

# キャビテーションクラウド崩壊に伴う圧力波形成とリエントラント挙動

## Pressure wave formation with cavitation cloud collapse and re-entrant motion

○和田洋平(金沢工業大学大学院) 佐藤恵一(金沢工業大学) 杉本康弘(金沢工業大学)

Youhei Wada, Kanazawa institute of technology

Keiichi Sato, Kanazawa institute of technology

Yasuhiro Sugimoto, Kanazawa institute of technology

### Abstract

Cloud cavitation shows a periodic shedding behavior of bubble cluster (namely, cloud) and causes strong impacts with the cloud collapse. In this research, the relation of the pressure wave generated at the collapse of cavitation cloud with the re-entrant motion is investigated through a high-speed video observation and the image analysis. As the result, it is shown that the re-entrant motion is able to be caused through the propagation of pressure wave generated by the severe collapse of the cavitation cloud shed downstream.

*Key Words:* Cloud cavitation, Re-entrant motion mechanism, Pressure wave, Image analysis, High speed video observation

### 1. 諸言

クラウドキャビテーションは高速液流中の翼やノズルなどの収縮拡大流路に発生し周期的な非定常挙動を示し、流体機器を高速強力化する際の障害となっている。しかし一方、クラウドキャビテーションは大きなエネルギー集中化作用を示すことが知られており、その利用は興味深い課題でもある。

これまでの多くの研究によれば、クラウドキャビテーションの非定常挙動を生み出す不安定性は、「リエントラントジェット不安定性」と「システム不安定性」に分類される(例えば文献<sup>(1)</sup>) が、それぞれにおいて未だ未解明な点が残されている<sup>(2), (3)</sup>。例えば、前者に関連してその左右因子として「キャビティ後端近傍の圧力勾配」と「キャビティ厚み」が挙げられている<sup>(1)</sup> が、フィードバックを引き起こす機構については検討の余地がある。

筆者らの収縮拡大流路における研究によれば<sup>(2), (4)-(6)</sup>、リエントラント挙動の周期的サイクルが生じる可能性が高いのはクラウド状キャビティが下流に明瞭な形で放出される時である。このとき放出クラウドは激しく下流域で崩壊し圧力波を発生する。この圧力波が附着キャビティ後端に達しリエントラント運動を誘発している可能性が指摘できる<sup>(2), (7)</sup>。

本研究では、収縮拡大流路において発生する非定常クラウドキャビテーションについて、2方向から高速度ビデオカメラ撮影を行う。圧力波の伝播は液中に存在する微小気泡群の崩壊の形で可視化される。観察・可視化された現象に対して、フレーム間差分法を用いた画像解析<sup>(6)</sup>を適用し、動的なビデオ画像情報を定量的に表示する。この画像解析結果を下に、放出されたクラウド(気泡群)崩壊による圧力波形成と崩壊伝播挙動およびリエントラント挙動発生の実験的に明らかにする。もって、放出クラウド崩壊に伴う圧力波の形成がリエントラント運動の誘因になり得ることを、リエントラント運動の機構と共に示す。

### 2. 実験装置及び方法

**2-1 実験概要** 実験は密閉回流式小型キャビテーションタンネルを用いて行った。実験に用いた試験部の収縮拡大流路を図1に示す。本実験では、回流式キャビテーションタンネルに設置された図1に示すような絞り流路において、非定常クラウドキャビテーションの発生から崩壊までの過程を観察した。図2に示すように流路外壁上加速度計(TEAC・703FB)を取り付け、その信号と同期することにより高速度ビデオカメラ(Photron FASTCAM SA1, KODAK EKTAPRO-4540)撮影を行った。ここに、本研究で使用した試験部は、高さ80mm、幅60mmの矩形断面である。実験流路は、図1のような前方の絞り角度 $\alpha=45^\circ$ 、後方の広がり角度 $\theta=10^\circ$ の収縮拡大ノズル形状であり、図1(a)はノズル断面方向からの観察用流路A、図1(b)はノズル底面方向からの観察用流路Bである。それぞれノズル高さは流路幅に合わせ(拘束比0.5)、40mmと30mmである。2方向から撮影することで放出キャビテーションクラウドの崩壊伝播挙動及びリエントラント挙動の様相を詳細に観察することを試みた。

本実験では、ノズル部上流部の流速 $U$ を一定とし、タンネル内全体を減圧し、所定のキャビテーション発生状態に設定している。なお、実験条件で示される $\sigma$ はキャビテーション数 $=2(P-P_v)/\rho U^2$ 、 $\beta$ は溶存酸素量、 $F_s$ はビデオ撮影コマ速度、 $Re$ はノズル高さ $h$ と上流部流速 $U$ に基づくレイノルズ数を表す。 $P$ 、 $P_v$ および $\rho$ はそれぞれ上流部圧力、水の飽和蒸気圧と密度である。

**2-2 画像解析方法** 画像解析方法には、時間差分的手法であるフレーム間差分法を用いた。本手法では、気泡群領域を色の濃淡(256階調のグレースケール)で表現し、異なる時間の2画像(グレーレベル)の差を求めることで映像時間変化の定量的表現を試みた。つまり、ある時間間隔の2画像において、各セルのグレーレベルを取り出しフレーム毎の差を求め、グレーレベルの時間変化領域を捉えた。ついで、この変化が大きい状態から(気泡有り側から気泡無し側への変化方向を正と定義)小さい状態へと色調(濃淡)を付した。したがって、画像処理結果において、黒色域は気泡群崩壊(消失)を示し、白色域は気泡群の発生・成長(出現)を示す。

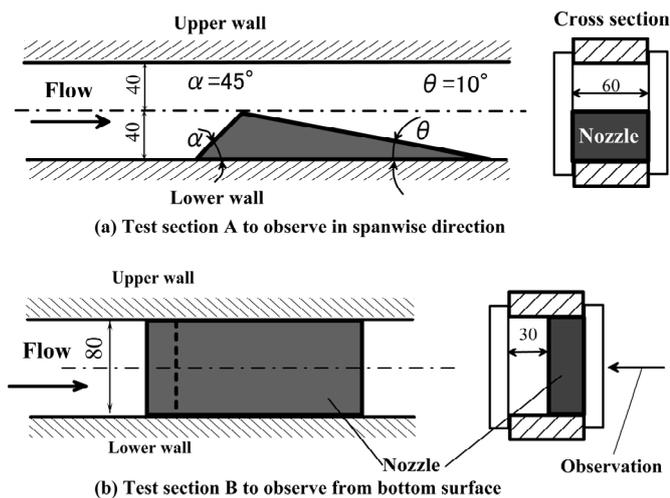


Fig. 1 Two kinds of convergent-divergent nozzle

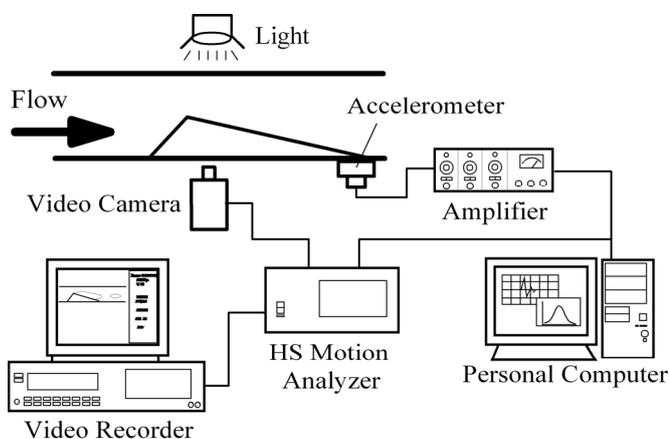


Fig. 2 Measurement system

### 3. 実験結果及び考察

#### 3-1 放出気泡群崩壊に伴う圧力波形成とリエントラント挙動 (収縮拡大ノズル断面方向からの観察: 試験部A)

図3に図1(a)に示す実験流路Aにおいて収縮拡大ノズル断面方向から高速ビデオカメラで撮影した映像の連続写真を示す。この画像はビデオ撮影コマ速度  $F_s=9000\text{fps}$  で撮影された映像を  $36\text{fps}$  ( $4\text{ms}$ ) 毎に示している。ここに、現段階での画像内の白色域はキャビテーションクラウド存在領域を示し、黒色域はキャビテーションクラウドの非存在領域を示す。時間領域  $t=-32\sim-4\text{ms}$  で放出キャビテーションクラウドが下流方向に移動し、 $t=0\text{ms}$  においてキャビテーションクラウドの崩壊 (図3中に Collapse と表示) が見られる。キャビテーションクラウドが  $t=0\text{ms}$  で崩壊後、付着キャビティ内においては、図中に矢印で示すように時間領域  $t=4\sim36\text{ms}$  において、気泡群密度が希薄な灰色域が順次上流側に伝播していくリエントラント挙動が認められる。リエントラント挙動が試験片ノズル頂点に達すると、付着剥離領域界面付近に新たな小規模クラウドが形成され、合体しながら大規模キャビテーションクラウドとして下流方向へ放出される<sup>(5)</sup>。つまり、新しい周期的挙動に移行するのが観察される。

図4に、図3に示した映像の画像 (差分) 解析結果を示す。参考のため解析結果上部には同じ配置での代表的な映像を同時に示してあ

る。まず、 $t=0\text{ms}$ 、 $x=250\text{mm}$  付近で気泡群崩壊に伴うクラウド (気泡群) 消失を示す明瞭な黒色域 (図4中 Collapse と表示) が確認できる。この領域付近をさらに拡大したものが図5である。図4および図5より、この黒色域が上流および下流方向にはほぼ水平に伸び、上流側は付着形キャビティ後端 (図4及び5における Trailing edge of attached cavity) に達していることがわかる。この黒色帯状領域はクラウド崩壊の伝播挙動に対応しており、放出クラウドの崩壊によって発生した圧力波によって引き起こされていると考えられる (圧力波の伝播挙動が連続的な微小気泡崩壊で可視化されている)。その傾きから伝播速度を概算してみると、約  $200\text{m/s}$  のオーダーであり気液二相流中での値として妥当なものであろう。また、約  $t=10\text{ms}$  付近にリバウンドしたキャビテーションクラウドの再崩壊としてそれに起因する上流への2番目の伝播挙動が認められ、この場合も2次的な (後述する) リエントラント挙動が (あまり明瞭ではないが) 認められる。

圧力波の軌跡に対応する黒色帯状域が付着キャビティ後端域に達した後、 $t=0\sim35\text{ms}$ 、 $x=200\sim0\text{mm}$  付近の領域に、左下方向 (主流とは逆方向) に伸びる黒色線状域が確認できる (Re-entrant motion と表示)。これは図3中の付着キャビティ内でのクラウド消失を伴うリエントラント運動に符合する。このリエントラント運動の移動速度は、この例では約  $4.0\text{m/s}$  である。また、一連の付着キャビティの成長は、これらリエントラント運動の開始後もかなり後まで続いている (図4によれば、この例の場合、約  $15\text{ms}$  後まで)。

以上のように、付着キャビティから放出されたキャビテーションクラウドが下流域で崩壊し、圧力波が上流に伝播し、付着キャビティに達し、それをきっかけとしてリエントラント運動が誘起されるという一連の機構が提示され得る。

#### 3-2 放出気泡群崩壊に伴う圧力波形成とリエントラント挙動 (収縮拡大ノズル底面方向からの観察: 試験部B)

図6に図1(b)の実験流路Bを用いて、収縮拡大ノズルの底面方向から撮影した映像の連続写真を示す。この実験は収縮拡大ノズルのスパン面様相を観察するために行われた。図6の画像は  $40000\text{fps}$  で撮影された連続ビデオ映像を  $200\text{fps}$  ( $5\text{ms}$ ) 毎に示している。ここに画像内の白色域はキャビテーションクラウド存在領域を示し、黒色域はキャビテーションクラウドの非存在領域を示す。時間領域  $t=-50\sim0\text{ms}$  の映像はキャビテーションクラウドが下流方向へ移動・放出する時期にはほぼ対応する。放出されたキャビテーションクラウドは、 $t=0\text{ms}$  で崩壊 (図6中 Collapse ①) し、 $t=5\text{ms}$  付近でリバウンドそして  $t=10\text{ms}$  付近で再び崩壊 (図6中 Collapse ②) している。

図7の画像解析結果 (画像中の細かい横縞はライティング・ノイズで、照明の強弱を拾っている) によれば、主クラウドの崩壊①およびそのリバウンド・クラウドの崩壊②に対応する計2回のクラウド崩壊点からの伝播領域に対応する黒色帯状域がほぼ水平に (つまり高速で) 伸び、それぞれが付着キャビティ領域のリエントラント挙動 (図7中に Re-entrant motion と表示) と連動していることがわかる。また、伝播軌跡に対応する黒色帯状域がキャビティ後端に達したとき、付着キャビティ後端を示す境界形状が鋸歯状に変形 (つまりキャビティ後端が圧力波の影響を受け変形) していることがわかる。ついで、リエントラント挙動を示す帯状の変色域 (図7中に Re-entrant motion と表示) が上流側に軌跡を描いていることが読み取れる。

#### 4. 結言

収縮拡大流路において発生する非定常クラウドキャビテーションについて高速度ビデオカメラ撮影を行い、観察結果のビデオ映像に対して時間差分的画像解析法を適用した動的定量化表示を通し、放出クラウドの崩壊に伴う伝播挙動及びリエントラント挙動発生との関係を検討した。

その結果、周期的非定常性クラウドキャビテーションにおけるリエントラント挙動のトリガー機構として、放出キャビテーションクラウド崩壊の存在を明らかにした。

#### 参考文献

- (1) Callenaere, M. Franc, J.-P., Michel, J.-M. and Riondet, M., The Cavitation Instability Induced by the Development of a Re-Entrant Jet, *J. Fluid Mech.*, 444, (2001), 223-256.
- (2) 佐藤・齊藤, 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 (第 13 回), 札幌, A2-9, (2006), 1-4.
- (3) Kawakami, D.T., Fuji, A., Tsujimoto, Y. and Arndt, R.E.A., An Assessment of the Influence of Environmental Factors on Cavitation Instabilities, *J. Fluids Eng.*, 130, (2008), 031303,1-8.
- (4) Sato, K., Nakamura, H. and Saito, Y., Observation of Unsteady Separated-Type Cavitation in Convergent-Divergent Channel, *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Measurement Techniques for Multiphase Flows*, Fukui, (2001), 203-210.
- (5) Sato, K., and Shimojo, S., Detailed Observations of a Starting Mechanism for Shedding of Cavitation Cloud, *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Cavitation*, Osaka, Cav03-GS-4-009, (2003), 1-7.
- (6) Saito, Y. and Sato, K., Bubble Collapse Propagation and Pressure Wave at Periodic Cloud Cavitation, *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Multiphase Flow*, Leipzig, S7-Tue-C-25, (2007), 1-8.
- (7) Sato, K., Shimojo, S. and Watanabe, J., Observations of Chain-Reaction Behavior at Bubble Collapse Using Ultra High Speed Video Camera, *Proc. 4<sup>th</sup> ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference*, Honolulu, FEDSM2003-45002, (2003), 1-6.

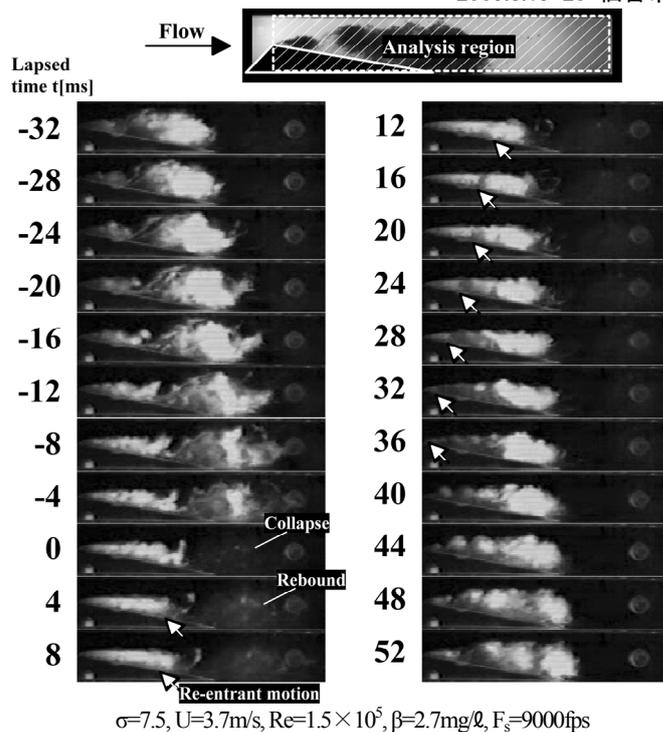


Fig.3 Behavior of cloud cavitation

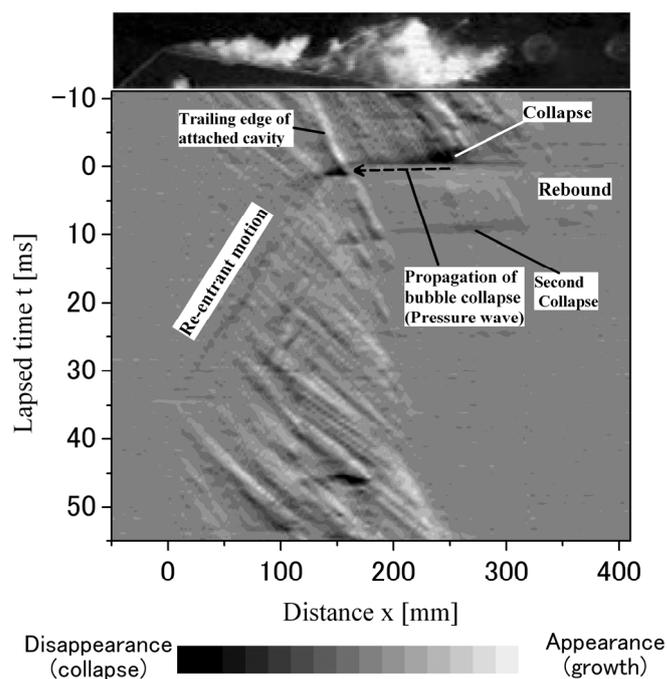
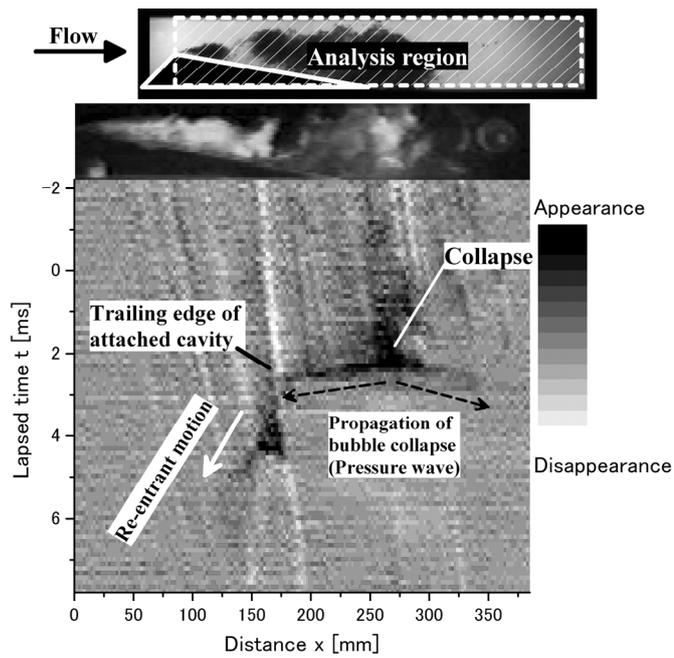
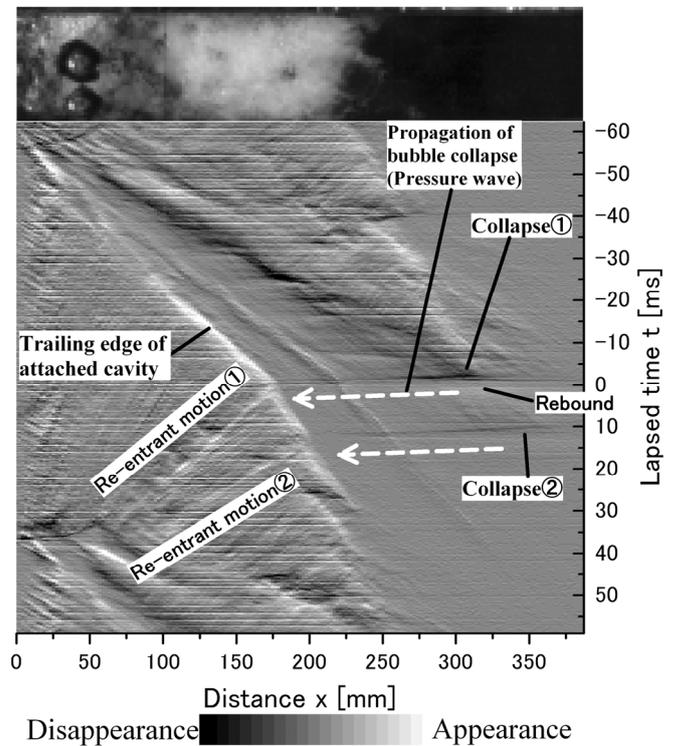
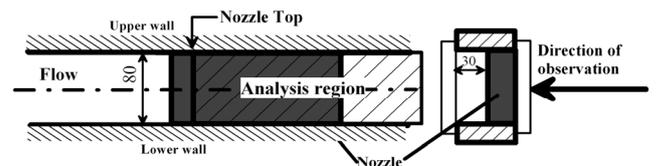


Fig.4 Image processing of cloud cavitation:  
collapse of shed cloud and re-entrant motion



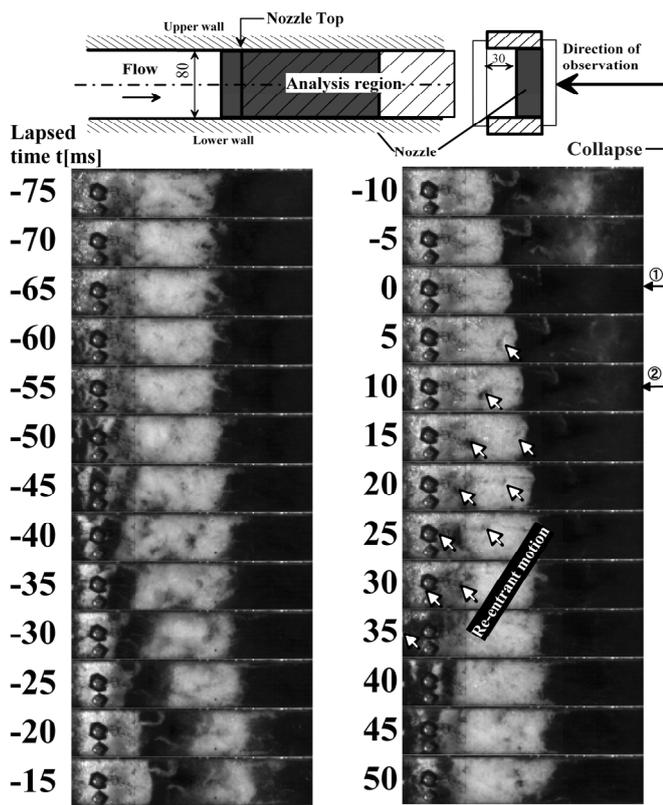
$\sigma=7.5, U=3.7\text{m/s}, Re=1.5 \times 10^5, \beta=2.7\text{mg/l}, F_s=9000\text{fps}$

Fig.5 Detailed process and cause of re-entrant motion:  
collapse of cavitation cloud shed downstream



$\sigma=6.6, Re=1.2 \times 10^5, U=3.7\text{m/s}, \beta=1.8\text{mg/l}, F_s=40000\text{fps}$

Fig.7 Image processing of cloud cavitation: traces of pressure wave from  
cloud collapse and re-entrant motion



$\sigma=6.6, Re=1.2 \times 10^5, U=3.7\text{m/s}, \beta=1.8\text{mg/l}, F_s=40000\text{fps}$

Fig.6 Span-view appearance of cloud cavitation:  
from bottom-side of convergent-divergent nozzle