

# 内灘海岸における水難事故防止のための海浜流の動態把握

水工学研究室 小宮 和樹  
指導教員 犬飼 直之 (細山田 得三)

## 1. 研究目的と背景

近年、沿岸域の土地利用の高度化により海洋性レクリエーションの場として需要が増している一方で、海浜事故も多く死亡事故も発生している。石川県も例外ではなく、中でも内灘海岸で離岸流による事故が多発していることが犬飼ら<sup>1)</sup>の既往研究によりわかっている。そのため、内灘海岸での離岸流関連の事故を防止することを含め、離岸流の発生要因を把握し、海浜流の動態を把握する手法を考案し、水難事故防止の知見に資することを本研究の目的とする。

そこで、本研究は石川県内灘海岸を対象とし(図-1に概要図を示す)、ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)による金沢港沖波浪データと北陸地方整備局金沢港湾・空港整備事務所から提供を受けた波浪観測データから内灘海岸の波浪特性を把握し、金沢港との比較を行い、金沢港の観測データから内灘海岸における波浪特性の推算を行った。

また、ADCPによる地形・流況観測データから内灘海岸の地形的特徴を把握し、流況データから離岸流成分の抽出を行った。また離岸流の発生間隔を特定し、離岸流発生間隔の推算式を用いて実測値との比較を行い、得られた関係式からカस्प地形やリップチャンネルを形成する波浪状況を推算した。最後に内灘海岸のカस्प地形の経年変化の検討を行った。

## 2. 内灘海岸の波浪を推算するための検討

離岸流の発生要因を把握するためには入射する波浪状況を把握する必要がある。しかし、内灘海岸での波浪観測は定常的に行われていないため、近くに位置しているナウファス金沢港沖波浪データから内灘海岸の波浪状況を把握できるよう検討を行った。



図1 内灘海岸の概要

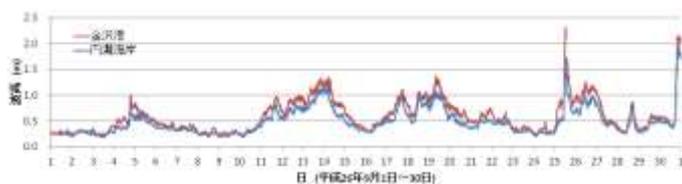


図2 内灘海岸と金沢港の波高経時変化 (平成26年9月1日～30日)

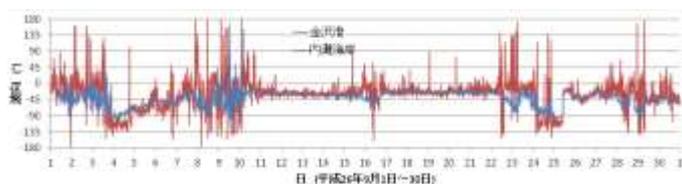


図3 内灘海岸と金沢港の波向経時変化 (平成26年9月1日～30日)



図4 内灘海岸と金沢港(補正後)の波高経時変化 (平成26年9月1日～30日)

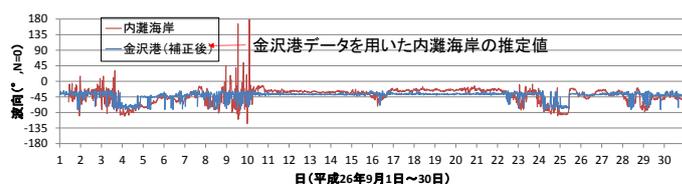


図5 内灘海岸と金沢港(補正後)の波向経時変化 (平成26年9月1日～30日)

まずは内灘海岸の観測データにおける波浪特性を把握した。内灘海岸で平成26年9月1日～30日の間に観測されたデータを用い、同期間の金沢港沖ナウファス波浪データと比較した。図2、図3に金沢港沖ナウファス波浪データと内灘海岸における波浪の経時変化を示す。波高は同様な挙動を示すが、0.5mを超える波高時には内灘海岸の方が小さくなる傾向となった。波向では、北方向からの入射波浪時には同様な挙動を示すものの、西方向からの入射時には内灘海岸では隣接する防波堤による影響で限られた範囲でしか波が入射していなかった。

そこで防波堤の影響を考慮し、金沢港の観測データの補正を行い、内灘海岸の観測データと比較した結果を図4、図5に示す。波高・波向ともに定性的に一致していることから、金沢港の波浪情報から内灘海岸の波浪状況の推算が可能であると考えられる。これにより、金沢港の情報を用いて内灘海岸における離岸流が発生しやすい波浪状況などが推定できるようになったと考えられる。

### 3. 内灘海岸の地形的特徴の把握

図6に航空写真から得られた内灘海岸におけるリップチャンネルの様子と発生間隔を示す。このときリップチャンネルの平均的な発生間隔は約88mであった。また、この海岸ではビーチカスプも形成されており、図7にビーチカスプの様子と形成される間隔を示す。この海岸の平均的な発生間隔は約170mであった。

次に、ADCPによる観測データから内灘海岸の地形的特徴の把握を行った。ADCPとは、超音波を発射し、懸濁物の移動速度に応じて変化した位相を計測することで流速や流向を計測することができる機器である。これまで、ADCPを海底に設置した定点観測は行われてきたが、本研究では、ADCPを水上バイクに搭載し、対象海域全体を平面的に移動しながら観測を行った。

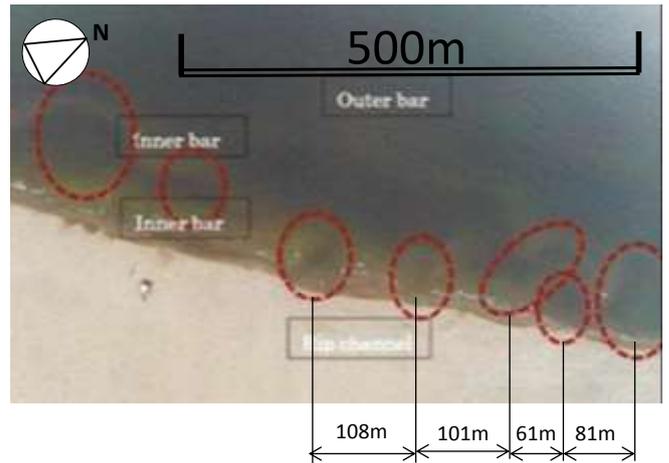


図6 内灘海岸におけるリップチャンネルの発生間隔



図7 内灘海岸におけるビーチカスプの発生間隔



図8 観測期間の波浪の経時変化

図8に調査日における内灘海岸の波浪状況を示す。図中の赤い実線はADCPによる観測日を示している。図より、観測時は比較的波高が小さい時に行われていることがわかる。また2日と8日の間には波高約60cmの波浪が、また8日と24日の間には波高約1.0mの波浪状態となった期間があった。

図9に9月2日に観測された水深分布図(表層)を示す。汀線付近でリップチャンネルが確認された。また、観測された3日分の地形

データから、離岸流が発生しやすいとされるリップチャンネルの部分が大きく削れている様子を確認した。汀線付近の砂の移動が激しく地形が変化しやすいことから、地形変化の影響を受けることで離岸流の発生場所も変動すると考えられる。また、図 10 に示す地形変位からは観測された 1m 程度の波浪による影響を受けて砂が移動し、リップチャンネルの場所が変動していることを確認した。これより、内灘海岸におけるリップチャンネルは低波浪時に形成されるのではないかと推測される。

#### 4. 観測データからの離岸流成分の抽出

##### 4.1 はじめに

金沢港湾・空港整備事務所により 9 月 2 日に行われた離岸流可視化実験では、小さい規模ではあるが、北西方向に流出する離岸流が確認された。図 11 にそのときの様子と航空写真、確認されたリップチャンネルの場所を合わせたものを示す。図より、観測された離岸流はリップチャンネルの奥部で発生し、リップチャンネルに沿って発生していることが分かる。

##### 4.2 流速・流向データの処理法の検討

観測場所において離岸流の発生が確認できたことから、ADCP による流況観測データを用いて離岸流成分の抽出を試みた。

本調査で用いた ADCP の計測時間間隔は 1 秒程度であり、その時に水深や流速、座標の計測を行っている。しかし、波浪は数秒間の周期の振動成分であることから、1 周期などで平均した流れの状況を把握する必要がある。しかし、実際の波浪は不規則波であり、様々な周期および波高の成分を持つ波浪が合成されている。そのため本研究では、最多出現頻度の周期・波高となる成分で平均することとした。ここでは、エネルギー密度が最大となる波の周期特性を把握するため、以下に示すブレットシュナイダー・光易型スペクトルの

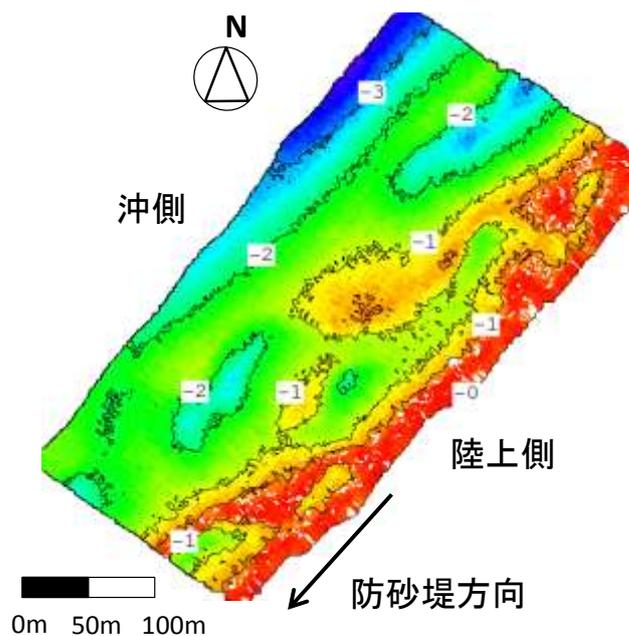


図 9 水深分布図 (9 月 2 日, 表層)

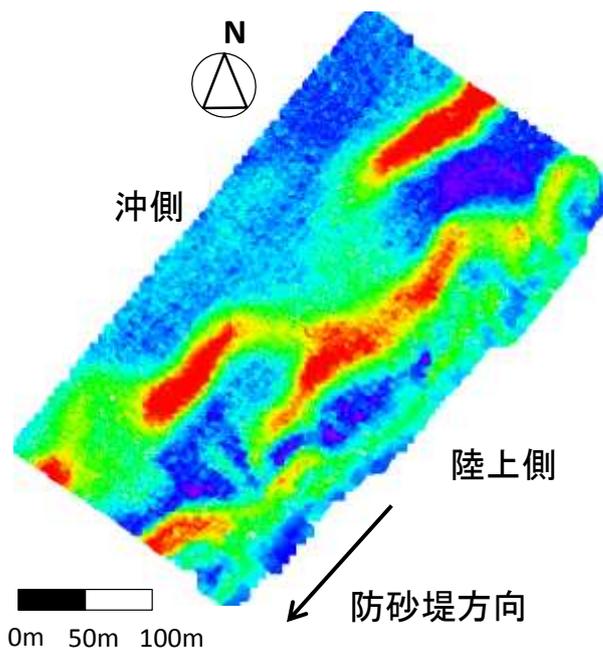


図 10 水深変位分布 (9 月 2 日 - 24 日, 表層)

式<sup>2)</sup>を用いて各観測日における周波数スペクトルを求めた。

$$S(f) = 0.257(H_{1/3})^2(T_{1/3})^{-4} f^{-5} \exp(-1.03(T_{1/3}f)^4)$$

$T_{1/3}$ : 有義波周期     $H_{1/3}$ : 有義波高  
 $f$ : 周波数

この式より，エネルギー密度の最大時における周波数を求めることができ，その周波数の逆数をとることでエネルギーが最大時の周期を求めることができる．図 12 および表 1 に得られた結果を示す．図表より，9 月 2 日の調査時では 0.24Hz (=4.17 秒) の波浪でエネルギー密度が最多となることから，本研究では 4 秒を中心値として平均流速・流向を算出した．

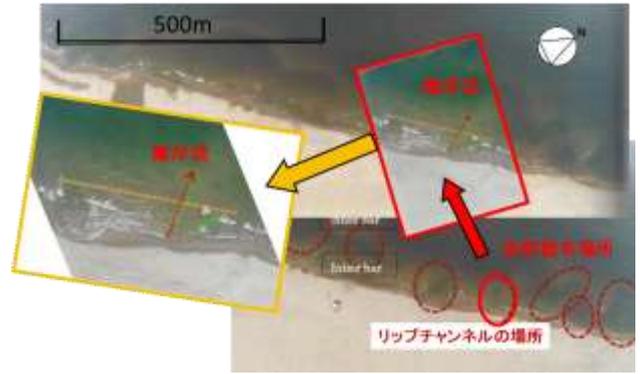


図 11 離岸流可視化実験の様子

### 4.3 離岸流成分の抽出結果（流速）

前節で求めた周期で平均した結果のうち，図 13 に 9 月 2 日に水上バイクで計測をおこなった航跡および流速分布を 1m 格子間隔で表示した結果を示す．図中，中央は水上バイクの航跡および各点での流速を示し，下は沿岸方向の流速分布，右は岸沖方向の流速分布を示す．沿岸方向の分布をみると，全域で似たような値を示している．離岸流発生場所では局所的に流向が周りと異なるために突出した流速分布となるイメージであるが，絶対値は周りと同程度の値となっている．また，岸沖方向の流速分布をみると，沖へ向かうほど流速が小さくなる傾向となっている．

### 4.4 離岸流成分の抽出結果（流向）

ここでは，9 月 2 日の表層における ADCP により観測された流向データを用いて 1m 格子間隔で表示した．360 度の全流向を表示させると傾向が不明瞭になることにより，離岸流が発生すると推測される流向のみを抽出するために 120～140 度の流向分布を表示させた．ここでは東方向への流出を 0 度とし，反時計回転方向を正としている．またこの場合，海岸線の方法はおよそ 45 度および 225 度方向となる．結果を図 14 に示す．図より流向が 120～140 度（NNW～NW）のときに，離岸流が観測された場所ではこの流向が多く分布することを確認できた．このことより，この手法を用いれば離岸流成分の抽出が可能であるのではないかと考えられる．

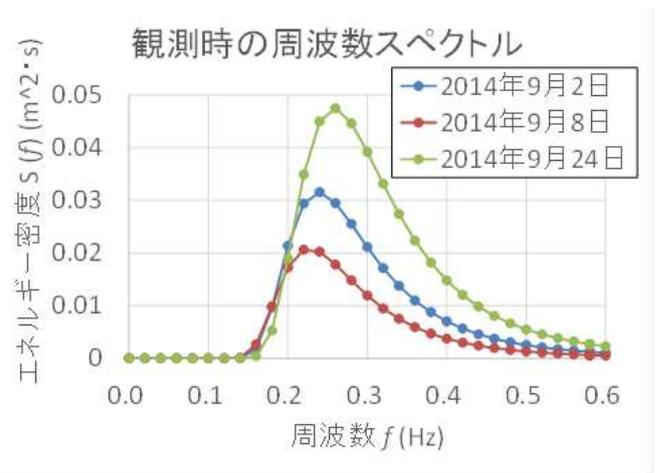


図 12 観測時における周波数エネルギースペクトル密度関数

表 1 観測時におけるエネルギー密度最大時の周波数および周期

	エネルギー密度 ( $m^2 \cdot s$ )	周波数 (Hz)	周期 (s)
9月2日	0.0315	0.24	4.17
9月8日	0.0206	0.22	4.55
9月24日	0.0475	0.26	3.85

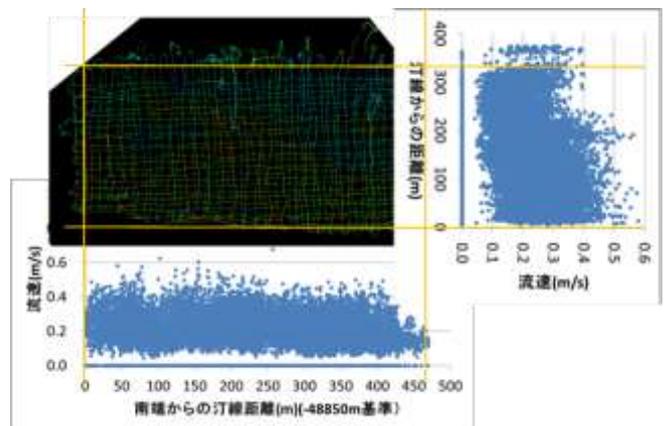


図 13 流速分布の岸沖・沿岸方向の関係（平成 26 年 9 月 2 日，表層）

また、この図をみると、さらに他の複数の場所でも一定間隔で流出方向の流れが顕著な部分があることがわかる。ここでは調査時には海面着色剤を散布して確認しなかったが、この場所でも離岸流が発生しているのではないかと考えられる。

また、図 15 にこのとき図 14 で観測された流向を沿岸方向による出現頻度分布図で示す。流出方向の流れが顕著な部分では、WNW～NNW で卓越している傾向が得られたことから、離岸流が発生しているとされる場所の特定が可能だと考えられる。

## 5. 離岸流発生間隔の推算値と実測値の比較

4.4 より離岸流が一定間隔で複数発生していることを確認できたので、これらの離岸流がどのような波浪条件や地形条件などで発生しているのかを把握することとした。

既往では佐々木<sup>3)</sup>や柴崎<sup>4)</sup>らが離岸流の発生間隔について推算する式を考案している。このうち、佐々木らによる手法は現地観測データを用いて回帰分析により得られる経験的な式であり、柴崎らの手法は物理的根拠に基づき入射波諸元や海底勾配などの関係を結びつけた推算式となっている。

本研究では、経験的な式ではあるが比較的精度よく発生間隔を推算可能である佐々木ら<sup>4)</sup>の推算式を用いて、実測値との比較を行った。以下に、推算式を示す。また、砕波波高は有義波高として算出した。

$$Y_r = 1.08T^{1.41}H_b^{0.54}(\tan\beta)^{-0.64}$$

$Y_r$ : 離岸流の発生間隔     $H_b$ : 砕波波高  
 $T$ : 周期     $\beta$ : 海底勾配

表 2、図 16 に推算式より得られた推算値と実測値との比較を示す。図表より、推算値は実測値とほぼ同様な数値となり、内灘海岸でもこの手法により離岸流の発生間隔を推算可能であることを確認した。

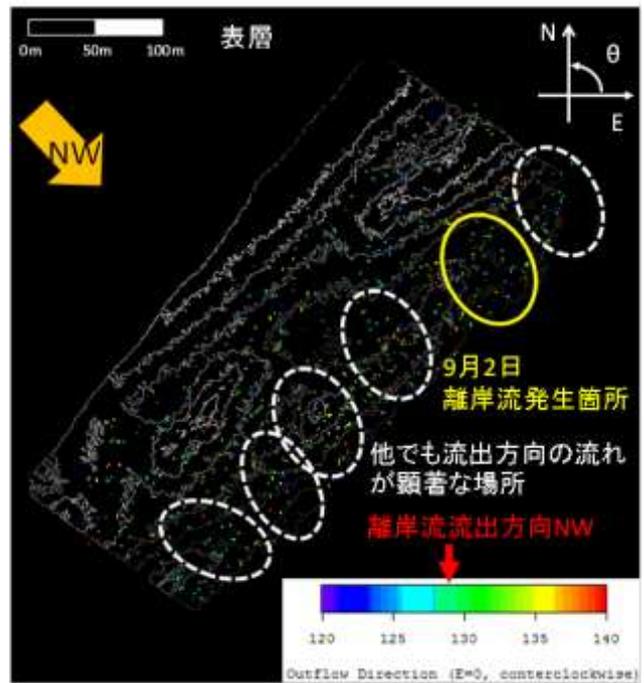


図 14 流向分布図 (120° ~ 140°)

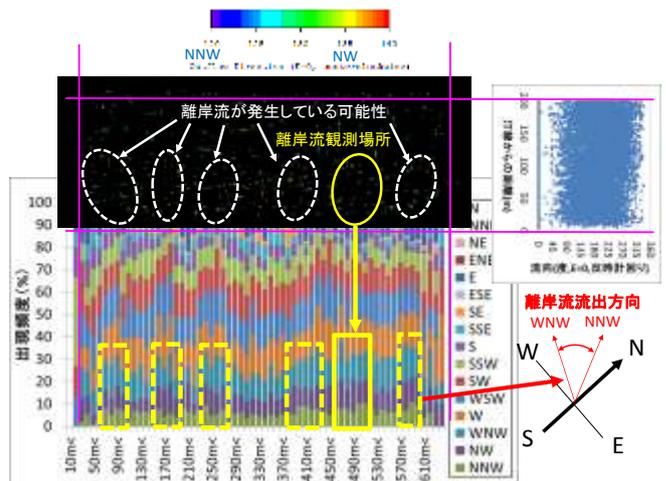


図 15 沿岸方向の流向の出現頻度分布図 (120度～140度)

また、この手法を用いることで、内灘海岸におけるリップチャンネルやカスプ地形が形成される波浪条件を推算可能であると考えられる。

## 6. 内灘海岸の地形を形成する波浪状況

3章で求めた内灘海岸におけるリップチャンネルの発生間隔の平均は約 88m であった。これより、離岸流発生間隔の推算式からこの約 88m となる波浪条件の推算を行った。海底

勾配は平均的な値（0.007）で固定した。

まず、波高および周期を変化させ離岸流発生間隔がどのように変化するかを求めた。図 17 および図 18 に周期および波高が増大するに伴い発生間隔も増大することがわかる。

次に、これらの図より離岸流発生間隔が 88m となる周期および波高を求めた。その結果、周期は 4 秒、波高は 0.4m 程度となった。これより、リップチャンネルは比較的穏やかな波浪条件時に生成されと考えられる。また、図 4 および図 19 より、この条件となるのは夏季では全体の半数近い期間となることがわかり、夏季においてこの規模のリップチャンネルおよび離岸流が多数発生すると考えられる。

同様に、内灘海岸ではビーチカuspが形成されており、この発生間隔は 3 章の結果では約 170m であった。ビーチカuspの地形でも離岸流が発生する<sup>6) 7)</sup>ことから、ビーチカuspの間隔を離岸流の発生する間隔と考え、この間隔で離岸流が発生する波浪条件を推算した。その結果、その条件は波高約 1.34m、周期約 6.3sであることを確認した。

また、金沢港湾空港整備事務所では、内灘海岸におけるビーチカuspの発生間隔（=波長）の平均値の経年変化を求めている。図 20 に 1962 年からの内灘海岸におけるビーチカuspの波長の経年変化を示す。図より、波長のばらつきが生じているが増加/減少といった傾向が見受けられない。波浪条件はこの期間に変化がないと仮定すると、この結果は地形勾配に大きな変化はないということを示しており、この海岸はこの期間大きな地形変化はないと考えられる。

## 7. まとめ

金沢港および内灘海岸の波浪特性を把握し、金沢港の波浪データを補正することで内灘海岸での波浪状況の推算が可能となった。

ADCP を用いた地形・流況観測データから、地形変化が及ぼす離岸流の発生場所の変動や、

表 2 離岸流発生間隔の推算値と実測値

	推算値(m)	実測値(m)
No.1—No.2	64.2	50.0
No.2—No.3	54.9	66.7
No.3—No.4	93.7	110.0
No.4—No.5	104.1	106.7
No.5—No.6	70.3	83.3

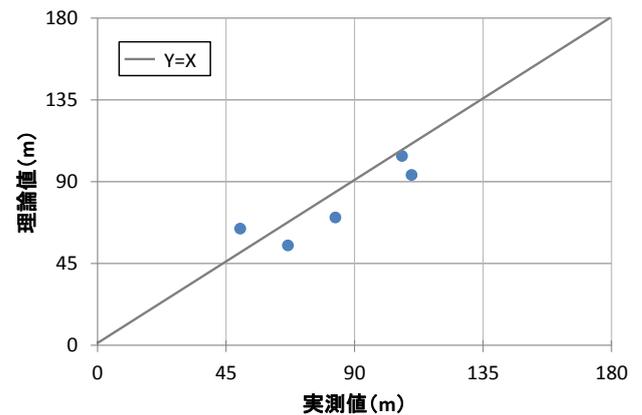


図 16 離岸流発生間隔における推算値と実測値の比較

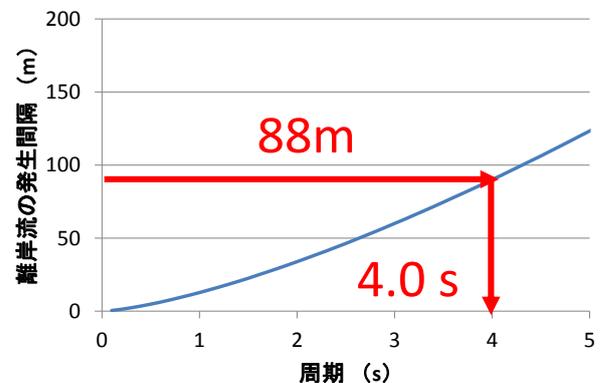


図 17 リップチャンネル形成時における離岸流発生間隔と周期の関係

流向をみることで離岸流の発生場所を確認することができ、本研究の手法において、離岸流の発生場所の特定が可能であることを示した。離岸流の発生間隔の推算式から、波浪諸元と海底勾配の情報を用いることで内灘海岸でも離岸流の発生間隔を推算可能であること

を確認した。さらに、離岸流の発生に重要な要因と考えられるリップチャンネルが生成する波浪条件および地形条件を把握した。その結果、リップチャンネルは低波浪時に形成される可能性があることを示した。また、ビーチカスの発生間隔（波長）を離岸流発生間隔の推算手法で推算した、その結果、この50年間に於ける内灘海岸での大きな地形変化は生じていないと考えられる。

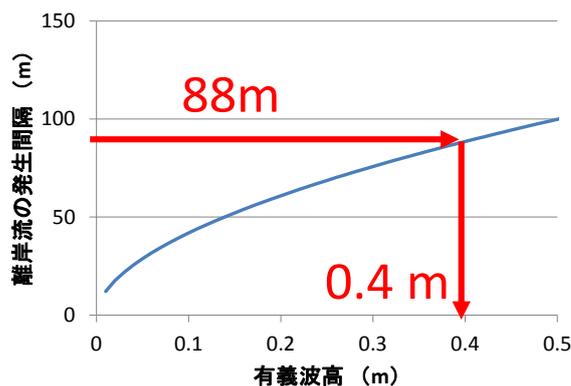


図 18 リップチャンネル形成時における離岸流発生間隔と有義波高の関係

### 参考文献

- 1) 犬飼直之, 小宮和樹, 米江駿介 (2014), "石川県内灘海岸における離岸流による海浜事故原因解明のための基礎的研究", 土木学会, 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, 第 32 巻, pp.176-179.
- 2) 服部昌太郎 著, 初版第 19 刷発行 (2011), 海岸工学, 株式会社 コロナ社, pp85-99.
- 3) 堀川清司, 佐々木民雄, 堀田新太郎, 桜本弘 (1974):海浜流に関する研究,第 15 回海岸工学講演会講演集,pp.347-354.
- 4) 柴崎 誠, 宇多高明, 芹沢真澄 (2006): 離岸流の発生間隔の予測式, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.917-920.
- 5) (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、<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>. 2011.
- 6) 犬飼直之, 江尻義史, 大竹剛史, 山本浩, 細山田得三, "新潟東港周辺における突堤で囲まれたカスプ地形海岸での離岸流の生成機構について", 土木学会, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No.2, I\_1687-I\_1692, 2015.
- 7) 犬飼直之, 江尻義史, 大竹剛史, 山本浩, 細山田得三, "両端を突堤で囲まれたカスプ地形を有する砂浜海岸における離岸流の生成機構について", 土木学会, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No.2, I\_1191-I\_1196, 2015.

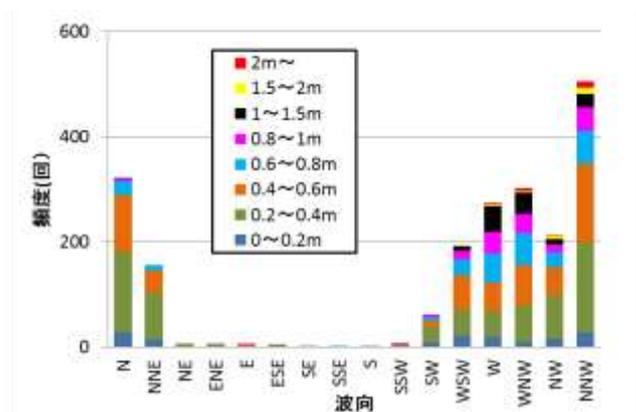


図 19 金沢港波浪特性<sup>5)</sup>  
(8月, ナウファス, 2001年~2014年)

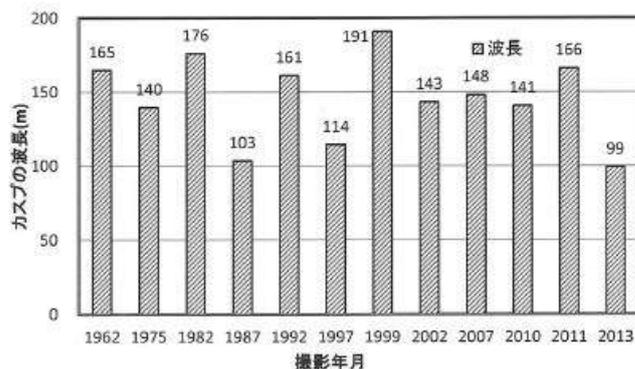


図 20 ビーチカスの波長の経年変化  
(提供: 金沢港湾空港整備事務所)