

斜降渦による底面近傍 3 次元流速変動に関する実験的研究

岡 安 章 夫*・岩 澤 秀 光**・片 山 裕 之***・敦 賀 仁****

1. はじめに

砕波による斜降渦は底質の浮遊に大きく影響し、砕波帯内における底質移動を考える上で重要である(例えば、灘岡ら, 1987, 岡安ら, 2000a)。従って、砕波帯内での浮遊漂砂を定量的に検討するには、斜降渦の特性をまず解明し、その底質移動への影響を評価する必要がある。

斜降渦を含む砕波帯内の流体運動は 3 次元性と非定常性、間欠性が強く、点計測による流速測定でその特性を把握することは困難である。岡安ら (2000b) は、高速度ビデオ撮影によって斜降渦による砂移動形態を把握すると共に、PIV を用いた底面上での砂粒子移動の追跡を繰り返し行い、底面付近での斜降渦の構造や特性について検討した。Cox・Anderson (2001) は岸沖・沿岸の 2 次元平面内において PIV (Particle Image Velocimetry) を用いた可視化実験を行っている。さらに、測定された流速の条件付きサンプリングにより砕波による乱れの定量的把握を試みているが、対象とした流速変動が斜降渦によるものであるかどうか明確ではない。また、LES (Large Eddy Simulation) 等のモデルを用いた 3 次元数値計算により砕波による渦形成の過程を解明する研究(渡部ら, 1998, Christensen・Deigaard, 2001) も行われているが、計算格子サイズと底面境界層を含む計算結果の妥当性についてはその検討が十分であるとは言えない。

そこで本研究では、実験水槽での砕波による底面上の砂移動を高速度ビデオで撮影することにより、斜降渦の発生とその構造、底面到達の位相等を評価した。また、高速ビデオ撮影と同時に 3 次元超音波流速計により底面近傍での 3 次元流速を記録し、斜降渦による局所流速変動や乱れ強度、底面最大流速の変化等について検討を行った。これにより、底面上の砂移動から斜降渦が形成されたと判断できる場合に限った流速変動の条件サンプリングが可能となる。

2. 実験の概要

(1) 実験条件

実験には、反射波の吸収制御機能を備えたピストン型造波装置を持つ長さ 17 m, 幅 0.5 m, 深さ 0.55 m の二次元波動水槽を用いた。この水路には 1/20 (法先 1 m のみ 1/10) の一様勾配斜面が設置されている。水路の側面はガラス張りであり、また、斜面の一部区間も 2 m に渡って底面ガラス張りとなっているため、下方からビデオ撮影が可能である。実験水槽の概略図を図-1 に示す。これらの実験において、 x は静水位汀線を原点とし岸向きを正とした岸沖方向座標、 y は波の進行方向左向きを正とした沿岸方向座標、 z は鉛直上向き座標である。

この実験水槽に、一様水深部での波高 11.6 cm (一様水深部の水深 29.8 cm), 周期 1.25 s の規則波を入射させた。砕波点の x 座標は $x_b = -326$ cm, 砕波水深 16.3 cm, 砕波波高 13.0 cm, 砕波形式は崩れ波型であった。巻き波型砕波の場合、砕波の突っ込みに伴う水塊の突入によって発生する大規模渦により底質が巻き上げられることがあり、砂の移動が斜降渦によるものであるかどうか判断することが難しい場合がある。そこで、本実験では崩れ波型砕波を対象とすることとした。

(2) 高速度ビデオカメラと流速計の設置

底面ガラス板上の斜降渦が最も頻繁に観察される領域において、底面上に薄く敷いた砂の移動を下方から高速度ビデオカメラ (DITECT 社製, HAS-200R) で撮影した。撮影領域は岸沖方向約 17 cm, 沿岸方向約 25 cm で、その中心は沿岸方向には水槽のほぼ中央、岸沖方向はおおよそ $x = -220$ cm の位置であった。これは、無次元岸沖距離 $x/|x_b| = -0.675 \pm 0.025$ に相当する。なお、撮影画像の解像度は 640 pixel $\times$ 480 pixel, 撮影間隔 1/200 s, シャッタースピード 1/400 s, 1 回の記録時間は約 2 s である。また、撮影画面の一部に砕波点での波高計出力の LED 表示を写し込むことにより、他の計測機器との同期を取った。

この撮影領域ほぼ中央の底面付近に 3 次元超音波流速計 (Sontek 社製, Micro ADV) を設置し、3 次元流速変動を記録した。この流速計は非接触式であり、計測点

* 正会員 工 博 横浜国立大学助教授 大学院工学研究院
** 西松建設(株)
*** 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所
**** 横浜国立大学大学院工学研究科

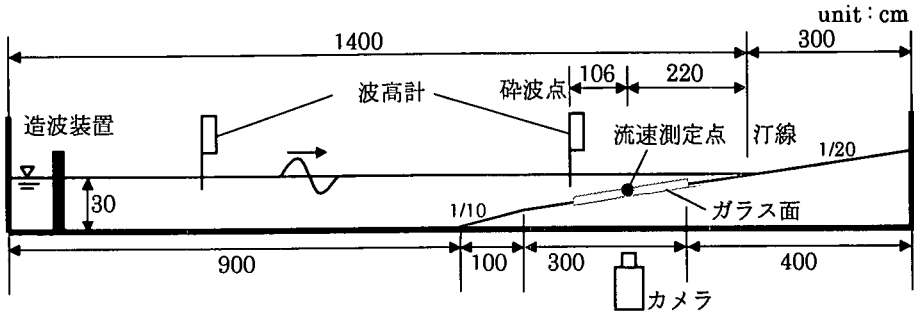


図-1 実験水槽と機器設置の概略

は超音波発射点より 5 cm 程離れているため、流速計本体が流体場に与える影響は小さい。本実験ではさらに、後流の影響を最小限にするために流速計本体を 45 度傾けて設置した。流速の測定領域は高さ 4.5 mm、直径約 5 mm の円筒形をしており、これを底面にほぼ接する形に配置することで、測定領域の中央をほぼ底面上 2 mm とした。また、この流速計の応答性は 50 Hz である。

(3) 実験手順とデータ収録

あらかじめ静水状態において、撮影領域に中央粒径約 0.1 mm の砂を砂同士がかぶらない程度に薄く均等に敷き、造波開始直前から流速計、波高計の出力をサンプリング周波数 200 Hz でデジタル・データ・レコーダに収録した。その後、造波開始後 4 波目の波峰が砕波点を通後直後にビデオ撮影を開始した。従って、本実験で観測された砂移動は、4 波目の波によるものである。一度砂が移動すると明瞭な砂移動パターンが判別できないので、計測終了後再び静水状態としてこれを繰り返し、合計 278 回の試行を行った。得られた画像から斜降渦の底面到達位置、時刻と砂移動領域の大きさ、移動パターンを判別すると共に、同時に得られた流速、水位変動を解析した。

3. ビデオ画像による観測結果

(1) 砂移動形態の分類とその出現数

岡安ら (2000b) はビデオ撮影による砂移動解析結果から、砂移動パターンの分類を行い、斜降渦が相反する回転方向を持つ 2 つの渦のペアである可能性を指摘した。本研究においても、まず、同様な視点において砂移動パターンの分類を行った。斜降渦の間欠性により、上記 278 回の試行のうち砂移動が観測されたのは 256 回であり、これを砂移動形態と規模を基に以下の 6 種に分類した。

- 明瞭に 2 つのパターンが確認できるもの：31 ケース、
- 1 つのパターンとも 2 つのパターンとも判別できないもの：53 ケース、
- 斜降渦の規模が小さいため上記 a, b の判別が不

表-1 斜降渦底面到達時の位相 (岸沖流速ゼロ・アップ・クロス時基準)

平均値	最小値	最大値	標準偏差
0.368	0.144	0.652	0.105

能なもの：134 ケース、

- 砂移動領域の半分以下しかフレーム内にないため斜降渦によるものか不明のもの：7 ケース、
- かなり小さな領域で砂の一部が直線的に沖側へ移動しているもの：31 ケース、
- 砂移動が確認できなかったもの：22 ケース。

全体の 80% 以上で砂移動が確認されたが、d, e に分類されたものにおいては、砂移動が斜降渦によるものかどうかは不明である。比較的大規模 (直径 10 cm～15 cm) のものは a および b に分類された。また、c に分類されたケースは小規模の砂移動が複数観察されたものが多く、全体の半数近くを占める。これは佐藤ら (1989) が、崩れ波砕波の場合の底質巻き上げは小規模で局所的に起こると報告していることと符合すると考えられる。また、斜降渦が単一の渦からなると明瞭に判断されたものはなかったが、これは岡安らの観測結果と整合するものである。

(2) 斜降渦の底面到達位相

ビデオ撮影と同期させた水位変動、流速変動から、斜降渦の底面到達位相について検討した。上記分類の a～e に該当するケースについて、渦が底面に到達した (砂が移動し始めた) 位相を求めた。位相は、4 波目の波による岸沖流速 u がゼロ・アップ・クロスする時刻を位相 0 とし、5 波目の波による u がゼロ・アップ・クロスする時刻を位相 1 とした。対象となる 256 ケースについて斜降渦到達位相をまとめたものを表-1 に示す。

これによると、斜降渦は波峰通過後 (波峰通過の位相はおおよそ 0.1) しばらくしてから底面に到達していることが分かる。このとき岸沖流速は、戻り流れの影響もあり、既に沖向きに転じている (図-5 参照)。ビデオ画像からも斜降渦による底面上の砂移動は、概ね沖向きとなっている。巻き上げられた底質の最終的な移動方向に

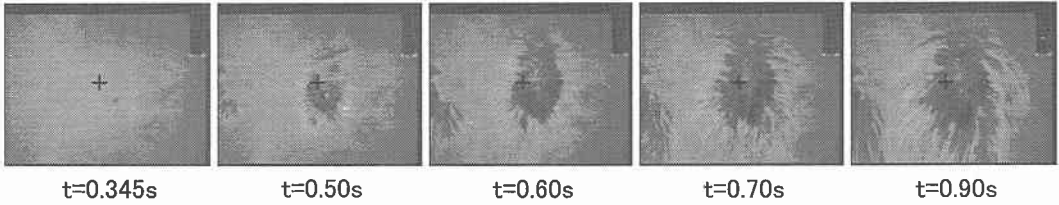


写真-1 流速測定点が砂移動領域のほぼ中央に位置している場合の砂移動状況のビデオ画像例

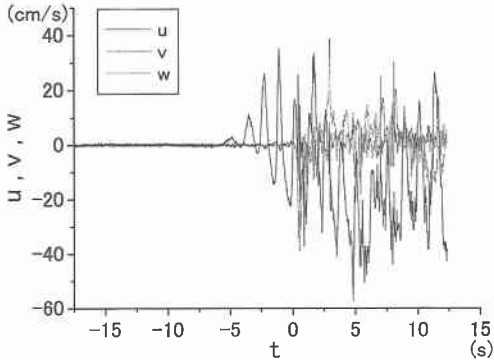


図-2 計測された流速記録の例

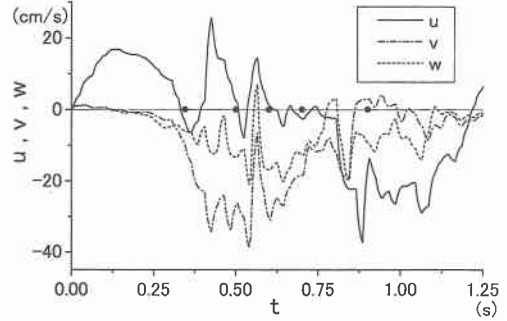


図-3 写真-1 のケースでの流速変動

については、底質の巻き上げ高さや移流・拡散の状況に依存するが、戻り流れの影響も考慮すると、斜降渦による底質移動は概ね冲向きに寄与することが推察される。

4. 斜降渦による流速変動特性

(1) 流速測定点と渦到達点の関係による流速変動の分類と特性

まず、計測された流速変動の例を図-2 に示す。図中に示された流速記録は造波開始前からのもの(時刻 $t=0$ は4波目の岸沖流速ゼロ・アップ・クロス時)であり、4波目の波峰通過後から流速の乱れ変動が大きくなっていることが分かる。また、砂移動が観測されたのも4波目以降であった。このことは4波目の波では前の波による乱れの影響がほとんどないことを示し、斜降渦による流速特性を純粋に議論する上では都合がよい。しかしながら、4波目以降岸沖流速 u に長周期的な変動が見られることや、それ以降の流速には比較的大きな乱れ変動が見られることから、4波目においては碎波帯内の流速場は定常に達していないと考えられる。

画像撮影と同時流速記録を行った全278ケースについて、流速測定点と斜降渦の到達点との位置関係に応じて新たに下記のような分類を行った。

- A) 流速測定点が砂移動領域(斜降渦)のほぼ中央に位置しているもの：18 ケース、
- B) 測定点が砂移動領域の端に位置しているもの：134 ケース、

C) 測定点が砂移動領域から離れているもの：104 ケース、

D) 観測領域で砂移動が観察されなかった(斜降渦が発生しなかった)もの：22 ケース。

写真-1 はこのうち分類 A の砂移動画像の1例である。時刻 $t=0.345$ s (4波目の流速ゼロ・アップ・クロス時が $t=0$) は砂移動開始時刻であり、流速計測点は写真中に+印で示してある。このとき計測された流速を図-3 に示す。 t 軸上の黒丸は写真-1 の画像の位相を示している。斜降渦到達(砂移動開始)後に、岸沖方向流速 u 、沿岸方向流速 v 、鉛直方向流速 w が大きく変動していることを示している。このケースに関しては、 u 、 v の変動が波峰通過時の u よりも大きい。比較のため分類 D の流速測定例を図-4 に示す。砂移動が観測されなかったケースにおいては、 u は波動運動に伴うものと推測される穏やかな変動を示し、 v および w の変動も小さい。

(2) 斜降渦による底面付近の流体運動と乱れの特性

図-5 は分類毎の u 、 v 、 w の各位相平均流速である。位相平均としてはどの分類についても全ケースの位相平均とほぼ同様の流速変動を示すが、測定点が斜降渦から遠ざかるに従って波谷位相付近での冲向き流速が大きくなる。碎波帯内のこの領域では一般に戻り流れが底面付近で最大となることを考えると、斜降渦が存在する領域での冲向き流速低下は、底面との剪断抵抗が増加するか、あるいは上層の流体との剪断抵抗が増加するかによるものであると考えられる。いずれにせよこのことは、斜降渦が局所的な渦動粘性係数を増大させていることを示唆

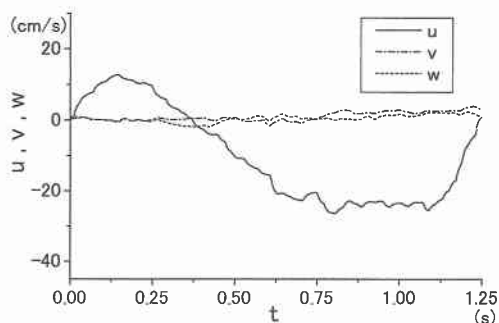


図-4 砂移動が観測されなかったケースでの流速変動

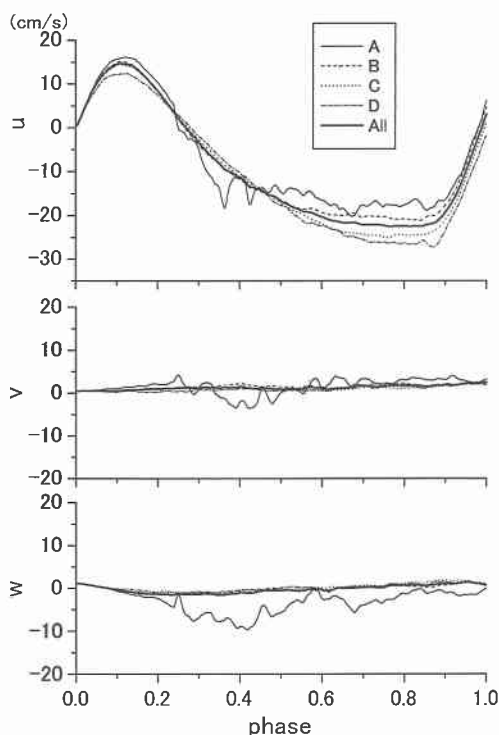


図-5 パターン別位相平均流速変動

している。

図-5では、 v の位相平均流速に顕著な傾向は見られない。そこで、渦周辺の流速構造を検討するために、分類Bでのケースを、流速測定点に対し水槽上方から見て渦が波の進行方向左側に形成された場合と右側に形成された場合に分けて、それぞれの位相平均流速を算出した。図-6を見ると、左側に形成された渦による v は負(右向き)、右側のものは正(左向き)となっている。このことは、少なくとも沿岸方向流速については底面付近の流速が渦の外側方向を向いていることを示している。また、図-5の w については、分類Aによるもので顕著な下降流が観測されており、渦中心付近での鉛直流速は下向き

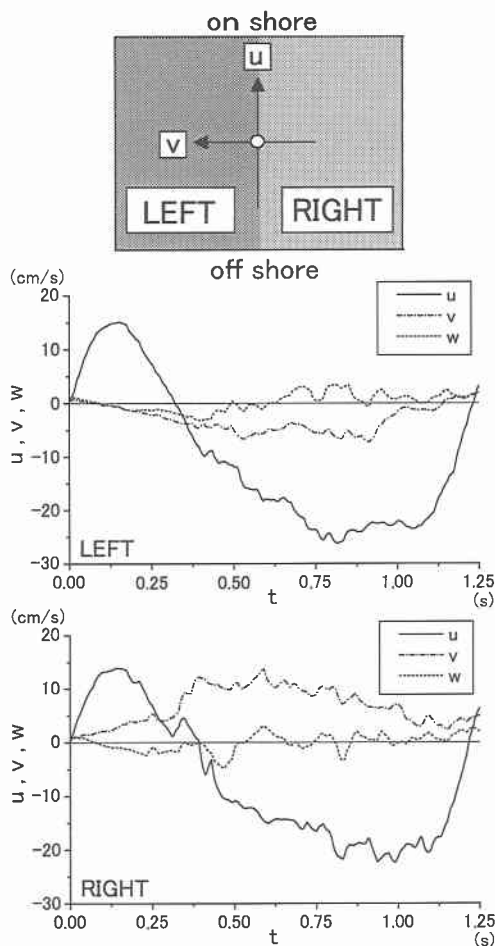


図-6 砂移動領域が流速測定点に対し左および右に位置する場合それぞれの平均流速変動

であることが分かる。しかしながら、このことからだけでは斜降渦が主に流体塊の下降によって特徴づけられるのか、あるいは中心部分が下向きとなる岸沖方向に伸びた渦軸を持つ相反する2つの渦のペアとして特徴づけられるのか判然としない。

各ケースにおいて、流速変動の全ケース位相平均流速からの偏差を乱れと定義した。図-7は上記分類A~D毎の流速の乱れ強度および全ケース平均の乱れ強度の比較である。図中 σ は対象ケース内での分散値を示す。図から斜降渦が計測点上あるいはその近傍に到達した場合(分類AおよびB)の乱れ強度が著しく大きいことが分かり、斜降渦が砕波帯における乱れに支配的な役割を示していることが分かる。

(3) 底面付近の剪断応力

図-8は各分類での最大水平流速(水平流速 $=\sqrt{u^2+v^2}$)の平均値の比較である。分類Dに比べて分類Aでは非常に大きな値となっており、斜降渦によって底

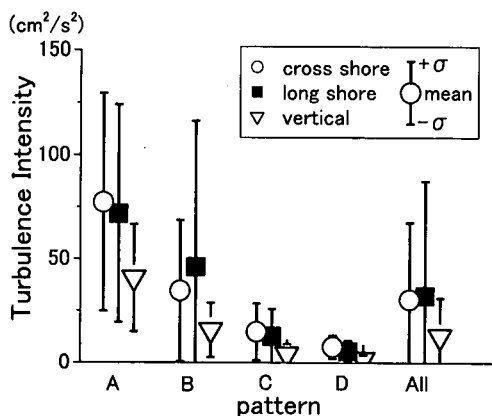


図-7 パターン別乱れ強度の平均値と標準偏差

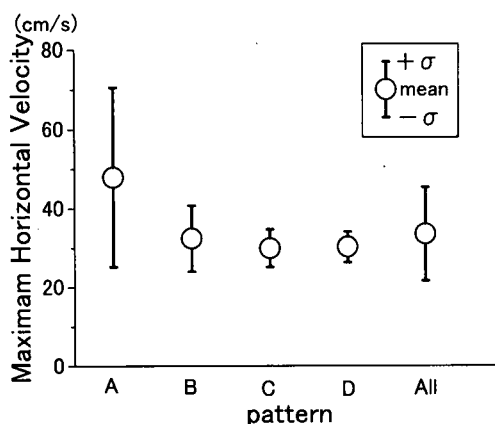


図-8 パターン別最大水平流速の平均値と標準偏差

面付近の剪断応力が増大し、底質の移動に大きく影響していると判断できる。

また、図-9に分類A(図-3と同じケース)および分類D(図-4と同じケース)での水平流速絶対値の時系列変動例も示した。図-3と比較すると、斜降渦によると考えられる流速変動により、水平流速が波動流速によるものと比べて斜降渦到達時に非常に大きくなっていることが確認できる。また、水平流速と同時に鉛直流速の変動も顕著となっていることが分かる。これらのことから、斜降渦が底質の巻き上げおよび浮遊に支配的であることが推測される。

5. 結 論

本研究では、砕波による底面上の砂移動を高速度ビデオで撮影することにより、斜降渦の発生とその底面到達の位相を評価すると共に、3次元流速計による底面上での同時流速記録からそれによる局所流速変動や乱れ強

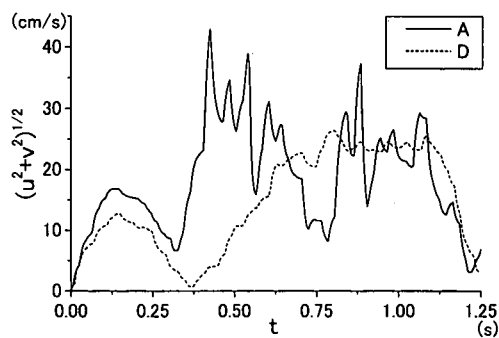


図-9 パターンAおよびDでの合成水平流速の時系列変動

度、底面剪断応力の増加、底質の移動等について検討を行い以下の結論を得た。

- 1) 砕波による斜降渦は、波峰通過後ほぼ0.3周期程度で底面に到達する。
- 2) 斜降渦の到達に伴い、底面付近で大きな流速変動が観測され、鉛直流速変動も著しく増大する。
- 3) 斜降渦により乱れ強度も増大し、見かけ上の渦動粘性係数も増大する。
- 4) 斜降渦により底面付近の剪断力は増大し、底質の移動に大きな影響を及ぼす。鉛直流速の増大とあわせて、底質の移動・浮遊に支配的な要因であることが確認された。

最後に、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(2000a): 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.
- 岡安章夫・敦賀仁・松川祐・Nimal Wijayarathna・片山裕之(2000b): 画像解析による斜降渦の特性とその発生分布について, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 141-145.
- 佐藤慎司・本間基一・柴山知也(1989): 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, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 279-283.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐龍行(1987): 砕波帯内の三次元的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.
- 渡部靖憲・森 憲広・佐伯 浩(1998): 砕波の3次元 Large Eddy Simulation, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 146-150.
- Christensen, E.D. and R. Deigaard (2001): Large eddy simulation of breaking waves, Coastal Engineering, Elsevier, Vol. 42, No. 1, pp. 53-86.
- Cox, D.T. and S.L. Anderson (2001): Statistics of intermittent surf zone turbulence and observation of large eddies using PIV, Coastal Engineering Journal, JSCE, Vol. 43, No. 2, pp. 121-131.