

越波ジェット水面の波峰方向不安定

Instability of jet surface along span direction at wave overtopping

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 石崎真一郎(Shinichiro Ishizaki)
北海道大学大学院工学研究科准教授 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

沿岸域において砕波が構造物等に衝突して発生する Flip-through 型越波飛沫は、荒天時には 30m 以上にも及ぶ高度まで打ち上がり、海岸背後へ広範囲に亘って輸送される。これに起因して海岸空間における交通障害や人的・物的被害が生じ、また大気エアロゾルの局所的増加や塩害の要因としても挙げられるなど様々な影響が報告されている。このように飛沫発生は沿岸環境にとって無視することのできない物理現象であるが、その生成メカニズムや発生するサイズ分布といった諸特性は未だ解明されておらず、影響・被害予測や沿岸構造物設計時の参考となる物理的ファクター（飛散量・飛散範囲など）に関する情報は殆ど定量化できていないのが現状である。

著者ら (2009) は、典型的な Flip-through 過程において、越波飛沫は大別して 3 つに分類される物理機構を介して生成することを確認した。特に越波ジェット発達に伴う流体分裂による飛沫群生成は非常に複雑なメカニズムを有しており、且つ広いレンジに亘るサイズ分布を持つ飛沫を生成させるため、飛沫の生成メカニズム・サイズスペクトルを把握する際に重要な要素となる。

この越波ジェットに関して、同一の波浪条件下においても壁体に衝突する砕波波面の突入形状の違いによってその後形成される越波ジェットの水面形状と飛沫生成に明らかな差異が生じることを確認した。これは僅かな流体擾乱の存在による若干の砕波形態の違いによるものであるが、砕波形態の違いは衝突時に巻き込む空気(エアトラップ)量や形状を大きく変化させ、Flip-through 過程における衝撃圧力や波浪中の流速分布に大きな影響をもたらすという報告がある(Lugini ら 2006)。このことから、生成する越波ジェット・飛沫サイズスペクトルも衝突時の砕波形態に強い依存性が存在するものであると考えられる。

そこで本研究では、衝突時の砕波形態と生成する越波ジェット・飛沫の関係性を把握すべく、室内水槽での画像計測実験を行う。

2. 実験装置と実験条件

本研究では、延長25m、幅0.6mのピストン型二次元造波水槽を用いた室内実験を行う(図-1)。造波板より岸側約16mの位置に設置した全面透明の矩形アクリルボックス(0.7×0.6×0.2m)前面において、造波した波を水槽底面の一様勾配下で砕波させて Flip-through 過程を誘発する。ボックス内部前面には青色LEDバックライト(180×100 mm)を設置し、ボックス前面を上昇するジェット及び飛沫のバックライト射影をミラーを介して水槽側方に設置した8bit 高速度デジタルカメラ(シャッタースピード 1/8000 s, フレームレート 500 Hz) によって撮影する。また実験

水には光学特性を持つウラニン溶液を用いており、ウラニン溶液の青色光吸収特性とカメラレンズの光学フィルタ(波長450nm以下のローパスフィルタ)を利用した光分離撮影によって、淡水時よりも流体領域が明確な画像を取得する。

本研究では、1) 砕波波峰着水後エアトラップしながら衝突する Bagnold 型衝撃砕波、2) 砕波点近傍で衝突する Bagnold 型衝撃砕波、3) エアトラップしない Wagner 型衝撃砕波の3種類の砕波形態についての Flip-through 型越波ジェット・飛沫を対象とした計測を行う(図-2)。水槽縦断方向にボックスを移動(砕波点から岸方向に $L=+20\text{cm}$, 0cm , -20cm , -30cm の4地点)させることによって上記3種類の砕波形態を再現し、各地点において計測領域となるバックライトを鉛直方向にトラバース(静水面より $Z=10, 20, 30, 40\text{cm}$)し、各計測点で約15回の試行計測を行った。

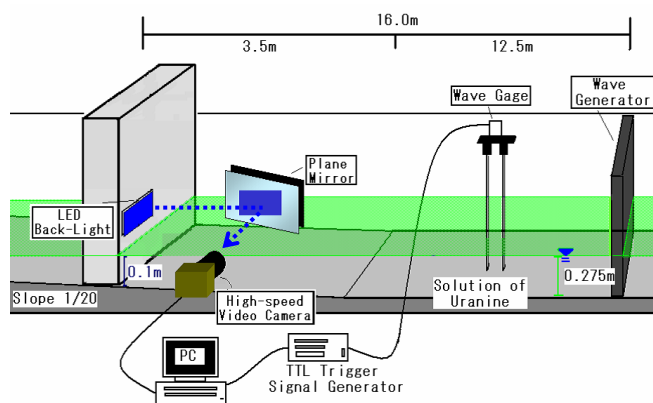


図-1 実験概要図

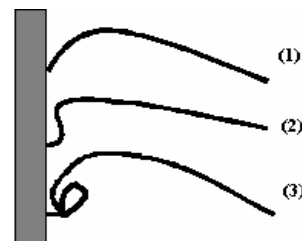


図-2 壁体に衝突する砕波形態の種類(1: Wagner 型、2: Bagnold 型・砕波点近傍、3: Bagnold 型・砕波波峰着水後)

3. 画像解析手法

実験で取得した画像全てについて線形投射を行い画像の歪みを実座標系に補正し、解像度 10pixel/1mm、256 色のグレースケール画像に変換した。複雑な水面形状を持つ越波ジェット・飛沫のエッジ検出手法として、著者ら(2009)と同様に Level-set

法を主体とした画像処理を行う。これは画像端に初期条件として与えるアクティブコンターについて、**Fitting Energy**(コンター内外の濃度偏差自乗和)を最小とするようなコンターからの距離関数 ϕ を逐次計算によって求める手法である。本研究では検出した流体エッジが画像内で閉合するものを飛沫、閉合せずエッジが画像端画素を含むものを越波ジェットと定義するものとする。また飛沫に関して、エッジ上の画像濃度微分絶対値を指標としてカメラのフォーカス平面(ボックス前面に設定)から離れたデフォーカス飛沫は排除して計測を行った。

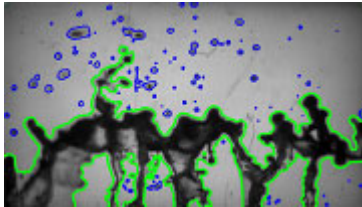


図-3 Level-set 法によって検出された流体エッジ
(緑線：越波ジェット、青線：飛沫)

4. 計測結果

(1) 砕波形態とジェット水面形状

L-30 : Wagner 型衝撃砕波

砕波点より 30cm 沖方向へボックスを移動させた L-30 では、衝突前の波面形状は比較的フラットであり、砕波ジェットの形成は殆ど見られない。越波ジェット水面は水平方向にほぼ様な形状でゆっくりと上昇し、ジェット先端に突起状フィンガー(間隔約 18~25mm)ジェット先端の不安定から最終的にはフィンガー形状に変化する(到達高さ 60~80cm 程度)。イベントを通して、高位置まで打ちあがる飛沫は殆ど発生せず、フィンガー先端部から分裂する大きな飛沫が時折目視で確認できた程度であった。

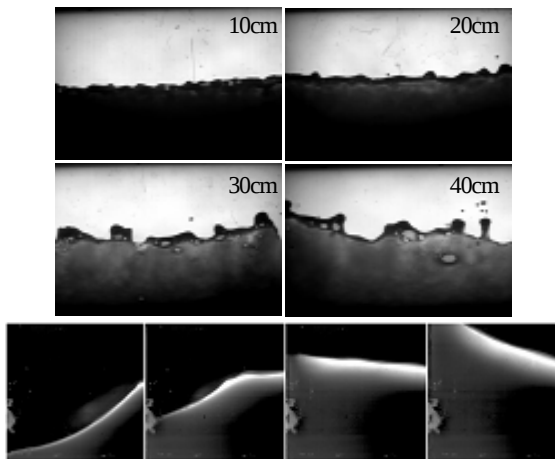


図-4 上図：L-30 の典型的な流体形状
下図：砕波波面進行の様子(左から右、時間間隔 0.01s)

L-20 : Wagner 型衝撃砕波

砕波点より 20cm 沖方向へボックスを移動させた L-20 では、L-30 と比較すると収束する波面の曲率が大きくなっていることが確認できるが、こちらもまだ砕波ジェットは形成されず、Flip-through 過程特有の急速な波面収束も顕著ではない。越波

ジェットはこちらも一様に上昇するが、L-30 と比較するとジェット先端に突起状フィンガー(間隔約 13~17mm)を形成するケースが多く、また比較的低い計測地点から確認できる。その後上昇とともに大規模フィンガー形状に変化する(到達高さ 70cm~100cm 程度)。

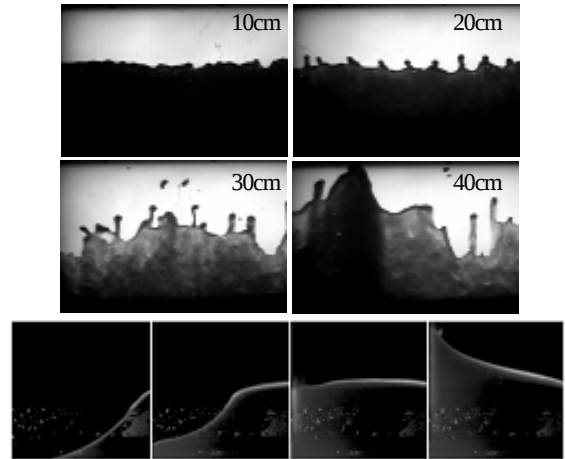


図-5 上図：L-20 の典型的な流体形状
下図：砕波波面進行の様子(左から右、時間間隔 0.01s)

L-0 : Bagnold 型衝撃砕波

砕波点近傍にボックスを設置した L-0 では、衝突直前に僅かな砕波ジェットの形成が確認できる。波面の曲率は大きく、砕波ジェットが壁体に衝突する直前、トラフ部が大きな鉛直加速度を伴い噴出し(図-6、下図 3 枚目)越波ジェットを形成する典型的な Flip-through 過程である。衝突時にエアポケットを形成するか否かで越波ジェット水面形状は大きく変化し、前者は初期から大規模なフィンガー形状を持つジェットが形成され、後者は水平方向に伸びる帯状のジェットがフィンガージェットに先行して現れ上昇とともに大規模フィンガーへと発達してゆく。

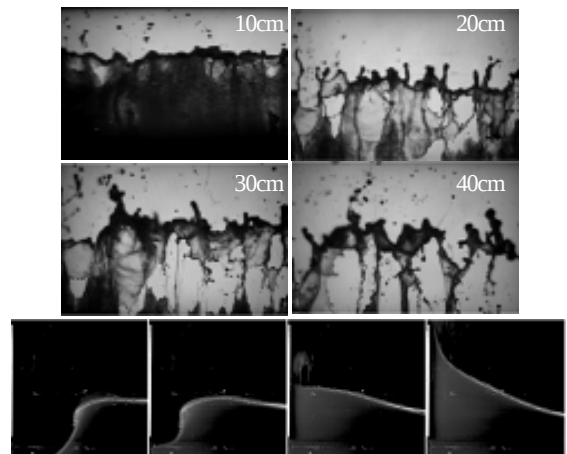


図-6 上図：mode0 の典型的な流体形状
下図：砕波波面進行の様子(左から右、時間間隔 0.01s)

L+20 : Bagnold 型衝撃砕波

砕波点より 20cm 岸方向へボックスを移動させた L+20 では、砕波波峰にジェットが突出後、波面に着水し、完全なエアチューブが形成される(図-7、直径約 10~30mm)。壁体衝突時には

このエアチューブの圧縮膨張に伴い瞬時に越波ジェット・大量飛沫群が形成される。越波ジェットは形成初期より典型的なフィンガー形状に発達し、上昇とともに大量飛沫へと分裂してゆく。

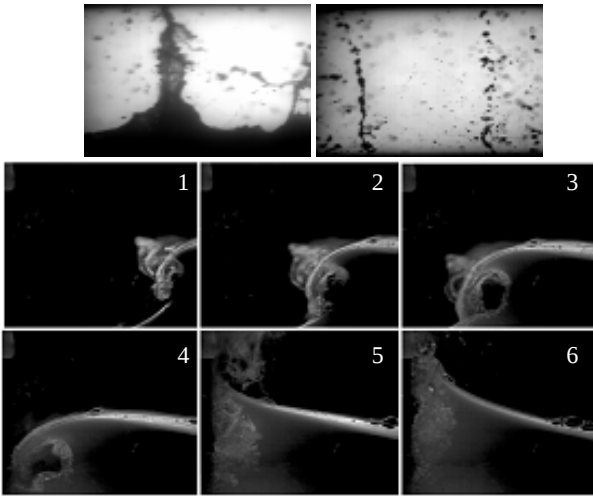


図-7 上図：L+20 の典型的な流体形状(左：Z=20cm 右：Z=25cm)、下図：砕波波面進行の様子(時間間隔 0.01s)。形成されたエアチューブは衝突時に圧縮膨張し、大量の気泡へと分裂する(5,6 枚目)。

(2) 越波ジェット水面形状の数値化

図-8 は、越波ジェットが画像内に占める流体領域に対し、画像鉛直方向の面積率空間変化について波数スペクトルを求めて表示したものである。このスペクトルから、水面形状を決定している波長成分を調べることができる。何れのモードにおいても上昇するにつれて広い波数帯にスペクトルが分布するようになり、これは飛沫へと分裂する短波長の突出フィンガーから大まかな水面形状を支配する大規模フィンガーまで、多様な波長成分を持ち越波ジェットが発達してゆくことを表している。またスペクトル確率密度 70%以上に着目すると、L が大きくなる

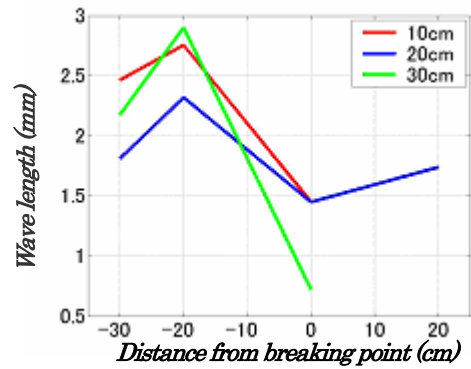


図-9 面積率波数スペクトルのピーク波長鉛直分布

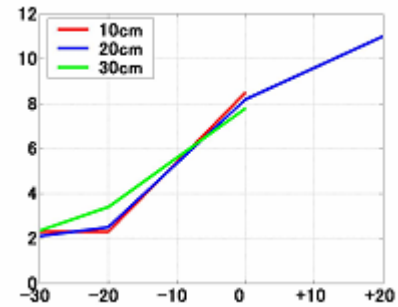


図-10 越波ジェットの総エッジ長率鉛直分布

につれて同じ計測高さでのスペクトルが若干ではあるものの小規模波数帯に遷移していく。これは図-9 のスペクトルピーク波長からも確認できることであるが、ジェット形状の複雑化と微細飛沫へと分裂するジェットの存在確率の増加を示していると考えられる。

次に越波ジェットの総エッジ長を求めた。図-10 は各モードでイベント間に発生した越波ジェットの総エッジ長について画像横断方向を 1 として正規化し、計測高さ別に図示したものである。砕波点手前と砕波後では総エッジ長の特徴に大きな違いが現れた。L=-30cm では上昇に伴うエッジ長に殆ど変化が見ら

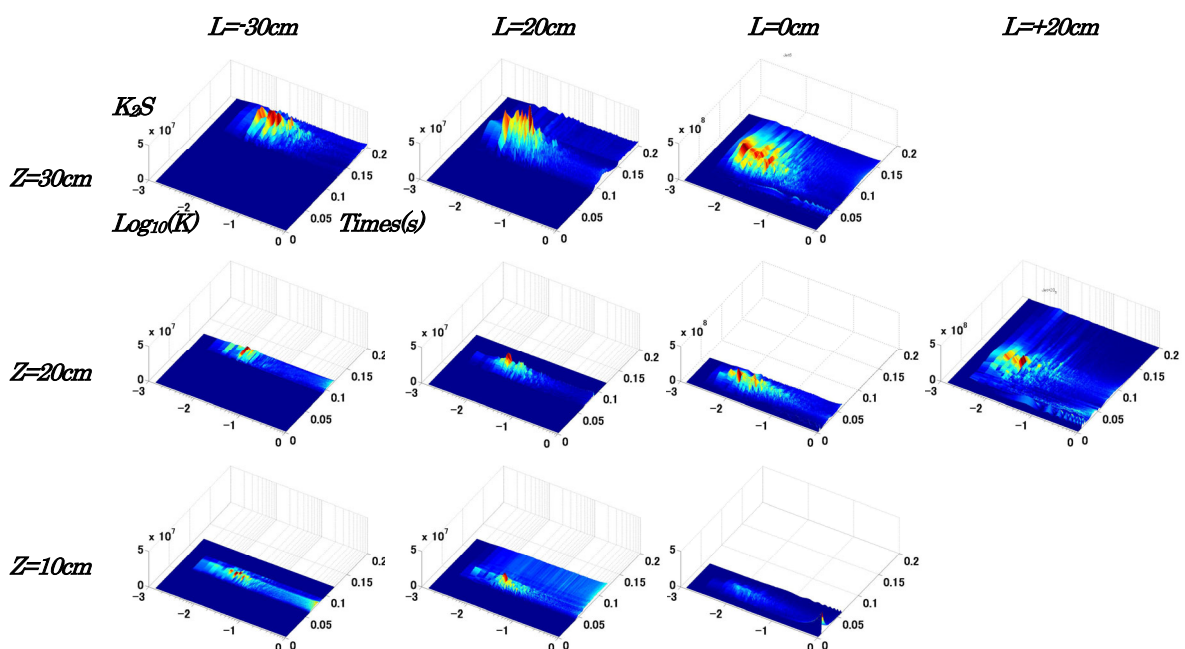
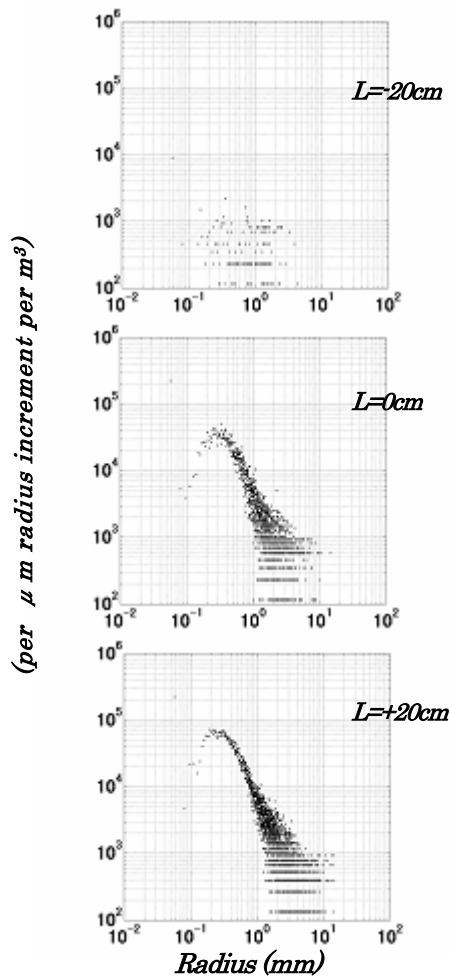


図-8 ジェット流体領域の鉛直方向面積率の波数スペクトル(kは波数を示す)

図-1.1 イベント間の飛沫サイズスペクトル($Z=20\text{cm}$)

れず、 $L=20\text{cm}$ は相対的にエッジ長の増加が見られるものの、両者ともに比較的シンプルな水面形状でジェットが上昇してゆることがわかる。一方砕波点近傍と砕波点後の $L=0, +20$ にかけて、エッジ長率は4~5倍以上に急増することが確認できる。これは衝突の際にエアポケットの爆発的な圧縮膨張がイベント初期から複雑な水面形状を形成し、様々な規模のフィンガーへと発達してゆくためであると考えられる。また $L=+20$ 以降、どのような傾向を示すのか興味深いところである。

(3) 飛沫発生の傾向

著者ら(2009)が明らかにした Flip-through 過程($L=0$)から生じる飛沫のサイズスペクトル特性は、計測高さによらずピークサイズ・スペクトル形状を決定するスペクトル勾配ともにほぼ一定で大きな変化を示さないというものであるが、 $L=+20$ においては $L=0$ とよく似た形状のスペクトルが現れた(図-11)。このことから、砕波点を越えた進行波が衝突するタイプの Flip-through 過程を介して発生する飛沫の物理機構には何らかの相関性が存在すると考えられる。一方図-12を見ても明らかのように、 $L=20$ では飛沫発生数自体が少なくはっきりとしたスペクトル傾向を掴む事が難しい。

5. 結論

本研究では、衝突時の砕波位相を変化させ、その後形成される越波ジェット・飛沫の水面形状やサイズスペクトルについて調査を行った。

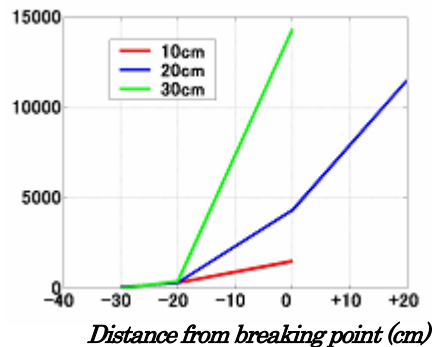


図-1.1 イベント間の飛沫発生総数の鉛直分布

計測の結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) フィンガー・ジェットの波峰方向スケールについて、上昇とともに波数スペクトルの分布波数帯は大きくなり、また若干小規模側に遷移する。
- 2) 衝突位置が砕波点の前と後では、越波ジェット・飛沫の物理特性が急変する。前者はシンプルな水面形状で漸变的にフィンガーが発達するのに対し、後者は初期から複雑且十分に発達したフィンガーが形成される。飛沫の発生総数も両者では4オーダー以上の差が生じ、スペクトル形状も相関性は殆ど確認できない。砕波前と砕波後では、越波ジェット・飛沫の生成過程を支配するメカニズムが全く異なると考えられる。

参考文献

- 渡部靖憲・石崎真一郎(2009): 越波ジェットのフィンガー化と飛沫への分列過程, 海岸工学論文集, 55, pp.76-80.
- Y.Watanabe, S.Ishizaki(2009): Spray size distributions at Flip-through wave overtopping, Coastal Dynamics 2009, Paper No.111
- Lugni, C., M. Brocchini and O.M. Faltinsen (2006): Wave impact loads: The role of flip-through, Physics of Fluids, 18, 122101, pp.1-17.