

砕波帯内の三次元的大規模渦構造と浮遊砂の現地観測

灘岡和夫*・上野成三**・五十嵐竜行***

1. はじめに

近年、砕波帯内の流速場の構造に関する研究が急速に進みつつあるが、このうち、その乱流構造に関しては、主として室内実験によってその特性が詳細に調べられてきている。例えば著者ら^{1),2)}は、砕波帯内の流速場に特徴的な「水平渦」と「斜降渦」と呼ばれる大規模渦構造が存在することを明らかにし、特に後者についてはそれが底面付近にまで到達し得ることから、砕波帯内での底質浮遊の支配的要因になり得ることを示唆している。(この点に関する室内実験によるその後の詳細な検討結果については、本講演会の文献 3) で報告している。)

一方、現地における砕波帯内の流速場に関する観測例もこれまで数多く報告されており、乱れに関する議論も若干行われているが、電磁流速計の応答性(通常 3 Hz 程度)の問題もあって、十分な情報は得られていないのが現状である。特に、上記のような三次元的大規模渦構造の存在あるいはその特性等について報告しているものは、著者らの知る限り皆無である。

このような点を踏まえて、本研究では、まず大型二次元造波水槽での予備実験によって、大規模室内実験での斜降渦の形成とその底面への衝突による浮遊砂の発生の可能性について検討し、その上で、実際の砕波帯内の流速場ならびに浮遊砂に関する現地観測データに基づいて、現地における砕波帯内の三次元的大規模渦構造の実態並びに底質浮遊との因果関係を明らかにすることを試みた。その結果、現地においても「斜降渦」に対応する三次元性の強い大規模渦構造が存在し、それがレイノルズ応力の生成や底質の巻き上げに重要な役割を果たしていることが明らかにされた。ただし、現地では室内と異なり、砕波による気泡の連行が相対的に激しく、気泡の密度効果がかかなりきいてくる可能性が高いことも併せて明らかにされた。

2. 大型造波水槽による予備実験

現地データの解析に入る前に、建設省土木研究所の大型二次元造波水槽(長さ 150 m, 幅 2 m, 深さ 5 m)を用いて行った予備実験の結果について述べる。

実験は、図-1 に示すような断面の移動床(中央粒径 0.3 mm の細砂)斜面に周期 3.5 s, 砕波高約 0.6 m の規則波を作用させて行った。測定点は、同図に示すように、trough 部から step 部に移行した直後に位置しており、この地点に容量式波高計と光電管式浮遊砂濃度計(底面上約 2 cm, 図中の丸印)を取り付けて計測を行った。

図-2 は、得られた生記録の一部を示したものである。これを見ると、規則波を作用させているにもかかわらず、浮遊砂の発生はかなり不規則でしかも間欠的であることが分かる。入射波の波高自体もこの測定位置では

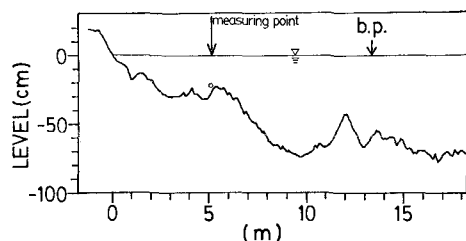


図-1 海底断面形状と測定位置(大型模型実験)

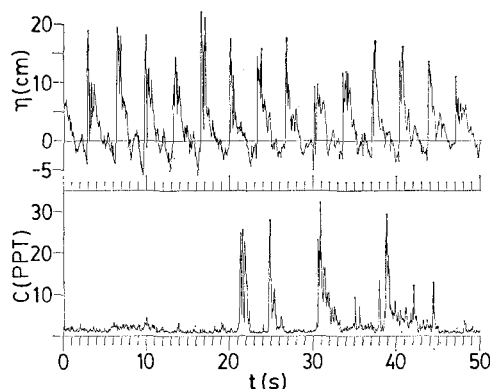
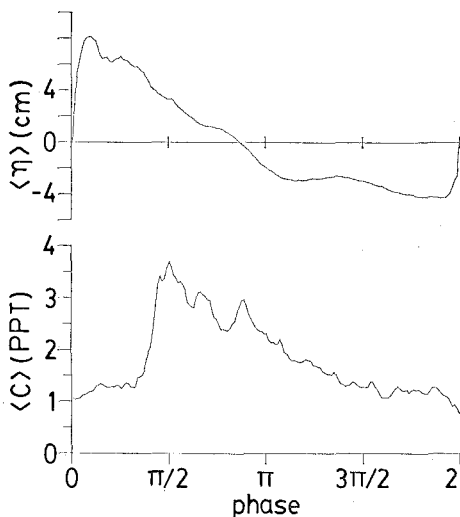


図-2 測定結果の一例

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

** 東京工業大学大学院

*** 正会員 INA 新土木研究所

図-3 表面波形 η と浮遊砂濃度 C の位相平均値

一様ではなくなりビートを打っているけれども、波高のビートと浮遊砂の発生との関連性は見られない。目視及びビデオによる観察によれば、このような浮遊砂の発生はむしろ碎波に伴う上層からの三次元的大規模渦(斜降渦)によるものであることが確認された。

図-3 は、浮遊砂濃度の位相平均値を表面波形の位相平均値と共に示したものである。これを見ると、浮遊砂濃度のピーク位相は表面波形のピーク位相とは一致しておらず、それよりかなり遅れて現れていることが分かる。このことは、底面付近の浮遊砂濃度レベルが底面せん断力のみによって規定されるのではなく、斜降渦に代表される上層からの大規模渦構造にも大きく支配されていることを示すものである。

3. 使用した現地データの内容

ここで使用する現地データは、運輸省港湾技術研究所漂砂研究室により、1987年3月9日から12日までの4日間、鹿島灘に面する運輸省波崎海洋研究施設(HORF)において取得されたデータの一部である。以下にその内容について述べる。

この施設は、全長 427 m の観測栈橋とその陸側端にある観測室からなり、図-4 に示すように鹿島港と波崎港のほぼ中間に位置している。栈橋には、その陸側端から 145 m の位置に計器取り

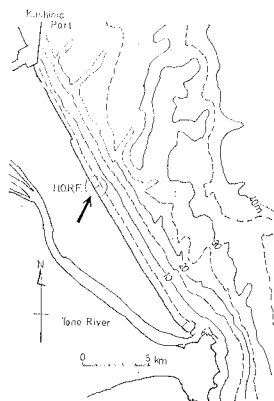


図-4 観測栈橋 (HORF) の位置図

付け用の片持ち梁式 ladder が備え付けられているが、今回のデータはこの ladder に固定した外径 49 mm の足場用単管パイプに 2 台の電磁流速計と 1 台の浮遊砂濃度計(光電管式)を図-5 に示すような形で取り付けて行われた測定結果である。なお、使用された電磁流速計は横河ナビテック(株)のものであるが、通常の電磁流速計がせいぜい 3 Hz の応答性しか持たない

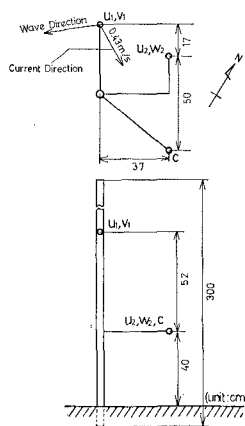


図-5 測定機器の配置図

のに対して 25 Hz の応答特性があり、乱れの計測がある程度可能である。

図-6 に観測期間中の潮位・有義波高・有義周期の記録を示す。ここで、図中の offshore point とは栈橋先端位置を意味している。この図に示すように、データの取得は上記の4日間に断続的に行われたが、このうち前半の10日10時までには、電磁流速計の設置方向に問題がありセンサー自体の wake をかぶる形になっていたこと、また後半の11日16時半以後は、濃度計が不調であったことから、ここでは、3月10日の15:47~16:07の20

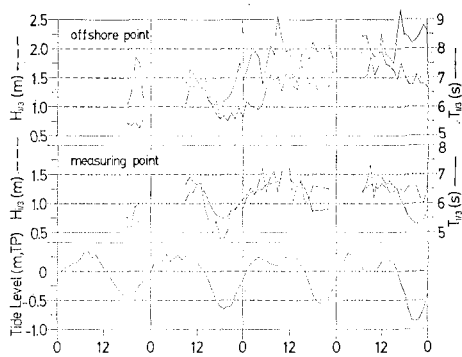


図-6 観測期間中の潮位・有義波高・有義周期

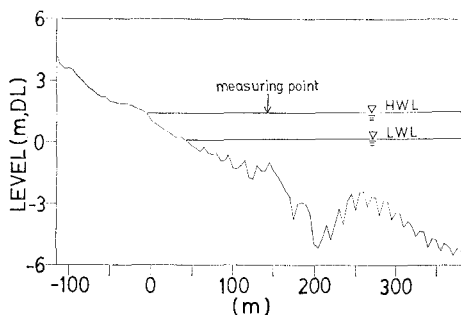


図-7 海底断面と測定位置

分間のデータのみを用いて解析を行った。この時の平均水深は 1.35 m で、波の主方向と平均流速の方向・大きさは、図-5 中に示されている。

図-7 は、10 日午前 10 時前後に行われた海底地形断面の測量結果を示したものである。これから分かるように、基準点から約 250 m の位置に bar があり、その陸側の trough 部を経て約 150 m から陸側での step 地形へとつながる形になっている。このときの第一砕波点は、沖の bar 上に位置しており、測定位置である 145 m の地点はほぼ第二砕波点付近にあたっていた。また、第二砕波点での砕波形式は、主として spilling 型であった。

4. 生記録上の大規模渦の特徴と浮遊砂雲との関係

不規則性の強い現地データを解析する際には、通常スペクトル解析や何等かの統計処理手法が用いられることが多い。しかし、ここで着目している大規模渦構造のような間欠的な現象の抽出にはこの様な方法はむしろ不向きであり、統計的平均操作の過程で必要とする情報のかなりの部分が失われる可能性がある。そこで、ここではなるべくこのような統計的平均操作を加えることなく、生記録を主体としてデータの解析を行うことを試みた。

(1) 生記録上に見られる大規模渦のパターン

図-8 は得られた生記録の一例で、上から、水位変動 η 、底面上 0.92 m での岸沖流速 u_1 (岸向きが正)、沿岸流速 v_1 (鹿島から波崎に向かう方向が正)、底面上 0.4 m の岸沖流速 u_2 、鉛直流速 w_2 (上向きが正)、瞬間レイノルズ応力 $-(u_2 - \bar{u}_2)(w_2 - \bar{w}_2)$ 、浮遊砂濃度 c を

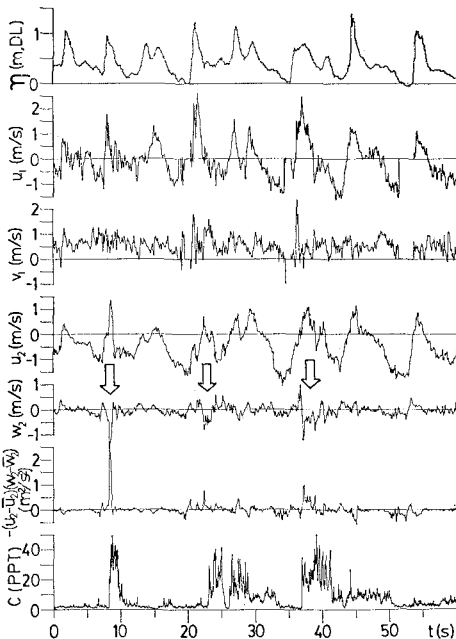


図-8 生記録の一例

示したものである。ただしここで言う岸沖流速とは、波の主方向に沿う方向の流速成分であり、沿岸流速とはそれに直角な方向の流速成分である。

このうち、鉛直流速 w_2 を見ると、下向きの強い流速変動が矢印の位相で間欠的に現れていることが分かる。(ただしこの場合の間欠性は、入射波の不規則性に基づく第二砕波点の時間変動に基づくものも含まれている。) この位相での岸沖流速 u_2 の変動を見ると岸向きの大きな値を示している。このことは、上層の大きな岸向きの運動量を持った流体塊が降下していることを意味しているが、これは、この位相でのレイノルズ応力 $-(u_2 - \bar{u}_2) \cdot (w_2 - \bar{w}_2)$ の間欠的な増大となって現れている。またこのとき、沿岸流速 v_1 はゼロではなく、やはり同程度の大きさの変動が現れている。

このようにここで見られた生記録上のいくつかの特徴は、三次元的な大規模渦の存在を反映したものと考えられる。また上記のように、この大規模渦はレイノルズ応力の生成にも重要な役割を演じていると考えられる。

(2) 浮遊砂雲の間欠的発生と大規模渦の関係

図-8 中の濃度変動記録を見ると、上述の矢印の位相で浮遊砂濃度が間欠的に増大していることが分かる。このことは、上層からの大規模渦によって底質の巻き上げが起こっていることを示すものと考えられ、ほぼ同様な海底地形条件で行われた前節の予備実験の結果とも符合するものである。

そこでこの関係をもう少し詳しく見てみるために、鉛直流速 w_2 が下向きの大きな値を示し、かつ後述する連行気泡に伴うノイズ信号が流速記録上に多量に含まれる位相を生データから読み取り、それを浮遊砂濃度記録上に矢印で示したものが図-9 である。これを見ると、矢印で示したほとんど全ての位相で浮遊砂濃度が増大していることが分かる。このことは、上記のように大規模渦と浮遊砂の生成との密接な関連性を示すものである。ただし、矢印以外の位相でも浮遊砂濃度の増大が見られるが、これは、他の地点で巻き上げられた浮遊砂雲が移流されて測定点に到達したケースを示すものと考えられる。

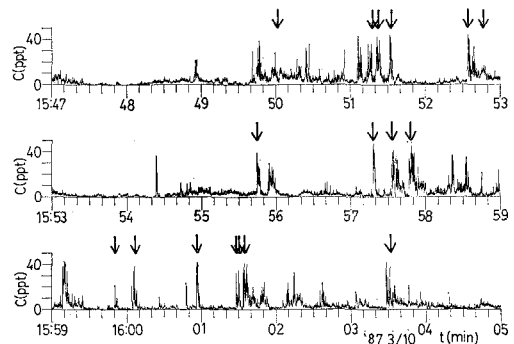


図-9 大規模渦と浮遊砂濃度の関係

5. 気泡による上昇流の生成とその役割

電磁流速計の電極(直径 5 mm)に気泡が接触し、それを覆う形になると一時的に絶縁状態になるため、出力信号中にノイズが現れる。図-9はこのノイズを取り除いた後のものだが、逆にこのノイズ信号を使えば気泡の存在を検出できる。

図-10は、生データからその移動平均値(平均時間 0.05 s)を差し引いてほぼ 10 Hz 以上の高周波成分を抽出し、表面波形および濃度波形と共に示したものである。これを見ると、通常の高周波乱れの現れ方とは異なったスパイク状のノイズがある程度かたまて間欠的に現れていることが分かる。このようなノイズのかたまりは、ここには示していないが大規模渦による流速変動と共に現れている。しかも、図によると、上層の流速記録のほうが下層よりも多くのノイズを含んでおり、さらに下層と上層のノイズの現れ方に時間遅れが生じていることが分かる。このようなことから、ここに見られるノイ

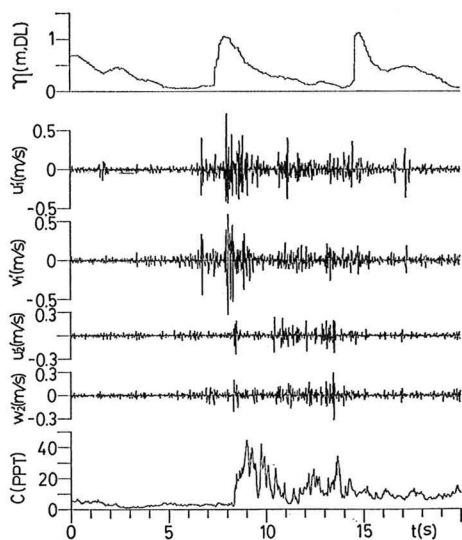


図-10 気泡に対応する流速記録上のノイズ



写真-1 砕波通過後の水塊の boil 状の沸き上がり

ズのパターンは、上層からの大規模渦に含まれる連行気泡が渦塊の下方への伸展と共に底面近くに輸送された結果生じたものと考えられる。

一方、写真-1は、砕波通過直後の水表面を栈橋上から撮影したものであるが、多量の気泡を含んだ水塊が boil 状に沸き上がっている様子がわかる。目視によると、この水塊には多量の砂が混ざっていることがあり、このような水塊の沸き上がりによって水表面にまで達する底質の大規模な巻き上がりが生じているものと推定された。このような水塊の上昇は、上記の連行気泡によって引き起こされるものと考えられるが、実際、著者の一人が行った室内実験¹⁾では、斜降渦通過後の水深全体にわたる弱い上昇流の発生に伴う中立粒子の運動が観察されている。しかしながら、今回現地で観察されたような大規模な上昇流の発生は通常の実験では観察されない。これは、ウェーバー数の違いによる気泡混入に関する scale 効果、ならびに海水と真水の泡立ちやすさの違い²⁾の現れと考えられる。

このように、現地では相対的に多量の気泡が砕波に伴う大規模渦によって連行されるが、渦塊が底面に達して浮遊砂が発生した後、気泡による密度効果によって上昇流が誘起され、それと共に多量の砂が上方に輸送されるものと考えられる(図-11)。

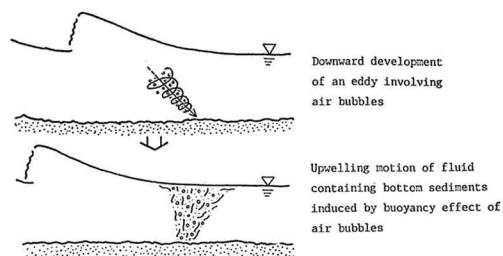


図-11 大規模渦による気泡の連行と引き続く上昇流の生成の概念図

6. おわりに

本研究では、現地データを解析することにより、現地における大規模渦構造の実態とその役割を明らかにすることを試みた。その結果、現地においても、これまでの室内実験で明らかにされているものに対応する三次元的な大規模渦構造が存在し、それが、レイノルズ応力の生成や底質の浮遊に重要な役割を果たしていることが示された。このような渦塊は渦度の carrier であると同時に多量の気泡の carrier でもあるが、現地ではこの気泡による密度効果が顕著であり、それによって誘起される上昇流により、底質の浮遊が大きく支配されているものと推定された。

謝辞: 本研究を行うにあたり、運輸省港湾技術研究所漂

砂研究室の加藤一正室長をはじめとするスタッフの方々には、現地データの提供等の面で多大なご援助を頂いた。また、建設省土木研究所の宇多高明海岸研究室長にも大型造波水槽の使用の機会を与えて頂くなどのご協力を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表します。

なお、本研究においては、文部省科学研究費一般研究(B)「砕波帯内外の波・乱れ共存場の力学構造と海底地形との相互作用に関する研究」(代表者: 日野幹雄)の援助を受けていることを付記しておく。

参 考 文 献

- 1) 日野幹雄・灘岡和夫・小俣 篤: 砕波帯内の乱れの組織的渦構造と水粒子運動について, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 1~5, 1984.
- 2) 灘岡和夫・小谷野喜二・日野幹雄: 二成分光ファイバー流速計を用いた砕波帯内流速場の特性の解明, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 50~54, 1985.
- 3) 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行: 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. 110~114, 1987.
- 4) 例えば, 堀川清司・堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦: 砕波後の波にともなう流速場に関する現地観測, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 46~50, 1979.
- 5) 柿沼忠男・伊福 誠・栗原 薫: 砕波帯における浮遊砂濃度に関する二, 三の観測例, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 321~325, 1985.
- 6) 例えば, 阿部友三郎: 「あわの科学」, 地人選書 4, 地人書館, 1984.