

不規則波浪のStokes Driftを考慮した海洋・波浪結合モデルを用いた沿岸流の解析

著者	今井 優樹, 森 信人, 二宮 順一, 安田 誠宏, 間瀬 肇
著者別表示	Imai Yuki, Mori Nobuhito, Ninomiya Junichi, Yasuda Tomohiro, Mase Hajime
雑誌名	土木学会論文集B3(海岸工学)
巻	72
号	2
ページ	I_511-I_516
発行年	2016-11-15
URL	http://doi.org/10.24517/00049527

doi: 10.2208/kaigan.72.I_511



不規則波浪の Stokes Drift を考慮した 海洋・波浪結合モデルを用いた沿岸流の解析

今井優樹¹・森 信人²・二宮順一³・安田誠宏⁴・間瀬 肇⁵

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒 615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: imai.yuki.84z@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: mori@oceanwave.jp

³正会員 金沢大学助教 理工研究域 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: jnino@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒 564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)
E-mail: tomo@oceanwave.jp

⁵正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: mase.hajime.5c@kyoto-u.ac.jp

海洋を対象とした波浪や流れおよび塩熱環境の再解析には、数値モデルの構築において対象スケールに適した物理素過程を考慮することが重要である。実際の波浪場は風波やうねりの共存する不規則波浪場であるが、沿岸域において、その重要性のわりに不規則波による波・流れ相互作用はあまり考慮されてこなかった。本研究では、砕波帯外の海域で波・流れに及ぼす影響として重要な不規則波浪場の Stokes drift について領域スケールの海洋・波浪結合モデルに考慮した。構築した結合モデルを用いて和歌山県田辺湾を対象とした沿岸流の解析を行い、既存のモデルの計算結果と比較を行った。単一の海洋モデルおよび規則波に対する Stokes drift を考慮した結合モデルでは、Stokes drift を全体的に過大評価傾向にあったが、本結合モデルでは Stokes drift の平均流への 30% 程度の影響があることを明らかにした。

Key Words : Stokes drift, coupled ocean-wave model, random wave, regional ocean environments, the two-dimensional wave spectra

1. 序論

一般に、沿岸部において、波浪や流れが砂浜の形状や防波堤の設計外力を決め、また水温・塩分の分布構造が生態系に大きな影響を与える。近年、このような沿岸外力や環境場に及ぼす地球温暖化の影響は、防災や社会活動の観点からその長期的変化に注目が集まっている。とりわけ、IPCC-AR5¹⁾ (Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report, 2013) においても、沿岸域などの領域スケールにおける気候変動に伴う将来予測と影響評価の必要性が指摘されている。

今日、日本周辺や北西太平洋の海洋再解析として JCOPE2²⁾や FORA-WNP3³⁾があるが、水平解像度 10km 程度と依然として低解像度である。このため、全球などの大規模スケールを対象とした数値モデル (例えば Global Climate Model : GCM) に加えて、沿岸域を対象とした領域モデルの開発が求められる。

一方、沿岸域のような有限水深海域では、海洋循環場の解析に加え、波による流れ・混合の影響を考慮することが重要である。Uchiyama ら⁴⁾ (2010) は、領域海洋モデル ROMS において波による流れの影響を考慮するような枠組み (以下 WEC : Wave Effect on Current

と略記) を提案し、vortex force 項と Stokes Coriolis 項を新たに組み込むことで波浪が流れに及ぼす影響を評価することを可能とした。

そこで本研究では、スペクトル型波浪モデル SWAN を用いて波浪の解析を行い、得られた波浪情報を海洋モデル ROMS に組み込むことで、不規則波に対する波・流れ相互作用の考慮を可能とする高分解能 (例えば水平解像度数百 m) で積分可能な海洋・波浪結合モデルの構築を行う。具体的には、SWAN によって計算された周波数スペクトル、方向スペクトルを、各々のパラメータの受け渡しにより ROMS において近似的に周波数分布、方向分布を考慮することで、不規則波浪場における Stokes drift 効果を再現する。次いで、再現した不規則波浪における Stokes drift 効果の理論的検証およびこの結合モデルを用いた単純地形を対象とするテスト計算を行い、ROMS における WEC の効果を検証する。これらによって構築したモデルを用いて和歌山県田辺湾沖における白浜を中心とした水平解像度 500m の過去再現計算を実施し、沿岸流の解析を行う。

2. 数値モデルの概要

(1) 海洋モデル ROMS

ROMS に用いられる運動量の支配方程式は，水平方向にデカルト座標系，鉛直方向には静水圧近似が用いられ，それぞれ式 (1)，式 (2) で表される．

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla_{\perp}) \mathbf{u} + w \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} + f \hat{z} \times \mathbf{u} + \nabla_{\perp} \phi - \mathbf{F} - \mathbf{D} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} - \nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) = -\nabla_{\perp} \kappa + \mathbf{J} + \mathbf{F}^w \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{g\rho}{\rho_0} = -\frac{\partial \kappa}{\partial z} + K \quad (2)$$

ここに，直行座標系 (x, y, z) における $\mathbf{u} = (u, v)$ は水平方向流速ベクトル， w は鉛直方向流速， t は時間， ∇_{\perp} は水平微分演算子， f は Coriolis パラメータ， \hat{z} は鉛直方向単位ベクトル， ϕ は圧力， \mathbf{F} は波浪以外に起因する非保存的外力， \mathbf{F}^w は波浪に起因する非保存的外力， \mathbf{D} は拡散項， μ は動粘性係数， (\mathbf{J}, K) は水平方向，鉛直方向の vortex force 項と Stokes-Coriolis 項の和， κ は高次の Bernoulli head， ρ は密度， ρ_0 は鉛直平均密度， g は重力加速度である．式 (1)，式 (2) における (\mathbf{J}, K) ， κ は次式のように表される．

$$\mathbf{J} = -\hat{z} \times \mathbf{u}^{st} \left((\hat{z} \cdot \nabla_{\perp} \times \mathbf{u}) + f \right) - w^{st} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \quad (3)$$

$$K = \mathbf{u}^{st} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{\sigma H^2}{16 \cdot k \sinh^2 kh} \int_{-h}^z \frac{\partial^2 \nu}{\partial z^2} \sinh [2k(z - \hat{z})] d\hat{z} \quad (5)$$

$\mathbf{u}^{st} = (u^{st}, v^{st})$ は水平方向 Stokes drift 流速ベクトル， w^{st} は鉛直方向 Stokes drift 流速である．

(2) 不規則波浪に対する Stokes drift の表現

ここでは，不規則波における流れに及ぼす波の影響を考慮するために，不規則波における Stokes drift の定式化を行う．不規則波に対する Stokes drift は次式のように表される (Kenyon et al., 1969⁵⁾) ．

$$\mathbf{u}^{st} = \frac{1}{\rho} \iint F(\mathbf{k}) \frac{\mathbf{k}}{\omega(k)} \left[\frac{2k \cosh(z+h)}{\sinh 2kh} \right] d\mathbf{k} \quad (6)$$

ここに， z は鉛直座標， ρ は水の密度， $k (= \sqrt{k_x^2 + k_y^2})$ ， \mathbf{k} は波数，波数ベクトル， h は全水深で，波の 2 次元エネルギースペクトル $F(\mathbf{k})$ は式 (7) のように定義され，

$$\begin{aligned} \rho g [\eta^2(x, t)] &= 2\rho g \sum_{\mathbf{k}} [\eta_{\mathbf{k}} \eta_{\mathbf{k}}^*] \\ &= \int \int_{-\infty}^{\infty} F(\mathbf{k}) d\mathbf{k} \end{aligned} \quad (7)$$

また，周波数 ω は微小振幅波の分散関係式を満たす． η は波の水面変位， $\mathbf{x} = (x, y)$ は水平座標ベクトル， $\eta_{\mathbf{k}}$ はフーリエ振幅 ($\eta_{\mathbf{k}}^*$ は $\eta_{\mathbf{k}}$ の復素共役)， g は重力加速度である．

(3) 波のエネルギースペクトル

スペクトル型波浪モデル SWAN では，各格子において波浪の方向スペクトルが計算される．波浪場と循環場の情報伝達において，これらのスペクトル型を関数として授受することは計算負荷が非常に大きい．一方，Mori ら⁶⁾ (2011) によると，ピーク周波数近傍に着目すると，方向スペクトルに 2 次元ガウス分布を次式のように近似的に表すことができる．

$$E(\omega, \theta) = \frac{m_0}{2\pi\sigma_{\omega}\sigma_{\theta}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma_{\omega}} \right)^2 + \left(\frac{\theta - \theta_p}{\sigma_{\theta}} \right)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

ここに， m_0 は水面変位の分散， ω_p ， θ_p はそれぞれピーク周波数，波向き， σ_{ω} ， σ_{θ} はそれぞれ周波数分散，方向分散である．周波数分散 σ_{ω} は，既往研究の JONSWAP 型の周波数パラメータ γ や Goda の提唱する周波数スペクトル幅パラメータ Q_p と次式のような関係がある．

$$\sigma_{\omega} = \frac{1}{\sqrt{\pi}Q_p} \quad (9)$$

$$Q_p = -0.015\gamma^2 + 0.60\gamma + 1.37 \quad (10)$$

同様に，方向分散 σ_{θ} は，既往研究の光易型の方向分散パラメータ S を用いて次式のように近似できる．

$$\sigma_{\theta} \simeq \sqrt{\frac{2}{1+S}} \quad (11)$$

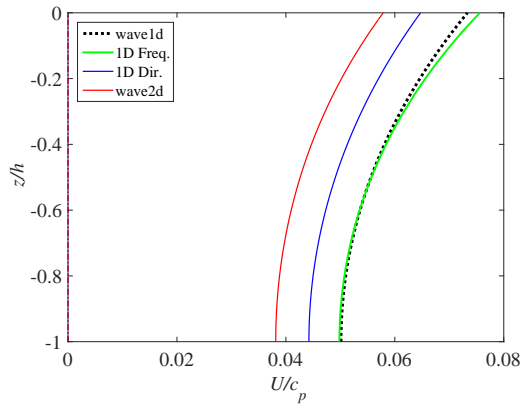
このように，波の方向スペクトルは，4 つのパラメータで近似される．結合モデル間において 4 つのパラメータを授受することで，海洋モデル内において不規則波を考慮した波による流れの影響を組み込むことができる．これにより，モデル間の通信コストを大幅に軽減することができる．

3. モデルの検証

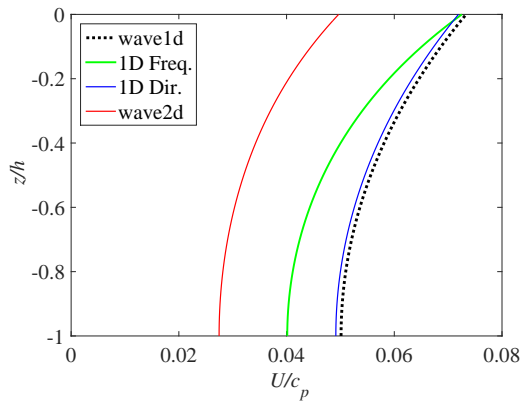
本章では，2 章で結合モデルに組み込んだ不規則波における波による流れの影響の理論値やモデルによる計算結果の妥当性を，鉛直分布および水平空間において検証する．

(1) Stokes drift の鉛直分布

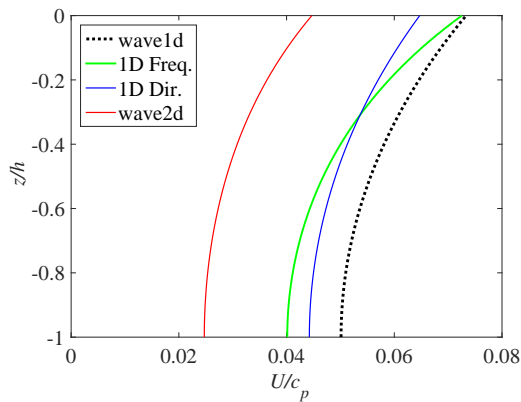
ここでは，波高 0.5m，周期 10.0s，水深 5.0m の前節で条件を例にとり定式化した Stokes drift 流速の鉛直分布について分析を行う．具体的には，規則波と不規則波および周波数分散，方向分散それぞれのみを考慮した場合の Stokes drift 鉛直分布を相互に比較する．Goda の周波数スペクトル幅パラメータや光易型の方向スペクトルパラメータはそれぞれ一般に $1.0 \leq Q_p \leq 5.9$ ， $7.0 \leq S \leq 87.9$ の範囲で変化し，式 (9)～式 (11) からわかるようにそれぞれ周波数分散，方向分散と反比



(a) $Q_p = 2.0, S = 7.0$



(b) $Q_p = 1.0, S = 50$



(c) $Q_p = 1.0, S = 7.0$

図-1 Stokes drift の鉛直流速分布（水深 5m, 周期 10s, 波高 0.5m, 黒点線：規則波（wave1d）, 赤線：不規則波（wave2d）, 緑線：周波数分散のみ考慮（1D Freq.）, 青線：方向分散のみ考慮（1D Dir.）

例の関係がある．周波数分散が小さく方向分散が大きい場合（図-1(a), $Q_p = 2.0, S = 7.0$ ）, Stokes drift 流速の鉛直分布において, 周波数分散のみを考慮した場合（図中緑線, 以下 1D Freq. と略記）と比べ方向分散のみを考慮した場合（図中青線, 以下 1D Dir. と略記）の方が Stokes drift 流速が小さく評価される．これとは対照的に, 周波数分散が大きく方向分散が小さい場合（図-1(b), $Q_p = 1.0, S = 50$ ）, 1D Dir. に比べて 1D Freq. の

方が Stokes drift 流速が小さく評価される．これら周波数分散が大きい場合の 1D Dir. と周波数分散が大きい場合の 1D Freq. の Stokes drift 流速の鉛直平均がほぼ等しいことは, $Q_p = 1.0, S = 7.0$ 条件下の図-1(c) より確認できる．一方で, 1D Dir. と比べ 1D Freq. は水深に伴う Stokes drift の減少が大きいことがわかる．水面波が流れに及ぼす影響は水面近傍で大きく表れるが, 特に周波数分散が大きい場合はこの傾向が顕著である．また, 図-1(a)(b) に示されているように, 周波数分散と方向分散を共に考慮した場合（図中赤線, 以下 wave2d と略記）を比較すると, 方向スペクトルが狭い (b) の wave2d による Stokes drift 流速の方が (a) の wave2d よりも小さく, 方向スペクトル分散が Stokes drift 流速に及ぼす影響が大きいことが確認できる．

(2) 単純地形を対象とした波による流れの感度解析

構築した結合モデルを用いて, 沿岸域を模した単純地形（図-2）を対象とした波により生じる流れの影響の感度解析を行う．東西 15.4km × 南北 14.4km, 水平解像度 200 m, 鉛直 20 層, 対象領域中央には幅 1.2km のスリットが設けられており, 一定海底勾配（1/641）の沖側と水深 4m の岸側の海域に分かれている．計算は連続した 60 時間の周波数分散・方向分散共に考慮しない場合（以下, wave1d と略記）および wave2d について行った．後者については不規則波の JONSWAP の周波数分散パラメータ $\gamma = 3.3, 10$, 方向分散角 $\sigma_\theta = 10, 50, 90$ の組み合わせ, 6 パターンについて実施した．

初期条件は波・流れ共にない状態で, 北側境界より波高, 周期及び周波数・方向分散を設定し, 沖波の流

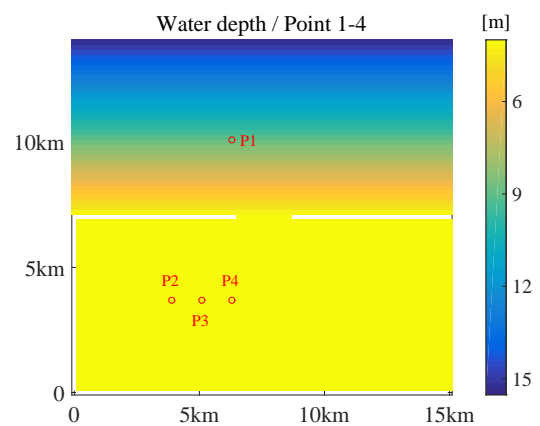
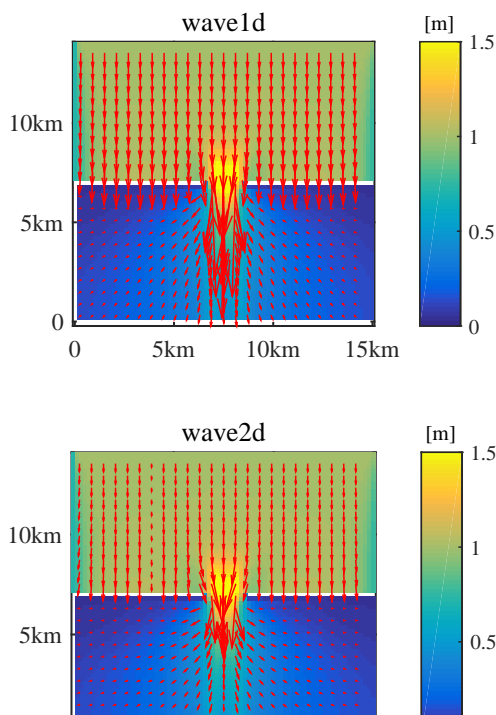


図-2 単純地形を対象とした波による流れの感度解析で用いた地形データ

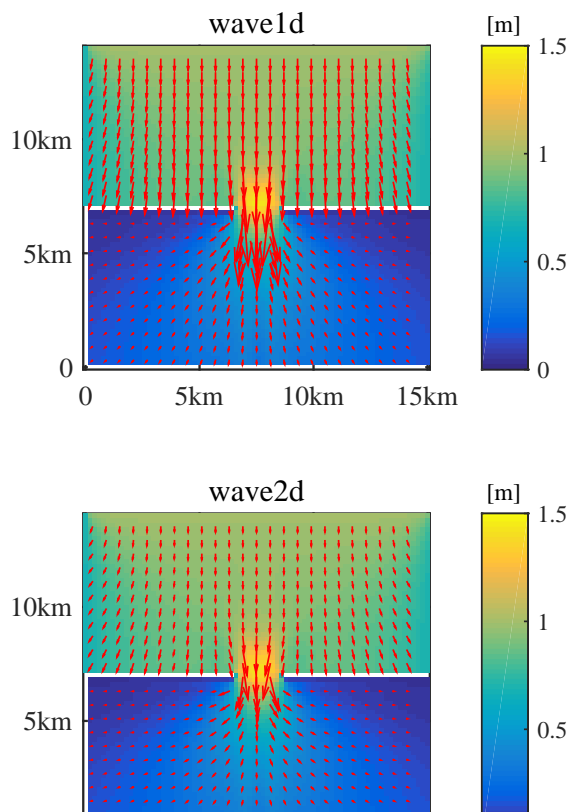
入を再現した．また, 境界条件として南側は閉鎖境界条件, 東西境界は自由境界条件, 波の入射条件として北側境界は固定境界条件とした．

a) Stokes drift の空間分布

$\gamma = 3.3, \sigma_\theta = 50$ 条件下の最上層 (20/20) における Stokes drift 流速の 24~25 時間の 1 時間平均 (図-3) では, wave1d と比較してスリット岸側で wave2d の Stokes drift 流速が小さく方向分散も大きくなっており, これは不規則波の考慮によるエネルギー消散による影響と考えられる. 周波数分散が大きく方向分散が小さい $\gamma = 3.3, \sigma_\theta = 10$ 条件下の同様の Inlet test による Stokes drift を図-4 に示す. 図-4(a) に示す最上層における結果では, 図-3 の $\gamma = 3.3, \sigma_\theta = 50$ 条件下に比べ Stokes drift 流速の方向分散が小さく表れていることが確認できる. 次いで, 図-4(a) に加えて, 同条件下の下層 (5/20) における Stokes drift (図-4(b)) にも着目すると, 各 wave2d, wave1d 同士の比較では水深に伴う Stokes drift 流速の低下が見られる一方で, その水深が深くなるにしたがって Stokes drift 流速の減少傾向は wave2d の方が顕著である. これは本節 (1) に示した周波数分散が大きい場合に水面近傍で Stokes drift 流速が大きく水深に伴い減少する結果と整合する.



(a) 最上層, 上図: wave1d, 下図: wave2d



(b) 下層, 上図: wave1d, 下図: wave2d

図-4 単純地形を対象とした波による流れの感度解析: Stokes drift と波高分布, 1 時間平均 (24~25 時間), $\gamma = 3.3, \sigma_\theta = 10$

図-3 単純地形を対象とした波による流れの感度解析: Stokes drift, 1 時間平均 (24~25 時間), 最上層, $\gamma = 3.3, \sigma_\theta = 50$, 上図: wave1d, 下図: wave2d

b) Stokes drift の時系列変化

図-5 は単純地形を対象とした波による流れの感度解析における P1~P4 (参照: 図-2(b)) の Stokes drift の時系列であり, 実線が wave2d, 点線が wave1d を表し

ている. P1~P4 の設定は, 南北にスリット幅の距離および東西に半スリット幅を設けた. Stokes drift 流速の時系列では, wave1d より wave2d の方が Stokes drift 流速が一貫して小さくなることを確認できる. P1 と比較して, スリットより沿岸側に位置する P2~P4 の Stokes drift 流速は, wave1d に比べ wave2d の割合が P4~P2 の

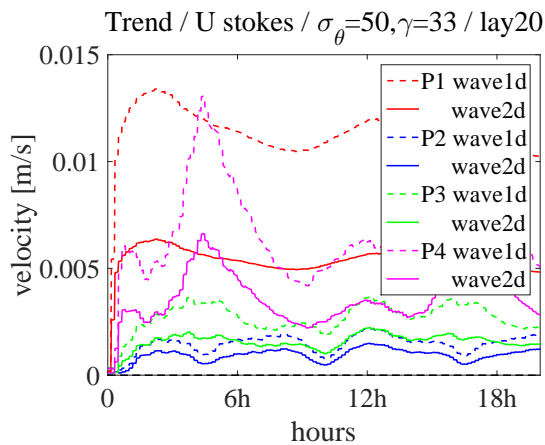


図-5 単純地形を対象とした変化:Stokes drift の時系列, P1~P4 (参照: 図-3), 実線: wave2d, 点線: wave1d

降順に大きくなっていることが確認できる。wave2d のケースでは, スリットより沿岸側では不規則波の考慮による回折の効果があり, 単位周波数の回折計算である wave1d と比較して, 方向分散の影響が表れていると考えられる。

4. 田辺湾における沿岸流の解析

前章まで構築した海洋・波浪結合モデルを用いて, 和歌山県田辺湾の白浜を中心とした過去再現計算を実施した。計算対象海域は東西 30km×南北 30km であり, 図-6 に示す地形データを用いて水平解像度 500m, 鉛直 10 層の条件で, 積分を行った。wave1d, wave2d に加え, ROMS による単独計算 (以下, ROMS run と略記) も行い, モデルの有効性を検証する。

対象期間は 2009 年 9 月 30 日から同年 10 月 10 日とし, スピンアップ期間を 1 週間とした。気象条件は基本的に気象庁 MSM-GPV データを与え, 長波放射量のみアメダスデータを与えた。開境界条件として, 自由表面は Sommerfelt 境界条件, 3 次元流速には放射条件を与え, 潮汐には TPXO7.2 のデータを用いた。計算条件に

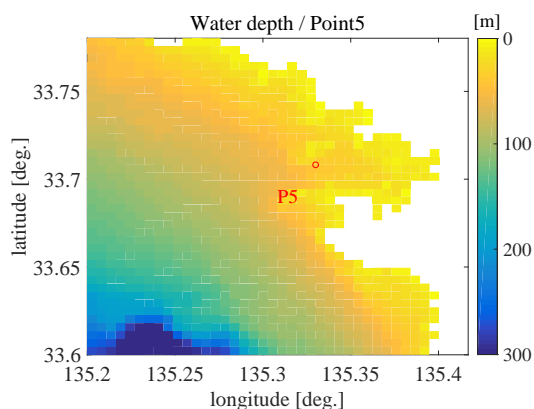


図-6 和歌山県田辺湾沖計算で用いた地形データ

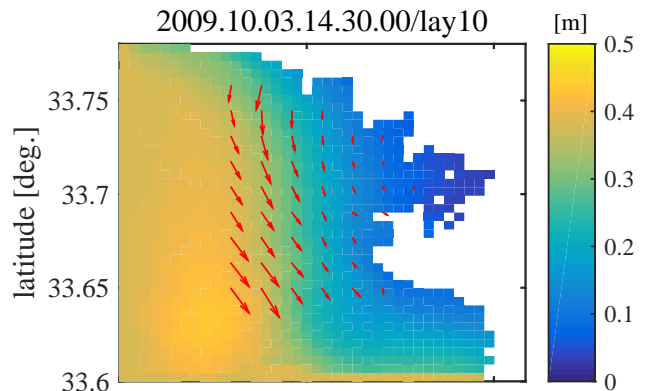
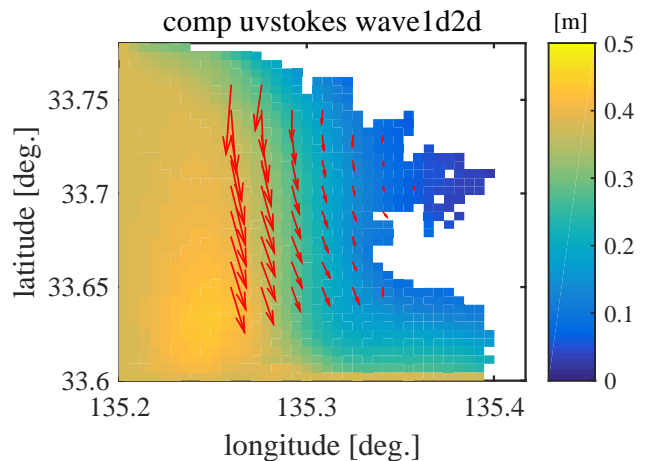


図-7 Stokes drift の空間分布, 上図: wave1d, 下図: wave2d, スナップショット (10 月 3 日 14 時 30 分), 最上層

関する詳細については森ら⁷⁾ (2010) を参照されたい。

(1) 沿岸流の空間分布

図-7 に示すのは wave1d, wave2d の 2 ケースの Stokes drift の空間分布 (10 月 3 日 14 時 30 分) である。3 章 (2) と同様に, wave1d に比べて wave2d の Stokes drift 流速の方が小さく, 不規則波を考慮したことによる流速の低下が確認できる。また, Stokes drift の方向は, wave1d では南向き成分が強いことと比較して, wave2d では東向き成分が強く表れている。

(2) 平均流の時系列変化

Stokes drift が平均流に及ぼす影響として, 定点 (P5: 図-6) における ROMS run, wave1d, wave2d の 3 ケースの波高・潮位, 平均流速および平均流速の wave2d/wave1d・wave2d/ROMS 比それぞれの時系列を 図-8 に示す。潮位と平均流の時系列変化において, 潮位が高くなる際に ROMS run に比べて, wave2d の平均流が大きくなる傾向がある。一方, 潮位が低い時は ROMS run に比べ wave2d の平均流が小さくなる傾向も見られる。また, 平均流の wave2d/wave1d 比では, 平均流速の変化率は約 30% 前後となった。これと比較し

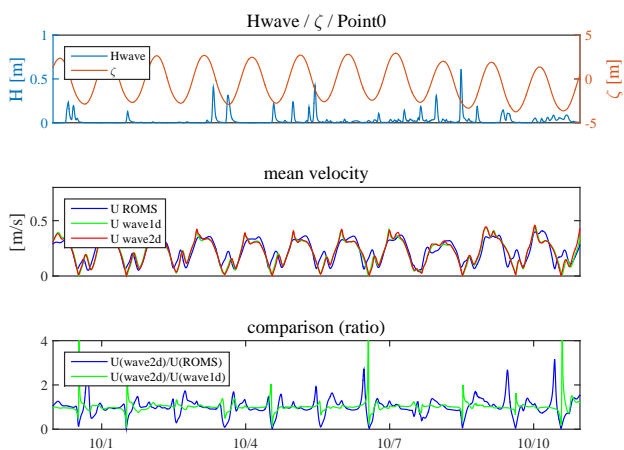


図-8 波高・潮位（上段），平均流速（中段）およびその wave2d/wave1d・wave2d/ROMS 比（下段）の時系列変化，中段（青：ROMS，緑：wave1d，赤：wave2d）

て wave2d/ROMS 比は，Stokes drift の有無により，平均流速の変化率は大きく表れている。

5. 結論

本研究では，不規則波により生成される流れを考慮するために，波の方向スペクトルから Stokes drift を計算する海洋・波浪結合モデルの構築を行った。Stokes drift は周波数分散の増加に従って底層で Stokes drift 流速の減少が顕著となる。また，結合モデルを用いて単純地形を対象とした波による流れの応答解析を実施し，不規則波の考慮の有無による Stokes drift の変化を調べた。不規則波を考慮したことにより，スリット背後の回折効果の特性が変わり，Stokes drift 流速が広く分布することが示された。最後に，構築したモデルを用いて和

歌山県田辺湾沖における過去再現計算を実施し，沿岸流の解析を行った。不規則波を考慮した場合は考慮しない場合と比較して Stokes drift 流速が小さく評価され，これが平均流に 30% 程度の影響を及ぼすことが確認された。

謝辞：本研究は，文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムおよび科学研究費補助金による成果である。

参考文献

- 1) IPCC-A5 WGI: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter, 12, <https://www.ipcc.ch/>, 参照 2015-05-01.
- 2) Miyazawa, Y., Miyama, T., Varlamov, S. M., Guo, X and Waseda, T.: Open and coastal seas interactions south of Japan represented by an ensemble Kalman filter. *Ocean Dynamics*, Vol.62(4), pp.645-659. 2012.
- 3) Usui, N., T. Wakamatsu, Y. Tanaka, N. Hirose, T. Toyoda, S. Nishikawa, Y. Fujii, Y. Takatsuki, H. Igarashi, H. Nishikawa, Y. Ishikawa, T. Kuragano and M. Kamachi: Four-dimensional Variational Ocean Reanalysis: A 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30), 2015.
- 4) Uchiyama, Y., McWilliams, J. C. and Shchepetkin, A. F.: Wave-current interaction in an oceanic circulation model with a vortex-force formalism: Application to the surf zone. *Ocean Modelling*, Vol.34(1), pp.16-35, 2010.
- 5) Kenyon, Kern E.: Stokes Drift for random gravity waves. *J. Geophysical Research*, Vol.74, No.38, pp.6991-6994. 1969.
- 6) Mori N., Onorato M., and Janssen P. A. E. M.: On the Estimation of the Kurtosis in Directional Sea States for Freak Wave Forecasting. *J. Phys. Oceanogr.* Vol.41, pp.1484-1497. 2011.
- 7) 森信人, 鈴木崇之, 木原直人: 海洋表層鉛直混合におよぼす風応力と波浪の影響. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.66(1), pp.311-315. 2010.

(2016.3.16 受付)

ANALYSIS OF THE COASTAL CURRENT BASED ON COUPLED OCEAN-WAVE MODEL CONSIDERING STOKES DRIFT ON RANDOM WAVES

Yuki IMAI, Nobuhito MORI, Junichi NINOMIYA,
Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

It is important to adequately consider the physical mechanisms of ocean waves to determine the spatial scale and extent of current, temperature and etc in the ocean. This study develops a coupled ocean-wave model to consider wave-current interaction on random waves and analyzes the sensitivity of coastal currents in ideal condition and the Tanabe bay of Wakayama prefecture. The effects of wave-induced transport on random waves are implemented in the ocean model by formulating Stokes drift including random wave spectra. First, the validation of the model was carried out for wave-induced currents having wave diffraction through a slit on constant slope. Second, three runs were carried out for Tanabe Bay of Wakayama Prefecture, considering the Stokes drift effect on random waves and regular waves but not considering the effect of wave-current interaction, to assess the influence of the Stokes drift on random waves. The intercomparison among the results indicated that Stokes drift affected the mean velocity by about 30%, suggesting the Stokes drift effect should not be neglected in the regional circulations.