海岸工学論文集，第 50 巻（2003）
土木学会，1041-1045

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

波利井　佐　紀*・灘　岡　和　夫**

造礁サンゴ類は有性生殖によって幼生を分散・加入させる．サンゴの幼生が分散先の礁に加入できるかは，その海域の環境に依存するため，定着条件を明らかにすることが重要となる．琉球列島では赤土流出が問題となっており，本研究では，どの程度の赤土が懸濁・堆積するとサンゴ幼生の定着が阻害されるのか，2種の幼生（*A. tenuis, H. coerulea*）について室内実験を行って検討した．その結果，赤土懸濁物および堆積の存在によって幼生の定着が阻害されること，また，*A. tenuis* の方が定着率の減少が顕著であったことから，種類によっても耐性が異なることが示された．また，幼生はストレスを感じて粘液を出し，エネルギーを損失している可能性が示唆された．

1. はじめに

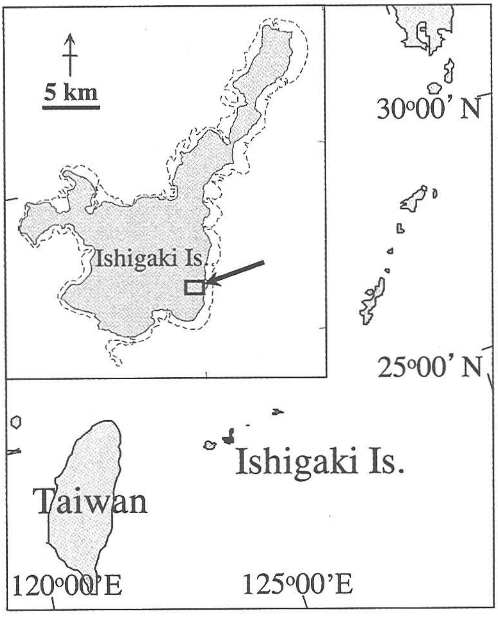
サンゴ礁に生息する造礁サンゴ類は，有性生殖と無性生殖によって増殖する．有性生殖では，浮遊幼生を分散させてサンゴ礁へと加入させ，その後，無性生殖によって親群体へと成長させる．幼生が加入に成功するかどうかは，浮遊期における水柱の環境と，定着先のサンゴ礁環境に依存すると考えられる．近年，サンゴ礁は地球規模・地域規模の環境変動により破壊されてきている．セジメンテーションは地域的な環境悪化の1つであり，例えば陸域からの土砂流出，沿岸開発（港湾建設，浚渫など）によって多くのサンゴ礁が破壊されている（Rogers, 1990；Richmond, 1997）．琉球列島でも，1970 年代より農地開発等による赤土流出が増加し，多くのサンゴ礁が被害を受けている（大見謝他，1997，2003；満本他，2000）．

海中の懸濁や海底の堆積物の増加は，親サンゴの成長や生殖活動に影響を及ぼす（Tomascik・Sander, 1985；1987）．一方，サンゴの幼生（プラヌラ幼生）の定着・加入も阻害することが考えられる．これまでに，懸濁物質や堆積物がサンゴの幼生の定着に及ぼす影響については，いくつかの野外調査や室内実験の報告がある（Hodgson, 1990；Babcock・David, 1991；Hunte・Winttenberg, 1992；Gilmore, 1999）．例えば，Gilmore（1999）は，ミドリイシ科 *Acropora digitifera* の卵やプラヌラ幼生を用いた室内実験を行い，懸濁物質量の増加によって受精率や生残率，定着率が減少することを明らかにしている．しかし，従来の研究では，懸濁物質と堆積物は区別して考えられていなかった．幼生の分散期には，浮遊期の懸濁物質の影響，定着時の堆積物の影響が考えられるため，これらを別々に検討する必要があるだろう．また，これまでに赤土に関しては，どの程度の懸濁あるいは堆積物量がサンゴ幼生の定着に影響を及ぼすのかは明らかでないはい．本研究では，室内実験により，様々な赤土懸濁・堆積量下におけるサンゴ幼生2種の定着率を比較し，赤土に対するサンゴ幼生の環境負荷レベルの定量化を試みた．

*　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

2. 方　法

室内実験は，2002 年6月，7月に阿嘉島臨海研究所および西海区水産研究所石垣支所で行った．赤土は石垣島轟川周辺より採集した（図―1）．轟川河口付近での懸濁物は，平常時で 10 mg・L^{-1}以下，通常の降雨時では平均 46.1 mg・L^{-1}である（仲宗根他，1993）．採集した赤土は，淡水で洗浄した後，75 μm メッシュで篩い，後述の実験に用いた．実験には，ミドリイシ科ウスエダミドリイシ（*Acropora tenuis*）およびアオサンゴ科アオサンゴ（*Heliopora coerulea*）のプラヌラ幼生を用いた．*Acropora tenuis* は，産卵前に阿嘉島周辺海域より数群体を採取し，実験室内に持ち帰り，採卵・受精させて幼生を得た．



図―1　赤土採集場所（石垣島轟川周辺）．

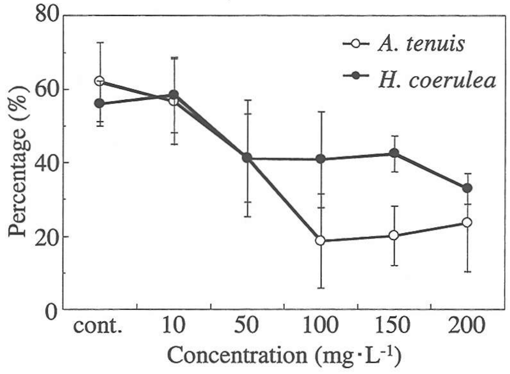
Heliopora coerulea は，石垣島においてHarii他（2002）に基づき幼生を採集した．幼生は，それぞれ定着率の高い受精後6日目以降(灘岡他，2002)，放出直後～7日以内のものを用いた（Harii他，2002）．実験水温は空調をコントロールすることで，産卵時の値に保った（それぞれ26℃，29℃）．定着基盤には素焼きのタイル(5 cm×5 cm，厚さ5 mm）を用いた．プラヌラ幼生が定着するためには，基質の表面に生物皮膜が必要であり，特に石灰紅藻類に含まれる化学物質に定着が誘引されることが知られている（Morse・Morse, 1991）．そのため，素焼きのタイルは，使用前3～4ヶ月程海中に浸水させ，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（Wilson・Harrison, 1998；Harii他，2002）．なお，実験使用前に大型の底生生物（主として二枚貝やホヤ類，褐藻類）は取り除いた．

（1）　赤土懸濁下での定着率

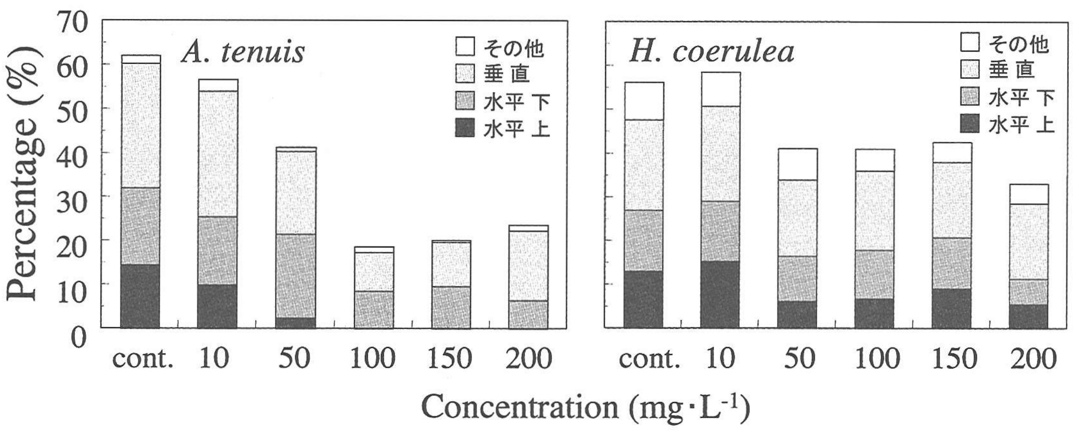
赤土懸濁物の影響を明らかにするため，赤土を含む海水2Lを入れた容器に，プラヌラ幼生を *A. tenuis* では500個体，*H. coerulea* では200個体と，定着基盤を水平・垂直方向に各3枚を入れた(それぞれ水平基盤，垂直基盤とする)．水平基盤は，その底面が容器の底から10 mm上になるように設置し，基盤の上下に定着できるようにした．容器内の海水は3～4時間おきにピペットにより攪拌し，懸濁状態を作製するようにした．赤土濃度は0, 10, 50, 100, 200 mg･L^{-1}を，それぞれコントロール，平常時，通常の降雨時，大雨時，沖縄県の流出規制濃度の値として設定した．実験開始1日後に，実体顕微鏡下で定着数を数えて定着率とした．定着は，幼生が基盤上に付着し，ピペットによる水流では動かず，発生速度の違いにより *A. tenuis* では隔膜の形成が確認されたもの，*H. coerulea* では円盤状に変態したものとした．実験は，それぞれ3回繰り返した．

（2）　赤土堆積下での定着率

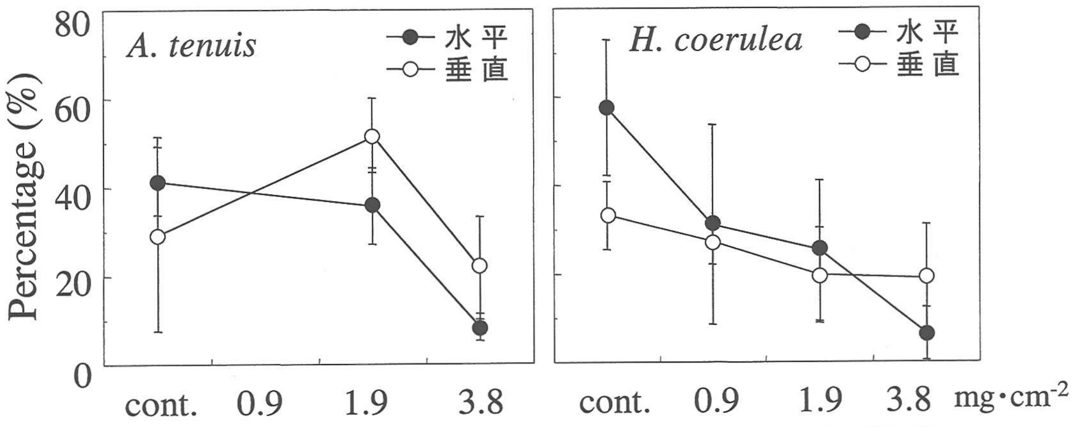
赤土堆積の影響を明らかにするため，円形容器に赤土濃度0，200(*H. coerulea* のみ)，400，800 mg･L^{-1}を含む海水約300 mlと基盤1枚を水平に入れ静置し，赤土を基盤上全体に堆積させ，懸濁状態がないようにした（それぞれ0，0.9，1.9，3.8 mg･cm^{-2}となった）．先の実験同様，基盤はその底面が容器の底から10 mm上になるよう設置した．基盤の下側には，堆積物は確認されなかった．また，同赤土条件で容器の底に赤土を堆積させて懸濁状態がないようにし，その中に基盤1枚を鉛直に入れた．垂直基盤上には，赤土堆積物は確認されなかった．その後，それぞれの試験区にプラヌラ幼生50個体ずつ静かに入れ，実験開始2日後に実体顕微鏡下で定着数を数えた．実験は *A. tenuis* では3回，*H. coerulea* では5回繰り返した．



図—2　赤土懸濁下におけるプラヌラ幼生の定着率(%)．縦棒は標準偏差を示す．



図—3　さまざまな定着基盤面ごとにみたプラヌラ幼生の定着率(%)と赤土懸濁濃度の関係．



図—4　赤土堆積下における水平基盤，垂直基盤上のプラヌラ幼生の定着率の変化(%)縦棒は標準偏差を示す．

3. 結果および考察

(1) 赤土懸濁下での定着率

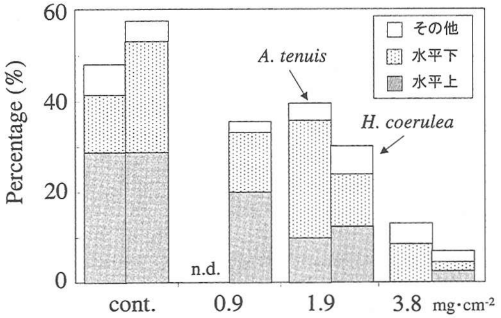
プラヌラ幼生2種の赤土懸濁下での基盤上全体の定着率は，コントロールおよび通常のサンゴ礁の赤土懸濁濃度 ($10\ mg \cdot L^{-1}$) ではともに違いはみられず，約60%であった (図—2)．しかしながら，$50\ mg \cdot L^{-1}$ (通常の降雨時の赤土懸濁濃度) で両種とも赤土懸濁の影響が顕著に現われはじめ，ともに40%程度に定着率が減少した．$100\ mg \cdot L^{-1}$の赤土濃度では，*A. tenuis* では20%となった．

基盤の向きによる定着率の違いを図—3に示す．水平基盤の上側 (水平上) では，両種ともに赤土懸濁物濃度の増加に伴い定着率が減少し，*A. tenuis* では$100\ mg \cdot L^{-1}$以上の高濃度ではほとんど定着しなかった ($100\ mg \cdot L^{-1}$, 0.1%)．一方，水平基盤の下側 (水平下) および垂直基盤では，両種ともに赤土懸濁物濃度の増加に伴い定着率が減少したものの，高濃度 ($200\ mg \cdot L^{-1}$) でも定着がみられた．

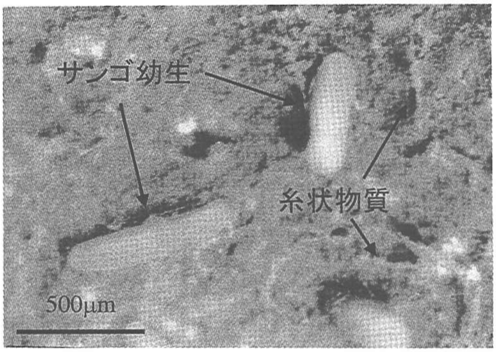
以上より，赤土懸濁の存在はプラヌラ幼生の定着を阻害することが示された．また，*A. tenuis* でより顕著な定着率の減少がみられたことから，サンゴの種類によってもその影響が異なることが明らかとなった．さらに，赤土懸濁の存在があっても，水平基盤の下側や垂直面に定着がみられたことから，幼生が懸濁物の影響の少ない場所を選択している可能性が考えられる．

(2) 赤土堆積下での定着率

プラヌラ幼生2種の赤土堆積下での基盤上全体の定着率は，赤土堆積量の増加とともに水平基盤において顕著に減少し，$3.8\ mg \cdot cm^{-2}$の赤土堆積のとき，*A. tenuis* で8.3%，*H. coerulea* で7.7%となった (図—4)．一方，垂直基盤では，*A. tenuis* の幼生の定着率は，$1.9\ mg \cdot cm^{-2}$の条件で51.6%とコントロール時よりも高く，$3.8\ mg \cdot cm^{-2}$の条件でも21.6%が定着し，*H. coerulea* では，赤土堆積量の増加に伴い定着率は減少したものの，$3.8\ mg \cdot cm^{-2}$の条件では水平基盤よりも定着率は高く，また，$1.9\ mg \cdot cm^{-2}$の条件との差はみられなかった ($3.8\ mg \cdot$



図—5　基盤の向きの違い (堆積物下．水平基盤) におけるプラヌラ幼生の定着率(%)．



図—6　赤土堆積下におけるプラヌラ幼生 (*A. tenuis*) の行動．

cm^{-2}；垂直18.8%，1.9 mg・cm^{-2}；垂直19.6%).

水平基盤の定着面の向きによる定着率の違いをみると，*A. tenuis* の幼生は堆積量の増加とともに下側面に定着し，3.8 mg・cm^{-2}の条件では上側面への定着はみられなかった(図—5)．一方，*H. coerulea* の幼生の定着率は，基盤の上側，下側ともにほぼ同様な割合で減少した.

赤土堆積物のある環境では，幼生が堆積物の少ない場所を選択して定着する可能性が示され，特に *A. tenuis* でその傾向が強く，種による差が認められた．Hodgson (1990)は，ハナヤサイサンゴの幼生を用い堆積物下での定着率を調べ，基底が95%覆われた条件では幼生が定着しないことを明らかにし，その原因として基質が粒子で構成されており不安定である（動きやすい）ためであると指摘している．本研究では，さらに基底が100%覆われた状態で，その量（堆積物の厚さ）が増加すると，定着率が減少することを明らかにした．プラヌラ幼生は，先述のように，基質に付着している石灰紅藻などの中の化学的物質に誘引されて定着するとの報告がある(例えば，カリブ海に生息する *Agaricia humilis* のプラヌラ幼生；Morse・Morse, 1991)．堆積物の厚さが増加すると，基質が不安定であることに加えて，プラヌラ幼生がこのような定着誘因物質を探すことが困難となるため，定着率が減少するのかもしれない.

（3） 赤土懸濁物質・堆積下での幼生の行動

両種ともに赤土懸濁物中でのプラヌラ幼生の遊泳行動パターンには変化はみられなかったが，幼生が粘液状の物質を出している様子が観察された．また，赤土堆積物下では，どちらの条件の赤土堆積物上(水平基盤の上側，および垂直基盤を設置した容器の底面）に糸状の跡が多数みられた．これは，幼生が定着場所を探索した際に，赤土と幼生由来の粘液物質とが絡んでできたものと考えられる（図—6)．赤土堆積下の垂直基盤の条件で，赤土が堆積した容器の底に糸状の跡がみられたことは，仮に堆積物の少ない場所が近くにあっても，何度かは堆積物のたまりやすい海底面を探索して，定着前にストレスを受ける可能性があることを示している.

4. ま と め

本研究では，赤土懸濁および堆積の存在によって，プラヌラ幼生の定着が阻害されること示すことができ，また，その度合いが種類によって異なることが示唆された．さらに，プラヌラ幼生は懸濁物や堆積物に接することでストレスを感じて粘液を出し，エネルギーを損失している可能性が示唆された.

琉球列島でのサンゴの産卵時期は4月～6月に集中しているが，その時期は梅雨と重なるため，赤土の流出が多くなる．本研究の結果は，サンゴの産卵，受精が正常に行われたとしても，幼生が浮遊時期に赤土懸濁物の多い海域を経験したり，定着時期に赤土懸濁物や堆積物の多いサンゴ礁に到達したりすると，定着できなくなる可能性を示している．近年，破壊されたサンゴ礁を回復させるため，サンゴ幼生の供給源－供給先を特定し，重点的に保全しようという動きがある（例えば，灘岡他 2002)．仮に，そのような海域が特定できたとすれば，さらに，供給源から供給先までの幼生の分散範囲の環境も含め，重点的に保全策を検討していくことが重要となる.

謝辞：本研究を行うにあたり，財団法人 熱帯海洋生態研究振興財団 阿嘉島臨海研究所 岩尾研二研究員，(独法）水産研究総合センター西海区水産研究所石垣支所 林原毅研究員には，有益なご助言を頂くとともに，施設利用に際して便宜を図って頂いた．琉球大学 森本直子氏には，室内実験を行うにあたり，ご助力いただいた．なお，本研究は，科学研究補助金基盤研究A(1)(一般)(研究代表者：灘岡，課題番号14205071)，同若手研究(B)(研究代表者：波利井，14740416）を得て行った.

参 考 文 献

大見謝辰男（2003)：赤土等の流出によるサンゴ礁の汚染，沿岸海洋研究，第40巻，pp. 141-148.

大見謝辰男・仲宗根一哉・満本裕彰・上原睦男・大城 哲（2000)：サンゴの赤土汚染耐性と白化耐性の比較，沖縄県衛生環境研究所報，第34号，pp. 69-76.

満本裕彰・大見謝辰男・小林 孝（2000)：石垣島白保海域の赤土汚染とサンゴ礁の現状，沖縄県衛生環境研究所報，第3号，pp. 121-124.

仲宗根一哉・比嘉榮三郎・大見謝辰男・安村茂樹・灘岡和夫（2001)：石垣島轟川のSSと栄養塩濃度，沖縄県衛生環境研究所報，第35号，pp. 93-102.

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.

Babcock R. and P. Davies (1991): Effects of sedimentation on settlement of *Acropora millepora*, Coral Reefs, pp. 205-208.

Gilmore J. (1999): Experimental investigation into the effects of suspended sediment on fertilization, larval survival and settlement in a scleractinian coral. Mar. Biol., Vol. 135, pp. 451-462.

Harii S., H. Kayanne, H. Takigawa, T. Hayashibara and 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.

Hodgson G. (1990): Sediment and the settlement of larvae of the reef coral *Pocillopora damicornis*, Coral Reefs, pp. 41-44.

Hunte W. and M. Winttenberg (1992): Effects of eutrophication and sedimentation on juvenile corals. II. Settlement; Mar. Biol., Vol. 114, pp. 625-631.

Morse D. E. and Morse E.N.C. (1991): Enzymatic characteri-

zation of the inducer recognized by *Agaricia humilis* (scleractinian coral) larvae. Biol. Bull. Vol. 181, pp. 104-122.

Richmond R. (1997): Reproduction and recruitment in Corals: Critical links in the persistence of reefs, In life and death of coral reefs, ed Birkeland C., Chapman & Hall, 536 p.

Rogers C.S. (1990): Response of coral reef organisms to sedimentation. Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol. 62, pp. 185-202.

Tomascik T. and F. Sander (1985): Effects of eutrophication on reef-building corals. I. Mar. Biol., Vol. 87, pp. 143-155

Tomascik T. and F. Sander (1987): Effects of eutrophication on reef-building corals. III. Reproduction of the reef-building coral *Porites porites*, Mar. Biol., Vol. 94, pp. 77-94

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.