

振動流環境下でのサンゴ幼生の定着に関する室内実験

波利井佐紀*・灘岡和夫**・安田仁奈***・林原 毅****

サンゴ礁では、波あたりの違いに対応して、異なる形状特性を持つ造礁サンゴ類が分布しており、複雑な地形を形成している。この地形特性はサンゴ礁上の波浪場の変形過程に影響を与え、礁内に様々な流速振幅を生じさせている。サンゴは、有性生殖によって幼生を分散させる。サンゴ幼生の定着には底面の境界条件が重要と考えられるが、これまでに、波動流速に着目した研究は行われていない。本研究では、振動流装置を用いて、異なる流速振幅でのサンゴ幼生の定着を調べ、定着時の振動流環境の影響を明らかにした。その結果、サンゴ幼生の定着に及ぼす振動流環境の影響は種類により異なることがわかった。こうした幼生定着能力の差異が、親サンゴの分布と関係していることが示唆された。

1. はじめに

サンゴ礁では、波あたりの違いに対応して、異なる形状特性を持つ造礁サンゴ類（以下、サンゴ）が分布しており、複雑な地形を形成している (Wells 1954)。この地形特性はサンゴ礁上の波浪場の変形過程に影響を与え、礁内に様々な流速振幅を生じさせている (田村ら, 2003)。サンゴは有性生殖と無性生殖によって増殖する。有性生殖では、浮遊幼生（プラヌラ幼生）を分散させてサンゴ礁へと加入させ、その後、無性生殖によって親群体へと成長させる。サンゴのプラヌラ幼生がどの場所に定着するかは、サンゴ礁の複雑な底面流速変動の空間分布特性が密接に関与している可能性がある。

海産無脊椎動物の幼生に関しては、その海底への定着過程における流れの影響の重要性が指摘されている (Butman ら, 1988, Underwood・Keough, 2001)。例えば、多毛類やカキの仲間の幼生は、静水時よりも流れの存在下で基質を選択し定着する (Butman ら, 1988, Tamburri ら, 1996)。サンゴでは、野外での幼生の定着の観察は困難である上、室内においても主に静水中で定着実験が行われていたため、流れと幼生定着の研究は遅れている。最近、Hariri・Kayanne (2002) によって、一方向流のもとでのサンゴ幼生 2 種の定着実験が行われ、流速の違いによって定着率が異なること、また、その流速依存性が種によって異なることが明らかにされている。しかしながら、これは一方向流を扱ったものであり、これまでに波動流速の影響に着目した研究はない。そのため、どの程度の波動流速で幼生が定着するのか、またその依存性がサンゴの種類により異なるのかは明らかではない。

本研究では、振動流装置を用いて異なる流速変動振幅でのサンゴ幼生の定着を調べ、幼生定着時の振動流環境の影響を明らかにし、さらに、その結果に基づいて、定着特性の差異と親サンゴの分布との関係を検討した。実験には放卵放精型のみドリイシ科タチバナガサミドリイシ (*Acropora selago*) およびコユビミドリイシ (*Acropora digitifera*)、保育型のアオサンゴ科アオサンゴ (*Heliopora coerulea*) を用いた。*Acropora selago* や *A. digitifera* は礁嶺—礁縁—礁斜面上部にみられ、特に後者は波あたりの強い礁斜面上部に優占的に分布する (Wells, 1954, 西平・Veron, 1995)。一方、*Heliopora coerulea* は波あたりの弱い礁池内に大きな群落を形成することが知られている (Banner, 1952, Wells, 1954, Zann・Bolton, 1985, Hariri ら, 2003)。

2. 方 法

(1) サンゴ幼生の採集

室内実験は、2003 年 5 月および 7 月に西海区水産研究所石垣支所で行った。実験には、*Acropora selago* および *A. digitifera*、*Heliopora coerulea* のプラヌラ幼生を用いた。*Acropora digitifera* および *A. selago* については、産卵前に石垣島富野海域付近で親群体を採取し、実験室内に持ち帰り、採卵・受精させて幼生を得た。*Heliopora coerulea* については、Hariri ら (2002) に基づき石垣島白保海域より親群体を採取し、実験室内で幼生を採集した。プラヌラ幼生は、それぞれ定着率の高い受精後 5 日目以降、放出後 7 日以内のものをを用いた (灘岡ら, 2002, Hariri ら, 2002)。

(2) 振動流装置を用いた定着実験

実験には、山下ら (1985) が漂砂実験用に考案したものと同様の、加振用空気室付 U 字管振動流装置 (図-1) を用いた。この装置は、U 字管内の水塊振動の固有周期と空気室の加振周期を一致させ、正弦振動流を定常的に安定して生成させるものである。水平部は 11 cm×10 cm の断面で全長は 420 cm とした。ここでは、固有周期を 4.8 s とし、その周期で、実際に安定した正弦波形の振動

*	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
**	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
***		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
****	博(水)	(独)水産総合研究センター	西海区水産研究所石垣支所 主任研究員

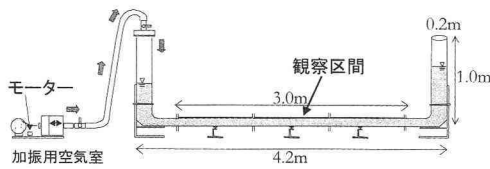


図-1 加振用空気室付振動流装置

流が生成されることを確認した。

流速振幅は、野外で実際に観測されているサンゴ礁の波あたりの弱い環境(礁池)、および強い環境(礁嶺)の条件での典型的な値である、 $4\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Speed 1) および $23\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Speed 2) とした。それぞれの流速に対して、海水 77.1 l に、プラヌラ幼生を *A. selago* については 4000 個体、その他の 2 種に関しては 2000 個体を装置に均一に入れ、定着基盤を図-1 に示す観察区間に *Acropora* 2 種については 1 枚、*H. coerulea* については 3 枚設置した。その後、振動流を起こし、実験開始 1 日後に定着基盤を取り出し、実体顕微鏡下で基盤上に定着したプラヌラ幼生の数を数えた。これとは別に、実験毎に静水状態でのプラヌラ幼生の定着率を、定着基盤 1 枚と幼生 50 個体を海水 1 l に入れ、1 日後に定着数を数えて求めた。定着基盤には素焼きのタイル(振動流装置では $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 、静水実験では $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 、厚さはともに 5 mm)を用いた。サンゴ幼生が定着するためには、基質の表面に生物皮膜が必要であるため(Morse・Morse, 1991)、素焼きのタイルは、使用前 3~5 ヶ月程海中に置いて石灰紅藻類を含めた底生生物を付着させ、幼生が定着可能な状態にした(波利井・灘岡, 2003)。幼生が定着したかどうかの確認は、基盤上に付着した幼生がピペットによる水流で攪乱しても動かず、変態速度の違いによ

り *Acropora* 2 種に関しては隔膜の形成が確認されたかどうかによって、*H. coerulea* では円盤状に変態したかどうかによって行った(図-2)。実験水温は、それぞれの産卵時の水温に近い値とした(*Acropora* 2 種で約 $26\sim 27^\circ\text{C}$ 、*H. coerulea* $29\sim 30^\circ\text{C}$)。

3. 結果および考察

(1) 振動流下での定着率

表-1 に、異なる流速振幅下でのそれぞれのサンゴ幼生の定着数を示す。*Acropora selago* と *A. digitifera* では、Speed 1 の条件で幼生の定着数がそれぞれ 1008 個体、313 個体であった。流速が速い Speed 2 の条件では、それぞれ Speed 1 の条件の約 $1/2$ 、 $1/3$ に減少したものの、ある程度の定着がみられた。一方、*H. coerulea* での平均定着数は、Speed 1 の条件では 62 個体であったが、Speed 2 の条件ではわずか 1.5 個体でありほとんど定着がみられなかった。コントロール(静水状態)での定着率は、*Acropora selago*、*A. digitifera*、*H. coerulea* の順にそれぞれ平均 41%、48%、14%であり、*H. coerulea* の定着率はかなり低かった。

以上より、サンゴ幼生の定着に及ぼす振動流環境の影響はサンゴの種類によって異なることが明らかとなった。サンゴ礁は複雑な地形をしており、波浪場の変形過程に影響を与え、空間的にさまざまな流速振幅を生じさせている。特に、沖側の礁嶺や礁斜面上部付近では、波高が最も高くなるため波動流速が大きく、礁内では逆に波高が低く波動流速は小さい。サンゴはこうした波あたりの違いに対応して、種により異なる分布をしているが(Wells, 1954, Yamano ら, 1998)、これまで、その要因については、親サンゴの波に対する耐性の観点からしか議論されていなかった。本研究の結果は、サンゴ礁において、サンゴのプラヌラ幼生が、それぞれ異なる振動流環境の場所に選択的に定着・加入し、個体群を形成することを強く示唆するものである。

実際、*A. digitifera* は比較的波あたりの強い環境(礁嶺~礁斜面上部)に優占的に分布する一方(Wells, 1954, 西平・Veron, 1995)、*H. coerulea* は波あたりの弱い環境

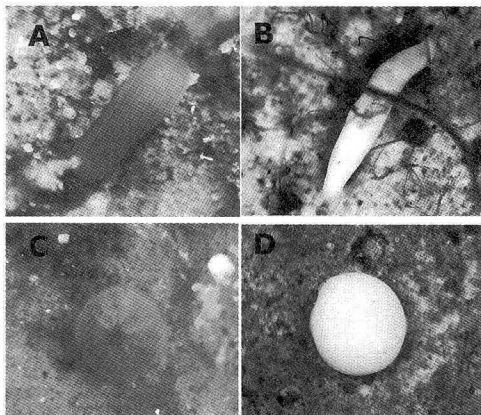


図-2 サンゴのプラヌラ幼生(A, B)と定着後のポリプ(C, D 直径約 1 mm)。A. *A. digitifera* (約 0.5 mm)、B. *H. coerulea* (約 3 mm)、C. *A. digitifera*、D. *H. coerulea*

表-1 異なる流速振幅下でのサンゴ幼生の定着総数(個体)。*Acropora selago*、*A. digitifera* は各 1 回、*Helipora coerulea* は 2 回の平均値を示す。

種 類	定着基盤(枚)	Speed 1 ($4\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Speed 2 ($23\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
<i>Acropora selago</i>	1	1008	511
<i>A. digitifera</i>	1	313	101
<i>Helipora coerulea</i>	3	62	1.5

に大きな群落を形成することが知られているが (Banner, 1952, Wells, 1954, Zann・Bolton, 1985, Harii ら, 2003), 上記のような振動流環境下での幼生定着能力の差が, このような親サンゴの分布を規定している主要な要因の一つとなっている可能性がある. 同様に, 一方向流に関して Harii・Kayanne (2002) は, 異なる分布パターンを持つサンゴ幼生 2 種, *H. coerulea* と *Pocillopora damicornis* (ハナヤサイサンゴ) の流体中での定着数を調べ, 前者では流れが速いほど定着数が減少し, 後者では定着数は流速に依存しないことを明らかにし, こうした定着の違いが分布に影響を及ぼすことを指摘している.

(2) 振動流下での幼生の行動

図-3 は, 振動流中でのサンゴ幼生の定着過程を模式的に示したものである. どの流速条件下でもサンゴ幼生 3 種の浮遊行動は類似しており, 幼生はその長軸方向をほぼ鉛直方向に向けて浮遊し, 振動流によって水平に移流されながらも下方向へと移動し, 基盤に接触してとどまった. その際, 流れによって基盤から剝離されることはなかった(a, b). その後, 棒状または一部体を湾曲させ基盤上を移動したが, 定着に至らない場合には再浮遊した(d). この際, *Heliopora coerulea* のみ, 糸状の物質に絡まって基盤とつながっている様子が観察された. 静水状態では, *Acropora* 2 種のプラヌラ幼生は, 上下に鉛直的に遊泳行動を行った. 一方, *H. coerulea* の幼生は, 底層付近に分布しているものもみられたものの, 多くは長軸方向を水平にして水面近くに浮いていた. 以上より, *Acropora* 2 種と *H. coerulea* では, 基盤への付着後の行動パターンや, 静水中での行動が異なることが明らかとなった.

はじめに, プラヌラ幼生の付着機構の違いについて考察する. *Acropora* や *Pocillopora* の仲間の幼生は, 定着する際に刺胞を利用し, 基盤上にアンカリング (基盤上に刺胞をアンカーのように打ち込み, ある場所にとどまる) することが報告されている (Paruntu ら, 2000, Haya-shibara ら, 2000). 一方, *H. coerulea* の幼生は, 粘液を利用して基盤上に付着していることが示唆されている (図-4, Harii・Kayanne, 2002). 振動流環境での種によるプラヌラ幼生の定着特性の差異は, こうした幼生の付

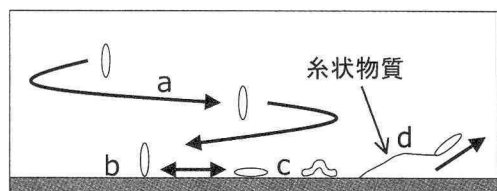


図-3 振動流環境下での *Heliopora coerulea* のプラヌラ幼生の浮遊・定着行動

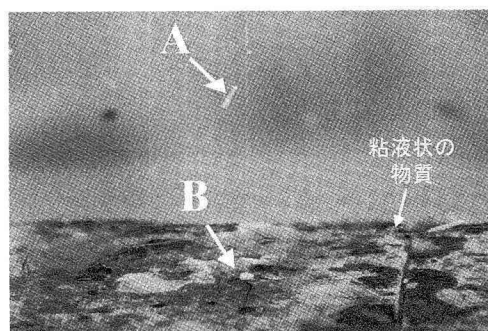


図-4 流体中での *Heliopora coerulea* のプラヌラ幼生の定着 (Harii・Kayanne, 2002). A, 浮遊個体, B, 定着個体

着機構の違いによるのかもしれない. すなわち, アンカリングを行うプラヌラ幼生は波あたりの強い環境でも定着が可能であり, 粘液によって定着する幼生は比較的波あたりの弱い環境にのみ定着が可能なのかもしれない.

次に, *Heliopora coerulea* の幼生の静水状態と振動流中での行動の違いについて検討する. この種類の幼生は, 遊泳能力が乏しいため (Harii ら, 2002), *Acropora* の幼生と異なり, 自ら鉛直移動して基盤へ移動することは困難であると考えられる. 幼生の向きをみると, 静水状態では水平方向になっていたが, 振動流中では図-3 中の a に示すようにほぼ鉛直方向になっていた. 振動流中では, 幼生は流れによって基盤に運ばれるだけではなく, 体の向きが変わることでわずかでも鉛直に移動しやすくなり, 基盤に到達するのかもしれない. この幼生は, 流速が速いと定着しにくかったものの, 比較的遅い流れでは定着がみられている. 実際の海域でも, *H. coerulea* の幼生は緩やかに流れのある状態で定着・加入することが指摘されている (Harii ら, 2003).

4. ま と め

本研究では, 振動流環境下において, サンゴの種類によりプラヌラ幼生の定着特性が異なることを示した. さらに, こうした違いは, 種による定着機構の違いにより生じることが示唆された. 従来, サンゴ類の分布の差異は, 親サンゴの波浪への耐性の違いの観点から議論されてきたが, 今回, はじめてプラヌラ幼生の定着の違いが密接に関与している可能性が示された.

現在, 世界各地のサンゴ礁の多くがさまざまな環境変動によって衰退してきているが, サンゴ礁の修復技術の 1 つとして, サンゴのプラヌラ幼生の加入促進をはかる技術が研究・開発されてきている. 例えば, ダメージを受けたサンゴ礁海域へサンゴ幼生を人工的に輸送し定着させる技術が検討されているが, その際, 定着時の環境条件を明らかにし, 定着に有利な場所を選択する必要が

ある。今回の波動流速の影響に着目した研究は、そうした技術開発の一助にもなるものと期待される。

謝辞: 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(B) (研究代表者: 波利井, 14740416), 同基盤研究A(1) (一般) (研究代表者: 灘岡, 課題番号 14205071) を得て行った。サンゴの採集および定着基盤の設置には、島袋英三氏, 平良正義氏にお世話になった。

参考文献

- 田村 仁・灘岡和夫・Enrico Paringit・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岸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.
- 灘岡和夫・波利井佐紀・三井 順・田村 仁・花田 岳・Enrico Paringit・二瓶泰雄・藤井智史・佐藤健治・松岡建志・鹿熊信一郎・池間健晴・岩尾研二・高橋孝昭 (2002): 小型漂流ブ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, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 366-370.
- 西平守孝・JEN Veron (1995): 日本の造礁サンゴ類, 海遊舎, 439 p.
- 波利井佐紀・灘岡和夫: 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 (2003): 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1041-1045.
- Butman, C.A., Grassle, J.P. and Webb, C.M. (1988): Substrate choices made by marine larvae settling in still water and in a flume flow, *Nature*, Vol 333, pp. 771-773.
- Banner, A.H. (1952): Preliminary report on marine biology study of Onotoa Atoll, Gilbert Islands, *Atoll Res. Bull.*, Vol. 13, pp. 1-42.
- Harii, S., H. Kayanne (2002): Larval settlement of corals in flowing water using a racetrack flume. *Mar. Technol. Soc. J.*, Vol. 36, pp. 76-79.
- Harii, S., H. Kayanne, H. Takigawa, T. Hayashibara, M. Yamamoto (2002): Larval survivorship, competency periods and settlement of two brooding corals, *Heliopora coerulea* and *Pocillopora damicornis*, *Mar Biol.*, Vol. 141, pp. 39-46.
- Harii, S., H. Kayanne (2003): Larval dispersal, recruitment, and adult distribution of the broody stony octocoral *Heliopora coerulea* on Ishigaki Island, southwest Japan, *Coral Reefs*, Vol. 22, pp. 188-196.
- Hayashibara, T., T. Kimura, and M. Hatta (2000): Changes of cinida composition during planula development of a reef-building coral *Acropora nasuta*, *Galaxea, JCRS*, Vol. 2, pp. 39-42.
- Morse, D.E., E.N.C. Morse (1991): Enzymatic characterization of the inducer recognized by *Agaricia humilis* (scleractinian coral) larvae. *Biol. Bull.*, Vol. 181, pp. 104-122.
- Paruntu, C.P., K. Hidaka, and M. Hidaka (2000): Development changes in cinida composition of the coral *Pocillopora damicornis*, *Galaxea, JCRS*, Vol. 2, pp. 23-28.
- Tamburri, M.N., C.M. Finelli, D.S. Wethey, and R.K. Zimmer-Faust. (1996): Chemical induction of larval settlement behavior in flow, *Biol. Bull.*, Vol. 191, 367-373.
- Wells, J.W. (1954): Recent corals of the Marshall Islands, *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, vol. 260, pp. 609-615.
- Yamano, H., H. Kayanne, N. Yonekura, H. Nakamura, and K. Kudo (1998): Water circulation in a fringing reef located in a monsoon area: Kabira Reef, Ishigaki Island, southwest Japan, *Coral Reefs*, vol. 17, pp. 89-99.
- Underwood, A.J. and M.J. Keogh. (2001): Supply-side ecology. The nature and consequences of variations in recruitment of intertidal organisms. In *Marine community ecology*, eds. Bertness M.D., Gaines S.D. and Hay, M.E., pp. 183-200. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc.
- Zann, L.P., L. Bolton (1985): The distribution, abundance and ecology of the blue coral *Heliopora coerulea* (Pallas) in the Pacific, *Coral Reefs*, vol. 4, pp. 125-134.