



# 流れから波へのフィードバック機構による離岸流の発達抑制メカニズム

内山, 雄介  
甲斐田, 秀樹

---

(Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 68(2):I\_36-I\_40

(Issue Date)

2012

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2012 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002927>



# 流れから波へのフィードバック機構による離岸流の発達抑制メカニズム

Suppression mechanism of development of rip currents by current effects on waves

内山雄介<sup>1</sup>・甲斐田秀樹<sup>2</sup>

Yusuke UCHIYAMA and Hideki KAIDA

If current effects on waves (CEW) are considered, the offshore extent of rip currents can be significantly suppressed by wavenumber modulation associated with wave ray bending (Weir *et al.*, 2011). In the present study, a two-dimensional shallow-water model based on Regional Oceanic Modeling System (ROMS) with wave effects on slowly-evolving littoral currents through a vortex-force formalism, coupled tightly with WKB refraction equations, is used to examine dynamic effects essential to development of rip currents. If CEW is taken into consideration, wave ray bending occurs with a modified wavenumber field that changes the alongshore pressure gradient force and the cross-shore component of acceleration due to wave breaking through wave shoaling, leading to the reduction of the extent of rip current.

## 1. はじめに

離岸流は、砕波帯や沿岸域における物質輸送や海底地形変化等に重大な影響を及ぼす因子であると同時に、しばしば沖向きの速い流れを伴うことから、海浜利用者の安全性にも強く関与している。そのため、離岸流の定量的な発生・発達過程の予測は工学的に極めて重要な課題であり、詳細な実験、観測等に加えて、モデルによる精緻な解析を行うことが不可欠である。

図-1に示すように、流れから波へのフィードバック機構 (Current Effects on Waves, 以下CEWと略称する)を考慮しない場合は、離岸流が沖へと過剰に発達してしまい、十分な精度で離岸流を再現できないが、CEWを考慮するとその発達が適切に抑制されることが知られている (Haasら, 1998; Yu・Slinn, 2003. 以下YS03)。CEWによる離岸流の抑制効果について、YS03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、Weirら (2011)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変化についての解析は手つかずのままであり、未だ詳細なメカニズムの解明には至っていない。そこで本研究では、離岸流によるCEWを介した波浪変形機構と、それに伴う海浜流場の運動量収支構造の変化に関する詳細な解析を行い、CEWによる離岸流の発達抑制メカニズムについて運動学的・力学的に検討した。

## 2. モデルの概要

最近の知見によれば (Uchiyamaら, 2009), vortex force

(VF) の概念を導入することで、砕波、VF, Bernoulli head等に伴う波動場から流れ場への運動量輸送 (以下WECと呼称する) をクリーンに分解し、かつ Euler的に議論できる枠組みが得られる。本研究では、Uchiyamaら (2009)と同様に、領域海洋循環モデルROMS (Shchepetkin・McWilliams, 2005)をベースとして、海浜流場にはVF型WECを導入した平面二次元のEuler型位相平均浅水流モデルを、波浪場にはドップラーシフト等に代表されるCEWを表現可能なアクション保存式をベースとしたWKB近似に基づくいわゆるray方程式を用い、双方向的にカップリングすることにより波-流れ共存場を表現した。

### (1) 海浜流場のモデル

海浜流場の解析のベースとなる連続式、運動量方程式はそれぞれ次の通りである。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot H \mathbf{u} = -\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{U}^{\text{st}} \dots\dots\dots (1)$$

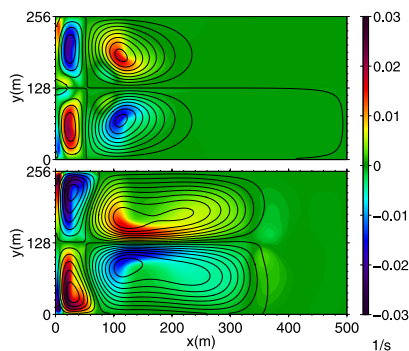


図-1 本研究で得られた離岸流の発達パターン。CEWを考慮した場合 (上) としない場合 (下) の流れ場。CEWによって離岸流の沖への発達が抑制される。カラーは Euler流速による相対過度、コンターは Lagrange 流速による流線を表す

1 正会員 博(工) 神戸大学准教授 大学院工学研究科 市民工学専攻  
2 学生会員 学(工) 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻

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

ここに、 $\zeta$ ：水位、 $\hat{\zeta}$ ：Bernoulli headによるset down量、 $\mathbf{u} = (u, v)$ ：水平Euler流速、 $H$ ：全水深、 $g$ ：重力加速度である。また、 $\mathbf{J}$ ：VF項、 $\mathbf{B}$ ：碎波による波から流れへの運動量輸送項、 $\mathbf{D}$ ：底面摩擦項であり、

$$\mathbf{J} = -\hat{\mathbf{z}} \times \frac{1}{H} \mathbf{U}^s \chi ; \quad \mathbf{D} = \mu \frac{\mathbf{u}}{H} ; \quad \mathbf{B} = \frac{\varepsilon_b \mathbf{k}}{\rho H \sigma} \quad \cdots (3)$$

のように定義される。ここで、 $\hat{\mathbf{z}}$ ：鉛直上向きの単位ベクトル、 $\chi$ ：相対渦度 (1/s)、 $\varepsilon_b$ ：碎波による波のエネルギー消散率、 $\mathbf{k}$ ：波数ベクトル、 $\sigma$ ：波の周波数、 $\rho$ ：流体の密度、 $\mathbf{U}^s$ ：水深積分されたストークスドリフト速度 (ストークス輸送)、 $\mu$ ：線形摩擦係数 (m/s) である。 $\mathbf{U}^s$ と $\hat{\zeta}$ は、波形勾配 $ak$  ( $a$ ：波の振幅、 $k = |\mathbf{k}|$ ) に関する弱非線形近似の下に以下のように表される。

$$\mathbf{U}^s = \frac{a^2 \sigma \mathbf{k}}{2k \tanh kH} = A \mathbf{k} ; \quad \hat{\zeta} = -\frac{a^2 k}{2 \sinh 2kH} \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 $A$ ：波のアクション (波作用量) である。

## (2) 波浪変形モデル

波浪場の方程式は、WKB近似に基づくray方程式に従うものとする。

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \nabla \cdot \{A(\mathbf{c}_g + \mathbf{u})\} = -\frac{\varepsilon_b}{\sigma} \quad \cdots \cdots (5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} + (\mathbf{c}_g + \mathbf{u}) \cdot \nabla \mathbf{k} = -(\tilde{\mathbf{k}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} - \frac{k\sigma}{\sinh 2kH} \nabla h \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\sigma^2 = gk \tanh kH ; \quad \omega = \mathbf{u} \cdot \mathbf{k} + \sigma \quad \cdots \cdots (7)$$

式 (5) は波のアクション保存式、式 (6) は波数保存式、式 (7) は分散関係式を表し、 $\omega$ は流れによるドップラーシフトを受けた波の周波数であり、 $\sim$  (チルダ) を付した変数同士の演算を先に行うものとする。碎波輸送 $\varepsilon_b$ には、Rayleigh波高分布を仮定した狭帯スペクトル波に対するChurch & Thornton (1993) による次式を用いる。

$$\varepsilon_b = \frac{3}{16} \sqrt{\pi} \rho g f_p B^3 \frac{H_{rms}^3}{H} \left\{ 1 + \tanh \left[ 8 \left( \frac{H_{rms}}{\gamma H} - 1 \right) \right] \right\} \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{H_{rms}}{\gamma H} \right)^2 \right]^{-2.5} \right\} \quad \cdots (8)$$

ここで、 $H_{rms}$ ：RMS波高、 $f_p$ ：ピーク周波数である。 $B$ および $\gamma$ は地形や沖波条件に依存するモデルパラメータであり、本研究ではそれぞれ $B = 1.3$ 、 $\gamma = 0.38$ とした。

## (3) モデルの妥当性の確認

モデルの妥当性を確認するため、YS03によるCEWを考慮した場合の離岸流の特性に関する数値計算の再現実験を行った。岸沖方向を $x$ 軸、沿岸方向を $y$ 軸、沖側境界

における波の入射角 $\theta$ を $x$ 軸から時計回りの方向にそれぞれ定義した上で、離岸流の発生位置を固定するために、米国North Carolina州Duck海岸を模して、距岸80mに頂部を有するバー型海浜に正弦波状の凹凸を沿岸方向に付与して作成したYS03地形を用いた (図-2)。ここでは、リップチャンネルの無次元深さ $\varepsilon$ と沿岸方向波長 $\lambda$ 、および入射波高 $H_0$ 、入射角 $\theta$ 、線形摩擦係数 $\mu$ の5つのパラメータをそれぞれ変更した計18通りの計算を行い、YS03の結果と比較した。一例として、図-3に入射波高 $H_0$ を変更した場合の、リップチャンネル上における岸沖流速の計算開始後2時間から10時間までの時間平均値を示す。 $H_0 \geq 0.8\text{m}$ では、 $x = 130\text{m}$ で岸沖流速の最大値が現れている。 $0.8\text{m} \leq H_0 \leq 1.2\text{m}$ では、波高増加に伴って岸沖方向の最大流速が増加し、 $H_0 \geq 1.6\text{m}$ の場合は、波高が増加するにつれて最大流速は減少している。これらの特徴は、YS03による解析結果 (詳細はYS03参照) とほぼ完全に一致しており、本研究で用いるモデルの妥当性が十分であることが示された。

## 3. CEWによる波数変化と離岸流の発達・抑制

まず、波浪場を表すray方程式中のCEWに関連する項に注目し、各項が有する離岸流の発達抑制への寄与を検討する。波数保存式 (6) を成分表示すると、

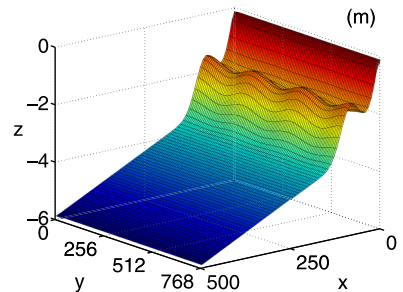


図-2 解析に用いたモデル海浜地形。米国Duck海岸を模している (Yu・Slinn, 2003)。リップチャンネルは $y = 128\text{m}$ 、 $384\text{m}$ 、 $640\text{m}$ に位置している

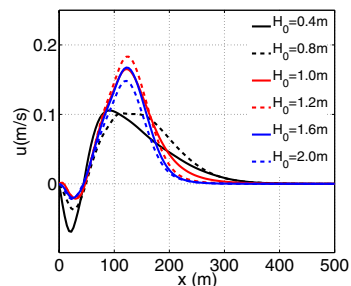


図-3 リップチャンネル上 ( $x = 128\text{m}$ ) における岸沖流速の時間平均値の岸沖分布。 $\varepsilon = 0.1$ 、 $\lambda = 256\text{m}$ 、 $\theta = 0^\circ$ 。 $\mu$ は波高に応じて $0.0013 \sim 0.0064\text{ m/s}$ の範囲に設定した (YS03参照)

表-1 離岸流の発達・抑制に及ぼすCEWの効果についての計算条件

CASE	条件	CASE	条件
1	CEWを全て考慮.	7	波数保存式の流れによる屈折項 (右辺第2, 3項) を無視
2	アクション保存式・波数保存式の水深変化 (set-up/down) によるCEWを全て無視	8	波数保存式の流れによる屈折項のうち, 波と流れの直行成分 (式 (9) 右辺第2項, 式 (10) 右辺第3項) を無視
3	アクション保存式・波数保存式の流れに伴うCEWを全て無視	9	波数保存式の流れによる屈折項のうち, 波と流れの交差成分 (式 (9) 右辺第3項, 式 (10) 右辺第2項) を無視
4	波数保存式の流れに伴うCEWを全て無視	10	波数保存式中の流れによる屈折項の交差成分のうち, $x$ 成分 (式 (9) 右辺第3項) のみを無視
5	アクション保存式の流れに伴うCEWを全て無視	11	波数保存式中の流れによる屈折項の交差成分のうち, $y$ 成分 (式 (10) 右辺第2項) のみを無視
6	波数保存式の右辺第一項によるCEWを無視	12	CEWを全て無視.

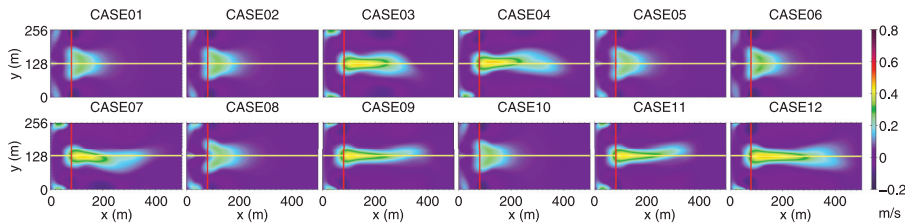


図-4 表-1の計算条件により得られた岸沖流速のケース毎の時間平均値 (準定常状態)

$$\frac{\partial k_x}{\partial t} = - \left[ (c_g^x + u) \frac{\partial k_x}{\partial x} + k_x \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{k\sigma}{\sinh 2kH} \frac{\partial h}{\partial x} \right] \dots (9)$$

$$\frac{\partial k_y}{\partial t} = - \left[ (c_g^y + v) \frac{\partial k_y}{\partial y} + k_x \frac{\partial u}{\partial y} + k_y \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{k\sigma}{\sinh 2kH} \frac{\partial h}{\partial y} \right] \quad (10)$$

となる. 式 (9), (10) の右辺第1項 (移流項) 中の  $\mathbf{u}$  によるドップラーシフト, 右辺第2, 3項の流れによる波の屈折効果がCEWを表す. なお, 第4項は水深変化による屈折効果である. アクション保存式 (5) では, 左辺第2項 (移流項) 中の  $\mathbf{u}$  によるドップラーシフト, 右辺外力項の  $\varepsilon_b$  中の全水深  $H$  に対する set-up/down の効果などがCEWを表すことになる.

解析にはYS03地形 (図-2) を用い,  $x$  方向500 m,  $y$  方向768mの長方形領域を水平解像度4mの直交格子で表現した. 沖側境界において入射波高  $H_{rms} = 1\text{m}$ , 入射角  $\theta = 0^\circ$ , 周期  $T = 10\text{s}$  の入射波を与え, 静水状態から開始して離岸流を発生させ, 地形変化が生じない固定床として実時間で10時間の解析を行った. 線形摩擦係数は  $\mu = 0.002 \text{ m/s}$ , リップチャンネル無次元深さは  $\varepsilon = 0.1$ , その沿岸方向波長は  $\lambda = 256 \text{ m}$  に固定した. 波浪モデル中の各項のCEWの効果調べるにあたって設定した条件は, 表-1に示す全12通りである. なお, 沿岸方向には周期境界条件, 沖境界では流速の法線成分にはアンチストークス条件 ( $u = -U^S/H$ ), 接線成分と水位にはFlather型放射条件, 岸境界では不透過条件を課した.

図-4に, 流れがほぼ定常状態となった計算開始後9時間を経過した時点から10時間までの間の岸沖流速の時間平均値を示す (以降の図面も同様). また, 図-4上での黄線はリップチャンネルを, 赤線はバーの頂部をそれぞれ示している. 図-4より, CASE 1, 2, 5, 6, 8, 10では離岸流の発達が岸近くに抑制されている一方, それ以外のケースでは離岸流がジェット状に沖へと発達している. CASE 2, 3の比較から, 水深変化よりも離岸流速によるCEWが離岸流の発達に影響を及ぼすこと, CASE 4, 5から, 離岸流速によるCEWはアクション保存式よりも波数保存式で効果的であること, CASE 6, 7から, 波数保存式中の流れによる屈折項が重要であることが順次示されている. 流れによる屈折項をさらに細かく分解して調べると, CASE 8, 9から, 流れと波の交差成分が影響を持つこと, CASE 10, 11から, 交差成分のうち, 波数の主方向 (岸沖) 成分  $k_x$  が交差 (沿岸) 成分  $k_y$  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による離岸流場の力学構造の変化

CEWによる離岸流場の力学構造変化を調べるため, 離岸流が十分発達して準定常状態とみなせる状態の平均量を用いて, CEWあり/なしの2ケース (前節CASE 1および12) 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) 中の非定常項は0である. 圧力勾配項を  $\mathbf{P}$ , 移流項を  $\mathbf{A}$  と略記すると, 式 (2) は,

$$\mathbf{B} - \mathbf{D} + \mathbf{J} - \mathbf{A} - \mathbf{P} = 0 \dots\dots\dots (11)$$



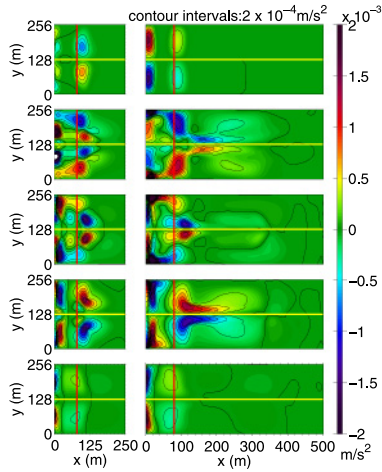


図-5 CEWを考慮した場合(左)としない場合(右)の運動量沿岸成分の空間分布. 上から順に,  $B_y$ ,  $-P_y$ ,  $A_y$ ,  $J_y$ ,  $-D_y$ を表す

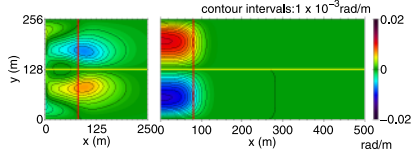


図-6 CEWを考慮した場合(左)としない場合(右)の波数ベクトル沿岸成分 $k_y$ の空間分布

という準定常バランスで表現される. なお, 式(11)中の各項はベクトルであり, 以降では各項の岸沖成分・沿岸成分をそれぞれ下付き添字 $x$ ,  $y$ で表す.

### (1) 運動量の沿岸成分

CEWを考慮した場合・しない場合の2ケースにおける運動量沿岸成分の空間分布を図-5に示す. 運動量方程式の各項のCEWによる変化は, 波からの直接の外力項である砕波項 $\mathbf{B}$ が波浪変形によって式(3)を通じて変化することで起こる. 次いで,  $\mathbf{B}$ に釣り合うように水位変化が生じて圧力勾配項 $\mathbf{P}$ を変化させ, それにバランスするようにVF項, 底面摩擦項, 移流項が決定されているものと考えられる. 定常沿岸流場では, 沿岸方向の運動量は $B_y$ と $D_y$ のバランスが卓越し,  $A_y$ と $J_y$ のサブバランスが成立する(Uchiyamaら, 2009). しかしながら, 準定常離岸流場におけるバー( $x = 80\text{m}$ )より沖側の領域では, 弱い沿岸流速 $v$ のために $D_y$ が小さく, CEWなしの場合は, 離岸流が発達するバー沖側で $P_y$ と $J_y$ , 岸近傍領域では沿岸流場と同様に $B_y$ と $D_y$ のバランスが概ね成立している. 一方, CEWありの場合は, バーより沖側の領域で $P_y$ ,  $A_y$ ,  $J_y$ の3つが $B_y$ とバランスするという構図になっている. 離岸流場と沿岸流場の最大の差異は,  $\mathbf{P}$ が有意な大きさを有する点であり, 離岸流場ではCEWの有無によって運動量沿岸成分の分配が異なることが明らかとなった.

次に, 波浪の影響を受けて変化する $B_y$ と,  $B_y$ により変

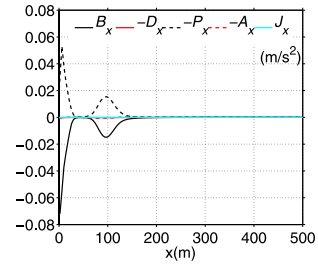


図-7 リップチャンネル上( $x = 128\text{m}$ )における時間平均された運動量岸沖成分の岸沖分布 (CEWあり)

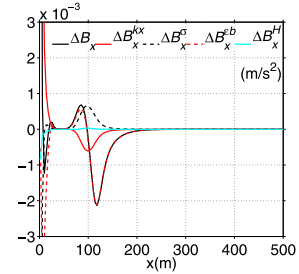


図-8 リップチャンネル上( $x = 128\text{m}$ )における $\Delta B_x$  (CEWありの $B_x$ からCEWなしの $B_x$ を引いたもの)および1要素のみCEWなしの値(右肩添字, 詳細は本文参照)を用いた場合の $\Delta B_x$ の岸沖分布

化する $P_y$ の空間構造について詳細に検討する. 図-6に波数ベクトルの沿岸成分 $k_y$ の空間分布を示す. まず, 流れによる波の屈折効果により $k_y$ が変化して波向きがリップチャンネルへ収斂し, それに対応して $B_y$ もリップチャンネルへ収斂するように変化していることが分かる.  $-P_y$ は, CEWなしの場合にはリップチャンネルの上下で正負が反転し,  $x = 300\text{m}$ 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( $x < 160\text{m}$ )に限定され, CEWなしの場合と逆符号になり, 流れをリップチャンネルから発散させるような構造になっている. このことから, CEWに伴う $k_y$ の変化が $B_y$ を変化させ, 運動量収支構造の改変を伴って $P_y$ の分布を変化させ, バー直近で離岸流を発散させる, という構造になっていることが分かった.

### (2) 運動量の岸沖成分

リップチャンネル上( $y = 128\text{m}$ )における岸沖方向の平均運動量収支(図-7)は,  $B_x$ と $P_x$ のバランスに強く支配されている. このバランスは沿岸方向に一樣な海底地形の場に直入射波が作用する場合に成立することがよく知られているが(Bowenら, 1969; Uchiyamaら, 2009), 沿岸方向に凹凸を有するバー型海浜における定常離岸流場においても成立していることが明確に示された.

図-7より,  $B_x$ は卓越外力として岸沖運動量バランスを圧倒的に支配しているとともに, 全領域で負, すなわち常に離岸流を岸向きに押し戻す作用を有している. そこで, CEWの有無による $B_x$ の変化量 $\Delta B_x$  (CEWありの $B_x$

からCEWなしの $B_x$ を引いたもの)を調べてみると(図-8), バーのやや沖側の $x=120\text{m}$ 地点において $\Delta B_x$ は負の大きな値を取っており, CEWありの場合に岸向きの $B_x$ が強化されていることが分かる。

以上のことから,  $B_x$ は離岸流の抑制に重要な意味を持つと考えられる。式(3)から,  $B_x$ は $k_x$ ,  $H$ ,  $\sigma$ ,  $\varepsilon_b$ の4つの要素により決まるが, これらは全てCEWによって変調する可能性を有している。そこで, 4要素のうち, どの要素が原因となって大きな $\Delta B_x$ が生じるのかを探るため, 感度実験を行った。つまり, 4要素のうち1要素のみにCEWなしの値を用い, 残り3要素にはCEWありの値を用いて4通りの $B_x$ を求め, CEW有無の差 $\Delta B_x$ を評価した。CEWなしの値に置き換えた要素(例えば $H$ )を右肩添字に付して $\Delta B_x^H$ のように表示し, リップチャンネル上での岸沖分布を図-8に重ねて示した。 $x > 50\text{m}$ では $\Delta B_x$ と $\Delta B_x^{\varepsilon_b}$ がほぼ重なっていることから,  $x = 120\text{m}$ 周辺における岸向き $B_x$ の強化にはCEWによる碎波輸送量 $\varepsilon_b$ の改変の影響が最も強いことが分かる。

そこで次に,  $\varepsilon_b$ に対するCEWによる変調の大きさとその成因を探るべく,  $\Delta B_x$ (図-8)と同様の感度実験を $\varepsilon_b$ に対して行った(図-9)。まず,  $\Delta B_x$ に大きな変化が見られた $x = 120\text{m}$ 付近では,  $\Delta \varepsilon_b$ にも顕著な正の変化が生じており, CEWによって $\varepsilon_b$ が著しく増加することが示されている。 $\varepsilon_b$ は, 式(8)よりCEWの影響を受ける $H$ ,  $H_{rms}$ ,  $f_p (=2\pi\sigma)$ の3要素から評価されるので, 先ほどと同様に $\Delta \varepsilon_b^H$ などを求め, 図-9に重ねて示した。バー沖側の $x > 100\text{m}$ では $\Delta \varepsilon_b$ の大部分は $H_{rms}$ によって支配されていることが分かる。CEWによるリップチャンネル上の波高変化は図-10に示す通りであり, 高々4cm程度の増加に過ぎない。しかしながら, このCEWによる波高変化が $\varepsilon_b$ ,  $\mathbf{B}$ を変調させ,  $\mathbf{k}$ の変化と連動することによって, CEWによる離岸流抑制作用を引き起こしているのである。なお, この波高の増加は, CEWによって $\mathbf{k}$ がリップチャンネルへ収束するように屈折し, 離岸流上でアクションが増大することで引き起こされたものと考えられる。

## 5. おわりに

離岸流場においてCEWを考慮すると, まず, 流れによる波の屈折効果により波向きが変化する。波向きの変化は, 沿岸方向には $B_y$ の変化を通じて $P_y$ を変化させ, リップチャンネルから発散させるような流れを形成する。岸沖方向には, バーのやや沖におけるアクション保存による波高の増加に伴って碎波輸送量が増加し, 岸向きの $B_x$ が強化される。これらの効果が重畳し, CEWによって離岸流の沖への発達が抑制されることが明解に示された。

なお, 本稿では波が直入射するケースについて論じたが, 斜め入射の場合についても検討している。紙面の都合

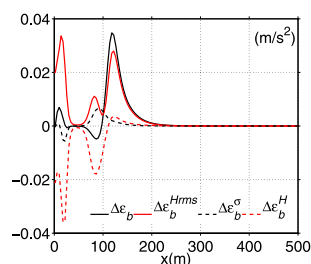


図-9 図-8と同じ。ただし $\Delta \varepsilon_b$ に対する結果。

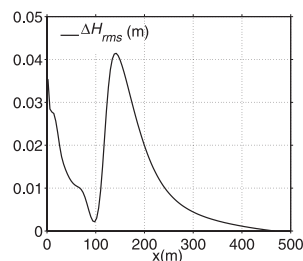


図-10 リップチャンネル上 ( $x = 128\text{m}$ ) における $\Delta H_{rms}$  (CEWあり $H_{rms}$ からCEWなしの $H_{rms}$ を引いたもの)の岸沖分布

上示さないが, 入射角 $\theta \geq 3^\circ$ の状況下では入射角による $B_y$ の増大が地形効果を上回って沿岸流的な状況となり, 定常場ではCEWの効果はかなり小さくなることを確認している。この結果はWeirら(2011)と整合している。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究C(24560622, 代表者：内山雄介)の援助を受けた。

## 参考文献

- Bowen, A.J., L.Inman and V.P.Simmons (1969) : Wave set-down and set-up, J. Geophys. Res., Vol. 73, pp.2569-2577.
- Church, J.C. and E.B.Thornton (1993) : Effects of breaking wave induced turbulence within a longshore current model. Coastal Eng., Vol.20, pp.1-28.
- Haas, K.A., I.A.Svendsen, and M.C.Haller, (1998) : Numerical modeling of nearshore circulations on a barred beach with rip channels, 26<sup>th</sup> ICCE, ASCE, pp.801-814.
- Shchepetkin, A.F. and J.C.McWilliams (2005): The Regional Oceanic Modeling System: a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modell., Vol.9, pp. 347-404.
- Uchiyama, Y., J.C.McWilliams and J.M.Restrepo(2009): Wave-current interaction in nearshore shear instability analyzed with a vortex-force formalism, J. Geophys. Res., Vol.114, C06021, doi:10.1029/2008JC005135.
- Weir, B., Y.Uchiyama, E.M.Lane, J.M.Restrepo and J. C. McWilliams (2011) : A vortex-force analysis of the interaction of rip currents and surface gravity waves, J. Geophys. Res., Vol.116, C05501, doi: 10.1029/2010JC006232.
- Yu, J., and D.N.Slinn (2003) : Effects of wave-current interaction on rip currents, J. Geophys. Res., Vol.108(C3), 3088, doi:10.1029/2001JC001105.