Flip-through 過程における越波ジェット及び飛沫の生成メカニズム

Mechanisms of Jets and Sprays at Flip-through 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

防波堤や護岸等の直立壁体に対して砕波が衝突する直前、砕 波面とトラフ部水面が壁体前面において集中し、その直後集中 領域を中心に 1000g 超の加速度を持って流れの指向性を水平方 向から鉛直上向きに急変させる Flip-through 過程を経て、大量飛 沫を伴う鉛直越波ジェットが生成される(Cooker & Peregrine)。

このFlip-through 過程が発生するときに最も大きな衝撃砕波圧 が生じ、その物質的被害は数多く報告されており、砕波圧に関 する種々の研究が行われている。一方、同時に大量発生した越 波飛沫は広範囲に飛散し、これも海岸空間に多大な影響をもた らす。例えば、沿岸道路での視覚不良による交通障害や、近年 増加する景観を利用した沿岸親水施設での人間活動の抑制、ま た環境面では飛沫による海岸域での局所的なエアロゾルの高濃 度化現象や塩害なども報告されており、注目されてきている。 しかし越波ジェット及び飛沫の生成メカニズム・サイズスペク トルといった諸特性については、計測が困難であり、効果的手 法が確立されていないために未だ解明には至っていない。

過去の越波に関する研究では、越波流量について、沿岸構造 物の設計時のパラメータとして古くから多くの研究がされてお り、既に一定の評価が期待できるものである。しかし、人々の 活動・注目がより海岸域に集まりつつある近年、海岸空間に求 められている機能・情報は、インフラ建設・管理のみならず人 間活動の安全性や環境面に関するものへと変容してきている。 よって将来、需要が期待される海岸域情報の一つとして、越波 飛沫の諸特性を定量的に把握することが我々の研究の目的であ る。

本研究では、室内水槽実験において Flip-through 過程を誘発さ せ、生成される越波ジェット・飛沫を対象とした画像計測実験 を行う。時空間的に複雑な挙動を見せるジェット・飛沫を正確 に計測するための実験方法及び画像処理システムの提案をし、 統計的な定量化を行い Flip-through 型越波のメカニズムを解明し てゆく。

2. 実験装置と実験条件

延長 25m、スパン方向 0.6m のピストン型 2 次元造波水槽を 用いて室内実験を行った(図 - 1)。造波板から岸側 16m の位置に 直立堤を模した全面透明の矩形アクリルボックス(0.7×0.6× 0.2m)を設置し、ボックス前面 3.5m間に設けた 1/20 の一様勾配 下において浅水変形による砕波を起こして Flip-through 過程を 誘発する(図-2)。沖水深は0.275m、ボックス前面水深は0.1m に決定した。実験波高は、沖側に設置した 2 台の容量式波高計 から計測された水位変動より入反射波分離を行い決定した。本 実験では波高 14.6cm、周期 1.9s であった。

本実験では、実験水に蛍光特性を持つウラニン溶液を用い、

青色 LED ライトをボックス前面に設置し、励起された越波ジェ ット・飛沫のバックライト射影を撮影するという手法を試みた。 ウラニン溶液は計測領域となる LED ライト(9×16cm)の青色光 (波長約 436nm)を吸収して緑色蛍光(極大波長約 530nm)するた め、カメラのレンズに光学フィルター(波長 450nm 以下のロー パスフィルター)を装着し撮影することによって、バックライト と射影の画像濃淡差がより明確な画像入手が可能となった(図-3)。

バックライト撮影には高速度ビデオカメラ(シャッタースピード 1/8000s、フレームレート 500Hz)を用いた。図のように水槽 側方に LED ライトと水平になるよう設置し、カメラの視軸から 45 度回転させた平面鏡を通してボックス前面で生成する越波ジ ェット・飛沫を撮影する。

撮影領域となる LED ライトは、静水面から鉛直方向に 4cm から 14cm まで 5cm 間隔でトラバースし、各計測地点において約 30 回の計測を行った。繰り返し計測を行う上で、同位相の波 についてアンサンブル統計量を算出するため、沖側に設置した 容量式波高計からのトリガー信号をカメラに送信して撮影を開始した。



図-2 Flip-through 過程(1・2: 砕波面とトラフ部が集中する 3: 壁体前面の一点に集中する 4: 直後、鉛直越波ジェット及 び飛沫群が生成される)



図-3 バックライト射影画像(左:淡水、右:ウラニン溶液)

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。

複雑な形状を持つ越波ジェット・飛沫の射影エッジ検出法と して、Level-Set 法を適用する(Chan & Vase 2001)。これは、逐 次計算によって形状を変化させるアクティブコンターを初期条 件として画像端に設置し、コンターライン内外の画像濃度偏差 の二乗和を Fitting Energy(FE、式(1))と定義して、FE が最小 値となるときにコンターが射影エッジを検出するという概念の 下、コンターからの距離関数である Level-Set 関数 ϕ の微分値が 収束するまで逐次計算を行う方法である(式(2))。

$$FT = \int |g - C_{\rm in}|^2 H(\phi) dx + \int |g - C_{\rm out}|^2 H(\phi) dx \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \delta(\phi) [\mu \cdot \kappa(\phi) - \lambda_1 \int |g - C_{\rm in}|^2 H(\phi) dx + \lambda_2 \int |g - C_{\rm out}|^2 (1 - H(\phi)) dx] \quad (2)$$

ここで、gは 各ピクセルの画像濃度値、*Cin、Cout* はそれぞ れコンター内外の画像濃度平均値、H(ϕ)はコンター境界線の内 外を引数として1,0を与える Heaviside 関数であり、境界幅 ϵ を持つようにしている。 μ 、 λ_{λ} 、 λ_{2} はそれぞれ定数、 κ は 曲率 $\Delta(\Delta \phi | | \Delta \phi |)$ 、 δ は Level-Set 関数の値が0のとき極大 となる幅 ϵ の正規密度関数である。

本研究の対象となる越波ジェットと飛沫の混在する画像を Level-Set 法で処理する過程で、微細飛沫のエッジが正しく判定 されないケースが見受けられた。これは、径がミリ単位以下の ミクロスケールである微細飛沫に対し、マクロスケールである



図-4 上図: Level-Set 法によりエッジ判定を行った(緑線)射 影画像 下図:個々の画像濃度微分絶対値でカラーリングを施 した飛沫射影(黒線はジェット水塊)



ジェット水塊のFEが画像内において支配的となり、微細飛沫の 濃度分布が無視される傾向にあるためである。そこで、元画像 を濃度の高い画素と低い画素に分割し、それぞれの分割領域に ついて Level-Set 法を施すことによってジェット水塊と飛沫双 方のエッジ検出を行った(図-4上)。

また、カメラのフォーカス平面から視軸方向において離れた 領域に存在する飛沫のデフォーカス射影は、ぼやけて実際のサ イズとは異なってエッジ判定される傾向にある(図-5)ため、場 合に応じてこの領域の射影はエッジ検出後任意的に除去する必 要がある。そこで、実際に発生する飛沫スケールのウラニン液 滴(径約2.4mm、0.7mm)を LED ライトとカメラ間の視軸上各 点に落下させ、バックライト射影を撮影する簡易実験を行った。 図-5に示すように、視軸上各点において取得した液滴射影画 像について射影エッジの画像濃度微分絶対値を求め、任意の閾 値を設けることによりフォーカス領域に存在する飛沫の除去が 可能となる(図-4下)。

4. 解析結果

(1) Flip-through 形態のタイプ分け

越波ジェット・飛沫の生成特性は、Flip-through 形態(砕波 ジェット形状や砕波面-ボックス間において圧縮膨張されるエ アチューブの形状・スケールなど)に大きく依存する(C.Lugni ら)。よって、越波ジェットの生成メカニズムを検討するには Flip-through 形態のタイプ別に計測画像を議論する必要がある。 我々はLED バックライト射影の画像撮影と同時に、ボックス側 方から集中領域近傍域の動画像撮影及びいイドロフォン(サンプ リング周波数 40kHz)を用いてボックス前面での水中音圧測定 を行い、本実験において発生する複数の Flip-through タイプを 確認した。以下に示す2つのタイプは中でも非常にインパクト が強く、実験水槽において2~3m 以上の到達高を持つ越波飛沫 を発生させる典型的な Flip-through 形態であった。

Aタイプ:フィンガー状ジェット型

Flip-through 直後、フィンガー状に発達する越波ジェットが 形成される(図-6左)。このタイプは相対的に上昇速度が大きく (約 7.0 - 8.0m/s)、フィンガーが鉛直上向きに延長しながら発達 する。また初期に大量かつ様々な径を持つ飛沫群の発生が顕著 に確認できた。

集中時の砕波面-トラフ部水面間の曲率は比較的大きく、砕 波波峰には初期ジェットが形成される巻き波砕波形態である。 トラフ部に対して砕波ジェットが同時或いは若干先行して空気



図-6 異なる Flip-through 形態(上、フレームレート 600Hz) とその後生成される越波ジェット・飛沫群(下)(左図:A タイプ 右図:Bタイプ)

を巻き込むようにフォーカスし、その後集中領域から噴出する ように鉛直ジェットが高速度で打ち上がる(図-〇)。

また図-7(上)の音圧時系列からも、壁体-水面間に空気を巻き込む Bagnold 型衝撃砕波であることが確認できる。計測された音波振動数を基に、気泡の圧縮膨張振動数と気泡径の関係式である resonance relation (式3)を用いてインパクト後断熱圧縮されたエアチューブが約28mm 相当の気泡径スケールであることが推測できる。また、衝撃圧に比例相関するインパクト時の音圧は最大約55Paであった。

 $f: 周波数、<math>R: 気泡径 \kappa: 比熱比 P_o: 気泡内圧力 \rho: 水の密度$

Bタイプ:帯状ジェット型

Flip-through 後、集中領域から約 10~25cm の区間におい て越波ジェット本流から先行して分裂する水平帯状の水塊ジ ェットが形成される(図-6右)。このタイプは相対的にジェッ トの上昇速度が小さく(約 5.0 - 6.0m/s)、上昇するに伴い帯状



ジェットは複数の水塊に断裂し、それぞれが鉛直上向きに延長 するように発達する。また、ジェット本流からの分裂時に多数 の飛沫の形成が確認できた。

集中時の砕波面-トラフ部水面間の曲率は比較的小さく、集 中水面全体がほぼ一様にフォーカスしている。しかし、砕波面 に対して同時或いは若干先行してトラフ部がフォーカスポイン トに到達している。

音圧を見ると、こちらも Bagnold 型衝撃砕波であることが推 測される。巻き込まれるエアチューブは約 10mm 相当の気泡径 スケールであり、インパクト時の音圧は最大約 40Pa であっ た。これより、A タイプがより典型的な Bagnold 型衝撃砕波に よる Flip-through 形態であることが分かった。

以上2つの Flip-through 形態について、それぞれ画像計測結 果を検討していく。

(2) 飛沫数密度・平均径時系列、サイズスペクトル

以下に示す図-8,9は、それぞれの計測地点におけるタイプ 別の越波ジェット本流を除いた飛沫数密度及び平均径の時系列 を表している。どの位相でも、平均径約0.5mm以下の微細飛沫 が高速度(約10m/s程度)で打ちあがる。Aタイプについて、フォ ーカス直後に初期発生する大量微細飛沫は瞬時に上昇又は多方 向に拡散するため、数密度は急勾配で減少する。そして z = 14cmの位置から、上昇するにつれジェット本流から分裂し始め たピーク径が約1mm 程度であると推測できる。また Bタイ



(左:Aタイプ 右:Bタイプ)



図-9 飛沫平均径の時系列(左:Aタイプ 右:Bタイプ)



図-10 飛沫サイズスペクトル

プは相対的に数密度がどの位相でも少ないが平均径は同程度 の値を持つことから、このタイプは生成される飛沫が比較的 大径側に支配的であることが分かる。

サイズスペクトルから、A タイプは初期発生する飛沫のス ペクトルが上昇後と相似していることが分かる。これは、典 型的な Bagnold 型衝撃砕波によって初期に大量発生する飛沫 群が上昇過程においても支配的傾向にあるためであると考え る。一方 B タイプについては、インパクト直後に発生する飛 沫は比較的小径かつ少数であるが、上昇するにつれ A タイプ のスペクトルと高い相関を持つ。これは帯状ジェットが断裂 又はジェット本流から分裂することにより多彩な径を持つ飛 沫が大量に生成されるためであると考えられる。

5. 結論

本研究では、Flip-through 型越波についてその発生要因と なる Flip-through 過程直後からの計測を試みた。実験水にウ ラニン溶液を用いたバックライト射影画像について Level-Set 法でエッジ検出を行うという計測手法は、これまで 困難とされてきた越波飛沫及びジェット本流をも含めた包括 的な解析を可能にするものである。

また今回の実験では典型的な2タイプのFlipthrough形態の諸特性及びその後生成される越波ジェット・飛沫について 検討を行い、次のことが確認できた。

A:フィンガー状ジェット型

大きなスケールの空気を巻き込む Bagnold 型砕波による Flip-through 形態。相対的に衝撃圧が大きく、インパクト直 後に大量かつ多様な径を持つ飛沫を伴うフィンガー状越波ジェ ットが形成される。

B:帯状ジェット型

比較的小さなスケールの空気を巻き込む Flip-through 形態。 インパクト後、上昇するにつれジェット本流から帯状に分裂 するジェットが形成される。帯状ジェットが分裂・断裂する ことにより、多様なサイズを持つ飛沫群が生成される。

参考文献

Lugini,C., M.Brocchini and O.M.Faltinsen (2006): Wave impact loads: The role of the flip-through, Phisics of Fluids, 18, 122101

Chan T. and L.Vese (2001): An active contour model without edges, IEEE Trans. on Image Processing,10,266-277

渡部靖憲、山内悠司、佐伯浩(2002):砕波遷移に伴う気泡生成 特性変化とマイクロバブル量に関する研究、海岸工学論文集、 第49巻、106-110