

汀線近傍における海浜流・離岸流の規則性・不規則性の抽出

長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 吉川 大介
長岡技術科学大学 環境社会基盤工学 細山田 得三

1. はじめに

海浜流とは、海岸付近の流れのうち海浜の碎波帯及び波打ち際周辺において波浪が直接の要因となって生ずる流れである。海岸から沖合に向かう流れを離岸流、岸に沿って流れる流れを沿岸流、沖合から海岸に向かう流れる向岸流等からなり、これらを総称して一般的に海浜流系と呼ぶ。特に、海浜流系の一環である離岸流は、海岸に打ち寄せた波が沖に戻ろうとする時に発生する強い流れで、1m/s以上にもなり、波の大きい時には2m/s程度にも達することがある。この速さは人間の泳力を超えており、海水浴やサーフィンでの水難事故などの原因となっている。離岸流の存在は見た目にはなかなかわかりづらく、複雑な流れにより急に波浪が高くなることもあり、海水にもまれそのまま溺死してしまう可能性が高い。さらには、こうした高速流によって漂砂が生じ、海岸近傍において地形変化にも影響も与えている。

我が国ではこうした海岸流起因の水難事故や海岸浸食に関連した地形変化が多く起こっており、海浜流に関する研究は、長らく離岸流のメカニズムを追求することを目的として理論・数値計算、観測、実験と多岐にわたった多くの研究が積み重ねられている。しかしながら、従来の研究の中でも離岸流がなぜ発生するのか、どのような条件で最も成長するのかといった基礎研究は研究全体の中で占める比率はかなり小さいと思われる。

また、図-1に示すような沿岸方向にほぼ一定間隔で凹凸を有する規則的なパターンの地形がある。こういった地形は離岸流及び沿岸流による砂の輸送によって形成されたものであり、この現象を流体自身が有する力学的不安定性から発生されたものとする仮説に関心を引いている³⁾。これはエッジ波や長周期波などの外因要素が存在しなくても発生するというものであり、代表的なものに日野の理論がある^{1)~2)}。しかし、どのような現象がこの離岸流発生に直接起因しているかについては、



図-1 沿岸方向のセルパターン
北海道興部漁港北西の海岸 (Google Satellite)

はっきりとわかっているわけではなく、研究結果に関して必ず留保が付けられるため^{1),2)}、セル構造を有する強力な離岸流の生成を説明する決定的な結論とはなっていない。そのような背景を踏まえ、本研究では離岸流発生 of 直接的な原因について基礎的な研究を行ったものであり、極めてシンプルな数値モデルによって、離岸流の動態を可視化することを目的とした。

なお、問題を単純化するために地形変化をあえて行わず、一様な平均場での比較的単純な造波条件を与え、セル構造の動態に焦点を当てた。海底地形が海浜流に従って発達する場合、海浜流・離岸流の成長を助長することにもなるはずである。しかし、時間スケールが長くなり、そこまで到達する以前でも離岸流の性質を抽出することが可能ではないかと判断し、ここでは固定床にとどめた。また、カスプ地形に見立てた凹凸地形を汀線近傍に設定し、その凹凸の規模が離岸流の発生・強化にどの程度寄与するかについても検証を行った。

2. 計算手法

本研究で用いた数値モデルは極めてシンプルなものであり、平面2次元の連続方程式(1)、ラジエーションシストレスを含んだ2次元の非線形波方程式(2)、(3)である、入射波は打線に直角のみである。

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\bar{\eta} + \bar{h})U] + \frac{\partial}{\partial y} [(\bar{\eta} + \bar{h})V] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - \frac{1}{\rho(\bar{\eta} + \bar{h})} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{CU}{(\bar{\eta} + \bar{h})} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} - \frac{1}{\rho(\bar{\eta} + \bar{h})} \frac{\partial S_{yy}}{\partial x} - \frac{CV}{(\bar{\eta} + \bar{h})} \quad (3)$$

ここに、 U , V , ρ , g , $\bar{\eta}$, \bar{h} , C はそれぞれ x 方向, y 方向水平流速, 水の密度, 重力加速度, 平均水位上昇高, 水深, 海底摩擦係数であり, 式中の $\bar{\eta} + \bar{h}$ は水深と等しい. S_{xx} と S_{yy} はラジエーションストレスで, 計算領域の水深は十分に浅いと見なし($\kappa \bar{h} \rightarrow 0$), S_{xx} と S_{yy} は次のように計算した.

$$S_{xx} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \left(\frac{2\kappa \bar{h}}{\sinh 2\kappa \bar{h}} - \frac{1}{2} \right) \cong \frac{3}{16} \rho g H^2 \quad (4)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \left(\frac{2\kappa \bar{h}}{\sinh 2\kappa \bar{h}} - \frac{1}{2} \right) \cong \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (5)$$

また, 流れの場を可視化する1つの方法として染料投入を模擬したパッシブスカラー量 c の輸送方程式(6)を用いた. 式(6)において拡散項はゼロとしている.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial Uc}{\partial x} + \frac{\partial Vc}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

なお, これらの計算方法には経験則に依存する度合いの高いと考えられる砕波はモデル化されておらず, 計算の非線形性と汀線に向かって水深が減少することによる波高低減で砕波を模擬した現象を表現した. 式(1), (2), (3), (6)の時間積分にはアダムスバッシュフォーススキームを用いた.

図-2には計算に用いた領域図を示す. 計算に用いた格子は直行格子であり, 岸沖方向(x), 沿岸方向(y)にそれぞれ250, 150個, 格子サイズ Δx , Δy をそれぞれ5m, 10mとし, 計算領域は岸沖, 沿岸

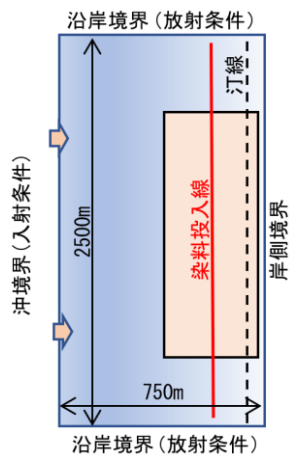


図-2 計算領域の模式図
肌色部: 平面可視化対象領域

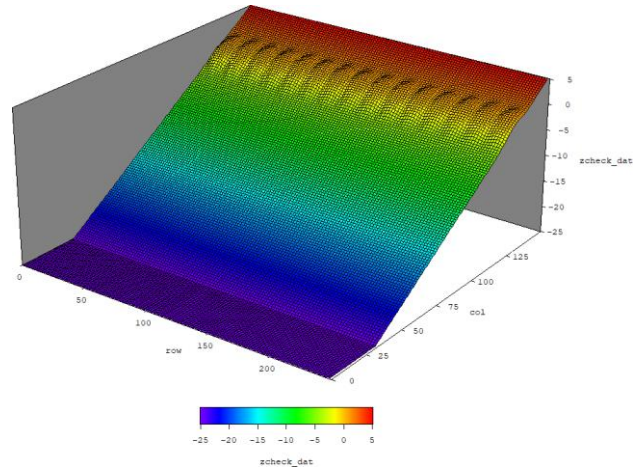


図-3 カस्प地形に見立てた凹凸地形の3D図

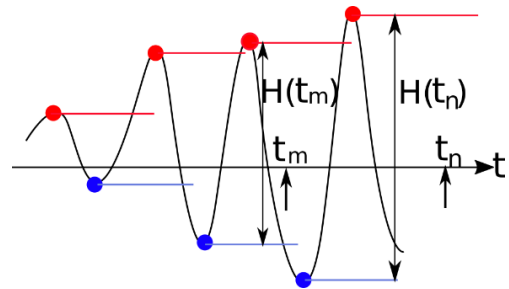


図-4 時間発展計算とともに波高を算出する考え方
時刻 t_n, t_m での波高 $H(t_n), H(t_m)$

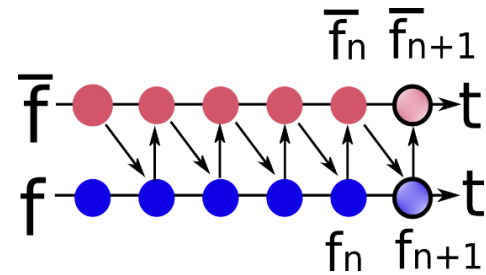


図-5 時間発展計算とともに移動平均を算出する考え方

方向がそれぞれ750m, 2500mとした. また前浜勾配は0.05とし, 一様勾配として設定した. なお, 計算に用いた入射波は全て正弦波の規則波であり, 0.7m, 周期は8sとした. このパラメータを砕波帯相似パラメータ I_r で示すと, およそ0.3程度となる. この範囲は日野による理論解析の適用範囲となり, 流体力学的不安定理論によって離岸流セルが生じる範囲に含まれる⁴⁾. また, カस्प地形に見立てた凹凸地形の3D図を図-3に示す. この凹凸地形は式(7)を用いて地形データに凹凸の標高 $ZZ(m)$ を加算することで求めた.

$$ZZ = 0.5Z(1.0 - \tanh(a(xx - 2.0xl))) \quad (7)$$

なお, Z , a , xx , xl のパラメータはそれぞれ凹凸

の標高(m), 山斜面の勾配, 凹凸頂上からの距離(m), 山の幅のスケールを示す. 凹凸地形の設定間隔は後ほど説明をする図-7によって求められた一様な平均場で発生する沿岸方向のセル構造をもとに設けた.

従来の海浜流系の研究は, 流れの計算に入る前にエネルギー平衡方程式や緩勾配方程式を使って波高分布を求め, 式(4), (5)のHを与えてラジエーションストレスの場が定常であり, そのため海浜流の場も定常に向かうことが前提になっていると思われる. 波高分布の推定として時々刻々と算出される水面変動について時刻歴から波の峰と谷を抽出し, その差を波高とした. そのため波高分布を事前に求める必要はない. この方法は波動場に反射が重複している場合には進行波を分離できないが汀線での波の打ち上げによる反射は小さいものとして本研究では採用した.

波によって引き起こされる海浜流系はこれら式(1)から(3)に含まれる時間発展の移動平均場として求め. 時間平均はある時点で過去の時間歴を平均して求めることになるが, 平均の個数は任意に設定できる. 例えば, 図-5に示すように時刻nにおいて取得されている平均 \bar{f}_n が過去のN個のデータによって求められていたと仮定すると新しく算出された f_{n+1} によって平均する平均値は重み付き平均として以下のように求めることができる.

$$\bar{f}_{n+1} = \frac{(N-1)\bar{f}_n + f_{n+1}}{N} \quad (8)$$

なお, n=1ではデータがないため決定されていないが, $\bar{f}_n = f_n$ とし, 時間が進行するに従い, 移動平均が真値に近づく. またNの値を固定せず, 時間ステップ数nとして変化させた場合, 計算終了時は全平均を一致する. この方式により(1)~(3)によって求まる水位変動, 平均流速の移動平均が時間進行とともに即座に求まることになる. 式(8)における変数をfとして, η, U, V を適用し, 平均水位変動, 海浜流・離岸流流速とした.

3. 計算結果

(1) 岸沖縦断分布

図-6には岸沖方向流速の岸沖方向分布の初期状態からの時間変化を示す. 汀線から数十メートル

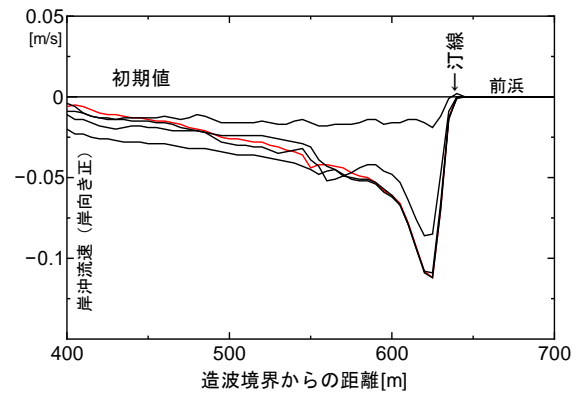


図-6 沖向き流速の岸沖分布と時間変化

の位置で沖向きのピークを持ちすべての位置で沖向き流れとなっている. 平均流速が沖向きの離岸方向の流れとなっていることは質量保存則によって説明され, 既往研究においても確立された現象と思われる. 水平流速は時間とともに赤実線で示した一定値に近づいており従来の理論解析や計算手法である定常の仮定についても確認することができた.

(2) 離岸流・海浜流系統の可視化

沖向き流速, 渦度, および物質の移流による流れの2次元的な広がりの中で離岸流の空間的な構造を調べた. 図-7には離岸流セルが安定的に生じたケースのある時間における水平流速, 渦度, 染料の空間分布から推定された沿岸方向のセルの分布を示す. 染料の時間発展は式(6)で計算された変数cの分布である. 赤い破線はこれらの図-4から推定された沿岸方向のセルの頂点に該当している. 図-4の縦方向(沿岸方向)は1500mであり, 赤い破線間の距離が1238mであることから8波のセル構造を持つため, 波長 L_c は155mとなる. LBは碎波幅であり, 本研究では水面低下の極値をとる位置と汀線の距離としている. 既往の理論研究^{1)~3)}によればパラメータ($= 2\pi LB/L_c$)の値が0.785~4.2とされており, 本研究の計算結果では3.0程度であることから成長範囲であることが分かった. 谷川らの研究³⁾では $\lambda \approx 8$ 程度で最も成長するとされており, 3.0は成長範囲ではあるが, 成長率が最大には対応していない. 数値計算によって最大成長率のセル構造条件を見出すことは数多くのケースが必要で制御された室内実験と同様困難と言わざるを得ない. 離岸流セルの間隔を種々の経験的な仮定の元

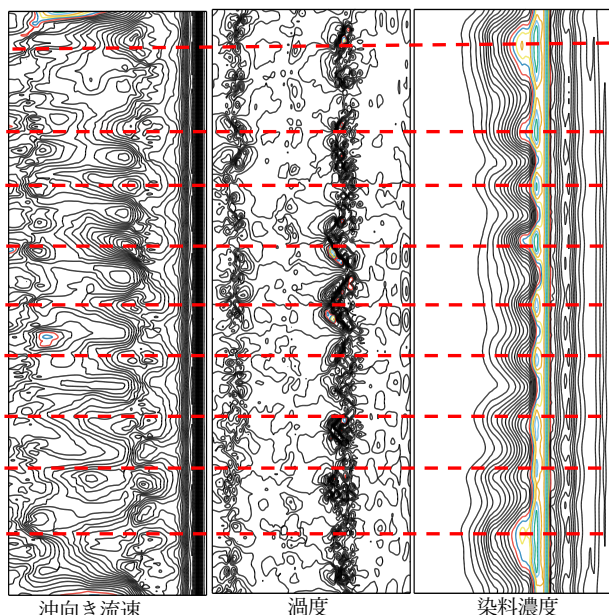


図-7 冲向き流速・渦度・染料濃度分布の関係と水平波長

平均 $L_c=155$ m, $L_b=75$ m波高1.4 m, 周期8秒, 造波後1728秒後に誘導する試みは行われているが, 本研究は経験則や経験式を用いないものとして計算を行ったので今後はこのような経験式との比較検討も視野に入れていきたい。

(3) 凹凸地形による離岸流の動態

また, 図-8に一樣勾配と凹凸地形がある場合の染料分布を示した。なお凹凸の標高を1.0mと設定した。左図の一樣勾配と比較しても分かる通り, 凹凸があることによりセル構造が発達しやすいものになっている。また, 図-9には地形中央の座標における最大冲向き流速と凹凸の標高の関係を示した。凹凸の標高が高くなるにつれ, 冲向き流速が大きくなっていることがわかる。このことからある程度の地形的な外因性を設けることで, 離岸流の発達に寄与することの確認が取れた。

本研究では波の入射方向は汀線に直角方向のみで碎波モデルを含まず地形変化の流れや波への影響を無視し用いた地形も平板的な沿岸方向に一樣なものであり, 現実の海岸の場を模擬していない。このことは理論計算が理想化された状況を仮定して結論を得るということに数値計算として対応させるという方針に沿ったためである。現実問題への対応は今後の課題として検討したい。

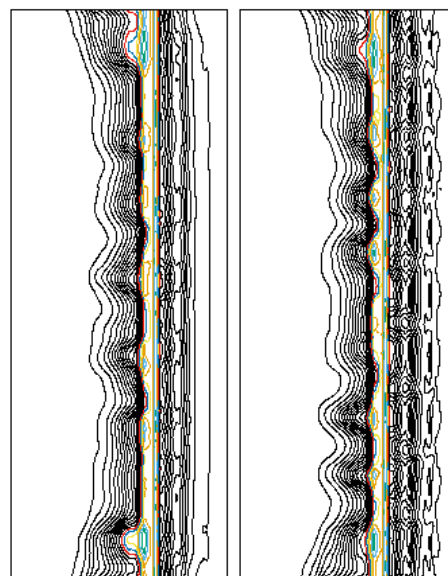


図-8 一樣勾配と凹凸ありの地形の染料分布比較 造波後576秒後

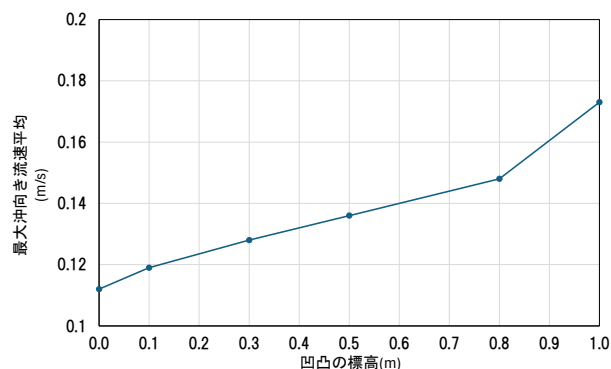


図-9 凹凸の高さによる冲向き流速の変化

参考文献

- 1) 日野幹雄, 林直樹: リップ・カレントの発生理論, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 93-96, 1972. 玉井佐一: 海浜カスプの形成機構に関する研究, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 135-139, 1975.
- 2) 日野幹雄, リップ・カレント系の発生理論IV -主として内在因子の影響について-, 第22回海岸工学講演会論文集, pp.121-126, 1975.
- 3) 谷川麻子, 泉典洋, 田中仁: 汀線に直角に入射する波によって形成されるビーチカスプ, 応用力学論文集, Vol.7, pp.1005-1012, 2004.
- 4) 岩垣雄一, 榎木亨: 海岸工学, pp.192, 共立出版, 1990.
- 5) 堀川清司: [新編]海岸工学, 東京大学出版社, pp. 213-218, 1991.
- 6) 細山田得三, 村川はるみ, 犬飼直之: 離岸流と海岸変形の相互作用に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp.1_556-1_560, 2011.