

#### D-4 サンゴ礁生態系の維持機構の解明とその保全に関する研究

##### (2) サンゴ礁生態系に及ぼす環境ストレスの影響の解明

##### ② サンゴ礁における栄養環境とその影響

研究代表者 中央水産研究所海洋生産部低次生産研究室長 松川康夫

中央水産研究所

海洋生産部 低次生産研究室 市川忠史

物質循環研究室 下田 徹

平成6～8年度合計予算額 9,226千円

(平成8年度予算額 3,091千円)

[要旨] 開発によるサンゴ礁の衰退が懸念されており、サンゴ礁の水質環境基準策定が急がれる。そこで、サンゴ礁の水・底質環境とサンゴの生育状況や生理状態がどのような関係にあるか、またサンゴの生理状態は何を指標にしたらよいかを知るため、沖縄諸島周辺のサンゴ礁における水・底質、サンゴ生育状況、核酸比 (RNA/DNA)、安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) を観測した。サンゴ生育状況は栄養塩が増えるとともに傾向的に悪化し、ソフトコーラルや大型海藻に交替した。サンゴが保全される水質の目安はアンモニアと硝酸・亜硝酸 ( $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$ ) で  $10^0 \mu\text{M}$ 、リン酸 ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) で  $10^1 \mu\text{M}$  のそれぞれ低い値と推察された。従って、懸濁態のチッソは硝酸・亜硝酸と、リンはリン酸とそれぞれ同程度存在したことを考慮しても、サンゴ保全の水質基準は現行の類型I (全チッソ  $14.3 \mu\text{M}$ 、全リン  $0.7 \mu\text{M}$ ) に比べて特にチッソについて厳しくする必要があると考えられた。トゲスギミドリイシの核酸比は貧栄養域では1.5、富栄養域では1.0まで下がり、次第に大型海藻やソフトコーラルに交替したが、反対にハナヤサイサンゴの核酸比は貧栄養域の1.0から富栄養域の2.0と高くなり、サンゴの核酸比がサンゴの成長・増殖に関わる生理状態を表し、トゲスギが貧栄養に、ハナヤサイが富栄養に適応していることが示唆された。また、サンゴ共生藻の炭素安定同位体比と共生藻とサンゴ虫の差 ( $\Delta \delta^{13}\text{C}$ ) の間には概ね正の相関が見られ、共生藻の光合成活性が高くなるほどサンゴ虫が炭素を外部から取り込む割合が増えること、つまり共生藻の光合成が活発になるとサンゴ虫は光合成産物を摂餌のための運動や粘液形成に向けること、つまりより活発で健康になることが示唆された。

[キーワード] サンゴ礁、サンゴ生育状況、水質、核酸比、安定同位体比

#### 1. 序

沖縄諸島周辺は多様性に富んだサンゴ礁海域として世界に知られているが、埋立や港湾開発による破壊、都市化・農業開発に伴う赤土や汚染物質の流入、オニヒトデの食害などによる衰退が憂慮され、サンゴ礁の保全が叫ばれている<sup>1)</sup>。このような人為的影響の問題

についてはGrigg and Dollar<sup>2)</sup>が総説し、人為的ストレスとサンゴへの影響に関する定量的研究が不足していると指摘している。我が国の場合もこの例外ではなく、サンゴの生物学、サンゴ礁の生物学、サンゴ礁の地理・地質学に関する研究は進んでいる<sup>1, 3)</sup>が、サンゴ礁の水質・底質とサンゴの生育状況・生理状態の関係や、サンゴ礁海域の水質とオニヒトデの初期生残の関係といった研究は未だ取り組まれていない。

Grigg and Dollar<sup>2)</sup>によれば、サンゴ礁の富栄養化に関する報告はハワイの例があるのみである。ハワイではかつて都市下水をサンゴ礁のラグーン（礁池）に排出した時期があり、このため排出口のごく近傍では底質汚染と硫化水素（ $H_2S$ ）の発生によってサンゴが死滅し、その外側では大型海藻にとって替わられ衰退した。その後排水口を礁縁の外側に設置したところ、1～2年でサンゴは回復した。下水をラグーンに排出した時期のラグーンの水質はアンモニアと硝酸・亜硝酸が $1.15\mu M$ 、リン酸が $0.48\mu M$ 、礁縁の外側に排出するようになってからの時期はそれぞれ $0.78\mu M$ 、 $0.15\mu M$ であったと報告されている<sup>4)</sup>。

造礁サンゴは貧栄養で体成分よりも炭素とチツソの比が遥かに高い環境に適応した生物で、共生藻の光合成と骨格形成は余分な炭素を効果的に排除する適応的仕組みに他ならず（C/Nバランス仮説）、従って富栄養化は彼らにとって不都合である可能性が高い<sup>5)</sup>。このことはアンモニアを添加した飼育実験によっても確認されている<sup>6)</sup>。添加されたアンモニアは共生藻の光合成産物を共生藻の増殖に利用せしめ、従ってサンゴ虫の光合成産物の受け取りが減り、共生関係が良好な状態から外れるのである。ただ、このアンモニア添加飼育実験は $20\sim 50\mu M$ という高濃度下で行われており、自然状態での確認が必要である。

このようなわけで、この分野の研究は国際的に見ても新しいものであり、早急に取り組む価値があると判断された。

## 2. 研究目的

沖縄諸島においては本土と全く同じ水質基準が適用され、それに基づいてCODのモニタリングが行われてきた。オニヒトデについても駆除が基本で、予防という観点は希薄である。サンゴ礁生態系を保全するためにはこれでは恐らく不十分で、サンゴ礁とその周辺海域の水・底質基準を別途定めること、またこのための研究を進めることが必要であろう。序に述べた研究動向も勘案し、この研究ではサンゴの生育状況・生理状態とサンゴ礁の水・底質に関する現場データを取得し、サンゴ礁の水質基準、特にチツソ・リン基準の手がかりを得ることを目的とした。

## 3. 研究方法

サンゴ礁は一般に極めて貧栄養であって、栄養塩を初めとした水質を精度良く測定することは容易でなく、既往のデータが殆ど無い。従ってレトロスペクティブな方法を採用することができない。地理的条件から実験的手法を採用するのも困難である。一方、沖縄諸島には汚濁の甚だしい沖縄本島与那原から自然状態に近い西表島まで様々な富栄養化の段階にあるサンゴ礁が存在する。そこでこの研究では、沖縄諸島周辺のサンゴ礁の水・底質と生育状況・生理状態に関するデータを取得し、それらを比較する方法を採用した。

観測した年月日、地点、項目は表1の通りである。現場へのアプローチは、西表島の南

風見崎、八重目崎、サバ崎、外離島、浦内湾口南の5地点のみボートで、他は全て海岸からの徒歩や水泳で行った。サンゴ生育状況と底質は目視で概況を潜水観察した。水質測定のための採水はポリタンク(2ℓ)で行い、冷蔵して現地実験室に持ち帰り、濾過等の処理をした後に冷凍し、中央水研で分析した。アンモニア(NH<sub>4</sub>-N)は、石垣島と西表島については速やかな現地測定が可能だったが、それ以外については中央水研で測定した。サンゴの生理状態の指標としては、蛋白合成活性の指標とされる核酸比(RNA/DNA)と、サンゴ共生藻の光合成活性や共生関係の指標とされる安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ )に着目し、沖縄諸島によく見られるトゲスギミドリイシサンゴ(*Acropora nobilis*)、コブハマサンゴ(*Porites lutea*)、ハナヤサイサンゴ(*Pocillopora damicornis*)、エダコモンサンゴ(*Montipora degitata*)の適当量を採取し、現場で市販の歯磨き用ウォーターピックを用いてサンゴ骨格から組織を剥ぎ取り、核酸比測定用(100g)はホルマリン固定し、安定同位体比測定用(数10g)は凍結保存(-40℃)し、中央水研で測定した。

アンモニアはサンプリング後数時間内にSasaki and Sawadaの方法<sup>7)</sup>により分析を行った。硝酸(NO<sub>3</sub>-N)、亜硝酸(NO<sub>2</sub>-N)、リン酸(PO<sub>4</sub>-P)、ケイ酸(SiO<sub>3</sub>-Si)は、ミリポアディスポーザブルフィルターで濾過後、凍結保存して実験室に持ち帰り、オートアナライザーTRAACS800により分析した。クロロフィルは試水200mℓをワットマンGF/Fにより濾過後フィルターを凍結保存して実験室に持ち帰り、ジメチルフォルムアミドで抽出<sup>8)</sup>後、蛍光法により分析した。

RNA/DNAについては、サンゴのホルマリン固定試料から共生藻を取り除くためハンドグラスホモジナイザーで一様にした後5μmポアサイズのヌクレオポアフィルターで濾過し、その濾過分のRNAとDNAをそれぞれSTS改良法<sup>9)</sup>により分析した。

$\delta^{13}\text{C}$ については、サンゴの凍結試料を解凍後に遠心分離をかけて濃縮したものを3%塩水に再懸濁させて洗浄し、それを10μmヌクレオポアフィルターで濾過し、フィルター上に残ったものを共生藻分画、濾過されたものをサンゴ分画とし、それぞれを酸処理、凍結乾燥、封管法によるガス化、精製後、質量分析計(MAT252)で測定した。

#### 4. 結果

調査地点におけるサンゴ生育状況の所見は表1の通りである。多くの調査地点がアプローチの関係でラグーンであったためもあるだろうが、見事なサンゴ礁というものは意外と少ないことが見てとれよう。沖縄本島では瀬底島は概ね良好だが、金武岬は一見良好に見えるもののキクメイシが多く、金武湾中央部の伊芸はシルトの堆積とヒルモの中に点在する岩場に活力の低そうなサンゴが散在し、中城湾の与那原に至っては東京湾並の汚濁の中で気味悪い形状の海藻以外にサンゴは全く見当たらなかった。渡嘉敷島や宮古島はオニヒトデの食害から回復し切れていないところが多いが、概して良好であった。石垣島は開発が及んでいない北部は良好だが、農業開発が進んだ中部に下るにつれて次第に悪化し、都市化と港湾建設の影響を受けた南部ではサンゴが殆ど見られなかった。西表島も意外に海藻群落が多く、また道路や港湾建設の影響を受けた地点も少なくなかった。

調査地点の水質は1992、1993年のフィージビリティスタディの結果も含めて表2の通りである。極端に汚れた与根、中城、与那原を除けば、アンモニアと硝酸・亜硝酸が10<sup>-1</sup>

～ $10^0 \mu\text{M}$ 、リン酸が $10^2 \sim 10^1 \mu\text{M}$ の範囲で、概ね熱帯サンゴ礁の範囲にある<sup>4,10,14)</sup>が、全体としては水質が悪化した側に位置している。1994年のリン酸の値は他の年に比べてはほぼ一桁高い。しかし、この1994年の値はリン酸だけでなく硝酸・亜硝酸も含めてCrossland<sup>10)</sup>が1981年5、6月に瀬底島で測定した値と殆ど同じレベルである。従って1994年のリン酸の高い値をあながち測定誤差とは決めつけがたい。サンゴ礁の水質は時季によって大きく変わるのかも知れない。そういう不確実性を含みながらも、全体として富栄養化した場所ほどサンゴの成育状況が悪くなる傾向があることは明らかである。そしてサンゴが衰退する水質レベルが、与那原のようにアンモニアが添加飼育実験と同じ $20 \mu\text{M}$ <sup>6)</sup>にも及びそれに硝酸・亜硝酸を加えれば $20 \mu\text{M}$ を遥かに越える極端な水域から、全チッソで数 $\mu\text{M}$ 、全リンでコンマ数 $\mu\text{M}$ といった環境基準の類型Iに相当する水域を経て、さらに一桁低い貧栄養熱帯水域までの間のどこかにある、ということが重要である。

瀬底島におけるサンゴ虫4種のRNA/DNAの毎月の測定結果は図1、石垣島におけるサンゴ虫2種のRNA/DNAは表3の通りである（他の2種は試料が揃わなかった）。時期や場所で値が異なっているが、殆ど1～3の範囲にある。マイワシ仔魚やコペポータで3という値は殆ど飢餓状態にある時のものであり、サンゴがいかに貧栄養に適応した生物であるかがうかがえる。

瀬底島で毎月測定されたサンゴ虫と共生藻（正確にはそれらを主とした分画）の $\delta^{13}\text{C}$ は図2の通りである。共生藻の値が殆ど常にサンゴ虫のそれよりも高いが、いずれもマイナス9%からマイナス17%の間にある。これは、概ねグレートバリアーリーフの場合<sup>15)</sup>と一致している。

## 5. 考察

3年間の結果を全体的に見れば、サンゴ礁の栄養塩が増えると傾向的にサンゴの生育状況が悪化し、ホンダワラに似た大型海藻に交替することがうかがわれる。この結果はハワイの経験<sup>2)</sup>、C/Nバランス仮説<sup>5)</sup>、アンモニア添加飼育実験結果<sup>6)</sup>と一致している。赤土流入によるシルト堆積がサンゴに悪影響を及ぼすことも明らかである。

表3は、サンゴ生育状況、水質、RNA/DNAが全て整った石垣島のサンゴ礁の比較である。全体の傾向が良く整合している。サンゴの生育状況が良好なのはアンモニアと硝酸・亜硝酸で $1 \mu\text{M}$ 以下、リン酸は $0.1 \mu\text{M}$ 以下と見ることができる。しかし、この値は先に上げた熱帯サンゴ礁の水質<sup>10,14)</sup>の中でも最も環境の良い部類に属するので、これを水質基準とすることは厳しすぎるように思われる。石垣島の調査時期がたまたま普段よりも水質の良い時期に当たった可能性もあり、多くの時期多くの場所についてデータが集積すれば、他の熱帯サンゴ礁のデータ<sup>10,14)</sup>も参考にして、アンモニアと硝酸・亜硝酸で $10^0 \mu\text{M}$ 、リン酸で $10^1 \mu\text{M}$ のそれぞれ低い値に収斂することが予想される。従って、懸濁態チッソ（PN）が硝酸・亜硝酸と、懸濁態リン（PP）がリン酸とそれぞれ同程度あることを考慮しても、サンゴ礁を保全していくための水質環境基準は現行の類型I（自然環境保全：全チッソ $0.2\text{mg}(14.3 \mu\text{M})$ 以下、全リン $0.02\text{mg}(0.7 \mu\text{M})$ 以下）よりも特にチッソにおいて厳しいものが必要と思われる。

表3では、礁嶺から礁縁に多いトゲスギの核酸比が貧栄養域の1.5から富栄養域の1.0

まで下がるか、あるいは大型海藻やソフトコーラルに交替する。反対に、ラグーンに多いハナヤサイの核酸比は貧栄養域の1.0から富栄養域の2.0と高くなる。トゲスギは見るからに綺麗な水の方が生きいきし、骨格も太く逞しい。ハナヤサイは登野城などのぼんやりした水の方がみずみずしい褐色を呈するが、骨格は薄くもろい。このことは、サンゴの核酸比が成長・増殖に関する生理状態の指標であると共に、環境への適応の指標でもあること、つまりトゲスギが貧栄養に、ハナヤサイが富栄養に適応したことを示唆する。

瀬底島におけるサンゴ4種のRNA/DNAの季節変化(図1)では、トゲスギやコブハマの値は夏に最低、秋に増加、冬に減少、春に最高、夏に再び最低というパターンである。これは、夏の高温による白化など生理状態の悪化、秋の降温とブルーミングによる生理状態の回復と成長、冬の低温と冬枯れによる生理状態の一時的悪化、春の昇温とブルーミングによる生理状態の高揚と成長・成熟・産卵、夏の産卵後の疲労と高温による生理状態の悪化という彼らの1年単位の生活周期を表していると解釈できる。これに対し、ラグーンに多いハナヤサイやエダコモンでは1年単位の生活周期がハッキリしない。ハナヤサイは他のサンゴと異なってハワイでは1年中毎月、沖縄では5月から9月にかけて毎月プラヌラを放出する<sup>3)</sup>ので、年周期がハッキリしなくなるのは理解できる。しかし、エダコモンサンゴはトゲスギやコブハマと同じく年1回の産卵なので、生活周期だけでは説明できない。恐らく、両者のパターンの差異は環境変化の差異を反映したものであろう。トゲスギやコブハマが生育する礁嶺から礁縁は常に外海水に洗われており、水温は年周期で、餌条件は年2峰型で変化する。これに対し、ハナヤサイやエダコモンが生育するラグーンは大潮・小潮や天候の具合で水温・塩分・流れ・シルトの巻き上がり・陸からの栄養塩の流入などが大きく変化する。これらに応じてサンゴの生理状態が大きく変化するということが考えられる。

サンゴ4種の共生藻が主たる分画の $\delta^{13}\text{C}$ とサンゴ虫が主たる分画の $\delta^{13}\text{C}$ の季節変化(図3)では、概ね共生藻の値が大きくなればサンゴ虫の値も大きくなる。このような関係はグレートバリアリーフでも見出されており<sup>15)</sup>、共生関係が良好なことを物語っていると推察される。 $\delta^{13}\text{C}$ の季節変化のパターンはRNA/DNAの場合と同様に2つと見ることができよう。トゲスギとコブハマは9~10月の秋と3~4月の春にピークがある。これは、貧栄養下に生息するトゲスギやコブハマは栄養制限にある、ということの意味するようと思われる。ハナヤサイとエダコモンは7~8月の夏と11月の晩秋と4月の春にピークがある。これは、富栄養下に生息するハナヤサイとコブハマには栄養より日照やラグーンの濁りの方が効く、ということの意味するようと思われる。

図3は、共生藻の $\delta^{13}\text{C}$ と共生藻とサンゴ虫の差 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ の間には概ね正の相関があることを示している。この正の相関は、共生藻の光合成活性が高くなるほどサンゴ虫が炭素を外部から取り込む割合が増えること、つまり共生藻の光合成が活発になるとサンゴ虫は光合成産物を摂餌するための運動や粘液形成に向けること、つまりより活発で健康になる、ということを示唆するようと思われる。

以上の諸点は今後の現場調査や実験によって検証されることが期待される。

## 6. まとめ

①沖縄諸島のサンゴ礁におけるサンゴ生育状況と水質を比較した結果、サンゴは水域の富栄養化と共に傾向的に生育状況が悪化し、大型海藻にとって替わられ、その目安はほぼアンモニアと硝酸で数 $\mu$ M、リン酸でコンマ数 $\mu$ Mであろうと判断された。これは環境基準の類型Iより特にチッソにおいて厳しい値である。現場と実験のデータをさらに積み上げ、目安をより確実にし、速やかにサンゴ保全の環境基準を設定する必要がある。

②サンゴの核酸比の季節変化と、核酸比と生育状況と水質の関係を調べた結果、サンゴの核酸比は成長・成熟に関わる生理状態の指標になることが示唆された。実験による確認が期待される。

③共生藻とサンゴ虫の $\delta^{13}\text{C}$ の季節変化や相互関係を調べた結果、共生藻の $\delta^{13}\text{C}$ は光合成活性の指標、共生藻とサンゴ虫の差 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ はサンゴ虫の共生藻に対する依存度、或いは運動や粘液形成に関わる生理状態の指標になることが示唆された。これも実験による確認が期待される。

## 7. 本研究によって得られた成果

①沖縄諸島におけるサンゴ礁の水質、サンゴの核酸比、安定同位体比に関するデータが積み上げられた。

②我が国におけるサンゴ保全のための水質環境基準の目安が得られた。

③サンゴの核酸比が成長・成熟に関する生理状態の指標となり得ることが確認された。

④共生藻の炭素安定同位体比が光合成活性の指標、共生藻とサンゴ虫のその差が共生藻に対するサンゴ虫の依存度、或いはサンゴ虫の運動や粘液形成に関わる生理状態の指標となり得ることが確認された。

## 8. 文献

1) 沖縄のサンゴ礁. 西平守孝編、三陽印刷、1988.

2) Grigg, R.W. and S.J. Dollar: Natural and Anthropogenic Disturbance on Coral Reef. Chapter 17 of Coral Reefs (Ecosystems of the World, 25) ed. by Z. Dubinsky, Elsevier, Amsterdam- Oxford- New York-Tokyo, 1990.

3) サンゴの生物学. 山里 清、東大出版会、1991.

4) Coles, S.I. and L. Ruddy: Comparison of water quality and reef coral mortality and growth in Southeastern Kaneohe Bay, Oahu, Hawaii, 1990 to 1992, with conditions before sewage diversion. *Pacific Science*, 49(3), 247-265, 1995.

5) 東 正彦: C-Nバランスに基づくサンゴ礁生態系形成モデル. 月刊海洋 (海洋出版)、12、794-800、1991.

6) Jokiel, P.L., Z. Dubinsky and N. Stambler: Results of the 1991 United States-Israel Workshop, "Nutrient Limitation in the Symbiotic Association between Zoosantellae and Reef-building Corals". *Pacific Science*, 48(3), 215-218, 1994.

7) Sasaki, K. and Y. Sawada: Determination of ammonia in estuaries. *Bul. Japan. Soc. Scien. Fish.*, 46(3), 319-321, 1980.

8) Suzuki, R. and T. Ishimaru: An improved method for the determination of phytoplankton

- chlorophyll using N, N-Dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 46, 190-194, 1990.
- 9) 中野 広：稚仔魚研究のための核酸の定量法. *海洋と生物*, 54, 23-26.
  - 10) Crossland, C.J. : Dissolved nutrients in reef waters of Sesoko Island, Okinawa: A preliminary study. *Galaxea*, 1, 47-54, 1982.
  - 11) Ayukai, T. : Temporal variability of the nutrient environment on Davies Reef in the Central Great Barrier Reef, Australia. *Pacific Science*, 47(2), 171-179, 1993.
  - 12) Capone, D.G. : Microbial nitrogen transformations in unconsolidated coral reefs sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 80, 75-88, 1992.
  - 13) Charpy-Roubaud, C.j., L. Charpy and J.L. Cremoux : Nutrient budget of the lagoonal waters in an open central South Pacific atoll (Tikehau, Tuamotu, French Polynesia). *Marine Biology*, 107, 67-73, 1990.
  - 14) Laws, E.A. and C.B. Allen : Water quality in a subtropical enbayments more than a decade after diversion of sewage discharges. *Pacific Science*, 50(2), 194-210, 1996.
  - 15) Risk, M.J., P.W. Sammarco and H.P. Shwarcz : Cross-continental shelf trends in  $\delta^{13}\text{C}$  in coral on the Great Barrier Reef. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 106, 121-130, 1994.

#### 国際共同研究等の状況

特になし

#### 研究発表の状況

- 市川忠史・中田 薫・松川康夫・今井良松：沖縄・瀬底島におけるサンゴと共生藻の相互関係と季節変化、1994年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集、245-246.
- 松川康夫・中田 薫・市川忠史：沖縄におけるサンゴ四種のRNA/DNA、1996年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集、282.
- 市川忠史・下田 徹・松川康夫：サンゴ同位体比からみたサンゴ・共生藻と環境との関係、1996年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集、283-284.

表1. 調査地点の環境とサンゴ生育状況所見（サンゴ欠X、少△、並○、多◎）

1992.10.15（瀬底島）

瀬底ビーチ（◎）：礁嶺・礁縁にミドリイシ、ハマサンゴ、礁池にエダコモン、ハナヤサイ多い。  
 琉大センター前（◎）：ラグーンのない礁、ソフトコーラル散見。

1993.09.04（沖縄本島、潜水観察無し、岸からの観察のみ）

与根（X）：糸溝の北、台風直過で水濁り、干潟のようでサンゴがある感じせず。  
 那覇マリーナ（○）：新港、水綺麗、岸壁にサンゴ散見。

北谷ビーチ（○）：埋立人工海水浴場、水綺麗。

谷茶（○）：恩納村、自然海浜、細砂、水比較的綺麗。

伊芸（△）：金武湾、細砂、水ぼんやりとして程やか、点在する岩にホンダワラ、サンゴ礁なし。

伊計島（○）：金武湾と中城湾の境界、水綺麗、岩礁に海藻とサンゴ散在。

中城（X）：埋立開発で泥底、サンゴなし、海藻なし。

知念（X）：海水浴場、砂場、遠くにリーフ。

1993.09.05（同上）

名護（△）：公園の人工岸壁、水綺麗。

屋我地（X）：シルト堆積激甚。

平良湾（X）：赤っぽい砂。

1994.06.22（沖縄本島）

金武岬（○）：岩盤、水綺麗、ミドリイシ、キクメイシ多い。

伊芸（△）：細砂、シルト多い、コアマモの中に点在する岩にサンゴ散在。

与那原（X）：細砂、汚濁最悪、ゴミ多し、点在する岩礁に気味の悪い藻。

1994.06.23（渡嘉敷島）

阿波連ビーチ西端（◎）：水綺麗、岸際からエダサンゴの大群落、近くにキャンプ排水か？

渡嘉志久ビーチ（○）：水綺麗、ビーチはもずく多し、何かの原因でサンゴ荒れた。

1994.06.28、29（宮古島）

砂山ビーチ（○）：水綺麗、大規模なオニヒトデ食害痕跡

新城（◎）：水綺麗、見事なエダサンゴ群落、巨大ハマサンゴ塊。

1995.08.30～09.1（石垣島）

浦底（西海水研石垣支所前）St.1～5（◎）：見事なテーブルサンゴ群落。

St.6～9（○）：オニヒトデ食害痕跡

St.10（△）：シルト堆積、水ぼんやりとして、サンゴ勢いなし。

吉原A（距岸100m）（△）：礁池、泥混じり砂、水綺麗、岸際は海藻・草多し

吉原B（距岸500m）（◎）：礁嶺間近、エダサンゴ群落。

底地ビーチ南端（△）：シルト堆積、水ぼんやり、ヒルモの中に点在する岩礁にサンゴ

観音崎（X）：八重山港周辺開発や都市排水の影響か、シルト堆積酷く、サンゴなし。

平野（◎）：島の北端、水綺麗、オニヒトデの回復途上か。

白保（△）：集落の前、岩盤はホンダワラに席卷されている。

登野城（△）：石垣港西端外側、人工岸壁寄りにハナヤサイ散見、他は海藻とソフトコーラルが席卷。

1996.09.06～08（西表島）

南風見崎（X）：どこまでもホンダワラ密生。

八重目崎（○）：礁池のない礁、サンゴ少なくないが一つひとつが小さい。

サバ崎（◎）：サンゴ密度高い、生きいきした感じ。

外蔵島（◎）：同上

浦内湾港南（△）：ホンダワラ多い。

船浦港西側砂質（△）：港建設のシルト堆積、アマモ多い中に貧弱なサンゴ散見。

上原（△）：同に似る。

星砂海岸（○）：礁池に海水浴客多し、水ぼんやり、ハナヤサイ、コブハマ、エダコモン多い。

祖納（△）：ヒルモからホンダワラ群落、エダサンゴ群落の痕跡、直近の漁港建設のシルト被害か。



表2. 調査地点のサンゴ生育状況評価と水・底質

| 年月日   | 地点       | 評価  | 底質   | NH4   | NO3   | NO2  | PON<br>( $\mu$ M) | PO4  | POP  | Chla<br>( $\mu$ g/l) |
|---|----------|-----|------|-------|-------|------|-------------------|------|------|----------------------|
| 1992.10.15 (瀬底島)                              |          |     |      |       |       |      |                   |      |      |                      |
|   | 瀬底ビーチ    | (◎) | 礁縁   | 3.15  | 0.27  | 0.05 | 0.23              | ND   | 0.00 | 0.20                 |
|   |          | (○) | 礁池   | 2.43  | 0.90  | 0.03 | 0.30              | ND   | 0.01 | 0.20                 |
|   | 琉大施設前    | (◎) | 岩盤   | 3.00  | 1.54  | 0.06 | 0.71              | ND   | 0.00 | 0.70                 |
| 1993.09.04~05 (沖縄本島)                          |          |     |      |       |       |      |                   |      |      |                      |
|   | 伊計島      | (○) | 岩礁   | 1.10  | 2.22  | 1.91 | 1.10              | 0.08 | 0.10 | 0.26                 |
|   | 那覇マリーナ   | (○) | 砂    | 1.46  | 4.35  | 1.56 | 1.28              | 0.25 | 0.14 | 0.49                 |
|   | 北谷ビーチ    | (○) | 砂    | 2.90  | 2.53  | 0.22 | 1.74              | 0.19 | 0.29 | 0.48                 |
|   | 谷茶       | (○) | 細砂   | 0.37  | 1.69  | 0.22 | 3.24              | 0.08 | 0.39 | 0.75                 |
|   | 名護       | (△) | 人工岸壁 | 1.23  | 0.74  | 0.21 | 0.94              | 0.16 | 0.11 | 0.29                 |
|   | 伊芸       | (△) | 細砂   | 0.48  | 9.20  | 0.31 | 5.11              | 0.08 | 0.43 | 3.05                 |
|   | 知念       | (X) | 砂場   | 0.22  | 5.20  | 0.23 | 2.47              | 0.10 | 0.25 | 1.57                 |
|   | 平良湾      | (X) | 赤砂   | 0.87  | 1.20  | 0.10 | 0.65              | 0.07 | 0.10 | 0.50                 |
|   | 屋我地      | (X) | シルト  | 1.34  | 5.27  | 0.21 | 16.81             | 0.22 | 1.91 | 14.14                |
|   | 中城       | (X) | 泥底   | 2.86  | 12.37 | 0.63 | 2.55              | 1.73 | 0.41 | 0.43                 |
|   | 与根       | (X) | 泥    | 10.00 | 72.73 | 2.13 | 4.94              | 0.36 | 0.72 | 3.86                 |
| 1994.06.21, 22, 23, 28~29 (瀬底島、沖縄本島、渡嘉敷島、宮古島) |          |     |      |       |       |      |                   |      |      |                      |
|   | 新城       | (◎) | 岩盤   | 0.23  | 0.43  |      | 0.44              | 0.04 | 0.05 | 0.16                 |
|   | 阿波連西端    | (◎) | 岩盤   | 3.03  | 0.42  |      | 1.09              | 0.61 | 0.07 | 0.11                 |
|   | 瀬底ビーチ    | (◎) | 岩盤   | 0.38  | 0.85  |      | 0.39              | 0.78 | 0.08 | 0.28                 |
|   |          | (○) | 砂    | 0.73  | 1.28  |      | 0.61              | 0.83 | 0.07 | 0.35                 |
|   | 砂山ビーチ    | (○) | 岩盤   | 0.17  | 0.52  |      | 0.54              | 0.02 | 0.08 | 0.33                 |
|   | 渡嘉志久     | (○) | 岩盤   | 0.83  | 1.20  |      | 0.65              | 0.73 | 0.06 | 0.27                 |
|   | 金武岬      | (○) | 岩盤   | 1.39  | 0.83  |      | 1.13              | 0.83 | 0.10 | 0.22                 |
|   | 伊芸       | (△) | シルト  | 0.39  | 0.19  |      | 0.59              | 0.77 | 0.10 | 0.32                 |
|   | 与那原      | (X) | 細砂   | 18.27 | 19.23 |      | 5.14              | 1.58 | 1.12 | 7.78                 |
| 1995.08.30~09.1 (石垣島)                         |          |     |      |       |       |      |                   |      |      |                      |
|   | 浦底St.1~5 | (◎) | 岩盤   | 0.05  | 0.46  | 0.05 | 0.50              | 0.05 | 0.03 | 0.41                 |
|   | 吉原B      | (◎) | 岩盤   | 0.27  | 0.31  | 0.07 | 0.42              | 0.07 | 0.01 | 0.07                 |
|   | 平野       | (◎) | 砂    | 0.24  | 0.40  | 0.07 | 0.46              | 0.07 | 0.03 | 0.14                 |
|   | St.6~9   | (○) | 岩盤   | ND    | 0.33  | 0.04 | 0.61              | 0.04 | 0.04 | 0.55                 |
|   | St.10    | (△) | シルト  | 0.32  | 0.36  | 0.05 | 0.64              | 0.04 | 0.05 | 0.46                 |
|   | 吉原A      | (△) | 砂泥   | 0.09  | 0.76  | 0.11 | 0.40              | 0.04 | 0.01 | 0.12                 |
|   | 底地ビーチ    | (△) | シルト  | ND    | 0.32  | 0.04 | 0.47              | 0.05 | 0.03 | 0.24                 |
|   | 白保       | (△) | 岩盤   | 0.75  | 0.66  | 0.06 | 0.54              | 0.07 | 0.02 | 0.28                 |
|   | 登野城      | (△) | 礁    | 1.59  | 1.73  | 0.09 | 0.88              | 0.26 | 0.08 | 0.83                 |
|   | 観音崎      | (X) | シルト  | 1.84  | 1.19  | 0.13 | 1.82              | 0.11 | 0.24 | 2.30                 |
| 1996.09.06~08 (西表島)                           |          |     |      |       |       |      |                   |      |      |                      |
|   | サバ崎      | (◎) | 岩盤   | 0.61  | 0.63  | 0.03 |                   | 0.02 |      | 0.36                 |
|   | 外離島      | (◎) | 岩盤   | 0.65  | 1.40  | 0.04 |                   | 0.08 |      | 0.06                 |
|   | 八重目崎     | (○) | 岩盤   | 1.13  | 0.54  | 0.06 |                   | 0.08 |      | 0.10                 |
|   | 星砂海岸     | (○) | 岩盤   | 1.59  | 0.93  | 0.12 |                   | 0.04 |      | 0.41                 |
|   | 浦内湾港南    | (△) | 岩盤   | 0.40  | 0.18  | 0.04 |                   | 0.03 |      | 0.16                 |
|   | 船浦港西側    | (△) | シルト  | 0.85  | 0.38  | 0.04 |                   | 0.00 |      | 0.49                 |
|   | 上原       | (△) | シルト  | 0.93  | 0.25  | 0.03 |                   | 0.01 |      | 0.25                 |
|   | 祖納       | (△) | 礁    | 0.73  | 0.17  | 0.08 |                   | 0.02 |      | 0.36                 |
|   | 南風見崎     | (X) | 岩盤   | 0.99  | 1.03  | 0.06 |                   | 0.07 |      | 0.33                 |

表3. 1995年8月30日~9月1日の石垣島周辺サンゴ礁の概況(上段)、サンゴ2種のRNA/DNA(中段)、水中の栄養塩( $\mu\text{M}$ )、Chl.a( $\mu\text{g/l}$ )、SS( $\text{mg/l}$ )(下段)。

|   | St.1 | 平野   | 吉原B  | St.5 | 底地        | St.10 | 吉原A      | 観音崎北 | 白保   | 登野城   |
|---|------|------|------|------|-----------|-------|----------|------|------|-------|
| サンゴ生育   | ◎    | ◎    | ◎    | ○    | △         | △     | △        | X    | X    | X     |
| 大型植物底質  |      |      |      |      | 海草<br>シルト | シルト   | 海草<br>砂泥 | シルト  | 海藻   | 海藻    |
| トゲスギ  | 1.55 | 1.48 | 1.45 | 1.37 | 1.21      | 1.13  | 1.07     | 1.03 | ---  | ---   |
|   | 1.48 | 1.47 | 1.43 | 1.34 | 1.17      | 1.07  | 1.07     | 1.01 | ---  | ---   |
| ハナヤサイ   | ---  | 1.01 | ---  | ---  | 1.27      | 1.98  | ---      | 1.91 | ---  | 1.99  |
|   | ---  | 0.99 | ---  | ---  | 1.27      | 1.98  | ---      | 2.15 | ---  | 1.94  |
| NH <sub>4</sub> +NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> | 0.63 | 0.71 | 0.65 | 0.43 | 0.36      | 1.06  | 0.96     | 3.16 | 1.47 | 3.41  |
| (NH <sub>4</sub>                                  | 0.09 | 0.29 | 0.27 | ND   | ND        | 0.63  | 0.09     | 1.84 | 0.92 | 1.59) |
| PN  | 0.50 | 0.46 | 0.42 | 0.55 | 0.47      | 0.61  | 0.40     | 1.82 | 0.54 | 0.88  |
| PO <sub>4</sub>                                   | 0.04 | 0.07 | 0.07 | 0.04 | 0.05      | 0.06  | 0.04     | 0.11 | 0.08 | 0.26  |
| PP  | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | 0.03      | 0.05  | 0.01     | 0.24 | 0.02 | 0.08  |
| Chl.a   | 0.30 | 0.11 | 0.07 | 0.60 | 0.24      | 0.37  | 0.12     | 2.30 | 0.19 | 0.83  |
| SS  | 0.27 | 1.04 | 1.52 | 1.04 | 1.37      | 0.40  | 0.47     | 5.13 | 0.91 | 1.51  |

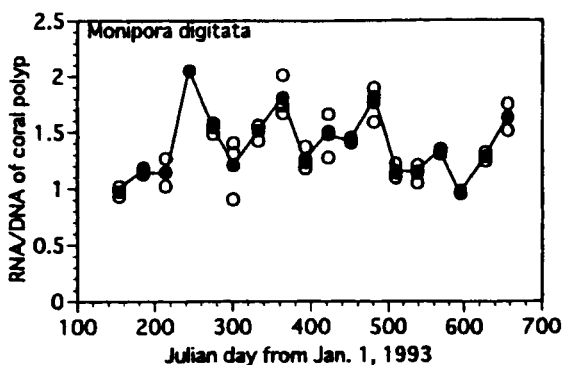
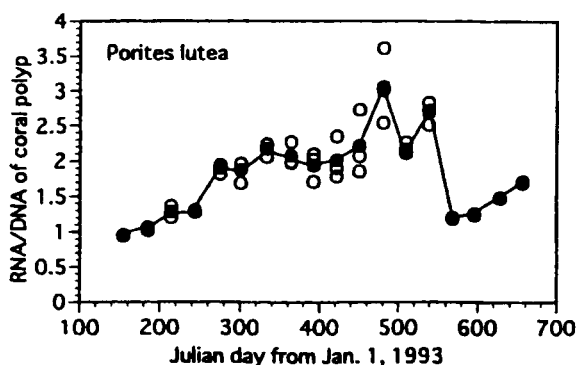
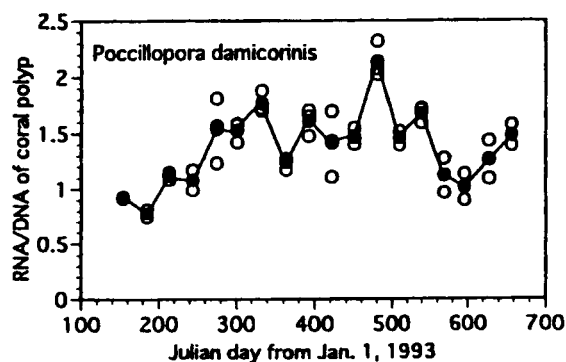
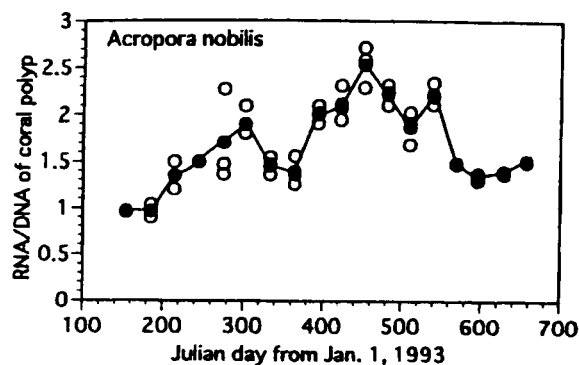


図1. 瀬底島におけるサンゴ4種、トゲスギ (*Acropora nobilis*)、コブハマ (*Porites lutea*)、ハナヤサイ (*Pocillopora damicornis*)、エダコモン (*Montipora digitata*) のRNA/DNAの季節変化

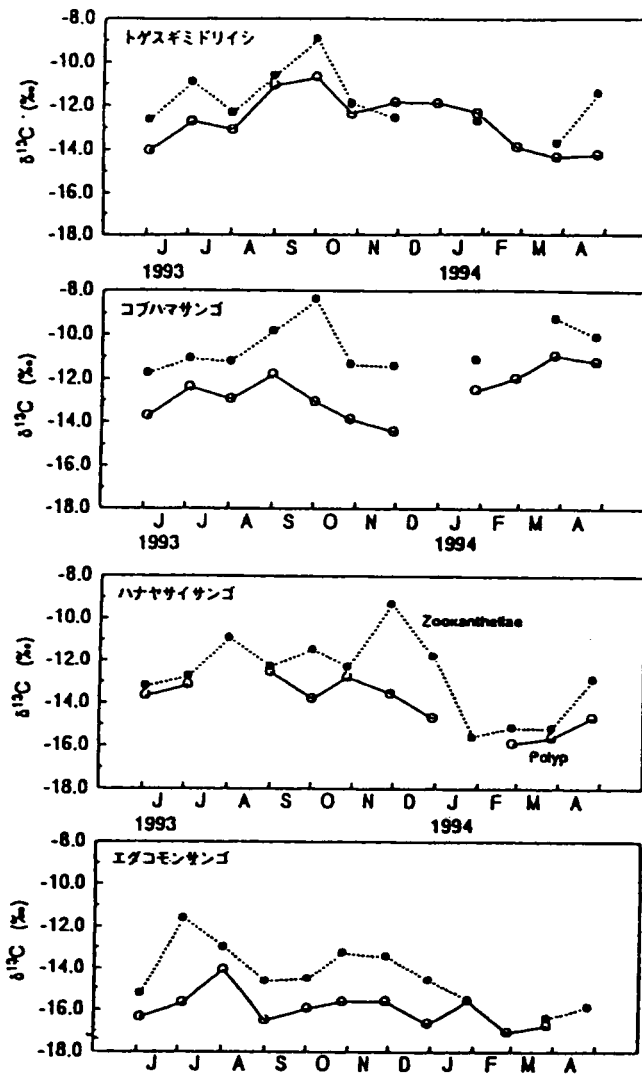


図2. 瀬底島におけるサンゴ4種の共生藻とサンゴ虫の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) の季節変化

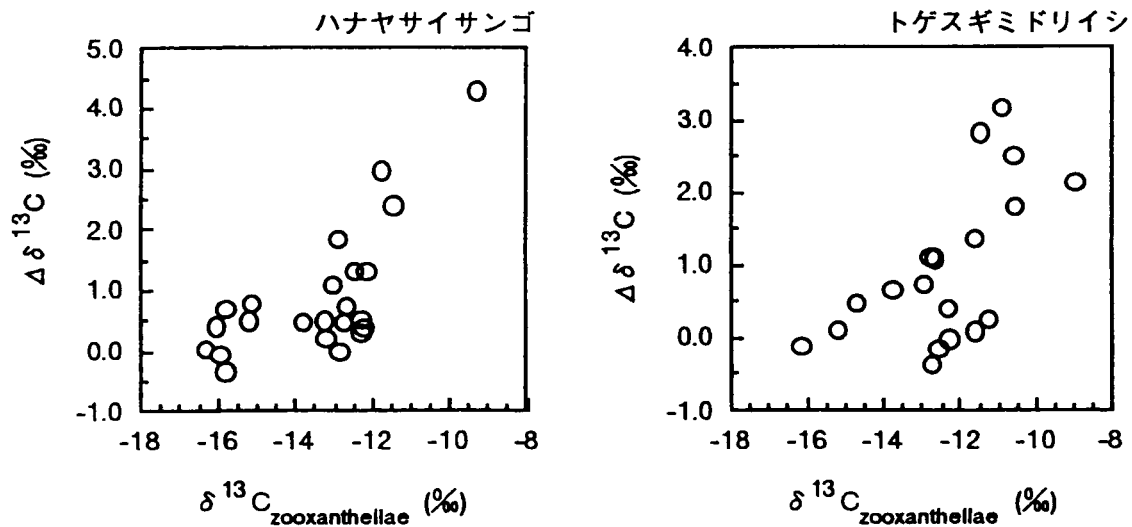


図3. 沖縄諸島におけるハナヤサイサンゴとトゲスギミドリイシの共生藻の炭素安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) と、サンゴ虫との差 ( $\Delta\delta^{13}\text{C}$ ) との関係