

現地砕波における底質巻き上げの間欠性と流体運動との関係

鈴木崇之* ・岡安章夫** ・Daniel T. Cox***
片山裕之**** ・森 信人***** ・敦賀 仁*****

砕波帯内では砕波による大規模渦が発生し、複雑な流体運動を形成している。この流体運動は、底質浮遊し、地形変化の起因となっていると考えられる。この大規模渦を解明するため、観測アレイを用いた砕波帯内局所観測を行い流体運動、浮遊砂濃度の計測を行った。観測データ解析の結果、流体加速度と乱れ成分は相関が高く、これらと浮遊砂濃度の相関もまた高いことがわかった。また、流速と流体加速度を用いて移流・巻き上げの双方を含んでいる浮遊砂濃度から巻き上げによるものを選定を行った。これより、巻き上げの時間的・空間的間欠性が示されたと共に、浮遊砂の供給源である巻き上げイベントをある程度特定することができた。

1. はじめに

砕波帯内では砕波による流体運動により底質が浮遊し、地形変化に大きな影響を与えられとされる。近年、底質巻き上げについてはその局所性と間欠性が指摘されているが、流体運動との関連については不明な点が多い。

砕波帯内に関する研究は室内実験、現地観測、数値シミュレーションなどで数多く行われ、灘岡ら (1987) は、砕波によって水深スケールの 3 次元流体運動 (大規模渦構造) が形成され、底質の浮遊現象に支配的な影響を与えていると報告し、張ら (1993) は室内実験により、底面到達渦のタイプ分けを行っている。また、佐藤ら (1995) は、砕波点や沖での現地観測より、個々の波による底質の巻き上げは直前の波の底面摩擦力との相関が高いとしている。Kubo ら (2001) は室内実験において崩れ波砕波で下降する流体運動の形成を報告しており、底質へかかる流体強度の大きさは砕波エネルギーと関係があるとしているが、流体の底質への影響については明らかにされていない。

砕波による局所渦を含めた大規模 3 次元流体運動による底質移動を評価するためには、底質の巻き上げ量の定量的評価と共に、砕波による大規模流体運動やその時の濃度分布、さらに、これらの時空間的変動特性および関連特性を検討する必要がある。

そこで、本研究では現地砕波帯内に設けた多測点同時 3 次元局所観測アレイにより得た流速、浮遊砂濃度データを用いて、乱れと流体運動との関係を検討すると共に、底質巻き上げと流体運動との関連について検討を行った。

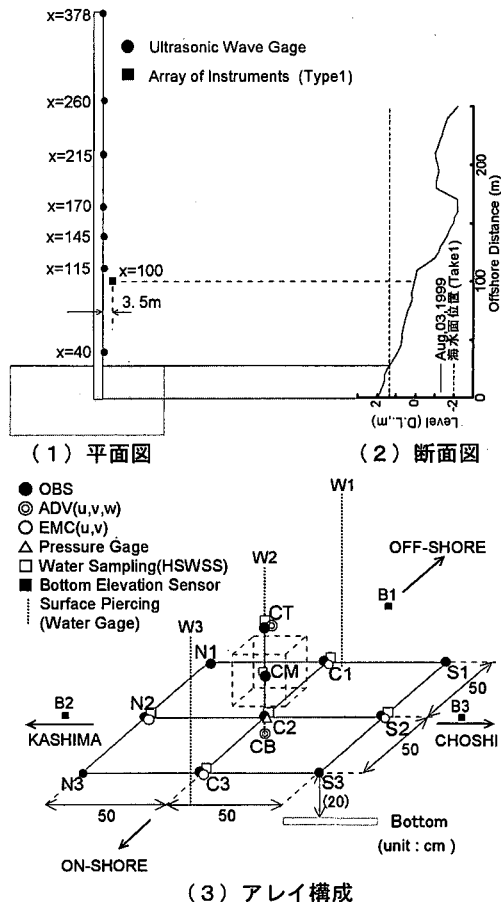


図-1 観測アレイ設置位置および計測器配置

2. 現地観測の概要

観測は合同現地観測プロジェクト HORS 99 の一部として、1999 年 8 月 2～3 日にかけて茨城県波崎町の独立行政法人港湾空港技術研究所波崎海洋観測施設 (HORS) にて行われた (例えば、栗山ら, 2000)。砕波帯内の流体運動と浮遊砂濃度の時空間的変動の把握を目的とし、縦、横、高さ約 1 m の 3 次元局所観測アレイを作成し、後方

* 学生会員 修(工) 横浜国立大学大学院工学府社会空間システム学専攻
** 正会員 工 博 東京水産大学助教授 水産学部
*** Ph.D Texas A&M 大学助教授 Dept. of Civil Eng.
**** 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所
***** 正会員 工 博 (財)電力中央研究所流体科学部 主任研究員
***** 修(工) 横浜水道局

表-1 各 Take の観測条件

Take	計測開始時刻	h_i (m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)
Take 1	8/2/ 18:43:36	1.35	0.95	5.85
Take 2	8/2/ 19:59:00	1.33	0.95	5.99
Take 3	8/3/ 07:47:13	1.23	0.84	6.61
Take 4	8/3/ 08:52:41	1.10	0.72	6.97
Take 5	8/3/ 09:58:11	1.03	0.60	7.11

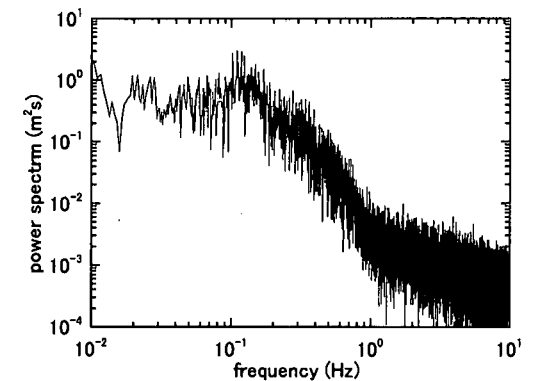


図-2 岸沖方向パワースペクトル (Take 2, 測定点 CB)

散乱式浮遊砂濃度計 (OBS) 11 台 (A&D 社製 10 台, 北斗理研社製 1 台), 3 次元超音波流速計 (ADV) 10 台 (Sontec 社製 9 台, Nortec 社製 1 台), 2 次元電磁流速計 (EMC) 4 台 (Alec 社製), 容量式波高計 3 台 (KENEK 社製), 圧力センサー 1 台, 採水口 7 本を取付け, 水深約 1.2 m の地点に設置し計測を行った。また, アレイ周辺に光電式砂面計 3 台 (三洋測器社製) を配置し, 底面変動を観測した。計測器の配置を図-1 に示す。

観測データはサンプリング周波数 20 Hz で収録し, 1 時間の計測を計 5 回 (Take 1 ~ 5) 行った。各観測条件を表-1 に示す。全てアレイ設置位置における各計測時間内の値であり, h_i は平均水深, $H_{1/3}$ は有義波高, $T_{1/3}$ は有義波周期である。観測時の目視から, 砕波帯内のアレイ設置地点では砕波による底質の巻き上がりが発生していることを確認している。

3. 流体運動と浮遊砂濃度の関係

本観測は, 砕波帯内に計測器を密に配置したことにより, 同測定点での流速と浮遊砂濃度データを採取している。ここで, 流体運動と浮遊砂濃度の関係について述べる。

3.1 キャリブレーション

a) 流速計

観測アレイに設置した ADV, EMC は, 以下の較正直線を用いて流速値を算出した。

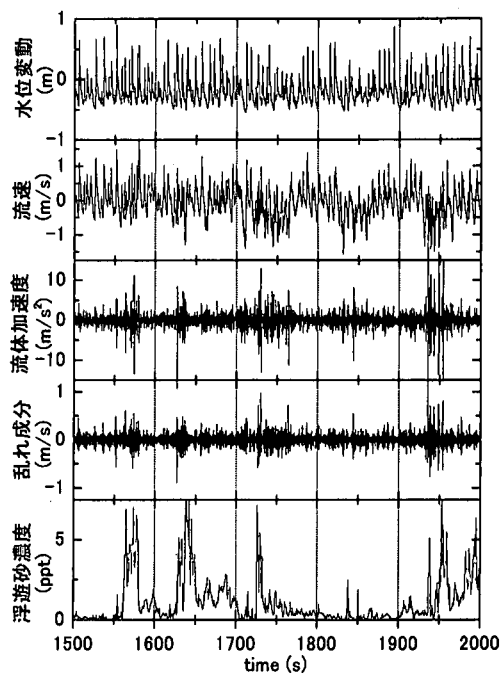


図-3 水位変動, 流速, 流体加速度, 乱れおよび浮遊砂濃度計の比較 (Take 2)

ADV : 流速[m/s] = 出力電圧[V] - 2.5

EMC : 流速[m/s] = 出力電圧[V] × 0.40

b) 浮遊砂濃度計

観測に先立ち, 現地砂を用いての予備キャリブレーション結果およびポンプにより海中から採水ホースを経て海上約 7 m の棧橋上まで直接海水を汲み上げて採取した採水データの両者を用いて OBS (A&D 社製) の較正直線を求めた。較正直線は

濃度[ppt] = 4.25 × OBS 出力電圧[V] - 0.620 とした。ただし, 北斗理研社製 OBS (図-1 中の S₂) に関しては, 別途単独で較正直線を求めた。(岡安ら, 2000)

本研究では濃度変化の大きい底質の巻き上げを対象とするため, 得られた浮遊砂濃度を 0.5 秒でリサンプリングし解析を行った。岡安らが示している浮遊砂濃度図において, 底質の巻き上げによる局所的な滞留の持続時間は 5 秒程度あることから, 0.5 秒のリサンプリングは妥当であると思われる。

3.2 周波数分離

底質浮遊には砕波による乱れが関与していると指摘されているが, その乱れの範囲の定義についてはさまざまである。本研究では, 定常成分は 1 時間平均値, 波動成分と乱れ成分の境界周波数は, 観測された岸沖方向流速のピーク周波数の約 4 倍である 0.5 Hz と定義した。ただし, 5 Hz 以上に関してはノイズと判断し, 解析からは除外した。図-2 に Take 2, 測定点 CB での ADV 岸沖方

表-2 波毎の流速・加速度による選別結果 (単位: 波)

(a) Take 2					
測定点	加速度>5.0 流速>0.85	加速度>5.0 流速>0.85	加速度>5.0 流速>0.85	加速度>5.0 流速>0.85	計
S2	5	1	497	301	804
C1	7	2	455	340	804
N2	3	0	299	502	804
C3	1	1	331	471	804
計 (%)	16 (0.50)	4 (0.12)	1582 (49.19)	1614 (50.19)	3216 (100)

(b) Take 3					
測定点	加速度>5.0 流速>0.85	加速度>5.0 流速>0.85	加速度>5.0 流速>0.85	加速度>5.0 流速>0.85	計
S2	16	4	482	218	720
C1	9	0	487	224	720
N2	3	2	324	391	720
C3	3	2	370	345	720
計 (%)	31 (1.08)	8 (0.28)	1663 (57.74)	1178 (40.90)	2880 (100)

(単位: 加速度 = m/s², 流速 = m/s)

表-3 OBSの平均濃度と標準偏差

測定点	Take 2 (ppt)		Take 3 (ppt)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
S2	1.02	1.31	2.34	2.28
C1	1.07	1.13	2.34	2.18
N2	1.02	1.16	2.23	2.23
C3	1.11	1.06	2.44	2.33

のを評価対象にしていることから、これを含めた状態で解析を行った。また、流速値は岸沖方向(u , 岸向きが正)、沿岸方向(v , 鉾子向きが正)の合成流速を用いて行うこととし、合成流速は

$$Vel_{uv} = \sqrt{u^2 + v^2} \dots\dots\dots (2)$$

で判断した。流速値から巻き上げイベントを選定する方法として、以下の方法を用いた。

流速値での選定は、流速、流体加速度の絶対値を利用して行う。まず、流速の絶対値が、設定値 0.85 m/s を超えた場合を巻き上げ発生イベントと判断した。これは底質が巻き上がるためには、砂粒子の密度がある程度疎の状態(シートフロー状態)になっていることが必要であると、シートフロー発生限界シールズ数(0.55)を超える流速値を設定値とした。

次に、この流速の絶対値によって抽出された時刻における流体加速度の絶対値が、設定値(任意: 本研究では 5.0 m/s²)を超えるケースを抽出する。ただし、抽出する際、容量式波高計で得た水面変動データをゼロアップクロスで1波毎に時間を区切り、その1波中にこの設定値を超えるケースを抽出した。1波に設定値を超える値が2回以上ある場合は、はじめのイベントが抽出されそれ以後はカウントされず、次の波での抽出に移ることとした。この設定値は、アレイ底面に設置した4測点(図-1中、S1、C1、C3、N2)の流速データ、浮遊砂濃度データを時系列毎にチェックし、巻き上げと思われるイベントが最も多く含まれるように決定した。表-2に場合分けされたTake2、Take3での結果を示す。

4.2 浮遊砂濃度計からの選定

4.1において、流速計からの選定を行ったが、浮遊砂濃度との適合具合を把握するため、以下の方法で浮遊砂濃度計からイベントを選定する。

浮遊砂濃度が高いイベントが考えられるケースとして、局所的な巻き上げによるものと移流によるものがある。移流によるものは、巻き上がりからある程度時間が経過していることを考慮に入れると、一般に浮遊砂雲の拡散により濃度変化が緩やかであると考えられる。よって、OBSにより局所巻き上げを判定する条件として

向成分のパワースペクトルを示す。

3.3 流速、流体加速度と浮遊砂濃度

図-3にTake2におけるアレイ底面中心に設置したADV(図-3中のCB)の岸沖方向成分の流速、流体加速度および流速乱れ成分(0.5 Hz~5 Hz)とOBS(図-1中のC2)の出力グラフを示す。流体加速度は以下の式で算出しており、定点における観測であるため厳密にはEuler的加速度と表現すべきであるが、本研究においては単に流体加速度と表記する。

$$u'(t) = \frac{u(t) - u(t-1)}{\Delta t} \dots\dots\dots (1)$$

(u , u' : 岸向きが正, Δt : サンプリング間隔)

流速は水位と高い相関を示しているが浮遊砂巻き上げイベントとの相関はグラフから見出すことはできない。一方、流体加速度と乱れ成分に関しては高い相関が見られ、また、これらと浮遊砂巻き上げイベントについても良い相関が得られていることがわかる。

4. 巻き上げイベントの選定

浮遊砂巻き上げは、間欠的に起こるため、アレイ底面に設置した、EMCの流速データを用いて巻き上げイベントの選定を行う。また、その時の浮遊砂濃度の状況も把握するため以下のような検討を行った。

4.1 流速計からの選定

現地流速データには定常流が含まれており、これを除去して解析を行う場合もあるが、本研究では流速そのもの

表-4 判断イベントの適合率

測定点	Take 2	Take 3
S 2	4/5	10/16
C 1	6/7	1/9
N 2	3/3	3/3
C 3	1/1	0/3
計 (適合率)	14/16 (87.5%)	14/31 (45.2%)

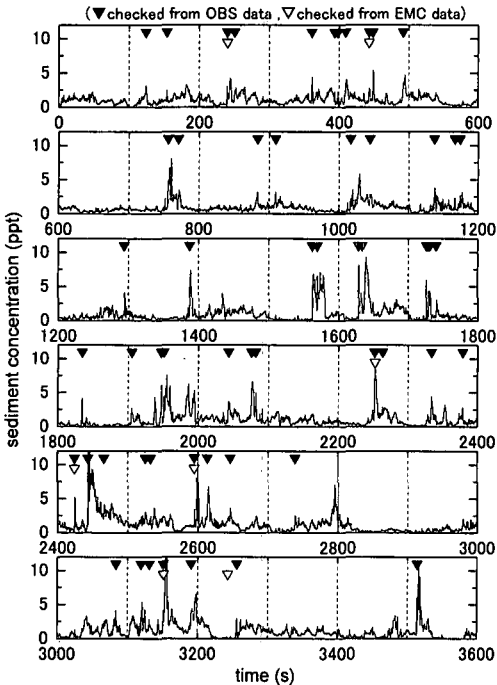


図-4 濃度変化と巻き上げ判断イベント (Take 2, 測定点 C1)

各測定点での浮遊砂濃度が、 $C_{ave} + \sigma$ (C_{ave} :各測定点での1時間平均濃度、 σ :各測定点での濃度の標準偏差) [ppt]以上あり、且つその値に至るまでの0.5秒間の濃度変化の傾きが $2C_{ave}$ (1時間平均値の2倍) [ppt/s]以上のイベントを選定した。これらのイベントには移流によるものも含まれてしまっている可能性があるが、少なくとも、巻き上げによるものは高い割合で抽出できているものと考えられる。

EMCを設置した地点(図-1中S2, C1, C3, N2)のTake 2, Take 3での1時間平均濃度および標準偏差を表-3に示す。

4.3 巻き上げイベント発生条件

巻き上げイベント発生の条件は、流速計を用いた選定と浮遊砂濃度計を用いた選定の時刻差が、有義波周期の1/5以内である場合をイベントと定めることにした。

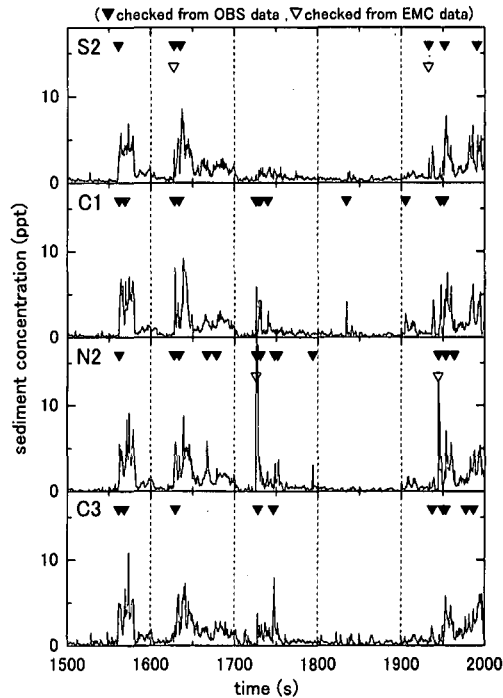


図-5 浮遊砂濃度の時系列変化 (Take 2)

5. 観測データへの適用

5.1 Take 2, Take 3 への適用

図-4にTake 2, 測定点C1での1時間浮遊砂濃度を示す。流速, 流体加速度の絶対値が共に設定値よりも大きい16ケースのうち、測定点C1に該当する7ケースを▽印で、浮遊砂濃度計から選定したものを▼印で示す。また、図-5にTake 2での4測定点の時系列ごとの選定状況を示す。これらより、巻き上げは時間的、空間的にも間欠的に発生していることがわかる。

ここで、流速値からの判断イベント(▽)を基準として、浮遊砂濃度計からも巻き上げと判断(▼)されていた(▽と▼が共にある)割合は、Take 2で88%, Take 3で45%であった(表-4)。流速データと浮遊砂濃度データを用いて巻き上げかどうかを判断することが適当だが、流速により選定されたものの5割から9割は濃度でも選定されており、流速データのみから巻き上げか否かを判断してもおおよそは良いと言える。

この割合は、イベントを1測定点ごとの流速値、浮遊砂濃度から判断している。しかし、流速値から判断されたイベントの時刻に浮遊砂濃度から判断されたイベントが他の測定点で記録されている場合がある。本研究では、1測定点で判断していることからこのような場合は不適合とした。しかし、これは定常流や波向きなどによるためと考えられ、この観測アレイが縦横1mであり、碎波

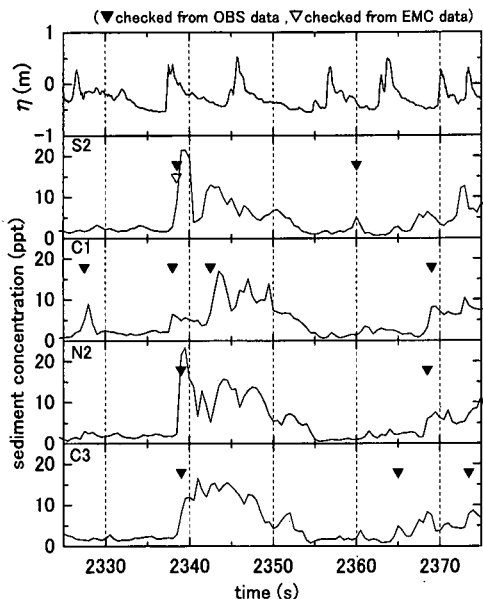


図-6 浮遊砂濃度変化 (Take 3)

帯内と比較すると遙かに小さいことを考えると巻き上げと判断しても良いと思われるが、判断基準が煩雑となるため今回は不適合とした。

5.2 既存研究データへの適用

図-6に岡安ら(2000)が巻き上げと移流を判別したTake 3, $t=2325\sim 2375$ sに、本研究で示した巻き上げイベント選定法を適用したものを示す。

流速値による判断イベント(▽)は測定点S2のみ選定されているが、浮遊砂濃度による判断イベント(▼)が4測点共にについており、 $t=2338$ sでS2を中心とした巻き上げがあったと推測できる。C1においては3秒ほど遅れて $t=2341$ sで濃度上昇が発生しており、これは先の巻き上げ分が移流してきたものと推測できる。

岡安らは測定点C3で局所巻き上げが発生しているとしているが、図-6より時系列的にもS2が早いことから、ほぼ同時期ではあるがS2, C3, N2の順で巻き上げが発生した、あるいはS2のみが巻き上げでありC3, N2は共に移流であるものと考えられる。

6. 結 論

現地砕波帯に流速計、浮遊砂濃度計等を局所的密に配

置し、多測点同時観測を実施した結果以下の結論を得た。

1) 砕波による流体運動は極めて間欠性の高いものである。また、流体加速度と乱れとは高い相関があり、それらと浮遊砂濃度にも相関が見られる。

2) 流速と流体加速度を用いて、底質巻き上げの発生イベントをおおよそ把握することができる。

3) 岡安らが示した巻き上げと移流の判別への適用を試みた結果、ある程度の適合性が見られた。

本研究によって、ある程度流速値から巻き上げイベントを選定することが出来ることから、1回の巻き上げ量を仮定することで、ネット量ではなく巻き上げによってその場から無くなる(移動する)量の評価が期待できる。

最後に、本観測実施にあたり、HORSでの観測に便宜を図って頂いた独立行政法人港湾空港技術研究所漂砂研究室長栗山善昭氏、観測において協力を頂いた東京工業大学灘岡和夫教授をはじめとする合同現地観測プロジェクトHORS 99参加の皆様には多大なご協力を頂いた。また、ADV 9台はTexas A&M大学CBI所有の装置を、砂面計においては五洋建設(株)技術研究所所有の装置を、容量式波高計は大成建設(株)技術研究所所有の装置を使用させて頂いた。関係者の皆様には謝意を表す。

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金基盤研究B (No.13450203 代表者:岡安章夫)による研究であることを付記する。

参 考 文 献

- 岡安章夫・鈴木崇之・片山裕之(2000): 斜降渦による底質浮遊と流体運動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 546-550.
- 佐藤慎司・田中茂信・野口賢二・山本幸次(1995): 砕波点付近における浮遊砂の現地観測, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 135-144.
- 栗山善昭・他10名(2000): 浅海域における長周期水理現象に関する総合現地観測, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 231-235.
- 張 達平・砂村継夫(1993): 砕波帯における底面到達渦に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 61-65.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐龍行(1987): 砕波帯内の3次元大規模渦構造と浮遊砂の現地観測, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 21-25.
- 堀川清司(1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp. 157-158.
- Kubo, H. and T. Sunamura (2001): Large-scale turbulence to facilitate sediment motion under spilling breakers, Coastal Dynamics '02, pp. 212-221.