

サンゴ増殖基盤に必要な機能と構造 に関する考察

DISCUSSION ABOUT "FUNCTION AND STRUCTURE" FOR THE ARTIFICIAL BASE OF CORAL DISTRIBUTION

安藤亘¹・渡邊浩二¹・田村真弓²・三宅崇智³・北野倫生⁴・山本秀一⁵
Wataru ANDO, Kouji WATANABE, Mayumi TAMURA, Takatomo MIYAKE, Michio KITANO
and Hidekazu YAMAMOTO

¹正会員 (社)水産土木建設技術センター(〒104-0045 東京都中央区築地2-14-5)

²(社)水産庁漁港漁場整備部整備課(〒100-8907 東京都千代田区霞が関1-2-1)

³正会員 修(工学) (株)エコー(〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

⁴博(工学) (株)エコー(〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

⁵正会員 博(生物資源工学) (株)エコー(〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

The function required on the artificial base of coral distribution are the structure that the planula larvae and the coral fragments are easy to recruit, the structure to be stable for wave, the structure that is easy to transplant juvenile coral, the structure to prevent feeding by marine animate and so forth considering environmental factors exerting to the coral recruitment, growth and survival. The basic structures are consisted of lattice structure, measure type structure, stable structure and prevention structure from feeding damage and the design considering hydrographic conditions around the project area is significant.

Key Words: coral, function and structure, artificial base, aquaculture structure, Okinotorishima

1. はじめに

サンゴ群集は亜熱帯から熱帯海域に分布し、サンゴの骨格が形成する複雑な立体構造等により、陸上の熱帯雨林に劣らず一次生産力および生物の多様性が高いことから、漁場環境として重要な役割を果たしている。しかし、沿岸域の開発や地球温暖化等の影響でサンゴ群集の衰退が報告されており¹⁾²⁾³⁾、水産業の立場からもサンゴ群集の増殖技術の開発が望まれている⁴⁾。

サンゴ群集の増殖技術には、いくつかの事例が報告されている。その一つとして海底に安定基盤を形成する方法が知られている⁵⁾⁶⁾。これは港湾などの人工構造物に付加的にサンゴ群集が自然着生した事例⁷⁾やそれを促進する技術⁸⁾等である。また、水産的な視点から、海底に安定基盤を設置して藻場を造成する技術は古くから検討されているが⁹⁾、サンゴ増殖に特化した基盤の開発事例は国内には無い。海外では、フロリダやインドネシアで、船舶の座礁やダイナマイト漁等で底質が不安定になり、サンゴ群集の加入・成長が減少した海底を安定化させる目的に、基盤を整備した事例があるが¹⁰⁾¹¹⁾、既存のコンクリ

ートブロック等を用いたものである。サンゴ増殖に特化した基盤には、既存の地形を模した人工基盤が数例あるが¹²⁾¹³⁾、どれもサンゴ増殖基盤に必要な機能と構造に関する研究事例は見あたらない。

そのような状況において、沖縄県の水産資源生物であるタカセガイ[和名:サラサバテイ, 学名:*Tectus niloticus*]の中間育成を行うためのタカセガイ中間育成礁(以下、タカセガイ礁)の内部にサンゴが自然着生した事例が確認され、その機能と構造に関する仮説が提示された¹⁴⁾。その仮説では、タカセガイ礁内部の格子構造と外形の桁型構造に、サンゴ増殖基盤としての①浮泥・漂砂の影響軽減機能、②サンゴ幼生や餌料のトラップ機能、③光量の維持機能、④海水交換維持機能、⑤波浪軽減機能、⑥食害生物の進入防止機能、⑦タカセガイによる競合生物(藻類)の除去機能などが備わっているとしている。

本研究は、以上のような背景のもとに、宮古島(沖縄県)、沖ノ鳥島(東京都)、阿嘉島(沖縄県)で現地実証実験を行い、サンゴ増殖基盤に必要な機能と構造に関する検討を行った。特に、日本最南端の島である沖ノ鳥島周辺においては、サンゴを増やしてサンゴ礁の維持を図り、多種多様な生物が共存・

生産する場を形成することが、水産動植物の生育場としての機能の強化と島の保全にも寄与することが期待されている¹⁵⁾。

2. 方法と結果

(1) 宮古島に設置されているタカセガイ礁におけるサンゴ増殖効果の検証実験

宮古島ではタカセガイ礁56基(112柵)を池間大橋東方の浅瀬に設置し、1996年からタカセガイの中間育成事業が行われている。タカセガイ礁は鉄筋コンクリート製の柵型2連(外測:5.1×2.8×1.1 m, 内測:2.1×2.1×0.6 m, 重量:約26 t)で、柵内部にFRP製格子板(2.01×1.01×0.04 m, 目合:5×10 cm)が2枚/柵設置されている(図-1)。

このタカセガイ礁内にサンゴ群集が確認されたため¹⁴⁾、我々はサンゴ増殖基盤に必要な機能と構造について、2007年2月から2009年2月まで検証実験で確認を行った。そして、2008年2月までの成果からタカセガイ礁の格子構造と柵構造が、サンゴ増殖基盤に必要な機能と構造に関する仮説の一部であることを確認した¹⁶⁾。その後も継続的にタカセガイ礁内外の生物調査、稚サンゴの加入量調査、流況と水温調査を実施している。

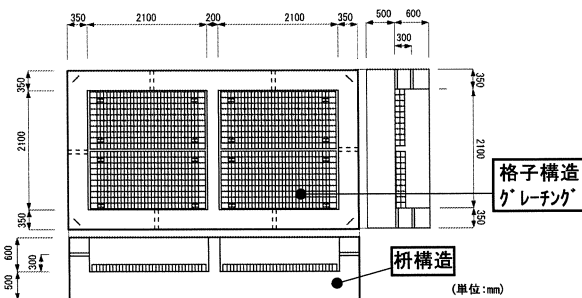


図-1 タカセガイ礁の構造

その結果、前述した仮説に対して、次の結果が得られた。①浮泥・漂砂の影響軽減機能に対しては、4回のセディメントトラップから柵内で浮泥の影響が少ないことが分かった。②サンゴ幼生のトラップ機能に対しては、隣接する3つ(A, B, C)のタカセガイ礁の柵内外の壁面観察から、柵の内側で加入量が多いことが分かり(表-1)、サンゴ幼生のトラップ機能が、格子構造だけでなく¹⁶⁾柵構造の壁面でも確認できた。③光量の維持機能に対しては、水深が浅いことから明確な違いは確認できなかった。④海水交換維持機能に対しては、満潮時に適当な海水交換が図られていることが分かった。⑤波浪軽減機能に対しては、波浪の影響を受けやすい干潮時に柵内の流速が小さくなることで、サンゴ群体への直接的な波圧低減効果があると考えられた。⑥食害生物の進入防止機能に対しては、柵内外で魚類の噛み跡が確認さ

れなかったが、ウニ類の個体数が多い柵ではサンゴの被度が低かった。⑦タカセガイによる競合生物(藻類)の除去機能に対しては、貝類の数とサンゴの被度に明確な関係は見られなかったが、藻類の多い柵ではサンゴの被度が低かった。

また、柵内外の2008年2月から2009年2月までのサンゴの長径の変化量は、図-2の柵内のサンゴの成長量が柵外に比べて大きく、柵型構造と格子構造がサンゴ増殖基盤に必要な機能を有していることが示された。

表-1 タカセガイ礁の柵内外壁面のサンゴ加入量(3つの柵(A, B, C)の内外の壁面に加入した平均群体数/m²)

	A	B	C
柵内	37±6.2	24±6.0	19±2.9
柵外	1±0.6	1±0.6	0±0

※2009年2月の観察結果。各柵の4壁面における枠取り調査から、平均値と標準偏差値を求めた。

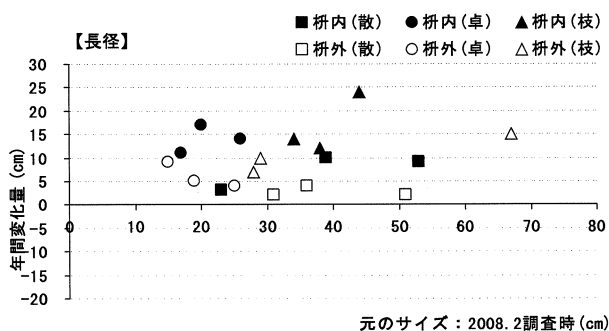


図-2 柵内外のサンゴサイズ（長径）年間変化量
散：散房花状ミドリイシ類、卓：卓状ミドリイシ類、枝：枝状ミドリイシ類を示す。

(2) 沖ノ鳥島におけるサンゴ増殖実験礁の設置とモニタリング調査

沖ノ鳥島に2006年5月と2007年5月に図-3に示すサンゴ増殖実験礁（以下、実験礁）各4基（計8基）を図-4に示す礁内に設置した。実験礁の構造は、ステンレス製のフレームとFRP製グレーチングで構成されている。グレーチングはタカセガイ礁の格子構造を参考にした。大きさは1.0m×1.4m×1.0mで、海底面から0m, 0.5m, 1mの高さにグレーチングの柵を設けた。これらの実験礁へのサンゴの自然加入の状況については、2008年5月にモニタリング調査を行った。

その結果、図-4に示すとおり礁内では、場所によって加入の傾向が異なり、西側ほど加入群体数が多いことが判明した。沖ノ鳥島は絶海の孤島であり、サンゴ群体の自然加入が少ないとされていたが¹⁵⁾、この結果は、別途実施した加入量調査の結果¹⁷⁾や産卵時期の流況の結果(卓越流向：東から西への流れ)¹⁸⁾と整合する。また、サンゴの着生位置と海底面からの高さの関係については、西側では海底面から

30cmまでの範囲には加入がみられていない。さらに、実験礁のフレームに着生したサンゴの長径と海底面からの高さとの関係を計測した結果(図-5), 2年間で長径が60mm以上に成長した群体は海底面から70cm以上の高さに多く分布していることが分かった。これは、激浪時の漂砂の影響によるものと推察され、着生させる位置を、漂砂の影響範囲に合わせて高さ調整することが必要であることを示唆している。

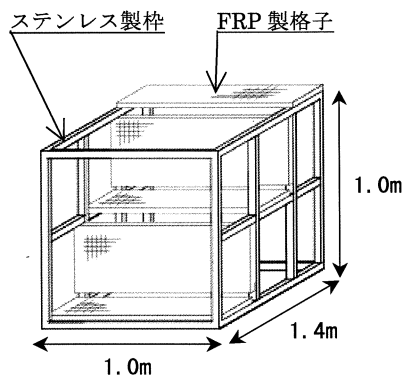


図-3 サンゴ増殖実験礁の構造

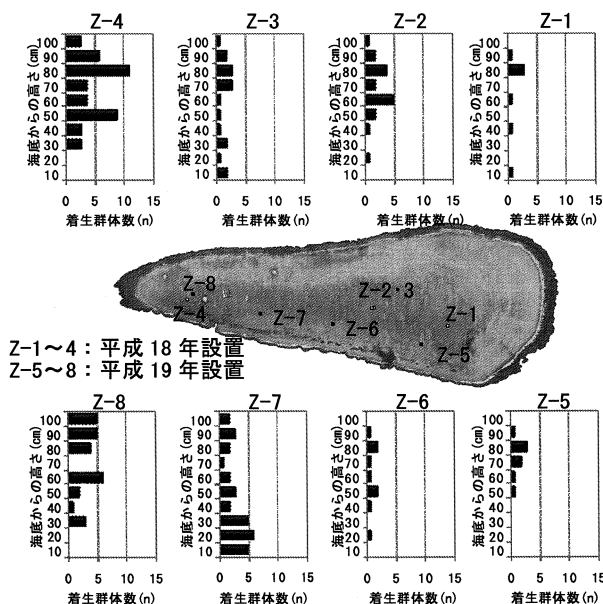


図-4 サンゴ増殖実験礁の設置位置とサンゴ加入量

サンゴ群体の着生位置は図-6に示すとおりグレーチングの裏面、格子の中に多く、表面の加入量が少ない。なお、平面的な構造との比較実験を行っていないが、平面的な構造は表面部分の面積がサンゴ群体の加入によって無駄になることが確認されたものと考えられる。

また、波浪等により破損して海底を移動してきたと考えられるサンゴ断片が、実験礁の底面の格子にトラップされて固着・成長している事例も観察されている。このことは底面部の格子構造が無性生殖に寄与する効果があることを示唆するものである。

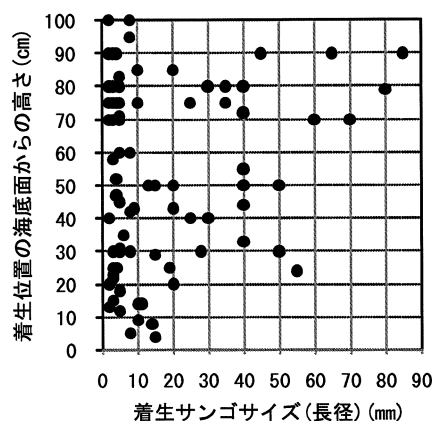


図-5 サンゴの着生高さと長径の関係

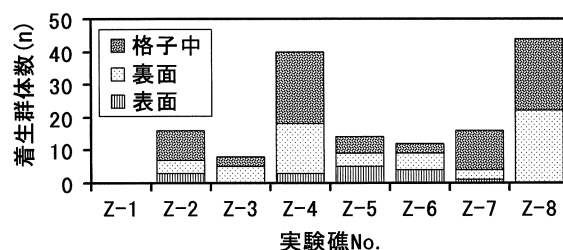


図-6 サンゴ群体の着生位置

(3) 阿嘉島におけるサンゴ増殖基盤プロトタイプの設定とモニタリング調査

宮古島および沖ノ島島のモニタリング結果を受けて、図-7に示す桁構造と格子構造からなるサンゴ増殖基盤のプロトタイプ（以下、プロトタイプ礁）を考案した。プロトタイプ礁は、鉄筋コンクリート製の台座(2.4×2.4×0.5m, 重量:約6 t)の上にFRP製の格子板(1.2×1.2×0.5m)をステンレスフレームで固定し、さらにその上にもFRP製格子板(0.6×0.6×0.5m)を同様に固定したものである。プロトタイプ礁は4基製作し、2基は桁構造の効果を検証するため、高さ0.5mの木製外枠をコンクリート基盤上の四方に取り付けた。

プロトタイプ礁は、2008年2月に沖縄県の阿嘉島阿嘉漁港地先の水深D.L.-3.8mの平坦な海底に設置し、4月には阿嘉島臨海研究所および阿嘉島種苗生産センターで採卵・飼育した3種(*Acropora tenuis*, *A. humilis*, *A. formosa*)の0年齢から3年齢の阿嘉島産の稚サンゴを移植し、生残・成長の状況をモニタリングすることで機能の評価を行った。また、一部の移植サンゴ群体には写真-1のように食害防止カゴ(網目状のビニールコーティングした針金製のカゴ)を取り付け、さらに、加入量を把握するため、4月に加入量調査板を設置した。

桁や食害防止カゴの効果に関するモニタリング調査は、2008年の5月、7月の2回実施し、サンゴの生存・部分死・全部死等の状態を潜水目視で観察した。

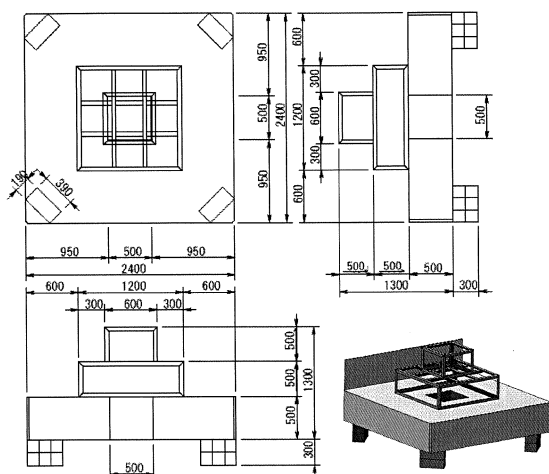


図-7 サンゴ増殖プロトタイプ礁の構造
(桁構造は、コンクリート基盤上の四面を取り囲む構造とした。図では一面のみ示した。)

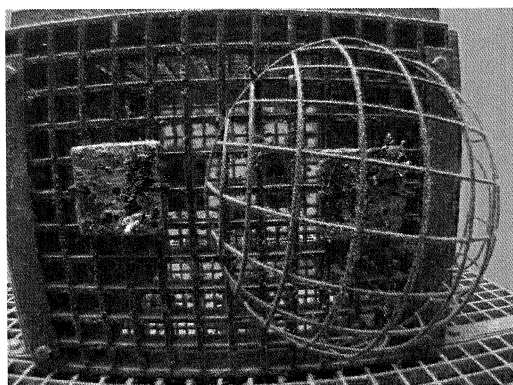


写真-1 食害防止カゴの設置状況

調査の結果、図-8に示すとおりサンゴの生残に桁の有無は効果がないことが窺える。タカセガイ礁のように水深が浅く、干潮時に干出する場所では、波浪の制御や海水交換などの機能を発揮するが、プロトタイプ礁を設置した深い場所では、効果は期待できない。また、図-9に示すとおり食害防止カゴの効果は確認された。ブダイ等の食害魚類の多い海域では食害防止対策が必要である。

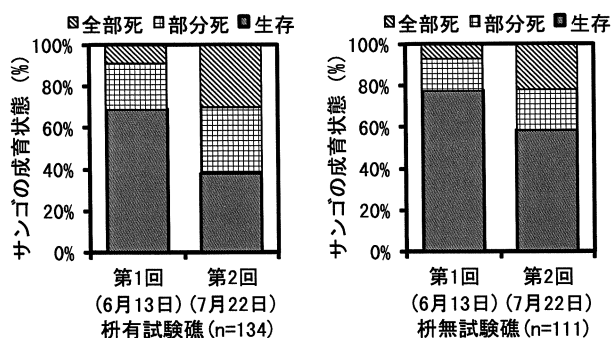


図-8 桁構造の有無とサンゴの生残率

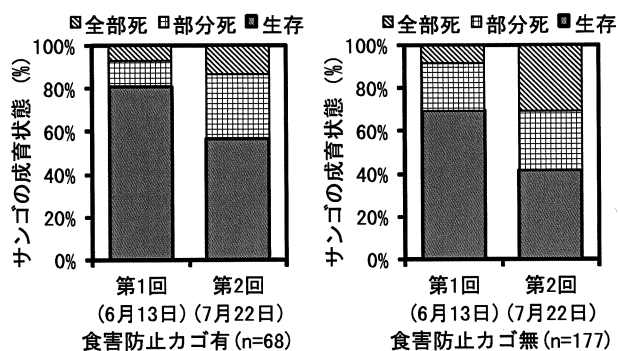


図-9 食害防止カゴの有無とサンゴの生残率

3. 考察

(1) サンゴの加入・成長・生残に関する環境因子

サンゴの生活史を模式的に図-10に示す¹⁹⁾。サンゴの増殖する過程には、放卵放精やプラヌラ放出によって増殖する有性生殖過程と、波浪等により破損したサンゴ断片が海底を移動して固着する無性生殖過程がある。サンゴはこの2つの過程によって基盤上に加入し、成長するとともに、外的要因によって死亡する。つまり、サンゴ群体は、このような加入と成長、そして死亡のバランスの上に形成されている。

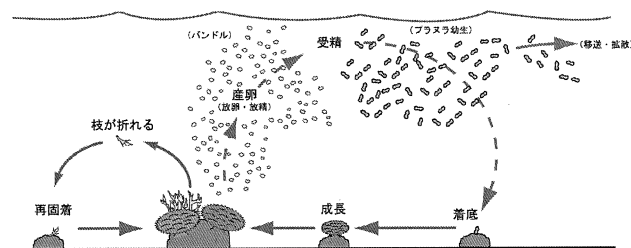


図-10 サンゴの生活史¹⁹⁾を一部改変

サンゴの成長・生残に関する環境因子を模式的に図-11に示す²⁰⁾。サンゴの成長・生残は、主に波浪、日照、水質に規定されている。それらが水深や地形の影響を受けて複合的に基盤上のサンゴ群体に作用している。したがって、サンゴ増殖基盤を考えるにあたっては、サンゴの成長・生残を高めるために、図-11に示した基盤、波浪・流速、堆積物、水中日照量、競合生物、捕食生物およびサンゴの加入に配慮する必要がある。

(2) サンゴ増殖のための環境因子ごとの配慮事項

図-11に示した環境因子に対するサンゴ増殖のための配慮事項は以下のように整理することができる。

着生基盤：多くのサンゴは、砂礫質の不安定な底質には着生できないため¹⁰⁾、底質の安定化が必要である。

波浪・流速：サンゴ群体の成長は、適度な波浪環境下では成長が速く、大きな波浪環境下では成長が遅いため²¹⁾、適度な波浪制御が必要である。

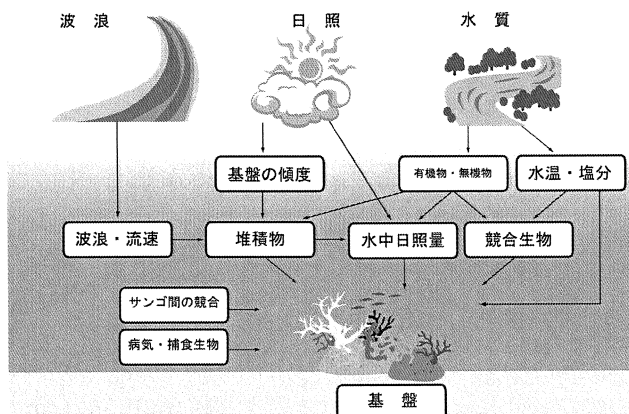


図-11 サンゴの成長・生残に関する環境因子²⁰⁾を一部改変

堆積物：堆積物が多い環境下ではサンゴ幼生の加入量が少ないため²²⁾、浮泥や漂砂の影響軽減が必要である。また、タカセガイ礁の調査結果からも、浮泥の堆積が少ない柵内の方がサンゴの加入が多いことが確認されている。

水中日照量：光量はサンゴの成長に影響を及ぼす主要因である²³⁾²⁴⁾。種類によって適正な光量が異なるが、光量の維持が必要である。

競合生物：サンゴの競合生物として藻類があげられる。フロリダでは植食動物のガンガゼの減少がサンゴ群集衰退の原因と考えられている²⁵⁾。また、タカセガイ礁の調査結果からも藻類が多い場所でサンゴの被度が低いことが確認されている。したがって、競合生物を排除するには、ガンガゼやタカセガイとサンゴが共生させることが必要である。

捕食生物：サンゴを捕食するオニヒトデやブダイ²⁶⁾の侵入を防止する必要がある。阿嘉島のプロトタイプ礁の実験結果からも食害防止カゴの効果が確認されている。

サンゴの加入：サンゴの加入はプラヌラ幼生の加入とサンゴ断片の加入がある。プラヌラ幼生やサンゴ断片の着生を促進するためには、これらをトラップさせることが必要である。タカセガイ礁の格子構造や柵構造は、プラヌラ幼生をトラップする機能が確認されている。沖ノ鳥島の実験礁でもフレームやグレーチングに多くのサンゴ幼生が成長していることが確認されている。また、サンゴ断片についても底面のグレーチングにトラップされていることが確認されている。この他、サンゴの自然加入が期待できない場合は、稚サンゴの移植²⁷⁾や断片サンゴの移植²⁸⁾、幼生放流²⁹⁾などが必要で、その場合には、フレームやグレーチングは移植しやすい構造である。

(3) サンゴ増殖基盤に必要な機能と構造

宮古島、沖ノ鳥島、阿嘉島で行った現地実証実験をもとに、サンゴ増殖基盤に必要な機能とその他の構造を図-12に整理した。図-12からわかるとおり、サンゴ増殖基盤の基本構造には、格子構造と柵構造に食害防止構造を加えた安定する基盤が必要である。それぞれの構造の特徴を下記に示す。

格子構造：サンゴ幼生やサンゴ断片のトラップに有効であるとともに、浮泥が堆積しにくい点も有効である。さらに、稚サンゴなどの移植に対しても優れた構造である。

柵型構造：水深の浅い海域においては波浪制御や海水交換の促進、食害生物の侵入抑制の面から有効であるが、プロトタイプ礁の結果から、水深の深い海域では効果は期待できないと思われる。

食害防止構造：カゴで食害生物から防護することが可能である。ただし、カゴには浮泥が堆積したり藻類が繁茂したりすることも考えられ、材質や形状について検討する必要がある。

安定性：流れによる水平力や滑動に対して安定する必要がある³⁰⁾。特に、格子構造の場合には、自重が軽くなるため、沖ノ鳥島の実験礁のように、アンカーボルトを海底に打ち込んで固定する必要がある。

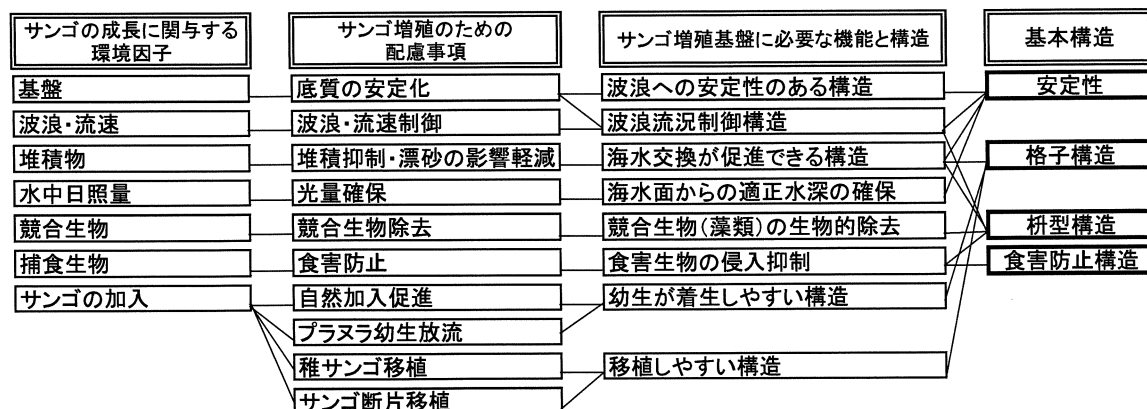


図-12 サンゴの加入・成長・生残に関する環境因子とサンゴ増殖基盤に必要な機能と構造

4. 結 論

沖ノ鳥島のサンゴ増殖技術開発の一環として、宮古島、沖ノ鳥島、阿嘉島で現地実証実験を行い、サンゴ増殖基盤に必要な機能と構造に関する検討を行った。その結果、サンゴ増殖基盤に求められる機能は、サンゴの加入・成長・死亡に影響を及ぼす環境因子を排除すること、プラヌラ幼生やサンゴ断片が加入しやすいこと、波浪に対して安定性があること、稚サンゴが移植しやすいこと、食害生物からサンゴを防護することが必要であることを明らかにした。そして、そのための構造として、格子構造、桁型構造、食害防止構造をもつ安定した基盤であることを条件として設計する必要がある。今後は、実用化に向けて、詳細事項や施工方法についても検討する予定である。

参考文献

- 1) 土屋誠：サンゴ礁からの警告ー最大規模の白化現象は何を意味するかー, *Galaxea JCRS*, Vol.1, pp.27-29, 1999.
- 2) Hoegh-Guldberg O.: Global climate change and the thermal tolerance of corals, *Galaxea JCRS*, Vol.2, pp.1-11, 2000.
- 3) Hoegh-Guldberg O., Mumby P. J., Hooten A. J., Steneck R. S., Greenfield P., Gomez E., Harvell C. D., Sale P. F., Edwards A. J., Caldeira K., Knowlton N., Eakin C. M., Iglesias-Prieto R., Muthiga N., Bradbury R. H., Dubi A. and Hatziolos M. E.: Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, pp.1737-1742, 2007.
- 4) 三上信雄, 安藤亘, 石岡昇, 大隈篤, 山本秀一, 北野倫生：沖ノ鳥島周辺海域における水産利活用の促進, *海洋開発論文集*, 第23巻, pp.925-930, 2007.
- 5) 海の自然再生ワーキンググループ：海の自然再生ハンドブック, 第4巻サンゴ礁編, 国土交通省港湾局, ぎょうせい, 2003.
- 6) 大森信：サンゴ礁に関する技術手法-現状と展望-, 環境省自然環境局, 2003.
- 7) 森田晋, 田淵郁男, 前原弘海, 進明男, 児玉理彦, 山本秀一：サンゴの人工構造物への着生状況, *海岸工学論文集*, 第39巻, pp.1001-1005, 1992.
- 8) 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：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*, 第53巻, pp.1106-1110, 2006.
- 9) 徳田廣, 川嶋昭二, 大野正夫, 小河久朗：海藻の生態の藻礁, 緑書房, 1991.
- 10) Schmahl P. S., Donald R. D. and Sharon K. S.: Cooperative natural resource damage assessment and coral reef restoration at the container ship Houston grounding in the Florida Keys National Marine Sanctuary, *Coral Reef Restoration Handbook*, CRC Press, pp.235-256, 2006.
- 11) Fox H. E.: Rapid coral growth on reef rehabilitation treatments in Komodo National Park, Indonesia. *Coral Reefs* 24(2): p.263, 2005.
- 12) Kaufman L. S.: If you build it, will they come? Toward a concrete basis for coral reef gardening, *Coral Reef Restoration Handbook*, CRC Press, pp.119-142, 2006.
- 13) Tallman J.: Aesthetic components of ecological restoration, *Coral Reef Restoration Handbook*, CRC Press, pp.193-203, 2006.
- 14) Omori M., Kajiwaru K., Matsumoto H., Watanuki A. and Kubo H.: Why corals recruit successfully in top-shell snail aquaculture structures?, *Galaxea JCRS*, 8, pp.83-90, 2007.
- 15) 三上信雄, 安藤亘, 石岡昇, 中村良太, 河野大輔, 北野倫生：沖ノ鳥島のサンゴの維持・拡大を目的とした種苗生産技術と増殖技術の開発, *海洋開発論文集*, 第23巻, pp.931-935, 2007.
- 16) 安藤亘, 石岡昇, 岩村俊平, 三宅崇智, 宮地健司：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*, 第24巻, pp.813-818, 2008.
- 17) 北野倫生, 三宅崇智, 山本秀一, 藤田孝康, 安藤亘, 石岡昇：沖ノ鳥島のサンゴの広域分布と加入特性, *日本サンゴ礁学会講演要旨集*, p.91, 2007.
- 18) 高尾敏幸, 白木喜章, 柴木秀之, 安藤 亘, 三上信雄：沖ノ鳥島の流動特性とサンゴの分布特性, *日本サンゴ礁学会講演要旨集*, p.76, 2007.
- 19) 灘岡和夫, 波利井佐紀, 池間建晴, Paringit, E., 三井順, 田村仁, 岩尾研二, 鹿熊信一郎：沖縄・慶良間列島におけるサンゴ産卵とスリック動態に関する観測, *海岸工学論文集*, 第49巻, pp.1176-1180, 2002.
- 20) Yamamoto H., Sugiura N. and Maekawa T.: Coral growth processes using multiple regression analysis and neural network model, *Eco-Engineering*, 14(3), pp.3-11, 2002.
- 21) Adey W. H.: Coral reef morphogenesis, a multidimensional model, *Science*, 202, pp.831-837, 1978.
- 22) Babcock R. and Davies P.: Effects of sedimentation on settlement of *Acropora millepora*, *Coral Reefs*, p.9, 205-208, 1991.
- 23) Chappell J.: Coral morphology, diversity and reef growth, *Nature*, 288, pp.249-252, 1980.
- 24) Chalker B. E., Barnes D. J., Dunlap W. C. and Jokiel P. L.: Light and reef-building corals, *Interdisciplinary Science Reviews*, 13(3), pp.222-237, 1988.
- 25) Macintyre I, Glynn P. W. and Hinds F.: Evidence of the role of *Diadema antillarum* in the promotion of coral settlement and survivorship, *Coral Reefs* 24: p.273, 2005.
- 26) Sanchez J., Gil M., Chasqui L. and Alvarado E.: Grazing dynamics on a Caribbean reef-building coral, *Coral Reefs* 23: pp.578-583, 2004.
- 27) 北野倫生, 山本秀一, 渡邊浩二, 青田 徹, 田村真弓：沖ノ鳥島産稚サンゴ 6 万群体の移設, *日本サンゴ礁学会講演要旨集*, p.135, 2008.
- 28) 大久保奈弥, 大森信：世界の造礁サンゴの移植レビュー, *Galaxea JCRS*, 3, pp.31-40, 2001.
- 29) 林原毅, 加藤雅也, 玉城泉也, 伏屋玲子, 清水弘文：幼生放流によるサンゴ群集の修復技術, *みどりいし*, 18, pp.7-11, 2007.
- 30) 漁港・漁場の施設の設計の手引検討委員会, 水産庁監修：漁港・漁場の施設の設計の手引, 社団法人全国漁港漁場協会, 2003.