

Two-Way Feedback による波浪 - 海浜流解析に関する研究

山田文彦¹・土田将己²・鄭 金海³・間瀬 肇⁴

波浪場と海浜流場の計算において, 相互の解析結果を取り込みながら反復することで, 波・流れの相互作用 (Two-Way Feedback) を考慮する統合解析モデルを提案した. 波浪解析は間瀬らの波作用量平衡式モデルを用い, 海浜流解析には Svendsen らのモデルを採用し, 室内実験との比較より, 海浜流の空間分布が波浪場に及ぼす影響や波浪 - 海浜流解析における波・流れの相互作用の重要性について検討を行った. その結果, Two-Way Feedback を考慮することで線形の分散関係式を用いても浅水変形特性を改善できることがわかり, ほぼ 2 回の繰返しで計算は安定に収束する傾向にあることを示した.

1. はじめに

河口域や入江等の波と流れ (海浜流, 潮流, 河川流等) の共存場において, 両者の相互干渉を適切に評価することは, 対象領域周辺の底質移動や地形変化予測および航路の安全・維持管理を行う上で重要である (例えば, Jonsson, 1990). 従来, 両者の干渉は, ラディエーション応力を通じた波から流れへの影響評価 (Longuet-Higgins・Stewart, 1964), もしくは, ドップラー効果を考慮した波浪の分散関係式と波作用量平衡式を用いた流れから波への影響評価 (Chawla・Kirby, 2002; 間瀬ら, 2004) として, 一方向の干渉効果 (One-Way Feedback) で取り扱われることが多い. そのため, 双方向の干渉効果 (Two-Way Feedback) を検討した例は非常に少ない (挙げれば, Hass ら, 2003; Battjes, 2006). 本研究では, 波浪場と海浜流場の計算において, 相互の解析結果を取り込みながら反復することで, 波・流れの Two-Way Feedback を考慮した統合解析モデルを提案する. また, 室内実験結果との比較を通して, 海浜流の空間分布が波浪場に及ぼす影響や波浪 - 海浜流解析における Two-Way Feedback の重要性について検討を行う.

2. 波・流れの相互作用解析モデル

(1) 波浪変形モデル

逆流場でも安定した計算が容易である位相平均モデルを用い, 波作用量 (Wave Action) 平衡式に流れの影響を考慮した砕波限界式, 砕波減衰, 回折効果を組み込んだ, 間瀬ら (2004) の WABED モデルを拡張して用いる.

本研究で用いる波作用量平衡式は, 独立変数として平面位置座標 (x, y) , 波の伝播方向 (波向) θ を用いて, 式 (1) のように表される.

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\sigma} \times \left\{ (CC_s \cos^2 \theta N_g) - \frac{1}{2} CC_s \cos^2 \theta N_{gg} \right\} - \varepsilon_b N \cdots (1)$$

ここで, N は波作用量であり, $N = E/\sigma$ で定義される. E は波のエネルギー, σ は流れに相対的な角周波数であり, 絶対角周波数 ω , 波数 k , 流速 U , および全水深 h との間に以下の分散関係式を満たす.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh, \sigma = \omega - k \cdot U \cdots (2)$$

なお, 特性速度 C_x, C_y, C_θ , 回折項の影響係数 κ , 砕波によるエネルギー減衰係数 ε_b および砕波限界式の詳細については, 間瀬ら (2004) を参照されたい.

本研究では, 上記計算より得られた波高 (H)・波向 (θ)・位相速度 (C) の空間分布を用いて, 時間平均量として波運動が流れへ及ぼす影響をラディエーション応力および質量輸送フラックスとして次式で評価する (Svendsen, 1984; Hansen, 1990; Okayasu ら, 1986).

a) 砕波帯外のラディエーション応力: $S_{\alpha\beta}$

$$S_{\alpha\beta} = e_{\alpha\beta} S_m + \delta_{\alpha\beta} S_p \cdots (3)$$

ここで,

$$e_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

$$S_m = \frac{1}{16} \rho g H^2 (1 + G), S_p = \frac{1}{16} \rho g H^2 G,$$

$$G = \frac{2kh}{\sinh 2kh}$$

α, β はデカルト平面座標, δ はクロネッカーのデルタ, g は重力加速度, ρ は流体の密度である.

b) 砕波帯内のラディエーション応力: $S_{\alpha\beta}$

$$S_{\alpha\beta} = e_{\alpha\beta} \rho g H^2 \frac{C^2}{gh} \left[\frac{1}{8} + 0.06 \frac{h}{H} \right] + \delta_{\alpha\beta} \frac{1}{16} \rho g H^2 \cdots (4)$$

1 正会員 博(工) 熊本大学助教授自然科学研究科
2 正会員 修(工) 建設技術研究所東京本社ダム部
3 工博 河海大学助教授 海岸・海洋工学研究所
中国政府派遣研究員・京都大学招へい外国人学者
4 正会員 工博 京都大学助教授防災研究所

c) 碎波帯外の波に伴う質量輸送フラックス: Q_{wa}

$$Q_{wa} = \frac{1}{8} \frac{gH^2}{C} \frac{k_\theta}{k} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, $k_\theta = k(\cos \theta, \sin \theta)$ である.

d) 碎波帯内の波に伴う質量輸送フラックス: Q_{wa}

$$Q_{wa} = \frac{gH^2}{C} \frac{C^2}{gh} \left(\frac{1}{8} + 0.06 \frac{h}{H} \right) \frac{k_\theta}{k} \dots\dots\dots (6)$$

以降の検討に先立ち, 本波浪モデルの精度検証を室内実験との比較により行った. 実験は, 波の回折・反射が卓越し, 海浜流の影響が小さい, アメリカ陸軍工兵隊技術研究開発センターでの Natural Inlet 開口部周辺の波浪変形の実験結果を用いた (Lin・Demirbilek, 2005). その結果, 計算値は波高を相対誤差 20%, 波向を絶対誤差 7 度以内で再現でき, 他の位相平均モデル (STWAVE; Resio, 1981) に比べて, 波高の予測精度が高い事を確認した.

(2) 海浜流モデル

本研究では, 波・流れ共存場を含む広範囲の地形変化予測を最終目的としているため, 海浜流の計算では底面近傍の流速を含め, 比較的少ない計算労力で, 精度良く評価するモデルが望ましい. そこで, 本研究では SHORECIRC モデル (Putrevu・Svendsen, 1999; Svendsen ら, 2003) を採用した.

SHORECIRC モデルでは, 瞬時の流速変動 $u_\alpha(x, y, z, t)$ を式(7)のように4つの項に分離できると仮定する.

$$u_\alpha = u'_\alpha + u_{w\alpha} + V_{m\alpha} + V_{d\alpha} \dots\dots\dots (7)$$

ここで, u'_α は乱れ成分, $u_{w\alpha}$ は波浪成分, $V_{m\alpha}$ は水深方向に一樣な流れ成分, $V_{d\alpha}$ は水深方向に変化する流れ成分である. 波の周期で式(7)を時間平均すると, $\overline{u'_\alpha} = 0$, また, 波谷以下のレベルでは $\overline{u_{w\alpha}} = 0$ となる. ここで, 上付バーは時間平均を表す. 次に, 全質量輸送フラックスの時間平均値 $\overline{Q_\alpha}$ は式(8)で表されるので, 水深方向に一樣な流れ成分 $V_{m\alpha}$ を式(9)で定義する.

$$\overline{Q_\alpha} = \int_{-h_0}^{\zeta} \overline{u_\alpha} dz = \int_{-h_0}^{\zeta} (V_{m\alpha} + V_{d\alpha}) dz + Q_{w\alpha} \dots\dots (8)$$

$$V_{m\alpha} = \frac{\overline{Q_\alpha} - Q_{w\alpha}}{h} \dots\dots\dots (9)$$

ここで, h_0 は静水深, ζ は水位, $\bar{\zeta}$ は平均水位, $h = h_0 + \bar{\zeta}$ である. 従って, 水深方向に変化する流れ成分である $V_{d\alpha}$ は次式を満たす.

$$\int_{-h_0}^{\zeta} V_{d\alpha} dz = 0 \dots\dots\dots (10)$$

SHORECIRC の基礎方程式は, 連続の式と Reynolds 方程式を水深方向に積分した式(11)と(12)で表され, $\bar{\zeta}$ と $\overline{Q_\alpha}$ のみを未知量として取り扱う.

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{Q_\alpha}}{\partial x_\alpha} = 0 \dots\dots\dots (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{Q_\alpha}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\frac{Q_\alpha \overline{Q_\beta}}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left[\int_{-h_0}^{\zeta} V_{d\alpha} V_{d\beta} dz \right. \\ \left. + \int_{\zeta}^{\zeta} (u_{w\alpha} V_{d\beta} + u_{w\beta} V_{d\alpha}) dz \right] + gh \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x_\alpha} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho} + \frac{\tau_\alpha^b}{\rho} \\ + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left(S_{\alpha\beta} - \frac{Q_{w\alpha} Q_{w\beta}}{h} - \int_{-h_0}^{\zeta} T_{\alpha\beta} dz \right) = 0 \dots\dots (12) \end{aligned}$$

ここで, T は Reynolds 応力, τ^s は水表面摩擦応力, τ^b は底面摩擦応力であり, これらの項の取り扱いについては, Hass ら (2003) を参照されたい.

さて, 式(12)の左辺の第3・4項は, 海浜流が水深方向に変化すること起因した流れ・流れの相関項と波・流れの相関項であり, このままでは方程式系は閉じない. SHORECIRC モデルでは, これらの項を分散項と類似の形式で表現し, 分散係数に含まれる多重積分項を底面からの距離に応じた多項式関数 (形状関数) で解析的に近似するところに特徴がある. そのため, 水平流速の鉛直分布は, 水深一様な平面2次元の計算結果に解析解 (水深方向に変化する成分) を重ね合わせることで求め, その計算負荷は平面2次元モデルとほぼ同等である.

3. 解析結果

(1) 海浜流の空間分布が波浪場に及ぼす影響評価

波浪変形予測において海浜流の空間分布を考慮する重要性を検討するために, 縮尺 1/125 の現地模型実験結果 (鄭ら, 2006) と比較・検討した. 入射波の諸元は, 有義波高 $(H_{1/3})_0 = 7.26$ cm (現地スケール 9.0 m), 有義波周期 $(T_{1/3})_0 = 1.21$ s (現地スケール 13.5 s) の単一方向不規則波 ($S_{max} = 200$) である. 計算は, 海浜流を考慮せず波浪変形予測を行った場合 (No Feedback) と海浜流場の存在を考慮した場合 (One-Way Feedback) の2通りを実施した.

図-1a) は波高・海浜流の空間分布の実験結果を示す. $x = 0$ m が入射波を与えた位置であり, 入射波の波向きは, y 軸に垂直である. 波高および流れは平面的に 1 m 間隔で計測し, 図中の数値は各地点の有義波高を $(H_{1/3})_0$ で除した無次元波高である. また, 流れは, それぞれの設置水深の中央で計測し, サンプリング間隔は 20 Hz, 海浜流は 300 秒間の平均値として算出した. 図より離岸流が顕著に発生する $x = 4 \sim 9$ m, $y = 5 \sim 7$ m 付近で波高の集中が確認できる. b) 図は海浜流を考慮せずに(1)式を用いた波浪変形の計算結果を示す. 実験結

果とは大きく異なり、波高の集中は見られず、全体的に様な波高分布である。c) 図は、式(1)に計測値に基づいた海浜流の空間分布を考慮した場合の計算結果である。No Feedback の結果と比較すると、 $x=7\sim 9\text{ m}$ 、 $y=6\sim 7\text{ m}$ 付近で波高の集中が再現されており、実験状況を定性的に再現している。なお、本計算の碎波減衰項には Chawla・Kirby (2002) を用いたが、 $H_{1/3}/h < 0.8$ の領域では碎波減衰を考慮していない。

図-2 は、定量的な計算精度を検証するために、図-1a) の A-A' (沿岸方向)、B-B' (岸沖方向) ライン上での波高分布を比較した図である。図より海浜流分布を考慮することが波浪場の予測精度向上に重要であることが定量的にも確認できる。なお、碎波点に至る浅水変形を過小評価する傾向 (図-2b) の $x=4\sim 9\text{ m}$ が

れるが、この一つの要因として、逆流中を伝播する波浪の波高増大に伴う非線形性を考慮してことが考えられる。Chawla・Kirby (2002) は非線形の分散関係式を用いることで、波作用量平衡式での浅水変形特性を改善したが、逆流が強くなると非線形分散関係式の数値解の安定性には問題が残る。そこで次節では、線形の分散関係式(2)を用い、波・流れの相互作用 (Two-Way Feedback) を考慮することによる計算精度の改善効果について検討する。

(2) 波・流れ共存場での Two-Way Feedback の重要性

本研究で提案する Two-Way Feedback の計算手順を要約すると、以下の通りである。

① まず海浜流を考慮しない状態 (全領域で速度場がゼ

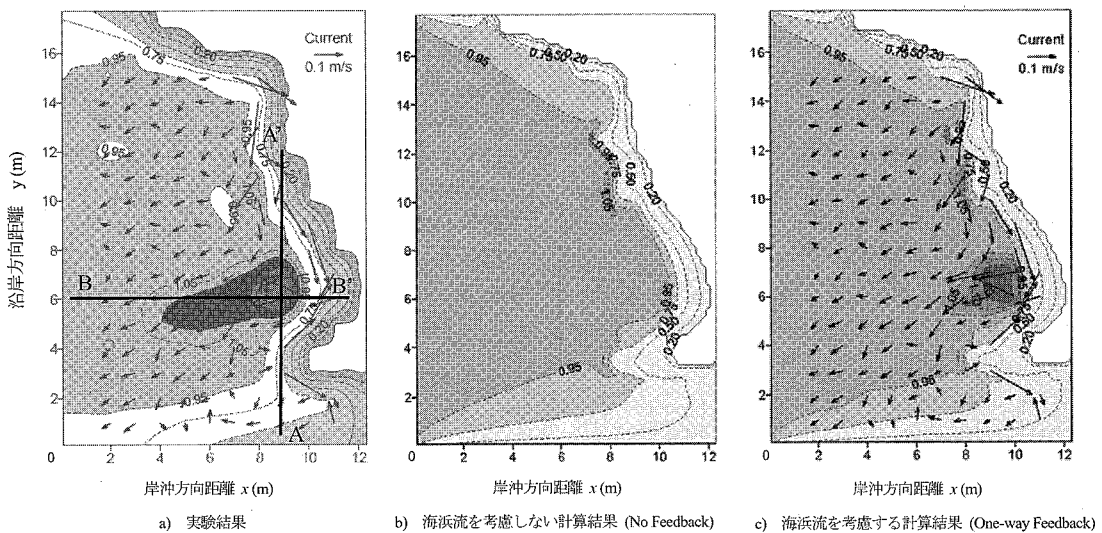


図-1 無次元波高と海浜流の空間分布

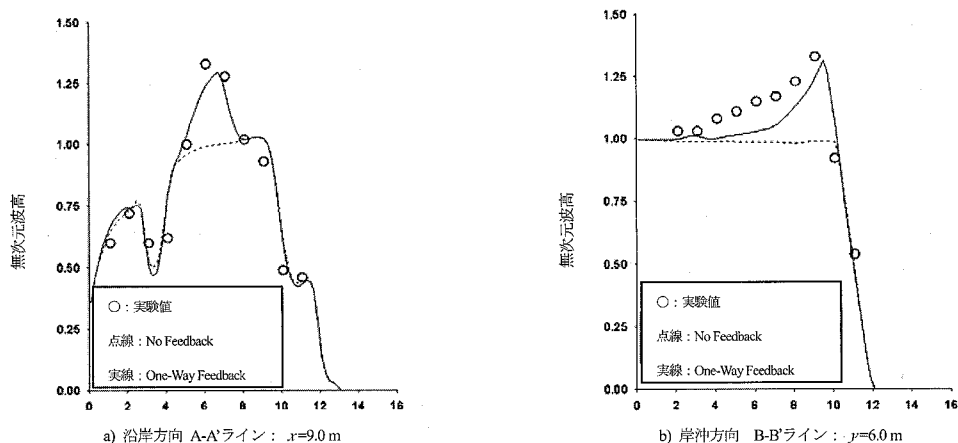


図-2 無次元波高の沿岸・岸沖分布の実験結果と計算結果の比較

- ロ)で、沖側境界から入射波を与え、WABED モデルにより波浪場の計算を行う (No Feedback).
- ②手順①で得られた波高・波向・波速の空間分布からラディエーション応力および波による質量輸送フラックスを求め、SHORECIRC モデルの入力条件とし、定常状態に達するまで海浜流場の計算を行う (One-Way Feedback).
- ③手順②で得られた海浜流場を入力条件として考慮し、再度、沖側から入射波を与え、WABED モデルにより波浪場の計算を行う。
- ④手順③で得られた波高・波向・波速の空間分布からラディエーション応力および波による質量輸送フラックスを求め、SHORECIRC モデルの入力条件とし、定常状態に達するまで海浜流場の計算を行う。

本研究では、相互の解析結果を取り込みながら反復する手順③と④の計算過程を Two-Way Feedback と定義する。これ以降の説明では、この繰り返し回数を Two-Way Feedback の回数として使用している。

本節では、LSTF (Large-scale Sediment Transport Facility) を用いた固定床上の実験結果 (Hamilton・Ebersole, 2001) との比較により、本手法の計算精度を検証する。この水槽には沖側 4 台の造波板に加えて、両側境界にそれぞれ 20 台のポンプを設置し、流出・流入量を独立に調整することで、定常な波浪・海浜流場を長時間継続できる (図-3)。そのため、波・流れ共存場における本計算手法の基本性能の検証に最適と判断した。比較に用いた入射波の条件は波高が 0.182 m, 周期 2.5 s, 角度 10° の規則波であり、Hamilton・Ebersole (2001) の実験ケース 6N である。

図-4 は、水槽中央の B ラインに沿った波高の岸沖分布を比較したものである。海浜流の影響を考慮しない場合 (No Feedback) と比べて、海浜流を考慮した場合は、沖側から碎波点までの波高が増大し、実験結果に近づくことが分かる。海浜流場の実験結果では、沿岸方向成分が卓越しているが、岸沖方向には沖側、つまり逆流が存在しており、図は示していないが、計算でも同様の分布を再現できた。これより、波・流れの相互作用を考慮することで、線形の分散関係式を用いても浅水変形特性を改善できることがわかった。さらに、Two-Way Feedback を繰り返しても波浪場の計算結果は安定しており、ほぼ 2 回の繰返しで収束する傾向にあることが確認できる。

図-5 は A~D ラインに沿った沿岸流速の岸沖分布を比較した結果である。海浜流場の算定精度は No Feedback においても比較的良好であるが Two-Way Feedback を繰り返すことで、特に、碎波点付近 ($x=9.5\sim 12$ m) の沿岸流速が増大し、実験結果の再現性が向上して

いることがわかる。また、計算の安定性は良好であり、計算の収束性もほぼ 2 回の繰返しで十分である。以上の結果より、波・流れ共存場の解析において、Two-Way Feedback を考慮することで、特に碎波帯付近での波浪—海浜流場の解析精度を向上可能であることが示された。

最後に、B ラインに沿った岸沖方向流速の鉛直分布を比較した結果を図-6 示す。計算結果は Two-Way Feedback を 3 回繰り返した結果であり、各測点での垂線は速度ゼロを示す。実験では碎波後、特に $x=12$ m 以浅で undertow が発達し、海浜流の水深非一様性が顕著である。計算でも定性的にその分布をよく再現しているが、定量的には過大評価する傾向にある。これは、碎波点前後で位相速度が増大・減少する特性を考慮しておらず、波による質量輸送フラックスを過大評価することが原因と考えられ、今後のモデル修正の課題である。

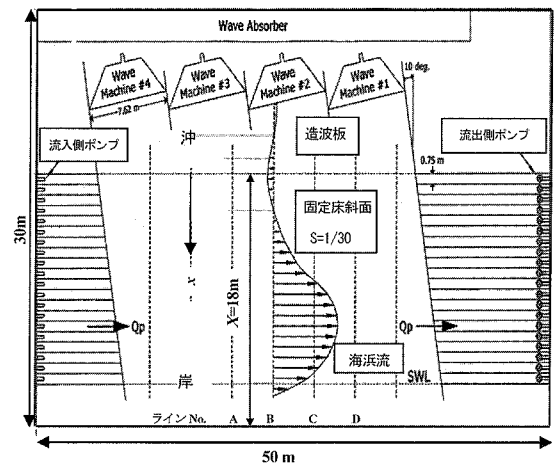


図-3 LSTF の水槽諸元
(アメリカ陸軍工兵隊技術研究開発センター)

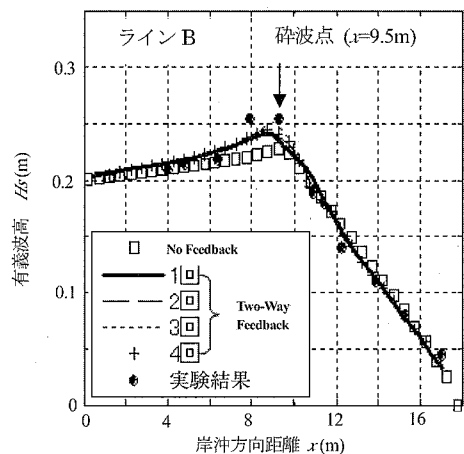


図-4 波高の実験結果と計算結果に関する岸沖分布の比較

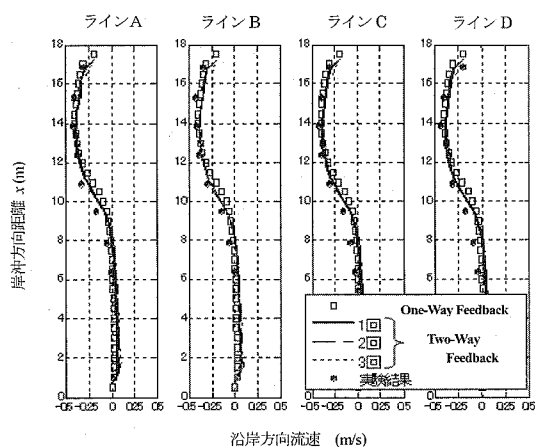


図-5 沿岸方向流速の岸沖分布に関する比較

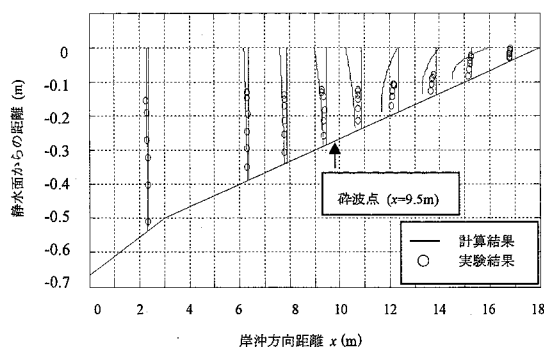


図-6 岸沖方向流速の鉛直分布 (B ライン上計算結果)

4. ま と め

本研究では、波浪・海浜流場の計算において、相互の解析結果を取り込みながら反復する Two-Way Feedback を考慮した統合解析モデルを提案した。また、室内実験との比較より、海浜流の空間分布が波浪場に及ぼす影響や波浪-海浜流解析における Two-Way Feedback の重要性について検討を行った。主な結論は以下のとおりである。

- 1) 海浜流を考慮しない場合 (No Feedback) と海浜流場から波浪場への One-Way Feedback を考慮した場合の 2通りの計算結果を現地模型実験結果と比較した結果、海浜流の空間分布を考慮することが、波浪場の予測精度向上に重要であることを定量的に示した。
- 2) 計算結果を Large-scale Sediment Transport Facility における定常海浜流場の実験結果と比較し、線形の分散関係式を用いても、波・流れの相互作用 (Two-Way Feedback) を繰り返し考慮することで、沖側から砕波点までの浅水変形特性が改善し、波高分布の再現性が向上することを示した。

3) 沿岸方向の海浜流分布を比較した結果、Two-Way Feedback を繰り返すことで、砕波点付近の沿岸流速が増大し、実験結果の再現性が向上すること、さらに、Two-Way Feedback における計算の収束性は、波浪・海浜流ともに 2 回程度の繰返しで十分であることを確認した。

謝辞：本研究を行うに際し、関西電力(株)電力中央研究所の目見田 哲博士、アメリカ陸軍工兵隊技術研究開発センターの Zeki Demirbilek 博士、Jane Smith 博士にご協力いただきましたことを付記し、ここに謝意を表する。なお、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)および鹿島学術振興財団の補助を受けて実施したものであることを付記する。

参 考 文 献

- 鄭 金海・間瀬 肇・目見田 哲(2006)：流れの場における砕波減衰モデルの多方向不規則波浪変形理論への導入とその検証，海工論文集，第53巻（印刷中）
- 間瀬 肇・由比政年・雨森洋司・高山知司(2004)：波・流れ共存場における砕波および回折効果を考慮した位相平均波浪変形予測モデルの構築，海工論文集，第51巻，pp.6-10。
- Battjes, J. A. (2006) : Developments in coastal engineering research, Coastal Engineering, Vol. 53, pp. 121-132.
- Chawla, A. and J. T. Kirby (2002) : Monochromatic and random wave breaking at blocking points, J. Geophysical Research, Vol. 107, No. C7, pp.(4-1)-(4-19).
- Hamilton, D. G. and B. A. Ebersole (2001) : Establishing uniform longshore currents in a large-scale sediment transport facility, Coastal Engineering, Vol. 42, pp. 199-218.
- Hansen, J. B. (1990) : Periodic waves in the surf zone: Analysis of experimental data, Coastal Engineering, Vol. 14, pp. 19-41.
- Hass, K. A., I. A. Svendsen, M. C. Haller, and Q. Zhao (2003) : Quasi-three-dimensional modeling of rip current systems, J. Geophysical Research, Vol. 108, No. C7, pp. (10-1)-(10-21).
- Jonsson, I. G. (1990) : Wave-current interactions, The Sea, Vol. 9 (A), ed. by Mehaute, B. L. and D. M. Hanes, John Wiley, pp. 65-120.
- Lin, L. and Z. Demirbilek (2005) : Evaluation of two numerical wave models with inlet physical model, J. Water, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 131, pp. 149-161.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1964) : Radiation stresses in water waves; a physical discussion with applications, Deep-Sea Research, Vol. 11, pp. 529-562.
- Okayasu, A., T. Shibayama, and N. Mimura (1986) : Velocity field under plunging breakers, Proc. 20th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, pp. 660-674.
- Putrevu, U. and I. A. Svendsen (1999) : Three-dimensional dispersion of momentum in wave-induced nearshore currents, Eur. J. Mech., B/Fluids, Vol. 18(3), pp. 409-427.
- Resio, D. T. (1981) : The estimation of wind-wave generation in a discrete spectral model, J. Physical Oceanography, Vol. 11, pp. 510-525.
- Svendsen, I. A. (1984) : Mass flux and undertow in a surf zone, Coastal Engineering, Vol. 8, pp. 347-365.
- Svendsen, I. A., W. Qin, and B. A. Ebersole (2003) : Modeling waves and currents at the LSTF and other laboratory facilities, Coastal Engineering, Vol. 50, pp. 19-45.