

# 両端を突堤で囲まれたカस्प地形を有する砂浜海岸における離岸流の動態把握について

水工学研究室 江尻義史

指導教員 犬飼直之

細山田得三

## 1. はじめに

離岸流は波浪場で形成され、海岸波動の非線形性によって岸側に輸送された海水が局所的な地点において沖へ戻る際に形成される強い流れである。しかし、振動流場内にあり、実際には見極めが困難であることが水難事故発生の原因でもある。離岸流の研究では、西ら<sup>1)</sup>は宮崎県青島海岸において小型フロートでの漂流観測より離岸流発生箇所の特定が可能であることを示した。また、日野<sup>2)</sup>は、波の代表的な緒言や平均的な海浜地形勾配などの条件を入力すれば、その条件下で発達する離岸流の形状や地形変形を予測する手法を示した。

ところで、海上保安庁<sup>3)</sup>によると全国でマリネレジャーに関する海浜事故による事故者数は毎年 800 人前後であり、平成 26 年度では発生した海浜事故に遭った事故者数 803 人のうち、約 34%が遊泳中の事故者である。犬飼ら<sup>4)</sup>が新聞記事の情報をまとめた結果によると、新潟県沿岸域でも夏季において海浜事故は発生しており、特に新潟市周辺の海岸での事故が多く、そのうちの半数近くが離岸流に関連する事故が多く発生している可能性を示した。ところで、新潟県内では広大な砂浜をもつ海岸は少なく、突堤や離岸堤などが多く設置されている。しかし、突堤近くの海水浴場で海水浴客が沖に流される海浜事故の発生が多いこと<sup>4)</sup>から、こういった海域での海浜流の状況を把握し、発生予測が可能となることは事故防止対策の為に重要であると考えられる。そこで本研究では、新潟県に多く見られるカस्प地形を有する砂浜海岸の近くに突堤が設置されている海岸を対象に、カस्प地形および突堤の 2 つの要因の影響を受ける海浜流の流況を把握し知見を得ることで、水難事故防止の技術向上に資することを目的とした。そのために、この特徴を有する海岸で離岸流の調査を行い、その地形や海象条件に合わせた数値実験で調査時の離岸流を再現し、現場付近の流況パターンを把握した。

## 2. 離岸流の現地調査

### 2.1. 調査海岸の概要および調査海岸での事故発生状況

犬飼ら<sup>4)</sup>によると新潟県内で離岸流が原因と考えられる海浜事故が多いのは、新潟市周辺では新潟東港周辺であることから、図 1 に示す新潟県北蒲原郡聖籠町網代浜



図 1 調査海域（網代浜海水浴場および藤塚浜海水浴場）位置

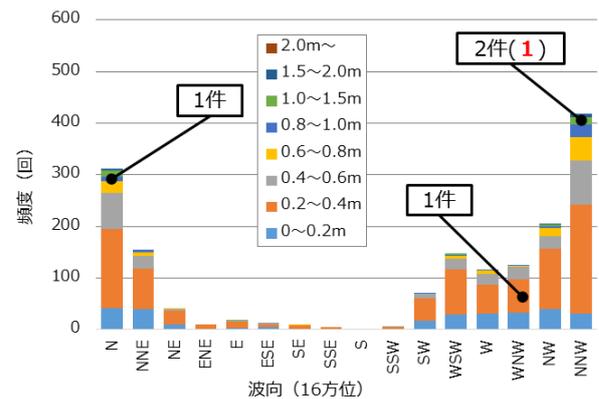


図 2 波高別波向頻度表および離岸流事故発生件数 (7月) (新潟市周辺海域), ( ) 内は網代浜と藤塚浜の事故件数 (2011年~2014年の7月, Nowphas 新潟県沖データより)

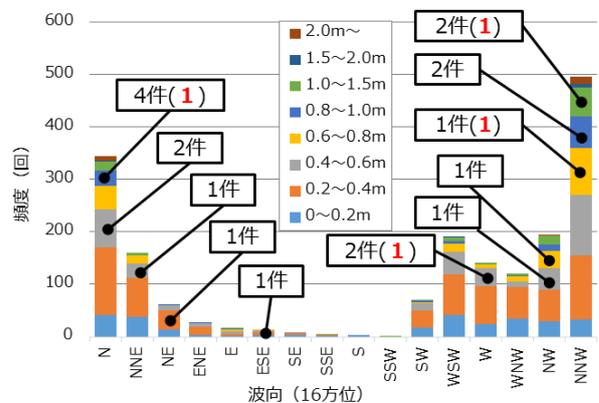


図 3 波高別波向頻度表および離岸流事故発生件数 (8月) (新潟市周辺海域), ( ) 内は網代浜と藤塚浜の事故件数 (2011年~2014年の8月, Nowphas 新潟県沖データより)

海水浴場および新潟市藤塚浜海水浴場で離岸流調査を行った。網代浜海岸は新潟東港の東側に位置し、両側を焼く 500m の距離で突堤に囲まれたカスプ地形を有する砂浜海岸である。一方、藤塚浜海水浴場は北東側の片方に突堤が位置し、砂浜上はほぼ直線状であるが、水底地形が 200m に渡り冲向きに凸となる褶曲が連続する砂浜海岸また、これらの海岸では冬季は高波浪となるが、調査時と夏季とで水底地形の特徴は大きく変動していないことを調査時の踏査で確認した。これらの海岸を含めた新潟市周辺での事故発生状況を把握するために、新潟海上保安部および新潟市より 2001 年から 2014 年間の海浜事故発生情報を提供していただいた。その中から、新潟市周辺の海岸で 7 月、8 月に発生した離岸流によるものと思われる事故を抽出し、最寄りの波浪計である新潟県沖西方約 10km にある Nowphas<sup>5)</sup> の 7 月、8 月の波浪データを用いて事故発生時の海象を把握した。図 2 および図 3 に事故発生時の波向別波高頻度表および事故件数を表 1 に波高別、波向別の事故発生件数を示す。図より新潟市周辺では 14 年間で合計 22 件の離岸流によるものと思われる事故が発生しており、そのうち網代浜および藤塚浜では 5 件の事故が発生した。7 月、8 月の波浪は多くが 0.4m 以下であり、卓越波向は NNW~N である。図表より、事故時の最多波向は夏季の卓越波向と同じであることから、離岸流は発生箇所では恒常的に発生していると考えられる。また、事故時の波高は 0.4m 前後であることから、卓越波向時には小さい波高でも離岸流は発生している可能性はあるが、波高 0.4m 程度以上時に事故を発生させるような離岸流が発生するのではないかと考えられる。

## 2.2. 調査日時および調査時の波浪・離岸流発生状況

調査は表 2 に示すように網代浜海水浴場で 1 回、藤塚浜海水浴場で 2 回の調査を行った。調査時の網代浜の海象は、新潟県沖 Nowphas<sup>5)</sup> の記録によると、14 時の有義波高は 0.98m、周期は 6.5sec、波向 NNW であった。これは夏季最多波向ではあるが海水浴シーズンに多い波高 0.5m 程度以下よりも高い状態であり、通常より規模が大きい離岸流が発生していたと考えられる。波浪は図 4 のように海岸を背にして右前方の沖側から入射していた。さらに図内右側の砂浜の凸部付近では入射する波峰が周りよりも乱れ、そこから海岸を背にして左前方の沖に向かって離岸流が発生している様子を確認した。また、突堤付近でも波峰が周りよりも乱れ、根元付近から沖に向けて離岸流が発生している様子を確認した。藤塚浜での 1 回目の調査日は 10 時には有義波高 0.18m、周期 3.9sec、波向 NNW であり、夏季の最多波向であったが低波高であったために顕著な離岸流の発生は確認できなかった。しかし、午後に波高が高くなり、離岸流を観測した 16 時の有義波

表 1 波高別事故発生件数と波向別事故発生件数

有義波高	件数	波向	件数 (上位)
0.8 m 以上	10	N	7
0.6 m~0.8 m	3	NNW	7
0.4 m~0.6 m	6	NW	2
0.2 m~0.4 m	3		

表 2 調査日と調査海岸名および調査時の海象

調査日	場所	海象 (Nowphas新潟沖)
平成26年9月17日	網代浜	波高0.98, 周期6.5秒, 波向NNW
平成27年3月18日	藤塚浜	波高0.57, 周期3.8秒, 波向N
平成27年4月23日	藤塚浜	波高0.52, 周期3.4秒, 波向NW



写真1 空撮用 UAV (無人航空機)



写真2 離岸流把握機材 (左: 海面着色剤, 右: 流速計)



写真3 海面着色剤の散布状況 (2014年9月17日, 網代浜)

高は0.57m, 周期3.8sec, 波向Nであった。これは夏季に多い波浪および最多事故時の波浪状況である。また2回目の調査日の12時には有義波高0.52m, 周期3.4sec, 波向NWであり離岸流を確認した。これらの調査からも、離岸流発生場所では恒常的に発生しているが、波高が0.4m程度以上時に事故を発生させるような顕著な離岸流が派生すると考えられる。

### 2.3. 離岸流の調査方法

離岸流を海面着色剤散布により可視化し、その流れの挙動をUAV(無人航空機)での空撮で把握し、プロペラ流速計で流速の計測を行った。UAVは写真1に示すようにDJI Phantom2 Vision Plusを使用し、空撮を行った。また、写真2に示すように、海面着色剤には国土交通省認定品の興亜化工株式会社製KW1、プロペラ流速計は株式会社ケネック製VR-301を用いた。流速の計測間隔は1.0secとした。また、水深1.0m程度までの海底勾配を3本計測し、勾配を求めた。

### 2.4. 調査結果

写真3に網代浜での離岸流場への海面着色剤の散布状況を示す。また、図4に網代浜の海面状況を示す。ここでは写真左側に突堤が位置する。写真右側から中央に向けて離岸流が発生していたが、ここでは目視でも碎波状況が他と異なっていた。図5に海面着色剤拡散状況を示す。ここでは、水底地形が沖に凸となる場所から地形に沿うように離岸流が沖へ流出していた。この調査では、30秒間隔の航空写真で着色剤の先端部の位置を求めることにより離岸流の平均流速を把握した。図6に離岸流場内の各地点での離岸流の流速・流向ベクトルおよび平均流速を示す。結果では、汀線(波打ち際)付近の平均流速が最大で平均0.9m/s, 沖側で0.4m/s以下であり、海岸に近い場所では離岸流の平均流速は大きく、沖に出るほど小さくなる傾向であった。また碎波帯沖で流向が変わり突堤の沖側に向けて流出した。離岸流の長さは、碎波帯の岸沖方向の幅の1.8程度までと知られているが<sup>9)</sup>、調査時における離岸流の先端部までの距離は120m程度であり、碎波帯幅は約100mであったので約1.2倍の長さであった。

写真4に2回目調査時の藤塚浜での離岸流場への海面着色剤の散布状況を示す。この海岸では海岸を背に右手方向に突堤が位置する。図7に海面着色剤の散布状況を示す。写真4および図7では、水底地形の褶曲先端部の左側より散布した。ここでも地形が沖に凸となる場所から地形に沿うように離岸流が沖へと流出していた。また、海岸を背に波浪の入射とは反対側に離岸流が発生していた。図8に網代浜同様にUAVによる航空写真を元に求めた離岸流の平均流速を示す。こちらも離岸流は、海岸に近い場所では離岸流の平均流速は大きく、沖に出るほど小

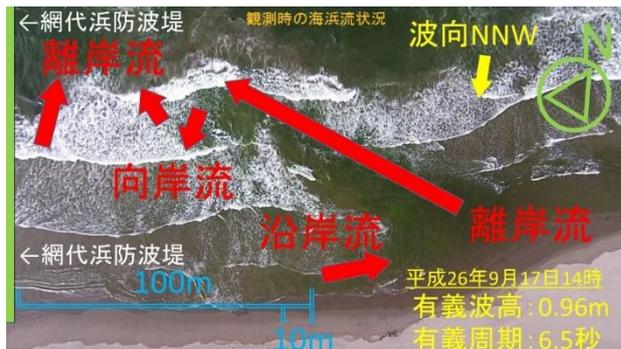


図4 離岸流の発生散状況 (2014年9月17日, 網代浜)

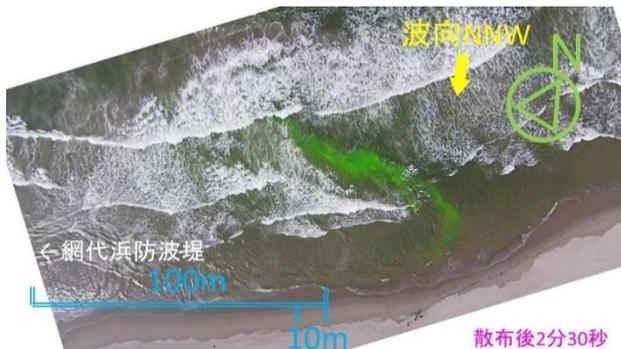


図5 海面着色剤の拡散状況 (網代浜, 散布後2分30秒後)

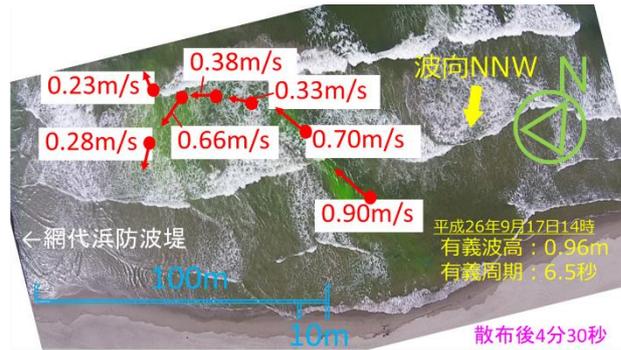


図6 離岸流場内の流向・流速 (網代浜, 散布後4分30秒後)



写真4 海面着色剤の散布状況 (2015年4月23日, 藤塚浜)

さくなる傾向であった。以上より、地形的な特徴および波浪の状況から離岸流の発生場所をピンポイントで特定し、さらに離岸流を可視化して発生場所や流況や長さなどを把握した。

### 3. 現地地形を模した地形での数値実験

#### 3.1. 数値モデルの概要および計算条件

現地調査で離岸流発生場での流況や流速などを把握できたので、ここでは、網代浜の条件にあわせて数値実験を行い離岸流の再現を試みた。用いた数値モデルでは、式(1)~(6)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ことができる修正ブシネスク方程式および連続式でそれを陽的に差分した。ここで、 $MD_{xy}$  は式(4)に示す碎波減衰項、 $\alpha_D$  は碎波帯で2.5となる係数、 $s$  は海底勾配、 $f_D$  は碎波減衰係数、 $D$  は全水深 (m)、 $Q_{xy}$  は流量 ( $m^2/s$ )、 $h$  は静水深 (m)、 $\eta$  は水面変動量 (m)、 $B$  は定数(1/21)、 $g$  は重力加速度 ( $m/s^2$ )、 $\tau_x$  は式(7)に示すマニング公式を用いた海底摩擦項、 $n$  はマニング粗度係数 ( $m^{2/3}/s$ ) である。

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

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

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$MD = f_D Q = \alpha_D s \sqrt{\frac{g \hat{Q} - Q_r}{d Q_s - Q_r}} Q \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Q_s &= 0.4 \times (0.57 + 5.3s) \sqrt{gd^3} \\ Q_r &= 0.135 \sqrt{gd^3} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\tau_x = \frac{gn^2 \times U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} \quad (x \text{ 方向}) \quad (6)$$

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、この数値モデルで保存系の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を用いた数値モデルでは碎波を含む波の非線形性によって生じる諸現象を各時間ステップで求め、波動成分としての流速を用いて逐時的に拡散計算をおこなうようにした。拡散計算では次式を用いて現地に合わせて、カスプ先端から点源で仮想的に1の濃度を与え連続拡散計算を行った。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - A_h \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (7)$$

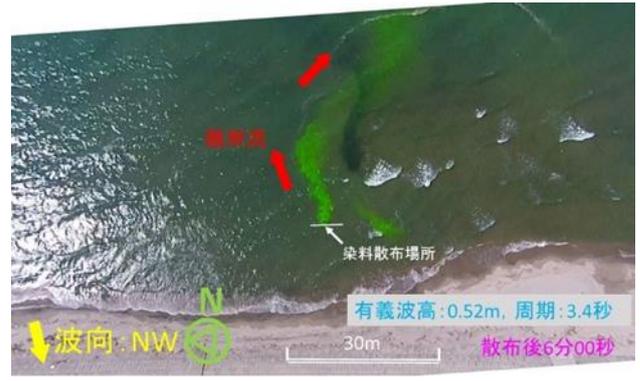


図7 離岸流の拡散状況 (藤塚浜, 6分00秒後)

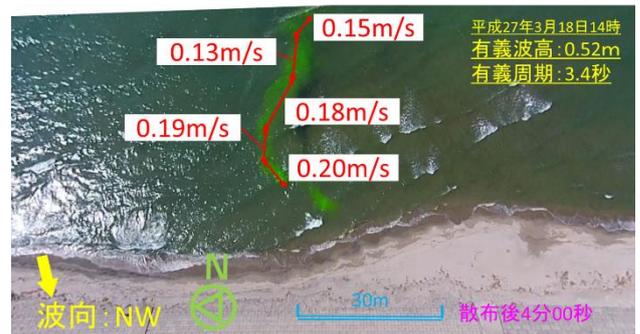


図8 離岸流場内の流向・流速 (藤塚浜, 散布後4分00秒後)

ここで、 $x$  は東西方向、 $y$  は南北方向、 $u$  は東西方向流速 ( $m/s$ )、 $v$  は南北方向流速 ( $m/s$ )、 $C$  は保存系拡散物質、 $A_h$  は水平渦動粘性係数である。地形情報は、両端を突堤で囲まれた網代浜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500m、岸沖方向に1000mである。格子間隔は2mとし200m間隔のカスプ地形とした。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、資料<sup>7)</sup>や現地調査で得られた結果より、汀線付近のカスプ地形の形状にあわせて地形変化をしていると考え、汀線形状にあわせて水深変化する地形とし、海底勾配は1/80とした。更に海岸を背に両端に突堤を設置し、2つの突堤の距離は現地にあわせ500mとした。計算では観測時の波浪条件にあわせるために、波高1.0m、周期6.0secの規則波を海岸と反対側の外境界で入力した。また、波向きがNNWであり、これは現場では海岸を背に7度程度右前方からの入射となるので、波浪の入力時に各格子で波浪を入力させるタイミングに時間差を生じさせることによって位相差を生じさせた。仮想染料拡散計算では渦動粘性係数は $4.0cm^2/s$ とした。

#### 3.2. 計算結果

図9に、波浪1周期で平均した海浜流の平均流速の流速分布を示す。図より、(1)のカスプの先端部付近から左斜め前の方向へ周囲よりも流速が大きい流速場がある。これは、斜めに入射した波浪がカスプ地形の海岸側凹部に集中しカスプ先端部より流出していると考えられる。

また、(2)の突堤付近では突堤に沿うように沖に向けて流速がまわりよりも大きい流速場がある。これは突堤に囲まれた海域に入射して発生した海浜流が沖へ流出しているためと考えられる。これらは現場の調査から得られた離岸流の流況とほぼ一致している。流速はカスポ先端部では40cm/s程度であり、観測時よりも小さい値となった。また、図10に仮想的に海面着色剤を散布した7分後の拡散状況を示す。左図は堤防有りのケース、右図は堤防無しの場合である。左図より、砕波帯外側付近で蛇行しつつ100mほど進行しており、平均流速は23cm/sであった。この流速も調査時よりも小さい値となった。計算での流速が調査結果よりも小さい理由として、計算は有義波高のみの計算であり最大波高時の流速が反映されていないこと等が原因と考えられる。しかし、流況分布などから数値モデルは離岸流の流況や仮想海面着色剤の拡散状況を定性的に再現していると考えられる。

#### 4. 突堤付近の砂浜の離岸流の生成機構の考察

数値モデルで離岸流を定性的に再現が可能であることが確認できたことから、数値モデルを使用して仮想地形での離岸流の計算をおこなった。具体的には、現地海岸は両側を突堤で囲まれていることやカスポが発達していることから、片側の突堤がないケースおよび、カスポが存在しない一様勾配の海底地形での2条件で海浜流の計算をおこなった。一様勾配の地形では海底勾配を1/80としている。入力した波浪条件は変更していない。

図11に海浜流の下流方向の突堤がないケースでの波浪1周期で平均した海浜流の流速分布を示す。両端を突堤で囲まれた図9のケースと比較して(1)のカスポ先端部で離岸流が発生しているが、沖側では海岸を背に左方向へ屈曲している。また、図9の(2)の領域でみられた周囲よりも顕著に流速が大きい領域が見られない。しかし、(1)の領域の流速を含め、全域で1.5倍程度流速が増大した。また、図10の右図より、着色剤はカスポ地形付近で沖に流出した後は、沿岸流にのり移動している。またこのケースでは7分間で約180m移動しており、平均流速は43cm/s程度であり、右よりも流速が増大している。これは海浜流を突堤が遮らなくなったことが原因と考えられる。

次に、図12に両側を突堤で囲まれ、海底勾配が一様な地形での海浜流の平均流速分布を示す。図より、海底地形および汀線に褶曲がないことで海浜流の局所的な集中による離岸流は発生していない。また左側突堤では沿岸流が集中することにより流速が増大している。

以上より、カスポ地形でない1/80程度の比較的緩勾配の一様勾配地形の場合では、海岸付近では離岸流は発生しなかったが、200m程度の波長のカスポ地形を有する地形の場合、波高1m程度の時にカスポ先端部付近で流速

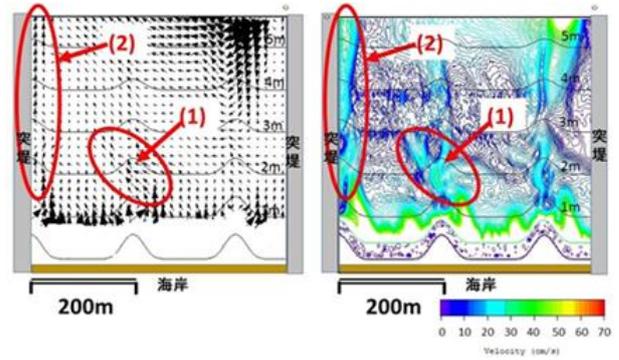


図9 平均流速分布 (1周期平均: 6秒)

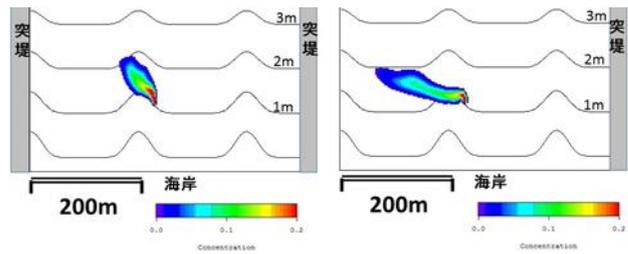


図10 仮想着色剤の散布状況  
(散布開始後7分、左: 突堤有り、右: 突堤無し)

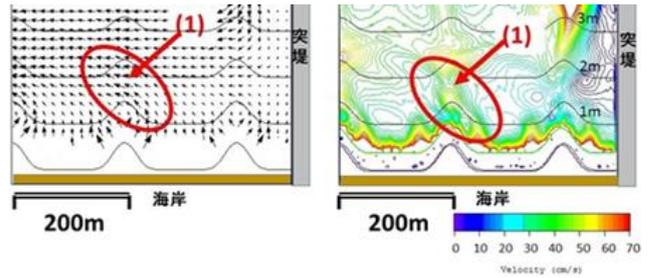


図11 平均流速分布 (1周期平均: 6秒)

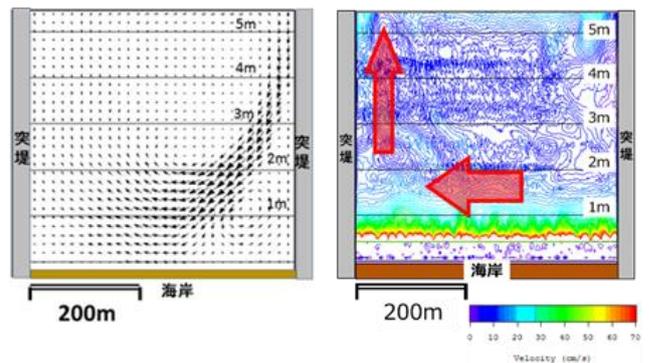


図12 平均流速分布 (1周期平均: 6秒)

が平均60cm/s弱の離岸流が発生したが、その後は沿岸流となり沖側へは流出しなかった。しかし、カスポ1波長の距離で両側を突堤で囲まれた地形では、カスポ先端部付近で発生し、離岸流の流速は平均30cm/s弱の流速となり流速が若干低下したが、さらに突堤付近の沖向の沿岸流で沖へ流出した。

以上より、網代浜においてカスポ地形先端部付近から突堤方向へ流出した離岸流は、カスポ地形のある砂浜で

の離岸流および突堤付近の沖向き海浜流の2つの流れの影響を受けた状況であったと考えられる。

## 5. 結論

現地調査において、波浪状況および地形的特徴から離岸流の発生箇所を特定することができた。確認箇所に海面着色剤で散布することで、離岸流の流況を可視化することができた。さらに、UAVによる空撮を行うことで、離岸流の流速や流況などの把握が可能であることが分かった。

現地地形を模式化して波浪場および海浜流の数値モデルに仮想海面着色剤の拡散状況計算の数値モデルと組み込み再現計算をおこない、離岸流場を再現し仮想着色剤の可視化が可能であることを確認した。その結果、網代浜海水浴場では構造物付近の離岸流より砂浜の離岸流の影響が大きい可能性があり、全域ではこの2つの離岸流が合成し、流れ場を生成している可能性がある。

以上より、今後様々な条件下での離岸流場を可視化しUAVで上空から撮影することにより、水難事故防止対策の為の技術向上に資せる知見を得る事ができるのではないかと考えられる。

## 参考文献

- 1) 西隆一郎, 萩尾和央, 山口博, 岩根信也, 杉尾毅: 水難事故防止のための離岸流調査に関する基礎的研究, 土木学会, 海岸工学論文集, Vol.50, pp.151-155, 2003.
- 2) 日野幹雄: 海浜流系の発生理論, 土木学会論文報告集, No.225, pp.17-29, 1974.
- 3) 海上保安庁救難課マリネリジャー安全推進室: 平成26年度における海難の現況と対策について, 海上保安庁, <http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h27/k20150318/k150318-2.pdf>
- 4) 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.
- 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) 酒井哲郎: 海岸工学入門, 森北出版株式会社, 2001.
- 7) 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾・空港整備事務所: 新潟港, 国土交通省, 2007.