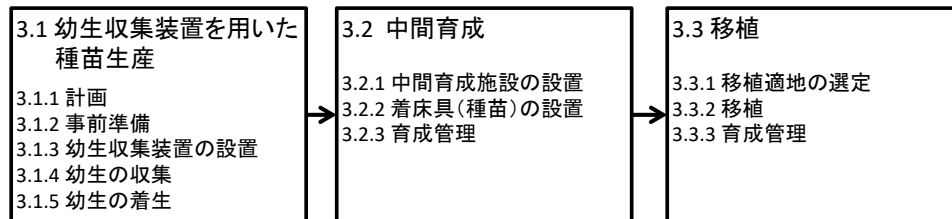


3. 幼生収集装置を用いた種苗生産によるサンゴ面的増殖技術

幼生収集装置を用いる方法は、静穏な海域であれば陸上の種苗生産施設がない場所で種苗生産を行うことが可能である。

以下に、沖縄海域での実証事例を基にして、本事業で開発された幼生収集装置(図Ⅱ. 3-1)を用いた種苗生産から移植を行う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。



図Ⅱ. 3-1 沖縄海域におけるサンゴ面的増殖技術の作業フロー

3. 1 幼生収集装置を用いた種苗生産

幼生収集装置を用いた種苗生産とは、親サンゴを採取し、現地海域でサンゴの卵・精子を収集・受精させ、発生した幼生が着生能力を有するまで装置内で保持し、装置内に設置した着床具に幼生を着生させることである。

【解説】

1) 幼生収集装置の機能と作業手順

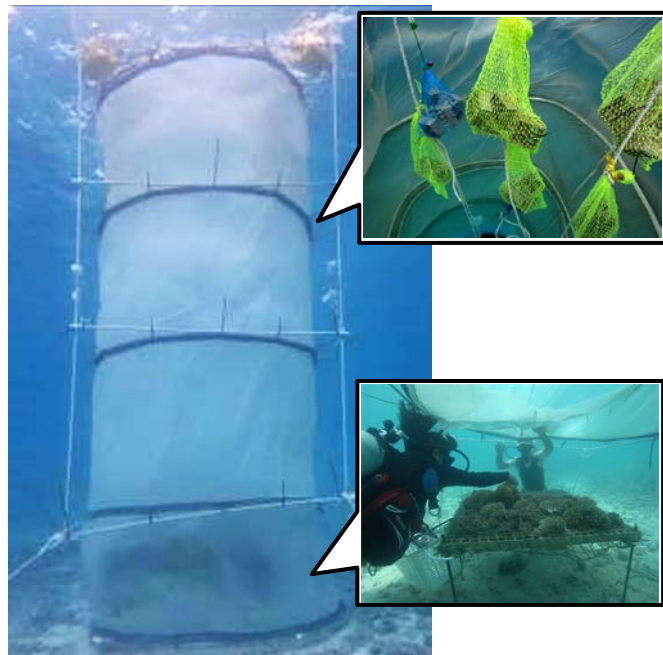
本手法は、現地海域で次の①～③に示す機能を果たすことが可能な「幼生収集装置」(図Ⅱ. 3-2)を用いるものである。

＜幼生収集装置の機能＞

- ① 親サンゴから放出された卵・精子の“収集・受精”
- ② ①で得られた幼生が着生能力を有するまでの“保持”
- ③ ②で保持した幼生の着床具への“着生”

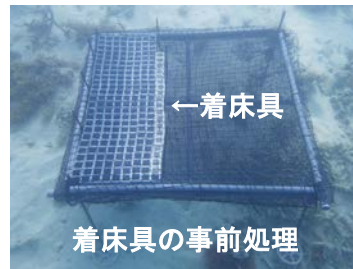
本装置は、1 m²あたり 100 万個以上のサンゴの卵を収集し、着生能力を持つ 4 日齢まで幼生を生残率 90% 以上で保持することが可能である。

幼生収集装置を用いた種苗生産の作業フローは、図Ⅱ. 3-3 の通りである。



図Ⅱ. 3-2 幼生収集装置

3.1.1 計画
・親サンゴの採取計画



事前準備

3.1.2 事前準備
・着床具の事前処理
※産卵予想日 1 ヶ月前
・親サンゴの採取
※産卵予想日 1 週間前

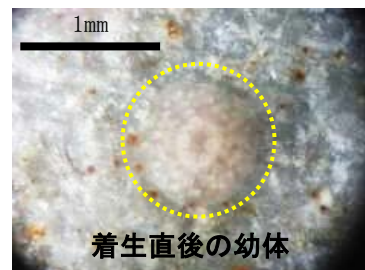


3.1.3 幼生収集装置の設置
※産卵予想日直前



幼生の収集

3.1.4 幼生の収集
※産卵後 4 日目



幼生の着生

3.1.5 幼生の着生
※着床具設置後 1~2 日間

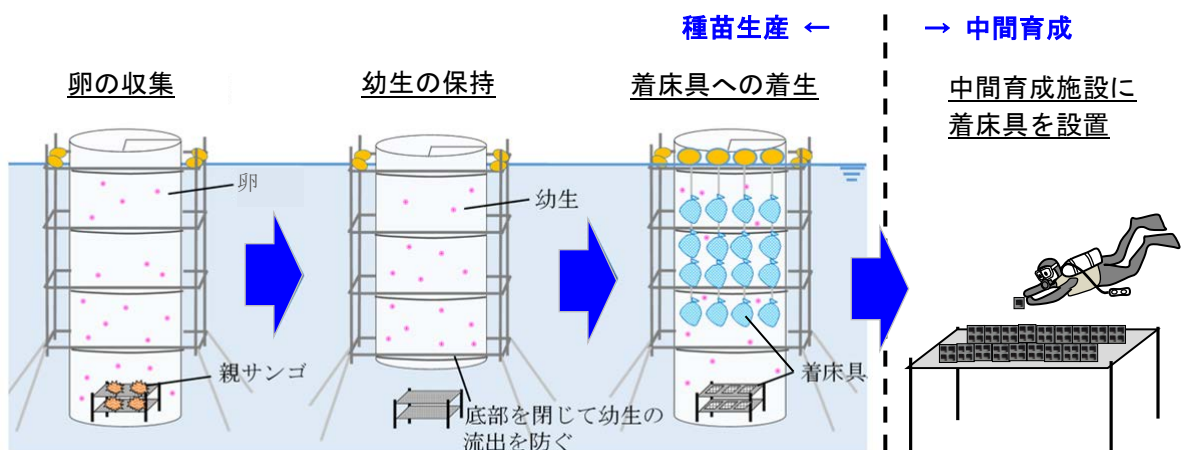


図 II. 3-3 幼生収集装置による種苗生産の作業フローおよびイメージ

2) 幼生収集装置の構造・材質

装置の構造・材質について、概要を図Ⅱ.3-4、表Ⅱ.3-1 に示す（第Ⅲ編幼生収集装置を参照）。

(1) 装置本体・外枠フレーム

装置本体の構造は、流れの抵抗を低減するため円筒形状とし、また、形状維持のために装置本体に外枠フレームを取り付ける。外枠フレームの材質は、柔軟性と耐久性に優れた強化プラスチック複合管等を用いる。外枠フレームを容易かつ強固に取り付けられるように、装置本体に目合い2～3cmで耐久性の高い加工が施された網状の素材（アイメッシュ：図Ⅱ.3-4 参照）を1m毎に帯状に縫製しておくことが重要である。

装置本体の材質は、プランクトンネット等に用いられるナイロンメッシュ素材を使用する。サンゴの受精卵および発生初期の幼生（胚）は、物理的な衝撃に弱く割球が解離しやすい。ナイロンメッシュの目合いは、30 μ m程度の細かい目合いであれば、素材との擦れによる幼生への影響が少なく、4日齢まで幼生の生残率を90%以上で維持できる（岡田ほか、2016）。

装置本体のサイズは、一辺4cm程度の着床具を万単位で設置するには、容積は約9m³必要である。直径が大きく高さが短い、または高さが長すぎる装置だと、流れに対する抵抗も大きくなるため、サイズの目安としては直径1.7m、高さ約4m程度が良い。当該サイズの装置を使用した場合、収集・保持可能な幼生数は最大で約300万個体である。

(2) 装置天井部

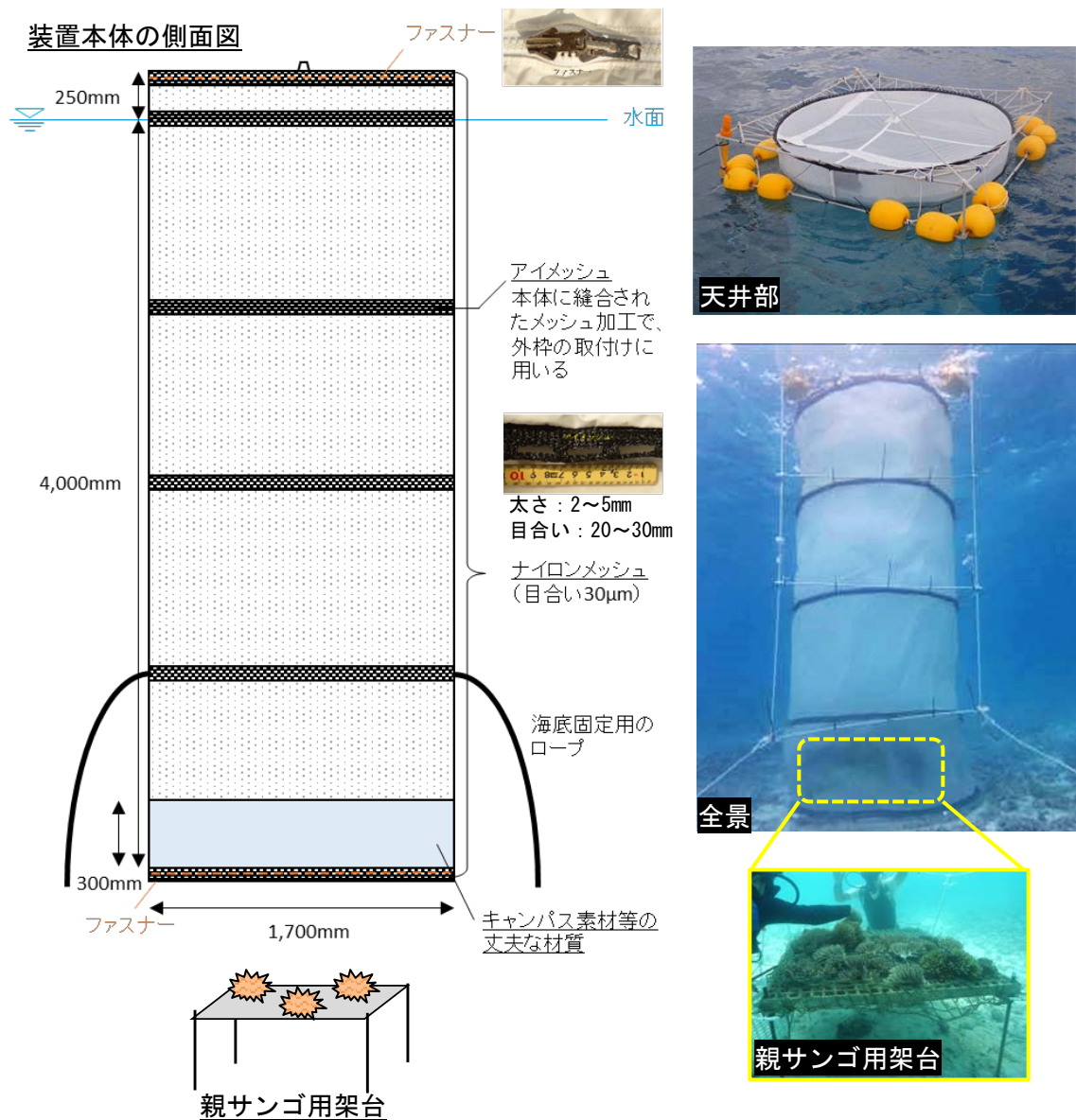
装置の天井部は、海面から卵や幼生の流出を防ぐために密閉構造とする。ただし、装置内の幼生数を測定するサンプリング（3.1.4 幼生の収集 3）幼生数の計測 を参照）や着床具の設置（3.1.5 幼生の着生 を参照）に際しては、天井部を開放させて作業を行う必要があるため、開閉可能なファスナーを設ける（図Ⅱ.3-5）。サンプリング時以外は、装置外への幼生の流出を防ぐため、ファスナーを閉めておく。

受精時の条件を自然界と同様にすることが望ましいため、外枠フレームおよび浮力体を用いて、海面上に空間を確保する（波風の抵抗を出来る限り低減するため海面上20cm程度がよい）浮力体は、浮力が大きく安定性の高い浮子等を外枠フレームの水面部分に取り付ける。(1)で記述するサイズの装置を使用する場合、浮力体は浮力4kg×16個＝計64kg程度でよい。

(3) 装置底面部

装置の底面部は、海底に固定するため、外枠フレームもしくはアイメッシュ素材の部位にロープを取り付ける。また、装置と海底との摩擦による破損の恐れがあるため、底面部と底面部付近（30cm程度の範囲）の側面は、キャンパス素材等の強度の高い材質を使用するとよい。

卵の収集時に底部を開放する必要があるため、装置底面部に開閉可能なファスナーを設ける。卵の収集時には、ファスナーを開けて架台上に配置した親サンゴを覆うように設置し、卵の収集後には、ファスナーを閉めて卵や幼生の装置外への流出を防ぐ。



※この設置事例は、石垣島浦底湾奥部の水深4mの地点に5月上旬の6日間設置したものである。設置期間の波高は0.5m以下であった。

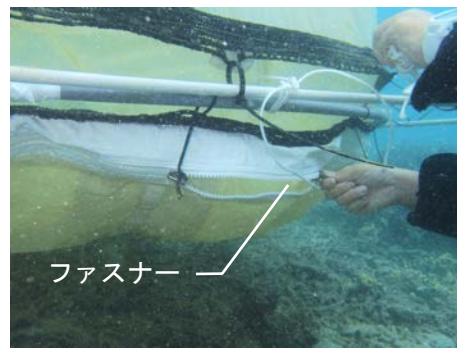
図Ⅱ.3-4 幼生収集装置（概要）

表Ⅱ.3-1 幼生収集装置の構造・材質の概要

部位	構造・材質
装置本体	・胴体部：ナイロンメッシュ 目合い30μm(φ1.7m)×3.8m ・胴体部の6箇所：アイメッシュ 目合い2~3cm ・底面部+底面部付近：キャンパス ・天井部+底面部：ファスナー
外枠フレーム	・強化プラスチック複合管（外径 φ14mm・内径 φ4mm） ・その他、複合管の連結用部材など
浮力体（水面）	・浮力 4kg×16 個=64kg
ロープ (装置固定用)	・φ10mm×5m×4 本=20m



天井部のファスナー（幼生数の計測時）



底面部のファスナー（閉塞時）

図Ⅱ.3-5 装置天井部および底面部のファスナー

3) 親サンゴ用架台の構造・材質

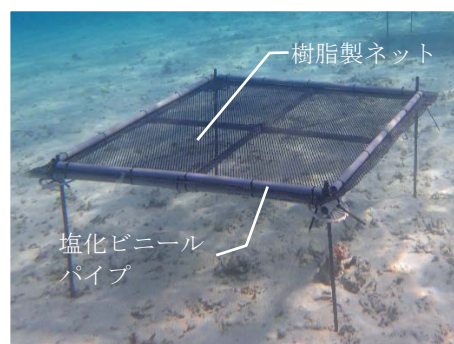
装置の設置に際して、海底には親サンゴを配置するための架台を設置する。

架台は、荒天時の砂礫等の移動による摩耗からの回避と、オニヒトデのようなサンゴ食の底生生物の侵入防止のため、鉄筋棒等の脚部を設けて海底より 50cm 以上嵩上げた構造であり、また、通水性があり浮泥が堆積しにくい格子構造のものを用意する。

架台の例として、静穏な海域におけるサンゴの中間育成にも用いることができる架台について、写真を図Ⅱ.3-6 に、部位別の主な材質・寸法を表Ⅱ.3-2 に示す（第Ⅱ編 3.2 中間育成を参照）。



①FRP 製グレーチング



②樹脂製ネット

※この設置事例は、石垣島浦底湾奥部の水深 4m の地点に 5 月上旬の 6 日間設置したものである。設置期間の波高は 0.5m 以下であった。

図Ⅱ.3-6 親サンゴ用架台

表Ⅱ.3-2 棚状架台の材質・寸法

部位	構造・材質・寸法
天端部	①FRP製グレーチング 寸法：幅100cm、長さ100cm、厚さ4cm ②樹脂製ネット+塩化ビニールパイプ（8本：4辺×ネットの上下） 寸法：幅100cm、長さ100cm
脚部	鉄筋棒（呼び径D13）×4本 寸法：外径12.7mm、長さ100cm

4) 着床具の構造・材質

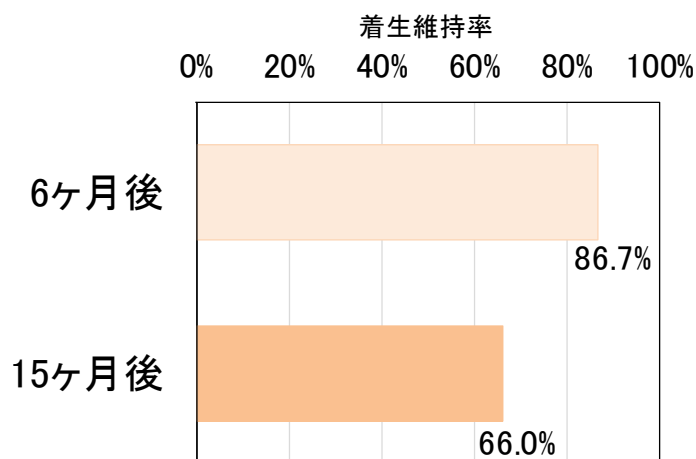
幼生収集装置による種苗生産では、幼生の着生後にそのまま海域に着床具を設置して、初期減耗が大きい0歳齢の状態では稚サンゴの中間育成を行うため、魚類の食害や浮泥堆積等の様々な成育阻害要因を低減する機能を有した構造が求められる。

海域に設置する着床具には、これまで陶器製コマ型着床具が実用されているところであるが、最近では角筒型着床具（40mm×40mm×40mm、1辺の厚さは4mm）（図Ⅱ.3-7）が開発されている。

角筒型着床具は、通水性が確保され浮泥が堆積しにくくなるほか、内面に着生した稚サンゴが魚類等に捕食されにくいと、平板状の着床具に比べて海域での生残が高くなることが確認されており、生産した種苗のうち約66%が着生15ヶ月後に生残した実績がある（図Ⅱ.3-8）。（Suzuki et al. 2011）。また、取り扱いやすいサイズなため、作業効率がよくなることが期待できる。



図Ⅱ.3-7 角筒型着床具
（硬質ポリ塩化ビニル製）



※着生維持率

各時点で1群体以上の着生がみられた着床具の割合



着生15ヶ月後の種苗

図Ⅱ.3-8 着床具の着生維持率

【コラム】格子状サンゴ着生基盤の有効性

近年、格子状構造を利用したサンゴ着生基盤の有効性が明らかになってきた。きっかけは、礁原上のタカセガイの中間育成施設（タカセガイ礁）にサンゴがたくさん生育したことであった（Omori et al. 2006）。タカセガイの稚貝が基盤表面のサンゴを傷つけず海藻類のみを食べることで、サンゴが育ちやすくなったと考えられた（Omori 2005）が、タカセガイ礁には格子状の基盤（グレーチング）が使われており、そこにサンゴが着生していた。そこで、格子状構造に注目して、グレーチングメーカーの協力を得ながら、サンゴの生き残りとの関係を明らかにする研究が始まった。着生直後のサンゴの死亡要因は、魚類が岩盤表面の藻類を齧り取る際の間接的な被害や、堆積物や競合する付着藻類等に覆われることだと想定された。格子状構造は、目合が2.5～4 cmであれば、浮泥が溜まらない垂直面に着生したサンゴが魚類に被食されることなく、かつ成長に必要な光量を確保できるため、たとえタカセガイがいなくても、サンゴの生残が非常に良くなることが明らかになった（Suzuki et al. 2011, 2013）。しかし、格子状基盤として万能ではない。これまでの試験結果から、着生密度と6か月後の生残密度および生残率を比較すると、場所による違い、格子ピッチによる違い、種による違いが複雑に関係している（表1）。例えば、石垣島浦底湾の浅い水深では、2.5 cmの格子ピッチでの生残が良いようだし、本方式はコユビミドリイシには適していないと考えられる。それらを踏まえた上で、サンゴの実際の生育状況から推測すると、格子状基盤上では、6か月後の生残密度が0.01 個体/cm²以上（生残率5%以上）で、稚サンゴの育成に成功したと言えそうである（図1）。

人工基盤上にサンゴを着生させて育てる上で、着生密度も重要になる。密度が高すぎると死亡率が高くなり（主には病気の発生が原因と考えられている）、低すぎると基盤上に生き残らないからである。そこで、格子状基盤を用いて着生密度と初期生残率の関係を調べたところ、0.1 個体/cm²程度が理想的な着生密度であり、0.5 個体/cm²を超えると死亡率が高くなることが明らかになった（Suzuki et al. 2012）。



図1 着生から約2年後のヤングミドリイシ（小浜島南、水深12m）

表1 格子状基盤を用いたミドリイシ属サンゴの着生・生残試験の結果

年	場所	水深	格子ピッチ	種	着生密度(/cm ²)	6か月後生残密度(/cm ²)	生残率
2010	浦底・岸魚礁	3m	4cm	スギノキ、ウスエダ、クロマツ	0.810	0.010	1.3%
2010	浦底・東奥	3m	4cm	スギノキ、ウスエダ、クロマツ	0.176	0.006	3.3%
2010	浦底・岸魚礁	3m	2.5cm	スギノキ、ウスエダ、クロマツ	0.518	0.040	7.7%
2010	浦底・東奥	3m	2.5cm	スギノキ、ウスエダ、クロマツ	0.120	0.027	22.2%
2011	小浜南	5m	4cm	ヤング	0.040	0.006	15.2%
2011	小浜南	6m	4cm	ヤング	0.190	0.010	5.4%
2011	小浜南	9m	4cm	ヤング	0.210	0.006	3.1%
2011	小浜南	12m	4cm	ヤング	0.100	0.025	25.1%
2011	小浜南	15m	4cm	ヤング	0.230	0.018	7.7%
2011	小浜南	18m	4cm	ヤング	0.190	0.011	6.1%
2012	小浜南	4m	2.5cm	ヤング	0.191	0.012	6.1%
2012	小浜南	9m	2.5cm	ヤング	0.368	0.036	9.8%
2013	浦底・岸魚礁	3m	2.5cm	コユビ	0.125	0.002	1.5%
2013	浦底・岸魚礁	3m	2.5cm	ウスエダ	0.080	0.022	27.5%
2013	浦底・岸魚礁	12m	2.5cm	コユビ	0.083	0.000	0.0%
2013	浦底・岸魚礁	12m	2.5cm	ウスエダ	0.125	0.020	16.4%
2015	浦底・湾奥	3m	4cm	ウスエダ	0.104	0.021	20.3%

3. 1. 1 計画

種苗生産の規模に応じて、生産目標とする着床具（種苗）の数量を計画する。親サンゴ群体は大量に産卵するが、サンゴは高密度な着生により大量斃死を引き起こす恐れがあるため、適正密度で幼生が着生できるような条件にすることを念頭に置き、幼生供給量を調整する。

【解説】

1) 親サンゴの採取数

種苗生産に必要な親サンゴの数は、「第Ⅱ編 2.1 親サンゴの採取・運搬」に記述するように、遺伝的多様性の観点から産卵可能なサンゴ 6 群体以上を採取する。天然サンゴの再生産への影響に配慮して、親サンゴの採取数は必要最低限の数量とする。

2) 幼生供給量

ウスエダミドリイシの場合は、直径 30 cm の 1 群体で約 24 万個の卵を産卵するという知見がある（北田 2002）。これをもとに算定すると、6 群体の親サンゴから供給されて着床具に着生する幼生数（幼生供給量）は、以下に示すように約 23 万個体である。

ここで、受精率、生残率、着生率は、沖縄の沿岸海域で行った幼生収集装置の開発試験における実績値である。

6 群体の親サンゴの産卵数

$$240,000 \text{ 個} \times 6 \text{ 群体} = 1,440,000 \text{ 個}$$

↓

卵が受精して幼生となる数

$$1,440,000 \text{ 個} \times \text{受精率 } 90\% = 1,296,000 \text{ 個体}$$

↓

着生期(4 日齢)まで生残する幼生数

$$1,296,000 \text{ 個体} \times \text{生残率 } 90\% = 1,166,400 \text{ 個体}$$

↓

着床具に着生する幼生数（幼生供給量）

$$1,166,400 \text{ 個体} \times \text{着生率 } 20\% = \underline{233,280 \text{ 個体}}$$

3) 着床具の数量計画

6 群体の親サンゴ群体から大量の幼生が得られるが、サンゴは高密度な着生により大量斃死を引き起こす恐れがある。したがって、生産目標とする着床具（種苗）の数量を計画する際には、適正密度で角筒型着床具（1 個あたりの内面 50cm²）に幼生が着生できる条件となるように、幼生供給量を調整する必要がある。Suzuki et al. (2012) によると、海中で格子状基盤に幼生を直接着生させて育成した場合、着生密度が 0.5 個体/cm²を超えると死亡率が高まり、0.1 個体/cm²が理想的な着生密度である。

例えば、生産目標とする着床具（種苗）数を 1 万個とすると、適正な着生密度で幼生が着生できる条件では、以下に示すように 5 万個体の幼生が必要となる。したがって、2) 幼生供給量で示す 6 群体の親サンゴからの幼生供給量では過大になる。

$$10,000 \text{ 着床具} \times (0.1 \text{ 個体/cm}^2 \times 50\text{cm}^2/\text{着床具}) = \underline{50,000 \text{ 個体}}$$

このように、生産目標とする着床具数に対して幼生供給量が過大な場合には、着床具の設置前（幼生が着生能力を有する 3～4 日齢の時）に幼生数を減らす、もしくは直径 30cm 程度の親サンゴを群体ごとでなく断片を採取して産卵数を減らす等の方法で、幼生供給量を適正量に調整するとよい。断片を採取する場合の必要量の目安は、例えば着床具数 1 万個では、親サンゴ 6 群体からそれぞれ 1/4 程度の断片となる。また、生産目標とする着床具数に対して幼生供給量が不足する場合には、採取する親サンゴの数を増やし産卵数を増やすことで、幼生供給量を適正量に調整するとよい。

着床具の数量計画にあたっての留意点を以下に示す。

- 幼生収集装置（直径 1.7m、高さ約 4m、容積約 9m³）に設置可能な着床具数は、装置の開発試験での実績で約 1 万個のため、1 万個以上の着床具（種苗）を生産する場合は、装置の規模を拡大するか、装置を複数基用意する必要がある。
- 親サンゴは群体ごとに成熟状況に差異があり、想定した産卵数には不確実性を伴うため、着床具の設置前に実際の幼生数を計測し（3.1.4 幼生の収集 3）幼生数の計測を参照）、幼生数を確認・調整する必要がある。

幼生収集装置の開発試験での実績では、幼生収集装置に設置した着床具のうち約 80% の着床具で着生が確認されている（表Ⅱ.3-3）。この実績を踏まえれば、例えば 1 万個の着床具を幼生収集装置に設置すれば、8 千個の種苗が生産できると見積もられる。

表Ⅱ.3-3 幼生収集装置における着生 3 日後の着生維持率（実績）

着床具数	種苗数 (着生が確認された着床具数)	着生維持率
7,348 個	6,152 個	83.7%

注) 着生維持率：各時点で 1 群体以上の着生がみられた着床具の割合

3. 1. 2 事前準備

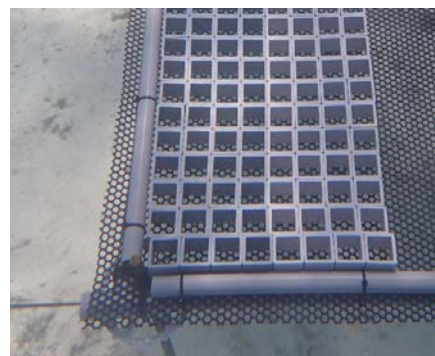
事前準備として、産卵期の約 1 ヶ月前に必要な計画数量の着床具を海中に浸漬し、着床具上に石灰藻やバイオフィルムを繁殖させることで、サンゴの幼生が着生できる状態にする。また、産卵期の約 1 週間前に親サンゴを採取する。

【解説】

1) 着床具の事前処理（海域での浸漬）

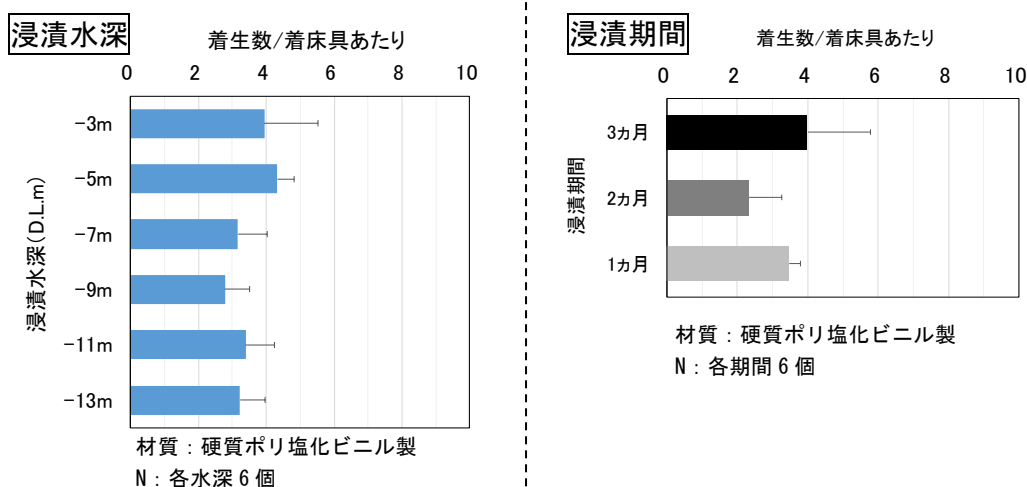
幼生の着生を決めるのは材質ではなく、着床具表面の石灰藻やバイオフィルムであることが知られているため（大森 2016）、着床具を海域に 1 ヶ月間以上浸漬して生物相を形成させる事前処理が必要である。

着床具を海中に浸漬する水深や期間については、浸漬条件（水深・期間）別に角筒型着床具を用いてサンゴの着生密度を比較した結果、浸漬水深は D.L. -3～D.L. -13m までの着生密度に大きな違いはみられず、浸漬期間は 1 ヶ月と 3 ヶ月で同程度の着生数であった。



図Ⅱ.3-9 着床具の浸漬（架台上に着床具を敷き並べた状況）

したがって、着床具の浸漬水深は 10m 程度までの範囲で適応性があり、設置期間は 1 ヶ月間あれば十分であることが確認されている（図Ⅱ.3-10）。



図Ⅱ.3-10 角筒型着床具の浸漬条件（水深・期間）別の着生数結果

2) 親サンゴの採取

親サンゴの採取は、各海域で予想される産卵期の約 1 週間前を目安に行う。

卵と精子を受精させる有性生殖を行うためには、遺伝的に異なる他の群体から放出された卵や精子が必要となる。同じ場所で同種のサンゴを採取するとそれらが遺伝的に同一のクローンである可能性があるため、異なる場所から複数群体採取する。

親サンゴは、天然サンゴの再生産への影響に配慮して、群体ごと採取するのではなく、ハンマーやタガネを用いて断片を採取することが望ましい（第Ⅱ編 2.1 親サンゴの採取・運搬を参照）。なお、親サンゴは産卵後に元の採取場所に戻すことを原則とする。

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、しばらくの間は仮置きしておく。静穏な海域で荒天が予想されていない場合は、親サンゴは幼生収集装置の設置場所となる架台上に直に置く。波当たりが大きい、または荒天が予想されている場合は、結束バンド等を用いて架台に親サンゴを固定する。

親サンゴを採取する場合は、関係機関への手続きが必要となる（第Ⅲ編 現地調査に関する諸手続きを参照）。



Acropora yongei (樹枝状)



Acropora tenuis (散房花状)

図Ⅱ.3-11 親サンゴの仮置き（架台上）

3. 1. 3 幼生収集装置の設置

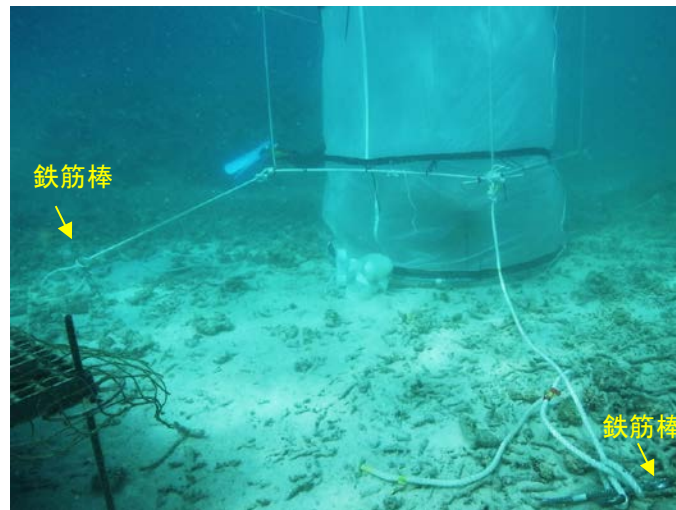
幼生収集装置を設置する際には、幼生収集装置の高さと水深、底質を考慮して設置場所を決める。装置設置の際には、装置が流れの影響を受けやすいことに留意して作業する必要がある。

【解説】

1) 設置場所の選定

幼生収集装置の設置に際しては、事前に設置場所を選定する。幼生収集装置の容量を考慮すると装置の高さは 4m程度が望ましく、当該サイズの装置が満潮時でも水没しない水深（概ね 4m程度）となる場所を選定する。

架台や装置固定用のロープを取付けるための鉄筋棒を打ち込むことを考慮し、底質は砂礫底の場所を選ぶ（図Ⅱ.3-12）。



図Ⅱ.3-12 幼生収集装置の設置場所の例

2) 設置手順

設置手順を以下に示す。

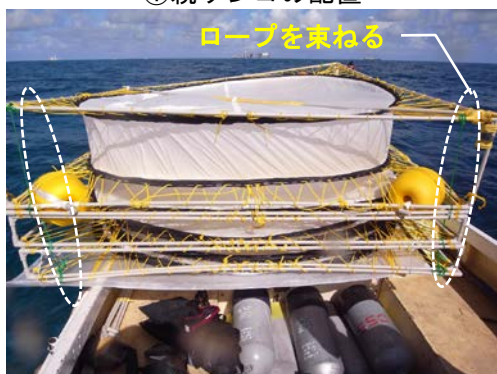
- ① 装置設置場所に架台を設置し、架台上に親サンゴを配置する。
- ② 装置固定用のロープを固定するための鉄筋棒を、設置場所の周囲 4 方向の海底に打ち込む。
- ③ 装置を折り畳んだ状態で船舶に積み、設置場所まで運搬する。
- ④ 設置場所直上の海面に装置を配置する。
- ⑤ ダイバーにより海中で折り畳んだ装置を展開する。装置が流れの影響を受けやすいため、3～4 名の潜水土が同時に装置を下方方向に伸ばしていくことが望ましい。
- ⑥ 架台の天端高と装置の底部の高さが同位置になるよう調整しながら、装置四隅と鉄筋をロープで固定する。四隅のロープは、張力が同程度になるように調整しながら固定する。



①親サンゴの配置



②鉄筋棒の打ち込み



③装置の運搬



④直上（水面）への装置の配置



⑤装置の展開



⑥架台の天端高と装置の底部の高さを調整

図Ⅱ.3-13 装置の設置手順

3. 1. 4 幼生の収集

装置内で親サンゴが産卵したことを確認する。産卵が確認された場合は、装置底部を閉塞して卵・幼生の流出を防ぎ、産卵が確認されない場合は、産卵誘発処理を行う。幼生の収集後、着床具の設置数を調整するために幼生数を計測する。

【解説】

1) 卵・精子の収集

産卵の可能性が高い期間には、毎朝、産卵状況を確認する。なお、ウスエダミドリイシやヤングミドリイシなどの産卵時刻が19時～20時頃と比較的早い種を対象とする場合には、18時頃にバンドルセット（ポリプの口の部分でバンドルが出かかった状態）の確認により、その日の産卵の有無を判断することが可能である。

予定期間を過ぎても産卵しない場合には、産卵誘発処理を行うことが可能である。産卵誘発処理は、過酸化水素水を用いて、成熟群体の産卵を誘発させて計画的に産卵させる技術である（Hayashibara et al. 2004）。産卵誘発の実施日の目安及び手順は下記の通りである（図Ⅱ.3-14）。

産卵誘発の実施日の目安

- 採取した断片の成熟が進んでおり産卵準備が整っている。
- 高い確率で産卵を起こすため、産卵させたい日の前日の午後に誘発処理を行うことができる。

産卵誘発の手順

- ① 架台上の親サンゴ断片をバケツ等の容器に入れて小型船舶上に引き上げる。
- ② ①の容器に過酸化水素が 1mM になるように添加し、2 時間静置する。
- ③ 清浄な海水の入った容器に移し替え、水中に持ち込み、架台上に再配置する。



過酸化水素水の添加状況



静置状況

図Ⅱ.3-14 産卵誘発処理の実施例

2) 装置底部の閉塞

産卵が確認された場合、装置に収集したサンゴの卵や幼生が装置底部から流出しないように、開放されている装置底部を閉塞する作業を行う。作業は開閉可能なファスナーにより行う。

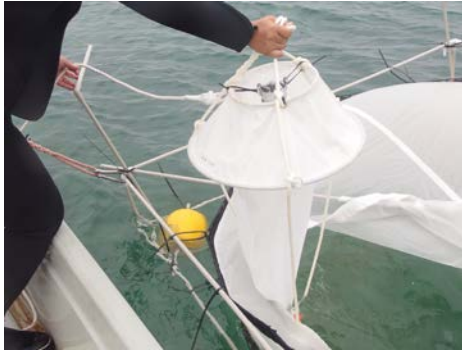
3) 幼生数の計測

想定した産卵数には不確実性が伴うため、着床具の設置前（幼生が 3～4 日齢となる時期）に実際の幼生数を計測し、計画通りの幼生数であるか確認する。

計測作業の手順は以下の通りである。

- ① 装置天井部を開放し、北原式プランクトンネット（口径φ200mm、濾過部口径φ400mm、ネット目合い 100 μm）を装置内の底面から海面に向けて鉛直曳きして幼生のサンプリングを行う。
- ② サンプリング後、採取した卵をメモリ付のポリバケツに洗い流し、海水を加えて 10L にしたものから、1L をサンプルとして採取し、残りの 9L は装置の中に戻す。サンプリングは計 3 回行う。

- ③ サンプルは実験室に持ち帰り、海水を加えて 2L にしたものから 50ml ずつ、実体顕微鏡で計数する。産卵数を測定して 3 サンプル分の平均値を求め、計画値との整合性を確認して後述する着床具の設置量を調整する。



①幼生のサンプリング



②サンプル採取作業



③幼生数の計数作業

図Ⅱ. 3-15 幼生数の計測手順

幼生の収集にあたっての留意点を以下に示す。

- 船上作業時は、親サンゴや収集した幼生は遮光ネット等で覆い、定期的に海水をかけて水温上昇を防ぐ。
- 幼生数の計測実施前に、水中の攪拌を念入りに行うことで装置内の幼生分布が均一化し、幼生数推定の精度を向上できる。方法は、装置底部の中央から空気を数分間送り込み（エアーフロー）、装置全体を循環するような流れをつくる（図Ⅱ. 3-16）。
- 幼生の収集後、親サンゴは元の採取場所に戻る。



エアーフローシステム



装置底部からのエアーフロー状況

図Ⅱ. 3-16 幼生分布の攪拌処置

3. 1. 5 幼生の着生

幼生を着床具に着生させるには、幼生が着生期直前（発生後 66 時間後）であり、かつ鉛直的に大きな偏りなく分布する時期に着床具を設置し、設置後 1～2 日後に回収する。設置方法は、浮力体を付けて海面から鉛直方向に着床具を吊り下げることで行う。

【解説】

1) 着床具の設置時期

着床具は、装置全体を有効利用して設置するため、着生期直前であり、幼生が鉛直的に大きな偏りなく分布する時期に装置内に設置する。

ウスエダミドリイシの幼生の場合は、発生後 66 時間以降に鉛直的に大きな偏りなく分布することが報告されている（岩尾ほか 2014）。石垣島での実証試験事例でも、ウスエダミドリイシの幼生について 3 日齢時に装置内の上・中・下層に分けて定量採取を行った結果、3 層に分布する幼生数は同程度であり、鉛直的にほとんど偏りなく分散することが確認されている（表Ⅱ.3-4）。なお、種によっては、幼生が鉛直的に大きな偏りなく分布する時期が異なる可能性もあるため、既往研究を参考にすることが望ましい。

表Ⅱ.3-4 装置内の各層における幼生数（3 日齢時）の例

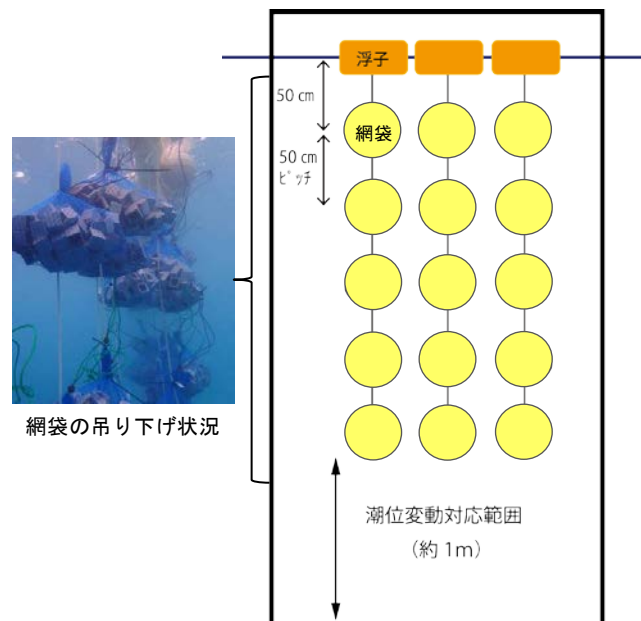
採取層（水深帯）	幼生数（個体/層）	幼生分布割合（％）	幼生数（n/基）
上層 （水面下 0-133 cm）	95,332	37.7	252,704
中層 （水面下 134-266 cm）	72,634	28.8	
下層 （水面下 267-400 cm）	84,739	33.5	

2) 着床具の設置方法

設置方法は、角筒型着床具が 50 個程度入る目合い 1～2cm の網袋に着床具を入れ、装置内の海面下 50 cm から架台上 1m 程度までの範囲に 50 cm ピッチで浮力体を付けて吊り下げる。これを 1 セットとし、必要な着床具数量を複数セット垂下する（図Ⅱ.3-17）。

3) 着床具の回収時期

設置後の着床具は、吊り下げてから 1～2 日後に回収する。幼生収集装置の開発試験の実績では、吊り下げた全ての水深の着床具で、着生が確認されている（岡田ほか 2016）。



図Ⅱ.3-17 着床具の設置イメージ

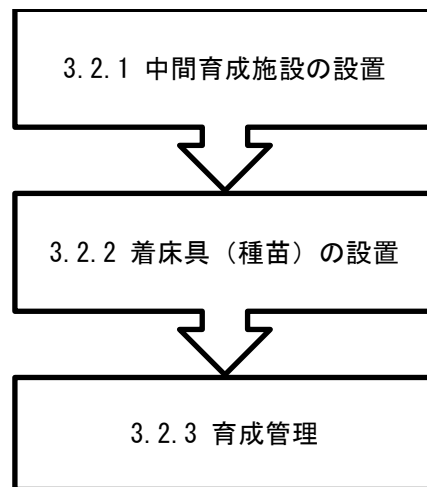
3. 2 中間育成

中間育成では、現地に設置した中間育成施設に、幼生収集装置内の着床具（種苗）を設置し、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。

中間育成の作業フローは図Ⅱ. 3-18 のとおりである。事前に中間育成施設を設置し、幼生収集装置で種苗生産した 0 歳齢の稚サンゴ付着床具を中間育成施設に設置する。その後は、モニタリングを行い移植適正サイズとなるまで育成管理する。



図Ⅱ. 3-18 中間育成の作業フロー

3. 2. 1 中間育成施設の設置

沖縄本島等の沿岸域のように台風が来襲する場所では、海底固定式の棚型中間育成施設またはカゴ型中間育成施設を設置する。

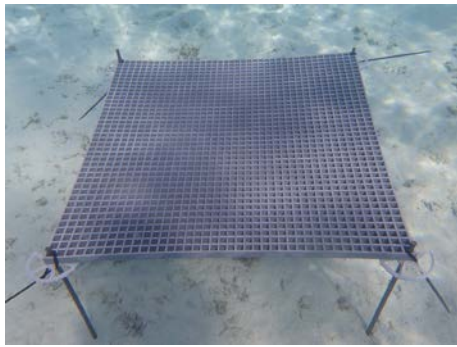
【解説】

1) 中間育成施設の構造

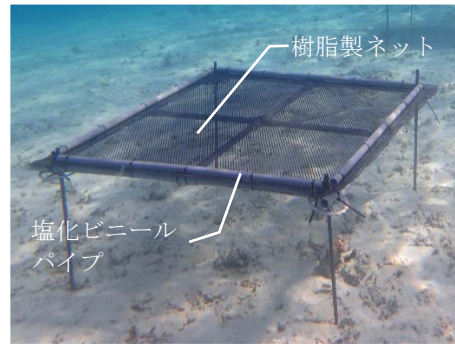
台風等の接近がほとんどみられない波浪条件の穏やかな場所では、垂下式あるいは吊り下げ式中間育成施設を設置することができる。一方、沖縄本島等の沿岸域は、基本的に波浪条件が穏やかな海域であるが、台風の来襲により高波浪の影響を強く受けることがあるため、海底固定式の棚型あるいはカゴ型の中間育成施設で中間育成を行うとよい。カゴ型の中間育成施設は、食害の影響が大きい海域で用いる。

(1) 棚型中間育成施設

幼生収集装置で種苗生産したサンゴの中間育成の実績がある棚型中間育成施設について、写真を図Ⅱ. 3-19 に、部位別の主な材質・寸法を表Ⅱ. 3-5 に示す。着床具（種苗）を設置する天端部は、耐久性に優れる FRP 製グレーチングや樹脂製ネットを用いることができる。



①FRP 製グレーチング



②樹脂製ネット

図Ⅱ.3-19 棚型中間育成施設

表Ⅱ.3-5 棚型中間育成施設の材質・寸法

部位	材質・寸法
天端部	①FRP製グレーチング 寸法：幅100cm、長さ100cm、厚さ4cm ②樹脂製ネット、塩化ビニールパイプ（ネット上面と下面に各4本） 寸法：幅100cm、長さ100cm
脚部	鉄筋棒（呼び径D13）×8本 寸法：外径12.7mm、長さ100cm

(2) カゴ型中間育成施設

幼生収集装置を用いて種苗生産したサンゴの中間育成では、着生したサンゴが捕食されにくい角筒型着床具(Suzuki et al. 2011)を使用するため、種苗は食害を受けにくい。ただし、食害の影響が大きい海域では、オニヒトデやシロレイシガイダマシ類などの食害生物の侵入防止のためのネットや貝返し等を設けるとよい。

陸上施設で種苗生産したサンゴの中間育成の実績があるカゴ型中間育成施設について、写真を図Ⅱ.3-20に、部位別の主な材質・寸法を表Ⅱ.3-6に示す。カゴは、塩化ビニール製パイプおよびプラスチック製ネットの物を用いる。脚部には、食害生物のシロレイシガイダマシ類の侵入を防ぐ貝返し（脚部にプラスチック製の板等を傘状に巻きつけ円錐形状にしたもの、図Ⅱ.3-21）を設ける。沖縄の沿岸で中間育成を行った事例では、貝返し設置以降、殻長1～2cm程度の大型のシロレイシガイダマシ類の侵入は見られなくなり、カゴの脚部より這い上がる個体は貝返しにより排除できる効果が確認されている。カゴに付着藻類が溜まりにくくする対策としてカゴ内に藻食性貝類を収容する場合は、カゴから貝類が逃げ出さないようにネットの目合いは1cm程度とする。



海底への設置状況



上蓋を開けた状態のカゴ

図Ⅱ.3-20 カゴ型中間育成施設



脚部へ貝返しを設置したカゴ型中間育成施設（丸で囲んだ箇所が貝返し）



貝返し近景

図Ⅱ.3-21 貝返しの設置状況

表Ⅱ.3-6 カゴ型中間育成施設の部位別材質・寸法

部位	材質・寸法
カゴ	枠部：塩化ビニールパイプ、径16mm 網部：プラスチック製ネット、目合10mm 寸法：幅80cm、奥行60cm、高さ30cm
脚部	塩化ビニールパイプ、径25mm 寸法：幅100cm、奥行き130cm、高さ100cm
錘（底部）	建材ブロック（空洞付き、約10kg/個） 寸法：390×190×100cm 数量：2カゴあたり8～10個を設置

2) 設置

中間育成施設の設置場所は、以下の条件に基づき選定する。

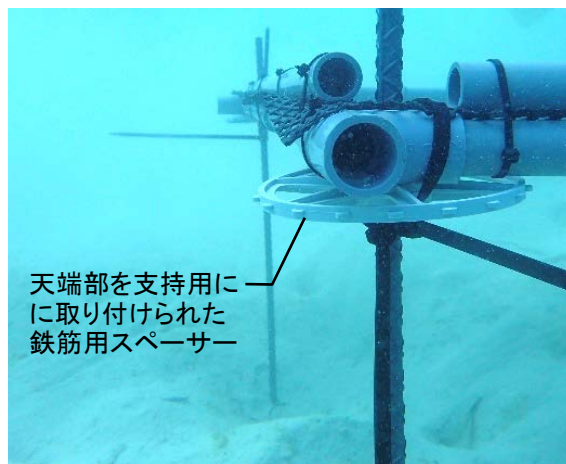
- 赤土等の流入が少なく海水が清浄であること
- 波浪等の影響が少ない静穏な海域であること
- 水深が2～6mであること

設置場所の底質については、荒天時の濁りが起きにくい岩盤が望ましいものの、脚部に鉄筋棒を用いる場合は鉄筋棒を海底に打ち込む必要があるため、砂地や砂礫底の場所でもよい。ただし、その場合は沈下や埋没に注意する。

設置場所の水深については、基本的に水深2～6mとする。2mより浅い場所では波浪の影響が大きくなることが予測されるため、設置は避けた方がよい。なお、光が十分に達し、サンゴの成長が良い海域であれば、6m以深でも飼育は可能である。

中間育成施設は、脚部を海底に打ち込んだり、脚部の周りに重りを配置してロープで固縛したりして、安定した状態で設置場所に固定する。設置後は、中間育成する部位について50cm以上の嵩上げが確保されていることを確認する。

種苗（着床具）を設置することを考慮し、中間育成施設の上面が海底面に対して水平を維持できるようにする。例えば、図Ⅱ.3-22のように、中間育成施設の天端部を支持するために、鉄筋用スペーサー等を脚部の鉄筋に取り付けて天端部の水平を維持するなどの工夫が必要である（図Ⅱ.3-22）。



図Ⅱ.3-22 中間育成施設の水平維持の工夫例

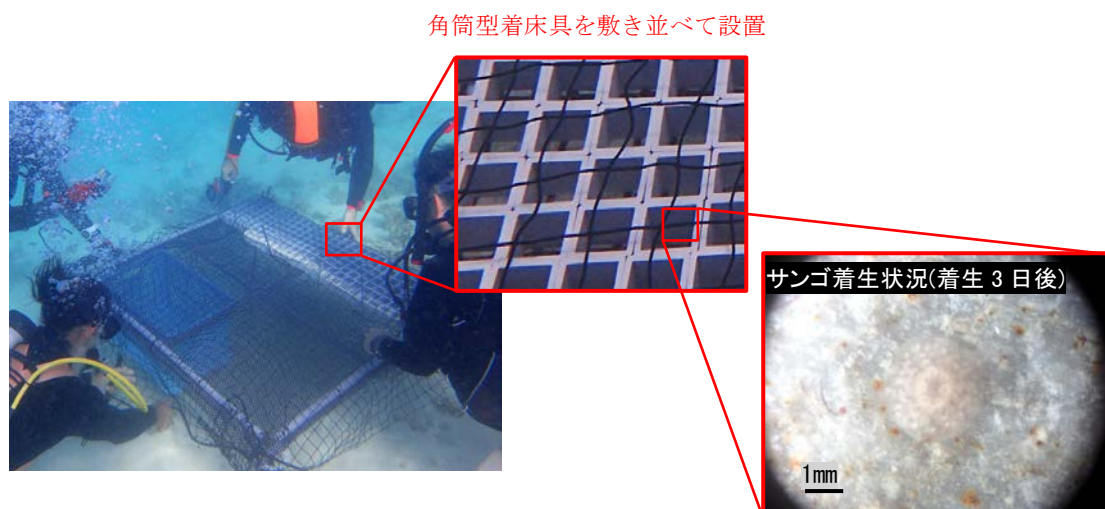
3. 2. 2 着床具（種苗）の設置

幼生収集装置で生産した0歳齢の種苗が着生した角筒型着床具を、中間育成施設上に敷き並べる。

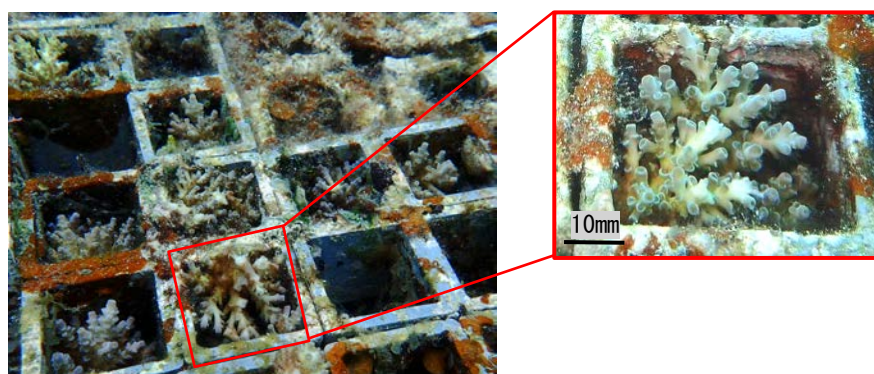
【解説】

幼生収集装置を用いた種苗生産では、0歳齢の種苗付きの角筒型着床具を数千個単位で大量に生産する場合、台風等の荒天時に着床具が動かないように1つ1つを固定すると、多大な労力を必要とする。そのため、着床具を中間育成施設の天端部上に隙間なく敷き並べた後、目合い20～30mmの園芸用や防鳥用に用いられるネットを被せて固縛する方法が効率的である。

また、図Ⅱ.3-20に示すカゴ型中間育成施設の場合は、着床具収容と同時に、藻食性の貝類（タカセガイ等）をカゴ内に収容し、藻類が繁茂するのを防ぐ（Omori 2005）。幅80×奥行60×高さ30cmのカゴに殻幅約2cmのタカセガイ幼貝20個体程度を収容する。



図Ⅱ.3-23 着床具の設置状況およびサンゴ着生状況



図Ⅱ.3-24 中間育成により育成したサンゴの状況例（着生から 15 ヶ月後）

3. 2. 3 育成管理

沖縄本島等の沿岸域では、モニタリングと育成管理を頻繁に行うことが望ましい。

【解説】

沖縄本島等の沿岸域では管理がしやすいため、頻繁にモニタリングを行うことが望ましい。目安として、移植適正サイズになるまでの約 2 年間は 1 ヶ月おきに育成管理を行うことが理想的である。さらに、種苗の生残状況や藻類繁茂等の外的要因のモニタリング結果を解析し、有効な対策を検討することで、順応的に育成管理を行うことが望ましい。

1) モニタリング

中間育成中のモニタリングに関しては「第Ⅱ編 2.3.4 育成管理」を参照する。

2) 育成管理

中間育成中の育成管理に関しては「第Ⅱ編 2.3.4 育成管理」を参照する。

【コラム】陸上水槽で種苗生産した稚サングのカゴ型中間育成

水槽内で生産した稚サング(第Ⅱ編 2.2 陸上施設を用いた種苗生産)を、水槽内で移植サイズまで飼育した場合、揚水やエアレーションのための電気代および飼育管理のための人件費などがかかり、生産コストが高くなる。ある程度の期間は着底直後の稚サングを水槽内で飼育して初期の減耗を低く抑え、その後海域にて中間育成することにより飼育コストを削減することが可能となると考えられる。

そこで、中間育成の有効性を調べるために、2015年および2016年に沖縄県久米島の仲里漁港内において、水深DL-2mおよび-6mに設置した目合1cmの飼育カゴを用いて飼育試験を実施した。飼育カゴは、「3.2 中間育成 3.2.1 中間育成施設の設置 1) 中間育成施設の構造

(2) カゴ型中間育成施設」で示したものをを用いた。藻類の駆除のため、殻幅約20mmのタカセガイ稚貝を1つのカゴあたり約20個体収容した。試験には、1、4、6ヶ月齢のウスエダミドリイシの稚サングを用いた。試験結果は以下の通りであった。

①1ヶ月齢の稚サングを盛夏の7月に沖出しした試験では、沖出し直後から生残率が急激に下がり、1年後にはほぼ全滅した。2016年は沖出し直後に高水温が発生しており、その影響も考えられる。今後も頻繁に高水温が発生する恐れがある盛夏の時期に、小型の稚サングを海域へ沖出しするとことは適切でないのかもしれない。

②4ヶ月齢および6ヶ月齢の稚サングのおもな減耗要因は、シロレイシガイダマシによる捕食であった。2015年の6ヶ月齢、2016年の4ヶ月齢および6ヶ月齢の稚サングを用いた試験では、それぞれ沖出しの496、190、126日後に貝返しを設けた。それ以降は、カゴ内に大型の捕食貝は見られず生残率の低下が緩やかとなった。しかし、貝返し設置以降でも、浮遊幼生として侵入したと思われる殻長2、3mm程度のシロレイシガイダマシが、3ヶ月間隔のモニタリングの際にカゴ内で見られるケースもあった。ひと月に1回程度の駆除で、これらの小型個体による被害は小さくできると考えられる。

③2016年の4ヶ月齢の水深2m、6ヶ月齢の水深2mおよび6mの3つの試験区では、シロレイシガイの捕食が少なかったため、試験終了時の生残率は66～82%であった(試験期間は4ヶ月齢で約9.5ヶ月、6ヶ月齢で約7か月)。

④2015年の6ヶ月齢の試験より、移植に適していると考えられている直径5cmのサングを得るには、着生後約630日の飼育期間が必要と考えられる(水槽内6ヶ月(180日)＋中間育成450日)。

これらの結果から、直径5mmより大きい群体(4か月齢以降)を沖出しし、適正に捕食者の駆除を行うことにより、飼育カゴを用いた中間育成において高い生残率を得ることができると考えられる。但し、遺伝的攪乱を防ぐために、中間育成は、種苗生産に用いた親サングが生息していた海域の近隣で行う必要がある。

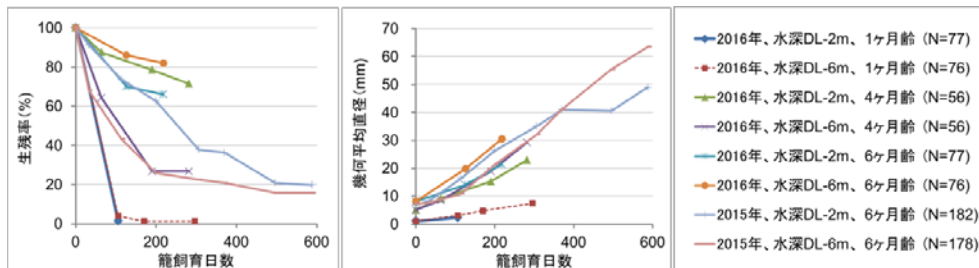


図1 飼育カゴを用いた中間育成試験におけるウスエダミドリイシ稚サングの生残と成長

3. 3 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】

移植の考え方は、「第Ⅱ編 2.4 移植」を参照する。

3. 3. 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。特に、本島沿岸の場合は、人為的な影響（赤土の流入や富栄養化）について注意して選定する必要がある。

【解説】

基本的な考え方は、「第Ⅱ編 2.4.1 移植適地の選定」で示したとおりである。本島沿岸では、環境要素の「地形・基盤」、「水温」、「波浪・流況や砂礫の移動」の条件に加え、人為的な影響となる「赤土の流入」、「富栄養化」について検討が必要である。「サンゴ分布」、「地形・基盤」、「水温」、「波浪・流況や砂礫の移動」、「食害動物」、「サンゴ幼生の供給源として望ましい箇所」については、「第Ⅱ編 2.4.1 移植適地の選定」を参照されたい。なお、本島沿岸の「サンゴ分布」については、人為的な影響によるサンゴ分布の変化が大きいことが想定されるため、過去のサンゴ分布等を考慮した上で、移植適地を検討することが重要となる。ここでは、本島沿岸で想定されるサンゴの育成に影響を及ぼす環境要素とサンゴ分布の関係の有意性の検討方法について解説する。

なお、選定された移植適地が、漁業やマリンレジャー等の人の利用される地域と重複する場合には、自治体や漁業者、マリンレジャー運営者に対し、サンゴの保全に配慮した海域の利用方法について協議する必要がある。

表Ⅱ.3-7 本島沿岸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。
赤土の流入	サンゴ礁内の赤土などの堆積状況（SPSS）。
富栄養化	サンゴ礁内における栄養塩類
(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) 赤土の流入

赤土の流入は、代表地点※の SPSS（海域底質中懸濁物質含有量）により把握する。

陸域からの赤土流入により、濁りが透明度を低下させ、長期にわたって光量不足が続くと、サンゴの成長が阻害される。また、赤土の堆積は、サンゴ幼生の着底も阻害するため、赤土の流入の影響が極力小さい場所を選ぶ必要がある。大見謝（2003）によると、SPSS が 30kg/m³ を上回るとサンゴ被度が低下すると報告されており、これらを基準にしてサンゴの移植可能な場所であるかどうか判断する。

※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、各環境要素の特性に応じて、地点数を設定する。

(2) 富栄養化

富栄養化は、サンゴ礁内の代表地点における採水分析による栄養塩類を把握する。

農地からの肥料や畜産ふん尿、あるいは生活排水が流入することにより、富栄養化した海中では、基盤上に海藻類が繁茂し、幼生の加入や成長を阻害することがある。また、植物プランクトンが増殖しやすくなるため透明度が低下し、サンゴの成長が阻害されるため、海域の富栄養化状況を水質調査で確認し、富栄養化していない場所を選定する必要がある。

3. 3. 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】

移植に関しては「第Ⅱ編 2.4.2 移植」を参照する。

3. 3. 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】

育成管理に関しては「第Ⅱ編 2.4.3 育成管理」を参照する。

引用文献

- Abrego D, Willis BL, van Oppen MJH (2012) Impact of light and temperature on the uptake of algal symbionts by coral juveniles. PLoS ONE, 7(11), e50311, doi:10.1371/journal.pone.0050311
- 安藤 亘・石岡 昇・岩村俊平・三宅崇智・宮地健司 (2008) サンゴ増殖礁の開発を目的としたタカセガイ中間育成礁による検証実験. 海洋開発論文集, 24, 813-818
- 青田 徹・綿貫 啓・柴田早苗・熊谷 航・灘岡和夫・三井 順・岩尾研二・谷口洋基・大森 信 (2004) サンゴ礁形成要因としてのサンゴの成長量に与える物理環境の影響. 海岸工学論文集, 51, 1071-1075
- Baker AC, Glynn PW, Riegl B (2008) Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 80(4), 35-471
- 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
- Berkelmans R, Van Oppen MJH (2006) The role of zooxanthellae in the thermal tolerance of corals: a nugget of hope for coral reefs in an era of climate change. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 273(1599), 2305-2312
- Buddemeier RW, Baker AC, Fautin DG, Jacobs JR (2004) The adaptive hypothesis of bleaching. In Rosenberg E, Loya Y (ed.), Coral Health and Disease, Springer, New York, 427-444.
- dela Cruz, D and Harrison, PL (2017) Enhanced larval supply and recruitment can replenish reef corals on degraded reefs. Scientific Reports 7:13985, doi:10.1038/s41598-017-14546-y
- Dixon G B, Davies SW, Aglyamova GV, Meyer E, Bay LK, Matz MV (2015) Genomic determinants of coral heat tolerance across latitudes. Science, 348(6242), 1460-1462
- Fukami H, Omori M, Shimoike K, Hayashibara T, Hatta M (2003) Ecological and genetic aspects of reproductive isolation by different spawning times in *Acropora* corals. Marine Biology, 142(4), 679-684
- 波利井佐紀 (2012) 造礁サンゴ類の初期生活史における共生成立過程. みどりいし, 23, 8-13
- 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
- 林原 毅 (1995) 慶良間列島阿嘉島周辺の造礁サンゴ類とその有性生殖に関する生態学的研究. 博士論文, 東京水産大学, 123p
- Hayashibara T, Iwao K, Omori M (2004) Induction and control of spawning in Okinawan staghorn corals. Coral Reefs, 23, 406-409

- Hoegh-Guldberg O, Mumby AP, Hooten AJ, Steneck RS, Greenfield P, Gomez E, Harvell CD, Sale PF, Edwards AJ, Caldeira K, Knowlton N, Eakin CM, Iglesias-Prieto R, Muthiga N, Bradbury RH, Dubi A, Hatziolos ME (2007) Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318, 1737-1742
- 岩尾研二 (2010) サンゴをかじる種. *みどりいし*, 21, 34-37
- 岩尾研二・佐藤 力・平田清佳 (2014) 発生中のミドリイシ属サンゴ胚の浮沈. *みどりいし*, 25, 30-32
- 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, 521-526
- 神田 優 (1996) ニザダイ科魚類の摂食に関わる機能形態学的研究. 東京大学農学生命科学研究科学学位論文要旨, 96p
- 片山悦治郎・米澤泰雄・小松俊晶・山本秀一・安藤 亘・西崎孝之・渡邊則仁 (2014) サンゴ生息状況及び生息環境条件の重ね合わせによる沖ノ鳥島のサンゴ再移植適地検討. *日本水産工学会学術講演論文集*, 129-132
- 片山美可・森田太一・鈴木久美子・米澤泰雄・片山悦治郎・山野博哉・安藤 亘・西崎孝之・渡邊則仁 (2014) サンゴの分布拡大のための時系列な高分解能衛星画像を用いた沖ノ鳥島のサンゴの把握. *日本リモートセンシング学会, 第56回学術講演会論文集*, 93-94
- 加藤伶奈・服田昌之・中村良太・朝倉邦友 (2016) ミドリイシ属サンゴに着生行動を引き起こす海洋性バクテリア. *日本サンゴ礁学会第 19 回大会要旨集*, 41
- 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
- 公益社団法人全国豊かな海づくり推進協会 (2016) 平成 29 年度水産多面的機能発揮対策講習会講習テキスト
- 久保弘文 (2015) タカセガイ育成礁を活用した中間育成技術開発. 平成 25 年度沖縄県水産海洋技術センター事業報告書, 75, 23-35
- 久保弘文・諏佐直子・堀井 亨・勝俣亜生 (1993) タカセガイ中間育成礁の開発IV. FRPグレーチング型付着基盤の敷設試験. 平成4年度沖縄県水産試験場事業報告, 122-133
- Levy G, Shaish L, Haim A, Rinkevich B (2010) Mid-water rope nursery-testing design and performance of a novel reef restoration instrument. *Ecological Engineering*, 36, 560-569
- Lirman D, Thyberg T, Herlan J, Hill C, Young-Lahiff C, Schopmeyer S (2010) Propagation of the threatened staghorn coral *Acropora cervicornis*: methods to minimize the impacts of fragment collection and maximize production. *Coral Reefs*, 29, 729-735
- Luna GM, Biavasco F, Danovaro R (2007) Bacteria associated with the rapid tissue necrosis of stony corals. *Environmental Microbiology*, 9, 1851-1857
- Mascarelli A (2014) Designer reefs. *Nature*, 508(7497), 444
- Morse ANC, Iwao K, Baba M, Shimoike K, Hayashibara T, Omori M (1996) An ancient chemosensory mechanism brings new life to coral reefs. *Biological Bulletin*, 191, 149-154

- Morse DE, Hooker N, Morse ANC, Jensen RA (1988) Control of larval metamorphosis and recruitment in sympatric agariciid corals. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 116, 193-217
- 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
- Nakamura T, Yamasaki H (2008) Flicker light effects on photosynthesis of symbiotic algae in the reef-building coral *Acropora digitifera* (Cnidaria: Anthozoa: Scleractinia). *Pacific Science*, 62(3), 341-350
- Nedimyer K, Gaines K, Roach S (2011) Coral tree nursery: an innovative approach to growing corals in an ocean-based field nursery. *Aquaculture, Aquarium, Conservation and Legislation International Journal of the Bioflux Society* 4, 442-446
- Negri AP, Webster NS, Hill RT, Heyward AJ (2001) Metamorphosis of broadcast spawning corals in response to bacteria isolated from crustose algae. *Marine Ecology Progress Series*, 223, 121-131
- 日本サンゴ礁学会サンゴ保全委員会 (2008) 造礁サンゴ移植の現状と課題. *日本サンゴ礁学会誌*, 10, 73-84.
- 西平守孝 (1995) サンゴ礁 生物がつくった〈生物の楽園〉. 平凡社 東京, 93p
- Nozawa Y, Isomura N, Fukami H (2015) Influence of sperm dilution and gamete contact time on the fertilization rates of scleractinian corals. *Coral Reefs*, 34, 1199-1206
- 岡田 亘・安武陽子・鈴木 豪・林原 毅・安藤 亘・石岡 昇・内田 智・中村浩介 (2016) サンゴ幼生の収集・保持・着生装置の開発. *日本水産工学会学術講演会論文集*, 31-34
- 沖縄県環境部自然保護課 (2017) 沖縄県サンゴ礁保全再生事業総括報告書, 8+182+134+3+1+7+8p, <http://www.pref.okinawa.lg.jp/site/kankyo/shizen/hogo/sangohozensaisei.html>
- 大見謝辰男 (2003) SPSS簡易測定法とその解説. *沖縄県衛生環境研究所報*, 37, 99-104
- Omori M (2005) Success of mass culture of *Acropora* corals from egg to colony in open water. *Coral Reefs*, 24, 563
- 大森 信 (2016) 連結式サンゴ幼生着床具は最良のCoral babe magnetではない: すぐれたサンゴ幼生の着生基盤についての考察. *日本サンゴ礁学会誌*, 18, 1-9
- Omori M, Higa Y, Shinzato C, Zayasu Y, Nagata T, Nakamura R, Yokokura A, Janadou S (2016) Development of active restoration methodologies for coral reefs using asexual reproduction in Okinawa, Japan. *Proceedings of 13th International Coral Reef Symposium*, 359-377
- 大森 信・比嘉義視・新里宙也・座安結奈・中村良太・長田智史 (2015) サンゴの種苗生産と植え付け技術の進歩. *日本サンゴ礁学会第18回大会講演要旨集*, 141
- 大森 信・岩尾研二 (2014) 有性生殖を利用したサンゴ種苗生産と植え付けによるさんご礁修復のための技術手法: 付, 積極的なさんご礁修復再生事業に役立つ参考論文集. 熱帯海洋生態研究振興財団, 東京, 63p
- Omori M, Kajiwarra K, Matsumoto H, Watanuki A, Kubo H (2007) Why corals recruit

- successfully in top-shell snail aquaculture structures? *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies*, 8, 83-90
- Omori M, Kubo H, Kajiwaru K, Matsumoto H, Watanuki A (2006) Rapid recruitment of corals on top shell snail aquaculture structures. *Coral Reefs*, 25, 280
- Rinkevich B (2006) The coral gardening concept and the use of underwater nurseries: Lessons learned from silvics and silviculture. In: Precht WF (ed.) *Coral Reef Restoration Handbook*, CRC Press, Florida, 291-301
- Rinkevich B (2014) Rebuilding coral reefs: does active reef restoration lead sustainable to reefs? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7, 28-36
- Sen S, Yousif OM (2016) Development of a coral nursery as a sustainable resource for reef restoration in Abu Al Abyad Island, Abu Dhabi, United Arab Emirates, Arabian Gulf. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies*, 18, 3-8
- Shafir S, Edwards A, Rinkevich B, Bongiorno L, Levy G, Shaish L (2010) Constructing and managing nurseries for asexual rearing of corals. In: Edwards A (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research and Capacity Building for Management Program*, St Lucia, 49-72
- Shafir S, van Rijn J, Rinkevich B (2006) A mid-water coral nursery, *Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium*, 1674-1679
- 新保裕美・山本克則・田中昌宏 (2013) 港内のサンゴ生息地適性指標モデル (HSIモデル) の開発. *土木学会論文集B2*, 69(2), I_1231-I_1235
- 白木喜章・山本秀一・片山悦治郎・安藤 亘・西崎孝之・渡邊則仁 (2014) 沖ノ島島におけるサンゴ幼生追跡シミュレーション. *日本水産工学会学術講演論文集*, 133-136
- Suzuki G, Arakaki S, Suzuki K, Iehisa Y, Hayashibara T (2012) What is the optimal density of larval seeding in *Acropora* corals?. *Fisheries Science* 78, 801-808
- Suzuki G, Kai S, Yamashita H, Suzuki K, Iehisa Y, Hayashibara T (2011) Narrower grid structure of artificial reef enhances initial survival of in situ settled coral. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 2803-2812
- Suzuki G, Yamashita H, Kai S, Hayashibara T, Suzuki K, Iehisa Y, Okada W, Ando W, Komori T (2013) Early uptake of specific symbionts enhances the post-settlement survival of *Acropora* corals. *Marine Ecology Progress Series*, 494, 149-158
- Tebben J, Motti CA, Siboni N, Tapiolas DM, Negri AP, Schupp PJ, Kitamura M, Hatta M, Steinberg PD, Harder T (2015) Chemical mediation of coral larval settlement by crustose coralline algae. *Scientific Reports*, 5:10803. doi: 10.1038/srep10803
- 塚本拓人・山本秀一・安藤 亘・石岡 昇・内田 智・中村浩介・鯉渕幸生 (2015) 長期インターバルカメラを用いた移植サンゴの生残・成長解析. *日本サンゴ礁学会第17回大会要旨集*, 68
- van Oppen MJ, Oliver JK, Putnam HM, Gates RD (2015) Building coral reef resilience through assisted evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(8), 2307-2313
- 依藤実樹子・波利井佐紀・中村良太・朝倉邦友 (2016) 将来の高水温とサンゴ共生褐虫藻の変化-長期飼育実験の結果-. *日本サンゴ礁学会第19回大会要旨集*, 68

- Yorifuji M, Harii S, Nakamura R, Fudo M. (2017) Shift of symbiont communities in *Acropora tenuis* juveniles under heat stress. PeerJ, 5, e4055, doi.org/10.7717/peerj.4055
- 依藤実樹子・波利井佐紀・中村良太・西崎孝之・渡邊則仁 (2014) 高水温環境下で稚サンゴの共生褐虫藻はどう変化するのか? 日本サンゴ礁学会第17回大会要旨集, 72
- 依藤実樹子・波利井佐紀・中村良太・内田智・中村浩介 (2015) 稚サンゴの遺伝的差異と高水温下における共生褐虫藻の変化. 日本サンゴ礁学会第18回大会要旨集, 15
- Yuyama I, Nakamura T, Higuchi T, Hidaka M (2016) Different stress tolerances of juveniles of the coral *Acropora tenuis* associated with clades C1 and D *Symbiodinium*. Zoological Studies, 55(19), doi:10.6620/ZS.2016.55-19