

# キャビテーション気泡で可視化された円形噴流中の渦構造

## Vortical Structures Visualized by Cavitation Bubbles in a Circular Jet

○佐藤庄平（北大工），早川道雄（北大工），藤川重雄（北大工）

Shohei SATO, Michio HAYAKAWA and Shigeo FUJIKAWA  
Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628

A visual study was made on vortical structures in a cavitating, submerged water jet which is discharged from a circular nozzle into still water. Owing to the close relationship between vortices and low pressure regions, large-scale axisymmetrical vortices and smaller-scale longitudinal vortices(i.e., ribs) in the high Reynolds-number circular jet were visualized as localized lumps of a number of small cavitation bubbles.

### 1. はじめに

液体中においては、圧力がその液体の温度における飽和蒸気圧以下になると、いわゆるキャビテーション現象によって気泡が発生する。通常、気泡の発生は、ベンチュリ管内や翼面上では流れの加速領域で起こるのに対し、噴流や後流中では渦の形成と密接に関係している。これは、一般に渦内部の圧力が周囲流体の圧力よりも著しく低下することによる。このため、空気あるいは水の単相乱流中の渦構造を同定する際にも、局所的低圧領域がよく用いられている<sup>1), 2)</sup>。また、気泡と渦の関係とは別に、液体中に局在する小気泡はその内部と周囲液体との圧力差に応じて受動的に振舞うこと、およびその固有振動数が高いこと（例えば、直径1mmの球形気泡の場合、3kHz程度）を利用して、測定が困難な液体乱流中の静圧変動を気泡径の時間変化から算定することも行われている<sup>3)</sup>。したがって、キャビテーション気泡の挙動を観測することにより、液体流れ中の渦構造について、少なくとも定性的な情報を得ることが可能である。

著者らは最近、水中ウォータージェット技術の問題に関連して、数気圧に加圧した水を円形ノズルから静止水中に噴射させたときに発生するキャビテーション気泡の特性を調べている。本報告では、その実験の過程で気泡の写真撮影を通して観察された、高レイノルズ数（約10<sup>5</sup>）噴流中の渦構造について述べる。

### 2. 実験方法

図1に実験装置の概略図を示す。加圧水槽①は断面積0.1m<sup>2</sup>、高さ0.4mのステンレス鋼製タンクで、圧縮機③により内部を1.0MPa（絶対圧）程度まで加圧することができる。一方、貯水槽②は長さ0.6m、幅0.4m、高さ0.5mの透明アクリル樹脂製で、真空ポンプ⑥により約0.05MPaまで減圧可能な構造になっている。

2つの水槽をつなぐ連結管（内径15mm）に電磁弁⑦が設置されており、これを開くことにより、加圧された水が連結管の右端にあるオリフィス⑨（口径5mm）から静止水中に噴射される。流れ場の観察は2台のカメラ⑫で行われた。1台は噴流を側面から、他方は正面から撮影するものである。電磁弁を始動するための電気信号は同時にパルス回路⑩に投入される。これに遅延時間を与えて発生させたパルスによって、写真撮影用光源⑪が発光する。光源の閃光時間は約2μsである。なお、電磁弁の開き始めから開放状態に達するまでに要する時間は約15msである。

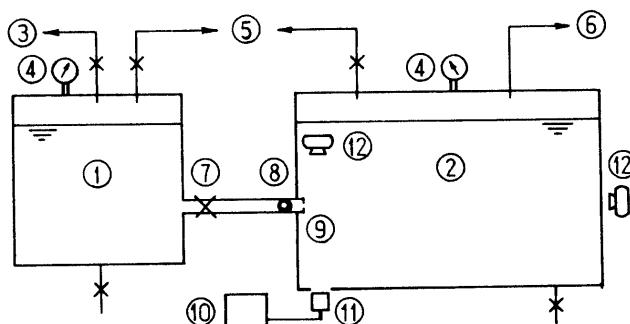
実験は、加圧水槽内の圧力 $p_1 = 0.5 \text{ MPa} \sim 0.8 \text{ MPa}$ 、貯水槽内の圧力 $p_2 = 0.10 \text{ MPa}$ （大気圧）～0.06MPaの範囲で行った。このとき、ノズル出口断面平均流速は $V_j = 17 \text{ m/s} \sim 23 \text{ m/s}$ 、 $V_j$ とオリフィス径( $D$ )に基づくレイノルズ数は $Re \cong (0.8 \sim 1.1) \times 10^5$ であった。

### 3. 結果

#### 3.1 出発渦と渦輪状気泡

電磁弁を開いた直後の流れはいわゆる出発噴流の状態であるため、噴流の先端部にリング状の出発渦が形成される。貯水槽内の圧力( $p_2$ )を大気圧に開放して、噴射開始直後の流れを観察した結果、加圧水槽内圧力( $p_1$ )を約0.4MPa以上にしたとき、噴流中にキャビテーション気泡の発生が認められた。図2は $p_1 = 0.6 \text{ MPa}$ のときに撮影された写真の例である。同図に見られるように、噴射直後に発生する気泡の多くは軸対称的に分布し輪状を呈する。これは、気泡発生が噴流出発渦の作り出すリング状の低圧領域で起こることを示している。

発生した渦輪状の気泡と出発渦の運動との対応を見るために、ノズル内の水に色素を混入して出発渦を可視化し、その流れ方向位置の時間変化を調べた。それを渦輪状気泡の位置の変化と比較した結果、両者はほぼ一致することが確認された。色素は下流に進むにつれて急速に拡散し、出発渦の位置を識別できたのは $x/D \cong 6$ までであったのに対し、渦輪状気泡は $x/D = 10$ よりもさら



①Water tank ②Water reservoir ③Compressor  
④Pressure gauge ⑤Water supply ⑥Vacuum pump  
⑦Solenoidal valve ⑧Pressure transducer ⑨Nozzle  
⑩Pulse circuit ⑪Flash light ⑫Camera

Fig.1 Experimental arrangement; not in scale.

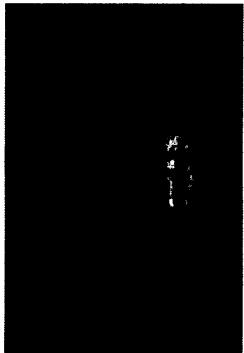


Fig.2 Side view of a bubble ring.

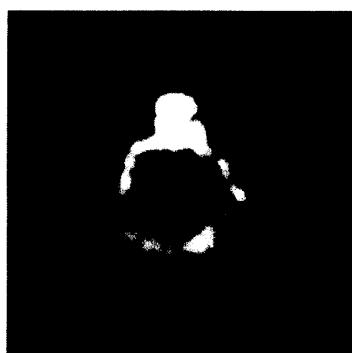


Fig.3 End view of a bubble ring.

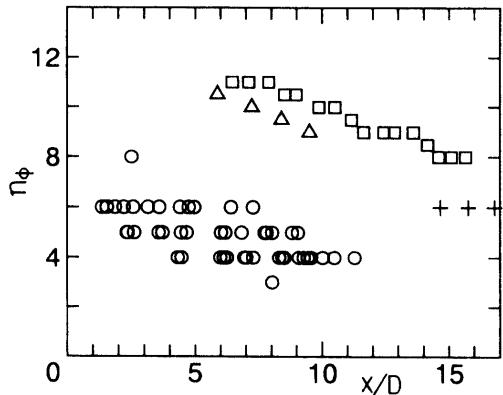


Fig.4 Number of azimuthal waves of bubble rings  
 ( $\circ$  :  $Re \approx 10^5$ ), compared with that of a vortex ring<sup>4)</sup>  
 (+ :  $Re = 1400$ ,  $\square$  :  $Re = 2600$ ,  $\triangle$  :  $Re = 4600$ ).

に下流まで明瞭に認められた。このことからも、気泡の利用が渦の挙動を知る上で有効であることがわかる。

一般に、単独渦輪は並進運動する過程で周方向に波状変形する。図3は渦輪状気泡の正面写真的例である。気泡の分布が周方向に変形している様子が見られる。図4は、同様の写真から気泡が半径方向に突き出た部分の個数を数え、それを(波状変形した渦)周方向の波の数  $n_\phi$  とみなして、 $x$  に対してプロットしたものである。比較のため、内藤ら<sup>4)</sup>による空気中の渦輪の結果 ( $Re \sim 10^3$ ) も図中に記入してある。同図から、 $n_\phi$  はレイノルズ数の増加とともに減少する傾向にあることがわかる。

### 3.2 定常噴流中の渦構造

オリフィスあるいは縮流ノズルから流出する円形噴流では、ポテンシャルコア領域に噴流固有の軸対称的渦構造が準周期的に形成される。図5(a, b)は噴流がほぼ定常状態に達したのちに撮影されたものである。前節で述べた渦輪状気泡と類似の気泡塊が準周期的に流下している様子が明瞭に認められる。これらの写真から、 $x/D = 4$  前後の位置で気泡塊の流れ方向間隔( $\lambda$ )を測り、気泡塊の移動速度を  $V_c = (0.5 \sim 0.6) V_j$  と仮定して周波数  $f (= V_c / \lambda)$  に換算した結果、 $f D / V_j = 0.4 \sim 0.6$  であった。この値は単相流において知られている噴流卓越ストロハル数 ( $0.3 \sim 0.5$ )<sup>5)</sup> よりもやや高めであるが、これが気泡の有無によって現れた有意な差異であるか否かは、本実験における計測の不確かさとサンプル数の少なさのために、今のところ明らかではない。

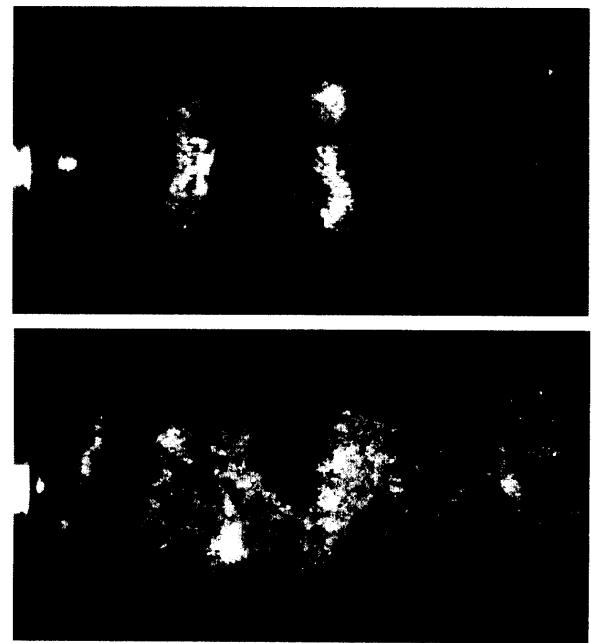


Fig.5 Two examples of bubble distribution in later stages of jet development.

図 5(b)にも見られるように、隣り合う大きな気泡塊の間に、ほぼ流れ方向に連なった多数の筋状の気泡群が頻繁に観察された。これは、いわゆるリブ構造(縦渦または2次渦)の内部に気泡が発生するためと考えられる。リブ構造は軸対称渦に比べてスケールが小さく不規則に形成されるため、 $Re=10^5$ 程度の高いレイノルズ数の場合には、色素や煙によってリブ構造を明瞭に観察することは通常困難である。本実験において気泡によって可視化されたことは、スケールは小さいものの、リブ構造が気泡の発生条件である低圧(飽和蒸気圧)をもたらすに十分な強い渦度を有していることを示唆している。なお、このような縦渦によるキャビテーション気泡の発生は、2次元フェンス下流などでも観測されている<sup>6)</sup>。

#### 4. まとめ

キャビテーションを伴う円形水噴流を簡便な写真撮影法によって観察した。本実験の流れ場においては、キャビテーション発生をもたらす条件が、主に渦構造内部の低圧域で実現された。その結果、噴射直後に現れる出発渦とその周方向への変形の様子、定常状態に達したのちにおける円形噴流固有の軸対称渦およびリブ構造の存在が、いずれも局所的に発生したキャビテーション気泡群によって可視化された。

引用文献

- 1) S.K.Robinson, S.J.Kline and P.R.Spalart: In Near-Wall Turbulence (eds. S.J.Kline & N.H.Afgan, Hemisphere Publ. Co., 1990) 218-247.
  - 2) K.Toyoda, T.Okamoto, and Y.Shirahama: Fluid Mechanics and Its Application **21** (eds. J.P.Bonnet & M.N.Glauser, Kluwer Acad. Publ., 1993) 125-136.
  - 3) A.La Porta et al., : Phys. Fluids **12** (2000) 1485-96.
  - 4) 内藤 隆, 今井伸治, 山田日出夫: 第28回乱流シンポジウム講演論文集(1996) 91-92.
  - 5) C.-M.Ho and P.Huerre: Ann. Rev. Fluid Mech. **16** (1984) 365-424.
  - 6) T.J.O'Hern: J. Fluid Mech. **215** (1990) 365-391.