

キャビテーション・ウォータージェットにおける衝突壁面近傍の キャビテーションクラウドの崩壊・衝撃の様相*

佐藤 恵一^{*1}, 大慈弥 三郎^{*2}, 杉本 康弘^{*1}

Collapsing and Impulsive Behavior of Cavitation Clouds on Cavitating Water-Jet Impinging on Solid Wall

Keiichi SATO, Saburo OHJIMI and Yasuhiro SUGIMOTO^{*3}

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of Technology,
7-1 Ogioka, Nonoichi-machi, Ishikawa-gun, Ishikawa, 921-8501 Japan

It is known that ring-shaped cavitation clouds are formed when a cavitating water jet impinges on solid wall. The ring-shaped cavitation clouds cause ring-shaped erosion distribution. In this study, we use a confined channel in order to observe the two-dimensional view of cavitating jet. We observe the collapsing behaviors and formation process of cavitation clouds spreading on solid wall in order to directly connect the collapsing behavior of cavitation clouds with the erosion distribution. As a result, at least two types of bubble collapse behavior can be observed. The one is a collapse of cavitation clouds around jet center and the other is in the peripheral portion on the impinging wall.

Key Words: Water Jet, Cavitation, Image Analysis, Frame Difference Method, Cavitation Erosion

1. 緒 言

高速液流中のはく離流れ場において発生するキャビテーションは、ある程度の大きさまで成長すると流れ場に影響を与え⁽¹⁾、キャビテーション特有の非定常な流れ場を形成する⁽²⁾。この非定常性によりキャビテーションクラウドが周期的に放出され、付着形キャビテーションでの周期的なりエントラント挙動の発生そして圧力変動や高い衝撃作用が引き起こされる^{(3)~(9)}ことが明らかにされている。

一方、水中の高速水噴流まわりに発生するジェットキャビテーションにおいても、クラウドキャビテーションが形成され非定常な挙動を示すことが知られており、カッピング、ショットレスピーニングおよび洗浄等にとどまらず微粒化技術や殺菌など幅広い分野で利用されている^{(10)~(13)}。このような高衝撃・壊食には気泡クラウドの非定常性が大きく関係しており、作動環境によりその結果は大きく異なる。キャビテーションクラウドがある程度密になると気泡崩壊に伴う圧力

波の集中化作用が起こり強い衝撃波が発生することが明らかにされているが^{(14)~(16)}、非定常なクラウド放出を呈するキャビテーション・ジェットの衝撃発生メカニズムにはまだ不明な点が多い。

このような状況の下、著者らは非定常キャビテーションクラウドの衝撃メカニズムについて、高速度ビデオ計測および画像処理を中心に研究を行っている^{(17)~(20)}。高速度キャビテーションクラウドの非定常挙動およびクラウド崩壊時に発生する圧力波に伴う気泡崩壊伝播挙動の定量的評価を画像解析を用いて行い、その結果、クラウドキャビテーションに伴う非定常現象あるいは高衝撃現象にはクラウド崩壊時の圧力波の発生が密接に関連していることなどを示す結果を得ている。

本研究では、キャビテーション・ウォータージェットによる衝撃・壊食に直結するキャビテーションクラウドの崩壊挙動の解明を目的とし、高速度ビデオ観察するとともに得られた映像を画像解析した。とくに、ウォータージェット特有のリング状壊食痕に着目し、壁面近傍におけるキャビテーションクラウドの崩壊挙動と衝撃発生機構との関係を明らかにした。

* 原稿受付 2008年7月2日。

^{*1} 正員、金沢工業大学工学部(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)。

^{*2} 学生員、金沢工業大学大学院機械工学専攻。

E-mail: y-sugi@neptune.kanazawa-it.ac.jp

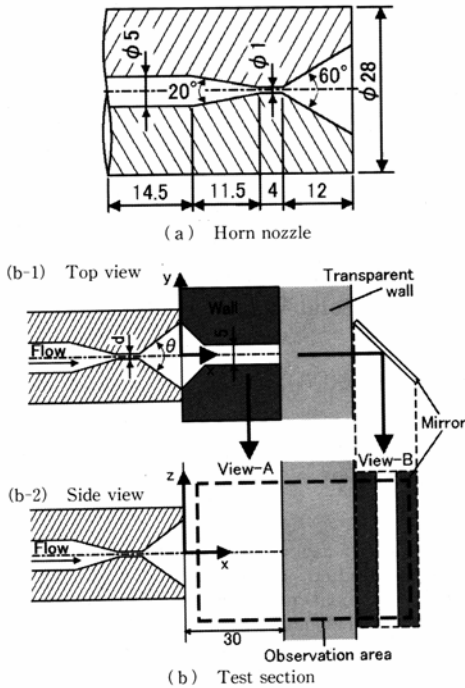


Fig. 1 Schematic diagram of test section

2. 実験装置および方法

本研究では、図1(a)に示すようなど径 $d=1$ mm、開口角 $\theta=60^\circ$ のホーンノズルを用い、図1(b)に示すような試験部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6 MPaに設定し、大気圧 P_2 下の水槽へ噴出した。噴流衝突面近傍での気泡崩壊挙動を2次元的に観察するために、あえてノズル下流部の流路幅を5 mmに狭めた拘束流路を用いた。透明アクリル樹脂壁面をノズル中心軸に垂直にスタンドオフ距離 $x/d=30$ の位置に設置し、衝突面とした。そのアクリル樹脂壁面の背後には鏡をノズル中心軸に対して 45° 傾けて配置し、同時に2方向からの観察(噴流側面方向と噴流面方向)を行った。ここに、ノズル出口を原点とし、ノズル中心軸方向を x 軸、ノズル中心軸に垂直方向(衝突面に沿う方向)を y および z 軸とした。

キャビテーションクラウドの挙動は2台の高速度ビデオカメラ(KODAK, MODEL HS 4540)および(Photron, FASTCAM SA 1)を用いて、それぞれ $F_s=27\,000$ fps、 $F_s=100\,000$ fps の撮影速度で観察を行った。衝突面を構成する試験片にアルミニウム(A 1070)を用いて60分間の壊食実験を行った。試料

水中の空気含有量は溶存酸素量 β の形で評価している。また、フレーム間差分法⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾を用いてキャビテーションの挙動の変化を画像解析した。

3. 実験結果

3.1 壁面近傍のキャビテーションクラウドの崩壊様相 壁面に衝突するキャビテーションジェットを噴流側面および噴流断面の2方向から観察した結果を図2に示す。ここで、図2中のView-Aの画像は噴流側面方向からのもので、スタンドオフ距離 $x/d=20\sim 30$ の領域(図中左上に示す模式図の点線内領域 10×40 mm)を示している。同様に、View-Bは噴流面方向画像(5×40 mm)である。ここに、図2に示すようにキャビテーションジェットは全体的に非定常的な挙動を示し、周期的にキャビテーションクラウドが壁面に衝突していることがわかる。

観察結果から壁面近傍で崩壊するキャビテーションクラウドには少なくとも2つのパターンがあることが確認される。2つの崩壊パターンをそれぞれ図2中のa, bに示す。まず、図2中のaに示す崩壊パターンは、壁面に衝突したキャビテーションクラウドが1つの塊のままノズル中心軸付近で崩壊する様相である。壁面に近づいてくるキャビテーションクラウド(図2中のaで示す矢印部)がFrame No. 12付近で壁面に到達している。このキャビテーションクラウドは、1つの塊のままFrame No. 14~18付近で壁面近傍において変形し、Frame No. 20、 $z/d=0$ 付近で崩壊している。View-Bにおいてもキャビテーションクラウドが1つの塊のまま $z/d=-5\sim 5$ 近くで崩壊している様相が観察できる。これが1つ目の崩壊パターンである。

もう1つの崩壊パターンは、図2中のbに示すように壁面に衝突した噴流が衝突中心からキャビテーションクラウドとして外側に広がり崩壊する様相である。Frame No. 24付近でそのクラウドが現れている。クラウドはFrame No. 26~38で成長しながら外側に移動し、Frame No. 40、 $z/d=\pm 10\sim \pm 15$ 付近で崩壊している。View-Bにおいても矢印で示すように噴流衝突中心から外側に広がり崩壊していくクラウドが観察できる。

ここで、これらの図2に示した画像に対してフレーム間差分法を用いて画像解析を行った。解析方法を図3に示す。図3(a), (b)はそれぞれ図2におけるFrame No. 38, 40の平均グレーレベル分布を示している。そして、図3(c)は(a)と(b)の差分をとったグレーレベル分布を示している。このような差分作業

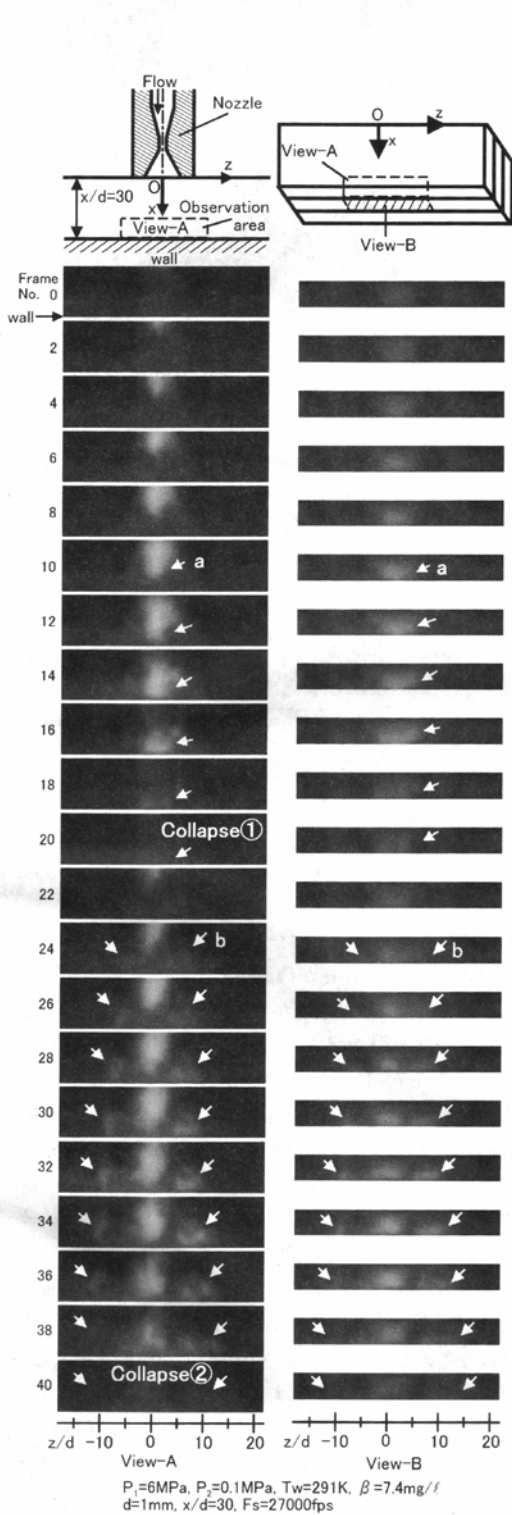


Fig. 2 Two patterns of collapsing behavior in cavitating jet

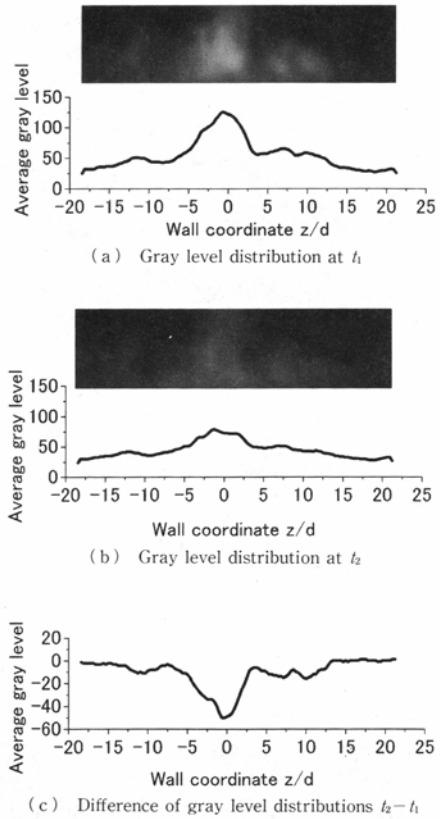


Fig. 3 Image analysis method (frame difference in surface direction of impinging wall)

をすべてのフレーム間で行うことで、図4に示す解析結果を得ることができる(図4上部には参考のためにFrame No.-24時の原画像を付す)。図4における解析間隔は2 Frameである。図4中ではキャビティの出現する領域を白色、消滅する領域を黒色で表している。

図4では白色領域と黒色領域が時間経過に伴い交互に存在している。このことからキャビテーションクラウドが周期的に壁面に衝突、崩壊していることが分かる。さらに、図4のFrame No.0付近から白色領域が現れ、それに続いてFrame No.20付近まで黒色の領域が存在していることが読み取れる。これは、図2中のaで示した壁面に衝突したキャビテーションクラウドが噴流衝突中心付近で崩壊していることを表している。その後、図2のFrame No.22では、次のキャビテーションジェットが近づいており、図4のFrame No.22付近の $z/d=0$ 付近に白色領域が現れる。そのまわりを外側に向かって広がっていく帯状白色領域が認められる。これは、図2中のbで示したキ

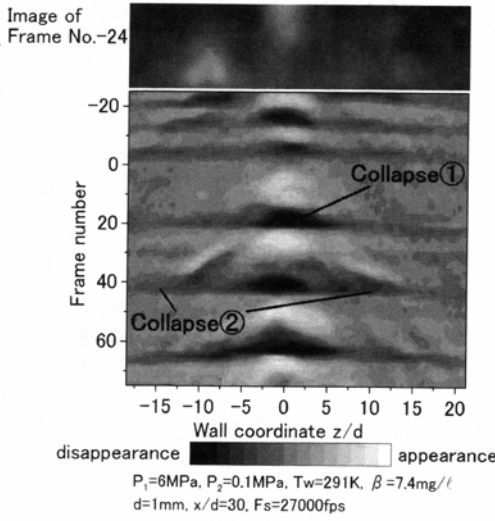


Fig. 4 Image analysis of cavitation clouds

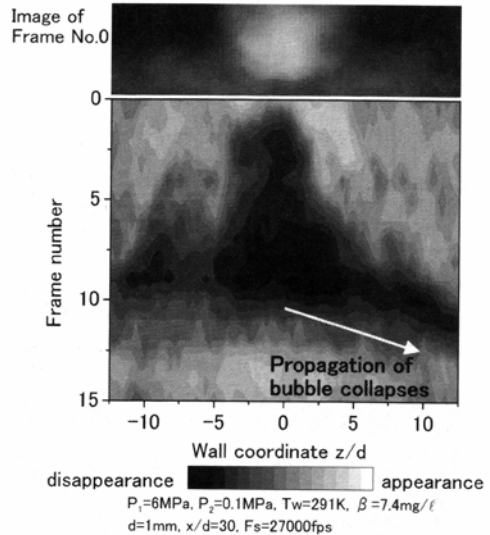


Fig. 6 Propagation of bubble collapses

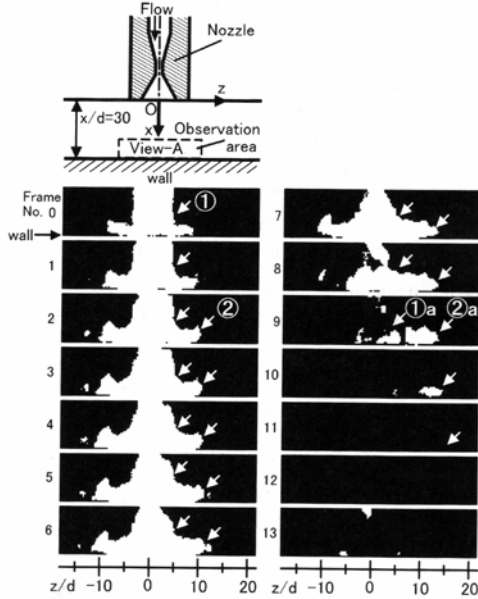


Fig. 5 Detailed behavior of cavitation cloud collapse

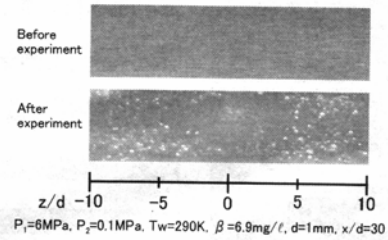


Fig. 7 Erosion pits distribution

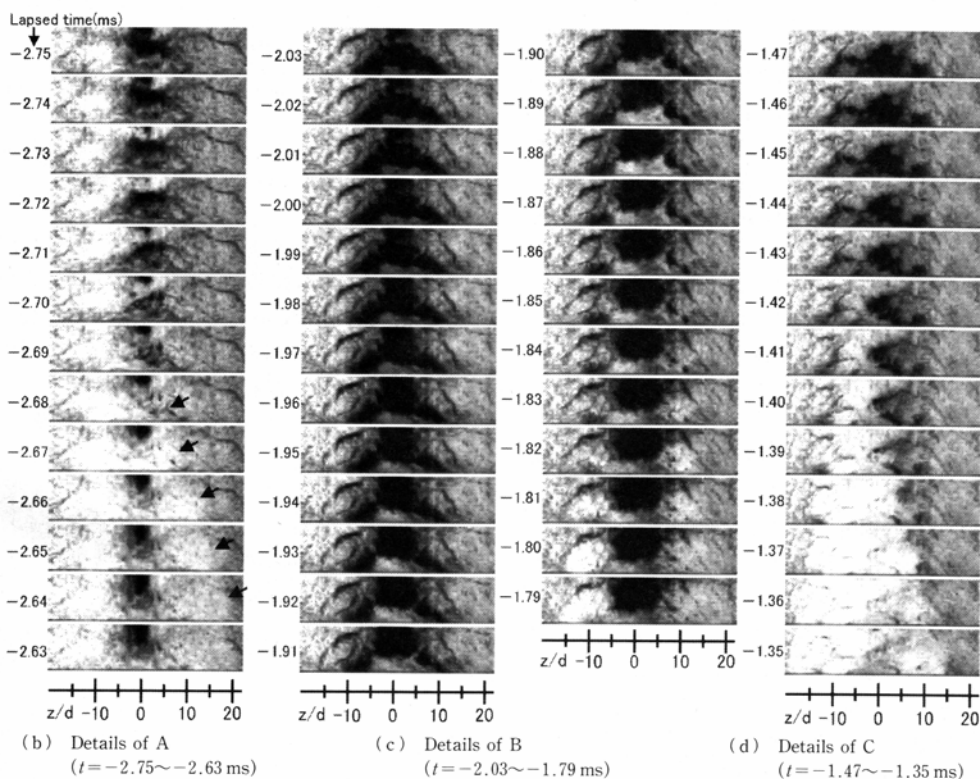
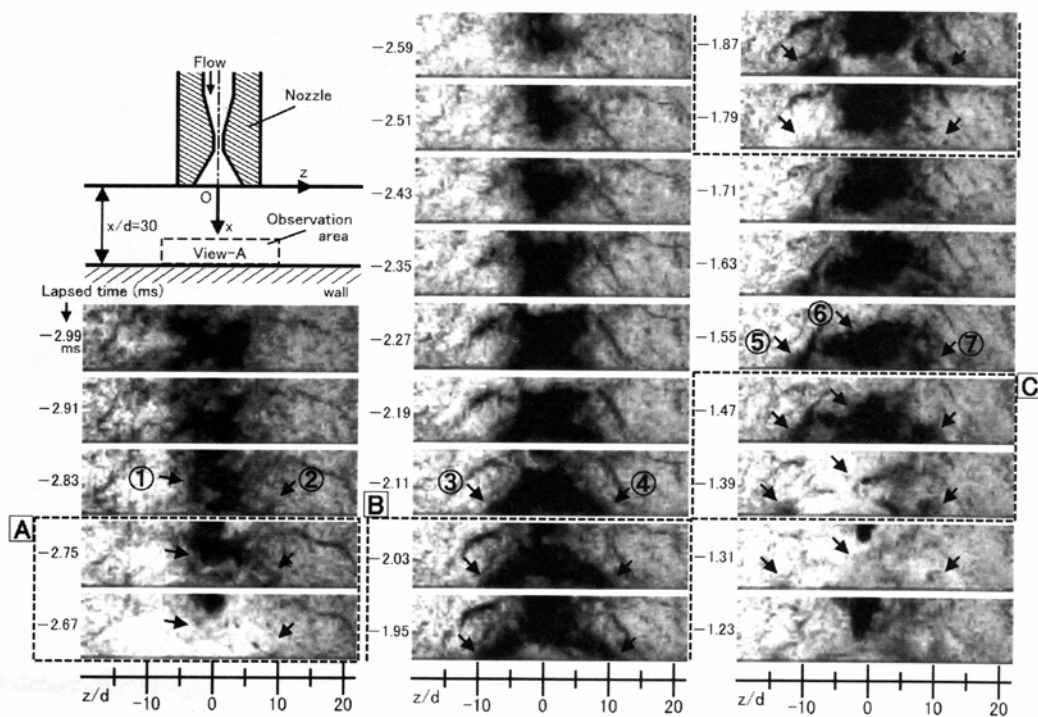
キャビテーションクラウドが Frame No. 24 付近で現れ、周辺部方向に成長している様相を表している。したがって、この外側に広がるクラウドの崩壊が、図 4 における Frame No. 40, $z/d = \pm 10 \sim \pm 15$ 付近の黒色領域に相当していることになる。

3.2 キャビテーションクラウドの連鎖的崩壊

次に、キャビテーションクラウドの崩壊時付近で特徴的に認められたクラウド連鎖的崩壊現象の一例を図 5 に示す。図 5 において、噴流衝突中心近傍に存在するキャビテーションクラウド(図 5 中の矢印①)とその周

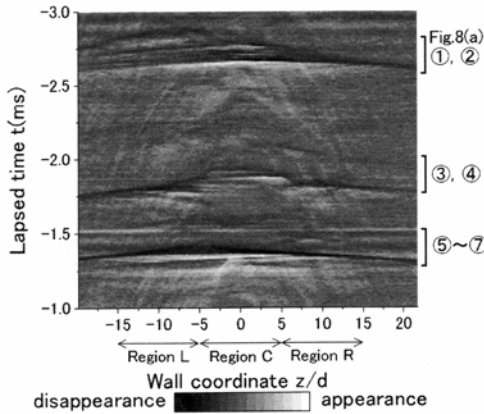
辺部に存在するキャビテーションクラウド(図 5 中の矢印②)の 2 つの存在が確認される。ここに、キャビテーションクラウド崩壊が周囲のクラウドに伝播し連鎖的崩壊を引き起こしている様相が観察できる。Frame No. 7~10 近傍で噴流衝突中心にあるキャビテーションクラウド(図 5 中の矢印① a)が崩壊・消滅し、この崩壊に引き続いて Frame No. 8~11 近傍で外側に存在するキャビテーションクラウド(図 5 中の矢印② a)が崩壊・消滅している。

この崩壊の連鎖性を評価するために解析間隔を 1 Frame にとりフレーム間差分を用いてさらに詳細な画像解析を行った。解析結果を図 6 に示す(図 6 上部には参考のために Frame No. 0 時の原画像を付す)。 $z/d = 0$ 付近の崩壊を示す黒色領域(Frame No. 1~10)から傾きを持って外側に伸びる連続的な黒色領域(Frame No. 8~12)が存在することがわかる。この一連の帯状領域は連鎖的崩壊に対応していると考えられる。この黒色帯状領域の傾きから、連鎖的崩壊の伝播速度は、おおよそ 130 m/s 程度と評価される。



$P_1 = 6$ MPa, $P_2 = 0.1$ MPa, $T_w = 290$ K, $\beta = 7.2$ mg/L, $d = 1$ mm, $x/d = 30$, $F_s = 100\,000$ fps

Fig. 8 Collapsing behavior of cavitation cloud near wall

Fig. 9 Image analysis for z -axis direction

3.3 キャビテーション壊食実験 キャビテーションクラウドの崩壊挙動と衝撃・壊食との関係を探るために、衝突壁面に柔らかなアルミニウム材料を選び壊食痕分布を調べてみた。

図7に壊食実験前と実験後の試験片表面様相を示す。壊食痕の分布を見ると噴流中心軸付近の $z/d = -5 \sim 5$ の範囲には壊食痕があまり見られず、噴流周辺領域に対応する $z/d = \pm 5 \sim \pm 10$ 程度の範囲に壊食痕が多く見られる。本実験は流路幅を拘束した流路であるが、上述の壊食痕分布に関する結果は拘束の無い軸対称ウォータージェット衝突面で観察されるリング状壊食痕に符合するものと考えられよう。

3.4 噴流周辺部壊食痕に関連する気泡崩壊の様相

図8に、キャビテーションジェットの衝突面近傍での挙動をさらに詳しく調べるために、 $F_s = 100\,000$ fpsの超高速撮影した結果の一例を示す。ここで、図8中の画像はスタンドオフ距離 $x/d = 20 \sim 30$ の領域(図中左上模式図の点線内領域 10×40 mm)を示したものである。照明を試験部背面方向から当てて撮影しているため、この画像では気泡領域が黒く、背景が白く表示されている。なお、図8(a)の各様相は全体の変化を示すために8 Frame 間隔で示され、撮影経過時間 t が直接表記されている。図8(b)、(c)、(d)には、代表的なキャビテーションクラウドの崩壊消滅挙動に対応する図8(a)のA、B、Cの各部分の詳細を、それぞれ時間間隔(b) $t = -2.75 \sim -2.63$ ms、(c) $t = -2.03 \sim -1.79$ ms、(d) $t = -1.47 \sim -1.35$ ms と1 Frame 間隔で詳細様相を示している。

例えば、図8(a)の $t = -2.83$ ms の画像においては、噴流軸中心付近の噴流軸全体にわたりキャビテーションクラウドが存在している。時間経過とともに衝

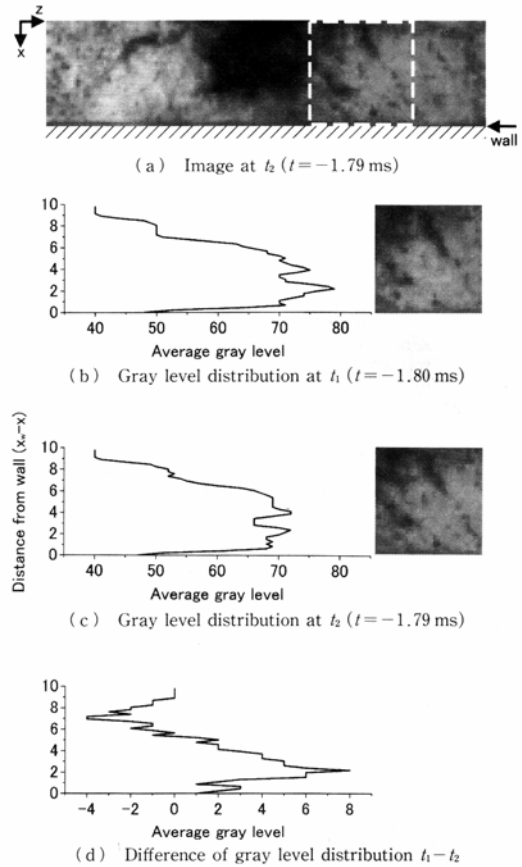


Fig. 10 Image analysis method (frame difference in normal direction to impinging wall)

突壁面近傍のクラウドは少なくなり、 $t = -2.67$ ms 付近で消滅している [図8(a)の矢印①、②を参照]。その後、その消滅域は外側方向へ伝播していく。この時の詳細な様相を図8(b)に示す。図8(b)より、噴流軸中心近傍に存在するクラウドが $t = -2.69 \sim -2.67$ ms 近傍で消滅した後、時間経過とともに消滅領域が外側へ広がっていく様子が確かめられる(図中の矢印参照)。また、その後、図8(a)において $t = -2.59 \sim -2.51$ ms 付近で新たなキャビテーション噴流が壁面に向かって衝突し、 $t = -2.35$ ms 付近から外側に広がっている様相が見られる。ついで、 $t = -2.03$ ms 付近から噴流中心軸上で壁面近傍の気泡クラウドが消えはじめる。その詳細を示す図8(c)から、消滅域が周囲に広がっていくのが観察される。周辺方向へ広がった気泡クラウドは、この消滅域の拡大(伝播)の影響を受け、おおよそ $z/d = \pm 10$ の位置の壁面上に付着形の気泡クラウドとして存在する($t = -1.91$ ms など参照)のが読み取れる。そして、この1対の壁

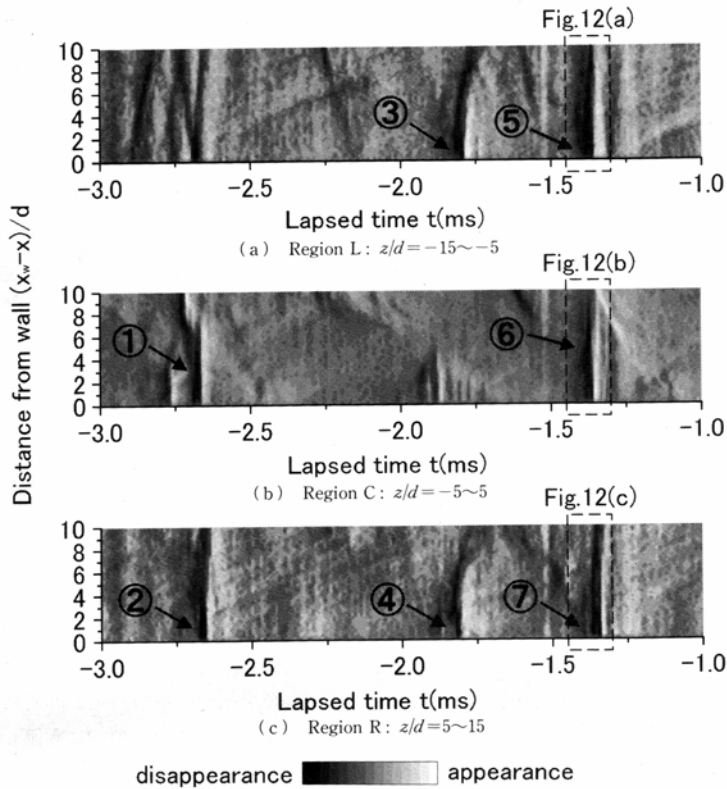


Fig. 11 Image analysis for x -axis direction

面上気泡は最終的に $t = -1.79$ ms 付近で崩壊している [図 8(a)の矢印③, ④を参照]。図 8(c)を見ると, $t = -2.03$ ms ではすでに噴流軸中心上で崩壊が起こり, 急速に周辺に広がっていくことがわかる。そして, $t = -1.82$ ms 付近で $z/d = 10$ 付近に存在するクラウドが消滅し, $t = -1.80$ ms 付近で $z/d = -10$ 付近に存在するクラウドが消滅している。

さらに, 図 8(a) $t = -1.55 \sim -1.39$ ms でも同様に, 噴流中心軸上に存在するキャビテーションクラウドが崩壊後, 少し遅れて外側のクラウドが崩壊している [図 8(a)の矢印⑤, ⑥, ⑦を参照]。この時の詳細な様相を図 8(d)に示す。図 8(d)を見ると崩壊伝播の始まりが噴流軸中心から少しずれており, $t = -1.42$ ms で $z/d = -5$ 付近のクラウドが崩壊している。この崩壊が伝播して噴流軸中心のクラウドと外側に広がったクラウドが崩壊していることが読み取れる。

以上のように, 図 8 に示した崩壊様相を見ると, 噴流中心軸付近での崩壊の影響を受けて, 周辺部に広がったクラウドが壁面にごく近い位置で崩壊している様相が読み取れる。このことを確認するために, 領域を

分けて画像解析(フレーム間差分法)を行い崩壊位置の特定を試みた。解析間隔(フレーム差)は 1 Frame である。

まず, 図 9 には壁面に沿う領域(z 軸方向)全体における解析結果を示す。これより, 大きく噴流中心領域から周辺部に広がる 3 つの崩壊挙動が認められる。それぞれ図 8(a)では, おおよそ時間 $t = -2.83$ ms (矢印①, ②), $t = -2.11$ ms (矢印③, ④), $t = -1.55$ ms (矢印⑤~⑦)付近から始まる消滅運動に符合する。

つぎに, このような消滅運動について, 噴流中心部(図 9 における領域 C: $z/d = -5 \sim 5$)と周辺部(領域 L: $z/d = -15 \sim -5$, 領域 R: $z/d = 5 \sim 15$)に壁面領域を分けて検討し, 壁面から崩壊点までの位置関係(x 方向)を調べてみる。図 10 に噴流軸方向(x 方向)の変化を調べるための解析手順を示す。図 10(a)は, 図 8 の時間 $t = -1.79$ ms の画像であり, 画像中の点線で囲まれた領域を切り出し画像解析を行う。図 10(b)は, この領域の $t = -1.80$ ms, (c)は $t = -1.79$ ms での平均グレーレベル分布をそれぞれ示している。縦軸は壁からの距離 $x_w - x$ を示しており, ここにノズル出口から壁面までの距離 $x_w = 30$ mm である。そし

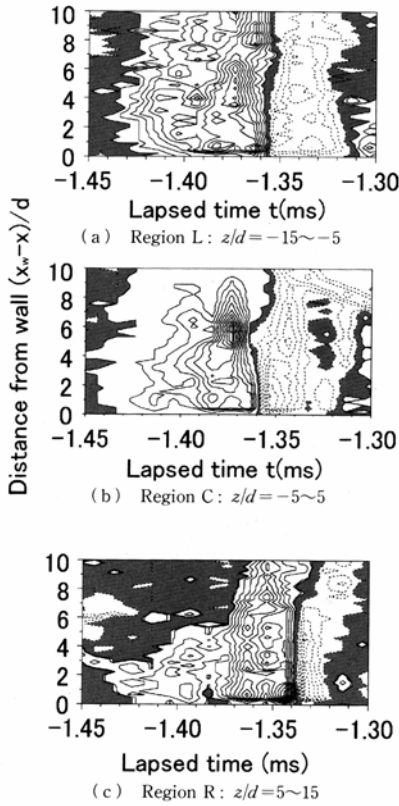


Fig. 12 Image analysis using contour line

て、図10(d)は、(b)と(c)のグレーレベル分布のフレーム間の差をとったものである。

このようにして解析した噴流軸方向(x 軸方向)の変化を図11に示す。図11には、(a)噴流周辺領域L、(b)噴流中心領域C、(c)噴流周辺領域Rの3つの範囲についての解析結果を示す。ここでは、壁面からの垂直方向座標を縦軸に選び、時間経過に対しての変化を示してある。まず、噴流周辺領域L、Rに対応する図11(a)および(c)には、気泡消滅崩壊挙動に対応する何本かの黒色帯状域の存在が読み取れる。空間座標に対する時間座標であり、帯状域の傾きは速度を表すことになり、一般に速度の大きな変化であることがわかる。噴流中心領域Cに対応する図11(b)においても同様である。図11の矢印①～⑦で示す黒色帯状域は、図8(a)で示した崩壊様相①～⑦にそれぞれ対応している。すなわち、矢印①、②で示す黒色帯状域は時間 $t = -2.67$ ms付近の崩壊様相、矢印③、④で示す黒色帯状域は時間 $t = -1.79$ ms付近の崩壊様相、矢印⑤～⑦で示す黒色帯状域は時間 $t = -1.39$ ms付近の崩壊様相にそれぞれ対応する。

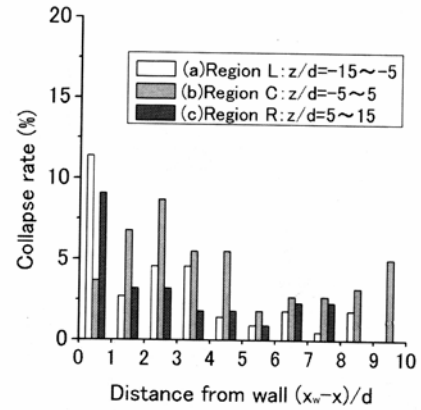


Fig. 13 Difference of collapse rate in positions

ここに、図11で示した黒色帯状域からは、色調分解能の関係上、崩壊位置の壁面からの距離を特定することがやや難しい。そこで、崩壊位置を明瞭に示すためにグレーレベルを等高線の形で表した結果を図12に示す。等高線の間隔は、グレーレベルの最大値と最小値を比例配分して20等分したものとなっている。ここに、グレーレベルの変化が非常に大きいところは、内挿で等高線位置を近似的に評価している。図12において、グレーレベルの正值、すなわちキャビティの出現する領域を点線、グレーレベルの負値、すなわち消滅・崩壊する領域を実線で表している。そして、正值から負値に変わる領域(グレーレベル0)を灰色で塗りつぶして表している。図12は、図11における時間 $t = -1.45 \sim -1.30$ msの範囲[図8(a)における矢印⑤、⑥、⑦で示す崩壊の近傍]を取り出して解析した一例である。

さて、キャビテーションクラウドの崩壊点を評価してみよう。ここでは、画像色調がもっとも黒色な領域に対応する等高線の頂点領域が気泡の消失領域(崩壊あるいは移動)と考えられる。単なる移動の場合は隣に発生領域を伴う。ただし、気泡リバウンドの場合も同じ状態となるが、その区別は原画像との対比で判別される。また、一般に気泡挙動はその崩壊時に急激な変化をし成長時には相対的に緩やかな変化をすることはよく知られた性質である。つまり、グレーレベルの変化が大きな等高線密度の高い部分が崩壊点近傍に相当すると言える。例えば、噴流中心領域Cの崩壊様相を示す図12(b)では $(x_w - x)/d = 6$ 付近で等高線の密度が高くなっている。それに対して、噴流周辺領域L、Rの崩壊様相を示す図12(a)、(c)では、 $(x_w - x)/d = 0 \sim 1$ 付近で等高線の密度が高くなっている。これらより、噴流中心領域での崩壊では壁面から離れた位

置で崩壊し、噴流周辺領域での崩壊では壁面に近い位置で崩壊していることが読み取れる。このような崩壊挙動がキャビテーション噴流におけるリング状壊食につながっていると考えられよう。

以上は代表例であるが、図12の代表例と同じ解析方法を用いて崩壊位置を(a)周辺領域L、(b)中心領域C、(c)周辺領域Rについて解析し、ビデオ映像とも合わせ比較検討して特定した。それぞれにおいて50例以上、全体で219例について解析し、壁面からの崩壊位置を評価した。結果を図13に示す。崩壊数の総和を100%とし、壁面からの距離を1mm間隔で区切り、それぞれの区間での崩壊頻度を示している。図13より、壁面近傍領域($(x_w - x)/d = 0 \sim 1$)で周辺領域の崩壊が最も大きな頻度を示している。それに対して、それ以外の壁面から離れた領域では噴流中心領域Cが最も大きな崩壊頻度を示している。この結果から、噴流中心領域では壁面からやや離れた位置で崩壊し、噴流周辺領域では壁面に近い位置で崩壊する傾向が相対的にあることが読み取れる。

これまで示した画像解析と崩壊様相結果から、キャビテーションクラウド崩壊の伝播挙動が3・3節で示したようなリング状壊食に関連していると考えられる。噴流中心領域だが壁面から離れた位置でのキャビテーションクラウド崩壊が伝播することで、噴流周辺領域のクラウドが壁面近傍で急激な崩壊挙動を示すことになる。このような壁面近傍での急激な崩壊挙動は高衝撃性を示す⁽¹⁵⁾⁽²¹⁾。さらに、図8で示した噴流周辺領域のクラウド崩壊位置はおおよそ $z/d = \pm 10$ 付近であり、壊食実験の結果とも一致し、このような崩壊挙動とリング状壊食痕との関連性が確かめられる。

4. 結 言

リング状壊食痕と気泡崩壊の直接的な関連付けを目的として、キャビテーションジェットの壁面近傍での崩壊様相を高速度ビデオ観察した。

(1) 壁面への衝突キャビテーションクラウドにおいて、1つの塊のまま噴流中心領域で崩壊するタイプ(噴流中心タイプ)と、壁面に衝突したキャビテーションクラウドが外側に広がり噴流周辺領域で崩壊するタイプ(噴流周辺タイプ)の少なくとも2つの崩壊パターンが観察された。

(2) 部分的なキャビテーションクラウド崩壊が、その周囲のクラウド崩壊を順次引き起こす連鎖的崩壊挙動の存在を明らかにし、画像解析とともに示した。

ここに、クラウド崩壊が噴流中心付近から連鎖的に周辺部に向かい、壁面近傍での崩壊が引き起こされる

様相が観察された。

(3) キャビテーションクラウドの詳細な崩壊位置を画像解析により示した。この結果から、噴流中心タイプは壁面からある程度離れた位置で崩壊する比率が高いこと、一方、噴流周辺タイプは壁面にごく近い位置で崩壊する比率が高いことを示した。この挙動の差がリング状壊食痕の形成に関連すると考えられる。

文 献

- (1) Sato, K., A Study of Cavitation Process by Means of Acoustic Pulse Measurement, *Proceedings of International Symposium on Cavitation Research Facilities and Techniques*, ASME, FED-Vol. 57 (1987), pp. 115-121.
- (2) Knapp, R. T., Recent Investigations of the Mechanics of Cavitation and Cavitation Damage, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 77 (1955), pp. 1045-1054.
- (3) Furness, R. A., Studies of the Mechanics of Fixed Cavities in a Two-Dimensional Convergent-Divergent Nozzle, *Cavitation, I Mech E, C 160/74* (1974), pp. 119-128.
- (4) Kubota, A., Kato, H., Yamaguchi, H. and Maeda, M., Unsteady Structure Measurement of Cloud Cavitation on a Foil Section Using Conditional Sampling, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 111 (1989), pp. 204-210.
- (5) Le, Q., Franc, J. P. and Michel, J. M., Partial Cavities: Global Behavior and Mean Pressure Distribution, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 115 (1993), pp. 243-248.
- (6) Oba, R., The Severe Cavitation Erosion, *Proceedings of 2nd International Symposium on Cavitation*, (1994), pp. 1-8.
- (7) Sato, K., Nakamura, H. and Saito, Y., Observations of Unsteady Separated-Type Cavitation in Convergent-Divergent Channel, *Proc. 3rd International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow*, (2001), pp. 203-210.
- (8) Sato, K. and Saito, Y., Unstable Cavitation Behavior in a Circular-Cylindrical Orifice Flow, *JSME International Journal, Series B*, Vol. 45, No. 3 (2002), pp. 638-645.
- (9) Sato, K. and Shimojo, S., Detailed Observations on a Starting Mechanism for Shedding of Cavitation Cloud, *Proceedings of Fifth International Symposium on Cavitation*, (2003), pp. 1-7, on CD-ROM.
- (10) Yamaguchi, A. and Shimizu, S., Erosion Due to Impingement of Cavitating Jet, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 109 (1987), pp. 442-447.
- (11) Soyama, H., Yamauchi, Y., Adachi, Y., Sato, K., Shinoda, T. and Oba, R., High-Speed Observation of the Cavitation Cloud around a High-Speed Submerged Water-Jet, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 59, No. 562 (1993), pp. 1919-1924.
- (12) Kalumuck, K. M. and Chahine, G. L., The Use of Cavitating Jets to Oxidize Organic Compounds in Water, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 122 (2000), pp. 465-470.
- (13) Kato, H., Environmental Protection Using Cavitation Technology, *Turbomachinery*, Vol. 31, No. 11 (2003), pp. 648-654.

- (14) Reisman, G. E., Wang, Y.-C. and Brennen, C. E., Observations of Shock Waves in Cloud Cavitation, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 355 (1998), pp. 255-283.
- (15) Morch, K. A., Cavity Cluster Dynamics and Cavitation Erosion, *ASME Cavitation and Polyphase Flow Forum*, (1981), pp. 1-10.
- (16) Okuda, K. and Ikohagi, T., Numerical Simulation of Collapsing Behavior of Bubble Clouds, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 62, No. 603 (1996), pp. 3792-3797.
- (17) Saito, Y. and Sato, K., Instantaneous Behavior of Cavitation Clouds at Impingement of Cavitating Water-Jet, *Progress in Multiphase Flow Research*, No. 2 (2007), pp. 47-53.
- (18) Saito, Y. and Sato, K., Instantaneous Behavior of Cavitation Clouds at Impingement of Cavitating Water-Jet, *Proceedings of Sixth International Symposium on Cavitation, CAV 2006*, (2006), on CD-ROM.
- (19) Saito, Y. and Sato, K., Bubble Collapse Propagation and Pressure Wave at Periodic Cloud Cavitation, *Proceedings of 6th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007*, No. S7_Tue_C_25 (2007), on CD-ROM.
- (20) Sugimoto, Y., Oojimi, S. and Sato, K., Measurement of Cavitation Clouds in Cavitating Jet Impinging on Solid Wall Using Frame Difference Method, *Journal of Jet Flow Engineering*, Vol. 24, No. 3 (2007), pp. 32-38.
- (21) Sato, K. and Kondo, S., Collapsing Behavior of Vortex Cavitation Bubble near Solid Wall under Flow Condition (Bubble Patterns from Viewpoint Perpendicular to Solid Wall), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 63, No. 606 (1997), pp. 16-21.