

3次元海浜流が砕波帯-陸棚間の物質交換に及ぼす影響について

Effects of three-dimensional littoral currents on material exchange between surfzone and inner-shelf

- 甲斐田秀樹, 神戸大院工, 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: kaida@stu.kobe-u.ac.jp
 内山雄介, 神戸大院工, 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp
 James C. MCWILLIAMS, University of California, Los Angeles, E-mail: jcm@atmos.ucla.edu
 Hideki KAIDA, Kobe University, 1-1 Rokkodai-Cho, Nada-ku, Kobe, Japan
 Yusuke UCHIYAMA, Kobe University, 1-1 Rokkodai-Cho, Nada-ku, Kobe, Japan
 James C. MCWILLIAMS, UCLA, 405 Hilgard Ave., Los Angeles, CA 90095-1565, USA

Recent observations have suggested that wave-driven three dimensional littoral currents are inevitable for surfzone-inner shelf interaction (e.g., Lentz *et al.*, 2008). In this study, a synoptic, detailed numerical experiment is conducted to pursue this problem with a quintuple nested coupling system consisting of WRF, SWAN and ROMS-WEC (Uchiyama *et al.*, 2010) at horizontal resolutions down to 20 m (the inner-most L5 domain). To examine the effects of three-dimensional littoral currents on material exchange between surfzone and inner-shelf, three-dimensional Lagrangian particle tracking is carried out using the L5 outputs. The Lagrangian PDF analysis clearly demonstrates that breaking wave-induced three-dimensional littoral currents significantly enhance lateral and vertical mixing between surfzone and inner-shelf.

1. はじめに

離岸流に代表される砕波により生じる海浜流系は、沿岸域における海浜変形、物質輸送等の諸問題に対して多大な影響を与えている。近年の観測的研究により、砕波帯-陸棚間の海水交換に対して、密度成層や潮汐等の影響に加えて、海浜流系が重要な役割を担っていることが示されている (例えば, Lentz *et al.*¹⁾)。また、砕波帯は砕波に伴う岸沖断面内の鉛直循環に伴って陸棚との海水交換に対してバリアのような役割を果たし、「sticky water」と呼ばれる孤立水塊を形成することが知られている²⁾。しかしながら、陸棚循環流と海浜流とを一体的かつ3次元的に解析する枠組みは、波-流れ相互理論を正確に考慮する理論や砕波帯を表現するための高解像化等が必要であるため十分に確立されておらず、数値モデルを用いた砕波帯-陸棚相互作用に関する研究は観測的研究に比べて立ち遅れている。そこで本研究では、ROMS および ROMS-WEC³⁾と WRF および SWAN からなるカップリングシステムを用いた多段階ネスティングによる水平解像度 20m の超高解像度 3次元海洋モデリングを行った。本報では、3次元的な中立粒子追跡を通じて、砕波に伴って生じる 3次元海浜流が砕波帯-陸棚間の水平・鉛直両方向の物質交換に及ぼす影響について検討した結果について報告する。

2. 数値モデル

本研究では、高品質な陸棚循環流モデリングの実績がある米国サンタモニカ湾を対象海域とした (Fig.1)。外洋の影響を適切に考慮するため、データ同化を組み込んだ全球再解析データ SODA2.0.4 を最外側境界条件として、ROMS および ROMS-WEC を用いた5段階の1-way オフラインネスティングを行った。すな

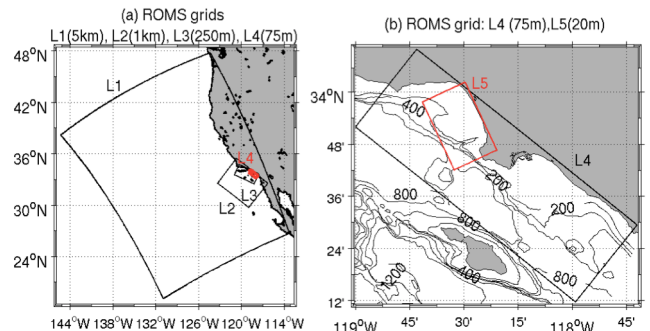


Fig.1. The quintuple nested ROMS domains consisting of L1, L2, L3, L4 and L5. The inner-most L5 has a horizontal grid resolution of 20 m.

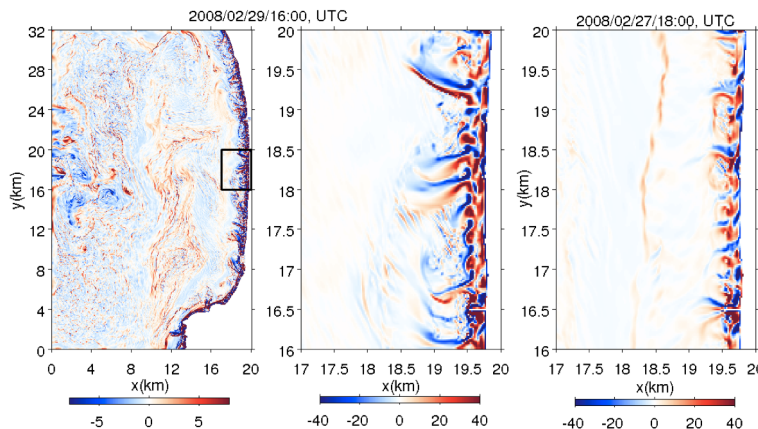


Fig.2. Snapshot of surface normalized relative vorticity in L5. Left: the L5 model domain, middle and right: nearshore zoom-in corresponding to the black frame in the left panel. Left and middle: control case, right: suppressed littoral current case.

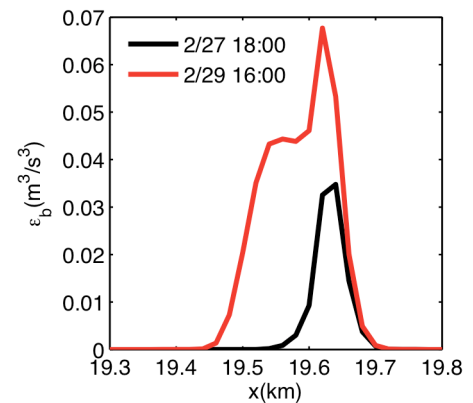
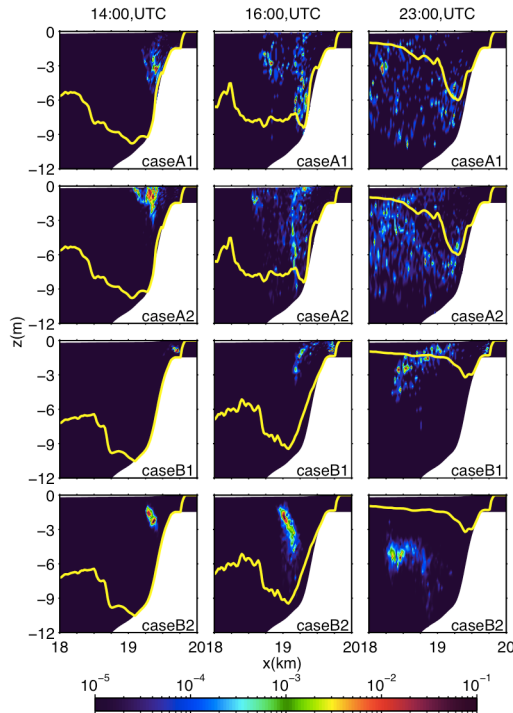


Fig.3. Cross-shore profiles of kinematic wave dissipation rate ϵ_b [m^3/s^3] at $y = 18$ km from the L5 SWAN solution. Red line: ϵ_b for the strongest rip currents.

Table 1. Computational configurations for the three dimensional Lagrangian particle tracking experiment.

Case No.	ε_b	released site and number of particles N released from each site
A1	ON	Inside the surfzone, $N = 600$
A2	ON	Outside the surfzone, $N = 1660$
B1	OFF	Inside the surfzone, $N = 600$
B2	OFF	Outside the surfzone, $N = 1660$

**Fig. 4.** Temporal evolution of alongshore integrated Lagrangian PDFs of the particles on 2/28/2008. Left: 1 hour, middle: 3 hours, right: 10 hours after the release. Yellow curves in each panel indicate the KPP-estimated surface boundary (mixed) layer depth.

わち, SODA (水平解像度 0.5°) $\rightarrow$ L1 (同 5 km) $\rightarrow$ L2 (同 1 km) $\rightarrow$ L3 (同 250 m) $\rightarrow$ L4 (同 75 m) $\rightarrow$ L5 (同 20 m) へと順次ダウンスケールした。各子領域では親領域の計算結果を境界条件として与えており, L2 以降では潮汐シグナルを与えている。海面での風応力および熱・放射熱フラックスには, NOAA-NCEP による NARR データを境界条件とした WRF による 2 段階ネスティングにより水平解像度 6 km までダウンスケールした海上風を一方的に与えた。波浪は L3・L4・L5 領域で考慮しており, 最外側の境界条件に NDBC のブイ観測データ, 海表面の応力として WRF の結果を用いた 3 段階ネスティング SWAN (L5 水平解像度 20 m) による推算値を与えた。鉛直乱流モデルには碎波による鉛直混合を考慮した KPP モデルを用い, L5 の計算期間は冬期風浪を対象とするため 2008 年 2 月~2008 年 4 月末の約 3 ヶ月間とした。

3. 流れ場へ及ぼす碎波の影響についての感度実験

Fig.2 は, L5 領域における計算結果の一例であり, 流れ場が静穏な時間および卓越した離岸流が存在する時間における表層の無次元相対渦度の瞬間値である。SWAN による波浪場の推算結果より, 波浪の発達に伴って波浪場から流れ場への碎波エネルギー輸送 ε_b が強化され, 離岸流の沖への発達が促進される (**Fig.3**)。このような碎波により生じる海浜流の碎波帯-陸棚間の物質交換への寄与を明確にするため, 波浪場から流れ場への運動量輸送を独立的に取り扱うことが可能な vortex-force 型 WEC モデルの利点を活かして, 水平方向の運動方程式中の碎波項において $\varepsilon_b = 0$ とす

ることにより, 碎波の影響を取り除く感度実験を行った。すなわち, ε_b を適切に考慮した Case A と, $\varepsilon_b = 0$ とした Case B の 2 ケースの数値実験を行った。離岸流最盛時の約 4 日前から ε_b をゼロにすることにより, Case B では Bernoulli head 等の保存的な波の効果, および碎波帯外沖側海域での大域的な流動構造を維持しながらも, 海浜流のみをほぼ完全に除去できていることを確認している。

4. 3 次元 Lagrange 粒子追跡

碎波に伴う 3 次元海浜流が碎波帯-陸棚間の物質交換に与える影響を評価するため, L5 の計算結果を用いて中立粒子の 3 次元 Lagrange 追跡を行った。本稿では, バックグラウンドの流況として強い離岸流が生じている時間 (2/29 13:00 放流開始) に対し, ε_b の有無を変更した 2 通りの流れ場を対象として, 粒子の初期分布 (碎波帯内側・外側の 2 通り) を考慮した計 4 ケースの追跡計算結果を示す (**Table.1**)。任意の移流時間に対して与えられる粒子の変位に関する確率密度関数である Lagrangian PDF⁴⁾を沿岸方向に積分した鉛直断面内の時間発展から (**Fig.4**), ε_b の有無により粒子の鉛直・岸沖方向の分散過程が著しく異なり, 十分に時間が経過すると碎波ありのケース (Case A) では表層から底層に至る広い範囲に粒子が存在するようになるが, 海浜流なし碎波あり ($\varepsilon_b = 0$, Case B) では, Case A よりも鉛直・岸沖方向の分散の程度が弱まり, 粒子群はパッチ状構造を保ちながら徐々に沖へと輸送されることが分かる。粒子の初期配置位置に着目すると, 碎波帯内で粒子を放流した場合は (Case A1, B1), 海浜流あり ($\varepsilon_b \neq 0$) では undertow の影響を受けながら全粒子が碎波帯外へ輸送されているが, 碎波なしのケースでは放流後 10 時間を経過してもある程度の割合の粒子が碎波帯内に留まり続けている。一方, 碎波帯外側に粒子を初期配置すると (Case A2, B2), 海浜流ありでは表層付近の離岸流によって全粒子が碎波帯外へと輸送されている。ここでは示さないが, 海浜流ありでは海浜流セルによる水平循環の影響を受けて, 粒子が活発に碎波帯内外を流出入し, 循環することを確認した。以上のことから, 碎波に伴う 3 次元海浜流が岸沖・鉛直方向の粒子分散に強く影響を及ぼし, 碎波帯-陸棚間の混合を著しく促進することが分かった。

5. 結論

WRF・SWAN・ROMS-WEC カップリングシステムを用いた多段階ネスティングによる超高解像度 3 次元海洋モデルを用いて, 碎波に伴う 3 次元海浜流が碎波帯-陸棚間の物質交換に及ぼす影響を解析した。中立粒子を用いた Lagrange PDF 解析の結果, 3 次元海浜流が碎波帯-陸棚間の水平方向の混合を助長し, 沿岸域の有する「stickiness」を解消すること, 表層を中心に発達する離岸流や底層で形成される undertow 等を通じて, 物質の鉛直分散過程に対しても重要な役割を果たしていること等が明らかになった。

参考文献

- (1) Lentz, S. J., M. Fewings, P. Howd, J. Fredericks, and K. Hathaway (2008) : Observations and a model of undertow over the inner continental shelf, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.38, pp.2341-2357.
- (2) Wolanski, E. (1994) : *Physical Oceanographic Processes of the Great Barrier Reef*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 194pp.
- (3) 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.
- (4) Mitarai, S., D. A. Siegel, J. R. Watson, C. Dong and J. C. McWilliams (2009) : Quantifying connectivity in the coastal ocean with application to the Southern California Bight, *J. Geophys. Res.*, Vol.114, C10026, doi:10.1029/2008JC005166.