

F-5 サンゴ礁生態系の攪乱と回復促進に関する研究

(1) サンゴ礁の攪乱、回復の評価とそれに基づく管理手法に関する研究

① 造礁サンゴ群集の健全度指標に基づく生態系管理手法の開発

独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所

黒潮研究部 生物生産研究室 藤岡義三

東京水産大学水産学部 大葉英雄

平成12～14年度合計予算額 14,700千円
(うち、平成14年度予算額 5,100千円)

[要旨] サンゴ礁生態系の健全度を評価できる生物指標を探索するため、典型的な裾礁が発達する石垣島東海岸において、造礁サンゴ類および海藻・海草類の群集構造と環境要因との関係を調べた。造礁サンゴ類は14科43属123種が出現し、岸側よりも中央～沖側において被度や種数が高く、ほとんどの地点でコモンサンゴ属、ミドリイシ属、ハマサンゴ属、キクメイシ科の4分類群が主要な構成要素となっていた。コモンサンゴ属やハマサンゴ属が局所的に大規模群集を形成するものの、造礁サンゴ類全体の被度、種数、新規定着数等が健全な群集に比べて著しく低い上、死亡群体の割合が高く、特に環境変動の影響を受けやすいミドリイシ群集の衰退が顕著であった。海藻類は緑藻46種、褐藻21種、紅藻58種、藍藻6種、海産種子植物(海草)4種の合計135種が出現し、被度が岸から沖に向かって増加する海域と、中央の被度が他地点に比べ低い海域とに大別された。死サンゴ骨格上には、ハイアミジ、ハイオウギ、無節石灰藻類、イワノカワ類等の匍匐性小型海藻の繁茂が顕著に認められた。これらの海藻類は、サンゴ礁生態系の二次遷移の段階、すなわち攪乱を受けたサンゴ礁の回復状態を評価できる「遷移指標種」と見なすことができた。多変量解析の結果、造礁サンゴ類と海藻類の分布特性には当初想定していた南北間の差異は認められなかったが、岸～沖系列軸が認識できたことから「岸側指標種」や「沖側指標種」等の選定が可能となった。浦底湾における定点調査では、1998年夏の白化現象による造礁サンゴ群集の崩壊以後、沖側を中心に幼群体の加入が繰り返され、環境条件が良好であれば急速に群集が復元されるという可能性が示唆された。造礁サンゴ類と海藻類の分布特性、死サンゴ骨格の形状と散乱状況、幼群体の加入状況、および過去の報告から判断すると、石垣島礁池における造礁サンゴ群集、特にミドリイシ群集の攪乱状態は十数年以上前に生じ、その後、長期間にわたって二次遷移が初期段階で停滞していることが判明した。

[キーワード] 造礁サンゴ、海藻、サンゴ礁、環境保全、生物指標

1. はじめに

近年、世界のサンゴ礁は、地球レベルの環境変動や地域における自然・人為的攪乱により著しく疲弊し、健全な造礁サンゴ群集は減少の一途をたどっている^{1),2)}。世界有数のサンゴ礁が分布している南西諸島においても状況は同じであり、その南端に位置する八重山諸島の中でもとりわけ人口が集中している石垣島周辺のサンゴ礁はさまざまな攪乱を受け、造礁サンゴ類を中心とした

生態系は衰退傾向にある。

石垣島の造礁サンゴ類に関する研究は1970年初頭に始まり、1980～90年代における環境庁、石垣市、NGO（非政府組織）等による分布調査^{3),4),5),6)}や群集調査⁷⁾を経て、現在環境省が実施しているモニタリング調査^{8),9)}に至る。海藻類（海草およびシアノバクテリア〔藍藻〕を含む、以下同様）に関しては、これらの報告のほか、出現種の報告がある^{10),11)}。石垣島周辺において、オニヒトデ禍や白化現象によって造礁サンゴ類が大きな被害を被ったことは記憶に新しいが、それ以前の状況については決して十分な情報があるわけではなく、現在、礁池で見られる大量の死サンゴ基盤を、攪乱による群集遷移の一断面として捉えて良いのか、あるいは環境変動によってもはや回復不可能な状況に陥っているのか、判断することは容易な状況ではない。

サンゴ礁生態系で見られる生物群集の生育特性は、それを取巻く環境要因と深くかかわっており、水温、光、水深、懸濁物、堆積物、波浪、潮汐等の物理的要因や塩分、栄養塩類、炭酸塩、溶存酸素、有害物質等の化学的要因が主な生息環境要因としてあげられる^{12),13),14)}。固着性底生生物である造礁サンゴ類や海藻類の分布特性は、海域全体ではなく、より局所的な底質や水質環境を反映しているため、こうした無機的環境要因との関係が必ずしも明瞭ではない場合がある。しかし、固着性底生生物の分布特性を指標としてサンゴ礁環境を評価することができれば、一時的な環境データからは得ることのできない、長期的な環境変動や、複合的、あるいは拮抗的に作用する環境変動を検出できる可能性がある。

本課題は八重山諸島石垣島の礁池をモデル海域として、固着性底生生物、特に造礁サンゴ類および海藻類の分布特性を調べ、群集構造を規定する環境要因との関わり合いを明らかにすることにより、サンゴ礁生態系の健全度を評価する上で有用な生物指標や指標種を探索する試みである。

2. 研究目的

サンゴ礁生態系における代表的な固着性底生生物である造礁サンゴ類と海藻類について、群集組成と環境条件との関係、生物間の相互関係等を、フィールド調査を通して明らかにする。また、定点調査によって生物群集の経時的变化を追跡調査するとともに、既往知見を整理することにより、白化現象や人為的攪乱の発生状況を把握し、造礁サンゴ群集の回復過程を明らかにする。これらの結果に基づいて、サンゴ礁生態系の現状を評価するとともに、生育環境を的確に反映する生物指標を探索することが本課題の目的である。

3. 研究方法

(1) 広域分布調査

石垣島周辺は水温、塩分、透明度等の点で造礁サンゴ類の生息に適しており、サンゴ礁が非常によく発達している。特に、南東部から東海岸全域を経て北部の平久保半島に至る海域には、浅くて幅広い礁池をもつ典型的な裾礁が認められる。礁池の幅は広い所で1 kmを超え、その沖側にある礁原（または礁嶺）を含めると1.5 kmにおよぶこともある。さらに、礁縁、礁斜面を経て外洋へ至る明瞭なサンゴ礁地形が形成されている。

石垣島の南北間で栄養塩濃度、濁度、赤土堆積等に関する環境勾配があることを想定して16調査海域を選定し、2000年9月および2001年9月に、造礁サンゴ類と海藻類に関する定量的分布調査を同時に行った（図1、表1）。調査海域は、岬の先端付近、リーフの最も張り出した所、浅

く幅広い礁池を有する所等、地形条件が共通する場所を選んだ。また、過去の状況と比較するため、従来の報告^{3)~6), 8)~9)}で調査されていることも選定条件の一つとした。

各調査海域の岸側、中央、沖側の3地点において、海岸線と平行に50m×4mのベルトトランセクトを設定して出現種を把握した後、トランセクトに沿って10mごとに1㎡方形枠を合計6個設置し(図2)、Weinberg¹⁵⁾の群体被度推定法(ICCE法)に従って、出現種、被度、群体数または個体数、生存率、底質の種類等を調査した。各生物群集の分布特性は、多様度指数(Shannon-Wiener's Index)、多次元尺度法、類似度分析(Jaccard法)、群分析(Ward法)、主成分分析等の手法を用いて解析した。

(2) プロファイル調査

比較的造礁サンゴ類の被度が高い伊原間と轟川の2海域において、海岸から礁縁部まで幅1mのベルトトランセクトを設定し、5mごとに水深、底質、造礁サンゴ類および海藻類の種類と被度を記録した。これに基づいてプロファイルを作成し、分類群ごとの生サンゴ、死サンゴの占有率、海藻類の分布状況を比較した。

(3) 定点モニタリング調査

造礁サンゴ群集の経時的変化を明らかにするため、浦底湾において定点モニタリング調査を実施した。礁原上の岸側、中央、沖側にそれぞれ4ヶ所ずつ合計12ヶ所に、1㎡方形枠を固定し、表在生物を剥ぎ取り、その後の群集遷移を観察した。1995年以降、9月および可能なら3月の年1~2回、造礁サンゴ類の出現種、群体数、群体サイズ、被度を記録し、2001年からは海藻類についても調べた。

4. 結果・考察

(1) 広域分布調査

多くの調査海域で共通して認められた特徴として、岸側で砂や礫が多く沖側では岩盤が多いこと、水深が中央~沖側で最大となること、岸側で懸濁物が多いため透明度が岸側から沖側に向かって良好になること、岩盤の起源は主に死サンゴで構成されていること等があげられる。しかしながら、水深や地形、底質等はもとより、河川や水路の有無や形状等に伴う海水流動、懸濁物、堆積物等、さまざまな環境要素は基本的には調査地点固有のものである。

① 造礁サンゴ類

各調査海域における造礁サンゴ類の被度、出現種数、(被度に基づく)種多様度指数(H'c)の3項目を図3に示した。造礁サンゴ類は合計14科43属123種が出現し、調査地点全体(200㎡)の平均出現種数は、岸側5~25種、中央13~49種、沖側15~44種で、9海域で岸側から沖側に向かって増加したのに対して、6海域では中央が最大となった。分類群組成については、轟川や宮良川のような河口域を除いて、中央~沖側ではほとんどの地点でコモンサンゴ属(*Montipora*)、ミドリイシ属(*Acropora*)、ハマサンゴ属(*Porites*)、キクメイシ科(*Faviidae*)の4分類群が出現した。健全な群集で見られる種数-面積曲線から予測される値¹⁶⁾と比較した場合、ミドリイシ群集の推定値(52.2~64.3)を大幅に下回り、ほとんどの地点で塊状ハマサンゴ群集や枝状コモンサンゴ群

集の推定値 (29.6~37.8) に近い値が得られた。ミドリイシ属は平久保、平野、岩崎、安良北等の北部海域では10種前後が出現したが、中南部の海域では数種しか確認できなかった。各地点の中央~沖側ではこれら4分類群以外の属が多く出現したが、主なものとしてムカシサンゴ属 (*Stylocoeniella*)、ハナヤサイサンゴ属 (*Pocillopora*)、ハナガササンゴ属 (*Goniopora*)、アミメサンゴ属 (*Psammocora*)、シコロサンゴ属 (*Pavona*)、クサビライシ属 (*Fungia*)、アザミサンゴ属 (*Galaxea*)、イボサンゴ属 (*Hydnophora*)、アナサンゴモドキ属 (*Millepora*) があげられる。

被度は、北部海域および白保、轟川の合計5海域において、沖側で最大となった。一方、中南部海域においてはやや深みのある礁池の中央付近でエダコモンサンゴ (*Montipora digitata*) やユビエダハマサンゴ (*Porites cylindrica*) 等の少数種が大規模な群集を形成することがあり、そのような地点では高被度となった。北部海域は南部海域に比べてミドリイシ属が多い傾向が認められたが、市街地に近い真栄里や大浜 (目視観察による) でも高被度群集が存在したり、宮良湾や安良崎等のように、水路を隔てた近接2海域において著しく被度が異なる現象が認められる等、分布に関する南北間格差について統一的に解釈するのは困難であった。

種多様度指数は11海域において沖側が最大となったが、これは礁池に生息するコブハマサンゴ (*Porites lutea*)、フカアナハマサンゴ (*P. lobata*)、ハマサンゴ (*P. australia*)、ユビエダハマサンゴ (*P. cylindrica*) やエダコモンサンゴ (*Montipora digitata*)、トゲエダコモンサンゴ (*M. stellata*) 等の種と、主に礁原~礁縁部に生息するミドリイシ属やシコロサンゴ属の分布が重なり合っ、多様なサンゴ群集を形成していたためである。平久保の沖側ではスギノキミドリイシ (*Acropora formosa*)、トゲスギミドリイシ (*A. nobilis*)、コエダミドリイシ (*A. microphthalma*) 等の少数種が、白保北の沖側ではアオサンゴ (*Heliopora coerulea*)、ユビエダハマサンゴ (*Porites cylindrica*) がそれぞれ優占的に出現するため、多様度指数が中央よりも低かった。平久保、浦崎、玉取崎等の岸側、および安良崎の全域では、複数種の小規模な群体が散在することにより多様度指数が高くなった。種多様度指数は、たとえ被度が小さくても複数種が均等に出現した場合にも高い値を示すことから、単独の指標として使用するべきではなく、被度や出現種数とあわせて比較する必要がある。

主要種の被度を、比較的類似した出現パターンを示す近似種ごとにまとめて、図4に示した。塊状ハマサンゴ属3種、コブハマサンゴ (*Porites lutea*)、フカアナハマサンゴ (*P. lobata*)、ハマサンゴ (*P. australia*) は46地点中43地点で出現し、岸側から沖側まで広範囲に分布し、礁池で最も優占する分類群であった。同様に、カンボクアナサンゴモドキ (*Millepora exaesa*) やフカトゲキクメイシ (*Cyphastrea serailia*) も36~37地点で出現したが、これらは決して優占種になることはなかった。枝状のハマサンゴ属2種、ユビエダハマサンゴ (*P. cylindrica*)、アミメハマサンゴ (*P. nigrescens*) は北から南まで多くの地点で出現したが、中央~沖側でやや多く見られた。枝状コモンサンゴ属3種、エダコモンサンゴ (*Montipora digitata*)、トゲエダコモンサンゴ (*M. stellata*)、サボテンコモンサンゴ (*M. cactus*) はやや水深のある礁池中央で大規模な群集を形成していた。一方、枝状ミドリイシ属4種、スギノキミドリイシ (*Acropora formosa*)、トゲスギミドリイシ (*A. nobilis*)、ヒメマツミドリイシ (*A. aspera*)、オトメミドリイシ (*A. pulchra*) は中央と沖側で多く、特に北部海域では大規模な群集が認められた。コユビミドリイシ (*A. digitifera*)、クシハダミドリイシ (*A. hyacinthus*)、オヤユビミドリイシ (*A. gemmifera*) の3種は沖側を中心に出現したが、これは主要な生息域である礁縁部から分布域を拡大している

ものと考えられた。ニオウミドリイシ (*Isopora*) 亜属の2種、ニオウミドリイシ (*A. palifera*)、フトエダミドリイシ (*A. brueggemanni*) は北部海域を中心に分布していた。アオサンゴ (*Helio-
pora coerulea*) は白保中央～沖側においてのみ、被度が高い典型的な局所的分布パターンを示した。このように、分布パターンには広域分布型、北部海域分布型、偏在分布型、礁池中央分布型、礁池沖側分布型等さまざまな型が認められ、同じ属でも種ごとに異なった様相を呈していた。

各調査地点に出現したミドリイシ属の大きさ頻度分布を図5に示した。平久保や浦崎の沖側では、直径20cmをモードとして正規分布に近似し、1cmに満たない小型群体から最大直径50cmを超える群体まで、さまざまな大きさの群体で構成されていた。これらは、沖側に多く出現した枝状ミドリイシ属4種、スギノキミドリイシ (*Acropora formosa*)、トゲスギミドリイシ (*A. nobilis*)、ヒメマツミドリイシ (*A. aspera*)、オトメミドリイシ (*A. pulchra*) が主体となっており、これら2地点を含め、平久保～安良北までの北部海域でも比較的大きな群体が認められた。これに対し、中～南部の海域では伊野田のヒメマツミドリイシ (*A. aspera*) 群集を除いてミドリイシ属は極めて少なく、特に直径30cmを超える大型群体はほとんど認められなかった。また、1年以内に新規定着したと見られる直径1cm未満の小型群体は北部海域に偏在し、中～南部海域においてはほとんど確認できなかった。

②海藻類

海藻類の被度および出現種数を、調査地点ごとに図6に示した。海藻類は緑藻46種、褐藻21種、紅藻58種、藍藻6種、海産種子植物(海草)4種の合計135種が出現した。ほとんどの調査海域では、造礁サンゴ群集、特にミドリイシ群集が崩壊した状態にあったが、緑藻の種数が多く褐藻の種数が少ないという熱帯海域の海藻相の特徴^{17), 18)}は失われていなかった。1㎡方形枠6個あたりの出現種数は、一部の地点で60種という高い値が得られたが、多くの地点では20～40種であり、地点間には明瞭な差異は認められなかった。礁池には、本来、さまざまな造礁サンゴ類が生育しているが、中でも枝状サンゴ類(ミドリイシ属、ハマサンゴ属、コモンサンゴ属等)が大きな群集を形成している。これらの群集は、ある程度加齢が進むと、枝の中～下部のポリプや共肉部が死に、そこに数多くの固着生物が侵入・成育するようになる¹⁹⁾。すなわち、枝状のサンゴ群集がよく発達した礁池では、礁池中央～沖側で海藻類の出現種数が最も高くなる。しかし、現在、多くの調査海域では、枝状ミドリイシ群集がほとんど崩壊しているために、造礁サンゴ群集が健全な白保(北)を除くと、礁池中央～沖側における海藻類の出現種数はかなり低下していた(図6の右図)。

被度は調査地点ごとに異なった特徴を示したが、緑藻は種数が多いにもかかわらず被度が極めて低く、逆に褐藻は種数が少ないにもかかわらず被度が高いという傾向が全体的に認められた。これは緑藻に微小～小型の種が多く、反対に褐藻には大型種が多いか、あるいは小型でも広い範囲にわたって高密度に生育する種が多いためである。緑藻の被度が高い地点では、サボテングサ (*Halimeda opuntia*) あるいはヤセガタモツレミル (*Codium geppiorum*) が優占していた。褐藻の被度は多くの調査地点で高かったが、その構成種はアミジグサ属の一種ハイアミジ(仮称) (*Dictyota friabilis*) やハイオウギ (*Lobophora variegata*) 等の匍匐性の小型海藻か、あるいはラッパモク (*Turbinaria ornata*)、ヤバネモク (*Hormophysa cuneiformis*)、ホンダワラ類 (*Sargassum* spp.) 等の大型海藻であった。一方、紅藻の被度が高い地点では、無節石灰藻類

(Melobesioideae)、イワノカワ類 (*Peyssonnelia* spp.)、糸状紅藻類 (スズメダイ類による農園) 等が優占し、地点によってはカタメンキリンサイ (*Eucheuma gelatinum*)、イバラノリ類 (*Hypnea* spp.)、マクリ (*Digenea simplex*) 等がこれに加わった。調査海域の礁池中央～沖側にかけて、枝状ミドリイシ群集の死滅・骨格崩壊によると思われるガレキ場 (礫堆積場) が広がっている所が多かったが、そのガレキ上には褐藻のハイアミジ、ハイオウギ、紅藻の無節石灰藻類、イワノカワ類等の小型匍匐海藻や、紅藻・藍藻等からなる小型糸状 (短命) 海藻が繁茂していた。沖側の死サンゴ骨格からなる岩盤上には、ガレキ上に繁茂していた小型海藻に加え、所々でラッパモク、ヤバネモク、ホンダワラ属数種等の大型 (多年) 海藻が群落 (ガラモ場 *Sargassum* bed) を形成していた。

礁池と礁斜面 (外海) との間に形成される礁嶺の内側は、水深が浅く大潮時に干出する不毛帯 (barren zone) や海藻帯が発達している。健全なサンゴ礁でも、このような地帯には造礁サンゴ類はほとんど生育しない。海藻帯が形成されている場合には、小型緑藻のアオサ類、シオグサ類、小型褐藻のウミウチワ類、大型褐藻のホンダワラ類²⁰⁾、小型紅藻のハイコナハダ (*Yamadaella caenomyce*)、石灰藻類、藍藻類等が群生する。近年の礁池における造礁サンゴ類の死滅に伴い、今まで礁嶺近くで繁茂していたウミウチワ類やホンダワラ類が、より岸側に向かって分布域を拡大している可能性がある。

主要分類群の分布パターンを図7にまとめた。分布パターンは、(i)全調査海域に広く分布する種群 (サボテングサ、ハイオウギ、ラッパモク、無節石灰藻類、糸状紅藻類等)、(ii)北東部海域の礁池中央～沖側を中心に分布する種群 (ハイアミジ、イワノカワ類、藍藻類等)、(iii)東南部海域を中心に分布する種群 (ヤバネモク、ホンダワラ類等)、(iv)礁池岸側で多く見られる種群 (ヤセガタモツレミル、オオマタアミジ *Dictyota bartayresiana*、マクリ等) の4つに大別された。分布パターン(i)と(ii)を示す種群は、転石や死サンゴ骨格上を被って生育する匍匐性の小型海藻である。分布パターン(iv)は海岸に近い波静かな岩盤上に生育する種の特徴を反映していた。これらの分布パターンは、石垣島東岸の南北間の環境勾配に対応した海藻類の分布特性を示すものではなかった。

(2) プロファイル調査

伊原間の礁池のプロファイルと造礁サンゴ類および海藻類の帯状分布構造を図8に示した。礁池の水深は非常に浅く、岸側で1～1.5m (平均海面108cm下、以下同じ)、中央～沖側では1～3m、沖側には干潮時にほぼ干出するサンゴ小丘 (coral knoll) がパッチ状に点在していた。礁原部の水深はわずか数10cmで、小潮の干潮時においても干出する場所が多かった。海岸線から礁縁部までの距離はおよそ1400m、礁縁部から沖に向かって礁斜面を経て急激に深くなった。底質は岸側で砂の割合が高く、中央～沖側で礫や岩が主体となり、礁原部ではサンゴ礫が強固に凝固した岩盤となっていた。

岸側の底質は多くが砂であることから、海草類のリユウキュウスガモ (*Thalassia hemprichii*)、リユウキュウアマモ (*Cymodocea serrulata*)、ウミジグサ (*Halodule uninervis*)、ウミヒルモ (*Halophila ovalis*) が群落 (アマモ場 seagrass bed) を形成していた。点在する小岩上には、オオマタアミジ、サボテングサ、藍藻類等の小型海藻が生育していた。中央部では、砂地に散在する礫や小岩上に、オオマタアミジ、藍藻類等が生育していたが、礁池内で最も海藻被度が低か

った。沖側では死サンゴ上を被うようにして、ハイアマミジ、無節石灰藻類、ラッパモク、ハイオウギ、イワノカワ類等の海藻類が繁茂していた。礁嶺付近の礁原上には、トサカモク (*Sargassum cristaefolium*)、アツバモク (*S. crassifolium*) 等のホンダワラ類の群落 (ガラモ場) が形成されていた。

定着可能な岩盤や礫底の面積に比べて生きたサンゴ群集の発達が悪く、平均被度はわずかに 3.8 ± 5.3 (SD) %にとどまったのに対して、死サンゴ基盤はその10倍近い 33.8 ± 35.5 (SD) %という値を示した。局所的にハマサンゴ属の大きな群体が50%近い被度を示していたが、コモンサンゴ属やキクメイシ科は分散して分布していた。ミドリイシ属は生サンゴのわずか8.3%しか占めていなかったが、骨格の形状から死サンゴ基盤のうち少なくとも39.6%が枝状のミドリイシ起源であるものと推定された。同時期に行った轟川の礁池でも、生きたサンゴの被度が 6.1 ± 9.4 (SD) %、死んだサンゴの被度が 14.0 ± 16.6 (SD) %で、死サンゴの割合は約7割にも及んでおり、伊原間と同様に枝状ミドリイシ属の死亡率は高かった。

こうした状況は今回の広域分布調査でも認められたが、1970~1980年頃には現在よりも多くの枝状ミドリイシ群集が形成されていたこと (大葉 未発表) と整合性があり、かつて優占群集していた枝状ミドリイシ群集が崩壊した痕であると推察される。上述のように、造礁サンゴ群集の加齢が進むにつれ、枝の中~下部のポリプや共肉部が死に、そこにさまざまな固着生物が進入することによって、立体的で複雑な層状構造が創出される¹⁹⁾。したがって、ミドリイシ群集の崩壊は、礁池における造礁サンゴ群集の多様性を著しく低下させるのみならず、海藻や他の固着生物の生息場所をも制限し、サンゴ礁生態系全体の生物多様性を低下させる原因となっているものと考えられる。

(3) 定点モニタリング調査

浦底湾における定点モニタリング調査の結果を図9~11に示した。1995年の実験開始後、1996年から1998年夏までの3年間に造礁サンゴ類の被度、群体数、出現種数は増加の一途をたどった。平均被度は岸側で23.7%、中央で28.3%、沖側で22.2%、1 m²あたりの平均群体数は岸側で23.8個、中央で134.8個、沖側で177.0個、1 m²あたりの平均出現種数は岸側で6.3種、中央で9.2種、沖側で14.3種にのぼり、いずれの地点でも順調な回復が見られた。分類群組成は、中央および沖側でミドリイシ属が大部分を占めたのに対して、岸側ではハマサンゴ属が優占し、ミドリイシ属がこれに続いた。ミドリイシ属の構成種はそれぞれの地点で異なっており、沖側ではクシハダミドリイシ (*Acropora hyacinthus*) やコユビミドリイシ (*A. digitifera*) が枝状種に混じって出現し、中央では枝状のスギノキミドリイシ (*A. formosa*)、トゲスギミドリイシ (*A. nobilis*)、オトメミドリイシ (*A. pulchra*) 等が優占し、岸側ではウスエダミドリイシ (*A. tenuis*) とヒメマツミドリイシ (*A. aspera*) が多くみられた。岸側で多く出現したハマサンゴ属は、コブハマサンゴ (*P. lutea*) がほとんどであった。

1998年夏に大規模な白化現象が起こり、同年9月から翌年1月までの間に、沖側の造礁サンゴ類は全て死滅し、中央でも1 m²あたり平均わずか1群体を残すのみとなった。これに対して、岸側では白化の影響は小さく、翌年1月時点の被度は15%を維持していた。これは、塊状のハマサンゴ属が白化に対する耐性が強いためであると考えられる。また、ミドリイシ属についても岸側に分布する種の生存率は高く、白化に対して強い耐性を示した。その後、2001年まで大規模な攪

乱は見られず、沖側および岸側のサンゴの被度は白化前を上回るまでに回復したが、中央では回復スピードは遅く、2002年9月時点でも被度はわずかに6.7%にとどまっていた。回復に伴う分類群組成の変化は認められず、基本的には攪乱前の分類群組成を復元しているという点は注目に値する。2002年夏の台風16号の強い西風に伴う波浪の影響で、沖合では直接的破壊により、岸側では著しい礫の堆積により、造礁サンゴ類の被度は減少した。

被度から見た種多様度指数の経時的変化 ($H'c$) と群体数から見た種多様度指数の経時的変化 ($H'n$) を比較すると、実験前の遷移が進んだ状態では $H'c$ の値が $H'n$ の値を下回っていたが、回復期には $H'c$ の値が $H'n$ の値を上回ることが多かった。これは、ランダムに加入した複数種が群集を構成しており、種間競争によって優占種が台頭する段階には至っていないということを示唆している。

ミドリイシ属およびハマサンゴ属の新規定着数の経年変化を図11に示した。白化前も白化後も例年継続的な加入は繰り返されており、そのほとんどはプラヌラ幼生の新规定着からの群体形成によるものであり、1999年から2001年までの3年間、直径のモードが徐々に大きいサイズへ移行していた。いずれの年度でも1cm未満の小型群体が多く見られるが、次年度には群体数は減少しており、かなりの初期減耗があるものと推察された。沖側におけるミドリイシ属の新規加入群体は、白化前で年間平均66~84個/m²、白化後で17~27個/m²程度、岸側におけるハマサンゴ属の新規加入群体は白化前後を通して1.3~2.5個/m²程度と推定された。1997年および1998年にはミドリイシ属の新規加入は非常に多かった。これは、周辺のみドリイシ群集が健全であり、産卵が正常に行われたためであり、前年のミドリイシ群集の被度と新规定着群体数との間には極めて高い相関関係が認められた。2000年~2002年に新規加入がやや少ないのは、1998年の白化によって群集が激減したことと深く関係している。ハマサンゴ属については、群体数が少ないため、岸側でしか解析できなかったが、やはり群集被度と新规定着群体数との間には正の相関関係が認められた。

(4) 環境指標種

広域分布調査結果に基づき、造礁サンゴ類および海藻類の在不在データを Jaccard の共通係数で地点間の類似度を計算し、多次元尺度法 (MDS) で二次元に圧縮するとともに、Ward法によりクラスター分析を行った (図12)。在不在データなので稀種の貢献度が高くなるが、両方の手法とも岸側の地点と中央~沖側の地点に明瞭に区別できた。これらの2グループはMDSの左右で分かれていることから、MDSの第1軸 (Dimension-1) は岸側系列と中央~沖側系列という、礁池における固着性底生生物の帯状分布特性を反映しているものと考えられた。

造礁サンゴ類で見られる中央~沖側グループでは、海域間よりも海域内での共通性が高く、クラスター分析でもこれらが隣接している例が多く見られた (例えば、浦崎、平野、白保、大里、真栄里)。中央や沖側でありながら岸側グループに分類された海域 (安良中央、轟川中央、野原沖側) はいずれも水深が浅いために、岸側の群集組成に似た特徴を有していた。逆に、岸側でありながら中央~沖側グループに分類された海域 (平野岸側) は水深がやや深かったということが原因の一つであると考えられる。

造礁サンゴ類で岸側から出現して沖に向かうにつれ少なくなるのは、パリカメノコキクメイシ (*Goniastrea aspera*)、シナキクメイシ (*Favites chinensis*)、エダコモンサンゴ (*Montipora digitata*)、フカトゲキクメイシ (*Cyphastrea serailia*) 等の種であり、これらは「岸側指標

種」と考えられる。カンボクアナサンゴモドキ (*Millepora exaesa*)、コカメノコキクメイシ (*Goniastrea pectinata*)、ハナヤサイサンゴ (*Pocillopora damicornis*) 等の種は岸側から沖側まで分布する「広域分布種」という特徴を示した。一方、中央～沖側に分布する種としては、スギノキミドリイシ (*Acropora formosa*)、ハナガサミドリイシ (*A. nasuta*)、コモンキクメイシ (*Goniastrea retiformis*)、サオトメシコロサンゴ (*Pavona cactus*)、コノハシコロサンゴ (*P. frondifera*) 等があり、これらは「沖側指標種」として認識することができる。沖側礁原～礁斜面に分布中心をもつミドリイシ属数種、ユビミドリイシ (*A. digitifera*)、クシハダミドリイシ (*A. hyacinthus*)、オヤユビミドリイシ (*A. gemmifera*)、ホソエダミドリイシ (*A. valida*)、コエダミドリイシ (*A. microphthalma*) については、礁池の水域特性として評価する場合には、明らかな「沖側指標種」と考えることができる。

一方、海藻類では次の3つのグループに分類できた。すなわち、(i) 礁池岸側を中心に分布していた種群：緑藻のリウキュウガサ (*Acetabularia dentata*)、ミズタマ (*Bornetella sphaerica*)、ヒロハサボテングサ (*Halimeda macroloba*)、フササボテングサ (*H. simulans*)、ヤセガタモツレミル (*Codium geppiorum*)、紅藻のカイメンソウ (*Ceratodictyon spongiosum*)、マクリ (*Digenea simplex*)、海草類のリウキュウスガモ (*Thalassia hemprichii*)、(ii) 礁池中央～沖側にかけて分布していた種群：緑藻のサボテングサの一種 (*H. hederacea*)、褐藻のハイアミジ (*Dictyota friabilis*)、ジガミグサ (*Styopodium zonale*)、紅藻のヒライタイシモ (*Lithophyllum bamleri*)、ミナミイシモ (*L. kotschyamum*)、モルツカイシモ (*L. pygmaeum*)、コケイバラ (*Hypnea pannosa*)、キクヒオドシ (*Melamansia glomerata*)、藍藻のクダモの一種 (*Lyngbya sordida*)、(iii) 岸側～沖側の全域に分布していた種群：緑藻のフデノホ (*Neomeris annulata*)、ヒメイチョウ (*Udotea javensis*)、藍藻類 (cyanophytes)、の3グループである。(i) 群と(ii) 群は、それぞれ礁池の水域特性に対し、「岸側指標種」、「沖側指標種」に指定することができる。「岸側指標種」は造礁サンゴ類で少なく、海藻類が多かったが、これは陸からの淡水や赤土等の影響に対する感受性の差異を反映しているものと考えられる。

サンゴ礁生態系で見られる造礁サンゴ類の群集特性(種組成や多様性)は、それを取巻く環境条件と深くかかわっている^{13),14)}。本課題では、礁池の岸～沖にかけての環境勾配と、島の北～南にかけての環境勾配が、固着性底生生物の分布特性にどのように反映しているのかを明らかにすることが目的であったが、岸側～沖側の勾配軸に沿った生物相の変化は、造礁サンゴ類でも海藻類でも認識することが可能であった。岸側に共通した環境としては、水深が浅いこと、水温の日周変動や年較差が激しく、夏期に高水温に冬期に低水温になること、降雨時に塩分・透明度が低下すること、懸濁物・堆積物が多いこと、砂底の割合が高いこと等の特徴があげられる。こうした環境に対応した造礁サンゴ類の分布特性として、被度が低いこと、出現種数や多様度指数が小さいこと、塊状ハマサンゴが優占し、キクメイシ科とコモンサンゴ属がこれに続き、ミドリイシ属が少ないこと、ヒラフキサンゴ科 (Agariciidae)、ピワガラシ科 (Oculinidae)、サザナミサンゴ科 (Merulinidae) がほとんど出現しないこと等があげられる。一方、中央～沖側に共通した特徴はこれとは逆で、被度が高いこと、出現種数や多様度指数が大きいこと、コモンサンゴ属、ミドリイシ属、ハマサンゴ属、キクメイシ科の4分類群で基本構成をなすとともに、多くの科から構成される多様なサンゴ群集が見られること等である。礁池中央と沖側では、ともに出現種数が多かったが、これは、沖側では礁縁や礁斜面上部を中心に分布している種が外側礁原を超えて分

布域を拡大し、中央では水深が深くなることにより多様な生息環境が創出される、といった理由によるものと考えられる。杉原・中森²³⁾は、石垣島において地形と対応して造礁サンゴ類の帯状分布構造が認められ、礁池においては岸側から順に、ハマサンゴキクメイシ群集、コモンサンゴ群集、ミドリイシ群集が発達することを明らかにした。この傾向はいくつかの種（例えば *Acropora* spp.、*Montipora digitata*）に限定すれば今回の結果とよく一致し、岸側におけるハマサンゴ属の占有率が高かったのは、ミドリイシ属をはじめとする多くの造礁サンゴ類が生息していなかった結果と解釈することもできる。

以上の結果をまとめ、造礁サンゴ類と海藻類の全出現種一覧表とともに、表2～3に整理した（造礁サンゴ類については未確定種を除いた）。当初想定していた石垣島の南北間での環境（栄養塩濃度、濁度、赤土堆積等）勾配に対応した生物指標種を見出すことはできなかったが、造礁サンゴ類および海藻類とともに、礁池内の水域特性（波当たりの強さ、水深、底質、陸からの流入水の影響等）に対応する指標種（「岸側指標種」、「沖側指標種」）を選定できた。さらに、サンゴ礁の攪乱後に生じる二次遷移の段階、すなわち回復の程度・進行状態を評価できる指標種を選定することができた。それは、褐藻のハイアミジ、ハイオウギ、紅藻の無節石灰藻類、イワノカワ類等の小型匍匐海藻である。後述するように、これらの小型匍匐海藻は、二次遷移の初期によく出現し繁茂する種群である。したがって、これらの「遷移指標種」が広域にわたって繁茂している場合は、サンゴ礁生態系が二次遷移の初期段階にあること、また繁茂が長期間継続している場合は、環境悪化が継続しているか、あるいは断続的に環境悪化が繰り返されていると判断することが可能である。

従来、サンゴ礁の健全度を把握する指標として造礁サンゴ類の被度が最もよく利用されるが、実際、サンゴ礁は複雑な地形の組み合わせによって形成され、波浪や季節風の影響が大きい海域や砂礫底では恒常的に被度が低い状態にある。したがって、海域間で被度を比較するだけでなく、多様度や均等度、サンゴの成長、生産量、病気等による攪乱状況等、サンゴ礁全体のさまざまな要素を総合的に判断することが重要であると考えられる。また、造礁サンゴ群集の攪乱要因と遷移を含めた動的なプロセスを検出するためには、時系列的なモニタリングが不可欠である。工藤²²⁾はサンゴ礁の健康診断を実施するに際し、従来からの被度調査に加えて、サンゴや魚の多様性、海藻類の被度、魚の現存量と生産量、サンゴの成長速度、サンゴの白化、魚とサンゴの加入パターン、最近死滅したサンゴの割合、病気の発生、サンゴ礁の石灰化と浸食等、さまざまな調査項目を提案しているが、いずれも被度と同様、時間的にも空間的にも変動が大きいことを認めている。サンゴ礁魚類についてはさらに詳しい検討もなされており、チョウチョウウオ類やスズメダイ類等について底質や餌環境と一定の関係があることから、生物指標としての有効性が議論されている^{23)、24)}。一方、本課題で明らかになった造礁サンゴ類および海藻類の分布特性・指標種は、汚染や栄養塩勾配等に対する指標ではなく、礁池における水域特性を現わしていた。しかしながら、枝状ミドリイシ属数種の全体に占める割合（編組比率）と生存率は、一定の範囲において指標としての有効性を示していた。横地²⁵⁾は、網取湾における定点調査の結果から、やはりミドリイシ属の定着加入と成長によって群集の回復状況が大きく左右されることを明らかにしている。これに対して、コモンサンゴ属やハマサンゴ属は環境変動に強い種が多いため、たとえ一定海域で大規模群集を形成していたとしても、サンゴ礁の健全度を判断する上では注意が必要である。

(5) サンゴ礁生態系の攪乱と健全度評価

台風や生物食害のような一時的な攪乱の場合には、サンゴ群集の急速な回復が期待されるが、懸濁物、堆積物、栄養塩類の増加のような慢性的なストレスの場合には、回復が非常に遅かったり、回復の過程で群集構造が変化する。こうした現象は、群集の長期モニタリングを経てはじめて明らかになることであるが、過去10~20年間にわたって石垣島の礁池で報告された事例では、造礁サンゴ群集が恒常的に攪乱された状態にあることを示唆していた。オニヒトデは、1958年頃に川平湾や石垣市街地先で発生し、1975年~1980年代にかけて大規模な発生が起こり³⁾、そのピークは1981~83年であった²⁶⁾。東海岸における造礁サンゴ群集の多様性の崩壊は、この時期に端を発している可能性がある。また、1980年代中頃から石垣島周辺の多くの地点で農地造成、畜産振興、土木工事に伴う赤土流出が顕著に見られ、礁池のサンゴ群集に重大な影響を及ぼしていた^{3),4)}。特に河川流域では近年の土地改良事業に起因する赤土流出が著しく、サンゴ礁域への年間流出量は宮良川でおよそ50,680トン、轟川で32,880トンにも達しており²⁷⁾、河口における堆積量も著しく高い値を示している²⁸⁾。宮良川河口において赤土は水路を経て宮良湾へ流出するものの、河口にあるマングローブ域や礁池での堆積・再懸濁を繰り返し、南部サンゴ礁域での環境悪化の主要因となっている。一方、轟川から流出した赤土は、直接礁池内へ堆積するため造礁サンゴ類等の底生生物に極めて大きな影響を及ぼしている。沿岸域の人為的改変や汚染に伴う底生生物群集への影響は、当時から現在まで継続しているものと考えられる。

熱帯海域は、寒帯や温帯等の海域に比べて、プランクトンや懸濁物の乏しい貧栄養海域である。栄養塩が増加すると、プランクトンや懸濁物が増えるとともに透明度や光量が減少し、造礁サンゴ体内に共生する褐虫藻の光合成活性の低下を招いたり、環形動物や軟体動物のような穿孔性濾過摂食者が増加したり、懸濁物がサンゴ上皮に堆積しストレスを及ぼしたりといった悪影響が生じ、その結果、一次生産量の低下と石灰化阻害を引き起こす²⁹⁾。Berwick & Faeth³⁰⁾はオアフ島における長期モニタリング結果から、栄養塩の増加に伴って海藻(緑藻類のキッコウグサ属*Dictyosphaeria*)が繁茂し、そのことが造礁サンゴ群集の定着や初期成長を阻害するという事を明らかにした。また、Littler & Littler³¹⁾は富栄養化によって無節石灰藻が増え、それによってサンゴが覆われるという仮説を提唱した。これらの知見は、環境変動が海藻類の繁茂を介して、造礁サンゴ群集を衰退させる可能性を示唆するものである。下田他³²⁾の調査によれば、石垣島北部の栄養塩環境は、南部の登野城や白保に比べて良好であることから、石垣島東南部における栄養塩の増加とそれに伴う海藻類の繁茂は、造礁サンゴ群集、特にミドリイシ群集の回復を阻害している可能性がある。

また、造礁サンゴ類と海藻類は着生基盤をめぐって競争関係にあると考えられるが、両者の因果関係については未解明な点が多い。McCook他³³⁾は、これまで報告されているイシサンゴと海藻間の競争関係を形態と生活史に基づいて吟味した結果、海藻との直接的な競争によってサンゴ群集が崩壊したという例はほとんど見あたらず、多くの場合は他の外的攪乱要因によって群集構造が変化したことを指摘している。また、McCook³⁴⁾は海藻がサンゴの成長に及ぼす影響はほとんど認められなかったことを述べている。Hughes³⁵⁾は大型台風によって造礁サンゴ群集が崩壊した後、海藻が新たに繁茂してサンゴとの競争が起こる現象を明らかにしたが、群集変化のメカニズムは攪乱や競争の頻度に依存するものではなく、偶然性が高いことを強調した。本調査においても、サンゴと海藻との被度の関係は必ずしも明瞭ではなく、両者の競争が限られた条件でしか起こっ

ていないという可能性を支持していた。

陸上では、生態系遷移の研究が進んでいるが、海洋・沿岸域での遷移の研究例はまだ少ない。森林が存在する海域で耕作を止めた農地があると、まず初めに一年生の草、次に多年生の草、それから低木、さらに高木となり、最後には森林が発達するといった遷移が生じ、生物群集は小型で短命な種群から大型で長命な種群へと移り変わって行く^{36),37)}。これは、植物の生育には必要不可欠な光の奪い合い、すなわち光獲得競争の結果と考えられている。温帯の沿岸域でも、藻場が形成されている場所で、生態系の攪乱が生じ二次遷移が始まると、生物群集が小型短命の海藻から大型長命のホンダワラ類やアラメ・カジメへと移り変わることが知られている^{38),39)}。サンゴ礁を代表する大型固着生物は造礁サンゴ類、ソフトコーラル類、海藻類であるが、これらはいずれも光合成に依存しているという共通点があり、異なった分類群間で光獲得競争が生じているという点は生態系遷移を考える上で重要である。サンゴ礁生態系が光獲得競争に依存した遷移をたどると仮定すれば、短命な小型海藻から、より大型で長命な海藻、ソフトコーラル群集、造礁サンゴ群集へと変化していくことが考えられる。海中公園センター⁴⁰⁾、西平他⁴¹⁾は、沖縄島においてオニヒトデ食害後に行った生物調査結果から、オニヒトデによる攪乱後のサンゴ礁生態系においては、(i)サンゴ群集の回復、(ii)ソフトコーラル群集への移行、(iii)ホンダワラ群集への移行が生じることを予測した。彼らは、本研究で観察された匍匐性小型海藻群集への移行については触れていないが、この群集は極相期の群集ではないと判断したのだろう。何れにしても、サンゴ礁生態系の遷移系列（更新する群集の順番等）については、その場の環境により異なることが考えられ、詳細については今後の研究を待たねばならないが、少なくとも小型海藻が恒常的に繁茂する状態が、二次遷移の初期段階であるという解釈と矛盾するものではない。

サンゴ礁生態系の遷移極相においては、造礁サンゴ類が優占群集するが、造礁サンゴ群集が攪乱を受けて部分的または大規模に死滅した場合、一時的に海藻類やその他の競合生物がそこに侵入し繁茂・群集する。死んだ骨格上に多く見られた褐藻のハイアマミジやハイオウギ、紅藻の無節石灰藻類やイワノカワ類等の小型匍匐海藻は、サンゴ礁生態系の遷移初期に出現したり、あるいは遷移極相期にあっても転石や死サンゴ片（礫）等の不安定基質上に生育することが多い^{42),43)}。不安定基質は、波浪等により転がり、その度に表面の生物相が破壊されるので、頻繁に遷移を繰り返すことになる。小規模で短期的な自然要因による攪乱の場合には、環境が回復すれば造礁サンゴ類が優占する生物相へ移行するが、堆積物や栄養塩等の人為的な攪乱が複合的、長期的に作用している場合には、遷移が初期段階で停滞し、そのまま海藻群落が存続する可能性がある。

石垣島礁池で海藻類が繁茂している原因として、(i)環境悪化の継続、繰り返しによる二次遷移の停滞、(ii)漁獲圧の増大や環境悪化による草食魚類の減少、(iii)陸域から流入する栄養塩類やサンゴ成長阻害物質の増加、(iv)サンゴ幼生加入量の減少等が考えられるが、詳細な原因究明と対策については今後の継続的な調査研究が必要である。また、海藻類の繁茂が、造礁サンゴ類のプラヌラ幼生の着底・成育を阻害している可能性も考えられるが、それを確かめるためには、実験室レベルの研究（本課題のサブサブテーマ（2）②の結果を参照）、あるいは野外での海藻剥離実験や人工基盤設置実験等が必要である。

サンゴ礁生態系では日常的に適度な攪乱が繰り返されることにより、高い多様性が維持されているため⁴⁴⁾、礁池で見られる海藻の繁茂とサンゴ群集の衰退が、攪乱による群集遷移の一断面として捉えて良いのか、あるいは環境変動によってもはや回復不可能な状況に陥っているのか判断

することは容易ではない。浦底湾における定点モニタリング調査では、環境条件が良好であれば元の群集と類似した群集が復元されることが示唆されたが、石垣島東岸の礁池では本研究結果から判断して、同じような回復過程（すなわち二次遷移）をたどっている、あるいはたどる可能性は極めて低いものと考えられる。

以上のように、造礁サンゴ類の分布特性、海藻植生、サンゴ死骨格の状況、並びに過去の報告書等から、石垣島東岸の中南部礁池におけるミドリイシ群集の崩壊は1998年の白化後に起こったものではなく、十数年以上前に生じ、その後も攪乱要因となる環境悪化が継続しているか、攪乱を断続的に繰り返しているものと推察され、サンゴ礁生態系の二次遷移が長期間にわたって初期段階で停滞した状態にあるものと推察された。

5. 本課題によって得られた成果

- (1) 石垣島裾礁における造礁サンゴ類と海藻類の空間的・時間的分布特性を調べ、東岸の礁池でミドリイシ類を主体とした造礁サンゴ群集が壊滅状態にあることを明らかにした。
- (2) 造礁サンゴ類および海藻類について、健全度を評価する指標種は選定できなかったが、礁池内の水域特性や遷移段階（攪乱後の回復状態）を評価する指標種を選定することができた。
- (3) 海藻類の繁茂や他の環境要因によって、造礁サンゴ幼生の加入や成長が阻害され、サンゴ礁生態系の二次遷移が長期間にわたって初期段階で停滞しているという可能性が示唆された。

6. 引用文献

- 1) Wilkinson, C. (eds.) 1998. Status of Corals of the World: 1998. Aust. Inst. Mar. Sci., 184 pp.
- 2) Wilkinson, C. (eds.) 2000. Status of Corals of the World: 2000. Aust. Inst. Mar. Sci., 363 pp.
- 3) 白井祥平・佐野芳康 1985. 石垣島周辺海域サンゴ礁学術調査報告書. 太平洋資源開発研究所, 570 pp.
- 4) 目崎茂和(編) 1991. 石垣島のサンゴ礁環境. 世界自然保護基金日本委員会. 214 pp.
- 5) 環境庁 1998. 平成9年度生態系多様性地域調査(石垣島東部及び平久保半島の沿岸海域) 報告書. 環境庁自然保護局・海中公園センター, 174 pp.
- 6) 環境庁 2000. 平成12年度石垣島周辺海域におけるサンゴ礁モニタリング調査報告書. 環境庁自然保護局, 69 pp.
- 7) Nakamori, T. 1986. Community structures of recent and Pleistocene hermatypic corals in the Ryukyu Islands, Japan. Tohoku Univ. Sci. Rep., 2(Geol.), 56(2): 71-133.
- 8) 環境省 2001. 平成13年度石垣島周辺海域におけるサンゴ礁モニタリング調査報告書. 環境省自然保護局, 72 pp.
- 9) 環境省 2002. 平成14年度石垣島周辺海域におけるサンゴ礁モニタリング調査報告書. 環境省自然保護局, 68 pp.
- 10) Nozawa, Y. 1972. On the sea-grass from Ishigaki Island. Mem. Kagoshima Junshin Junior Coll., 2: 56-66.

- 11) 大葉英雄・有賀祐勝 1982. 八重山群島石垣島周辺の海藻. 藻類, 33: 325-331.
- 12) Stoddart, D.R. & Johannes, R.E. (eds.) 1978. Coral reefs: research methods. Unesco, 581 pp.
- 13) Huston, M.A. 1985. Patterns of species diversity on coral reefs. Ann. Rev. Ecol. Syst., 16: 149-177.
- 14) Veron, J.E.N. 1995. Corals in space and time. Comstock/Cornell, 321 pp.
- 15) Weinberg, S. 1981. A comparison of coral reef survey methods. Bijdragen Dierkunde, 51: 199-218.
- 16) 藤岡義三 2000. 造礁サンゴ群集の多様性構造に関する研究. 環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書「サンゴ礁における生物多様性構造の解明とその保全に関する研究」, pp. 23-35.
- 17) 瀬川宗吉 1956. 原色日本海藻図鑑. 保育社, 175 pp.
- 18) 中原紘之・増田道夫 1971. 海洋植物の形態 2. 緑藻と褐藻の生活史と水平分布. 海洋科学, 3(11): 24-26.
- 19) Morton, J.E. & Challis, D.A. 1969. The biomorphology of Solomon Islands shores. Phil. Trans. Roy. Soc., B255: 459-516.
- 20) 松田伸也 1986. 白保礁原・礁池におけるサンゴ・海藻・堆積物について. 白保サンゴ礁海域の学術調査報告書. 世界野生生物基金日本委員会, pp. 15-28.
- 21) 杉原薫・中森亨 1998. 石垣島における造礁サンゴの帯状分布. 日本サンゴ礁学会第1回大会講演要旨集, p. 40.
- 22) 工藤君明 1998. サンゴ礁の健康診断. JAMSTEC, 10(1): 34-42.
- 23) 佐野光彦 1997. サンゴ礁生態系健全度指標の開発. 環境庁地球環境研究総合推進費終了研究報告書「サンゴ礁生態系の維持機構の解明をその保全に関する研究報告書」, pp. 71-77.
- 24) 渋谷拓郎・高田宣武・阿部寧・橋本和正・佐野光彦・川崎博之 2002. 移動性動物群集によるサンゴ礁生態系の指標化と管理手法の開発. 環境庁地球環境研究総合推進費研究報告書「サンゴ礁生態系の攪乱と回復促進に関する研究」, pp. 161-165.
- 25) 横地洋之 1998. 西表島網取湾周辺における造礁サンゴ群集の加入と回復. 日本サンゴ礁学会第1回大会講演要旨, p. 39.
- 26) Yamaguchi, M. 1986. *Acanthaster planci* infestations of reefs and coral assemblages in Japan: a retrospective analysis of control efforts. Coral Reefs, 5: 23-30.
- 27) 沖縄県 1995. 平成6年度宮良川流域赤土流出実態調査報告書. 沖縄県環境保健部環境保全課, 215 pp.
- 28) 大見謝辰男・池間修宏 1990. 沖縄県内各地の海域における赤土汚濁の現状. 沖縄県公衆衛生学会誌, 21: 1-15.
- 29) Kinsey, D.W. 1988. Coral reef system response to some natural and anthropogenic stresses. Galaxea, 7: 113-128.
- 30) Berwick, N.L. & Faeth, P.E. 1988. Simulating the impacts of sewage disposal on coral reefs. Proc. 6th Int. Coral Reef Symp., 2: 353-361.
- 31) Littler, M.M. & Littler, D.S. 1984. Models of tropical reef biogenesis: the con-

- tribution of algae. *Prog. Phycol. Res.*, 3: 323-364.
- 32) 下田徹・市川忠史・松川康夫 1998. 琉球列島のサンゴ礁における栄養環境とそのサンゴ生育への影響. 中央水産研究所研究報告, 12: 71-80.
 - 33) McCook, L. J., Jompa, J. & Diaz-Pulido, G. 2001. Competition between corals and algae on coral reefs. *Coral Reefs*, 19: 400-417.
 - 34) McCook, L. J. 2001. Competition between corals and algal trufs along a gradient of terrestrial influence in the nearshore central Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 19: 419-425.
 - 35) Hughes, T.P. 1989. Community structure and diversity of coral reefs: the role of history. *Ecology*, 70(1), 275-279
 - 36) Whittaker, R.H. 1970. *Communities and Ecosystems*. Macmillan Co. 158 pp.
 - 37) 宝月欣二 (訳) 1979. ホイッター生態学概説(第2版). 培風館. 363 pp.
 - 38) 片田実 1963. 海藻の生活形と遷移. 日本水産学会誌, 29: 798-808.
 - 39) Katada, M. & Satomi, M. 1975. Ecology of algae. *In*, Tokida, J. and Hirose, H. (eds.), *Advance of Phycology in Japan*. Dr. W. Junk b. v. Publishers., pp. 211-239.
 - 40) 海中公園センター (編) 1973. 浅海における海中の生態系に関する研究—オニヒトデ異常発生のメカニズムとその対策に関する研究—. 環境庁. 74 pp.
 - 41) 西平守孝・山里清・仲宗根幸男・香村真徳・新本洋允 1974. 瀬底島周辺サンゴ礁のオニヒトデによる攪乱に関するノート. 琉球列島の自然とその保護に関する基礎的研究, I: 237-254.
 - 42) 今野敏徳 1977. 海藻群落構造の測定. 日本水産学会 (編)「海の生態学と測定」. 恒星社厚生閣. pp. 16-34.
 - 43) Littler, M.M. & Littler, D.S. 1984. Relationship between macroalgal functional form groups and substrata stability in a subtropical rocky-intertidal system. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 74: 13-34.
 - 44) Connell, J.H. 1978. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*, 199: 1302-1310.

7. 国際共同研究等の状況

(1) 「パラオ国際サンゴ礁センターとの環境保全、海藻現存量の変化に関する共同研究」。

カウンターパート: Yimnang Golbuu, Steven Victor & Carol Emaurois (the research staff of the Palau International Coral Reef Center in the Republic of Palau)。
JICA研究支援プロジェクト。

(2) カセサート大学 (タイ国)、東南アジア漁業開発センター (フィリピン)、国際農林水産業研究センター (JIRCAS) 等が実施している国際共同プロジェクト「マングローブ汽水域における魚介類の持続的生産システムの開発」に参加、調査手法や研究結果について情報交換。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<学会誌 (査読あり)>

- ① Y. Fujioka: Galaxea, JCRS, 1, 41-50 (1999) "Mass destruction of the hermatypic corals during a bleaching event in Ishigaki Island."
- ② Y. Fujioka: Galaxea, JCRS, 4, 53-61 (2002) "Destruction and recovery of hermatypic coral communities after the mass bleaching event at Ishigaki Island."
- ③ K. Kikutani, H. Ohba, and H. Yamakawa: J. Tokyo Univ. Fish., 88, 47-52 (2002) "Distribution and gut contents of the green snail *Turbo marmoratus* in Tokunoshima Island."
- ④ H. Ohba, H. Ochi and Y. Fujioka: Proceedings of Algae 2002, (in press) "The decline of reef-coral community and the luxuriant growth of benthic marine algae in the moat of Ishigaki-jima Island, Ryukyus (southern Japan)."

<学会誌 (査読なし)>

- ① Y. Fujioka: Proc. 9th Int. Coral Reef Symp, 306 (2000) "Species-area curve of some coral communities in southwestern Japan."
- ② H. Namikawa and Y. Fujioka: Nat. Sci. Mus. Monogr., 20, 11-17 (2001) "Ahermatypic corals collected from Tosa Bay, southwestern Japan."

<書籍>

- ① 竹内均編：地球環境調査事典、第3巻沿岸域、フジテクノシステム社、(2003 印刷中)
「第7編 海藻・海草の調査、第3章 植生調査、第1節 対象藻類の同定法、
1-13. 熱帯性緑藻 (執筆担当：大葉英雄)」
- ② 竹内均編：地球環境調査事典、第3巻沿岸域、フジテクノシステム社、(2003 印刷中)
「第7編、第3章、第2節 生育の場や基質の違いによる植生の調査法、
2-7. サンゴ礁域 (執筆担当：大葉英雄)」

<報告書類等>

- ① 中央水研ニュース, No. 24, 1-3 (2000) 「造礁サンゴの白化、その後 (藤岡義三)」
- ② 環境省地球環境研究総合推進費 平成12年度研究成果報告集, 269-273 (2001) 「造礁サンゴの健全度指標に基づく生態系管理手法の開発 (藤岡義三、大葉英雄)」
- ③ 環境省地球環境研究総合推進費 平成13年度研究成果報告集, 154-160 (2002) 「造礁サンゴの健全度指標に基づく生態系管理手法の開発 (藤岡義三、大葉英雄)」
- ④ 農林水産省 森林、海洋等におけるCO2収支の評価の高度化報告書, 80-81 (2002) 「サンゴ類によるCO2収支の把握 (藤岡義三)」

(2) 口頭発表

- ① 藤岡義三：日本水産学会中国・四国支部例会 (2000) 「土佐湾で新たに確認された造礁サン

ゴ群集」

- ② 藤岡義三：日本サンゴ礁学会第3回大会（2000）「南西諸島における造礁サンゴ群集の多様性構造」
- ③ 大葉英雄・藤岡義三：日本サンゴ礁学会第4回大会（2001）「石垣島東～南岸礁池内の海藻植生」
- ④ 藤岡義三：日本サンゴ礁学会第4回大会（2001）「南四国におけるイシサンゴ生物相」
- ⑤ H. Ohba, H. Ochi and Y. Fujioka: Joint Conference of Algae 2002 in Tsukuba (2002)
"The decline of reef-coral community and the luxuriant growth of benthic marine algae in the moat of Ishigaki-jima Island, Ryukyus (southern Japan)."
- ⑥ 藤岡義三・大葉英雄・澁野拓郎・高田宣武・鈴木淳：日本サンゴ礁学会第5回大会（2002）
「石垣島礁池の造礁サンゴ群集は回復するのか？」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① 高知放送（平成13年7月4日、堆積物が造礁サンゴに与える影響について1分ほど解説）
- ② テレビ高知（平成13年10月2日、南西日本のサンゴについて2分ほど解説）

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、「環境省国際サンゴ礁研究・モニタリングセンター」と協力して南西諸島のサンゴ礁生態系の保全対策に寄与する。また、本研究結果の一部は、環境省足摺宇和海国立公園自然再生推進計画の検討事項として反映してゆく予定である。

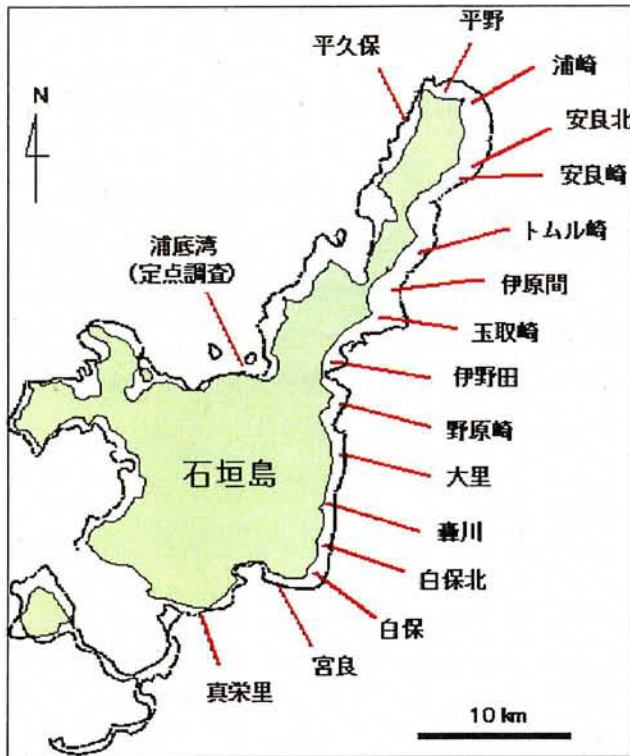


図1. 石垣島における調査海域

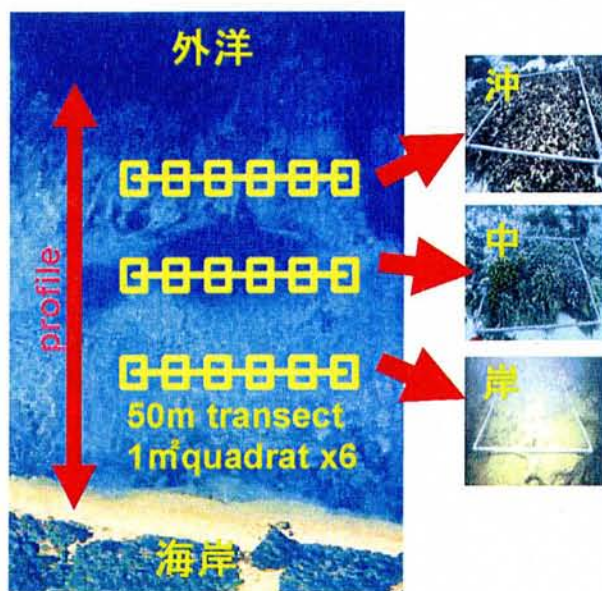


図2. 広域分布調査の方法

表1. 調査地点の緯度経度 (日本測地系)

調査地点		北緯(N)	東経(E)
平久保	岸側	24° 35' 39"	124° 18' 44"
	中央	24° 35' 42"	124° 18' 37"
	沖側	24° 35' 44"	124° 18' 28"
平野	岸側	24° 36' 11"	124° 19' 45"
	中央	24° 36' 20"	124° 19' 53"
	沖側	24° 36' 30"	124° 20' 01"
浦崎	岸側	24° 35' 44"	124° 20' 29"
	中央	24° 35' 38"	124° 20' 48"
	沖側	24° 35' 36"	124° 21' 03"
安良北	岸側	24° 33' 41"	124° 19' 55"
	中央	24° 33' 38"	124° 20' 06"
	沖側	24° 33' 36"	124° 20' 15"
安良	岸側	24° 33' 30"	124° 19' 32"
	中央	24° 33' 25"	124° 19' 40"
	沖側	24° 33' 22"	124° 19' 50"
トムル崎	岸側	24° 31' 01"	124° 18' 08"
	中央	24° 30' 58"	124° 18' 20"
	沖側	24° 30' 54"	124° 18' 30"
伊原間	岸側	24° 30' 03"	124° 17' 10"
	中央	24° 30' 04"	124° 17' 34"
	沖側	24° 30' 04"	124° 17' 40"
玉取崎	岸側	24° 29' 02"	124° 17' 02"
	中央	24° 28' 54"	124° 17' 25"
	沖側	24° 28' 41"	124° 17' 40"
伊野田	岸側	24° 27' 32"	124° 15' 25"
	中央	24° 27' 28"	124° 15' 44"
	沖側	24° 27' 24"	124° 15' 57"
野原崎	岸側	24° 26' 17"	124° 15' 32"
	中央	24° 26' 15"	124° 15' 45"
	沖側	24° 26' 14"	124° 15' 55"
大里	岸側	24° 24' 50"	124° 15' 30"
	中央	24° 24' 50"	124° 15' 43"
	沖側	24° 24' 50"	124° 15' 55"
轟川	岸側	24° 22' 44"	124° 15' 13"
	中央	24° 22' 44"	124° 15' 26"
	沖側	24° 22' 44"	124° 15' 30"
白保北	岸側	24° 21' 34"	124° 15' 08"
	中央	24° 21' 36"	124° 15' 17"
	沖側	24° 21' 34"	124° 15' 24"
白保	岸側	24° 20' 20"	124° 14' 23"
	中央	24° 20' 10"	124° 14' 30"
	沖側	24° 20' 00"	124° 14' 35"
宮良	岸側	24° 20' 40"	124° 13' 08"
	中央	未調査	
	沖側	未調査	
真栄里	岸側	24° 19' 25"	124° 10' 36"
	中央	24° 19' 17"	124° 10' 36"
	沖側	24° 19' 09"	124° 10' 36"
浦底湾 (定点調査)	岸側	24° 27' 08"	124° 13' 24"
	中央	24° 27' 37"	124° 12' 54"
	沖側	24° 27' 44"	124° 12' 50"

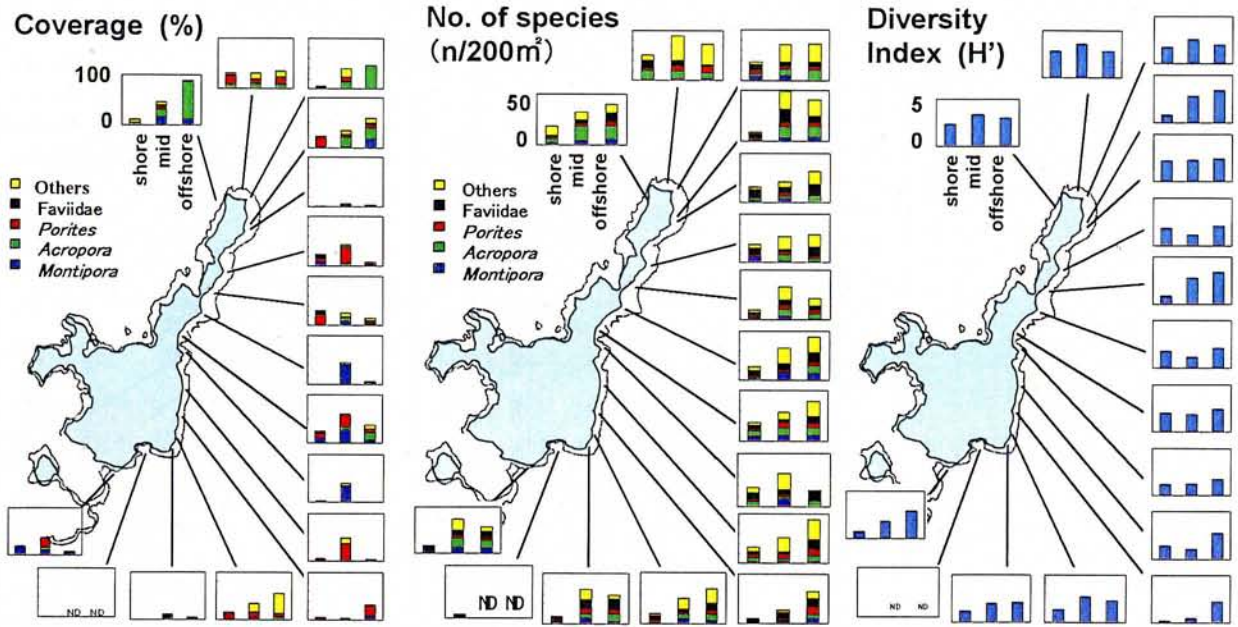


図 3. 造礁サンゴ類の分布特性 (左図：被度，中図：出現種数，右図：多様度指数)

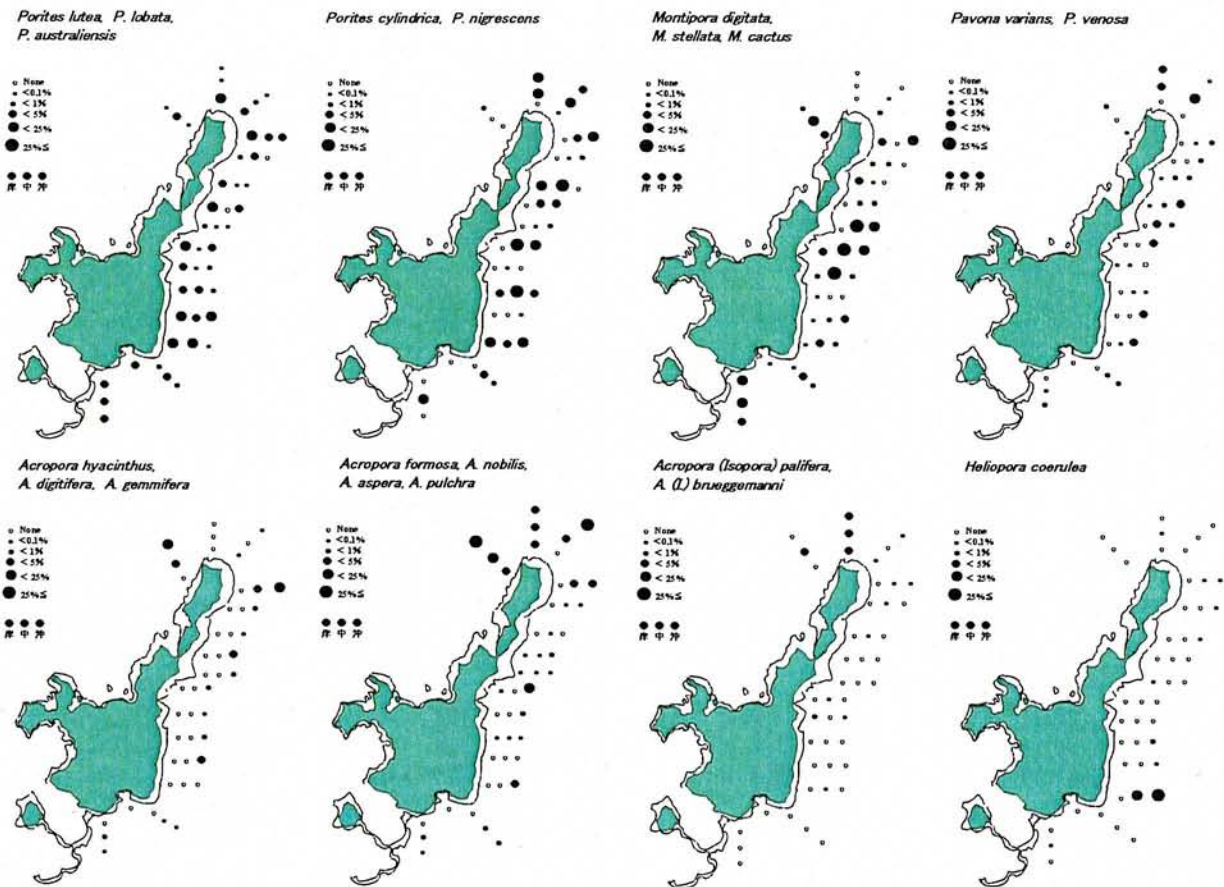


図 4. 造礁サンゴ主要種の分布パターン

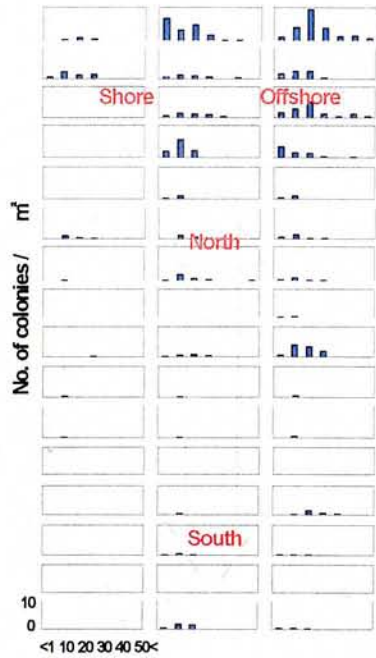


図5. *Acropora*の直径頻度分布

海藻・海草の群落特性

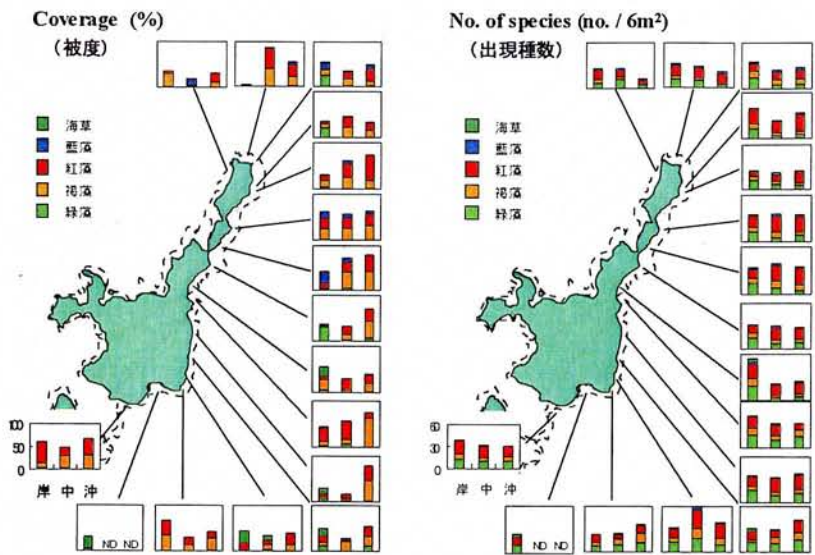


図6. 海藻類の分布特性 (左図:被度, 右図:出現種数)

種の分布特性(海藻・海草)

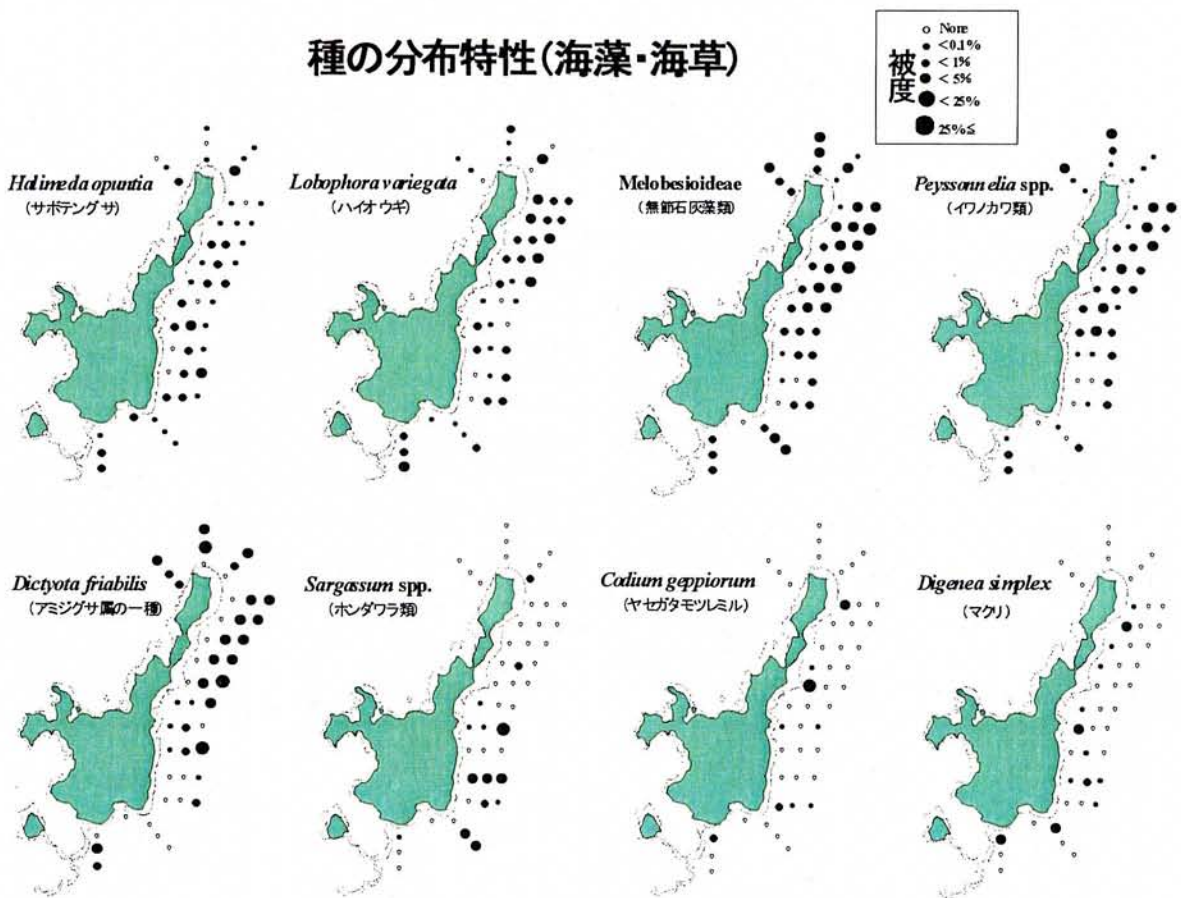


図7. 海藻主要種の分布パターン

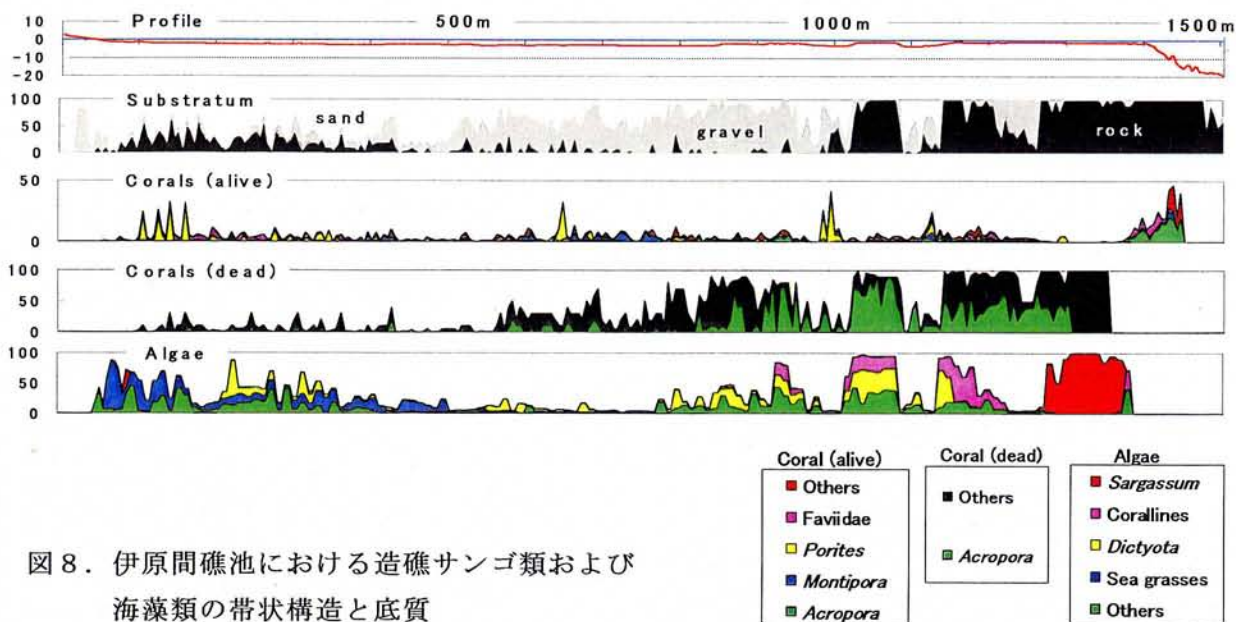


図8. 伊原間礁池における造礁サンゴ類および海藻類の帯状構造と底質

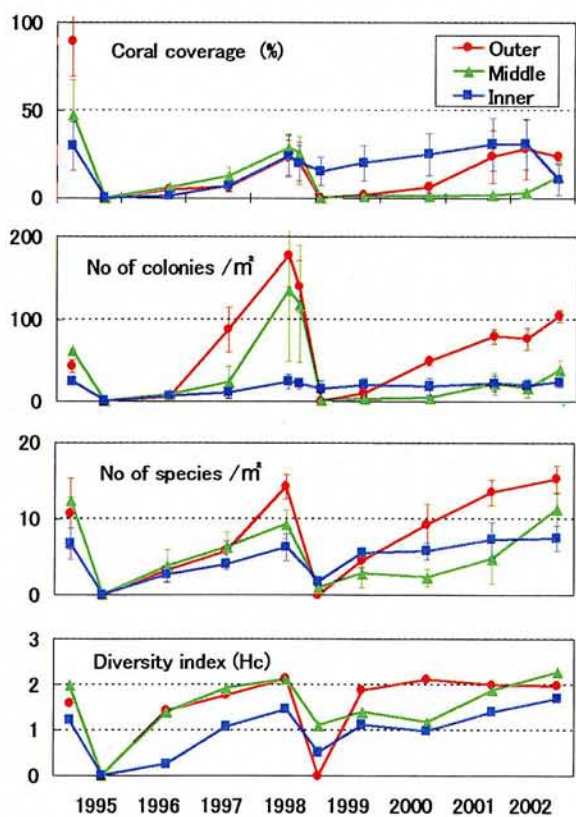


図9. 定点モニタリング調査の結果 (上から被度、群数、種数、多様度指数)

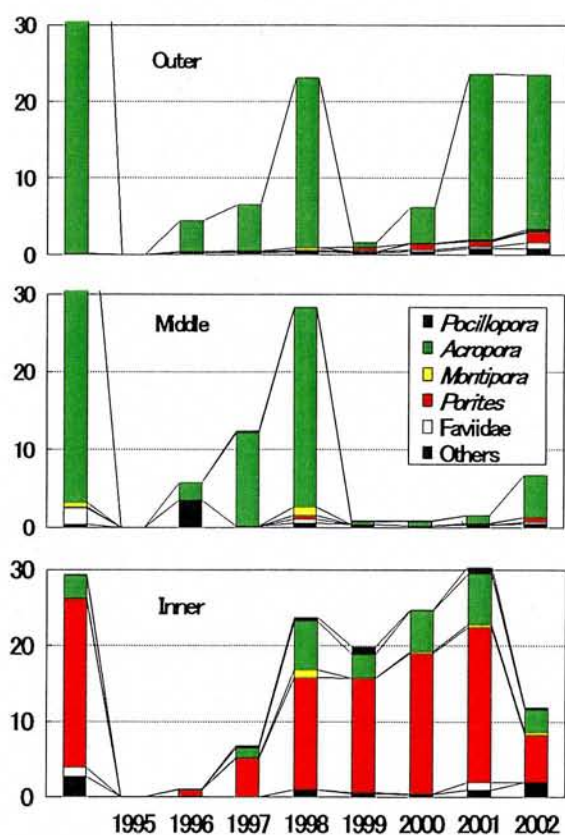


図10. 造礁サンゴ類の分類群組成(%)の経年変化

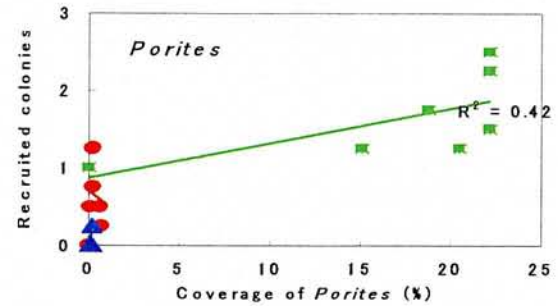
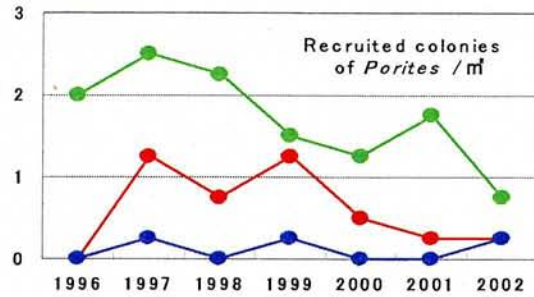
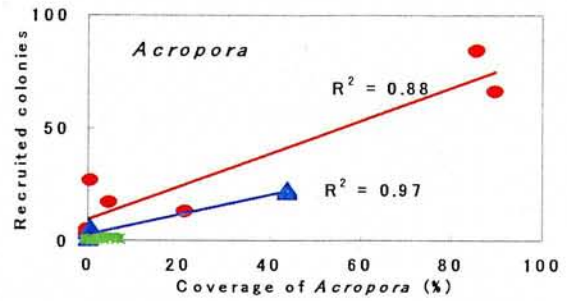
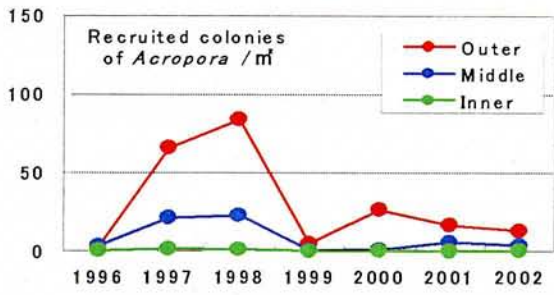


図 1 1. *Acropora*と*Porites*の新規定着群体の経年変化

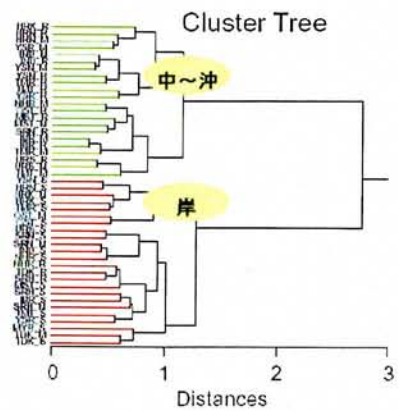
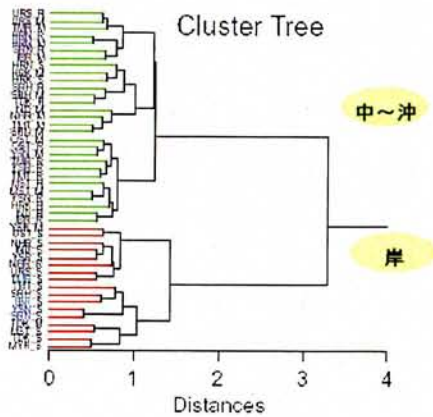
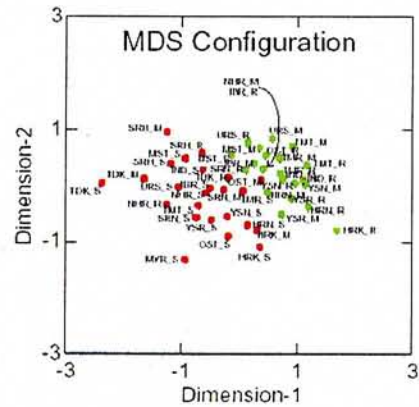
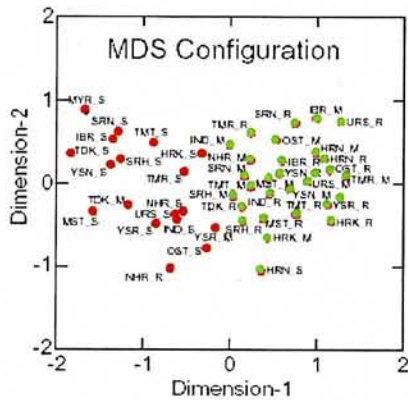


図 1 2. MDS解析とクラスター解析 (左2図: 造礁サンゴ類、右2図: 海藻類)

表 2. 造礁サンゴ類の出現種と指標種

分布域	岸 中 沖		指標種
	全域		
<i>Stylocoeniella guentheri</i>	<i>Acropora microphthalma</i>	<i>Goniopora stutchburyi</i>	<i>Favia pallida</i>
<i>Pocillopora damicornis</i>	<i>Acropora vaughani</i>	<i>Alveopora spongiosa</i>	<i>Favia speciosa</i>
<i>Seriatopora hystrix</i>	<i>Acropora aspera</i>	<i>Psammocora contigua</i>	<i>Favia fava</i>
<i>Seriatopora caliendrum</i>	<i>Acropora pulchra</i>	<i>Psammocora haimeana</i>	<i>Favia danae</i>
<i>Stylophora pistillata</i>	<i>Acropora millepora</i>	<i>Psammocora profundacella</i>	<i>Favia matthaii</i>
<i>Montipora monasteriata?</i>	<i>Acropora tenuis</i>	<i>Coscinaraea columna</i>	<i>Favia rotundata</i>
<i>Montipora turgescens</i>	<i>Acropora hyacinthus</i>	<i>Pavona cactus</i>	<i>Favites chinensis</i>
<i>Montipora digitata</i>	<i>Acropora nasuta</i>	<i>Pavona frondifera</i>	<i>Favites abdita</i>
<i>Montipora gaimardi</i>	<i>Acropora valida</i>	<i>Pavona varians</i>	<i>Favites halicora</i>
<i>Montipora hispida</i>	<i>Acropora secale</i>	<i>Pavona venosa</i>	<i>Favites pentagona</i>
<i>Montipora informis</i>	<i>Acropora divaricata</i>	<i>Leptoseris mycetoseroides</i>	<i>Favites russelli</i>
<i>Montipora efflorescens</i>	<i>Acropora subglabra</i>	<i>Coeloseris mayeri</i>	<i>Goniastrea retiformis</i>
<i>Montipora grisea</i>	<i>Acropora elseyi</i>	<i>Heliofungia actiniformis</i>	<i>Goniastrea aspera</i>
<i>Montipora stellata</i>	<i>Acropora spp.</i>	<i>Fungia fungites</i>	<i>Goniastrea pectinata</i>
<i>Montipora cactus</i>	<i>Astreopora gracilis</i>	<i>Fungia sp.</i>	<i>Platygyra daedalea</i>
<i>Montipora aequituberculata</i>	<i>Porites lobata</i>	<i>Fungia valida</i>	<i>Platygyra sinensis</i>
<i>Montipora spp.</i>	<i>Porites australiensis</i>	<i>Fungia paumotensis</i>	<i>Platygyra ryukyuensis</i>
<i>Anacropora forbesi</i>	<i>Porites lutea</i>	<i>Fungia spp.</i>	<i>Platygyra pini</i>
<i>Acropora palifera</i>	<i>Porites cylindrica</i>	<i>Fungia moluccensis</i>	<i>Montastrea curta</i>
<i>Acropora brueggemanni</i>	<i>Porites nigrescens</i>	<i>Galaxea fascicularis</i>	<i>Montastrea annuligera</i>
<i>Acropora humilis</i>	<i>Porites lichen</i>	<i>Galaxea astrea</i>	<i>Cyphastrea serailia</i>
<i>Acropora gemmifera</i>	<i>Porites annae</i>	<i>Acanthastrea echinata</i>	<i>Cyphastrea chalcidicum</i>
<i>Acropora digitifera</i>	<i>Porites horizontalata</i>	<i>Symphyllia recta</i>	<i>Heliopora coerulea</i>
<i>Acropora nobilis</i>	<i>Porites spp.</i>	<i>Hydnophora exesa</i>	<i>Millepora exesa</i>
<i>Acropora grandis</i>	<i>Porites rus</i>	<i>Hydnophora microconos</i>	<i>Millepora intricata</i>
<i>Acropora formosa</i>	<i>Goniopora columna</i>	<i>Merulina scabricula</i>	<i>Millepora murrayi</i>

表 3. 海藻類の出現種と指標種

分布域	岸 中 沖		指標種
	全域		
CHLOROPHYTA (46 taxa)	<i>Avrainvillea erecta</i>	<i>Galaxaura fasciculata</i>	<i>Ceratodictyon spongiosum</i>
<i>Ulva sp.</i>	<i>Udotea javensis</i>	<i>Gelidium pusillum</i>	<i>Coelarthrum (?) sp.</i>
<i>Rhizoclonium grande</i>	<i>Tydemania expeditionis</i>	<i>Pterocladia sp.</i>	<i>Coelothrix irregularis</i>
<i>Cladophora catenata (?)</i>	<i>Halimeda discoidea</i>	<i>Gelidiella acerosa</i>	<i>Ceramium sp.</i>
<i>Cladophora patentiamea</i>	<i>Halimeda hederacea</i>	<i>Hydrolithon reinboldii</i>	<i>Spyridia filamentosa</i>
<i>Cladophora sp. 1 (creeping)</i>	<i>Halimeda macroloba</i>	<i>Lithophyllum bamleri</i>	<i>Wrangelia tanegana</i>
<i>Cladophora sp. 2</i>	<i>Halimeda opuntia</i>	<i>Lithophyllum kotschyannum</i>	<i>Wrangelia (?) sp. (large)</i>
<i>Anadyomene wrightii</i>	<i>Halimeda simulans</i>	<i>Lithophyllum pallescens</i>	<i>Wrangelia (?) sp.</i>
<i>Microdictyon japonicum</i>	<i>Halimeda velasquezii</i>	<i>Lithophyllum pygmaeum</i>	<i>Dasya sp.</i>
<i>Microdictyon okamurae</i>	<i>Codium geppiorum</i>	<i>Lithothamnion sp.</i>	<i>Vanvoorstia spectabilis</i>
<i>Boodlea coacta</i>	filamentous green algae	<i>Mastophora rosea</i>	<i>Polysiphonia sp.</i>
<i>Struvea sp.</i>	PHAEOPHYTA (21 taxa)	<i>Mesophyllum erubescens</i>	<i>Tolypocladia glomerulata</i>
<i>Boergesenia forbesii</i>	<i>Sphacelaria sp.</i>	<i>Neogoniolithon frutescens</i>	<i>Digenea simplex</i>
<i>Ventricaria ventricosa</i>	<i>Dictyota bartayresiana</i>	<i>Neogoniolithon variabile</i>	<i>Laurencia parvipapillata</i>
<i>Valonia aegagropila</i>	<i>Dictyota fragilis</i>	<i>Porolithon (?) sp.</i>	<i>Laurencia tronoi</i>
<i>Valonia fastigiata</i>	<i>Dictyota patens (?)</i>	<i>Sporolithon ptychoides</i>	<i>Laurencia sp.</i>
<i>Dictyosphaeria cavernosa</i>	<i>Dictyota sp. (striped)</i>	<i>Sporolithon (?) sp.</i>	<i>Acanthophora spicifera</i>
<i>Dictyosphaeria versluisii</i>	<i>Lobophora variegata</i>	Melobesioideae	<i>Levillaea jungermannioides</i>
<i>Acetabularia dentata</i>	<i>Styopodium zonale</i>	<i>Amphiroa foliacea</i>	<i>Melamansia glomerata</i>
<i>Acetabularia parvula</i>	<i>Padina australis</i>	<i>Amphiroa fragilissima</i>	filamentous red algae
<i>Bornetella nitida</i>	<i>Padina japonica</i>	<i>Amphiroa fragilissima (thicker type)</i>	CYANOPHYTA (6 taxa)
<i>Bornetella sphaerica</i>	<i>Padina minor</i>	<i>Jania capillacea</i>	<i>Hydrocoleum (?) sp.</i>
<i>Neomeris annulata</i>	<i>Padina ryukyuana (?)</i>	<i>Peyssonnelia spp.</i>	<i>Lyngbya semiplena (?)</i>
<i>Bryopsis harveyana</i>	<i>Hormophysa cuneiformis</i>	<i>Portieria hornemannii</i>	<i>Lyngbya sordida</i>
<i>Caulerpa cupressoides</i>	<i>Turbinaria ornata</i>	<i>Betaphycus gelatinum</i>	<i>Symploca hydroides</i>
<i>Caulerpa lentillifera</i>	<i>Sargassum crassifolium</i>	<i>Hypnea charoides</i>	<i>Gardnerula corymbosa (?)</i>
<i>Caulerpa microphysa (?)</i>	<i>Sargassum cristaeifolium</i>	<i>Hypnea pannosa</i>	cyanophytes
<i>Caulerpa parvifolia</i>	<i>Sargassum echinocarpum</i>	<i>Gracilaria arcuata</i>	SPERMATOPHYTA (4 taxa)
<i>Caulerpa peltata</i>	<i>Sargassum myriocystum</i>	<i>Gracilaria edulis</i>	<i>Cymodocea serrulata</i>
<i>Caulerpa racemosa var. clavifera</i>	<i>Sargassum polycystum</i>	<i>Gracilaria euchaeumoides</i>	<i>Halodule uninervis</i>
<i>Caulerpa serrulata</i>	<i>Sargassum polyporum (?)</i>	<i>Gracilaria salicornia</i>	<i>Thalassia hemprichii</i>
<i>Caulerpa sertularioides</i>	<i>Sargassum swartzii (?)</i>	<i>Tylopus lichenoides</i>	<i>Halophila ovalis</i>
<i>Caulerpa taxifolia</i>	<i>Sargassum sp.</i>	<i>Gelidiopsis intricata</i>	
<i>Caulerpa webbiana</i>	RHODOPHYTA (58 taxa)	<i>Gelidiopsis repens</i>	
<i>Chlorodesmis fastigiata</i>	<i>Actinotrichia fragilis</i>	<i>Gelidiopsis variabilis (?)</i>	
<i>Avrainvillea amadelpa</i>	<i>Galaxaura cuculligera</i>	<i>Gelidiopsis (?) sp. (very small)</i>	(Total taxa of 135)