

小型漂流バイ観測および幼生定着実験によるリーフ間 広域サンゴ幼生供給過程の解明

灘 岡 和 夫*

田 村 仁****

二 瓶 泰 雄*****

松 岡 建 志*****

岩 尾 研 二*****

・ 波 利 井 佐 紀**

・ 花 田 岳*****

・ 藤 井 智 史*****

・ 鹿 熊 信 一 郎*****

・ 高 橋 孝 昭*****

・ 三 井 順***

・ Enrico Paringit*****

・ 佐 藤 健 治*****

・ 池 間 健 晴*****

白化などにより広域かつ顕著な被害を受けたサンゴ礁では、健全なサンゴ礁海域からのサンゴ幼生の供給が重要となる。本研究では、新たに開発した GPS 搭載小型漂流バイや HF レーダによる広域海水流動場の解明とサンゴ幼生の分布、幼生の行動・定着に関する室内実験から、沖縄本島南西海域におけるサンゴ幼生の広域供給過程の解明を試みた。その結果、サンゴ幼生は慶良間列島から沖縄本島西岸へ東向きの流れによって産卵後、4～5 日で輸送されることを明らかにした。また、幼生は受精後約 4 日で探索行動率（定着場所を探す行動）が最も高くなった。幼生の輸送に要する時間と、幼生の探索行動率のピークの時期がほぼ一致していることから、慶良間列島が沖縄本島西岸へのサンゴ幼生の重要な供給源の 1 つとなり、サンゴ礁回復に寄与することが示された。

1. はじめに

1998 年に世界規模で生じた造礁サンゴの白化・死滅現象は、琉球列島でも大規模に発生し、特に沖縄本島西岸域のサンゴ礁は広域かつ顕著なダメージを受けた (Wilkinson, 1998; 茅根ら, 2000; 谷口ら, 2000)。大部分のサンゴが死滅した海域の回復には、当該海域から離れた比較的ダメージの低いサンゴ礁海域からの幼生の供給が重要となる。そしてそのようなサンゴ幼生の広域供給過程の存在が実証できれば、その供給源のサンゴ礁を重点的に保護していく施策に科学的な根拠を与えることが可能となる。具体的なサンゴ幼生の広域供給過程の解明のためには、それを支配する広域海水流動場の実態と、その中での幼生の挙動を明らかにする必要がある。

造礁サンゴは有性生殖を行い、卵や精子を海中に放出し、受精させ、プラナリア幼生をつくる。プラナリア幼生は

ある期間海中を漂い、分散し、海底へと定着、サンゴ礁に加入する。サンゴ幼生の分散に関しては、グレートバリアリーフやカリブ海などで研究されている。産卵後、スリック（海面にできる卵や幼生の帯状集合体）は風の影響を受けて親のサンゴ礁外へと流出する (Willis and Oliver, 1990)。幼生は定着までに 4 日～7 日必要とし、最大数十日も浮遊期間を持つことから (Babcock and Heyward, 1986; Wilson and Harrison, 1990)、広範囲に分散することが示されている。グレートバリアリーフでは遺伝的解析からも、親から離れたサンゴ礁へ幼生が供給されていることが示唆されている (Ayre and Hughes, 2000)。

一方で、数値シミュレーションによって、幼生が定着可能になるまでの期間、滞留が起り、親のサンゴ礁にも定着可能だと報告もある (例えば, Black, 1991)。最近では、同じ幼生供給源から、様々な海流パターンによって異なる経路で輸送され、親のサンゴ礁内/外の両方に加入することが指摘されている (Fernandez ら, 2001)。このように、サンゴ幼生の輸送過程は、その海域による海水流動とその中でのサンゴ幼生の挙動によって決定されると考えられ、両者を併せて検討する必要がある。

* 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
**	博(理)	東京工業大学助手 大学院情報理工学 研究科情報環境学専攻
***		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
****	学生会員	修(工) 東京工業大学大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻博士課程
*****		野村総合研究所 (前東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻)
*****		東京工業大学大学院理工学研究科 土 木工学専攻博士課程
*****	正 会 員	博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学 科
*****		通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術セ ンター
*****		通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術セ ンター
*****		通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術セ ンター
*****		亜熱帯総合研究所
*****		亜熱帯総合研究所
*****		阿嘉島臨海研究所
*****		アレック電子(株)

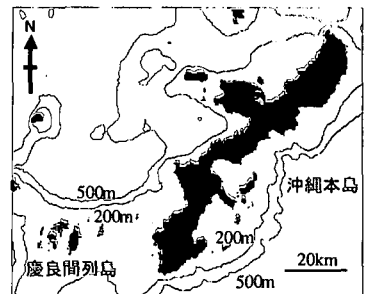


図-1 沖縄本島および慶良間列島
(数値は水深を示す)

琉球列島では、沖縄本島西岸海域への幼生の供給源として、約 40 km 西側に位置する、慶良間列島(図-1)が考えられてきた(木村ら, 1992; 林原, 1995)。木村ら(1992)は、漂流はがきを用いて慶良間列島内からの表層粒子の行方を調べ、放流したはがきの一部が沖縄本島西岸へ到達していることから、慶良間列島が沖縄本島への幼生供給源となっている可能性を指摘した。さらに、灘岡ら(2001)は、同海域において短波海洋レーダ(HF レーダ)観測およびアルゴスブイを用いた表層海水流動場の観測を行っており、その経路と日数の把握を試みている。しかし、途中でブイを回収せざるを得なくなり、広域輸送過程の把握が部分的な範囲にとどまったことから、十分な解明は行われていない。また、ブイ周辺での幼生の分布や、幼生の行動の時系列変化についての詳細は調べられていない。

本研究では、新たに小型の GPS 搭載漂流ブイを開発することによって、幼生の供給源から供給先までの具体的な経路と日数を明らかにすることを試みた。また、HF レーダにより、広域表層海水流動分布を空間的に把握した。さらに、今回は漂流ブイ周辺でのサンゴ幼生の密度の観測や、サンゴ幼生の行動・定着に関する室内実験を行い、幼生の生物学的な挙動を明らかにした。

2. 現地観測および室内実験の概要

(1) 現地観測

1) 漂流ブイによる表層粒子のラグランジュ的追跡

サンゴの産卵時期である 2001 年 6 月 8 日から 6 月 12 日に、慶良間列島から沖縄本島の範囲において、GPS 搭載小型漂流ブイ(後述、以下漂流ブイ)による幼生の追跡を行った。サンゴの産卵があった翌日に、スリックを航空機から採し(灘岡ら, 2002)、漂流ブイを 10 個を投入し、ラグランジュ的追跡を行った。

今回、新たに開発した漂流ブイ(図-2)は、GPS が得た位置情報をメモリに記録するとともに携帯電話で通信し陸上で得られる仕組みになっている。特徴としては、小型化によるサンゴ幼生の追従性が向上、常に位置情報を得られる、比較的安価である、などがあげられる。また、抵抗体(drogue)の取り付け位置は、水面下約 25 cm

とした。

サンゴ幼生の分布を明らかにするため、漂流ブイ周辺の幼生・卵の採集を行った。採集には、改良型ノルバックネット(口径 45 cm, 目合い 100 μ m)を用い、ブイの周辺で 3 層(表層, 水深 5 m, 10 m)の 3 層において、それぞれ 1 kont, 5 分間、水平曳きを行い採集した。採集した卵や幼生は、船上にて 5% 中性海水ホルマリンで固定、または生存したまま実験室内に持ち帰り、数を数えた。

b) HF レーダによる広域表層海水流動分布

慶良間列島から沖縄本島にかけての広域表層海水流動分布を長期的、かつ空間的に把握するために HF レーダ観測を行った。レーダは粟国島および沖縄本島読谷村磯間に設置し、慶良間列島東方および北方領域を測定した。観測期間は 2001 年 5 月 24 日～7 月 16 日とした(ただし、停電などにより一部データの欠損があった)。また、慶良間列島阿嘉島に、2001 年 6 月 8 日～12 日まで、風向風速計を設置し、表層流への影響を調べた。

(2) サンゴ幼生の行動および定着に関する室内

サンゴ幼生の遊泳能力の変化および、定着時期の時系列変化を明らかにするため、室内実験を行った。対象種は慶良間列島阿嘉島で優占する、ミドリイシ科ウスエダミドリイシ(*Acropora tenuis*)とハナガサミドリイシ(*A. nasuta*)の 2 種とした。

幼生の遊泳能力の変化を明らかにするため、深さ 1 m, 直径 7 cm の円筒形水槽にろ過海水を 90 cm の水深になるまで入れ、そこへ幼生を 20～30 個体入れて数十分ほど静置させた後、幼生の鉛直方向の位置を記録した。実験は 1 日 1 回、受精直後～1 週間、行った。

幼生の探索行動、および定着率は、ろ過海水 1 L を入れた容器に、幼生 50 個体と定着基盤(海中に 1 ヶ月間沈めた 5×5 cm の素焼きタイル)を入れ、2 日後に基盤上を探索している個体数と定着した個体数を数えて求めた。受精後 2～7 日目までは 0.5 日間隔、7～21 日目までは 2～4 日間隔で実験を行った。なお、探索・定着の判定は、基盤上に接触し棍棒状になっているものを探索行動とし、円盤状まで変態し、基盤上に付着してピペットによる水流で剝離しないものを定着とした。

3. 結果および考察

(1) 漂流ブイによる輸送経路・時間および幼生の分布

漂流ブイを追跡した結果、慶良間列島から沖縄本島西岸域へのサンゴ幼生供給経路および時間を示すことに初めて成功した(図-3)。投入された 10 個(うち 2 個ロスト)の漂流ブイの内、5 個(ブイ 2, 3, 6, 8, 9)が慶良間列島を出て、投入後 3～4 日で沖縄本島西岸へ達した。そのうち慶良間列島内に留まっていた期間は 0.5～1 日

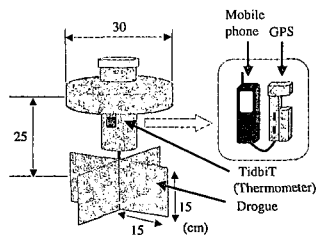


図-2 GPS 搭載型小型漂流ブイ

であった。また、ブイ5, 6, 7はほぼ同時刻・同位置に投入され互いに近い距離を保ちながら潮流による往復運動をしていたが、ブイ6のみが慶良間列島北部から出て沖縄本島西岸に到達した(図-4)。一方ブイ5, 7は、慶良間列島内を往復し続け、投入後約2日で回収された。

漂流ブイを追尾したプランクトンネットによる幼生採集の結果の一例を図-5に示す。スリック内では、表層における卵・幼生の数が圧倒的に多く、 $3.4 \times 10^6 \sim 4.2 \times 10^7$ 個体・ m^{-3} 存在した。沖縄本島付近でブイを回収するまでの間、幼生は常に分布し(表層、 $4 \sim 69$ 個体・ m^{-3})、漂流ブイとともに幼生が輸送されていることが明らかとなった。また、スリック内を除いて10 m深までは深さによる幼生の違いはみられず、鉛直方向の乱れによる拡散に加えて、後述(3節)のように、幼生が日数の経過とともに次第に遊泳能力を獲得し、鉛直方向にも移動した可能性が示された。

(2) 幼生の輸送に関わる広域表層海水流動場

HFレーダより、慶良間列島北部海域の表層海水流動は、複雑なパターンを示しながらも東へ向かう流れが観測され、最大流速は50 cm/s以上となった(図-6)。観測期間中、風は5 m/s程度であり(図-7)、吹送流が風速の3%程度であることを考慮すると、この東向きの流れは吹送流では説明できない。そこで、漂流ブイに搭載

した水温計のデータの分析したところ、黒潮分枝流の影響が陸棚近傍まで及んでいることが示唆された。筆者らは、1999年にも同様にこの海域の調査を行い黒潮の影響を指摘しており(灘岡ら, 2001)、この時期を代表とした流れであると考えられる。

一方、慶良間列島内の流れは潮流が支配的で、満潮時に北、干潮時に南へ流れる傾向があった。また、局所的に特に流れの速い海域が存在しており、その流れに乗った漂流ブイは慶良間列島外へ出たが、わずかな初期位置の違いで慶良間列島内に留まるブイもあった。このように局所性が大きいことや、ブイが慶良間列島内に留まる期間が全期間の内の2~3割を占めることから、全輸送過程における、慶良間列島内での幼生輸送過程も重要であると考えられる。

本研究では、慶良間列島から沖縄本島までのサンゴ幼生の供給経路と日数を決定する流れには、黒潮分枝流の影響を受けた慶良間列島北部海域での流れと、慶良間列島内の潮汐支配的な流れの両方が重要であることを示した。グレートバリアリーフでは、サンゴの卵や幼生は、主として風による表層流によって分散することが報告されている(Willis and Oliver, 1990)。礁外へ分散した卵

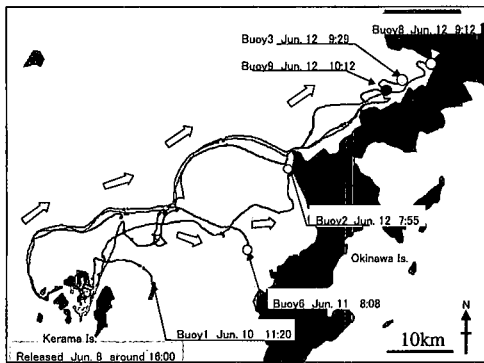


図-3 漂流ブイの軌跡

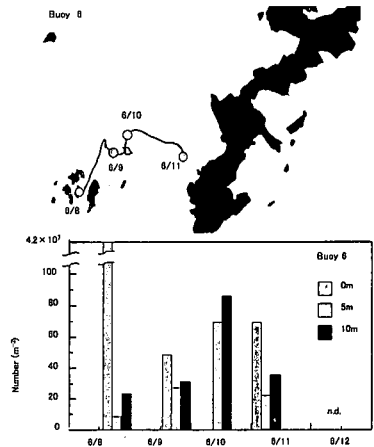


図-5 ブイ6周辺におけるサンゴ幼生の分布

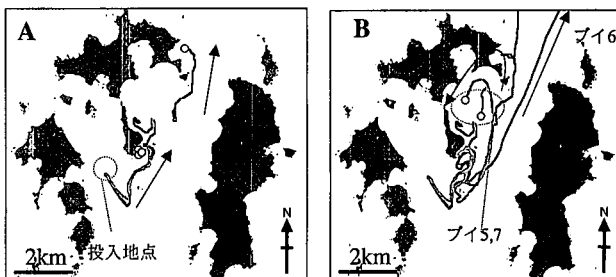


図-4 慶良間列島内の漂流ブイの軌跡。ブイは6/8 15:50に投入した。A, 6/9 0:00; B, 6/9 12:00

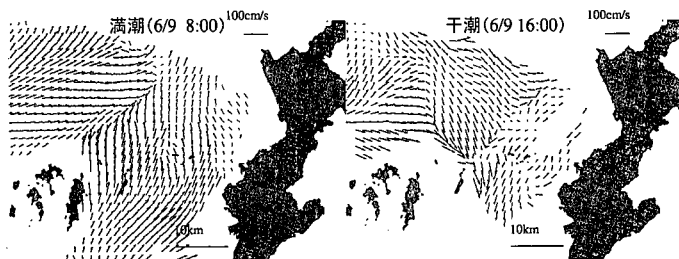


図-6 HF レーダによる典型的な広域表層流動場

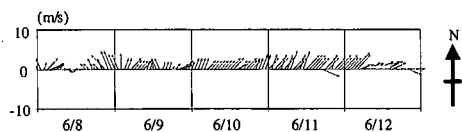


図-7 産卵期間中の風向風速 (2001 年, 阿嘉島中岳)

や幼生は、海流によって遠くに運ばれる一方、(Williams ら, 1984) 流れが滞留するサンゴ礁もあり、幼生が親のサンゴ礁に加入するという報告もある (Black, 1991). メキシコ湾では、漂流プイ追跡によって様々な海流パターンが明らかにされており、幼生が親のサンゴ礁に加入する場合と、遠くに分散する場合の両方あることが指摘されている (Fernandez ら, 2001). このように、海域によって流れが異なり、それぞれの輸送過程が決定する。

(3) サンゴ幼生の行動および定着

サンゴ幼生は、受精後 25 時間までは遊泳能力がなく、水面に浮上した。両種ともに、受精後 2.1~3.2 日に鉛直的に遊泳し、一部の幼生が水面から 20 cm の層へ移動した。底層までは、*A. tenuis* では 4.1 日、*A. nasuta* では 3.2 日を要した。幼生の探索行動率は、両種ともに、受精後 4 日前後に最大となり、その後、定着率は 10~14 日前後で高くなった (図-8)。

室内実験の結果より、遊泳能力を獲得した幼生が、その後、海底へと移動して探索行動を開始し、定着すると考えられる。探索行動中、幼生は海底付近にとどまるため分散しにくくなることから、探索行動率が高いときにリーフ付近まで輸送されていれば、定着する可能性は高

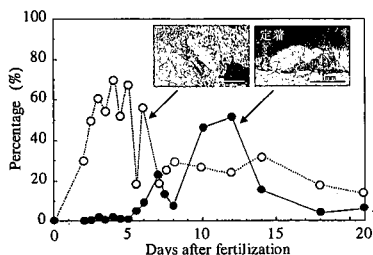


図-8 サンゴ幼生の探索行動率と定着率の変化 *A. nasuta*

まることが期待される。さらに、両種ともに受精 21 日後においても探索行動、定着がみられたことから、この 2 種においては受精後 21 日以降も定着能力を保持する可能性あり、慶良間-沖縄本島間の他にもより離れたサンゴ礁にも分散して加入する可能性や、慶良間列島や沖縄本島よりも南の海域から、当海域へ幼生が供給される可能性も考えられる。

これまでに、サンゴ幼生は 4 日~7 日程度で定着能力を持つことが報告されていたが (Babcock and Heyward, 1986), 本研究によって、時系列的データとしての探索・定着率が明らかになり、幼生の定着に適する期間を示すことができた。

(4) 慶良間-沖縄本島間のサンゴ幼生広域輸送過程

漂流プイ観測では、慶良間列島内のスリックに放流された 8 個のプイの内、5 個が沖縄本島西岸へ輸送され、輸送にかかる期間は産卵後 4, 5 日 (あるいはそれ以上) であった。一方、室内実験からは、幼生は受精後約 2 日から遊泳能力を持ち始め、探索行動は受精後約 4 日で最大となり、定着能力は受精後約 10 日前後で最大となった。幼生が慶良間列島から沖縄本島西岸域に到達した後、探索行動、定着の段階に移ると考えれば、到達した幼生は、定着する可能性がある (図-9)。以上より、慶良間列島が沖縄本島西岸へのサンゴ幼生の重要な供給源の 1 つとなり、サンゴ礁回復に寄与することが示唆された。

近年、環境破壊などによりダメージを受けた海域の回復のため、幼生の供給源-供給経路を明らかにし、供給源を保全するべきであるとの動きが高まっている (Robert, 1997). 本研究では、サンゴ幼生の供給源-供給先を明らかにすることができたが、この成果が、今後、サンゴ礁保全にも役立つことを期待する。

4. おわりに

本研究によって得られた知見をまとめる。

(1) 漂流プイによる追跡から、慶良間列島から沖縄本島までのサンゴ幼生の輸送経路と輸送に要する時間を把握した。

(2) 慶良間列島北部では、黒潮の分枝流と考えられ

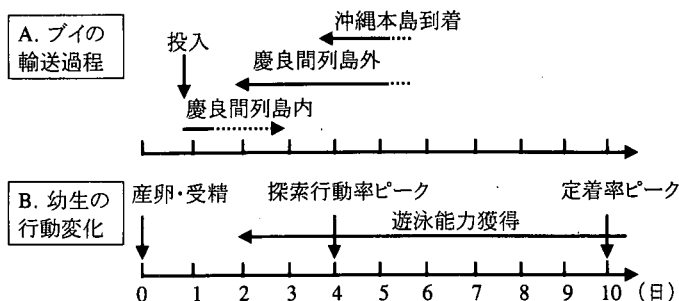


図-9 サンゴ幼生の広域供給過程の時系列変化

る海流の影響により、沖縄本島西岸へ向かってサンゴ幼生が輸送されること、一方、慶良間列島内では潮流が卓越するが、複雑な地形効果に基づく局所的な流動場の非一様性により、海域内のわずかな位置の違いにより、その後の幼生輸送の経過が大きく異なることが明らかとなった。

(3) 沖縄本島西岸までの輸送に要する時間と、サンゴ幼生の探索行動率がピークとなる時期はほぼ一致しており、時間的な整合性が取れていることから、慶良間列島から沖縄本島へ幼生が供給されている可能性が示された。

今後は、慶良間列島から沖縄本島に輸送される幼生の量及び、加入量を解明し、離れたリーフ間における幼生の供給-加入の数量的関係を明らかにしていく予定である。また、慶良間列島の複雑な地形効果を取り入れた数値シミュレーション手法を開発することを予定している。

なお、本研究は、科学研究費補助金基盤研究 B(1) (研究代表者：灘岡，課題番号：12450198)，同基盤研究 B(2) (研究代表者：灘岡，課題番号：12555147)，亜熱帯総合研究所・内閣府調査研究事業「サンゴ礁に関する調査研究」による受託研究費を得て行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 木村 匡・林原 毅・下池和幸 (1992): 漂流はがき実験結果報告, みどりいし, No. 3, pp. 18-21.
- 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 (2000): 琉球列島石垣島白保・川平の定測線における 1998 年白化前後の造礁サンゴの被度変化, 日本サンゴ礁学会, *Galaxea*, Vol. 1, pp. 73-82.
- 谷口洋基・岩尾研二・大森 信 (2000): 慶良間諸島阿嘉島周辺の造礁サンゴの白化, 1998 年 9 月の調査結果, 日本サンゴ礁学会, *Galaxea*, Vol. 1, pp. 59-64.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・花田 岳・藤井智史・佐藤健治・池間健晴・

- 鹿熊信一郎・岩尾研二・若木研水 (2001): HF レーダ・漂流プイ観測と数値シミュレーションによるサンゴ幼生の広域輸送過程, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 431-435.
- 灘岡和夫・波利井佐紀・池間健晴・Enrico Paringit・三井 順・田村仁・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 (印刷中)
- 林原 毅 (1995): 慶良間列島阿嘉島周辺の造礁サンゴ類とその有性生殖に関する生態学的研究, 東京水産大学博士論文, 123 p.
- Ayre D. J. and T. P. Hughes (2000): Genotypic diversity and gene flow in brooding and spawning corals along the Great Barrier Reef, Australia, *Evolution* Vol. 54, pp. 1590-1605.
- Babcock R. C. and A. J. Heyward (1986): Larval development of certain gamete-spawning scleractinian corals, *Coral Reefs* Vol. 5, pp. 111-116.
- Black K. P., P. J. Moran and L. S. Hammond (1991): Numerical models show coral reefs can be self-seeding, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 74, pp. 1-11.
- Fernandez A., K. Deslarzes, J. Price, G. Boland and M. V. Morin (2001): Inferring probable dispersal of Flower Garden Banks coral larvae (Gulf of Mexico) using observed and simulated drifter trajectories, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 21, pp. 47-67.
- Roberts, C. M. (1997): Connectivity and management of Caribbean coral reefs, *Science*, Vol. 278, pp. 1454-1457.
- Williams D. M., E. Wolanski and J. C. Andrews (1984): Transport mechanisms and the potential movement of planktonic larvae in the central region of the Great Barrier Reef, *Coral Reefs*, Vol. 3, pp. 229-236.
- Willis, B. L. and J. K. Oliver (1990): Direct tracking of coral larvae: implications for dispersal studies of planktonic larvae in topographically complex environment, *Ophelia*, Vol. 32, pp. 145-162.
- Wilkinson C. (1998): The 1997-1998 mass bleaching event around the world. In C. Wilkinson, ed. *Status of coral reefs of the world: 1998*. Aust. Inst. Mar. Sci., Townsville, Australia.
- Wilson J. R. and P. L. Harrison (1998): Settlement-competency periods of larvae of three species of scleractinian corals, *Mar. Biol.*, Vol. 131, pp. 339-345.