

5. 稚ヒトデ調査・成体個体群調査・サンゴ群集調査

岡地 賢（コーラルクエスト）・山川英治（沖縄県環境科学センター）

5-1. 目的

小卵多産型の繁殖成体をもつ底生無脊椎動物では、初期生活史における生残率が個体群サイズに深く関与する。オニヒトデについても同様に、浮遊幼生期とそれに続く稚ヒトデ期の生残率の増加が大量発生をまねくと考えられてきた。幼生期については餌料が重要な制限要因であることがわかっており、主食である植物プランクトンが増加することにより生残率が高まって大量発生につながるという「幼生生き残り仮説」が提唱されるようになった（Fabricius et al. 2010）。一方で、着底後から成体までおよそ2年間という長期間にわたって影響を受け続ける捕食圧が制限要因であるとして、捕食者が減少することが大量発生の引き金になると主張する「捕食者減少説」も一定の支持を受けている（Keesing and Halford 1992a; Sweatman 2008）。しかしながら、稚ヒトデ期については、野外で発見、観察することが困難であることから、着底から成体（性成熟）までの動態を研究した例は西表島（波部 1989）とフィジー（Zann et al. 1990）の2例しかない。

稚ヒトデから成体までの成長率として、過去に熱帯地域で行われた室内実験では1年で約10cm、2年で約20cm、3年で約30cmという目安が示されているが、フィジーや西表島で取得された野外データではやや遅く、1年で数cm、2年で十数cmであった。沖縄県においてオニヒトデの幼生き残り仮説の検証や大量発生予察を行うにあたっては、野外の成体年級群が何年前に産まれたかを推定しなくてはならず、稚ヒトデから成体に至るまでの成長率が基礎情報として求められる。本研究では、オニヒトデの大量発生が繰り返し起き、現在も成体密度が慢性的に高い状態が続いている沖縄島恩納村と、かつては大量発生が起きたが現在はほとんど成体がみられない北谷町砂辺の2つの異なる海域における稚ヒトデの成長率を推定した。

オニヒトデの個体群形成過程、とくに個体群サイズが生活史のどの段階でどの程度減耗するかについては、現在のところ Scandol (1993) が個体群変動のシミュレーションモデルで設定した仮定の値が専ら使われている（1年目生残率2%）。フィジーの野外観察でも似た値が推定されたが（1年目1%以下、Zann et al. 1990）これを支持するデータは得られていない。個体群サイズの減耗が最も大きいとされるサンゴモ食期稚ヒトデの死亡率は Keesing and Halford (1992a, b) や Okaji (1996) により、サンゴモ食期前半の直径5mm前後までは野外で調べたデータが存在するが、サンゴモ食期後半の直径8~10mm前後の死亡率はまだわかっていない。これを明らかにするため本事業では平成25年から27年にかけて野外におけるサンゴモ食期稚ヒトデの密度変化から死亡率の推定を試みたが、時期により、あるいは年による加入数により、稚ヒトデの発見数が密度変化をマスクするほど変動した（図3-5-1）。そこで、平成28年度は稚ヒトデがサンゴモ上に残す新鮮な食痕を追跡することで死亡率を推定する方法を採択した。

沖縄県内各地のサンゴ礁におけるオニヒトデ個体群動態の基礎情報として、大量発生していない自然状態の成体密度を調べるため、過年度に引き続き沖縄本島、阿嘉島、座間味島および久米島の28地点でスポットチェック法に準じた方法でオニヒトデ成体と食痕の相対密度調査も実施した。また、稚ヒトデ成長率推定のフィールドとなった恩納村万座と北谷町砂辺において、サンゴ食期の餌の評価としてサンゴ群集調査も実施した。

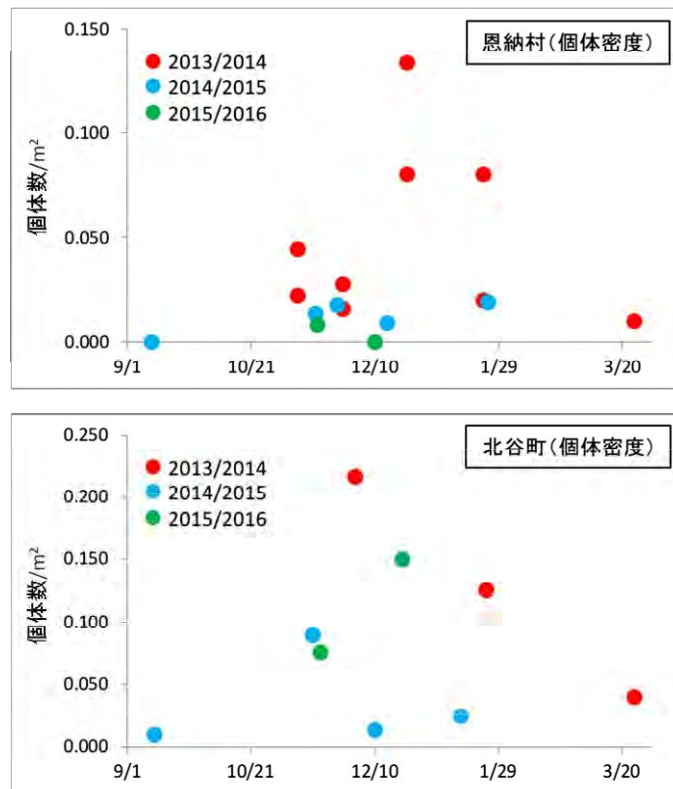


図3-5-1. 恩納村万座と北谷町砂辺で平成25年(2013/2014年)から27年(2015/2016年)にかけて実施した稚ヒトデ密度調査における調査時期別の発見個体数。ランダムコドラート調査で観察面積が統一されていないため、発見個体数は個体密度(個体数/m²)におきかえている。

5-2. 方法

5-2-1. 稚ヒトデ食痕調査

稚ヒトデ食痕調査を開始する前に、食痕の色の変化がどのように起きるかの予備観察を北谷町砂辺海岸(図3-5-2)の礁斜面4ヶ所で実施した。平成28年11月15日に砂辺海岸の水深約15mの礁斜面4ヶ所において、サンゴモ食の稚ヒトデが1日~2日以内に摂餌したと思われるオレンジ色や緑色の食痕を含む食痕群に釘とラベルでマークをつけた。これら4つの食痕群を16日、17日と継続観察して色の変化をみたところ、オレンジ色の食痕は1日経過すると薄緑色になり、緑色の食痕はほぼ白くなることがわかった(図3-5-3)。また、白い食痕群は2週間程度するとサンゴモが再び芽生えるか、または堆積物や付着物でおおわれて判別がつかなくなることもわかった。

本調査として、平成28年11月30日と12月1日、砂辺海岸の水深約8mの礁斜面に50m測線3本を水平に設置し、各測線の上下2mの範囲内にみられた新鮮な食痕合計72個にクギと蛍光テープでラベルをつけた。すべての食痕はスケールとともに写真撮影した(図3-5-4)。また、測線を設置した範囲を俯瞰するおおよその地形図を描き、その上に食痕ラベルの位置を記録しておおむね4つの範囲に分けた(図3-5-5)。以後の食痕追跡観察は、12月13日、26日、平成29年1月11日、1月26日に実施し、ラベルからの食痕の方向と位置、新鮮食痕の有無を記録および撮影した(すべての食痕の写真と観察記録は付録に掲載)。1月26日と27日には最終の調査として食痕の観察とあわせて夜間潜水による稚ヒトデの確認作業も行った。

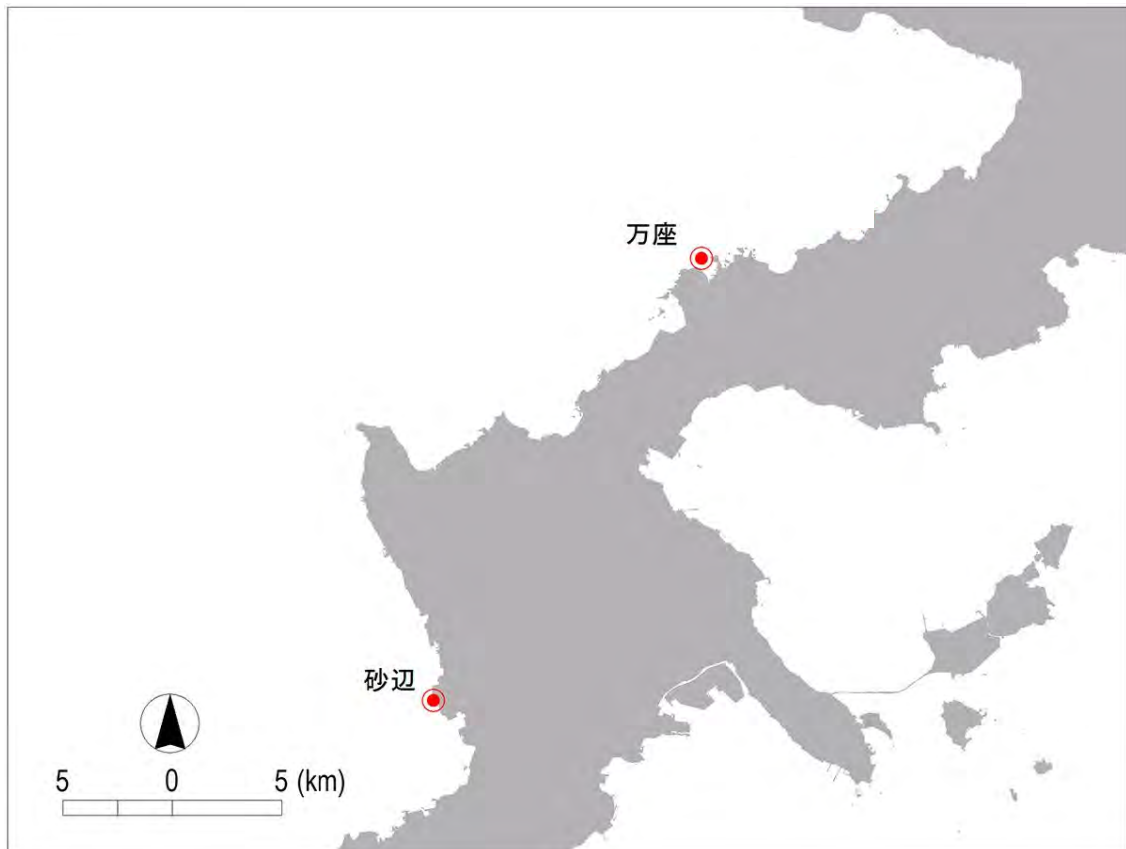


図3-5-2. 稚ヒトデ調査・稚ヒトデ成長率推定・サンゴ群集調査を行った地点



図3-5-3. (その1) 稚ヒトデ食痕の色の変化。左は11月16日撮影、右は11月17日撮影。

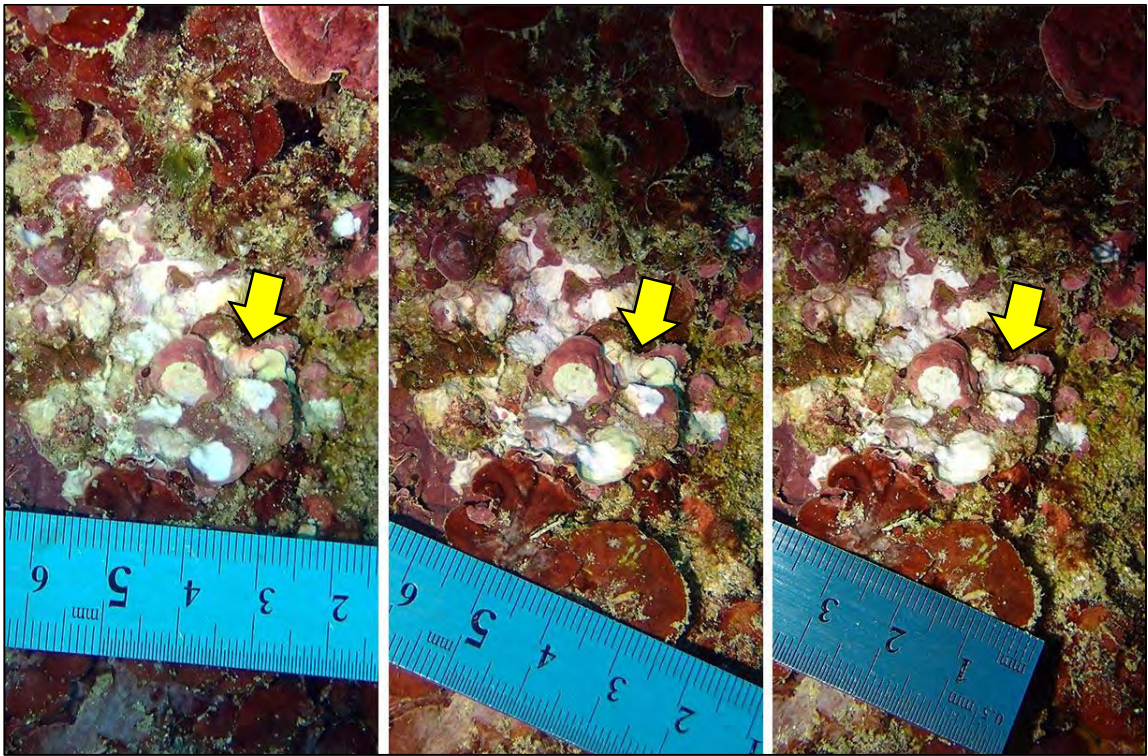


図3-5-3. (その2) 稚ヒトデ食痕の色の変化。左は11月16日撮影、右は11月17日撮影。

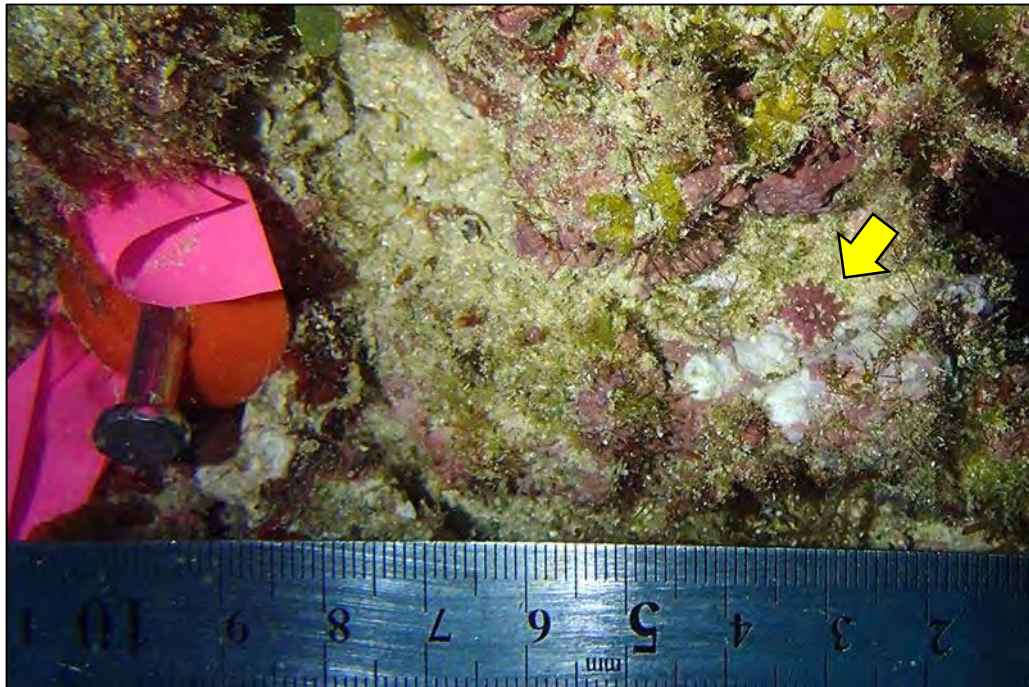


図3-5-4. 稚ヒトデ食痕のラベルの状況。この食痕では稚ヒトデ個体が確認できた。(11月30日撮影)

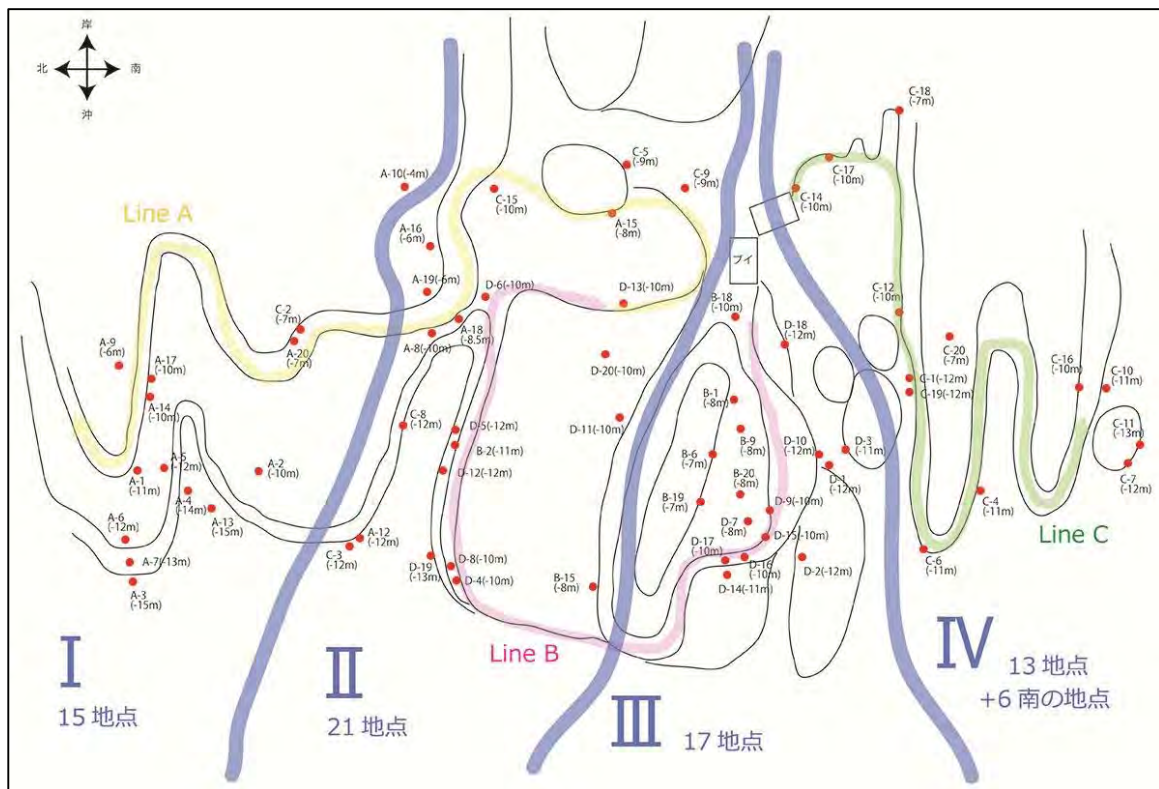


図3-5-5. 稚ヒトデ食痕の位置と調査範囲(I~IV)を記した地形図

5-2-2. 稚ヒトデ成長率推定

平成25年10月から平成28年7月までの約2年9ヶ月にわたり、恩納村万座と北谷町砂辺の礁斜面で稚ヒトデおよび成体個体の直径データを取得した。稚ヒトデは採集後実験室内に持ち帰って実体顕微鏡下でマイクロメーターを用いて直径と腕数を測定した。平成28年3月から6月にかけては、恩納村万座地先で漁業者が実施する毎月1回のオニヒトデ駆除に同行してすべての駆除個体を写真撮影し、室内のパソコン上で直径を測定した。駆除個体は複数の年級群から成るため、月毎の直径データを統計ソフトR(3.2.2)のMclustパッケージを用いて2つないし3つの年級群に分離した。ただし、平成28年の駆除個体に関しては、前提となる年級群数が2、3、4のいずれでも分離できなかったため、大型個体の外れ値を検出するために各月のデータをグラフの棄却検定(grubbs.test)にかけ、各月に採捕された最大個体の直径データが外れ値として有意であることを確認したうえで3歳群として取り扱った。成長式の推定は、サンゴモ食期に対してはネイピア数指数関数式に近似させる方法(Yamaguchi 1977)を、サンゴ食期以降に対しては統計ソフトR(3.2.2)のnlst関数でゴンペルツ成長式を近似させる方法を使用した。

5-2-3. 成体個体群調査

環境省のスポットチェック法(野村ら 2001)によるオニヒトデモニタリングの方法にならない、沖縄県内各地における相対的な成体オニヒトデ密度を求めた。野外調査は、沖縄島、慶良間諸島および久米島に設定した28地点において実施した。調査に際しては2名のスノーケルダイバーが礁斜面の2500平方メートル(おおむね50m四方または同等の面積)の範囲を約15分間遊泳し、オニヒトデの直径を20cm未満、20-30cm、30cm以上の3つのクラスに分けて個体数を、同じ範囲でみられたオニヒトデの食痕数とともに記録した。

5-2-4. サンゴ群集調査

サンゴ群集調査には、デジタルカメラを使用するフォトトランセクト法を採用した (Jonker et al. 2008)。過年度と同じく、稚ヒトデ食痕調査を実施した恩納村万座と北谷町砂辺の礁斜面、水深 8m (低潮線基準) の等深線に沿って長さ 40m の調査測線を 5 本設置し、測線に沿って 1m 間隔で合計 200 枚の 40cm x 60cm 枠内の海底を写真撮影した。撮影した画像は室内のパソコン上で専用ソフトウェア (米国立サンゴ礁研究所作成のポイント・カウント Coral Point Count 3.6 ; Kohler and Gill 2006) を使用して解析し、サンゴ、海藻、ソフトコーラルなどの付着生物と底質 (岩盤、礫、砂) の被度を算出した。

5-3. 結果と考察

5-3-1. 稚ヒトデ食痕調査

稚ヒトデ食痕調査の観察結果は章末の表 3-5-1 に記した。平成 28 年 11 月 30 日の初回調査でラベルをつけた 72 個の食痕のうち、ラベルが脱落した 2 個以外は 4 回の観察を行った (12 月 13 日、26 日、平成 29 年 1 月 11 日、1 月 26 日)。この間に個体の移動によると思われる新たな食痕にラベルを追加することもあった。すべての食痕について野帳の記録と写真の経時的な変化を注意深く比較し、I~IV の調査範囲別に調査回ごとの生残数を表 3-5-2 に示した。なお、1 月 27 日の潜水調査ではラベルをつけた食痕付近から合計 34 個の稚ヒトデを採集した。

表 3-5-2. 食痕比較に基づく稚ヒトデ生残数 (2016 年 11 月 30 日にラベル設置)

調査日	生残数			
	I	II	III	IV
2016/11/30	12	19	16	16
2016/12/13	12	19	16	15
2016/12/26	10	17	11	15
2017/1/11	10	15	9	13
2017/1/26	7	13	6	11

食痕を比較する際、オレンジ色や緑色の新しい食痕がみられたときや、堆積物や藻類が付着していない新しい白色の食痕が前回より増えているときは稚ヒトデが生残しているとみなした。いっぽうで、複数回にわたって食痕に変化がみられなくなったときや、周辺も含めて食痕が消滅したときは稚ヒトデが死亡したとみなした。また、いったん食痕がみられなくなった後に観察範囲ではない離れた場所に食痕があらわれたときや、隣接する食痕との区別がつかなくなったとき、複数個体が存在する可能性があるときは無効として生残数にも母数にも含めなかった。

調査範囲別の生残率 (%) の推移は図 3-5-6 に示した。範囲 I、II、IV と比べて、範囲 III では 3 回目 (12 月 13 日) 以降の生残率が低くなっていた。これら 4 つの調査範囲はダイバーの分担を振り分けるために便宜的に設置したもので、地形や水深などの環境条件に大きな差異はなかった。念のため、各調査範囲の全期間を通じた生残率、各調査回の生残率および 1 日あたり死亡率 (生残率を日数で乗根して 1 から引いた値の %) をそれぞれアークサイン変換して一元配置

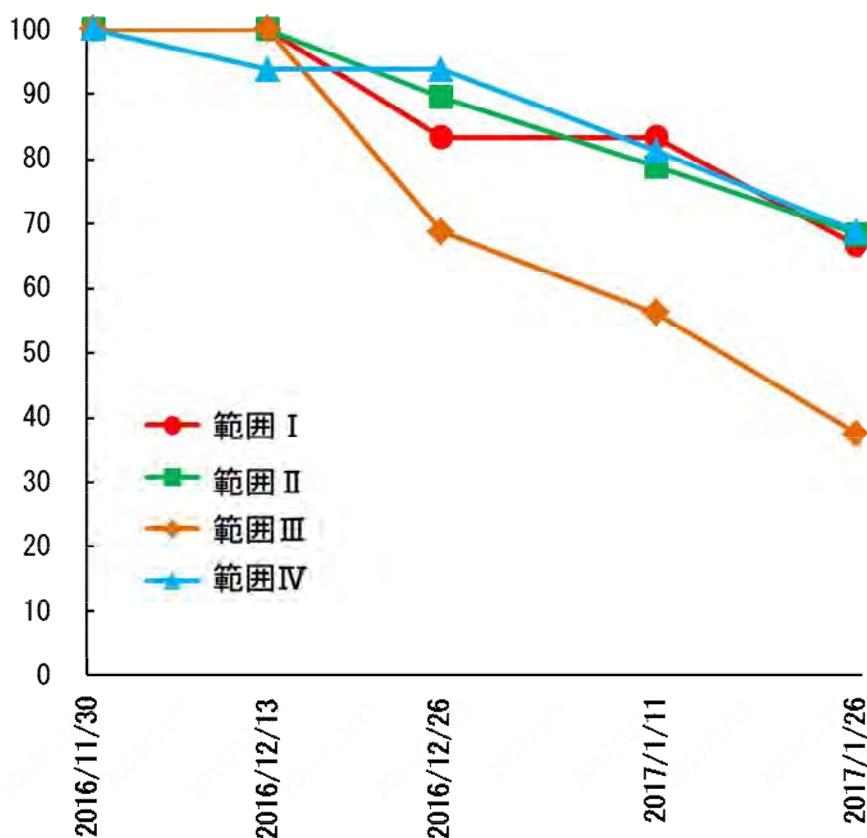


図3-5-6. 調査範囲別の稚ヒトデ生残率の推移

分散分析で比較したが、いずれも統計的な有意差はみられなかった ($p < 0.05$)。今回ラベルをつけた食痕 72 個から無効またはラベル脱落の 9 個をのぞいた 63 個に対し、最終回まで稚ヒトデが生残していたと思われる食痕は 38 個で、全期間を通じた 1 日あたり死亡率は 0.88% となった (表 3-5-3)。

表3-5-3. 食痕比較に基づく 1 日あたり稚ヒトデ死亡率

調査日	1日あたり死亡率(%)				
	I	II	III	IV	全体
2016/11/30	NA	NA	NA	NA	NA
2016/12/13	0.00	0.00	0.00	0.50	0.12
2016/12/26	1.39	0.85	2.84	0.00	1.20
2017/1/11	0.00	0.78	1.25	0.89	0.75
2017/1/26	1.48	0.95	2.67	1.11	1.41
全期間	0.71	0.66	1.71	0.66	0.88

今回の調査により得られた死亡率が妥当を、過去にオーストラリアで行われた稚ヒトデの放流・再捕実験により報告された例と比較してみたい。サンゴモ食期稚ヒトデの 1 日あたり死亡率はサイズ依存とされ、稚ヒトデを野外に放流した時のサイズ (直径) に対応する死亡率が報告されている (Keesing and Halford 1992; Okaji 1996; 表 3-5-4)。今回の最終回調査で採集した 34 個体の稚ヒトデの平均直径 (14.2 mm) と、平成 26 年度の本調査により推定したサンゴモ食期稚ヒトデの成長式 ($St = -22.7127 + 23.2127 \exp(0.0026t)$) から、食痕調査を開始した 11 月 30

日の稚ヒトデのサイズを逆算すると約9.2mmとなった。これまで報告されているサンゴモ食期稚ヒトデの直径と1日あたり死亡率をプロットすると、直径と死亡率の間には有意な相関がみられ ($P < 0.0401$)、回帰式 $Y = 8.4175 \exp(-0.5328X)$ が得られた (図3-5-7)。この回帰式に今回の稚ヒトデサイズ9.2mmを代入して得られた死亡率の期待値は0.063%となるので、今回の調査で求めた死亡率はその約14倍である。

表3-5-4. 過去に報告されているサンゴモ食期稚ヒトデの1日あたり死亡率

着底後月数	直径	1日あたり死亡率 (%)	出典
0-mo	0.6	8.97	Okaji 1996
0-mo	0.7	5.05	Okaji 1996
1-mo	1.1	6.49	Keesing and Halford 1992
2-mo	1.2	2.57	Okaji 1996
3-mo	3.2	2.40	Okaji 1996
4-mo	2.7	1.24	Keesing and Halford 1992
7-mo	5.5	0.45	Keesing and Halford 1992
6-mo	9.2	0.88	本調査

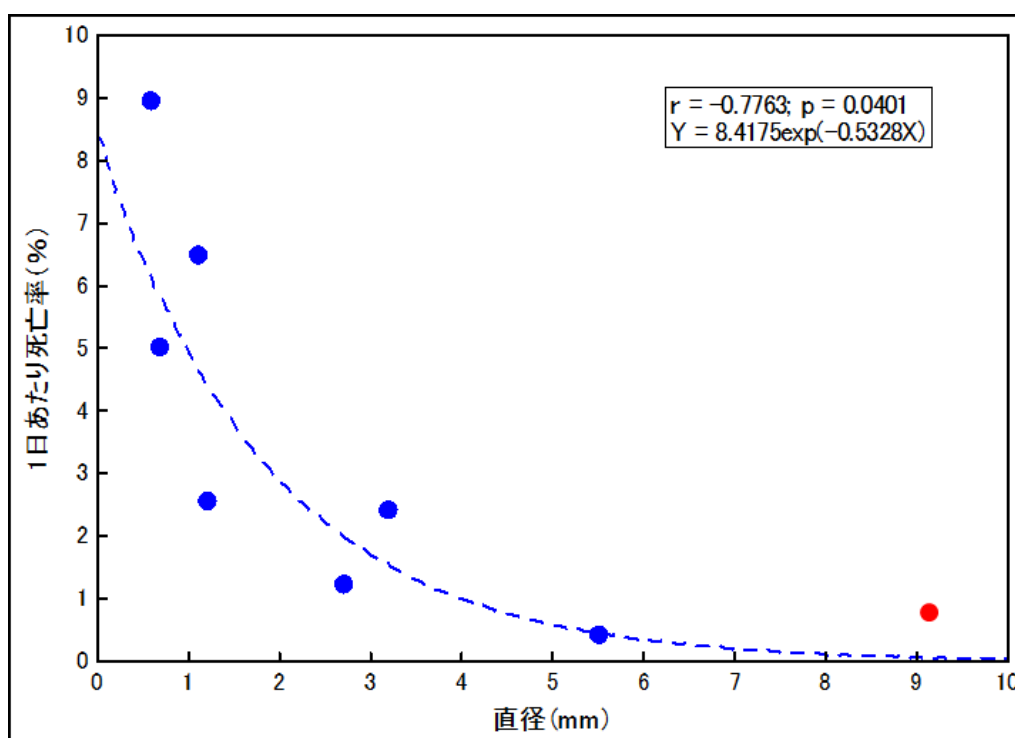


図3-5-7. 過去に報告されたサンゴモ食期稚ヒトデの1日あたり死亡率(青丸)と回帰式(青点線)および今回調査で得られた1日あたり死亡率(赤丸)

今回の調査では、ある回の調査で死亡と判定された場合は、約2週間前の前回調査までの生残として取り扱ったため、1日あたりに換算した死亡率は実際より高くなると考えられる。また、オーストラリアで死亡率が調べられたデイビーズリーフの礁斜面は緩い礫底で、砂辺の岩盤主体の礁斜面とは捕食者を含め様々な環境条件が異なっているであろうし、それらも含めて実験的手法や観察で求めた死亡率が普遍的かどうか現時点では判断できないので、今回得られた死亡率の妥当性も評価は難しい。しかしながら、サンゴ食期へ移行する直前の稚ヒトデ群の死亡率が推定できたことで、サンゴモ食期という初期生活史のまとまった部分について減耗率が計算できるようになったことはオニヒトデの個体群動態研究には有意義であろう。食痕の変化から個体を追跡するという調査方法は今回が初めての試みであるため、食痕に変化がないときや個体が確認できない場合はむろんのこと、新しい食痕がみられた場合でも、真に個体の生死が追跡できているかどうかを主張できるデータや証拠をさらに積み上げてゆかなくてはならない。具体的な作業としては、最初に食痕のラベルを設置する際に半径50cm程度の範囲を観察して他の食痕がないことを十分に確認したり、設置時にも夜間の観察を行って個体を確認するといった作業が今後も必要になると思われる。

5-3-2. 稚ヒトデ成長率推定

平成28年8月までに取得できた成体の直径データから、恩納村万座における平成25年着底群の成長式を推定したところ、下記のゴンペルツ式が得られた(図3-5-8)。この成長曲線に基づいて算出したオニヒトデの直径は、着底後1年が約35mm、2年が約184mm、3年が約293mmとなる。比較のため、西表島(波部1989)で得られた成長式と北谷町砂辺の成長式も併記した。

$$\text{恩納村} \quad St = 347.6424 * 0.0001453^{\wedge} \exp(-0.003606t)$$

$$\text{西表島} \quad St = 371.6159 * 0.008047^{\wedge} \exp(-0.002202t)$$

$$\text{砂辺海岸} \quad St = 27.2722 * 0.0252^{\wedge} \exp(-0.008637t) \quad \text{または} \quad St = 3.8885 \exp 0.004693t$$

なお、砂辺海岸の直径データは平成27年4月と5月のデータに2つの年級群が混在していると思われたため、それ以前のデータと小型グループの平均値をとる成長式と、大型の2個体の平均値をとる成長式の2とおりを求めた。前者は成長に上限があるゴンペルツ式だが、後者はサンゴモ食期の稚ヒトデに特有の指数関数である。砂辺海岸では大型個体はまれにしかみられず、平成27年3月から5月にかけて3回実施した測線調査でも20cm以上の個体は1個体しか見つからなかった。万座と砂辺で今年度まで3年間継続してきたサンゴ群集調査で明らかになっているとおり、砂辺海岸には成体の餌となるサンゴがほとんどないためサンゴ食期に移行した稚ヒトデが十分に成長できないと考えられる。恩納村万座の調査で得られた成長式は、西表島の式よりやや早く大型に成長することを示しているが、こちらについても西表のフィールドでサンゴがさほど豊富ではなかった(横地、私信)ことを反映したものと思われる。

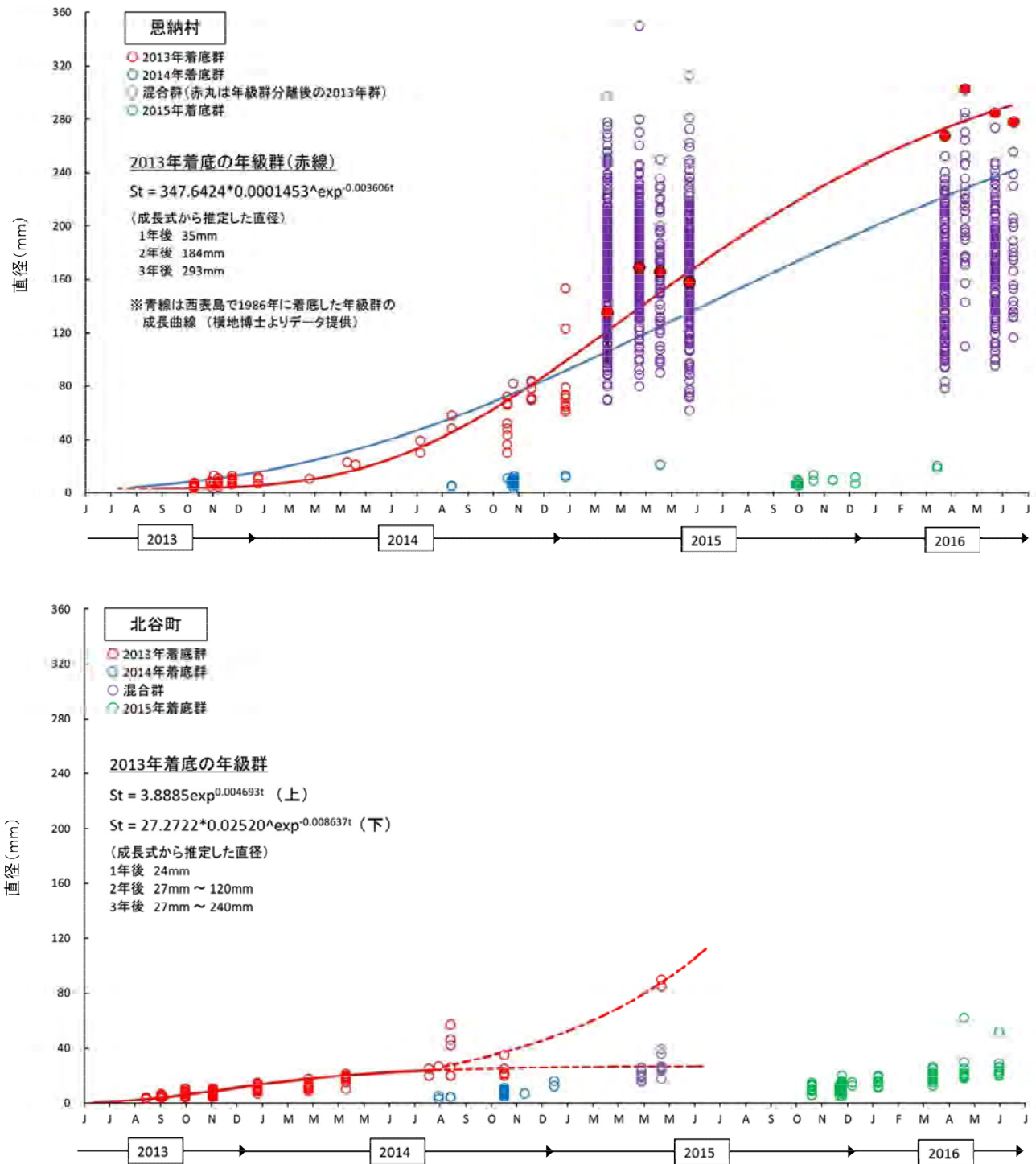


図3-5-8. 恩納村と北谷町におけるオニヒトデの成長データ(赤丸は2013年着底群、青丸は2014年着底群、紫丸は混合群、緑色は2015年着底群)。恩納村の成長曲線のうち赤実線は2013年着底群のデータから、青実線は1986~1989年に西表島で取得されたデータから推定した。北谷町の成長曲線は、赤点線で最大(上)と最小(下)の両方を示している。

5-3-3. 成体個体群調査

平成28年7月から8月にかけて沖縄島、慶良間（阿嘉島、座間味島）、久米島の合計28地点で実施した成体密度調査の結果を表3-5-5にまとめた。平成28年度の調査データは表3-5-6に示した。平成27年の調査と比較して、本部海域で個体数・食痕数ともに増加した以外は恩納、慶良間、久米ではどちらも減少していた。本部では前回調査で浜元地先が7個体/0.25ha、瀬底南で5個体/0.25haであった個体密度が、今回はそれぞれ8個体/0.25ha、14個体/0.25haと大幅に増加していた（いずれも2回観察のうち多い方の結果）。他方、平成26年から27年にかけて個体密度が増加した恩納村では（成長式の項でも述べたように平成25年着底群による増加と思われる）、今回調査では最大密度が9個体/0.25haまで低下したが（前回は23個体/0.25ha）、伊武部、熱田、ギシフ、前兼久の5地点で5個体/0.25haになっており、前回ののような偏りがみられなかった。慶良間では個体数が0.38（個体/0.25ha）から0.06に、食痕も2.31（個/0.25ha）から0.17へと大幅に減少した。久米島で個体、食痕ともほとんどみられないのは前回と同様であった。

表3-5-5. 沖縄県内各地の成体密度調査の結果

島	海域	調査地点数	データセット数	平均個体数 (±標準誤差)	個体数 (範囲)	平均食痕数 (±標準誤差)	食痕数 (範囲)	前回との比較
沖縄島	本部	4	8	4.38 ± 1.70	0 - 14	5.75 ± 1.82	1 - 17	↑ ↓
	恩納	7	14	3.29 ± 0.86	0 - 9	4.71 ± 1.05	0 - 11	
	読谷	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	糸満	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
慶良間		9	18	0.06 ± 0.06	0 - 1	0.17 ± 0.13	0 - 2	↓
久米島		8	16	0.06 ± 0.06	0 - 1	0.44 ± 0.23	0 - 2	↓
合計		28	56		0 - 14		0 - 17	
総平均(H28)				1.48 ± 0.40		2.18 ± 0.49		
総平均(H27)				1.43 ± 0.48		3.57 ± 0.59		
総平均(H26)				1.50 ± 0.30		5.92 ± 0.91		
総平均(H25)				1.88 ± 0.39		4.70 ± 1.05		

表3-5-6. 平成28年度の成体密度調査結果(取得データ).

No	島	海域	地点名	緯度	経度	調査日	観察開始時刻1	観察終了時刻1	観察開始時刻2	観察終了時刻2	合計個体数1	サイズ1 < 20cm	サイズ1 20-30cm	サイズ1 30cm <	合計個体数2	サイズ2 < 20cm	サイズ2 20-30cm	サイズ2 30cm <	食痕数1	食痕数2	地点平均	海域平均	SE	食痕平均	SE
1	沖縄本島	本部	浜元	26.67167	127.88292	2016/8/1	10:23	10:43	10:44	11:04	8	0	0	5	3	1	3	1	8	6	6.5				
2	沖縄本島	本部	ヤツケー	26.66295	127.87397	2016/8/1	11:30	11:50	11:51	12:11	0	0	0	1	0	1	0	2	2	2	0.5			5.75	1.82
3	沖縄本島	本部	マガイグワア	26.64137	127.85615	2016/8/1	13:16	13:36	13:37	13:57	5	1	4	0	0	0	0	0	6	1	2.5	4.38	1.70		
4	沖縄本島	本部	伊武部	26.62977	127.85805	2016/8/1	14:37	14:57	14:58	14:18	14	0	12	2	2	0	1	1	17	4	8				
5	沖縄本島	恩納	伊武部	26.53073	127.92144	2016/8/3	10:03	10:23	10:24	10:44	5	2	3	0	0	0	0	0	8	2	2.5				
6	沖縄本島	恩納	熱田	26.51734	127.89775	2016/8/3	10:57	11:17	11:18	11:38	2	0	2	0	6	1	4	1	3	4	4				
7	沖縄本島	恩納	万座	26.50783	127.85239	2016/8/3	11:54	12:14	12:15	12:35	1	0	1	0	1	0	1	0	2	2	1				
8	沖縄本島	恩納	恩納ギンブ	26.49356	127.83506	2016/8/3	13:46	14:06	14:07	14:27	6	1	4	1	8	0	5	3	7	11	7	3.29	0.86	4.71	1.05
9	沖縄本島	恩納	富着	26.46625	127.80376	2016/8/3	14:46	15:06	15:07	15:27	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0.5				
10	沖縄本島	恩納	前兼久	26.45375	127.79318	2016/8/3	15:37	15:57	15:58	16:18	6	0	5	1	9	0	6	3	8	11	7.5				
11	沖縄本島	恩納	山田	26.44119	127.78417	2016/8/3	16:59	17:19	17:20	17:40	1	1	0	0	0	0	0	0	2	1	0.5				
12	座間味島	慶良間	知志	26.24733	127.31403	2016/8/19	9:18	9:38	9:39	9:59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5				
13	座間味島	慶良間	新田真	26.23934	127.29277	2016/8/19	10:30	10:50	10:51	11:11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
14	座間味島	慶良間	新田洞穴	26.23598	127.28905	2016/8/19	11:15	11:35	11:36	11:56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
15	座間味島	慶良間	新田西	26.23510	127.28601	2016/8/19	12:00	12:20	12:21	12:41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
16	安曇島	慶良間	安曇子巳	26.20211	127.31873	2016/8/20	13:53	14:13	14:14	14:34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.06	0.17	0.13
17	安曇名敷島	慶良間	安曇名敷	26.21711	127.29383	2016/8/20	15:37	15:57	15:58	16:18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
18	兼比島	慶良間	兼比北	26.21517	127.28728	2016/8/20	14:48	15:08	15:09	15:29	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0				
19	座間味島	慶良間	ニシハマ	26.20230	127.28881	2016/8/19	14:54	15:14	15:15	15:35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
20	座間味島	慶良間	燈台下	26.22237	127.24513	2016/8/19	13:37	13:57	13:58	14:18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
21	久米島	久米	伊武部	26.36235	126.93153	2016/7/18	14:02	14:22	14:23	14:43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
22	久米島	久米	秘密君	26.35493	126.87665	2016/7/18	15:02	15:22	15:23	15:43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5				
23	久米島	久米	イチャゴザ	26.34958	126.83804	2016/7/19	9:11	9:31	9:32	9:52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
24	久米島	久米	阿嘉島石	26.36816	126.80896	2016/7/19	11:21	11:41	11:42	12:02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25	久米島	久米	阿嘉下	26.37198	126.79759	2016/7/19	10:15	10:35	10:36	10:56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
26	久米島	久米	豊崎	26.39274	126.77630	2016/7/18	16:35	16:55	16:56	16:16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
27	久米島	久米	フーラ	26.31052	126.76945	2016/7/18	9:46	10:06	10:06	10:26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
28	久米島	久米	南口	26.31111	126.84056	2016/7/18	11:12	11:32	11:33	11:53	1	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0				

5-3-4. サング群集調査

ポイント・カウント用の海底写真は、平成 28 年 4 月 11 日に北谷町砂辺で、13 日に恩納村万座で、それぞれ水深 8m に設置した測線に沿って 1m 間隔で 200 枚 (50m x 4 本) 撮影した。各地点で撮影した画像解析結果の概要は表 3-5-7 に、解析生データは章末の表 3-5-8 (万座) と表 3-5-9 (砂辺) に示した。サング群集の平均被度は万座で 18.3%、砂辺で 2.2% と、平成 25 年~27 年と同様に両地点間で大きな差があった。ソフトコーラルの被度が拮抗しているのも同じ傾向で、万座で 2.1%、砂辺で 54.1% であった。一方、石灰藻被度は両地点でほとんど同じであった (万座 9.9% vs. 砂辺 9.2%)。これらの結果から、砂辺ではサングに食性転換した後のオニヒトデにとって餌環境が相対的に乏しいことがわかる。

表 3-5-7. 恩納村万座と北谷町砂辺でのサング群集調査結果 (生データは章末の表 3-5-8 と表 3-5-9 を参照)

カテゴリー	平均被度 (%)	
	恩納村 (万座)	北谷町
造礁サング (合計)	18.33 ± 1.87	2.23 ± 0.41
(ミドリイシ)	(0.61 ± 0.20)	(0.14 ± 0.06)
(ハマサング)	(0.20 ± 0.13)	(0.72 ± 0.25)
(キクメイシ)	(10.39 ± 1.25)	(0.86 ± 0.21)
ソフトコーラル	2.14 ± 0.20	54.11 ± 4.27
石灰藻	9.86 ± 2.29	9.22 ± 0.57
海藻	0.02 ± 0.01	0.36 ± 0.08
岩盤	68.95 ± 3.18	33.50 ± 4.03
礫	0.01 ± 0.01	0.04 ± 0.03
砂	0.01 ± 0.01	0.06 ± 0.02

(参考文献)

- Fabricius KE, Okaji K, De'ath G (2010) Three lines of evidence to link outbreaks of the crown-of-thorns seastar *Acanthaster planci* to the release of larval food limitation. *Coral Reefs*, 29:593-605.
- 波部忠重 (1989) サンゴ礁の保護・育成とオニヒトデ幼生の駆除に関する研究. 昭和 63 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1989 年 3 月, 東海大学海洋学部. pp266.
- Jonker M, Johns K, Osborne K (2008) Surveys of benthic reef communities using underwater digital photography and counts of juvenile corals. Standard Operational Procedure No.10., Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia, 2008. 75pp.
- Keesing J, Halford AR (1992a) Field measurement of survival rates of juvenile *Acanthaster planci*: techniques and preliminary results. *MEPS* 85: 107-114.
- Keesing J, Halford AR (1992b) Importance of postsettlement processes for the population dynamics of *Acanthaster planci* (L.). *Aust J Mar Fresh Res* 43: 635-651.
- Kohler KE, Gill SM (2006) Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A Visual Basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. *Computers and Geosciences* 32: 1259-1269.
- 野村恵一・木村 匡・川越久史 (2001) 広域サンゴ礁モニタリング手法としてのスポットチェック法の紹介と石西礁湖におけるその実践例. *海中公園情報*. 131: 5-12.
- Okaji K (1996) Feeding ecology in the early life stages of the crown-of-thorns starfish, *Acanthaster planci*. Ph.D. dissertation, James Cook University, Townsville, 1996. 133pp.
- Scandol JP (1993) CotSim—scientific visualisation and gamingsimulation for the *Acanthaster* phenomenon. *In*, Engalhardt and Lassig (eds.), *The possible causes and consequences of outbreaks of the Crown-of-Thorns Starfish*. Great Barrier Reef Marine Park Authority, Townsville, Australia, Workshop Series 18, 119-128. Great Barrier Reef Marine Park Authority.
- Sweatman H (2008) No-take reserves protect coral reefs from predatory starfish. *Current Biology*. 18(14): R598-R599.
- Yamaguchi M (1977) Estimating the length of the exponential growth phase: growth increment observations on the coral-reef asteroid *Culcita novaeguineae*. *Mar. Biol.* 39: 57-59.
- Zann L, Brodie J, Vuki V (1990) History and dynamics of the crown-of-thorns starfish *Acanthaster planci* (L.) in the Suva area, Fiji. *Coral Reefs* 9: 135-144.

表3-5-1. (その1) 稚ヒトデ食痕調査の結果(範囲I)

ラベル	1回目 11/30	2回目 12/13	3回目 12/26	4回目 1/11	5回目 1/26	生死 判定	備考
A-10	◎ 新食痕	◎ 新食痕	○ 食痕増加	△ 変化なし	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
A-19	◎ 新食痕	◎ 新食痕	○ 食痕増加	○ 食痕増加	○ 食痕増加	5回目 まで生残	
A-20	◎ 新食痕	△ 変化なし	○ 食痕増加	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
C-2	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
A-2	△ 写真なし	△ 白食痕	△ 変化なし	△ 変化なし	× 食痕消滅	無効	
F-11			◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 個体採取	無効	A-2とは別個体と思われる
A-17	◎ 個体確認	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
A-13	◎ 個体確認	◎ 新食痕	◎ 個体確認	○ 食痕増加	◎ 個体採取	4回目 まで生残	別個体採取の可能性 (元食痕から約1m移動)
A-4 (G-11)	◎ 新食痕	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	◎ 個体採取	4回目 まで生残	3回目にラベル脱落、4回目にG-11設置 別個体採取の可能性(ラベルから約1.2m)
A-14	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
A-1	△ 白食痕	△ 白食痕	× 行方不明	× 食痕消滅	× 食痕消滅	無効	
A-5	△ 白食痕	△ 白食痕	× 行方不明	× 食痕消滅	× 食痕消滅	無効	
A-9	◎ 新食痕	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	◎ 新食痕	5回目 まで生残	5回目観察時は標識を発見できず、その 後の回収時に発見、新食痕を確認した。
A-3	◎ 新食痕	◎ 新食痕	× 行方不明	× 食痕消滅	× 食痕消滅	2回目 まで生残	
A-6	△ 白食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
A-7	△ 白食痕	◎ 新食痕	× 行方不明	× 食痕消滅	× 食痕消滅	2回目 まで生残	

表3-5-1. (その2) 稚ヒトデ食痕調査の結果(範囲Ⅱ)

No.	ラベル	1回目 11/30	2回目 12/13	3回目 12/26	4回目 1/11	5回目 1/26	生死 判定	備考
1	A-15	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
2	C-5	◎ 新食痕	△ 変化なし	◎ 新食痕	△ 変化なし	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
3	C-9	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	○ 食痕増加	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
4	C-15	△ 白食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	○ 食痕増加	○ 食痕増加	5回目 まで生残	
5	A-16	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
6	A-8	◎ 新食痕	○ 食痕増加	× 行方不明	× 食痕消滅	× 食痕消滅	2回目 まで生残	
7	C-8	△ 写真なし	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	△ 変化なし	3回目 まで生残	
8	C-3	◎ 新食痕	× 行方不明	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	5回目 まで生残	E-16と重複の可能性
	E-16		◎ 新食痕	◎ 新食痕	× 行方不明	× 行方不明	無効	
9	A-12	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
10	B-15	◎ 新食痕	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	× 行方不明	4回目 まで生残	
11	D-19	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
12	D-4	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	D-8と 区別困難	◎ 個体採取	5回目 まで生残	4回目は隣接するD-8との区別が困難 採取時はD-8に近い場所
13	D-8	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	○ 食痕増加	○ 食痕増加	無効	
14	B-2	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	△ 変化なし	× 行方不明	2回目 まで生残	
15	D-12	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	○ 食痕増加	○ 食痕増加	5回目 まで生残	
16	D-5	◎ 新食痕	△ 変化なし	△ 変化なし	○ 食痕増加	× 行方不明	4回目 まで生残	
17	D-11	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
18	D-6	◎ 新食痕	○ 食痕増加	× 行方不明	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
19	D-20	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	× 行方不明	× 行方不明	3回目 まで生残	
20	D-13	△ 写真なし	△ 変化なし	◎ 新食痕	◎ 新食痕	× 行方不明	無効	2個体の可能性あり
21	A-18	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	

表3-5-1. (その3) 稚ヒトデ食痕調査の結果(範囲Ⅲ)

赤ラベル	1回目 11/30	2回目 12/13	3回目 12/26	4回目 1/11	5回目 1/26	生死 判定	備考
B-18	△ 白食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	× 行方不明	× 行方不明	3回目 まで生残	
D-18	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 白食痕	◎ 新食痕	× 行方不明	4回目 まで生残	
F-6			△ 白食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	無効	F-6/F-10は当初から見落としていた食痕の可能性
F-10			△ 白食痕	△ 白食痕	△ 変化なし	無効	
B-1	◎ 新食痕	△ 変化なし	× 行方不明	○ 食痕増加	× 行方不明	4回目 まで生残	
B-9	△ 白食痕	○ 食痕増加	○ 食痕増加	△ 変化なし	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
D-3	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
D-1	△ 白食痕	○ 食痕増加	○ 食痕増加	○ 食痕増加	◎ 新食痕	5回目 まで生残	
D-10	◎ 新食痕	○ 食痕増加	△ 変化なし	△ 変化なし	△ 変化なし	2回目 まで生残	
B-6	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	4回目 まで生残	採取個体は食痕とは別個体の可能性 (継続観察の食痕から約70cm離れた場所で採取)
B-20	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
B-19	◎ 新食痕	○ 食痕増加	× 行方不明	× 行方不明	× 行方不明	2回目 まで生残	3回目からシルト等により元食痕を見失う。 その後新しい食痕がみられないため死亡とみなした。
D-9	○ 新食痕	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	○ 食痕増加	5回目 まで生残	5回目の食痕は新しい
D-7	△ 白食痕	◎ 新食痕	× 行方不明	× 行方不明	× 行方不明	2回目 まで生残	
E-30		△ 白食痕	× 行方不明	× 行方不明	× 行方不明	無効	
D-15	△ 白食痕	△ 変化なし	△ 変化なし	◎ 新食痕	◎ 個体採取	無効	元食痕の個体と採取個体が別の可能性
D-2	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	◎ 新食痕	◎ 個体採取	5回目 まで生残	
D-16	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	△ 変化なし	△ 変化なし	2回目 まで生残	
D-17	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	△ 変化なし	3回目 まで生残	
F-3			◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	無効	
D-14	◎ 新食痕	○ 食痕増加	× 食痕消滅	× 食痕消滅	× 食痕消滅	2回目 まで生残	

表3-5-1. (その4) 稚ヒトデ食痕調査の結果(範囲Ⅳ)

ラベル	1回目 11/30	2回目 12/13	3回目 12/26	4回目 1/11	5回目 1/26	生死 判定	備考
C-14 G-8	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	◎ 新食痕	◎ 個体採取	生残 8週間	
C-17	◎ 新食痕	△ 変化なし	○ 食痕増加	◎ 新食痕	△ 変化なし	生残 6週間	
C-18	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	◎ 個体採取	生残 8週間	
C-12	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 白食痕	生残 8週間	5回目の白食痕は比較的新しい
C-20	◎ 新食痕	○ 食痕増加	△ 変化なし	○ 食痕増加	◎ 個体採取	生残 8週間	
C-1	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	生残 8週間	
C-19	◎ 新食痕	× 行方不明	× 行方不明	× 行方不明	× 行方不明	無効	C-1/C-19は同一個体の可能性あり (C-19の4回目はC-1の食痕)
C-6	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	◎ 新食痕	◎ 個体採取	生残 8週間	
C-4	◎ 新食痕	△ 変化なし	△ 白食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	生残 2週間以下	4回目と5回目の食痕は上方すぎて別個体の可能性
E-41		◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	× 行方不明	無効	C-4とは別個体と思われる
C-11	◎ 個体確認	◎ 新食痕	△ 変化なし	◎ 新食痕	◎ 個体採取	生残 8週間	
C-7	◎ 個体確認	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	生残 8週間	
C-10	△ 白食痕	△ 変化なし	△ 変化なし	× 行方不明	× 行方不明	無効	C-10はもともと個体不在の可能性 2回目の写真でE-46の食痕と混同
E-46	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	△ 変化なし	生残 6週間	E-46の4回目以降はC-10(G-10)と 区別がつかない
C-16	◎ 新食痕	◎ 新食痕	○ 食痕増加	△ 変化なし	◎ 個体採取	生残 8週間	
B-12	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	× 食痕消滅	× 食痕消滅	生残 4週間	
B-5 E-52	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	△ 変化なし	△ 変化なし	生残 4週間	B-5から移動したと思われる個体の食痕を E-52でラベル
B-13	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 個体採取	生残 8週間	
B-3	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	× 行方不明		無効	3回目以降にラベル脱落
Pre 4	◎ 新食痕	◎ 新食痕	◎ 新食痕	× 行方不明		無効	3回目以降にラベル脱落
A-11	△ 写真なし	◎ 新食痕	○ 食痕増加	◎ 新食痕	◎ 新食痕	生残 8週間	

表3-5-8. サンゴ群集調査の画像解析データ(恩納村万座)

調査名称 H28オニヒトデ総合対策事業
 調査地点名称 恩納村万座 8m
 調査(撮影)日 2016/4/13

トランセクト番号	T1	T2	T3	T4	T5			
画像数	40	40	42	42	42			
合計観察点数	2160	2160	2268	2268	2268			
有効観察点数(枠、巻尺、陰影部分のぞく)	2130	2073	2242	2192	2260			
主要生物区分(%被度)						平均値	標準偏差	標準誤差
造礁サンゴ	17.65	22.58	15.83	22.54	13.05	18.33	4.19	1.87
海藻	0.00	0.00	0.04	0.00	0.04	0.02	0.02	0.01
石灰藻	18.08	9.36	9.81	8.03	4.03	9.86	5.13	2.29
付着性ベントス	2.25	2.99	2.77	3.33	2.74	2.82	0.39	0.18
底質	61.97	65.07	71.54	66.10	80.13	68.97	7.13	3.19
死亡サンゴ群体	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01
死亡サンゴ群体(海藻被覆)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
不明	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
枠、巻尺、陰影、水深、障害物等	1.39	4.03	1.15	3.35	0.35	2.05	1.56	0.70
合計	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
サンゴ分類群および底質区分(%被度)						平均値	標準偏差	標準誤差
造礁サンゴ								
ミドリイシ科	1.22	0.29	0.94	0.41	0.18	0.61	0.45	0.20
ヒラフキサンゴ科	0.89	0.24	0.00	0.27	0.00	0.28	0.37	0.16
ナガレハナサンゴ科	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
キサンゴ科	0.05	0.24	0.13	0.00	0.62	0.21	0.25	0.11
キクメイシ科	8.40	13.36	9.99	13.09	7.08	10.39	2.79	1.25
クサビライシ科	0.05	0.05	0.18	0.05	0.00	0.06	0.07	0.03
アオサンゴ科	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
サザナミサンゴ科	0.80	0.43	0.13	0.64	0.75	0.55	0.27	0.12
アナサンゴモドキ科	0.47	0.87	0.54	0.50	0.22	0.52	0.23	0.10
オオトゲサンゴ科	0.61	1.54	0.58	2.05	1.11	1.18	0.63	0.28
ピワガラシ科	0.61	0.96	0.36	0.55	0.35	0.57	0.25	0.11
ウミバラ科	0.56	1.06	0.13	0.23	0.31	0.46	0.37	0.17
ハナヤサイサンゴ科	0.47	0.53	0.54	1.60	0.22	0.67	0.53	0.24
ハマサンゴ科	2.91	2.99	2.32	2.78	2.21	2.64	0.35	0.16
ヤスリサンゴ科	0.61	0.00	0.00	0.36	0.00	0.20	0.28	0.13
ヒユサンゴ科	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
クダサンゴ科	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
海藻								
サポテングサ類	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
大型海藻	0.00	0.00	0.04	0.00	0.04	0.02	0.02	0.01
芝草状海藻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
石灰藻								
石灰藻	18.08	9.36	9.81	8.03	4.03	9.86	5.13	2.29
付着性ベントス								
貝類その他	0.23	0.00	0.04	0.00	0.00	0.06	0.10	0.05
ソフトコーラル	1.41	2.17	2.23	2.60	2.30	2.14	0.44	0.20
カイメン	0.05	0.00	0.09	0.00	0.00	0.03	0.04	0.02
イワスナギンチャク	0.56	0.82	0.40	0.73	0.44	0.59	0.18	0.08
底質								
石灰岩盤	61.97	65.07	71.54	66.10	80.04	68.95	7.10	3.18
礫	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.02	0.01
砂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.02	0.01
シルト	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
死亡サンゴ群体								
死亡サンゴ群体	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01
死亡サンゴ群体(海藻被覆)								
死亡サンゴ群体(海藻被覆)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
不明								
不明	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
枠、巻き尺、陰影、水深、障害物等								

枠	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
陰影部分	1.39	1.30	1.15	0.97	0.35	1.03	0.41	0.18	
水深ほか判読障害物等	0.00	2.73	0.00	2.38	0.00	1.02	1.41	0.63	
群体形区分 (%被度)						平均値	標準偏差	標準誤差	
洗矢状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
枝状ミドリイシ	0.14	0.05	0.04	0.00	0.00	0.05	0.06	0.03	
散房花状ミドリイシ	0.33	0.10	0.13	0.36	0.13	0.21	0.13	0.06	
被覆状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
塊状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
卓状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
枝状サンゴ	0.14	1.01	0.09	0.23	0.66	0.43	0.40	0.18	
被覆状サンゴ	6.10	4.49	2.63	4.24	2.08	3.91	1.60	0.72	
葉状サンゴ	0.09	0.87	0.09	0.05	0.13	0.25	0.35	0.16	
塊状サンゴ	9.67	14.62	11.73	15.33	9.56	12.18	2.70	1.21	
クサビライシ類	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	
準塊状サンゴ	0.47	0.58	0.89	1.87	0.22	0.81	0.64	0.29	
アオサンゴ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
アナサンゴモドキ類	0.47	0.87	0.18	0.50	0.22	0.45	0.28	0.12	
クダサンゴ類	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
群体形区分 (全サンゴに対する%)									
洗矢状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
枝状ミドリイシ	0.80	0.21	0.28	0.00	0.00	0.26	0.33	0.15	
散房花状ミドリイシ	1.86	0.43	0.85	1.62	1.02	1.15	0.58	0.26	
被覆状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
塊状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
卓状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
枝状サンゴ	0.80	4.49	0.56	1.01	5.08	2.39	2.20	0.99	
被覆状サンゴ	34.57	19.87	16.62	18.62	15.93	21.12	7.68	3.43	
葉状サンゴ	0.53	3.85	0.56	0.20	1.02	1.23	1.49	0.67	
塊状サンゴ	54.79	64.74	73.80	68.02	72.88	66.85	7.68	3.44	
クサビライシ類	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00	0.06	0.13	0.06	
準塊状サンゴ	2.66	2.56	5.63	8.30	1.69	4.17	2.75	1.23	
アオサンゴ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
アナサンゴモドキ類	2.66	3.85	1.13	2.23	1.69	2.31	1.03	0.46	
クダサンゴ類	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
主要生物区分 (点数)						合計	平均値	標準偏差	標準誤差
造礁サンゴ	376	468	355	494	295	1988	397.60	82.25	36.78
海藻	0	0	1	0	1	2	0.40	0.55	0.24
石灰藻	385	194	220	176	91	1066	213.20	107.53	48.09
付着性ベントス	48	62	62	73	62	307	61.40	8.88	3.97
底質	1320	1349	1604	1449	1811	7533	1506.60	203.18	90.86
死亡サンゴ群体	1	0	0	0	0	1	0.20	0.45	0.20
死亡サンゴ群体 (海藻被覆)	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
不明	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
枠、巻尺、陰影、水深、障害物等	30	87	26	76	8	227	45.40	34.20	15.30
合計観察点数	2160	2160	2268	2268	2268	11124			
サンゴ分類群および底質区分 (点数)						合計	平均値	標準偏差	標準誤差
造礁サンゴ									
ミドリイシ科	26	6	21	9	4	66	13.20	9.73	4.35
ヒラフキサンゴ科	19	5	0	6	0	30	6.00	7.78	3.48
ナガレハナサンゴ科	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
キサンゴ科	1	5	3	0	14	23	4.60	5.59	2.50
キクメイシ科	179	277	224	287	160	1127	225.40	56.77	25.39
クサビライシ科	1	1	4	1	0	7	1.40	1.52	0.68
アオサンゴ科	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
サザナミサンゴ科	17	9	3	14	17	60	12.00	6.00	2.68
アナサンゴモドキ科	10	18	12	11	5	56	11.20	4.66	2.08
オトゲサンゴ科	13	32	13	45	25	128	25.60	13.56	6.06
ピワガラシ科	13	20	8	12	8	61	12.20	4.92	2.20
ウミバラ科	12	22	3	5	7	49	9.80	7.60	3.40

ハナヤサイサンゴ科	10	11	12	35	5	73	14.60	11.72	5.24
ハマサンゴ科	62	62	52	61	50	287	57.40	5.90	2.64
ヤスリサンゴ科	13	0	0	8	0	21	4.20	6.02	2.69
ヒュサンゴ科	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
クダサンゴ科	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
海藻									
サポテングサ類	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
大型海藻	0	0	1	0	1	2	0.40	0.55	0.24
芝草状海藻	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
石灰藻									
石灰藻	385	194	220	176	91	1066	213.20	107.53	48.09
付着性ベントス									
貝類その他	5	0	1	0	0	6	1.20	2.17	0.97
ソフトコーラル	30	45	50	57	52	234	46.80	10.33	4.62
カイメン	1	0	2	0	0	3	0.60	0.89	0.40
イワスナギンチャク	12	17	9	16	10	64	12.80	3.56	1.59
底質									
石灰岩盤	1320	1349	1604	1449	1809	7531	1506.20	202.43	90.53
礫	0	0	0	0	1	1	0.20	0.45	0.20
砂	0	0	0	0	1	1	0.20	0.45	0.20
シルト	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
死亡サンゴ群体									
死亡サンゴ群体	1	0	0	0	0	1	0.20	0.45	0.20
死亡サンゴ群体（海藻被覆）									
死亡サンゴ群体（海藻被覆）	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
不明									
不明	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
枠、巻き尺、陰影、水深、障害物等									
枠	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
陰影部分	30	28	26	22	8	114	22.80	8.79	3.93
水深ほか判断障害物等	0	59	0	54	0	113	22.60	31.00	13.86
群体形区分点数（トランセクト）						合計	平均値	標準偏差	標準誤差
洗矢状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
枝状ミドリイシ	3	1	1	0	0	5	1.00	1.22	0.55
散房花状ミドリイシ	7	2	3	8	3	23	4.60	2.70	1.21
被覆状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
塊状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
卓状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
枝状サンゴ	3	21	2	5	15	46	9.20	8.38	3.75
被覆状サンゴ	130	93	59	93	47	422	84.40	32.68	14.61
葉状サンゴ	2	18	2	1	3	26	5.20	7.19	3.22
塊状サンゴ	206	303	263	336	216	1324	264.80	55.61	24.87
クサビライシ類	0	0	1	0	0	1	0.20	0.45	0.20
準塊状サンゴ	10	12	20	41	5	88	17.60	14.15	6.33
アオサンゴ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
アナサンゴモドキ類	10	18	4	11	5	48	9.60	5.59	2.50
クダサンゴ類	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
群体形区分点数（全サンゴに対する%）									
洗矢状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
枝状ミドリイシ	3	1	1	0	0	5	1.00	1.22	0.55
散房花状ミドリイシ	7	2	3	8	3	23	4.60	2.70	1.21
被覆状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
塊状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
卓状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
枝状サンゴ	3	21	2	5	15	46	9.20	8.38	3.75
被覆状サンゴ	130	93	59	92	47	421	84.20	32.61	14.59
葉状サンゴ	2	18	2	1	3	26	5.20	7.19	3.22
塊状サンゴ	206	303	262	336	215	1322	264.40	55.84	24.97
クサビライシ類	0	0	1	0	0	1	0.20	0.45	0.20
準塊状サンゴ	10	12	20	41	5	88	17.60	14.15	6.33
アオサンゴ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
アナサンゴモドキ類	10	18	4	11	5	48	9.60	5.59	2.50
クダサンゴ類	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00

表3-5-9. サンゴ群集調査の画像解析データ(北谷町砂辺)

調査名称 H28オニヒトデ総合対策事業
 調査地点名称 北谷町砂辺 8m
 調査(撮影)日 2016/4/11

トランセクト番号	T1	T2	T3	T4	T5			
画像数	40	40	40	40	40			
合計観察点数	2160	2160	2160	2160	2160			
有効観察点数(枠、巻尺、陰影部分のぞく)	2140	2114	2089	2095	2090			
主要生物区分(%被度)						平均値	標準偏差	標準誤差
造礁サンゴ	1.26	1.61	2.39	2.24	3.64	2.23	0.91	0.41
海藻	0.65	0.38	0.38	0.19	0.19	0.36	0.19	0.08
石灰藻	9.67	11.02	9.05	7.49	8.85	9.22	1.28	0.57
附着性ベントス	49.91	60.22	52.32	67.73	42.58	54.55	9.69	4.33
底質	38.50	26.73	35.85	22.34	44.74	33.63	9.04	4.04
死亡サンゴ群体	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01
死亡サンゴ群体(海藻被覆)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
不明	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
枠、巻尺、陰影、水深、障害物等	0.93	2.13	3.29	3.01	3.24	2.52	1.01	0.45
合計	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
サンゴ分類群および底質区分(%被度)						平均値	標準偏差	標準誤差
造礁サンゴ								
ミドリイシ科	0.00	0.28	0.05	0.10	0.29	0.14	0.13	0.06
ヒラフキサンゴ科	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01
ナガレハナサンゴ科	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
キサンゴ科	0.05	0.09	0.05	0.00	0.24	0.09	0.09	0.04
キクメイシ科	0.75	0.33	0.67	1.58	0.96	0.86	0.46	0.21
クサビライシ科	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01
アオサンゴ科	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
サザナミサンゴ科	0.05	0.00	0.00	0.05	0.14	0.05	0.06	0.03
アナサンゴモドキ科	0.19	0.00	0.05	0.00	0.00	0.05	0.08	0.04
オオトゲサンゴ科	0.00	0.00	0.05	0.00	0.48	0.11	0.21	0.09
ビワガライシ科	0.09	0.19	0.00	0.05	0.10	0.09	0.07	0.03
ウミバラ科	0.05	0.14	0.10	0.05	0.10	0.09	0.04	0.02
ハナヤサイサンゴ科	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.03	0.06	0.03
ハマサンゴ科	0.09	0.47	1.39	0.43	1.20	0.72	0.55	0.25
ヤスリサンゴ科	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ヒユサンゴ科	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
クダサンゴ科	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
海藻								
サボテングサ類	0.65	0.38	0.34	0.19	0.14	0.34	0.20	0.09
大型海藻	0.00	0.00	0.05	0.00	0.05	0.02	0.03	0.01
芝草状海藻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
石灰藻								
石灰藻	9.67	11.02	9.05	7.49	8.85	9.22	1.28	0.57
附着性ベントス								
貝類その他	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ソフトコーラル	49.58	60.03	51.89	66.83	42.20	54.11	9.54	4.27
カイメン	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
イワスナギンチャク	0.33	0.19	0.43	0.91	0.38	0.45	0.27	0.12
底質								
石灰岩盤	38.50	26.63	35.62	22.34	44.59	33.54	9.00	4.03
礫	0.00	0.00	0.14	0.00	0.05	0.04	0.06	0.03
砂	0.00	0.09	0.10	0.00	0.10	0.06	0.05	0.02
シルト	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
死亡サンゴ群体								
死亡サンゴ群体	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01
死亡サンゴ群体(海藻被覆)								
死亡サンゴ群体(海藻被覆)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
不明								
不明	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
枠、巻き尺、陰影、水深、障害物等								

枠	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00		0.04	0.08	0.04
陰影部分	0.93	1.62	0.79	0.51	0.42		0.85	0.48	0.21
水深ほか判読障害物等	0.00	0.32	2.50	2.50	2.82		1.63	1.35	0.60
群体系区分 (%被度)							平均値	標準偏差	標準誤差
洗矢状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
枝状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
散房花状ミドリイシ	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00		0.01	0.02	0.01
被覆状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
塊状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
卓状ミドリイシ	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00		0.06	0.13	0.06
枝状サンゴ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
被覆状サンゴ	0.23	0.19	0.24	0.14	0.81		0.32	0.28	0.12
葉状サンゴ	0.00	0.14	0.00	0.05	0.05		0.05	0.06	0.03
塊状サンゴ	0.84	0.99	2.06	1.81	2.58		1.66	0.73	0.33
クサビライシ類	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
準塊状サンゴ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14		0.03	0.06	0.03
アオサンゴ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
アナサンゴモドキ類	0.19	0.00	0.05	0.00	0.00		0.05	0.08	0.04
クダサンゴ類	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
群体系区分 (全サンゴに対する%)									
洗矢状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
枝状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
散房花状ミドリイシ	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00		0.40	0.89	0.40
被覆状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
塊状ミドリイシ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
卓状ミドリイシ	0.00	17.65	0.00	0.00	0.00		3.53	7.89	3.53
枝状サンゴ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
被覆状サンゴ	18.52	11.76	10.00	6.38	22.37		13.81	6.51	2.91
葉状サンゴ	0.00	8.82	0.00	2.13	1.32		2.45	3.67	1.64
塊状サンゴ	66.67	61.76	86.00	80.85	71.05		73.27	10.01	4.47
クサビライシ類	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
準塊状サンゴ	0.00	0.00	0.00	0.00	3.95		0.79	1.77	0.79
アオサンゴ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
アナサンゴモドキ類	14.81	0.00	2.00	0.00	0.00		3.36	6.46	2.89
クダサンゴ類	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
主要生物区分 (点数)						合計	平均値	標準偏差	標準誤差
造礁サンゴ	27	34	50	47	76	234	46.80	18.83	8.42
海藻	14	8	8	4	4	38	7.60	4.10	1.83
石灰藻	207	233	189	157	185	971	194.20	28.13	12.58
付着性ベントス	1068	1273	1093	1419	890	5743	1148.60	203.13	90.84
底質	824	565	749	468	935	3541	708.20	190.21	85.06
死亡サンゴ群体	0	1	0	0	0	1	0.20	0.45	0.20
死亡サンゴ群体 (海藻被覆)	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
不明	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
枠、巻尺、陰影、水深、障害物等	20	46	71	65	70	272	54.40	21.71	9.71
合計観察点数	2160	2160	2160	2160	2160	10800			
サンゴ分類群および底質区分 (点数)						合計	平均値	標準偏差	標準誤差
造礁サンゴ									
ミドリイシ科	0	6	1	2	6	15	3.00	2.83	1.26
ヒラフキサンゴ科	0	1	1	0	0	2	0.40	0.55	0.24
ナガレハナサンゴ科	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
キサンゴ科	1	2	1	0	5	9	1.80	1.92	0.86
キクメイシ科	16	7	14	33	20	90	18.00	9.62	4.30
クサビライシ科	0	1	0	0	0	1	0.20	0.45	0.20
アオサンゴ科	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
サザナミサンゴ科	1	0	0	1	3	5	1.00	1.22	0.55
アナサンゴモドキ科	4	0	1	0	0	5	1.00	1.73	0.77
オオトゲサンゴ科	0	0	1	0	10	11	2.20	4.38	1.96
ピワガラライシ科	2	4	0	1	2	9	1.80	1.48	0.66
ウミバラ科	1	3	2	1	2	9	1.80	0.84	0.37

ハナヤサイサンゴ科	0	0	0	0	3	3	0.60	1.34	0.60
ハマサンゴ科	2	10	29	9	25	75	15.00	11.47	5.13
ヤスリサンゴ科	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
ヒュサンゴ科	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
クダサンゴ科	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
海藻									
サボテングサ類	14	8	7	4	3	36	7.20	4.32	1.93
大型海藻	0	0	1	0	1	2	0.40	0.55	0.24
芝草状海藻	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
石灰藻									
石灰藻	207	233	189	157	185	971	194.20	28.13	12.58
付着性ベントス									
貝類その他	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
ソフトコーラル	1061	1269	1084	1400	882	5696	1139.20	200.11	89.49
カイメン	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
イワスナギンチャク	7	4	9	19	8	47	9.40	5.68	2.54
底質									
石灰岩盤	824	563	744	468	932	3531	706.20	189.43	84.72
礫	0	0	3	0	1	4	0.80	1.30	0.58
砂	0	2	2	0	2	6	1.20	1.10	0.49
シルト	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
死亡サンゴ群									
死亡サンゴ群	0	1	0	0	0	1	0.20	0.45	0.20
死亡サンゴ群 (海藻被覆)									
死亡サンゴ群 (海藻被覆)	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
不明									
不明	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
枠、巻き尺、陰影、水深、障害物等									
枠	0	4	0	0	0	4	0.80	1.79	0.80
陰影部分	20	35	17	11	9	92	18.40	10.29	4.60
水深ほか判読障害物等	0	7	54	54	61	176	35.20	29.18	13.05
群体系区分点数 (トランセクト)						合計	平均値	標準偏差	標準誤差
洗矢状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
枝状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
散房花状ミドリイシ	0	0	1	0	0	1	0.20	0.45	0.20
被覆状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
塊状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
卓状ミドリイシ	0	6	0	0	0	6	1.20	2.68	1.20
枝状サンゴ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
被覆状サンゴ	5	4	5	3	17	34	6.80	5.76	2.58
葉状サンゴ	0	3	0	1	1	5	1.00	1.22	0.55
塊状サンゴ	18	21	43	38	54	174	34.80	15.16	6.78
クサビライシ類	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
準塊状サンゴ	0	0	0	0	3	3	0.60	1.34	0.60
アオサンゴ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
アナサンゴモドキ類	4	0	1	0	0	5	1.00	1.73	0.77
クダサンゴ類	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
群体系区分点数 (全サンゴに対する%)									
洗矢状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
枝状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
散房花状ミドリイシ	0	0	1	0	0	1	0.20	0.45	0.20
被覆状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
塊状ミドリイシ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
卓状ミドリイシ	0	6	0	0	0	6	1.20	2.68	1.20
枝状サンゴ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
被覆状サンゴ	5	4	5	3	17	34	6.80	5.76	2.58
葉状サンゴ	0	3	0	1	1	5	1.00	1.22	0.55
塊状サンゴ	18	21	43	38	54	174	34.80	15.16	6.78
クサビライシ類	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
準塊状サンゴ	0	0	0	0	3	3	0.60	1.34	0.60
アオサンゴ	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
アナサンゴモドキ類	4	0	1	0	0	5	1.00	1.73	0.77
クダサンゴ類	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00

6. 個体群統計モデリング

熊谷直喜（国立環境研究所）

6-1. 緒言

オニヒトデの大量発生を予察する手法として、個体密度や食痕数の広域モニタリングや、稚ヒトデモニタリングが提案され、地域関係者にとって有効な手段として検討されている。これらの手法に加え、統計モデルやGISを利用した「大量発生の起きやすさ」を数値化できれば、オニヒトデ大量発生の効率的な予察に大きく貢献できると考えられる。

海洋底生生物の個体数変動には、底生生活を始めて以降の生存プロセスと、浮遊幼生期の分散プロセスの双方のバランスが影響すると考えられてきた。ここでは過去の大量発生または駆除記録、幼生分散シミュレーションに基づいた統計モデリングによる海域別の「大量発生の起きやすさ」を推定し、沖縄県内における新しいオニヒトデ大量発生予察手法の確立をめざした調査研究を行う。前年度までに、オニヒトデ発生に関わる環境要因の探索、オニヒトデの加入プロセスとして海流による幼生分散の予備的なシミュレーションを行ってきた。今年度は、幼生分散シミュレーションの改良・プログラムの高速化を行い、17年分のシミュレーションを実行した。さらにその計算結果を用い、オニヒトデ成体、サンゴ被度、幼生加入パターンを関連付けて、オニヒトデ成体の発生パターンを推定する時系列統計モデルを八重山海域について試作した。

6-2. 方法

6-2-1. 幼生分散モデル

海洋生物の卵・精子や幼生の分散プロセスのシミュレーションでは、大小スケールの海水の流動と、海水に漂う粒子としての幼生の振る舞いとを再現するため、高度なプログラミング技術と大きな計算コストが伴う。このため本研究では、計算済みの値が公開されている海流のシミュレーション結果を利用し、その海流に従った時の幼生の分散パターンを計算した。このやり方には、海流の流動の計算を行わないことによって、大きく計算コストを抑えることができるメリットがある。

6-2-2. 幼生海流分散シミュレーション概要

シミュレーションは以下の条件で行った。a) オニヒトデ発生パターンの類似性から分類した、沖縄島9区画、慶良間諸島2区画、宮古諸島4区画、八重山諸島7区画、台湾、フィリピン北部の計24区画を解析単位として設けている（図3-6-1）。それらのうちで、1990年代から2000年代にオニヒトデの高頻度の発生（スポットチェック法による密度2.5以上）が見られた調査地点を幼生分散開始地点として使用した。b) 海流データには、1998～2014年の17年分のデータを使用した。海流は南北方向と東西方向の流速値が与えられており、これに基づいて幼生の分散方向を決定した。c) 1回の試行は、予め設定した幼生期間が尽きると終了するように設定し、終了時の位置座標を記録した。d) 幼生はクロロフィル*a*濃度に比例して成長率・生存率が変化するよう設定し、試行毎に10万個体を放出するとした。e) 各海域を出発点とした試行を繰り返し、到達確率のマップを作成した。シミュレーションの繰り返し回数は1万回とした。

6-2-3. モデルの比較・改良の詳細

前年度は簡易的に、緯度・経度方向の海流のうち流速の遅い方向へは、流速比に比例してランダムに移動するアルゴリズムを組んだ(図3-6-2 a)。しかし、これでは幼生の拡散を十分には表現できないため、拡散アルゴリズムの改良を行った。幼生分散のシミュレーションとしてはランダムウォークモデルが簡便な手法として多用される。このモデルは前の時点の状態(流速)の影響が長く残る様子を表現できるため、長距離分散も表現しやすいとされる(図3-6-2 c)。しかし一方で、大多数のランダムな拡散を表現するには極端なモデルになってしまう。そこで今回は完全にランダムなモデルとランダムウォークモデルの中間的な振る舞いを示すマルコフ連鎖モデルを実装した(図3-6-2 d)。このモデルは前の時点の状態の影響が時間経過に伴い次第に減衰していくため、ランダム性と影響持続性とを兼ね備えている。アルゴリズムとしては、Siegel et al. (2003) が幼生分散のシミュレーションへの使用を目的として提唱した下記の2つの式(ラグランジュ表現)を緯度・経度方向に適用した。

$$X_{i,t+1} = X_{i,t} + \Delta t(V_i + v_{i,t}) \quad \dots (1)$$

Δt はシミュレーションの時間間隔であり、海流の渦の動態を考えると0.1日以下が望ましいが、間隔を狭めると計算負荷が増大するため、本研究では許容限度の0.1日とした。 $X_{i,t}$ はグリッド*i*、時間*t*における幼生の位置を表し、 V_i はグリッド*i*における流速(9-2-4に述べる、一般に公開されているデータ、日単位)である。 $v_{i,t}$ は V_i からのランダムな変異を表す流速であり、次の式で表せる。

$$v_{i,t+1} = v_{i,t} (1 - \Delta t/\tau_L) + \sigma_v \cdot \text{sqrt}(2\Delta t/\tau_L) \cdot \text{RN} \quad \dots (2)$$

τ_L はLagrangian decorrelation timescale(ある時点の流速の影響が見られなくなるまでの時間)であり、岸に接近すると少し小さくなるが、今回のシミュレーションで用いている空間解像度 0.1° では無視できる程度であり、最大値の3(一定値)として用いた。 σ_v はランダムな変動のスケールを示し、流速の絶対値に伴い増減するが、Siegel et al. (2003)にしたがい $5 \sim 30$ cm/sの範囲を取るように、 $5 + 25 \cdot \exp(-10 / |V_i|)$ と記述した。RNは標準正規乱数(平均0、標準偏差1)である。以上により、式2の前半部分は以前の流速の影響が次第に減衰する様子を表現し、後半部分は元の流速のスケールに応じた規模のランダムな拡散を追加している。 σ_v の決定に少し仮定が入っているものの、全体としては無理な仮定や推定すべきパラメータを必要とせずに幼生のランダムな分散をシミュレートすることが可能である。このシミュレーションには多大な計算負荷が掛かるが、マルコフ連鎖のアルゴリズムをC++言語で記述し、ベースとして用いているR言語から呼び出すことで、計算時間を約1/15に短縮することに成功した。

6-2-4. 海流データ、クロロフィル*a*データと幼生分散時期の設定

前年度同様に、日本海洋データセンター提供の 0.1° (約10 km)グリッドのデータ(データ同化MOVE)を使用した(<http://near-goos1.jodc.go.jp/>)。このデータは直接観測の海流と計算による補正で平滑化されており、渦のようなノイズは均された値となっている(Usui et al. 2006)。なお、沿岸の一部には欠損値があるため、inverse distance weighting法によって空間補間を行った。データは多少の欠損区間があるものの、日単位の値で提供されている。幼生期間はYasuda et al. (2010)を参照に設定した。海流データの使用期間は、フィリピンは4月、台湾は5月、八重山諸島では5月後半から6月前半、宮古諸島は6月後半から7月前半を使用。慶

良間諸島と沖縄島は7月のデータを使用した。データには10日ほどの連続した欠損期間が混じっており、この場合は前後の期間からデータを引用し補った。

幼生の分散は各期間のいずれかの日に生じたと仮定し、今回の試行では単一日の流動の元で分散する設定とした（例：6月9日に分散開始した幼生は、2週間分散したとしても、6月9日の流動条件のまま分散）。ただし、海流の変動係数は久米島の周辺でやや大きいものの、全般的には島の周辺では変動が小さいため、あまり影響はないと考えられる（図3-6-3）。改善が望ましい仮定ではあるが、データ欠損により対処不能な期間も多く、現在のところ根本的な解決策がない。

クロロフィル *a* データは海流と同じ期間について、NOAA 提供の 0.05° グリッド（約5 km）のデータを使用した（Aqua MODIS, NPP, L3SMI, Global, Science Quality, 0.05° ）。

6-2-5. 幼生の分散プロセスの設定

前年度同様に、オニヒトデ幼生の分散は遊泳能力を無視し、受動的な分散のみで拡散すると仮定した。また、鉛直方向の移動も考慮していない。シミュレーションにおける分散期間は2つのケースで終了すると仮定した。ひとつは、予め設定した幼生期間が終了した場合、またはクロロフィル *a* 濃度に関連して中期ブラキオラリア幼生への変態に失敗（死亡）した場合である。幼生期間は平均を3週間（21日）、標準偏差を1.1とした対数正規分布に従うと仮定し、シミュレーション試行毎に乱数を引き期間を設定した。クロロフィル *a* 濃度に関連した生存率 p_t は Fabricius et al. (2010) の元データを一般化線形モデルで再解析した以下のロジスティック式によって求めた：

$$p_t = \text{logistic}(-5.62 + 0.347 \cdot T + 5.30 \cdot \log_4 CHLa) \quad (T: \text{期間、} CHLa: \text{クロロフィル } a \text{ 濃度})$$

この関係式はクロロフィル *a* 濃度一定の元の実験データに基いているが、幼生分散シミュレーションにおいては、分散経路の環境によってクロロフィル濃度 *a* が変化する。このため便宜的に次のようにして差分確率の総和を用いて分散開始から終了までの生存率 P_T を求めた：

$$P_T = \prod (p_t - p_{t-1})$$

この関係式は、移動経路において変化するクロロフィル *a* 濃度に対応し、経路のいずれかのタイミングで変態に成功し生存する確率を示している。単純な差分確率を利用しているため、各時間単位におけるクロロフィル *a* 濃度の影響は、過去のクロロフィル *a* 濃度に影響されないという仮定を置いていることになる。これは改良すべき点であるが、現状では根拠となる実データは得られていない。

本シミュレーションでは、クロロフィル *a* 濃度の影響の参考とするために、生存率と着底率、出生地への着底率（self-seeding rate）の比較も行った。生存率には、シミュレーション終了時に生存しているが、いずれの海域区画内にもいない個体を含んでおり、着底率はいずれかの海域区画に到達している場合、出生地への着底率はシミュレーション開始時と終了時のいずれも同一海域区画に存在する場合、と定義した。これらの値の比較により、分散過程のどの段階で死亡が起こりやすいかを推察することができる。コネクティビティの解析では、各24区画のポリゴン内に到達した幼生数の各合計を算出した。これを元に、Source site（幼生の出生地、供給側）、Receiving site（幼生の着底地、加入側）を対にした着底幼生数を比較した。

6-2-6. 幼生加入と成体発生変動の時系列統計モデル、個体群動態シミュレーション

前年までの研究成果により、成体の発生頻度にはサンゴ被度や流動に関する環境要因が関連することが分かっていた。後者はすなわち幼生の加入頻度との関連を示していると予想されたため、サンゴ被度、幼生の加入頻度（幼生分散シミュレーションの結果）と成体の発生頻度とを時系列的に結びつける統計モデルを適用した。今年度は試験的に、データの揃った八重山海域の7区画に絞り解析を行った。区画*i*の*t+1*年におけるオニヒトデ成体数 $Cots_{t+1,i}$ を前年の成体数 $Cots_{t,i}$ 、2年前のオニヒトデ加入密度 $Recruit_{t-1,i}$ 、前年のサンゴ被度 $Coral_{t,i}$ （1を最大とする）、前年のサンゴ被度と前年の成体数の交互作用から推定し、サンゴ被度 $Coral_{t+1,i}$ を前年のサンゴ被度 $Coral_{t,i}$ および前年の成体数 $Cots_{t,i}$ から推定する二階層の自己回帰モデル（ゴンペルツ型）を使用した（回帰係数 *a-h* を最尤法により推定）。

$$\log_{10} Cots_{t+1,i} = a + b \cdot \log_{10} Cots_{t,i} + c \cdot \log_{10} Recruit_{t-1,i} + d \cdot \log_{10} Coral_{t,i} + e \cdot \log_{10} Cots_{t,i} \cdot \log_{10} Coral_{t,i} + \varepsilon_i \quad \dots (3)$$

$$\log_{10} Coral_{t+1,i} = f + g \cdot \log_{10} Coral_{t,i} + h \cdot \log_{10} Cots_{t,i} + \delta_i \quad \dots (4)$$

次に、回帰係数の推定値（平均、標準誤差）を確率分布（正規分布を適用）とみなし、式3、4を1998～2014年の17年間の個体群動態シミュレーションを実行した。初期値として、サンゴ被度は0.3～1（1が被度100%に相当）、オニヒトデ成体はスポットチェック法による密度で2.5～5個体とし、それぞれの範囲でランダムな値を与えた。各年・各海域への幼生加入は前項のシミュレーションの結果を使用した。

6-3. 結果

6-3-1. 幼生海流分散シミュレーション

今回のマルコフ連鎖モデル（以降、改良版）では、前年の簡易版で見られていた極端に幼生加入の集中するグリッドは見られなくなり、周辺海域に広く拡散するパターンが見られた。図3-6-3に海域間のコネクティビティを対戦表形式で示した。対角線の左上が供給、右下が加入側を表しており、対角線上は出生地への回帰（self-seeding）を指している。つまり、ある海域区画に着目した時、self-seedingのグリッドの縦方向に値の多い区画は他の多くの区画から幼生が加入しやすいsink傾向にあり、横方向に値の多い区画は他の多くの区画へ幼生を供給しているsource傾向にある区画と判断できる。

海域区画間でコネクティビティを比較すると、まずやはり沖縄島内、宮古諸島内、八重山諸島内のコネクティビティは高い傾向にあった。これに加え、黒潮の流れから期待される南西から北東方向への供給としては、慶良間諸島から沖縄島への供給は高く、また台湾から八重山諸島西部、八重山諸島から宮古諸島へも供給があった。またこの逆方向として黒潮逆流によると見なされる、宮古諸島から八重山諸島、慶良間諸島から宮古諸島、供給があるという結果になった。

コネクティビティのパターンには年代による変化も見られた。1998～2001年は縦長のパターンが顕著な加入に偏ったコネクティビティの傾向が見られたが、2002年の八重山諸島を境にして、海域内で縦・横に長い双方向のコネクティビティへと変化した。

6-3-2. 幼生加入と成体発生変動の時系列統計モデル

まず、統計モデルに使用する各変数との関係性を図示した(図3-6-4)。前年のサンゴ被度、前年のオニヒトデ成体数とは予想通り、おおよそ比例する傾向が得られた。すなわち、前年にサンゴが多いほど、オニヒトデ成体数も多く、また前年にオニヒトデ成体が多かった場所では当年も多いことを示す。2年前の幼生加入密度の回帰係数は弱いながらも正であり、比例関係があることが示された。中間報告の試行版による加入密度との関連は負となってしまうので、これは大きな意義のある進展である。

最尤推定により得られた回帰係数を用いて、定常状態の成体密度を初期条件として実行したシミュレーションを行った。その結果、あまり個体数が増えないパターン(図3-6-5a)、増え続け大発生するパターン(図3-6-5b)、大発生した後に収束に向かうパターン(図3-6-5c)が確認できた。

6-4. 考察

幼生分散シミュレーションについては、アルゴリズムの大きな改良に成功した。マルコフ連鎖によるラグランジェ拡散は信頼性・被引用数の高い論文(Siegel et al. 2003)で使用されたアルゴリズムであり、これを実装し、かつ大幅な高速化に成功したことは大きな進展である。

今回の改良版のシミュレーションでは、広い海域間において幼生のコネクティビティが成立していることが示された。フィリピンから沖縄県内にかけての広い範囲で、飛び石的ではあるものの、オニヒトデ幼生が供給されうることを解析的に確かめることができた。また幼生供給のパターンとして、黒潮に沿った流れの方向だけでなく、黒潮逆流を示すとみられる逆方向の供給が確認されたことも興味深い。

一方、国間、諸島間の長距離の分散は低頻度であり、想定されていたようなフィリピンから沖縄県内への幼生供給は1幼生世代内では再現されず、台湾を経由する必要があるという結果になった。この理由は、本研究のシミュレーションはFabricius et al. (2010)によるクロロフィル*a*量に対応した生存率を組み込んでいるため、外洋域を大きく横断する長距離分散では生存率が低下する効果が働いているためである。しかし最近、Nakajima et al. (2016)は、オニヒトデ幼生は植物プランクトンだけでなく懸濁体有機物(POM)なども補助的な餌資源として利用できることを示した。このため長距離分散の過程でクロロフィル濃度の低い海域を横断しても生存率がさほど低下しない可能性もある。

オニヒトデ成体、サンゴ被度、幼生シミュレーションの結果を組み合わせた個体群動態シミュレーションでは、定常の低密度状態のオニヒトデ個体群から大発生が起りうることが解析的に示された。今回検証した17年間を通じて、国外からの幼生供給量は八重山西部への低頻度に限られていたことを考えると、過剰な幼生供給によって大発生が引き起こされたというよりは、沖縄県内に低頻度に生息していた成体がソース個体群となったと解釈できる。これに関連する環境の変化として、コネクティビティの年間パターンの変化に見られたように、およそ2002年以降の全般的なクロロフィル濃度の増大の影響が考えられる。このような全般的にクロロフィル濃度増大が継続している原因は明らかではないが、その原因を突き止めら対策できるまでは、成体に対する対策を講じ続けるしか対抗手段はないかもしれない。

本年度までに、幼生分散シミュレーションおよび成体の個体群動態シミュレーションを実行する環境作りが整った。今回の結果により、供給地または分散過程におけるクロロフィル濃度の変動がコネクティビティや大発生のパターンに大きく影響しうることが分かってきたので、クロロフィル濃度の変動に対応したパターンの変化に着目した解析を実施する予定である。また、幼生の長距離分散については再確認をしてみたい。例えば、沖ノ鳥島のような外洋中の孤島においてもオニヒトデ発生の記録があり（国土技術研究センター 2002）、このような場所での self-seeding による発生は考えにくい。これを検証するには、海流のデータを逆方向に用いて幼生の供給源を探るバックキャストが有効だろう。到達を可能にするのに必要な生存率・生存期間を逆推定することにより、どれくらいの貧栄養環境でも耐えうるのかを推定することができるだろう。関連して、フィリピンから沖縄県への幼生 1 世代による分散が本当に起こり得ないのか再検証したい。これについては、現在使用している海流データは 15° N 以北しか提供されていなかったため、データソースの変更準備を進めているところである。HYCOM という全球レベルで 1992 年以降について 1/12° 解像度という、今回のデータの 1/10° より少し高解像度のデータが提供されている。現在、この HYCOM について、グレートバリアリーフからハワイまでをカバーする広範囲のデータの取得、使用可能なフォーマットへの整形が済んだところである。

駆除モデルの結果について今回述べなかったが、過去 2012～2015 年分についてのベイズ計算を一通り実行している。2013 年のデータに適用してきたプログラムをそのまま適用すると一部で推定計算が失敗するケースが出ており、アルゴリズムのマイナーな調整だけでは対応できないため、計算実行可能なケースに限定し、これ以外に年を単位とした時系列的なモデルを適用するよう検討中である。この方針で行けば、広域の個体群動態シミュレーションをベースとしたモデルで対応でき、さらに摺合せも容易になるはずである。

以上を踏まえ、来年度の検討項目を列挙する：

- (1) 沿岸付近のクロロフィル濃度の変動を組み込む：事業で得られているクロロフィルの岸・沖の濃度の違いを利用（現在、岸・沖の濃度差の解析が終了）
- (2) クロロフィル濃度の日変動を組み込む：これまでは月平均を使用していたが、日単位データを取得し、月平均と標準偏差を計算し対数正規乱数として変動を与える（データ取得、整備、シミュレーションのプログラミングコードの変更が完了）
- (3) 生存率におけるクロロフィル濃度の変動を組み込む：回帰式におけるクロロフィル濃度の回帰係数を確率分布で表現する（シミュレーションのプログラミングコードの変更が完了）
- (4) 幼生初期と中後期におけるクロロフィル濃度の影響の違いの考慮：初期におけるクロロフィル濃度のみを考慮したシミュレーションを追加し比較する
- (5) 鹿児島県内や本土南部、沖ノ鳥島、グアム、フィリピン南部など、幼生分散シミュレーション対象の拡大とバックキャストによる長距離分散の可能性の検証（生存率を考慮しない試行版を実行中）
- (6) 成体、幼生、サンゴ被度を関連付ける個体群統計モデルのアップデート：今回のモデルはデータの欠損している年があると実行できないものだったが、欠損にも対応できる状態空間モデルを適用することで沖縄県全体のデータを利用した推定へとアップデートする
- (7) 駆除モデルの確定と個体群統計モデルへの関連付け：個体群動態モデルに駆除による減少の項を付け加えることで対応可能と想定。

参考文献

- Fabricius KE, Okaji K, De' ath G (2010) Three lines of evidence to link outbreaks of the crown-of-thorns seastar *Acanthaster planci* to the release of larval food limitation. *Coral Reefs* 29: 593-605
- 国土技術研究センター (2002) 沖ノ鳥島技術レポート. 財団法人国土技術研究センター調査第一部. 平成 13 年 3 月: pp 1-203
- Nakajima R, Nakatomi N, Kurihara H, Fox MD, Smith JE, Okaji K (2016) Crown-of-Thorns starfish larvae can feed on organic matter released from corals. *Diversity* 8: 18;
doi:10.3390/d8040018
- Siegel DA, Kinlan BP, Gaylord B, Gaines SD (2003) Lagrangian descriptions of marine larval dispersion. *Marine Ecology Progress Series* 260: 83-96
- Usui N, Ishizaki S, Fujii Y, Tsujino H, Yasuda T, Kamachi M (2006) Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Advances in Space Research* 37: 806-822
- Yasuda N, Ogasawara K, Kajiwara K, Ueno M, Oki K, Taniguchi H, Kakuma S, Okaji K, Nadaoka K (2010) Latitudinal differentiation in the reproduction patterns of the crown-of-thorns starfish *Acanthaster planci* through the Ryukyu Island Archipelago. *Plankton Benthos Res* 5: 156-164

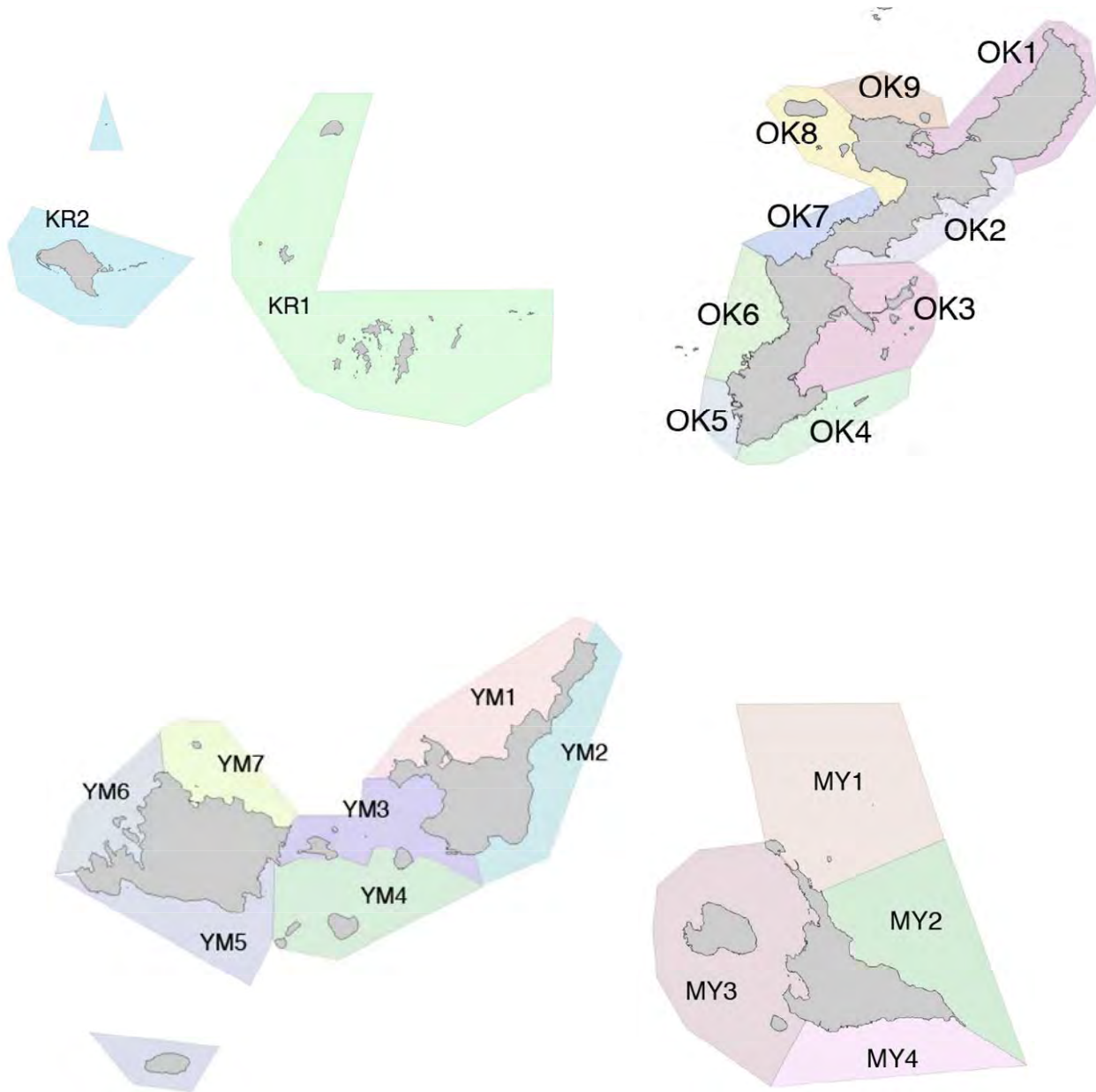


図3-6-1. 幼生シミュレーションの解析単位として使用した区画. (左上)慶良間諸島、(右上)沖縄島、(左下)八重山諸島、(右下)宮古諸島. この他、台湾、フィリピン北部も解析単位とし、合計24区画を設定した.

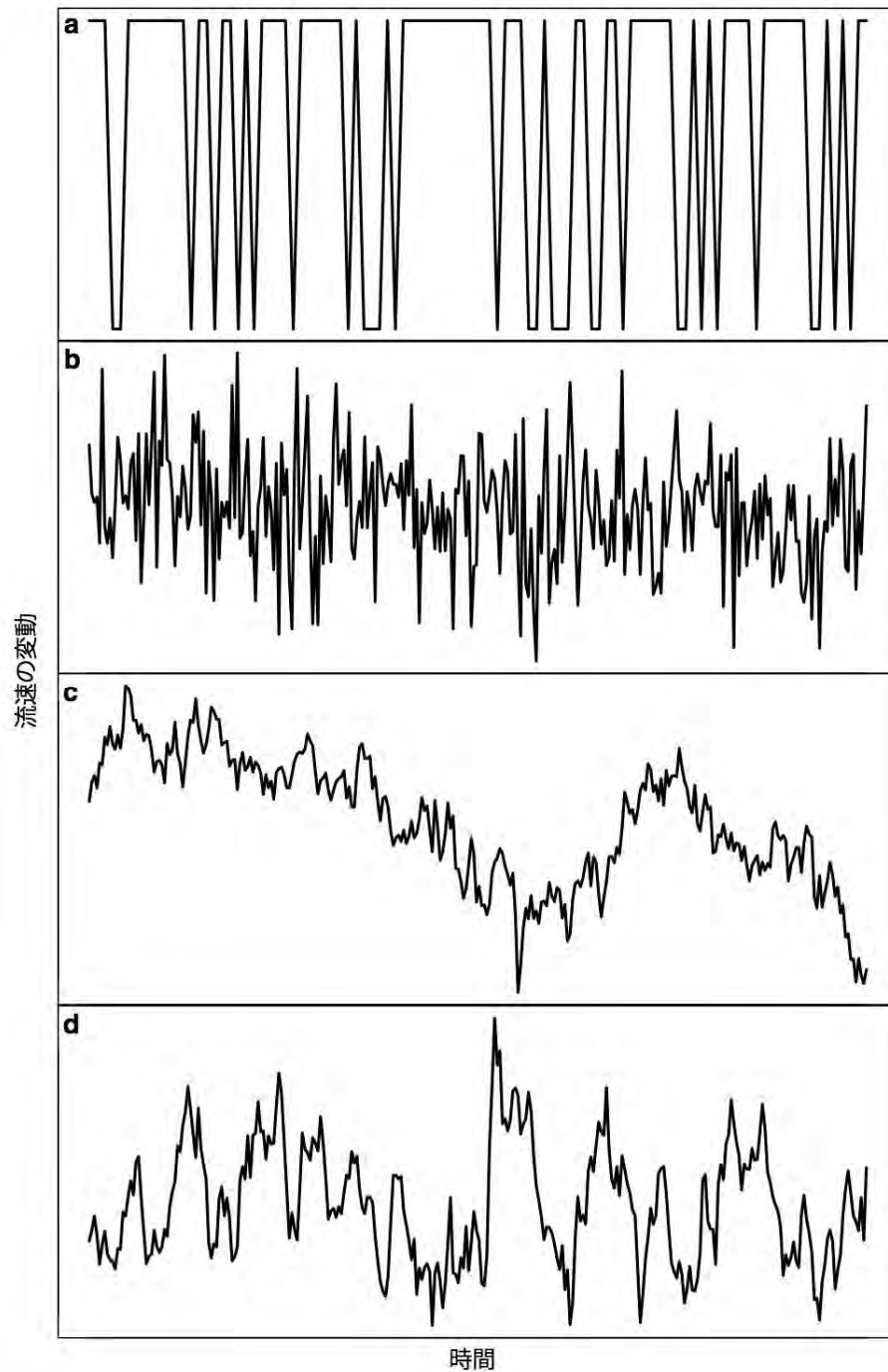


図3-6-2. 幼生の拡散のモデル. a)二相モデル:緯度・経度方向の海流のうち流速の遅い方向へは流速比に比例してランダムに移動する. 前年度用いた簡易的なモデルだが、一般には用いられない. b)ランダムモデル:乱数によって無傾向に拡散する. c)ランダムウォークモデル:前の時点の状態に依存して変動する. d)マルコフ連鎖モデル:ランダムウォークに似るが、前の時点の影響が減衰していく違いがある. 今年度の改良によって実装したモデル.

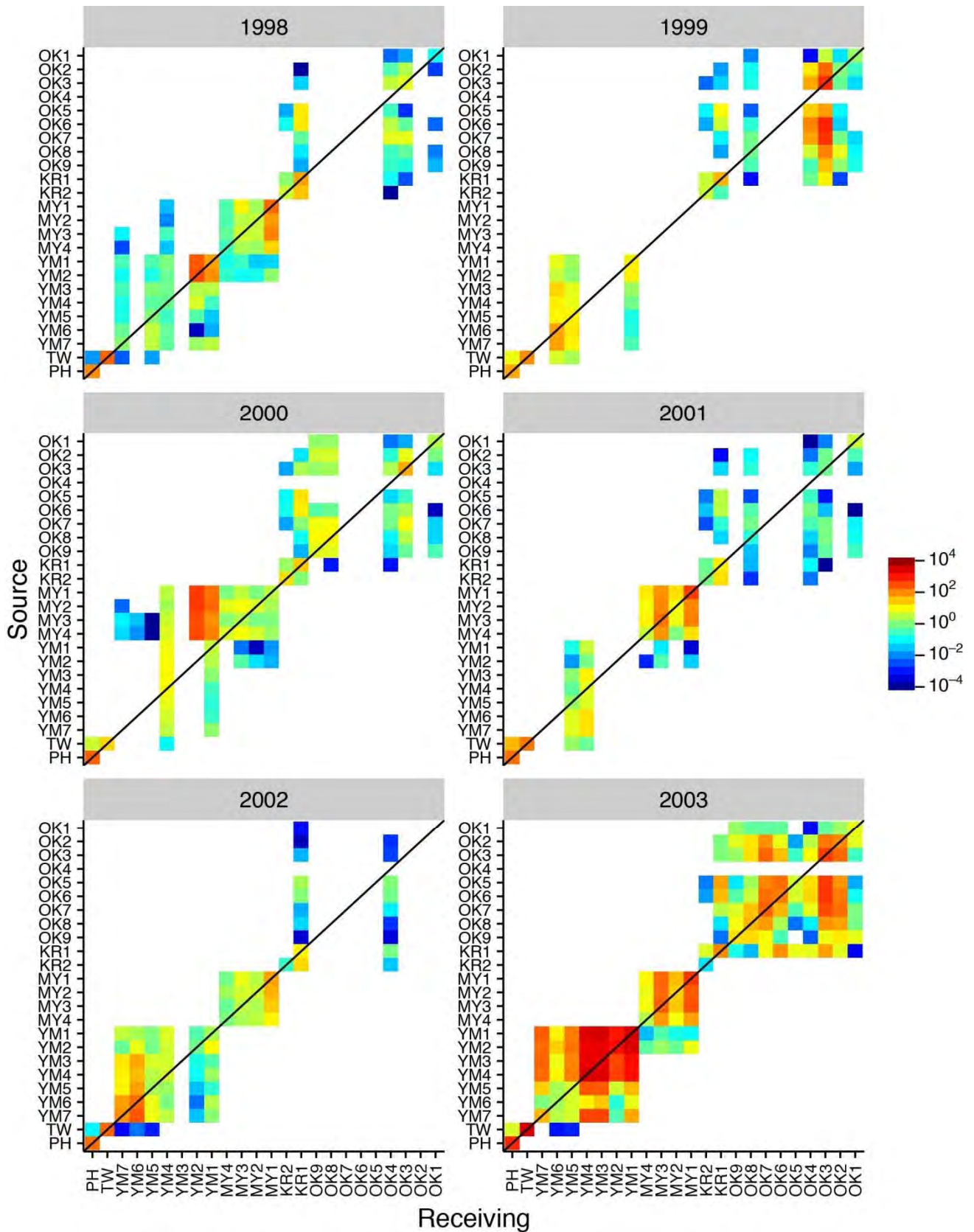


図3-6-3. 海流シミュレーションによるオニヒトデ幼生のコネクティビティ(1998~2003年). 区画名の略号は図3-6-1を参照. 各パネルの縦軸は source site(供給側)、横軸は receiving site(加入側). 値は供給側からの 10 万個体あたりの平均加入幼生数.

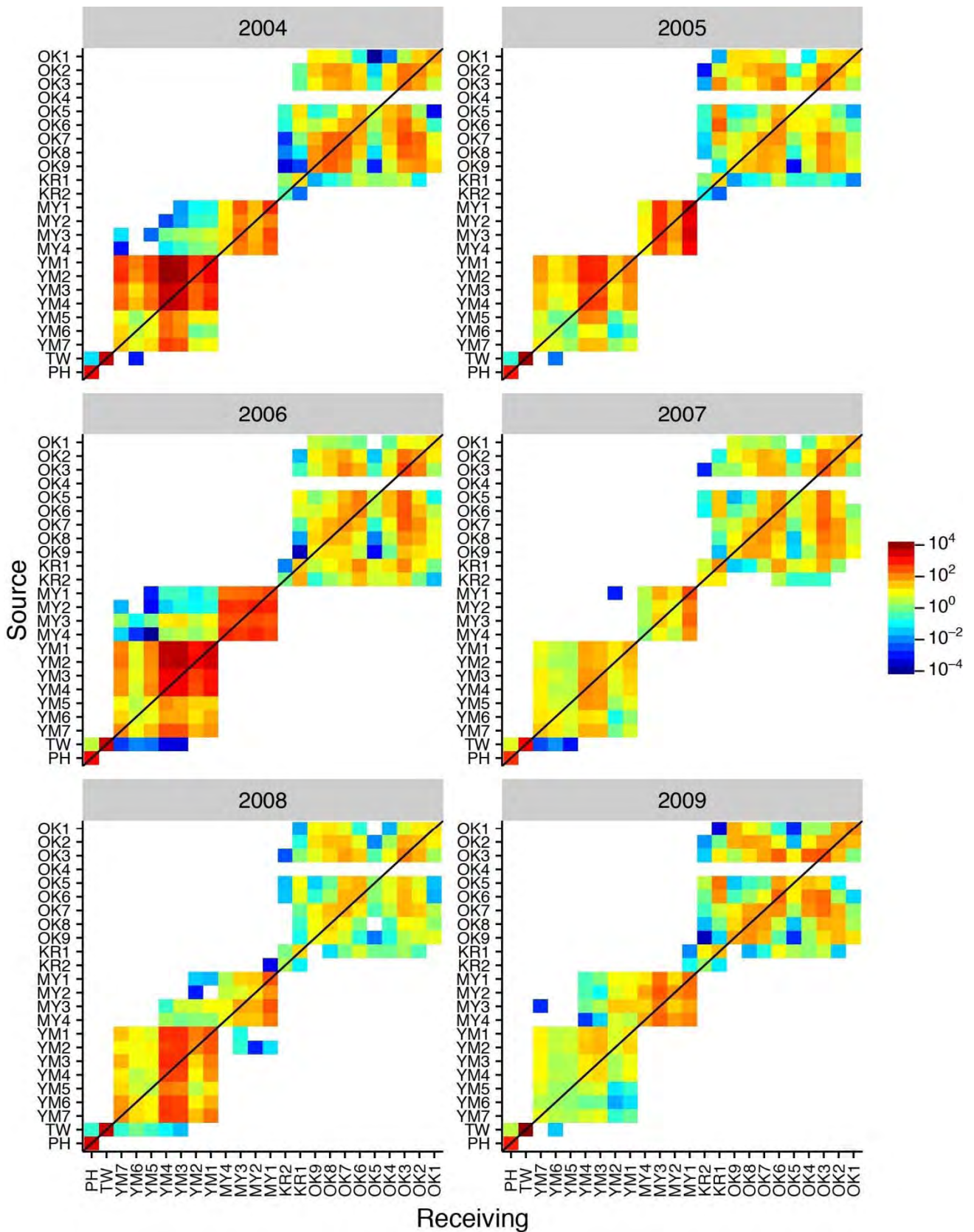


図3-6-3(つづき). 海流シミュレーションによるオニヒトデ幼生のコネクティビティ(2004~2009年). 区画名の略号は図3-6-1を参照. 各パネルの縦軸は source site(供給側)、横軸は receiving site(加入側). 値は供給側からの10万個体あたりの平均加入幼生数.

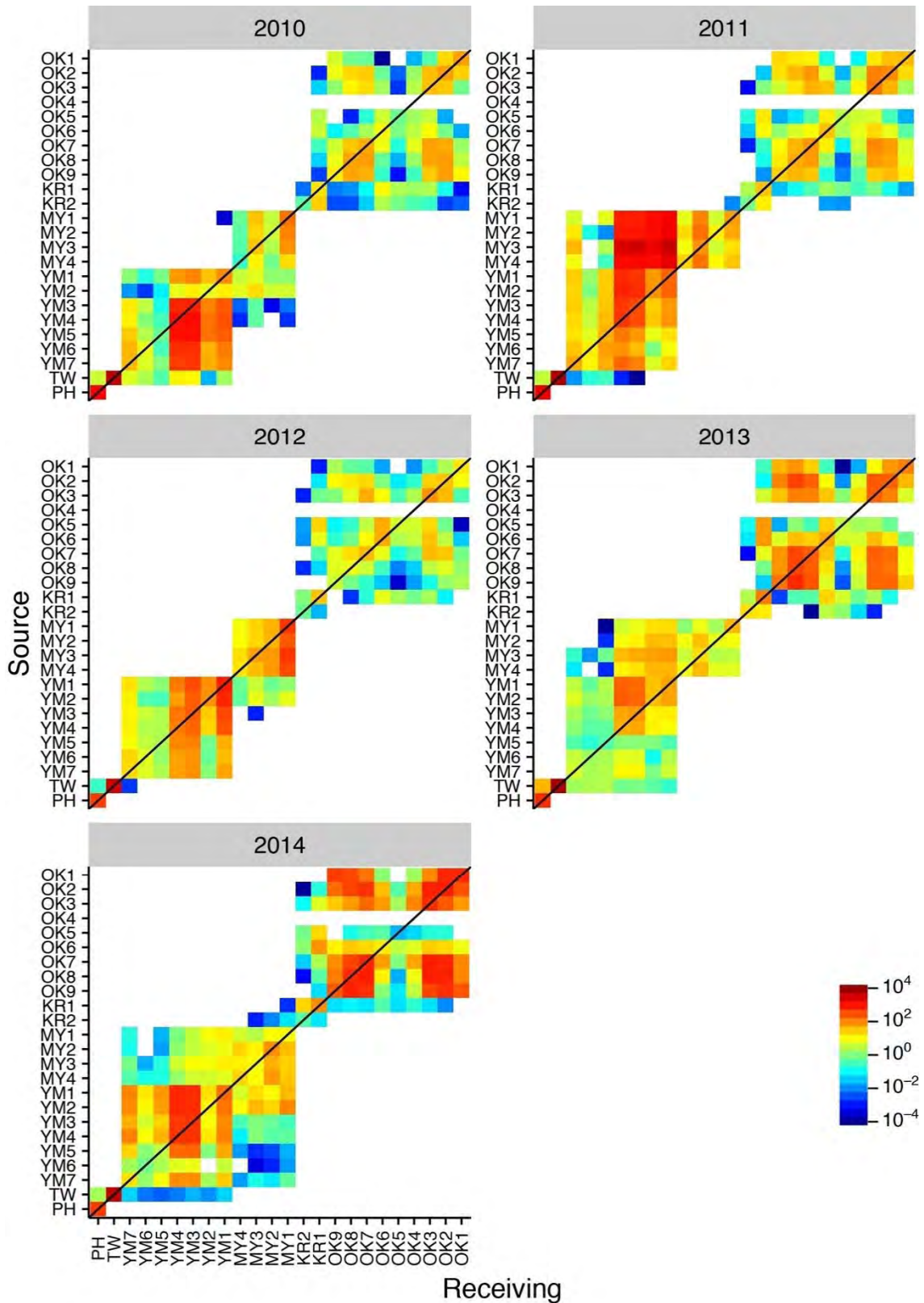


図3-6-3(つづき). 海流シミュレーションによるオニヒトデ幼生のコネクティビティ(2010~2014年). 区画名の略号は図3-6-1を参照. 各パネルの縦軸は source site(供給側)、横軸は receiving site(加入側). 値は供給側からの 10 万個体あたりの平均加入幼生数.

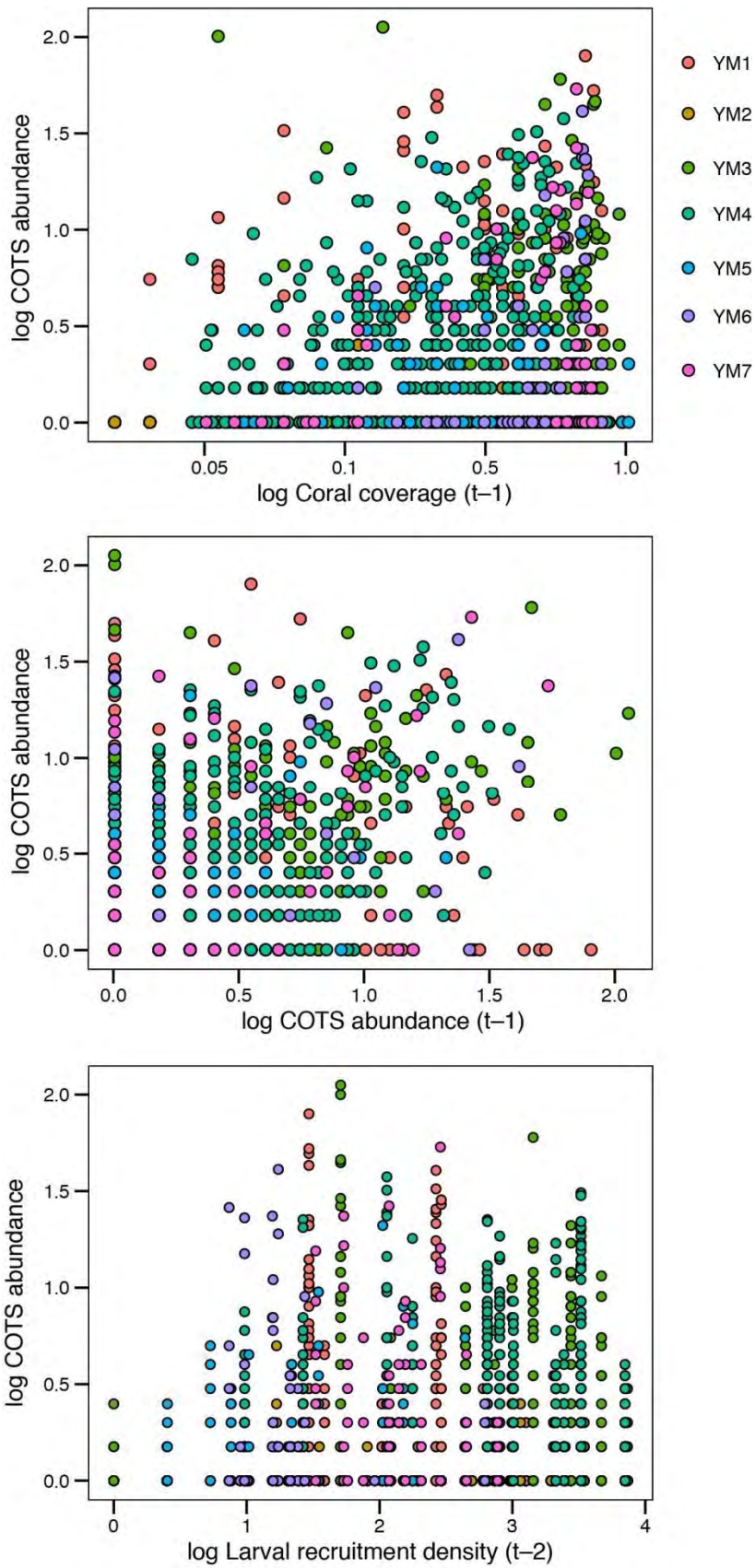


図3-6-4. 八重山諸島7区画におけるオニヒトデ数(COTS abundance)と、前年のサンゴ被度(Coral cover)、前年のオニヒトデ数、二年前の幼生加入密度。

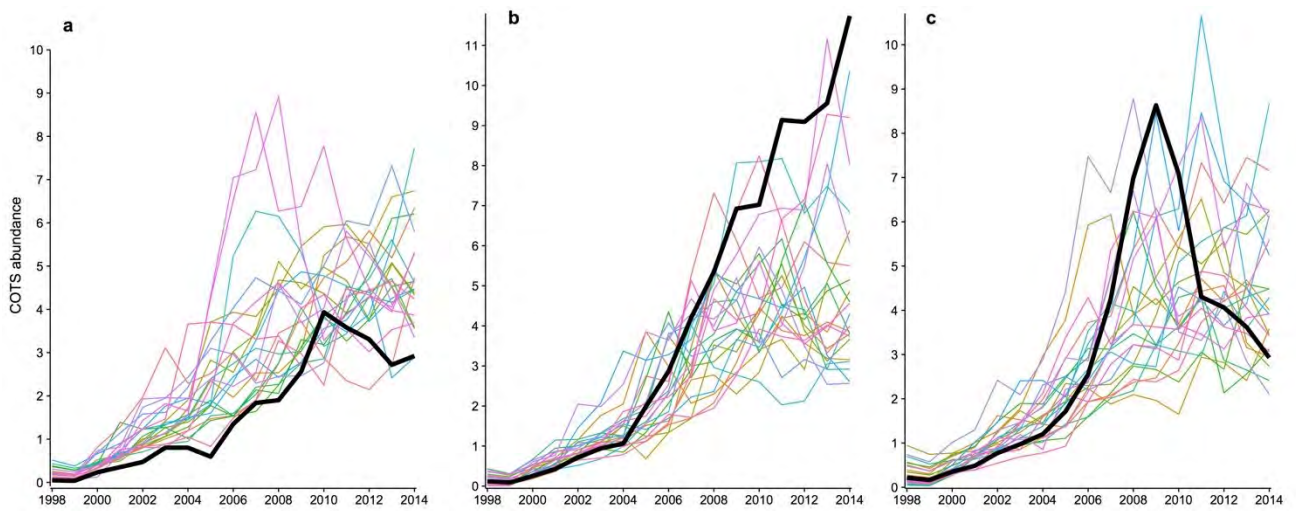


図3-6-5. オニヒトデ成体、サンゴ被度、オニヒトデ幼生加入による個体群動態シミュレーション. 各ラインは各区画を表し、着目した区画を太線で表記、a) 低密度のまま推移し大発生しないパターン、b) 増加し続け大発生するパターン、c) いったん大発生した後に収束に転じたパターン.

7. ケミカルシグナルを利用した大量発生予測手法開発

北村誠（沖縄県環境科学センター）

7-1. 目的

オニヒトデの初期生活史における「浮遊後期幼生（後期ブラキオラリア）から稚ヒトデへの着生現象」と「サンゴモ食期からサンゴ食期へ食性が変化する稚ヒトデの摂餌行動」に着目し、それぞれの現象を司る化学物質（着生誘引物質・摂餌行動刺激物質）の探索研究と、それら化学物質を用いた幼生・稚ヒトデトラップを開発し、将来のオニヒトデ大量発生予察手法としての利用を目的とする。具体的な研究課題は、以下の2つである。

- ①後期ブラキオラリアの着生誘引物質の同定
- ②体長 15mm～50mm の稚ヒトデの摂餌行動刺激物質を利用したトラップ開発

①では、オニヒトデ幼生の着生誘引物質（Inducer A、B、及びA'）の質量分析を行い、いくつかの分子量ピークを観察することができた。

②では、平成 27 年度までの室内トラップ試験において、生きた *Acropora tenuis*（ウスエダミドリイシ）及びその水溶性抽出分画を誘引剤として用いた場合、比較的良好な捕獲率を得た（それぞれ 64.0%, n=5 と 54.4%, n=3）。しかし、分離をさらに進めると誘引活性が減少した。

また本年度は、様々試作したトラップを実海洋へ設置しその効果を検証した。室内試験において実績のある Type3 トラップ（図 3-7-1 左）は、海洋での稚ヒトデ捕獲に成功した。しかし捕集率及び誘引力が低くさらなる改良が必要であった。一方 Type4 トラップ（図 3-7-1 右）は、室内及び海洋試験において稚ヒトデの誘引力は非常に高いことが判ったが、稚ヒトデの捕獲力はない。

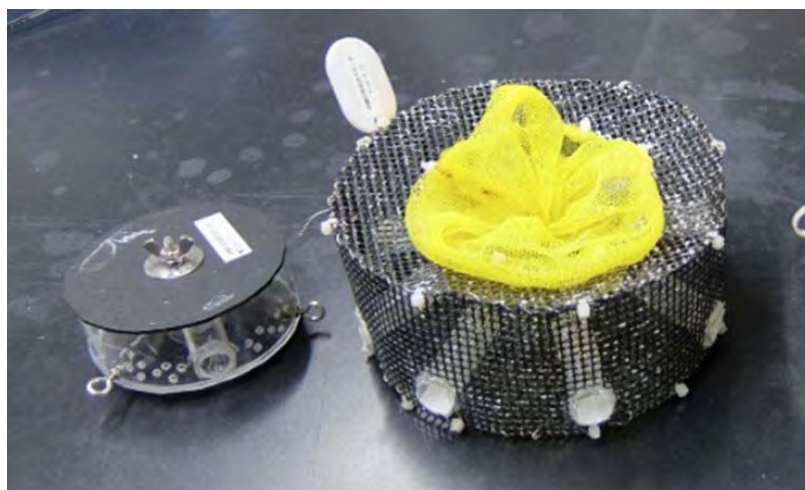


図3-7-1. 稚ヒトデトラップ(左から Type3, Type4).

7-2. 方法

7-2-1. 着生誘引物質

それぞれ単離された着生誘引物質 (Inducer A、B、及び A の類似物質と想定される A') を琉球大学の四重極飛行時間型質量分析計 (Waters 社、Xevo G2-XS QTof) を用いて測定した。

7-2-2. 稚ヒトデの摂餌行動刺激物質を利用したトラップ開発

(1) 海洋トラップ試験

各試験に用いたトラップの構造及び特徴を表 3-7-1 に示す。また海洋試験の条件を表 3-7-2 に示す。海洋試験は、沖縄県北谷町砂辺の沿岸にてすべて行われた (水深: 6.7~15m、期間: 2~6 [1 週間ごとに観察])。また、トラップ構造改良のために行われた室内試験条件は、それぞれ下記の 7-3. 結果に示す。

(2) 摂餌行動刺激物質の探索

摂餌行動物質の探索試験は、すべて室内試験によって行われた。以下に試験方法を示す。

- ・試験海水、水量、容器: 人口海水、20L、ガラス水槽 (エアーレーション有り)
- ・稚ヒトデ: 10~26 個体 (直径 15-50mm)
- ・トラップ: Type3 (直径 90mm、高さ 36mm、開口部 13mm、3 つ穴式ヒトデ導入部、側面に直径 3mm の穴を約 20 個、透明アクリル製、図 1 左)
- ・試料: 40mm シャーレのフタに試料を添加し、真空ポンプで溶媒を蒸発させる。その後、2mL の 0.5% 寒天溶液を添加し、固まる前によく攪拌する
- ・試験時間: 約 9~12 時間
- ・活性評価: (トラップに捕獲された個体数 / 全体数 × 100) を摂餌行動誘引活性率とする

表 3-7-1. トラップの構造及び特徴.

名称	直径・高さ (mm)	形状	材質および特徴	入口部構造 (穴個数)	蓋構造
Type2	90・36	丸型	透明アクリル製	横穴 (3)	透明アクリル板
Type3	90・36	丸型	透明アクリル製、側面に穴加工	横穴 (3)	黒色アクリル板
Type4	167・70	丸型	ナイロンメッシュ製	横穴 (8)	ネット
Type5	160・70	丸型	ナイロンメッシュ製	下穴 (9)、	洗濯網 (チャック)
Type6	184・120	丸型	ポリプロピレン製、2重構造	底面と側面の境に設置 (13)	網付きタッパー
Type7	184・120	丸型	ポリプロピレン製、2重構造、側面メッシュ窓	底面と側面の境に設置 (13)	網付きタッパー
Type8	184・120	丸型	ポリプロピレン製、2重構造、側面メッシュ窓	底面と側面の境、側面に設置 (17)	網付きタッパー
Type9	184・120	丸型	ポリプロピレン製、2重構造、側面メッシュ窓	底面と側面の境に設置 (8)	網付きタッパー

表3-7-2. 海洋試験条件

試験番号	期間	設置場所	水深(m)	食痕サイズ(mm)	トラップ種類	トラップ個数
1	3/17-3/22 (4days)	根の側面	8.7-14.2	9.0-19.0	type2	13
2	3/24-3/29 (4days)	根の側面	7.0-15.0	11.0-15.0	type3	13
3	5/25-6/2 (3weeks)	根の上面	6.7-7.2	近傍に無し(15, 18)	type3	5
4	6/8-6/24 (2weeks)	根の上面	6.7-7.2	同上	type3	5
5	5/25-6/29 (6weeks)	根の上面	6.7-7.2	同上	type4	5
6	6/8-7/6 (4weeks)	根の上面	6.7-7.2	同上	type5	5
7	8/1-9/5 (5weeks)	根の上面	7.9, 8.1	無し	type7	2
8	8/1-9/5 (5weeks)	根の上面	7.9, 8.1	無し	type8	2
9	8/1-9/5 (5weeks)	根の上面	8.1	無し	type9	1

7-3. 結果および考察

7-3-1. 着生誘引物質

(1) Inducer A

確からしいと判断できるピークは確認されず。

(2) Inducer B

$m/z=413.2329$ ($M+Na$)⁺、 429.2373 ($M+K$)⁺ が観察された。よって推定分子量 $M=390.2430$
 $m/z=529.1666$ ($M-H$)⁻、 565.1367 ($M+Cl$)⁻ が観察された。よって $M=530.1744$

(3) Inducer A'

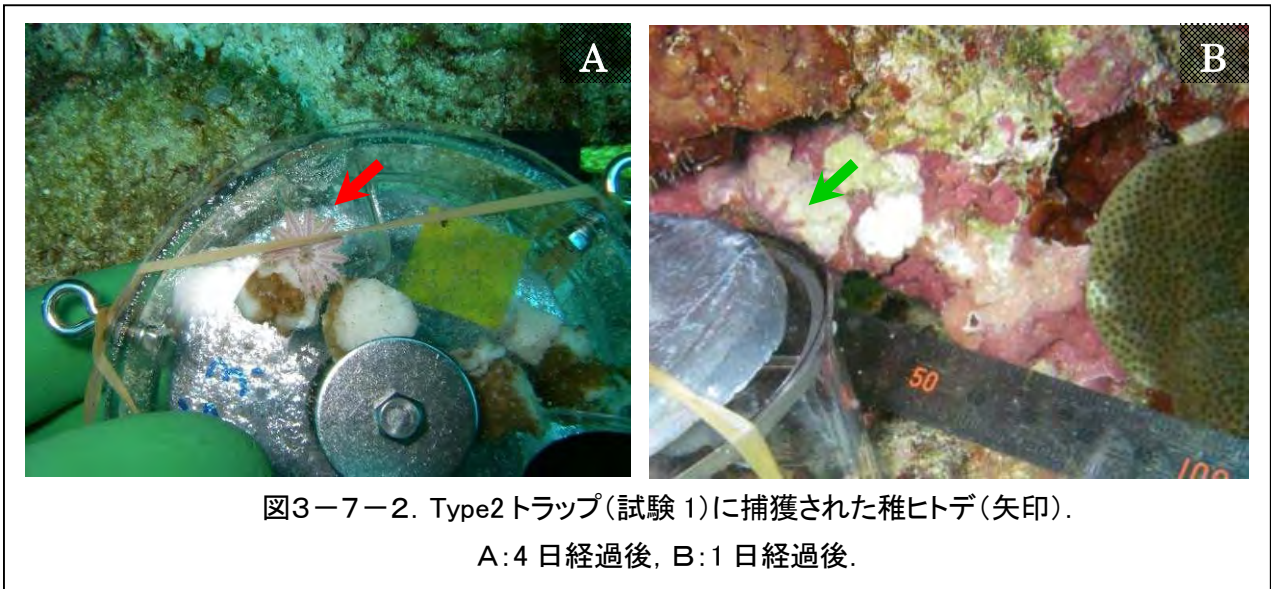
$m/z=407.2938$ ($M+H$)⁺、 429.2265 ($M+Na$)⁺ が観察された。よって $M=406.2367$
 $m/z=813.5831$ ($M+H$)⁺、 835.5542 ($M+Na$)⁺ が観察された。よって $M=812.5644$

今後、これらピークが観察された Inducer B 及び A' の分子量から分子式の推定、さらに化合物ライブラリーからの誘引物質候補の検索を行う。

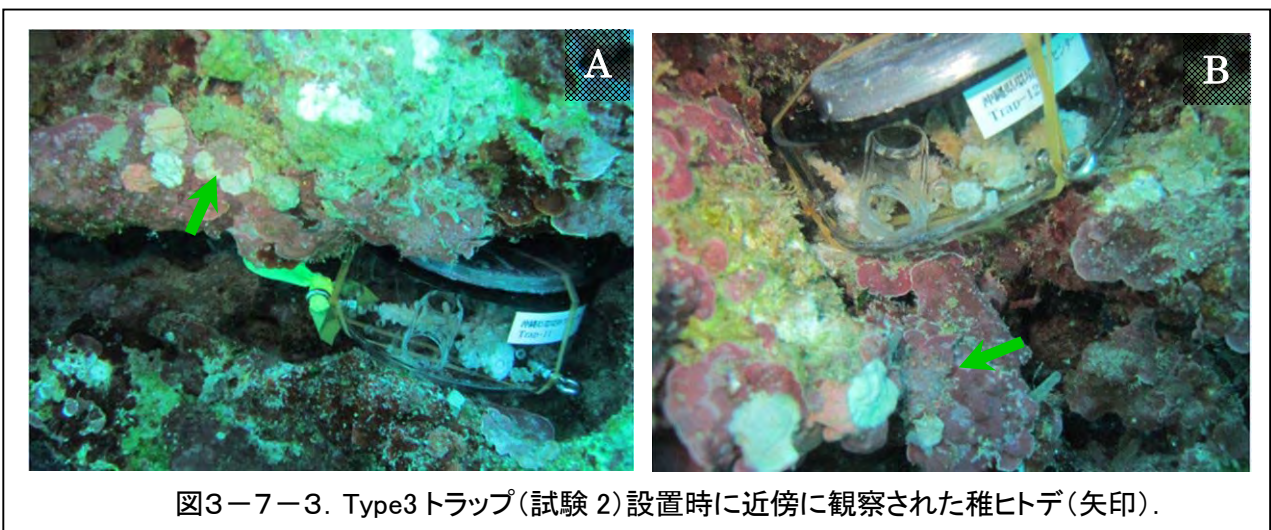
7-3-2. 稚ヒトデの摂餌行動刺激物質を利用したトラップ開発

(1) 海洋トラップ試験

試験1 (表3-7-2) では、すべてのトラップを稚ヒトデの比較的新しい食痕付近に設置した。その結果、13トラップ中1つのトラップに稚ヒトデを捕獲することに成功した (図3-7-2 A)。捕獲された稚ヒトデは、設置後1日目に観察時にトラップ背後ですでに観察されていた個体と考えている (図3-7-2 B)



捕獲には成功したものの、捕獲率は満足いくものではなかった。そこで誘引物質の拡散効果を高める目的でType2トラップの側面に直径2.5mmの穴を45個設けたType3を作製し試験した(試験2)。試験2も13個中11個は比較的新しい食痕の近傍に設置した。また、この設置時に2個体の稚ヒトデも観察された(図3-7-3 A, B)。しかしながら設置後1日及び4日で捕獲された個体は観察されなかった。



これら結果から、食跡が直径20cm以内に密集するような食性を示す稚ヒトデは、いくらサンゴ食期(体長10mm以上)に成長していても、生きたサンゴやサンゴ抽出物を誘引剤としたトラ

ップに誘引されにくいと判断した。また図3-7-3Aの個体は、設置1日後の観察時もほぼ同じ場所で観察された。

同事業の砂辺における夜間稚ヒトデ調査(4/11)で、試験1と2のトラップ設置場所の隣接する海域で、9個体/1時間という稚ヒトデ(平均体長18.9mm)の過密地域が確認された。発見された稚ヒトデ近傍にサンゴモの食痕はあるものの数が少なく、サンゴモ食期からサンゴ食期に移行している個体と判断し、新たなトラップ設置場所に決定した(試験3, 4)。試験3, 4では、設置期間も2~3週間に延長したが、捕獲される個体はなかった(各週観察)。

Type3の誘引能力を室内実験においてサンゴ食期の稚ヒトデを用い試験した(室内試験1)。生きた*A. tenuis*を誘引剤とした場合、15L海水での捕獲率は 75.8 ± 5.4 (SE) %と非常に高い結果となった。しかしながら海水量を3.3倍の50Lとすると捕獲率は 51.6 ± 1.1 %にまで低下することが判った。これら結果から、サンゴ食期に移行した稚ヒトデには、それほど強いサンゴ探索能力がないことが判った。以下試験の詳細を示す。

<室内試験1>

- ・15L 容器：W35.5xD24.5xH26cm ガラス水槽
- ・50L 容器：W76xD45xH20cm 特大型トロ函-2
- ・稚ヒトデ：19個体，体長13.0~26.5mm
- ・試験条件：Type3を水槽中央に1個設置，コントロール無し，繰返し5回，人口海水，約12時間

上記知見から、実海洋で使用するトラップには、さらに強い誘引物質の拡散が必要であると判断し、トラップ本体を大型化し、生きたサンゴの添加量を増加した。またトラップ素材もアクリルからナイロンメッシュ製とした。これら改良したType4トラップを、上記稚ヒトデ過密海域へ設置した(試験5)。試験5では、5つのトラップを6週間海底に設置し(図3-7-4A)、その後1, 2, 4, 6週の頻度で観察を行った。その結果、トラップ内に捕獲される稚ヒトデ個体は観察されなかったものの、トラップ底面外側に誘引された稚ヒトデを3個体確認した。これら3個体は、設置後1週目で2個体(体長24mm【図3-7-4B】，27mm)が別々のトラップへ誘引された。また設置後2週目で1個体(20mm【図3-7-4C】)が誘引された。

Type4の底面外側に誘引された稚ヒトデを確実にトラップ内に誘引することを目的に、トラップ入口部を底面側にしたType5を作製し、同海域に設置した(試験6)。試験6では、5個のトラップを4週間設置し、2, 3, 4週の頻度で観察を行った。その結果、Type4と同様にトラップ底面外側に誘引された稚ヒトデが4週目に1個体(体長29mm)観察されたが(図3-7-5)、トラップ内に捕獲された稚ヒトデ個体はなかった。

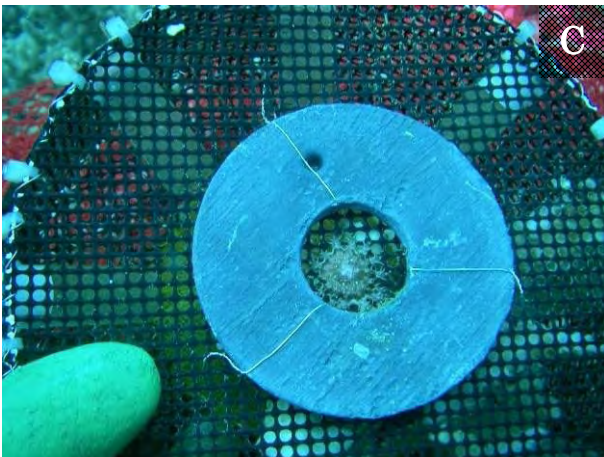
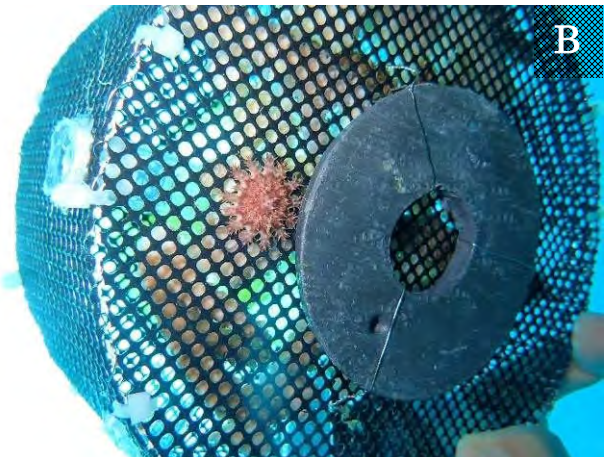


図3-7-4. Type4トラップの設置と稚ヒトデ誘引.

A: 設置直後の type4トラップ.

B: 設置 1 週間後、底面外側に誘引された稚ヒトデ(体長 24mm).

C: 設置 2 週間後、底面外側に誘引された稚ヒトデ(体長 20mm).



図3-7-5. Type5トラップ.

A: 設置直後の Type5トラップ, B: 設置 4 週間後、底面外側に誘引された稚ヒトデ.
(体長 29mm)

海洋試験において、稚ヒトデが Type4、5 トラップの底面外側へは誘引され張付くが、トラップ内に誘導されない現象解明のため、室内試験 2 を下記の条件で行った。

<室内試験 2>

- ・試験水槽：50L 水槽（W76xD45xH20cm 特大型トロ函-2）
- ・稚ヒトデ：26 個体，体長 16.0~45.0mm
- ・試験条件：Type4 を水槽中央に 2 個設置，コントロール無し，繰返し 3 回，人口海水，約 10 時間

その結果、海洋と同様に室内試験においてもトラップ内に誘導された稚ヒトデ個体は確認されなかった。しかし、ほとんどすべての個体がトラップ下側に誘引される非常に強い活性が観察された（図 7-3-5 A、誘引率=94.9±3.4%）。この結果から、ナイロンメッシュを素材にしたトラップではトラップ内とトラップ外に、十分な誘引物質濃度勾配が形成されていないことが判った。また、トラップ底面外側に強い濃度勾配が形成されるため、稚ヒトデはトラップ内には侵入せず、トラップ底面外側に強く引き付けられる。さらに、これら底面外側に誘引された稚ヒトデ個体が、ナイロンメッシュ越しにサンゴを摂餌している様子も観察された（図 3-7-6 B）。メッシュ外側からもサンゴを摂餌できる稚ヒトデは、トラップ内に入る理由がないことも判った。

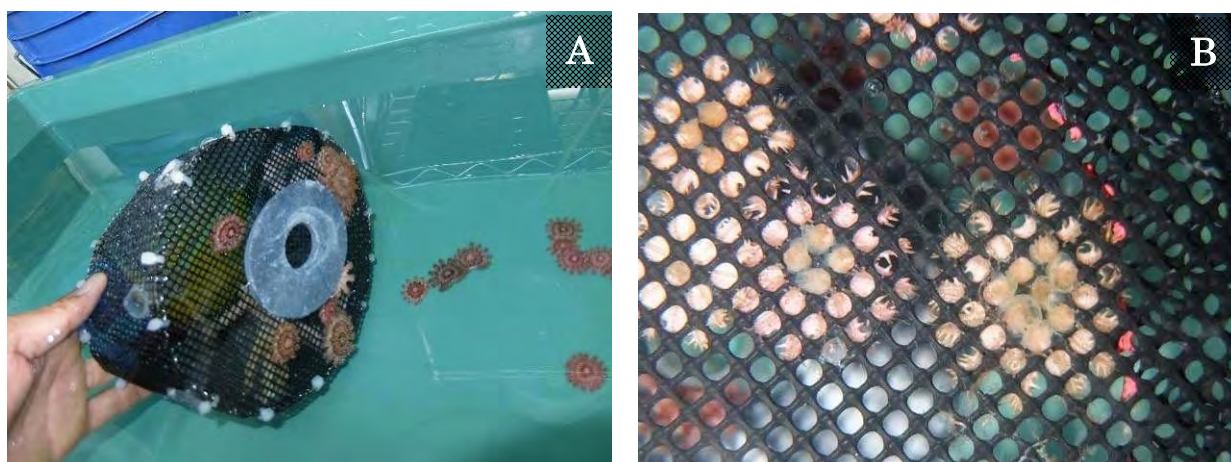


図 3-7-6. Type4 の室内試験.

A：トラップ底面外側に誘引される稚ヒトデ.

B：トラップ内の生きたサンゴを取除いた稚ヒトデ裏側の様子，反転させた胃がメッシュ外側（紙面裏側）から内側（紙面表側）に侵入していることが判る.

室内試験 2 の知見から濃度勾配を考慮し、Type3 の構造をトラップ下側に、Type4 の構造を上側に合わせた構造となっている Type7（図 3-7-7 参照）試作し、室内試験 2 と同様の水槽、稚ヒトデを用い室内試験 3 を行った。試験条件を以下に示す。

<室内試験 3>

- ・試験条件：Type6 と 7 を水槽中央に 1 個ずつ設置，繰返し 3 回，約 10 時間

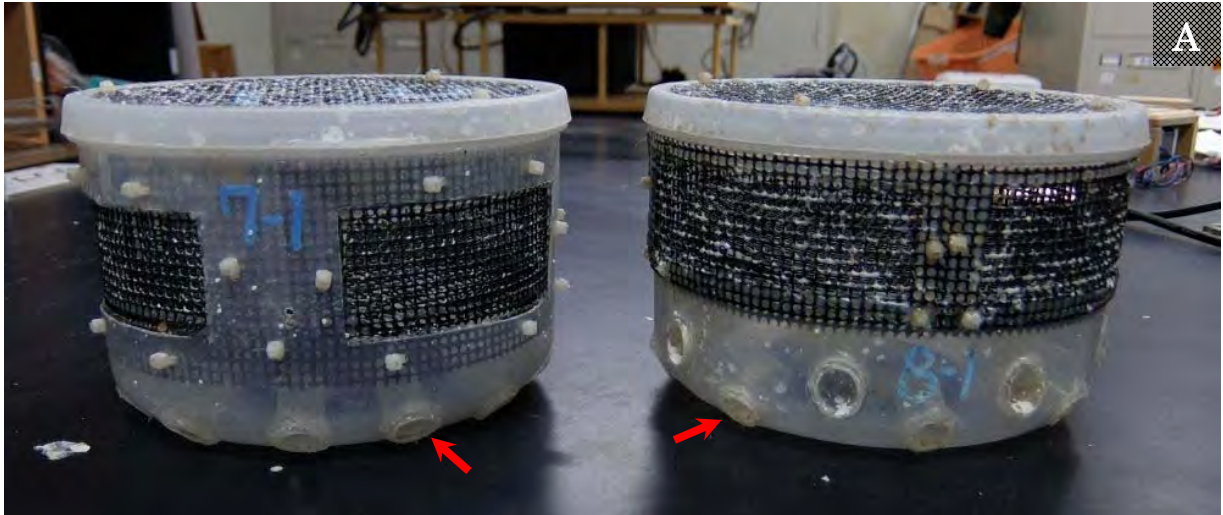


図3-7-7. 稚ヒトデトラップ (Type7とType8) .



A : 図左が Type7, 右が Type8. トラップ構造はほぼ同じであるがヒトデ導入口 (赤矢印) の位置及び数 (Type7=13 個, Type8=17 個) に差がある.

B : 誘引物質拡散用の窓は, 上部側面と蓋部分に設ける. またトラップ内側中央付近に仕切りネット (緑矢印) が設置され, 上部に誘引剤 (生きたサンゴ, 下部は捕獲ヒトデの収納空間とした).

その結果、Type6 と 7 を合わせて $43.6 \pm 8.4\%$ の捕獲率となった。トラップ別の捕獲率は、Type6 及び Type7 でそれぞれ $19.2 \pm 2.2\%$ 、 $24.4 \pm 6.8\%$ であった。これは同海水量を用いた Type3 の 1 個あたりの捕獲率 ($51.6 \pm 1.1\%$) のほぼ半分の値であった。

Type7 が Type3 に勝る点は、Type3 より多くの生きたサンゴを収容できる点。また、トラップ内が 2 重構造になっており、トラップ内に侵入した稚ヒトデが直接サンゴを摂餌できない構造をしている点である。さらに、側面に大きな窓を設けており、誘引剤として用いている生きたサンゴを良好な状態で長期海洋に設置できる点もある。しかしながら、海洋試験における Type7 の稚ヒトデ誘引及び捕獲は一度も観察されなかった。また同様に Type7 の入口部を 13 個から 17 個に増やした Type8 (図 3-7-7 参照)、及び入口部直径を拡大した Type9 にも稚ヒトデの誘引及び捕獲はなかった (図 3-7-8 参照)。

室内試験において良好な稚ヒトデ捕獲率を有す Type3 と、室内・海洋試験において良好な稚ヒトデ誘引効果を示す Type4 の両構造を合わせた Type7 であったが、単純に構造を合わせただけでは、高い稚ヒトデ捕獲率と誘引力を合わせもったトラップにならない。



図 3-7-8. Type7, 8, 9 の設置状況.

これまでに得た知見をもとに、海域における高い捕集効果を持ったトラップ作製に、下記の条件を付け加え改良を進めている。

- ・ 誘引物質拡散用のトラップメッシュ部とヒトデ導入部を分けない
- ・ 濃度勾配の形成（トラップ外側→導入部→中側）
- ・ メッシュ部の拡大（誘引力）と導入部の拡大（捕獲率）
- ・ 誘引剤（生きたサンゴや物質）を極力トラップ中心に局在させる（濃度勾配）
- ・ Type3 程度の大きさが望ましい、またトラップのデッドスペースを低減する
- ・ 室内トラップ性能試験（水量：55L）において、捕獲率：70%以上、底面誘引率：95%以上の性能を持つ

（２）摂餌行動刺激物質の探索

現在までの摂餌行動刺激物質の分離スキームを図 3-7-9 に示す。前年度報告では、図 3-7-9 の Fr. 2 に誘引活性があったことを報告している（コントロール=17%、Fr. 2=47%）。

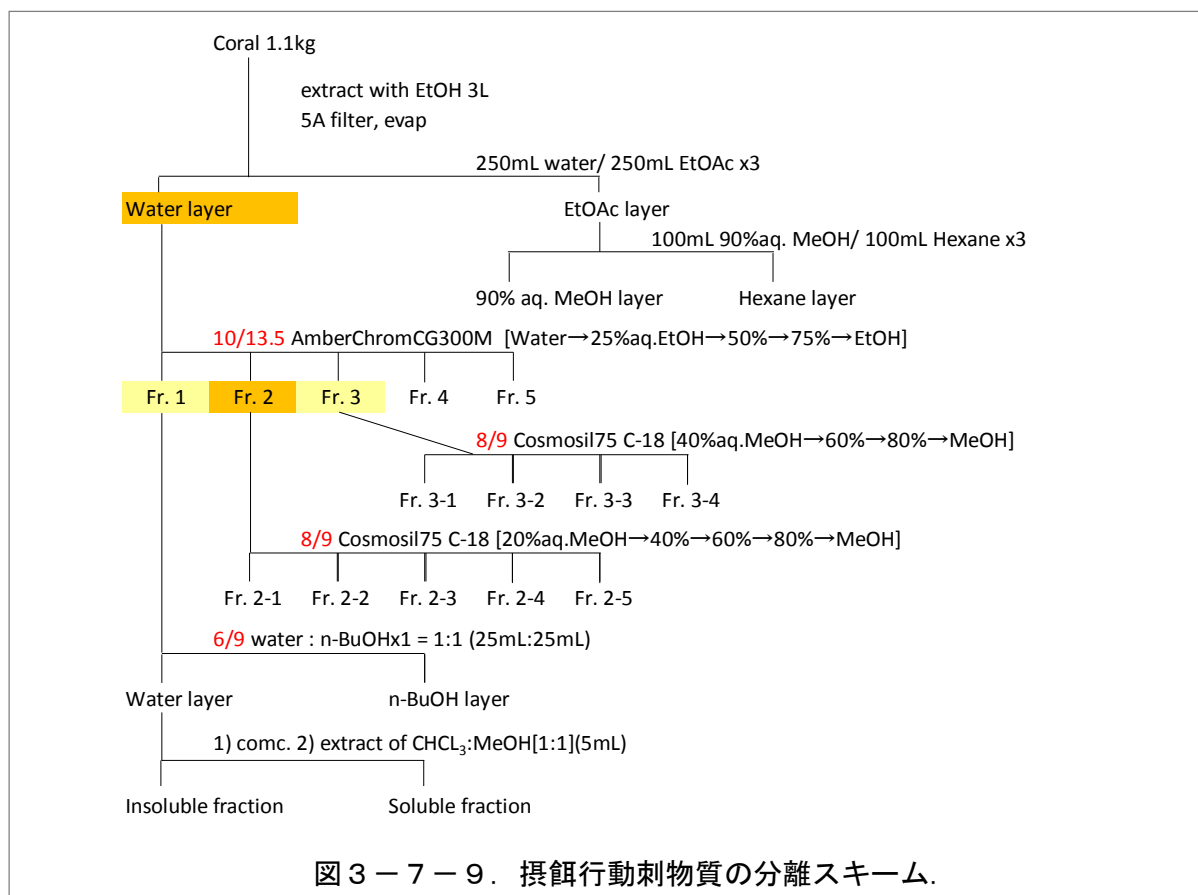


図 3-7-9. 摂餌行動刺激物質の分離スキーム.

その後、試験を繰返した結果 Fr. 1 の方が弱いながらも安定した活性が現われた (n=3, Fr. 1=26.7, Fr. 2=8.9%)。生きたサンゴの活性 (60%) に近づけるため、サンプル添加量の増加が必要とされた。しかし Fr. 1 は、水分層、ついで CG300M の水溶出分画であるため塩分濃度が非常に高く、高濃度サンプルを作成し、活性試験に用いると、トラップ内の塩分濃度が上昇することが予想された。

そのため Fr. 1 の活性物質と塩類の分離のため、「水・ブタノール分配」と「クロロホルム・メタノール混合溶媒に対する可溶性分離」を用いた。しかしながら分離した各分画の誘引活性率は 0~7% となり、Fr. 1 より大きく低下した。これら原因が試験生物の不良によるものか、複合系化学物質の関与によるものかを現在検討している。

また誘引物質の海洋試験への適応を考慮して、さらに高濃度のサンゴ抽出物を得るため 22.2kg のサンゴ（ミドリイシ属、恩納村漁協提供養殖サンゴ）を用いてエタノール抽出を行った。生物活性試験を指標に分配・分離を進めている。複合系化学物質の関与も考慮して、脂溶性分画の分離も進める予定である。

8. サンゴ礁モニタリングロボット等の研究開発

昨年度からの新規テーマとして、「サンゴ礁モニタリングロボット等の研究開発」を実施している。主な目的は、潜水では困難な水深帯のモニタリングおよびモニタリングの省労力化等であり、4つの研究テーマを実施している。

表3-8-1. サンゴ礁モニタリングロボット等の研究開発の研究分担.

氏名	所属	担当テーマ	研究概要
武村 史朗	沖縄工業高等専門学校	10～30mの水深帯で使用可能な水中モニタリングロボット等の開発	サンゴ礁のモニタリング手法であるマンタ法を深場で実施するため、海底との距離計測・保持機能及び障害物回避機能等を有した水中ロボット等の開発
高橋 悟	香川大学	サンゴ礁モニタリング画像からサンゴ被度及びオニヒトデ食痕の自動検出技術の開発	サンゴ礁モニタリングの自動化技術の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・画像内の生きたサンゴの抽出と画面上の割合算出 ・画像内のオニヒトデの食痕の抽出と画面上での割合算出
川端 邦明	日本原子力研究開発機構		
相良 慎一	九州工業大学	サンゴ礁モニタリング画像からオニヒトデの自動検出技術の開発	サンゴ礁モニタリングは通常、熟練した調査員によって行われるものの、その労力は多大である。このため、画像から自動的に算出できる技術の開発を行う。 <ul style="list-style-type: none"> ・画像内のオニヒトデの抽出
鈴木 剛	東京電機大学	サンゴ礁定点観測システムの開発	サンゴの産卵やオニヒトデ等の遠隔監視 <ul style="list-style-type: none"> ・サンゴ礁での定点観測技術や通信技術等の開発

8-1. 10~30m の水深帯で使用可能な水中モニタリングロボット等の開発

武村 史朗（沖縄工業高等専門学校）

8-1-1. 目的

従来、人が行っていたマンタ法による水中モニタリングを水中ロボットで行うための、機器開発、要素機能の実装を行う。本ロボットの仕様は大まかに以下のものとする。

1. ~5ノット（1ノット=約0.5m/s）で曳航可能
2. 深度30mまで利用可能
3. 障害物回避機能（上下）、高度維持機能を有す
4. カメラ搭載、水温計測機能搭載

これらの仕様を満たす水中ロボットの設計、製作を行なった。プールで水中ロボットのピッチ角制御、深度維持制御の曳航基礎実験を行なった。プール実験では、人力で曳航していることから速度約2ノット（約1m/s）での曳航しかできていないが、水中ロボットの深度変更、水中ロボットのピッチ角維持の機能は実現できていると判断している。プール実験の後、いくつかのハードウェア・ソフトウェアの改善を行ない、海実験を行なった。さまざまな課題が抽出され、次年度に改善を行なうための準備を行なっている。

8-1-2. 実施概要

曳航型水中ロボットの製作と基礎制御実験

(1) 設計指針

ダイバーが曳航されながら調査を行うマンタ法は、曳航速度が2~3ノット（1m/s ~ 1.5m/s）程で、水深5m~7mの海域を調査する。また、数分毎に停止し、ダイバーがサンゴの被度等を記録する時間もあり短時間での広範囲調査、比較的深い深度での調査には向かない。そのためダイバーを水中ロボットへ置き換え、効率よく水中調査を行えるように以下の3点を目標とし設計を行う。

- ・浅海域を5ノット（2.57m/s）で曳航（図3-8-1）
- ・サンゴの被度をカメラ映像で記録するため、海底面との距離を一定に保つ
- ・障害物を回避するための移動機構

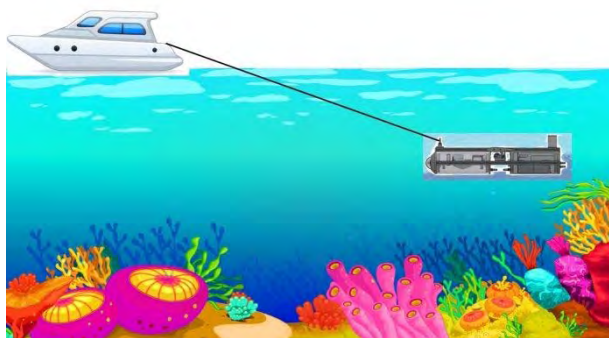


図3-8-1. 曳航型水中ロボットでの調査イメージ。



図3-8-2. 曳航型水中ロボット。

(2) 曳航型水中ロボットの設計と製作

曳航型水中ロボットは前後二つの耐圧容器に分けており、前方の耐圧容器は透明アクリル、後方の耐圧容器はアルミでできている。透明アクリル容器部には、カメラ（前方1個、下方2個）、CPUボード（レスコンボード、サンリツオートメーション製）、姿勢センサ、深度センサを搭載している。アルミ容器部には電源系、モータドライバ、モータを搭載し、熱を発生させそうな部品を集中させ、熱を逃がしやすい構造を念頭において設計している。それぞれの耐圧容器の真ん中にフラップ機構を配置し、アルミ容器部に搭載したモータの動力をマグネットカップリングによりアルミ容器外に伝達し、フラップの可動を非接触で行なえる設計としている。図3-8-2にCAD図を、図3-8-3に製作した曳航型水中ロボットを示す。前方がアクリル容器部、後方がアルミ容器部である。その間にフラップ機構を配置し、陸上でコントローラによる動作確認は済んでいる。150m電源ケーブルで動作している。現時点では、LED照明は未搭載である。

(3) 曳航型水中ロボットのプールでの基礎制御実験

曳航型水中ロボットが曳航されながら、以下の制御の検証をプールで行なった。

- 1) 水中ロボットのピッチ角を保つための尾翼の効果を確認するためのピッチ角維持制御（目標ピッチ角0度としたP制御（比例制御））
- 2) 曳航時に高度を維持するため高度維持制御（目標高度20cmとしたP制御（比例制御））

実験方法は図3-8-3のようにプール（水深1.2m～1.4m）にケーブルを繋げた曳航型水中ロボットを沈め、プール端から端まで人力によりケーブルを曳航した。なるべく曳航速度が一定になるように曳航者は引っ張っており、曳航速度は約1m/s程度になっている。主翼、尾翼ともに遠隔操作による手動・目標値に対する自動制御のどちらでも動かすことができるようにしている。

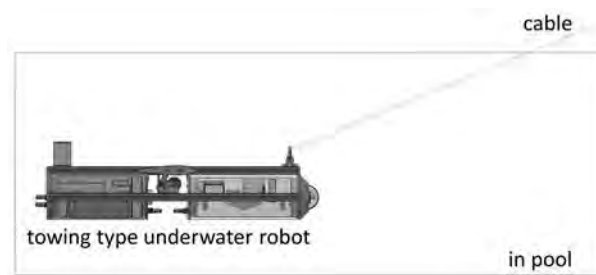


図3-8-3. 実験方法.

(4) プール実験結果

図3-8-4に水中の曳航型水中ロボットを示す。このように曳航していないときは浮力より重量が大きいので、プール底に着底している。前回の主翼より長さを2倍とし、約0.5m/s(1ノット)でも高度を維持できる揚力を発生できるようにしている。尾翼が追加されている。

人力で曳航型水中ロボットを引っ張っている実験の様子を図3-8-5に示す。図3-8-5は主翼を浮上する方向に固定し、尾翼はピッチ角を0度に保つように自動制御実験時の写真である。主翼の作用により海面近くを維持していることがわかる。水中ロボットの曳航している部分はロボット先端のため、上方向の揚力により、ロボット先端が下向きになる。それを押さえるため、尾翼が上向きとなり、ロボット後方を下向きに下げる力を発生し、ピッチ角を0度に保つようとしている様子が見える。

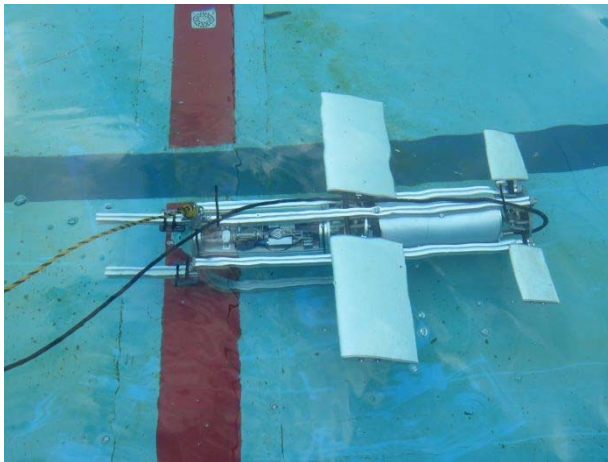


図3-8-4. プール中の曳航型水中ロボット.



図3-8-5. 曳航時の水中ロボット.

1) 水中ロボットのピッチ角を保つための尾翼の効果を確認するためのピッチ角維持制御

図3-8-6は主翼を浮上方向に固定し、尾翼を水平に保って曳航したときのピッチ角を示している。図3-8-7は主翼を浮上方向に固定し、ピッチ角0度を目標値として尾翼を自動制御で曳航したときのピッチ角を示している。ピッチ角は0度に収束することはできていないが、自動制御を行なったときはピッチ角の幅が小さく押さえられていることから、尾翼の自動制御による水中ロボットのピッチ角制御の効果があると言える。尾翼を大きくすれば、ピッチ角の幅はより抑えることができる。

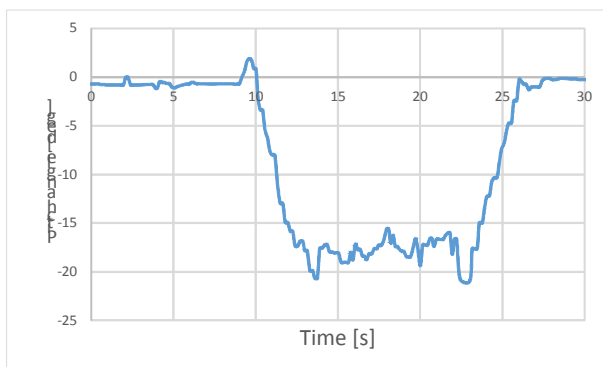


図3-8-6. 主翼・尾翼固定.

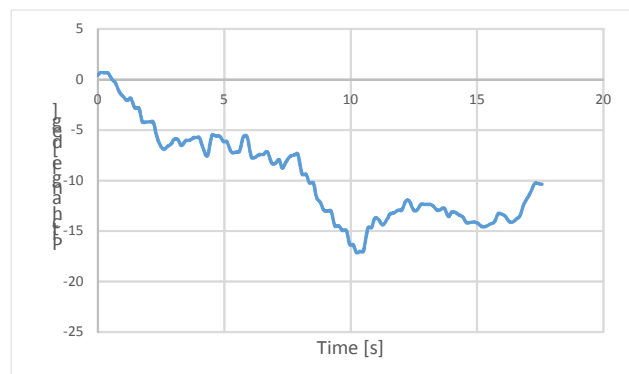


図3-8-7. 主翼固定, 尾翼はピッチ角0度の自動制御.

2) 曳航時に高度を維持するため高度維持制御

画像処理でプール底のレーザーを認識して、高度が変化することで画像内のレーザーの位置が変化することを利用した高度計測による水中ロボットの高度維持システムの実験を行なった。プール底から水中ロボット底面までの目標高度は20cmとしている。図3-8-8は実験時のパソコン画面である。真ん中の映像は前方カメラからの映像で障害物回避に用いる。右側の丸い映像はプール底を写しており、真ん中の点がレーザーである。

実験を行なうプールは図3-8-9のような25mプールで、両端の水深1.2m、中央の水深は1.4mである。プール底から水中ロボット底面までの目標高度20cmとした際の高度維持制御を行なった。



図3-8-8. 高度維持実験時のパソコン操作画面。

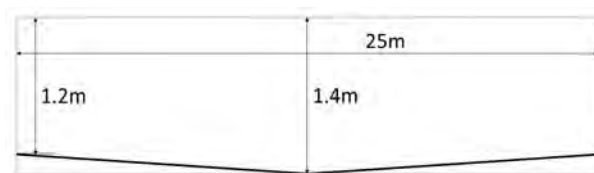


図3-8-9. 実験プール。

図3-8-10は主翼を浮上する方向に揚力を発生するように固定し、尾翼は水平方向に固定した状態での深度の変化を示している。図3-8-11は主翼を高度維持制御し、尾翼は水平に固定した状態での深度の変化を示している。図3-8-10は高度維持制御が行なわれていないため、スタート後、常に浮上し続け（深度が浅くなる）、ゴール間際に深度が深くなり、プールに着底していることがわかる。図3-8-11はスタート後にプール底から浮上し、プール底から離れるため高度維持制御によりプール底に近づいている（深度が浅くなり、真ん中付近で深くなるので深度が深くなる）。13秒あたりでプール底に着底し、再度、浮上して高度を保つように高度制御が働き、ゴール間際に着底していることがわかる。プール中央で着底し

てしまうのは、実験プールがそれほど深くないために生じる。海では、深度は深く取れることから、問題は解消されると考える。

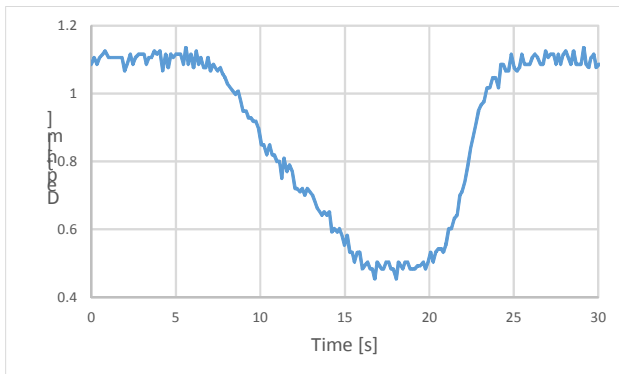


図3-8-10. 主翼・尾翼固定.

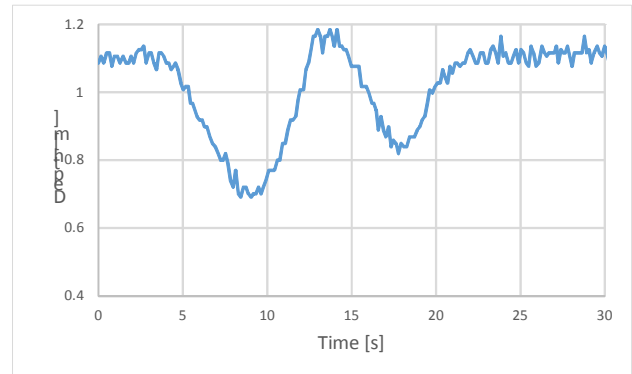


図3-8-11. 主翼は高度維持制御, 尾翼固定.

(5) 海実験

I. 実験方法

日時：2017年3月1日（水）12：20～13：20（推定時刻）

場所：瀬底島西南沖 海底が砂地のところ

天気：雨たまに曇り。実験中は曇りか雨であり、晴れの時間帯はなかった。波は穏やか。

船の先端でロープを引っ張り、曳航型水中ロボットを船で曳航する。今回の実験はすべて手で主翼を動かす。自動制御ができるような環境であるかを把握するための実験でもある。実験中は水中ロボット搭載カメラで正面映像と海底映像の記録、姿勢・深度データなどを記録する。高度を計測するためのレーザーの見え方も海底映像とともに記録する。曳航速度は1～3ノットとする。数分間曳航した後に、船を停止・旋回し、再度曳航する。計5回ほど曳航実験を行なう。

II. 実験結果

実験時の様子を図3-8-12に示す。初回の曳航実験は、2ノットで曳航しているときは、プール実験と同じような環境だったので、プール実験と同じような感じで曳航されていると感じたが、波の影響や船も真直ぐな直線で進んだりしないので、横方向からの力を受けているようで海実験でわかったような現象があった。図3-8-13は海実験時の操作画面である。以下に実験結果を記す。

1. 水中ロボットがロール回転（進行方向に対して水平じゃない）をしていた。

プール実験では横方向からの力を受けることがなかったが、海ではその影響を知ることとなった。重心をなるべく下にする、垂直尾翼を下にもつける、などのハードウェアの改善を行なう

2. カメラなどが入っている前方部のアクリル容器のみ漏水した。

電源系が入っている後方部のアルミ容器は漏水していなかったことから、蓋の防水方法に問題は無い。カメラ撮影のためのアクリルドーム部分の固定の仕方に問題があるため、カメラ窓の作り方を改善する。

3. 水中ロボットの高度によってはレーザーをカメラで確認することができた。

図3-8-13はレーザーが確認できている際の写真である。しかしながら、高度によっては、レーザーがカメラで確認できなかった。レーザーの見え方については、今後も実験が必要である。レーザーと画像を組み合わせた高度維持制御が可能であると、市販の高度計を用いるときより約1/10の価格で実装できるため、引き続き改善を進め、検討を行ないたい。



図3-8-12. 海実験で曳航する前の水中ロボット.

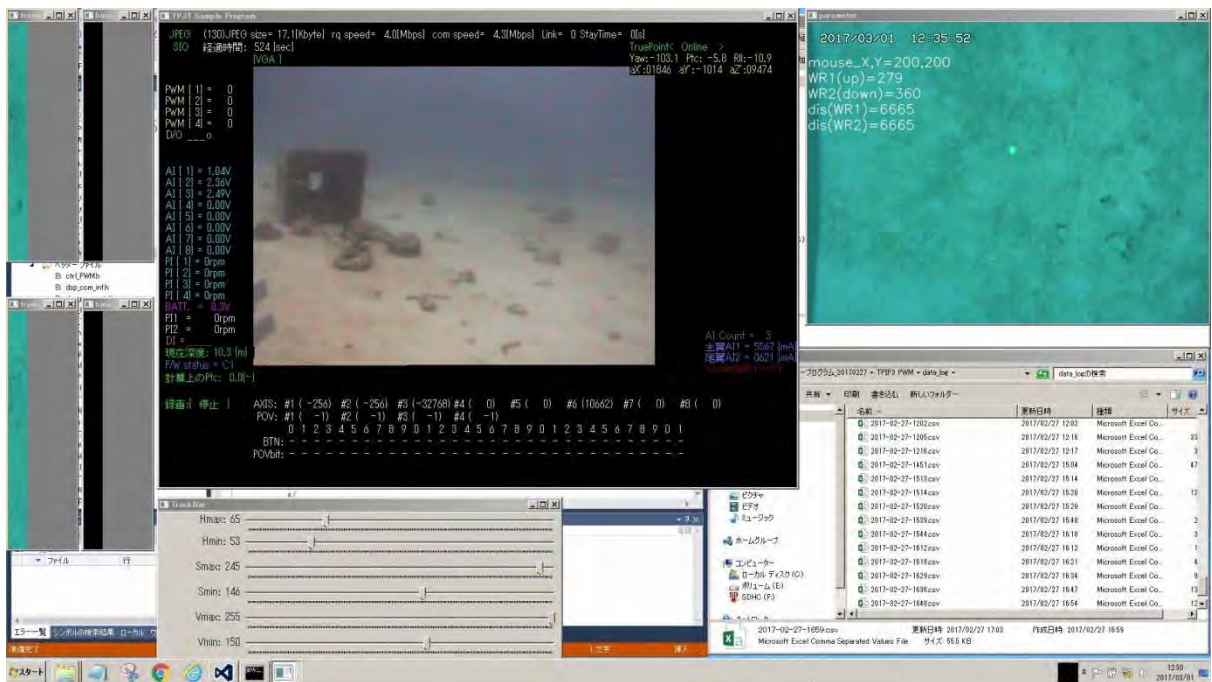


図3-8-13. 海実験時のパソコン操作画面.

(6) まとめ

曳航型水中ロボットを製作し、プールにおいて尾翼によるピッチ角制御実験、主翼による高度維持制御を行なった。実験結果からは、どちらも可能であることが示されたと考える。また、海実験で曳航型水中ロボットの実証実験を行なった。さまざまな課題が抽出されたが、対策不可能とは考えていないので、引き続き改善を行なっていく。

8-1-3. 今後の予定

プール実験において、ハードウェアの基本的な性能を確認した。その後、海実験を行ない、さまざまな課題の抽出を行なった。まずは、ハードウェアの改善をし、海で実証実験を重ねながら、曳航型水中ロボットの性能を向上させていくことを目指す。

最終年度である次年度は、曳航型水中ロボットのハードウェアを改善し、検証を進めながら、高度維持システムの実証実験にも取り組んでいく。

8-2. サンゴ礁モニタリング画像からサンゴ被度及びオニヒトデ食痕の自動検出

技術の開発

高橋 悟（香川大学）・川端 邦明（日本原子力研究開発機構）

8-2-1. 目的

サンゴ被度を算出するにあたり、マンタ法にて得られる海中動画像からサンゴを検出・抽出する動画像処理手法の構築が重要である。そのため、海中物体に固有なテクスチャ情報や画像輝度に頑健な画像処理技術を導入することで、平成27年度から継続的に研究開発を進めているテクスチャ解析手法の精度向上を図る。

現在、我々が提案しているテクスチャ解析の基本アルゴリズムを先に示す。本提案手法は大きく4つの手順にて構成される。

【基本アルゴリズム】

Step 1: RGB 入力画像に対し、次の前処理を実施する。

Step 1(a) グレースケール変換。

Step 1(b) 画像の領域分割。ここで、分割領域サイズは任意とする。

Step 2: Step 1 の画像に対して、濃度共起行列を構成する。

Step 3: Step 2 の濃度共起行列を用いて、Haralick の 14 特徴量 ($f_1 \sim f_{14}$) を求める。

Step 4: Step 3 で得られる 14 次元空間の特徴量に対して、線形判別分析法を適用し、サンゴ検出を行う。

基本アルゴリズムに対し、今年度後半より、画像輝度変換に頑健となるステップを加え、基本アルゴリズムの改良を実施している。実際には、濃度共起行列に代わり、方向符号共起行列を用いる。

【改良アルゴリズム】

Step 1: RGB 入力画像に対し、次の前処理を実施する。

Step 1(a) グレースケール変換。

Step 1(b) 画像の領域分割。ここで、分割領域サイズは任意とする。

Step 2: Step 1 の画像に対して、方向符号共起行列を構成する。

Step 3: Step 2 の方向符号共起行列を用いて、Haralick の 6 特徴量 ($f_1, f_5, f_9, f_{12}, f_{13}, f_{14}$) を求める。

Step 4: Step 3 で得られる特徴量に対して、線形判別分析法を適用し、サンゴ検出を行う。

(備考) Haralick の特徴量については、文献 R. M. Haralick, K. Shanmugam and I. Dinstein, "Texture features for image classification", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 3, no. 6, pp. 610-621, 1973 を参照。

現在、上記の基本アルゴリズムと改良アルゴリズムに従い得られるサンゴの検出結果に対し、原画像全体におけるサンゴ被度の算出を行っている。

8-2-2. 実施概要

■基本アルゴリズムによる解析

(1) 前処理

Step. 1 で二つの前処理を行う。Step. 1-a) のグレースケール変換は Step. 2 に必要な処理である。Step. 1-b) の局所領域の分割は Step. 2 および Step. 3 にて利用する。ここで、領域サイズは対象に合わせ任意に設定する。図 3-8-14 に入力画像として用いた RGB 画像を示し、これに対し前処理を施した画像を図 3-8-15 に示す。入力画像は実際に沖縄周辺海域にてダイバーが撮影したものであり、撮影環境は昼間の快晴時である。局所領域の分割サイズは 160×160 [ピクセル×ピクセル] である。



図3-8-14. 入力画像.

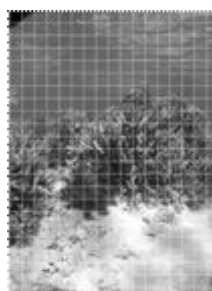


図3-8-15. 前処理画像.

(2) 濃度共起行列

Step. 2 では Step. 1-b) にて分割した局所領域毎に濃度共起行列を算出する。図 3-8-16 に濃度共起行列の算出方法を示す。濃度共起行列 P_{δ} は対象画素の輝度値 i と対象画素対し距離 r_c 、角度 θ_c の位置にある画素の輝度値 j の組合せパターンを評価したものである。

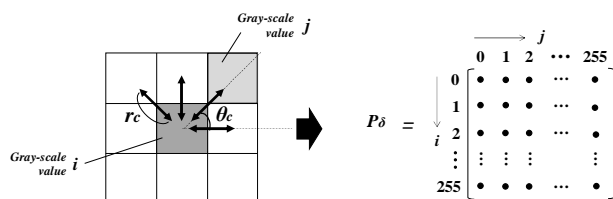


図3-8-16. 濃度共起行列.

濃度共起行列の解像度はグレースケール変換で変換された濃淡値の階調数に依存し、本研究では 256 階調濃淡値を用いる。行列の大きさは 256×256 [ピクセル×ピクセル] である。

(3) Haralick の 14 特徴量

Step. 3 において Step. 2 で算出した濃度共起行列に基づき Haralick の 14 種類の特徴量を算出する。濃度共起行列は前処理にて局所領域毎に算出するため、Haralick の 14 特徴量も同様に領域毎に算出される。以下に、例として $f_1 \sim f_{14}$ の 14 種類の特徴量のうちテクスチャの特質を視覚的に表す $f_1 \sim f_3$ の条件式を示す。

$$f_1 = \sum_i \sum_j \{P_{\sigma}(i, j)\}^2 \quad (1)$$

$$f_2 = \sum_k k^2 \sum_i \sum_j P_{\sigma}(i, j) \quad (2)$$

$$f_3 = \left(\sum_i \sum_j \ddot{P}_{\sigma}(i, j) - \mu_x \mu_y \right) / \sigma_x \sigma_y \quad (3)$$

ここで、 f_1 は角二次モーメント、 f_2 はコントラスト、 f_3 は相関を各々意味する。また、同式中において i, j は輝度値、 P_{σ} は濃度共起行列、 k は濃度共起行列の階調数、 $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y$ は各々標準偏差を表す。

(4) 線形判別分析法

Step. 4 では Step. 3 で求めた 14 種類の特徴量に従い線形判別分析を行う。線形判別法は特徴空間上の所属不明なデータ群を学習データに基づき構築した判別モデルに従い、どのグループに帰属するかを判別する方法である。本研究では、沖縄県周辺海域にて撮影した複数枚の画像に対し、Step. 1 から Step. 4 の処理を施したのから判別モデルを構築し、各対象の判別を実施する。

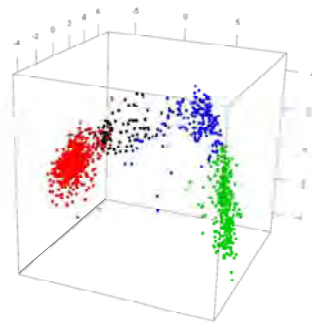


図3-8-17. 判別モデル.

図3-8-17に実際に構築した判別モデルを示し、表2に判別モデルの精度を示す。図3-8-17の赤点は図3-8-14のサンゴ、黒点はオニヒトデ、緑点は砂地、青点は海水を各々表す。また、表3-8-2の領域数は判別モデルを構築するために使用した各クラスの領域の数を意味する。そして、判別正答率は、判別結果と領域数から算出する。この判別モデルは全てのクラスにおいて90%以上の正答率を得られているため、高精度な判別モデルであると言える。

表3-8-2. 判別モデル精度.

	A	B	C	D	領域数
A: サンゴ	591	9	0	0	600
B: オニヒトデ	7	93	0	0	100
C: 砂地	0	0	331	19	350
D: 海水	0	0	0	174	174
判別正答率	98.83%	91.28%	100.0%	90.16%	

(5) 実証実験

図3-8-18に示す各クラスの領域に対して、図3-8-17の判別モデルを用いて、提案アルゴリズムの有効性を実証する。

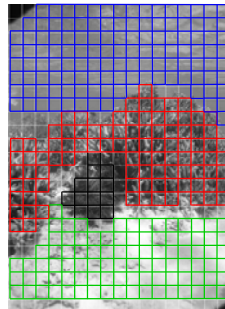


図3-8-18. 実験使用領域.

ここで、図3-8-18における領域の色は図3-8-17のグラフ上の点の色と対応し、各クラスの領域を表す。表3-8-3に実験結果を纏める。

表3-8-3. 判別結果.

	A	B	C	D	領域数
A:サンゴ	85	9	0	0	94
B:オニヒトデ	2	11	0	0	13
C:砂地	0	21	60	13	94
D:海水	0	0	6	116	122
判別正答率	78.70%	55.00%	90.91%	89.92%	

表3-8-3より、サンゴに対して78.70%の判別正答率があり、要求精度である80.00%に近い数字を得られている。砂地、海水においても高い判別正答率が導かれている。ただし、オニヒトデについては、身体の一部毎にテクスチャが異なるため、判別精度の向上のために改善が必要なのことがわかる。

●改良アルゴリズムによる解析

濃度共起行列と方向符号共起行列の違いについて説明する。

濃度共起行列は、図3-8-19に示す輝度対 (i, j) となる頻度を要素に持つ行列である。輝度値 i の画素から角度 θ_c 方向に距離 r_c 離れた画素の輝度値が j である頻度を要素 $P_\theta(i, j)$ と表し、濃度共起行列を構成する。ここで、 θ_c は 0° 、 45° 、 90° 、 135° の4方向、 r_c は任意の値を取る。本研究では $r_c=1$ とし、 $P_\theta(i, j)$ の各要素を正規化した値を $p(i, j)$ と表す。

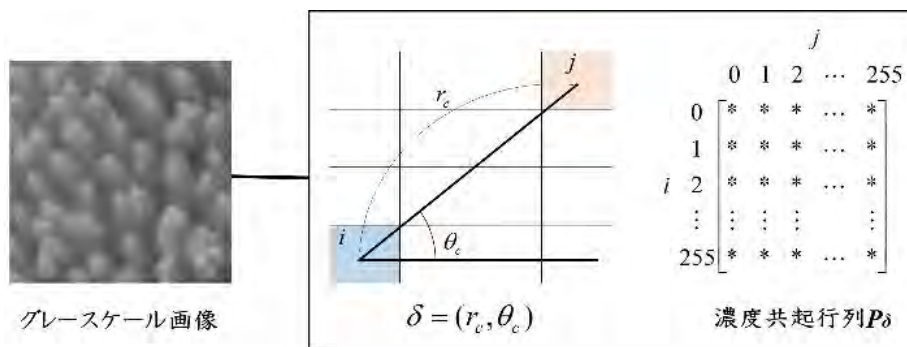


図3-8-19. 濃度共起行列の概念.

方向符号共起行列は、方向符号と濃度共起行列の概念を組み合わせた新たな概念であり、図3-8-20のように定める。つまり、方向符号の画像輝度に頑健な部分を濃度共起行列に加味したものである。方向符号共起行列のサイズは $(N+1) \times (N+1)$ となり、 $N=16$ である。

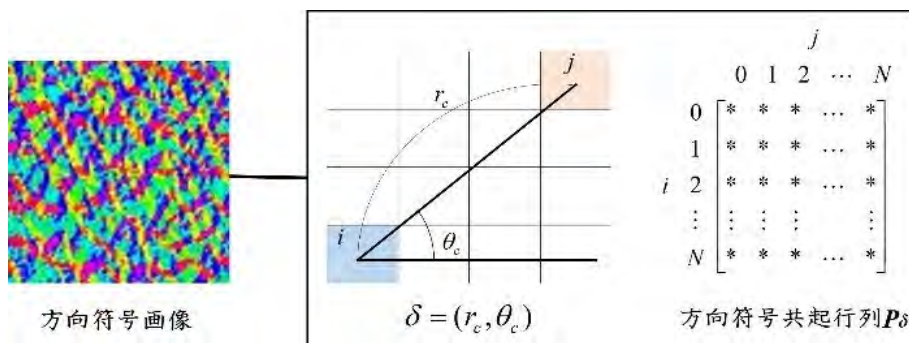


図3-8-20. 方向符号共起行列の概念.

次に、方向符号共起行列を用いることで、従来手法よりサンゴの検出精度が向上していることを示す。

このとき、基本アルゴリズムの濃度共起行列に基づく Halarick の 14 特徴量、改良アルゴリズムの方向符号共起行列に基づく $f_1, f_5, f_9, f_{12}, f_{13}, f_{14}$ の 6 特徴量に従い、各線形判別を行い、精度検証を実施した。入力画像はミドリイシ類、ハナヤサイ類、岩礁を含む図3-8-21の海中画像を用いる。

表3-8-4(a)に濃度共起行列に従い線形判別した結果を示す。さらに、表3-8-4(b)に方向符号共起行列に従い得られる結果を示す。表3-8-4の精度は図3-8-21で各対象を判別した際の正答率を意味する。



図3-8-21. 入力した海中画像.

表3-8-4より、提案した方向符号共起行列に基づく特徴量に従う改良アルゴリズムは、サンゴ、特にミドリイシに対するテクスチャ解析に対して有益なことが言える。

表3-8-4. 判別結果.

	ミドリイシ	ハナヤサイ	岩礁
ミドリイシ	2	0	0
ハナヤサイ	1	0	0
岩礁	91	2	33
精度	2.1%	0.0%	100.0%

(a) 判別正答率(濃度共起行列)

	ミドリイシ	ハナヤサイ	岩礁
ミドリイシ	86	2	8
ハナヤサイ	3	0	0
岩礁	5	0	25
精度	91.5%	0.0%	75.8%

(b) 判別正答率(方向符号共起行列)

●マンタ法により撮影された実動画像を用いた検証

図3-8-22に、サンゴ被度算出のために用いたマンタ法により得た海中画像を示す。ここで、画像サイズは3840×2160[ピクセル×ピクセル]、局所領域サイズは50×50[ピクセル×ピクセル]である。

図3-8-22中の各局所領域に対して算出したHaralickの14特徴量をテストデータとし、卓状サンゴとその他のクラスとして2分岐分類を行う。さらに、教師データはテストデータ同様、マンタ法により撮影した動画像から抽出した画像の特徴量を用いて、各クラス1000個ずつを作成した。表3-8-5に、基本アルゴリズムにより得られた判別結果を示し、図3-8-23にその結果を視覚的に表現する。

表3-8-5より、この海中画像に対する卓状サンゴのサンゴ被度は、総領域数3268個と卓状サンゴと判別された領域数580個を用いて17.8%と算出された。ここでは、サンゴ被度は画像全体の総領域数に対して判別により卓状サンゴと判別された領域数の割合により導出している。



図3-8-22. 海中画像原画.

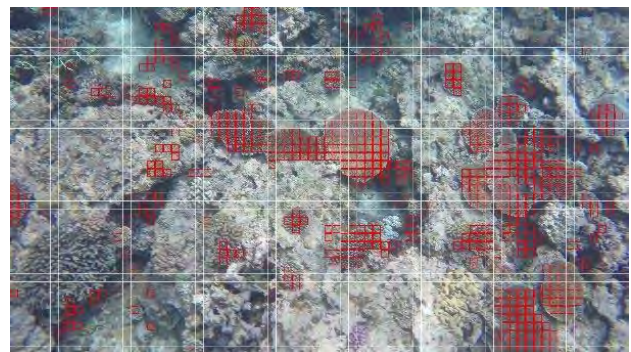


図3-8-23. 抽出された卓上サンゴ.

表3-8-5. 判別正答率.

	A	B	TOTAL
A: 卓状サンゴ	359	38	397
B: その他	221	2650	2871
判別正答率	61.9%	98.6%	

8-2-3. 今後の予定

マンタ法により撮影された動画像に対し、基本アルゴリズムを適用することでサンゴの検出・識別及びサンゴ被度の算出が可能であることがわかった。

実験結果では、その他の領域を卓状サンゴと誤判別することはほとんど無く、その他の領域を卓状サンゴと誤判別した領域が 221 個出力されている。これは、教師データを作成する際に、100%卓状サンゴを含む領域のみを卓状サンゴ領域としたことの影響があると思われる。今後は、卓状サンゴをどの程度含んだ領域を卓状サンゴの教師データとして用いているか、また教師データをより適切に設定することができるか等を踏まえ、判別結果の更なる精度向上を図る。さらに、今回は卓状サンゴを対象としたが他のサンゴ類に対しても今後展開する。

8-2-4. 研究成果発表

学術誌論文（査読有）

執筆者名：高橋悟，野田祥希，松田朝陽，川端邦明，鈴木剛，武村史朗，小笠原敬，金子俊一

論文題目：海洋観測に向けた海中ランドマークの生成手法

掲載誌名：信号処理学会論文誌（採択済み），2017.

国際会議論文（査読有）

執筆者名：A. Matsuda, S. Takahashi, K. Kawabata, F. Takemura and K. Ogasawara

論文題目：Extraction method of texture features on monitoring image of coral reef

掲載誌名：IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, v-17, 2 pages, 2016.

国内学会論文（査読無）

執筆者名：松田朝陽，奥田雄大，高橋悟，川端邦明，小笠原敬

論文題目：サンゴ被度の自動検出に向けたテクスチャ解析

掲載誌名：第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp. 0569-0571, 2016.

8-3. サンゴ礁モニタリング画像からオニヒトデの自動検出技術の開発

相良 慎一（九州工業大学）

8-3-1. 目的

モニタリング画像から自動的にオニヒトデを検出する方法として、昨年度、AdaBoost型Cascade識別器を用いた機械学習による方法と、画像処理アルゴリズムによる方法の二通りで検討を行っている。今年度は特に、学習時間が大幅に必要であるため機械学習による方法に注力した。今年度後半より画像処理アルゴリズムによる方法の検討も再開したが、現状では前年度と同程度の精度であるため本報告では省略する。

機械学習による方法のH27年度成果として、学習用画像は正解画像よりも不正解画像を増やした方が、誤認識は減る傾向にあることがわかった。ここで、使用しているOpen CVプログラムは、学習用正解画像は最も画素数の少ない(解像度の低い)画像を基準として学習する。H27年度では60×60(pixel)を用いていたので、今年度は、まず画素数を増やし、80×80(pixel)と100×100(pixel)の場合について学習を行い、認識率の変化を検討した。

つぎに、Cascade識別器を用いた機械学習は強分類器と呼ばれる識別器を並べたものである。これまで、強分類器の個数はOpen CVプログラムの標準設定数である20個で学習を行ってきたが、その個数を増やすことによる認識率の変化を検討した。

さらに、誤認識した部分の画像を不正解画像として採用し、学習用不正解画像枚数を増やした場合の認識率の変化も検討した。

なお、学習用正解画像の画素数に比例して学習時間は増加する(画素数以外が同条件の場合、60×60(pixel)では学習時間が約2週間であったものが、80×80(pixel)と100×100(pixel)ではそれぞれ4週間と8週間とかかる)。そこで、強分類器個数および不正解画像数追加の2項目については、60×60(pixel)の場合で検討した。

8-3-2. 成果の概要

まず、学習済分類器の学習区分を表3-8-6に示す。

表3-8-6. 分類器の学習区分.

分類器	画像サイズ(pixel)	Positive画像数	Negative画像数	強分類器個数
A	100×100	7000	3000	20
B			7000	
C	80×80		3000	
D			7000	
E	60×60		3000	
F			7000	
G	60×60	7000	3000	30
H	60×60	7000	5000	20

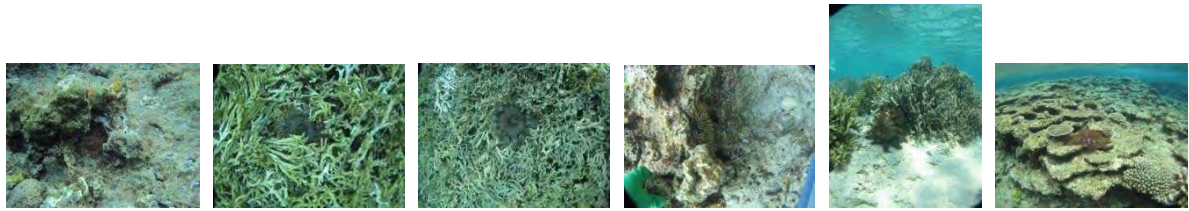


図3-8-24. 検証用画像.

なお、検証用画像は、基本的には昨年度と同じく図3-8-24の6枚を用いている。また、機械学習では、認識過程において様々なサイズの検出枠を用いており、一般にこれらの検出枠は重複するので、重複度が大きい枠のみ残すよう設定するようになっている。今年度は重複度 $T=2$ を基本として比較した。

まず、不正解画像 3000 枚の場合の認識結果例を図3-8-25と3-8-26に示す。これらの結果より、学習用画像サイズを大きくすると誤認識が減る傾向が見られる。

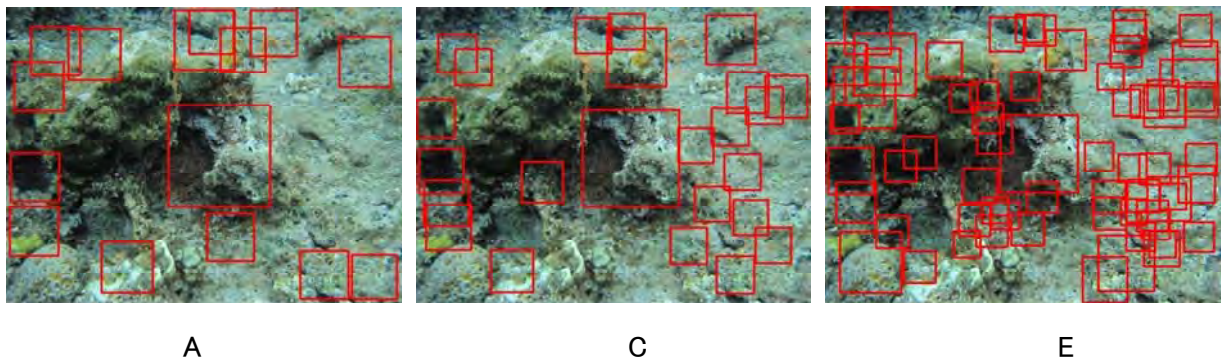


図3-8-25. 画像サイズによる比較: その1 (不正解画像 3000 枚).

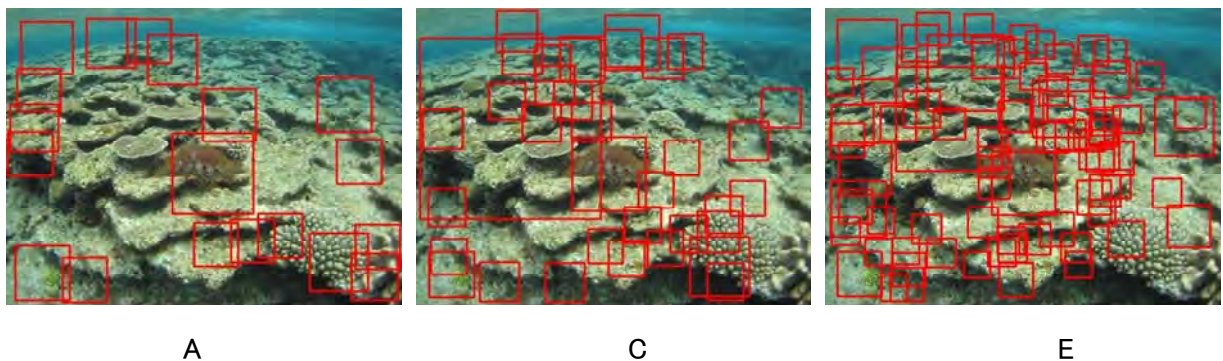
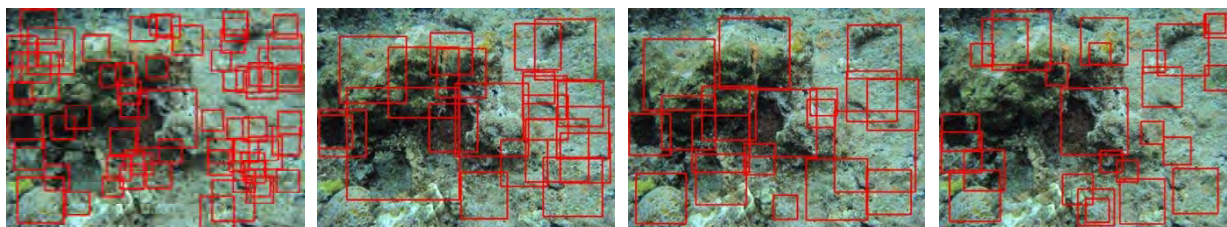


図3-8-26. 画像サイズによる比較: その2 (不正解画像 3000 枚).

つぎに、分類器E(画像サイズ 60×60 pixel、不正解画像 3000 枚、強分類器 20 個)を基準として、不正解画像を 7000 枚に増加した場合(分類器F)、強分類器を 30 個とした場合(分類器G)、誤認識部分を新たに不正解画像として追加した場合(分類器H)の3通りを比較した。認識結果例を図3-8-27と3-8-28に示す。これらの結果より、いずれも方法も誤認識が減る傾向が見られることがわかる。

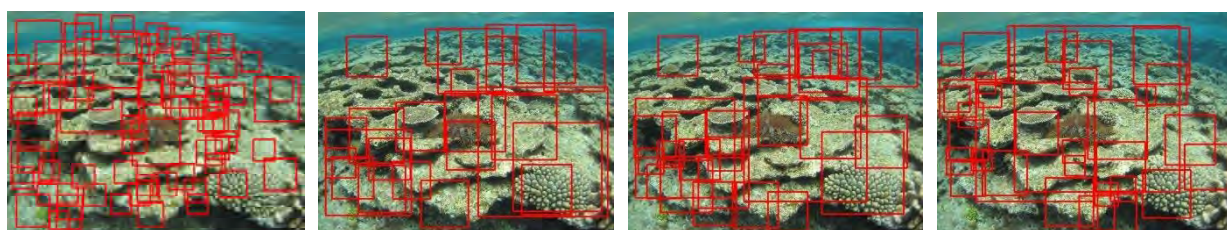
以上より、学習画像サイズ増大、強分類器増加、誤認識部を用いた不正解画像数増加をすべて適用して学習すれば、認識率が向上すると考えられる。

さらに、重複度を大きくした場合の認識状況を図3-8-29と3-8-30に示す。現状では簡単な比較しか実施していないが、重複度を上げると誤認識が減少する傾向が見られる。ただし、重複度を上げすぎると認識できない場合もあるので、今後は適切な重複度を探っていきたい。



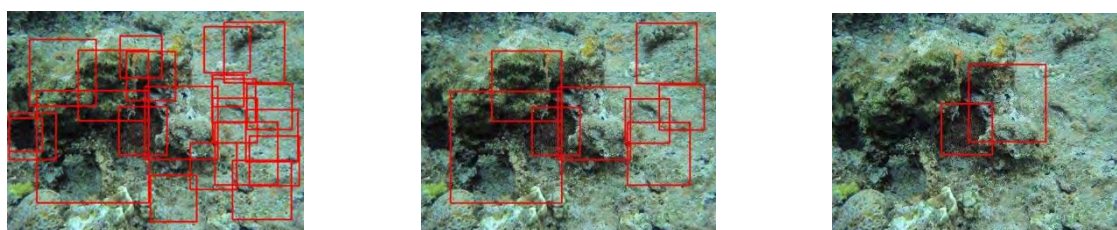
E(不正解画像 3000 枚) F(不正解画像 7000 枚) G(強分類器 30 個) H(誤認識画像追加)

図3-8-27. 各種条件による比較:その1 (60×60(pixel)).



E(不正解画像 3000 枚) F(不正解画像 7000 枚) G(強分類器 30 個) H(誤認識画像追加)

図3-8-28. 各種条件による比較:その2 (60×60(pixel)).

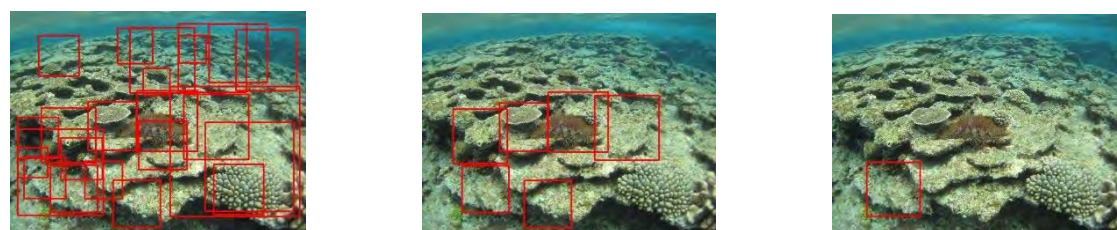


T=2 (分類器 F)

T=15

T=15 (誤認識画像 2000 枚追加)

図3-8-29. 重複度の比較:その1 (60×60(pixel)).



T=2 (分類器 F)

T=15

T=15 (誤認識画像 2000 枚追加)

図3-8-30. 重複度の比較:その2 (60×60(pixel)).

なお、本報告書提出直前に、表3-8-7 (誤認識画像 2000 枚を追加して不正解画像を 9000 枚とし、強分類器を 30 個とした場合) の場合の学習結果が得られたので追記する。図3-8-3

1に6枚の検証用画像(図3-8-24)を適用した結果を示す。最後の画像を除いて、いずれの画像に対しても誤認識領域が極端に軽減するとともにオニヒトデを的確に認識していることがわかる。最後の画像のオニヒトデは正面ではなく斜めから見えており、現状では斜めからの学習用画像は非常に少ないため、認識できなかったと考えられる。以上の結果から、誤認識流域の追加学習と強分類器個数増加は認識率向上に寄与することが確実となり、また、実用的なレベルに近づいたと考えられる。

表3-8-7. 学習済分類器(追加).

分類器	画像サイズ (pixel)	Positive 画像数	Negative 画像数	強分類器個数
I	60×60	7000	7000+ 2000	30



図3-8-31. 分類器 I(不正解画像 9000 枚、強分類器 30 個)を用いた場合の結果.

8-3-3. 今後の予定

まず、機械学習については、学習画像サイズ増大、強分類器増加、誤認識部を用いた不正解画像数増加を複数適用した学習を進めたい。また、重複度についても検討を進めていく予定である。ただし、学習用正解画像の画素数に比例して学習時間は増加し、また、強分類器の個数増加も学習時間が増加するので、学習時間短縮のため、次年度はコンピュータにGPUボードの追加実装が必要であると考えられる。

つぎに、画像処理アルゴリズムによる方法は、現在、機械学習で用いている4台のコンピュータの一つを充てて改善に取り組んでいる。昨年度の問題点は把握できているので、識別精度向上が期待できる。

8-4. サンゴ礁定点観測システムの開発

鈴木 剛（東京電機大学）

8-4-1. 目的

近年、海水温の上昇による白化現象や、オニヒトデ等による浸食被害などの大規模発生の問題から、サンゴ礁生態系の保全・管理が急務となっている。保全活動計画や対応策の立案などには、サンゴの状態変化とその環境要因の長時間かつ継続的な観測が必要不可欠である。現状では、主としてダイバーら人手による観測が行われているが、これには潜水時の肉体的・精神的負荷などによる様々な制限がある。

そこで、本研究では、センサネットワーク技術を用いた海洋生態系観測・記録支援システムを提案している。本システムは、定点センサノードと移動センサノードから構成される。定点センサノードを対象領域の複数地点に設置し、各センサノードが任意の周期で並列的・継続的に定点観測を行う。定点センサノードで観測できない箇所等は、移動センサノードを操作して情報収集を行う。

本課題では、定点観測に用いる定点センサノードの開発、実地機能試験、および、データ収集とその評価を目的とする。前回の報告において、2016年9月に行った実地機能試験の概要、および、9月実験での課題に基づくセンサノードの改良について述べた。その後の進捗として、改良機を用いて2017年1月9～12日に、改良機を用いて琉球大学 熱帯生物圏研究センター 瀬底研究施設にて実地機能試験を行った。

8-4-2. 成果の概要

前回の報告において示した改良定点SNを、図3-8-32に示す。



図3-8-32. 定点SNの外観。

2017年1月9日(月)13:15～10日(火)9:38にかけて図3-8-32に示す定点SNを2台、海中に設置し、複数地点観測の実験を行った。ノードの状態を把握しやすいよう、3[m]ほどの距離を隔てたキクメイシ状のサンゴとテーブル状のサンゴをターゲットとして定点SNを設置した。各定点SNの間欠稼働間隔は30分、1回の動作で50回のデータ取得を行った。設置した定点SNの様子と取得画像の例を図3-8-33に示す。取得画像のターゲット左側にある緑の3点はレーザーポインタのスポットである。



図3-8-33. 定点 SN の 2 地点への設置と取得画像例.

本実験より、改良版の定点 SN を用いて、間欠稼働や、各稼働時の画像、温度、加速度、GPS データの取得などの基本動作を確認できた。また、2 地点（複数個所）への設置とデータ取得が可能であり、各定点 SN の情報のサーバへの回収も可能であった。定点 SN は、およそ 20 時間の稼働を行ったが、SN 回収時のバッテリー残量は約 70%であり、間欠稼働間隔の調整により更に長時間の稼働が可能と考えられる。

また、定点 SN の連続稼働での状態を確認するため、1 月 11 日(水)に、定点 SN を、およそ直径 45cm のククメイシをターゲットに再設置し、間欠稼働は行わず 13:30~15:01 まで 5[sec]間隔で継続してデータ取得を行った。取得データ例を図 3-8-34 に示す。



(a) 定点 SN で取得した連続画像の一部

定点SN ID	温度 [°C]	加速度データ					画像データ		GPSデータ(GPRMCフォーマット)												
		Roll [deg]	Pitch [deg]	X軸 [m/s ²]	Y軸 [m/s ²]	Z軸 [m/s ²]	ファイル名	ファイルサイズ [byte]	\$GPRMC	50018	A	2638.1392	N	12751.9146	E	0.15	58.88	110117			D*55
S01	24.66	-90	77.9	-0.98	-0.3	1.07	S01_2017.01.11.14.0011.000002.White.jpg	330494	\$GPRMC	50031	A	2638.1391	N	12751.9148	E	0.14	234.76	110117			D*6B
S01	24.68	-57.8	69	-0.93	-0.3	1.12	S01_2017.01.11.14.0024.000001.White.jpg	342801	\$GPRMC	50044	A	2638.1383	N	12751.9149	E	0.18	129.51	110117			D*6D
S01	24.67	-90	71.4	-0.95	-0.36	1.07	S01_2017.01.11.14.0037.000001.White.jpg	338225	\$GPRMC	50057	A	2638.1361	N	12751.9148	E	0.13	182.92	110117			D*69
S01	24.67	0	90	-1.21	-0.27	1.09	S01_2017.01.11.14.0050.000001.White.jpg	333279	\$GPRMC	50110	A	2638.1374	N	12751.914	E	0.19	279.78	110117			D*60
S01	24.68	-90	68.5	-0.93	-0.37	1.09	S01_2017.01.11.14.0103.000001.White.jpg	337693	\$GPRMC	50123	A	2638.1378	N	12751.9141	E	0.49	350.31	110117			D*6F

(b) 連続画像に対応するセンサデータ

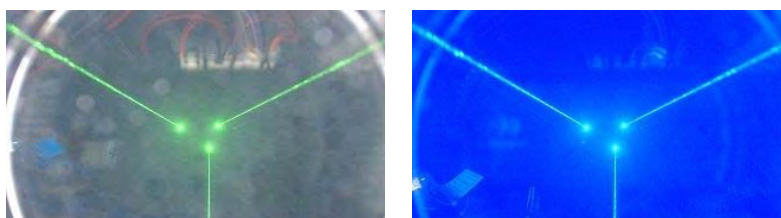
図3-8-34. 連続稼働時の取得データ.

図 3-8-34 より、前述の実験と同様、画像、温度、加速度、GPS データの取得が、連続稼働でも安定して動作することが確認できた。観測対象や観測目的に応じて、間欠動作や連続稼働などの運用方法の変更も可能と考えられる。

日中では、図 3-8-33 に示すようにターゲットの画像を取得できた一方で、図 3-8-35 は、9 日夜間に取得した画像例であるが、各種データの取得および画像撮影はできたものの、水密容器内の映り込みが強く、鮮明な海中画像を取得できなかった。これは、カメラが LED 照明より後方にあったため、夜間では容器の映り込みにフォーカスして撮影したためと考えられる。なお、今回の定点 SN には偏光フィルタ等を取り付けていないため、青色 LED 照明で撮影した画像は、画像全体が照明光の色になっている。

図 3-8-34 の結果から、定点 SN 内部の機器配置を再検討し、LED 照明をカメラ後方に配置した。修正を行った定点 SN を、1 月 11 日 19:11~12 日 10:30 まで海中に設置し、夜間のデータ取得実験を行った。間欠稼働の間隔を 30 分、1 回の動作で 50 回のデータ取得を行うよう動作を設定した。

この実験においても、間欠稼働と、各稼働時の画像、温度、加速度、GPS データの取得を確認できた。図3-8-36に、撮影画像の例を示す。この画像より、現状の構成で、夜間の撮影においてターゲットのサンゴが認識できることが確認できた。図3-8-35と同様に青色 LED 照明で撮影した画像は、画像全体が照明光の色になっているが、サンゴの一部の蛍光は確認できた。今後、照明の調整やフィルタなどを通した蛍光画像のみの取得を行う。



(左)白色 LED 光を用いた撮影、(右)青色 LED 光を用いた撮影

図3-8-35. 夜間撮影画像の例(1).



(左)白色 LED 光を用いた撮影、(右)青色 LED 光を用いた撮影

図3-8-36. 夜間撮影画像の例(2).

以上、各実験により定点 SN の基本機能と安定動作を確認できた。一方で、各実験での取得画像からは定点 SN の揺動が見られ、カメラの画角内にターゲットを捕らえられていない画像も多かった。現状では、定点 SN は、錘とベルトによる3点設置を行っているが、水位や水流の影響によりセンサノードの揺動が起こる。今後、設置方法の再検討や、画像処理によるターゲットの補足などを検討する。

海上でのデータ通信状況を確認するため、WiFi、LTE の各通信品質の計測を行った。図3-8-37に計測結果を示す。

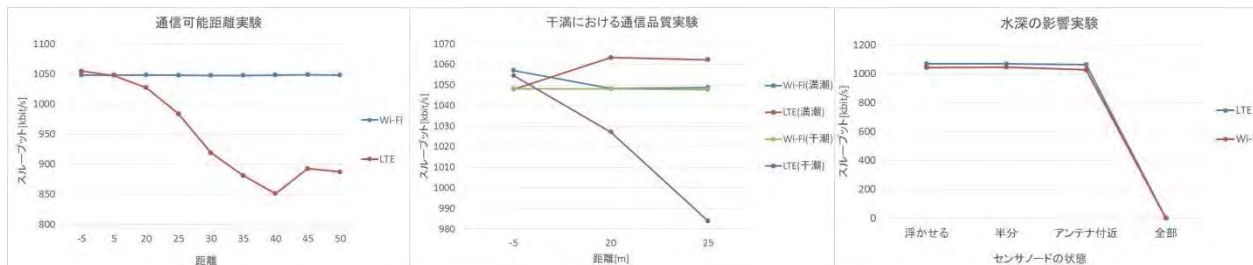
図3-8-37(a)は、陸地に設置した基地局から沖に向かって海上のSNの位置を移動したときの、各距離におけるスループット(単位時間当たりの通信容量)を計測したものである。Wi-Fi、LTE とも、近距離では0.8~1.0[Mbps]の通信が可能であり、この範囲であれば画像を含むデータ転送を問題なく行えることが確認できた。また、LTE の通信範囲はより広範であるが、時間帯によって通信状態が変動するため、近距離であればWi-Fiのほうが安定していることが分かった。

図3-8-37(b)は、同一地点の定点 SN の通信状態を、干潮時と満潮時にそれぞれ計測したものである。海上では、水位の変化により、水上に露出している定点 SN の通信ユニットのアンテナ高さが変化する。満潮時は、陸上の基地局と定点 SN のアンテナ距離が短くなるため、Wi-Fi 通信が安定していると考えられる。

定点 SN の通信ユニットとセンサユニットは錘により固定されているが、干満の差が大きい場合は通信ユニットも水没する。そこで、アンテナの水没状況による通信状態を確認した。図3-8-37(c)

は。通信ユニットのアンテナが水中に没している度合いによる通信状態の変化を示している。当然ながら、アンテナが完全に水没した場合は通信は不可能であるが、アンテナ付近までの水没であれば通信は可能であることが確認できた。

以上の結果より、基地局からの定点 SN の設置範囲や、観測時間帯の水位の変化などに応じて、通信品質の高い通信方式を選択し運用するなどの対応が考慮できる。



(a)沿岸からの距離に対する変化 (b)干満の差による変化 (c)アンテナの水没度合いによる変化
図3-8-37. 海上での定点センサーの通信特性.

8-4-3. 今後の予定

今回の実験では、これまでより長時間の稼働と動作の安定性が確認できたが、実験 3 日目において各ユニットに浸水が見られた。水密容器を密閉する圧力フレームの一部に樹脂部品を用いているが、これらの割れや変形により密閉力が弱まったためと考えられる。今後、圧力容器の各部を金属部品へ変更するなどの対応を図る。

引き続き実地機能試験を行い、定点センサーの課題抽出、必要機能の追加および動作確認、計測精度等の評価を行うとともに、天候への対応なども含め、定点 SN による長時間観測方法について検討する。また、観測対象領域への簡易かつ確実な設置展開方法の検討、水位の変化への対策、観測情報のデータベース化や複数地点観測情報の総合的な分析手法など、より実際の運用への対応を進める予定である。

9. 研究総括

岡地 賢（コーラルクエスト）

9-1. 研究計画とスケジュール

オニヒトデ総合対策事業における調査研究の目的は、研究コンソーシアムとの連携のもと、オニヒトデが大量発生するメカニズムを明らかにし、人為的要因が関与しているならば、それらを低減または除去する抜本対策を検討することである。

初年度にあたる平成24年度に過去の研究成果をレビューし、大量発生の要因として特に重要な、水質（幼生期の餌）、海流（幼生分散）、捕食者（稚ヒトデ期の生残）、サンゴの量（稚ヒトデの餌と成長）の相対的な重要性を評価するための研究課題および研究計画を定めた。その計画に基づいて平成25年度に10件の研究課題に着手、平成26年度には新規の課題2件を追加した。これら12件のうち2件は26年度で終了とし、平成27年には別の2件を新たに追加して合計12件の研究課題を実施した。これらのうち2件は同年に終了し、平成28年に実施した研究課題は10件であった。

研究課題ごとの平成25年度から29年度までの実施スケジュール（以下、スケジュールと省略）を表3-9-1にまとめた。表中では平成28年度分として12件の研究課題が掲げられている。これらのうち2件、II-A-1（海流：流動解析）とIV-A-2（大量発生要因時間空間解析）は実質的な独立課題としていない。前者は既存の海流データを利用してIV-A-1（統計モデリング）のなかで実施した。後者はIV-A-1（統計モデリング）に恩納村の駆除データを提供する作業であるため、やはりIV-A-1に含めている。

各課題の目標および実施概要は表3-9-2にまとめた。これら課題で計画していた野外調査や試験・実験等はすべて平成28年度内に完了し、これまでと同様、沖縄県でのオニヒトデ大量発生要因に重要な示唆をあたえる研究結果が得られた。次項目に大量発生メカニズム解明に関する課題の進捗、成果概要と平成29年度に向けた検討事項を概説する。

9-2. 調査研究の成果と次年度に向けた課題

今年度に実施した10件の調査研究はいずれも将来の沖縄県におけるオニヒトデ対策につながるものであるが、ここでは、オニヒトデ大量発生「幼生生き残り仮説」をめぐる最近の議論をふまえて、沖縄県における大量発生メカニズム解明にむけて次年度にどのような課題に取り組むべきかを述べたい。

本事業が開始された平成24年頃、グレートバリアリーフでは再びオニヒトデが大量発生していることが明らかとなり、以後5年間にわたってAIMS（オーストラリア海洋科学研究所）をはじめとする複数の機関で「幼生生き残り仮説」に関連する調査研究が行われるようになった。それらの成果は昨年ハワイで開催された国際サンゴ礁学会でのオニヒトデセッションと、その参加者が主体となって投稿・編集した学術雑誌”Diversity”のオニヒトデ特集号で公表されている。

Fabriciusら（2010）が発表した、植物プランクトンの増殖でクロロフィル量が $0.25\mu\text{g/L}$ 以上に増加することが大量発生の引き金になるという「幼生生き残り仮説」に対して、現在は2とおりの見解が存在している。オニヒトデ幼生は自然状態の低い餌密度でもゆっくりとだが着底まで成長できるので栄養塩流入による植物プランクトンの増殖が必ずしも大量発生の要因とはならないという説と（Wolfe et al. 2017）、従来どおりの幼生生き残り仮説を一次発生仮説として支持するとともに、降雨期に恒常的に起きる栄養塩流出でも二次発生が悪化するので栄養塩流出の影響 という説である（Brodie et al. 2017）。

Wolfeら（2015）は飼育下のオニヒトデ幼生がクロロフィル量 $0.1\mu\text{g/L}$ 付近の低い餌密度でも3~5週間で着底に至ることを報告した。Pratchettら（2017）の飼育実験でも同様な結果が得られた。これらの実験結果は、オニヒトデ幼生はきわめて貧栄養な外洋域では餌料制限をうけて死滅するものの、クロロフィル量が $0.1\sim 0.5\mu\text{g/L}$ の範囲で推移する沿岸域では一定数の幼生がつねに生き残ることを示し、餌が増えることによる幼生期の生残よりもむしろ偶発的な同調産卵や（Babcock et al. 2016）幼生の滞留（Black and Moran 1991）、稚ヒトデの捕食者の減少（Sweatman 2008）が大量発生の引き金であることを示唆している。対してBrodieら（2017）は、過去の一次発生がつねに大規模な洪水イベントの数年後に始まることを示すとともに、大量発生集団から産み出される幼生が、通常の規模の降雨で栄養塩が流入した海域を通過することでその後の二次発生が維持されることを水質データ、衛星データと流動シミュレーションで示した。

1980年代から1990年代にかけてもオニヒトデ研究者の間で同様な議論があったが、そのときも今回も、「幼生生き残り仮説」に対して賛否がわかるのはオニヒトデ幼生の摂餌生態でわかっていることから推測する野外の状況と、野外で観測される実際の現象との間にギャップが存在するためである。このギャップはけっして埋められないものではない。例えば、Wolfeらの実験では単一の培養藻が餌として使われ、幼生が成長できる最低量がクロロフィル量にして $0.1\mu\text{g/L}$ だと報告されたが、これとおおむね等量の植物プランクトンを含む天然海水の合計クロロフィル量は「幼生生き残り仮説」で生残範囲とされる $0.3\mu\text{g/L}$ 前後だと考えられる（Brodie et al. 2007）。また、バヌアツやハワイなど、クロロフィル量がつねに低いと考えられていた場所でオニヒトデの大量発生が起きたときは、深海からの湧昇流や北方海域からの冷水塊など、栄養塩のインプットがあったことがわかっている（Houk et al. 2007, 2010）。「幼生生き残り仮説」をバイアスなく検証するためには、幼生がどの餌を食べていて、その餌がどのくらい野外に存在しあるいは変動しているのかを正確に把握しなくてはならない。

平成 28 年度に実施した調査研究の成果として特筆すべきはつぎの 4 点である。いずれも沖縄県のオニヒトデ大量発生仮説の組み立てに重要な示唆をあたえる研究結果として今後の進展が期待できる。

- (1) これまでの水質モニタリングでは、沖縄本島沿岸域の植物プランクトン密度（クロロフィル量）はオニヒトデ幼生が生残できる下限にちかいと考えられていた。しかし、幼生餌料研究により植物プランクトン以外の有機物粒子（POM）も餌として利用可能であることが明らかとなったため、死亡した植物プランクトンの指標であるフェオフィチン量を測定したところ、平均でクロロフィルの約 1.8 倍存在し、半数程度の幼生が生残できるレベルにあることがわかった。
- (2) 生物態有機物を含んだ自然海水で培養した幼生の方が、加熱処理をした海水で培養した幼生より成長し、より多くの餌を同化していたことがわかった。これは非生物態有機物（デトリタス）よりも生物態有機物がオニヒトデ幼生の成長および生存により貢献していることを示している。また、幼生にとってデトリタスは利用しづらい、または積極的に捕食しない有機物であるが、同位体比の変化よりその同化は可能であることもわかった。さらに、自然海水と培養藻類を添加した海水では、自然海水の平均クロロフィル濃度が低いにも関わらずより高い成長率を示していたことから、単一の餌（培養藻類）よりも多様な餌（天然藻類、鞭毛虫、バクテリアなど）を含む自然海水の方が餌としての質が高いことが明らかとなった。
- (3) オニヒトデの親個体から受け継いだ、受精卵および孵化直後の幼生に豊富に含まれる脂肪酸（長鎖脂肪酸やステロール類）の存在比は発達がすすんだビピンナリア幼生とブラキオラリア幼生で顕著に小さくなり、脂肪酸が初期発生の際に利用されていることが明らかとなった。しかし、低い餌環境下でも成長が認められた後期ビピンナリアと、さらに変態が進行した初期ブラキオラリアの幼生に含まれる脂肪酸組成に顕著な差異は認められず、また、同じ時期に十分な餌を摂取できなかった幼生で卵からの窒素同位体比の変化がなかったことから、幼生期中頃以降で成長を制限している要因は脂肪酸ではなく、アミノ酸やその他の必須化合物が制限している可能性が示唆された。
- (4) 過去 17 年分の幼生分散シミュレーションを行ったところ、広い海域間で幼生のコネクティビティが成立しているものの、沖縄本島内、宮古諸島内、八重山諸島内でより高い傾向にあることがわかった。また、オニヒトデ成体、サンゴ被度、幼生シミュレーションの結果を組み合わせた個体群動態シミュレーションでは、定常の低密度状態のオニヒトデ個体群から大発生が起りうるということが解析的に示された。これらの結果から、オニヒトデの大量発生は南方海域からの過剰な幼生供給によって引き起こされたというよりは、沖縄県内に低頻度に生息していた成体がソース個体群となったと解釈できる。これに関連する環境の変化として、2002 年以降の全般的なクロロフィル濃度の増大の影響が考えられる。

本事業の水質研究では、植物プランクトンの増殖によってオニヒトデの大量発生が引き起こされるという「幼生生き残り仮説」が沖縄県にもあてはまるかどうかを検証することを目的とし、オニヒトデが慢性的に発生している沖縄本島西海岸で栄養塩量とクロロフィル量を測定する水質モニタリングを行ってきた。平成 26 年度までの結果により、本島西海岸のクロロフィル量は

オニヒトデ幼生が生残可能と考えられている領域 ($0.25 \mu\text{g/L}$ 以上) に一時的には達するが、多くの場合はそれより低いことがわかった。平成 27 年度はサンプリング地点数を減じ、代わりにオニヒトデの産卵期に集中的にモニタリングを実施した。その結果、やはりクロロフィル量はおおむねオニヒトデ幼生が死滅するか、または生残に影響する範囲であることがわかった。一方で、同年から実施している幼生餌料研究ではオニヒトデ幼生が海水中の POM (懸濁態有機物粒子) を捕食・同化していることを示す結果が得られたため、平成 28 年度の水質モニタリングでは植物プランクトンの死骸を示すフェオフィチンもクロロフィルと同時に測定したところ、平均でクロロフィルの約 1.8 倍存在することがわかった。これは、生きた植物プランクトンと同様に幼生が餌として利用できるならば、半数あるいはそれ以上の幼生が生残できるレベルである。オニヒトデ幼生が植物プランクトンの死骸をどの程度利用できるか、また、クロロフィルに代わる餌の指標として何を使うべきか、水質モニタリングで得られたデータと幼生餌料研究の結果とあわせて検討することが平成 29 年度の目標のひとつとなる。

近年、クロロフィル量の低い海域でもオニヒトデの大量発生が起きる例が世界各地から報告されており (Lane 2012; Miller et al. 2015; Roche et al. 2015)、幼生が生残に必要なとする餌の量が従来考えられていたよりも少ないか、または植物プランクトン以外に利用できる餌の存在が指摘されている (Wolf 2015, 2017)。平成 27 年度の幼生餌料研究では、植物プランクトン以外の POM を幼生が実際に捕食・同化することが過年度の研究で確認されており (Nakajima et al. 2016)、それら POM が野外でも補助的な餌として重要であることが今年度の飼育実験でも明らかとなった。これらの結果から、フェオフィチンを含む植物プランクトン死骸も有用な餌であると予想されたが、加熱処理により人工的に作り出した植物プランクトンの死骸やデトリタス (懸濁態有機物粒子) を与えた幼生の同位体比は餌の同位体比にはさほど近付かず、量に比例して利用するほどではないようである。ただし、加熱処理によりタンパク質や脂質が変成して利用できなかった可能性もあるため、生きた植物プランクトンを吸引濾過や冷凍処理により破砕するなど別の方法での確認作業が必要になるだろう。

幼生餌料研究のもう 1 つの目的は、オニヒトデ幼生が野外の多様な餌のうちどの画分を利用するかを調べるために、卵から受け継いだ栄養素の一つである必須脂肪酸と、外部から与えられた植物プランクトンから得た必須脂肪酸がどのような組成としてどのように置きかわっていくのかをトレースすることであった。受精卵と孵化直後で捕食を開始する前の幼生の脂肪酸組成は極めて類似しており、長鎖脂肪酸やステロール類が豊富に存在していた。これらの脂肪酸存在比はピピンナリア幼生とブラキオラリア幼生で顕著に小さくなったため、捕食を開始する初期発生までに利用され代謝されていることが明らかとなった。Caballes ら (2017) は栄養状態を変えて飼育した (=与えるサンゴの種類と量を変えた) 複数のオニヒトデの雌個体から受精卵を得て幼生中期まで飼育したところ、ミドリイシや数種のサンゴを混合して与えた雌個体から得た幼生は、ハマサンゴだけ与えた雌個体や餌を与えず飼育した雌個体から得た幼生よりも少ない餌でよく成長したと報告した。脂肪酸と特定はしていないが、Caballes らは雌個体から卵が受け継いだ栄養が幼生の成長に重要だと述べている。また、AIMS での幼生飼育実験でも、脂肪酸を多く含む培養藻で飼育した幼生のほうが成長、生残とも良いということであった (Uthicke 私信)。もし、雌個体からの栄養や培養藻の脂肪酸が、本研究で存在をつきとめた脂肪酸と同じであるならば、それらは発生初期以降も幼生の成長にとって重要かもしれない。研究報告のなかでも述べられて

いるアミノ酸組成とあわせて、野外のどの画分から脂肪酸を得ているかは引き続き調べるべき課題だと思われる。

オニヒトデの幼生生き残り説をめぐる議論で注目されているもう1つの要因は海流である。グレートバリアリーフでは過去の大量発生がつねに同じ海域（南緯16°付近）から周期的に始まっていた。Wooldridge and Brodie (2015)はこの周期に着目し、グレートバリアリーフに面した北部クイーンズランド州沿岸における多雨による洪水イベント時の水質データと海流シミュレーションモデルとを組み合わせ、ENSO（エルニーニョ・南方振動）で流動が弱まった年にオニヒトデ幼生が富栄養化した水塊中のサンゴ礁に滞留することが大量発生の引き金であることを示した。かれらの解析結果は、クイーンズランド州で比較的頻繁に起きる洪水によりサンゴ礁付近の海水が富栄養化しても、そこへ幼生が運搬されてこなければ大量発生は起きにくい、つまり、海流変動が餌と同じように重要な要因であることを示唆している。

本事業の統計モデリングでは既報の海流データを用いて沖縄県内でオニヒトデが相対的に多い場所どうしのコネクティビティを調べている。このアプローチはWooldridge and Brodieの物理シミュレーションとは違い、海流に乗った幼生がどこへ向かう確率が高いかを計算によって求めるものである。過去17年分の実際の海流データ、クロロフィル量データとそれに対応する幼生の生残率に基づく計算により、島嶼内のセルフシーディング傾向が強いことと、それがクロロフィル量の上昇によって増幅されている可能性が示されたことは沖縄での幼生生き残り仮説の評価においてきわめて重要な成果である。さらには、幼生加入から個体数形成までの過程もモデル化できており、オニヒトデ大量発生の複数のシナリオを組み立てたうえで、その中からもっとも現実的なものを選択してゆく作業が平成29年度のおもな課題になるとと思われる。

9-3. 学会発表等

平成25年から28年2月までに、オニヒトデ総合対策事業で実施した調査研究の対外発表リストを表3-9-3にまとめた。調査研究が主軸のひとつとなっている本事業では、過去4年間で多くの成果が国内外の学会や学術雑誌に発表された。今年度は国際サンゴ礁学会（平成28年6月、ハワイ・ホノルル市）でオニヒトデを主要テーマにしたセッションが催され、沖縄県オニヒトデ総合対策事業協同企業体メンバーの岡地が共同座長となって本事業の研究コンソーシアムメンバー4名（4件）の発表をアシストした。ほかにも、日本機械学会（平成28年6月）、日本ロボット学会（10月）、第40回沖縄産業まつり（10月）、日本サンゴ礁学会（12月）など7つの学会で口頭発表（2件）とポスター発表（6件）が行われた。また、査読付き論文は合計6編発表され、そのうち1編は本事業で沖縄県と協定をむすんでいるオーストラリア国立海洋科学研究所（AIMS）との共同研究の成果である。

<参考文献>

- Caballes CF, Pratchett MS, Buck ACE (2017) Interactive effects of endogenous and exogenous nutrition on larval development for Crown-Of-Thorns Starfish. *Diversity*. 9:15. doi:10.3390/d9010015
- Babcock RC, Milton DA, Pratchett MS (2016) Relationships between size and reproductive output in the crown-of-thorns starfish. *Mar. Biol.* 163:234. <http://dx.doi.org/10.1007/s00227-016-3009-5>.
- Black KP, Moran PJ (1991) Influence of hydrodynamics on the passive dispersal and initial recruitment of larvae of *Acanthaster planci* (Echinodermata:Asteroidea) on the Great Barrier Reef. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 69:55-65.
- Brodie J, De' ath G, Devlin M, Furnas M, Wright M (2007) Spatial and temporal patterns of near-surface chlorophyll a in the Great Barrier Reef lagoon. *Mar. Freshw. Res.* 58: 342-353.
- Brodie J, Devlin M, Lewis S (2017) Potential enhanced survivorship of Crown of Thorns Starfish larvae due to near-annual nutrient enrichment during secondary outbreaks on the central mid-shelf of the Great Barrier Reef, Australia. *Diversity*. 9: 17. doi:10.3390/d9010017
- Fabricius KE, Okaji K, De' ath G (2010) Three lines of evidence to link outbreaks of the crown-of-thorns seastar *Acanthaster planci* to the release of larval food limitation. *Coral Reefs*. 29:593-605.
- Houk P, Bograd S, van Woesik R (2007) The transition zone chlorophyll front can trigger *Acanthaster planci* outbreaks in the Pacific Ocean: Historical confirmation. *J. Oceanogr.* 2007, 63, 149-154.
- Houk P, Raubani J (2010) *Acanthaster planci* outbreaks in Vanuatu coincide with ocean productivity, furthering trends throughout the Pacific Ocean. *J. Oceanogr.* 2010, 66, 435-438.
- Lane DJ (2012) *Acanthaster planci* impact on coral communities at permanent transect sites on Bruneian reefs, with a regional overview and a critique on outbreak causes. *J. Mar. Biol. Assoc.* 92: 803-809.
- Miller I, Sweatman H, Cheal A, Emslie M, Johns K, Jonker M, Osborne K (2015) Origins and implications of a primary Crown-of thorns starfish outbreak in the Southern Great Barrier Reef. *Mar. Biol.*
- Nakajima R, Nakatomi N, Kurihara H, Fox MD, Smith JE, Okaji K (2016) Crown-of-thorns starfish larvae can feed on organic matter released from corals. *Diversity* 8:18. <http://dx.doi.org/10.3390/d8040018>
- Pratchett MS, Dworjanyn S, Mos B, Caballes C, Thompson CA, Blowes S (2017) Larval survivorship and settlement of Crown-of-Thorns Starfish (*Acanthaster cf. solaris*) at varying algal cell densities. *Diversity*. 9:2. doi:10.3390/d9010002

- Roche RC, Pratchett MS, Carr P, Turner JR, Wagner D, Head C, Sheppard CRC (2015) Localized outbreaks of *Acanthaster planci* at an isolated and unpopulated reef atoll in the Chagos archipelago. *Mar. Biol.* 162, 1695-1704.
- Wolfe K, Graba-Landry A, Dworjanyn SA, Byrne M (2015) Larval starvation to satiation: influence of nutrient regime on the success of *Acanthaster planci*. *PLoS One*. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0122010>
- Wolfe K, Graba-Landry A, Dworjanyn S, Byrne M (2017) Superstars: Assessing nutrient thresholds for enhanced larval success of *Acanthaster planci*, a review of the evidence, *Marine Pollution Bulletin*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.079>
- Wooldridge SA, Brodie JE (2015) Environmental triggers for primary outbreaks of crown-of-thorns starfish on the Great Barrier Reef, Australia. *Marine Pollution Bulletin*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.08.049>

表3-9-1. オニヒトデ大量発生メカニズム解明に係る調査研究事業の実施スケジュール(平成28年度).

テーマ	研究分野	研究課題	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	備考・変更点等	
I 水質	A 栄養塩変動	1 栄養塩濃度調査	本島西岸中心に通年・広範囲	本島西岸中心に通年・広範囲	主要13地点で採水	主要17地点で採水	水質 とりまとめ	H28年度は前年度のオニヒトデの発生状況を考慮し、採水地点を17とした。(H25年から継続している9地点を含む)	
		2 流出源評価		GIS構築・データ入力	GISデータ更新・追加				
	B 植物プランクトン変動	1 クロロフィル分布調査	栄養塩と同地点・採水とCTD	栄養塩と同地点・採水とCTD	主要13地点(2地点で高頻度)	主要13地点(2地点で高頻度)		調査地点は栄養塩と同一。H28からクロロフィルaに加え、クロロフィルaが壊れて生成されるフェオフィチンaも測定した。	
		2 クロロフィル衛星データ解析	衛星画像の取得・解析手法検	画像解析試行	画像追加・解析				
II 幼生分散	A 海流	1 流動解析			分散パターンの試行計算	データ追加・モデル改善	幼生分散 とりまとめ		IV-A-1 統計モデリングのなかで実施。公表されている海流データを用いてオニヒトデ幼生の分散方向を試行的に推定する。
	B メタ個体群	1 集団遺伝解析	県内各地の集団を解析	遺伝子流動の方向性を推定					
		2 コネクティビティ	着底場所特定+GPSプイ	着底場所特定+GPSプイ	プランクトンサンプリング	プランクトンサンプリング			
	C 幼生生態	3 幼生餌料制限			同位体比分析による餌料特定	生残に必要な餌要求量の推定		幼生生き残り仮説で提唱されている幼生の餌料要求量を、同位体比分析を中心とする新しい手法で推定する。	
III 個体群プロセス	A 個体群動態	1 稚ヒトデ調査	恩納村沿岸	恩納村沿岸	恩納村沿岸	北谷町沿岸	個体群動態 とりまとめ	稚ヒトデモニタリングは毎年9月～12月を中心に行う。	
		2 成体個体群調査	沖縄県全域とモデル海域	沖縄県全域とモデル海域	沖縄県全域とモデル海域	沖縄県全域とモデル海域		推定した成長式が、恩納村の駆除個体の直径変化と合致するかどうか調べる。	
		3 サンゴモニタリング	沖縄県全域とモデル海域	沖縄県全域とモデル海域	沖縄県全域とモデル海域	沖縄県全域とモデル海域		成体個体群調査を実施している2地点(恩納村万座と北谷町砂辺)において、年1回のサンゴ被度調査を実施。	
IV 大量発生予察	A 大量発生パターン解析	1 個体群統計モデリング	既存データに基づいてモデル化	モデル改善検討	モデル改善検討	調査研究成果を加え再モデル	大量発生予察 とりまとめ	恩納村の駆除データにもとづき個体群変動を推定する。	
		2 大量発生要因時間・空間解析		GIS構築・データ入力	データ追加・更新	データ追加・更新		IV-A-1 統計モデリングの付随課題。恩納村の駆除データをGISデータ化する。	
V 効果的防除	A 駆除手法	1 注射駆除効果検証		酢酸注射効果検証室内実験			効果的防除 とりまとめ	着生誘引物質の質量分析とトラップ改善をすすめる。	
	B モニタリング手法	2 モニタリングロボット開発			搭載機器・システム試験	搭載機器・システム試験		H28は航行・画像処理・観測通信など、モニタリングロボットに搭載される予定の各種機器やシステムの設計、製作および試験を行った。	
	C 研究成果とりまとめ	3 成果発表抜本対策検討			サンゴ礁学会での発表	総合まとめ・シンポ開催		中間年度にはサンゴ礁学会等で、最終年度にはシンポジウムを開催して成果を発表する。	

表3-9-2. 平成28年度調査研究課題、目標、コンソーシアムメンバーおよび結果概要

No	研究課題	平成28年度の目標	コンソーシアムメンバー	成果概要
1	栄養塩濃度調査	オニヒトデの繁殖期を中心とした、本島西海岸沿岸における栄養塩濃度変化の把握	沖縄県 衛生環境研究所 JV	オニヒトデ幼生の餌となる植物プランクトンの指標であるクロロフィル量と栄養塩濃度（窒素やリン）のモニタリングを沖縄島西海岸で実施した。調査地点数は、過年度までの水質調査結果およびオニヒトデ幼生の発生地域を考慮し、13地点から17地点に変更した。分析項目は11項目（TN, DTN, DIN, TP, DTP, DIP, 濁度, TOC, DOC）とした。
2	クロロフィル分布調査	オニヒトデの繁殖期を中心とした、本島西海岸沿岸におけるクロロフィル量変化の把握	沖縄県 衛生環境研究所 JV	オニヒトデ幼生は植物プランクトン以外の有機物粒子も捕食することがわかったため、今年度からクロロフィル量（Chl. a）とともに、クロロフィルが壊れて（=植物プランクトンが死亡して）生成されるフェオフィチン量（Pheo. a）も測定した。今年度測定したChlの平均値は0.19 µg/Lと過年度と同様に低いレベルであったが、Pheoは0.36 µg/Lであった。Pheo. aはChl. aの平均1.86倍存在することから、沿岸域において植物プランクトン由来の餌条件は危険領域ではないことがわかった。
3	コネクティビティ	沖縄島西海岸におけるプランクトンサンプルによってオニヒトデ幼生の分布状況を把握	JV	H27年度に本島西海岸の広い範囲でプランクトンサンプルを採集したが、ネットの目詰まりにより濾水量が低下して十分な量のサンプルを採集することができなかった。H28はネットの目合を約2倍にし、船で曳くことで1サンプル分の濾水量を100m3前後まで増加させた。8月末までに16地点で合計125サンプル採取し、うち25サンプルから合計42個体のヒトデ幼生が検出され、DNA相同性検索により3個体がオニヒトデ幼生と確認された（幼生密度は0.2または0.4/m³）。これらの幼生は6月21日と29日に採取された時点でピピンナリア期であったことから、今年の産卵は通常より早かったと思われる。
4	幼生餌料制限	異なる餌料環境下での飼育実験により、野外でのオニヒトデ幼生の餌料要求量の推定	山本修一・中富伸之 （創価大学） 中嶋亮太（SCRIPPS） JV	H27にオニヒトデ幼生が有機物粒子（POM）を補食・同化することが確認されたため、今年度はPOMのどの画分の有機物を幼生が利用しているか、特にデトリタスの餌資源としての重要性を評価する実験を行った。主軸となる飼育実験は、0.2 µm、0.7 µm、20 µmのフィルターで濾過した自然海水、20 µmフィルター濾過海水を中熱処理した海水、培養藻を加えた0.7 µm濾過海水とそれを熱処理した海水のそれぞれで幼生を飼育し、数日ごとに発達段階を記録するとともに同位体比分析用サンプルを採取した。幼生の成長は、20 µm濾過自然海水中のほうが、培養藻添加0.7 µm濾過海水中より良好であったが、前者のほうがクロロフィル量は低いことからPOMやデトリタスなど植物プランクトン以外の餌も重要であることがわかった。
5	稚ヒトデ調査	恩納村と北谷町での稚ヒトデ集団の密度変化と成長率の把握	JV	H25年度からH27年度にかけて継続してきた稚ヒトデ密度調査では、調査の時期によって個体発見数が変動し、あるいは発見数が少なすぎて密度の推定ができないことがあった。今年度は調査時期を12月～1月に限定して新鮮な食痕を観察する方法で死亡率を推定した。約8週間にわたる5回の観察の結果得られた1日当たり死亡率は0.93%であった。
6	オニヒトデ成体個体群調査	県内各地におけるオニヒトデ個体群密度調査	酒井一彦 （琉球大） JV	7月～8月に沖縄本島・慶良間・久米島の28地点で目視観察によるオニヒトデ成体および食痕密度調査を行った。慶良間、久米島ではほとんどオニヒトデはみられず、本島でも恩納村海域でオニヒトデ個体密度・食痕密度とも減少したが、本部海域では前回と比較してオニヒトデが増加した。恩納村でのH25年着底群の成長式を推定することができ、大量発生する集団が20cm前後のときは2年前、30cm前後のときは3年前に着底したとみなして差し支えないことがわかった。
7	サンゴ群集調査	サンゴ群集被度および群集構成変化の把握	JV	H28年5月に上記の稚ヒトデ調査・成体調査で設置したトランセクトに沿って海底写真を撮影した。成体の餌の指標となるサンゴ被度は恩納村万座で19.7%、北谷町砂辺で2.2%と、これまでと同様の結果が得られた。
8	個体群統計モデリング	オニヒトデ発生確率基礎モデル、駆除効率推定統計モデルおよび幼生分散モデルの改善	熊谷直喜 （国立環境研究所）	幼生分散シミュレーションの改良・プログラムの高速化を行い、17年分のシミュレーションを実行した。さらにその計算結果を用い、オニヒトデ成体、サンゴ被度、幼生加入パターンを関連付けて、オニヒトデ成体の発生パターンを推定する時系列統計モデルを八重山海域について試作した。幼生分散のコネクティビティは沖縄本島内、宮古諸島内、八重山諸島内で高い傾向にあり、諸島間あるいは国間（日本と台湾・フィリピン）では低かった。オニヒトデ成体、サンゴ被度、幼生シミュレーションの結果を組み合わせた個体群動態シミュレーションでは、低密度状態のオニヒトデ個体群から大発生が起りうるということが解析的に示された。今回検証した17年分のシミュレーションを通じて、オニヒトデの大量発生は県外からの過剰な幼生供給によって引き起こされたというよりは、沖縄県内に低頻度に生息していた成体がソース個体群となったと解釈できる。また、2002年以降に大量発生が起きやすくなったのはクロロフィル量の増加がおもな要因と考えられた。
9	ケミカルシグナル利用した大量発生予測手法開発	オニヒトデ幼生の変態誘引物質および稚ヒトデの摂餌誘引物質を利用した水槽実験と誘引試験	JV	後期ブラキオラリアの着生誘引物質として、これまでに単離されたInducer A、B、及びAの類似物質と想定されるA'について、Inducer Aをのぞいて分子量が推定できた。稚ヒトデの摂餌行動刺激物質探索では活性がある2つの分画を得ており、より活性が強くなるよう分離を検討している。また、量的供給を考慮して、サンゴ抽出物の再分離もすすめている。稚ヒトデトラップについては、これまでの試験結果をふまえた改良をすすめている。
10	サンゴ礁モニタリングロボット等の研究開発	潜水では困難な水深帯のモニタリングを自動化・省力化するロボットを開発	武村史郎 （沖縄高専） ほか4名	潜水では困難な水深帯のモニタリングの省力化等をめざして、ロボット開発、サンゴ被度の自動検出、オニヒトデ個体の自動検出、定点観測システムという4つの研究開発を実施している。今年度は試作した曳航型ロボットをプール実験でハードウェアの基本的な性能を確認した。サンゴの自動検出では方向符号共起行列に基づく特徴量に従う改良アルゴリズムは、サンゴ、特にミドリイシに対するテクスチャ解析に対して有益であること、オニヒトデの自動検出では重複度を上げると誤認識が減少する傾向が見られた。定点観測システム開発も引き続き改良を継続する。

表3-9-2. 平成28年度調査研究課題、目標、コンソーシアムメンバーおよび結果概要

No	研究課題	平成28年度の目標	コンソーシアムメンバー	成果概要
1	栄養塩濃度調査	オニヒトデの繁殖期を中心とした、本島西海岸沿岸における栄養塩濃度変化の把握	沖縄県 衛生環境研究所 JV	オニヒトデ幼生の餌となる植物プランクトンの指標であるクロロフィル量と栄養塩濃度（窒素やリン）のモニタリングを沖縄島西海岸で実施した。調査地点数は、過年度までの水質調査結果およびオニヒトデ幼生の発生地域を考慮し、13地点から17地点に変更した。分析項目は11項目（TN, DTN, DIN, TP, DTP, DIP, 濁度, TOC, DOC）とした。
2	クロロフィル分布調査	オニヒトデの繁殖期を中心とした、本島西海岸沿岸におけるクロロフィル量変化の把握	沖縄県 衛生環境研究所 JV	オニヒトデ幼生は植物プランクトン以外の有機物粒子も捕食することがわかったため、今年度からクロロフィル量（Chl. a）とともに、クロロフィルが壊れて（=植物プランクトンが死亡して）生成されるフェオフィチン量（Pheo. a）も測定した。今年度測定したChlの平均値は0.19 µg/Lと過年度と同様に低いレベルであったが、Pheoは0.36 µg/Lであった。Pheo. aはChl. aの平均1.86倍存在することから、沿岸域において植物プランクトン由来の餌条件は危険領域ではないことがわかった。
3	コネクティビティ	沖縄島西海岸におけるプランクトンサンプルによってオニヒトデ幼生の分布状況を把握	JV	H27年度に本島西海岸の広い範囲でプランクトンサンプルを採集したが、ネットの目詰まりにより濾水量が低下して十分な量のサンプルを採集することができなかった。H28はネットの目合を約2倍にし、船で曳くことで1サンプル分の濾水量を100m3前後まで増加させた。8月末までに16地点で合計125サンプル採取し、うち25サンプルから合計42個体のヒトデ幼生が検出され、DNA相同性検索により3個体がオニヒトデ幼生と確認された（幼生密度は0.2または0.4/m³）。これらの幼生は6月21日と29日に採取された時点でビピンナリア期であったことから、今年の産卵は通常より早かったと思われる。
4	幼生餌料制限	異なる餌料環境下での飼育実験により、野外でのオニヒトデ幼生の餌料要求量の推定	山本修一・中富伸之 （創価大学） 中嶋亮太（SCRIPPS） JV	H27にオニヒトデ幼生が有機物粒子（POM）を補食・同化することが確認されたため、今年度はPOMのどの画分の有機物を幼生が利用しているか、特にデトリタスの餌資源としての重要性を評価する実験を行った。主軸となる飼育実験は、0.2 µm、0.7 µm、20 µmのフィルターで濾過した自然海水、20 µmフィルター濾過海水を中熱処理した海水、培養藻を加えた0.7 µm濾過海水とそれを熱処理した海水のそれぞれで幼生を飼育し、数日ごとに発達段階を記録するとともに同位体比分析用サンプルを採取した。幼生の成長は、20 µm濾過自然海水中のほうが、培養藻添加0.7 µm濾過海水中より良好であったが、前者のほうがクロロフィル量は低いことからPOMやデトリタスなど植物プランクトン以外の餌も重要であることがわかった。
5	稚ヒトデ調査	恩納村と北谷町での稚ヒトデ集団の密度変化と成長率の把握	JV	H25年度からH27年度にかけて継続してきた稚ヒトデ密度調査では、調査の時期によって個体発見数が変動し、あるいは発見数が少なすぎて密度の推定ができないことがあった。今年度は調査時期を12月～1月に限定して新鮮な食痕を観察する方法で死亡率を推定した。約8週間にわたる5回の観察の結果得られた1日当たり死亡率は0.93%であった。
6	オニヒトデ成体個体群調査	県内各地におけるオニヒトデ個体群密度調査	酒井一彦 （琉球大） JV	7月～8月に沖縄本島・慶良間・久米島の28地点で目視観察によるオニヒトデ成体および食痕密度調査を行った。慶良間、久米島ではほとんどオニヒトデはみられず、本島でも恩納村海域でオニヒトデ個体密度・食痕密度とも減少したが、本部海域では前回と比較してオニヒトデが増加した。恩納村でのH25年着底群の成長式を推定することができ、大量発生する集団が20cm前後のときは2年前、30cm前後のときは3年前に着底したとみなして差し支えないことがわかった。
7	サンゴ群集調査	サンゴ群集被度および群集構成変化の把握	JV	H28年5月に上記の稚ヒトデ調査・成体調査で設置したトランセクトに沿って海底写真を撮影した。成体の餌の指標となるサンゴ被度は恩納村万座で19.7%、北谷町砂辺で2.2%と、これまでと同様の結果が得られた。
8	個体群統計モデリング	オニヒトデ発生確率基礎モデル、駆除効率推定統計モデルおよび幼生分散モデルの改善	熊谷直喜 （国立環境研究所）	幼生分散シミュレーションの改良・プログラムの高速化を行い、17年分のシミュレーションを実行した。さらにその計算結果を用い、オニヒトデ成体、サンゴ被度、幼生加入パターンを関連付けて、オニヒトデ成体の発生パターンを推定する時系列統計モデルを八重山海域について試作した。幼生分散のコネクティビティは沖縄本島内、宮古諸島内、八重山諸島内で高い傾向にあり、諸島間あるいは国間（日本と台湾・フィリピン）では低かった。オニヒトデ成体、サンゴ被度、幼生シミュレーションの結果を組み合わせた個体群動態シミュレーションでは、低密度状態のオニヒトデ個体群から大発生が起りうるということが解析的に示された。今回検証した17年分のシミュレーションを通じて、オニヒトデの大量発生は県外からの過剰な幼生供給によって引き起こされたというよりは、沖縄県内に低頻度に生息していた成体がソース個体群となったと解釈できる。また、2002年以降に大量発生が起きやすくなったのはクロロフィル量の増加がおもな要因と考えられた。
9	ケミカルシグナル利用した大量発生予測手法開発	オニヒトデ幼生の変態誘引物質および稚ヒトデの摂餌誘引物質を利用した水槽実験と誘引試験	JV	後期ブラキオラリアの着生誘引物質として、これまでに単離されたInducer A、B、及びAの類似物質と想定されるA'について、Inducer Aをのぞいて分子量が推定できた。稚ヒトデの摂餌行動刺激物質探索では活性がある2つの分画を得ており、より活性が強くなるよう分離を検討している。また、量的供給を考慮して、サンゴ抽出物の再分離もすすめている。稚ヒトデトラップについては、これまでの試験結果をふまえた改良をすすめている。
10	サンゴ礁モニタリングロボット等の研究開発	潜水では困難な水深帯のモニタリングを自動化・省力化するロボットを開発	武村史郎 （沖縄高専） ほか4名	潜水では困難な水深帯のモニタリングの省力化等をめざして、ロボット開発、サンゴ被度の自動検出、オニヒトデ個体の自動検出、定点観測システムという4つの研究開発を実施している。今年度は試作した曳航型ロボットをプール実験でハードウェアの基本的な性能を確認した。サンゴの自動検出では方向符号共起行列に基づく特徴量に従う改良アルゴリズムは、サンゴ、特にミドリイシに対するテクスチャ解析に対して有益であること、オニヒトデの自動検出では重複度を上げると誤認識が減少する傾向が見られた。定点観測システム開発も引き続き改良を継続する。

表3-9-3 (その2) . 沖縄県オニヒトデ総合対策事業 発表等業績一覧表 (平成25~28年度) .

年度	発表者	日時	形式	発表場所	発表タイトル	発表概要
27	田場 凌	H28. 1. 20	口頭	International Symposium on Artificial Life and Robotics 2016 大分県別府市	Development of an altitude maintenance system for underwater robots using laser beams	マンタ法利用の水中ロボットには海底からの高度を維持するための機能が必要になる。単眼カメラとレーザーモジュールを用いた画像処理による距離を計測する手法を元にした、水中ロボットの高度維持制御の方法ならびに、基礎実験について報告する。
27	Masahiro Suganuma	H28. 1. 20	口頭	International Symposium on Artificial Life and Robotics 2016 大分県別府市	Development of an automatic detection method for crown-of-thorns starfish using contour information	サンゴ礁モニタリング画像から自動的にオニヒトデを検出する技術開発として、オニヒトデの特徴の一つであるトゲを特徴量として検出する方法を提案した。
27	Masako Nakamura ほか5名	H27. 11. 26	論文	Marine Ecology Progress Series 540: 1-12, 2015	Spatial variability in recruitment of acroporid corals and predatory starfish along the Onna coast, Okinawa, Japan	恩納村沿岸において、造礁サンゴのミドリイシ類とその捕食者であるオニヒトデの加入パターンを空間的に比較し、両者とも北部へより多く加入することがわかったが、GPSブイの軌跡を解析するとオニヒトデは恩納村外から流れてきていると考えられた。
28	田場 凌	H28. 6. 9	ポスター	日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2016 神奈川県横浜市	水中ロボットのための単眼カメラを利用した高度維持システムの開発	マンタ法利用の水中ロボットには海底からの高度を維持するための機能が必要になる。単眼カメラとレーザーモジュールを用いた画像処理による距離を計測する手法を元にした、水中ロボットの高度維持制御の方法ならびに、定速で曳航した際の基礎実験について報告する。
28	平山 慶太	H28. 6. 9	ポスター	日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会2016 神奈川県横浜市	曳航型水中調査ロボットの開発	マンタ法利用は従来、人手で行なっているが、これを水中ロボットに置き換える。水深30mまで潜ることができる曳航型の水中ロボットの開発を行なう。ここでは、仕様と設計・製作について報告する。
28	S. Kasai ほか2名	H28. 6. 21	ポスター	13th International Coral Reef Symposium Honolulu, Hawaii, June 19-24, 2016	Characterizing chemical composition of size-fractionated particulate organic matter in a fringing coral reef of Malaysia	マレーシアと沖縄の裾礁海水中の粒子状有機物 (POM) を2 μ m、20 μ m、100 μ m、180 μ mのメッシュでサイズ分画し、それぞれのPOM中の炭素安定同位体比を調べた。その結果、2 μ m以下のPOMの大部分がシアノバクテリアであったことは共通だが、2-20 μ mと20-100 μ mのPOMはマレーシアと沖縄とは異なっていた。これは両地点のナノプランクトンおよびマイクロプランクトンの組成比を反映していると考えられる。
28	Y. Tadokoro ほか5名	H28. 6. 21	ポスター	13th International Coral Reef Symposium Honolulu, Hawaii, June 19-24, 2016	Evaluation of size-fractionated particulate organic matter as a food source for Crown-of-Thorns Starfish larvae	オニヒトデ幼生をブラキオラリア期まで飼育した海水に含まれていた、植物プランクトン、バクテリア、鞭毛虫、デトリタスのそれぞれの存在量を測定し、炭素量に換算して幼生の要求量と比較した。その結果、植物プランクトンが全炭素量の7-20%であったことに対し、デトリタスは53-91%にもぼっていた。オニヒトデ幼生は植物プランクトン以外にもデトリタスを餌料としていたと考えることが妥当であろう。
28	N. Nakatomi ほか5名	H28. 6. 24	口頭	13th International Coral Reef Symposium Honolulu, Hawaii, June 19-24, 2016	Elucidating food sources for larval stage of Crown-of-Thorns Starfish by stable isotope analysis.	沖縄のサンゴ礁海水を20 μ mのフィルターで濾過した海水で飼育した幼生はブラキオラリア期まで発達し、それらの体組織の窒素と炭素の安定同位体比は海水中の粒子状有機物 (POM) の安定同位体比に近づいた。2 μ m濾過海水で飼育した幼生はピピンナリア期までしか発達しなかったが、同位体比はやはりPOMと同等になった。一方、POMを除去した海水で飼育した幼生は約1週間で萎縮し、同位体比は未受精卵と変わらなかった。POMは幼生の有効な餌料だと考えられる。
28	武村 史朗	H28. 9. 9	口頭	日本ロボット学会学術講演会2016 山形県山形市	サンゴ調査のための曳航型水中調査ロボットの基礎実験	マンタ法利用は従来、人手で行なっているが、これを水中ロボットに置き換える。水深30mまで潜ることができる曳航型の水中ロボットの開発を行なっている。ここでは、製作した曳航型水中ロボットの基礎実験について報告する。
28	R. Nakajima ほか5名	H28. 10. 6	論文	Diversity 8(4): 18, 2016 doi:10.3390/d8040018	Crown-of-Thorns Starfish larvae can feed on organic matter released from corals	生きたサンゴ群体に炭素安定同位体 (13C) と窒素安定同位体 (15N) を取り込ませ、これら同位体を含む粘液を取り出して飼育環境下のオニヒトデ幼生に与えた。幼生を固定してその体組織を分析したところ、粘液を与えた幼生の体組織に含まれていた同位体は対照区 (粘液なし) と比較して優位に高かった。この実験結果はオニヒトデ幼生が植物プランクトンではない、粒子態あるいは溶存態の有機物を捕食、同化できる証拠である。
28	武村 史朗	H28. 10. 21 ~ 10. 23	ポスター	第40回沖縄の産業まつり2016 沖縄県那覇市 奥武山公園 県立武道館	曳航型水中調査ロボットの開発	マンタ法利用は従来、人手で行なっているが、これを水中ロボットに置き換える。水深30mまで潜ることができる曳航型の水中ロボットの開発を行なっている。一般来場者に向け、曳航型水中ロボットについて紹介する。
28	M. Nakamura ほか4名	H28. 11. 16	論文	Diversity 8(4): 24, 2016 doi:10.3390/d8040024	Using long-term removal data to manage a Crown-of-Thorns Starfish Population	恩納村沿岸で2003年から2015年にかけて実施されたオニヒトデ駆除から得られた駆除個体数データを解析し、1歳令の駆除個体数から翌年の駆除個体数を推定する簡便なモデルを得た。そのモデルから恩納村沿岸の5つの駆除範囲において残存個体数を推定し、当該年に投入すべき人員など海域管理に利用している。
28	C. Mellin ほか4名 (AIMS共同*)	H28. 11. 24	論文	Preprints (www.preprints.org) doi:10.20944/preprints201611.0124.v1	Selective feeding and microalgal consumption rates by Crown-of-Thorns Seastar (Acanthaster cf. solaris) larvae	これまでは短時間の補食実験でのみ比較されていたオニヒトデ幼生の餌の選択性を、複数の種類の餌を大量発生が引き起こされると考えられている密度に調整し、最長18時間にわたって飼育することにより評価した。その結果、幼生の培養でよく使われる5種類の微細藻 (Dunaliella sp., Chaetoceros sp., Phaeodactylum tricornutum, Pavlova lutheri, Tisochrysis lutea) のうち、栄養価がより高い前2者への選択性が強いことがわかった。
28	田所良幸 ほか5名	H28. 12. 2	ポスター	日本サンゴ礁学会第19回大会 沖縄県那覇市	安定同位体対比分析を用いたオニヒトデ幼生の餌資源の解明	オニヒトデ幼生の餌資源を検討するために、サイズの異なる有機物粒子 (POM) を含む現場濾過海水と単一の培養藻類を添加した人工海水を用いて培養を行い、それぞれの実験区における幼生の成長度合いと餌の捕食の関係を炭素安定同位体比分析によって解析した。その結果、植物プランクトン以外のPOM (鞭毛虫、バクテリア、デトリタス) も餌資源として重要であることがわかった。
28	A. Matsuda ほか4名	H28年 出版	論文	IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, v-17, 2016	Extraction method of texture features on monitoring image of coral reef	
28	松田朝陽 ほか4名	H28年 出版	論文	第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, p0569-0571, 2016.	サンゴ被度の自動検出に向けたテクスチャ解析	
28	高橋 悟 ほか7名	H29年 (採択済)	論文	信号処理学会論文誌	海洋観測に向けた海中ランドマークの生成手法	

*沖縄県とAIMSとの研究協力覚書にもとづき、J Vの岡地が2014年にAIMSを訪問した際に協力した実験結果。