

神戸大学大学院工学研究科 学生員 ○甲斐田 秀樹
 神戸大学大学院工学研究科 正会員 内山 雄介

1. はじめに

流れから波へのフィードバック機構（以下 CEW と呼ぶ）により、離岸流の沖へ発達が抑制されることが知られている¹⁾。Yu and Slim²⁾ は波のエネルギー平衡方程式中の radiation stress による仕事の変化が、Wier *et al.*³⁾ は様々な CEW の効果のうち、流れによる波の屈折作用（ドップラーシフトを通じた波数変化）が効果的であることをそれぞれ示した。しかしながら CEW による離岸流場の変調に対する力学構造の解析は手付かずのままであった。そこで本研究では、Uchiyama *et al.*⁴⁾ と同様の VF 型 Euler 平均浅水流方程式の枠組みを用い、CEW によって離岸流の沖への発達が抑制される原因について運動量収支解析を通じて力学的に説明することを試みた。

2. 解析モデルの概要

本研究で用いる流れのモデルの質量保存式および運動方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \nabla \cdot H\mathbf{u} = -\frac{\partial \hat{\xi}}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{U}^{st} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + g\nabla \xi = \mathbf{J} + \mathbf{B} - \mathbf{D} \quad (2)$$

ここに、運動方程式 (2) 右辺の **J** : VF 項、**B** : 砕波項、**D** : 底面摩擦項（線形摩擦則を使用）である。

一方、波動モデルは WKB 近似に基づく ray 方程式をベースとしており、波のアクション保存式および波数保存式は以下の通りである。

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \nabla \cdot \{A(\mathbf{c}_g + \mathbf{u})\} = -\frac{\varepsilon_b}{\sigma} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} + (\mathbf{c}_g + \mathbf{u}) \cdot \nabla \mathbf{k} = -(\tilde{\mathbf{k}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} - \frac{k\sigma}{\sinh 2kH} \nabla h \quad (4)$$

その他の変数等の本解析モデルの詳細については参考文献^{3),4)}を参照されたい。

本研究では、**図-1**のように岸沖方向を *x* 軸、沿岸方向を *y* 軸と定義し、*x* = 80 m 地点に頂部を有し、沿岸方向に正弦波状の凹凸を持つバー型海浜を解析に用いた。離岸流の流路であるリップチャンネルは、*x* = 128 m, 384

m, 640 m に位置している。沖側境界において入射波高 $H_{RMS} = 1.0$ m, ピーク周期 $T_p = 10$ s の直入射波を与え、静水状態から開始して離岸流を発達させ、定常状態に至るまで、実時間で 10 時間の計算を行った。

3. 波浪モデル中の各項の離岸流への影響

紙面の都合上ここでは示さないが、ray 方程式 (3), (4) に対して、分解された CEW の効果（全水深への set-up/down の寄与、流れによるドップラーシフトなど）を詳細に検証し、その中のどの効果が離岸流の発達に影響を有するのかを精査した。その結果、ドップラーシフトのうち、流れによる波の屈折、特に波数の主波向（岸沖）成分が交差（沿岸）成分に変換される効果が支配的な要因であることを特定した。

4. CEW による力学構造の変化

離岸流が十分に発達した後の、定常状態での時間平均値を用いて、CEW を考慮したケースと考慮しないケースの 2 ケースについての運動量収支解析を行った。定常状態であるので、式 (2) の非定常項（左辺第 1 項）は 0 であり、圧力勾配項を **P**, 移流項を **A** と略記すると、

$$\mathbf{B} + \mathbf{J} - \mathbf{D} - \mathbf{A} - \mathbf{P} = 0 \quad (5)$$

と書き換えられる。上式の各項はベクトル表示されており、以後、各項の岸沖成分・沿岸成分をそれぞれ下付き添字 *x*, *y* で表す。この 5 つの項の中で外力項として波

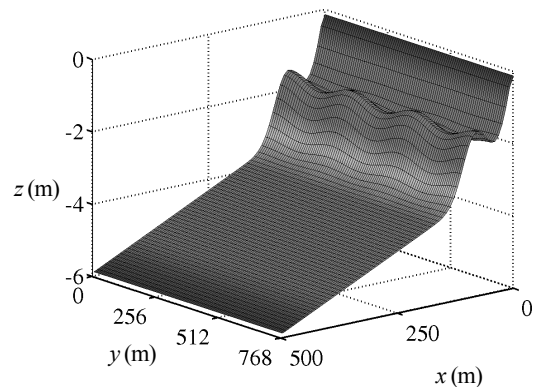


図-1 モデル地形 (Duck 海岸を模したバー型海浜)

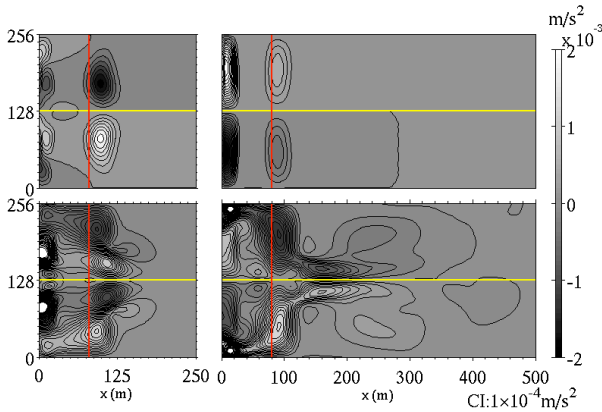


図-2 CEW を考慮した場合 (左) としない場合 (右) の碎波項 y 成分 B_y (上) と圧力勾配項 y 成分 P_y (下)

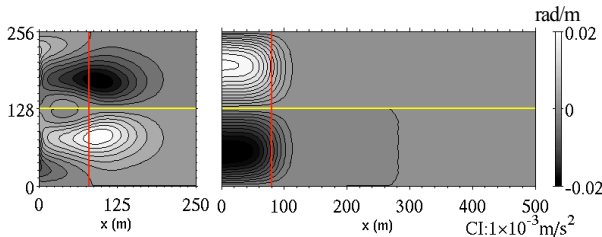


図-3 CEW を考慮した場合 (左) としない場合 (右) の波数ベクトル沿岸成分 k_y の空間分布

の影響を直接表しているのは碎波項 \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \frac{\varepsilon_b \mathbf{k}}{\rho H \sigma} \quad (6)$$

である。ここで、 ε_b は碎波エネルギー輸送 (アクション方程式中ではエネルギー減衰率)、 \mathbf{k} は波数ベクトル、 H は全水深、 σ は波の周波数である。

沿岸方向の運動量バランスでは、まず始めに B_y が波浪場の変形により変化し、その結果として P_y が変化して収支構造が変わるので、 B_y と P_y の空間分布特性を調べた (図-2)。特に P_y に着目すると、CEW なしの場合にはリップチャンネル ($y = 128$ m) の上下で P_y の正負が反転し、 $x = 300$ m 程度の沖合まで流れを収束させるような分布となっている。一方、CEW ありの場合には P_y の影響範囲は岸近くに限定され、正負の構造が CEW

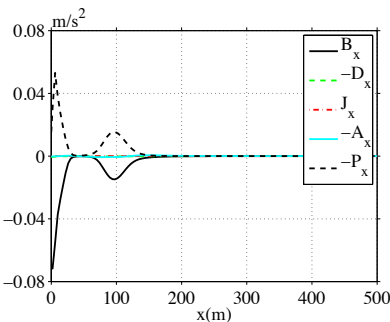


図-4 各運動量の x 成分の岸沖分布

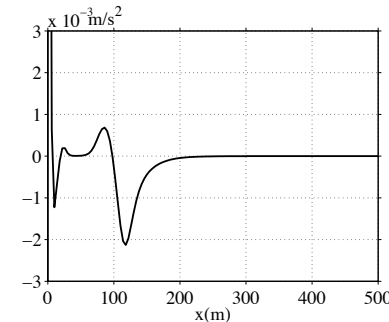


図-5 $\Delta B_x (B_x^{CEW} - B_x^{NOCEW})$ の岸沖分布

なしの場合と逆であり、流れを発散させるような分布となっている。これに対応して、波数ベクトルの沿岸成分 k_y の空間分布 (図-3) から、CEW なしの場合にはリップチャンネルから発散するような波向きであったものが、CEW ありの場合にはリップチャンネルへ収束するような波向きとなっている。つまり、波向きの変化により碎波項 B_y が変化し、その結果として圧力勾配 P_y が変化するという構図になっているものと結論付けられる。

リップチャンネルにおける岸沖方向の平均運動量収支 (図-4) から、 B_x と P_x は他の項よりも 1~2 オーダー大きく、岸沖方向にはこの二項による wave set-up バランスに強く支配されていることが確認される。このとき、 B_x は全領域で負、すなわち離岸流を岸向きに押し戻す作用を持っている。そこで CEW の有無による B_x の変化量 ΔB_x を調べてみると (図-5)、バーのやや沖側の $x = 120$ m 地点において CEW ありの場合に B_x が強化されていることが分かる。この原因を調べた結果、流れによる波の屈折により、波数ベクトル \mathbf{k} がリップチャンネルへ収束する方向へと変化したため、 $x = 120$ m 付近での波高が増加し、それに伴って碎波輸送量 ε_b が増加し、碎波項 B_x が強化されるという図式になっていることが分かった。

5. 結論

CEW を考慮すると、まず流れによる屈折効果によって波向きが変化する。波向きの変化は、沿岸方向には圧力勾配項を変化させ、リップチャンネルから流れを発散させるような分布を形成する。岸沖方向には、波高の増加に伴う碎波輸送量の増加により、碎波点沖側 ($x = 120$ m 付近) で強い岸向きの作用が生じるようになる。これらの相乗効果により、CEW によって離岸流の沖への発達が抑制されることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Haas, K. A., I. A. Svendsen and M. C. Haller (1998), 26th ICCE, ASCE, pp.801-814.
- 2) Yu, J., and D. N. Slinn (2003), *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, C3.
- 3) Weir, B., Y. Uchiyama, E. M. Lane, J. M. Restrepo, and J. C. McWilliams (2011), *J. Geophys. Res.*, Vol. 116, C5001.
- 4) Uchiyama, Y., J. C. McWilliams, and J. M. Restrepo (2009), *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, C6021.