

越波ジェットของフィンガー化と飛沫への分裂過程

Fingering and fragmenting precesses of overtopping flip-through jets

渡部靖憲¹・石崎真一郎²

Yasunori WATANABE and Shin-ichiro ISHIZAKI

A flip-through overtopping jet evolves into laterally deintegrated jets, so-called finger jets, at an early stage of the wave uprush on a vertical wall. The finger jets are vertically stretched to fragment into small multiple droplets or sprays. In this study, these fingering and fragmenting processes were visualized, and the shapes of the jets and sprays were quantitatively measured on the basis of novel level-set image detecting algorithm. The evolution of the size distributions and water volume fractions for the both jets and sprays were characterized via spectrum image analysis.

1. はじめに

堤体への到達直前に碎波を伴う場合、堤体上において碎波波面の集中とそれによるエアポケットの圧縮膨張に伴い1500gに及ぶ加速度で鉛直ジェットが放出されるいわゆるFlip-through越波において、越波水は大量の飛沫群として高さ数十mにまで放出され広い領域に飛散する(Lugniら, 2006)。これに伴う交通、作業障害や人的、物的被害等に与える影響について調査研究されている一方、生成する飛沫の発生機構及び飛沫サイズを決定する物理的ファクターが不明であるため、サイズに応じて異なる飛沫の輸送・飛散量の定量化は困難な現状である。

本研究は、光分離によりジェット本体と飛沫の両者を同時画像計測する手法を提案すると共に、計測結果からFlip-through ジェットの变形とそれに伴う飛沫の分裂機構を明らかにし、生成飛沫分布とジェット形状そして碎波の堤体への衝突形態との密接な関係とそれらを決定するパラメータについて議論するものである。

2. 実験方法

勾配1/20, 延長25m, 幅0.6m, 高さ1.0mの側面ガラス張りのピストン型2次元造波水槽において実験を行った(図-1参照)。造波機全面の一定水深域では水深0.275m, ボックス前面水深0.100mの条件において、入射波高0.146m, 周期1.9sの規則波を造波する。一様水底勾配上に模型直立堤として全面透明矩形アクリルボックスを設置し、このボックス前面に碎波を衝突させFlip-through過程を誘発する。ボックス内部には青色LEDライトアレイ(200×100mm)を設置し、ボックス前面を上昇するジェット及び飛沫の射影をミラーを介して水槽側方に設置し

た8bit高速デジタルカメラ(シャッタースピード1/8000s, 撮影周波数500Hz)によって撮影する。碎波ジェットがボックス前面で集中する過程を別の高速デジタルカメラで撮影する。沖に設置された容量式波高計が波浪を検知した時に送信されるTTLトリガー信号により両高速カメラは同期して計測を開始する。

Flip-through過程において、越波ジェット流体から飛沫へと分裂する遷移領域では、時々刻々と形状を変化させ、多様なサイズを持つ流体が混在する。物体形状の画像計測で広く行われているバックライト法は、界面の存在する流体のエッジ部を中心に射影を撮影するものであり、球形飛沫の様な比較的安定した形状の形状計測に優れている一方、複雑に変形する自由水面を有する流体塊に対してはその変形の曲率に応じて光が屈折して射影が記録されてしまうため、正しくエッジの形状を計測できない。本研究では、実験水に蛍光特性を持つウラニン溶液を用い、青色LED光源によるバックライト射影撮影実験を行った。ボックス前面を通過する越波ジェット・飛沫は、ウラニンの特性により青色光(波長約436nm)を吸収・励起して緑色蛍光(極大波長約530nm)するため、カメラのレンズに光学フィルタ(波長450nm以下のローパスフィルタ)を装着することにより、流体塊全域に渡る光の透過を防ぎ流体塊の局所変形によるエッジの誤計測のない射影画像の取得が可能となる(図-2参照)。

撮影領域となるLEDライトアレイは、静水面上鉛直方向に4cmから109cmまでの範囲で5cm間隔でトラバースし、各計測地点において30回の試行計測を行い結果を統計的に評価した。

3. 画像処理法

実験により取得した全ての画像について、予め撮影した正方グリッド画像を用いて線形投射画像変換を行い、補正した。計測解像度は10pixel/mmであった。

1 正会員 博(工) 北海道大学准教授大学院工学研究科
2 学生会員 北海道大学大学院工学研究科

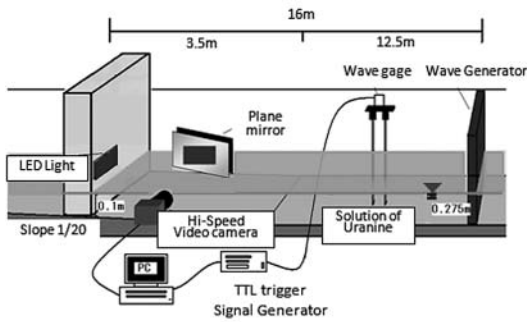


図-1 実験装置



図-2 Level-set法により検出された流体エッジ画像（黒線：飛沫のエッジ、灰色線：ジェットのエッジ）

著者ら（2008）と同様に、画像中の流体エッジ検出法として、Level-set法を適用する。これは、画像濃度に対し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、コンター内外の画像濃度偏差の二乗和を最小とするよう境界線からの距離関数である ϕ を逐次計算によって求める方法である。

図-2の灰色線及び黒線は、本手法によって逐次計算で得られたジェット流体及び飛沫の画像濃度のエッジを表している。ここで、ジェット流体はそれを包括するエッジが計測領域境界まで伸びている領域を、また飛沫とはエッジが計測領域内で閉じているものと定義する。物理的なジェット流体と飛沫の定義とは異なるので注意が必要である。本計測法では、撮影画像において微細飛沫の濃度は低く、大規模流体塊の濃度は高く計測される。このエッジ検出への影響を軽減するため、原画像を高濃度画素域と低濃度画素域に濃度レベルに対して分割し、それぞれの分割レベルについてLevel-set法を適用した。また、カメラのフォーカス平面（本実験ではボックス前面に設定）から視軸方向に離れた領域に存在する飛沫によるデフォーカス射影は実際のサイズと異なってエッジ判定されるため、これを除去する必要がある。そこで、飛沫サイズスケールのウラニン液滴（径約2.4mm, 0.7mm）を視軸上の異なる位置に落下させ、その射影を撮影し、デフォーカス部を判定する濃度勾配の閾値を決

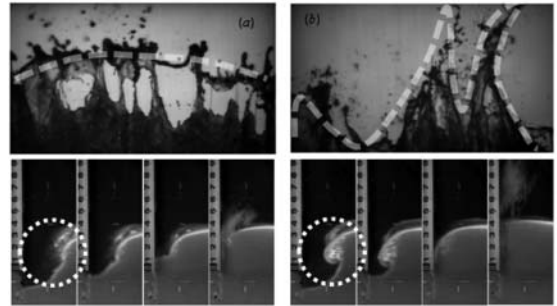


図-3 帯状及びフィンガー形状のFlip-throughジェット（上）と対応する碎波波面の収束の様子（下）。下図の波面が壁体に衝突した後、堤体壁面上昇する水槽横断方向に不均一な形状のジェット液体が黒色で上図において可視化されている

定した。これによりデフォーカス領域の飛沫を除外して計測結果を評価することが可能となる。

4. 結果

碎波直後に壁体に衝突するFlip-through過程では、同一の入射波条件による試行の中で、僅かな波峰ジェット突入形状の違いによって、同一高さにおけるFlip-throughジェットの水面形状が完全異なることが明らかになった（図-3）。即ち、ジェットの飛び出しが僅かに早くジェット前方の波面が収束する前にエアポケットが形成される場合には典型的な大規模フィンガー形状の鉛直ジェットが、エアポケットを形成せずに波面の収束に伴う加速度によりジェットが噴出する場合には横断方向に結びついた帯状のジェットの先端がフィンガーに先行しその背後にフィンガージェットを伴う2つのパターンである。図-4は、 $z = 24\text{cm}$ の位置における、これら2つのタイプのジェットの発達過程を表したものである。帯状に繋がったジェットは、背後のジェット本体より高速で上昇するため、その間の流体は伸張され鉛直方向に筋状に分断される。先行する帯状のジェットはその後横断方向に分離すると同時にさらに小径の大量の飛沫へと分裂を繰り返す。一方、遅れて上昇する流体ジェット本体の先端は、ジェットの分断の直後から相対的に間隔の小さいフィンガー形状が形成されるが（図-5参照）、その後、隣接するフィンガーと結合を繰り返し、大規模なフィンガーへと発達していく。Flip-through初期段階においてフィンガー形状となるタイプでは、横断方向の間隔が大きくフィンガーの長さも前者より長い（図-6参照）。さらに、ジェット先端の上昇速度も前者より高速であり、飛沫は主としてフィンガーの軸に渡って縦に分断されることによって生成される。これらの差異は、碎波ジェットの衝突時のジェットの形状に依存して初期ジェットの上昇加速度が異なることに起因していると考えている。即ち、ジ



図-4 $z = 24\text{cm}$ におけるFlip-throughジェットの発達過程
(左:帯状ジェット, 右:フィンガー状ジェット)

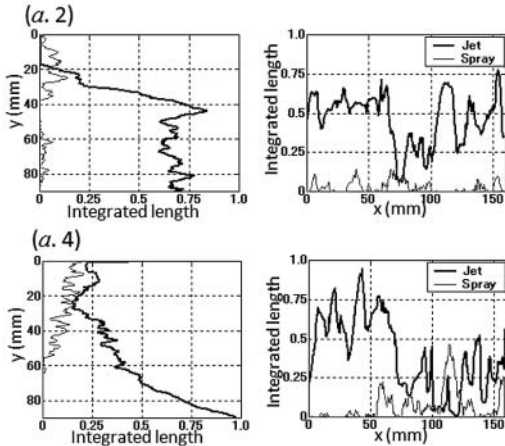


図-5 横断方向 (左) と鉛直方向 (右) のジェット流体及び飛沫の面積率空間変化 (帯状ジェット). $z = 24\text{cm}$. 図-4の位相に対応する

ジェットがオーバーターンしながら壁面に衝突する際に形成されるエアポケットは波面の収束により急速に圧縮され、その膨張と共に初期ジェットは高い加速度で噴出し、すぐにジェットが分断され多量の飛沫へと分裂する。このため、放出された飛沫から遅れて上昇するジェットはflip-throughの初期段階ですでに十分に発達したフィンガー形状となり、同一レベルにおいて帯状ジェットのタイプとその形状が大きく異なると思われる。

図-5及び図-6は、図-4のそれぞれの位相に対応する鉛直及び横断方向のジェット流体及び飛沫が占める面積の割合の空間変化を表しており、空間平均的なジェット形状と飛沫分布の鉛直及び横断方向の変化の特徴を知ることができる。図-7は、この横断方向のジェット流体及び

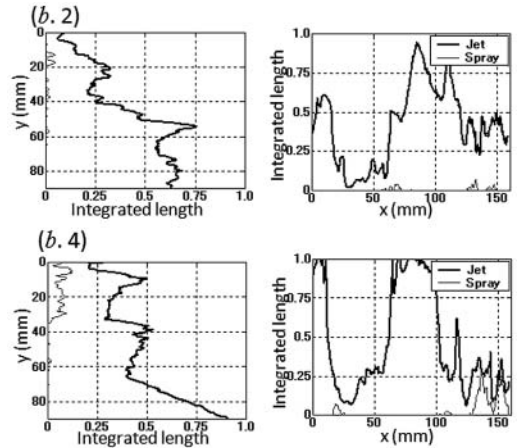


図-6 横断方向 (左) と鉛直方向 (右) のジェット流体及び飛沫の面積率空間変化 (フィンガー状ジェット). $z = 24\text{cm}$. 図-4の位相に対応する

飛沫の面積率のスペクトルを表している。相対的に低い位置では、ジェットのフィンガーも十分に発達しておらず対応する波数帯に飛沫は多く存在しない。最もフィンガージェットの分裂が盛んになる $z = 34\text{cm}$ の位置では、フィンガージェットの横断方向卓越波数に対応して飛沫スペクトルピークが存在する。つまり、この位置では、大スケールのフィンガー幅約100mmと小スケール幅約30-50mm間隔が重畳し配列するフィンガーから分裂した飛沫群が同一間隔で分布する (図-8も参照)。ジェット本体の到達高さを超える $z = 44\text{cm}$ の位置では、ジェット自体が計測されていないにもかかわらず、フィンガーが伸長されさらにジェット本体から分断された流体塊が分裂前のフィンガーの波数と同一の波数の分布をもって上昇していることが確認できる。この位置での飛沫は更なる分裂が進行し、この流体塊より高波数側の間隔約25mmにスペクトルピークを持ち、15-30mmのレンジで分布する。さらに高い位置では再分裂の末、飛沫は十分に発達し、約8-30mm程度の間隔で広いレンジにわたって分布することになる。

次に、ジェットの飛沫への分裂及び飛沫の再分裂について、その特徴を詳細に調べていく。図-8は、ジェットあるいは飛沫が最初に各計測位置に到達したときの典型的な形状を表している。初期的な帯状のジェットから次第に小さなスケールの流体塊へと遷移し、最終的に安定形状の飛沫へと発達していく過程がわかる。

図-9は、ジェット流体及び飛沫の両者に対する総エッジ長をFOVの水平長さで正規化したエッジ長率と面積率の時系列を計測点毎に表わしたものである。 $z = 24\text{cm}$ から34cmにかけて、ジェットの先端において分裂が進行し、飛沫のエッジ長率が増加しているのがわかる。また、

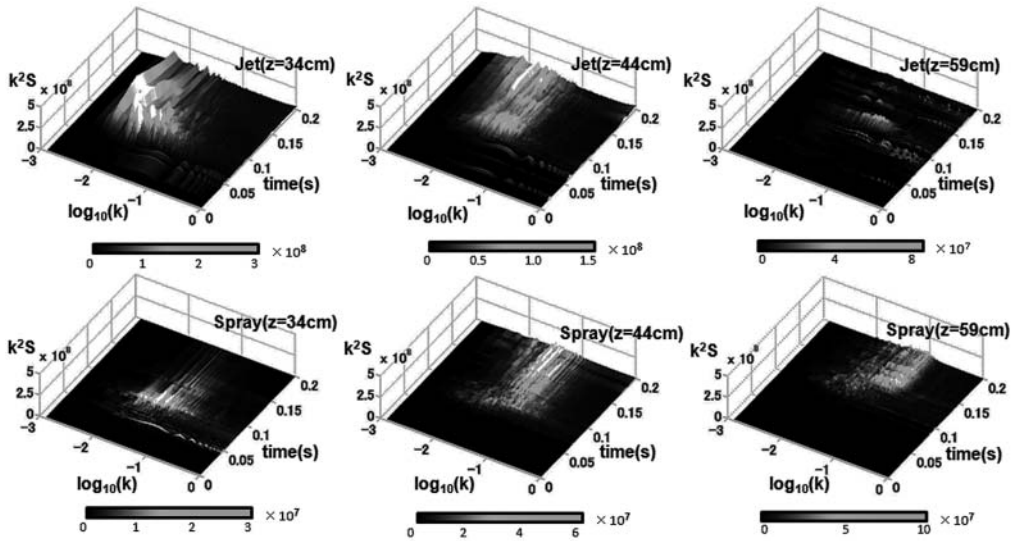


図-7 横断方向のジェット流体及び飛沫の面積率の波数スペクトル (k は波数を示す.次元: mm^{-1})

$z = 34\text{cm}$ でのジェット流体のエッジ長率が $z = 24\text{cm}$ のものと比べ長時間相対的に大きな値を示しており、この高さでは殆どのジェット流体がフィンガー化されていることを表している。 $z = 34\text{cm}$ から 44cm にかけて、エッジ長率が増加し、フィンガージェットからの分裂が加速し、さらに上方($z = 59\text{cm}$)では、飛沫の面積率は微増しているのに対して、エッジ長率は倍以上に急増している。これは、微小飛沫の増加を意味しており、飛沫からの再分裂過程が支配していることを表している。

個々の飛沫径に対する発生量を記述するために、越波イベント間に発生した飛沫に対して 0.1mm 毎のビン内の頻度を飛沫サイズスペクトルと定義し図-10に示す。Flip-through過程において繰り返して起こる分裂により飛沫が形成されていくにもかかわらず、飛沫のサイズスペクトル形状自体はどの高さにおいても大きな変化を示さないことが明らかになった。計測限界解像度が 0.1mm であるため小径飛沫の計測結果が十分ではない可能性があるが、本計測では、どの高さにおいても約 $0.2\text{--}0.3\text{mm}$ にスペクトルピーク径が存在する。また、約 0.7mm より大径側では、 $-3/2$ から $-10/3$ 乗勾配に渡るレンジ内に全てのサイズスペクトルが存在し、これより小径側では $-3/2$ 乗のスペクトル勾配をもつ。 $-3/2$ 及び $-10/3$ 乗勾配が現れる物理的意味は不明であるが、分裂過程にあるそれぞれの位置でのスペクトルの類似性を考えると、前者は小スケールの安定した飛沫サイズの勾配を表し、後者は再分裂の可能性のある大径飛沫のサイズ分布を表しているとも考えられる。議論の対象が変わるが、Deane・Stokes (2002) が明らかにした碎波下の混入気泡のサイズスペクトルは、Hinze scale (1mm) より大径側では、 $-10/3$ 乗

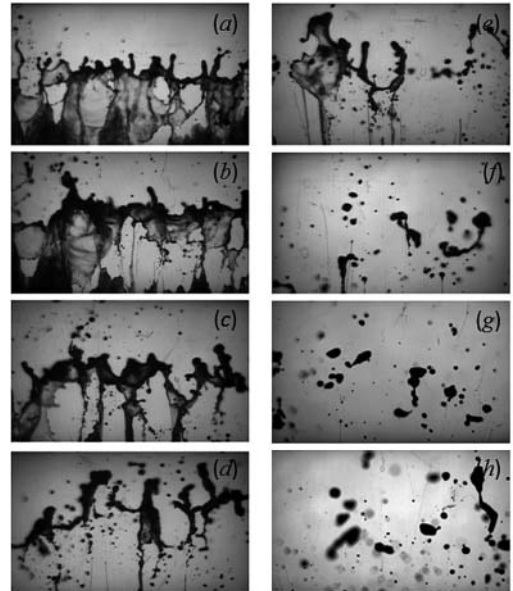


図-8 各計測地点における典型的な流体形状; $z = 19\text{cm}$ (a), 24cm (b), 29cm (c), 34cm (d), 44cm (e), 49cm (f), 54cm (g), 59cm (h)

勾配、小径側では $-3/2$ 乗勾配であり、我々の飛沫のスペクトル勾配と同一である。これが全くの偶然であるのか、界面の介した気液の交換機構として何かしらの相似性があるのか実に興味深い。

5. 結論

本研究では、Flip-through型越波についてその初期生成過程から発達過程までの計測を行った。実験水に蛍光染料を用いた光分離によるバックライト射影画像につい

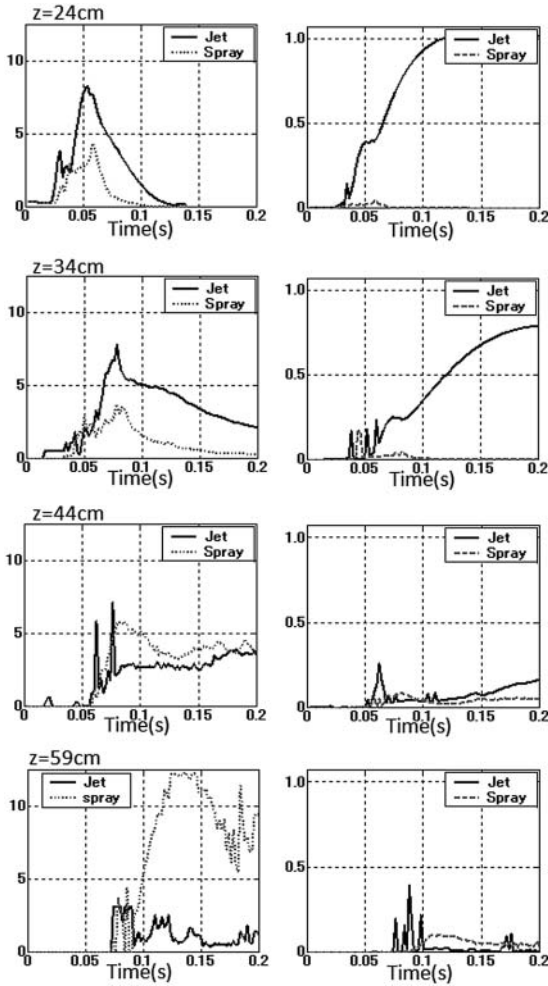


図-9 流体総エッジ長率 (左) と流体面積率 (右)

て、Level-Set法を基とした画像処理を行う流体計測手法は、これまで困難であった複雑な水面形状を持つ越波ジェット・飛沫の包括的な解析を可能にするものである。

同一の波浪条件にも係わらず僅かな擾乱の違いによって堤体衝突時のジェット突入形状が変化し、結果として同一高さにおけるFlip-throughジェットの水面形状が次のように異なることが明らかになった。(a) 碎波ジェットの先端部が波面の収束に相対して早く発達し、壁体と波面間にエアポケットが形成される場合、越波ジェット形成直後に発生する典型的なフィンガー形状の鉛直ジェット。(b) エアポケットを形成せずに波面の収束に伴う加速度によりジェットが噴出する場合、フィンガージェットに先行して発生する横断方向に結びついた帯形状のジェット。(a) はエアポケットの圧縮膨張過程と関連すると考えられ、越波生成初期においては (b) よりも高速に打ち上がり初期飛沫数も多い。一方、(b) は帯状に繋がったジェット先端が上昇するにつれ分断され、それに

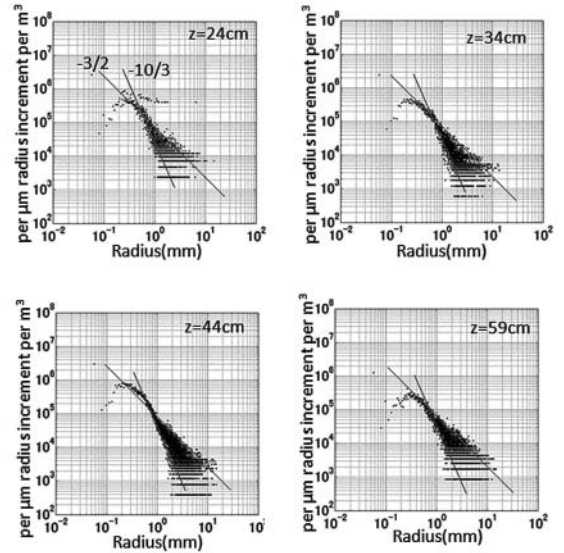


図-10 飛沫サイズスペクトル

伴い大量の飛沫が生成される。

フィンガージェットの波峰方向スケールと対応する分裂飛沫の分布の関係性について、相対的に低い計測点ではジェットと飛沫の分布に相関はあまり見られない。最もフィンガージェットの分裂が盛んになる位置ではジェットの卓越波数に対応して飛沫スペクトルピークが存在する。その後フィンガージェットの到達高さを超える計測点では、飛沫は背後のフィンガージェットのもつ波数に対応して上昇する。また、ジェットのタイプによらず発達した大スケールのフィンガー幅は約100mm程度であり、30-50mm間隔の小スケールフィンガーも重畳する。

ジェット上昇に伴い、ジェット先端部で分裂し生成する飛沫群が確認できた。流体エッジ長と流体面積率の変化から、上昇するにつれ発達するフィンガージェットと飛沫への分裂、また飛沫の更なる再分裂過程が数値的に確認できた。また、Flip-through過程において異なるタイプのジェットから異なる機構で発達・分裂を繰り返すにも拘らず、飛沫サイズスペクトルのピーク径は両タイプとも0.3mm程度であり、また計測地点の違いによるサイズスペクトル形状にも大きな差異を示さないことが明らかになった。

参考文献

- 渡部靖憲・石崎真一郎 (2008) : Flipthrough型越波飛沫のサイズスペクトル, 海岸工学論文集, 55, pp. 76-80.
- 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.
- Deane, G.B. and M.D. Stokes (2002): Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves, *Nature*, 418, pp. 839-844.