

砕波に伴う渦の発生条件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・野崎猛盛²・高江俊之³

Hirokazu SUMI, Takemori NOZAKI and Toshiyuki TAKAE

Horizontal and obliquely descending eddies due to breaking waves tend to have three-dimensional phenomena. There are a few studies on experimental observations of three-dimensional velocity distributions under the breaking waves. Thus, the formation of the horizontal and obliquely descending eddies are not completely explained at present. This study has experimentally found the generation condition of the horizontal and obliquely descending eddies and the three-dimensional velocity distribution under the wave breakings. As a result, the generation condition of the obliquely descending eddies is dependent on the breaking type index (Bt) and Reynold's number. Still more, the lateral velocity distribution has been found to be random in time and space.

1. はじめに

砕波に伴い波内部に生成される大規模な渦については、榎木ら（1973）により水平渦が砕波後の波高減衰と関連づけられて検討されて以来、これまでに多くの研究が行われている。特に、灘岡ら（1987a）が砕波後の波頂部後方に形成される斜降渦が、底質の浮遊に影響することを明らかにしたことにより、漂砂量公式の提案のような工学的な観点からも、斜降渦の特徴を明らかにする研究が精力的に実施されている。

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。このような斜降渦を中心とする大規模渦の数値計算による研究は、渡部ら（1999, 2000）による3次元LESを用いた大規模渦の生成・発達過程の検討が挙げられる。一方、実験的な研究においては、張・砂村（1993）が底面に到達する大規模渦の分類や発生条件を提示している。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対の渦であることを報告している。3次元渦構造については灘岡ら（1987b）が実験室のみならず現地においても流速観測を実行し、流速と浮遊砂濃度との関係から渦の3次元的存在を示唆している。また、奥村ら（2001）は3次元PTVにより、斜降渦に起因すると推察される水粒子の回転しながら下降する軌道を捉えている。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、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波内部の岸沖・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、砕波時の3成分の流速分布と大規模渦の発生形態については不明な点が多い。

本研究は、一様斜面上で発生する砕波現象を対象として、底面到達渦の形態や発生条件を検討するとともに、砕波帯での岸沖・沿岸・水深方向の3成分の流速分布を水理実験により考究するものである。

2. 水理実験の概要

本研究では砕波に起因する大規模渦の発生形態と発生条件を検討する実験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、金沢工業大学地域防災環境科学研究所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。水深は $h=40\text{cm}$ とし、水槽内にはアクリル板で作成した一様海底勾配（ $\tan\beta=1/20$ 、長さ9.6m、幅0.7m、高さ0.48m）を設置した。

（1）大規模渦の発生形態・条件を検討する実験Ⅰ

実験Ⅰでは、水路側方に設置した高速度カメラ（デジモ製：VCC-H1000B）により、渦の構造や挙動を可視化する画像を撮影した。高速度カメラの撮影速度は250fpsであり、分解能は縦232pixel×横512pixelである。実験波は波高 $H_1=8.0\text{cm}$ 、周期 $T=1.2\text{s}$ （以下にケース1とする）と $H_1=8.0\text{cm}$ 、 $T=1.0\text{s}$ （ケース2）の2種類の規則波とした。砕波形式はケース1と2でspilling砕波である。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成分流速分布を検討する実験Ⅱ

実験Ⅱでは、ステレオPIV（FLOWTECH RESEARCH）を用いて、砕波時の波内部の岸沖・沿岸・水深方向の3成分流速を計測した。水路上方からレーザーシート光（カトウ光研製：Green Laser Sheet 50mG）を水槽内に岸沖方向

1 正会員 博(工) 金沢工業大学准教授 地域防災環境科学研究所
2 正会員 修(工) 五洋建設(株) 東京支店
3 正会員 修(工) 前田建設工業(株) 関西支店

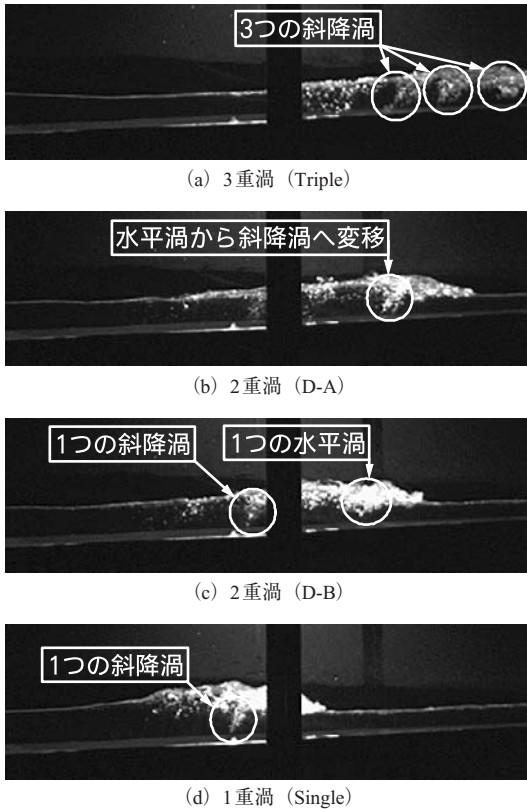


図-1 底面到達渦の撮影画像

に約50cmの幅で照射し、水中に投入したナイロン12（中央粒径 $d_{50}=12\mu\text{m}$ ）を水粒子のトレーサとして水粒子を可視化した。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CCDカメラ（SONY製：XC-HR50）により同一の流れ場を撮影することにより、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120点設置し、この基準点の位置情報に基づいて調整した。2台のカメラの撮影間隔は $\Delta t=1/30\text{s}$ 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32.8cm×横32.6cm）において波の砕波過程を撮影した。なお、CCDカメラの撮影速度は60fpsであり、分解能は縦232pixel×横512pixelである。実験波は $H_1=8.0\text{cm}$ 、 $T=1.0\text{s}$ の規則波であり、砕波形式はspilling砕波である。

3. 砕波に伴う大規模渦の分類と発生条件

張・砂村（1993）は、砕波帯内で発生する底面到達渦を渦の数と種類により1重渦と2重渦、および3重渦からなる7形式に分類している。本研究においても砕波直後に形成される底面に到達する渦は、図-1（a）～（d）に例示す

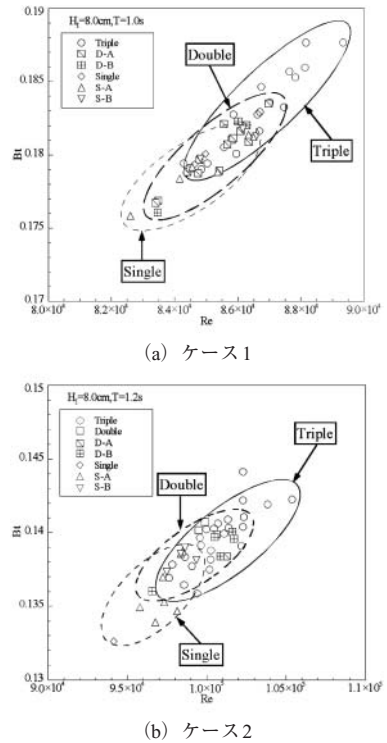


図-2 底面到達渦の発生条件

るように実験Ⅰでの高速度カメラによる画像解析から、水平渦と斜降渦であり、計7形式の底面到達渦を確認した。

図-1（a）は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、3つの斜降渦（Triple）を連続的に形成する3重渦である。図-1（b）は波峰前面で波頂部から砕けた水塊が波前脚部に衝突して形成される水平渦が波の伝播に伴って斜降渦へと遷移し、2つの斜降渦が存在する形式（D-A）である。図-1（c）は1つの斜降渦と1つの水平渦が形成される形式（D-B）である。2重渦は、これら2形式の他にも岸沖方向に2つの斜降渦（Double）が連続して形成される形式も観測しており、計3形式を確認した。1重渦は、図-1（d）に示した1つ斜降渦（Single）が発生する形式と1つの水平渦が斜降渦へ変移する形式（S-A）、ならびに1つの水平渦（S-B）が生成される形式の計3形式を確認した。なお、7形式の底面到達渦の発生は間欠的でありケース1と2において、6割程度の発生確率であった。

このような7形式の底面到達渦の発生条件を breaker-type index である Br と砕波に関する Re 数を用いて整理する。図-2（a）、（b）はそれぞれケース1と2の7形式の底面到達渦の発生条件を Br と Re 数により図化したものである。なお、 $Br=H_b/gT^2\tan\beta$ であり H_b は砕波波高、 T は波の周期、 $\tan\beta$ は海底勾配である。 $Re=H_bL_b/\nu T$ であり L_b は砕

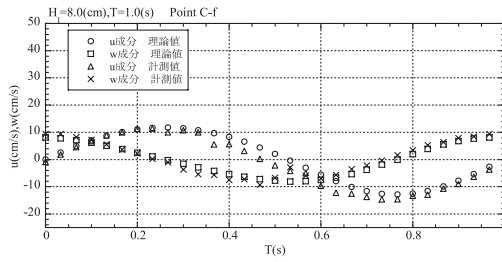


図-3 ステレオPIVによる水粒子速度

波波長, ν は動粘性係数であり $0.01\text{cm}^2/\text{s}$ とした。 H_b と碎波水深 h_b は, 碎波状況の波高変化を撮影画像より観察することによって実験波毎に求めた。7形式の底面到達渦は波浪諸元が同一の実験ケースにも関わらず, すべて発生している。さらに, 渦の形態が同一形式な場合においても発生位置に差異があり, 時空間的に間欠性を持っている。しかし, 図-2 (a), (b) から碎波に起因して発生する底面到達渦の発生条件はケース1と2に共通して, Bt と Re 数に依存して変化することが判った。すなわち, H_b が大きく Bt と Re 数が増加すると3重渦の発生する場合が多くなる。一方, H_b が減少し Bt と Re 数が小さくなると1重渦が生成される場合が顕著となる。また, 1重渦と3重渦の発生する中間の領域 (ケース1では $8.3 \times 10^4 \leq Re \leq$

8.8×10^4 , $0.176 \leq Bt \leq 0.184$, ケース2では $9.6 \times 10^4 \leq Re \leq 1.02 \times 10^5$, $0.136 \leq Bt \leq 0.141$) では, 2重渦が生成される頻度が高い。この中間の領域は, 1重渦から3重渦への遷移領域であると考えられる。

4. ステレオPIVの精度検証

碎波帯内での3成分流速をステレオPIVを使用して計測するにあたって, 計測精度を検証する必要がある。 $h=40\text{cm}$ の一樣水深において, 実験IIと同一の実験波を造波し, ステレオPIVにより岸沖・水深方向の流速を計測する検証実験を実施した。2台のカメラ校正と配置, および撮影領域は, 実験IIと同様にした。図-3はステレオPIVにより計測した撮影領域の中心部における岸沖方向と水深方向の流速 u , w と微小振幅波理論による水粒子速度の理論値の時間波形を示したものである。ステレオPIVによる計測値と理論値はほぼ一致しており, ステレオPIV計測の妥当性が確認できる。

5. 碎波帯内での3成分の流速分布

ステレオPIVによる碎波時の岸沖・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-4 (a) ~ (h) に時系列で示す。図-4 (a) ~ (h) のそれぞれは, 左手系

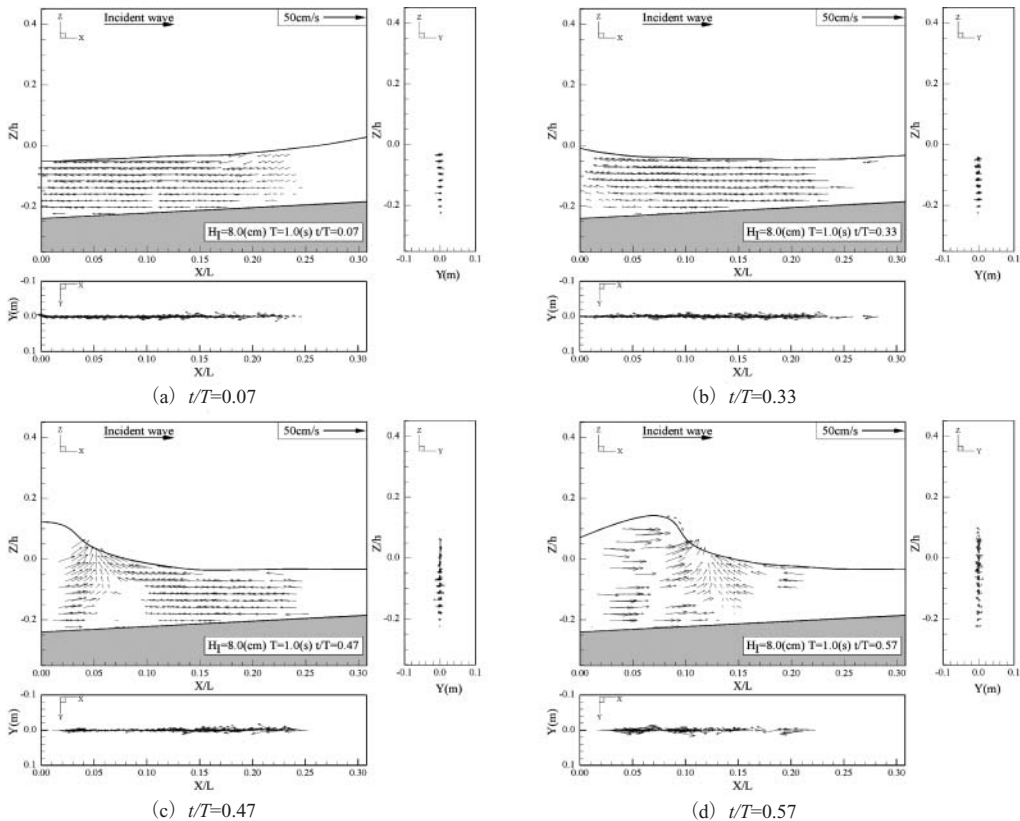


図-4 ステレオPIVによる碎波帯での3成分流速分布

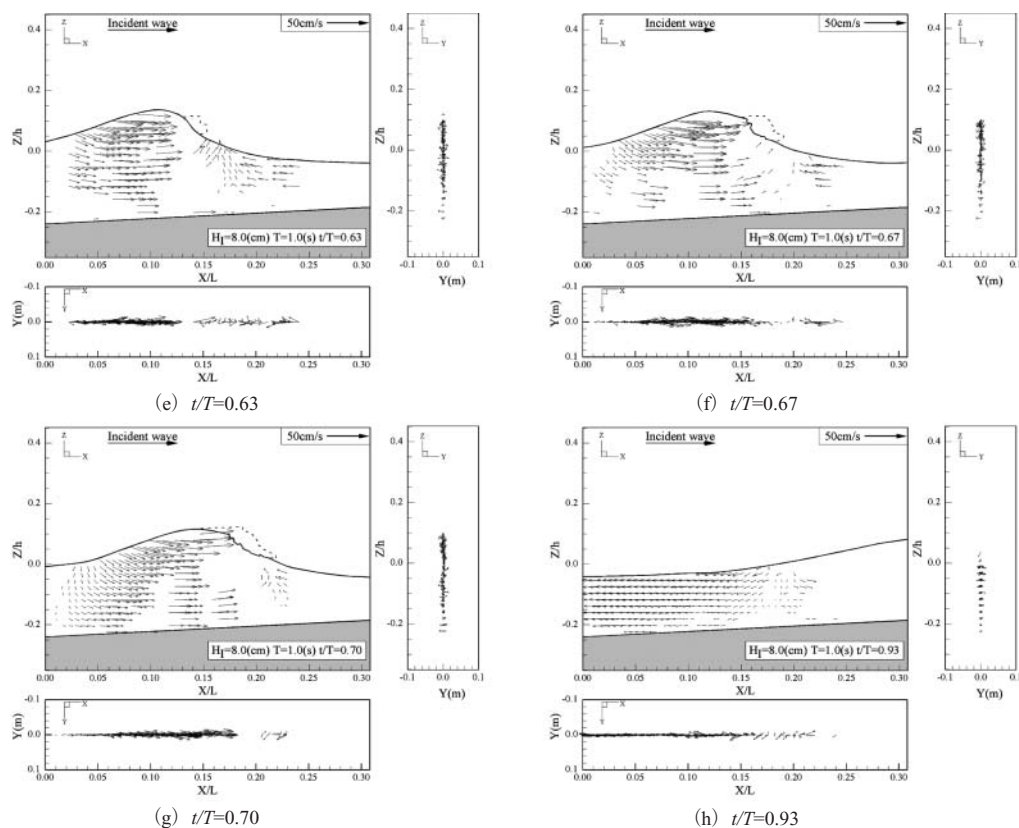


図-4 ステレオ PIV による砕波帯での 3 成分流速分布

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、沿岸方向に実験水槽の中央部における $h=9.6\text{cm}$ の静水面である。 X/L は原点からの岸方向距離 X を $h=40\text{cm}$ での入射波の波長 L で無次元化したものである。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 $t/T=0.63$ 、 h_b は約 9.0cm である。造波機の始動から第 12 波目を計測対象波とした。

図-4 (a) は沖方向の流れが発生している $t/T=0.07$ の時刻の 3 成分流速分布を示している。岸沖-沿岸断面から沿岸方向の流れ v は、 $0.01 \leq X/L \leq 0.23$ において正と負ともに存在しているが、沿岸-水深断面より 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おり、この時刻において底面近傍での渦による乱れの影響は小さいと考えられる。図-4 (b) は波前脚部が $X/L=0.0$ に到達した $t/T=0.33$ の時刻の 3 成分流速分布を示している。 v は岸沖-沿岸断面において、岸沖方向に不均一に分布していることが確認できる。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 (1999) 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。図-4

(c) は図-4 (b) から 0.17s 後の $t/T=0.47$ の時刻の 3 成分流速分布を示している。岸沖-水深断面の $X/L \approx 0.06$ では岸方向と沖方向に流向を持つ流れが合流し、上昇流が発生している。 v は、正と負の両方向に不規則であるが、その不規則性は岸方向の流れが発生している $0.02 \leq X/L \leq 0.06$ よりも沖方向の流れが生じている $0.12 \leq X/L \leq 0.24$ が顕著である。図-4 (d) は砕波直前の $t/T=0.57$ の時刻の 3 成分流速分布を示している。 v は波の伝播により岸方向の流れが発生している $0.04 \leq X/L \leq 0.11$ において正と負の両方向に発達していることが岸沖-沿岸断面から確認できる。図-4 (e) は砕波時の $t/T=0.63$ の時刻の 3 成分流速分布を示している。 v は岸沖-沿岸断面より、 $0.03 \leq X/L \leq 0.12$ の岸方向の流れと $0.18 \leq X/L \leq 0.24$ 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、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) による三次元 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-4 (f) は砕波直後の $t/T=0.63$ の時刻の 3 成分流速分布を示している。砕波直後の岸沖-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。さらに、沿岸-水深断面の $-0.1 \leq Z/h \leq 0.1$ で v は、正と負の両方向に存在し、この範囲の v の大きさは同程度であることから、砕

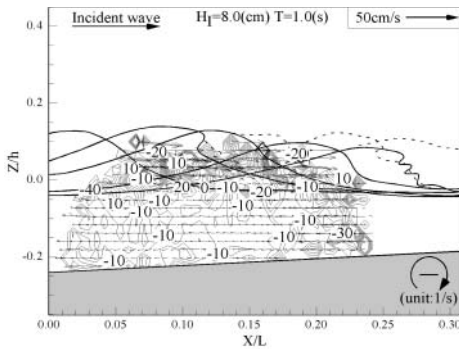


図-5 定常渦の空間分布

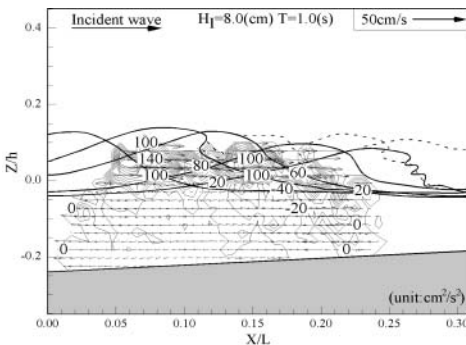


図-6 レイノルズ応力の空間分布

波により波頂部から砕けて気泡の混入した水塊の下端から発生した斜降渦が $Z/h \approx -1.0$ 付近にまで接近していると推測できる。図-4 (g) は砕波後の時刻の $t/T=0.70$ の3成分流速分布を示している。沿岸-水深断面を $t/T=0.63$ と比較すると底面近傍の $Z/h \approx -2.0$ の v が増加している。これは、波の進行に伴って斜降渦が底面に到達した影響によるものと考えられる。図-4 (h) は砕波後の時刻の $t/T=0.93$ の3成分流速分布を示している。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 v の不均一な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、砕波瞬時から砕波直後、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、斜降渦の海底へ向けての発達に影響にされたものであると推測できる。

6. 定常渦とレイノルズ応力

図-5はステレオPIVにより計測した u と w を1周期で時間平均した流速から算定した渦度の空間分布である。同図から定常渦は、静水面より上方の岸方向の平均流と静水面より下方の沖方向の平均流の発生域の境界である

$Z/h \approx 0$ を渦面として渦列を形成することが判る。この渦列が存在する渦層では渦度が大きい値となる。渦列の発生原因は静水面付近で岸沖方向に流向の異なる平均流が卓越しているためであると考えられる。

レイノルズ応力 $\overline{u'w'}$ をステレオPIVの計測値から算定し、空間分布を図-6に示した。レイノルズ応力は、 $Z/h > 0$ において流速の変動が $Z/h < 0$ と比較して大きく、かつ岸沖と水深方向の速度変動成分が時間的に同様な変化をしている。一方、 $Z/h < 0$ では岸沖と水深方向の速度変動成分に関連性のないことが判る。

7. おわりに

本研究では、底面到達渦の発生条件と砕波帯内での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) 底面到達渦は1重渦と2重渦、および3重渦からなる7形式に分類された。今回の実験においては、波浪諸元が同一な実験波において、連続して入射する波毎の H_b と h_b の相違により、底面到達渦の発生傾向が Br と Re 数に特徴づけられることを確認した。
- (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が拡大した。

本研究では砕波帯内での3成分流速の分布特性を検討したが、定性的な議論の域に留まっている。今後、乱れ成分も考慮して波の伝播に伴う渦の挙動特性を定量的に検討する予定である。

参考文献

- 岡安章夫・敦賀 仁・松川 祐・NimalWijayarathna・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.
- 奥村悠樹・波部靖憲・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.69-100.
- 樫木 亨・岩田好一朗・松本 昇 (1973) : 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.
- 張 達平・砂村継夫 (1993) : 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.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987a) : 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.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987b) : 砕波帯内の三次元の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.
- 波部靖憲・安原幹雄・佐伯 浩 (1999) : 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.
- 波部靖憲・安原幹雄・佐伯 浩 (2001) : 砕波乱流の平均流速変動への力学的寄与について大規模旋回, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.76-80.