

PDF issue: 2025-06-07

サブメソスケール渦・非定常海浜流オーバーラップ 領域における波一流れ相互作用の効果について

甲斐田, 秀樹

内山, 雄介

<mark>(Citation)</mark> 土木学会論文集B2(海岸工学),70(2):I_71-I_75

(Issue Date) 2014

(Resource Type) journal article

(Version) Version of Record

(Rights) @2014 公益社団法人 土木学会

(URL)

https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002940



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 Overwrapping 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 sufzone 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砕波帯 - 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、砕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、砕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,砕波の影響によって汀線付 近に発達する海浜流系が砕波帯-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砕波の効果

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

は特に初期分散過程において顕著に現れることなど, 砕波帯 – 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、砕波帯周辺にお 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砕波帯 – 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



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	$\tau_x = 0, \ \tau_y = 0.2 \sin(t \pi / 2.5)$ [Pa]. t:時間[日].			
沖側境界に おける 入射波条件	・Case1:ペ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	 WEC のみを考慮したケース(以後WEC-only と略称) WEC とCEWの双方を考慮したケース(以後 WEC+CEWと略称) 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: $s(z) = 33.7-0.2 \tanh(0.1z+2)$			

表-1 計算条件

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 (Uchivama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 - 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。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パターンの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.

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

ニアン, **2**:鉛直上向きの単位ベクトルである.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.

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

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.

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

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.

(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.

$$\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} + \mathbf{c}_{g} \cdot \nabla \mathbf{k} = -\left(\widetilde{\mathbf{k}} \cdot \nabla\right)\widetilde{\mathbf{u}} - \frac{k\sigma}{\sinh 2kD}\nabla D \dots (7)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot \left(A\mathbf{c}_{g}\right) = -\frac{\varepsilon_{w}}{\sigma} \dots (8)$$

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、~ (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.

沖合で発達するサブメソスケール渦に対する 波ー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(ξ/f)のスナップショット. (a):WEC-only, (b):WEC+CEW, (c):NOWEC.



図-3 x > 10km 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.





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 ξ/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-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.

なお,砕波帯内で生じる海浜流による強い非地衡流的な 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のそれで除したもの)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



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Case2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していることが分かる(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ust(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 ることが分かる.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. 砕波帯ー陸棚相互作用における双方向的な波 一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) 渦による砕波帯 – 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砕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 メソスケール渦の砕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砕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),砕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 砕波帯内における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 ル渦の砕波帯内への進入・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 の相互干渉に及す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 ξ / 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.

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($\chi < 800$ m)において $\Delta\lambda >$ 0,すなわちCEWの効果により渦の発達が抑制されてい 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(r> 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 θ_p = 10°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・流況および物質や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改変を 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△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 界条件の改変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. L_56-L_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) : Wavecurrent 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.