

サブメソスケール渦・非定常海浜流オーバーラップ領域における波-流れ相互作用の効果について

Effects of Wave-Current Interaction on Overlapping Submesoscale Eddies and Unsteady Littoral Currents

甲斐田秀樹¹・内山 雄介²

Hideki KAIDA and Yusuke UCHIYAMA

Effects of two-way wave-current interaction (WCI) on the surfzone-inner shelf circulations affected by submesoscale eddies and unsteady littoral currents are investigated with the ROMS-WEC model (Uchiyama *et al.*, 2010) coupled tightly with a spectrum-peak wave model to account for both wave effects on currents (WEC) and current effects on waves (CEW) (e.g., Uchiyama *et al.*, 2009). Eddy activity around the outer edge of the surfzone is enhanced when CEW is considered. The key mechanism to induce the surfzone-inner shelf dynamical interaction and enhancement of offshore eddy activity is considered to be CEW that weakens the offshore component of the littoral currents. In turn, offshore eddy activity is attenuated by WEC, demonstrating that WCI plays an essential role not only in the surfzone but also in the shelf region.

1. はじめに

物質の移流拡散や漂砂現象などの沿岸域における工学的課題に適切に対処するためには、岸沖間の海水・物質交換に代表される碎波帯-陸棚相互作用に対する理解を深化させることが極めて重要となる。近年、波浪場から平均流場への効果 (Wave Effects on Currents, 以後WECと略称する)と平均流場から波浪場へのフィードバック効果 (Current Effects on Waves, 以後CEWと略称する。WECとCEWについての詳細はUchiyamaら (2009)を参照されたい)から構成される波-流れ相互作用が、碎波帯周辺の力学構造に著しい影響を及ぼすことが明らかにされている。例えば、甲斐田・内山 (2014)は、水深平均型の位相平均海浜流モデルを用いて離岸流場・沿岸流場および両者間の遷移過程における非定常海浜流場に及ぼすCEWの影響について解析し、平均流および乱流場に対するCEWの有意性を明示した。また、内山ら (2013; 以下前報と呼称)は、5段ネスティングによるダウンスケーリング海洋モデルにより、外洋影響を正確に考慮しつつ、碎波帯と海浜流を解像可能な水平解像度20 mの超高解像度3次元海洋モデリングを実施した。その結果、碎波の影響によって汀線付近に発達する海浜流系が碎波帯-陸棚間の混合を3次元的に促進すること、水平物質分散に対する碎波の効果

は特に初期分散過程において顕著に現れることなど、碎波帯-陸棚相互作用に対するWECの効果を具体的かつ定量的に明らかにした。しかしながら、前報ではCEWが考慮されていなかったため、WECとCEWによる双方向的な相互作用による沖合流動と海浜流場の改変効果については未解明のままである。

そこで本研究では、諸条件を任意に制御することが可能な理想条件下において、波-流れ相互作用を双方向的に考慮した3次元数値実験を行い、碎波帯周辺における非定常海浜流と陸棚上で発達するサブメソスケール渦がオーバーラップする状況を表現し、波-流れ相互作用が沖合流動および碎波帯-陸棚間の力学的な相互作用に及ぼす影響についての基礎的な検討を行った。

2. 研究方法

領域海洋循環モデルROMS (Shchepetkin・McWilliams, 2005)にvortex-force型Euler位相平均Primitive方程式を組

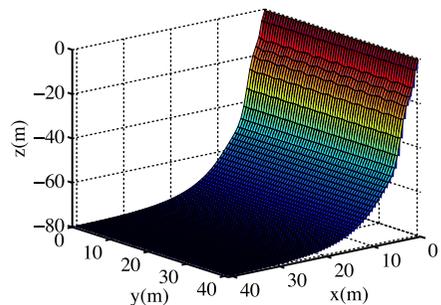


図-1 本研究で用いたモデル地形

1 正会員 修(工) 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (現在、(一財)電力中央研究所)
2 正会員 博(工) 神戸大学大学院准教授 工学研究科市民工学専攻

表-1 計算条件

計算領域	領域サイズ: L_x (x 方向総延長) = L_y (y 方向総延長) = 40,960m, 格子数: 512×512×24 層 (σ 座標), 水平解像度80m.
海表面風応力 τ_0	$\tau_x = 0, \tau_y = 0.2\sin(\pi t / 2.5)$ [Pa], t : 時間 [日].
沖側境界における入射波条件	<ul style="list-style-type: none"> Case1: ベースとなる離岸流場 $H = 2.0$[m], $T_p = 7.0$[s], $\theta_p = 0^\circ$ Case2: case1 と比べて弱い離岸流場 $H = 1.0$[m], $T_p = 7.0$[s], $\theta_p = 0^\circ$ Case3: 沿岸流場 $H = 2.0$[m], $T_p = 7.0$[s], $\theta_p = 10^\circ$ ここに, H : 波高, T_p : 周期, θ_p : 入射角である.
波浪場・位相平均流場間のカップリング条件	1. WECのみを考慮したケース (以後WEC-only と略称) 2. WECとCEWの双方を考慮したケース (以後WEC+CEWと略称) 3. WECを考慮しないケース (以後NOWECと略称)
初期条件	水温: $t(z) = 14.1 + 4\tanh(0.105z + 2)$ 塩分: $s(z) = 33.7 - 0.2\tanh(0.1z + 2)$

み込むことで波浪により駆動される3次元流れの解析を可能にしたROMS-WEC (Uchiyamaら, 2010) とスペクトルピーク型WKB波浪モデル (Mei, 1994) をタイトにカップリングさせることによって波一流れ共存場を表現した. 米国サンタモニカ湾の一部を模したモデル地形 (図-1) を作成し, 同図のように岸沖方向に x 軸, 沿岸方向に y 軸, 鉛直上方に z 軸を定め, 沖側境界における波の入射角 θ_p を x 軸から時計周りの方向に定義した. 本モデルでは, 波浪や海上風, 初期成層および地形等の諸条件を任意に制御することが可能であるが, 今回は表-1に示す条件を適用した. 同海域における冬季の典型的な密度成層を初期条件として与え, 周期的に変化する沿岸方向の海上風応力を作用させて湧昇を励起させ, 密度フロントにおける傾圧不安定によるサブメソスケール inner shelf eddy を発達させた. 同時に, 異なる波浪場とそれに伴って生じる様々な regime の海浜流場における解析を行うべく, 表-1に記した3パターン入射波条件を課した. これらの入射波条件と波浪場-位相平均流場間のカップリング条件を組み合わせた計7ケースについて, それぞれ実時間で60日分の数値実験を行った.

(1) 位相平均流モデル

vortex-force型Euler位相平均Primitive方程式の水平方向の運動量保存則は次式で表される.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla_{\perp}) \mathbf{u} + w \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} + f \hat{\mathbf{z}} \times \mathbf{u} + \nabla_{\perp} \phi - \mathbf{F} = -\nabla_{\perp} K + \mathbf{J} + \mathbf{F}^w \dots \dots \dots (1)$$

ここに, (\mathbf{u}, w) : 流速 (\mathbf{u} : 水平流速, w : 鉛直流速), t : 時間, \mathbf{F}^w : 波浪に起因する非保存的外力 (砕波項, bottom streaming項および鉛直乱流拡散項の和), \mathbf{F} : 波浪以外に起因する非保存的外力, f : コリオリパラメータ, ϕ : 圧力, K : 高次のBernoulli head, ∇_{\perp} : 水平ハミルト

ニアン, $\hat{\mathbf{z}}$: 鉛直上向きの単位ベクトルである. \mathbf{J} はWECの導入により付加されるvortex force項とStokes-Coriolis項の和であり, 次式のように表わされる.

$$\mathbf{J} = \hat{\mathbf{z}} \times \mathbf{u}^{st} \left((\hat{\mathbf{z}} \cdot \nabla_{\perp} \times \mathbf{u}) + f \right) - w^{st} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \dots \dots \dots (2)$$

$(\mathbf{u}^{st}, w^{st})$ は3次元のストークスドリフト速度であり,

$$\mathbf{u}^{st} = \frac{a^2 \sigma \mathbf{k}}{2 \sinh^2 kD} \cosh 2k(z+h) \dots \dots \dots (3)$$

$$w^{st} = -\nabla_{\perp} \cdot \int_{-h}^z \mathbf{u}^{st} dz' \dots \dots \dots (4)$$

で表わされる. ここに, z' は鉛直積分に伴うダミー変数である. 分散関係式は次式で与えられる.

$$\sigma^2 = gk \tanh kD \dots \dots \dots (5)$$

a : 波の振幅, σ : 波の周波数, \mathbf{k} : 波数ベクトル ($k = |\mathbf{k}|$), D : 静水深 h と水位 ζ および次式に示すBernoulli headによるset down量の和として表される全水深である.

$$\zeta = -\frac{a^2 k}{2 \sinh 2kD} \dots \dots \dots (6)$$

(2) 波浪変形モデル

位相平均型平面波浪変形モデルには, CEWを表現可能なWKB近似に基づく屈折方程式系を用いた.

$$\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} + \mathbf{c}_g \cdot \nabla \mathbf{k} = -(\tilde{\mathbf{k}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} - \frac{k\sigma}{\sinh 2kD} \nabla D \dots \dots \dots (7)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot (A \mathbf{c}_g) = -\frac{\varepsilon_w}{\sigma} \dots \dots \dots (8)$$

ここに, $A: E/\sigma$ で表わされる波のアクション (E : 波のエネルギー), ε_w : 砕波と底面摩擦の効果による波のエネルギー消散率である. (7)は波数保存式, (8)は波のアクション保存式であり, \sim (チルダ)を付与した変数同士の演算を先に行うものとする.

3. 沖合で発達するサブメソスケール渦に対する波一流れ相互作用の効果

図-2は, モデル時間31日目におけるCase 1の表層無次元渦度 (ζ/f , ζ : 表層の相対渦度) のスナップショットである. 表-1中の3つのカップリング条件のいずれにおいても, 沖合領域でのサブメソスケール渦の発達が確認される. WECを考慮しないケースではWECを考慮した場合と比べて, より細かく強い渦が広く沖合へと発達しており, WECの効果により沖合のサブメソスケール渦の発達が抑制されることが示唆されている. また, WECを考慮した2ケースでは, 砕波に伴って生じる海浜流系の発

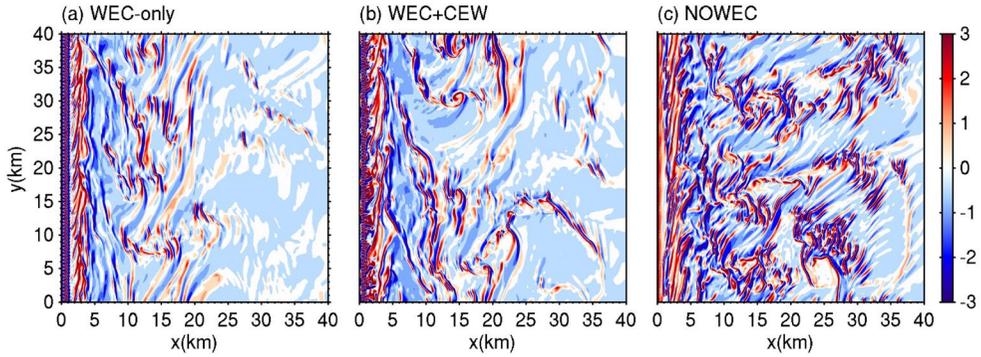


図-2 Case 1における表層無次元渦度(ζ/f)のスナップショット。(a) : WEC-only, (b) : WEC+CEW, (c) : NOWEC.

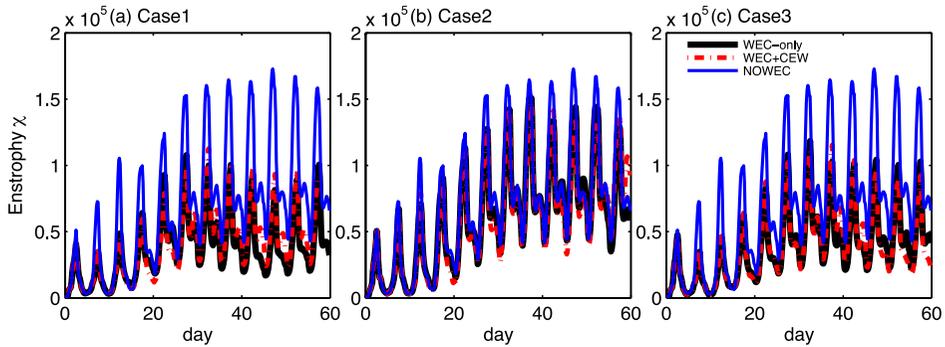


図-3 $x > 10$ km の領域を対象として計算したenstrophy $\chi(t)$ の時系列。(a) : Case1, (b) : Case2, (c) : Case3.

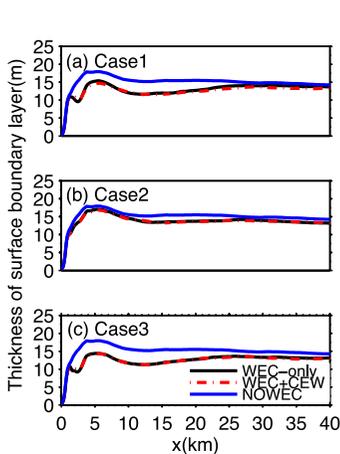


図-4 時空間平均された表層混合層厚の岸沖分布。(a) : Case1, (b) : Case2, (c) : Case3

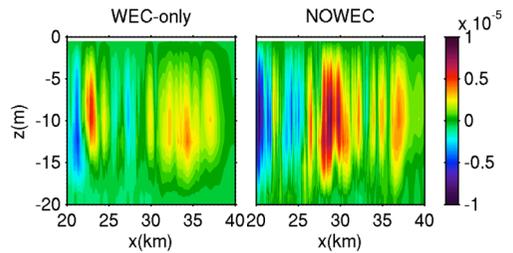


図-5 時空間平均された鉛直流速 w (m/s) の岸沖断面図。(a) : WEC-only, (b) : NONEW. ただし, Case1に対するもの。

$$\chi(t) = \int_{L_x} \int_{L_y} \sqrt{(\zeta/f)^2} dy dx \dots\dots\dots (9)$$

なお、碎波帯内で生じる海浜流による強い非地衡的な渦度の影響をカットし、沖合におけるサブメソスケール渦の発達に及ぼすWECの影響を評価するため、 $x > 10$ kmの沖合領域を評価対象とした。

Case 1に対する $\chi(t)$ の時系列(図-3(a))は、図-2において定性的に示されたWECによる沖合サブメソスケールの発達抑制効果を定量的に示している。この結果から計算される本数値実験期間中におけるWECによる χ の抑制率(WEC-onlyの χ をNOWECのそれと除したものの)の最大値は63%であった。沖合サブメソスケール渦のWECによる発達抑制の一つの原因として、WECを導入するこ

達に伴い、汀線近傍で正負の渦度が間欠的あるいは周期的に生成され、海浜流の非定常性が強化される。

図-2において示唆されたWECの有無による渦の発達の程度の差異を定量的に評価するため、次式で表される表層無次元渦度 ζ/f の二乗平方根の空間積分値であるenstrophy $\chi(t)$ (例えば、Dong・McWilliams, 2007)の時系列を全ケースに対して計算した(図-3)。

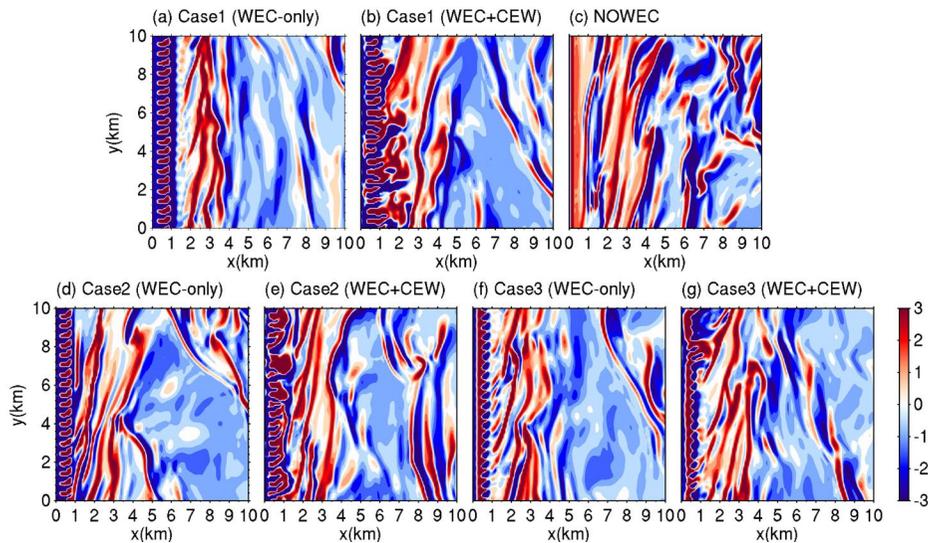


図-6 モデル時間31日における表層無次元渦度(ζ/f)のスナップショット。(a)・(b) : Case 1, (d)・(e) : Case 2, (f)・(g) : Case 3, (a)・(d)・(f) : WEC-only, (b)・(e)・(g) : WEC+CEW, (c) : NOWEC.

とに伴って出現するStokes-Coriolis項やvortex force項による運動量収支構造の改変効果(内山ら, 2012)が考えられるが, 詳細なメカニズムの解明は今後の課題の1つである。

沖側境界での入射波高をCase 1よりも低い1mに設定したCase 2では, WECを考慮するケース・しないケースの間の差異が低減し, WECによる渦抑制機構が弱化的であることが分かる(最大抑制率88%)。これは, 波高の減少に伴うストークスドリフト速度 u^{st} (式(3))の低下の影響を受けて, 式(2)中のStokes-Coriolis項がCase 1よりも小さくなり, WECの導入に伴う運動量収支構造の改変効果が弱まり, ケース間の差異が低減したためと考えられる。沖側境界での入射角 θ_p を 10° として沿岸流を発達させたCase 3では, Case 1と同程度のWECによる渦抑制効果が認められた(最大抑制率69%)。

次に, 沖合サブメソスケール渦のWECによる発達抑制効果が海洋構造へ与える影響について調べた。図-4は沿岸方向について空間平均を, モデル時間25~39日の期間に対して時間平均(以下同様)を取った時空間平均表層混合層厚の岸沖分布である。図-4より, WECの導入に伴って表層混合層厚が陸棚上の広範囲において小さくなる事が分かる。混合層厚の薄化の程度は, 表層無次元渦度のWECによる抑制度の大小関係と一致しており, 波高低下によって成層に対するWECの効果も低下することが確認される。同様の時空間平均操作を施した鉛直流速 w の岸沖断面図(図-5)を見ると, 表層混合層の縮退に対応して, WECの効果により w が低減し, 鉛直混合が抑制されることが分かる。したがって, 混合層厚の変化に影響される大気・海洋間の相互作用や沖合の流動構造に

対して, WECは無視し得ない影響を与えることが示された。一方で, 以上のような沖合流動に関する検討からは, 顕著なCEWの効果は認められなかった。

4. 碎波帯-陸棚相互作用における双方向的な波-流れ相互作用の効果

双方向的な波-流れ相互作用が非定常海浜流とサブメソスケール(inner shelf)渦による碎波帯-陸棚相互作用に及ぼす影響について検討する。図-6(a)~(c)は, 図-2に示した表層無次元渦度 ζ/f のスナップショットの拡大図であり, 非定常海浜流とサブメソスケール渦がオーバーラップしている領域に着目して図示している。まずCase 1(a~b)に着目する。WECを考慮しないケースでは, サブメソスケール渦が碎波帯内部に相当する領域まで容易に侵入し, 汀線付近まで影響を及ぼしている。一方, WECのみを考慮したケース(WEC-only)ではサブメソスケール渦の碎波帯内への侵入は起こっていない。これは, WECの導入により発達した離岸流が沖合へと噴出し, さらに海上風の効果を受けて整流化されることによって, サブメソスケール渦の碎波帯内への侵入がブロックされるためと考えられる。WECとCEWの双方を考慮すると(WEC+CEW), 碎波帯外縁部においてサブメソスケール渦と離岸流の強い干渉が見られる。これは碎波帯内におけるCEWの効果によって離岸流の発達が抑制され(例えば, 甲斐田・内山, 2014), サブメソスケール渦の碎波帯内への進入・干渉が容易になることを意味するものと解釈される。Case 2(d・e)では, 波高の減少に伴うWECの弱化的によって離岸流の発達が抑制され,

WEC-only・WEC+CEWの間の空間的差異がCase 1と比べて低減している。甲斐田・内山 (2014) は、沿岸流場では平均流に対するCEWの効果は限定的であると報告しているが(ただし海浜流の非定常成分の抑制には寄与する)、これに対応してCase 3 (f・g) では、CEWの有無による空間的差異が低減するとともに、砕波帯-陸棚間の相互干渉はさらに弱化している。

このような海浜流-サブメソスケール (inner shelf) 渦の相互干渉に及ぶCEWの効果を各ケースにおいて定量的に評価するため、まず、次式で表わされる無次元渦度 ζ/f の二乗平方根の沿岸積分値の岸沖分布 $\lambda(x, t)$ をCase 1~3のWEC-only・WEC+CEWケースに対して求める。

$$\lambda(x, t) = \int_{L_y} \sqrt{(\zeta/f)^2} dy \dots\dots\dots (10)$$

さらに、モデル時間31日時点における $\Delta\lambda$ (WEC-onlyからWEC+CEWを引いた値) の岸沖分布を求めた(図-7)。Case 1, 2では、砕波帯内側 ($x < 800m$) において $\Delta\lambda > 0$ 、すなわちCEWの効果により渦の発達を抑制されていることが分かる。これはCEWによる離岸流の発達抑制効果によるものであると考えられる。一方、砕波帯外側 ($x > 800m$) では $\Delta\lambda < 0$ の負のピークが現れ、CEWによる渦度の強化が示されている。 $\Delta\lambda < 0$ の領域は波高が大きいほど岸沖方向に広がっており、Case 1ではCase 2よりも沖側(沖合2 km程度)にまで及んでいる。また、波向角 $\theta_p = 10^\circ$ を与えた沿岸流が卓越する条件下にあるCase 3における $\Delta\lambda$ は、他のケースと比べて非常に小さい。

以上のことから、非定常海浜流とサブメソスケール渦による砕波帯・陸棚間の力学的な相互作用に及ぼすWEC・CEWの効果は、本研究の条件下では、離岸流が発達する直入射条件 ($\theta_p = 0^\circ$) かつ波高が比較的大きいときに最も強く現れることが示された。非定常海浜流とサブメソスケール渦が互いに干渉しあう場における双方向的な波-流れ相互作用の効果は、砕波帯・陸棚間の力学構造・流況および物質と海水交換へ影響を及ぼすことが強く推察される(例えば、内山ら, 2013)。また、外洋流動に対しても、沖合海域に対する境界条件の変更を通じて少なからぬ影響を与えている可能性がある。

5. まとめ

理想化された条件下において、波-流れ相互作用を双方向的に考慮した3次元数値実験を行い、砕波帯-陸棚間の相互作用および沖合流動に対して波-流れ相互作用が与える影響についての基礎的な検討を行った。沖合海域では、表層無次元渦度や鉛直混合の抑制、表層混合層厚の減少等の形でWECの効果が強く現れる。一方、CEWの効果は砕波帯周辺の渦度を抑制し、反対

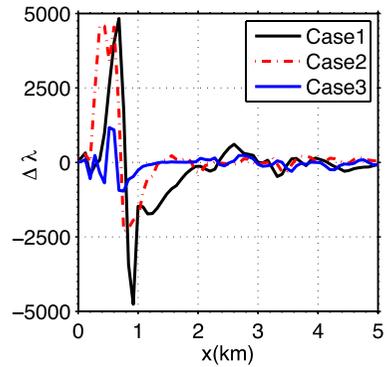


図-7 モデル時間31日における、Case1~3に対する $\Delta\lambda$ の岸沖分布

に沖合2 km程度までの浅海域上の渦度を強化する。このように、砕波帯-陸棚相互作用に対する波-流れ相互作用の効果は有意であり、本研究におけるレジーム下においては、WECの効果が特に顕著であった。WEC・CEWの影響は、砕波帯周辺海域だけではなく、陸棚域(例えば、内山ら, 2012)や、沖合に対する境界条件の変更を通じて外洋域へも波及する可能性があるため、引き続き様々な海域、海象条件について検討していく必要があると考えられる。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究C (24560622) の援助を受けた。

参考文献

内山 雄介・西井 達也・James C. McWilliams (2012) : VF型位相平均Primitive方程式を用いた沿岸海洋流動に及ぼす波浪の影響に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_426-I_430.
 内山 雄介・甲斐田 秀樹・James C. McWilliams (2013) : VF型位相平均Primitive方程式による砕波帯-陸棚相互作用に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_56-I_60.
 甲斐田 秀樹・内山 雄介 (2014) : 波-流れ相互作用が海浜流系の力学構造に及ぼす影響について, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 1, pp. 1-14.
 Dong, C. and J. C. McWilliams (2007) : A numerical study of island wakes in the Southern California Bight, Continental Shelf Res., Vol.27, pp.1233-1248.
 Mei, C. C. (1994) : The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, World Scientific, Singapore, 740p.
 Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams (2005) : The Regional Oceanic Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates oceanic model, Ocean Modell, Vol.9, pp.347-404.
 Uchiyama, Y., McWilliams, J. C. and Restrepo, J. M. (2009) : Wave-current interaction in nearshore shear instability analyzed with a vortex-force formalism, J. Geophys. Res., Vol.114, C06021, doi:10.1029/2008JC005135, 2009.
 Uchiyama, Y., J. C. McWilliams and A. F. Shchepetkin (2010) : Wave-current interaction in an oceanic circulation model with a vortex force formalism: Application to the surf zone, Ocean Modell., Vol. 34: 1-2, pp.16-35.