

人工構造物におけるサンゴ群集成長過程の解析

山本秀一* ・高橋由浩** ・住田公資***
林 輝幸**** ・杉浦則夫***** ・前川孝昭*****

サンゴ群集成長過程と環境条件との関係に関する解析は、亜熱帯から熱帯圏における沿岸域開発と環境保全の観点において重要な課題である。沖縄県に位置する那覇港の人工構造物におけるサンゴ群集の被度調査結果をもとに 18 年間のサンゴ群集の成長過程を解析した。人工構造物上におけるサンゴ群集の成長過程は、異形ブロック上と直立壁面上で異なり、それぞれの基盤面上での成長過程をロジスティック曲線により近似し、標準的な成長過程を示した。さらに、サンゴ群集の安定成長期における被度と環境条件を比較して、異形ブロック上と直立壁面上のそれぞれでサンゴ群集の成長に影響を及ぼす環境条件を比較し、検討した。

1. はじめに

亜熱帯から熱帯圏の沿岸域生態系においてサンゴ群集の役割とその機能がきわめて重要なものの一つであることが Costanza 他 (1997) や Moberg and 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よる白化現象の影響を受け、大きなダメージを受けた (Hoegh-Guldberg, 2000 等)。現在はその回復過程にあり、時間・空間的条件とサンゴ群集の成長過程に関する知見は重要なものとなっている。また、新たな人工構造物整備とその後のサンゴ群集成長過程に関する知見の集積は、開発と保全の観点から重要な課題である。

サンゴ群集の成長過程に関する研究は、グレートバリアリーフ等の自然地形 (サンゴ礁) において行われている (Connell 他, 1997; Connell, 1997 等)、国内における研究事例は少ない。また、サンゴ群集の成長過程に関する研究の多くは、遷移の過程で生じた嵐などの影響による減少の後の回復過程を調査したもので、人工構造物上での長期間にわたるデータ解析の事例はない。

一方、沖縄県に位置する那覇港では 1994 年に防波堤等人工構造物上における 157 地区の同一水深帯においてサンゴ群集の被度分布調査を実施している (岩上他, 1995)。人工構造物は施工した年が明らかのため、1 回の調査で構造物施工後の経過年数とサンゴ群集の成長過程を整理することができる。調査対象区域には 1 年前から 18 年前までに施工された構造物があり、経過年数に対応するサンゴ群集の被度のデータが得られている。

本報は、1994 年に得られたデータをもとにサンゴ群集の成長過程と環境条件の関係を統計解析したものである。標準的な成長過程と環境条件との関係に関する知見は、サンゴ群集が優占する沿岸域の環境修復事業における長期的目標設定や実行計画立案に際してきわめて重要なものと考えられる。

2. 方 法

2.1 人工構造物におけるサンゴ群集の調査

1994 年に那覇港の人工構造物を対象として、図-1 に示す 157 調査地区でサンゴ群集の被度分布調査を実施している (岩上他, 1995)。サンゴ群集の被度は、異形ブロック上と直立壁面上における D.L.-1 m から -2 m の水深帯をベルトトランセクト法によって潜水目視観察で求めている。調査区域の人工構造物の構造形式、施工時期は施工履歴より整理した。

2.2 サンゴ群集成長過程と環境条件の解析

a) 環境条件

サンゴ群集の成長過程に影響を及ぼす環境条件としては、波浪、流速、光量、水温、水質、生物間の競合等があげられる (Yamamoto 他, 2002 等)。これらの環境条件に関する情報は、対象地区周辺で実施されている調査結果 (沖縄総合事務局那覇港湾工事事務所, 1986-1994) をもとに地点ごとの値を線形補間して各調査地区の値とした。主な環境条件の指標値は次のとおりである。

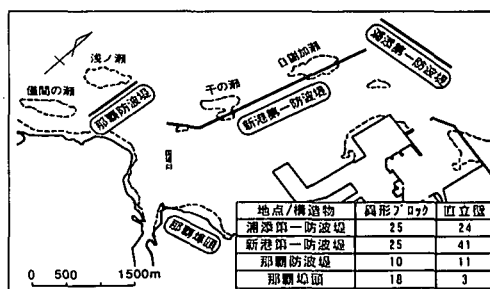


図-1 調査地区とサンプル数

* 正会員 学修 株式会社エコー
** 株式会社エコー
*** 正会員 沖縄総合事務局那覇港湾空港工事事務所
**** 前沖縄総合事務局那覇港湾空港工事事務所
***** 農博 筑波大学農林工学系
***** 農博 筑波大学農林工学系

構造物直近の波浪・流速の指標値は、設計波（50 年確率波）を波浪変形して求めた構造物前面波高（ $H_{1/50}$ ）（以下、堤前波高）とした。これは、Murakami 他（2001）が付着生物の分布状況と波浪条件との関係を解析する際に用いた手法である。光量の指標値は、対面方向（北向きを 0° とし、東を 90° 、南を 180° 、西を 270° ）、透明度、基盤の傾度（異形ブロックは 0° 、直立壁面は 90° ）とした。水温の指標値は平均水温、最高水温とした。水質の指標値は塩分、COD、TN、TP、SS とした。生物間の競合（食害動物、サンゴ間の競合、その他生物との競合）については考慮しなかった。

対象区域の環境条件の平均値（標準偏差）を以下に示す。堤前波高は 7.1 m（4.1 m）、透明度は 12.5 m（4.3 m）、平均水温は 24.4°C （ 0.1°C ）、最高水温は 29.7°C （ 0.2°C ）、塩分は 34.68（0.14）、COD は 0.9 mg/l（0.1 mg/l）、TN は 0.17 mg/l（0.06 mg/l）、TP は 0.014 mg/l（0.010 mg/l）、SS は 1.3 mg/l（0.9 mg/l）である。

b) 解析の方法

i) サンゴ群集が成長できる環境条件の解析

人工構造物上のサンゴ群集の調査結果には被度がきわめて低い地区が存在する。サンゴ群集の被度は構造物の施工時期から求められる経過年数と共に変化するため、経過年数ごとに区間推計し、95%信頼区間を下回る被度の地区についてはサンゴ群集の成長に適さない環境条件が存在するものと判断した。95%信頼区間を下回る被度の地区とその他の地区との環境条件の違いを T 検定により検証し、那覇港においてサンゴ群集が成長できる環境条件の目安を求めた。

ii) サンゴ群集の成長過程の解析

サンゴ群集が成長できる環境条件を有する地区のサンゴ群集の被度を対象に、異形ブロック上と直立壁面上でサンゴ群集の成長過程に違いがあるとの仮説を立て T 検定で検証し、それぞれについてサンゴ群集の成長過程をロジスティック曲線で近似した。

iii) サンゴ群集の成長過程と環境条件の関係の解析

サンゴ群集の成長過程を初期成長期とその後の安定成長期に分け、初期成長期については指数関数近似して異形ブロック上と直立壁面上およびその他の事例を対象に増加率の比較を行なった。安定成長期のサンゴ群集の被度についても同様に平均値の比較を行なうとともに、異形ブロック上と直立壁面上での各種環境条件とサンゴ群集の被度の相関関係を求めた。

3. 結果と考察

3.1 サンゴ群集が成長できる環境条件

人工構造物の施工時期から求められる経過年数とサンゴ群集の被度の関係（ $n=157$ ）を図-2 に示す。概略的な

サンゴ群集の被度の経年変化過程は確認できるものの、全体的に経年的な変動と年ごとの被度の分散が大きい。これは各年の調査地区にサンゴ群集の成長に適さない地区が含まれていることと、構造基盤が大きく異なるデータが混在しているためと考えられる。

そこで、構造物施工後の経過年数ごとにサンゴ群集の被度の区間推計を行ない、95%信頼区間を下回る値についてはサンゴ群集の成長に適さない地区（ $n=45$ ）としてサンゴ群集の成長が可能な地区（ $n=112$ ）と区分した。各区分における環境条件の母平均の差を T 検定により検証した結果、堤前波高、透明度、塩分、SS、COD、TN、TP に有意な違いが認められた。サンゴ群集の成長に適さない地区の 90%以上は那覇埠頭と新港第一防波堤の港内側の地区である。これらの地区では河川（国場川）からの淡水や栄養物質の供給とそれにもなう透明度の低下がサンゴ群集の成長を阻害する一つの要因となっているものと考えられる。那覇港の人工構造物においてサンゴ群集の成長が顕著に確認された地区（ $n=112$ ）の環境条件を表-1 に示す。環境修復計画を検討する際には表-1 に示す条件を考慮して対象区域を選定することが望ましい。

3.2 サンゴ群集の成長過程

サンゴ群集が成長できる地区について、異形ブロック上と直立壁面上のサンゴ群集の被度には有意水準 1% で差が認められ、それぞれについてサンゴ群集の成長過程の解析を行った。サンゴ群集の成長過程はロジスティッ

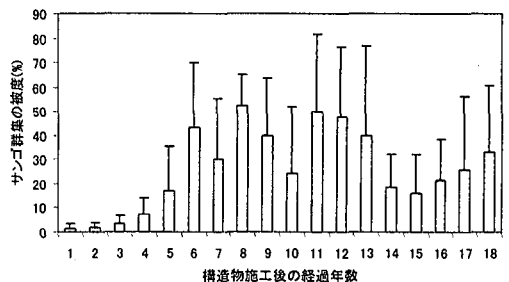


図-2 サンゴ群集の被度と経年変化

表-1 那覇港でのサンゴ群集の成長に適した環境条件

	自然環境条件	
	平均値	S.D.
堤前波高 (m)	8.4	3.4
塩分	34.7	0.1
透明度 (m)	13.7	3.5
SS (mg/l)	1.2	0.5
COD (mg/l)	0.8	0.1
TN (mg/l)	0.15	0.04
TP (mg/l)	0.012	0.005

ク曲線で近似した。ロジスティック曲線は限界のある条件での成長過程を表す方程式である。本報ではロジスティック曲線として Yamaguchi (1983) がハナヤサイサンゴ (*Pocillopora damicornis*) の成長解析に用いた Gompertz の成長曲線 (1) 式を用いた。近似式を式 (2), (3) に示すとともに人工構造物上でのサンゴ群集の成長曲線を図-3 に示す。

$$\ln S_t = \ln S_{\infty}(1 - be^{-Kt}) \dots\dots\dots (1)$$

S_{∞} は最終的な被度, K は成長係数, b は年齢が 0 歳の時の初期サイズで決まる変異定数である。

< 異形ブロック上の平均成長曲線 >

$$\ln S_t = 4.01(1 - 2.14e^{-0.55t}) \quad (R^2 = 0.82, n = 17) \dots\dots\dots (2)$$

< 直立壁面上の平均成長曲線 >

$$\ln S_t = 2.75(1 - 2.67e^{-0.57t}) \quad (R^2 = 0.22, n = 17) \dots\dots\dots (3)$$

サンゴ群集の成長過程は 6 年目から 8 年目までの初期成長期とその後の安定成長期に分けて考えることができる。成長係数 (K) は異形ブロック上と直立壁面上ではほぼ同じ値になっているが、直立壁面上では相関係数が低い。最終的な被度 (S_{∞}) が異なるのは、安定成長期のサンゴ群集の平均的な被度が異形ブロック上では約 50% と高く、直立壁面上では約 20% と低いことによるものである。Yamaguchi (1983) が Stephenson and Stephenson (1933) の観察結果をもとに求めたハナヤサイサンゴ (*Pocillopora damicornis*) の成長曲線を式 (4) に示す。これはハナヤサイサンゴ 1 群体の面積を指標とした成長過程を示すものであるため、最終的な被度 (S_{∞}) の値は異なるが、成長係数 (K) はほぼ同程度である。

$$\ln S_t = 7.034(1 - 1.426e^{-0.514t}) \dots\dots\dots (4)$$

このように、成長モデルにおける成長係数は、単一種のサンゴ群体だけでなく、実海域の複数種から構成されるサンゴの成長を解析する指標として有効であることが明らかになった。また、異形ブロックと直立壁面におけるサンゴ群集の標準的な成長過程は、今後の環境修復計

画における時間・空間的な目標設定に際しての根拠となりうるものである。

3.3 サンゴ群集の成長過程と環境要因

a) 初期成長期

サンゴ群集の被度は、初期成長期には指数関数的に増加する。初期成長期について 1 年目から 6 年目のデータを指数関数 ($y = ae^{mt}$; a は初期値, m は増加率) に近似して式 (5), (6) に示す。

< 異形ブロック上の初期成長曲線 (水深 1 m) >

$$y = 0.0034e^{1.78t} \quad (R^2 = 0.89, n = 18) \dots\dots (5)$$

< 直立壁面上の初期成長曲線 (水深 1 m) >

$$y = 1.1277e^{0.51t} \quad (R^2 = 0.73, n = 20) \dots\dots (6)$$

初期のサンゴ群集の成長過程はロジスティック曲線よりも高い相関係数で近似できており、異形ブロック上では直立壁面上と比較して増加率が 3 倍以上大きい。異形ブロック上と直立壁面上では基盤の傾度が異なり、それによって基盤面上の光量が異なる。那覇港内 12 箇所における構造物前面の水深 D.L.-1 m での実測値では、水中での相対照度が傾度 0° の面に対して 90° の面では 27% に減少することが観測されている。光量はサンゴ群集の成長に影響を及ぼす主要因であること (Chalker 他, 1988) から、異形ブロック上と比較して直立壁面上では基盤傾度の増加により光量が減少してサンゴの被度の増加率が低下しているものと考えられる。

なお、Yamamoto 他 (2002) における那覇港内同一地点のサンゴ群集連続観察結果での 6 年目までの被度変化の指数関数近似式を求め式 (7), (8) に示す。これによると、増加率は傾度 10° では 1.25 であり、傾度 90° では 0.24 で、それぞれ異形ブロック上の 1.78 と直立壁面上の 0.51 と類似した傾向を示している。

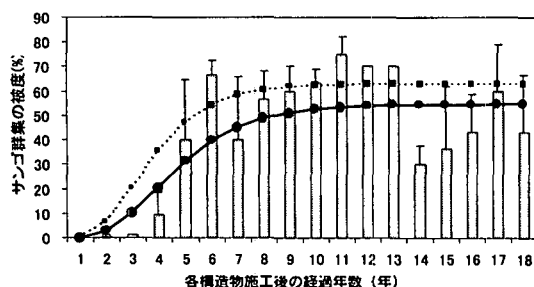
< 水深 1 m 傾度 10° の初期成長曲線 >

$$y = 0.0227e^{1.25t} \quad (R^2 = 0.69, n = 9) \dots\dots (7)$$

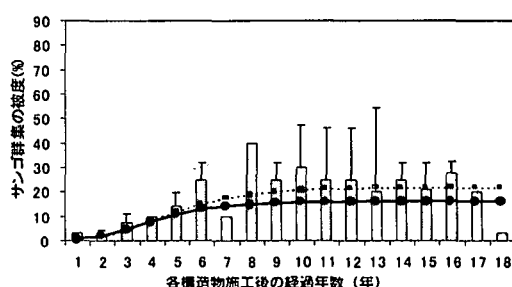
< 水深 1 m 傾度 90° の初期成長曲線 >

$$y = 1.6927e^{0.24t} \quad (R^2 = 0.28, n = 9) \dots\dots (8)$$

また、Connell 他 (1997) におけるオーストラリアのへ



異形ブロックにおけるサンゴ群集の成長過程 (n=59)



直立壁におけるサンゴ群集の成長過程 (n=53)

図-3 人工構造物上でのサンゴ群集の成長過程

注: 棒グラフは実測値, 実線は理論式から求めた平均成長曲線, 破線は最適成長曲線 (平均値 + 標準偏差)

ロン島での自然基盤上のサンゴ群集回復過程の調査事例から増加率を求めた。対象地点は那覇港における人工構造物上と類似した環境を有すると考えられる外洋に面した礁斜面の水深0.5m地点とし、サンゴ群集の被度の变化をグラフから読み取り、指数関数近似して式(9)に示す。これによると、オーストラリアにおけるサンゴ群集の回復過程における増加率は1.10であり、那覇港における異形ブロック上におけるサンゴ群集の成長過程と類似している。

＜ヘロン島での回復過程の成長曲線＞

$$y=0.0261e^{1.10x} \quad (R^2=0.95, n=4) \cdots \cdots (9)$$

b) 安定成長期

6年目以降の安定成長期におけるサンゴ群集の被度の平均値と標準偏差は、異形ブロック上では50.9%と19.7%($n=44$)であり、直立壁面上では22.9%と13.9%($n=35$)である。Yamamoto 他(2002)における那覇港内の異形ブロック上のサンゴ群集定点連続観察結果から6年目から11年目までの被度の平均値と標準偏差を求めると、傾度10°の地点で48.9%と14.1%($n=18$)であり、傾度90°の地点で11.5%と5.7%($n=18$)である。それぞれの値が本調査結果と同レベルの値となっており、基盤の傾度が安定成長期におけるサンゴ群集の被度に影響を及ぼしていることを示している。また、Connell 他(1997)におけるオーストラリアのヘロン島における外洋に面した礁斜面の水深0.5m地点でのサンゴ群集の被度の安定成長期における値をグラフから読んで求めた平均値と標準偏差は65%と13.7%($n=9$)である。これは異形ブロック上におけるサンゴ群集の安定成長期の被度がオーストラリアにおける天然礁での安定成長期の被度より低いもののほぼ同じレベルであることを示している。

サンゴ群集の各調査地区における被度の違いは各地区

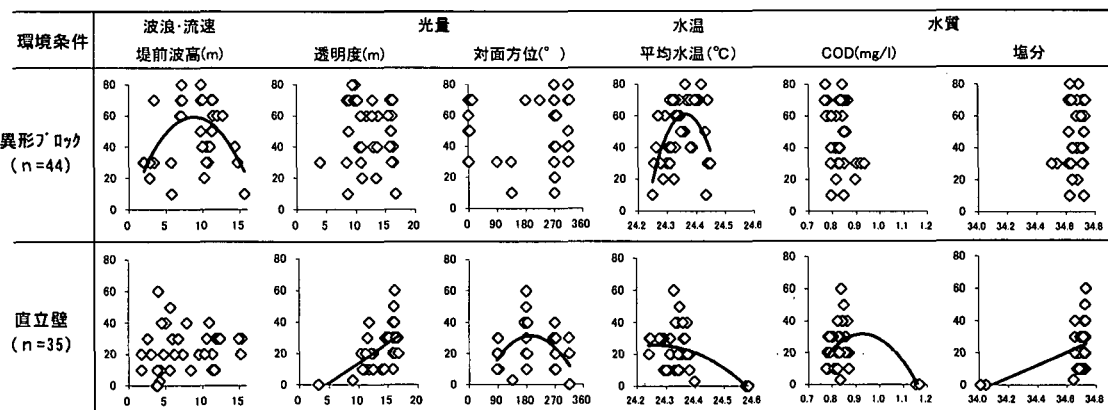
の環境条件の影響を受けていると考えられるため、主な環境条件とサンゴ群集の被度の相関関係を求め表-2に示す。

これによると、サンゴ群集の成長に影響を及ぼしている環境条件は異形ブロック上と直立壁面上では異なっている。異形ブロック上でのサンゴ群集の成長に影響を及ぼす主な環境条件は、波浪・流速の指標値である堤前波高で、6mから10mの範囲で被度が最大になり、それよりも高くても低くても被度が小さくなる。これは、流速が小さいとサンゴ群集に十分な栄養分が供給されないためであり(Atkinson 他, 2001)、大きな波浪はサンゴ群集を破壊する(Massel and Done, 1993)ことによるものと考えられる。同様の傾向は、日本の温帯域における付着動植物の現存量と堤前波高の関係についても種類に応じて現存量が最大になる領域があることが示されている(Murakami 他, 2001)。サンゴ群集の場合には付着力が強いので、温帯域の付着動植物よりも大きな波浪条件に適応しているようである。

直立壁面上でのサンゴ群集の成長に影響を及ぼす主な環境条件は、光量の指標値である透明度と対面方位で、光量が多い環境条件(透明度が高く対面方位が南向き)であるほど被度が高い。直立壁面上では傾度が大きいことによって当初から光量が制限されているため、さらに光量の指標値の影響が大きくなるものと考えられる。

以上より、サンゴ群集の成長過程に影響を及ぼす主な環境条件としては、異形ブロック上では波浪・流速、直立壁面上では光量あげられる。しかし、サンゴ群集の成長過程には周辺のさまざまな生物が関与し、競合による影響も受けるはずである。したがって、周辺生物間の相互作用を考慮しなければならないが、サンゴ群集が優占する海域の環境修復事業において構造タイプ別に環境共生適地を選定する場合や、実行計画の立案に際してこ

表-2 異形ブロックと直立壁におけるサンゴ群集の被度と環境条件との関係



注1:縦軸はサンゴ群集の被度(%), 横軸は各環境条件の値を示す。

注2:近似曲線は $R^2>0.1$ について示す。

これらの環境条件を指標として検討することの重要性を見出すことができた。

4. おわりに

本研究によって那覇港においてサンゴ群集が成長可能な環境条件を抽出した。また、異形ブロックと直立壁面においてはサンゴ群集の成長過程が異なり、それぞれの成長過程をロジスティック曲線により近似した。さらに、サンゴ群集の安定成長期における被度と環境条件を比較して、異形ブロック上と直立壁面上でサンゴ群集の成長に影響を及ぼす環境条件を抽出した。

以上により、サンゴ群集の回復過程や新たな構造物を施工した後の成長過程が概ね予測可能になった。また、今後のサンゴ群集に関する環境修復事業の実施箇所選定や実行計画の立案に際して環境条件から予測するための知見が得られた。

沿岸域生態系におけるサンゴ群集の役割と機能はきわめて重要であり、今後の沿岸域開発に際してはさらにサンゴ群集の成長過程と生物間の相互作用を含めた環境条件との関係に関する知見を集積するとともに、環境の維持・回復・創造技術を開発する必要がある。

参 考 文 献

- 岩上淳一・宮井真一郎・栗田一昭・尾崎幸男・山本秀一・高橋由浩 (1995): サンゴの人工構造物への着生状況-2, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1206-1210.
- 沖縄総合事務局那覇港工事事務所(1986-1994): 那覇港海域環境調査資料.
- Atkinson, M. J., J. L. Falter and C. J. Hearn (2001): Nutrient dynamics in the Biosphere 2 coral reef mesocosm: Water velocity controls NH_4 and PO_4 uptake, *Coral Reefs*, 20 (4), pp. 341-346.
- 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, T. B. Werner (2002): *Marine Biodiversity Hotspots and Conservation Priorities for Tropical Reefs*, Science, Vol. 295, pp. 1280-1284.
- Chalker B. E., D. J. Barnes, W. C. Dunlap and P. L. Jokiel (1988): Light and Reef-Building Corals, *Interdisciplinary Science Reviews*, 13-3, pp. 222-237.
- Connell J. H., T. O. Hughes and C. C. Wallace (1997): A 30-year study of coral abundance, recruitment, and disturbance at several scales in space and time, *Ecological Monographs*, 67 (4), pp. 461-488.
- Connell J. H. (1977): Disturbance and recovery of coral assemblages, *Coral Reefs*, 16, pp. 101-113.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Pauelo, R. G. Raslin, P. Sutton, M. van den Belt (1997): The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, Vol. 387/15, pp. 253-260.
- Hoegh-Guldberg O. (2000): Global climate change and the thermal tolerance of corals, *Galaxea*, JCRS, 2, pp. 1-11.
- Massel, S. R. and T. J. Done (1993): Effects of cyclone waves on massive coral assemblages on Great Barrier Reef, *Coral Reefs*, 12 (3), pp. 153-166.
- Moberg F., C. Folke (1999): Ecological goods and services of coral reef ecosystems, *Ecological Economics*, 29, pp. 215-233.
- Murakami K., T. Asai, K. Nakase, A. Watanuki, H. Yamamoto (2001): Classification of attached organisms on marine structures with respect to wave and water quality conditions, *Coastal Eng. Japan*, 43 (3), pp. 203-219.
- Stephenson T. A. and A. Stephenson (1933): Growth and asexual reproduction in corals, *Sci. Rep., Gt. Barrier Reef Exped*, 3, pp. 167-217.
- Yamaguchi M. (1983): Growth data analysis in the reef-building coral *Pocillopora damicornis* (Linnaeus), *Galaxea*, 2, pp. 21-27.
- Yamamoto H., N. Sugiura, T. Maekawa (2002): Coral growth processes using multiple regression analysis and neural network model, *Eco-Engineering*, (in printing)