

## 陸棚から砕波帯までを考慮した沿岸流動モデル\*

内 山 雄 介\*\*

### A Coastal Circulation Model for Continental Shelves and Surf Zones

Yusuke Uchiyama

陸棚から砕波帯までを考慮した沿岸流動モデルでは、浅海域のダイナミクスに対して特に重要となる波浪の影響を正確に考慮すること、および沖合流動の影響を取り込むためのマルチネスティング技術によるダウンスケーリングが同時に必要となる。本報では、領域海洋循環モデル ROMS に対して波の位相平均効果を精緻に考慮した ROMS-WEC モデル (Uchiyama *et al.*, 2010) の概要と5段ネストモデリングによる米国南カリフォルニア湾への適用事例について、波-流れ相互作用理論の導出に関する経緯を含めて紹介する。ROMS-WEC モデルでは、保存的な波浪の作用である vortex force, Stokes-Coriolis force, Bernoulli head と、砕波帯で重要となる水深依存性の砕波に伴う波動から平均流への運動量輸送などを外力項として陽に取り扱う点に特徴がある。

Coastal circulation models applicable to shallow seas ranging from continental shelves to surf zones are essential to add dynamical roles played by surface gravity waves and a multiple nesting technique to account properly for phase-averaged wave forcing and offshore oceanic signals simultaneously. Uchiyama *et al.* (2010) developed a ROMS-WEC model based on a multi-scale asymptotic theory of Eulerian phase-averaged dynamics suitable to geophysical fluids (McWilliams *et al.*, 2004) by exploiting a state-of-the-art regional circulation model, ROMS (Shchepetkin and McWilliams, 2005, 2008). The historical and theoretical context of the evolution of three-dimensional wave-current interactions is described during the development of the present model. The ROMS-WEC model explicitly handles conservative wave effects (vortex force, Stokes-Coriolis force, and Bernoulli head), as well as non-conservative accelerations associated with depth-induced wave breaking, bottom streaming, and wave-enhanced vertical mixing. Quintuple-nested synoptic modeling with ROMS-WEC is presented for the Southern California Bight, CA, U. S., forced by double-nested WRF and triple-nested SWAN products. Wave effects pronouncedly alter the quasi-geostrophic momentum balance over the inner-shelf region through the additional Stokes-Coriolis force, leading to modification of the flow field at depth down to about 800 m, which is much deeper than wavelength scale and wave-modified Ekman boundary layer thickness, typically of tens of meters. Abrupt eruptions of offshore-directed rip currents significantly enhance lateral and vertical mixing between inner-shelf and surf zone.

キーワード：波-流れ相互作用, ROMS-WEC モデル, 多段ネスティング, 海浜流, 物質分散

#### 1. はじめに

陸棚域から砕波帯に至る浅海域は、海洋生物のライフサイクルや、漁業等の人間活動など様々な局面で重要な役割を果たす領域であり、沿岸域における物質の移流拡散問題に代表される海洋環境科学・海岸工学的諸問題を取り扱う際には、砕波帯内外の物質交換機構に対する理解を深化させることが極めて重要である。砕波帯は、砕波に伴う岸沖断面内の鉛直循環によって陸棚海域との海水交換に対してバリアとして作用し、「sticky water」

(Wolanski, 1994<sup>1</sup>; Restrepo *et al.*, 2014<sup>2</sup>) と呼ばれる孤立水塊を形成することがある。これに対して、現地観測に基づく研究を通じて、波に駆動される3次元的な undertow や離岸流等の海浜流系が砕波帯-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 *et al.*, 2008<sup>3</sup>; Omand *et al.*, 2011<sup>4</sup>; Ohlmann *et al.*, 2012<sup>5</sup>)。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、沖合海域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が必要となる。しかしながら、これらを全て考慮するには技術的な困難が少なからず存在していたため、砕波帯-陸棚間に対する数値解

\* 2014年10月7日受領, 2014年11月11日受理

\*\* 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻

連絡先: 内山雄介, 神戸大学大学院工学研究科

〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

析技術は十分に確立されてはおらず、外洋や縁辺海を対象とした海洋モデリング研究と比較して立ち遅れていた。

波-流れ共存場において位相平均流の運動量・質量保存則を記述する場合、非線形移流項に対して Helmholtz 分解を用いて vortex force の概念を導入し、Bernoulli head などの保存的運動量交換に加え、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得られる (Uchiyama *et al.*, 2010<sup>6)</sup>). 本稿では、まず、領域海洋循環モデル ROMS (Shchepetkin and McWilliams, 2005<sup>7)</sup>; 2008<sup>8)</sup>) をベースに開発された Uchiyama *et al.* (2010)<sup>6)</sup> によるモデル (ROMS-WEC と呼称する) の導出背景について、波-流れ相互作用理論に関する既存の研究を紹介しながら説明し、次いで、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 モデリング技術について紹介する。本モデルは、全球海洋再解析データを境界条件として ROMS および 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 から構成されるマルチスケール・マルチモデルカップリングシステムとなっている。ROMS-WEC を核とした本解析システムにより、外洋影響を適切に考慮しつつ、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 の超高解像度 3 次元海洋モデリングを行うことが可能となった。本稿では、解析対象海域である米国南カリフォルニア湾およびサンタモニカ湾における砕波帯-陸棚間の相互作用について、準地衡流的な運動量バランスに対する波による改変効果と、離岸流に代表される海浜流が砕波帯内外の物質輸送に及ぼす影響について解析した結果について紹介する。

## 2. 波-流れ共存場に適用可能な沿岸流動モデル

波-流れ共存場の表現方法としては、変動周期と波長の短い波動現象を位相平均し、より長周期・長波長の海洋循環流に対する運動量・質量保存則に外力項として組み込む方法と、波動と海洋循環流を波の位相を解像したまま同時に表現する方法の 2 つに大別される。本稿では前者の枠組みについて論じるが、後者の位相解像型の枠組みについては中長期にわたる海洋循環に適用することは計算コスト的に困難であり、長波近似による平面 2 次元の枠組みで、挟領域・短期間の現象に対して用いられることが多いようである (例えば、Chen *et al.*, 1999<sup>9)</sup>). 前者の位相平均方程式の原点となる基礎理論は、Longuet-Higgins and Stewart (1960<sup>10)</sup>; 1964<sup>11)</sup>) による水

深積分型の理論であり、位相平均された余剰運動量フラックスである radiation stress の導入によって特徴付けられる。ここから派生した類似の理論としては Longuet-Higgins (1970)<sup>12)</sup>, Hasseleman (1971)<sup>13)</sup>, Phillips (1977)<sup>14)</sup> などが挙げられ、海浜流の発生機構などに明快な解答を与えるものとして広く認知された。これらの理論の 3 次元場への拡張は、当初、Andrew and McIntyre (1978a<sup>15)</sup>, b<sup>16)</sup>) による GLM (Generalized Lagrangian-mean) 理論にもとづいて行われ、Walstra *et al.* (2000)<sup>17)</sup> によって Delft-3D モデルに、Mellor (2003<sup>18)</sup>; 2008<sup>19)</sup>) によって POM に導入された実績がある。Mellor の定式化は厳密には鉛直  $\sigma$  層に対して重み付け平均された鉛直 semi Lagrange 座標系を用いたものであるが、導出過程の誤りなど様々な問題点があったものの (Ardhuin *et al.*, 2008a<sup>20)</sup>), Aiki and Greatbatch (2012)<sup>21)</sup> によって理論的な整理と修正がなされた。しかしながら、運動方程式中において波浪の位相平均効果を radiation stress の勾配項として表現するため、後述する vortex force の効果はカップリングする波浪モデルの中で高精度に考慮する必要がある (Lane *et al.*, 2007<sup>22)</sup>) ことや、海洋表層で供給される white capping や水深依存性砕波に伴う運動量輸送効果、海底境界層に生じる streaming の影響 (例えば、Longuet-Higgins, 1953<sup>23)</sup>) など水深方向に非一様に分布する各種の波浪の効果を単一の radiation stress として評価することが極めて困難であるという根本的な問題が生じるため、成功を収めているとは言い難い状況である。

一方、波-流れ共存場において位相平均流の運動量則を記述する場合に、Helmholtz 分解を用いて非線形移流項をベクトル不変型に書き直し、適当なスケーリングの下に漸近展開し、位相平均化操作を施し、弱非線形波動理論を導入することにより、Stokes drift と相対渦度の相関である vortex force が導出される。そもそも vortex force は Langmuir 循環を記述するために導入された (Craik and Leibovich, 1976<sup>24)</sup>; Garrett, 1976<sup>25)</sup>; Leibovich, 1980<sup>26)</sup>) ものであるが、特にこれを回転流体に拡張した際に表れる Stokes-Coriolis (相関) 項 (Hasselmann, 1971<sup>13)</sup>; McWilliams and Restrepo, 1999<sup>27)</sup>) は、海洋表層の Ekman 境界層の鉛直構造を大きく改変するため (例えば、Xu and Bowen, 1994<sup>28)</sup>), 海洋循環モデルに対して本質的に重要な波浪の効果の 1 つである。Radiation stress 型と比較して vortex force 型の定式化では、vortex force, Stokes-Coriolis force (あるいは Hasselmann stress), Bernoulli head (最低次ではいわゆる wave set-down を表す) の保存的 (conservative) な波浪の位相平均効果と、砕波, streaming, Stokes シアや砕波などによる渦動粘性や渦拡散変化などの何らかのモデル化を要する非保存的な位相

平均効果をそれぞれ独立に取り扱うことができるという大きな利点があるため (例えば, Dingemans *et al.*, 1987<sup>29</sup>), 位相平均海洋循環モデルの基礎理論として優位であると考えられる. 現時点において vortex force 型理論として広く用いられている主な理論は, Euler 座標に基づくマルチスケール漸近展開理論による McWilliams *et al.* (2004)<sup>30</sup> と, GLM 座標に基づく Arduin *et al.* (2008b)<sup>31</sup> の 2 つであり, 前者は Uchiyama *et al.* (2010)<sup>6</sup> によって ROMS (Shchepetkin and McWilliams, 2005<sup>7</sup>; 2008<sup>8</sup>) に, 後者は Bennis *et al.* (2011)<sup>32</sup> によって MARS 3D (Lazur and Dumas, 2008<sup>33</sup>) に組み込まれている. Euler 座標表示の場合, 水面の境界条件の定義位置の厳密性がわずかに損なわれるというデメリットはあるものの, 方程式系が全て Euler 変量で表記されるため, 例えば乱流モデル, 境界条件スキームなどについて, 通常の海洋流動モデルで用いられるものをそのまま利用できるという大きな利点がある.

Uchiyama *et al.* (2010)<sup>6</sup> は, 波に起因する外力項を Euler 位相平均された vortex force 型の定式化を用いて ROMS に付加し, WKB 理論による action 保存式および波数保存式から構成される Rayleigh 型波高分布を仮定した狭帯スペクトル波浪モデルとタイトにカップリングすることで, 波-流れ相互作用を双方向的に考慮するモデル (ROMS-WEC) を開発し, Duck94 データセットとの比較計算を行い, その高い現象再現性を確認した. また, GLM に基づく radiation stress 勾配項を付加された 3 次元モデルとの比較数値実験を通じて, 碎波点近傍に生じる鉛直循環流や, それに伴う undertow などの再現性において, vortex force 型モデルの高い優位性を示した. ROMS-WEC では, 碎波帯内で卓越する碎波による運動量輸送・TKE 供給効果だけではなく, 波による底面摩擦に伴う運動量輸送より生じる bottom streaming や, vortex force, Stokes-Coriolis 効果, Bernoulli head 効果などの保存的な WEC メカニズムが全て考慮されているなど, 海浜流場だけではなく, 広く海洋一般に適応したモデルであることが特徴となっている. 波動モデルは平面 2 次元の ray 方程式をベースとしており, action 保存式右辺に Rayleigh 分布を仮定した碎波減衰項と底面摩擦減衰項, および surface roller への転換項を付加して roller 成分に関する action 保存式と連成させるとともに, 波数保存式には流れによる波のドップラーシフト項と屈折変形項を導入している. この ray モデルは ROMS のサブルーチンの一つとして組み込まれており, 傾圧成分計算ステップごとに流れの効果を考慮した波浪変形を逐次計算することにより, 双方向的な波-流れ相互作用をタイトにカップリングさせている.

陸棚-碎波帯領域に適用可能な 3 次元モデルとしては, Uchiyama *et al.* (2010)<sup>6</sup>, Bennis *et al.* (2011)<sup>32</sup> の他にも, Walstra *et al.* (2000)<sup>17</sup> や Newberger and Allen (2007)<sup>34</sup> のモデルなどがあるが, 前者では vortex force が考慮されていないこと, 後者では波動理論に長波近似を用いているなどの問題点がある. Uchiyama *et al.* (2010)<sup>6</sup> のモデルは, 米国 Duck 海岸 (内山・McWilliams, 2011<sup>35</sup>), 米国 Santa Monica 湾 (内山ほか, 2012<sup>36</sup>; 2013<sup>37</sup>; Kumar *et al.*, 2014<sup>38</sup>), フランス Biscarrosse 海岸 (Marchesiello *et al.*, 2014<sup>39</sup>) などへの適用実績があり, 現地データとの比較などについても十分な実績を有する. また, ROMS-WEC のサブセット版として水深平均型の平面 2 次元モデルも同時に開発されており (実際にはフル 3D の ROMS-WEC モデルから CPP スイッチを用いて簡単に切り替えることが可能), それらは主に順圧性の強い海域や現象を対象とした研究に用いられている. 例えば, Uchiyama and McWilliams (2008)<sup>40</sup> では外洋における長周期波の発生・伝播と脈動 (hum) の発生との関連について, Uchiyama *et al.* (2009)<sup>41</sup> や甲斐田・内山 (2014)<sup>42</sup> では沿岸流・離岸流場に生じるシア不安定現象等について, Uchiyama *et al.* (2013)<sup>43</sup> では土砂輸送と rip channel 地形の自励的な発達過程の検討などに用いられている.

### 3. ROMS-WEC による沿岸流動モデリング

#### 3.1 基礎方程式

ROMS-WEC では, vortex force 型 Euler 座標位相平均 Primitive 方程式の水平運動量保存則は, デカルト座標系において次式のように表される.

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

ここに,  $(\mathbf{u}, w)$ : Euler 流速,  $\mathbf{u}$ : 水平流速,  $w$ : 鉛直流速,  $t$ : 時間,  $\mathbf{F}^w$ ,  $\mathbf{F}$ : 波浪および波浪以外に起因する非保存的な外力,  $f$ : Coriolis パラメータ,  $\phi$ : 単位密度あたりの圧力,  $K$ : 高次の Bernoulli head,  $\nabla_{\perp}$ : 水平ハミルトニアンである.  $\mathbf{J}$  は vortex force 項と Stokes-Coriolis 項の和であり, 次式で定義される.

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

ただし,  $(\mathbf{u}^{st}, w^{st})$ : 3 次元の Stokes drift 速度であり,

$$\begin{cases} \mathbf{u}^{st} = \frac{a^2 \sigma \mathbf{k}}{2 \sinh^2 kD} \cosh 2k(z+h) \\ w^{st}(z) = -\nabla_{\perp} \cdot \int_{-h}^z \mathbf{u}^{st} dz' \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh kD}; D = (h + \zeta + \hat{\zeta}) \quad (4)$$

と表す。ここに、 $a$  : 波の振幅,  $\sigma$  : 分散関係式(4)に従う波の周波数,  $\mathbf{k}$  : 波数ベクトル ( $k = |\mathbf{k}|$ ),  $h$  : 静水時の水深,  $\zeta$  : 水位であり,

$$\dot{\zeta} = -\frac{a^2 k}{2 \sinh 2kD} \leq 0 \quad (5)$$

は低次の Bernoulli head による順圧的かつ準静的な水位変動 (いわゆる wave set-down) である。したがって、式(4)中の  $D$  が位相平均された波の効果を検討した全水深となる。

式(1)中の波による非保存的外力項  $\mathbf{F}^w$  は、碎波項  $\mathbf{B}^b$ , bottom streaming 項  $\mathbf{B}^{wd}$ , 鉛直乱流拡散項  $\mathbf{D}^w$  の和であり、特に碎波項  $\mathbf{B}^b$  は次式で表される。

$$\mathbf{F}^w = \mathbf{B}^b + \mathbf{B}^{wd} + \mathbf{D}^w; \quad \mathbf{B}^b = \frac{\varepsilon_b}{\rho_0 \sigma} \mathbf{k} f^b(z) \quad (6)$$

ここに、 $\varepsilon_b$  : 碎波エネルギー輸送,  $\rho_0$  : 基準密度,  $f^b(z)$  : 経験的な鉛直分布関数であり、 $\varepsilon_b$ ,  $\mathbf{k}$ ,  $\sigma$  は波浪モデル出力やデータから与えられる。鉛直乱流モデルには KPP モデル (Large *et al.*, 1994<sup>44</sup>); Durski *et al.*, 2004<sup>45</sup>) をベースに碎波の効果を加し、底面摩擦応力には波-流れ共存場に対する Soulsby (1995<sup>46</sup>); 1997<sup>47</sup>) の経験的なモデルを用いる。 $\mathbf{F}^w$  項のさらなる詳細や経験的に定めるべきパラメータの選択等については Uchiyama *et al.* (2010)<sup>6</sup> を参照されたい。

位相平均型平面波浪変形モデルとして、Uchiyama *et al.* (2010)<sup>6</sup> は WKB 近似に基づく屈折方程式系 (ray モデルと呼称する。例えば、Mei, 1994<sup>48</sup>) を用いた。

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

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

ここに、 $A : E/\sigma$  で表される波のアクション ( $E$  : 波のエネルギー),  $\mathbf{c}_g$  : 群速度ベクトル,  $\varepsilon_w$  : 碎波 ( $\varepsilon_b$ ) と底面摩擦の効果による波のエネルギー消散率である。式(7)は波のアクション保存式, (8)は波数保存式であり、 $\tilde{\cdot}$  (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。群速度は

$$\mathbf{c}_g = \mathbf{u} + \frac{\sigma}{2k^2} \left( 1 + \frac{2kD}{\sinh 2kD} \right) \mathbf{k} \quad (9)$$

で表され、Euler 流速による Doppler シフトを考慮している。

上記の ray モデルは ROMS-WEC のサブルーチンとして実装され、baroclinic 計算ステップ毎に計算が実行されるため、波と流れはタイトにカップリングされている。ray モデルを用いた場合は、単一周波数あるいは狭帯スペクトル波を仮定した場合のピーク周波数にもとづいて Stokes drift 等の波動諸元を定義する。しかしなが

ら、例えばスペクトル波浪モデル出力を積分して得られる Stokes drift 速度は、式(3)から求められる値と比較してより水面付近に集中した鉛直分布型となることが知られているため注意を要する (Tamura *et al.*, 2012<sup>49</sup>)。上述したように、波浪諸元  $\varepsilon_b$ ,  $\mathbf{k}$ ,  $\sigma$  は、ray モデル以外にもスペクトル波浪モデル SWAN (Booij *et al.*, 1999<sup>50</sup>); Ris *et al.*, 1999<sup>51</sup>) などを用いて評価することも可能である。実際、以下で報告するサンタモニカ湾に対する適用例では、ROMS-WEC と同じグリッドを用いた多段階 SWAN モデル出力結果を offline で使用している。

ROMS-WEC モデルのベースとなるのは、3次元領域海洋循環モデル ROMS (Shchepetkin and McWilliams, 2005<sup>7</sup>); 2008<sup>8</sup>) である。ROMS は、Boussinesq 近似、静水圧近似されたプリミティブ方程式と、トレーサー (水温・塩分など) 保存式、状態方程式、KPP 乱流モデルなどから構成された領域海洋循環モデルであり、移流項や圧力勾配項への高精度スキームの適用、特性曲線法に基づく精緻な開境界処理 (Marchesiello *et al.*, 2003<sup>52</sup>); Mason *et al.*, 2010<sup>53</sup>)、並列計算への対応などに顕著な特徴を有する。

### 3.2 対象海域

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およびその一部を構成するサンタモニカ湾である。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 より下層を北米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 (例えば、Dong *et al.*, 2009<sup>54</sup>) による海況再解析などが精力的に進められている。

### 3.3 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

解析データである SODA (version 2.0.4, Carton and Giese, 2008<sup>55</sup>) 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 (Fig. 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 × 402 × 鉛直 40 層) → ROMS-L2 (同 1 km, 402 × 514 × 40 層) → ROMS-L3 (同 250 m, 562 × 1122 × 40 層) → ROMS-L4 (同 75 m, 562 × 1602 × 32 層) → ROMS-L5 (同 20 m, 1002 × 1602 × 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 データを境界条件とした 2 段ネスティング WRF (水平解像度約 18 km → 6 km, Michalakes *et al.*, 1998<sup>56</sup>) による推算値を用いた. 波浪は L3, L4 および L5 で考慮し, L3 領域側方境界条件に 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 段ネスティング SWAN (ROMS-L3, L4 および L5 と同一グリッド) 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 (Egbert *et al.*, 1994<sup>57</sup>) を用い, ROMS-L2 の水位および順圧流速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, Uchiyama *et al.* (2010)<sup>6</sup> による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

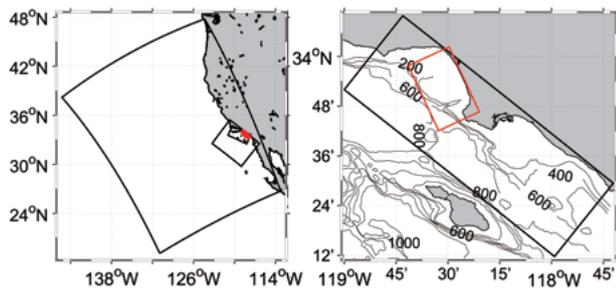


Fig. 1 A hierarchy of the quintuple-nested oceanic downscaling system for the Southern California Bight. The boundaries of the U. S. West Coast model (ROMS-L1, the outermost black box in the left panel), the California Coast model (ROMS-L2, the intermediate black box in the left panel), the extended Southern California Bight model (ROMS-L3, the inner black box in the left panel), the high-resolution Southern California Bight model (ROMS-L4, the innermost red box in the left panel and the outermost black box in the right panel), and the surf zone-resolving Santa Monica model (ROMS-L5, the red box in the right panel) are displayed. Contour lines in the right panel are isobaths.

KPP モデルなどを使用した.

本ダウンスケールシステムの実現性や, 半日周内部潮汐, サブタイダル海洋構造, トレーサーや Lagrange 粒子分散等に関する解析は, Buijsman *et al.* (2012)<sup>58</sup>, Romero *et al.* (2013)<sup>59</sup>, Uchiyama *et al.* (2014)<sup>60</sup>, および Kumar *et al.* (2015)<sup>38</sup> に詳しい. 本報では, 沿岸域で特に重要となる地形の実現性を向上させ, サブメソスケール現象をより精緻に考慮するため, 解像度 75 m とした ROMS-L4 の結果, および砕波帯の影響を考慮した解像度 20 m の ROMS-L5 に関する解析結果について紹介する. 冬期風浪を対象とするため, L4 の計算期間は 2007 年 12 月から 2008 年 4 月までの 6 ヶ月間, L5 の計算期間は 2008 年 2 月から 4 月の約 3 ヶ月間とした. 海底地形は, 沖合では 30 秒メッシュの SRTM30 データ (Becker *et al.*, 2009<sup>61</sup>) を, 沿岸付近では 3 秒メッシュの USGS/NOAA の Coastal Relief データを用いた. なお, 本システムは NASA-JPL による 3 次元変分データ同化を組み込んだ南カリフォルニア湾海象予報システムのプロトタイプとして開発されたものである.

#### 4. 米国 Santa Monica 湾に対する適用例

##### 4.1 ROMS-L4 (南カリフォルニア湾詳細モデル): 波の保存的効果

南カリフォルニア湾沿岸域における典型的な砕波帯幅は岸から 100 ~ 400 m 程度であり, 水平解像度 75 m の ROMS-L4 モデルでは十分に表現できない. そのため, ROMS-L4 では砕波に関わるモデルを考慮せず, 砕波帯外の陸棚循環における波の効果について検討する. 水平方向の位相平均運動方程式 (1) を時間平均すると,

$$\mathbf{T} + \mathbf{A} + \mathbf{C} + \mathbf{P} + \mathbf{D} + \mathbf{V} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (10)$$

のように表現される. ここでは上式を用いて運動量収支解析を行う. ただし, 運動方程式の各項はベクトル表示されており,  $\mathbf{T}$ : 非定常項,  $\mathbf{A}$ : 移流項 (Reynolds 応力成分を含む),  $\mathbf{C}$ : Coriolis 項,  $\mathbf{P}$ : 圧力勾配項 (Bernoulli head を含む),  $\mathbf{D}$ : 鉛直拡散項 (主に風応力の効果を表し, 式 (1) では  $\mathbf{F}$  に含まれる),  $\mathbf{V}$ : vortex force 項,  $\mathbf{S}$ : Stokes-Coriolis 項の主要 7 項から構成されている. 相対渦度  $\nabla_{\perp} \times \mathbf{u}$  と水平 Stokes drift 速度  $u_{st}$  の外積である vortex force 項と, 惑星渦度  $f$  と  $\mathbf{u}^{st}$  の外積である Stokes-Coriolis 項の 2 項は, 流れに対する波の保存的な運動量改変効果を表している.

時間平均運動方程式 (10) の各項の平均的な大小関係を調べるために, 波浪を考慮した場合としない場合の海表面における各項のベクトル絶対値の空間平均を求めた (Fig. 2). ただし, ここでは十分に解像されていない砕

波帯の影響を完全に排除するために、水深10 m 以深の領域に対して空間平均操作を行っている。Fig. 2 を見ると、Coriolis 項 C, 圧力勾配項 P, 鉛直拡散項 D が卓越し、運動量収支において主要な役割を果たしていることが分かるが、Stokes-Coriolis 項 S も有意な大きさを持ち、D や P と同程度になっている。波によって D の一部が S に転嫁されているが、これは Stokes-Coriolis 項が Ekman veering の改変 (例えば, Xu and Bowen, 1994) を通じて鉛直拡散項 D を変化させることを表している。Fig. 2 のような空間平均値にした場合の vortex force 項 V は小さく、波浪の影響は主に Stokes-Coriolis 項として出現することが分かる。移流項 A の寄与も相対的に小さいが、平均流成分よりも Reynolds 応力成分が優勢であることが示されている。なお、時間平均操作により、非定常項 T はほぼゼロとなっていることが確認される。

ここでは図示しないが、ROMS-L4 の結果から以下のようなことが明らかとなった (詳細については内山ほか, 2012<sup>36)</sup> を参照)。まず、上記のような運動量各項のバランス改変の結果、外力条件として波浪を考慮しない場合と考慮した場合の海表面の時間平均流速流構造も大きく変化していた。波浪に起因する Stokes-Coriolis 効果は、(準)地衡流平衡を形成する圧力勾配項とコリオリ項と同オーダーであり、特に沖合海域で発達していた。Stokes drift の直接的な影響範囲は海表面から高々  $(2k)^{-1} \sim O(10)$  m 程度 (波長スケール) であり、Stokes-Coriolis 効果による Ekman 境界層構造の改変も、鉛直渦動粘性を一定とした古典的な解析モデルによれば、 $O(10)$  m 程度の表層でしか生じない。しかしながら、水平流速成分は波の影響を考慮することにより、波の直接的な影響範囲である海表面のみならず、水深800 m 程度

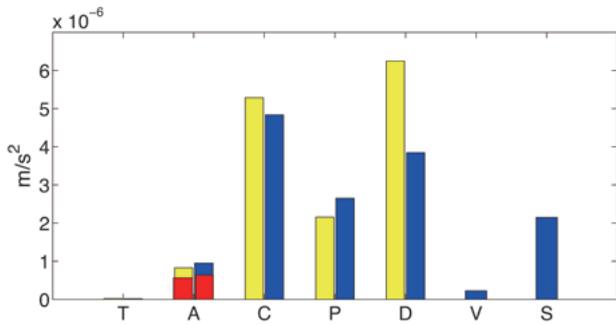


Fig. 2 The area-averaged surface momentum terms in the time-averaged momentum balance equation (10) for ROMS-L4. The magnitude of each momentum term vector is depicted. T: tendency term, A: advection term (red bars are Reynolds stress components out of A), C: Coriolis term, P: pressure gradient term, D: vertical diffusion term, V: vortex force term, and S: Stokes-Coriolis term. Blue: with waves, yellow: without waves (Uchiyama *et al.*, 2012).

に至るまで有意な変化が生じていることが確認された。これは、Stokes-Coriolis 効果によって準地衡流バランスと Ekman 境界層周辺の鉛直混合が改変され、大局的な力学構造が変調されることにより、波浪の影響範囲が波長スケールより深くまで拡大していたことを示唆するものである。一方、Rossby の内部変形半径以下の沿岸付近では Stokes-Coriolis 項が相対的に小さくなり、vortex force 項が卓越していた。vortex force に影響を与える EKE に対する波浪の影響は、メソスケール成分とサブメソスケール成分の両者に強く表れ、特に沿岸付近では後者が卓越し、相対渦度の発達を通じて vortex force が強化されていた。

#### 4.2 ROMS-L5 (Santa Monica 湾砕波帯解像モデル): 波の非保存的效果

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 ( $\xi/f$ ;  $\xi$ : 表層における相対渦度の鉛直成分) 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 (Fig. 3)。比較的流れが静穏な状況にあっても離岸流と戻り流れによる水平循環セル構造 (rip cell) が形成され、弱い渦が岸近傍に貼り付くよう

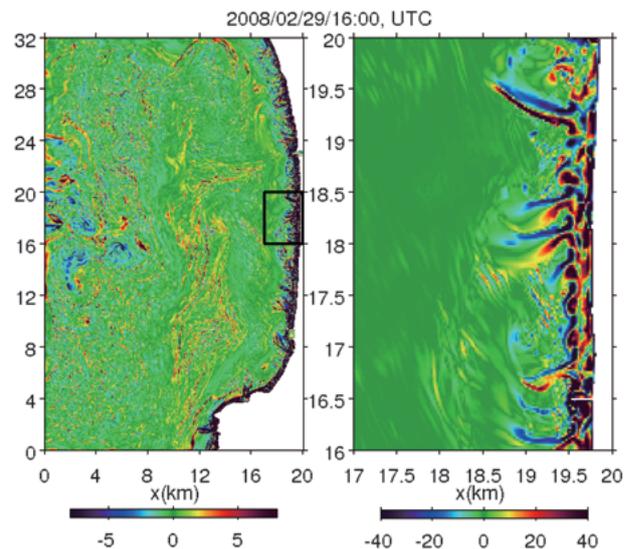


Fig. 3 Snapshots of surface relative vorticity normalized by background rotation  $f$  estimated with ROMS-L5 model at 16:00, Feb. 29, 2008, when erupting rip currents were pronounced. Left panel: for the entire L5 domain, right panel: magnification around the surf zone indicated by the black box in the left panel. Notice the different color scales (Uchiyama *et al.*, 2013).

に恒常的に生じていた。ROMS-L5 モデル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ほか、2013<sup>37)</sup>を参照）。密度分布変化を用いた Euler 的視点、および中立粒子追跡による Lagrange 的視点から碎波帯-陸棚間の物質分散に関する解析を行った。その結果、離岸流に代表される 3 次元海浜流系が碎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。二粒子分散解析により統計的に求められる Lagrange 相対拡散率を評価したところ、水平分散に対する碎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。その傾向は碎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岸方向に再輸送されて碎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。

なお、ROMS-L5 では Langmuir 循環 (LC) に酷似した縦渦構造が碎波帯沖合で発達することがあった。L5 が対象とする状況は非静力学モデルが必要となるレジームであると考えられ、静水圧近似に依拠している ROMS-WEC モデルで表現されるこの縦渦構造は「hydrostatic LC」と称すべきものである。LC をより正確に表現するためには非静水圧モデル（例えば、McWilliams *et al.*, 1997<sup>62)</sup>）を用いてグリッドスケールで解像するか、付加的な鉛直混合としてサブグリッドスケールモデルとして考慮する（例えば、Kantha and Clayson, 2004<sup>63)</sup>）方法がある。ROMS-WEC モデルでは後者のアプローチを取ることが現実的であるが、現状では KPP モデルには LC の効果は考慮されていない。これらの点は今後の課題であると考えている。

## 5. おわりに

本稿では、陸棚から碎波帯までを考慮した沿岸流動モデルとして、領域海洋循環モデル ROMS に対して波の位相平均効果を精緻に考慮した ROMS-WEC モデルの概要とその開発背景について、波-流れ相互作用理論の導出に関する歴史的な経緯を含めて紹介した。外力としては保存的な波浪の作用である vortex force, Stokes-Coriolis force, Bernoulli head の効果と、特に碎波帯で重要となる水深依存性碎波による波動から平均流への運動量輸送などを正確に表現し、かつ沖合流動の影響を極めて小さな空間スケールで考慮する必要があるため、陸棚

域-碎波帯間に適用可能な沿岸流動モデリングには技術的な困難が付きまとう。しかしながら、近年の数値海洋流動モデルの robustness の向上や、マルチネスティング技術の進展、並列計算機への対応などの点で必要最低限のインフラは概ね揃ったといえる。この種のモデルの精度検証には、ADCP・波高計・CT チェーンなどを用いた係留系による平均量および各種統計量（分散、周波数分解した変動強度、有義値など）、ビデオ画像・X バンドレーダなどを用いた小スケールリモートセンシングによる平面流況観測、碎波帯用ドリフターを用いた Lagrange 的流動・分散計測などが有用であると考えられる。沖合の影響としては時空間スケールのサブメソスケール渦がこの領域における物理プロセスに強く関与し得るため、例えば航空機リモートセンシングと高速艇を組み合わせた平面観測システムも効果的であると考えられる。碎波帯での係留・曳航観測の困難さから、現時点では数値モデルが先行して進化しているように思われるが、観測サイドのチャレンジによって新たなブレイクスルーが見込まれる有望な研究分野であることは間違いない。また、工学的な応用に結びつける場合には、観測データに同化させるなど何らかの形でモデルの精度を向上させる必要がある（例えば、入江・岡田, 2015<sup>64)</sup>）。そのような場合においても、同化に伴う数値解の修正を極力低減することが求められるため、本報で紹介したような forward モデルの精度を向上させることがデータ同化モデリングの成功に対しても重要な鍵となることは言うまでもない。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、科学研究費基盤研究 C (24560622) の援助を受けた。ROMS-WEC の開発においては米国 University of California, Los Angeles の James C. McWilliams 教授、Alexander Shchepetkin 研究員らの協力を、南カリフォルニア湾・サンタモニカ湾モデリングでは当時神戸大の学生であった甲斐田秀樹氏（現・電中研）および西井達也氏（現・東京海上日動火災）らの献身的な協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を申し上げる。

## 参 考 文 献

- 1) Wolanski, E. (1994): Physical Oceanographic Processes of the Great Barrier Reef. CRC Press, Boca Raton, Florida, 194pp.
- 2) Restrepo, J. M., S. C. Venkataramani and C. Dawson (2014): Nearshore sticky waters. Ocean Modelling, **80**, 49-58.
- 3) Letz, S. J., M. Fewings, P. Howd, J. Fredericks, and K. Hathaway (2008): Observations and a model of undertow over the inner continental shelf. Journal of Physical Oceanography, **38**, 2341-

- 2357.
- 4) Omand, M., J. Leichter, P. J. Franks, R. T. Guza, A. Lucas and F. Feddersen (2011) : Physical and biological processes underlying the sudden surface appearance of a red tide in the nearshore. *Limnology and Oceanography*, **56**, 787-801.
  - 5) Ohlmann, J. C., M. Fewings and C. Melton (2012) : Lagrangian observations of inner-shelf motions in southern california : Can surface waves decelerate shoreward-moving drifters just outside the surf zone ? *Journal of Physical Oceanography*, **42**, 1313-1325.
  - 6) 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 Modelling*, **34**, 16-35.
  - 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 Modelling*, **9**, 347-404.
  - 8) Shchepetkin, A. F. and J. C. McWilliams (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) Chen, Q., R. A. Dalrymple, J. T. Kirby, A. B. Kennedy and M. C. Haller (1999) : Boussinesq modeling of a rip current system. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 20617-20637.
  - 10) Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1960) : Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents. *Journal of Fluid Mechanics*, **8**, 565-583.
  - 11) Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1964) : Radiation stress in water waves : A physical discussion with applications. *Deep-Sea Research*, **11**, 529-562.
  - 12) Longuet-Higgins, M. S. (1970) : Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 1 & 2. *Journal of Geophysical Research*, **75**, 6778-6801.
  - 13) Hasselmann, K. (1971) : On the mass and momentum transfer between short gravity waves and larger-scale motions. *Journal of Fluid Mechanics*, **50**, 189-201.
  - 14) Phillips, O. M. (1977) : *The Dynamics of the Upper Ocean*. Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 336pp.
  - 15) Andrews, D. G. and M. E. McIntyre (1978a) : An exact theory of nonlinear waves on a Lagrangian-mean flow. *Journal of Fluid Mechanics*, **89**, 609-646.
  - 16) Andrews, D. G. and M. E. McIntyre (1978b) : On wave action and its relatives. *Journal of Fluid Mechanics*, **89**, 647-664.
  - 17) Walstra, D. J. R., J. A. Roelvink and J. Groeneweg (2000) : Calculation of wave-driven currents in a 3D mean flow model. In : Edge, B. L. (Ed.), *Proceedings of the 27th Coastal Engineering International Conference 2000*, Sydney, Australia. American Society of Civil Engineers, New York, 1050-1063.
  - 18) Mellor, G. (2003) : The three-dimensional current and surface wave equations. *Journal of Physical Oceanography*, **33**, 1978-1989.
  - 19) Mellor, G. (2008) : The depth-dependent current and wave interaction equations : a revision. *Journal of Physical Oceanography*, **38**, 2587-2596.
  - 20) Ardhuin, F., A. D. Jenkins and K. A. Belibassakis (2008a) : Comments on "The three-dimensional current and surface wave equations". *Journal of Physical Oceanography*, **38**, 1340-1350.
  - 21) 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. *Journal of Physical Oceanography*, **42**, 725-747.
  - 22) Lane, E. M., J. M. Restrepo and J. C. McWilliams (2007) : Wave-current interaction : a comparison of radiation-stress and vortex-force representations. *Journal of Physical Oceanography*, **37**, 1122-1141.
  - 23) Longuet-Higgins, M. S. (1953) : Mass transport in water waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, **245**, 535-581.
  - 24) Craik, A. D. D. and S. Leibovich (1976) : A rational model for Langmuir circulations. *Journal of Fluid Mechanics*, **73**, 401-426.
  - 25) Garrett, C. (1976) : Generation of Langmuir circulations by surface waves - a feedback mechanism. *Journal of Marine Research*, **34**, 116-130.
  - 26) Leibovich, S. (1980) : On wave-current interaction theory of Langmuir circulations. *Journal of Fluid Mechanics*, **99**, 715-724.
  - 27) McWilliams, J. C. and J. M. Restrepo (1999) : The wave-driven ocean circulation. *Journal of Physical Oceanography*, **29**, 2523-2540.
  - 28) Xu, Z. and A. J. Bowen (1994) : Wave- and wind-driven flow in water of finite depth. *Journal of Physical Oceanography*, **24**, 1850-1866.
  - 29) Dingemans, M. W., A. C. Radder and H. J. D. Vriend (1987) : Computation of the driving forces of wave-induced currents. *Coastal Engineering*, **11**, 539-563.
  - 30) McWilliams, J. C., J. M. Restrepo and E. M. Lane (2004) : An asymptotic theory for the interaction of waves and currents in coastal waters. *Journal of Fluid Mechanics*, **511**, 135-178.
  - 31) Ardhuin, F., N. Rascle and K. A. Belibassakis (2008b) : Explicit wave-averaged primitive equations using a generalized Lagrangian mean. *Ocean Modelling*, **20**, 35-60.
  - 32) Bennis, A. -C., F. Ardhuin and F. Dumas (2011) : On the coupling of wave and three-dimensional circulation models : Choice of theoretical framework, practical implementation and adiabatic tests. *Ocean Modelling*, **40**, 260-272.
  - 33) Lazure, P. and F. Dumas (2008) : An external-internal mode coupling for a 3d hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*, **31**, 233-250.
  - 34) Newberger, P. A. and J. S. Allen (2007) : Forcing a three-dimensional, hydrostatic, primitive-equation model for application in the surf zone : 1. Formulation. *Journal of Geophysical Research*, **112**, C08018. doi : 10.1029/2006JC003472.
  - 35) 内山雄介・J. C. McWilliams (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)*, **67**, I\_96-I\_100.
  - 36) 内山雄介・西井達也・J. 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)*, **68**, I\_426-I\_430.
  - 37) 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)*, **69**, I\_56-I\_60.
  - 38) Kumar, N., F. Feddersen, Y. Uchiyama, J. McWilliams and W. O'Reilly (2015) : Mid-shelf to surf zone coupled ROMS-SWAN

- model-data comparison of waves, currents, and temperature : Diagnosis of subtidal forcings and response. *Journal of Physical Oceanography*. (in print)
- 39) Marchesiello, P., R. Benshila, R. Almar, Y. Uchiyama, J. McWilliams and A. Shchepetkin (2014) : On tridimensional rip current modeling. *Proceedings of the 19th IAHR-APD Congress 2014, Hanoi, Vietnam*, 7p.
- 40) Uchiyama, Y. and J. C. McWilliams (2008) : Infragravity waves in the deep ocean : generation, propagation, and seismic hum excitation. *Journal of Geophysical Research*, **113**, C07029, doi : 10.1029/2007JC004562.
- 41) Uchiyama, Y. and J. C. McWilliams, J. M. Restrepo (2009) : Wave-current interaction in nearshore shear instability analyzed with a vortex-force formalism. *Journal of Geophysical Research*, **114**, C06021, doi : 10.1029/2008JC005135.
- 42) 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 B 2 (海岸工学)*, **70**, 1-14.
- 43) Uchiyama, Y., H. Kaida and D. Miyazaki (2013) : Wave-current interaction in formation of rip channel system. *Proc. 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2013)*, Bali, Indonesia, 173-179.
- 44) Large, W. G., J. C. McWilliams and S. C. Doney (1994) : Oceanic vertical mixing : a review and a model with nonlocal boundary layer parameterization. *Review of Geophysics*, **32**, 363-403.
- 45) Durski, S. M., S. M. Glenn and D. Haidvogel (2004) : Vertical mixing schemes in the coastal ocean : comparison of the level 2.5 Mellor-Yamada scheme with an enhanced version of the K profile parameterization. *Journal of Geophysical Research*, **109**, C01015, doi : 10.1029/2002JC001702.
- 46) Soulsby, R. L. (1995) : Bed shear-stresses due to combined waves and currents. In : Stive, M., Fredsøe, J., Hamm, L., Soulsby, R., Teisson, C., Winterwerp, J. (Eds.), *Advances in Coastal Morphodynamics*. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. 420-423.
- 47) Soulsby, R. L., 1997. *Dynamics of Marine Sands : A Manual for Practical Applications*. Thomas Telford, London.
- 48) Mei, C. C. (1994) : *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, World Scientific, Singapore, 740pp.
- 49) Tamura, H., Y. Miyazawa and L.-Y. Oey (2012) : The Stokes drift and wave induced-mass flux in the North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, **117**, C08021.
- 50) Booij, N., R. C. Ris and L. H. Holthuijsen (1999) A third-generation wave model for coastal regions. Part I: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 7649-7666.
- 51) Ris, R. C., N. Booij and L. H. Holthuijsen (1999) : A third-generation wave model for coastal regions. Part II : Verification. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 7667-7682.
- 52) Marchesiello, P., J. C. McWilliams and A. F. Shchepetkin (2003) : Equilibrium structure and dynamics of the California Current System. *Journal of Physical Oceanography*, **33**, 753-783.
- 53) Mason, E., Molemaker, J., A. F. Shchepetkin, F. Colas, J. C. McWilliams and P. Sangrà (2010) : Procedures for offline grid nesting in regional ocean models. *Ocean Modelling*, **35**, 1-15.
- 54) Dong, C., E. Idris and J. C. McWilliams (2009) : Circulation and multiple-scale variability in the Southern California Bight. *Progress in Oceanography*, **82**, 168-190.
- 55) Carton, J., and B. Giese (2008) : A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Monthly Weather Review*, **136**, 2999-3017.
- 56) Michalakes, J., J. Dudhia, D. Gill, J. Klemp and W. Skamarock (1998) : Design of a next-generation regional weather research and forecast model. *Proceedings of Eighth Workshop on the Use of Parallel Processors in Meteorology*, Reading, United Kingdom, European Center for Medium Range Weather Forecasting, 117-124.
- 57) Egbert, G., A. Bennett and M. Foreman (1994) : TOPEX/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *Journal of Geophysical Research*, **99**, 24821-24852.
- 58) Buijsman, M., Y. Uchiyama, J. C. McWilliams and C. R. Hill-Lindsay (2012) : Modeling semidiurnal internal tide variability in the Southern California Bight. *Journal of Physical Oceanography*, **42**, 62-77.
- 59) Romero, L., Y. Uchiyama, C. Ohlmann, J. C. McWilliams and D. A. Siegel (2013) : Particle-pair dispersion in the Southern California coastal zone. *Journal of Physical Oceanography*, **43**, 1862-1879.
- 60) Uchiyama, Y., E. Idris, J. C. McWilliams and K. D. Stolzenbach (2014) : Wastewater effluent dispersal in Southern California Bays. *Continental Shelf Research*, **76**, 36-52.
- 61) Becker, J. J., D. T. Sandwell, W. H. F. Smith, J. Braud, B. Binder, J. Depner, D. Fabre, J. Factor, S. Ingalls, S-H. Kim, R. Ladner, K. Marks, S. Nelson, A. Pharaoh, R. Trimmer, J. Von Rosenberg, G. Wallace and P. Weatherall (2009) : Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution : SRTM30\_PLUS. *Marine Geodesy*, **32**, 355-371.
- 62) McWilliams, J. C., P. P. Sullivan and C. H. Moeng (1997) : Langmuir turbulence in the ocean. *Journal of Fluid Mechanics*, **334**, 1-30.
- 63) Kantha, L. H. and C. A. Clayson (2004) : On the effect of surface gravity waves on mixing in the oceanic mixed layer. *Ocean Modelling*, **6**, 101-124.
- 64) 入江政安・岡田輝久 (2015) : データ同化を用いた沿岸域モデルの高度化. *沿岸海洋研究*, **52**, 159-168.

### 質 疑 応 答

問 : モデルの精度検証はどのような統計量を用いるのか? その為にはどのような観測システムが必要か?

(愛媛大院理工, 日向 博文)

答 : パルス的な離岸流の沖合への噴出や, 陸棚上で発達するサブメソスケール渦は間欠的でカオティックな現象であるので, 同化を用いない forward モデルで決定論的に再現することは原理的に不可能である. その精度検証においては, 平均量および各種統計量 (分散, 周波数分解した変動強度やフラックス, 有義値など) を用いることが一般的であると思われる. 本研究で示したような現象を現地で捉えるためには, ビデオ画像・Xバンドレーダなどを用いた小スケールリモートセンシングによる平面流況観測, 砕波帯用ドリフター

を用いた Lagrange 的流動・分散計測などが有用であると考えられる。航空機リモートセンシングと高速艇

を組み合わせた平面観測システムも効果的であると考えられる。