

1. はじめに

離岸流は海浜流の一種であり、沖から岸に向かう波動運動の非線形性によって岸向きの質量輸送が卓越し、それを補償するための強力な沖向き流れである。離岸流の発生原因について古くから数多く研究されているが、現在でもその発生原因を突き止めた厳密な理論には至っていない。村川ら (2011) は、数値実験より離岸流と海岸変形の相互作用を検討して、離岸流の生成とその影響によって生じる海底地形変化 (リップチャンネル) の形成を示した、離岸流の発生理論には沿岸に平行に伝播するエッジ波による外因説、流体现象の不安定によるとする、内因説に大別される。一番説得性を持つ日野ら (1972) の理論は、内因説であり、離岸流が最も成長するパラメータを固有値解析から求めており、村川の研究結果でもその結果を支持している。離岸流研究においては現象そのものを目視したり、観察したりすることが困難でその動態を把握することが困難であることが大きな障害となっている。本研究では日野らの不安定理論に沿った離岸流の支配方程式で数値計算を行い、新しい離岸流の可視化方法を導入してあらためて離岸流形成の特性について報告する。

2. 計算モデル

計算に用いた方程式は、日野(1972)によるものであり、平面2次元の非線形長波方程式である。村川らの研究では分散性波動を記述できるブシネスク方程式を用いているが、研究対象が海岸に極めて近い汀線付近に限定されているため、極浅海波 (長波) の範囲に限定した。これらの支配方程式を式(1), (2), (3)に示す,

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

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

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\bar{\eta} + \bar{h})U] + \frac{\partial}{\partial y} [(\bar{\eta} + \bar{h})V] = 0 \quad \dots\dots (3)$$

式(1), (2)はそれぞれ x 方向, y 方向の運動方程式であり、ここでは x 方向を岸沖向き方向, y 方向を沿岸方向としている。u, v は x 方向流速、y 方向流速であり、 $\bar{\eta}$ は平均水面変動である、 \bar{h} は水深である。C は海底摩擦係数、 S_{xx} , S_{yy} および S_{xy} ラジエーションストレスで、次のように示される。また、出力された水平流速にベクトル演算での回転を適用すると水平渦度の時間発展も評価することができる。

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

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

$$S_{xy} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \left(\frac{2k\bar{h}}{\sinh 2k\bar{h}} - \frac{1}{2} \right) \sin 2\theta \approx \frac{1}{16} \rho g H^2 \sin 2\theta \quad \dots\dots (6)$$

波高 H については、今回の研究においては水面変動の時間発展の経過と同時に算出する手法を適用した。具体的には平均的な水面変動の極大値と極小値の差により式(3)の時間発展計算の各時間刻みにおいて逐次的に計算される。具体的な計算の方法は図 1 に示す。図 1 は試験的な波動データに対するアルゴリズムの適用例を示す。図中の黒い実線の波動は仮想瞬時水面変動、赤い実線は水位変動の極小と極大の差に基づいて即時に出力したものであり、不規則波の波高を概ね算出していることが確認できる。また、 θ は各格子点において時間変動として評価した。

ここで用いた計算モデル式(1)~(3)には碎波が内部

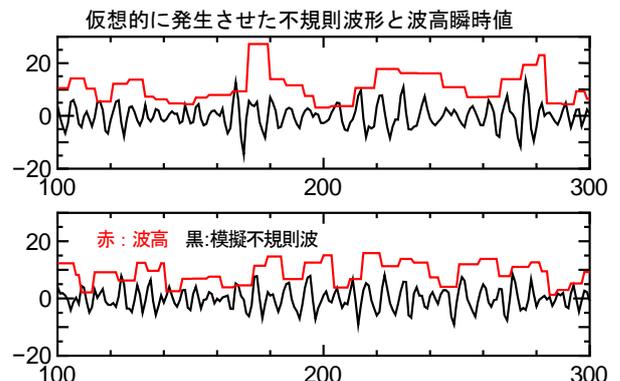


図 1 時間発展計算しながら平均量を算出した事例 不規則波から波高(赤)を抽出

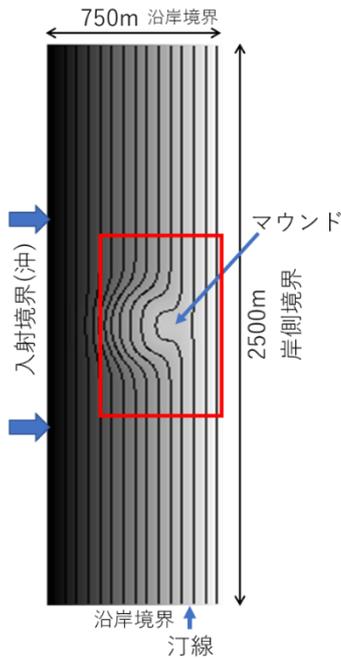


図2 計算領域と境界条件

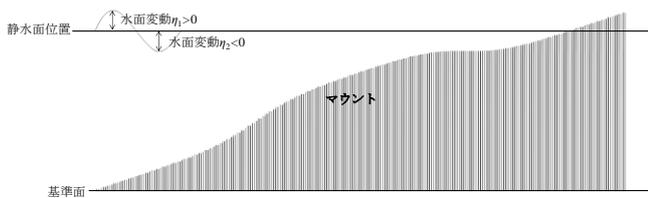


図3 計算領域の縦断形状

的に含まれていない。村川らの研究ではブシネスク方程式に砕波判定指標を設け、計算モデルに砕波を内在させている。本研究では、沖側境界付近での海底地形が沿岸方向にほぼ一様であり、砕波が沿岸方向に一様に生じていると仮定し、砕波よりも岸側の波動現象の中に海浜流や離岸流の現象を解析するカギが含まれていると考えたため、砕波判定を含めなかった。また、先行している日野の理論にも砕波は考慮されていない、ただし、式(1)~(3)は非線形方程式であるため、波の非線形性による現象はある程度考慮されていると判断している。

3. 計算条件

地形条件、および波浪条件による海浜流の発生の違いを検討するため、表-1のように条件を変化させ計算を行った。計算タイムステップ $\Delta t=0.005$ 、計算時間 500s とした。時間的に変化する各種の水利特

表-1

地形形状	岸沖方向750m, 沿岸方向2500m 中央部マウンド付き一様勾配地形
地形勾配	1/25, 1/20, 1/15
周期	4.0~12.0
入射波振幅	0.5~1.5
波向き	汀線に直角方向0°

性は、 $500 \Delta t$ ごとに出力した。図3は1/25勾配の計算領域中央の垂直縦断面図である、一様勾配地形の中央にマウンドが設置されていることを確認できる。本稿では、計算条件についてすべてを示すことができないため、以下の計算結果では、特徴的な計算結果のみを示すこととする。

4. 計算結果

図4および図5には時間発展計算の最終状態のマウンド近傍の物理量の分布を示す。図4の左は水面変動の瞬時値であり、マウンドの影響を受けて波峰線（等位相線）が変形しており、屈折の効果が表れている、屈折の結果、波がマウンド中心側に伝播して集中していると思われる。図4中では、波動場による流速を時間的に平均したものであり、マウンドに向かって沿岸方向から流れが集中しており、さらに沖に向かう流れが形成されている。この流れがさらに成長して強力になると離岸流が形成されるものと思われる。本研究では地形に依存した離岸流は容易に形成できることが分かった。図4右は平均水面である。計算領域の沖側でやや高くなり、岸側およびマウンド陸側において平均水面が下降している。この分布がこの傾向が維持されるのではなく、ウェーブセットアップ・セットダウンによって変動するものと思われるが、現時点では未確認である。図5の左は渦度を示しており、汀線近くでの流速変動に起因する渦とマウンド周辺において渦が沿岸方向に対称に見られる。この渦度は海浜流・離岸流の特徴とどのように関連するか検討中である。図5中および左はラジエーションストレスの S_{xx} , S_{xy} を示している。

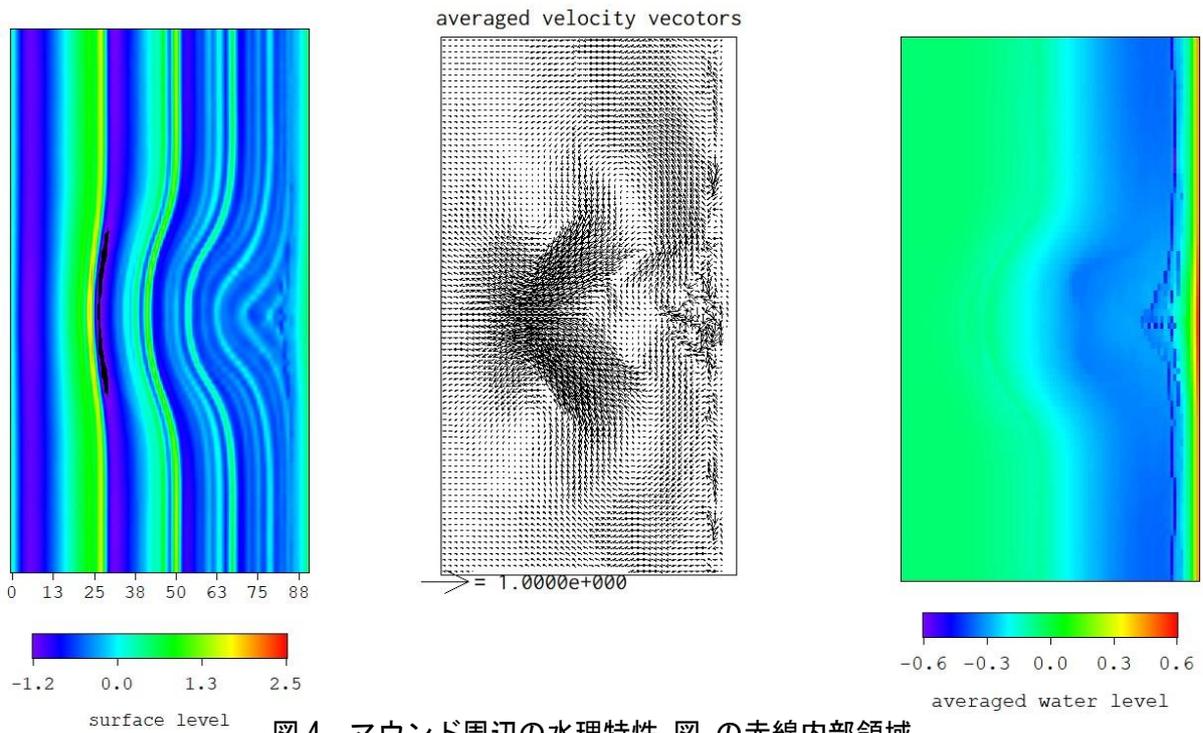


図4 マウンド周辺の水理特性 図の赤線内部領域

左：水位変動瞬時値

中：時間平均流速ベクトル離岸流抽出 [m/s]

右：時間平均水位変動（セットアップ・ダウン対応）

周期 12 秒、入射波高 1.0m

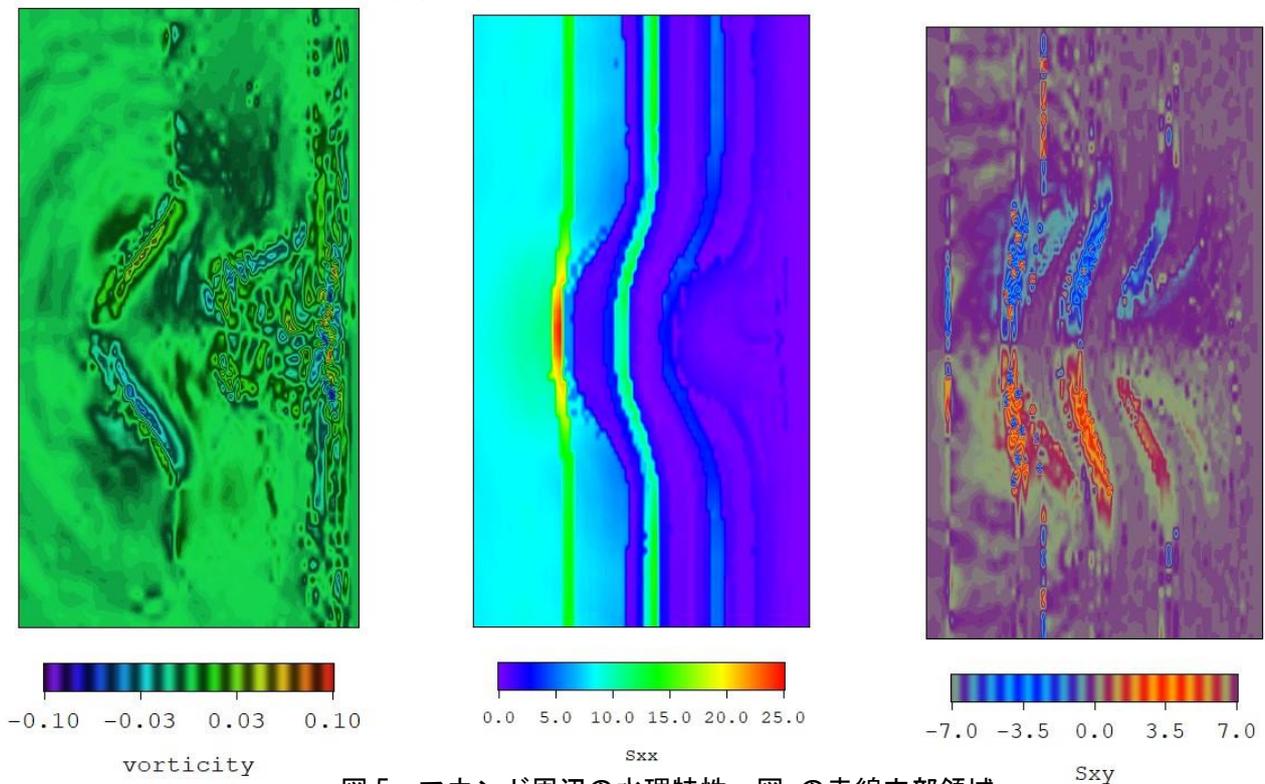


図5 マウンド周辺の水理特性 図の赤線内部領域

左：渦度

中：ラジエーションストレス S_{xx}

右：ラジエーションストレス S_{xy}

周期 12 秒、入射波高 1.0m S_{yy} の分布形状はほぼ S_{xx} と同様のため省略

S_{yy} については S_{xx} とほぼ同様の分布となるため、表示していない。 S_{xx} は式の形より波高分布の2乗の分布となっており、沖側境界から入射した波が岸に近づくにつれて波高が増大している現象に対応している。 S_{xy} は S_{xx} , S_{yy} と異なり、局所的な波向きの影響を受けるため、それらとは異なった分布となっている。なお、日野(1972)では S_{xy} は波が直角に入射し地形も一様であるため、 S_{xy} は考慮されていない。既往研究では波高の分布に伴う S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} が海浜流を引き起こし、さらに離岸流に発展する、本研究では離岸流を計算によって可視化していく手法についての確信が得られたと考えている、これらの他に計算領域に無数の粒子を配置して流れに沿って移動していく手法、物質拡散による可視化手法も試行的に行っており、発表会において口頭で報告したいと考えている。

5. 考察

本稿では、マウンドを有する地形に波を作用させることによる、流速、水面変動の逐次出力および時間平均特性量の時間発展を示すことによって海浜流

やそれに応じて生じる沖向き流れ（強力な離岸流への発展可能性を示す）を可視化することができた。波の作用が基本的には海水を沖から岸に運ぶ以上、その補流としての平均的な沖向き流れがあることは当然と見なすことができる。その沖向き流れの中から特に強力な流れがある種の空間的パターンに従って沖に向かう「離岸流」が生じる理由については未知であり、離岸流を可視化して注意深く特性量を抽出してその原因を探りたいと考えている。

参考文献

- 村川はるみ・細山田得三・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 B2，58 巻，1 号，pp.556～560，2011.
- 日野幹雄・林 直樹：リップカレントの発生理論，海岸工学講演会論文集，第 19 回，pp.93～96，1972.
- 犬飼直之，塚田佳樹，山本浩，新潟県上下浜海岸におけるカスプ地形の生成要因に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 74, No.2, I_1405-I_1410, 2018