

プランジャー変動流れにおけるウォータジェット用収縮拡大ノズル内 キャビティの変動周期特性

Cavity Periodicity in a Convergent-Divergent Nozzle for Water Jet in Unsteady Plunger Flow

○田口 裕太(金沢工大(院)) 林 正太(金沢工大(院)) 杉本 康弘(金沢工大) 佐藤 恵一(金沢工大)

Yuta TAGUCHI, Graduate Student, Kanazawa Institute of Technology, Ogigaoka, Nonoichi, Ishikawa

Shota HAYASHI, Graduate Student, Kanazawa Institute of Technology

Yasuhiro SUGIMOTO, Kanazawa Institute of Technology

Keiichi SATO, Kanazawa Institute of Technology

It is well known that cavitation clouds in cavitating water jet and cloud cavitation around body have a periodic tendency in the behavior and produce high impact at their collapses. In order to clarify the cavitation in an actual flow condition, it is important to solve the mechanism of periodic cavity behavior. In particular, we need to make clear the effect of the upstream pressure oscillation caused by a plunger pump for high speed water jet. In the present study the behavior of cloud cavitation is experimentally examined in a convergent-divergent nozzle with a high-speed video camera. An image analysis method is applied to the pictures taken by a high-speed video camera. As a result, it is found that the cavitating flow has two kinds of periodic behaviors. One can be related to the upstream pressure fluctuation from a plunger pump. The other is considered to be due to the cavitation cloud by nature, which is not affected by the plunger unsteadiness.

Key Words: Cloud Cavitation, Periodic Behavior, Water Jet, High-Speed Video Observation, Image Analysis

1. 緒言

剥離型のキャビテーションに代表的に観られるクラウドキャビテーションは、多くの文献から総合的に判断すると、ある条件の下では特徴的な周期性をもつ非定常運動を示すといえる。例えば、Francらによる翼形の部分キャビテーションにおける周期性クラウドキャビテーションの研究⁽¹⁾は良く知られている。しかしながら、その機構の普遍性については、まだ完全に説明されていない。キャビテーションを伴う流れの場においては、キャビティあるいはクラウドの崩壊に伴い局所的に多くの圧力波の形成が確かめられており(例えば、文献⁽²⁾)、その役割の詳細な解明が待たれている。佐藤らによる回流型キャビテーションタンネル内の試験部に設置された収縮拡大流路における剥離キャビティに関する研究によれば、下流に放出されたキャビテーション・クラウド(クラウドと略)崩壊に伴う圧力波発生をきっかけとしてキャビティ内を上流に向かうリエントラント運動が起こり、周期的なクラウドキャビテーションを形成する現象が起きることが指摘されている^(2,4)。

一方、他の周期的クラウド運動の代表例は、キャビテーション・ウォータジェット(Cav-WJと略)である。この場合も噴流形成部のノズル部および噴射された噴流境界面でキャビテーションが形成されていると考えられ、Cav-WJの非定常性についてのキャビテーションおよびそれに伴って形成される圧力波の役割の検討はきわめて興味深い事項である。

本研究では、比較的大型のCav-WJ装置のノズル部に透明アクリル樹脂製の収縮拡大(軸対称)ノズルを用いて、このCav-WJ内でのキャビテーション挙動について調べてみた。当然ながら本Cav-WJ用ノズルにおいても周期的なキャビテーションクラウド状ジェットが形成された。しかしながら、本実験で使用されたようなウォータジェット装置の場合の大きな問題の一つは、加圧用のプランジャーポンプの存在である。この種のポンプ装置では、プランジャーによる周期的な変動が流れに影響を与えることになるが、一般にCav-WJ装置はプランジャーポンプにより高圧加圧されていることが多い。本研究ではノズルのど部下流噴流部のキャビテーションがあまり発達しない状態に限定しているが、上流部変動がキャビテーション現象に与える影響についても検討した。

よって本研究では、透明アクリル樹脂製の円筒収縮拡大ノズルを用いて、ノズル内部の流れ様相を観察し、画像解析からノズル内部の周期的キャビティ挙動のメカニズムの解明を試みた。特に、プランジャーポンプに起因するノズル上流部における圧力変動が周期的キャビティ挙動に与える影響をも明らかにするため、ポンプの回転数をインバータにより変化させた計測も行った。結果として、この種の流れ状態では、Cav-WJに2種類の周期的変動を有するクラウドキャビテーションが発生する。それらの一つは(プランジャーポンプの周期的吐出に起因する)上流部変動による周期的クラウドキャビテーション、もう一つはキャビテーション流れ特有のものと考えられる周期性クラウドキャビテーションである。

2. 実験概要

2・1 実験装置

図1に本実験に使用する実験装置の概略図を示す。貯水タンクに水道水を貯め、高圧ポンプによって試験水槽内に設置された円筒収縮拡大ノズルからウォータージェットを水中へ噴射する。試験水槽内の水位は一定に保たれ、オーバーフローした水は貯水タンクへと戻る。高圧ポンプの回転数はインバータにより制御した。ノズル内の非定常キャビテーション挙動は高速度ビデオカメラ(MEMRECAM GX-1 plus)を用いて撮影された。この時、ノズル上流部の圧力計測(圧力変換器 JTEKT PMS-8M-2)と高速度ビデオカメラは同期されている。また、撮影においては撮影面とノズルをはさんで反対面の水中にメタルハライドランプ(NPI PCS-UMX 350)を光源とする面ライトを設置し、バックライト撮影した。横型3連プランジャー式の高圧ポンプを、吐出圧力 30MPa, 吐出流量 33L/min, 回転速度 340min^{-1} で使用した。

図2に Cav-WJ 用円筒収縮拡大ノズルを示す。ノズルは透明アクリル樹脂製で、絞り角は 45° 度、拡がり角は 10° 度、のど部径 d は 1.0, 1.2mm の 2 種類とし、いずれも、のど部長さは 10mm である。また、ノズル絞り部入口を原点とし流れ方向に距離 x [mm] をとる。ノズル外周は平滑に平面加工されておりノズル内部の様相を明瞭に観察できる。

なお、本論文で用いられる p [MPaG] は上流部圧力、 p' [MPa] は上流部変動圧力、 F_s [fps] は撮影速度、 t [ms] は経過時間、 f [Hz] はインバータ周波数、 β [mg/L] は溶存酸素量、 T_w [K] は試験水槽内水温をそれぞれ示す。

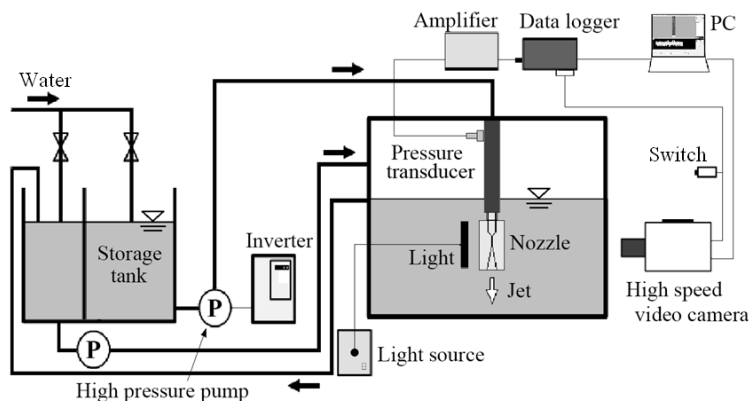


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

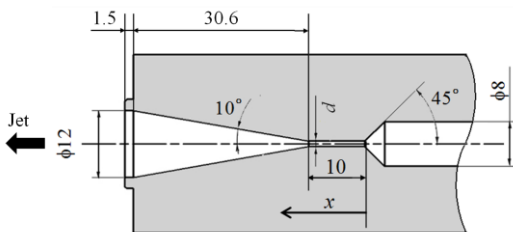
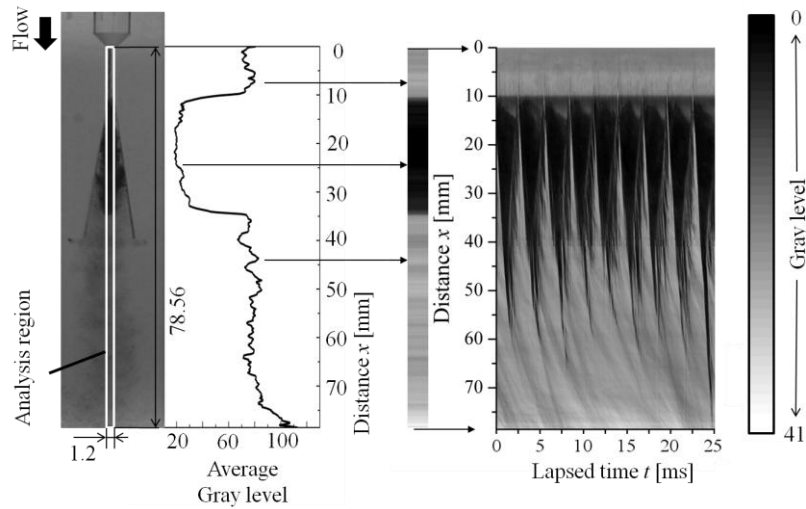


Fig.2 Transparent convergent-divergent nozzle

2・2 画像解析手法

本研究ではキャビテーション挙動を評価するために、グレーレベルを用いた画像解析を行った。図3に本論文で用いた画像解析方法を示す。まず高速度ビデオ撮影で得られた画像を設定された解析領域において、黒の階調値を0、白



(a) Gray level distribution at time $t = t_l$ (b) Change of cavitating zone

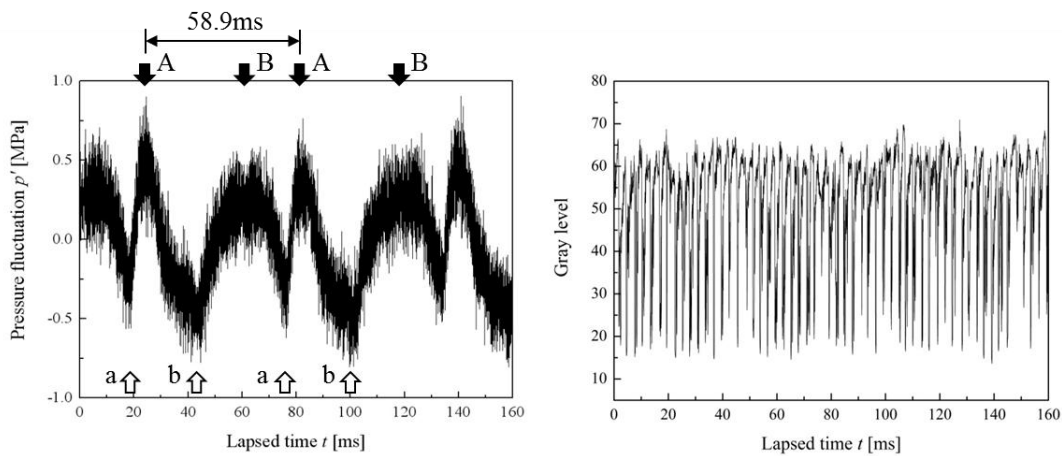
Fig.3 Outline of image analysis method used in the present study

の階調値を 255 とする 256 階調のグレースケール画像に変換する。ここに図 3 (a) に示すように解析領域は、幅をのど部径、高さをのど部入口から画像の下端($x=78.56\text{mm}$)までとする。解析領域において、流れに直角方向(8pixels)にグレースケールを平均化する。この作業を流れ方向 x に 1pixel 毎に順次進めることで図 3 (a) に示すような平均グレースケール曲線を得る。これを時間間隔 0.03ms で全時間範囲に対して同様に行う。同時に全時間範囲で、新たにグレースケールの最大値に白(階調値 41)を、最小値に黒(階調値 0)を設定し 42 階調の濃淡を得る。この再設定された濃淡画像を、時系列に並べることにより図 3 (b) に示すような、のど部入口からの距離 x と経過時間 t に関する画像解析結果を得る。ここに図 3 (b) に示す黒色領域はクラウドの存在領域(キャビティ領域)を示す。さらに、同様の方法で得られたグレースケールの値を連続する二画像間で差分をとり、そのグレースケール差分値を時系列に並べることによって、フレーム間差分法を用いた画像解析も行った。クラウドの生成・出現は白色領域、そして崩壊・消滅は黒色領域として表される。フレーム間差分法の詳細に関しては、本シンポジウムの改田らの論文⁽⁵⁾を参照されたい。

3. 実験結果

3・1 プランジャー流れにおける二種類の変動

図 4 に、上流部圧力 $p=3\text{MPaG}$, $f=60\text{Hz}$ のときの upstream 圧力変動 p' [MPa] (図 4 (a)) と、その時のノズル内キャビティ挙動の画像解析結果 (図 4 (b)) を示す。後者においては、図 3 (b) に示すノズル内キャビティ画像におけるグレースケール



(a) Upstream pressure fluctuation (due to plunger pump) (b) Gray level change for cavity length

$d=1.2\text{mm}$, $T_w=299\text{K}$, $\beta=5.8\text{mg/L}$, $f=60\text{Hz}$

Fig.4 Two kinds of oscillation in plunger flow at $p=3\text{MPaG}$

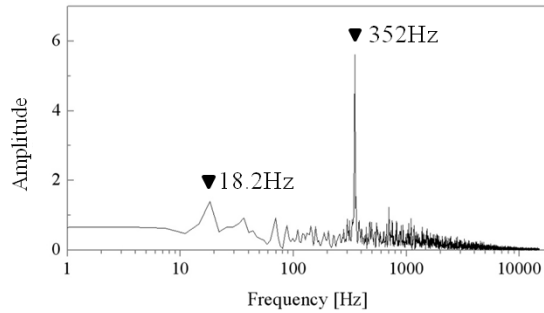


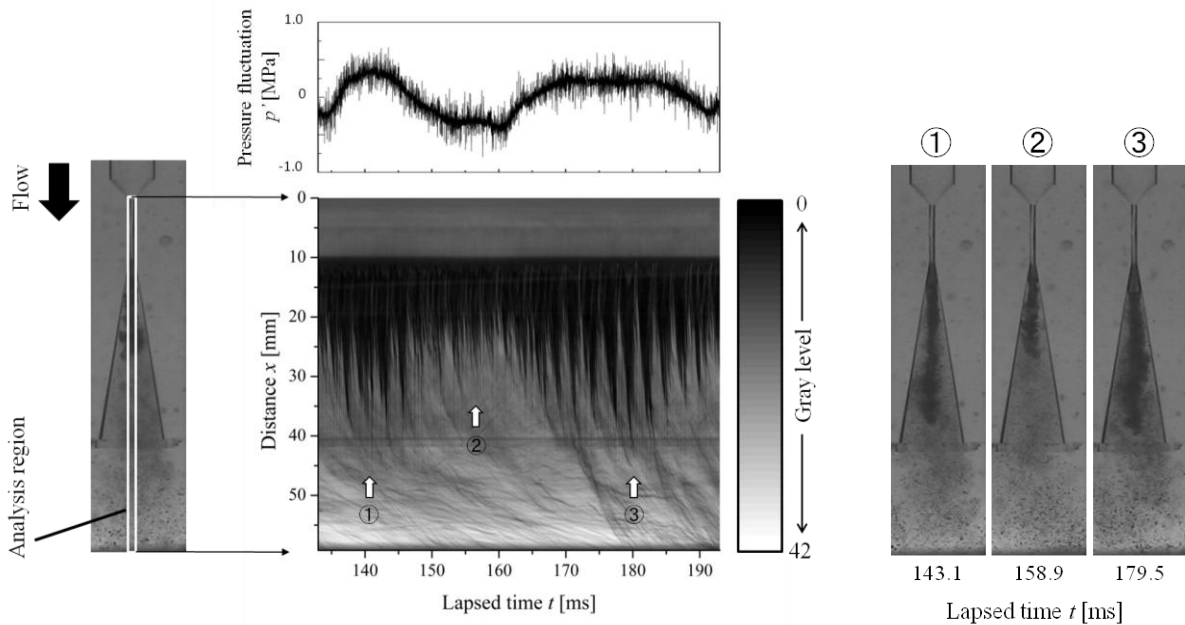
Fig.5 FFT analysis of gray level change in cavity length

値の変動と経過時間の関係を、 $x=50\text{mm}$ の位置において示している。ここにキャビティ領域は黒色領域、そしてキャビティ無し領域は白色領域として現れている。この変動の周波数は約17Hzであり、ポンプ回転数の3倍の値とほぼ一致する(3連プランジャーポンプを使用)。したがって、上流部圧力脈動の長周期的挙動は加圧用プランジャーポンプに起因するものであると判断される。

また、ノズル内のキャビティ長さは、上流部圧力脈動より比較的短周期で変動していることが認められる。図4(b)に示すように、キャビティ長さは図4(a)に示す上流部圧力脈動と別個に一定の周期で変動している。上流部圧力脈動の周波数が約17-18Hz(周期58.9ms, 図4(a)参照)であるのに対し、このキャビティ長さ変動は、周波数解析結果である図5に示すように約350Hzの比較的短周期的挙動である。このように、本プランジャー流れにおいては、上流部圧力脈動とキャビティ独自と考えられる変動の二種類の異なる変動が現れることが指摘できる。

3・2 上流部圧力変動とキャビテーション様相の対応付け

図6に上流部圧力 $p=2\text{MPaG}$ のときの上流部圧力変動 p' [MPa]とキャビテーション様相とを示す。流れは上から下方向である。図6(a)は画像解析結果(キャビティつまりクラウド領域変動)を、図6(b)はキャビテーション領域全体の成長・収縮に関する様相例を示している。図6(a)の画像解析結果において、黒色領域はキャビティ領域を示し、ノズルのど部入口からの距離 x に対する経過時間 t の関係の下に示されている。また、上流部圧力変動の時間は画像解析結果と対応する。



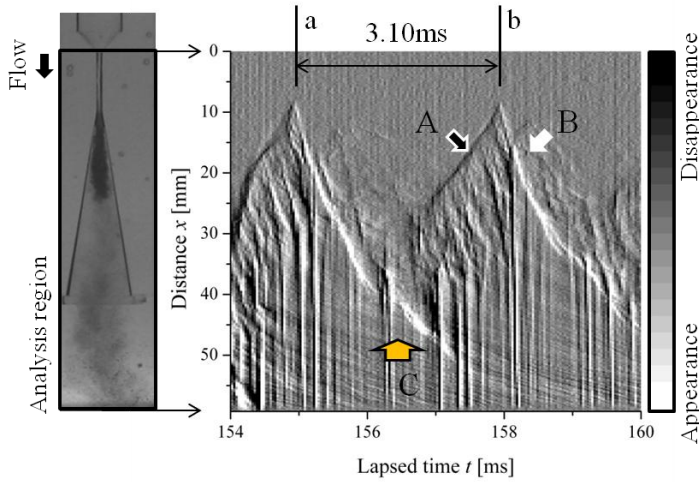
(a) Change of cavitating zone and upstream pressure fluctuation

(b) Behavior of cavitation cloud due to upstream pressure fluctuation

$$d=1.0\text{mm}, T_w=298\text{K}, \beta=6.7\text{mg/L}, Fs=30,000\text{fps}$$

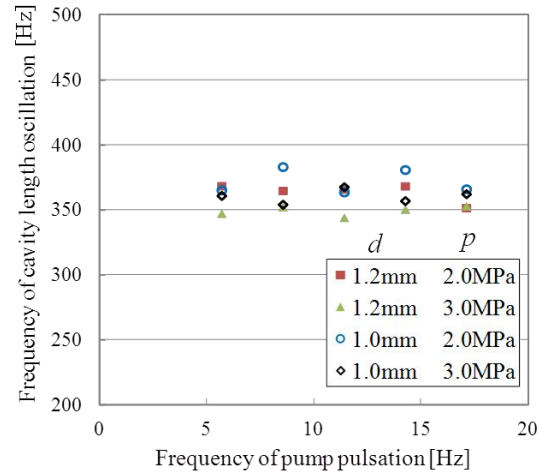
Fig.6 Relation between upstream pressure fluctuation and behavior of cavitation cloud at $p=2\text{MPaG}$

図 6(a) にみられるように、上流部圧力が大きくなる（つまり流速大）ときにキャビティ長さが長くなり（図中①、③）、上流部圧力が小さいときにキャビティ長さが短くなる（図中②）。図 6(b) を見ても、①143.1ms、②158.9ms、③179.5ms にみられるように、この種のキャビティ長さは上流部圧力に左右されていることが確認できる。上流部圧力変動 p' の周波数はプランジャーポンプ回転数とほぼ対応することから、プランジャー脈動に起因する上流部圧力変動は、キャビティ長さの周期的変動に影響を及ぼすことが分かる。したがって、キャビティ長さの周期的変動の主因の一つは上流部圧力変動である。



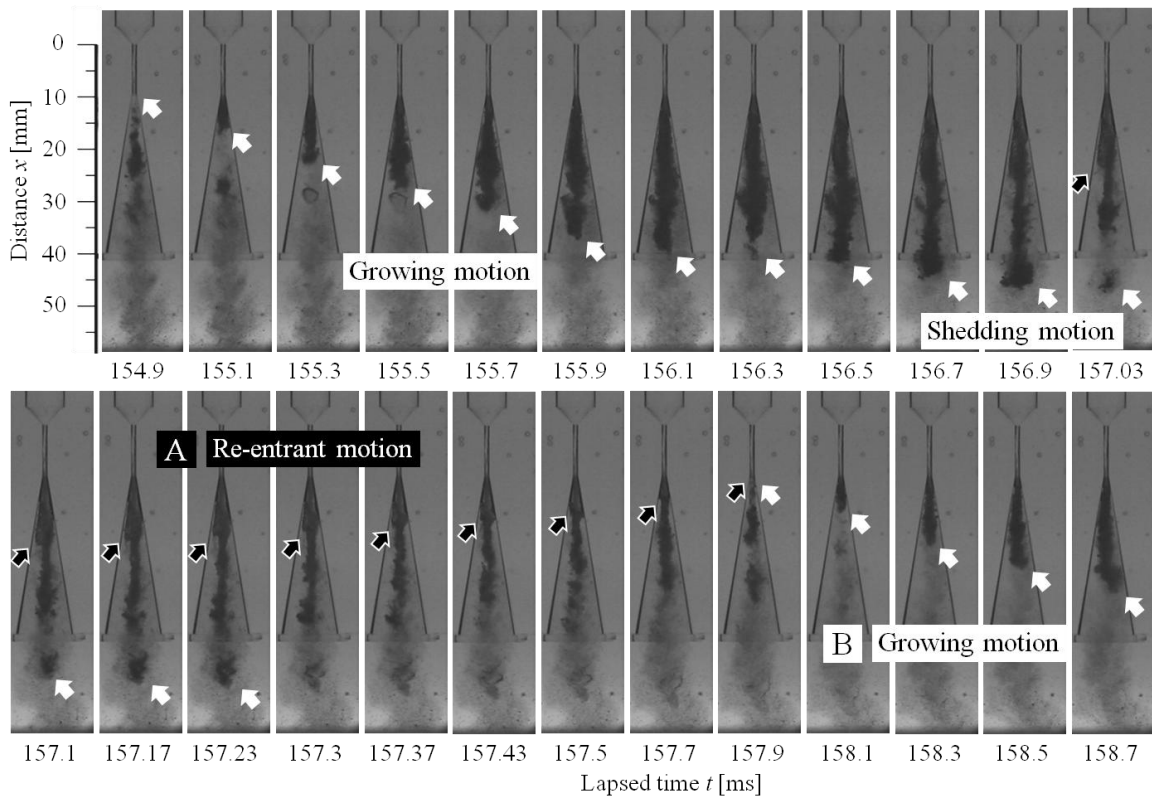
$d=1.0\text{mm}$, $T_w=298\text{K}$, $\beta=6.7\text{mg/L}$, $f=60\text{Hz}$, $Fs=30,000\text{fps}$

(a) Image analysis



$T_w=298\text{--}300\text{K}$, $\beta=5.9\text{--}6.7\text{mg/L}$, $Fs=30,000\text{fps}$

(b) Relation between frequency of pump pulsation and cavity length oscillation



(c) Behavior of cavitation cloud

$d=1.0\text{mm}$, $T_w=298\text{K}$, $\beta=6.7\text{mg/L}$, $f=60\text{Hz}$, $Fs=30,000\text{fps}$

Fig.7 Cavitation cloud oscillation in the nozzle at $p=3\text{MPaG}$

3・3 クラウドの放出と崩壊の周期特性

一方、キャビティ(クラウド領域)長さには図4に認められるように長周期振動とともに短周期振動が存在する。図7(a)に観測時間 $t=154\text{-}160\text{ms}$ を例にとり、上流部圧力 $p=3\text{MPaG}$ のときのフレーム間差分法による画像解析結果を示す。この場合、キャビティ長さ変動周期は図7(a)中のaからbまでの約 3.10ms に対応する。図7(b)に種々のノズル径および上流部圧力におけるキャビティ長さの変動周波数(図4(b)に示す方法による)、そして図7(c)にはクラウドの崩壊・放出様相の詳細な連続写真例を示す。ここに、 $157.0\text{-}157.5\text{ms}$ までは 0.0667ms 、 157.5ms 以降は 0.2ms 間隔で示す。これら図7(a)-(c)からわかるように、約 350Hz 程度で、クラウドキャビテーションが収縮(例えばA)・成長(例えばB)・放出運動を繰り返していることが確かめられる。

なお、画像解析結果の全時間範囲にわたって、時間軸にほぼ垂直な黒と白の線が比較的明瞭に認められるが、これらはクラウド崩壊に伴う圧力波の発生・伝播そしてクラウド出現に対応するものであると考えられ、今後の詳細な検討を予定している。図7(b)には、キャビティ長さの短周期変動周波数をポンプ回転数との関係の下に示した。このキャビティ変動周波数は約 360Hz 程度であり、ポンプ回転数よりもかなり大きく、さらにポンプ回転数によらずほぼ一定の値を示している。

さらにキャビティ(クラウド)の崩壊と放出の過程を詳しく見ると、図7(c)より $t=154.9\text{ms}$ 付近からキャビティ(クラウド)の成長が起こり拡大部で発達する。この場合、おおよそ $t=157.0\text{-}157.3\text{ms}$ において、拡大部出口付近でクラウド放出・崩壊挙動が認められる。ついでノズル上流方向へのリエントラント運動(図7(c)中A)が認められ、ノズルのど部方向へクラウドが消失していく。リエントラント運動がノズルのど部出口に到達した後(157.9ms 付近)、新たなキャビティの成長運動が開始される。いわゆるキャビティの非定常周期運動の典型的パターン⁽⁴⁾が確認できる。

以上より、本研究で観察されたクラウドの収縮・成長・放出挙動に伴うキャビティ長さの周期的挙動は上流部の圧力変動に依存しないキャビティ固有の変動であると考えられる。ちなみに、キャビティ長さを用いたストローハル数($St=nl/U$)は、おおよそ $St=0.28$ 程度である。ここに、 U はのど部平均流速、 n はキャビティ長さ変動周波数である。

4. 結言

円筒収縮拡大ノズル内部のクラウド様相の高速度観察とノズル上流部圧力変動測定、そして画像解析を用いて、クラウドの周期的挙動に及ぼすプランジャー変動流れ(加圧用プランジャーポンプによる上流部圧力変動を伴う流れ)の影響を検討した。その主な結果をまとめると次のようになる。

プランジャーポンプの回転数に起因するノズル上流部圧力変動によるキャビティ(クラウド領域)長さの周期的変動が指摘されるが、それとは独立に短周期キャビティ長さ変動が存在する。この短周期キャビティ長さ変動は、クラウドの収縮(リエントラント)、成長、放出運動を伴い、クラウドキャビテーション特有の周期的変動流れと考えられる。

5. 参考文献

- (1) Franc, J. P. and Michel, J. M. Fundamentals of Cavitation, Kluwer Academic Publishers, (2004), pp. 131-145.
- (2) 佐藤, 斉藤, 剥離形キャビテーションの周期的放出過程(再付着型剥離流れ), 日本学術会議 キャビテーションに関するシンポジウム(第11回), (2001), pp. 113-116.
- (3) 佐藤, 斉藤, クラウドキャビテーションにおけるリエントラント運動とクラウド放出機構に関する検討(収縮拡大流路において), 日本学術会議 キャビテーションに関するシンポジウム(第13回), (2006), pp. 1-4.
- (4) Sato, K. Wada, Y. Noto, Y. and Sugimoto, Y. Reentrant motion in cloud cavitation due to cloud collapse and pressure wave propagation, ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Summer Meeting, FEDSM-ICNMM2010-30350, (2010), pp. 1-5.
- (5) 改田, 杉本, 佐藤, 斜め衝突するキャビテーショングウォータージェットの二方向同時高速度観察, 日本学術会議 キャビテーションに関するシンポジウム(第16回), (2012), pp. 1-6.