

## 3. サンゴ礁保全再生に関する調査研究

本章では、本事業のサンゴ種苗植付けによるサンゴ礁再生活動に関して必要と考えられる調査及び研究を行った結果を収録した。

3.1 項は、本事業検討委員会の委員であり、サンゴ類・サンゴ礁生態系研究の第一人者のお一人である大森信東京海洋大学名誉教授によって、今後の移植事業や事業に関する各種課題解決に大きく貢献すると考えられる約 500 篇を総説として取りまとめられた成果である。

3.2 項は、サンゴ種苗の移植に関して、種の多様性保全を念頭においた沖縄県下のサンゴのゲノム解析、無性生殖株のミドリイシ類個体群の遺伝的多様性が検証の検証結果である。

3.3 項は、サンゴ種苗移植作業の具体として、成長し、産卵するに至った複数群体の生殖可能な距離について現地調査及び解析された結果である。

### 3.1 移植によるサンゴ礁の修復再生のための研究と技術開発

[Reef rehabilitation through transplantation of corals]

大森 信 Makoto Omori

#### 3.1.1 総論：これまでの進捗

[A review: What we have learned so far]

##### (1) はじめに

さんご礁は地球の海洋総面積のわずか 0.17%にすぎないが、そこには 178,000 種以上（海洋全体の 25~30%）の生物が棲んでいる。さんご礁は海のオアシスと呼ばれるほどの高い生物多様性を有し、海岸を波浪による浸食から護り、漁業生物を育て、観光産業にも大きな利益をもたらすなど、人類に豊かな生態系サービスを提供している。しかし、さんご礁は、今、20 世紀後半からの激しい環境変動のために、減少の一途をたどっている。過去 40 年の間に地球全体で約 40%のさんご礁が失われ、残りも多くが今世紀末までに消滅するだろうとさえ危惧されている (Burke et al. 2011)。こうしたさんご礁の危機は行政や一般にもある程度知られてはいるものの、対策の効果はそれほど挙がっているとは言えない。

造礁サンゴは有性生殖と無性生殖で増える。移植は有性生殖と無性生殖を利用

して種苗を育てて、適当な方法で傷んださんご礁に植込み、さんご礁の回復や再生を期待する技術である。移植技術は4つに大別される。1. 直接移植。2. 無性生殖を利用して種苗を生産し、海中で中間飼育した後、植込む無性生殖法。3. 有性生殖を利用して種苗を卵から育てて、成長してから植込む有性生殖法。4. 移設。

移植によるさんご礁の修復再生のための研究と技術開発は、海外では1980年代、日本では1990年代から行われるようになった（大森・大久保 2003）。さんご礁の危機が意識されはじめた1998年頃からはそれまでの無性生殖を利用した移植に加えて、有性生殖を利用した種苗育成についての研究も始まり、各地で移植事業がさかんに行われるようになった。しかし、これまで広い海域でのさんご礁の再生を実証し、その生態系機能の回復を示すまでには至っていない。その原因は、移植技術が未だ完成に至っていないことと移植を容易な技術と考えると事業に関わる人びとが少なくなかったこと、また、これまで移植に失敗した事例の報告や真摯な反省が十分ではなかったためである。移植は誰にでもできるような容易な技術ではない。費用もかかる。成功したという報告があっても、何を成功とするかという基準がない。安易な移植事業は資金の無駄づかいや開発事業の免罪符になるだけのおそれさえある（日本サンゴ礁学会サンゴ礁保全委員会 2008）。

移植によって修復できるさんご礁の面積は、地球規模で減少が続いているさんご礁の面積に対して、あまりにも小さいから、これだけで地球のさんご礁が修復できるとはだれも考えないだろう。そのため、移植の効果については疑問視する研究者が依然少なくないが、ある程度大規模にサンゴの植込みを行えば、移植したサンゴが成長して、毎年産卵（放卵放精）することによって周辺に運ばれた幼生が着生し広い範囲のさんご礁の修復再生を促進するという働きが認識されてからは、周辺からの幼生供給量が大幅に減ってしまったさんご礁域に、移植で幼生供給基地を造成することの効果が期待されるようになった（Horoszowski-Fridman et al. 2011, Montoya-Maya et al. 2016, Rinkevich 2014）。但し、幼生供給基地としての機能を発揮させるには、同種で遺伝子型の異なる複数の群体をそれらが放出した配偶子同士が受精できる範囲内に植込まなくてはならない。

直接移植は天然のサンゴから群体の一部、即ち破片（断片と呼ぶ）を切り取って、そのまま海底の岩盤や砂礫地、人工礁に固定するものである。少ない費用で容易にできることから、地域の住民や関心のある人たちも参加しやすい。他方で、この方法は断片を採取する親株（ドナー）になる天然のサンゴを傷めるし、断片自体も傷ついているので、植込み後、活着するのにかなりのエネルギーを要するため、死亡率が高く、天然のサンゴに比べて成長が遅くなる。技術の例は大久保・

大森（2001）に、実施の例は Onaka et al. （2013）や dela Cruz et al. （2014）に詳しい。

無性生殖法は採取した断片から種苗を作り、基盤に固定して中間育成施設で一定期間育成して基盤への活着を強めたり、種苗を大きくしたりしてから植込む（移植）技術である。Lirman et al. （2010）は海中の育成施設での *Acropora cervicornis* の断片の成長が、近くの天然の同種群体の成長より勝っていたと述べているが、ほかの研究報告では必ずしもそうではない。この方法も断片を採取する時には親株を傷めるし、植込んだ後で、基盤への活着が不十分で、脱落して死んでしまうサンゴも少なくない。そのうえ、限られた数の親株から種苗をつくと、増えたサンゴ群集は多くのクローンを含むので、遺伝的多様性が低くなる。そしてサンゴ群集が環境変動に対して同じ耐性閾値を持っていれば、移植後の環境変動や病気に対応できず、一斉に白化現象を起こしたり、病気の蔓延によって全滅したりする可能性がある。また、サンゴは多くがクローン間では受精しないので、それらが成長して産卵しても、自然界への大量の幼生供給は期待できない。遺伝的多様性を高く維持するためには、恩納村（沖縄県）の親株育成場のような施設を作って、できるだけ多くの、遺伝子の異なる親株を育てるとか、植込み方法を工夫して、高い遺伝的多様性を保つことが必要になる。技術の例は Shafir and Rinkevich （2008b）や Shafir et al. （2010）に詳しい。また実施の例は Shalsh et al. （2008）や Johnson et al. （2011）に示されている。

有性生殖法による種苗生産は、主に日本の研究機関が開発してきた技術である。この方法は、ミドリイシ類を対象としてサンゴの一斉産卵を利用して、卵と精子の塊であるバンドルを集めて、受精させ、幼生を基盤に定着させる。そして、大量の稚サンゴを海中や陸上施設で育てて、植込むものである。この方法は天然のサンゴを傷つけることもなく、サンゴの遺伝的多様性は高く保てるが、種苗の生産に高い技術と労力、時間と設備（したがって費用も）が必要である。技術の例は大森・岩尾（2014）に示され、実施の例は Omori （2005）や Nakamura et al. （2011）や Guest et al. （2014）にある。

移設は沿岸開発や港湾施設の建設のために破壊される予定のサンゴ群体をそのまま別の場所に移して、保護しようとするミチゲーション事業で、全体のサンゴ群集を増やすことにはならない。技術の例は藤原・大森（2003）や Kilbane et al. （2008）に、実施の例は Seguin et al. （2009）や Kotb et al. （2016）に詳しい。

そのほかに、サンゴのポリプの増加率を切断の刺激や癒合によって人為的に増

やしたり（例えば Forsman et al. 2015）、人工基盤を海中に設置して天然サンゴの幼生を着生させたり（例えば Fujiwara et al. 2016）、陸上施設で増やした幼生を海中に放って着生と成長を期待したりする（例えば Heyward et al. 2002, Edwards et al. 2015）ような、経費と労力をできるだけ削減してサンゴを増やそうとする試みがあるが、その技術は完成には至っていない（McDermott 2016）。

これまで移植の対象になったサンゴは主に枝状のミドリイシ属（*Acropora*）のような成長が速いサンゴ類で、塊状のハマサンゴ属（*Porites*）やキクメイシ属（*Favia*）など成長の遅いサンゴ類はあまり移植されていない。しかし、枝状のサンゴ類は塊状のサンゴ類に比べて環境ストレスに弱いので、死にやすい。長期にわたるさんご礁生態系の回復と保全を期待するとき、この点を十分に意識して、移植に用いる種を選び、塊状のサンゴ類や被覆状のサンゴ類を加えた移植事業を展開することが望ましい（Edwards and Clark 1998、Muko and Isawa 2011b）。

無性生殖法と有性生殖法による移植の工程は、二つの段階に分けられる。種苗生産と中間育成が第一段階、植込みが第二段階である。前者に関しては、もちろんさらなる研究が必要だが、これまで多くの技術開発がなされてきた。しかし、後者（第二段階）に関しては、基盤の選択、植込み方法、種や適地の選択、植込みの距離間隔、耐波性、遺伝子の多様性を保持した種苗の組み合わせ、幼生加入の促進など、いまだ多くの課題が手つかずに残っている（Rinkevich 2014）。また、重要なことは移植後のモニタリングである。標識や GPS 付きの水中カメラや方形枠などを用いて、移植直後の 1 か月は毎週 1 回、次の 2 か月は月 2 回と云うように、定期的にサンゴの状態の観察を続ける。観察期間は 3~4 年で（後半は年 1 回でもよい）、植込んだサンゴが産卵する時まで観察を続けて記録を残し、結果を将来の技術開発に用いたいものである（例えば Ammar et al. 2013）。

2005 年に開始された WB/GEF による国際研究事業 The Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program（サンゴ礁の研究と管理能力の向上にシボった研究計画）は世界各国の第一線の研究者と 40 に及ぶ研究機関の参加を得て（日本からは大森 信、木村 匡、岩尾研二、田村 實が参加）、サンゴ移植の目標、問題、技術の現状と展望などについて考察するとともに、移植技術の向上を目指して、現場で種々の移植実験を行った。そして、その結果を 1) 基本概念とガイドライン（Edwards and Gomez 2007）と 2) マニュアル（Edwards 2010）の 2 つの出版物にまとめて刊行した。そこで強調されていることは、参加者の総意として発表された「さんご礁の自然環境を改善できないままにサンゴを

者の総意として発表された「さんご礁の自然環境を改善できないままにサンゴを移植しても順調に育つものではない。さんご礁の保全と再生を目指すとき、移植の前に、サンゴが自然に増えるような環境に戻すことがもっとも重要である」というフレーズである。もともとサンゴのないところに移植をしてもサンゴは育たない。また、悪化しているさんご礁の自然環境を改善できないままに、サンゴを移植しても、順調に定着、成長しさらに繁殖するものではない。

移植と移植技術に関するレビューは、そのほかに Edwards and Clark (1998) や大森 (2003) や Rinkevich (2005) がある。もっとも最近では Barton et al. (2015) によるものがある。

本総説では、これまでの研究と技術開発をふりかえって明らかになった事柄を総括し、移植事業を成功させるためには何が必要なのかを考え、そして移植事業のこれからについても考察する。論文は二部から構成されている。3.1.1 では、これまでの移植技術の発展に関わる研究成果を総覧して、問題点とこれからの展望を述べる。3.1.2 は約 500 篇に及ぶ参考論文リストである。

総説は以下の項目が含まれる。

- (1) はじめに、
- (2) 直接移植、
- (3) 無性生殖を利用した種苗生産、
- (4) サンゴ断片の接着、
- (5) 有性生殖を利用した種苗生産、
- (6) 褐虫藻の導入、
- (7) サンゴ幼生の着生基盤、
- (8) 幼生と種苗の輸送、
- (9) 植込み、
- (10) 環境要因と投餌がサンゴの成長と生残に与える影響。
- (11) 汚損生物の除去、及び魚類や無脊椎動物による食害防止、
- (12) 電着技術を応用したサンゴの成長促進技術、
- (13) 費用対効果に関するもの、
- (14) 移植の研究と事業の将来。

## (2) 直接移植

天然のサンゴ群体から採取した断片や波浪などで折れ落ちた断片をそのまま基底（海底）の岩場や砂礫地に固定する技術（“low-tech” method とよばれる）

である。サンゴは無性生殖でも増える。波浪によって壊れたサンゴの一部が海底に活着（サンゴの組織が基底に固着すること）して、そこから新しいポリプが成長し、大きな群体になることは、よく見られる現象である。Smith and Hughes（1999）は3種のみドリイシ群体から人為的につくった断片900本を海底に撒いて17か月後の生残数を調べ、*A. intermedia*では32%が、*A. hyacinthus*でも8%が生存し、それらの活着率は0~50%であったことを報告した。一般に、折れた断片の成長速度は天然の同じサイズの群体に比べて低く、また生残率も低く、卵巣内卵数も少なくなる。これは、断片が基底への活着のために多くのエネルギーを要することが原因と思われる。長さ約5、10、20 cmの断片の*A. formosa*断片の移植後の生残率と産卵活動を調べた Okubo et al.（2005, 2007）によると、それらは断片の大きさと移植時期によって異なり、18か月後の生残率は20 cmが100%でもっとも高く、5 cmでは29%であった。また、5 cmでは卵母細胞が吸収されたが、20 cmでは発生が進んだ。また、移植時に卵母細胞が発生初期だった*A. nasuta*では卵母細胞が吸収されたが、発生後期だったものは発達して、産卵した。また、植込み直後には産卵が見られたサンゴでも、2年目、3年目には産卵しないものが増えた（Okubo et al. 2009）。直接移植で天然のさんご礁から種苗を採取すれば、さんご礁のサンゴ被度は低下し、植込み後の種苗の死亡率と成長率もまた、植込み直後から1年目までに低下することが多いので、全体のサンゴの被度は一旦下がり、元に戻るまでに数年かかる（Yap and Gomez 1985, Clark and Edwards 1995, Forrester et al. 2014）。また植込み1年後の生残率が高くて2年目に低下することもあり、移植後はサンゴが活着と生残のために生殖と成長を犠牲にしていることがわかってきた。直接移植が成功しなかった例は少なくない。カリブ海で波浪によって折れ落ちた*Acropora palmata*をサンゴ基底にケーブルタイで固定したケースでは12年後、たった3%しか生存しておらず、群体の56%が剥離し、35%がその場で死亡していた（Garrison and Ward 2012）。

移植後の生残率は一般に小さい断片ほど低い。これは活着や生存のためのエネルギーの蓄積が少ないことに加えて、魚類などの食害と砂や転石などによる破壊を受けやすいことによる。一方、移植時の断片が大きすぎる場合は波浪によって破損又は流失しやすい。Soong and Chen（2003）は*Acropora pulchra*の断片を台湾南部の浅海の育成施設で飼育して、断片の大きさや移植の仕方などがサンゴの成長に影響することを明らかにしている。小さな断片より大きな断片の方が成長率も生残率も高いことが示され、1 cm程度の断片は藻類に覆われてしまったり、魚の食害を受けたりして失われるために種苗としては適さないこと、親株につい

ては断片を採取しすぎると生殖能力が落ち、回復までに数年かかることなどが明らかにされた。彼らは移植に用いるミドリイシ類の断片の大きさは約4 cmがよく、また断片に傷をつけておけばそこからの新しい枝の成長が促進されると述べている。

### (3) 無性生殖を利用した種苗生産

群体から採取した多数の断片を人工基盤に活着させ、種苗として中間育成施設で一定期間育成したのちに基盤ごと固定する技術である（例えば Rinkevich 2000, Shafir et al. 2006 a, b）。人工基盤を用いず、断片をそのまま海中の施設で育成する方法もある（Mbije et al. 2013, Montorya-Maya 2016）。

無性生殖を利用した種苗生産では、直接移植同様、天然のサンゴ群体を切り取って種苗（断片）にすることが多い。しかし、それでは天然のさんご礁を傷めることになるし、断片の切り方や、移植場までの運搬の仕方などによって、植込み後の種苗の生残や成長が大きく変わる。親株となるサンゴ群体の不足やサンゴ群体への影響を最小にするために試みられる小さな断片を種苗とすることも、植込み後に同様な課題がある。これらの課題を解消するために、Rinkevich（1995, 2000）は移植のための種苗を好適な環境条件の下で中間育成して、断片の切り口を癒し、基盤への活着を強化し、大きく育ててからサンゴを移植する「Gardening approach」を提唱した。これは陸上の栽培植物の育苗法に準ずるもので、大量の種苗の中間育成が鍵である（Shafir and Rinkevich 2008a）。植込みの前に種苗の中間育成をすることで、断片を作るときにサンゴに加えられた大きなストレスが和らげられ、また切断の刺激は切断部分の成長につながることもあるようである。中間育成は大きな水槽のある陸上施設や、懸濁物や海底からの砂礫の移動の影響を受けない、波の静かな、海中の施設で行なわれていて、その効果が確かめられている（例えば Shafir et al. 2006b, 比嘉ほか 2017）。

種苗となる断片は、なるべく多くの親サンゴから採取することで遺伝的多様性を高めることで、植込んだのちのサンゴ群集が成長してから、環境ストレスに同じ反応を起して白化や病気の蔓延を起さないように配慮する必要がある（Shaish et al. 2010, Shafir and Rinkevich 2013）。

移植によって回復したさんご礁を長く持続するためには、できるだけ自然状態に近いさんご礁の再生を目指すことが重要である。そのためには自然のさんご礁の状態を遺伝的多様性の観点からも調べたうえで、種多様性と遺伝的多様性の保持を心がけて、移植を行わなければならない（例えば Baums 2008）。遺伝子型は

AFLP 法を用いたり、マイクロサテライトマーカ―を使用して解析できる（例えば Amar et al. 2008、Shinzato et al. 2014）。

サンゴの断片は、親株からハンマーとたがねやワイヤーカッターを使って切り取って形を整える。ミドリイシ類の群体の一部だけを切り取った場合は、親株の傷口は普通 1 週間ぐらいでふさがり、約 1 か月後には中軸ポリプが見られるようになる。テーブル状やコリンボース状のサンゴの場合は群体周辺全体からでなく、ケーキを切るように扇形で切り取る方が良い（Heeger and Sotto 2000、比嘉ほか 2017）。こうすれば、切り取られた部分の両側から回復が進んで、約 1 年後には、ほぼ円形に回復する。ハナサンゴ類 (*Euphyllia*) のような塊状で壊れやすいサンゴの切り取りには繊細な工作などに利用されるロータリーツール (dremel tool) が使われている (Borneman and Lowrie 2001)。親株からの断片の切り取りは 10% 程度に留める方が、親株の生残にも産卵にも悪い影響が出ないようで、Epstein et al. (2001) は、そのことを *Stylophora pistillata* で確かめている。また、枝先から断片を切りとると、親株は、切断が刺激となって、切り取らなかったサンゴより成長を高めることが多くの観賞用サンゴ同好者に知られている（例えば Lirman et al. 2010）。

断片の大きさについては、野外では、大きい方が環境ストレスや藻類、及び懸濁物の影響を受けにくく、魚類などによる食害も少ないという報告が多い (Bowden-Kerby 2001, Okubo et al. 2005)。カリブ海の *Acropora cervicornis* では、2.5 cm の断片の死亡率が 87%であったのに対し、3.5 cm では 13%であった (Lirman et al. 2010)。断片を植込む際は方向は横向きでも縦向きでもよいが (Lam 2000, Gomez et al. 2011)、樹枝状サンゴやテーブル状サンゴでは、基盤に活着した断片が受ける水流の圧力が幅と高さとの比率によって変わるので、断片は幅 1 に対して高さ 2~3 以下にとどめてバランスを保つように配慮する。しかしながら、水槽を用いた育成の場合は、魚類による食害を除くことができるし、流れや懸濁物などの環境ストレスも調節できるので、断片の形や大きさはそれほど問題にならない。Forsman et al. (2006) は陸上水槽で *Porites lobata* の小さい断片を育成して、3 cm<sup>3</sup>以上の断片で生残率と成長率が最も高くなったと述べている。

中間育成施設はいろいろなものが考えられている (Shafir et al. 2010)、例えば、紅海の Eilat 湾では海底上 14 m、深さ 6 m に垂下式の施設を作って、サンゴの育成環境を向上させた。流れが大きくなること、適当な照度を得られること、堆積物がたまらないこと、サンゴ食の生物が近づきにくいことなどが利点であっ

た (Rinkevich 2006、Shafir et al. 2006b)。Nedimyer et al. (2011) は浮きを付けたロープに数本の PVC パイプを横に取り付け、それに断片を吊り下げる coral tree nursery を考案し、近年、各地で用いられている。ロープだけの垂下式あるいは吊り下げ式育成施設もある。利点は安価で、ロープのねじりを戻した「すき間」に断片（基盤なし）を差し込んで垂下できることで、こうすれば付着生物も少なくなる (Levy et al. 2010)。

垂下式あるいは吊り下げ式の間育成施設は海面からの深さを変えることができる。そうすることで、断片の生残率や成長率が変わることが知られている。Soong and Chen (2003) は *Acropora pulchra* の断片で、深さ 5 m と 10 m の成長率を比較した。その結果、光量の勝っている 5 m の方が 10 m より高くなった。しかし、5 m 層では波や流れが 10 m 層より強かったので、サンゴの剥離数は 5 m 層の方が多かった。

台風などがしばしば来襲するために、垂下式や吊り下げ式の間育成施設が設置しにくい場所では、海底に固定式の棚状の施設を作る。棚の高さは海底から 50 cm 程度である (Shaish et al. 2008, 比嘉ほか 2017)。

間育成の期間は種や断片の大きさや施設のある場所の環境（水温や食害生物の存在）によって変える。また、管理にかかる費用も、期間を決める要素になる。一般に、成長の遅いハマサンゴ類の方が、成長の速いミドリイシ類より植込み後は強いので、植込みに用いる種苗の大きさはハマサンゴ類では 4~5 cm ミドリイシ類では 7~10 cm が適当であろう (Shafir et al. 2010, 比嘉ほか 2017)。間育成をはじめたときの断片の長さが 3 cm 程度のミドリイシ類であれば、7~10 cm に成長するには 9~12 か月かかる (Shafir et al. 2006)。

これらとは別に、同じ遺伝子を持つサンゴの小断片 (nubbin と呼ばれる数個のポリプだけからなる微小断片から 1 cm<sup>2</sup> ぐらいまでの断片) を基盤に並べて張り付け、水槽で飼育すると、切断の刺激によって小断片の成長が促進されることと、4 で述べるように、クローン (同質遺伝子) 間の癒合や同種間のキメラ癒合によって、サンゴの成長率が著しく増大し、終いには小断片が基盤を覆うまでに大きくなる。例えば、*Orbicella faveolata* と *Porites lobata* では月間成長率 (被覆面積) がそれぞれ 63 cm<sup>2</sup> と 23 cm<sup>2</sup> に達している (Forsman et al. 2015)。Forsman et al. (2015) はこの方法で生産された種苗を野外の移植事業に用いる可能性を考えているが (McDermott 2016)、無性生殖を利用した移植技術としては未完成である。

#### (4) サンゴ断片の接着

サンゴは多くが群体で生活する生きものなので、断片は群体の一部である。天然でも、台風などによって折られたいろいろな種の断片が基底に活着して成長し、分布を広げている (Bothwell 1981、Highsmith 1982)。しかし、断片がどんな素材の基盤に活着しやすいか、また基盤に活着する速度はどの位なのかについては、詳しく比較研究されていない。前者については、フェライト入りコンクリート、素焼きタイル、コンクリートブロック、自然のサンゴ岩盤、鉄板の 5 種の基盤を設置し、*Acropora tenuis* の断片 (長さ 10 cm) を断片の下端から 1 cm のところにケーブルタイで固定して活着率を比較したところ、2 か月後にはコンクリートブロックとフェライトコンクリートでは約 90 %、素焼きタイルとサンゴ岩盤では約 50 % が活着した。しかし、鉄の基盤には 29 % しか活着せず、基盤が錆びるとはがれてしまった (大久保 2003)。近年の沖縄での大規模移植事業ではマグネシウム系固化剤 (藤森・小杉 2000) を用いた人工基盤が使われた。海外では、サンゴ砂とセメントを混ぜた Aaragocrete (Anonymous 2013) やシャコガイ殻 (Dizon et al. 2008) , スラグ入り基盤 (Mohammed et al. 2012) など基盤として用いられている。

大きな断片の基盤への接着や種苗の付いた基盤の基底への接着にはステンレススチールの針金やケーブルタイや瞬間接着剤や各種のエポキシ樹脂水中接着剤 (例えばユニシ水中ボンド E380) が用いられている (Guest et al. 2010)。前出の nubbin のような小断片はワイヤーカッターで切り取って、水中で保管し、切口を一端乾燥して瞬間接着剤 (cyanoacrylate glue、例えば Super Glue®) で基盤に貼り付け、水槽に戻す。Boch and Morse (2012) は、pushmount (れんが工事に用いる埋め込みピン) の上に断片を立て、周りを Tygon® チューブで巻いて外側からケーブルタイで締めるといふ、接着剤なしの、断片の接着方法を考案した。

ミドリイシ類の断片はほぼ 2 週間~1 か月で基盤に活着するが、活着に要する時間は種類によって大きく異なる。それはまた基盤の素材や季節によっても異なると考えられるが、十分に測られていない。Guest et al. (2009) が形状の違った 7 科 11 種のサンゴ断片の活着速度を調べた結果、*Acropora hyacinthus* や *A. difitifera* がもっとも速く、1 か月後には活着したが、キクメイシ科の *Echinopora lamellosa* では 5 か月後でも 50 % が活着したに過ぎなかった。

別々の容器に主剤と硬化剤が入っている水中接着剤では、使用直前に 2 剤を混ぜて、硬化する前に手早く水中での作業を終える。接着剤が死んだ組織の上をできるだけ覆うように塗布すれば、生きた組織がやがて硬化した接着剤を覆って成

長する。基底や基盤と断片の間に死んだ組織が露出していると、新しい組織が死んだ組織の上に伸びて来ず、活着までの時間が長くかかる (Osinga et al. 2012)。

植込みにあたって、種苗の向きは横でも縦でもよいが、生きたポリプと基盤（あるいは基底）との接触面ができるだけ大きく（広く）なるように留意する。断片が基盤に十分に接着しないと、波や流れによって、基盤から剥離する。接着が悪ければ、このような剥離による死亡が断片自体の実際の死亡を上回ることさえおきる (Garrison and Ward 2012、Shafir et al. 2006b)。

#### (5) 有性生殖を利用した種苗生産

サンゴの多くは雌雄同体で、その内の約 80%は卵と精子を海中に放出して体外受精を行う（放卵放精型）。一方、20%は、体内受精を行い、受精卵は胃腔内でプラヌラ幼生になって体外に放出される（プラヌラ幼生保育型）。有性生殖を利用した種苗生産は放卵放精型サンゴ（例えば *Acropora tenuis*）とプラヌラ幼生保育型サンゴ（例えば *Pocillopora damicornis*）のいずれでもできるが、まず、対象の種の産卵時期あるいはプラヌラ幼生の放出時期を知らなければならない。地方によっては、それらが明らかになっていないところもあるが、放卵放精型の種では、ひとつの場所での産卵時期や産卵時間が毎年ほぼ一定なので、調査を重ね、それを基に、作業計画を立てる (Guest et al. 2010)。

放卵放精型の種では野外観察で群体の成熟を判定し、産卵直前に海中でサンゴ群体の上に漏斗状のバンドルコレクターを設置することによって、容易にバンドルを採取できる。採取したバンドルは室内に持ち帰り、直ちに受精作業にかかる。また、一斉産卵の夜から翌朝にかけては水面を帯状に漂流するスリックが形成されることがあるので、バケツやひしゃくでこれをすくって受精卵を集めることもできる。プラヌラ幼生保育型の幼生のコレクターも工夫されているが (Guest et al. 2010, Horoszowski-Fridman et al. 2011) , このタイプの種では、野外で幼生の放出時間を特定することが難しいので、現場で幼生を採取するより、親群体やその一部を採取して室内の水槽に移して飼育し、やがて放出された幼生を集める方が容易である (大森・岩尾 2014)。

72 種のサンゴの遺伝子座あたりのアレル多様度（遺伝的多様性）を解析した Shearer et al (2009) によると、アレル多様度は平均 8.27 であった。彼らは種の遺伝的多様度を次世代まで保持するためには 10~35 株の群体から配偶子を得る必要があると述べている。植込み後のサンゴ群体の遺伝的多様性を高めるためにも、なるべく多くの群体から配偶子を採取する方がよいが、室内での受精作業

に使える親株に限りがあるので、一種類のサンゴにつき 3 群体以上から得たバンドルから得た精子と卵を混合して受精させている (Iwao et al. 2014)。容器に移したバンドルはヘラで攪拌して、卵と精子を分離する。卵は水面に浮くので、集めて洗卵し、別の容器の別の親群体から採取した精子を混ぜて受精させる。精子は卵を掬い取った残液中に白濁しているので、それを用いる。

精子は高い濃度 (105 ないし 106 / ml) の場合に、多精受精を抑えて受精率が最も高まる (多くの場合 80%以上) (Willis et al. 1997, Omori et al. 2001)。受精卵は正常な発生過程を経て、やがてプラヌラ幼生になって水中を漂い始める。この間もっとも重要なことは、飼育水を清浄に保つことである。そのために、胚が水面に浮かんでいる間は、胚を集めて新鮮な濾過海水を満たした水槽に移動させる作業を繰り返す。病気の発生を抑えるために、UV 処理をした濾過海水を使う場合もある (Guest et al. 2014)。幼生が水中に分散するようになったら、容器を増やして個体数密度を下げ、水質が悪化しないように心がける。大森・岩尾 (2014) は胚や幼生を移動することなしに、連続して換水できる飼育装置を考案して、使っている。

海上にいけす水槽を浮かべて大量の幼生を飼育することができる。Omori et al. (2004) は小割いけす用筏にビニール製シートを張った 2m×2m ×深さ 1m の水槽を用いて、1 水槽当たり 42 万個体以上 (134 個体/ L) の幼生を飼育した。

プラヌラ幼生保育型の種の幼生は親株から離れると直ちに着生するが、放卵放精型の種の幼生が着生能力を持つまでには、ミドリイシ類では 26~27°C で、5~5.5 日、キクメイシ類では 2~3 日かかる (Babcock and Hayward 1986, Harrison and Wallace 1990, Gleason and Hofmann 2011)。また、着生能力を持っている期間は種によって異なり、例えば *Acropora tenuis* の幼生では 20 日以上長期にわたって比較的高い着生能力を保持するが、*A. nasuta* では、ほんの 1~2 日で、2 週間後には着生しなくなってしまう (Morse et al. 1996)。また *Montastraea magnistellata* など 5 種の幼生の生存時間は 195~244 日で、長距離分布の可能性を示したが、100 日目以後から死亡率が上昇した (Graham et al. 2008)。幼生を基盤上に着生・変態させるには、その種の着生能力のピーク時に合わせて、着生作業を行う必要がある。

ミドリイシ類の幼生が着生能力を持ったかどうかは、海水 10mL と石灰藻のチップ (3mm) を入れた培養皿に幼生を入れ、幼生の 50% が着生した時点を判定の基準にする (Heyward and Negri 1999, Boch and Morse 2012)。

基盤を収容した水槽に着生能力を得た幼生を入れると、幼生は早ければ 1 日で、

遅くとも 5 日程度で基盤に着生して変態する。幼生の密度が 100~130 個体/L であれば、60%以上が 1 日で着生するだろう (大森・岩尾 2014)。着生作業は、ふつう、水槽の海水をエアレーションによってゆっくり動かしながら 2~3 日間続け、着生しなかった幼生は捨てる。着生密度は高いほどよいというものではない。経験的には (大森私信) 0.5~1.5 個体/cm<sup>2</sup> が適当と思われる。着生直後の稚サンゴの死亡率は高く、安定的には保てない。種苗生産にあたって、これが現在解決できていない問題のひとつである。稚サンゴ同士が接するほどの密度では病気が感染しやすく、初めの 1 か月程度で稚サンゴの大量斃死が起きることがある (大森・岩尾 2014)。一方、同じ種の稚サンゴを高密度で飼育すると、クローン間の癒合やキメラ癒合によって複数の種苗が合体して大きくなり、生残率も高まることがある (Puill-Stephan et al. 2012, Raymundo and Maypa 2004)。

基盤に着生した稚サンゴは、網で囲ったカゴに入れて海中に垂下したり (Omori 2005)、陸上の流水水槽にならべて飼育したりして (Nakamura et al. 2011)、適当な大きさになったら移植場所に植込む。

#### (6) 褐虫藻の導入

放卵放精型のサンゴでは約 80%の種が海中から褐虫藻を獲得する「水平伝播型」である (Baird et al. 2009)。それらのサンゴの中には幼生期から褐虫藻を取り込んでいる種もあるが、通常は海底に着生して稚サンゴに変態してから 5~7 日以内に取り込みを始める。褐虫藻を獲得できなかったポリプはやがて死んでしまうので、稚サンゴの育成にはまず共生を開始させることが重要である。幼生が遊泳している間や着生してまもなく、水槽にシャコガイ類や親サンゴ群体などを外から持ち込み、一日以上入れておくことによってそれらから放出された褐虫藻を取り込ませることができる (Petersen et al. 2008)。これによって稚サンゴの生残率が大幅に上昇するかどうかはわかっていないが、大した手間を要しないので、種苗生産過程に取り入れてよいだろうと思われる。体内の褐虫藻が増えると基盤上の稚サンゴは黄色みがかってくる。なお、サンゴ親群体のポリプに多い褐虫藻の遺伝子タイプ (クレード) は C であるが、稚サンゴに取り込まれているクレードは主に耐熱性の強い群体に多く見られる A や D (Abrego et al. 2009, Yamashita et al. 2013) なので、遊泳状態にあるクレード A や D の培養株を取り込ませば、より望ましい効果が見られるかもしれない (Suzuki et al. 2013)

## (7) サンゴ幼生の着生基盤

これまで、サンゴ幼生の着生基盤の素材や形状がいくつも提案され、コンクリート、セラミック素材、素焼き陶製タイル、貝殻、陶石、スレート、ポリカーボネート、強化グラスファイバー (FRP) や鉄鋼スラグ入りの基盤 (例えば Okamoto et al. 2008 や Mohammed et al. 2012) などが使われたが、これまでのところ、幼生の着生数密度や着生率が卓越した素材はまだ見つかっていない。なぜか? それはサンゴ幼生が基盤の素材を選んで着生するのではないからである。多くのサンゴ幼生は基盤の表面に生じたサンゴモ (無節石灰藻) やバクテリアフィルムからの特定の化学シグナルに応じて着生し、変態する (Morse et al. 1996, Negri et al. 2001)。したがって、Fujiwara et al. (2016) のように基盤を海中に設置して天然幼生の着生と変態を期待するというような戦略は、遺伝子攪乱を起こさない範囲内で幼生の加入量多い海域を選定する必要がある (大森 2016 b)。

幼生の着生・変態過程は大まかに以下の 4 段階に分かれる。(a) 着生シグナル受容→ (b) 着生行動→ (c) 着生→ (d) 変態。着生と変態は複数のシグナルによる刺激の連続によって起こるが、それぞれの過程は独立したものと考えられている (Tebben et al. 2011)。これらの 4 段階への基盤の関わりは、(a) 幼生へのシグナルの発信と (c) において生じる活着である。また、実際には (d) で活着の強化も関係すると考えられる。着生行動 (b) や着生 (c) では、幼生は基盤表面がざらざらしているとかままりやすいとか、凹凸面周辺に生ずる乱流によって留まりやすいなど、基盤表面の物理的構造が影響する可能性が高い。Whalan et al. (2015) は基盤に 400、700、1000  $\mu\text{m}$  のくぼみを刻み込んで、*Acropora millepora* の幼生 (体幅約 430  $\mu\text{m}$ ) を着生させたところ、幼生はその体幅にもっとも近いくぼみに多く着生したと報告している。

サンゴの種苗生産の際には、基盤を海中にあらかじめ 4~8 週間沈水して、着生・変態に有効なサンゴモやバイオフィルムを基盤表面に繁茂させておき、幼生の着生を促すのが通常の方法である (Guest et al. 2014, 大森・岩尾 2014)。

多くの場合、着生基盤は同時に育成基盤、植込み基盤、さらには植込み後にサンゴを支える基盤にもなることから、基盤の評価は、1. 着生・変態、2. 育成、3. 植込み、4. その後、の 4 段階を総合してなされるべきであろう。基盤はタイル状のものより、懸濁物の堆積しにくく、立体的な構造をもつものや基盤上の稚サンゴが捕食動物による食害や匍匐動物による破壊から逃れやすい突起やくぼみを持つものがよい (例えば Nozawa 2008, 2012)。着生数を測定するにはタイル状基盤が容易だが、種苗の運搬にスペースを要して扱いにくく、さらに植込み作業に手

間がかかるので、現在では、CSD (Okamoto et al. 2008) や“コーラルペグ” (Omori and Iwao 2009) のような立体的な基盤が多く用いられている。Boch and Morse (2012) や Villanueva et al. (2012) も円柱形基盤を用い、その他に網状基盤が試みられている (宮城ら 2016)。

#### (8) 幼生と種苗の輸送

幼生の運搬は、胚がボール型になった時期 (受精後 1.5 日) から可能ではあるが、幼生が着生能力を持ち始め、各種のストレスに抵抗力を持つ受精後 3~4 日目以降のほうが好ましい。この頃であれば、2,000 個体/L 程度を、生残率 90% 以上で、常温の宅配便や小包によって遠隔地に送ることができる。これまで、阿嘉島臨海研究所では、50 mL 容器を用いて、欧州の水族館に幼生を送っている (Petersen et al. 2005)。

運搬時には、振動のストレスを低減するため、容器いっぱいまで海水を満たして密閉するほうがよい。運搬時間が長くなる場合には密度を下げる。運搬容器にはポリ瓶、蓋付きバケツ、口の小さなコンテナやポリタンク、ビニール袋などを用いるが、ビニール袋は熱圧着するなどして角を鈍くして幼生が隅に残らないように工夫する (青田ほか 2003)。また、幼生の着生を促すために、基底をネットで覆って、その中に幼生を放流する場合は、ダイバーが押すと容器中の幼生が海水とともに流れ出るようなやわらかいポリエチレン製のコンテナ (10 L 又は 20 L 容程度) が扱いやすい。

断片を採取するために親株を陸上施設に運ぶ際は、短時間 (1 時間以内) で運搬が可能なら、群体を水槽に入れて運ぶ必要はなく、直射日光を避け、群体を海水を含んだタオルやシートで覆って風を当てないだけでよい。長距離輸送の場合は水槽に群体を入れて、光を避けるためネットで覆い、新鮮な海水を少しずつ加えて換水しながら目的地まで運ぶ。この際、サンゴに手で直接触れないことと、海水を直接サンゴにかけないことが大事である (Heeger and Sotto 2000)。Nakamura et al. (2011) は沖ノ鳥島で採取した親株を水槽に入れ、遮光ネットで照度を 1/3 に落とし、水温 22.5~28.4 °C の海水を一日 3 回、1/3 ずつ換水しながら、1,100 km 離れた沖縄の阿嘉島まで死亡群体なしで運搬した。また、本事業においても中村 (私信) は、7 月にも阿嘉島から沖縄島の恩納村まで、稚サンゴの着生した基盤を酸素を充満させた海水入りビニール袋に入れ、保冷剤を使って 5 時間で輸送している。

## (9) 植込み

サンゴの形態や植込み場所によって、植込みに適当な断片の大きさは変わるだろうが、著者の経験では、ミドリイシ類の植込みの場合、直接移植の断片でも、無性生殖法や有性生殖法で育てた種苗でも、幾何平均径 8 cm 程度が望ましく、本事業でも同様な結果が示された（比嘉ほか 2017）。ハマサンゴのような塊状のサンゴは 4-5 cm 程度でよいと思われる（Shafir et al. 2010）。種苗は、周辺に同種のサンゴが育っている、あるいは過去にたくさんあった場所を選んで植込む。そして、その場所の水質が良好で流れがあり、基底が安定してサンゴ礫や転石によってサンゴが傷む恐れがない、海底から 50 cm 以上上がったノルの突出部分が望ましい（Edwards and Clark 1998, Gomez et al. 2011, 比嘉ほか 2017）。窪地や谷間や海底が平坦で岩礁が丸みを帯びているような場所は、波や流れによって海底の砂礫が移動するので、そのような場所は避ける。植込みはまた、台風シーズンの直前や海水温が最も高い時期を避けるほうがよい（大森・岩尾 2014）。

断片の成長は季節によって変わるので、成長の良い時期に植込む方がよいとの考えもある。Latypov (2006) はヴェトナムで春に移植したサンゴのほうが、秋に移植したものより月間成長率が 1.2~1.3 倍が高かったと述べている。マウイ島（ハワイ）の *Pocillopora damicornis* の成長速度も冬より夏の方が高かった（Pinlak and Brown 2008）。

いろいろな場所で行われた移植を比較してみると、環境も種類も群体の形や大きさも違うので、結果はまちまちである。例えば、Raymundo et al. (1999) は *Pocillopora damicornis* をフィリピンの陸上施設で < 3 mm, 3~6 mm, 6.1~10 mm, >10 mm になるまで育ててから植込んだ結果、6 週間以上を経た時の生残率は 10 mm 以上が最も大きく 83%以上であった。しかしながら、Edwards and Clark (1998) が Maldives で行った直接移植による植込みで、2 年後の死亡率が 5~50%であった。植込み後に高い生残率を維持するための決定的要因は適地の選択と種類と種苗の大きさ、及び植込みの方法である（Omori et al. 2016）。

また、植込みに使われる断片の大きさによって、植込み後の産卵のあるなしが決まる。Okubo et al. (2005, 2007) は *Acropora formosa* と *A. hyacinthus* で、大きい断片（長さ約 20 cm）の卵巣内卵数が、小さい断片（5 cm）のそれより明らかに多くなることを見つけている。また、断片を切り出した時の卵巣の成熟度と断片の大きさによって、卵がそのあとで発達するか卵巣内で吸収されてしまうかが決まる（Okubo et al. 2007）から、産卵によって幼生の加入量のより早い増加を期待している場所では種苗の大きさと植込み時期は決定的に重要になる。

サンゴが海底に活着して成長するかどうかは、基盤や断片がしっかり固定されたかどうかにかかっているため、植込み作業の後、一日以内にすべての種苗をもう一度入念に調べて固定状態を確認する。固定した筈の断片や基盤が波浪などで少しでも動くようだと、サンゴは活着しない（大森・岩尾 2014）。

## (10) 環境要因と投餌がサンゴの成長と生残に与える影響

### 1) 光

サンゴの成長には波長 400~700 nm の光が必要である。サンゴが分布している海中で飼育する多くの場合は問題無いが、陸上水槽で飼育する場合は、光の影響を十分に考慮しなければならない（Osinga et al. 2011）。Yap et al.（1998）によると、*Porites cylindrica* と *P. rus* の成長は、明らかに光によって大きな影響を受けた。赤色（~630~690 nm）の波長は成長を阻害する（Wijgerde et al. 2014）。光の必要量は種によって異なるが、共生する褐虫藻の強光阻害（葉緑体の縮小）を招かないために、光子量を一定以下に維持する必要がある。Nakamura et al.（2011）は陸上の野外水槽で種苗を育成する際、6月から11月までの光が強い期間は、水槽をネットで覆って、現場の光子量の70%になるようにした。

室内水槽での飼育にはメタルハライドや LED（light emitting diode）など、いろいろな光源が使われているが、LED と LEP（light emitting plasma）を *Galaxea fascicularis* の飼育で比較した Wijgerde et al.（2012）によると、どちらも効果があったが、波長の幅が広い LEP の方が成長が良かった。

### 2) 投餌

どんなサンゴも褐虫藻からの栄養のみでは生きられない。共生する褐虫藻から栄養の大半を得ている造礁サンゴでも独立栄養型ではなく、その発生や成長には外からの必須有機栄養物質が必要である（Osinga et al. 2011）。水槽での飼育では常に生きた餌や人工餌料が与えられる。海中での飼育でも、適当な餌が与えられたら、成長は促進され、生残率も高まるであろう。Petersen et al.（2008）は室内で *Artemia salina* のノープリウス幼生を、毎日、飼料として与えることで、*Acropora tenuis* などの稚サンゴの成長率を高めた。また、Toh et al.（2014）は *Pocillopora damicornis* の稚サンゴを無投餌で飼育した結果、個体の成長率は  $1.18 \text{ mm}^3 / \text{週}$  であったが、*Artemia* ノープリウスを毎週2回、 $3,600 \text{ 個体/L}$  ずつ与えた場合には  $10.65 \text{ mm}^3 / \text{週}$  に増加した。そして、投餌によって高い成長率を示した稚サンゴは植込み後も高い生残率を示した。生きた餌にはワムシ

*Branchionus sp.* も試されたが、摂餌効果は *Artemia* ノープリウスより劣っていた (Osinga et al. 2012)。市販の粉末乾燥飼料も稚サンゴの飼育に有効と思われるが、成分が明らかにされていないものが多いために、その効果を十分に比較解析されていない。

### 3) 水流

パラオの2つのさんご礁に植込んだ *Acropora digitifera* について、18か月後の成長を測定したところ、流れの強い礁のサンゴの重さが流れの弱い礁のサンゴのそれを明らかに上回った (121g vs 60g) (Boch and Morse 2012)。彼らは *A. hyacinthus* についても同様の結果を得て、流れの強い礁ほど窒素を含んだ栄養物質が内側の礁湖から豊かに供給され、同時にサンゴから不要になった老廃物が除去されたことが成長に大きく影響したと考えている。好ましい流速は種や生息環境によって異なるだろうが、流れはサンゴに栄養物質や酸素を供給し、老廃物を取り除く働きがあるので、代謝と成長に大きく影響することがわかっている。Dennison and Barnes (1988) によれば、*Acropora formosa* を止水条件下で飼育した場合は、海水を攪拌した時に比べて、純光合成量と呼吸量が25%減少し、暗条件での石灰化速度は約60%減少した。また、Schutter et al. (2010) は *Galaxea fascicularis* を流水0、10、20、25 cm/秒で48週間飼育した結果、25 cm/秒で藻類やシアノバクテリアによる成長阻害が減少し、成長率が最大になったと述べている。

この水流の条件は1998年の水温上昇による世界的な白化現象の際にも、サンゴの生残に顕著な影響を与えていて、沖縄で、水温26.2~33.7℃で、流速が2~3cm/秒だった場所では、多くの *Acropora digitifera* が白化して死んだのに対して、流速50~70 cm/秒だった場所では死亡率が低かった (Nakamura and van Woessik 2001)。白化後の回復も流れのある場所の方が、弱い場所より速かったことが確かめられている (Nakamura et al. 2003)。

### 4) 懸濁物質

さんご礁域の懸濁物質の主要な起源は河川を通じて流入する陸上の物質である。それはさんご礁に最も大きい負の影響を与えている。懸濁物質の影響は4つに分けられる。1は溶存無機物質の影響で、増えるとサンゴの石灰化を抑制し、受精率を低下させ、微小藻類を増やす。2は粒状有機物質の影響で、増えるとある種のサンゴには栄養となって成長に寄与するが、水中の光量が減衰するので成

長を阻害する。また、サンゴの競争者となる多くの濾過食性無脊椎動物やオニヒトデの幼生の栄養になって、彼らを増やす。3 は水中の光量を低下する働きで、褐虫藻の光合成代謝を妨げる。4 は堆積物の影響で、サンゴの成長と幼生の基底への着生を妨げる (Fabricius 2005)。懸濁物質が多い環境にサンゴを植込むことはできない。Gilmour (1999) は 2 段階の懸濁物質濃度 (約 100 mg/ L と約 50 mg/ L) の影響を調べ、懸濁物質はいずれの濃度でも受精率を低下させるが、胚の発生には影響しないこと、また、天然海域でも見られる約 50 mg/ L 程度の濃度でも幼生の着生と生残には明確な負の影響を与えることを明らかにしている。

大見謝 (1987) は底質中懸濁物質含量 (SPSS) の簡易測定法を開発し、沖縄県各地の底質状況とさんご礁の健全度との関係を明らかにした。それによると、健全なさんご礁生態系が維持されている水域の SPSS は 10~30 kg /m<sup>3</sup> 以下である。

#### (11) 汚損生物の除去、及び魚類や無脊椎動物による食害防止

植込み初期の稚サンゴは、海中で魚類やヨコエビ類などによって齧られたり、ウニ類や巻貝類によって削りとられたりしやすい。サンゴ食魚類や無脊椎動物の働きについては、Rotjan and Lewis (2008) の総論がある。また、サンゴのまわりに生える大型藻類は、サンゴにとって空間と光量をめぐる競争者である (Lirman 2001, Quan-Young and Espinoza-Avalos 2006)。稚サンゴはまた堆積物や群体ボヤやコケムシ類などの汚損 (付着) 生物に覆われて死ぬ。そうした死亡要因を取り除いた環境で育成することが望ましいが、現時点では管理が容易な流水式水槽で飼育する以外、適当な方法はない。

阿嘉島臨海研究所では、海中にカゴを垂下して、その中で稚サンゴを育成しているが、カゴや中の基盤に繁茂する藻類を除去するために、かごの中に藻食性巻貝のタカセガイ (=サラサバテイ *Trochus niloticus*) の稚貝 (殻径 5~10 mm) を入れて混養している (個体数密度は約 50 個/m<sup>2</sup>) (大森・岩尾 2014)。サラサバテイの稚貝は藻食の際、稚サンゴをよけて行動するので、稚サンゴが削り取られることは少ない (田村 2008)。ウニ類も多くは藻食性だが、稚サンゴを食べたり壊したりしてしまう種類 (例えばガンガセ類) は使えない。

海中養殖では不可能だが、基盤上の稚サンゴを陸上水槽で飼育する場合には、藻食性貝類のほかに藻食性魚類アイゴ類 *Siganus* spp. の幼魚も藻類の除去に役に立つ。また、ミズレチョウチョウウオ *Chaetodon kleinii* は水槽中に侵入するイソギンチャク類を捕食し除去してくれる (Nakamura et al. 2011)。

種苗を海中のカゴの中で飼育すると、水の流れが淀んで稚サンゴには負の影響を及ぼすことが考えられる。殊に *Acropora digitifera* や *A. hyacinthus* のように流れのある方が成長がよい種類 (Boch and Morse 2012) には、適当な時期にカゴを外したり、カゴの目合いを大きなものに変えたりして、適当な水流を確保したい。野外に植込んだサンゴも、殊に植込み直後にはハクセイハギ *Cantherhines dumerilii* などによる“齧り”を受けることが多い。このような食害を避けるために、サンゴに粗い目合いの保護網をかぶせる試みがなされている。しかし、保護網の効果は認められても、長期間そのままにしておくと、カゴの内側に海藻が繁茂したり、波浪による網のサンゴの成長に悪影響を及ぼす恐れがある。保護網は1年以内にはずして、藻食性魚類によって藻類を除去させる工夫が必要である (大森・岩尾 2014)。

#### (12) 電着技術を応用したサンゴの成長促進技術

電着技術 (電気分解法) とは海水中に溶存しているカルシウムイオンやマグネシウムイオンを電気分解によって陰極面 (鉄構造など) に電着物として析出させて、海水中でモルタルで被覆したような構造物を構築しようという技術である (古賀 1988)。Herbertz and Goreau (1996) は、この陰極面に多数のサンゴの幼生が着生し、また、そこに断片を植付けると、電着物の析出によってサンゴの活着が強固になり、サンゴ体内の褐虫藻が増えて、サンゴの生残率と成長率が大きく高まるとして、低圧電流を用いたさんご礁の修復技法を考案し、熱帯の島嶼国で修復事業を展開してきた (Romatzki 2014 参照)。しかし、彼らが主張するように、海中のモジュール (棚) 上 (陰極側) に取り付けられたサンゴの成長率が無荷電のものとの2~10倍 (平均3.17倍)、生残率は3.47倍にもなるという報告 (Goreau 2014) については、十分に条件を整えた追加試験が行われていないために、科学的証明が依然として明確ではない。共生する褐虫藻の密度が高まるとサンゴの成長率が高まることは予想できても、どの程度の荷電あるいは電場での電流量で効果があるのかが十分に明らかにされていない。砂礫の移動の影響を受ける海底上に比べて棚上ではサンゴの成長や生残がある程度増すことは電着技術なしでも、水理学的条件だけから説明できる。

電着技術では、電流が褐虫藻の増殖を刺激してサンゴの成長に寄与するらしい (Goreau et al. 2004) が、Borell et al. (2010) は、 $\sim 2.8 \pm 0.1 \text{ A/m}^2$  の電流を陽極に流してサンゴの成長促進効果を測定した結果、*Acropora yongei* の成長率は陰極上より陰極から離れた電場で最大になり、陰極上では死亡率が増加し

て成長率も減少した。一方、*A. pulchra*では褐虫藻の密度とサンゴの成長率は増加した。また、Romatzki (2014)は陽極側に  $1.67\text{A}/\text{m}^2$ の電流を流した時の *A. yongei*の成長率は  $7.5\text{mm}/\text{月}$ で、無荷電での  $5.8\text{mm}/\text{月}$ を上回ったが、それ以上の電流ではむしろ有害であったと述べている。このような電場の効果に疑問を抱く研究者の報告に対して、考案者の説明(Goreau 2014)は十分に納得できるものではない。実際、陽極から流した電流に比べて、棚上(陰極側)の電場(電流密度)は微弱で、それはまた、電着物の析出量の時間的変化によって変化し、多くの実験では解析されていないので、サンゴの成長との関係を明らかにするのは容易ではない。Kihara et al. (2013)は電場測定の手法を開発し、その結果から、 $0.05\text{A}/\text{m}^2$ 程度の微弱な電場がサンゴの成長を促進することを明らかにした。しかし、その成長量はGoreau (2014)の報告から期待された値より小さかった(木原ほか2013)。

### (13) 費用対効果に関するもの

さんご礁の保全再生の方法は大きく3つに分けられる。1は陸上の開発や赤土の流入や富栄養化のような地域的な人為的ストレスを可能な限り除去・軽減するもの、2は積極的なサンゴの移植によるもの、3はさんご礁域を海洋保護区に指定して、その中で人間活動を制限するという方法である。1と2の間には、不法な爆破漁業で破壊されたさんご礁に石灰岩を入れて人工のノルを作ったり、沿岸に人工礁を設置したりして天然のサンゴ幼生の着生を期待する海底整備(例えばFox et al. 2005, Omori et al. 2007, Fox and Haisfield 2010)が含まれる。まず、保全再生の3つの方法のうち、どれが最も費用がかからず、成果が大きいかを考えなければならない。Edwards and Clark (1998)は自身のMaldivesでの研究の経験から、それまでの移植技術が未熟で、結果が不確かであったことを理由に、移植はサンゴの幼生の加入が少しでもある場所では控え、すっかりなくなってしまったさんご礁に限って行う方がよいと述べている。また、Ferse et al. (2013)も移植によって周辺のサンゴ幼生の加入量が増えるだろうという考えに疑問を呈して、天然の幼生の供給がある場所では人為的ストレスを除去・軽減し、人工基盤によって海底整備を図る方が移植よりさんご礁の修復に効果があるだろうと述べている。生態系サービスを提供できる程のさんご礁の回復を目指すような移植事業にはかなりまとまった数の種苗の植込みと相応の経費が必要である。その上で、移植によるさんご礁の生態系サービスの回復を選ぶとき、まず成功のゴールをどこに置くか、そしてどのような方法を用いて事業を行うかを十分に検討しなければならない。

移植によってサンゴの生物量や被度が増えたという報告はいくつかあるが（例えば Lindahl 1998, Guzman 1991）、予定した種苗数を植込んだというだけでは、事業が成功したとは言えない。サンゴの被度や多様度が高まって元の状態以上になれば移植の効果があった判断できるが、Omori et al. (2016) は植込んだ種苗が成長して産卵するまで（多くは 3 年）の生残率 40%以上を成功のゴールにすることを提唱している。

移植事業の経費は莫大で、1 ヘクタール当たり US\$10,000～US\$50,000,000 を要している（Spurgeon 2001）が、その場のさんご礁の経済的価値をどの位に評価するかによって、事業経費の妥当性が判断されるだろう。因みに、ハワイのさんご礁の価値は年間 US\$878/hect. と見積もられているが（Cesar and van Beukering 2004）、フィリピンの Tubbataha 礁は年間 US\$19/hect. と評価されている（Subade 2007）。

経費の見積りは第一段階すなわち植込みに適する大きさまで（樹枝状サンゴでは 7～10 cm、塊状サンゴでは 4～5 cm）の種苗生産、及び中間育成と、第二段階すなわち植込みからサンゴの産卵までで、それまでの生残率 40%以上を条件とする、に分ける方がよいと考えられる（「はじめに」を参照）（大森ら 2016a）。しかし、第二段階の経費の見積りは多くが植込みまでで、植込み後のモニタリングは含まれていない。経費の算出方法については、Edwards et al. (2010) に詳しく示されている。運転費用は事業の実施場所（人件費等が国毎で大幅に異なるため）に関わらず、時間×人で表わす。経費が移植の方法や現場の条件によって大きく異なることは言うまでもない。例えば中間育成を海中で行うか陸上の施設で行うか、海中の場合は港からの距離や施設のある場所の水深なども、経費を変える要素になる。

表 3.1.1-1 にこれまで公表された種苗生産、中間育成、植込み、モニタリングに要した経費の例を示す。方法によって比較すると、有性生殖法は幼生の生産に要する手間や稚サンゴの初期の減耗などが原因で、ほかの方法に比べて圧倒的に費用が掛かり、技法の劇的な進歩と改革によって経費を減少できない限り、さんご礁の減少が懸念されている途上国では、まだほとんど事業に用いられない。

表 3.1.1-1 1株あるいは1基盤あたりの種苗生産、中間育成、植込み、モニタリング費用

著者	発表年	実施国	方法	種苗生産+中間育成	植込み	モニタリング
dela Cruz et al.	2014	フィリピン	直接移植		US\$0.15-0.37	
Heeger & Sutto	2000	フィリピン	無性生殖	US\$1.00		
Shafir et al.	2006	イスラエル	無性生殖	US\$0.50-1.00		
Higa et al.	2017	日本	無性生殖	US\$9.80	US\$3.35	US\$2.60
Nakamura et al.	2011	日本	有性生殖	1基盤=US\$174.00		
Omori & Iwao	2014	パラオ	有性生殖	US\$50.00	US\$13	
Guest et al.	2014	フィリピン	有性生殖	US\$61.00 *		

\*種苗生産+中間育成+植込み

Bayraktarov et al. (2016) は種苗一株当たりの経費が示されているこれまでの報告をもとに、生残率の高かった移植を選抜して比較し、最も効率のよかった移植方法は直接移植で、その必要経費は1ヘクタール当たりUS\$11,717であったと述べている。一方、最も経費を要した事業は途上国での海底整備を含めた移植事業で、1ヘクタール当たりUS\$2,879,773を要した。生残率は移植の成功あるいは不成功を決める大きな要素で、「9. 植込み」で述べたように、それは適地の選択、種と種苗の大きさ、及び植込み方法に左右される。

さんご礁や藻場などの沿岸域の修復での問題は、経費と事業の成功との間に明瞭な関係が示されていない、つまり未だ、経費をかければ移植が成功するとは限らないことである。これは陸上の修復事業との大きな違いであって、サンゴ移植技術とそれに関する研究の未熟さの表われと言える (Bayraktarov et al. 2016)。

#### (14) 移植の研究と事業の将来

移植の目的は本来、荒廃したさんご礁にサンゴを増やして生態系サービスの回復をはかるものである。それはサンゴ群集の景観レベルの修復から再生から幼生の加入基地の大きな造成につながり、さらにさんご群集の遺伝的多様性の維持を目指している。

観光業や漁業がさんご礁に大きく依存する途上国では、ダイビングポイントの修復や漁場の維持管理のために住民やNGOなどが参加しやすい直接移植や無性生殖を利用した種苗生産と植込みが続けられるものと思われる。ダイビングショップや同好者が行っているような、ある機会に数株~数十株を植込むだけの小規模な移植は陸上の記念植樹のようなもので、環境保全を考えるための啓発にはなっても、本来の移植の目的にはつながらないが、その場合でも必ず経験豊かな研究

者の助言を得ながら事業を進めなければならない。移植で遺伝的多様性を維持するには、成長は遅いが、環境ストレスへの耐性が高い塊状サンゴ種を含む多様な種を育成する大きな親株の育成施設をつくり、多様な遺伝子を持つ種苗が成長して、それらの幼生が傷んださんご礁に加入するような、植込みのデザインが必要になる (Muko and Iwasa 2011a, b)。種苗のジーンバンクも置かれることになる。有性生殖を利用した種苗生産と植込みは、遺伝的多様性を高く保てるとか、自然のさんご礁を傷めない、また親株の育成施設が要らないなどの点で無性生殖法に勝っている。しかし、現在はまだ高い技術と労力と経費がかかる (大森・岩尾 2014, Villanueva et al. 2012)。コストの低減のためにも、移植事業を増やし、技術開発と研究をさらに進めることが望まれる。

これまで沖縄で移植されたサンゴは 2017 年に終了する沖縄県さんご礁再生事業を除いて、約 140,000 株であるが、そのほとんど全てが直接移植による植込みである。限られた資料によれば、それらのサンゴの 3 年後の生残率は、場所によっては 10%以下になってしまったところも少なくない。しかも、失敗の事例はしばしば報告されないために、試験結果のみが報告され改善に資する機会が十分であったとは言えない。移植は決して易しい技術ではない。関係者はもっと真剣に技術の進歩を心がけ、植込み 3 年後の生残率 40%以上になるようになるように技術を高めてほしい。

著者の知る限り、これまでになされた最も大規模な移植は断片約 85,000 株を 7.1 ヘクタールに植え込んだコスタリカの例 (Edwards and Clark 1998) と断片約 112,000 株を 1 ヘクタールに植込んだインドネシア、バリ島の例 (Onaka et al. 2013) であるが、今後、大規模な移植事業は各地で行われると思われる (例えば Johnson et al. 2011)。米国フロリダ州でもカリブ海沿岸各所に種苗育成場を作り、無性生殖を利用した種苗生産と植込みによって、2017 年から 15 年間で約 100 万株のサンゴを生産して植込む計画がある (Moto Marine Laboratory 2016)。



図 3.1.1-1 沖縄県読谷村の *Acropora tenuis*. 高温耐性を持つ株（右）と持たない株  
（有限会社海の種 金城浩二氏提供）

これからのさんご礁の保全にとって最も深刻な問題は、地球規模で進みつつある温暖化と海洋の酸性化だというひとが少なくない (Bruno and Valdivia 2016)。これに関して、白化現象を一度経験したサンゴが高温に対する順応性を高めるらしいことが、あちこちで報告されている (例えば Guest et al. 2012)。一部の研究者 (例えば Palumbi and Palumbi 2014 や van Oppen et al. 2015) は高温や海水酸性化に強いサンゴ (スーパーサンゴ) を探し出して、それらの遺伝子の特性や順応の効果を確認しようとしている (Mascarelli 2014)。しかし、そのようなスーパーサンゴは紅海や湾岸域の特別な環境だけではなく、かなり広い範囲に常在するもののようで、沖縄県読谷村の *Acropora tenuis* でも確認されている (図 3.1.1-1)。現在のさんご礁を形成しているミドリイシ類などの六放サンゴ (Hexacorallia) の出現は約 2 億 4500 万前の中世代三疊紀と言われるが、長い歴史の中で、サンゴはすでに何度も温暖化や酸性化の影響を受けてきた筈なので、それぞれの種の中に生き残りのための特定の遺伝子を保持している小集団がいて、強烈な日光と暑さの下でも成長しているのかも知れない。環境ストレスに耐性のある種や遺伝子型を選抜して移植に用いるという提案は今後採用されるだろう。しかし、それは自然界で生じる選抜を人為的に加速させることだから、どこまで許容されるかはそれぞれの種や遺伝子の集団遺伝学的研究をもとに慎重に考え、多様性の保存に留意しなければならない (例えば Zayasu et al. 2016)。

### 3.1.2 参考文献一覧

[Useful references]

- (1) さんご礁修復の目的と展望：事業の展開と管理に関するもの (Objectives and scope of reef rehabilitation: Planning and management) ..... 3-27
- (2) さんご礁再生修復技術概論 (Technique for reef rehabilitation: Introduction) ..... 3-31
- (3) 直接移植 (Direct transplantation of coral fragments; low tech methodology) ..... 3-33
- (4) 無性生殖を利用した種苗生産と植込み (Nursery farming of corals using asexual propagation and outplanting) ..... 3-43
- (5) 有性生殖を利用したサンゴ種苗生産と植込み (Rearing of coral larvae and juveniles using sexual propagation and outplanting) ..... 3-49
- (6) 幼生の着生と変態 (Larval settlement and metamorphosis) ..... 3-52
- (7) 幼生の直接散布・加入促進 (Direct reseeding of larvae) ..... 3-55
- (8) 幼生と種苗の輸送 (Transportation of coral larvae and juveniles) .... 3-56
- (9) 移設 (Coral translocation) ..... 3-57
- (10) 環境要因と摂食がサンゴの生残や成長に与える影響 (Effects of various environmental factors including heterotrophy to growth and survivorship) ..... 3-58
- (11) 造園デザイン (Gardening design of coral community) ..... 3-62
- (12) 基盤・人工礁と固形剤・接着剤、及び固定方法に関するもの (Substrata, artificial reefs, and products and method for hardening of substrata and attachment of corals) ..... 3-63
- (13) 海底整備 (Seafloor stabilization) ..... 3-70
- (14) 電着技術を応用したサンゴの成長促進技術 (Electrochemical method) .... 3-71
- (15) 基盤汚濁生物の除去および魚類や無脊椎動物による食害防止 (Biological control of fouling organisms and protection of corals from grazing and nibbling by invertebrates and fish) ..... 3-73
- (16) サンゴ幼生や稚サンゴによる褐虫藻獲得 (Acquisition of symbiotic dinoflagellates by coral spats) ..... 3-75
- (17) 表現型遺伝子の選抜、遺伝的多様性、及び種の分布(幼生拡散)に関するもの (Genetic repository, genetic diversity and connectivity) ..... 3-76

(18) さんご礁修復の効果、魚類の多様性・漁業と生態系サービスの回復 (Effects of coral transplantation. Interrelationship between corals and fish diversity. Recovery of coral reef fisheries and ecosystem services) .....	3-77
(19) 費用対効果に関するもの (Cost and benefit of coral reef rehabilitation) .....	3-79
(20) 主著者名による文献検索 (Senior Author Index) .....	3-80

(1) さんご礁修復の目的と展望：事業の展開と管理に関するもの (Objectives and scope of reef rehabilitation: Planning and management)

- 1.1 Abelson, A. (2006) Artificial reefs vs coral transplantation as restoration tools for mitigating coral reef deterioration: benefits, concerns, and proposed guidelines. *Bulletin of Marine Science* 78, 151-159.
- 1.2 Bayraktarov, E., Saunders, M.I., Abdullah, S., Mills, M., Beher, J., Possingham, H.P., Mumby, P.J. and Lovelock, C.E. (2016) The cost and feasibility of marine coastal restoration. *Ecological Applications* 26, 1055–1074.
- 1.3 Carne, L. (2011) Strengthening coral reef resilience to climate change impacts: A case study of reef restoration at Laughing Bird Caye National Park, Southern Belize. WWF, 41pp.
- 1.4 Chou, L.M., Yeemin, T., Abdul Rahim, B.G.Y., Si Tuan, V.O. and Alino, P. (2009) Coral reef restoration in the South China Sea. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies* 11, 67-74.
- 1.5 Delbeek, J.C. (2001) Coral farming: past, present and future trend. *Aquarium Sciences and Conservation* 3, 171-181.
- 1.6 Edwards, A.J. (ed.) (2010) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program. St Lucia, Australia. ii+166 pp.
- 1.7 Edwards, A. and Fisk, D. (2010) Steps in planning a rehabilitation project. pp. 7-28 in Edwards, A.J. (ed.) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program. St Lucia, Australia.
- 1.8 Edwards, A.J. and Gomez, E.D. (2007) Reef Restoration Concepts and Guidelines: Making sensible management choices in the face of uncertainty. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia. iv + 38 pp.

- 1.9 Edwards, A.J. and Gomez, E.D. (2010) Objectives and scope of this manual. pp. 1-6. in Edwards, A.J. (ed.) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program. St Lucia, Australia.
- 1.10 Ferse, S.C.A., Nugues, M.M., Romatzki, S.B. and Kunzmann, A. (2013) Examining the use of mass transplantation of brooding and spawning corals to support natural coral recruitment in Sulawesi/Indonesia. *Restoration Ecology* 21, 745-754.
- 1.11 Fisk, D. and Edwards, A. (2010) Managing risks in reef restoration projects. pp. 29-48 in Edwards, A.J. (ed.) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program. St Lucia, Australia.
- 1.12 Fisk, D.A. and Job, S. (2008) Funafuti Atoll (Republic of Tuvalu) – Coral reef restoration project, 1, 3, 6, 9 and 15 months post-trial – Monitoring report. CRISP, July 2008. 34 pp.
- 1.13 Golbuu, Y., Victor, S., Penland, L., Idip Jr, D., Emaurois, C., Okaji, K., Yukihiro, H., Iwase, A. and van Woesik, R. (2007) Palau's coral reefs show differential habitat recovery following the 1998-bleaching event. *Coral Reefs* 26, 319-332.
- 1.14 Harriott, V.J. and Fisk, D.A. (1988) Coral transplantation as a reef management option. Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium, Townsville, Australia, 2, 375-379.
- 1.15 Harriott, V.J. and Fisk, D.A. (1995) Accelerated regeneration of hard corals: a manual for coral reef users and managers. Great Barrier Reef Marine Park Authority Technical Memorandum 16, 42 pp.
- 1.16 Hunt, J. and Sharp, W. (2014) Developing a Comprehensive Strategy for Coral Restoration for Florida. State Wildlife Grant Award T-32-R 1169, Final Report. 89pp.
- 1.17 Job, S., Schrimm, M. and Morancy, R. (2003) Reef Restoration: Practical guide for management and decision-making. Carex Environnement, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, IFRECOR. 32 pp.
- 1.18 Kojis, B.L. and Quinn N.J. (2001) The importance of regional differences in hard coral recruitment rates for determining the need for coral restoration. *Bulletin of Marine Science* 69 , 967-974.
- 1.19 Lirman, D. and Miller, M.W. (2003) Modeling and monitoring tools to assess recovery status and convergence rates between restored and undisturbed coral reef habitats. *Restoration Ecology* 11, 448-456.
- 1.20 Maragos, J.E. (1974) Coral transplantation: a method to create, preserve and

- manage coral reefs. Sea Grant Advisory Report UNIH-SEAGRANT-AR-74-03, CORMAR-14, 30pp.
- 1.21 McCook, L.J. (1999) Macroalgae, nutrients and phase shifts on coral reefs: scientific issues and management consequences for the Great Barrier Reef. *Coral Reefs* 18, 357-367.
  - 1.22 McCook, L.J., Jompa, J. and Diaz-Pulido, G. (2001) Competition between corals and algae on coral reefs: a review of evidence and mechanisms. *Coral Reefs* 19, 400-417.
  - 1.23 Milon, J.W. and Dodge, R.E. (2001) Applying habitat equivalency analysis for coral reef damage assessment and restoration. *Bulletin of Marine Science* 69, 975-988.
  - 1.24 Nazurally, N. and Rinkevich B. (2013) A questionnaire-based consideration of coral farming in Mauritius. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science* 12, 47-56.
  - 1.25 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. Reef Conservation Committee, Japanese Coral Reef Society (2008) Present status and critical issues on coral transplantation and reef restoration. *Journal of the Japanese Coral Reef Society* 10, 73-84. (in Japanese)
  - 1.26 Normile, D. (2009) Bringing coral reefs back from the living dead. *Science*, 325, 559-561.
  - 1.27 Omori, M. (2011) Degradation and restoration of coral reefs: Experience in Okinawa. *Marine Biology Research* 7, 3-12.
  - 1.28 Omori, M. (2012) Coral reefs are dying, we can only prevent it if we act now. *Journal of Black Sea and Mediterranean Environment* 18, 1-9.
  - 1.29 大森 信 (2004) 4年後の生残率 20%以下— 問題多いサンゴ移植事業. 琉球新報「論壇」2004年4月15日.
  - 1.30 大森 信 (2016) 目標は植込み3年後の生残率 40%以上—サンゴ移植の現状及び課題と方向—. *みどりいし* (27), 1-4. Omori, M. (2016) A goal for >40% coral survival rate after 3 years out-planting: a reasonable requirement and prospect of active reef restoration. *Midoriishi* (27), 1-4. (in Japanese)
  - 1.31 Pandolfi, J.M., Jackson, J.B.C., Baron, N., Bradbury, R.H., Guzman, H.M., Hughes, T.P., Kappel, C.V., Micheli, F., Ogden, J.C., Possingham, H.P. and Sala, E. (2005) Are U.S. coral reefs on the slippery slope to slime? *Science* 307, 1725-1726.

- 1.32 Precht, W.F., Aronson, R.B. and Swanson, D.W. (2001) Improving scientific decision making in the restoration of ship grounding sites on coral reefs. *Bulletin of Marine Science* 69, 1001-1012.
- 1.33 Precht, W.F., Deis, D.R. and Gelber, A.R. (2002) Damage assessment protocol and restoration of coral reefs injured by vessel groundings. *Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia, 2*, 963-968.
- 1.34 Richmond, R.H. (2005) Recovering populations and restoring ecosystems: Restoration of coral reefs and related marine communities. pp. 393-409 in Norse, E.A. and Crowder, L.B. (eds.) *Marine Conservation Biology: the Science of Maintaining the Sea's Biodiversity*. Island Press, Washington DC. 470 pp..
- 1.35 Rinkevich, B. (1995) Restoration strategies for coral reefs damaged by recreational activities: the use of sexual and asexual recruits. *Restoration Ecology* 3, 241-251
- 1.36 Rinkevich, B. (2005) Conservation of coral reefs through active restoration measure: recent approaches and last decade progress. *Environmental Science and Technology* 39, 4333-4342.
- 1.37 Rinkevich, B. (2008) Management of coral reefs: We have gone wrong when neglecting active reef restoration. *Marine Pollution Bulletin* 56, 1821-1824.
- 1.38 Rinkevich, B. (2014) Rebuilding coral reefs : does active reef restoration lead to sustainable reefs? *Current Option in Environmental Sustainability* 7, 28-36.
- 1.39 SECORE International (2012) Giving coral reefs a future: worldwide coral reef conservation through research, education, outreach, and restoration. [www.secore.org](http://www.secore.org)
- 1.40 Spalding, M.D. and Grenfell, A.M. (1997) New estimates of global and regional coral reef areas. *Coral Reefs* 16, 225-230.
- 1.41 Spurgeon, J. (1998) The socio-economic costs and benefits of coastal habitat rehabilitation and creation. *Marine Pollution Bulletin* 37, 373-382.
- 1.42 Spurgeon, J.P.G. (2001) Improving the economy effectiveness of coral assessment and restoration. *Bulletin of Marine Science* 69, 1031-1045.
- 1.43 Spurgeon, J.P.G. and Lindahl, U. (2000) Economics of coral reef restoration. pp. 125-136 in Cesar, H.S.J. (ed.) *Collected Essays on the Economics of Coral Reefs*. CORDIO, Sweden.
- 1.44 Symons, L.C., Stratton, A. and Goodwin, W. (2006) Streamlined injury assessment and restoration planning in the U.S. National Marine Sanctuaries. pp.167-192 in Precht, W.F (ed.) *Coral Reef Restoration Handbook*, CRC Press,

Boca Raton, Florida.

- 1.45 Tamelander, J. and Obura, D. (2002) Coral reef rehabilitation; Feasibility, benefits and need. pp. 263-271 in Linden, O. et al. (eds.) Coral Reef Degradation in the Indian Ocean—Status Report 2001.
- 1.46 Tamelander, J., Visram, S. and Obura, D. (2002) Prospects for coral recovery through transplantation and natural recruitment, Kenya. Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia, 2, 991-996.
- 1.47 Thom, R.M. (1997) System-development matrix for adaptive management of coastal ecosystem restoration projects. *Ecological Engineering* 8, 219-232.
- 1.48 Whittingham, E., Campbell, J. and Townsley, P. (2003) Poverty and Reefs. DFID-IMM-IOC/UNESCO. 260 pp.
- 1.49 Wilkinson, C. (2008) Status of Coral Reefs of the World: 2008. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Centre, Townsville, Australia, 296 pp.
- 1.50 Yap, H.T. (2000) The case for restoration of tropical coastal ecosystems. *Ocean & Coastal Management* 43, 841-851.
- 1.51 Yeemin, T., Sutthacheep, M. and Pettongma, R. (2006) Coral reef restoration projects in Thailand. *Ocean & Coastal Management* 49, 562-575.
- 1.52 Young, C.N., Schopmeyer, S.A. and Lirman, D. (2011) A review of reef restoration and coral propagation using the threatened genus *Acropora* in the Caribbean and western Atlantic. *Bulletin of Marine Science* 88, 1075-1098.
- 1.53 Zimmer, B. (2006) Coral reef restoration: an overview. pp. 39-60 in Precht, F. (ed.) *Coral Reef Restoration Handbook*. CRS Press, Boca Raton, Florida.

(2) さ ん ご 礁 再 生 修 復 技 術 概 論 (Technique for reef rehabilitation: Introduction)

- 2.1 Ammar, M.S.A., El-Gammal, F., Nassar, M., Belal, A., Farag, W., El-Haddad, K., Orabi, A., Abdelreheem, A. and Shaaban, A. (2013) Review: Current trends in coral transplantation—an approach to preserve biodiversity. *Biodiversitas* 14, 43-53.
- 2.2 Barton, J.A., Willis, B.L. and Hutson, K.S. (2015) Coral propagation; a review of techniques for ornamental trade and reef restoration. *Reviews in Aquaculture* Doi: 10.1111/raq.12135
- 2.3 Clark, S. (2002) Coral reefs. pp. 171-196 in Perrow, M.R. and Davy A.J. (eds.)

- Handbook of Ecological Restoration. Vol. 2. Restoration in Practice. Cambridge University Press, Cambridge..
- 2.4 Edwards, A.J. (ed.) (2010) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program. St Lucia, Australia. ii+166 pp. [www.gefcoral.org](http://www.gefcoral.org)
- 2.5 Epstein, N., Bak, R.P.M. and Rinkevich, B. (2001) Strategies for gardening denuded coral reef areas: the applicability of using different types of coral material for reef restoration. *Restoration Ecology* 9, 432-442.
- 2.6 Heeger, T. and Sotto, F. (eds.) (2000) Coral Farming: A Tool for Reef Rehabilitation and Community Ecotourism. German Ministry of Environment, German Technical Cooperation and Tropical Ecology Program (GTZ-TÖB), Philippines. 94 pp.
- 2.7 Jaap, W.C. (2000) Coral reef restoration. *Ecological Engineering* 15, 345-364.
- 2.8 Johnson, M.E., Lustic. C., Bartels, E., Bauns, I.B., Gilliam, D.S., Larson, L., Lirman, D., Miller, M.W., Ncdimeyer, K. and Schopmeyer, S. (2011) Caribbean *Acropora* Restoration Guide: Best Practices for Propagation and Population Enhancement. The Nature Conservancy, Arlington, VA. Vii+54pp <http://www.frrp.org/>
- 2.9 Jokiel, P.L. and Naughton, J. (2001) Coral reef mitigation and restoration techniques employed in the Pacific islands. II. Guidelines. OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition 1, 313-316.
- 2.10 Maragos, J.E. (1974) Coral transplantation: a method to create, preserve and manage coral reefs. Sea Grant Advisory Report UINHI-SEAGRANT-AR-74-03, CORMAR-14, 30 pp.
- 2.11 Miller, S.L., McFall, G.B. and Hulbert, A.W. (1993) Guidelines and recommendations for coral reef restoration in the Florida Keys National Marine Sanctuary. National Undersea Research Center, University of North Carolina at Wilmington. 38 pp.
- 2.12 Naughton, J. and Jokiel, P.L. (2001) Coral reef mitigation and restoration techniques employed in the Pacific islands. I. Overview. OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition 1, 306-311.
- 2.13 沖縄総合事務局開発建設部港湾計画課 (2010) サンゴ群体の移植・移築技術を利用した港湾整備におけるサンゴ礁との共生指針. 那覇. 13pp. Okinawa General Bureau (2010) A Manual: Coexistence of Harbor and Coral Reefs Using the Technique of Coral Transplantation and Translocation. Naha, Okinawa, 13pp. ( in Japanese )

[http://www.dc.ogb.go.jp/Kyoku/Business/port/pdf/topix\\_sango\\_guntai.pdf](http://www.dc.ogb.go.jp/Kyoku/Business/port/pdf/topix_sango_guntai.pdf)

- 2.14 沖縄県自然保護課 (2008) サンゴ移植マニュアル. 那覇. 38 pp. Okinawa Prefecture, Division of Nature Conservation (2008) Manual for Coral Transplantation. Naha, Okinawa, 38pp. (in Japanese) [http://www.pref.okinawa.jp/site/kanky/shizenhogo/hogo/sango\\_isyoku\\_manual.html](http://www.pref.okinawa.jp/site/kanky/shizenhogo/hogo/sango_isyoku_manual.html)
- 2.15 大森 信 (編著) (2003) 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. 84pp. Omori, M. (ed.) (2003) Manual for Restoration and Remediation of Coral Reefs, Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment, Japan. (in Japanese) [www.COREMOC.go.jp/report/RSTR/RSTR2003a.pdf](http://www.COREMOC.go.jp/report/RSTR/RSTR2003a.pdf)
- 2.16 Omori, M. and Fujiwara, S. (eds.) (2004) Manual for Restoration and Remediation of Coral Reefs. Nature Conservation Bureau, Ministry of Environment, Japan. 84pp. [www.COREMOC.go.jp/report/RSTR/RSTR2004a.pdf](http://www.COREMOC.go.jp/report/RSTR/RSTR2004a.pdf)
- 2.17 Paragos, J.E. (1974) Coral transplantation: a method to create, preserve and manage coral reefs. Sea Grant Advisory Report UNIHI-SEAGRANT-AR-74-03, CORMAR-14, 30 pp.
- 2.18 PIANC: The World Association for Waterborne Transport Infrastructure (2010) Dredging and port construction around coral reefs. PIANC Report (108), 73pp.
- 2.19 Precht, W.F. (ed.) (2006) Coral Reef Restoration Handbook. CRC Press, Boca Raton, Florida. 363 pp.
- 2.20 Precht, W.F. and Robbart, M. (2006) Coral reef restoration: The rehabilitation of an ecosystem under siege. pp. 1-24 in Precht, W.F. (ed.) Coral Reef Restoration Handbook. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- 2.21 Rinkevich, B. (2014) Rebuilding coral reefs: does active reef restoration lead to sustainable reefs? Current Opinion in Environmental Sustainability 7, 28-36.
- 2.22 Shaish, L., Levy, G., Katzir, G. and Rinkevich, B. (2010) Coral reef restoration (Bolinao, Philippines) in the face of frequent natural catastrophes. Restoration Ecology 18, 286-299.
- 2.23 Wabnitz, C., Taylor, M., Green, E. and Razak, T. (2003) From ocean to aquarium. UNEP-WCMC, Cambridge, UK. 64 pp.

(3) 直接移植 (Direct transplantation of coral fragments; low tech methodology)

- 3.1 Alcala, A.C., Gomez, E.D. and Alcala, L.C. (1982) Survival and growth of coral transplants in Central Philippines. Kalikasan; Philippines Journal of Biology 11,

- 136-147.
- 3.2 Ammar, M.S.A., Amin, E.A., Gundacker, D. and Mueller, W.E.G. (2000) One rational strategy for restoration of coral reefs: application of molecular biological tools. To select sites for rehabilitation by asexual recruits. *Marine Pollution Bulletin* 40, 616-627.
  - 3.3 Auberson, B. (1982) Coral transplantation; an approach to the re-establishment of damaged reefs. *Kalikasan; Philippines Journal of Biology* 11, 158-172.
  - 3.4 Becker, L.C. and Mueller, E. (2001) The culture, transplantation and storage of *Montastrea faveolata*, *Acropora cervicomis* and *Acropora palmata*: What we have learned so far. *Bulletin of Marine Science* 69, 881-896.
  - 3.5 Birkeland, C., Randall, R.H. and Grimm, G. (1979) Three methods of coral transplantation for the purpose of re-establishing a coral community in the thermal effluent area at the Tanguisson Power Plant. University of Guam Technical Report, 60pp.
  - 3.6 Boch, C.H. and Morse, A.N.C. (2012) Testing the effectiveness of direct propagation techniques for coral restoration of *Acropora* spp. *Ecological Engineerings* 40, 11-17.
  - 3.7 Bothwell, A.M. (1981) Fragmentation, a means of asexual reproduction and dispersal in the coral genus *Acropora* (Scleractinia : astrocoeniida): a preliminary report. *Proceedings of 4th International Coral Reef Symposium, Manila, Phillipines*, 2, 137-144.
  - 3.8 Bouchon, C., Jaubert, J. and Bouchon-Navano, Y. (1981) Evolution of a semi-artificial reef built by transplanting coral heads. *Tethys* 10, 173-176.
  - 3.9 Bowden-Kerby, A. (1997) Coral transplantation in sheltered habitats using unattached fragments and cultured colonies. *Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium, Panama*, 2, 2063-2068.
  - 3.10 Bowden-Kerby, A. (2001a) Coral transplantation modeled after natural fragmentation processes: Low-tech tools for coral reef restoration and management. Ph.D. Thesis, University of Puerto Rico, Mayaguez, Puerto Rico. 195pp.
  - 3.11 Bowden-Kerby, A. (2001b) Low-tech coral reef restoration methods modeled after natural fragmentation processes. *Bulletin of Marine Science* 69, 951-931.
  - 3.12 Bowden-Kerby, A. (2004) Coral transplantation and restocking to accelerate the recovery of coral reef habitats and fisheries resources within no-take marine protected areas: hands-on approaches to support community-based coral reef

- management. pp.80-85 in: People and reefs: successes and challenges in the management of coral reef marine protected areas. UNEP Regional Seas Report and Studies No. 176.
- 3.13 Bowden-Kerby, A. (2008) Restoration of threatened *Acropora cervicornis* corals: intraspecific variation as a factor in mortality, growth, and self-attachment. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Fort Lauderdale, Florida, 2, 1200-1204.
- 3.14 Bowden-Kerby, A. (2012) Thermal tolerance as a factor in Caribbean *Acropora* restoration. Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia. ICRS2012 20A-1.
- 3.15 Bruckner, A.W. and Bruckner, R.J. (2001) Condition of restored *Acropora palmata* fragments off Mona Island, Puerto Rico: Two years after the *Fortuna Reefer* ship grounding. *Coral Reefs* 20, 235-243.
- 3.16 Bruckner, A.W. and Bruckner, R.J. (2006a) Restoration outcomes of the *Fortuna Reefer* grounding at Mona Island, Puerto Rico. pp. 257-269 in Precht, W. (ed). *Coral Reef Restoration Handbook*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- 3.17 Bruckner, A.W. and Bruckner, R.J. (2006b) Survivorship of restored *Acropora palmata* fragments over six years at the M/V *Fortuna Reefer* ship grounding site, Mona Island, Puerto Rico. Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa, 1645-1650.
- 3.18 Bruckner, A.W. and Bruckner, R.J. (2010) Re-attachment and monitoring of broken fragments of *Acropora palmate* following a ship grounding in Puerto Rico. pp.152-154 in Edwards, A.J. (ed.) (2010) *Reef Rehabilitation Manual*. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia.
- 3.19 Bruckner, A.W., Bruckner, R.J. and Hill, R. (2008) Improving restoration approaches for *Acropora palmata*: Lessons from the *Fortuna Reefer* grounding in Puerto Rico. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Fort Lauderdale, Florida, 2, 1199-1203.
- 3.20 Cabaitan, P.C., Gomez, E.D. and Aliño, P.M. (2008) Effects of coral transplantation and giant clam restocking on the structure of fish communities on degraded patch reefs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 357, 85-98.
- 3.21 Cabaitan, P.C., Yap, H.T. and Gomez, E.D. (2015) Performance of single versus mixed coral species for transplantation to restore degraded reefs. *Restoration Ecology* 23, 344-356.

- 3.22 Carne, L. (2011) Strengthening coral reef resilience to climate change impacts: A case study of reef restoration at Laughing Bird Caye National Park, Southern Belize. WWF, 41pp.
- 3.23 Chen, G., Xiong, S. and Xie, JN. (1995) A study on the transplantation of reef-building corals in Sanya waters, Hainan province. *Tropic Oceanology* 14(3), 51-57.
- 3.24 Clark, S. and Edwards, A.J. (1995) Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: evaluation of a case study in Maldiv Islands. *Coral Reefs* 14, 201-213.
- 3.25 Clark, T. (1997) Tissue regeneration rate of coral transplants in a wave exposed environment, Cape d'Aguilar, HongKong. *Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium, Panama, 2, 2069-2074.*
- 3.26 Custodio, I.H.M. and Yap, H.T. (1997) Skeletal extension rates of *Porites cylindrica* and *Porites (Synaraea) rus* after transplantation to two depths. *Coral Reefs* 16, 267-268.
- 3.27 dela Cruz, D.W., Villanueva, R.D. and Baria, M.V.B. (2014) Community-based, low-tech method of restoring a lost thicket of *Acropora* corals. *ICES Journal of Marine Science* 71:1866-1875.
- 3.28 Dizon, R.T. and Yap, H.T. (2006) Effects of coral transplantation in sites of varying distances and environmental conditions. *Marine Biology* 148, 933-943.
- 3.29 Edwards, A.J. and Clark, S. (1998) Coral transplantation: a useful management tool or misguided meddling? *Marine Pollution Bulletin* 37, 474-487.
- 3.30 遠藤秀文・R. Prasetyo・西平守孝・大中 晋 (2006) 移植サンゴの定着率に関する長期現地モニタリングおよびサンゴ移植の適用性の検討. *海岸工学論文集* 53, 1296-1200. Endo, S., Prasetyo, R., Nishihira, M. and Onaka, S. (2006) Long-term monitoring on settlement of transplanted corals and consideration on the method of transplantation. *Proceedings of Coastal Engineering* 53, 1296-1200. (in Japanese)
- 3.31 遠藤秀文・R. Prasetyo・西平守孝・大中 晋 (2008) バリ島・クタ海岸におけるサンゴ移植・増殖の適応性に関する検討. *海岸工学論文集* 55, 1121-1125. Endo, S., Prasetyo, R., Nishihira, M. and Onaka, S. (2008) Experimental coral transplantation in the lagoon of Kuta Beach, Bali Island, Indonesia. *Proceedings of Coastal Engineering* 55, 1121-1125. (in Japanese)
- 3.32 Endo, S., Prasetyo, R. and Onaka, S. (2013) Study on attachment methods, retention and growth of transplanting coral. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies* 15, Supplement (Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Coral Reef

- Symposium), 330-335.
- 3.33 Ferse, S.C.A. (2010) Poor performance of corals transplanted onto substrates of short durability. *Restoration Ecology* 18, 399-407.
  - 3.34 Ferse, S.C.A., Nugues, M.M., Romatzki, S.B. and Kunzmann, A. (2013) Examining the use of mass transplantation of brooding and spawning corals to support natural coral recruitment in Sulawesi/Indonesia. *Restoration Ecology* 21, 745-754.
  - 3.35 Forrester, G.E., Ferguson, M.A., O'Connell-Rodwell, C.E. and Jarecki, L.L. (2014) Long-term survival and colony growth of *Acropora palmata* fragments transplanted by volunteers for restoration. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 24, 81–91.
  - 3.36 Forrester, G.E., Maynard, A., Schofield, S. and Taylor, K. (2012) Evaluating causes of *Acropora palmata* used for coral reef restoration. *Bulletin of Transplant Stress in Fragments of Marine Science* 88, 1099-1113.
  - 3.37 Forrester, G.E., O'Connell-Rodwell, Baily, P., Forrester, L.M., Giovannini, S., Harmon, L., Karis, R., Krumboltz, J., Rodwell, T. and Jarecki, L. (2011) Evaluating methods for transplanting endangered elkhorn corals in the Virgin Islands. *Restoration Ecology* 19, 299-306.
  - 3.38 Forrester, G.E., Taylor, K., Schofield, S. and Maynard, A. (2013) Colony growth of corals transplanted for restoration depends on their site of origin and environmental factors. *Marine Ecology* 34, 186–192.
  - 3.39 Franklin, H., Muhando, C.A. and Lindahl, U. (1998) Coral culturing and temporal recruitment patterns in Zanzibar, Tanzania. *Ambio* 27, 645-650.
  - 3.40 Garrison, V. (2008) Storm-generated coral fragments- A viable source of transplants for reef rehabilitation. *Biological Conservation* 141, 3089-3100.
  - 3.41 Garrison, V. and Ward, G. (2012) Transplantation of storm-generated coral fragments to enhance Caribbean coral reefs: A successful method but not a solution. *Revista de Biologia Tropical* 60, 59-70.
  - 3.42 Gleason, D.F., Brazeau, D.A. and Munfus, D. (2001) Can self-fertilizing coral species be used to enhance restoration of Caribbean reefs? *Bulletin of Marine Science* 69, 933-943.
  - 3.43 Gomez, E.D., Cabaitan, P.C., Yap, H.T. and Dizon, R.M. (2014) Can coral cover be restored in the absence of natural recruitment and reef recovery? *Restoration Ecology* 22, 142-150.
  - 3.44 Gomez, E.D., Yap, H.T., Cabaitan, P.C. and Dizon, R.M. (2011) Successful

- transplantation of a fragmenting coral, *Montipora digitata*, for reef rehabilitation. *Coastal Management* 39, 556-574.
- 3.45 Griffin, S., Spathias, H., Moore, T.D., Baums, I. and Griffin, B.A. (2012) Scaling up *Acropora* nurseries in the Caribbean and improving techniques. Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia. ICRS2012 20A-2
- 3.46 Guest, J.R., Dizon, R.M., Edwards, A.J., Franco, C. and Gomez, E.D. (2009) How quickly do fragments of coral 'self-attach' after transplantation? *Restoration Ecology* 17, 1-9.
- 3.47 Guest, J.R., Todo, P.A., Goh, B.P.L. and Chou, L.M. (2007) The effect of transplantation on reproduction in clonal ramets of *Goniopora columna* on Singapore's coral reefs. *Invertebrate Reproduction and Development* 50, 133-138.
- 3.48 Guignard, C. and Le Berre, T. (2010) Transplantation of coral fragments and colonies at tourist resorts using coated metal frames as a substrate. pp. 143-145 in Edwards, A.J. (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program*. St Lucia, Australia.
- 3.49 Guzman, H.M. (1991) Transplantation of reef-building corals in Pacific Costa Rica. *Conservation Biology* 5, 189-194.
- 3.50 Harriott, V.J. and Fisk, D.A. (1988) Coral transplantation as a reef management option. Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium, Townsville, Australia, 2, 375-379.
- 3.51 Higa, Y. and Omori, M. (2014) Production of coral colonies for outplanting using a unique rearing method of donor colonies at Onna Village, Okinawa, Japan. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies* 16, 19-20.
- 3.52 Highsmith, R.C. (1982) Reproduction by fragmentation in corals. *Marine Ecology Progress Series* 7, 207-226.
- 3.53 Hollarsmith, J.A., Griffin, S.P. and Moore, T.D. (2012) Success of outplanted *Acropora cervicornis* colonies in reef restoration. Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia. ICRS2012 20A-3.
- 3.54 Hudson, J.H. and Goodwin, W.B. (1997) Restoration and growth rate of hurricane damaged pillar coral (*Dendrogyra cylindrus*) in the Key Largo National Marine Sanctuary, Florida. Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium, Panama, 1, 567-570.
- 3.55 海中公園センター (1993) 平成4年度さんご礁生態系の復元手法に関する研究報

- 告書. 42pp. Marine Parks Center of Japan (1993) Study on recovery of coral reef ecological system in 1992. 42pp. (in Japanese)
- 3.56 海中公園センター (1994) 平成 5 年度さんご礁生態系の復元手法に関する研究報告書. 86pp. Marine Parks Center of Japan (1994) Study on recovery of coral reef ecological system in 1993. 86pp. (in Japanese)
- 3.57 海中公園センター (1995) 平成 6 年度さんご礁生態系の復元手法に関する研究報告書 87pp. Marine Parks Center of Japan (1995) Study on recovery of coral reef ecological system in 1994. 87pp. (in Japanese)
- 3.58 海洋科学技術センター (1991) サンゴ礁造園技術の研究開発. 平成 3 年度報告書 183pp. Japan Marine Science and Technology Center (1991) Research and development on coral reef gardening technique; Report of 1991. 183pp. (in Japanese).
- 3.59 Kaly, U.L. (1995) Experimental test of the effect of methods of attachment and handling on the rapid transplantation of corals. CRC Reef Research Centre Technical Report (1), 1-28.
- 3.60 Lam, K.K.Y. (2000) Early growth of a pioneer recruited coral *Oulastrea crispata* (Scleractinia, Faviidae) on PFA-concrete blocks in a marine park in Hong Kong, China. Marine Ecology Progress Series 205, 113-121.
- 3.61 Latypov, Y.Y. (2006) Transplantation and cultivation of fragments of coral colonies of various scleractinian species on a reef in Vietnam. Russian Journal of Marine Biology 32, 375-381.
- 3.62 Latypov, Y.Y. (2014) Artificial cultivation of hermatypic corals on experimental frame on the reefs of Vietnam. Journal of Biodiversity, Bioprospecting and Development. 1, 117. Doi:10.4172/2376-0214.1000117
- 3.63 Laydo, R.S. (1996) Coral transplantation in reef managements at Buccoo Reef, South-west Tobago. Caribbean Marine Studies 5, 67-77.
- 3.64 Liñán-Cabello, M.A., Flores-Ramírez, L.A., Laurel-Sandoval, M.A., Mendoza, E.G., Santiago, O.S. and Delgadillo-Nuño, M.A. (2011). Acclimation in *Pocillopora* spp. during a coral restoration program in Carrizales Bay, Colima, Mexico. Marine and Freshwater Behaviour and Physiology 44, 61-72.
- 3.65 Lindahl, U. (1998) Low-tech rehabilitation of degraded coral reefs through transplantation of staghorn corals. Ambio 27, 645-650.
- 3.66 Lindahl, U. (2003) Coral reef rehabilitation through transplantation of staghorn corals: Effects of artificial stabilization and mechanical damages. Coral Reefs 22, 217-223.

- 3.67 Miller, M.W. and Barimo, J. (2001) Assessment of juvenile coral populations at two reef restoration sites in the Florida Keys National Marine Sanctuary: Indication of success? *Bulletin of Marine Science* 69, 395-405.
- 3.68 Miyazaki, K., Keshavmurthy, S. and Fukami, K. (2010) Survival and growth of transplanted coral fragments in a high-latitude coral community (32° N) in Kochi, Japan. *Kuroshio Biosphere* 6, 1-9+1pl.
- 3.69 Munoz-Chagin, R.F. (1997) Coral transplantation program in the Paraiso coral reef, Cozumel Island, Mexico. *Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium, Panama*, 2, 2075-2078.
- 3.70 Nagelkerken, I., Bouma, S., van den Akker, S. and Bak, R.P.M. (2000) Growth and survival of unattached *Madracis mirobitis* fragments transplanted to different reef sites, and the implication for reef rehabilitation. *Bulletin of Marine Science* 66, 497-505.
- 3.71 Ngai, N.D., Cu, N.D. and Tuyet, D.A. (2013) Coral degradation and ability of rehabilitation of coral reefs in Co To Archipelago, Quang Ninh province, Vietnam. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 96, 50-55.
- 3.72 西平守孝 (1994) 群体破片を用いた造礁サンゴの移植について—竹串を用いる簡便な方法—. *沖縄生物学会誌* 32, 49-56. Nishihira, M. (1994) Transplantation of hermatypic coral using fragments of colonies—Brief method using bamboo stick. *Biological Magazine of Okinawa* 32, 49-56. (in Japanese)
- 3.73 西平守孝 (2006) 伸縮性素材を用いたサンゴ片の新たな固定法. *名桜大学総合研究* (9), 71-75. Nishihira, M (2006) New methods for transplanting coral pieces using elastic materials. *Bulletin of Meio University Research Institute* (9), 71-75. (in Japanese)
- 3.74 西平守孝 (2007a) 沖縄県南部具志頭浜の礁池における移植サンゴ片の生存と成長. *名桜大学総合研究*(11), 37-46. Nishihira, M. (2007a) Survival and growth of coral fragments transplanted in back-reef moat of Gushikashira Beach, Okinawa. *Bulletin of Meio University Research Institute* (11), 37-46. (in Japanese)
- 3.75 西平守孝 (2007b) 分割可能なサンゴ移植プレートを用いたサンゴ片の新たな移植法. *名桜大学総合研究*(11), 63-67. Nishihira, M. (2008a) Method of multiple coral transplantation for establishment of coral populations. *Bulletin of Meio University Research Institute* (11), 63-67. (in Japanese)
- 3.76 西平守孝 (2008a) サンゴ片移植によるサンゴ群集創出における逐次多回移植法. *名桜大学総合研究*(12), 33-37. Nishihira, M. (2008a) Method of multiple coral transplantation for establishment of coral populations *Bulletin of Meio University Research Institute* (12), 33-37. (in Japanese)

- 3.77 西平守孝 (2008b) 板チョコプレートを用いたサンゴの移植について. 名桜大学総合研究 (12), 45-48. Nishihira, M. (2008b) Note on coral transplantation with chocolate bar-shape substrate. Bulletin of Meio University Research Institute (12), 45-48. (in Japanese)
- 3.78 大久保奈弥 (2003) 分割群体の移植. pp.31-36. 大森 信(編著) 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. Okubo, N. (2003) Transplantation of coral fragments. pp. 31-36 in Omori, M. (ed.) Manual for Restoration and Remediation of Coral Reefs. Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment, Japan. (in Japanese)
- 3.79 大久保奈弥 (2003) サンゴの移植に適する基盤. みどりいし (14), 31-33. Okubo, N. (2003) Appropriate artificial substrates for coral transplantation. Midoriishi (14), 31-33. (in Japanese)
- 3.80 Okubo, N. (2004) Restoration technology by using asexual reproduction. pp. 34-40 in Omori, M. and Fujiwara, S. (eds.) Manual for Restoration and Remediation of Coral Reefs. Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment, Japan.
- 3.81 Okubo, N., Motokawa, T. and Omori, M. (2007) When fragmented coral spawn? Effect of size and timing of coral fragmentation in *Acropora formosa* on survivorship and fecundity. Marine Biology 151, 353-363.
- 3.82 大久保奈弥・大森 信 (2001) 世界の造礁サンゴの移植レビュー. 日本サンゴ礁学会誌 3, 31-40. Okubo, N. and Omori, M. (2001) The review of coral transplantation around the world. Galaxea, Journal of Coral Reef Studies 3, 31-40. (in Japanese)
- 3.83 Okubo, N., Taniguchi, H. and Motokawa, T. (2005) Successful methods for transplanting fragments of *Acropora formosa* and *A. hyacinthus*. Coral Reefs 24, 333-342.
- 3.84 Okubo, N., Motokawa, T. and Omori, M. (2007) When fragmented coral spawn? Effect of size and timing on survivorship and fecundity of fragmentation in *Acropora formosa*. Marine Biology 151, 353-363.
- 3.85 Okubo, N., Taniguchi, H. and Omori, M. (2009) Sexual reproduction in transplanted coral fragments of *Acropora nasuta*. Zoological Studies 48, 442-447.
- 3.86 大中 晋・遠藤秀文・西平守孝・吉井一郎 (2008) インドネシアにおける大規模サンゴ移植の実施. 海洋開発論文集 24, 825-830. Onaka, S., Endo, S., Nishihira, M. and Yoshii, I. (2008) Implementation of large-scale coral transplantation in Indonesia. Proceedings of Civil Engineering in the Ocean 24, 825-830. (in Japanese)

- 3.87 Onaka, S., Prasetyo, R., Endo, S. and Yoshii, I. (2013) Large-scale coral transplantation in artificial substrates at a shallow lagoon in Kuta Beach, Bali, Indonesia. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies, Supplement (Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Coral Reef Symposium)*, 336-342.
- 3.88 Palomar, M.J.S., Yapp, H.T. and Gomez, E.D. (2009) Coral transplant survival over 3 years A under different environmental conditions at the Hundred Islands, Philippines. *Philippine Agriculture Science* 92, 143-152.
- 3.89 Pinlak, G.A. and Brown, E.K. (2008) Growth and mortality of coral transplants (*Pocillopora damicornis*) along a range of sediment influence in Maui, Hawai'i. *Pacific Science* 62, 39-55.
- 3.90 Plucer-Rosario, G.P. and Randall, R.H. (1987) Preservation of rare coral species by transplantation: An examination of their recruitment and growth. *Bulletin of Marine Science* 41, 585-593.
- 3.91 Quinn, N.J. and Kojis, B.L. (2006) Evaluating the potential of natural reproduction and artificial techniques to increase *Acropora cervicornis* population at Discovery Bay, Jamaica. *Revista de Biología Tropical* 54 (Supplement 3), 105-116.
- 3.92 Quinn, N.J., Kojis, B.L. and Bowden-Kerby, A. (2005) Assessing the potential for natural recovery and coral restoration techniques for enhancing coral habitat in Jamaica. *Oceans* 3, 2752-2759.
- 3.93 Raymundo, L.J. (2001) Mediation of growth by conspecific neighbors and the effects of site in transplanted fragments of the coral *Porites attenuate* Nemenzo in the central Philippines. *Coral Reefs* 20, 263-272.
- 3.94 Raymundo, L.J., Maypa, A.P. and Luchavez, M.M. (1999) Coral seeding as a technology for recovering degraded coral reefs in the Philippines. *Phuket Marine Biological Center Special Publication* 20, 81-92.
- 3.95 Smith, L.D. and Hughes, T.P. (1999) An experimental assessment of survival, re-attachment and fecundity of coral fragments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 235, 147-164.
- 3.96 Thongtham, N. and Chansang, H. (2009) Transplantation of *Porites lutea* to rehabilitate degraded coral reef at Maiton Island, Phuket, Thailand. *Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Fort Lauderdale, Florida*, 2, 1276-1280.
- 3.97 Toh, T.C., Ng, C.S.L., Peh, J.W.K., Toh, K.B. and Chou, L.M. (2014) Augmenting the post-transplantation growth and survivorship of juvenile scleractinian corals via nutritional enhancement. *PLOS One* 9(6) e98529.

- 3.98 Tortolero-Langarica, J.J.A., Cupul-Magaña, A.L. and Rodríguez-Troncoso, A.P. (2014) Restoration of a degraded coral reef using a natural remediation process: A case study from a Central Mexican Pacific National Park. *Ocean & Coastal Management* 96, 12-19.
- 3.99 Williams, D.F. and Miller, M.W. (2010) Stabilization of fragments to enhance asexual recruitment in *Acropora palmata*, a threatened Caribbean coral. *Restoration Ecology* 18, Supplement 2, 446-451.
- 3.100 Yap, H.T. (2009) Local changes in community diversity after coral transplantation. *Marine Ecology Progress Series* 374, 22-41.
- 3.101 Yap, H.T., Alino, P.M. and Gomez, E.D. (1992) Trends in growth and mortality of three coral species (Anthozoa; Scleractinia), including effects of transplantation. *Marine Ecology Progress Series* 83, 91-101.
- 3.102 Yap, H.T., Alvarez, R.M., Custodio III, H.M. and Dizon, R.M. (1998) Physiological and ecological aspects of coral transplantation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 229, 69-84.
- 3.103 Yap, H.T. and Gomez, E.D. (1984) Growth of *Acropora pulchra*. Responses of natural and transplanted colonies to temperature and day length. *Marine Biology* 82, 209-215.
- 3.104 Yap, H.T. and Gomez, E.D. (1985) Growth of *Acropora pulchra* 3. Preliminary observations on the effects of transplantation and sediment on the growth and survival of transplants. *Marine Biology* 87, 203-209.
- 3.105 Yap, H.T. and Molina, R.S. (2003) Comparison of coral growth and survival under enclosed, semi-natural conditions and in the field. *Marine Pollution Bulletin* 46, 858-864.
- 3.106 Zayasu, Y. and Shinzato, C. (2016) Hope for coral reef rehabilitation: massive synchronous spawning by outplanted corals in Okinawa, Japan. *Coral Reefs*. Doi: 10.1007/s00338-016-1463-7.

(4) 無性生殖を利用した種苗生産と植込み (Nursery farming of corals using asexual propagation and outplanting)

- 4.1 Al-Horani, F.A. (2013) Sustainable resources of corals for the restoration of damaged coral reefs in the Gulf of Aquaba, Red Sea. *Life Science Journal* 10, 352-360.
- 4.2 Amar, K.O. and Rinkevich, B. (2007) A floating mid-water coral nursery as larval dispersion hub: Testing and idea. *Marine Biology* 151, 713-718.

- 4.3 Barton, J.A., Willis, B.L. and Hutson, K.S. (2015) Coral propagation; a review of techniques for ornamental trade and reef restoration. *Reviews in Aquaculture*, Doi: 10.1111/raq.12135 -19.
- 4.4 Bongioni, L., Giovanelli, D., Rinkevich, B., Pusceddu, A., Chou, ML. and Danovaro, R. (2011) First step in the restoration of a highly degraded coral reef (Singapore) by *in situ* coral intensive farming.. *Aquaculture* 322/323, 191-200.
- 4.5 dela Cruz, D.W., Rinkevich, B., Gomez, E.D. and Yap, H.T. (2015) Assessing an abridged nursery phase for slow growing corals used in coral restoration. *Ecological Engineering* 84, 408-415.
- 4.6 Epstein, N., Bak, R.P.M. and Rinkevich, B. (2001) Strategies for gardening denuded coral reef areas: the applicability of using different types of coral material for reef restoration. *Restoration Ecology* 9, 432-442.
- 4.7 Epstein, N., Bak, R.P.M. and Rinkevich, B. (2003) Applying forest restoration principles to coral reef rehabilitation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 13, 387-395.
- 4.8 Epstein, N. and Rinkevich, B. (2001) From isolated ramets to coral colonies: The significance of colony pattern formation in reef restoration practices. *Basic and Applied Ecology* 2, 219-222.
- 4.9 Forsman, Z.H., Page, C.A., Toonen, R.J. and Vaughan, D. (2015) Growing coral larger and faster: micro-colony-fusion as a strategy for accelerating coral cover. *PeerJ* 3, e1313. Doi 10.7717/oerh,1313
- 4.10 Forsman, Z.H., Rinkevich, B. and Hunter, C.L. (2006) Investigating fragment size for culturing reef-building corals (*Porites iobata* and *P. compressa*) in *ex situ* nurseries. *Aquaculture* 261, 89-97.
- 4.11 Gomez, E.D. (2009) Community-based restoration: The Bolinao experience. *Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program*, St Lucia, Australia. 4 pp.
- 4.12 Griffin, S., Spathias, H., Moore, T.D., Baums, I. and Griffin, B.A. (2012) Scaling up *Acropora* nurseries in the Caribbean and improving techniques. *Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium*, Cairns, Australia, 20A-2.
- 4.13 Heeger, T., Cashman, M. and Sotto, F. (1999) Coral farming as alternative livelihood, for sustainable natural resource management and coral reef rehabilitation. pp. 171-185 in *Proceedings of the Oceanography International 99 Pacific Rim*. Spearhead Exhibitions Ltd, Singapore, 171-185.
- 4.14 Heeger, T. and Sotto, F. (eds). (2000) *Coral Farming: A Tool for Reef*

- Rehabilitation and Community Ecotourism. German Ministry of Environment, German Technical Cooperation and Tropical Ecology Program (GTZ-TÖB), Philippines. 94 pp.
- 4.15 Heeger, T., Sotto, F.B., Gatus, J.L. and Laron, C. (2001). Community-based coral farming for reef rehabilitation, biodiversity conservation and as a livelihood option for fisherfolk. pp. 133-145 in L. M. B. Garcia (ed.), Responsible Aquaculture Development in Southeast Asia. Proceedings of the Seminar-Workshop on Aquaculture Development in Southeast Asia organized by the SEAFDEC Aquaculture Department, October 1999, Iloilo City, Philippines: SEAFDEC Aquaculture Department, Iloilo, Philippines
- 4.16 Herlan, J. and Lirman, D. (2008) Development of a coral nursery program for the threatened coral *Acropora cervicornis* in Florida. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium 24, Fort Lauderdale, Florida. 1244-1247.
- 4.17 Higa, Y. and Omori, M. (2014) Production of coral colonies for outplanting using a unique rearing method of donor colonies at Onna Village, Okinawa, Japan. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies* 16, 19-20.
- 4.18 比嘉義規・新里宙也・座安佑奈・長田智史・中村良太・謝名堂聡・大森 信 (2017) 沖縄県さんご礁サンゴ保全再生事業における無性生殖を利用したサンゴの種苗生産と植込技術の段階的進歩。日本サンゴ礁学会誌。投稿中 Higa, Y., Shinzato, C., Zayasu, Y., Nagata, T., Nakamura, R., Janadou, S. and Omori, M. (2017) Gradual development of active restoration methodologies for coral reefs using asexual reproduction in the Coral Reef Preservation and Rehabilitation Project by Okinawa Prefectural Government, Japan. *Journal of the Japanese Coral Reef Society*. In submission. (in Japanese)
- 4.19 Horoszowski, Y. (2010) Transplantation of nursery reared corals to a degraded reef at Eilat, Israel. pp.149-151 in Edwards, A.J. (ed.) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program. St Lucia, Australia.
- 4.20 Horoszowski-Friedman, Y.B., Izhaki, I. and Rinkevich, B. (2011) Engineering of coral larval supply through transplantation of nursery-farmed gravid colonies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 399, 162-166.
- 4.21 Horoszowski-Friedman, Y.B., Brêthes, J.C., Rahmani, N. and Rinkevich, B. (2015) Marine silviculture: Incorporating ecosystem engineering properties into reef restoration acts. *Ecological Engineering* 82, 201-213.
- 4.22 Johnson, M.E., Lustic, C., Bartels, E., Bauns, I.B., Gilliam, D.S., Larson, L., Lirman, D., Miller, M.W., Ncdimeyer, K. and Schopmeyer, S. (2011) Caribbean *Acropora* Restoration Guide: Best Practices for Propagation and Population Enhancement. The Nature Conservancy, Arlington, VA. Vii+54pp

<http://www.frrp.org/>

- 4.23 Levy, G., Shaish, L., Haim, A. and Rinkevich, B. (2010) Mid-water rope nursery: Testing design and performance of a novel reef restoration instrument. *Ecological Engineerings* 36, 560-569.
- 4.24 Lirman, D., Schopmeyer, S., Galvan, V., Drury, C., Baker, A.C., Baums, I.B. (2014) Growth dynamics of the threatened Caribbean staghorn coral *Acropora cervicornis*: Influence of host genotype, symbiont identity, colony size, and environmental setting. *PLoS ONE* 9: e107253. doi:10.1371/journal.pone.0107253
- 4.25 Lirman, D., Thyberg, T., Herlan, J., Hill, C., Youg-Lahiff, C., Schopmeyer, S., Huntington, B., Santos, R. and Drury, C. (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.
- 4.26 Mbije, N.E.J., Spanier, E. and Rinkevich, B. (2010) Testing and the first phase of the ‘gardening concept’ as an applicable tool in restoring denuded reefs in Tanzania. *Ecological Engineerings* 36, 713-721.
- 4.27 Mbije, N.E.J., Spanier, E. and Rinkevich, B. (2013) A first endeavor in restoring denuded, post-bleached reefs in Tanzania. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 128, 41-51.
- 4.28 Mercado-Molina, A.E., Ruiz-Diaz, C.P. and Sabat, A.M. (2015) Demographics and dynamics of two restored populations of the threatened reef-building coral *Acropora cervicornis*. *Journal for Nature Conservation* 24, 17–23.
- 4.29 Montoya-Maya, P.H., Smit, K.P., Burr, A.J. and Frias-Torres, S. (2016) Large-scale coral reef restoration could assist natural recovery in Seychelles, Indian Ocean. *Nature Conservation* 16, 1-17.
- 4.30 Monty, J.A., Gilliam, D.S., Banks, K.W., Stout, D.K. and Dodge, R.E. (2006) Coral of opportunity survivorship and the use of coral nurseries in coral reef restoration. *Proceeding of 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa*. 1665-1673.
- 4.31 Moothien-Pillay, R., Bacha-Gian, S., Bhojroo, V. and Curpen, S. (2012) Adapting coral culture to climate change: the Mauritanian experience. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science* 10, 155-167.
- 4.32 Nature Seychelles (2015) Transplanted corals attach themselves in pioneering reef restoration project in Seychelles. <http://www.natureseychelles.org/what-we-do/coral-reef-restoration>

- 4.33 Nedimyer, K., Gaines, K. and Roach, S. (2011) Coral Tree Nursery © : An innovative approach to growing corals in an ocean-based field nursery. *International Journal of the Bioflux Society* 4, 442-446.
- 4.34 Ng, C.S.L. and Chou, L.M. (2014) Rearing juvenile 'corals of opportunity' *in situ* nurseries—A reef rehabilitation approach for sediment-impacted environments. *Marine Biology Research* 10, 833-838.
- 4.35 Ng, C.S.L., Ng, S.Z. and Chou, L.M. (2012) Does an *ex situ* coral nursery facilitate reef restoration in Singapore's waters? *Contributions in Marine Science*, 95-100.
- 4.36 Ng, C.S.L., Toh, T.C. and Chou, L.M. (2016) Coral restoration in Singapore's sediment-challenged sea. *Regional Studies in Marine Science* 8, 422-429.
- 4.37 Omori, M., Higa, Y., Shinzato, C., Zayasu, Y., Nagata, T., Nakamura, R., Yokokura, A. and Janadou, S. (2016) Development of active restoration methodologies for coral reefs using asexual reproduction in Okinawa, Japan. *Proceedings of the 13th International Coral Reef Symposium, Honolulu, HA*, 369-387.
- 4.38 Putchim, L., Thongtham, N., Hewett, A. and Chansang, H. (2009) Survival and growth of *Acropora* spp. in mid-water nursery and after transplantation at Phi Phi Islands, Andaman Sea, Thailand. *Proceeding of 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida*, 19-22.
- 4.39 Reveret, C., Frias-Torres, S., Montoya-Maya, P.A.H., Shah, N. and Henri, K. (2016) Survival and growth monitoring of transplanted corals in special reserve, Republic of Seychelles. <https://www.youtube.com/watch?v=18s9OsYF4TU>
- 4.40 Rinkevich, B. (2000) Steps towards the evaluation of coral reef restoration by using small branch fragments. *Marine Biology* 136, 807-812..
- 4.41 Rinkevich, B. (2005) Conservation of coral reefs through active restoration measure: Recent approaches and last decade progress. *Environmental Science and Technology* 39, 4333-4342.
- 4.42 Rinkevich, B. (2006) The coral gardening concept and the use of underwater nurseries: Lessons learned from silvics and silviculture. pp. 291-301 in Precht, W.F. (ed.) *Coral Reef Restoration Handbook*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- 4.43 Rinkevich, B. (2014) Rebuilding coral reefs: does active reef restoration lead to sustainable reefs? *Current Opinion in Environmental Sustainability* 7, 28-36.
- 4.44 Shafir, S., Abady, S. and Rinkevich, B. (2009) Improved sustainable maintenance for mid-water coral nursery by the application of an anti-fouling

- agent. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 368, 124-128.
- 4.45 Shafir, S., Edwards, A., Rinkevich, B., Bongiorno, L., Levy, G. and Shaish, L. (2010) Constructing and managing nurseries for asexual rearing of corals. pp. 49-72 in Edwards, A.J. (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program*. St Lucia, Australia.
- 4.46 Shafir, S. and Rinkevich, B. (2008a) The underwater silviculture approach for reef restoration: An emergent aquaculture theme. pp. 279-295 in Schwartz, S.H. (ed.) *Aquaculture Research Trends*. Nova Science Publishers, New York.
- 4.47 Shafir, S. and Rinkevich, B. (2008b) Mariculture of coral colonies for the public aquarium sector. pp. 315-318 in Leewis, R.J. and Janse M. (eds.) *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums. Public Aquarium Husbandry Series Vol. 2*. Burgers' Zoo, Arnhem, the Netherlands.
- 4.48 Shafir, S. and Rinkevich, B. (2013) Mariculture of coral colonies for the public aquarium sector. pp. 315-318 in Leewis, R.J. and Janse, M. (eds) *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums. Vol. 2*, Burgers' Zoo, Arnhem, Netherlands.
- 4.49 Shafir, S., van Rijn, J. and Rinkevich, B. (2001) Nubbing of coral colonies: a novel approach for the development of island broodstocks. *Aquarium Science and Conservation* 3, 183-190.
- 4.50 Shafir, S., van Rijn, J. and Rinkevich, B. (2006a) A mid-water coral nursery. *Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa*, 1674-1679.
- 4.51 Shafir, S., van Rijn, J. and Rinkevich, B. (2006b) Coral nubbins as source material for coral biological research: A prospectus. *Aquaculture* 259, 444-448.
- 4.52 Shafir, S., van Rijn, J. and Rinkevich, B. (2006c) Steps in the construction of underwater coral nursery, an essential component in reef restoration acts. *Marine Biology* 149, 679-687.
- 4.53 Shaish, L., Levy, G., Gomez, E. and Rinkevich, B. (2008) Fixed and suspended coral nurseries in the Philippines: Establishing the first step in the "gardening concept" of reef restoration. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 358, 86-97.
- 4.54 Shaish, L., Levy, G., Katzir, G. and Rinkevich, B. (2010a) Coral reef restoration (Bolinao, Philippines) in the face of frequent natural catastrophes. *Restoration Ecology* 18, 286-299.
- 4.55 Shaish, L., Levy, G., Katzir, G. and Rinkevich, B. (2010b) Employing a highly

- fragmented, weedy coral species in reef restoration. *Ecological Engineering* 36, 1424-1432.
- 4.56 Soong, K. and Chen, T. (2003) Coral transplantation; regeneration and growth of *Acropora* fragments in a nursery. *Restoration Ecology* 11, 62-71.
- 4.57 上原 直 (1994) 造礁サンゴの破片を海中に垂下することによる、サンゴの増殖法と移植法. 特開平 6-303875. Uehara, S. (1994) Method of cultivation and transplantation of coral fragments by suspending them with rope in the sea. Patent presentation 1994-303875 (in Japanese)
- (5) 有性生殖を利用したサンゴ種苗生産と植込み (Rearing of coral larvae and juveniles using sexual propagation and outplanting)
- 5.1 青田 徹・柴田早苗・綿貫 啓 (2006) サンゴ幼生の大量飼育、運搬、基盤着生によるさんご礁回復技術の開発. *みどりいし* (17), 4-10. Aota, T., Shibata, S. and Watanuki, A. (2006) Development of coral reef restoration technology: Mass culture, transportation and settlement of coral larvae. *Midoriishi* (17), 4-10. (in Japanese)
- 5.2 Baria, M.V.B., dela Cruz, D.W., Villanueva, R.D. and Guest, J.R. (2012) Spawning of three-year-old *Acropora millepora* corals reared from larvae in northwestern Philippines. *Bulletin of Marine Science* 88, 61-62.
- 5.3 Barton, J.A., Willis, B.L. and Hutson, K.S. (2015) Coral propagation; a review of techniques for ornamental trade and reef restoration. *Reviews in Aquaculture*, Doi: 10.1111/raq.12135 -19.
- 5.4 Guest, J., Baria, M.V., Gomez, E.D., Heyward, A.J. and Edwards, A.J. (2013) Closing the circle: is it feasible to rehabilitate reefs with sexually propagated corals? *Coral Reefs*, 33, 45-55.
- 5.5 Guest, J., Heyward, A., Omori, M., Iwao, I., Morse, A. and Boch, C. (2010) Rearing coral larvae for reef rehabilitation. pp. 73-92 in Edwards, A.J. (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program*. St Lucia, Australia.
- 5.6 服田昌之・岩尾研二・谷口洋基・大森 信 (2003) 種苗生産. pp.13-25 大森 信 (編著) *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. Hatta, M., Iwao, K., Taniguchi, H. and Omori, M. (2003) Restoration technology using sexual reproduction. pp. 13-25 in Omori, M. (ed.) *Manual for Restoration and Remediation of Coral Reefs*, Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment, Japan. (in Japanese)
- 5.7 Hatta, M., Iwao, K., Taniguchi, H. and Omori, M. (2004) Restoration technology

- using sexual reproduction. pp. 14-28 in Omori, M. and Fujiwara, S. (eds.) Manual for Restoration and Remediation of Coral Reefs, Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment, Japan.
- 5.8 林 徹・岩瀬文人 (2010) 四国における人工繁殖によるクシハダミドリイシの成長と成熟について。黒潮生物研究財団紀要 6, 15-26, 2pls. Hayashi, T. and Iwase F. (2010) Growth and maturation of the artificially bred *Acropora hyacinthus* in Shikoku, Japan. Kuroshio Biosphere 6, 15-26, 2pls. (in Japanese)
- 5.9 Hayashibara, T., Iwao, K. and Omori, M. (2004) Induction and control of spawning in Okinawan staghorn corals. Coral Reefs 23, 406-409.
- 5.10 林原 毅・加藤雅也・玉城泉也・伏屋玲子・清水弘文 (2007) 幼生放流によるサンゴ群集の修復技術。みどりいし (18), 7-11. Hayashibara, T., Kato, M., Tamaki, M., Fuseya, R. and Shimizu, H. (2007) Restoration of coral assemblages by coral larvae seeding. Midoriishi (18), 7-11. (in Japanese)
- 5.11 Heyward, A.J., Smith, L.D., Rees, M. and Field, S.N. (2002) Enhancement of coral recruitment by *in situ* mass culture of coral larvae. Marine Ecology Progress Series 230, 113-118.
- 5.12 Horoszowski-Fridnab, Y.B., Izhaki, I. and Rinkevich, B. (2011) Engineering of coral reef larval supply through transplantation of nursery-farmed gravid colonies. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 399, 162-166.
- 5.13 Hough, P. (1996) The captive breeding of Great Barrier Reef corals: A new wave of Aussie culture. AZA Annual Conference Proceedings, 1996, 151-156.
- 5.14 岩尾研二 (2000) 造礁サンゴ産卵時期のコントロール。みどりいし (11), 24-25. Iwao, K. (2000) Note on the control of coral spawning timing. Midoriishi (11), 24-25. (in Japanese)
- 5.15 岩尾研二 (2013) 阿嘉島での植付けサンゴの再生産。みどりいし (24), 36-38. Iwao, K. (2013) Reproduction of outplanted corals at Akajima Island. Midoriishi (24), 36-38. (in Japanese)
- 5.16 Iwao, K., Omori, M., Taniguchi, H. and Tamura, M. (2010) Transplanted *Acropora tenuis* spawned initially 4 years after egg culture. Galaxea, Journal of Coral Reef Studis 12, 47.
- 5.17 Iwao, K., Wada, N., Ohdera, A. and Omori, M. (2014) How many donor colonies should be cross-fertilized for nursery farming of sexually propagated corals? Natural Resources 5, 521-526.
- 5.18 Linden, B. and Rinkevich, B. (2011) Creating stocks of young colonies from brooding coral larvae, amenable to active reef restoration. Journal of

- Experimental Marine Biology and Ecology 398, 40-46.
- 5.19 Nakamura, R., Ando, W., Yamamoto, H., Kitano, M., Sato, A., Nakamura, M., Kayanne, H. and Omori, M. (2011). Corals mass-cultured from eggs and transplanted as juveniles to their native, remote coral reef. *Marine Ecology Progress Series* 436, 161-168.
- 5.20 Omori, M. (2005) Success of mass culture of *Acropora* corals from egg to colony in open water. *Coral Reefs* 24, 563.
- 5.21 Omori, M. (2008) Coral reefs at risk: the role of Japanese science and technology for restoration. pp. 401-406 in Leewis R.J. and Janse, M. (eds.) *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums*. Public Aquarium Husbandry Series Vol. 2. Burgers' Zoo, Arnhem, the Netherlands.
- 5.22 Omori, M., Aota, T., Watanuki, A. and Taniguchi, H. (2004) Development of coral reef restoration method by mass culture, transportation and settlement of coral larvae. pp. 31-38 in Yukihiro, H. (ed.) *Proceedings of Palau Coral Reef Conference*. Palau International Coral Reef Center Publication (04-001).
- 5.23 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のために役立つ参考論文集。熱帯海洋生態研究振興財団（阿嘉島臨海研究所）63 pp.
- 5.24 Omori, M., Iwao, K., Tamura, M. (2007) Growth of transplanted *Acropora tenuis* 2 years after egg culture. *Coral Reefs* 27, 165.
- 5.25 Omori, M., Shibata, S., Yokokawa, M., Aota, T., Watanuki, A. and Iwao, K. (2007) Survivorship and vertical distribution of coral embryos and planula larvae in floating rearing ponds. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies* 8, 77-81.
- 5.26 Petersen, D. and Tollrian, R. (2001) Methods to enhance sexual recruitment for restoration of damaged reefs. *Bulletin of Marine Science* 69, 989-1000.
- 5.27 Petersen, D., Laterveer, M., van Bergen, D., Hatta, M., Hebbinghaus, R., Janse, M., Jones, R., Richter, U., Ziegler, T., Visser, G. and Schuhmacher, H. (2006) The application of sexual coral recruits for the sustainable management of *ex situ* populations in public aquariums to promote coral reef conservation – SECORE project. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 16, 167-179.
- 5.28 Raimondi, P.T. and Morse, A.N.C. (2000) The consequences of complex larval behavior in a coral. *Ecology* 81, 3193-3211.
- 5.29 Sato M. (1985) Mortality and growth of juvenile coral *Pocillopora damicornis* (Linnaeus). *Coral Reefs* 4, 27-33.
- 5.30 西海区水産研究所石垣支所 (1999) 過酸化水素によるサンゴの産卵誘発. 西海区水

- 産研究所主要研究成果集 1, 8-9. Seikai Regional Fisheries Research Laboratory (1999) Induction of spawning of stone-building corals hydrogen peroxide. Results of Major Research Activities of the Laboratory 1, 8-9. (in Japanese)
- 5.31 下村優子・服田昌之・綿貫 啓・青田 徹・岩尾研二 (2002) ミドリイシ幼生の大量飼育：サンゴ種苗生産に向けて. 日本サンゴ礁学会第 5 回大会講演要旨集, 36. Shimomura, Y., Hatta, M., Watanuki, A., Aota, T. and Iwao, K. (2002) Mass rearing of acroporid larvae: Towards production of coral larvae for plantation. Abstract of the 5th annual meeting of the Japanese Coral Reef Society, 36. (in Japanese)
- 5.32 水産庁漁港漁場整備部 (2009) 有性生殖によるサンゴ増殖の手引き—生育環境が厳しい沖ノ鳥島におけるサンゴ増殖. 水産庁, 東京. 71+82+19pp. Fisheries Agency, Japan (2009) The Guide of the Coral Increase by the Zoogamy. 71+82+19pp. (in Japanese). [http://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko\\_gyozyo/sub7.html](http://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/sub7.html)
- 5.33 Toh, TC, Guest, J. and Chou, LM. (2012) Coral larval rearing in Singapore: Observations on spawning timing, larval development and settlement of two common scleractinian coral species. Contributions to Marine Science 2012, National University of Singapore, 81-87
- 5.34 Villanueva, R.D., Baria, M.V.B. and de la Cruz, D.W. (2012) Growth and survivorship of juvenile corals outplanted to degrade reef areas in Bolinao-Anda Reef Complex, Philippines. Marine Biology Research 8, 877-884.
- 5.35 Webster, N.S., Smith, L.D., Heyward, A.J., Watts, J.E.M., Webb, R.I., Blackall, L.L. and Negri, A.P. (2004) Metamorphosis of a scleractinian coral in response to microbial biofilms. Applied and Environmental Microbiology 70, 1213-1221.
- 5.36 山木克則 (2010) 網目状人工基盤を用いたサンゴ群集再生技術. 鹿島技術研究所年報 58, 117-120. Yamaki, K. (2010) Coral reef restoration technique using mesh-type artificial substrate. Annual Report of Kashima Engineering Research Laboratory 58, 117-120. (in Japanese)
- (6) 幼生の着生と変態 (Larval settlement and metamorphosis)
- 6.1 Babcock, R. and Mundy, C. (1996) Coral recruitment: Consequences of settlement choice for early growth and survivorship in two scleractinians. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 206, 179-201.
- 6.2 Baird, A.H. and Morse, A.N.C. (2004) Induction of metamorphosis in larvae of the brooding corals *Acropora palifera* and *Stylophora pistillata*. Marine and Freshwater Research 55, 469-472,
- 6.3 藤村俊一郎・木村 匡・大森 信 (2012) 阿嘉島で生まれたサンゴの卵と幼生の行方.

- みどりいし (23), 14-19. Fujimura, S., Kimura, T. and Omori, M. (2012) Where planula larvae of *Acropora* corals of Akajima have gone? Midoriishi (23) 14-19. (in Japanese).
- 6.4 Golbuu, Y. and Richmond, R.H. (2007) Substratum preferences in planula larvae of two species of scleractinian corals, *Goniastrea retiformis* and *Stylaraea punctata*. *Marine Biology* 152, 639-644.
- 6.5 Graham, E.M., Baird, A.H. and Connolly, N.A. (2008) Survival dynamics of scleractinian coral larvae and implications for dispersal. *Coral Reefs* 27, 529-539.
- 6.6 Harrington, L., Fabricius, K., De'ath, G. and Negri, N. (2004) Recognition and selection of settlement substrata determine post-settlement survival in corals. *Ecology* 85, 3428-3437.
- 6.7 Heyward, A.J. and Negri, A.P. (1999) Natural inducers for coral larval metamorphosis. *Coral Reefs* 18, 273-279.
- 6.8 岩尾研二 (1997) サンゴ幼生の変態促進物質. みどりいし (8) , 20-22. Iwao, K. (1997) Study to find chemical inducer for metamorphosis of scleractinian corals. *Midoriishi* (8), 20-22. (in Japanese).
- 6.9 Iwao, K., Fujisawa, T. and Hatta, T. (2002) A cnidarian neuropeptide of the GLWamide family induces metamorphosis of reef-building corals in the genus *Acropora*. *Coral Reefs* 21, 127-129.
- 6.10 Kuffner, I.B., Walters, L.J., Becerro, M.A., Paul, V.J., Ritson-Williams, R. and Beach, K.S. (2006) Inhibition of coral recruitment by macroalgae and cyanobacteria. *Marine Ecology Progress Series* 323, 107-117.
- 6.11 Mason, B., Beard, M. and Miller, M.W. (2011) Coral larvae settle at a higher frequency on red surfaces. *Coral Reefs* 30, 667-676.
- 6.12 Miller, K. and Mundy, C. (2003) Rapid settlement in broadcast spawning corals: implications for larval dispersal. *Coral Reefs* 22, 99-106.
- 6.13 Morse, A.N.C., Iwao, K., Baba, M., Shimoike, K., Hayashibara, T. and Omori, M. (1996) An ancient chemosensory mechanism brings new life to coral reefs. *Biological Bulletin* 191, 149-154.
- 6.14 Morse, A.N.C. and Morse, D.E. (1996) Flypapers for corals and other planktonic larvae. *Bioscience* 46, 254-262.
- 6.15 Morse, D.E., Hooker, N., Morse, A.N.C. and Jensen R.A. (1988) Control of larval metamorphosis and recruitment in sympatric agariciid corals. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 116, 193-217.

- 6.16 Morse, D.E., Morse, A.N.C., Raimondi, P.T. and Hooker, N. (1994) Morphogen-based chemical flypaper for *Agaricia humilis* coral larvae. *Biological Bulletin* 186,172-181.
- 6.17 Mundy, C.N. and Babcock, R.C. (1998) Role of light intensity and spectral quality in coral settlement: Implications for depth-dependent settlement? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 223, 235-255.
- 6.18 Negri, A.P., Webster, N.S., Hill, R.T. and Heyward, A.J. (2001) Metamorphosis of broadcast spawning corals in response to bacteria isolated from crustose algae. *Marine Ecology Progress Series* 223,121-131.
- 6.19 Osinga, R., Schutter, M., Griffioen, B., Wijffels, R. H., Verreth, J.A.J., Shafir, S., Henard, S., Taruffi, M., Gill, C. and Lavorano, S. (2011) The biology and economics of coral growth. *Marine Biotechnology* 13: 658-671.
- 6.20 Puill-Stephan, E., van Oppen, M., Pichavant-Rafini, K. and Willis, B. (2012) High potential for formation and persistence of chimeras following aggregated larval settlement in the broadcast spawning coral, *Acropora millepora*. *Proceedings of the Royal Society B* 279, 699-708.
- 6.21 Raimondi, P.T. and Morse, A.N.C. (2000) The consequences of complex larval behavior in a coral. *Ecology* 81, 3193-3211.
- 6.22 Raymundo, L.J. and Maypa, A.P. (2004) Getting bigger faster: Mediation of size-specific mortality via fusion in juvenile coral transplants. *Ecological Applications* 14, 281-295.
- 6.23 Suzuki, G., Arakaki, S., Suzuki, K., Iehisa, Y. and Hayashibara, T. (2012) What is the optimal density of larval seeding in *Acropora* corals? *Fisheries Science* 78, 801-808.
- 6.24 Tebben, J., Motti, C.A., Siboni, N., Tapiolas, D.M., Negri, A.P., Schupp, P.J., Kitamura, M., Hatta, M., Steinberg, P.D. and Harder, T. (2015) Chemical mediation of coral larval settlement by crustose coralline algae. *Scientific Reports* 5:10803. Doi: 10.1038/srep10803
- 6.25 Tebben, J., Tapiolas, D.M., Motti, C.A., Abrego, D., Negri, A.P., Blackall, L.L., Steinberg, P.D. and Harder, T. (2011) Induction of larval metamorphosis of the coral *Acropora millepora* by tetrabromopyrrole isolated from a *Pseudoalteromonas* bacterium. *PLoS ONE* 6(4): e19082.
- 6.26 Vermeij, M.J.A. and Sandin, S.A. (2008) Density-dependent and mortality structure the earliest life phases of a coral population. *Ecology* 89, 1994-2004.
- 6.27 Webster, N.S., Smith, L.D., Heyward, A.J., Watts, J.E.M., Webb, R.I., Blackall,

- L.L. and Negri, A.P. (2004) Metamorphosis of a scleractinian coral in response to microbial biofilms. *Applied and Environmental Microbiology* 70, 1213-1221.
- 6.28 Wilson, J.R. and Harrison, P.L. (1998) Settlement-competency periods of larvae of three species of scleractinian corals. *Marine Biology* 131, 339-345.
- (7) 幼生の直接散布・加入促進 (Direct reseeding of larvae)
- 7.1 青田 徹・柴田早苗・綿貫 啓 (2006) サンゴ幼生の大量飼育、運搬、基盤着生によるさんご礁回復技術の開発. *みどりいし* (17), 4-10. Aota, T., Shibata, S. and Watanuki, A. (2006) Development of coral reef restoration technology: Mass culture, transportation and settlement of coral larvae. *Midoriishi* (17), 4-10. (in Japanese)
- 7.2 青田 徹・綿貫 啓・大森 信・谷口洋基 (2003) プラヌラ幼生の大量運搬によるサンゴ礁回復技術の開発. *海洋開発論文集* 19, 379-384. Aota, T., Watanuki, A., Omori, M. and Taniguchi, H. (2003) Development of coral reef restoration method by transportation of large amount of coral larvae. *Proceedings of Civil Engineering in the Ocean* 19, 379-384. (in Japanese)
- 7.3 Boch, C.H. and Morse, A.N.C. (2012) Testing the effectiveness of direct propagation techniques for coral restoration of *Acropora* spp. *Ecological Engineerings* 40, 11-17.
- 7.4 Cooper, W.A., Lirman, D., VanGroningen, M.P. Parkinson, J.E., Herlan, J. and McManus, J.W. (2014) Assessing techniques to enhance early post-settlement survival of corals *in situ* for reef restoration. *Bulletin of Marine Science* 90, 651-664.
- 7.5 Edwards, A.J., Guest, J.R., Heyward, A.J., Villanueva, R.D., Baria, M.V., Bollozos, I.S.F. and Golbuu, Y. (2015) Direct seeding of mass-cultured coral larvae is not an effective option for reef rehabilitation. *Marine Ecology Progress Series* 525, 105-116.
- 7.6 林原 毅・加藤雅也・玉城泉也・伏屋玲子・清水弘文 (2007) 幼生放流によるサンゴ群集の修復技術. *みどりいし* (18), 7-11. Hayashibara, T., Kato, M., Tamaki, M., Fuseya, R. and Shimizu, H. (2007) Restoration of coral assemblages by coral larvae seeding. *Midoriishi* (18), 7-11. (in Japanese)
- 7.7 Omori, M., Aota, T., Watanuki, A. and Taniguchi, H. (2004) Development of coral reef restoration method by mass culture, transportation and settlement of coral larvae. pp. 31-38 in Yukihiro, H. (ed.) *Proceedings of Palau Coral Reef Conference*. Palau International Coral Reef Center Publication (04-001).
- 7.8 Suzuki, G., Arakaki, S., Suzuki, K., Iehisa, Y. and Hayashibara, T. (2012) What

is the optimal density of larval seeding in *Acropora* corals? Fisheries Science 78, 801-808.

(8) 幼生と種苗の輸送 (Transportation of coral larvae and juveniles)

- 8.1 青田 徹・綿貫 啓・大森 信・谷口洋基 (2003) プラヌラ幼生の大量運搬によるサンゴ礁回復技術の開発. 海洋開発論文集 19, 379-384. Aota, T., Watanuki, A., Omori, M. and Taniguchi, H. (2003) Development of coral reef restoration method by transportation of large amount of coral larvae. Proceedings of Civil Engineering in the Ocean 19, 379-384. (in Japanese)
- 8.2 Baria, M.V.B., Guest, J.R., Edwards, A.J., Alino, P.M., Heyward, A.J. and Gomez, E.D. (2010) Caging enhances post-settlement survival of juveniles of the scleractinian coral *Acropora tenuis*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 394,149-153.
- 8.3 Delbeek, J.C. (2008) Collecting and shipping live coral: techniques, tips and headaches. pp. 363-373 in Leewis, R.J. and Janse, M. (eds.) Public aquarium husbandry series, Volume 2: Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums. Burgers' Zoo, Arnhem, ,
- 8.4 Nakamura, R., Ando, W., Yamamoto, H., Kitano, M., Sato, A., Nakamura, M., Kayanne, H. and Omori, M. (2011) Corals mass-cultured from eggs and transplanted as juveniles to their native, remote coral reef. Marine Ecology Progress Series 436, 161-168.
- 8.5 Omori, M., Aota, T., Watanuki, A. and Taniguchi, H. (2004) Development of coral reef restoration method by mass culture, transportation and settlement of coral larvae. pp. 31-38 in Yukihiro, H. (ed.) Proceedings of Palau Coral Reef Conference. Palau International Coral Reef Center Publication (04-001).
- 8.6 Osinga, R. et al. (2012) The CORALZOO project: a synopsis of four years of public aquarium science. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 92(4), 753-768
- 8.7 Petersen, D., Hatta, M., Laterveer, M. and Van Bergen, D. (2005) *Ex situ* transportation of coral larvae for research, conservation and aquaculture. Coral Reefs 24, 510-513.
- 8.8 Petersen, D, Laterveer, M., Van Bergen, D., Hatta, M., Hebbinghaus, R., Janse, M., Jones, R., Richter, U., Ziegler, T., Visser, G. and Schuhmacher, H. (2006) The application of sexual coral recruits for sustainable management of *ex situ* population in public aquarium--SCORE project. Aquatic Conservation: Marine and freshwater Ecosystems 16, 167-179.

- 8.9 Villanueva, R.D., Baria, M.V.B. and dela Cruz, D.W. (2012) Growth and survivorship of juvenile corals outplanted to degraded reef areas in Bolinao-Anda Reef Complex, Philippines. *Marine Biology Research* 8, 877-884.
- 8.10 綿貫 啓・青田 徹・柴田早苗・谷口洋基・大森 信 (2004) プラヌラ幼生の大量運搬によるサンゴ礁回復技術の開発 (2). *海洋開発論文集* 20, 389-394. Watanuki, A., Aota, T., Shibata, S., Taniguchi, H. and Omori, M. (2004) Development of coral reef restoration method by transportation of large amount of coral larvae (2). *Proceedings of Civil Engineering in the Ocean* 20, 389-394. (in Japanese)

(9) 移設 (Coral translocation)

- 9.1 Fisk, D. and Khan, Z. (2010) Transplantation of coral colonies to create new patch reefs on Funafuti Atoll, Tuvalu. pp.140-142 in Edwards, A.J. (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia.*
- 9.2 藤原秀一・大森 信 (2003) 全群体の移植及びサンゴ群集 (礁全体) の移築. pp.40-45, 大森 信(編著) *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.* Fujiwara, S. and Omori, M. (2003) Transplantation of whole coral colonies and of coral reefs. pp.40-45 in Omori, M. (ed.) *Manual for Restoration and Remediation of Coral Reefs. Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment, Japan.* (in Japanese)
- 9.3 Fujiwara, S. and Omori, M. (2004) Transplantation of whole coral colonies and of coral reefs. pp.44-49 in Omori, M. and Fujiwara, S. (eds.) *Manual for Restoration and Remediation of Coral Reefs. Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment, Japan.*
- 9.4 Hudson, J.H. and Diaz, R. (1988) Damage survey and restoration of M/V Wellwood grounding site, Molasses Reef, Key Largo National Marine Sanctuary, Florida. *Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium, Townsville, Australia, 2, 231-236.*
- 9.5 石井正樹・前幸地紀和・大村 誠・山本秀一・高橋由浩・田村圭一 (2000) 平良港におけるサンゴ群集に配慮した環境修復技術. *海岸工学論文集* 48, 1301-1305. Ishii, M., Maekouchi, N., Omura, M., Yamamoto, H., Takahashi, Y. and Tamura, K. (2001) Environmental restoration technologies about port improvement at Hirara port. *Proceedings of Coastal Engineering in the Ocean* 48, 1301-1305. (in Japanese)
- 9.6 Job, S. (2010) Transplantation of corals to a traditional no-fishing area affected by coral bleaching in Fiji. pp.158-160 in Edwards, A.J. (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia.*

- 9.7 Jokiell, P.L., Rodgers, K.S. and Farrell, F. (2005) Coral Relocation Project in Kaneohe Bay, Oahu, Hawaii. Report on Phase I. Coral Reef Assessment and Monitoring Program (CRAMP), University of Hawaii, Hawaii Institute of Marine Biology, Kaneohe, Hawaii, 9pp.
- 9.8 Kenny, I., Kramer, A., Kelly, P.W. and Burbury, T. (2012) Coral relocation: A mitigation tool for dredging works in Jamaica. Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia, 20A-4.
- 9.9 Kilbane, D., Graham, B., Mlcahy, R., Onder, A. and Pratt, M. (2008) Coral relocation for impact mitigation in northern Qatar. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Fort Lauderdale, Florida, 2, 1253-1257.
- 9.10 Kotb, M.M.A. (2016) Coral translocation and farming as mitigation and conservation measures for coastal development in the Red Sea: Aqaba case study, Jordan. Environmental Earth Sciences 75:439. Doi:10.1007/s12665-016-5304-3
- 9.11 Petersen, D., Laterveer, M., van Bergen, D. and Kuenen, M. (2004) Transportation techniques for massive scleractinian corals. Zoo Biology 23, 165-176.
- 9.12 Plucer-Rosario, G.P. and Randall, R.H. (1987) Preservation of rare coral species by transplantation: an examination of their recruitment and growth. Bulletin of Marine Science 41, 585-593.
- 9.13 Salvat, B., Chancerelle, Y., Schrimm, M., Morancy, R., Porcher, M. and Aubanel, A. (2002) Restauration d'une zone corallienne dégradée et implantation d'un jardin coralline á Bora Bora, Polynésie française. Revue d'Écologie, La Terre et La vie , suppl. 9, 81-96.
- 9.14 Seguin, F., Le Brun, O., Hirst, R., Al-Thary, I. and Dulrieux, E. (2009) Large coral transplantation in Bal Haf (Yemen): an opportunity to save corals during construction of a Liquefied Natural Gas plant using innovative techniques. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Fort Lauderdale, Florida, 2, 1272-1275.

(10) 環境要因と摂食がサンゴの生残や成長に与える影響 (Effects of various environmental factors including heterotrophy to growth and survivorship)

- 10.1 Anthony, K.R. (2000) Enhanced particle-feeding capacity of corals on turbid reefs (Great Barrier Reef, Australia) Coral Reefs 19, 59-67.
- 10.2 Arvedlund, M., Craggs, J. and Pecoerlli, J. (2003) Coral culture-possible future trends and directions. pp. 233-253 in Cato, J.C. and Brown, C.L. (eds.) Marine

Ornamental Species: Collection, culture and conservation. Iowa State Press, Ames, Iowa, USA.

- 10.3 Dennison, W.C. and Barnes, D.J. (1988) Effect of water motion on coral photosynthesis and calcification. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 115, 67-77.
- 10.4 Edmunds, P.J. (2011) Zooplanktivory ameliorates the effects of ocean acidification on the reef coral *Porites* spp. *Limnology and Oceanography* 56, 2402-2410.
- 10.5 Fabricius, K.E. (2005) Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin* 50, 125-146.
- 10.6 Ferrier-Pagès, C., Witting, J., Tambutte, E. and Sebens, K.P. (2003) Effect of natural zooplankton feeding on the tissue and skeletal growth of the scleractinian coral *Stylophora pistillata*. *Coral Reefs* 22, 229-240.
- 10.7 Forsman, Z.H., Kimoteo, B.K., Bird, C.E., Hunter, C.L. and Toonen, R.J. (2012) Coral farming: effects of light, water motion and artificial foods. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 92, 721-729.
- 10.8 Gilmour, J. (1999) Experimental investigation into the effects of suspended sediment on fertilization, larval survival and settlement in scleractinian coral. *Marine Biology* 135, 451-462.
- 10.9 Gleason, D.F. and Hofmann, D.K. (2011) Corallarvae: from gametes to recruits. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 408, 42-57.
- 10.10 Goldman L. (2007) Evaluation of live food versus artificial food on the growth of juvenile *Pocillopora damicornis* cultured from planulae. *Advanced Aquarist Online Magazine* VI. <http://www.advancedaquarist.com/2007/6/aafeature16>.
- 10.11 Grottoli, A.G., Rodrigues, I.J. and Palarday, J.E. (2006) Heterotrophic plasticity and resilience in bleached corals. *Nature* 440, 1186-1189.
- 10.12 Heidelberg, K.B., Sebens, K.B. and Purcell, J.E. (1996) Effects of prey escape behavior and water flow on prey capture by the scleractinian coral, *Meandrina meandrites*. *Proceedings of 8th International Coral Reef Symposium, Panama*, 2, 1081-1086.
- 10.13 Hii, Y.S., Soo, C.L. And Liew, H.C. (2009) Feeding of scleractinian coral, *Galaxea aspicularis* on *Artemia salina* nauplii in captivity. *Aquaculture International* 17, 363-376.
- 10.14 Houlbreque, F. and Ferrier-Pages, C. (2009) Heterotrophy in tropical scleractinian corals. *Biological Reviews* 84, 1-17.

- 10.15 Houlbreque, F., Tambutte, E., Allemand, D. and Ferrier-Pages, C. (2004) Interactions between zooplankton feeding, photosynthesis and skeletal growth in the scleractinian coral *Stylophora pistillata*. *Journal of Experimental Biology* 207, 1461-1469.
- 10.16 Houlbreque, F., Tambutte, E. and Ferrier-Pages, C. (2003) Effect of zooplankton availability on the rates of photosynthesis, and tissue and skeletal growth in the scleractinian coral *Stylophora pistillata*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 296, 145-166.
- 10.17 Kuanui, P., Chavanich, S., Viyakarn, V., Park, H.S. and Omori, M. (2016) Feeding behaviors of three tropical scleractinian corals in captivity. *Tropical Zoology* 29, 1-9.
- 10.18 Lewis, J.B. (1992) Heterotrophy in corals: zooplankton predation by the hydrocoral *Millepora complanata*. *Marine Ecology Progress Series* 90, 251-256.
- 10.19 Lirman, D. (2001) Competition between macroalgae and corals: effects of herbivore exclusion and increased algal biomass on coral survivorship and growth. *Coral Reefs* 19, 392-399.
- 10.20 Mass, T., Genin, A., Shavit, U., Grinstein, M. and Tchernov, D. (2010) Flow enhances photosynthesis in marine benthic autotrophs by increasing the efflux of oxygen from the organism to the water. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107, 2527-2531.
- 10.21 Nakamura, T. and van Woesik, R. (2001) Water-flow rates and passive diffusion partially explain differential survival of corals during the 1998 bleaching event. *Marine Ecology Progress Series* 212, 391-394.
- 10.22 Nakamura, T., Yamasaki, H. and van Woesik, R. (2003) Water flow facilitates recovery from bleaching in the coral *Stylophora pistillata*. *Marine Ecology Progress Series* 256, 287-291.
- 10.23 Osinga, R., Janssen, M. and Janse, M. (2008) The role of light in coral physiology and its implications for coral husbandry. pp. 173-181 in Leewis, R. J. and Janse, M. (eds.) *Public aquarium husbandry series, Volume 2: Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums*. Burgers' Zoo, Arnhem, The Netherlands.
- 10.24 Osinga, R., Schutter, M., Griffioen, B., Wijffels, R.H., Verretj.J.A.J., Shafir, S., Taruffi, M., Lavorano, S. and Gili.C. (2011) The biology and economics of coral growth. *Marine Biotechnology* 13, 658-671.
- 10.25 Osinga, R. et al. (2012) The CORALZOO project: a synopsis of four years of public aquarium science. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 92, 753-768.

- 10.26 Petersen, D., Wietheger, A. and Laterveer, M. (2008) Influence of different food sources on the initial development of sexual recruits of reef building corals in aquaculture. *Aquaculture* 277, 174-178.
- 10.27 Porter, J.W. (1974) Zooplankton feeding by the Caribbean reef-building coral *Montastrea cavernosa*. Proceedings of 2nd International Coral Reef Symposium, Brisbane, Australia. 111-126.
- 10.28 Quan-Young, L.I. and Espinoza-Avalos, J. (2006) Reduction of zooxanthellae density, chlorophyll a concentration, and tissue thickness of the coral *Montastrea faveolata* (Scleractinia) when competing with mixed turf algae. *Limnology and Oceanography* 51, 1159-1166.
- 10.29 Rodolfo-Metalpa, R., Peirano, A., Houlbreque, F., Abbate, M. and Ferrier-Pagès, C. (2008) Effects of temperature, light and heterotrophy on the growth rate and budding of the temperate coral *Cladocora caespitosa*. *Coral Reefs* 27, 17-25.
- 10.30 Schutter, M., Van Velthoven, B., Janse, M., Osinga, R., Verreth, J.A.J. and Wijffels, R.H. (2008) The effect of irradiance on long-term skeletal growth and net photosynthesis in *Galaxea fascicularis* under four light conditions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 367, 75-80.
- 10.31 Schutter, M., Crocker, J., Paijmans, M., Janse, M., Osinga, R., Verreth, J.A.J. and Wijffels, R.H. (2010) The effect of different flow regimes on the growth and metabolic rates of the scleractinian coral *Galaxea fascicularis*. *Coral Reefs* 29, 737-748.
- 10.32 Schutter, M., Kranenbarg, S., Wijffels, R.H., Verreth, J.A.J., and Osinga, R. (2011) Modification of light utilization for skeletal growth by water flow in the scleractinian coral *Galaxea fascicularis*. *Marine Biology* 158, 769-777.
- 10.33 Sebens, K.P., Grace, S.P., Helmuth, B., Maney, E.J. Jr and Miles, J.S. (1998) Water flow and prey capture by three scleractinian corals. *Madracis mirabilis*, *Montastrea cavernosa* and *Porites porites*, in a field enclosure. *Marine Biology* 131, 347-360..
- 10.34 Sebens, K.P., Vandersall, K.S., Savina, I.A. and Graham, K.R. (1996) Zooplankton capture by two scleractinian corals, *Madracis mirabilis* and *Montastrea cavernosa*, in a field enclosure. *Marine Biology* 127, 303-317.
- 10.35 Toh, TC., Ng, CSL., Peh, JWK., Toh, KB. and Chou, LM. (2014) Augmenting the post-transplantation growth and survivorship of juvenile scleractinian corals via nutritional enhancement. *PloS One* 9(6) e98529.
- 10.36 Wijgerde, T., Henkemans, P. and Osinga, R. (2012a) Effects of irradiance and light spectrum on growth of the scleractinian coral *Galaxea fuscicularis* –

- applicability of LEP and LED lighting to coral aquaculture. *Aquaculture* 344, 188-193.
- 10.37 Wijgerde, T., Jurriaans, S., Hoofd, M., Verreth, J.A., and Osinga, R. (2012b) Oxygen and heterotrophy affect calcification of the scleractinian coral *Galaxea fascicularis*. *PloS One* 7, e52702.
- 10.38 Wijgerde, T., Spijkers, P., Karruppanan, E., Verreth, J.A. and Osinga, R. (2012c) Water flow affects zooplankton feeding by the scleractinian coral *Galaxea fascicularis* on a poly and colony level. *Journal of Marine Biology* 2012: Article ID 854849, 7 pp.
- 10.39 Wijgerde, T., van Melis, A., Silva, C.I.F., Leal, M.C., Vogels, L., Muter, C. and Osinga, R. (2014) Red light represses the photophysiology of the scleractinian coral *Stylophora pistillata*. *PLoS One* 9, e92781.
- (11) 造園デザイン (Gardening design of coral community)
- 11.1 Cabaitan, P.C., Yap, H.T. and Gomez, E.D. (2015) Performance of single versus mixed coral species for transplantation to restore degraded reefs. *Restoration Ecology*. Doi: 10.1111/rec.12205.
- 11.2 Charnesky, E.A. (1991) The ties that bond: Inter-clonal cooperation may help a fragile coral dominate shallow high energy reefs. *Marine Biology* 109, 41-51.
- 11.3 Mascarelli, A. (2014) Climate-change adaptation: Designer reefs. *Nature* 508, 444-446.
- 11.4 Muko, S. and Iwasa, Y. (2011a) Optimal choice of species and size class for transplanting coral community, *Journal of Theoretical Biology* 273, 130-137.
- 11.5 Muko, S. and Iwasa, Y. (2011b) Long-term effect of coral transplantation: Restoration goals and the choice of species. *Journal of Theoretical Biology* 280, 127-138.
- 11.6 Sleeman, H.C., Boggs, G.S., Radfont, B.C. and Kendrick, G.A. (2005) Using agent-based models to aid reef restoration: Enhancing coral cover and topographic complexity through the spatial arrangement of coral transplants. *Restoration Ecology* 13, 685-694.

- (12) 基盤・人工礁と固形剤・接着剤、及び固定方法に関するもの (Substrata, artificial reefs, and products and method for hardening of substrata and attachment of corals)
- 12.1 Akakura, Y., Hanashiro, S., Urabe, S., Maehara, H., Ono, M., Mizoguchi, T. and Yamamoto, H. (2006) Various contrivances for restoration of coral assemblages in harbor development projects; A report. Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa, 1651-1656.
- 12.2 Al-Horani, F.A. and Khalaf, M.A. (2013) Developing artificial reefs for the mitigation of man-made coral reef damages in the Gulf of Aqaba, Red Sea: coral recruitment after 3.5 years of deployment. *Marine Biology Research* 9, 749-757.
- 12.3 Álvarez-Filip, L. and Gil, I. (2006) Effects of Hurricanes Emily and Wilma on coral reefs in Cozumel, Mexico. *Coral Reefs* 25, 583.
- 12.4 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. Ando, W., Ishioka, N., Iwamura, S., Miyake, T. and Miyaji, K. (2008) Field experiment to grasp relation between coral growth and environment in top-shell snail aquaculture structure. *Proceedings of Civil Engineering of Ocean* 24, 813-818. (in Japanese)
- 12.5 安藤 亘・渡邊浩二・田村真弓・三宅崇智・北野倫生・山本秀一 (2009) サンゴ増殖基盤に必要な機能と構造に関する考察. *海洋開発論文集* 25, 461-466. Ando, W., Watanabe, K., Tamura, M., Miyake, T., Kitano, M. and Yamamoto, H. (2009) Discussion about “function and structure” for the artificial base of coral distribution. *Proceedings of Civil Engineering of Ocean* 25, 461-466. (in Japanese)
- 12.6 Anonymous (2014) Product data sheet. Sikacrete. [http://usa.sika.com/en/home-page-features/product-finder/iframe\\_and\\_dropdown/sikacrete.html](http://usa.sika.com/en/home-page-features/product-finder/iframe_and_dropdown/sikacrete.html)
- 12.7 Bachtiar, I. (2002) Promoting recruitment of scleractinian corals using artificial substrate in the Gili Indah Lombok Barat, Indonesia. *Proceedings of 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia*. 1, 425-430.
- 12.8 Carleton, J.H. and Sammarco, P.W. (1987) Effects of substratum irregularity on success of coral settlement: Quantification by comparative geomorphological techniques. *Bulletin of Marine Sciences* 40, 85-98.
- 12.9 Chansang, H. and Thongtham, N. (2010) Use of artificial substrates to enhance coral and fish recruitment in Phuket, Thailand. pp.146-148 in Edwards, A.J. (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity*

Building for Management Program, St. Lucia, Australia.

- 12.10 Clark, S. and Edwards, A.J. (1994) Use of artificial reef structures to rehabilitate reef flat degraded by coral mining in the Maldives. *Bulletin of Marine Science* 55, 724-744.
- 12.11 Clark, S. and Edwards, A. J. (1999) An evaluation of artificial reef structures as tools for marine habitat rehabilitation in the Maldives *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 9, 5-21.
- 12.12 Dizon, R.M., Edwards, A.J. and Gomez, E.D. (2008) Comparison of three types of adhesives in attaching coral transplants to clam shell substrates. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 18, 1140-1148.
- 12.13 Edwards, A.J. and Clark, S. (1992) Rehabilitation of coral reef flats using pre-cast concrete. *Concrete* 26, 16-19.
- 12.14 Encalada, M.M. (2010) Transplantation of coral fragments onto artificial reefs at a hurricane-damaged site in Cozumel, Mexico. pp.161-163 in Edwards, A.J. (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia*
- 12.15 Ferse, S.C.A. (2008) Artificial reef structures and coral transplantation: fish community responses and effects on coral recruitment in North Sulawesi/Indonesia. Ph.D. thesis, University of Bremen, Bremen, Germany.
- 12.16 Ferse, S.C.A. (2010) Poor performance of corals transplanted onto substrates of short durability. *Restoration Ecology* 18, 399-407.
- 12.17 Ferse, S.C.A., Nugues, M.M., Romatzki, S.B. and Kunzmann, A. (2013) Examining the use of mass transplantation of brooding and spawning corals to support natural coral recruitment in Sulawesi/Indonesia. *Restoration Ecology* 21, 745-754.
- 12.18 藤森新作・小堀 茂 (2000) 自然環境にやさしい土壌硬化剤マグホワイト開発. 農業土木学会誌 68, 1297-1300. Fujimori, S. and Kobori, S. (2000) Characteristics and available range of soil hardening chemical of Mug White. *Journal of the Agricultural Engineering Society, Japan* 68, 1297-1300. (in Japanese)
- 12.19 Fujiwara, S. (2010) Coral transplantation, using ceramic coral settlement devices, on reefs damaged by bleaching and *Acanthaster planci*. pp. 155-157 in Edwards, A.J. (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia*.
- 12.20 Fujiwara, S., Kezuka, D., Ishimori, H., Saito, T. and Okamoto, M. (2016) A new approach to coral reef restoration: The coral settlement device. *Reef Encounter*.

- 31, 32-38.
- 12.21 Geothermal Research Reef Aquarium Laboratory (2016) Eddie Postma's famous Aragocrete™ classes. [www.garf.org/class.html](http://www.garf.org/class.html)
- 12.22 Gomez, E., Dizon, R. and Edwards, A. (2010) Methods of coral transplantation. pp. 99-112 in Edwards, A.J. (ed.) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia.
- 12.23 Guest, J.R., Dizon, R.M., Edwards, A.J., Franco, C. and Gomez, E.D. (2009) How quickly do fragments of coral 'self-attach' after transplantation? *Restoration Ecology* 17, 1-9.
- 12.24 Guest, J., Baria, M.V., Gomez, E.D., Heyward, A.J. and Edwards, A.J. (2014) Closing the circle: is it feasible to rehabilitate reefs with sexually propagated corals? *Coral Reefs* 33, 45-55.
- 12.25 Guignard, C. and Le Berre, T. (2010) Transplantation of coral fragments and colonies at tourist resorts using coated metal frames as a substrate. pp.143-145 in Edwards, A.J. (ed.) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia.
- 12.26 Harrington, L., Fabricius, K., De'ath, G. and Negri, A. (2004) Recognition and selection of settlement substrata determine post-settlement survival in corals. *Ecology* 85, 3428-3437.
- 12.27 Harriott, V.J. and Fisk, D.A. (1987) A comparison of settlement plate types for experiments on the recruitment of scleractinian corals. *Marine Ecology Progress Series* 37, 201-208.
- 12.28 林原 毅 (2009)サンゴ群集の修復技術:石西礁湖と阿嘉島、それぞれに適した再生戦略は? *みどりいし* (20), 9-13. Hayashibara, T. (2009) Restoration technology of coral communities: What is the appropriate strategy for Sekisei Lagoon and Kerama Islands, respectively? *Midoriishi* (20), 9-13. (in Japanese)
- 12.29 Jaap, W.C. (2000). Coral reef restoration. *Ecological Engineering* 15, 345-364.
- 12.30 Job, S. (2010) Transplantation of corals to a traditional no-fishing area affected by coral bleaching in Fiji. pp.158-160 in Edwards, A.J. (ed.) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia..
- 12.31 Kaufman, L.S. (2006) If you build it, will they come? Toward a concrete basis for coral reef gardening, pp.119-142 in Precht, W.F. (ed.) *Coral Reef Restoration Handbook*, CRC Press, Boca Raton, Florida.

- 12.32 Lam, K.K.Y. (2000a) Early growth of a pioneer recruited coral *Oulastrea crispata* (Scleractinia, Faviidae) on PFA-concrete blocks in a marine park in Hong Kong, China. *Marine Ecology Progress Series* 205, 113-121.
- 12.33 Lam, K.Y. (2000b) Coral transplantation onto a stabilized pulverized fuel ash substratum. *Asian Marine Biology* 17, 25-41.
- 12.34 Linden, B. and Rinkevich, B. (2011) Creating stocks of young colonies from brooding coral larvae, amenable to active reef restoration. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 398, 40-46.
- 12.35 Maekouchi, N., Ano, T., Oogi, M., Tsuda, S., Kurita, K., Ikeda, Y. and Yamamoto, H. (2010) The 'Eco-Block' as a coral-friendly construction. *Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Fort Lauderdale, Florida, 2*, 1258-1262.
- 12.36 Maida, M., Sammarco, P.W. and Coll, J.C. (1995) Effects of soft corals on scleractinian coral recruitment. I: Directional allelopathy and inhibition of settlement. *Marine Ecology Progress Series* 121, 191-202.
- 12.37 三宅光一・甲斐広文・宮里高広・国吉啓太・山本秀一・田村圭一・岩村俊平 (2006) 人工構造物の表面加工によるサンゴ群集着生促進効果の評価. *海岸工学論文集* 53, 1106-1110. Miyake, K., Kai, H., Miyazato, T., Kuniyoshi, K., Yamamoto, H., Tamura, K. and Iwamura, S. (2006) Evaluation of unevenly-surfaced block to facilitate coral settlement and growth. *Proceedings of Coastal Engineering* 1106-1110 (in Japanese)
- 12.38 宮城 清・山木克則・日野林譲二・中野裕治・中村良太 (2016) 慶良間海域における自然分解性サンゴ着生基盤を用いたサンゴ群集再生. 第 19 回日本サンゴ礁学会要旨集
- 12.39 Mohammed, T.A., Aa, H., Nf, H., Ma, E.E. and Khm, E.M.I (2012) Coral rehabilitation using steel slag as a substrate. *International Journal of Environmental Protection* 2, 1-5.
- 12.40 Mundy, C.N. (2000) An appraisal of methods used in coral recruitment studies. *Coral Reefs* 19, 124-131.
- 12.41 Ng, C.S.L., Lim, S.C., Ong, J.Y., Teo, L.M.S., Chou, L.M., Chua, K.E. and Tan, K.S. (2015) Enhancing the biodiversity of coastal defense structures: transplantation of nursery-reared reef biota onto intertidal seawalls. *Ecological Engineering* 82, 480-486.
- 12.42 Nozawa, Y. (2008) Micro-crevice structure enhances coral spat survivorship. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 367, 127-130.

- 12.43 Nozawa, Y. (2012) Effective size of refugia for coral spat survival. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 413, 145-149.
- 12.44 Nozawa, Y., Tanaka, K. and Reimer, J.D. (2011) Reconsideration of surface structure of settlement plates used in coral recruitment studies. *Zoological Studies* 50, 53-60.
- 12.45 O'Donnell, K.E., Lohr J.E., Bartels, E. and Patterson, J.T. (2017) Evaluation of staghorn coral (*Acropora cervicornis*, Lamarck 1816) production techniques in an ocean-based nursery with consideration of coral genotype. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 487, 53-58.
- 12.46 Okamoto, M. and Nojima, S. (2004) Development of underwater techniques for coral reef restoration. pp. 50-61 in Omori, M. and Fujiwara, S. (eds.). *Manual for Restoration and Remediation of Coral Reefs*. Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment, Japan.
- 12.47 Okamoto, M., Nojima, S., Fujiwara, S. and Furushima, Y. (2008) Development of ceramic settlement devices for coral reef restoration using *in situ* sexual reproduction of corals. *Fisheries Science* 74, 1245-1253.
- 12.48 Okamoto, M., Nojima, S., Furushima, Y. and Phoel, W.C. (2005) A basic experimental of coral culture using sexual reproduction in the open sea. *Fisheries Science* 71, 263-270.
- 12.49 Okamoto, M., Roeroe, K.A., Yap, M., Lalamentic, L.T.X., Fujiwara, S. and Oyamada K. (2012) Experimental transplantation of coral using sexual reproduction in Manado, Indonesia. *Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium*, Cairns, Australia, 20A-5.
- 12.50 大久保奈弥 (2003) サンゴの移植に適する基盤. *みどりいし* (14), 32-34. Okubo, N. (2003) Appropriate artificial substrates for coral transplantation. *Midoriishi* (14), 32-34. (in Japanese)
- 12.51 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., (2016) The ceramic coral settlement devise (Okamoto et al. 2008) is not the best "Coral babe magnet" : Consideration on superior substratum for settlement of coral larvae. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies* 18, 1-9. (in Japanese)
- 12.52 Omori, M. and Iwao, K. (2009) A novel substrate (The "Coral Peg") for deploying sexually propagated corals for reef restoration. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies* 11, 39.
- 12.53 Omori, M., Kajiwara, K., Matsumoto, H., Watanuki, A. and Kubo, H. (2007) Why

- corals recruit successfully in top-shell snail aquaculture structure. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies* 8, 83-90.
- 12.54 Ooka, S., Hanashiro, S., Gushi, R., Urabe, S., Hayashi, N., Takanashi, Y. and Yamamoto, H. (2006) Growth of coral assemblages on artificial structures and surrounding natural substrates. *Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa*, 91-98.
- 12.55 Oren, U. and Benayafu, Y. (1997) Transplantation of juvenile corals: a new approach for enhancing colonization of artificial reefs. *Marine Biology* 127, 499-505.
- 12.56 Ortiz-Prosper, A. L., Bowden-Kerby, A., Ruiz, H., Tirado, O., Caban, A., Sanchez, G. and Crespo, J.C. (2001) Planting small massive corals on small artificial concrete reefs or dead coral heads. *Bulletin of Marine Science* 69, 1047-1051.
- 12.57 Oyamada, K., Okamoto, M. and Iwata, I. (2014) Development of restoration technology for coral reefs using “marine block TM” JFE Technical Report, available at: <http://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/019/pdf/019-23.pdf>
- 12.58 Perkol-Finkel, S. and Benayahu, Y. (2009) The role of differential survival patterns in shaping coral communities on neighboring artificial and natural reefs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 369, 1-7.
- 12.59 Petersen, D., Laterveer, M. and Schuhmacher, H. (2005) Innovative substrate tiles to spatially control larval settlement in coral culture. *Marine Biology* 146, 937-942.
- 12.60 Phongsuwan, N. (1991) Recolonization of a coral reef damaged by a storm on Phuket Island, Thailand. *Phuket Marine Biological Center Research Bulletin* 56, 75-83.
- 12.61 Reef Ball Foundation (2008) A step-by-step guide for grassroots efforts to reef rehabilitation. Reef Ball Foundation Inc., Athens, Georgia, U.S.A. 133 pp.
- 12.62 Salinas-De-Leon, P., Costales-Carrera, A., Zeljkovic, S., Smith, D.J. and Bell, J.J. (2011) Scleractinian settlement patterns to natural cleared reef substrata and artificial settlement panels on an Indonesian coral reef. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 93, 80-85.
- 12.63 Schuhmacher, H. (1988) Development of coral communities on artificial reef types over 20 years (Eilat, Red Sea). *Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium, Townsville, Australia*, 2, 384-397.
- 12.64 Sherman, R.L., Gilliam, D.S. and Spieler, R.E. (2001) Site-dependent differences in artificial reef function: Implications for coral restoration. *Bulletin of Marine*

- Science 69, 1053-1056.
- 12.65 Sherman, R.L., Gilliam, D.S. and Spieler, R.E. (2002) Artificial reef design: void space, complexity, and attractants. ICES Journal of Marine Science 59, S196-S200.
- 12.66 Shongtham, N. and Chansang, H. (1999) Influence of surface complexity on coral recruitment at Maiton Island, Phuket, Thailand. Phuket Marine Biological Center Special Publication 20, 93-100.
- 12.67 Spieler, R.E., Gilliam, D.S. and Sherman, R.L. (2001) Artificial substrate and coral reef restoration: What do we need to know to know what we need. Bulletin of Marine Science 69, 1013-1030.
- 12.68 Sprung, J. and Delbeek, C. (2005) The Reef Aquarium, Vol. 3: Science, Art, and Technology. Ricordea Publishing Inc, Florida, U.S.A. 680pp.
- 12.69 Suzuki, G., Iehisa, Y., Harada, T., Shibuno, T., Hayashibara, T. and Abe, O. (2009) Japan Patent Kokai no. P2009-77649 (16 April, 2009), .Japan Patent Office.
- 12.70 Suzuki, G., Kai, S., Yamashita, H., Suzuki, K., Iehisa, Y. and Hayashibara, T. (2011) Narrower grid structure of artificial reef enhances initial survival of *in situ* settled corals. Marine Pollution Bulletin 62, 2803-2812.
- 12.71 谷口洋基 (2007) 水槽内でのサンゴ幼生の着生に対する基盤の検討. みどりいし (18), 12-14. Taniguchi, H. (2007) Examination of artificial plates for settlement of coral larvae. Midoriishi (18), 12-14. (in Japanese)
- 12.72 Thornton, L.L., Dodge, R.E., Gilliam, D.S. DeVactor, R. and Cooke, P. (2002) Success and growth of corals transplanted to cement armor mat tiles in southeast Florida: Implications for reef restoration. Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia, 2, 955-962.
- 12.73 Whalan, S., Abdul Wahab, MA., Sprungala, S., Poole, AJ. And de Nys R (2015) Larval settlement: The role of surface topography for sessile coral reef invertebrates. PloS One. Doi: 10.1371/journal.pone.0117675.
- 12.74 山木克則 (2010) 網目状人工基盤を用いたサンゴ群集再生技術. 鹿島技術研究所年報 58, 117-120. Yamaki, K. (2010) Coral reef restoration technique using mesh-type artificial substrate. Annual Report of Kashima Engineering Research Laboratory 58, 117-120. (in Japanese)
- 12.75 山下隆男・西平守孝・土屋義人・スワンディー (1996) サンゴの移植によるバリ島サヌール海岸の保全について. 海岸工学論文集 43, 1281-1285. Yamashita, T., Nishihira, M., Tsuchiya, Y. and Swanty (1996) Protection of Sanul coast in Bali

- Island by coral transplantation. *Proceedings of Coastal Engineering* 43, 1281-1285. (in Japanese)
- 12.76 Yap, H.T. (2004) Differential survival of coral transplants on various substrates under elevated water temperatures. *Marine Pollution Bulletin* 49, 306-312.
- (13) 海底整備 (Seafloor stabilization)
- 13.1 Edwards, A.J. and Clark, S. (1992) Rehabilitation of coral reef flats using pre-cast concrete. *Concrete* 26, 16-19.
- 13.2 Fox, H.E. (2001) Pilot study suggests viable options for reef restoration in Komodo National Park. *Coral Reefs* 20, 219-220.
- 13.3 Fox, H.E. (2003) Recovery in rubble fields; Long-term impacts of blast fishing. *Marine Pollution Bulletin* 46, 1024-1031.
- 13.4 Fox, H.E. (2004) Coral recruitment in blasted and unblasted sites in Indonesia: Assessing rehabilitation potential. *Marine Ecology Progress Series* 269, 131-139.
- 13.5 Fox, H. and Haisfield, K.. (2010) Substrate stabilization to promote recovery of reefs damaged by blast fishing. Pp. 137-139 in Edwards, A.J. (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program. St Lucia, Australia.*
- 13.6 Fox, H.E., Mous, P., Pet, J., Muljadi, A. and Caldwell, R. (2005) Experimental assessment of coral reef rehabilitation following blast fishing. *Conservation Biology* 19, 98-107.
- 13.7 Fox, H.E. and Pet, J.S. (2001) Pilot study suggests viable options for reef restoration in Komodo National Park. *Coral Reefs* 20, 219-220.
- 13.8 Fox, H.E., Pet, J.S., Dahuri, R. and Caldwell, R.L. (2002) Coral reef restoration after blast fishing in Indonesia. *Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia*, 2, 969-976.
- 13.9 Fox, H.E., Pet, J.S., Dahuri, R. and Caldwell, R.L. (2003) Recovery in rubble fields: long-term impacts of blast fishing. *Marine Pollution Bulletin* 46, 1024-1031.
- 13.10 Raymundo, L. (2010) Rehabilitation of a reef damaged by blast-fishing in the Philippines by stabilizing rubble using plastic mesh. pp.164-166 in Edwards, A.J. (ed.) *Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia.*

13.11 Raymundo, L.J., Maypa A.P., Gomez, E.D. and Cadiz, P. (2007) Can dynamite-blasted reef recover? A novel, low-tech approach to stimulating natural recovery in fish and coral populations. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1009-1019.

(14) 電着技術を応用したサンゴの成長促進技術 (Electrochemical method)

14.1 Benedettia, A., Bramantibe, L., Tsounisb, G., Faimalid, M. Pavanellod, G., Rossie, S., Gilid, J.M. and Santangeloc, G. (2011) Applying cathodically polarized substrata to the restoration of a high value coral biofouling: *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research* 27, 799-809.

14.2 Bernd, S. and Romatzki, C. (2014) Influence of electrical fields on the performance of *Acropora* coral transplants on two different designs of structures. *Marine Biology Research* 10, 449-459.

14.3 Borell, E.M., Romatzki, S.B.C. and Ferse, S.C.A. (2010) Differential physiological responses of two congeneric scleractinian corals to mineral accretion and an electric field. *Coral Reefs* 29, 191-200.

14.4 Goreau, T. (2014) Electrical stimulation greatly increases settlement, growth, survival, and stress resistance of marine organisms. *Natural Resources* 5, 527-537.

14.5 Goreau, T.J., Cervino, J.M. and Pollina, R. (2004) Increased zooxanthellae numbers and mitotic index in electrically stimulated corals. *Symbiosis* 37, 107-120.

14.6 Goreau, T. and Hilbertz, W. (2005) Marine ecosystem restoration; Costs and benefits for coral reefs. *World Resource Review* 17, 375-409.

14.7 Hilbertz, W.H. and Goreau, T.J. (1996) Method for enhancing the growth of aquatic organisms and structure created thereby. U.S. Patent #5,543,034. <http://www.uspto.gov>.

14.8 Kihara, K., Taniguchi, H., Koibuchi, Y., Yamamoto, S., Kondo, Y. and Hosokawa, Y. (2013). Enhancing settlement and growth of corals using feeble electrochemical method. *Galaxea, Journal of Coral Reef Studies, Supplement (Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Coral Reef Symposium)*, 323-329.

14.9 木原一禎・細川恭史・山本悟・鯉渕幸生・近藤康文・山本秀一・谷口洋基 (2013) サンゴ成長における電場の効果。第 16 回日本サンゴ礁学会要旨集。Kihara, K., Hosokawa, Y., Yamamoto, S., Koibuchi, Y., Kondo, Y., Yamamoto, H. and Taniguchi, H. (2013) Effect of electric field on growth of coral. Abstract of the 16th annual meeting of the Japanese Coral Reef Society (in Japanese)

- 14.10 古賀哲郎 (1988) 電着 [コーラルプロセス] の紹介. 配管技術 1988、増刊号、151-157. Koga, T. (1988) Introduction of electrolytic technology (coral process). *Haikan gijutsu* 1988, suppl., 151-157. (in Japanese)
- 14.11 鯉淵幸生・木原一禎・山本 悟・近藤康文 (2009) サンゴの微弱電流による成長促進効果. 海洋開発論文集 25, 467-472. Koibuchi, Y., Kihara, K. and Yamamoto, S. (2009) Studies on the growth of reef building corals by using a feeble electrochemical method. *Proceedings of Civil Engineering in the Ocean* 25, 467-472. (in Japanese)
- 14.12 大森 信 (2006) 果たしてバイオロック技術はサンゴの増殖に有効か? みどりいし (17), 1-3. Omori, M. (2006) Is Biorock technology effective to restore coral reefs? *Midoriishi* (17), 1-3. (in Japanese)
- 14.13 Romatzki, S.B.C. (2014) Influence of electrical fields on the performance of *Acropora* coral transplants on two different designs of structures. *Marine Biology Research* 10, 449-459.
- 14.14 Sabater, M.G. and Yap, H.T. (2002) Growth and survival of coral transplants with and without electrochemical deposition of CaCO<sub>3</sub>. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 272, 131-146.
- 14.15 Sabater, M.G. and Yap, H.T. (2004) Long-term effects of induced mineral accretion on growth, survival and corallite properties of *Porites cyndrica* Dana. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 311, 353-374.
- 14.16 Schuhmacher, H. (2002) Use of artificial reefs with special reference to the rehabilitation of coral reefs. *Bonn Zoological Monograph* 50, 81-108.
- 14.17 Schuhmacher, H., Treek, P., Eisinger, M. and Paster, M. (2000) Transplantation of coral fragments from ship groundings on electrochemically formed reef structures. *Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia*. 2, 989-990.
- 14.18 Strömberg, S. M., Lundälv, T. and Goreau, T. J. (2010) Suitability of mineral accretion as a rehabilitation method for cold-water coral reefs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 395, 153-161.
- 14.19 Van Treek, P. and Schuhmacher, H. (1997) Initial survival of coral nubbins transplanted by a new transplantation technology: options for reef rehabilitation. *Marine Ecology Progress Series* 150, 287-292.
- 14.20 Van Treek, P. and Schuhmacher, H. (1998) Mass diving tourism – a new dimension calls for new management approaches. *Marine Pollution Bulletin* 37, 499-504.

14.21 Van Treek, P. and Schuhmacher, H. (1999) Artificial reefs created by electrolysis and coral transplantation: An approach ensuring the compatibility of environmental protection and diving to tourism. *Estuarine, Coastal & Shelf Science* 49, 75-81.

(15) 基盤汚濁生物の除去および魚類や無脊椎動物による食害防止 (Biological control of fouling organisms and protection of corals from grazing and nibbling by invertebrates and fish)

15.1 Baria, M.V.B., Guest, J.R., Edwards, A.J., Alino, P.M., Heyward, A.J. and Gomez, E.D. (2010) Caging enhances post-settlement survival of juveniles of the scleractinian coral *Acropora tenuis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 394, 149-153.

15.2 Brock, R.E. (1979) An experimental study on the effects of grazing by parrotfishes and role of refuges in benthic community structure. *Marine Biology* 51, 381-388.

15.3 Christiansen, N.A., Ward, S., Harii, S. and Tibbetts, I.R. (2009) Grazing by a small fish affects the early stages of post-settlement stony coral. *Coral Reefs* 28, 47-51.

15.4 Ferse, S.C.A. (2008) Artificial reef structures and coral transplantation: Fish community responses and effects on coral recruitment in North Sulawesi, Indonesia. PhD Thesis. University of Bremen, Germany.

15.5 Ferse, S.C.A. and Kunzmann, A. (2009) Effects of concrete-bamboo cages on coral fragments: Evaluation of a low-tech method used in artisanal ocean-based coral farming. *Journal of Applied Aquaculture* 21, 31-49.

15.6 Frias-Torres S, van de Geer C. (2015) Testing animal-assisted cleaning prior to transplantation in coral reef restoration. *PeerJ* 3:e1287

15.7 Frias-Torres S., Goehlich, H., Reveret, C., Montoya-Maya, P.H. (2015) Reef fishes recruited at midwater coral nurseries consume biofouling and reduce cleaning time in Seychelles, Indian Ocean. *African Journal of Marine Science* 37, 421-426.

15.8 Nakamura, R., Ando, W., Yamamoto, H., Kitano, M., Sato, A., Nakamura, M., Kayanne, H. and Omori, M. (2011). Corals mass-cultured from eggs and transplanted as juveniles to their native, remote coral reef. *Marine Ecology Progress Series* 436, 161-168.

15.9 西平守孝 (2008) 移植サンゴで観察された死亡要因について. 名桜大学総合研究 (12), 39-44. Nishihira, M. (2008) Some factors of mortality observed in

- transplantation of corals. Bulletin of Meio University Research Institute (12), 39-44. (in Japanese)
- 15.10 大久保明彦 舟越善隆 跡邊隆行 上野信平 (2005) 駿河湾のエダミドリイシ個体群の成長とガンガゼによる摂食の影響. 東海大学海洋研究所報告 24, 51-57. Okubo, A., Funakoshi, Y., Atobe, T. and Ueno, S. (2005) Growth of *Acropora tumida* and effect of *Diadema* grazing. Report of Tokai University Ocean Research Laboratory, 24, 51-57. (in Japanese)
- 15.11 Rotjan, R.D. and Lewis, S.M. (2008) Impact of coral predators on tropical reefs. Marine Ecology Progress Series, 367, 73-91.
- 15.12 Sammarco, P.W. (1980) *Diadema* and its relationship to coral spat mortality: Grazing, competition, and biological disturbance. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 45, 245-272.
- 15.13 Sammarco, P.W. (1982). Echinoid grazing as a structuring force in coral communities: Whole reef manipulations. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 61, 31-55.
- 15.14 Sammarco, P.W. and Carleton, J.H. (1981) Damselfish territoriality and coral community structure: Reduced grazing, coral recruitment, and effects on coral spat. Proceedings of the 4th International Coral Reef Symposium, the Philippines, 2, 525-535.
- 15.15 佐藤 力 (2010) ウニ類がサンゴ幼生の着生および幼ポリプの生残におよぼす影響. みどりいし (21), 30-33. Sato, R. (2010) Effect of grazing activity by sea-urchin on settlement of coral larvae and survival of coral polyps. Midoriishi (21), 30-33. (in Japanese)
- 15.16 田村 實 (2008) サラサバタイ(タカセガイ)幼貝の摂食行動がサンゴの初期ポリプに与える影響. みどりいし (19), 37-39. Tamura, M. (2008) Effects of feeding behavior of juvenile top shell *Trochus niloticus* on the early developmental stage of coral. Midoriishi (19), 37-39. (in Japanese)
- 15.17 Toh, T.C., Ng, C.S.L., Guest, J. and Chou, L.M. (2013) Grazers improve health of coral juveniles in *ex situ* mariculture. Aquaculture 414, 288-293.
- 15.18 Trapon, M.I., Pratchett, M.S., Hoey, A.S. and Baird, A.H. (2013) Influence of fish grazing and sedimentation on the early post-settlement survival of the tabular coral *Acropora cytherea*. Coral Reefs 32, 1051-1059.
- 15.19 Villanueva, R.D., Edwards, A.J. and Bell, J.D. (2010) Enhancement of grazing gastropod populations as a coral reef restoration tool: Predation effects and related applied implications. Restoration Ecology 18, 803-809.

- 15.20 Wolf, A.T. and Nugues, M.M. (2013) Predation on coral settlers by the corallivorous fireworm *Hermodice carunculata*. *Coral Reefs* 32, 227-231.
- (16) サンゴ幼生や稚サンゴによる褐虫藻獲得 (Acquisition of symbiotic dinoflagellates by coral spats)
- 16.1 Abrego, D., van Oppen, M.J.H. and Willis, B.L. (2009) Onset of algal endosymbiont specificity varies among closely related species of *Acropora* corals during early ontogeny. *Molecular Ecology* 18, 3532-3543.
- 16.2 Cumbo, V.R., Bairds, A.H. and van Oppen, M.J.H. (2013) The promiscuous larvae: flexibility in the establishment of symbiosis in corals. *Coral Reefs* 32, 111-120.
- 16.3 Gomez-Cabrera, M., Ortiz, J., Loh, W., Ward, S. and Hoegh-Guldberg, O. (2008) Acquisition of symbiotic dinoflagellates (*Symbiodinium*) by juveniles of the coral *Acropora longicyathus*. *Coral Reefs* 27, 219-226.
- 16.4 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* 8-13. Harii, S. (2012) Establishment of symbiosis in early developmental stages of hermatypic corals. *Midoriishi* (23), 8-13. (in Japanese)
- 16.5 Harii, S., Yasuda, N., Rodriguez-Lanetty, M., Irie, T. and Hidaka, M. (2009) Onset of symbiosis and distribution patterns of symbiotic dinoflagellates in the larvae of scleractinian corals. *Marine Biology* 156, 1203-1212.
- 16.6 Hirose, M., Yamamoto, H. and Nonaka, M. (2008) Metamorphosis and acquisition of symbiotic algae in planula larvae and primary polyps of *Acropora* spp. *Coral Reefs* 27, 247-254.
- 16.7 Howells, E.J., Beltran, V.H., Larsen, L.K., Bay, B.L., Willis, B.L. and van Oppen, M.J.H. (2012) Coral thermal tolerance shaped by local adaptation of photosymbionts. *Nature Climate Change* 2, 116-120.
- 16.8 Suzuki, G., Yamashita, H., Kai, S., Suzuki, K., Iehisa, Y., Okada, Y., Ando, W. and Komori, T. (2013) Early uptake of specific symbionts enhances the post-settlement survival of *Acropora* corals. *Marine Ecology Progress Series* 494, 149-158.
- 16.9 Yamashita, H., Suzuki, G., Hayashibara, T. and Koike, K. (2013) *Acropora* recruits harbor "rare" *Symbiodinium* in the environmental pool. *Coral Reefs* 32, 355-366.

(17) 表現型遺伝子の選抜、遺伝的多様性、及び種の分布(幼生拡散)に関するもの  
(Genetic repository, genetic diversity and connectivity)

- 17.1 Ayre, D.J. and Hughes, T.P. (2000) Genotypic diversity and gene flow in brooding and spawning corals along the Great Barrier Reef, Australia. *Evolution* 54, 1590-1605.
- 17.2 Baums, I.B. (2008a) A restoration genetics guide for coral reef conservation. *Molecular Ecology* 17, 2796-2811.
- 17.3 Baums, I.B. (2008b) A synopsis of coral restoration genetics. pp.335-338 in Leewis R.J. and Janse, M. (eds.) *Advances in Coral Husbandry in Public Aquariums*. Public Aquarium Husbandry Series. 2, Burgers' Zoo, Arnhem, the Netherlands.
- 17.4 Hellberg, M. (1996) Dependence of gene flow on geographic distance in two solitary corals with different larval dispersal capabilities. *Evolution* 50, 1167-1175.
- 17.5 Hemond, E. and Vollmer, S.V. (2010) Genetic diversity and connectivity in the threatened staghorn coral (*Acropora cervicornis*) in Florida. *PloS One* 5(1), e8652.
- 17.6 Isomura, N., Baba., Y, Nagata, S., Nonaka, M. and Yamamoto, H.H. (2013) The relationship between genetic similarity and reproductive success in the branching coral *Acropora intermedia*. *Marine Biology Research* 9, 181-188.
- 17.7 Nakajima, Y., Nishikawa, A., Iguchi, N. and Sakai, K. (2009) Genetic connectivity of the broadcast-spawning coral *Acropora digitifera* analyzed by microsetalite makers in the Sekisei Reef, southwestern Japan. *Zoological Science* 28, 209-215.
- 17.8 Nakajima, Y., Nishikawa, A. and Sakai, K. (2010) Gene flow and genetic diversity of a broadcast-spawning coral in northern peripheral populations. *PloS One* 5(6), e11149.
- 17.9 西川 昭(2004) 琉球列島における造礁サンゴの集団遺伝学的研究. *みどりいし* (15), 20-22. Nishikawa, A. (2004) Population genetics of scleractinian corals in the Ryukyu Archipelago. *Midoriishi* (15), 20-22. (in Japanese)
- 17.10 Nishikawa, A., Katoh, M. and Sakai, K. (2003) Larval settlement rates and gene flow of broadcast-spawning (*Acropora tenuis*) and planula-brooding (*Stylophora pistillata*) corals. *Marine Ecology Progress Series* 256, 87-97.
- 17.11 Nishikawa, A. and Sakai, K. (2003) Genetic variation and gene flow of broadcast spawning and planula brooding coral, *Goniastrea aspera* (Scleractinia) in the

- Ryukyu Archipelago, Southern Japan. *Zoological Science* 20, 1031-1038.
- 17.12 Nunes, F.L.D., Norris, R.D. and Knowlton, N. (2011) Long distance dispersal and connectivity in amphi-Atlantic corals at regional and basin scales. *PloS One* 6(7), e22298.
- 17.13 Schopmeyer, S.A., Lirman, D., Bartels, E., Byrne, J., Gilliam, D.S., Hunt, H., Johnson, M., Larso, E.A., Maxwell, K., Nedimyer, K. and Walter, C. (2011) *In situ* coral nurseries serve as genetic repositories for coral reef restoration after an extreme cold-water event. *Restoration Ecology* 20, 696-703.
- 17.14 Shearer, T.L., Porto, I. and Zubillaga, A.L. (2009) Restoration of coral populations in light of genetic diversity estimates. *Coral Reefs* 28, 727-733.
- 17.15 Shinzato, C., Mungpakdee, S., Arakaki, N. and Satoh, N. (2015) Genome-wide SNP analysis explains coral diversity and recovery in the Ryukyu Archipelago. *Scientific Reports*, 5, 182111; Doi:1038/step18211.
- 17.16 Underwood, J.N. (2009) Genetic diversity of and divergence among coastal and offshore reefs in a hard coral depend on geographic discontinuity and oceanic current. *Evolutionary Applications* 2, 222-233.
- 17.17 Underwood, J.N., Smith, L.D., van Oppen, M.J.H. and Gilmour, J.P. (2009) Ecologically relevant dispersal of corals on isolated reefs: implications for managing resilience. *Ecological Application* 19, 18-29.
- 17.18 Van Oppen, M.J.H., Lutz, A., De'ath, G., Peplow, L. and Kininmonth S. (2008) Genetic traces of recent long-distance dispersal in a predominantly self-recruiting coral. *PloS One* 3(10) e3401.
- 17.19 Van Oppen, M.J.H., Oliver, I.K., Putnam, H.M. and Gates, R.D. (2015) Building coral reef resilience through assisted evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 2307-2313.,
- (18) さんご礁修復の効果、魚類の多様性・漁業と生態系サービスの回復 (Effects of coral transplantation. Interrelationship between corals and fish diversity. Recovery of coral reef fisheries and ecosystem services)
- 18.1 Bortone, S.A. (ed.) (2014) *Interrelationships between Corals and Fisheries*. CRC Press, Boca Laton, Florida. Xvi + 289 pp.
- 18.2 Cabaitan, P.C., Gomez, E.D. and Alino, P.M. (2008) Effects of coral transplantation and giant clam restocking on the structure of fish communities on degraded patch reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 257, 85-98.

- 18.3 Chabanet, P., Ralambondrainy, H., Amanieu, M., Faure, G. and Galzin, R. (1997) Relationship between coral reef substrata and fish. *Coral Reefs* 16, 93-102.
- 18.4 dela Cruz, D.W., Villanueva, R.D. and Baria, M.V.B. (2014) Community-based, low-tech method of restoring a lost thicket of *Acropora* corals. *ICES Journal of Marine Science* 71, 1866-1875.
- 18.5 Emslie, M.J., Cheal, A.J. and Johns, K.A. (2014) Retention of habitat complexity minimizes disassembly of reef fish communities following disturbance: a large-scale natural experiment. *PloS ONE* 9, e105384.
- 18.6 Ferse, S.C.A. (2008) Artificial reef structures and coral transplantation: fish community responses and effects on coral recruitment in North Sulawesi/Indonesia. Ph.D. thesis, University of Bremen, Bremen, Germany.
- 18.7 Lindahl, U., Ohman, M.C. and Schelten, C.K. (2001) The 1997/1998 mass mortality of corals: effects on fish communities on a Tanzanian reef. *Marine Pollution Bulletin* 42, 127-131.
- 18.8 Merolla, S.A., Holevoet, A.J., Musser, S.L. and Forrester, G.E. (2013) Caribbean damselfish recolonize reefs following coral restoration. *Ecological Restoration* 31, 353-356.
- 18.9 Sano, M. (2000) Stability of reef fish assemblages: responses to coral recovery after catastrophic predation of *Acanthaster planci*. *Marine Ecology Progress Series* 198, 121-130.
- 18.10 Sano, M. (2001) Short-term responses of fishes to macroalgal overgrowth on coral rubble on a degraded reef at Iriomote Island, Japan. *Bulletin of Marine Science*, 68, 543-556.
- 18.11 Sano, M., Shimizu, M. and Nose, Y. (1987) Long-term effects of destruction of hermatypic corals by *Acanthaster planci* infestation on reef fish communities at Iriomote Island, Japan. *Marine Ecology*, 37, 191-199.
- 18.12 Stella, J.D., Pratchett, M.S., Hutchings, P.W., and Jones, G.P. (2011) Coral-associated invertebrates: diversity, ecology importance and vulnerability to disturbance. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 49, 43-104.
- 18.13 Wilson, S.K., Burgess, S.C., Cheal, A.J., Emslie, M., Fisher, R., Miller, I., Polunin, N.V. and Sweatman, H.P. (2008) Habitat utilization by coral reef fish: implications for specialists vs. generalists in a changing environment. *Journal of Animal Ecology* 77, 220-228.

- (19) 費用対効果に関するもの (Cost and benefit of coral reef rehabilitation)
- 19.1 Bayraktarov, E., Saunders, M.I., Abdullah, S., Mills, M., Beher, J., Possingham, H.P., Mumby, P.J. and Lovelock, C.E. (2016) The cost and feasibility of marine coastal restoration. *Ecological Applications* 26, 1055–1074.
- 19.2 Cesar, H.S.J. and van Beukering, P.J.J. (2004) Economic valuation of the coral reefs of Hawaii. *Pacific Science* 58, 231-242.
- 19.3 Cesar, H., Burke, L. and Pet-Soede, L.(2003) The economics of worldwide coral reef degradation. Cesar Environmental Economics Consulting. Arnhem, The Netherlands. 23pp.
- 19.4 dela Cruz, D.W., Villanueva, R.D. and Baria, M.V.B. (2014) Community-based, low-tech method of restoring a lost thicket of *Acropora* corals. *ICES Journal of Marine Science* 71:1866-1875.
- 19.5 Edwards, A., Guest, J., Rinkevich, B., Omori, M., Iwao, K., Levy, G. and Shaish, L. (2010) Evaluating costs of restoration. pp.113-126 in Edwards, A.J. (ed.) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia.
- 19.6 Edwards, A., Job, S. and Wells, S. (2010) Learning lessons from past reef-rehabilitation projects. pp.129-136. In Edwards, A.J. (ed.) Reef Rehabilitation Manual. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program, St Lucia, Australia.
- 19.7 Guest, J., Baria, M.V., Gomez, E.D., Heyward, A.J. and Edwards, A.J. (2014) Closing the circle: is it feasible to rehabilitate reefs with sexually propagated corals? *Coral Reefs* 33, 45-55.
- 19.8 Haisfield, K.M., Fox, H.E., Yen, S., Mangubhai, S. and Mous, P.J. (2010) An ounce of prevention: cost effectiveness of coral reef rehabilitation relative to enforcement. *Conservation Letters* 3, 243-250.
- 19.9 Mbije, N.E.J., Spanier, E. and Rinkevich, B (2013) A first endeavor in restoring denuded, post-bleached reefs in Tanzania. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 128, 41-51.
- 19.10 Spurgeon, J. (1998) The socio-economic costs and benefits of coastal habitat rehabilitation and creation. *Marine Pollution Bulletin* 37, 373-382.
- 19.11 Spurgeon, J.P.G. (2001) Improving the economic effectiveness of coral reef restoration. *Bulletin of Marine Science* 69, 1031-1045.
- 19.12 Spurgeon, J.P.G. and Lindahl, U. (2000) Economics of coral reef restoration.

pp.125-136 in Cesar, H.S.J. (ed.) Collected Essays on the Economics of Coral Reefs. CORDIO, Sweden.

(20) 主著者名による文献検索 (Senior Author Index)

Abelson, A.	3-27
Abrego, D.	3-75
Akakura, Y.	3-63
Alcala, A..C.	3-33
Al-Horani, F.A.	3-43, 3-63
Álvarez-Filip, L.	3-63
Amar, K.O.	3-43
Ammar, M.S.A.	3-31, 3-34
Ando, W.	3-63
Anonymous	3-63
Anthony, K.R.	3-58
Aota, T.	3-49, 3-55, 3-56
Arvedlund, M.	3-58
Auberson, B.	3-34
Ayre, D.J.	3-76
Babcock, R.	3-52
Bachtiar, I.	3-63
Baird, A.H.	3-52
Baria, M.V.B.	3-49, 3-56, 3-73
Barton, J.A.	3-31, 3-44, 3-49
Baums, I.B.	3-76
Bayraktarov, E.	3-27, 3-79
Becker, L.C.	3-34
Benedettia, A.	3-71
Bernd, S.	3-71
Birkeland, C.	3-34
Boch, C.H.	3-34, 3-55
Bongiomi, L.	3-44

Borell, E.M.	3-71
Bortone, S.A.	3-77
Bothwell, A.M.	3-34
Bouchon, C.	3-34
Bowden-Kerby, A.	3-34, 3-35
Brock, R.E.	3-73
Bruckner, A.W.	3-35
Cabaitan, P.C.	3-35, 3-62, 3-77
Carleton, J.H.	3-63
Carne, L.	3-27, 3-36
Cesar, H.S.J.	3-79
Chabanet, P.	3-78
Chansang, H.	3-63
Charnesky, E.A.	3-62
Chen, G.	3-36
Chou, LM.	3-27
Christiansen, N.A.	3-73
Clark, S.	3-31, 3-36, 3-64
Clark, T.	3-36
Cooper, W.A.	3-55
Cumbo, V.R.	3-75
Custodio, I.H.M.	3-36
dela Cruz, D.W.	3-36, 3-44, 3-78, 3-79
Delbeek, J.C.	3-27, 3-56
Dennison, W.C.	3-59
Dizon, R.M.	3-64
Dizon, R.T.	3-36
Edmunds, P.J.	3-59
Edwards, A.J.	3-27, 3-28, 3-32, 3-36, 3-55, 3-64, 3-70, 3-79
Emslie, M.J.	3-78
Encalada, M.M.	3-64
Endo, S.	3-36
Epstein, N	3-32, 3-44

Fabricius, K.E.	3-59
Ferrier-Pagès, C.	3-59
Ferse, S.C.A.	3-28, 3-37, 3-64, 3-73, 3-78
Fisheries Agency, Japan	3-52
Fisk, D.	3-28, 3-57
Forrester, G.E.	3-37
Forsman, Z.H.	3-44, 3-59
Fox, H.E.	3-70
Franklin, H.	3-37
Frias-Torres, S,	3-73
Fujimori, S.	3-64
Fujimura, S.	3-52
Fujiwara, S.	3-57, 3-64
Garrison, V.	3-37
Geothermal Research Reef Aquarium Lab	3-65
Gilmour, J.	3-59
Gleason, D.F.	3-37, 3-59
Golbuu, Y.	3-28, 3-53
Goldman L.	3-59
Gomez, E.D.	3-37, 3-44, 3-65
Gomez-Cabrera, M.	3-75
Goreau, T.J.	3-71
Graham, E.M.	3-53
Griffin, S.	3-38, 3-44
Grottoli, A.G.	3-59
Guest, J.R.	3-38, 3-49, 3-65, 3-79
Guignard, C.	3-38, 3-65
Guzman, H.M.	3-38
Haisfield, K.M.	3-79
Harii, S.	3-75
Harrington, L.	3-53, 3-65
Harriott, V.J.	3-28, 3-38, 3-65
Hatta, M.	3-49

Hayashi, T.	3-50
Hayashibara, T.	3-50, 3-55, 3-65
Heeger, T	3-32, 3-44, 3-45
Heidelberg, K.B.	3-59
Hellberg, M.	3-76
Hemond, E.	3-76
Herlan, J.	3-45
Heyward, A.J.	3-50, 3-53
Higa, Y.	3-38, 3-45
Highsmith, R.C.	3-38
Hii, YS.	3-59
Hilbertz, W.H.	3-71
Hirose, M.	3-75
Hollarsmith, J.A.	3-38
Horoszowski, Y.	3-45
Horoszowski-Fridnab, Y.B.	3-45, 3-50
Hough, P.	3-50
Howells, E.J.	3-75
Houlbreque, F.	3-59, 3-60
Hudson, J.H.	3-38, 3-57
Hunt, J.	3-28
Ishii, M.	3-57
Isomura, N.	3-76
Iwao, K.	3-50, 3-53
Jaap, W.C.	3-32, 3-65
Japan Marine Science and Technology Center	3-39
Japanese Coral Reef Society	3-29
Job, S.	3-28, 3-57, 3-65
Johnson, M.E.	3-32, 3-45
Jokiel, P.L.	3-32, 3-58
Kaly, U.L.	3-39
Kaufman, L S.	3-65
Kenny, I.	3-58

Kihara, K.	3-71
Kilbane, D.	3-58
Koga, T.	3-72
Koibuchi, Y.	3-72
Kojis, B.L.	3-28
Kotb, M.M.A.	3-58
Kuffner, I.B.	3-53
Kuanui, P.	3-60
Lam, K.Y.	3-39, 3-66
Latypov, Y.Y.	3-39
Laydoo, R.S.	3-39
Levy, G.	3-46
Lewis, J.B.	3-60
Liñán-Cabello, M.A.	3-39
Lindahl, U.	3-39, 3-78
Linden, B.	3-50, 3-66
Lirman, D.	3-28, 3-46, 3-60
Maekouchi, N.	3-66
Maida, M	3-66
Maragos, J.E.	3-28, 3-32
Marine Parks Center of Japan	3-38, 3-39
Mascarelli, A.	3-62
Mason, B.	3-53
Mass, T.	3-60
Mbije, N.E.J.	3-46, 3-79
McCook, L.J.	3-29
Mercado-Molina, A.E.	3-46
Merolla, S.A.	3-78
Miller, K.	3-53
Miller, M.W.	3-40
Miller, S.L.	3-32
Milon, J.W.	3-29
Miyake, K.	3-66

Miyazaki, K.	3-40
Montoya-Maya, P.H.	3-46
Mohammed, T.A.	3-66
Monty, J.A	3-46
Moothien-Pillay, R.	3-46
Morse, A.N.C.	3-53
Morse, D.E.	3-53, 3-54
Muko, S.	3-62
Mundy, C.N.	3-54, 3-66
Munoz-Chagin, R.F.	3-40
Nagelkerken, I.	3-40
Nakajima, Y.	3-76
Nakamura, R.	3-51, 3-56, 3-73
Nakamura, T.	3-60
Nature Seychelles	3-46
Naughton, J.	3-32
Nazurally, N.	3-29
Nedimyer, K.	3-47
Negri, A.P.	3-54
Ng, C.S.L.	3-47, 3-66
Ngai, N.D.	3-40
Nishihira, M.	3-40, 3-41, 3-73
Nishikawa, A.	3-76
Normile, D.	3-29
Nozawa, Y.	3-66, 3-67
Nunes, F.L.D.	3-77
O'Donnell, K.E.	3-67
Okamoto, M.	3-67
Okinawa General Bureau	3-32
Okinawa Prefecture	3-33
Okubo, A.	3-74
Okubo, N.	3-41, 3-67
Omori, M.	3-29, 3-33, 3-47, 3-51, 3-55, 3-56, 3-67, 3-72

Onaka, S.	3-41, 3-42
Ooka, S.	3-68
Oren, U.	3-68
Ortiz-Prosper, A. L.	3-68
Osinga, R.	3-54, 3-56, 3-60
Oyamada, K.	3-68
Palomar, M.J.S.	3-42
Pandolfi, J.M.	3-29
Paragos, J.E.	3-33
Perkol-Finkel, S.	3-68
Petersen, D.	3-51, 3-56, 3-58, 3-61, 3-68
Phongsuwan, N.	3-68
PIANC	3-33
Pinlak, G.A.	3-42
Plucer-Rosario, G.P.	3-42, 3-58
Porter, J.W.	3-61
Precht, W.F.	3-30, 3-33
Putchim, L.	3-47
Puill-Stephan, E.	3-54
Quan-Young, L.I.	3-61
Quinn, N.J.	3-42
Raimondi, P.T.	3-51, 3-54
Raymundo, L.	3-42, 3-54, 3-70, 3-71
Reef Ball Foundation	3-68
Reveret, C.	3-47
Richmond, R.H.	3-30
Rinkevich, B.	3-30, 3-33, 3-47
Rodolfo-Metalpa, R.	3-61
Romatzki, S.B.C.	3-72
Rotjan, R.D.	3-74
Sabater, M.G.	3-72
Salinas-De-Leon, P.	3-68
Salvat, B.	3-58

Sammarco, P.W.	3-74
Sano, M.	3-78
Sato, M.	3-51
Sato, R.	3-74
Schopmeyer, S.A.	3-77
Schuhmacher, H.	3-68, 3-72
Schutter, M.	3-61
Sebens, K.P.	3-61
SECORE International.	3-30
Seguin, F.	3-58
Seikai Regional Fisheries Research Laboratory	3-51
Shafir, S.	3-47, 3-48
Shaish, L.	3-33, 3-48
Shearer, T.L.	3-77
Sherman, R.L.	3-68, 3-69
Shimomura, Y.	3-52
Shinzato, C	3-77
Shongtham, N.	3-69
Sleeman, H.C.	3-62
Smith, L.D.	3-42
Soong, K.	3-49
Spalding, M.D.	3-30
Spieler, R.E.	3-69
Sprung, J.	3-69
Spurgeon, J.S.	3-30, 3-79
Stella, J.D.	3-78
Strömberg, S.M.	3-72
Suzuki, G.	3-54, 3-55, 3-69, 3-75
Symons, L.C.	3-30
Tamelander, J.	3-31
Tamura, M.	3-74
Taniguchi, H.	3-69
Tebben, J.	3-54

Thom, R.M.	3-31
Thongtham, N.	3-42
Thornton, L.L.	3-69
Toh, TC.	3-42, 3-52, 3-61, 3-74
Tortolero-Langarica, J.J.A.	3-43
Trapon, M.I.	3-74
Uehara, S.	3-49
Underwood, J.N.	3-77
Van Oppen, M.J.H.	3-77
Van Treek, P.	3-72, 3-73
Vermeij, M.J.A.	3-54
Villanueva, R.D.	3-52, 3-57, 3-74
Wabnitz, C.	3-33
Watanuki, A.	3-57
Webster, N.S.	3-52, 3-54
Whalan, S,	3-69
Whittingham, E.	3-31
Wijgerde, T.	3-61, 3-62
Wilkinson, C.	3-31
Williams, D.F.	3-43
Wilson, J.R.	3-55
Wilson, S.K.	3-78
Wolf, A.T.	3-75
Yamaki, K.	3-52, 3-69
Yamashita, H.	3-75
Yamashita, T.	3-69
Yap, H.T.	3-31, 3-43, 3-69
Yeemin, T.	3-31
Young, C.N.	3-31
Zayas, Y.	3-43
Zimmer, B.	3-31

## 3.2 サンゴのゲノム解析、無性生殖株のミドリイシ類個体群の遺伝学的多様性の検証

### 3.2.1 遺伝子解析分野の目的

人為的に回復させたサンゴ礁を長く持続的に維持するためには、自然状態に出来るだけ近づけたサンゴ礁の復元を目指すことが重要となる。そのためには現状の自然のサンゴ礁の状態を把握したうえで、遺伝的多様性と種の多様性の保持、移植場所のサンゴの遺伝的攪乱に注意して事業を推進しなければならない。そこで沖縄県内のサンゴの遺伝的多様性や、地域間でのサンゴ遺伝子の交流の有無などといった集団遺伝学的情報が不可欠となる。さらに植付けに用いるサンゴの遺伝的多様性を確認することが求められる。我々は最先端の分子生物学・ゲノム科学的手法を駆使してこれら情報の集積と、本事業に使用されるサンゴ種へ応用するための技術開発を行った。その過程で、4つの学術論文として国際誌へ発表した。全て制限なくどこからでもインターネット上で閲覧・ダウンロードすることが可能なオープンアクセスの論文なので、研究成果が沖縄県だけの波及にとどまらず、世界中のサンゴ礁保護に貢献することが期待される。本報告はこれら4つの論文の内容を中心に報告する。

### 3.2.2 DNA 情報を用いた沖縄周辺の天然のサンゴ礁の現状把握

我々の研究グループは国頭村奥から採捕したコユビミドリイシ (*Acropora digitifera*) を用いて、世界で初めてサンゴの全ゲノム情報を解読することに成功した (Shinzato et al. 2011)。コユビミドリイシのゲノム DNA は、約 4 億 2 千万の塩基 (文字情報) から構成されており、その文字情報の組み合わせによってコユビミドリイシという生物を形作っている。この全ゲノム情報を利用したゲノム科学的解析が、本事業における遺伝子解析を担っている。

サンゴを人為的に移植する際には、移植する海域のサンゴの遺伝的攪乱を招かないよう、移植する海域と遺伝的な交流がある場所から種苗となるサンゴを採捕する必要がある。そのため地域内や地域間でのサンゴの交流や遺伝的多様度の情報は、本事業にとって極めて重要だと考える。

#### (1) ゲノム情報を用いた沖縄のミドリイシ属サンゴ (コユビミドリイシ、*Acropora digitifera*) の超高精度集団解析

我々はゲノム DNA 上の一つの塩基が置き換わる一塩基多系、SNP (Single Nucleotide Polymorphisms) に注目した。SNP はゲノム上に多数存在し (我々人間には 300~1,000 万個程度あるとされる)、生物学的特性や個性を生み出している。

SNP はいわば「ゲノムの個性」のようなもので、個体識別の精度は現在利用可能な手法の中で最も高い。

そこで解読したゲノム情報を駆使して、沖縄県内の様々な海域のコユビミドリイシの遺伝的変異度を、ゲノム上の膨大な数の SNP を用いて解析した。コユビミドリイシのゲノムが解読されたことで、ゲノムに多数存在する SNP を大量かつ同時に解析に用いることが可能となった。本解析は膨大な情報を駆使する「ゲノムレベル」によるものであり、DNA を用いた集団解析では現在最も高精度の解析である。この成果は、Nature Publishing Group の *Scientific Reports* というオンラインジャーナルに 2015 年 12 月 10 日付で公開された (図 3.2.2-1)。

Shinzato C, Mungpakdee S, Arakaki N, Satoh N. Genome-wide SNP analysis explains coral diversity and recovery in the Ryukyu Archipelago. (2015). *Scientific Reports*. 5: 18211.

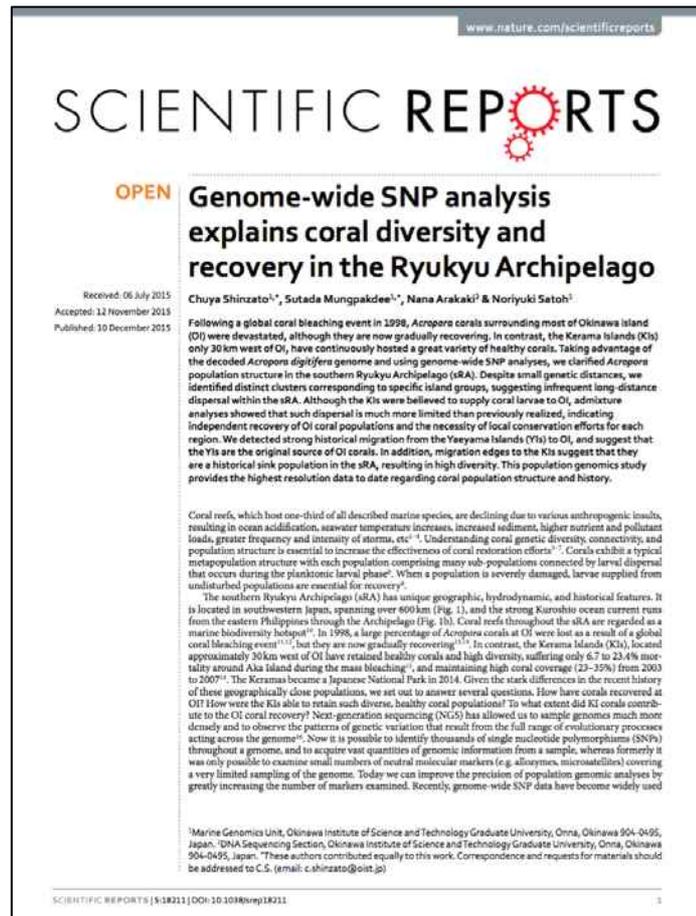


図 3.2.2-1 Nature Publishing Group のオープンアクセスジャーナル、*Scientific Reports* 誌に公表された論文

## 1) 研究方法

沖縄島周辺の5か所（瀬底島、万座、大度、辺戸岬、伊計島）、慶良間諸島の5か所（慶留間島、久場島、屋嘉比島、阿嘉島、座間味島）、石垣島（川平、大浜）、西表島（上原）で材料の採集を行った（図 3.2.2-2）。1地点において最低8、最高で27群体の採集を行い、それぞれの群体から1cm程度の枝を採捕した。サンゴは無性生殖により群体の一部分から新たな群体（クローン）となる可能性がある。同一群体由来のクローンからのサンプル採捕を避けるため、少なくとも15メートル以上離れている群体、合計155群体から枝を採捕した。採捕したそれぞれの群体由来の枝からDNAを抽出し、次世代シーケンサー（Illumina社のGA IIx, HiSeq）により配列決定を行った。ゲノム全体のDNAをまんべんなく解読するために、コユビミドリイシのゲノムサイズのおよそ5~8倍（20億~40億塩基）のDNA配列データを、それぞれのコユビミドリイシ群体から得た。様々なフィルタ（Mapping Quality, Hardy-Weinberg Equilibrium, Linkage Disequilibrium, Minor Allele Frequency）により、高品質なSNPを選抜した。さらにDNA配列データが少なく信頼性の低い群体のデータを取り除いた。最終的に121個体、90万5,561か所のSNPを解析に使用した。主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）を行い、沖縄周辺の地域間でコユビミドリイシのゲノムにどの程度違いがあるのか調べた。さらにTreeMix解析（Pickrell and Pritchard 2012）を行い、過去のサンゴの加入の歴史を調べた。

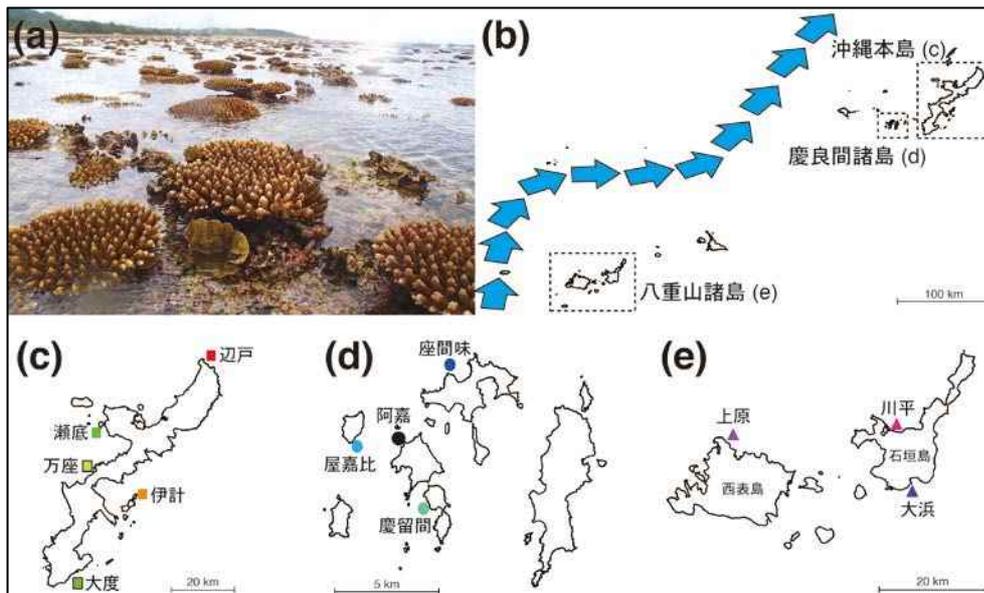


図 3.2.2-2 コユビミドリイシ (*Acropora digitifera*) と沖縄県内での採捕地点

(a) 典型的なコユビミドリイシの生息環境。干潮時に干上がるような浅い場所にも多く生息する。西表島上原で撮影。(b) 沖縄県周辺の地図と黒潮海流(青矢印)。(c) 沖縄島、(d) 慶良間諸島、(e) 八重山諸島での採集ポイント。全ての地点で別の色を使っており、沖縄島は四角、慶良間は丸、八重山は三角で記している。

## 2) 結果と考察

### ① 現在の沖縄のコユビミドリイシの集団構造

沖縄県各地のコユビミドリイシの DNA の違いは非常に小さく、これまでは琉球列島全域で広く分散していると考えられてきた。実際に今回の解析でも、ADMIXTURE (Alexander et al. 2009) や fastSTRUCTURE (Raj et al. 2014) といった解析ソフトによると、沖縄県全域でコユビミドリイシは一つの集団であると示唆された。しかし PCA により地域ごと・島ごとの 4 つのグループ (沖縄島、慶良間諸島、八重山南・北) に分けることができた (図 3.2.2-3)。わずか 30km ほどしか離れていない慶良間諸島と沖縄島でもグループが別れた。さらに、4 つのグループ間で幼生の行き来が示唆されたのは、予想されたよりも少ないという結果になった。一例として、慶良間諸島からのサンゴの幼生の加入が示唆されたのは沖縄島南岸のみで、他の場所にはほとんど加入の痕跡は認められなかった。八重山諸島でも石垣島の川平及び西表島の上原グループと石垣島の大浜グループという南北にグループが別れた。これは、石垣島と西表島の間に存在する日本最大のサンゴ礁、石西礁湖が南北の幼生の交流を阻んでいると考えられる。

各地点間の遺伝的距離 ( $F_{st}$ ) を調べたところ、沖縄全域で小さい値ではあったが、地域ごと・島ごとに固まる傾向であった (図 3.2.2-4)。遺伝的距離がとも小さく、統計的に同一集団とされたのは、同一地域の間だけであった。例えば沖縄島の地点は沖縄島内の他の地点と、慶良間の地点は他の慶良間の地点と、八重山では石垣島の川平と西表島の上原が同じ遺伝的集団と示唆された (図 3.2.2-4 の黒く囲われた部分)。実際に地点間の距離が遠くなると遺伝的距離も大きくなり、両者は有意に相関していることが示された。このことから、サンゴが毎年の一斉産卵で海中に放出した膨大な量の幼生は、島々の間で頻繁に長距離の行き来はしていない、若しくは幼生が長距離を移動して辿り着いたとしても、新しい場所で定着に成功し生存し続けることは少ないのではないかと考えられる。では近年沖縄島の一部、西海岸や瀬底島などで確認されている、1998 年の大規模白化現象から回復しつつあるサンゴはどこから来たのか。これまで慶良間諸島などのサンゴの豊かな場所から幼生がやって来たと思われてきたが、そうではなく、近くで生き残ったサンゴが自ら復活してきた可能性が高いと考えられる。

今回の解析により、従来考えられていたよりもサンゴの幼生の分散範囲は狭く、生息範囲の拡大が遅い可能性が示された。そのため一度失われたサンゴ礁が復活するのは、従来考えられているより時間がかかる可能性がある。そのため沖縄周辺でのサンゴ礁保護には、サンゴが豊富にある場所を守るだけでなく、地域ごとにサンゴ礁の保護に取り組む必要があると考えられる。サンゴ移植の種苗を採取する際にも、できるだけ植付けをする場所から近いところで採取する必要があるだろう。

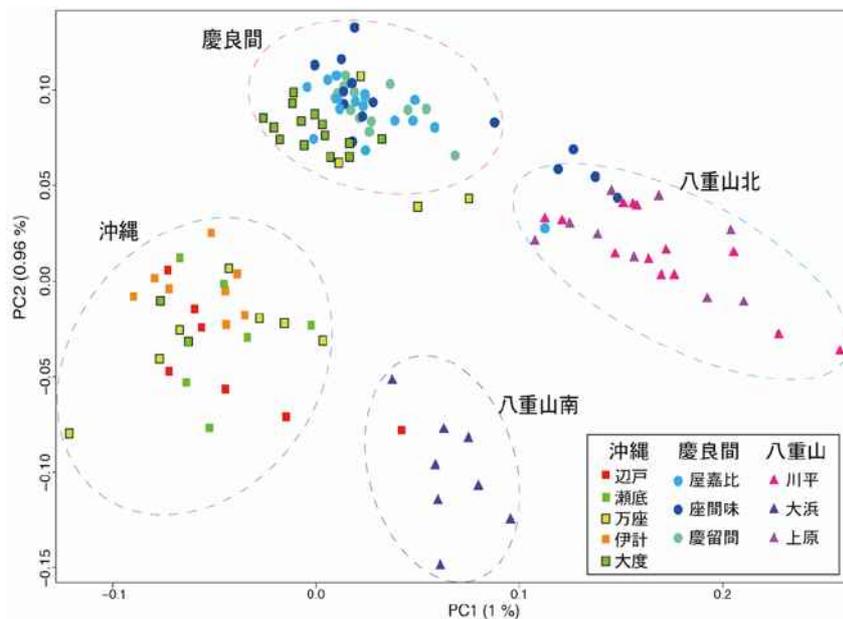


図 3.2.2-3 PCAによるコユビミドリイシ 122 個体のゲノム比較

それぞれの個体の 90 万 5,561 か所の SNP 情報を用いた解析。一つの点が一個体を表す。図 3.2.2-2 と同様、全ての地点で別の色を使っており、沖縄島は四角、慶良間は丸、八重山は三角で記している。位置が近いものは、それだけゲノム DNA が近い (似ている) という。地域ごとのクラスターを点線で囲む。

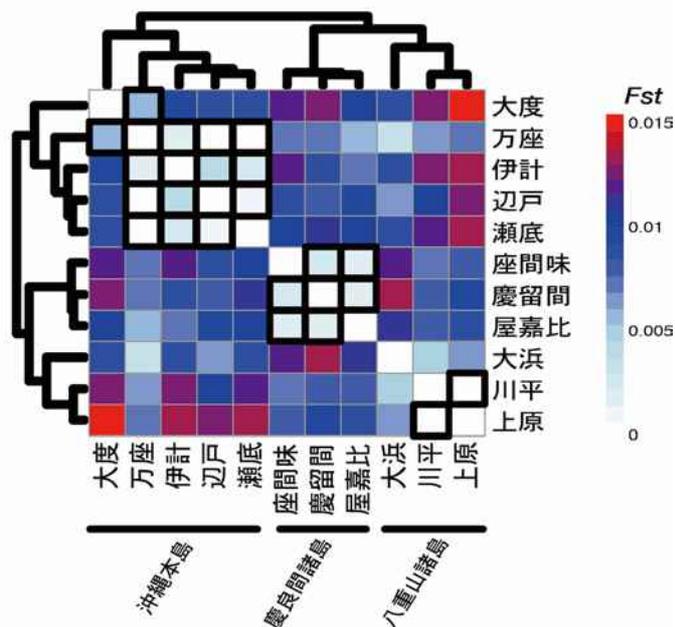


図 3.2.2-4 採取した地点間の遺伝的距離 ( $F_{st}$ )

全ての地点間の遺伝的距離を算出し、ヒートマップで示す。黒く囲われている地点は、遺伝的に有意に変わらないとされた地点の組み合わせ ( $p$ -value < 0.001)。

## ② 沖縄のコユビミドリイシの加入の歴史を辿る

膨大な SNP データを用いると、コユビミドリイシの集団はどのように形成されたのか、過去の加入の歴史を垣間見ることができる。TreeMix というソフトを用いると、過去 100 世代前、コユビミドリイシの一世代（成熟し次世代を残せるようになるのに必要な時間）を仮に 5 年とすると、500 年以上前に起こった加入の痕跡も検出することができる。

その結果、沖縄島のコユビミドリイシは八重山諸島からの影響を強く受けていること（ゲノムの約半分が八重山由来）、さらに、八重山諸島や沖縄島から、慶良間諸島への過去の加入が示唆された。実際に慶良間諸島のコユビミドリイシは、沖縄島や八重山諸島と比較して高い遺伝的多様性（ヘテロ接合度、heterozygosity）を保っていることが分かった。慶良間諸島のサンゴ礁は歴史的に見ると、様々な場所からサンゴが集まって形成された、いわば南西諸島の「サンゴのるつぼ」なのかもしれない。

## (2) 養殖主要種のスエダミドリイシの南西諸島での集団構造

本事業での移植重要種の一つであるスエダミドリイシ (*Acropora tenuis*) の南西諸島での集団解析の研究成果を学術論文として発表した。この成果は、*Ecology and Evolution* という科学誌に 2016 年 6 月 12 日付で公開された（図 3.2.2-5）。

Zayasu Y, Nakajima Y, Sakai K, Suzuki G, Satoh N, Shinzato C. Unexpectedly complex gradation of coral population structure in the Nansei Islands, Japan. (2016). *Ecology and Evolution*. 6: 5491-5505.

**Unexpectedly complex gradation of coral population structure in the Nansei Islands, Japan**Yuna Zayasu<sup>1</sup>, Yuichi Nakajima<sup>2</sup>, Kazuhiko Sakai<sup>3</sup>, Go Suzuki<sup>4</sup>, Noriyuki Satoh<sup>1</sup> & Chuya Shinzato<sup>1</sup><sup>1</sup>Marine Genomics Unit, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, 1919-1 Tancha, Onna-son, Okinawa 904-0405, Japan<sup>2</sup>Marine Biophysics Unit, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, 1919-1 Tancha, Onna-son, Okinawa 904-0405, Japan<sup>3</sup>Sesoko Station, University of the Ryukyus, 3422 Sesoko, Motobu, Okinawa 905-0227, Japan<sup>4</sup>Ishigaki Tropical Station, Seikai National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, 148-446 Fukai-ota, Ishigaki, Okinawa 907-0451, Japan**Keywords**

Acropora tenuis, gene flow, genetic diversity, microsatellite, population genetics.

**Correspondence**Yuna Zayasu and Chuya Shinzato, Marine Genomics Unit, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, 1919-1 Tancha, Onna-son, Okinawa 904-0405, Japan.  
Tel: +81 98 966 8653;  
Fax: +81 98 966 2890;  
E-mails: yuna.zayasu@oist.jp (Y.Z.) and c.shinzato@oist.jp (C.S.)**Funding Information**

Japan Society for the Promotion of Science (Grant/Award Number: 26290065, 15H04538).

Received: 28 April 2016; Revised: 8 June 2016; Accepted: 10 June 2016

doi: 10.1002/ece3.2296

**Abstract**To establish effective locations and sizes of potential protected areas for reef ecosystems, detailed information about source and sink relationships between populations is critical, especially in archipelagic regions. Therefore, we assessed population structure and genetic diversity of *Acropora tenuis*, one of the dominant stony coral species in the Pacific, using 13 microsatellite markers to investigate 298 colonies from 15 locations across the Nansei Islands in southwestern Japan. Genetic diversity was not significant among sampling locations, even in possibly peripheral locations. In addition, our results showed that there are at least two populations of *A. tenuis* in the study area. The level of genetic differentiation between these populations was relatively low, but significant between many pairs of sampling locations. Directions of gene flow, which were estimated using a coalescence-based approach, suggest that gene flow not only occurs from south to north, but also from north to south in various locations. Consequently, the Yaeyama Islands and the Amami Islands are potential northern and southern sources of corals. On the other hand, the Miyako Islands and west central Okinawa Island are potential sink populations. The Kerama Islands and the vicinity of Taketomi Island are potential contact points of genetic subdivision of coral populations in the Nansei Islands. We found that genetic population structure of *A. tenuis* in the Nansei Islands is more complex than previously thought. These cryptic populations are very important for preserving genetic diversity and should be maintained.**Introduction**

Coral reefs are highly productive ecosystems that provide habitat for a great variety of marine organisms. Humans derive many benefits from them, including fisheries and tourism (Cesar et al. 2003). Despite their importance, coral reefs are threatened globally by climate change and anthropogenic influences. Understanding population structure is essential for effective reef management and restoration of damaged reefs (reviewed in West and Salm 2003). Because successful recruitment is fundamental to the resilience of coral populations (Richmond 1997; Ritson-Williams et al. 2009), knowledge of source and sink dynamics is essential to create effective Marine Protected Areas and to predict large-scale effects of habitat changes,

especially within oceanic archipelagic systems (Nakajima et al. 2010; Polato et al. 2010; Golbuu et al. 2012; Davies et al. 2015; Shinzato et al. 2015). Furthermore, while transplantation of coral fragments has been one of the most frequently recommended approaches to enhance coral abundance on degraded reefs (Omori and Fujiwara 2004; Rinkevich 2008; Young et al. 2012), there have been concerns about adverse effects of transplantation, as there have been in regard to tree transplantation (Keller et al. 2000; Edmands and Timmerman 2003), an analogous situation. These concerns include reduced genetic diversity, breakdown of local genetic structure, and genetic introgression (Omori and Fujiwara 2004; Baums 2008).

The Nansei Islands (Nansei) are a 1200 km chain of approximately 200 islands that exhibit high levels of

© 2016 The Authors. Ecology and Evolution published by John Wiley & Sons Ltd.  
This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1

**図 3.2.2-5 Ecology and Evolution 誌に公表された論文****1) 研究方法**

調査は平成 26 年 5 月から平成 27 年 2 月までの期間に、南西諸島の 27 地点で行った (図 3.2.2-6)。健全な野生サンゴ集団の遺伝的多様性を把握するため、採集地点は目視でサンゴ被度の高いところ、特にミドリイシ類の生息数が多い地点を選定した。各地点でシュノーケル又はスキューバダイビングにて、平均 3 ヘクターほどを泳ぎながらウスエダミドリイシの群体を探し、生息を確認した群体の全てから枝先 (2cm 程度) を採集した。ウスエダミドリイシはゲノム情報が公開されていないので、コビミドリイシのようなゲノムレベルでの解析は出来ない。そこで、2014 年に本事業で開発された、ミドリイシ属に広く使えるマイクロサテライトマーカー (Shinzato et al. 2014、156, 157 項参照) のうち、PCR の増幅が良くなかった一つを除く 13 個のマーカーを使用して解析を行った。

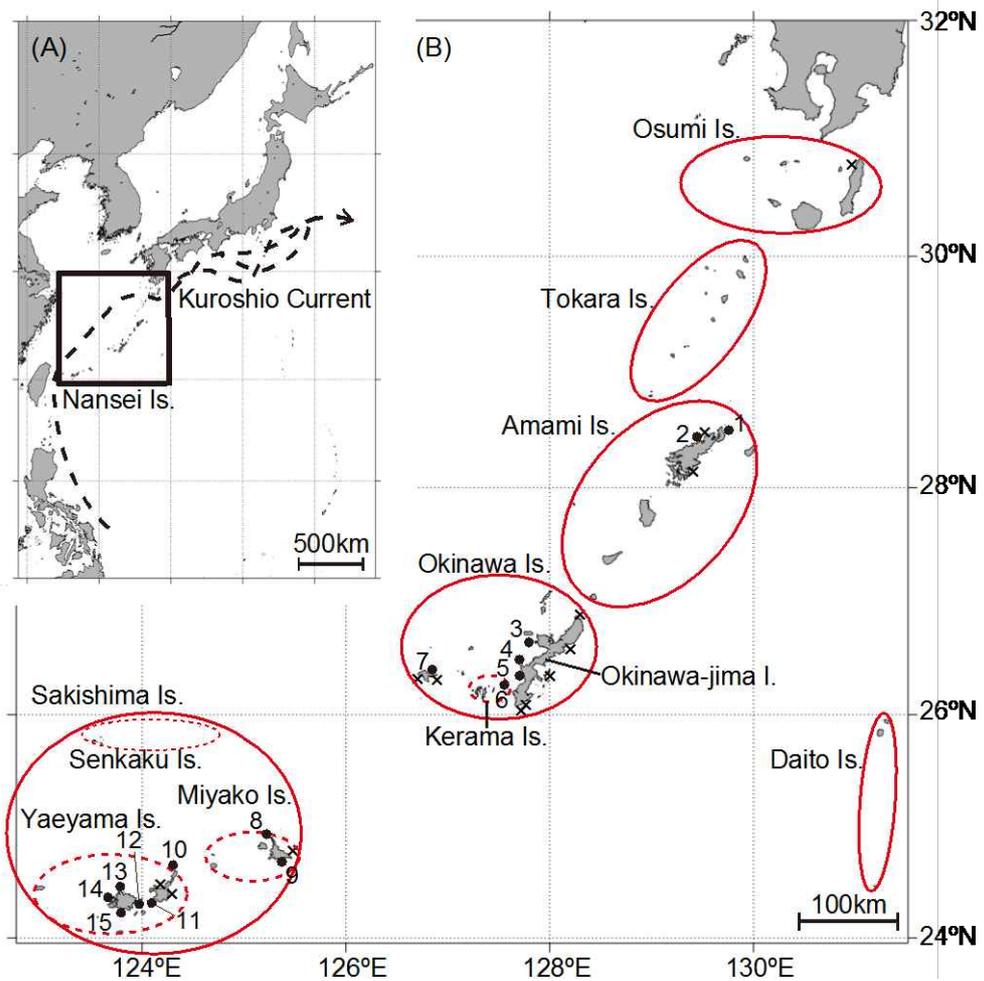


図 3.2.2-6 ウスエダミドリイシ調査地点  
赤丸は南西諸島の群島を示す。

## 2) 結果と考察

### ① 遺伝的多様性とクローンの有無

奄美大島ではウスエダミドリイシの生息が確認され、集団サイズも大きかったが、種子島北では生息が確認できなかった。種子島南、屋久島では海況悪化のため調査できなかったが、過去の文献情報や他の南方系ミドリイシの分布記録と合わせても、ウスエダミドリイシの分布の北限はトカラ列島周辺と予測できる。マイクロサテライトを用いた集団解析にはまとまった群体数が必要であるため、約3ヘクタールの調査地から10群体以上採集できた15地点について(図3.2.2-6)、集団が維持されている地点として調べた。とりわけ沖縄島では、ウスエダミドリイシ集団は島の西側に分布している傾向が顕著に見られた(図3.2.2-6)。

今回調べた 298 群体からは、298 の遺伝子型が検出された。つまり野生集団から採集された群体は全て別々の遺伝子型を有しており、破片化（クローン）により増えたと考えられる群体は一つも存在しなかった。南西諸島においてウスエダミドリイシは自然界では主に有性生殖により繁殖しており、海中で見られる物理的攪乱により折れた破片の大部分は、底質に固着する前に死んでしまうと考えられる。

また調査地点毎の遺伝的多様性の指標であるアレル多様度 (Allelic richness) とヘテロ接合度 (Expected Heterozygosity) の値を比べたところ、調査地点による遺伝的多様性は有意に違わなかった。一般的に、遺伝的多様性の度合いは高緯度で減少する傾向があるが、ウスエダミドリイシの場合はその傾向がみられなかった。

## ② 南西諸島におけるウスエダミドリイシの群集構造

個体の遺伝子型情報に基づくアサインメントテストによる解析は、南西諸島のウスエダミドリイシには少なくとも 2 つ以上の集団が存在することを示した (図 3.2.2-7 A)。この 2 つの集団の境界はどこかで明確に分かれているのではなく、地点毎に由来する集団の割合が異なりグラデーション様の構造を示していた (図 3.2.2-7 B)。

採集地点ごとの組み合わせで有意に分化しているかを検定した結果では (図 3.2.2-7 C)、3 つのグループがみられた。グループ 1 には奄美大島・沖縄島北半分が属し、グループ 2 には沖縄島南半分から八重山の一部が属した。また慶良間チービシでは、グループ 1 とグループ 2 の両方と有意な差がみられなかったことから、慶良間チービシは双方のグループの遺伝的な交差点となっている可能性が考えられる。グループ 3 には、石西礁湖と西表島網取湾の外海から少し閉鎖された地点が含まれた。竹富島はグループ 2 と 3 の遺伝的な交差点となっている可能性が考えられる。宮古島南は、他の地点とグループを形成しなかった。

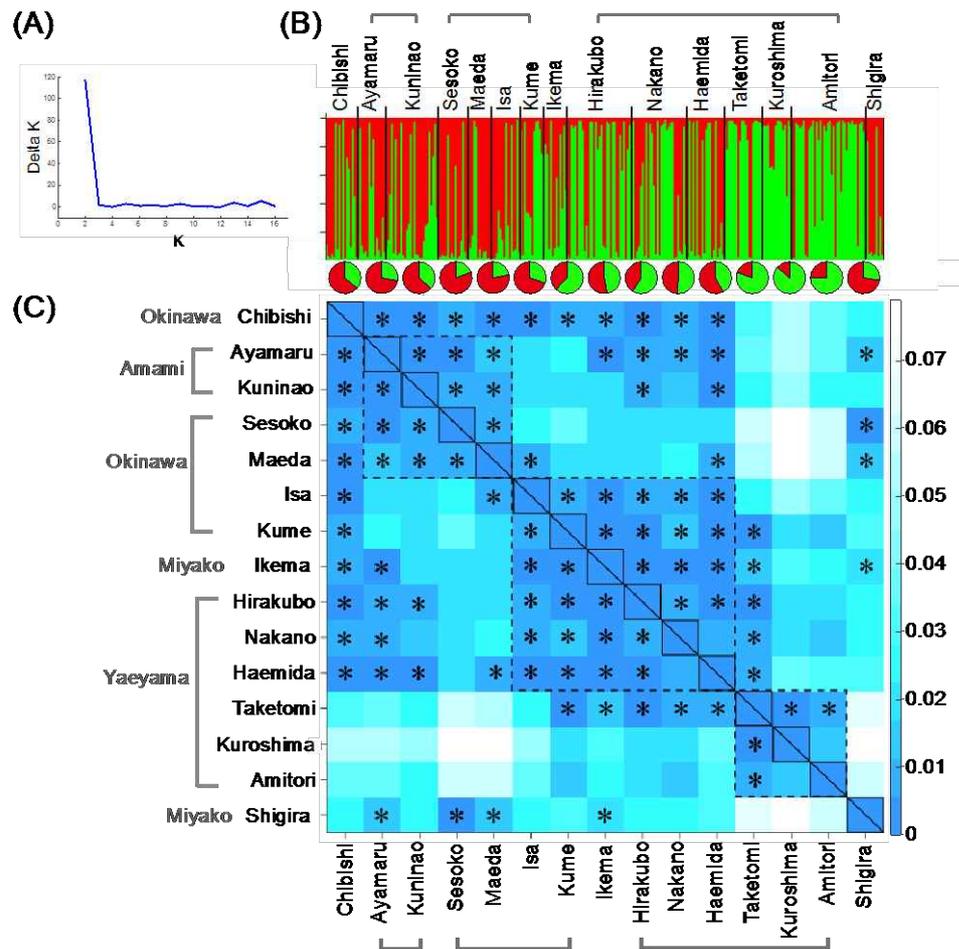


図 3.2.2-7 南西諸島におけるウスエダミドリイシの群集構造

(A) アサインメントテストによる最適クラスター数（集団数）の推定。(B) DNAの先祖集団を調べる STRUCTURE 解析の結果。2つの集団（赤と緑）が存在する場合を仮定し、それぞれどの程度混ざっているか示している。(C) 集団間の遺伝的距離 ( $F_{ST}$ ) を元にした分集団間の分化の度合い。アスタリスクは有意差なし、つまり同一集団と考えられる採集地点の組み合わせを示す。

### ③ 南西諸島におけるウスエダミドリイシの幼生加入方向

一般的に南西諸島では、黒潮海流の影響を受けてサンゴの幼生は南から北へ加入していると考えられてきた。マイクロサテライトマーカーの結果から幼生加入の方向を予測したところ、ウスエダミドリイシの場合は八重山から北方向への加入の他に、奄美大島から沖縄島西海岸へ南向きに加入している可能性が示唆された（図 3.2.2-8）。

日本海洋データセンターの海流データをもとに、南西諸島のウスエダミドリ

イシ産卵期（4月下旬から6月上旬）の中期にあたる5月の、水深40m以浅の海流を地図上にプロットしたところ、奄美大島から沖縄島北部の西海岸周辺に南向きの海流が確認された。この海流については、過去に2つの文献が触れており（Konaga et al. 1980、Veron and Minchin 1992）、黒潮がトカラ海峡を通る時に生じる反流であるとされる。奄美大島から沖縄島北部の西海岸への幼生供給は、この海流と関連があると考えられる。

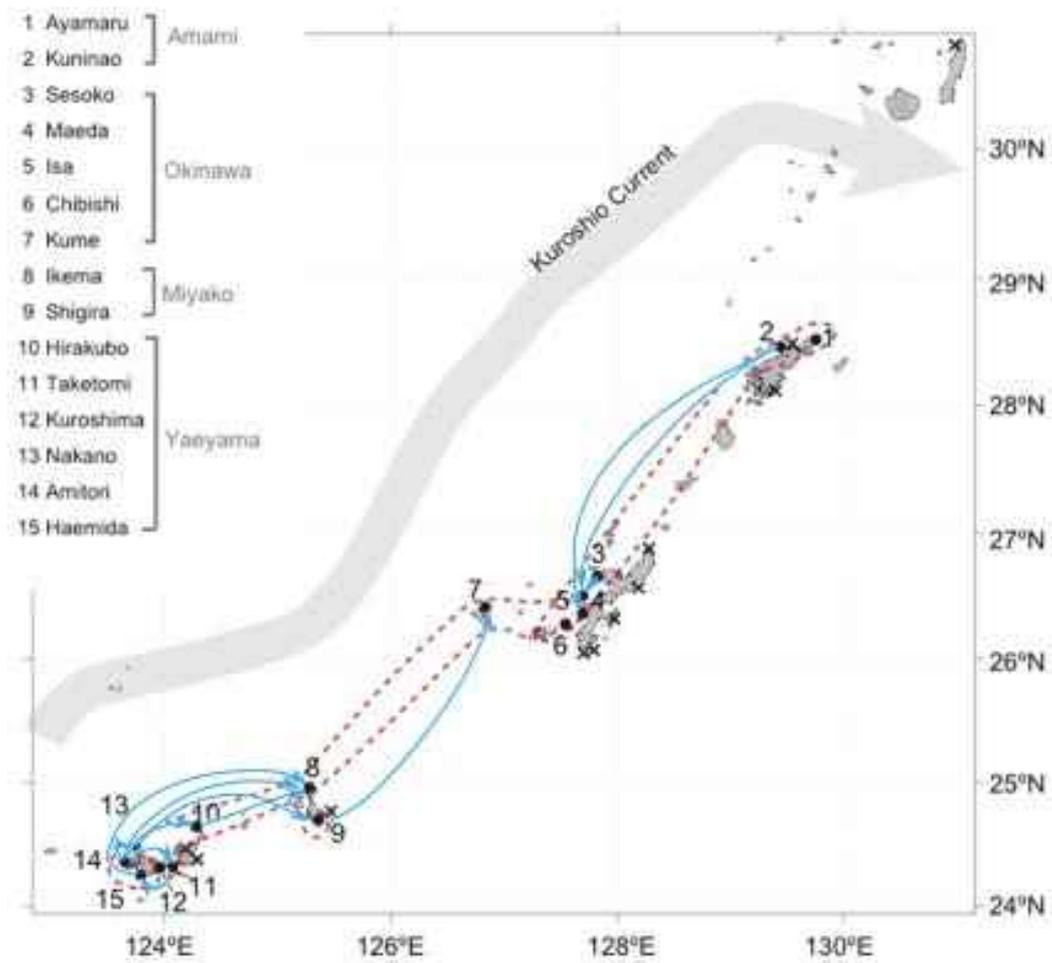


図 3.2.2-8 遺伝子流動の比率をもとにした幼生加入方向の予測

赤い点線：図 3.2.2-7 で予測された、ウスエダミドリイシの遺伝的集団、青い矢印：マイクロサテライト解析で示唆された幼生の加入方向。

### 3.2.3 養殖・植付けに使用されるサンゴの遺伝的多様性の確保

サンゴの養殖や移植のための種苗を作る方法の一つとして、サンゴを枝分けしてクローンを作る無性生殖法が用いられている。しかしサンゴ、とくにミドリイシ類は自家受精がほとんど無く、植付けたサンゴがクローン同士の場合、それらの配偶子が受精して次世代を残すことはできない。さらに環境変化などにより、植付けたクローンが同じように打撃を受ける恐れがある。できるだけ自然に近いサンゴ礁の再生を実現するためには、環境の変化に柔軟に対応でき、次世代を産み出すことができる「遺伝的多様性」の確保が重要となる。そこで実際に事業で用いられるサンゴ株を用いて、遺伝的多様性を確保するための技術開発と調査研究を行った。

#### (1) 植付け主要種であるミドリイシ属の多様な種に使用可能な DNA 鑑定技術の開発

本事業で扱うサンゴの種数・群体数は膨大であり、より簡単で低コストにサンゴの遺伝的多様性を評価する手法が求められる。同種のサンゴの個体識別は、見た目ではほとんど不可能である。さらに天然のサンゴ礁に近づけるためには、多種多様な種を植付けなければならない。そこで我々は、1) 同じサンゴ種内の個々の個体を区別し、産卵・受精して次世代を残せるサンゴ株を選別する技術の開発、2) テーブル型や枝状など、様々なサンゴ種に幅広く使用可能、の両方の課題をクリアする DNA 鑑定技術の開発を行った。この成果は、*Frontiers in Marine Science* というオンラインジャーナルに 2014 年 5 月 23 日付で公開された (図 3.2.3-1)。

Shinzato C, Yasuoka Y, Mungpakdee S, Arakaki N, Fujie M, Nakajima Y, Satoh N. Development of novel, cross-species microsatellite markers for *Acropora* corals using next-generation sequencing technology. (2014). *Frontiers in Marine Science* 1:11.



図 3.2.3-1 オープンアクセスジャーナル、*Frontiers in Marine Science* 誌に公表された論文

## 1) 研究方法

我々は「マイクロサテライト」とよばれる DNA 領域に注目した。マイクロサテライトとはゲノム上に散在する単純なリピート配列 (例: ACACACACACACACACACA) であり、同じ種でも個体によってリピートの回数に著しい差が生じやすい。両親から子供に DNA は受け継がれ、マイクロサテライトのリピートの回数も受け継がれるので、父型・母型由来の両方のパターン (リピート回数) が一つの個体には存在する。マイクロサテライトは DNA 鑑定 (親子判定) や科学捜査などの個体識別にも応用されており、集団遺伝学分野の研究にも広く用いられている。

我々は本事業での移植主要種であるミドリイシ属サンゴを対象に、技術の開発を行った。ミドリイシ属の中で最も遠縁のグループに属する二種のサンゴ (コユビミドリイシとウスエダミドリイシ) に注目した。ミドリイシ属の中で最も遠縁

のグループ、クレード I と IV にそれぞれ属するこの二種のサンゴは、ゲノム DNA もミドリイシ属サンゴの中では最もかけ離れている (図 3.2.3-2)。その両者のゲノム DNA を比較して、完全に保存されている領域がマイクロサテライト (同じ種でも DNA の変異が激しい) を挟んでいるゲノム上の領域を特定する。両者で保存されている DNA 配列は、この両者に挟まれる全てのミドリイシ種で保存されることが期待される。コユビミドリイシは全ゲノム情報が存在するので (Shinzato et al. 2011)、ウスエダミドリイシの DNA を次世代シーケンサー (MiSeq) で解読し、コユビミドリイシの DNA と比較することで、保存されている領域を特定した。

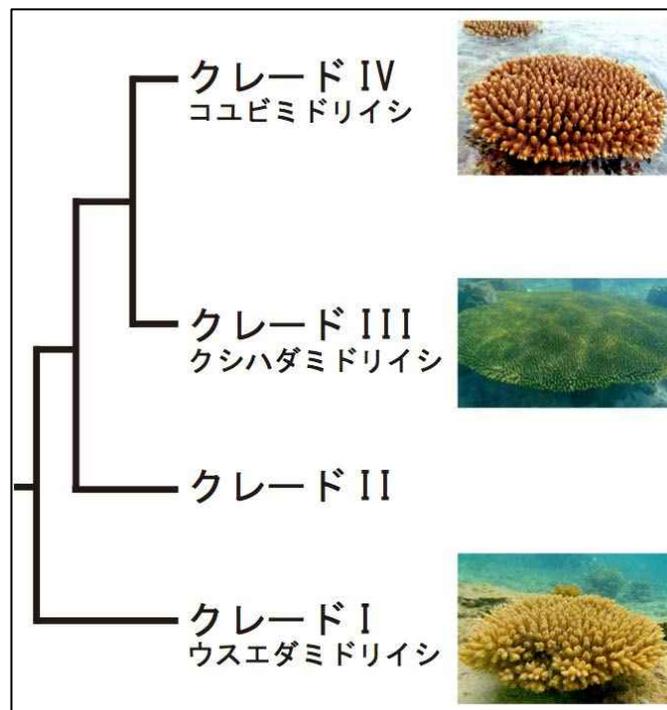


図 3.2.3-2 遺伝子データにより示されたミドリイシ属サンゴの系統関係  
マイクロサテライトマーカーの開発に使用したサンゴ種名を記入している。主要な一斉産卵式のミドリイシはクレード III に含まれる。

## 2) 結果と考察

コユビミドリイシとウスエダミドリイシの両方のゲノム DNA を比較することで、ミドリイシ属サンゴに広く使用することができる可能性のある 14 個のマイクロサテライトマーカーの開発に成功した。このマーカーを使用すると、上で報告したように (項目 (2) の 2) 自然集団のウスエダミドリイシ 298 群体を全て別々であると認識することができた。

ミドリイシ属サンゴはインド洋から太平洋にかけて最も一般的な造礁サンゴ

であり、現在までに約 113 種報告されている。系統的に離れた両種でも使用可能なマイクロサテライトマーカーは、その間に含まれるほぼ全てのミドリイシ属サンゴにも「理論上」利用できるはずである。その汎用性を検証するため、開発した 14 個のマイクロサテライトマーカーが実際に様々なミドリイシに使えるかどうか、実験的に試してみた。これまでに入手できた 26 種のミドリイシ属サンゴ（ハイスギミドリイシ(*A. acuminata*)、ヤッコミドリイシ(*A. divaricate*)、トゲツツミドリイシ(*A. echinata*)、サボテンミドリイシ(*A. florida*)、オヤユビミドリイシ(*A. gemmifera*)、クロマツミドリイシ(*A. grandis*)、ツツユビミドリイシ(*A. humilis*)、クシハダミドリイシ(*A. hyacinthus*)、キクハナガサミドリイシ(*A. latistella*)、オオツツミドリイシ(*A. longicyathus*)、*A. microclados*、コエダミドリイシ(*A. microphthalma*)、スギノキミドリイシ(*A. muricata*)、スゲミドリイシ(*A. nana*)、ハナガサミドリイシ(*A. nasuta*)、ヤスリミドリイシ(*A. robusta*)、ハリエダミドリイシ類似種(*A. aff. aculeus*)、*A. aff. vaughani*、セキセイミドリイシ類似種(*A. aff. sekiseiensis*)、ヤセミドリイシ類似種(*A. aff. horrida*)、*A. elegans*、タチハナガサミドリイシ(*A. selago*)、ホソツツミドリイシ(*A. subglabra*)、コユビミドリイシ(*A. digitifera*)、ウスエダミドリイシ(*A. tenuis*)、ヒメマツミドリイシ(*A. aspera*) )の DNA を用いた。その結果、14 個全てのマイクロサテライトマーカーで、試した全てのミドリイシ種の DNA において PCR での増幅を確認した。さらに複数個体用いた種ではマーカーの多形が確認され、個体識別が可能であった。

特筆すべき点は、2 個体しか用いていない種（ヤッコミドリイシ、スゲミドリイシ、*A. elegans*、ホソツツミドリイシ）でも個体の識別が可能だったことである。このように、開発した 14 個のマーカーは当初の予想通り、幅広いミドリイシ属サンゴに使用できることが証明できた。これまでに試したミドリイシ種には 100%使用できたので、今回調べていない他の様々なミドリイシ種へも使用できる可能性は非常に高い。ミドリイシ属サンゴは世界中に広く分布しているので、沖縄県だけにとどまらず世界のサンゴ礁の保全再生にも貢献することが、今後期待される。

## (2) 養殖サンゴの大規模一斉産卵の報告

2015 年に前兼久サンゴ養殖場で観察したウスエダミドリイシ親株の放卵放精について、国際サンゴ礁学会が母体となっているサンゴ礁分野の学術誌、Coral Reefs にて 2016 年 6 月 12 日付にオンラインで、2016 年 11 月 17 日に紙媒体で発

表した (図 3.2.3-3)。

Zayasu Y, Shinzato C. Hope for coral reef rehabilitation: massive synchronous spawning by outplanted corals in Okinawa, Japan. (2016). *Coral Reefs*. doi:10.1007/s00338-016-1463-7.

養殖場のサンゴの産卵によっても、環境条件がよければ幼生が流れ着いた先で群體数が増えることが期待される。もし養殖場由来の幼生が周辺の自然基質に着底して育つことができることが確認され、サンゴ群集を増殖させる場所を指定しない(海流任せにする)場合には、養殖場のサンゴを産卵可能な状態に維持することだけに注力すればよく、手間もコストも軽減される。さらにそこから有性生殖で生まれる次世代のサンゴ群集の遺伝的多様性は、野生のそれに匹敵するはずである。他海域では親株の産卵によるエネルギー消費を防ぐため、小さく株分けし続ける手法も推奨されている(Bowden-Kerby 2014)が、ウスエダミドリイシの場合は産卵可能サイズまで成長させて産卵させる方が、サンゴ群集全体の増殖効率という観点からは効率が良い可能性がある。

この論文の公表とともに、研究者からは養殖場の規模と風景への驚き、実際に手入れをしている地元漁業者の方々の努力と手間に対する称賛の声が上がった。世界的にはまだ知名度の低かった沖縄県での事例を紹介する良い機会になった。

## Hope for coral reef rehabilitation: massive synchronous spawning by outplanted corals in Okinawa, Japan



Fig. 1 Outplanted coral colonies in Maegasaki, Okinawa, Japan. a Daytime view. b Synchronous spawning of outplanted *Acropora sasakii*.

Since 1998, the Oma Village Fisheries Cooperative, Okinawa, Japan, has outplanted more than 40 scleractinian coral species, under permission by Okinawa Prefecture. The Coop has established unique and successful rearing method for outplants (Higa and Omori 2014) (Fig. 1a). Seeding outplants at the periphery of existing colonies has been suggested as a means of enhancing larval settlement to increase coral abundance, density, and cover during reef rehabilitation. During sexual reproduction, synchronous spawning maximizes fertilization rate by generating high gamete concentrations (Oliver and Babcock 1992).

Here, we report large-scale synchronous spawning of approximately 2800 colonies of outplanted *Acropora sasakii* (Dana, 1846) in Maegasaki, Oma, Okinawa. On 26 June 2015, 25 nights after the full moon, almost all outplanted colonies released gametes synchronously for approximately 5 min starting at 19:47 hrs, 21 min after sunset (Fig. 1b). Average water temperature from the surface to 4 m depth was 29.4 °C.

There have been concerns about reduction in genetic diversity in reef rehabilitation using asexual propagation methods; however, sexual reproduction by synchronized spawning of outplanted colonies should ensure levels of genetic variation equal to those of natural spawning. Along with increasing larval supply, habitat restoration is crucial for maintaining healthy coral reefs, and under unfavorable environmental conditions, coral larval supply cannot be enhanced efficiently by transplantation and outplanting (Ferre et al. 2013). Continuous observation of recruitment, post-settlement survivorship, and growth in recipient habitats will be needed to determine the effects of spawning events such as that reported here.

**Acknowledgments** The authors thank members of Oma Village Fisheries Cooperative, especially Mr. Masami Yamashiro, Mr. Muneo Moku, and Mr. Yoshimi Higa, and members of Okinawa Prefectural Institute of Health and Environment, especially Mr. Tomofumi Nagas, for field observations. We also thank Dr. Steven D. Aird (OIST) for editing the manuscript.

**Open Access** This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

### References

- Ferre SCA, Nugues MM, Romatrski SBC, Kintmann A (2013) Examining the use of mass transplantation of brooding and spawning corals to support natural coral recruitment in Sulawesi/Indonesia. *Restoration Ecology* 21:743–754
- Higa Y, Omori M (2014) Production of coral colonies for outplanting using a unique rearing method of donor colonies at Oma Village, Okinawa, Japan. *Galaxea* 16:19–20
- Oliver J, Babcock R (1992) Aspects of the fertilization ecology of broadcast spawning corals: sperm dilution effects and in situ measurements of fertilization. *Biol Bull* 183:409–417

Y. Zayasu (✉) · C. Shinzato  
Marine Genomics Unit, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, 1919-1 Tancha, Oma-son, Okinawa 904-0495, Japan  
e-mail: yuzayasu.san@gmail.com

Received: 25 March 2016 / Accepted: 4 May 2016

© The Author(s). This article is published with open access at Springerlink.com 2016

Coral Reefs (2016)

DOI 10.1007/s00338-016-1463-7

Published online: 01 June 2016

 Springer

### 図 3. 2. 3-3 Coral Reefs 誌に公表された論文

以下は本論文の内容を恩納村漁協へ共有させて頂いた本文の和訳である。

「恩納村漁協では 1998 年から 40 種以上のサンゴを、沖縄県採捕許可のもと、ひび立て式というオリジナルの方法 (Higa and Omori 2014 を引用) で養殖している。養殖サンゴによる産卵及び幼生供給が、サンゴ被度や密度の増加に寄与している。有性生殖においては、産卵が同調して起こることで配偶子の密度が高まり、受精率が上がることが知られている (Oliver and Babcock 1992)。

前兼久の養殖場には約 2,800 本ものウスエダミドリイシがあり、同調して産卵する様子が観察できた。満月から 25 日目、2015 年 6 月 26 日の日の入りから 21 分後の 19:47 から約 5 分間、多くの養殖ウスエダミドリイシが一斉にバンドルを放出する様子が観察できた。養殖ウスエダミドリイシが植えられている、表層か

ら海底 4m までの平均水温は 29.4 度であった。

無性生殖によるサンゴ礁再生の取組では、遺伝的多様性の低下が危惧されている。しかし養殖親株においても、同調産卵による有性生殖は、自然の産卵と同様の遺伝的多様性が保たれているはずである。サンゴの生息に適さない環境に移植をしても効率が悪いので、幼生供給を増やすと同時に、生殖環境の維持が不可欠である (Ferse et al. 2013)。このような産卵イベントの効果を評価するために、加入量や定着後の生残率や成長量などの調査が、引き続き必要である。

謝辞 観察において恩納村漁協の皆様にご多大のお世話になりました。特に山城正巳氏、銘苺宗和氏、比嘉義視氏、沖縄環境科学センター長田智史氏にお礼申し上げます。」

### (3) 無性生殖に使用される親株の遺伝的多様性の確認

(注) 以下の内容は学術論文として科学誌に投稿準備中である。

恩納村のサンゴ養殖場では 1998 年の世界規模で起きた大白化以降、生き残った株を保護し、保全再生活動を行っている。大きく育った群体を株分けする無性生殖法では、増殖時期や種のコントロールが可能であり、初期減耗が比較的少ないメリットがあるが、特定のクローンが増えすぎることによる集団内の遺伝的多様性の低下が危惧されてきた。そこで我々は恩納村の 2 つのサンゴ養殖場（恩納村前兼久・恩納）の遺伝的多様性指数、及びクローンである群体の割合を、南西諸島の野生のサンゴ集団と比較した。これらの養殖場の群体は本事業で海底に植付けられる苗の親株であるため、遺伝的多様性が確保されているかどうかの確認は重要である。両方の養殖場で最も保有群体数の多い種であるウスエダミドリイシを用いて解析を行った。前述の南西諸島における野生のウスエダミドリイシ（計 298 群体）と比較し、遺伝的多様性の評価を行った。

#### 1) 研究方法

恩納村の前兼久サンゴ養殖場と恩納サンゴ養殖場でスキューバダイビングを用いて潜水し、杭の上に養生されているウスエダミドリイシ群体から枝先を 2cm ほど採集した。採集する際、全ての杭に番号が印字されたプラスチックタグを結束バンドでつけ、採捕群体を後で追跡できるようにした。前兼久サンゴ養殖場から 112 群体、恩納サンゴ養殖場から 20 群体の計 132 群体について、前述の野生の群体の解析同様に、マイクロサテライトマーカーを用いて遺伝的多様性指数、クローンである群体の割合を評価した。

## 2) 結果と考察

### ① クローンの有無

前兼久サンゴ養殖場で調べた群体数は 112 であるが、検出された遺伝子型数は 59 個であった。恩納サンゴ養殖場で調べた群体数は 20 であるが、検出された遺伝子型数は 12 であった (表 3.2.3-1)。

前兼久サンゴ養殖場で保有する遺伝子型の内訳を見てみると、特定の遺伝子型の株が増えていることがわかった (表 3.2.3-1)。長年の管理の過程で成長が早い株、育てやすい株、強い株などが特に増やされたと考えられる。このような遺伝的多様性の偏りを防ぐためには、タグ付けによる管理や、株分けしたものをどこへ配置したかなどトレースすることが有効である。

表 3.2.3-1 前兼久サンゴ養殖場で保有する遺伝子型の内訳

クローンでは なかった株数 46	前兼久クローンの内訳						
	株番号 群体数	I 2	II 3	III 2	IV 2	V 36	VI 2
	VII 2	VIII 2	IX 4	X 2	XI 2	XII 5	XIII 2

### ② 集団構造 (集団の質の評価)

野生では南西諸島全体に同所的な 2 つの集団が検出され、その複雑な集団構造から、地域的分化の範囲をまたぐほどの地域間で人為的なサンゴ群体の移出、移入をすることは望ましくないことが明らかになった。養殖場のある恩納村の位置する沖縄島は赤色で色分けされた集団が優占している。養殖場でも赤色の集団が優占しており、養殖場は自然状況と同じ傾向を維持していると言える (図 3.2.3-4)。

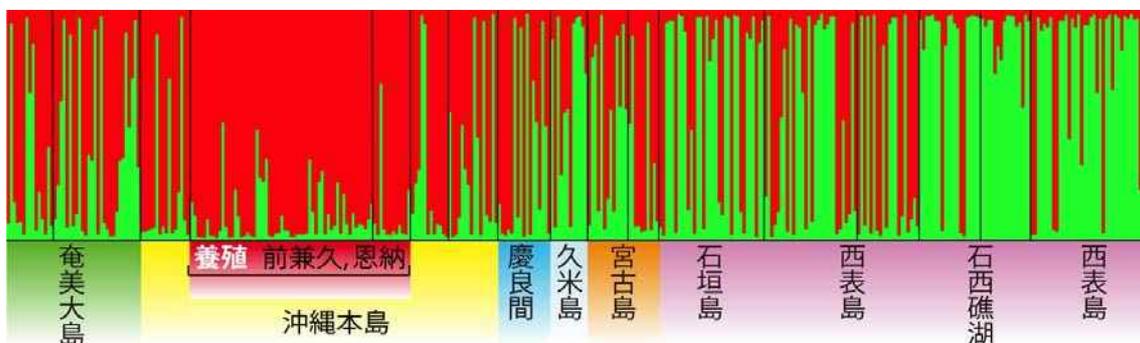


図 3.2.3-4 養殖場を含めた STRUCTURE 解析結果と養殖場の地図。

2 つの集団 (赤と緑) が存在する場合を仮定し、それぞれどの程度 DNA の先祖集

団が混ざっているか示している。

### ③ 遺伝的多様性の比較

調査地点毎の遺伝的多様性の指標、アレル多様度 (Allelic richness) とヘテロ接合度 (Expected Heterozygosity) の値を比べたところ (図 3.2.3-5)、調査地点による遺伝的多様性は有意に変わらず (Kruskal-Wallis test  $P < 0.05$ )、現時点で前兼久と恩納サンゴ養殖場での遺伝的多様性の低下は確認されなかった。

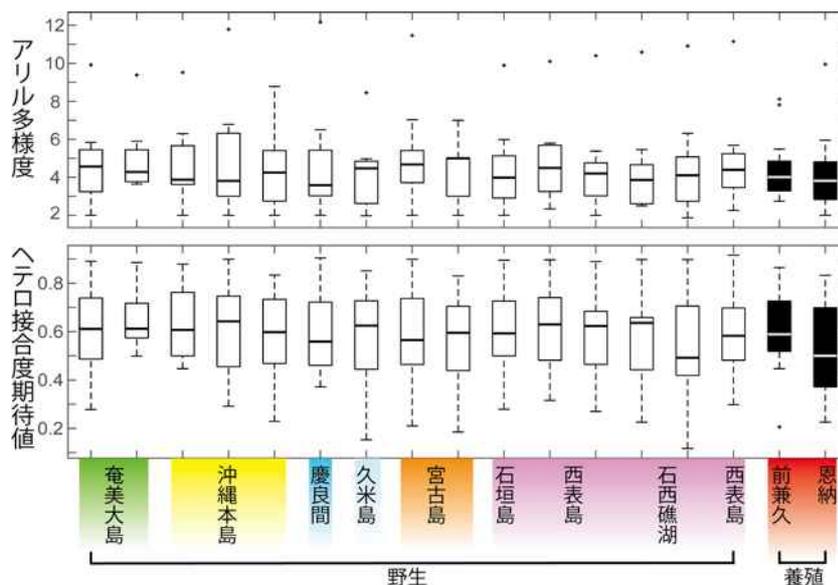


図 3.2.3-5 各採集地点の遺伝的多様性

上：アレル多様度 (Allelic richness)。遺伝子座あたりのアレル数の平均値を示す。下：ヘテロ接合度 (Expected Heterozygosity) の期待値。

#### 3.2.4 まとめ

これまでの我々の調査研究から、沖縄県における人為的な手法を用いたサンゴ礁の保全再生のために考慮すべき点を以下にまとめる。

##### (1) 沖縄県のサンゴ礁の集団構造について

ゲノム情報を用いたコユビミドリイシの集団解析により、この種は南西諸島全域で単一の集団ではなく、地域ごと・島ごとに DNA レベルでの違いが存在することが分かった。そのため、沖縄周辺でのサンゴ礁保護には特定の地域だけを守るのではなく、地域単位でサンゴ礁の保護に取り組む必要があると考えられる。

さらに移植有力種であるウスエダミドリイシについてもグラデーション様の集団構造が確認され、サンゴの幼生供給は単に北向きの一方方向ではないことが示唆された。今回はミドリイシ属の 2 種しか解析していないが、野生での増殖戦略

はサンゴ種によって異なり、沖縄県を含む南西諸島のサンゴの群集構造は一般的に考えられていたより複雑である可能性がある。自然の群集構造の破壊や遺伝子移入を避けるためには、できるだけ植付けを行う場所から近いところで種苗を採取し、地域をまたぐ移植を避けるように配慮する必要があると考えられる。

## (2) 人為的なサンゴの増殖（植付け）の種苗について

これまでに調べた養殖場のサンゴの遺伝的多様性は、質・量ともに今のところ問題は見られなかった。植付けに使用する他の種の状況についても解析することが求められる。

- ウスエダミドリイシについては、野生ではクローンで増えたと考えられる群体は見つかっていないことから、本解析では、自然界でのサンゴの増殖には有性生殖の役割が多い可能性がある。そのため、基本的に有性生殖で増殖させることが望ましい。
- 無性生殖法を用いる場合には、親株（ドナー）の遺伝子型を判定し、タグ管理により将来的に配偶子が受精できるように、異なる遺伝子型を持った株を組合せて植付けることが望ましい。

### 3.3 サンゴ群体間距離と受精率に関する研究

#### (1) 概要

1998年の世界的な海水温の上昇による白化現象以降、沖縄県ではサンゴの減少が顕在化し、この30数年、保全と修復のための様々な取り組みがなされている。しかし、残念ながら、その取り組みは十分に成功しているとは言えない。しかも、これまでの調査研究の中で、沖縄県のサンゴ礁生態系の回復力が低下していることを見出してきた。その原因の一つとしてサンゴ群体数の減少による産卵量の減少と受精率の低下、そしてそれに伴う幼生数の減少（つまり次世代サンゴの供給量の低下）が考えられている。

本研究の目的は受精に有効な群体間の距離を推定して再生産（繁殖）に適したサンゴ群集の群体密度を明らかにすることである。サンゴの多くは自家受精しないため、同種の異なる遺伝子をもつ群体由来の卵と精子がなければ受精は生じない。また、ウニやアワビなどの多くの底生生物と同様にサンゴの受精の成功には精子濃度が大きく影響しており、低すぎる精子濃度のもとでは、高い受精率は期待できない（Oliver and Babcock 1992、Omori et al. 2001）。したがって、サンゴの植付け・移植など（以下では植込みとする）をおこなうとき、子孫の生産、すなわち受精の成功率を高めるためには群体間の距離は短いほうがよい。しかしその一方で、限られた植付け株数で、より広範囲なサンゴ群集の再生を狙うならば、群体間の距離を開けて群体密度はなるべく低くしたい。この相反する2つの要求を満たすためには、ある程度高い受精率を生じる中で最大の群体間距離で植込みを行うべきである。なお、Iwao et al. (2014)は安定して遺伝子の多様性を高く保つためには、少なくとも3群体、できれば6群体以上の配偶子が海中で出会い、混じることが望ましいとしている。距離と同時に適当な分布密度を求めることが実際の目標である。

そこで、本研究の2年間で、阿嘉島沿岸をモデル海域として数mスケールの流れを精密に調べ、得られた流れを移流拡散モデルに取り込んで、複数の群体分布パターンのもとでの配偶子の濃度分布と時間変化を再現した。これらの一連の調査・解析をとおして最適な分布パターン（すなわち、植付けパターン）を探索する方法を開発し、さらに、現場で浮遊物の移流拡散に関わる風、地形、及び密度構造の効果についても現場データの解析結果や数値モデルを用いて考察した。

沖縄県サンゴ礁保全再生事業では、中間育成施設で育てたサンゴ種苗10万本を、かつてサンゴが繁茂していた3ヘクタールの岩礁に植込み、それらが毎年産卵することによって周辺に幼生を供給し、さらに広い範囲のサンゴ礁の再生を促進しようとする大規模な試みである。また、同事業の研究調査のひとつ、遺伝子解析で、植付けサンゴ種苗にクローンの混入を避けることができるようになった。こうした成果を有効に活用し、クローンではない、異なった遺伝子をもつ種苗6群

体以上を一組に、それらの受精率が 80%以上になるように配置することがさんご礁の再生促進には不可欠であり、本研究の成果は、適切な植え込み方法の確立への大きな前進になる。また、子孫の生産に適切な群体間距離（群体密度）の解明によって、沖縄県のサンゴ群集の回復力の劣化の原因の一つが明かされ、植え込みによる再生修復のための対策を計ることができるであろう。

## (2) 目的

本研究の結果から、サンゴ群集から放出された配偶子が高い割合で受精することができる適正な距離に複数のサンゴを植込む間隔を提示することができる。また、配偶子の分散に関わる物理要素を明らかにすることにより、植付け適地選定をおこなう際に調べるべき調査項目や方法の指針を示すとともに、物理環境の異なるそれぞれの場所での植付けの際の適正なサンゴ群体間距離の変動の目安を提案することができる。

## (3) 前年度（平成 27 年度）の成果

前年度、(1) 環境要素及び地形を実測し、詳細な流れの分布とその時間変化を調べ、拡散係数などの配偶子の拡散に関わる要素の解析をおこなった。また、(2) それらの数値を活用して、水平二次元拡散モデルを作成し、複数のサンゴ群体が分布する中での、精子の拡散による濃度分布の時間的変化を推測して、受精可能領域の変化を考察した。

### 1) 野外における流れの調査と拡散係数の分析

阿嘉島マジノハマで、2015 年 9 月に漂流板追跡調査及び染料散布実験を行い、並行して風向風速と流向流速を観測した。その調査結果と 2010 年 9 月に実施した予備調査の結果から、調査海域での流速分布を解析するとともに拡散係数を計算した。流速分布は、2010 年の調査によって得られた漂流板の軌跡を解析して、調査範囲に想定した格子点において流速の北向き成分と東向き成分の値を二次元内挿によってそれぞれ求め、収束・発散の分布図を得た。拡散係数は、(a) 2010 年調査での漂流板の位置の変化から Spydell et al. (2009)にしたがって、(b) 2015 年調査での漂流板の位置の分散の時間変化から Johnson and Pttiaratchi (2004)に基づいて、(c) 2015 年調査での染料拡散実験の結果から 柳・樋口(1982)に基づいて見積もるという 3 つの手法を用い、 $10^{-3} \sim 10^{-1}$  のオーダーであると推定された。

### 2) 水平二次元モデルによる精子の拡散のシミュレーション

拡散実験から見積もられた拡散係数は  $10^{-3} \sim 10^{-1}$  のオーダーであったため、こ

の範囲のうち、 $0.01 \text{ m}^2 / \text{s}$  及び  $0.1 \text{ m}^2 / \text{s}$  を用いて数値シミュレーションをおこなった。その結果、拡散係数  $0.01 \text{ m}^2 / \text{s}$  では、9 群体の集団（1 群体から放出される卵に周りの 8 群体からの精子が受精にかかわる）を仮想すると、群体間隔 3 m で精子放出開始後 30 分以内に受精可能領域（ $10^5 / \text{ml}$  以上）が形成されたものの、その範囲は各群体の周囲数 10 cm 以内にとどまり、精子の放出が終わった 30 分後にはその範囲が消失した（図 3.3.1-1）。群体間隔が 2 m の場合では放出 20~30 分後に受精可能領域が形成されたが、放出停止後受精可能領域は消失した（図 3.3.1-2）。したがって、卵は水面近くに長時間浮遊すると想定して、拡散係数  $0.01 \text{ m}^2 / \text{s}$  では少なくとも群体間隔が 2 m 以内であれば正方形内部に存在する卵と受精が可能であることが明らかになった。なお、拡散係数  $0.1 \text{ m}^2 / \text{s}$  では 1 m 及び 0.5 m でも 30 分後の  $6.7 \times 10^4$  個 / ml を最大としその後減少しており、受精可能領域は形成されず、受精は生じない結果となった（図 3.3.1-3、図 3.3.1-4）。精子の鉛直方向への拡散については、0~10 cm 層での滞留時間が 0.5~1.0 時間と見積もられているので（河野ほか、私信）、受精可能領域の形成に大きくは影響しないものと考えられる。

Diffusion0501  
 Distance between sources=3m  
 $Kh=0.01(m^2 s^{-1})$

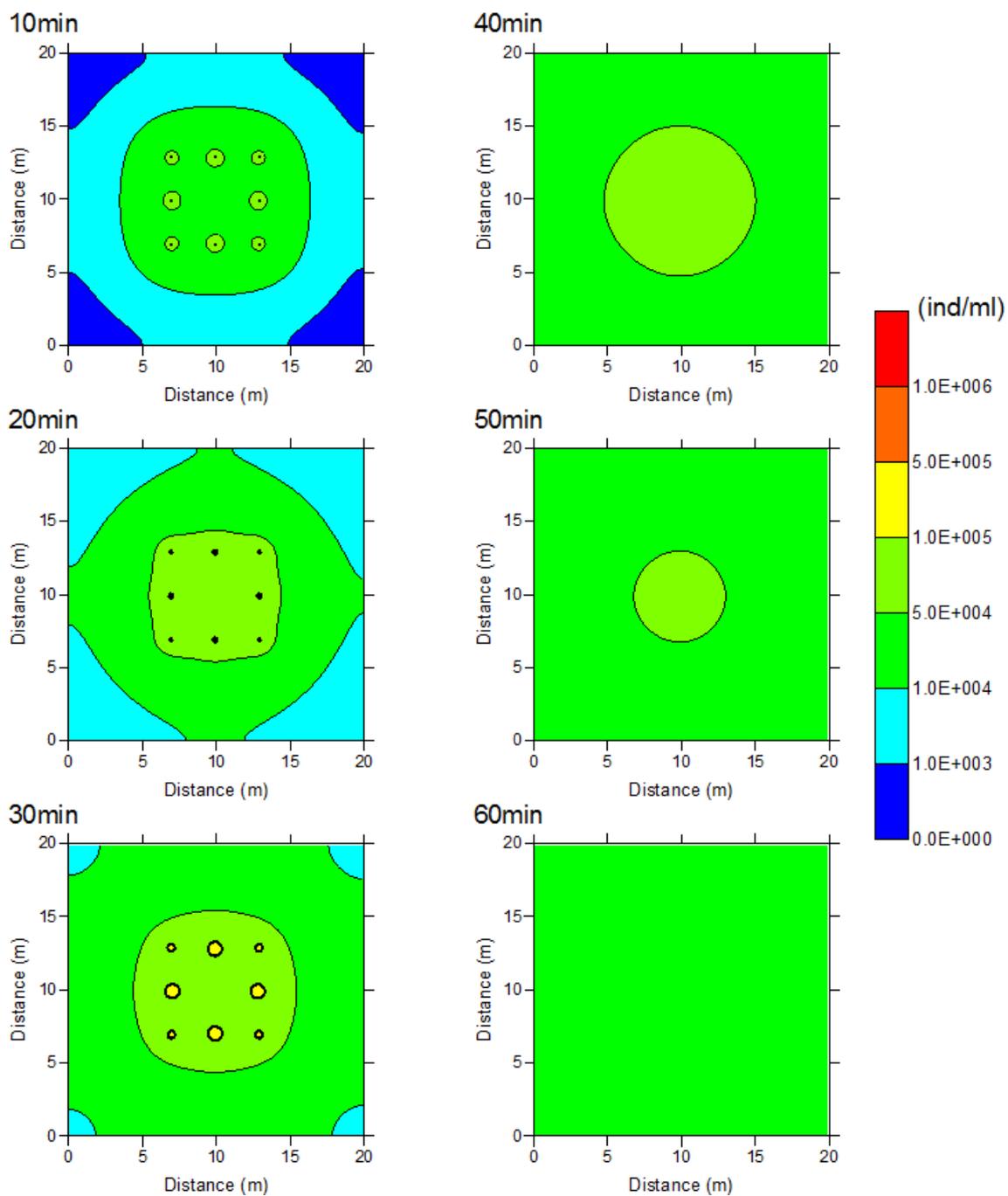


図 3.3.1-1 群体間隔 3m、拡散係数  $0.01m^2/s$  の拡散モデルによる精子の濃度変化

Diffusion0481  
 Distance between sources=2m  
 $Kh=0.01(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$

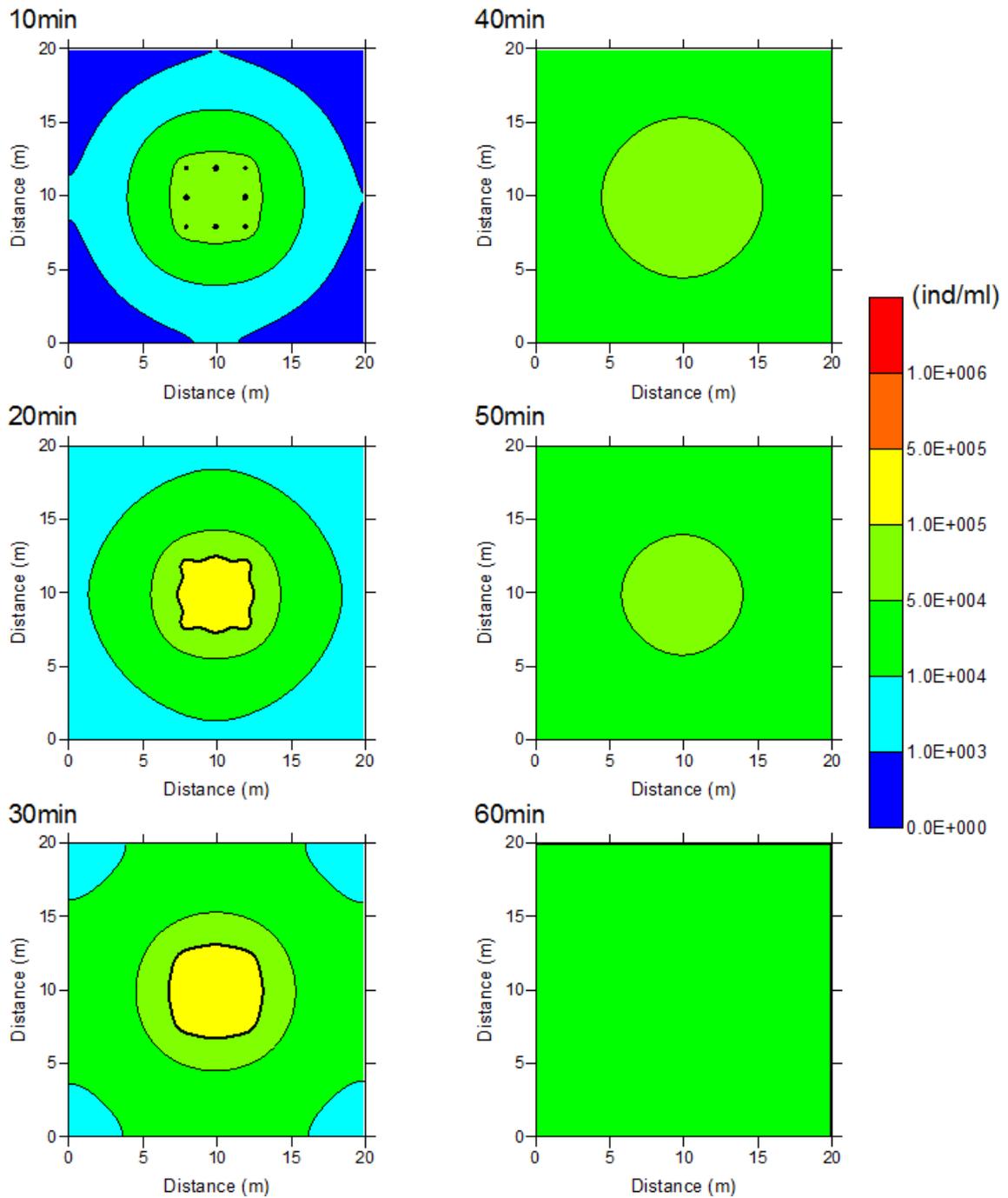


図 3.3.1-2 群体間隔 2m、拡散係数  $0.01\text{m}^2/\text{s}$  の拡散モデルによる精子の濃度変化

Diffusion0521  
 Distance between sources=1m  
 $Kh=0.1(m^2 s^{-1})$

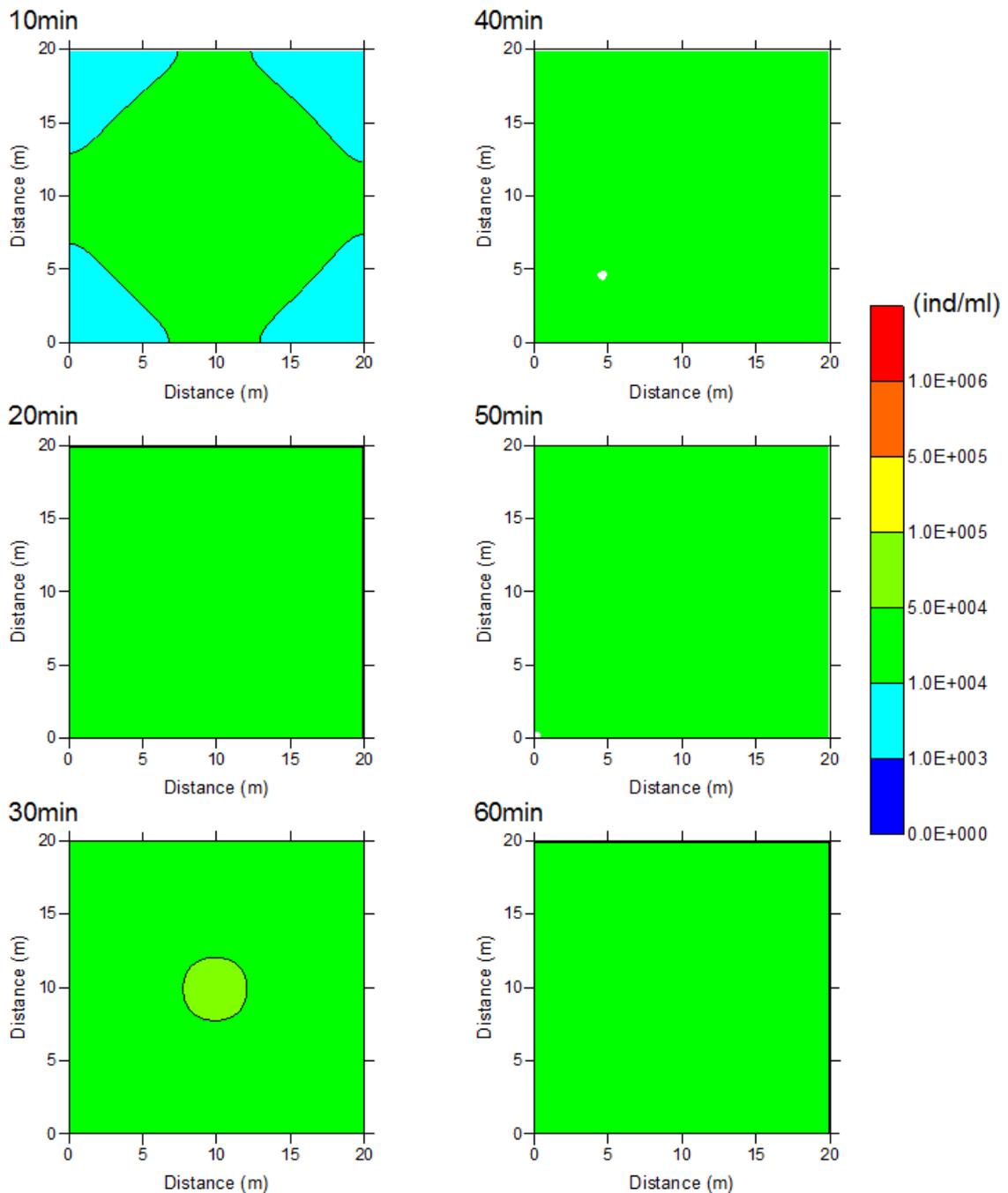


図 3.3.1-3 群体間隔 1m、拡散係数  $0.1m^2/s$  の拡散モデルによる精子の濃度変化

Diffusion0541  
 Distance between sources=0.5m  
 $Kh=0.1(m^2 s^{-1})$

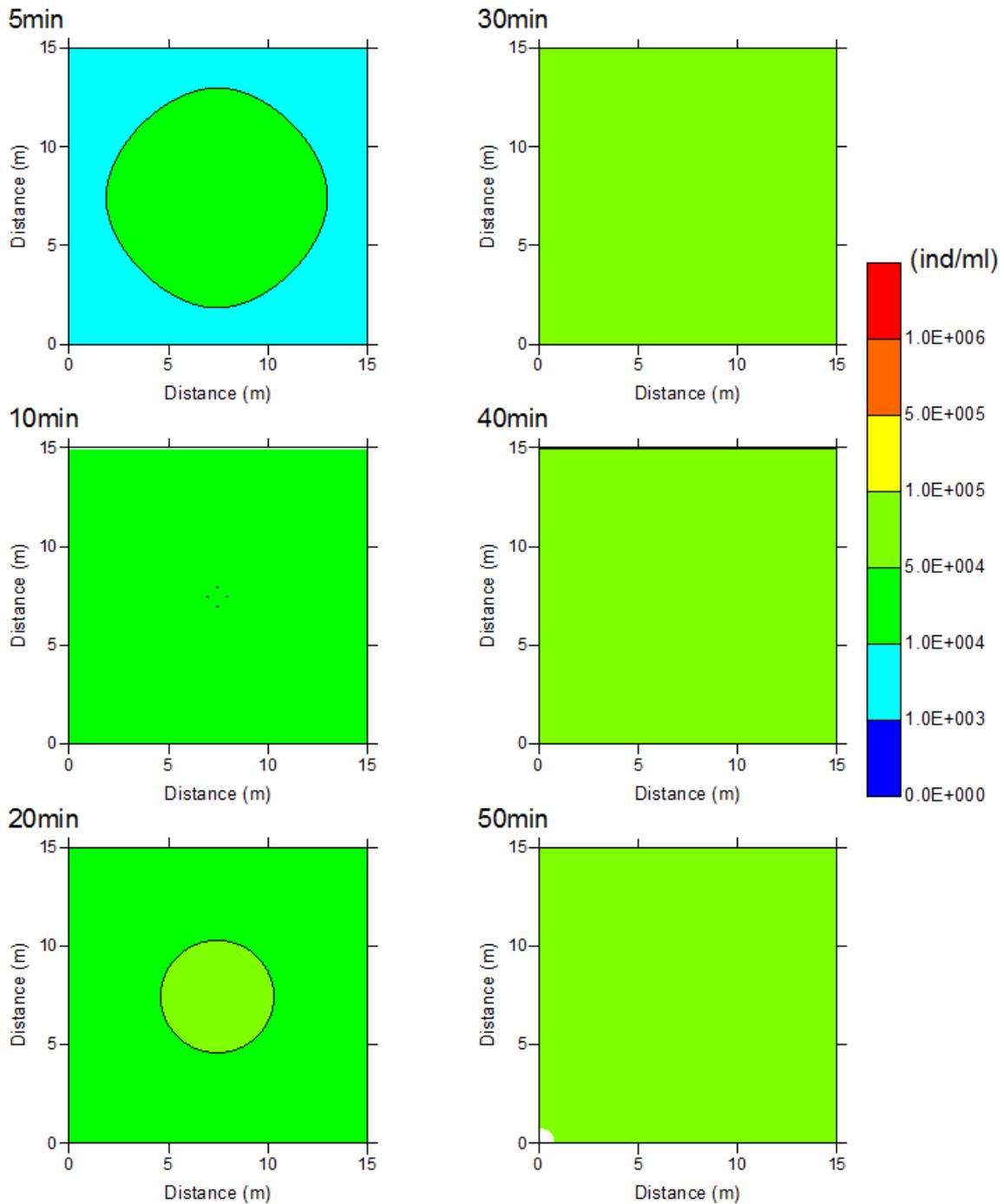


図 3.3.1-4 群体間隔 0.5m、拡散係数  $0.1m^2/s$  の拡散モデルによる精子の濃度変化

#### (4) 内容

##### 1) 野外での漂流板追跡による詳細な海面流速場調査

2015 年と同じ地点において漂流板の追跡調査をおこなうとともに、地形調査と風向風速及び流向流速を観測して現地での拡散係数を算出し、調査海域での海水流動の実態を調べて配偶子拡散についての基礎情報を収集蓄積した。

##### 2) 野外でのサンゴ群体の分布調査

2016 年は野外での実際のサンゴ群体の分布調査をウスエダミドリイシについておこない、分布密度を調べて、野外での受精可能性を検討した。

#### (5) 方法

##### 1) 野外における流れ等の調査と拡散係数の分析

###### ① 野外における流れ等の調査

2016 年 10 月 16 日から 10 月 21 日にかけて、2015 年の調査と同じ海域（阿嘉島マジヤノハマ）で（図 3.3.1-5）風向風速と流向流速を観測するとともに漂流板追跡調査等をおこなった。漂流板は市販のポリエチレン製の二重底プレートを 4 等分して水性ペンキで白く着色したもの（20 × 20 × 高さ 10cm：図 3.3.1-6）を 1 回につき 12 個同時に放流した。漂流の様子をドローン（遠隔操縦型マルチコプター：DJI 社製 Phantom 4：図 3.3.1-7）に搭載したカメラで上空から撮影した。ドローンは自動的に同じ位置と高度を維持できるため、漂流板の挙動を定量的に測定できる。漂流板の調査結果の解析には 10 月 18 日に撮影した映像のうちの 6 ケースを用いた（表 3.3.1-1）。風向風速は調査海域直近の防波堤に取り付けたカード式風向風速測定装置



図 3.3.1-5 調査地点

(ノースワン社製 KADEC21-KAZE-C : 以下単に風向風速計とする : 図 3.3.1-8) で 10 分毎に測定した。流向流速は漂流板調査の中心点の海底 (水深 7m) に超音波ドップラー流速プロファイラー (JFE アドバンテック社製 Aquadopp Profiler : 以下単に流向流速計とする) を設置し (図 3.3.1-9)、海面を基準に、0.9m から 0.5m 刻みで -10.4m までの 10 層の連続観測を行った。



図 3.3.1-6 調査に用いた漂流板



図 3.3.1-7 調査に用いたドローン (左) と撮影の様子 (右 : 矢印がドローン)

表 3.3.1-1 解析に用いたドローン撮影映像のリスト

フォルダ	ファイル	#	撮影開始	撮影終了	Case名	漂流板数	メモ
161018-AM 高度 10m	DJI_0003	1	10:37:48	10:44:47	Case3	12	
	DJI_0004	2	10:47:58	10:55:11	Case4	12	
	DJI_0005	3	10:58:53	11:05:07		12	撮影データ不良
161018-PM 高度 10m	DJI_0006	1	15:37:38	15:45:40	Case6	12	
	DJI_0007	2	15:48:19	15:57:42	Case7	12	
	DJI_0009	3	16:03:51	16:11:15	Case9	12	
	DJI_0010	4	16:18:46	16:25:23	Case10	12	



図 3.3.1-8 調査海域直近の防波堤に取り付けたカード式風向風速測定装置



図 3.3.1-9 海底に設置した超音波ドップラー流速プロファイラー

## ② 野外調査結果の解析

### ア. 調査海面での流速分布の解析

漂流板のドローン撮影ビデオ画像を 60 秒毎の静止画像とし、GIS 上でジオリファレンスをとることで、各漂流板の位置を追跡した。漂流板の位置解析より、各映像ケースの水平面の流速分布を算出した。

### イ. 漂流板調査からの拡散係数の算定

個々の漂流板の位置から分散特性を把握することは困難であるので、複数の漂流板位置データから、阿嘉島マジノハマの海域における分散特性を検討した。本調査では、漂流板が表層を漂うので、得られる結果は表層浮遊物の分散特性を表すことになる。この分散を算出する際に、まず、対象となる N 枚の

漂流板群の位置 $x_i$  ,  $y_i$  ( $x$ :平面直角座標系 JGD2000 の 15 系の東西方向位置,  $y$ :平面直角座標系 JGD2000 の 15 系の南北方向位置,  $i=1\sim N$ )に対する平均値、すなわち重心位置  $\bar{x}$  ,  $\bar{y}$  を求める。その漂流板群の重心位置 ( $\bar{x}$  ,  $\bar{y}$ ) に対する各漂流板の距離の 2 次モーメント (=分散)  $\sigma_G^2$ を(1)式により算出した。

$$\sigma_G^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2\} \quad (1)$$

この分散は、標準偏差  $1\sigma$  の面積となる。漂流板の拡がりのイメージとしては、図 3.3.1-10 に示すように一様流速  $U$  で  $t_0$  の分散特性が  $t_1$  ,  $t_2$  時間後に拡散する現象となる。

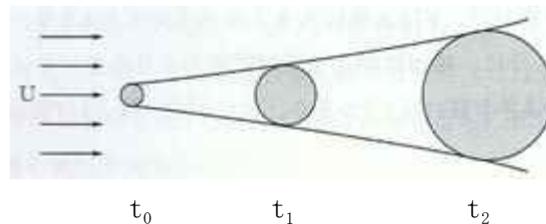


図 3.3.1-10 漂流板の分散特性のイメージ図

## 2) 野外でのサンゴ群体の分布調査

野外での受精環境を検討するために、実際に海底に生息するウスエダミドリイシを対象にサンゴ群体の分布状況を調査した。手順は次のとおりである；

- 1) 詳細な海底地形図の作成：航空写真等をもとにコンピュータ (PC) 上で地形をトレースして元図を作成し、それを海中に持ち込んで、実際の海底の状況と比較しながら図を修正して詳細で正確な調査値の海底地形図 (PC ファイルとしても保存) を作成した。
- 2) サンゴ群体の位置のプロット：スノーケリング又はスクーバ潜水により、海底に生息するウスエダミドリイシ群体の位置を作製した海底地形図上にプロットした。その際、サンゴ群体の長径及び短径を測定 (1 cm 単位) するとともに、最も近いウスエダミドリイシ群体との距離を測定 (10 cm 単位)

して記録した。

- 3) 野外データの整理：PC 内の海底地形図ファイル上に野外調査によって得られたサンゴ群体位置をプロットし直すとともに、個々の群体に番号を付けてサイズ等データを整理した。
- 4) 予想放出卵数等の計算：産卵に関する過去の資料を基にして、それぞれの群体のサイズから予想される放出卵数を算出し、それを合計することで調査海域において放出されると思われるウスエダミドリイシの卵数を計算した。

## (6) 結果

### 1) 野外調査結果の解析

#### ① 調査海域での風向風速及び流向流速の分析

調査期間中（2016年10月16日から10月21日）の風向風速及び風向頻度を図 3.3.1-11 と図 3.3.1-12 に示す。観測期間中は東方の風が強く、風速も平均 5 m/s 前後でやや強風であった。阿嘉島での風向風速の比較のため、近隣にある外地島の慶良間アメダス観測所（慶良間空港）において気象庁観測している観測データとの比較を行った。その結果を図 3.3.1-13 に示す。

風向は東～東北東方向であり、風速は阿嘉島マジヤノハマの観測値が慶良間アメダス観測所よりも大きな値となっていたが、それほどの特異性は見られないため、今後は慶良間アメダス観測所のデータを代用することも可能であると考えられた。

調査地に近い座間味港の潮汐カレンダー（図 3.3.1-14：<http://tide736.net> の潮汐表より引用）によると調査期間中は大潮から小潮にかけての時期にあたる。また、潮位と潮時の変動は図 3.3.1-15 のとおりであった。

流速の観測結果を図 3.3.1-16 に、流向の観測結果を図 3.3.1-17 に示す。表層の流速は中層下層に比べて小さいことがわかった。また、中層と下層は潮汐の影響を大きく受けていることがわかった。ただし観測期間が 6 日間であることから調和分解等の潮汐特性を把握できていない。潮流観測データの 25 時間移動平均を行った結果を図 3.3.1-18 と図 3.3.1-19 に示す。これより、上層の流速は非常に小さく 0.05m/s 程度でほぼ南向きの流向で定常的に流れがあることがわかった。阿嘉島マジヤノハマでは上層と中層下層で流れが大きく異なることが考えられ、それが成層の影響なのか、地形の影響であるかなどは、今後の調査で明らかにする必要がある。

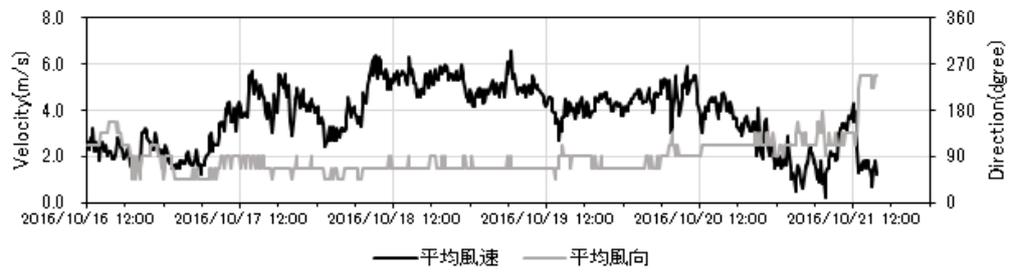


図 3.3.1-11 調査期間中の風向風速

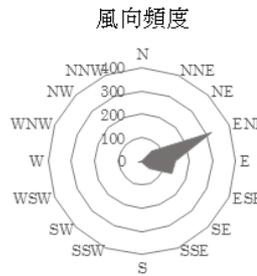
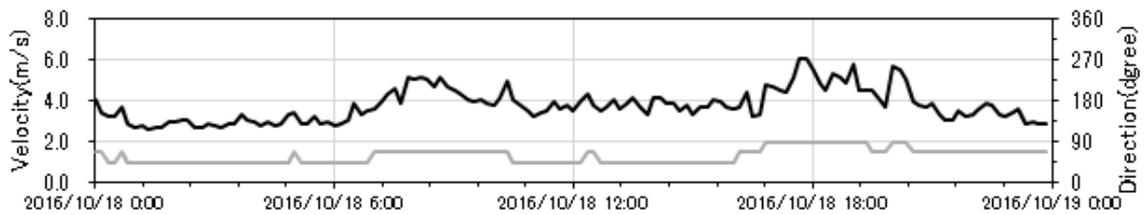


図 3.3.1-12 風向頻度分布

慶良間アメダス観測所



阿嘉島マジヤノハマ

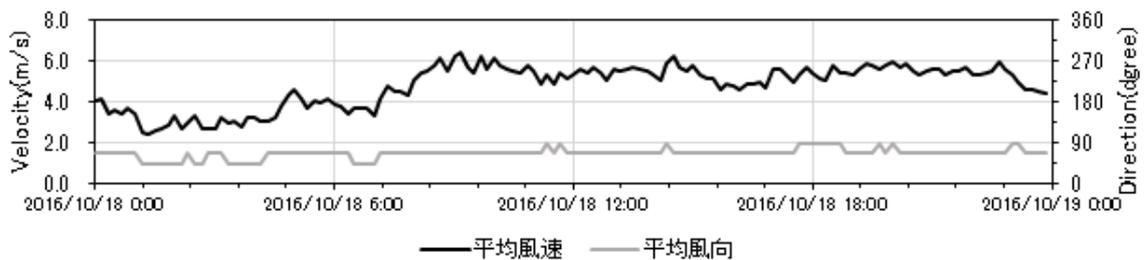
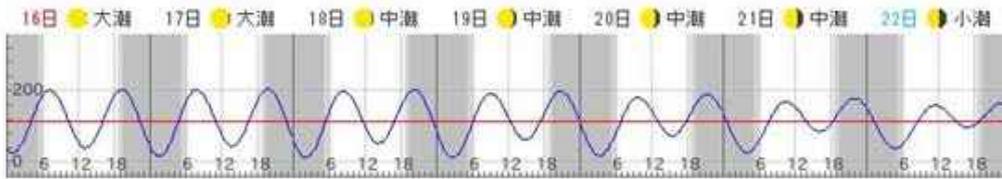
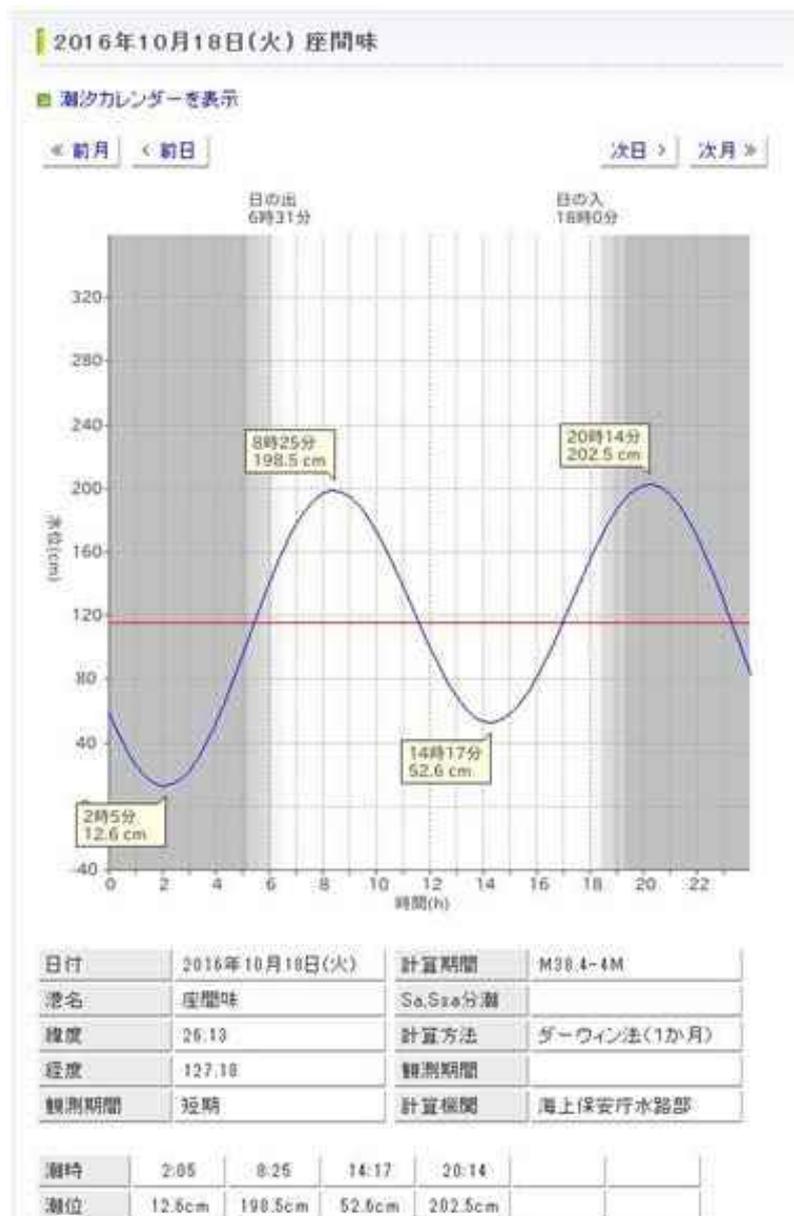


図 3.3.1-13 慶良間アメダス観測所と阿嘉島マジヤノハマ（調査地）での風向風速の比較



<http://tide736.net> より引用

図 3.3.1-14 座間味港潮汐カレンダー



<http://tide736.net> より引用

図 3.3.1-15 座間味港における2016年10月18日の潮位変動

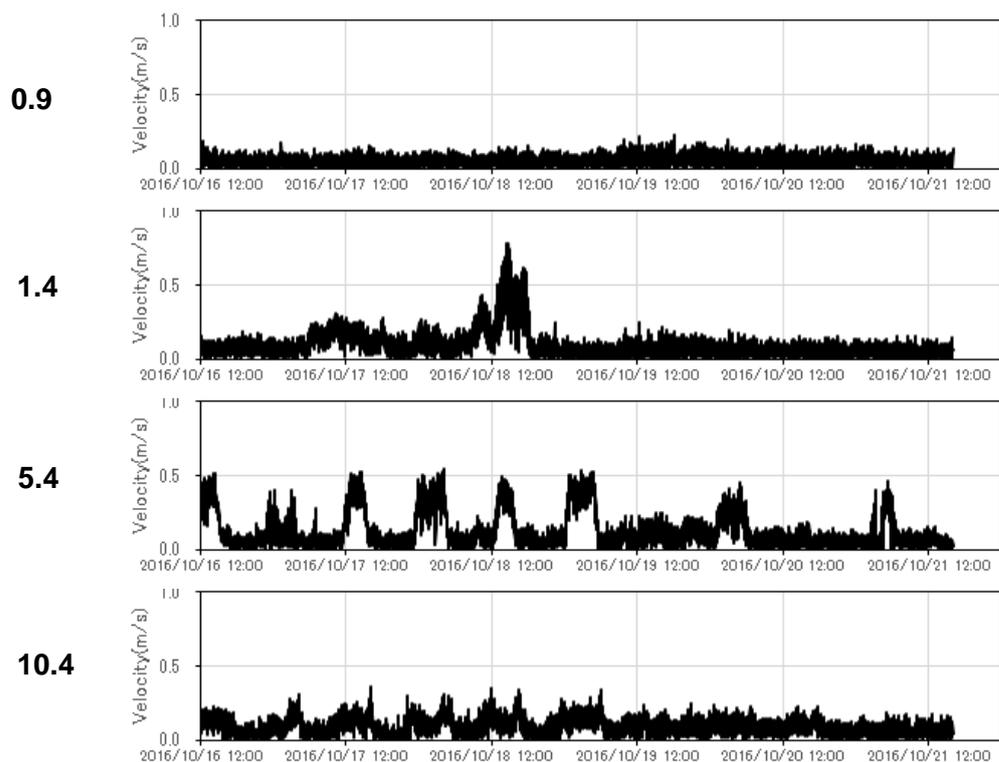


図 3.3.1-16 調査期間中の流速

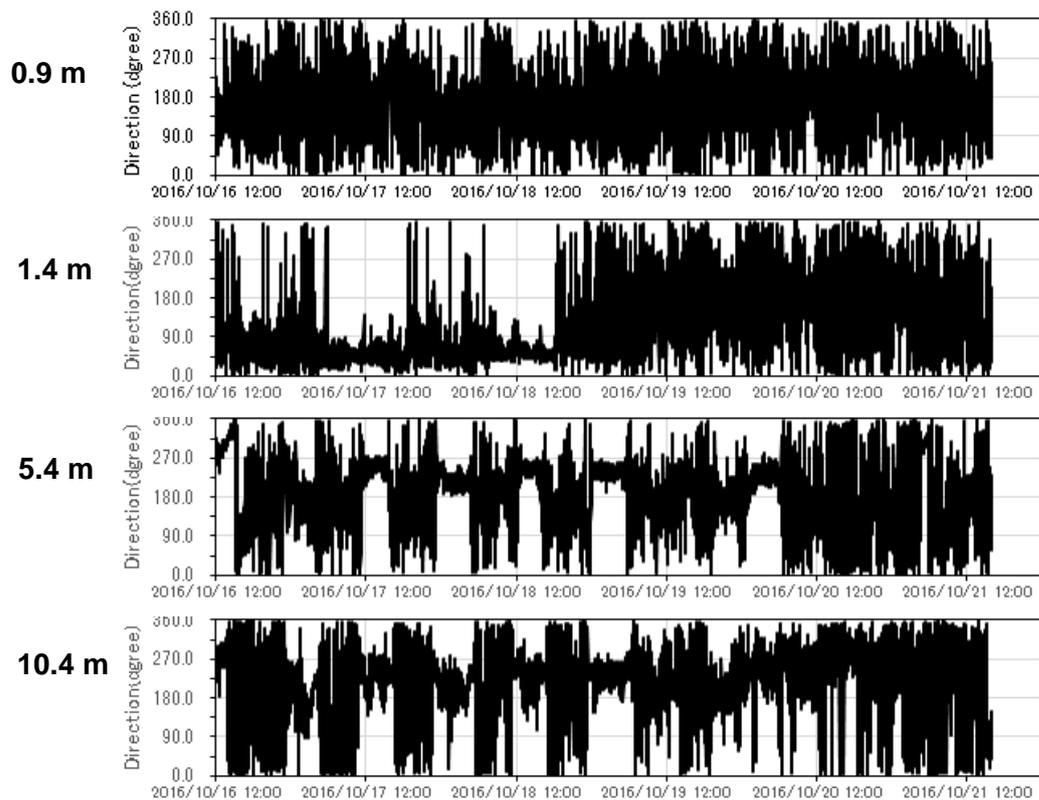


図 3.3.1-17 調査期間中の流向

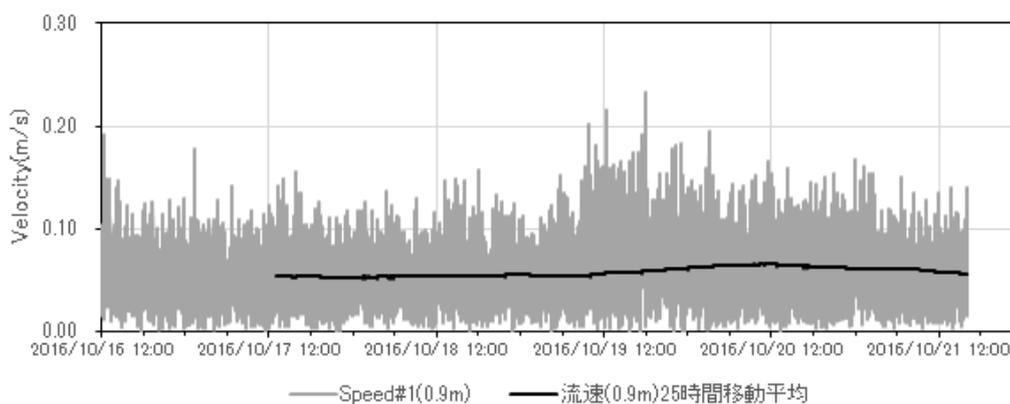


図 3.3.1-18 流速の 25 時間移動平均

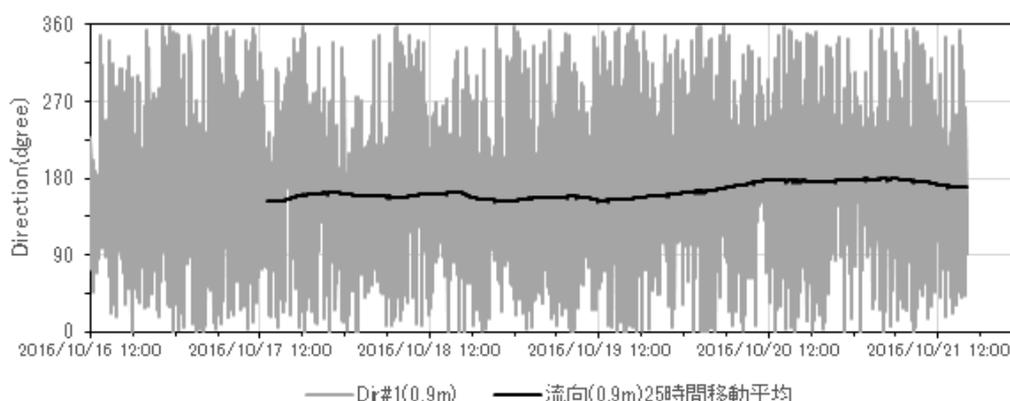


図 3.3.1-19 流向の 25 時間移動平均

## ② 調査海面での流速分布の解析

6 ケースについて分析をおこなったが、1 例としてケース #6 について、図 3.3.1-20 にドローン撮影による 1 分間ごとの静止画像を、図 3.3.1-21 に各時間の漂流板位置の追跡結果を示す。

漂流板の位置解析より、各ケースにおける水平面の流速分布を算出した結果を表 3.3.1-2 に示す。各ケースともに 12 個の漂流板の平均値を示す。また、潮汐の影響を排除するため潮流観測データは 25 時間移動平均を行った。基本的には、ほぼ同一の 220 度前後で南西方向に流がれており、流速としては各ケースともに 0.1 m/s 程度であった。観測時間は 5 分以内であり、短期であるため一様に流れていると考えられる。また、流向から東北東の風に大きく支配されていることもわかった。

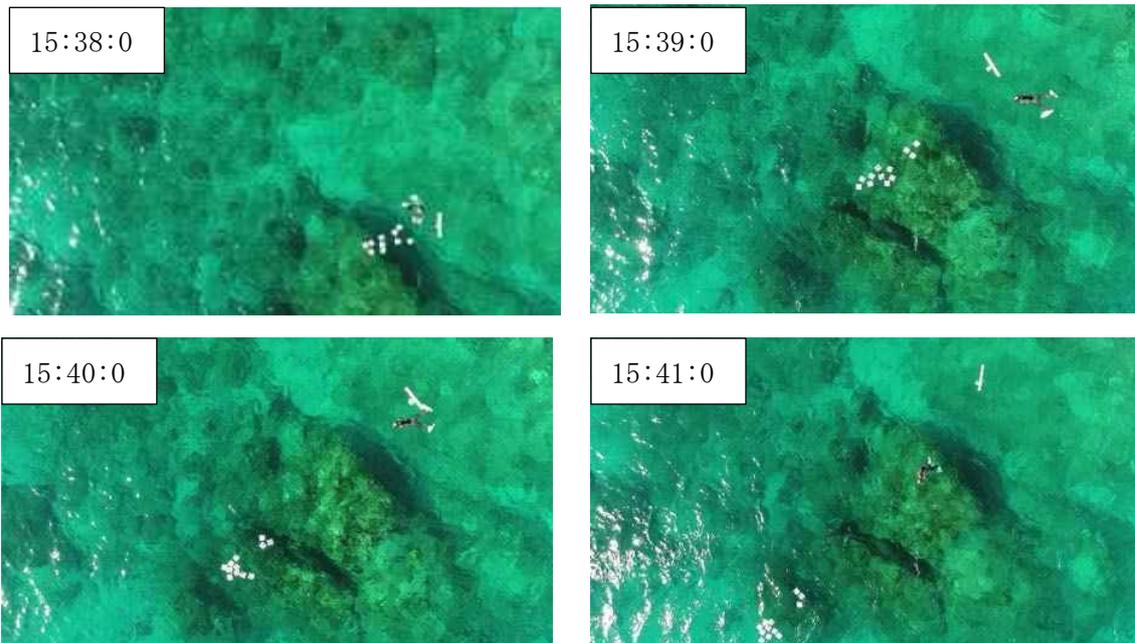


図 3.3.1-20 ドローン撮影による1分間ごとの漂流板の静止画像（ケース#6）

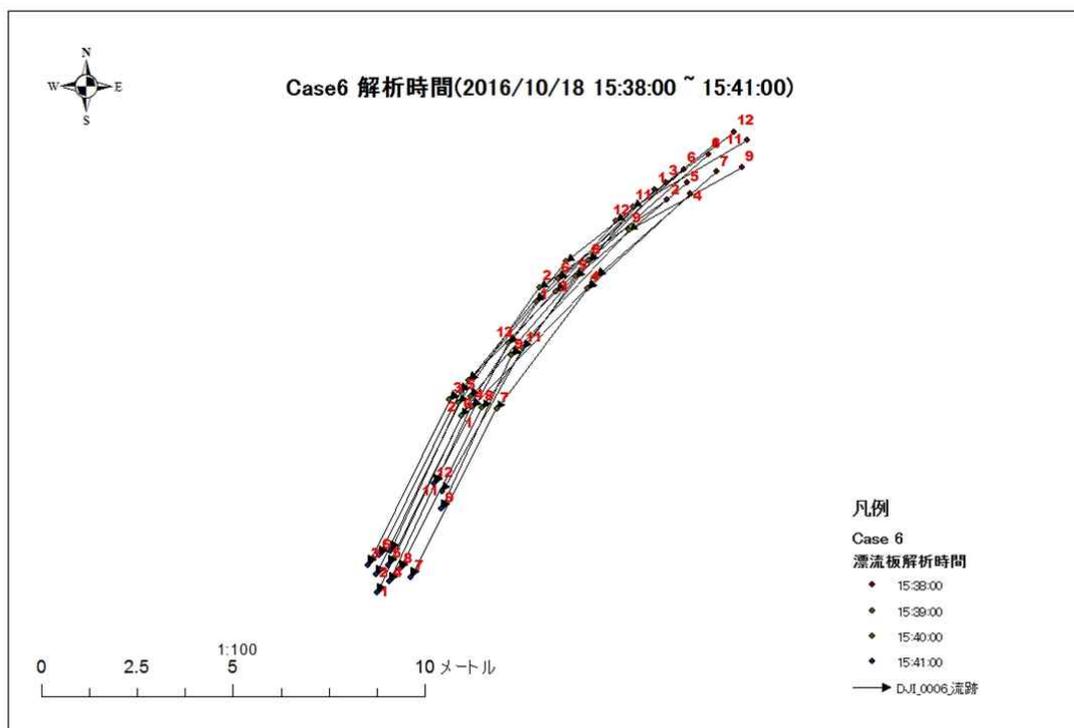


図 3.3.1-21 漂流板位置追跡結果（ケース#6）

表 3.3.1-2 漂流板流速一覽

No	FID	DateTime	Tidal (-0.9m)		Wind		Float Average	
			25h Moving average		velocity (m/s)	direction	velocity (m/s)	direction (dgree)
			velocity (m/s)	direction (dgree)				
Case3	0	2016/10/18 10:38:00	0.053	160.9	5.5	ENE		
	1	2016/10/18 10:39:00	0.053	160.9	5.5	ENE	0.087	221.6
	2	2016/10/18 10:40:00	0.053	160.9	5.4	ENE	0.099	225.7
	3	2016/10/18 10:41:00	0.053	161.0	5.4	ENE	0.125	211.5
Case4	0	2016/10/18 10:48:00	0.053	161.1	5.8	ENE		
	1	2016/10/18 10:49:00	0.053	161.1	5.8	ENE	0.106	211.2
	2	2016/10/18 10:50:00	0.053	161.1	5.5	ENE	0.096	206.8
	3	2016/10/18 10:50:55	0.053	161.0	5.5	ENE	0.117	204.3
Case6	0	2016/10/18 15:38:00	0.054	162.7	5.6	ENE		
	1	2016/10/18 15:39:00	0.054	162.7	5.6	ENE	0.106	211.2
	2	2016/10/18 15:40:00	0.054	162.7	5.5	ENE	0.096	206.8
	3	2016/10/18 15:41:00	0.054	162.7	5.5	ENE	0.071	240.8
Case7	0	2016/10/18 15:49:00	0.054	162.9	5.5	ENE		
	1	2016/10/18 15:50:00	0.054	162.8	5.8	ENE	0.080	227.3
	2	2016/10/18 15:51:00	0.054	162.8	5.8	ENE	0.087	228.2
	3	2016/10/18 15:52:00	0.054	162.8	5.8	ENE	0.082	229.7
	4	2016/10/18 15:53:00	0.054	162.9	5.8	ENE	0.091	232.6
	5	2016/10/18 15:53:55	0.054	162.9	5.8	ENE	0.122	244.0
Case9	0	2016/10/17 16:04:00	0.054	163.1	4.8	ENE		
	1	2016/10/17 16:05:00	0.054	163.1	4.8	ENE	0.062	210.5
	2	2016/10/17 16:06:00	0.054	163.1	4.8	ENE	0.072	214.7
	3	2016/10/17 16:07:00	0.054	163.0	4.8	ENE	0.080	233.2
	4	2016/10/17 16:08:00	0.054	163.0	4.8	ENE	0.091	251.6
	5	2016/10/17 16:09:00	0.054	162.9	4.8	ENE	0.070	235.0
Case10	0	2016/10/18 16:19:00	0.054	163.0	4.6	ENE		
	1	2016/10/18 16:20:00	0.054	162.9	4.9	ENE	0.106	211.2
	2	2016/10/18 16:21:00	0.054	162.9	4.9	ENE	0.096	206.8
	3	2016/10/18 16:22:00	0.054	162.8	4.9	ENE	0.071	217.4

### ③ 漂流板調査からの拡散係数の算定

6つのケースについて分析したが、その1例としてケース#6について図3.3.1-22に漂流板の標準偏差面積の変動を示す。そして、「方法」の(1)式で計算した結果を表3.3.1-3に示す。

今回の分析結果から拡散係数としては、負の値も存在するが、オーダー的には、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$ 程度であると考えられた。なお、今回は、下記の条件として分散特性を検討した；[1] 潮流は非常に小さいので無視する、[2] 風速も一様で1方向に吹く、[3] 海底地形は変化がない。拡散係数の負の値については、海底地形、鉛直方向の流れ、朝夕の影響等が考えられるが、今後の調査及び解析によりその原因について把握する必要がある。

なお、リチャードソンの拡散理論にもとづく拡散係数の算出もおこなった。リチャードソンの拡散理論とは、流れの中の2つの小物質塊の運動を同時に追跡することによって拡散を論じたもので、拡散係数は、 $K=0.01Y^2(4/3)$ で表すことができ、代表的拡がり幅の4/3乗則が成り立つとしたものである。多粒子の粒子の集まりを考えた場合、Yがその拡がりの幅となる。(有田ら 1998) (図3.3.1-23、図3.3.1-24参照) その結果、拡がりの幅は5m程度とすると $K=39.68 \text{ cm}^2 / \text{s} = 0.00397 \text{ m}^2 / \text{s}$ となり、オーダー的には、本調査で観測した拡散係数と大きな差はないことがわかった。ただし、拡散時間が長い場合に適用されるため、今後の観測及び解析を繰り返し、阿嘉島マジノハマ海域の拡散係数の検討を行う必要がある。

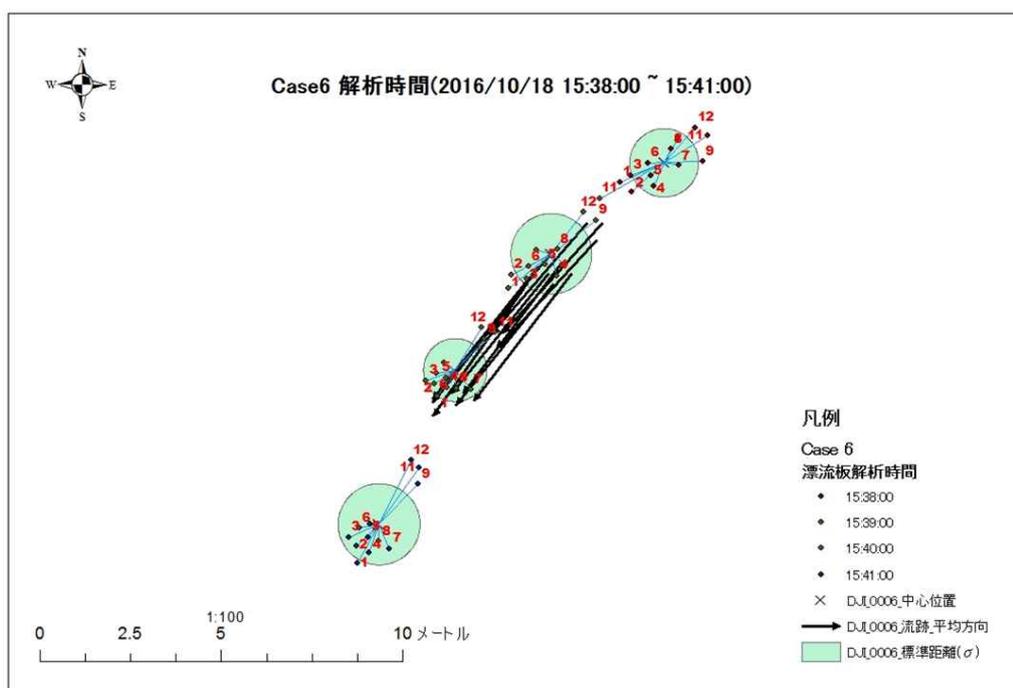


図 3.3.1-22 漂流板の位置と拡散面積 (ケース#6)

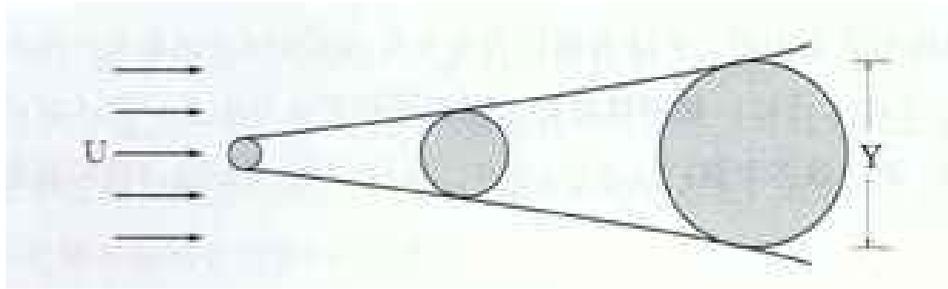


図 3.3.1-23 多粒子の相対拡散のイメージ

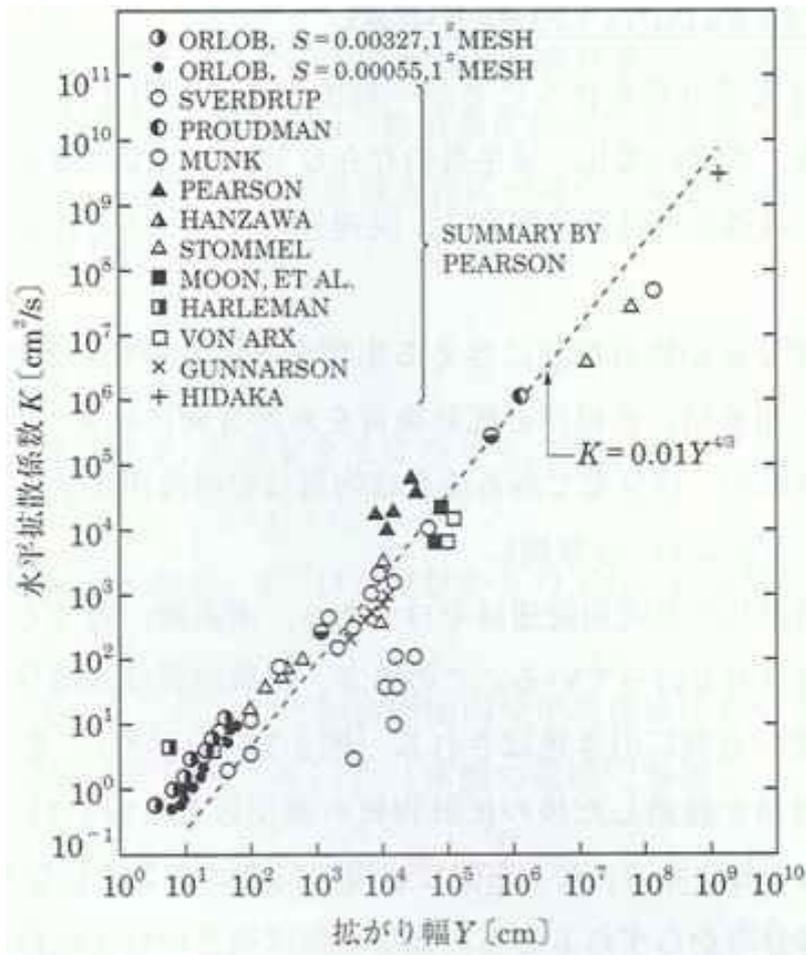


図 3.3.1-24 海洋における水平拡散係数

表 3.3.1-3 拡散係数の算出一覧

No	FID	Interval time (sec)	distance (m)	Area (m <sup>2</sup> )	CenterX (m)	CenterY (m)	StdDist	diffusion (m <sup>2</sup> /s)
Case3	0	0	6.271	3.129	-21245.279	21294.730	0.998	
	1	60	7.227	4.156	-21249.522	21291.500	1.150	<b>0.0171</b>
	2	120	6.679	3.550	-21253.699	21286.877	1.063	-0.0101
	3	180	7.309	4.251	-21260.003	21283.317	1.163	<b>0.0117</b>
Case4	0	0	8.076	5.190	-21248.808	21295.683	1.285	
	1	60	10.779	9.246	-21253.561	21292.879	1.716	<b>0.0676</b>
	2	120	9.075	6.554	-21259.173	21290.442	1.444	-0.0449
	3	175	7.164	4.084	-21265.261	21288.031	1.140	-0.0449
Case6	0	0	5.954	2.821	-21246.445	21293.463	0.948	
	1	60	6.997	3.896	-21249.547	21290.941	1.114	<b>0.0179</b>
	2	120	5.490	2.398	-21252.191	21287.715	0.874	-0.0250
	3	180	7.074	3.982	-21254.285	21283.438	1.126	<b>0.0264</b>
Case7	0	0	4.398	1.539	-21247.742	21300.470	0.700	
	1	60	3.594	1.028	-21250.994	21296.953	0.572	-0.0085
	2	120	2.970	0.702	-21254.467	21293.077	0.473	-0.0054
	3	180	3.450	0.947	-21257.633	21289.349	0.549	<b>0.0041</b>
	4	240	3.342	0.889	-21260.947	21285.014	0.532	-0.0010
	5	295	3.484	0.966	-21263.886	21278.982	0.554	<b>0.0014</b>
Case9	0	0	4.240	1.431	-21245.491	21297.474	0.675	
	1	60	4.391	1.534	-21248.696	21295.614	0.699	<b>0.0017</b>
	2	120	4.339	1.498	-21252.285	21293.234	0.691	-0.0006
	3	180	3.525	0.989	-21255.241	21289.590	0.561	-0.0085
	4	240	3.692	1.085	-21256.659	21284.180	0.588	<b>0.0016</b>
	5	300	3.481	0.964	-21259.063	21280.746	0.554	-0.0020
Case10	0	0	4.111	1.345	-21237.085	21282.913	0.654	
	1	60	3.783	1.139	-21240.803	21279.222	0.602	-0.0034
	2	120	6.353	3.212	-21243.033	21275.648	1.011	<b>0.0345</b>
	3	180	4.951	1.951	-21245.986	21272.933	0.788	-0.0210
					平均値	注) 負値を除く		<b>0.0184</b>
					最大値	"		0.0676
					最小値	"		0.0014

## 2) 野外でのサンゴ群体の分布調査

阿嘉島マジヤノハマのおよそ 1.5ha (150m×100m) の範囲内に 586 群体のウスエダミドリイシが生息していた。ただし、この範囲では過去に同種サンゴの植付けや移設がおこなわれており、それらの区別をおこなったところ、内訳は天然群体が 142 群体 (全体の 24.2%)、植付け群体が 430 群体 (73.4%)、移設群体が 14 群体 (2.4%) で、人為的に移植された群体の合計は 444 群体 (75.8%) に達しており、天然群体は 1/4 程度しかなかった (表 3.3.1-4、図 3.3.1-25)。

過去に下村(2004)によって報告されているウスエダミドリイシの群体面積と産卵数の関係式[産卵数(10<sup>4</sup>個) = 0.0872 × 群体の投影面積 - 33.056] (ただし、投影面積 379.1 cm<sup>2</sup>以下の群体は放卵しないものとする) に当てはめて計算すると、今回の調査地において放出されると予想される卵数は、天然群体から約 44,070 × 10<sup>3</sup>個、人為移植群体からは約 114,368 × 10<sup>3</sup>個 (植付け群体: 約 104,864 × 10<sup>3</sup>個、移設群体: 約 9,504 × 10<sup>3</sup>個) で合計 15,8437 × 10<sup>3</sup>個と考えられた (表 3.3.1-4)。前年度の数値モデルの計算から群体間隔 2 m 以内であれば高率で受精が可能であるという結果を得ているが、今回の分布調査の結果、調査地で 2 m 以内の群体間距離にあるものはおよそ 45 群体に過ぎず、天然群体だけ考えると 38 群体/142 群体 (約 28%) が受精できない卵を放出すると計算され、予想される受精卵数は 145,138 × 10<sup>3</sup>個であった。ただし、2015 年のモデルでは 9 群体を並べたシミュレーションだったことと、ある程度低い精子量密度 (10<sup>5</sup> / ml) でも低率ではあるが受精すること (Oliver and Babcock 1992, Omori et al. 2001) を考慮に入れると、受精可能な群体間距離はもう少し広がると想定される。

表 3.3.1-4 調査地におけるウスエダミドリイシの群体数と予想放出卵数

	群体数	%	成熟群体数	未成熟群体数	予想放出卵数
天然	142	24.2	81	61	44,069,544
植付け	430	73.4	236	194	104,864,325
移設	14	2.4	12	2	9,503,514
人為合計	444	75.8	248	196	114,367,839
総計	586	100.0	329	257	158,437,383

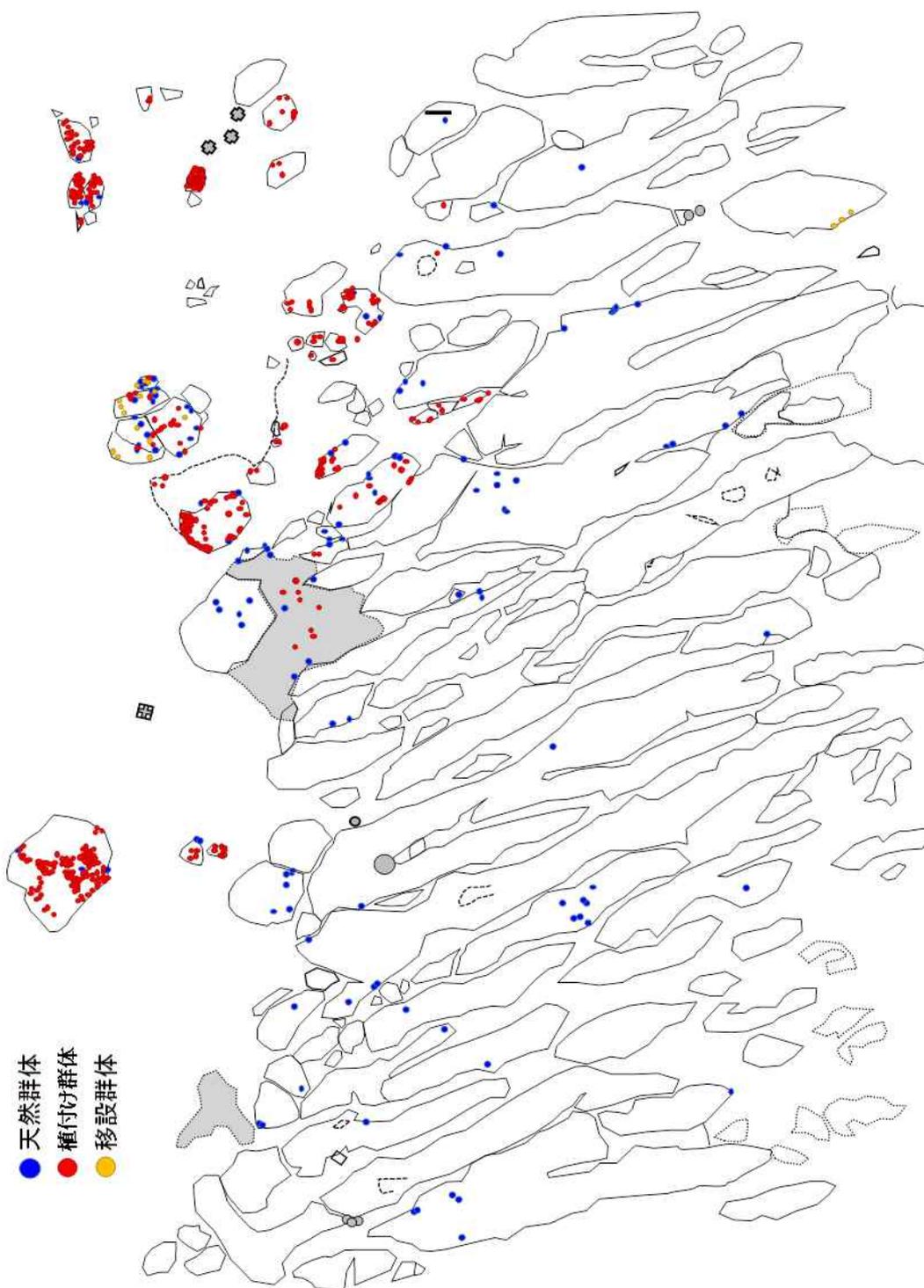


図 3.3.1-25 調査地でのウスエダミドリイシの分布

## (7) 考察

今年度の野外調査に基づく計算の結果、現地マジノハマにおける拡散係数は、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  程度で、前年度の数値シミュレーションで推測された拡散係数と合致した。しかしながら、地形や海況と拡散係数との関連（収束・発散の発生条件）は明確でなく、今後、地形の異なる場所での調査を実施するなどの実測データの蓄積が必要である。

受精に適正な群体間距離については、2年間の調査と解析研究により2 m以内と推定された。ただし、卵の拡散にかかわる特性（浮力などの属性）についての情報は不足している。

野外でのウスエダミドリイシ群体の分布調査から、その生息状況のみならず産卵や再生産状況を推測できる資料を得ることができた。これまでのところ放卵数と受精数を概算したのみだが、資料解析の仕方次第では、さらにさまざまな情報を検討することができそうである。

サンゴ群体間の距離と精子濃度に関する研究はサンゴ群集の保全維持そして修復再生において非常に重要なものなので、今後も研究が進められ、場所やサンゴ種、さんご礁生態系の構成種に対応した保全や修復のプランニングに活用できるまでに発展することを希望する。