

砕波後の組織渦構造とエネルギー散逸の関係について

水谷夏樹*・安田孝志**・武田真典***

1. 緒 言

砕波過程におけるエネルギーの散逸を考える場合、transition region ではジェット突入による大量の気泡混入を伴った大規模な渦が支配的な役割を果たすとされており、bore region ではローラーモデルに代表されるようなボアフロントにおける大規模な渦がその役割を支配していると考えられている。

著者らは、VOF 法による数値モデル(水谷ら, 1999)を用いて強い巻き波型砕波(入射波高 $H/h=0.50$, 相対リーフ高 $R/h=0.60$)の砕波過程におけるアンサンブル平均速度成分による渦度の分布を計算した。その結果、図一1のようにジェットの突入とスプレイの生成に伴う大規模渦が進行する波から取り残され、bore region においても先行するボアフロントから渦が次々と切り離されては残留するという結果を得た。これが事実であるならば、ジェットやスプレイの突入に伴う大規模な気泡混入渦は、気泡の消滅と共に消滅するわけではなく、一定の運動量を持って波からエネルギーを奪い取ることになる。また、bore region においてもボアフロントにおける大規模渦だけがエネルギーを散逸させるのではなく、随時渦を切り離すことによって波自身のエネルギーを減少させるという考え方が成立する。この考え方は従来の

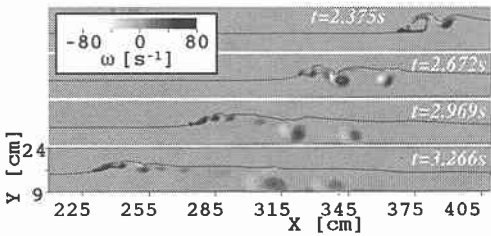
ローラーモデルを根本から捉え直す必要性を示唆するが、数値計算の結果が、1)気泡の影響を考慮していないこと、2)断面2次元の計算であること、などからどこまで実流体现象を再現しているのか検証する必要がある。

そこで、本研究では PIV を用いて砕波後の流速場の測定を行い、特に砕波後の大規模渦に着目してその時空間分布特性の検討を行った。

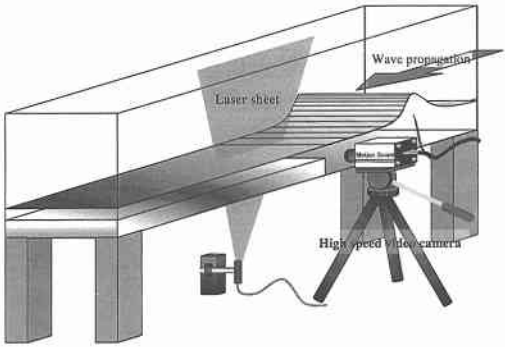
2. 実験方法および条件

水理実験は、 $15.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ の3面ガラス張り二次元波浪水槽を用い、その中にリーフ高 $R=9.0\text{ cm}$ の亚克力製のリーフを設置した。水深 h を 15.0 cm とし、沖側端のピストン式造波機によって $H/h=0.51$ (実測波高)の孤立波を入射させた。

画像の撮影は、図一2に示すように最大出力 5.0 W の半導体レーザー(Green光源:Millennia, Spectra-Physics製)を底面よりシート状にして水路中央に照射し、側方より高速度ビデオカメラ(Motion scope, Radlake Imaging製)を用いて行った。この時、造波信号をトリガーとして時間制御を行うことにより全ての撮影断面で画像の時間的同期を取った。それぞれの画像に対して PIV 法(VISIFLOW, AEA Technology製)により 56×56 の瞬間の速度ベクトルを得て、渦度分布を中心差分により求めた。1断面の画像の撮影範囲を約 $16\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ としたため、流下方向に画像を適度にオーバーラップさ



図一1 VOF 法による砕波過程における平均の渦度分布の変化 (Plunging breaker: $H/h=0.50$, $R/h=0.60$)



図一2 実験水槽と撮影手法の概略

* 学生会員 工修 岐阜大学大学院工学研究科生産開発システム工学専攻 (日本学術振興会特別研究員)
** 正 会 員 工博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
*** 学生会員 岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

表-1 計測位置の関係

CASE	$X=$	CASE	$X=$
SASE01	116~132 cm	CASE08	219~235 cm
SASE02	132~148 cm	CASE09	235~251 cm
SASE03	148~164 cm	CASE10	251~267 cm
SASE04	164~180 cm	CASE11	267~283 cm
SASE05	173~189 cm	CASE12	283~299 cm
SASE06	187~203 cm	CASE13	299~315 cm
SASE07	203~219 cm	CASE14	315~331 cm

せながら合計 14 断面の撮影を行った。また、フレームレートおよびシャッタースピードはそれぞれ 250 fps, 1/750 s とした。

画像の撮影にあたって水面や気泡界面から強い散乱光が生じることから、それらを抑制するためにトレーサー粒子（ナイロン 12, 比重 1.02, 平均粒径 50 μm ）を蛍光染料（Rhodamine-B）で着色した。この蛍光染料は波長 532 nm のレーザー光によって励起され、波長 590 nm 程度のオレンジ光を発光する。高速度カメラのレンズの前には 560 nm の臨界波長を持つ光学フィルター（S 76-O 56, 駿河精機製）を取り付け、強い散乱光をカットして励起光のみを撮影した。

また、予備実験においてレーザーシートの厚さを可能な限り薄く（1 mm 以下）にした場合、大規模渦が発生している領域では、シート層厚内にトレーサー粒子を保持できずベクトルを算出できない場合が多かった。そこで本実験ではシート厚を 5 mm に設定し 3 次元運動にもある程度対応できるように行った。

リーフ法先を $X=0$ cm として、撮影位置を表-1 に示す。なお、砕波点は $X=89$ cm, 突入点は $X=110$ cm であった。

3. transition region における大規模組織渦構造

transition region はジェット突入に始まる砕波過程の前半部分であり、スプレイアップが繰り返される区間に相当する。図-3 は transition region における撮影画像を並べて表示したものである。波は右から左へ進行しており、各ケースは撮影断面を表している。それぞれの断面における同時刻の画像を用いたため、それぞれの断面は同時記録されたものではない。また、図中の実線は気泡混入領域と液層領域の境界をトレースしたものである。図からも分かるように気泡混入領域においてはトレーサー粒子の識別が不可能となり、PIV によって信頼できる速度ベクトルを算出することができない。よって以下では実線以下の液層領域についてのみ議論を進めていく。

$t=4.480$ s はジェット突入によって生成された第一スプレイが再度突入し、第二スプレイが生成された状態を

示している。CASE 01~CASE 02 にはジェット突入による気泡混入領域が捉えられており、CASE 02~CASE 04 には第一スプレイ突入による気泡混入領域が捉えられている。第一スプレイに伴う気泡混入領域はリーフ底面にまで達し、水平方向にもかなりの領域に渡って気泡混入領域が拡散しているのが分かる。気泡混入領域こそ本研究で対象とする大規模組織渦であると考えられるが、気泡混入領域を直接測定することは事実上不可能であるため、以下では気泡の消滅後の大規模渦がどのように振る舞うのかについて検討を行った。

図-4 は図-3 に対応した鉛直断面内における渦度の分布である。正の渦度は反時計周りの渦を示しており、図中の実線は撮影画像からトレースした気泡混入領域と液層領域の境界である。CASE 01 の $t=4.480$ s~ 4.720 s にかけて高渦度領域がパターンを形成しつつ移流しており（図中の円内）、これがジェット突入による大規模渦であると思われる。同時刻の画像を見ると既に気泡は存在しておらず水面もそれほど乱れていない。大規模渦の周辺はほとんどの領域で渦度がゼロであることや、この渦の移流速度が波のフロントの伝播速度のおよそ半分であることから、波動場の中に渦が取り残されていると判断できる。この渦は断面を越えて CASE 02 では再現されていないが、 $t=4.720$ s~ 4.840 s の間の CASE 01 断面の渦度分布を詳細に見ると、この渦は急速に拡散し消滅していた。

CASE 02~CASE 03 にかけての第一スプレイに伴う大規模渦（図中の長方形内）も高渦度領域のパターン形成から判断できる。この渦については $t=5.320$ s まで追跡ができるものの、先行する大量の気泡群が生成する乱れに巻き込まれる形で追跡不能となる。この大量の気泡群は、CASE 04~CASE 05 にかけて広範囲に細かい乱れを生じてさせており、渦と呼べるような明確なパターン形成は判別できなかった。画像の観察からもそれぞれの気泡が自身の周辺を乱すため、大規模な回転運動を観察することはできなかった。

以上のように、ジェット突入および第一スプレイに伴う大規模渦が波のフロントの約半分の速度で移流し、波から取り残されつつ拡散・消滅していることが明らかとなった。しかしながら、ジェット突入および第一、第二スプレイ突入に際してはいずれも大量の気泡が混入するため、渦の主要な部分については計測が不能であり、混入気泡の周辺流体への効果も含めてさらなる検討が必要である。

4. bore region における大規模組織渦構造

次に波動場が空間的にほぼ定常状態となる bore region について検討した。図-5 は bore region における撮影画

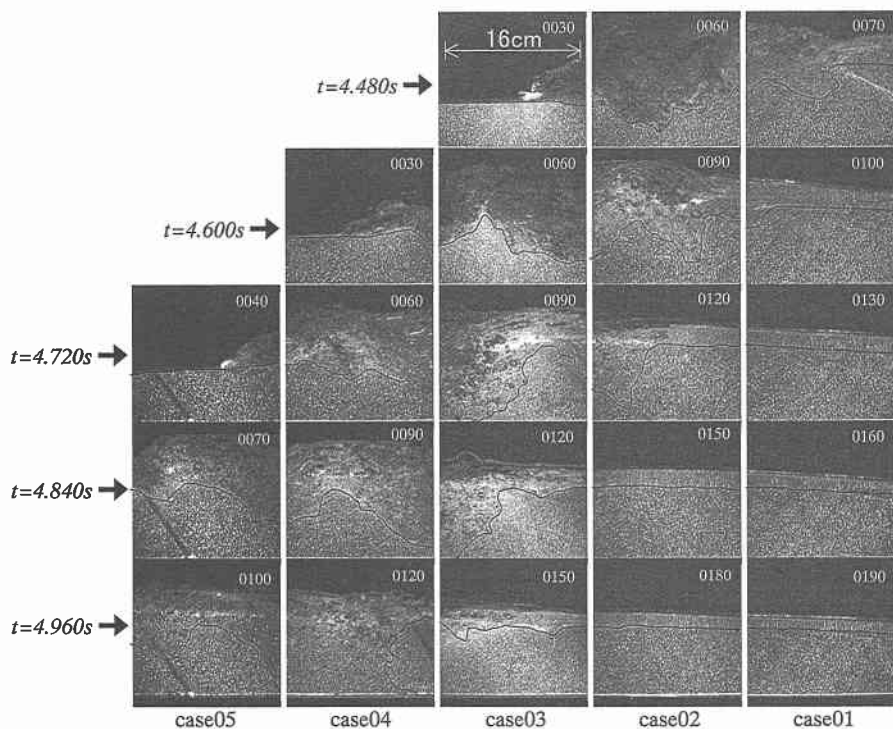


図-3 transition region における撮影画像の例

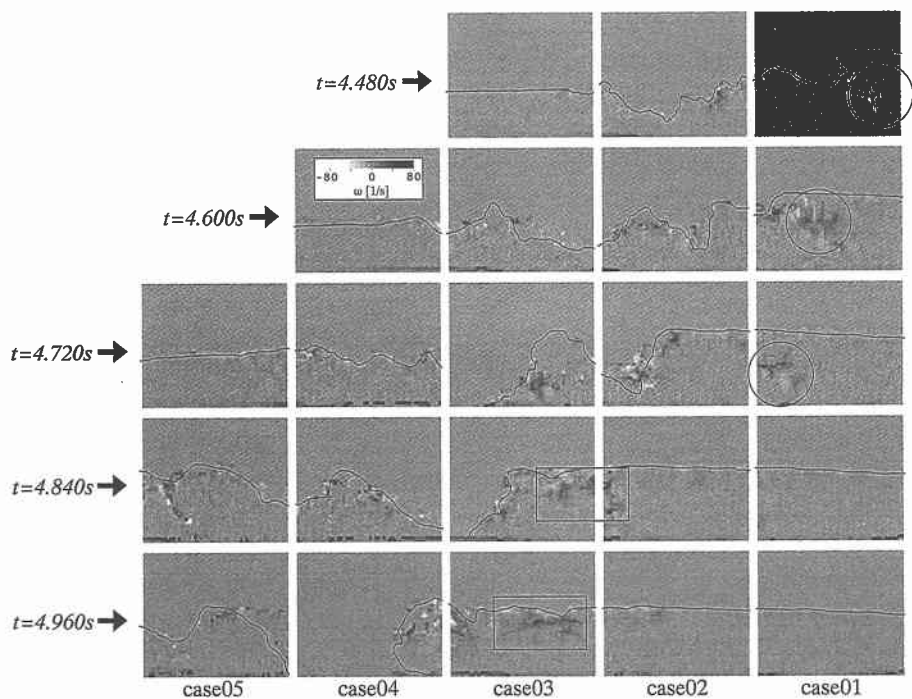


図-4 transition region における瞬間の渦度分布

像の例である。図-3 同様に各ケースは同時記録ではない。 $t=5.280\text{ s}$ 以降ボアフロントの形状はほぼ変化して

おらず定常な状態が続いている。図-6 は図-5 に対応した瞬間の渦度分布である。図中の円や長方形は高渦度領

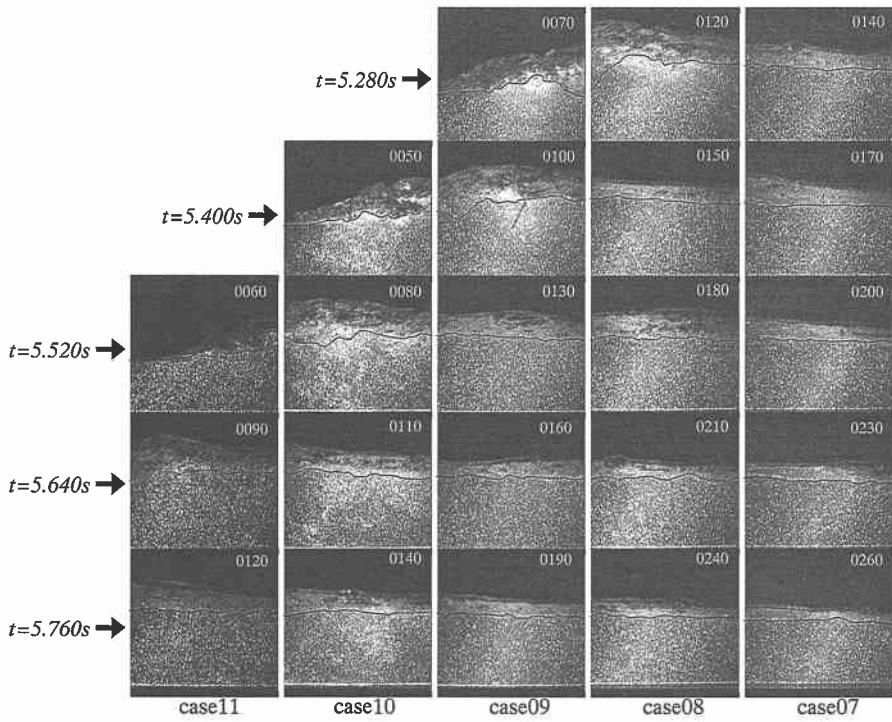


図-5 bore region における撮影画像の例

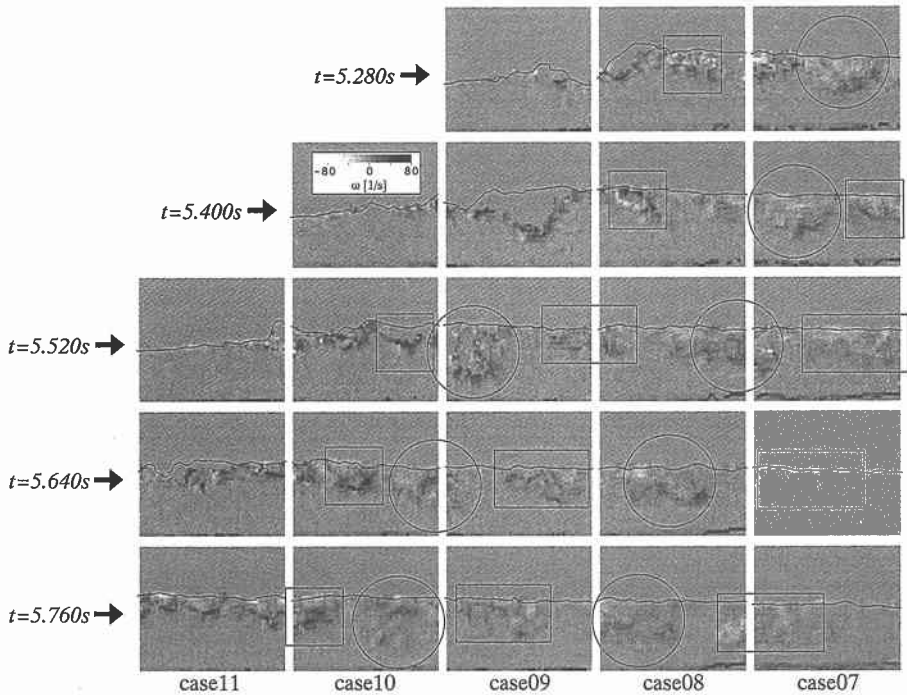


図-6 bore region における瞬間の渦度分布

域がパターンを保ったまま移流しているものについてピックアップしたものであり、これがボアフロントから

分離・残留する大規模組織渦群であると思われる。明らかに全ての渦がボアフロントの伝播速度よりも遅い速度

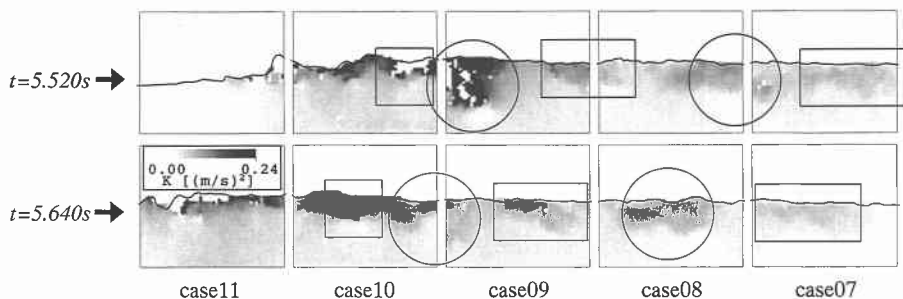


図-7 bore region における運動エネルギーの空間分布

で移流しており、ボアフロントの移流速度の1/2以下である。さらに各断面のケースは同時記録でないにもかかわらず、断面間を越えて高過度領域の移流がほぼ継承されている。これは本実験の再現性が高いことに加え、ボアフロントから分離される大規模渦がその大きさと発生するタイミングに相当の再現性があるということの証明である。各渦は全てが正の過度（反時計回り）をもっており、数値計算結果に一致する。過度の値は発生直後に 80 s^{-1} 程度であるが、移流・拡散に伴って小さくなっていく。数値計算による結果も水深を 15 cm とすればほぼ同じ値を示しており合致する結果となっている。

灘岡ら（1985）は、ボアフロントにおける大規模渦はさらにその前面に新たな渦塊を作り出すと指摘している。本研究で示した残留渦はこの新たな渦の後方の渦がボアフロントから分離したものを示していると考えられる。しかし、一方でボアフロントの後方では斜降渦が生成されるとしているが、彼らの言う斜降渦と本研究で示した残留渦が同様のものを示しているのかについてはさらに検討が必要である。

以上のように bore region においてもボアフロントからいくつもの組織渦が分離・残留している事実が明らかとなった。これらの渦は運動エネルギーを蓄えたままボアフロントから分離されるため、ボアフロントはその都度、波高を低下させることが予想される。図-7は、図-6の $t=5.520 \text{ s}$, 5.640 s に対応した運動エネルギーの空間分布を示したものである。過度の分布において組織渦が生じている領域に一致する形で運動エネルギーの高い領域が存在する。そのオーダーは $10^{-1}(\text{m/s})^2$ であり、著者らの計算結果と一致する。数値モデルの結果では、これらの組織渦が持つ乱流エネルギーのオーダーが $10^{-2}(\text{m/s})(\text{m/s})^2$ であった。Chang and Liu (1999) は、transition region における乱流場を PIV による繰り返し測定を

行って乱流成分を算出しているが、乱流強度の最大値は 0.11 m/s であると報告している。この値から推定される乱流エネルギーのオーダーは $10^{-2}(-2)(\text{m/s})^2$ である。このことからしても本実験で示した組織渦群が持つ運動エネルギーのオーダーは一桁以上大きく、波高減衰にはより大きく寄与していることが予想される。

5. 結 語

水理実験によって砕波後の組織渦構造を明らかにした。その結果、transition region においては、ジェットおよびスプレイ突入に伴う組織渦が波のフロントから取り残され、移流・拡散していく過程が明らかとなった。また、bore region においてもボアフロントから大規模な組織渦が次々と分離・残留する過程を示した。さらに、これらの渦群が乱流エネルギーのオーダーよりも一桁以上高い運動エネルギーを有していることから、波高減衰過程に相当の寄与が生じていることを示唆した。

謝辞：実験に際し、大学院生の井坂健司、川越雄太の両氏には多大なる助力を頂いた。ここに感謝の意を表する。また、本研究は日本学術振興会科学研究費（学振特別研究員奨励費）による成果であることを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 灘岡和夫・小谷野喜二・日野幹雄（1985）：二成分ファイバー流速計を用いた砕波帯内流速場の特性の解明，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 50-54.
- 水谷夏樹・安田孝志・小笠原敏記（1999）：孤立波の砕波過程への $k-\epsilon$ モデルの適用と乱流構造に関する研究，海岸工学論文集，第46巻，pp. 156-160.
- Chang, K.-A. and P. L.-F. Liu (1999): Experimental investigation of turbulence generated by breaking waves in water of intermediate depth, Phys. Fluids, 11(11), pp. 3390-3400.