

## 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

② 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

独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所

石垣支所 亜熱帯生態系研究室

澁野拓郎

東京大学大学院農学国際専攻

佐野光彦

<研究協力者> 独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所

石垣支所 亜熱帯生態系研究室

高田宜武・阿部 寧・橋本和正

東京大学大学院農学国際専攻

川崎博之

平成12～14年度合計予算額14,198千円

(うち、平成14年度予算額 5,190千円)

[要旨] 魚類：サンゴ礁で優占する樹状サンゴが大規模に死滅した場合、死滅サンゴ枝の崩壊の程度、すなわち、サンゴ礁生態系の悪化度を魚類の個体数密度によって間接的に示すことができるかどうかを、小型人工礁を用いた野外実験で検証した。スズメダイ科の稚魚、特にニセネッタイスズメダイの稚魚の個体数密度は、枝状構造が複雑な人工礁に多く、逆に単純な人工礁には少なかった。したがって、スズメダイ科稚魚の個体数密度はサンゴ礁生態系の悪化度を示す指標として有効であると考えられた。さらに、人工礁の大きさとスズメダイ科魚類の個体数密度との関係を調べたところ、人工礁が大きくなっても、個体数密度はほとんど変化しなかった。死滅サンゴ枝が著しく崩壊している場所に人工礁を設置して、魚類の個体数密度を高めたい場合には、設置する人工礁の大きさを重視するよりも、その構造的複雑性を考慮したほうがよいことがわかった。

ベントス：移動性ベントスを用いてサンゴ礁の環境をモニタリングすれば、サンゴ等よりも小さな空間と時間スケールを対象とした生物指標を確立できると考えられる。サンゴ礫トラップと塩化ビニル製付着板という2種類の基質を用いて、ベントス群集の効率的調査法の確立と指標化を検討した。塩化ビニル製付着板は、群集組成の変異が大きく魚類等の捕食の影響も大きいため、指標化には向かない事が分かった。サンゴ礫トラップでは2～4週間の設置で周辺環境を反映した群集が成立し、指標化に有効であった。そこで、サンゴ礫トラップを石垣島東海岸に設置することにより、地点の類別と指標種の抽出を行った。さらに、濁度と塩分がこれらの地点での主要な環境傾度である事を示すとともに、指標種の意味付けを行った。中でも2種のヤドカリ類(*Diogenes pallescens*, *Calcinus latens*)は高濁度地点の有効な指標種といえる。以上の結果から、ベントス群集組成の指標種の抽出と座標付けによる指標値の算出という2通りの方法が確立できた。サンゴ礫トラップのベントス群集を用いる事で、きめ細かなサンゴ礁環境のモニタリングが可能となるであろう。

[キーワード] スズメダイ科魚類、人工礁、ベントス、群集組成、指標種

## 1. はじめに

サンゴ礁生態系の保全及び管理の実施に際しては、十分な科学的な情報や根拠に基づいて行なうことが重要である。そのためには、サンゴ礁生態系の攪乱の現状を把握すると共に、サンゴを含むサンゴ礁生物群集から見た生態系保全のための指標を確立し、多方面の研究分野からサンゴ礁生態系管理のための手法を探究することが求められる。本課題ではサンゴ礁生態系において移動性動物群集（魚類・ベントス）を対象とし、攪乱と回復過程の指標化を行ない、これらを基に的確なサンゴ礁生態系管理手法を確立することを目的とする。

## 2. 研究目的

サンゴ礁生態系の攪乱度（悪化度）を評価する上で、生きたサンゴの分布量に加えサンゴが死滅したあとのサンゴの枝状構造がどのくらい保たれているかを把握することが重要である。野外において、生きたサンゴの分布量は面積を測定することで把握出来るが、死滅サンゴ枝の崩壊の程度を的確に測定することは困難である。しかし、死滅サンゴ枝の崩壊に伴って生じる生物学的現象を用いれば、このサンゴ礁生態系の攪乱度を間接的に知ることができる。そこで、野外実験を実施し、サンゴ礁にふつうにみられ定住性が強いスズメダイ科魚類（Pomacentridae）の稚魚、特に、ニセネッタイスズメダイ（*Pomacentrus amboinensis*）稚魚の個体数密度と、サンゴ枝の構造を単純化させて作った人工礁の構造変化との応答を詳しく調べることで、死滅サンゴ枝の崩壊の程度を定量化し、サンゴ礁生態系の攪乱度を指標化する手法を探索した。ニセネッタイスズメダイの稚魚は浮遊性の餌を主に食べ、同種や他種の他個体と競争関係をあまり示さないことから、本種の存在は生息場所の物理構造に大きく影響される。さらに、本研究では、同じ構造をもった人工礁を用いて、その大きさが変化した時のスズメダイ科魚類の個体数密度の応答を調べることで、攪乱をうけ悪化したサンゴ礁生態系において、減少した魚類を回復させる方策についても検討した。

また、サンゴや海藻類や魚類よりも小さな空間と短い時間スケールでのサンゴ礁の攪乱と回復過程の指標化を目的として、短寿命で生息場所選択性が高いという特性を持つ移動性ベントス群集を対象にサンゴ礫トラップと塩化ビニル製付着板という2種類の基質を用いた野外調査、実験を行った。まず、サンゴ礁池内の移動性ベントス群集の効率的調査法を確立するとともに、移動性ベントスの群集組成を用いてサンゴ礁池内の複数の地点を類別し、類別の指標種と物理化学的な環境変数との相関を調べた。また、サンゴや海藻群集の発達の悪い海域においても環境変化が群集組成と指標種に与える影響を実験的に検証する手法を開発した。

## 3. 調査方法

### (1) 魚類

本研究は沖縄県石垣島の浦底湾（24° 27' N, 124° 13' E）で行った（図1）。本湾の礁原および礁斜面の砂礫地（水深は3-10m）に小型人工礁を設置して、以下の3種類の野外実験（実験1-3）を行った。なお、実験区には、周囲に天然サンゴパッチや岩などが存在していない砂礫地を選んだ。

#### ・実験1

樹状サンゴの構造的複雑さは、鉛直方向と水平方向にのびるサンゴ枝によって基本的に決定さ

れると考えられる。そこで、サンゴ枝の構造をそのように単純化させ、以下の4タイプの人工礁を作製した(図2)。

1) タイプA: コンクリートの基盤(40cm×50cm×15cm)に、高さ25cmの塩化ビニルパイプ(直径13mm)を25本垂直に立て、さらに、10本のパイプを水平方向に格子状に組み合わせ、それを3層加えた。この人工礁は、構造的複雑さがまだ高く保たれている、死滅直後の樹状サンゴを模擬している。

2) タイプB: タイプAの構造から水平方向の格子状構造を2層取り除いた。この人工礁は、死滅サンゴ枝の崩壊がかなり進行し、水平方向にのびる枝の大部分が消失した状態を示している。

3) タイプC: タイプAの構造から水平方向の格子状構造をすべて取り除き、鉛直方向の棒状構造だけを残した。

4) タイプD: すべての棒状構造を取り除き、コンクリート基盤だけにした。この人工礁は、死滅樹状サンゴが完全に崩壊した状態を示している。

各タイプの人工礁をそれぞれ7基作製し、実験区に互いに5m以上離して、2000年1月に設置した。人工礁に加入したスズメダイ科稚魚(標準体長20mm未満)の各種の個体数を、スキューバ潜水で計数した。潜水観察は2000年1月に1回、3月に2回、4月以降は約10日間隔で繰り返し行った。

#### ・実験2

この実験では、死滅サンゴ枝の脱落によって生じる、サンゴ枝間の広がりやスズメダイ科稚魚の個体数にどのような影響を及ぼすかを検証した。実験1で、タイプA型の人工礁に多くのスズメダイ科稚魚が加入したので、この枝状構造の間隔を変えることによって、以下の4タイプの人工礁を作製した(図3)。

1) タイプI: コンクリートの基盤(40cm×50cm×10cm)上に、高さ25cmの塩化ビニルパイプ(直径13mm)を49本垂直に立て、さらに、14本のパイプを水平方向に格子状に組み合わせ、それを5層加えた。各パイプの間隔は縦方向4cm、横方向5cm、鉛直方向3cmとした。

2) タイプII: 鉛直方向のパイプを25本とし、水平方向のパイプを格子状に10本、4層に組んだ。各パイプの間隔は縦方向6cm、横方向8cm、鉛直方向5cmとした。

3) タイプIII: 鉛直方向のパイプを16本とし、水平方向のパイプを格子状に8本、3層に組んだ。各パイプの間隔は縦方向8cm、横方向12cm、鉛直方向7cmとした。

4) タイプIV: 鉛直方向のパイプを9本とし、水平方向のパイプを格子状に6本、2層に組んだ。各パイプの間隔は縦方向13cm、横方向18cm、鉛直方向11cmとした。

各タイプの人工礁をそれぞれ7基作製し、実験区に互いに5m以上離して、2001年3月に設置した。人工礁に加入したスズメダイ科稚魚を、スキューバ潜水で、2001年4月から8月まで1週間間隔で繰り返し計数した。

#### ・実験3

本実験では、同じ構造の人工礁を用いて、その大きさを定量的に変化させ、スズメダイ科魚類の個体数密度にどのような違いがみられるかを検証した。

人工礁には、実験2で使用したタイプIIIを用いた。2002年3月に、この小型人工礁を実験区に1基、4基、9基それぞれまとめて設置した(図4)。すなわち、同じ構造の小型人工礁を用いて、設置する数を増加させることで、人工礁の大きさを3段階に変化させた。これら各タイプの人工

礁をそれぞれ4つ作製し、実験区に互いに5m以上離して設置した。そして、2002年4月から8月まで、各人工礁にみられたスズメダイ科の成魚(標準体長20mm以上の成魚と未成魚)と稚魚を、スキューバ潜水で1週間に1回の割合で繰り返し計数した。

実験1と2において、異なるタイプの人工礁間で、ニセネッタイスズメダイ稚魚の個体数、およびそれ以外のスズメダイ科稚魚の個体数に違いがみられるかを反復測定分散分析<sup>1)3)</sup>を用いて検定した。有意な差が存在した場合は、Student-Newman-Keuls multiple comparison test (以下SNK test と略す)<sup>4)</sup>を用いて人工礁のタイプ間の有意差を求めた。これらの分析において、個体数はすべて平方根変換( $\sqrt{x+0.5}$ )した。なお、ニセネッタイスズメダイ以外は、各種の個体数が少なかったため、ひとまとめにして合計個体数で解析した。

実験3においては、大きさの異なる人工礁間で、スズメダイ科成魚と稚魚の個体数にどのような違いがみられるかを上記の方法で検定した。なお、ここでは、個体数の密度を人工礁の単位表面積あたりで表した。

## (2) ベントス

本研究は沖縄県石垣島周辺のサンゴ礁池内で行った(図10)。手法の開発を主眼とした実験1～5は浦底湾において、また指標化を主眼とした実験6は東部海域(平久保、安良、宮良湾周辺)で行った。

### ・実験1：塩化ビニル製付着板の短期加入実験

浦底湾の礁池内に塩化ビニル製の付着板を設置し、6週間後に藻類と移動性動物の加入を調査した。塩化ビニル板は25cm角の正方形で海底より約50cmの海中に浮かべ、一部の付着板は目合い3cmのテグス網をかぶせて魚類などの摂食を排除した。調査は2回行い、1回目は9月下旬に、水深10mと2mの2ヶ所に設置、2回目は12月中旬に浅所(2m地点)のみで行った。回収は、藻類や動物が脱落逃避しないように、水中で付着板全体をポリ袋中に密閉して実験室へ持ち帰った。室内で、藻類の被度・移動性動物の個体数を計数した。

### ・実験2：サンゴ礫トラップの短期加入実験

浦底湾の水深2mに、サンゴ礫(枝状サンゴの破片)をつめたカゴを設置し、移動性動物の加入を調査した。一部のカゴには魚類などの摂食を排除するため、目合い3cmのテグス網をかぶせた。調査は1回のみで1月中旬に設置し、4週間後に回収した。回収時に移動性動物が逃避しないように水中でカゴ全体をポリ袋中に密閉し、実験室内で移動性動物の同定と個体数の計数を行った。

### ・実験3：塩化ビニル製付着板の長期加入実験

浦底湾の水深2mに、25cm角の塩化ビニル製の付着板2枚を海底より約50cmの海中に設置した。設置は1月に行い、9ヶ月後の10月に、付着板上の藻類や動物が脱落逃避しないように、水中で付着板全体をポリ袋中に密閉して実験室へ持ち帰った。室内で、藻類の被度と移動性動物の個体数を計数した。

### ・実験4：サンゴ礫トラップの加入パターン実験

浦底湾の礁原部・湾奥部・海草帯の3ヶ所にサンゴ礫を詰めたカゴを設置し、1・2・4・8週間後に各地点4カゴずつ回収した。実験は春(4月～6月)と冬(11月～1月)の2回行い、季節変化と加入パターンを調べた。

#### ・実験5：サンゴ礫トラップの移植交換実験

群集組成に対する環境変化の影響の検証法を確立するため、外洋水の影響が強い礁原部と、海水濁度が高い湾奥部の2地点間でサンゴ礫カゴの移植交換実験を行った。実験群として、礁原部と湾奥部に3週間設置したのち2地点間で交換し1週間後に回収したカゴを用い、対照群として礁原部と湾奥部に4週間設置したカゴを用いた。各群4カゴずつ設置した。最後の1週間の環境変化による移出入や死亡が、実験群と対照群の群集組成の違いとして把握されるように設定した。

#### ・実験6：サンゴ礫トラップによるサンゴ礁池の類別と指標化

石垣島東部の水深2m以浅の複数地点にサンゴ礫トラップを4週間設置し、移動性ベントス群集の指標化を行った。設置個所は、平久保、安良北、安良南、磯部の、それぞれ礁池内の岸よりの地点、中間地点、礁原より沖地点と、宮良の岸地点、大浜の中間地点の計14地点で、4月から6月にかけて行った。群集組成の変化に相関する物理化学的環境を調べるため、採水して塩分と濁度を測定した。さらに、セディメントトラップを設置し1週間後に回収して、有機質、石灰質、それ以外の無機質粒子の沈殿量を測定した。

## 4. 結果

### (1) 魚類

#### ・実験1

人工礁に出現したニセネッタイスズメダイの稚魚は、5月15日にタイプAで最初に観察され、その後6月9日にはどのタイプの人工礁にも稚魚がみられた。この時点で、タイプAでは7基すべてに稚魚が確認されたが、タイプBでは7基中5基、タイプCでは4基、タイプDでは1基のみに稚魚が存在した。また、個体数もタイプ間で大きく異なり、タイプAの平均個体数は最も多く、タイプB、C、Dのそれぞれ6倍、9倍、30倍であった(図5)。

タイプDでは、6月9日に3個体の稚魚が出現したが、そのほかの観察時にはまったく出現しなかった。したがって、タイプDを除いた3タイプ間で、観察期間中に出現した稚魚の個体数を比較すると、タイプA>B=Cという結果になった(反復測定分散分析、 $F_{2,165}=27.8$ 、 $p<0.0001$ 、およびSNK test)。

人工礁において、ニセネッタイスズメダイ以外の稚魚はクラカオスズメダイ(*Amblyglyphidodon curacao*)、ナミスズメダイ(*A. leucogaster*)、ダンダラスズメダイ(*Dischistodus prosopotaenia*)、ナガサキスズメダイ(*Pomacentrus nagasakiensis*)などの10種が観察された。これら10種の稚魚の合計個体数も人工礁のタイプ間で有意に異なり、タイプA>B>Cであった(反復測定分散分析、 $F_{2,165}=9.99$ 、 $p<0.0001$ 、およびSNK test、図6)。タイプDには、ニセネッタイスズメダイ以外の稚魚の加入は確認できなかった。

#### ・実験2

ニセネッタイスズメダイの加入稚魚は、5月7日にタイプIIの人工礁で初めて確認され、5月28日にはどのタイプの人工礁にも多くの稚魚が出現した(図7)。観察期間中にみられたニセネッタイスズメダイの稚魚の個体数を4タイプの人工礁間で比較すると、タイプI=II>III>IVという結果になった(反復測定分散分析、 $F_{3,444}=43.6$ 、 $p<0.0001$ 、およびSNK test)。

ニセネッタイスズメダイ以外の稚魚はナミスズメダイ、フタスジリュウキュウスズメダイ(*Dascyllus reticulatus*)、ミツボシクロスズメダイ(*D. trimaculatus*)、ナガサキスズメダイ

などの15種が観察された。これらの稚魚の合計個体数はタイプⅠの人工礁で最も多かった(反復測定分散分析、 $F_{3, 472}=37.2$ 、 $p<0.0001$ 、およびSNK test、タイプⅠ>Ⅱ>Ⅲ=Ⅳ、図8)。

#### ・実験3

4月から8月までの観察期間中に出現した成魚はフタスジリュウキュウスズメダイ、ニセネツタイスズメダイ、ミツボシクロスズメダイなどの7種であり、優占種は3タイプの人工礁でほぼ同じであった。観察期間中にみられた成魚の単位表面積あたりの平均個体数を3タイプの人工礁間で比較したところ、どのタイプ間にも有意な差は存在しなかった(反復測定分散分析、 $F_{2, 225}=0.181$ 、 $p=0.835$ 、図9)。

一方、稚魚は観察期間中にニセネツタイスズメダイ、モンツキスズメダイ (*Pomacentrus alexanderae*)、ナミスズメダイなど、17種が出現し、優占種は3タイプの人工礁間でほとんど同じであった。稚魚の単位表面積あたりの平均個体数は、成魚と同様に、人工礁間で有意に異ならなかった(反復測定分散分析、 $F_{2, 201}=0.735$ 、 $p=0.481$ 、図9)。

## (2) ベントス

### ・実験1：塩化ビニル製付着板の短期加入実験

1回目、網をかけていない付着板(Open)では、10mでも2mでも約半分が裸地で、3割が褐藻類、2割が紅藻類であった。しかし表面の概観は大きく異なり、2mでは魚類によると思われる摂食痕が多数みられ、糸状の藻類が多く、セディメント(およびデトリタス)の付着が多かったのに対し、10mでは被覆状の藻類の被度が糸状よりも多くセディメントの付着もあまり見られなかった。動物はエビ類・巻貝類・ヨコエビ類がわずかに認められた。10mで網をかけた付着板(Caged)は、セディメントの付着が増加し、藻類の枯死によると思われる裸地が増加した。また、網をかけた事による動物の増加も確認できなかった。

2回目は、4週Openおよび6週Openのものでは約半分が裸地でその残りの大部分が褐藻で占められていた。ともに糸状の藻類がほとんどで、セディメントの付着は約1割、魚類によると思われる摂食痕が多数確認された。動物はエビ類・ゴカイ類・ヨコエビ類などが少数認められた。4週Openののち2週間網をかけた付着板では、糸状の藻類が卓越しているのは同様だが、セディメントの付着が約4割に増え、裸地・緑藻・ラン藻の被度が増加した。動物はエビ類・ゴカイ類・ヨコエビ類ともに増加し、またコペポダ類も増加した。

### ・実験2：サンゴ礁トラップの短期加入実験

エビ類・コシオリエビ類・ヨコエビ類・タナイス類が多く採集され、カニ類・ヤドカリ類・巻貝類・魚類などは少数認められた。網の有無による違いとしては、塩ビ板に出現したものと同種のエビが、網をかけたサンゴレキに多い傾向が見られたものの、他の種類では大きな違いは認められなかった。

### ・実験3：塩化ビニル製付着板の長期加入実験

2枚の塩ビ板は隣接して(約1.5m間隔)設置したにもかかわらず、海藻のおよび泥(デトリタス)の被度に大きな差が見られた。一方は海藻被度34%、被覆状の緑藻類が優占し、泥の付着は2%。もう一方は海藻被度82%、糸状の紅藻類が優占し、泥の付着は71%であった。海藻被度の高い付着板では、巻貝類やヨコエビ類等の移動性動物が多数認められたが、被度の低い付着板からは殆ど得られなかった。

#### ・実験4：サンゴ礁トラップの加入パターン実験

全体で204種群の大型移動性動物が認められたが、そのうち平均してカゴ当り0.5個体以上出現した種(優占種)は約1割に当たる22種のみであった。端脚類や多毛類等の小型動物も含めて、2週間以上で主要な分類群がほぼ出揃うが、分類群の移動能力によって加入パターンに違いがあることが分かった。また、優占種22種について出現パターンの類似度を調べると、季節や期間ではなく設置場所に対応する3つのグループに類別できた。それぞれのグループで、最も出現個体数の多かった種は、礁縁部でコシオリエビ類(*Galathea mauritiana*)、湾奥部で別のコシオリエビ類(*Coralliogalathea humilus*)、海草帯でヤドカリ類(*Diogenes pallescens*)であった。

#### ・実験5：サンゴ礁トラップの移植交換実験

腹足類・十脚甲殻類・魚類など91種の大型動物と、カイアシ類・端脚類・多毛類などの小型動物が採集された。多くの種類はカゴあたりの採集個体数が1個体以下であった。対照群と実験群で群集組成の違いが見られたが、種によって異なる反応を示した。ヤドカリ類の1種(*Pagurixus* spA)では礁原部から湾奥部への移植で減少したが、コシオリエビ類の1種(*Coralliogalathea humilus*)では移植による個体数の変化が見られなかった。また、2対照群と2実験群の計4群を判別分析で分離するためには、上記2種の他にコエビ類2種(*Thor paschalis*、*Periclimenes* spA)と巻貝類2種(*Pusillina marmorata*、*Zafra* spA)の計6種のデータが必要であった。

#### ・実験6：サンゴ礁トラップによるサンゴ礁池の類別と指標化

出現個体数の多い17種の個体数データを用いて主成分分析を行うと(図12)、第2主成分までで全体の57.5%のバラツキを説明できた。地点の配置を見ると、大きく宮良湾周辺とそれ以外の地域に分かれた。この主成分分析の計算式に実験4の浦底湾のデータを当てはめる事により、浦底湾のベントス群集が石垣東部海岸ではどの地点付近に相当するか推定することが出来た(図13)。また、環境変数のうち互いに独立で相関の低い濁度、塩分、石灰質粒子の沈殿量の3変数を利用してRedundancy Analysis(RDA)を行ったところ(図14)、先の主成分分析の第1主成分はほぼ濁度と塩分の環境傾度を説明していることがわかった。さらに、いくつかの種の個体数が(*Calcinus latens*、*Dogenes pallescens*、*Pagurixus* spB、*Thor paschalis*、*Pusillina marmorata*など)が環境変数と高い相関を示した。

また、14地点の群集組成をK-means法によって階層的にクラスター分けできた(図11)。各階層の地点群に特徴的に出現する種を、IndVal法によって指標種として抽出した。これらの指標種をRDAの結果と比較すると、最初の2分割が高塩分低濁度を示す指標種(*Thor paschalis*、*Pusillina marmorata*)と、低塩分高濁度を示す指標種(*Pagurixus* spB、*Calcinus latens*)によって分割されたといえる。

## 5. 考察と成果

### (1) 魚類

実験1において、ニセネッタイスズメダイの稚魚は、枝状構造が複雑なタイプAの人工礁に最も多く出現したが、コンクリート基盤だけのタイプDにはほとんど出現しなかった。また、タイプBとCの人工礁に出現した稚魚はタイプAよりも明らかに少なかった。このような事象はニセネッタイスズメダイ以外の稚魚にも認められた。

同様に、人工礁の枝間隔を変化させた実験2においても、ニセネッタイスズメダイの稚魚は枝

間隔の狭い、複雑な枝状構造をもった人工礁（タイプⅠとⅡ）に多かった。また、他のスズメダイ科稚魚もタイプⅠの人工礁に最も多く出現した。

オニヒトデ (*Acanthaster planci*) の食害や白化現象などによって樹状サンゴが死滅した場合、サンゴ枝が徐々に崩壊していく過程は、実験ⅠのタイプAからDまで、あるいは実験ⅡのタイプⅠからⅣまでの人工礁の形状変化によって段階的に示すことができる。したがって、本研究の結果より、スズメダイ科の稚魚、特にニセネッタイスズメダイの稚魚の個体数密度は死滅サンゴ枝の崩壊の程度、すなわち、サンゴ礁生態系の悪化度を示す指標として用いることができると考えられる。

近年、沿岸域における生物群集などの保全、あるいは攪乱後の回復促進に人工礁を利用する試みがなされている<sup>2)</sup>。サンゴ礁魚類においても、人工礁の設置はその保全や攪乱後の回復促進に役立つ、有効な道具のひとつであると考えられる。特に、樹状サンゴが大規模に死滅し、その構造的複雑さが失われた場合、人工礁をそのような場所に設置することで、魚類の減少をくい止め、サンゴ食魚以外の魚類の個体数密度を、もとの状態近くまで回復させることは可能であると思われる。しかし、設置する人工礁の構造や規模については十分に考慮されなければならない。

本研究の実験ⅠとⅡにおいて、枝状構造が複雑な人工礁ほど多くのスズメダイ稚魚が加入することが明らかになったが、その一方で、実験Ⅲにおいて示されたように、人工礁の大きさはスズメダイ科魚類の個体数密度に影響を及ぼさないことがわかった。したがって、人工礁を用いて、スズメダイ科魚類を含む多くのサンゴ礁魚類を維持したり、回復させるには、人工礁の大きさを重視するよりも、その構造的複雑性を考慮したほうがよいと考える。

## (2) ベントス

塩化ビニル製付着板とサンゴ礫トラップを使用した短期間の実験的手法で、移動性ベントスの定量採集が可能であった。しかし、塩化ビニル製付着板の長期実験では、近接した2枚の付着板の海藻被度が大きく異なった。主に魚類の摂食圧の違いによるものと思われるが、長期実験では礁池内の小さなスケールでの違いが誇張される可能性があり、代表値を算出することの妥当性が低くなる。サンゴ礫トラップでは、砂泥の沈澱による埋没のため8週間以上はカゴの状態を均一に保つのが困難である。加入パターンの実験によりサンゴ礫トラップでは2-4週間が適当な実験期間であるといえる。また、サンゴ礫トラップでは魚類等による捕食の影響を考慮する必要がなく、周辺の環境に依存した群集組成を成立させる事が出来ると考えられる。

石垣島東部海岸においてサンゴ礫トラップのベントス群集組成を用いて、複数の地点をグループに類別する事が出来た。その類別に関与する指標種を、IndVal という手法で抽出する事が出来た。これらの指標種に着目すれば、礁池内の地点の類別（ベントス群集によるゾーニング）が可能となる。

同じ石垣島東部海岸のベントス群集データを用いて主成分分析を行い、各地点の座標付けと主成分空間への配置が出来た。これらの座標値の計算方法はベントス群集の組成を数値化するもので、別の場所や時期に得られたデータにも応用可能である。実際に浦底湾のデータに適応したところ、浦底湾は安良周辺に該当した。また、環境データを加味したRDAでは、濁度と塩分が大きな環境傾度を導く事が示され、それらと相関の高い種類を見いだせた。また、浦底湾の群集組成の季節変化は、季節的な濁度塩分の変化に影響されている事も示唆された。RDAの結果とIndVal



の指標種を比較すると、指標種がどういった環境変数に対応しているのか推測できた。将来、指標種と環境変数との対応は実験的に検証する必要がある。その際、移植交換実験は、環境変化に敏感な種類の探索を可能にし、環境変化が群集組成と指標種に与える影響を検証する手法として有効だといえる。

### (3) 本研究により得られた成果

本研究課題の成果により、枝状構造が複雑な人工礁ほど多くのスズメダイ稚魚が加入することが明らかになったが、その一方で、人工礁の大きさはスズメダイ科魚類の個体数密度に影響を及ぼさないことがわかった。したがって、人工礁を用いて、スズメダイ科魚類を含む多くのサンゴ礁魚類を維持したり、回復させるには、人工礁の大きさを重視するよりも、その構造的複雑性を考慮したほうがよいと考える。また、サンゴ礁トラップのベントス群集組成を指標化する方法として、指標種の抽出と座標付けによる指標値の算出という2通りの方法が確立できた。今後は、サンゴ等と共にベントス群集を用いる事で、複眼的でよりきめ細かなサンゴ礁環境のモニタリングが可能となるであろう。

## 6. 引用文献

- 1) Keppel, G. 1991. Design analysis: a researcher's handbook. 3rd edn. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- 2) Rilov, G. and Y. Benayahu. 2000. Fish assemblage on natural versus vertical artificial reefs: the rehabilitation perspective. Mar. Biol., 136:931-942.
- 3) Underwood, A. J. 1997. Experiments in ecology: their logical design and interpretation using analysis of variance. Cambridge University Press, Cambridge.
- 4) Zar, H. J. 1999. Biostatistical analysis. 4th edn. Prentice Hall, Upper Saddle River.

## 7. 国際共同研究等の状況

なし

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表(学術誌・書籍)

<学術誌(査読あり)>

H. Kawasaki, M. Sano, and T. Shibuno: Ichthyol. Res., 50, 1, 73-77 (2003)

"The relationship between habitat physical complexity and recruitment of the coral reef damselfish, *Pomacentrus amboinensis*: an experimental study using small-scale artificial reefs"

<学術誌(査読なし)>

Shibuno, T., K. Hashimoto, O. Abe, Y. Takada, H. Kawasaki. Fisheries Science 68 supplement I : 139-142. (2002)

"Disturbed coral reefs and the effects upon the structure of fish communities at Ishigaki Island, Japan."

<書籍>

なし

<報告書類等>

①地球環境研究総合推進費平成12年度研究成果-中間成果報告集- (Ⅲ) pp. 274-277. (2001)  
「1-2. 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(澁野拓郎・高田宜武・橋本和正・阿部寧・佐野光彦・川崎博之)」

②西海区水研ニュース 106: 4-5 (2002)

サンゴ礁の環境指標としての移動性ベントス群集 (高田宜武)

③地球環境研究総合推進費平成13年度研究成果-中間成果報告集- (Ⅲ) pp. 161-165. (2002)  
「1-2. 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(澁野拓郎・高田宜武・橋本和正・阿部寧・佐野光彦・川崎博之)」

(2) 口頭発表・ポスター発表

① 川崎博之, 佐野光彦, 澁野拓郎: 第2回東日本魚類生態研究会 (2002)

「ニセネッタイスズメダイの加入パターンと生息場所の構造との関係」

② 川崎博之, 佐野光彦, 澁野拓郎: 第13回魚類生態研究会 (2002)

「ニセネッタイスズメダイの加入・着底と生息場所の複雑さに関する予備実験」

③高田宜武、澁野拓郎、阿部寧、橋本和正: 日本生態学会第49回大会 (2002)

「サンゴ礁池において短期の濁度環境変化がサンゴ礁底棲動物群集に与える影響」

④高田宜武、澁野拓郎、阿部寧、橋本和正: 日本甲殻類学会第40回大会 (2002)

「サンゴ礁トラップに加入する2種のコシオリエビ類 (*Galathea affinis* と *Coralliogalathea humilis*) の個体群構造」

⑤高田宜武: 第147回京大大学生態学研究センターセミナー (2003)

「サンゴ礁池におけるサンゴ礁底の移動性動物群集の群集構造」

⑥高田宜武、澁野拓郎、阿部寧、橋本和正: 日本生態学会第50回大会 (2003)

「石垣島東海岸におけるサンゴ礁に加入するベントス群集の指標化」

⑦澁野拓郎・高田宜武・藤岡義三・大葉英雄・阿部寧・橋本和正・越智晴基: 第14回魚類生態研究会 (2003)

「石垣島のスズメダイ科魚類群集組成と指標化の試み」

⑧澁野拓郎・高田宜武・藤岡義三・大葉英雄・阿部寧・橋本和正: 日本生態学会 (2003)

「石垣島サンゴ礁池内のスズメダイ科魚類群集組成とその指標化」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

人工礁を設置する事によって天然稚魚の加入量を増加させ、スズメダイ科魚類を含む多くのサンゴ礁魚類群集の維持・回復をはかろうとする時には、大型の人工礁を設置するのではなく、小型でも複雑な構造を持った人工礁を使用する方が適切であることがわかった。

ベントス群集組成を指標化する方法を確立した。今後は、サンゴ礁の生物群集組成を評価する方法として、サンゴ等と共にベントス群集を用いる事で、複眼的でよりきめ細かなサンゴ礁環境のモニタリングが可能となった。

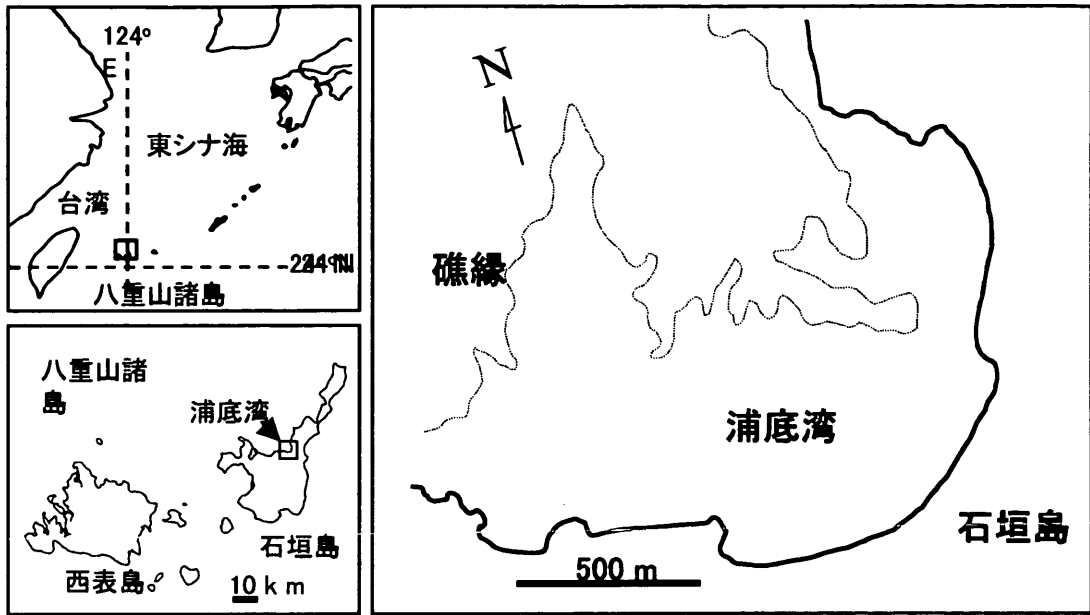


図1. 調査地の石垣島浦底湾。

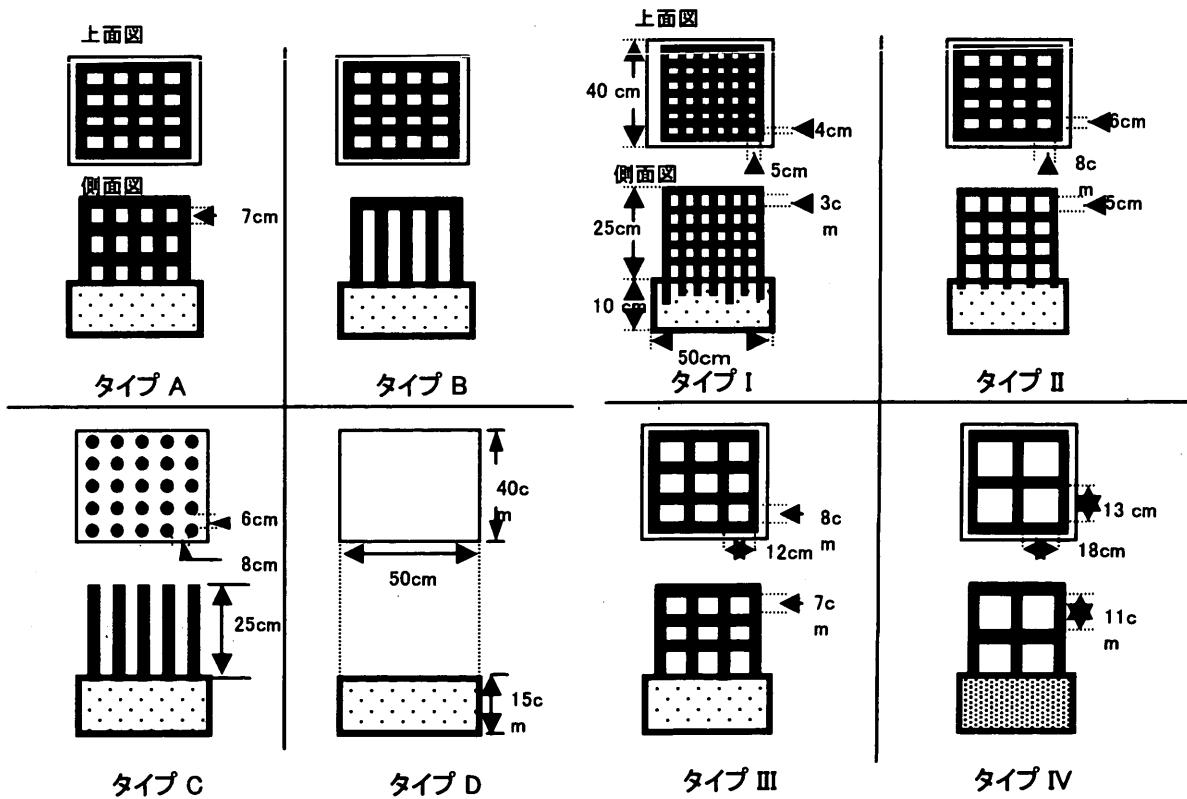


図2. 実験1で用いた、水平方向と鉛直方向の枝構造が異なる小型人工礁 (タイプA-D)。

図3. 実験2で用いた、枝間隔の異なる小型人工礁 (タイプI-IV)。

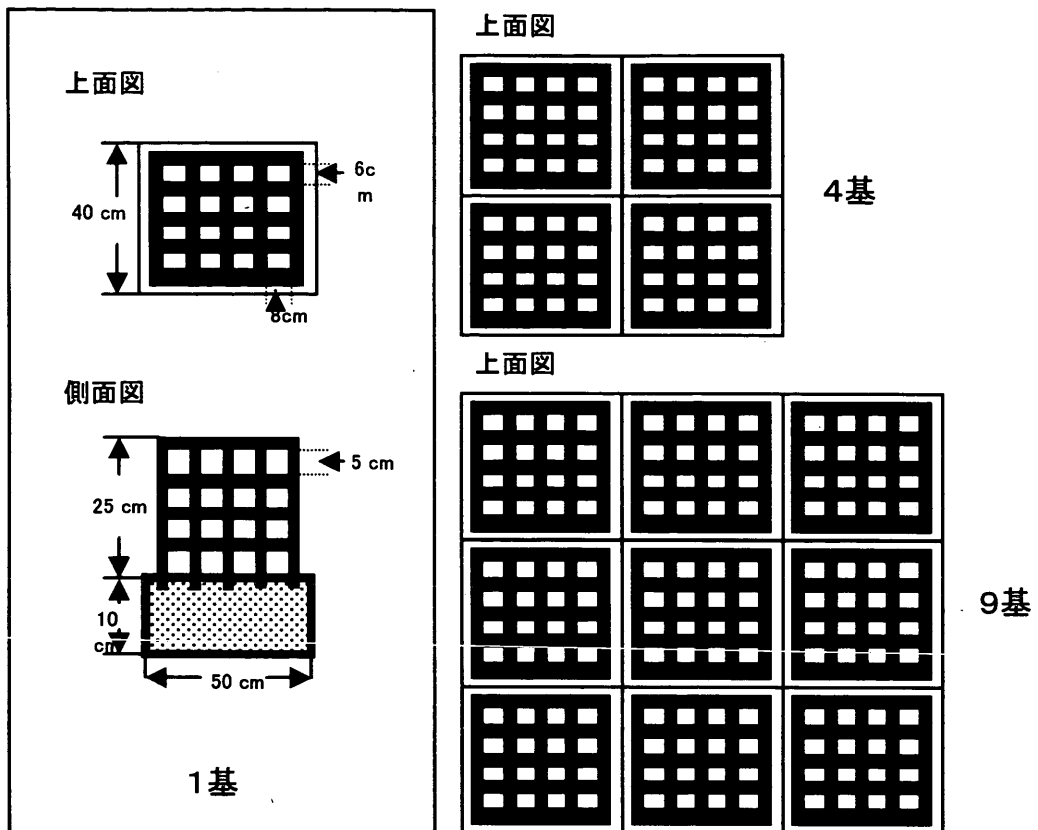


図4. 実験3で用いた、大きさが異なる人工礁。同じ構造の小型人工礁(実験2のタイプII)を、1基、4基、9基それぞれまとめて設置し、3つの大きさが異なる人工礁を作った。

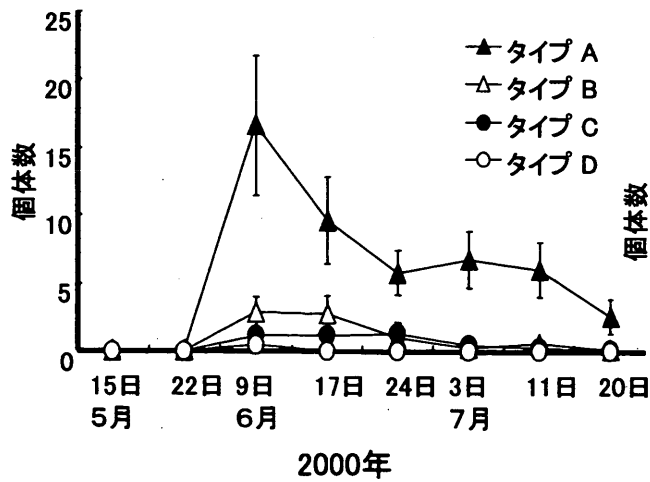


図5. 実験1において、4タイプ(A-D)の人工礁に出現したニセネッタイスズメダイ稚魚の個体数。人工礁あたりの平均値(n=7)と標準誤差(縦線)で示す。

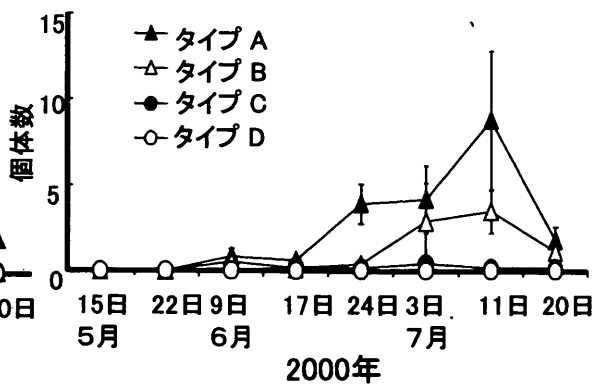


図6. 実験1において、4タイプ(A-D)の人工礁に出現したニセネッタイスズメダイ以外のスズメダイ科稚魚10種の個体数。人工礁あたりの平均値(n=7)と標準誤差(縦線)で示す。

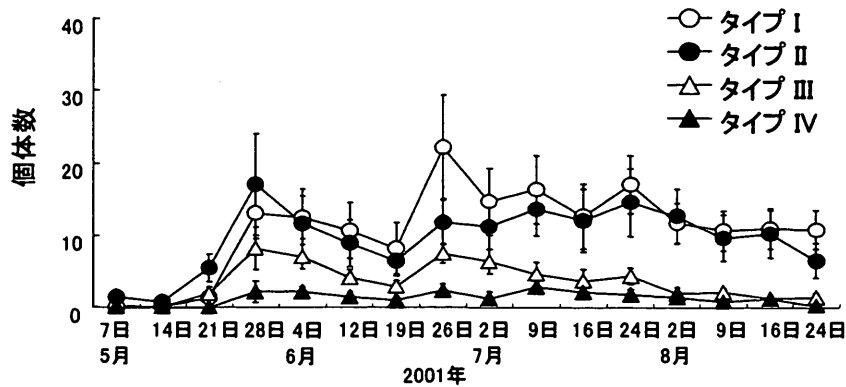


図7. 実験2において、4タイプ（I－IV）の人工礁に出現したニセネツタイスズメダイ稚魚の個体数。人工礁あたりの平均値（ $n = 7$ ）と標準誤差（縦線）で示す。

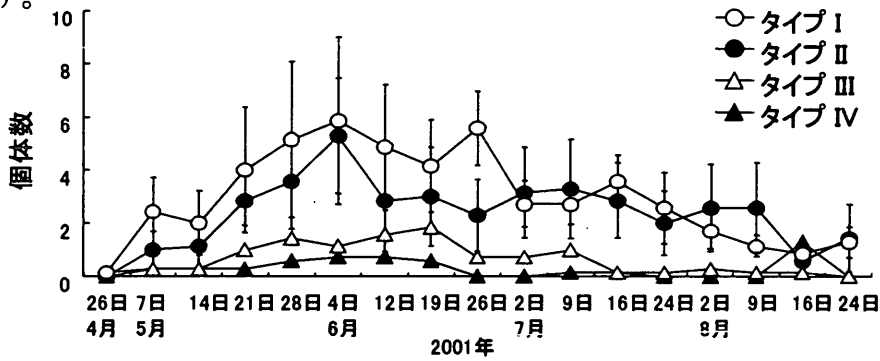


図8. 実験2において、4タイプ（I－IV）の人工礁に出現したニセネツタイスズメダイ以外のスズメダイ科稚魚15種の個体数。人工礁あたりの平均値（ $n = 7$ ）と標準誤差（縦線）で示す。

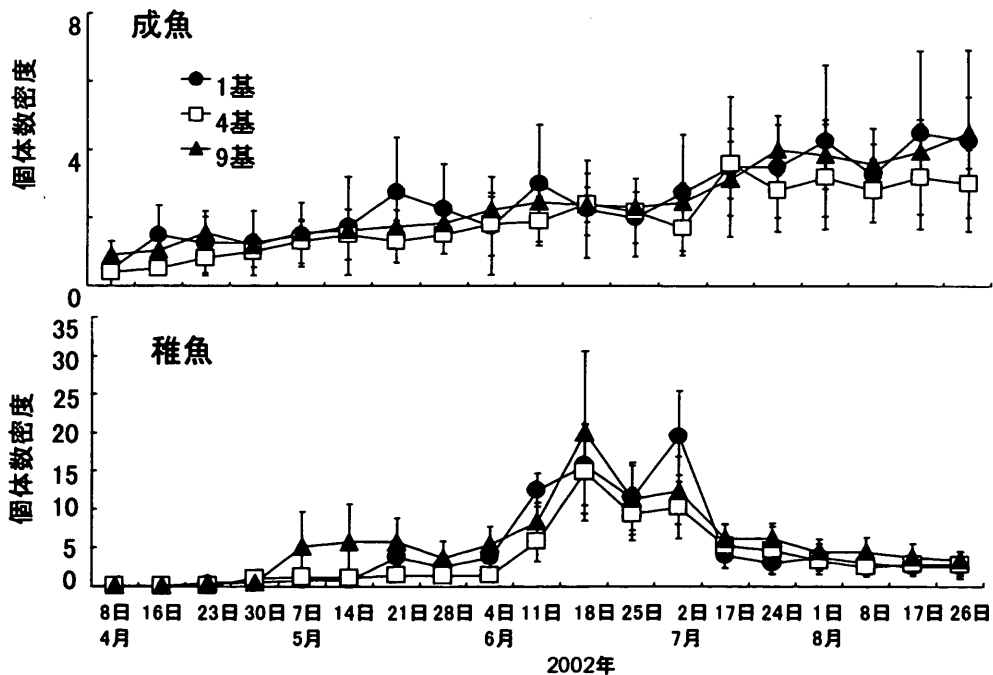


図9. 実験3において、3つの大きさの異なる人工礁に出現したスズメダイ科成魚と稚魚の個体数密度。人工礁あたりの平均値（ $n = 4$ ）と標準誤差（縦線）で示す。

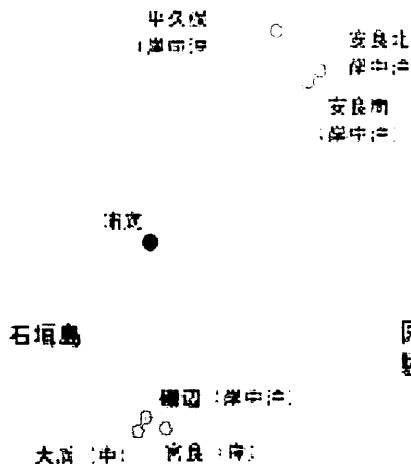


図10 調査地点。実験1～5は満底湾で、実験6は他の14地点で行った。

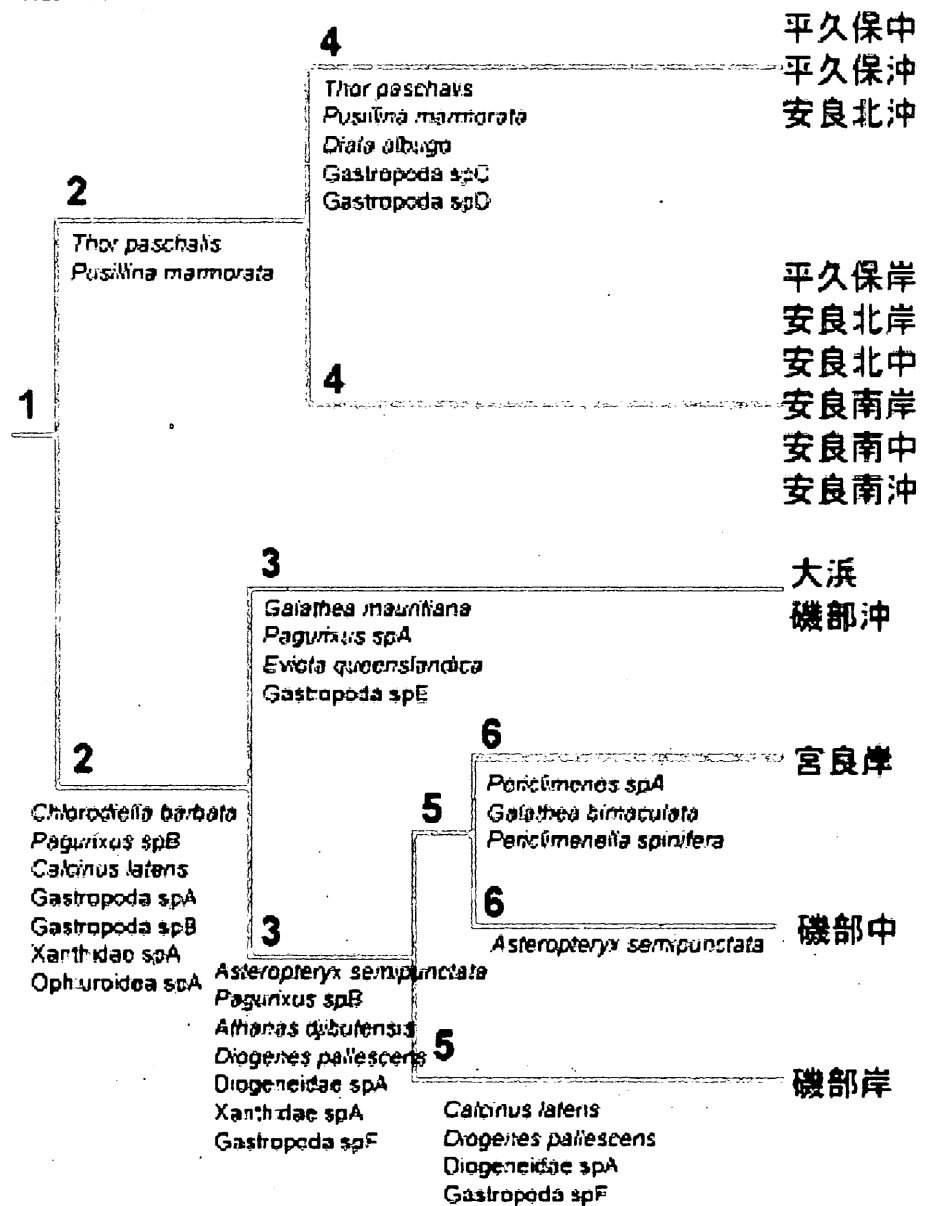


図11 K means法による石垣島東部海岸14地点の階層的なクラスター分割と、その分割群を代表する指標種。指標種はIndVal法を用いて階層ごとに抽出した。

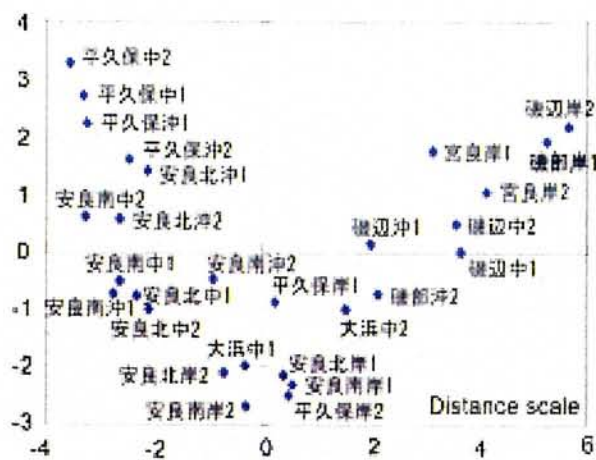


図12 出現個体数の多い17種を用いた主成分分析の結果。横軸を第1主成分、縦軸を第2主成分として、14地点28サンプルの配置をまで図示する。

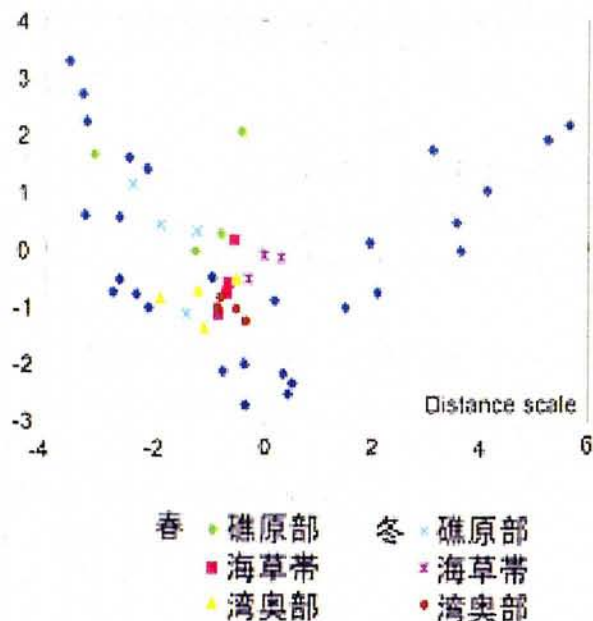


図13 石垣島東部海岸の主成分分析の計算式を浦底湾のデータに適用して、浦底湾のベントス群集組成の座標値を求めた。

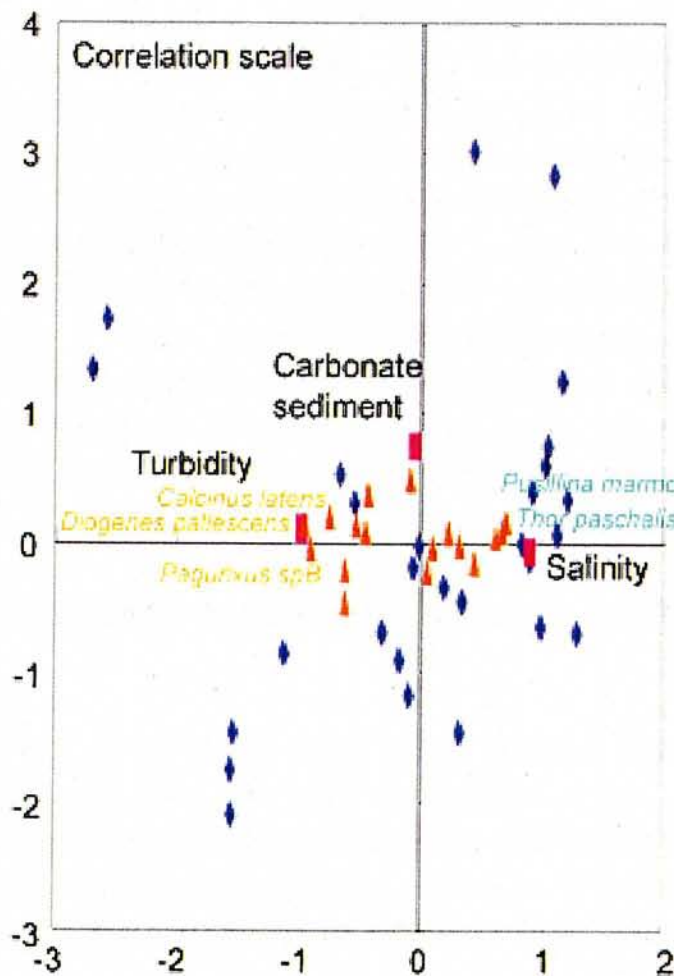


図14 石垣島東部海岸の環境データのうち、濁度、塩分、石灰質粒子の沈澱量を用いて、Redundancy Analysisを行った。結果をCorrelation scaleで、地点、種、環境データの同時プロットした。種と環境データの間の角度はそれぞれの相関を表す。