

平面ジェット下に発生する水面の不安定挙動と気泡生成メカニズム

Unstable surface behaviors and bubble formation mechanism under steady planar jets

北海道大学大学院准教授工学研究院 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)
北海道大学大学院工学研究科 ○ 学生員 牧田拓也 (Takuya Makita)

1. はじめに

海洋中に混入する気泡数は、Deane and Stokes[1]による半統計的、半経験に気泡径分布を与えるモデルによって見積もられてきた。その一方で、Kiger and Duncan[2]は、砕波直後、波峰方向に一定の間隔で気泡が形成される過程を可視化し、そのメカニズムを議論している。こうした流体力学的な気液界面の不安定を経由した気泡生成機構の解明は、砕波形態、規模の異なる任意の砕波に伴う時々刻々の気泡ソースのモデル化を可能とするものであり、任意の海象下への応用が期待される。

一方、一般的な気泡の生成機構について、従来円柱状ノズルジェットの着水に伴う気泡混入の研究が行われてきた。しかしながら、この実験モデルではジェット円周方向に重畳する表面張力波の影響で混入過程が複雑になるだけでなく、砕波ジェットのモデルとして適当でないことが指摘されている[2]。渡部ら[3]は平面ジェット下の気泡生成を観察する新たな実験モデルを提案し、ジェット水と受け側静水間に発生するキャビティ変位の統計的特徴を明らかにした一方、ジェット水面の毛管変位によって着水前の着水条件が制限されるため現実的な(巻き波に相当する)ジェット長さに対する計測が行われていない。

本研究は、渡部ら[3]のモデルを改良し、鉛直ガラス面を流下する安定した平面定常ジェットの静水面への着水による気泡の生成を観察する新たな実験モデルを提案し、その生成発達過程に対する高速高解像可視化実験によって微視的メカニズムの解明を目指すものである。

2. 実験方法

本実験装置は、貯留水槽、落水水槽、着水水槽、越流槽、水中ポンプ水槽からなり、図-1(上)の様にそれぞれの水槽がパイプで連結されている。水中ポンプから貯留水槽へ送水され貯留された水は高さ h のレベルに設置された排水ドレーンによって一定の水位が保たれる。貯留水槽下部と連結された落水水槽に貯留された水は、底部に斜め 45 度の角度をもって設置され楔状先端をもつ導流板と着水水槽のガラス壁面の間から平面状のジェットとして流下し、着水水槽内の水面に着水する。ガラス面上の流体の流下を通して水面は安定しており、渡部ら[3]の実験で問題となっていた平面ジェット側方の毛管収縮によるジェットのシート厚の変動を回避し、任意のジェット長 h_j に対する気泡生成を実現する。落水水槽から流入する流量と同一の流量の水が着水水槽から排水され、着水水槽内では一定の水位が保たれる。排水された水は越流槽と連結されたパイプを通して水中ポンプ

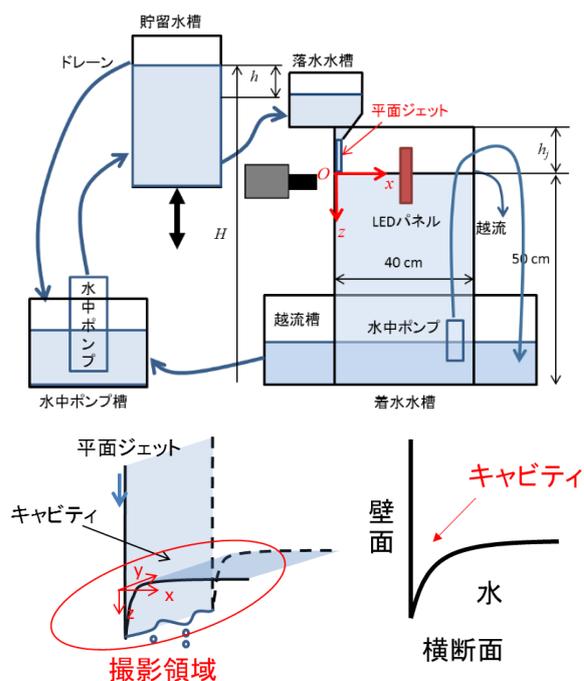


図-1 実験装置

槽へと流れる。

貯留水槽内部に 100×100 mm の赤色 LED バックライトパネルが静水面以下をカバーする様に設置され、LEDパネルからの平面光が平面ジェットの着水点の下を通過する様、着水水槽側面に向けて照射する。平面ジェット下ではジェット水面と着水水槽内水面の交線上にキャビティが発生し(図-1 下)、バックライトで照射されたキャビティの射影を高速カメラ(4000fps)によって撮影することができる。平面ジェット下のスパン方向(y軸方向)約 40×40 mm の Field-Of-View (FOV) のキャビティが 640×640 pixel の画像として撮影、保存され、較正画像を基に線形変換された解像度 0.05mm/pixel の画像に対して解析が行われる。キャビティ先端の界面先端位置は、画像濃度に対するレベルセット逐次計算[3]により抽出し、界面の時空間的変動の特徴を分析する。

3. 実験結果

(1) キャビティの発達と気泡形成

図-2は、典型的なキャビティ下の界面射影の連続画像であり、キャビティの発達、分断と気泡の生成に至る発達過程を表す。キャビティは、その延長方向(y軸)に幅広のシート状の形状をもち、鉛直下向きに伸長した後、分断され、独立した気泡群として下向きに移流される。

この時、複数個の気泡が同時に発生し、キャビティ延長方向(y 軸)にある一定間隔で配列する組織構造を伴うことが観察された。さらにこれら個々の気泡は例外なく y 軸を回転軸とする回転運動を継続することが明らかになった。図-3 は、それぞれウェーバー数の異なる条件下における典型的な水面下の界面射影画像である。ウェーバー数は以下の式で表される。

$$W_e = \frac{\rho L V^2}{\sigma}$$

ここで、代表速度をジェット着水速度、代表長さをキャビティ幅とし、 σ は表面張力係数である。ウェーバー数の小さいケース(左)では、図-2 で観察されるようなシート状の大規模なキャビティの発達を確認されず、微小気泡のみが間欠的に発生する。またウェーバー数の大きいケース(右)のエアレーションは、同時に多数のキャビティの分断と大規模気泡群の発生によって特徴づけることができる。

図-4 は、異なるウェーバー数に対する単位時間あたりに発生する気泡数(左)、平均気泡径(右)を表す。気泡数、気泡径は共にウェーバー数の増加に伴って増大する傾向にあり、このうち最もウェーバー数の低い条件($W_e = 85.36$)以下のウェーバー数を持つケースではキャビティの伸長や変動のみが観察され、キャビティの気泡への分断は確認されなかった。したがって、このウェーバー数は気泡混入が生じるか否かが決定される限界ウェーバー数であることが考えられ、気泡混入に対して有意なパラメータの1つである。

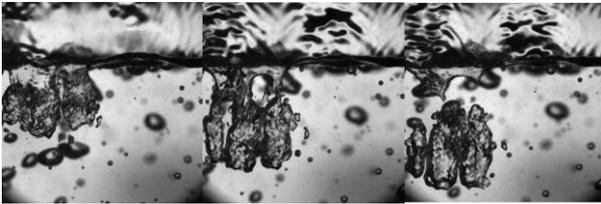


図-2 キャビティの発達

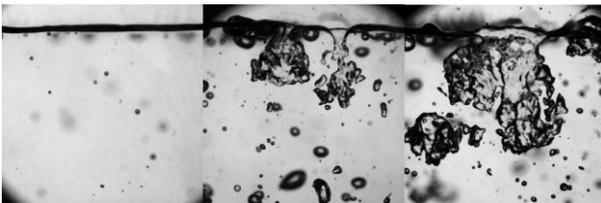


図-3 ジェット下のキャビティと気泡
(左から $W_e = 85.36, W_e = 196.49, W_e = 317.46$)

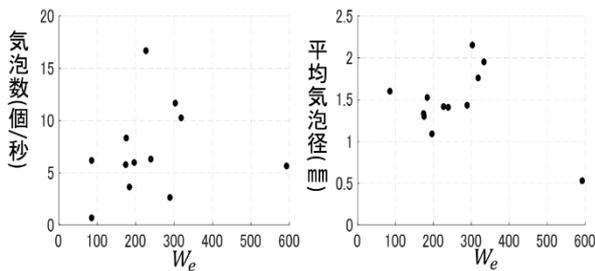


図-4 単位時間気泡数分布(左)平均気泡径分布(右)

(2)気泡混入メカニズム

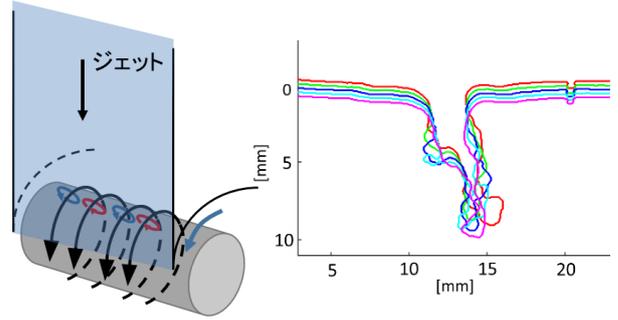


図-5 (左)ジェット下の水平渦(黒), 交互交代渦(赤青), (右)キャビティ形状の時間変化

ジェットの着水直下において複数の正負の渦度が y 軸方向に配列する交互交代渦列が一对の水平渦の円周方向に巻きつく様に組織され、水平渦と共に回転していると考えられる(図-5左)。即ち、図-2において観察されたキャビティの発達は、この水平渦に巻きつく交互交代渦内の低圧部内にキャビティ先端の水面が取り込まれた状態で水平渦と共に回転するため、交互交代渦の間隔をもって y 軸方向に配列し、回転運動を伴う気泡群が発生するものである。ジェットの着水条件によってその直下の渦の規模、強度が敏感に変化し、結果としてキャビティ発生間隔、伸長長さの変化に起因して気泡数、サイズ分布に影響を与えることを示唆する。また、ジェット下に発生する渦の他、比較的小さなスケールではスパン方向への表面張力波の伝播がキャビティの変動に対して支配的であると考える。図-5(右)はキャビティ先端形状変化 1/2000 秒ごとに表したものである。渦により時間の経過につれキャビティが伸長する一方で、y 方向の表面張力波の往来によるキャビティ内部の微小な変動が存在する。この左右から伝播する表面張力波による変動が重畳する箇所では界面が閉じ、気泡へと分断されると考え今後も調査を行う。

4. おわりに

平面ジェットの静水への着水に伴うエアレーション過程を観察するための実験モデルを提案し、高速高解像可視化実験によりキャビティの発生、発達、分断によるシート状気泡生成過程を調査した。ジェット下の気泡は、大規模なスケールにおいては、キャビティ下に発生する水平渦に巻き付き回転する交互交代渦内への水面の取り込みによるキャビティの連行、小規模なスケールにおいてはスパン方向を往来する表面張力波の変動に起因する。それ故ジェット着水条件によって気泡数、サイズ分布等エアレーションの特徴が決定される。

5. 参考文献

- [1] G B. Deane, M. D Stokes.: Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves, Nature 418, 839-844, 2002
- [2] K T. Kiger, J H. Duncan: Air-Entrainment Mechanisms in Plunging Jets and Breaking Waves. Annual Review of Fluid Mechanics 44, 563-596 2012.
- [3] 渡部靖憲・牧田拓也・小柳津遥陽: 平面ジェット下に発生するキャビティの不安定挙動と気泡形成, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71(2), 37-42 2015.