G050073

円筒オリフィス内キャビテーションの過渡流れ特性*

谷川 純一^{*1}, 杉本 康弘^{*2}, 佐藤 恵一^{*2}

Transient Flow Characteristics of Cavitation in Cylindrical Orifice

Junichi TANIKAWA^{*1}, Yasuhiro SUGIMOTO^{*2} and Keiichi SATO^{*2}^{*1} Kanazawa Institute of Technology Dept. of Mechanical Engineering
Ohgigaoka 7-1, Nonoichi, Ishikawa, 921-8501 Japan

Cavitation inception and desinent behaviors in a cylindrical orifice under transient flow condition are observed using a high-speed video camera. Pressurized sample water with some conditions of air content is accelerated or decelerated by opening or closing of solenoid valve. Pressures upstream and downstream of test section, and the flow rate are measured simultaneously with high-speed video observation. The test orifice is made of transparent acrylic resin. The orifice has nozzle diameter of 1.6mm and throat length in 6mm without inlet roundness. As a result from observation, the time delay of cavitation inception becomes shorter with the increase in upstream pressure in the accelerated flow and longer with the decrease in air content. Growth rate of cavitation also becomes higher with the increase in upstream pressure. For the decelerating flow, cavitation desinence is delayed with the increase in upstream pressure.

Key Words : Cavitation, Orifice, Transient Flow, Cavitation Inception, Cavitation Desinence

1. 緒 言

プラント配管系における減圧機構として可動部がなく単純な構造をもつ円筒オリフィスがよく用いられる。その流動状態は、動作開始および停止時に過渡的な非定常流動状態となる。また、自動車などの緩衝装置内においても作動流体がピストンの小孔（オリフィス）を通り移動する際の圧力損失が利用されている。このようなオリフィス内では急速な液体流れの変動が生じている。さらに、絞り流路においては急速な液体の加速流れが生じ、キャビテーションの発生に伴い壊食や騒音などが引き起こされている。特に自動車のような身近な状況では、商品の耐久性・信頼性や騒音性など使用環境に対して考慮する必要がある。さらにはキャビテーション発生による圧力損失の変化も予測され、機器の性能設計において、キャビテーション発生状況の把握は必要不可欠である。

上記のような円筒オリフィスにおいては、キャビテーション初生はノズル内部で発生することが多く、キャビテーション状態はキャビテーション数と空気含有量の変化に対して敏感である⁽¹⁾⁽²⁾。一方、水中ウォータジェットなどのノズル下流においては、せん断層⁽³⁾や出流渦内⁽⁴⁾にキャビテーションの発生が確認されており、ノズルまわりの渦形成との関連付けは興味深い問題である。また過渡的な流れにおいて、キャビテーションのヒステリシス現象などが示されており⁽⁵⁾、急激な加速時にはキャビテーション初生遅れ、減速時にはウォータハンマーや急激なキャビテーション崩壊による高衝撃が発生する。

そこで本研究では、小孔円筒オリフィス内の過渡的な流れ場に注目する。加速および減速過程時のキャビテーション初生・消滅現象を、種々の上流部流速および試料水の空気含有量の下に実験的に研究し、キャビテーション発生・消滅過程特性とともに、その様相を高速度ビデオ観察する。

^{*1} 学生員, 金沢工業大学大学院 (〒921-8501 石川県野々市市扇ヶ丘 7-1)

^{*2} 正員, 金沢工業大学 工学部

E-mail: planetrock46@venus.kanazawa-it.ac.jp

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。本実験では圧力設定された試料水を電磁弁の開閉により加速流れあるいは減速流れとした。貯水タンク④は圧力調整タンク③を経由し加圧あるいは減圧される。試験部⑱上流には電磁弁⑥が設けられ、ファンクションジェネレータ⑪からの入力信号により電磁弁が開き流動が開始する。ファンクションジェネレータからの入力信号は、電磁弁の開閉信号となると同時に高速度ビデオカメラ（Photron, SA5）⑳のトリガーとして使用され、オシロスコープ⑫上に記録される。オシロスコープには弁と試験部の間に設けた流量計⑦および試験部上流と下流に設置した圧力変換器⑨・⑰，そして試験部のノズル外壁に取り付けた加速度計⑭からの信号をも出力する。加速流れ過程を観察する場合には弁開放時にトリガーをかけ、減速流れ過程を観察する際には弁閉鎖時にトリガーを設定し、高速度ビデオ観察と同時に計測器出力信号を取得した。

上流部圧力としては、電磁弁を開放し試験部に水を流した状態で上流部ブルドン管型圧力計⑧によりゲージ圧力 $P_1=0.15\text{MPa}$, 0.25MPa , 0.35MPa にそれぞれ設定した。空気含有量を調節する際は、まず貯水タンクを減圧しタンク内の試料水を十分回流させ、所定の空気含有量に設定した後、9時間以上放置してから実験を行った。実験時には再度、空気含有量を測定した。

試験部の詳細を図2に示す。ノズルは透明アクリル樹脂製で、オリフィスは直径14mmから1.6mmまで急縮小されている。オリフィス長さは6mmである。なお、絞り入口角部は直角であり、ノズル外周は観察時のアクリル樹脂による屈折の影響を減らすため平面加工が施されている。

3. 実験結果

3・1 加速流れ過程におけるキャビテーション初生

図3に試験部上流側圧力 P_1 の時間変化を示す。ここに、経過時間 $t=0$ は電磁弁への信号入力時に対応する。 P_1 はいずれの条件においても信号入力後およそ $t=0.1\text{s}$ 以内に一度ほぼ設定圧まで達したのち、いったん低下してから設定圧に達している。図4に実験時の圧力およびノズル外壁上で測定した加速度の変化を示す。ここに、時間 $t=0$ は電磁弁への信号入力時に対応する。 $t=0.5\text{s}$ 付近でキャビテーション初生に伴う加速度計の出力が確認でき、それに伴う試験部上流側圧力 P_1 の変動が見られる。

図5に空気含有量 β が $4.2\sim 4.5\text{mg/l}$ における上流部圧力 (a) $P_1=0.15\text{MPa}$, (b) 0.25MPa および (c) 0.35MPa のキャビテーション初生の高速度ビデオ観察結果を示す。バックライト法で撮影しているため、キャビテーション発生域は黒色で示されている。全ての様相においてキャビテーションは絞り部入口より少し下流部で初生する。また、初生後、それぞれほぼ一定の速度で絞り部内で成長する。図6はフレーム間差分法⁽⁶⁾⁽⁷⁾を用いた解析結果を示す。白色域がキャビテーションの発生、成長を示し、黒は移動および消滅を示す。この結果よりキャビテーションの成長速度 V_c はそれぞれ (a) $V_c=0.8\text{m/s}$, (b) 6.5m/s および (c) 10m/s 程度であると評価できる。

図7に空気含有量の変化に対するキャビテーション初生時間（初生遅れ時間 Δt_i ）の関係を示す。ここに、図中には電磁弁の開放後 $t=10\text{s}$ 以内に発生したもののみ示している。上流部圧力 P_1 の増加に伴い、初生遅れ時間が短くなる傾向を示した。また、空気含有量 β の低下に伴い、初生遅れ時間 Δt_i が長くなる傾向も示した。空気含有量がある程度低く、上流部圧力が低い条件ではキャビテーション発生は確認できなかった。

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Details of orifice nozzle

$\beta=4.2\sim4.5\text{mg/l}$

Fig. 3 Time history of upstream pressure in accelerating flow

$\beta=4.3\text{mg/l}$, $P_1=0.25\text{MPa}$

Fig. 4 Time history of upstream pressure and acceleration in accelerating flow

$\beta=4.2\sim4.5\text{mg/l}$, $F_s=10000\text{fps}$

Fig. 5 Cavitation behavior in accelerating flow

$\beta=4.2\sim4.5\text{mg/l}$, $F_s=10000\text{fps}$, $\Delta t=1/10000\text{sec}$

Fig. 6 Image analysis of cavitation behavior in accelerating flow

Fig. 7 Time delay of cavitation inception in accelerating flow

Fig. 8 Time delay of cavitation desinence in decelerating flow

Fig. 9 Cavitation behavior in decelerating flow

Fig. 10 Image analysis of cavitation behavior in decelerating flow

3・2 減速流れ過程におけるキャビテーション消滅

図8に電磁弁閉鎖後のキャビテーション消滅時間（消滅遅れ時間 Δt_d ）を示す．ここで経過時間 $t=0$ は電磁弁閉鎖信号入力時に対応する．上流部圧力 P_1 の増加に伴い，消滅遅れ時間が大きくなる．また，本研究の範囲においては消滅遅れ時間 Δt_d は空気含有量 β に依存する傾向はあまり認められなかった．

図9にキャビテーション消滅様相，そして図10にその解析結果を示す．円筒オリフィス内にオリフィス出口部まで発達したキャビテーションがオリフィス入口部に向かって消滅する様相が確認できる．消滅速度は本研究の範囲では1.5~4m/s程度であった．消滅領域が絞り部入口に達した後，キャビテーション域が再成長する様相も見られた（図9（a） $t=0.0151\sim0.0161$ s）．また，消滅時近傍では図9（c） $t=0.0282\sim0.0302$ s付近で観察できるように，オリフィス入口付近で数珠状の微細気泡が観察された．

4. 結 言

（弁の開閉に伴う）加速あるいは減速流れ状態にある円筒オリフィス内流れにおいて，キャビテーション発生様相の高速観察を行った．主な結果は以下の通りである．

- (1) 加速流れ過程におけるキャビテーション初生に関して，上流部圧力の増加に伴い初生遅れ時間は小さくなる．また，空気含有量の低下に伴いキャビテーション初生遅れ時間は大きくなる．
- (2) 加速流れ過程において，上流部圧力あるいは空気含有量がある程度低くなるとキャビテーション発生は抑制傾向にある．
- (3) 減速流れ過程におけるキャビテーション消滅に関して，上流部圧力の増加に伴い消滅遅れ時間は大きくなる．また，本研究の範囲においては消滅遅れ時間は空気含有量にあまり依存しない．
- (4) 減速流れ過程において上流部圧力が低い場合，キャビテーション消滅時に絞り部入口付近でキャビテーション域の間欠的な再発生が見られる場合がある．

終わりに臨み，本研究に係る実験の遂行に協力してくれた金沢工業大学流体工学研究室の清水俊太郎君，丸岡展大君，南貴浩君に深謝する．

文 献

- (1) SATO K, "A study of cavitation process by means of acoustic pulse measurement", *ASME FED (Am Soc Mech Eng Fluids Eng Div)*, Vol.57, (1987), pp.151-121.
- (2) 佐藤恵一, 八野浩司, 斎藤康弘, "ベンチュリを用いたトラベリング・バブルキャビテーションの挙動に関する研究", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 70, No. 689 (2004), pp.69-76.
- (3) 祖山 均, 山内 由章, 安達 保則, 佐藤 一教, 進藤 丈典, 大場 利三郎, "高速水中水噴流まわりのキャビテーション気泡雲の高速写真観察", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 59, No. 562 (1993), pp.1919-1924.
- (4) 中野健太, 早川道雄, 藤川重雄, "水中ウォータジェット噴射時に発生するキャビテーション気泡の観察", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 69, No. 678 (2003), pp.360-367.
- (5) 佐藤恵一, 伊藤幸雄, 井小萩利明, 大場利三郎, 宮倉秀人, "キャビテーションの様相とその衝撃パルス特性（特に減速および増速流れについて）", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 51, No. 470 (1985), pp.3285-3290.
- (6) 杉本康弘, 大慈彌三郎, 佐藤恵一, "フレイム間差分法によるキャビテーティングジェットにおけるキャビテーションクラウドの壁面衝突挙動計測", 噴流工学, Vol. 24, No. 3 (2007), pp.32-38.
- (7) 佐藤恵一, 杉本康弘, 大慈彌三郎, "キャビテーションクラウドにおける圧力波伝播とその画像解析（壁面に衝突するキャビテーティングウォータジェット）", 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 77, No. 784 (2011), pp.2286-2294.