

砕波帯における底面到達渦に関する実験的研究

張 達 平*・砂 村 継 夫**

1. はじめに

砕波に起因する大規模渦として砕波点付近に形成されるものに、斜降渦と数種の水平渦の存在が知られている(砂村・張, 1989)。既に Miller (1976) や Nadaoka et al. (1987) は、これらの渦が底面に到達すると底質を浮遊させることを見出している。このことは、底面に到達するような渦(底面到達渦と呼ぶ)が砕波帯内の物質拡散や地形変化を考える上で重要であることを示している。しかし、底面到達渦がどのような波浪や斜面勾配の条件で発生するのか、また砕波点付近のみならず砕波帯内ではどのような特性を示すのかといった問題に関しては、全く研究が行われていない。そこで本研究では、これらを明らかにすることを目的として2次元造波水路実験を行った。

2. 実験装置・条件ならびに方法

実験装置は、長さ12 m、高さ0.4 m、幅0.2 mの片面ガラス張り2次元造波水路(プランジャー式造波装置付)の一端に一樣勾配の斜面(ステンレススチール製)を設置して行われた。一樣水深部の水深は25 cmで、一定に保たれた。斜面勾配は1/10, 1/20の2種類とし、実験波の周期を0.6~2.4 s、砕波波高を5~14 cmの範囲内で変化させ、斜面勾配・周期・波高を適宜組み合わせ合計110ケースの実験を行った。

砕波現象および砕波に起因する渦の構造や挙動を調べるため、2台のビデオカメラを用いて同時撮影(テープスピード: 30 frames/sとシャッタースピード: 1/500あるいは1/1000 s)を行った。1台のカメラは水路側方から水路に向けて直角にセットされており、砕波帯の全体を含む領域を撮影するのに用いた。他の1台は砕波点後方の水路側方に設置し、波の進行方向に対して約30°の角度から砕波帯内を撮影するのに用いた。渦の特性は砕波に伴って混入した気泡のものをトレーサとして用いて、ビデオ画像上で調べられた。また、砕波型式、砕波

波高、砕波水深、底面到達渦の位置や水深もビデオ画像から測定した。なお、砕波形式はspilling(崩れ波), plunging(巻き波), collapsing(巻き寄せ波), surging(砕け寄せ波)の4つに分類した。

3. 底面到達渦のタイプ

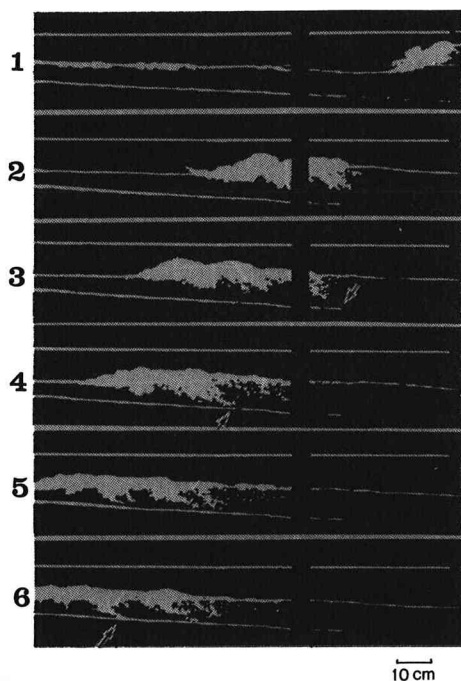
砕波直後に形成された底面到達渦は斜降渦(oblique vortex: 傾斜した軸のまわりに回転しながら降下する渦)か水平渦(horizontal vortex: 水平な回転軸とほぼ円形の断面をもつ渦)であることが確認できた。後者の渦には次の4つのタイプがある。すなわち、(1)水平渦から斜降渦へと遷移するタイプ[砂村・張(1989)の分類のH-a]、(2)複数の水平渦が発達するタイプ[H-b]、(3)水平渦が短時間に消滅するタイプ[H-c]、(4)水平渦から無組織渦へと変化するタイプ[H-d]。ここでは(1)のタイプをA-type水平渦、(2)、(3)、(4)のものを一括してB-type水平渦と分類することにした。斜面勾配と波浪の条件により、砕波帯内では、複数の底面到達渦が存在し、底面到達渦の数と渦の種類により、7つのタイプに分けられることが明らかとなった。そこで、以下に各タイプの特徴を説明する。

写真-1は一連のビデオ写真を並べたもので、時間の経過に従って順次3つの斜降渦が底面に到達するケースを例示している。写真の左端にステージ番号を示す。ステージと次のステージとの間の時間間隔は1/6 sである。まず、波が砕けた後、波頂付近から気泡を含んだ水塊が岸側斜面を滑り降りるように波面前面に広がり(ステージ1)、傾いた軸をもって、水粒子の回転を伴いながら斜め下方に向う斜降渦が発達し(ステージ2)、矢印の所で底面に到達した(ステージ3)。次に、砕波後の波が進行するにつれて、砕波帯内に2番目の斜降渦が底面に到達し(ステージ4の矢印)、その後、3番目の斜降渦が底面に到達した(ステージ6の矢印)。これらの底面到達渦のエネルギーは岸へ行くほど小さくなると考えられる。

前述したように砕波直後に形成される底面到達渦は斜降渦か水平渦であるが、砕波後の波が伝播するにつれて形成される底面到達渦は実験条件にかかわらず必ず斜降

* 正会員 理博 筑波大学大学院 地球科学研究科
現在: 建設省土木研究所海岸研究室招へい研究員

** 正会員 工博 筑波大学教授 地球科学系



写真—1 底面に到達する三つの斜降渦
(碎波波高 11 cm, 周期 1.2 s, 斜面勾配 1/20)

渦であることがわかった。3 個の渦が底面に到達するケースを三重渦 (triple vortices), 2 個の場合を二重渦 (double vortices), 1 個の場合を単一渦 (single vortex) と呼ぶ (図—1)。図—1(a) は三重斜降渦, 図—1(b), (c), (d) はそれぞれ二重斜降渦, A-type 水平渦+斜降渦, B-type 水平渦+斜降渦, 図—1(e), (f), (g) はそれぞれ単一斜降渦, 単一 A-type 水平渦, 単一 B-type 水平渦を示している。

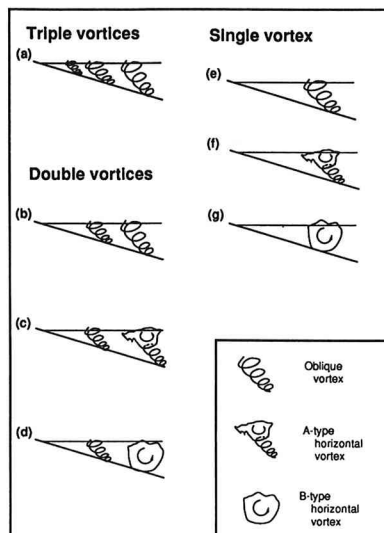
4. 底面到達渦の発生条件

本実験で観察された底面到達渦のタイプは図—1 に示される 7 つに分類された。これらの特徴的な流体運動以外に, 小波高・短周期の条件下では渦が底面に到達しないケースも出現した。これら 7 種類の渦の発生条件を統一的に整理するために, 砂村・張 (1989) にならって次の 2 つのパラメータを用いた。1 つは Galvin (1968) の breaker-type index, B_t , である。

$$B_t = H_b/gT^2 \tan \beta \quad (1)$$

ここに, H_b は碎波波高, T は波の周期, $\tan \beta$ は斜面勾配, g は重力加速度である。このパラメータは, 碎波点付近に発生する渦のタイプや碎波帯内での渦の挙動に碎波形式が重要な役割を果たすとの観点から採用したものである。

第 2 のパラメータとしては, 流体運動における粘性の効果を表す指標として, 碎波に関する Reynolds 数を用



図—1 本実験で観察された底面到達渦の模式図

いるのが妥当と考えられる。これは次式で定義される。

$$Re = H_b L_b / \nu T \quad (2)$$

ここに, L_b は碎波波長, ν は動粘性係数である。本研究では, $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ とし, L_b の値は微小振幅波理論に基づき実測された碎波水深から求めた。

上記の 2 つのパラメータを用いて, 各種のタイプの渦の発生条件をプロットしたものが図—2 である。この図より, 底面到達渦が発生するためには

$$Re > 2.7 \times 10^4, B_t > 0.013 \quad (3)$$

でなければならないことがわかる。この領域内では, 各種の渦の発生条件が明瞭に区分できる。三重斜降渦 (triple oblique vortices) の発生には

$$Re > 8.0 \times 10^4, B_t > 0.1 \quad (4)$$

という条件が必要となる。二重斜降渦 (double oblique vortices) の発生には

$$5.4 \times 10^4 < Re < 8.0 \times 10^4, B_t > 0.1 \quad (5)$$

A-type 水平渦+斜降渦 (A-type horizontal+oblique vortices) の発生には

$$Re > 5.4 \times 10^4, 0.07 < B_t < 0.1 \quad (6)$$

B-type 水平渦+斜降渦 (B-type horizontal+oblique vortices) の発生には

$$Re > 5.4 \times 10^4, 0.035 < B_t < 0.07 \quad (7)$$

の条件がそれぞれ必要となる。

単一斜降渦 (single oblique vortex) の発生には

$$2.7 \times 10^4 < Re < 5.4 \times 10^4, B_t > 0.1 \quad (8)$$

単一 A-type 水平渦 (single A-type horizontal vortex) の発生には

$$2.7 \times 10^4 < Re < 5.4 \times 10^4, 0.07 < B_t < 0.1 \quad (9)$$

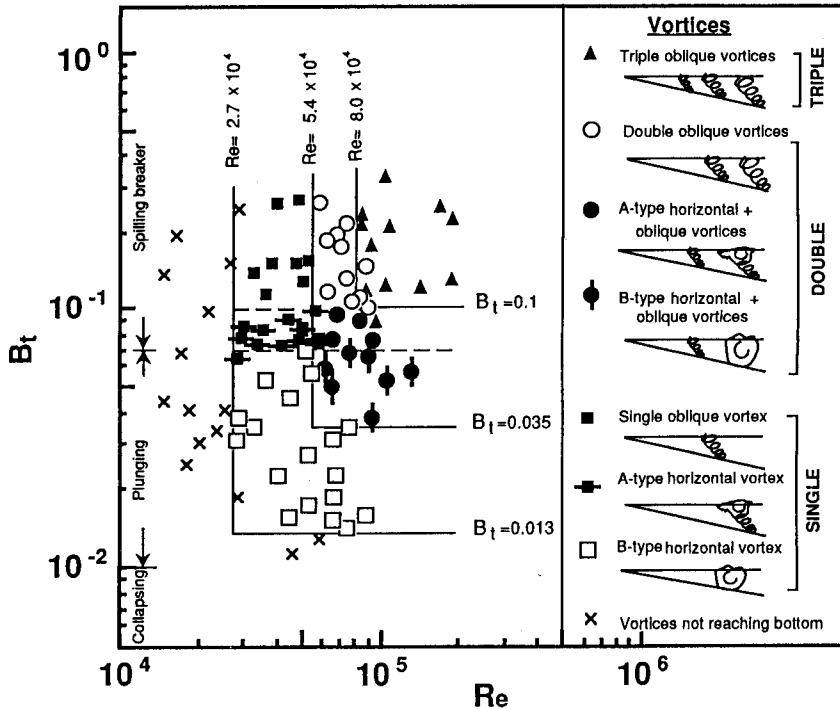


図-2 7つのタイプの底面到達渦の発生条件

単一 B-type 水平渦 (single B-type horizontal vortex) の発生には

$$\left. \begin{aligned} &2.7 \times 10^4 < Re \leq 5.4 \times 10^4, \quad 0.035 < B_t < 0.07 \\ \text{あるいは} \\ &Re > 5.4 \times 10^4, \quad 0.013 < B_t < 0.035 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

の条件が必要となる。

本実験で得られた砕波型式区分を図-2の縦軸の右側に示す。Spilling型とplunging型砕波との境界は、Galvin (1968) の結果とほぼ同じで $B_t = 0.07$ であった。Plunging型とcollapsing型との境界は $B_t = 0.01$ で与えられた。この図より、砕波型式と各種の底面到達渦とは必ずしも対応していないが、spilling型砕波は複数の底面到達斜降渦が発生する必要条件であることがわかる。

5. 砕波帯における底面到達渦の特性

写真-1は、一つの波が砕波帯を進行するにつれて異なる三箇所まで渦が底面に到達していることを示している。ある一つの底面到達渦が発生する場所で詳細に観察すると、必ずしもその場所内の同一地点で渦が底面に到達しているのではなく、一波ごとに多少その位置が異なる (6 cm 程度) ことがわかった。そこで数波について測定し、底面到達渦の平均位置を決定した。この位置から

砕波点までの水平距離を l_v 、そこでの水深を h_v とし、砕波点近傍の底面到達渦を1番目のものとする、砕波点から n 番目の渦までの距離、 l_{vn} 、およびそこでの水深、 h_{vn} 、は図-3の定義図のようになる。

まず、この l_{vn} は H_b 、 T 、 g および $\tan \beta$ の関数で表わせると考える。すなわち

$$l_{vn} = f_1(H_b, T, g, \tan \beta) \dots\dots\dots (11)$$

上式を L_o (沖波波長) を用いて無次元化すると

$$l_{vn}/L_o = f_2(H_b/gT^2 \tan \beta) \dots\dots\dots (12)$$

となる。この関数形を決定するため、 l_{vn}/L_o と $H_b/gT^2 \tan \beta$ のパラメータを用いて実験データを整理した結果を図-4に示す。図-4 a, b, c はそれぞれ $n = 1, 2, 3$ に対応している。この図より

$$l_{vn}/L_o = A(H_b/gT^2 \tan \beta)^{1.2} \dots\dots\dots (13)$$

で表せることがわかる。ここに、 A は n の関数である。 A と n との関係を知るために、図中の各線から求まる A の値とそれに対応する n の値とをプロットした結果が図-5である。この図より

$$A = 3.98 n^{0.86} \dots\dots\dots (14)$$

となり、式 (13)、(14) より、 l_{vn} は次式で表せる。

$$l_{vn}/L_o = 3.98 n^{0.86} (H_b/gT^2 \tan \beta)^{1.2} \dots\dots\dots (15)$$

次に、底面到達渦の水深 h_{vn} は単純に H_b だけの関数と仮定して、その関係をプロットした結果が図-6である。この図より

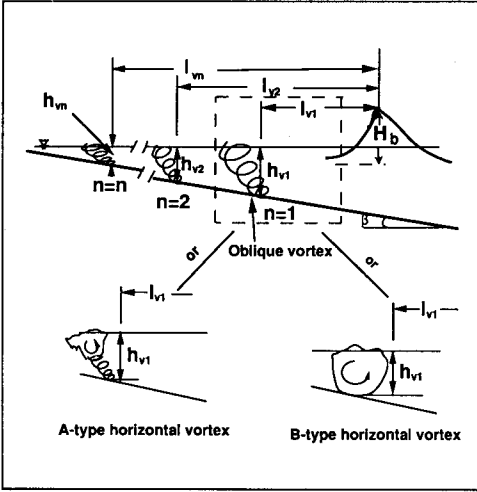


図-3 底面到達渦の位置と水深に関する定義図

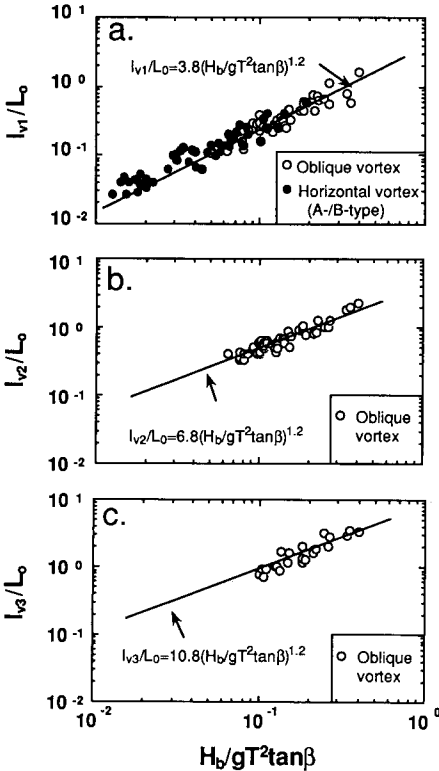


図-4 底面到達渦の位置と波の諸元および斜面勾配との関係を示す無次元プロット (a は $n=1$, b は $n=2$, c は $n=3$ の結果を示す)

$$h_{vn} = BH_b \quad (16)$$

で表せることがわかる。ここでも、 B は n の関数である。図中の各線から求まる B の値とその n の値とをプロットした結果が図-7である。この図より

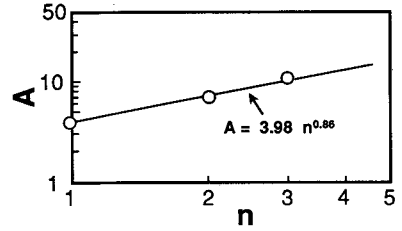


図-5 式 (13) 中の A の値と n との関係

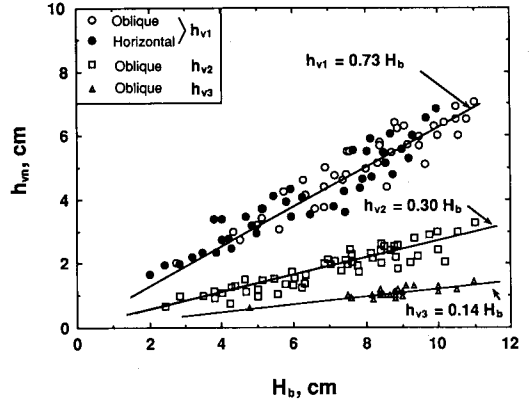


図-6 底面到達渦の水深と砕波波高の関係

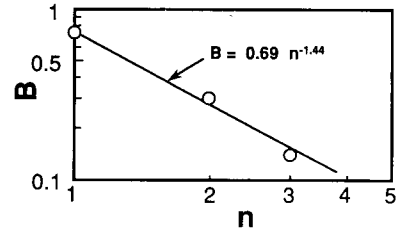


図-7 式 (16) 中の B の値と n との関係

$$B = 0.69n^{-1.44}H_b \quad (17)$$

となり、式 (16)、(17) より、 h_{vn} は次式で表せる。

$$h_{vn} = 0.69n^{-1.44}H_b \quad (18)$$

6. おわりに

本実験の条件下では、7つのタイプの底面到達渦の発生がみられた。Galvin の breaker-type index B_t と砂村・張 (1989) の砕波に関する Reynolds 数 Re とを用いることにより、その7つのタイプの底面到達渦の発生条件を B_t-Re 平面上で明確に区分することができた (図-2)。Spilling 型砕波は、複数の斜降渦が底面に到達するのに必要な条件を与えることがわかった。砕波帯における n 番目の底面到達渦の位置と水深は、それぞれ式 (15) と (18) で表わすことができた。

参 考 文 献

- 砂村継夫・張 達平 (1989): 砕波に起因する大規模渦の発生条件, 第36回海岸工学論文集, pp. 21-25.
- Galvin, C. J. (1968): Breaker type classification on three laboratory beaches, J. Geophys. Res., Vol. 73, pp. 3651-3656.
- Miller, R. (1976): Role of vortices in surf zone prediction: sedimentation and wave forces, Soc. Economic

Paleontologists Mineralogists, Special Pub., No. 24, pp. 92-114.

- Nadaoka, K., S. Ueno and T. Igarashi (1987): Characteristics of bottom velocity and sediment suspension in the surf zone, Proc. 21st Coastal Eng. Conf., Am. Soc. Civil Eng., pp. 1646-1660.