

沖ノ鳥島におけるサンゴ片, 砂の移動過程に関する研究

Study on movement of coral fragments and coral sand in the Okinotorishima Island

中山哲蔵¹・渡邊 浩二²・山本 秀一³

Akiyoshi NAKAYAMA, Kouji WATANABE and Shuichi YMAMOTO

This study examined movement of coral fragments and coral sand in the Okinotorishima islands in case of high-energy wave. Wave and current around the island were estimated by the modified Boussinesq equation. Movement of coral fragments and coral sand were calculated by using the formula of saltation for gravel and sand, and instantaneous velocity calculated by the former model. The extent of coral fragments transportation and the amount of sand transportation were made clear. Calculations were carried out in case of four wave directions such as north, south, east and west. +

1. はじめに

サンゴ礁には, サンゴを中心とした多様な生態系が形成されており, 健全に保全することが重要である. サンゴの増殖には, 有性生殖, 無性生殖の過程がある. 初夏大潮期に産卵・受精が行われ, 幼生が拡散・着底し(有性生殖), その後無性生殖により増殖し, 群体となる.

波浪などにより, サンゴの一部又は全部が剥離し, サンゴ片となり移動する. 移動した地点での生息環境が良ければ, 生残し, 増殖を続ける. サンゴ片の形成過程はフラグメンテーションといわれ, 有性生殖過程と同様にサンゴ礁の形成に寄与している. サンゴ増殖を促進する手法として, フラグメンテーションを利用することが考えられる.

本研究は, 沖ノ鳥島を対象として, フラグメンテーションの過程に着目し, サンゴ礁沖側斜面からのサンゴ片供給, 礁内への移動過程を, 修正ブシネスク波動方程式と砂礫移動モデルにより検討したものである. 加えて, サンゴ礁内での砂の移動を検討した.

2. 沖ノ鳥島の地形, サンゴ礁分布・底質分布

沖ノ鳥島の地形を図-1に, 底質分布, サンゴの被度分布(以後礁という)を図-2に示す. 同データは, 国交省の調査結果及び水産庁調査結果を基に作成したものである. 礁外縁部は礁内より高く, 礁嶺を有する岩盤地形である. 礁外縁沖側は図-1断面図からわかるように1:1程度の急勾配となっている. 礁内は水深が礁嶺より深く, 数m規模の凸状の岩盤(以後ノルという)にサンゴ群体が生育している. ノルは礁嶺に近い領域では密度が小さ

く, その大きさも小さい. ノルの一例を写真-1右に示す. ノルは礁西側中心部で密度が高く, サンゴ被度も高くなっている. 礁中心部には砂が堆積している(図-2参照).

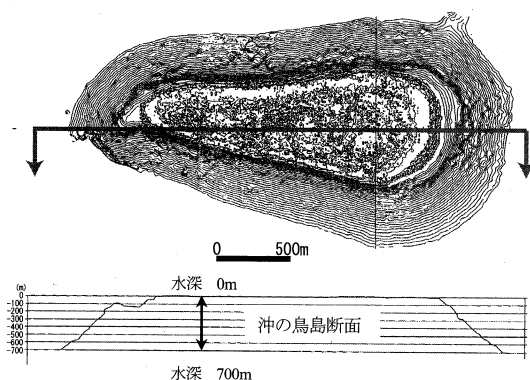


図-1 沖ノ鳥島地形図

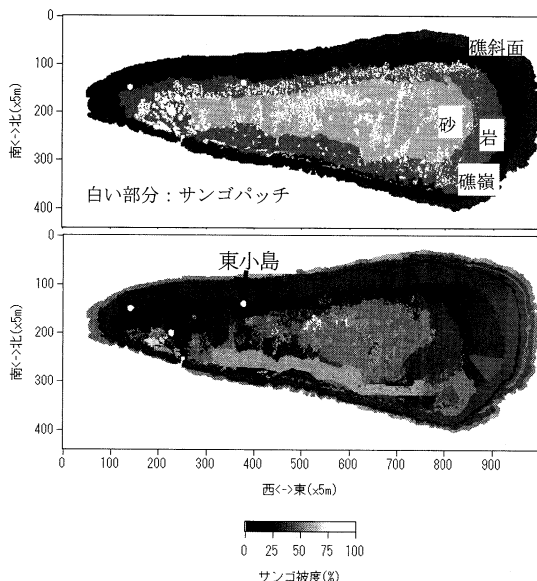


図-2 沖ノ鳥島底質(上)及びサンゴ被度分布(下)

- 1 正 会 員 工 修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
2 工 修 (社)水産土木建設技術センター
3 工 修 (社)水産土木建設技術センター

砂が堆積している中央部ではノルが散在している状態となっている。礁外縁沖側では、急斜面上水深5~60m程度の水深帯でサンゴが生育している(写真-1左参照)。このことから、礁外縁沖側からの礁内へのサンゴ片供給はあるものと推測される。

3. フラグメンテーション及び砂の移動計算

波浪によるサンゴの破壊過程に関してはMadin・Connolly (2006)が、サンゴに働く流体力を評価し、サンゴ群体に働く曲げモーメントとサンゴ群体の曲げ強度からサンゴの耐波性を検討している。このようにフラグメンテーション過程を把握するには、サンゴの種類別形態・規模分布・強度特性等詳細な情報が必要である。流動によるサンゴ片の剥離、移動をモデル化するには上記情報が不可欠であるが、そのような情報は今のところない。

これまでの観察結果等から見て、礁外沖側斜面の水深5~10mの領域でサンゴ片が生成され、この水深帯からサンゴ片が礁内外に供給されるものと仮定した。その輸送外力は台風等による波浪とした。波動流及びそれに伴うサーフピート及び海浜流により、サンゴ片が島内に打ち上がり、移動するものと考えた。

流動場の計算には、修正ブシネスク方程式を用いた。平山ら(1998)による非線形波浪モデル(NOWT-PARIV 4.6c3)をベースとし、計算の安定性、精度向上のために、移流項に2次精度の風上差分(Donnar-Cell法)を用いた。砕波による拡散項は佐藤・Kabiling (1994)と同様としたが、計算の不安定性回避のために、差分近似の際に現れる項の一部のみを次の時刻の値(未知数)とし、それにより発生する流量の不整合を後から補正するSSI (Symmetrical Semi-Implicit) 法を適用した。なお、造波境界背後及びその反対側境界には、スポンジ層を設置し、さらに両境界端に放射条件を設定し、計算領域内への再反射を極力防止した。入射波沿いの境界は完全反射とした。

サンゴ片の移動は砂礫と同様とし、大型水槽でグラベル移動に関する水理模型実験及び数値計算を行ったPedrozo ら(2006)が用いた掃流砂量公式を単純化したものを用いた。礁内の砂の移動では、図-2を参考として砂の堆積領域を設定し、佐藤・Kabiling (1994)が用いた掃

流砂量公式を用いて計算した。サンゴ片、砂の掃流量 q_x , q_y (添字 x , y はそれぞれ x 軸, y 軸方向を示す)は以下の式を用いた。

$$\frac{q_x}{\sqrt{(s-1)gD_s^3}} = \alpha_b \psi^{0.5} \max(\psi - \psi_c, 0) \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (1)$$

$$\frac{q_y}{\sqrt{(s-1)gD_s^3}} = \alpha_b \psi^{0.5} \max(\psi - \psi_c, 0) \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (2)$$

$$\psi = \frac{c_f u^2}{(s-1)gD_s} \quad (3)$$

ここで、 u , v ; x , y 方向瞬間流速, ψ ; シールズ数, c_f ; 底面摩擦係数, s ; 底質比重, g ; 重力加速度, D_s ; 粒径である。

サンゴ片については、 $\alpha_b=12$, $\psi_c=0.05$, $s=1.6$ (生きているサンゴの比重), $D_s=4\text{cm}$ とした。砂については $\alpha_b=3.5$, $\psi_c=0$, $s=2.7$, $D_s=1.4\text{mm}$ (底質分析結果)とした。サンゴ片の大きさについては情報がないので、Bruno (1998)の研究及びサンゴ片の堆積写真等を参考とした。

この掃流量を用いて以下の式から地形変化量を計算した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(q_y) \right\} \quad (4)$$

なお、サンゴ片の場合には空隙率 λ を0とし、砂の場合には0.4とした。堆積厚が無い場合には掃流量を0とした。サンゴ片に関してはこのような取り扱いでは量的な評価は不可能であるが、礁内のどの範囲まで輸送されるかを評価出来るものとした。

沖ノ鳥島沖側では図-1、沖ノ鳥島周辺では、国交省が行った深浅測量をもとに、5mメッシュの水深データを作成し、これを波浪及びサンゴ片、砂移動の計算に用いた。

国交省が行っている観測結果を参考に年に数回程度来襲する有義波高、周期(一方向不規則波)を、5m, 15秒とし、東、西、南、北それぞれの方向から、有義波相当で500波分約2.1時間作用させた(図-3参照)。計算の都合上、沖側での最大水深を40mとしている。流動場、地形変化の計算ともに、空間分解能、差分時間は5m, 0.19秒とした。

サンゴ礁内の地形は、先に述べたようにノルや岩盤地形により複雑である。したがって、本計算の空間分解能及び計算手法により、局所的な流れ、サンゴ片・砂の動きを評価することは困難であるが、ここでは沖ノ鳥島における全体的・平均的な現象を把握することを目的として、本計算による検討を行った。

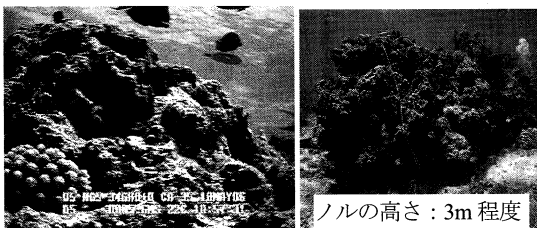


写真-1 礁外縁水深5mのサンゴ(左) 礁内のノル(右)

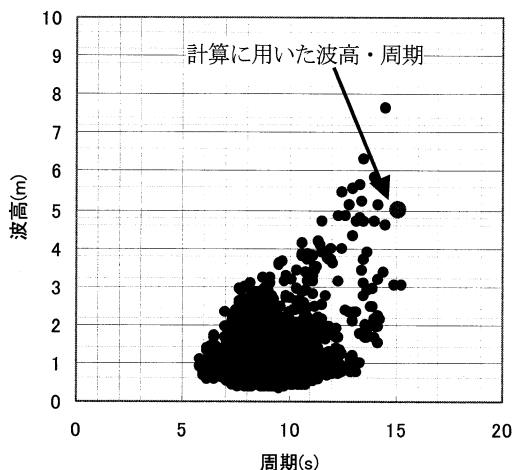


図-3 沖ノ鳥島来襲有義波高・周期分布 (2004/6~2005/6)

4. 計算結果及び考察

図-4, 5, 6, 7に沖ノ鳥島の波高分布, 水位・平均流速, サンゴ片堆積厚, 砂面変化分布を示す。波向きがそれぞれ東, 西, 北, 南となっている。島の沖側の波高は, 2.5m以上で等高線表示していない。なお, 平均流速は, ブシネスク波動方程式によって計算される線流量を時間平均し, セットアップを含めた平均水深で除することによって求めた。瞬間の線流量をそのときの全水深で除した流速の時間平均とは異なるが, 両者を比較したところ, 差異が少なかったため, 前者を掲載した。

沖側外縁部で波高8mを越す波高となっているが, 礁嶺部での砕波減衰により, ほとんどの場合, 礁内部では波高は概ね1~1.5m程度と小さい。ただし, 波向きが南(図-7)の場合は, 礁内でも波高2m程度と高くなっている。この原因は, 南側の礁嶺部の幅が北側に比較して小さいこと, 礁嶺背後で水深が大きいことによるものと考えられる。平均水位は, 来襲方向の礁嶺側で高くなっている。礁内の平均水位も波高分布と同様に波向きが南の場合に高くなっていることがわかる。平均流は波向きに対応した流れが形成されているが, 平均水位の高い礁嶺部では沖側へ流出する流れが生じている。波向きが南の場合にはやはり礁内の流れが他の場合より大きくなる。

サンゴ片の堆積分布状況をそれぞれの図から比較する。波向きが南北の場合には, 礁内への移動量が大きく, 礁中央部近くまで到達しているが, 量は少ない。波向きが東西の場合には波向き側領域で移動量が多いが, それ以外は少ない。以上から, サンゴ片は激浪来襲時においても礁中央までは到達することは少ないものと考えられる。しかしながら, 小さいノルが存在する礁嶺背後領域にまでは到達する可能性がある。また, 南北方向の波向きの

場合に移動量が大きくなるものと推察される。

砂の移動状況をそれぞれの図から比較する。まず, 全体に言えることは, 来襲波高が高いのに比して, 砂の移動量が少ない。これは, 砂の堆積している領域が礁中央部で, 水深が3m以上となっていること, 礁中央部の波高, 平均流速が小さいことによるものと考えられる。特徴的なのは, 砂移動が波向きと反対方向にもかなりの量移動していることである。これは, 大きな波高が来襲した場合に島縁辺部が干出状態となって発生する礁外への強い流れ, サーフビートによる流れ及び先に述べた波向き側礁嶺部に発生する沖側への平均流等により礁外側への砂の輸送がおきることによるものと考えられる。なお, 南方向からの波向きに関しては, 台風来襲前後における

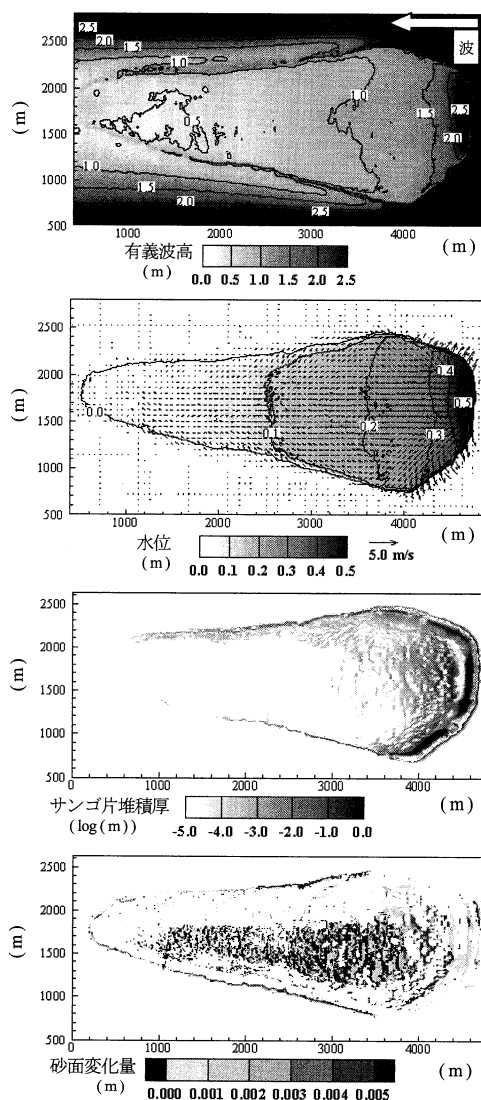


図-4 波高, 水位・平均流速, サンゴ片堆積厚, 砂面変化 (波向き東)

地形変化が観測されており、台風来襲後の東小島周辺(図-2下段図中に位置を示す)の砂の堆積形状は本計算結果とほぼ同様であった。

波向き別に沖への砂の流出量を図-8に示す。この図から、全体的に流出量は少ないが、波向きが南北方向のほうが流出量が多いことがわかる。通常時においても、潮汐、波浪、海浜流等により、島内の砂は徐々に移動しており、沖ノ鳥島での漂砂現象による地形変化は長期的な視点から検討する必要があると考えられる。この点については今後検討する必要がある。

以上、サンゴ片、砂の動きは、東西に細長いという沖ノ鳥島の地形的特徴を良く反映した結果となった。

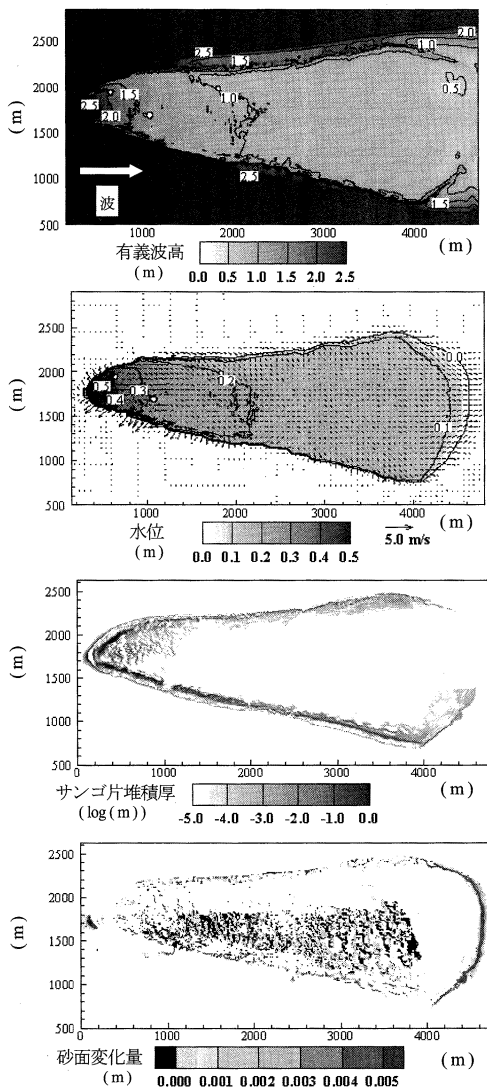


図-5 波高、水位・平均流速、サンゴ片堆積厚、砂面変化(波向き西)

5. まとめ

修正ブシネスク波動方程式及び砂礫移動モデルによって、沖ノ鳥島におけるサンゴ片及び島内の砂の移動状況について数値的な検討を行った結果、以下のようなことが言える。

- (1) 沖ノ鳥島でのサンゴ片の移動量、砂移動量は、波向きが南北の場合に多い。
- (2) サンゴ片の移動量は、小さなノルの存在する礁嶺背後領域までが多く、礁中央部は少ない。
- (3) 島外への砂の流出は、東西に比較して南北方向の波向きの場合に多い。

サンゴ片の移動に関しては、あくまで砂礫として見なした定性的な検討であり、定量的な検討のためには先に述べたようにサンゴ片の発生・移動過程をモデル化した

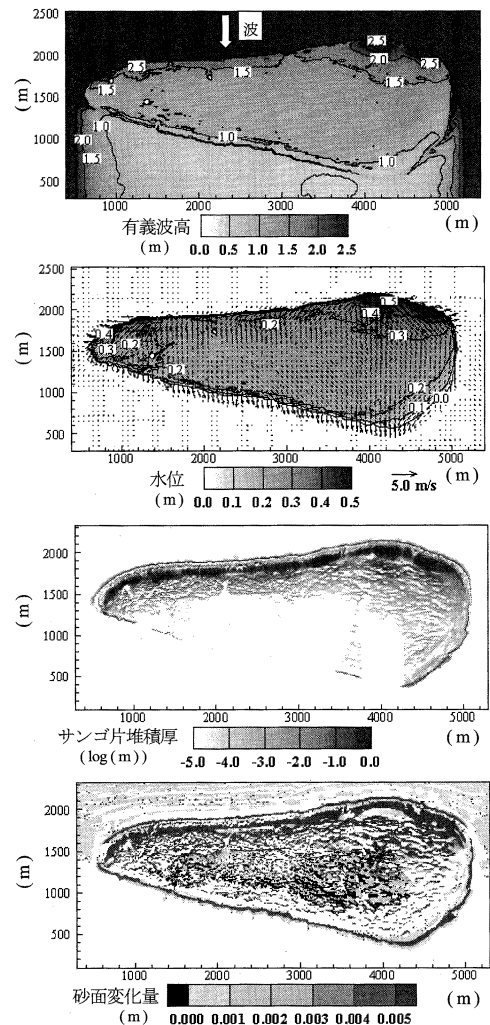


図-6 波高、水位・平均流速、サンゴ片堆積厚、砂面変化(波向き北)

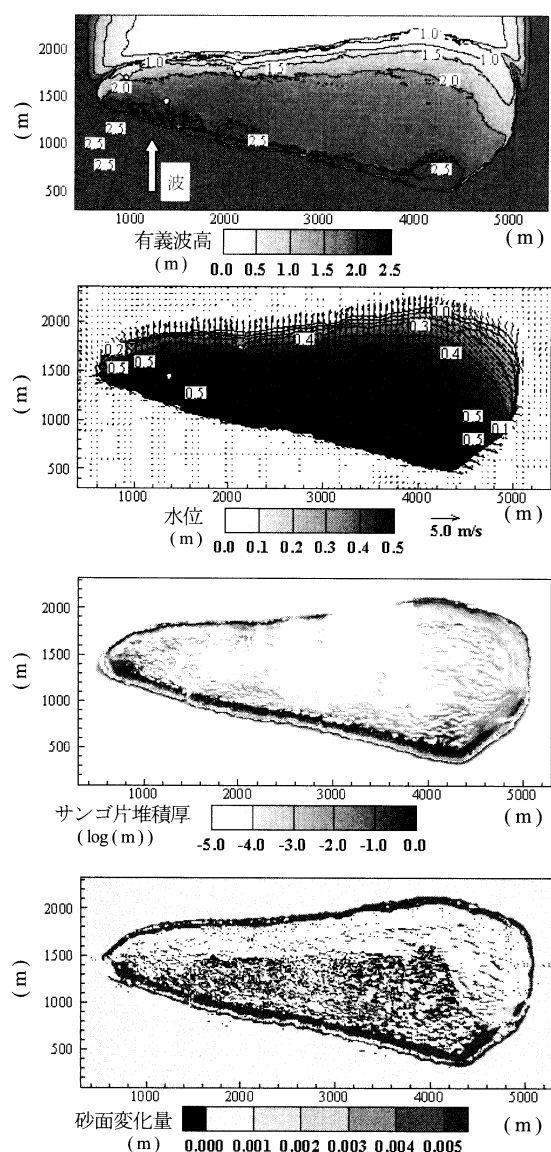


図-7 波高、水位・平均流速、サンゴ片堆積厚、砂面変化 (波向き南)

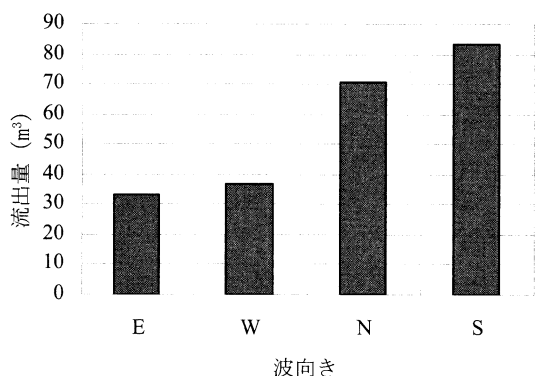


図-8 波向き別島外への砂流出量

検討が必要であり、今後行っていきたい。また、島内の砂移動による地形変化については長期的な検討が必要である。

参考文献

- (財)国土技術研究センター (2002): 沖ノ島島技術レポート, pp.203.
- 佐藤慎司・M. Kabiling (1994): 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.401-405.
- 水産庁漁港漁場整備部, 水産土木建設技術センター (2007): 平成18年度生育環境が厳しい条件下における増養殖技術開発調査委託事業報告書, pp.181.
- 中山哲蔵・牧野弘幸・新井雅之・大村智宏・小林 学・田村 仁・灘岡和夫・佐藤勝弘 (2006): 港内埋没対策技術と地形変化予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.526-530.
- 平山克也・平石哲也 (2004): プシネスクモデルによる碎波・遡上計算法とその適用性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.11-15.
- 平山克也・上原 功・永松宏一・平石哲也 (1998): 珊瑚礁リーフにおける波と流れの計算法の適用性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.161-165.
- Pedrozo, A., D. J. Simmonds, A. K. Otta, A. J. Chadwick (2006): On the cross shore profile change of gravel beaches, Coastal Engineering, 53, pp.335-347.
- Madin, J. S., S. R. Connolly (2006): Ecological consequences of major hydrodynamic disturbances on coral reefs, nature, Vol.444, pp.477-480.
- Bruno, J. F. (1998): Fragmentation in *Madracis mirabilis* (Duchassaing and Michelotti): how common is size-specific fragment survivorship in corals?, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, vol.230, pp.169-181.