

（４）石西礁湖におけるサンゴ礁性生物の再生産及び関連する環境動態の把握

国立研究開発法人水産総合研究センター

鈴木豪

国立研究開発法人水産総合研究センター

亀田卓彦・名波敦・福岡弘紀・山下洋

平成25～27年度累計予算額：22,198千円（うち平成27年度：7,098千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

近年、サンゴ礁生態系の劣化が地球規模で深刻となっている。特に造礁サンゴの減少は、世界中で報告され、オニヒトデの大発生や大規模白化現象が原因となっている。本研究では、サンゴ礁生物の回復に欠かせない再生産プロセスに注目し、モデル化にあたって実測値の情報が得られていない部分を、野外での実験および観測によって明らかにした。まず、サンゴ礁生態系の中心となっている造礁サンゴでは、幼生供給と加入が重要な再生産エネルギーとなるが、幼生が着底した後の1年間は、野外での発見が困難で生残・成長に関する情報が不足していた。そこで、本研究では、格子状基盤に人工的に作出した幼生を一定数着生させて、その後の生残および成長を15か月間追跡した。その結果、これまで漠然とサンゴが回復しない場所では着生後の生残も低いと考えられていたのに対し、着生後15か月間は周辺のサンゴ回復状況とは関係なく一定レベルで推移した。一方、サンゴの成長は違いがみられ、サンゴが回復していない場所では成長が遅かった。これは、海底を覆う藻類が場所によって異なり、稚サンゴに届く光量に影響していることが原因と示唆された。次に、石西礁湖における近年のサンゴ減少の主要因である、オニヒトデの大発生メカニズムを明らかにするため、オニヒトデの産卵期におけるオニヒトデ浮遊幼生の餌環境を詳細に観測した。その結果、オニヒトデ浮遊幼生の餌となる植物プランクトンは、石西礁湖の大部分では低レベルで推移し、河口に近い場所では局所的に降雨後に上昇することが明らかとなった。ただし、ごく限られた範囲であるが、市街地の周辺では、降雨に関係なく恒常的に植物プランクトン密度が高い場所も見つかり、オニヒトデ幼生の生残・分散モデルを構築する上で重要な知見が得られた。

【キーワード】

サンゴ礁生態系、サンゴ初期生活史、オニヒトデ、植物プランクトン

1. はじめに

近年、サンゴ礁は地球規模で劣化が進んでいるとされ、オーストラリアのグレートバリアリーフ、カリブ海、東南アジア地域等の代表的なサンゴ礁地域において、過去30年の間にサンゴ被度が半減したなどの報告がある。日本においても、沖縄を中心にサンゴ礁が分布しているが、1970年代からサンゴを食害するオニヒトデの大発生が頻発し、1998年の大規模白化なども経て、過去50年で多くのサンゴが消滅したと報告されている。日本最大のサンゴ礁として知られている石西礁湖では、1980年代に最初のオニヒトデ大発生が記録されており、その後、1998年、2007年と大

規模な白化を経験し、2007年頃から再びオニヒトデの大発生が見られている。その結果、石西礁湖のみならず、これを囲む石垣島および西表島を含めて、多くの沿岸域でサンゴ被度が大幅に低下した（詳細はサブテーマ1の環境省モニタリング1000データの解析結果を参照）。

このように、サンゴ礁を形成する造礁サンゴ（以下、サンゴ）は、度々大規模な死滅を経験してきたが、現在まで絶滅することはない、局所的には減少と回復を繰り返している。ここで注目すべきは、その回復の速度は場所によって異なり、数年で回復する場所もあれば、20年以上回復が見られない場所も存在するということである。さらに、同じ場所でも回復速度が年々下がっている可能性も示唆されている。しかし、この回復速度の違いや変化に関するメカニズムは明らかになっていないのが現状である。

大規模に死滅した造礁サンゴの回復には、幼生の供給、着底、稚サンゴの成長という加入プロセスが不可欠である。これまで、幼生の供給量は、人工着生基盤を用いた調査によって、モニタリングされてきた。また、着底から2～3年の稚サンゴの生息密度も肉眼で計測可能であり、ある程度把握されている。しかしながら、幼生の着底から1年間は、1cmに満たず岩盤の割れ目などに隠れているため、肉眼でほとんど確認できないという問題から、ブラックボックスになっていた。これは、通常の人工着生基盤では、幼生の着生はみられても、そのまま放置するとほとんどの着生個体が3か月以内に死亡してしまい、その場所の正確な着生直後の生残・成長を捉えることが難しいことも影響していたと考えられる。そこで、本研究では、これまで我々が開発してきた格子状の着生基盤を用いて、着生後の生残・成長を調べた。格子状構造によって、通常の人工着生基盤上での最も主要な減耗要因となる魚類のグレージング行動による被害を低減することで、その場所の本来の生息場（つまり、岩盤の隙間など）での生残、成長を再現することが可能となる。

一方、近年の石西礁湖において、サンゴ減少の最大の要因となっているのがサンゴを餌とするオニヒトデの大発生という生物的な現象である。このオニヒトデの大発生は、ピークになると15分間の潜水で100個体以上がカウントされるなど、サンゴ礁を覆いつくすように出現するが、ここで鍵となるのは、やはりオニヒトデの産卵から着底までの幼生加入プロセスであると考えられている。オニヒトデは1個体のメスが1000万個以上の卵を産むと推測されており、初期減耗の大きさが大発生に影響する可能性は高い。特に、最近注目されているのは、オニヒトデ浮遊幼生の餌となる植物プランクトンの密度によって、幼生の生残が大きく変動し、餌の濃度が2倍になると幼生生残率が4倍以上になるという実験結果である。これは、陸域からの栄養塩の増加が植物プランクトンの増加を招き、オニヒトデの大発生につながるという「栄養塩仮説」の重要な証拠と考えられている。しかし、この実験は室内での飼育実験であり、また「栄養塩仮説」自体もオーストラリアのグレートバリアリーフで提唱されてきたこともあり、このメカニズムが沖縄などの島嶼域でそのまま当てはまるかはまだ分かっていない。これを検証することは、本研究プロジェクト全体の目的であるが、本サブテーマでは、特に石西礁湖に接する最大の市街地である石垣港および河口周辺における幼生の餌環境を詳細に明らかにすることを目的とした。

これに加えて、サンゴ礁生態系では、サンゴに依存して生息する魚類が多く、大型のものは水産資源としても重要である。これらは再生産において、産卵場所や稚魚の着底場所としてサンゴを利用している。そこで、特定の時期に特定の場所で集合産卵を行うハタ類の1種であるナミハタを対象として、産卵量と卵の分散を予測するため、集合産卵直後の卵分布調査を実施した。

以上の研究は、個々の現象、状況を明らかにするだけにとどまらず、サブテーマ1の中心課題で

あるオニヒトデの大発生予測モデルおよびサンゴ群集動態モデルの精度向上に寄与させることが狙いである。

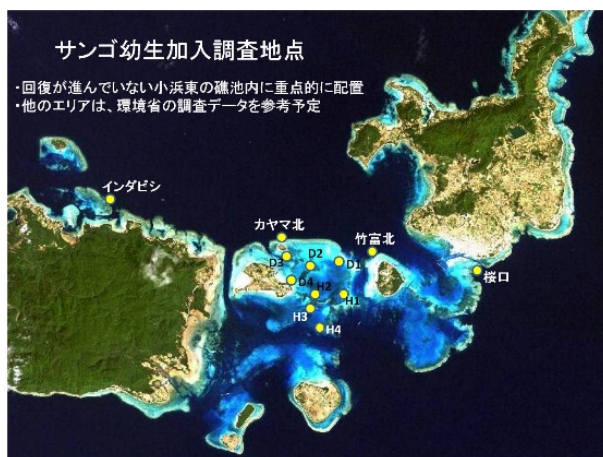
2. 研究開発目的

年単位の短い時間スケールで起こっている、サンゴ礁生物の島嶼 - サンゴ礁 - 外洋間の connectivity を明らかにするために、衰退傾向にあるサンゴ礁生態系の主要生物に着目し、現地調査によりそれらの再生産変動を捉える。具体的には、造礁サンゴの初期加入、オニヒトデ幼生の餌環境、沿岸魚類の集合産卵に関する調査を実施する。また、それぞれの再生産に関わる環境要因を調査し、サンゴ礁の衰退をもたらす要因を推定する。

3. 研究開発方法

(1) ミドリイシ属サンゴの幼生加入調査

石西礁湖で最も優占する種群でありながら、オニヒトデの食害や白化によって最も影響を受けやすいミドリイシ属サンゴは、年に1度、5月（あるいは6月）の満月前後にほとんどの種が一斉に産卵する。その後、1～2週間以内に幼生が着生し、サンゴ群集を形成・維持する役割を担っていると考えられる。そこで、本研究では、石西礁湖周辺の12か所（うち礁縁部の4か所では斜面に沿って2～3水深帯、図(4)-1）に、あらかじめ（産卵予想日の1か月以上前）着生基盤（2枚1組の8cm角のスレート版を1か所あたり5組）を設置し、産卵の2週間後から1か月半後の期間に回収、基盤上のミドリイシの着生個体をカウントすることで、幼生加入量を評価した。また、基盤に着生した個体は、基盤1枚あたり5～10個体程度を1個体ずつDNA抽出用の溶液に保存し、遺伝子による種判定を実施した。同様の調査は、2013年から2015年までの3年間継続して実施した。



図(4)-1 ミドリイシ属サンゴの幼生加入調査地点

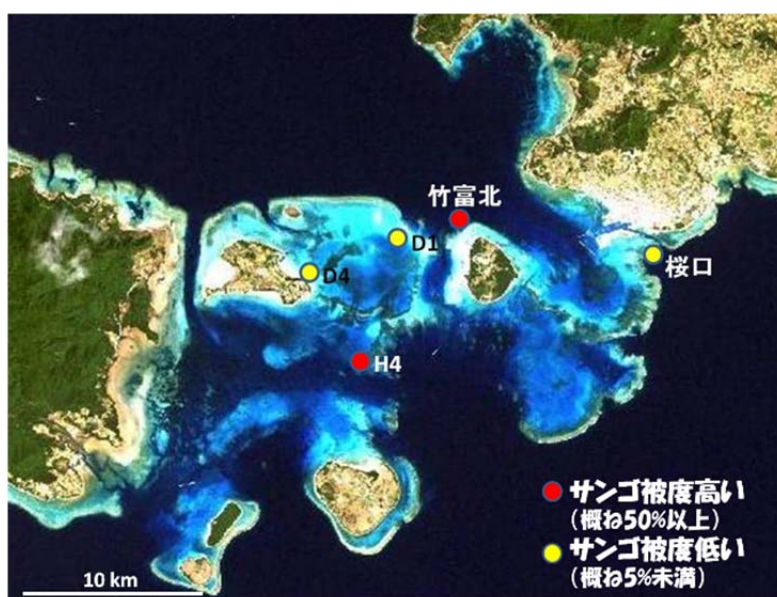
(2) ミドリイシ属サンゴの着生直後の生残比較試験

造礁サンゴは、他の多産型海洋生物と同様に、浮遊幼生期～着生期～着生直後にかけての初期減耗が大きく、幼生加入の成否が個体群の形成に大きく影響している。これまでの研究の結果、代表的な分類群であるミドリイシ属サンゴの着生量は、場所によってかなり変動することが分かっている。例えば、礁池内と礁斜面では、礁斜面で数十倍から数百倍多い上に、同じ礁斜面上でも

浅いところに集中する傾向がみられる。これらは概ね成体の分布（樹枝状種を除く）と一致しており、着生量によって分布密度が決定されているように思える。一方、着生から1年以内の死亡率は非常に高いことが知られているが、群体サイズが非常に小さく天然岩盤上での観察が困難なため、生活史段階として、「着生」と「着生後」のどちらが成体の分布に大きな影響を与えているかは不明である。そこで、本研究では、環境によって着生直後の生残にどの程度差があるのかを明らかにするため、人工基盤上に一定量のミドリイシ属サンゴの幼生を着生させ、半年間の生残率を比較した。

石西礁湖において、ミドリイシ属サンゴの被度の少ない場所と高い場所を選び（計5か所）（図(4)-2）、FRP製の格子状基盤（8×8マス、1マスは4cm角、ダイクレ社製）を各地点に8枚ずつ、ステンレス製ボルトと結束バンドを用いて海底に固定した。サンゴ幼生は、ウスエダミドリイシとタチバナガサミドリイシの成熟群体を用いて、水槽内で人工的に採卵した。その後、4日間飼育して着生能力を持った段階で、各種1000個体を一緒にビニール袋に入れ（計40袋）、各地点に船で運搬後、袋内に上記格子状基盤と共に48時間密閉することで（2000個体/枚）、基盤上への着生を促した。各格子状基盤には、観察用に一部を切り取れるように切込みが入っており、着生直後（72時間後）、1か月後、3か月後に各基盤から5ピース切り取って、実験室に持ち帰り、顕微鏡下で着生数を生存と死亡個体に分けて記録した。半年後の生残数は、ダイバーが海中で直接カウントした。また、海水中の褐虫藻組成を調べるため、着生の1か月後にあたる2014年6月27日に石西礁湖の5地点（うち2地点では2水深）からダイバーにより海底直上（bottom -1 m付近）の海水試料を得た。海水試料は20 μmの篩で夾雑物を除いた後、3 Lを孔径 0.8 μmのPCフィルターで吸引濾過した。海水中の粒子がトラップされたフィルターからTE煮沸法でDNAを抽出し、褐虫藻の核ITS領域全長を増幅可能なPCRプライマーを用いてPCR・クローニングを行った。得られた塩基配列をデータベースに照会し、cladeを判別した。

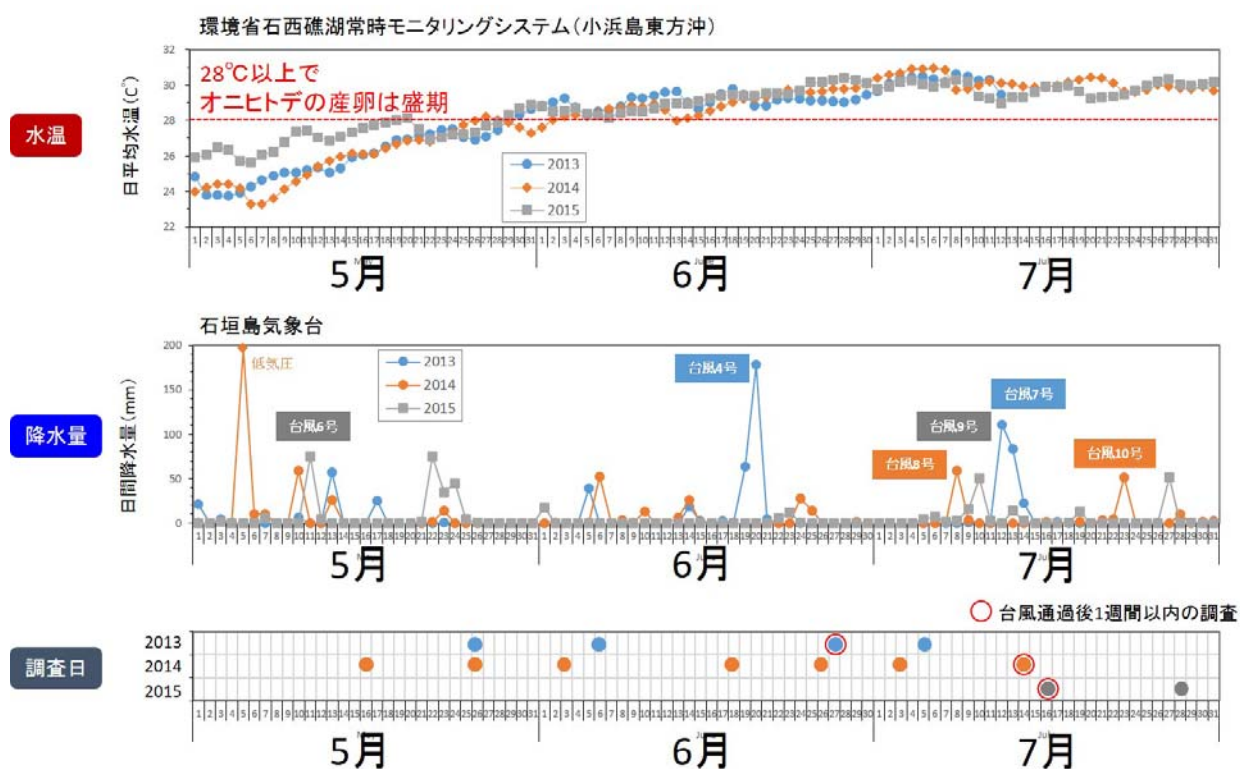
さらに、2015年は15か月後の生残率およびサイズ（長径）をダイバーが海中で記録した。



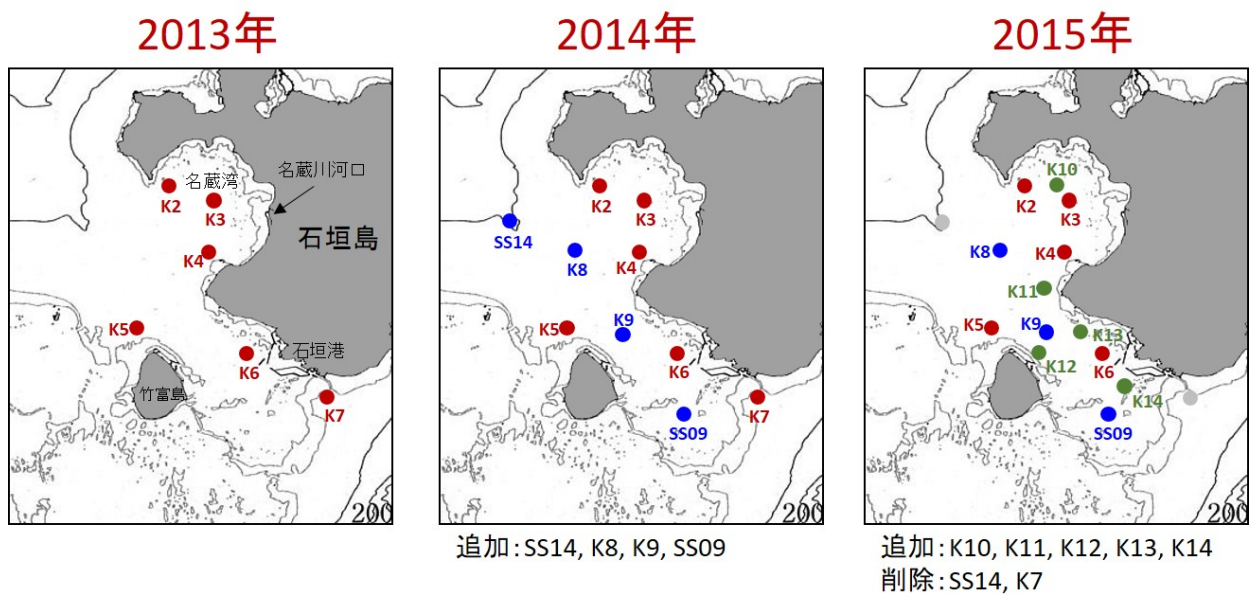
図(4)-2 着生直後のサンゴ幼体生残比較試験実施地点

(3) オニヒトデ浮遊幼生期の餌料環境調査

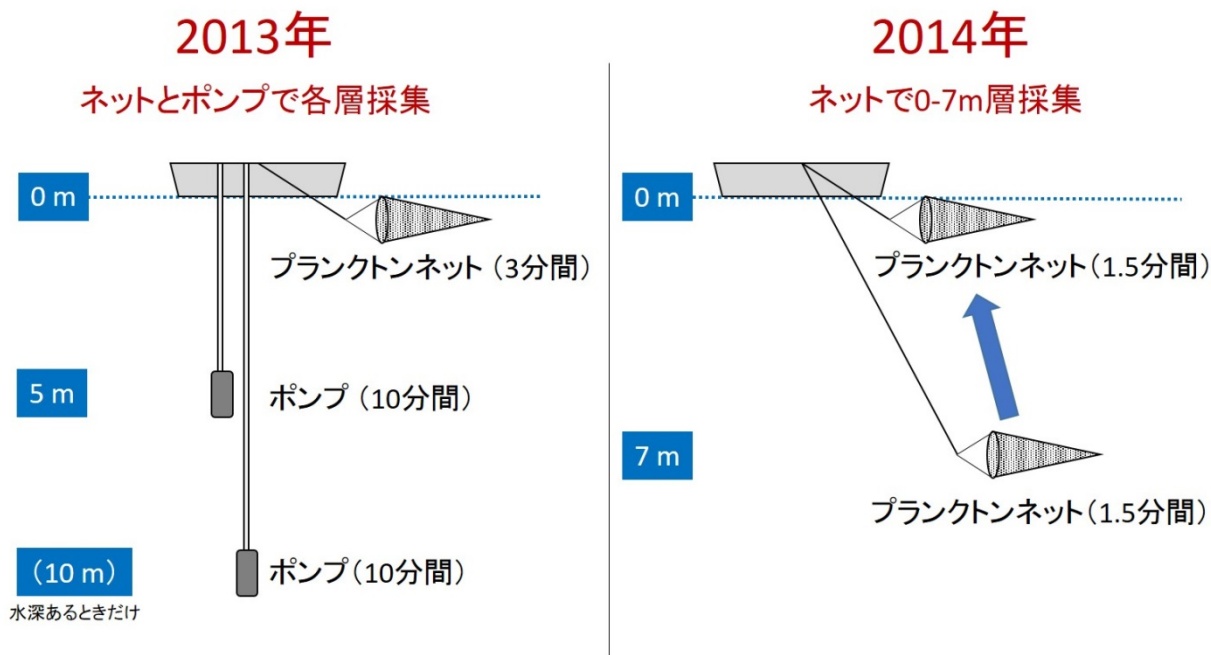
造礁サンゴを主食とするオニヒトデは、浮遊幼生期の餌料環境によって、生残数が大きく変動し、大発生につながると考えられている。また、水温28℃以上で産卵を行うことが知られており、石西礁湖周辺では、5月下旬から7月上旬が産卵期にあたと予想される（図(4)-3）。そこで、この期間に、週1回程度のペースで、水温・塩分、海水中のオニヒトデ幼生数、栄養塩濃度、クロロフィルa量（≒植物プランクトン量）、を調査した。なお、オニヒトデ幼生はピコプランクトンをほとんど摂餌しないという知見から、2μmでサイズ分画して測定した。調査地点は、石垣港周辺および名蔵湾の6か所（図(4)-4）、水深帯は表層、5m、10mの3層（水深が浅い場合は2層）で採集・採水を実施した。2014年は、調査地点を、4か所増やして、名蔵湾から石垣港周辺に至る水域の10か所（図(4)-4）で、うち5か所で幼生サンプリングを実施した。幼生は、水深0-7 m層を、目合い63 μmのプランクトンネットを3分間水平曳きして採集し（図(4)-4）。採集した幼生は、棘皮動物幼生を顕微鏡下で選別し、1個体ずつ99%エタノールに保存した後（-20℃）、DNA抽出キットを用いてDNAを抽出した。得られたDNAからオニヒトデ特異的マーカー（ミトコンドリアD-loop領域）を用いてPCRを実施し、電気泳動のバンドパターンからオニヒトデの可能性が高いものを特定した。2015年は、オニヒトデ幼生は採集しなかったが、調査地点は、名蔵湾から石垣港周辺に至る水域の13か所（図(4)-3）で実施した。



図(4)-3 石西礁湖における水温と降水量およびオニヒトデ産卵期の幼生餌料環境調査日



図(4)-4 オニヒトデ幼生浮遊期の餌料環境調査地点

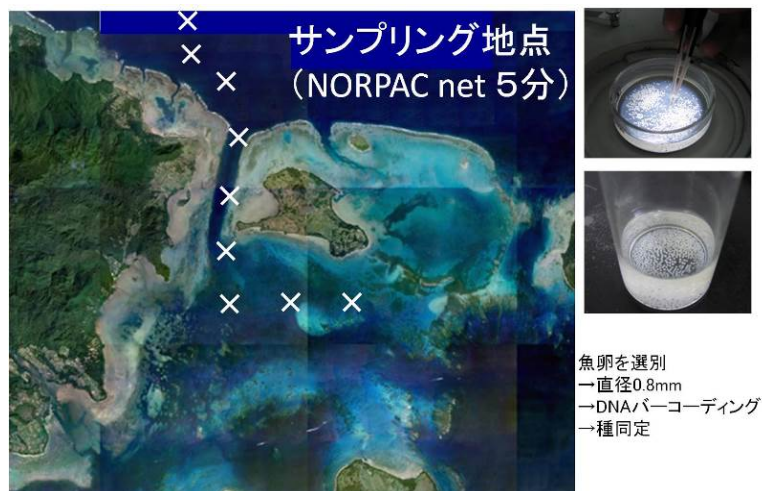


図(4)-5 オニヒトデ幼生のサンプリング方法

(4) ナミハタの産卵調査

サンゴ礁に生息する魚類には、産卵時に特定の場所に集合し、産卵集団を形成するタイプが少なからず存在する。重要な水産資源かつ上位捕食者である、ハタ類の多くはこの産卵集団を形成する。産卵集団は、一度に大量の受精卵を海域に供給するため、その特性や受精卵の分散範囲を明らかにすることは、個体群維持機構を明らかにする上で重要となる。そこで、石西礁湖における最大の産卵場であるヨナラ水道で調査定点を設け、産卵後の受精卵の分布状況を調査した (図

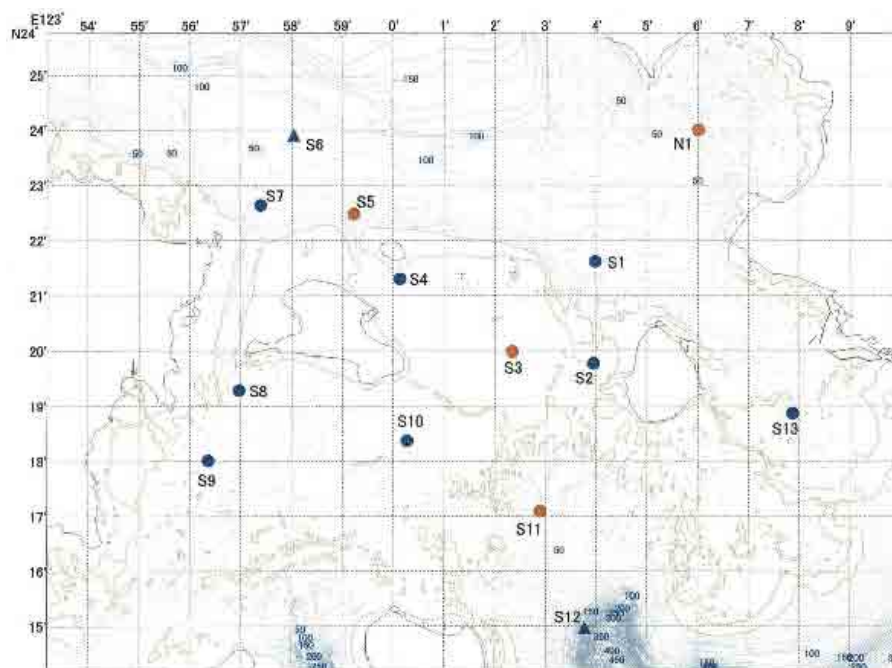
(4)-6)。図に示した9地点でNORPAC netを5分曳き、ろすい量から卵の密度を推定した。魚卵のうち、0.8mmの魚卵だけを選び、DNAバーコーディングにより種判別を実施した。



図(4)-6 ナミハタの卵分布調査地点

(5) 石西礁湖の定期海洋観測調査

石西礁湖の海洋環境の基礎データの蓄積および季節変動を把握するため、小型調査船やえやま(4.9トン)を用いて月1回、図(4)-7に示す14点で行った。全点で多項目水質計(JFEアドバンテックAAQ175)を用いて、水温、塩分、溶存酸素、濁度、光量子、クロロフィルa濃度を観測した。また、4点ではニスキンボトルによる採水とNORPACネット(目合0.1mm)による動物プランクトン採集を行った。採水したサンプルは栄養塩(硝酸態+亜硝酸態、リン酸、ケイ酸)とクロロフィルa濃度の分析に用いた。これらの結果のうち、濁度およびPARデータを用いて、石西礁湖内における水中光環境の局所的な差異を推定した。

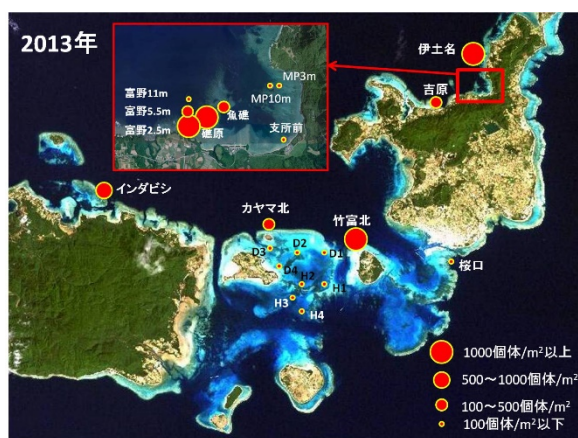


図(4)-7 石西礁湖環境モニタリングの定点

4. 結果及び考察

(1) ミドリイシ属サンゴの幼生加入調査

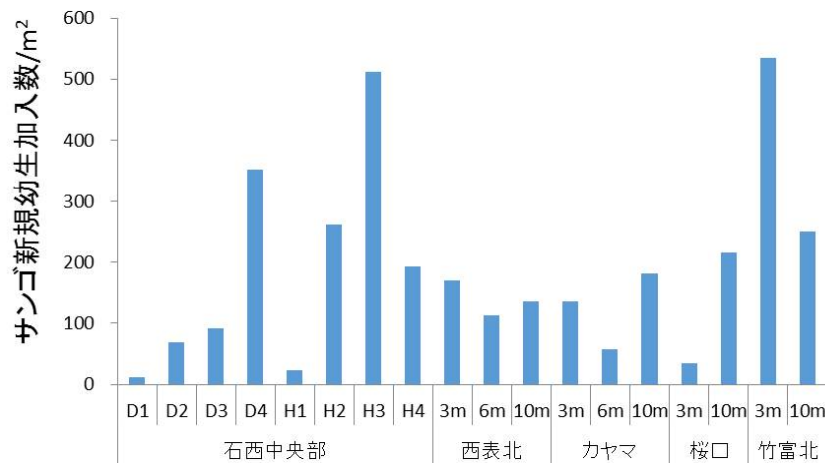
2013年の石西礁湖周辺海域の幼生加入パターンをみると、礁斜面に加入が集中する傾向が顕著である（図(4)-8）。石西礁湖の内側は、概ね100個体/m²以下であるのに対し、礁斜面側では1000個体/m²に達する地点も複数みられた。また、この加入群の内訳をみると、2013年の産卵は、同調性が低く、加入量も少なくなった可能性が示唆された。つまり、観察時の着生個体は、大きく3つのカテゴリーに区別され（①ポリプ出芽済み、②褐虫藻あり、③褐虫藻なし/骨格未完成）、着生個体の成長段階を考慮すると、それぞれ1週間以上着生時期がずれていると考えられた。また、地点間で優占的な成長段階が異なることから、一斉産卵の同調時期が石西礁湖周辺の数十km以内でも変化することが予想される。今後は、このような産卵タイミングに環境要因が影響している可能性についても検討していく必要がある。



図(4)-8 石西礁湖周辺海域におけるミドリイシ属サンゴの幼生加入量（参考データとして石垣島北岸域の結果も同時に示した）

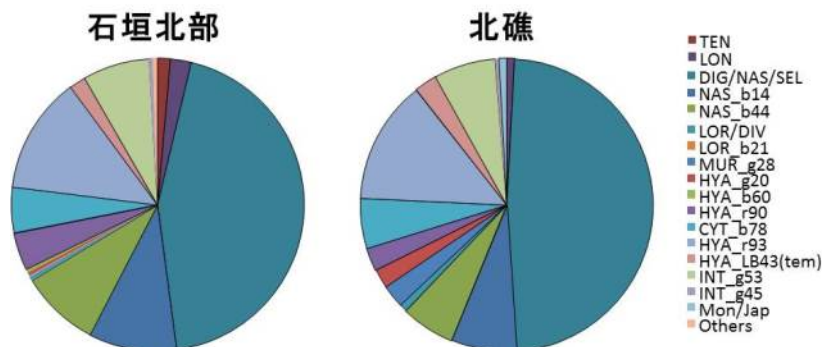
2014年の石西礁湖周辺海域の幼生加入パターンをみると、昨年度と同様に、礁斜面に加入が集中する傾向が顕著であった。特に、竹富北では約6000個体/m²に達した。一方、礁湖内も増加したが、100個体/m²程度に留まった。

2015年の石西礁湖周辺海域の幼生加入パターンをみると、昨年度までの礁斜面に加入が集中する傾向はみられず、礁湖内にあたる石西中央部でも北礁礁斜面と同程度の加入が見られた。礁湖内の加入は増加傾向にあり、100個体/m²を大きく超える地点が増えた（図(4)-9）。



図(4)-9 2015年石西礁湖周辺のミドリイシ属サンゴ幼生加入数

幼生加入群の遺伝子組成を比較すると、石垣島北部と石西礁湖北礁とでほぼ同じ組成が見られた(図(4)-10)。調査時点で、石垣島北部は、2011年のオニヒトデ大発生により、ミドリイシ属サンゴ被度はほぼ0%に低下していたのに対し、石西礁湖の北礁におけるミドリイシ属サンゴ被度は高く、幼生供給源として機能していた可能性は高い。原則として、加入した幼生の生まれ場所是不明であるが、両エリアの幼生加入群の遺伝的組成が一致したことから、北礁エリアから石垣島北部エリアに幼生が供給された可能性が高いと考えられる。



図(4)-10 石垣島北部および石西礁湖北礁における幼生加入群の遺伝子組成の比較

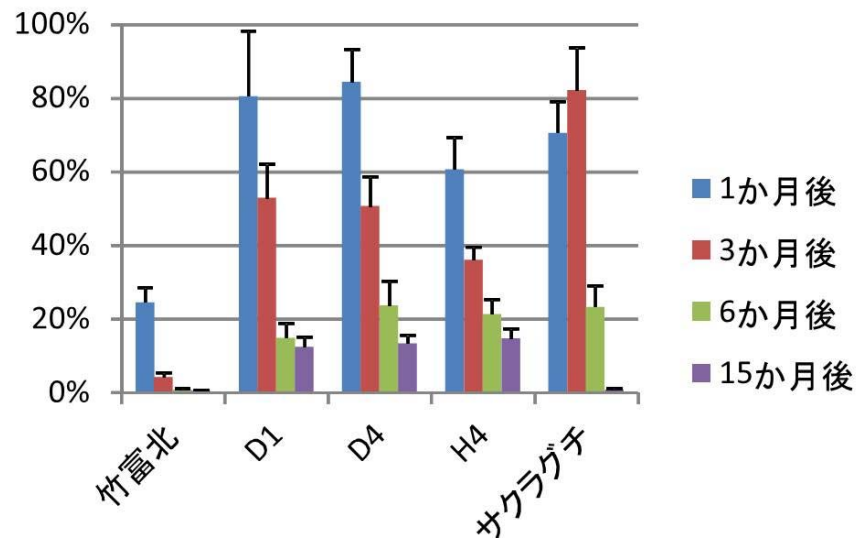
(2) ミドリイシ属サンゴの着生直後の生残比較試験

人工的に着生させたサンゴ幼体密度は、概ね25~30個体/100cm²であったが、5地点の中で最もサンゴ被度の高い「竹富北」で150±14個体/100cm²(平均±SE)と飛びぬけて多くなった(図(4)-11)。これは、基盤を袋に密閉した前後に、この地点だけ天然サンゴ幼生の着生が多かったためと予想される。3か月後の生残率は、「竹富北」のみ約4%と低く、それ以外の場所では周囲のサンゴ被度に関係なく、35~70%程度であった(図(4)-12)。さらに、6か月後の生残率は、竹富北で1%、それ以外の場所では15~24%であった。基盤表面の被覆藻類は、明らかにサンゴ被度が低い場所が多かった(図(4)-13)。また、着生した幼体の共生藻ソースとなる、海水中の褐虫藻組成をみると、サンゴ被度の低い場所では、クレードAおよびDといったサンゴ幼生や幼体に好まれるタイプが少

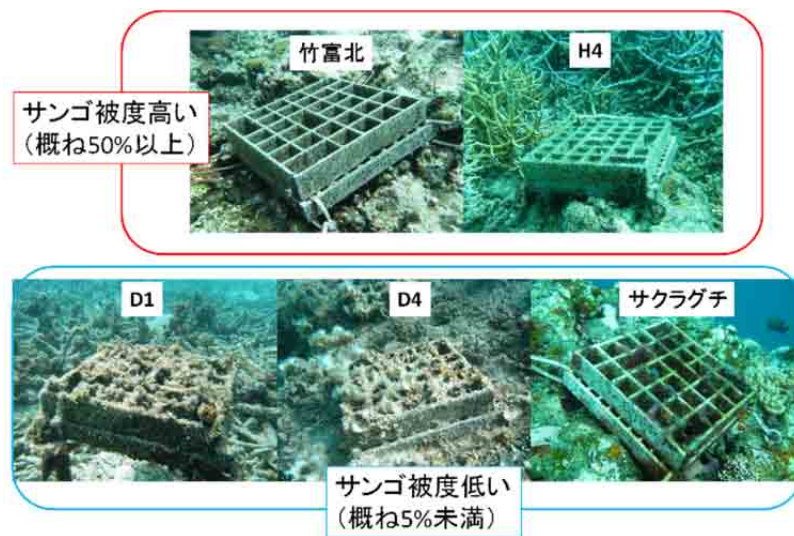
なかった(図(4)-14)。しかし、幼体生残率の結果から、サンゴ幼体は、少なくとも着生後6か月間は、成体のサンゴ被度が低く、競合が予想される基盤表面の海藻が多い場所でも、相対的にサンゴ被度が高い場所と同程度生き残ることが明らかとなった。つまり、サンゴ被度の回復が遅い原因は、着生直後の初期減耗ではなく、幼生の供給不足および成体の死亡率の高さになる可能性が高いと考えられる。



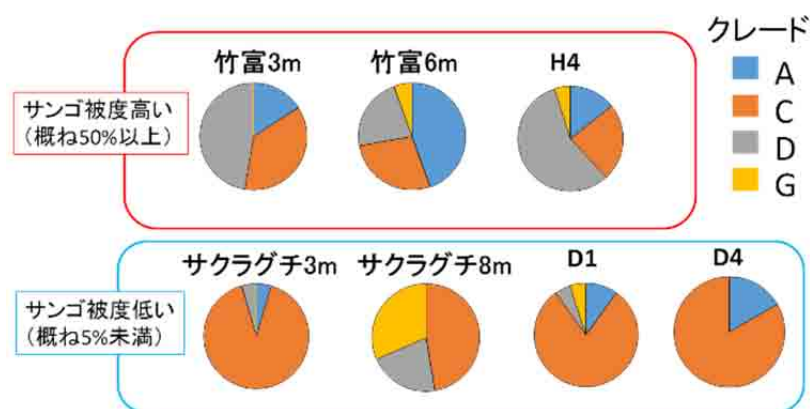
図(4)-11 各調査定点におけるミドリイシ属サンゴの基盤上の着生数



図(4)-12 各調査定点における基盤上のサンゴ幼体の生残率



図(4)-13 サンゴを着生させてから1か月後の基盤状況

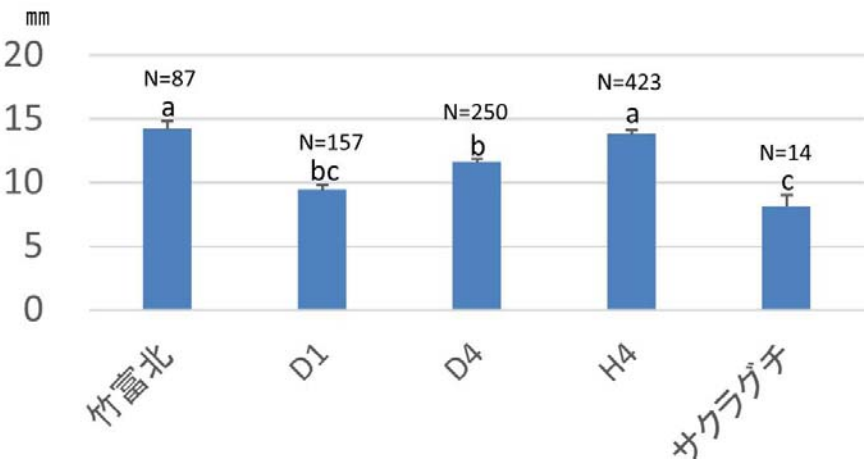


図(4)-14 着生から1か月後の各地点における海水中の褐虫藻組成

6か月後までは、着生数が異常に多かった竹富北以外では15～24%と大差なかったが、15か月後の生残率は、D1、D4、H4の3地点では10～15%で維持されたのに対し、サクラグチで1%以下と大きく低下した(図(4)-12)。サクラグチでは、おそらく台風の影響で、基盤自体が飛ばされることも多く、サンプル数が少なくなったが、残った基盤上で1cm以上に成長した群体が骨格を残した状態で大量に死亡していた。一方サイズでみると、周辺サンゴ被度が高い、竹富北およびH4で平均長径は有意に大きく、サンゴ被度が低いD1、D4、サクラグチで小さかった(図(4)-15)。この差が生じた原因は実証できていないが、D1およびD4は基盤を覆うウスユキウチワ等の大型藻類が多く、光を遮られたことが原因と考えられる。ただし生残率ではサンゴが健全で大型藻類が少ないH4と変わらなかったため、15か月後時点では成長速度のみに影響していると予想される。サクラグチは、大型藻類は多くなかったため、別の要因、例えば大きく成長したものは病気等で死亡しやすいことが考えられる。

以上の結果から、エリアごとの特徴を抽出したところ、それぞれに適した保全策が必要であることが示唆された(表(4)-1)。まず、竹富北が代表している北礁地域は、加入量が多く自然加入に

よる回復が見込めるため、白化やオニヒトデによって一時的にサンゴ被度が低下したとしても、早急な人為的な対策は必要ないと考えられる。一方、礁湖内は、北側の閉鎖的な場所と南側の開放的な場所で異なり、北側は加入が少なく稚サンゴの成長は遅いが生残率は低くないため、人為的な加入促進が有効と考えられた。南側は、加入は少ないが、稚サンゴの成長は早く、今すぐに対策は必要ないが、ダメージを受けた場合に人為的な加入促進によって速やかな回復が見込める。さらに、稚サンゴを育成する海域としても適している。最後にサクラグチが代表する市街地に近い南側のリーフは、加入が少なく、生残も低いので、人為的な加入促進でも効果が見込めず、追加的な対策が必要であることが分かった。追加的な対策については、地盤の安定性を高める対策や、1cm以上に成長してから死亡要因を探り、その対策を講じる必要がある。



図(4)-15 15か月後のサンゴ幼体のサイズ(長径)

表(4)-1 石西礁湖の各エリアにおけるサンゴの初期生活史特性の比較および採り得る対策

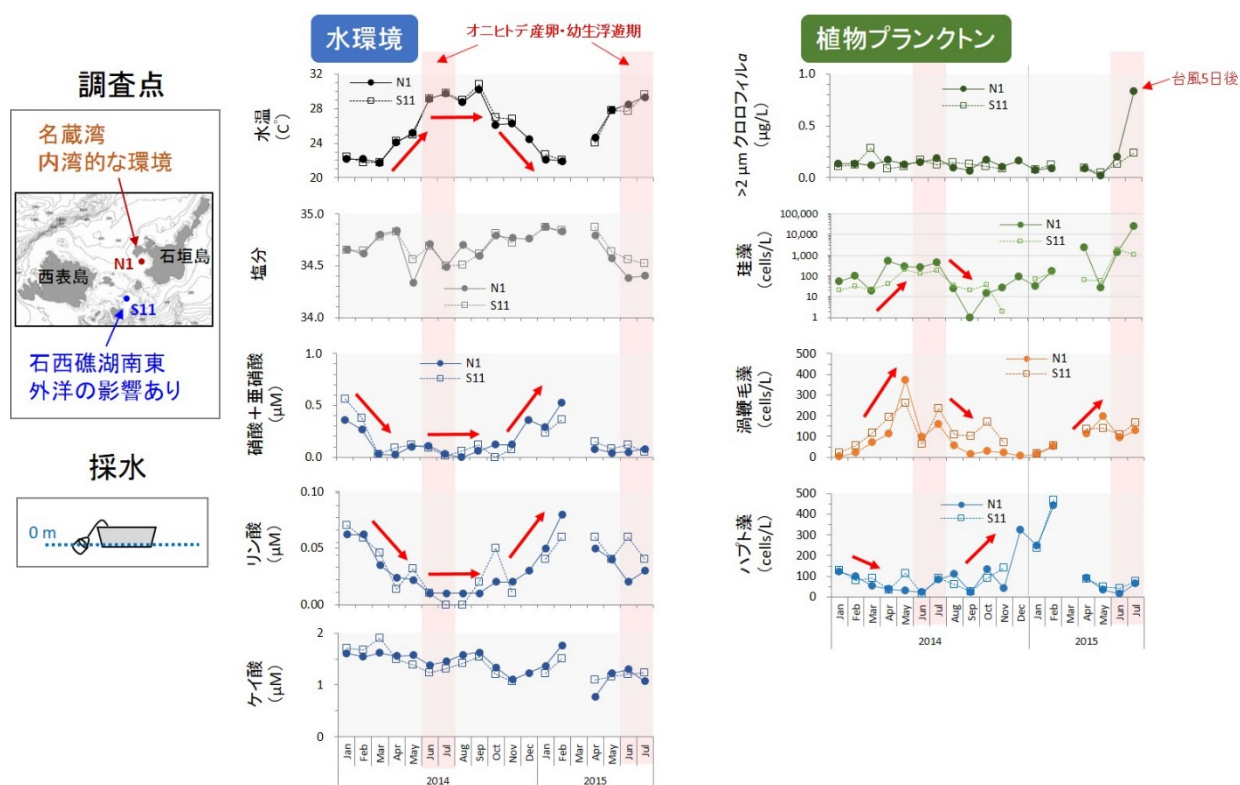
エリア	加入	生残	成長	対策
北礁(竹富北)	多	?	早い	人為的努力必要なし
礁湖内北 (D1、D4)	少	良	遅い	加入促進
礁湖内南(H4)	少	良	早い	必要に応じて加入促進
南礁 (サクラグチ)	少	悪い (1年後以降)	遅い	加入促進 ＋地盤の安定性を高める

(3) オニヒトデ浮遊幼生期の餌料環境調査

季節変動

石西礁湖におけるオニヒトデ産卵期にあたる5月下旬から7月中旬の幼生の餌環境、つまり植物

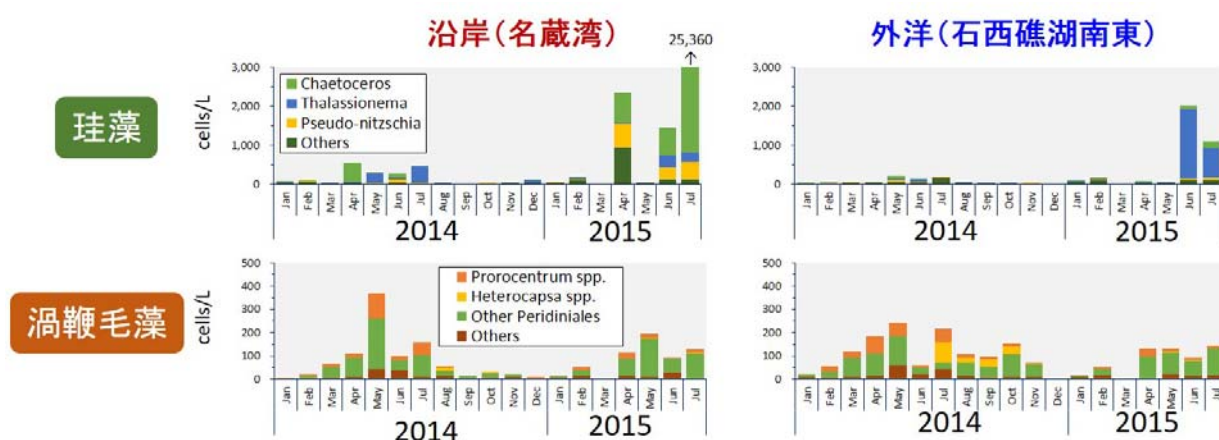
プランクトン環境の特徴を明らかにする上で、年間の季節変動を把握しておく必要がある。しかし、これまで、亜熱帯海域では植物プランクトン環境は季節変動が少ないと考えられたためか、石西礁湖はもとより琉球列島沿岸全体でみても、植物プランクトンの季節変動に関する報告はほとんどない。そこで、石西礁湖の2か所（陸域の影響が大きい石垣島名蔵湾と外洋水の影響の大きい石西礁湖南東海域）で2014年1月から2015年7月まで月1回のペースで採水を実施し、水温塩分、栄養塩などの水環境および植物プランクトン環境を明らかにした（図(4)-16）。結果は表(4)-2にまとめた。まず、栄養塩は、冬季に上昇するものの（硝酸+亜硝酸で $0.5\mu\text{M}$ 、リン酸で $0.05\mu\text{M}$ まで）、3月から5月の水温上昇期に急激に低下し、オニヒトデ産卵期も低下した状態であることが明らかとなった。次に、植物プランクトンを優占グループごとにみると、珪藻、渦鞭毛藻ともに水温上昇期に増加する傾向は共通していたが、オニヒトデ産卵期には、珪藻は密度の高い状態で推移したのに対し、渦鞭毛藻は低下傾向がみられた。オニヒトデ幼生の餌サイズとされる $2\mu\text{m}$ 以上のクロロフィル a では、年間を通じて $0.2\mu\text{g/L}$ 前後で推移しており、変動は少なかった。ただ、陸水の影響が強い内湾の地点でのみ、オニヒトデ産卵期の台風の直後には $0.5\mu\text{g/L}$ 以上に上昇することが分かった。植物プランクトンの組成は、季節ごとに変化がみられた（図(4)-17）。珪藻が高密度に上昇したオニヒトデ産卵期では内湾と外洋で種組成が異なり、内湾では、*Chaetoceros*属と*Pseudo-nitzschia*属が卓越していたのに対し、外洋では、*Thalassionema*属が優占していた。



図(4)-16 石西礁湖における水環境および植物プランクトン環境の季節変動

表(4)-2 水温上昇期およびオニヒトデ産卵期の栄養塩および植物プランクトンの変動傾向

	3-5月（水温上昇期）	6-7月（オニヒトデ産卵・幼生浮遊期）
窒素・リン	低下	低い
珪藻	上昇	高い
渦鞭毛藻	上昇	低下
>2μmクロロフィルa	低い	低-高



図(4)-17 石西礁湖における植物プランクトン組成の季節変動

オニヒトデ産卵期の水温塩分環境

・2013年

調査は、5/28、6/6、6/27、7/5の計4回実施し、全サブグループが合同で実施した一斉広域調査（6/17、18、21）を含めると、オニヒトデの産卵が活発になる水温28℃に達した5/30以降、産卵期を通した餌料環境変動を捉えることができたと考えられる。なお、6/19、20の二日間のみまとまった降雨がみられ、それ以外では50mm以上の降雨は観測されなかった。

まず地点間で水温・塩分を比較すると、水温は、26℃台であった5/26を除いて概ね29℃前後で推移し、外洋水の影響を受けるサクラグチ（K7）を除くと測点間の差は小さかった。塩分は、降雨後の6/21に全測点で大きく（約0.5PSU）低下した。6/27は名蔵湾内（K2、K3）の表層で低く、名蔵川からの水の影響を受けていたと考えられた。

・2014年

調査は、5/16、5/26、6/3、6/18、6/26、7/3、7/14の計7回実施し、全サブグループが合同で実施した一斉広域調査（6/7、13）を含めると、オニヒトデの産卵が活発になる水温28℃に達する前後の5月中旬以降、産卵期を通した餌料環境変動を捉えることができたと考えられる。なお、昨年

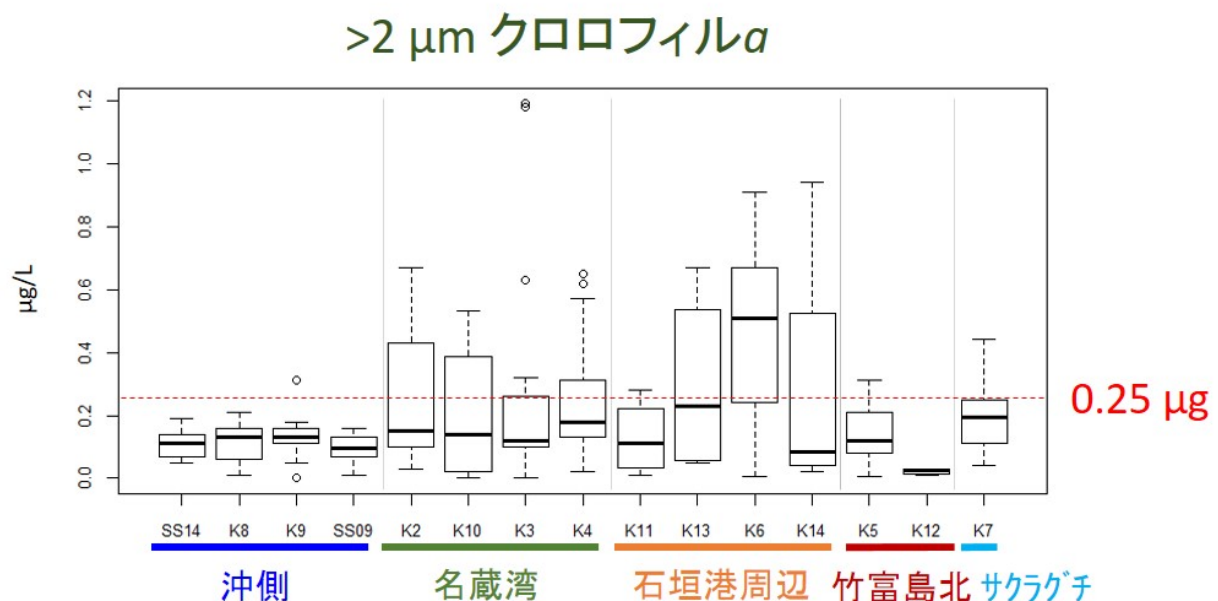
度と異なり、6/6と7/8の二回のみに50mm/日程度の降雨がみられたが、それ以外ではほとんど降雨は観測されなかった。

・2015年

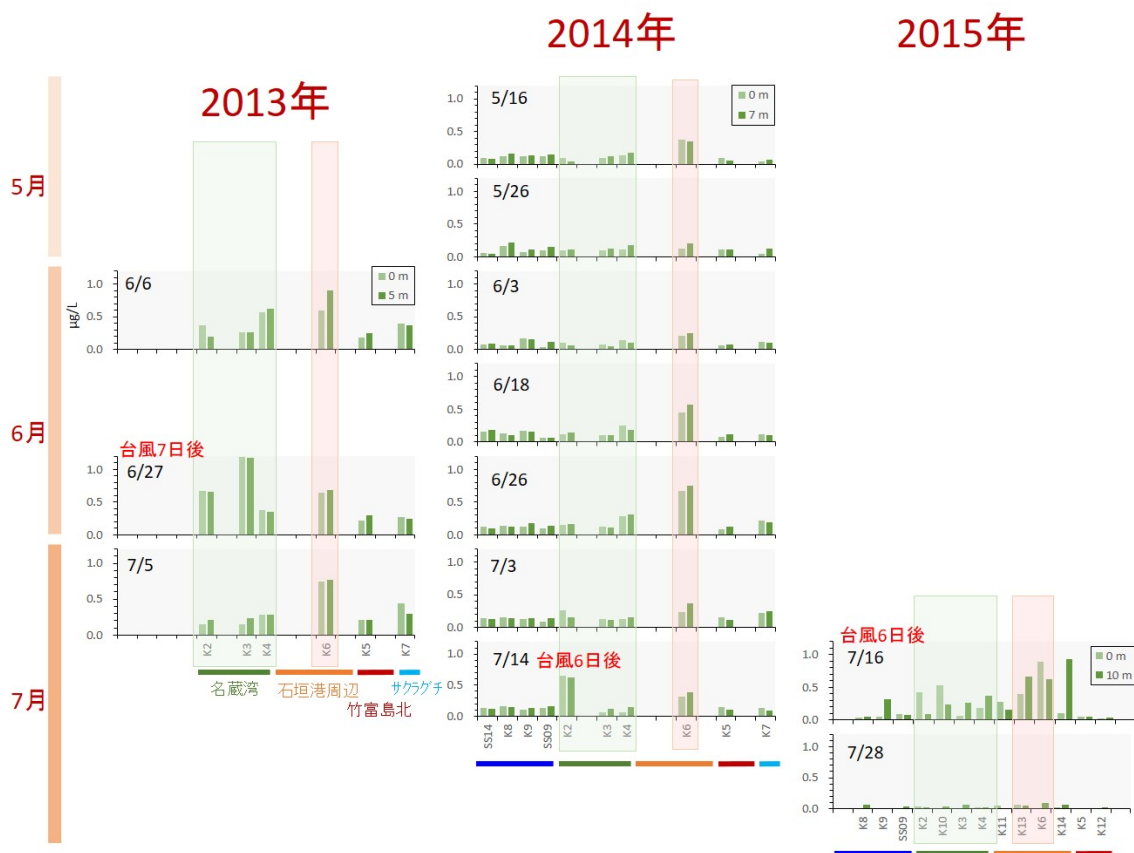
調査は、7/16および7/28の計2回実施し、全サブグループが合同で実施した一斉広域調査(6/25)を含めると、オニヒトデの産卵期の後半の餌料環境変動を捉えることができたと考えられる。なお、7/10に台風通過による多量の降雨が確認された。

クロロフィルa濃度 ($2\mu\text{m}$ 以上)

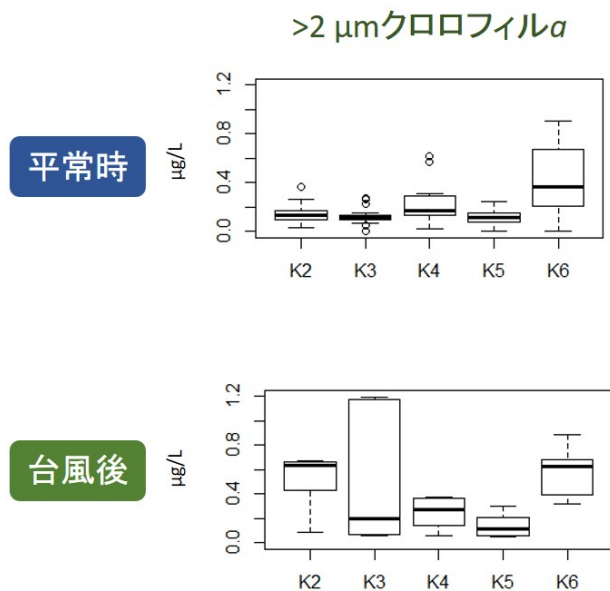
まず、全期間の平均値で、地点間を比較すると、名蔵湾と石垣港周辺で他地点より高い傾向が明らかとなった(図(4)-18)。両エリアでは、オニヒトデ幼生が飢餓するとされている $0.25\mu\text{g/L}^{1)}$ を超えることが多く、特に石垣港に一番近く市街地を流れる新川河口付近に位置するK6では、常にこのレベルを超えていた。次に、年毎の変動をみると(図(4)-19)、2013年は、港湾域(K6)では0m層、5m層とも高く、名蔵川河口に近いK3では0m層で高い傾向がみられた。降雨直後で風による攪乱の大きい状態の6/21は測点間の差がほとんどみられなくなり、その1週間後の6/27は測点間の差が最も大きくなり、名蔵湾(K3、K4)で高い濃度となった。2014年は、降水が少なかったことが影響したのか、石垣港・新川川河口沖(K6)や名蔵湾内(K2、K4)を除き濃度は非常に低かった。2015年は、台風通過6日後にあたる7/16は全体的に高く、特に石垣港周辺のK6、K13、K14では概ね $0.5\mu\text{g/L}$ を超えていた。一方、産卵期の終盤にあたる7/28には、すべての地点で $0.2\mu\text{g/L}$ 以下であった。最後に、全期間の値を、平常時と台風直後に分けて地点間で比較すると、平常時は、市街地に近い石垣港付近の地点のみ、他地点より有意に高く平均値は $0.4\mu\text{g/L}$ であった(図(4)-20)。これが台風直後になると、名蔵湾の値が上昇し、平均が $0.5\mu\text{g/L}$ に達する地点があった。石垣港付近は、台風後も変わらず高いままであった。



図(4)-18 オニヒトデ産卵期におけるクロロフィルa濃度(全期間平均)



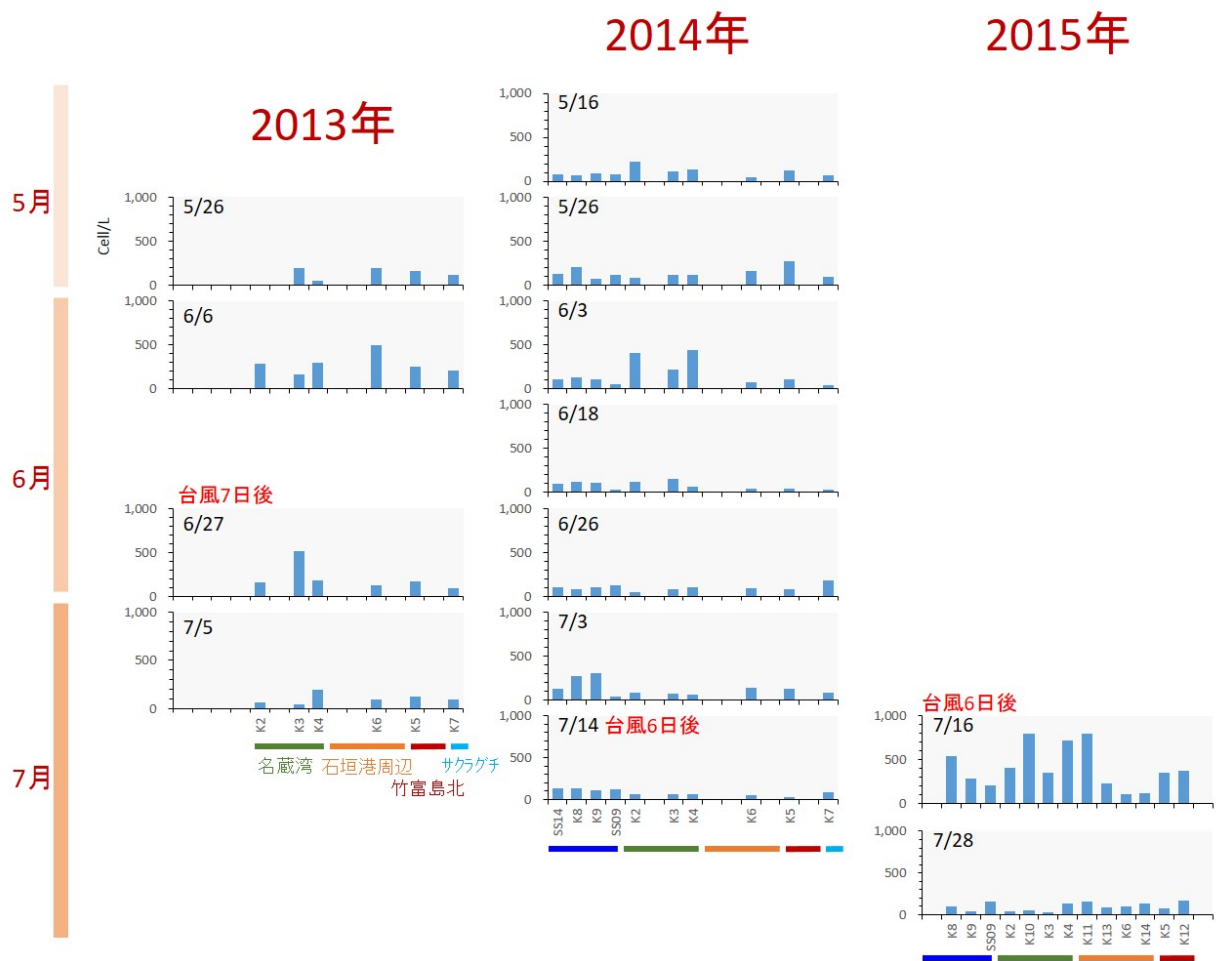
図(4)-19 オニヒトデ産卵期におけるクロロフィル*a*濃度の変動



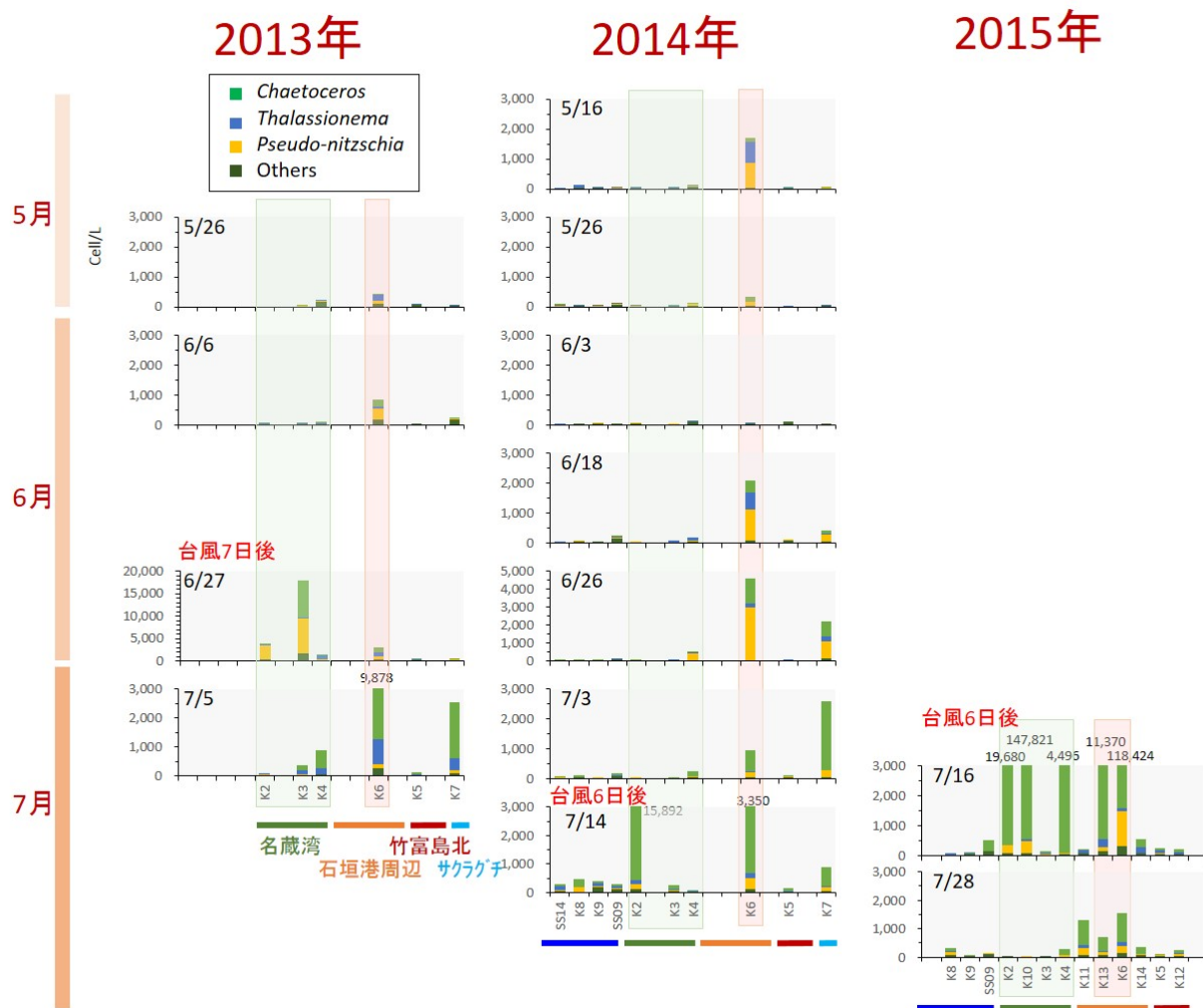
図(4)-20 オニヒトデ産卵期における平常時と台風後のクロロフィル*a*濃度の比較

植物プランクトン組成

2013年は、6月上旬までは細胞密度は低く、その中では渦鞭毛藻類の割合が高いが、陸水などの影響を受ける港湾域（K6）や名蔵湾（K3、K4）では珪藻もやや高かった（図(4)-21、22）。6月19-20日の降雨後1週間となる6/27の調査では珪藻の密度が急上昇していた。特に塩分が低下していた名蔵湾（K2、K3）の表層で高く、港湾域（K6）では7/5も高密度だった。クラスター解析の結果、港湾域（K6）の表層では調査期間中同じような群集が維持されているが、調査全域で6月上旬から下旬の間で群集構造が大きく変化していたことが明らかとなった。2014年は、石垣港・新川河口沖（K6）ではほぼ常に珪藻類が高密度に出現した。K6は市街地に近い測点であることから、河川等を通して陸域から常に高い濃度の栄養塩類が供給され珪藻類が増殖していたと考えられる。一方、昨年は台風による大量の降水後に名蔵湾内で珪藻類の非常に高い密度が記録されたが、降水が少なかった今年はそのような現象はみられなかった。K6で珪藻が高密度で出現する一方で、K6に近いK9とSS09では密度が低いことから、珪藻類の増殖域は限られ、増殖した珪藻類は潮汐により比較的速やかに希釈されることが示唆された。2015年は、台風通過後では、渦鞭毛藻は、名蔵湾沖などやや外洋に近い場所で多く出現したが、珪藻は、市街地石垣港近辺および名蔵湾で高密度に出現した。珪藻の優占グループは、昨年までと同様、*Chaetoceros*属であったが、市街地を流れる新川河口沖のK6では、*Pseudo-nitzschia*属も優占していた。その後、7/28には、渦鞭毛藻および珪藻ともに全地点で細胞密度は大きく低下し、市街地周辺を除けば、1000細胞/L以下であった。以上の結果から、オニヒトデ幼生の餌となる $2\mu\text{m}$ 以上の植物プランクトンのうち、降雨後に大きく増加するものの正体は、珪藻であることが示唆された。



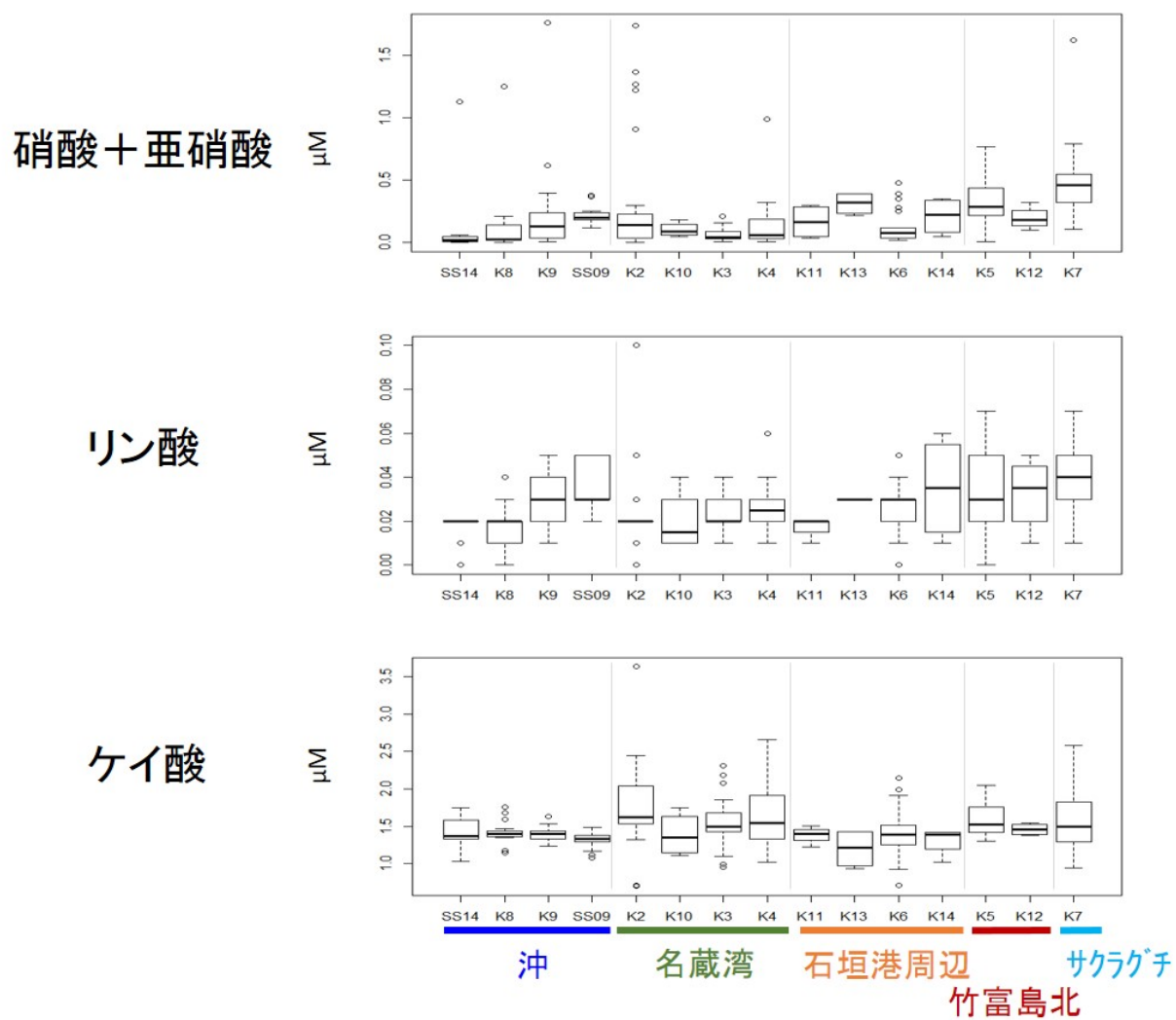
図(4)-21 調査期間中の定点ごとの渦鞭毛藻細胞密度および組成



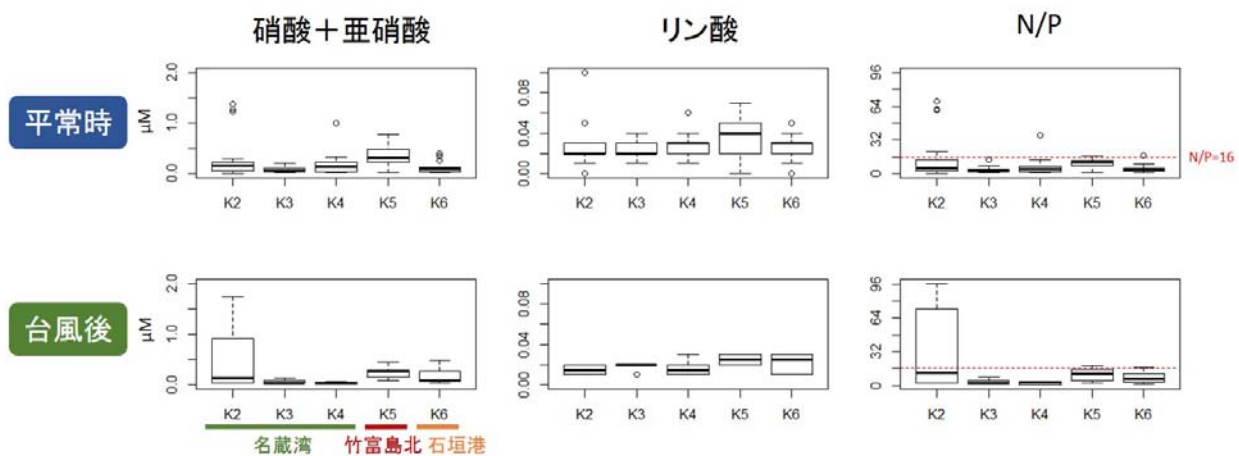
図(4)-22 調査期間中の定点ごとの珪藻細胞密度および組成

栄養塩類

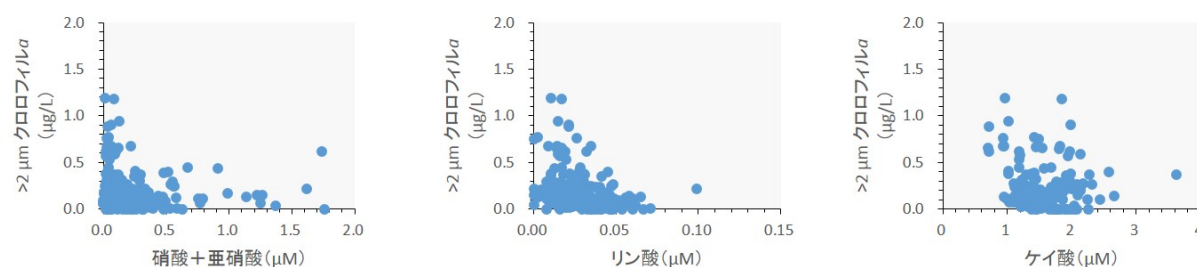
栄養塩の全期間平均値と分散をみると、硝酸・亜硝酸、リン酸、珪素すべてにおいて、名蔵湾の北部地点 (K2) で変動が大きいことが分かった (図(4)-23)。また、硝酸・亜硝酸に関しては、水道に近いサクラグチ (K7) と竹富北 (K5) で高い傾向がみられた。硝酸・亜硝酸とリン酸の比であるレッドフィールド比でみると、 $N/P < 16$ で、植物プランクトンの増殖において、概ね窒素が制限要因になっていることが示唆された。平常時と台風直後で比較すると、名蔵湾の北部では、硝酸・亜硝酸の変動はいずれの場合でも大きく河川水の影響が示唆された (図(4)-24)。リン酸に関しては、台風後に有意に低下しており ($p < 0.05$)、植物プランクトンが増殖することで取り込まれたと考えられる。このことは、栄養塩とクロロフィルの関係からも推測され、両者に相関がみられなかったことから (図(4)-25)、植物プランクトンが河川等を通して陸域から供給された栄養塩類を速やかに取り込んでいる可能性が考えられた。



図(4)-23 調査地点間の栄養塩濃度の比較 (全期間平均)



図(4)-24 平常時および台風後の栄養塩濃度およびNP比の比較



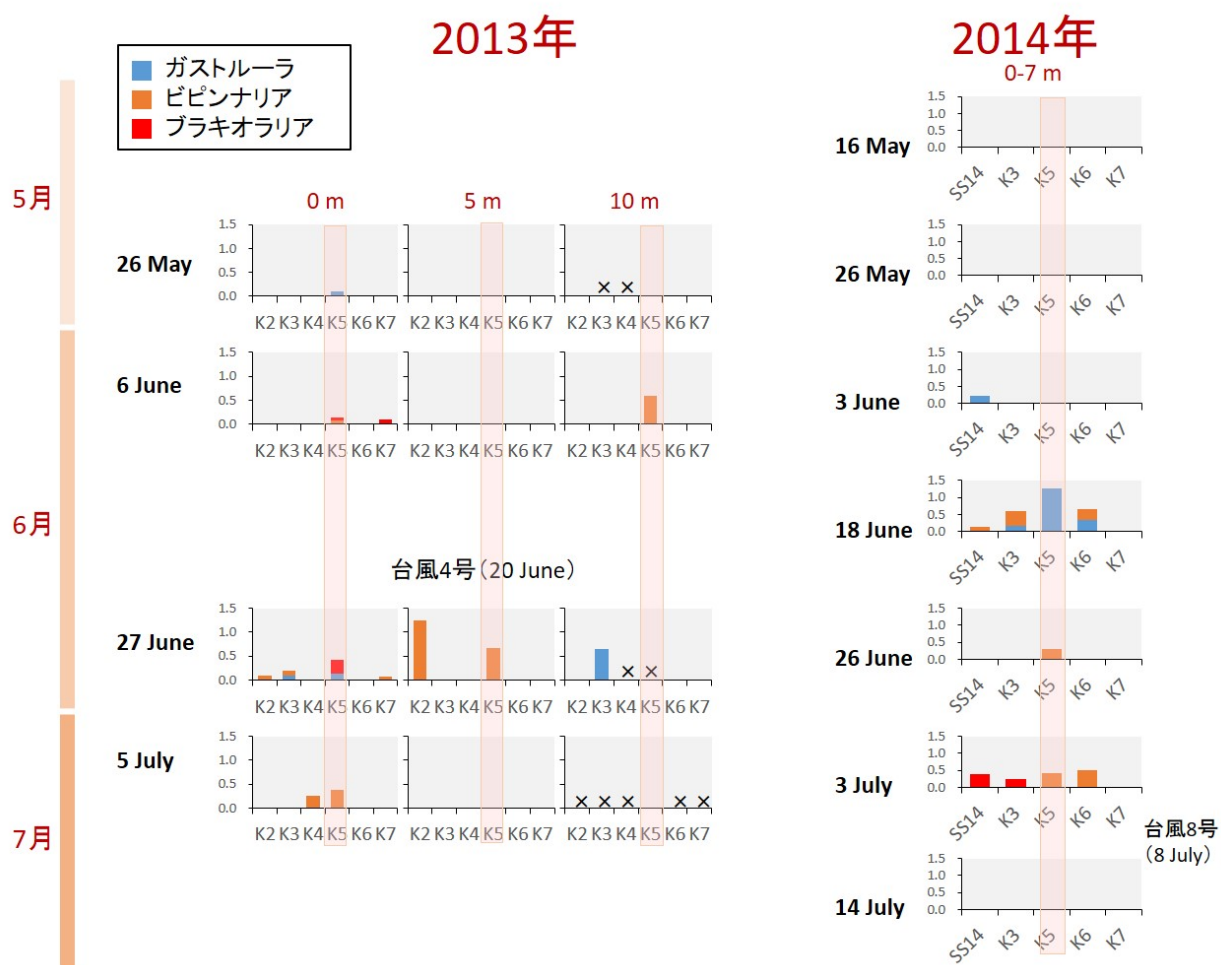
図(4)-25 栄養塩とクロロフィルa濃度の関係

オニヒトデ幼生密度

2年間の調査の結果、オニヒトデ幼生は、5月下旬から7月上旬まで出現することが明らかとなった（図(4)-26）。産卵1～2日後の発生段階であるガストルーラ幼生の出現から、5月下旬から6月下旬まで産卵は行われていることが示唆された。幼生密度は、最高で1.3個体/m³とヨナラ水道沖で見つかった高密度集団と比較すると、低い値であった。出現場所は、竹富島北のK5地点で最も頻度が高く、全調査11回中7回、65%の確率で出現した。ちなみに、オニヒトデ幼生が採集された調査回に限ると、8回中7回とほとんど常に出現していた。この竹富島北の地点は、竹富島の北西に位置する水道の出口に近く、一斉調査でヨナラ水道沖に高密度で出現したことも併せて考えると、サンゴ礁の内側と外側をつなぐ水道、水路付近にオニヒトデ幼生が集まる傾向があるかもしれない。今後、この仮説を検証する必要がある。

幼生の出現水域とクロロフィルa濃度との関連はみられず、最も出現頻度の高かった竹富島北はむしろクロロフィルa濃度は低い地点であった。ただし、幼生はクロロフィル濃度の高い石垣港周辺にも出現することから多量の餌に遭遇する機会はあると予想される。

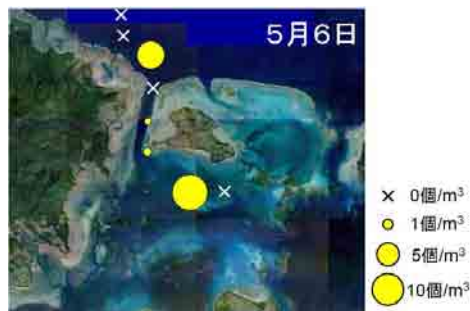
最後に、台風の影響について検討すると、一斉調査で台風直後に高密度集団が消滅したこと、2014年の7月上旬の台風後に幼生が見られなくなったことから、台風による大きな攪乱は、産卵期の後半では幼生散逸による加入減少効果が大きい可能性が考えられる。



図(4)-26 2013年および2014年のオニヒトデ産卵期におけるオニヒトデ幼生密度の変動

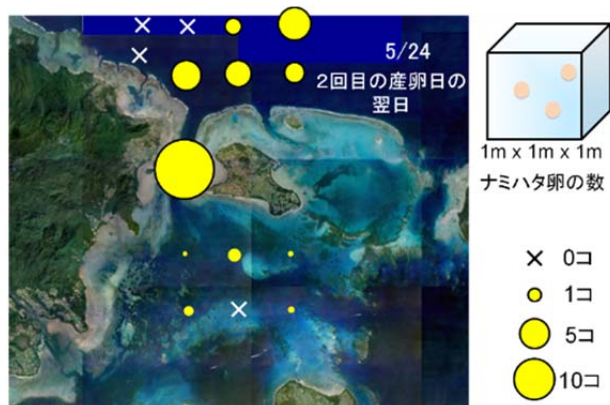
(4) ナミハタの産卵調査

2013年5月の産卵時期に保護区の中でナミハタの密度を調べたところ、メスの増減パターンより、5月4日と5日の夜に産卵したと考えられた。5月4日の翌日は、卵はヨナラ水道の中と小浜島南側にみられた。ただし、ナミハタの卵の数は少なかった。5月5日の夜には、のこりのメスがすべて産卵したと思われ、翌5月6日、卵はヨナラ水道の北と南の両方に分散していた(図(4)-27)。



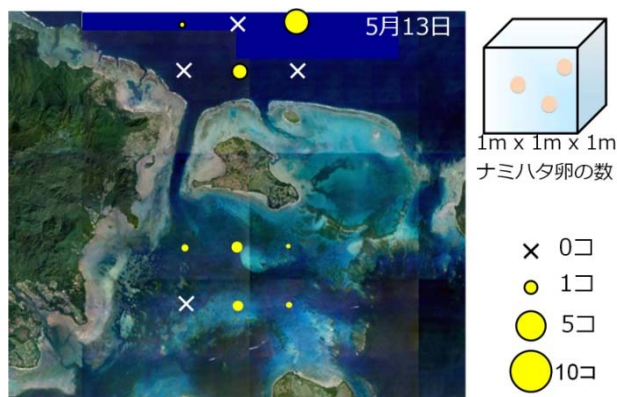
図(4)-27 ナミハタの集合産卵後の卵分布状況

2014年5月の産卵時期に保護区の中でナミハタの密度を調べたところ、メスの増減パターンより、5月21日と22日の夜に産卵したと考えられた。5月22日の翌日は、卵はヨナラ水道の沖の東寄りに高密度(10個/㎡)で出現した。翌5月24日、卵はヨナラ水道の内部に高密度でみられた。いずれの日も礁湖内にあたる南側には少なかった。



図(4)-28 ナミハタの産卵日翌日の卵分布状況

2015年5月の産卵時期に保護区の中でナミハタの密度を調べたところ、メスの増減パターンより、5月12日の夜に産卵したと考えられた。産卵日の翌日には、卵はヨナラ水道の南北両側に出現したが、密度は昨年までと比較すると少なく、10個体/㎡以上の場所は見つからなかった。

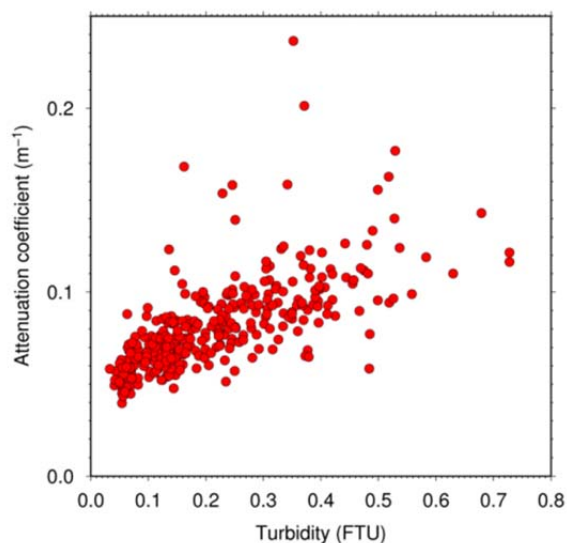


図(4)-29 ナミハタの産卵日翌日の卵分布状況

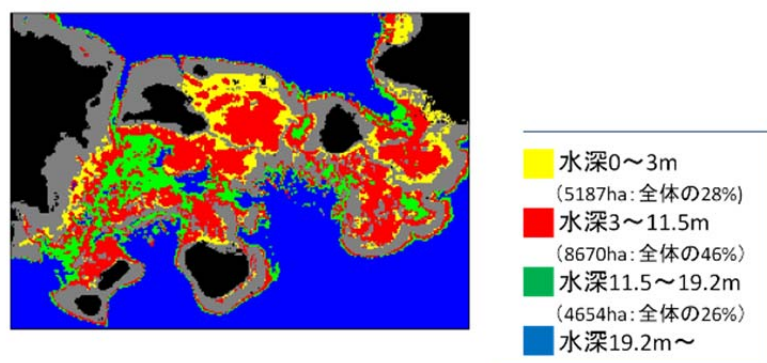
(5) 石西礁湖における水中光環境の推定

サンゴ礁の形成・維持に大きく影響する水中の光環境について、これまでの月1回の定点観測調査で得られたデータから、光合成有効放射 (PAR) の鉛直消散係数を算出し、海域による光環境の違いについて考察した。まず、濁度と鉛直消散係数には有意な正相関がみられた (図(4)-30) 一方で、クロロフィル a 濃度とは相関がみられなかったため、光分布は濁度により決まることが分かった。石西礁湖内では、小浜島と竹富島に挟まれた浅海域および西表沿岸部で、鉛直消散係数が高くなることが示された。現在の石西礁湖の平均鉛直消散係数は0.12であり、ミドリイシ属サンゴの生息限界水深を表層の10%のPARが届く範囲を限界とした場合に19.2mとなり、実際のミドリイシ属サンゴの分布状況と合っていた。これが、最も濁った状態である0.2に高まった場合には生息

限界は11.5mとなり、石西礁湖の26%にあたる4654haがミドリイシ属サンゴの生息できない環境になると推定された（図(4)-31）。



図(4)-30 濁度と消散係数の相関関係



図(4)-31 石西礁湖の水深分布図

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで未解明であったサンゴの着生直後1年間の生残について、格子状基盤および人工的に作出した幼生を用いることによって、着生後1年間の生残率をエリアごとに評価することができた。その結果、これまで、サンゴの回復が遅い場所は、初期生残率も低いと考えられてきたが、サンゴの回復の有無にかかわらず1年3か月後の生残率は15%程度であることが明らかとなった。しかし、石西礁湖の外側の外洋に面した場所に関しては、6か月後までは20%程度で維持されていたが、1年3か月後には1%程度まで急激に低下した。これは、稚サンゴが被覆状から枝が立ち上がる段階で捕食圧以外のストレスがかかっている証拠である。

オニヒトデの大発生メカニズム解明に関して、本研究では、「栄養塩仮説」を検証する上で必

要不可欠な野外での浮遊幼生の分布および餌である植物プランクトン環境を明らかにした。その結果、石垣港周辺では、他と比べて常に植物プランクトン濃度が高く、生活排水の影響で植物プランクトン密度を $0.2 \mu\text{g/L}$ から $0.5 \mu\text{g/L}$ と2倍以上に上昇していることが示唆された。一方、名蔵湾では、台風通過後のみ高く、河川の増水という一時的な陸水の影響で、瞬間的に植物プランクトンが高密度になっていることが推定された。栄養塩に関しては、植物プランクトンの増殖の結果を反映していることが多く、餌環境のモニタリング指標には適さないと判断できる。しかし、オニヒトデ幼生が多く出現したのは、植物プランクトンが高密度であった石垣港周辺ではなく、むしろ植物プランクトン密度は低いほうであった竹富島北(K5)であり、餌の供給源と幼生の出現場所は分けて考える必要があると提言できる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

特に記載すべき事項はない。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) G. SUZUKI, N. YASUDA, K. IKEHARA, K. FUKUOKA, T. KAMEDA, S. KAI, S. NAGAI, A. WATANABE, T. NAKAMURA, S. KITAZAWA, L.P.C. BERNARDO, T. NATORI, M. KOJIMA and K. NADAOKA: Diversity, 8, 9 (2016) doi:10.3390/d8020009 Detection of a High-Density Brachiolaria-Stage Larval Population of Crown-of-Thorns Sea Star (*Acanthaster planci*) in Sekisei Lagoon (Okinawa, Japan)

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 亀田 卓彦、山下 洋、福岡 弘紀、鈴木 豪、甲斐 清香：第16回日本サンゴ礁学会（2013）「石西礁湖における海洋環境モニタリング」
- 2) 福岡弘紀、山下洋、鈴木豪、亀田卓彦、佐川清香、中村 隆志、Lawrence Patrick C. Bernardo、北沢駿介、長井敏、安田仁奈、齋藤佑太、池原浩太、渡邊敦、灘岡和夫：第16回日本サンゴ礁学会（2013）「2013年オニヒトデ産卵期の石西礁湖および周辺水域におけるクロ

ロフィルa濃度分布」

- 3) 鈴木豪、甲斐清香、山下洋：第16回日本サンゴ礁学会（2013）「八重山諸島におけるミドリイシ属サンゴの幼生加入について」
- 4) 亀田 卓彦、福岡 弘紀、山下 洋、鈴木 豪：第17回日本サンゴ礁学会（2014）「石西礁湖における光合成有効放射（PAR）の鉛直消散係数」
- 5) 福岡 弘紀、山下 洋、亀田 卓彦、鈴木 豪、渡邊敦：第17回日本サンゴ礁学会（2014）「石垣島沿岸域におけるオニヒトデ産卵期の植物プランクトン環境」
- 6) 鈴木 豪、山下 洋：第17回日本サンゴ礁学会（2014）「異なる環境下におけるミドリイシ属サンゴの着生後生残比較」
- 7) 亀田 卓彦、福岡 弘紀、山下 洋、鈴木 豪：第18回日本サンゴ礁学会（2015）「石垣島浦底湾における海洋環境の季節変動」
- 8) 福岡 弘紀、鈴木 豪、山下 洋、亀田 卓彦、藤倉祐治、渡邊敦：第18回日本サンゴ礁学会（2015）「石垣島沿岸域におけるオニヒトデ浮遊期幼生の出現と海洋環境」
- 9) 鈴木 豪、山下 洋：第18回日本サンゴ礁学会（2015）「ミドリイシ属サンゴの着生後1年間の生残について一環境間および種間比較」

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 第17回石西礁湖自然再生協議会内 学術調査ワーキンググループ報告（平成26年度1月27日、沖縄県八重山合同庁舎、参加者54名）
- 2) 第18回石西礁湖自然再生協議会内 平成26年度第2回 石西礁湖自然再生協議会学術調査ワーキンググループ報告（平成27年1月23日、石垣市健康福祉センター 視聴覚室 参加者34名）

（５）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 沖縄タイムス（2016年4月20日、「オニヒトデ幼生の集団発見」）
- 2) 琉球新報（2016年4月20日、「オニヒトデ幼生を集団確認 世界初、石西礁湖で」）
- 3) みなと新聞（2016年4月20日、「オニヒトデ群生を発見」）
- 4) 八重山毎日新聞（2016年4月20日、「オニヒトデ幼生 高密度で分布 世界初、石西礁湖で集団発見」）
- 5) 成果の記者発表（2016年4月19日、於水産庁会議室、「世界初、オニヒトデ幼生の高密度集団を発見」）。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 参考文献

- 1) K. E. Fabricius, K. Okaji, and G. De'ath: Three lines of evidence to link outbreaks of the crown-of-thorns seastar *Acanthaster planci* to the release of larval food limitation. Coral Reefs 2010, 29: 593-605 DOI 10.1007/s00338-010-0628-z

Contribution to the Ecosystem Restoration of Sekisei Lagoon based on Elucidation of the Integrated Islands-Reefs-Ocean Network System

Principal Investigator: Kazuo NADAOKA

Institution: Graduate School of Information Science and Engineering
Tokyo Institute of Technology
2-12-1-W8-13 O-okayama, Meguro-Ku, Tokyo 152-8550,
JAPAN
Tel: +81-3-5734-2589 / Fax: +81-3-5734-2650
E-mail: nadaoka.k.aa@m.titech.ac.jp

Cooperated by: The Fisheries Research Agency a national research and development agency, Miyazaki University

[Abstract]

Key Words: Sekisei lagoon, Integrated network system, Coral reefs, Islands, Crown-of-thorns sea star, Numerical simulation, Metagenome analysis, Population genetics, Connectivity, Early life stage of corals

Sekisei Lagoon is the largest coral reef area in Japan, and harbors rich and diverse corals and other reef organisms. However, corals in Sekisei Lagoon have recently been damaged due to frequent occurrences of coral bleaching, outbreaks of crown-of-thorns sea star (COTs) and several typhoon attacks. Hence, for the restoration of the reef environments, the key questions are “What factors are causing the deterioration in the resilience of corals after the disturbances?” and “How can we propose to policy-makers to remove or lessen such factors?”

To answer these key questions, we first analyzed the coral monitoring data collected from 1983 in Sekisei Lagoon area and classified the time-series of coral cover into 3 groups, namely “high cover”, “low cover”, and “decreased” groups. The decreased group, which is mainly located in the central and southern parts of Sekisei Lagoon and occupies ca. 40% of the lagoon, showed a drastic decrease in coral cover after a coral bleaching event in 2007 and has not recovered well since then. The low recovery rate was mainly caused by COTs predation and partly by low recruitment of coral larvae.

To test if the “terrestrial nutrient runoff hypothesis” of COTs outbreaks holds true for the Sekisei Lagoon area, we conducted intensive wide-area sampling of nutrients, phytoplankton, COTs larvae, and metagenome samples in Sekisei Lagoon 8 times from 2013-2015. We found high densities (53.3 individuals/m³) of COTs larvae just outside of Yonara Channel, which is the largest channel in Sekisei Lagoon. Most of the larvae found were advanced-stage brachiolaria. No spatial correlation was found between larval density

and either nutrient or chlorophyll *a* concentrations, suggesting that *A. planci* larvae do not necessarily aggregate in nutrient-rich water. These findings suggest that high-density populations of late developmental stage *A. planci* larvae were produced even under a low phytoplankton concentration, and such events could potentially trigger an adult outbreak. We also tested if nutrient runoff from adjacent land areas can induce COTs outbreaks using a newly-developed integrated modelling system, and found that it could potentially trigger outbreaks in the Sekisei Lagoon area. From the numerical simulations, it was recommended to reduce nutrient runoff by 50% to lessen the possibility of frequent COTs outbreaks in Sekisei Lagoon.