ジェット着水過程におけるフィンガージェットと飛沫のサイズ遷移

Scale Transitions of the Finger-Jets and Sprays Under Jet Splashing Process

北海道大学工学研究科	学生員	猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)
北海道大学工学研究科	正員	渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

砕波ジェットが着水すると着水点から更なるジェットが跳ね 上がると同時に空気中に飛沫を生成する.これらの飛沫は特 に高波浪時に大量に陸域へと輸送され沿岸域の安全性を阻 害すると同時に塩害をもたらす原因となる一方,それらの影響 予測を行う為に必要な砕波ジェット着水時に発生する飛沫量 やサイズスペクトル等については実験的計測が困難なことから, 殆ど解明されていない.これまでにジェットと空気とのせん断 力に起因した飛沫の生成(Lin & Reitz, 1998)や,ジェットの着 水に伴う気泡混入メカニズムに関する研究(Iafrati et al., 2004)はなされてきたものの,未だ砕波下の飛沫生成量や飛 沫サイズを予測するには至っていない.そこで猿渡・渡部 (2007)は,水塊ジェット着水後のジェット分裂過程に関する数 値計算結果を基にジェット体積率を予測するモデルの構築を 行った.

本研究はこれまで観察が困難であったジェットの分裂過程 の撮影を行い,水塊ジェット着水後のジェット分裂分散過程を 明らかにすると同時に,分裂ジェットの体積率や飛沫サイズの 時間変化について特徴化するものである.

2. ジェット分裂過程の測定法

2.1 実験装置

水理実験は、側面ガラス張りの全長75cm×幅50cm×高さ 30cmの水槽内で行った.図-1 に示すように、水槽上部に幅 22cmの貯水用ボックスを前方に傾けて設置し、ボックス前面 の仕切りを上方にスライドさせることによりシート状ジェットを水 槽内の静水面へと着水させた.初期ジェットの着水点から噴 出する二次ジェット形状の三次元化、即ちフィンガー・飛沫へ の分裂過程を観察した.初期ジェット形状の二次元性を確保 する為に、水槽内部に幅 18.5cmのアクリル側壁を設置し、三 次元性が強く表れる初期ジェット両端を除外した.本研究では 貯水ボックス内に溜める水量を 1500cc とし、初期ジェット着 水速度を 1.3m/s、初期ジェット厚を 3.0cm、着水時のジェットと 静水面との成す角を 40°とした.このとき、Weber 数 (We =



図-1 二次元ジェット発生装置.

 $\rho u^2 d/\sigma$) 並びに Fr oude 数 ($Fr = u/(gd)^2$) はそれぞれ We = 530, Fr = 2.4 である.

二次ジェットの分裂過程は水槽上方または側方に設置され た高感度デジタルビデオカメラによって撮影される(図-1 参 照).水槽及び貯水ボックス内の水には蛍光染料(ウラニン)が 混入されており,青色発光ダイオードを照射することにより流 体を発光させ,カメラのレンズ前面に装着された光学フィルタ ーにより蛍光波長の光のみを撮影した.上方からの撮影時に おいて発光ダイオードはアクリル壁の両側の静水位上 3~ 13cm に向かい合わせに設置されており,その光を強く受ける 二次ジェット流体は静水面以下の流体よりも強く発光する為, ジェット流体と静水位以下の流体とを識別することが可能とな る.このとき二次ジェット軌道内である静水位上 5cmの面にフ ォーカスを合わせた.また,側方からの撮影時には発光ダイオ ードをカメラ側のアクリル壁側から静水位上 3~13cmの範囲 にあるジェットを照らすように設置されており,カメラ側のアクリ



図-2 上方カメラにより撮影された典型的な二次ジェットの分裂過程.赤線は標準輝度の75%等値線.



図-3 検出された二次ジェット(白)とジェット体積率の定義 (2.2 節参照).

ル壁近傍のジェットが強く発光させた.

カメラの解像度は 260×348 ピクセル, 12bit グレースケール であり、シャッタースピードは 1/2000s, 撮影周波数は 40Hz で ある. 撮影範囲は上方からの撮影時は 10cm × 14cm (ジェット 進行方向×スパン方向),側方からの撮影時は 9cm×12cm (鉛直方向×ジェット進行方向)とし,上方からは着水点から ジェット進行方向に1~11cm,9~19cm,18~28cmの3地点, 側方からは着水点から-4~8cm,7~19cm の2地点からそれ ぞれ 30 回の撮影を行った.ジェット着水地点の静水面上に原 点をとり,ジェット進行方向にx軸,スパン方向にy軸,鉛直上 方に z 軸をとる.また LED ランプと電源を接続した電気回路 の一端をアクリル壁の外側に,もう一端を水槽水中に設置し, アクリル壁によりカットされた初期ジェットの片端がアクリル壁 外側に着水すると同時に電流が流れ点灯する LED ランプをト リガーとして用いた.LED ランプはジェットと同一画像内に撮 影され, LED の点灯時刻を初期ジェット着水時刻 t = 0s とし た.

2.2. 二次ジェットの検出

ガラス容器に溜めた平均二次ジェット厚と等しい2.3cmの水 層を上方から撮影したときの輝度を標準輝度とし,その75%を 閾値として上方から撮影された画像を二値化し,二次ジェット 流体と静水面下の流体とを分離した(図-2 参照).その際,水 面位置が低く発光ダイオードの光が十分照射されていない為 に発光強度の弱い二次ジェット背後の領域(例えば図-2,x= 1~4cm の領域) も二次ジェット流体とみなした.図-3 は標準 輝度をベースに二値化され検出された典型的な二次ジェット 流体を示す.先端にフィンガージェットを有する二次ジェット並 びに飛沫を検出可能であることを確認した.

3. 二次ジェット軌道

図-4は二次ジェットの発生発生直後及び再着水直前のジェ ットを側方から撮影したものである.二次ジェットはフィンガー の形成に代表される様なスパン方向の変動は顕著に表れる 一方,側方から見るとほぼ二次元的な形状をしており同一時 刻のジェット先端のフィンガーは同一高さに存在していた.ま た,図-5は後述する二次ジェット体積率分布の中央位置が通 過する平均的な軌道を示したものである.二次ジェットは発生 直後から再着水までの間,およそ水面上5±2cmに存在して おり,フォーカス面から大きく外れていないことを確認した.

4. ジェット分裂過程

図-2に水槽上方から撮影された典型的なジェット分裂過程 を示す.着水時の強いインパクトは,着水と同時に高速で噴 出し先端に小スケールのフィンガージェットを有する二次ジェ ットを発生させる.小スケールのフィンガーに働く強い表面張 力はジェット水面における不安定を誘発し,フィンガージェット を飛沫へと分裂させる(例えば図-2(*a*, *b*),図-4(*b*)の飛沫). よってフィンガー先端から分離することにより発生する飛沫の サイズはフィンガーサイズに規定される.また,表面張力の効 果により隣接するフィンガー同士を融合させようとする力が働く 為,フィンガーサイズは時間と共に増大する.それに伴いフィ ンガー先端から生成される飛沫スケールも増大していく.

着水前の初期ジェット形状がほぼ二次元的であるにも関わ らず,着水と同時にジェットは急速に三次元形状へと遷移する. これは初期ジェット着水時にジェットと静水面下の流体との間 に発生する強せん断力場がジェットスパン方向の微小変動を 急速に発達させる為である.

5. フィンガー間隔の遷移

撮影領域内 (スパン方向に 14cm) に確認されるフィンガ ー数を数えることにより,フィンガーの形成間隔の時間変化に ついて調べた.ここでフィンガーは二次ジェット本体と連結して いる,長さが1cm以上の凸型ジェット形状と定義した.図-6 に フィンガー間隔の平均値並びに標準偏差の時間変化を示す. 二次ジェット形成直後 (t ≅ 0.075s) においては薄い二次ジ ェット先端に小スケールのフィンガージェットが形成されている



図-4 真横から撮影された二次ジェット.(a)着水直後,着水点近傍.(b)再着水時,着水点から7~19cm地点.ここでは 手前のフィンガージェット(b,矢印)が他のジェットよりも先に再着水する為,ジェット形状が仮定から逸脱する.

平成19年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第64号



図-5 二次ジェット体積率分布中央の軌道.時刻は t=0, 0.025, 0.05, 0.075, 0.10, 0.125, 0.15, 0.175, 0.20, 0.225 [s] である.

為,フィンガーは小間隔で配列する.その後フィンガーの融合 によりフィンガーサイズが増大すると共に数が減少していく為, フィンガー間隔は時間的に増加する(t > 0.1s).

6. 飛沫サイズスペクトル

飛沫サイズを図-3 のように抽出されたジェット流体の二値化 画像から求めた飛沫の投影面積の円相当径として定義し、そ の時間変化について調べる.上方から撮影した 3 地点におい て同時刻に観察された飛沫サイズの確率密度分布を求め異 なる 3 時刻についてプロットした(図-7).ピーク飛沫サイズが 時間的に増加していくと共に、初期のピーク径以上の飛沫発 生確率が時間的に増加していくことが分かる.これらは前章で 示した飛沫の発生源であるフィンガージェットのサイズ、更に はフィンガーから分離して発生する飛沫のサイズが時間的に 増大することに伴うものである.

猿渡・渡部(2007)は、ジェット着水後の水面流れに関す る数値計算結果から、ある時刻における二次ジェットの分裂サ イズスペクトルが標準偏差σ,の正規対数分布により近似可 能であることを示した、本研究で得られた飛沫サイズスペクト ルもまた対数正規分布により近似可能である、本研究では時 間が進行するに従い新たに発生する飛沫のサイズが増大して いく為、飛沫サイズの確率密度分布の広がりσ,は徐々に増加 していく、

7. ジェット体積率分布

ここでは実験結果から二次ジェットの体積率分布について 統計的に調査する.2.2 節の方法で検出された二次ジェットか ら,次式により定義される任意の x 座標におけるジェット流体 体積率 α を求める (図-3 参照).

 $\alpha = \sum_{i} d_{i} / L,$

ここで *d_i*(*i* = 1, 2, 3,…) は任意の *x*座標における *i* 番目の ジェット流体投影長さであり, *L* はスパン方向の撮影領域長さ である.図-8(*a*)に上式により求められた平均ジェット体積率 分布の時間変化を示す.

二次ジェット発生直後の時刻 (t < 0.075s) では二次ジェット背 後がフォーカス面まで到達しておらず二次ジェット形状を正確 に抽出できていない為,また,時刻t>0.175s においてはフィ ンガーの背後から徐々に二次ジェットの再着水が開始される 為,二次ジェット先端部の体積率分布のみが求められている. 二次ジェット形状が本体から先端にかけてフィンガー更には 飛沫へと遷移していくことにより,体積率分布は減少していく. 更に二次ジェットは全体が前方へと進行しながら分裂を繰り返 していくことから,分布位置が時間と共にx軸方向に移動して



図-6 フィンガー間隔の時間変化.エラーバーは標準偏 差.









図-7: ジェット体積率の時間変化.着水からの経過時間 は左から t = 0.025, 0.05, 0.075, 0.10, 0.125, 0.15, 0.175, 0.20, 0.225 [s]. (a) 実験結果から求めた平均ジ ェット体積率,及び(b) モデルによる再現結果.

いる.二次ジェット体積率の分布位置の移動速度は,二次ジェットの初期速度と同オーダーとなった.

次に猿渡・渡部(2007) により提案された連続式をベースとしたジェット分裂分散モデルを本実験へと適用し,その再現可能性を検討する.本モデルはジェットの初速度及び厚さを入力することによりジェット体積率分布の時間変化を平均 μ_s ,標準偏差 σ_s の正規分布の分布関数の形状として予測するものである.ここで入力値は側方から撮影された画像から読み取ったジェットの初期条件の平均,即ち,二次ジェット初速度1.25m/s,二次ジェット厚2.3cmとした.図-8 (b) が実験結果と対応するモデルによる予測結果である.体積率分布の中央位置 μ_s の時間変化や,分布の広がり σ_s が再現されていることが確認できる.ただし,t = 0.175s以降の二次ジェットが再着水する時刻においては,二次ジェットがモデルで仮定した形状(シート状のジェット先端がフィンガージェットへの分裂)から逸脱する.

8. まとめ

ジェット着水後に発生する二次ジェットの分裂過程を撮影した.ほぼ二次元形状の初期ジェット着水時のインパクトにより 二次ジェットが発生すると共にその内部に働く強いせん断力 によりスパン方向の微小変動が増幅され,フィンガージェット が急速に発達した.

ジェット着水直後の小スケールのフィンガーは表面張力の 効果により隣接するフィンガーと融合し,配列間隔が時間的に 増大した.また,フィンガージェット水面において発生する表 面張力不安定によりフィンガーに応じたスケールの液滴が先 端から生成された.

フィンガージェットから分離することにより発生する飛沫のサ イズ分布の時間変化を求めた.初期ジェット着水直後は小ス ケールの飛沫が大量に生成されるが,時間的にフィンガース ケールが増大するのに伴い発生する飛沫のサイズ分布も増 加していくことが明らかとなった.

ジェット体積率分布の時間変化を求めた.ジェットの本体か ら先端にかけて徐々に低下するジェット体積率分布は,時間 的にジェット進行方向に移動した.著者らが既に提案したジェ ット体積率分布を予測する為の分裂分散モデルの適用性に ついて調べた.ジェットが再着水するまでは任意の時刻にお ける体積率分布の特徴を比較的良く再現可能であることが確 認された.

参考文献

- 1) 猿渡亜由未,渡部靖憲: "自由水面をもつジェットの分 裂分散モデル",海岸工学論文集,vol. 54,pp. 66-70, 2007.
- Iafrati, A. et al.: "Air entrainment induced by the impact of a planar translating jet on a flat free surface", 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2004.
- Lin, S. P., Reitz, R. D.: "Drop and spray formation from a liquid jet", Annu. Rev. Fluid Mech., vol. 30, pp. 85-105, 1998.