

砕波帯における底面流速変動波形の評価法

佐藤 慎司*・鈴木 秀典**

1. 序 論

砕波帯における波の波形や流速変動を予測することは、砕波帯の波・流れの力学的機構や漂砂現象を理解するうえで重要な問題の一つである。砕波帯の波浪・流速場についてはレーザ・ドップラ流速計を用いた室内実験や緩勾配方程式を用いた数値計算などにより、データの集積とモデル化が進められている。しかし、波の非対称性や遡上域の予測まで含めた波浪変形モデルの開発は未だ十分とは言えない。

波の非線形性を考慮した数値計算は、主として浅水理論の運動方程式を用いて行われてきた。Hibberd・Peregrine (1978) は、浅水理論の運動方程式を散逸型の Lax-Wendroff 法で解き、遡上を含めた波の変形を計算した。Madsen・Svendsen (1983, 1984) は、ボアを表面付近の乱流領域とその下部のポテンシャル流領域に分割し、浅水理論の運動方程式を乱流モデルと組み合わせて解くことによりボアの形状を含めてその進行を計算できることを示した。また、Kobayashi ら (1989) は、Hibberd・Peregrine (1978) と同様の手法により、様々な条件における波の変形と遡上波の数値計算を行なっている。これらの浅水理論に基づく計算では、Kobayashi ら (1989) も述べている様に、砕波帯外で波の分散性が無視できない領域における計算精度が低いことと、ボアの手前で数値的な不安定が起こりやすいことが問題である。

波の非線形性に加えて分散性をも考慮した運動方程式は Boussinesq によって導かれ、その後 Peregrine (1967) や後藤 (1984) により適用条件が拡張された。非線形分散波理論を用いた波の計算例としては、非砕波条件に対して Abbot ら (1978), Madsen・Warren (1984), 長尾ら (1985) があり、砕波帯を含む条件では Basco (1983), 榎木ら (1985) が挙げられる。

斜面上の波の変形を計算するには、遡上先端部で特別の取扱いが必要となる。先に述べた Hibberd・Peregrine (1978) の計算では、波先端の位置と流速を外挿により求

め、運動量方程式と組み合わせて繰り返し計算をする方法が用いられている。また、岩崎・真野 (1979) は、遡上域の地形を数値計算の格子に合わせて階段状に近似することにより、波の遡上を計算できることを示した。さらに厳密な先端条件としては後藤・首藤 (1979) や Takeda (1987) によるものなどが提案されており、これらの比較も後藤・首藤 (1980) によってなされている。

これらの数値計算手法の改良と信頼度の高いデータの蓄積を背景として、本研究では特に砕波帯における表面波形と底面流速波形に注目し、従来の計測結果の統一的な整理を試みた。さらに波の非線形性と分散性を考慮した波浪変形の数値モデルを提案し、入射波の条件から砕波帯内の波浪・流速場を予測するモデルを構築することを目的とした。

2. 波形のフーリエ級数展開

砕波帯内外における規則波の水位と底面流速の同時計測データを収集し、同位相平均波形を評価した。解析の対象としたのは、Sato ら (1988), Okayasu ら (1988), Sato ら (1989) のデータで、斜面勾配 $s=1/40 \sim 1/20$, 周期 $T=0.99 \sim 3.3$ s の条件で、すべて容量式波高計とレーザ・ドップラ流速計による同時計測記録であり、全データ数は 142 である。各条件の水面変動と流速変動から時間平均値を引いて波動成分 η_w, u_w とし、これらを次式のようにフーリエ展開し、三次までのフーリエ成分の振幅 (a_1, a_2, a_3) と位相 (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) を算出した。

$$u_w = \sum_{n=1}^3 a_n \cos n(2\pi t/T - \phi_n) \dots\dots\dots (2.1)$$

ただし、位相については任意性が残るため、 ϕ_2, ϕ_3 は ϕ_1 に最も近いものを選ぶことにする。図—1 は、Sato ら (1988) が計測した底面流速波形を示したものである。図中、 x は静水汀線を原点とする計測地点の位置、 x_b は砕波点位置、 U_r はアーセル数であり、実線は実験値を、破線は三次までのフーリエ成分和を示している。解析の対象とした全てのケースで波形は三次までのフーリエ成分で十分な精度で表現できることを確認した。解析は水位と底面流速の両者に対して行ったが、紙数の制約上、

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 正会員 東京都庁

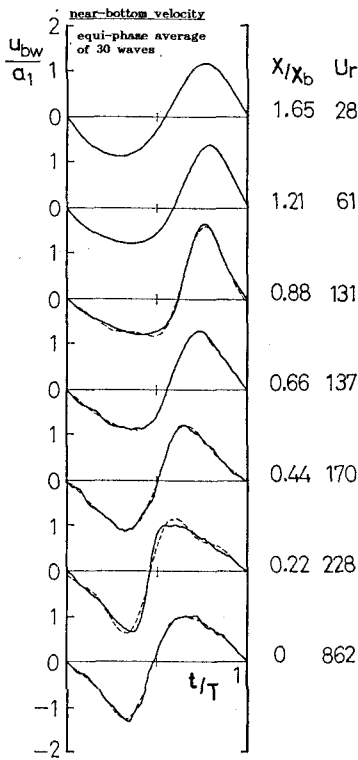


図-1 底面流速波形の変化

ここでは底面流速の解析結果のみを示すことにする。

図-2, 3 は底面流速波形のフーリエ成分振幅比および位相差とアーセル数の関係を示したものである。黒く塗りつぶしたデータは碎波帯内のデータである。実線はクノイド波およびストークス波理論による振幅比の理論値である。碎波帯外では理論値と良く一致するが、碎波帯内では理論値を大きく下回ることがわかる。

図-4, 5 はフーリエ成分振幅比および位相差と x/x_b との関係を示したものである。前傾した波の解析によく用いられる鋸形波形で完全に前傾化した波形では

$$\phi_2 - \phi_1 = -\pi/4, \phi_3 - \phi_1 = -\pi/3 \dots\dots\dots (2.2)$$

となる。図-4, 5 の位相差は、汀線に近づくにつれて波形が前傾化するとともに減少し、それぞれ鋸形波形の極限理論値に収束している。碎波帯外のデータのみならず碎波帯内のデータも x/x_b をパラメータとすれば統一的に整理できることがわかった。

3. 非線形分散波理論による数値計算

3.1 碎波減衰項を含む非線形分散波方程式

碎波帯の水面および流速の変動波形を予測する数値モデルを構築した。基礎方程式は後藤(1984)によって導かれた非線形分散波理論の運動量方程式に碎波による運動減衰量項を加えたもので、次式の様に表される。

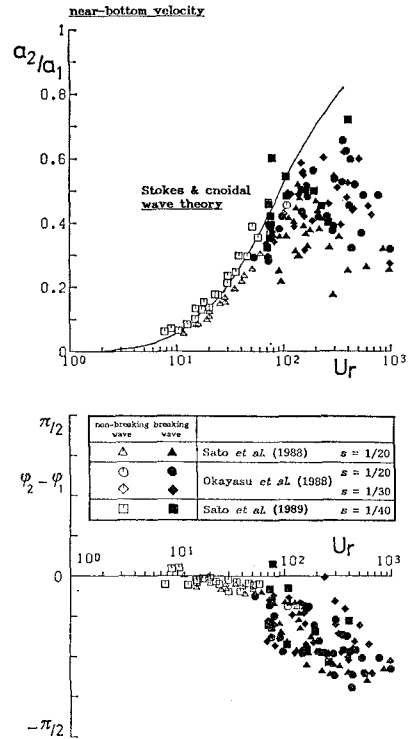


図-2 二次のフーリエ成分とアーセル数の関係

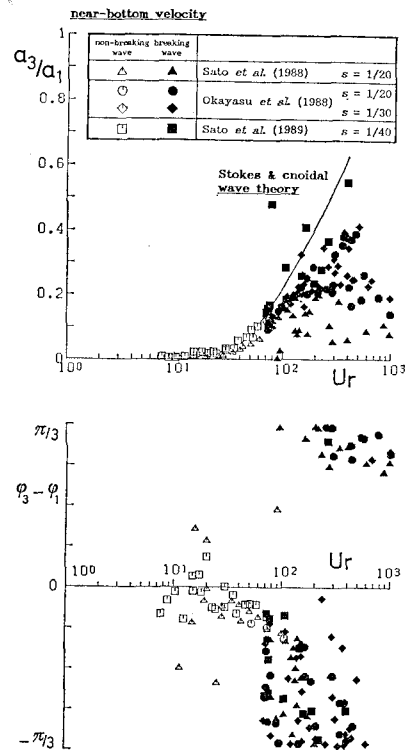
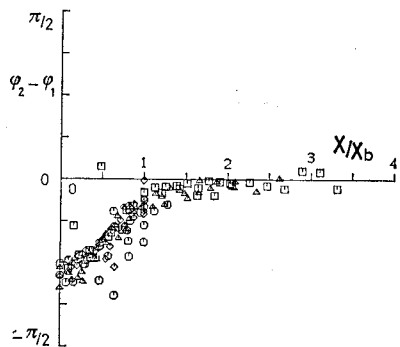
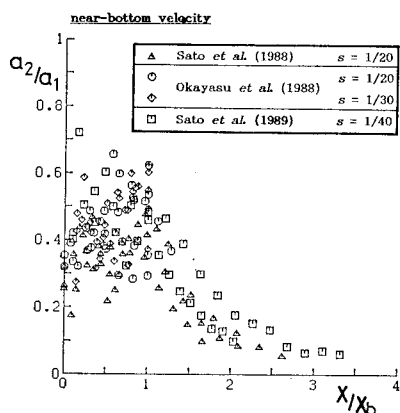
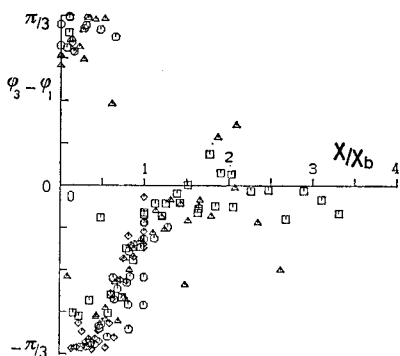
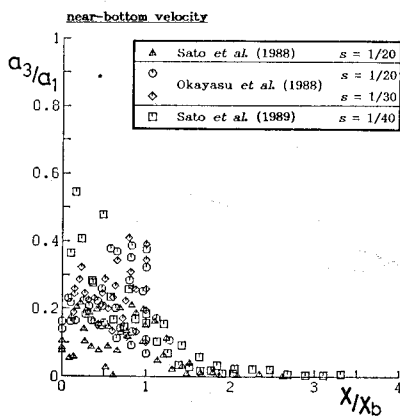


図-3 三次のフーリエ成分とアーセル数の関係



図—4 二次のフーリエ成分と x/x_b の関係



図—5 三次のフーリエ成分と x/x_b の関係

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial x} + M_D &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{d^3}{3} \frac{\partial^2}{\partial t \partial x} \left(\frac{Q}{d} \right) \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (3.1)$$

ここで、 Q は線流量、 d は全水深、 g は重力加速度である。運動量減衰項 M_D は、従来の線形の非定常緩勾配方程式による研究成果を参考にして導入した。Watanabe・Dibajnia(1988) は、運動量減衰項を次式の様に置くと精度の良い計算ができることを示した。

$$M_D = f_D Q = \alpha_D s \sqrt{\frac{g}{d}} \frac{\hat{Q} - Q_r}{Q_s - Q_r} Q \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 α_D は砕波帯で 2.5 となる係数、 $\hat{Q}$ は線流量の振幅であり、 Q_s 、 Q_r はそれぞれ次式で計算される。

$$Q_s = 0.4(0.57 + 5.3s) \sqrt{gd^3}, \quad Q_r = 0.135 \sqrt{gd^3} \dots\dots\dots (3.3)$$

一方、砕波前面では強い乱れ的作用により運動量交換が生じていると考えられる。乱れに伴う運動量交換を渦動粘性係数 ν_e を用いて表わすと、運動量減衰項は

$$M_D = \nu_e \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

となる。ここで、(3.2) 式で表されるような運動量減衰項を用いれば砕波帯内の波浪場が精度良く計算できることを念頭に置き、 ν_e を決定する。 Q の変動が正弦的で、波を長波で近似できるものとする (3.2) 式と整合する形として、次式が導かれる。

$$\nu_e = \frac{gd}{\sigma^2} f_D \dots\dots\dots (3.5)$$

ここで σ は角周波数である。本研究では、(3.2) 式の様に Q に比例する形(モデルⅠ)と、(3.4) 式の様に渦動粘性係数を導入した形(モデルⅡ)の両方を検討する。

3.2 計算方法および境界条件

入射境界は砕波点より十分沖に設定し、そこで三次近似のクノイド波を入射するとともに反射波成分を自由に透過させた。汀線は移動境界とし、岩崎・真野(1979)の方法により波の遡上波形も計算できる様にした。数値計算は全水深と線流量を変数として、すべての微係数を中央差分で置き換えることにより陰形式に進めた。

3.3 計算結果

Sato ら(1988) の規則波のケース 6 の条件(斜面勾配 1/20) で計算した結果、波高と平均水位の分布はモデルⅠ、Ⅱともに類似した結果となるが、水位と流速の変動波形については、モデルⅡの方が実測値に近い波形が得られた。図—6, 7 は、計算された流速波形のフーリエ成分の振幅と位相差を実測値とともに示したものである。モデルⅠではほとんど波形の前傾が見られないのに対し、モデルⅡでは汀線に近づくにつれて波形が前傾化

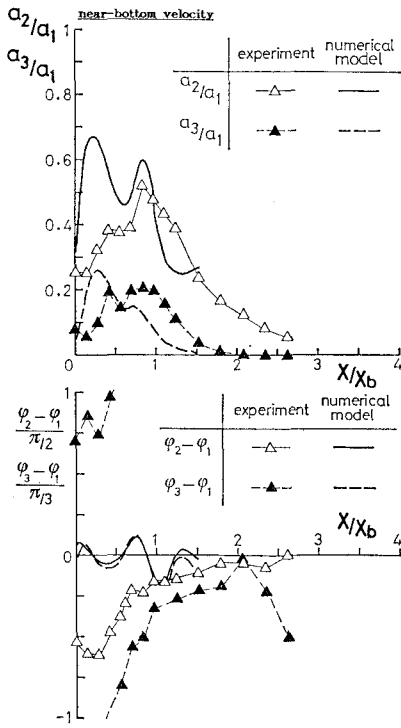


図-6 計算値と実験値の比較(モデル I)

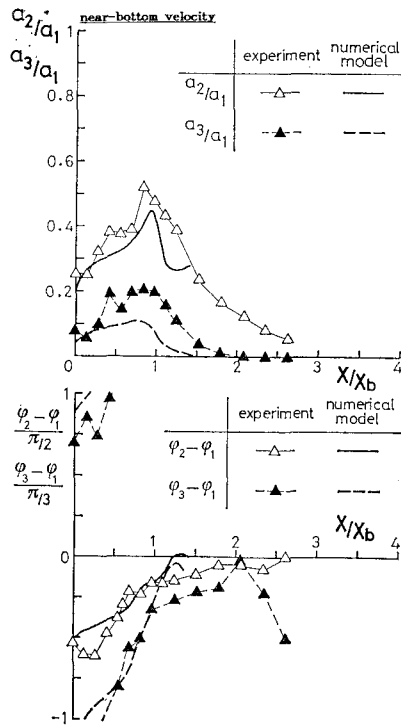


図-7 計算値と実験値の比較(モデル II)

し、位相差が生じていく様子が再現されている。

図-8 は、同じ条件でのモデル II による波高と平均水位の計算結果である。Sato ら (1989) の条件 (斜面勾配 1/40) についても計算した結果、実験値との対応は良好であることが確認された。図-9 は、底面流速の全振幅と定常成分の計算結果である。流速振幅はほぼ妥当な値を予測しているが定常流速は実験値の約半分となっている。さらに精度を上げるには碎波ボアによる質量輸送とそれを補償する戻り流れを考慮する必要がある。

4. 不規則波条件への拡張

さらに、本モデルを不規則波条件へ拡張した。入射波は Bretschneider・光易型のスペクトルをもとに正弦波を合成し、さらにそれら成分波の二次干渉を考慮することにより、非線形性を導入した。斜面からの反射波は、ピーク周期に対する線形理論の波速を用いて検出し、計算領域へ再反射しないようにした。

碎波減衰係数は個々の波に対して評価した。各瞬間の空間波形をゼロダウクロス法で個々の波に分割し、合田の碎波指標により、碎波・非碎波を判定する。碎波している場合にはその波の線流量振幅を用いて次式で個々の波の減衰係数 f_{DW} を計算し、碎波していない場合に

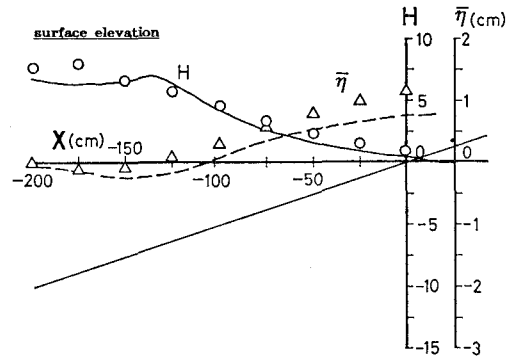


図-8 規則波の波高と平均水位(モデル II)

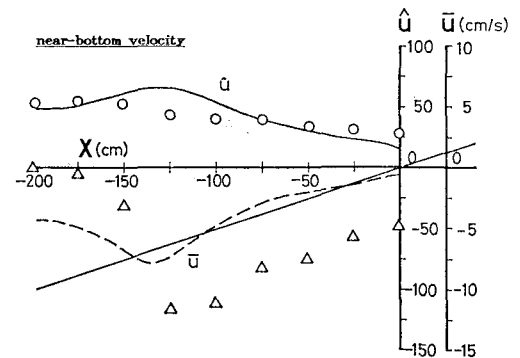


図-9 規則波の底面流速全振幅と定常流速(モデル II)

は f_{DW} を 0 と置く。

$$f_{DW} = \alpha_r f_D = \alpha_r \alpha_{1s} \sqrt{\frac{g}{d} \frac{Q - Q_r}{Q_s - Q_r}} \dots \dots \dots (4.1)$$

ここで、 α_r は不規則波条件での実験との比較によって決定される係数である。これらの値を各波の中央点における代表値とみなし、これを空間的に内挿することによりその時刻における不規則波での f_b の分布を求めた。これらの f_b の値を用いて式 (3.5) により v_e を求め、モデル II の砕波減衰項を導入して波の変形を計算した。

図-10 は Sato ら(1988)のケース 3 に相当する不規則波条件での計算結果で、水位と底面流速の rms 値を示したものである。無次元係数 α_r は、0.5 程度にとれば実験との対応が良いことがわかった。図-11 は、同条件で α_r を 0.5 とした場合の水面変動と底面流速の歪み度を示したものである。計算結果は実測値よりやや小さめとなるが、砕波帯内外ではほぼ一致する結果が得られた。

5. 結 論

本研究では、砕波帯内の水位と流速の実測値を解析するとともに数値モデルを構築し、以下の結論を得た。

(1) 斜面上で砕波する波の表面波形や底面流速変動波形は、砕波帯外ではアーセル数、砕波帯内では砕波帯における相対的位置を用いて整理すれば良い。

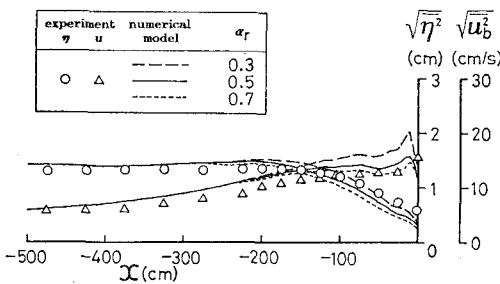


図-10 不規則波の水位と底面流速の rms 値

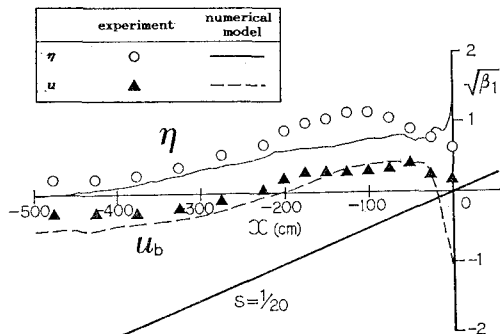


図-11 不規則波の水位と底面流速の歪み度

(2) 砕波帯内外の波浪場は、非線形分散波理論に砕波に伴う運動量減衰項を加えることにより計算することができる。計算された波高、平均水位、水位・流速波形と実測値は良く一致する。さらに本モデルは不規則波条件にも適用可能であることが確かめられた。

参 考 文 献

- 岩崎敏夫・真野 明 (1979): オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 70~74.
- 後藤智明・首藤伸夫 (1979): 非線形津波の二次元遡上計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 56~60.
- 後藤智明・首藤伸夫 (1980): 各種津波遡上計算法と波先端条件の比較, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 80~84.
- 後藤智明 (1984): アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方程式, 土木学会論文集, Vol. 351, pp. 193~201.
- 榎木 亨・李 宗燮・出口一郎・松山 章 (1985): 非線形分散波理論による波浪変形および海浜流の数値予測モデルについて, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 238~242.
- 長尾昌朋・後藤智明・首藤伸夫 (1985): 非線形分散波の数値計算, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 114~118.
- Abbot, M. B., H. M. Petersen and D. Skovgaard (1987): On the numerical modelling of short waves in shallow water, J. Hyd. Res., Vol. 16, No. 3, pp. 173~204.
- Basco, D. R. (1983): Surf zone currents, Coastal Eng., Vol. 7, pp. 331~355.
- Hibberd, S. and D. H. Peregrine (1978): Surf and run-up on a beach: a uniform bore, J. Fluid Mech., Vol. 95, pp. 323~345.
- Kobayashi, N., G. S. DeSilva and K. D. Watson (1989): Wave transformation and swash oscillation on gentle and steep slopes, J. Geophys. Res., Vol. 94, No. C 1, pp. 951~966.
- Madsen, P. A. and I. A. Svendsen (1983): Turbulent bores and hydraulic jumps, J. Fluid Mech., Vol. 129, pp. 1~25.
- Madsen, P. A. and I. R. Warren (1984): Performance of a numerical short-wave model, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 73~93.
- Okayasu, A., T. Shibayama and K. Horikawa (1988): Vertical variation of undertow in the surf zone. Proc. 21 st Conf. on Coastal Eng., pp. 478~491.
- Peregrine, D. H. (1967): Long waves on a beach, J. Fluid Mech., Vol. 27, pp. 815~827.
- Sato, S., M. Fukuhama and K. Horikawa (1988): Measurements of near-bottom velocities in random waves on a constant slope, Coastal Eng. in Japan, Vol. 31, No. 2, pp. 219~229.
- Sato, S., T. Isayama and T. Shibayama (1989): Long-wave component in near-bottom velocities under random waves on a gentle slope, Coastal Eng. in Japan, Vol. 32, No. 2, pp. 149~159.
- Svendsen, I. A. and P. A. Madsen (1984): A turbulent bore on a beach, J. Fluid Mech., Vol. 148, pp. 73~96.
- Takeda, H. (1984): Numerical simulation of run-up by variable transformation, J. Ocean. Soc. of Japan, Vol. 40, pp. 271~278.
- Watanabe, A. and M. Dibajnia (1988): A numerical model of wave deformation in surf zone, Proc. 21 st Conf. on Coastal Eng., pp. 578~587.