

第Ⅱ編 サンゴ面的増殖技術

1. サンゴ面的増殖技術

サンゴ面的増殖技術とは、サンゴを移植して面的に拡大させることを目的とする技術である。この技術について大森ほか（2015）では、移植によってできるサンゴ群集が、幼生の供給の核となり、次世代サンゴの加入や拡散を通してサンゴ礁の修復・再生を図る幼生供給基地の概念をもつ技術として期待されている。

ここでは、サンゴの面的増殖技術の基本的な考え方と手順について解説する。また、2章以降は、有性生殖を利用した種苗生産として、陸上の種苗生産施設を用いて種苗生産を行う方法と、実海域で幼生収集装置等を用いて種苗生産を行う方法に分けて、それぞれのサンゴ面的増殖技術を詳述する。なお、各章（節）の解説は、「厳しい環境条件下におけるサンゴ増殖技術開発実証委託事業」（水産庁，平成 21 年度～ 平成 29 年度）での最新の技術や知見等を記述したものである。サンゴ面的増殖技術を実践する際には、当該海域の条件や種苗生産技術に応じて、これを参考にされたい。

1. 1 基本的な考え方

サンゴ面的増殖技術とは、有性生殖法によってサンゴ種苗を大量に生産し、これを中間育成して移植し、面的に増殖する技術である。

【解説】

移植のためのサンゴ種苗を生産する手法には、サンゴの一部を採取した断片を着床具に固定する無性生殖法と一斉産卵を利用して卵と精子を受精させ、幼生を着床具に着生させる有性生殖法がある。無性生殖法は、断片の採取により親サンゴを傷つけること、大量の断片を確保しにくいこと、同じ親サンゴから採取した断片の間では、成長して産卵しても受精しないこと、遺伝的多様性が低くなることなどが指摘されている（日本サンゴ礁学会，2008）。一方、有性生殖法は、高度な技術と人員の確保を必要とされるが、親サンゴを傷つけず、同種で遺伝的に多様なサンゴ種苗を生産できるので、例えば、同種の種苗を密集移植し、産卵サイズまで育てることができれば、産卵時の受精率を高められる点が、広範囲のサンゴ礁の修復・再生には有効と考えられる。

こうしたことから、水産庁では、水産生物の好適な環境となっているサンゴ礁を面的に保全・再生する上で実用性が高い、有性生殖法を用いたサンゴ面的増殖技術の開発を行ってきた。サンゴ面的増殖技術とは、有性生殖法を使ってサンゴの種苗を大量生産し、これを中間育成して一定の大きさに育て、面的に移植するという3つの技術で構成される増殖技術である。この技術の特長は表Ⅱ.1-1に示すとおりである。

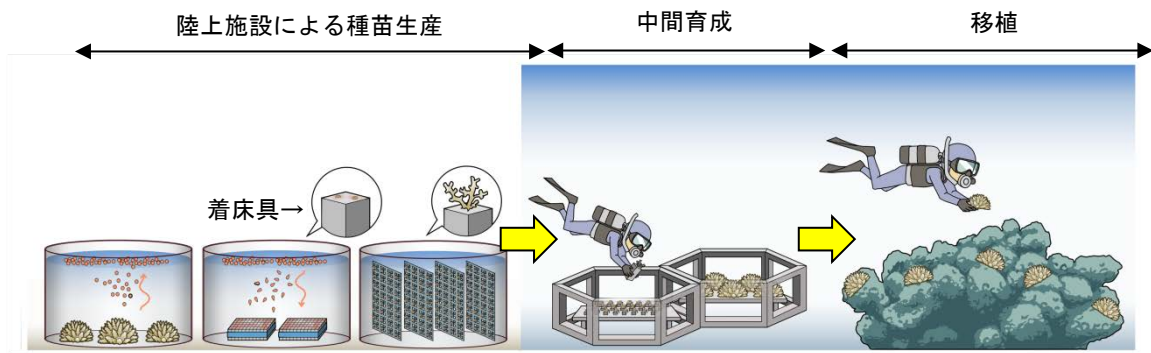
表Ⅱ.1-1 有性生殖法と無性生殖法によるサンゴ増殖技術の特長

有性生殖法によるサンゴ増殖技術 (サンゴ面的増殖技術)		無性生殖法によるサンゴ増殖技術	
メリット	デメリット	メリット	デメリット
● 移植用のサンゴが大量に確保できるので、大規模な移植が可能である。 ● 親サンゴを傷つけない。 ● 遺伝的に多様なサンゴを生産できるため、海域のサンゴの受精率を高めることが期待できる。	● 種苗生産に高度な技術を要する。 ● 現時点においては、ミドリイシ属サンゴ種の一部しか種苗生産技術が確立していない。 ● 移植サイズに育てるまでに時間を要する。	● いずれの種類でも断片化(種苗生産)が可能である。 ● 有性生殖法に比べて安価に断片を確保できる。 ● サイズの大きい断片は、有性生殖法に比べて短期間に移植サイズとすることができる。	● 親サンゴを傷つけるので、大量に断片を確保できない。 ● 親サンゴが同じ断片の間では産卵しても受精しない。 ● 天然サンゴの採取は条例などで規制されている。

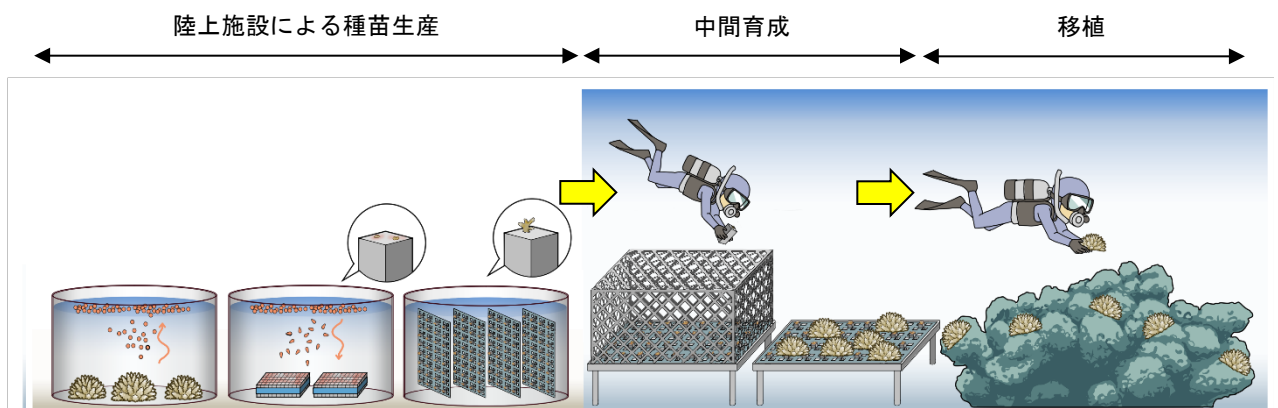
有性生殖を利用した種苗生産には、陸上の種苗生産施設を用いる場合と実海域で幼生収集装置等を用いる場合に大別され、当該海域の条件等に応じて、適切な手法を用いることが重要である。表Ⅱ.1-2 は、沖ノ島島や沖縄海域での知見をもとに、陸上の種苗生産施設を用いた方法と、実海域で幼生収集装置を用いた方法に分けて、それぞれの基本的な流れと特長を示し、図Ⅱ.1-1 にそのイメージ図を示す。

表Ⅱ.1-2 有性生殖を利用した種苗生産別のサンゴ面的増殖技術の流れ

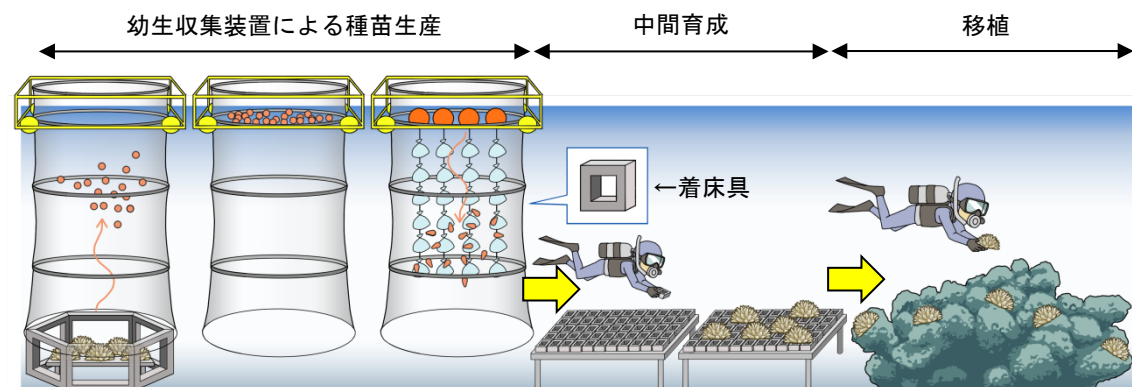
			
陸上施設	陸上の種苗生産施設の水槽を用いてサンゴを飼育し、水槽内で産卵させて種苗を生産する。	着床具に着生したサンゴ種苗を、成育環境がよく、管理の容易な実海域に設置した中間育成施設へ運び込み、移植サイズになるまで育成する。	移植適地を検討した上で、種苗を移植適地へ移植する。 移植後は、サンゴの成長や生残率を高めるため、定期的に育成管理を行う。
幼生収集装置	実海域で幼生収集装置を用いて卵・幼生を確保し、着床具に幼生を着生させて種苗を確保する。		



陸上施設で種苗生産し、中間育成施設で中間育成後、サンゴを取り外して、着床具ごと移植場所へ移植する。



陸上施設で種苗生産し、4 か月後に海域のカゴ型中間育成施設で中間育成後、サンゴを取り外して、着床具ごと移植場所へ移植する。



実海域において幼生収集装置で幼生を収集し、着床具に幼生を着生させてから棚型中間育成施設で中間育成し、その後、サンゴを着床具ごと移植場所へ移植する。

図Ⅱ．1-1 有性生殖を利用した種苗生産別のサンゴ面的増殖（イメージ）

なお、図Ⅱ．1-1 はイメージであり、当該海域の条件によって、図とは異なる種苗生産や中間育成の方法を用いることができる。

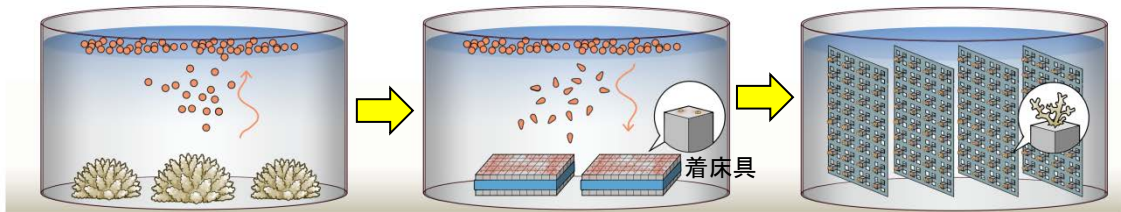
1. 1. 1 種苗生産

有性生殖法による種苗生産は、放卵放精型のサンゴの一斉産卵を利用して卵と精子を受精させ、幼生を着床具に着生させて中間育成できるサイズに育てるまでの技術であり、陸上施設での種苗生産と実海域での種苗生産の2つの方法に大別される。

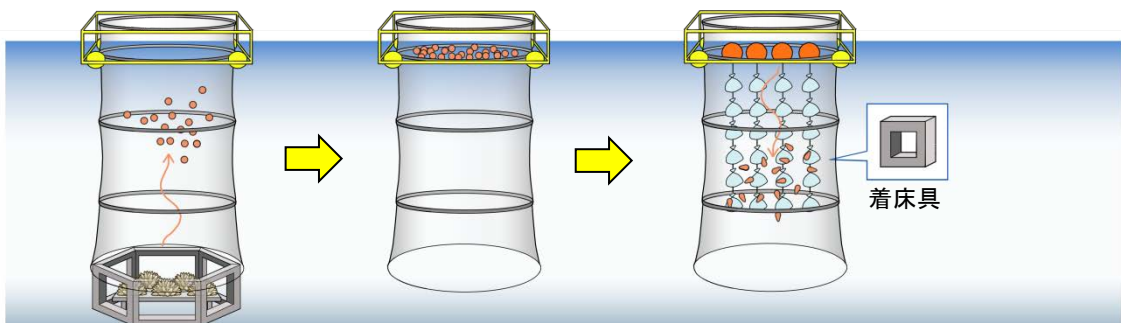
【解説】

図Ⅱ. 1-2 は、遠隔離島のように対象海域の近傍で種苗生産ができない、または遺伝的攪乱を避ける必要がある場合等で、陸上施設での種苗生産を行う方法である。ただし、陸上施設での種苗生産技能を有すれば、地理的条件に関わらず種苗生産を行うことは可能である。サンゴの種苗生産を行うにあたっては、サンゴの適正な飼育環境を保つため、水温、流れ、光量等が調整できる種苗生産施設が必要である（第Ⅱ編2 陸上施設での種苗生産を参照）。沖縄県では、室内の施設で有性生殖法によって生産した種苗を、天然海域で中間育成し、実海域に移植している（大森・岩尾 2014、久保 2015）。

また、図Ⅱ. 1-3 は、幼生収集装置を用いてバンドルや幼生を収集して種苗生産を行う方法である。幼生収集装置とは、筒状のナイロン製ネットで1㎡あたり100万個以上のサンゴ卵の収集を可能とし、ネット内に専用の着床具を入れることで効率よく幼生を着生させるものである（第Ⅱ編3 幼生収集装置を用いたサンゴ面的増殖技術を参照）。この装置を用いた石垣島での実証試験では、装置内において4日令までの幼生を高い生残率で保持できることが確認されている（岡田ほか、2016）。



図Ⅱ. 1-2 陸上施設を用いたサンゴの種苗生産（イメージ）



図Ⅱ. 1-3 幼生収集装置を用いたサンゴの種苗生産（イメージ）

1. 1. 2 中間育成

実海域においてサンゴの育成に適した環境を確保できる中間育成施設に、種苗生産されたサンゴを植え付けて、移植に適した大きさまで育成する。

【解説】

中間育成施設は、サンゴ種苗を実海域で育成するために設置する施設であり、中間育成施設と同様、以下の性能を有しているものである。

1) 要求される性能

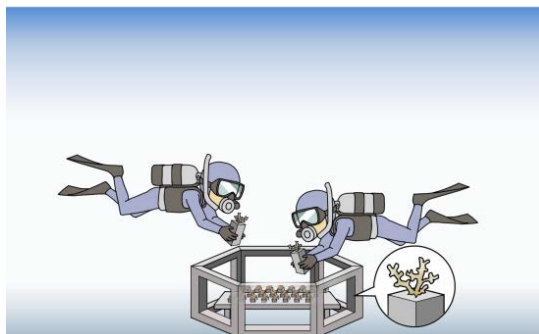
中間育成施設は、以下の性能を有することとする。

- 増殖の対象とするサンゴの育成に好適な天端高、流動、基質形状、光、海底面からの高さ等の諸元を有すること。
- 波、流れ等の作用に対して、中間育成施設の安定質量を満足していること。
- 漁船等の船舶航行に影響を及ぼさないよう、適切に配置又は配慮されていること。
- 中間育成施設は、コンクリートや石材等で構成され、設置海域の波、流れの条件に応じて適切なものであること。

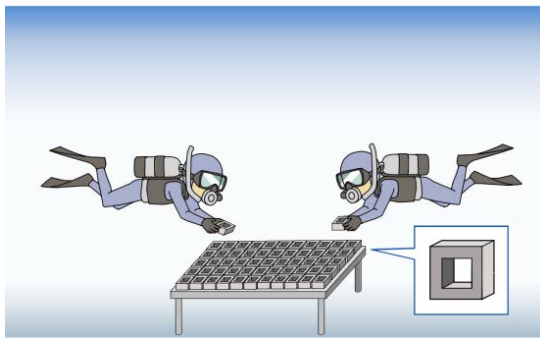
2) 中間育成施設の設計

中間育成施設を波浪等の影響が厳しい場所に設置する場合には、波、流れ等に対して安定した魚礁・着定基質のような構造（図Ⅱ.1-4）が必要である。このため、設計にあたっては、波や流れの実測、あるいは数値シミュレーションや水理模型実験を行って波浪推算し、設置水深の波力や潮流を計算して所要質量を算出する。計算方法に関しては、礁内の波高については、「漁港・漁場の施設の設計の手引（2015年版）」資料2.5リーフ上の波の変形を用いる。また、構造面や機能面は着定基質と類似することから、必要とする所要質量は、同手引きの「第16編第2章着定基質 2.2 藻場礁」を参照することができる。

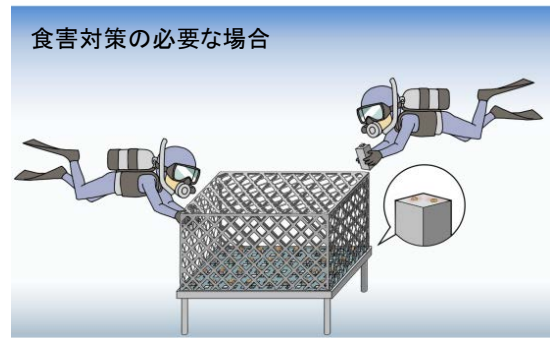
また、上記と異なり、波、流れ等の作用が小さい場合は、図Ⅱ.1-5の棚型中間育成施設やカゴ型中間育成施設で対応することができる（第Ⅱ編3.2 中間育成を参照）。この場合には、漁業者等によるサンゴ礁保全活動に活用される（【コラム】漁業者中心で行われているサンゴ礁の保全活動を参照）。



図Ⅱ. 1-4 波、流れ等の作用が大きい場所での中間育成施設（イメージ）



棚型中間育成施設



カゴ型中間育成施設

図Ⅱ．1-5 波、流れ等の作用が小さい場所での中間育成施設（イメージ）

3）設置場所の条件

中間育成施設の設置場所の選び方は、サンゴハビタットマップ上から、サンゴの成育に適した場所で、かつ育成管理の可能な場所を選定する。

1. 1. 3 移植

移植では、中間育成施設からサンゴを取り外して運搬し、移植適地に植え付ける。また、移植したサンゴの生残率や成長率を高めるため、定期的に育成管理を行う。

【解説】

移植先は、サンゴの成育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・再生につながる幼生の供給源となる必要がある。移植適地を検討するにあたっては、サンゴの生息状況を把握し、地形（水深）、水温、流況等の環境条件を考慮したサンゴハビタットマップを作成し、移植先を絞り込んで行くことが重要である（第Ⅱ編 2.4 移植を参照）。



図Ⅱ．1-6 移植状況

また、植え付けにあたっては、必要な人員を確保し、効率よく実施するとともに、サンゴを動かないように固定する。そして、移植直後からモニタリングを開始し、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実施するとともに、モニタリング結果を評価し、問題が生じている場合には、問題が起こっている段階（計画・設計・対策）にフィードバックして、見直しを図ることが必要である。

【コラム】漁業者中心で行われているサンゴ礁の保全活動

沿岸域で実施されているサンゴ保全活動の事例として、沖縄本島の恩納村の事例を紹介する。

沖縄県恩納村では漁業者を中心に「恩納村美ら海を育む会」が下に示すサンゴの保全活動を継続的に実施しており、活動には水産庁の水産多面的機能発揮対策事業も活用されている。

①オニヒトデの除去（昭和 44 年～現在）

②サンゴの養殖（平成 10 年～現在）

③養殖サンゴの移植（平成 15 年～現在）

オニヒトデの除去については、主に潜水作業によって除去を行い、これまでの継続的な活動により多くのオニヒトデが除去されている。今後も活動を継続し、12～13 年周期で起こるオニヒトデの大発生を未然に防ぐことが期待されている。

サンゴの養殖についてはこれまで 11 科 15 属 54 種の多様なサンゴが養殖されている。海底に直接植え付けず、ひび建て式として基質とサンゴの距離と取っている点が特徴である（図 1）。

養殖サンゴの移植は、上記の養殖したサンゴから分割したサンゴ片を元に行う無性生殖法によるものであり、陸上での種苗生産、海域での中間育成、目的地への移植、の工程で行う。種苗生産は陸上施設にて、親サンゴから多数のサンゴ片（種苗）をつくり、それらが基盤に活着するまでの短期間で行われ（図 2）、種苗を海域の中間育成棚に取り付けて中間育成する（図 3）。成育したサンゴは中間育成棚から取り外し、目的地の基質に穴をあけて基盤ごと移植する（図 4）。移植したサンゴは継続してモニタリングを実施し、移植したサンゴの生残率や成長を記録している。



図 1 ひび建て式サンゴ養殖の状況



図 2 種苗生産後に基盤に活着したサンゴ



図 3 中間育成の状況



図 4 目的地への移植の状況

【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

海外では、中間育成を伴う無性生殖を利用した種苗生産と移植の2つのステップで構成される手法によるサンゴ増殖技術が活発に行われているので紹介する。

Rinkevich (2014) は、ガーデニングコンセプトという (a) サンゴの種苗を陸上の種苗のように水中で育成する (中間育成段階: Nursery phase)、(b) 中間育成されたサンゴの移植段階 (Transplantation phase) の2つのステップで構成される修復技術を提唱している。波浪や流れが静穏な海域における中間育成の一例として、図1の(a)(b)に示すような海中に設置された垂下式施設で、5種類の枝状サンゴ群体11株から作られた断片を取り付け育成している (Rinkevich 2006、Shafir et al. 2006)。この施設は、海中に浮いているので、施設が受ける流れによって浮泥等が堆積しにくいこと、適正な光と水温を調節できること、食害生物が近づきにくい特長がある (Shafir et al. 2010)。

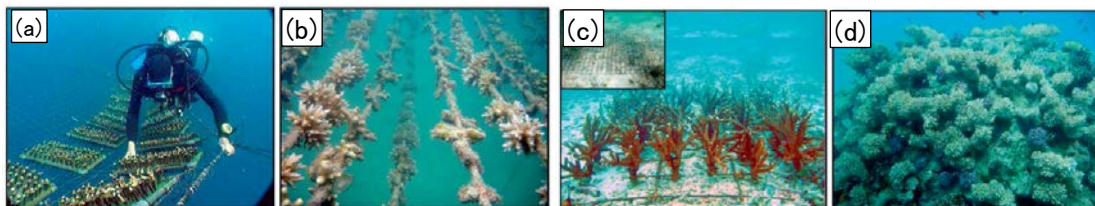


図1 サンゴ礁の再生におけるガーデニングコンセプト

(a), (b) は中間育成施設、(c) は移植直後、(d) はサンゴ移植後5年目である (Rinkevich 2014)。

また、Sen and Yousif (2016) は図2に示すような、浮きを付けたロープに数本のPVCパイプを横に取り付けて、サンゴ断片を吊り下げる coral tree nursery[®] (Nedimyer et al. 2011) を用いて中間育成をしている。

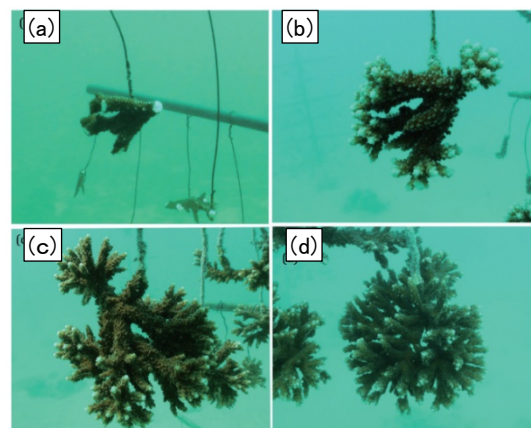
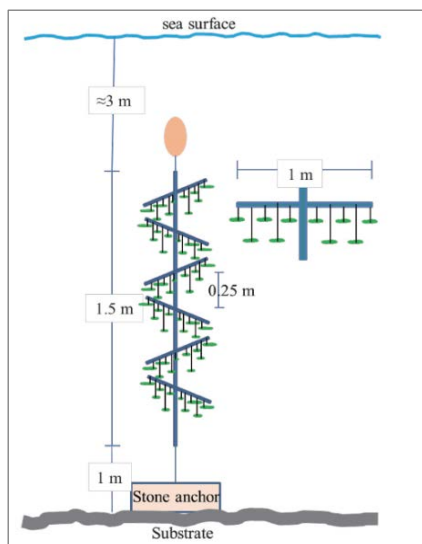


図2 coral tree nurseryの概要図

(a) *Acropora clathrata* の断片設置直後(断片の大きさ平均約6cm)、(b)5ヵ月後、(c)9ヵ月後、(d)15ヵ月後の状況。最終的に平均17.4cmまで成長した (Sen and Yousif 2016)。

中間育成の断片の大きさは、大きい方が運搬や植込み時のストレスを受けにくい (Lirman et al. 2010)。また、中間育成段階から移植を行う時期は、大きさと種類によって植込み後のストレスの影響に差があることから、植込み時の種苗の大きさはハマサンゴ類が4~5cm、ミドリイシ類で7~10cmが適当と言われている (Shafir et al. 2010, Omori et al. 2016)。

【コラム】タカセガイ育成礁を用いた稚サンゴの中間育成

沖縄県サンゴ再生保全事業では、平成24～28年度において、沖縄県恩納村海域にてタカセガイ育成礁および高床式養殖棚を用いて、有性生殖法により種苗生産された稚サンゴの中間育成試験が実施された（沖縄県環境部自然保護課 2017）。前者は3～6週齢の初期稚サンゴを約1年間飼育する「前期中間育成」、後者は前期中間育成後のサンゴを直径4cm以上まで、更に約1年間飼育する「後期中間育成」の施設として用いられた。試験には、ウスエダミドリイシ、クシハダミドリイシ、ツツユビミドリイシ、*Acropora donei*の4種が用いられた。

タカセガイ育成礁は、元々タカセガイ種苗の中間育成用として開発されたものである（久保ほか 1993）。同育成礁はサンゴ礁の礁嶺部に設置されており、幼生のトラップ効果、波浪の緩和、清浄な海水の供給、十分な餌料の提供、捕食者からの保護、海藻繁茂の抑制、適度な水深の確保、海底からの嵩上げによる飛来物からの防御等の機能を持つことにより、サンゴの育成にとっても良好な環境を提供しており（Omori et al. 2007, 日本サンゴ礁学会サンゴ保全委員会 2008, 安藤ほか 2008）、実際に天然サンゴがタカセガイ育成礁の中で、高い被度で生育するケースが多々見られる。高床式養殖棚は、塩ビパイプ等で作成された高さ40～60cmの棚で、礁湖内の水深5m程度の海底に設置された。棚には、食害防止用の網は設置されなかった。

同試験では、様々な試験区が設けられており、また年度やサンゴ種により生残状況が異なることから、前期中間育成開始後6ヶ月での「生産基盤率」は5～100%と変化の大きい値であった（生産基盤率：試験区全体の基盤（着床具）数に対する1群体以上生残した基盤数の占める率）。後期中間育成における群体の生残率は、開始後6ヶ月で60～100%と高い値であった。また、事業成果として、平成24～27年度に種苗生産した稚サンゴから、前期・後期中間育成を通して2万群体以上の移植可能段階（直径約4～6cm）のサンゴが生産され、実際に海域に移植された。有性生殖法由来の直径4cm以上の大型群体を、世界で最も多く移植した事例となった。



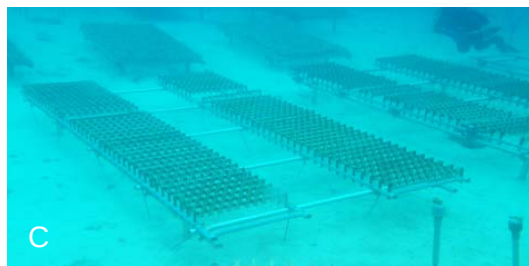
図1 恩納村海域に設置された中間育成施設

A: タカセガイ育成礁外観

B: タカセガイ育成礁内に設置された着床具

C: 高床式養殖棚

沖縄県環境部自然保護課(2017)より転載



【コラム】サンゴ面的増殖技術の将来展望

将来、サンゴ面的増殖技術で、サンゴ礁域の幼生供給量を上げるには、図1と2に示す現技術を発展させた新たな手法の開発が求められている。

図1は、サンゴ増殖礁、または中間育成施設内で産卵サイズまで稚サンゴを育て、産卵時に幼生収集装置を中間育成施設に設置して幼生を一定期間保持する。その後、幼生収集装置を目的の場所へ移動させて幼生を放出することで、礁に着生する稚サンゴの数を増やす手法である。海底に有効な着床具を置いて、それに着生させてもよい。ただし、dela Crus et al. (2017)が行った実験では、幼生の供給量を増やしても礁に着生して成長するサンゴは多くないので、一定の面積の幼生供給量を上げるには、数十基の幼生収集装置と中間育成施設が必要と思われる。また、幼生供給面積を増やし着生率と生残率を上げるための技術開発も併せて行う必要がある。

図2は、サンゴ増殖礁を複数配置して、サンゴ礁域の幼生供給量を上げる手法である。この手法の実用化には課題が多く、例えば、目的の場所に幼生を供給するためにはどこにサンゴ増殖礁を設置すればよいのか、卵と精子の受精率を上げるためには増殖礁の配置間隔はどのくらいかなどがある。

しかし、これらの新たな手法によって、大量のサンゴの幼生を、傷んだサンゴ礁に集中的に供給できるようになり、そこでサンゴが成長して産卵するようになれば、やがて広域のサンゴ礁の修復・再生に寄与できると期待している。

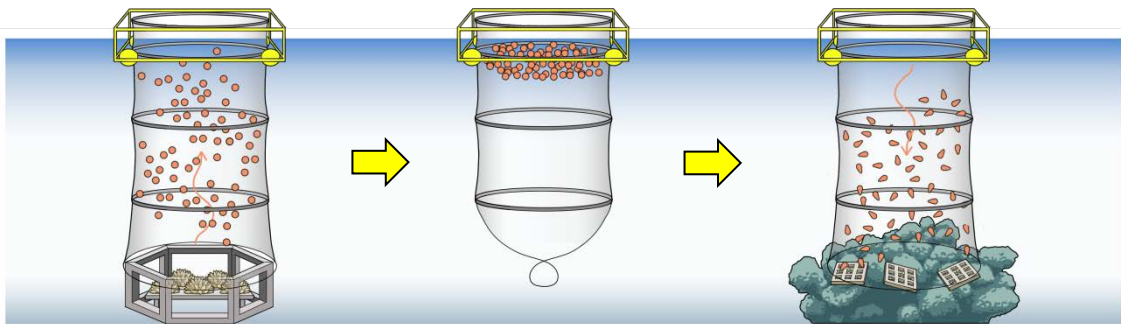


図1 サンゴ面的増殖のイメージ①図

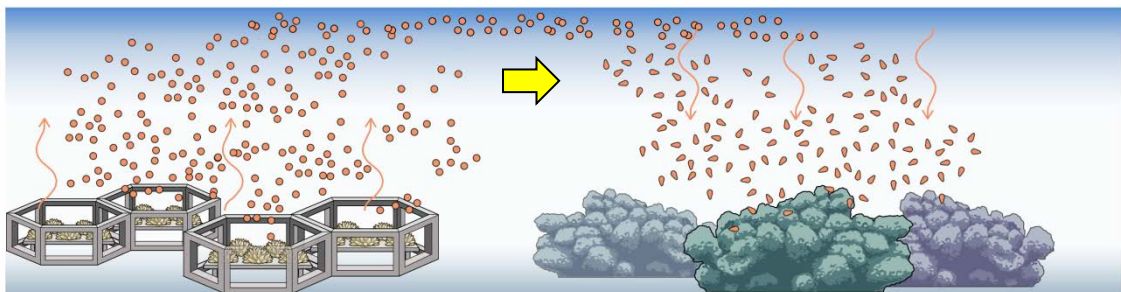


図2 サンゴ面的増殖のイメージ②図