30 画像の積層化立体表示による高速 水中水噴流の非定常挙動の解明

東北大・流体研 祖山 均[○], 井小萩 利明, 大場 利三郎

A Study of Unsteady Behavior on High-Speed Submerged Water Jets by Stereoscopic Stacking Display of Digital Images

Hitoshi SOYAMA*, Toshiaki IKOHAGI* and Risaburo OBA*

Recently, submerged water-jets are very often applied for cutting, peening and cleaning. In such a jet-working-capacity, the shedding of cavitation clouds and the vortex cavitation around the jets are the most important factor. In order to clarify the mechanism of the shedding around the jets, we systematically observe the aspects of the jets, by means of a highspeed-video-camera, whose maximum framing rate is 40500 per second, by using a laser-light-sheets. And the digital images taken by the video camera are stacked to a stereoscopic display to examine the jets behavior changing with time. The cavitation clouds and the vortex cavitation are stereoscopically displayed by the digital image-processing-technique.

1. ま え が き

近年, 高速水中水噴流(以下, 単に噴流という)は, ピーニング加工や洗浄に広く用いられており, その加工能力は噴流まわりの高壊食性キャビテーション気泡雲や渦キャビテーションに強く依存することが明らかにされている^{(1)~(3)}. よって, 噴流加工の最適条件を確定するためには, 噴流構造の解明が必要不可欠であるが, 噴流は高速で変動し, また, 濃密なキャビテーション気泡(以下, 単に気泡という)を伴うために観測がやや困難であり, その非定常性については未知なる点が多く残されている. そこで, 従来, 流れパターンの構造解明に用いられているレーザシート光(以下, 単にLLSという)を用いて断面を可視化撮影して, 流れ構造を立体再構成するデジタル画像処理⁽⁴⁾を高速で変動するキャビテーションを伴う噴流へ応用して, 噴流構造の解明を試みる.

本報では, 噴流の非定常挙動の解明を目的として, LLSを用いて噴流まわりの気泡による可視化噴流断面をハイスピードビデオカメラで撮影し, デジタル画像処理により画像の積層化立体表示を試みる.

2. 実験装置および方法

実験には, 図1に示すような極力ポンプなどの変動圧力を回避して, 加圧タンク①(最大容量 20ℓ)に貯留された試料水を, 窒素ボンベ②(最大圧力 14.7 MPa)から高圧ホース③により導入された高圧窒素により加圧して, 高圧ホース④(内径 6mm)を通してノズル⑦から水槽⑧に噴射する装置を使用している. なお, 噴流の吐出し圧力 P_1 は, ノズル固定用アダプタに取り付けた圧力変換器⑥により測定している. ノズル形状は, 激しいキャビテーション気泡雲を放出するノズル出口部にホーンを取

* Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai.

り付けたいわゆるホーンノズル^{(1)~(3)}としている。なお、ノズルのスロート部は、幅 $D=1\text{mm}$ 、長さ $\ell=4\text{mm}$ である。なお、ノズル出口中心を原点 O とし、噴流方向に x 軸、鉛直方向に y 軸、 x - y 面と垂直に z 軸を取っている。

高速に変動しているキャビテーションを伴う噴流を詳細に観察するために、アルゴンイオンレーザー (Spectra-Physics 製, Head:2017-04s, 管:0026-0006, 電源:2550, マルチモードで使用, 最大出力: 4W) を光源とした LLS (日本レーザー製, SLS-01, 厚さ 1mm で使用) を入射して、気泡により噴流断面を可視化して、ハイスピードビデオカメラ (コダック製, コダックエクタプロモーションアナライザー HS4540, 最高記録速度:40500 コマ/s, 最高解像度:256×256×8bits) により撮影している。なお、図 2 に示すようにハイスピードビデオカメラで撮影した画像データは、パーソナルコンピュータ (NEC 製, PC9821Ap) 用の専用ボード、ネットワークを介して、ワークステーションに転送し、これを画像処理してキャビテーションの発生領域などを求めている。また、2 次元的な各画像を経過時刻順に積層化し、平面と時間軸から構成する立体表示には、流体科学研究所のスーパーコンピュータ (CRAY-YMP) システムに搭載されている Multi Purpose Graphic System (以下, MPGS という) を使用している。

3. 実験結果

まず、噴流の流れ方向の挙動を把握するために、図 3 には、LLS を噴流軸を通るように入射して、ハイスピードビデオカメラを用いて 18000 コマ/s で撮影し、1 コマおきに抜き出した噴流の様相を示す。LLS を上方から入射しているため、図中では、噴流まわりの気泡により噴流の上側界面が可視化されており、ノズル吐出し部から $x/D=50 \sim 60$ の辺りまで気泡が発達し、気泡雲が周期的に放出⁽²⁾されている様相が見て取れる。また、注目すべきことに、壊食試験結果から $P_1=10\text{MPa}$ の時に壊食率が極大となる第 2 ピーク点^{(1),(3)} の $x/D \cong 40$ で、噴流界面の辺りに渦キャビテーションの断面と見られる白いスポットが認められ、噴流軸まわりの円周方向に渦コアを持つ渦キャビ

Fig. 1 Experimental set-up

(Cips: Computer Center Image Processing System)

Fig. 2 Image processing system

テーションが、 $x/D \cong 40$ で発達・崩壊する事実を示唆している。特に、渦キャビテーションの近傍を気泡雲が通過する時に、渦キャビテーションの太さ d が大となるので、気泡雲まわりでは圧力が低下している可能性⁽⁵⁾がある。

噴流まわりの気泡雲や渦キャビテーションを詳細に観察するために、図4には、渦キャビテーションが顕著に発生している $x/D = 40$ の位置で、噴流上方から噴流軸に直交して *LLS* を入射し、ノズル斜め後方にハイスピードビデオカメラを設置して 40500 コマ/s で撮影し、各時刻毎の画像を時間 t 軸方向に積層化し、*MPGS* により等濃度値面を作成し、それを上 (Top v. で示す) と横 (Side v. で示す) から見た様相を示す。噴流が濃密な気泡を伴っているために、*LLS* が噴流断面を完全には通過できないので、図4では噴流上側界面近傍のみを示している。図より、気泡雲が周期的に発達・収縮を繰り返しており、その周波数が約 600Hz であることが見て取れる。また、 $t \cong 16\text{ms}$ において、気泡雲の界面から離れて渦キャビテーションが存在している。これを拡大して図5に示す。図5では、 y - z 平面と t 軸からなる3次元空間において構成した等濃度値面を気泡雲と渦キャビテーションの位置が分かるように斜めから見ている。図より、渦キャビテーションが気泡雲の周方向に渦コアを持つ形で発達し、崩壊している。また、この渦キャビテーションは、流れ方向に対して傾いて

Fig. 3 Jet behavior changing with time ($P_1=10\text{MPa}$, 18000frames/s)

Fig. 4 Stereoscopic stacking display from the cross sectional view of the jet by means of *MPGS* ($P_1=10\text{MPa}$, 40500frames/s)

おり、かつ、U 字形をしていることから、2 次元翼形で見られる高壊食性 U 字形渦キャビテーション⁽⁶⁾に類似していると言えよう。

次に、渦キャビテーションの発達・崩壊について詳しく調べてみるために、図 6 には、上記の立体等濃度値面を t 軸と平行な渦キャビテーションを横切る断面の等濃度図を示す。図より、渦キャビテーションの最大太さ d_{max} が 1.8mm で、 d_{max} から崩壊までの時間 $t_v = 0.48\text{ms}$ である。渦コアに渦の太さと同程度の単一気泡を仮定すると、Rayleigh の式⁽⁷⁾から、

$$t_v = 0.91468 \frac{d_{max}}{2} \sqrt{\frac{\rho}{p_{\infty}}}$$

が成り立つ。ここで、 ρ は試料水の密度、 p_{∞} は静圧である。そこで、 p_{∞} を概算してみると、約 3kPa となるので、渦キャビテーションの渦コア近傍では飽和蒸気圧と同オーダーまで静圧が低下している。これは、気泡が存在する事実からもその妥当性が裏付けられよう。

4. あとがき

高速水中水噴流の挙動を、画像の積層化立体表示により詳細に観察した結果、気泡雲の周期的な発達・収縮および渦キャビテーションが可視化でき、気泡雲と渦キャビテーションが同時に発達・崩壊することから、噴流まわりに高・低の圧力波が存在する可能性が示唆された。また、画像処理による渦キャビテーションの大きさおよびその発達・崩壊時間の計測から、渦キャビテーションの渦コア近傍は飽和蒸気圧と同オーダーであることが分かった。

参 考 文 献

- (1) 山内・祖山・安達・佐藤・進藤・大場・山部・大島, 機論, 59B-557 (1993), 16.
- (2) 祖山・山内・安達・佐藤・進藤・大場, 機論, 59B-562 (1993), 1919.
- (3) 祖山・山内・佐藤・井小萩・大場・大島, 機論, 59B-568 (1993), 3714.
- (4) 高曾・福井・内野・速水, 可視化情報, 12-S1 (1992), 59.
- (5) 山内・祖山・佐藤・大場, 機講論, 930-49 (1993), 223.
- (6) 伊藤・大場・祖山・緒方・岡村・須藤・池田, 機論, 54B-506(1988), 2727.
- (7) Rayleigh, L., Phil. Mag. S.6, 34-200 (1917), 94.

Fig. 5 Vortex cavitation around the clouds visualized by MPGS ($P_1=10\text{MPa}$, 40500frames/s)

Fig. 6 Cross section of the vortex cavitation visualized by MPGS ($P_1=10\text{MPa}$, 40500frames/s)