

サンゴ礁海域の安全利用に関する基礎的研究

西 隆一郎¹・二ツ町 悟²・伊藤秀行³・三宅武治⁴
長山昭夫⁵・大谷 明⁶・村井弥亮⁷

海浜事故に関する研究が、例えば、西 (2006a, 2006b) により行われている。海浜事故は、砂質海岸だけでなくサンゴ礁に代表されるような岩礁性海岸でも地形性の冲向き流れにより発生している。しかしながら岩礁性海岸での海浜流及び海浜事故の知見はまだ少ない。よって、本研究ではサンゴ礁性海岸での海浜事故状況を調べ、海浜事故が地域的にリーフカレントと呼ばれる冲向きの流れに起因している可能性が高いことを明らかにした。そして、リーフカレントにより海浜事故が生じたと思われる鹿児島県と沖縄県のサンゴ礁性海岸で、海浜流と地形の現地調査を行った。その結果、シュノーケルや遊泳で利用されやすいリーフギャップ背後地海浜で冲向き流れが発生しやすく、これが海浜事故の原因となることが分かった。

1. はじめに

鹿児島県薩南諸島、沖縄県沿岸、東京都小笠原諸島沿岸には岩礁海岸の一種であるサンゴ礁性の海岸が広がる。サンゴ礁性の海岸は、その美しさから島嶼圏の重要な観光資源ともなっている。一方、観光面だけでなく多様な生物の生息地としても重要なサンゴ礁性の海域で、遊泳やシュノーケルを行なう海域利用者が、サンゴ礁性海域特有の地形性離岸流 (沖縄県ではリーフカレントとも呼ばれる) により事故に遭遇する場合がある。また、サンゴ礁性の海域では、海域利用者が地形性離岸流と推定される流れで事故にあう事例は、ある程度特定の海岸に集中する傾向がある。よって、観光客などの海域利用者がその危険箇所を避ければ海域利用時の安全性が高まるものと考えられる。ところが、サンゴ礁上の地形性離岸流が原因で海浜事故が起きたと推定される鹿児島県奄美大島、そして、沖縄県石垣島の事故発生箇所は、海底面が砂地で歩きやすく、かつ、水深変化に富み多様なサンゴや魚類を眺めることができるために、シュノーケルや遊泳などを行なう海域利用者から見れば、一見、親水活動に適した海域に見える。つまり、自然景観の美しさや利用のしやすさと、海象条件によっては利用者を沖に流してしまう危険性が同居した海域である。通常、地元の利用者は危険性を周知しているが、自然の美しさやすばらしさを求めて来島する観光客の多くは、水中に存在する危険性をほとんど知らずに海域利用を行いがちである。したがって、本研究ではサンゴ礁性海岸での流れと海域利用時の安全性に関する指針を得るために、海浜事故に

関するデータ解析及び現地調査を行うことにした。

2. サンゴ礁海域での海浜事故の状況

サンゴ礁地形そのものは硬い岩礁地形で、本土の比較的に柔らかい砂質海浜に対して、ハードボトム海岸とも呼ばれる。サンゴ礁内の白い砂浜と前面に広がる色鮮やかなソフトコーラルやハードコーラルは、多くの海域利用者を引き付けやすい。特にシュノーケルやダイビングなどは、鉛直方向の水深変化が大きいリーフギャップ (サンゴ礁が未発達 of 切り込み地形) 周辺が人気スポットになりやすい。ただし、リーフギャップそのものは、波浪や潮汐が原因でサンゴ礁内に溜まった海水が沖に流出する水路でもあり、海域利用者が沖に流される海浜事故が発生しやすい地形である。そこで、サンゴ礁性海岸が広がる沖縄県でどの程度の海浜事故が生じているのか、(財) 沿岸レジャー安全センター (1991) および (財) 日本海洋レジャー安全振興協会 (2005) などを参考に海浜事故データベースを作成した。図-1 に各都道府県の実海浜事故状況を示す。なお、類似の用語として海難事故があるが、海難事故は船舶を対象とした事故であり、本

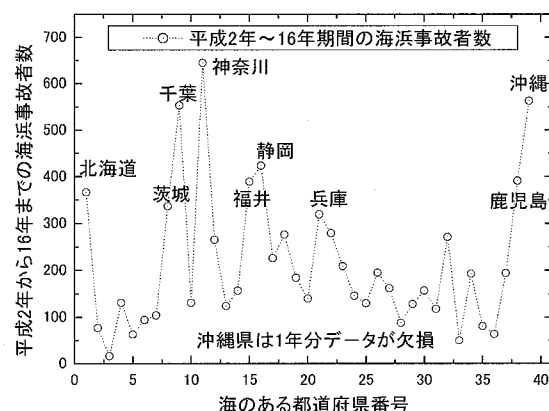


図-1 平成2年から平成16年までの各都道府県の実海浜事故者数の総計

1 正会員 博(工) 鹿児島大学水産学部水産学科助教授
2 第五感区海上保安本部海洋情報部部長
3 第十管区海上保安本部海洋情報部
4 第十一管区海上保安本部海洋情報監
5 鹿児島大学大学院理工学研究科海洋土木工学専攻
6 有限会社アイオーテック代表取締役
7 (財) 日本水路協会 調査研究部長

研究では、事故データベースに取り込んでいない。

本データベースに基づけば全国的に海浜事故者数が多いのは、神奈川県と千葉県そして沖縄県であり、それぞれ 645 人、553 人、563 人である。神奈川県と千葉県は隣接する東京などの大都市圏を含めた海域利用者数そのものが多いことが海浜事故の一因と考えられる。一方、沖縄県の人口は約 136 万人と神奈川や千葉及び東京に比べると少なく、関東、関西、福岡など本土からの約 560 万人の観光客が海浜事故に大きく関与しているものと推定される。

神奈川県や千葉県では、砂質海岸で生じる離岸流が多く、海浜事故に関わっているものと考えられる。海浜事故と離岸流の関連性に関しては、例えば、西 (2006b) により検討が行われ、その中で「宮崎県消防局管内で 27.3%、鳥取海上保安所管内において約 7 割強、ブラジルサンタカタリーナ海岸では 82% が離岸流起因」と言う数値が示されている。一方、沖縄県はサンゴ礁性海岸での事故であり、別途検討が必要である。そこで、まず沖縄県沿岸域の空中写真を利用して、リーフギャップ地形の判読を行なった。そして、判読したリーフギャップの中で、冲向き流れによる海浜事故が発生している米原海岸および吉原海岸での事故状況を、表-1 に示すように調べた。なお、事故状況を調べた 2003 年から 2005 年の期間では、石垣島の海浜事故はこの両海岸に集中していた。

表-1 米原海岸および吉原海岸のリーフギャップ周辺での海浜事故状況 (2003 年～2005 年)

海浜事故状況	備考
12 時頃から男性が友人と共に米原海岸地先海域で遊泳中、14 時 15 分頃潮流のため沖合に流された。友人は自力で陸に上がり通報した。(遊泳中)	晴れ、南の風 6m、波浪 1m、水温 25℃、救命胴衣なし
12 時 30 分頃、男性が、シュノーケリング目的で吉原海岸から入水し、沖合のリーフ際で遊泳中、15 時頃、岸に戻ろうとしたが、リーフカレントが強く戻れなくなりリーフ沖で漂流した。該人は翌朝まで漂流を続け、翌朝の夜明け時にリーフ切れ目から入水した海岸に自力で泳ぎ着いた。(シュノーケリング中)	曇り、東の風 13m、水温 25℃、救命胴衣なし
14 時頃、米原海岸においてシュノーケリング中の男性及び女性の 2 名が、リーフカレントにより沖合に流された。助けを呼ぶ声に気づいた他の遊泳者 4 名が浮き輪等を持って救助に向かい、約 15 分後に会合した。(シュノーケリング中)	晴れ、南東の風 4m、波浪 1m、うねり南東 3m、水温 25℃、救命胴衣なし
14 時 45 分頃、男性が友人 1 名と共に、吉原海岸から入水、距岸 10～20m の水深約 1 m の海域を遊泳中、16 時 45 分頃に行方不明となった。後日、リーフ切れ目の水深約 24m の海底において発見揚収された。(シュノーケリング中)	曇り、北の風 10m、波浪 2m、うねり北 1m、水温 25℃、ウェットスーツ着用
16 時 15 分頃から、男性が、吉原海岸において遊泳を開始したが、16 時 20 分頃、沖合に流されていることに気づき岸に戻ろうとしたが、流れが強く戻れず漂流した。これに気づいた友人が発砲スチロールを持って救助に向かったが、同様に岸にもどれなかった。(遊泳中)	曇り、北東の風 7m、波浪 1m、うねり北 1m、救命胴衣なし

なお、表中で潮流やリーフカレントにより流されたとあるものは、リーフギャップでの冲向き流れを意味している。表中の一事例だけは、潮流で沖に流されている中に一名が流れに逆らいながら自力で浜に辿り着き、それ以外の事例では救助者を含む海浜事故者が潮流ないしはリーフカレントに逆らい自力で浜に帰ることが出来ていないことがわかる。また、表中 2 番目の海浜事故者は、海上自衛隊関係者で遊泳能力の高い該人であったが、流れに逆らって浜に帰還することはできず、流れが収まるのをリーフ沖合で一昼夜待っていた。当然、一般的な遊泳者の能力では不可能なことである。このように、海域利用者が流れに逆らって泳ぐことができなかったことから、海浜事故時に 1 ないしは 2 ノット以上の冲向き流れが発生していたものと推定される。

3. 現地観測

鹿児島県大島郡笠利町土盛海岸、沖縄県石垣市吉原海岸で、WaveHunter99Σ、超音波ドップラー流向・流速計 (Aquadopp Profiler)、小型の GPS を組み込んだフロート (HGPS フロート)、シーマーカー (染料)、トータルステーション、熱赤外線カメラ、デジタルビデオカメラ、デジタルカメラ、一眼レフカメラなどの観測機材などを用いて、波・流れ・地形の観測を行なった。

観測期間は、大島郡笠利町土盛海岸では 2005 年 7 月下旬～8 月上旬、石垣市吉原海岸では 9 月 26 日～9 月 31 日であった。なお、両海岸ともに観測期間は台風の影響状況が基本的な制約条件となっており、台風が接近した場合には機材を回収するようにした。

(1) 土盛海岸の現地調査

当海岸では、平成 16 年 8 月 23 日に、中学 1 年生と小学 1 年生の姉妹が地形性の冲向き流れと推測される流れで海浜事故に至っている。姉妹を救助しようとした男性によれば「現場は川のような流れでまっすぐ泳げない状態だった」(南日本新聞 2004 年 8 月 24 日) とのことである。本証言は、リーフカレントに逆らって泳ごうとしたことを示している。さらに、本海岸では以前にも医師が遊泳中に流されて行方不明になったこともあり、海域利用者に注意を促すために、「この海岸は、潮の流れが速いので注意して下さい。台風・高波・高潮時には海水浴を絶対にしないで下さい。」との看板が設置されている。ただし、予備調査時のうねりの高い状況でも、リーフ内で遊んでいる 10 人以上の利用者がおり、啓発効果としては改善の余地があろう。なお、本観測地は、写真-1 に示すように砂浜前面のサンゴ礁のリーフフラット (礁原) が幅広く続く海域の中で、矢印で示すように一部が切れ込んだリーフギャップと呼ばれる海底地形になっている。本海岸のようなサンゴ礁性の海岸では、(i)リーフ

フラットが幅広い海域から、碎波により多量の海水がリーフ上に供給され平均水位が上昇（セットアップ）し、隣接海域の平均水位が低いリーフギャップから沖に流出する機構と、(ii)潮位が下がるときにリーフエッジ周辺は底面高さがやや高いために、底面高さの低い溝状になったイノー（礁池）およびリーフギャップ部分から海水が流出しやすいという機構が考えられる。

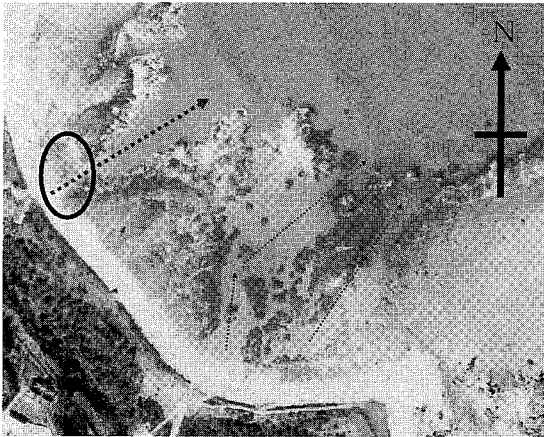


写真-1 現地観測を行なった笠利町土盛海岸

当該海域では、ADCP を用いた観測を行う前に予備調査として HGPS フロートと染料を用いて流況観測を、写真-1 中の黒丸で囲った領域で行った。予備調査時には、台風に伴ううねりが来襲しており、安全管理上、水深が腰ぐらいまでの浅い箇所では HGPS フロートと染料を流した。そのために、沖向き流れが発生していると推測される水深領域にフロートや染料を投入できず、結果として、写真-2 中の染料 1 の矢印に示されるような沿岸方向の平均流速 0.88m/s （約 1.78 ノット）の強い流れだけが観測された（図-2 参照）。なお、本研究で使用した小型 GPS の緯距・経距の分解能は約 2.5m である。

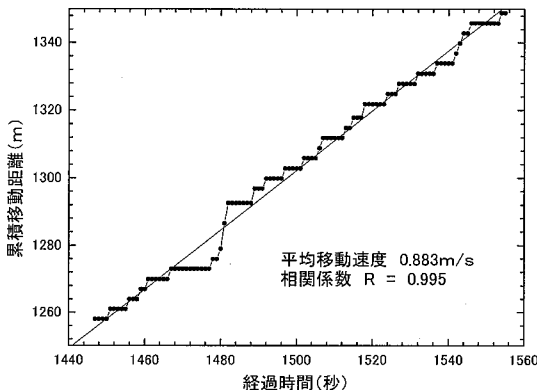


図-2 予備調査時の小型 GPS フロートの移動状況と平均流速の算定

次いで、ADCP の設置は 2005 年 7 月 29 日の干潮時に行い、回収は台風 0508 号が接近する前の 8 月 4 日午前の干潮時に行った。観測は 20cm 層厚 $\times$ 10 層の条件で行った。なお、ADCP は写真-2 に示されるように極浅海域に設置してあるために、干潮時に観測層の一部が空气中に露出し、その結果、ノイズデータも一部記録されている。したがって、ノイズデータを取り除くために、生データのクリーニングが必要であった。

図-3 に ADCP で得られた観測最下層の 2 分間平均海浜流速と平均水位（潮位）の関係を示す。

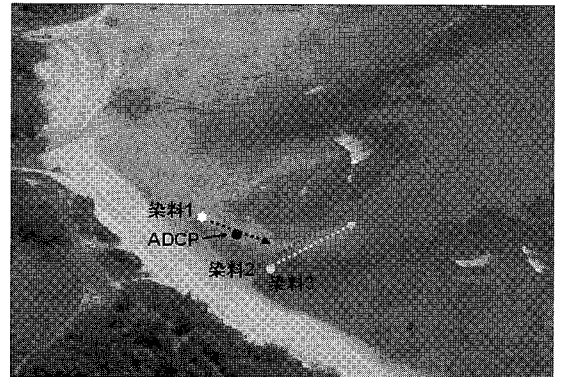


写真-2 ADCP 観測箇所（写真-1 の左側リーフギャップ）の地形と流れの様子

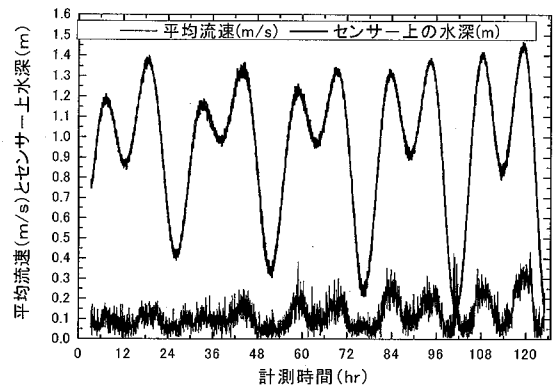


図-3 センサー付近の平均海浜流速と平均水位

図中 ADCP による 2 分間平均海浜流速は、海底から高さ $0.5\sim 0.7\text{m}$ 間の 0.2m の層（以下 0.7m 層）のものを使用した。観測期間中の海浜流速と平均水位の相関係数は 0.608 で正の相関を示した。平均的には、干潮時に平均流速が小さく、また、サンゴ礁上の平均水深つまり碎波水深および碎波波高が大きくなる大潮に向かい平均流速が大きくなる傾向がある。そして、図中の計測時間では 122 時間に相当する 8 月 3 日の満潮時に最大で約 0.4m/s の海浜流速が発生した。また、干潮時は

平均して 0.1m/s 弱の海浜流流速が発生していた。

各層(海底 0.5m の高さから上に 0.2m 間隔で最高 1.9m までの層)での海浜流流速と潮位の相関関係も 0.7m 層と同様の傾向があった。なお、 0.7m 層から 1.9m 層の鉛直方向各層の満潮時の海浜流流速の水平成分は、図-4 に示すように、流れの向きが上層、中層、下層で反転せず、また、平均流速のオーダーもほぼ同じである。つまり、深さ方向に平均流がほぼ一様であった。この傾向は満潮時に見られたが、干潮時は水深が浅くなり鉛直方向の観測層数が減ることに伴い、データ数が少なくなったので海浜流流速が深さ方向に一様であるかどうかは判別できなかった。また、最も海底面に近い低層での流れの向きは、 $160^\circ \sim 150^\circ$ の南東向き(沿岸方向)で、フィーダーカレントと思われる平均流が発達していた。

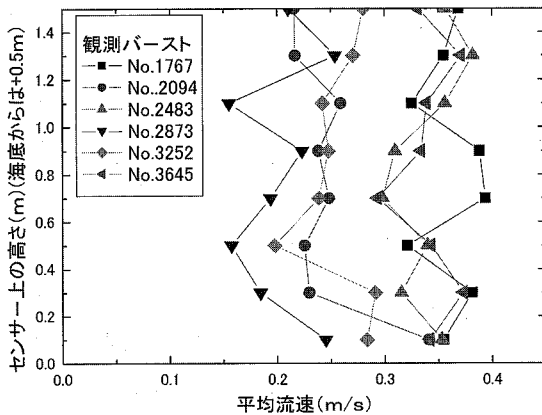


図-4 平均流速の鉛直分布

(2) 吉原海岸での現地観測結果

当海岸は、表-1 に示したように沖向きの流れによる海浜事故が発生しやすい海岸である。これは、写真-3 に示す空中写真の判読から、リーフギャップ地形から沖に向かう流れが発生しやすいためと考えられる。そこで、流れの特性を調べるために、2005年9月27日から28日にかけて WaveHunter を用いた観測を行った。WaveHunter の設置位置は写真-3 中で白丸で示される箇所である。

観測時の平均水位、有義波高、平均流速を図-5 に示す。波高計の設置位置は、リーフギャップが最も陸側に切れ込んだ箇所のリーフエッジ付近である。ただし、観測日は、入射波高が小さかったこともあり、最大平均流速のオーダーは約 0.2m/s (約 0.4 ノット) 程度と強い流れは観測されていない。また、観測点では観測期間中は常に正の流速つまり沖向き(北向き)の流れになっていた。なお、図中の平均流速は干潮時側でピーク流速を示している。但し、後述するように本観測地は背後地の小河川から供給される河川水の流出経路になっている可

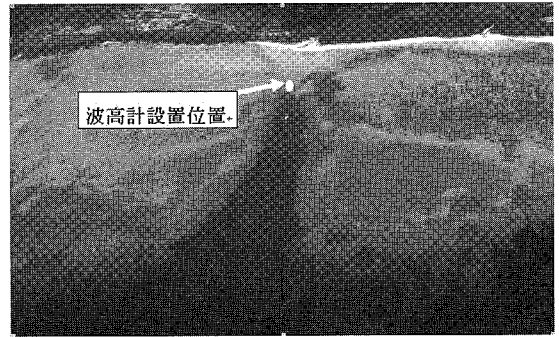


写真-3 吉原海岸のリーフ形状と波高計設置位置

能性があり、今後の長期観測でどの程度が波浪により形成される海浜流に伴うものか、潮流に伴うものか、そして、河川流によるものか検証する必要がある。

観測地の流況を把握するには海面着色剤(シーマーカー)を投入する手法が有効である。したがって、海浜地に高さ約 5.4m の仮設のやぐらを設置し、やぐら上から染料拡散の様子をデジタルビデオカメラ及びデジタルカメラで撮影した。その結果を写真-4 に示す。本写真で

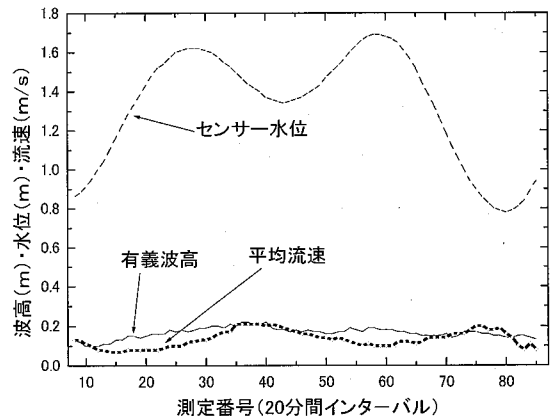


図-5 WaveHunter による観測結果

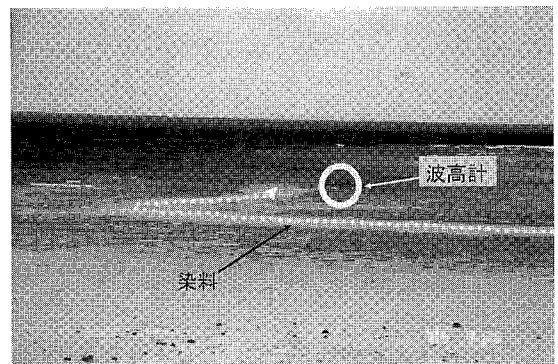


写真-4 染料(点線)により示される離岸流

は、緑色の着色料で示される離岸流の主軸が、設置した Wave Hunter のやや左側にあることが分かる。

今後、リーフカレントの数値計算および予測を行うには、サンゴ礁海域の詳細な海底地形データが必要となる。このようなサンゴ礁性海岸の詳細な海底地形の測深には航空レーザー測深システムなどが有効と考えられる。例えば、米国フロリダ州やハワイ州ではサンゴ礁海域の航空レーザー測深調査が既に行われ、一部データについて ADCP 観測箇所(写真-1 の左側リーフギャップ)の地形と流れの様子はインターネット上で利用が可能である(http://shoals.sam.usace.army.mil/hawaii/pages/Hawaii_Data.htm を参照)。一方、我が国においては、第六管区海洋情報部に航空レーザー測深システムが配備されており、広領域での測深が困難なサンゴ礁海域に広く適用されれば海域利用の安全性に資するものと考えられ、本観測と平行して、米原海岸、吉原海岸、そして、川平湾にいたる領域で航空レーザー測深が行われた。ただし、わが国では航空レーザー測深システムが簡単に利用できるわけではないので、通常の現地調査では、田中ら(2006)により指摘された様に地形測量がいまだに困難な調査項目の一つである。なお、本研究では、写真-5 に示す空中写真を用いて海底地形の概況も把握した。その結果、河口付近からリーフギャップに向かい溝状の微地形が形成され、この地形が干潮時においては河川流路としても機能している可能性が高いことが分かった。

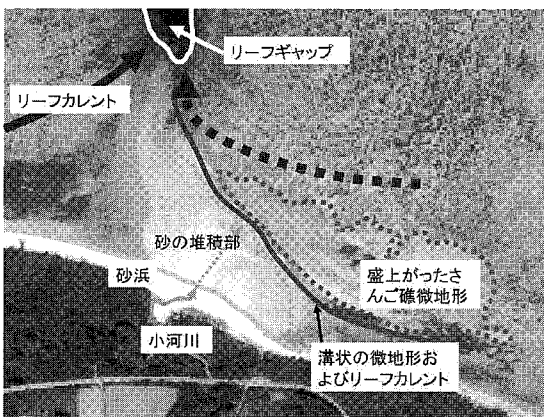


写真-5 リーフギャップ背後の海岸の様子

4. 結 論

海浜事故予防を目的としたリーフカレントの現地調査はまだ始まったばかりであり、今後も調査データを蓄積しその特性を解明する必要がある。リーフカレントの予備調査の意味合いを持つ初年度の現地観測では、以下に示すことが分かった。

(1)土盛海岸では、満潮時に平均流速が大きくなる傾向があり、ADCP による観測では最大で 0.4m/s の流速が発生していた。これは、砕波水深の増加に伴いセットアップで供給される海水量が増えるためと考えられる。また、台風に伴ううねりで波高が高めであった予備調査時には、小型 GPS フロートで計った平均流速は約 0.88m/s であった。

(2)20cm 層厚 × 10 層の ADCP 観測データの内、水深が十分確保できる満潮時のデータに関しては、水平方向の平均流速成分の鉛直方向分布がほぼ一様であった。

(3)吉原海岸では、海面着色料を用いた実験から調査時に幅の狭い地形性の離岸流が発達していることが分かった。ただし、観測期間が約 1 日と短く、入射波浪も小さかったために、観測された平均流速は 0.2m/s 程度であった。

(4)空中写真判読によれば、吉原海岸においては沖向き流れに対して河川流の効果もあると考えられるが、定量的な取り扱いに関しては今後の観測に残された。

謝辞： 現地観測では、第十管区海上保安本部海洋情報部、同鹿兒島航空基地、名瀬海上保安部、第十一管区海上保安本部海洋情報監視課・調査課、石垣海上保安部、第六管区海上保安本部海洋情報部、そして、(有)アイオーテックの関係諸氏の協力を頂いた。紙面を借りて謝意を表させていただくことにする。また、海浜事故状況をまとめるに当たり、財団法人日本海洋レジャー安全・振興協会の舟木部長からアドバイスを頂いたことを記し謝意とさせていただく。最後に本研究は、(財)日本水路協会が日本財団からの事業助成金を受けて行った「離岸流等の観測手法及び特性把握に関する研究」(2006) で得られた成果の一部についてまとめたものであり、ここに謝意を表させていただく。

参 考 文 献

- 西 隆一郎 (2006a)：目で見える離岸流 - その 1 -，季刊水路 第 136 号，pp. 21-26，2006 年 1 月。
- 西 隆一郎 (2006b)：海岸の安全利用 - 離岸流その 2 -，季刊水路 第 137 号，pp. 27-33，2006 年 4 月。
- (財)沿岸レジャー安全センター (1991)：平成 2 年における海洋レジャーに伴う海浜事故，p 126。
- (財)団法人日本海洋レジャー安全・振興協会 (2005)：平成 16 年におけるマリレジャーに伴う人身事故の状況。
- 田中龍児・西 隆一郎・幸 哲也・二ツ町 悟 (2006)：民生用デジタルカメラを用いた浅海域地形の写真測量法の開発について，海洋開発論文集 第 22 巻，(印刷中)。
- (財)日本水路協会 (2006)：離岸流の観測手法及び特性把握に関する研究 その 3，財団法人日本水路協会調査研究資料 126，89p。