

巻き波型砕波による乱れと底質浮遊機構

酒井 哲郎*・内田 雅博**

1. ま え が き

砕波帯における漂砂現象を解明する上で重要な外力の一つとして、砕波による乱れが認識され、測定機器の開発とともに、とくに実験水槽でその測定が行なわれるようになった。そこでは、砕波による乱れの定義、乱れ強度やレイノルズ応力の位相変化と鉛直分布などが議論されているが、これらはいずれも底質の浮遊機構を直接議論したものではない。

砕波によるスケールの大きい渦の存在については、榎木ら¹⁾が horizontal roller と呼んで砕波後の波の減衰機構の議論で扱っている。さらに Miller²⁾ も、連行気泡の動きから同様の渦の挙動を解析し、渦と底質移動との関係について議論している。巻き波型砕波と浮遊漂砂との関連を議論したものとしては、柴山ら^{3)~5)}の研究もある。さらに昨年 Peregrine⁶⁾ は、最近の斜面上での砕波に関する研究を解説し、その中で Miller 同様巻き波型砕波の形態に関して、かなり規則的な運動が存在することを示した。

ここでは、実験水槽内の一樣勾配斜面上で砕ける巻き波型砕波による砕波帯内の岸沖および鉛直方向の流速を、2成分レーザードップラー流速計で同時測定するとともに、中立粒子をトレーサーとして砕波帯内の水塊の突入によって生じるとされている渦運動の実態を明らかにする。さらにこの渦運動を流速計によって測定された流速によって説明することを試み、底質の浮遊機構との関連を議論する。

なお、レイノルズ応力に関しては、土木学会の第39回年次学術講演会⁷⁾で発表する予定である。

2. 実験装置、条件および方法

(1) レーザードップラー流速計による流速測定

a) 実験装置

実験は、京都大学工学部土木工学教室地下実験室の長さ 27 m、幅 50 cm、高さ 70 cm の両面ガラス張り水槽を用いた。水槽の一端に勾配 1/20 の斜面を設置した。

用いた流速計は、往復流の2方向成分が測定可能なレーザードップラー流速計 (LDV) である。

b) 実験条件および方法

実験条件を表-1に示す。ここで i は斜面勾配、 T は

表-1 実験条件

i	T (sec)	h_b (cm)	H_b (cm)	W (cm)	H_0/L_0
1/20	1.82	14.0	13.0	280	0.019

波の周期、 h_b は砕波点の静水深、 H_b は砕波高、 W は砕波帯幅、 H_0/L_0 は換算沖波波形勾配である。砕波点 (b.p.) より岸側 45 cm から 65 cm まで、岸方向に 5 cm おきに5測線とり、各測線において鉛直方向に底面の約 1 cm 上から静水面下約 3 cm までの7~8点の測定点をとった。各測定点での流速測定は、90秒間行なった。図-1に、砕波帯内における測定範囲が示されている。

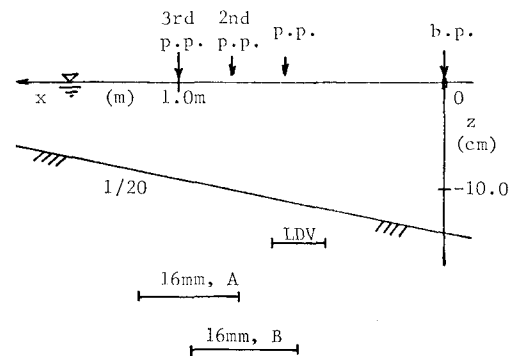


図-1 測定範囲

(2) 中立粒子による渦運動のトレース

a) 実験装置

実験水槽、斜面などは、(1)のレーザードップラー流速計による流速測定の場合と同じである。トレーサーとして、比重約 1.0、直径約 2 mm のピンクと黒に着色したポリスチレン粒子を用いた。16 mm カメラは、水槽の外側から、波の進行方向に直角に向けて設置した。

b) 実験条件および方法

実験条件は、実験 (1) と同じ 表-1 に示す通りであ

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

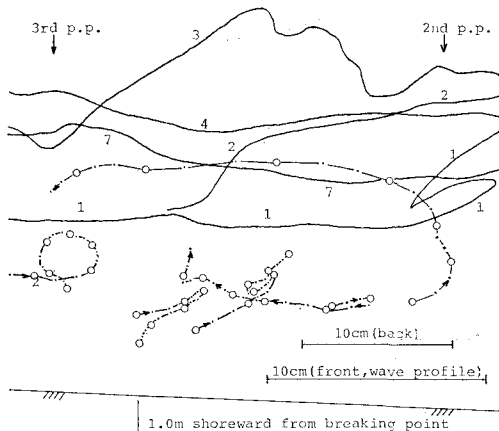
** 正会員 工修 間組 (株)

る。撮影区間は、図一1に示すように、2種類の区間 A、B を選んだ。中立粒子を、撮影区間よりやや岸側の水面上から投入し、その動きを数波の波が通過する間、毎秒 64 コマで撮影した。

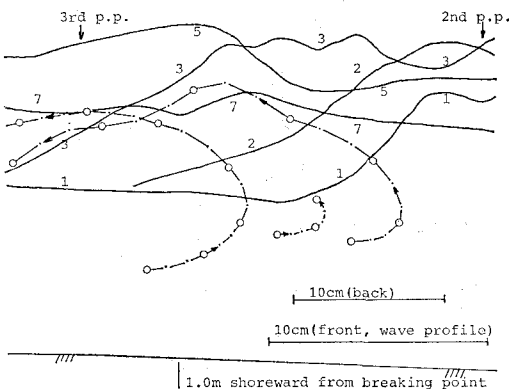
3. 砕波帯内における中立粒子の挙動

(1) 区 間 A

図一2 は、図一1 の区間 A の撮影の結果の例を示す。図には、同時に撮影された水面形も示している。なお、撮影は、水槽側面から約 1m のところから広角レンズを用いて行なったため、水槽の手前の側壁位置と後方の側壁位置とは、図上でのスケールが異なる。粒子は、2 コマ毎に、水面は 6 コマ毎にトレースしている。粒子位置のうち白丸をつけているのは、その位相が水面の位相と一致していることを示す。各粒子の軌跡の始点の位相は、ほとんどの場合水面形の 1 番の位相に一致するが、一致しない場合は、対応する水面形の番号を付けている。なお粒子は一般に水槽横断方向にも運動していることが考えられるので、図から粒子の正確な位置は計算



図一2 (1) 砕波帯内 (区間 A) での中立粒子の運動の例 (1)

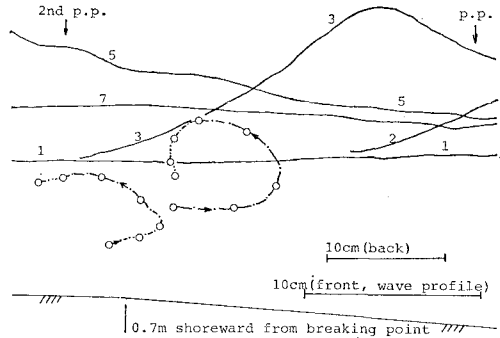


図一2 (2) 砕波帯内 (区間 A) での中立粒子の運動の例 (2)

出来ない。また、水面形は手前の側壁の内側でのものと考えられる。

(2) 区 間 B

図一3 は、図一1 の区間 B での撮影の結果の例を示す。



図一3 砕波帯内 (区間 B) での中立粒子の運動の例

4. 樫木ら¹⁾および Miller²⁾ の結果との比較

(1) 第 1, 第 2 および第 3 突っ込み点

図一1に示したように、中立粒子の運動の写真撮影は、2種類の区間で行なわれた。区間 A は、砕波点から岸側約 75 cm から 115 cm まで、区間 B は 55 cm から 95 cm までである。図一2, (1) は区間 A で一例を除いて中立粒子の運動が相対的に小さいスケールの運動を示す例であり、(2) は相対的に大きいスケールの運動を示す場合の例である。区間 A では、追跡可能であった粒子のうち約 6 割は図の (1) のような相対的に小さなスケールの運動を示した。一方区間 B では、追跡可能であった全ての粒子が 図一3 に示したような区間 A における 2 つのスケールの中間のスケールの運動を示した。

樫木ら¹⁾は、斜面と水平床との接続部で強制的に砕波する巻き波型砕波の水塊が水面に突入した後 splash が生じることを述べている。一方、Miller²⁾ および Peregrine³⁾ は、実験水槽の斜面上で砕けた波の進行状態の写真と比較して、砕波の突っ込み点のさらに岸側に、第 2, 第 3 の再突っ込み点のあることを示した。

中立粒子が撮影された 16 mm フィルムに同時に撮影された水面形を詳細に検討した結果、図一1に示されたように、区間 A および B には、それぞれ第 2 (2nd p.p.) および第 3 突っ込み点 (3rd p.p.)、第 1 (p.p.) および第 2 突っ込み点が存在することがわかった。このように、実験結果では、第 1 突っ込み点から第 2 突っ込み点までは、中立粒子は相対的に中間のスケールの運動を示し、第 2 から第 3 突っ込み点にかけては、相対的に小さなスケールの運動を示している。

(2) horizontal roller

樫木ら¹⁾は、斜面部との接続部で強制的に砕ける巻き

波型砕波の水平床での伝播の実験で、砕波の水塊の突込み点から、horizontal roller が形成され、この horizontal roller が底面に達した後は、そこから水塊に連行された気泡が水面に向かって上昇していくと述べている。彼等の実験結果では、上述の splash が水面に達するまでの距離は roller が底面に達して消滅するまでの距離よりも長い。

この実験では、水平床ではなく一様勾配の斜面上で伝播する巻き波型砕波を扱っている。またここでは、一つの粒子の軌跡に着目した(すなわち Lagrange 流)こともあり、直接比較することは出来ない。しかしこの実験では、図-3 に示すように、砕波の水塊の突込み点から第2突込み点(樁木らの splash が静水面と交わる点)の間では、基本的には段波の伝播に近い現象を呈していると考えられることからすると、ループ状の運動を示す中立粒子の軌跡から、樁木らの言う horizontal roller 状の運動を類推出来ないことはない。

(3) 3つの vortex

Miller²⁾ は、樁木らの水平床と異なり、実験水槽の一様勾配斜面上で砕ける巻き波型砕波および崩れ波型砕波の水面形およびそれによる砕波帯内に連行された気泡の運動を撮影し、やはり樁木らと同様に水塊の突入による渦の存在を示唆した。

とくに巻き波型砕波の場合は、上述の第1から第3までの突込み点に対応して、少なくとも3つの渦が形成され、第2および第3の渦は底面にまで達することを示した。今回の実験中においても、気泡の動きを観察したが、確かに気泡の動きからは、Miller の述べたような渦が類推されつる。しかし、図-2 および 3 で例示したこの実験の結果では、個々の粒子の軌跡に着目したこともあって、そのような渦の存在は明確には類推できない。

いずれにせよ、図-2、(1) で例示したように、第2から第3突込み点の間には、第1から第2突込み点の間より小さいスケールの運動が見られ、第2、第3の渦のほうが第1の渦より大きく発達するという Miller の結果は確認出来ない。

5. LDV による流速データを用いた中立粒子の運動のシミュレーション

図-1 に示したように、LDV による流速測定の範囲は、中立粒子による渦運動のトレースの範囲よりかなり沖側に位置し、区間 B の第1突込み点を含んでいるだけである。区間 B では、図-3 に例を示したように、中立粒子の運動では樁木ら¹⁾および Miller²⁾ がいう水塊の突入による渦の存在を間接的に示すような運動が見られた。一方区間 A では、相対的にスケールの小さい運動が見られた。

ここでは、測定区間は異なるが、LDV による多点での異なる波による岸沖および鉛直方向の流速の同時測定記録を用いて、上述のスケールの小さい運動を説明することを試みる。

(1) 計算方法

まず、5本の測線のうち、もっとも岸側の測線位置に波の峯が到達する位相より 0.3 秒前を時間の原点とした。流速測定点とそれより 39 cm 岸側の2点に設置された波高計による水位測定結果から、流速測定範囲における波速を求め、それから各測線間すなわち 5 cm を波が通過するのに要する時間 0.04 秒を求めた。最も沖側の測線上の測定点では、その流速記録のうち、典型的と思われる部分を、波の峯が到達する位相より 0.3 秒前から 2 秒間とさらにその前後 0.1 秒間の合計 2.2 秒間選んだ。他の測線では、同様の操作を 0.04 秒づつ位相を進めて行なった。

中立粒子は、各測線上から上述の時間の原点より、

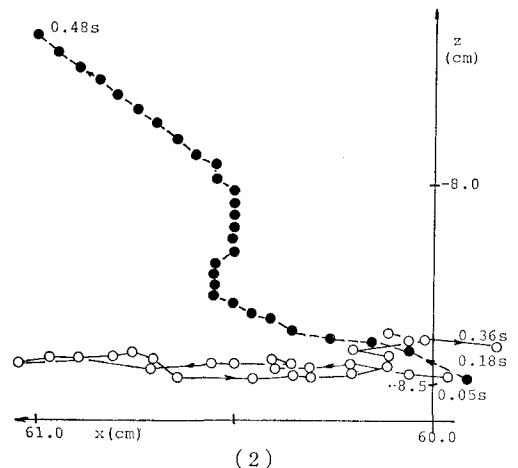
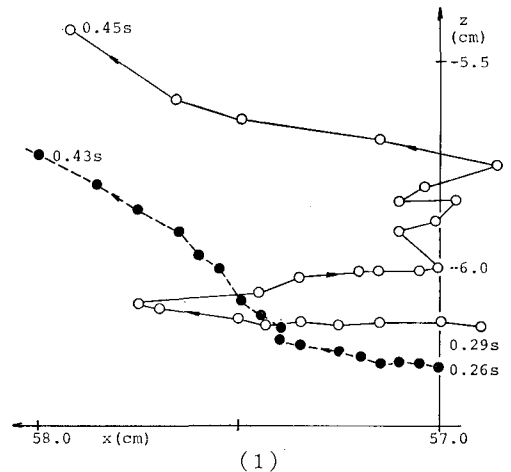


図-4 レーザードップラー流速計による流速記録を用いた中立粒子の運動のシミュレーションの例 (○: 生の流速記録を用いた場合, ●: 0.2 秒の移動平均後の流速記録を用いた場合)

その点でのその時間での岸沖および鉛直方向の流速で 0.01 秒間移動し、移動後の点で、再びその点での時間原点より 0.01 秒後の流速で 0.01 秒間移動するものとした。

同様の計算を、岸沖および鉛直方向の流速記録を 0.2 秒で移動平均したものを用いても行なった。

(2) 計算結果

図-4 は、結果の例を示している。○印は、移動平均をしていない元の流速記録を用いたもの、●印は、0.2 秒の移動平均をした流速を用いたものである。軌跡の始点と終点には時間が示してある。 x は碎波点を原点とし岸方向を正にとった水平座標、 z は静水面を原点に上向きを正にとった鉛直座標である (図-1)。

図から明らかなように、移動平均をしない流速記録を用いた軌跡は、移動平均をした流速を用いた軌跡にない複雑な運動を示している。また、同じ点から出発しても、1 秒より短い時間内に位置がかなり異なっている。

移動平均をしていない流速記録を用いた場合の軌跡に見られる複雑な運動スケールは、1cm 以下である。図-3 で例示したように、第 1 および第 2 突っ込み点の間の約 0.03 秒間の中立粒子の軌跡には、1cm 程度のスケールの乱れはない。ただし、区間 B より小さいスケールの運動を示した区間 A では、1cm 程度のスケールの運動も見られる。

6. 巻き波型碎波の乱れと底質浮遊機構

以上、流速計による流速測定と中立粒子の軌跡から、従来その存在が指摘されている巻き波型碎波の碎波帯における渦運動を確認し、また流速計によって測定された流速によって中立粒子の軌跡を説明することを試みた。その結果、図-3 に示された中間的なスケールのループ状の運動は、従来指摘されている巻き波型碎波の水塊の突っ込みによる渦の存在を間接的には示唆するものであることがわかった。

第 1 突っ込み点付近で流速計で測定された流速の、0.2 秒の移動平均からの偏差として定義される乱れによっては、第 1 から第 2 突っ込み点付近の 0.03 秒毎の中立粒子の軌跡に見られるループ状の運動は説明出来ないことがわかった。しかし、第 2 および第 3 突っ込み点付近の相対的にスケールの小さい運動の説明の可能性が示唆された。

なお、この研究では、中立粒子の特定の 1 個の軌跡にを調べており、その意味では、沈降速度を有しないものの、底質の浮遊の様子を間接的に表しているものといえる。この観点から図-2, 3 を見てみると、とくに図-2, (1) の軌跡に見られるループ状およびねじれたような運動から、いわゆる第 2 および第 3 突っ込み点付近では

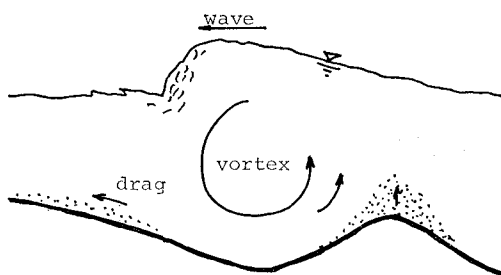


図-5 Miller²⁾ による巻き波型碎波による底質浮遊機構

小さな渦や乱れによる底質の浮遊があると考えられ、第 1 突っ込み点付近では、そのような運動は顕著でないと考えられる。

第 1 突っ込み点での水塊の突っ込みにとまなう渦そのものによる底質の底面から上方および沖側への巻き上げについては、すでに Miller²⁾ (図-5) によって指摘されている。同様なことは柴山ら^{3), 4)} も指摘しており、とくにこの効果は、一様勾配から底面が変形を始める初期の段階で顕著であり、トラフが掘られるにつれて次第に浮遊砂濃度が減少することを指摘した。この付近の底質の浮遊に関しては、図-4 で示した乱れによる複雑な運動が関係しているものと考えられる。

なお、これまでの議論は、1/20 という一様勾配の固定斜面上での碎波に関する実験結果をもとにした議論である。砂州を有する侵食型の移動床上の碎波による浮遊機構とは、ある程度相違のあることが考えられる。とくに、いわゆる第 1 突っ込み点付近での 1 つめの渦は、一様勾配上よりも砂州を有する場合の方が、第 2, 3 の渦に比較して相対的には大きく発達することが考えられる。

7. あとがき

ここでは、岸沖方向の漂砂を念頭に置いて、巻き波型碎波の乱れと底質浮遊機構に関して、議論した。

沿岸方向漂砂に関しては、Kana ら⁵⁾ が、CERC の桟橋での観測結果として、ストーム状態では、波のエネルギーフラックスから算定される沿岸漂砂量の大半が浮遊漂砂量である例を示している。この場合の浮遊砂濃度分布を支配するのは、図-2, (1) で例示したような複雑なスケールの小さい運動に関係している碎波帯内の乱れと考えられる。

最後に本研究にあたり、有益な御助言を頂いた京都大学工学部土木工学教室岩垣雄一教授に謝意を表するとともに、この研究の一部は、文部省科学研究費一般研究 A (代表京都大学工学部岩垣雄一教授) によることを付記する。

参考文献

- 1) 樫木 亨・岩田好一朗 他: 碎波後の波の変形に及ぼす乱れ

- の効果について、——砕波の内部機構に関する基礎的研究
第3報——, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 565~570,
1973.
- 2) Miller, R.: Role of vortices in surf zone prediction:
sedimentation and wave forces, Soc. Econ. Paleontol.
Mineralog., Spec. Publ. No. 24, pp. 92~114, 1976.
- 3) 柴山知也・堀川清司: 砕波による底質の浮遊と侵食型海浜
の形成機構に関する研究, 第28回海岸工学講演会論文集,
pp. 227~231, 1981.
- 4) 柴山知也・堀川清司 他: 二次元海浜変形予測手法の実験に
よる検討, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 249~253,
1982.
- 5) 柴山知也・堀川清司 他: 砕波帯内の浮遊漂砂量の計測, 第
30回海岸工学講演会論文集, pp. 219~223, 1983.
- 6) Peregrine, D. H.: Breaking Waves on Beach, in
Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 15, ed. by
M. van Dike, J. W. Wehausen, pp. 149~178, 1983.
- 7) 内田雅博・酒井哲郎: 巻き波型砕波の乱れのレイノルズ応
力, 第39回年次学術講演会講演概要, 2, 土木学会, 1984
(印刷中).
- 8) Kana, T. W. and L. G. Ward: Nearshore suspended
sediment load during storm and poststorm condi-
tions, Proc. 17th Coastal Eng. Conf., Vol. II, pp.
1158~1174, ASCE, 1980.
-