

浅海域の水面波形と底面流速波形の非対称特性

武 若 聡*・入 江 功**・深川 孝之***

1. 緒 言

岸沖漂砂はこれまで主に底面流速変動の強度を表すシーلز数をベースに整理されてきたが、最近ではこれに底面流速波形の非対称性に関する情報を加味して漂砂の予測精度を向上させる機運が高まっている（例えば、石田ら、1988；Dibajnia・渡辺、1991；橋本ら、1993）。

本研究は漂砂の予測精度向上に資することを念頭におき、浅海域における水面波形と底面流速波形の非対称性を調べる。入射波条件を幅広く変化させた実験を行い、浅水・砕波変形に伴う波形の変化を測定した。また、Boussinesq 方程式を用いて入射波条件と底面勾配を変化させた数値計算を行った。以上の両者の結果から浅海における波形の非対称性の変化特性を論じる。

2. 波形の非対称性の定義

本研究では規則波を対象とする。実験ならびに数値計算から得られる水面と底面流速波形の非対称性を、図-1に示すように、上下方向には S_1 、前後方向には S_2 というパラメータで表す。図中の記号を用いると

$$S_1 = (H_c - H_b) / H \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$
$$S_2 = (T_r - T_f) / T \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

である。 H_c 、 H_b は波形の平均値から測った峰と谷の高さである。 S_1 、 S_2 ともに正弦波では 0 となり、非線形効果が現れ、波形が尖る、あるいは前方に傾くとこれらの値は大きくなる ($0 \leq S_1, S_2 < 1$)。

波形の非対称性を表すのに頻繁に用いられるパラメータ(合田, 1990)である skewness (尖り度), atiltness (前傾度) と S_1 , S_2 の関係を調べた。クノイド波を幾何学的に前傾化させることにより、所定の非対称性 (S_1 , S_2 の値を指定) を有する波形を作成し、これの skewness と atiltness を求めた。図-2 に S_1 あるいは S_2 を固定し、他方を変化させた波形の非対称性を求めた結果を示す。 S_1 , S_2 と skewness, atiltness は類似の変化傾向にあり、 S_1 ,

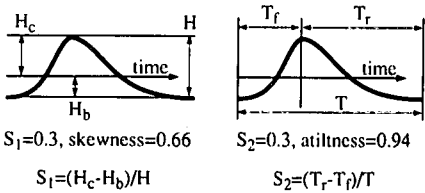


図-1 波形の非対称性 S_1 , S_2 の定義

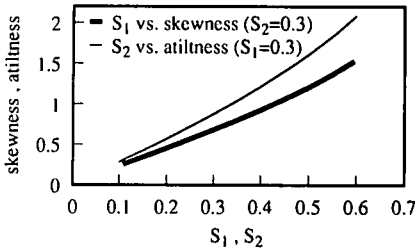


図-2 S_1 , S_2 と skewness, atiltness の関係

表-1 入射波の条件

Run	T (s)	H_{in} (m)	H_0/L_0	砕波形式
1	2.0	0.037	0.006	plunging
2	2.0	0.076	0.012	plunging
3	1.7	0.073	0.018	plunging
4	1.5	0.072	0.022	plunging
5	0.9	0.042	0.036	spilling
6	1.0	0.066	0.046	spilling
7	1.0	0.081	0.055	spilling
8	1.0	0.083	0.061	spilling

T: 周期, H_{in} : 一様水深部波高, H_0/L_0 : 換算沖波波形勾配

S_2 は波形の非対称性を論じるのにふさわしいパラメータであると判断される。

3. 水面波形と底面流速波形の非対称性の測定

(1) 実験の概要

実験は長さ 28 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.5 m の二次元造波水路の一端に 1/20 勾配の木製斜面を設置して行った。一様水深部の静水深を 0.3 m に設定し、表-1 に示す条件の波を発生させた。水面変位 η を容量式波高計、底面上 5 mm の水平方向流速変動 u_b をレーザードップラー流

* 正会員 工博 九州大学助手 建設都市工学科
** 正会員 工博 九州大学教授 建設都市工学科
*** 工修 清水建設(株) 土木本部

速計で計測し、データレコーダにサンプリング周波数 100 Hz で記録した。 η と u_b は同位置で測定し、斜面の始点から碎波点までの間は波長の 1/8 程度の間隔で、碎波点から汀線までの間は 0.1 m 間隔で測った。

(2) 実験結果

測定記録を波動成分と定常成分に分離し、波動成分から位相平均波形を求め、これの S_1 , S_2 を求めた。これ以降、 S_1 , S_2 に添え字 η , u を加えた場合には、それぞれ水面と底面流速変動の非対称性を指すこととする (例: $S_{1\eta}$, S_{2u})。

実験結果を概観し(後の図-7, 8 参照), また、これまでに行われてきた研究を検討した結果, 本研究では S_1 , S_2 の岸沖分布特性を, a) 斜面開始点から碎波点までの浅水域, b) 碎波点から岸側の碎波帯, に分けて整理することとした。

a) 浅水域

関根・服部 (1985), 桂川・服部 (1988) は浅水域の波形変形特性を skewness, atiltness の観点から, 佐藤・鈴木 (1990) はフーリエ成分の振幅・位相の相対的な変化の観点からそれぞれ調べている。いずれの研究においても波形変形特性を波の非線形性を記述するパラメータであるアーセル数, あるいは合田 (1990) の Π を用いて整理している。ここではアーセル数 $U_r (=HL^2/h^3, H$: 波高, L : 波長, h : 水深) を整理パラメータとして採用し, 浅水域変形に伴う S_1 , S_2 の変化を見る。

図-3 に S_1 と U_r の関係を示す。 $S_{1\eta}$ は S_{1u} に比較して大きな値となる。浅水域変形に伴い S_1 は増加するが, その状況は入射波の換算沖波波形勾配 H_0/L_0 により異なる。

図-4 に S_2 と U_r の関係を示す。 $S_{2\eta}$ は S_{2u} に比較して大きい, S_1 の場合に比べてその差は小さい。 S_2 は $U_r < 25$ 以下では 0 とみなせる。また, S_2 の $U_r \geq 25$ での増加には H_0/L_0 に対する依存性はない。

以上の浅水域における波形の非対称性の変化の特徴は関根・服部 (1985), 桂川・服部 (1988), 佐藤・鈴木 (1990) の研究に示されている実験結果からも読み取れる。

栗山ら (1990), Doering・Bowen (1995) が現地波浪の波形の非対称性について報告している。これらの研究では浅水域, 碎波帯における波形の非対称特性が Π , U_r の非線形パラメータを用いて整理されている。整理された結果のばらつきは現地波浪が対象であるために大きい, いずれの研究にも S_2 に相当する量のばらつきが S_1 に相当する量のばらつきに比べてかなり小さく現れている。これは不規則波浪場の波形の前傾化現象(S_2 の変化)も非線形パラメータのみを用いて整理し得ることを示唆している。

b) 碎波帯

碎波帯における S_1 , S_2 は佐藤・鈴木 (1990) を参考に

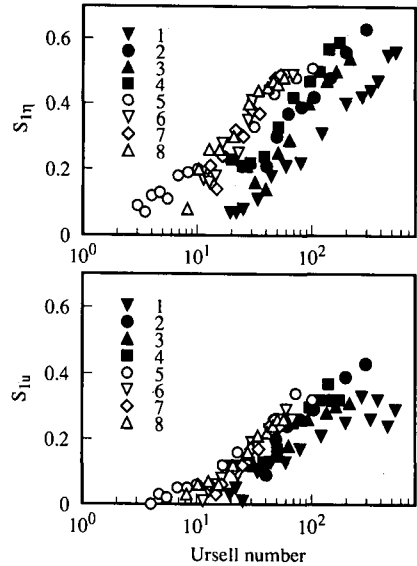


図-3 浅水域の S_1 の変化

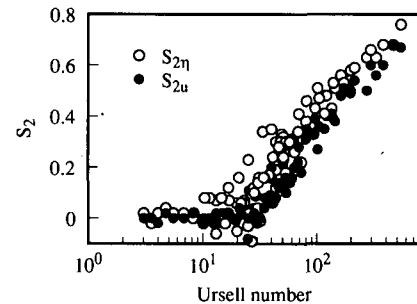


図-4 浅水域の S_2 の変化

し, 碎波帯内における相対的な位置 x/x_b (x : 汀線からの距離, x_b : 碎波帯幅) をパラメータとして整理した。 S_1 , S_2 の碎波帯内の変化は碎波形式に依存していた。

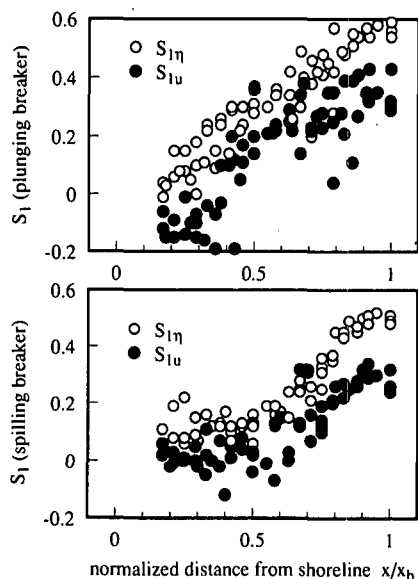
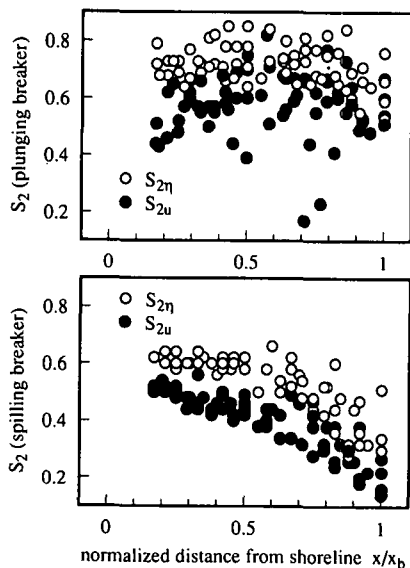
図-5 に S_1 の変化を示す。碎波後, 波形の上下方向の非対称性は波が進行するのに伴い小さくなる。Spilling 形式の碎波では碎波直後に S_1 が急減する。

図-6 に S_2 の変化を示す。Plunging 形式の碎波では浅水域変形過程ですでに波形が前傾しており (碎波点で $S_{2\eta} \approx 0.6$), 碎波後も前傾化した状態を維持する。これに対して Spilling 形式の碎波では碎波後に波形の前傾化が始まる。

以上に示したように, 碎波帯内の波形の非対称特性の変化と碎波形式に密接な関連がある。しかしながら, 現状では碎波により発生する渦, ボア等と波形変化についての系統的な理解は得られていない。

4. 碎波帯内外の波浪の数値計算

浅海域の波動場を Boussinesq 系の方程式を用いて計

図-5 碎波帯の S_1 の変化図-6 碎波帯の S_2 の変化

算した。先ず3章に記した実験に対応した斜面勾配 1/20 の計算を行いその精度を検討した。続いて斜面勾配 1/15, 1/30, 1/40, 1/50 についての計算を行い、入射波の波形勾配と斜面勾配の変化に伴う S_1 , S_2 の変化を調べた。

(1) 数値計算の概要

数値計算には分散関係を改善した修正 Boussinesq 方程式 (Schäffer・Madsen, 1995) を用いた。Staggered scheme を採用し、方程式系を時空間方向に差分化した。非線形項の取り扱い喜岡・柏原 (1995) になった。

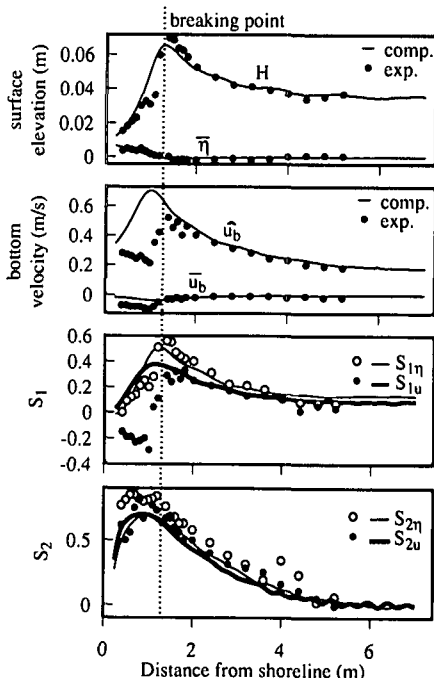


図-7 計算結果 (実験 Run 1, 斜面勾配 1/20)

沖側境界では1次のクノイド波を入射させた。計算を進めながら斜面上で碎波・非碎波を判定し、碎波点より岸側では勾配拡散型の碎波減衰項 (片山・佐藤, 1993) を運動量方程式に加えた。岸側には水深 0.015 m の一様水深領域を設定し、ここでは運動量方程式に抵抗項を加えて波を減衰させた。

計算は沖側の一様部の水深 h を 0.3 m に設定し、底面勾配を 1/15, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50 と変化させて行った。入射波条件は実験 Run 1~8 にあわせて設定し、総計 40 組の計算結果を得た。

(2) 計算精度の検討

斜面勾配を変化させた計算を行う前に、計算結果の精度を底面勾配 1/20 の実験結果 (3 章) を用いて検討した。Boussinesq 系の方程式系は、計算対象となる波の性質が長波性の波 (方程式系を導く際の前提) とみなせなくなると、位相速度、群速度 (= 浅水変形特性) の再現性が悪くなる (Schäffer・Madsen, 1995)。このことは h/L_0 ($L_0 = gT^2/2\pi$, g : 重力加速度) の値の大小により判断され、この値が大きくなると方程式系の適用性が悪くなる。ここには、実験 Run 1 ($h/L_0 = 0.048$) と最も方程式系の適用が厳しくなることが予想される実験 Run 5 ($h/L_0 = 0.237$) を追算した結果を示す。

図-7 に実験 Run 1 に対応する計算結果を示す。浅水域における、波高 H 、平均水位 $\bar{\eta}$ 、底面流速全振幅 $\bar{u}_b$ 、平

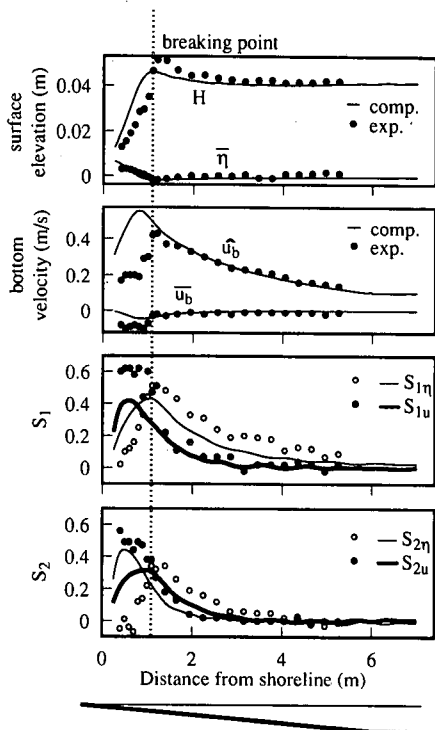


図-8 計算結果 (実験 Run 5, 斜面勾配 1/20)

均流速 $\bar{u}_b$, S_1 , S_2 の計算値は実験結果と良好に一致した。また、実験波形と計算波形の位相関係の合致も良好であった。これに対して、碎波帯内では H , $\bar{\eta}$, $S_{1\eta}$, $S_{2\eta}$ の計算値は実験結果とおおむね一致したもの、 $\bar{u}_b$, $\bar{u}_u$, S_{1u} の再現性は悪かった。この原因は、碎波減衰モデルが適当でないこと、複雑な鉛直構造をもつ流速場を単純な流速分布で表現していること、等にある。

図-8 に実験 Run 5 に対応する計算結果を示す。浅水域における実験と計算結果の一致は Run 1 の場合に比較してやや劣ったものの、容認できる範囲にあった。碎波帯の計算については上述と同様に不一致が目立った。

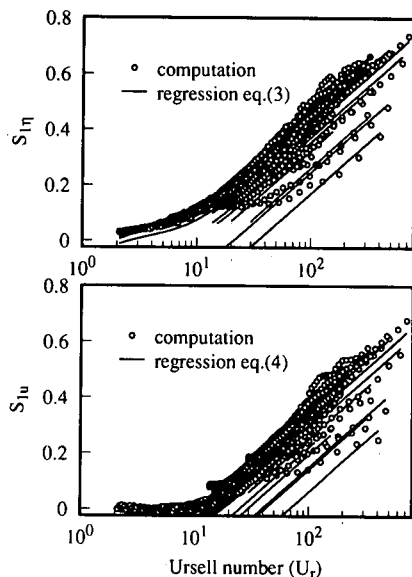
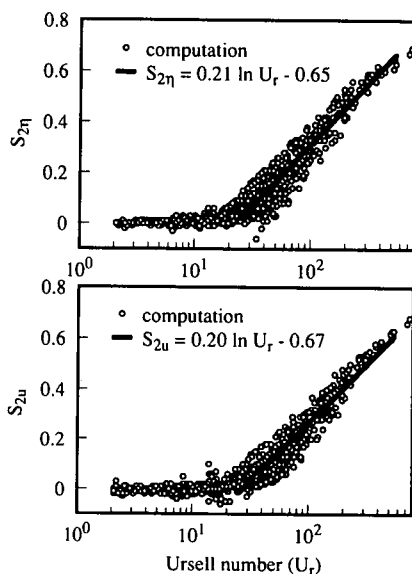
この他に、Madsen・Warren (1984), Kabiling・Sato (1993) の実験結果を用いて勾配 1/40, 1/30 の計算の精度を検討した。計算と実験結果は上述と同じ程度で一致した。

以上に述べたように数値計算による碎波帯内の水理現象の再現性には問題がある。次章では浅水域の計算結果を用いて波形の非対称特性を論じる。

5. 浅水域の水面波形と底面流速波形の非対称特性

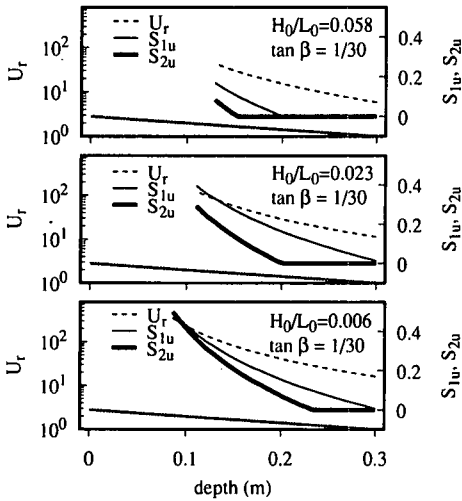
(1) 波形の上下の非対称性 S_1

浅水域の S_1 と U_r の変化を 40 組の全計算結果について示したのが図-9 である。表示の都合上、全結果を同一

図-9 浅水域の S_1 の変化 (計算結果)図-10 浅水域の S_2 の変化 (計算結果)

の記号で表してある。

S_1 と U_r の変化を個々の計算結果について詳しく検討したところ、実験結果と類似した特徴が見られた。すなわち、 $S_{1\eta}$ は S_{1u} に比較して大きな値をとり、また、浅水変形に伴う S_1 の増加状況は入射波の H_0/L_0 、底面勾配 $\tan \beta$ により異なった。 H_0/L_0 が同一の時は $\tan \beta$ が小さくなる程、また、 $\tan \beta$ が同一の時は H_0/L_0 が大きくなる程、 S_1 はより大きな値をとる。以上の $S_{1\eta}$, S_{1u} の変化を表す回帰式は

図-11 浅水域の S_{1u} , S_{2u} の変化

$$\left. \begin{aligned} S_{1v} &= 0.16 \ln U_r + C_v(1 - e^{-0.25 U_r}) \\ C_v &= -0.25 - 0.5 \frac{H_0}{L_0} - 0.45 e^{\frac{H_0}{L_0} (78 - \frac{9.3}{\tan \beta})} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{1u} &= 0.16 \ln U_r + C_u(1 - e^{-0.25 U_r}) \\ C_u &= -0.34 - 1.7 \frac{H_0}{L_0} - 0.45 e^{\frac{H_0}{L_0} (102 - \frac{10.4}{\tan \beta})} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (4)$$

であり、これらを図中に実線で示した。 H_0/L_0 が小さい時、また、 $\tan \beta$ が大きい時の一致がやや悪い。

(2) 波形の前後の非対称性 S_2

浅水域の S_2 と U_r の変化を 40 組の全計算結果について示したのが図-10 である。 S_{2v} は S_{2u} に比較して大きい。また、 S_2 は $U_r < 25$ では 0 とみなせ、 $U_r \geq 25$ での増加には H_0/L_0 , $\tan \beta$ に対する依存性は見られなかった。 $U_r \geq 25$ での S_{2v} , S_{2u} の変化を表す回帰式は

$$S_{2v} = 0.21 \ln U_r - 0.65 \cdots \cdots (5)$$

$$S_{2u} = 0.20 \ln U_r - 0.67 \cdots \cdots (6)$$

であり、これらを図中に実線で示した。

(3) 浅水域の波形の非対称性

砕波点までの浅水変形に伴う波高変化と U_r の変化は首藤 (1974) の浅水変形理論により求められるので、浅水域の S_1 , S_2 の分布は容易に求まる。図-11 に H_0/L_0 が異なる実験室規模の波の浅水変形に伴う S_{1u} , S_{2u} , U_r の砕波に至るまでの変化を示す。 H_0/L_0 が小さい波では波形変化に占める S_{2u} の割合が浅水変形の早い段階で大きくなるのが特徴的である。

海浜の性状は定性的には入射波の H_0/L_0 が大きいときに欠壊型、小さい時に堆積型になるとされている (例えば、清水, 1995)。岸沖漂砂における流速波形の非対称性の効果の評価は現時点では定まっていないものの、 H_0/L_0 により異なる海浜の性状と浅水域の S_{1u} , S_{2u} の変化特性の間には何らかの関連があると考えられる。

6. 結 語

本研究では漂砂の予測精度向上に資することを念頭におき、浅海域における水面波形と底面流速波形の非対称性を調べた。実験を行い、浅水・砕波変形に伴う水面波形と底面流速波形の非対称性 S_1 , S_2 の変化を調べた。Boussinesq 系の方程式を用いた浅水・砕波変形の数値計算を行い、実験結果を用いてその計算精度を詳しく調べた。計算結果を用い、入射波と底面勾配が変化した場合の波形の非対称特性を調べ、浅水域における S_1 , S_2 の変化を表す式を定めた。

参 考 文 献

- 石田 昭・浅井 功・川合正恭・喜岡 渉 (1988): 波動場の歪みを考慮に入れた岸沖漂砂量公式, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 312-316.
- 片山裕之・佐藤慎司 (1993): Boussinesq 方程式を用いた不規則波の浅水・砕波変形の計算法, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 16-20.
- 桂川哲行・服部昌太郎 (1988): 浅水波動場の計算法, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 73-77.
- 喜岡 渉・柏原謙爾 (1995): 高次 Boussinesq 方程式とそのステップ地形への適用性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 166-170.
- 栗山啓昭・加藤一正・磯上知良 (1990): 砕波位置近傍での流速波形の非線形性と岸沖漂砂量, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 284-288.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版, pp. 210-214.
- 佐藤慎司・鈴木秀典 (1990): 砕波帯における底面流速変動波形の評価法, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 51-55.
- 清水隆夫 (1995): 縮尺効果を考慮した海浜変形実験手法とその現地適用性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 621-625.
- 首藤伸夫 (1974): 非線形長波の変形, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 57-63.
- 関根義和・服部昌太郎 (1985): 波動理論の適用範囲に関する実験的研究, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 11-15.
- Dibajnia Mohammad・渡辺 晃 (1991): 非対称振動流によるシートフローの発生と漂砂量, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 236-240.
- 橋本誠也・入江 功・村上啓介・小野信幸・小島治幸 (1993): モンテカルロ法を用いた海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 366-370.
- Doering, J. C. and A. J. Bowen (1995): Parametrization of orbital velocity asymmetries of shoaling and breaking waves using bispectral analysis, Coastal Eng., Vol. 26, pp. 15-33.
- Kabiling, M. B. and S. Sato (1993): Two-dimensional nonlinear dispersive wave-current and three-dimensional beach deformation model, Coastal Eng. in Japan, Vol. 36, pp. 195-212.
- Madsen, P. A., and I. R. Warren (1984): Performance of a numerical short-wave model, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 73-93.
- Schäffer, H. A. and A. Madsen (1995): Further enhancements of Boussinesq-type equations, Coastal Eng., Vol. 26, pp. 1-14.