

社会基盤整備と環境の両立を目指した防波堤整備におけるサンゴ増殖事業モデル構築の試み

中西 敬¹・比嘉 義光²・谷口 洋基³・新垣 善憲⁴・
松下 紘資⁵・西村 博一⁶・葛西 博文⁷・小田島 勉⁷

¹正会員 徳島大学環境防災研究センター (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島 2-1)

E-mail: naka24taka4@zeus.conet.ne.jp (Corresponding Author)

²一般社団法人うみの子 (〒901-3311 沖縄県島尻郡座間味村阿嘉 138)

³一般社団法人座間味村観光協会さんごゆんたく館 (〒901-3311 沖縄県島尻郡座間味村阿嘉 936-2)

⁴日建工学(株) 沖縄営業所 (〒900-0016 沖縄県那覇市前島 2-21-13)

⁵正会員 西日本工業大学 工学部 (〒800-0394 福岡県京都市都府田町新津 1-11)

⁶日建工学(株) 事業推進部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-10-1 日土地西新宿ビル 17F)

⁷正会員(株) 総合開発 開発営業部 (〒768-0065 香川県観音寺市瀬戸町 2-14-16)

社会基盤整備と環境の両立を目指し、港の維持管理・機能強化事業にサンゴの増殖を組み込む仕組みづくりを試行した。折れたサンゴの枝を簡便に取り付けることができるコンクリート基盤を開発し、アスパラギン酸を混和することによってサンゴの活着が促される可能性が示唆された。折れたサンゴの枝を活着させたブロックを防波堤工事で使用し、その後のモニタリング調査によりサンゴが順調に成長していることが確認できた。①社会基盤整備と環境の両立が図れること、②ボランティアではなく有償の事業としてサンゴの再生が成り立つこと、③地域の水産業・観光業にも相乗効果が導出される可能性があることが確認できた。

Key Words : environment and development, coral rooting bed, amino acid, coral restoration

1. 背景と目的

持続可能な社会を実現する上で、開発と環境の対立構造を軽減もしくは解消することが大きな課題といえよう。開発という括りには、新たな社会基盤の整備に加え、安全・安心や利便性・快適性向上のための社会基盤の維持管理・機能強化が含まれる。例えば沖縄県の離島では、移動や生活物資の運搬、観光や水産業を支える港や空港の維持管理・機能強化は不可欠であるが、事業実施時にはサンゴに何らかの影響が及ぶことがあり、開発と環境の両立が求められる。加えて、サンゴは、白化やオニヒトデによる食害、赤土の流入、ボートのアンカーや観光客の立ち入りによる損傷などの劣化が生じてきており、これらに対して保全や移植・増殖等再生の取り組みが行われてきた。「沖縄県サンゴ礁保全再生事業成果発表シンポジウム(2016)」では、サンゴ再生の課題として「低予算、簡易な方法、大規模化」とそれに伴う「資金の確保、実施運営体制」が上げられた¹⁾。

本研究開発・実装実験では、アミノ酸を混和したコンクリート製のサンゴ活着基盤を開発し、それをを用いて港

湾・漁港(以下、港湾と記す)の維持管理・機能強化事業にサンゴの増殖が組み込まれる仕組みづくりを試行した。社会基盤整備と環境が両立した港湾構造物の整備を実証することで、前述の課題解決に加え経済活動としてサンゴの再生が成り立つ事業モデルの構築を目的とした。

2. 研究開発・実装実験の内容

研究開発・実装実験の実施場所を図-1に、枠組み並びにタイムテーブルを図-2に示した。

(1) 仮説の立案

筆者らは、アミノ酸を混和したコンクリートの実用化に関する研究²⁾³⁾並びに実証実験、事業化を進めてきた。アミノ酸コンクリートとはアルギンをコンクリートに混和することによって、コンクリート表面に付着する微細藻類の生長を促す等の効果を有するものである。ここでは、アミノ酸コンクリートをサンゴの活着基盤として活用することを目指した。

(2) 基礎実験

サンゴの成長や骨格形成, 石灰質結晶化にアミノ酸を含有するたんぱく質が寄与すること⁴⁾, サンゴの骨格に含まれるアミノ酸のうち, アスパラギン酸がサンゴの成長と相関を有すること⁵⁾, サンゴが代謝により生成するアミノ酸とサンゴ骨格に含まれるアミノ酸組成を比較すると, アスパラギン酸, グルタミン酸の比率が小さいこと⁶⁾ 等から, サンゴにとって必須アミノ酸である可能性があるアスパラギン酸 (以下 Asp.と記す), グルタミン酸 (以下 Glu.), プロリン (以下 Pro.), バリンと微細藻類の生

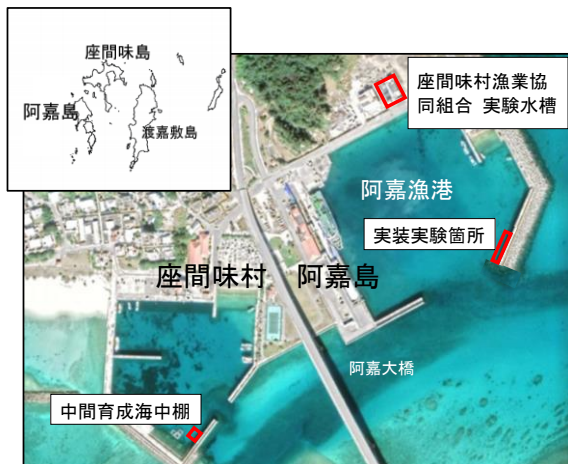


図-1 研究開発・実装実験場所

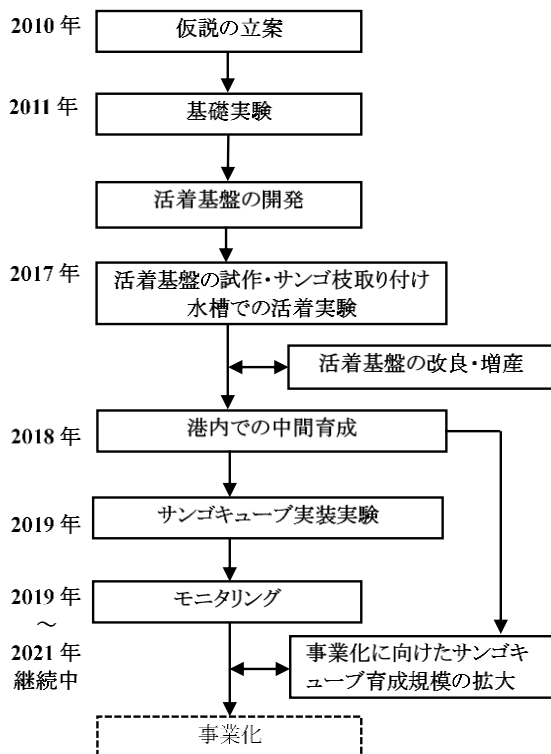


図-2 研究開発・実装実験の枠組み

長促進に効果を発揮した^{2,3)}アルギニン(以下 Arg.)を用いた実験を行った。

これらのアミノ酸を混和したコンクリート基盤と混和しない普通コンクリート基盤を用いて, ①サンゴ幼生の着生・稚サンゴの生残・成長実験, ②サンゴ断片が基盤に活着する過程におけるアミノ酸の効果に関する基礎実験を(一財)熱帯海洋生態研究振興財団阿嘉島臨海研究所に依頼し2011年に実施した。

実験の結果(未発表), 普通コンクリート基盤とアミノ酸を混和した基盤とではサンゴの浮遊幼生の着生過程における基盤選択性に顕著な差異が見られなかった。サンゴ断片が基盤に活着する現象についても顕著な差異は見られなかったが, 普通コンクリート基盤に比べ Asp.を混和した基盤において活着が良好な傾向を示した。また, 実験に用いた基盤が小さく, アミノ酸の持続性に課題があったなど, 実験方法に改良の余地が確認できた。

(3) 折れたサンゴの枝の活着実験

基礎実験を踏まえ, 「活着」に目的を絞り再度実験を行った。サンゴは有性生殖(図-3の左生活環)と無性生殖(図-3の右生活環)で増殖する。ここでは, ボートのアンカーや観光客の立ち入りにより折れたサンゴの枝を基盤に活着させ, それを港湾構造物に組み込む無性生殖での増殖を目的とした。

消波ブロック等に溝状の凹凸を付加するなどし, 浮遊幼生の着生・生育を促す試み(有性生殖によるサンゴの増殖促進)は行われてきたが, 無性生殖により増殖させたサンゴを港湾構造物に植え付け, その後の成長がモニタリングされた例は見当たらない。

なお, サンゴの着生・植付け基盤には, セラミック素材やマグネシウム系素材等様々な材質があるが⁷⁾, ここでは社会基盤整備事業としてサンゴを港湾構造物へ組み込むことを目的としたことから, コンクリート製の基盤であることを前提とし, 基盤の大きさや材質の改良によるサンゴの活着に関する実験を行った。

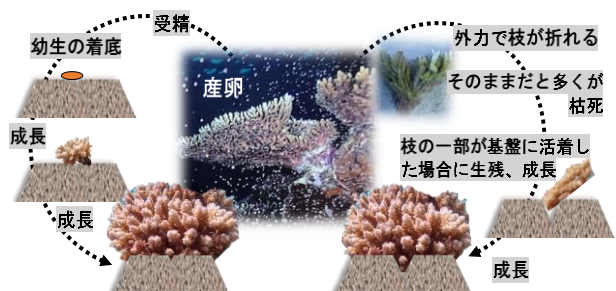


図-3 サンゴの生活史(改訂 有性生殖によるサンゴ増殖の手引き, 水産庁漁港漁場整備部⁸⁾を参考に作成)

(4) サンゴ活着用コンクリート基盤の開発

折れたサンゴの枝を活着させるためのコンクリート基盤（以下サンゴキューブと記す）を製作した（図-4）. サンゴキューブには、折れたサンゴの枝を結束バンドで簡便に取り付けられるよう、表面から裏面に貫通する2つ一組の穴を4か所に配置した. 加えて、根固めブロックや消波ブロックにあらかじめ設けた箱抜き部に設置しやすくするため、表面を120mm×120mm、裏面を110mm×110mmとし傾斜をつけた. さらに、後述する中間育成時の吊り具やブロックに設置する際の持ち運び金具を取り付けられるよう、中央部に表側φ8mm、裏側φ12mmの穴を貫通させた. 細部構造を確実に製作するため、バイコン製法（ゼロスランプコンクリートを用いた即時脱型技術）にてサンゴキューブを製作した.

(5) 水槽での活着実験

前述の既存知見に加え、「一般的に無脊椎動物の骨格に含まれる有機気質タンパクは Ca^{2+} と結合しやすい酸性アミノ酸（Glu., Asp.）を多く含んだリピート構造を持つこと、サンゴ骨格に含まれるタンパク質には高濃度の酸性アミノ酸、特にAsp.が多く含まれる」⁹⁾との知見並びに基礎実験の結果を踏まえ、サンゴキューブにAsp.をセメント重量比で5%, 10%混和したものを各10個製作し、混和しないもの10個とともに実験に供した.

サンゴキューブを座間味村漁業協同組合が所有する海水かけ流し型の屋外水槽で2週間程度馴致後、1つのサンゴキューブに4片のサンゴの枝を取り付けた（写真-1, 上）. なお、サンゴの枝は同組合が水槽で人工的に繁殖・育成したものをを用いた. 2018年2月に水槽に設置し、経過観察をスタートし（写真-1, 下）、実験開始から約3カ月経過時に生残や活着状況等を確認した（写真-2）. 計測項目と判定基準を表-1に示した. なお、実験中、水槽ポンプの故障による給水の停止や直射日光による水温上昇、藻類の大量繁殖などにより、一部のサンゴが枯死し

枝の抜け落ちなどが発生した（写真-2, 上）. 実験に用いたサンゴの活性や年齢等の初期条件が異なるとともに、大きさや形状によっては基盤と接する部分の長さや面積にそもそも差異が生じる. また、屋外水槽では位置によって日当たりや流れなどの条件が微妙に異なる. そのため、実験結果の信頼性や再現性に課題が残されるが、水槽実験の結果からは、普通コンクリートに比べAsp.を混和したサンゴキューブにおいてサンゴの枝の活着が促進される可能性が示唆された（図-5）.

なお、先行研究において、コンクリートに混和したアミノ酸の溶出量が $10^{-3}\text{mg-N/cm}^2/\text{day}$ 程度と極めて微量であることが明らかにされており¹⁰⁾、また、アミノ酸は栄養価が高く、海水中では微生物等に迅速に取り込まれてしまう¹¹⁾ため、コンクリートから溶出するアミノ酸の影響はブロックの極めて表層に限定されるものと考えられる. よって、水質への影響や同一水槽内でアミノ酸の有無による実験を行ったことへの影響はほとんどないものと判断した.



写真-1 実験状況（上左：折れたサンゴの枝，上右：基盤への取り付け，下：水槽での育成）

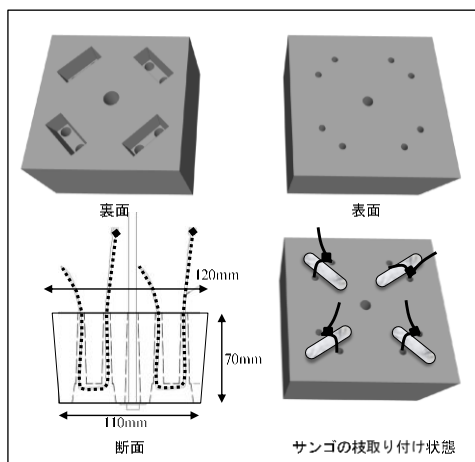


図-4 サンゴキューブの構造

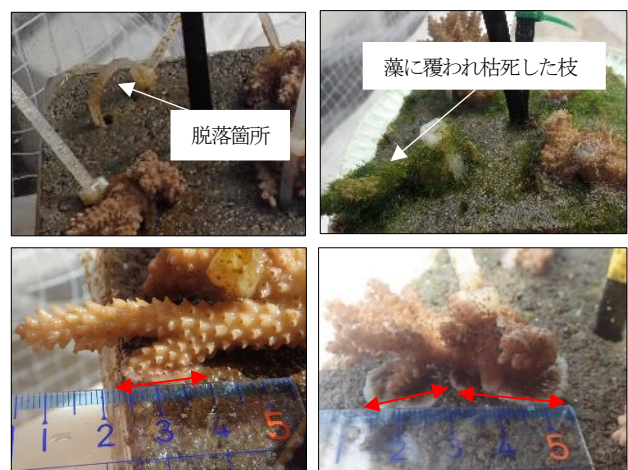
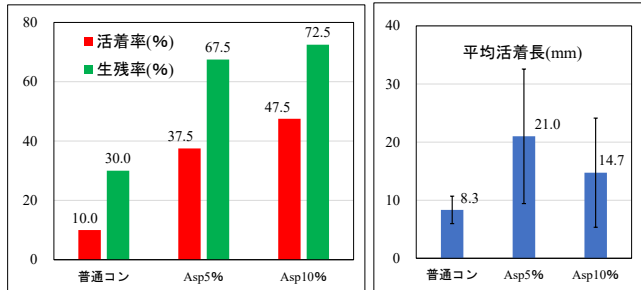


写真-2 キューブの状態（上：脱落、藻の繁殖による枯死，下：活着状況並びに活着長の計測状況）

表-1 計測項目と判定基準

総個体数	1 ケースにつき 40 個体:各サンゴキューブに4個体を設置したものを10セット.
生 残 数	総個体数のうち枯死していないもの.
活 着 数	生残している個体のうち、指で押しても動かない状態で基盤に固着したもの(結束バンドのみに固着し生残しものを除いた).
平均活着長(mm)	活着個体の活着部の長径の平均値(写真-2, 下). 複数箇所活着している場合は平均.
生残率(%) 活着率(%)	生残, 活着それぞれの個体数を総個体数で除したものの.



(バーは標準偏差を示す)

図-5 生残率, 活着率, 平均活着長の計測結果

(6) 港内での中間育成

水槽実験の経過を踏まえ, Asp.10%を混和したサンゴキューブを新たに製造し, 港内に単管パイプで組んだ棚状の中間育成施設にロープで垂下した状態で活着・育成実験を2018年9月にスタートした(写真-3). 2年後の2020年9月のモニタリングでは, 藻類等の付着生物により枯死する個体も見られたが, おおむね良好な状態でサンゴが活着していることが確認できた. このことから水槽を用いずとも実海域で枝の活着を促し, サンゴキューブを作ることが可能であると判断された.

例えば区画漁業権漁場を利用して規模を拡大し, いわば「苗床」のようにサンゴキューブを準備・供給することが可能になる. 具体的な方策については, 今後の継続的なモニタリングに基づき検討を進めたい.

(7) 防波堤への実装

阿嘉漁港防波堤の改良工事において, 沖縄県並びに工事施工業者と協議の上, あらかじめ根固めブロックの天端に箱抜きを設置を依頼し, 2019年3月にサンゴキューブを箱抜き部に実装した. 設置水深は上段±0.0m, 下段-1.5mであり, 各水深に14基, 計28基のサンゴキューブを30分程度で簡便かつ迅速に設置することができた(図-6, 7). なお, 当初は箱抜き部にサンゴキューブそのものをはめ込む予定であったが, 箱抜きが小さいという不具合が生じ, 一回り小さな台座ブロックをサンゴキューブに取り付け箱抜きにはめ込んだ(写真-4, 左).

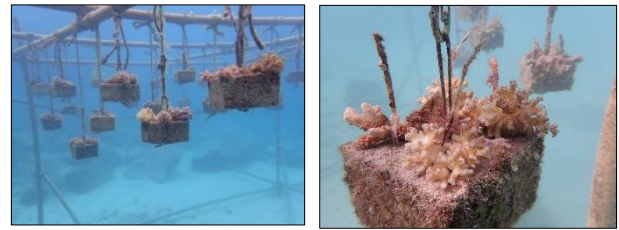


写真-3 港内での中間育成実験状況

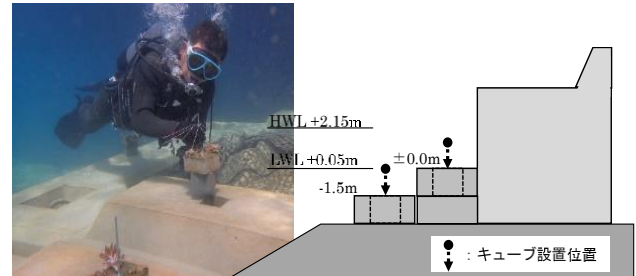


図-6 防波堤への設置状況と設置水深

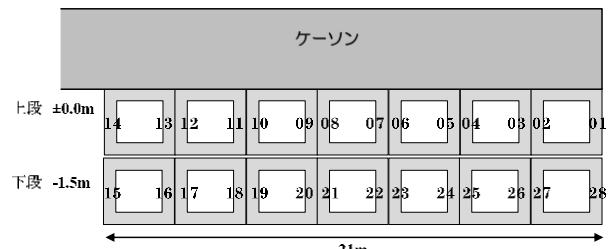


図-7 サンゴキューブ設置平面位置

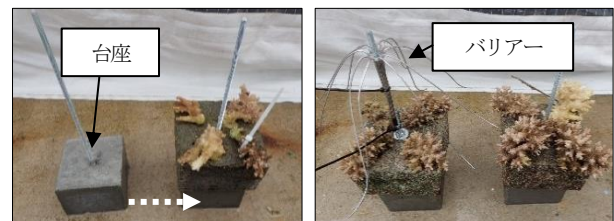


写真-4 取付けたサンゴキューブ(左:台座と台座を取付けたサンゴキューブ、右:食害防止バリアーの有無)

さらに, 魚による食害を防止するため, ステンレス線を用いた簡易なバリアーを製作し, 半数のキューブに取り付けた(写真-4, 右).

(8) 実装実験のモニタリング経過

水深±0.0mに設置したNo.01~No.14のサンゴキューブは, 夏季の大潮時に干出しサンゴが全滅した. 一方, 水深-1.5mに設置したNo.15~No.28のうちNO.15を除く13基のサンゴキューブが1年7ヶ月経過した2020年9月時点で順調に成長を続けていることが確認できた. なかでも成長が良好なNo.20, 22, 27(Asp.10%混和)の2019年3月~2020年9月の成長の経過を写真-5に示した. なお, 食害防止バリアーの有無による差異は見られなかった.

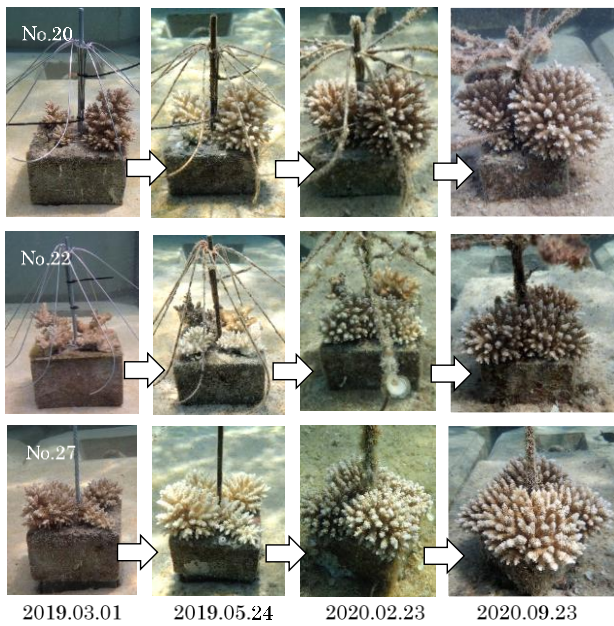


写真-5 港内に実装したサンゴキューブ成長の経過

3. まとめ

本研究開発・実装実験の結果は以下のとおりである。

- ① 折れたサンゴの枝を簡便に取り付けることができる
とともに根固めブロック等に設けた箱抜き部に迅速
にはめ込むことが可能な育成基盤を開発した。
- ② 水槽実験の結果、コンクリートの基盤に Asp.を混和
することによって、普通コンクリートの基盤に比べサ
ンゴの活着が促される可能性が示唆された。
- ③ サンゴキューブ 28 基を防波堤改良工事の根固めブ
ロックに 30 分程度で潜水士 2 名が簡便かつ迅速に設
置することができた。港湾工事においてより多くのサ
ンゴを植え付けることが可能になる。
- ④ サンゴキューブのうち、干出する水深±0.0mに設置し
たサンゴは全滅したが、水深-1.5mに設置した14基のう
ち、13基のサンゴが順調に成長を続けていることが、
枝の取り付けから2年8ヵ月経過、防波堤への設置から
1年7ヵ月経過した時点で確認できた。なお、Asp.の効
果は基盤への活着を促すことが期待されるものであ
り、実海域へ実装後の成長は海域の環境に依存する。
- ⑤ 実装した港内では毎年サンゴの産卵後にスリック（卵
と幼生の带状集合体）が確認されており幼生が供給さ
れ着生しているものと考えられるが、港内にはほぼサ
ンゴが見られない。サンゴキューブを実装した根固め
ブロックの表面に多くのシルトが堆積していること、
サンゴの成長がシルトの堆積量と関係有すること¹²⁾
から、ある程度成長し立体構造を有するサンゴキュー
ブはシルト堆積の影響を受けにくく、有性生殖による

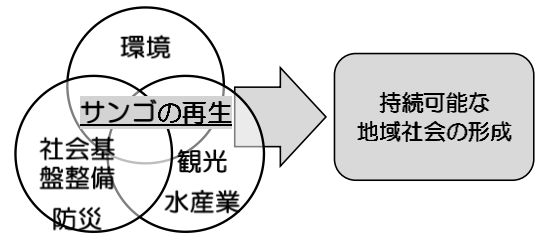


図-8 社会基盤整備と環境の両立、地域活性化のイメージ¹³⁾

幼生の着生段階からの増殖に比べ、生残・成長の機会を増やしているものと推察できる。

- ⑥ 折れたサンゴを地元のダイバーと漁業者が協力して活着させ、施工業者に創意工夫の一環として有償で提供することによって、a) 社会基盤整備と環境の両立が図れること、b) ボランティアではなく有償の事業としてサンゴの再生が成り立つ仕組みが可能なこと、c) 当事業モデルによって、地域の水産業・観光業にも相乗効果が導出される可能性があることが確認できた（図-8）。

4. 課題

課題を以下に示した。

- ① サンゴを再生することの価値評価が課題として上げられる。サンゴの増殖を主目的とした場合にはサンゴそのものの価値や事業のB/Cが問われるところであるが、ここでは、主目的である社会基盤整備にサンゴの増殖を付加する形を目指したことから、社会基盤整備時にどれくらいのコストをかけて環境配慮を組み込んでも良いのかという点が今後の議論・検討課題となる。
- ② ここで試行した仕組みを拡大するためには、サンゴの枝の確保が課題となる。今回の研究開発・実装実験では、座間味村漁業協同組合が有性生殖にて養殖・育成してきたサンゴの枝を利用したが、本来であれば、ボートのアンカーや観光客の立ち入りにより折れそのままでは枯死するサンゴを救出・回収し活着させ、サンゴの再生に役立てることがより有効な方法である。しかしながら、折れたサンゴの回収については沖縄県サンゴ移植マニュアル¹⁴⁾に「沖縄県では、漁業調整規則により、サンゴを採取する行為が原則禁止されています。サンゴを採取しなくても、採取とみなされる行為、例えば台風などで折れたサンゴを拾って、海底の基盤に固定することも禁止されています。」と記述されている。今後は折れたサンゴの救出・回収と有効活用、並びに有性生殖と組み合わせたサンゴの枝

の確保について検討・調整を進める必要がある。

- ③ 本研究開発では、Asp.がサンゴの活着促進に効果があることが示唆されたが、異なる環境条件下での再現性の確認並びに活着促進のメカニズム究明が残された課題である。前者については、他地域と連携するなどして実装箇所数を増やし、そこでのモニタリング結果を積み重ねていく必要がある。後者については、土木工学の域を超える部分も多く、サンゴの生理・生態の専門家による今後の研究に期待するところである。

謝辞：養殖サンゴを提供いただくとともに水槽を利用させていただいた座間味村並びに座間味村漁業協同組合、アミノ酸の提供及び仮説立案において貴重なアドバイスをいただいた福田光則氏(味の素株)、現地調査をサポートしていただいたチーム AKA35 の比嘉めぐみさん、鈴木貴子さん、様々な側面で支援をいただいた元日建工学株会長行本卓生氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 沖縄県環境部：サンゴ礁再生の道筋、沖縄県サンゴ礁保全再生事業成果発表シンポジウム（さんごの海フェスタ in OIST）配布資料, pp.3-4, 2016.
- 2) 上月康則, 中西敬, 佐藤和博, 多良千鶴, 西村博一, 山口奈津美, 岩城嘉宏, 山中亮一：アミノ酸混和コンクリート表面上での付着微細藻類の生長特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.111-116, 2010.
- 3) 上月康則, 佐藤和博, 中西敬, 西村博一, 多良千鶴, 田保橋健, 石田達憲, 中田紘子, 水口祐太, 野上文子, 山口奈津美, 山中亮一：アミノ酸コンクリート上の遷移初期の付着生物相に関する考察, 土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol.67, No.2, pp.1126-1130, 2011.
- 4) M.Azizur Rahman, Tamotsu Oomori : Aspartic Acid-rich Proteins in Insoluble Organic Matrix Play a key Role in the Growth of Calcitic Sclerites in Alcyonarian Coral, CHINESE JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY, Volume24, Issue12, pp.2127-2128, 2008.
- 5) Lallan P. Gupta, Atsushi Suzuki, Hodaka Kawahara : Aspartic acid concentrations in coral skeletons as recorders of past disturbances of metabolic rates, Coral Reefs (2006) 25, pp.599-606, 2006.
- 6) Lisa M. FITZGERALD, Alina M. SZMANT : Biosynthesis of 'essential' amino acids by scleractinian coral, Biochem.J. (1997) 322, pp.213-221, 1997.
- 7) 大森信, 岩尾研二：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, Akajima Marine Science Laboratory, pp.33-34, 2014.
- 8) 水産庁漁港漁場整備部：改訂 有性生殖によるサンゴ増殖の手引き, 2019.
- 9) 新里由也：サンゴの遺伝子研究のこれまでの歩みとゲノム解読による新展開, 海の研究, 21(4), pp.119-130, 2012.
- 10) 佐藤和博, 上月康則, 多良千鶴, 西村博一, 中西敬, 上田隆雄, 山中亮一：コンクリートに混和したアルギニンの存在形態と溶出機構, Journal of the Society of Materials Science, japan, Vol.64, No.5, pp.417-423, May, 2015.
- 11) 早乙女伸枝：HPLCによる海水中の超微量溶存アミノ酸分析, 東京大学技術発表要旨, Ver12, 2014.
- 12) 松本範子, 安田誠宏, 山中亮一, 松下紘資, 田島佳征, 佐藤裕則, 岡本玄洋, 中西敬：浜崎海岸の人工リーフにおけるサンゴの生育と環境要因に関する現地調査, 沿岸域学会誌, Vol.33 No.3, pp.37-47, 2020.
- 13) (一社)海の子, 徳島大学, 日建工学株, 総合開発株：折れたサンゴを助けよう！クローン増殖によるサンゴ再生の取り組み, 国際サンゴ礁年さんごゆんたく館ミーティング, ポスター, 2018.
- 14) 沖縄県文化環境部自然保護課, 沖縄県サンゴ移植マニュアル, 平成20年度版, pp.6-7.

(Received February 4, 2021)

(Accepted April 23, 2021)

ATTEMPT TO BUILD A CORAL BREEDING PROJECT MODEL FOR BREAK-WATER DEVELOPMENT AIMING AT BOTH INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT AND ENVIRONMENT

Takashi NAKANISHI, Yoshimitsu HIGA, Hiroki TANIGUCHI,
Yoshinori ARAKAKI, Hiroshi MATSUSHITA, Hirokazu NISHIMURA,
Hirohumi KASAI and Tsutomu ODAJIMA

Aiming to achieve both social infrastructure development and the environment, we tried to create a mechanism to incorporate coral proliferation into port maintenance and function enhancement projects. We developed concrete base on which broken coral branches can be easily attached. It was suggested that that coral survival could be promoted by mixing aspartic acid. A block with broken coral branches was used for breakwater construction, and subsequent monitoring surveys confirmed that the coral was growing steadily. It has been confirmed that (1) it is possible to achieve a balance between social infrastructure development and the environment, (2) coral regeneration can be established as a paid business rather than as a volunteer, and (3) synergistic effects may be derived for the local fisheries and tourism industries.