

F-5 サンゴ礁生物多様性保全地域の選定に関する研究

(2) 保全すべきサンゴ礁環境の探索

① 保全すべきサンゴ礁の水質・光環境条件に関する研究

独立行政法人産業技術総合研究所

地質情報研究部門 物質循環研究グループ

鈴木 淳

<協力研究者>

東京大学 大学院新領域創成科学研究科環境学系

川幡徳高

琉球大学 熱帯生物圏研究センター

酒井一彦・森本直子・岩瀬晃啓

平成15～17年度合計予算額 11,196千円

(うち、平成17年度予算額 2,832千円)

〔要旨〕サンゴ礁生物多様性保全地域の選定に際して、サンゴ礁生態系の特徴である生物多様性を維持しうるサンゴ礁の環境構成要素の状態および広がりを考慮する必要がある。また、一旦設定された保全地域の長期的な環境管理のためには重要な環境指標の抽出と数値基準の導入が求められる。そこで本サブテーマでは、サンゴや藻類の分布や物質生産（群集代謝）に影響を与えると考えられる水質と光環境に注目し、光環境の支配要因である濁質挙動、それぞれの時空間パターンの把握と変動要因を明らかにするとともに、多様な生物群集を維持しうるサンゴ礁環境の数値基準及び指標の導入の可能性を探る。琉球列島石垣島周辺部の3つのサンゴ礁（宮良湾、シモビシ、カタグラー）について水質（水温、塩分、濁度、栄養塩）および炭酸系溶存成分のある瞬間における分布状況を捉えることを目的とした、いわゆる「スナップショット」観測を複数回実施し、生物群集の分布特性と海洋環境との比較、特に陸域の影響について検討が可能なデータセットを収集した。宮良湾に面したサンゴ礁内岸寄りでは塩分が外洋水よりも低下している様子が捉えられ、これは汀線付近からの陸水の流入によると考えられる。海水の各種栄養塩は岸部で高く、塩分と逆相関して、岸側から沖方向に向けて希釈されて行く様子が認められる。サンゴ礁における富栄養化の指標として、グレートバリアリーフやカリブ海の研究より、海水中クロロフィル濃度 $0.3\text{--}0.5\mu\text{g L}^{-1}$ 、溶存無機態窒素($\text{NH}_4+\text{NO}_3+\text{NO}_2$) $1\mu\text{M}$ 、リン濃度 $0.1\text{--}0.2\mu\text{M}$ がしきい値（閾値）になると提案されている¹⁾。この基準に比較すると、宮良湾の湾奥部は富栄養化レベルにあると考えられる一方、シモビシ、カタグラーではサンゴ礁海水の水質は閾値を下回って良好である。また、石西礁全域を対象とした水質調査を実施し、礁湖内では海水中クロロフィルや各種栄養塩濃度が外洋に比べて高いことを見出した。本研究による観測結果は、ベースラインデータとして今後の石西礁域の水質変化のモニタリングに有用であると考えられる。

〔キーワード〕サンゴ礁、水質、クロロフィル、富栄養化、栄養塩

1. はじめに

高い生産性と生物多様性を有しているサンゴ礁は、その地域に食糧生産や観光の場を提供するだけでなく、海岸線保護にも利益をもたらす極めて重要なものである。しかし、豊かなサンゴ礁があるとされている東南アジアをはじめ、世界的な規模でサンゴ礁の減少・衰退が進んでおり、今後20年以内には全世界の30%のサンゴ礁が劣化するとも言われている。このため、サンゴ礁の保全は国際的にも重要な課題となっており、自国内にサンゴ礁を有する日本にとっても緊急性が高い。優れた自然景観を保護するという現行の自然公園制度は、限られた海域を保全対象として一定の効果をあげてきた。しかし、サンゴ礁生態系は陸域や外洋も含めた広域な物質循環によって維持されていることから、サンゴ礁での保全地域選定に当たっては、現在の景観も重要であるが、サンゴ礁生態系の特徴である生物多様性を維持しうるサンゴ礁の環境構成要素、広がり、海域環境要因等に基づいて決定する必要がある。今までのサンゴ礁域での研究の多くは、各生物群集の分類や分布様式について、または地球温暖化と関連した「サンゴ礁は二酸化炭素の吸収源か、放出源か」といったことに焦点が置かれてきた。しかしながら、サンゴ礁の保全を目的に生物的・非生物的環境の両方を対象にした統合的な研究は極めて少なかった。サンゴ礁の保全のためには、守るべき重要な地点・海域を明確にすることが求められる。本研究は、世界的にも貴重なサンゴ礁である沖縄県八重山諸島において、サンゴ、魚類、海藻といった主要なサンゴ礁生物群集と、それらの生息環境要因を同時に調査する野外合同調査を実施し、サンゴ礁生物群集と環境要因との関係を解明し、サンゴ礁生物多様性保全地域選定に必要な科学的資料を得ることを目的とする。本研究の成果は、サンゴ礁生物多様性保全地域を選定するに当たって考慮しなければならない要因に関しての科学的資料として利用される。

2. 研究目的

本サブサブテーマでは、サンゴ礁保全地域を選定するにあたって、水質および海水の流動特性の観点から生物多様性構造を維持しうる環境の必要条件について、琉球列島石垣島近傍のサンゴ礁を対象に検討を行う(図1)。特に、サンゴや藻類の分布や物質生産(群集代謝)にも影響を与えると考えられる光環境に注目し、光環境の支配要因である赤土由来と、植物プランクトン由来の懸濁物に大別し、それぞれの時空間パターンの把握と変動要因を明らかにする。陸域からの栄養塩・赤土の流入についても検討を行うと同時に、流動観測等による海水交換現象の把握や、微小スケールでの乱流特性の観測を通じた海中懸濁物の沈降・堆積・再懸濁過程について検討するサブサブテーマ

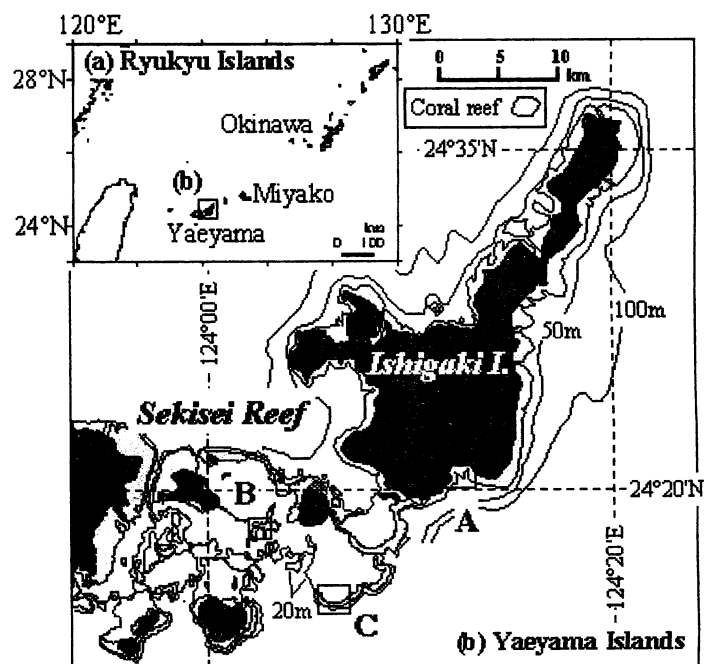


図1 琉球列島八重山諸島の石垣島とその南西部に分布する石西礁。A: 宮良湾、B: シモビシ、C: カタグワ。

(2)– ②と連携して、総合的なサンゴ礁環境の把握に努める。また、海水炭酸系の計測により、群集代謝状態を評価し、サンゴ礁環境評価の一指標とする。各年度あたり一ヶ所のサンゴ礁を対象に水質等の環境計測を行って、その維持機構を解明すると共に、外洋の影響が強い石西礁湖についても水質・環境データを計測して比較検討を行う。これらの海洋環境観測は生物群集調査地点において実施し、生物群集の生育特性と海洋環境との比較検討が可能なデータセットの収集に努める。研究終了時には、多様な生物群集を維持しうるサンゴ礁環境について、数値基準あるいは指標の導入の可能性を探ると共に、サンゴ礁環境の保全のための具体的な施策提言を目指す。

3. 研究方法

琉球列島石垣島周辺部の3つのサンゴ礁（宮良湾、シモビシ、カタグラー）について水質（水温、塩分、濁度、栄養塩）および炭酸系溶存成分のある瞬間における分布状況を捉えることを目的とした採水調査を実施した（図1）。観測および分析を行った項目は、水温、塩分、海水の炭酸系（pH、全アルカリ度）、懸濁物濃度（SS）、栄養塩（ $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ）およびクロロフィル a 濃度である。海水の炭酸系の計測は、サンゴ礁生物群集の有機炭素・無機炭素（炭酸塩）生産についての情報を得るために実施した。採水の計画立案と実施に際しては、以下の点に注意を払った。

- ・採水は1隻の調査船で行うものの、満潮を挟む約2時間以内に終了するように努めた。
- ・採水地点は、対象とするサンゴ礁全体の水質を把握するために、基本的に格子点様の配置（経緯度0.1分間隔=約185 m）とし、また、各生物地形区が含まれるように留意した。

水温は、バケツによる採水直後に温度計によって測定した。濁度および塩分測定用の試料はポリエチレンボトルに採取した。海水の濁度の測定には、Hach社の携帯用2100P型濁度計を用いて、採水後数時間以内に行った。塩分は、採水試料を実験室に持ち帰り、電気伝導度式塩分計（Model Autolab, YeoKal社製）により測定した。海水のpHはSWS標準液を用いて電極法によった。海水の全アルカリ度は滴定法により測定した。クロロフィル a 濃度は褐色のポリエチレンボトルに採取した海水0.5–1LをGF/Fフィルタを用いてろ過し、DMFによる抽出を行って蛍光光度計にて定量した。懸濁物濃度はろ過法による。また、2001年から2002年に実施した調査結果も併せて解析した。

石西礁を対象とした主たる広域観測は、2003年9月および2004年9月に実施し

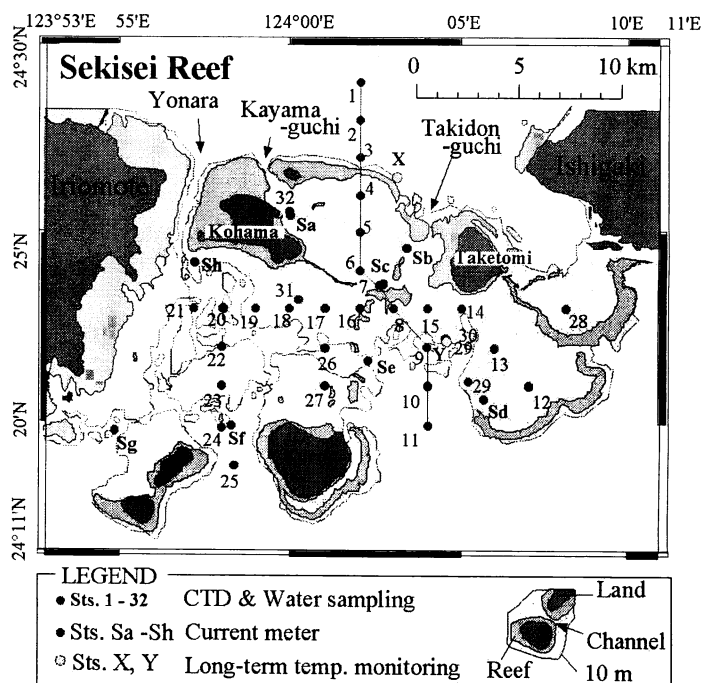


図2 八重山諸島の石西礁。石垣島と西表島の上に位置するサンゴ礁複合体は、一般に「石西礁湖」あるいは「石西礁」と呼ばれる。St. 1–32は採水地点、St. Sa–Shは流速計設置点、St. X, Yは長期の水温設置点を示す。

た(図2)。ここでは、主に2003年9月に実施した観測結果について報告する。石西礁のほぼ全域に配置された採水点にて、水温、塩分、海水の炭酸系(pH、全アルカリ度)、懸濁物濃度(SS)、栄養塩($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$)およびクロロフィルa濃度を測定した。海水の炭酸系の計測は、サンゴ礁生物群集の有機炭素・無機炭素(炭酸塩)生産についての情報を得るために実施した。なお、石西礁は東西およそ20kmにわたり、宮良湾など石垣島周囲の裾礁のように短時間の採水で全体をカバーすることができない。そこで、数日に渡って採水を行った。

4. 結果・考察

(1) 宮良湾サンゴ礁の水質環境について

2003年6月11日午後の満潮時に宮良湾のサンゴ礁(図3)において実施した表層採水の結果を図2に示す。水温分布は、日射によって浅いサンゴ礁の海水が暖められている様子を示しており、特に汀線付近で上昇効果が顕著なことがわかる。宮良湾に面した3つのサンゴ礁内岸寄りでは塩分が外洋水よりも低下している様子が捉えられているが、この時期は河川流量が少ない時期であり、塩分の低下は専ら汀線付近からの陸水の流入によると考えられる。各種栄養塩の濃度は海水の塩分と逆相関傾向を示し(図3)、岸側から沖方向に向けて希釈されて行く様子が認められる。これは陸水がサンゴ礁にもたらされる栄養塩の供給源になっていることを示す。宮良湾の湾奥部はかなりの富栄養化レ

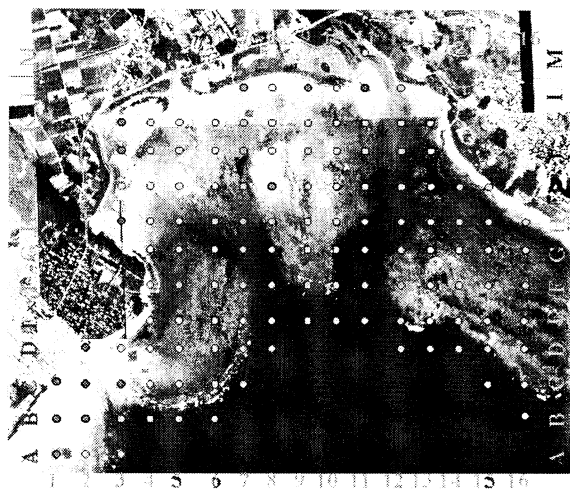


図3 石垣島南東部に位置する宮良湾のサンゴ礁。東から、宮良、磯辺、大浜の3つの集落に囲まれる。宮良湾には、宮良川および磯辺川が流入しており、サンゴ礁は、河口から伸びる水路(チャンネル)によって、3つに分かれている。

ベルにあると考えられる一方、外洋寄りのサンゴ礁の水質は外洋水の値と大きくは変わらない。海水の濁度も岸部で高く、塩分と逆相関している様子がみられるが、これは陸から濁質がもたらされているのではなく、海岸付近の海水の動揺によって堆積物中の泥質成分が再懸濁することによると考えている(サブサブテーマ(2)-②参照)²⁾。

(2) シモビシの水質環境について

石垣島東南部に位置する宮良湾のサンゴ礁は、陸域影響を強く受けている箇所と考えられるのに対し、石西礁のほぼ中央部に位置するシモビシは陸域からの影響が比較的軽微なサンゴ礁健全域の例として、検討を行った(図6)。サンゴ、魚類、海藻といった主要なサンゴ礁生物群集については、63地点で詳細な分布調査が実施された(サブテーマ(1)参照)。

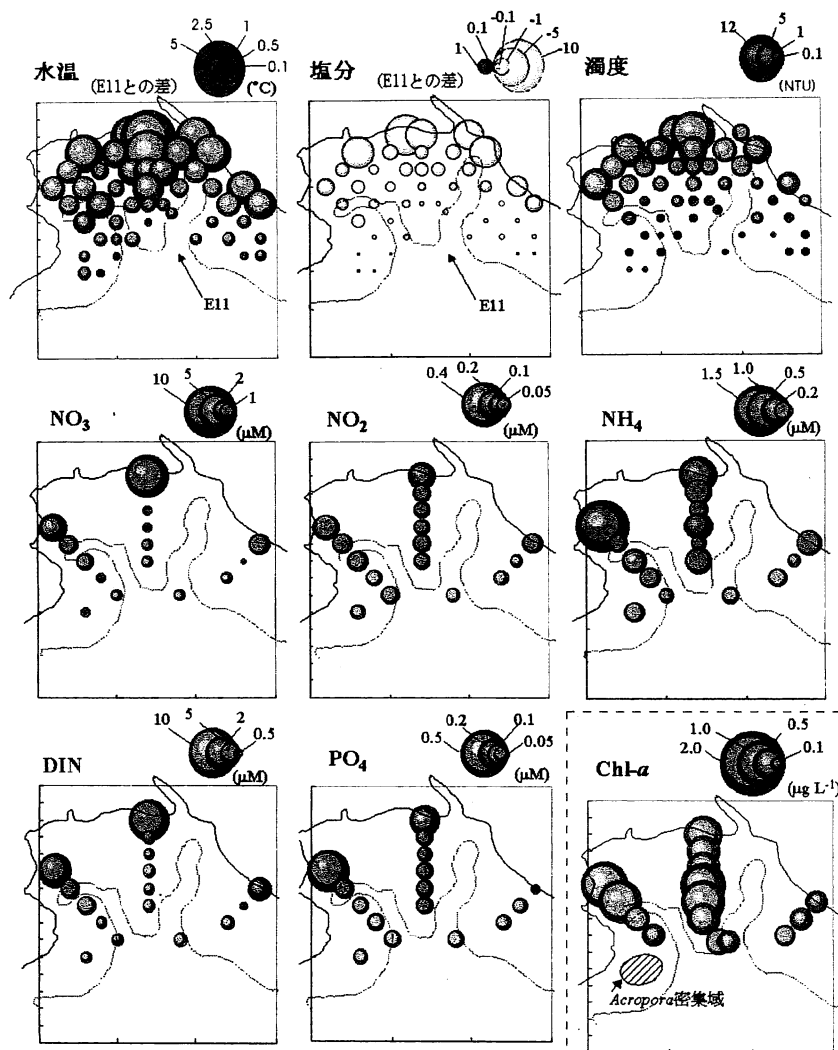


図4 宮良湾のサンゴ礁における水温、塩分、濁度、および各種栄養塩濃度の空間分布。2003年6月11日満潮時の表層採水の結果。水温と塩分は外洋のSt. E11の値からの偏差を示した。溶存無機態窒素は、硝酸態、亜硝酸態およびアンモニア態窒素の総和 ($\text{DIN} = \text{NH}_4 + \text{NO}_3 + \text{NO}_2$)。右下のクロロフィルa濃度の分布は2003年9月19日満潮時に観測されたもの。大浜集落地先に分布する枝状Acropora属の密集域を併せて示した。

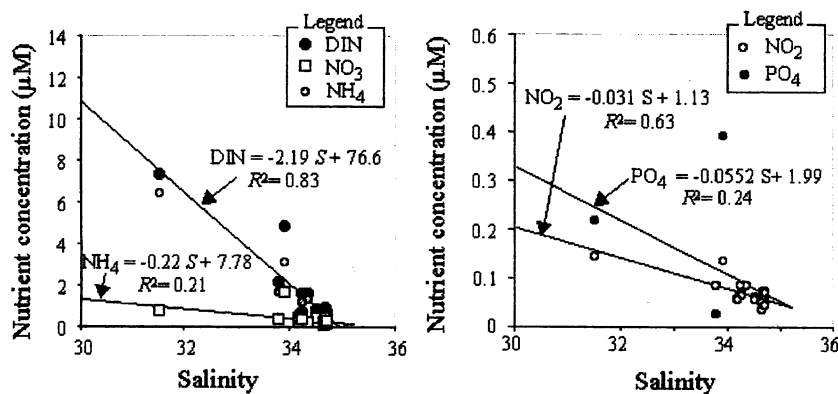


図5 宮良湾のサンゴ礁における各種栄養塩濃度の塩分との関係。2003年6月11日満潮時の表層採水の結果をプロットした。溶存無機態窒素は、硝酸態、亜硝酸態およびアンモニア態窒素の総和 ($\text{DIN} = \text{NH}_4 + \text{NO}_3 + \text{NO}_2$)。

2003年9月21日日中に実施されたシモビシにおける水質観測の結果を図7に示す。ここでは、水温、塩分、濁度、および各種栄養塩濃度について、調査範囲の南西端の地点St. H8の値からの偏差の空間分布を示した。宮良湾のサンゴ礁では、岸沖方向のわずか300mほどの距離の間で、水温で約5℃、塩分で約5、濁度でも約10NTUの顕著な環境勾配が認められたのに比較して、シモビシにおける環境の空間不均一性はきわめて小さい。採水した44地点における水温差は最大で0.3℃、塩分については0.05であった。塩分の分布については傾向を見出し難いが、水温は調査範囲の南東部でわずかながら高温を示し、濁度については、北西部で比較的高く、南東部で低いという傾向が認められる。後述のように、シモビシは、竹富島および小浜島の間分布する閉鎖性の高い礁湖の南端部に位置し、その南に分布する比較的外洋水の流入が多いと思われる礁湖との境界となっている。シモビシ調査海域の北西部にみられる比較的高い濁度の海水は礁湖の影響を、また、低濁度の海水は礁湖の影響を受けていると考えられる。同様の傾向は、極めて低濃度ながら、アンモニア態窒素およびリン酸濃度の分布にも認められる。

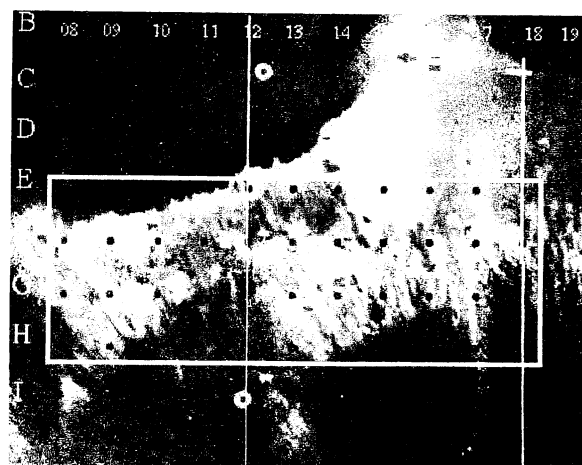


図6 石西礁中央部に位置するシモビシ。生物群集調査は、基本的に格子点様の配置（経度緯度0.1分間隔=約185 m）を取る63地点で実施された。このうち、白枠で囲まれた44点にて採水を実施し、そのうち12点について栄養塩類の分析を行った。

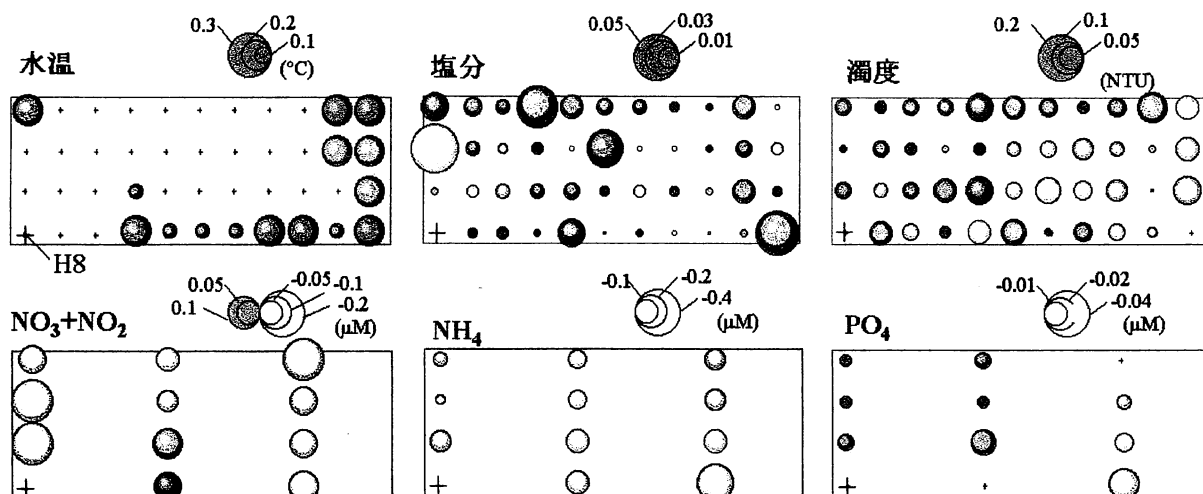


図7 シモビシにおける水温、塩分、濁度、および各種栄養塩濃度の空間分布。2003年9月21日日中の表層採水の結果。各水質項目は、調査範囲の南西端の地点St. H8からの偏差を示した。この基準点の値よりも高い地点については濃色の球グラフで、低い地点については淡色の球グラフで示した。

(3) カタグラーの水質環境について

石西礁のほぼ中央部に位置するシモビシよりもさらに陸域の影響が小さいく、外洋の影響を強

く受ける健全なサンゴ礁の例として竹富島南方のカタグラーを選定し、水質環境調査を実施した（図8）。2004年秋日中に実施したスナップショット観測によると、濁度および各種栄養塩濃度にサンゴ礁と外洋の差が認められるが、これは、宮良湾やシモビシで観測されたサンゴ礁内外の差と比べて小さい。これは、カタグラーのサンゴ礁が外洋との海水交換がよいことを示すものである。礁嶺を越えて外洋側にサンゴ礁海水起源と思われる組成の水が張り出しているが、これは、下げ潮時に採水を行ったためであると思われる。

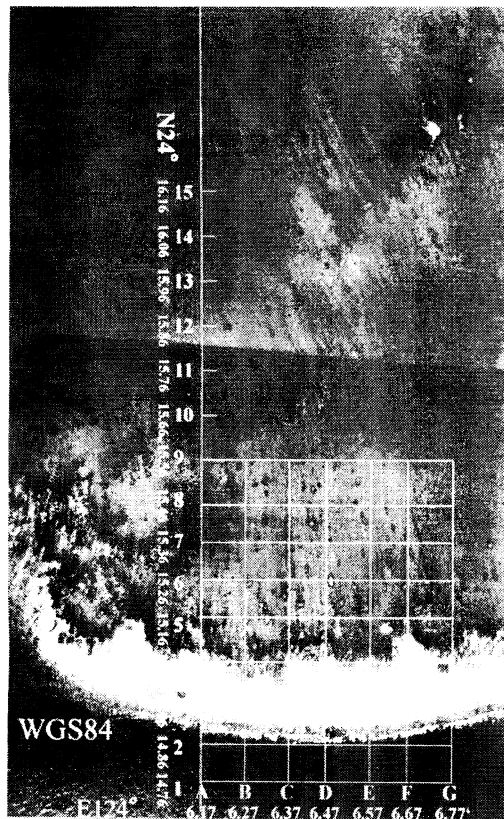


図8 石西礁南部に位置するカタグラー。南側が外洋にあたる。生物群集調査は、基本的に格子点様の配置（経度緯度0.1分間隔=約185 m）を取る地点で実施された。このうち、32地点にて採水を実施した。

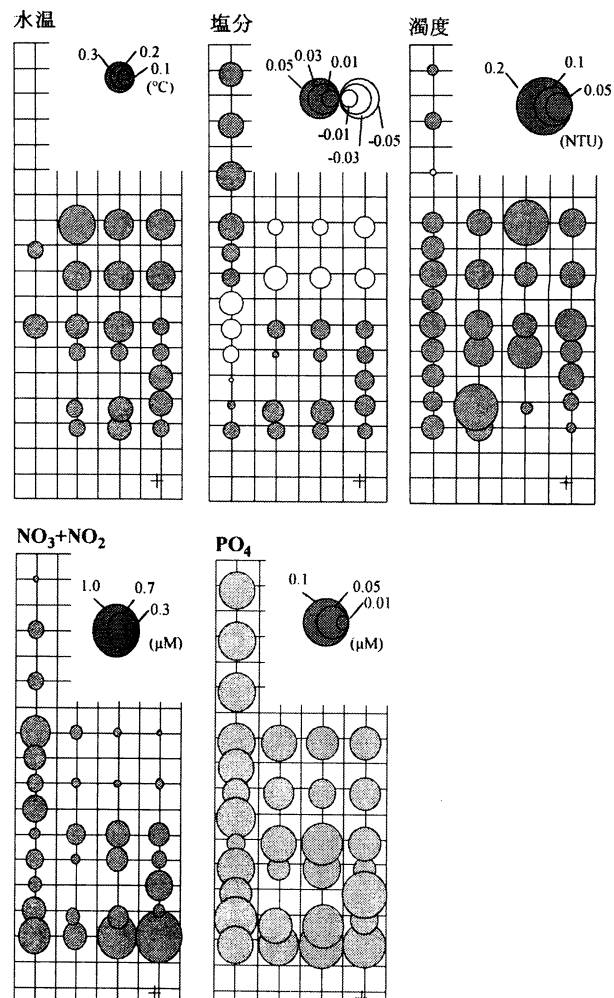


図9 カタグラーにおける水温、塩分、濁度、各種栄養塩濃度の空間分布。各水質項目は、調査範囲の南東端の地点St. G1からの偏差を示した。この基準点の値よりも高い地点については濃色、低い地点については淡色の球グラフで示した。

(4) 石西礁における広域的な水質特性

石西礁内外の2地点において2002年9月から約1年間の水温観測結果を図10に示す。St. Xは竹富島北西方の外洋側礁斜面であり、一方、St. Yは竹富島南方の礁湖底に設置されたものである。図3(B)に示されるように、夏期は礁湖内が外洋に比べて相対的に水温が高く、冬期は逆に外洋のほうが礁湖よりも水温が高い。同様の水温パターンは石垣島周辺の裾礁の内外でもみられるが、石西礁内外のほうがその水温差は概して小さい。

水質観測と同期して海洋科学技術センター(現:独立行政法人海洋研究開発機構)によって実施された流動観測の結果から、各流速計測地点でのある一潮汐期間における進行ベクトルを図11に示す。石西礁湖西部のSt. ShおよびSgにて大きな流速が観測された。この2点に比較して、その他の地点の流速は比較的小さい。

Furushima et al. (2002)³⁾は同様の流況観測から

海水の交換速度を検討して、石西礁をいくつかのユニットに区分した。その区分を一部改変したものを図11(A)に示す。竹富島と小浜島の中の礁湖(礁湖A)は、その北側を連続的な礁原で囲まれ、南側もシモビシなどの地形的高まりで区切られておりため、外洋や隣接するユニットとの海水の交換は限定的と考えられる。

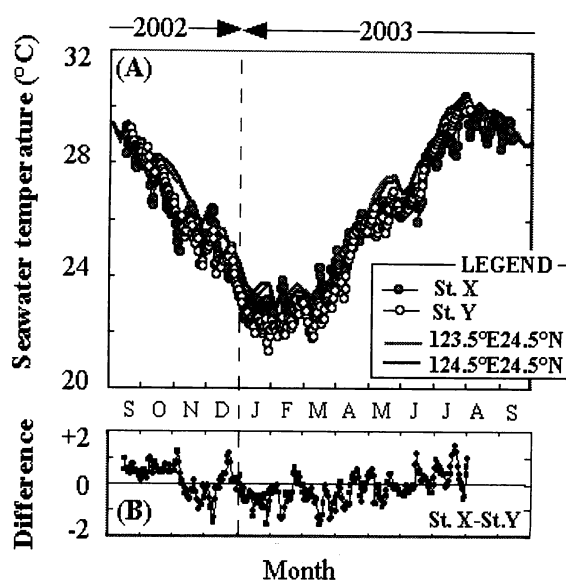
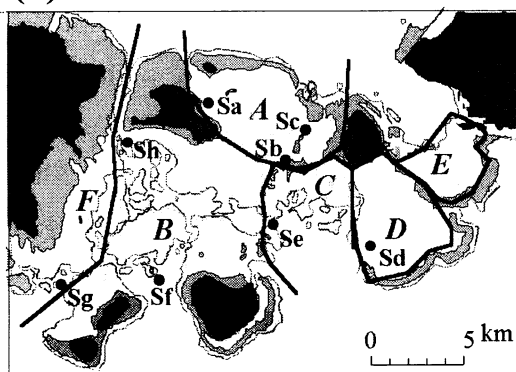


図10 (A)石西礁のSt. XおよびYの2地点における通年水温計測結果と人工衛星観測に基づく外洋水温。(B)石西礁北の外洋側St. Xと礁湖内のSt. Yの水温差。正の値はSt. X、すなわち礁湖内が外洋に比べて相対的に水温が高いことを示す。

(A) Area classification



(B) Progressive trajectories

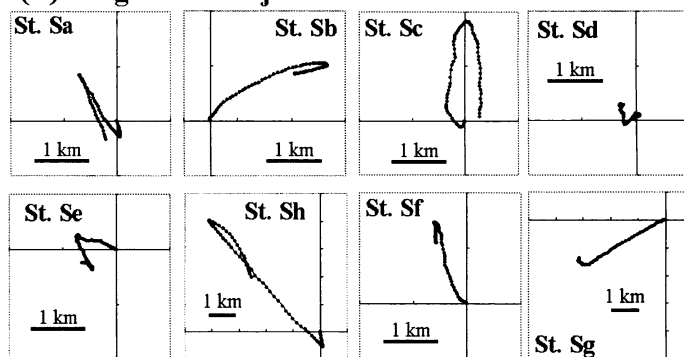


図11(A)石西礁の流速観測点とユニット区分(A-F)。海水交換の観点から区分されたもので、竹富島と小浜島の中の礁湖Aはもっとも閉鎖的と考えられる。(B)各流速観測点における進行ベクトル図。

石西礁は全体に配置された採水点での観測は、数日に渡って実施された。各水質項目について、各調査日毎に石西礁湖内と外洋との差を求め、重複採水地点については平均した結果を統合したものが図12である。水温および塩分の分布図は省略されているが、石西礁湖内と外洋との差は極

めて小さく、基本的に外洋との海水の交換が活発なことが予想される。しかし、礁湖海水の全アルカリ度は外洋レベルからの明瞭な低下が認められ、活発な石灰化が進行している様子がわかる。海水の栄養塩濃度はわずかながら外洋水よりも高いレベルにあり、クロロフィル濃度も $0.5\mu\text{g L}^{-1}$ を上回る値が散見される。堡礁あるいは環礁タイプのサンゴ礁にて、礁湖海水が外洋よりも栄養塩濃度が高くなることはグレートバリアリーフの陸棚上のパッチリーフや赤道湧昇域の環礁で報告されている。礁湖での活発な窒素固定によりサンゴ礁内に供給される栄養塩がこのような結果をもたらすことも考えられるが、石西礁湖の場合、小浜島や黒島など、さとうきび栽培や放牧が盛んな島があり、これらからの栄養塩の流入が卓越している可能性がある。

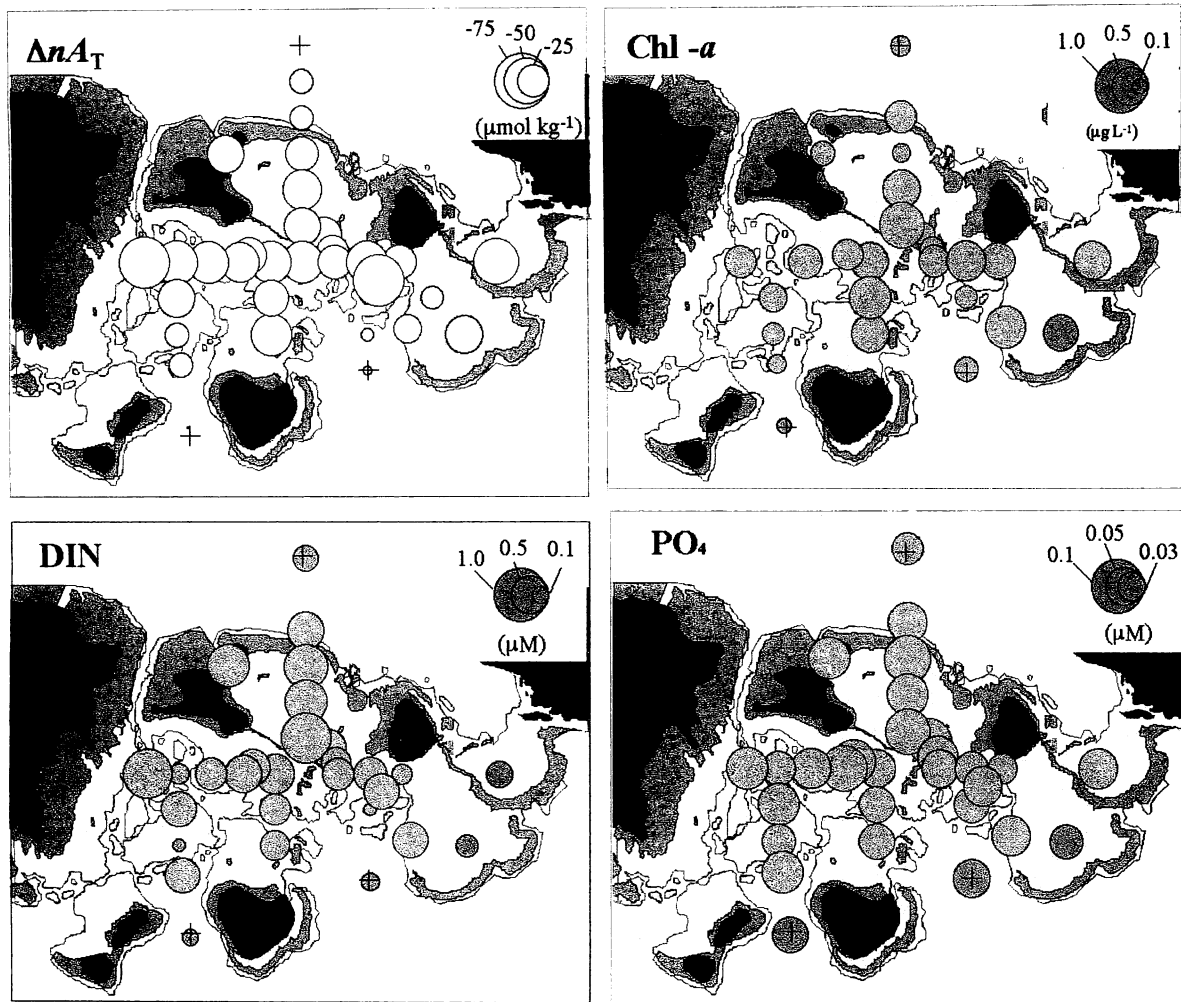


図12 石西礁湖における全アルカリ度(A_T)、クロロフィル a 、および溶存無機態窒素・リン濃度の分布。2003年9月15日から20日の期間に実施した表層採水の結果をコンポジットしたもの。全アルカリ度については、図中に+記号で示された3点の外洋値平均からの偏差を塩分補正した値(ΔnA_T)を示した。石西礁湖内の測点はみなを負の値を示している。溶存無機態窒素は、硝酸態、亜硝酸態およびアンモニア態窒素の総和($\text{DIN} = \text{NH}_4 + \text{NO}_3 + \text{NO}_2$)である。

図12に示される石西礁内の海水と外洋水との水質の大局的な違いは、数日にわたる観測を統合したものである。石西礁中央部を南北に縦断する測線に沿って、ある日の日中の比較的短時間に採水した結果を図13に示す。これは、いわゆるスナップショット観測にあたる。図12に示された

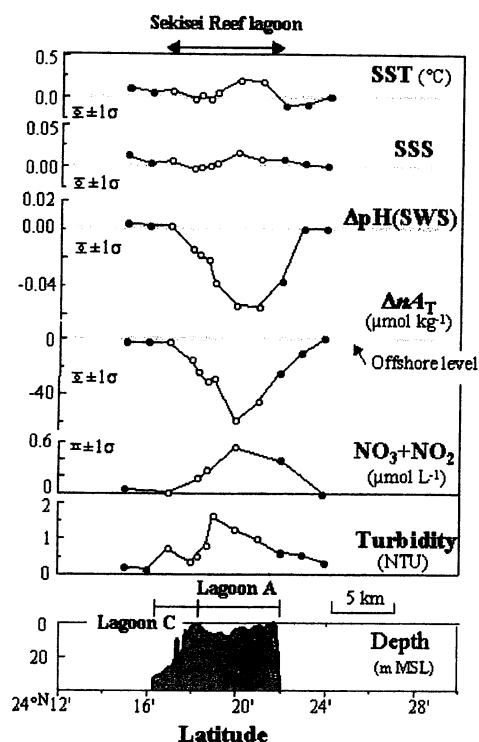


図13 石西礁の南北トランセクトに沿う水温等の水質項目と地形断面図。各水質項目の分析誤差を標準偏差で示した。石西礁の礁湖部分にハッチを施した。礁湖A (Lagoon A) およびCの海域区分は図4と対応する。

水質項目のうち、表層水温 (SST)、表層塩分 (SSS)、pHおよび塩分補正した全アルカリ度については、外洋と石西礁内の値の差を示し、硝酸態および亜硝酸態窒素と濁度については、外洋値が微小なため測定値をそのまま示した。なお、図13では、各水質項目の測定誤差がほぼ同じ大きさになるようにスケーリングして表示されている。夏期(9月)の観測であることから、水温は礁湖Aでは外洋よりも有意に高いが、礁湖Cでは、外洋との差はごくわずかである。塩分の内外差は分析精度をわずかに越える程度である。一方、炭酸系の諸量と栄養塩・濁度については、それぞれの分析精度を大きく上回る内外差が検出され、特に礁湖Aの中央部から南部にかけて極値をもつ分布が見られる。海水の炭酸系はサンゴ礁生物群集の代謝の影響を受けていると考えられ、図12で見られたのと同様に、この南北測線に沿っても、全アルカリ度とpHに顕著な減少が認められることから活発な石灰化が生じていることが分かる。礁湖Aの中央部にみられる極値は、この部分の生物代謝が活発であったと解釈するよりもむしろ、礁湖Aの閉鎖的な地形特性により、停留時間の長く炭酸系の変容が蓄積した海水が分布していると考えた方が合理的であろう。礁湖Aに比較して外洋に開放的な礁湖Cは外洋との濃度差が小さいが、これは外洋水の

流入による希釈効果が強いことに起因していると考えられる。

上述のように海水の全アルカリ度は、その海水中の炭酸イオンとカルシウムイオンを材料としてサンゴ礁生物が石灰化をしたときに減少する化学量であって、1 molの炭酸カルシウムの析出に伴い、2 molの全アルカリ度が減少するという関係が成立している。ここで、1) 石西礁湖に存在する海水がすべて外洋水起源であること、2) 陸水からの全アルカリ度の流入量を見捨てること、3) 礁湖海水はよく鉛直混合していること、を仮定すると、図11に示した全アルカリ度分布と水深から、石西礁全体で海水から除去された全アルカリ度と石灰化量を計算することができる(図14)。さらに、石西礁湖の海水の停留時間がわかれば、このサンゴ礁(厳密には礁原より内側の海域)の石灰化速度を推定することができる。現段階では、十分な精度をもった停留時間推定は行われていないが、礁湖の平均水深(約10m)と平均潮位差に基づく潮汐プリズム法で計算される停留時間として仮に5日を採用すると、石西礁湖全体の石灰化速度は、 $4.9 \times 10^6 \text{ mol day}^{-1}$ 、単位面積あたりの石灰化速度は $0.9 \text{ kg CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と計算される。熱帯域の平均的なサンゴ礁の石灰化速度は、活発な礁原部の群集について $3 \sim 5 \text{ kg CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、浅い礁湖や礁池で $0.5 \text{ kg CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と見積もられており、今回の推定値もこの範囲に含まれる。

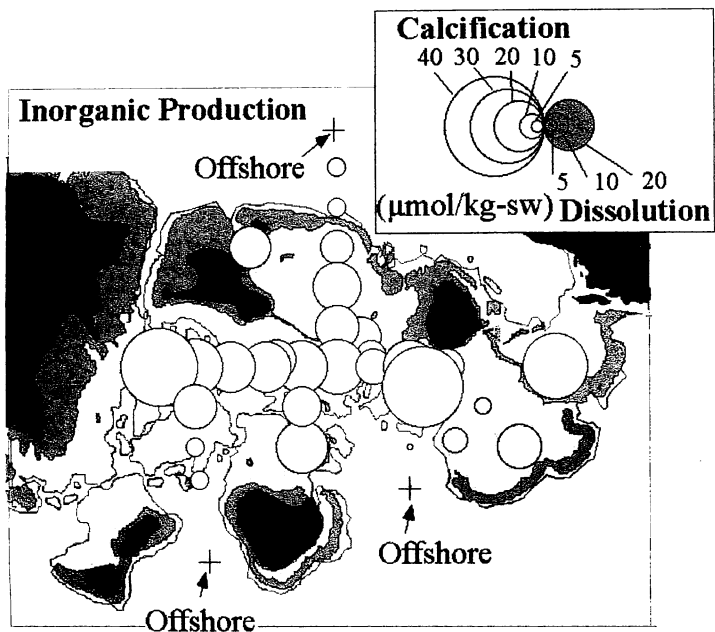


図14 石西礁湖における石灰化量分布。礁湖内の海水中の全アルカリ度 (A_T) と外洋との差から推定したもので、各地点の海水が外洋からその地点に到達するまでの間に海水1 kgあたりから析出した正味の炭酸カルシウム量 (μmol) を示す。2003年9月15日から9月20日の期間に実施した表層採水の結果をコンポジットしたもの。

(5) 3つのサンゴ礁の水質環境の比較

「スナップショット」観測により水質環境の調査を行った石垣島周辺部の3つのサンゴ礁（宮良湾、シモビシ、カタグラー）について、陸域からの影響は宮良湾が最も強く、シモビシ、カタグラーの順で小さいのではないかと、陸域からの距離に基づいて予想される。陸域影響のひとつの

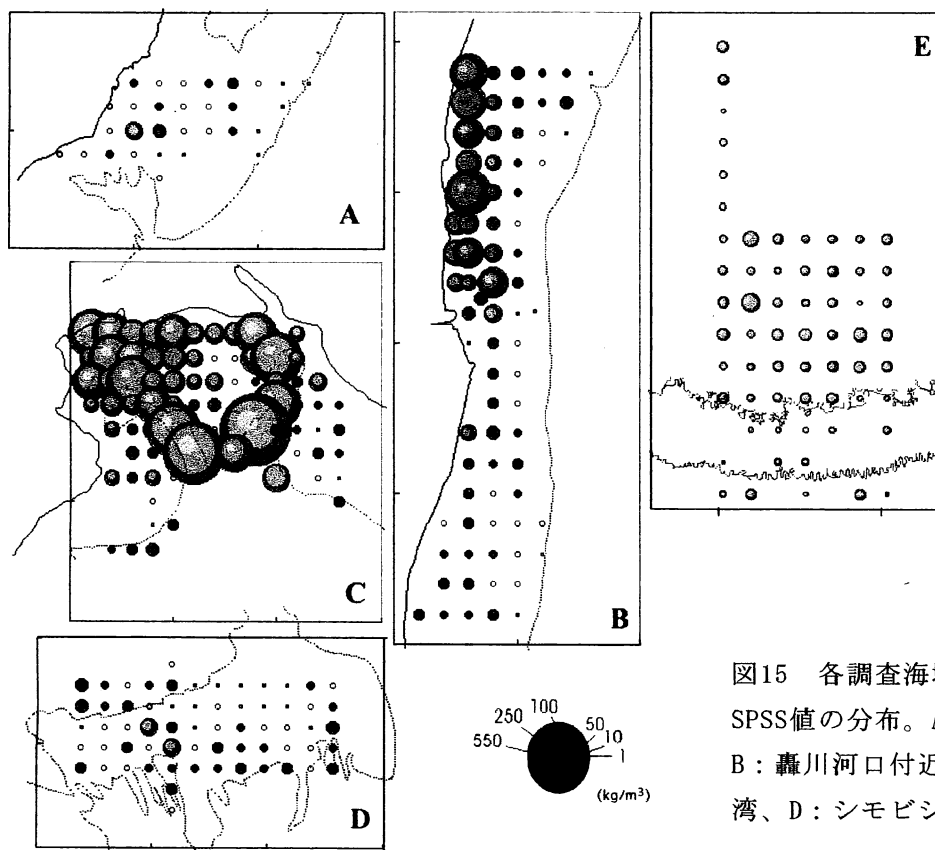


図15 各調査海域におけるSPSS値の分布。A：安良崎、B：轟川河口付近、C：宮良湾、D：シモビシ。

指標として、サブサブテーマ(2)-②により実施された底質中懸濁物質含量簡易測定法（SPSS測定法）の結果を図15に示した。SPSS測定法は、堆積物中の赤土の量を測る簡単な分析方法として、沖縄県衛生環境研究所により考案された調査法である⁴⁾。図15には、水質環境の調査を行った3つのサンゴ礁（宮良湾、シモビシ、カタグラー）に加え、石垣島東海岸の安良崎および轟川河口部から白保集落地先のサンゴ礁についての調査結果が示されている。宮良川などが流入する宮良湾のサンゴ礁の礁池の一部と水路部分、轟川河口から北側の海岸部にSPSS値の高い海域が見出された。一方、河川の影響が少ない安良崎、白保では全体的にSPSS値が低かった。石西礁内のシモビシおよびカタグラーも、赤土堆積量はわずかである。このSPSS測定法による赤土堆積量調査の結果は、この河川の有無や土地利用の違いによく対応している。宮良湾を囲むように分布する裾礁には、宮良川・磯辺川という二つの河川が流入している。この川は礁内の環境に、大量の土壌粒子をもたらしていると考えられる。白保サンゴ礁にも、その北部に轟川が流入しており、出水時には大量の土壌粒子をサンゴ礁に流入させる。一方、安良崎の裾礁の陸域は牛などの放牧場として利用されているが、表土が露出している部分はわずかであり、陸域からサンゴ礁への赤土流出が少ない。

次に、3つのサンゴ礁（宮良湾、シモビシ、カタグラー）について海水の濁度と硝酸態窒素濃度の分布の比較図を図16、17および19に示す。濁度は、宮良湾岸寄りの海域で高いが、岸から200～300mの間に急速に減少して、外洋寄りのサンゴ礁域の値は、シモビシとほぼ同じようなレベル

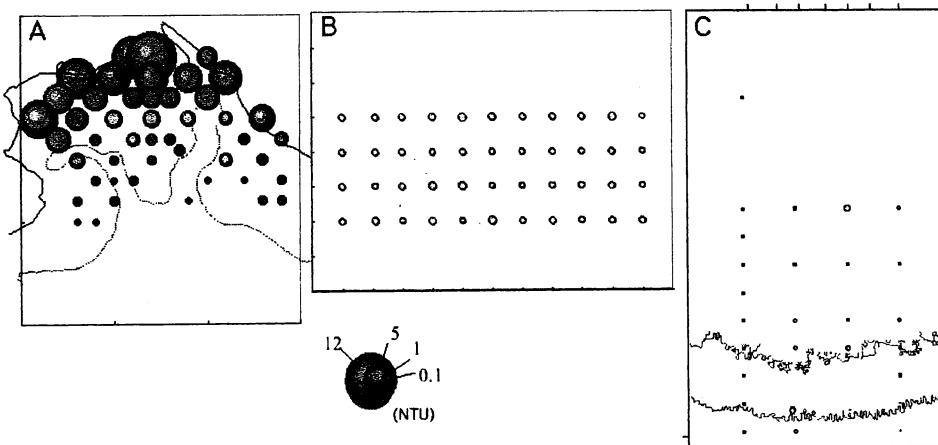


図16 宮良湾
(A)、シモビシ
(B)、カタグラー (B) の表層海水の濁度。

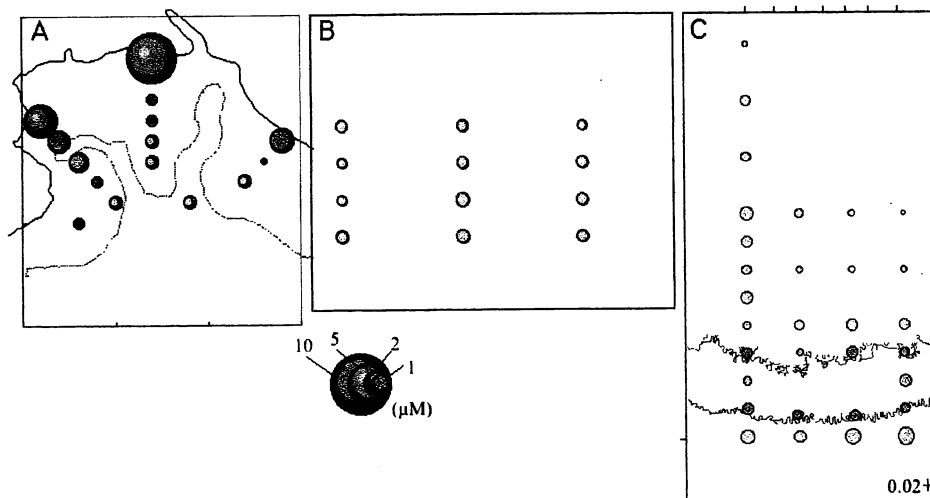


図17 宮良湾
(A)、シモビシ (B)、カタグラー (B) の表層海水の硝酸態窒素濃度。

であった。カタグラーの濁度は、シモビシよりさらに低いレベルであった。サブテーマ2-②の検討によると、宮良湾の場合、大局的にSPSS値との有意な相関関係が認められ、礁内での海水の濁度の成因が堆積物中の細粒物質の再懸濁であると考えられた。シモビシよりもカタグラーの方がSPSS値は大きい、濁度はカタグラーの方が低いのは、清澄な外洋水の流入が卓越しているからかもしれない。硝酸態窒素濃度は、基本的に濁度と相関し、宮良湾岸寄りの海域で高く、外洋寄りのサンゴ礁域の値は、シモビシおよびカタグラーとほぼ同じようなレベルであった。他の栄養塩類でも同様の傾向が見られ、水質環境は、宮良湾、シモビシ、カタグラーの順で、陸域からの距離が離れるに従って、良好に、あるいは外洋水の値に近づく様子が明らかになった。

(6) 富栄養化指標の検討

Hughes (1994)により提唱されたサンゴ礁の「Phase shift」⁵⁾の仮説は、様々な批判を受けつつも広く認められつつあるように思われる。この仮説では、造礁サンゴ類と大型藻類の競争が重要と考えられているが、この競争に影響する因子として海水の栄養塩濃度と海底に到達する光量が挙げられる⁶⁾。1970年代以降、人間活動の影響を受けて、変化・荒廃していくサンゴ礁の研究が活発に行われている。

ハワイのオアフ島カネオヘ湾におけるサンゴ礁環境の悪化の報告^{7,8)}では、生活廃水による富栄養化が、植物プランクトンの増加もたらして海水濁度が上昇し、光量低下と共にサンゴ類の減少と大型藻類の増加に傾く様子が記述されている。一般に貧栄養海域に分布するサンゴ礁生態系にとって、リンや窒素などを大量に含む陸水の流入による富栄養化の影響は深刻である。サンゴ礁海域の富栄養化により、大型藻類は活発に繁殖してサンゴ類の被覆度は減少し、サンゴ骨格の石灰化速度が減退するなどの現象が報告されている。また、多量の懸濁物の流入は、共生藻の光合成に必要な日射を遮りサンゴの成長を遅らせる。

サンゴ礁における富栄養化の指標として、グレートバリアリーフやカリブ海の研究より、海水中クロロフィル濃度 $0.3\text{--}0.5\mu\text{g L}^{-1}$ 、溶存無機態窒素($\text{NH}_4+\text{NO}_3+\text{NO}_2$) $1\mu\text{M}$ 、リン濃度 $0.1\text{--}0.2\mu\text{M}$ がしきい値(閾値)になると提案されている⁹⁾。これらの数値は、毎週の観測を年間実施して得られる平均値を対象にしている。Mutti and Hallock (2003)¹⁰⁾も、主にカリブ海を対象として、サンゴ

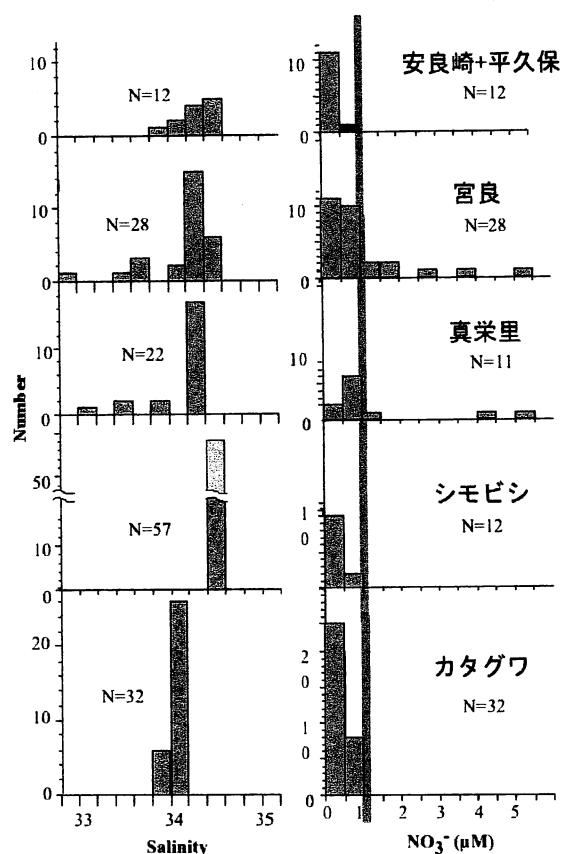


図18 石垣島各地のサンゴ礁および石西礁湖表層海水の塩分と硝酸態窒素濃度の観測頻度分布(ヒストグラム)。実線はBell and Elmetri¹⁾による硝酸態窒素濃度についての富栄養化の閾値($1\mu\text{g L}^{-1}$)。

礁生物群集の健全度の指標として海水中クロロフィル濃度に注目し、 $0.1\mu\text{g L}^{-1}$ 以下でサンゴの成長が良好であり、 $0.1\text{--}0.5\mu\text{g L}^{-1}$ の“Mesotrophic”な状態でサンゴと大型藻類の競争が始まり、 $1.0\mu\text{g L}^{-1}$ の濃度に達すると光が海底に届かなくなってサンゴの生育に障害が発生するとしている(図19)。

これらの基準と宮良湾の観測結果を比較すると、宮良湾の湾奥部はかなりの富栄養化レベルにあると考えられる一方、*Acropora*属の枝状サンゴが密生する大浜集落沖のサンゴ礁海水の水質は閾値を下回って良好である(図4)。また、石西礁湖についての予察的な観測によると、クロロフィル濃度が $0.5\mu\text{g L}^{-1}$ を上回る値がみられ、富栄養化の初期段階にあるのではないかと懸念される(図12)。これらの基準と比較するためには、1回の観測だけではなく、通年に渡る観測を実施して注目する海域の平均的な栄養塩濃度およびクロロフィル濃度を知る必要がある。一方で、もともとの海水中の栄養塩の多寡などやその他の地域的な特性が、サンゴと藻類の競争関係に影響する可能性も指摘されており、グレートバリアリーフやカリブ海を対象に設定された海水中クロロフィル濃度の閾値を他の地域に適用することには慎重であるべきという指摘もある。今後、宮良湾に帯状構造を持って分布するサンゴ礁生物群集データや、石西礁湖のシモビシ、カタグワから収集されるサンゴ礁生物群集データと比較しつつ、琉球列島のサンゴ礁に適応可能な富栄養化指標について検討を行う必要がある。

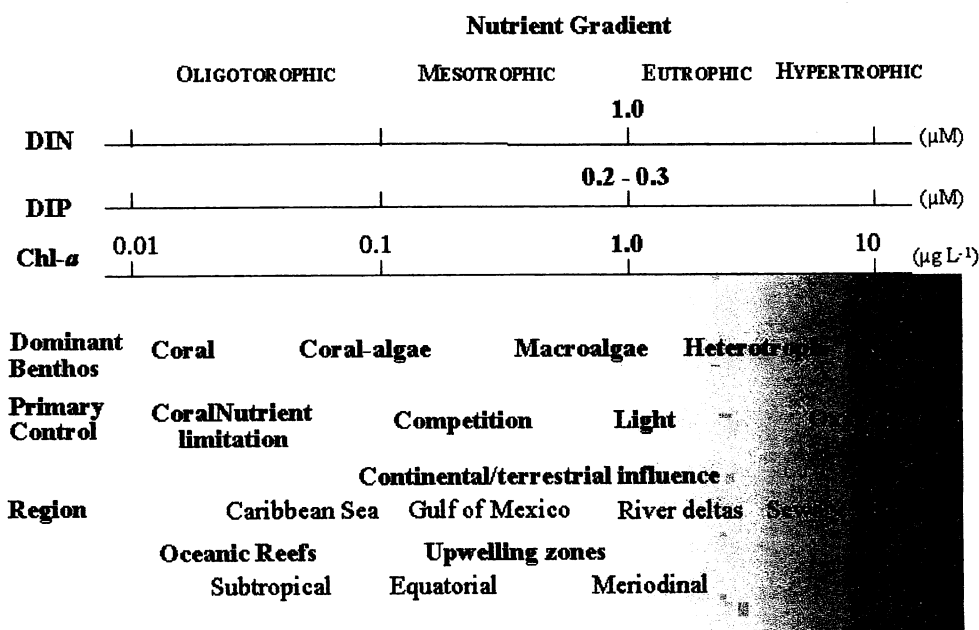


図19 サンゴ礁生物群集と海水の栄養塩濃度との関係。Mutti and Hallock⁹⁾によって提唱されたChl-aと底生生物群集の卓越種、主要な制限要因のモデルに、Bell and Elmetri (1995)¹⁾による栄養塩濃度(DIN、DIP)を対応付けて示した。

石垣島のサンゴ礁への栄養塩の流入については、Umezawa et al. (2002)¹¹⁾の詳細な先行研究があり、汀線付近からサンゴ礁に流れ込む地下水が、サンゴ礁に大量の溶存無機態窒素をもたらしていることが明らかにされている。石垣島においても人間活動が活発な南部を中心に、サンゴ礁の富栄養化に加えて、赤土汚染の進行とサンゴ礁海水の濁度低下は深刻な問題であると考えられる。

サンゴ礁生態系の崩壊が顕著な南西諸島のなかで、比較的良好な状態にあると考えられていた石垣島周辺サンゴ礁も過去数十年にわたる環境ストレスの累積により、生態系としての健全性は大きく失われていることが、本研究課題の先行研究である「サンゴ礁生態系の攪乱と回復促進に関する研究（H12-14）」により明らかとなった。一方で、従来注目されていなかった微視的スケール、すなわち百メートルから数十メートルの空間スケールでみた場合、局所的には、極めて高い生物多様性が維持されている箇所が多数確認されている。石垣島宮良湾はその典型例であり、沖縄県内でも有数の赤土河川である宮良川が流入するにも関わらず、河口域近傍にも高い多様性を維持したサンゴ礁群集がパッチ状に存在していることは注目に値する。図4に示されるように、このような局所的な健全域には、陸水の影響が到達せず、クロロフィル濃度も比較的低いレベルに留まっている様子が観察されたことは、今後、多様性保全地域として選定されるサンゴ礁域の長期的な環境管理についての示唆に富む。オーストラリア・グレートバリアリーフのように、広域的に健全度が高く、かつ人為的負荷が相対的に小さいサンゴ礁の管理手法は、南西諸島はじめ人口稠密地域である東南アジア域にはなじまない。むしろ、微視的スケールでの現象把握に立脚した、きめ細かな環境管理が求められる。特に、健全域を特別保全区域化して人間活動の影響を隔離・緩和する方法は有効性が期待されるが、どのような規模で設定すべきか、海水の流動特性を踏まえたスケールの検討は今後の課題である。

最近、オーストラリアの研究グループが、わずかなクロロフィル濃度の上昇が、オニヒトデの大発生を引き起こす可能性を水槽実験とモデル研究より明らかにした¹²⁾。この研究によると、海水中のクロロフィル濃度を $0.2\mu\text{g L}^{-1}$ から $0.4\mu\text{g L}^{-1}$ へ2倍に増加させたところ、オニヒトデ幼生の生存率は8.6倍と劇的に増加することが実験的に明らかにされ、これがオニヒトデの大発生の引き金になるとされた。この実験結果は、オニヒトデ被害が軽微な北部グレートバリアリーフ海域のクロロフィル濃度が $0.2\mu\text{g L}^{-1}$ 程度であるのに比べ、オニヒトデの異常発生が多発するグレートバリアリーフ中部の沿岸部ではクロロフィル濃度がおおよそ $0.4\mu\text{g L}^{-1}$ であるという観測事実とも整合的である。グレートバリアリーフ中部の沿岸部でクロロフィル濃度が高いのは、毎年12月から3月にかけての雨期に、栄養塩に富んだ陸水が流入することに起因するが、このタイミングはオニヒ

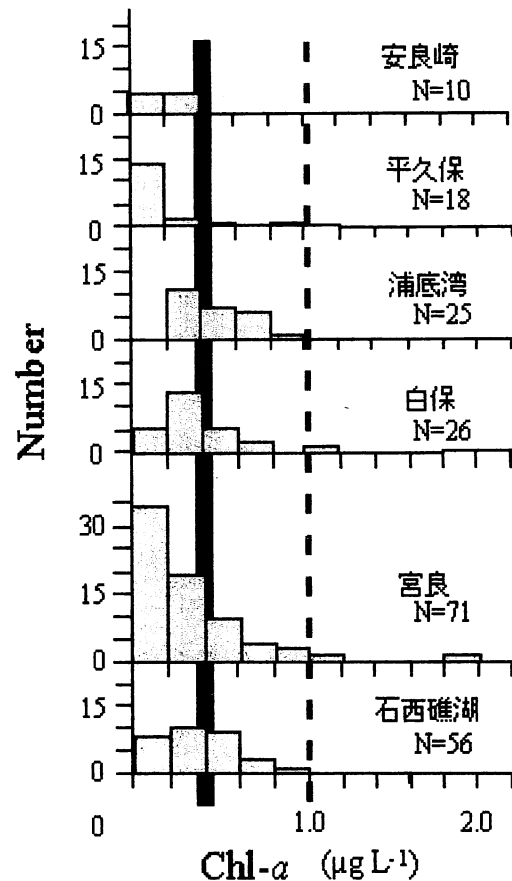


図20 石垣島各地のサンゴ礁および石西礁湖表層海水中のクロロフィル a 濃度の観測頻度分布（ヒストグラム）。2001年12月より2003年9月の間に実施された調査結果による。実線はBell and Elmetri¹⁾による富栄養化の閾値（ $0.3-0.5\mu\text{g L}^{-1}$ ）、点線はMutti and Hallock¹⁰⁾による富栄養状態の境界値（ $1\mu\text{g L}^{-1}$ ）。

トデの浮遊性の幼生期にあたり、その生残率増加に効果的に作用する。従来の富栄養化の閾値と同等か、あるいは若干低い $0.4\mu\text{g L}^{-1}$ という低いクロロフィル濃度でオニヒトデの異常発生が誘発されるとすると、石西礁湖中央部をはじめとして琉球列島の多くのサンゴ礁もその影響が懸念される。このクロロフィル濃度とオニヒトデ大発生の関係については、引き続き研究の推移を見極める必要がある。

5. 本研究により得られた成果

琉球列島石垣島周辺部の3つのサンゴ礁（宮良湾、シモビシ、カタグラー）について水質（水温、塩分、濁度、栄養塩）および炭酸系溶存成分のある瞬間における分布状況を捉えることを目的とした、いわゆる「スナップショット」観測を複数回実施し、生物群集の分布特性と海洋環境との比較、特に陸域の影響について検討が可能なデータセットを収集した。宮良湾に分布するサンゴ礁内岸寄りでは塩分が外洋水よりも低下している様子が捉えられ、これは陸水の流入によると考えられる。海水の濁度は岸部で高く、塩分と逆相関している様子がみられる。各種栄養塩も塩分と逆相関傾向を示し、陸水が供給源になっていること、そして岸側から沖方向に向けて希釈されて行く様子が認められる。サンゴ礁における富栄養化の指標として、グレートバリアリーフやカリブ海の研究より、海水中クロロフィル濃度 $0.3\text{--}0.5\mu\text{g L}^{-1}$ 、溶存無機態窒素($\text{NH}_4+\text{NO}_3+\text{NO}_2$) $1\mu\text{M}$ 、リン濃度 $0.1\text{--}0.2\mu\text{M}$ がしきい値（閾値）になると提案されている。この基準に比較すると、宮良湾の湾奥部は富栄養化レベルにあると考えられる一方、シモビシ、カタグラーではサンゴ礁海水の水質は閾値を下回って良好である。石西礁湖域の水質環境を検討したところ、礁湖海水の栄養塩濃度はわずかながら外洋水よりも高いレベルにあり、クロロフィル濃度も $0.5\mu\text{g L}^{-1}$ を上回る値が散見され、今後の継続監視の必要性が示唆される。宮良湾のサンゴ礁では、岸沖方向のわずか300mほどの距離の間で、水温で約 5°C 、塩分で約5、濁度でも約10NTUの顕著な環境勾配が認められたのに比較して、シモビシおよびカタグラーにおける環境の空間不均一性はきわめて小さい。

6. 引用文献

- 1) Bell, P.R.F. and Elmetri, I. 1995. Ecological indicators of large-scale eutrophication in the Great Barrier Reef Lagoon : *Ambio* 24:208-215.
- 2) 鳥取海峰, 長尾正之, 森本直子, 井上麻夕里, 岩瀬晃啓, 渋谷拓郎, 藤岡義三, 大葉英雄, 菅浩伸, 鈴木 淳. 2004. 琉球列島の石垣島周辺のサンゴ礁における底質と海水濁度の関係 : *Galaxea, JCRS*, 6: 1-19.
- 3) Furushima Y, Okamoto M, Nojima S. and Kanno, S. 2002. Characteristics of physical environment of Japanese coral reef region in Sekisei lagoon (Okinawa prefecture, JAPAN) : *Oceans 2002 MTS/IEEE Proc.* 660-666.
- 4) 大見謝辰男. 1987. 沖縄県の赤土汚濁の調査研究（第2報）—赤土汚濁簡易測定法と県内各地における赤土濃度— : 沖縄県公害衛生研究所報 20 : 100-110.
- 5) Hughes T. P. 1994. Catastrophes, hase shifts and large-scale degradation of a Caribbean coral reef : *Science*. 265: 1547-1551
- 6) McCook L.J. 1999. Macroalgae, nutrients and phase shifts on coral reefs: scientific issues and management consequences for the Great Barrier Reef. : *Coral Reefs*. 18: 357-367

- 7) Banner, A.H. 1974. Kaneohe Bay, Hawaii; Urban pollution and a coral reefs ecosystem. : Proc. 2nd Int Coral Reef Symp 2: 685-702
- 8) Smith, S.V., Kimmerer, W.J., Laws, E.A., Brock, R.E. and Walsh, T.W. 1981. Kaneohe bay sewage diversion experiment: Perspectives on Ecosystem response to nutritional perturbation. : Pacific Sci. 35: 279-402.
- 9) Vecsei, A. 2003. Nutrient control of the global occurrence of isolated carbonate banks. : Int. J. Earth Sci. 92: 476 - 481.
- 10) Mutti, M. and Hallock, P. 2003. Carbonate systems along nutrient and temperature gradients: some sedimentological and geochemical constraints. : Int. J. Earth Sci. 92: 465-475
- 11) Umezawa, Y., Miyajima, T., Kayanne, H., and Koike, I. 2002. Significance of groundwater nitrogen discharge into coral reefs at Ishigaki Island, southwest of Japan. : Coral Reefs 21: 346-356.
- 12) Brodie, J., Fabricius, K., De' ath, G. and Okaji, K. 2002. Are increased nutrient inputs responsible for more outbreaks of crown-of-thorns starfish? An appraisal of the evidence. CRC Reef Research Centre Technical Report No. 53.

7. 国際共同研究等の状況

産業技術総合研究所・海洋資源環境研究部門の前身である工業技術院地質調査所海洋地質部では、日豪科学技術協力協定登録課題「熱帯陸棚域の炭素循環に関する研究（平成10-12年度）」をオーストラリア海洋科学研究所（担当：Gregg BrunskillグループリーダーおよびPeter Isdale主任研究員）と実施し、研究者の相互訪問と共同観測結果の解析を進めて現在に至る。これらの成果は、Suzuki et al. (Skeletal isotope microprofiles of growth perturbations in *Porites* corals during the 1997-1998 mass bleaching event” , *Coral Reefs*, 22, 357-359, 2003)として公表論文に反映された。また、インドネシア科学研究所(担当:Dr. Wahyoe S. Hantoro)との共同研究「サンゴ骨格等を用いた海洋環境汚染の復元に関する研究」を平成13年度から開始し、平成14年3月にはジャカルタ湾近傍のサンゴ礁にて共同調査を実施した。さらに、フィリピン国立地質科学研究所(担当: Prof. Fernando P. Siringan)と「サンゴ骨格および群集解析による海水準変動とサンゴ礁形成過程に関する研究」を平成13年度より実施し、ルソン島南部およびボホール島のサンゴ礁にて研究試料採取調査を実施し、その後、相互の研究所訪問を行っている。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

〈論文（査読あり）〉

- ① Kawahata, H., Ohta, H., Inoue, M. and Suzuki, A.: *Chemosphere*, 55, 1519-1527 (2004)
“Endocrine disrupter nonylphenol and bisphenol A contamination in Okinawa and Ishigaki Islands, Japan - within coral reefs and adjacent river mouth- “
- ② Suzuki, A. and Kawahata, H.: *Global Environmental Change in the Ocean and on Land* (M. Shiyomi, H. Kawahata, H. Koizumi, A. Tsuda, and Y. Awaya ed.), Terra, Tokyo,

229-248 (2004)

“Reef water CO₂ system and carbon production of coral reefs: Topographic control of system-level performance”

＜その他誌上発表（査読なし）＞

なし

（２）口頭発表（学会）

- ① 鈴木 淳, 川幡穂高, Gagan, M.K., Fabricius, K. and 雪野 出: 日本地球化学会年会 (2003)
「白化サンゴ骨格に見られる酸素・炭素同位体比変動: 代謝効果と反応速度論的效果」
- ② Sato, T., Normal, E., Murakami, A., Suzuki, A., Kawahata, H., Omata, T. and T. Maruyama: 10th International Coral Reef Symposium, Ginowan, Japan, (2004)
“Light Acclimation of a Scleractinian Coral, *Porites* sp. and its Zooxanthellae”
- ③ Kitada, Y., Kawahata, H., Suzuki, A. and Omori, T.: 10th International Coral Reef Symposium, Ginowan, Japan, 2004
“Seasonal variation of nonylphenol and bisphenol A in aquatic environments using liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry”
- ④ Kawahata, H., Ohta, H., Inoue, M. and Suzuki, A.: 10th International Coral Reef Symposium, Ginowan, Japan, 2004
“Endocrine disrupter nonylphenol and bisphenol a contamination in Okinawa and Ishigaki Islands, Japan - within coral reefs and adjacent river mouths - ”

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、本研究の成果を発展させ、学会誌および国際誌での公表活動を進めるとともに、サンゴ礁保全地域の選定等の政策的な課題へ適用できるように努める。