石狩湾海岸付近における 風向変動時の流況の把握

犬飼 直之¹・品田 啓太²

¹ 正会員 長岡技術科学大学准教授 技学研究院 環境社会基盤工学専攻
(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail: inu@nagaokaut.ac.jp

² エヌシーイー株式会社 (〒950-0954 新潟県新潟市中央区美咲町 1-7-25)

石狩湾奥部の石狩海岸付近では度々水難事故が発生し、2016年8月にも石狩浜で男性4名の水難事故が発生した。既往研究では湾内で季節風による強い流れの発生が確認されているが、水難事故発生との関連は考察されていない。よって、石狩湾での事故発生時の気象・海象の特徴の把握を試みた。まず、既往事故発生状況を把握し、地図や衛星写真などで海岸の特徴を把握し、事故が多く発生している海岸を把握した。次に、既往事故発生時の気象・海象を、観測結果を利用して、過去の事故発生時の風向の変動状況及び流向・流速の変動状況を把握した。また、流況が大きく変動する時の天気図の特徴を把握した。次に、現地観測を実施し、現地の離岸流や沿岸流の発生状況を把握した。最後に数値計算を実施し、事故発生時の表層の流況の変動状況を把握した。

Key Words : Ishikari bay, Ishikarihama beach, rip current, wind driven current, water accident

1. はじめに

北海道の石狩海岸は石狩湾奥部に位置する全長約27 kmの砂浜海岸であり、海岸中央付近に石狩新港、海岸の北東端付近に石狩川河口が位置する(図-1)。この海岸では水難事故が度々発生し、近年では、2016年8月11日に石狩浜海岸で、2017年8月27日には銭函海岸で男性4名による水難事故が発生した。砂浜海岸では通常海浜流が卓越するが、この海域では他に季節風による強い流れの発生が既往研究で把握されている。例えば山下ら¹⁾は、冬季北西風により湾内で時計回りの強い流れが発生することを明らかにした。しかし、これらは水深10 m以上の海域の流況であり、海岸付近の流況の検討はされていない。よって本研究では、石狩海岸の事故発生状況を把握すると共に、海岸付近の流れの特徴を把握する事を試みた。

2. 既往事故発生状況および海岸の特徴把握

対象海岸での水難事故の発生状況を把握するために、本研究では、朝日新聞の新聞記事データベースや北海道新聞などの記事などを検索した。その結果、図-1に示すように12件の事故が抽出され、そのうち「流された」事故は7件であった。

図-1 石狩海岸位置図および波浪観測場所

図-1に事故発生場所および発生年月日を示す。図より、石狩海岸南西部の銭函海岸および北東部の石狩浜海岸で多く事故が発生している。

図-2および図-3に石狩浜海岸および銭函海岸の衛星写真を示す。図-2より、石狩浜海岸は波長200 m程度のカスプ地形を有する砂浜海岸である。また図-3より、銭函海岸では沖に複数の離岸堤が設置されており、海岸は160 m前後のカスプ地形の砂浜海岸である。このようなカスプ地形は波浪により形成され、離岸堤付近も含めて離岸流が発生することが確認されている²⁾。

表-1 既往事故発生日時および場所、気象・海象

日付	地域	気象・海象
1999.8.15	石狩市弁天町	風向:SE, 風速:3-4m/s 有義波高:0.26m, 周期:3.9s
2010.8.10	小樽市銭函	風向:E-NW-N-E, 風速:2.5-3m/s 有義波高:0.15m, 周期:3.7s, 波向:静穏
2012.8.14	石狩市親船町	風向:NW-N, 風速:4->5m/s 有義波高:0.40->0.93m, 周期:4s, 波向:NW
2015.7.12	石狩市新港東	風向:SE->N, 風速:3.3-4m/s 有義波高:0.6->0.8m, 周期:5.1s, 波高:NW
2016.8.8	小樽市銭函	風向:SE->NNW, 風速:6.0->2.9m/s 有義波高:0.31m, 周期:3.0s, 波向:W
2016.8.11	石狩市弁天町	風向:SE->NNW, 風速:1.5->3.5m/s 有義波高:0.25m, 周期:2.6s, 波向:静穏
2017.8.27	小樽市銭函	風向:W->NNW, 風速:1.5->2.6m/s 有義波高:1.03m, 周期:5.2s, 波向:WNN

3. 既往事故発生時の気象・海象把握

事故発生時の気象および海象を把握するために、図-1に示す既往事故より、「沖に流された」事故の7件について、発生時の気象および海象を表-1にまとめた。ここでは、気象は気象庁 AMeDAS 石狩（図-1 内）の地上データ⁴⁾を、海象は Nowphas 石狩新港（図-1 内）のデータ⁵⁾を利用した。また、表中、事故発生数時間前から発生時にかけて風向・風速や波高・周期・波向が大きく変動した場合には赤字で示した。

表より、事故発生前の波浪状況の変化は2件だけであるが、気象が変化した事例は6件であり、このうち、風向が大きく変動したのは4件であった。

このうち、2016年8月11日の天気図を図-4に、AMeDAS 石狩での風速および風向の時間変動を図-5および図-6に示す。図-4より、当日は現場上空を高気圧が東進していた。記事内容より事故は14時前後に発生したと考えられるが、図-5および図-6より、12時前後から風向がSEからNへ変化すると共に風速も増大している。

このように、風向が変動した全ての事例では、事故発生数時間前から風向が90°以上変化し、最終的に風向は石狩湾へ吹き込む北方向へ変化している。このように、この海域では波浪現象だけではなく、風向の変化による水難事故も発生している。また、風の影響で遊泳者が沖に流される事を想像するが、事故発生時には現場では沖から陸への風向であった。よって、遊泳者は風に流されたのではなく、海の流れの影響を受けたと考えられる。この場合、その流れとして海浜流や吹送流が考えられる。

4. 現地調査

2016年8月11日に水難事故が発生した石狩浜海岸（図-1）で現地調査を実施した。調査日は2017年7月8日である。調査時には犬飼らの手法²³⁾で流れを海面着色剤で可視化し、UAVで空撮した。また、調査時に現場に気象

図-2 石狩浜の衛星写真

図-3 銭函海岸の衛星写真

図-4 天気図 (2016年8月11日6時)

図-5 風速時間変化(AMeDAS 石狩, 2016年8月11日)

図-6 風向時間変化(AMeDAS 石狩, 2016年8月11日)

計を設置した。

図-7および図-8に、調査日の現地および AMeDAS 石狩の風速および風向の時間変化を示す。図より、調査中の風向は、現地および AMeDAS ともにほぼNであった。

図-1 より, AMeDAS 観測場所は北側が海で開けていることより, 風向 N の時には, AMeDAS は陸地の影響は少なく, 現地の風向とほぼ同様であると考えられる. また, 観測日には風速は徐々に増大したが, 現地データと AMeDAS では, 2 倍程度の差が生じている. これは陸地の影響と考えられ, 風向 N 時には, ほぼこの関係となると考えられる. よって, 2016 年 8 月 11 日に風向が N へ変化し, AMeDAS の風速は 1 m/s 程度から 3.4 m/s 程度まで増大した事より, 現地の風速は 2 m/s 程度から 8 m/s 程度まで増大したと考えられる.

また, 現場付近の石狩新港では有義波高 0.43 m, 周期 5.1 秒の波浪であった.

図-9 に, 調査時の海岸付近の流況を示す. 図より, 事故発生推定場所付近の地点①と②の 2 か所で離岸流の発生を確認し, その周辺では離岸流方向への沿岸流が発生していた. 図-10 に地点①での可視化した離岸流の流況を示す. 地点①では約 15 cm/s の流速の離岸流が発生していた. 当日の波高に対する離岸流の発生状況は他の例²³⁾と同様であった. しかし, 沖へ流出後は海岸に平行な SW 方向へ約 19 cm/s の流速で移動した. これは沿岸流の影響を受けていたのではないかと考えられる.

5. 石狩湾での気象変化による流動変化把握

(1) 風向と流向の変化方向の関係の把握

事故発生時には風向が変動している事が多いことより, 石狩湾付近を低気圧や高気圧が通過し風向が変動することで流況がどのように変動するか把握を試みた. ここでは山下⁹⁾が得た観測情報を使用し, 風向が変動した時の流向の変化および天気図を把握した. 流れ及び風の観測場所は, 図-1 で St.3 及び St.4 で流れを, 石狩新港で風を観測した. また, 天気図より, 低気圧や高気圧が石狩湾の南北どちらを通過したかを分類した. これより, 表-2 に示すように 14 の事例を確認した.

表-2 風向変動と流行変動まとめ

日時	風向変化	天気図による分類	流向変化
1996/10/4/12:00	↖ → ↘	低気圧が北側通過	↑ ↘ ↙
1996/10/7/9:00	↖ ↑ ↘	低気圧が北側通過	↑ → ↘
1996/10/10/7:00	↖ → ↘	低気圧が北側通過	↑ ↗ ↘
1998/1/25/10:00	↖ → ↘	低気圧が北側通過	↖ → ↘
1998/2/10/9:00	↖ ↗ ↘	低気圧が北側通過	↗ ↘ ↙
1998/2/13/0:00	↖ ↗ ↘	低気圧が北側通過	↗ ↘ ↙
1996/10/5/6:00	↖ ↗ ↘	低気圧が南側通過	↖ ↗ ↘
1998/1/21/14:00	↖ ↗ ↘	低気圧が南側通過	↓ ↗ ↘
1998/1/24/0:00	↖ ↗ ↘	低気圧が南側通過	↓ ↗ ↘
1996/10/5/14:00	↖ ↗ ↘	高気圧が北側通過	↓ ↗ ↘
1998/2/7/0:00	↖ ↗ ↘	高気圧が北側通過	↓ ↗ ↘
1996/10/7/18:00	↖ ↗ ↘	高気圧が南側通過	↓ ↗ ↘
1998/2/11/17:00	↖ ↗ ↘	高気圧が南側通過	↓ ↗ ↘
1998/2/13/21:00	↖ ↗ ↘	高気圧が南側通過	↓ ↗ ↘

変動方向: ○時計回り, ○半時計回り

図-7 風速時間変化 (2017 年 7 月 8 日)

図-8 風速時間変化 (2017 年 7 月 8 日)

図-9 離岸流発生場所 (2017 年 7 月 8 日, 石狩湾)

図-10 離岸流発生状況(図-9①の地点, 散布後 5 分)

図-11 離岸流流速分布

表より, 低気圧と高気圧がどちらも北側を通過した際風向は時計回りに変動した. また南側を通過した際風向は反時計回りに変動した. なお, 事故発生日は現場上空の南側を高気圧が東進しており, 風向は半時計回りに変動した. また, 流向の変動は, 風向の変動方向に関係なく時計回りに変動している.

(2) 風向変化から最大流速になるまでの時間の把握

次に、風向が変動してから流速が最大となるまでの時間及び最大流速の把握を試みた。ここでも山下ら⁹⁾が得た観測情報を使用した。山下らによると、流速は水深3 mで把握したことより、式(1)を用いて表層流速に換算した⁸⁾。

$$u=v(1+z/h)(1+3z/h) \quad (1)$$

ここで、 u :水深 z での流速、 v :表層流速、 z :流速を測定した水深、 h :水深である。

以上より得られた結果を、図-12に風向変動開始から最大流速になるまでの時間及び最大流速の関係を示す。図より、早い変動では変動開始から3~5時間で最大流速となり、流速は70 cm/s程度となった。

また、変動開始から最大流速となる時間で2つのグループに分かれた。原因として、低気圧や高気圧の移動速度や気圧傾度の大小などが考えられる。移動速度が速い又は気圧傾度が大きい場合には短時間で変動すると考えられる。

なお、事故発生日は現場上空の南側を高気圧の中心が通過したことにより、短時間で風向が変動し、流向も短時間で変動したと考えられる。

図-12 風向変動開始から最大流速までの時間と最大流速

図-13 流速分布 (左)および仮想着色剤拡散状況 (右)

図-14 調査時の石狩湾の流速分布

6. 現地海域の流動把握のための数値実験

(1) 調査時の海岸付近の流況把握

波浪数値モデルを用いて調査時の流況の把握を試みた。ここでも、式(2)~(4)に示すように波浪の伝播状況および、海浜流の状況を計算する修正ブシネスク方程式および連続式を用いた。ここで、 Q_x および Q_y は流量、 g は重力加速度、 D は全水深、 η は水面変動量、 MD_x および MD_y は碎波減衰項、 τ_x および τ_y はマニング公式を用いた海底摩擦項、 B は定数(1/21)、 h は静水深である。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - MD_x + \tau_x \\ &= \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) + \\ & \quad Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - MD_y + \tau_y \\ &= \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) + \\ & \quad Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial y \partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

また、現地調査では海面着色剤を散布し、その拡散状況を観測したことから、この数値モデルで拡散計算がおこなえるように改良をおこなった。具体的には、修正ブシネスク方程式および連続式で碎波を含む波の非線形性によって生じる諸現象と拡散計算を各時間ステップで同時に計算するようにした。拡散計算では次式を用いて点源で仮想的に1の濃度を与え連続拡散計算を行った。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - A_h \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (5)$$

ここで、 u は x 方向流速、 v は y 方向流速、 C は濃度、 A_h は水平渦動粘性係数である。

地形は、カस्प地形を有する石狩湾の地形を模擬的に表現した地形とした。計算領域は沿岸方向に250 m、岸沖方向に500 mである。格子間隔は1 mとし100 m間隔のカस्प地形とした。計算時間間隔は0.1秒とした。また海底地形や海底勾配は、現地調査の結果を参考に1/80とした。

計算では、平成29年7月8日波浪条件にあわせ、波高0.5 m、周期5秒の規則波を海岸と反対側の外境界で入力した。波向きは現地と同様に海岸に78度の角度で入射させた。また、調査時に流出した離岸流は、沖では海岸を背に右から左方向へ20 cm/s程度の流速で移動した調査結果にあわせ、海岸沖で図右から図左の方向に20 cm/sの流速を与えた。海岸に直角方向の外境界では透過

条件とした。仮想染料拡散計算では渦動粘性係数は $4 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。計算結果を図-13に示す。右図より、カサブ地形横から沖へ離岸流により着色剤が沖に流出し、沖では沿岸流により左方向へ拡散している。また、左図より、海岸付近では 15 cm/s 程度、沖では 20 cm/s 程度の流速となっており、計算結果は調査時の海岸付近の流況をほぼ再現できていると考えられる。

(2) 調査時および事故発生時の石狩湾の吹送流の把握

ここでは、犬飼らの手法⁹⁾を参考に、式(6)から式(9)に示ように、静水圧近似した運動方程式および連続式を陽的に差分した数値モデルを用いて現場海域付近の吹送流の数値実験をおこなった。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ - A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$-\rho_w g - \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

ここで、 u, v, w :流速、 h :水深、 f :コリオリ係数、 A_h :水平渦動粘性係数、 A_v :鉛直粘性係数である。

使用した地形情報は 500 m メッシュ水深データ⁷⁾で、表層から 1 m 、 5 m 、 10 m 、それ以深の4層に区切った。計算では、最初に調査時の風向 N 、風速 8 m/s の海上風を6時間入力し流況を求めた。次に、事故時の気象にあわせ開始時に風向 SE 、風速 2 m/s の海上風を6時間入力して安定させた後に、1時間で風向 NNW 、風速 8 m/s へ変化させ、その後6時間同じ風向・風速を入力した。

図-14に調査時の石狩湾の流速分布を示す。図より、石狩浜付近では流速は 20 cm/s 程度であり、調査結果の沖側の流速と同様であることより、定性的に流れを再現できていると考えられる。

図-15に事故発生現場付近の表層 1 m の流速の時間変位および水位の時間変位を示す。図より、計算開始後6時間で風向が変化する際に流速が変化し、約2時間かけて流速が増大した。

図-16および図-17に、風向 SE 時の海域の表層 1 m の流速分布および流速ベクトル図を示す。図より、石狩浜付近では 0.2 m/s 程度の NE 方向の流速である。また、図

図-15 事故発生付近（石狩湾）での流速の時間変化

図-16 風向 SE 時の流速分布（計算開始後4時間）

図-17 風向 SE 時の流速ベクトル（図-16と同様）

図-18 風向 NNW 時の流速分布（計算開始後8時間）

図-19 風向 NNW 時の流速ベクトル（図-18と同様）

-18および図-19に風向NNW時の流速分布および流速ベクトル図を示す。図より、石狩湾内では0.1 m/s程度の流速であるが、石狩浜付近では海岸に平行に約1 m/sの流速となっている。以上より、風向が大きく変動した後の2時間程度で石狩湾内奥部の石狩海岸付近では、流速が急激に増大する可能性があると考えられる。

7. まとめ

本研究では、石狩海岸付近の地形の特徴を把握するとともに既往事故について把握した。その結果、石狩浜および銭函海岸付近で事故が多発していることを確認した。これらの事故のうち、風向が大きく変化した際の事故が複数あることから、海浜流だけでなく、吹送流による短時間の流況の変化も原因の1つである可能性を確認した。

石狩浜海岸で実施した流況把握調査では、調査日の海象・風向は一定であったが、海岸付近では海浜流による離岸流の発生を確認し、沖側では南西方向の沿岸流を把握した。これより、石狩浜では気候の安定時でも離岸流が発生することを確認した。石狩浜海岸付近では、波浪の平穏時でも水難事故発生に注意が必要であると考えられる。風向と流向が大きく変動する日の天候は、低気圧や高気圧が石狩湾付近を通過しており、それぞれが現場南側か北側を通過することで、風向の変化方向が決まる。また、流向は風向変化後の数時間で大きく変動し、流速は毎秒1 m近くになることがある。

最後に石狩湾全域を対象に吹送流の数値計算を実施した。その結果、風向がSEからNNWへ変化した場合には、特に石狩湾の表層で流況が大きく変動し、石狩浜海

岸付近では変化後2時間程度でSW方向の強い流れが発生する可能性を示した。

謝辞: 2017年7月の現地調査では、水難学会事故調査委員会で調査を実施した。その際、救助活動を実施した石狩消防署や第一管区海上保安本部からも現地で貴重な情報を提供していただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 山下俊彦, 星秀樹, 新山雅紀, 長谷部隆光, 福本正, 多田彰秀: 石狩湾沿岸の冬季の三次元流動特性, 海岸工学論文集, Vol. 46, pp.426-430, 1999.
- 2) 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No.2, I_1687-I_1692, 2015.
- 3) 犬飼直之, 櫻井龍亮, 山本浩: 複数の離岸堤付近で発生する離岸流の流況把握, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 73, No.2, p. I_186-I_191, 2017.
- 4) 気象庁: AMeDAS, <http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>.
- 5) 国土交通省港湾局: NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網) (オンライン), <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, 2011.
- 6) 犬飼直之, 早川典生, 福嶋祐介, Peter SHENG: 直線状海岸付近の吹送流による水位変動についての研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.391-395, 2001.
- 7) 日本海洋データセンター: 500m メッシュ水深 (オンライン), http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/depth500_file.jp.
- 8) 宇野木早苗: 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp.252-256, 1995.

(2018.2.8 受付)

A STUDY ON WIND DRIVEN CURRENT AND NEARSHORE CURRENT AT ISHIKARI-HAMA BEACH

Naoyuki INUKAI and Keita SHINADA

In August 2016, the accident occurred that four swimming people carried away to offshore and die at Ishikari-hama beach in Hokkaido. The several other accident that the swimming people carried away occurred around the Ishikari coast in recently years. The current analysis in Ishikari Bay due to the seasonal wind was studied in the past research. However, the current dynamics due to the wind direction change in short time has not studied yet. Therefore, we tried to comprehend the feature of the current dynamics in Ishikari bay, expressly around Ishikari-hama beach.

As research contents, we grasped the history of the accident around the Ishikari coast. In this case, we used the on-line database and extract the newspaper article about the accident at Ishikari coast. As the result, we comprehended the feature of the accident in Ishikari Bay. Secondary, we made the field survey at Ishikari-hama beach in July 2017. This beach has cusp topography. The interval spacing of cusp topography was about 100m, and the slope of the bottom was about 1/80. In the field, we pigmented the rip current by the sea water colorant, and the pigmented current was recorded as the aerial photography by the UAV. Thirdly, we confirmed the fluctuation of the current in Ishikari Bay due to the wind direction fluctuation. As a result, we comprehended that the current direction changed in several hours after the wind direction changed. Finally, we simulated the rip current and the wind driven current in Ishikari Bay.