

裾礁型サンゴ礁海域における台風期の海水流動空間構造特性と形成メカニズムの解明

Analysis of Hydrodynamic Characteristics of a Fringing Reef and their Formation Mechanism under Typhoon Condition

灘岡和夫¹・山本高大²・有坂和真²

Kazuo NADAOKA, Takahiro YAMAMOTO, Kazuma ARISAKA

Numerical simulations were conducted to examine hydrodynamic characteristics of a fringing reef under typhoon condition and their formation mechanism by using a shallow water turbulent flow model, SDS-Q3D model. Topographic circulation effect was found to surpass wind-induced current effect around a big channel even under a strong wind condition. The wind-induced current component showed appreciable spatial non-uniformity over the reef, especially around the big channel, where the wind-induced current appeared negligibly small. This is because of a nonlinear effect via bottom friction.

1. はじめに

近年, 様々な環境負荷によるサンゴ礁生態系の衰退が懸念されている。隣接する陸域からサンゴ礁に流入する微細土砂や過剰栄養塩は, サンゴにとっての主要な環境負荷物質であることから, それらのサンゴ礁内での輸送・拡散現象を定量的に評価することがサンゴ礁生態系保全において重要な課題となる。陸源負荷物質の流入やサンゴ礁内での挙動は, 熱帯・亜熱帯というサンゴ礁が存在する地理的条件から, 台風で代表される時間的に集中した激しい気象攪乱に左右されやすい。したがって, その実態を定量的に評価する上で, 台風などの強風下におけるサンゴ礁内の流動構造の特性を明らかにすることが極めて重要となる。

これまでの研究で, 強風下における浅水域流動場では風および波の作用が支配的であることが示されているが (Kraines ら, 1998; 山中ら, 2001), それらの物理的要因がどのような相互作用のもとで流動を規定するかなどの特性については依然不明のままである。特にサンゴ礁地形のような特異的な地形において強風が作用した場合に外力が流動構造に与える影響やその形成メカニズムについての知見は十分であるとは言えない。そこで本研究では, 典型的な裾礁型サンゴ礁である石垣島東海岸を対象とした現地観測結果に基づいて, 数値シミュレーションを実施することにより, 台風期を対象とした裾礁型サンゴ礁内の海水流動特性を明らかにすると同時に, その形成メカニズムを解明することを試みた。

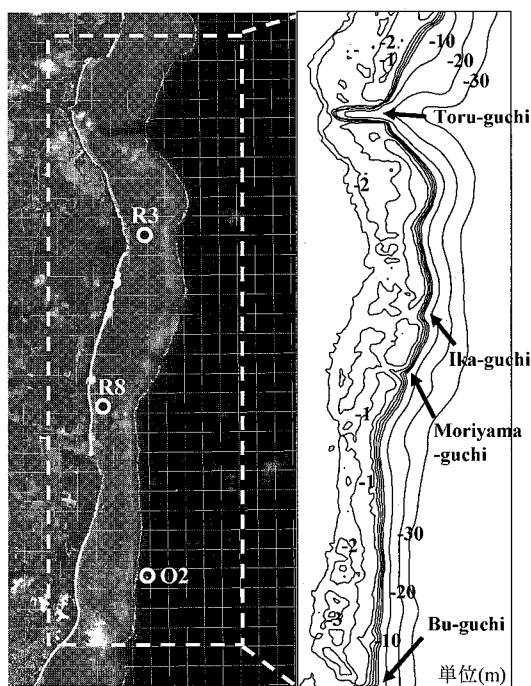


表-1 計算に用いたパラメータ

流 動 計 算	
時間刻み幅(s)	1
東西方向空間解像度(m)	50
南北方向空間解像度(m)	50
連成分数	1
移動境界水深(m)	0.02
底面摩擦係数	0.035
コリオリパラメータ(1/s)	6.02×10^{-5}
波 浪 計 算	
周波数分割数	10
方向角分割数	35
方向集中度パラメータ	75
入射角(°)	53.8

域の流動を大きく規定している（灘岡ら，2001；田村ら，2004）。

（2）数値計算モデルの概要

流動の数値解析には，準三次元浅水乱流モデル SDS-Q3D モデル（灘岡ら，2000）を使用した。このモデルは極浅水域における乱流モデルとして SDS 浅水乱流モデル（灘岡・八木，1993）を導入しており，浅水乱流場を低計算負荷で合理的に計算できるモデルである。

（3）計算条件

数値解析領域は図-1 で示した東西方向 3200 m，南北方向 9600 m の領域とした。この領域は著者らが 2005 年夏期に行った集中観測の対象海域であり，境界条件に必要な入力データおよび計算結果の検証にはそのとき得られた実測データを用いた。対象としたリーフ海域のような浅海域では水深データが数値計算の精度に大きく影響するが，本計算においては衛星画像の逆解析手法（Paringit・灘岡，2002）に基づいて衛星画像から算出されたリーフ内高精度水深データを用いた（図-1）。計算期間は台風 9 号が石垣島を通過した 2005 年 8 月 4 日 21 時の前後約 2 日間をとり，8 月 3 日 0 時から 8 月 7 日 0 時の 4 日間とした。

数値計算の外力計算としては風応力と潮汐および波浪を与えた。潮汐の計算には現地観測から得られたリーフ外の観測点 O2 における水位データを調和解析して沖合水位の境界条件として与えた。また波浪に関しては O2 での観測結果から算出した有義波高および有義周期を用いて，2 時間ごとに 1 回エネルギー平行方程式を解くことで波高分布とそれに伴う radiation stress を求めた。このほかの河川流量および降雨量などに関しては，本計算では考慮していない。

その他の計算に用いたパラメータについては表-1 のように定めた。ここで底面摩擦係数に関して，通常は浅海域における値として 0.01 程度であるが，サンゴ礁海

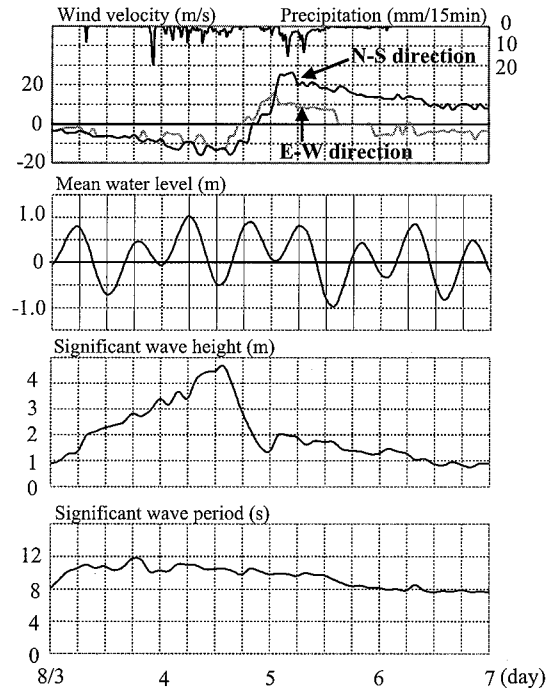


図-2 対象期間の気象概況および外洋海況

域では底面粗度が大きいと考えられることから（Lugo-Fernandez ら，1998），本計算では流速変動の数値結果が現地データと一致する値とする 0.035 とした。また風応力項の表面摩擦係数は風速レベルに応じて定めた（本多・光易，1980）。

なお SDS-Q3D モデルでは連成分数を変えることにより準三次元流動計算が可能であるが，本計算では連成分数を 1 としており平面 2 次元の枠組みで流動計算を行っている。

（4）計算期間中の海況および気象概況

図-2 は計算期間中の 15 分間平均降雨量と石垣島気象台によって得られた 10 分間平均風速，リーフ外における潮位，有義波高および有義周期である。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。台風 9 号が石垣島を直撃した 8 月 4 日 20 時ごろには風向が北風から南風に急激に変化している。また波浪状況を見ると，有義波高が最大で 4.5 m に達する高波浪状態となっている。この間，有義周期は 10 s から 12 s と比較的長く，うねり性の波浪が卓越した。

3. 数値流動解析結果と考察

（1）実測データとの比較による計算結果の妥当性検証

図-3 は，R3，R8 地点での 30 分ごとの潮汐残差流の数値解析結果を実測データと比較したものである。これ

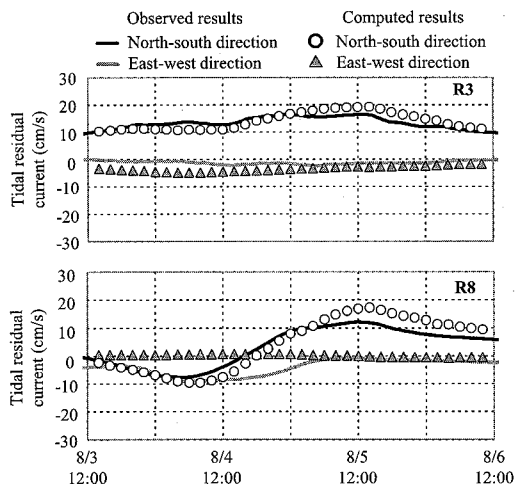


図-3 計算値と実測値の比較

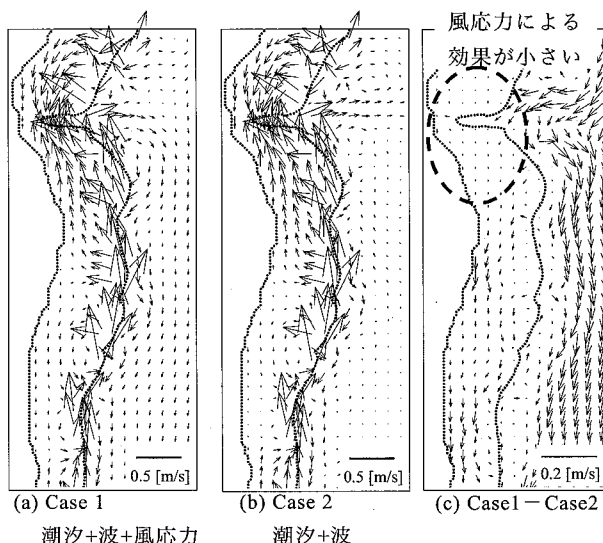


図-4 北風最強時における潮汐残差流の平面分布

から、台風の通過に伴う北風から南風への風向の急変に対応した、両地点での特徴的な南北方向の流速変動パターンが計算結果でも良好に再現できていることがわかる。

(2) 強風期におけるリーフ内流動場の特徴

図-4の(a)Case1は台風期の北風最強時(8月4日15時)における潮汐残差流の空間分布を示したものである。これからリーフ内の特に北側の大規模チャンネル周辺では、北風強風時であるにもかかわらず、風向に逆らってチャンネルに向かう流れとなっていることがわかる。田村ら(2004)はこの海域において、平常時に大規模チャンネル(トゥールグチ)に向かう顕著な流動パターンを見出しているが、本数値シミュレーションの結果から、リーフ内の大規模チャンネル周辺では、強風下においても吹送流の効果をはるかに上回る地形性循環流が卓越することがわかる。ここで図-4の(b)Case2は、台風時の風応力のリーフ内流動に対する相対的な効果を評価するために、あえて風応力をゼロとして計算したときの結果である。Case1との比較から、対象海域の南区では南向きの流れが見られなくなっており、また北区ではより大規模チャンネルに向う流れが強くなっていることから、風の効果によって全体的に南向きに流れが引っ張られていることがわかる。しかし流動に対する風応力の効果はリーフ内で一様に現れるわけではない。図-4の(c)はCase1とCase2の流速差を図示したもののだが、吹送流の効果は大規模チャンネルから十分離れた海域では有意な大きさで現れているのに対し、大規模チャンネル周辺海域では流速差がかなり小さく、吹送流の効果がほとんど現れていないことがわかる。

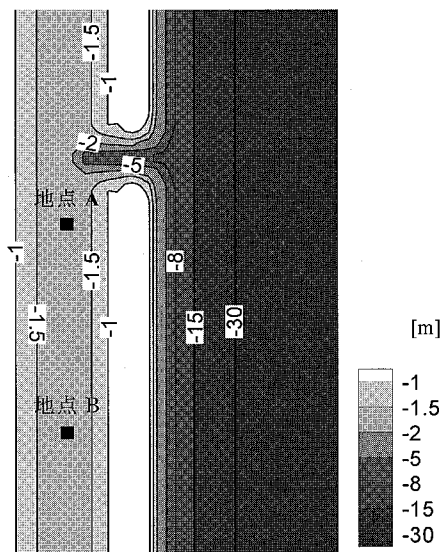


図-5 裾礁域モデルの海底地形

(3) 大規模チャンネル周辺の風応力の相対効果に関する数値実験

そこで本節では、このような、大規模チャンネルからの距離の相対的な違いによって吹送流の効果の現れ方が異なることについて、そのメカニズムを詳細に検討するべく、より単純な裾礁域モデル地形を用いた数値実験を行った。モデル地形としては、図-5に示すように、岸から沖方向に礁池、チャンネル及び礁嶺、礁斜面と続く、典型的な裾礁型サンゴ礁を模した水深データを設定した。

図-6は、モデル地形を用いて行った数値実験によ

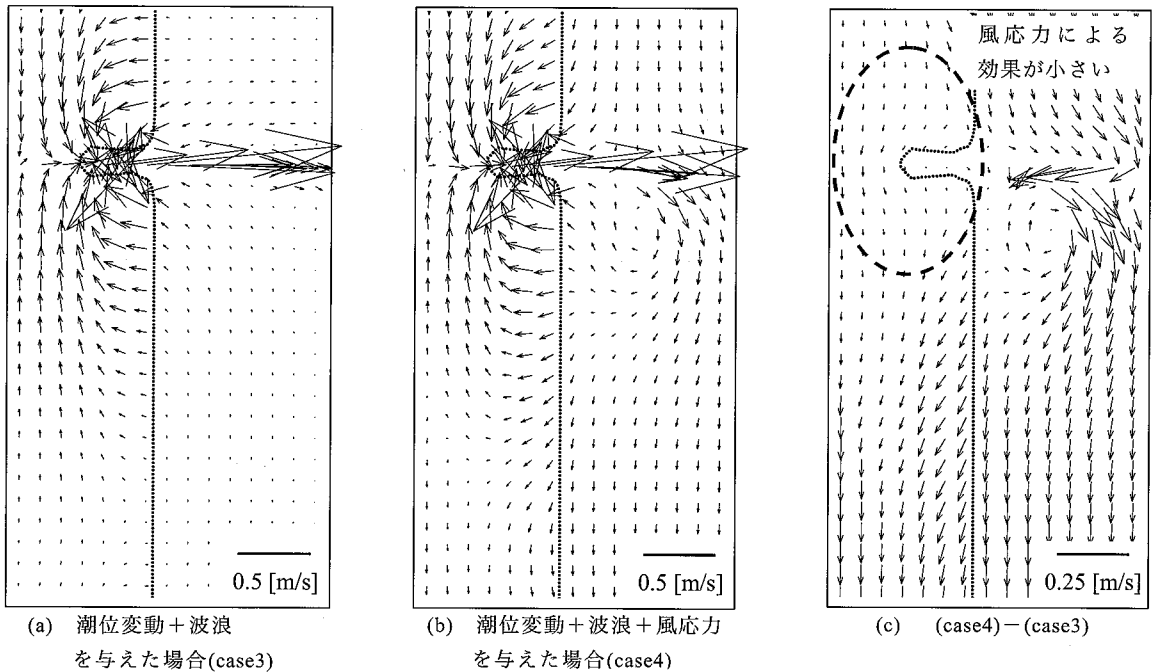


図-6 海底モデル地形における北風時の一潮汐平均流の平面分布

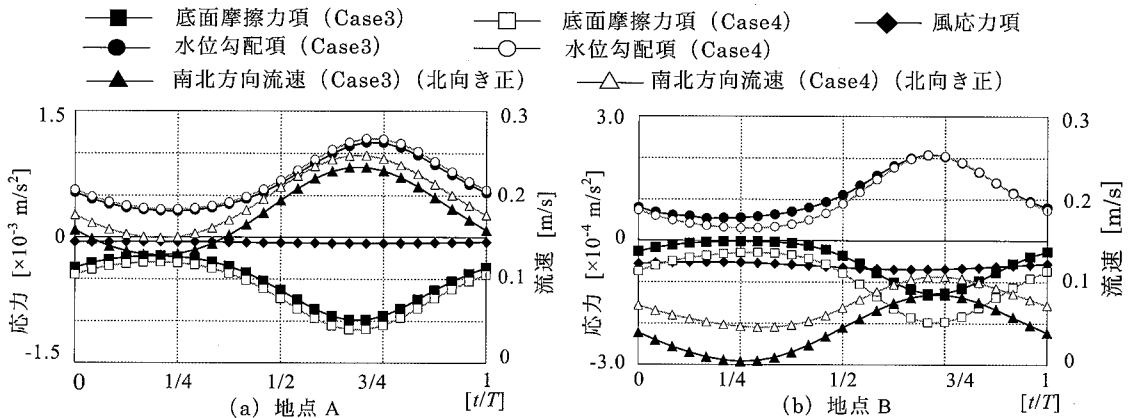


図-7 モデル地形における底面摩擦力項, 風応力項, 水位勾配項および南北方向流速の一潮汐時系列変動

て得られた一潮汐平均流の空間分布であり, それぞれ (a)外力条件として潮汐変動と波浪効果 (有義波高 3.4 m, 有義波周期 11 s) を考慮した場合 (case3), (b)潮汐変動と波浪効果, 風応力 (北風 10 m/s) を考慮した場合 (case4), (c)それらの差 ((b)-(a)) を示している. 実地形における数値解析結果で得られた結果 (図-4) と同様に大規模チャネル周辺では流動に対して風応力の効果が小さくなる結果が得られており, 基本的な流動構造の特徴が再現されていることがわかる.

(c)で見られる流速差の空間的な違いを調べるために, 大規模チャネル近くの地点 A と大規模チャネルから十

分離した地点 B での運動量方程式中の各構成項の比較を行った (図-7). ただし, リーフ内での極浅水域流動場の特徴として, 水位勾配と底面摩擦が力学バランスにおける主要な成分となっていることから, 図中には水位勾配項と底面摩擦項, 風応力項のみを南北方向流速とともに示している. 水位勾配項と底面摩擦項に着目すると, 風応力が付加されたとき水位勾配項にはほとんど変化はなく, 風応力の効果は底面摩擦項が変化することで力学バランスが保たれていることが確認できる. ここで, 底面摩擦力の変化に対応する流速の変化は, 底面摩擦力が流速の 2 乗に比例することから, 元々の流速レベルによ

って異なることになる。すなわち、

$$M_b \propto u^2 = \bar{u}^2 + 2\bar{u}u' + u'^2 \quad (u = \bar{u} + u') \cdots \cdots (1)$$

ここに、 M_b ；底面摩擦力項、 u ；case4の流速、 $\bar{u}$ ；case3の流速、 u' ；風応力による流速差であることから、風応力が作用する前の流速レベル $\bar{u}$ が大きい大規模チャンネル付近（地点A）ではごく僅かの流速変化で、水位勾配にバランスする底面摩擦力が形成されるのに対し、流速レベル $\bar{u}$ が小さい地点Bでは風応力の効果がより大きな流速差として現れることになる。

以上のことから、リーフ内では極浅水域流動場の特徴として、水位勾配と底面摩擦が主要な成分となっていること、風応力の付加は流動場の変化を通じて底面摩擦力の変化となって現れること、そして、底面摩擦が流速の2乗に比例することから、もともと流速レベルが高い大規模チャンネル周辺では風応力が付加された場合にごく僅かの流速の変化で、水位勾配にバランスする底面摩擦力が形成されること（非線形効果）、という基本的な力学構造が明らかになった。

4. おわりに

本研究では、石垣島東海岸を対象として準三次元浅水乱流モデル（SDS-Q3Dモデル）を用いて台風期の流動数値シミュレーションを行った。その結果、以下のことが示された。

- a) SDS-Q3Dモデルに風応力の効果を組み込むことで台風期における流動を概ね精度良く再現することができた。
- b) 台風期の強風下においてもリーフ内では大規模チャンネル周辺で地形性循環流が卓越し風向に逆らってチャンネルに向かう流れが現れる。
- c) 大規模チャンネル近傍では、たんに強風下でも地形性循環流が卓越するというだけでなく、吹送流自体がかなり小さくなる。これは風応力の付加に対応して変化

する底面摩擦の非線形効果による。

謝辞：本研究は、科学費補助金・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・Enrico 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.
- 灘岡和夫・八木 宏(1993)：浅い水域の乱流場に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用，土木学会論文集，No. 473，pp. 25-34.
- 灘岡和夫・田村 仁・八木 宏・二瓶泰雄(2000)：準三次元浅水乱流モデルの開発に基づく三次元大規模渦構造の数値シミュレーション，海岸工学論文集，第47巻，pp. 466-470.
- 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(2001)：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，pp. 1151-1155.
- 本多忠夫・光易恒(1980)：水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 90-93
- 山中亮一・西田修三・鈴木誠二・川崎浩司・田代孝行・中辻啓二(2001)：気象擾乱を考慮した陸奥湾の流動解析，海岸工学論文集，第48巻，pp. 401-405.
- Paringit, E・灘岡和夫(2002)：多バンド・リモートセンシングに基づくサンゴ礁マッピングへの逆解析手法の応用，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1191-1195.
- Kraines, S. B・T. Yanagi・M. Isobe・H. Komiyama (1998)：Wind-wave driven circulation on the coral reef at Bora Bay, Miyako Island, Coral Reefs, Vol. 19, pp. 343-357
- Lugo-Fernandez, A・H. H. Roberts・W. J. Wiseman Jr.・B. L.Carter (1998)：Water level and currents of tidal and infragravity periods at Tague Reef, St.Croix (USVI), Coral Reefs, Vol. 17, pp. 343-349.