

広域水温モニタリングネットワーク展開による 沖縄サンゴ礁水温環境地域差の解析

灘岡 和 夫* ・ 若 木 研 水** ・ 鹿熊信一郎*** ・ 二 瓶 泰 雄****
諸 見 里 聡***** ・ 大見謝辰男***** ・ 岩 尾 研 二***** ・ 下 池 和 幸*****
谷 口 洋 基***** ・ 中 野 義 勝***** ・ 池 間 健 晴*****

1. はじめに

沿岸域における水温環境は、沿岸生態系の物理環境を
考えるうえで基本的な重要性をもつ。実際、1997 年から
1998 年にかけて世界規模で発生したサンゴ礁の白化・斃
死現象は、エルニーニョ現象による沿岸水温の高温化が
主因として考えられており (Brown ら, 1996)、沖縄に関
しては、さらに台風の発生数の減少が水温の高温化を助
長したために大規模な被害が現れたとされている (仲座
ら, 1999)。しかし、サンゴの白化・斃死の程度にはかな
りの地域性があることも知られている (Wilkinson,
1998; Berkelmans ら, 1999a; 長谷川ら, 1999; 大見謝
ら, 2000)。その原因として、1) 沿岸水温環境そのもの
にかなりの地域性がある (Berkelmans ら, 1999b; Win
ter ら, 1998)、2) 沿岸水温環境に有意な地域性が無い場
合でも、陸水流入による透明度の低下や土砂堆積 (大見
謝, 2000)、栄養塩過多、塩分低下等の陸域影響 (William,
1997; Brown, 1997)、捕食生物の急増 (Yamaguchi,
1986)、その他の環境ストレスやサンゴ種の組成 (Mar
shall ら, 2000; 茅根ら, 1999) に地域性がある (Glynn,
1993)、という 2 つの可能性が考えられる。

本研究では、このうち、前者についての実態を探るべ
く、琉球諸島全体に 100 点以上ものモニタリングポイン
トを分布させた広域水温モニタリングネットワークを構
築し、そのデータの解析等から沖縄沿岸水温環境の地域
性の実態を原因とともに明らかにすることを試みた。そ
して、沿岸水温環境の地域性とサンゴ白化・斃死の関連
性について検討した。

2. 研究方法

(1) 広域水温モニタリングネットワーク ORTMN (Okinawa Regional Temperature Monitor ing Network)

琉球列島のほぼ全域にわたる 100 点以上の沿岸モニタ
リングポイント (図-1) の底面近くに、直径約 3 cm の
円盤型小型メモリ式水温計 (米 Optic Computer 社) を設
置し、1999 年 6 月からモニタリングを開始した (Ka
kuma ら, 2000)。設置点の水深はポイントにより若干異
なるが、概ね 3 m 以下となっている。なお、水温計の設
置、維持管理、データの回収に関しては、地元の漁業関
係者やダイバーショップの方々の協力を得た。

(2) リーフスケール集中観測

ORTMN による計測データには、地域分布のほかに、
水深等の違いによるリーフスケールでの局所的な水温変
化が重なっているものと考えられる。そこでこの局所的
な水温分布を把握する目的で沖縄島西岸に位置する恩納
村安富祖海岸と、慶良間諸島の阿嘉島におけるリーフ内
外に複数のモニタリングポイントを配置し (図-2)、そ
れぞれのポイントでは水深方向に複数の水温計を設置し
た。観測は 1999 年 5 月下旬から約 40 日間実施した。

(3) 日射量計測

日射量の地域差の影響を評価するため、安富祖、阿嘉
島、久米島の 3 点に日射計を設置し、2000 年 6 月よりモ
ニタリングを開始した。

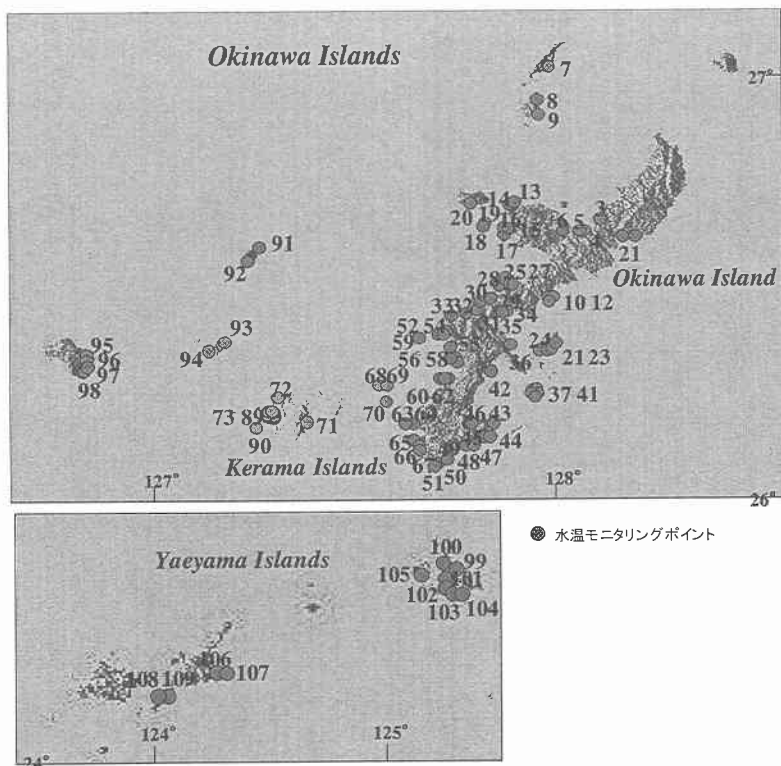
(4) 衛星画像解析

沖縄島周辺の平面的な水温分布状況を把握するため
SST 画像解析を行った。データの解像度は 1.1 km で、各
日にちで、1 日 8 回の計測データ中の最高値の合成画像
を使用した。陸は黒で表示し、雲や水蒸気の影響による
データの欠損は白抜きとした。また、湧昇の存在を判断
するため NASA/GSFC, ORBIMAGE, TRIC/TSIC,
NASDA/ EORC 提供の Sea WiFS の level-2 データ (解
像度: 1.1 km) によって Chl. a 濃度分布の確認を行っ
た。

(5) 数値シミュレーション

外洋からの黒潮系暖水塊の沿岸域への波及過程を解析

* フェロー 工 博 東京工業大学大学院教授 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
*** 沖縄県水産試験場漁業室長
**** 正 会 員 博(工) 東京理科大学専任講師 理工学部土木工
学科
***** 沖縄県水産試験場主任研究員
***** 沖縄県衛生環境研究所赤土研究室長
***** 阿嘉島臨海研究所研究員
***** 琉球大学
***** 亜熱帯総合研究所



図一 広域多点水温モニタリングネットワーク

するため、鉛直座標系に dual- σ 座標 (灘岡ら, 2000) を用いた POM による簡単な海水流動数値実験を行った。計算領域は南北方向 232 km, 東西方向 248 km でグリッドサイズは 2 km $\times$ 2 km とした。初期条件として, 20 km 四方の暖水塊を沖縄島西方沖 (図一7) に周囲との水温差 +2°C, 鉛直方向密度一様で与え, 初期流速はゼロ, 風および潮汐等の外力は無視した。

3. 結果と考察

(1) 水温の局所性と水深依存性

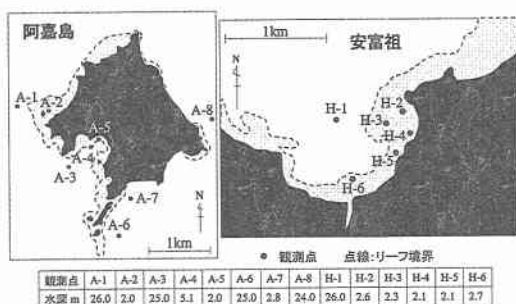
図一3に, 平常時 (6月28日~7月5日) の安富祖リーフ内外における水温を測定水深と併せて示す。同じ安富祖リーフ内にある2点 H-5, H-6 における水温変動を比較しても日中のピーク値やその位相に有意な差がみられ, 水温の局所性が現れていることがわかる。また, 同一地点であっても測定水深の違いにより水温変動幅が大きく異なっており, 水温の水深依存性が存在することがわかる。これらのことは, 沿岸水温の地域性を ORTMN による水温データから論じる際, その単純な比較に依拠することは問題があり, このようなリーフスケールでの局地的な効果や水深依存性を合理的に取り除く必要があることを示している。

図一3で, 午前6時付近の水温最低下時に注目すると,

リーフ内の水温はどの水深もリーフ外の表層水温に近づいていることがわかる。そこで, 安富祖リーフ内における1日の代表水温を24時間平均値とした場合と最低水温とした場合の2つのケースについて, 水温の局所性と水深依存性の現れ方を比較したところ, 最低水温の場合には, 局所性, 水深依存性ともに小さく抑えられており, また, リーフ外表層水温にほぼ一致することが判明した (図一4)。このことは阿嘉島についても同様であった。

(2) 夏期の琉球列島沿岸水温の地域差

上の結果を踏まえて, 夏期 (1999年7月1日から9月30日) の ORTMN データを日最低水温で比較した時系



図一2 集中観測観測点
安富祖 (図一 No. 15~17) と阿嘉島 (No. 50~58)

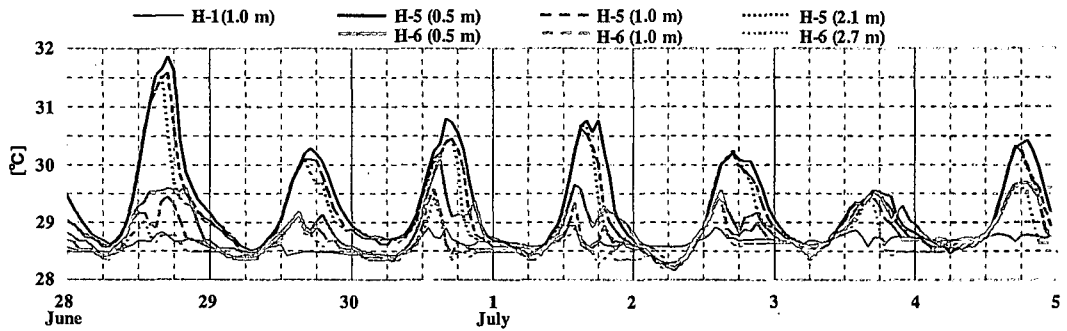


図-3 安富祖リーフ内 (H-5, H-6) における水温変動の水深による比較とリーフ外 (H-1) 水温との比較

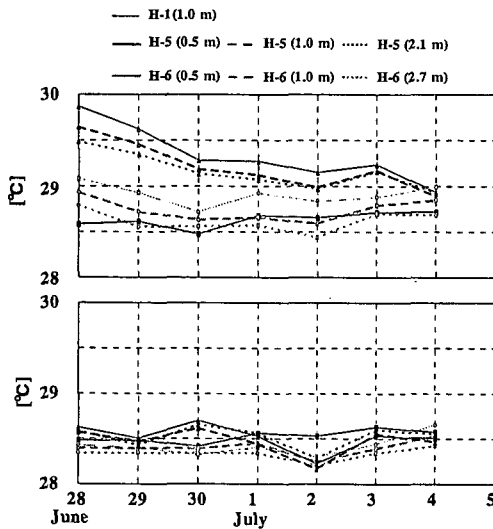


図-4 安富祖とリーフ外水温に対するリーフ内 (H-5, H-6) の 24 時間平均水温 (上) と日最低水温 (下) の比較

列グラフを、那覇气象台で測定された風速ベクトルと併せて図-5 に示す。傾向として、八重山諸島(宮古島、石垣島)の水温が高く、沖縄島沿岸や久米島、伊江島の水温が次いで高くなっている。そしてチービスと慶良間諸島中の阿嘉島では、これらに比べて 1°C 程度低い日が多くなっている。また、台風等による気象攪乱時には、水温の地域差が解消されているのがわかる。

モニタリングしているポイントが最も多い期間 (7 月 11 日より 50 日間) の日最低水温を平均し、 0.3°C 毎に分類してその地域分布を見てみた結果を図-6 に示す。これから、沖縄島沿岸ではあまり差が無く、八重山諸島の水温が高くて、チービスおよび慶良間諸島の水温は低いという傾向が、この年の夏期に平均して現れていたことがわかる。

(3) 1998 年, 1999 年の外洋 SST 分布

1998 年, 1999 年夏期の典型的な SST 画像を用いて広域的な海面水温分布について検討した。対象期間では雲

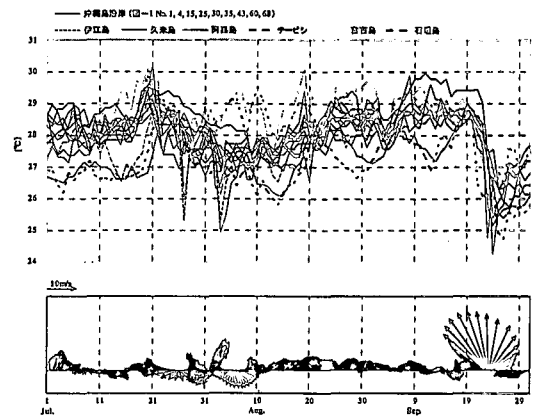


図-5 広域多点水温モニタリングネットワーク (ORTMN) 観測点における日最低水温の変化と 24 時間移動平均風ベクトル (那覇: 気象庁气象台) の比較

等の影響により判別不可能な日が少なくなかったが、比較的画像状態が良く広域 SST 分布が読みとれるデータでは、ほとんどの場合、慶良間諸島やチービス付近の海域で相対的に水温が低くなっており、逆に沖縄島の西岸や東岸には高温水塊が接近している日が多く見られた。この結果は、上記の ORTMN の傾向と一致しており、また白化が実際に起こった 1998 年夏の水温地域差が 1999 年と同様の傾向であったことを示唆している。

(4) 沿岸水温の地域性とサンゴ白化の地域性の関係
つぎに、大見謝 (2000) による沖縄本島およびその周辺でのサンゴ礁被度ならびに海底赤土濃度含有量分布データ (表-1) を図-6 の結果と比較してみた。これを見ると、慶良間諸島中の阿嘉島では、生存サンゴの被度が 50% 以上と他の海域に比べて被害が明らかに小さいことがわかる。一方、沖縄本島西海岸に位置する赤瀬においては、赤土汚染状況が阿嘉島の観測点と同程度であるにもかかわらず、生存サンゴ被度が 0% と壊滅的になっている。このことは、沿岸水温の地域性がサンゴ白化の地域性に支配的な影響を与えていることを例証する

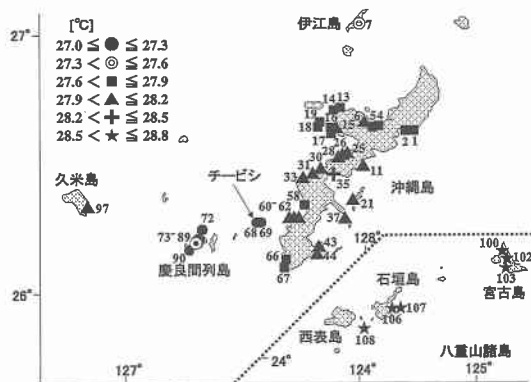
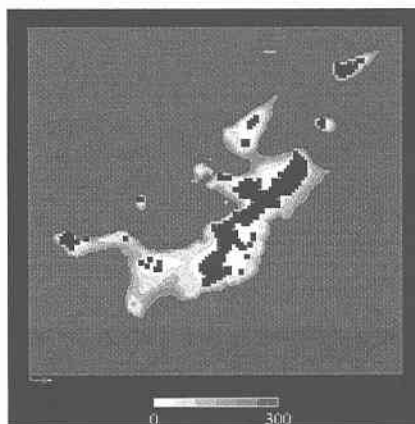


図-6 ORTMN による日最低水温(7月11日～8月29日)



水深分布

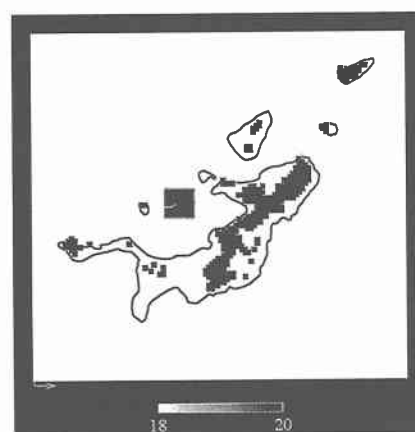
ものである。

(5) 慶良間諸島およびチーピシ周辺海域における相対的低水温の原因

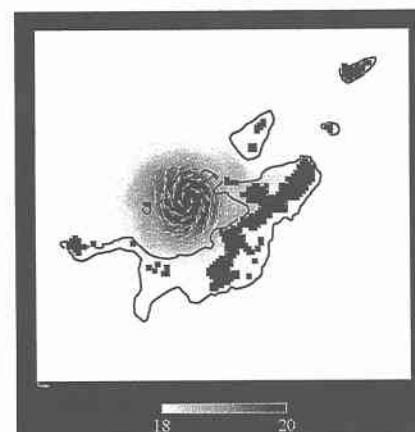
慶良間列島およびチーピシの周辺の水温が相対的に低くなる原因としては、次の4つが考えられる；①日射量が相対的に少ない、②慶良間列島やチーピシが位置する陸棚上で潮汐の効果による鉛直混合が周囲の深海域よりも強く起こり、結果として水深数m以浅の水温が低くなる、③陸棚域で深海からの冷水塊が湧昇している、④黒潮系暖水塊が陸棚の縁でブロックされている。

まず、日射量に関して、安富祖と阿嘉島における累積日射量と水温を2000年7月1日より9月30日まで比較してみたところ、阿嘉島の方が日射量が多いにもかかわらず水温が低い日が多くなっていることが判明した。したがって、上記①が原因である可能性は低い。

つぎに陸棚上の鉛直混合の効果を検証するために、陸棚上の流れを支配する潮汐による成層の鉛直混合に関す



水温分布の初期条件



5日後の水温分布

図-7 暖水塊波及計算結果

表-1 サンゴ礁被度と底質中懸濁物質含量の対応

Location	Nearest point No.	Cover degree %			SPSS Max kg/m ²
		Oct 1996	Jul 1998	Oct 1999	
Henan. 2	3	7.2	8.3	6.4	488
Henan. 3	3	1.6	1.3	1.3	168
Genka. 1	4, 5	27.9	36.6	10.3	293
Genka. 3	4, 5	12.1	15.9	5.6	242
Taira. 2	1, 2	10.2	14.3	11.4	1070
Taira. 3	1, 2	6.6	5.3	2.1	500
Akase. 2	25~27	30.6	53.0	0.0	45
Akase. 3	25~27	33.4	52.4	0.0	34
Kanna. 1	10~12	10.8	4.4	5.5	1260
Kanna. 3	10~12	2.5	0.9	1.6	134
Kan. 2	34, 35	22.3	34.0	19.4	118
Kan. 3	34, 35	29.4	37.5	11.1	132
Ishikawa. 3	34~35	44.4	25.4	27.3	312
Ahij. 3	47, 48	50.2	39.2	38.6	104
Odo. 1	49~51	12.8	6.7	6.0	62
Odo. 2	49~51	70.9	66.3	66.7	31
Kushibaru	73~89	73.7	—	55.3	25
Agonohama	73~89	98.8	—	57.1	6

る簡単な2次元計算を行ってみた。その結果、陸棚上のSSTを明確に減少させるだけの十分な鉛直混合は起こらないことが示された。

③の影響の検討にあたって、深海域からの湧昇がある場合、栄養塩供給を伴うことに着目して、Sea WiFS 画像によって当該海域の Chl. a 濃度の分布を確認してみた。しかし、Chl. a 濃度の増加傾向は見いだされなかった。

最後に、黒潮系暖水塊の波及が陸棚によってブロックされている可能性を確かめるために、沖縄本島西方沖に暖水塊を仮定し、その波及過程を数値計算によって求めるという簡単な数値実験を行った(図-7)。計算開始から5日後、沖縄島西岸には暖水が波及しているのに対し、慶良間列島やチービスが位置する陸棚上には波及せず、陸棚の縁で暖水波及が止まっていることがわかる。この計算結果は、慶良間諸島およびチービス周辺の陸棚の存在が、陸棚端部で暖水の波及をブロックし、その結果として陸棚上で相対的に水温が低くなる、という一種の「陸棚効果」の存在を強く示唆するものである。

4. 結 論

(1) リーフスケール局所水深効果

リーフスケール集中観測の結果、水温変動の顕著な局地的な水深依存性の存在が示された。また、ORTMN データにより沿岸水温の地域性を論じる際に、このような局地的な水深依存性を合理的に取り除く方法として、日最低水温の形で地域間比較をすればよいことが示された。

(2) ORTMN による沖縄沿岸域の水温分布特性とサンゴ白化との関連性

上記の方法で局所効果を取り除いた ORTMN データより、慶良間諸島周辺の夏期水温が相対的に低くなることが明らかとなった。また、サンゴ白化調査結果と比較したところ、サンゴ白化のダメージの地域性が主として沿岸水温の地域性によって支配されていることが示された。

(3) 沿岸水温の地域性の原因：黒潮系暖水塊沿岸波及過程への陸棚効果

SST 画像解析結果より、慶良間列島周辺の200 m水深以浅の陸棚領域では水温が相対的に低く保たれている傾向が頻繁に見出された。数値実験により、陸棚縁部において外洋暖水塊の沿岸への波及過程がブロックされる「陸棚効果」の存在が認められ、これが、以上で述べた沿岸水温分布の地域特性の原因の一つであることが強く示唆された。

謝辞：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：10450181及び12450198), 同基盤研究(B)(2)(研究代表者：灘岡, 課題番号：12555147), 同基盤研究(C)(1)(研究代表者：灘岡,

課題番号：12895008), 平和中島財団国際学術共同研究助成金(研究代表者：灘岡)を得て行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 大見謝辰男・仲宗根一哉・瀧本裕彰・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.
- 大見謝辰男 (2000): 沖縄県赤土汚染定点調査海域における白化後のサンゴ被害状況, みどりいし, No. 11, pp. 15-18.
- 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 (1999): 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群集被度変化, 日本サンゴ礁学会, Galaxea, Vol. 1, pp. 73-82.
- 仲座栄三・津嘉山正光・川崎康智・砂川恵輝・北村康司・川上和宏 (1999): 定点観測データから捉えたサンゴ白化の一因としての海水温の変化について, 海岸工学論文集, Vol. 46, pp. 1236-1240.
- 長谷川 均・市川清士・小林 都・小林 孝・星野 貞・目崎茂和 (1999): 石垣島における1998年のサンゴ礁の広範な白化, 日本サンゴ礁学会, Galaxea, Vol. 1, pp. 31-39.
- Berkelmans, R. and J. K. Oliver (1999a): Large-scale bleaching of corals on the Great Barrier Reef, Coral Reefs, 18, pp. 55-60.
- Berkelmans, R. and B. L. Willis (1999b): Seasonal and local spatial patterns in the upper thermal limits of coral on the inshore Central Great Barrier Reef, Coral Reefs, 18, pp. 219-228.
- Brown, B. E., R. P. Dunne and H. Chansang (1996): Coral bleaching relative to elevated seawater temperature in the Andaman Sea (Indian Ocean) over the last 50 years. Coral Reefs 15, pp. 151-152.
- Brown, B. E. (1997): Coral bleaching: causes and consequences, Coral Reefs 16, Suppl., pp. S129-S138.
- Glynn, D. W. (1993): Coral-Reef bleaching-ecological perspectives, Coral Reefs 12, pp. 1-17.
- Kakuma, S., S. Moromizato, K. Nadaoka, Y. Nihei, T. Omija, K. Iwao and Y. Nakano (2000): A water temperature monitoring network around the Rukyu islands, Japan, Abstract of 9th Int. Coral Reef Symp., p. 348.
- Marshall, P. A. and A. H. Baird (2000): Bleaching of corals on the Great Barrier Reef: differential susceptibilities among taxa, Coral Reefs 19, pp. 155-163.
- Nadaoka, K., T. Yoshino and Y. Nihei (2000): Oil spill simulation with improved coastal current and wind models, Proc. 4th Int. Conf. on Hydrodynamics, pp. 777-782.
- William, J. M. and K. O. Gary (1997): Coral bleaching: A potential biomarker of environmental stress, J. Toxicol. Env. Health, 50, pp. 529-552.
- Wilkinson, C. (1998): The 1997-1998 mass bleaching event around the world. Status of Coral Reefs of the World: 1998, Australian Institute of Marine Science, pp. 15-38.
- Winter, A., R. S. Appeldoorn and A. Bruckner (1998): Sea surface temperatures and coral reef bleaching off La Parguera, Puerto Rico (northeastern Caribbean Sea), Coral Reefs, 17, pp. 377-382.
- Yamaguchi, M. (1986): *Acanthaster planci* infestations of reefs and coral assemblages in Japan: a retrospective analysis of control efforts, Coral Reefs, 5, pp. 23-30.