

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

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*****

1. はじめに

サンゴ礁生態系は、熱帯・亜熱帯の比較的栄養塩レベルが低い海域に非常に豊かな生物層を形成しているユニークな生態系で、サンゴは基盤的な役割を担っている。したがって、サンゴ礁生態系を適切に保全して行くには、サンゴそのものが置かれている環境を良好な形に維持していく必要がある。沖縄には元来 300 種類以上の造礁サンゴが生息しており(西平ら, 1995), その種の多様性から世界的にも有名なサンゴ礁海域となっている。しかしながら、1972 年の本土復帰に伴う振興開発事業等が盛んに行われるようになって以来、農地や建設現場等の微細土壌がサンゴ礁海域に大量に流出・堆積する「赤土汚染」が深刻な問題となっている(大見謝ら, 1998; 満本ら, 2000)。さらに 1998 年の夏にはエルニーニョ現象と台風発生数の減少が相まって、海水温が例年よりも 1~2℃上昇した(例えば、仲座ら, 1999) ことにより、大規模な「白化現象」が発生し(長谷川ら, 1999), サンゴ礁は壊滅的な被害を受けている(茅根ら, 1999)。

このように陸域および外洋域からの環境ストレスにさらされているサンゴ礁生態系を今後適切に保全していくためには、陸域および外洋域からの影響を含めてサンゴ礁海域の環境モニタリングを実施し、生態環境システムの形成・維持に関わる物理・生態環境を明らかにすることが不可欠となる。これまで赤土がサンゴ礁環境に与える影響(大見謝, 1996)や、サンゴ礁水域内における赤土の拡散・堆積過程(津嘉山ら, 1992)等の研究、また、

リーフ内外における波や流れに関する研究(仲座ら, 1992・Yamano ら, 1998)も幾つかなされているものの、サンゴ礁海域特有の地形効果による現象の複雑性により、リーフにおける河川水やリーフ外水の挙動は十分に解明されていないのが現状である。

そこで本研究では、河口からの赤土流入負荷を有する沖縄の典型的な裾礁タイプサンゴ礁海域において、陸域影響を代表する微細土砂(赤土)輸送と外洋影響を代表する熱輸送、及びそれらの輸送特性を支配するサンゴ礁内海水流動構造、等を明らかにす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、2000 年 6 月 6 日から 10 月 5 日までの 4 ヶ月間にわたり、沖縄県八重山諸島の石垣島東部に位置する白保海域で実施した(図-1)。白保海域のサンゴ礁は典型的な裾礁であり、浜から水深 2 m 前後の礁池、さらに浅い礁原が沖に向かって広がり、引き続く礁嶺の沖側が急勾配の礁斜面となって外洋と接する形になっている。典型的なリーフ幅は約 1 km である。図-1 に示す

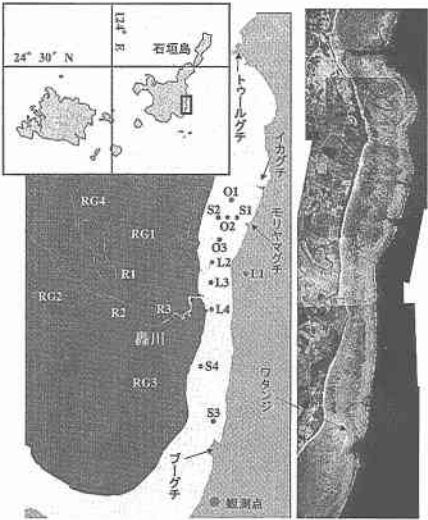


図-1 観測海域と観測点

* 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
**	東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻
*** 正 会 員 博(工)	東京理科大学専任講師 理工学部土木工学科
****	前東京工業大学工学部土木工学科
*****	東京理科大学大学院理工学研究科 土木工学専攻
*****	(株)新日鉄ソリューションズ
*****	沖縄県衛生環境研究所赤土研究室長
*****	沖縄県衛生環境研究所赤土研究室
*****	WWF-J, サンゴ礁保護研究センター
*****	通信総合研究所 沖縄亜熱帯計測技術センター

ように、対象とするリーフ海域には、大小4つの切れ目(クチ)が存在し、また一番南のクチ(ブーグチ)の南側には干潮時に干上がる浅瀬(ワタンジ)が浜から礁嶺まで続いている。観測領域の中央付近には全長約6 kmの蕪川の河口があり、出水時にはここから多量の赤土がリーフ内に流入する(仲宗根ら, 2000)。

今回の観測では、リーフ内の河口付近(L2~4)、礁嶺(S3)およびクチ付近(S1~2, O1~3)を主な対象として観測点を配置し、各地点では係留ブイによる複数水深の水温・塩分、表層の濁度・Chl.a濃度、表層および底層流速、3次元流速鉛直分布、波高・波向、水深等の連続計測を行った。リーフ外には、平均水深約27 mの地点に観測点(L1)を設け、リーフ内と同様の方法で水温、塩分、流速、波高、水深の連続計測を行った。また、水温については、リーフにおける平面的な水温分布の動態を把握する目的で、別途、9月の約1ヶ月間37の観測点を平面的に展開し各地点の底面付近にメモリ式小型水温計を設置した観測を行った。

そして、梅雨が明け台風が襲来する前の赤土堆積量が一番多くなる時期にあたる6月25日から27日にかけて、リーフ内に面的に配置した48地点における底質中懸濁物質含量(SPSS)を、大見謝の考案による簡易測定法(大見謝, 1987)により求めた。

さらに、リーフ内での底質の巻上げを計測するために、9月4日から27日にかけてL3地点の海底に超音波3次元流速計(Vector; Nortek社製、以下ADVと記す)を設置し、焦点を底面上15 cmに合わせて、2時間毎に8 Hzで5分間の計測を行った。

また、10月3日の満潮から下げ潮時と4日の上げ潮から満潮にかけて、GPS搭載型漂流ブイによるリーフ域流動のLagrange的計測を行った。

3. 観測結果と考察

(1) リーフ内海水流動構造に及ぼす地形効果

図-2に、L2(平均水深2.4 m)およびS1(平均水深3.2 m)における平常時(9月25日0時~27日0時)の表層流速と、水位(L1~L4, S1)、風向風速(石垣気象台)の時系列を示す。流速は、沿岸方向成分 V_c (北向きが正)と岸沖方向成分 V_o (沖向きが正)の2成分を北から時計回転方向の角度と併せて表示している。この期間中の流速が5 m/s以下と比較的小さく、また風向変動と流向変動がほとんど相関がないことから、流れの主な駆動力が水位差であると考えられるため、ここでは空間的な水位差構造をみるために、流速、風速ともに0に近い25日0:00時点での観測点間の水位差を0としてそれからの水位変動を算出した。

まず、流速データを見てみると、L2, S1の流速には干

潮時(これは図-2ではリーフ外のL1地点での水位データから読みとれる)から上げ潮に転じて2~3時間後に急激な流向変化がみられ、L2ではわずか1時間弱の間だけ南に流れる以外は、北向きの一方向的な流れとなっている。S1では約2時間、強い岸向きの流速となり、その後は下げ潮に伴って沖向きの流れとなる。関連して、図-3は、下げ潮時に放流された漂流ブイの軌跡を示した例で、クチの近くの領域ではクチに吸い込まれるようにしてリーフ外に流出する流動パターンとなっていることがわかる。なお、上記の流向が急変する位相は、L2よりもS1が20分程早い。

つぎに、図-2のL1~L4, S1の水位変動記録を見てみると以下のことが分かる。すなわち、水位がある一定値以下になるとリーフ外(L1)の水位変動とその他の地点における水位変動に差が生じ、リーフに面的な水位差が生じ始める。その波形の歪みは $L4 > L3 > L2 > S1$ とクチから遠い点の水位変動ほど大きく、最小水位となる位相も遅くなっている。そのとき下げ潮時では、この $L4 > L3 > L2 > S1$ の順で水位が低くなっておりモリヤマグチ方向に向かう形で沿岸方向に水位勾配がついている。一方、上げ潮時は下げ潮時と比較して有意な大きさの水位差がついている時間が短い。したがってこのことが上記のように流向が急激にかつ限られた時間帯に変化している原因となっているものと考えられる。なお、低水位時に比べると、高水位時には水位の面的な差はリーフ内外にわたってほとんどついていない。

以上から、水位変動及び流速変動パターンの特徴をまとめると以下のようなになる。まず基本的な構造として、

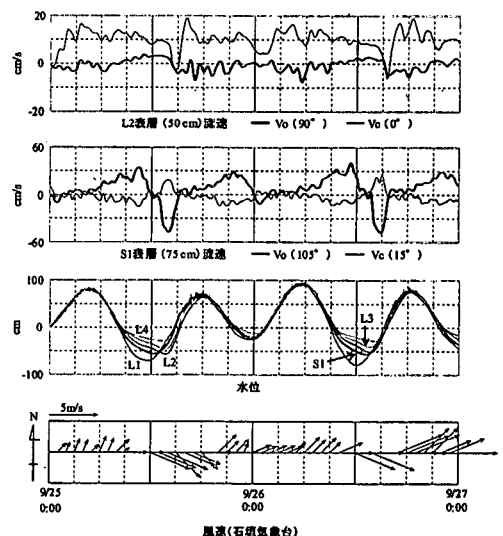


図-2 平常時のリーフ内およびクチ近傍における流速と水位、風向風速の関係

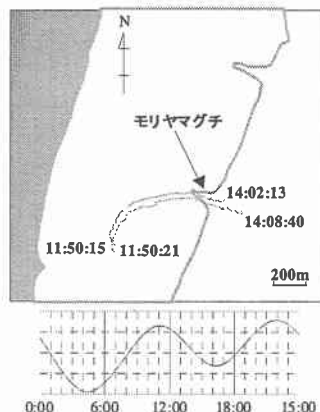


図-3 10月3日下げ潮時におけるリーフの漂流ブイ挙動

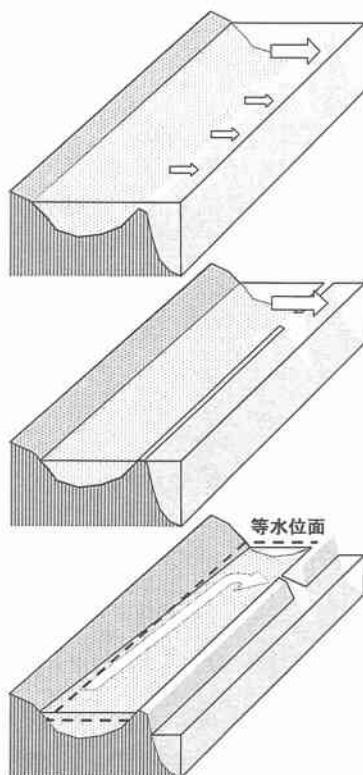


図-4 水位差によるリーフ海水流動パターン

高水位状態ではリーフ内外の水理的な接続が岸沖2次元になり、リーフ外水位変動にリーフ内の変動がよく追従することから面的な水位差があまり現れないのに対し、低水位状態ではリーフエッジ領域で岸沖方向の水理的な接続が断たれるため、海水流動が基本的に沿岸方向の水位勾配に支配されるようになり、流向も沿岸方向となって、クチからリーフ外に流出する形になる(図-4)。クチ近傍では、局所的な地形効果によりさらに特徴的な

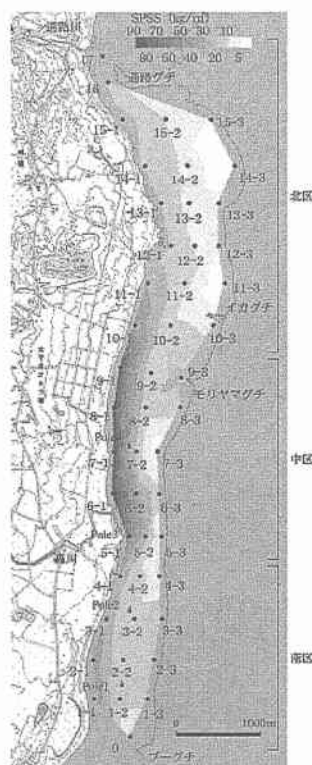


図-5 底質中懸濁物質含有量 (SPSS) 分布

水位・流速変動が現れ、ごく限られた時間帯に強い岸向き流速が現れる。また、これらの地形効果の空間的非一様性により、リーフ内には、ほぼ無風状態でも潮汐変動により一方向流が現れる。

(2) 微細土砂堆積分布状況

図-5に示す2000年6月27日の時点でのリーフ内におけるSPSS分布図をみると、赤土堆積量は河口近辺から岸に沿って北側に多く、またモリヤマグチ付近も他の礁嶺と比較して含有量が大きいのことがわかる。河口から流入した微細土砂が移流、拡散、沈降、巻上げの結果として北に輸送され、その一部がモリヤマグチからリーフ外に放出されていることを示しているものと考えられる。このことは、リーフ内では無風時でも北向きの流れが卓越し、低潮時にクチからリーフ外に流出する流動パターンとなつたとして上記の内容と符合している。

(3) 微細土砂の巻上げ

灘岡ら(1999)は、1998年10月上旬から約1ヶ月間の同じ海域での観測において、L4付近において台風時での底質の再浮上現象をとらえている。本観測でも、ほとんど降雨のない7月5日、6日の台風4号接近時に、L2~4において底面からの巻き上げによると思われる表層水濁度の上昇がとらえられた。ここでは、ADVによる底面近傍

での流速および微細粒子濃度変動計測の結果から、この巻き上げ過程をより詳しく検討してみた結果について述べる。

ただし、この ADV の設置期間は 9 月の約 1 ヶ月間で上記の 7 月の期間は観測していない。また、微細懸濁粒子濃度 C は、以下の手順で ADV の後方散乱強度 I から算定した。まず、信号強度 EL およびノイズレベル NL を Lohrmann (1999) にならって求め、つぎに、焦点距離 15 cm、超音波の水による吸収係数を 10 dB/m、粒子による吸収を無視し、レイリー散乱を仮定して、次式によって I を求めた (川西ら, 1998)。

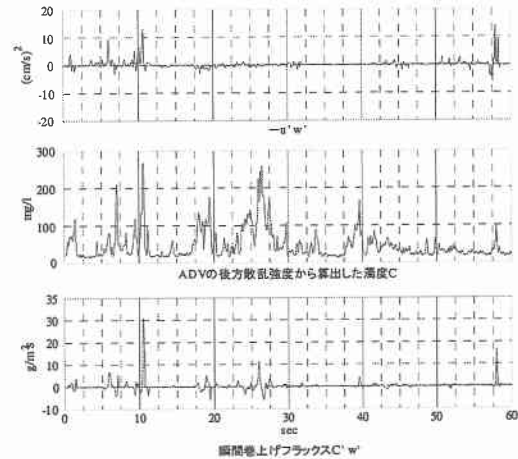
$$I=10\frac{EL}{10}-10\frac{NL}{10} \dots\dots\dots (1)$$

超音波の後方散乱強度 I から微細懸濁粒子濃度 C への変換は、現地の底質を用いた検定実験から得た次式

$$I=734806C^2-10^7C \dots\dots\dots (2)$$

によって行った。

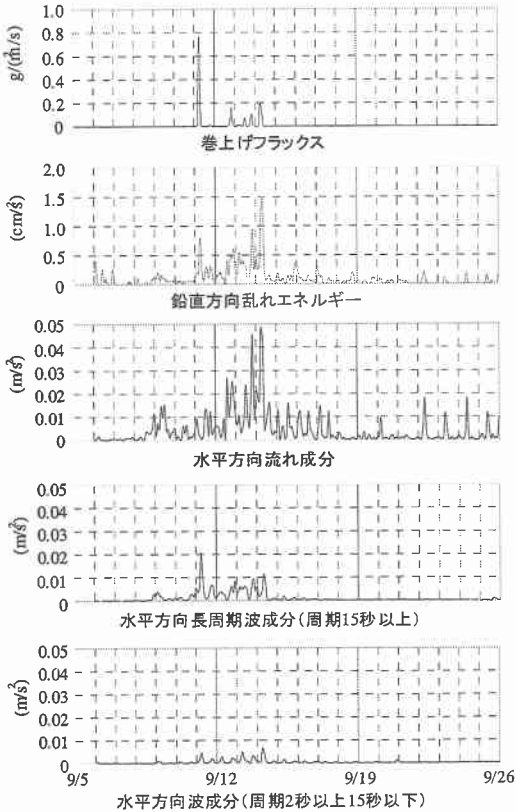
まず、台風 14 号が接近し、リーフの流速、波高、底層濁度の増加がみられた 9 月 10 日から 15 日の期間における ADV の流速データから、平均流速、後方散乱強度共に高いデータ (9/13 19:57; 30~20:02:30) を抽出し、水平成分、鉛直成分それぞれについてスペクトル解析を行った。その結果、Kolmogorov の $-5/3$ 乗則に従うエネルギースペクトルが 0.5 Hz 以上の周波数でみられたので、この周波数帯域の変動を「乱れ」として定義した。乱れの水平方向 (沿岸北向きを正) と鉛直方向 (上向きを正) の相関をみると負の相関が見られ、第 2 象限に分布する値が大きいことから、ejection 型 (低速上昇流) の乱れによって瞬間 Reynolds 応力 $-u'w'$ が顕著に発生していることが確認された。そこで $-u'w'$ と ADV の後方



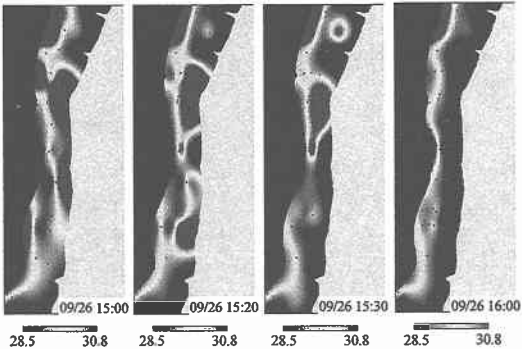
図一六 低速上昇流 (ejection) の発生と濁度および瞬間巻上げフラックスの関係

散乱強度から推算した濁度 C 、および瞬間巻上げフラックス $C'w'$ を比較すると、間欠的に発生する ejection と濁度のピークが一致していることが示された (図一六)。これらの結果は上記水平成分に直交する向き (岸向きを正) の流速変動成分に関しても同様であった。図一六に見られる ejection 発生時以外の濁度の上昇は、巻上げフラックスが微小であることから、懸濁物質の移流によるものと考えられる。

つぎに、巻上げと外力の対応を検討するため、観測期



図一七 巻上げフラックスと水平方向外力の比較



図一八 上げ潮時のリーフ水温平面分布

間中の時間平均巻上げフラックス $\overline{Cw}$ (平均時間: 5 分) と鉛直乱れエネルギー、水平流速変動記録から抽出した「波」、「長周期波」、「平均流」の 3 成分の各エネルギーについて、それぞれの時間変動を比較した(図-7)。ここで、水平流速 u のそれぞれの成分は、スペクトル解析の結果から、単純平均値を流れ成分、周期 15 秒以上の変動成分を長周期波成分、2 秒から 15 秒までを波成分として抽出した。これによると、鉛直方向乱れエネルギーがあるレベルを超えたときに巻上げが発生しているが、巻上げフラックスの最大値は乱れエネルギーの最大値には必ずしも対応していないことがわかる。このときの水平方向運動エネルギーをみると、長周期波成分のエネルギーが卓越していることから、長周期波との関連性がうかがわれる。

(4) リーフ内海水流動構造と熱輸送特性の関係

図-8 に示すリーフ内底層水温の上げ潮時の面的な分布変動を見ると、前半はリーフ外からの低温水の流入がクチに限定されているが、ある一定水位以上になると礁嶺を越えてほぼ岸沖 2 次元的に流入する様子がわかる。下げ潮時にはこれと逆の流出が起こっているものと考えられる。この結果は先に (1) で述べた結果と符合している。これらの結果から、礁嶺およびクチの地形効果が水位変動の空間的非一様性をもたらす、リーフ内海水流動に大きく影響していることが判明した。

4. 結 論

(1) リーフ内海水流動構造に及ぼす地形効果

高水位状態ではリーフ内外の水理的な接続が岸沖 2 次元的になり、リーフ外水位変動にリーフ内の変動がよく追従するのに対し、低水位状態では礁嶺領域で岸沖方向の水理的な接続が断たれるため、海水流動が基本的に沿岸方向の水位勾配に支配されるようになることが明らかになった。これらの地形効果の空間的非一様性により、リーフ内には、ほぼ無風状態でも潮汐変動により一方向流が現れることが確認された。

(2) 細粒子の巻き上げ・輸送特性

底質の巻上げが瞬間 Reynolds 応力の増大位相で集中して発生すること、および巻上げ量と底面近傍乱流強度との関係、さらには長周期波動成分エネルギーとの相関関係の存在などが明らかになった。

(3) リーフ内海水流動構造と熱輸送特性の関係

リーフ内に平面的に多数配置した水温計による平面アレイによって、リーフ内の平面的な水温分布の動態を把握するとともに、それと上記の海水流動構造の密接な関連を明らかにした。

謝辞: 本観測を実施するにあたり、東京理科大学土木

工学科二瓶研究室(現・青木建設)の矢井秀明氏には ADV による濁度計測に関する検定結果を提供して頂き、民宿白保の平良正義氏には測器設置等大変お世話になりました。ここに記して謝意を表します。なお、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: 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。

参 考 文 献

- 大見謝辰男(1987): 沖縄県の赤土汚濁の調査研究(第2報)一赤土汚濁簡易測定法と県内各地における赤土濃度一, 沖縄県公害衛生研究所報, 第20号, pp. 100-110.
- 大見謝辰男(1996): 赤土堆積がサンゴに及ぼす影響, 沖縄県衛生環境研究所報, 第30号, pp. 79-86.
- 大見謝辰男・仲宗根一哉・小林 孝(1998): 石垣島白保海域の赤土汚染とサンゴ礁の現況, 沖縄県衛生環境研究所報, 第32号, pp. 113-117.
- 沖縄県環境保健部環境保全課(1996): 轟川赤土流出実態調査報告書.
- 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.
- 川西 澄・山本洋久・余越正一郎(1998): 超音波流速計と散乱光式濁度計を用いた懸濁粒子の濃度, 粒径, フラックスの測定, 水工学論文集, 第42巻, pp. 559-564.
- 津嘉山正光・仲座栄三・高良尚樹・屋良朝博(1992): 赤土流出の発生とサンゴ礁水域内での拡散について, 海岸工学論文集, Vol. 39, No. 2, pp. 945-949.
- 仲座栄三・津嘉山正光・川満康智・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.
- 仲宗根一哉・大見謝辰男・比嘉榮三郎・満本裕彰(2000): 雨天時河川水 SS の解析, 沖縄県衛生環境研究所報, 第34号, pp. 97-104.
- 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.
- 西平守孝・Veron J. E. (1995): 日本の造礁サンゴ礁.
- 長谷川均・市川清士・小林 都・小林 孝・星野 眞・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.
- 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況(第2報), 沖縄県衛生環境研究所報, 第34号, pp. 121-124.
- Lohrmann A. (1999): Monitoring Sediment Concentration with acoustic backscattering instruments, Nortek Technical Note, No. 3.
- Yamano H., H. Kayane, N. Yonekura, H. Nakamura and K. Kudo (1998): Water circulation in a fringing reef located in a monsoon area: Kabira Reef, Ishigaki Island, Southwest Japan, *Coral Reefs*, Vol. 17, pp. 89-99.