

サンゴ幼生着床具を用いたサンゴ群集修復マニュアル



平成 19（2007）年 3 月

環境省 九州地方環境事務所 那覇自然環境事務所

目 次

I. サンゴ礁修復の意義と方針	1
1. サンゴ礁の再生	1
(1) サンゴ礁の衰退	1
(2) 再生の方策	2
2. サンゴ礁の恩恵	3
3. サンゴ礁修復の意義と方針	6
(1) 修復の意義	6
(2) 修復の方針	6
II. サンゴ群集修復の手法	9
1. 修復場所の選定	10
1-1. サンゴ群集現況調査	10
(1) リモートセンシング画像取得	10
(2) 画像の識別	13
(3) 礁池サンゴ礁底調査	18
1-2. 修復候補地の選定方法	25
(1) サンゴ被度	25
(2) 堆積物	25
(3) 水温	26
(4) オニヒトデ	26
(5) 候補地の選定	27
2. 修復候補地の評価	28
2-1. 着床具を用いた加入調査によるサンゴ礁復元力の検証	28
(1) 設置時期	28
(2) 設置数	28
(3) 着床具抽出	29
(4) 解析	29
2-2. 稚サンゴ出現状況調査によるサンゴ礁復元力の検証	30
(1) 方法	30
(2) 解析	31
2-3. 幼生供給力	34
2-4. 評価	36
3. 移植手法	38
(1) 有性生殖と無性生殖	38
(2) 有性生殖法の利点	39

(3) 連結式着床具の開発	40
4. 着床具の製作	42
(1) 着床具	42
(2) 樹脂ケース・着床具ケース・架台	43
5. 着床具の設置	45
(1) 設置時期	45
(2) 設置場所	47
(3) 設置工事	48
(4) 着床具抽出による着床状況の確認	52
(5) 維持管理	59
6. 採苗数予測	60
(1) 抽出時期	60
(2) 抽出法	60
7. 採苗	62
(1) 採苗時期	62
(2) 採苗方法	63
(3) 運搬	66
8. 移植	68
(1) 移植ユニットの選定	68
(2) ユニットの設定	68
(3) 移植	70
(4) 環境測定	74
9. モニタリング	76
(1) 対象種苗設定	76
(2) 調査内容	78
(3) モニタリング期間	78
(4) 解析	79
索引	85

はじめに

沖縄県八重山群島の石垣島と西表島の間には、石西礁湖と呼ばれるわが国で最大規模のサンゴ礁が発達している。石西礁湖内のほとんどの海域は 1972 年に西表国立公園に指定され、また 1977 年には同海域内に 4 つの海中公園地区が指定されている。

一方、石西礁湖内では、海中公園地区の指定と前後して、オニヒトデが大発生し、駆除作業が行われたものの、1980 年代半ばには礁湖内のサンゴ群集は北部の一部海域を除き、ほぼ全域が死滅した。このオニヒトデの異常発生は餌となるサンゴ群集の消失によって 1980 年代後半に終息し、その後、礁湖内の各地でサンゴ類は徐々に回復がみられてきた。しかし、1998 年には高海水温に伴う大規模な白化現象が発生し、また陸域からの土砂の流入等の様々な影響により、石西礁湖のサンゴ礁生態系は現在も大きな脅威にさらされている。

このため、環境省では「石西礁湖自然再生マスタープラン」を策定し、平成 17 年度より、サンゴ幼生着床具を用いた有性生殖移植法によるサンゴ群集修復事業を実施している。本事業は今後、発展的に展開していくことが予想されるが、事業の拡大に伴い、携わる技術者の増加が必要となってくる。しかし、着床具を用いた移植法は、最新の技術を用いて実施されているため、参考とすべき教科書はなく、マニュアルの製作が不可欠である。

そのため、これまでに得られた知識と経験に基づき、着床具を用いて移植を行おうとする技術者のためのマニュアルを作成した。なお、本マニュアルは、石西礁湖の事例を用いながら、可能な限り一般化するよう努めた。

本マニュアルが、わが国におけるサンゴ群集修復事業の推進に寄与し、更なる技術の発展につながることを期待する。

2007 年 3 月

環境省 九州地方環境事務所

那覇自然環境事務所

I. サンゴ礁修復の意義と方針

1. サンゴ礁の再生

(1) サンゴ礁の衰退

サンゴ礁生態系の根幹を成す造礁サンゴ類（以下単にサンゴという）の生物学的特性は栄養源を体内に共生している褐虫藻と呼ばれる直径約 $10\ \mu\text{m}$ の単細胞藻類 *Symbiodinium* の光合成により作り出される栄養物に依存していることで、貧栄養であり、透明度の高いサンゴ礁の海（図 I.1.1）に適応した生活機能を有していることである。サンゴ礁本来の海水は栄養塩が乏しく、例えば、人為的影響をあまり受けていない西表島網取湾において東海大学海洋研究所が 1995、1996 年の 2 年間、夏秋を主に測定した表層全窒素平均値は 0.047mg/l で（油井ら 1997）、大阪湾などと比較するとほぼ 1 桁低い。



図 I.1.1 澄み切ったサンゴ礁の海（西表島崎山湾）

このように、サンゴ群集の健全な成長のためには、良好な水質環境が必要であるが、陸域の開発のありようによっては、礁池の水質環境は悪化して、生息するサンゴ群集に悪影響を及ぼす。そのため、サンゴ礁の保全には陸水域の保全が極めて重要であり、また、河口から連続する干潟、マングローブ、海草藻場の一連の生態系が持つ環境保全機能を維持することが求められる。

一方、サンゴ礁には高水温により引き起こされるサンゴ白化現象やサンゴを食害するオニヒトデ大発生のような海自身に起因する攪乱もあり、それらがサンゴ群集に及ぼす影響も小さくない。琉球列島では 1998 年に大規模な白化現象が起こり、サンゴ群集は大

大きく衰退した。陸域からの表土流出、海域における様々な攪乱により、わが国のサンゴ礁は近年大きく衰退し、その保全と再生が焦眉の急となっている。

(2) 再生の方策

陸域からの表土流出対策には集水域の土地管理を進めることが不可欠で、地域住民の参加を通じて効果をあげることが期待できる。一方、海に起因する攪乱への対策については、サンゴ礁の複雑な変遷過程を十分に理解した上で、その方策を検討する必要がある。

サンゴ礁では過去にもオニヒトデの大発生によりサンゴ群集の大規模な死滅があり、石西礁湖ではその回復過程が経年的に追跡されている（図 I.1.2）。石西礁湖では 1980 年頃、オニヒトデ個体群の異常な増殖が起こり、礁湖のサンゴ群集は北部を除いて、ほぼ全域で食害により死滅した。サンゴ群集の衰退後、オニヒトデ大個体群も消滅したが、群集の回復はすぐには進まなかった。食害直後の 1980 年代には回復はほとんどみられず、停滞した状態が続いた。次第に回復の兆しがみられるようになったのは、1990 年代初頭からで、目だって高被度（50%以上）分布域が広がるようになったのは、1993 年からのことである（森 1995）。

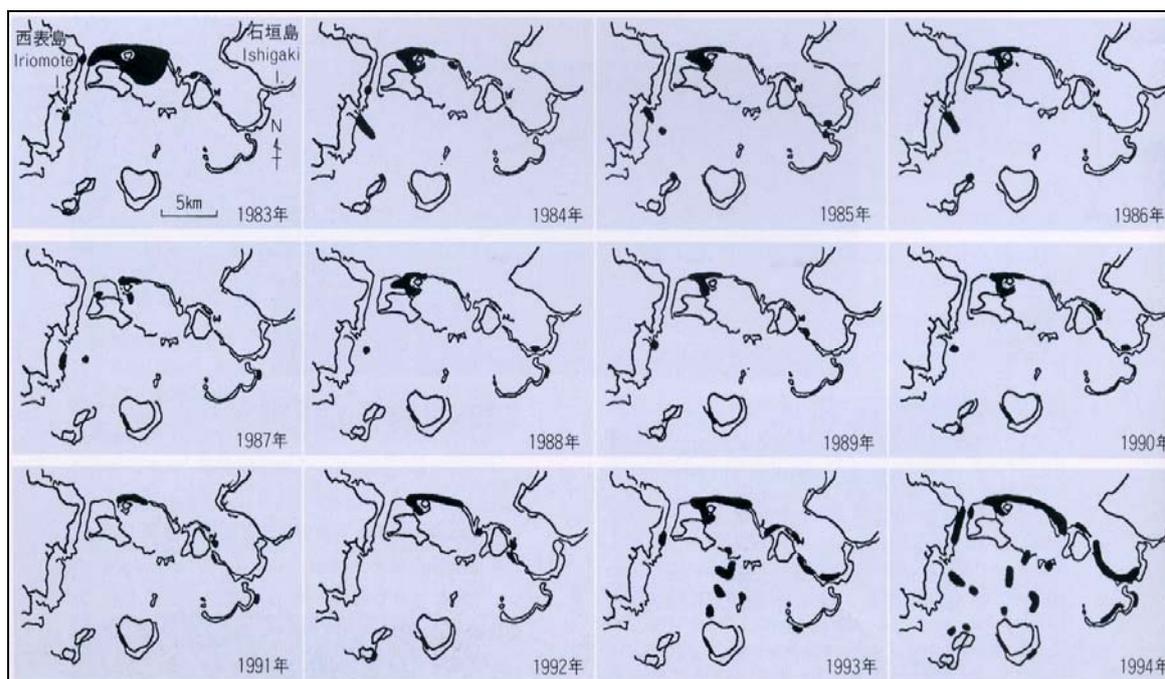


図 I.1.2 石西礁湖におけるサンゴ高被度（50%以上）域の変遷（森 1995）

しかし、高被度分布域は礁斜面や礁湖中央部の離礁など開放的な環境条件の場所で回復が進み、礁池のような閉鎖的な海域では回復が遅く、場所による偏りが大きいことが特徴である。攪乱後の群集回復はサンゴ浮遊幼生の加入が地形、潮流、気象などに影響

されるため、単純な過程では進まず、早期に回復する場所がある一方、いつまでも回復のみられない海域も存在する。早期に回復が期待できる海域では自然の加入を待つことが適切と考えられるが、自然の加入が貧弱な海域では、人為的なサンゴ移植を行うことにより、群集の回復を促進することを進めるべきである。移植群集の成長により、生物のすみかや海中景観の創出のみならず、再生産による広域サンゴ群集の回復に寄与することができる。

2. サンゴ礁の恩恵

サンゴ礁は海の熱帯林ともいわれ、種の多様性が高いことで知られている。のみならず、地域の産業や生活に欠くことのできない場でもあり、また島によっては土地自体がサンゴ礁で形成され、サンゴ礁の防波堤により高波から守られている。これらサンゴ礁の恩恵は次のように整理される（環境省那覇自然環境事務所 2005）。

① 恵み豊かな地域共有の海

サンゴは多くの生物に産卵場所、隠れ場所、食料を提供し、豊かな海の基盤を作っている。多くの生物が生息するサンゴ礁は漁業の場であり（図 I.1.3）、また古くからアーサ採り、モズク採り、貝拾いなど季節の食材を提供してくれる地域住民共有の海である。



図 I.1.3 サンゴ礁の魚類

② 美しいやすらぎの海

美しいサンゴ礁の海は人々にやすらぎと潤いを与え、また釣りや海水浴などレクリエーションの場として利用されている。さらにダイビングやグラスボートなど観光資源として地域の経済を支えている。

③ 生活環境を支える海

サンゴ礁は人が住む島を作るほか、水質浄化などの働きをして、人間の存在にとって欠くことのできない基盤となっている。また、自然の防波堤の役割を果たし、人々を災害から守っている。

④ 生き物とのふれあいを学ぶ場

潮が引いた干潟はカニやナマコなどの生物を観察するのに絶好の場であり、礁池はスノーケリングによる魚、サンゴなど生物の観察に最適の場である。生物と身近にふれあえる豊かなサンゴ礁は環境教育の場として活用される（図 I.1.4）。



図 I.1.4 礁池でのスノーケリングによる環境教育

⑤ 豊かな文化のみなもと

八重山では上布の海晒し、カニの生態を生き生きと謡った民謡、春の浜下りなど自然と密接に結びついた豊かな文化が今も生きており、サンゴ礁は文化、芸術の発展に欠かすことのできない資源である。

引用文献

- 環境省那覇自然環境事務所（2005） 石西礁湖自然再生マスタープラン、79pp+9.
森 美枝（1995）石西礁湖におけるイシサンゴ類とオニヒトデの異常発生について、海中公園情報（107）：10-15.

油井正明・酒井一彦・横地洋之・内田紘臣・岩瀬文人・浅井康行・森 美枝・古谷勝則・
黒瀬 毅・水嶋信文（1997） 陸域の土地利用がサンゴ礁に与える影響、サンゴ礁生態
系の維持機構の解明とその保全に関する研究、平成 6～8 年度. 環境庁地球環境研究総合
推進費終了研究報告書：79-109.

3. サンゴ礁修復の意義と方針

(1) 修復の意義

第1項において、サンゴ礁の回復過程は複雑で時空間的偏差が大きいことを紹介した。そのため、サンゴ幼生の到達が貧弱で、加入が少なく回復が進まない場所については、移植などの人為的なサンゴ群集の修復によりサンゴ礁の再生が進められるべきである。しかし、これには、再生対象とするサンゴ礁が環境ストレスを受けていないことが前提条件として必要である。環境ストレスを強く受けているサンゴ礁ではストレスの軽減・除去を行うことがまず行われなければならない。

(2) 修復の方針

サンゴ移植による人為的なサンゴ群集修復は世界的にも歴史が浅く、その技術は未だ発展途上にある。特に、移植後の成長、生残に関する長期にわたる知見はモニタリング例が少ないこともあり、十分に解明されていない。そのため、移植後、長期にわたるモニタリングを行い、その結果を修復事業に反映させる順応的管理が不可欠である。

また、修復対象場所の選定に当たっては、サンゴ群集の現況調査に始まり、環境ストレスの状況、加入、流動など十分な調査を行い、回復阻害要因を明らかにした上で、科学的根拠に基づき実施することが必要である。

なお、日本サンゴ礁学会でもサンゴ移植については度重なる議論を経て、既存サンゴ群集から採取した断片を移植する移植法について、無秩序な移植事業が横行する心配からガイドラインを発表しているので、参考までに掲載する。

造礁サンゴの特別採捕許可についての要望

日本サンゴ礁学会サンゴ礁保全委員会

2004年12月11日

基本的見解

日本サンゴ礁学会は、我が国のサンゴ礁が荒廃の一途をたどっていることに強い危機感を持っている。沖縄県漁業調整規則（以下、規則と略記）は、漁場や水産資源の育成の場としての造礁サンゴ（以下、サンゴと略記）の意義を認め、これを保護することを目的として第33条2項*にサンゴの採捕を禁止する規定を設けていると理解し、現状ではサンゴを保護する上で最も重要な規則であると考え。サンゴの採捕を意図して、その適用除外に関する規定（第40条**）に基づき特別採捕許可（以下特採と略記）の申請があった場合には、沖縄県下のサンゴ群集の保護・保全のために、以下のような項目に十分に配慮されているかどうかを今一度慎重に審査し、申請内容に応じて必要な制限・条件を付して許可するとともに、許可内容を公表することを要望する。特に、流通を意図したサンゴの採捕を許可する場合には、密漁や違法な採捕を抑止する対策の構築、サンゴ流通の実態把握、既存サンゴ群集への影響を極力小さくするための指針づくり、審査の透明性の確保などを行って、サンゴ礁保全に悪影響を与えるような特採がむやみに増えることがないようにしていただきたい。

1. 既存のサンゴ群集へ大きな影響が及ばないこと

サンゴの採捕において危惧されるのは、既存のサンゴ群集の弱体化である。特に、採捕が希少な種に集中した場合は、その個体群の絶滅をもたらす恐れがある。このため、特採申請前に採捕場所の事前調査を義務づけるべきである。採捕許可にあたっては、その調査結果に基づいて、既存サンゴ群集への影響が極力小さくなるように制限・条件を付すことが必要である。また、申請件数の増加による影響が懸念される場合には、年間の採捕許可量を制限するなどの対策も検討していただきたい。

2. 移植事業が効果を得られる見込みのある計画であること

特採によるサンゴ断片の移植事業は、衰退したサンゴ群集の回復を意図したものであるが、効果が検証されていないものや、計画性のない事業も散見される。その方法や期待される効果など、事業計画の科学的な裏付けの有無と妥当性を検討する必要がある。養殖目的の特採においても、その後サンゴ断片の移植を実施する場合には、その計画の科学的な裏付けの有無と妥当性を検討する必要がある。

3. 違法な採捕を助長させないこと

これまで沖縄産のサンゴが観賞用として県外に流通することは比較的少なかったが、特採をむやみに許可すれば、移植用のサンゴや違法に採捕されたサンゴが観賞用として市場に大量に紛れ込む恐れがある。その結果、天然のサンゴはますます減少するであろう。特採によって採捕されたサンゴをほかのサンゴと区別する方法と、その後の流通を追跡できる方法などの対策が必要である。

4. 特採を許可するにあたっては許可内容を公開すること

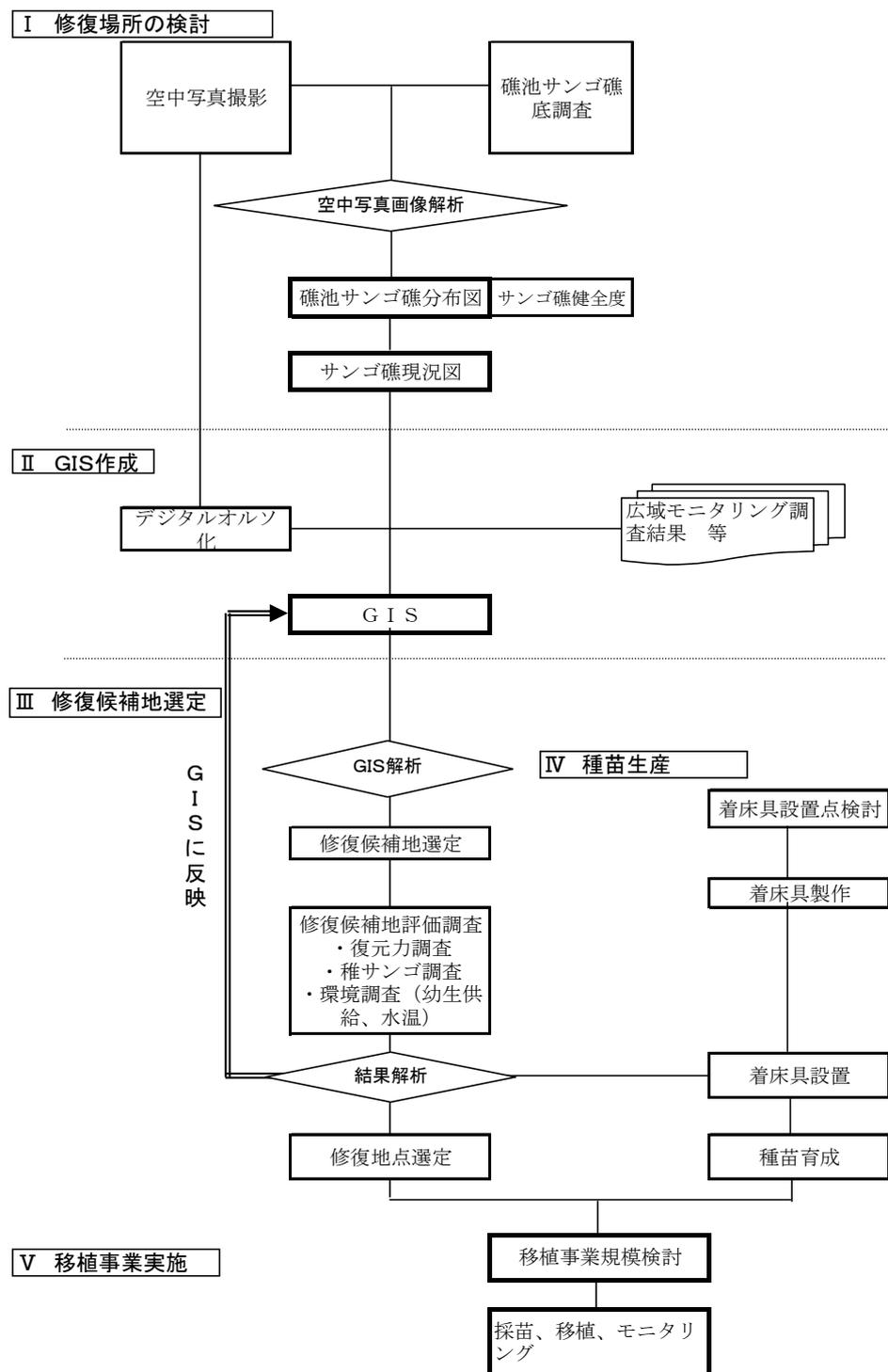
特採審査の公平性などについて疑義が生じないように、許可内容は事業の目的を含めて公表されるべきである。また、サンゴ採捕の現場は目が行き届きにくいこともあり、密漁や不適切な採捕が増える可能性がある。これを極力抑制するには、許可案件を周知し、一般による監視を助長することも有効である。

* 第33条2 かめ類が放産した卵および造礁サンゴ類(腔腸動物のうち石さんご目、ひどろさんご目、やぎ目、くださんご目を言う。)はこれを採捕してはならない。

**第40条 この規則のうち水産動植物の種類若しくは大きさ又は水産動植物の採捕の期間若しくは区域又は使用する漁具若しくは漁法についての制限又は禁止に関する規定は、試験研究、教育実習又は増養殖用の種苗(種卵を含む)の供給(自給を含む。)(以下本条において「試験研究等」という。)のための水産動植物の採捕について知事の許可を受けた者が行う当該試験研究等については、適用しない。

II. サンゴ群集修復の手法

移植のプロセスはフロー図に示すとおり、「修復場所の検討」、「GIS 作成」、「修復候補地選定」、「種苗生産」、「移植事業実施」で構成される。



移植フロー図

1. 修復場所の選定

修復場所の選定に当たっては、サンゴ礁の現況を把握し、回復の進まない海域の阻害要因を明らかにし、修復の可能性について評価を行うことが求められる。そのためには、まずサンゴ礁生態系の根幹をなすサンゴ群集の現況を把握することが必要である。

1-1. サンゴ群集現況調査

再生対象海域は、一般的には地理的な単位を考慮して行われる。群島、離礁群などであるが、広範なサンゴ群集の現況を把握するにはリモートセンシングによる画像判読と現地調査を組み合わせた方法が有効である。

(1) リモートセンシング画像取得

リモートセンシング画像は衛星画像と航空機撮影画像に分けられる。衛星画像として最もよく使われてきたのがランドサット画像である。サンゴ礁においても多くの研究例があるが、地表分解能が 30m と粗いため、詳細なサンゴ群集の解析には不適である。

最近になって、より分解能の高い画像を提供する衛星も打ち上げられるようになった。その一つが IKONOS 衛星画像である。この画像は白黒であれば分解能 1m の精度を有している。しかし、衛星は地上 600km 以上の高々度を飛行するため、航空機画像に比べ、より雲の影響を受けやすく、雲のない画像を得るためには時間がかかる。

一方、航空機画像（最もよく使われる空中写真の場合）は飛行高度が格段に低いため（1/10,000 縮尺の場合 1.5km）、雲の影響を受けることは相対的に低く、また分解能も IKONOS 画像に比べ、1桁高い。ただし、画像は歪みを有していることが普通なので、幾何補正（オルソ化）を行う必要がある。

衛星画像として IKONOS 画像、航空機画像として空中写真画像について仕様の比較を表 II.1.1 に示す。両画像とも既撮影画像の利用が可能だが、IKONOS 画像は雲のない画像をそろえることが困難な場合があり、空中写真画像は数年前の画像しか入手できない場合がある。また、空中写真は陸域を対象として撮影されているので、海域は付随的に存在する上、陸域用の露出では海域はオーバーになることが多く、使える画像に制約がある。

画像を新規に取得する場合の両画像の費用について八重山群島（西表島西部、石垣島中部）を例にして表 II.1.2 に示す。衛星画像は空中写真の約 65% の費用で取得できるが、実際には許容撮影回数の 3 回以内では対象範囲全域の雲なし画像得ることは困難と予想される。

なお、ライブラリーの既存画像の費用は IKONOS 画像が 20,000 円/k m²（最小注文面積 25k m²）、空中写真（カラー紙焼き）が 3,650 円/約 4k m²（1 枚から可能）である。画像解析のためには空中写真をデジタルオルソ化する必要があるが、既存画像で入手可能で、約 8000 円/k m²である。ただし、サンゴ礁域全域をカバーしておらず、離島域の場合は未整備である。

表 II.1.1 航空機画像と衛星画像の比較

	カラー空中写真 (カラー画像)	IKONOS衛星画像デジタルオルソデータ
撮影方法	航空搭載フィルムカメラ	衛星搭載CCDカメラ
情報形態	フィルム	電子化
縮尺	通常1/10,000	自在
撮影高度	1500m (1/10000の場合)	680 k m
撮影範囲	2 k m×2 k m (1/10000の場合)	11.3 k m幅
解像度	約0.1m	1m
紙焼き時解像度	約0.1m	1m (カラー空中写真サイズに300dpiで出力した場合)
波長帯	アナログ可視域	R、G、B、IR
位置情報	無	有 (1/5,000地図に重ね合わせ可能な精度)
歪み	不定の歪み	正射投影画像
画像接合	手作業	無償
色彩	撮影時の太陽照度により異なる	撮影時の太陽照度により異なるが、撮影範囲が広いので、細かな変動はない。画像ソフト上で補正可能
撮影頻度	随時	2,3日に1回

表 II.1.2 空中写真と衛星画像の取得費用の比較 (石西礁湖の例)

画像	カラー空中写真	IKONOS衛星画像
仕様	1/15,000、フィルム画像をデジタルオルソ化	デジタルオルソ画像
撮影範囲	13 コース (西表島西部、石垣島中部)	2 エリア (西表島西部、石垣島中部)
解像度	約 0.1m	1m
費用内訳	撮影費 : 13,000,000 円 デジタルオルソ化費=1,800,000 円	画像費 : 30,000 円×121 k m ² (注文最小面積) ×2 エリア=7,260,000 円 新規撮影費* : 1,200,000 円×2 エリア=2,400,000 円
総費用	14,800,000 円	9,660,000 円
既撮影画像取得費	3,650 円×100 枚=365,000 円 (1/10,000) デジタルオルソ化費=1,800,000 円 計 2,165,000 円	20,000 円×242k m ² =4,840,00 円

*新規撮影費：ライブラリーの画像ではなく、新たに撮影すること。エリア全体の雲量が 20%以下になるまで撮影実施 (但し 3 回まで)。20%以下にならなかった場合はキャンセルできる。

空中写真を新規撮影した場合は、密着カラー焼付けを行うとともに、データ処理やサンゴ礁情報を GIS で処理するため、デジタルオルソ化する。焼付け写真はラミネートで防水処理をした上で、現場調査に持参すれば、調査地点の様子を把握できるため便利である。

デジタル処理は撮影した空中写真のネガを 12.5 μ m 分解能（実測 18cm/pixel 相当）でスキャンし、写真と写真を張り合わせ、デジタルモザイク写真を作成し、水面解像度を 50cm/pixel 相当になるようリサンプリングをかけて行う。オルソ処理とは、空中写真特有のカメラの傾きと中心投影、土地の比高等による画像の歪みを補正し、地図のように正射投影した写真地図を作成することである（図 II.1.1）。写真地図は位置情報を有しているため、写真上で特定した位置の経緯度を GIS ソフトにより簡単に知ることができる。デジタル写真の仕様は、表 II.1.3 の通りである。



図 II.1.1 デジタルオルソ化写真（新城島下地礁池）

表 II.1.3 デジタル写真の仕様

地上解像度	50cm/pixel
画像形式	TIFF 形式
画像サイズ	8×6 km（約 550Mb）
色情報	フルカラー24bit
格納媒体	CD-R

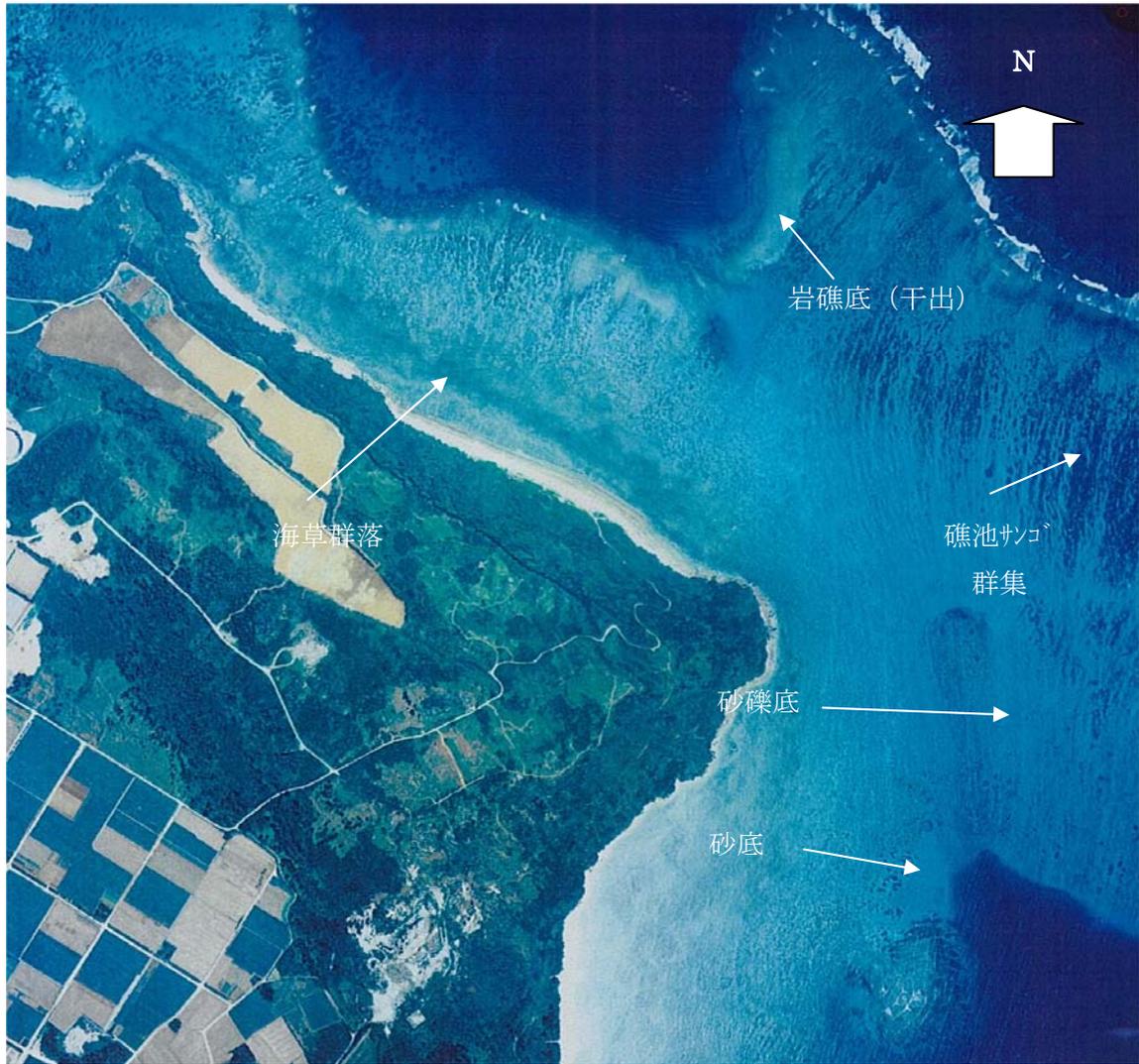
(2) 画像の識別

サンゴ礁ではサンゴ群集、海草藻場のような生物群集が岩礁底、砂底、礫底などのさまざまな基質上に複雑に分布しており、その状況はリモートセンシング画像の判読以外からは正確に把握することは不可能である。サンゴ群集等の分布状況を面的に把握するには、一定の画像範囲を選定し、画像の判読からさまざまな海底性状を識別し、性状を数量的に表すための現地調査を行う。

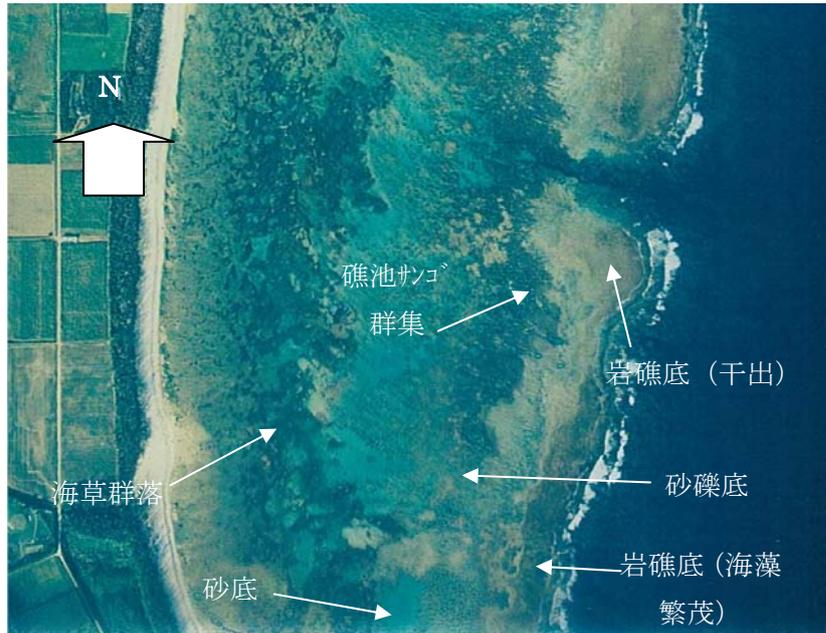
海底性状の識別を現地調査データなしでコンピュータ上で行うことは、現時点では研究レベルであるため、精度の高い結果を得ることは困難である。海中における光の特性として、空気中に比べ格段に大きい消散がある。消散係数はスペクトルにより大きく異なり、長波長の光ほど大きく、指数関数的に減衰する。したがって、光に対する同一の反射特性を有する物体でも、水深が浅い場所にある場合と深い場所にある場合では異なる色の画像となる。水深要素を数学的に消去することはできるが、そもそも海中からの反射輝度が低いため、物体間の差が数量的に小さく、反射輝度のみから物体の差を検出することは困難である。また、太陽光線の照射量が異なれば（撮影時の雲の量や太陽角度）反射輝度も異なるため、異なる撮影時では画像の色彩は異なることが多い。これは標準化できないので、特に問題である。したがって、画像の判読には異なる撮影時の色彩変化に注意して、肌理の判読も加えて行う必要がある。これは肉眼で行うほかないため、サンゴ礁底の画像判読には経験が求められるが、判読のための簡単な基準を表Ⅱ.1.4に示す。また、判読の参考になるよう色彩や肌理の例を画像上で示す(図Ⅱ.1.2～Ⅱ.1.6)。

表Ⅱ.1.4 画像判読のための基準

サンゴ礁底区分	画像色彩	画像肌理
砂底	明るい白色。水深が深くなると青色を帯びる	肌理は明瞭。
礫底	灰色	肌理はやや不明瞭。
岩礁底	明るい灰色	肌理は明瞭。干出し、裸岩の場合、白色に近い。藻類の被度が高くなるにつれ、灰色が増す。
泥底	暗褐色、赤褐色	肌理は不明瞭
礁池サンゴ群集	黒色、暗褐色	死滅している場合、肌理が不明瞭。
海草群落	暗緑色	肌理は不明瞭。特に画像縁辺が不明瞭。
ホンダワラ群落	黒色	肌理は不明瞭。外側礁原上にしばしば見られ、サンゴと似た色彩を示す。



図Ⅱ.1.2 画像判読例 (宮古島福山)



図Ⅱ.1.3 画像判読例 (石垣島白保)



図Ⅱ.1.4 画像判読例 (八重山群島黒島)

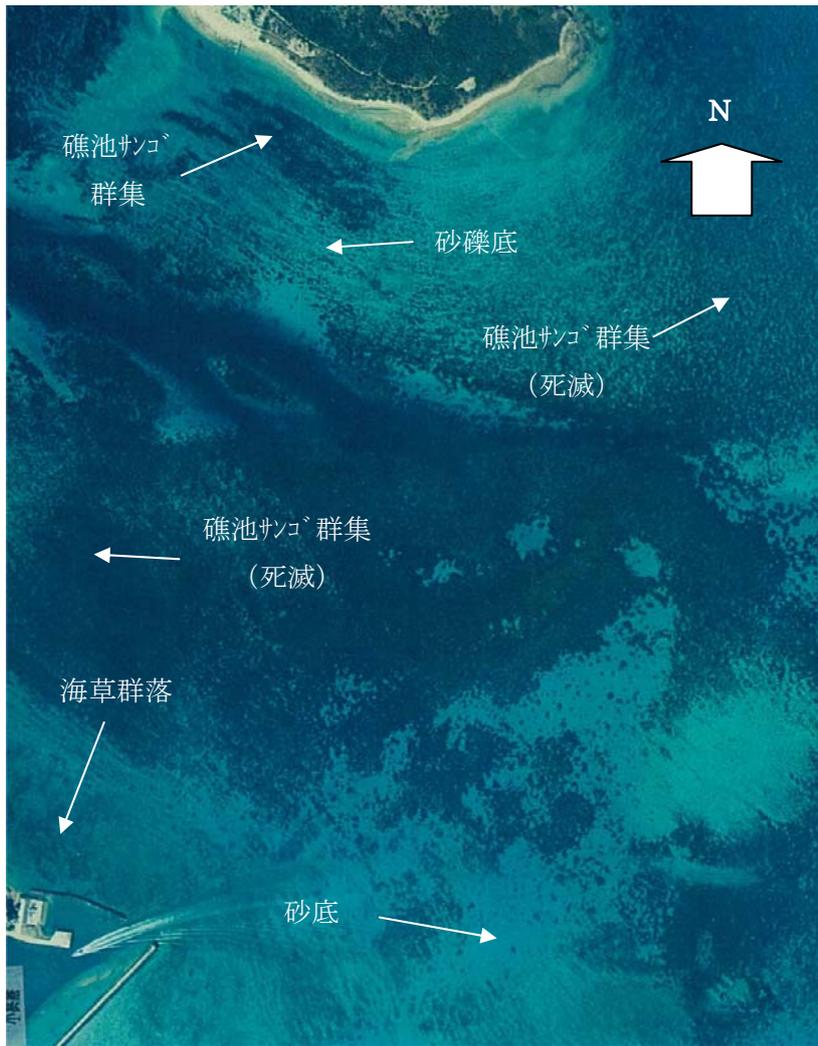


図 II.1.5 画像判読例 (石西礁湖北部)

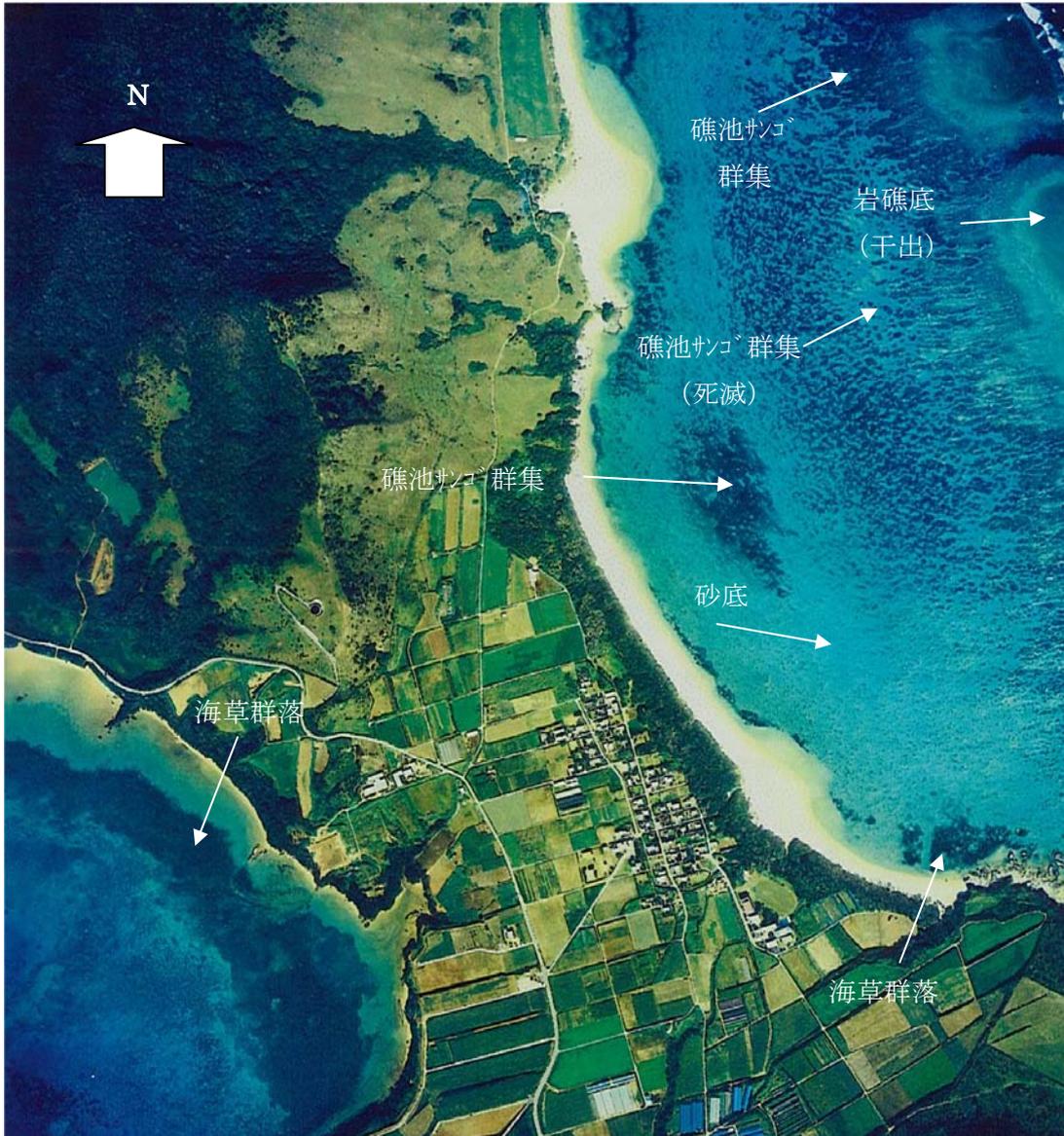


図 II.1.6 画像判読例 (石西礁湖北部)

(3) 礁池サンゴ礁底調査

識別した画像の代表的な場所に調査地点を設定し（広域のサンゴ礁を対象とする場合、通常 1ha に 1 地点）、潜水により定量的調査を行う。GIS ソフトを使えば、設定した調査地点の経緯度を予め求めることができ、GPS により地点への到達が容易である。

① 定量的調査法

定量的調査法にはコドラート法、トランセクト法など様々な方法があるが、調査対象が広い場合は、小調査面積の少数抽出からでは実態を反映しない恐れがあるため、できるだけ広い範囲を観察するほうが誤りを回避できる。そのため、遊泳観察による被度測定（スポットチェック法）を行う。

ア.被度測定方法

調査地点には GPS により到達し、スキューバ潜水により目視観察でサンゴ礁底の被度調査を行う。調査は調査員 2 名により調査地点において各々広く 5 分間の遊泳を行い、調査範囲の平均的な被度の観察値を記録する。5 分間の遊泳は各地点 3 回行う。

イ.測定項目

a.水深、底質類型

水深は調査範囲の平均的な水深を水深計により記録し、底質は最も広く分布する性状を類型化し、記録する。

b.生サンゴ被度、死サンゴ被度、生サンゴ優占種被度

生サンゴ被度は観察範囲の平均的な生存サンゴの着生基質に対する割合を記録し、死サンゴ被度は白色骨格のまま藻類の目立った付着がない群体について同様に記録する。また、優占して分布する種について、その被度を記録する。

c.植被、植物優占種被度

植被は観察範囲の底生植物の着生基質に対する平均的な割合を記録し、また優占して分布する種について、その被度を記録する。

d.サンゴ以外の主な表在底生無脊椎動物の分布

サンゴ以外の主な無脊椎動物について、個体数を記録する。

e.白化現象

観察範囲内で白化群体がみられた場合、次のように区分して記録する。

- 1：白化はほとんど認められない。
- 2：群体の白化部は 50%未満。
- 3：群体の白化部は 50%以上。
- 4：群体はほぼ全部白化。

f.シルト堆積状況

観察範囲内の平均的シルト堆積状況を次のように区分して記録する。

- 1：堆積物をかき混ぜても、シルトの舞い上がりは少ない。
- 2：堆積物をかき混ぜるとシルトにより水中が濁る。
- 3：外見でもシルトの存在を確認できる。
- 4：シルトが海底を覆う。

g. サンゴ捕食者

オニヒトデ、シロレイシガイダマシ等サンゴを捕食する動物が確認できた場合、個体数ないしは個体群規模を記録する。また、食痕を確認した場合、記録する。

ウ. 写真撮影

調査地点の代表的な海中景観を撮影する（図Ⅱ.1.2）。



図Ⅱ.1.2 海中景観写真撮影例（石西礁湖）

② データ処理

被度調査データは調査員2名の3回の測定値を算術平均し、表Ⅱ.1.5のように整理する。現地調査結果や既存データを活用して、画像の優占群集を決定し、画像解析のための基本データとする。

表 II.1.5 被度調査結果整理の例（石西礁湖）

St	緯度	経度	底質 ¹⁾	水深 (m)	被度 (%)					優占する種類 (被度：%)	白化 ⁵⁾	堆積物 ⁶⁾	捕食者 等 ⁷⁾
					生サンゴ ²⁾	死サンゴ ³⁾	無脊椎動物 ⁴⁾	植物	裸面				
18-9	24 15.717	124 59.406	岩	12	5	1	1	76	18	ハイオキ ⁺ (35)、イワカ 類 (28)	1	1	オヒトテ ⁺ 1個体
19-1	24 16.720	124 5.520	枝礫平 面	5.5	38	1	1	28	32	スキノキミ ⁺ リイ (20)	1	2	
19-2	24 15.094	124 6.008	枝礫平 面	1.5	20	5	0	74	1	スキノキミ ⁺ リイ (10)	1	1	
19-3	24 15.088	124 6.512	枝礫平 面	7	30	1	0	35	34	スキノキミ ⁺ リイ (12)	1	1	
19-4	24 19.968	124 6.501	岩礁	1.5	20	1	0	20	59	オトミ ⁺ リイ・ヒメ マツミ ⁺ リイ (10)	1	1	
21-1	24 13.167	123 54.769	岩礁	1	73	0	0	17	10	クシハ ⁺ ミ ⁺ リイ (62)	1	1	
21-2	24 13.176	123 56.188	岩礁砂 被り	0.5	1	0	0	70	29	ホンダ ⁺ ワラ類幼体 (40)	1	1	
21-3	24 14.384	123 55.631	岩石	9	33	8	0	37	22	ハナハ ⁺ チミ ⁺ リイ (12)	1	1	
22-1*	24	124	岩	0.8	1	0	0	99	0	ハイテグ ⁺ サ (90)	1	2	
23-1	24 13.365	124 1.506	岩・枝 礫平面	1	50	1	0	29	20	エダ ⁺ コモンサンゴ ⁺ (15)、 <i>M.</i> <i>samarensis</i> (14)、 <i>M. altasepta</i> (1 5)	1	1	
23-2	24 14.004	124 1.976	枝礫平 面	6	62	1	0	20	17	エダ ⁺ アサ ⁺ ミサンゴ ⁺ (48)	1	1	

注 1) 枝礫平面：枝状サンゴ礫が海底に平面的に分布

枝礫堆積：枝状サンゴ礫が海底に堆積

2) サンゴの被度がほとんど認められない場合、便宜上1%とした。

3) 死滅した直後のサンゴ群体。白色骨格のまま、藻類の目立った付着がない状態。

4) サンゴ以外の主な大型表在底生無脊椎動物

5) 1：ほとんど認められない。2：群体の白化部50%未満。3：群体の白化部50%以上。4：群体はほぼ白化

6) 1：堆積物をかき混ぜてもシルトの舞い上がりは少ない。

2：堆積物をかき混ぜると、シルトにより水中が濁る。

3：外見でもシルトを確認できる。

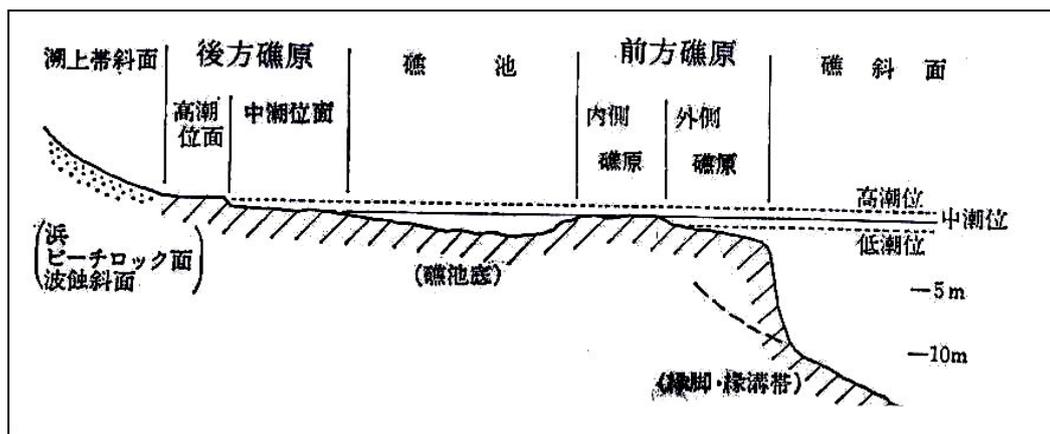
4：シルトが海底を覆う。

7) 確認された主なサンゴ捕食動物

*海底性状の確認のため簡易な観察を行った地点。

③ 空中写真画像解析

サンゴ礁底の性状分布を作成するには、サンゴ礁被度調査データを基に画像解析を行う。なお、判読対象は後方礁原、礁池（礁湖）、前方礁原とし、判読の困難な礁斜面は除く。サンゴ礁地形の構成を図Ⅱ.1.3に示す。判読にあたってのサンゴ礁底性状の区分は表Ⅱ.1.6及び表Ⅱ.1.7の通りである。



図Ⅱ.1.3 サンゴ礁地形の構成（高橋 1980）

表Ⅱ.1.6 サンゴ礁底性状の区分

性状	記号	内容
サンゴ群集	C	礁池、礁湖底の枝状サンゴ礫域、砂底域、岩礁域などの底質に分布する造礁サンゴ群集。海草群落と混生する場合もある。
海草群落	SG	砂底域に分布する海草群落
海藻群落	SW	前方礁原、後方礁原など干出域に分布するホンダワラ類、テングサ類群落など
枝状サンゴ礫域	G	前方礁原の干出域などに分布する枝状サンゴ礫域。サンゴが疎生する。
干出裸岩域	R	前方礁原の干出する岩礁域など。無節サンゴモ類が優占し、塊状サンゴ類が疎生する。
砂底域	S	海草、サンゴとも疎生する砂底域
泥底域	M	海草、サンゴとも疎生する泥底域

表Ⅱ.1.7 性状被度の区分

性状	階級	範囲
サンゴ群集	I	5%未満
	II	5~25%未満
	III	25~50%未満
	IV	50~75%未満
	V	75~100%
海草群落	I	5%未満
	II	5~50%未満
	III	50~100%

なお、造礁サンゴ群集以外の区分でもサンゴの生存は普通にみられ、着生基質があれば泥底でさえも分布するが、被度は低いのが一般的で、群集を形成するに至っていない。そのため、干出する場所や砂底域などサンゴの好適な生息環境でない、サンゴ被度の低い地点については、それぞれの地点の相観と最大被度を示す要素に基づき、性状区分を行う。ただし、サンゴ被度が低くても、潜在的にサンゴの好適な生息域と考えられる地点はサンゴ群集域とする。

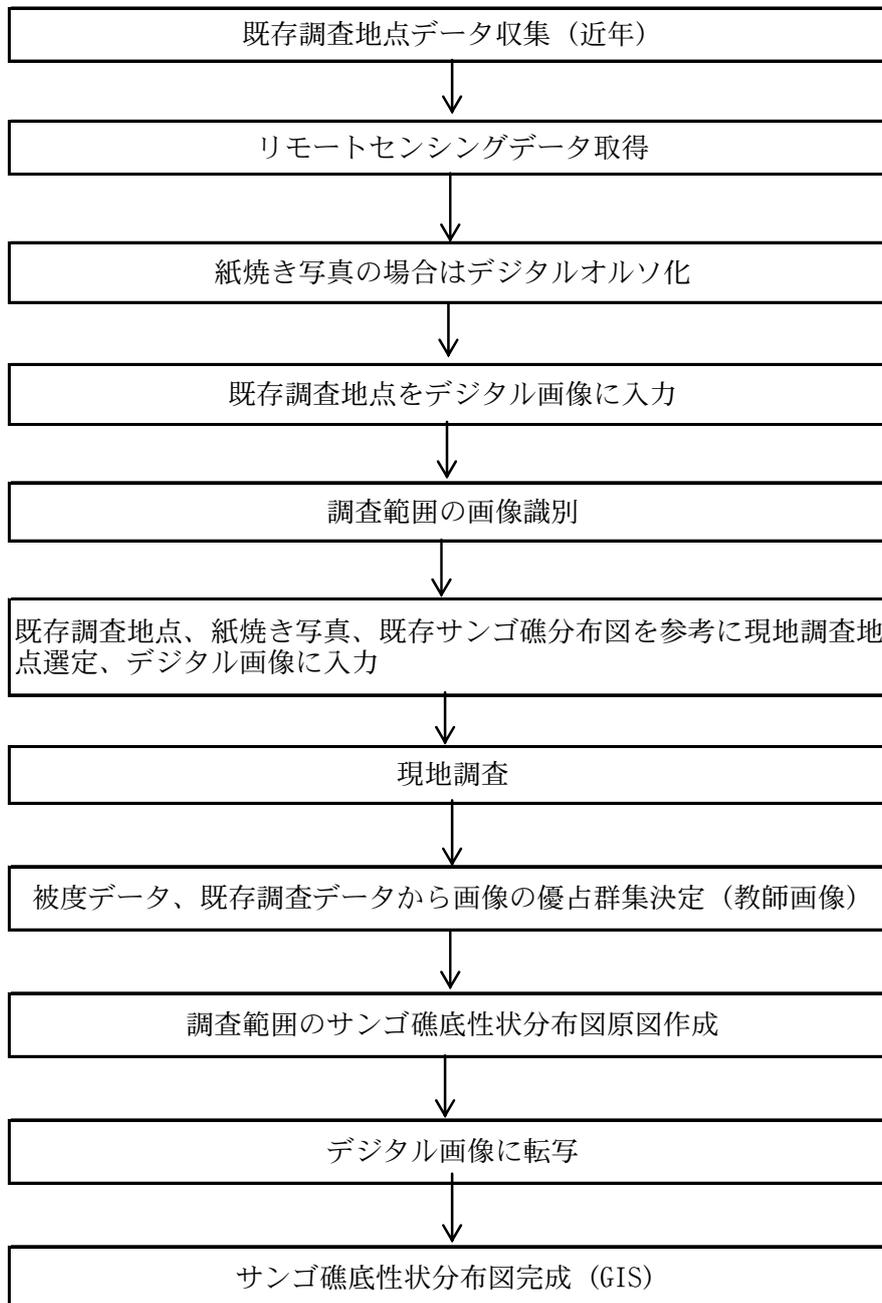
被度データから識別した各画像の優占する群集を決定し、当該画像を教師画像として調査範囲の画像に敷衍し、サンゴ礁底性状分布図を作成し、GIS化する（図Ⅱ.1.4）。作業のフローを図Ⅱ.1.5に示す。



サンゴ ◎	×××××× ××××××	I	～5%未満
	▲▲▲▲▲▲	II	5～25%未満
	●●●●●●	III	25～50%未満
	□□□□□□	IV	50～75%未満
	○●○●○●	V	75～100%
海草 ◎	●●●●●●	I	～5%未満
	▲▲▲▲▲▲	II	5～50%未満
	●●●●●●	III	50～100%

図 II.1.4 サンゴ礁底性状分布図の例（石西礁湖小浜島周辺）

<Afor : スギノキミドリイシ、Br-Ac : 枝状ミドリイシ>



図Ⅱ.1.5 サンゴ礁底性状分布図作成のフロー

1-2. 修復候補地の選定方法

(1) サンゴ被度

修復候補地の選定はまず、礁池サンゴ礁底性状分布図からサンゴ群集低被度域（被度25%未満）を抽出する。また、現在低被度域であっても、過去には高被度域であった場所を過去の調査データから抽出し、候補地選定の検討材料とする。環境阻害要因がなくサンゴ被度が低い場所としては、白化現象による死滅、オニヒトデ食害による場合のほか、地形により加入が貧弱である場合などがある。

(2) 堆積物

阻害要因として最も一般的である赤土堆積物の分布状況を検討する。サンゴ礁の赤土堆積物の環境を示す指標としてよく使われるのが SPSS（簡易測定法による底質中懸濁物質含量）である。SPSS は沖縄県衛生環境研究所で考案された測定法で、底質の中に含まれる赤土等に由来する細かい土の粒子の量（C）を測定することで、赤土等による汚染の程度を知る方法である。測定は底質を水に入れてよく混ぜ、水の濁りの程度から底質に含まれる赤土等の量を測ることにより、堆積環境を知る方法である。測定の詳細な方法は沖縄県衛生環境研究所のホームページ <http://www.eikanken-okinawa.jp/> で見ることができる。SPSS の測定結果は8ランクに分けられている（表Ⅱ.1.7）

表Ⅱ.1.7 SPSS のランク

階級	測定値 C (kg/m ³)
1	C < 0.4
2	0.4 ≤ C < 1
3	1 ≤ C < 5
4	5 ≤ C < 10
5a	10 ≤ C < 30
5b	30 ≤ C < 50
6	50 ≤ C < 200
7	200 ≤ C < 400
8	400 ≤ C

$$C = \{(1718 \div T) - 17.8\} \times D \div S$$

C：底質中の微粒子の含有量 (kg/m³)

T：透視度 (cm)

S：測定に用いた試料の量 (ml)

D：希釈倍=500/分取量

SPSS ランクは石西礁湖では SPSS ランク 6 (赤土等堆積量 $50\text{kg}/\text{m}^3$ 以上 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 未満で、一見して赤土等の堆積がわかる状態) 以上の分布地点が赤土の堆積の激しい場所として抽出された。

(3) 水温

水温の上昇しやすい海域も把握する必要がある。近年、地球温暖化のためか、水温は年毎に上昇の傾向にあり、高水温が連続した場合、サンゴは白化現象を起こし、大きな打撃を受けることもある。そのため、水温の上昇しやすい海域は修復場所としては不適である。

水温測定は自記式水温計 (例えば HOBO Water Temp Pro データロガー、オンセットコンピュータ社製) を設置し、毎正時、通年の詳細な水温を測定する。サンゴの白化は日平均水温 30°C 以上が長期間連続すると起こりやすいとされているため、特に水温の上昇する夏季における昇温状況を把握しておく必要がある。

サンゴ礁では夏季激しい日射により、礁原など水深の浅い場所や流動の少ない閉鎖的な場所で水温が高くなる傾向がある。

水温計による測定は、実測データとして貴重であるが、GIS としてサンゴ礁の温度環境を面的に検討するにはやや不向きである。そのような検討には数値シミュレーションが有効で、石西礁湖では自然再生調査の一環として、実測値から水温上昇のシミュレーションが行われた (東京工業大学灘岡研究室)。それにより作成された 1 日間に 30°C を超える時間の分布と 1998 年及び 2001 年に激しい白化現象が見られた (白化ランク 4: 完全に白化後、群体の大部分が死滅した状態。既に海藻に覆われているところもある) 地点を抽出した。これらの地点の多くは浅所あるいは閉鎖的な礁池にあり、1998 年の白化地点 4 ヶ所のうち 3 ヶ所は水温シミュレーションでも水温 30°C を超える時間が非常に長い環境条件にあった (図 II.1.6)。

(4) オニヒトデ

オニヒトデはサンゴを好んで捕食するため、その出現状況は修復事業にとって、重要な情報である。そのため、オニヒトデ個体群の増加域をモニタリングにより抽出する必要がある。石西礁湖では環境省によりモニタリングが行われており、その結果からオニヒトデ個体群の動向を把握することができた (図 II.1.6)。

(5) 候補地の選定

サンゴ高被度消滅域あるいは低被度域の中から、SPSS 強堆積域に近い場所（2km 以内）を除き、また高水温域及び過去の強白化地点を除き、さらにオニヒトデの増加域を避けて、候補地を選定する。これらの情報は GIS 化することにより、容易に重ね合わせて理解することができ、選定の検討に有効である。石西礁湖では GIS 化により再生区として修復候補地を選定した（図 II.1.6）。

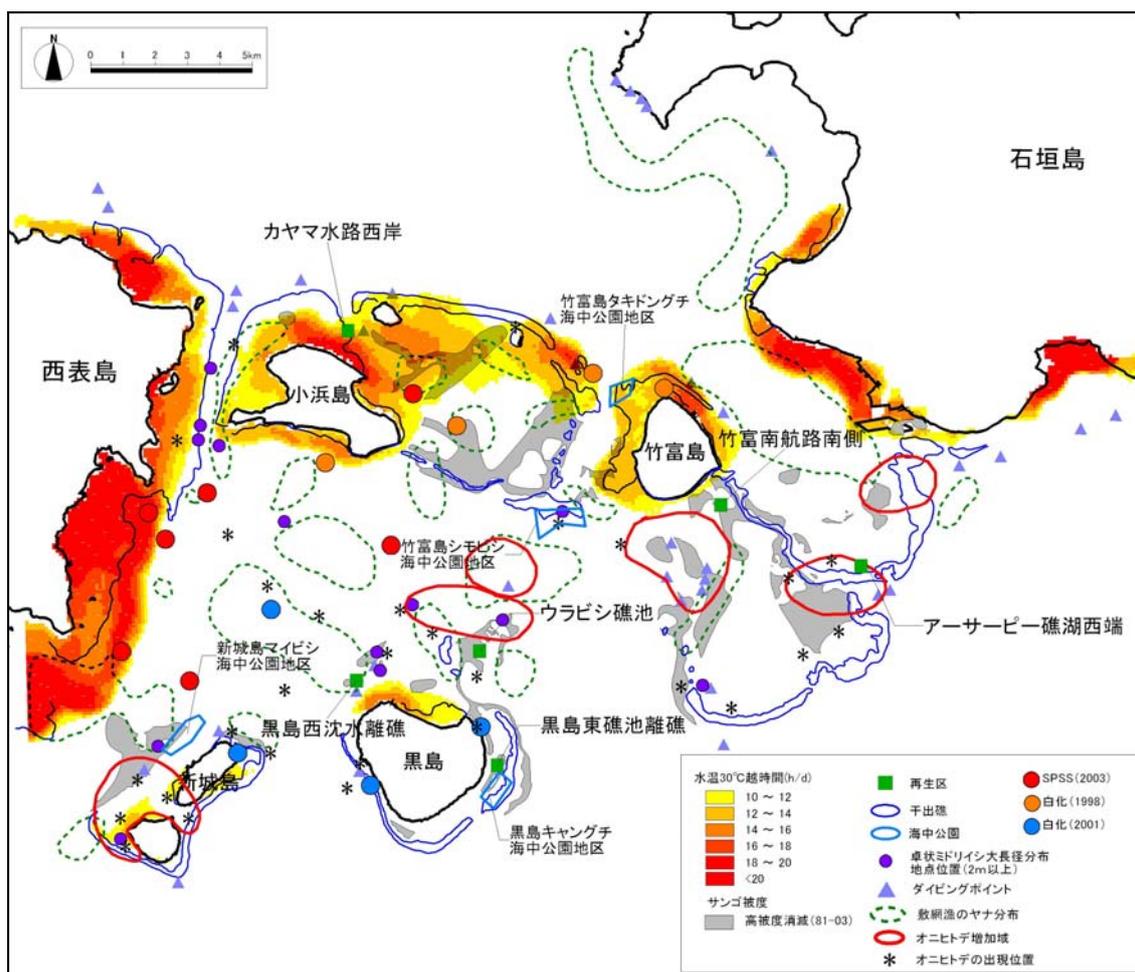


図 II.1.6 石西礁湖における修復候補地選定 GIS

2. 修復候補地の評価

修復候補地を選定したら、特に重要な地点選定の要因である幼生到達によるサンゴ礁復元力及び幼生供給力を科学的に検証し、評価を行い、その中から修復地点を最終的に決定する。

2-1. 着床具を用いた加入調査によるサンゴ礁復元力の検証

サンゴ礁復元力はある場所への幼生加入の大きさにより測定する。それには、サンゴ幼生着床具を使用すると便利である。海底の加入状況を調査することは容易ではないが、着床具を設置すれば、容易に加入群体を観察することができる。しかも、突発的なイベント（漂砂礫など）を避けることができ、潜在的な加入度合いを同一条件下で測定することが可能である。

調査はサンゴ産卵期に海底に着床具を設置し、着床群体が肉眼で観察可能となる 3 ヶ月後に抽出し（図 II.2.1）、着床幼生数の測定を行う。残りの着床具は移植種苗として使用することができる。着床具設置の方法については、3.移植手法の項で述べるので、本項では調査結果に基づき、復元力についてのみ記載する。



図 II.2.1 着床具に着生した幼サンゴ群体

(1) 設置時期

琉球列島では八重山群島で 5 月、沖縄本島で 6 月、奄美群島では 6 月、本土南西海域では 7 月、小笠原諸島では 8 月の満月前後にミドリイシ類を主とする一斉産卵が起こることが知られている。サンゴ幼生の着床は産卵後 1 週間程度であるが、着床具の設置はミドリイシ類の幼生着床を目指し、少なくとも海水馴致のためにも満月 3 日前には実施しておく必要がある。そのころには産卵がしばしば見られる。

(2) 設置数

着床具設置数は、着床具 1 ケースが 120 個（着床具 12 個縦連結が 1 束、1 ケースに 12 束収容）1 ケースであるので、これの倍数となる。架台には最大 8 ケース搭載可能であるが、8 ケースでは過密になり、正確な加入量を反映しない場合もあると思われるので、

4～6 ケース搭載が適当であろう。架台数は流出の危険性を分散させるため、複数であることが望まれる。石西礁湖では 6 架台を基本とした。搭載ケース数、架台数は調査地点数と全体の設置可能数とを考慮して決定すればよい。

(3) 着床具抽出

着床具への着床状況を測定するため、設置個数の 5% を抽出、乾燥後、検鏡し、着床サンゴの種類、着床位置、長径を記録する。抽出は着床具束単位で行う。着床サンゴの種類は、1.ミドリイシ属、2.ハナヤサイサンゴ科、3.アナサンゴモドキ属、4.その他の種、5.不明種の 5 種類に区分して記録する。種類の判別については、第 6 項で述べる。

抽出時期はサンゴの長径が 1 mm 程度になり、観察しやすくなる着床から約 4 ヶ月後及び台風後の点検をかねて約 9 ヶ月後に行う。

(4) 解析

抽出した着床具の観察を行い、測定した結果は、地点ごとに平均着床数（着床具 1 個あたりの着床数）、種別着床数として整理する。

① 平均着床数

石西礁湖における 2004 年度の測定では、多い場所で約 4 群体の着床が見られた（図 II.2.2）。この場所は水路に面した位置で、このような場所では流動が大きく加入量が多い傾向がみられる。また外洋に近い場所でもやや高い値を示す。このような場所は復元力が高いと思われる。ただし、加入は年による変動が大きく、一定せず、着床しても底質の環境が不安定であると減耗することがある。図 II.2.2 で 2005 年 1 月の群体数が減少しているのはそのためである。なお、一斉産卵以外にも幼生保育型のサンゴではほぼ通年幼生を放出する種もあり、それによる群体数増加もみられる。

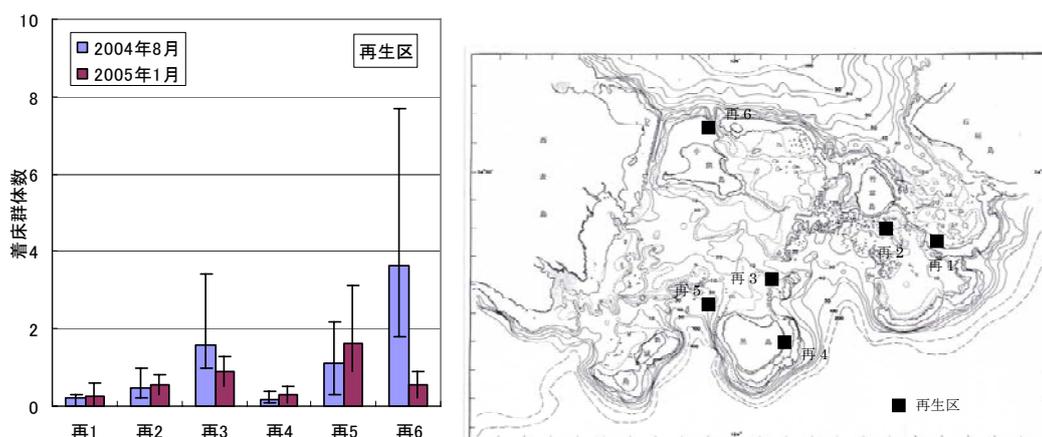


図 II.2.2 石西礁湖修復候補地（再生区）における着床具平均着床群体数

バー：着床具束（この調査では 10 個）別、着床具最小・最大着床群体数の平均値

② 種別着床数

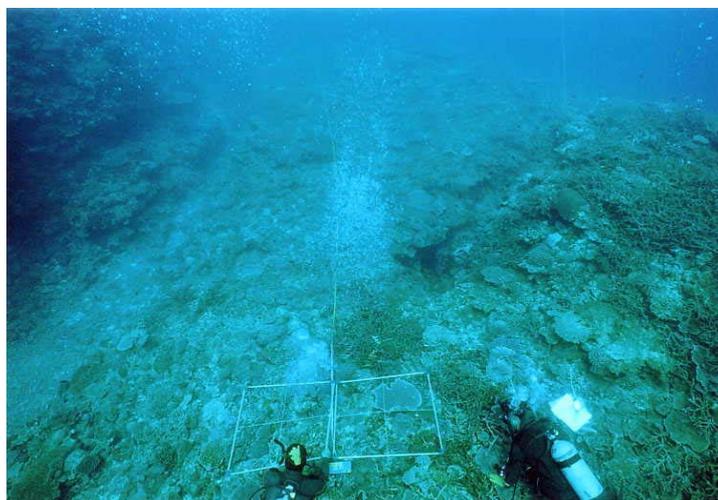
サンゴ礁ではミドリイシ類が卓越して分布しており、多くのミドリイシ類が一斉産卵するので着床群はミドリイシ属の割合が高くなる。加入量の少ない地点ではハナヤサイサンゴ科の出現割合が大きくなる場合がある。このような場所では浮遊型の幼生が到達しにくい閉鎖的地形のため、浮遊期間の短い幼生保育型種の割合が高くなると考えられる。そのため、ミドリイシ類の割合が高いほうが加入による復元力は高いと判断できる。

2-2. 稚サンゴ出現状況調査によるサンゴ礁復元力の検証

サンゴ礁の復元力は、着床具の設置により高い精度で測定できるが、対象地点の稚サンゴ出現状況を調査することによっても可能である。稚サンゴの観察は3次元的に複雑な基質の中で、小さな群体を発見しなければならないため、熟練を要するが、材料を必要とせず、時期に関わらず実施できる。

(1) 方法

標準的な方法は、調査地点において、水深などの環境が大きく変わらないように15mの調査線を設定し、調査線の両側において1m×1mのコドラートを15回連続的におき、計30m²の調査を行う(図Ⅱ.2.3)。各コドラートでは基本的データとして、稚サンゴの他に次のような測定を行う。



図Ⅱ.2.3 コドラート調査風景

・調査項目 (各コドラート)

- ①水深、底質類型
- ②生サンゴ被度、死サンゴ被度
- ③サンゴ種別被度

④ 稚サンゴ属別出現数（長径 5cm 未満の群体）

⑥ 植被、優占種被度

⑦ サンゴ以外の主な表在底生生物の分布

⑧ 白化現象、サンゴ捕食者等の分布

(2) 解析

調査データは地点ごとに稚サンゴ密度、属別稚サンゴ密度としてとりまとめる。また、他の調査項目についても表にとりまとめ、整理し、解析の参考にする（表Ⅱ.2.1）。

表Ⅱ.2.1 コドラート調査結果例（石西礁湖）

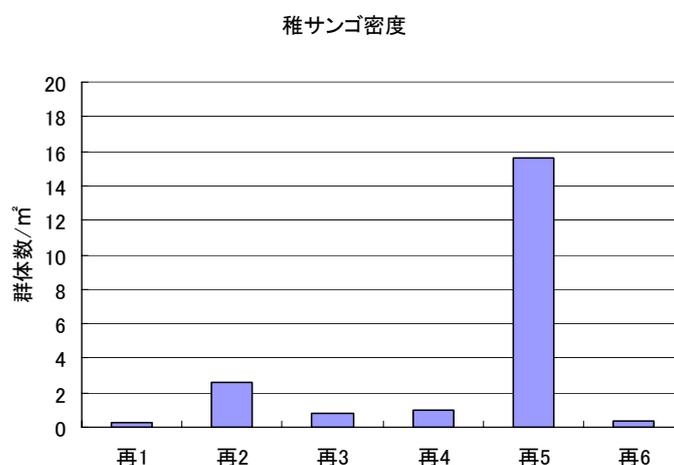
位置	再生区3																				平均 ¹⁾											
	ウラビシ礁湖																															
場所	ウラビシ礁湖																															
コドラートNo	1L	1R	2L	2R	3L	3R	4L	4R	5L	5R	6L	6R	7L	7R	8L	8R	9L	9R	10L	10R	11L	11R	12L	12R	13L	13R	14L	14R	15L	15R		
水深(m)	4																															
年月日	2005/8/8																															
時刻	14:00																															
位置	ウラビシ礁湖																															
コドラートNo	1L 1R 2L 2R 3L 3R 4L 4R 5L 5R 6L 6R 7L 7R 8L 8R 9L 9R 10L 10R 11L 11R 12L 12R 13L 13R 14L 14R 15L 15R																															
地形	礁湖底																															
底質	枝状礁																															
サンゴ被度(%)	0	0	6	0	3	2	2	0.1	2	0	2	0.1	3	2	2	0	0	2	2	0	2	0	2	6	2	0.1	3	0	0.1	0.1	3	2
死サンゴ被度(%)	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
植物被度(%)	70	80	75	65	50	80	70	80	70	75	60	70	80	65	40	60	50	45	60	35	30	40	50	60	40	70	80	50	50	40		
植物主要種	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di	Di		
造礁サンゴ以外の主な底生動物被度(%)	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	
造礁サンゴ以外の主な底生動物主要種	Mv		Ho						Tu		Tu		Sp						Sp		Tu		Tu		Sp		Sp		Tu			
標高	30	19	19	34	46	18	28	20	27	24	38	30	17	33	58	40	50	53	38	64	68	53	48	39	57	30	20	50	47	57		
造礁サンゴ出現種数	0	0	4	0	3	2	1	0	2	0	2	0	3	2	2	0	0	2	4	0	4	2	4	0	1	0	0	0	2	0		
白化																					0											
シルト	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1		
食痕 ²⁾	1																				3.3											
オシサンゴ科 <i>Astrocoeniidae</i>																					0.00											
オシサンゴ属 <i>Stylocoeniella</i>																					0.00											
<i>Stylocoeniella armata</i>	ヒメムカシサンゴ																				0.05											
オシサンゴ科 <i>Pocilloporidae</i>																					0.00											
オシサンゴ属 <i>Pocillopora</i>																					0.00											
<i>Pocillopora damicornis</i>	ハナヤサイサンゴ																				0.03											
<i>Pocillopora meandrina</i>	チリメンハナヤサイサンゴ																				0.03											
オシサンゴ属 <i>Seriatorpora</i>																					0.00											
<i>Seriatorpora hystrix</i>	トゲサンゴ																				0.10											
オシサンゴ科 <i>Acroporidae</i>																					0.00											
オシサンゴ属 <i>Montipora</i>																					0.00											
オシサンゴ属 <i>Acropora</i>																					0.00											
<i>Acropora elseyi</i>	マルツツミドリイン																				0.03											
<i>Acropora formosa</i>	スギアキミドリイン																				0.17											
<i>Acropora microphthalmal</i>	コエダミドリイン																				0.03											
<i>Acropora millepora</i>	ハイマツミドリイン																				0.12											
<i>Acropora tenuis</i>	カスエダミドリイン																				0.30											
オシサンゴ科 <i>Fungiidae</i>																					0.00											
オシサンゴ属 <i>Fungia</i>																					0.00											
<i>Fungia concinna</i>	ヒラタクサピライシ																				0.03											
<i>Fungia valida</i>	ノコギリクサピライシ																				0.03											
<i>Fungia</i> sp	クサピライシ属の1種																				0.03											
ウカサビ科 <i>Oculinidae</i>																					0.00											
ウカサビ属 <i>Galaxea</i>																					0.00											
<i>Galaxea fascicularis</i>	アザミサンゴ																				0.02											
オシサンゴ科 <i>Mussidae</i>																					0.00											
オシサンゴ属 <i>Lobophyllia</i>																					0.00											
<i>Lobophyllia hemprichii</i>	オオハナガタサンゴ																				0.05											
ウカサビ科 <i>Pavidae</i>																					0.00											
ウカサビ属 <i>Favia</i>																					0.00											
<i>Favia</i> sp	キクメイン属の1種																				0.02											
ウカサビ科 <i>Goniastrea</i>																					0.00											
<i>Goniastrea pectinata</i>	コカメノキクメイン																				0.07											
ウカサビ科 <i>Cyathastrea</i>																					0.00											
<i>Cyathastrea chalcidicum</i>	コトゲキクメイン																				0.05											
ウカサビ科 <i>Echinopora</i>																					0.00											
<i>Echinopora mammiformis</i>	ヒラリュウキウキッカサンゴ																				0.03											
ウカサビ科 <i>Milleporidae</i>																					0.00											
ウカサビ科 <i>Millepora</i>																					0.00											
<i>Millepora exesa</i>	カンボクアササンゴモドキ																				0.20											
<i>Millepora tenella</i>	ヤツデアササンゴモドキ																				0.07											
出現種数	0	0	4	0	3	2	1	0	2	0	2	0	3	2	2	0	0	2	4	0	4	0	5	0	1	0	0	0	2	0		

1) 造礁サンゴ出現種数は総出現数である
2) 食痕は食痕率=食痕の観察されたコドラート数/全コドラート数×100 で示した。

稚サンゴ密度結果について、石西礁湖の例を図Ⅱ.2.4に示す。飛びぬけて高い値を示した再5はサンゴ被度は13.1%と低いが、着床具への着床数もミドリイシ属を主に比較的多い。生息する種はアナサンゴ、アバタコモンサンゴ、コカメノコキクメイシ、ウスチャキクメイシ等、塊状、被覆状のサンゴが優占している。同地点の稚サンゴの属別出現状況(図Ⅱ.2.5)に示すように、キクメイシ属、ミドリイシ属、コカメノコキクメイシ属、ハマサンゴ属、アナサンゴ属の順に多く出現している。ミドリイシ属以外は優占分布種とほぼ同じであることから、ミドリイシ属の成長を妨げる要因が存在するものと思われる。再5は2.1項でも述べたように周辺の細砂が台風により巻き上げられ、それがミドリイシ類の生息に影響を及ぼしている可能性がある。ミドリイシ類種苗の移植によりその検証が可能である。

再1ではトゲエダコモンサンゴが優占して生息するが、稚サンゴの出現はミドリイシ属、トゲキクメイシ属、ムカシサンゴ属、ハマサンゴ属であった。再4はエダアザミサンゴがミドリイシ類とともに多くみられる地点であるが、稚サンゴ出現数もエダアザミサンゴが最も多かった。黒島東礁池には幼生保育型のエダアザミサンゴが特異的に多く分布しており、地形環境の閉鎖性を傍証している。

このように稚サンゴ出現状況を調べることにより、成体サンゴの出現状況と比較し、地点の地形的環境特性を把握することができる。



図Ⅱ.2.4 地点別稚サンゴ出現密度 (石西礁湖)

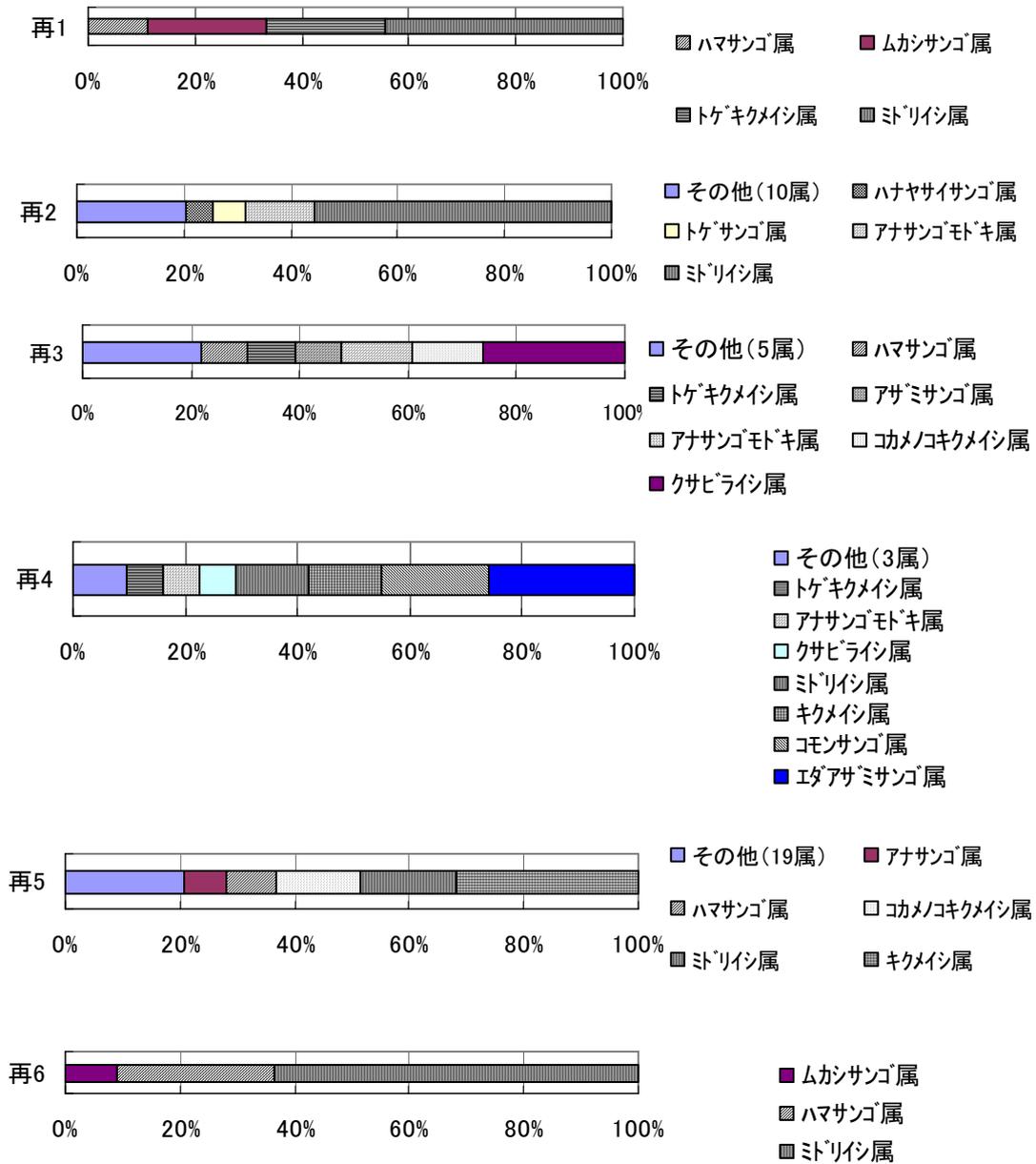
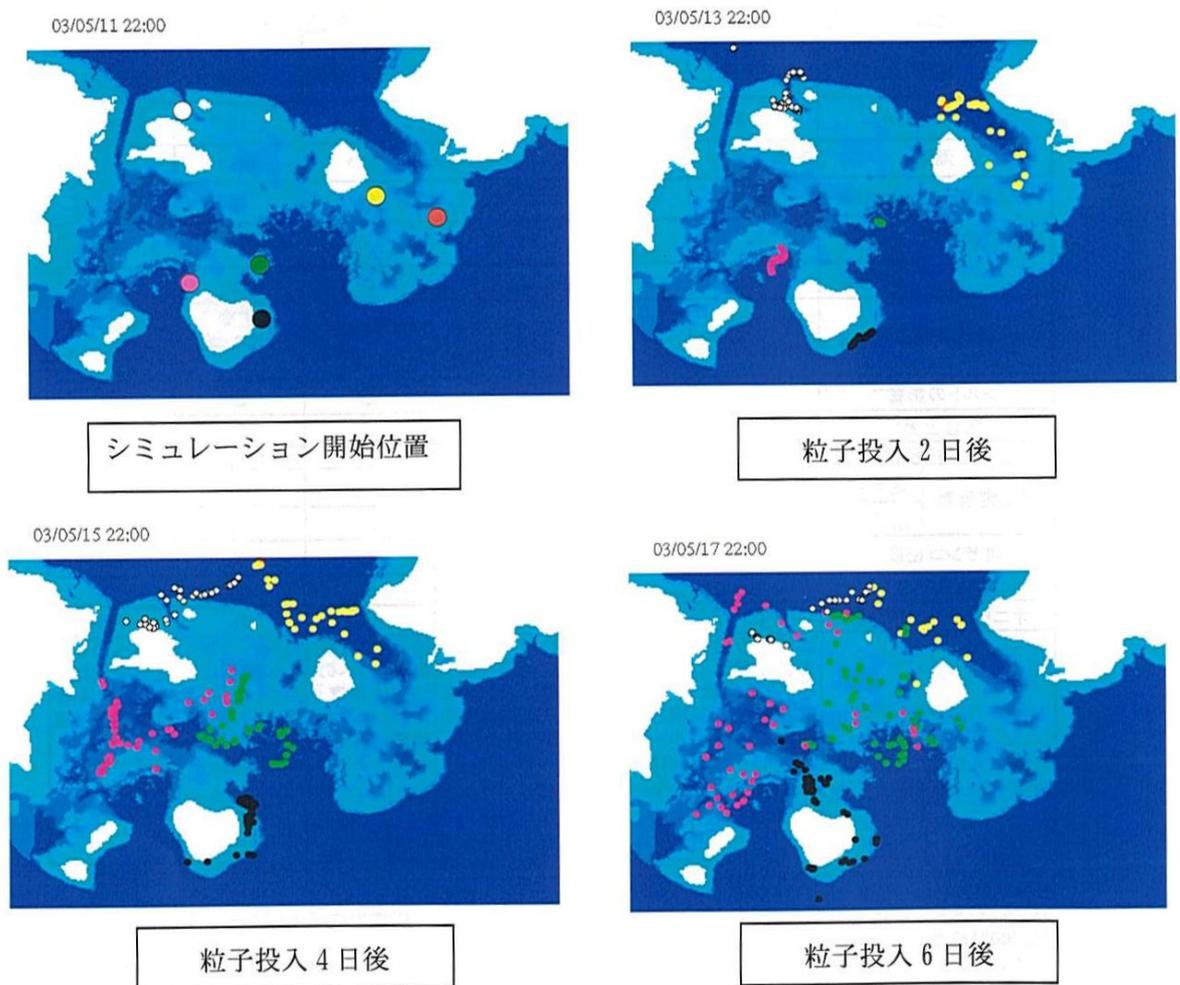


図 II.2.5 属別稚サンゴ出現状況

2-3. 幼生供給力

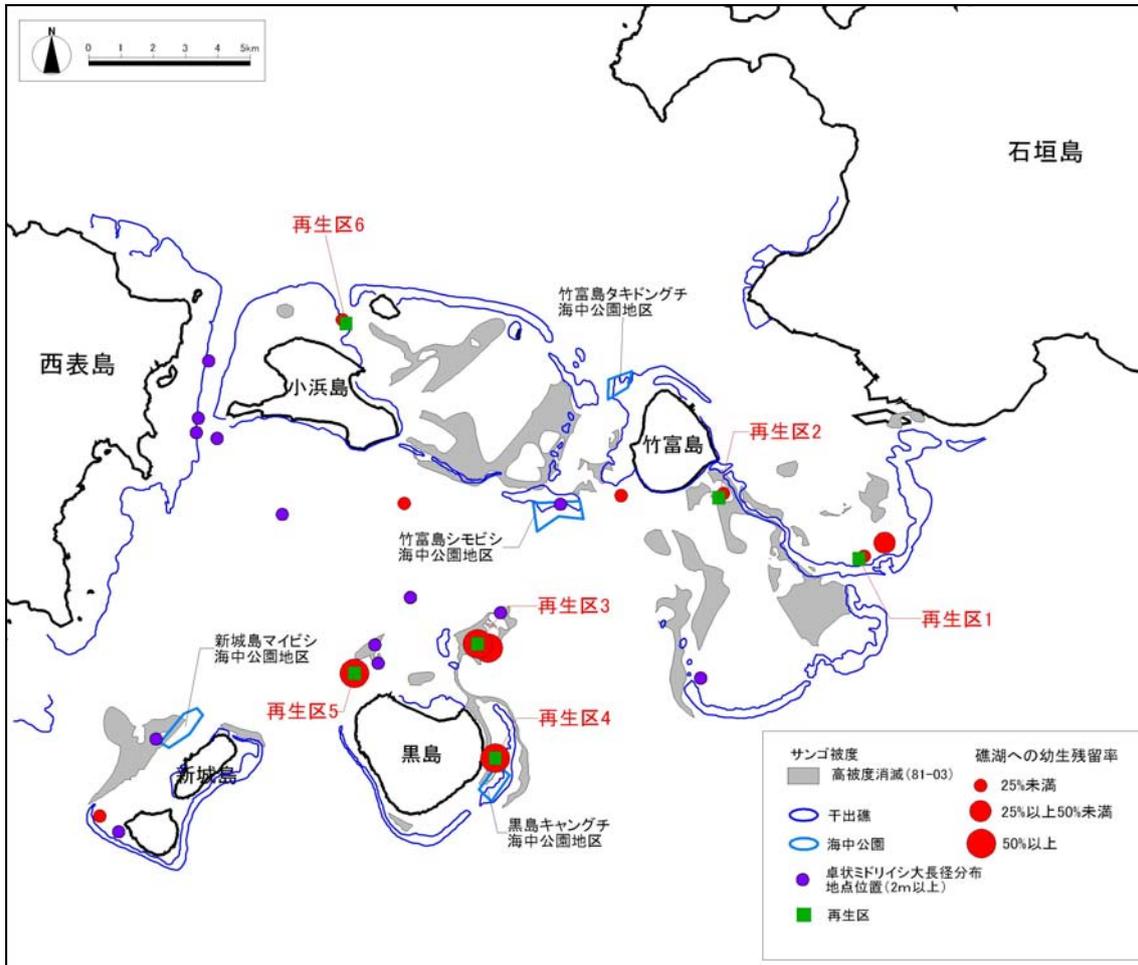
移植したサンゴが順調に成長し、再生産可能になった場合、移植サンゴから供給される幼生が、再生対象海域に貢献する必要がある。その可能性を検討するためには、まず海域の流動を把握し、幼生運搬の動向を調査する。

石西礁湖では、幼生の供給度を潮流実測値からシミュレーションし（図Ⅱ.2.6、東京工業大学灘岡研究室）、各候補地の礁湖内部に対する貢献度を評価した（図Ⅱ.2.7）。評価の結果、再生区5、再生区6はサンゴ幼生が多く到達しており、稚サンゴ密度が高いことから、阻害要因は幼生供給でないことが判明した。残る再生区1、再生区2、再生区3、再生区4について、特に幼生供給の少ない石西礁湖中心部へのサンゴ幼生供給をシミュレーションで検討した。その結果、再生区3及び再生区4から供給された幼生は、着床し始める一斉産卵4日後にその半分以上が石西礁湖にとどまり、石西礁湖内の幼生供給源として貢献度が高いことがわかった（環境省那覇自然環境事務所 2006）。



図Ⅱ.2.6 サンゴ幼生供給のシミュレーション

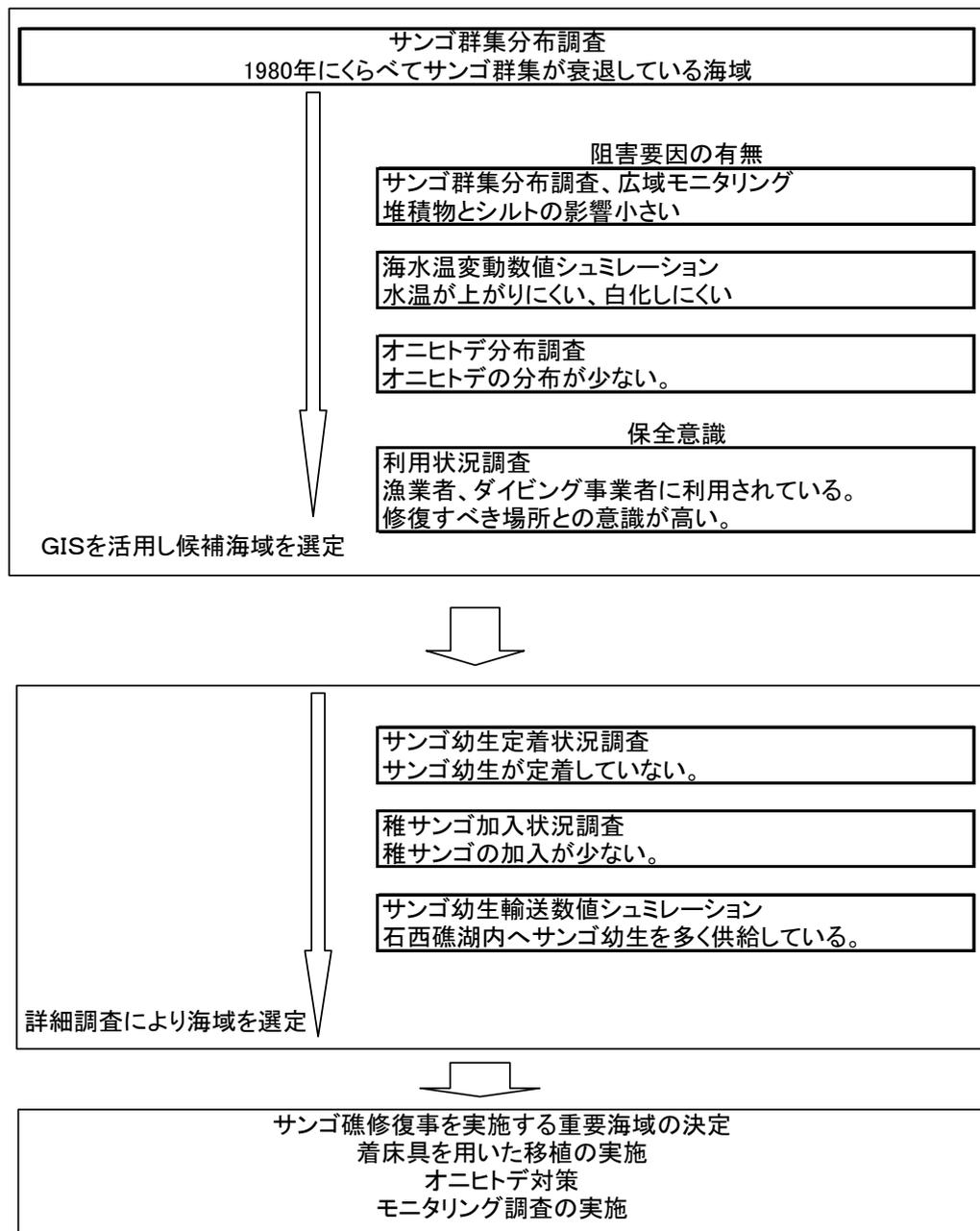
点の色は基点とした再生区を示し、再生区1を赤、2を黄、3を緑、4を黒、5をピンク、6を白で示した。



図II.2.7 各再生区の礁湖への幼生残留率

2-4. 評価

前項までの調査結果を基に最終的な修復地点決定のための評価を行うが、そのフローを整理すると図Ⅱ.2.8 のようになる。サンゴ着床数が低い場所は修復の必要性があるが、流動シミュレーション結果から他海域への幼生供給度が低いと判断される場合は、評価は低くなる。石西礁湖における評価例を表Ⅱ.2.2 に示す。



図Ⅱ.2.8 サンゴ群集修復事業実施海域選定フロー
(環境省那覇自然環境事務所 2006)

表Ⅱ.2.2 石西礁湖候補地（再生区）評価表

再生区番号		1	2	3	4	5	6
場所		アーサーピー 礁湖西端	竹富南航路 南側	ウラビシ礁湖	黒島東礁池	黒島西沈水 離礁	小浜島北部
中心位置	緯度	24° 17.602	24° 18.664	24° 16.120	24° 14.186	24° 15.621	24° 21.700
	経度	124° 08.782	124° 06.203	124° 01.698	124° 02.020	123° 59.441	123° 58.669
地形		礁湖底	礁湖底	礁湖底	礁池底・離礁	沈水離礁	水路
底質		枝状礫	枝状礫	枝状礫堆積・ 岩礁	枝状礫・岩礁	岩礁	岩礁
平均水深(m)		2-3	4	3-4	5	10	4
潮流		やや強い	弱い	やや強い	弱い	弱い	強い
被度の変遷 ¹⁾	1980年	△	◎	◎	◎	◎	△
	1991年	×	△○	◎	×	×	◎
	2002年	△	×	×	△	△	×
優占種		トゲエダコモ ンサンゴ	スギノキミドリ イシ	カンボクアナ サンゴモドキ	マルヅツミドリ イシ	アナサンゴ	カンボクアナ サンゴモドキ
シルトの影響 ²⁾		○	○	○	○	○	○
水温上昇 ³⁾		◎	○	◎	○	◎	△
利用者の認識 ⁴⁾		△	△	○(漁業)	△	○(ダイビング)	△
幼生定着数	定着板 ⁵⁾	△					
	着床具 ⁶⁾	△	△	○	△	○	(◎) ¹⁰⁾
稚サンゴ密度 ⁷⁾		△	△	△	△	◎	△
幼生供給度 ⁸⁾		△	△	◎	◎	◎	△
オニヒトデ出現状況 ⁹⁾		○	不明	○	◎	◎	不明
評 価		礁湖への幼生供給度は低い。被供給度も低い。	礁湖への幼生供給度は低い。被供給度も低い。シルトの影響を受けることもある。水温がやや高くなりやすい。	礁湖への幼生供給度は高い。被供給度は中位。	礁池への幼生供給度は高い。被供給度は低い。水温がやや高くなりやすい。	礁湖への幼生供給度は高い。被供給度は極めて高いが、サンゴ被度が低い。	礁湖への幼生供給度は低い。被供給度は極めて高いが、サンゴ被度が低い。

1) 被度 × : 粗被度(5%未満)、△ : 低被度(5-25%)、○ : 中被度(25-50%)、◎ : 高被度(50%-)、1980年は環境庁サンゴ分布図から推定

2) △ : シルト分布地点から2km以内、○ : シルト分布地点から2km以上、環境省広域モニタリング及び自然再生調査(2002)結果

3) 30°C以上水温継続時間: △ : 8時間以上、○ : 4時間以上8時間未満、◎ : 4時間未満、灘岡教授シミュレーション結果

4) △ : あまり利用されていない、○ : 利用されている、◎ : よく利用されている、自然再生調査委員会資料(2003)

5) △ : 1-5、○ : 5-10、◎ : 10- /100cm²定着、野島助教授2004年調査結果

6) △ : 1、○ : 1-2、◎ : 2- /1着床具 定着、自然再生調査(2004)結果

7) △ : 1-5、○ : 5-10、◎ : 10- /m²、自然再生調査(2004)結果

8) △ : 幼生礁湖内残留率25%未満、○ : 幼生礁湖内残留率25%以上50%未満、◎ : 幼生礁湖内残留率50%以上、灘岡教授シミュレーション結果より推定

9) △ : 出現数が増加、○ : 出現数が減少、△ : 出現なし、環境省オニヒトデ調査結果(2004)

10) 船進入不可のためカヤマ水路に設置した。

3. 移植手法

(1) 有性生殖と無性生殖

サンゴ礁の修復は長く既存サンゴ群体の一部を折り、修復場所に運搬し、接着剤等で固定する無性生殖法で行われてきた（図Ⅱ.3.1）。わが国では、和歌山県串本町にある串本海中公園センターが1970年に地先海域に海中展望塔を建設した際、展望塔周辺の海中景観を修復するため、周辺のサンゴを移植した例が嚆矢と思われる。串本海域は本州における代表的な造礁サンゴ分布域で、卓状のクシハダミドリイシ *Acropora hyacinthus* が広範に群生することで知られている。同種を用いた移植実験では1-2年で群体の特徴を示す大きさに成長したことが報告されている（辰喜 1977）。



図Ⅱ.3.1 断片移植

世界的には1960-1970年代にオニヒトデ大発生による大規模なサンゴ食害後、回復の進まないサンゴ礁の復元手法として、分割群体の移植が行われるようになった。今日でも世界各地ではこの方法による修復は主流である。2004年6月、沖縄県において開催された第10回国際サンゴ礁シンポジウムではカリブ海、メキシコ湾、太平洋、インド洋、紅海など約20カ国・地域からサンゴ礁修復に関する発表があったが、全て無性生殖に関するものであった。

しかし、この方法では、健全なサンゴ群集を破壊することにもつながりかねず、特別な場合を除き大規模な事業としては成立しにくい面がある。そのため、国際的なサンゴ礁の学界でもサンゴ礁再生の重要性は認識されているが、修復の手法として無性生殖法は必ずしも広範な理解が得られていない（Working Group on Coral Reef Restoration and Remediation）。

(2) 有性生殖法の利点

一方、近年わが国ではサンゴの初期生活史に関する様々な研究が進んだ結果、サンゴの産卵、受精、着生の詳細が明らかになり、有性生殖により作られた稚サンゴによる移植が実用化されるようになった。この手法は、既存群体（ドナー）を傷つけることなく、自然の一斉産卵を利用するため、多様な種が着生し、自然状態と同様の種構成による移植が可能である。また、幼生を用いるため、単一の移植群体のもととなる群体（ドナー）から遺伝的に同じ個体を複数移植する場合と比べて、同一種内の遺伝的多様性も確保可能であるなど優れた点が多い移植法である（表Ⅱ.3.1）。日本サンゴ礁学会サンゴ礁保全委員会の「造礁サンゴ類の特別採捕許可についての要望」（2004年12月11日）においても、採捕による既存サンゴ群集の弱体化が特に懸念されており、ドナーを採捕しない有性生殖法は今後の基本的サンゴ移植法といえる。

この方法には、実験室において稚サンゴを生産する方法と野外において採苗する方法等があるが、野外の場合は幼生着床のための着床具を設置するだけ済み、比較的安価に稚サンゴを生産することができる（表Ⅱ.3.2）。

表Ⅱ.3.1 有性生殖と無性生殖による移植法の比較（環境省那覇自然環境事務所 2006）

	有性生殖	無性生殖
移植方法	室内あるいは野外において受精したサンゴ幼生を基盤へ着生させて移植する。	自然群体の分割により移植断片を作成し、移植する。
既存サンゴ群集への影響	幼生を活用するため、既存群集へは影響を与えない。	分割される群体に対し、付加を与える。
移植群集の多様性	自然海域で産卵した幼生を活用する場合、多様な種を移植できる。	断片製作、海底固着の容易な種に限定される。また、遺伝的に同じ個体を移植するため、種内多様性は低い。
再生の規模	大規模に実施可能。	既存群集の規模に制限される。
移植作業の簡易性	作業の標準化が可能であるため、事業化が可能。	断片製作及び海底固着に熟練が必要なため、作業の標準化が困難。

表Ⅱ.3.2 有性生殖移植法の比較（環境省那覇事務所 2006）

	野外採苗法（着床具法）	屋内採苗法	幼生着生誘導法	幼生放流法
移植法	野外において幼生を着生させ、野外で蓄養後、稚サンゴを着床具ごと移植する。	室内産卵又は野外産卵後、室内において幼生飼育し、基盤への着生、着生後の稚サンゴ飼育後、移植する。	野外の人工構造物を表面加工し、浮遊幼生の着生を誘導する。	野外あるいは屋内において採卵後、幼生飼育し、海底に放流する。
施設、機材	着生基盤、接着剤	室内飼育・蓄養装置、着生基盤、接着剤	構造物表面加工材料	室内飼育・蓄養装置
再生の規模	海底固着ダイバー数に制限される。年変動する採苗数に制限される。	飼育・蓄養施設、海底固着ダイバー数に制限される。	人工構造物規模に制限される。	飼育・蓄養施設及び放流場所を囲うための膜設置規模に制限される。
特徴	汎用的：特別な施設を必要としないため、実施場所は制限されず、費用も安価。	限定的：陸上施設と濃密な飼育管理が必要であるため、実施場所が限定され、費用がかかる。	きわめて限定的：人工構造物に付随して実施されるため、実施は限定される。	限定的：飼育管理が必要であり、膜の設置規模に制限されるため、実施は限定される。

(3) 連結式着床具の開発

野外採苗のために、これまで貝殻やスレート板等の着生基盤を海底に設置する方法が実験的に行われてきた。その結果、好適幼生着床部を有し、稚サンゴへの食害が防止でき、移植に便利な形状の着生基盤が必要であることが判明した。最近になって、それらの条件を備えたより実用的な幼生着床具が東京海洋大学の岡本峰雄助教授らにより開発された（特許第 3530838 号）。開発された着床具は杯状に焼成した直径 40 mm×高さ 40 mm くらいのセラミックで（図Ⅱ.3.2）、縦に重ねてケースに収め、サンゴ産卵期前に海底に設置し、幼生の着生をまつ。約 1 年後には肉眼ではっきりと稚サンゴが識別できるほどに成長し、着床具はそのまま移植種苗として使用できる。移植は海底にドリルで穴をあけ、着床具の下部に水中ボンドを付けて差し込む（図Ⅱ.3.3）。

この着床具は軽量、安価で、大量生産が可能であり、一度に多くの着床具を設置し、幼生を着床させることができるため、大量の移植サンゴ種苗生産の可能性を持っている。着床具による種苗移植は移植を標準化（年齢、サイズ、群体部位、ダメージ）すること

が可能のため、より科学的な移植評価を行うことができる。また、着床具ごとに移植群体の生残、成長等を把握することが可能で、継続モニタリング容易であることが特徴である。そのため、石西礁湖サンゴ群集修復事業に採用され、サンゴ礁再生が行われている。



図 II.3.2 開発された着床具（2002 年型）

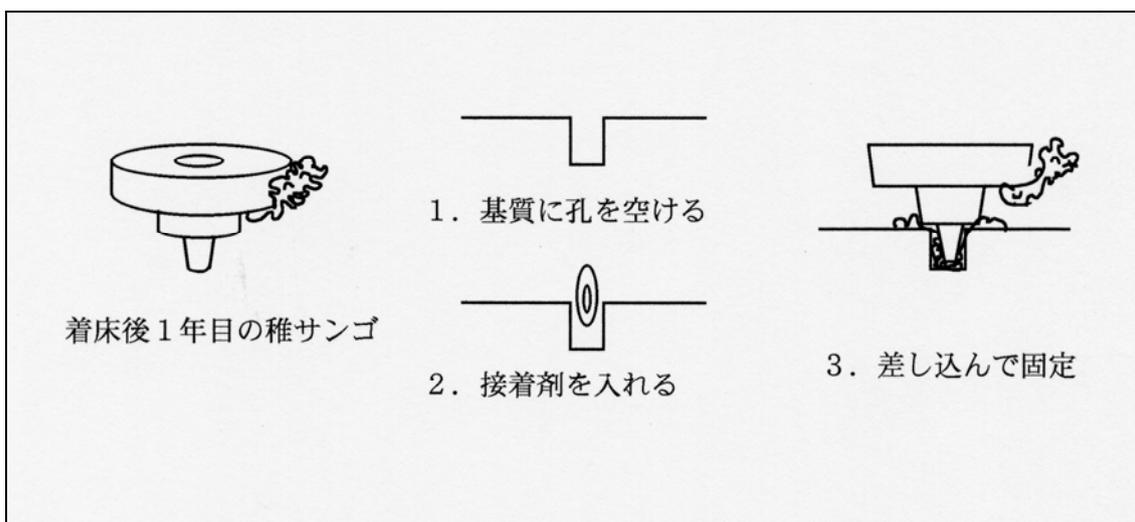


図 II.3.3 着床具の移植法（岡本・野島 2003）

4. 着床具の製作

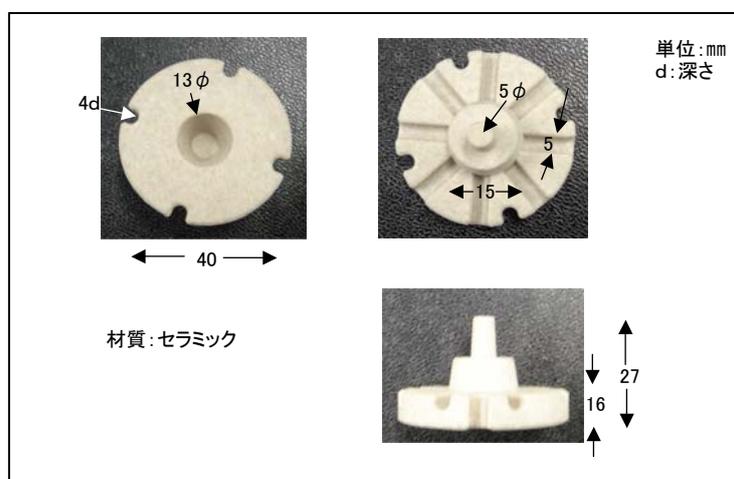
2002年に開発された着床具をやや軽量化した着床具が2004年に開発され（図Ⅱ.4.1）、平成15年度採苗のため設置、平成16年度移植に供された。着床具は直径55mm、高さ25mmで、粘土を素材とし、石膏型を用いた圧力鋳込みで成型、1250℃で酸化焼成されている。着床板部の上面・下面に溝があり、脚部は最大直径10mm、長さ10mm、着床板部側面に4カ所の溝を有し、10段に重ねてテグスで固縛した束をユニットとしている。海中に設置する際は樹脂製のコンテナに20束を固縛固定された。しかし、石西礁湖自然再生事業の規模拡大に伴う着床具設置個数の増加に対応するため、着床具の小型化ならびに専用ケースの開発が求められた。



図Ⅱ.4.1 2004年に開発された着床具

(1) 着床具

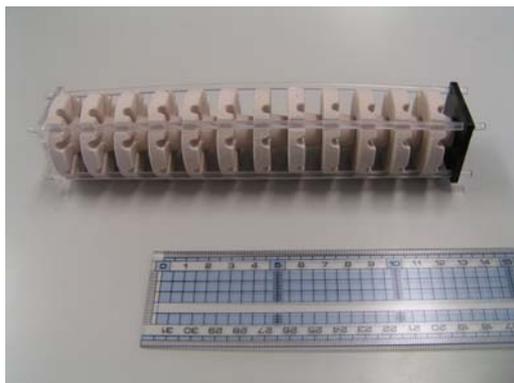
着床具大量生産のため、着床具製作を金型法に変換することが検討され、それにより着床具形状の均一化が可能となるため、平行して専用の樹脂ケースの開発が進められた。樹脂ケースに多くの着床具が収められるよう着床具は小型化され、12段の着床具を10組、計120個固定できる着床具ケースが開発された。大きさは縦、横、高さがそれぞれ15、27、20cmで、専用架台に固定が容易で、移植の際には移植地への移動にバケツに入れて扱える。着床具の小型化により脚部が6mmと細くなったため、穿孔作業はかなり容易になった（図Ⅱ.4.2）。



図Ⅱ.4.2 着床具図面（2005年型）

(2) 樹脂ケース・着床具ケース・架台

前述のように着床具を 12 段にした束を樹脂ケースに装填（図Ⅱ.4.3）、この樹脂ケースを着床具ケースに 10 束固定した（図Ⅱ.4.4）。着床具ケース 8 組をステンレス製の専用架台にプラスチックバンドで固定した（図Ⅱ.4.5）。専用架台には着床具が計 960 個装填されることになる。樹脂ケース、着床具ケース、架台の図面を各々図Ⅱ.4.6～Ⅱ.4.8 に示す。



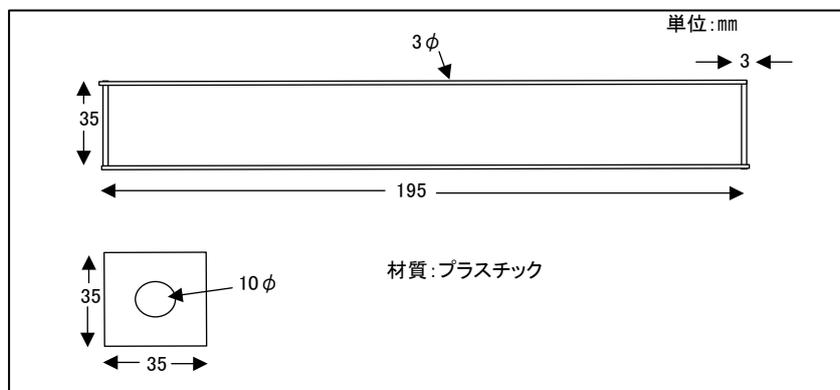
図Ⅱ.4.3 着床具束（樹脂ケース）



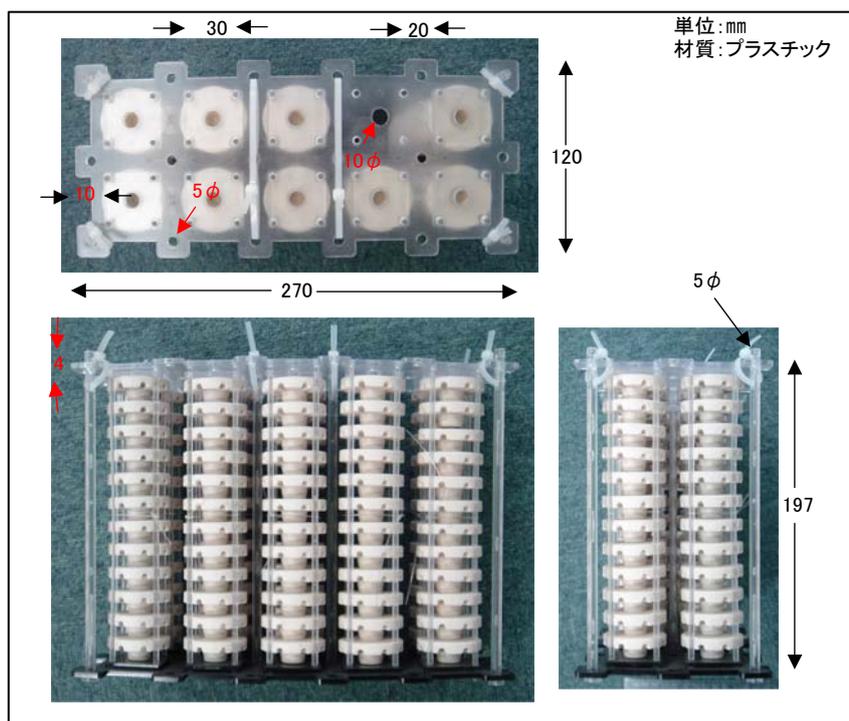
図Ⅱ.4.4 着床具ケース（15×27×20 cm高）



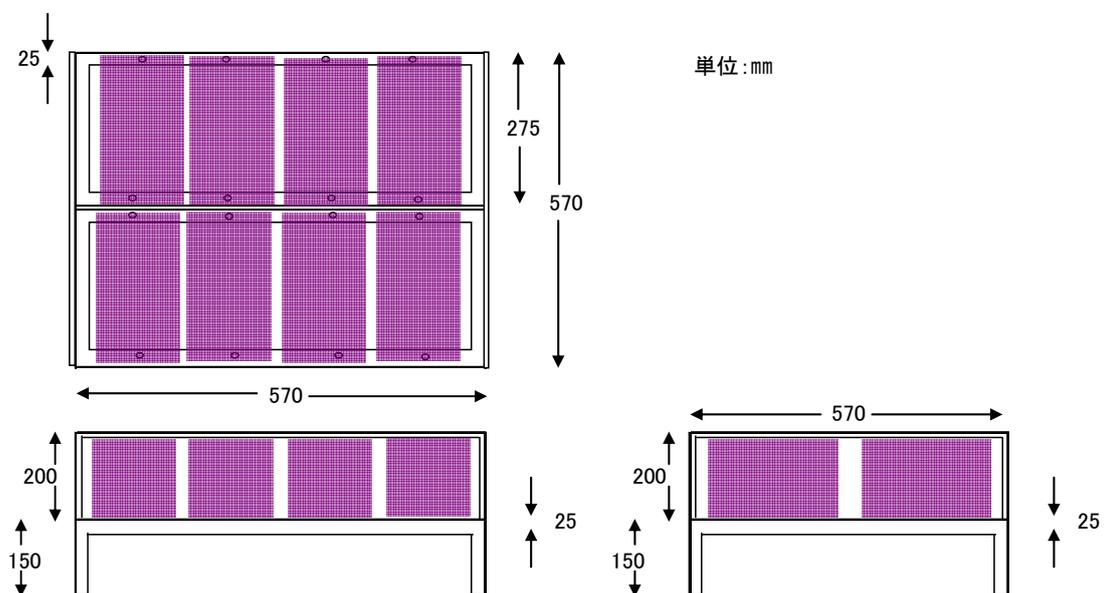
図Ⅱ.4.5 着床具架台（57×57×35cm高）



図Ⅱ.4.6 樹脂ケース図面



図Ⅱ.4.7 着床具ケース図面



図Ⅱ.4.8 架台図面

なお、架台上の着床具ケースの配置については、過密の恐れもあり、ケース数の減少及び架台大きさの増加により過密を緩和させることを検討してもよい。

5. 着床具の設置

(1) 設置時期

サンゴ礁で卓越して分布するサンゴ群集はミドリイシ属である。群体も大きいためポリプの数が多く、しかも一斉産卵する種が多いため、野外で採苗する主要な対象グループである。採苗は一斉産卵を狙って行うので、採苗海域の産卵時期は重要な情報である。八重山群島では、一斉産卵は5月の満月付近に起こる。ただし、満月が4月の末で、水温が高めに推移している場合は、産卵の可能性があり、次の満月である5月の末を狙って準備しては十分な採苗ができない可能性があるため、早めに設置しておくことが必要である。

ミドリイシ属の代表的な種で、わが国に広く分布するクシハダミドリイシ *Acropora hyacinthus* の産卵期は八重山では4～5月、沖縄本島周辺では5～6月、紀伊半島串本では7～8月と黒潮下流へ行くほど遅くなり、小笠原では8月に産卵が確認されている（林原 2004）。

産卵に近くなると、サンゴの生殖腺がピンク色に色づくので（図Ⅱ.5.1）、ポリプを観察し、成熟度を確認する。



図Ⅱ.5.1 成熟したミドリイシ属の生殖腺（下池和幸氏提供）

八重山群島石西礁湖では一斉産卵は5月であるが、2005年ではポリプ観察結果から満月3日前に、礁湖南部のカタグアで産卵観察を行ったところ、21:30頃より指状ミドリイシのポリプからバンドルが見え（図Ⅱ.5.2）、22:10、枝状ミドリイシが一斉産卵を開始した（図Ⅱ.5.3）（環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所・国土環境株式会社 2006）。2006年は5月13日が産卵予想日であったが、2日前から石西礁湖の複数の海域で幼生スリック（図Ⅱ.5.4）がみられ、1日前の23:00頃竹富島南方（通称やすらぎボ

イント) で大規模な産卵がみられた。

このように、産卵日は満月の数日前に起こる可能性が高いので、余裕を持って準備することが必要である。



図Ⅱ.5.2 放卵直前の指状ミドリイシ



図Ⅱ.5.3 放卵する枝状ミドリイシ



図Ⅱ.5.4 幼生スリック

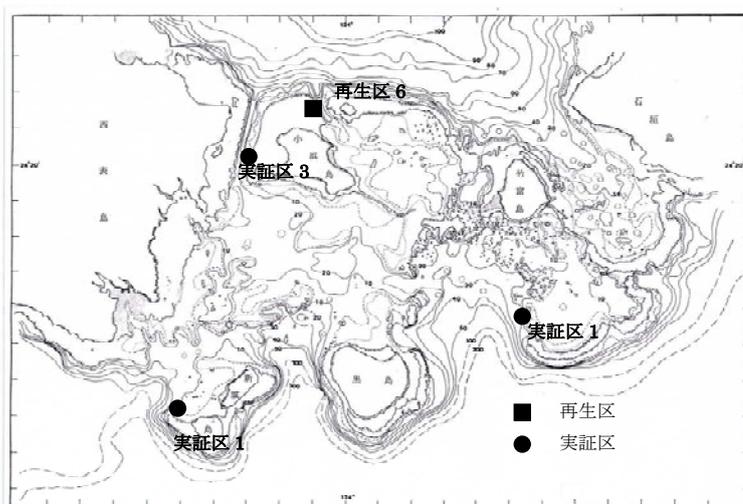
(2) 設置場所

採苗のための着床具設置場所は、Ⅱ.2-1項で述べた復元力調査結果及びⅡ.2-2項で述べた稚サンゴ出現状況調査結果を参考にして選定する。設置場所は第1に幼生の移送路におくことが重要であるが、そのほかにも次のような環境条件を検討しなくてはならない。

① 波浪・流動

サンゴ礁域では台風の襲来を避けられないので、波浪に対する十分な備えが重要である。礁斜面では波高10mに達する高波が押し寄せることは珍しくない。そのため、礁斜面に設置する場合は、できるだけ早い時期に着床具を静穏海域に移動することが必要である。移動時期は台風の本格的シーズンである9月以前に行わなければならない。着床直後は未だ十分に着床具に固着していない可能性があるため、少なくとも着床10日間は移動させないほうがよい。したがって、幼生浮遊期間を1週間とすれば、産卵日から20日程度以後に移動する。次の満月にも産卵の可能性があるので、移動は最初の産卵日から50日後程度がよい。

一般的には礁斜面への設置を避け、高波の直撃を受けない外礁や離礁の内側に設置することが望まれる。石西礁湖では図8.5に示す地点が常設の設置地点である。小浜島周辺の2地点（再生区6、実証区3）は水路部の内側に窪んだ地形で、新城島の地点（実証区4）は外礁の内側に点在する離礁の北側にあり、いずれも高波を避けられる地点にあり、2006年9月15日に八重山地方を襲った強力な台風13号の高波の被害から免れている。実証区1（カタグア）は直接外洋に面した離礁群で、高波を受けやすい位置にあるが、離礁が形成する池状地形の中に設置しているため、ほとんど被害を受けていない。



図Ⅱ.5.5 着床具常設設置地点

注意しなくてはならないのは、サンゴ礁では直接高波を受けなくても、外礁を超えた波やうねりが地形によっては、強い流れを引き起こし、設置している着床具に影響を及ぼすことである。この流れは礁池で起こりやすく、礁池の切れ目に向かい一方的に流れる。

② 水深

水深で第 1 に考慮しなくてはならないことはサンゴ幼生の着床限界深度である。幼生着床は水深 5m を超えると減少するといわれ（野島 私信）、水深 10m 以深ではほとんど着床を期待できないとされている（岡本 私信）。一方、夏季の高水温や強い紫外線によるサンゴの白化現象を避けるためには、できるだけ深いほうが安全である。また、波浪の影響を避けるためにも、浅瀬は避けたい。したがって、外礁の内側では 5m を超える水深、礁斜面の場合は 10m 未満の場所が適当である。

③ 底質

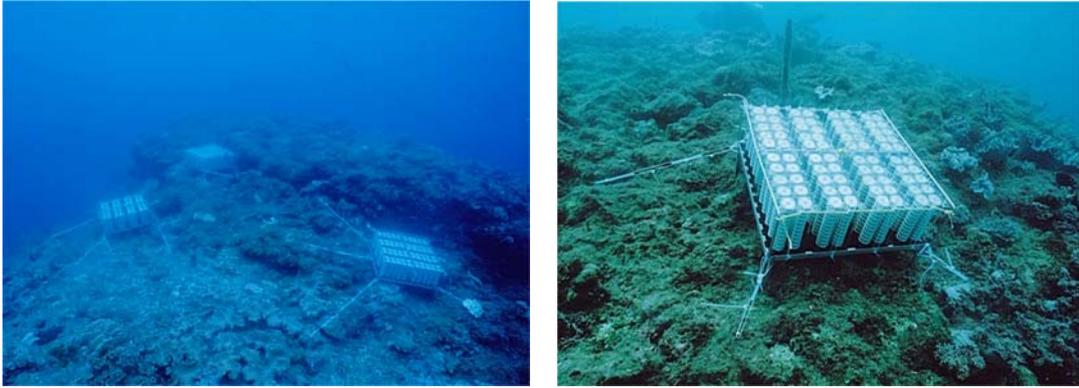
着床具の設置は底質に制限されることはないが、外礁の内側では砂礫底であることが多いため、波浪による底質の巻上げに注意する必要がある。台風時には高波により砂礫が大きく移動するのみならず、折れたサンゴ群集や場合によっては破壊された岩礁や卓状ミドリイシが衝突することもある。したがって、少なくとも漂砂礫に埋没されないよう着床具は海底から一定の高さを保つことが必要である。また、周囲のサンゴ群集とあまり接近していると、破壊されたサンゴ群集が押し寄せてきて埋没することもあるので、2~3m 程度は離して設置する必要がある。

④ 水質

着床具設置は水通しのよい場所であることが求められるので、水質の心配はあまり考える必要はないと考えられるが、着床が期待できる場所が河口等、天候により水質が大きく変化する場所である場合は、着床後移動する必要がある。移動時期は①に記したとおりである。

(3) 設置工事

着床具架台の設置は架台数が少ない場合はそのまま設置する。固定は 4 隅から 30 cm 程度離して、長さ 1m の鉄筋（砂礫底や柔らかいサンゴ礁の場合）又は長さ 30 cm の鉄杭（硬いサンゴ礁の場合）をしっかりと打設し、それと架台をステンレス針金で結ぶ（図 II. 5.6）。インシュロックなどのプラスチック製バンドは取り扱いが便利であるが、高波のように瞬間的に大きな力がかかると切断されることがあり、また長期間設置しておくと、劣化してしまうので、避けたほうがよい。



図Ⅱ.5.6 単独架台の設置

架台を多数設置する場合は、固定させるための足場パイプ枠を組立てる(図Ⅱ.5.7)。足場パイプ及びパイプを組むクランプは建材店で入手できる。組立ては材料を船で設置点に運び、海底で行うが、事前に陸上で試作し、架台を載せて、寸法を確認する。

海底では、最初に垂直のパイプを海底に30 cmほど打ち込み、固定させてから、水平のパイプを組立てる。その際、海底が水平とは限らないので、レベル器を用いてパイプが水平となるよう調整する。また、クランプのねじ山には時間が経過すると生物が付着し、ナットが緩まなくなるので、設置時にシリコンのコーキング剤で谷を埋めておく。

足場パイプ枠が組立てられたら、架台を船上から海底に下ろし、枠に載せ、インシュロックバンドで固定する(図Ⅱ.5.8)。パイプ枠1基に8架台設置を標準とする。インシュロックバンドはできるだけ太く、劣化しにくい黒色のものを使用し、設置1年後には交換する。架台設置後、台風時の波浪に対し安定性を高めるため、4隅に鉄筋を打設し、足場パイプ枠とステンレス針金で固定する。ロープは台風時に移動してきたサンゴにより切断される恐れがあるので、避けたほうがよい。また、砂嚢も同様の理由で、破損するので不適である。

設置点の水温を記録するため、自記記録式水温計(HOBO Water Temp Pro データロガー、オンセットコンピュータ社製)を1個設置し、毎正時に記録しておく(図Ⅱ.5.9)。



図Ⅱ.5.8 足場パイプ枠に固定した着床具架台

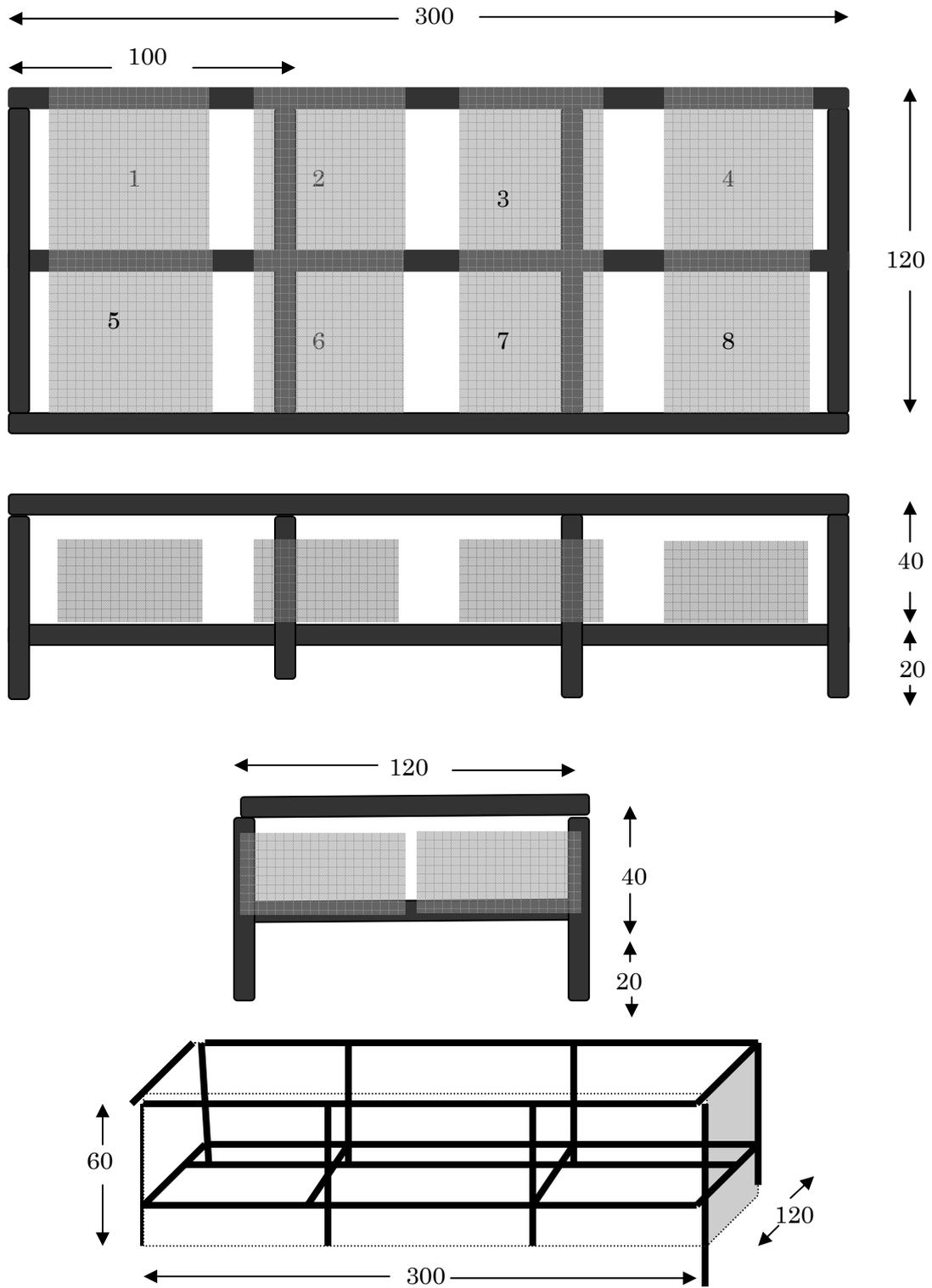


図Ⅱ.5.9 架台に取り付けた自記式水温計
(生物の付着防止のためビニールテープを巻いてある)

着床具設置工事の標準的作業量を表Ⅱ.5.1に示す。

表Ⅱ.5.1 着床具設置工事作業量 (1日当り)

成 果	工事監理	工事	船
足場パイプ枠2基 及び 架台設置16架台	主任技師 1名 及び 技師 1名	主任技師 1名 及び ダイバー 4名	監理 1隻 及び 工事 1隻

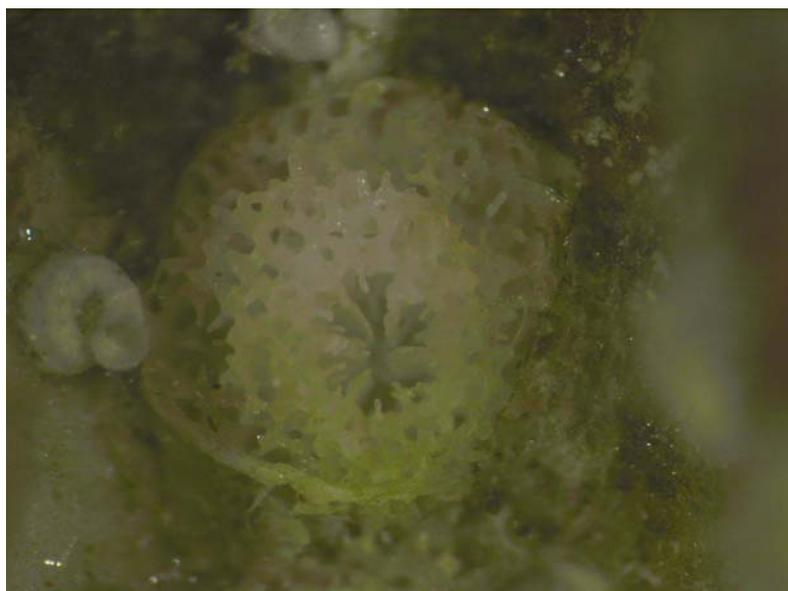


図Ⅱ. 5. 7 着床具架台設置用足場パイプ枠 (単位 : cm)

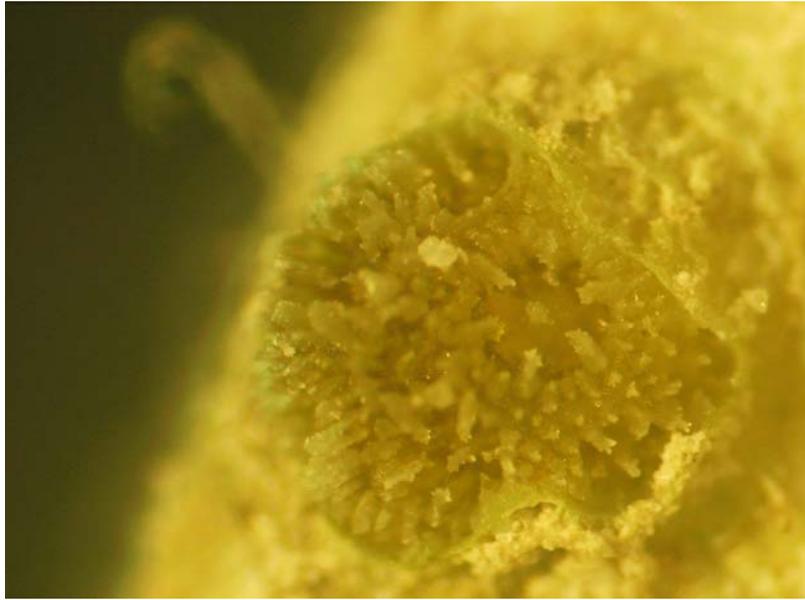
(4) 着床具抽出による着床状況の確認

設置した着床具への幼生着床状況を把握するため、設置後適切な時期に抽出する。着床後約3ヵ月を経ると、着床群体は1mm程度になり、ルーペで確認ができる。通常、設置3ヵ月後に第1回目の抽出を行い、その半年後の冬季に第2回目の抽出を行う。これにより、夏季以降に着床した幼生保育型サンゴの群体を確認することができる。サンゴ礁で普通に見られるハナヤサイサンゴ科のサンゴは代表的な幼生保育型サンゴでほぼ周年幼生を放出するとみられている（波利井 2004）。

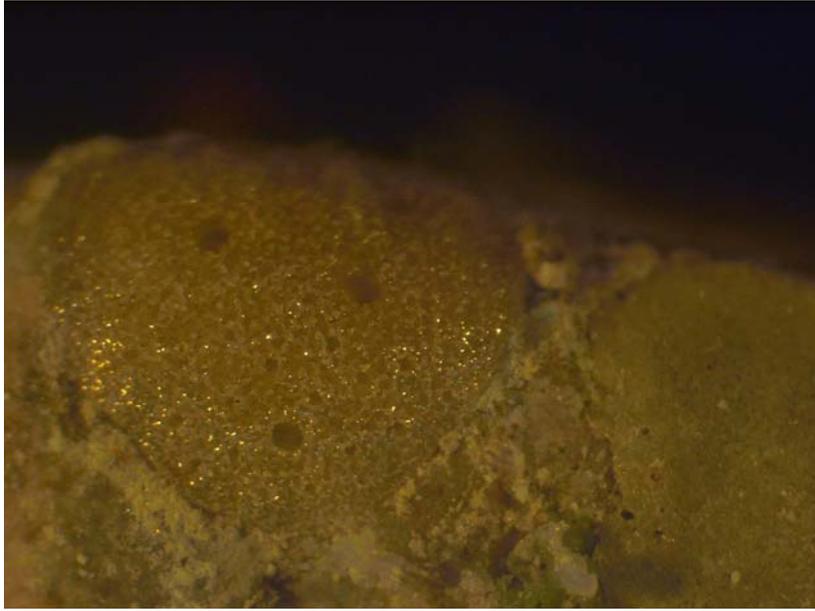
抽出数は石西礁湖では各回設置個数の約2%としている。抽出した着床具は乾燥後、実験室に持ち帰り、検鏡に供し、着床サンゴの種類、着床位置、長径を記録する。着床サンゴの種類は、1. ミドリイシ属、2. ハナヤサイサンゴ科、3. アナサンゴモドキ属、4. その他の種、5. 不明種の5種類（図Ⅱ.5.8）に区分して記録する。着床サンゴの同定にはオーストラリア海洋研究所が発行した調査マニュアル（Australian Institute of Marine Science 1997）にもいくつかの着床サンゴの鮮明な写真が掲載されているので参考になる。



図Ⅱ.5.8-1 ミドリイシ属（直径約1mm）
放射型の隔壁が6の倍数明瞭に見られるのが特徴



図Ⅱ.5.8-2 ハナヤサイサンゴ科 (上：直径約1mm、下：高さ約5mm)
菜の中央部の針状突起が特徴

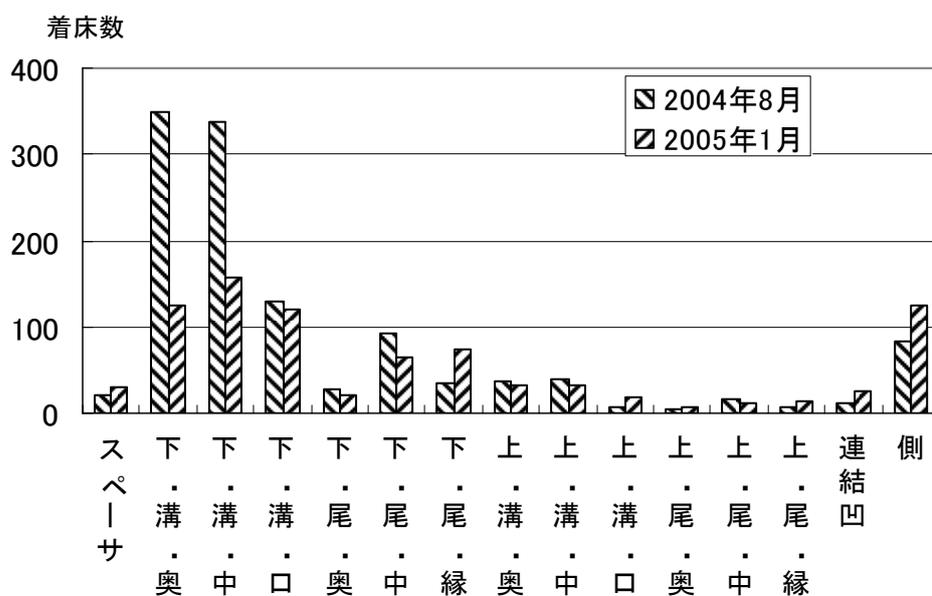


図Ⅱ.5.8-3 アナサンゴモドキ属
群体表面に光沢がある。一見すると無節サンゴモに似るが、
無節サンゴモには莖がないので区別できる



図Ⅱ.5.8-4 その他の種類

着床具への着床は圧倒的に下面の溝部に集中する。図Ⅱ.5.9に石西礁湖における2004年設置着床具への部位別着床状況を示す。最も多かった部位は下面溝部の奥部で、ほとんどが下面に着床する。側部にはアナサンゴモドキ属やハナヤサイサンゴ科の着床が比較的多い。ハナヤサイサンゴ科の幼生は共生藻類を有しているため、光のあたる側部へ着床する傾向があることが推察される。



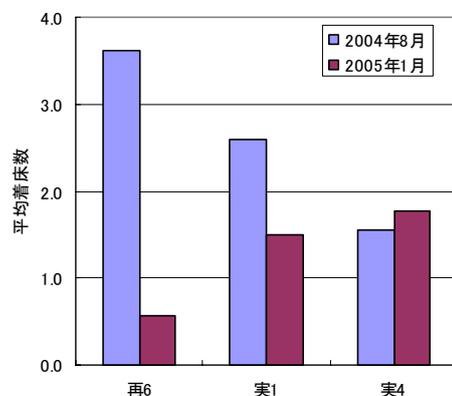
図Ⅱ.5.9-1 部位別着床数



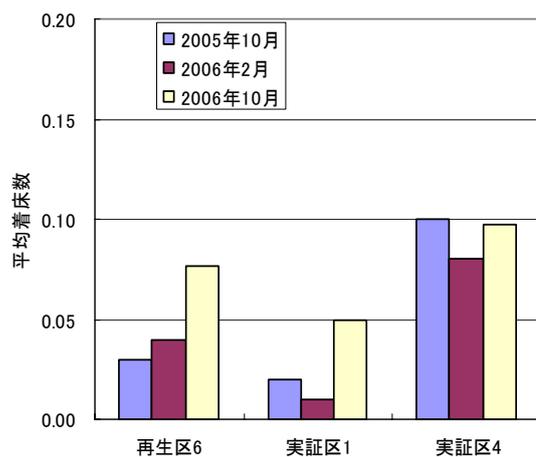
図Ⅱ.5.9-2 着床部位図 (左：下部、右：上部。各部は奥部、中部、縁辺部もしくは口部に細分した。奥部は中心部から1/5まで、中部は1/5から4/5まで、縁辺部もしくは口部は中心部4/5から末端まで)

着床数は同じ場所でも年により大きく変動する。石西礁湖の例では、2004年、再生区6(カヤマ水路)で約3.5の着床数がみられたが(図Ⅱ.5.10)、2005年では約0.03と100

分の1に激減している。他の地点も同様の傾向を示している。2006年にはやや回復した傾向が見られるものの、1桁の差がある（図Ⅱ.5.11）。

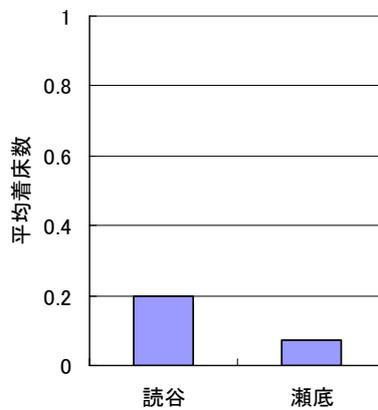


図Ⅱ.5.10 2004年の着床数



図Ⅱ.5.11 2005年の着床数

このような変動は、石西礁湖のみならず沖縄本島でもみられ、かつて多くの着床がみられた瀬底島周辺では、同様の着床具を使った調査で2004年には約0.1群体しか着床がみられなかった（図Ⅱ.5.12）。



図Ⅱ.5.12 瀬底島における2004年の着床数
(亜熱帯総合研究所 準備中)

このように着床数は時空間的偏りが大きく、ある年、ある場所で多く着床しても、翌年必ずしもその場所で同様に着床するとは限らない。そのため、移植種苗を安定的に生産するためには、野外において自然の着床を待つだけでなく、幼生スリックの採集、飼育、着床などの手法を開発する必要があるが、それは今後の課題である。

種類別着床数の解析からは、その場所の加入環境の特性を知ることができる。たとえば、ハナヤサイサンゴ科の種は幼生保育型の生殖様式を有するため、放出後数時間で定着すると考えられており（波利井 2004）、周辺の親群体からの供給が主と考えられる。したがって、一般的には幼生保育型の種が多く定着する場所は、より長期に浮遊するミドリイシ類が到達しにくい地形環境の場所と考えられるが、ミドリイシ類の幼生生産量が少ないことも考えられ、長期的な追跡が必要である。2005年の石西礁湖では、実証区3（ヨナラ水道）でハナヤサイサンゴ科の割合が高く、ミドリイシ属がほとんどなかったが、これは2005年ミドリイシ属の生産量が非常に低かったことと関係がある。実証区4以外でもミドリイシ属の割合が低いことからこのことがうかがえる（図Ⅱ.5.13）。

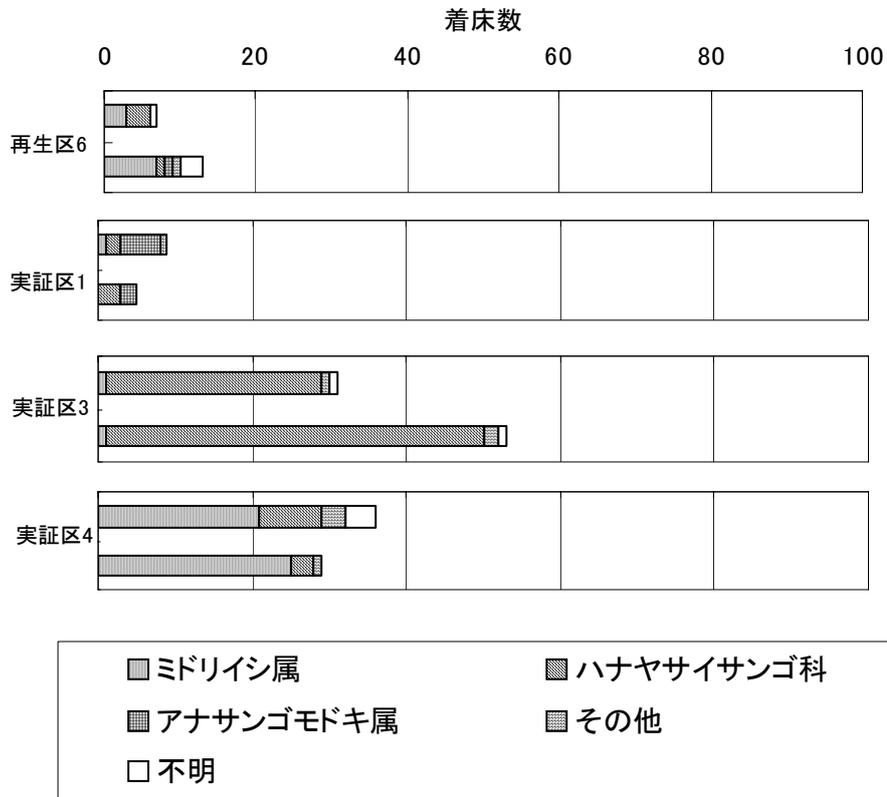


図 II. 5. 13 2005 年石西礁湖種類別総着床数 (上段 : 2005 年 10、12 月、下段 : 2006 年 2 月)

長径データからは着床群体の年齢を知ることができる。石西礁湖の例では、長径は設置 5～7 ヶ月後の 2005 年 10 月、12 月時で、各種類とも 2～3mm、設置 9 ヶ月後の 2006 年 2 月時で、アナサンゴモドキ属が約 6 mm、他の種類が約 3 mmであった (図 II. 5. 14)。

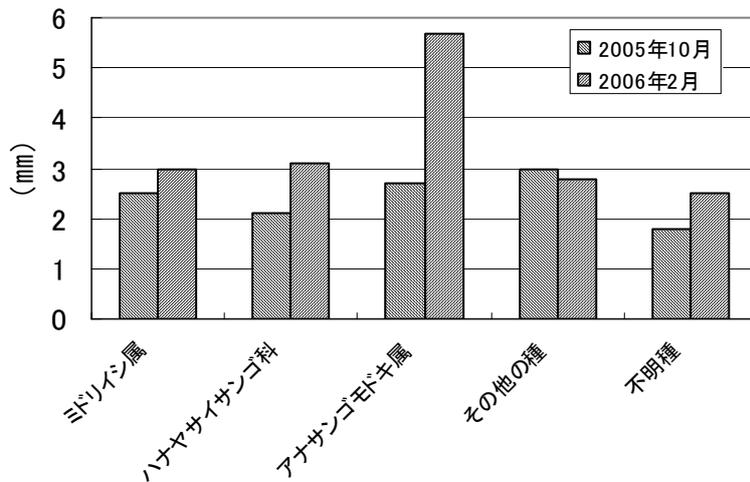


図 II. 5. 14 種類別長径 (mm)

(5) 維持管理

設置した着床具は抽出時のほかに台風通過後などに、巡回し、点検する必要がある。インシュロックや針金、あるいはケースの点検、補修、また着床具が流出した場合は回収する。着床具には時間とともに海藻類が付着するのでそれらを除去するとともにケース天板に浮泥が堆積している場合は除去する。

水温計は概ね3ヶ月ごとに交換し、データを取り出す。

引用文献

Australian Institute of Marine Science (1997) Survey Manual for Tropical Marine Resources, 2nd Edition. S. English et al. (ed). 390pp.

波利井 佐紀 (2004) サンゴの産卵—幼生保育型サンゴ—、環境省・日本サンゴ礁学会 (編). 日本のサンゴ礁 : 158-159.

林原 毅 (2004) イシサンゴ類の一斉産卵、環境省・日本サンゴ礁学会 (編). 日本のサンゴ礁 : 158-159.

環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所・国土環境株式会社 (2006) 平成17年度石西礁湖自然再生技術手法検討調査業務報告書、270pp.

岡本峰雄・野島 哲 (2003) 有性生殖を利用したサンゴ礁修復法開発の試み、大森 信 (編) サンゴ礁修復に関する技術手法—現状と展望—. 環境省自然環境局 : 46-56.

辰喜 洸 (1977) 海中景観の復元、海中公園情報 (41) : 10-12.

Working Group on Coral Reef Restoration and Remediation (Brochure), Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management.

6. 採苗数予測

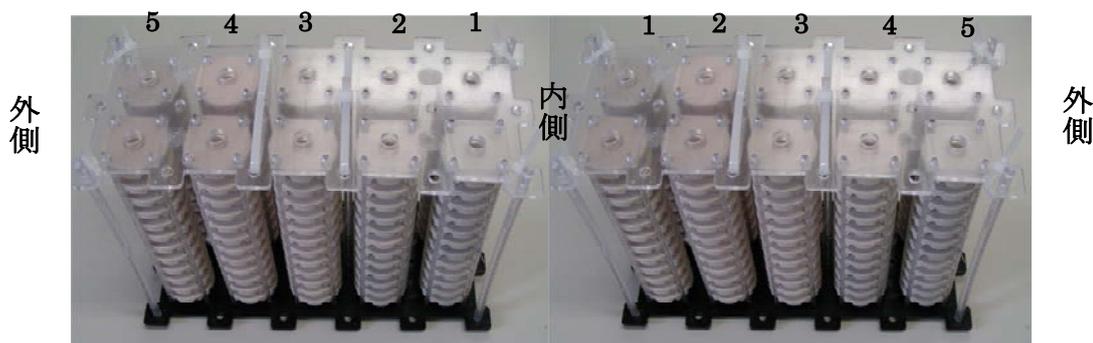
(1) 抽出時期

種苗移植にあたっては事前に移植作業量を見積もる必要があり、そのために採苗数をできるだけ直近に推定する必要がある。移植時期を後述するように11月とすると、台風の影響を避けるため、台風期後に着床具の抽出を行う必要があることから、10月下旬が適当である。台風期前では、台風により攪乱を受けた場合、その変動を見逃してしまうからである。着床具を鉄パイプ枠に設置した場合には、底質攪乱の影響を受ける可能性は少ないが、着床具架台を直接海底に設置した場合には、漂砂礫により着床群体が死滅することもある。そのため、台風期後の移植時期の直近に推定のための抽出を行う。

(2) 抽出法

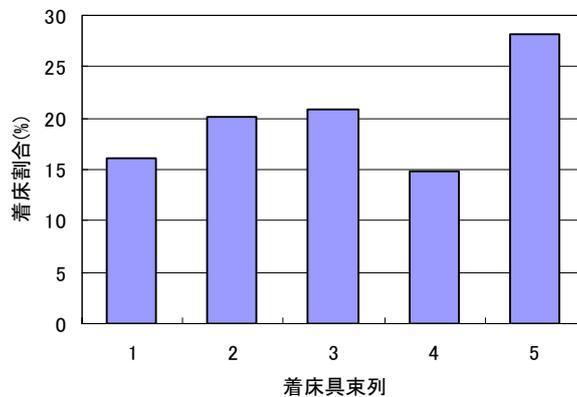
予測のための抽出は、予測精度を高めるため、着床束単位で設置着床具数の5%で行う。抽出位置は推定数をできるだけ最小に算出するため、着床しにくい位置の束を抽出する。実際の採苗数が推定採苗数と乖離した場合、上回った場合は次回に移植すればよいが、下回った場合は準備した人員、材料等が無駄になる可能性があるため、できるだけ最小に算出する。

着床具を密に配置した場合、幼生の量が少ないと、幼生の着床が均質に行われるとは限らない。2006年度設置着床具の2006年9月サンプリングで、着床具ケース内における着床具束間の着床率の差について調査を行った。着床具ケースが向き合う側を内側、向き合わない側を外側として、最内側を1列、最外側を5列として(図II.6.1)、列間の比較を行った。その結果を図II.6.2に示す。



図II.6.1 着床具束列の位置

着床具束列別着床割合



図Ⅱ.6.2 着床具束列別着床割合

列1～4までは明らかな傾向は認められないが、最外側の5列は他の列に比べ、明らかに高い結果となっている。このことから、着床具束の設置について、改善を行い、すべての着床具が抽出できるようにする必要があるが、密配置の場合は、できるだけ内側の束を抽出する。

抽出したサンプルの識別も、通常の抽出は、サンプリング後、乾燥し、実験室に持ち帰り行うが、推定抽出では、採苗数を控えめにするため、実際の採苗条件と同じにする。海底における種苗選別は曇天下の場合、暗いことや付着動物がさえぎって（実験室では乾燥後のため、識別しやすい）、微小なサンゴを見落とすことがある。実験室と現場での識別条件の差を解消するため、サンプル識別（種類）を海底で行い、予測精度を高める。識別したサンプルは現場で保存し、種苗として活用することとする

識別結果は、地点ごとにとりまとめ、採苗率を算出する。束ごとの平均採苗率を算出するとともに、95%信頼限界を算出し、区間推定を行い、最低値を推定採苗数の根拠とする。

7. 採苗

(1) 採苗時期

採苗は原則として移植時に行う。その理由は、いったん着床具ケースを解体して、着床具の選別を行い、種苗を取り出すと、以後の着床具の海底での固定が難しいからである。採苗時期は設置後 1.5 年を標準とする。

その理由は、石西礁湖における 2004 年 5 月設置着床具の群体長径測定結果から、各種とも設置 1 年後の長径は 5 mm 程度と考えられ、2 年後でミドリイシ属 35 mm、ハナヤサイサンゴ科 35 mm、アナサンゴモドキ属 25 mm であった (図 II.7.1)。この結果から、着床後 1 年以内の成長は小さく、2 年目の高水温期に成長量が急速に増大すると思われる。

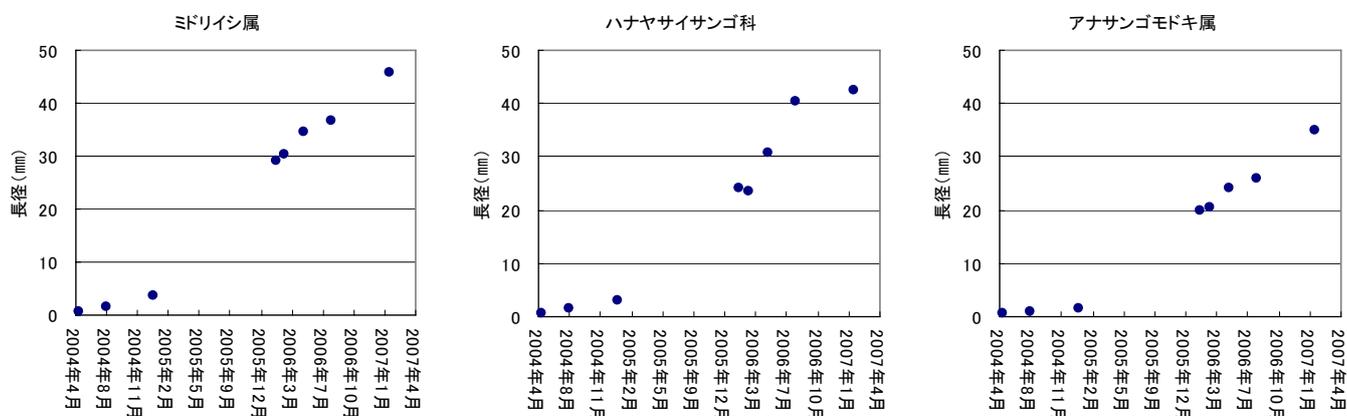


図 II.7.1 石西礁湖2004年5月設置着床具の着床群体長径平均値

(着床時の大きさは便宜的に幼生の大きさ0.5mmとした)

移植種苗としては長径10mm以下では海底での識別に支障をきたす場合もあるので、10 mm以上であることが望ましい。着床群体がその大きさに達するのは2年目の夏季である。したがって、採苗時期は設置翌年の夏季以降であるが、幼群体期の攪乱はできるだけ避けるために台風前の移植は避け、台風期後の11月以降が望まれる。そのため、2年目の夏以降が移植に適した大きさで、台風期後の移植を適期とすれば1.5年が標準移植適齢となる。

種苗の標準年齢を1.5年とし、その標準サイズは図 II.7.1から求めると、各種類とも1.5年の長径は約20mmとなるので、長径20mm以上を移植標準サイズとする。標準サイズ以下の種苗はできれば標準サイズに達するまで、さらに育成するとよいが、その方法はできるだけ静穏な海域、水深において、仮置きに準じた方法で行う。仮置きについては後述する。

なお天候から検討すると、気温が低下すると、運搬中にコンテナ内の水温が低下するので、真冬は荒天待機増加の面からも好ましくない。コンテナについては後述するが、コンテナ容積が大きければ水温低下も緩和されるが、船上から海面のダイバーへの受け

渡しに困難をきたすため、人が受け渡しできる重量に制限される。そのため、水温と気温に大きな差がない季節が望まれる。

(2) 採苗方法

着床具設置地点において架台から着床具ケースを取り外し、着床具ケースをペンチなどで解体する（図Ⅱ.7.2）。その際、鉄パイプ枠のパイプを緩める必要があるため、クランプレンチを忘れないように携行する。



図Ⅱ.7.2 着床具ケースの解体



図Ⅱ.7.3 種苗の選別

種苗選別は着床具の上下面、側面を観察し、数mmの小さな群体も見落とさないようにする（図Ⅱ.7.3）。選別は着床具ケースを解体する係1名、記録する係1名、選別する係1名の計3名で行う。記録は①ミドリイシ属、②ハナヤサイサンゴ科、③アナサンゴモドキ属、④その他の4種類で区分し（図Ⅱ.7.4）、選別係が指の数で記録係りに伝える。記録係はあらかじめ記録紙に上記の4種類の欄を作成しておき、正の字で記録する。なお、群体は着床具だけでなく、着床具束のプラスチック棒を巻いた形でも多く着床する。それらは解体する時に注意深く切断し、着床具から離さないように取り出すようにしなければならない（図Ⅱ.7.5）。切断後、着床していない着床具に水中ボンドで固着する（図Ⅱ.7.6）。

種類の同定は、ミドリイシ属、ハナヤサイサンゴ科については、標準サイズ以上であれば、成体と形態は変わらないので、誤まる恐れは少ないが、アナサンゴモドキ属の被覆上幼群体は海中では無節サンゴモとの区別が困難な場合があり、注意が必要である。アナサンゴモドキ属の場合はルーペで観察すれば、明瞭に夾の穴が見え、その周囲に光沢がある。

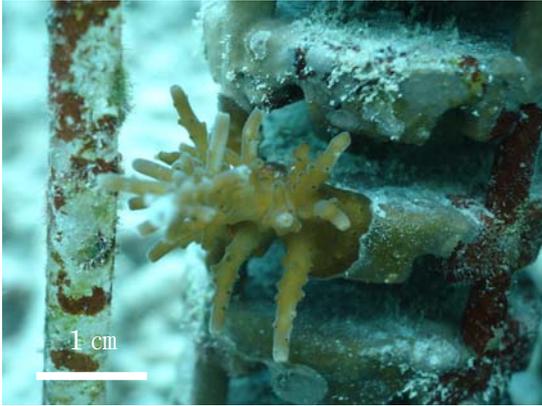


図 II.7.4-1 ミドリイシ属 (枝状)



図 II.7.4-2 ミドリイシ属 (塊状)

枝状ミドリイシは通常、最も多く出現するタイプである。枝の先端に突出する頭頂莖があり、側莖も突出する傾向があるため、誤ることはない。塊状ミドリイシは通常それほど多く出現しないが、やや開放的な礁池などでニオウミドリイシが多く生息する場所に、出現することがある。突出する莖を群体全面にすきまなく配置する特徴がある。



図 II.7.4-3 ハナヤサイサンゴ科



図 II.7.4-4 アナサンゴモドキ属

ハナヤサイサンゴ科はミドリイシ属に次いで多く出現するグループで、場所によっては優占する。群体に頭頂莖はなく、先端が尖っているものもある。側莖はミドリイシ属のように突出してなく、小さい。

アナサンゴモドキ属は群体が微小な段階では、無節サンゴモと区別がつきにくい。無節サンゴモはより厚みがなく、表面に光沢がない。決定的に異なるのは、無節サンゴモには莖がないことである。成長して群体が立体的な形状を示すようになれば、判別は容易である。莖は突出することなく、小さな穴が点在する。

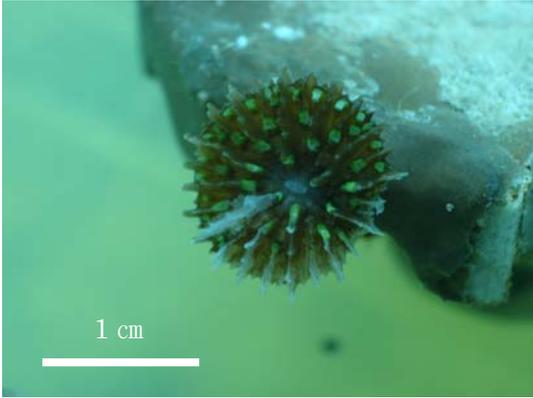


図 II.7.4-5 その他の種類1



図 II.7.4-6 その他の種類2

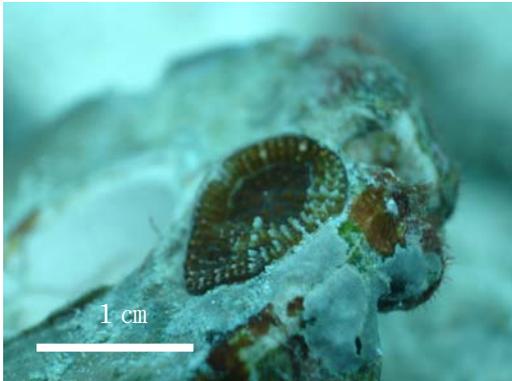


図 II.7.4-5 その他の種類3

着床するサンゴのほとんどは図 II.7.4の1~4に示した種類であるが、まれに他の種も出現する。これらは種類名を特定することができないので、その他の種として記載する。



図 II.7.5 プラスチック棒を巻いた形で着床した群体



図 II.7.6 固着した切断種苗

選別した種苗はすのこ（着床具脚に適合した丸穴が並んでいる）に置く（図 II.7.7）。すのこは種苗が触れない程度の高さで2段にすると限られた容積のコンテナに多く収納

できる。コンテナは蓋が止められるタイプのものを使用し、選別作業が終了後、収容して船上に引き上げる（図Ⅱ.7.8）。



図Ⅱ.7.7 種苗を置いたすのこ



図Ⅱ.7.8 コンテナの船上引き上げ

(3) 運搬

種苗選別作業終了後、船上に引き上げ、できるだけ早く移植場所に運搬する（図Ⅱ.7.9）。その際、気温が高い場合、海水に浸した毛布などで覆い、適宜海水をかけ、コンテナの水温が上昇しないよう注意する。逆に気温が低い場合、プラスチックシートなどで覆い、風が直接あたり水温が低下しないよう注意する。

移植場所へ到着後、直ちにコンテナを海底に降ろす。選別作業と移植作業は各々独立に作業したほうが効率がよいので、移植作業までの間、選別した種苗は移植場所へ仮置きしておく。仮置きは着床具架台などを海底に杭打ちなどにより固定し、その上にすのこを固定し、大型魚類の捕食を防ぐためにプラスチックネットで覆う（図Ⅱ.7.10）。なお、コンテナの運搬はできるだけ短時間で終了させるほうがよいため、運搬の作業は集中して行うことが望まれる。作業の手順上、選別地点に種苗を仮置きしておいてもよい。その方法は移植場所における方法と同じである。

コンテナ、すのこにもその材質は金属を避ける必要がある。小容積にサンゴを収容する場合、短時間であっても、金属から溶出する成分がサンゴに影響する恐れがあるので、プラスチックを使用しなくてはならない。

種苗選別の標準作業量は3名1組で、選別着床具数500個/1時間である。



図Ⅱ.7.9 船上の種苗コンテナ



図Ⅱ.7.10 仮置きされた種苗

8. 移植

(1) 移植ユニットの選定

移植場所の選定については第Ⅱ.2 項で述べたとおりである。移植場所における移植範囲（移植ユニットという）の選定及び設定は次のように行う。

まず移植場所の空中写真を判読して、ユニット候補地の選定を行う。候補地の選定は次のような点に留意して行う。

- ① 砂礫の分布状況：砂礫は種苗の埋没、流出、摩滅を起こし、これらの攪乱は台風時に激増する。砂礫による埋没を避けるためには、付近に砂礫の堆積域がない場所を選定する。
- ② 海底地形：平坦な海底を避けて、離礁が点在し、砂礫の移動が妨げられる場所を選定する。
- ③ 流動状況：台風時には外礁を超えて礁池に入るうねりや高波が起こす強い流れが水路部に向かう。この流れも砂礫移動を引き起こすと考えられるので、卓越流を避けることができる離礁の陰を選定する。

空中写真上で候補地を選定したら、可能ならGISソフトで経緯度を算出し、GPSを使用して、現場へ到達する。現場では潜水により、微地形を観察し、候補地の評価を行う。その基準は、

- ① 海底が平坦でなく、岩礁などで起伏に富んでいる（砂礫の移動を妨げられる）。
- ② 付近に砂礫が少なく、ハイオオギなど多年生の海藻が分布している（海底が不安定でない）。
- ③ サンゴの生息が見られる（サンゴの存在が砂礫移動を妨げる）。

であり、これらの基準で評価し、移植ユニット地点を決定する。決定したらGISで空中写真にユニット位置を記入するとわかりやすい（図Ⅱ.8.1）。

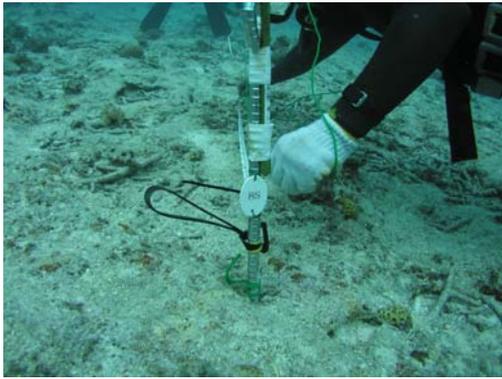
(2) ユニットの設定

決定したユニット地点において、最も良好な場所にユニットを選定する。起点に鉄杭を打設し、起点から15mの測線を張り、終点に鉄杭を打設する。鉄杭にはユニット番号を記したプラスチック製の札を針金で固定する。札には起点と終点ができるように起点はS、終点はEなどと書いておく（図Ⅱ.8.2）。測線は細引きの丈夫なロープを使い、測線の両側1m幅にも設定、また測線1m毎にロープを設定し、30個の1m×1m枠が設定できるようにロープを張り、釘で固定する（図Ⅱ.8.3）。底質は変化に富んでいるため、場合によっては礫が多い所もある。その場合はその場所を避け、代わりの枠を選定する。

ユニットの形状は完全な矩形でなくてもよく、臨機応変に行う。



図Ⅱ.8.1 空中写真への移植ユニット位置記入例（黒島東礁池）



図Ⅱ.8.2 起点の鉄杭



図Ⅱ.8.3 ユニットの設定

(3) 移植

移植ユニットでは、1枠ごとにエアドリルで10個/m²の移植用の穴を穿孔する(図Ⅱ.8.4)。穿孔後、ワイヤーブラシで周囲の付着海藻除去及び砂粒の除去を行い(図Ⅱ.8.5)、水中ボンド(エスダイニングジョイナーW 主剤及び硬化剤、積水化学工業社製、図Ⅱ.8.6)を用いて、種苗を1 m²あたり10個の割合で、1ユニット300個を海底に固着する(図Ⅱ.8.6、Ⅱ.8.7)。



図Ⅱ.8.4 ドリルによる穿孔(右は使用したドリル)



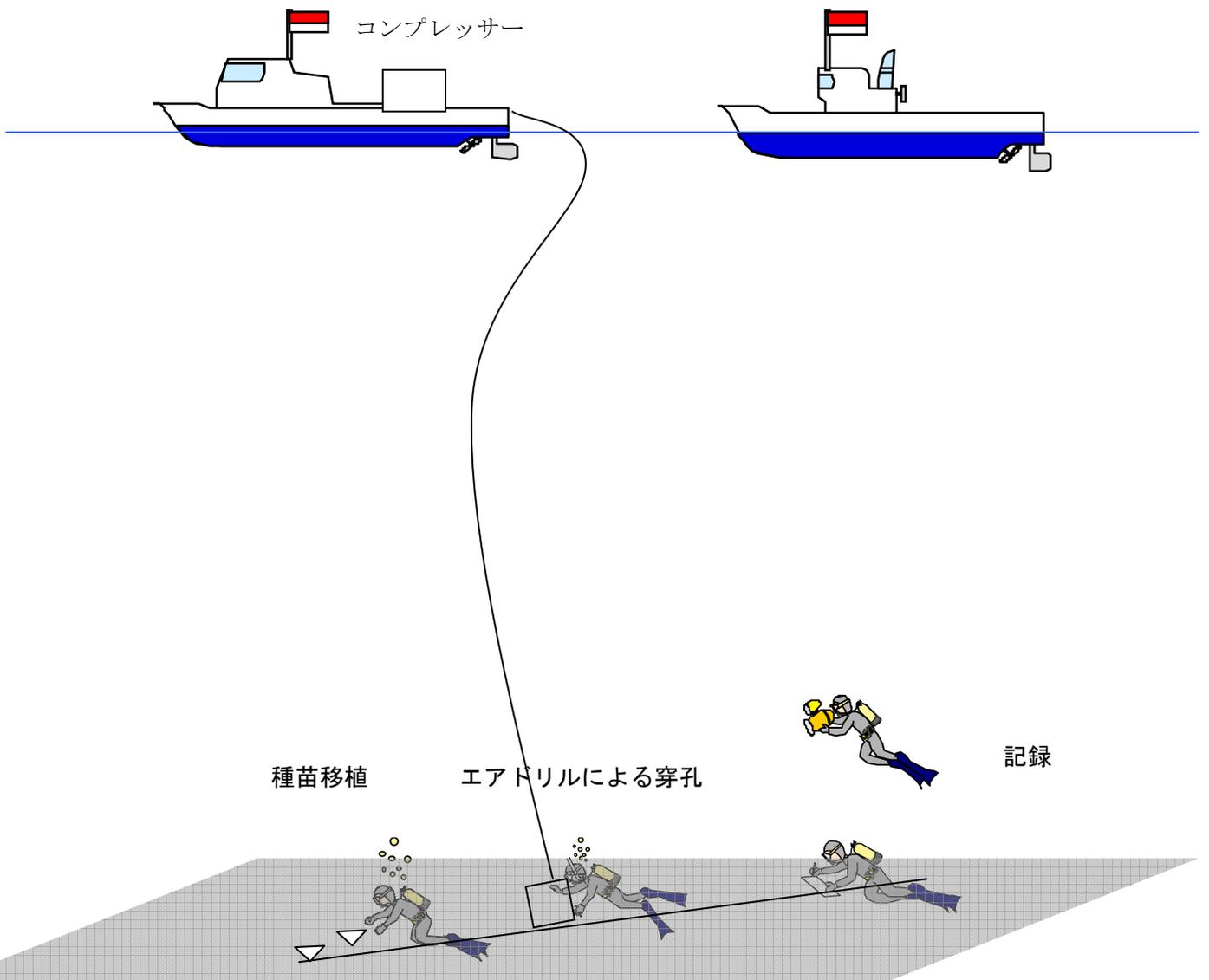
図Ⅱ.8.5 海藻の除去



図Ⅱ.8.6 種苗の固着

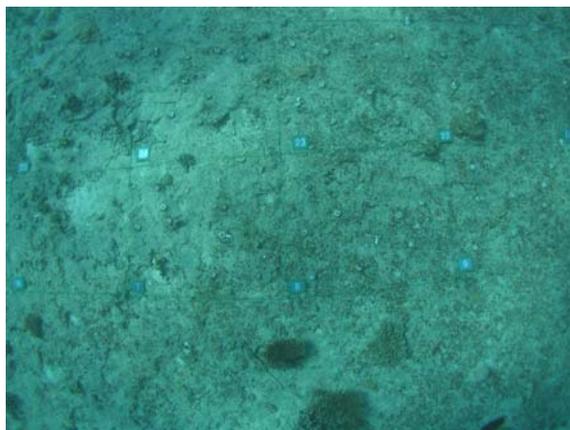


図Ⅱ.8.7 固着した種苗 (モニタリング対象)

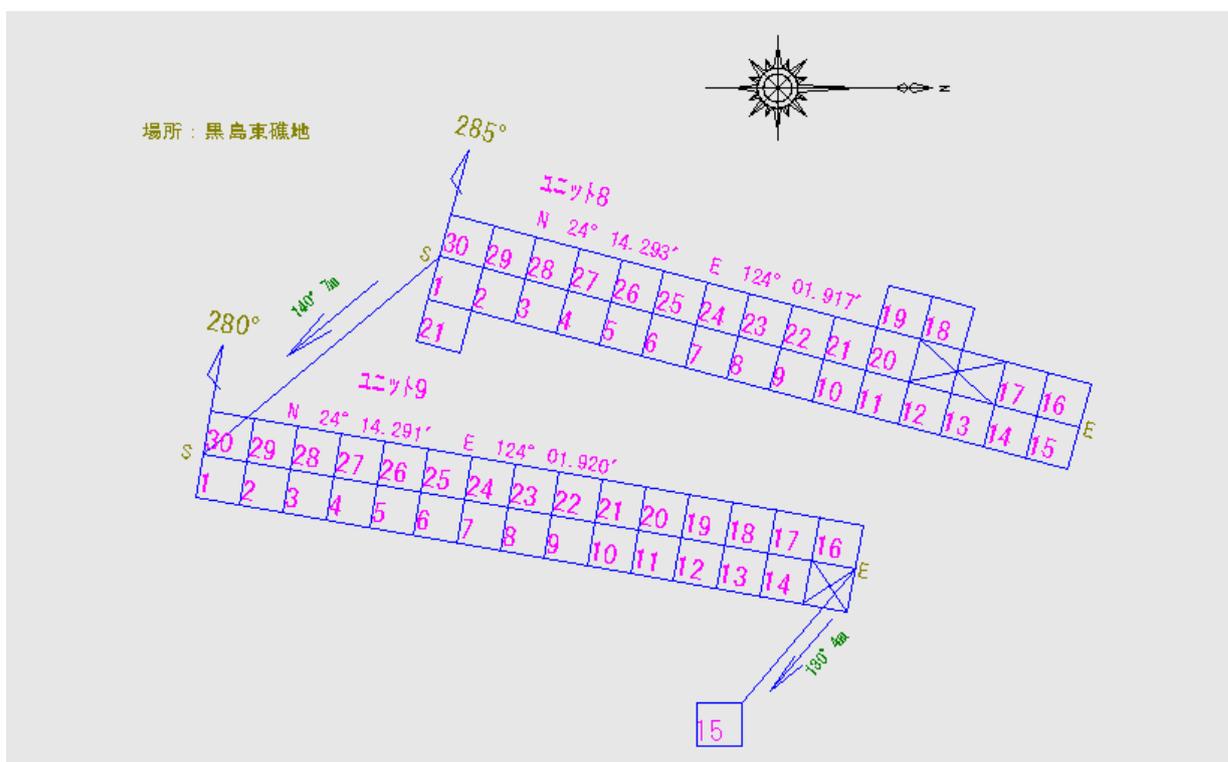


図Ⅱ.8.8 移植作業模式図

移植後、各ユニットの概況（地形、水深、底質、サンゴ生息状況）、移植種苗数を記録し、1 m²毎の移植状況を撮影する（図Ⅱ.8.9）。また、ユニットの詳細な配置図を作成する（図Ⅱ.8.10）。なお、移植期間中の気象を参考資料として記録しておく（表Ⅱ.8.1）。各作業の標準的作業量を表Ⅱ.8.2に示す。



図Ⅱ.8.9 移植状況撮影



図Ⅱ.8.10 ユニット配置図例（石西礁湖黒島東礁池）

表Ⅱ.8.2 標準的作業量

作業内容	作業人員	作業量	備考
ドリル穿孔	1人	1ユニット/1日	1ユニットは30 m ² で穿孔300穴。1日の潜水時間5時間。補助ダイバー1名必要。
種苗移植	1人	30個/1時間	標準的には4人1組で実施

表Ⅱ.8.1 移植期間中の気象・海象記録例（石西礁湖）

月日	曜	潮 期	潮 時		天 候	風向（最大風速時）	平均風速（m/s）	波高(m)
			満 潮	干 潮				
1月29日	日	中潮	7:54	13:05	雨	ESE	5.5	2
1月30日	月	中潮	8:28	13:51	雨時々曇	SE	6.0	2
1月31日	火	中潮	9:02	14:36	曇時々雨	N	4.8	3
2月1日	水	中潮	9:36	15:21	晴	N	6.9	3
2月2日	木	中潮	10:10	16:08	曇	NNE	5.0	2
2月3日	金	中潮	10:43	16:58	曇	NNE	6.0	4
2月4日	土	小潮	11:18	17:54	曇時々雨	NNE	6.7	4
2月5日	日	小潮	11:56	19:05	曇	E	6.2	3
2月6日	月	小潮	12:44	5:57	曇一時雨	WSW	4.6	3
2月7日	火	小潮	13:56	22:15	曇	NNE	6.4	3
2月8日	水	中潮	15:29	9:38	曇	NNE	6.1	3
2月9日	木	中潮	16:44	11:14	曇	NNE	4.5	3
2月10日	金	中潮	7:11	12:03	曇	SSW	2.4	1
2月11日	土	大潮	7:28	12:38	曇	SW	3.3	1
2月12日	日	大潮	7:48	13:09	曇	NE	6.6	3
2月13日	月	大潮	8:08	13:39	曇	EWE	5.3	4
2月14日	火	大潮	8:28	14:08	曇	SE	4.9	1
2月15日	水	中潮	8:49	14:38	晴	SE	4.9	1
2月16日	木	中潮	9:10	15:03	晴	NNE	4.6	1
2月17日	金	中潮	9:32	15:41	雨	NNE	7.0	4
2月18日	土	中潮	9:32	15:41	雨	E	6.1	2
2月19日	日	小潮	10:21	16:55	雨	SE	6.2	2
2月20日	月	小潮	10:50	17:45	雨	NNE	4.2	2
2月21日	火	小潮	11:27	18:58	雨	NE	4.1	2
2月22日	水	小潮	12:23	5:46	雨	NNE	4.3	2
2月23日	木	中潮	13:59	7:54	雨	NNE	5.4	2

(4) 環境測定

移植地点には自記式水温計（HOBO Water Temp Proロガー、オンセットコンピュータ社製）及び自記式濁度計（ATU3-8M、アレック電子社製）を各1基設置し、毎正時測定を行う（図Ⅱ.8.11）。



図Ⅱ.8.11 濁度計と水温計

9. モニタリング

モニタリングは移植種苗の生残状況等を追跡調査し、その結果を移植や管理方法に反映させるために行うもので、順応的管理に不可欠のものである。モニタリングを行うためには移植時に対象種苗にマーキングを行い、長期的な追跡が行えるようにする。

(1) 対象種苗設定

移植時に各地点の種苗の10%にタグを付け、追跡ができるようにする(図Ⅱ.9.1)。タグにはプラスチックのテープ(テプラ社製)に番号を印刷し、パンチで穴を開けておく。移植時に着床具の脚に通し、固着する。このテープは1年で、文字が摩滅により薄くなる欠点があるが、現時点では代わるものがない。番号は起点右列から終点右列へ向かい、次いで起点左列から終点左列へ向かい1から順番につける。こうしておけば、タグが切れても順番を間違えることがない。また、ユニット配置図の番号と整合させておく。モニタリング対象種苗については、番号と属名を記録する(表Ⅱ.9.1)。



図Ⅱ.9.1 モニタリング対象種苗



図Ⅱ.9.2 マイクロチップ

マイクロチップ(PITタグTX1410L、18mm長×2.1mmφ)を埋め込み、実用性について追跡試験を行い(図Ⅱ.9.2)、追跡調査時に水中ハウジングに入れた読取器(ミニポータブルリーダーMPR HS5900L)を用いて内蔵番号の読み取りを行ったところ全ての埋め込み種苗について、読取器とマイクロチップの距離が最大10cm以内で読み取ることができたので、マイクロチップの利用も検討してよい。

表Ⅱ.9.1 モニタリング種苗の記録例（石西礁湖）

年月日	2006/12/24	場所	黒島東礁池	緯度	24° 14.291	経度	124° 01.920	時刻	1000
Unit No	8	水深	5m	地形	礁池平坦	底質	岩盤	サンゴ被度	5%未満
概況	<p>黒島東礁池に位置する平坦な礁池底で、離礁の北側に広がる岩盤域である。本礁池では南からのうねりの越波により起こされる南から北への流れが卓越しており、その流れにより砂礫が移動する。その漂砂礫を避けるため離礁の北側にユニットを設定した。海底は微小な窪みが散在し、平坦な場所は30%程度の被度でハイオオギに覆われている。サンゴはウスチャキクメイシ、フカトゲキクメイシ、コカメノコキクメイシ、カンボクアナサンゴモドキ、トゲエダコモンサンゴが被度は5%未満で散在するため、漂砂礫を妨げる効果がある。ユニット線は南から北方向に設定。</p>								
No	タグNo.	属名	長径 (mm)	備考					
1	1	ミドリイシ属	60						
2	2	ミドリイシ属	40						
3	3	ミドリイシ属	20						
4	4	ハナヤサイサンゴ科	42						
5	5	ハナヤサイサンゴ科	40						
6	6	ミドリイシ属	30						
7	7	ミドリイシ属	30	上部サンゴ接着					
8	8	ハナヤサイサンゴ科	40	上部サンゴ接着					
9	9	ハナヤサイサンゴ科	25	上部サンゴ接着					
10	10	ハナヤサイサンゴ科	50						
11	11	ミドリイシ属	40						
12	12	ミドリイシ属	30						
13	13	ミドリイシ属	40	2段着床具					
14	14	ミドリイシ属	40	上部サンゴ接着					
15	15	アナサンゴモドキ属	40	上部サンゴ接着					
16	16	アナサンゴモドキ属	20	上部サンゴ接着					
17	17	ハナヤサイサンゴ科	25						
18	18	ミドリイシ属	40						
19	19	ミドリイシ属	40						
20	20	ミドリイシ属	50	上部サンゴ接着					
21	21	ミドリイシ属	21						
22	22	ミドリイシ属、ハナヤサイサンゴ科	15、5						
23	23	ミドリイシ属	5	上部サンゴ接着					
24	24	ハナヤサイサンゴ科	15						
25	25	ミドリイシ属	25						
26	26	ミドリイシ属	20	2段着床具					
27	27	ミドリイシ属	15						
28	28	ミドリイシ属	30						
29	29	ミドリイシ属	20						
30	30	アナサンゴモドキ属	20						
備考	<p style="text-align: center;">ユニット8</p> <p style="text-align: center;">↓ N</p> <p style="text-align: center;">ユニット9</p>								

(2) 調査内容

モニタリングの調査内容は表Ⅱ.9.2の通りである。

表Ⅱ.9.2 モニタリング内容

項目	調査内容
種類名	サンゴの科名もしくは属名。成長により種名が判定できるようになれば、種名を記録する。
長径	サンゴ群体の最大径をmm単位で測定する。
生存・死滅状況	サンゴ群体の死滅部の割合を%で測定する。
活性（白化）状況	サンゴ群体の白化状況を次の基準で区分する。
	0：白化がみられない
	1：白化はほとんどみられない（群体の5%未満）
	2：白化部は群体の50%未満
	3：白化部は群体の50%以上
破損状況	サンゴ群体の破損状況を次の基準で区分する。
	0：破損がみられない
	1：破損はほとんどみられない（群体の5%未満）
	2：破損は群体の50%未満
	3：破損は群体の50%以上
破損状況	4：群体のほとんどが破損（群体の90%以上）
	0：破損がみられない
	1：破損はほとんどみられない（群体の5%未満）
	2：破損は群体の50%未満
	3：破損は群体の50%以上
4：群体のほとんどが破損（群体の90%以上）	
食害状況	オニヒトデ、サンゴ食巻貝等による食害の有無及び食害者を記録する。
海藻類の繁茂状況	着床具上に付着した海藻類を記録する。
堆積状況	着床具上に堆積した堆積物の厚さを記録する。
すみこみ状況	サンゴ群体及び着床具にすみこんでいる動物の種類および個体数を記録する。

(3) モニタリング期間

モニタリングは、移植1ヵ月、3ヶ月、6ヶ月、1年後にモニタリング対象種を主に実施する。その後は、台風前と後の1年に2回程度行う。モニタリング期間は、5年を第1期の

目処とする。移植サンゴの再生可能な年齢を5年としたことによる。那覇港における6年間の連続観測結果から山本ほか（2002）は水深1m傾度10°での成長近似式を次のように示している。

$$\text{被度 } y = 0.0227e^{1.25t} \quad (R^2=0.69, n=9, t: \text{年})$$

なお、グレートバリアリーフの、ヘロン島における自然群集の調査報告から推定した水深0.5mのサンゴの成長近似式は次のように示されている。

$$\text{被度 } y = 0.0261e^{1.10t} \quad (R^2=0.95, n=4, t: \text{年})$$

これらによれば、サンゴ被度の増加は3～5年目に急速に増加し、6年目から安定成長期に入るとされているため、再生までの時間を5年程度とする。

(4) 解析

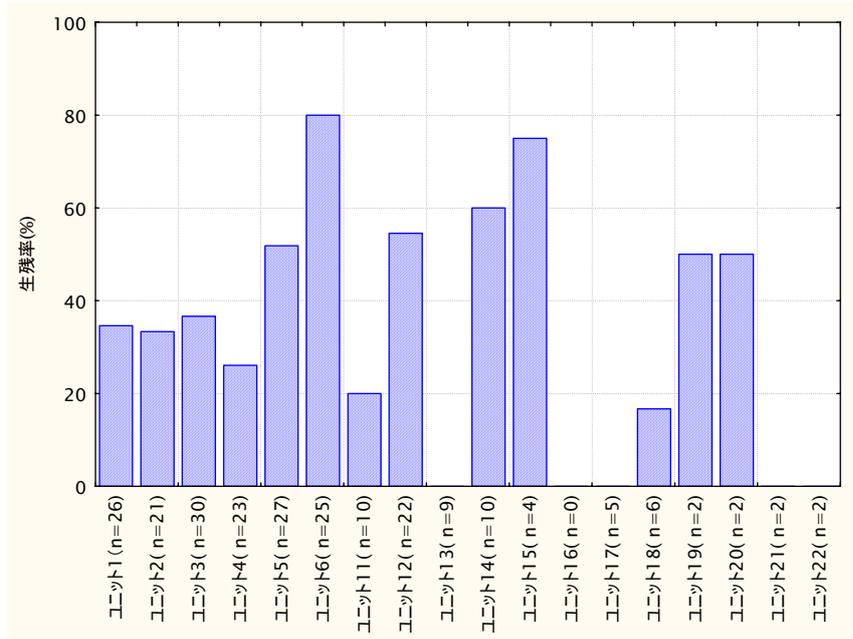
モニタリング結果は各項目についてとりまとめ、成果を管理に反映させる。ここでは第11項で紹介した石西礁湖におけるサンゴ移植のモニタリング結果をとりあげ紹介する。モニタリングは移植後3ヵ月、6ヵ月、1年後に実施した（表Ⅱ.9.3）。移植種苗総数は5,400個で、移植時に各ユニットの種苗のうち10%（各30個）にタグを付け、追跡ができるようにした。

表Ⅱ.9.3 モニタリング時期の例（石西礁湖）

NO	移植後月数	調査期間
1	1	2006年3月21日～3月25日
2	3	2006年5月29日～6月2日
3	6	2006年8月29日～9月4日
4	12	2007年2月9日～2月13日

① 種苗生残率

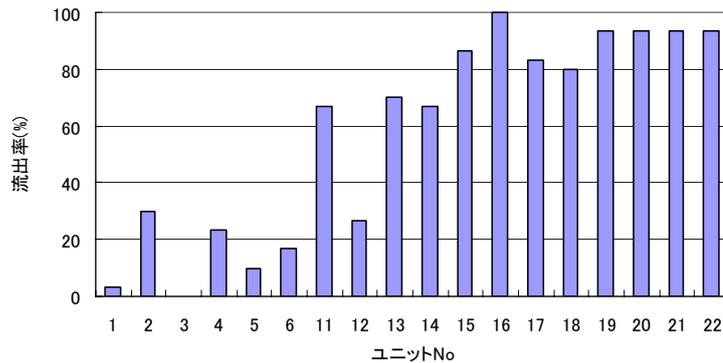
種苗生残率は移植成否の検討材料となるデータである。ユニット別の種苗生残率を検討すればユニットの移植場所としての適性を判断することができる。石西礁湖の例では、移植1年後（2007年2月）に最大生残率は80%であったが、いくつかのユニットでは2006年9月15日に八重山地方に襲来した大型台風13号による海底攪乱のため移植種苗の大半が砂礫の被覆を受け死滅した（図Ⅱ.9.3）。サンゴ礁域では台風の襲来は避けられないので、砂礫の分布を十分に把握するとともに、移動を妨げる工夫が必要である。この結果から、漂砂礫への対策が移植種苗の生残に重要な要素であることが判明し、前述したように、ユニット選定やユニット設定法に反映されている。



図Ⅱ.9.3 石西礁湖におけるユニット別種苗生残率（2007年2月）

② 種苗流出率

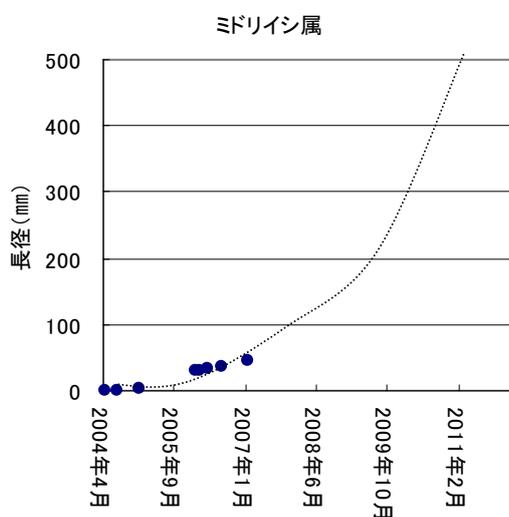
種苗流出率からは移植場所の底質安定性を検討することができる。石西礁湖の例では、移植1年後の流出種苗状況から、流出率が高いユニットでは、海底が平坦底のため、台風13号によって引き起こされた流れによる礫の衝突が多かったことが判明した（図Ⅱ.9.4）。このように漂砂礫が流出に及ぼす影響が大きいことが判明した場合、ユニット選定を見直す。



図Ⅱ.9.4 種苗流出数（2007年2月）

③ サンゴ面積

生残率は順応的管理に反映させる検討材料であるが、移植サンゴの面積も重要な要素である。サンゴの成長に伴い、サンゴ面積が増加すれば、1 m²に移植した10 種苗のうち、数個が生残するだけで、サンゴ群集の被度は増大する。取り上げている移植事例のミドリイシ属の長径成長が指数関数的に増大するとすれば（図Ⅱ.9.5）、移植5 年後（2011 年2 月）には長径は約50 cmに達し、4 群体生残すれば、被度は100%近くになる。高被度に区分される被度50%以上を移植目標とすれば、目標生残率は20%（2 群体）である。したがって、移植5 年目における種苗維持目標は20%が適当と考えられる。



図Ⅱ.9.5 ミドリイシ属平均長径の成長予測

石西礁湖では、移植後1 年時点で、大きな種苗で長径10 cmを超え（図Ⅱ.9.6）、ユニットの移植サンゴ面積は着実に増加した。成長による移植サンゴ面積の増加を図Ⅱ.9.7 に示した。面積は移植種苗流出率30%以下のユニットにおける移植種苗の1 m²あたりの平均面積を近似的に円の面積： $[(長径/2)^2 \times \pi]$ により求めた。移植時の面積を100 とすると1 年で1 m²あたりの面積は約3 倍に増加した。



図 II.9.6 移植 1 年目の種苗 (バー : 1 cm)

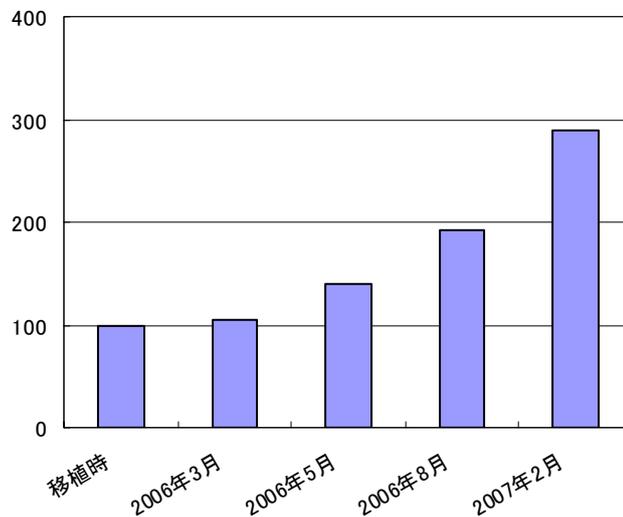


図 II.9.7 石西礁湖移植サンゴ面積の変化

④再生産の有無

移植の成果は移植したサンゴが再生産することにより、他の海域へ幼生供給を果たしたときに現れる。移植サンゴの再生産は少なくとも移植後 5 年目くらいからと想定されるため、5 年目モニタリングでは、ポリプの観察を行い、卵巣の成熟を確認する必要がある。

⑤移植環境

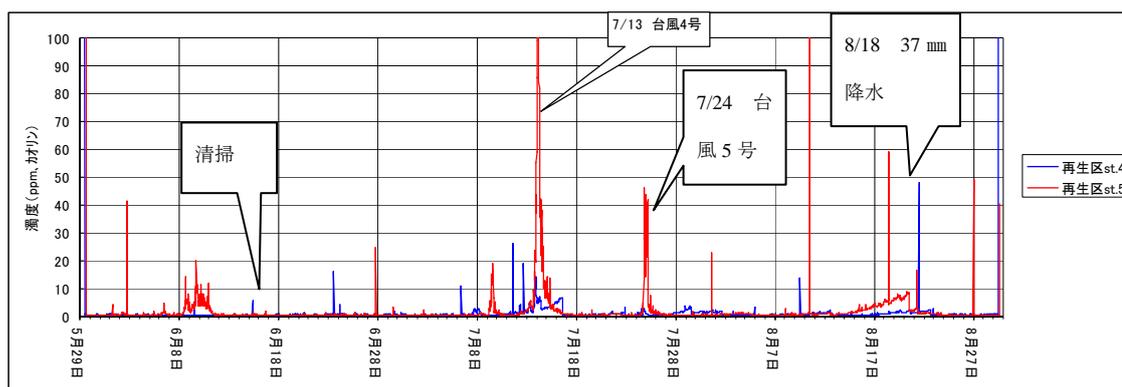
サンゴの生息に大きな影響を及ぼすのが水温である。夏季に 30℃以上の水温が長期間連続すると、白化現象を起こし、死滅することがある。移植地点の水温を記録しておくことにより、移植地点の長期的な環境を評価することが可能になるため、移植期間中は自記式水温計を設置し、毎正時観測しておく必要がある。水温計については第 5. (3) 設置工事の項に記した。

水温とともにサンゴの生息に大きな影響を及ぼすのが海水の懸濁状況である。濁度は懸濁状況を高頻度で測定できる要素である。石西礁湖の礁池と外海で自記式濁度計（図Ⅱ.9.8、ATU3-8M、アレック電子社製）を用いて1時間に1回測定した例を図Ⅱ.9.9に示す。天候の攪乱のない時期の濁度は両地点とも1ppm以下で、顕著な差はみられない。濁度が大きく上昇（約100倍）している時期には台風が通過しており、台風による堆積物の巻上げが原因と考えられる。

このように、濁度は設置しておけば多くのデータが取得でき、水質環境の分析に有効であるが、濁度計センサーの清掃を少なくとも10日に1度は行わなくてはならないので、経費がかかる制約がある。



図Ⅱ.9.8 濁度計設置状況（右下は自記式水温計）



図Ⅱ.9.9-1 濁度の変化（1）

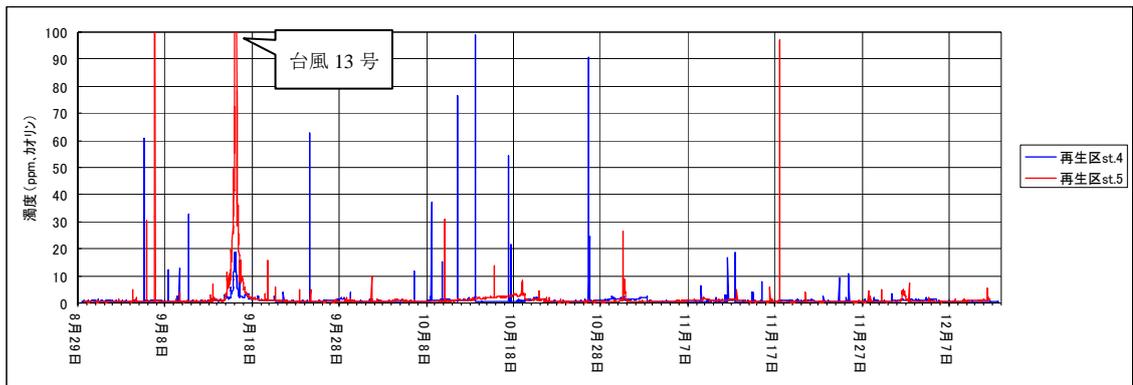


図 II.9.9-2 濁度の変化 (2)

引用文献

山本秀一・高橋由浩・住田公資・林 輝幸・杉浦則夫・前川孝昭 (2002) 人工構造物におけるサンゴ群集成長過程の解析、海岸工学論文集 49 : 1186-1190.

用語索引

足場パイプ枠	49
アナサンゴモドキ属	52、 64
移植標準サイズ	62
移植ユニット	68
オニヒトデ	2
画像判読	12
群体長径	62
サンゴ移植	6
サンゴ礁底性状	20
サンゴ面積	81
産卵	45
自記式水温計	25
自記式濁度計	74、 83
種別着床数	28
水中ボンド	70
スポットチェック法	17
生残率	79
石西礁湖	2
造礁サンゴ類	1
堆積物	24
タグ	76
稚サンゴ	29
着床具	27、 39、 41
着床具架台	43
着床具ケース	42
着床部位	55
ハナヤサイサンゴ科	52、 64
被度調査	17、 24
標準移植適齢	62
平均着床数	28
マイクロチップ	76
ミドリイシ属	52、 64
無性生殖	37
有性生殖	37
幼生供給	33
リモートセンシング画像	9
流出率	80
GIS	26
SPSS	24

サンゴ幼生着床具を用いたサンゴ群集修復マニュアル

平成 19 年（2007 年）3 月

環境省九州地方環境事務所 那覇自然環境事務所

〒900-0027 沖縄県那覇市山下町 5-21

Tel. 098-858-5825

請負者：いであ株式会社