

人工構造物の表面加工によるサンゴ群集着生促進効果の評価

三宅光一¹・甲斐広文²・宮里高広²・國吉啓太²
山本秀一³・田村圭一⁴・岩村俊平⁵

那覇港では、サンゴ群集が防波堤に自然着生している様子が観察されたことを受けて、1991 年からサンゴ幼生の着生を促進するための凹凸加工実験を開始した。また、1999 年からエコブロック事業を開始した。エコブロックは凹凸の幅と深さが約 5 mm と約 10 mm のタイプで効果が高く、水深 C.D.L. -5 m 以浅でブロック設置後 3 年目までに著しくサンゴ群集が着生・成長する効果が認められた。那覇港では防波堤上のサンゴ群集の着生過程を 1990 年からモニタリングしている地点があり、それらと比較することでサンゴ群集着生促進効果を評価した。サンゴ群集の増加率の評価は、異形ブロック等を活用したサンゴ群集の再生や代償措置、白化等による衰退からの回復過程を検討する際の指標として有効である。

1. 緒 論

サンゴ群集は、亜熱帯から熱帯圏の沿岸域生態系においてきわめて重要なものの一つであることが Costanza 他 (1997) や Moberg・Folke (1999) によって示されている。また、世界中のサンゴ礁の中で沖縄県の位置する日本の南部海域は希少な生物が最も数多く生息している“ホットスポット”の一つであることが Callum 他 (2002) により指摘されている。このような沖縄県周辺海域のサンゴ群集は、1998 年に広範囲にわたる高水温に伴う白化現象の影響により大規模に衰退した (土屋, 1999; Hoegh-Guldberg, 2000)。現在はその回復過程にあるものの、白化前後におけるサンゴ群集の成長過程の把握と白化後のサンゴ群集の回復に関する技術開発はきわめて重要な課題である。

内閣府沖縄総合事務局は、1972 年の沖縄の日本復帰から港湾整備を推進してきた。同時に、サンゴ群集との共生をめざして、サンゴの移植技術開発を 1986 年から那覇港で開始した。1989 年には新港第一防波堤の異形ブロックにサンゴ群集の自然着生が確認されたことを受けて、1990 年から 1997 年までのモニタリング調査が実施され、吉見他 (1998) や Yamamoto 他 (2002) 等に結果が報告されている。また、吉見他 (1998) は人工構造物上のサンゴ群集の加入に関する実験において、凹凸加工の効果を確認しており、事業化の可能性を示している。

本研究では、このような着生促進効果を有する異形ブロック製作を事業化した「エコブロック事業」について 1999 年から 2005 年までモニタリング調査した結果と、1990 年以降 2005 年まで継続している人工構造物への自然着生過程の調査結果をもとに、人工構造物の表面加工

によるサンゴ群集の着生促進効果を評価するとともに、白化前後におけるサンゴ群集の成長過程を比較した。

2. 方 法

(1) エコブロックの製作

初期の実験として、1 cm の高さの凸部を消波ブロック表面に施し、その効果を確認した (吉見他, 1998)。この結果を受けて「エコブロック事業」を開始した。この事業は、那覇港 (図-1) で 1999 年から継続的に実施されている。エコブロックは、施工業者が異形ブロック製作時に表面の打設口 (図-2) に様々なパターンで凹凸処理したものである。

(2) エコブロック調査

1999 年に図-1 に示す那覇防波堤の北端部でエコブロック調査を開始し、2005 年まで年 1 回ずつモニタリングを行った。1999 年に施工されたエコブロックの上向きの面を対象として、エコブロック表面の粗度別に、対照区としての無加工区、深さと幅が約 2 mm の区域、約 5 mm の区域、約 10 mm の区域の 4 レベルに分類して調査地点を設定した。記録項目を群体数、被度等として、潜水目視観察により C.D.L. -2 m, -5 m, -8 m の水深で 50 cm×50 cm の範囲をそれぞれ 3 箇所ずつ観察した。

(3) 無加工の異形ブロックの定点調査

図-1 に示す那覇港新港第一防波堤のサンゴ群集の着

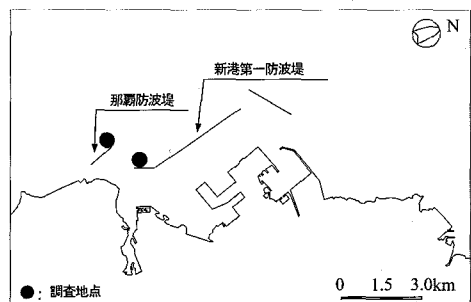


図-1 調査地点位置図

1 正会員 内閣府沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所
2 正会員 内閣府沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所
3 正会員 博(生物資源工) (株)エコー 沿岸デザイン本部 沿岸環境部
4 正会員 修(農) (株)エコー 沿岸デザイン本部 沿岸環境部
5 正会員 修(工) (株)エコー 沿岸デザイン本部 沿岸環境部

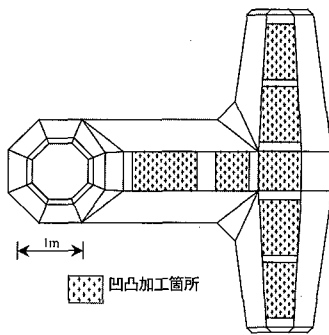


図-2 エコブロック (40t) の状況

生過程に関する調査区では1990年から1997年までの8年間にわたり6水深帯の同一地点(各3箇所)のサンゴ群集の被度、群体数等の経年変化を観察し報告している(吉見他, 1998; Yamamoto 他, 2002)。その後、1998年に世界的規模での高水温に伴う白化現象によるサンゴ群集の大規模な衰退が起こったため、2000年に同一地点でのモニタリング調査を再開し、2005年まで実施した。

(4) 表面加工によるサンゴ群集着生促進効果の評価

山本他(2002)は、人工構造物上のサンゴ群集の成長過程を施工後6年目から8年目の初期着生過程とその後の安定成長過程に分けている。本研究では、定点調査とエコブロック調査の被度の結果を用い、ブロック施工後6年目までの変化を指数関数近似して被度の増加率を求め、エコブロックのサンゴ群集の着生効果を評価した。

$$y = ae^{mt} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 y は被度、 a は初期値、 t は経過年数、 m は増加率を表す。

3. 結 果

(1) エコブロックへのサンゴ群集の着生過程

図-3に水深別の群体数と被度を粗度の違いにより比較したものを示す。各グラフでは、各地点のデータの平均値($n=3$)を示している。

a) C. D. L. -2m

C. D. L. -2mでは、施工後2年目まで全ての粗度タイプで群体数が増加傾向にあり、粗度が大きいほどサンゴの初期着生に対する効果が高くなっている。3年目以降では、粗度10mmで群体数が減少、粗度5mmでは横ばいとなっている一方、被度は増加傾向を示している。これは、各群体が成長して、群体の接触から被覆に至る過程で、競争に負けた群体が淘汰されたためと考えられる。あるいは同種の複数群体による接触から融合に至る現象も推察される。粗度2mmでは、4年目まで群体数

が増加し5年目で横ばいとなっている。被度は4年目から5年目にかけて著しく増加している。対照区では、5年目まで群体数、被度がわずかに増加し、6年目で横ばいとなっている。6年目の時点では、粗度10mm、5mm、2mmとも群体数、被度は同程度となっており、対照区と比較すると明らかに粗度の効果が認められる。

b) C. D. L. -5m

C. D. L. -5mでは、施工後3年目から4年目まで全ての粗度タイプで群体数が概ね増加傾向にあり、C. D. L. -2mと同様に粗度が大きいほどサンゴの着生促進効果が高い。4年目以降では、粗度10mm、5mmで群体数が減少しており、被度についても45%から65%と高い値で推移している。粗度2mmでは、4年目まで群体数が増加し5年目で横ばいとなっており、3年目から5年目にかけて被度が著しく増加している。対照区では、群体数については粗度小と同様の傾向を示しているものの、被度は横ばいとなっている。

c) C. D. L. -8m

C. D. L. -8mでは、C. D. L. -5mと同様に施工後3年目から4年目まで加工タイプで群体数が増加傾向にあるものの、粗度との関係は明確でない。対照区では、横ばいとなっている。4年目以降では、粗度加工タイプで群体数が減少し、被度が増加している。粗度2mmでは、対照区との差はほとんど無い。6年目では、粗度10mmと5mmで対照区および粗度2mmと比較して群体数が多く、被度が高い。

(2) 無加工の異形ブロックへのサンゴ群集の着生過程

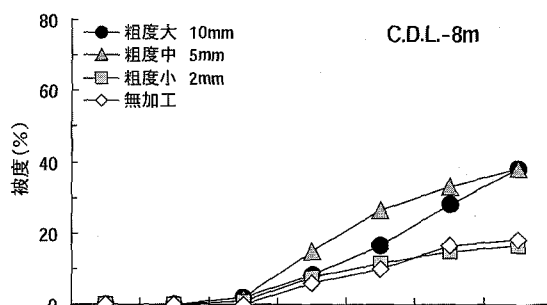
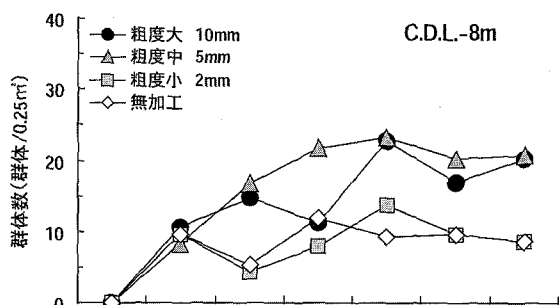
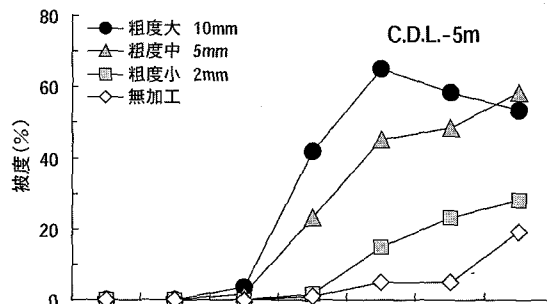
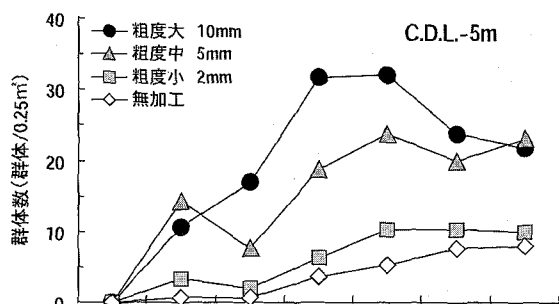
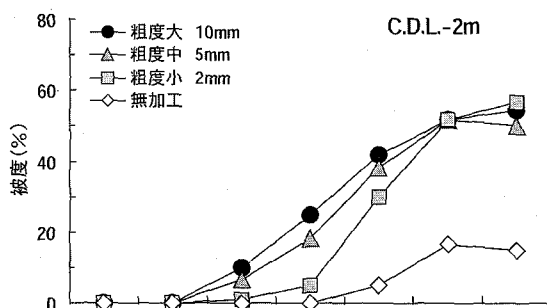
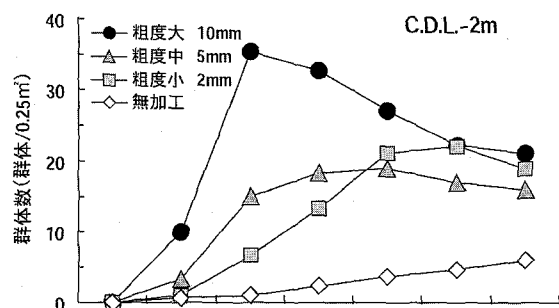
定点調査地点の消波ブロックは1986年に施工されており、2005年は施工後18年目に相当する。図-4に水深別の被度と群体数の経年変化を示す。各地点データは上を向いた面(傾度0度)における平均値($n=3$)を示している。

a) 被度の変化

2000年には1997年以前と比較して、全水深で被度が低下している。これは、1998年に世界的な規模で記録された海水温の上昇に伴うサンゴ群集の死滅が原因と考えられ、特に高水温の影響が大きかったと考えられるC. D. L. -1m、-3mでの被度の低下が著しい。

水深別の調査結果について2004年と2005年の結果を比較すると、概ね横ばいであるが、C. D. L. -1m、-5mで被度が増加している。また、2000年から2003年までの期間はC. D. L. -12mで最も高い被度を示しており、2005年には1997年以前のように、C. D. L. -1m、-3mに次ぐ値となっている。

優占種はC. D. L. -1mでミドリイシ属、C. D. L. -3mでミドリイシ属とハナヤサイサンゴ属、C. D. L. -7m、-9mでハナヤサイサンゴ属、C. D. L. -12mでハ



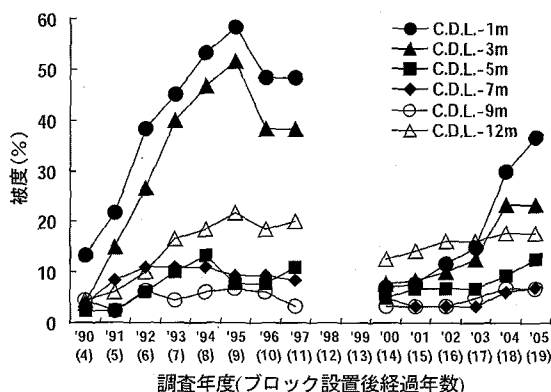
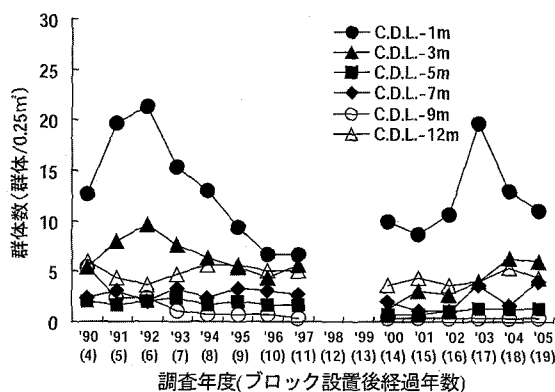
調査年度(ブロック設置後経過年数)

調査年度(ブロック設置後経過年数)

(a) 群体数

(b) 被度

図-3 エコブロックにおけるサンゴ群集の群体数と被度の経年変化



調査年度(ブロック設置後経過年数)

調査年度(ブロック設置後経過年数)

(a) 群体数

(b) 被度

図-4 無加工の異形ブロックにおけるサンゴ群集の被度と群体数の経年変化

マサンゴ属となっている。水深別の被度の経年変化は、ミドリイシ属とハナヤサイサンゴ属が高水温の影響で一時的に低下した後に回復している状況とハマサンゴ属が高水温時に生き残り成長している状況を現した結果となっている。

b) 群体数の変化

C. D. L. -1 m, -3 m の群体数をみると、1990 年から 1992 年までは群体数と被度の両方が増加しているものの、1993 年から 1995 年にかけては、被度の増加に伴って群体数は減少している。C. D. L. -5 m 以深では群体数が少なく、C. D. L. -1, -3 m に比べると光条件に乏しい環境にあることから成長が遅く、サンゴ群体間での基質面をめぐる競合はほとんど生じていないと考えられる。

1998 年の白化現象後の調査結果に着目すると、2000 年から 2002 年までの群体数の変化が小さい。このことは、調査年には幼サンゴの新規加入が少なくを示唆している。一方で、2003 年には群体数の増加がみられ、特に D. L. -1 m では、10.7 群体/0.25 m² から 19.7 群体/0.25 m² と約 2 倍増加している。2004 年には C. D. L. -1 m での減少が目立っている。被度は増加しており、2003 年に着生した群体が成長したためと考えられる。

4. 考 察

(1) エコブロックへのサンゴ群集の着生過程

エコブロックは、粗度が大きいほどサンゴの着生に効果があった。基盤表面の粗度が大型海藻の着生を促進することは寺脇 (1988) や Watanuki・Yamamoto (1990) が報告している。このような着生促進効果は、表面の起伏によって流動場に乱れと滞留域が形成され、サンゴの幼生が着生しやすい場所が形成されることと、着生して成長したサンゴのポリプが捕食者から守られることに起因するものと考えられる。

また、水深の違いによって効果の程度が異なった。C. D. L. -2 m では、施工後 2 年目から 3 年目の幼サンゴの初期着生時において、粗度が大きいほど高い効果が得られた。しかし、年数が経過するにしたがっていずれの粗度についても群体数、被度は同程度となった。これは、C. D. L. -2 m での光や流れ等の条件がサンゴの成育に適しているためと考えられる。つまり、着生したサンゴが年数の経過に伴って成長したために、被度の差がみられなくなったと考えられる。これらのことから、C. D. L. -2 m ではいずれの粗度についても、対照区と比較して高い効果が得られることがわかった。C. D. L. -5 m では、粗度 2 mm の効果が小さく、粗度 10 mm と 5 mm では高い効果が確認できた。C. D. L. -8 m では粗度 2 mm の効果が確認できなかったものの、粗度 10

mm, 5 mm ではわずかに効果が得られた。

(2) 無加工の異形ブロックへのサンゴ群集の着生過程

1986 年に異形ブロックを施工した後、サンゴ群集の被度は 8 年目で 50 % を越え、その後横ばい状態となった。高水温に伴う白化現象の影響のため、サンゴ群集が大規模に衰退した 1998 年から 7 年後の 2005 年の被度は、1986 年のブロック施工直後から 7 年後の 1993 年と比較して水深 D. L. -1 m, -3 m では低いものの、概ね同程度の値を示した。しかしながら、1998 年に発生した白化現象以前の被度の増加を示す傾きと 2000 年以降の傾きを比較すると、後者の成長が遅いことがわかった。これは後述するように白化後のサンゴの加入量低下や、衰退したサンゴ群集の骨格の隙間に生息するウニ類をはじめ稚サンゴの捕食者が増加したことなどが一因と考えられる。

(3) 増加率を用いた粗度の効果の評価

粗度の違いによるサンゴ群集の被度の増加率を比較したものを表-1 に示す。

エコブロック調査区では、無加工区と比較して粗度を設けたもので増加率が高く、粗度の効果が確認できる。

表-1 基盤の違いによる増加率の比較

(a) エコブロック

調査地点 / 水深 (C.D.L.)		-2	-5	-8	期間
エコ ブロック 新規基盤 (n = 21)	10 mm	増加率	1.26	1.36	1.19
		R ²	0.48	0.78	0.79
	5 mm	増加率	1.40	1.38	1.15
		R ²	0.77	0.82	0.68
	2 mm	増加率	1.46	1.23	1.04
		R ²	0.86	0.86	0.71
	無加工区	増加率	1.17	0.94	1.12
		R ²	0.57	0.42	0.80

(b) 定点調査区 (無加工)

調査地点 / 水深 (C.D.L.)			-1	-3	-5	-7	-9	-12	期間
定点調査 (無加工)	新規基盤 (n=12)	増加率	1.43	1.37	1.05	1.20	0.99	1.19	1986-
		R ²	0.95	0.98	0.91	0.93	0.77	0.94	1992
	白化後の 基盤 (n=15)	増加率	0.43	0.69	0.54	0.12	0.06	0.11	1998-
		R ²	0.55	0.22	0.05	0.01	0.00	0.02	2004

* R²: 決定係数

(4) 増加率を用いた白化後のサンゴ群集回復の評価

定点調査区について、新規基盤における 1986 年から 1992 年までと 1998 年に起こった白化現象による衰退後から 2004 年までの増加率を比較すると、新規基盤での増加率が高い。白化後では決定係数が低く、特に C. D. L. -3 m 以深で低いものの、白化後の基盤では新規基盤と比較してサンゴ群集の回復が遅いことが伺える。新規基盤と比較して白化後の基盤でサンゴ群集の回復が遅いことは、Ooka 他 (2006) でも報告されており、サンゴ

の死骸としての骨格が新たに加入した幼生や稚サンゴを捕食する巻貝類やウニ類などの生息場として機能している可能性が示されている。また、サンゴ幼生の供給量が白化後に減少することが Jinendradasa・Ekaratne (2000) や Omori 他 (2001) により報告されており同様の可能性が考えられる。つまり、白化後にはサンゴ幼生の供給量が減ることと、サンゴ幼生が着生してもそれらを捕食する移動性の付着動物により初期着生が阻害されることが白化後の基盤でサンゴ群集の回復が遅いことの要因と考えられる。

一方、表-1および図-3においてエコブロックの無加工区と加工区を比較すると、粗度を加工したブロックにおける被度の増加率が高いことやサンゴ群体数の加入が多いことから、サンゴ幼生の供給量が少ない場合であっても、粗度を設けることで効率よくサンゴ幼生を着生させることができると考えられる。これは、既に示したように表面の起伏によって流動場に乱れと滞留域が形成され、サンゴの幼生が着生しやすい場所が形成されることによるものと考えられる。

Bachtiar (2000) は人工基盤を用いたサンゴ群集の再生の可能性を報告している。Fox (2005) は、インドネシアのコモド国立公園でダイナマイト漁で破壊されたサンゴ礁に人工基盤を設置して4年から5年でミドリイシ類の固着が順調に進んでいることを報告している。サンゴ群集が衰退した海域に粗度を有する人工基盤を設置することでサンゴ群集の再生が促進されるものと考えられる。

5. 結 論

本研究の結論は、以下のように要約される。

- 1) サンゴ群集の被度の増加率は、新規に設置された基盤の方が、高水温の影響で死滅したサンゴの骨格が残った状態の基盤よりも大きい。
- 2) 那覇港においても既往の報告と同様に、白化後には白化前と比較してサンゴ幼生の供給量が減少している可能性がある。
- 3) エコブロックによるサンゴ幼生の着生促進効果は、凹凸の幅と深さが5 mm と 10 mm のタイプで効果が高い。特に、水深 D. L. -5 m 以浅でブロック設置後3年目までに著しい効果がある。
- 4) これらのことから、エコブロックはサンゴ幼生の供給量が減少したと考えられる大規模な白化現象後の状況においても、効果的にサンゴ幼生を着生させる効果があると考えられる。

- 5) 被度の増加率による成長過程の評価は、異形ブロックなどを活用したサンゴ群集の再生や代償措置、および白化などによる衰退からの回復過程を検討する際の指標として有効である。

参 考 文 献

- 土屋誠(1999)：サンゴ礁からの警告—最大規模の白化現象は何を意味するか—, *Galaxea JCERS*, Vol. 1, pp. 27-29.
- 寺脇利信(1988)：海中林造成技術の基礎的検討第2報, カジメ幼体の入植と人工基盤の表面形状, 電力中央研究所報告, U88037, 26p.
- 吉見昌弘・與那覇健次・片岡真二・山本秀一・高橋由浩・田村圭一(1998)：サンゴの人工構造物への着生状況-3, 海岸工学論文集第45巻, pp. 1111-1115.
- 山本秀一・高橋由浩・住田公資・林輝幸・杉浦則夫・前川孝昭(2002)：人工構造物におけるサンゴ群集成長過程の解析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1186-1190.
- Bachtiar, I. (2000) : Promoting recruitment of scleractinian corals using artificial substrate in the Gili Indah, Lombok Barat, Indonesia., *Proc. 9th Int. Coral Reef Symp.*, Bali, pp. 425-430.
- Callum, M. R., C. J. McClean, J. E. N. Veron, J. P. Hawkins, G. R. Allen, D. E. McAllister, C. G. Mittermeier, F. W. Schueler, M. Spalding, F. Wells, C. Vynne and T. B. Werner(2002) : Marine Biodiversity Hotspots and Conservation Priorities for Tropical Reefs, *Science*, 295, pp. 1280-1284.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. S. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Pauelo, R. G. Raslin, P. Sutton and M. van den Belt(1997) : The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387, pp. 253-260.
- Fox and E. Helen(2005) : Rapid coral growth on reef rehabilitation treatments in Komodo National Park, Indonesia, *Coral Reefs*, Vol. 24(2), p. 263.
- Hoegh-Guldberg, O. (2000) : Global climate change and the thermal tolerance of corals, *Galaxea JCERS*, Vol. 2, pp. 1-11.
- Jinendradasa, S. S. and S. U. Ekaratne (2000) : Post-bleaching changes in coral settlement at the Hikkaduwa Nature Reserve in Sri Lanka, *Proc. 9th Int. Coral Reef Symp.*, Bali, pp. 417-420.
- Moberg, F. and C. Folke(1999) : Ecological goods and services of coral reef ecosystems, *Ecological Economics*, Vol. 29, pp. 215-233.
- Omori, M., H. Fukami, H. Kobinata and M. Hatta(2001) : Dignificant drop of fertilization of *Acropora* corals in 1999 : An after-effect of heavy coral bleaching? *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 46(3), pp. 704-706.
- Ooka, S., S. Hanashiro, R. Gushi, S. Urabe, N. Hayashi, Y. Takahashi and H. Yamamoto (2006) : Growth of coral assemblages on artificial structures and surrounding natural substrates, *Proc. 10th Int. Coral Reef Symp.*, Naha, pp. 91-98.
- Yamamoto, H., N. Sugiura and T. Maekawa(2002) : Coral growth processes using multiple regression analysis and neural network model, *Eco-Engineering*, Vol. 14(3), pp. 3-11.
- Watanuki, A. and H. Yamamoto(1990) : Settlement of seaweeds on coastal structures, *Hydrobiologia* 2004/2005, pp. 275-280.