

水面波ジェットと突入後の砕波過程との関係について

水谷夏樹* ・安田孝志** ・小笠原敏記***
井坂健司**** ・多田彰秀***** ・福本 正*****

1. 緒 言

砕波後の諸現象がジェットの突入によって始まることは、容易に想像できるが、そのジェットの振る舞いすら未解明であるため、ジェットの放出から突入に至る過程のモデル化においてはまずそれらの特性の解明から始める必要がある。さらに、スプレイの生成、連行気泡や水平渦の規模などは、突入ジェットの運動特性に支配されると考えられることから、それらのジェットとの関係を把むことも重要な課題である。

そこで、本研究では、砕波限界より始まるジェット放出過程におけるジェットの運動特性を水理実験による画像解析に加えて境界積分法 (BIM) を用いて解明する。さらに、ジェット突入に始まるスプレイの放出および気泡の拡散過程についても画像解析結果を基に検討し、ジェットと砕波後の諸量との関係を明らかにする。

2. 実験方法と実験条件

実験は、図-1 に示すように西松建設(株)技術研究所所有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潜堤を設置して行った。水深 ($h=26.0\text{ cm}$) および潜堤高さ ($R=13.0\text{ cm}$)、潜堤幅 ($B=150\text{ cm}$) は一定とし、孤立波の波高を 6 通りに変化させて崩れ波型から巻き波型の砕波を発生させた。これらのジェット放出過程および突入後の気泡の拡散過程を高速ビデオカメラ (Nac 製, 200 fps) によって撮影し、撮影された画像を適当な画像処理 (二値化処理, エッジ検出等) を行った上で解析画像として用いた。この時、ジェットの突入点は、全てのケースで潜堤を通過した後であり、大規模渦や混入気泡は底面の影響を受けていない。入射波高は、 $H/h=0.38, 0.43, 0.45, 0.50, 0.53,$

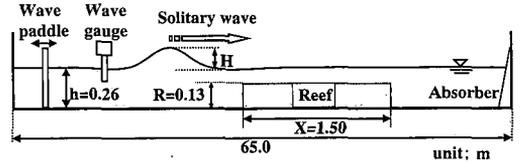


図-1 実験水槽の概要

0.59 の 6 ケースを行った。

3. 計算方法と計算条件

数値計算は、Yasuda ら (1997) によって精度の検証が十分になされている境界積分法 (BIM) を用い、ジェット突入直前までの計算を行った。底面諸元等の条件は実験条件と同一とし、入射波高については実験条件と同一のものを含む 10 ケースとした ($H/h=0.38, 0.40, 0.43, 0.45, 0.46, 0.47, 0.49, 0.50, 0.53, 0.59$)。

4. ジェットの運動特性

ここでは、ジェットの運動をジェット先端部の移動によって代表させ、砕波限界からのジェット先端部の位置を時間的に追跡する。

(1) 水平方向の運動特性とジェットサイズ

図-2 は、ジェット先端部の水平移動距離の時間変化を示したものであり、同様に波頂部の水平移動距離の時間変化について示したものが図-3 である。これらから、ジェット先端部、波頂部ともに移動距離は時間に比例した変化を示している。つまり、直線の傾きは異なるものの、両者とも水平方向にはほぼ等速度で運動していることがわかる。この結果を基に最小二乗法によって時間に関する 1 次直線を当てはめると、その傾きはジェット放出過程におけるジェット先端部の水平移動速度 U_{jet} および波頂部のそれ U_{crest} となる。

図-4 に、こうして求めた水平移動速度と入射波高の関係を示す。図中の白抜きの記号は、BIM を用いて計算した結果から実験と同様の手法で水平移動速度を算出し、整理したものである。図を見ると、ジェット先端部、波頂部共に実験と計算結果は良く一致していると言える。直観的には入射波高の増大に伴って波頂部の速度

* 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 工学研究科 環境エネルギーシステム専攻
*** 学生会員 工 修 富山県庁
**** 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
***** 正 会 員 博(工) 長崎大学助教授 工学部 社会開発工学科
***** 博(工) 西松建設(株)技術研究所 技術部海洋技術課

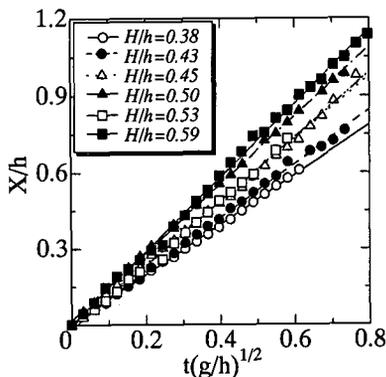


図-2 実験によるジェット先端部の水平移動距離の時間変化

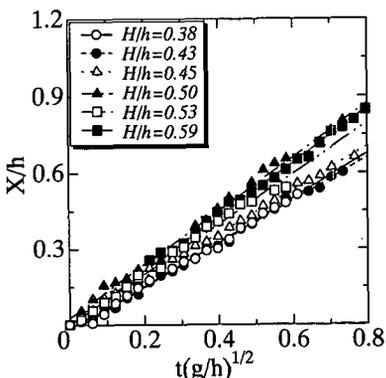


図-3 実験による波頂部の水平移動距離の時間変化

U_{crest} も増大するものと予想されるが、事実は $H/h \approx 0.5$ 付近に極大値が現れ、入射波高によって図中の破線で区分した概ね3つの領域に分割できる速度変化となっている。一方、ジェット先端部の速度 U_{jet} を見ると、その傾向は2つに分かれ、 $H/h = 0.5$ 付近を境に波高とともに移動速度が増大する領域 ($H/h < 0.5$) とほぼ $1.5\sqrt{gh}$ 程度で一定となる領域 ($H/h > 0.5$) が存在する。これは、Chang・Liu (1997) の周期波の碎波の実験結果 1.47C にほぼ対応している。

図-5は、BIMによるこれら3つの領域における代表的な空間波形変化を示したものである。図-5(b)と(c)を比較すると明らかにジェット発達過程に差異が生じており、入射波高が低いにも関わらず碎波の規模は(b)の方が大きくなっている。

図-6は碎波規模を表す定量的な指標として Yasudaら (1997) が提案しているジェットサイズと入射波高との関係を示したものである。この図においても、先に示した3つの領域が明瞭に現れており、水深増加の影響がジェットの発達過程においても大きく作用していることがわかる。そこで、図-7に図-4で求めたジェット先端部における水平移動速度を波頂部におけるそれと除した

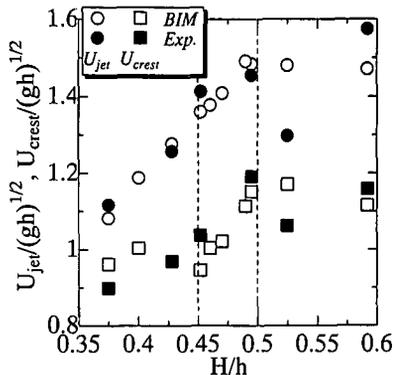
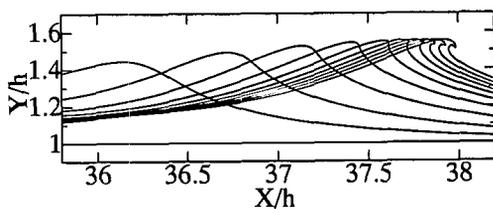
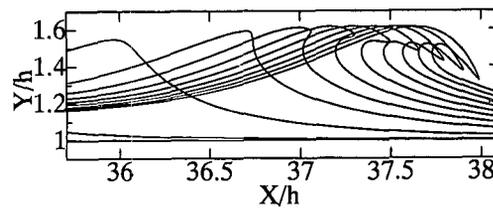


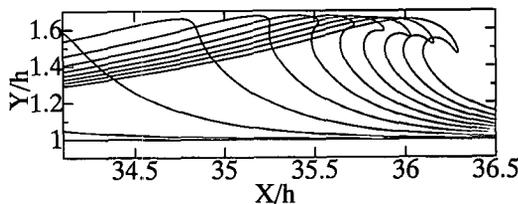
図-4 ジェット先端部および波頂部の水平移動距離と入射波高との関係



(a) $H/h = 0.38$



(b) $H/h = 0.45$



(c) $H/h = 0.59$

図-5 BIMによる代表的な波形変化

速度比 U_{jet}/U_{crest} を入射波高で整理したものを示すと、 $H/h = 0.45$ 付近に1つのピークが認められる。このピークは先に示したジェットサイズの変化にも明瞭に現れており、この速度比が碎波規模を表す指標になると考えられる。図-8は、ジェットサイズと水平速度比の関係を示したものであるが、図からその関係は明瞭で、ジェット先端部と波頂部の水平速度比に対応した1次の関係を見いだすことができる。これは、碎波規模を定量的に表す

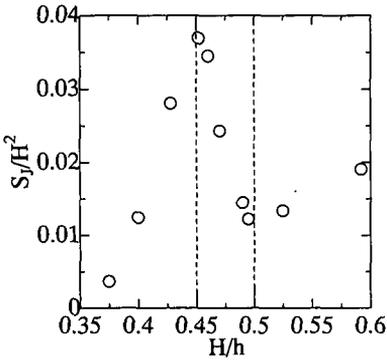


図-6 BIMによるジェットサイズと入射波高との関係

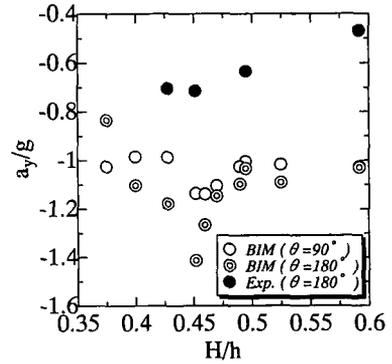


図-9 ジェット先端部の鉛直落下加速度と入射波高との関係

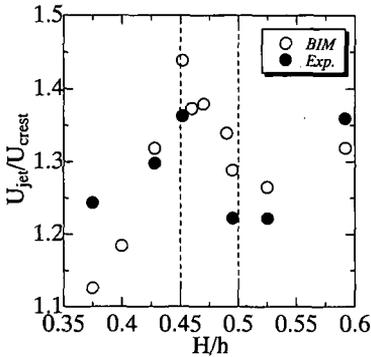


図-7 水平速度比と入射波高との関係

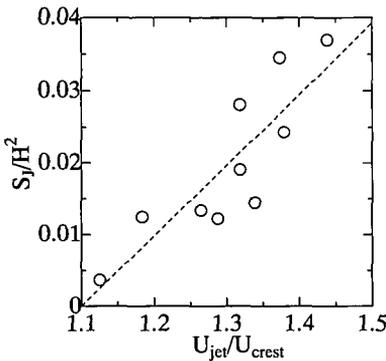


図-8 BIMによるジェットサイズと水平速度比との関係

指標として速度比が有効であることを示すものである。

(2) 鉛直方向の運動特性とジェット突入諸量

図-9は、ジェット先端部の鉛直方向の軌跡に最小二乗法を用いて時間に関する2次関数をあてはめ、それを2階微分することによって求めたジェット先端部の鉛直落下加速度 a_y と入射波高との関係を BIM による結果とともに示したものである。図中のかっこ内の角度は、砕波限界 ($\theta=90^\circ$) からと、ジェット落下限界 ($\theta=180^\circ$)

からの加速度をそれぞれ示している。

BIMにおけるジェット落下限界からの加速度については、 $H/h=0.45$ 付近に極小値が存在しており、図-7の水平速度比において見られた傾向に類似している。一方、砕波限界からの加速度においては、同様に $H/h=0.45$ 辺りに極小値が見られるが、その変動幅は小さく、概ね重力加速度に等しい値で分布していると言える。砕波限界からの解析がジェット放出過程の全体を平均的に捉えた結果、ほぼ一定値になっているのに対し、ジェット落下限界からの結果は砕波規模に応じた鉛直加速度を表しており、ジェット放出過程においてさえ、なお固有の発達過程が存在していることを示すものである。

ジェット先端部の水平速度 U_{jet} および鉛直方向加速度 a_y 、放出開始鉛直速度 V_{ini} 、突入する瞬間までの時間 Δt より、ジェット先端部の突入速度の鉛直成分は $V_{jet} = a_y \Delta t + V_{ini}$ で与えられ、ジェット突入速度 $|U|$ と突入角度 α を次式で与えることができる。

$$|U| = \sqrt{U_{jet}^2 + V_{jet}^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = \tan^{-1} |V_{jet}/U_{jet}| \dots\dots\dots (2)$$

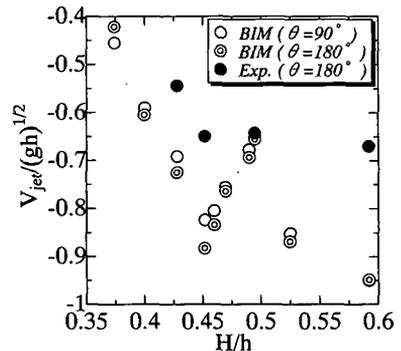


図-10 ジェット突入速度の鉛直成分と入射波高との関係

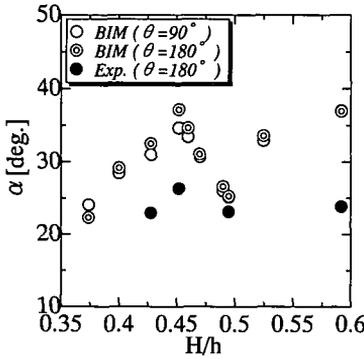


図-11 ジェット突入角度と入射波高との関係

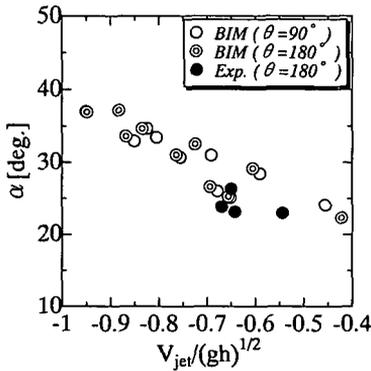


図-12 ジェット突入角度と突入速度の鉛直成分との関係

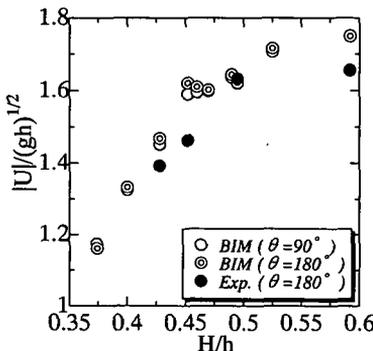


図-13 ジェット突入速度と入射波高との関係

図-10 および 11 は、ジェット突入速度の鉛直成分 V_{jet} および突入角度 α の入射波高に対する関係をそれぞれ示したものである。砕波限界からとジェット落下限界からの結果には差異はなく、両者はほぼ一致している。ただし、実験と計算結果には若干の差異が生じており、鉛直加速度の差異がここに現れていると考えられる。

図-12 は、突入角度と突入速度の鉛直成分の関係を示したものであるが、実験値を含めて両者の間に直線的関

係を見いだすことができる。一方、ジェット突入速度 $|U|$ と入射波高の関係を図-13 に示すが、突入速度は波高にほぼ比例した結果となっている。

5. 突入後の現象とジェット諸量との関係

(1) スプレイの運動特性

図-14 は、突入点を原点として、最大到達高さに達するまでのスプレイ高さの時間的な変化を示したものである。いずれのケースも 2 次関数的な変動を示しており、到達高さが極大値に達していることがわかる。

ジェット先端部の移動の場合と同様に時間に関する 2 次関数を当てはめると、スプレイ発達に伴う鉛直上昇加速度 a_s および鉛直初速度 V_s を算出することができ、図-15 に、それらと入射波高との関係を示す。鉛直初速度については概ね 0.5 前後に分布している。ジェット突入速度の鉛直成分が -0.6 前後に分布していることを考えると、その比 $|V_s/V_{jet}|$ はおよそ 0.8 となり、ジェット突入による運動量のうち、その鉛直成分の約 8 割はスプレイとして消費されることが分かる。一方、鉛直上昇加速度については 0.3~0.5 程度で重力加速度に比べてかなり小さい。スプレイ上端に作用する力の釣り合いを考えれば、スプレイ内部に重力加速度の 1/2 以上を打ち消す程度の圧力が生じていることを示している。

図-16 は静水面を原点としたスプレイの最高到達高さ $(Y_s)_{max}$ とジェット突入点を原点としたスプレイの跳ね上がり距離 $\Delta(Y_s)_{max}$ をジェット突入速度で整理したものである。いずれのケースも静水面から見た最高到達高さはほぼ一定で、水深の約 5~6 割である。跳ね上がり距離は砕波の規模によって突入点の高さが異なるため、最高到達高さが同じであることを考えるとジェット突入速度に対して比例した傾向を示す。

(2) 連行気泡塊の特性

ジェットが放出される時、その内側に空気塊が巻き込まれ、その空気塊はジェットの突入とともに水中へ連行

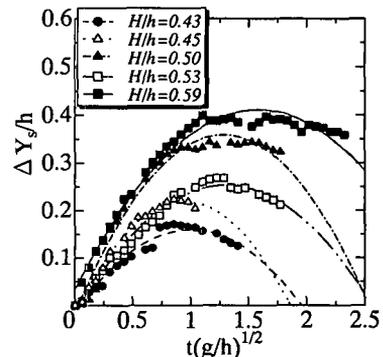


図-14 実験によるスプレイ高さの時間変化

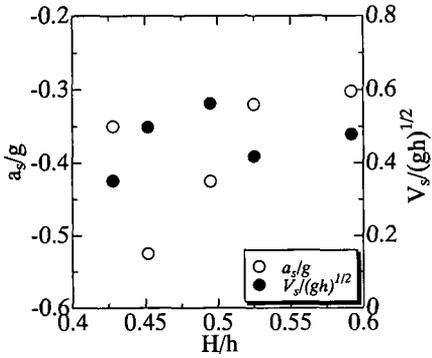


図-15 スpray発達過程における鉛直加速度および鉛直初速度と入射波高との関係

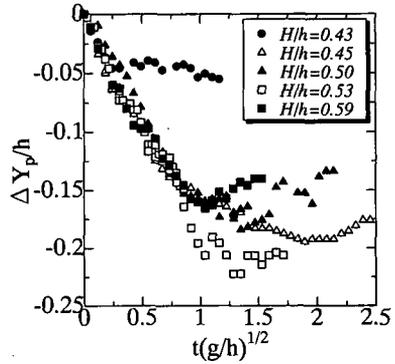


図-17 実験による運行気泡塊の到達深度の時間変化

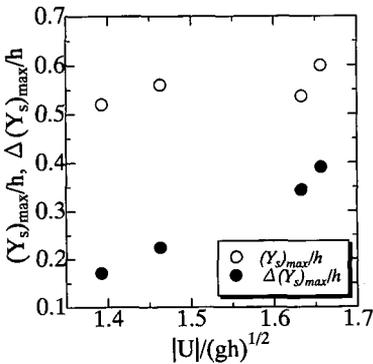


図-16 スpray到達高さおよびスpray跳ね上がり距離とジェット突入速度との関係

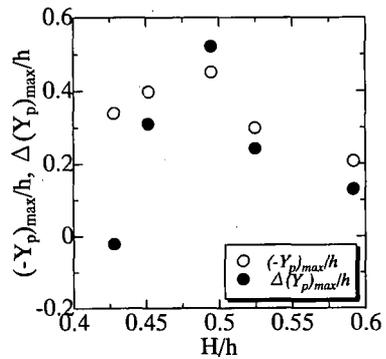


図-18 最高到達深度および突入点からの到達距離と入射波高との関係

されていく。ここでは、定量化可能なパラメータとして最高到達深度 $(Y_p)_{max}$ と突入点からの到達距離 $\Delta(Y_p)_{max}$ について検討する。

図-17は、ジェット突入時からの運行気泡塊の深度の時間的変化を示したものである。いずれのケースもほぼ直線的に最高深度まで変化しているが、最高深度付近に達するとほぼ横這いとなる。この間に運行気泡塊は多くの小さな気泡群へと分裂し、波峯の通過後、拡散しながら上昇していく。この時間的変化から、ほぼ安定した状態を最高到達深度とし、静水面からと、ジェット突入点からの距離を求めることで、それぞれ定量化を行った。図-18は最高到達深度 $(Y_p)_{max}$ と突入点からの到達距離 $\Delta(Y_p)_{max}$ を入射波高で整理したものである。両者の傾向は極めて類似していて、 $H/h=0.5$ 付近にピークが存在する。

6. 結 語

ジェット放出過程における波頂部及びジェット先端部は水平方向に等速度で移動しており、鉛直方向には時間

に関する2次関数として捉えられることがわかった。また、波頂部の水平移動速度やジェットサイズから、潜堤による砕波が3つの領域に分けられること示し、入射波高のみでは特定できなかったジェットサイズが水平速度比 U_{jet}/U_{crest} で表現できることがわかった。さらに、ジェット突入速度の鉛直成分と、スpray上昇の鉛直初速度の比から、突入ジェットの運動量の約8割がスprayの発達に消費されることがわかった。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費（学振特別研究員奨励費）および基盤(c)(2)10650501による成果であることを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

Chang, K. and P. Liu (1998): Velocity, acceleration and vorticity under a braking wave, *Phys. Fluids*, 10(1), pp. 327-329.
 Yasuda, T., H. Mutsuda and N. Mizutani (1997): Kinematics of overturning solitary waves and their relations to breaker types, *Coastal Eng.*, Vol. 29, pp. 317-346.