



## 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

内山, 雄介

Mcwilliams, James C.

---

(Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 67(2):I\_96-I\_100

(Issue Date)

2011

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2011 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002926>



# 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

Three-dimensional Unstable Littoral Currents Analyzed with An Eulerian Phase-averaged  
Primitive Equation Based on A Vortex Force Formalism

内山雄介<sup>1</sup>・James C. McWilliams<sup>2</sup>

Yusuke UCHIYAMA and James C. MCWILLIAMS

Littoral flows are analyzed with an Eulerian-averaged primitive equation for slowly-evolving oceanic flows based on a vortex-force formalism coupled with a WKB spectrum-peak wave model (ROMS-WEC; Uchiyama *et al.*, 2010). Two surf zone problems on a realistic topography are analyzed: 1) shear instability associated with longshore currents driven by obliquely incident waves, and 2) normal mode instability of offshore-directed rip currents under a near-normal incident condition. The coupled wave-current model successfully reproduces 3-D shear waves during the SandyDuck field measurement. We found in 3-D rip-induced coherent eddies that littoral currents have significant depth dependency leading to vorticity stretching/titling effects and to faster decay of enstrophy and kinetic energy than 2-D rip eddies.

## 1. はじめに

波-流れ共存場において平均流の運動量・質量保存則を記述する際、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 (McWilliams ら, 2004) に加え、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。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 型方程式は碎波帶内の流れをより高精度に再現できることが明らかにされている (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りつつある。

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 Wier 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。そこで本研究では、VF を用いたマルチスケール漸近展開理論によるオイラー型位相平均プリミティブ方程式をベ

スとした 3 次元領域海洋モデルを非定常な海浜流場に適用し、沿岸流のシア不安定や離岸流のジェット不安定などに伴う組織的乱流構造、および海浜流系統の平均構造等を 3 次元的に明らかにすることを目的とする。まず始めに shear wave が発達した状況下における緩勾配砂浜海岸での現地観測データとの比較を通じ、3 次元モデルの再現性を確認する。次いで、同じ海浜における深浅測量データを用い、入射波条件を変えることにより形成される様々なレジームの海浜流のうち、典型的なレジームとして直入射条件下における離岸流が卓越する状況に着目した解析を実施し、平面 2 次元モデルとの違いなどについて述べる。

## 2. 解析モデルの概要

解析モデルのベースとなるのは、3 次元領域海洋モデル ROMS (Shchepetkin and McWilliams, 2005) 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 亂流モデルなどから構成された新世代の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条件、並列計算への対応などに顕著な特徴を有する。

Uchiyama ら (2010) は、オイラー平均された VF 型の WEC (wave effects on current) 項を 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

1 正会員 博(工) 神戸大学准教授  
2 Ph.D カリフォルニア大学ロサンゼルス校教授

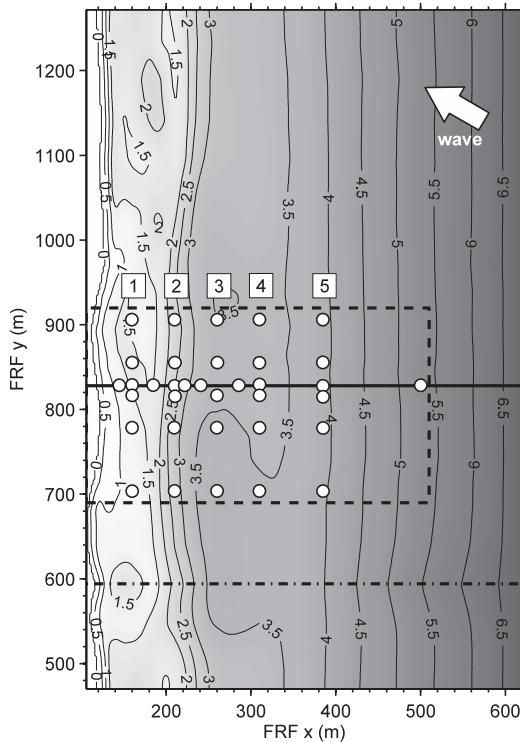


図-1 1997年10月30日の深浅測量データから作成した計算領域地形。センターは水深(m), ○はPUV(水压、水平流速2成分)センサー設置位置、角抜き数字はPUV array番号、点線はPUV測定領域、太実線は主観測ライン( $y = 828\text{m}$ )、

型のWEC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、VF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、VF・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。

一方、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CEW (current effects on wave) として流れによるドップラーシフト項と屈折変形項を導入している。波動モデルは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CEWを考慮した波浪変形を逐次計算することにより、波一流れ相互作用をタイトにカップリングさせている。なお、本解析モデルの詳細についてはUchiyamaら(2010)を参考にされたい。

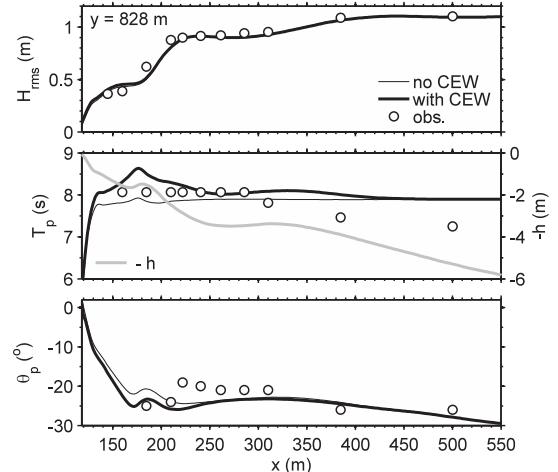


図-2 1997年11月1日1:00 ESTの入射波条件における主観測ラインでの波浪変形計算結果(実線、細線はCEWを考慮しない場合、太線は考慮した場合)と観測データ(○印)。上から、RMS波高、ピーク周期と地形、波向きを示している。

### 3. 現地データとの比較：shear wave

まず、モデルの再現性を確認するため、米国North Carolina州Duck海岸において1997年に実施された、いわゆるSandyDuckデータセットとの比較を行う。1997年10月30日の深浅測量結果を用い、碎波帯を含む東西約550m、南北約800mの浅海域を考え(図-1)、これを水平解像度2m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。現地データの再現性を向上させるために、波一流れ共存場での底面摩擦力評価式として、Duckデータによって最適化されたFeddersonら(1998)によるバルクモデルを用いた。計算条件としては、明確なshear waveが形成された11月1日1:00 ESTの波浪条件、すなわち、RMS波高 $H_{rms} = 1.09\text{ m}$ 、ピーク入射角 $\theta_p = -31.63^\circ$ (SE方向)、ピーク周期 $T_p = 7.90\text{ s}$ を与え、地形変化が生じなかったものと仮定した固定床の計算を行った。波浪モデル中の碎波減衰項にはChurch and Thornton(1993)によるモデルを用い、モデルパラメータは $B = 1.3$ 、 $\gamma = 0.34$ とした。また、rollerモデルに対するパラメータは $\sin \beta = 0.04$ 、 $a_r = 1.0$ とした(詳細はUchiyamaら、2010を参照)。本波浪モデルはシンプルではあるが、沖側境界条件を適切に与えることにより、例えばDuck海岸主観測線( $y = 828\text{ m}$ )における波高、周期、波向きの岸沖変化を比較的良好に再現することができていることが確認される(図-2)。

このような波浪条件下での海浜流場を評価するにあたり、実測地形上でフル3-D計算(3-D VT)に加えて、沿岸方向に地形を平均化したケース(3-D UT)を行った。さらに比較のため、平面2-D(2-D VT, 2-

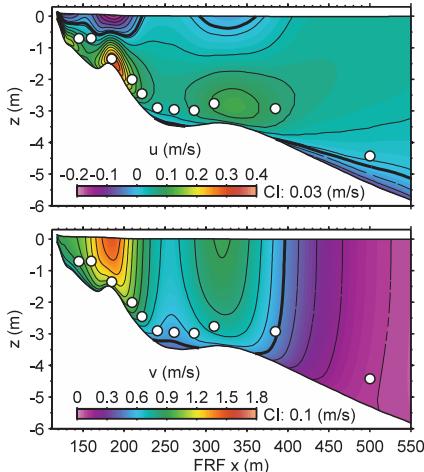


図-3 主観測ラインにおける平均流速の計算値(3-D VT ケース)。○は流速計設置位置を示している。太線は  $u = 0$ ,  $v = 0.5 \text{ m/s}$ , 点線は  $u < 0$ ,  $v < 0.5 \text{ m/s}$ , 実線は  $u > 0$ ,  $v > 0.5 \text{ m/s}$ に対応しており, CIはコンター間隔の値を表す。

D UT), および Q3-D ( $y$  方向を 1 グリッドとした岸沖 2 次元計算) 計算も併せて行った。3-D VT ケースの主観測ラインにおける平均流速構造(図-3)を見ると,  $x = 180 \text{ m}$ ,  $320 \text{ m}$ あたりに形成されたバー付近で生じる碎波に伴う運動量輸送により, 水表面での強い岸向き流れと底層での undertow による鉛直循環流構造が形成され, 強い北向き沿岸流が発生していることが分かる。水平流速  $u$ ,  $v$  はともに明確な鉛直構造を持っていることが確認され, かつ, この強い沿岸流速の岸沖方向のシア不安定により shear wave が生じていた。図-4 は, 水平流速  $u$ ,  $v$  の平均および RMS 流速の岸沖分布に関する観測値と計算値の比較を示しているが, 全般的な観測データの再現性は良好である。しかし, 2-D モデルの平均流速(特に岸沖流速)の再現性が低い。これは明らかに 2-D モデルが図-3 に見られた undertow などの 3 次元的な流れを表現できないことによる。また, VT ケースよりも UT ケースの方が RMS 流速を大きく評価する傾向があり, Reynolds 応力の強化によって平均流速構造にも差が生じている。また, いずれのケースも RMS 流速の岸沖方向での変化の傾向や絶対値については一致しているが, ピーク位置については再現性がやや低く, また, 汀線近傍での乱流強度が過小評価されている。shear wave の位相速度を評価するために, 観測値および計算値(3-D VT ケース)の岸沖流速の周波数 - 沿岸方向波数 ( $f-k_y$ ) スペクトルを求めたところ(図-5), 両者は定量的に概ね一致しており, しかも平均沿岸流速とも良好な対応関係があることから, シア不安定による擾乱の伝播に関しても 3-D モデルの再現性が高いことが分かる。

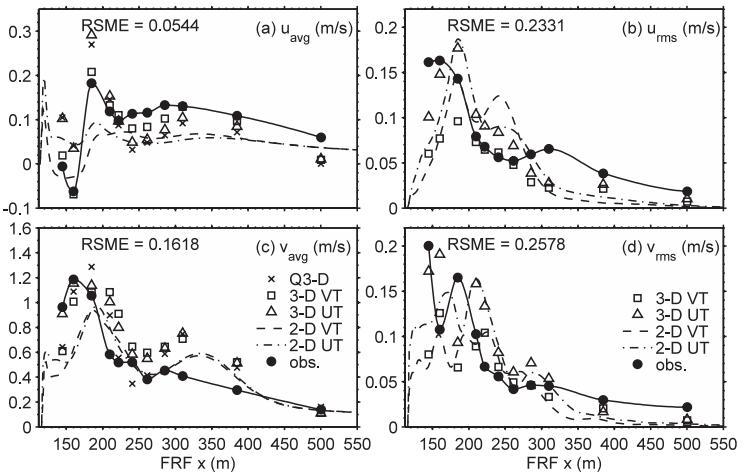


図-4 主観測ラインにおける流速観測値と計算値の比較。(a) 沖向き流速の平均値  $u_{avg}$ , (b) RMS 値  $u_{rms}$ , (c) 北向き沿岸流速の平均値  $v_{avg}$ , (d) RMS 値  $v_{rms}$ 。●は観測値(実線は3次 splineによる補間値), その他は計算値, VT は実測地形を, UT は沿岸方向に一様な地形を与えた計算ケースである(本文参照)。2-D ケースの流速には水深平均流速を, 3-D ケースは観測点での3次元流速の水平成分を用いている。RSME は3-D VT と観測地との誤差の RMS 値を示している。

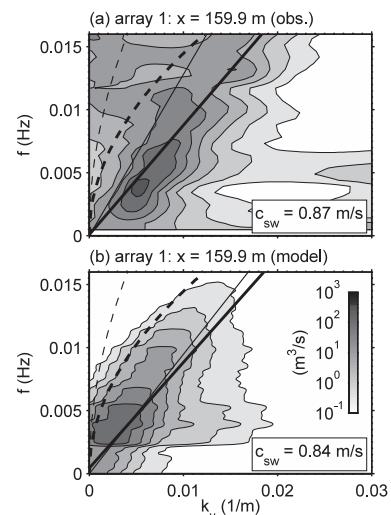


図-5 岸沖流速  $u$  の周波数 - 沿岸方向波数 ( $f-k_y$ ) スペクトル。(a) 観測値(IMLM 法), (b) 計算値(3-D VT ケース, 2-D FFT 法)。点線はモード 0, 1 のエッジ波の分散曲線, 太実線は最小自乗フィッティングによる shear wave の位相速度  $c_{sw}$ , 細実線は平均沿岸流速を示している。

#### 4. 実地形上における3次元海浜流：離岸流

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。入射角が浅い場合は(約 10 度以内), 入射波高の大小に関わらず, 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が卓越する海浜流系統が生じることが確認された(前節参照)。入射角を浅くした状態で入射

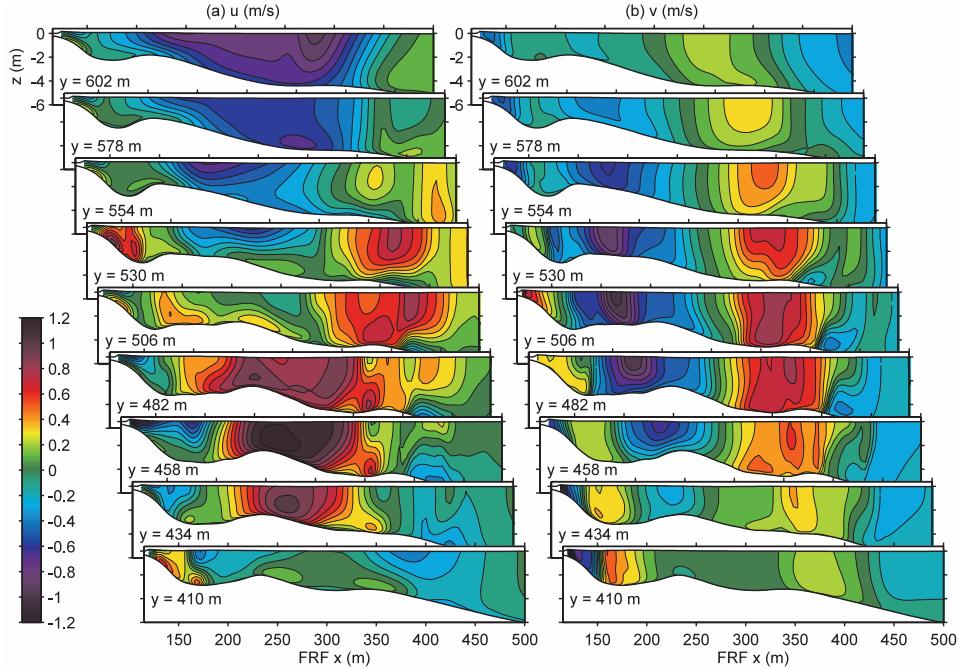


図-6 実地形上での3次元海浜流の瞬間像の一例 (218分後). 流速水平2成分のx-z断面内センターの沿岸方向分布.

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碎波帯周辺に発生するような状況も確認された。これらの詳細に関しては、紙面の都合上、別の機会に報告することとし、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-6、7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 ( $H_{rms} = 1.2$  m,  $T_p = 10$  s,  $\theta_p = 0^\circ$ ) を与えた場合の計算結果の一例であり、碎波点は  $x = 300$  m周辺である。碎波帯内では、碎波輸送トルク（例えば、Wier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ジェット不安定・ノーマルモード不安定により反時計回りに巻き込みながら  $y > 550$  mの領域で弱い岸向き流れに転じ、直徑200m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とを確認している。このときの流れの鉛直構造もやはり水深依存性が強く、バーより岸側では図-3にも見られた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。

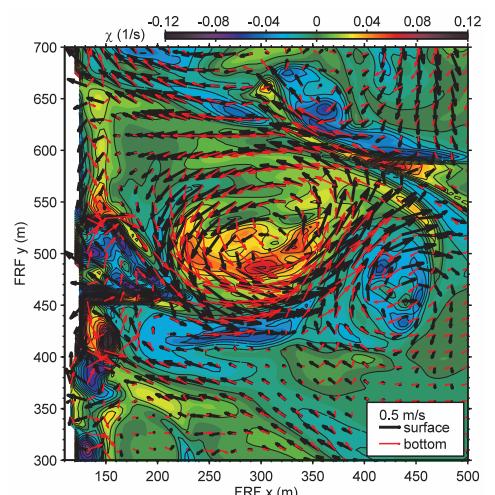


図-7 実地形上での3次元海浜流の瞬間像の一例 (218分後). 水深平均流速の相対渦度（カラーおよびセンター）と流速ベクトル（黒太：海表面、赤細：海底面直上）.

## 5. spin-down テストによる3次元性の抽出

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。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2-D, 3-D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3-D計算を

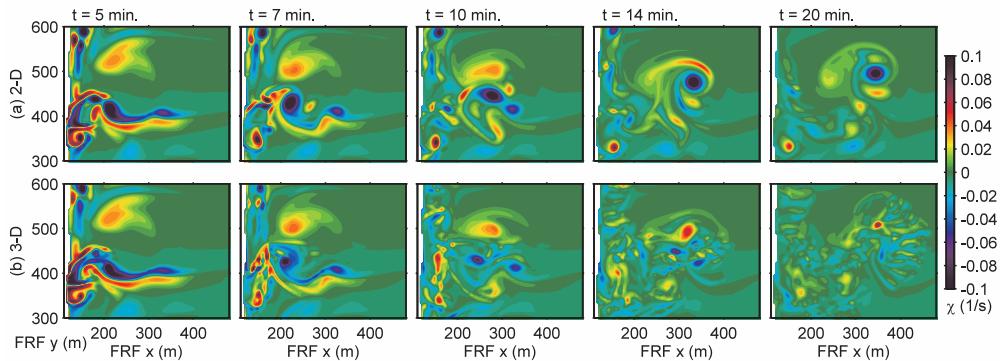


図-8 離岸流に伴う大規模渦構造の散逸過程に関するspin-downテスト結果。水深平均流速による相対渦度 $\chi$ の時間変化。(a) 疑似2-D計算, (b) フル3-D計算による。時刻 $t < 5$  min.では波による外力を与えて離岸流による沖向きジェットを生成させ、その後は外力をゼロにして運動エネルギーを散逸させている。

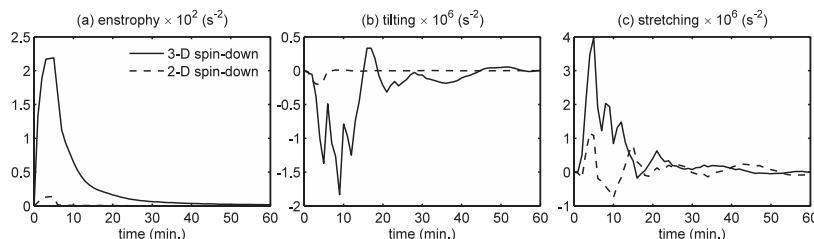


図-9 spin-downテストによる(a) enstrophy, (b) 渦度方程式tilting項(直交成分), (c) 同stretching項(平行成分)の時系列。

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)2-D計算を行っている。2-Dの場合と比較して3-D離岸流では渦の寿命が短く、卓越波数も総じて高いことが確認される(図-8)。この原因の一つとして、図-9に示すように、3-Dの場合は渦度鉛直成分のtitling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るという構造となっていることが分かった。

## 6.まとめ

沿岸流、離岸流は碎波輸送トルクによって渦度が増大し、容易に不安定になるが、その初期発達や卓越波長などは2次元と3次元の場合では明確に異なる。碎波帯周辺の海浜流場には明確な水深依存性を有する3次的な流れが形成されることから、沖域の流れとシームレスに接続するためにも、3次元解析が必要である。

**謝辞:**本研究の一部は、近畿建設協会研究助成および建設工学研究所特別研究費の補助を受けた。また、SandyDuckデータセットおよびDuck海岸における深浅測量データを利用させていただいた。Office of Naval ResearchならびにS. Elgar, R.T. Guza, T.H.C. Herbers, P.A. Howd, K.K. Hathaway,

W.A. Birkemeier, C.E. Longの各氏および関係者各位に感謝します。

## 参考文献

- Church, J.C. and E.B. Thornton (1993): Effects of breaking wave induced turbulence within a longshore current model. Coastal Eng., Vol. 20, pp.1-28.
- Feddersen, F., R.T. Guza, S. Elgar and T.H.C. Herbers (1998): Alongshore momentum balances in the nearshore. J. Geophys. Res., Vol. 103, pp.15667-15676.
- McWilliams, J.C., J.M. Restrepo, and E.M. Lane (2004): An asymptotic theory for the interaction of waves and currents in coastal waters, J. Fluid Mech., Vol. 511, pp.135-178.
- Mellor, G.L. (2003): The three-dimensional current and surface wave equations, J. Phys. Oceanogr., Vol. 33, pp.1978-1989.
- Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams (2005): The Regional Oceanic Modeling System: a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modell., Vol. 9, pp. 347-404.
- Uchiyama, Y., J.C. McWilliams and J.M. Restrepo (2009): Wave-current interaction in nearshore shear instability analyzed with a vortex-force formalism, J. Geophys. Res., Vol. 114, C06021, doi:10.1029/2008JC005135.
- 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, pp.16-35.
- Weir, B., Y. Uchiyama, E.M. Lane, J.M. Restrepo and J.C. McWilliams (2011): A vortex-force analysis of the interaction of rip currents and gravity waves, J. Geophys. Res., Vol.116, C05001, doi:10.1029/2010JC006232.