

網取湾のサンゴ生息環境に及ぼす 波浪外力の影響

INFLUENCE OF OCEAN WAVES ON CORAL HABITAT ENVIRONMENT OF AMITORI-BAY

鵜飼亮行¹・河野裕美²・中瀬浩太³・島谷 学⁴・
神野正樹⁵・木村賢史⁶

Akiyuki UKAI, Hiroyoshi KOHNO, Kouta NAKASE, Manabu SHIMAYA,
Masaki ZINNO, Kenshi KIMURA

¹正会員 博(工) 五洋建設株式会社 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

²東海大学 沖縄地域研究センター 准教授 (〒907-1541 沖縄県八重山郡竹富町上原870-277)

³正会員 五洋建設株式会社 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8) .

⁴正会員 博(工) 五洋建設株式会社 土木設計部 (同上)

⁵東海大学 海洋学部 海洋生物学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

⁶正会員 博(工) 東海大学 海洋学部 海洋生物学科 教授 (同上)

A coral forms a coral reef under the influences of various environment factors such as sunlight, water temperature, waves, flow etc. in the sea. Among these environmental parameters, the growth of coral is considered to be especially influenced by waves. Therefore, it is helpful for the conservation and reproduction of coral reef to elucidate suitable wave environment for the growth of coral.

In this study, the distribution of corals and particular incoming waves are examined by filed investigation in Amitori Bay. Furthermore, wave characteristics are evaluated in the whole bay by numerical analyses, in which a wave transformation model is utilized. It turns out that the shape of coral body varies by the height of acting waves, which indicates that a coral is adaptable to physical environment.

Key Words : Amitori bay, coral habitat environment, field survey, energy balance equation

1. はじめに

サンゴは様々な環境要因に影響を受けながらサンゴ礁を形成している。その環境因子としては、光・水温・波や流れ・栄養塩などの物理・化学的因子、水深・底質などの地形・地質因子、競合生物・外敵などの生物因子、埋立などの開発行為や陸域開発に伴う土砂流入などの人的因子等が挙げられる。その中でも、栄養塩の供給や浮泥堆積の影響、また外力による破損や流出などの側面から、波や流れといった物理的因子がサンゴ礁におよぼす影響は大きい。

波浪外力とサンゴの生育状況の関係については、数多くないものの幾つかの報告がなされている。防波堤に生育するサンゴの被度と堤体前面波高について、50年確率波を対象とした場合、堤体前面波高が7~11mの範囲にサンゴの被度が高いといった報告がなされている¹⁾。また、島谷ら(2006)は那覇港の消波ブロック上に生育するサンゴを対象に、水理模型実験および数値波動水路によって消波ブロック上の軌道流速を評価し、常時波浪(年間平均有義波)作

用時の軌道流速とサンゴの被度を比較した結果、流速0.1~1.0m/sの範囲でサンゴの生育が見られ、特に0.4m/s以上でサンゴの被度が高いという結果を得ている²⁾。

このように、波浪外力とサンゴの生育には密接な関係があると考えられ、サンゴの生育に適した波浪環境を適切に評価することで、サンゴ礁の保全や再生に寄与できるものと考えられる。

一方、沖縄県西表島の北西部にある網取湾(図-1)は奥行き約3.5kmの変化に富んだ湾で、造礁サンゴを含む様々なサンゴ礁が形成されているエリアである。サンゴ礁の他にも、2つの河川が流入する湾奥部には干潟とマングローブ林が形成されている。水深約70mの湾口部には造礁サンゴが張り出しており、湾の特徴的な形状と相まって、風浪による影響、特に高波浪時の物理環境に特徴的な分布が見られる。サンゴの分布にも湾の形状に合わせて多様な変化が見られ、波浪外力との強い関連性が予想される。

そこで本研究では、網取湾をフィールドにサンゴの分布と波浪に着目した現地調査を行い、特に高波

浪時の物理環境との関連性を中心に考察を行うことで、サンゴの生育に適した環境条件の抽出を試みた。

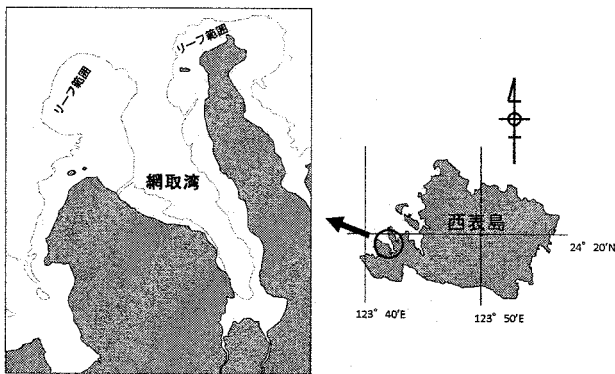


図-1 網取湾の位置図

2. 現地調査

網取湾の特徴的なサンゴの分布と波浪との関係を考察する基礎資料を得るため、それぞれの実態について現地調査を行った。

サンゴの生息分布については湾内沿岸部全域にわたってサンゴの形状および被度の調査を行った。波浪については、通年の波浪特性を把握するため、湾内の2地点で1年間の波浪観測を行った。

(1) サンゴの分布調査

サンゴの分布調査は2009年10月下旬～11月上旬に実施した。図-2に示すように湾内沿岸部全域にわたって調査ライン18本を設け、ライン上に全36地点のコードラット調査地点を設定した。各調査地点では3箇所1m×1mのコードラット調査を実施し、3箇所所得られた被度を平均したものを調査地点の代表値とした。また、サンゴを図-3に示すような形状別に分類し、被度の記録を行った。被覆状サンゴは着生基質を覆うように生育しており、大きな突起がない形状から一般的に波浪には強いとされている。また、

塊状サンゴは密な骨格を形成しており、頑丈で波浪にも強いとされるが、一方で堆積物に対する耐性も高く礁池内でも数多く生育している。葉状サンゴは薄い葉のように骨格が立ち上がり、キャベツのような形状を形成する。また、卓状サンゴは横方向に広がりながら成長し、机のような形状を形成する。枝状サンゴは文字通り樹木の枝のような形状で、生育する環境によって枝部の長さや太さは様々である。

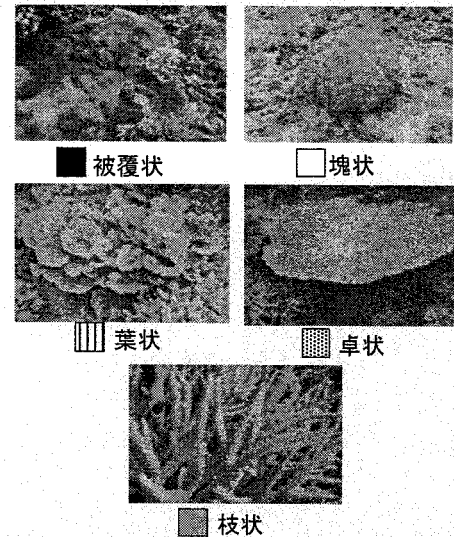


図-3 サンゴの分類に用いた形状と凡例

形状ごとに分類したサンゴの出現割合を図-4に示す。湾口部では湾の東側、西側に問わず様々な形状のサンゴが出現しているが、湾奥へ移るにつれ形状が単一的になり、塊状や枝状の群体が優占ようになる。形状別にみると、卓状サンゴの分布は礁縁部に集中し、湾口部から湾中央部にかけての比較的波当たりの強いエリアに分布が見られる。一方、枝状や塊状のサンゴは湾内全体に分布するが、岸沖方向で見ると岸側に塊状、沖側に枝状と分布位置に明確な相違があることが認められた。特に塊状は海岸線が砂浜であるエリアの岸際に数多く分布してお

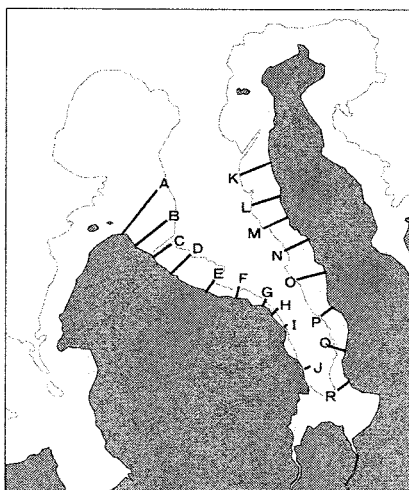


図-2 サンゴの調査ライン

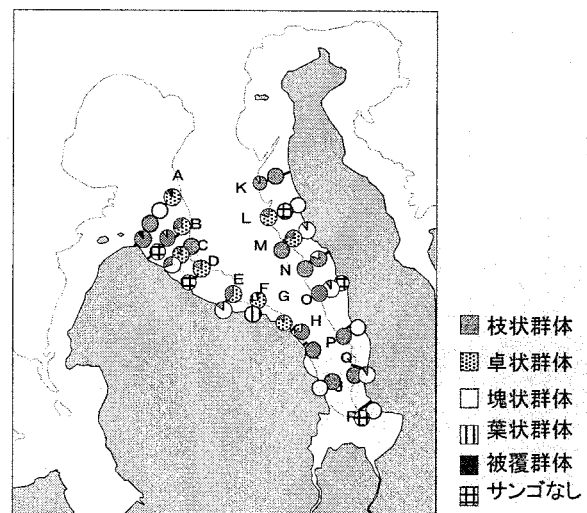


図-4 サンゴの出現割合

り、堆積物に対する耐性の高さがうかがえる。また、葉状サンゴは湾中央部西側と湾口部西側のごく一部のエリアにしか分布が見られなかった。同様に、被覆状サンゴについても湾口部西側および湾中央部西側の一部に分布が見られる程度であった。

このように、網取湾では枝状、卓状、塊状のサンゴが多くみられ、その分布位置はそれぞれ特徴的であり、特に波当たりや水深といった環境因子の影響を強く受けていることが示唆された。

次に、各測点で優占して出現していたサンゴ形状についての被度分布を図-5に示す。被度の割合は円の大ききで示しており、0～30%、30～60%、60%以上の3段階で整理した。被度の高いエリアは湾口部に集中しており、特に西側の枝状サンゴと西側および東側の卓状サンゴが特徴的である。西側の一部（調査ラインD、F）の卓状サンゴは東側に比べると被度が低く、波当たりの強さが影響しているものと考えられる。河川流入や堆積物の影響の強い湾奥部では全体的に被度が低く、湾口部との生育状況の差が明確となった。

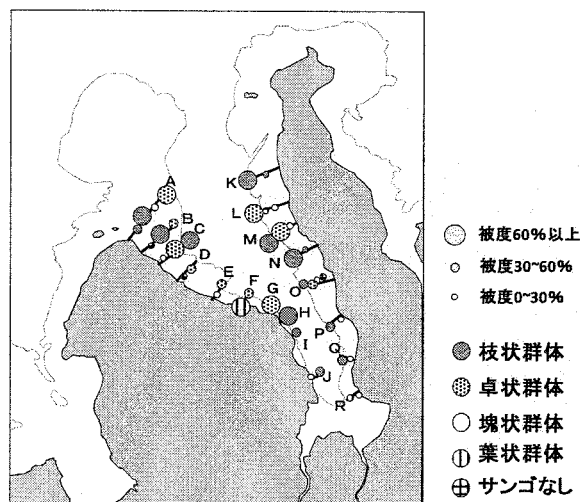


図-5 サンゴ形状別の被度分布

(2) 湾内の波浪観測

湾内波浪の現地観測は、2008年7月～2009年10月までの約1年3ヵ月の期間に、自記式波高・流速計を2台設置し、水位、水圧、流速2成分の計4成分の観測（毎正時20分間）を連続して行った。

波浪観測地点は、湾内において比較的高波浪の観測が期待できる場所として、湾の開口部に開けた西側の沿岸付近とした（図-6）。沿岸部は海底勾配が急でサンゴが分布している場所が多いが、波高計の設置場所は、サンゴがなく、できるだけ海底勾配が緩く平坦な場所を選んだ。2地点の水深は約10mおよび20mである。

図-7に観測された有義波高の経時変化を冬期（2009年1月～3月）、夏期（2009年7月～10月）の期間について示す。また、図中には沖波条件として網取湾の沖合約40km地点での気象庁GPVデータ（3時

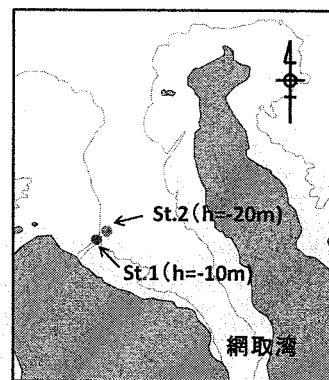
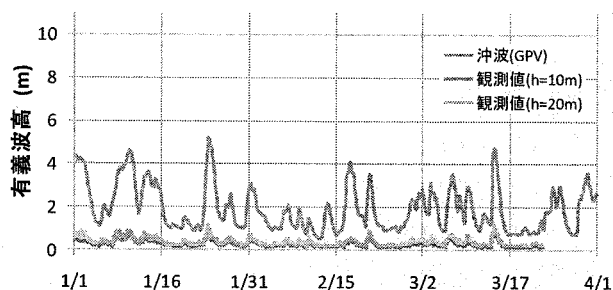
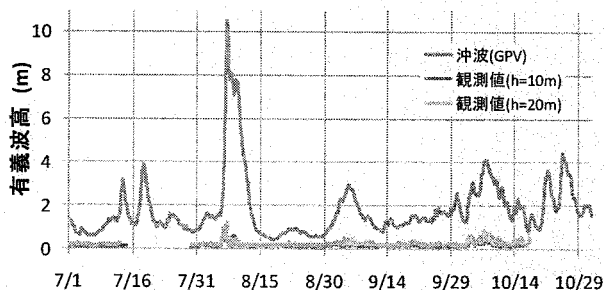


図-6 波浪観測地点位置図



(1) 冬期：2009年1月～2009年3月



(2) 夏期：2009年7月～2009年10月

図-7 有義波高の経時変化

間毎）の情報を併せて示した。

水深20m地点の観測有義波高の季別平均値は、10月～12月（秋期）で0.39m、1月～3月（冬期）で0.41m、4月～6月（春期）で0.26m、7月～9月（夏期）で0.28mであった。これに対し同期間の沖波（気象庁GPVデータ）の平均波高が2.0m、1.9m、1.3m、および1.7mであった。網取湾内は外洋に比べて静穏であることがわかる。湾内（St.2）と沖波の波高比は平均的には0.2程度である。

台風0908号の通過に伴い観測期間中最も大きな沖波（波高10.5m）が生じた2009年8月7日前後の湾内波高（St.2）および沖波波高の経時変化を図-8に示す。図中には、沖波の波向を矢印で示し、湾内波高と沖波波高との比の経時変化も示した。湾内の波高は、沖波向の影響を大きく受け、沖波の波高が比較的小さい時期でも北寄りの波向では湾内の波高が大きくなっていることがわかる。湾内波高と沖波の波高比の経時変化からも波向の影響を見ることができ、南寄りでは0～0.2の値が、北寄りに変化すると0.4程度まで大きくなっている。湾口部の水深が70mと深

いことから、台風の経路によっては湾内に直接高波浪が来襲する可能性も考えられる。ただし、湾口部の両側に張り出したリーフにより直接入射できる波向の範囲が狭められていることによって、湾内が比較的静穏に保たれていると考えられる。

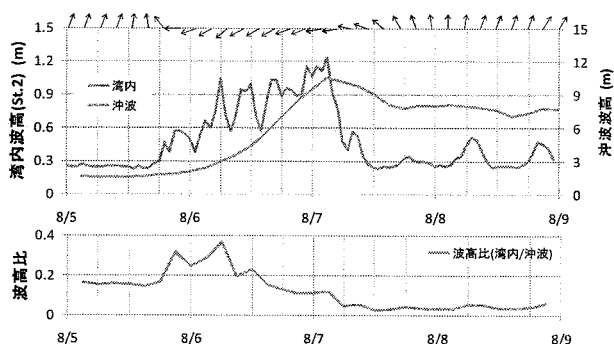


図-8 高波浪時の波高等の経時変化

図-9は、観測期間中のGPVデータの沖波向と2008年の西表島気象観測地点（アメダス）の記録による風向の出現分布を示したものである。いずれも湾口部の開けた北西寄りの出現頻度は少なく、東寄りの出現頻度が高い傾向にある。このことも、網取湾内が外洋に比べて比較的静穏である要因と言える。

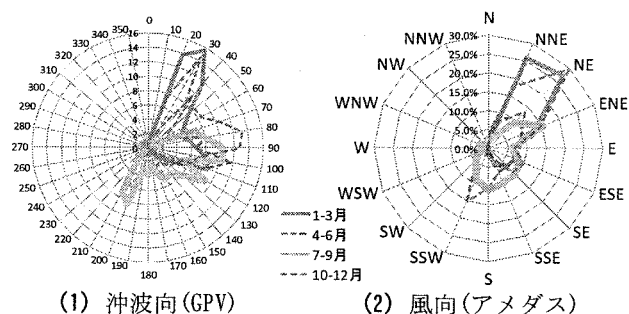


図-9 観測期間中の波向および風向の出現分布

3. 数値解析による湾内波浪場の平面分布特性の把握

現地調査によって把握した湾内のサンゴの平面的な分布と波浪外力の関係を考察するため、網取湾内の波高の平面分布を数値解析によって評価することにした。

サンゴに作用する波浪外力は、高波浪時の影響が大きいと考え、観測期間中に得られた高波浪時の平面分布を求めることにした。また、1年間の現地観測結果では湾内で高波浪が頻繁に発生していなかったことから、常時波浪についても検討した。

高波浪時の計算対象は、2009年1月23日で水深20m地点の波高が1.2mを超えたケースの他2ケースで、計算の入力条件である沖波の波浪条件（波高、周期、および波向）は、気象庁のGPVデータを用いた。また、常時波浪については、沖波の平均波浪を目安に

波高3段階、GPVデータの波向の出現頻度を参考に波向3方向を設定し、それぞれの組み合わせとして9ケースの計算を行った。これらの計算ケースを表-1に示す。なお、常時波浪の計算に用いた周期は、GPVによる沖波の波高と周期の関係を基に設定した。

ここでは波浪変形計算の方法として、エネルギー平衡方程式を用いた。湾内はサンゴ礁による起伏に富んだ地形を有しているので砕波変形は、磯辺(1986)による砕波モデル³⁾を用いた。

表-1 湾内波浪場の計算ケース

ケース	対象	沖波条件		
		$H_{1/3}(m)$	$T_p(s)$	波向
1	2009/01/23	5.23	10.3	NNE
2	2009/02/17	4.14	10.3	NE
3	2009/08/07	10.52	13.3	ENE
4	常時波浪 1	1.0	7.8	NNE
5	常時波浪 2	1.0	7.8	NE
6	常時波浪 3	1.0	7.8	ENE
7	常時波浪 4	2.0	8.5	NNE
8	常時波浪 5	2.0	8.5	NE
9	常時波浪 6	2.0	8.5	ENE
10	常時波浪 7	4.0	9.8	NNE
11	常時波浪 8	4.0	9.8	NE
12	常時波浪 9	4.0	9.8	ENE

計算領域は、網取湾周辺の地形の影響を考慮するため、石垣島を含む大領域（150km×100km、500m格子）と網取湾周辺の小領域（4.5km×3km、20m格子）の2段階に分けた。計算領域の範囲を図-10に、小領域の水深を図-11に示す。

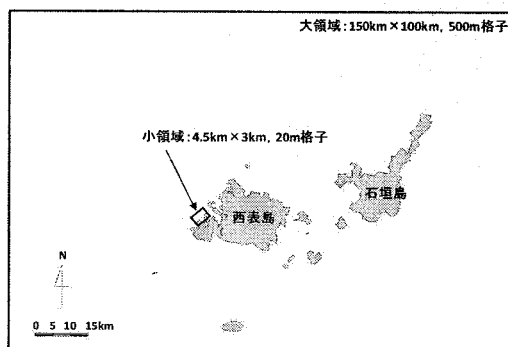


図-10 波浪変形計算領域

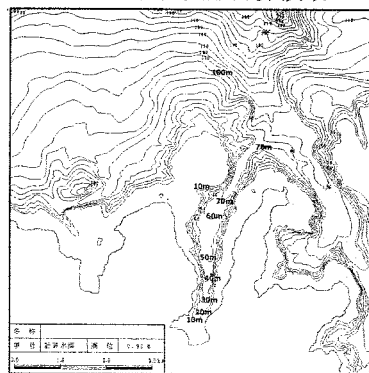


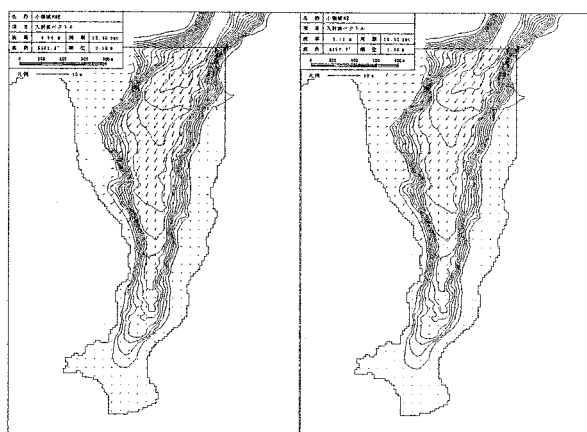
図-11 小領域の水深等高線図(網取湾付近)

高波浪時を対象としたケース1およびケース2の計算結果（波高・波向ベクトル図）を図-12に示す。

常時波浪の計算結果は、沖波の波高および波向と湾内の任意地点の波高を対応付ける変換テーブルの作成に利用する。

図-13は、2009年の冬期（1月～3月）および夏期（7月～10月）のSt.2での有義波高について観測値と計算値との比較を示したものである。観測値の時系列変化に常時波浪の計算結果（ケース4～ケース12）により作成した波高の変換テーブルを基に算出した波高の時系列変化を重ねて示している。また、ケース1～3の高波浪時を対象とした計算結果については図中のシンボルで示した。波高の計算結果は、観測結果の時系列変化の傾向をおおよそ再現している。

このことから、気象庁GPVデータを沖波として入力し波浪変形計算を行うことで得られる網取湾内の波高分布は、サンゴ分布との比較を行うという今回の目的に対しては十分適用できるものと考えられる。



(1) ケース1 (2) ケース2
図-12 ケース1および2の波高・波向ベクトル図

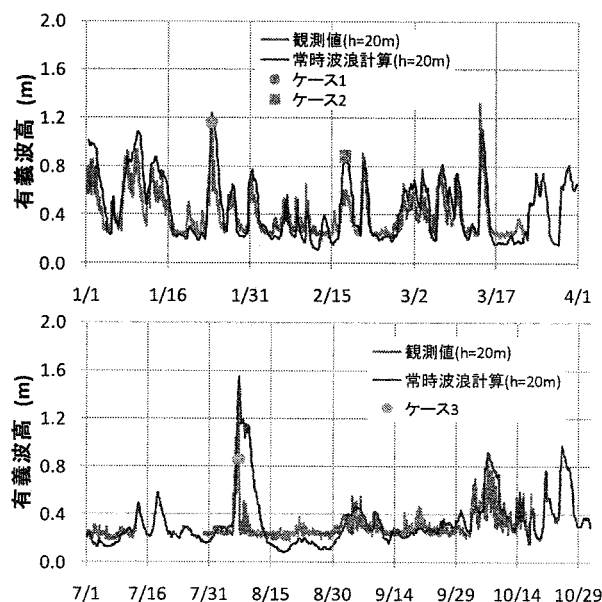


図-13 波高経時変化の計算値と観測値の比較（St.2）

4. サンゴ分布と波浪外力との関係に関する考察

湾内の波高分布とサンゴ分布（場所および水深）を対比することで、両者の関係を調べた。図-14では全調査結果について、横軸に高波浪時の数値解析結果により設定した波高を、縦軸に水深をとり、形状の出現割合と被度についてプロットした。波高は、湾内の波高比（湾内／沖波）が大きい北寄りの波向のケース1を用いた。これは、サンゴ分布に影響を与えるような高波浪が生じやすい波向のケースと考え選択した。この図をもとに、形状別に分類したそれぞれのサンゴ分布に対する環境条件を整理する。

卓上サンゴは、水深1～4m、波高は0.4～1.0mの環境下に分布しており、波浪外力に対する耐性は強いと考えられる。枝状サンゴは、水深1～9m、波高0.2～0.6mの環境下に分布している。卓状サンゴに比べて波浪のやや穏やかな環境に分布しており、卓上サンゴよりも耐波性は低いものと考えられる。ただし、分布している水深の幅が広く、光に対する適応性は高いと考えられる。塊状サンゴは、水深1m前後、波高0.2～0.4mの浅場で波浪が静穏な場所に集中して分布している。葉状サンゴは、水深1m、波高0.4m程度の一部のみに分布しているが、分布が限られていることに対する理由は把握できていない。

次に、湾内を大きくエリア分けし、湾内の平面的な分布特性について考察する。図-15は、湾口部西側沿岸のエリアに、図-16は湾口部東側沿岸のエリアに限定して図-14と同様にサンゴ分布をプロットしたものである。卓状サンゴ、枝状サンゴおよび塊

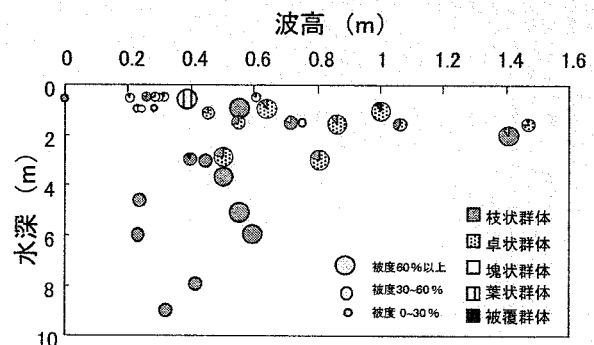


図-14 サンゴ分布の波高と水深との関係（波高条件：高波浪時，ケース1）

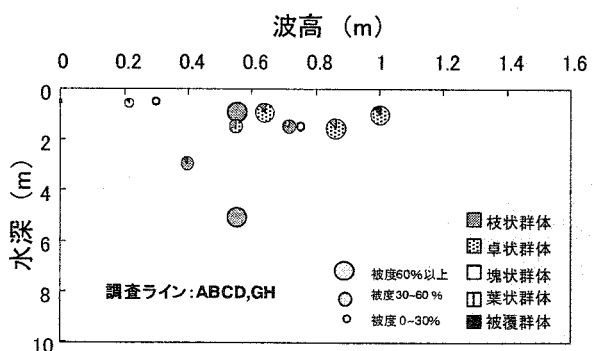


図-15 サンゴ分布の波高と水深との関係（湾口部西側）

状サンゴについては、湾口部の東側と西側で分布している波高や水深の環境はほぼ同じと言える。

図-17は、東側の湾中央部のものである。このエリアは、東側の沿岸でも外洋からの波浪が直接来襲する場所にあたる調査ラインE,Fである。湾口部と同様に卓上サンゴと枝状サンゴが見られるが、波高が1mを超過するためか被度が低い。一方で、他の場所で見られない葉状のサンゴが被度の高い状態で分布している。また、他の場所で多く見られる礁縁の外側の比較的水深の深い場所に出現する枝状のサンゴがここでは見られなかった。

図-18は、湾奥部のエリア (I, J, P, Q, R) について示したものである。塊状、枝状ともに波高0.2～0.4mの静穏な場所に分布しているが、それぞれ分布する水深帯が異なり、塊状は1m前後の浅場、枝状は3～9mの深場に分布している。この水深や波高の環境条件は、湾口部のものとほぼ同様となっている。

以上の関係図は、高波浪時の波浪外力がサンゴの生息条件に大きな影響を与えると考えて高波浪時（

ケース1)の湾内波浪場の計算結果を用いてまとめたが、高波浪の発生頻度は常時の波浪状況に比べると少ないことから、常時波浪を用いた整理も行った。

図-19は、図-14に示した全範囲のサンゴ分布と波高と水深との関係図を、観測期間中の平均的な波浪条件と考えられる常時波浪での波浪場の計算結果（ケース8）の波高を用いてプロットし直したものである。調査ライン上の波高は、ほぼ0.6m以下となっている。常時波浪の条件で見ると、卓上サンゴは波高0.2～0.6mに分布しており、高波浪への耐性は高いものの常時においては枝状サンゴと同程度の波浪環境下に分布している。枝状および塊状サンゴは、波高0.1～0.6mに集中しており、常時および高波浪時で大きな波浪環境の変化がない場所に分布している。

以上、環境要因として波浪に着目し、サンゴの形状ごとに異なる分布特性との関係をおおまかながら整理することができた。

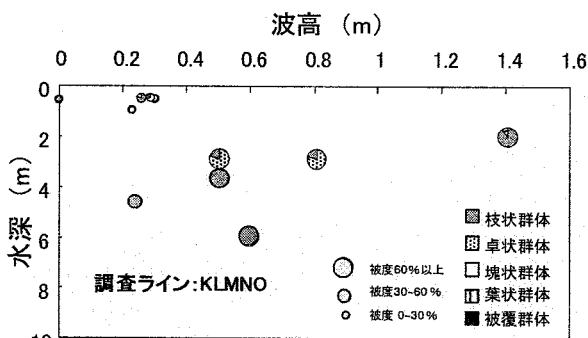


図-16 サンゴ分布の波高と水深との関係（湾口部東側）

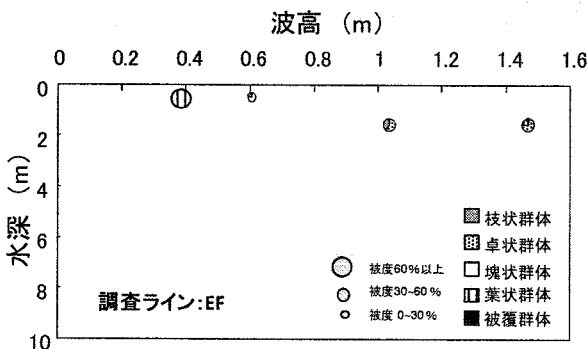


図-17 サンゴ分布の波高と水深との関係（E, F）

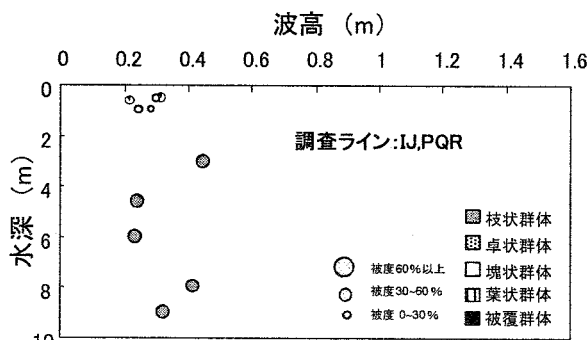


図-18 サンゴ分布の波高と水深との関係（湾奥部）

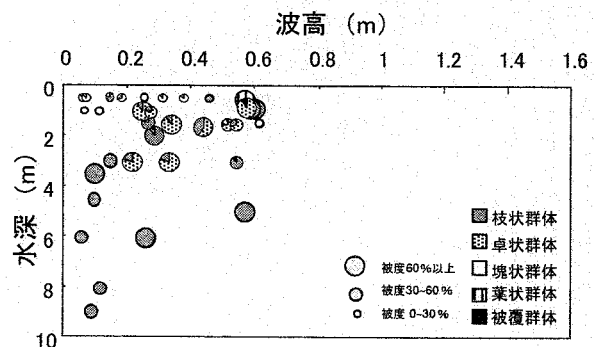


図-19 サンゴ分布の波高と水深との関係
（波高条件：常時波浪、ケース8）

5. まとめ

本研究では、サンゴ分布と波浪の現地観測および波浪の数値解析により、網取湾内のサンゴ分布と波浪特性の現状を把握した。この結果に基づく考察から、サンゴ形状の分布と波浪外力が関連づけられ、サンゴ形状ごとに持つ環境適応性と物理環境（波浪）との関係が確認できた。

なお、現在同地区でサンゴ着生基盤を設置した現地実験を実施中であるが、今後は、ここで検討した波浪環境を考慮して実験結果の検討・評価を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 沖縄総合事務局：平成6年度那覇港防波堤周辺環境調査報告書，1995。
- 2) 島谷 学・佐貫 宏・中瀬浩太・江里口岳志・岡安章夫：那覇港外郭施設におけるサンゴの生育に適した流動環境について，日本サンゴ礁学会第9回大会講演要旨集，pp. 46，2006。
- 3) 磯部雅彦：放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 134-138，1986。