

気象擾乱に伴うサンゴ礁海域の物理・水質環境特性の 動的変動過程について

山本高大¹・灘岡和夫²・西本拓馬³
Ariel.C.Blanco⁴・石丸 隆⁵

サンゴ礁への陸域負荷は、熱帯・亜熱帯域特有の気象条件により時空間的に集中することが多い。本研究では石垣島東海岸域にて台風を挟む約1ヶ月間の現地観測から、サンゴ礁海域の物理・水質環境の動的変動特性を解析した。その結果、台風時は吹送流の効果が顕著であるものの、リーフ内で一様に現れるのではなく場所によって地形性の循環流の効果が強く現れることがわかった。またリーフ内の濁度上昇の原因として、河川からの赤土流入だけでなく海底に堆積した赤土の波浪による再浮上も重要であることが示された。さらに台風によるイベント的な栄養塩供給が、本来貧栄養であるサンゴ礁海域の内部生産に強く影響することがわかった。

1. はじめに

サンゴ礁生態系は様々な環境ストレスに晒されて劣化が進行しているが、隣接する陸域からのサンゴ礁内への赤土流入や過剰栄養塩流入は、環境ストレスの中でも代表的なものである。サンゴ礁は熱帯・亜熱帯域に位置することから、これらの陸源負荷は、時空間的に集中する形の降雨-出水イベントによってもたらされることが多い。また、出水イベントは台風や低気圧等の気象擾乱に起因することから、ほとんどの場合、強風や高波浪などの気象・海象条件の急激な変動を伴っており、サンゴ礁内の力学過程自体が急激な変動性を示すことになる。したがって、サンゴ礁内における赤土や栄養塩ストレスの動態は、個々の出水イベントに伴う、時空間変動が極めて大きい現象になっているものと考えられ、陸源負荷物質を定量的に評価するには重要である。これまでもサンゴ礁海域における赤土や栄養塩の動態に関する研究は行われているが(仲座ら, 1994; 山本ら, 2000; Nadaoka ら, 2001), 台風や低気圧時における実態はほとんど解明されていない。

そこで本研究では、石垣島東海岸リーフ海域において2005年夏季の約1ヶ月間現地観測を行い、主に台風イベント時の短期的な物理・水質動態ならびに台風イベントに引き続く平常時の過渡過程がサンゴ礁生態系へもたらす影響を明らかにすることを試みた。

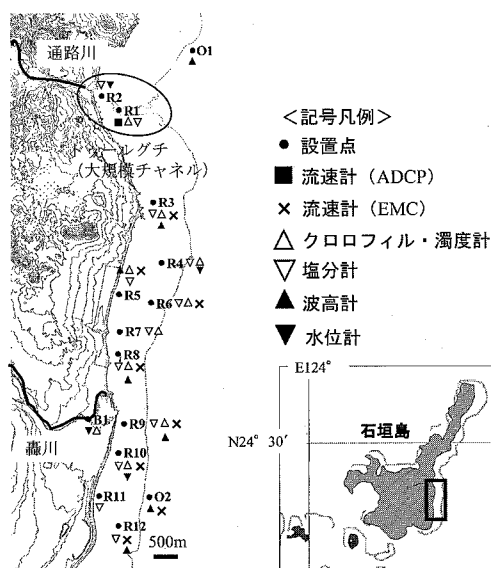


図-1 観測地と観測点ならびに使用観測機材

2. 方法

(1) 観測地概要

石垣島東海岸リーフ海域は東西に約1kmの幅をもつ裾礁型サンゴ礁である。対象海域には主要な河川として轟川と通路川が流れており、また北側にはトゥールグチと呼ばれる大規模チャンネルが位置している。この海域には世界的に有名なアオサンゴ群落など豊かなサンゴ礁が広がっているが、近年、赤土等の陸源負荷や白化等によるサンゴ礁の衰退が危惧されている。

(2) 観測方法

図-1に示すようにリーフ内の12点、リーフ外の2点に観測点を設け、多点係留系測器展開による連続観測を行った。それぞれの地点には自記式の流速計、波高計、塩分計、クロロフィル・濁度計ならびに水温計を設置した。クロロフィル・濁度計は係留ブイを用いて水面下

1 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻
2 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
3 東京工業大学 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
4 東京工業大学 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
5 農博 東京海洋大学教授 海洋科学部海洋環境学科

表-1 使用測器と設定条件

計測器	製品名	測定間隔	サンプル数	周波数
電磁流速計	Compact-EM(アレック電子社)	30 min	120	1 Hz
		120 min (O2のみ)	300	1 Hz
波高計	Compact-WH(アレック電子社)	120 min	2,400	2 Hz
水位計	Diver (Van Essen 社)	10 min	1	—
		15 min (B1のみ)	1	—
塩分計	Compact-CT(アレック電子社)	1 min	1	—
クロロフィル・濁度計	Compact-CLW(アレック電子社)	15 min	60	1 Hz
超音波流速計	Workhorse(RD 社製)	30 min	600	1 Hz

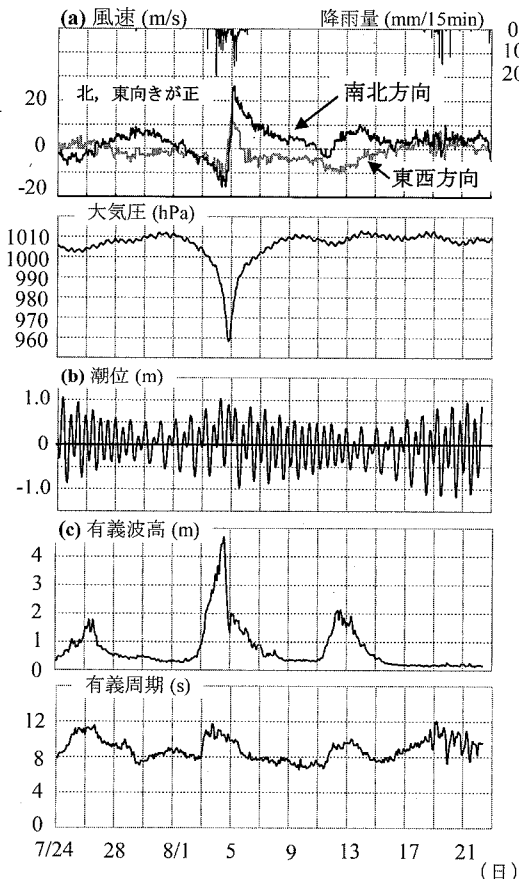


図-2 観測期間中の (a)風向風速・降雨量・大気圧, (b) O2 における潮位, (c) O2 における有義波高・有義周期

10 cm 程の表層に設置した。同時期にこの海域の主要な河川であり、観測領域のほぼ中央に流入している轟川の下流に自記式の水位計と濁度計を設置し、轟川流域の4点に雨量計を設置した。使用した計測器は表-1に示した通りである。なおデータは表中に示す「測定間隔」ごとに「サンプル数」分の個数を各「周波数」で測定した。

さらに観測期間中（主に降雨直後）に栄養塩濃度・クロロフィル濃度の測定を目的として各観測地点にて採水を計5回行った（ただし R2, R11, B1 を除く。また各採水ごとに欠測地点あり）。各点においては表層水と底

層水を両方採水した。ただし水深が1 m 以下の浅い地点においては表層水のみを採水した。採水したサンプルは帰港後、直ちにフィルタリング等の処理をしたのち冷凍保存し、後日分析を行った。栄養塩の分析項目は、硝酸態、亜硝酸態、アンモニア態、リン酸態、ケイ酸態である。

観測期間は2005年7月24日から8月22日の約1ヶ月間である。

3. 観測結果と考察

(1) 観測期間の気象概況

図-2(a)は轟川流域に設置した4点における平均降雨量と石垣島気象台（石垣島）によって得られた風速・海面大気圧を示している。なお風速は北向き、東向きの風をそれぞれ正にとっている。8月3日から7日にかけて台風9号が直撃し、8月4日20時ごろには石垣島上空を通過したため風向は北風から南風に急激に変化した。この台風による総降雨量は215 mmであった。また8月18日にも低気圧の影響による降雨（45 mm）が見られたが、こちらは微風であった。

(2) 観測期間中の潮位及び波浪概況

図-2(b)はリーフ外に設置した観測点 O2 における潮位である。8月3日から7日頃にかけては台風の接近による高潮の影響により潮位が上昇している。

観測期間中の波浪状況を見ると（図-2(c)）、7/25-7/27、8/3-8/7、8/11-8/14の期間で有義波高が1 m 以上の高波浪状態となっている。特に8/3-8/7は台風9号の接近期間であり有義波高は最大で4.5 mに達した。さらにこれらの期間では有義周期が9 s から12 s と比較的長く、うねり性の波浪が卓越した。

(3) 台風期における流動特性

図-3は台風期（8月3日から7日）における降雨量・風速と R3 および R8 における25時間平均流速の南北成分を示している。なお風速は北向きの風が正である。前述の通り風向は台風の目の中に入った8月5日を挟んで北風から南風に風向が急激に変化しており、これに対応するように25時間平均流速は北向きの流れが強くなっている。図-4は R3 における25時間平均流速の南北成

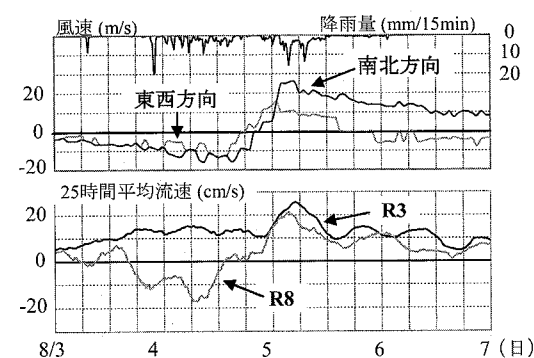


図-3 台風期の風速, 降雨量, 南北方向 25 時間平均流速 (R3, R8)

分 (北向きが正) とリーフ外 (O2) における有義波高をとったものであるが, これより同程度の有義波高に対する北向き流速は台風期では平常時に比べ軒並み倍以上であり, 強風による吹送流の効果が顕著であることがわかる。

しかし, このような強風による吹送流の効果はリーフ内において一様に現れるわけではなく, 場所によってかなり大きな違いが現れている。例えば, 図-3 を見ると台風通過に伴う北風から南風への風向き変化に対応して, 轟川河口前面に位置する R8 地点での流速は南流から北流に急激に流向を変えているのに対し, R3 では風向にかかわらず常に北流となっている。さらに R3, R5, R8 における 25 時間平均流速の南北成分をリーフ外の O2 での有義波高に対してプロットした図-5 では, 対象海域の北側に行くほど北向きの流れが強いことがわかる。これは, 観測領域北端に位置する大規模チャネル (トールグチ) の存在に起因するものと考えられ, 北風強風時であるにもかかわらず, トールグチに近い地点ほど風向に逆行して北流となっている。田村ら (2004) はこの海域において, トールグチに向かう顕著な流動パターンを見出しているが, 本結果は強風時においても, このトールグチに向う地形性の循環流特性が支配的であることを示すものである。

(4) 台風期ならびにそれ以降の水質環境特性

a) 台風期間中の陸域からの負荷流入量

観測期間中, 轟側下流 B1 において濁度と水位を測定していたが, 濁度計の不具合により, 濁度データは欠測となってしまう。そこで赤土流出量を流量との関係を次の L - Q 式によって便宜的に算定した。

$$L = aQ^b \quad \dots \dots \dots (1)$$

L : 土砂流出量 Q : 流量 a, b : 定数

なお定数の算定には同地点において当研究室が行った 2001 年 6 月から 9 月と 2002 年 6 月から 9 月のモニタリングデータを用いて求めた。

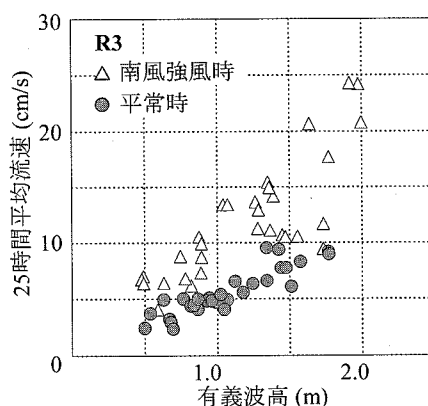


図-4 平常時と南風強風時の有義波高と南北方向 25 時間平均流速 (北向きが正) の相関

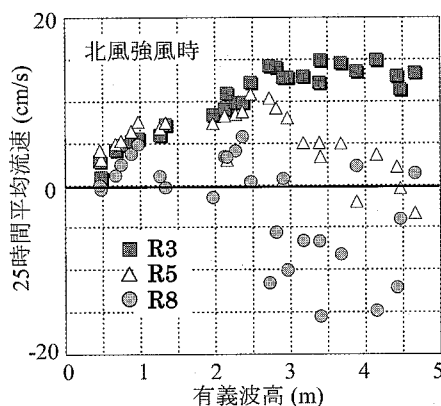


図-5 北風強風時の有義波高と南北方向 25 時間平均流速 (北向きが正) の相関

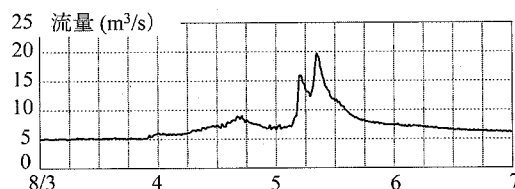


図-6 轟川下流部における流量の経時変化 (日)

$$a = 0.0001, b = 2.7045, r = 0.673$$

ここでは, 降雨開始の 8 月 3 日 7 時から終了までの 8 月 6 日 2 時を積分したものを台風時の流量とした (図-6)。このとき赤土流出量は式 (1) より, およそ 145 トンと算出される。この値は, 2001 年 5 月 31 日から 6 月 1 日にかけての異常出水時での轟川流域からの赤土流出量 (約 160 トン) (灘岡・Paringit, 2002) に匹敵する量で (当時, この赤土流入によって轟川南側海域におけるハマサンゴが大きなダメージを受けた), 同年の年間総流出量 1084 トンに比べてみてもいかに大量の赤土流出があったかがわかる。

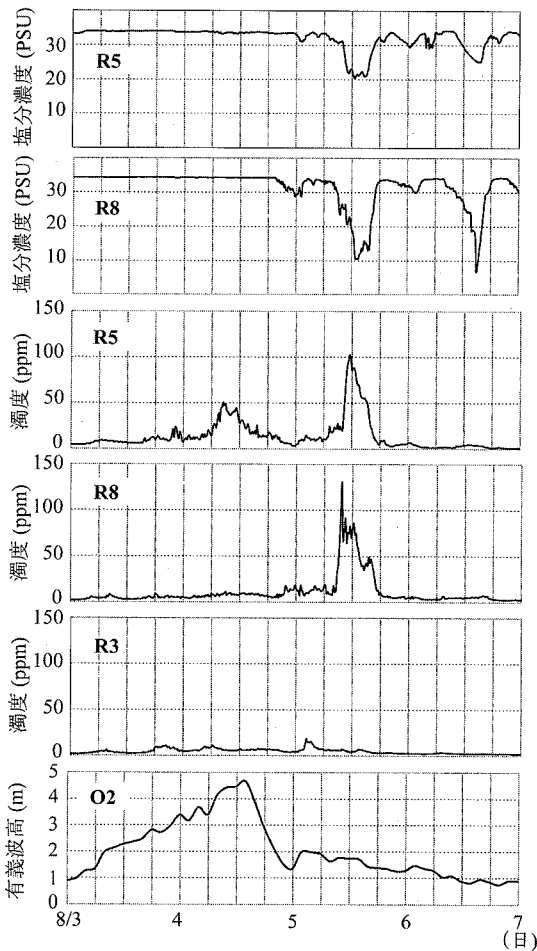


図-7 台風期の塩分濃度(R5, R8), 濁度(R3, R5, R8)ならびに有義波高(O2)の経時変化

b) 台風期のサンゴ礁海域での水質環境特性

図-7は、台風期における塩分濃度(R5, R8), 濁度(R3, R5, R8)ならびに有義波高(O2)を示している。R5, R8では台風後半期に塩分の顕著な低下が現れており、同時に濁度は急激な上昇を示している。R8は藤川の河口付近に位置しており、これらの現象は河川ブルームの波及によるものと考えられる。またR5における塩分濃度の低下は河川ブルームが台風期後半の北向きの風によって藤川から輸送されてきたことによるものと考えられる。一方、R3では台風期間中を通じて濁度は低い値を保っており、河川ブルームの波及効果と見られるような濁度低下は見られない。

またR5では台風の前半期(8月4日)においても顕著に濁度が上昇している。既述のように台風後半期の濁度上昇の際には塩分濃度の上昇が見られたのに対し、台風前半期には塩分濃度が低下しておらず、この濁度上昇は河川ブルームがもたらしたものと考えられない。

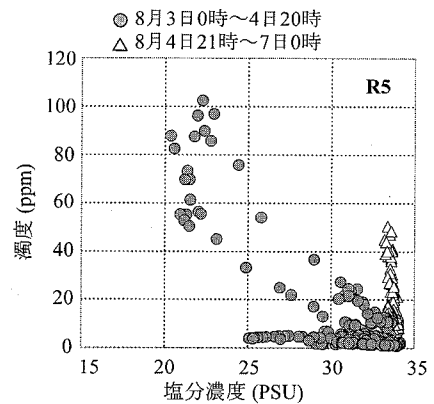


図-8 塩分濃度と濁度の相関

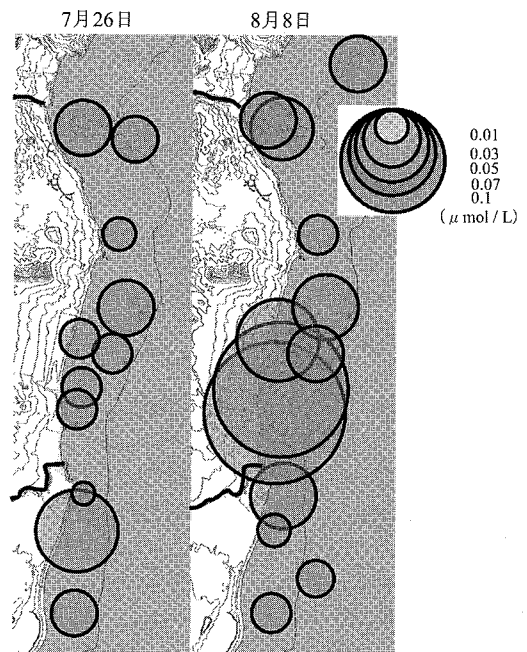


図-9 平常時(7月26日)と台風後(8月8日)の表層 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度分布の比較

R5における塩分濃度と濁度の関係(図-8)を見ると、台風の前半期と後半期とでは濁度の上昇に対する塩分の変化は明らかに異なっている。すなわち台風後半期では塩分濃度の低下に伴った濁度の上昇が見られるのに対し、台風前半期では濁度の上昇期であっても塩分濃度はほとんど変化していない。ここでリーフ外のO2における有義波高を見ると、台風の前半期で高くなっており、ちょうど台風の通過に先んじる形で入射波の有義波高がピークを示しているのがわかる。したがって台風前半期のR5における濁度の上昇は、高波浪に対応しているものと考えられる。このことはリーフ内の濁度上昇の原因と

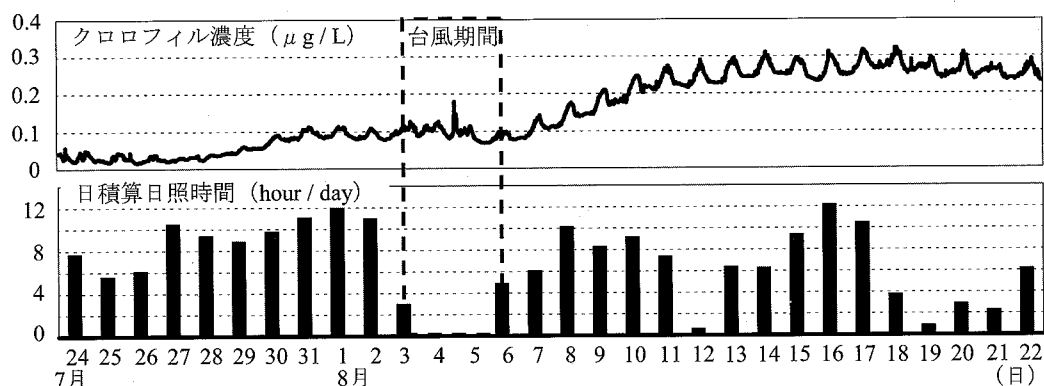


図-10 R3におけるクロロフィル濃度と日積算日照時間の変化

して、河川からの赤土流入だけでなく、海底に堆積した赤土の波浪による再浮上メカニズムが重要であることを示している。

c) 台風イベント後のサンゴ礁海域の水質環境特性

図-9は7月26日と8月8日における栄養塩分析結果を示したものである。7月26日は平常時にあたり、前後の数日間は快晴であった。一方、8月8日は台風の通過後にあたる。台風通過後は、平常時と比べて $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が轟川河口以北において高くなっており、河口から流入した陸域起源の負荷が北向きの流れによって輸送されたものと考えられる。

さらにR3におけるクロロフィル濃度と日積算日照時間の変化を示した図-10に着目すると、クロロフィル濃度は台風通過後、日照時間の回復に対応して徐々に上昇しており、最終的なクロロフィル濃度は台風前に比べ3-4倍にも達していることがわかる。これは台風によってリーフ内の栄養塩レベルが上昇し、その後リーフ内の内部生産が活発になったためである。

4. 結 論

本研究では、沖縄県石垣島東海岸を対象に約1ヶ月間にわたり連続観測を行い、気象擾乱とその後に引き続く平常時の過渡過程がサンゴ礁生態系へもたらす影響を明らかにすることを試みた。その結果、以下のことが示された。

a) 台風時には強風による吹送流の効果が顕著になり、25時間平均流速で見た場合、平常時に比べて倍以上の値になり得る。

b) しかし強風の効果はリーフ内に一様に現れるわけではなく、場所によってかなり異なる。これは、観測領域北端に位置する大規模チャネル（トオールグチ）の存在に起因するもので、トオールグチに近い地点ほど北流

が強くなる。このことは、強風時においても地形性の循環流の効果が強いことを示すものである。

c) リーフ内の濁度上昇の原因としては、河川からの赤土流入だけでなく、海底に堆積した赤土の波浪による再浮上メカニズムも重要となる。

d) 台風通過後、クロロフィル濃度は日射の増加とともに徐々に上昇し台風前の3-4倍の値に達した。これは、台風によるイベント的な栄養塩供給が、本来貧栄養であるサンゴ礁海域における内部生産に強く影響することを示すものである。

謝辞：現地調査を行うに当たりご助力を頂いた平良正義氏に感謝致します。なお本研究は、科研費補助金・基盤研究(A)(一般)(研究代表者：灘岡和夫、課題番号：17206052)を得て行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 田村仁・灘岡和夫・E.C.Paringit(2004)：石垣島東岸裾礁域の流動特性に関する現地観測と数値解析，土木学会論文集，No.768/Ⅱ-68，pp.147-166.
- 仲座栄三・津嘉山正光・砂川恵輝・金城太(1994)：サンゴ礁海岸における赤土堆積と拡散に関する研究，海岸工学論文集，第41巻，pp.1031-1035.
- 灘岡和夫・E.Paringit(2002)：石垣島轟川流域における赤土流出に関する現地データ解析と数値シミュレーション，石垣島サンゴ群生地被害実態・原因究明緊急調査調査報告書，pp.77-93.
- 山本幸次・佐藤慎司・仲座栄三・大谷靖郎・堀口敬洋(2000)：サンゴ礁海域における赤土の流出過程と拡散特性に関する研究，海岸工学論文集，第47巻，pp.1266-1270.
- Nadaoka, K., Y. Nihei, R. Kumano, T. Yokobori, T. Omija, K. Wakaki(2001)：A field observation on hydrodynamic and thermal environments of a fringing reef at Ishigaki Island under typhoon and normal atmospheric conditions, Coral Reefs, No.20, pp.387-398.