

離岸流場において安全に活動するための指標の提案

水圏防災研究室 難波 悠太
指導教官 犬飼 直之

1. はじめに

我が国の海水浴場における水難事故の約 46%が離岸流によるものである。離岸流は現地での見極めが困難なことから水難事故の大きな原因となっている。

本研究グループでは山下らが波高変化における離岸流流速の推算式を作成し、推算を行った。推算式では、0.2 m/s 程の弱い離岸流はほとんど評価が行われていなかったが、銭函海岸の事故事例から、弱い離岸流でも事故が発生していることが確認された。また、事故地点の水深は、足が届く程度の水深であったことから、離岸流による水難事故を考える際は、弱い離岸流に加え、浅い水深での事故発生メカニズム等から原因を追究することで水難事故防止に寄与する知見を得ることができると考えた。

そこで、本研究では小さな離岸流で事故が発生するメカニズムおよび原因の検討、救助や調査で実際に入水する場合、どの程度の波高時までなら入水しても安全かを定量的に検討することを目的とした。それ以外では、蓄積された離岸流の観測データから離岸流流速推算式に用いるパラメーターを算定し直し、より精度の高い推算式を作成することを試みた。

2. 現地調査による漂流時の視覚変化の把握

水難事故発生の原因の 1 つに漂流時における距離感の喪失がある。本研究では実際に離岸流に漂流されることで漂流者から見た岸方向の景色の変化を把握した。

2.1 調査時の海象および調査方法

調査は 2019 年 7 月 9 日午前 11 時に石川県河北郡内灘町内灘海水浴場で行った。調査当日の海象は Nowphas 金沢港のデータをより、有義波高 0.32m、周期 5.2 秒、波向き NNW であり、穏やかな海象であった。

調査は、まず離岸流発生場所を把握するため、海面着色剤で離岸流を可視化し(図 1)、UAV で空撮した。離岸流発生場所を確認した後、GPS 機能付きビデオカメラをヘルメットに装着して実際に離岸流に流されることで、漂流者視点の景色の変化を確認した。

2.2 調査結果

漂流される調査の概要図を図 2 に示す。漂流開始後 5 分 40 秒の間に 73m 沖へ流された。この時の離岸流速は平均して約 0.21m/s であった。また、漂流後、岸方向に 15 秒間ずつフィンキックを行った際の移動速度は 0.6m/s であった。

図 3 に漂流時の景色の変化を示す。図 3 より 105m 沖の地点から約 40m 岸に近い 68m 地点での景色は大きく変わらないことが確認された。このことから、漂流時には距離感の喪失が起り、体力を消耗することで溺水につながるということが考えられる。

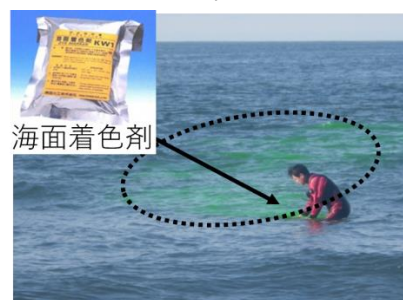


図 1 海面着色剤散布の様子



図 2 漂流される調査の概要図



図 3 漂流時の景色変化の様子

3. 数値解析による銭函海岸での事故発生時の水面挙動の把握

3.1 事故概要

平成 29 年 8 月 27 日に北海道石狩湾内の小樽市に位置する銭函海岸において、高校生 3 人が沖に流される事故が発生した。事故は 11 時 00 分頃に発生し、身元は海岸から約 250 メートル沖合にある消波ブロック周辺で発見された。3 人がおぼれたのは岸から 100~150m 沖と見られている。当時、波の高さは 1m であった。事故が起きた海岸の地形はカスプ地形を擁し、前面に離岸堤が複数設置しているのが特徴である。

3.2 方法

事故発生時の水面挙動の把握を行うため、非線形波浪変形モデル「NOWT-PARI Ver4.6 β (Nonlinear Wave Transformation model by PARI)」を用いて、数値解析を行った。また、計算で使用する地形データは、現地海岸での測量成果、海象条件は NOWPHAS 石狩新港の波浪データを使用し、計算条件を設定した。表 1 に計算条件、図 4 に地形データを示す。

また、推定事故発生場所の水面形把握を行う際に、汀線から岸沖方向 140m の位置に 2 つの離岸堤中心付近を基準点として結んだ沿岸方向約 240m の間に出力点 50 個を設置した。

3.3 結果

図 5 に計算により得られた水位図を示す。離岸堤開口部より入射した波が、離岸堤の背後で回折波と重なることで細かな波形が形成されることが確認された。また、離岸堤の前面では、反射波の影響により水位が高くなることが確認された。

図 6 に計算終了時刻から 6s 前までを抜粋した 1s 毎の汀線から 140m に位置する水位変動図を示す。図から離岸堤開口部付近では、入射波の影響により、水位変動は約 0.9m となった。一方で、事故が発生したとされる離岸堤背後付近での水位変動は約 0.5m となった。

表 1 計算条件

| | |
|-----------------------|------|
| 有義波高 $H_{1/3}$ (m) | 1.08 |
| 有義波周期 $T_{1/3}$ (s) | 5.2 |
| 波向き | NNW |
| 格子サイズ(m) | 1.0 |
| 計算時間間隔 Δt (s) | 0.02 |

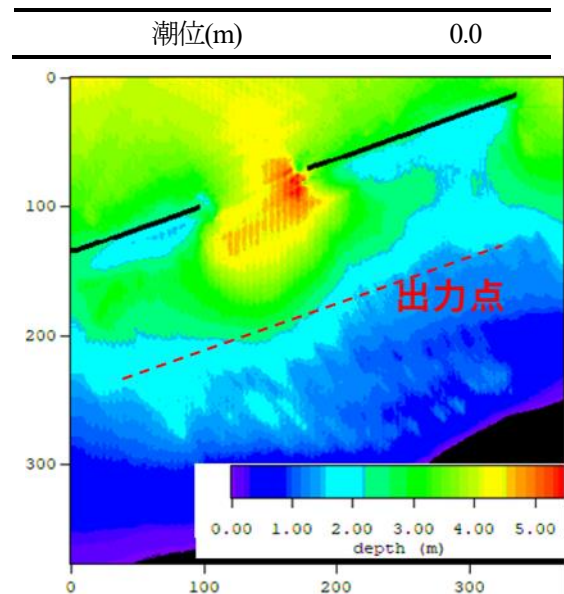


図 4 銭函海岸の地形データ

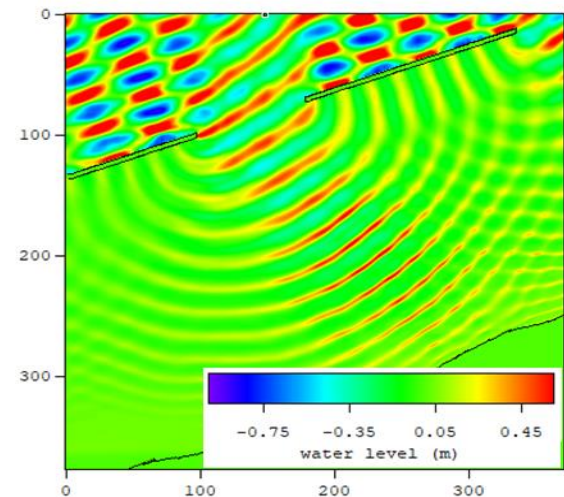


図 5 水位図

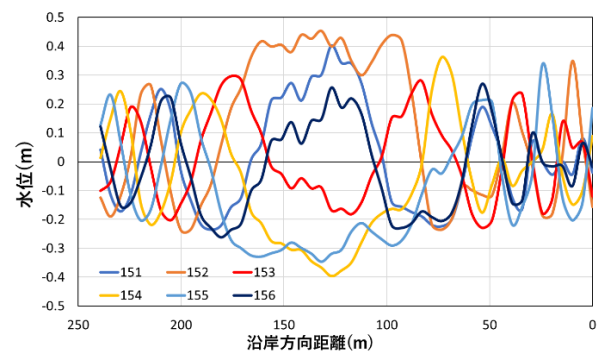


図 6 水位変動図

3.4 考察

事故発生地点付近では複数の離岸堤から形成され

た回折波が合成される地点であり、数値計算によって複雑な水位変動が起こることが判明した。回折波同士が重なり合うと、周期が乱れるばかりでなく、重なりによって波が盛り上がる。事故発生地点のように最大水深 1.5m であった地点が水深 2.0m に達することもあり得る。

また、足がギリギリ届かなくなる水深では溺水者は立ち泳ぎに近い状態で手掻きだけで流れに逆らおうとするため、小さい流速の沖向きの流れにも逆らえないことが考えられる(図7)。さらに、このような場所では海岸線から沖へ数十メートルの場所であり、流れに逆らおうとしても距離感が分からず、実際に戻れているかどうかを把握することは困難だと推測され、距離感の喪失によって体力を消耗してしまう可能性も高い。

4. 立ち泳ぎ・つま先立ち時の遊泳速度測定

数値解析の考察結果から、水中で実際に立ち泳ぎ・つま先立ち時には、どの程度流速までなら抵抗することができるか定量的に把握した。

4.1 測定内容及び方法

測定は海水浴中に考えられる遊泳方法として、①歩き+手掻き、②立ち泳ぎ(足を屈めた手掻き)、③自由形、④フィン+シュノーケルを着用の4種で行った。測定は水深 1.4m の室内プールで、約 10 年水泳経験のない男子学生 2 名で行った。測定の様子を図8～図11に示す。

4.2 測定結果

測定者 2 名の遊泳速度を平均した結果、①歩き+手掻きの平均移動速度は 0.42m/s、立ち泳ぎ(足を屈めた手掻き)は 0.25m/s、③自由形は 0.41m/s、④フィンとシュノーケルを着用しての自由形は 0.58m/s となった。

4.3 考察

遊泳速度の測定結果から、足がギリギリ届かなくなるほどの水深で、手掻きによる移動では 0.25m/s 程度までの離岸流に逆らって移動することができ、沖に流された際の自由形による移動では、0.4m/s 程度の離岸流に逆らって泳ぐことができるということが推察された。また、調査時などにおいてフィンとシュノーケルを着用している際は、0.58m/s 程度までの離岸流であれば逆らって泳ぐことが可能である。

5. 離岸流流速の推算式の精度の向上

5.1 離岸流流速の推算方法

本研究では、沿岸流が離岸流と沿岸流に分岐する概念(式(1))を参考に山下らが作成した離岸流流速

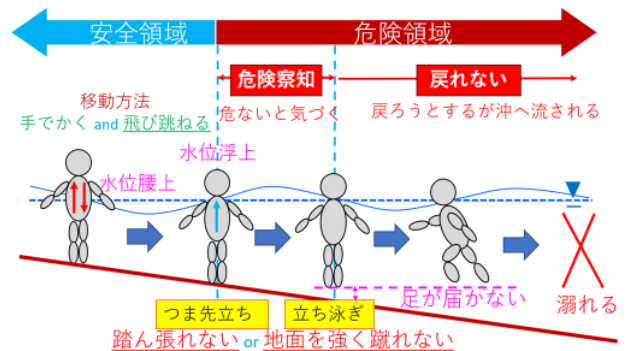


図7 水難事故発生のメカニズム



図8 測定の様子(① 歩き+手掻き)



図9 測定の様子(② 立ち泳ぎ)



図10 測定の様子(③ 自由形)



図 11 測定の様子(④ フィン+シュノーケル着用)

の推算式で用いるパラメーターを、従来よりも多い 18 ケースの観測値から算定し直し、より精度の高い推算式を作成した。式(2)に離岸流流速の推算式を示す。

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{rip} \quad (1)$$

$$U_{(x)} = p \left(\frac{w_{in}}{w_{rip}} \right) \left(\frac{h_l}{x \times \tan\beta} \right) v_{in} \quad (2)$$

ここに、 V_{in} :沿岸流流速、 W_{rip} :離岸流幅、 p :分配率、 W_{in} :分岐前の沿岸流幅である。なお、海底勾配 $\tan\beta$ については現地での測量結果を用いた。測量成果がない海岸では、着色剤散布地点の水深を 0.8m とし、汀線からの離岸距離から算定した。いずれも、一様勾配として計算を行う。

沿岸流流速 V_{in} は Komar and Inman の式(3)を用いた。

$$V = 1.17 \sqrt{gH_{1/3} \sin\alpha \cos\alpha} \quad (3)$$

ここに、 g は重力加速度(9.8m/s²)、 $H_{1/3}$ は有義波高(m)、 α は沖からの波の入射角(°)である。有義波高は Nowphas 波浪データを使用し、波の入射角は離岸流事故事例の多い NNW とした。離岸流幅 W_{rip} は UAV で撮影した映像から、作成した波高変化における離岸流幅の経験式(図 12)を使用した。また、分配率 p は現地調査で離岸流と分岐後の沿岸流が同時に観測された 3 ケースの分配率の平均値 0.469 を使用した。分岐前の沿岸流幅 W_{in} は、観測値から作成した波高変化における離岸流流速の経験式(図 13)より、離岸流幅 W_{rip} を求めた後、平均分配率 0.469 から分岐後の沿岸流幅 W_{out} を求め、式(1)の概念から算出した。

5.2 推算結果

図 14 に海岸の種類ごとにおける離岸流流速観測値と推算値を示す。本研究では従来よりも多くの観測データから推算式のパラメーターを再算定したことで、観測値に近い推算値となり、推算式の精度が向上したと考える。

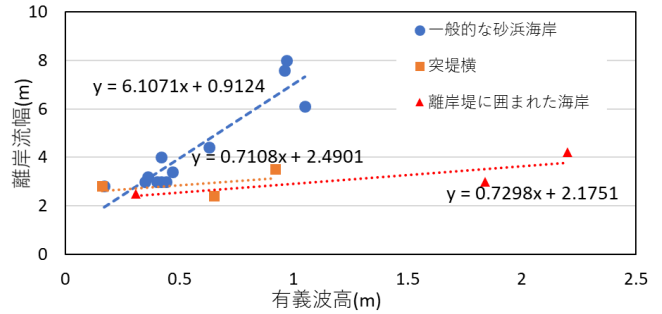


図 12 波高変化における離岸流幅の経験式

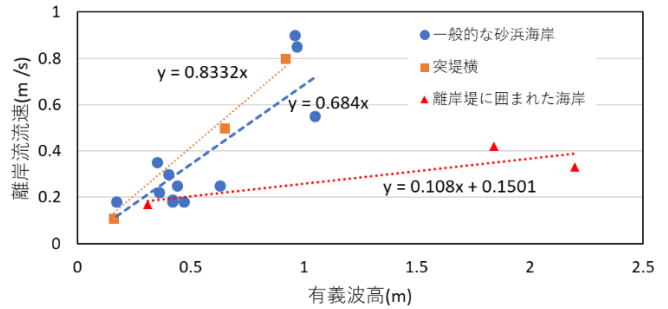


図 13 波高変化における離岸流流速の経験式

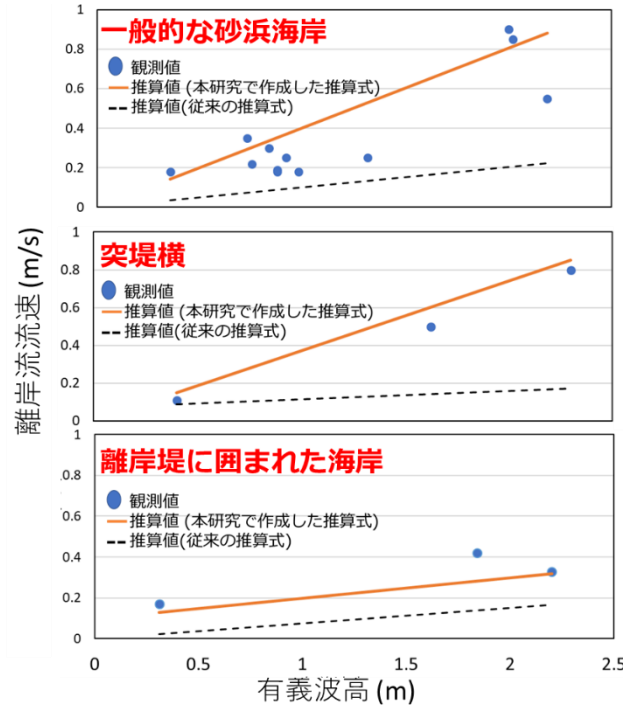


図 14 離岸流流速の観測値と推算値

6. まとめ

遊泳速度の測定結果と波高変化における離岸流流速の観測値による経験式から図15のような指標を得た。

以上のことから、実際に入水して水中を移動する際の移動速度および安全に遊泳可能な波高を定量的に把握することができた他、漂流した際の景色の変化についても離岸距離別に把握することができた。また、海底勾配が既知の海岸においては、波浪条件から離岸流流速を推算することが可能となったため、離岸流場で安全に活動する為の知見を得ることができた。

7. 参考文献

1) 犬飼直之, 南原充, 安倍淳, 木村隆彦, 鈴木直子, 齋藤弘樹, 斎藤秀俊, "2017年8月に銭函海岸の離岸堤付近で発生した水難事故の発生要因の把握", 土木

学会, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 76, No.2, I_1183-1188, 2020.

2) 犬飼直之, 山下晃史, 山本浩, "突堤が設置されたカस्प地形海岸で発生する離岸流の流況把握", 土木学会, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 74, No.2, I_141-I_1416, 2018.

3) (独法) 港湾空港技術研究所: NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網) (オンライン), 国土交通省, 2011, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>

4) 気象庁 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) (2021.1.10 閲覧)

5) (独法) 港湾空港技術研究所: NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網), 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/> (2021.1.10 閲覧)

6) 海上保安庁 (<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/index.html>) (2021.1.10 閲覧)

| | ①歩き+手掻き | ②手掻きのみ (立ち泳ぎ) | ③自由形 | ④フィン+シュノーケル着用 |
|--------------------|--------------|------------------|--------------------------|---------------|
| 人の移動速度 (m/s) | 0.52 | 0.25 | 0.41 | 0.58 |
| 移動速度に対応する波高 (m) | 0.75 | 0.36 | 0.60 | 0.80 |
| 海水浴可能 (波高0.5m) よりも | 高い | 低い | 高い | 高い |
| 評価 | 危険水深でなければ対応可 | 遊泳可でも溺水する可能性 | 遊泳可波高なら対応可→遊泳距離や個人差などの問題 | 遊泳可能波高なら対応可 |

図15 離岸流場で安全に活動するための指標