

# 斜面上の碎波における水塊の突入と渦の挙動

酒 井 哲 郎\*・田 中 秀 明\*\*

## 1. ま え が き

昨年(1985)の海岸工学講演会では、碎波帯における規模の大きい渦運動の存在に関する発表が4編<sup>1)~4)</sup>あった。このうち3編<sup>1)~3)</sup>はいずれも斜面と水平床の接続部で強制的に碎波を起こし、その後水平床を伝播する碎波後の波による渦運動を議論している。もう1つの著者らの研究<sup>4)</sup>では、1/20 の一様勾配斜面上の碎波帯での渦運動を議論した。

とくに日野ら<sup>1)</sup>の研究では、水槽横断方向に軸を有する渦(以後“水平渦”と呼ぶ)の他に、次第に沖側が下方に傾いた波の進行方向を軸とする渦(以後“斜め渦”と呼ぶ)が発達することを示した。著者らの研究では、中立粒子をトレーサとして渦運動の存在を検討したものであるが、波動運動による大きなループ状の軌跡の他に、さらに小さなスケールの複雑な軌跡が存在することがわかったものの、上述の斜め渦の存在に関しては明確に出来なかった。

一方、Peregrine<sup>5)</sup>は、樫木ら<sup>6)</sup>が呼んだ horizontal roller や、Miller<sup>7)</sup>の研究を紹介するとともに、とくに斜面上の巻き波型碎波の場合には、碎波によって峯から放出される水塊が前面の水面に突入すると、水中に規模の大きい水平渦を発生させるとともに、さらに前方に新たな水塊の飛び出しを発生させ、この水塊が同様の過程を繰り返すことを示唆した。この点に関しても、著者ら<sup>4)</sup>はある程度確認出来たが十分ではなかった。

ここでは、昨年<sup>4)</sup>同様、1/20 の勾配上で碎ける巻き波による碎波帯内の運動を、ビデオカメラおよび35mmカメラ撮影し、気泡そのものをトレーサとして、Peregrine<sup>5)</sup>のいう水塊の突入と飛び出しの過程、および水平床の場合にその存在が示された斜め渦の斜面上での碎波における存在を検討する。

## 2. 実験装置, 条件, 方法

### (1) 実験装置

実験装置は、昨年<sup>4)</sup>とほぼ同様である。すなわち、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、水槽の一端に勾配 1/20 の斜面を設置した。

### (2) 実験条件

実験条件も、昨年と出来るだけ同じものにした(表-1)。ここで  $i$  は斜面勾配,  $T$  は波の周期,  $h_b$  は碎波点

表-1 実験条件

| $i$  | $T$<br>(sec) | $h_b$<br>(cm) | $H_b$<br>(cm) | $W$<br>(cm) | $H_0/L_0$ |
|------|--------------|---------------|---------------|-------------|-----------|
| 1/20 | 1.82         | 15.5          | 13.5          | 310         | 0.021     |

の静水深,  $H_b$  は碎波高,  $W$  は碎波帯幅,  $H_0/L_0$  は換算沖波波形勾配である。昨年に比べて波高がやや大きく、したがって碎波静水深, 碎波帯幅もやや大きくなっているが、典型的な巻き波型碎波であることは同じである。なお、一様水深部水深は、昨年同様 35 cm である。

### (3) 実験方法

ビデオ撮影は、水槽とほぼ同じ高さで水槽側面よりガラス面を通して行なった。図-1 は碎波帯と撮影区間を示している。ここで、b.p. は碎波点, 1st p.p.~3rd p.p. は、3. で述べる第 1~第 3 の水塊が前面の水面に突入する地点を意味する。一回の撮影では、連続する約 10 波分をとった。35 mm カメラによる撮影も、カメラをビデオカメラとほぼ同様の位置に設置して行なった。

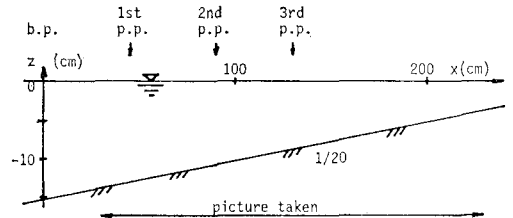


図-1 ビデオカメラおよび 35 mm カメラによる撮影区間

## 3. 水塊の突入と水平渦の挙動

ビデオカメラによって撮影された碎波帯内における運動は、再生して詳細に観察した。ビデオモニターの静止

\* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

\*\* 学生員 京都大学大学院修士課程学生 工学研究科

画面を 35 mm カメラで再撮影した写真は鮮明でないので、ここでは同様の条件で 35 mm カメラによって撮影された写真を用いて、観察結果を述べる。

写真-1 は、35 mm カメラによって撮影された、碎波点より約 30 cm から 230 cm 岸側までの区間の碎波帯内の運動の様子である。ただし同一の波の時間経過を示すものではなく、基本的にはビデオ撮影結果の観察から得られた事実を明瞭に示す 35 mm カメラによる写真を選び出して並べたものである。なお、写真 (5)~(8) の中心部に、写真 (1)~(4) の右端に位置する水槽側壁の 1 m 毎の鉛直材が写っている。また写真 (9) の左端がこの鉛直材の位置にあたる。

写真 (1)~(3) のからわかるように、碎波によって波の峯から飛び出した水塊は、前面の波の谷の水表面に衝突し、その結果波の谷の水面上に、波の進行方向を右にして反時計周りの回転軸を有する回転運動（水平渦 I）を発生させる。その一方で、さらに前方に、多量の気泡を混入した第 2 の水塊の飛び出しを発生させる。このことはすでに、樫木ら<sup>6)</sup>、Miller<sup>7)</sup> および Peregrine<sup>5)</sup> が述べていることである。

第 2 の水塊は、写真 (4) でわかるように、その背後の水面の高さよりもさらに高い位置まで上昇する。その後写真 (5), (6) からわかるようにこの第 2 の水塊は、最初の波の峯から飛び出した第 1 の水塊と同様に、さらにその前方の水面に突入し、新たに第 2 の水平渦 II（第 1 の渦と同じ方向の回転軸を有する）と、さらに前方への第 3 の水塊の飛び出しを発生させる。

第 3 の水塊は、写真 (7) で若干わかるように、あまり明瞭ではないものの第 1 および第 2 の水塊と同様の過程を繰り返す。以上の様な水塊の飛び出しと水平渦の発生過程の繰り返しもとなつて、写真 (5)~(7) に見られるように、水面下の気泡を含んで白く映っている部分の下端は波状を呈する。この事実もまた、すでに Peregrine<sup>5)</sup> が述べている。

その後はさらに運動は明瞭ではなくなるが、写真 (8), (9) からわかるように、水面下の気泡を含んだ白く見える部分の下端はやはり波状を呈しており、基本的にはスケールの小さい水塊の突入による水平渦の発生と新たな水塊の飛び出しという過程を繰り返しているものと思われる。

図-2 は、以上の過程を模式的に示したものである。なお、渦 I は、気泡の運動から見る限り、発生後次第にその領域を拡大し、ほぼ水底まで達するとともに、全体として第 2 の水塊の突入点（第 2 突込点）付近まで前進した後停滞する。渦 I, II および III のいずれも、時間の経過とともに気泡の濃度は減少し、水塊 1 の突入から約 3/4 周期後消滅する。

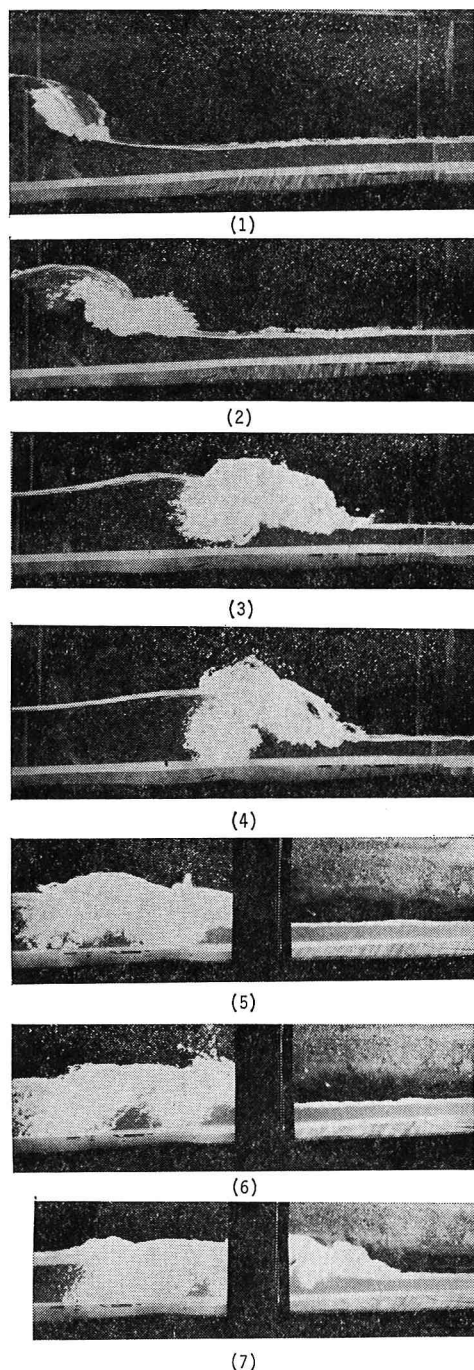
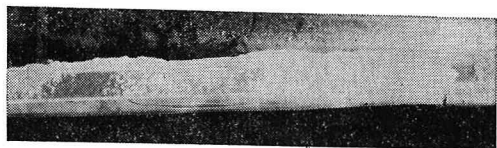


写真-1 水塊の突入、水平渦の形成および新たな水塊の飛び出しのサイクル（その 1）

水塊の突入による水平渦の形成と新たな水塊の飛び出しの過程が繰り返されるという以上の事実は、日野ら<sup>1)</sup>が行なった斜面と水平床の接続部で碎波しその後水平床を伝播する碎波の場合には、述べられていない。その 1 つの理由としては、ここで行なった実験では、水底が 1/20 というような勾配斜面であり、日野らの実験の場合

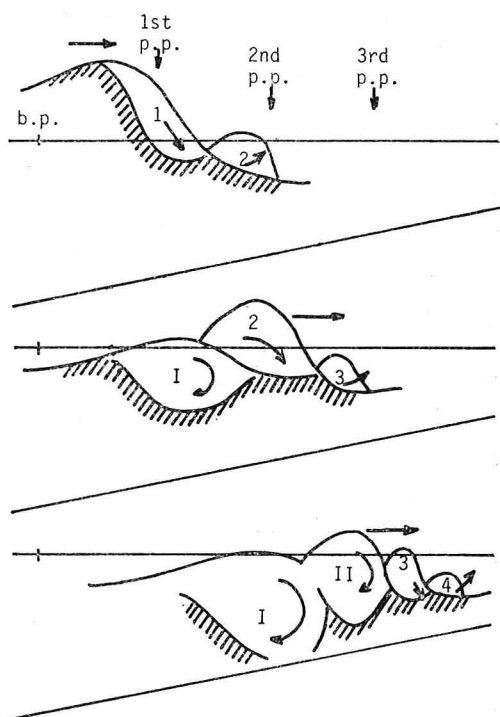


(8)



(9)

写真—1 水塊の突入、水平渦の形成および新たな水塊の飛び出しのサイクル (その 2)



図—2 水塊の突入、水平渦の形成および新たな水塊の飛び出しの過程のサイクルの模式図

の水平床と異なって、進行とともに次第に水深が減少し、また戻り流れも強くて、新たな水塊の飛び出しが強調されることが考えられる。

ごく最近、Basco<sup>8)</sup> は、Peregrine<sup>9)</sup> が引用したデンマーク工科大学で製作された斜面上の碎波の 16 mm フィルムを詳細に観察し、斜面上の碎波による水塊の突入による 2 種類の渦の発生を指摘した。すなわち 1 つは、上述の第 1 の水平渦 I で plunger vortex と呼び、もう 1 つは上述の第 1 の水塊が突入した前面の水面上に生じる surface roller である。彼は、乱れが生じる原因となる強いシヤーの発生場所に注目し、また崩れ波から巻き波ま

での広い範囲での碎波に対して共通した特徴を得ようとしたこともあって、上述した過程の繰り返し (サイクル) の存在に関しては述べていない。

#### 4. 斜め渦の存在

斜め渦に関しては、1. で述べたように、日野<sup>1)</sup>が斜面と水平床の接続部で碎波しその後水平床を伝播する場合に関してその存在を示し、また現地観測結果<sup>9)</sup>に見られる浮遊砂雲の柱状の構造や、渦動運動に関する一般的性質からも、一般的にその存在の可能性が高いことを示した。

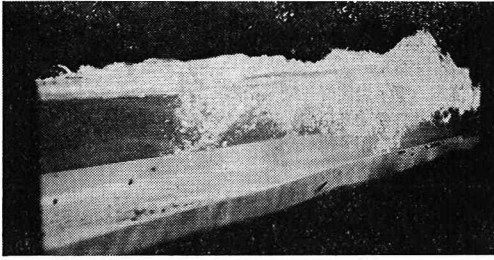
なお、青野<sup>2)</sup>も、日野らと同じ、斜面と水平床の接続部で碎波しその後水平床上を伝播する碎波帯内の底面上に乱れが発生することを可視化実験で示している。彼等は、このことと現地観測で見られる浮遊砂雲の柱状構造との関係を示唆している。これもまた斜め渦の存在を示すものとも考えられる。すなわち上層から発達してきた斜め渦が底面に達し、そこで底面に存在していたミルク層を乱したものとも考えられる。

ここでは、水平床上の碎波の場合に存在が示された斜め渦が、斜面上の碎波の場合にも見られるかどうかを、上述のビデオ撮影結果から検討する。

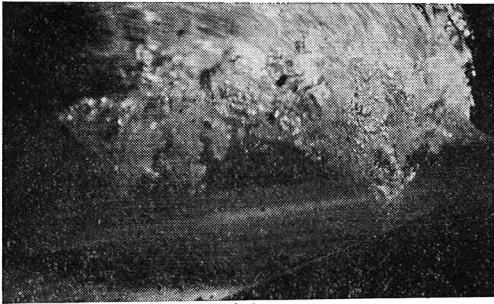
写真—1、(4) は、3. で述べたサイクルで言えば、第 2 の水塊が前面の水面に衝突し、第 3 の水塊の飛び出しが始まる時点のものである。この写真の、気泡を多量に含んでいる渦 I の下側の縁は、水槽側壁と斜面の間の水の出入りを防ぐために貼られた布テープで邪魔されて見えないが、滑らかでなく突起状の部分を持している場合がある。このような突起部は、ビデオ撮影結果から、白く見える水平渦の下縁から急激に下方に向かって発達することが観察された。このような突起は、渦 II でも見られることがある。この突起部は、日野<sup>1)</sup>の写真—2 で斜め渦の存在を示すものとして指摘された突起部と合わせて類似しており、基本的には同じものと考えられる。

写真—2 の (1) は、この突起部を波の進行方向の背後から見たものである。白濁した部分の下縁部が波状になっている。この写真は波を斜め後ろから見たもので、この波状の部分は水槽横断方向に向いている。すなわち写真—1 の (4) に見られた渦 I の下縁部に生じた突起部と同じもので、この写真ではそれが水槽横断方向に少なくとも 2 個存在していることを示している。写真—2 の (2) は、この部分を拡大して撮影したものである。

なお 3. の水塊の突入と水平渦の発生のサイクルのところでも述べた、水平床と斜面という海底形状の相違は、斜め渦の発達に関しても影響を有しており、斜面上の碎波による斜め渦の場合は、水深減少によって水平渦が水



(1)



(2)

写真-2 斜め渦

中で占める部分が相対的に大きく、斜め渦が発達するための十分な空間が底面までの間に存在しないため、その発達が明瞭に識別出来ないことが考えられる。

また、ビデオ撮影結果の観察によると、この斜め渦はとくに水槽側壁の内側壁面近くで発生しやすいように思われた。このことは水槽側壁の存在が斜め渦の発達を助長している可能性を示唆している。

最後に、渦度方程式を用いて、実験水槽内の砕波帯における斜め渦の発達の可能性を検討する。式(1)は、非圧縮性流体の渦度方程式である<sup>10)</sup>。

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega_i}{\partial x_j} = \omega_j s_{ij} + \nu \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\omega_i$  は渦度の3方向成分 ( $i=1, 2, 3$ )、 $u_j$  は流速の3方向成分 ( $j=1, 2, 3$ )、 $x_j$  は直角座標の3方向、 $\nu$  は動粘性係数で、 $s_{ij}$  は次式で与えられる歪み割合である。

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$x_1 \equiv x$  を波の進行方向に、 $x_2 \equiv y$  を水槽横断方向に、 $x_3 \equiv z$  を鉛直方向にとり、 $u_1 \equiv u$ 、 $u_2 \equiv v$ 、 $u_3 \equiv w$  とする。左辺第2項の移流項を右辺に移項し、渦度の時間的変化項  $\partial \omega_i / \partial t$  のみを考える。粘性を無視し、さらに右辺においては、 $\omega_x = \omega_z = 0$ 、すなわち水平渦  $\omega_y$  のみ存在すると仮定すると、式(1)は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \omega_x}{\partial t} &= \omega_y \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial \omega_y}{\partial t} &= -u \frac{\partial \omega_y}{\partial x} - v \frac{\partial \omega_y}{\partial y} - w \frac{\partial \omega_y}{\partial z} + \omega_y \frac{\partial v}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \omega_z}{\partial t} &= \omega_y \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\}$$

アンダーラインの部分は、式(1)の  $\omega_j \cdot s_{ij}$  の項で、歪み割合による渦度ベクトルの増幅と回転を表す<sup>10)</sup>。

いま考えている場合は、本来2次元流れであるが、現実には実験水槽においても横断方向に一樣ではない ( $\partial / \partial y \neq 0$ )。また  $u$ 、 $w$  に比べて  $v$  は小さいが0とは言えない。したがって、式(3)の3つの下線部のうち、第1、第3式の下線部の方が第2式の下線部と同程度、場合によってはより大きくなる可能性もある。

もちろん、 $\omega_x$ 、 $\omega_z$  が発達するかどうかは、適当な安定解析を行って議論する必要があるが、いずれにせよ、波の進行方向および鉛直方向を軸とする渦度成分が、次第に発達する可能性は考えられる。

## 5. あとがき

以上、簡単な可視化実験で、1/20 勾配斜面上で砕ける巻き波型砕波による砕波帯内での運動を検討し、次のような結果が得られた。

(1) 巻き波型砕波によって波の峯から飛び出した水塊は、その前面の水面に衝突し、水中に突入して波の進行方向を右にして反時計周りの回転軸を有する水平渦Iをひき起こす。

(2) その一方で、さらに前方に多量の気泡を含んだ第2の水塊を飛び出させる。この第2の水塊はさらに前方の水面に衝突し、第1の水塊と同様に、水平渦II (水平渦Iと同じ回転方向を有する) と第3の水塊を飛び出させる。

(3) 水槽側壁から見た場合、気泡を含んだ領域の下縁部が波状になっていることから、以後同じ過程を繰り返すと考えられるが、その規模は次第に小さくなり明瞭でなくなっていく。

(4) 水平渦Iは、発生後成長して水底にまで達するとともに前方に移動し、第2の水塊の突入点付近で停滞する。水平渦I、II、IIIはいずれも、水塊1の突入から約3/4周期で消滅する。

(5) 以上の巻き波型砕波の砕波帯での運動サイクルは、水平床上の砕波帯の場合には、水深が減少しないこともあってそれほど強調されないものと考えられる。

(6) 水平床上の砕波帯で日野<sup>1)</sup>がその存在を指摘した斜め渦は、斜面上の巻き波型砕波の場合にも観察されたが、水深減少によって、その発達は水平床の場合より顕著でない。

(7) 渦度方程式から、実験水槽内の砕波帯においても、その横断方向流速および横断方向勾配の存在によって斜め渦が発達する可能性のあることが考えられる。ただし、水槽側壁の存在が斜め渦の発達を助長している可能性がある。

最後に、この研究を行うにあたり有益な助言を頂いた  
京都大学工学部岩垣雄一教授に謝意を表する。

### 参 考 文 献

- 1) 日野幹雄・灘岡和夫・小俣 篤: 碎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, 土木学会, pp. 1~5, 1984.
- 2) 青野利夫・服部昌太郎: 碎波下での大規模乱れ構造に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 6~10, 1984.
- 3) 三村信男・岡安章夫・柴山知也・Preecha Kamronrithisorn: Plunging 碎波によって発生する碎波帯内流速場の構造, 第31回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 11~14, 1984.
- 4) 酒井哲郎・内田雅博: 巻き波型碎波による乱れと底質浮遊機構, 第31回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp. 296~300, 1984.
- 5) Peregrine, D. H.: Breaking Waves on Beach, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 15, pp. 149~178, 1983.
- 6) 榎木 亨・岩田好一朗・松本 昇: 碎波後の波の変形に及ぼす乱れの効果について, ——碎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, 土木学会, pp. 565~570, 1973.
- 7) 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.
- 8) Basco, D. R.: A qualitative description of wave breaking, Jour. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 2, pp. 171~188, 1985.
- 9) 田中則男・加藤一正・灘岡和夫・小山内英雄・近藤隆道: 大洗海岸における碎波帯内の総合観測, 港湾技術研究所報告, 運輸省, 第18巻, 第2号, pp. 27~57, 1979.
- 10) Tennekes, H. and J. L. Lumley: A First Course in Turbulence, The MIT Press, pp. 81~84, 1972.