

スリック形成に着目した造礁サンゴ幼生のリーフ内 初期分散過程に関する数値解析

灘岡和夫¹・有坂和真²・田村 仁³

放卵放精型サンゴの繁殖戦略において重要となるスリック（卵・幼生の带状集合体）の形成メカニズム，特にリーフ内外の流れを中心とした物理環境との関係はまったく分かっていない．そこで，典型的な裾礁型サンゴ礁である石垣島白保海域を対象に，数値シミュレーションに基づいて，サンゴ幼生のリーフ内初期分散過程，特にスリック形成メカニズムについて検討した．その結果，裾礁型サンゴ礁に一般的に見られる礁嶺-チャンネルシステムの存在が，周辺のリーフ内外における循環流構造と幼生の分散過程を特徴付けており，リーフ内の粒子群がチャンネルを通過することによりスリックが形成されることを示した．また，その潮汐依存性について検討した．

1. はじめに

サンゴ礁は，栄養塩レベルの低い熱帯・亜熱帯海域に広く分布し，生物相の豊かな生態系を形成している．しかし，近年，赤土流入や高水温ストレス，オニヒトデによる食害等の環境ストレスにさらされており，世界の約 6 割のサンゴ礁が危機的状況にあり，適切な保全・再生策を早急に確立していくことが必要となっている．そのためにはサンゴの生活史の各段階への環境影響を把握していくことが必要となる．しかし，このうちサンゴの受精・幼生初期分散過程については実態そのものに不明な点が多い．ほとんどのサンゴ（放卵放精型）は，年に一度だけ産卵を行い多くの群体が同調して産卵することによって互いに異なる群体からの卵・精子が受精して多量の幼生を産出するという繁殖戦略を有している（Babcock ら, 1986；林原, 2002）．卵（正確には卵・精子の粒状集合体であるバンドル）は脂質を多く含むため水面に浮上し（Arai ら, 1993），時にスリックと呼ばれる卵や幼生の混在する带状構造体を形成することがある（Oliver ら, 1987；灘岡ら, 2002）．スリック形成は異なる群体からの卵・精子の遭遇確率（従って，受精確率）を大きく左右するが，スリック形成のメカニズム，特にリーフ内外の流れを中心とした物理環境との関係についてはまったく分かっていない．そこで，本研究では，数値シミュレーションに基づいて，典型的な裾礁型サンゴ礁である石垣島白保海域を対象に，サンゴ幼生のリーフ内初期分散過程，特にチャンネルおよび礁嶺の存在に着目したスリック形成メカニズム及びその潮汐依存性について検討した．

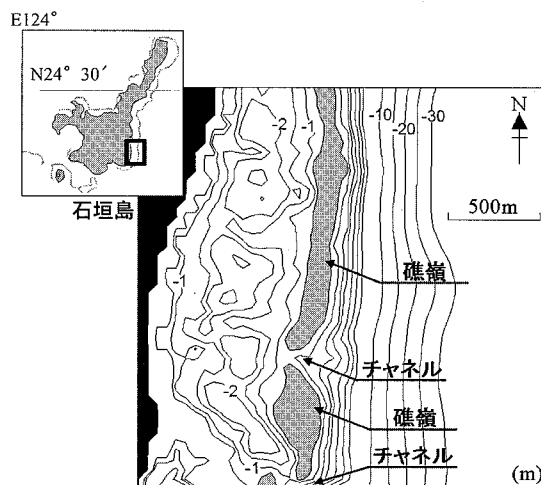


図-1 数値解析領域及び水深分布，地形特徴

2. 数値解析手法

本研究で対象とする石垣島白保海域は，岸沖方向に，水深 0～3 m 程度の礁池，サンゴがよく発達している内側礁原，干潮時に干出する礁嶺と続き，さらに局所的に礁嶺が裂け礁池と外洋とを繋ぐチャンネルが存在する典型的な裾礁域である（図-1）．

（1）流動・粒子追跡モデルの概要

本数値シミュレーションでは，リーフ海域における流動場を再現した上で，サンゴ卵および幼生の移動を追跡することでサンゴスリックの形成メカニズムの解明を試みる．流動場の計算には，田村ら（2003）により開発された裾礁リーフ海域に適用可能な準三次元浅水乱流モデル（SDS-Q3D Model）を用いている．このモデルでは極浅水域における乱流モデルとして SDS 乱流モデルを用いている．また，礁嶺の干出効果や波浪による海浜流計算が可能となっている（田村ら, 2004）．

幼生粒子のトラッキング計算に際しては，SDS 乱れ

1 フェロー 工博 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境工学専攻
2 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境工学専攻修士課程
3 正会員 博(工) (独)海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター研究員

表-1 流動計算に用いたパラメータ

時刻幅 (s)	1
東西方向空間解像度 (m)	50
南北方向空間解像度 (m)	50
移動境界基準水深 (cm)	2

表-2 波浪計算に用いたパラメータ

周波数分割数	10
方向角分割数	35
方向集中度パラメータ	75
有義波高 (m)	0.72
有義波周期 (s)	6.8
入射角 (°)	19.14

強度から拡散係数を評価したランダム・ウォークモデル (例えば, 小林ら, 1997) を用いた。

(2) 数値計算条件

数値解析領域は, 図-1 に示した東西方向 2.4 km × 南北方向 2.4 km の海域である。流動計算の外力は潮汐及び波浪である。本研究では, 裾礁域における一般的なサンゴ幼生のリーフ内初期分散過程について検討する為, 潮流計算には M2 分潮のみを沖合潮位変動として与え, また, 波浪計算には, 沖合入射波条件として一定の値 (有義波高: 0.72 m, 有義波周期: 6.8 s) を用いた。なお, 本計算に用いたパラメータは表-1, 表-2 の通りである。

3. 数値解析結果と考察

(1) 流動パターンと分散過程の検討

図-2 は, 潮位変動として M2 分潮 (振幅: 1.0 m) を与えたときの各時刻における流速分布の数値解析結果を示したものである。これより, 下げ潮時にはチャネルおよび礁嶺からリーフ内水塊がリーフ外へと流出するが, その後の干潮時には礁嶺の干出効果によりチャネルからのみリーフ外へと流出し, この時リーフ内においてはチャネルへ向かう流れが生じていることが分かる。さらに, 上げ潮時に礁嶺が冠水するとリーフ内への急激な流入が生じている (田村ら, 2004)。図-3 は, 一潮汐平均流速分布である。これから, 礁嶺からリーフ内へ流入し, リーフ内ではチャネルへ向かう流れが生じ, チャネルから外洋へと流出していくという平面的な循環流構造が存在することが分かる。

図-4(a)に, 大潮期上げ潮時に投入した粒子の投入位置とその分散状況 (粒子投入後 6 時間後) を示す。この投入位置は, 実際の白保海域においてサンゴの群集の存在が茅根ら (1999) によって確認されている範囲の中から設定したものである。チャネルを通過することで粒子群が岸沖方向にストレッチされ, 沿岸方向の分散幅が急激に縮小されることが分かる。さらに粒子投入から 12.5

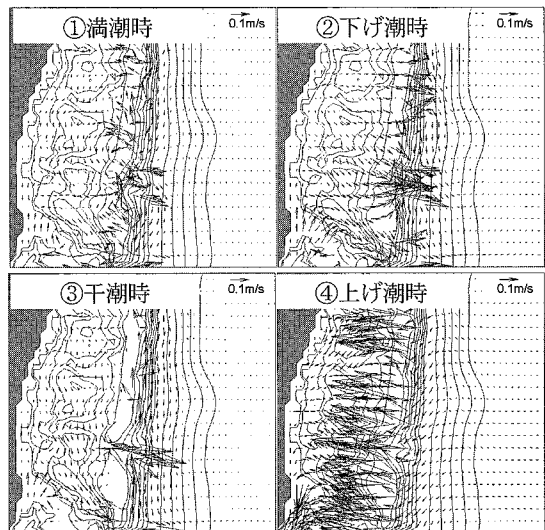


図-2 各時刻における流速分布

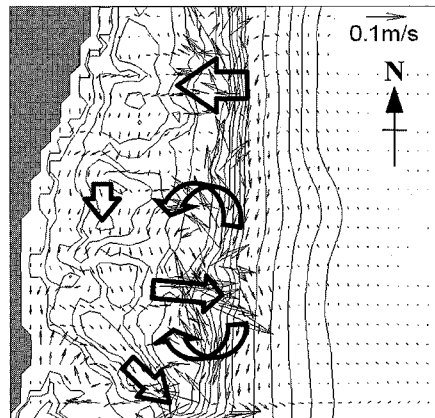


図-3 一潮汐平均流速分布

時間後には, 投入時にはリーフ内で広い範囲に分布していた粒子群の分布形状が大きく変化し, 沿岸方向に伸びた帯状体に集中する形, すなわち, スリック状構造を示すようになっていくことが分かる (図-4 (b)). このスリック状構造は, 茅根ら (1999) によって確認されているサンゴ生息域内の他のエリアに粒子群を投入しても同様に確認することができる (図-5, 図-6). ただし, 図-6 からわかるようにチャネルから遠い場所に粒子を投入した場合は, 当然ながら, スリック状構造が形成されるまでに時間がかかる形になっている。このようなスリック状構造の形成は, サンゴの受精確率を高めるように作用することから, 本研究で得られた結果は, 裾礁型サンゴ礁に一般的に見られるチャネル-礁嶺システムの存在が, スリック状構造の形成を通じて, サンゴの受精確率を高める役割を有していることを示唆するものである。

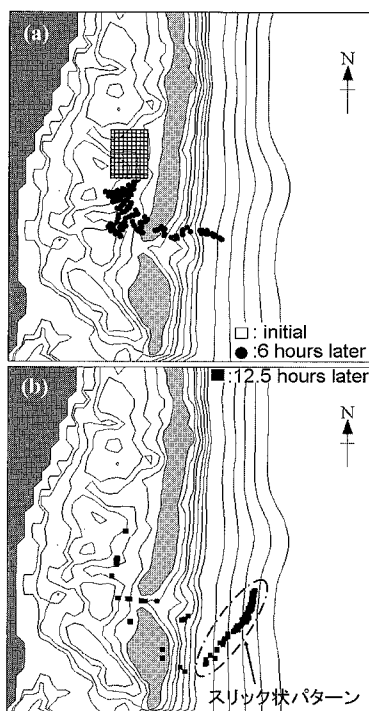


図-4 スリック形成 Case①

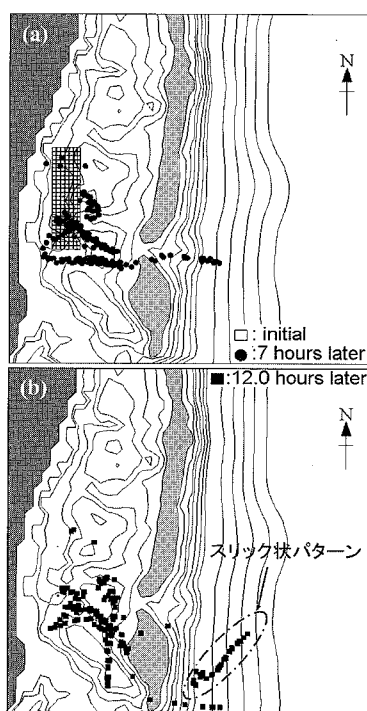


図-5 スリック形成 Case②

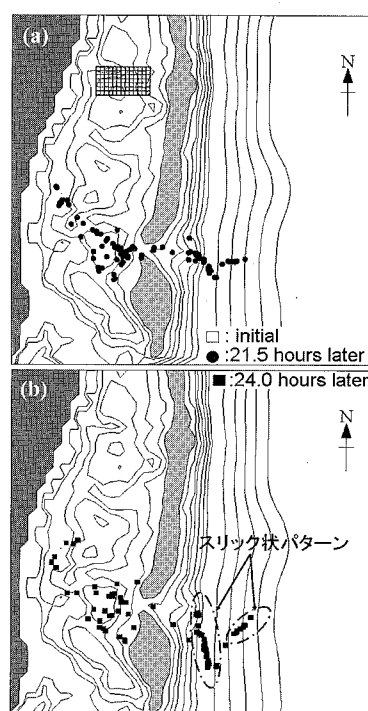


図-6 スリック形成 Case③

(2) 潮汐依存性の検討

サンゴの一斉産卵が発見された1980年代半ばのグレートバリアリーフでは、サンゴ産卵のタイミングが多くの場合小潮期干潮時に当たっているが、沖縄では、大潮期小潮期両方の満潮時前後に産卵が行われていることが多いと報告されている (Hayashibara ら, 1993). そこで、ここでは、サンゴの生殖戦略上、よりスリックを形成し易く、従って受精確率が高くなる潮汐のタイミングで一斉産卵している可能性を検討することを目的として、様々な潮汐条件下での幼生輸送に関するシミュレーション解析を行った. 具体的には、一斉産卵時における潮汐の違いによるスリックの形成しやすさを比較するために、大潮期 (振幅: 1.0 m) と小潮期 (振幅: 0.4 m) それぞれについて、満潮時、下げ潮時、干潮時、上げ潮時という異なる産卵時刻ごとにリーフ内のほぼ全域 (図-7) に粒子を投入して粒子追跡計算を行った.

その結果、投入後一潮汐以内に図-8(a)中に示したチャネルを通過してリーフ外へと流出した粒子の投入位置 (図-8, 図-9中の黒色部分) を比較すると、小潮期に投入した場合の方が、大潮期の同じ時刻に投入した場合よりも広い範囲の粒子までチャネルからリーフ外へと流出することが判明した. より広い範囲の粒子がチャネルを通過するということは、小潮期に産卵が行われた方がチャネルを通じてスリックを形成しやすく、受精確率が高くなるということを示唆するものである. 大潮期と小潮

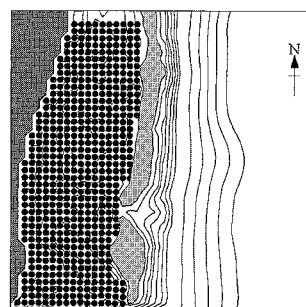


図-7 粒子投入範囲 (リーフ内全域)

期のチャネルと礁池 (図-10) における流速時系列変動 (図-11, 図-12) より分かるように、大潮期と小潮期では、流速波形の特徴が大きく異なる. すなわち大潮期では、上げ潮期初期の短期間に冲向き流速よりも大きな岸向き流速が生じているのに対し小潮期では常に冲向きの流出方向となっている. このような違いが一潮汐間の通過粒子数の違いによって現れる原因になっているものと考えられる. なお、ここでの数値シミュレーション結果は、スリック状構造の形成し易さ (より直接的には、スリック状構造の形成につながる一潮汐間チャネル通過粒子数) の違いから見たとき、小潮期の方が受精確率が高くなる可能性を示しており、上記のグレートバリアリーフの報告例と符合しているが、より一般的な結論を得るには、今後さらにシミュレーション対象海域や計算条件

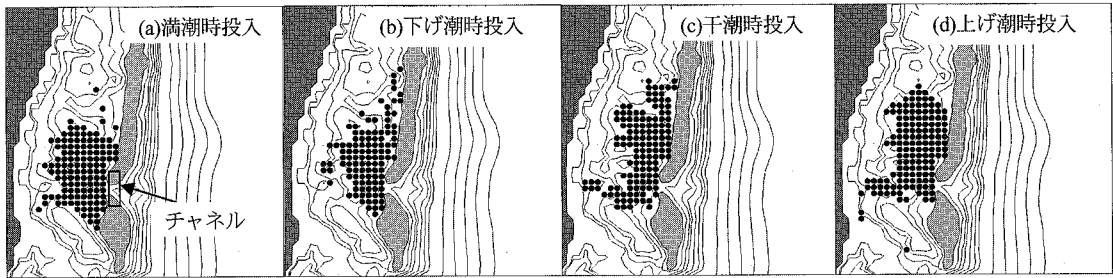


図-8 大潮期に投入した場合のチャンネル通過粒子分布

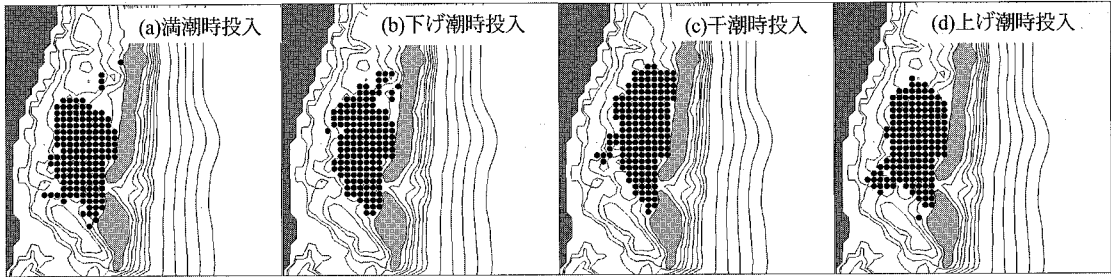


図-9 小潮期に投入した場合のチャンネル通過粒子分布

を増やして検討していく必要がある。

(3) リーフからの幼生流出及び自己加入割合の検討

サンゴ産卵の後、サンゴ幼生の何割が当該リーフに留まり、何割がリーフ外に出て他のリーフへの加入に寄与する可能性があるかを知ることは、サンゴ礁域の生態系維持機構を把握する上で重要な要素となる。

そこでここでは、リーフ内のほぼ全域 (図-7 黒色部分) に粒子を投入し、それらの粒子のその後の分散過程を一潮汐間追跡した。図-13 の黒色部分は、(a)大潮期 (振幅: 1.0 m) と (b) 小潮期 (振幅: 0.4 m) の干潮時に粒子を投入した場合それぞれにおける、一潮汐後にリーフ内に残存している粒子の投入位置を示したものである。チャンネル-礁嶺システムにより、リーフ内の粒子は、まず、チャンネルに向かって輸送された後チャンネルを通過してリーフ外へと流出する。図-13 に示したリーフ内残存粒子の初期位置に投入した粒子は一潮汐以内にチャンネルまで到達しなかった、またはチャンネルを通過したもののリーフ内へと押し戻されたためにリーフ内残存粒子となった粒子である。これから、リーフ内全域に投入した粒子の約 5 割が一潮汐以内にリーフ外へと流出しているものの、残りの 5 割がリーフ内に残存していることがわかる。もちろんこの割合は、対象海域の設定によって異なってくるものと思われる。また、一産卵後の海象・気象条件 (例えば吹送流の大きさや向き) によっても割合は変わってくるものと考えられる。その意味で、ここで示した結果は、一例に過ぎないが、今後、この種の検討を様々な条件下で実施していく予定である。

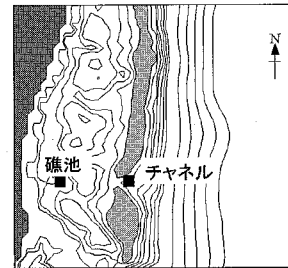
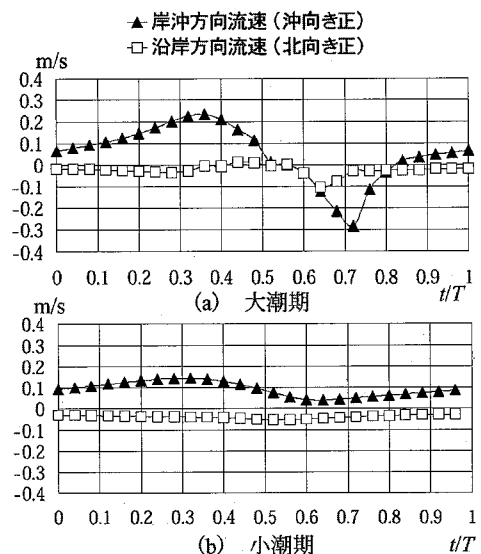


図-10 図-11, 12 におけるチャンネルおよび礁嶺の位置

図-11 チャンネルにおける流速の一潮汐時系列変動 (満潮時: $t/T=0$)

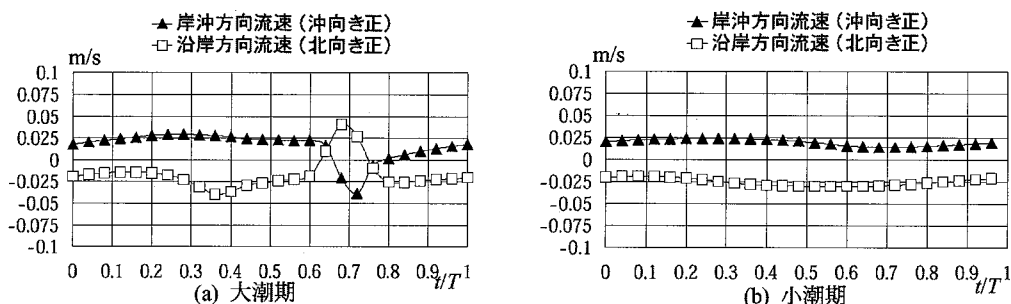


図-12 礁池における流速の一潮汐時系列変動
(満潮時: $t/T=0$)

なお、小潮期に対する結果(図-13 (b))を見ると、チャンネルに近い位置であるにもかかわらず、ある程度の数の粒子が残存している形になっている。この領域は、典型的な保育型サンゴであるアオサンゴの群落の場所とほぼ重なっている。保育型サンゴは放卵放精型サンゴと比べて幼生分散範囲が小さく(Harii ら, 2003)、従って自己加入の割合が高いものと考えられることから、この結果は、同海域でのアオサンゴ群落の維持メカニズムの一端を示唆するものとなっている。

4. おわりに

本研究では、典型的な裾礁域である石垣島白保海域を対象として、サンゴの卵・幼生のリーフ内初期分散過程を把握するために、流動計算および卵・幼生分散シミュレーションを行った。その結果、裾礁型サンゴ礁に一般的に見られるチャンネル・礁嶺システムの存在は、周辺のリーフ内外における循環流構造とそれに伴う幼生の分散過程を特徴付けており、リーフ内の粒子群がチャンネルを通過することにより、スリック状構造が形成され、サンゴの受精確率を高める役割を有していることを示した。また、このスリック状構造の形成し易さに潮汐依存性があることを示し、それが実海域でのサンゴ一斉産卵の潮汐依存性に関連している可能性があることを示した。さらに、一斉産卵後の幼生粒子の一潮汐後の移動パターンを計算することにより、リーフ外への流入量と自己加入(self-seeding)に寄与し得るリーフ内残存量について定量的に検討を行った。

なお、本研究は科研費基盤研究(A)(一般)(研究代表者: 瀬岡和夫, 課題番号: 17206052)を得て行ったものであることを付記する。

参考文献

- 茅根 創・波利井佐紀・山野博哉・田村正行・井手陽一・秋元不二雄(1999): 琉球列島石垣島白保・川平の定例線における1998年白化前後の造礁サンゴ群集被度調査, *Galaxea*, JCRS, 1, pp. 73-82.

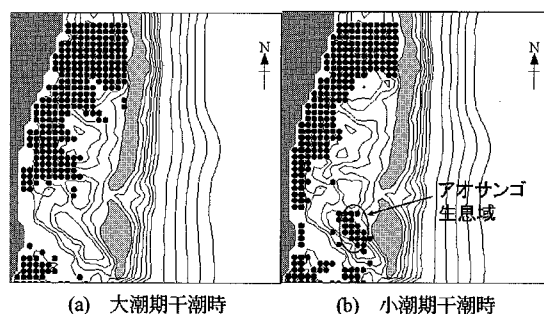


図-13 リーフ内残存粒子の初期分布

- 小林智尚・Poojitha D. Yapa (1997): 海岸域での油の挙動の数値計算, *海岸工学論文集*, 第44巻, pp. 1041-1045.
- 田村 仁・瀬岡和夫・Enrico Pringit・三井 順・波利井佐紀・鈴木庸彦(2003): リーフ地形効果に着目した石垣島東裾礁域の流動構造に関する研究, *海岸工学論文集*, 第50巻, pp. 386-390.
- 田村 仁・瀬岡和夫・Enrico Pringit (2004): 石垣島東岸裾礁域の流動特性に関する現地観測と数値解析, *土木学会論文集*, No. 768/II-68, 147-166.
- 瀬岡和夫・波利井佐紀・池間健晴・Enrico Pringit・三井 順・田村 仁・岩尾研二・鹿熊信一郎(2002): 沖縄・慶良間列島におけるサンゴ産卵とスリック動態に関する観測, *海岸工学論文集*, 第49巻, pp. 1176-1180.
- 林原 毅(2002): 造礁性イシサンゴ類の配偶子放出の周期性と同調機構, *海洋と生物*, 143, pp. 491-498.
- Arai, T., M. Kato, A. Heyward, A. Ikeda, Y. Iizaka, and T. Murayama (1993): Lipid composition of positively buoyant eggs of reef-building corals, *Coral Reefs*, 12, 71-75.
- Babcock, R. C., G. D. Bull, P. L. Harrison, A. J. Heyward, J. K. Oliver, C. C. Wallace, and B. L. Willis (1986): Synchronous spawning of 105 scleractinian coral species on the Great Barrier Reef, *Mar. Biol.*, 90, pp. 379-394.
- Harii, S., and H. Kayanne (2003): Larval dispersal, recruitment, and adult distribution of the brooding stony octocoral *Heliopora coerulea* on Ishigaki Island, southwest Japan, *Coral Reefs*, 22, pp. 188-196.
- Hayashibara, T., K. Shimoike, T. Kimura, S. Hosaka, A. Heyward, P. Harrison, K. Kudo, and M. Omori (1993): Patterns of coral spawning at Akajima Island, Okinawa, Japan, *MEPS*, Vol. 101, pp. 253-262.
- Oliver, J. K., and B. L. Willis (1987): Coral-spawn slicks in the Great Barrier Reef: preliminary observations, *Mar. Biol.*, 94, pp. 521-529.