石垣島宮良湾の裾礁礁池における塊状ハマサンゴの分布特性

The distribution of massive *Porites* in the moat of Miyara fringing reef, Ishigaki Island, Japan

佐藤崇範¹・堀 信行¹・鈴木 淳²

T. Satoh¹, N. Hori¹ and A. Suzuki²

¹ 東京都立大学大学院理学研究科地理科学専攻

¹ Department of Geographical Science, Tokyo Metropolitan University

² 工業技術院地質調査所海洋地質部

² Marine Geology Department, Geological Survey of Japan,
Agency of Industrial Science and Technology

Abstract: The spatial distribution and morphologies of massive *Porites* colonies were investigated over a large area (1100m×200m) in the sandy moat of Miyara fringing reef, Ishigaki Island, Japan. Massive *Porites* (diameter>50cm) showed a preferential distribution for deeper depths (i.e., 2 to 3m). This distribution pattern suggested that massive *Porites* colonies were transported to deeper more stable habitats, as “mobile colonies”. Twenty-three percent of the colonies were mushroom shaped, with narrow stems attached to the substratum. Significant portions of mushroom shaped colonies (69%) were dislodged and 66% of them were tilted toward the dominant direction of water flow. The mushroom morphologies appear related to the high mobility of sandy sediments around the colonies, which interferes with ordinary growth of the colony base. Mobile colonies seems important for maintaining local coral populations in sandy habitats, which are often unsuitable habitats for larval settlement. In this case, physical environmental factors, such as water movement and micro-geomorphology, influence the distribution and population structure of coral communities in the sandy shallow habitats.

Key words: massive *Porites*, moat, mobile colony, water movement, micro-geomorphology

はじめに

砂質・砂礫質の堆積物で覆われている裾礁礁池は、固着性生物の着底基盤としては不安定であるため、造礁サンゴの被度は一般的に低い (Takahashi *et al.* 1985)。しかし、多くの礁池ではハマサンゴ属 (Genus *Porites*) などの大きな塊状群体が特徴的に観察される (中森 1991)。Highsmith (1980) は、塊状ハマサンゴが不安定な基盤上にもみられる理由として、破片化 (fragmentation) によって無性生殖的に加入し、生存する可能性が高いためであるとした。このことは、塊状ハマサンゴが幼生の加入に適さない海域における造礁サンゴ群集のパイオニア種となり、他の生物の幼生が着底可能な安定した基盤を提供することを示唆する (Highsmith 1980; Done and

Potts 1992)。また、不安定な砂質底に塊状ハマサンゴが加入し成長することは、群体の接地面において基盤を安定化させ、礁池内の大型構造物として堆積物の移動・再堆積に影響を及ぼすことから、サンゴ礁内の地形形成に果たす役割も大きいと考えられる (Hopley 1982)。そのため、塊状ハマサンゴ群の分布構造を把握することは、礁池内の微地形形成や群集形成を考える上でも重要である。

ところで、分布密度が低く、群体径が大きい礁池の塊状ハマサンゴの分布を定量的に把握するためには、低被度地域を広範囲にわたって調査する必要がある。現在、造礁サンゴ類の被度や群集構造の調査には、コドラート法やベルトトランセクト法などが多く用いられている。しかし、方形区の一辺、もしくはベルトの横幅は通常 1

～2 m程度であり、直径が数メートルに達するような群体について定量的なデータをえるためには有効な調査法ではない。また、サンゴ群集を広範囲にわたって定量的に把握する調査法は、大規模コドラート（10～50 m四方の方形区）を用いたもの（Fujioka 1999）、メジャーとコンパスを用いたマイクロアトールの分布調査（長谷川・長谷川 1998）などごく一部の研究で試みられているのみである。

そこで本研究では、礁池内における造礁サンゴの分布と微地形との関係を把握するための第一段階として、礁池における塊状ハマサンゴの分布を広範囲において調査し、その分布特性と環境条件、特に微地形および海水の流動との関わりを検討する。なお本研究では Done and Potts (1992) にならい、塊状の生活型を示すコブハマサンゴ (*Porites lutea*)、ハマサンゴ (*P. australiensis*)、フカアナハマサンゴ (*P. lobata*) の3種を一括して「塊状ハマサンゴ」とよび、一つの分類群として取り扱う。

調査地域の概要

本研究は、琉球列島南西部に位置する石垣島の宮良湾東岸（図1a）の礁池を対象として行なわれた。石垣島東海岸には、幅数百メートルの裾礁が連続的に発達しており、本調査地域はその裾礁の南端部に位置する。宮良湾には、於茂登山系にその源を発する宮良川（流域面積：35.4km² 流路延長：12km）が北側から流入しており、河口から南西方向に通称「ミヤラグチ」と呼ばれる水道が形成されている。

方 法

地形区分

現地調査では、海岸線に直行する測線を設け、距離25 m間隔で地形断面測量を行った。また地形の起伏が著しい地点においても随時測深を行った。測点の深度は石垣港の潮候曲線を参考に時刻補正を行い、平均海面からの水深を求めた。さらに地形断面測量の結果と国土地理院1995年撮影のカラー空中写真（縮尺1万分の1）（図1b）の判読結果から、調査地域のサンゴ礁微地形分類図を作成した（図2a）。

塊状ハマサンゴの分布・外形調査

予察調査において、塊状ハマサンゴは礁池の中でも特に海岸に近い部分に比較的多くみられ、外洋側ではほとんど観察されなかった。そこで分布調査は、海岸から沖合にかけて塊状ハマサンゴがほとんど確認できなくなる範囲、すなわち海岸線から沖合方向に約200～300 m、平行方向に約1,100 mの範囲で行った（図1b）。調査時における海域の水平方向の透視度に応じた間隔（約10～15 m）で調査区内を海岸線と直交方向に往復し、塊状ハマサンゴを探索した。群体の位置測量および生育状況の調査は、長径50 cm以上の群体を対象として行い、長径50 cm未満の群体については、目視観察により分布状況等を随時記録するにとどめた。群体の位置測量には、光学距離測定器（LYTESPEED 800, BUSHNELL; 測定誤差±1 m）と

図1 (a) 研究対象地域（琉球列島、石垣島）および (b) 宮良湾の空中写真（国土地理院1995年撮影）直線X-X₁-X₂は地形断面（図2b）の測線を示す

Fig. 1. (a) Map of the Ishigaki Island, the Ryukyus, Japan. (b) Aerial photograph of Miyara Bay taken in 1995. Line X-X₁-X₂ show the transect of micro-geomorphological profile shown in Fig.2b

コンパス（測定誤差±0.5°）を用いた。

群体の生育状況は大きさ・外形・接地状態について調査し、各項目を三段階に区分して記録した。大きさについては、小型（長径50～99cm）・中型（長径100～199cm）・大型（長径200cm以上）、外形については半球型・きのこ型・その他、接地状態については固着・傾倒・反転のカテゴリをそれぞれ設定した。外形における「きのこ型」とは、群体下部の径が最大径より明らかに小さく、「きの

図2 (a) 宮良湾礁池の微地形分類および (b) 裾礁の地形断面
 1: 陸域 2: 海浜 3: 後方礁原 4: 礁池 (I: 礁池深部、II: 礁池浅部) 5: 漂砂痕
 6: 塩分計および流向・流速計の設置地点

Fig. 2. (a) Microgeomorphological map of the moat. (b) Topographical profile along the transect of fringing reef in Miyara Bay, Ishigaki Island.

1: Land, 2: beach, 3: inner reef flat, 4: moat (I: deeper moat, II: shallower moat), 5: sandy stripes, 6: observation points where we set salinometers and current meter.

こ」に類似した外形を持つ群体を指す。これは、Done and Potts (1992) による「live hemisphere on dead inverted cone」および「overhanging “skirts”」をもつ群体に相当する。また「その他」とは、サンゴ組織が残存するものの骨格の侵食が著しく、群体が変形しているため、「半球型」もしくは「きのこ型」に分類できない群体の総称として設けたカテゴリである。

流向・流速および塩分調査

1999年8月12日から8月20日までの9日間、3つの観測点 (P1, P2, P3; 図2a) において、流向・流速および塩分を観測した。調査域のほぼ中央に位置するP2には、自記録式の流向流速計 (ACM-8 M, アレック電子) と水温塩分計 (ACT-16K, アレック電子) を設置し、調査域縁辺部のP1およびP3には、小型水温塩分計 (MDS-CT, アレック電子) を設置して、それぞれ10分間隔で計測を行った。さらにこの計測結果と石垣島気象台 (石垣市登野城) における降水量および風向・風速の観測結果を比較し、礁池内の海水流動との関係を検討した。

また礁池内の海水流動と塊状ハマサンゴとの関係を把握するため、調査域全体から無作為に選んだ半球型の41群体について、周囲に集積する砂質堆積物の堆積方向を

記録した。

結果

地形区分

空中写真判読および現地での地形断面測量の結果から、調査地域の裾礁を陸側から海浜、後方礁原、礁池、礁原に区分し、さらに礁池を礁池深部と礁池浅部に細分した (図2)。これらの微地形は海岸線とほぼ平行に帯状の配列をなしていた。礁原は頂面がほぼ低潮位の高さとなる平坦面であり、礁池を隔てて海浜の沖側に広がる同様の地形を後方礁原とした。礁池深部は、後方礁原から沖側に続く起伏の少ない凹地形で、水深は約2~2.5mである。礁石灰岩上に主に砂質堆積物が広がり、部分的に石灰岩基盤の露出もみられた。一方礁池浅部は、礁池深部から沖側に続く緩やかに起伏する地形であり、水深は約1~2mである。沖合に向かうにつれて堆積物が砂質から砂礫質へと変化し、調査時 (1998年2月) には海藻、特にホンダワラ類 (*Sargassum* spp.) が多くみられた。

塊状ハマサンゴの分布および外形

調査範囲 (面積約147,200m²) において確認された長径

図3 塊状ハマサンゴの分布

Fig. 3. Distribution of massive *Porites* in the moat.

50cm以上（最大約350cm）の塊状ハマサンゴは、283群体であった（図3）。平面図化した全群体の分布パターンを明らかにするため、各群体を十分に小さな点と仮定し、最近接群体までの距離についてランダム分布での期待頻度と実際の分布の観測頻度の有意差を検定した。その結果、ランダム分布は棄却され（ $\chi^2=52354$; $df=50$, $p<0.001$ ）、実際の分布は集中的であると判断された。また最近接群体までの平均距離に対する分散の割合は6.81であり、高い集中分布であるといえる。分布の集中域は、中央北東部と北東部および南西部の後方礁原よりにあると考えられた（図3）。そこで、調査区内の分布が集中していると思われる地域を含む8地点において、20m四方の方形区内にみられる塊状ハマサンゴ群体の数と方形区の水深を比較した（図4b）。その結果、水深の深い地域ほど群体密度が高い傾向がみられ、水深と群体数の間に有意な正の相関関係が示された（ $r_s=0.51$, $n=32$, $p<0.01$ ）。

外形に関してしてみると、一番多いのは半球型の群体（図5a）で約51%、きのこ型の群体（図5b）は約23%であった。きのこ型群体は、基盤と接する部分が上部より小さい不安定な形であり、基盤から離脱して転倒しやすいと考えられたため、きのこ型群体の接地状態を比較した。きのこ型で転倒している群体の割合は、きのこ型群体全体の約69%であり、そのうち傾倒している群体が89%、反転している群体が11%であった。傾倒している群体について、基部からみた本来頂部にあたる部分が向いている方向を群体の倒れている方向として計測すると、倒れている方向は南東、南、東の順に多く、全体の66%の群体が南東～南であった（図6a）。

長径50cm未満の群体についての目視観察から、群体下部が砂質堆積物に埋没しているものの、基盤に固着しておらず簡単に動かすことができる未固着群体がいくつかみとめられた（図5c）。補足的に調査範囲内の3地点において長径10～50cm未満のハマサンゴ属（塊状ハマサンゴ以外の種も含む）の非固着群体数を計測したところ、0.5

群体/㎡であった。

流向・流速および塩分の経時変化

調査地域の中央付近（P2; 図2a）における流向・流速の連続観測から、大潮～中潮にかけて水道方向（北西）への一定した流れが観測され、特に下げ潮時に強まる（30cm/s以上）傾向がみられた（図7）。中潮～小潮に向かうに従い、流向は不安定となり流速も遅くなった。しかし熱帯低気圧が接近した8月20日には、小潮にも関わらず北西方向への強い流れ（最大98cm/s）が確認された。観測期間中、気象台の記録では風向が南西～南東で安定し、夏季季節風の影響下にあった。また熱帯低気圧が接近した8月20日以降、風向は南東となり風速も増加した。このように今回の調査からは風向・風速と、流向・流速に明瞭な対応関係は認められなかった。また群体の周囲に集積する砂質堆積物の堆積方向は、70%が北西であり（図6b）、傾倒したきのこ型群体が多く倒れている方向（図6a）と正反対の方向にあった。

水道からの距離が異なる3点（P1, P2, P3; 図2a）で塩分に大きな差異は認められなかったが、潮汐との関係から変化のピークがずれる傾向が見られた（図7）。塩分低下のピークはほぼ干潮時と一致し、最も水道から遠いP3から順にピークに達した。一方、塩分上昇のピークは満潮に近い上げ潮時とほぼ重なり、同様にP3から順にピークに達した。また、最も水道に近いP1において、13日の大潮の満潮（8時4分）直後の8時40分から約1時間30分、極端な塩分低下（33.2‰から26.4‰）がみられ、同時に水温の異常な上昇（28.3℃から40.2℃）も観測された。調査期間中、上げ潮時から満潮時にかけての数時間、宮良川起源と思われる濁水塊が調査範囲内に流入する様子が観察され、特に降雨時に顕著にみられた。なお、期間中1mm/h以上（最大10.5mm/h; 8月20日12:00）の降水は、8月12日8:00～11:00、17:00、13日4:00（1.5mm/h）、20日12:00、17:00、22:00～23:00に観測された。

図4 (a) 8調査地点の位置および (b) 各地点400m²内の群体数と水深の関係

Fig. 4. (a) Location of eight sites. (b) Relationship between number of colonies in an area of 400m² and depth among each site.

考 察

きのこ型群体の形成と海水の流動特性

本調査で確認された塊状ハマサンゴの約4分の1は、接地状態として不安定なきのこ型の外形を呈していた。これは、一定方向への顕著な流れがみられる砂質底の礁池に群体があることから、砂質堆積物の挙動との関係が大きいと推測される。本稿のきのこ型群体のように、群体の基底接地部の径が最大径よりも明らかに小さくなる現象は、塊状の *Diploria strigosa* (Hillis and Bythell 1998) やグレートバリアリーフにおける塊状ハマサンゴ (Done and Potts 1992) の例などが報告されており、その原因として、砂質堆積物による群体下部の埋積、ウニなどのグレーザーによる生物侵食、群体の巨大化による群体下部の自己遮蔽の影響が挙げられている。本稿では、直接的にきのこ型群体が形成される原因を明らかにすることはできなかったが、砂質堆積物の定常的な移動が考えられる地域での群体固着部全周のグレージングや、長径1~2m程度の群体で自己遮蔽による群体下部の著しい生長阻害が主要因となる可能性は低いと考えられる。

大潮の下げ潮時に特に顕著にみられる北西方向への一定した流れは、この海域の卓越流であると考えられる(図7)。卓越流は空中写真から確認された漂砂痕(図2a)と一致し、他の裾礁礁池で知られている海水の挙動とも類似する (Suhayda and Roberts 1977; 山内ほか 1989)。

これは上げ潮時に礁嶺を超えて流入してきた海水が、下げ潮時に礁池内を海岸線と平行に流れて礁嶺より低い水道から排出される動きである。下げ潮時以外にも、熱帯低気圧の接近時など外洋から激しい波によって礁池内へ海水が流入することで、卓越流向に通常以上の強い流れが生じている(図7)。このような海水流動の特性から、礁池底の砂質堆積物は潮汐に合わせて日常的に移動・堆積を繰り返す一方、台風など暴浪時には一斉に再移動し、堆積状況を大きく変化させると考えられる。塊状ハマサンゴは、定常的な砂質堆積物の堆積によって埋積されることで群体下部が部分死し、生存している上部のみが生長を続けることで群体下部より最大径が大きくなると推測される。これが暴浪時に堆積物を取り払われることで「きのこ」の柄の部分露出するのだろう。そのため、半球型にみえる群体でも、群体下部が堆積物に埋積されたままの潜在的なきのこ型群体はさらに多い可能性がある。またきのこ型群体の約70%が頂部を卓越流向にむけて倒れていたことは(図6a)、水中の構造物に対し砂質堆積物が卓越流の下流側に多く堆積しやすいこと(図6b)と関係があるだろう。砂の堆積が群体の卓越流下流側で進むことにより、群体下部の安定性に差が生じる。そのため暴浪時などに群体のバランスが崩れた場合、堆積物による支えのない卓越流上流側に群体が傾くものと考えられる。

図5 塊状ハマサンゴの外形と接地状態 (a) 半球型群体 (b) 転倒したきのこ型群体 (c) 群体下部が礁池底に埋没していた未固着の小群体

Fig. 5. Morphology and status of attachment of massive *Porites*. (a) Hemisphere shaped colony; (b) Mushroom shaped colony which turned sideways; (c) Small mobile colony which buried into the moat bottom.

図6 (a) 傾倒したきのこ型群体の倒れている方向および (b) 群体周辺に集積する砂質堆積物の堆積方向

Fig. 6. (a) Tilted direction rose depicts the dislodged mushroom shaped colonies. (b) Deposit direction rose depicts the sandy sediment around colonies.

図7 礁池における流向・流速、風向、塩分および計測器の水深

Fig. 7. Hourly vector diagram of current and wind, and time series of salinity and water depth at current meter.

塊状ハマサンゴの分布特性とその制限要因

本調査の塊状ハマサンゴは集中分布を示し、礁池内の水深が深い地域ほど分布密度は高くなる傾向を示した(図4b)。この傾向は、塊状ハマサンゴの加入が主に可動性群体(mobile colony)によるものであることを示唆すると考える。本調査域の礁池底はほぼ砂質であり、露出している基盤の面積は少ない。そのため、造礁サンゴの幼生着底基盤としては不安定な底質環境であり、幼生による新規加入は困難である。Highsmith (1980) は、エニウェトク環礁の砂質底の礁湖において、塊状ハマサンゴ群体の多くがより深くより波浪に遮蔽された安定性の高い地域に多くみられることを指摘し、破片化した塊状ハマサンゴが海水流動によって分散・加入したためと推測した。本研究の結果は、この推測を定量的に裏付けるものと考えられる。またこれは、恩田(1999)による琉球列島久高島の裾礁礁原における巨礫堆積物の分布調査から、暴浪時に縁脚から礁原に運び込まれた巨礫(塊状ハマサンゴの生組織が残存したものも含む)が、礁池のより深い地域に分布する傾向があることも整合的である。破片分散は、波浪などで比較的容易に壊れる枝状のミドリイシなどについて詳細な研究が行われている(Kobayashi 1984; Smith and Hughes 1999)。しかし、塊状のハマサンゴなどでも、頻度は低いものの群体の一部もしくは全体が離脱することが報告されている(DeVantier and Endean 1989; Massel and Done 1993)。本調査においても、きのこ型群体の転倒(図5b)や長径50cm未満で基盤に固着していない群体(図5c)がみられ、塊状群体であっても全てが終始安定して固着・成長していないことは明らかである。これは、塊状ハマサンゴの成長軸の解析から、いくつかの群体で成長軸が途中大きく変化していることから間接的に示唆されるだろう(斎藤 1994)。破片化による加入は、破片のサイズが大きく、かつ立体的なものが生存の可能性が高い(Highsmith 1982; Smith and Hughes 1999)。つまりミドリイシ枝の破片など小さく立体性に欠けるものは、砂質堆積物の上に安定することは難しく、埋没する可能性が大きい一方、塊状群体の破片は、大きく立体的なサンゴ片となる潜在性をもつため、生存する可能性が相対的に高くなる。よって、本調査域のように海水流動により堆積物が移動しやすい海域では、塊状ハマサンゴが特徴的にみられると考えられる。なお、このような海水流動によって移動できる可動性群体には、単に群体の一部が破片化したサンゴ片だけではなく、破片化した後、固着する前に可動状態で何度も成長軸を変化させ、全体的に生サンゴ組織で覆われたcoralliths (Glynn 1974; Scoffin *et al.* 1985; Riegl *et al.* 1996)や基盤から離脱した群体全体、未固結の礫等に着底した幼生が成長したものなども含まれるであろう。

本調査域は赤土流出の顕著である宮良川に隣接するため(沖縄県 1994)、河川水の礁池内への流入が塊状ハマサンゴの分布に影響を及ぼす可能性も考えられた。しかし、河川水流入の指標となる塩分の計測結果からは、宮良川の影響による礁池内の塩分の慢性的な低下や、河口からの距離に対応した塩分の明らかな勾配は認められない(図7)。また宮良川からの距離と塊状ハマサンゴの分布にも明瞭な関係はみられず(図3)、本調査の空間スケ-

ルでは、河川の影響が塊状ハマサンゴの分布を規定する主要因とは考えにくい。一方、潮汐と同調する塩分の変動に時間的なずれが観測され、水道に最も遠い卓越流の上流側から先ピークに達する傾向がみられた。本調査域の北東部にあたる白保海域の礁池における塩分変化の観測から、礁池でみられる顕著な塩分低下は海岸から陸水が流入することが原因と考えられている(Kawahata *et al.* 2000)。下げ潮時に陸域から流入する淡水、上げ潮時に外洋から流入する海水が、卓越流によって水道方向に移動する結果としてピークのずれが生じると考えられる。しかし、現時点では礁池内のサンゴ群に対して、海岸から流入する陸水の影響を考察する有効なデータはなく、今後さらに検討する必要があるだろう。

謝 辞

本研究に際し、琉球大学のRobert van Woesik先生には造礁サンゴの生態に関する貴重な情報およびご助言を頂いた。また国土館大学の長谷川均先生、駒沢大学の市川清士先生には石垣島のサンゴ礁に関して有益な助言を頂いた。現地調査に際し、東京都立大学大学院生の室伏多門(現(財)日本システム開発研究所)、丸岡英生(現(財)自然環境研究センター)、琉球大学学部生の山本美和(当時)、駒沢大学学部生の工藤聖子各氏のご協力を得た。東京都立大学の岡秀一先生、高岡貞夫先生(現専修大学)には終始ご指導頂いた。また恩田真理子氏には、本稿作成にあたり数多く的重要なご助言・ご協力を頂いた。記してお礼申し上げます。本稿は東京都立大学大学院に提出した佐藤崇範の修士論文(1999 MS)に、その後の調査結果を加えたものである。本研究の一部は日本サンゴ礁学会第2回大会において発表した。

引用文献

- DeVantier LM, Endean R (1989) Observations of colony fission following ledge formation in massive reef corals of the genus *Porites*. *Mar Ecol Prog Ser* 58: 191-195
- Done TJ, Potts DC (1992) Influences of habitat and natural disturbances on contributions of massive *Porites* corals to reef communities. *Mar Biol* 114: 479-493
- Fujioka Y (1999) Mass destruction of the hermatypic corals during a bleaching event in Ishigaki Island, southwestern Japan. *Galaxea, JCRS* 1: 41-50
- Glynn PW (1974) Rolling stones among the Scleractinia: mobile coralliths in the Gulf of Panama. *Proc 2nd Int Coral Reef Symp* 2: 183-198
- 長谷川 均・長谷川明雄(1998) 琉球列島石垣島白保サンゴ礁でみられるマイクロアトールの特徴—米原サンゴ礁との比較をもとに—。国土館大学地理学報告 7: 1-24
- Highsmith RC (1980) Passive colonization and asexual colony multiplication in the massive coral *Porites lutea* Milne Edwards & Haime. *J Exp Mar Biol Ecol* 47: 55-67
- Highsmith RC (1982) Reproduction by fragmentation in corals. *Mar Ecol Prog Ser* 7: 207-226
- Hillis ZM, Bythell JC (1998) "Keep up or give up": hurricanes promote coral survival by interrupting

- burial from sediment accumulation. *Coral Reefs* 17: 262
- Hopley D (1982) The geomorphology of the Great Barrier Reef: quaternary development of coral reefs. Wiley-Interscience, New York
- Kawahata H, Yukino I, Suzuki A (2000) Terrestrial influences on the Shiraho fringing reef, Ishigaki Island, Japan: high carbon input relative to phosphate. *Coral Reefs* 19: 172-178
- Kobayashi A (1984) Regeneration and regrowth of fragmented colonies of the hermatypic corals *Acropora formosa* and *Acropora nasuta*. *Galaxea* 3: 13-23
- Massel SR, Done TJ (1993) Effects of cyclone waves on massive coral assemblages on the Great Barrier Reef: meteorology, hydrodynamics and demography. *Coral Reefs* 12: 153-166
- 中森 亨 (1991) 沖縄県石垣島周辺海域および石西礁湖の造礁サンゴ群集。目崎茂和編『石垣島のサンゴ礁環境』世界自然保護基金日本委員会、57-72
- 沖縄県 (1994) 『沿岸海域実態調査 (宮古島、石垣島及び西表島並びに周辺離島)』沖縄県
- 恩田真理子 (1999) 琉球列島久高島裾礁における巨礫堆積物の分布とその地形形成における役割。地理学評論 72A (11): 746-762
- Riegl B, Piller WE, Rasser M (1996) Rolling stones: first report of a free living *Acropora anthocercis* (Brook) from the Red Sea. *Coral Reefs* 15: 149-150
- 斎藤 出 (1994) インサンゴ骨格の密度模様と環境変動—琉球列島を中心にして—。三重大学大学院人文社会科学研究所修士論文
- Scoffin TP, Stoddart DR, Tudhope AW, Woodroffe C (1985) Rhodoliths and coralloliths of Muri Lagoon, Rarotonga, Cook Islands. *Coral Reefs* 4: 71-80
- Smith LD, Hughes TP (1999) An experimental assessment of survival, re-attachment and fecundity of coral fragments. *J Exp Mar Biol Ecol* 235: 147-164
- Suhayda JN, Roberts HH (1977) Wave action and sediment transport on fringing reefs. *Proc 3rd Int Coral Reef Symp*: 65-70
- Takahashi T, Koba M, Nakamori T (1985) Coral reefs of the Ryukyu Islands: Reef morphology and reef zonation. *Proc 5th Int Coral Reef Congr* 3: 211-216
- 山内秀夫・長谷川均・長澤良太 (1989) 石垣島吉原のサンゴ礁海岸における砂質堆積物分布について。沖縄地理 2: 1-12

(Date of acceptance: November 30, 2000)