

不規則碎波帯における浮遊砂輸送量の解析法

佐藤 慎司*・島谷 学**・志村 豊彦**

1. 序 論

不規則波碎波帯では、碎波に伴う強い乱れによって多量の底質が巻き上げられるため、活発な浮遊砂現象が見られる。従来、巻き波碎波では水平渦が、崩れ波碎波では斜降渦が底質の巻き上げに重要な役割を果たしていることが指摘されている(Kana, 1978, 灘岡ら, 1987 など)が、巻き上げ後の輸送機構の予測法は確立していない。

碎波による巻き上げは三次元性が強いいため、点計測のみでなく画像記録などの付加的な計測を併せ用いることが重要である。ビデオ画像解析による浮遊砂現象の把握は、佐藤・久保田(1991)によって試みられているが、不規則波条件の様に長時間に及ぶ記録を解析した例はない。本研究では、点計測とVTRによる画像解析を組み合わせた室内実験と数値実験により、三次元性の強い複雑な現象である浮遊砂輸送の実態を解明する。そして、巻上量予測に重要となる支配パラメタを抽出し、数値モデルを構成する手法を検討することを目的とした。

2. 碎波帯における浮遊砂濃度の測定

2.1 実験の方法と条件

無反射性不規則波造波器を有する二次元造波水槽に1/20および1/40勾配の斜面を設置し、中央粒径0.18mmの標準砂を敷き均した。Bretschneider・光易型のスペクトル特性を持つ不規則波を発生させ、碎波帯内に設置した11個の測点における浮遊砂濃度、流速、水面変動を光学式濃度計、超音波流速計、容量式波高計を用いて20分間連続計測すると同時に、これらの点計測と同期したVTRカメラで水槽側面から浮遊砂の発生状況を撮影した。測点は、水平方向には50cm間隔、鉛直方向には底面上0.5cmから始めて2cm間隔で設置したが、ケース2については、汀線に一番近い測点では、センサーが水面上に露出することが多く、連続計測ができなかったため、10cm沖側にずらした。測点の配置と後述する実験条件ケース2、4の有義波高を図-1に示す。横軸のxは、岸向きを正とする静水汀線からの水平距離である。

実験条件をまとめて表-1に示す。ここで $(H_{1/3})_0$ は沖波有義波高、 $(T_{1/3})_0$ は有義波周期である。

不規則波碎波帯の浮遊砂輸送、特に汀線近傍の輸送に対しては、長周期波の影響が大きいが、加藤(1990)、Dally(1991)、Roelvink・Stive(1990)らの研究で指摘されている。本研究では長周期波の影響を検討するため、線形の成分波に加えて非線形性を考慮した造波信号でも実験を行い比較検討した。非線形性を考慮した造波では、浜田(1964)の二次干渉理論に基づき、二次の干渉成分

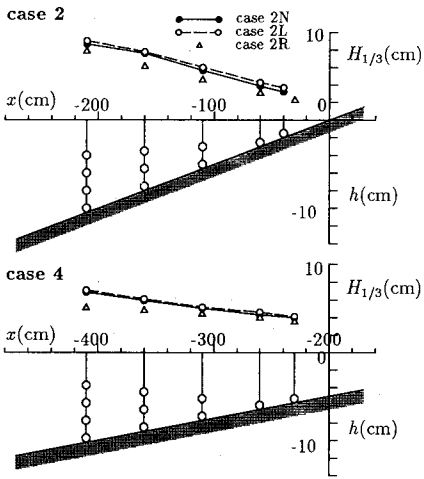


図-1 測点の配置と有義波高

表-1 実験条件

ケース	底面勾配	$(H_{1/3})_0$ (cm)	$(T_{1/3})_0$ (s)	波の種類
1 L	1/20	9.68	1.34	線形造波信号による 不規則波
2 L	1/20	7.79	1.97	
3 L	1/40	10.1	1.31	
4 L	1/40	8.43	1.97	
1 N	1/20	9.59	1.34	非線形造波信号による 不規則波
2 N	1/20	7.88	1.94	
3 N	1/40	10.5	1.34	
4 N	1/40	8.30	1.98	
1 R	1/20	11.3	1.18	規則波
2 R	1/20	8.41	1.74	
3 R	1/40	11.8	1.19	
4 R	1/40	8.76	1.79	

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 横浜国立大学大学院 工学研究科

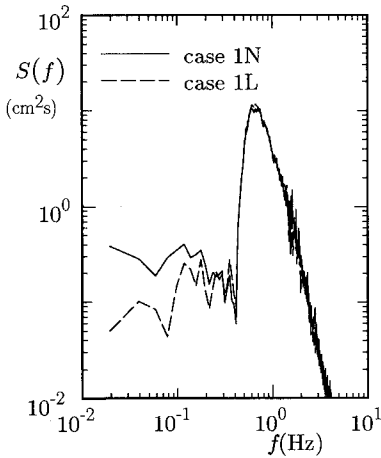


図-2 水面変動のパワースペクトル

として2倍周波数成分と全ての成分波の組み合わせに対する周波数の和・差成分を加え合わせて信号を作成した。

図-2は一樣水深部での水面変動のパワースペクトルを示したものである。線形理論で造波したもの(ケース1L, 破線)と、二次的非線形性を考慮したもの(ケース1N, 実線)とでは、特に低周波数帯で有意な差がみられる。汀線付近では長周期成分が増幅されるため、入射波

の特性のわずかな違いが、特に汀線付近の漂砂現象に実質的な差異をもたらす可能性がある。

3. 点計測と VTR 画像の解析

3.1 浮遊砂フラックスの分布

図-3に、勾配1/20(ケース2)と1/40(ケース4)の条件での定常流速 $\bar{u}$ 、浮遊砂濃度の時間平均値 $\bar{c}$ 、浮遊砂フラックス $\overline{uc}$ を示す。●印が二次干渉理論で造波したケース、○印が線形理論で造波したケース、△印が対応する規則波のケースである。2.で述べた様に、ケース2では不規則波と規則波で、汀線が一番近い測点の位置が10 cmずれているが、ここでは比較のため規則波条件の測点に合わせて図示してある。まず規則波と不規則波とを比較すると、規則波では強い流れと高い浮遊砂濃度が碎波点に集中して見られるのに対し、不規則波では碎波点付近で大きな値となるものの碎波帯全般に分布している。NとLを比較すると、濃度にはあまり顕著な差はないが、浮遊砂フラックスには有意な差が見られる。造波方法のわずかな違いによって生じる流速と濃度の位相関係の差が輸送量に大きな影響を与えていると考えられる。

不規則波には様々な周期の変動が含まれており、それぞれが浮遊砂の輸送に特徴的な役割を果たしていると考え

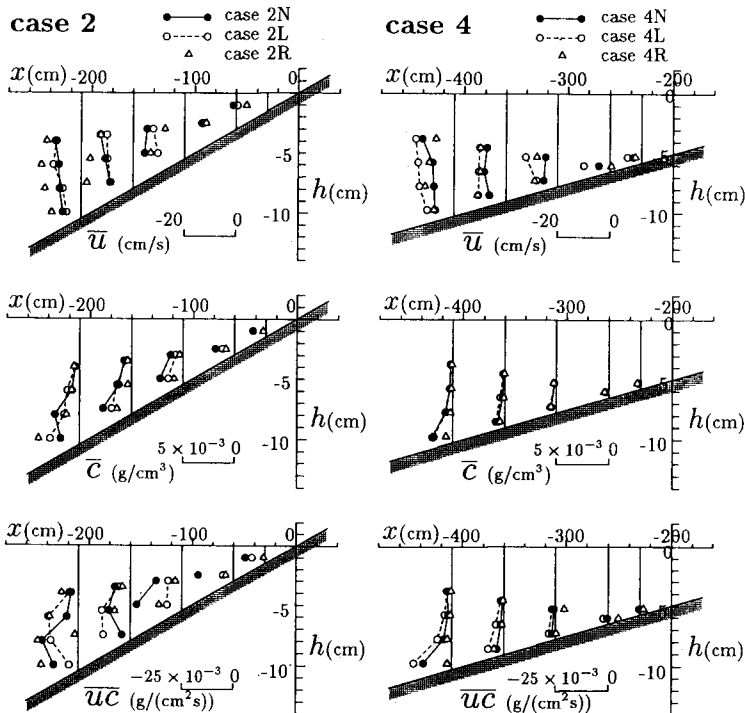


図-3 定常流速、平均浮遊砂濃度と浮遊砂フラックス

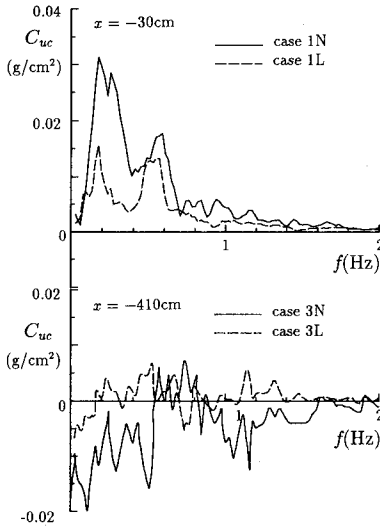


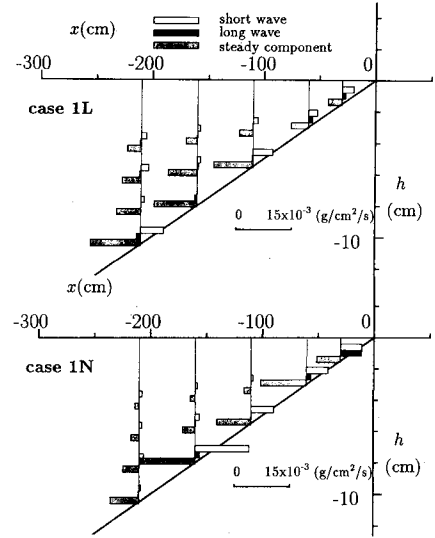
図-4 流速と濃度のコスペクトル

えられる。図-4は流速と浮遊砂濃度のコスペクトルを示したものである。上段はケース1の汀線近傍 $x = -30$ cmのもので、下段はケース3の砕波点付近 $x = -410$ cmの底面に一番近い測点のものである。勾配1/20の汀線近傍では、全周波数領域で輸送方向は岸向きで、低周波数帯でも有意な輸送が見られる。ケース1Nでは、岸向きの輸送がさらに顕著となり、非線形性の結果発達した長周期波が汀線付近の浮遊砂の輸送に支配的な役割を果たしていると考えられる。勾配1/40の砕波点付近ではケース3Nでは沖向きの輸送が大きくなる。長周期変動のパワーそのものはあまり変わらないため、この差は長周期波と包絡波との位相関係の違いが原因である。

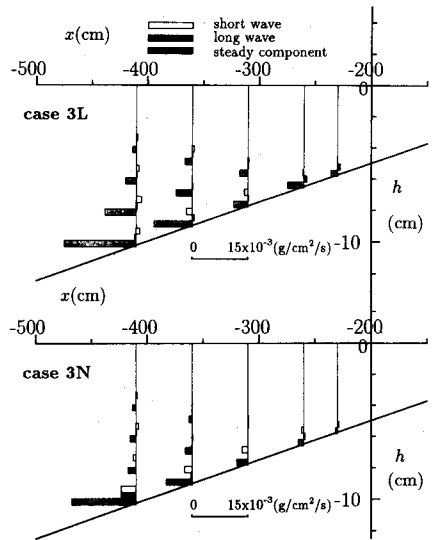
図-5(a), (b)は、ケース1, 3の浮遊砂フラックスに対する各周波数成分の貢献度を示したものである。定常成分の貢献度は、定常流速と平均濃度の積で算定し、長周期成分と短周期成分は、流速と濃度のコスペクトルをそれぞれの周波数領域で積分することにより算定した。本研究ではスペクトル解析の結果を参考にして、長周期成分と短周期成分の境界周波数を $1/(2T_{1/3})$ に設定した。勾配1/20のケースでは、定常成分と波動成分がほぼ同程度の大きさであり、長周期成分は岸側で岸向き、沖側ではやや沖向きとなる。勾配1/40のケースでは、定常成分による貢献が大きく、波動成分や長周期成分の占める割合は低い。

3.2 巻き上げ機構の分類

VTR画像を詳細に解析した結果、底質の巻き上げは、砂漣からの巻き上げ、砕波に伴う乱れによる巻き上げ、シートフロー状態からの遷移の3つに分類できることがわかった。砕波による巻き上げはさらに砕波形式によって、崩れ波に伴うものと巻き波に伴うものに分類できる。



(a) case 1



(b) case 3

図-5 浮遊砂フラックスに対する各周波数成分の貢献度

崩れ波では、斜降渦による巻き上げはほとんど見られず、砕波前面に集中する乱れによって瞬間的に巻き上げが発生し、巻き上げ後の底質が波峰下の岸向き流速によって岸へ輸送されることが多かった。これに対して、巻き波砕波による巻き上げでは、水塊の突入による渦の作用によって主として沖向きに輸送されるが、砕波後の強い乱れのために様々な方向へ散乱する傾向もある。

シートフロー状態からの遷移は、勾配1/20の汀線近傍でのみ発生し、沖向きの強い流れが継続する時に砂漣の峰から砂が削り取られるようにして巻き上げられ、沖方向へと輸送されるものである。汀線付近では底面付近で

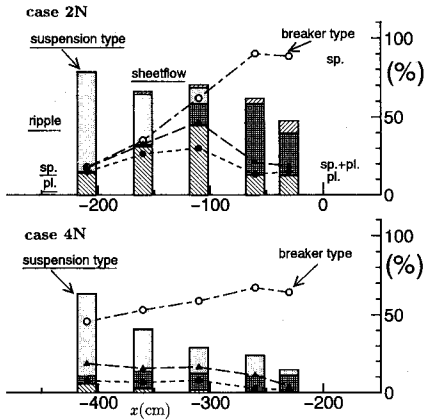


図-6 底質の巻き上げ機構と碎波形式の推移

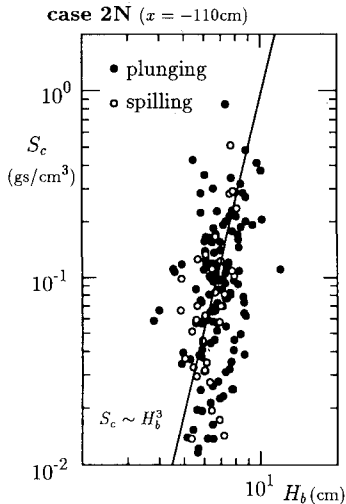


図-7 浮遊砂濃度の時間積分値と碎波波高との関係

強い沖向きの流れが見られることが多く、浮遊砂の発生に貢献している。

図-6は、VTRから巻き上げ機構を読み取り、碎波帯内の底質の巻き上げ機構の出現頻度を示したものである。図には碎波形式・碎波率の推移も同時に示してある。碎波形式は下から、巻き波(●印)、中間型(▲印)、崩れ波(○印)の順に累加する形で図示してある。碎波が通過した場合でも乱れが底面まで到達せず、砂漣による巻き上げが見られた場合には砂漣からの巻き上げと判定した。碎波点付近の沖浜領域では砂漣からの巻き上げが主であるが、碎波率が増加するにつれて徐々に碎波に伴う乱れが支配的な要素となってくる。全ての条件について解析した結果、勾配が急になるほど、また周期が長くなるほど巻き波型碎波の頻度が高くなり、浮遊砂濃度・フラックスともに大きくなる傾向があった。

碎波による巻き上げ量を推定するためには、浮遊砂濃度の瞬間的な分布を知る必要があるが、本実験では十分な情報が得られなかった。そこで、一波あたりの巻き上げ量と相関が高いものとして、一波あたりの浮遊砂濃度の時間積分値を指標に用いることにした。図-7は、碎波による巻き上げが生じている波に対して、浮遊砂濃度の時間積分値 S_c とその波の碎波直前の波高 H_b との関係を示したものである。巻き波碎波で波高が大きい波ほど巻き上げ量が大きくなることがわかり、巻き上げ量は直前の波高と相関が高い。

4. 数値モデルの拡張

4.1 浮遊砂輸送の数値モデルの拡張

佐藤・浅野(1992)によって提示された、浮遊砂濃度に対する拡散方程式に基づく数値モデルを拡張して、碎波による底質の巻上現象を取り込んだ。本研究ではまず、次式の一次元拡散方程式に基づいて碎波による底質の浮遊の取り込み方を検討する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + w_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ϵ は拡散係数、 w_s は底質の沈降速度であり、底質の巻き上げ量は、底面における境界条件を次式で与えることにより評価する。

$$\epsilon \frac{\partial C}{\partial z} = - \sum_i \alpha_s \rho_s w_s D (\Psi_i - \Psi_c) u_i T_i / (\lambda \sqrt{sgD}) \cdot \delta(t - t_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\alpha_s (=0.065)$ は無次元係数、 u_i 、 T_i 、 Ψ_i は個々の波の半周期毎の底面流速振幅、半周期、シーلز数、 $\Psi_c (=0.1)$ は限界シーلز数、 λ は砂漣の波長、 ρ_s と $s(=1.65)$ は底質の密度と水中比重、 g は重力加速度、 t_i は底面流速変動がゼロクロスする時刻である。

4.2 碎波による底質の浮遊量

(2)式で評価される底質の巻き上げは、砂漣からの巻き上げのみが考慮されている。碎波による巻き上げ量は図-7の結果をふまえて、碎波によって失われる波のエネルギーの一部が浮遊底質の位置エネルギーに変換されるものと考えて定式化した。すなわち、碎波する直前の波 H_b のエネルギーの一部が、体積 V_b の砂を水深 h の半分の位置まで持ち上げるエネルギーに変換されるとすると、 a_b を無次元係数として

$$\frac{1}{8} \rho g H_b^3 \cdot a_b = (\rho_s - \rho) V_b g \frac{h}{2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

が成立するため、単位面積あたりの砂の巻き上げ量は次式で与えられることになる。

$$V_b = a_b \frac{(\rho_s - \rho) H_b^3}{4 \rho h} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで $a_b = 500$ とし、碎波による巻き上げが生じた時刻

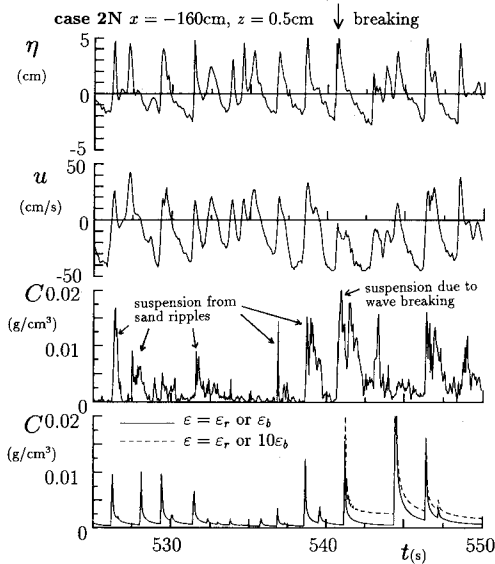


図-8 浮遊砂濃度変動の計算値と実測値

を VTR 画像から読み取り、その時刻に上式の巻き上げ量を(2)式の右辺に新たに加えた。

4.3 拡散係数

砕波による巻き上げが生じるときには、水表面から強い乱れが発生し、長い期間継続する。これに対し、砂漣からの巻き上げでは乱れは半周期毎に底面境界層から発生し、それが底質の浮遊を維持している。両者で乱れの特性が異なるため、拡散係数もそれに応じて変化させる必要がある。

本研究では、基本的には次式の Nielsen (1988) が規則波に対して提案した次式を用いることにし、砕波による巻き上げが生じている時には、その波に対する拡散係数を変化させて用いることにした。

$$\varepsilon_r = w_s \eta (1.24 \exp[-40(w_s/\bar{u})^2] + 0.2) \dots\dots (5)$$

ここで、 η は砂漣の波高であり、実験データから評価した。また $\bar{u}$ は、底面流速振幅であり、有義波高から換算して代表させた。

砕波による乱れについては従来の研究から、渦動粘性係数はエネルギー逸散率 D_B を用いて

$$\nu_t = c_\nu \left(\frac{D_B}{\rho} \right)^{1/3} h \dots\dots\dots (6)$$

で表されることが報告されているため、拡散係数としても上式を長波近似等を用いて変形した次式を用いることにした。

$$\varepsilon_b = c_\nu \left(\frac{5}{16} \tan \beta \left(\frac{H}{h} \right)^2 \right)^{1/3} \sqrt{gh} \cdot h \dots\dots\dots (7)$$

ここで $\tan \beta$ は底面勾配であり、定数 c_ν は岡安ら(1989)の研究を参考にして 0.03 とした。砕波による巻き上げが生じている時間では、砕波直前の波高 H_b を用いて上式から計算される拡散係数を用いて計算を行った。

計算された浮遊砂濃度変動を実測値とともに示したのが図-8 である。この例では $t=541$ s 付近で砕波による巻き上げが生じている。この例に対する拡散係数は $\varepsilon_r = 5.8$, $\varepsilon_b = 6.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ となり、同程度となる。そこで試みに ε_b の値を 10 倍して計算したのが破線である。実線よりむしろ破線の方が砕波後の浮遊砂の拡散状況を良く表現していると思われる、今後さらに広範な実験データを用いて諸係数の同定を行う必要がある。

5. 結 論

本研究では斜面上の不規則波砕波帯における浮遊砂輸送に関して、点計測と VTR による画像記録とを併せて用いた実験を行うことにより以下の結論を得た。

(1) 入射波の非線形性を考慮した造波を行うことにより、非線形性の強い条件でも合理的な不規則波実験を行える。汀線近傍での浮遊砂輸送に対しては長周期波の貢献度が高い。

(2) 不規則波砕波帯の底質の巻き上げ機構を分類し、各機構に対する巻き上げ量の推定法を検討した。これらに基づく数値モデルを開発し、その妥当性を実験データを用いて検討した。

参 考 文 献

- Dally, W. R. (1991): Long wave effects in laboratory studies of cross-shore transport, *Coastal Sediments '91*, pp. 85-99.
- Kana, T. W. (1978): Surf zone measurement of suspended sediment, Proc. 16th Conf. on Coastal Eng., pp. 1725-1741.
- Nielsen, P. (1988): Three simple models of wave sediment transport, *Coastal Eng.*, Vol. 12, pp. 43-62.
- Roelvink, J. A. and M. J. F. Stive (1989): Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach, *J. Geophys. Res.*, Vol. 94, No. C4, pp. 4785-4800.
- 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 砕波帯におけるエネルギー収支と戻り流れのモデリング, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 31-35.
- 加藤一正 (1990): 漂砂と海浜地形変化に及ぼす長周期波の影響に関する研究, 東京工業大学学位論文, 120 p.
- 佐藤慎司・久保田洋次 (1991): ビデオ画像を用いた砕波点付近の浮遊漂砂現象の解析, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 251-255.
- 佐藤慎司・浅野 学 (1992): 不規則波砕波帯における浮遊砂フラックス, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 281-285.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐龍行 (1987): 砕波帯内における底面近傍の流体運動特性と浮遊砂について, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 256-260.
- 浜田徳一(1964): 表面波の二次干渉, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp. 12-18.