

新潟県沿岸域の離岸流生成機構の解明に関する研究

水工学研究室 竹林 剛
指導教官 細山田 得三

1. はじめに

毎年、マリインレジャー等に伴う海浜事故が発生し、場合によって死亡事故につながるケースがある。その海浜事故の中の1つに海の流れが原因で起こる事故があり、代表的な流れとして、岸側から沖側に向かう強い流れがある。

この流れは一般に離岸流(Rip Current)と呼ばれている。多くの場合、離岸流の中にいることに気づかずに、懸命に陸に向かって泳ごうとして体力を消耗してしまい、死亡事故等につながっている。離岸流による事故の報告は全国各地であり、新潟県でもこのような事例の報告がある。

2. 研究の目的及び流れ

離岸流は気象や地形等によって流れや規模が異なる上に、発生時期・期間の予測が困難な流れであることが知られている。そのため、離岸流の生成機構を把握することは重要である。そこで本研究では、基礎的な離岸流生成機構の解明を目的とし、修正ブシネスク方程式を用いて平面波浪場の数値計算を行い、基礎的な離岸流生成機構について検討した。また計算には一定勾配から一定水深に変わる一様勾配地形と直線海岸線と平面海岸の中で沖合に指数関数的に減少していく周期的な流れを生ことが知られている Shell 式の地形を用いて行った。

3. 数値計算

波の波動場の計算には、平面2次元における連続の式(1)及び修正ブシネスク方程式(式(2)、(3))を用いて行った。以下にそれらの式を示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad \dots (1)$$

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

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

ここで、 η は水位変動量(m)、 Q_x 、 Q_y は X (岸沖) 方向、Y (沿岸) 方向の線流量(m³/s)、D は全水深(m)、B は補正係数(= 1/21)、h は静水深(m)、t は時間である。また式(2)、(3)の左辺第5項は、それぞれ式(4)及び式(5)のようになる。

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

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

ここで各式中の ν_e は碎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(m²/s)であり、次式のように表される。

$$\nu_e = \frac{gd}{\sigma^2} f_D = \frac{\alpha_D sgd}{\sigma^2} \sqrt{\frac{g}{d} \frac{\hat{Q} - Q_r}{Q_s - Q_r}} \quad \dots (6)$$

$$\nu_e = 8 \times 10^{-4} \sqrt{gd} \frac{d}{s} \quad \dots (7)$$

式(6)は碎波帯内の波高減衰は精度よく計算できるが、碎波帯外にある構造物周辺では粘性による運動量の減衰が無いことになり、非現実的な線流

量が計算され、構造物の隅角部などでは非常に大きな流速が計算されることがあり、海浜流の流況も非現実的なものとなる。このような場合には、海浜流の計算でよく用いられている式(7)を用いた。ここで ρ は碎波帯内で 2.5 となる係数、 s は海底勾配、 d は平均水深(m)、 f_D は碎波減衰係数、 Q は線流量(m^2/s)、 \hat{Q} は線流量の振幅(m^2/s)で Q_s 、 Q_r は次式で計算される。

$$Q_s = 0.4 \times (0.57 + 5.3s) \sqrt{gd^3} \dots (8)$$

$$Q_r = 0.135 \sqrt{gd^3} \dots (9)$$

以上の計算式を用いて、変動水位量、 $X \cdot Y$ 方向の線流量を求めていく。それらを求めた後、式(10)、(11)より、 $X \cdot Y$ 方向の海浜流速を求める。

$$U = \frac{Q_x}{D + \eta} \dots (10)$$

$$V = \frac{Q_y}{D + \eta} \dots (11)$$

4. 地形条件

地形は 1/25 の一様勾配から水深 6.0m の一定水深になる一様勾配地形(図-1)と、式(12)で表される Shell の式で求められる地形を使用した(図-2)。

$$d(x, y) = 0.025x \left[1 + 20e^{-3\left(\frac{x}{20}\right)^{1/3}} \sin^{10}\left(\frac{\pi y}{80}\right) \right] \dots (12)$$

ここで、 d は点(x 、 y)における水深、 x は汀線からの沖向きへの長さ、 y は汀線方向への長さを表す。これは直線海岸線と平面海岸の中で沖合に指数関数的に減少していく周期的な流れを生むと知られている。

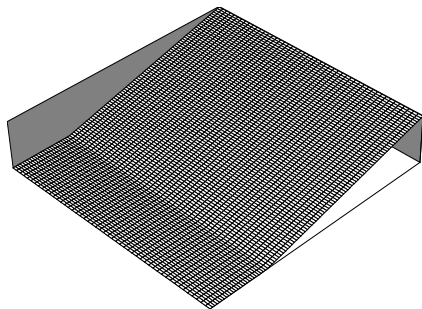


図-1 一様勾配地形

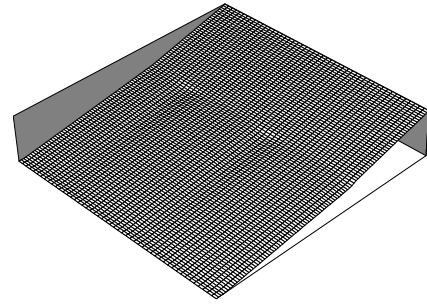


図-2 Shell 式地形

Shell 式の地形の特徴として、窪みがあることである(図-3)。

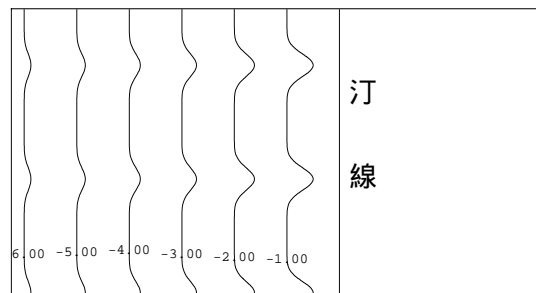


図-3 平面図(Shell 式地形)

5. 計算条件

計算の条件として、表-1 に示すケースで計算を行った。また時間ステップ dt は 0.1s とし、 x 方向、 y 方向の格子間隔を 2.0m として数値計算を行った。

	case1	case2	case3	case4	case5
地形条件	shell	shell	shell	一様	一様
有義波高(m)	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0
有義波周期(s)	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
波向	180	180	180	180	180
造波方法	規則波	規則波	規則波	規則波	規則波

表-1 計算ケース

	case6	case7	case8	case9	case10
地形条件	一様	shell	shell	一様	一様
有義波高(m)	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0
有義波周期(s)	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
波向	180	180	168	180	168
造波方法	規則波	不規則波	不規則波	不規則波	不規則波

6. 計算結果

6-1 一様勾配地形(規則波)

図-4 に計算開始から 64 周期目(567-576 秒)の 1 周期分で平均した各流速ベクトル図を示す。

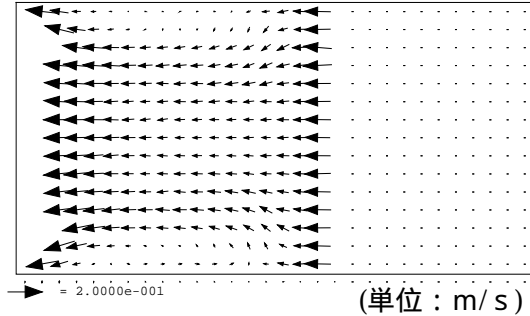


図-4 ベクトル図(波高 3.0m)

規則波時で、一様勾配地形の場合、波浪場は波が沖から岸へ、岸から沖への往復流が流れ続ける。この時は波高による流れの差異は見られず、どのケースでも岸から沖への強い流れである、離岸流のような流れは見られなかった。

6-2 Shell 式地形(規則波)

前節と同様の計算条件の時の、波高 3.0mの平均ベクトル図を図-5 に示す。

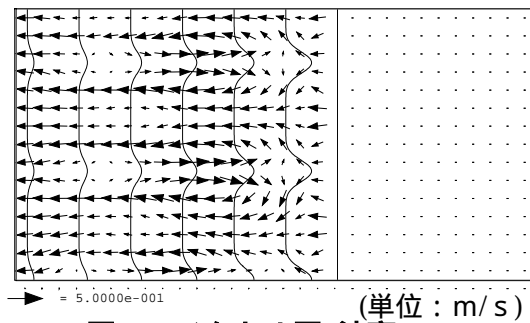


図-5 ベクトル図(波高 3.0m)

図-5 より、汀線近傍で流れが乱れ、沖へ向かう流れが発生していることが分かる。その場所は、窪みが存在しているところ付近で流れがその部分に集中し沖へ向かう離岸流と思われる流れがある。また Shell 式地形を用いたどのケースを見ても、汀線近傍で流れが乱れ、沖へ向かう流れが発生していた。流れは波高が高くなるにつれ乱れが大きくなった。次にこの時の時系列データ(540-900 秒間)(図-5 の点 a)を図-6 に示す。

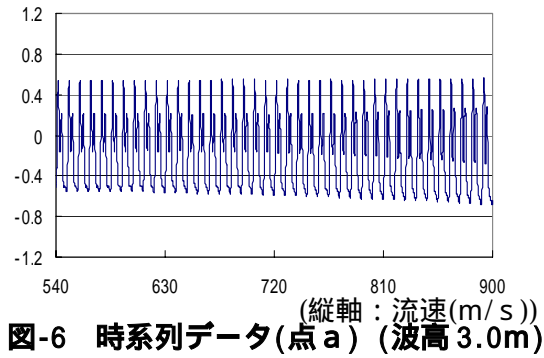


図-6 のデータを平均し、流速を求めると 0.133m/s(沖向き)となり、離岸流が発生していることが分かる。また最大流速は 0.59m/s であった。

6-3 一様勾配地形(不規則波)

不規則波では岸に直角に入射する波と 12° で入射する波を用いて行った。

図-7 に 64 周期目(567-576 秒)の 1 周期分で平均した各流速ベクトル図を示す。

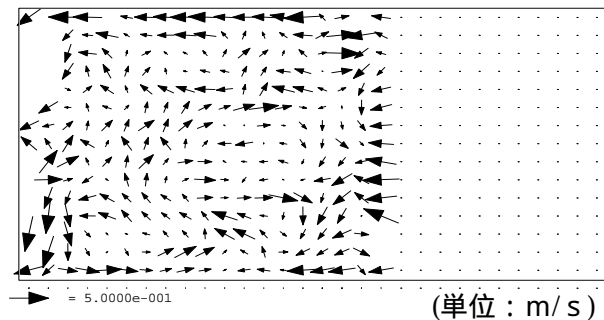


図-7 ベクトル図(入射角 180°)

図を見ると沖向きの流れが発生しているのが分かる。しかし、その流れは途中で沖からの波の影響などもあってか、沿岸方向にそれてしまう流れとなっている。確かに離岸流であるとは言い難いが、不規則波を用いることで一様勾配地形ではあるが、沖向きの流れが発生することが分かる。

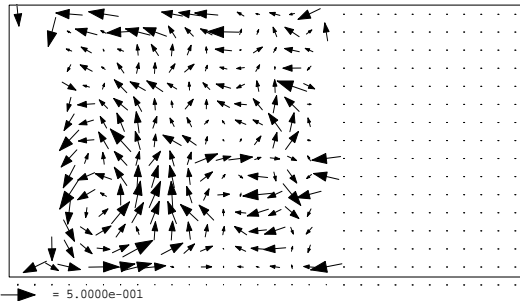
6-4 Shell 式地形(不規則波)

図-8 に前節と同様の計算条件の時の、の平均ベクトル図を示す。

ベクトル図を見ると、波形のような分布を示している。また、窪み付近では、流れが集まりやすい状況になっている。沖へ向かう離岸流は一様勾配地形よりも速く、速いところで汀線付近では

0.7m/s くらいになり、速いところでは 0.8m/s を越える流速を記録した。

入射角 168° の時は、180° のケースと比べて、同じような傾向が見られ、離岸流が発生した。



(単位：m/s)

図-8 ベクトル図(入射角 180°)

6-5 離岸流発生過程

数値計算を通し、離岸流発生の過程を把握が可能となった。以下にその過程を示す。

1. 波が汀線まで押し寄せて、岸にぶつかる (図-9) (図中の丸部分)
2. 水位が窪み間部分に集中し、汀線付近の窪み間部分で水位が上昇する (図-10) (図中の丸部分)
3. 波高の不均一より、沖への流れが発生し、離岸流となる (図-11)

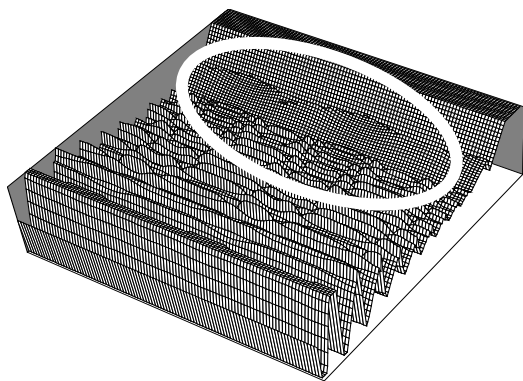


図-9 離岸流発生過程 1

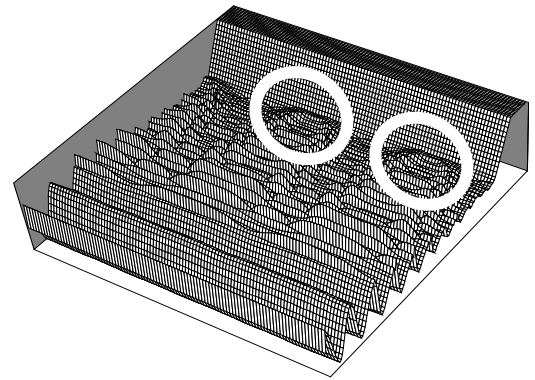


図-10 離岸流発生過程 2

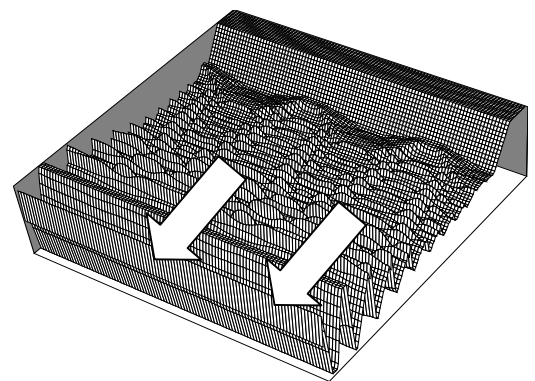


図-11 離岸流発生過程 3

7. 結論

数値計算の結果、窪みがある Shell 式の地形は一様勾配地形とは異なり、沖向きの流れが見られ、この窪みの存在が離岸流の流れ及び発生を助長していることが明らかになる共に、数値計算を通して離岸流が発生する過程を把握することができた。離岸流は幅が 10~30m の狭い領域で発生し、200~300m の長さには達していた。また発生した離岸流の流速は最大で約 1.0m/s となった。

8. 参考文献

- 【1】川邊真：実海岸を対象とした底質移動及び海底地形変化に関する数値実験、2003、長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文
- 【2】本間仁監修・堀川清司編：海岸環境工学 - 海岸過程の理論・観測・予測方法、東京大学出版会、1985
- 【3】Noda, E.K. : Rip-currents, Proc. 13th Coastal. Eng. Conf., ASCE, 1972