ×（1－天然サンゴの被度/100）



図Ⅱ.2-63 移植場所選定のイメージ

2. 4. 2 移植

中間育成施設で育てたサンゴから移植に適したサイズまで育成したサンゴを取外し、移植場所へ運搬し、植え付けを行う。

【解説】

1) 中間育成施設からの取外し

中間育成施設からの取り外しは、移植するサンゴの「(1)移植サンゴ選定・目印付け」を行った上で、「(2)移植サンゴの取外し及び運搬」を行う。

表Ⅱ.2-18 中間育成施設からの取外しに必要な資材・機材リスト

項 目	資 材 ・ 機 材
移植サンゴの選定・目印付け	水中カメラ、野帳・筆記具、目印リボン
移植サンゴの取外し	手袋、スクレーパー、ハンマー、運搬容器、結束バンド
運搬	コンテナ容器、遮光ネット、散水用バケツ、ブラシ

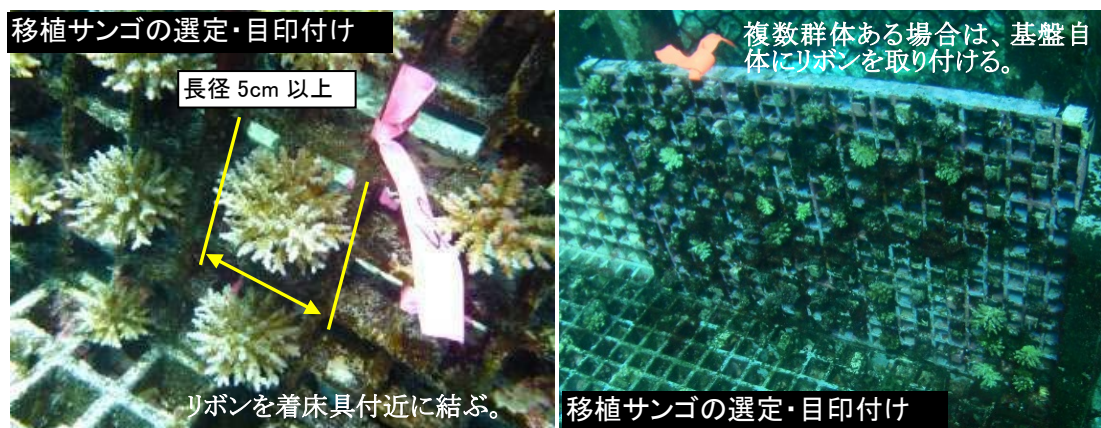
(1) 移植サンゴの選定・目印付け

移植サンゴは群体長径が 5cm 以上で白化等をしていない健全なサンゴを選定し、移植目標のサンゴ群体数の有無を確認した上で、移植サンゴに目印（リボン等）を取り付ける。

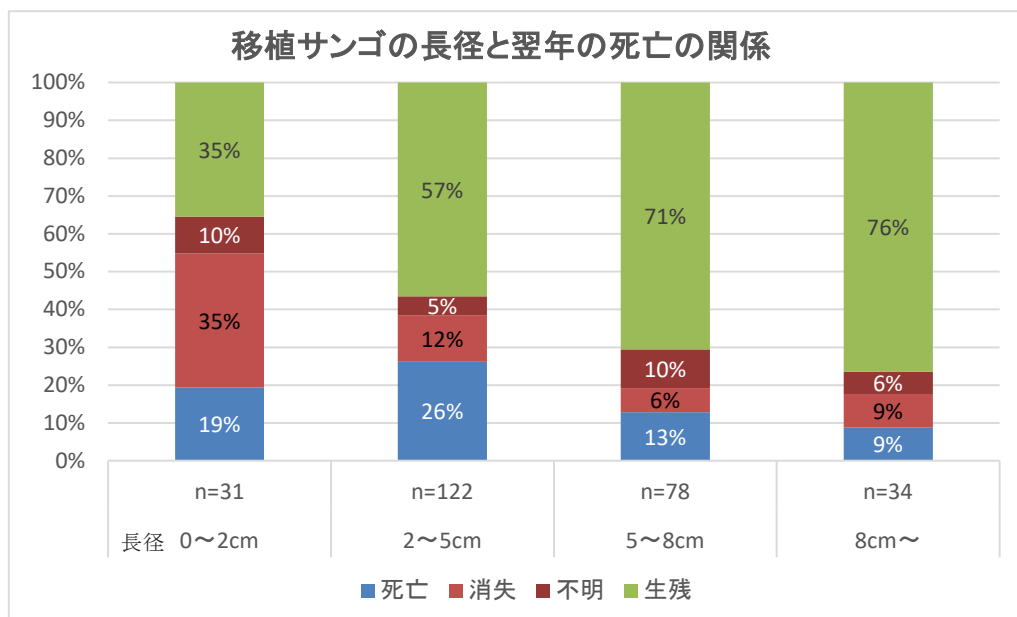
移植サンゴの選定・目印付けの作業に際しては、移植サンゴが中間育成施設の何処に何群体あるか野帳に記録しておく事により、移植サンゴの取り外し作業を効率的に行うことができる。

沖ノ鳥島の事例では、移植サンゴの選定・目印付け作業を、約 250 群体/人日の作業効率で実施している。

また、沖ノ鳥島では、5cm 以上のサンゴを移植することで、1 年後の生残が 70%以上に維持されている（図Ⅱ.2-65）。



図Ⅱ.2-64 移植サンゴの選定・目印付け作業状況



図Ⅱ.2-65 移植サンゴの長径と翌年の死亡の関係（沖ノ鳥島の事例）

(2) 移植サンゴの取外し及び運搬

中間育成施設から移植サンゴを着床具とともに取外し、運搬を行う（図Ⅱ.2-66）。

試験基盤に固定されているサンゴは、試験基盤からスクレーパー等の工具を用いて着床具ごと取外し、運搬容器に固定する。着床具ごと取外したサンゴは、運搬時にサンゴ群体の転倒や破損を防ぐため、緩衝剤を敷いた運搬容器等に固定する。

次に、ボートに海水を満たしたコンテナ容器を準備し、サンゴ群体を固定した運搬容器をコンテナ容器に浸漬させる。船上に引き上げた容器や基盤は、水温上昇を避ける遮光ネットで覆い、散水しながら可能な限り短時間で運搬し、移植場所に到着後速やかに海底に仮置きする。

移植サンゴの取外し及び運搬時の留意事項は以下に示すとおりである。

- 取外しに際しては、体温の伝達によるサンゴへのストレス低減のため、手袋を必ず着用する。
- 作業は細心の注意を払って実施するものとし、サンゴ群体の落下や破損を防ぐよう 2 名体制を基本とする。
- 着床具取外しにおける工具による衝撃は、群体にストレスを与えるので、衝撃や大きな損傷を与えないよう注意する。
- 移植サンゴの入った運搬容器をボートに上げてから、移植場所へと移動するまでの時間を極力短くし、サンゴへのストレスを最低限に抑える必要がある。



沖ノ鳥島の事例では、移植サンゴの取外し及び運搬作業を、約 420 群体/人日の作業効率で実施している。

2) 植え付け

サンゴ群体の植え付けは、表Ⅱ.2-19 の事項について現状確認を行った上で、植え付け作業に移行する。

表Ⅱ.2-19 現状確認を行う項目

確認項目	確認内容
地形、底質等の物理環境	・ 台風等高波浪やそれに伴う砂礫移動により大規模な地形変化やサンゴの破壊が生じている可能性があるため、選定時の地形、底質性状との変化の有無
基盤競合種	・ サンゴ育成の阻害要因となりうる海藻等の繁茂の有無 ・ 新たに加入した天然サンゴの有無
食害対象種	・ サンゴ食性魚類やオニヒトデ等の捕食圧の有無 (食害対象種は表Ⅱ.2-15 を参照)

植え付けは、スクレーパー等により藻類等の付着物を除去した後の岩盤露出面に行う。

植え付けを行う水深は、高水温による白化リスクが高まる海面直下や高波浪時の砂礫等の移動によるサンゴの破壊のリスクが高まる海底面直上を避け、海面下 1m～砂礫移動の影響を受けない高さより上の範囲に行う。

植え付け間隔は、サンゴ群体が成長後、産卵時の受精率を高めるために、再生産可能となる移植 3～4 年後に、同種のサンゴ群体が 1m² 当たり 1 群体以上生残し、かつ、成長しても移植サンゴ同士が重なり合わない距離に移植する。沖ノ鳥島で移植した *Acropora tenuis* は、長径 30cm 前後まで成長する群体が多いことから、1m² 当たり 5 群体前後の密度を目安とするのが良いものと考えられる。

着床具の固定は、水中エポキシ樹脂接着剤により行う。固定時は出来るだけサンゴの一部が移植基盤に接触するように固定し、成長して基盤にサンゴが活着しやすいよう留意する。また、水中エポキシ樹脂接着剤を出来るだけサンゴに付着させないことに留意する。固定終了後、モニタリングのための識別番号をつけた名札を取り付ける。

なお、サンゴ群体の規模や移植先の捕食圧等を考慮して食害の可能性が高いと判断される場合には、可能な範囲で食害防止カゴ（沖ノ鳥島の事例では目合い 6cm を使用）を設置することが望ましい。水中エポキシ樹脂接着剤と針金等で食害防止カゴを基盤に固定する。

以上の作業の終了後、植え付け状況のカメラ撮影、観察記録（作業日時、サンゴ群体の長径・短径・高さ、活性状況、植え付け位置等）を行う。

遠隔離島は、現地作業期間が限定されるため、各工程の作業時間を適宜確認して、作業効率を改善するよう努めることが重要である。

植え付け時の留意事項は以下に示すとおりである。

- 移植後の成長を考慮しオーバーハングした日陰箇所は移植しない。
- 複数年にわたって移植を行う場合、移植したサンゴが死亡して空いたスペースが多い場合には、再度移植を行い産卵時の受精効率を高めるよう留意する。
- 食害防止カゴは、1 群体毎に設置するより、複数の移植サンゴをまとめて覆う食害防止カゴ（沖ノ鳥島では 30cm×1m 程度）を使用することで、作業効率を向上させることが可能である。

表Ⅱ.2-20 植え付けに必要な資材・機材リスト

項 目	資 材 ・ 機 材
移植場所の 現状確認	GPS、目印ブイ、水中カメラ、野帳・筆記具、過年度データ
植え付け	スクレーパー、水中エポキシ樹脂接着剤、針金、食害防止カゴ、仮置き固定用おもり及びロープ、識別用名札、手袋、水中カメラ、野帳と筆記具、定規



図Ⅱ.2-67 植え付け作業状況

沖ノ鳥島の事例では、植え付け作業（藻類除去、接着剤によるサンゴ固定、食害防止カゴ設置）を、約 18 群体/人日の作業効率で実施している。

2. 4. 3 育成管理

移植サンゴのモニタリングを行い、必要に応じて育成管理を行う。

【解説】

1) モニタリング

モニタリングは、移植サンゴの生残、成長状況を把握するとともに、移植サンゴの生残、成長状況に支障が生じた際の要因分析に必要となる、天然サンゴの増減や水温等の移植箇所周辺の状況を把握する。

沖ノ鳥島の事例では、1 年に 1 回の頻度でモニタリングを実施している。

(1) 移植サンゴの生残、成長状況に関するモニタリング

移植サンゴの生残、成長状況に関するモニタリング項目は、表Ⅱ.2-21 に示すとおりである。これらの状況を経年的に確認し、どのような環境条件で、より生残、成長するかを確認し、以降の移植手法等に反映していくことが重要である。

また、定期的に同一視点より移植サンゴの写真撮影を行うと、生残、成長状況を視覚的にも把握することができる。その際には、移植サンゴだけでなく、周辺 1m×1m 程度が入る俯瞰写真を撮影し、周辺の藻類などの阻害要因も含めた確認ができるようにする。

移植を大規模に実施する場合、全移植群体を確認することは多大な労力を必要とするため、サンプル調査とする必要がある。

モニタリング時の留意事項は以下に示すとおりである。

表Ⅱ.2-21 移植サンゴの生残、成長状況に関するモニタリング項目

項目・内容		方法
① 移植サンゴの識別と位置情報の記録（移植時の記録）		
a. 識別名	移植時設置の識別札の確認	目視観察
b. 移植年月日	移植年月日の記録	
c. 移植基盤	移植場所（基盤）の記録	
d. サンゴ種類	移植サンゴの種類	
e. 移植水深	水面から移植位置までの深さ（m）	
f. 海底からの高さ	海底面から移植位置までの高さ（m）	
g. 基盤中心からの移植方向	基盤中心からの移植方向（東西南北、天端）	
② 生存・死亡状態の観察（群体の生残状況の把握）		
a. 生存	群体全体が生存している	目視観察
b. 部分死亡	群体のうち、一部分が生存している（観察時に可能な範囲でその程度を把握することが望ましい。）	
c. 全部分死亡	白化して骨格のみ、骨格が消失	
③ 群体サイズの計測（成長量の把握）		
a. 短径、長径、高さ	生きた部分の長さ	現地計測
④ 育成状態の観察（群体の健全度の把握）		
a. 健全	正常な外観色、粘液なし、触手を伸長	目視観察
b. 弱っている	外観色が薄い、粘液あり、群体の一部に藻類の付着あり	
c. 死亡	*) ②生存・死亡状態の死亡と同じ	
⑤ 基盤への固着		
a. 基盤への固着	サンゴの基質への固着の有無の確認	目視観察
⑥ 食害状況の観察（食害防止ネットの効果の確認）		
a. 魚類	骨格が齧られた、折られた痕跡	目視観察
b. 貝類	共肉部が消失した痕跡、周辺に貝類確認	
c. ヒトデ類	同上	
⑦ 藻類の被覆状況の観察（競合生物からの保護対策の検討）		
a. 被覆なし	藻類被覆なし	目視観察
b. 部分被覆	一部分が被覆されている（観察時に可能な範囲でその程度を把握することが望ましい。）	
c. 全部分被覆	全被覆	
⑧ カゴ設置状況の確認		
a. 食害防止カゴの設置状況	食害防止カゴの設置状況の確認	目視観察
⑨ 水温の確認		
a. 水温	水温変動（特に夏季の高水温期）確認	機器連続観測

モニタリングにより得られたデータをもとに、植え付けや育成管理の手法に対し必要に応じて改善を加えていく。

モニタリングにより得られたデータの解析項目を以下に示す。

- 移植サンゴの種類と生残率・成長量の関係
- 移植場所と生残率・成長量の関係
- 移植水深と生残率・成長量の関係
- 食害状況と生残率・成長率の関係
- 藻類の被覆状況と生残率・成長量の関係
- 水温と生残率・成長量の関係

(2) 周辺海域のモニタリング

周辺海域のモニタリング調査に関しては、「第Ⅱ編 2.3.4 育成管理 1) モニタリング (2) 周辺海域のモニタリング調査」を参照する。

2) 移植サンゴの育成管理

サンゴ群体の植え付け後、時間経過に伴いサンゴ群体は徐々に成長していくが、藻類等の競合生物も繁殖するため、定期的な「藻類等除去」を行う。移植サンゴ周辺 30cm 程度の範囲の藻類等の付着生物や堆積する浮泥をブラシやスクレーパーを用いて除去する。また、移植サンゴや食害防止カゴの固定状況を確認し、緩みが確認された場合は、水中エポキシ樹脂接着剤等により再度固定する。

また、食害防止カゴを設置した移植サンゴについては、食害の影響を受けにくくなったものと判断できる場合には食害防止カゴを取り外す。移植サンゴが長径 10cm 以上に成長する群体である場合には、長径 10cm を目安に食害防止カゴを取り外す。なお、対象海域によって食害の影響程度が異なるため、食害防止カゴの撤去のタイミングは、食害の程度により決定する必要がある。沖ノ鳥島の場合、魚類による捕食圧が比較的大きいため、長径 20cm 程度に成長するまで食害防止カゴを設置している。

なお、沖ノ鳥島の事例では、1 年に 1 回の頻度で育成管理を行った。

表Ⅱ.2-22 移植サンゴの育成管理に必要な資材・機材リスト

項 目	資 材 ・ 機 材
藻類除去	ブラシ、スクレーパー
サンゴ及び食害防止カゴの再固定	水中エポキシ樹脂接着剤、針金
食害防止カゴ取外し	ハンマー、スクレーパー、ニッパー等



藻類除去作業



カゴの撤去が必要となったサンゴ

図Ⅱ.2-68 移植サンゴの育成管理の状況