

キャビテーションクラウドの挙動と圧力波伝播の可視化(高速度ビデオ観察)

Behavior of Cavitation Cloud and Visualization of Pressure Wave Propagation (High Speed Video Observations)

○佐藤恵一(金沢工大) 杉本康弘 能登吉隆(金沢工大・院) 地引雄志

Keiichi Sato, Department of Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of Technology

Yasuhiro Sugimoto, ditto.

Yoshitaka Noto, ditto.

Yuushi Jibiki, ditto.

Cavitation cloud phenomena are experimentally investigated through a high-speed-video observation to understand quantitatively the behavior of pressure wave generated at the cloud collapse using the frame difference image analysis method. It is confirmed that the present image analysis method is useful to visually catch the propagation of pressure wave using experimental observations and sound pressure measurements in the case of a cavitating water jet impinging on solid wall. It is also made clear that the formation of pressure wave at the cloud collapse can cause the secondary collapse of cavitation cloud. Further, for the cloud cavitation in a convergent-divergent nozzle, it is shown that the reentrant motion can be induced through the pressure wave caused by the collapse of shedding cavitation cloud and can be accompanied with local cloud collapses and pressure wave formation/ propagation.

Key Words: Cavitation Cloud, Pressure Wave Propagation, High Speed Video Observation, Frame Difference Image Analysis

1. 緒言

キャビテーション現象は多数の微細気泡群つまりキャビテーションクラウドとして運動することが多く、しかもクラウド崩壊時には1個の気泡と同様に激しく収縮崩壊し衝撃波を伴う非正常挙動を呈することが、これまでの理論面を含めた多くの研究により明らかにされている(例えば、Brennenら[1])。

ここに注目すべきことは、実際の流れ場で生じたクラウドの動的挙動であり、クラウド中での圧力波形成および伝播の過程、そしてそれらとキャビテーション衝撃・壊食との関係などである。さらには、クラウドの代表例である翼などに生じるクラウドキャビテーションの周期的リエントラント挙動の機構や産業的に注目されるキャビテーション・ウォータージェット(以下、CAV-WJと略す)などの特性を解明することである。

本報告においては、筆者らのグループのこれまでの発表(例えば、[2])を中心に新しい結果を加え、以上の諸点に関連する事項についてまとめて提示する。代表的なキャビテーションクラウドとして、衝突壁面近傍のCAV-WJ および収縮拡大流路における非正常クラウドキャビテーションを取り上げる。超高速度のビデオカメラを用いるが、キャビテーション流れの定量的画像解析として、フレーム間差分法の適用を試み、その有効性を明らかにする。本手法は、クラウドを構成する微細気泡群の発生・消滅あるいは移動を利用し可視化するものでキャビテーションクラウドの挙動解析に有用であると考えられる。

2. 実験装置および方法

本研究では2種類の方法でキャビテーションクラウドを発生させ、挙動観察および圧力波の可視化を行っている。図1(a)に示す収縮拡大ノズルおよび図2に示す水中ウォータージェットで発生するキャビテーションクラウドである。発生したキャビテーションクラウドは、図1(b)に代表的に示す高速度ビデオ(Photron, SA5)システムを用いて観察した。撮影時に

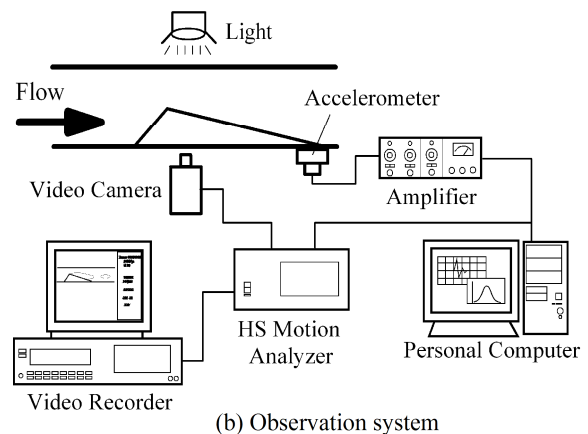
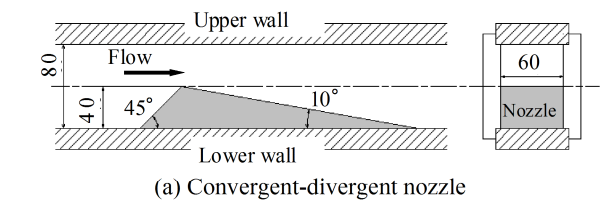


Fig.1 Experimental setup

は外壁面上に加速度計(TEAC, 703FB)を取り付け、映像と衝撃波形を同期計測している。試料水としては水道水を用い、試料水中の溶存空気量を溶存酸素量 β の形で評価した。図2中の右図に示すようにウォータージェット観察流路にはハイドロフォン(Muller; Platte Needleprobe)を所定の位置に挿入し、クラウド崩壊に伴う音圧の測定を行なった。

3. 実験結果

3-1 高速度ビデオ画像の解析方法 撮影された映像を定量的に評

価するためにキャビテーション流れに関するフレーム間差分法[3]を用いる。この手法により、静止画像では失われてしまう時間微分情報を取り出すことができ、急速な変化現象を(画像解析的に)強調可視化し、変化しない不要な背景領域などを除去できるという特徴を有している。

例えば、図3(a)および(b)に示すような微小時間 $\Delta t = t_2 - t_1$ 離れた 2 枚の連続画像(キャビテーションクラウドの映像)を考えてみる。まず、2 次元グレー画像としての原画像から平均グレーレベルとして 1 次元画像情報を算出し、ついで Δt 間の差を取り、図3(c)に示すようなグレーレベル差分布を作成する。このグレーレベル差が大きいほど時間変化の大きな現象が現れていることになる。ついで、このグレーレベル差分布を再度色づけする際に、発生あるいは消滅部を強調するために、図3(d)に示すようにグレーレベル差の最大および最小値(変化なしレベル0を挟んだ)中間領域にのみグレーレベルを割り当てるものとする。ここにクラウド発生・出現側が白色域、消滅側が黒色域に相当する。

3-2 クラウド内での圧力波計測と可視化: 壁面衝突型キャビテーション グウォータジェットにおけるクラウド挙動と圧力波形成

上流部圧力 6MPa に加圧された試料水を、図2に示すノズル径 $d=1\text{mm}$ のホーンノズルから大気圧下の水槽に噴射した場合に生じるキャビテーションクラウドと、それに伴う圧力波形成についての結果を図4に示す。ここでノズルホーン部出口から下流側流路は明瞭な光学的観察を目的として透明アクリル樹脂製とし、流れ場に影響はあるものの取って流路幅を 5mm に制限している。衝突壁面は噴流軸に対して 90度である。ホーン部出口から壁面の噴流衝突面までのスタンドオフ距離は $x/d=30$ に設定した。

まず、図4(a)はジェット衝突面近傍(観察領域は図2の最右端図中の点線矩形域)での一連の高速度ビデオ静止画像であり、画像解析結果図4(b)、音圧波形図4(c)、そしてリング状壊食痕様相図4(d)(アクリル樹脂板、壊食時間 $t=30\text{min}$)を合わせて示す。図4(a)中の細棒 R_0, R_1, L_0 は挿入されたマイクロフォンである。黒色に映るキャビテーションクラウドが最初、噴流中心軸のやや壁面から離れた位置 A で崩壊し、ついで周辺部へ伝播し、壁面附着形のクラウド B, C が崩壊しているのが、(静止画像では)鮮明度がやや落ちるものを読み取れよう。

この微小気泡群崩壊伝播の様相は、フレーム間差分による画像解析結果である図4(b)においては明瞭に読み取れる。点 A から「ハの字」状に伸びる消滅帯状域(その傾きは伝播速度に対応し、この場合約 170m/s と評価できる)そして、壁面上の点 B, C における 2 次崩壊に対応する「ハの字」状の黒色帯状域の存在をも確かめることができる。この壁面附着状態での 2 次的クラウド崩壊は CAV-WJ におけるリング状壊食域形成(図4(d)参照)と関連付けられ興味深い[4]。

図4(c)は、実験時に 3 本のマイクロフォン R_0, R_1, L_0 によってそれぞれ計測された音圧波形であるが、その音圧ピーク時間は図4(b)の消滅帯状域のマイクロフォン通過時間と合致し、この帯状域が圧力波の伝播ラインに対応することを確かめることができる[4]。

3-3 キャビテーションクラウドにおける放出クラウドの崩壊と圧力波形成・伝播およびリエントラント挙動

翼やノズルのような圧力勾配をもつ流れ場においてはクラウドキャビテーションが発生し、周期的なクラウド放出挙動を示すことが知られている。ここでは、図5(a)-(c)に収縮拡大流路に生じたクラウドキャビテーションのクラウド放出・崩壊そしてリエントラント運動の観察例を示す。解析結果(図5(b)および詳細解析結果(c))に示されるように、放出クラウドの崩壊、圧力波形成・伝播、そしてそれに

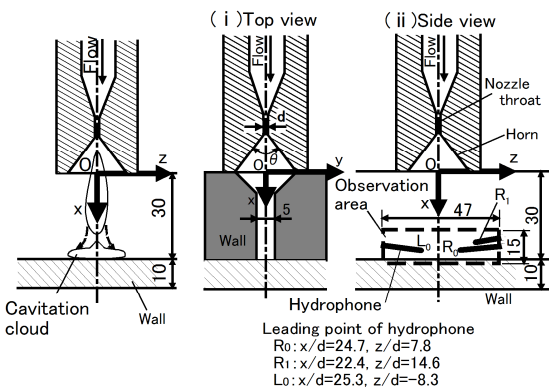


Fig.2 Test section and observation area for cavitating waterjet near impinging wall

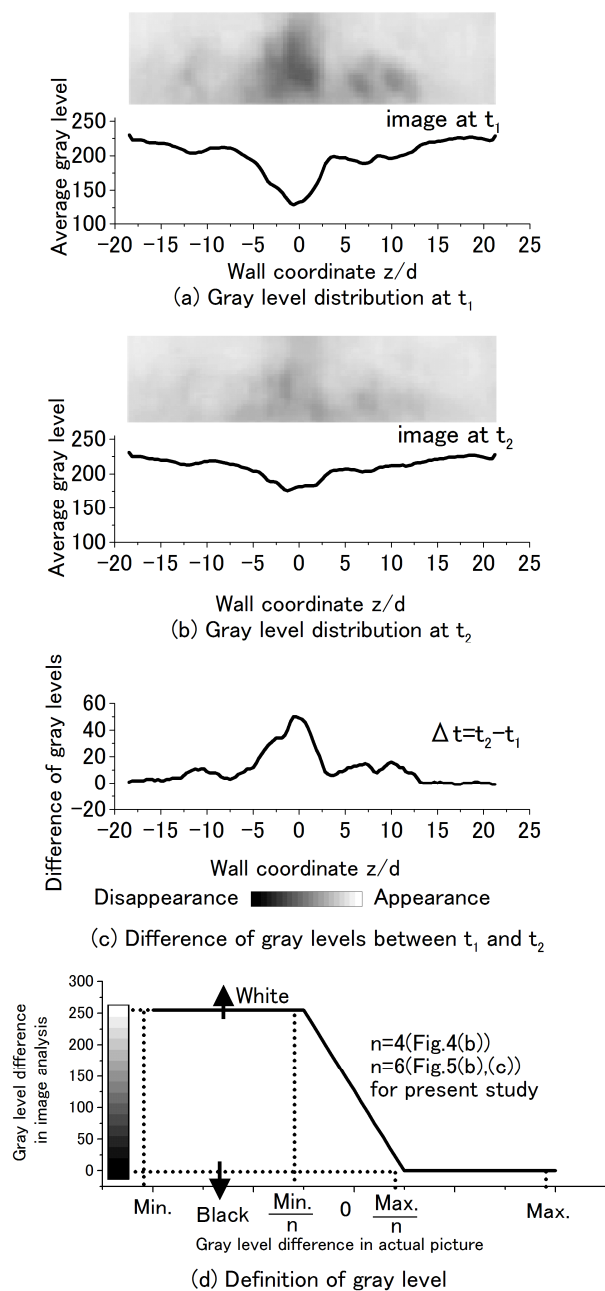


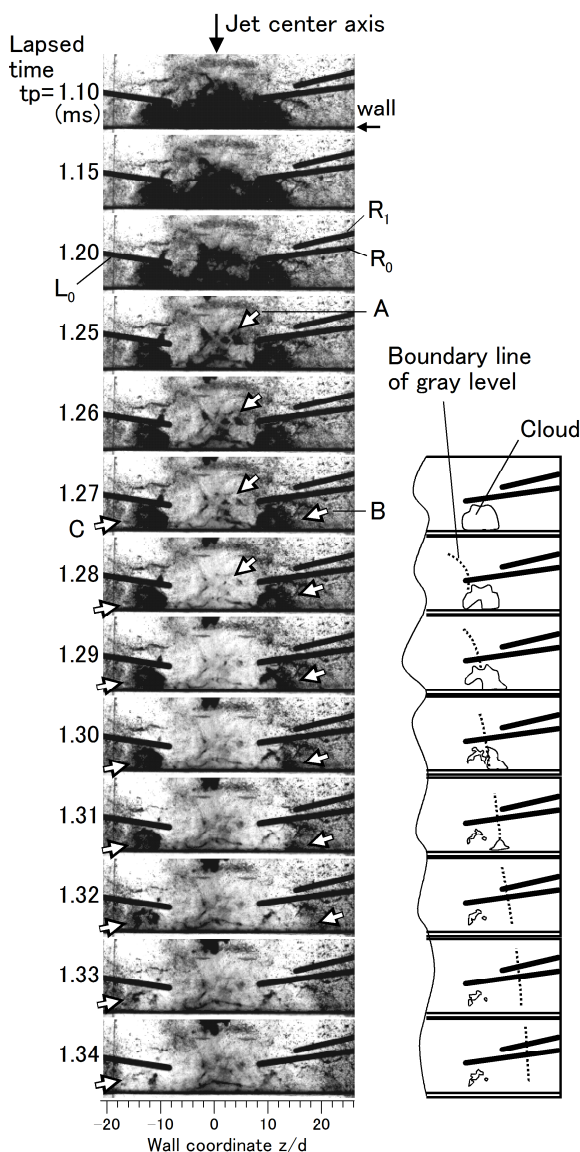
Fig. 3 Image analysis using frame difference method for cavitating flow

に伴い誘起されるリエントラント運動の存在が確認される。

著者らは、これらの代表的な結果を今まで幾つかの機会に発表[2, 5-7]してきたが、ここで示す例は、2個のクラウド放出に対して1回のリエントラント運動が生じる興味ある場合である。この結果から、より明瞭な形で圧力波の伝播とリエントラント挙動の直接的な関係が確かめられよう。

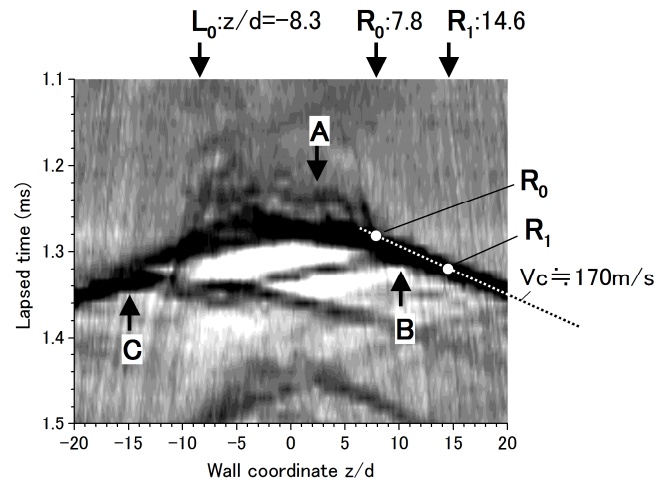
つまり、図5(a)のビデオ画像群によると、放出クラウドは $t=42\text{ms}$ 付近で最初の崩壊を起こしている。図5(b)によると、崩壊(例えば、図中の矢印 Collapse)に伴い黒色帯状域(つまり圧力波の伝播)が形成され、上流側を含め周囲に伝播する。その際の消滅帯状域の傾きは時間軸に対して非常に小さく、伝播速度がかなり大きいこと、そしてクラウド崩壊に伴う圧力波形成に対応する「ハの字」状帯状域の様相(ここに傾きは非常に小)を示していることが読み取れる。圧力波の主体は上流方向へ伝播し(矢印A)、離脱しつつある次の放出クラウドに達し、底面を中心に1回目のリエントラント運動(図中のBに対応)を引き起こしている。

その後、この部分リエントラント運動Bは、局所的なクラウド崩壊($t=56\text{ms}$ ms 付近)と新たな圧力波伝播挙動Cを引き起こし、さらに上流側の付着

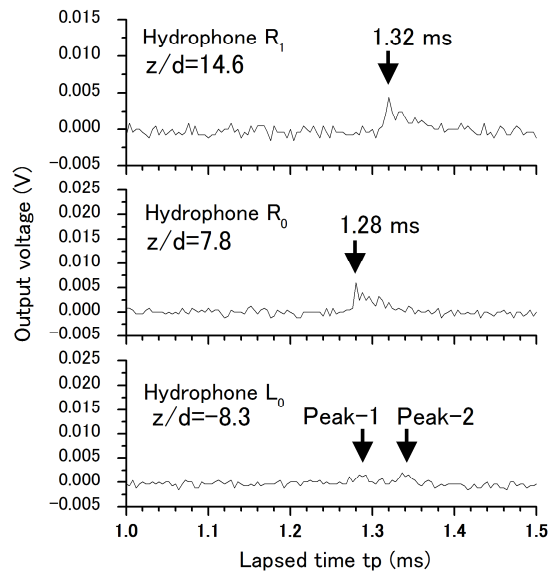


$P_1=6\text{MPa}$, $P_2=0.1\text{MPa}$, $T_w=292\text{K}$, $\beta=5.3\text{mg/l}$, $d=1\text{mm}$, $x/d=30$, $F_s=100,000\text{fps}$

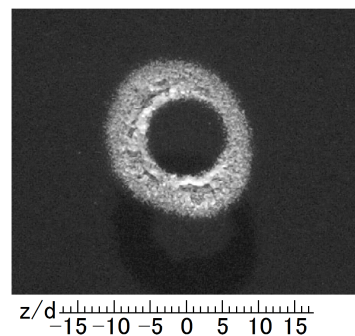
(a) Still pictures in high speed video observation



(b) Image analysis and propagation of cloud collapses



(c) Sound pressure measured with hydrophones R_0 , R_1 and L_0



$P_1=6\text{MPa}$, $P_2=0.1\text{MPa}$, $T_w=289\text{K}$, $\beta=4.7\text{mg/l}$, $d=1\text{mm}$, $x/d=30$, $t=30\text{min}$

(d) Ring-like erosion pit distribution on acrylic resin plate

Fig.4 Jet peripheral type collapsing behavior of cavitation cloud in near impinging wall region and erosion distribution

圧力波形成とリエントラント挙動, キャビテーションに関するシンポジウム (第 14 回), 日本学術会議, (2009).

キャビティ後端に達し ($t=58\text{ms}$ 付近), 新たなリエントラント運動 D へとつながっている. このリエントラント運動 D は, 最終的には, $t=75\text{ms}$ 付近で付着キャビティ上流端 (つまり, 収縮拡大ノズルのど部) に達し, $t=86\text{ms}$ の映像に示されるような新たなクラウド放出サイクル過程へと移行する. ここに, 付着キャビティ上流端付近では, 局所クラウド崩壊 E と「ハの字」帯状域つまり圧力波形成そして高速の伝播挙動の存在が認められる.

以上のように, 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は, 局所的なクラウド崩壊に起因する圧力波形成・伝播を伴う上流方向への運動であることが (少なくとも一つのパターンとして) 指摘できよう.

4. むすび

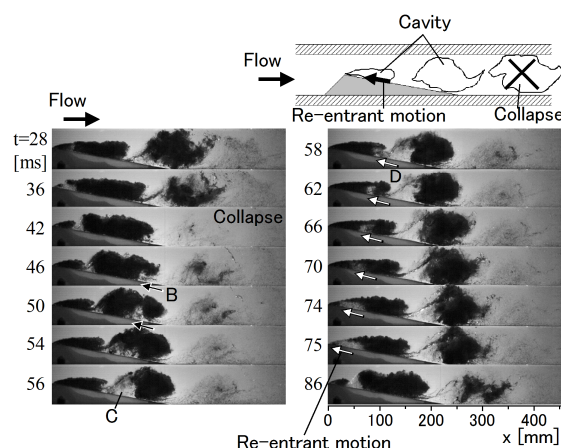
キャビテーション現象において注目されるキャビテーションクラウドを高速ビデオ撮影を通して観察し, その崩壊時に生じる圧力波の挙動をフレーム間差分画像解析法により定量的に捉えた. 主な結果をまとめる以下ようになる.

1) 高速で固体壁面に衝突する CAV-WJ について観察・解析および音圧測定を行い, 当該の画像処理方法 (フレーム間差分画像解析法) が圧力波伝播を捉える有力な手法であることを示した. ついで, 衝突面近傍においてクラウド崩壊に伴う圧力波形成が 2 次的なクラウド崩壊を引き起こし, 連鎖的に生じうることを明らかにした.

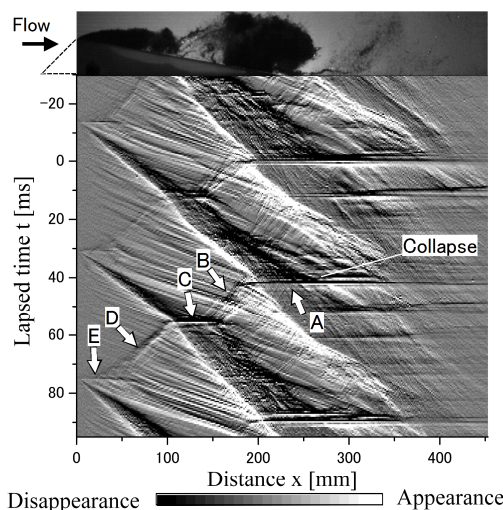
2) 収縮拡大流路におけるクラウドキャビテーションについて, 高速ビデオ撮影およびフレーム間差分画像解析を行い, クラウドキャビテーションに特有なリエントラント運動が放出クラウド崩壊に伴う圧力波により誘起され得ること, そして, そのリエントラント運動が局所的なクラウド崩壊および圧力波形成伝播過程を伴い得ることなどを明らかにした.

文献

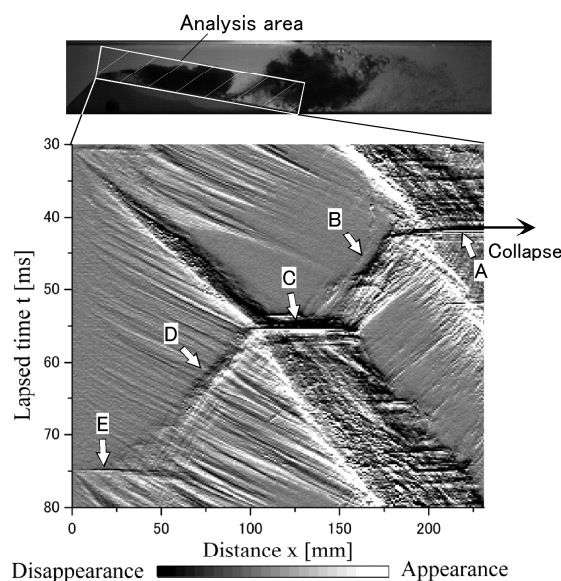
- [1] Reisman, G. E., Wang, Y.-C. and Brennen, C. E., Observations of shock waves in cloud cavitation, *J. of Fluid Mechanics*, 355, 255-283, (1998).
- [2] Sato, K., Wada, Y., Noto, Y. and Sugimoto, Y., Reentrant motion in cloud cavitation due to cloud collapse and pressure wave propagation, ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Summer Meeting, FEDSM-ICNMM2010-30350, (2010).
- [3] 杉本康弘・大慈彌三郎・佐藤恵一, フレーム間差分法によるキャビテーション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, 24-3, 32-38, (2007).
- [4] Sato, K., Sugimoto, Y. and Oojimi, S., "Pressure-Wave Formation and Collapses of Cavitation Clouds Impinging on Solid Wall in a Submerged Water Jet, 7th International Symposium on Cavitation (CAV2009), Paper No.66. (2009).
- [5] Sato, K., Nakamura, H. and Saito, Y., Observations of Unsteady Separated-Type Cavitation in Convergent-Divergent Channel, Proc. of the Third Int. Symp. on Measurement Techniques for Multiphase Flows, Fukui, 203-210, (2001).
- [6] 佐藤恵一・斎藤康弘, 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 (第 13 回), 日本学術会議, (2006).
- [7] 和田洋平・佐藤恵一・杉本康弘, キャビテーションクラウド崩壊に伴う



(a) Behavior of cavitation cloud



(b) Image analysis and propagation of cloud collapses



(c) Detailed result of image analysis

$$\sigma=7.1, Re=1.5 \times 10^5, U=3.7\text{m/s}, \beta=1.35\text{mg/l}, Fs=10,000\text{fps}$$

Fig.5 Image analysis for cavitation cloud shedding using frame difference method in convergent-divergent nozzle