

砕波帯内における渦の特徴と底質の移動に関する実験

日大生産工(院) ○宮内 直哉
日大生産工 ○鷺見 浩一

1. はじめに

砕波によって生成される底面まで到達するような大規模な渦は、底質の移動と密接に関連している。そのため、砕波帯内の流れ、渦の特性を知ることは海浜変形の予測を行う上で極めて重要な課題である。しかし、波頂部後方から海底方向へ伸長する斜降渦の底面到達位置と底質の移動状況の関係を実験的に検討した研究は少数である。したがって、斜降渦の底面到着地点と底質の移動形態の関係については、不明な点が多いのが現状である。

本研究では、一様斜面上で発生する砕波現象を対象として、水理実験・数値計算を実施し、砕波の流速分布と斜降渦や水平渦などの発生形態や発生条件、ならびに斜降渦の底面到達地点と底質の移動状況に関連づけて考究した。

2. 研究概要

2-1. 水理実験の概要

実験Iと実験IIともに、縮尺を 1/60 とし、図 2-1 に示すように水深 $h=40$ cm の両面ガラス張りの反射吸収制御機能を備えた 2 次元造波水路(長さ 30.0 m, 幅 0.7 m, 高さ 1.0m)を用いて行った。水路の水平床面上に木材で作製した固定床となる一様勾配斜面(勾配 $i=1/30$)を設置し、一様水深部の水深は $h=0.4$ m とした。渦の底面到達分布と底質の移動状況を確認するために、海底勾配上に一辺 4cm の正方形格子が書かれたアクリル板を設置した。

(1) 斜降渦の発生条件を検討する実験 I

図 2-2 に示す水路側方に設置した CCD カメラにより、渦の構造を可視化する画像を撮影した。CCD カメラの撮影速度は、30fps である。実験波は、波高が $H_I=12.0, 14.0, 16.0$ cm であり周期が $T=1.4$ s と同一なケース 1~3, $H_I=18.0$ cm, $T=1.8$ s のケース 4, $H_I=20.0$ cm, $T=2.0$ s のケース 5 の 5 種類の規則波とし、各 100 波ずつ撮影した。砕波波高 H_b , 砕波波長 L_b は撮影した画像から計測した。図 2-2 に実験 I の撮影領域を示す。斜降渦を張・砂村(1993)にならい計 7 形式に

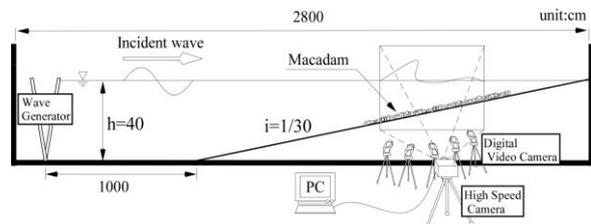


図 2-1 実験水槽

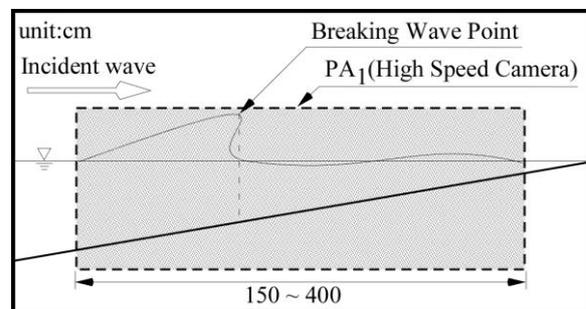


図 2-2 撮影領域 (実験I)

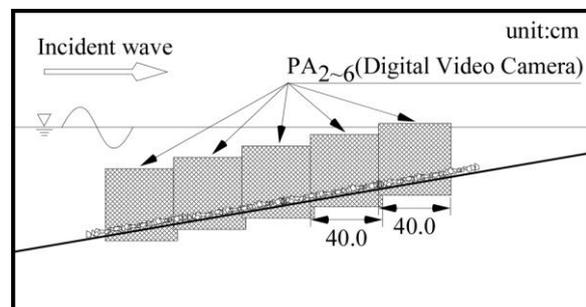


図 2-3 撮影領域 (実験 II)

分類し、発生条件について Galvin の Breaker-type index である Bt と砕波に関する Reynolds 数である Re によって整理した。ここに、 Bt , Re の式を(1)と(2)に示す。

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

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

Study of the form and conditions of obliquely descending eddy formation.

Naoya MIYAUCHI, Hirokazu SUMI

H_b : 砕波波高, T : 周期, $\tan\beta$: 海底勾配, g : 重力加速度, L_b : 砕波波長, 動粘性係数 $\nu=0.01\text{cm}^2/\text{s}$ である.

(2) 底面到達分布・底質の状況を検討する実験 II

図 2-3 に示す水路側方・上方に設置したデジタルビデオカメラにより, 渦の底面到達位置を可視化する画像を撮影した. デジタルビデオカメラの撮影速度は, 30fps である. 撮影範囲を図 2-3 に示す. 実験波は, 底面到達渦による砕石の移動が顕著に見られたケース 3~5 とした. 得られたビデオ画像を解析し, 100 波あたりに海底面の正方格子に渦が到達した数を求めた. また, 底質は JISA5001 に規定されている砕石 S-5 7 号(中央粒径 $d_{50} = 1.7\text{mm}$) とし水槽壁と 5cm の間隔を設けて一層敷いた. 移動状況は造波開始後 20, 40, 60, 80, 100 波毎に一格子面積あたりの残石量を計測し底質の移動分布を求めた.

2-2. 数値計算の概要

数値計算をするにあたって, 構造物や造波境界を設定する必要がある. 計算領域を図 2-4 に示す(水路長 $L=28.0\text{m}$, 高さ $H=1.5\text{m}$ とし, 初期水深 $h=0.50\text{m}$). 入射波条件は波高 $H=10\text{cm}$, 周期 $T=1.6\text{s}$ の微小振幅波とした. 水路岸側のスロープは, 高さ $Y=0.65\text{m}$, 長さ 19.5m とした.

MARS 法は, 自由表面の解析手法の一種であり, 流体体積率の輸送を考える際に界面の勾配を考慮しているため, 界面形状の再現性に優れている.

そのため本研究では, MARS 法により計算する. MARS 法で使用する基礎式は, 次の多相流の連続式, 運動方程式, 体積率輸送方程式である. (F_1, F_2 は気相と液相の液体体積率, u, w は X, Z 方向の流速, P は圧力, ρ_1, ρ_2 は気相と液相の密度, ν は動粘性係数)

$$\frac{\partial(F_1 + F_2)}{\partial t} + \frac{\partial F_1 u}{\partial x} + \frac{\partial F_1 w}{\partial z} + \frac{\partial F_2 u}{\partial x} + \frac{\partial F_2 w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{F_1 \rho_1 + F_2 \rho_2} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\langle \nu \rangle \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\langle \nu \rangle \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\sigma \kappa_x}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{F_1 \rho_1 + F_2 \rho_2} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\langle \nu \rangle \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\langle \nu \rangle \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\sigma \kappa_z}{\rho} \quad (3)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial t} + \frac{\partial F_1 u}{\partial x} + \frac{\partial F_1 w}{\partial z} - F_1 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (4a)$$

$$F_1 + F_2 = 1.0 \quad (4b)$$

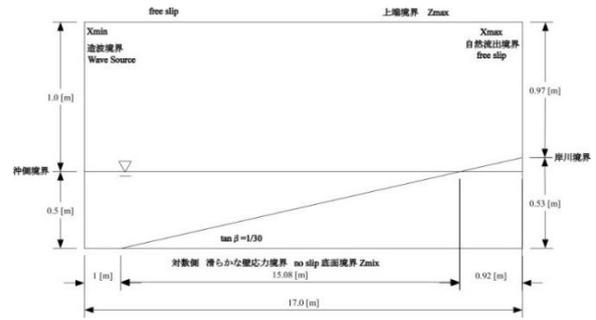
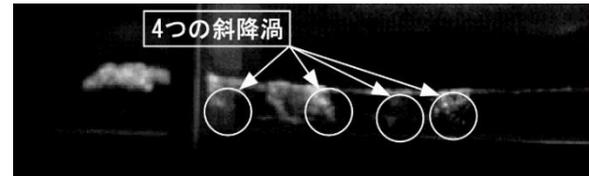
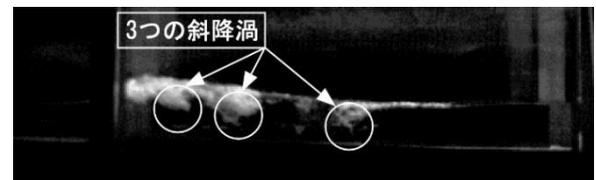


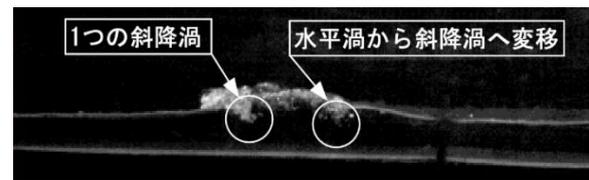
図 2-4 計算領域



(a) Quadruple



(b) Triple



(c) D-A



(d) Single

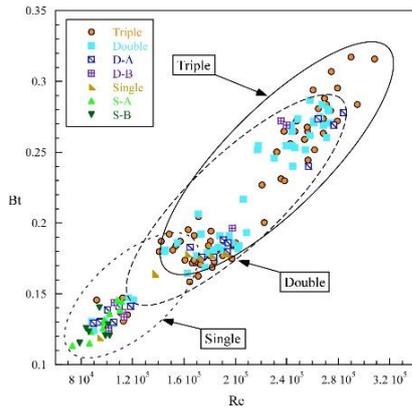
図 3-1 底面到達渦撮影画像

3. 結論

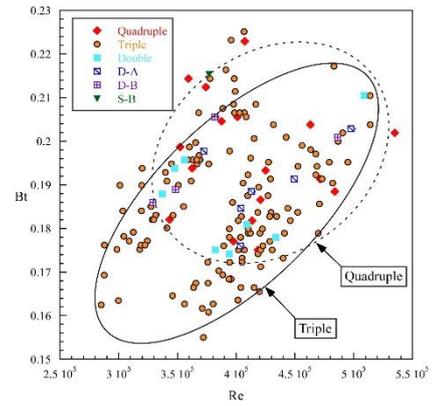
3-1. 実験結果

(1) 渦の発生条件 (実験I)

水平渦や斜降渦は既往の研究により 1~3 重渦となることが示されていたが, 図 3-1(a) に示すように新たに砕波時の波内部に 4 つの斜降渦が岸沖方向に形成される 4 重渦の発生を確認した. それぞれ 4 つの斜降渦(Quadruple)と図 3-1(b) に示す 3 つの斜降渦(Triple)が発生した. 2 重渦では 2 つの斜降渦(Double)と図 3-1(c) に示す 1 つの斜降渦と水平渦が斜降渦へ変移する形式(D-A), および斜降渦と水平渦が 1 つずつ形成される形式(D-B)の 3 種, 1 重渦では図

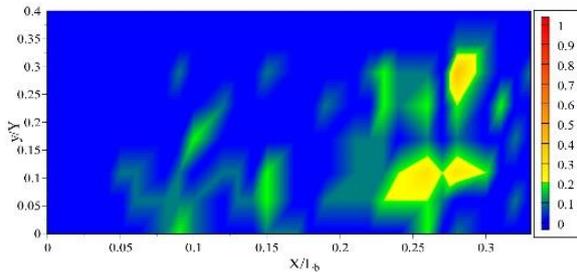


(a) ケース 1~3

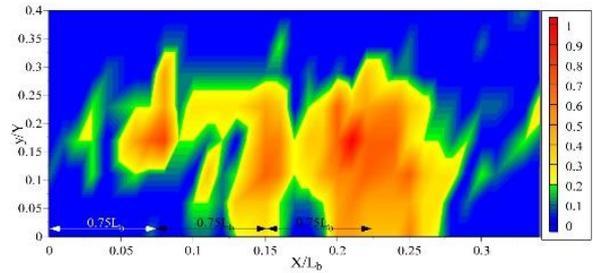


(b) ケース 4・5

図 3-2 底面到達渦撮影画像



(a) ケース 4



(b) ケース 5

図 3-3 斜降渦の底面到達数と位置

3-1(d)に示す1つ斜降渦(Single)と1つの水平渦が斜降渦へ変移する形式(S-A), および1つの水平渦(S-B)が生成される形式の3種が発生した。

渦の発生条件は, 碎波に関する Re 数と Breakertype index(Bt)に支配され, Re 数が大きいほど4重渦の発生数が増加した. ケース1~3では図3-2(a)に示すように, Re 数と Bt が比較的小さい $8.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1.6 \times 10^5$, $0.11 \leq Bt \leq 0.18$ では1重渦の発生数が多い. 一方, Re 数と Bt が大きくなる $1.6 \times 10^5 \leq Re \leq 3.0 \times 10^5$, $0.16 \leq Bt \leq 0.32$ では3重渦の発生頻度が高くなる. 1重渦と3重渦が発生する中間域では2重渦の生成が顕著となることから, この中間域は1重渦から3重渦への遷移域であると推察できる. Re 数がケース1~3より大きいケース4と5では図3-2(b)に示すように, 3重渦と4重渦がそれぞれ約8割と約1割の発生確率で生成され, 4重渦が生じる下限の Re 数は約 3.4×10^5 であった.

(2) 底面到達分布・底質の移動分布 (実験II)

碎波形式が同一の場合, 碎波帯相似パラメータ ξ が大きくなると斜降渦の底面到達数は増加し, 底面到達域も拡大した. 図3-3(a), 図3-3(b)に示すように, ケース4と5の斜降渦の底面到達地点の平面分布は, 両ケースにおいて碎波点 ($X/L_b=0.0, L_b$:碎波波長)から岸側の $0.22 \leq X/L_b \leq$

0.275 に集中的に位置し, ケース5 ($\xi=0.18$)とケース4 ($\xi=0.17$)の規準化した渦の底面到達数は, ケース5ではケース4の約4.5倍となっていた.

斜降渦の底面到達位置は L_b に依存して変化し, ケース5では碎波点 $X/L_b=0.0$ から岸側へ $X \cong 0.075L_b$ 毎となる $X/L_b \cong 0.075$, $X/L_b \cong 0.15, X/L_b \cong 0.225$ の3領域への底面到着が顕著であり, これは3重渦の形成を示唆している.

ケース4と5では図3-5に示すように, 底質は舌状の侵食域が出現する形状に分布し, 造波数の増加に伴い侵食域は拡大した. 格子に残留した底質面積 A' を格子面積 A で除した A'/A が 0.3 以下となる舌状の侵食域の位置は $X \cong 0.075L_b$ 毎に生じる斜降渦の底面到達位置と一致しており, 斜降渦の底面到着位置に起因して, 底質の侵食域は発生すると考えられる.

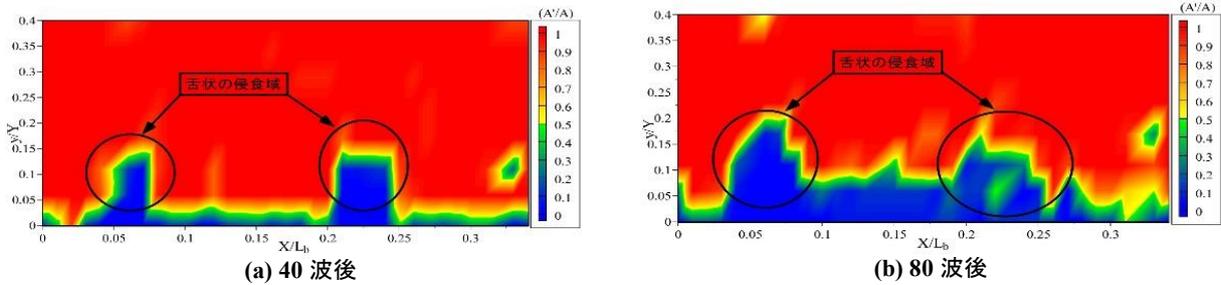
3-2. 解析結果

図3-6は $t/T=0.30$, $t/T=0.60$, $t/T=0.90$ での一様勾配斜面上における碎波帯での波の流速ベクトル図である. この図を比較すると, 流速ベクトルが増大していく様子を読み取れる. また, 時間が進むにつれ流速ベクトルの向きに統一性がなくなり分散しているため, 力が分散し, 波高が減少している. 碎波の特徴としては, 碎波時に波の形状が鋭く尖り, 波の流速が増大していることが読み取れる.



ケース 5 ($t/T=40$)

図 3-4 底質移動後の撮影画像



(a) 40 波後

(b) 80 波後

図 3-5 造波後の堆積域と侵食域

4. おわりに

- (1) 砕波が発生すると波の形状は鋭く尖り、流速ベクトルは増大する。しかし流速ベクトルに統一性はなく分散しているため、力は分散し、波高は高くならず減少していく。
- (2) 水平渦や斜降渦は既往の研究により 1~3 重渦となることが示されていたが、新たに砕波時の波内部に 4 つの斜降渦が岸沖方向に形成される 4 重渦の発生を確認した。渦の発生条件は、砕波に関する Re 数と Breakertype index に支配され、 Re 数が大きいほど 4 重渦の発生数が増加した。
- (3) 砕波形式が同一の場合、入射波高が大きくなると斜降渦の底面到達数は増加し、底面到達域も拡大した。今回の実験では、斜降渦の底面到達地点の平面分布は、砕波点からの砕波波長 L_b に依存して変化した。
- (4) 斜降渦が発生する領域の底質は、舌状の侵食域が出現する形状に分布した。舌状の侵食域が現れる位置は斜降渦の底面到達地点と一致しており、斜降渦の底面到着に起因して、底質の侵食域が発生したと考えられる。

参考文献

- 1) 水村和正：海岸海洋工学、p58,1992
- 2) 砂村継夫、張達平：砕波に起因する大規模渦の発生条件、海岸工学論文集、第 36 巻、pp.21-25、1989。
- 3) 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行(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 回海岸工学論文集、pp. 21-25。
- 4) 張達平・砂村継夫(1993)：砕波帯における底面

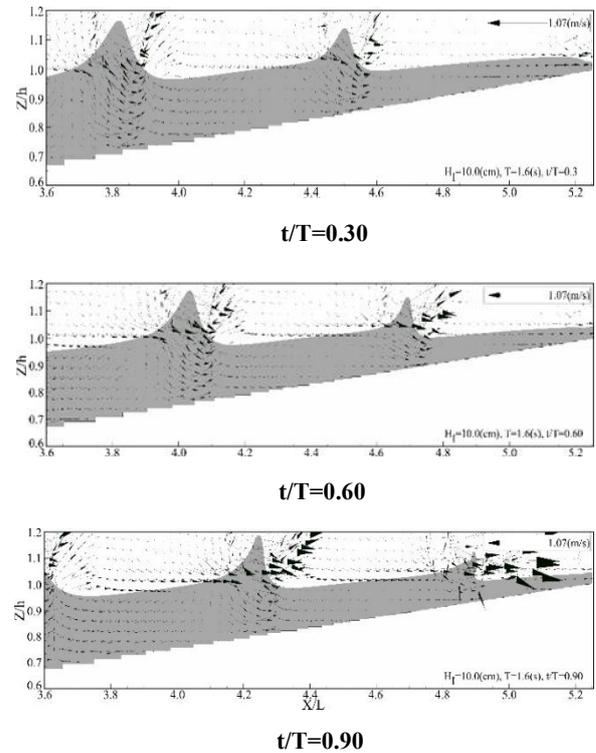


図 3-6 流速ベクトル

- 到達渦に関する実験的研究、海岸工学論文集、第 40 巻、pp.61-65。
- 5) 鷺見浩一、出村拓也、山清太郎、落合実、遠藤茂勝：斜降渦の平面的な分布特性に関する実験的研究、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.66, No1, pp.81-85, 2010。
- 6) 岡安章夫、敦賀仁、松川祐、NimalWijayarathna、片山裕之：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, 2000。