

砕波による底質の巻き上げ量の評価に関する実験的研究

佐藤 慎 司*・本間 基 一**・柴 山 知 也*

1. 序 論

波による底質の移動機構については砕波帯外の漂砂に関しては室内実験や現地観測により研究が進められ、有用な漂砂量公式もいくつか提案されている。しかし砕波帯内の漂砂については、砕波による乱れや大規模渦の発生などの流体運動とそれに伴う底質の巻き上げや輸送機構との関係について未だ不明確な部分が多い。特に砕波による底質の巻き上げに関しては、砕波に伴う流体運動が複雑であることや浮遊砂濃度の測定が困難であることなどの理由により、定量的な解明が遅れている。

砕波による底質の浮遊機構を定量的に研究した例として、Kana (1978) は現地海岸において採水器を用いて浮遊砂濃度の測定を行ない、巻き波型砕波による浮遊砂濃度が崩れ波型砕波によるものの 10 倍程度になると報告している。Shibayama ら (1986) は巻き波型砕波の底質の浮遊砂濃度と流速場の詳細な測定結果をもとに底質の輸送現象のモデル化を行なっている。また、灘岡ら (1987) は巻き波型砕波で生じる大規模渦だけでは砕波帯の底質浮遊現象を評価できないと指摘し、砕波帯内の広い範囲にわたって底面まで達する斜降渦による攪乱作用も重要であると報告している。

一方浮遊砂濃度の測定方法については、捕砂器やサクションによる採水法と超音波や光線を利用した濃度計による方法が一般的である。しかし、前者は捕砂器の種類によっては流体の流れの場を乱す上、瞬間的な現象を捉えるのに適していない。また後者は砕波による気泡の混入の影響を強く受けるため結果の解釈が困難であるという問題点を有している。

本研究では、砕波点における底質の巻き上げ機構を把握するために、光学式濃度計による計測実験を行なう。まず濃度計の出力に対する混入気泡の影響を補正する方法を検討したうえで、崩れ波型から巻き波型砕波の条件に対して砕波点付近の浮遊砂濃度を詳細に計測し、砕波による底質の巻き上げ機構を解明する。そして広範な入射波の条件に対して、底質の巻き上げ量の予測算定式を

提案する。

2. 実験条件と方法

実験は長さ 17 m、幅 0.6 m の二次元造波水槽に勾配 1/20 の斜面を設置して行った。図-1 に示した様に、斜面の一部の 1 m の区間を切込んでトレイを設置し、砂を平坦に敷き詰めた。底質には豊浦標準砂 (粒径 $D=0.18$ mm) と珪砂 ($D=0.15$ mm) の二種類の砂を用いた。種々の波の条件に対して予備実験を行ない、トレイ上で底質の巻き上げが観察された波の中から実験条件を選んだ。そして表-1 に示した様に、崩れ波型 (sp.)、巻き波型 (pl.) および両者の中間型 (sp.-pl.) のそれぞれの砕波形式で砕波する波に対して計 14 ケースの実験を行った。ここで T は波の周期、 h_i は一様水深部の水深、 H_i は一様水深部の波高、 H_b は砕波波高、 M_{sm} は後述の方法で評価した単位幅あたりの底質の巻き上げ量である。

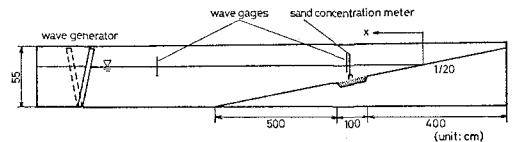


図-1 実験装置

表-1 実験条件

CASE	D (cm)	T (s)	h_i (cm)	H_i (cm)	H_b (cm)	Breaker type	M_{sm} (g/cm)
1	0.018	1.08	38.5	9.7	9.9	sp.-pl.	0.19
11	0.015						0.68
2	0.018	3.45	38.5	6.8	12.0	pl.	0.61
12	0.015						1.07
3	0.018	2.13	39.0	10.4	15.3	pl.	0.63
13	0.015						1.71
4	0.018	0.87	39.0	8.3	9.4	sp.	0.02
14	0.015						0.21
5	0.018	1.65	39.0	9.8	12.2	pl.	0.46
15	0.015						0.89
6	0.018	1.35	39.5	9.9	11.9	pl.	0.24
16	0.015						0.78
7	0.018	1.16	39.5	9.3	10.6	sp.-pl.	0.11
17	0.015						0.41

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 清水建設株式会社

各ケースに対して、トレイ上の数十 cm にわたる浮遊砂雲発生領域に約 35 個の測点を配置し、15 波分の水面波形と浮遊砂濃度を測定した。浮遊砂濃度の測定には測定部の直径が 3 mm の光学式濃度計を用いた。また、底質の巻き上げ状況や砕波により発生する気泡の混入状況を把握するため、水槽側面からビデオカメラで撮影した。一点の測定が終わる毎に造波機を止め、トレイ内の砂を平坦にならした。測定の時間中に有意な地形の変化や砂澱の発達は見られなかった。データは時間間隔 0.01 s で離散化し、フロッピーディスクに記録した後計算機で処理した。データの読み取り間隔を比較的短くしたのは混入気泡の処理を行なうためである。さらに一部の実験ケースに対してはサクション採水法による濃度計測もあわせて行った。サクションには内径 3 mm のパイプを用い、水路に直角方向に吸い込み速度約 40 cm/s で 15 波分採水するようにした。採水した水の体積と乾燥後の砂粒子の質量から各点の時間平均濃度を評価した。

3. 底質の巻き上げ機構

図-2 は巻き波型砕波条件であるケース 2 の底面近傍における計測記録例である。上段は光学式濃度計の出力であり、下段は波高計の出力である。砕波が通過した直後の位相で浮遊砂濃度が高くなっており、これは砕波に伴う水塊の突入によって発生する大規模渦の作用により底質が巻き上げられることに対応している。しかしこの図にも見られる様に、全ての波に対して底質の巻き上げが観察されるわけではなく、一周期を通じて濃度変化がほとんど生じない波も見受けられる。ビデオ画像を解析した結果これは一波毎の砕波点が微妙にずれることと、発生する大規模渦の構造が三次元的であることが原因であることがわかった。

崩れ波型砕波の場合には、灘岡ら(1987)が報告した様に砕波によって発生した乱れが底面に到達した時に底質が巻き上げられていた。この場合には乱れの構造がさらに三次元的な強いものであるため、浮遊砂雲の発生もさらに間欠性の強いものとなる。崩れ波型砕波の場合の底質の巻き上げは、巻き波型砕波の場合に見られる大規模渦によるものより小規模で局所的に起こるため、巻き上

げ総量は巻き波型砕波の場合に比べて圧倒的に少なくなる様に見受けられた。

4. 混入気泡の影響について

光学式濃度計の出力が混入気泡の影響を受けることは従来から度々指摘されている。本研究でも特に巻き波型砕波の場合には濃度計の検出部を頻繁に気泡が通過しているのが観察された。そこでまず、本研究で対象とした実験条件では気泡がどの程度混入しているのか検討することにした。観測部を固定床とし、100 波分の砕波状況をビデオカメラで記録した。ビデオ画像の解釈を容易にするために水槽をしきり、水槽の側壁から 20 cm までの部分を撮影する様にした。そしてある地点に注目して画像記録を再生し、波が通過する際にその場所に気泡が混入する波の数を数え、気泡の混入率とした。中間型砕波条件と典型的な巻き波型砕波に対して気泡の混入率を示したのが図-3 である。巻き波型砕波では砕波の突込み点付近に底面近傍まで気泡が到達しているのに対し、中間型砕波や崩れ波型砕波では水面付近のみに集中していた。これらの気泡混入率の高い領域では、気泡の通過により濃度計の出力が強く影響を受けると考えられる。ただし、ここで示した気泡の混入率は気泡の通過が見られた波の数の全波の数に対する割合であるため、出力に対する影響度とは直接結びつかない。周期の長い波では、気泡が水面まで上昇して消滅してから次の波が到達するまでの間は気泡が存在しない時間が長く継続するため、出力に対する気泡の影響は相対的に小さくなる。

図-4 の上段は気泡が多く混入している地点における濃度計の出力例を示したものである。浮遊砂濃度の変動に混じって数ヶ所にスパイク状の出力が見られるのがわかる。ビデオの画像記録と合わせて解析した結果、これらのスパイク状の出力は気泡が濃度計のセンサー部を通過した瞬間に見られることがわかった。そこで、このような出力を計算機上で検出し、気泡の影響を取り除いた記録とすることにした。具体的には図-5 に示した様に、0.01 s 間隔で離散化した濃度変動に対して、ある時刻の出力とその直前の 0.03 秒間の出力の平均値を比較し、その差があるしきい値 $4C$ 以上であり、かつその後

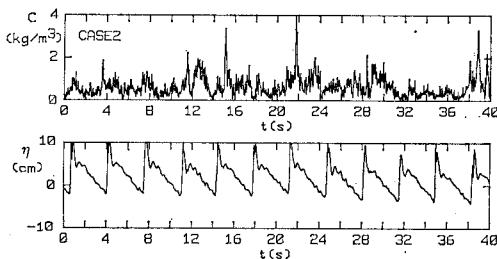


図-2 浮遊砂濃度と波形の計測例

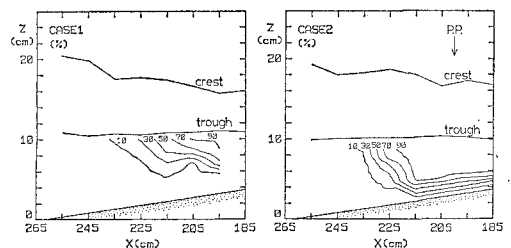


図-3 気泡の混入率

0.1 秒以内に再び元の平均値から $\Delta C/2$ 以下のレベルに復帰すればその出力は気泡の通過によるものと判断して除去し、直前の平均値をその時刻の出力として代用することにした。 ΔC の値はいくつかの条件に対してビデオ画像記録と合わせて解析した結果、今回の実験条件に対する最適な値として $\Delta C = 1.5 \text{ kg/m}^3$ とした。図-4 の下段にこのような補正をした後の記録を示す。スパイク状の出力が良好に取り除かれていることがわかる。

この様に補正した後の出力から巻き波型砕波の場合の時間平均濃度を算出した例を図-6 に示す。図中の実線は波峰の水位と波谷の水位を表わしており、矢印は巻き波型砕波の場合の突っ込み点を示している。また図-7 はこのような補正を行わず生データをそのまま用いた場合の評価例であり、図-8 は採水法による計測記録である。図-7 では特に気泡が大量に発生する水面付近で濃度が見かけ上高くなっているが、図-6 ではこの部分が補正され、採水法による計測記録とはほぼ一致していることが確認できる。

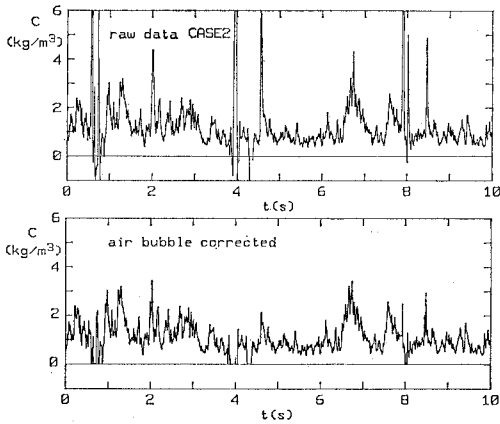


図-4 気泡の通過による光学式濃度計の出力

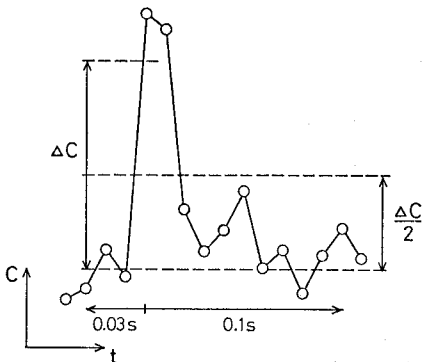


図-5 混入気泡の処理

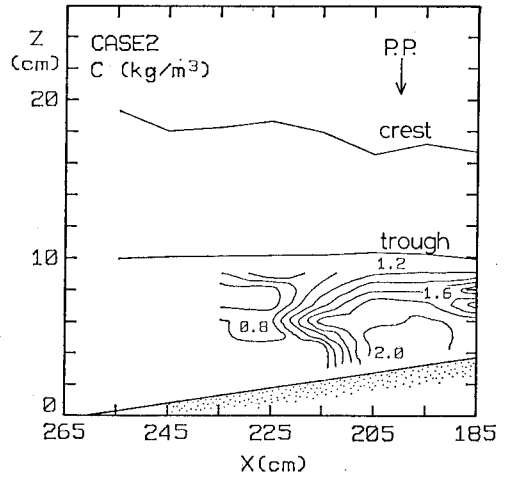


図-6 時間平均濃度の分布 (巻き波型砕波、気泡処理後)

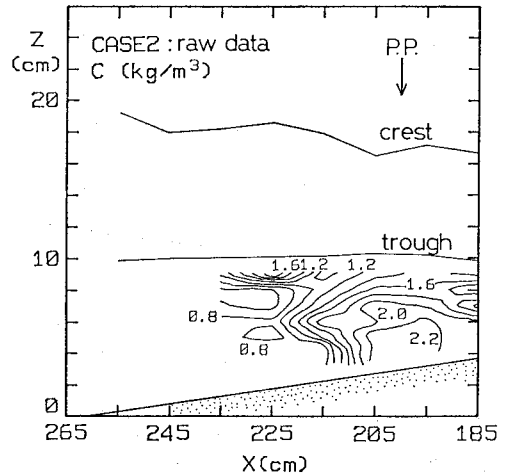


図-7 時間平均濃度の分布 (巻き波型砕波、気泡処理なし)

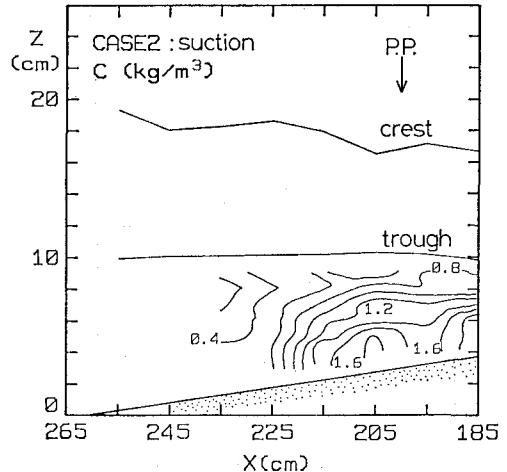
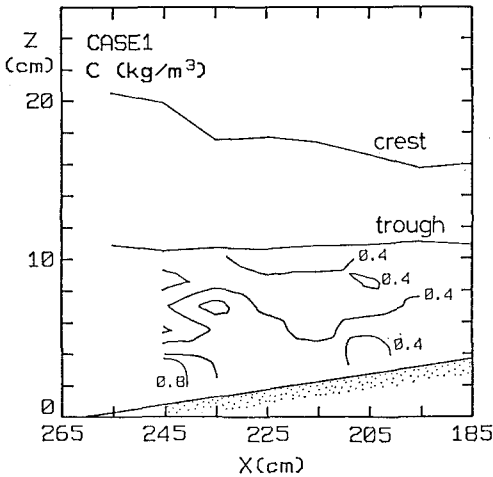


図-8 時間平均濃度の分布 (巻き波型砕波、採水法)

5. 浮遊砂濃度の分布特性

5.1 時間平均濃度の分布

図—9 は中間型の碎波条件における時間平均濃度の分布例を示したものである。図—6 と 図—9 を比較すると、中間型や崩れ波型碎波では浮遊砂が観察される領域が小さい上、濃度の絶対値も小さい。これに対し、巻き波型碎波の場合には碎波の突っ込み点のやや岸側の底面付近に極めて高濃度の領域が見られる。波高がほぼ同じ条件で比較した場合、碎波形式が巻き波型になると崩れ波型碎波の場合に比べて急激に浮遊砂量が増加すること



図—9 時間平均濃度の分布 (中間型碎波)

が確認された。

5.2 同位相平均濃度の分布特性

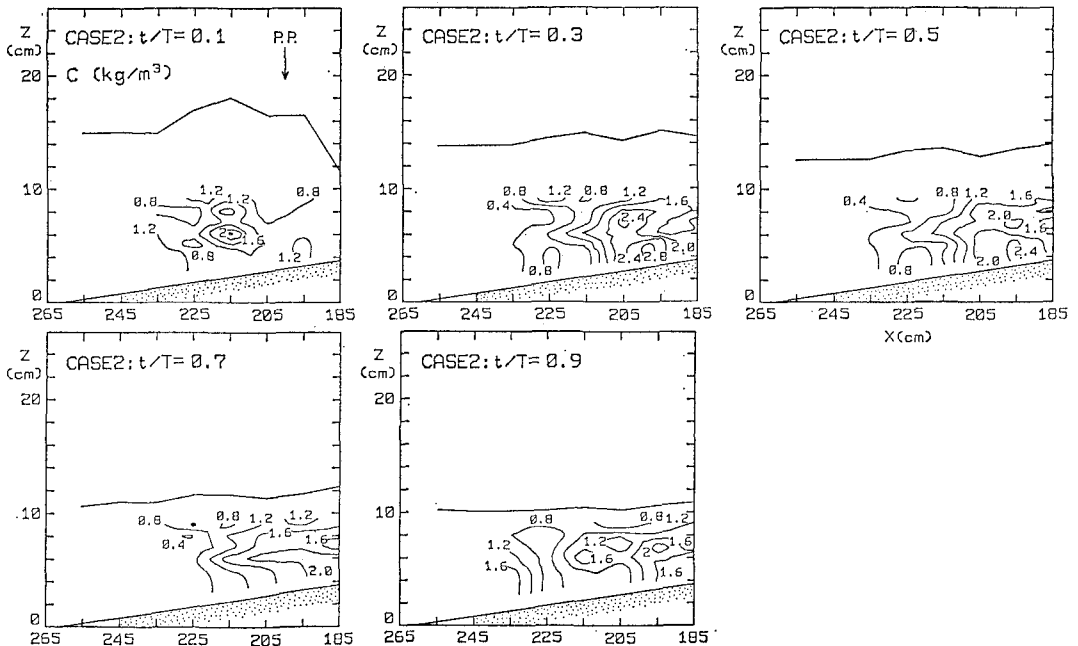
図—10 は巻き波型碎波の条件に対して同位相平均濃度の分布を示したものである。時刻の原点は碎波した波が観測部の沖側端に到達した瞬間にとっている。碎波により突入した水塊が底面に到達した直後に突っ込み点のやや岸側で高濃度の浮遊砂雲が発生していることがわかる。ただし、3. でも述べた様に、浮遊砂雲の発生は時空間的に変動性の強い現象であるため、この図で示した濃度分布は平均化されたものである。実際にビデオ画像などを解析して浮遊砂雲を追跡するとさらに鮮明な浮遊砂雲の発生が見られる。

6. 底質の巻き上げ量の評価

各ケースの測定領域内の同位相平均濃度を面積積分することにより巻き上げられた底質の総量を評価した。

図—11 の実線は典型的な巻き波碎波条件における単位幅当りの浮遊砂総量の位相変化を示している。破線は気泡の影響に対する補正を行わない場合の浮遊砂量である。気泡の影響を除去した場合の浮遊砂総量の位相変化は比較的小さい。これは、巻き波型碎波においても底質の巻き上げ機構が間欠性と三次元性の強いものであることが原因である。

最後に碎波による底質の巻き上げ量を把握するために、各ケースにおける浮遊砂総量の位相変化からその最大値 M_{sm} を評価した。図—12 は無次元化した浮遊砂総量の最大値 $M_{sm}/(\rho_s \cdot H_b^3)$ と $\hat{u}_0/w_s$ との関係を示したも



図—10 同位相平均濃度の分布 (巻き波型碎波)

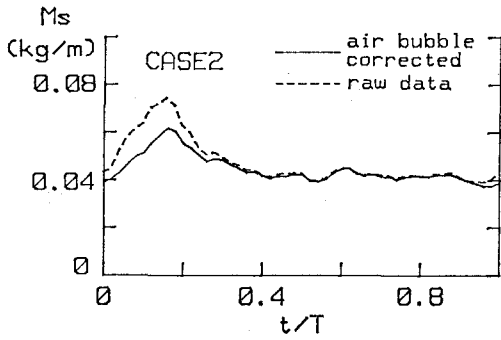


図-11 総浮遊砂量の位相変化 (巻き波型砕波)

のである。ここで、 ρ_s は底質砂粒子の密度、 $\hat{u}_b$ は微小振幅波理論により計算される砕波点における底面流速振幅値、 w_s は Rubey の式を用いて計算される底質の沈降速度である。浮遊砂の総量を砕波波高の自乗で無次元化したのは、砕波により発生する渦の面積が砕波波高の自乗のスケールで与えられると考えたからである。図-12 を見ると崩れ波型砕波から巻き波型砕波に至るまで次式で表わされる図中の実線で底質の巻き上げ総量を評

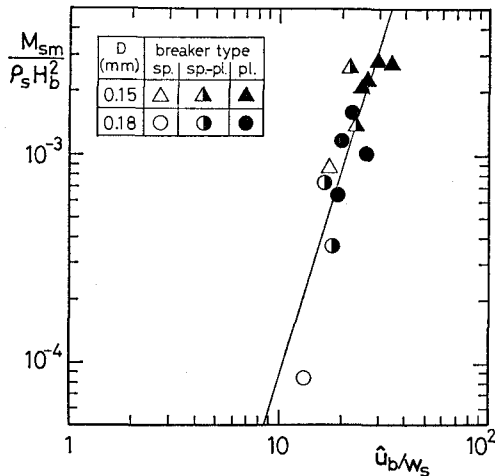


図-12 砕波による底質の巻き上げ量

価できることがわかった。

$$M_{sm}/(\rho_s \cdot H_b^2) = 4.4 \times 10^{-8} (\hat{u}_b/w_s)^{3.3} \quad \dots\dots (1)$$

7. 結 語

本研究では砕波による底質の巻き上げ量を実験によって評価し、以下の結論を得た。

- 1) 光学式濃度計の出力に与える混入気泡の影響を検討し、これを除去する方法を提案した。この補正法は気泡が底面付近にまで頻繁に到達する巻き波型砕波の際に特に有効である。
- 2) 巻き波型砕波では、砕波により大規模な渦が発生し、この渦が底面に達する突っ込み点のやや岸側で多量の底質が巻き上げられる。崩れ波型砕波の場合にも砕波に伴う乱れ的作用により底質が巻き上げられるが、その現象は巻き波型砕波の場合よりさらに局所的かつ間欠的で、巻き上げ量も少ない。
- 3) 砕波点付近における底質の巻き上げ量は、砕波点における底面流速振幅と底質の沈降速度を用いて評価できる。

今回対象とした実験条件は、一様勾配斜面上の二次元規則波の砕波という極めて単純な条件であるが、崩れ波型砕波から巻き波型砕波までの広い範囲の条件を対象としているため、より一般的な砕波による底質の巻き上げ量を評価する際に有用であると考えられる。巻き上げられた底質の輸送機構と巻きあげ量算定式の現地海浜への適用性について検討することが今後の課題である。

参 考 文 献

- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (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.
- Kana, T. W. (1978): Surf zone measurement of suspended sediment, Proc. 16th Conf. on Coastal Eng., pp. 1725-1741.
- Shibayama, T., A. Higuchi and K. Horikawa (1986): Sediment transport due to breaking waves, Proc. 20th Conf. on Coastal Eng., pp. 1509-1522.