

## 水中ウォータジェットにおける壁面に衝突する キャビテーションクラウドの高速観察\*

### Instantaneous Behavior of Cavitation Clouds at Impingement of Cavitating Water-Jet

斉藤 康弘\*\*  
SAITO Yasuhiro

佐藤 恵一\*\*  
SATO Keiichi

**Abstract** It is known that water-jet with cavitation clouds shows unsteady behavior and causes high impact. The study on unsteady cavitation clouds is useful for not only the water jet technology but also various engineering fields. The unsteadiness of cavitation clouds is one of the most interesting problems for the use of the cavitating water-jet. In this study, we tried to estimate the behavior of the cavitation clouds at the impingement. Especially, the behavior of the cavitation clouds was observed using a high-speed video camera triggered by the cavitation impact, and analyzed with an image processing technique. As a result, we showed the behavior on two kinds of cavitation clouds on the impinging wall and related the collapse of cavitation clouds with the erosion region through the image analysis of cavitation clouds.

**Keywords:** Water-jet, Cavitation, Cavitation erosion, Image processing

#### 1. 緒言

水中高速水噴流では噴流まわりのせん断層にジェットキャビテーションが発生することが知られている[たとえば 1, 2]。この場合、キャビテーションは非定常な挙動を示す高衝撃性のキャビテーションクラウドを形成する[3-5]。近年、キャビテーションジェットは洗浄・ピーニングやゲッターリングなどの工業分野にとどまらず環境関連技術などへの応用も広く試みられている[6]。

このようなジェットキャビテーションに関して多くの研究が行われてきており、リング状壊食痕の存在やスタンドオフ距離に対する 2 つの壊食量ピーク、衝撃力の空間的分布などが示されている[7-13]。これらの研究成果に対してキャビテーション気泡群の挙動そしてその様相の把握は重要な課題である。しかしながら、キャビテーションクラウド崩壊の瞬間様相に関する観察例[8]はあるものの、衝撃と崩壊様相とを直接関連付けたものはほとんどないようである。本研究グルー

プでは衝撃と同期させたキャビテーションジェット挙動の定量的な評価を試み、特に、静止液体中に噴射されたキャビテーションジェットの非定常挙動とそれによって誘起される衝撃を関連付けてきた[13]。

本報告では、壁面に衝突するジェットキャビテーションについて衝撃と同期させた様相観察を行った。さらに、画像解析を用いてキャビテーションクラウド崩壊の定量的な評価を行い、クラウド崩壊挙動、衝撃および壊食の関連付けを試みた。

#### 2. 実験装置および方法

##### 2.1 キャビテーションクラウドの観察

本研究では Fig. 1 に示すウォータジェット観察水槽を用いて実験を行った。試料水は水道水を用い、高圧ポンプを介して噴射圧力  $P_1$  を 6MPa に設定し、大気圧  $P_2$  下の水槽へ噴出した。供試ノズルにはホーンノズルを用いた（開口角  $60^\circ$ 、ホーン部長さ 12 mm、ノズルスロート部径  $d = 1$

\* 2006.11.15 受付

\*\* 金沢工業大学工学部機械工学科 〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1  
TEL: (076)248-9182 FAX: (076)294-1327 E-mail: y-sugi@neptune.kanazawa-it.ac.jp

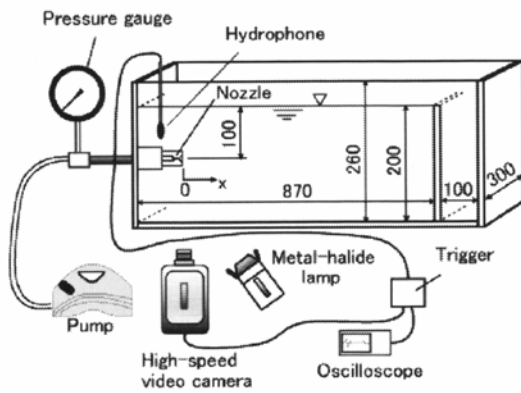


Fig. 1 Test vessel.

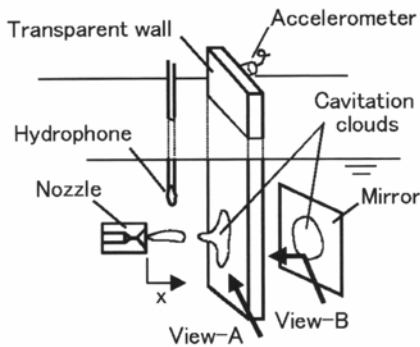


Fig. 2 Test section for observation from two directions.

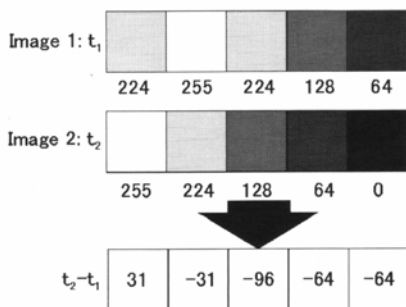


Fig. 3 Image processing method.

mm、スロート部長さ $l=4$  mm)。噴流衝突面での気泡崩壊挙動を観察するために、Fig. 2に示すように透明アクリル樹脂壁面を噴流中心軸に垂直に設置した。そのアクリル樹脂壁面の背後には鏡を噴流軸に $45^\circ$ 傾けて配置し、同時に2方向から

の観察を行った。また、壊食試験を行う際にはアルミニウム製試験片 (A5052) を所定のスタンドオフ距離  $x/d$  (Fig. 2 に示すようにノズル出口を原点とし噴流中心軸方向に  $x$  軸を選んだ) に設置し、15分間の試験を行った。

ノズル下流に発生するキャビテーションクラウドの挙動はマイクロホン (B&K、8103) および加速度計 (TEAC、703FB) に同期した高速度ビデオカメラ (KODAK、MODEL HS4540) を用いて観察した。また試料水中の溶存酸素量  $\beta$  は溶存酸素メータ (HORIBA、OM-51) を用いて測定した。

## 2.2 画像解析法

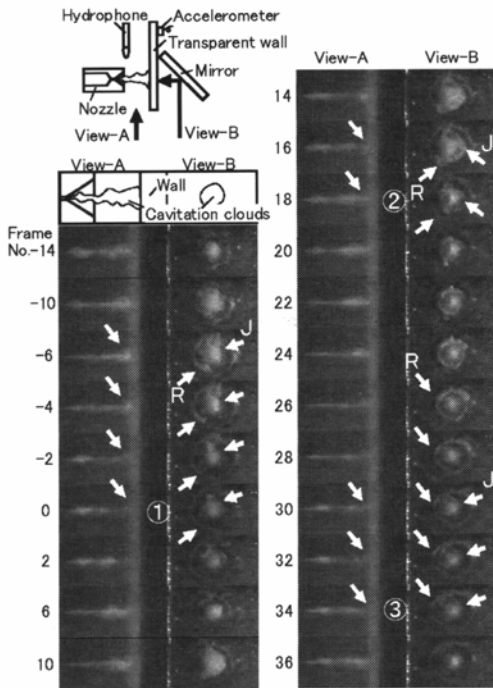
キャビテーションクラウド崩壊時には微小気泡群が連鎖的に崩壊するため、キャビテーション領域の (白黒) 画像に濃淡変化が生じる。この変化に対して、本研究では画像処理を用いてキャビテーションクラウド挙動の定量的評価を試みた。

解析には 256 階調のグレースケール画像を用いた [5, 13]。Fig. 3 の模式図のように、異なる時間  $t_1$ 、 $t_2$  の 2 画像 ( $t_1$ : Image1、 $t_2$ : Image2) において、各セルのグレースケールを取り出し、フレーム毎の差を求め濃淡変化領域を差分的に捉えることを試みた。この手法を各時間 (高速度ビデオカメラのフレームに対応) における測定画像に適用し、色調の時系列的な変化量として図示した。つまり、本解析対象の一次画像では一般に気泡領域は白く、気泡無し領域は黒く表示される。したがって白から黒への変化 (グレースケールにおいて、値の大きなほうから小さなほうへの変化) の差をとった場合、負値が気泡崩壊 (あるいは消失) に対応し、正値が気泡の成長 (あるいは気泡域の出現・拡大) を表すことになる。本研究ではキャビテーション領域の気泡変化をより明確にとらえるために、このような画像間のグレースケールの差を示す差分画像として表してみた。

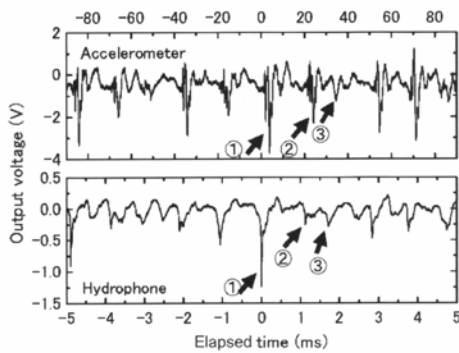
また、リング状のキャビテーションクラウドの半径方向への挙動をとらえるため、解析画像におけるリング直径に沿う細長い領域のみを解析し、画像の径方向への挙動を評価してみた (後述の Fig. 7 参照)。

## 3. 実験結果

### 3.1 衝突面上のキャビテーションクラウドの挙動



(a) Behavior of cavitation clouds

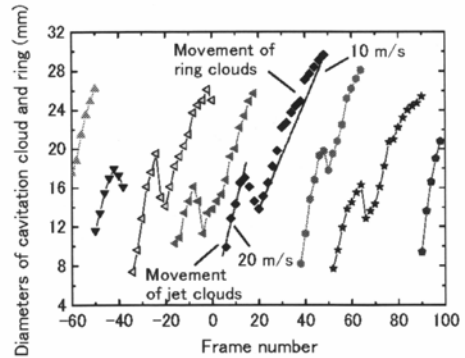


(b) Peaks of unsteady pressure and acceleration

$P_f=6\text{MPa}$ ,  $P_s=0.1\text{MPa}$ ,  $\beta=8.0\text{mg/l}$ ,  $T_w=286\text{K}$ ,  $F_s=18000\text{fps}$ ,  $x/d=25$

Fig. 4 Collapse of cavitation clouds with high impact.

透明アクリル樹脂製壁面に衝突するキャビテーションジェットを2方向から観察した結果をFig. 4 (a)に示す。ここで、衝突用壁面はスタンドオフ距離  $x/d=25$  に設置されている。図中のView-Aが噴流を横から観察した結果、View-Bが衝突面の背面から衝突噴流断面を観察した結果である。また、Fig. 4 (b)はFig. 4 (a)に示すキャ



$P_f=6\text{MPa}$ ,  $P_s=0.1\text{MPa}$ ,  $\beta=8.0\text{mg/l}$ ,  $T_w=286\text{K}$ ,  $F_s=18000\text{fps}$ ,  $x/d=25$

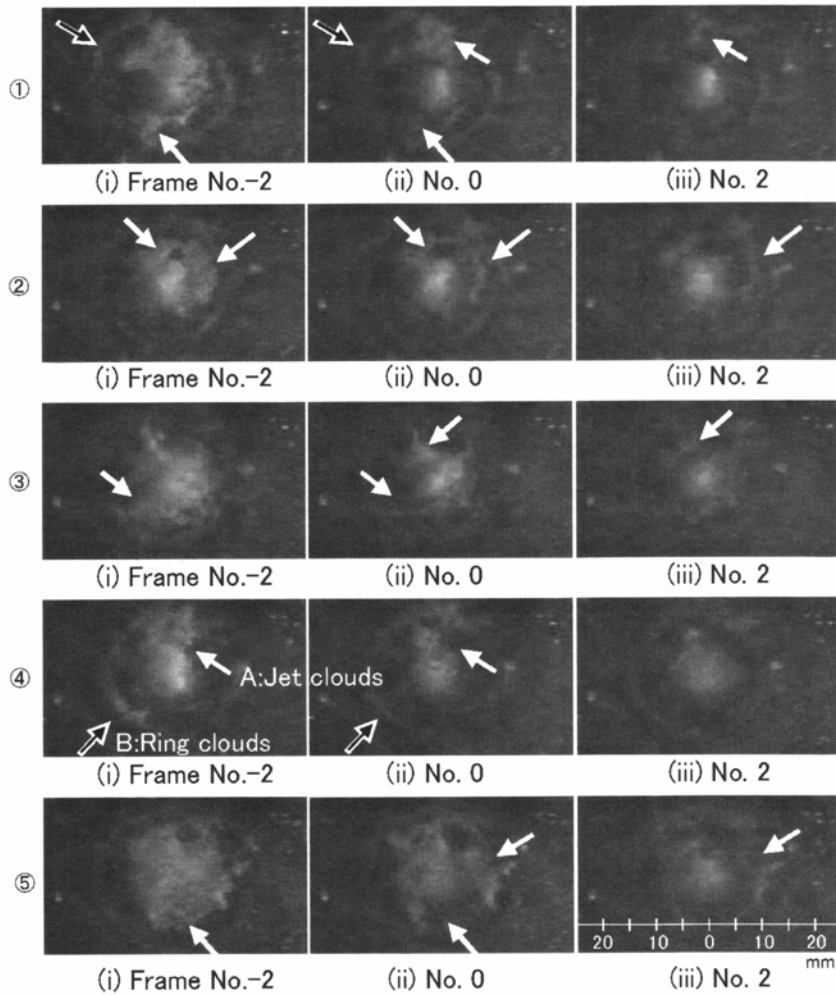
Fig. 5 Spreading behavior of cavitation clouds on solid wall.

ビテーション挙動と同時に計測したハイドロフォンおよび加速度計の出力値(電圧)を示す。

Fig. 4 (a)に示すように、非定常的にキャビテーションクラウドが壁面に衝突している。衝突面においては噴流まわりのせん断領域に発生するキャビテーションクラウド (Fig. 4 (a)中のJ部) とそれらを取り囲むリング状のキャビテーションクラウド (Fig. 4 (a)中のR部) が観察できる。以後、前者を噴流クラウドおよび後者をリング状クラウドと呼ぶことにする。これらのクラウドは時間経過とともにそれぞれ(噴流中心軸より)半径方向に変化している。

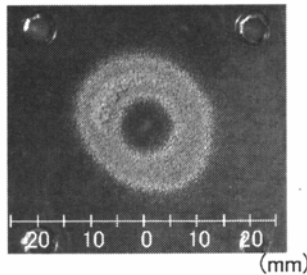
Fig. 4 (b)に示すように加速度計およびハイドロフォンからの出力にも周期的なピークが検出される (Fig. 4 (b)①~③)。この2種類の波形の時間のずれは計測位置の差による(本計測の場合、加速度計の波形は衝撃発生時より4~5コマ(約220~280  $\mu\text{s}$ )、ハイドロフォンでは最大1コマ(約55  $\mu\text{s}$ ) 遅れる)。これらの圧力および加速度ピーク①~③はFig. 4 (a)中の様相と対応しており(①はFrame No.0、②はNo.18、③はNo.34付近に対応)、それぞれのピーク検出に対応するキャビテーションクラウドの崩壊が確認できる。ここに、外見上複数のクラウド崩壊が観察される場合があり、細部までの対応関係には更なる検討が必要である。

壁面に衝突した噴流クラウドは半径方向へある程度の大きさ(本実験の場合、直径20mm程度)



$P_1=6\text{MPa}$ ,  $P_2=0.1\text{MPa}$ ,  $\beta=8.0\text{mg/l}$ ,  $T_w=286\text{K}$ ,  $F_s=18000\text{fps}$ ,  $x/d=25$

(a) Collapsing behavior of cavitation clouds



$P_1=6\text{MPa}$ ,  $P_2=0.1\text{MPa}$ ,  $\beta=6.3\text{--}8.1\text{mg/l}$ ,  $T_w=288\text{--}293\text{K}$   
 $x/d=25$ ,  $t=15\text{min}$

(b) Erosion pits distribution

Fig. 6 Collapsing behavior of cavitation clouds and erosion pits distribution.

まで広がり、その後崩壊している (Fig. 4 (a)、Frame No. -14~0、6~18、20~34 付近の J 部)。このとき同時にリング状クラウドの崩壊も観察できる (たとえば Frame No. 0、18、34 付近の R 部: 詳細なクラウドの崩壊挙動については 3.2 節で後述する)。このように噴流クラウドおよびリング状クラウドの断続的な崩壊に伴い、壁面には周期的に衝撃が作用していることがわかる。Fig. 4 (b)に示される衝撃ピークが噴流クラウドとリング状クラウドのどちらに対応するかという問題は興味深いが、前述のように現段階では特定できない。

次に、噴流衝突面におけるキャビテーションクラウドの半径方向への成長あるいは移動挙動について Fig. 5 に示す。衝突壁面上の噴流クラウドおよびリング状クラウドの直径の時間変化である。ここでキャビテーションクラウドの直径の概略をとらえるために、簡易的に画像の横幅方向 (おおそ Fig. 4 における水平方向幅に相当) の長さを計測し評価した。

これより、計測されるキャビテーションクラウドに対応して、大きく 2 つのクラウド径変化領域に分けることができることがわかる。1 つ目は噴流クラウドが成長し広がっていく領域である。たとえば、Fig. 5 中の◆の例で示されるように噴流クラウドはおおよそ直径 15~20 mm 程度まで広がり (Frame No. 5~15 付近)、その後、崩壊挙動を呈する (No.15~20 付近)。2 つ目は噴流まわりの噴流クラウドから離れて、リング状クラウドとして広がっていく領域である。Fig. 5 中の Frame No.20~40 付近の◆の例で示されるようにリング状クラウドの外径は、本研究の範囲 (クラウドが明瞭に観察される範囲) では最大約 30 mm 程度まで広がることを確認される。また、リング状クラウドの外径の勾配が終盤において緩やかになり、直径が大きくなると広がる速度が遅くなることをわかる。これら 2 つのクラウドの広がる平均速度は、噴流クラウドの場合 13~25 m/s、リング状クラウドの場合 10~15 m/s のオーダーであると評価された。ちなみに、本実験の場合の噴流速度 (ノズルスロート部平均流速) は約 60 m/s である。

### 3.2 衝撃発生時のキャビテーションクラウドの崩壊挙動

Fig. 2 で示すように噴流クラウドが衝突する壁

面に取り付けられた加速度計からの出力と高速度ビデオカメラとを同期させ、キャビテーションクラウドの崩壊を詳細に観察した。衝撃パルス検知時付近 (パルス発生時の 2 フレーム前: Frame No.-2、パルス発生時: No.0、パルス発生時の 2 フレーム後: No.2) の様子を観察した結果のうち代表的な 5 例を Fig. 6 (a)に示す。ここでは衝撃到達時間のずれを補正し、衝撃発生時に対応するフレームを 0 としている。

Fig. 6 (a)中の白矢印で示される部分において噴流クラウドの崩壊が明瞭に認められる (たとえば Fig. 6 (a)④: A)。崩壊する噴流クラウドまわりには多くの場合、リング状クラウドが存在する (Fig. 6 (a)中の黒矢印で示される)。いくつかの噴流クラウドの崩壊が Frame No.0 付近で観察されるが、その位置は、当然ながら先に発生したリング状クラウドの内側であり、噴流クラウドが壁面近傍で時間的にランダムに全体的に崩壊していることがわかる。また、リング状クラウドの崩壊も同時に確認される (たとえば Fig. 6 (a)④: B)。

以上のような観察結果から、2 つのキャビテーションクラウドの挙動についてまとめてみる。噴流クラウドが壁面に衝突し、半径方向へ広がり、その後、噴流クラウドが崩壊してゆく。それと共に、残存するクラウド (噴流まわりにもともと存在するせん断層や壁面衝突によって形成されると予想される渦状クラウド) や、あるいはリバウンドしたクラウドがリング状クラウドを形成する。その後、リング状クラウドは半径方向に広がり、崩壊してゆくと考えられる。

また、壊食試験後のアルミニウム試験片の写真を Fig. 6 (b)に示す。壊食試験はスタンドオフ距離  $x/d=25$  の位置で試験時間は 15 分間で行った。ここに、様相の写真と壊食試験結果の写真は同じスケールである。リング状の壊食痕が認められ、従来から指摘されている結果 [7-9] と符合する。また、Fig. 6 (a)で示されたクラウド崩壊が明瞭に観察される位置は、Fig. 6 (b)に示す壊食痕の位置とおおむね一致していることが確認できる。

### 3.3 画像解析を用いたキャビテーションクラウドの挙動解析

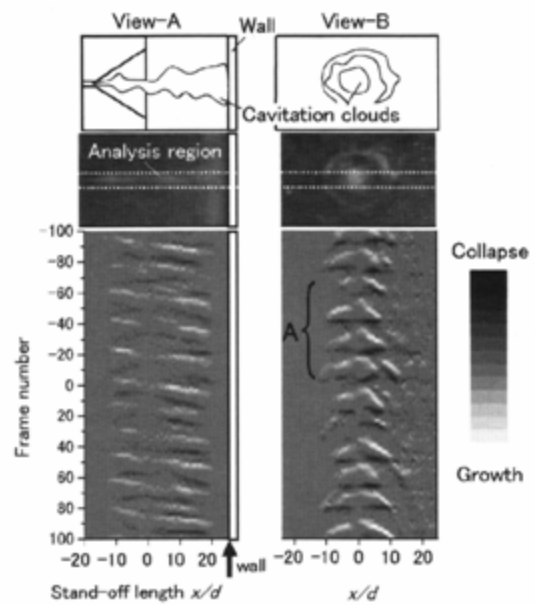
Fig. 7 は Fig. 4 (a)に示された高速度ビデオ観察結果を画像解析した結果である。ここでリング状クラウドは円周状に存在しているため、解析画像の中央付近の狭い領域のみ (リング直径方向: Fig.

7 (a)の上側の画像中の点線部を参照。View-A および View-B はともに  $115 \times 16$  pixels の領域である。ここに、画像解像度は  $2.2 \text{ pixel/mm}$  である。)を解析することで、リング状クラウドの半径方向への挙動を簡易的に評価している。また、キャビテーションクラウドの時間的な変化を観察するため、時間的に連続する2画像のグレーレベルの差を表示した (2.2 参照)。そのコンター表示結果を Fig. 7 (a)に示す。図中の白色領域は撮影された原画像の黒から白への変化が大きいこと、つまりキャビテーションクラウドの成長(あるいは移動)を示している。逆に黒色領域はクラウド崩壊(あるいは消失か移動)を示している。

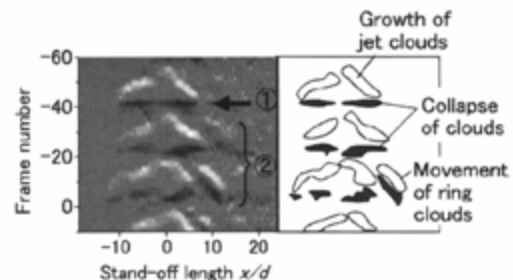
まず、Fig. 7 (a)View-A に示す噴流挙動の軸方向の挙動を観察した画像より、ある程度周期性を持ったキャビティの崩壊挙動が観察できる。ただ、本解析の場合、壁面近傍においてはキャビテーションを含む手前(あるいは奥)方向への流れがじゃまをしているため、壁面のごく近傍付近での気泡崩壊が明瞭にとらえられていない。

Fig. 7 (a)View-B は噴流クラウドおよびリング状クラウドのそれぞれの中心から半径方向への挙動を示したものである。Fig. 7 中の区域 A 付近の詳細および模式図を Fig. 7 (b)に示す。噴流クラウドの成長に対応すると考えられる白色領域が「ハ」の字型を示しており、時間経過とともに径方向外側へ広がっていることがわかる。ここに、白色領域の内側には気泡消滅域に対応する黒色領域が存在しない。つまり、このクラウド域は径方向に成長し、その内部には気泡消滅域を伴わないことから、この挙動は噴流クラウドの成長・拡大挙動を示していると考えられる。このハ字白色域の下にほぼ同一 Frame No.に近い形で、黒色帯状域が横方向に伸びている。これは噴流クラウドがほぼ瞬時に全体的に崩壊していることに符合している(たとえば Fig. 7 (b) ①付近)。

一方、Fig. 7 (b) ②付近においては興味ある結果が認められる。つまり、リング状クラウドの変化を示す白色領域の内側にほぼ平行にクラウドの消失を示す黒色領域を伴う部分が観察できる。気泡域出現を表す白色域の下側に(つまり、時間的に後で)平行に、気泡域消失を表す黒色域が並んで存在することは、半径方向へ気泡クラウド域がその幅をほとんど変えずに移動することを示しており、リング状クラウドが外向きに移動して



(a) Growth and collapse of cavitation clouds



(b) Detailed picture around region A in Fig. 7(a)

$P_1=6\text{MPa}$ ,  $P_2=0.1\text{MPa}$ ,  $\beta=8.0\text{mg/l}$ ,  $T_1=286\text{K}$ ,  $F_s=18000\text{fps}$   
 $x/d=25$

Fig. 7 Image analysis of cavitation clouds.

いることを示している。この例の場合、その後、リング状クラウドは、Frame No.0 付近で、より内側に存在する噴流クラウドとほぼ同時に崩壊している。

このような比較的急激な気泡崩壊を示す黒色領域は主に、図中の横軸、おおよそ  $x/d \sim 15 \sim 15$  の領域(中央部付近を除く)において認められる。この領域で急激に噴流クラウドおよびリング状クラウドが崩壊していることを示している。この結果は、Fig. 6 (b)に示した壊食試験結果の壊食痕リングの直径約  $10 \sim 25 \text{ mm}$  とおおよそ合致する。

#### 4. 結 言

壁面に衝突するジェットキャビテーションについて、衝撃に同期した高速度様相観察を行った。計測された映像を画像解析しキャビテーションクラウド崩壊との対応付けおよび検討を行った。主要な結果をまとめると次のようになる。

(1) キャビテーション噴流における衝突壁面上では、噴流まわりに形成されるキャビテーションクラウド(噴流クラウド)およびリング形状を成し衝突面上を径方向に広がりながら移動するキャビテーションクラウド(リング状クラウド)の少なくとも2種類のキャビテーションクラウドが存在する。

(2) 以上の2種類のキャビテーションクラウドの崩壊に対応して高衝撃が発生する。衝撃はキャビテーションクラウドの非定常崩壊挙動に伴い固体壁面に繰り返し作用する。

(3) 差分形の画像色調解析を行うことでキャビテーションクラウド(気泡群)の非定常高速崩壊挙動あるいは高速変形挙動を捉えることができる。

(4) キャビテーションクラウド崩壊位置を壊食領域と対応付けて示すことができた。これより高速度観察および画像解析を用いて気泡挙動を評価することより壊食領域をある程度予測可能であることを示した。

#### 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究補助金・基盤研究(C)(一般)課題番号:16560161 および若手研究(B)課題番号:18760132の助成を受けていることを付記し、ここに感謝の意を表す。

#### Nomenclature

$P_1$	: injection pressure	[Pa]
$P_2$	: pressure in the vessel	[Pa]
$x/d$	: stand-off distance	[-]
$d$	: diameter of nozzle throat	[m]
$x$	: distance from nozzle	[m]
$T_w$	: temperature of water	[K]
$F_s$	: framing rate of high speed video camera	[fps]

#### Greek letters

$\beta$	: air content	[mg/l]
---------	---------------	--------

#### 参考文献

- [1] Hoyt, J. W. and Taylor, J. J., A Photographic Study of Cavitation in Jet Flow, *Trans. ASME J. Fluids Eng.*, **103**, 14-18 (1981).
- [2] Chahine, G. L. and Genoux, Ph. F., Collapse of a Cavitating Vortex Ring, *Trans. ASME J. Fluids Eng.*, **105**, 400-405 (1983).
- [3] Franc, J. P. and Michel, J. M., *Fundamentals of Cavitation*, Kluwer Academic Publishers (2004).
- [4] 斉藤・佐藤, 円筒オリフィス内部に発生する非定常キャビテーション挙動の可視化, 可視化情報, **23**(5), 46-51 (2003).
- [5] 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), キャビテーションに関するシンポジウム(13回), 日本学会会議(2006).
- [6] 加藤, ターボ機械と環境 キャビテーションを利用した環境保全技術, ターボ機械, **31**(11), 648-654 (2003).
- [7] 清水ほか2名, キャビテーションを伴う噴流の衝突による壊食(第2報: 噴流出口周りおよび衝突面形状の影響), 油圧と空気圧, **22**(1), 57-62 (1991).
- [8] 祖山ほか5名, 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, 機論, B編, **59**(562), 1919-1924 (1993).
- [9] 山内ほか4名, 高速水中水噴流の壊食の発達過程, 機論, B編, **60**(571), 736-743 (1994).
- [10] Momma, T. and Lichtarowicz, A., A Study of Pressures and Erosion Produced by Collapsing Cavitation, *Wear*, **186**(187), 425-436 (1995).
- [11] 寺崎ほか4名, 水中ウォータージェットにおけるキャビテーション衝撃力に関する研究, 機論, B編, **64**(623), 2004-2010 (1998).
- [12] 小林ほか3名, 破断・放出にかかわるキャビテーションジェットのキャビティ界面の非定常挙動, 機論, B編, **71**(703), 804-810 (2005).
- [13] Saito, Y and Sato, K., Instantaneous Behavior of Cavitation Clouds at Impingement of Cavitating Water-Jet, *Sixth International Symposium on Cavitation (CAV2006)*, Paper No.57, 1-5 (2006).