

海岸の安全利用からみた静穏時離岸流の現地調査 —研究者, 実務者と海岸利用者との連携の試み—

FIELD MEASUREMENTS OF CRITICAL RIP CURRENTS UNDER CALM SEA
CONDITION – COLLABORATIVE INVESTIGATION FOR WATER SAFETY

青木伸一¹・上野成三²・西隆一郎³・小峯 力⁴・石川仁憲⁵・堀口敬洋⁶
Shin-ichi AOKI, Seizo UENO, Ryuichiro NISHI, Tsutomu KOMINE
Toshinori ISHIKAWA and Takahiro HORIGUCHI

¹正会員 工博 国立大学法人豊橋技術科学大学教授 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

²正会員 大成建設(株) 土木技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³正会員 博(工) 鹿児島大学水産学部准教授 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市下荒田4丁目50-20)

⁴体修 流通経済大学スポーツ健康科学部准教授 (〒301-8555 茨城県龍ヶ崎120)

⁵正会員 工修 (財) 土木研究センターなぎさ総合研究室 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

⁶正会員 (株) アイ・エヌ・エー海岸部 (〒112-8668 東京都文京区関口1-44-10)

An investigation team comprised of coastal researchers and engineers carried out field measurements of rip currents and experienced drift by the current on Sagara Sun Beach during August 23-24, 2007 with help of lifeguards and surfers. The waves and rip currents were observed near the breakwaters and the data were analyzed from the viewpoint of the safety of the beach users such as sea bathers and surfers. Various water safety problems related to the rip currents were discussed based on the field data, real experience of the drift and information of the lifeguards. A steady rip current around 0.25 m/s generated along a breakwater under calm sea condition yields dangerous situation to sea bathers and the degree of the dangerousness depends on the water depth as well as current velocity.

Key Words : Field observation, Rip current, Water safety, Sagara sun beach

1. はじめに

我が国の海浜事故の主因の一つは離岸流である¹⁾²⁾。この離岸流について、海岸工学を専門とする研究者や実務者の多くは文献や基準書等で理解することはあっても、自らが体験した上で理解する機会は少ない。また、安全な海域利用に関して実務的に

利用できる知見も少ない。一方、海岸を活動の場としているライフセーバーやサーファーなどは、経験的に離岸流の発生箇所、強さなどを把握し、水難事故を未然に防ぐとともに、時には離岸流を活用しているが、離岸流の定量的な取り扱いについては経験が少ない。本研究はこのような背景をふまえて、図-1に示す静岡県相良サンビーチにおいて、研究



図-1 対象海岸（静岡県相良サンビーチ：相良港海岸）と離岸流発生箇所



図-2 研究者、実務者と海岸利用者が連携した現地調査の参加者

者や実務者を対象に、地元ライフセーバーとの交流、離岸流体験、簡易調査を行う機会を設け、ライフセービング・レスキューという実務的な活動と海岸工学という学術的な知見を結ぶ試みを行い、現場に即した調査結果・知見をとりまとめ、その結果を参考に海岸工学における今後の課題を抽出した。

2. 調査内容

国、大学、研究機関、コンサルタント、日本ライフセービング協会から計 12 名が参加し、相良サーフライフセービングクラブの協力を得て、2007 年 8 月 23、24 日に現地調査を行った（図-2）。調査内容は、まず意見交換会を実施し、経験に基づく対象海岸における水難事故の実態とその要因、波浪や潮位と離岸流の関係など事細かな部分についてまでも情報の共有化を図った。次に入水現地踏査により水面下の地形条件を把握し、参加者全員が離岸流に流される体験を行った。また、定常的に離岸流が発生する海岸北端（図-1 の A 区域）において、水圧式波高計と電磁流速計による定点観測、定点カメラと染料および被験者による漂流実験、GPS フロートによる流況観測により定量的なデータを取得し、一連の調査結果のとりまとめを行った。

3. 調査結果

(1) ヒアリング

ライフセーバーの経験をもとに、対象海岸における水難事故の実態を整理した。対象海岸では、水難事故は主に離岸流箇所が発生し、相良港外郭施設南側と離岸堤 2-3 号間の 2 箇所（図-1 の A、B 区域）に特定される。さらに離岸流の流速は経験的に上げ潮時に大きいとのことであった。また、海水浴客は波高により安全性を確認する傾向があり、特に対象海岸のように離岸堤などの消波施設が沖合に設置されている海岸では、子供など泳力の乏しい海水浴客

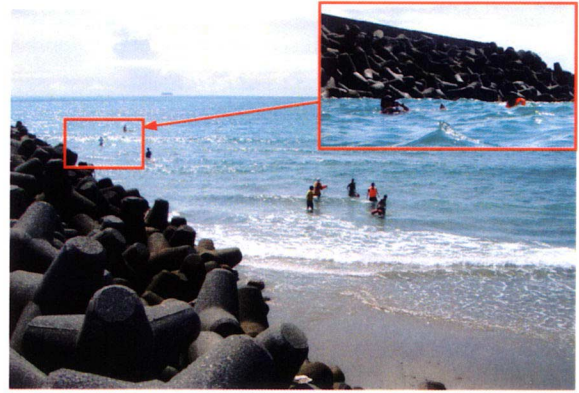


図-3 離岸流体験の様子

表-1 波高・流速計観測概要

観測項目	流 速	波 高
観測期間	2007年8月24日 9:30:00 - 12:20:00	
計測機器	アレック電子製 Compact-EM	アレック電子製 Compact-WH
観測仕様	$\Delta t=0.5s$ 連続観測	$\Delta t=0.25s$ 連続観測
備考	海底から52cmの地点の流速データ	水深データに変換して処理

は周囲に比べて静穏な施設背後の波高が小さい場所を好んで海に入る傾向がある。しかしながら、このような場所は静穏であっても強い流れが発生していることが多く、これによって流され、事故につながるものが問題として挙げられた。このほか、強い陸風の場合に遊泳者が沖に流されやすいことから、安全利用の啓発には、波流れ以外に風（向き）の影響についても示す必要があることがわかった。

(2) 離岸流体験

調査時は波高も小さく、静穏であったが、後述の調査結果より 0.2~0.3m/s 程度の離岸流が相良港の外郭施設に沿って発生していた。そこで、フロートを用いて離岸流の体験を行った（図-3）。この結果、この程度の離岸流であっても、離岸流に逆らって泳ぐことは困難であることを体感した。また、離岸流体験は干潮時と上げ潮時の 2 回行ったが、水深が大きくなった上げ潮時の方が強い流れを感じ、流れに対する被験者の危険感に大きな違いがあった。

(3) 波高、流速、水深の定点観測

図-1 に示す観測地点において干潮時からの上げ潮時に調査を行った。観測概要を表-1 に示す。図-4 には、取得した水圧データおよびその 1 分移動平均値の経時変化を示す。これより、観測期間中の平均水深は、上げ潮により 1.2m から 1.6m 程度に変化した。水圧計のデータを 20 分毎に分割して求めた有義波高、有義波周期の経時変化を図-5 に示す。観測期間中の有義波高は $H_{1/3}=0.3m$ 程度であった。

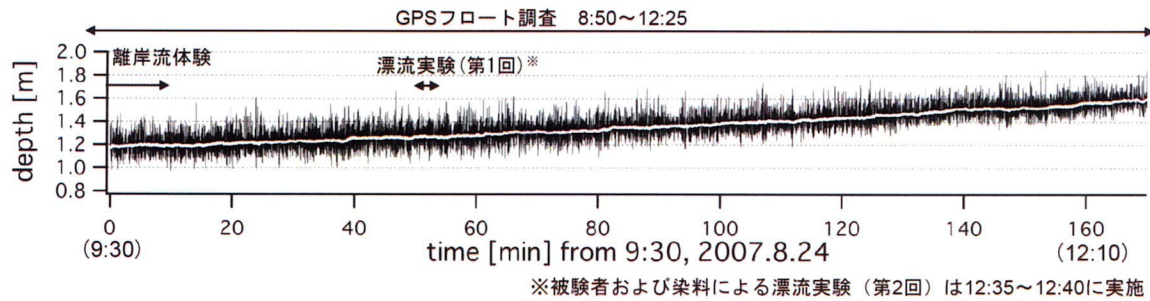


図-4 水深の経時変化と調査実施状況

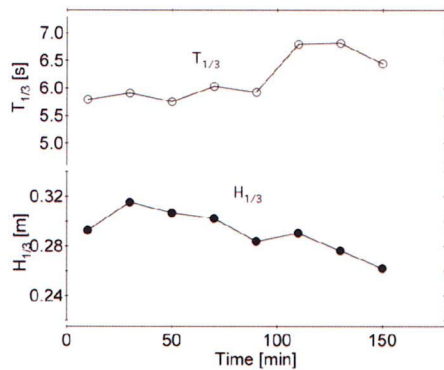


図-5 有義波高と有義波周期の経時変化

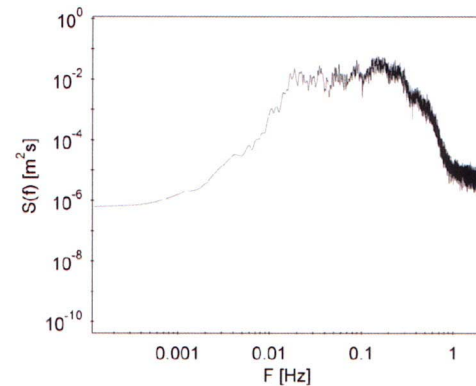


図-6 水位変動のスペクトル

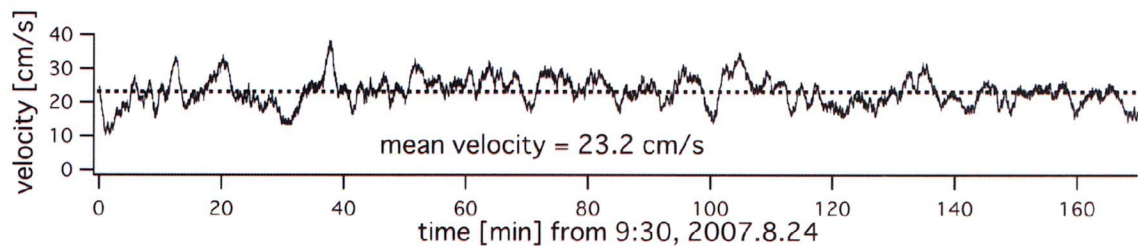


図-7 1分平均流速の絶対値の変動

なお、有義波高は0.26~0.32mで漸減傾向、有義波周期は5.7~6.8sで漸増傾向であるが、これは圧力波形を直接解析しているためであると思われる。図-6は、観測期間中の全水圧データを用いて求めた水位変動のスペクトルである。砕波帯内であるためスペクトル形状がフラットになっており、比較的長周期の変動成分のエネルギーが大きい。図-7は、流速計の東西方向、南北方向流速成分をそれぞれ1分で移動平均し、それらを合成して求めた平均流速の絶対値の経時変化である。流速の大きさは、数分~10分程度での変動はあるものの、0.23m/sを平均値として比較的安定した流れとなっている。図-8は、東西方向および南北方向の流速成分の1分移動平均を位相面上にプロットしたものである。これより、港外郭施設に沿う方向で流向が安定していることがわかる。

(4) 被験者と染料による漂流実験

離岸流を視覚的に捉えることを目的として、外郭施設にカメラを設置して被験者および染料によるトレーサ調査を実施した。定点カメラの観測概要およ

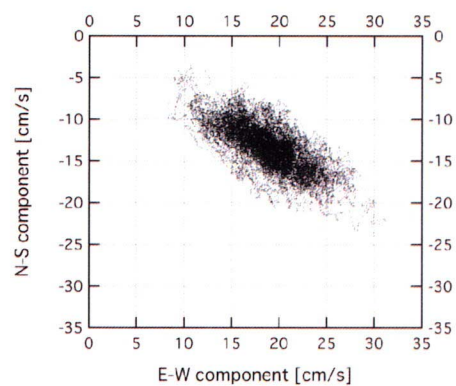


図-8 流れの方向分布図

び設置状況を表-2および図-9に示す。定点カメラで取得した画像内の距離と撮影時間の関係より、トレーサ調査時間における平均流速を求めると、被験者による調査時(図-10)は約0.25m/s、染料による調査時(図-11)は約0.3m/sであった。この結果は、前述の流速の定点観測結果とほぼ同じ数値である。一方、被験者による調査時に比べて0.4m程度

表-2 定点カメラ観測の概要

観測 (平均水深 ^{※1})	被験者による漂流 (1.27m)	被験者および染料に よる漂流(1.59m ^{※2})
観測期間	2007年8月24日 10:20:00 - 10:24:59	2007年8月24日 12:35:00 - 12:39:59
使用機器	MOBOTIX社製WEBカメラ(M22)	
観測仕様	取得画像:VGA(640*480), △t=0.5s, 連続観測	
備考	・画像データ:LAN接続でノートPCに記録 ・電源:自動車バッテリー	

※1:波高計観測データ(水深データ)の期間平均

※2:波高計撤去後の観測のため波高計観測最後の1分
間平均値(12:19の観測平均値)

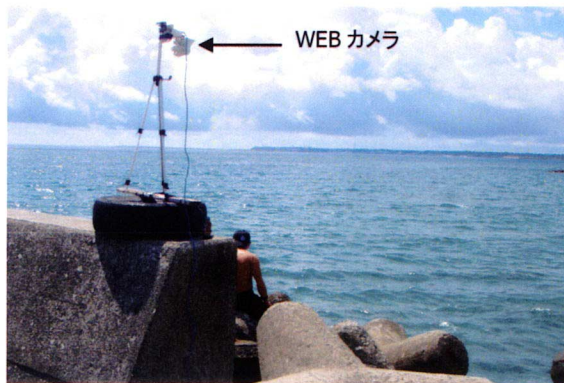


図-9 定点カメラの設置状況

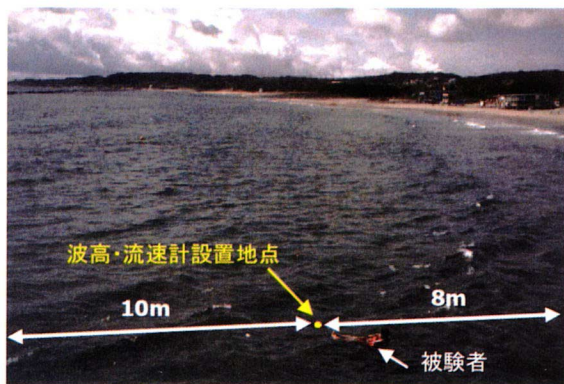


図-10 定点カメラ取得画像(被験者トレーサ調査)

水深が増加した染料トレーサ調査時の方がやや流速が速い結果であり、これは被験者が上げ潮時(染料トレーサ調査時)の方が強い流れを感じた結果と一致している。なお、流速計の定点観測終了後であったため、定点流速観測による定量的な評価まではできていない。

(5) GPS フロートによる流況調査

調査海域は、前面に離岸堤群がそして左側端部に相良港外郭施設が設置された半閉鎖的な海水浴場である。構造物の設置状況からは、各離岸堤の間に沖に抜ける離岸流と、離岸堤背後を左向きに流れる



図-11 染料によるトレーサ調査の状況

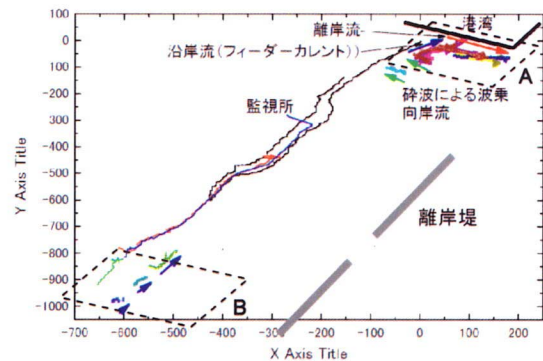


図-12 GPSフロートによる流況(移動軌跡, 広域)

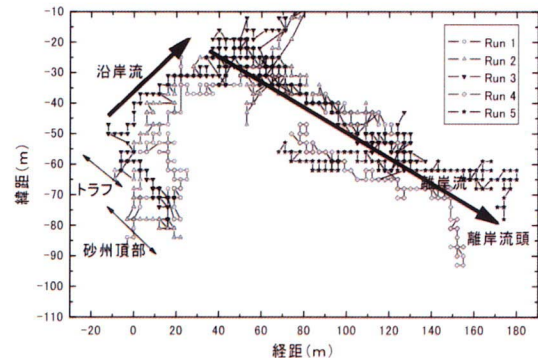


図-13 GPSフロートの移動軌跡(A区域拡大図)

沿岸流が漁港を迂回するような形で生じる離岸流の発生が予想された。そこでこのような流況を把握するため、GPSを組み込んだフロートによる漂流調査を行った。

図-12にGPSフロートにより求めた観測時の流況を示す。離岸堤群背後ではフロートが沿岸流に乗って港側に漂流していることが分かる。観測時には、波浪が静穏状態であることも一因で、離岸堤群を沖に抜けるような離岸流は観測されなかった。一方、港周辺の $x=0\text{m}$ 辺りで沿岸流が外郭施設に沿うような形で向きを変えて、沖向きの流れが生じていることが分かる。図-13には、港近くで5回投入したGPSフロートの軌跡を示す。図中 $x=140\sim 160\text{m}$ 付近に離岸流頭があるが、Run5の軌跡で示さ

れるように流れの一部は港を迂回するような形で下手側に流れていることが推測される。

漂流時間とGPSフロートの移動距離から沿岸流と離岸流の平均的な速度を算出した結果、ともに約0.15m/sであった。

4. まとめ

調査結果より、以下の知見が得られた。

- 対象海岸の離岸流の発生箇所は、沖合の離岸堤群と相良港外郭施設によりほぼ固定されている。
- 調査時は、波高 $H_{1/3}=0.3\text{m}$ 程度と比較的静穏であったが、港外郭施設に沿って離岸流が発生していた。
- 沿岸流の平均速度は0.15m/s程度であった。
- 離岸流の平均速度は0.2~0.3m/s程度であった。この程度の離岸流であっても、流れに逆らって泳ぐことは困難であり、遊泳者にとって危険な条件であった。
- 現地調査は、上げ潮により水深が0.4m程度増加する条件で実施したが、体感では、水深増加時の方が離岸流による流れを強く感じた。実際に漂流実験においても沖に向かう速度がわずかに速かった。これは、対象海岸のライフセーバーが経験的に得ていた「流速は、上げ潮時に大きい。」という意見とも一致した。

5. 考察

調査結果より、同程度の波高、流速でも潮位が上がる（水深増加）ことで水難者は離岸流を強く感じ、実際に被験者の移動速度が速くなる結果が得られた（図-14）。この理由としては、足が海底に着く浅海域では、流圧面積（水面下の体の面積）および浮力が大きくなり、離岸流の力を強く感じるためである。このような足の着く水中部における人体に受ける抗力と水深の関係は須賀ら³⁾の実験においても同様の結果が得られている。一方、足が付かない沖合では、海底面付近の流速が同程度であっても流速は水深方向に分布をもつため、表層の流速が大きくなっていることが考えられる。しかしながら、これは複雑な波流れ場での浮遊物体に作用する流体力の問題であり、今回の調査では十分な検討を行うに足るデータを取得できなかったため、今後の調査課題である。また、漂流速度のわずかな増大に比べて、被験者の危険意識が大きく増大したことについては、水深が大きくなったことによる不安感など心理的な面も影響していると思われる。

ライフセーバーからのヒアリング結果や現地調査の結果より、対象海岸の水難事故のメカニズムは以

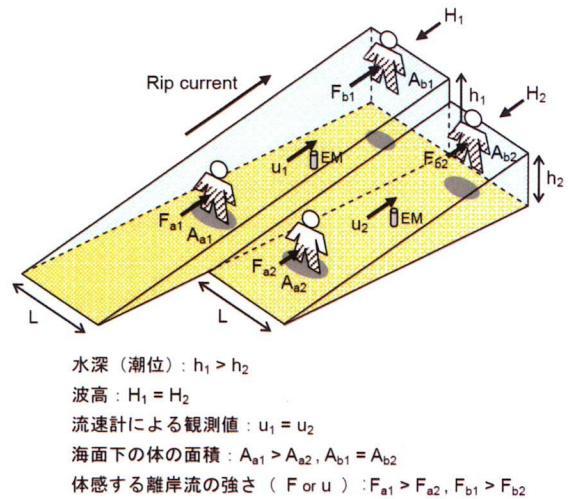


図-14 調査結果のイメージ

下のように整理できる。

- ① 水難者は、沿岸流から離岸流につながる一連の流れによって岸近くから沖合へ流される。ここで、水難者は岸から離れた時点で自分が流されていることに気づくことが多く、陸側に戻ろうとするが離岸流により戻れずにパニックに陥り、体力を消耗し、水難事故につながる。
- ② 対象海岸のように港や離岸堤など構造物が周辺にある場合、構造物周辺の局所的な流れが水難事故を助長する。
- ③ また、離岸堤背後では、波高は小さくても離岸堤群の開口部に向かう流れが発生することがあり、海岸利用者自身による波高の視認情報と安全性が一致しないことが水難事故につながる。
- ④ このほか、水難事故は浮き輪などフロートを使用した場合に流されやすく、波流れのほかに、吹送流（陸風）の影響によりリップヘッドよりも沖合に流される事例も多い。

6. 今後の課題

海岸法改正を受け、これからの海岸保全には、「環境」や「利用」にも配慮していく必要があるが、利用に配慮した施設設計について、具体的な要求性能（基準や設計指針）、照査方法（検討方法）はないのが現状である。例えば、本調査の対象海岸の結果では、同程度の波高、流速でも水深が大きくなることで水難者は離岸流を強く感じ、かつ移動速度も速くなるという結果が得られた。これは言い換えれば同じ流速でも深さにより危険度が変わるということを示唆している。つまり海岸利用の安全性照査において、平均流速により指標を設定する場合は、水深との対応を考慮する必要がある。また、子供や大人など体型によっても危険度が変わるため、人間工

学的な考え方も入れる必要があろう。以下に、本研究により得られた知見を参考に、海岸工学における課題を述べる。

a) 保全施設への要求性能

施設による海岸保全と安全な海岸利用の場の提供はトレードオフの関係にある。例えば、前述したように、水難事故の要因のひとつとして、波高が小さいが循環流が発生している離岸堤背後では、海岸利用者自身による波高の視認情報と安全性が一致しないことが挙げられた。しかしながら、海岸保全上トンボロの形成を図る場合は、循環流の発生が望ましく、循環流の発生を抑えることは保全機能の低下につながる。

海岸の安全利用に関する保全施設の要求性能を検討するには、対象海岸の特性、水難事故のメカニズムを把握することが必要である。現地では、新聞記事になるような死亡事故等の重溺事故以外に、安全移送（自ら安全な位置や浜に移動することができない者の移送）等の事故が多く発生している。課題解決の方策のひとつとして、例えば、ライフセーバーが記録しているレスキューログやパトロールログを海岸工学的な視点から分析し、外力（波・風）と水難事故のメカニズムの関係を把握する方法が考えられる。

b) 外力条件

現在の施設設計における波浪条件は、設計波、年数回波、エネルギー平均波であり、海水浴利用等を考慮した小さい波は考えられていない。また、海岸利用を考慮した流速について、基準書等に明確な指標等は示されていない。設計において参考になる安全性に関する資料は、例えば、「ビーチ計画・設計マニュアル改訂版」⁴⁾がある。これによれば、海水浴可能波は0.5m、遊泳可能流速は0.2～0.3m/s以下と提案されているが、本調査での離岸流体験より0.2～0.3m/s程度の離岸流であっても、流れに逆らって岸に戻ることは困難であった。波流れを総合的に評価した指標や、海岸特性を考慮した指標が求められる。

c) 解析・設計手法

侵食対策や高潮対策のための海岸構造物の検討においては、現状では、構造物を設置することによる波浪・海浜流の平面的な変化による地形変化への影響という観点から、年数回波の条件で構造物設置前の測量成果より作成した現地形に構造物を配置した場合の計算を実施しているのが一般的であり、利用への配慮という観点ではほとんど検討されていないのが実情である。一方、実際の海浜事故が静穏時および高波浪時ともに発生している現状を考えれば、海域利用を図る海岸では、入射波浪の小さい条件で

も流れの計算を行い、海域利用上注意が必要となる0.2m/s以上の流れの発生状況を設計の段階で確認しておくべきと考えられる。

7. おわりに

本研究では、研究者、実務者と海岸利用者が連携した現地調査を行ったことで、より現地海岸の状況に即した調査を行うことができ、研究者、実務者においては現地の状況を体で感じることで離岸流に対する理解が進んだ。今後も研究者と実務者の連携による多様なフィールドでの調査機会を設けていき、そこで得られた調査結果等を反映して、利用に配慮した施設設計における要求性能、その性能を照査する方法などについても検討を進める予定である。

また、調査で確認できた対象海岸の沿岸流や離岸流による特徴的な流況に対して、現地のライフセーバーは経験と体感によりその流れを把握しながらライフセービング活動を行っており、海水浴場の適切な管理体制が実現されているようであった。

謝辞：本調査は土木学会海岸工学委員会・沿岸域研究連携推進小委員会の活動の一環として行ったものである。現地調査では、筆者ら以外に（独）港湾空港技術研究所の栗山善昭氏、国土技術政策総合研究所の加藤史訓氏、パシフィックコンサルタンツ（株）の五味久昭氏、（株）INAの佐々木崇雄氏、（株）建設技術研究所の細井寛昭氏、日本ライフセービング協会の風間隆弘氏、そして地元相良サーフライフセービングクラブの副代表名取芳和氏をはじめライフセーバーの方々、地元サーファーの方々に参加して頂き、海岸の安全利用と海岸保全施設の設計や管理上の課題などについて活発な意見交換を行った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 西 隆一郎：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。
- 2) 西 隆一郎・マリオ・デ・レオン・村井弥亮・高江洲剛・古賀幸夫：リーフカレントによる事故状況と海浜の安全利用，海洋開発論文集 第23巻，pp.673-677, 2007年。
- 3) 須賀堯三，上阪恒雄，吉田高樹，浜口憲一郎，陳志軒：水害時の安全避難行動（水中歩行）に関する検討，水工学論文集，第39巻，pp.879-882, 1995年。
- 4) 社団法人日本マリーナ・ビーチ協会：「ビーチ計画・設計マニュアル改訂版」，p. 229, 2005。