



## 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

内山, 雄介

西井, 達也

Mcwilliams, James C.

---

(Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 68(2):I\_426-I\_430

(Issue Date)

2012

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2012 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002928>



# 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

Effects of Surface Gravity Waves on an Inner-Shelf Circulation Analyzed with  
an Eulerian-Averaged Primitive Equation Ocean Model Based on a Vortex-Force Formalism

内山雄介<sup>1</sup>・西井達也<sup>2</sup>・James C.McWilliams<sup>3</sup>

Yusuke UCHIYAMA, Tatsuya NISHII and James C. MCWILLIAMS

Influences of surface gravity waves on an inner-shelf circulation, such as an interaction between waves' Stokes-drift and Coriolis force and a correlation between Stokes drift and background relative vorticity, are investigated with a quadruple-nested high-resolution modeling framework based on ROMS-WEC (Uchiyama *et al.*, 2010). While the primary momentum balance occurs between the pressure gradient and Coriolis forces, consistent with the geostrophic balance at  $R_o < 1$ , the Stokes-Coriolis effect comes in at the same order of magnitude to modify the dynamic balance substantially. Eddy kinetic energy associated with mesoscale and submesoscale momentum fluctuations is also strongly affected by waves. The latter is energized in the nearshore, leading to the dominant submesoscale contribution through vortex force.

## 1. はじめに

沿岸海洋環境アセスメント中核ツールとしての3次元海洋流動モデリングの精度向上が期待されている。しかしながら、沿岸域で特に重要な風波の効果を合理的に取り込む枠組みの開発は立ち遅れていた。これに対して、最近、vortex force (VF) 型 Euler位相平均Primitive方程式を領域海洋循環モデルROMSに組み込み、沿岸域特有の波に駆動される流れを含む海洋循環流の3次元解析を可能とする枠組みが示された（以降ROMS-WECと呼ぶ；Uchiyamaら, 2010）。これまででは波浪の影響が最も強く現れる碎波帯周辺浅海域での解析に主眼が置かれており、碎波帯外の沖合海域におけるダイナミクス、特にVFやStokes-Coriolis効果などの保存的な波-流れ相互作用を通じて、総観規模、中規模、サブメソスケールの海洋循環流に対して波浪がどの程度の影響を及ぼすかについては未解明な部分が多くあった。

そこで本研究では、ROMS-WECにスペクトル波浪モデルSWANと領域気象モデルWRFをカップリングさせ、多段階のネスティングによる精緻なダウンスケーリング実験を行い、中規模およびサブメソスケールの現象が支配的な陸棚循環流に対する波浪の影響を定量的に評価することを試みた。本稿では、南カリフォルニア湾における陸棚循環流を対象に、海盆スケールの力学バランスに支配された海流などの外洋シグナルの波及、サブメソスケール力学、潮汐、風波、局地気象、海底地形・海岸線

地形などの影響を厳密に考慮しつつ、沿岸海洋流動に対する保存的な波-流れ相互作用の影響を詳細に検討した結果について報告する。

## 2. 研究方法

### (1) 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畠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ら, 2009）による海況予報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であるSODAを最外側境界条件とし、ROMSを

1 正会員 博(工) 神戸大学准教授 大学院工学研究科市民工学専攻

2 学生会員 学(工) 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻  
3 Ph.D カリフォルニア大学ロサンゼルス校教授

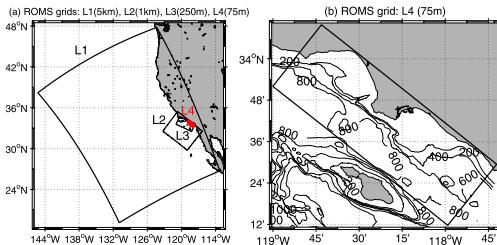


図-1 4段階のネスティング (L1 : 解像度5km, L2 : 1km, L3 : 250m, L4 : 75m, 赤) によるROMS計算領域。 (a) L1～L4領域の境界形状, (b) L4領域の拡大図と水深分布。TPXO7による潮汐はL2から, SWANによる波浪はL3から考慮している。

用いた4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5km、格子数 $514 \times 402 \times$ 鉛直40層）→ROMS-L2（同1km、 $402 \times 514 \times 40$ 層）→ROMS-L3（同250m、 $562 \times 1122 \times 40$ 層）→ROMS-L4（同75m、 $562 \times 1602 \times 32$ 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データを境界条件とした2段ネスティングWRF（解像度約18km→6km）による推算値を用いた。波浪はL3およびL4で考慮し、最外側境界条件にNDBCの波浪観測データ、海表面応力にWRFの結果を用いた2段ネスティングSWAN（ROMS-L3およびL4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。

本ダウンスケーリングシステムの再現性や、半日周内部潮汐等に関する解析は、Buijsmanら（2012）を参照されたい。本研究では、沿岸域で特に重要な地形の再現性を向上させ、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75mのROMS-L4の結果に関する解析結果について報告する。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ヶ月間とした。海底地形は、沖合では30秒メッシュのSRTM30データを、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中のものである。

### 3. 運動量収支解析

外力条件として波浪を考慮しない場合と、考慮した場

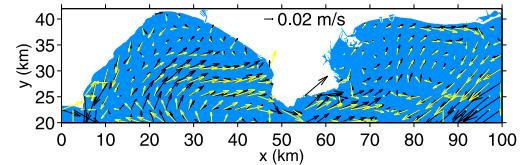


図-2 L4領域における時間平均流速ベクトル（黄色：波浪を考慮した場合、黒色：波浪を考慮しない場合）。35グリッドごとに間引いて表示している。

合についての海表面の時間平均流速ベクトル（2007年12月～2008年4月）を見ると、波浪の有無により平均流構造が大きく変化していることがわかる（図-2）。そこで、海洋流動に及ぼす波浪の影響を調べるために、時間平均的な運動量バランスを解析し、各項の寄与や特徴を検討する。デカルト座標系におけるVF型Primitive方程式の水平運動量保存は式（1）のように表される。

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

ここに、 $(\mathbf{u}, w)$ ：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、 $\phi$ ：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。

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

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

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

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

と表す。ここに、 $a$ ：波の振幅、 $\sigma$ ：は分散関係式（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、

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

は低次のBernoulli headによる順圧的・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考慮した全水深となる。本研究では、式（1）を時間平均した次式を用いて運動量収支解析を行う。

$$\mathbf{T} + \mathbf{A} + \mathbf{C} + \mathbf{P} + \mathbf{D} + \mathbf{V} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

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

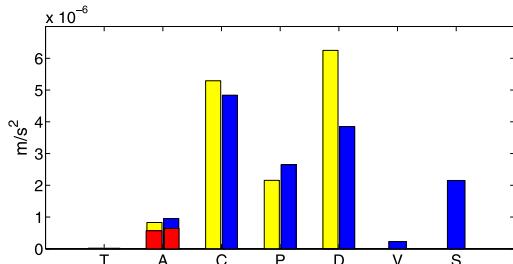


図-3 時間平均運動方程式(6)の海表面における各項ベクトル絶対値のL4領域空間平均値。T:非定常項, A:移流項, C:Coriolis項, P:圧力勾配項, D:鉛直拡散項, V:VF項, S:Stokes-Coriolis項。青:波浪あり, 黄:波浪なし。Aに重ねた赤色部分はReynolds応力成分。

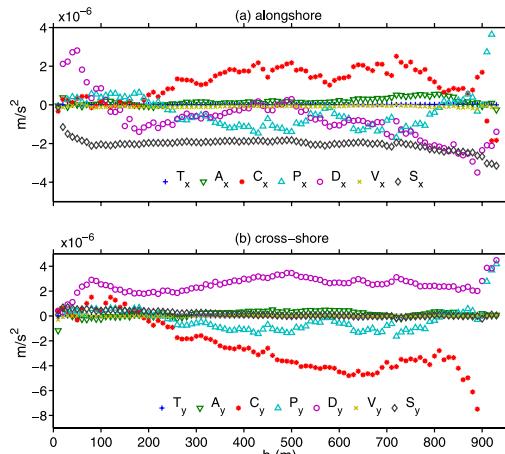


図-4 波浪を考慮した場合の海表面における平均運動方程式(6)各項の水深レンジ(10m間隔)毎の分布。(a)沿岸成分( $x$ ), (b)岸沖成分( $y$ )。平均的な岸沖分布に相当する。

$F$ に含まれる),  $V$ : VF項,  $S$ : Stokes-Coriolis (SC) 項の主要7項から構成されている。相対渦度  $\nabla \times \mathbf{u}$  と水平 Stokes drift速度  $\mathbf{u}^s$  の外積である VF 項と, 惑星渦度  $f$  と  $\mathbf{u}^s$  の外積である SC 項の2項は, 流れに対する波の保存的な運動量変換効果を表しており, 碎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と独立に取り扱うことが可能である (Uchiyamaら, 2010)。

まず, 時間平均運動方程式(6)の各項の平均的な大小関係を調べるために, 海表面における波浪を考慮した場合としない場合の各項のベクトル絶対値の空間平均を求めた(図-3)。ただし, ここでは十分に解像されていない碎波帯の影響を排除するために,  $h > 10\text{m}$ に対して空間平均操作を行なっている。図-3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, SC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SC項がEkman veeringの改変(例えば, Xu・Bowen, 1994)

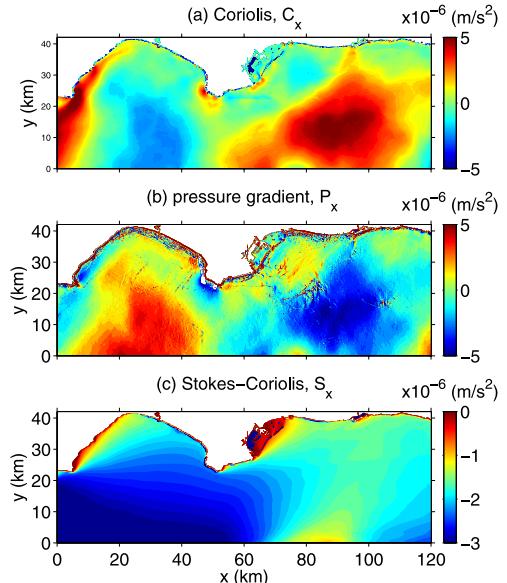


図-5 波浪を考慮した場合の表層における時間平均運動方程式(6)各項の沿岸( $x$ )成分の空間分布。(a) Coriolis項  $C_x$ , (b) 圧力勾配項  $P_x$ , (c) Stokes-Coriolis項  $S_x$ 。

を通じて鉛直拡散項Dを変化させることを表している。図-3のような空間平均値にした場合のVF項Vは小さく, 波浪の影響は主にSC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。

式(6)各項の海表面での値を水深レンジ(10m間隔)毎に空間平均し, 沿岸方向( $x$ )成分と岸沖方向( $y$ )成分の平均的な岸沖分布特性を調べた(図-4)。沿岸成分を見ると, 圧力勾配項  $P_x$  と Coriolis項  $C_x$  が概ねバランスしており, 地衡流平衡に近い状態にあることが分かる。波の効果を表すSC項の沿岸成分  $|S_x|$  は沖合へ向かって徐々に大きくなるとともに,  $|C_x|$  や  $|P_x|$  と同程度の大きさを持つが, その岸沖成分  $|S_y|$  はかなり小さい。これは, 本海域の卓越波向きが岸沖方向と概ね平行であることによる。つまり, Stokes driftは  $|u^s| < |v^s|$  であるので, 式(2)よりSC項は  $|S_x| \gg |S_y|$  となる。表層における沿岸成分の空間分布図(図-5)からも,  $P_x$  と  $C_x$  がバランスし, SC項  $S_x$  は沖合で強化(負値)されていることが確認できる。一方, 移流項AやVF項Vは全領域で相対的に小さい。

次に, 沿岸付近での波浪の影響を見るために, 距岸5kmまでのVF項とSC項の岸沖分布を調べた。ここではL4領域のほぼ中央付近に位置するPalos Verdes地先の測線  $x=55\text{km}$ を例に挙げる(図-6(a) (b))。SC項は岸に向かって徐々に弱まるが, 反対にVF項は浅海域(距岸1km程度より岸側)で強化されており, 岸近傍ではSC項

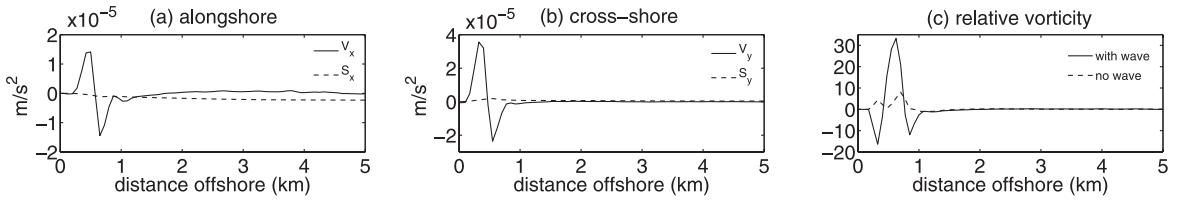


図-6 沿岸距離  $x=55\text{km}$  (領域中央の Palos Verdes岬付近)における距岸  $5\text{km}$ までの表層における vortex force 項(実線)と Stokes-Coriolis 項(点線)の(a)沿岸成分と(b)岸沖成分の岸沖分布、および(c)同ラインにおける波浪あり(実線)、波浪なし(点線)の場合の表層相対渦度の岸沖分布。

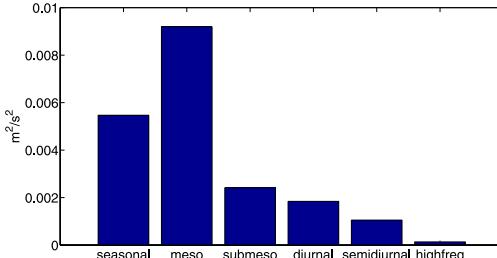


図-7 左から順に、季節変動成分、メソスケール成分、サブメソスケール成分、日周成分、半日周成分、高周波成分から求まる渦運動エネルギー(EKE)の空間平均値(表層)。

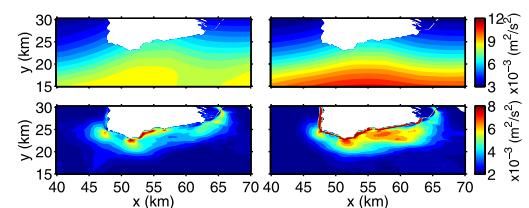


図-9 Palos Verdes沖における表層渦運動エネルギー(EKE)空間分布。(上) メソスケール成分、(下) サブメソスケール成分、(左) 波浪なし、(右) 波浪あり。

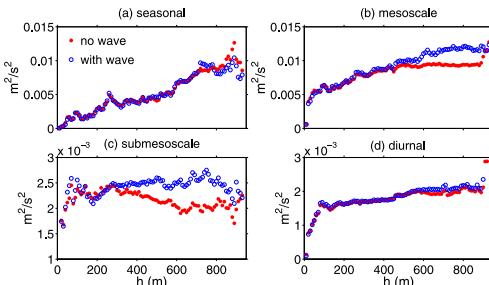


図-8 表層における(a)季節変動成分、(b)メソスケール成分、(c)サブメソスケール成分、(d)日周成分から求まる渦運動エネルギー(EKE)の水深レンジごとの分布。平均的な岸沖分布に相当する。青:波浪あり、赤:波浪なし。

よりも VF 項の方が圧倒的に優勢となっている。これは、Coriolis 項 C の分布 (図-4) から推定される Rossby の内部変形半径が約  $20\text{ km}$  ( $h \approx 300\text{m}$ ) であることから、それよりも岸側では惑星渦度  $f$  の作用が相対的に弱くなり、SC 項が発達しにくくなることと、岸近傍における地形効果によって相対渦度が発達することが原因である。同じ岸沖測線における表層無次元相対渦度 ( $\nabla \times \mathbf{u}/f$ ) の時間平均値 (図-6 (c)) を見ると、距岸  $1\text{km}$  程度以浅の沿岸域において、波浪を考慮した場合に渦度が増大する傾向が見て取れ、沿岸域における VF 項の分布パターンに寄与していることが分かる。同様の結果は、他の測線においても得られることを確認している。

#### 4. 成分毎の乱流統計量

渦度の発達に影響を及ぼす流れの変動特性を精査する

ために、乱流統計量解析を行った。流速3成分に対し、Butterworth周波数バンドパスフィルタを用いて (a) 季節変動成分 (周期 90 日以上), (b) 低周波成分 (30 時間～90 日), (c) 日周成分 (18～30 時間), (d) 半日周成分 (8～18 時間), (e) 高周波成分 (8 時間未満) に分離し、さらに低周波成分 (b) に対して decorrelation length を  $20\text{ km}$  とした Gaussian 空間フィルタを適用し、準地衡流的なメソスケール成分 (波長  $20\text{km}$  以上) と非地衡流的なサブメソスケール成分 (波長  $20\text{km}$  以下) に分解した。まず、各成分から求められる渦運動エネルギー (EKE) の時空間平均値を見ると (図-7)，最も卓越するのはメソスケール成分であり、L4 のような比較的狭小な解析領域であっても、準地衡流的な中規模現象が支配的であることが分かる。次いで季節変動成分、サブメソスケール成分の順に寄与が大きく、潮汐成分を中心とした日周・半日周成分および高周波成分は相対的に小さい。

次に、EKE が大きい季節変動、メソスケール、サブメソスケール、日周成分について、波浪を考慮した場合としない場合の EKE の水深レンジ毎の分布 (平均的な岸沖分布に相当) を比較した (図-8)。季節変動成分と日周成分 (潮汐等) に関しては波浪の有無による差異はほとんど見られないが、メソスケール成分は水深  $500\text{m}$  程度以深の沖合海域で波浪の影響が顕著となっている。これに対し、サブメソスケール成分は水深  $100\text{m}$  未満の浅水域を含むほぼ全域で波浪の有無による差異が見られる。そこで次に、Palos Verdes 沿岸域での波浪あり・なしの場合でのメソスケールおよびサブメソスケール EKE の空間分布を調べた (図-9)。波浪の影響はメソスケール成分では

沖合海域，サブメソスケール成分では沿岸域においてより強く出現することが明瞭に示されている。なお，波浪ありの場合のサブメソスケールEKEには，岸ごく近傍で値がかなり大きい部分が確認できるが，これは水深変化による碎波の影響を表しており，非定常的に沖合海域へ強い正負の渦度を供給している様子が観察された。

## 5. 陸棚循環流の鉛直構造に及ぼす波浪の影響

ここまでは海洋表層の力学構造に着目して議論してきたが，最後に，本海域の陸棚循環流の鉛直構造に及ぼす波浪の影響について検討する。一例として，Palos Verdes沖 $x=55\text{km}$ の岸沖断面における波浪を考慮した場合としない場合の時間平均された流速と密度 $\sigma_t$ ，および両者の差の分布を図-10に示す。沿岸流速 $u$ ・岸沖流速 $v$ とともに，波の直接的な影響範囲である海表面のみならず，水深800m程度に至るまで有意な変化が生じていることが確認できる。密度に関しては，水平流速2成分より深い部分でのみ改変を受けるが，それでも水深400m程度まで最大 $0.06\text{kg/m}^3$ 程度の差が生じていることが分かる。

Stokes driftの直接的な影響範囲は海表面から高々 $(2k)^{-1} \sim O(10^1)\text{m}$ 程度（波長スケール）である。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（Xu・Bowen, 1994）によれば， $O(10^1)\text{m}$ 程度の表層でしか生じない。したがって，図-10に見られる深層までの波の影響の波及は，運動量収支解析で明らかにされたように，準地衡流的な力学バランスが成立する陸棚循環流場に同程度のオーダーの寄与を有するSC項が付与されて水平地衡流バランスが変化したことが主たる原因である。同時に，SC項によって鉛直拡散項が大きく変化するため（図-3），風応力の内部領域への伝達過程が改変され，より深層まで波浪の影響が伝播した可能性もある。なお，密度構造にも無視し得ない偏差が生じているが，これは流速場の変化に伴う地衡流調節によるものと考察される。

## 6. おわりに

沿岸海洋流動に及ぼす波浪の影響を定量的に評価するため，多段階ネスティングによる海洋ダウンスケーリング実験を実施し，局所気象，潮汐，風波などを可能な限り厳密に考慮した大規模数値実験を行った。サブメソスケール現象と沿岸の複雑な地形構造を同時に考慮し得る水平解像度 $75\text{m}$ の高解像度計算結果を用い，水平流速分布，運動量収支，成分分解された渦運動エネルギー，流れ・成層の鉛直構造について解析した。得られた主要な結論は以下のようである。

波浪に起因するStokes-Coriolis効果（SC）は，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

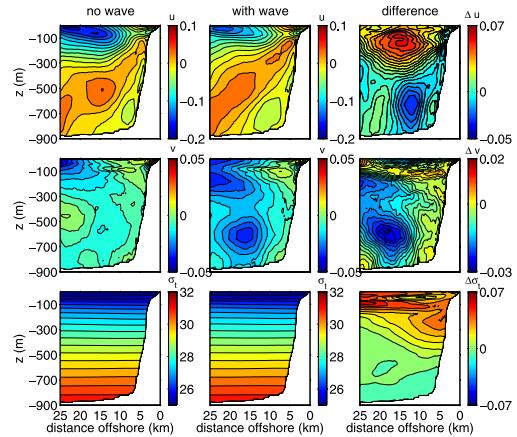


図-10  $x = 55\text{km}$  岸沖断面における，沿岸流速 $u$ （上段），岸沖流速 $v$ （中段），密度 $\sigma_t$ （下段），左から，波浪を考慮しない場合，考慮した場合，考慮しない場合とした場合の各変量の差。すべて解析期間全体の時間平均値。

あり，特に沖合海域で発達する。SCによって地衡流バランスと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，波浪の影響範囲は波長スケールより深くまで拡大する。一方，Rossbyの内部変形半径以下の沿岸付近ではSC項が相対的に小さくなり，vortex force（VF）が卓越する。VF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に強く表れ，特に沿岸付近では後者が卓越し，渦度の発達を通じてVFが強化される。このような波浪による陸棚循環流構造の本質的な改変効果は，海洋中の物質分散に無視し得ない影響を及ぼすことが予想され，沿岸海洋環境アセスメントを実施する上では波浪を考慮することの重要性が具体的に示された。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究C（24560622，代表者：内山雄介）の援助を受けた。

## 参考文献

- Buijsman, M., Y. Uchiyama., J.C. McWilliams and C.R. Hill-Lindsay (2012) : Modeling semidiurnal internal tide variability in the Southern California Bight, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.42, pp.62-77.
- Dong, C., E. Idica and J.C. McWilliams (2008) : Circulation and multiple-scale variability in the Southern California Bight, *Progress in Oceanography*, Vol.82, pp.168-190.
- 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.
- Xu, Z. and A.J. Bowen (1994) : Wave-and Wind-Driven Flow in Water of Finite Depth, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.24, pp.1850-1856.