

突入ジェットと気泡混入を伴う砕波後の内部特性の関係

松田 博文* ・陸田 秀実** ・板野 誠司***
安田 孝志****・多田 彰秀*****・福本 正*****

1. 緒 言

砕波に伴う散逸現象は、流体運動を非回転から回転運動に転換させ、さらに強い渦拡散を発生させる運動であり、従来から数多くの研究がなされ、Svendsen (1984) により領域分割された outer/inner/run-up 領域の内、特に、inner 領域における波動伝播、波高減衰特性およびそのモデル化については種々の知見が得られ、実用的にも生かされている。

しかしながら、砕波形式、砕波時のジェット放出過程、ジェット突入によるスプレイ生成過程、その後の気泡混入を伴うボア生成過程および波高減衰過程等の outer～inner 領域の全領域にわたる一連のプロセスの統一的描像は必ずしも十分であるとは言い難い。この点については、outer から inner 領域へ急激に遷移する、いわゆる transition 領域（例えば、山下ら (1988)）の運動機構を詳細に解明し、これに outer 領域の代表的パラメータであるジェットサイズと inner 領域の波高伝達率の関係（安田ら, 1995）を考え併せれば、outer/transition/inner 領域の一連過程を包括的に取り扱うことが可能であると考えられる。

本研究では、outer/transition 領域の流体特性について、VOF 法による数値計算および水理実験を基に、ジェットサイズ、大規模水平渦の内部構造、スプレイ生成・発達機構、気泡混入を伴うボア生成および波高伝達率の関係を各砕波形式ごとに行い、砕波前後の全領域にわたる一連過程の統一的関係を定量的に明らかにする。

2. 実験方法

実験は、図-1 に示すように西松建設(株)技術研究所の片面ガラス張り水槽（ $65\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.6\text{ m}$ ）内に鋼製ユニット構造の 1 段および 2 段リーフを設置し、表-1 に示す条件下で行った。なお、リーフ高さは $R_1=13.2\text{ cm}$

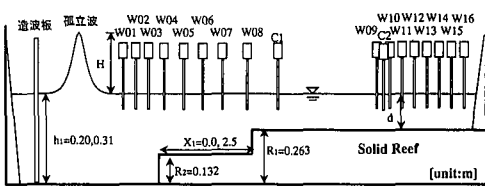


図-1 実験水槽の概要

表-1 実験条件

Breaker Type	Reef	$h_1[\text{cm}]$	H/h_1	R_1/h_1	R_2/h_1	X_1/h_1
Spilling	Single	31.0	0.34	0.42	—	—
Plunging	Single	20.0	0.45	0.66	—	—
Composite	Double	31.0	0.50	0.43	0.85	8.06

および $R_2=26.3\text{ cm}$ と固定し、水深 $h_1=20.0$ および 31.0 cm とした。また、砕波後の波形変化は 16 台の容量式波高計 (W 01～W 16) により測定し、砕波限界前後の急激な空間波形変化については高速ビデオカメラ (NAC 社製, 200 コマ/秒) によって撮影を行い、得られた画像に対して適当な画像処理を施し、解析画像とした。

3. 数値計算手法

支配方程式は、非圧縮性粘性流体に基づく Navier-Stokes 方程式と連続式、さらには気液界面を判定する VOF 関数 F ($0 \leq F \leq 1$) に対する移流方程式である。

本研究では、ここで対象とする写真-1 のような非定常性の強い大規模な砕波現象に対しても自由表面が正確に捕獲され、かつ安定に計算が行われるように VOF 法の改良を行った。主な改良点は、移流項の空間差分の高精度化、自由表面（表面セル）に対する適切な境界条件の設定である。加えて、最も重要な改良点として、砕波後のジェット放出過程を高精度で計算するために、従来の VOF 法の Donor-Acceptor 法の欠点である流体の進行方向に対して斜め方向に発生する移流誤差の問題を極力排除し、各物理量を正確に移流させたことが挙げられる。具体的には、VOF 関数 F に対する移流方程式に関して、功刀 (1997) と同様に 1 ステップ内での移流計算を座

* 正 会 員 工修 (株)北水エンジニアリング
** 正 会 員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科
*** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科
**** 正 会 員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
***** 正 会 員 工修 西松建設(株)技術研究所 技術部海洋技術課
***** 工博 西松建設(株)技術研究所 技術部海洋技術課

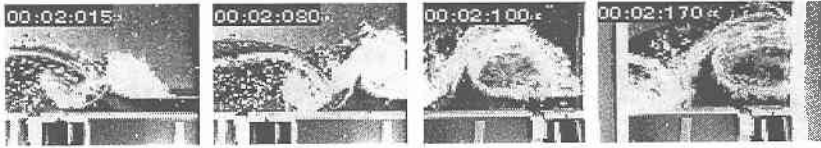


写真1 高速ビデオカメラより得られた砕波後のジェット突入時の波形変化

標軸に沿った方向ごとに多段階で行う方法を採用した。

4. 砕波後の水粒子の運動機構

4.1 流速ベクトル

図-2および3は、巻き波型および複合型砕波のジェット突入から第1スプレイが生成される過程の波形変化および内部流速ベクトルを示したものである。いずれの場合も水粒子速度の高速領域とジェットが一致し、高速ジェットが水面に突入していく様子がわかる。また、ジェット突入直後にスプレイが生成され、波高とほぼ同程度の高さにまで巻き上がり、同時に大規模水平渦が発達する。この時生成されるスプレイ内部の流速は突入ジェットとほぼ同程度の流速を有しており、両者が運動量的に一体であることを裏付けている。

図-4および5は、これらの流速ベクトルから波の伝播速度を差し引き、波とともに進む移動座標系から見た流速分布を示したものである。突入ジェットによる封入気泡を伴う大規模渦とスプレイにより生成された大規模渦がそれぞれ対になり、気泡領域に沿った時計回りの循環を形成していることがわかる。また、ジェットサイズの大きい複合型砕波の場合、突入ジェットによる巻き込み空気量、それに伴うスプレイ規模および流速の高速領域は巻き波型砕波のそれを大きく上回っており、水塊と封入空気塊の混合過程がより活発になると言える。

4.2 水粒子運動の軌跡

図-6は、突入直前のジェット内に白マーカー粒子を配置する一方で、着水面を含むその他の領域に黒マーカー粒子を配置した場合の水粒子運動の軌跡を複合型砕波について示したものである。これから、ジェット内部の水粒子の一部は、突入と同時にスプレイの形成される方向に移流し、最終的には空気泡を伴う大規模な渦域に沿った水粒子運動の軌跡となる。また、その他の水粒子は突入ジェット下面の封入空気塊に沿った循環軌跡をたどり、再びジェット内に戻っていくことがわかる。

4.3 渦度の特性

ジェット突入によって砕波後の運動は、非回転から回転運動へと急激に遷移し、渦拡散によって波のエネルギーを急速に消散させるが、渦度を調べることによって渦拡散およびその作用範囲を知ることが出来る。

図-7および8は、前述の図-2および3におけるもの

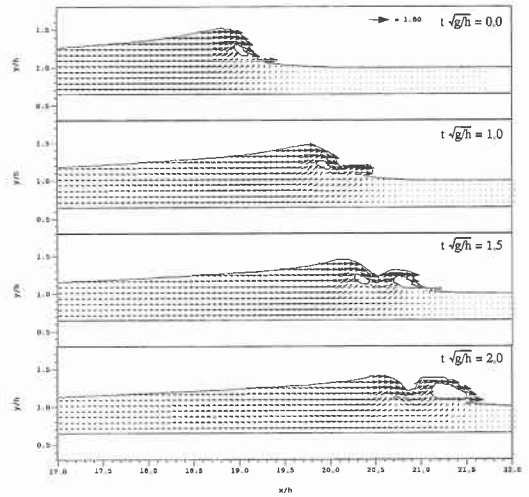


図-2 巻き波型砕波の波形および流速ベクトルの変化

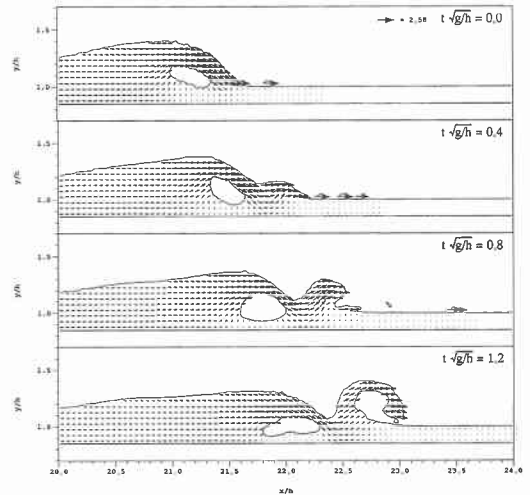
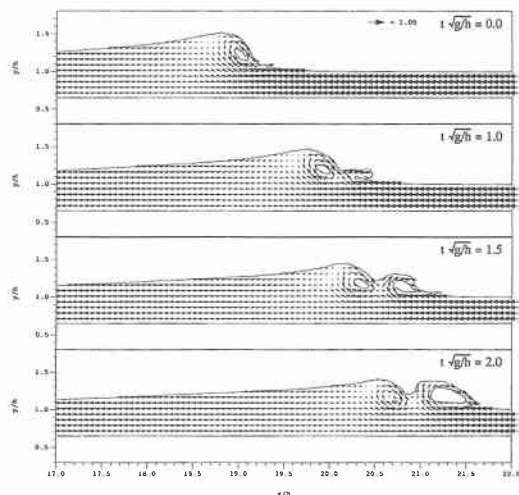
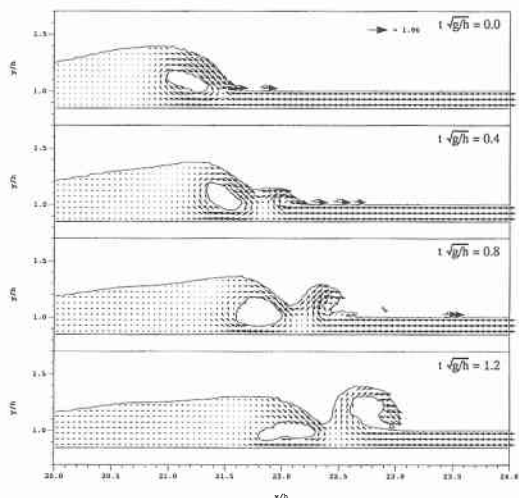


図-3 複合型砕波の波形および流速ベクトルの変化

と同時刻の巻き波型および複合型砕波の渦度分布を示したものである。なお、ここでは負値は時計回りを表す。両砕波形式ともジェット突入時から急激に渦度が発達し、ジェットによる第1水平渦とスプレイによる第2水平渦の気泡領域周辺において渦度が卓越していることが分かる。また、砕波規模の大きい複合型砕波の場合、強



図—4 巻き波型砕波の移動座標系から見た流速分布

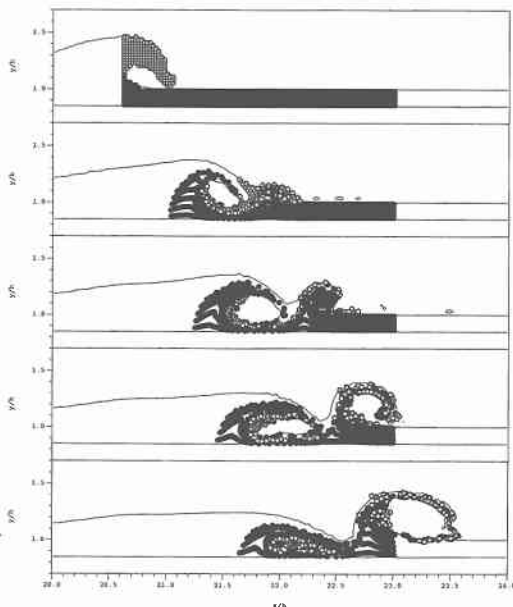


図—5 複合型砕波の移動座標系から見た流速分布

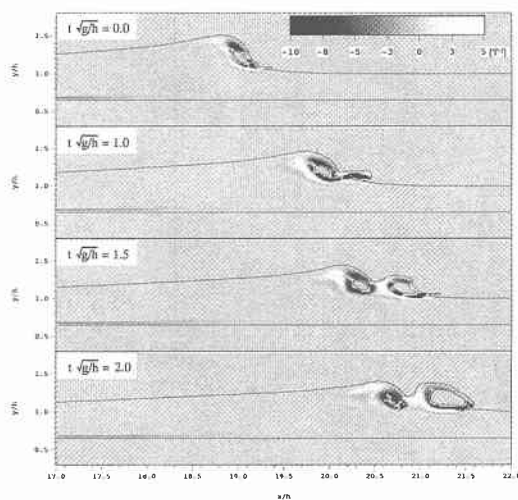
い渦度領域の分布およびその絶対値は、ともに巻き波型砕波のそれを大きく上回っている。

5. 砕波形式による砕波前後の物理量の関係

砕波規模（ジェットサイズ）と突入ジェットにより形成されるスプレイ、さらにその結果として生じる渦度との間には密接な関係があり、ここではこれらの間の定量的な関係について検討する。outer および inner 領域の代表的パラメータとしてジェットサイズおよび波高伝達率を定め、これに加えて transition 領域の代表的パラメータとしてスプレイ形状、循環および気泡混入量を後述のように定義し、これらの関係について調べる。



図—6 マーカ粒子による水粒子運動の軌跡（複合型砕波）



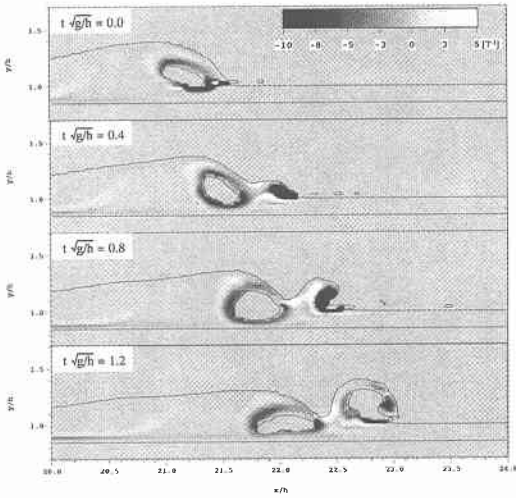
図—7 巻き波型砕波の砕波後の渦度分布の変化

5.1 ジェットサイズと波高伝達率について

これまで著者ら（安田ら，1995）の研究によって，砕波時のジェットサイズ S_J と波高伝達率 K_T （伝達波と初期波高の比）は一義的な関係にあることが明らかとなっている。図—9 は，今回の水理実験による結果を示したものである。砕波規模が大きくなるにつれ，すなわちジェットサイズが増すにしたがって波高伝達率は低下する。

5.2 スプレイについて

図—10 は，第 1 スプレイが最大となる瞬間の波形に対して，スプレイ幅 S_W ，高さ S_H およびこれらの積（面積）



図—8 複合型砕波の砕波後の渦度分布の変化

S_{HW} を定義したものである。なお、各諸量は高速ビデオカメラにより得られた画像を基に求めている。

図—11 および 12 は、初期波高 H で無次元化した S_H/H , S_W/H , S_{HW}/H^2 とジェットサイズ S_J および波高伝達率 K_T の関係を示したものである。これから、ジェットサイズが増すにつれ、スプレイ諸量も増大し、ジェットサイズが最も発達する複合型砕波 (Composite) の場合にスプレイも大きくなっている。また、このとき波高伝達率は当然のことながら最も低くなる。

5.3 循環について

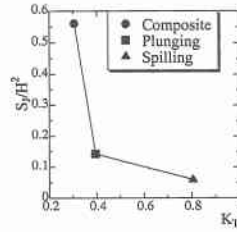
突入ジェットおよびこれにより発生するスプレイは、4.における水粒子 (マーカー粒子) の運動軌跡や流速ベクトル分布からも明らかのように、大規模水平渦と呼ばれる循環を形成し、さらには強い渦度を急速に発達させる。

そこで、ジェット突入後の渦度の強さの総和を循環 $\tilde{\Gamma}$ として次式で定義する。

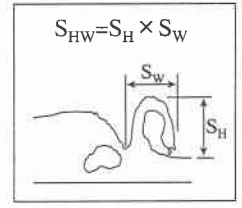
$$\tilde{\Gamma} = \sum \omega \cdot s \dots\dots\dots (1)$$

ここで、反時計回りを正とし、 s は計算上の 1 セルの面積、 ω は 1 セルの渦度であり、気泡内の渦度はゼロとしている。この場合、領域内に気泡を含むため、Stokes の定理は成立せず、 $\tilde{\Gamma}$ はジェット突入によって生成される大規模水平渦周りの循環と封入された気泡周りの循環の差を表す。

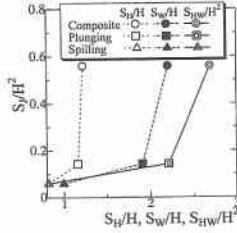
図—13 は、循環とジェット突入時からの無次元時間 $t\sqrt{g/h_1}$ の関係を示したものであり、黒印は各砕波形式ごとの極大値を表す。なお、便宜上、 $-\tilde{\Gamma}$ として符号を反転させている。この図から、砕波規模の大きな砕波 (Composite) ほど循環の極大値 ($-\tilde{\Gamma}_{\max}$) は大きく、しかも極大値に達する時間が短い。一方、砕波規模の小さい砕波 (Spilling) の場合、 $-\tilde{\Gamma}_{\max}$ の値は前者に比べて約半分で



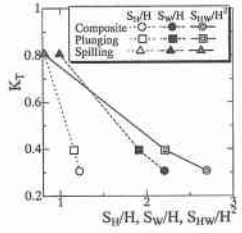
図—9 ジェットサイズ S_J と波高伝達率 K_T の関係



図—10 スプレイ諸量の定義図



図—11 各スプレイ諸量とジェットサイズ S_J の関係



図—12 各スプレイ諸量と波高伝達率 K_T の関係

あり、またピーク到達時間も約 2 倍程度遅く、循環の成長率もジェットサイズに対応していることがわかる。

図—14 および 15 の極大値 ($-\tilde{\Gamma}_{\max}$) とジェットサイズ S_J および波高伝達率 K_T の関係をそれぞれ示したものである。いずれの図からも循環の極大値との間に一義的な関係が認められ、これらの関係が砕波形式に大きく依存していることがわかる。これは、突入ジェットおよびスプレイによって大規模水平渦、すなわち、循環が形成され、それに伴う水塊と気泡の鉛直混合・攪乱が波高伝達率に影響を与えていることを示しており、その強さはジェットサイズに支配されていることを意味している。

5.4 気泡混入量について

ここでは、ジェット突入によって波動場に混入される気泡領域の面積について考察する。このため、高速ビデオカメラより得られた画像に対して、適当な画像処理 (輝度変換、エッジ処理、ダイナミックレンジなど) を施し、厳密な閾値を基に 2 値化処理を行い、水塊領域と気泡領域を識別して気泡領域の面積 A を求めた。

図—16 は、砕波形式による気泡領域の空間的変化の比較を示したものである。縦軸は無次元気泡領域面積 A/d^2 (d : 天端水深)、横軸はジェット突入地点から岸側方向の無次元距離 X_J/h_1 、黒印は極大値を示している。この図から、砕波規模が増大するにつれて気泡領域 A は急激に増大し、その極大値は、複合型砕波の場合、巻き波型砕波の約 8 倍以上にも達し、しかもジェット突入直後に現

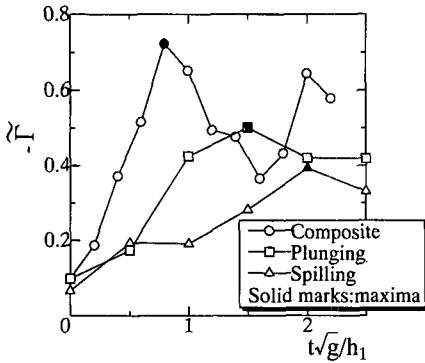
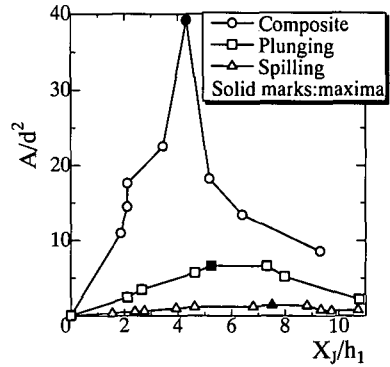
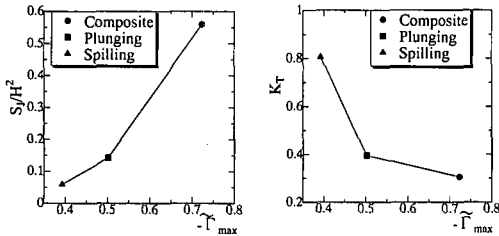
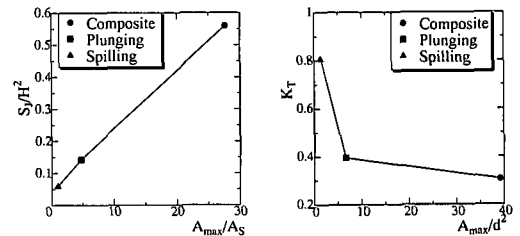
図-13 碎波後の循環 $\tilde{\Gamma}$ の時間変化の碎波形式による比較

図-16 気泡領域面積 \$A\$ の空間変化の碎波形式による比較

図-14 循環の極大値
($-\tilde{\Gamma}_{max}$) とジェッ
トサイズ S_j の関係図-15 循環の極大値
($-\tilde{\Gamma}_{max}$) と波高伝
達率 K_T の関係図-17 気泡領域面積の極大
値 A_{max} とジェッ
トサイズ S_j の関係図-18 気泡領域面積の極大
値 A_{max} と波高伝
達率 K_T の関係

れる。一方、崩れ波型碎波の気泡領域の極大値は非常に小さく、また極大となる位置は複合型碎波のその約2倍程度岸側となっている。

図-17 および 18 は、各碎波形式の気泡領域面積の極大値 A_{max}/A_s (A_s : Spilling 型碎波の気泡領域の極大値) とジェットサイズ S_j および波高伝達率 K_T の関係を示したものである。いずれの図からも、各諸量の間には一義的な関係があり、碎波形式に依存していることが分かる。すなわち、水塊と気泡の混合・攪乱を支配する循環は、碎波後のボア生成過程において気泡領域を急激に増大させ、波浪エネルギーの消散を促進していることを示しており、その結果として、岸側の波高伝達率の低下につながっていることを意味している。

6. 結 語

以上、本研究では、outer/inner 両領域の遷移区間であり、未だ不明な点の多い transition 領域の流体特性に關して、VOF 法による数値計算および水理実験結果に基づき、ジェットサイズ、大規模水平渦の渦構造、スプレイの生成・発達機構、気泡混入量、波高伝達率について詳細な検討を行った。

その結果、ジェット突入と同時に生成されるスプレイ

はジェットと同程度の速度で発達し、それに伴い時計回りの大規模渦が生み出され循環を形成する。また、ジェットの質量および運動量はこの循環に沿う流れによって再びジェット内に戻っていくことが明らかとなった。さらに、outer/transition/inner 領域において、上記すべての代表的パラメータ間に一定の定量的関係があることが明らかとなり、碎波前後の波動運動がジェットサイズを基本パラメータとして統一的に扱える指針を得た。

最後に、本研究は文部省科研費基盤 (C) (2) (10650742) および奨励 (10750387) による成果であることを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 山下隆男・James R. Tallent・土屋義人 (1988): 碎波水平渦の生成機構と移動特性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 54-58.
- 安田孝志・陸田秀実・水谷夏樹・大屋敦嗣・多田彰秀・福本 正 (1995): 複合型碎波の碎波後の波形変化と波高減衰特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 61-65.
- 功刀資彰 (1997): 自由界面を含む多相流の直接数値解析法, 機械学会論文集 (B編), 第63巻, 第609号, pp. 1576-1584.
- Svendsen, I. A. (1984): Wave height and set-up in a surf zone, Coastal Engineering, Vol. 8, pp. 303-329.