

現地観測に基づくパラオ諸島ラグーン海域における 海水循環構造の解明

灘岡 和 夫*・三 井 順**・渡 邊 敦***・秦 浩 司****

2001 年 3 月と 2002 年 3 月の 2 回にわたって、典型的な堡礁タイプのサンゴ礁であるパラオ諸島において行った現地観測の結果から、ラグーン内外の海水交換ならびにそれに伴うラグーン内の底層水の形成・維持機構について検討し、その結果、潮の干満に伴う barrier reef の礁原を超えた 2 次元的な海水流入・流出という、これまで想定されていた機構に加えて、外洋側の表層混合層厚に匹敵する深さを有する大規模な channel を通じての、3 次元的な海水流入・流出という機構が重要な役割を演じている可能性が示された。また、年スケールで見えた場合、気象・海象条件の違いによってラグーン内の水塊構造が一変する程のダイナミックな変動が存在することが示され、その実態解明を含めて長期連続観測を行うことの必要性が示唆された。

1. はじめに

近年、沿岸域におけるさまざまな環境異変が報告されており、そこでの生態系の維持に関わる問題が深刻化している。熱帯・亜熱帯沿岸域の比較的低栄養塩レベルの海域に生息するサンゴ礁生態系も、世界の約 6 割が危機的状況にあるといわれ (World Resources Institute, 1998)、その保全対策のための基礎として、サンゴ礁生態環境システムの形成・維持に関わる物理・生態環境の基本特性を明らかにすることが求められている。

著者らは、これまで日本のサンゴ礁海域に多くみられる裾礁 (fringing reef) タイプのサンゴ礁における物理環境を外洋・陸域影響を考慮して総合的に明らかにすることを試みてきた (Nadaoka et al., 2001a, b; 灘岡ら 1999, 2001a, b; 二瓶ら, 2001, 他)。しかしながら、オセアニア島嶼国等に数多く見られる堡礁 (barrier reef) タイプのサンゴ礁については、ラグーン内の水環境を支配する海水循環構造等が十分に明らかにされていない。

そこで本研究では、パラオ諸島の堡礁海域において、サンゴ礁内の栄養塩・濁質・CO₂等の物質輸送および熱輸送を支配する 3 次元海水流動構造を明らかにするとともに、現在開発中のサンゴ礁物理環境シミュレーションモデルの検証データを得るための総合的な現地観測を実施した。

2. 現地観測の概要

現地観測は、典型的な堡礁タイプのサンゴ礁であるパラオ諸島 (北緯: 6°53' - 8°12', 東経: 134°08' - 134°44') において行った。ラグーン海域の平均水深は約 20 m で、最深部では 50 m を超える。(パラオの地理・生態的な説

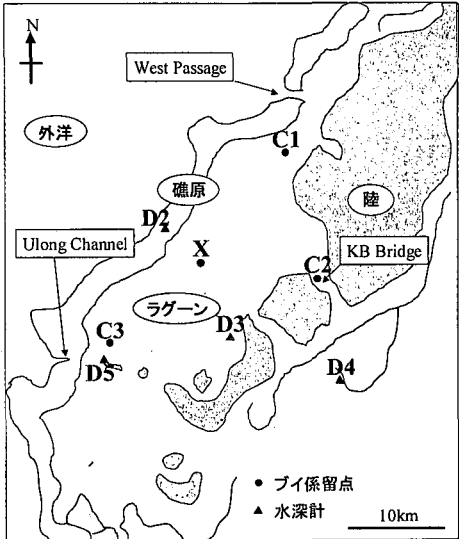


図-1 観測海域の観測点位置 (2001 年 3 月観測)

明については、例えば Maragos and Cook (1995) に詳しい)。観測は、2001 年 3 月 27 日から 30 日までの約 4 日間と、2002 年 3 月 16 日から 20 日までの約 5 日間の 2 回実施した。ここでは主に 2001 年の観測結果について述べ、2002 年の観測結果は補足的に述べるだけにとどめる。

観測点は、図-1 に示すように、ラグーン内外をつなぐチャンネルの近傍 (C1, C2, C3 地点)、ラグーン最深部 (X 地点) や礁原に配置し、各観測点においてメモリー式の測器を係留ブイまたは海底に固定して、流速、水深、水温、塩分の連続計測を行った。各設置点の水深は、C1: 49 m, C2: 29 m, C3: 33 m, X: 52 m である。また、各観測点の近傍で STD (濁度・Chl. a センサー付き) および ADCP による水質および流速の鉛直プロファイルを測定するとともに、採水調査を行った。さらに、図-1 中に示す位置で、水圧式水深計を設置した。図-2 に、係留ブイによるセンサー設置状況を C1 地点の場合を例にとって示すとともに、船からの STD ならびに ADCP 観

* フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究所情報環境学専攻
** 東京工業大学大学院情報理工学研究所情報環境学専攻 修士課程
*** 修(理) 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 博士課程
**** 修(理) ハザマ技術研究所技術・環境本部 環境修復事業部

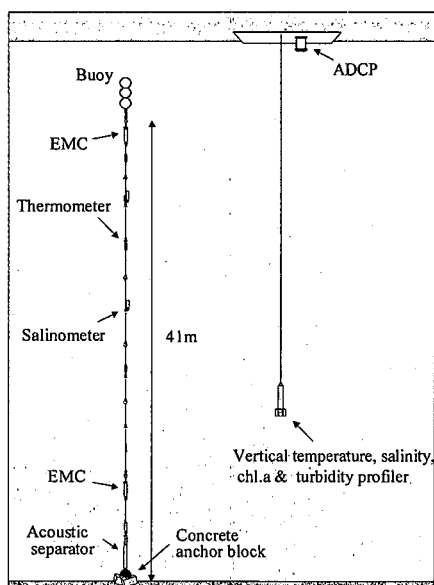


図-2 係留ブイによるセンサー設置例 (C1 地点), 及び船からの ADCP 観測, STD+濁度・Chl. a 分布観測

測の状況を図式的に表す (係留ブイで、ブイを水面下にしているのは盗難を防ぐため)。

潮汐は M_2 成分が卓越していて、観測期間中の潮差は約 1.5 m であった。観測期間中は、西向きの季節風が卓越していたが、風速レベルはほぼ 5 m/s 弱であったことから、吹送流の寄与は小さかったとも考えられる。

3. 観測結果及び考察

(1) ラグーン内の水温、塩分、密度、濁度、Chl. a 分布

ラグーン内の C1, C2, C3, X 地点について、STD (濁度・Chl. a センサー付き) による水温、塩分、密度、濁度、Chl. a の鉛直分布を測定した結果を、それぞれ、図-3 にまとめて示す。これから、以下のことが読みとれる。

ラグーンの中央部に位置する X 地点では、密度成層がよく発達しており、約 20 m の深さにシャープな躍層が現れている。塩分の鉛直分布を見ると、水表面から約 20 m の深さまでほぼ一様な混合層が発達している。これに対して水温鉛直分布には、水表面付近で日射による加

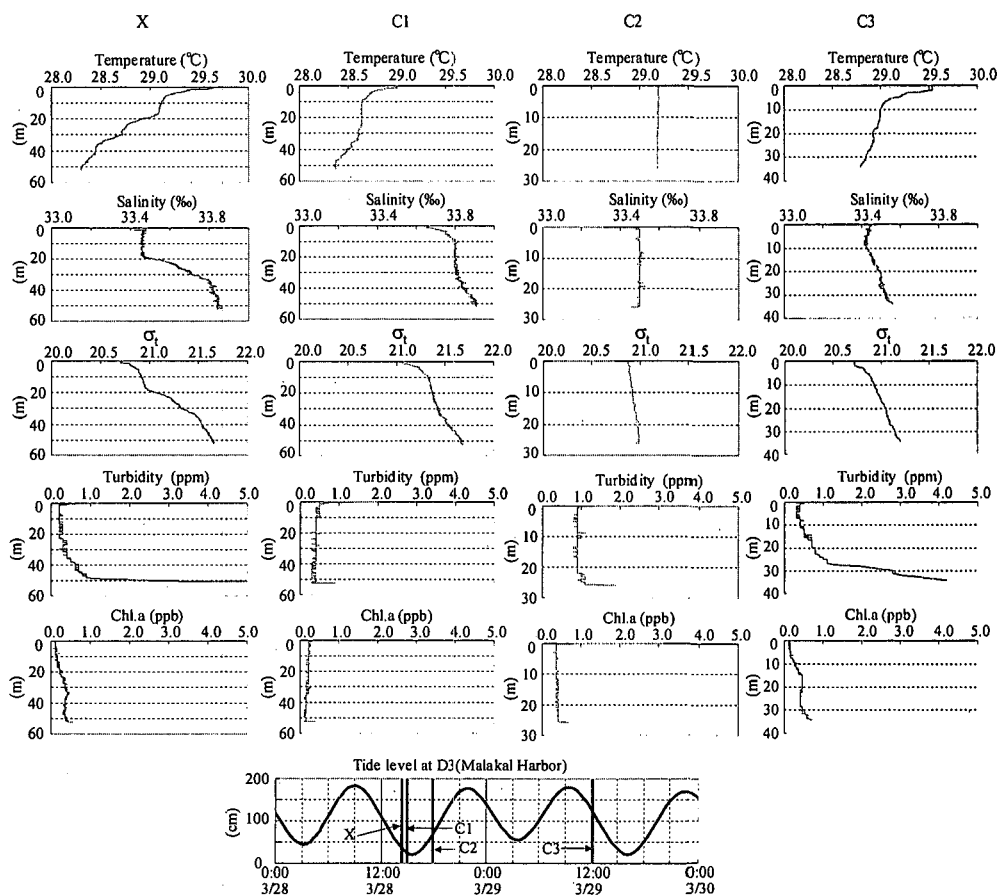


図-3 ラグーン内の水温、塩分、密度、濁度、Chl. a 分布

熱に起因すると思われる強い成層が現れている。さらに、濁度分布では、下層にやや濁度が高い領域が存在すること、Chl. a 分布では、表面混合層下部の躍層あたりに Chl. a のピークが現れる形になっていることがわかる。

鉛直成層構造のパターンは、同じラグーン内でも、Ulong Channel に近い C3 地点では X 地点のパターンと微妙に異なっている。すなわち X 地点で明瞭に存在していた塩分の表層混合層が、C3 地点ではあまり明確ではなくなっている。また、濁度分布を見ると、下層の濁度レベルがより高くなっている。

一方、KB bridge に近い C2 地点では、全ての量が水深全体にわたってほぼ一様になっており、水深スケールの強い鉛直混合が存在することがうかがえる。

北側の West Pass 近くの C1 地点では、水温成層パターンは C1 や C3 地点とほぼ同じであるが、塩分成層に特徴が現れている。すなわち、水表面近くで塩分が明らかに減少する形の分布形状になっている。これは、C1 地点が、パラオ最大の陸域（バベルダウ島）の河川の河口にも近いことから、そこからの河川ブルームの影響を受けていることによるものと考えられる。

(2) ラグーン内観測点での流速の時間変動特性

図-4 は、上から順に、ラグーン内の C1 地点での上層

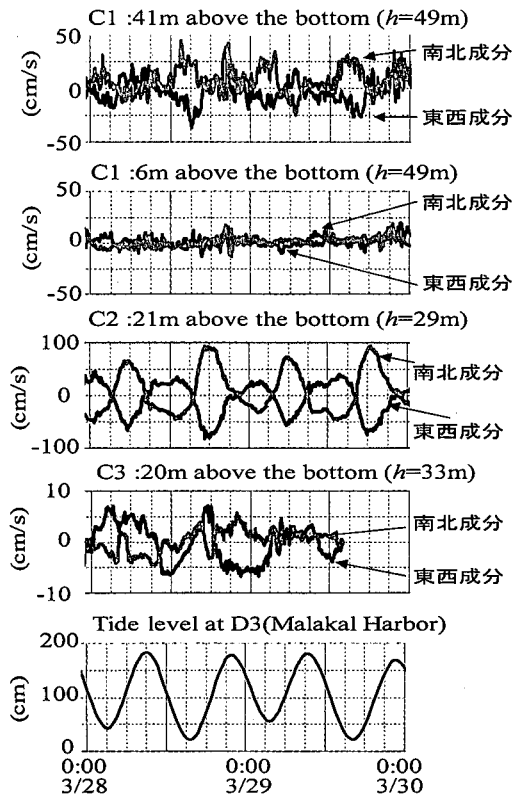


図-4 ラグーン内における流速の時間変動

(底面上 41 m) と下層 (同 9 m), C2 地点での中上層 (同 21 m), C3 地点での中層 (同 20 m) において、電磁流速計 (EMC) によって得られた流速の時間変動記録を潮位変動とともに示したものである。これを見ると、特に、KB bridge に近い C2 地点での流速値が明瞭な半日周期の潮流変動パターンを示しており、その振幅が約 100 cm/s にも達していることがわかる。このような強い潮流が存在することが、水深全体にわたる激しい混合をもたらし、その結果、上記のように、C2 地点で成層がほとんど見られなくなっているものと考えられる。

(3) ラグーン内観測点での鉛直流速分布特性

図-5 は、ラグーン内の X, C1, C2, C3 地点での水平流速の鉛直分布の、ADCP による計測例を示したものである。これを見ると、C2 地点では、上記のように流速レベルが大きく密度成層が微弱なことに対応して、水深全体にわたって対数分布的な単純な水平流速分布になっていることがわかる。これに対して、X, C1, C3 地点では、密度成層に対応して、流向が鉛直方向に複雑に変化する形になっている。すなわち、X および C1 地点では上下 2 層の交差流的な分布形に、また C3 地点では 3 層流的な

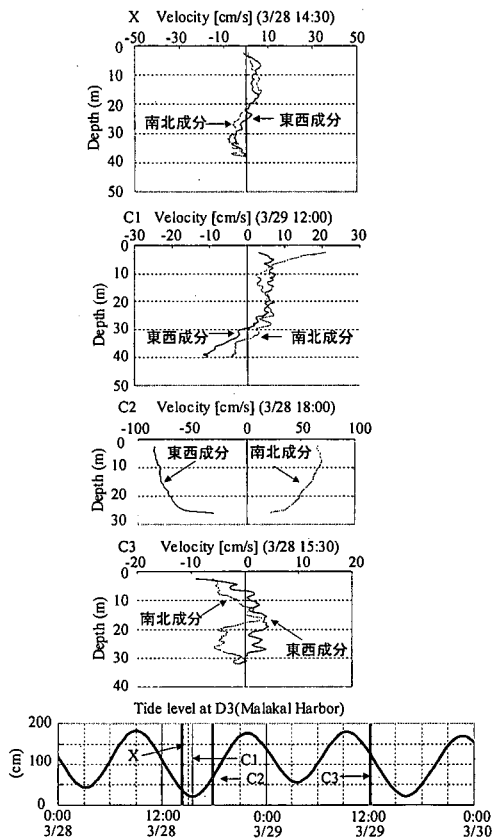


図-5 ラグーン内における水平流速の鉛直分布

分布形になっている。

このように、ラグーン内では、C2 地点のように潮流が強く浅い場所を除くと、密度成層に支配された baroclinic な効果が強く表れる複雑な流動場となっており、上層と下層では流向が全く異なる状況がしばしば現れる。特に、パラオ最大規模の channel である West Pass (幅約 100 m、水深約 70 m) に近い C1 地点においてもこのような密度流的なパターンが現れていることは注目すべきである。すなわち、図-5 で示している例は下げ潮時のものであるが、そのことに対応して、上・中層での流向が、ラグーン内の水が West Pass を通じ外洋に出て行く向きになっているのに対し、下層では流向が逆転しており、下げ潮時であるにもかかわらず、ラグーン内に向けて海水が入り込んでいる形になっている。

(4) 外洋側の成層構造とラグーン内成層特性との関係

図-6 に、D2 地点沖の水深約 150 m の場所での STD 観測の結果を、X 地点と C1 地点の結果と比較する形で示したものである。これから、観測期間当時、ラグーンの外では、約 75 m の深さに、水温・塩分ともに非常にシャープな躍層があって、その上層はよく発達した表層

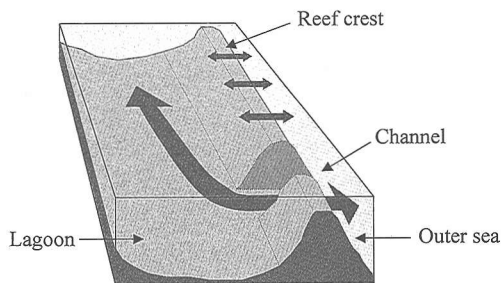


図-7 パラオ諸島におけるラグーン内外の海水交換の模式図

混合層になっていたことがわかる。躍層下部の塩分は、34.7‰に達している。なお、ここでは示していないが、濁度の値はラグーン内に比べてかなり小さく、Chl. a もやはりラグーン内に比べて小さいが、躍層下部でピークを示す分布形になっていた。

この外洋の STD 観測結果を、ラグーン内の X 地点と C1 地点のものと比較すると、下層の海水密度が外洋側の表層混合層内の密度とほぼ同じになっていることがわかる。水温や塩分で見ても、下層で、外洋の表層混合層下部の値に近くなっている。

(5) ラグーン内の底層水塊の形成機構

パラオ諸島のラグーン内と外洋との間の海水交換、ならびにそれに伴うラグーン内の底層水塊の形成に関しては、これまで、潮の干満に伴う barrier reef の礁原を超えた 2 次元的な海水流入・流出ということで考えられている (例えば、Hata et al., 1998)。しかし、今回の観測結果からは、そのような 2 次元的な海水交換機構だけでなく、West Pass のような、外洋側の表層混合層厚に匹敵する深さを有する大規模な channel を通じての、3 次元的な海水流入・流出、ならびにそれに伴うラグーン内底層水塊の形成・維持、という機構が重要な役割を演じている可能性が示された (図-7 に模式図を示す)。

ただし、外洋側の表層混合層厚や躍層の位置は海象・気象条件によって時々刻々変化しており、常に、このような機構が存在するとは限らないし、存在するとしても、大規模 channel を通じての外洋水の流入量及び水温・塩分・密度は、channel 水深と躍層位置との関係によって大きく変わるものと考えられる。その意味で、今後は、湧昇や内部潮汐などによる動的な躍層位置のモニタリングも含めた長期的な連続観測を行っていく必要がある。

(6) 2002 年 3 月の観測での STD 結果

図-8 に、2002 年 3 月に行った観測結果のうち、2001 年観測の際の外洋側、X 地点、C1 地点にそれぞれ近い観測点である、外洋側測点、H 地点、Ac 地点での STD 観測の結果を示す。これからわかるように、2001 年 3 月の観測結果と異なり、ラグーン内での明瞭な成層は見られ

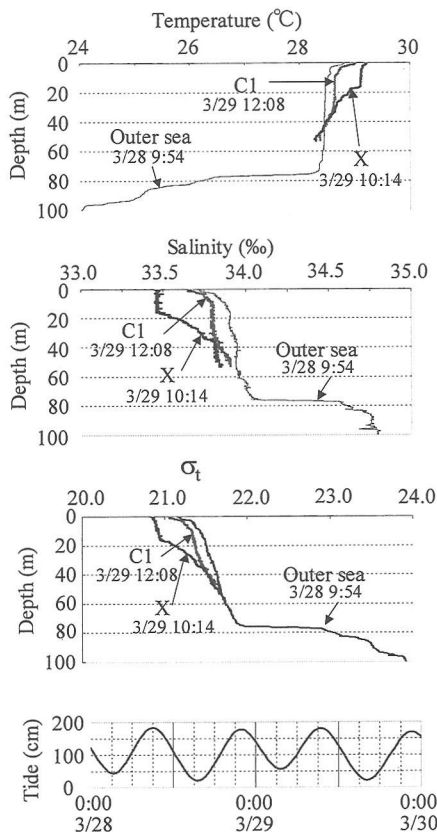


図-6 外洋における水温、塩分、密度の鉛直分布

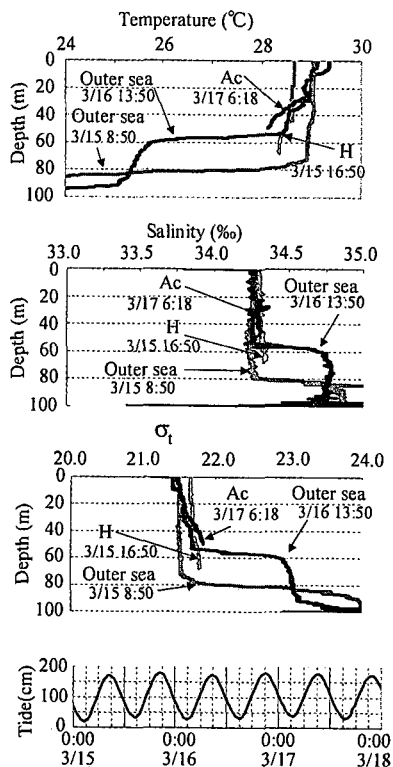


図-8 2002年3月のSTD観測結果

ず、外洋側と比べても、水温、塩分ともにほとんど同じ値になっている。つまり、2002年3月の観測時点では、ラグーン内の水塊は全体的に混合が進んでおり、外洋側の表層混合水とほぼ同じ水塊構造をしていた。これは、海象・気象条件が2001年と比べて異なっていることによるものと考えられる。このように、ラグーン内の水塊構造は、年スケールの変動でみると、全体的にな成層構造が一変するほどのダイナミックな変動を示しており、その意味からも、今後その実態を探るための長期連続観測が必要になる。

4. あとがき

本論文では、2001年3月と2002年3月の2回にわたって、典型的な堡礁タイプのサンゴ礁であるパラオ諸島において行った現地観測の結果から、ラグーン内外の海水交換ならびにそれに伴うラグーン内の底層水の形成・維持機構について検討し、その結果、潮の干満に伴う barrier reef の礁原を超えた2次元的な海水流入出という、これまで想定されていた機構に加えて、外洋側の

表層混合層厚に匹敵する深さを有する大規模な channel を通じての、3次元的な海水流入出という機構が重要な役割を演じている可能性が示された。また、年スケールで見た場合、気象・海象条件の違いによってラグーン内の水塊構造が一変する程のダイナミックな変動が存在することが示され、今後その実態解明を含めた長期連続観測の必要性が示唆された。

謝辞：本研究の実施に当たっては、当時東工大灘岡研究室修士課程学生であった若木研水君に大変ご助力頂いた、ここに記して謝意を表します。また、本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C)(1)(研究代表者：灘岡，課題番号：12895008, 13895009)による補助を得て行ったものであることを付記する。

参考文献

- 灘岡和夫・二瓶泰雄・横堀達也・熊野良子・大見謝辰男 (1999): サンゴ礁海域の水環境に関する陸水・外洋水影響の検討, 海岸工学論文集, Vol. 46, pp. 1181-1185.
- 灘岡和夫・若木研水・二瓶泰雄・今井陽介・青木康哲・丸田直美・大見謝辰男・満本裕彰・小林 孝・藤井智史 (2001a): 現地観測に基づく石垣島サンゴ礁海域の流動特性と微細土砂・熱輸送特性に関する解析, 海岸工学論文集, 第48巻, No. 2, pp. 1151-1155.
- 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 (2001b): 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, 海岸工学論文集, 第48巻, No. 2, pp. 1276-1280.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・綱島康雄・丸田直美・青木康哲・若木研水 (2001): サンゴ礁海域の温熱環境特性に関する多面的観測と解析, 海岸工学論文集, 第48巻, No. 2, pp. 1146-1150.
- Hata, H., A. Suzuki, T. Maruyama, N. Kurano, S. Miyachi, Y. Ikeda and H. Kayane (1998): Carbon flux by suspended and sinking particles around the barrier reef of Palau, western Pacific, *Limnol. Oceanog.*, Vol. 43, No. 8, pp. 1883-1893.
- Maragos, J. E. and C. W. Cook Jr. (1995): The 1991-1992 rapid ecological assessment of Palau's coral reefs, *Coral Reefs*, Vol. 14, pp. 237-252.
- Nadaoka, K., Y. Nihei, K. Wakaki, R. Kumano, S. Kakuma, S. Moromizato, K. Iwao, K. S. himoike, H. Taniguchi, Y. Nakano and T. Ikema (2001a): Regional variation of water temperature around Okinawa coasts and its relationship to offshore thermal environments and coral bleaching, *Coral Reefs*, Vol. 20, No. 4, pp. 373-384.
- Nadaoka, K., Y. Nihei, R. Kumano, T. Yokobori, T. Omija and K. Wakaki (2001b): A field observation on hydrodynamic and thermal environments of a fringing reef at Ishigaki Island under typhoon and normal atmospheric conditions, *Coral Reefs*, Vol. 20, No. 4, pp. 387-398.
- World Resources Institute (1998): *Reefs at Risk: A map-based indicator of threats to the world's coral reefs.*