

碎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

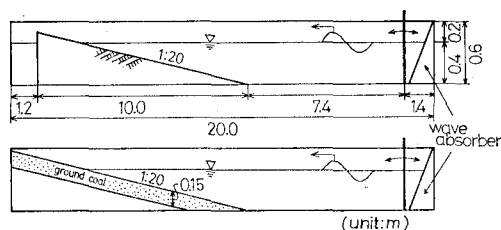
灘岡 和夫*・上野 成三**・五十嵐竜行***

1. はじめに

近年、漂砂量公式、特に岸沖漂砂量公式の提案がいくつか行われてきている¹⁾。このうち、沖浜帯での砂漣の存在下での漂砂については、それが砂漣回りの剥離渦という明確な流体運動が介在する現象であるため、比較的物理性を持った形での定式化が可能である。これに対して、碎波帯内の漂砂については、通常の現地の条件下では砂漣は消滅することが多く、流速場の構造も複雑になってくるため、その定式化も格段に難しくなる。そのため、現在のところ、U字管を用いた簡単な往復流のもとの sheet flow を取り扱った例は二三あるものの、多くの場合、漂砂の移動機構の詳細にはあまり触れず、むしろそれを black box と見立てて、漂砂量とシールズ・パラメータ等を経験的に関連づける試みがなされているにすぎない。

一方、最近になって、漂砂の直接の外力となる碎波帯内の流速場の構造、特に大規模渦構造の実態が急速に明らかにされてきている。特に、灘岡ら^{2),3)}は、碎波帯内の広い範囲にわたって、底面近傍まで達する三次元性の強い大規模渦構造が発達することを示している。このことは、plunging breaker の場合に局所的に形成される horizontal roller が碎波点近傍の底質浮遊に関連すると言う従来の議論^{4),5)} だけでは大規模渦の役割の評価は不十分で、碎波帯内のかなり広い範囲にわたってこの斜降渦に代表される大規模渦が砂移動に関与している可能性を示唆している。

そこで本研究では、碎波帯内における砂移動のメカニズムを把握すると言う観点から、砂移動の直接の外力となる底面近傍の主としてこの斜降渦に伴う流体運動の特性を LDV や圧力センサーにより詳細に調べ、それとの関係から、結果としての砂移動特性(特に浮遊砂の特性)を明らかにし、両者の間の因果関係を解明することを試みた。



図一1 実験装置概略図

2. 実験装置ならびに実験方法

実験は、図一1に示されるような長さ 20 m、幅 0.4 m の二次元水路の一端に勾配 1/20 の斜面を設置して行った。斜面は、木製の固定床としたものと、それを岸側にスライドさせその上に石炭粉(中央粒径 0.21 mm, 比重 1.45)を厚さ 15 cm に敷き詰めて移動床としたものの 2 種類である。

入射波の条件は、碎波形式の異なる 3 ケースとしたが、ここでは、その内の (horizontal roller の発生しない) spilling breaker のケースの結果について述べる。この場合の周期 T は 1.27 s, 碎波波高 H_b と碎波水深 h_b は、それぞれ 14.8 cm と 16.7 cm ある。

水位変動及び水平・鉛直流速変動の測定にはそれぞれ容量式波高計、レーザ流速計(二成分光ファイバー型)を用いた。また、底面での圧力変動の測定には小型の圧力センサー(直径 1 cm, 厚み 3 mm, 応答特性 1 kHz)を使用し、浮遊砂濃度変動の測定には光電管式の濁度計を用いた。

3. 固定床実験による底面近傍の流体運動特性の解明

(1) 流速記録上に見られる乱れの間欠性

図一2は碎波帯内の bore が十分発達した $h/h_b = 0.67$ (h は静水時の水深) の水路中心位置での水位 η 、底面での圧力 p 、底面上 0.7 cm での水平流速 u 、及び鉛直流速 w の時間変動記録を示したものである。このうち流速変動記録(u, w)を見ると、波の crest 後方の位相で極めて間欠的な乱れが生じていることが分かる。また、

* 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

圧力変動記録 p も同様の位相においてある程度の乱れが認められる (図中の矢印). この流速及び圧力変動にみられる間欠的な乱れは, ビデオとの同時記録から, 最近, 灘岡ら^{2),3)} によって示された大規模渦 (特に斜降渦) (図-3) が底面まで到達している時に生じていることが

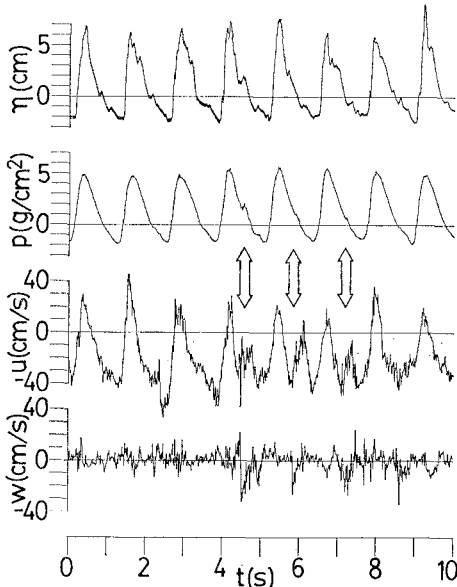


図-2 生記録の一例

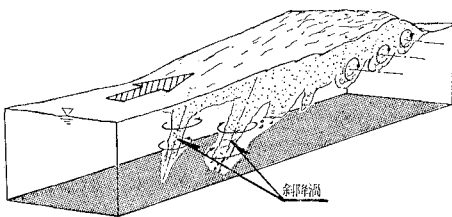


図-3 碎波帯内の大規模渦構造^{2),3)}

確認された. このことから, 斜降渦が測点を通過するとき流速変動に激しい乱れが生じ, この渦塊が底面まで到達していわば底面をヒットすることにより圧力変動に乱れが生じるものと考えられる. このことは, 碎波帯内での浮遊砂の生成にこのような上層からの斜降渦による底面での攪乱作用が大きく関与する可能性があることを示唆している.

(2) Conditional Sampling による斜降渦の解析

そこで, この斜降渦が流速場に及ぼす影響をより定量的に調べるために, まず水平・鉛直流速の乱れ強度 u' , w' の位相平均値を算出してみた. その結果が図-4で, 碎波帯内の $h/h_0=0.67$ における底面上 0.7, 2.7, 4.7, 6.7 cm の4点で得られた各々約 200 波分のデータから算出されたものである. ここの乱れの定義は, 生の変動記録とそれに 0.2 s の幅で移動平均をかけたものとの差で, ほぼ 5 Hz 以上の高周波成分を意味している.

同図を見ると, 上層の $z=6.7$ cm での分布には crest 付近の位相において乱れ強度 u' , w' のゆるやかな増加が認められるけれども, ここで注目している底面近傍での乱れ強度の分布には, crest 付近の位相での shear の増大によると考えられる乱れ強度の増加は見られるものの, それ以外ではほとんど位相依存性は現れておらず, 上述の crest 背後の位相での斜降渦による底面近傍における間欠的な乱れの生成の影響はこの図でみる限り現れていないことが分かる. しかし, ここで注意すべきことは, この斜降渦の構造自体がもともと空間的に強い3次元性を帯びたものであるため, 一地点だけで測定された流速記録上には斜降渦の影響は一波ごとに同様には現れず, さらに平均操作の過程でその情報のかなりの部分が失われると考えられることである.

図-2 を見ると, 流速記録上にさまざまな乱れが常に現れているのに対し, 圧力記録上にはわずかな乱れが希に発生しているだけであることが分かる.

これは, 圧力変動が流速変動の2乗でできくため, ビデオとの同時記録によっても斜降渦

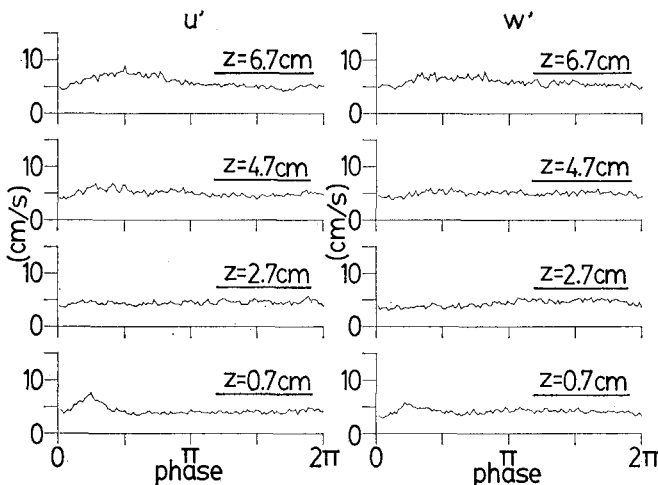


図-4 乱れ強度の位相平均値

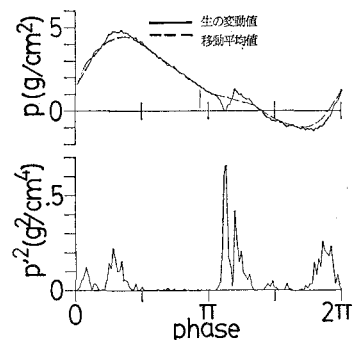


図-5 斜降渦到達時の圧力変動の生記録と乱れ強度

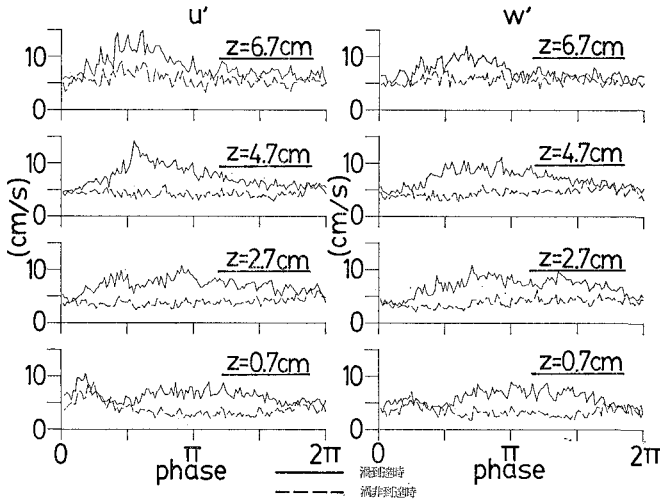


図-6 条件付抽出法による乱れ強度の位相平均値

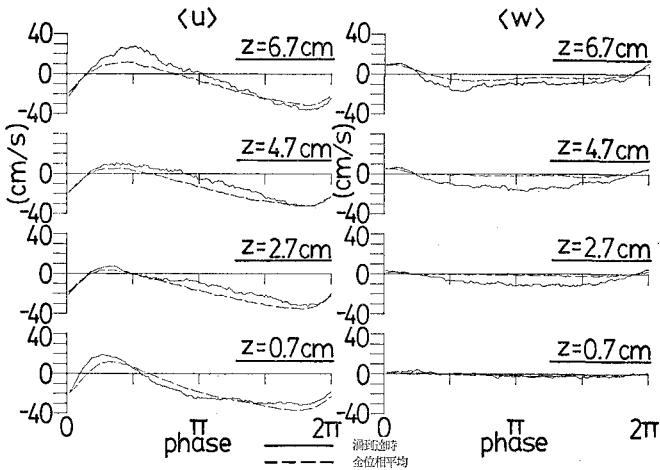


図-7 条件付抽出法による位相平均値

が底面の圧力計を直接たたく場合にのみ圧力記録上に鋭い乱れが現れることが確かめられている。そこで、ここではこのことを逆に利用してこの圧力変動記録の乱れの生成を trigger とした conditional sampling を行うことにより、斜降渦が測点を通過している時のイベントのみを抽出して斜降渦が流速場に及ぼす影響を詳しく調べを試みた。具体的には、まず得られたデータを zero up cross 法を用いて一波ごとに分解した後、各波の位相区間 $[\pi/2, 3\pi/2]$ での圧力変動の乱れの強弱を調べ、このようにして得られた乱れ強度が適当に設定したトリガーレベルを越えた場合、この一波分のデータを斜降渦が到達している時のデータとして抽出した（抽出割合は約 1/10 で、抽出サンプル数は約 50）。なお、検査する位相区間を $[\pi/2, 3\pi/2]$ としたのは、位相区間 $[0, \pi/2]$, $[3\pi/2, 2\pi]$ に現れる圧力変動の乱れが、砕波の crest 付近の水面そのものの凹凸によるものや、乱れの算出方法

（移動平均法）の問題により波の非線形性（高次の harmonics）の影響が見かけ上乱れとして出てくるものであること、また、目視の結果、斜降渦が底面に到達する位相は crest 後方の位相に集中していること等の理由によるものである（図-5）。

図-6 には、このような条件付抽出により斜降渦が底面まで到達していると判別された波のみから算出された乱れ強度 u' , w' の位相平均値（実線）と、同様の方法により斜降渦が到達していないと判別された波のみから算出された乱れ強度 u' , w' の位相平均値（破線）が示されている。同図から、斜降渦到達時の乱れ強度が、明らかな位相依存性を持った形の分布を示すのに対し、非到達時の乱れ強度にはそれが現れていないことが理解できる。しかも、斜降渦到達時には非到達時に比べて乱れ強度が約二倍ほど増大しており、底面近傍といえども砕波によって生じる上層からの乱れの影響が大きいことが分かる。また、測点が底面に近づくに従って乱れ強度のピーク位置が波の crest 直後の位相からより後方に移動していくことから、斜降渦が crest 後方から傾いた軸に沿って底面まで伸びている構造であることも同時に示されている。

図-7 は、前述と同様の方法により算出した斜降渦通過時の水平流速 u 鉛直流速 w の位相平均値（実線）を全データの水平流速 u 鉛直流速 w の位相平均値（破線）と共に示したものである。同図より斜降渦到達時には、それ以外の場合に比べて水平流速 u は岸向き

に、また鉛直流速 w は鉛直下向きに増大する形になっていることが分かる。このことは、上層にある岸向きの大きな運動量を持った流体塊が斜降渦によって下層に輸送されていることを示すものである。

この様に、砕波帯内の流速場は、上層からの三次元的大規模渦（斜降渦）によって基本的特徴づけられている。特に、この大規模渦が底面に達することにより底面近傍の流速場に間欠的な乱れがもたえられることから、このような渦構造が、砕波帯内の砂移動、特に底質の巻き上げ等に対して重要な役割を果たしているものと考えられる。

4. 移動床実験による浮遊砂特性ならびに大規模渦との関連の解明

(1) 斜降渦と底質の浮遊の可視化

次に実際に底面を移動床として実験を行い、固定床実

験の結果より明らかになった底面近傍の流体運動特性と底質の浮遊の関係について検討した。

図-8 は砕波帯内の $h/h_0=0.67$ の断面での水位変動 η と同断面の底面上 1.0 cm の位置での濃度変動 c の生記録を示したものである。同図には、波のかけ始めの合計 3 波分のデータが示されているが、1 波目は砕破していない波で濃度レベルも低く浮遊砂はほとんど発生していない。2 波目以降は、砕破している波で 2 波目の後半の位相で濃度レベルが増大しているのが分かる。図中のアルファベットは同時に撮影された連続写真の撮影時間を示している。これら一連の連続写真(写真-1)及びそのスケッチ(図-9)から前述の濃度レベルの増大に対応して斜降渦が底面まで到達し底質をヒットすることにより多量の浮遊砂が発生している様子が良く分かる。以下に、順を追って詳しく見てみると、

(A)…ほとんど浮遊砂は発生しておらず、わずかに底面

に沿う sheet flow 状の砂移動が認められるだけである。

(B)…砕波によって生じた bore の crest 部分に水平渦が

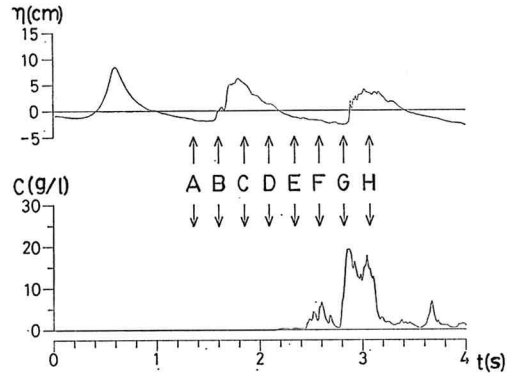


図-8 水位・濃度変動の生記録

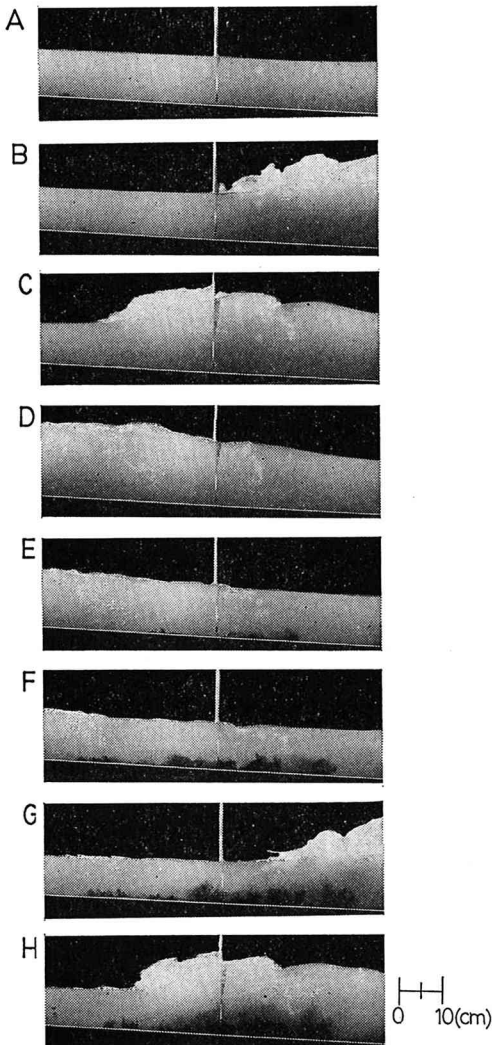


写真-1 斜降渦による底質浮遊の連続写真

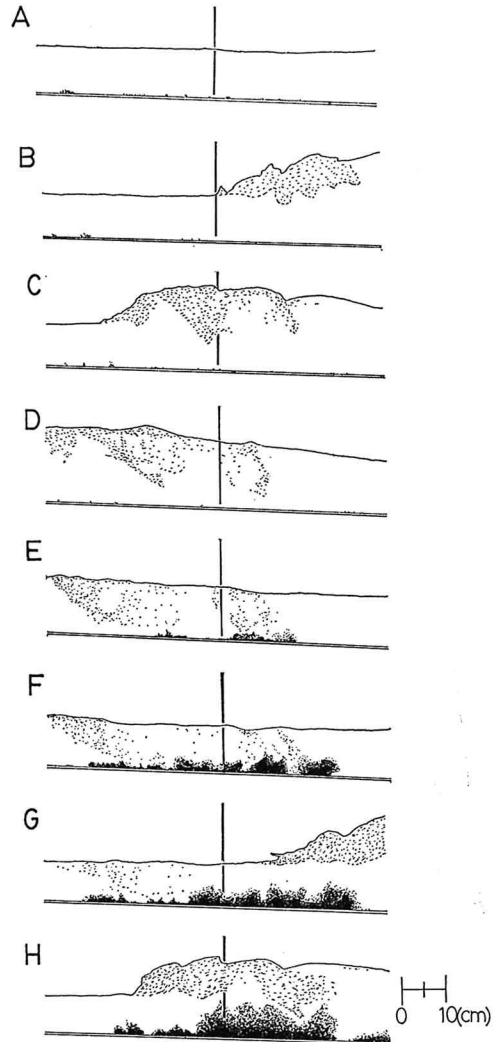


図-9 写真-1 のスケッチ

生成されている。

(C)…波の crest 後方で水平渦が斜降渦に変形しつつある。まだこの時点では底質の浮遊は見られない。

(D)…斜降渦が底面に伸びて行く。

(E)…斜降渦が底面をヒットした瞬間。この時点で底質が巻き上げられている。

(F)…斜降渦により底質が多量に巻き上げられている。濃度記録上にも反応が認められる。

(G)…巻き上げられた底質が戻り流れによって沖向きに移流している。また次の波の crest 前面で上向きの波の軌道流速により大きく上層に移流拡散している。

(H)…次の波の斜降渦が底面に伸びて行く。

以上のように、可視化の点からも、砕波帯内の底質の巻き上げに対する斜降渦の密接な関連性が示された。

(2) 浮遊砂濃度の空間分布と流速特性の関係

そこで、この様な斜降渦と浮遊砂の関係をより定量的に検討するために、底面上 0.5 cm と 1.0 cm での平均濃度値 $\bar{c}$ の岸沖方向分布をとってみたものが 図-10 である。同図には底面上 0.7 cm での水平軌道流速振幅 u_m と鉛直流速の乱れ強度 w' の分布も併せて示してある。ただし、実験は各測定毎に前もってフラットな面になら

して行い、解析には、波を入射後 wave set-up が完了し波が安定した後から底面に砂澱が形成される前までのデータ(約 70 波分)を用いた。

今回の実験では、底面上 0.5 cm の位置は掃流砂層内に位置しているが、底面上 1.0 cm の位置は掃流砂層から外れている。同図を見ると、掃流砂層内の底面上 0.5 cm の濃度レベル c は水平軌道流速振幅 u_m (従ってシールズパラメータ Ψ_m) に対応して砕波点で最大値を示しているのに対し、掃流砂層を外れている底面上 1.0 cm での濃度レベル c は u_m ではなくむしろ乱れ強度 w' に対応した地点で最大値を示している。これらのことから、砕波帯内での浮遊砂の発生は上層からの大規模渦による乱れ、特に、斜降渦が底面まで到達し、底質を巻き上げるという効果にかなり支配されることが明らかになった。

5. おわりに

従来岸沖漂砂量の算定法では、 Ψ_m や u_m といった底面摩擦に関連する量を外力として評価しているが、本研究の結果により、砕波帯内ではその広い範囲にわたって、上層からの斜降渦で代表される「上から決まる」流体運動によっても砂移動(特に底質の浮遊現象)がかなり規定されていることが明らかになった。

最後に、本研究が文部省科学研究費一般(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)による研究成果の一部であることを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 堀川清司 編: 海岸環境工学, 東京大学出版会, 1985.
- 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.
- 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.
- Miller, R. L.: Role of vortices in surf zone prediction: sedimentation and wave forces, Beach and Nearshore Sedimentation Soc. Econ. Paleontol. Mineralog., Spec. Publ. No. 23, pp. 92~114, 1976.
- 柴山知也・堀川清司: 砕波による底質の浮遊, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 302~306, 1985.

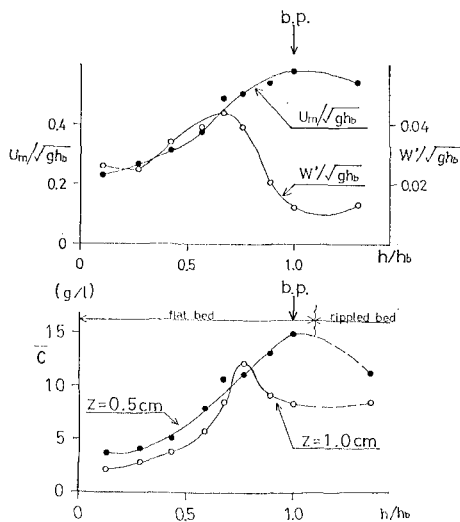


図-10 軌道流速振幅, 乱れ強度, 及び平均濃度の岸沖分布