

## 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）

#### Re-entrant Motion and Shedding Mechanism of Cloud on Cloud Cavitation (Convergent-Divergent Flow Channel)

○ 佐藤恵一（金沢工大） 齊藤康弘

Keiichi Sato and Yasuhiro Saito,

Dept. Mechanical Eng., Kanazawa Inst. Tech., Ohgigaoka 7-1, Nonoichi, Ishikawa 921-8501

It is known that attached or partial cavitation has a periodic character under a certain flow condition and is related to high cavitation impact with a shedding and collapse of cavitation cloud. The detailed mechanism of the periodic behavior remains to be solved though it appears to be caused by a re-entrant motion from the cavity trailing edge to the leading edge. In this study, we present our previous data as well as new results about a shedding process of cavitation cloud and a mechanism of re-entrant behavior. First, the partial cavitation phenomena are divided into two types. In addition, for these two types of cavity, the re-entrant motions in the cavity are discussed with high-speed-video-camera observations and a digital image processing technique. As the result, a re-entrant motion which plays an important role in unsteady or periodic characteristics of cloud cavitation is formed by the chain-reaction-like collapses of bubbles which are strongly related to the pressure impulse followed by the collapse of cavitation cloud.

**Key Words:** Cavitation, Partial cavitation, Periodic behavior, Re-entrant motion, Bubble collapse

### 1. はじめに

付着形（部分）キャビテーションは、ある条件下で周期的非定常性を示し、それに伴いキャビテーションクラウドの放出・崩壊そして高いキャビテーション衝撃が発生する。これらの周期的挙動がキャビティ内でのリエントラント運動をフィードバック機構として生じていることについては、多くの研究によって明らかにされてきている（例えば、Franc and Michel [1]や薬師寺ら[2]など）。

しかしながら、幾つかの不明点や疑問点がなお残されている。例えば、リエントラント運動は付着キャビティ後端から前縁方向に向かう運動であるが、その契機（駆動源）の機構はあまり明確ではない。さらにはリエントラント運動そのものが、従来多くの場合にイメージされてきたようなキャビティ底面を上流方向に進む流れあるいはジェットなのかという疑問点も残されている。

本報告においては、筆者らがこれまで明らかにしてきたクラウドキャビテーションに関するクラウド放出過程やリエントラント運動に関する研究成果[3-7]をもとに、最新成果を加えて、まとめた結果を提示するとともに問題点を明らかにする。

### 2. 実験方法

**2-1 キャビテーション実験装置** キャビテーション実験は、回流形キャビテーションタンネル[4]を用いた。試験流路部は矩形断面である。実験流路としては、収縮拡大

大流路となるように、図1(a)に示すような三角形壁を流路奥行き幅一杯に挿入したものをを用いた（角形のど部流路と呼ぶ）。剥離形状の効果を確かめるために図1(b)に示すようなど部形状を単純に丸めたもの（丸形のど部）も作成した。さらには、試験部に対して鉛直に三角形壁を取り付けられるものも作り、いわゆる Span-View 観察用とした（本報告では省略）。以上、大きく3通りの収縮拡大流路に対して実験を行った。

キャビテーション気泡の観察は、主に高速度ビデオカメラ（KODAK, EKTAPRO Model4540, 最高40500コマ/秒）を用いた。ただし、一部、最高フレーム速度1Mfps[8]によるものも示す。以下、フレーム速度をFsと表す。

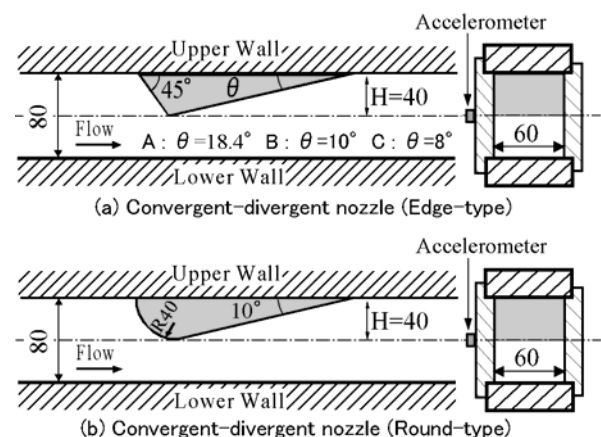


Fig.1 Test section

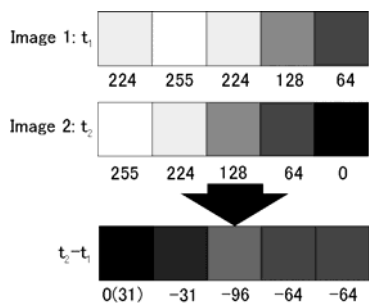


Fig.2 Image processing method

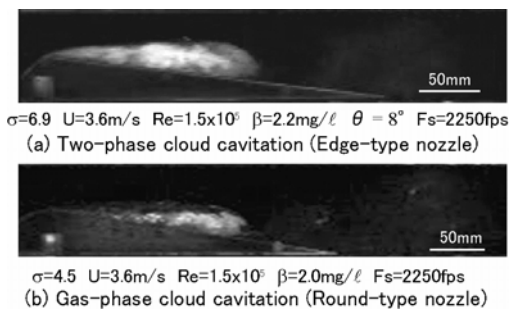


Fig.3 Two types of cloud cavitation

( $\sigma$  = cavitation number,  $\beta$  = air content,  $U$ =flow velocity,  $Re$  = Reynolds number)

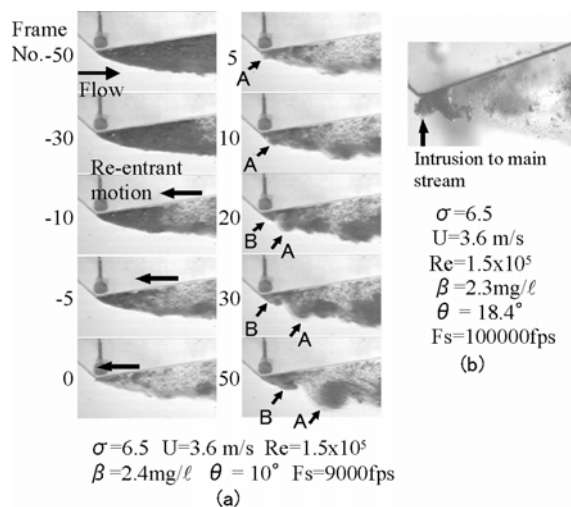


Fig.4 Re-entrant motion and its final stage on edge-type nozzle

2-2 画像処理方法 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. 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. 図 2 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, 各フレーム毎の差を求め濃淡変化領域を捉えることを試みた (ここでは白色から黒色への変化を正值にするため最終的には図 2 の差値の符号を反転させ, 負値は 0 とおいた). この手法を各時間 (高速度ビデオカメラのフレー

ム) における測定画像に適用し, 色調の時系列的な変化量を図示した. 本解析対象の画像では気泡領域は白く表示される. ここに, 主に気泡崩壊挙動を捉らえるため白から黒への変化を中心に解析している.

### 3. クラウドキャビテーションの周期的挙動

3.1 付着形 (部分) キャビテーションの分類 周期的にクラウド状の渦状気泡群を放出し高い衝撃性を示すキャビテーションを「クラウドキャビテーション」と呼ぶ. その代表例は, 外部流れにおいては翼の部分キャビティ (Partial Cavity), そして内部流れにおいては収縮拡大流路におけるのど部拡大部の付着キャビティなどであり, いずれもやや発達したキャビテーション状態である.

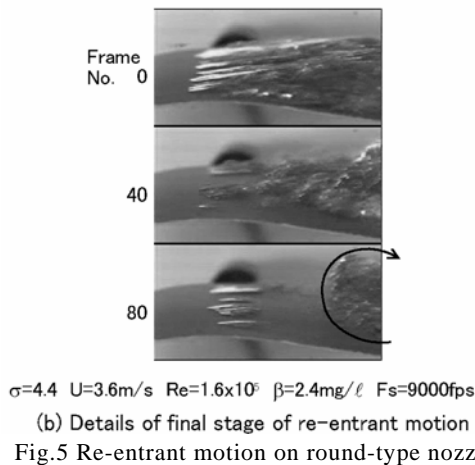
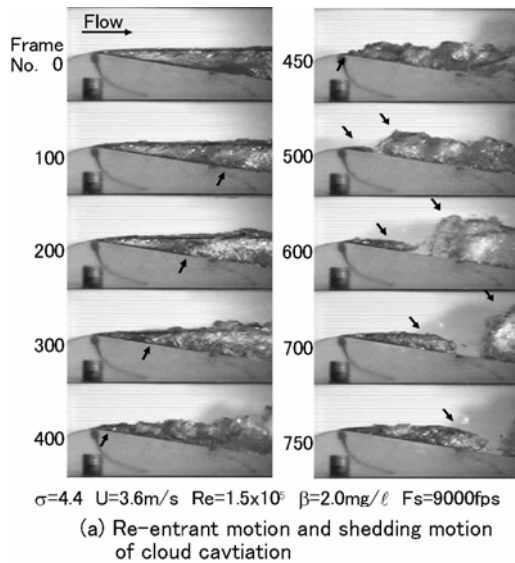
Michel&Franc[1]はクラウドキャビテーション発生域やキャビティ形態をマップとして図示しているが, 本観察によるとクラウドキャビテーション自体もそれらに応じて, 大きく 2 つのパターンに分けた検討が必要なのである. ここでは, Type-A : (気液) 二相キャビティと Type-B : (準) 気相キャビティとに分類してみる.

二相キャビティ: 鋭利な角から剥離するような比較的厚み大の剥離流れに多いタイプ. 物体面からやや離れた剥離剪断層に渦キャビテーション群として発生・発達するが, キャビテーション数の減少とともに付着形に移行し, クラウドキャビテーション状態となる. キャビティ内は, ある程度発達しない限り (剥離域厚みに依存するが) 気液二相状態にある. 図 3(a)にその例を示す.

気相キャビティ: 翼面のように丸みのある物体面の剥離泡などから生じる (剥離厚みの薄い) 場合に多いタイプ. 物体面上の微小な剥離泡のようなものを基に付着キャビテーションが発達すると, 少なくともキャビティ前半部領域において, ある程度クリアな (蒸) 気相状態をもつクラウドキャビテーション状態となる. 準気相キャビティというべきかもしれない. その例を図 3 (b) に示す. ここでは, 簡単のため気相キャビティとよぶ.

3.2 リエントラント運動の終結とキャビテーションクラウドの形成・発達・放出 リエントラント運動がキャビティ先端に達すると, キャビテーションクラウドの卵として渦キャビテーションの生成が開始される.

角形ののど部流路における二相キャビティに関しては, ほぼ図 4 に示すような形成過程と考えられる [7, 3]. すなわち, リエントラント運動がキャビティ先端に達した後, 剥離せん断層上に渦キャビテーションが形成され, その渦キャビティが合体・発達しながら下流に移動し, 最終的には大きなクラウド状の渦キャビテーションとなり放出される. 特徴的なことは, 図 4(b)のように, 先端部で気泡崩壊そしてリバウンド微細気泡群の主流領域への飛び出しが見られることで, この後, 渦キャビティの形成そして新しい付着キャビティの形成が始まる.



丸形のど部についての結果を図 5(a), (b)に示す. この試験物体では, 図 5(b)に示すように, 翼面など丸みのある剥離面に共通する細管列状形のキャビティ先端形状を示す. この部分にリエントラント運動が到達すると, 微小付着キャビティは細かく分裂して微小気泡群となり消滅する. その下流部では, キャビティ部が大きく巻き上がりキャビテーションクラウドを形成する. その後, 新たに付着キャビティが形成され成長発達する. これらの様相から, リエントラント運動到達時にはキャビティ微細崩壊していること(周辺流れ場の圧力上昇), 物体面に垂直方向に軸をもつ紐状渦キャビティが観察されることがわかる. キャビティ界面を突き破るようなリエントラント挙動は観察されない.

**3.3 放出クラウドの崩壊とリエントラント運動** リエントラント流れのきっかけとなるのは何であろうか. 種々の可能性が指摘されているが, 本研究によるとキャビテーションクラウド崩壊に伴う圧力波の発生が少なくともその原因の一つである.

それらは, ①放出されたクラウド崩壊時のもの, そして, ②キャビティ後端とキャビティ先端との間の領域

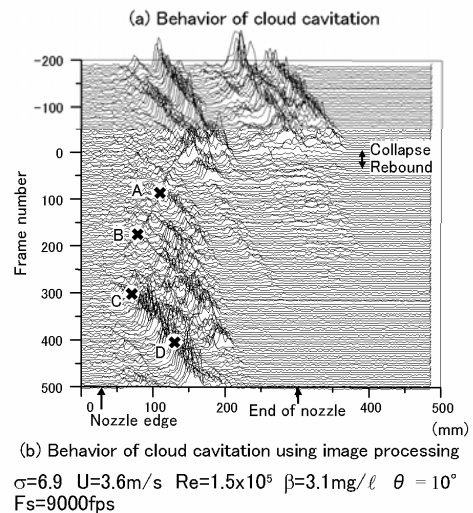
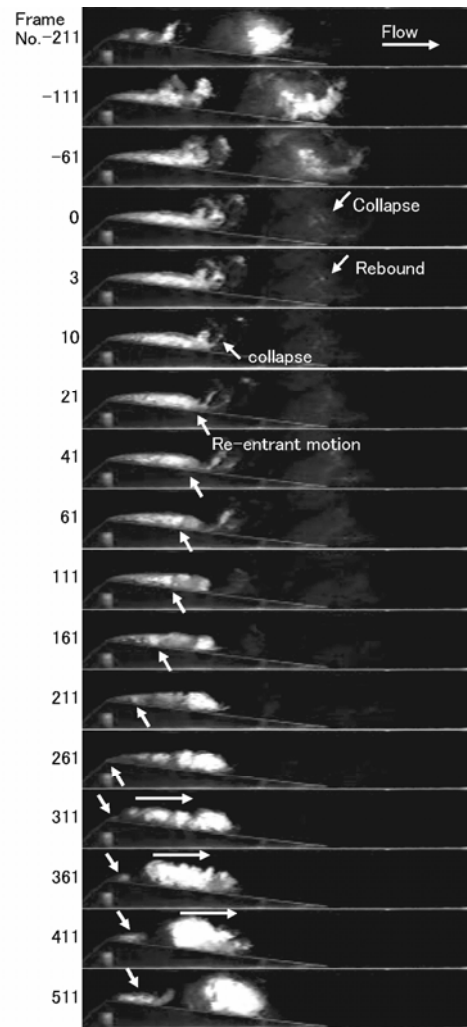


Fig.6 Collapse of shedding cloud and re-entrant motion

(巻き込み過程などの途中において)におけるキャビテーションクラウド崩壊によるもの, などである. 後者②の場合は, キャビテーションクラウド放出の規則的周期性に狂いが生じる原因となると考えられる.

前者①の場合の代表例を, 角形のど部流路について図 6(a)に示す. 放出クラウドの崩壊点が Frame No.0 付近に

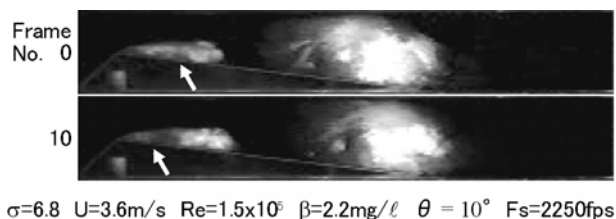


Fig.7 Re-entrant motion without collapse of shedding cloud

相当し、画像では白く見える気泡群が瞬間的に消滅している。その後、付着キャビティ後端部が消滅し（白色部が灰色に変化）、順次上流方向へ移っていく。巻き込み領域を含めて、この濃淡変化はキャビティ厚み方向のほぼ全体で起こっている。気泡群崩壊は順次上流側に伝播し（筆者らの結果[6,7]参照、また最近、円柱流れについて松平ら[9]によっても指摘されている）、Frame No.261付近でキャビティ先端に達した後、図4と同様な形で新しい周期的挙動に移行する。気泡崩壊伝播の様相は、この図4（この場合 Back-Light 照明であり気泡群領域が黒く映っている）においても確認される。図6(b)はそれらの画像処理結果である。濃淡変化が移動線として表示されている。これらの線ABおよび線CDの傾きより、リエントラント運動の移動速度が約3.3m/s、形成された渦キャビティの移動速度が5.3m/sと評価される。

後者②の場合の一例を図7に示す。この例の場合放出キャビティとは無関係に付着キャビティの巻き込み（矢印の位置）付近で気泡崩壊が起き（Frame No.0：局部黒色領域）、上流方向へ伝播している（この後、キャビティ先端に達し新たなクラウド形成挙動に移行する）。

**3.4 リエントラント運動について** 以上より、リエントラント運動自体も大きく2つに分類して考える必要がある。1つは、主に圧力の形で連鎖的気泡崩壊を伴いながら上流へ伝わる気泡崩壊伝播形であり、もう1つは単相あるいは気液二相流体の移動を伴うリエントラント流れ形である。これら2種類のリエントラント運動の存在はそれぞれ確認されるが、これらが複合する場合や気泡崩壊伝播形でも背後に液体追従流れを明確に伴う場合もある。ボイド比が高い液体中での圧力波の伝播速度は通常の液流速のオーダーであり、両者の区別は外見上かなり困難である。ただ、少なくとも本研究のスケール程度のキャビティ流れにおいては、従来単純にモデル化されてきていたような「キャビティ底面を液体流が上流方向に貫通するパターン」ではないことは確かである。

#### 4. 結論

クラウドキャビテーションの周期的挙動（キャビテーションクラウドの形成・発達→クラウドの放出・崩壊→リエントラント運動の発生・進行・終結→新たなクラウドの形成）について、筆者らの研究をまとめるとともに

問題点を示した。特に、

- (1) リエントラント運動を駆動する引き金として、放出後あるいはキャビティ内でのキャビテーションクラウドの崩壊（に伴う圧力波）、
  - (2) リエントラント運動の有効な形態として、気泡群崩壊伝播運動、
- などの存在と役割を、高速度ビデオカメラ観察を中心とした実験的研究により明らかにした。

最後に、本研究の遂行に種々の面から協力してくれた金沢工業大学機械工学科流体工学研究室の元大学院生、中村博一、下条茂雅両君をはじめとする学生諸君のその貢献に深謝する。

#### 参考文献

- [1] Franc, J.-P. and Mechel, J.-M., "Fundamentals of Cavitation," Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [2] 葉師寺, 山口, 川村, 前田, 迫田, "翼型の非定常キャビテーションと re-entrant jet の研究—実験と CFD によるアプローチ," 日本造船学会論文集, No.190, 61-74, 2001.
- [3] 佐藤, 斉藤, "剥離形キャビテーションの周期的放出過程（再付着形剥離流れ）," キャビテーションに関するシンポジウム（第11回）, 113-116, 2001.
- [4] Sato, K., Nakamura, H. and Saito, Y., "Observation of Unsteady Separated-Type Cavitation in Convergent-Divergent Channel, Proc. 3rd Int. Symp. on Measurement Techniques for Multiphase Flows, Fukui, 203-210, 2001.
- [5] Sato, K. and Saito, Y., "Unstable Cavitation Behavior in a Circular-Cylindrical Orifice Flow," Proc. 4th Int. Symp. on Cavitation, Pasadena, A9-003, 1-8, 2001.
- [6] Sato, K., Shimojo, S. and Watanabe, J., "Observations of Chain-Reaction Behavior at Bubble Collapse Using Ultra High Speed Video Camera," Proc. 4th ASME-JSME Fluids Eng. Conf., Honolulu, FEDSM2003-45002, 1-6, 2003.
- [7] Sato, K. and Shimojo, S., "Detailed Observations on a Starting Mechanism for Shedding of Cavitation Cloud," Proc. 5th Int. Symp. on Cavitation, Osaka, Cav03-GS4-009, 1-7, 2003.
- [8] 江藤, ほか4名, 斜行直線 CCD 型画素周辺記録領域をもつ 100 万枚/秒の撮影素子, 映像情報メディア学会誌, 56-3, 483-486, 2002.
- [9] 加藤, 團, 安達, 松平, "キャビテーションブレイクダウン時に発生する連鎖反応による気泡群崩壊の伝ば," 機論, 72-714B, 137-144, 2006.