

離岸流の発生の基礎的要因に関する研究

水工学研究室 大橋 俊樹
指導教官 細山田得三

1. はじめに

離岸流に関しては、すでに数多くの観測や研究が行われている。しかし、離岸流が原因とされる海水浴中の事故も毎年後を絶たないのが現状である。事故例によると、1つは高波浪来襲時にもかかわらず海に入り事故に至ったもの、もう1つは通常時波浪入射時に突如発生する離岸流によって沖に流され、事故に至ったものがある。いずれにしても、海浜を安全で快適なレクリエーションの場として利用するためには、離岸流の発生要因を解明する必要がある。

離岸流は地形や気象条件により発生や規模が異なることから地域性の強い流れであることが知られている。そのため、離岸流の発生を予測するためには、波浪特性の把握と離岸流の発生要因の解明が必要である。従って、数値解析による流動機構の把握がきわめて重要である。

2. 研究の目的

離岸流に関する研究はまだ浅い段階にあり、明確な発生メカニズムは知られていないのが現状である。そのため離岸流に関する研究として、仮想地形を用いた実験及び数値解析や現地での観測が行われている。そこで本研究は、離岸流の発生メカニズムの基礎的要因であろう、地形と波浪特性の条件から離岸流の生成機構との関係を把握することを目的とした。

離岸流の生成機構の検証には多くのデータが必要なため、実験や観測より繰り返し計算が可能な数値解析が有用である。そのため本研究では、波の非線形性と分散性を考慮した修正ブシネスク方程式を用い、離岸流生成について検討した。その上で、基礎的な離岸流の生成機構の解明を行うことを目的とした。

3. 解析モデル

本研究では、波の非線形性と分散性を考慮した修正ブシネスク方程式を用いた。この計算法では、流体運動の基礎方程式である連続式(1)と運動量方程式(2),(3)を解くことによって、波を再現することができる。また、式を鉛直方向に積分するため、波の非線形性のために生じる諸現象が同時に解くことができる。本研究では、運動量方程式の左辺に運動量拡散項を付加することで、運動量拡散による砕波などを再現した。

連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

x 方向の運動量方程式

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

y 方向の運動量方程式

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

ここで、 Q_x, Q_y はそれぞれ x, y 方向線流量 (m^2/s)、 D は全水深 (m)、 η は水面変動量 (m)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 h は静水深 (m)、 B は補正係数である。

また、 MD は砕波によるエネルギー減衰であり、式(4),(5)で表される。

$$MD_x = \nu_e \left(\frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_x}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$MD_y = \nu_e \left(\frac{\partial^2 Q_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

ここで、 ν_e は砕波によって生じる乱れによる運動量の混合を表す渦動粘性係数 (m^2/s) である。

また、 τ は海底摩擦による運動量減衰項であり、マンギン公式より式(6),(7)を用いて計算した。

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

$$\tau_y = \frac{gn^2 \times V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} \quad (7)$$

ここで τ_x, τ_y はそれぞれ x, y 方向のせん断応力、 n はマンギンの粗度係数 ($m^{2/3}/s$)、 U, V はそれぞれ x, y 方向の断面平均流速 (m/s)、 h は平均水深 (m) である。

以上の式を用いることで、砕波や海底摩擦による波の減衰を考慮した、波の再現性が高いモデルを用いて解析を行った。

4. 計算条件

離岸流の特性を把握するために、地形と波浪条件を変化させ、数値解析を行った。計算領域は、海岸線を1600m、沖方向に800mとし、波の造波には規則波を用いた。波浪条件は、平常時の波浪条件を基準として、入射波周期を5~10秒、有義波高を0.5~2.0mとした。仮想地形には、一様勾配(海底勾配 = 1/10)・カスパ地形を用いた。また、カスパについては、凹部分の幅(λ)を200m、振幅(η)を20~60m(波長と振幅の比を0.1,0.2,0.3)、海底勾配は1/10とした。

結果の表示には、領域を全体表示すると詳細がわからないため、結果の表示には岸方向500~1100m × 沖方向0~300mの領域中央を拡大したものを用いた。また、図中のベクトルは、流速を表示し、コンター図は沖方向への流速を表している。プラスなら沖へ、マイナスなら岸方向へ流れていることを示す。コンター図中の線は、地形の等深線を表している。なお、図はすべて各値を5周期平均したものをを用いた。計算時間は、計算領域全体が定常状態になることを確認したうえで、造波後200秒からを比較対象の範囲とした。

5. 解析結果

(1) 離岸流の再現

図.1, 図.2 に岸に対して直角入射の波 ($D=180$), 有義波高 (H)0.5m, 入射波周期 (T)5s における流速コンター図を示す。図.2 はカスパ地形で、 $\eta/\lambda=0.3$ である。一様勾配が全体に流速が散乱しているのに対して、カスパ地形では海岸付近では凸部分に離岸流が集中しているのがわかる。また、一様勾配地形においては、離岸流が発生しているものの、沿岸流が卓越し流速は小さい結果となった。このことから、離岸流は、地形によって規模や発生箇所が左右されると言える。

次に、実地形における離岸流の再現について述べる。図.3 に、新潟県島見浜付近の太夫浜の航空写真を (google マップより)、図.4 に解析結果を示す。太夫浜では、第九管区海上保安庁が観測を行っており、離岸流が確認されている。計算条件は、離岸流観測が行われたときの波浪条件を使用し、海図から地形を作成した。解析結果より、突堤付近で離岸流が発生していることがわかる。第九管区海上保安庁による観測でも、突堤付近から発生している離岸流が確認されている。流速等の詳細なデータがないため離岸流の比較は行えなかったが、発生位置については、実際の離岸流を再現できていると言える。

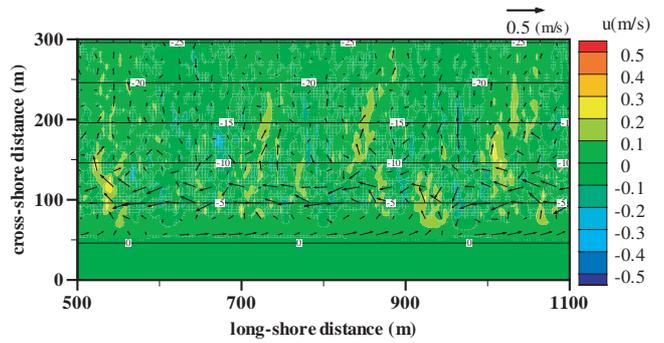


図.1 一様勾配地形 ($D=180, T=5, H=0.5$)

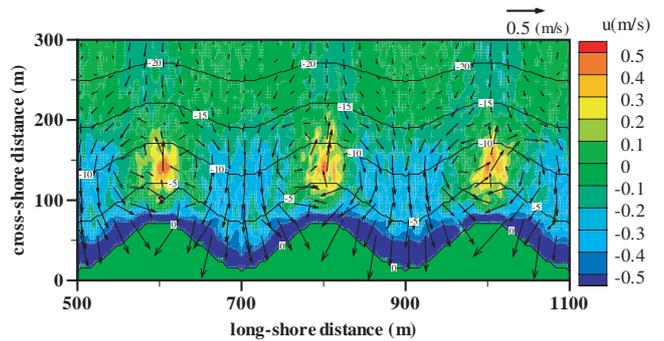


図.2 カスパ地形 ($D=180, T=5, H=0.5, \eta/\lambda=0.3$)



図.3 太夫浜 (新潟県島見浜付近)

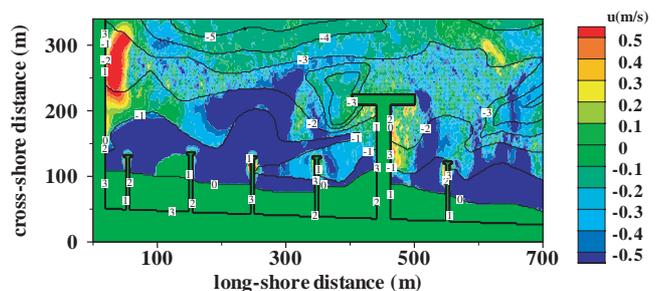


図.4 太夫浜の解析結果

(2) 離岸流の特性

離岸流は地形や波浪条件により発生や規模が異なることから、地域性の強い流れであることが知られている。そのためにも、地形や波浪条件が与える影響についての検討が必要である。以下に、地形・波浪条件が離岸流に与える影響について検討した結果について述べる。

図.5 に $\eta/\lambda = 0.1$ 、図.6 に $\eta/\lambda = 0.2$ の結果を示す。岸に対して直角入射の波 ($D=180$)、有義波高 (H)0.5m、入射波周期 (T)5s の波浪条件での流速コンター図である。同様の波浪条件下で $\eta/\lambda=0.3$ の結果は、図.2 に示した。

図.2,5,6 より、 η/λ が小さい場合は離岸流が長細いものになり、流速も小さい。形状は一樣勾配と近い傾向だが、離岸流の発生場所が岸の凸部分からのみと決まった場所にできているのが特徴に挙げられる。 η/λ が大きくなると離岸流が塊り、離岸流の最大流速も大きくなる結果が得られた。地形は、離岸流の形成に大きな影響を与えることがわかる。

図.7-9 に $\eta/\lambda = 0.3$ における主波向きの違いを示す。図.7,8 は、各主波向きにおける沖方向の流速コンター図となっている。主波向きについては、岸に対して直角入射が 180° 、岸と平行入射 (図中、左から右へ) を 90° の入射としている。有義波高 0.5m、入射波周期 5s の波浪条件での結果である。図より、波向きが海岸に対して鋭角になるにつれて沿岸流が卓越していくのがわかる。その結果、沿岸流が卓越することによって離岸流における流速は小さくなり、規模も小さくなっている。また、主波向きが変わることによって、離岸流が凸の部分から凹の部分へ離岸流の発生位置がずれていることがわかる。

図.9 に、各主波向きにおける離岸流の最大流速をプロットした図を示す。図より、有義波高が高くなるにつれて、離岸流の最大流速は同等の値に近づき、主波向きに依存しないことがわかる。また、有義波高 0.5m 付近に注目すると、入射波が岸に直角なものほど離岸流の最大流速は大きいことがわかる。主波向きが鋭角になるにつれて、沿岸流が卓越するためである。

また、有義波高について検討すると、有義波高が高くなるにつれて、離岸流の最大流速は減少する傾向が見られる。これは、波高が高くなるにつれて沿岸流が卓越や、離岸流面積の拡大によって、離岸流における最大流速が小さくなるためである。沿岸流が卓越する場合は危険でないが、離岸流面積が拡大する場合は、流れが遅いが流される領域が大きく危険な流れであると言える。

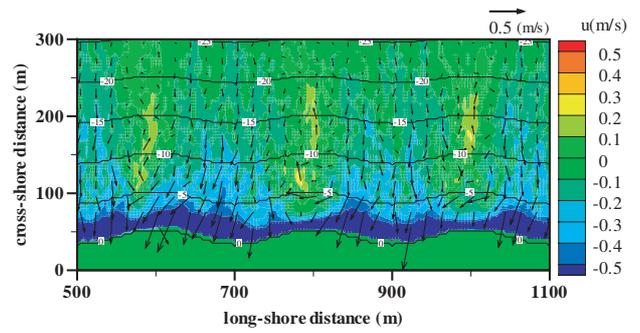


図.5 カस्प地形 ($\eta/\lambda=0.1$)

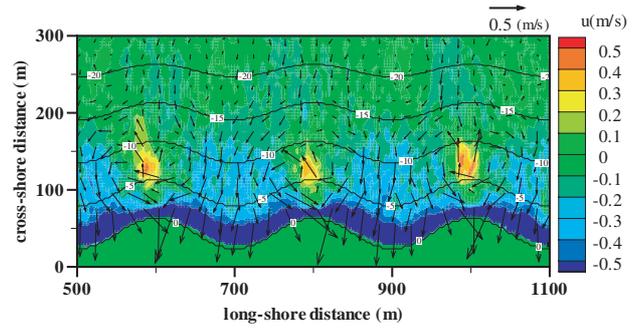


図.6 カस्प地形 ($\eta/\lambda=0.2$)

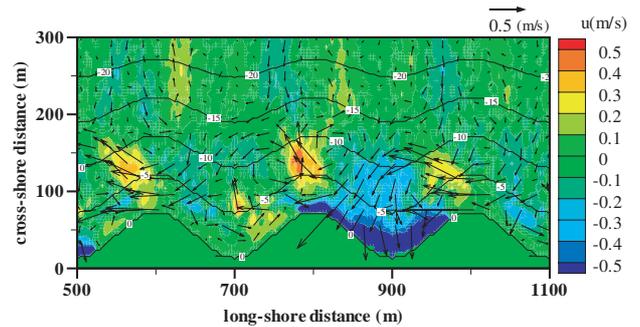


図.7 カस्प地形 (主波向き 170°)

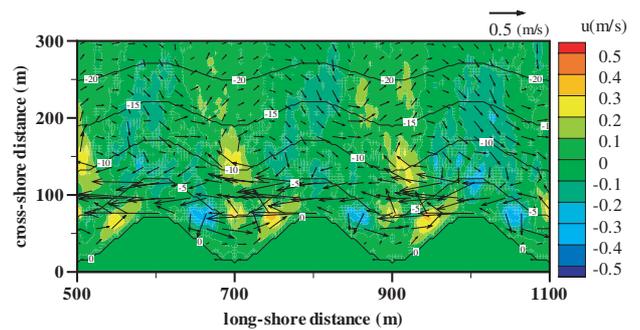


図.8 カस्प地形 (主波向き 140°)

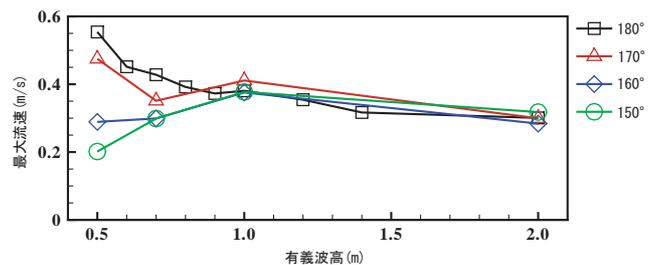


図.9 主波向きによる流速の違い ($\eta/\lambda=0.3$)

(3) 離岸流の指標

本研究は、入射波周期を 5~10 秒、有義波高を 0.5~2.0m の波浪条件下の数値解析を行った。これらの結果をまとめることで、離岸流を定量的に評価する。定量的に評価するために、離岸流最大流速 (U_{max}) を沖波速 (C) で除すことで無次元量として扱っている。また、沖波高 (有義波高: H)、沖波長 (L_0) を用い、波形勾配を求めること、波高を無次元量として扱った。

図.10-12 に各地形の波形勾配における最大流速と最大流速を示した。図には、主波向き 180° の直角入射における条件化で計算したすべての結果をプロットした。図より、 $\eta/\lambda=0.1$ 以外の地形では波形勾配が 0.013 のときピークの値を示していることがわかる。主波向きが流速に及ぼす影響は小さいため、カスプ地形において η/λ が 0.2 以上の地形では、波形勾配が 0.013 のとき離岸流が最大流速を示すと言える。

以上のことより、現地において波高、周期、カスプの波長と振幅比をもとめることで、その地形に応じた離岸流の最大流速を求めることが可能である。

また、離岸流の評価には、しばしば碎波帯相似パラメータが用いられる。碎波帯相似パラメータは式 (8) で表わされる。

$$I_r = \frac{i}{(H/L_0)^{1/2}} \quad (8)$$

ここに、 i は海底勾配、 H は波高、 L_0 は沖波長を表す。碎波帯相似パラメータを用いて、離岸流の流速の特徴を示す。図.13,14 より、最大流速・平均流速ともに碎波帯相似パラメータが 0.7~1.0 の間で最大流速となることがわかる。碎波帯相似パラメータ I_r は、海底勾配と波形勾配の比を求めるとなっている。従って、海底勾配と波形勾配の 1/2 乗が同等または少し低い値となるときの離岸流の流速は最大値となる傾向があるといえる。

本研究では、海底勾配を統一することで離岸流の傾向を検討した。そのため、海底勾配や地形が大きく変化した場合の予測は困難であるが、カスプ地形においては、 η/λ と波形勾配が離岸流の最大流速に影響を与えることがわかった。また、周期が長くなるにつれて離岸流面積が大きくなり、最大流速は小さくなる傾向が得られた。波高については、有義波高が 1.0m 付近で最大流速を示し、波高が高くなると沿岸流の卓越するため、離岸流の流速は減少し、波形勾配をとることで離岸流の最大流速を予測できる可能性があることがわかった。

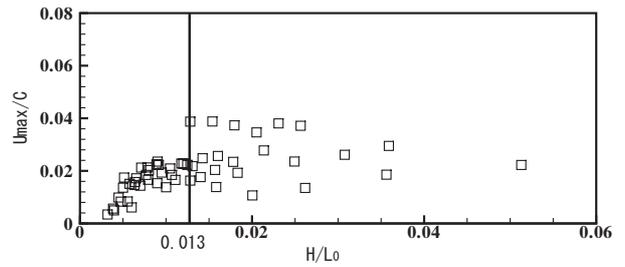


図.10 カスプ地形 ($\eta/\lambda=0.1$)

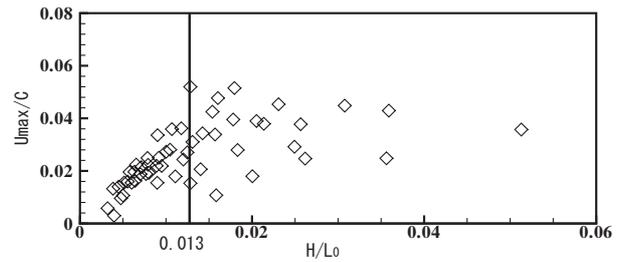


図.11 カスプ地形 ($\eta/\lambda=0.2$)

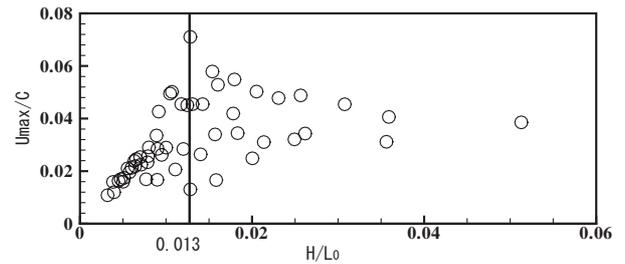


図.12 カスプ地形 ($\eta/\lambda=0.3$)

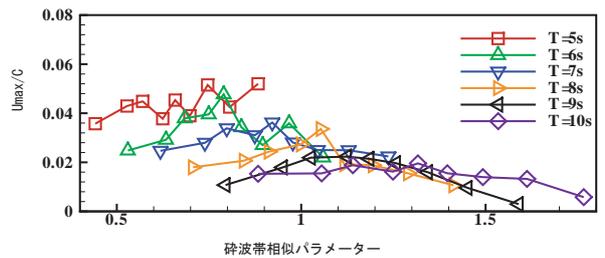


図.13 カスプ地形 ($\eta/\lambda=0.2$)

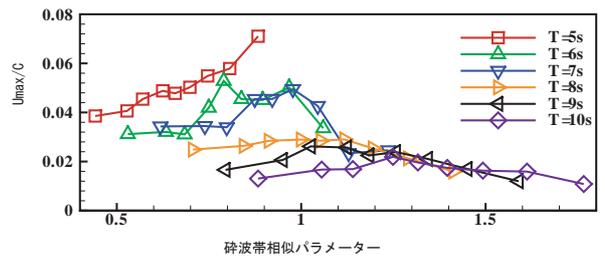


図.14 カスプ地形 ($\eta/\lambda=0.3$)

(4) 離岸流の発生要因

離岸流の発生要因を解明するため、図.2の離岸流内外の水位・流速を比較検討を行った。図.15に比較した座標、図.16に各座標の水位、図.17に各座標の流速、図.18に領域全体の水位総量を示す。

図より、領域全体の水位が上がる300秒前後で水位が上がり、その影響で380秒前後の流速が速くなっている。水位が上昇することで、離岸流の最大流速が大きくなり、水位が減少することで、離岸流の最大流速が減少する。領域全体の水位の変動に合わせて流速も推移していることがわかる。

また、離岸流発生の発端であるF点に注目すると、F点のみ常に周りの領域に比べ水位が低く、沖向き流れが常に発生していることがわかる。F点は離岸流の発生の発端であり、F点で常に水位が低いことから、離岸流の発生には水位の差が影響していると考えられる。その他のA~E点では水位が変わらないことを考えると、離岸流内部と外部で水位差はなく、F点のみが低いことで、離岸流が発生しているといえる。その他の領域でも同様に水位を調べたところ、F点付近の離岸流発生の発端領域のみで水位が低いことがわかった。従って、離岸流の発生要因は、F点のように常に水位が低い領域が存在することによって発生していると考えられる。従来の考えでは、離岸流は水の収支によって発生するとされているが、領域の水位総量と離岸流内外部の水位より、水位が上下し水が増減しても離岸流は常に発生していることから、離岸流の発生は水位差によって発生していると言える。また、常に水位が低い領域が存在することで、流況が循環した流れとなり、離岸流が常に発生し続けている。

離岸流は地形や波浪条件により発生や規模が異なることから、地域性の強い流れであることが知られている。また、離岸流の流況は複雑であり、離岸流の検討は難しいものとされている。このような中、離岸流の発生要因は、サーフピートやラディエーションストレスの減少が挙げられてきた。また、海浜流の発生領域を分類することで、各領域における離岸流の特性が違うことも指摘されている。本研究では、水位差によって離岸流が発生しているとしているが、観測結果による検証は難しく、実現象との検討ができなかった。今後、現地観測を行い、実現象との比較を行うことで、離岸流の発生要因を更に検証していく必要がある。

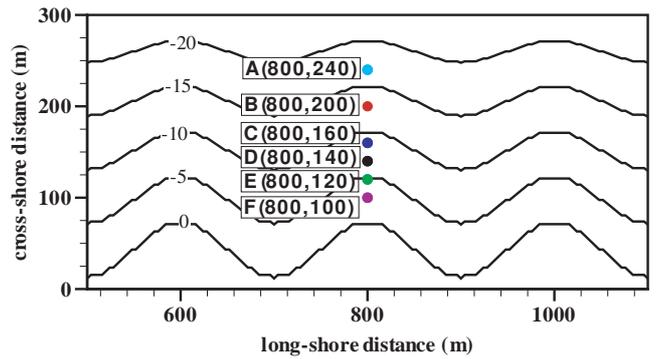


図.15 座標

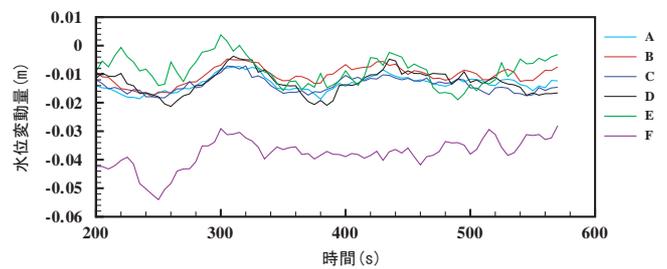


図.16 各地点の水位

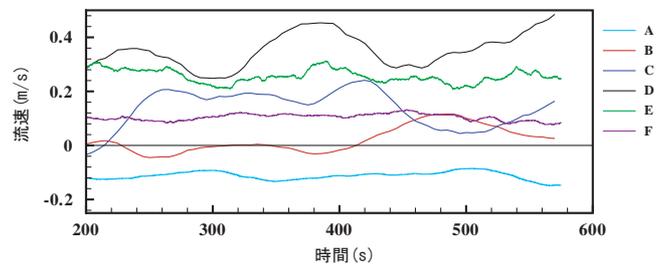


図.17 各地点の流速

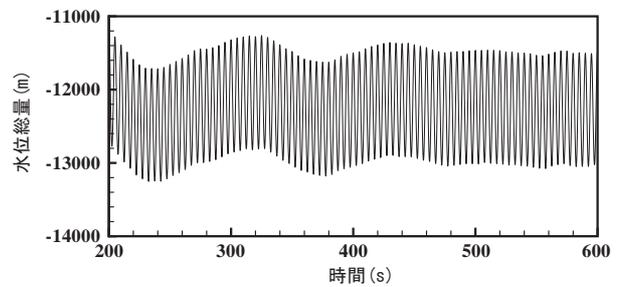


図.18 領域全体の水位総量

6. 結論

離岸流に関する研究はまだ浅い段階にあり、明確な発生機構は知られていないのが現状である。そこで本研究では、離岸流の発生機構の基礎的要因の解明を目的とした。以下に、本研究により得られた結果を総括する。

● 離岸流の発生機構

従来の離岸流の発生機構は、水の収支によって発生するものと考えられていた。しかし本研究では、離岸流の内外部での水位差に注目することで、離岸流の発生は水位差によって誘発されることがわかった。構造物が存在しても水位差によって離岸流は形成され、ある領域では常に水位が低く、循環する流れが形成されている。

● 波浪条件

有義波高、有義波周期、主波向きを変化させることで、これらのパラメーターが離岸流に与える影響を検討した。その結果、波高、周期ともに離岸流の流速に、主波向きは、発生個所や沿岸流に影響を与えることがわかった。また、波浪条件によって離岸流が卓越するパラメーターが存在することがわかった。

● 離岸流の再現

新潟県島見浜付近(太夫浜)を対象に数値解析を行った。その結果、突堤付近での離岸流を再現することができた。

● 離岸流の予測

本研究では、今までに試みられていない離岸流の流速の定量化を行った。その結果、砕波帯相似パラメータと流速(無次元化)では砕波帯相似パラメータが0.7~1.0付近で最大流速になる。また、波高(無次元化)と流速(無次元化)では、波高(無次元化)が0.013の値で最大流速を示す結果を得た。これらの結果より、カスプ地形での離岸流の最大流速の予測指標を示すことができた。

本研究では、修正ブシネスク方程式によって、準3次元モデルによって解析を行った。しかしながらいくつかの残された問題がある。以下にそれらの問題を列挙する。

(1) 離岸流の発生機構

本研究では、準3次元モデルを用いているが、流速は断面平均として一様な流速であり、鉛直分布を考

慮していない。特に、海岸付近では水深が浅いため流況が複雑であり、海底と水面では流れが逆流の場合もあり、離岸流の発生機構を検討する上で、流速の鉛直分布を無視できない。今後、流れの鉛直分布を考慮するために、解析モデルを発展させる必要がある。

(2) 指標の汎用性

本研究では、地形を一様勾配とカスプ地形に限定して離岸流を評価してきた。これらの地形は、対称地形であり、自然界ではあり得ない地形である。離岸流の指標を示したが、汎用性は低い。汎用性を高めるためにも、実地形やそれに近い地形での解析が必要である。

(3) 離岸流の予測

海浜事故の防止には離岸流の予測が必要である。本研究での結果を用いて予測をするには、海岸付近の水位データが必要となり現実的ではない。実用的な離岸流の予測手法を作るには、多くの現地観測、それに基づいた解析による多くのデータが必要不可欠である。今後、より多くの地形で同等の評価を行いデータの蓄積をしていく必要がある。

参考文献

- 1) 出口一郎、吉井匠、野村尚生、荒木進歩(2006): 離岸流の時間変動特性について、海岸工学論文集、第53巻、pp.101-105。
- 2) 出口一郎・荒木進歩・竹田怜史・吉井匠・藪崎洋隆(2005):カスプ地形で発生する離岸流の特性について、海岸工学論文集、第52巻、pp117-120。
- 3) 出口一郎・荒木進歩・竹田怜史・松見吉晴・古河泰典(2003):鳥取県浦富海岸で観測された離岸流の特性、海岸工学論文集、第50巻、pp151-155。
- 4) 岩垣雄一・榎木亨(1979):海岸工学、第11章、共立出版
- 5) Noda, E.k(1972): Rip-currents, Proc.13th Coastal Eng. Conf., pp.653-668.
- 6) Bowen, J.A. and D.L. Inman(1969): Rip-currents, Part and Par, Jour. Geophys. Res., Vol,74, No.23