

サンゴ礁形成要因としてのサンゴの成長量に与える 物理環境の影響

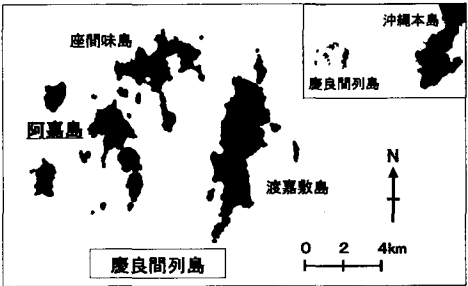
青 田 徹* ・綿 貫 啓** ・柴 田 早 苗***
熊 谷 航**** ・灘 岡 和 夫***** ・三 井 順*****
岩 尾 研 二***** ・谷 口 洋 基***** ・大 森 信*****

衰退したサンゴ礁を早期に回復する手法としてサンゴの移植が行われるが、移植適地の選定が重要となる。本研究では、サンゴの成長に良好な物理環境を求める目的で、まずシミュレーションにより得た波高とサンゴ礁の幅の関係を整理した。現地調査では、慶良間列島の阿嘉島で、波高と水温は1年間、流速は約3週間、サンゴの成長量は約6ヶ月間観測し、物理環境とサンゴの成長との関係を整理した。その結果、恒常的に来襲する波高が0.8 m程度、最大波高が3.5 m程度ではサンゴ礁が発達し、水深2 mの水温が夏に高く冬に低い、背後の地形勾配が1/4以下、潮流の平均流速と波動流速のr.m.sが小さい海岸でサンゴの成長率が高いことが示された。

1. はじめに

サンゴ礁は水産業や観光業にとって重要な沿岸域の生態系である。しかし、オニヒトデによる食害、農地や沿岸開発等による赤土流出（波利井・灘岡, 2003；大見謝ら, 2000）、異常高水温による白化現象等により（大見謝ら, 2000）、世界各地で危機的な状況であり、早期の回復が切望されている。サンゴ礁の修復の一手法としてサンゴの移植が実施されるが、移植先の環境がサンゴの成長条件に適合していない場合は生残率が低く、移植効果が十分に発揮できない。サンゴの成長には物理的、化学的、生物的環境要因が影響を与えるが、これらの環境要因とサンゴの分布あるいは成長との関係に着目した研究は少ない。サンゴの栄養源には、体内に共生する褐虫藻の光合成によるものと、浮遊する餌生物や有機粒子等を纖毛と粘液で捕らえて消化して得るものがある（山里, 1991）。いずれも、海水との遭遇が成長に大きく影響することが推測される。そこで、著者らは、特に物理的環境に注目し、サンゴ礁の発達あるいはサンゴの成長量との関係を把握し、サンゴの移植適地の選定基準を作ること为目标として調査を行っている（綿貫, 2003）。

まず、サンゴ礁が発達している場所はサンゴの成長が良好な場所であると仮定し、海岸に作用する波高と現状のサンゴ礁の幅との関係を数値シミュレーションで検討した。現地調査では、サンゴ礁の形状から成長点が水深2 m付近であると仮定し、ここの物理環境が重要と考え、水深2 mにおける温熱環境やその沖の波高の1年間の



図一1 慶良間列島位置図

継続調査を実施した。また、約半年間のサンゴの成長量調査と3週間の流速測定を実施し、サンゴの成長に与える物理環境の影響を検討した。

2. 研究内容

（1）調査対象海域

調査対象としては、周囲の島の遮蔽等により各海岸の物理環境が多様であり、比較的サンゴが健全に生息している多島海の沖縄県慶良間列島の阿嘉島（図一1）とした。

（2）波浪数値シミュレーション

サンゴ礁の形成要因には、サンゴの成長率と生残率が影響する。成長率には浮遊する餌生物や光合成に必要な物質との遭遇から恒常的な流動や波浪環境が重要であり、生残率はさらにイベント的な大きな波浪、すなわち台風等の異常時に来襲する最大波高による減耗が影響すると思われる。そこで、サンゴの成長にはエネルギー平均波、生残率には年最大波が影響するものと考え、これらの波高とサンゴ礁の幅との関係を求めることとした。

過去の波浪の実測データは、那覇港のデータがあるが、波浪観測場所は沖縄本島の西側に位置し、東方向からの波浪は計測できない。そこで、港湾空港技術研究所海洋・水工部水理研究室において推算された15年間の毎時の有義波を使用した。阿嘉島を取り囲む4地点の波浪推算

・		(株)テトラ	テトラ総合技術研究所
・	正 会 員	工修	(株)テトラ テトラ総合技術研究所
・		理修	(株)テトラ テトラ総合技術研究所
・			東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻 修士課程
・	フェロー	工博	東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
・		工修	(株)テトラ ブロック本部 技術部
・		理修	阿嘉島臨海研究所
・		工修	阿嘉島臨海研究所
・		水博	阿嘉島臨海研究所 所長

データを16方位の波向に分割し、波向毎に各年のエネルギー平均波高と年最大波高を算出し、各々15年間の平均値を求め、この値を計算に用いて沖波とした。ここで使用するエネルギー平均波高は、各方位毎のすべての有義波高を二乗して平均し、その平方根を計算したものである。なお、波向のNWは、約20 km離れた渡名喜島で遮蔽されてしまうため除き、NWを除く7方位について検討波浪を決定した。各方位毎の沖波の条件は、年最大波は波高2.4~5.4 m、周期8.9~11.7 s、エネルギー平均波は波高1.0~1.9 m、周期6.4~8.1 sである。これらの各方位の計算結果から、年最大波高は各海岸で水深10 m地点の波高が最も大きい値を、エネルギー平均波は得られた7つの値の平均を算出し、各海岸の波高と定義した。

有義波のエネルギー平均波高と最大値の入射波高について、水深10 m地点の波高を、間瀬ら(1999)を参考に回折効果を考慮したエネルギー平衡方程式で計算し、サンゴ礁の幅と背後の地形の勾配との関係を整理した。

波高推算地点は、100 m間隔の格子と海岸線に沿った水深10 mの等深線の交点の125点とした。サンゴ礁の

表-1 各観測地点の観測項目一覧

地点名	海岸名	観測項目				
		波高	流速	水温		サンゴ成長率
				水深2 m	水深5 m	
A	マジャノハマ	○	○	○		○
B	ハンタジャキ	○	○	○	○	○
C	ニシハマ南	○	○	○		○
D	ニシハマ南浅		○			
E	ニシハマ中		○	○		○
F	ニシハマ北	○	○	○	○	○
G	クシバル北	○	○	○		○
H	クシバル中		○	○		
I	クシバル南	○	○		○	○
J	クシバル新		○	○		
K	ヒズシ	○		○	○	○
T1~T6	水温計設置					
その他	水温計17台は水深2 mと10 m以外に設置					

表-2 各測定機器の測定モード

機器名	測定間隔 (min)	サンプル 間隔(s)	サンプル数	測定時間 (min)
圧力式波高計	120	0.5	2,400	20
電磁流速計	120	0.5	600	5
水温計	15	—	1	—

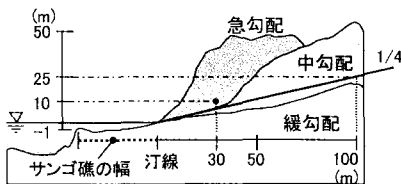


図-2 背後のサンゴ礁の幅および地形の勾配

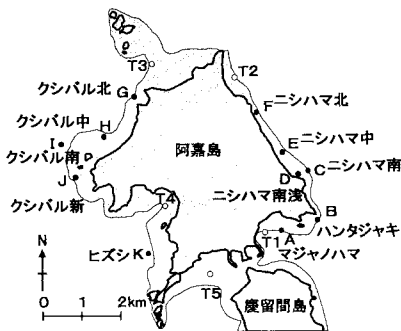
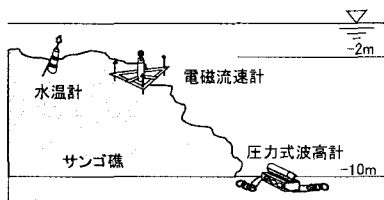
図-3 観測地点と海岸の名称
(北, 中, 南, 新は観測地点の呼称)

図-4 測定機器設置図

幅は、これら波高算出地点の背後の汀線から水深1 mの等深線との距離と定義した。また、反射波による擾乱は背後の地形勾配が急であると大きいことが予想されるので、サンゴ礁の幅は背後の地形の勾配にも影響すると考えられる。そこで、1/5,000の地形図から汀線より陸側の地形勾配を読みとり、汀線からの水平距離が100 mまでの勾配が1/4未満を緩勾配、それ以上を中勾配とした。特に汀線から30 mまでに標高10 m以上となる場合は急勾配とした(図-2)。

(3) 現地調査

現地調査は、2002年11月から2004年1月の約1年間、サンゴ礁形成の成長点と仮定した水深2 mを中心に、水温、サンゴの成長量、水深10 mの波高を測定した。観測地点は、阿嘉島の周囲に物理環境が異なる11地点(A~K)を選定し、表-1の観測を実施した。その他に水深2 mの水温計設置地点を5地点(T1~T5)設定した(図-3、表-1)。なお、水温計17台は、流れの様子を見るために、水深2 mおよび10 m以外に設置した。2002年11月に波高計7台と水温計34台を島周囲に設置して約1年間観測し、2003年8月22日から9月14日の約3週間は流速計10台により流速測定を行った。測定機器の測定モードを表-2に示す。サンゴの成長量の測定では、当初はクシハダミドリイシ(*Acropora hyacinthus*)を対象種としたが、一部オニヒトデの食害を受けたので、食害を受けにくいアザミサンゴ(*Galaxea fascicularis*)を調査対象とした。島周囲の8地点で各7~12群体のアザミサンゴを選定した。アザミサンゴの成長は、ポリプ数の増

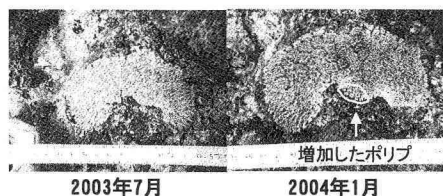


写真-1 アザミサンゴの成長量測定例

加と各ポリプの肥大成長との2通りが想定された。各ポリプの個々の大きさの測定は困難なので、ポリプ数の2003年7月と2004年1月の2回写真撮影し、ポリプ数の増加数を求め、約6ヶ月間の成長量とした。第1回調査では82群体をマークしたが、数群体は再測定ができず、最終的に70群体の測定結果を成長量解析に使用した。なお、解析対象の群体の中には、一部あるいは全体が死亡、あるいはポリプ数が減少した群体が確認された。そのため、それらを除いたものを健全な群体とし、その群体数から各観測地点の全群体に対する割合を算出して生残率とした。また健全な群体についてのみポリプ数の増加率を算出しサンゴの成長率とした(写真-1)。

3. 結果および考察

(1) 推算した波高とサンゴ礁の幅との関係

数値シミュレーションによって各海岸の水深10m地点の波高と、その地点の岸側のサンゴ礁の幅の関係を、パラメータに背後の地形の勾配をとって図-5, 6に示した。図-5のエネルギー平均波では、波高が0.5~0.8m、背後の地形の勾配が緩勾配の条件で、サンゴ礁の幅が最大である傾向があった。緩勾配でも波高が0.3m付近や、波高が0.8m付近でも中・急勾配ではサンゴ礁の幅は狭い。エネルギー平均波高0.5~0.8mでは、浮遊する餌料生物等との遭遇が良好だと推察される。

水深10mの最大波高とサンゴ礁の幅との関係(図-6)では、波高が3~3.5mでサンゴ礁の幅が約400mで最大となり、波高がそれ以上で急勾配な海岸では狭い。3~3.5m以上の波高が来襲する海岸のサンゴは、イベント的に来襲する波浪の波圧等により直接的に、あるいは飛来してくるサンゴ片や岩石等により間接的に破壊されている可能性が示唆される。また、急勾配の海岸では、波高が2~2.5mでサンゴ礁の幅は約200mで最大となり、勾配によりサンゴ礁の幅に違いがみられ、急勾配ではサンゴ礁の幅が狭く、緩勾配ではサンゴ礁の幅が広くなる傾向があった。

(2) 現地調査結果

a) 阿嘉島の調査年の水温状況

水深2m地点の全観測地点の日平均水温の平均値および阿嘉漁港地先の毎日AM10:00の表層水温の1998

年から6ヵ年の平均値の推移を図-7に示す。水深2mの観測値は20から30°Cの間で推移した。例年よりも本調査期間の水温は6~7月に低いが、8~9月に高く、夏期の高水温が続いた。

b) アザミサンゴの生残率および成長率

アザミサンゴの生残率の分布を図-8に示す。最も生残率が高い地点はKで75%である。次いでBの62.5%、Gの50%で、これは比較的サンゴ礁が発達していない海岸である。C, E, Fのニシハマの各地点は30%以下と低かった。アザミサンゴの成長率はA, B, Gで高く8~17%で、B, Gはサンゴ礁が未発達である(図-9)。C, E, Fのニシハマは、生残率、成長率ともに低い傾向であった。

c) 波高観測結果とサンゴの生残率および成長率との関係

主な地点の有義波高の最大値を図-10、および全期間

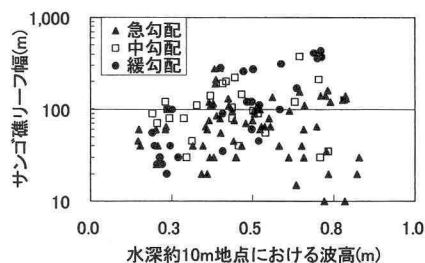


図-5 数値計算で求めた水深10m地点のエネルギー平均波高とサンゴ礁の幅

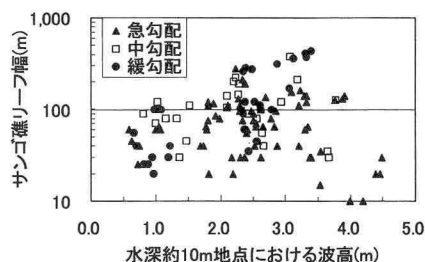


図-6 数値計算で求めた水深10m地点の最大波高とサンゴ礁の幅

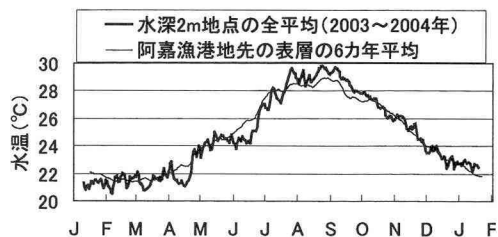


図-7 水深2m地点の日平均水温の平均値の推移および阿嘉漁港地先の表層水温の6ヵ年平均

の波高の頻度分布を図-11に示す。サンゴの成長率が高いB, Gでは、有義波高0.25 m以上の頻度が高く、台風等のイベント時に有義波高の最大値が3.0 m以上となり、他地点より大きい波浪が来襲する。しかし、BとGは図-6によればサンゴ礁の幅が広くなるはずであるが、実際にはサンゴ礁の幅は狭い。これは、最大波高3.0 m以上の波浪がイベント的に来襲する海岸では、サンゴが破壊されている可能性がある。年によっては本調査で観測した波高より大きな波高が来襲する可能性がある。なお、対象のアザミサンゴは、波高が大ききサンゴ礁が未発達な場所でも生残率が高く、形態的にダメージを受けにくい種である可能性も示唆された。一方、生残率および成長率のいずれも低いニシハマでは、波高頻度分布が最も小さい波高ランクの0~0.25 mで90%以上と多く、有義波高の最大値は全観測期間で1.0 m以下で小さく、年間を通して静穏であった。

d) 水温観測結果とサンゴの生残率および成長率との関係

水深2 mに設置した全14地点の日平均水温の平均値と各海岸の同水深の水温を比較した。主な地点の結果を図-12に示す。較差は概ね0.5°C以下であるが、その傾向から「①夏高冬低」、「②夏低冬高」、「③ほぼ年中高」の型に分類できた(図-13)。①は海水交換が小さく、②は海水交換が大きいと推測される。夏期に比較的水温が高

くなる海域は、サンゴに悪影響を与えると推測されたが、成長率が高いのは「夏高冬低」のA, Gであり、成長率が低いFは「夏低冬高」であった。本調査期間は、日平均水温が30°Cを越え悪影響を与える日はなく、夏高冬低となる海岸でも生残率が高かったと考えられる。

e) 流速観測結果とサンゴの生残率および成長率との関係

潮流の大潮および小潮時の平均流速を図-14に示す。大潮は8月26~29日の4日間、小潮は9月5, 6日の2日間のデータを平均したものである。大潮時の波動流速のr.m.sの平均を図-15に示す。波動流速のr.m.sは、観測データから波動による流速を抽出して二乗して平均し、その平方根を算出したもので、波動流速の大きさを示す値である。クシバルでは、I, Jは潮流の平均流速および波動流速のr.m.sの平均ともに大きく、G, Hは小さい。ニシハマは、東方沖に島があり、地形による遮蔽効果の影響が強く波動流速は小さいが、潮流は大きく大潮、

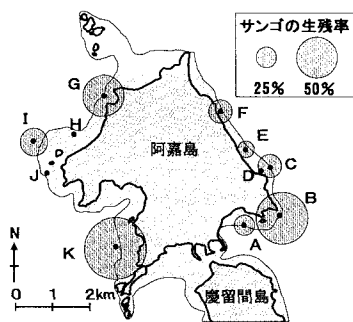


図-8 アザミサンゴの生残率の平均値

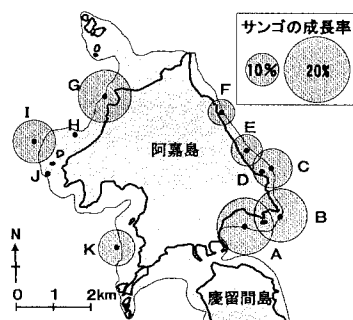


図-9 アザミサンゴの成長率の平均値

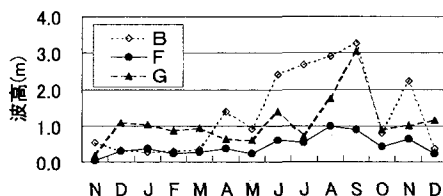


図-10 主な地点の各月の水深10 mにおける有義波高の最大値(実測値)の推移(2002年11月~2003年12月)

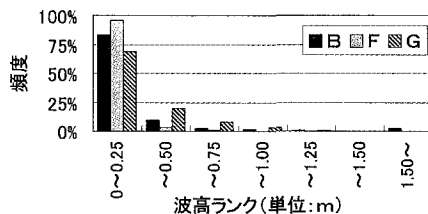


図-11 主な地点の水深10 mの波高頻度分布(2002年11月~2003年12月)

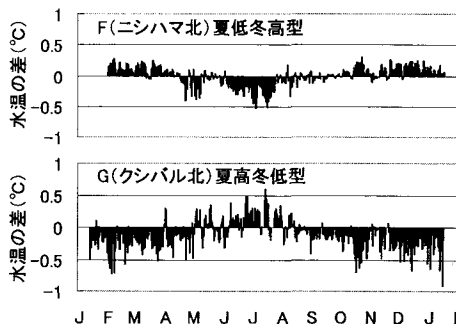


図-12 水深2 mの日平均水温の全観測地点の平均値と主な地点との差(2003年11月~2004年2月)

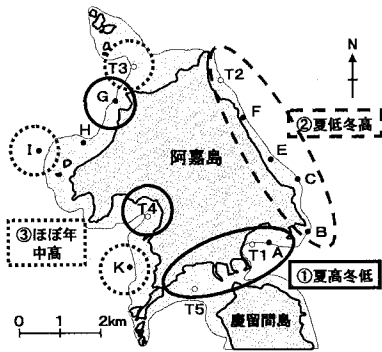


図-13 水深 2 m の日平均水温の全観測地点の平均値と各地との差から分類した水温の傾向型

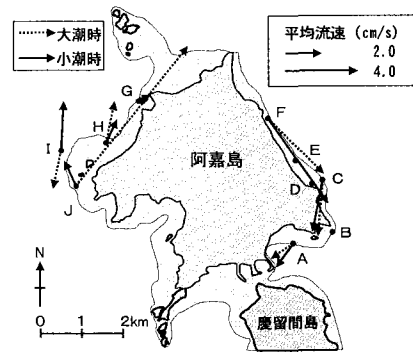


図-14 大潮時および小潮時の潮流の平均流速

小潮とも流向は南方向であった。ニシハマの3地点は、波浪や水温環境がほぼ同等だが、サンゴ礁の幅は異なりCが広く、サンゴ礁の形成には潮流が影響すると推察される。

浮遊する餌生物等との遭遇の観点から、流動環境の大きい海岸ほど、サンゴの成長には良好だと推測したが、サンゴの生残率および成長率ともに高いBやGは、潮流は小さく、波動流速は中程度であった。波高と同様に、サンゴの成長率が最大となる流速の範囲があると想定される。

4. 結 論

サンゴの成長と波高や水温との関係について、概ね把握できた。各物理環境の観測期間1年間の調査結果からは、以下の結論が得られた。

① 数値計算の結果から、有義波高のエネルギー平均波高が0.5~0.8 m程度、年最大波高が3~3.5 m程度の海岸は、サンゴ礁が発達しやすい。また、背後の地形が概ね1/4以下の緩やかな海岸は、サンゴ礁が発達している。

② 水深 2 m の日平均水温が、全測点の平均値との差から「夏高冬低」となる海岸、波高 0.25 m 以上の頻度が高い海岸、潮流の平均流速および波動流速の r.m.s の平均が小さい海岸は、サンゴ成長率は高い。また、最大波高 3.0 m 以上が来襲する海岸は、サンゴの生残率が低い。

なお、流速との関係は、さらに流速とサンゴ成長率を観測して関係を把握し、サンゴの移植適地の選定基準を作成する予定である。

謝辞：波浪の数値計算では、港湾空港技術研究所の橋

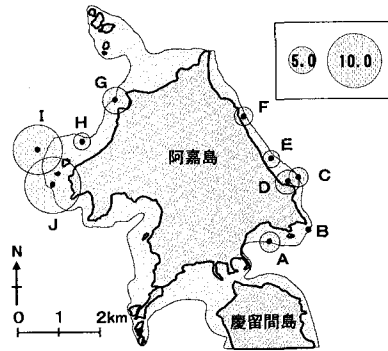


図-15 静穏時の大潮時の波動流速の r.m.s の平均

本典明氏には波浪推算データを提供して頂き、またその解析には(株)テトラの齋藤正文氏にご協力頂いた。ここに記して感謝の意を表します。なお、本研究は、競艇交付金により日本財団の援助を受けて(財)シップ・アンド・オーシャン財団が行う技術開発基金による補助金を受けた。

参 考 文 献

- 大見謝辰男・仲宗根一哉・満本裕彰・上原睦男・大城 哲 (2000): サンゴの赤土汚染耐性と白化耐性の比較, 沖縄県衛生環境研究所報, 第 34 号, pp. 69-76.
- 波利井佐紀・灘岡和夫 (2003): 環境ストレスとしての赤土懸濁・堆積がサンゴ幼生定着に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1041-1045.
- 間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋 (1999): 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 628/II-48, pp. 177-187.
- 山里 清 (1991): サンゴの生物学, 財団法人東京大学出版会, 150 p.
- 綿貫 啓 (2003): 海洋構造物設置に伴うサンゴの大規模移植技術の開発, 平成 14 年度技術開発基金による研究開発報告書, 第 22 集, (財)シップ・アンド・オーシャン財団, pp. 128-145.