

冬季季節風下でのリーフカレント発生機構に関する 現地調査

FIELD STUDY OF THE GENERATION OF HIGH SPEED REEF CURRENT
DURING WINTER SEASON

Julianti Manu¹・西 隆一郎²・Mario P. de Leon³・細谷和範⁴・日高正康⁵
Julianti Manu, Ryuichiro Nishi, Mario P. de Leon, Kazunori Hosotani, Masayasu Hidaka

¹学生会員 M. of Eng. 鹿児島大学大学院連合農学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目50-20)

²正会員 博(工) 鹿児島大学助教授 水産学部水産学科 (〒890-0056 鹿児島市下荒田4丁目50-20)

³正会員 博(工) San Carlos大学講師 工学部土木工学科

(P. des Rosario Street 6000, Cebu City, Philippines)

⁴正会員 博(学術) 津山工業高等専門学校講師 (〒708-8509 岡山県津山市沼624-1)

⁵正会員 鹿児島大学講師 水産学部水産学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元1丁目50-20)

Coral reef and carbonate beach attract many tourists for instance, nearly six million people in Okinawa. However, drowning accidents by a strong offshore current happen every year. Therefore, this paper deals with the physical characteristics of a reef current during winter season at Yoshiwara beach, Ishigakijima, Okinawa Prefecture, Japan, where drowning accidents were occurred by strong reef current during marine leisure activities. Field study on reef current was conducted in November and December, 2006 when northern wind prevailed the study area. The field study shows that the maximum 20-min average offshore velocity could be order of 2 m/s especially during winter season, because the northern wind that is perpendicular to the coast is persistent and generates reasonably high waves.

Key Words : Reef current, Rip current, Coral reef, Drowning accidents, Nearshore wave

1. まえがき

わが国では、東京都、鹿児島県、そして沖縄県の沿岸にサンゴ礁海域が広がる。また、鹿児島県内の渡瀬ライン辺りから沖縄県沿岸域に向かい、一般にサンゴ礁幅が広がり、沖縄県沿岸ではサンゴ礁幅が最大で約3~4kmの幅を持つようになる。しかし、それでもサンゴ礁類型としては十分に発達した環礁型のもではなく、ほとんどが据礁型のものである。サンゴ礁の海域は、有孔虫の殻やサンゴ礫などの生物性材料からなる白い砂浜と、多様性に富むカラフルなサンゴ類、そして、エメラルドブルー(グリーン)の海が多くの海域利用者を魅了し、離島などに観光客を呼び込む主因の一つとなっている。一方、海域利用者を魅了するサンゴ礁海岸の地形は、写真-1に示されるように、礁池(イノー・ラグーン)と、それを取り囲む礁嶺(リーフフラット・リーフエッジ)、陸側の砂浜、そして、リーフが未発達した結果形成されるリーフギャップ(口、切れ目)により構成される。

このリーフギャップでは、入射波による質量輸送、潮

の干満、そして、風による吹き寄せ(吹送流)などが原因となって、沖に向かう強い流れ(リーフカレント)が発生することがある。また、この強いリーフカレントに伴って、リーフエッジから海底方向に潜り込むようなダウンカレントと呼ばれる流れが生じているとするダイバーの体験談もある。

海岸管理者や救難関係者は、沖向き流れなどに関するより詳細な情報提供を海域利用者に行うなどの安全対策が求められている。しかしながら、海岸の安全利用に関する研究は、保全や環境に関する研究と比べ必ずしも十分とは言えないのが現状であり、前述のリーフカレントやダウンカレントは海域利用者の水難事故を発生させる要因になり得るので、注意が必要なサンゴ礁海域特有の沖向き流れの発生メカニズムを明らかにする必要がある。

これまでに実施された、危険なリーフカレントの調査例を挙げると、代表的な海域利用である遊泳やシュノーケリング中の事故は、沖縄県が特に多く¹⁾、そして、これらの海浜事故の主因は、サンゴ礁海域特有の沖向流れ(リーフカレント)であると考えられている。

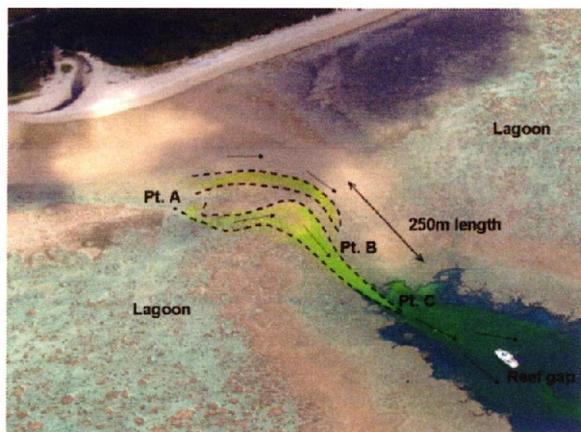


写真-1 サンゴ礁海岸でのリーフカレントの例

西²⁾ は平成17年度の夏季に沖縄県石垣島吉原海岸でリーフカレント観測を実施し、夏季および台風時期のリーフカレント発生機構に関しては、リーフカレントがリーフギャップで生じやすいこと、また、波や風のない静穏状態でも、低干潮時のリーフ内外の水位差により平均流速が1m/sを超える沖向き流れ（リーフカレント）が発生し、海域利用上危険であることなどが解明されている（西²⁾、Mario et al.³⁾）。



写真-2 現地調査したサンゴ礁海岸の様子

ただし、海水浴以外のシュノーケリング、スキューバダイビングなどのマリンレジャーは冬季だけでなく、年間を通して行われることも多い。さらに、東シナ海側のサンゴ礁海岸では、継続時間の長い冬季季節風下で発達する波浪の入射が原因で、強いリーフカレントが発生し、安全な海域利用上問題になることも推測された。そこで、波浪と季節風が海岸正面（海側）側から卓越的に作用する平成18年度の冬季に、同海岸でリーフカレントの現地観測を再度実施したところ、これまでに観測されたことのないような2m/s程度の流れの発生が確認された。

本論文は、この現地観測をもとに、冬季季節風が卓越する気象条件下におけるリーフカレントの特性、発生メカニズム等を明らかにしようとするものである。

2. 現地調査

海浜事故が多発した石垣市吉原海岸のリーフギャップ周辺に、海象計（波高、周期、波向、流速、流向、水温、平均水位（潮位））1台、電磁流速計1台、水位計4台、および観測箇所が見渡せるようにモニタリングカメラを一台設置した（表-1参照）。

なお、リーフカレント特性を解明するための観測は、2007年11月7日から約1か月間行い、データを取得した。また、小型GPSフロートを用いて、リーフギャップ背後域の流況も随時測定した。さらに、季節風の影響を調べるために、近隣のアメダスデータも解析した。

なお、リーフギャップの細い溝状地形に設置しようとした海象計と観測データ通信用ブイなどは、沖向き流れが強い状態で命綱を付けながら設置したが、回収時も沖向き流れが強いために、総ての観測機器を回収するのに1週間以上要した。

表-1 観測内容の一覧

使用機器	観測内容	台数	備考
海象計 (Wavehunter)	波浪、流向・流速、水温観測、平均水位（潮位）	1台	リーフギャップ近くの水路内
電磁流速計 (COMPACT-EM)	流速・水温	1台	リーフギャップ近くの水路内
波高計 (COMPACT-WID)	水位（波浪）観測	4台	リーフ内・外
GPSフロート	流況観測	3台	（発生位置・平均流速）
モニタリングカメラ	現場状況の撮影	1台	

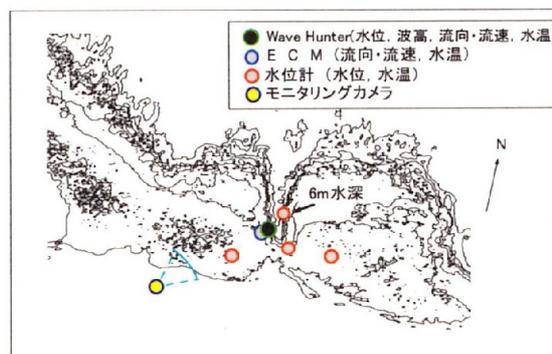


図-1 観測機材の設置状況

3. データ解析

(1) 流況観測

GPSフロートにより観測されたリーフギャップ周辺でのリーフカレントの代表的な流況と平均流速を図-2と図-3に示す。なお、本観測時は、典型的な西高東低の気圧配置のために、北方に面する当観測地では海側からの風と入射波浪が卓越する状況であり、干満の時間にかかわらず、沖向きの強い流れが常時観測される状況であり、計測終了後にリーフカレントに逆らいながら歩いて浜に帰る際には、観測者の足に強い抵抗を感じる状況であった。図-2に示すGPSフロートの漂流軌跡は、リーフギャップ背後の北側の水路状微地形に沿って投入したものであり、すべてリーフギャップに向かって流れている。GPSフロートの位置は1秒間隔で記録されているが、本システムの最終的な空間分解能が3mであるために生データのままである流速変動が大きい。そこで、10秒の移動平均で求めた平均流速（漂流速度）が図-3に実線で示されている。約20秒程度の流速変動を伴いながら、平均流速は0.5m/s～2m/sの間で変化し、リーフギャップ端部に近づいた160秒前後の時間帯においては、平均流速が3m/s程度まで増加していることが分かる。

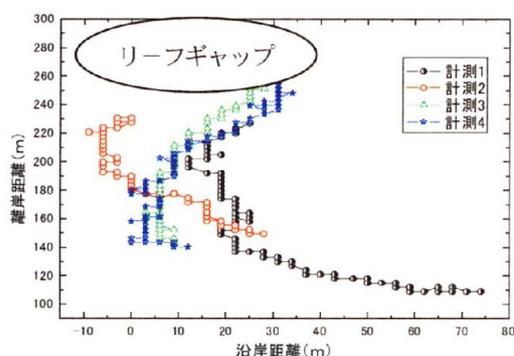


図-2 リーフギャップ周辺でのGPSフロートの流出状況

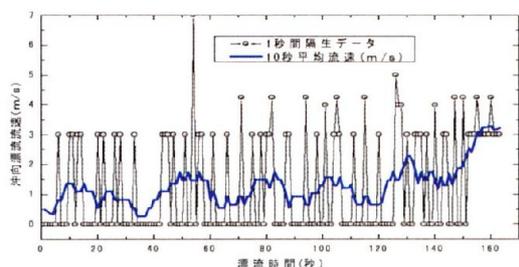


図-3 GPSフロートの漂流速度の時系列

(2) 20分間平均流速と流向

リーフギャップの流れが沖に出やすい水路状の微地形に設置したWAVE-HUNTERにより観測された流れの状況を

図-4に示す。なお、観測後26日目に波群津波状の波が本機材に作用し、機材が転倒してしまったので、それ以降のデータについては考察しないことにする。

観測機材を設置した水路状の微地形は北東方向に向いているために、当観測箇所では、2成分流速がそれぞれ、北向き及び東向きの方に流出側の流速となる。図から、本観測地点では、観測日8日、12日、13日、14日、15日、16日、22日、23日、24日、25日の干潮時で海側からの上げ潮がこの水路状の微地形に侵入してくるわずかな時間を除いて、ほとんどの時間帯で流出、つまりリーフカレントが卓越していることが分かる。さらに、沖向きのリーフカレント成分が卓越しながらも、潮汐のサイクルに応じた流速変動が生じていることが分かる。加えて、0～4日、4日～8日、8日～13日、17日～22日、そして26日以降に、それぞれ西高東低の気圧配置の状況あるいは入射波浪が大きく変わったことによると推定される流速変動が顕著に表れている。平成17年度までの観測結果は、主に潮汐に伴い発達したリーフカレントが計測されていたが、本年度の冬季観測では、入射波浪によるセットアップ効果、卓越風による吹き寄せ効果（吹送流）、および潮汐による効果が重なり合った流速が観測されたものと考えられる。

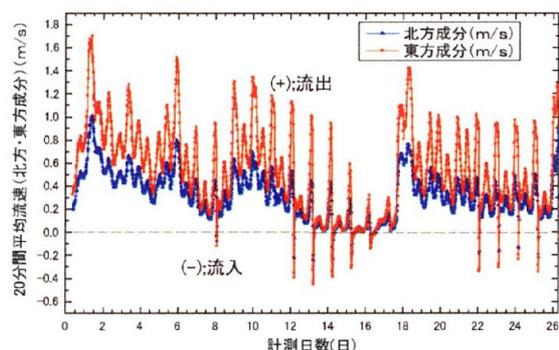


図-4 20分間平均流速成分の時系列

図-4の観測記録では、安全な海域利用上の目安と言われる0.2m/sを超える時間帯が非常に長く、さらに、水中作業上の限界である1ノット（0.5m/s）を超える時間も本計測地点では長いことが明らかである。また、北方成分と東方成分流速を合成した沖向き最大平均流速も約2m/sに達しており、当該海域では冬季の海域利用時に、気象・海象条件に十分な注意が必要になったことが明らかとなった。

流向に関しては、図-5に示すように45°（北東）と77.5°（東北東）の間にはほぼ固定され、常時リーフ内から外に向かう流出状況が生じていたことが分かる。そして、波によるセットアップ効果と、風による吹き寄せ効果が弱まった時期の干潮時上げ潮の限定的な時間だけが、流行が反転したことが分かる。風も波も弱い場合の夏季観測では、流行は潮汐に伴い反転していたことと比較すると、冬季は対照的な結果が得られたことになる。

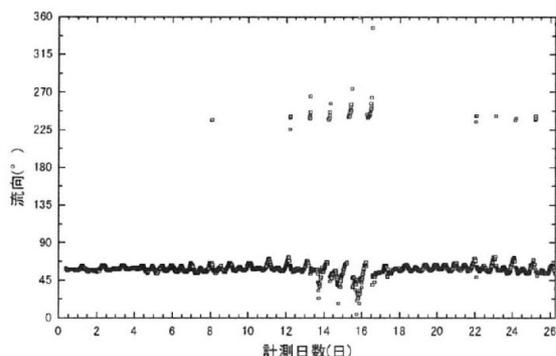


図-5 リーフカレントの流向の観測記録

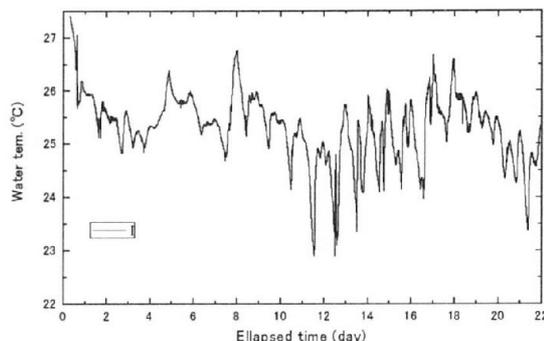


図-7 海底上約10cmに置いた電磁流速計の水温記録

(3) リーフギャップ海底面近傍での流速と水温

リーフカレント計測用に設置したWAVE-HUNTERの上流側(礁池側)約10mの海底面に設置したCOMPACT-EMで計測された瞬間流速と海水温の記録を図-6と図-7に示す。

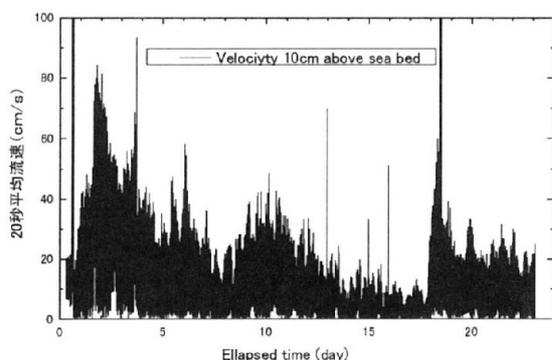


図-6 海底上約10cmに置いた電磁流速計の流速記録

流速変動の状況は、WAVE-HUNTERで計測された様に、0～4日、4日～8日、8日～13日、17日～22日に、それぞれ風のフロントあるいは入射波浪が大きく変わったことに起因するものと推定される流速変動が顕著に表れている。本電磁流速計は海底面から約10cmの高さに設置されていることを考えると、リーフカレントは底面近傍でも数十cm/秒というオーダーの強い流速を持つ流れであることが伺える。当然ながら、サンゴ礁海域の一般的な底質(砂)の限界流速はこのような観測値よりも小さいものであるために、本観測地点の海底面には砂が存在せず、固いサンゴ礁だけが存在していた。また、海底面近傍流速が平均的に増加する時には、海水温も平均的に増加していることが分かり、外洋性由来の暖かい海水がリーフ内に供給された結果、強いリーフカレントが発生しているのではないかと考えられる。

(4) 平均流速と潮位変化

潮汐とリーフカレントの流速の対応関係を図-8に示す。流速のピークは1日にほぼ2回生じる干潮の時間帯に表れるが、基本的には低低潮の時間帯の流速の方が大きいことがわかる。また、平成17年度の夏季の観測では、リーフカレントの発生要因として潮汐だけが効いている場合に、干潮時以外の流速はほぼゼロに近かったことに基づき冬季の流れを考察すると、例えば、本記録の観測日1日前後の流れは風と波の効果によりリーフカレントの速度を約0.8～0.9m/s増加させている。

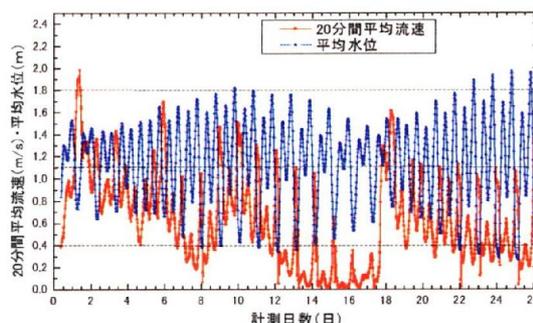


図-8 平均流速(海底より70cm)と平均水位の観測記録

(5) 対象海岸の気象条件

観測海岸に最も近い伊原間のアメダス情報による本海岸のリーフカレント発生に最も重要と考えられる風速と風向の時系列を図-9に示す。風向に関しては、海岸正面側の北ないしは東からの風が卓越していることが分かる。また、定常的に2～4m/s以上の風が吹いており、気圧配置によっては12m/s程度の平均風速が発生している。この平均風速は、外洋で発達する波浪のフェッチと吹送時間の状況を示す一種のパラメーターと考えられ、平均的には、平均風速が速い時に観測波高が高くなり、リーフカレントの速さも速くなっている。

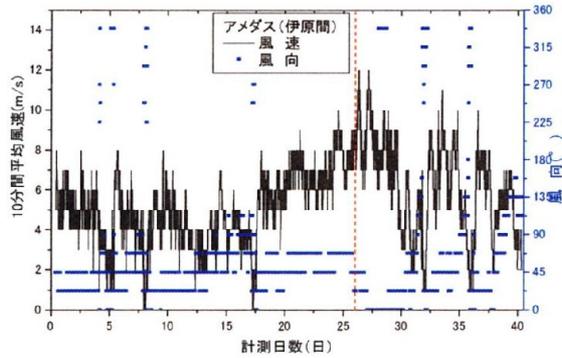


図-9 アメダス (井原間) の風向と風速の時系列

(6) 波高

入射波浪に関して、リーフギャップの水路状微地形に設置したWAVE-HUNTERで得られた有義波高と最大波高を図-10に示す。ただし、観測地点は、リーフギャップの最奥部のリーフフラット（礁嶺）にあるために、外洋側で海が非常に荒れているにも、地形による波の減衰・碎波効果により小さめの波高が記録されるので、今回の観測値は外洋が荒れているかどうかの指標として用いるべきものである。

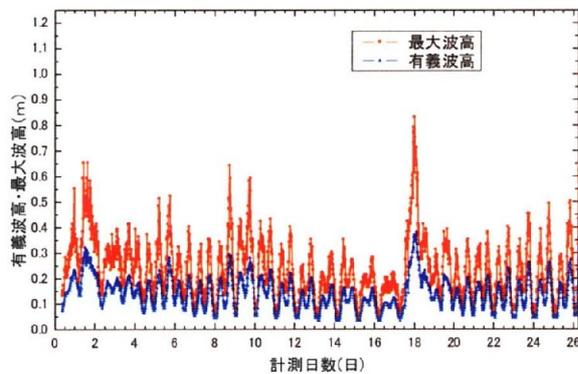


図-10 有義波高と最大波高の時系列

入射波浪としては、観測日約1日、5日、9日、18日および26日当たりで波高の極大値が見られる。ただし、入射波高でいえば観測日1日より18日の方が大きい。対応する日時のリーフカレントは観測日1日の方が約20cm/s強速くなっている。対応するこのリーフカレントの時間帯は、潮位がほぼ同じであるので、風と波の効果（吹き寄せ効果）がこの差を生じたものと考えられる。

4. ダウンカレントの数値計算

2006年11月2日に、リーフギャップ周辺では平均流速が2m/sに達する強いリーフカレントが観測された。この時に、リーフギャップ周辺で水深が急激に深くなる辺りでは、浮力のある玉浮や発泡スチロール性のゴミが多

数集積していた。これらのゴミは、リーフカレントに伴う水平流速が卓越しているのであれば徐々に沖に流されなければならないが、目視している間では、その位置がほとんど変わらなかった。つまり、開水路流れの段落部のように局部的に強い下向きの流れ（ダウンカレント）があるために沖に流されないのではないかと推測された。そこで、リーフギャップ中央部の測線を対象にイノーから沖合に流出する流れを数値モデルを用いて推算した。なお、本考察では、容易に解を求めるためにSOL法を用いた。支配方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

ただし

$$\phi = P / \rho$$

ここで、

u, w : 水平 (x), 鉛直 (z) 方向の流速成分

ν : 動粘性係数 (μ / ρ)

μ : 粘性係数

ρ : 密度

本数値計算に用いた格子図を、図-11に示す。

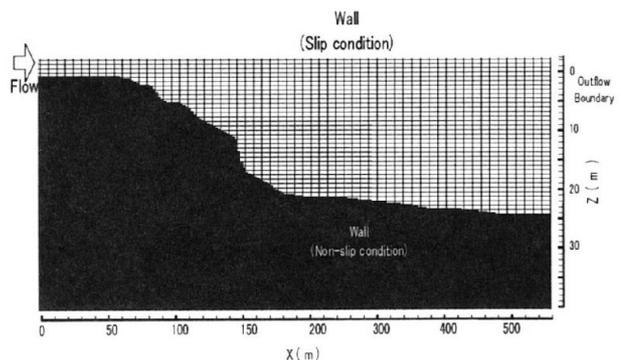


図-11 計算格子配置図

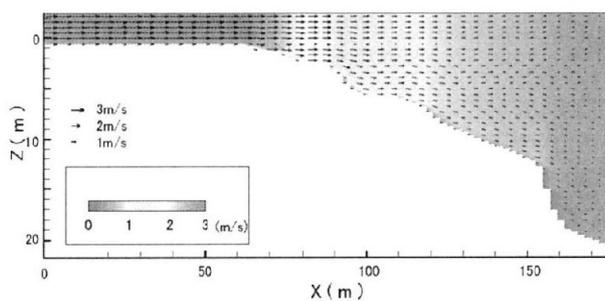
計算条件について、境界条件は海底面で流速が0となる nonslip 条件とし、海面は slip 条件とした。また、流出境界は速度勾配が0となる条件を採用した。本モデルは非定常計算モデルであるが、ここでは定常流を求めるため時間進行させずに、30,000回の繰り返し計算を行った。

流入する流れは低潮時と高潮時を対象とし、リーフの水深を50cm及び250cmの2ケースを対象とした。流入境

界格子に与える流速は現地観測結果を参考に、 $U_{in} = 1$ m/s, 2 m/s, 3 m/s の3通りとした。図-12に高潮時を対象にした計算結果を示す。例えば、最も流入速度が大きい $U_{in} = 3$ m/sの場合、リーフエッジから50m沖合でも1m/s以上の沖向きの流が存在する。鉛直下向きの流れは地形の拡大に伴い、リーフエッジの先端から発生することがわかる。

図-12 計算結果の例（高潮時）

一方、低潮時は水位が低く、流量が少ないため、早い流れの領域は高潮時に比べて狭い。ただし、前例と同様に鉛直下向きの流れは、地形の拡大に伴い、リーフエッジの先端から発生する。



5. 結論

本論文では、平成17年度までの観測で欠けていた冬季の観測結果について述べた。当該海岸は、黒潮の流れる東シナ海に面し、北に向いて開いた海岸であるために、リーフカレントの成長を助長すると考えられる海側からの風と入射波浪が冬季に定常的に作用しやすい海岸特性をもつ。そして、今回の観測では、機材設置時から厳しい海象条件にあり、機材の設置、観測、および回収が順調に進まなかった反面、観測結果には従来観測されたことのないような速いリーフカレントが測定された。平均流速で2m/sに達するようなリーフカレントの記録が得られたこと自体が、学術的にも安全教育上も非常に有意義なものと言える。なお、以下に示すような結論が得られた。

1) GPS フロート観測によれば、当該海岸では、季節にかかわらずリーフカレントが空間的に同じ個所で発生していた。したがって、リーフカレント発生個所は空間的に変動性が少ない。ただし、観測された漂

流流速には20~30秒の周期的変動があった。

- 2) 定常的な北（海側）からの冬季季節風と入射波浪が卓越する観測期間では、リーフカレントの平均流速の絶対値は潮汐に応じて変化する。しかし、流向はほぼ外洋側に固定され、結果として沖向流れ（リーフカレント）が常時形成されがちである。
- 3) 海底面から約10cmの高さに設置した電磁流速計では、流速が数十cm/sを超えていることから、リーフカレントは鉛直方向の減衰が顕著でないことが分かる。また、このことから格子間隔が広く、地形の凹凸の表現が荒い数値計算では底面の境界条件をslip条件とした方が良いかもしれない。
- 4) 冬季の観測結果からは、西高東低の気圧配置による風の発達およびその結果としての波の発達が、リーフカレントの強化要因として重要なことが示唆された。

リーフカレントを測定するという目的の下では、各種作業を沖向き平均流速が1~2m/sの状況でトライしなければならない場合があるために、現在の観測機器設置法及び回収法は安全が確保されているとは言いがたく、今後の観測では何らかの改善が必要と感じられた。

謝辞：現地観測に同行し、設置作業などを協力してく

れた当研究室4年生の谷口君、そして、現地で命綱をつけながら困難な設置作業に従事してくれた(有)アイオーテックの大谷社長、洞氏には紙面を借りて謝意を表させていただくことにします。最後に、本研究は、日本水路協会が日本財団からの事業助成金を受けたものであることを記し謝意を表させていただくことにします。

参考文献

- 1) 西 隆一郎： 海岸の安全利用 一離岸流その2一、季刊水路 第137号、pp. 27-33, 2006
- 2) 西 隆一郎： サンゴ礁海域での沖向流れ一離岸流その6一、季刊水路 第141号、pp. 15-19, 2007.
- 3) Mario P. de Leon, Ryuichiro Nishi, Fumio Kumasaka, Tsuyoshi Takaesu, Ryosuke Kitamura, Yasuro Ohtani: Reef Rip Current Generated by Tide and Wave during Summer Season: Field Observation Conducted in Yoshiwara Coast, Ishigakijima, Okinawa, Japan, Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 2009 (in printing)