

砕波帯における渦の発生と流速分布 に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON EDDY GENERATION AND VELOCITY DISTRIBUTION UNDER BREAKING WAVES

鷲見浩一¹・落合実²・遠藤茂勝³

Hirokazu SUMI, Minoru OCHIAI and Shigekatsu ENDO

¹正会員 博(工) 日本大学准教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

²正会員 博(工) 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (同上)

³フェロー 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (同上)

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. As such, there are many unknown factors regarding the formation structure of obliquely descending eddies along coasts and the distribution characteristics of the velocity components. 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." The condition for the formation of an obliquely descending eddy is determined by the surf similarity parameter ξ and the Reynolds number Re .

Key Words : *Obliquely descending eddy, surf Zone, breaker*

1. はじめに

砕波時に生成される大規模な渦には、波峰前面に沿って沿岸方向を軸として生成される水平渦と波頂部後方で沖側斜め下方に傾いて波の進行方向を軸として生成される斜降渦などがある。これらの大規模渦については、榎木ら¹⁾により水平渦が砕波後の波高減衰と関連づけて検討されて以来、これまでに多くの研究が行われており、日野ら²⁾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³⁾は、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。このような知見により、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。したがって、漂砂量公式の提案のような工学的な観点からも、斜降渦の特徴を解明する研究が精力的に行われている。

砕波によって発生する斜降渦を主柱とする大規模渦は、空間的な3次元性の強い現象である。砕波帯における岸沖方向の大規模渦の形態分類や発生条件については、張・砂村⁴⁾により提案されている。平面的な斜降渦の分布特性については、岡安ら⁵⁾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⁶⁾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。さらに、岡安ら⁷⁾は現地海岸においても流速観測を実行し、斜降渦による底質の浮遊の空間的なスケールは水深のオーダーよりも小さいことを明らかにしている。このように、砕波に伴う大規模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、不明な点が多いのが現状である。

本研究は、斜降渦の沿岸方向の発生形式を検討するとともに、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察するものである。

2. 水理実験

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

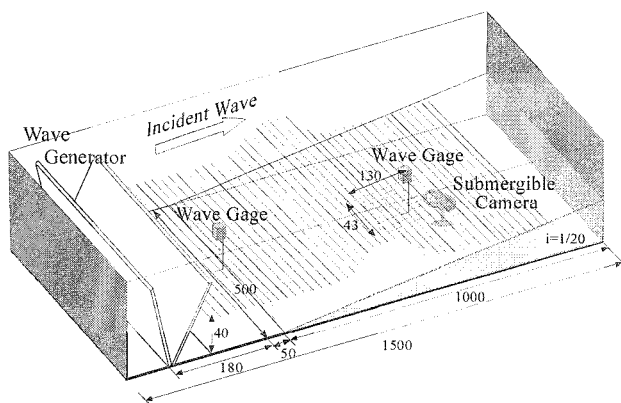


図-1 平面造波水槽(単位:cm)



図-2 撮影領域

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 $H_1=8.0\text{cm}$ 、周期 $T=1.0\text{s}$ (以下にケース1)と $H_1=8.0\text{cm}$ 、 $T=1.2\text{s}$ (ケース2)の2種類の規則波とし、水深 $h=40\text{cm}$ 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とケース2ともに、spilling砕波である。

(1) 斜降渦の沿岸方向の発生形態・条件を検討する実験Ⅰ

実験Ⅰは、図-1に示す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-2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 H_0 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3成分流速を検討する実験Ⅱ

実験Ⅱは、図-3に示す地域防災研の片面ガラス張

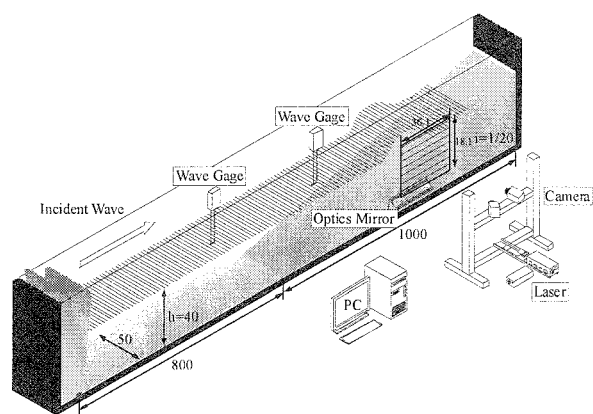
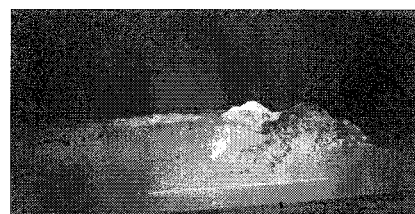
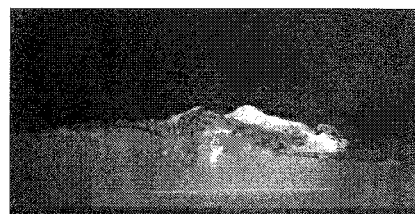


図-3 2次元造波水槽(単位:cm)



(a) 沖側カメラ



(b) 岸側カメラ

図-4 2台の高速度カメラによる撮影画像

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 $d_{50}=12\mu\text{m}$)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(Photron製:1024PCI)により、図-4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 $\Delta t=1/250\text{s}$ で同期させ、海底勾配上の砕

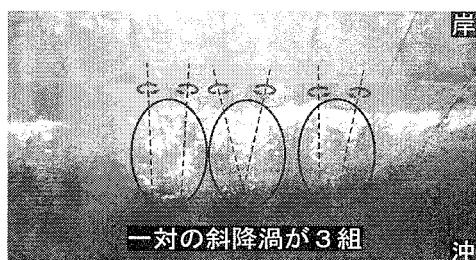


図-5 3組発生した1対の斜降渦

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。なお、高速度カメラの撮影速度は250fpsであり、分解能は縦512pixel×横1024pixelである。

3. 砕波に伴う斜降渦の分類と発生条件

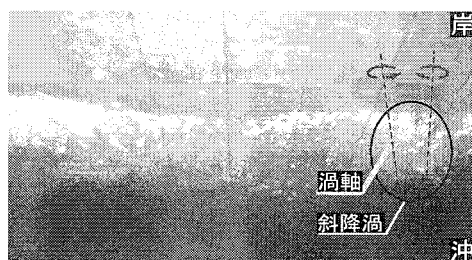
岡安ら⁵⁾は、一部ガラス張りの海底勾配面の上部に砂粒子を均等に配置し、高速度カメラにより海底勾配下方から撮影した入射波の砕波過程における砂粒子の奇跡画像に基づいて、斜降渦は相反する回転方向を持つ2つの渦のペアである可能性を報告している。

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、岡安ら⁵⁾が示した1対の斜降渦を確認することができた。

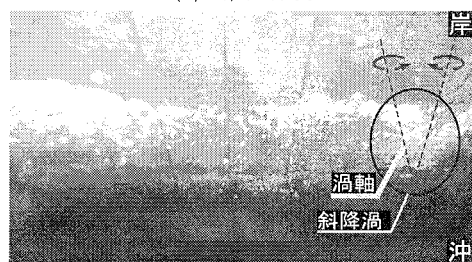
(1) 1対の斜降渦の発生形態

実験Ⅰによる砕波に伴い発生する斜降渦の沿岸方向の分布は、単一の渦と回転方向の相異なる1対の渦に大別できた。図-5に示すように、実験Ⅰにおける撮影領域内で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。しかし、水中カメラによる沿岸方向の撮影範囲に限界があることから、ここでは、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とケース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-6～8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、図面の上部が岸方向に相当する。図-6～8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3つの形

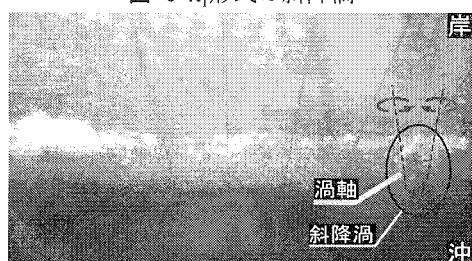


(a) $t/T=0.36$



(b) $t/T=0.39$

図-6 A₁形式の斜降渦

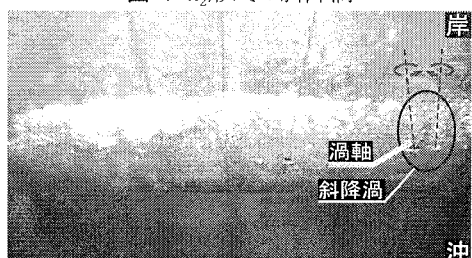


(a) $t/T=0.44$

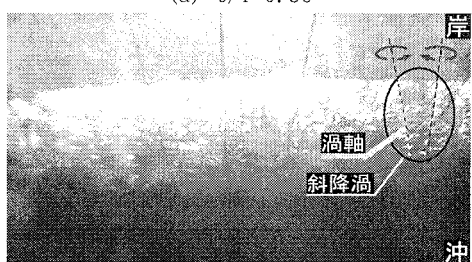


(b) $t/T=0.50$

図-7 A₂形式の斜降渦



(a) $t/T=0.36$



(b) $t/T=0.42$

図-8 B形式の斜降渦

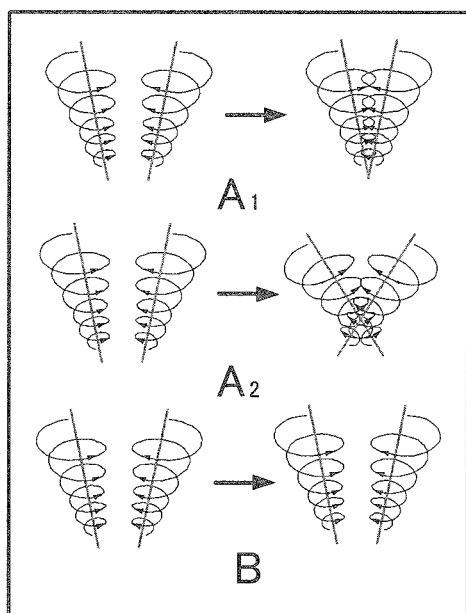


図-9 1対の斜降渦の形式分類の模式図

式となることが判明した。

すなわち、図-6(a), (b)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_1 形式とする。図-7(a), (b)は、砕波過程において1対の斜降渦の渦軸が交差する形式であり、 A_2 形式とする。図-8(a), (b)は、砕波過程において1対の斜降渦の渦軸の間隔が変化しない形式であり、B形式とする。 A_1 形式、 A_2 形式、ならびにB形式の斜降渦の模式図を図-9に図示する。

ケース1とケース2において、1対の斜降渦が1組形成される場合に、渦軸が接近する形式($A_1 \cdot A_2$)と渦軸の間隔が変化しない形式(B)の発生確率は、それぞれ約1割であった。渦の回転方向は、渦軸が接近する形式($A_1 \cdot A_2$)では、互いの内方向が岸側となる傾向が強く、1対の斜降渦の渦軸間の距離の縮小には、渦の回転方向が関係していると推察できる。

(2) 斜降渦の発生条件

沿岸方向に1対生じる斜降渦の発生組数の相違による発生条件を砕波帯相似パラメータ ξ と砕波に関するRe数を用いて整理する。図-10はケース1とケース2の沿岸方向に発生する斜降渦の組数を、 ξ とRe数により示したものである。 $\xi = \tan \beta / (H_b/L_b)^{1/2}$ であり、 $\tan \beta$ は海底勾配、 H_b は砕波波高、 L_b は砕波波長である。 H_b と砕波水深 h_b は、砕波状況の波高変化を容量式水位計より観測することによって求めた。 L_b は h_b を用いた微小振幅波理論の波長とした。また、 $Re = H_b L_b / \nu T$ であり、 T は波の周期、 ν は動粘性係数であり $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。波浪諸元が同一の実験ケースにも関わらず、1対の斜降渦は沿岸方向に1組から3組発生している。さらに、発生する渦の組数が同一な場合において発生位置に差異があり、斜降渦は時空間的に間欠性を持っている。しかし、図-10(a), (b)から砕波に起因して沿岸方向に発生する1

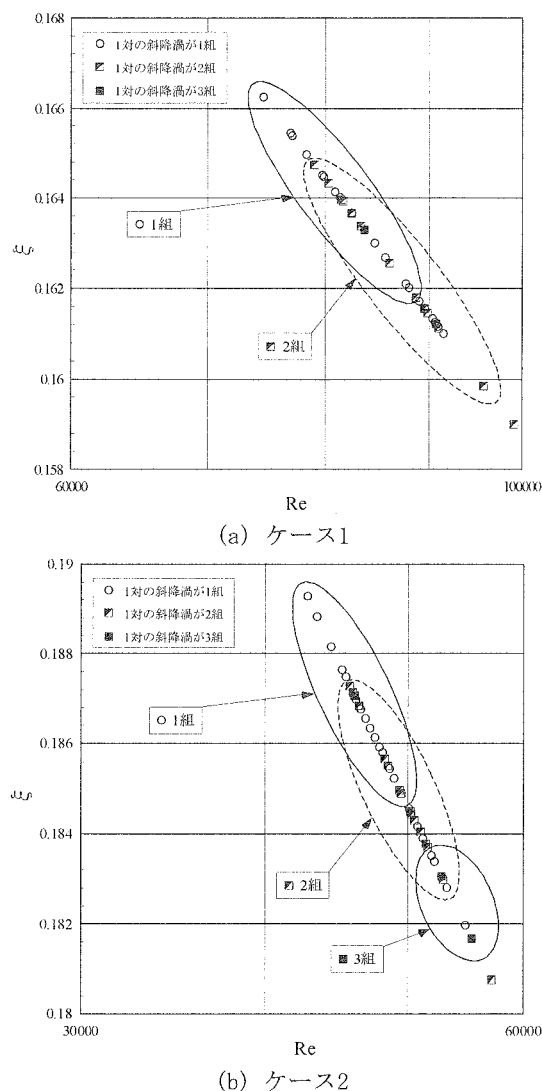


図-10 1対の斜降渦が複数組生じる場合の発生条件

組から3組の1対の斜降渦の発生条件はケース1とケース2に共通して、 ξ とRe数に特徴づけられることが判った。 H_b が大きくRe数が増加すると渦の発生組数が多くなる傾向となる。特にケース2では、Re数が比較的小さい $4.2 \times 10^4 \leq Re \leq 4.8 \times 10^4$ では1組の斜降渦が発生する頻度が高く、Re数が大きい $5.2 \times 10^4 \leq Re \leq 5.4 \times 10^4$ では3組の斜降渦の発生頻度が高くなる。1組と3組の斜降渦が発生する中間域では2組の斜降渦の生成が顕著となることから、この中間域は1組から3組への遷移域であると推察できる。

4. 砕波時の3成分流速

ステレオPIVによるケース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図-11(a)~(f)に時系列で示す。図-11(a)~(f)のそれぞれは、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 $h=6.3 \text{ cm}$

の静水面である。X/LとZ/hは、それぞれ原点からの岸方向距離Xをh=40cmでの入射波の波長Lで、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における流速値を示している。また、岸沖-沿岸断面(X-Y)では $-0.55 \leq Z/h \leq 0.55$ における流速値を、沿岸-水深断面(Y-Z)では $-0.00 \leq X/L \leq 0.35$ における流速値をそれぞれ投影的に図示している。岸沖-水深断面におけるハッチ部は海底勾配であり、入射波が砕波するときの時刻は $t/T=0.236$ 、 h_b は約5.8cm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-11(a)は計測対象波の波頂部が撮影領域の沖側端のX/L=0.0に到達した時刻 $t/T=0.167$ における3成分流速を示している。岸沖-沿岸断面から沿岸方向の流れvは、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。このような沿岸流速成分の複雑な分布は、先行波の砕波による渦の残留によるものと推察できる。渡部ら⁸⁾はplunging砕波において残留渦が波峰方向の流速変動の不均一性に寄与することを指摘している。また、沿岸-水深断面によるvの

大きさは底面に接近するほど減少する傾向となっている。この時刻において底面近傍では、斜降渦による乱れの影響は小さいと考えられる。図-11(b)は砕波時の $t/T=0.267$ の時刻の3成分流速を示している。vは岸沖-沿岸断面より、 $0.00 \leq X/L \leq 0.15$ の岸方向の流れと $0.18 \leq X/L \leq 0.35$ の沖方向の流れが発生している領域において、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⁸⁾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 $u \cdot w$ と同オーダーであることが報告されている。図-11(c)は砕波後の時刻 $t/T=0.400$ における3成分流速を示している。砕波後の岸沖-沿岸断面においてもvは正と負に不均一な分布となっている。また、沿岸-水深断面でのvが正と負に不規則に分布する大きさは、静水面下の $Z/h \cong -0.4$ 付近を境界として異なり、 $Z/h \cong -0.4$ から上部の流速値は下部の流速値よりも大きくなっている。これは、大規模渦による乱れの影響が $Z/h \cong 0.4$ まで達しているためであると考えられる。図-11(d)

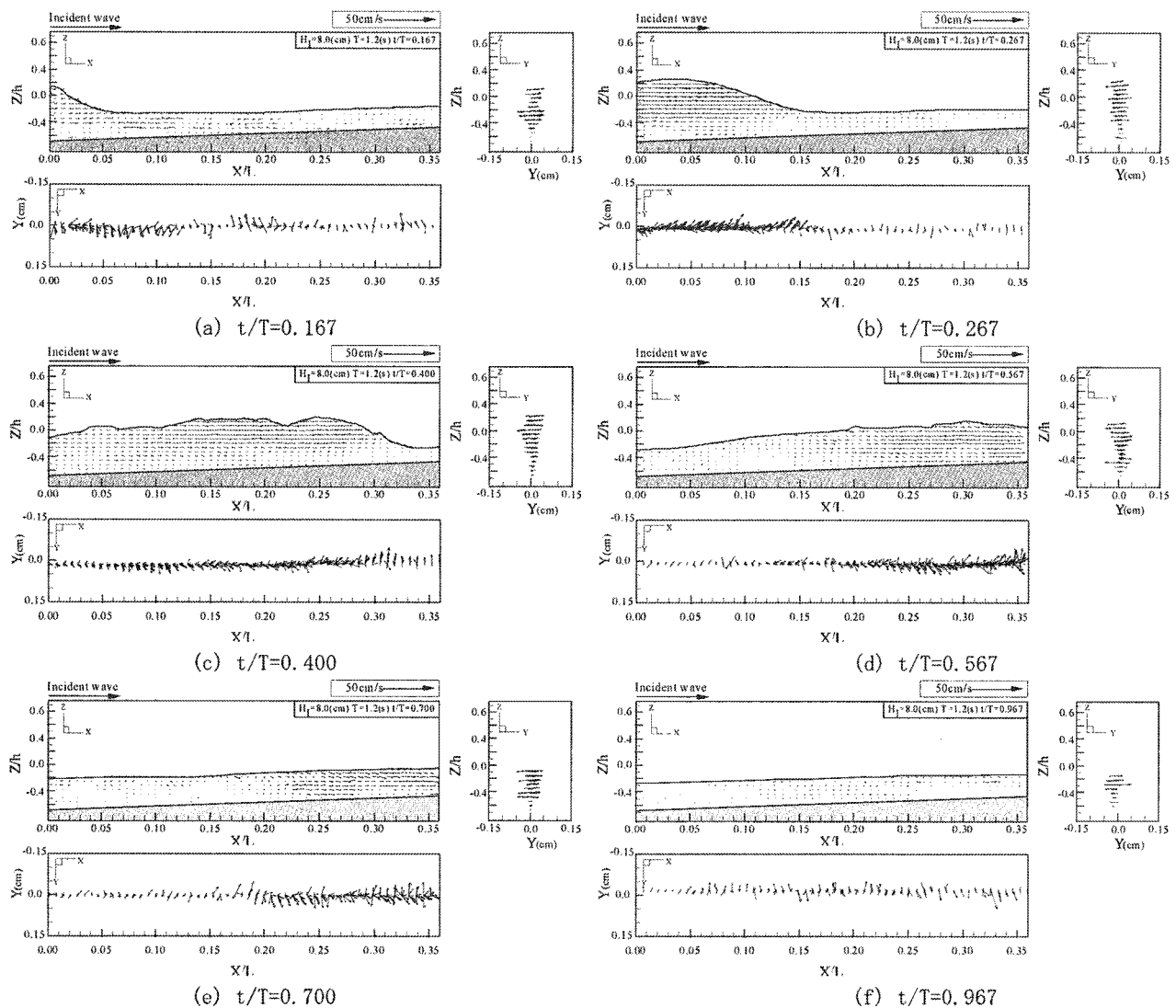


図-11 ステレオPIVによる砕波帯での3成分流速分布

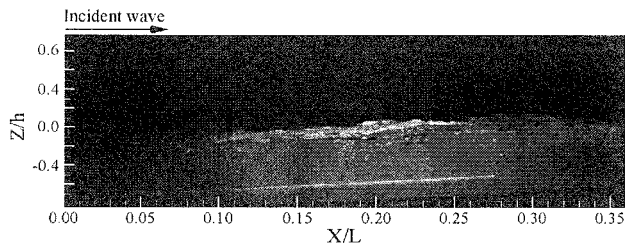


図-12 砕波後の時刻における可視化画像

は砕波後の時刻 $t/T=0.567$ における3成分流速を示している。岸沖-沿岸断面の v は、波頂部後方の $0.22 \leq X/L \leq 0.28$ において不均一に分布し、その大きさは図-11(c)の岸沖-沿岸断面の波頂部後方域の $0.19 \leq X/L \leq 0.25$ よりも大きくなっている。さらに、沿岸-水深断面の v は $Z/h \leq -0.4$ において、 $Z/h > -0.4$ よりも大きな流速が発生している。また、図-12は同時刻における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 $X/L \approx 0.28$ の海底付近に到達していることが判る。気泡は斜降渦の発達過程を完全に追跡できないが、図-11(d)と図-12をあせて考察すると、波頂部後方に発生した斜降渦が海底へ向けて発達している過程を確認することができる。図-11(e)は砕波後の時刻 $t/T=0.700$ における3成分流速を示している。岸沖-沿岸断面の $0.25 \leq X/L \leq 0.35$ の v は不規則に分布し、沿岸-水深断面の v は流速を増加させながら、 $Z/h < -0.4$ の海底方向へ不規則な分布となる領域を拡大させている。このことから、斜降渦が海底面へ到着していると推測できる。図-11(f)は砕波後の時刻 $t/T=0.967$ における3成分流速を示している。沿岸-水深断面の底面近傍の v は減少しており、同時刻においては、底面近傍の渦による乱れが消散したと推察できる。

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。すなわち、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にされたものであると考えられる。

9. まとめ

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。以下に主要な結論を示す。

- (1) 砕波に伴い発生する1対の斜降渦は、撮影領域内で同一な入射波の内部に3組まで確認することができた。また、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3つの形式となることが判明した。
- (2) 沿岸方向の流速成分の鉛直分布は、入射波の砕波過程に伴って変化した。砕波時から砕波後における時間経過において、沿岸方向流速の鉛直分布は、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(B)：鷺見浩一，課題番号：21760391)により行った。また水理実験の実施にあたっては、金沢工業大学 地域防災環境研究所の施設を使用した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 樺木亨，岩田好一朗，松本昇：砕波後の波の変形に及ぼす乱れの効果について，第20回海岸工学論文集，pp. 565-570，1973.
- 2) 日野幹雄，灘岡和夫，小俣篤：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. 1-5，1984.
- 3) 灘岡和夫，上野成三，五十嵐竜行：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. 256-260，1987.
- 4) 張達平，砂村継夫：砕波帯における底面到達渦に関する実験的研究，海岸工学論文集，第40巻，pp. 61-65，1993.
- 5) 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.
- 6) 岡安章夫，岩澤秀光，片山裕之，敦賀仁：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. 81-85，2001.
- 7) 岡安章夫，鈴木崇之，片山裕之：斜降渦による底質浮遊と流体運動に関する現地観測，海岸工学論文集，第4巻，pp. 546-550，2000.
- 8) 渡部靖憲，安原幹雄，佐伯浩：大規模旋回渦，斜行渦，3次元砕波ジェットの生成及び発達機構，海岸工学論文集，第46巻，pp. 141-145，1999.
- 9) 奥村悠樹，渡部靖憲，加藤雅也，佐伯浩：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. 69-100，2001.