# 斜降渦の平面的な分布特性に関する実験的研究

# Experimental Study on Longshore Distribution of Obliquely Descending Eddy

鷲見浩一<sup>1</sup>·出村拓也<sup>2</sup>·山清太郎<sup>3</sup>·落合 実<sup>4</sup>·遠藤茂勝<sup>5</sup>

# Hirokazu SUMI, Takuya DEMURA, Seitaro YAMA, Minoru OCHIAI and Shigekatu ENDO

An obliquely descending eddy caused by wave breaking is a strong three-dimensional phenomenon. However, there have been a limited number of studies using hydraulic model tests that examined the distribution of obliquely descending eddies along coasts and the distribution of the three components of velocity. In the present research, the structure for the formation of obliquely descending eddies was examined. As a result of the study, it was found that obliquely descending eddies formed along coasts can be categorized into different types: "A structure wherein two vortexes come into close proximity," and "a structure wherein the distance between the two vortexes remains constant."

# 1. はじめに

砕波に起因して生成される大規模な渦については、こ れまでに多くの研究が行われており、日野ら(1984)に より水平渦と斜降渦の組織的な構造と水粒子運動の関係 が考察されている.また、灘岡ら(1987)が水理実験に より斜降渦の海底面への到着が底質の浮遊へ支配的であ ることを明らかにしたことにより、斜降渦の特性評価が 砕波帯内での底質移動を考慮するにあたって、重要な課 題であると認識されるようになった.

砕波によって発生する斜降渦は,空間的な3次元性の強 い現象である.平面的な斜降渦の分布特性については, 岡安ら (2000)が可視化実験により,斜降渦は回転方向 の異なる1対の渦である可能性を報告している.斜降渦に よる3次元的な流速変動については,岡安ら (2001)が3 次元超音波流速計を用いた水理実験により,底面付近の 沿岸方向流速が渦の外側方向となることを示している. このように,砕波に伴う渦の特性については,重要な知 見が得られている.しかし,3次元性の強い現象である斜 降渦の沿岸方向の分布形態,ならびに渦による乱れの影 響が強く反映されると考えられる砕波時の岸沖・沿岸・ 水深方向の流速の3成分を実験的に計測した研究は少数で ある.したがって,斜降渦の沿岸方向の発生形態と砕波 時の3成分の流速分布については,不明な点が多い.

本研究では、斜降渦の沿岸方向の発生形式を検討する. さらに、砕波時の岸沖・沿岸・水深方向の3成分の流速 分布特性を斜降渦の発生形態と関連づけて考究する.

1 2	正会員 学生会員	博(工)	日本大学准教授生産工学部土木工学科金沢工業大学大学院工学研究科環境土木工学専政
3	学生会員		日本大学大学院生産工学研究科土木工学 専攻
4 5	正会員 フェロー	博(工) 工博	日本大学教授生産工学部土木工学科日本大学教授生産工学部土木工学科

### 2.水理実験の概要

本研究では砕波に起因する斜降渦の沿岸方向の発生形 態を検討する実験 I,ならびに砕波時の波内部の3成分 の流速分布を検討する実験 IIを実施した.実験 Iと実験 IIともに、実験波は波高H=8.0cm,周期T=1.0s(以下に ケース1)とH=8.0cm,T=1.2s(ケース2)の2種類の規 則波とし、水深h=40cmの水路床上に透明なアクリル板 で作成した一様海底勾配模型(tan $\beta$ =1/20)を設置した. 砕波形式はケース1と2ともに、spilling砕波である.

### (1) 斜降渦の発生形式を検討する実験 I

実験 I は,金沢工業大学地域防災環境科学研究所(以下に地域防災研)の反射吸収制御を備えた造波機を持つ 平面造波水槽(長さ15.0m,幅5.0m,高さ1.0m)を用い て行った.海底勾配の内部に設置した水中カメラ(3D社 製:TS-CRW355EX)により,海底勾配面から水表面方 向における斜降渦の沿岸方向の分布や挙動を可視化する 画像を撮影した.アクリル製の海底勾配面には,8cmの 正方格子を配置した.水中カメラの撮影速度は30fpsで ある.撮影領域(岸沖方向130cm,沿岸方向43cm)は, 図-1に示すように水槽の沿岸方向の中心部に砕波点を包 含するように設定した.可視化画像の撮影と同時に容量 式水位計で砕波波高Hbも計測した.斜降渦の発生形態・ 条件は,波内部に混入した気泡をトレーサとして各ケー ス100波分の可視化画像に基づいて分析した.

#### (2) 砕波時の流速の3成分を検討する実験 II

実験IIは,地域防災研の片面ガラス張りの2次元造波 水槽(長さ18.0m,幅0.7m,高さ1.0m)を用いて行った. 砕波時の岸沖・沿岸・水深方向の3成分流速は,ステレ オ PIV(KONCERTO ver.1)を使用して計測した.水路 側方から,岸沖方向に幅36cmのレーザーシート光 (Laser QUANTUM製:ハイパワーグリーンレーザー)を 海底勾配内部に傾斜角45度で設置した光学式ミラー(縦



図-1 斜降渦の沿岸分布についての実験の撮影領域



(a) 沖側カメラ(b) 岸側カメラ図-2 波内部の3成分流速実験の可視化画像

10cm,横30cm,反射率99%)へ向けて照射した.この 光学式ミラーによりレーザーシート光は反射され,照射 領域を岸沖-水深断面とし,可視化光は砕波における水面 擾乱の影響を受けない.水粒子を可視化するためのトレ ーサとして,ナイロン12(中央粒径d<sub>50</sub>=12µm)を水中に 投入した.

ステレオ PIVは、水路側方に砕波点を中心として岸側 と沖側にステレオ配置した2台の高速度カメラ(Photoron 製:1024PCI)により、図-2に示すような同一の流れ場 を撮影することで、レーザーシート光に直交する沿岸方 向の流速が計測可能となる。2台の高速度カメラ位置と 画像端部の歪み補正などの光学条件の設定は、3次元位 置情報が既知の基準点を水槽内の撮影領域に438点設置 し、この基準点の位置情報に基づいて調整した。2台の 高速度カメラの撮影間隔は $\Delta t = 1/250s$ で同期させ、海底 勾配上の砕波点周辺に設けた撮影領域(縦18.1cm×横 36.1cm)において、波の砕波過程を撮影した。高速度カ メラの撮影速度は250fps、分解能は縦512pixel×横 1024pixelである。

# 3. 斜降渦の分類

岡安ら(2000)は、一部ガラス張りの海底勾配面の上 部に砂粒子を均等に配置し、高速度カメラにより海底勾 配下方から撮影した入射波の砕波過程における砂粒子の 奇跡画像に基づいて、斜降渦は相反する回転方向を持つ 2つの渦のペアである可能性を報告している。本研究に おいても、砕波時に波内部に混入した気泡をトレーサと して、海底勾配内部に設置した水中カメラによる斜降渦 の可視化画像を2ケースの実験波(各ケース100波)を 対象に撮影し、1対の斜降渦を確認することができた. 図-3に示すように、撮影領域内で1対の斜降渦は、同一 な入射波の内部に3組まで確認することができた. 図中



(a) *t/T*=0.417



(b) *t/T*=0.444



(c) t/T=0.472 図-3 3組の1対斜降渦

の点線は渦軸を示している.同図からトレーサとした気 泡が,波の伝播に伴い水表面から海底方向に拡大するこ とが判る.

水中カメラによる沿岸方向の撮影範囲には限界があ る.そこで、本研究では沿岸方向に1対の斜降渦が入射 波の内部に1組発生した場合の発生形態について議論す る.なお、波内部に混入した気泡が、発生したすべての 斜降渦を可視化しているとは考え難いが、ケース1と2 において1対の斜降渦が1組、2組、3組発生する確率は、 発生する渦の組数が多くなるほど低下する傾向を示し た.また、本研究ではトレーサとした気泡が海底面近傍 まで接近した場合を斜降渦とした.

図-4と図-5にケース2における斜降渦の可視化画像を 例示する.同図は海底勾配下方から沖側水表面に向けて 撮影した画像であり,図面の下部が沖方向,上部が岸方 向に相当する.図-4と図-5より,ボア領域において混入 した気泡を含む水塊の下端が突起状となり,突起部が波 の進行に伴い沖側斜め下方に回転しながら発達し,沿岸 方向に1対となる斜降渦を確認することができる.そし て,この斜降渦が砕波の進行過程で,2つの渦の渦軸が 特徴的な形式となることが判明した.すなわち,図-4は 砕波過程において1対の斜降渦の渦軸の間隔が,短縮す る形式であり,A形式とする.図-5は砕波過程において1 対の斜降渦の渦軸の間隔が,比較的変化しない形式であ り,B形式とする.また,砕波過程において2つの斜降



(a) *t/T*=0.305



(b) *t/T*=0.333





(d) t/T=0.417 図-5 B形式の斜降渦

h=6.3cmの静水面である. X/L は岸方向距離Xをh=40cm での入射波の波長Lで無次元化したものであり, Z/hは 鉛直距離Zをh=40cmで無次元化したものである. 図中 の流速ベクトルは岸沖-水深断面(X-Z)ではY=0 cmに おける流速値を示している. 岸沖-沿岸断面(X-Y)で は-0.15 $\leq$ Z/h $\leq$ 0.2 における流速値を投影して図化している. 沿岸-水深断面(Y-Z)ではケース1の場合: 0.00 $\leq$ X/L $\leq$ 0.24, ケース2の場合: 0.00 $\leq$ X/L $\leq$ 0.19における流速値を投影し て図示している. 砕波の時刻は,ケース1と2でそれぞ れ/T=0.240 と 0.236である. 造波機の始動から第15 波目 を計測対象波とした.

図-6,7(a)は計測波の波頂部周辺がX/L=0.0に到達した時刻の3成分流速である。岸沖-沿岸断面における沿岸方向の流速vは、両ケースの計測領域全域において正と負ともに不均一に存在している。沿岸流速成分の不均一な分布は、先行波の砕波による乱れが影響していると推察できる。図-6,7(b)は砕波時の3成分流速を示している。ケース2のvは岸沖-沿岸断面において、0.00≤X/L≤0.08の岸方向の流れと0.10≤X/L≤0.18の沖方向の流れが発生し



(a) t/T=0.333



(b) *t/T*=0.347



(c) *t/T*=0.375



(d) t/T=0.389 図-4 A形式の斜降渦

渦が接触し、トレーサとした気泡の拡散状況により、渦 軸が交差したような場合も確認できた.ケース1と2に おいて、1対の斜降渦が1組形成される場合に、渦が接 近・接触する形式と渦軸の間隔が変化しない形式の発生 確率は、それぞれ約1割であった.本研究では、海底近 傍まで気泡が到達した場合を斜降渦として取り扱った. したがって、前述の約2割を除く場合は、水表面付近で の斜降渦は確認できたがトレーサとした気泡が海底面ま で到達しなかった場合、斜降渦が発生しなかった場合な どである.渦の回転方向は、渦が接近する形式では、互 いの内方向が岸側となる傾向が強かった.

## 4. 砕波時における波内部の3成分流速

ステレオ PIV によるケース1と2の岸沖・沿岸・水深方 向の流速である*u*, *v*, *w*の空間分布の計測結果を, それ ぞれ図-6と図-7に示す. 両図は左手系の直交座標におい て, 岸沖-水深断面 (*X-Z*), 岸沖-沿岸断面 (*X-Y*), 沿岸-水深断面 (*Y-Z*) の3つの空間的なベクトル図から構成さ れている. 原点は,沿岸方向に水槽の中央部における



ている領域で,正と負の両方向に不規則に分布している. 岸方向の流れが生じている領域では、沿岸方向に砕波に よる乱れが発生していることが判る. 奥村ら(2001)に よる3次元PTVを用いた砕波帯内のvも正と負に分布し、 その大きさはu・wと同オーダーであることが報告されて いる.図-6,7(c)の砕波後の沿岸-水深断面の流速分布よ り、両ケースにおいてvは底面に接近するほど小さくな る傾向にある. 図-6, 7(d) における岸沖-沿岸断面のvは,  $f = \frac{1}{\sqrt{L}} \frac{1}{$ の波頂の直後から後方域において不均一に分布している. さらに、両ケースにおける沿岸-水深断面のvはZ/h≤-0.05 において、Z/h>-0.05と同等の流速が発生している領域も 確認できる.また、図-8はケース2の同時刻におけるPIV 解析に使用した可視化画像を示している. 同図から波内 部に混入した気泡がX/L=0.15の海底付近に到達している ことが判る.図-7(d)と図-8を併せて考察すると、波頂 部後方域に生じた斜降渦が海底方向へ発達していると推 察できる.図-6,7(e)の沿岸-水深断面において,Z/h≅-0.05のvは流速を維持しながら,不規則な分布となって いる.図-6,7(f)より,沿岸-水深断面の底面近傍のvは 両ケースにおいて減少していることが判る.

以上のように, 砕波の進行過程により水深方向のvの 分布特性が変化することが明らかとなった.水深方向の vの分布は, 砕波瞬時から砕波後における一連の時間経 過において, 流速を増加させながら, 波前脚部周辺から 海底面近傍へ向けて不規則となる領域を拡大させる.こ のような, vの分布特性の変化は, 斜降渦の海底面へ向 けての発達に影響されたものであると考えられる.

# 5.おわりに

本研究では、斜降渦の沿岸方向の分布形式と砕波帯内 での3成分流速を実験的に検討した.その結果、砕波に







伴い沿岸方向に1対となって発生する斜降渦は,砕波の 進行過程で,2つの渦の渦軸が特徴的な形式となること が判明した.また,沿岸方向の流速の鉛直分布は,砕波 時から砕波後における時間経過において,波前脚部周辺 から海底面近傍へ向けて流速を増加させながら不規則と なる領域を拡大させた.

謝辞:本研究の一部は科学研究費補助金(若手研究

(B):鷲見浩一,課題番号:21760391)により行った. 水理実験は,金沢工業大学地域防災環境科学研究所の施 設を使用した.ここに,謝意を表する.

### 参考文献

- 岡安章夫・敦賀 仁・松川 祐・NimalWijayaratna・片山裕之 (2000):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.
- 岡安章夫・岩澤秀光・片山裕之・敦賀 仁 (2001):斜降渦に よる底面近傍の3次元流速変動に関する実験的研究,海岸 工学論文集,第48巻, pp. 81-85.
- 奥村悠樹・渡部靖憲・加藤雅也・佐伯浩(2001):砕波帯内 の3次元流速の実験的評価,海岸工学論文集,第48巻, pp.96-100.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行(1987):砕波帯内における 底面近傍の流体運動特性と浮遊砂について,第34回海岸 工学論文集,pp.256-260.
- 日野幹雄・灘岡和夫・小俣 篤(1984):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.