



ラングミュア循環の物理

沿岸域への影響：碎波帯周辺で生じる 3 次元組織渦構造

内 山 雄 介

Influences in coastal areas: 3-D coherent nearshore eddies around surf zone

Yusuke Uchiyama

うちやま ゆうすけ：神戸大学大学院工学研究科
市民工学専攻

碎波帯を含む沿岸域では、碎波に伴う波から位相平均流への運動量輸送が **vortex force** などよりも大きくなることで、海浜流に代表される特有の流れが生じる。これらはシア不安定により容易に組織渦を生成するとともに、**Langmuir** セルに類似した縦渦構造へと発達することがある。

1. はじめに

風波が沿岸域に到達すると、波運動の鉛直方向影響範囲（概ね半波長，数 10 m）は水深スケールと同程度になる。このとき、波の浅水変形によって波形勾配が急峻化し、波の非線形性が無視できなくなる（例えば，Uchiyama, 2019）。波が碎波帯へと到達すると非線形性がさらに強化されて波形が前後に非対称になり，前傾化した波頂部において負圧が生じ，碎波に至る。経験的には，碎波は波高が水深の 0.8 倍程度になったときに発生する。沖合海域で生じるいわゆるホワイトキャップ碎波と区別して，この現象は水深に規定された碎波（depth-induced wave breaking）と呼ばれる。浅海域ではこの水深規定碎波に伴う激しい渦運動によって波のエネルギー・運動量の大半が失われるが，それらは直接粘性散逸するのではなく，位相平均流へと転化されて平均海面を変化させ（例えば岸境界において平均海面が上昇する wave set-up），沿岸流や離岸流に代表される海浜流を駆動する。海浜流は地形の非一様性などに伴い組織乱流化し，さらにはストレッチングとティルティングによって微細渦へとカスケードダウンしていく（Uchiyama ら，2017）。同時に，浅海での波はいわゆる極浅海波に漸近していくため，その鉛直運動は水深の拘束を受け，海底面においては強い摩擦を生じてエネルギーが低減し，その損失分もまた位相平均流へと転化される。

一方で碎波帯は，碎波に伴う岸沖断面内の鉛直循環によって陸棚との海水交換に対してバリアとして作用し，「sticky water」（例えば，Restrepo ら，2014）と呼ばれる孤立水塊を形成することがある。近年，現地観測に基づく研究により波に駆動される 3 次元的な undertow や離岸流等の海浜流系が碎

波帯－陸棚間の海水交換に対して重要な役割を担っていることが再認識されつつある（例えば、Lentz ら、2008）。このような砕波帯－陸棚間の浅海域における陸棚循環流と海浜流とを海洋循環モデルを用いて統一的かつ3次元的に解析するためには、波－流れ相互作用に関する理論、砕波帯を表現するための高解像化、沖合の情報を高精度に取り込むための精緻なダウンスケーリング技術が必要となる。

波－流れ共存場における位相平均流の運動量・質量保存則を記述するにあたり、非線形項の展開に Helmholtz 分解を用いて vortex force (VF) の概念を導入し、適切な平均化操作を施すことにより、Stokes drift と相対渦度・惑星渦度との相関（前者は VF、後者はいわゆる Stokes-Coriolis 効果）、Bernoulli head 効果（1 次オーダーでは wave set-down）などの保存的運動量交換を含んだ位相平均方程式系が得られる（例えば、McWilliams ら、2004; Aiki and Greatbatch, 2012）。これらの方程式系は当然ながら Langmuir 循環を記述する。これらを浅海域や砕波帯を含む沿岸域に拡張するためには、水深規定砕波や底面摩擦などに伴う波動場から流れ場への非保存的な運動量輸送などを独立に取り扱うことが可能な汎用的な枠組みが必要となる。特に 3 次元海浜流場では、非線形項の Reynolds 分解による radiation stress に基づく GLM 方程式（例えば、Mellor, 2003）と比較して、VF 型方程式は砕波帯内の流れをより高精度に再現できる（Uchiyama ら、2010）。この VF 型の枠組みにより、これまで再現が困難であった非定常 3 次元海浜流の時空間構造を精緻に解析することが可能となった。

このような VF 型モデルによる非定常海浜流場への適用例としては、shear wave に対する波－流れ相互作用の効果を解析した Uchiyama ら（2009）や、離岸流場を対象とした Weir ら（2011）の研究があるものの、いずれも水深積分型の平面 2 次元の枠組みで行われたものであった。これに対して Uchiyama ら（2010）は、領域海洋循環モデル ROMS (Shchepetkin and McWilliams, 2005; 2008) をベースに、外洋－陸棚域－砕波帯に至る広い空間レンジ

において波の影響を考慮できる 3 次元位相平均海洋循環モデル (ROMS-WEC と呼称) を開発した。本稿ではまず、外洋影響と砕波帯での海浜流を同時に扱うためのマルチスケール ROMS-WEC モデリング技術の適用例を紹介する。このモデルは、全球海洋再解析データを境界条件として ROMS-WEC を用いて最大 5 段階のネスティングを行った海洋循環モデリング、多段ネストによる領域気象モデル WRF およびスペクトル波浪モデル SWAN からなるカップリングシステムを用いたものとなっている。これを用いて、外洋の影響を適切に取り込みつつ、砕波帯およびそこで生じる海浜流を表現可能な最小水平解像度 20 m の高解像度 3 次元海洋モデリングを実施した。さらに、砕波帯特有の現象として、離岸流のせん断不安定によって惹起される組織渦の 3 次元構造について、水平解像度 4 m の超高解像度 3 次元数値解析を行った結果の一例を紹介する。

2. 米国カリフォルニア州サンタモニカ湾での事例

(1) 対象海域

本章の研究対象海域は、太平洋東岸に位置する米国南カリフォルニア湾の一部を構成する Santa Monica 湾である（図 1）。この海域は、北太平洋亜熱帯循環の東岸境界流であるカリフォルニア海流の影響を強く受けることに加え、開放性であることから冬期風浪に直接的に曝されるため、陸棚循環流と波浪が重畳して作用する海域として特徴付けられる。カリフォルニア海流系は、沖合を南南東に流れる寒流であるカリフォルニア海流、沿岸域の水深 200 m より下層を西岸に沿って北に流れる Davidson 海流、北緯 30 度付近で反転し北上する南カリフォルニア反流などから構成される。この海域で特徴的な現象は、春季の赤道方向季節風によって生じる海洋深層水の沿岸湧昇である。このため、本海域は年間を通して海水温が低く、沿岸域に高濃度の栄養塩が供給され、高い生産性を持つ豊かな生態系が形成される海域として知られている。しかしながら、後背地に大都市ロサン

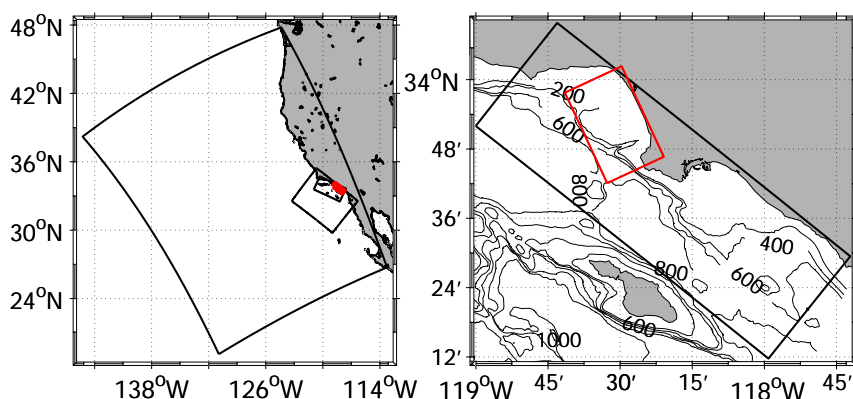


図1 5段階ネストによるU.S. West Coastモデル (ROMS-L1, 左図最外側黒ボックス), カリフォルニア沿岸モデル (ROMS-L2, 左図1つ内側の黒ボックス), 南カリフォルニア大領域モデル (ROMS-L3, 左図内側の黒ボックス), 南カリフォルニア詳細モデル (ROMS-L4, 左図赤ボックスおよび右図黒ボックス), サンタモニカ湾モデル (ROMS-L5, 右図赤ボックス). 右図のコンターは等水深線.

ゼルスを持つため, DDT の流出や下水処理水の海洋排出などを通じて, 人間活動の影響を色濃く受ける海域でもあり, 高度な海洋観測網 (SCCOOS ; 南カリフォルニア沿岸海洋観測システム) や海洋モデルによる海況再解析などが精力的に進められている.

(2) ダウンスケーリングモデル

海盆・総観規模のシグナルを取り込むために, 客観解析によるデータ同化を組み込んだ POP ベースの全球再解析データ SODA 2.0.4 を最外側境界条件とし, ROMS を用いた 5 段階の 1-way offline nesting によるダウンスケールを行い, 高解像度モデリングを行った (図 1). すなわち, SODA (水平解像度 0.5 度, 月平均値) → ROMS-L1 (同約 5 km, 格子数 $514 \times 402 \times$ 鉛直 40 層) → ROMS-L2 (同 1 km, $402 \times 514 \times 40$ 層) → ROMS-L3 (同 250 m, $562 \times 1122 \times 40$ 層) → ROMS-L4 (同 75 m, $562 \times 1602 \times 32$ 層) → ROMS-L5 (同 20 m, $1002 \times 1602 \times 32$ 層) である. 海面での風応力, 各種放射熱フラックスには, NOAA-NCEP の NARR 再解析値を境界条件とした 2 段階ネスティング WRF (解像度約 18 km → 6 km) による推算値を用いた. 波浪は L3, L4 および L5 で考慮し, 最外側境界条件に NDBC の波浪観測ブイデータ, 海表面応力に

WRF の結果を用いた 3 段階ネスティング SWAN (ROMS-L3, L4, L5 に対応) による推算値を外力として与えた. 潮汐には TPXO7.1 全球調和定数を用い, ROMS-L2 の順圧成分境界条件として与えた. 子グリッドである L3, L4, L5 では, 境界条件として親グリッドの計算結果を 2 時間毎に与えることにより, 内部潮汐などを含む高周波シグナルを考慮した. 鉛直乱流モデルには海表面と海底の両惑星境界層に対して KPP モデルを用いた. 領域循環に対する波の影響は SWAN による波浪推算を実施した ROMS-L3, L4, L5 に対して考慮し, 特に砕波帯を解像する ROMS-L5 では水深依存性砕波に伴う運動量輸送, bottom streaming, 砕波帯に拡張された KPP モデルなどを使用した.

(3) 主要な結果

砕波帯を表現可能な水平解像度 20 m の ROMS-L5 モデルを用いた synoptic な沿岸流動モデリングを行い, 砕波に伴う海浜流系が陸棚流動とどのように相互作用するかについて詳細に解析した. 例えば, 離岸流が卓越する時間における表層の無次元相対渦度の瞬間値を見ると, 海岸線近傍の砕波帯内では, 岸から沖方向に向けて強く発達する離岸流と, それに伴う細かく強い渦が沖向きに噴出するように生じている (図 2). 比較的流れが静穏

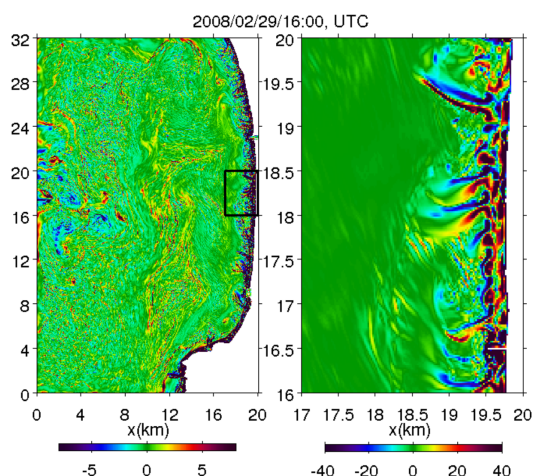


図2 離岸流が発達している時間 (2/29 16:00) における表層無次元相対渦度の瞬間値。左: ROMS-L5 領域全体、右: 左図黒枠内拡大図。

な状況にあっても離岸流と戻り流れによるセル構造 (rip cell) が形成され、弱い渦が岸近傍に貼り付くように恒常的に生じていた。その他、ROMS-L5 の結果から明らかとなった事実は以下の通りである (詳細については内山ら, 2013 を参照)。密度を用いた Euler の視点、および中立粒子を用いた Lagrange 的視点から砕波帯-陸棚間の物質分散に関する解析を行なった。その結果、離岸流に代表される 3 次元海浜流系が砕波帯と陸棚間の混合を著しく促進し、沿岸域の「stickiness」を解消させる役割を果たすことが具体的かつ定量的に示された。二粒子分散解析を用いて統計的に求められる Lagrange 相対拡散率を評価したところ、水平分散に対する砕波の影響は初期分散過程において最も顕著に現れることが確認された。その傾向は砕波帯を流出した物質が陸棚域へ流出するまでの数時間にわたって継続するため、引き続き生じる広域分散にも多大な影響を与える可能性が高いことが示唆された。一方で、海浜流セルによる水平循環によって物質が砕波帯周辺を滞留する状況も確認された。また、3 次元海浜流は、表層・中層に形成される離岸流、底層に形成される undertow

などを通じて鉛直分散過程に対しても重要となることが示された。

3. 米国ノースカロライナ州ダック海岸での事例

(1) 対象海域とモデリング

米国 North Carolina 州 Duck 海岸は、大西洋に面した開放性の海岸に位置し、海底勾配 1:80 程度の緩勾配砂浜が沿岸 (南北) 方向に概ね一様に広がっている海岸である。本章ではこの海浜における海底地形データおよび典型的な波浪条件を与えたシンプルな条件下において発生する非定常 3 次元離岸流の構造について検討した結果を紹介する。解析に先立ち、1997 年に実施された ONR プログラムによる SandyDuck フィールドキャンペーンのデータセットとの比較を行った。すなわち、1997 年 10 月 30 日の深浅測量結果を用い、砕波帯を含む東西約 550 m、南北約 800 m の浅海域を考え、これを水平解像度 2 m の直交格子、鉛直方向には水表面と海底面付近の解像度を向上させた不等間隔の s-座標を用いて 32 層で離散的に表現した。その他の詳細な計算条件や観測値との比較結果については内山・McWilliams (2011) を参照されたい。本モデルは外力として風波の効果のみに着目した解析を行うことを目的としているため、前章の多段ネストモデルとは異なりシングルドメインである。また、沖側はノイマン条件、沿岸方向は周期境界、密度一定、風応力なし、熱・淡水フラックス供給なし、コリオリ力なしとした。沖側境界において入射波条件を適切に与えることにより、波以外の外力を考慮しない場合においても、波高、周期、波向き、水平流速の鉛直構造などの岸沖変化を良好に再現できることを確認している (例えば、Uchiyama ら, 2010)。

(2) 非定常離岸流の 3 次元組織渦構造

次に、Duck 海浜における 2009 年以降の広域深浅測量データを用い、入射波の沖波波高と波向きをコントロールパラメータとした数値実験を行った。計算水平格子間隔は 4 m、鉛直 20 層とした。入射角が浅い場合は、入射波高の大小に関わらず

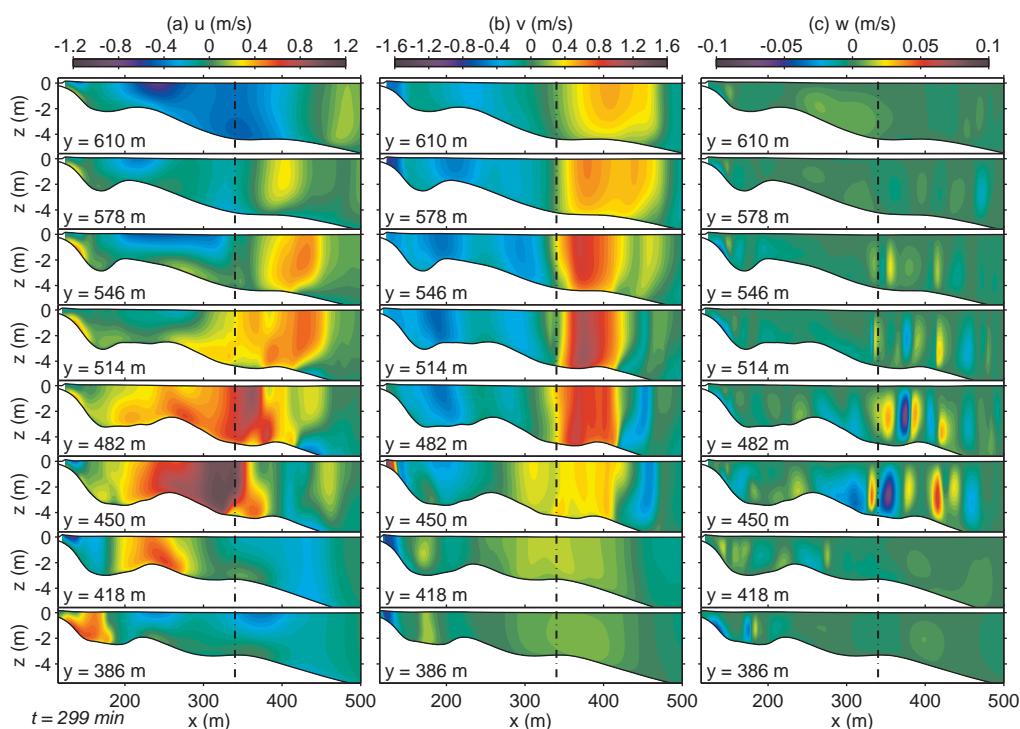


図3 Duck海岸地形上での3次元海浜流の瞬間像の一例(299分後). 沖向き水平流速 u , 北向き水平流速 v , 鉛直上向き流速 w の x - z 断面内コンターの沿岸方向分布.

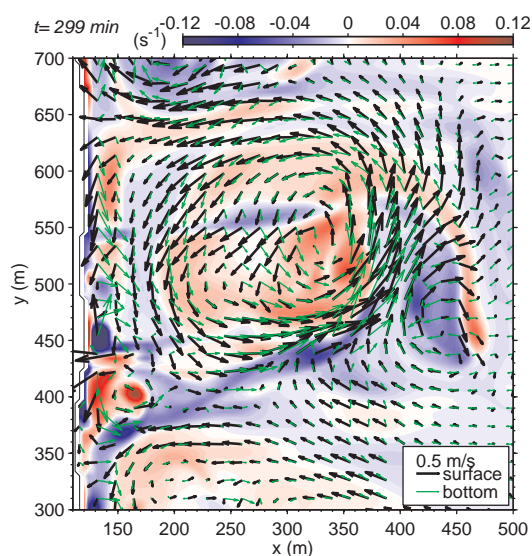


図4 Duck海岸地形上での3次元海浜流の瞬間像の一例(299分後). 水深平均流速の相対渦度(カラー), 水深コンター(1m間隔), および流速ベクトル(黒太: 海表面, 緑細: 海底面直上).

地形の沿岸方向の非一様性に起因した離岸流が発生し, 逆に入射角が深い場合はシア不安定 (shear wave) が卓越する海浜流系統が生じることが確認された. 入射角を浅くした状態で入射波高を増大させていくと, 徐々に鉛直方向のシア不安定が生じ始め, 最終的には VF による Langmuir セルに類似した縦渦構造が砕波帯周辺に発生する状況も確認された. ここでは離岸流が卓越するケースを典型的な例として示す. 図3, 4は, 2010年2月22日の Duck 海岸における地形データを用い, 汀線に対してほぼ直入射となる沖波入射波条件 (RMS 波高 1.2 m, 平均周期 10 s) を与えた場合の計算結果の一例であり, 砕波点は $x = 300$ m 周辺である. 砕波帯内では, 砕波輸送トルク (例えば, Weir ら, 2011) による正負の渦度とそれに伴う強い岸沖流れが沿岸方向に交互に現れ, $y = 450$ m 付近の rip channel から離岸流として放出され, その強い沖向き流れによるシア不安定により反時計回りに巻き

込みながら $y > 550 \text{ m}$ の領域で弱い岸向き流れに転じ、直径 200 m 程度の水平循環流を形成している。この構造は非常にロバストであり、時間平均流パターンもこれに酷似していた。このときの流れの鉛直構造もやはり水深依存性が強く、バーより岸側では x - z 断面内に鉛直循環流が明確に見られ、離岸流速の遅い場所では底面付近で undertow が発達している様子が観察される。沿岸流速の水深依存性は、岸沖流速のそれよりも若干小さいものの、正負いずれの v 流速であっても表層ほどその絶対値が大きくなるように鉛直方向にシアが形成されていることが分かる。一方、離岸流速の大きい場所では流れは鉛直方向に一様化される傾向が見られることが明らかとなった。

鉛直流速は水平流速より 1 桁以上小さいものの、離岸流に伴って最大で数 cm/s に達している。図 3 (c) を見ると、例えば $y = 450, 482, 514 \text{ m}$ の位置では離岸流の両端部付近で上昇流、渦度の正負が入れ替わる中心部付近で下降流を生じている。つまり、離岸流は Langmuir セルと類似した二重セル構造を有しており、流れの弱い離岸流端部から主流部である中心部に向かって表層では収束、底層では発散するような縦渦構造を伴っていることが分かる。

(3) 3 次元渦のカスケード

実地形上の 3 次元海浜流は、shear wave・離岸流のいずれの場合も平面 2 次元の場合よりも乱流強度などが抑制される傾向が共通して観測された (内山・McWilliams, 2011)。そこで、離岸流による大規模渦の発達初期における渦度の時間発展に関する spin-down テストを前章の条件に対して 2D, 3D の場合について行った。ただし、3 次元の渦度方程式各項の比較を行うため、前者については実際には 3D 計算を行い、鉛直渦動粘性に一律 $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ を付加して鉛直構造を大幅に低減させた (疑似的な) 2D 計算を行った。2D の場合と比較して 3D 離岸流では渦の寿命が短く、卓越波数も総じて高かった。この原因の一つとして、3D の場合は渦度鉛直成分の tilting 効果 (渦度ベクトルの直交方向への変形) と stretching が卓越し、これによ

り enstrophy の散逸が促進され、低波数渦が高波数へと移行することにより、運動エネルギーがカスケードダウンしていく、という構造となっていることが分かった。

4. おわりに

本稿では、砕波帯を中心とした沿岸域における波一流れ相互作用による乱流現象について、最新の 3 次元数値シミュレーション技術を駆使した精緻な解析結果を紹介した。このような海域では水深規定砕波の影響が運動量収支に対して卓越するため、沖合海域とは異なるメカニズムで特徴的な現象が発生する。特に波に惹起されて発達する海浜流 (沿岸流・離岸流) は、このような海域特有の流れの代表例である。海浜流は主にシア不安定機構によって容易に組織渦を生成するが、それらは実は強い 3 次元性を有している。非定常離岸流の 3 次元解析結果によれば、離岸流は Langmuir セルに類似した縦渦構造を伴っていることが示された。これらの流れや渦は、鉛直方向および砕波帯一陸棚域間の水平方向の物質混合を強く促進するため、沿岸環境を考える上で極めて重要な要素であると理解される。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究 A (18H03798) および同国際共同研究加速基金 (15KK0207) の援助を受けた。

参考文献

- [1] Aiki, H. and R. J. Greatbatch (2012): Thickness-weighted mean theory for the effect of surface gravity waves on mean flows in the upper ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 42, 725-747.
- [2] 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.*, 38, 2341-2357.
- [3] McWilliams, J. C., Restrepo, J. M., Lane, E. M. (2004): An asymptotic theory for the interaction of waves and currents in coastal waters. *J. Fluid Mech.* 511, 135-178.
- [4] McWilliams, J. C., Akan, C. and Uchiyama, Y. (2018): Robustness of nearshore vortices, *J. Fluid Mech.*, 850, R2, 12 pp., doi: 10.1017/jfm.2018.510

- [5] Mellor, G. (2003): The three-dimensional current and surface wave equations, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 1978-1989.
- [6] Restrepo, J. M., Venkataramani, S. C. and Dawson, C. (2014): Nearshore sticky waters, *Ocean Modell.*, 80, 49-58.
- [7] 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.*, 9, 347-404.
- [8] Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2008): Computational kernel algorithms for fine-scale, multiprocess, longtime oceanic simulations. In: Temam, R., Tribbia, J. (Eds.), *Handbook of Numerical Analysis: Computational Methods for the Ocean and the Atmosphere*, Elsevier, Amsterdam, 119-181.
- [9] Uchiyama, Y., McWilliams, J. C., Restrepo, J. M. (2009): Wave-current interaction in nearshore shear instability analyzed with a vortex-force formalism. *J. Geophys. Res.* 114, C06021. doi:10.1029/2008JC005135.
- [10] 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.*, 34:1-2, 16-35.
- [11] Uchiyama, Y., McWilliams, J.C. and Akan, C. (2017): Three-dimensional transient rip currents: Bathymetric excitation of low-frequency intrinsic variability, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 5,826-5,849, doi:10.1002/2017JC013005
- [12] Uchiyama, Y. (2019): Surface gravity and capillary waves, *Encyclopedia of Ocean Sciences* 3rd Edition, 3, 672-681, Elsevier, doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.11465-4
- [13] Weir, B., Uchiyama, Y., Lane, E. M., Restrepo, J. M. and McWilliams, J. C. (2011): A vortex-force analysis of the interaction of rip currents and gravity waves, *J. Geophys. Res.*, 116, C05001, doi:10.1029/2010JC006232
- [14] 内山雄介・McWilliams, J. C. (2011): Vortex-forceを用いたオイラー型位相平均プリミティブ方程式による海浜流の3次元解析, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, 96-100.
- [15] 内山雄介・甲斐田秀樹・McWilliams, J. C. (2013): VF型位相平均Primitive方程式による碎波帯-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, 56-60.
- [16] 内山雄介 (2015): 陸棚から碎波帯までを考慮した沿岸流動モデル, 沿岸海洋研究, 日本海洋学会沿岸海洋研究会, Vol. 52, No. 2, 149-158.

