

石西礁湖における礁斜面の環境因子と 台風の影響に関する研究

黒山 順二^{*1} 豊田 孝義^{*1}

筒井 浩之^{*1} 中島 敏光^{*1}

1998年10月に沖縄県の石西礁湖において、サンゴ礁環境とサンゴ生育状態の把握に関する実態調査を実施した。水温、塩分、クロロフィルaおよび栄養塩などを計測し、主に礁斜面におけるサンゴの生育およびサンゴ礁の発達にとって重要な環境因子を探索した。その結果、石西礁湖における北方礁斜面の方が南方礁斜面に比べてサンゴの生育およびサンゴ礁の発達が良好であり、その南北の違いに関連した環境因子として、特に海底地形、水温および栄養塩の南北の違いが見出された。これらのことから、海底勾配が緩やかな北方礁斜面の方が共生藻の光合成に必要な光と栄養塩が豊富にあり、それゆえにサンゴの生育およびサンゴ礁の発達が良好であると推測された。また、台風10号の通過に伴うサンゴ礁環境の変化を実測して、台風の通過は鉛直混合によって表層水の均質化を促進し表層水温を低下させる効果を持つことが確認された。その年の夏季は、例年に比べ異常に台風が少なかったために表層水温が高くなり過ぎ、石西礁湖の近辺海域においてサンゴの白化現象が起こったものと推定された。

キーワード：石西礁湖，サンゴ礁，礁斜面，環境因子，台風

Study of Environmental Factors around a Reef Slope and the Effect of a Typhoon in the Okinawa Sekisei Lagoon

Junji KUROYAMA^{*2} Takayoshi TOYOTA^{*2}

Hiroyuki TSUTSUI^{*2} Toshimitsu NAKASHIMA^{*2}

We performed a survey on the present coral reef environment and coral growing conditions in the Okinawa Sekisei Lagoon in October 1998. Through measurements of water temperature, salinity, chlorophyll-a and nutrients in and around the lagoon, we sought the environmental factors that impacted on coral growth and coral reef development, mainly around the reef slope. Coral growth and coral reef development around the northern reef slope were better than around the southern reef slope. We found that, especially, bottom topography, water temperature and nutrients were the environmental factors related to the difference. We inferred that light and nutrients were more abundant around the northern reef slope which had a gentler slope, and, therefore, coral growth and coral reef development around the northern reef slope were better than around the southern reef slope. In addition, the change of coral reef environment with the passage of typhoon No. 10 was measured. It was confirmed that vertical mixing had become active and that the typhoon promoted homogenization of the surface water, which had the effect lowering the surface layer temperature. We surmised that the surface layer temperature had become too high because there were abnormally few typhoons in the summer when the coral bleaching phenomenon was observed in the sea area around the Sekisei Lagoon.

Key words: Sekisei Lagoon, Coral Reef, Reef Slope, Environmental Factor, Typhoon

* 1 海洋生態・環境研究部

* 2 Marine Ecosystems Research Department

1 はじめに

石西礁湖は、沖縄県八重山諸島の石垣島と西表島の間位置し、東西約25km、南北約20kmの広さを有する我が国最大のサンゴ礁海域である。石西礁湖はその東部や北部などで堡礁を形成し、琉球列島の多くの島が裾礁を形成しているのと好対照である。我々は1998年10月10～23日、石西礁湖においてサンゴ礁の環境とサンゴ生育状態の把握に関する実態調査を実施した。なお、調査期間中の10月16日午前9時頃に、調査海域近くの台湾東方海域を超大台風10号が通過し、台風の通過前後でサンゴ礁環境の変化を実測することができた。近年、サンゴ礁が世界中で崩壊の危機に直面しており、その原因解明と保全が急務となっている。特に1997年から1998年にかけて世界的にサンゴの白化現象が大きく報じられ、石西礁湖の近海でも1998年の夏季に大規模な白化現象が発生した¹⁾。その原因として、エルニーニョ現象との関連性や、初夏から水温が高かったこと、さらに台風が少なく海水がかき回されなかったため水温上昇に拍車をかけたことなどが指摘されている。なお、我々が今回の調査を実施した10月は、石西礁湖におけるサンゴの白化が回復に向かい始めた頃であった。

ところで、「サンゴ」とはクラゲやイソギンチャクと同じ刺胞動物(腔腸動物)に属する動物群の総称であり、サンゴはサンゴ礁を作る石サンゴ類や軟体サンゴ類(ソフトコーラル)の「造礁サンゴ類」およびサンゴ礁とは関係のない深海性の本サンゴ類(宝石サンゴ類)などの「非造礁サンゴ類」とに大別される。一方、「サンゴ礁(コーラルリーフ)」とは造礁サンゴ類を中心として、石灰藻類、貝類、甲殻類および「星砂」で知られる有孔虫類などの、石灰質を分泌する生物すなわち「造礁生物」の遺骸が寄り集まり積み重なってできた地形のことである。サンゴ礁は沖合からの波浪に立ちはだかる一種のバリアーとなり、その消波効果によってサンゴ礁の内側に外側とは対照的な静けさと豊かな富を生産する。言わば、サンゴ礁は生物が作り上げた「生物の楽園」である²⁾。

なお、造礁サンゴは褐虫藻を体内に共生させ、その褐虫藻の光合成に大きく依存していることが分かっている。また、サンゴ礁は一般に外側に向かって発達することが知られ、礁斜面ではサンゴの被度が非常に高く種類もかなり多いと言われている。さらに、礁斜面における湧昇などによってサンゴ礁の外側から栄養物質が内側に供給される可能性も指摘されている^{3)～5)}。しかし、これらに関する実態およびメカニズム等は十分には分かっていない。

本稿では、上記の石西礁湖における実態調査のうち、主にサンゴ礁生態系の物理・化学的環境について調査結果を報告する。特に、(1)石西礁湖の北方および南方の礁斜面における環境因子を比較し、礁斜面のサンゴ生育およびサンゴ礁発達にとって重要な環境因子について考察するとともに、(2)台風の通過に伴う前後の環境変化を比較し、台風がサンゴ礁生態系に及ぼす影響について考察する。

2 調査方法

図1に3本の調査測線および各測点を示す。A測線は、北方から西表島と小浜島の間をヨナラ水道を通り礁湖内を経由して黒島と新城島の間を通過して南方へ抜ける、石西礁湖の西部海域を南北に縦断する測線である。B測線は、石西礁湖の南部海域において黒島の周囲を回る測線である。C測線は、黒島港から石垣港に向かい石西礁湖の東部海域を横断する測線である。本稿では、主にA測線について調査結果の報告および考察を行う。

1998年10月12日と13日には、船上オーバーフロータンクなどによる航走連続測定手法を用いて、St. 1～4、①～⑥およびSt. 5～8のA測線に沿って表層水温、塩分、クロロフィルaおよび透明度の水平分布を調べた。また、A測線上の各測点においてXBT計測により水温鉛直分布を調べた。さらに、10月13日には栄養塩分析などのための多層採水も行った。台風10号通過直後の10月18日には、St. 8.5～19および⑥～②のB測線およびA測線に沿って、航走連続測定手法による表層水温の水平分布と各測点におけるXBT計測による水温の鉛直分布を調べた。さらに、航走連続測定手法を用いて、St. (1)～(14)のC測線に沿って表層水温の水平分布も調べた。一方、サンゴの生育状況および白化状況を把握するため、10月22日

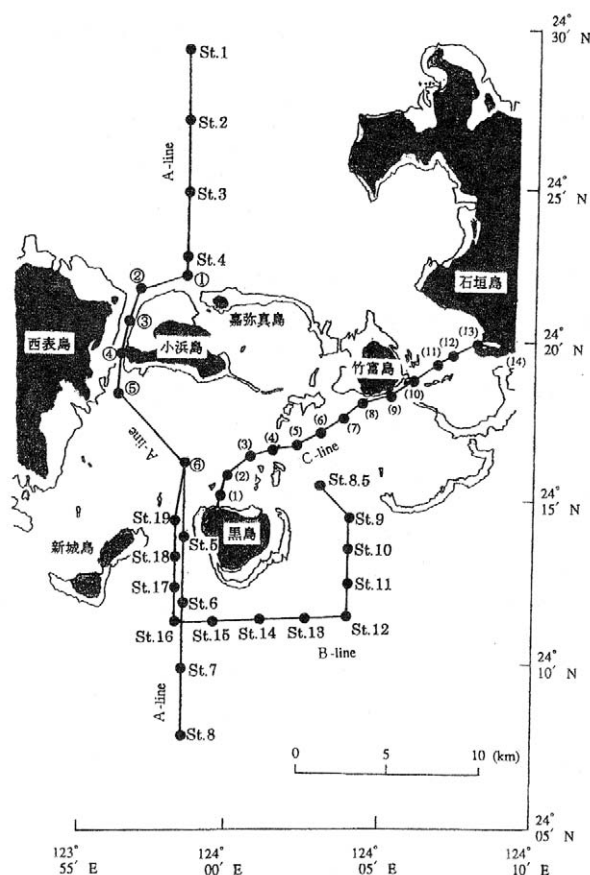


図1 調査測線および測点 (1998年10月12, 13, 18日)
Fig. 1 Observation lines and station points
(October 12, 13 and 18, 1998)

と23日にSt. 4 (北方礁斜面) とSt. 5 (南方礁斜面) の近傍でサンゴの生育状態をライントランセクト法によって調査し比較した。

3 結果および考察

3.1 礁斜面のサンゴ生育およびサンゴ礁発達に

とって重要な環境因子

図2は、環境庁発行(1996年)の「サンゴ礁分布図(先島諸島)」に海上保安庁発行(1978, 1983年)の「海底地形図」を組み合わせ加工したものである。サンゴの被度(被覆度)によって色分けされており、緑色の部分は50~100%, 黄色の部分は5~50%, その他の部分は5%以下(または未調査)である。被度を見ると, 5%以下の部分が石西礁湖全体の半分以上を占めているが, 特に小浜島の北方および東方域は被度が高く50%以上の部分が多く分布してサンゴの生育状況が良いことが分かる。また, サンゴ礁の発達状況を見ると, 同じく小浜島の北方, 竹富島の北方, および黒島の南方などでサンゴ礁の幅が広い。概して, サンゴ礁は礁湖の外側に向かって発達していると言える。さらに, 石西礁湖の西部海域を南北に縦断するA測線に沿ってサンゴ礁分布を見

ると, 測線の南方に比べて北方の方がサンゴの被度が高いと言える。

また, 実際に今回の調査でも, ライントランセクト法によるSt. 4 (北方礁斜面) とSt. 5 (南方礁斜面) の近傍におけるサンゴの生育状態の調査結果を比較すると, St. 4近傍ではSt. 5近傍よりも被度が高く出現属数も多いことが分かった。また, サンゴの白化はSt. 4近傍では少なかったがSt. 5近傍では多く見られた。よって, St. 4近傍のサンゴの方がSt. 5近傍のサンゴに比べて生育状況が良好であったと言える。

ところで, サンゴが健康に生きていくためには, 光が十分に当たる環境, 水温が高からず低からず, 塩分も低くなり過ぎない良い環境が必要であると言われている。一般に礁斜面は, この良い環境に近いのでサンゴの生育が最も活発な所であると考えられる。礁斜面の底部では, 通常それほど強い波当たりというわけでもなく, また, 水深が比較的浅い所では多くの光が届き, このような環境は多くのサンゴにとってかなり好適な条件であると予想される。また, 死んだサンゴの骨格は石灰藻などが固まっていくため, 長い間には沖合に向かってサンゴ礁が発達していくことになる。したがって, 一般に礁斜面に

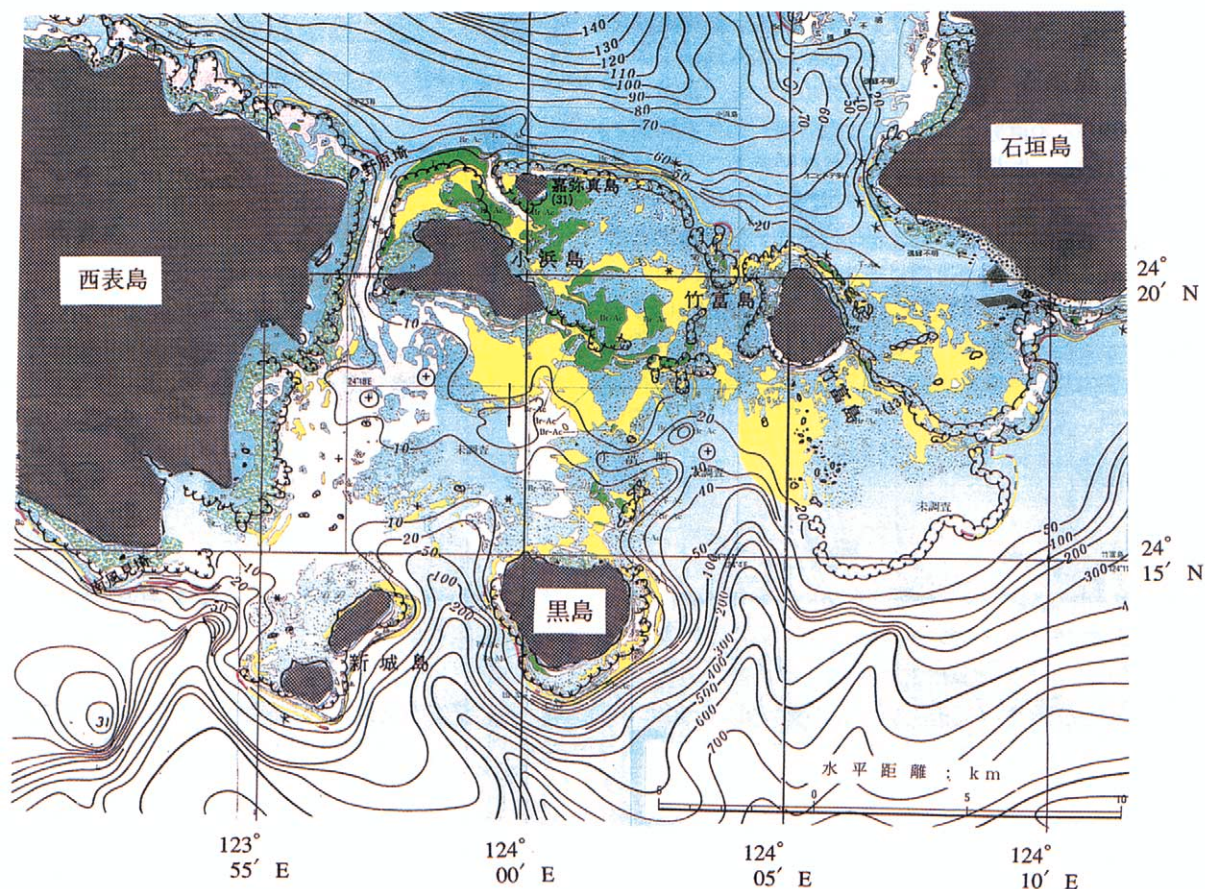


図2 石西礁湖のサンゴ礁分布と海底地形〔環境庁発行(1996)の「サンゴ礁分布図(先島諸島)」と海上保安庁発行(1978,1983)の「海底地形図」を組み合わせ加工して引用。色分けは被度を表し(緑色は50%以上), 等深線の数値はメートルの単位で示す。〕

Fig. 2 Coral reef distribution and bottom topography in the Okinawa Sekisei Lagoon

において、サンゴの生育状況およびサンゴ礁の発達状況が良いと考えられる。

一方、図2の海底地形を見ると、礁湖内部（礁湖内）は外部海域（礁湖外）に比べて浅く水深が20メートル程度以下である。また、礁湖外について、A測線に沿って北方礁斜面と南方礁斜面を比較すると、海底地形が全く対照的である。北方は海底勾配が緩やかで遠浅のようになっているのに対して、南方は海底勾配が急で溪谷のような様相を呈している。このような海底地形の違いが、北方と南方におけるサンゴ生育状況およびサンゴ礁発達の違いに大きく関連していると考えられる。たとえば、礁斜面の海底勾配以外の環境因子（水温、塩分、栄養塩、透明度、波および流動など）が全く同じだと仮定すれば、海底勾配が緩やかな方が沖に遠方まで浅くてサンゴ生育にとって重要な光を吸収しやすい環境となり、サンゴが生育する幅が沖に広がるとともにサンゴ礁が沖合に向かって発達しやすくなることが分かる。このことから、礁斜面におけるサンゴ礁の発達状況と海底勾配との間に相関があることが推測される。また、海底地形の違いによって、他の環境因子（水温、栄養塩、波および流動など）の違いが生じる可能性も考えられる。

図3は、A測線に沿って10月13日に計測した表層水温、表層塩分、表層クロロフィルaおよび透明度の水平分布である。礁湖内では礁湖外に比べて、水温および塩分はわずかに低く、クロロフィルaは高く、透明度は低い傾向が見られる。図4は、XBTを使ってA測線上の各測点で10月13日に計測した水温の鉛直分布である。礁湖外における鉛直分布の内、北方礁斜面と南方礁斜面とを比較すると、北方の方が概して低温であることが分かる。このことが、北方礁斜面の方が南方礁斜面よりサンゴの生育状況が良好であることに何らかの関連があると予想されるが、これだけでは不十分である。図5は、A測線上の各測点で10月13日に採水して計測した塩分の鉛直分布である。礁湖外における鉛直分布の内、北方礁斜面と南方礁斜面に大別して比較すると、表層では南方の方が概して高塩分であるが、深度30～100m程度では

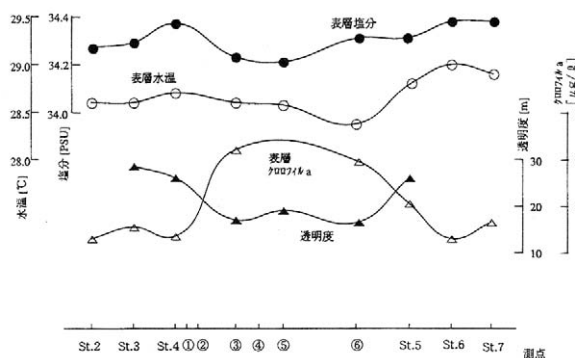


図3 A測線に沿った表層水温、表層塩分、表層クロロフィルaおよび透明度の水平分布（1998年10月13日）

Fig. 3 Horizontal distributions of temperature, salinity, chlorophyll-a and transparency on the surface along A-line (October 13, 1998)

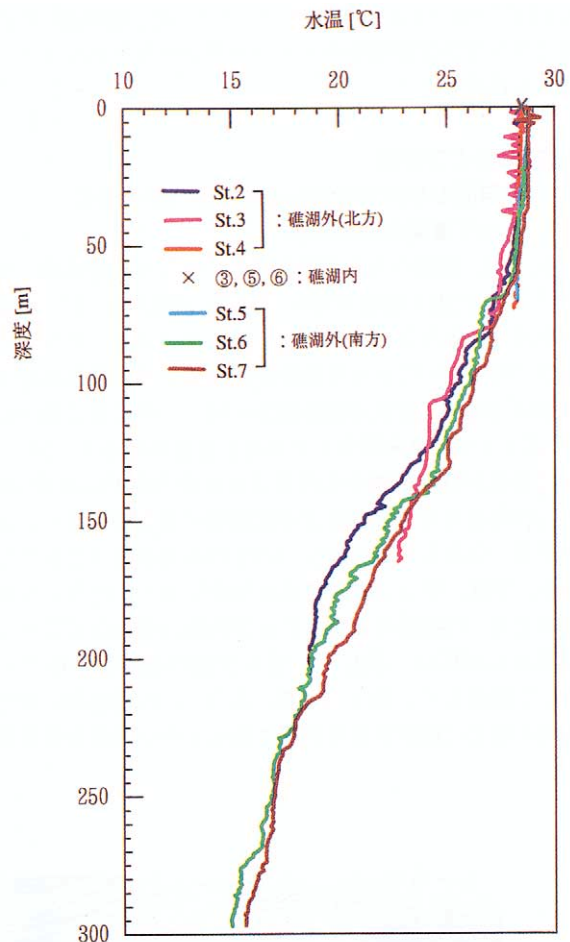


図4 A測線上の各測点における水温の鉛直分布（1998年10月13日）

Fig. 4 Temperature profiles at station points on A-line (October 13, 1998)

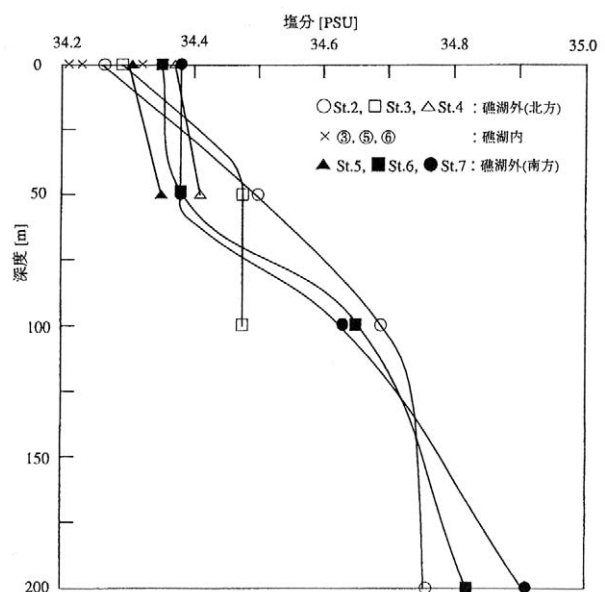


図5 A測線上の各測点における塩分の鉛直分布（1998年10月13日）

Fig. 5 Salinity profiles at station points on A-line (October 13, 1998)

逆転して北方の方が概して高塩分であることが分かる。

図6は、A測線に沿って10月13日に採水して計測した表層栄養塩（硝酸塩、磷酸塩、珪酸塩）の水平分布である。礁湖の内外を比較すると、硝酸塩および珪酸塩は礁湖内の方が高いが、逆に磷酸塩は礁湖外の方が高い。図7、8、9は、それぞれA測線上の各測点で10月13日に採水して計測した硝酸塩、磷酸塩、珪酸塩の鉛直分布である。いずれも、日本海沿岸海域の栄養塩濃度（たとえば富山湾で実測した鉛直分布）と比べると1桁程度も低く、サンゴ礁海域がいかに貧栄養であるかが分かる。また、北方礁斜面と南方礁斜面とを比較すると、北方礁

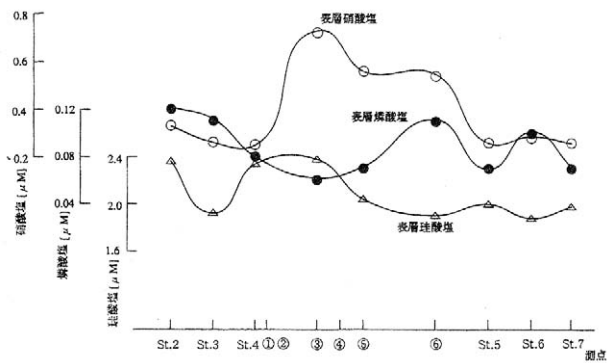


図6 A測線に沿った表層栄養塩（硝酸塩、磷酸塩、珪酸塩）の水平分布（1998年10月13日）

Fig. 6 Horizontal distributions of surface nutrient concentrations (NO_3^- , PO_4^- , SiO_3) along A-line (October 13, 1998)

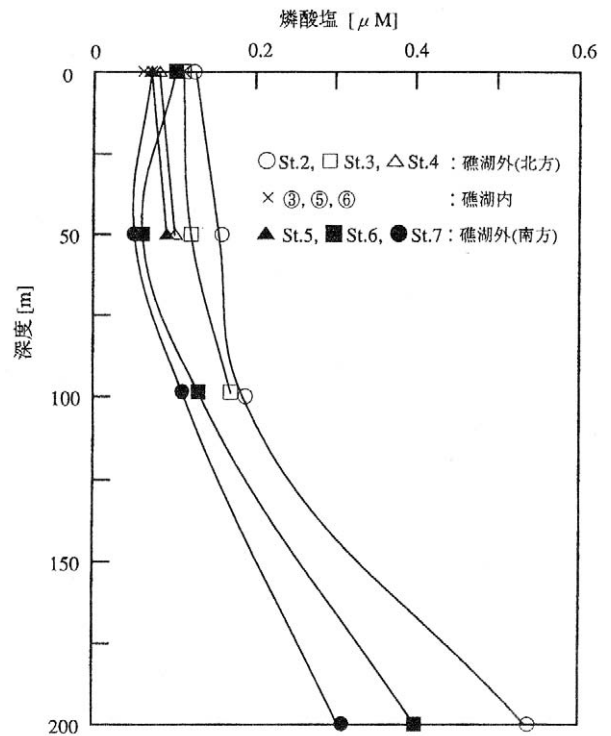


図8 A測線上の各測点における磷酸塩の鉛直分布（1998年10月13日）

Fig. 8 PO_4^- profiles at station points on A-line (October 13, 1998)

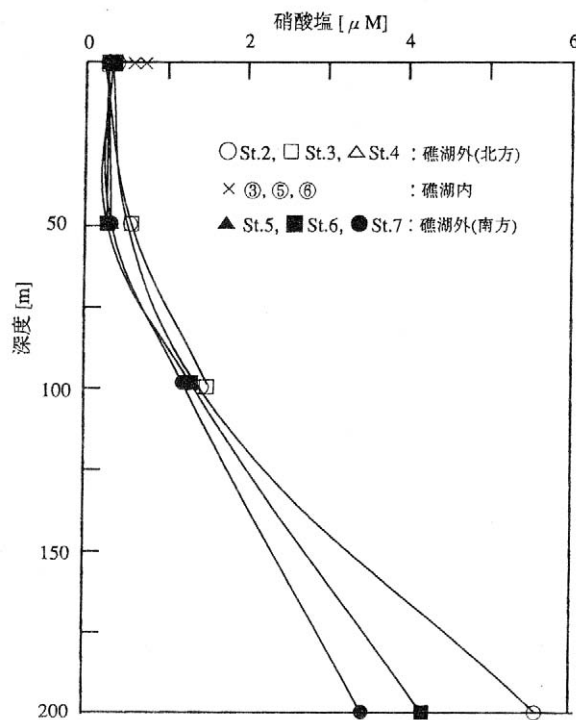


図7 A測線上の各測点における硝酸塩の鉛直分布（1998年10月13日）

Fig. 7 NO_3^- profiles at station points on A-line (October 13, 1998)

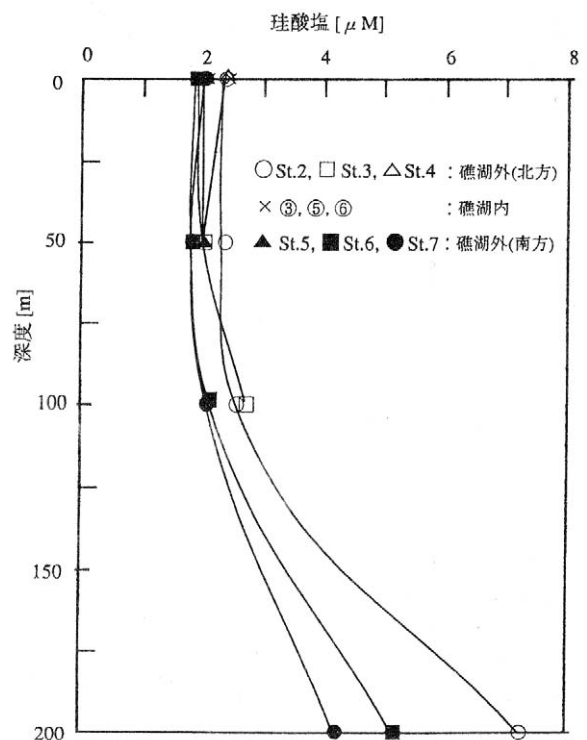


図9 A測線上の各測点における珪酸塩の鉛直分布（1998年10月13日）

Fig. 9 SiO_3 profiles at station points on A-line (October 13, 1998)

斜面の方がいずれの栄養塩も高いことが分かる。この原因としては、海底地形に関連した湧昇の可能性や、他に黒潮の影響や島からの栄養塩供給の影響などが考えられる。この湧昇による外部からの栄養塩供給に関しては、「サンゴ礁の新生産の元になる栄養供給、特にリンの問題について、サンゴ礁がバイオフィルターとして効率が高く、貧栄養の亜熱帯表層水からも有効に栄養を確保できるのでないか。それと同時に、おそらく風などによってサンゴ礁の周りに局所的な湧昇が生じて、深層水に近い海水からも栄養が供給されるのでないか」という指摘がある³⁾。また、パラオ諸島サンゴ礁では、「サンゴ礁は底生生物が優占する系なので、海水中の栄養塩が低濃度でも海水交換が大きければ栄養塩は随時供給され、サンゴ礁-外洋間の海水交換はサンゴ礁への外部からの栄養塩供給過程の1つとして重要である」という研究がある⁴⁾。さらに、オーストラリアのグレート・バリアー・リーフでは、「サンゴ礁に流入する水道(水路)付近において潮汐効果によって湧昇が生じ、その湧昇によってサンゴ礁の発達が促進される」という研究報告もある⁵⁾。石西礁湖の場合、北方礁斜面の方が南方礁斜面に比べて水温が低いとともに栄養塩が高いことから、北方礁斜面では海底地形などに関連した湧昇が生じ、沖の下層における低温・富栄養の海水が外部から供給されていることが推測される。

3.2 台風の通過がサンゴ礁生態系に及ぼす影響

10月16日午前9時頃に、調査海域近くの台湾東方海域を超大型台風10号が通過した。石垣气象台によると、台風10号の通過前の10月12～13日には東寄りの風が多かったが、台風通過後の10月18日には北寄りの風が支配的となった。

台風10号の通過に伴うサンゴ礁の環境変化を見るために、まず図10に、接近した2測点である10月13日のSt. 6(太線)と10月18日のSt. 17(細線)における水温鉛直分布を示す。また図11に、台風通過前の10月12日(実線)と通過直後の18日(破線)に、A測線(およびB測線の部分)に沿って得られた水温の鉛直断面分布を示す。1℃間隔で等温線を描くとともに、海面の水温を記入している。これらの図から、台風通過前にあった深度70m位の水溫躍層が通過直後には消失し、海面から深度140m程度の躍層まで水温が一様化されたことが分かる。すなわち、台風の通過によって、冬季の水溫鉛直分布に類似した様相に変化し、海面の水溫は通過前に比べて1℃近くも下がった。これは、台風の通過に伴って風の応力による海水の鉛直混合が起こり、表層の水溫低下を誘因したためと考えられる。すなわち、台風の通過は、サンゴ礁生態系にとってサンゴ礁を破壊するなどの悪影響ばかりではなく、特に暑い夏季において表層の水溫が異常に高温化することを抑制する効果を持つという意味では、サンゴの生育に好ましい影響を与ええると言える。換言すれば、例年台風が数多く通過する当海域において、1998年のように例外的に台風の通過が少ない場合には海水の混合が弱かったことも、表層水溫が上がり過ぎてサ

ンゴから褐虫藻(共生藻)が抜け出して白化現象が起こる要因の1つになったことが推測される。

4 まとめ

1998年10月に、沖縄県の石西礁湖においてサンゴ礁環境とサンゴ生育状態の把握に関する実態調査を実施した。特に、礁斜面におけるサンゴ生育およびサンゴ礁発達と環境因子との関連性を調べるために、石西礁湖の内外において水温、塩分、クロロフィルaおよび栄養塩などの分布を計測して考察を行った。

その結果、主に以下のことが分かった。

(1) 石西礁湖の北方および南方の礁斜面を比較すると、北方礁斜面の方が南方礁斜面に比べてサンゴ生育およびサンゴ礁発達が良好であるが、その南北の違いに関連し

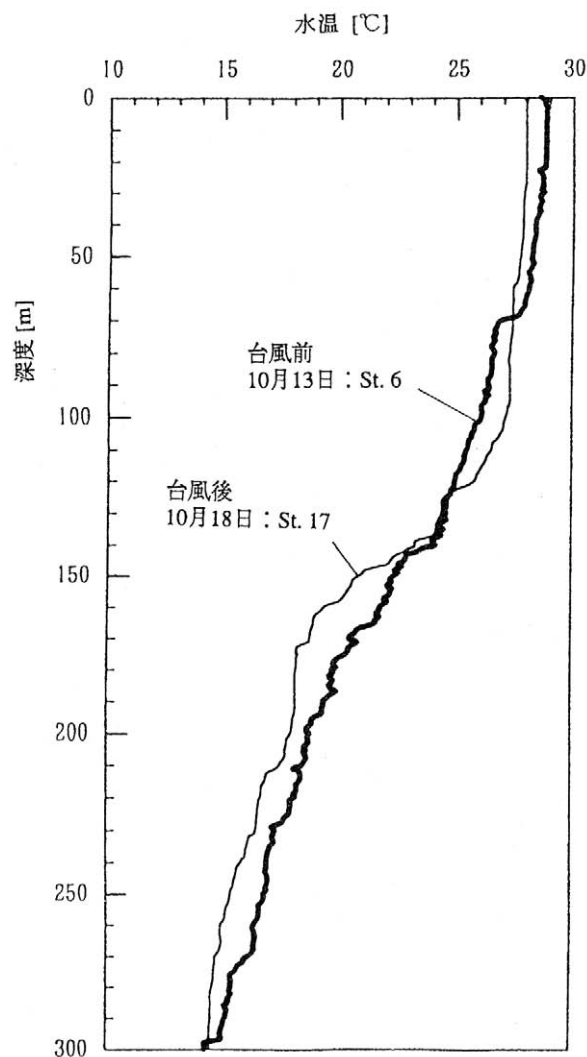


図10 台風前後における水温鉛直分布の比較
(1998年10月13日: St. 6 / 10月18日: St. 17)

Fig. 10 Comparison between temperature profiles before and after the passage of the Typhoon
(October 13, 1998: St. 6 / October 18, 1998: St. 17)

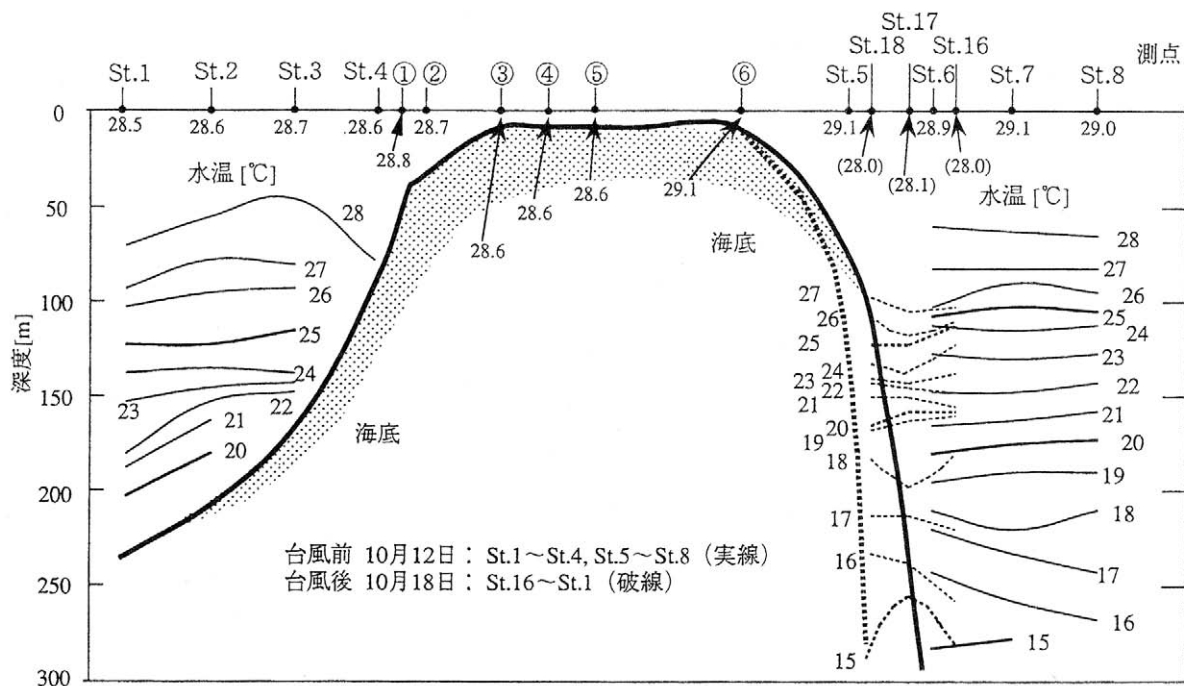


図11 水温の鉛直断面分布 (1998年10月12日: A測線/10月18日: B測線)

Fig. 11 Temperature section profiles along A-line (October 12, 1998) and along B-line (October 18, 1998)

た環境因子として、特に海底地形、水温および栄養塩の南北の違いが見付かった。このことから、北方礁斜面の方が海底勾配が緩やかであるため光を吸収しやすい環境であるとともに、湧昇などによって沖側から栄養塩が供給されやすいことが示唆された。結局、北方礁斜面の方が光と栄養塩が豊富にあり、褐虫藻の光合成に有利な環境であるためにサンゴが生育しやすく、さらにはサンゴ礁の発達が良いと考えられる。

(2) 台風の通過に伴う前後の環境変化を比較すると、台風の通過に伴って風の応力による海水の鉛直混合が起これば表層の水温低下を誘因することが分かった。このことから、台風の通過は、サンゴ礁生態系にとってサンゴ礁を破壊するなどの悪影響ばかりではなく、特に暑い夏季において表層の水温が異常に高温化することを抑制する効果を持つという意味では、サンゴの生育に好ましい影響を与えようと考えられる。

今後、サンゴ礁生態系におけるサンゴの生育およびサンゴ礁の発達にとって重要な環境因子について、さらに詳しく調べていく予定である。

謝辞

本調査の実施に際して御協力して頂くとともに有益な御助言を頂きました、財団法人熱帯海洋生態研究振興財団の阿嘉島臨界研究所ならびに財団法人海中公園センターの八重山海中公園研究所の関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤岡義三: “石垣島における造礁サンゴの白化に伴う大規模斃死”, 日本サンゴ礁学会第1回大会, 緊急討論「サンゴ白化問題」, (1998)
- 2) 西平守孝・酒井一彦・佐野光彦・土屋誠・向井 宏: サンゴ礁・生物がつくった生物の楽園, (平凡社, 1995)
- 3) 小池勲夫・茅根創ほか: 総合討論“サンゴ礁研究の課題と展望”, In 「海洋の物質循環と生態系—サンゴ礁研究の課題と展望—」, 月刊海洋, **23** (12), 838-849, (1991)
- 4) 秦浩司・山野博哉・丸山正・蔵野憲秀・茅根 創: “パラオ諸島サンゴ礁の栄養塩の分布とフラックス”, 日本サンゴ礁学会第1回大会 講演要旨集, 15, (1998)
- 5) Rory O. R. Y. Thompson and T. J. G and Golding: “Tidally Induced ‘Upwelling’ by the Great Barrier Reef”, Journal of Geophysical Research, **86**(C7), 6517-6521, (1981)
- 6) 白井祥平: サンゴ礁の世界, (沖縄高速印刷株式会社出版部, 1997)
- 7) 白井祥平: サンゴとサンゴ礁, (コーラルコーポレーション, 1993)
- 8) 山里 清: “サンゴ”, in 海洋大辞典, 和達清夫 監修, (東京堂出版, 1987)
- 9) 原島 省・功刀正行: 海の働きと海洋汚染, (裳華房, 1997)
- 10) 大森 信・茅根 創 監修: “海の顔・サンゴ礁 (第1~4回)”, in 海・知られざる世界 (第1~4巻), (日本放送出版協会, 1998, 1999)

- 11) ダグラス・H・チャドウィック：“サンゴ礁に迫る危機”，ナショナルジオグラフィック日本語版，1999年1月号，（日経ナショナルジオグラフィック社，1999）
- 12) 黒山順二・中島敏光・豊田孝義・筒井浩之・吉澤拓也：“沖縄石西礁湖におけるサンゴ礁環境の実態と台風の

影響”，1999年度日本海洋学会春季大会講演要旨集，89，（1999）

（原稿受理：1999年8月16日）