

水難事故予防のための離岸流調査に関する基礎的研究

西 隆一郎* ・萩尾和央**・山口 博***
岩根信也****・杉尾 毅*****

新海岸法では、[保全・環境・利用] が重要なキーワードとなり海域利用者の安全確保に積極的に関わる必要がある。そこで、現地海岸での現実的な離岸流予測に関する基礎的調査を、鹿児島大学と第十管区海上保安本部により実施した。その結果、ヘリコプターを用いた離岸流探査の有効性が示された。また、流況を把握するために小型 GPS センサー付きフロートを作成しこのフロートを携帯することで、遊泳者の漂流経路および漂流速度の定量化等が可能であることが示された。さらに、今回現地観測を行った離岸流は、地形の三次元性に起因するものであることが分かった。

1. ま え が き

沿岸域では沖に向かう流れを一般に離岸流と呼ぶ。沿岸域では、毎年この離岸流に起因した水難事故が多数発生する。離岸流は、第二次世界大戦時のスクリップス海洋研究所での研究（例えば、バスカム（1977）参照）を契機に、1980 年前後には海岸環境工学研究センターを中心として実験的・理論的展開（例えば、佐々木，1976；水口，1980）が進展した。ただし、我が国の海浜流研究は、海岸保全や港湾建設等を主目的とし、離岸流に関する知見を海域利用者の安全のために応用する試みは少ない。しかし、新海岸法では、[保全・環境・利用] が重要なキー・ワードとなり、海域利用者の安全確保に関しても積極的に関わらざるを得ない(例えば、Engle, 2002)。

水難事故を予防するには、離岸流に入らないことが重要で、例えば、小峯（2002）、出口（2003）の様に啓発教育が必要となる。言い換えれば、沿岸域全体で離岸流が発生しやすいような場所を何らかの方法で簡便に探知できる手法を、一般の人々を対象に開発する必要がある。次いで、離岸流に遭遇した場合の対処法を啓発する広報プログラムが必要である。また、同時に離岸流特性を詳細に調査する必要がある。そこで、離岸流による水難事故死をできるだけ低減することを目標として、現地海岸での現実的な離岸流予測に関する基礎的調査を、鹿児島大学と第十管区海上保安本部により実施した。本論文では、水難事故予防に役立つ予報システム構築の端緒として、第十管区海上保安本部担任水域内で得られた離岸流域探査法、流速分布、海底地形との関連性等について述べる。

2. 調 査 方 法

本研究で用いた調査法を列記すると以下のようになる。

(1) ヘリコプターによる離岸流（域）探査；海岸線を

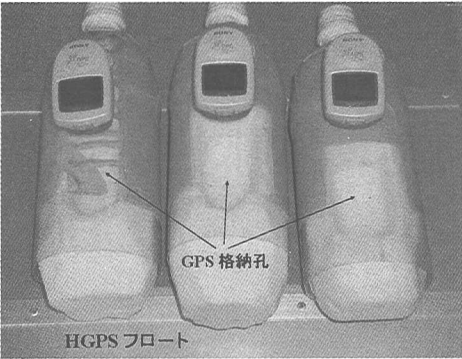


写真-1 鹿児島大学式小型 GPS フロート

ヘリコプターで飛行し、目視、写真撮影およびビデオカメラによる画像撮影を行う。

(2) フロート観測；視認しやすい蛍光塗料を塗布したフロートを多数流し、流れの位置や規模を視覚化し、以降の観測の基礎資料とする。また、フロートをビデオカメラで撮影し、広報用画像の取得を行う。

(3) 小型 GPS フロート観測；フロートの中に小型の GPS を内蔵させ、流況を簡便に数値化させる。流況観測に GPS を用いることで、空間的な拡がりを持つ平面流速場が計測でき、フロートの軌跡が空間座標値として直接求まる。本研究で使用される GPS は、Sony 社製の Handy GPS (PCQ-GPS3S) (写真-1 参照) である。

(4) 漂流観測；観測者が離岸流に流され、離岸流遭遇時の状況を実体験する。水難事故予防の観点から、離岸流付根、離岸流内、離岸流頭、向岸流内それぞれの状況を人間の感覚で確認する。なお、漂流者は小型 GPS を携帯し、漂流経路および速度を定量化する。

(5) 流速場の定点観測；離岸流にアレック社製 ADCP と AWAC、アイオーテック社製超音波式波高計を設置し流れの様子を調べた。

3. 現 地 観 測

平成 14 年 6 月と 7 月に薩摩半島西岸の吹上浜で、そして、平成 14 年 9 月と 10 月に宮崎市青島海岸で現地観測

* 正会員 博(工) 鹿児島大学工学部助教授海洋土木工学科
** 復建調査設計株式会社環境技術部
*** 鹿児島大学大学院理工学研究科
**** 第四管区海上保安本部海洋情報部長
***** 第七管区海上保安本部海洋情報部

を行った。また、9月6日には、第十管区海上保安本部鹿児島航空基地所属のヘリコプターを用いて、宮崎県と鹿児島県の海岸線で離岸流探査を行った。なお、本論文では主に青島海岸の観測結果について述べる。

(1) ヘリコプターによる離岸流探査

数百 km におよぶ長い海岸線で離岸流予報を行う場合、ヘリコプター等による上空からの離岸流探査が最も有効である。ただし、パイロットは通常、離岸流探査の訓練を受けていないので、ヘリコプターを用いた今回の探査は、パイロット向けの教材として今後用いる資料収集も兼ねている。飛行コースは、鹿児島空港を出発後、青島海岸上空を複数回飛行し日南海岸を南下、その後、志布志湾岸を複数回飛行して大隈半島と鹿児島湾を横断し、指宿上空から薩摩半島の吹上浜南端の小港漁港付近に飛来し、吹上浜を北上した。さらに鹿児島市上空を経由し鹿児島湾奥海岸を探査して、鹿児島空港へ帰投した。

観測当日は、青島海岸および志布志湾岸では比較的高く砕波の波峰線や流れが視認しやすく、一方、東シナ海に面する吹上浜では波が比較的静穏で浅海域の海底地形が認識しやすかった。写真-2と3に、ヘリコプター



写真-4 観測地海岸の様子

探査により離岸流の発生箇所としての可能性が高いと判断された代表的な箇所のビデオ画像が示されている。

(2) 青島海岸の概要

天然記念物に指定されている青島より約2 km 北の海域で、現地観測を行った。青島海岸は遠浅でうねり性の波が来ることからサーフィンの盛んな海岸で、9月の観測日にも多数のサーファーが、サーフィンやボディボードを楽しんでいた。

写真-4に示すように、事前のヘリコプター探査で青島海岸北部に非一様で一部が波抜けする砕波帯が確認され、離岸流が発生し易いリップチャンネルと判読されたので、この海岸を観測地とした。また、調査地背後地の橋梁高さも充分にあるので、三脚に固定したビデオカメラを直接橋梁の上に設置し、ビデオ撮影が可能であった。

(3) 青島海岸での1回目の現地観測(9月8日~10日)

(a) フロート観測実験

海浜流の存在を確認するために、GPS 無しフロート投入を行った。観測用フロートは、500 ml ペットボトルに赤色の蛍光塗料を塗り、鉄の錘を下面に付けたもので、約70個準備した。このフロートを流し、海浜流の有無及び流況を確かめ、移動状況を撮影し概況把握を行った。このデータを、その後のHGPSフロートの投入地点の決定等に使用した。投入した多くのフロートは離岸流に乗り、いったん沖方向に流され、その後、投入地点より約50 m 南に離れた所に打ち上げられる傾向があった。ただし、一部は循環流に再度捕捉され、また少数のフロートは沖に移動し続け最後は視認できないものもあった。実際、水難事故死者の遺体が波打ち際で見つかるのは循環流(向岸流)で岸向に移動し最終的に打ち上げられた場合で、外洋で見つかるのは海浜流系から沖合に放出され、海流に乗るためかもしれない。

(b) 漂流観測実験



写真-2 突堤付近のリップチャンネル

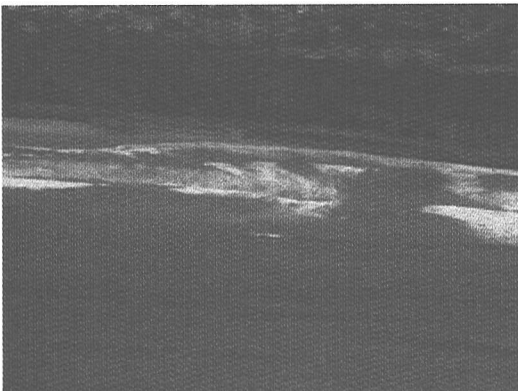


写真-3 自然に形成されたリップチャンネル

フロート観測により離岸流の発生を確認できたので、漂流実験を引き続き行った。実験は、ライフジャケットを着用した観測者(2名)が、HGPS付フロートを携帯し、離岸流発生箇所まで歩き、およそ腰から肩の辺りまで入水すると離岸流に捕捉され、離岸流頭まで流された。また、観測者2名は数分間隔で入水し漂流した。観測当日の波浪予報は約1.5mの予報値であったが、現地での目視では2m以上の波がしばしば継続した。なお、観測地点沖合には海上保安庁所属の測量船いそしが停泊し、砂浜には監視員を待機し緊急時に備えた。

図-1は、漂流経路を示す。2名とも別の地点でいったん離岸流頭の左側に移動しそうになったことを除くと、2名夫々の漂流経路はほぼ一致しており、2名とも同じ離岸流に流されていることが分かる。離岸流からの帰還は、地元サーファーの補助を受けサーフボードを波乗りさせながら行った。帰路はほぼ同じであり、2名の漂流者およびサーファーは夫々向岸流を利用し浜に着いている。この観測例では漂流者2名とも入水し約20分で元の地点に帰ってきている。フロリダ大学Dean教授によれば氏も離岸流に遭遇し、その時には流れ始めてから約6-7分で浜に辿り着いたとのことであった。

図-2は、漂流時15秒平均の平均流速分布を示す。漂流者の移動平均速度は、それぞれ0.74(m/s)、0.61(m/s)である。なお、離岸流付根付近から離岸流頭までは必ずしも様な流速ではなく、流速が局所的に速い箇所は

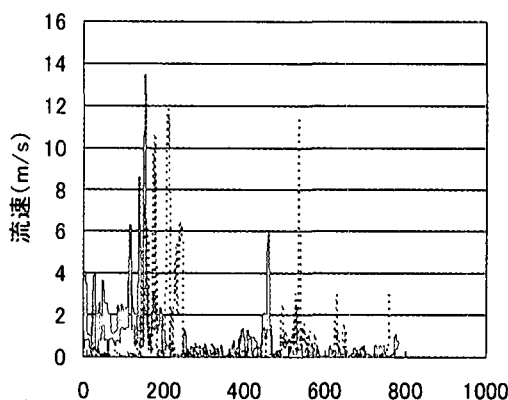


図-2 漂流流速分布 (横軸は15秒間隔のデータ番号)

リップチャンネルの断面積が狭いなどの要因が効いていると思われる。また、離岸流頭手前付近(測定番号300前後)においては、平均流速が一見小さいように見える。これは、漂流者が完全に砕波帯を抜けて沖に出ていないと、砕波に巻き込まれたり波乗りして岸向きに瞬間的に移動するが、波の谷の通過時に離岸流により沖に押し戻され、結果としてジグザグ運動をするためである。そのために、波が比較的高いと水平方向にも、鉛直方向にも漂流者の運動は大きく体力の消耗が激しい。加えて、今回の海象条件では砕波による波乗りのために砕波帯を抜けて沖の離岸流頭まで完全に到達できず、その結果、離岸流に逆らわず沖側へ流されても、沖で溺れる可能性があることも分かった。

漂流実験で観測された強い離岸流からの自力での脱出は困難であり、離岸流が水難事故の原因となることが漂流者により実感された。離岸流遭遇時の状況は、水難事故予防のための広報活動上重要であるので、以下に大学の泳部員であった漂流者No.2の体験談を記す。

「流れ始めた最初の時点では、(リップチャンネルの中で波が砕波しないために)陸も見え流されているという実感があった。しかし、(沖側と陸側の2段砕波帯の間に流されたために)すぐに陸が見えなくなり、(沖で待機する)船も見えなくなった。自分が流されているのかも分からなくなり、頭上で波が砕けると、波に飲まれてしまい、上下左右の感覚がなくなり一瞬パニックに陥った。離岸流頭手前付近(後でデータを見て判明)は、ちょうど大きい波の砕波点になっており、砕波の直前には足が着くのだが、すぐに波に飲まれてしまいほとんど身動きがとれなかった。図-2のデータを見ると、およそ10分間の間沖で漂っていたことが分かる。その後、陸の方角に見当をつけ泳いでいると、サーファーに出会ったので、陸までサーフボードにしがみついていた。陸にいた他の観測者たちが心配して、地元のサーファーに救援

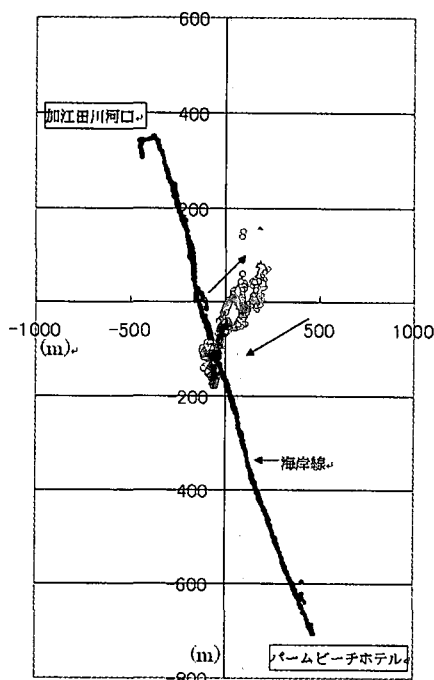


図-1 HGPS フロートを携帯した漂流者の移動状況

を頼んだとのことである。しかし、漂流者は二人とも同じ経路を辿って帰ってきており、自分では泳いで帰ってきたつもりであるが偶然向岸流に乗っただけである可能性もある。そうだとすれば、もし監視者がいなく、この向岸流に乗らなければ、水難の可能性も考えられる。この経験を通し、離岸流に流される危険性を強く感じた。」

(4) 青島海岸でのHGPSを用いた現地観測(10月4日)

漂流観測法による離岸流のデータ取得は大変危険であり、漂流者がHGPSフロートを携帯する方法では、効率的に離岸流データを取ることが困難であった。そこでHGPSセンサー付のフロートに、市販の釣り糸(6~8号)および伸縮率約400~500%のクッションを付け、安全な場所からHGPSフロートだけを流す手法を用いた。観測は、ライフジャケットを着用した観測者が腰の深さまで入り、流れが発生していると思われる箇所にHGPSセンサー付きのフロートをゆっくり投入する作業を繰り返した。図-3にHGPSフロートの漂流経路を、図-4には循環流パターンを示す移動状況を、図-5には移動速度を示す。

図-3では、二つの離岸流が補足され、その間隔は約450 mである。なお、漂流実験時に比べ、この実験中は比

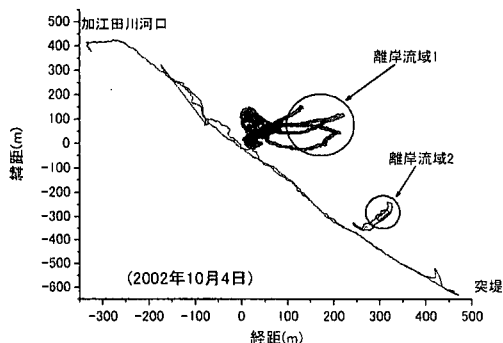


図-3 HGPSフロートの累積移動経路

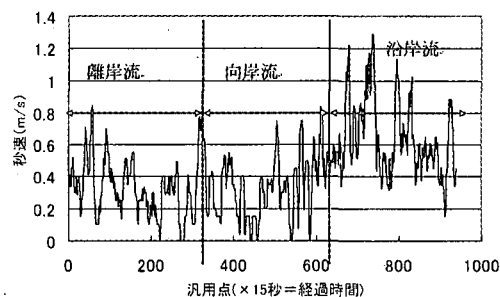


図-5 フロートの移動速度例(循環流パターン時)

較的波が穏やかで、得られた流速も若干小さめである。循環流パターンを示したケースでは、離岸流域で平均流速が約0.34 m/s、最大流速が約0.85 m/s、向岸流域で平均流速が約0.34 m/s、最大流速が約0.85 m/s、そして、沿岸流域で平均流速が約0.64 m/s、最大流速が約1.30 m/sであった。フロートの一部は、沖に行き過ぎて引き戻したのももあり、沖側にも循環流が存在する可能性を示した。

4. 青島海岸の海底地形と海浜流況の検証

青島海岸における離岸流は、平面的な碎波パターンから地形性の離岸流であると考えられた。そこで、本海域の深浅図を宮崎県土木部より提供していただき、海浜流との関係を検討した。図-6では、X軸800 m~900 m付近および、1,250~1,300 m付近にリップチャンネルがあることが分かる。そして、この部分が図-3の離岸流発生箇所と対応している。また、リップチャンネルの規模も離岸流規模の小さい右側(南側)のリップチャンネルの方で小さい。よって今回の離岸流は海底地形に強く依存したものであることが分かる。

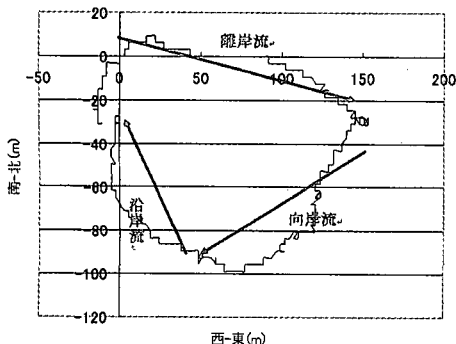


図-4 フロートの移動状況(循環流パターン)

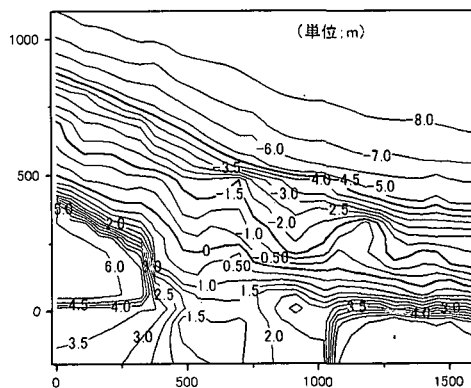


図-6 調査地域の海底地形(宮崎県土木部提供)

5. 結 論

本研究では、以下のような結論が得られた。

(1) ヘリコプターでの離岸流探査、現地踏査による裏づけ、また、各種フロートによる離岸流観測がシステムティックに実施できれば、水難事故予防上最も重要な離岸流発生箇所の特定が可能であることが示された。

(2) 本研究で使用した HGPS フロートは、値段も比較的安価で作成も簡単であるために、海岸工学の知識のない一般市民あるいは海岸管理者であっても容易に使用でき、海浜流の概況を把握する上で非常に有効であることが示された。

(3) 漂流観測から、離岸流に遭遇しても循環流を捉えることができれば数分～数十分で浜に達することが分かった。また、離岸流に逆らわず沖に移動しても、波が高いと砕波による巻き込み等が原因で溺れる可能性もあることが分かった。

(4) 漂流実験時の平均移動速度は、それぞれ 0.74 m/s, 0.61 m/s であったが、離岸流内の位置により流速が大きく異なり、最大で 3 m/s 以上の流速が観測された。

(5) 今回観測された離岸流は、基本的に地形の 3 次元性 (リップチャンネル) に起因したものであった。

本研究は、離岸流探査という意味では水難事故予防に役立つ結果が得られた。しかし、リップチャンネルおよび離岸流発生箇所を特定するには詳細な海底地形を短期間に取得することが望ましく、このためには、MacMahan (2001) の様な測量システムの整備が我が国でも今後必要であろう。また、標高の高い所にカメラを設置できるようであれば、鈴木ら (2002) のようなシステムを用いて、リップチャンネル位置を画像からとらえることも可能であり、システムの低価格化が望まれる。さらに、現地観測では、浅海域の海底地形の 3 次元性による砕波状況の空間的相違に起因した平均水位の勾配は、干潮時の方が明瞭であるように感じられた。この点に関しては、例えば、Haas ら (2002) の様に水位観測用 well (井戸) を用いて平均水位の勾配を測り離岸流の特性を明らかにする必要があると感じられた。なお、現状では離岸流がいつでもどれだけの強さで生じるかということに関し定量的な結果を得るところまでは到らなかったが、本研究は今後 3 年間継続する予定であり、その中で離岸流の物理的特性を定量化することを目的の一つとしている。

謝辞：本研究を実施するにあたり、ヘリコプターを用いた離岸流探査にご協力いただいた鹿児島航空基地所属の櫻山飛行長を始めとする搭乗員の方々、現地の深淺図を提供していただいた宮崎県土木部、現場写真を屋上から撮らせていただいたパームビーチホテルの関係諸氏、さらに現地観測にご配慮いただいた地元漁協関係者の皆様に紙面を借りて深湛の謝意を表させていただきます。また、困難な現地観測にご同行いただいた第十管区海上保安本部海洋情報部の関係諸氏、ならびに鹿児島大学工学部海洋土木工学科環境システム工学講座の (元) 4 年生諸君、そしてフロート作成に協力していただいた中村和夫技官に紙面を借りて謝意を表させていただきます。加えて、米国における離岸流観測の実情に関しては、フロリダ大学 Dean 教授および Kennedy 博士にご教示いただき、紙面を借り感謝させていただきます。最後に、本研究は鹿児島大学学長裁量経費の補助の一部を受けたものであることを記しておきます。

参 考 文 献

- ウィラード・バスカム著 吉田耕造・内尾高保訳 (1977): 海洋の科学—海面と海岸の力学—, 288 p.
- 小峯 力 (2002): 海岸安全管理における生命教育の有効性—ライフセービング・マネージメント—, 波となぎさ No. 154, pp. 42-45.
- 佐々木民雄 (1976): 海浜変形予測手法の研究現況調査報告書, 海岸環境工学研究センター, 153 p.
- 鈴木高二郎・高橋重雄・山縣延文・堀田 治・栗山尊昭・Stefan Aarninkhof・Gerban Ruessink・Irv Elshoff (2002): ARGUS ビデオ解析による宮崎住吉海岸の長期地形観測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 571-575.
- 出口一郎 (2003): 海の中の波と流れ, 水路新技術講演集, 第 16 巻, pp. 31-52.
- 水口 俊 (1980): 海浜循環流のメカニズムに関する基礎的研究, 海岸環境工学研究センター, 115 p.
- Engle, J. A. (2003): Formulation of a rip current forecasting technique through statistical analysis of rip current-related rescues, a thesis for the degree of master of science, University of Florida, 72 p.
- Haas, K. A., I. A. Svendsen, R. W. Brander, and P. Nielsen (2002): Modeling of a rip current system on Moreton Island, Australia, Proc. of the 28 th Int. Conf. On Coastal Engineering, pp. 784-796.
- MacMahan, J. (2001): Hydrographic surveying from personal watercraft, Journal of Surveying Engineering, Vol. 127, No. 1, pp. 12-24.