

# 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）

## Periodic Shedding Process of Separated-Flow Cavitation (With Reattached Separation)

佐藤 恵一（金沢工大） 齊藤 康弘

Keiichi SATO and Yasuhiro Saito

Kanazawa Institute of Technology, Ogigaoka 7-1, Nonoichi, Ishikawa

Many researchers have been studying about high impulsive cavitation. Unsteady shedding type of cavity has high potential for high impulse. Our main interest is in the mechanism of high impact occurrence in internal flow devices. Two kinds of channel profiles are examined about the separated vortex cavitation. One is a circular-cylindrical orifice flow and the other is a convergent-divergent channel flow. Observation of the cavity behavior is performed in these separated shear layers using a high-speed video camera. As a result, it is clearly observed that a cloud-like cavity sheds downstream with pairing and coalescing of small vortex cavities on the separated shear layer. And it is also ascertained that a reentrant motion of cavity makes an important role on the cavity-shedding periodicity.

Key Words : Cavitation, Vortex cavitation, Erosion, Collapsing motion, Impulsive pulse

### 1. 緒言

高速液体流れ中において発生するキャビテーションは、工業的・工学的に重要な問題である。これまで多くの研究が行われ、キャビテーション・クラウドの放出<sup>(1),(2)</sup>・非定常振動と共に高衝撃が発生することが指摘されている<sup>(3)</sup>。ついで、この非定常挙動には、少なくとも2つの特徴的なモードがあること、それらがキャビテーション数によって区分されること、翼形などの迎え角の大小に左右されることなど、が明らかにされつつある<sup>(4),(5),(6)</sup>。

一方、内部流れにおいても、バルブ、ベンチュリなど各種絞り流路において放出形の渦キャビテーションが問題となることが知られている<sup>(3)</sup>。この場合の対象の多くは、ある程度厚い（再付着を有する）はく離領域を持ったはく離渦流れである。著者らはこのような非定常キャビテーションに対応する周期的キャビティ放出挙動を詳細に観察し、大規模なキャビティの放出過程におけるキャビティのペアリング・合体・成長挙動の存在とリエントラント運動の役割を指摘し、その機構を明らかにしようと試みてきた<sup>(7),(8),(9)</sup>。本報告では、一連の研究で観察された特徴的なキャビテーション・クラウドの放出挙動を紹介する。

### 2. 実験装置および方法

実験は小形密閉回流式キャビテーションタンネルを用いて行われた。実験は2種類の流路を用いて行われた。まず、1つ目の試験流路部は直径 $D=80$  mmの円形断面を持つお

り、そこに図1に示されるような $d=22$  mm、長さ $L=100$  mmの入り口丸みのない円筒オリフィスが取り付けられている。試験部は透明アクリル樹脂製で外側から光学的様相観察が可能となっている。絞り部の端面から上流および下流20 mmの位置にそれぞれ圧力孔が設けられている。

2つ目は、図2に示されるような $80 \times 60$  mmの長方形断面の試験部における入口角度 $45^\circ$ 、出口角度 $18.4^\circ$ 、高さ $H=40$  mmの収縮拡大流路である。スパン方向の観察を行う際には図3に示されるような高さ $H=30$  mmのものが用いられた。ここで、流路拘束比は双方とも $1/2$ である。

様相観察は主に高速度ビデオカメラ（KODAK EXTAPRO MODEL4540、最高フレーム速度40500 fps : frames per second）を用いて行われた。本研究における高

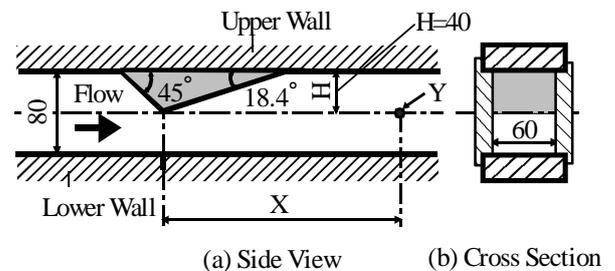


Fig.2 Convergent and divergent channel (side-view)

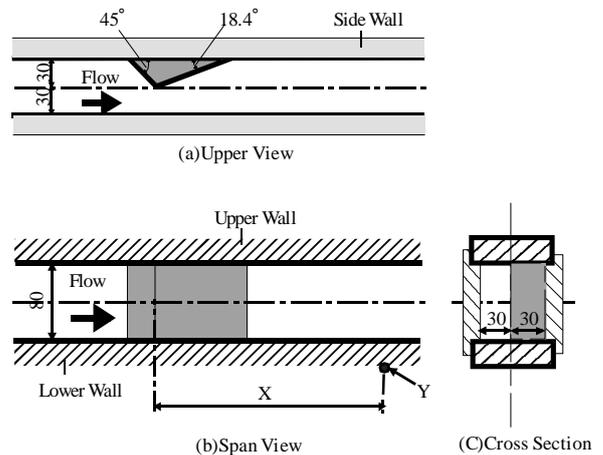


Fig.3 Convergent and divergent channel (span-view)

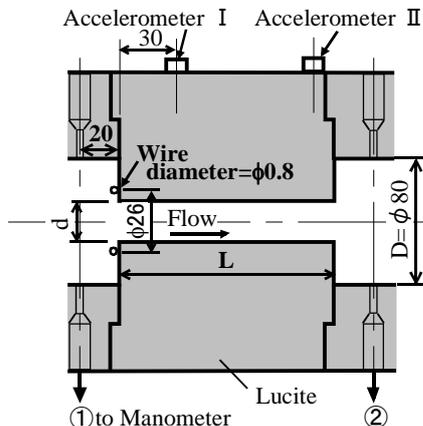


Fig.1 Details of test section

速度ビデオカメラの撮影速度は主に9000および13500 fpsである。

キャビテーション可視化実験は流速を一定に保ち、タンネル全体の静圧をゆっくり変化させ、所定のキャビテーション数に設定した後に行われた。本論文で用いられるキャビテーション数  $\sigma$  およびレイノルズ数  $Re_t$  は以下のように定義された。

円筒オリフィス：

$$\sigma = (P_2 - P_v) / (P_1 - P_2) \dots \dots (1)$$

$$Re_t = U_t \cdot d / \nu \dots \dots (2)$$

収縮拡大ノズル：

$$\sigma = (P_\infty - P_v) / \rho U^2 \dots \dots (3)$$

$$Re_t = U_t \cdot H / \nu \dots \dots (4)$$

ここに、 $P_1$ 、 $P_2$ はそれぞれオリフィス上流および下流点の静圧、 $P_v$ 、 $\nu$  および  $\rho$  はそれぞれ試料水の飽和蒸気圧、動粘度および密度、そして  $U$  および  $U_t$  は一様流および絞り部の平均流速である。また  $P_\infty$  は試験部上流の一様流部の静圧、試料水の温度および溶存酸素量をそれぞれ  $T_w$ 、 $\beta$ 、そして高速度ビデオのフレーム速度を  $Fs$  で表す。

### 3. 結果および考察

**3.1 円筒オリフィスにおけるはく離渦キャビテーション** 図4は高速度ビデオカメラによって13500fpsで観察されたキャビティ様相を示す。観察位置はオリフィスのど部入り口付近である。様相は衝撃がピーク値を示し明瞭に放出が観察されるキャビテーション数  $\sigma = 0.94^{(7),(8)}$  の様相である。図中の白い部分がキャビティを示している。

Frame No.-20~No.24でキャビティ放出のほぼ1周期を示している。クラウド状のキャビティが放出され崩壊してゆく様子が観察される。ここで、No.0はトリガ信号検知時のフレームである。衝撃は放出されたクラウド状のキャビティが崩壊するとき計測された。キャビティ崩壊後、新たなキャビティの放出が始まる (No.12~No.24)。このような挙動は周期的に繰り返される。このとき放出の周期は約

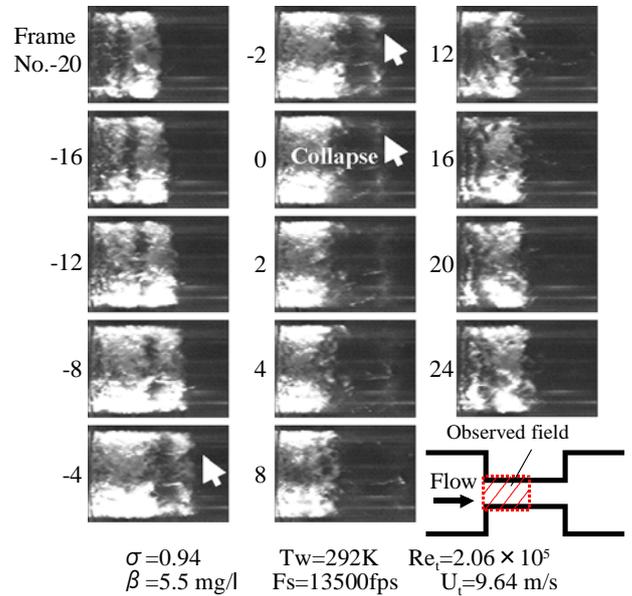


Fig.4 Cavity collapsing and shedding behavior in the throat of the circular cylindrical orifice

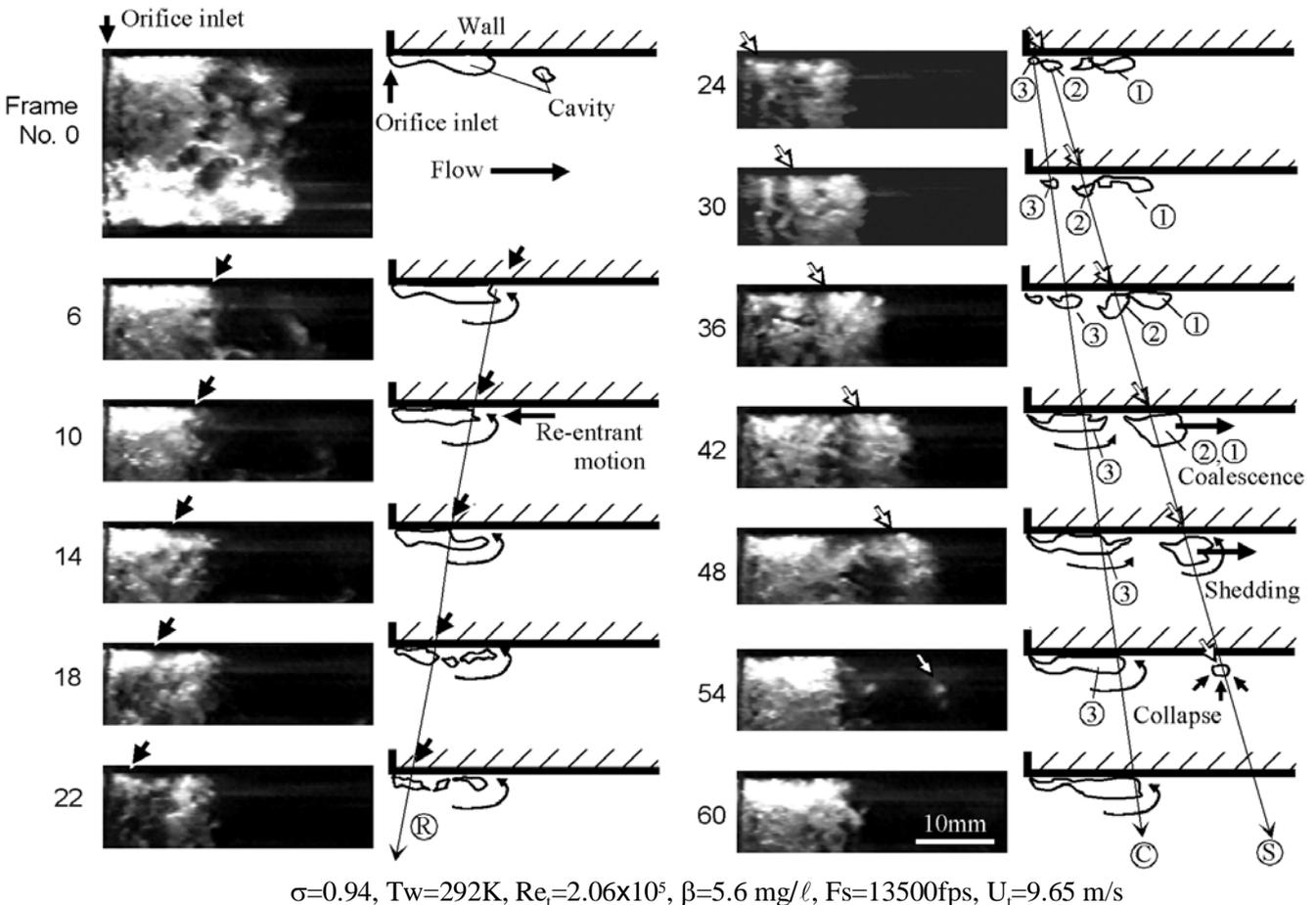


Fig.5 Behavior of cavity shedding and re-entrant motion

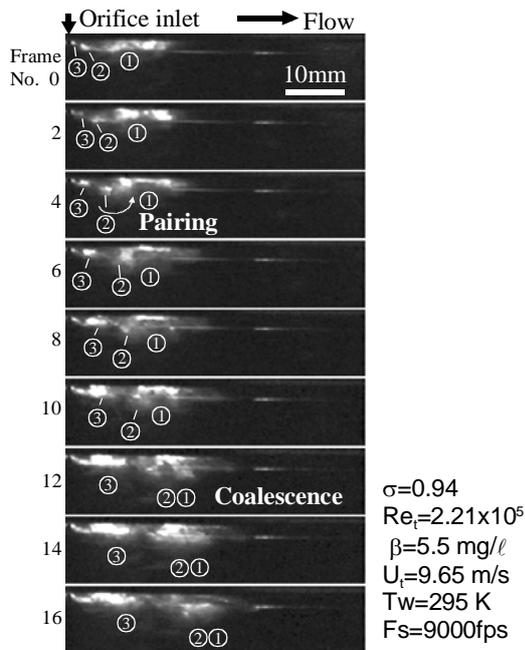


Fig.6 Sectional view of small vortex cavities with laser sheet method

260Hzと評価され、キャビティ長さそして縮流部平均流速に基づいたストローハル数は0.36であった<sup>(8)</sup>。また円筒オリフィス入口端面にトリッピングワイヤを取り付けた場合、 $\sigma=0.83$ のとき衝撃のピーク値をとり、そのときのキャビティ放出周波数は約365Hz、同様にストローハル数は0.49であった<sup>(8)</sup>。

### 3.2 円筒オリフィスにおけるクラウド状キャビティの放出過程

次に、クラウド状キャビティすなわちキャビテーション・クラウドの放出挙動を詳細に観察した例を図5に示す。試験部上下方向から照明を当て、キャビティ底部の観察を行った。Frame No.6以後は上半分の様相のみを示す。また、図6にレーザシートを用いてキャビティの断面の挙動を観察した結果を示す。観察位置は図4と同様のオリフィスのど部入り口付近である。これらの図5よりキャビティ放出のメカニズムは以下ようになる。

まず、キャビティ放出後、Frame No.6付近で付着キャビティの後端にリエントラント運動が始まる。その後、リエントラント運動は上流方向へ向かい (Frame No.10~22)、Frame No.24程度でキャビティ前縁に達していると考えられる。このときリエントラント運動の平均速度 $U_r$ は $U_r=10.8\text{m/s}$ と評価され、この値はオリフィスのど部平均流速 $U_t=9.65\text{m/s}$ とほぼ等しい速度となった。

リエントラント運動がキャビティ前縁に到達直後のFrame No.24には、剥離せん断層上に新たに生じたと思われるものを含め、数個の微小渦キャビティが認められる。ここでは少なくとも3つの渦キャビティがはく離せん断層上に観察された。これらの渦キャビティは合体・成長しながら下流方向へ移動してゆく。

その様相はレーザシート法を用いることにより、図6に示すようにキャビティの挙動をさらに明瞭に捕らえることができる。リエントラント運動がのど部前縁付近に到達後に剥離せん断層上に形成される微小渦キャビティには、既存の大きなキャビティと合体し一体のキャビティとして直後に下流へ放出されるものと (図5,6中のキャビティ①,②)、すぐには下流側に放出されず、それ以降に生じるキャビティと合体しながら成長するもの (図5,6中のキャビテ

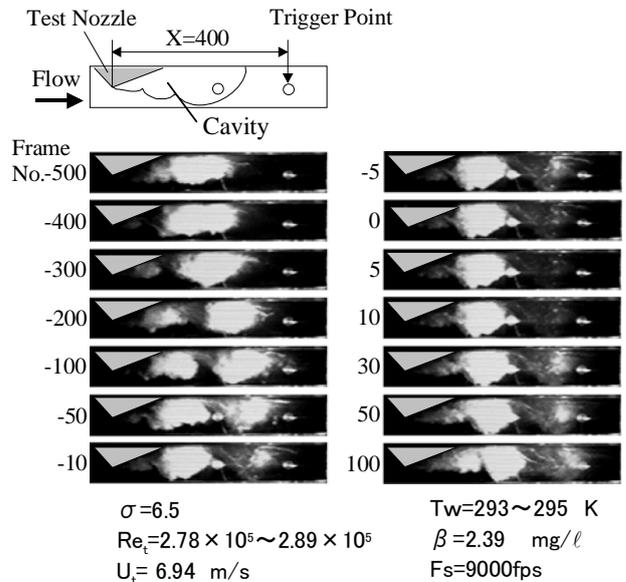


Fig.7 Shedding behavior of cavitation cloud in a convergent-divergent channel

ィ③)の2種類あることが観察される。前者のキャビティは下流に放出され大きく崩壊し衝撃を発生する。後者のキャビティはある程度の大きさになるまで成長するが、前者に関連する大きなキャビティがクラウド状気泡群 (キャビテーション・クラウド) として放出されると成長が停滞し、その底部に新たなリエントラント運動を呈する。リエントラント運動そのものに関する結果は翼形や絞り流路のキャビテーションに関する研究<sup>(10),(11)</sup>と符合する。

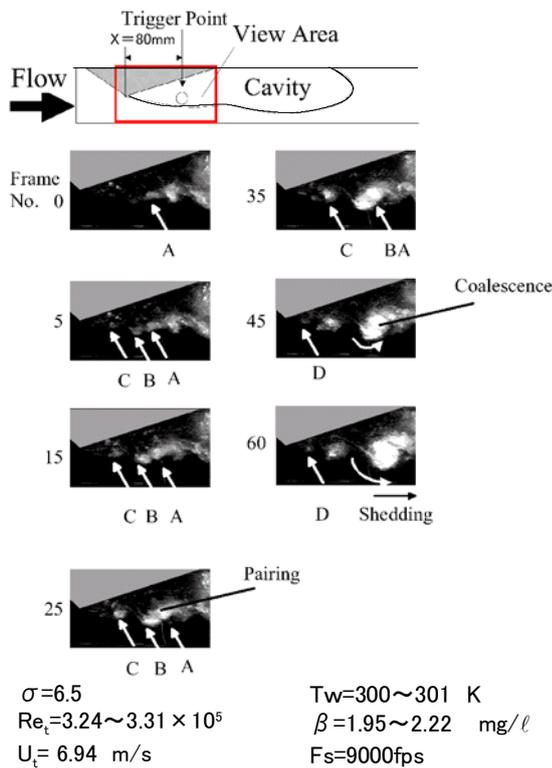
### 3.3 収縮拡大(矩形)流路におけるはく離渦キャビテーションの挙動

図7に衝撃ピーク付近の断面方向のキャビティ全体様相を示す。高速度ビデオカメラを用いて9000fpsで撮影された<sup>(9)</sup>。はく離せん断層で生じた渦キャビティが大きく成長し放出されていく様子が確認できる。また、このとき新たな付着型キャビティの発達も観察される (No.400~No.200)。その後、放出されたキャビティが下流で激しく崩壊する時 (No.-10~No.0)、高衝撃が計測された。またキャビティ崩壊後、リバウンド挙動を示していることも確認される (No.30~No.100)。

図8に、図7に示されたものと同じ条件において流路絞り部近傍の渦気泡挙動を詳細に観察した結果を示す。円筒オリフィスの場合と同様のキャビティ成長機構が捕らえられている。はく離せん断層上には少なくとも3つのキャビティが生成されている (図8のA, BおよびC)。これらのキャビティにおいて、AとBのキャビティがペアリング挙動を示し (No.25)、その後合体し (No.45)、そして下流に放出される。このような特徴的なキャビティ成長・放出過程は図5,6に示される円筒オリフィス内のキャビティ挙動でも観察されている。

次に、図9にはスパン方向のクラウド放出様相を観察した様相を示す。図中の直線①~④はキャビティの移動に合わせて引いたものである。これからキャビティの放出はほぼ一定の速度であること、直線がほぼ等間隔であり周期的に放出されていること、小渦キャビティ (サブキャビティ) との合体が生じていること、などが観察される。

例えば図9の③のキャビティにおいて代表的に示されるように各キャビティが③'のサブキャビティと合体し (Frame No.900~No.1100) 大きく成長しながら放出される様子が、このようなスパン方向からも明瞭に観察される。



**Fig.8 Behavior of small vortex cavities in a convergent-divergent channel**

#### 4. 結言

2種類の内部流れ場形状を用い、はく離形キャビテーションの挙動観察を行った。

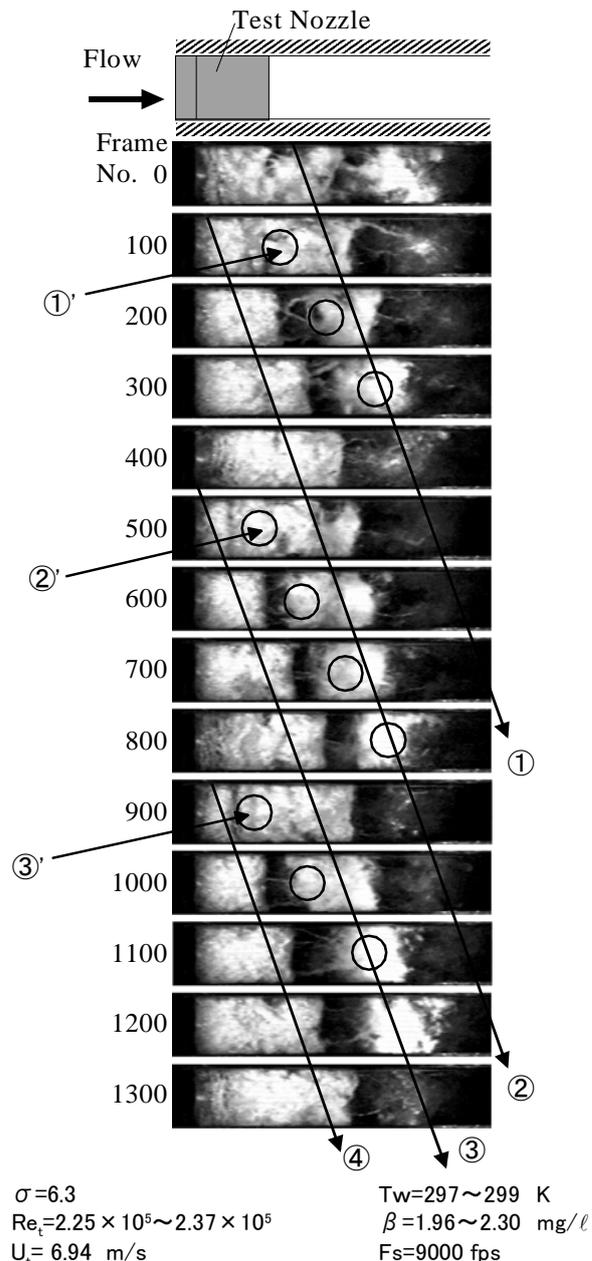
(1) 円筒オリフィス内部流れそして収縮拡大ノズル流れの両流れ場においてキャビテーション・クラウドの周期的な放出が観察された。

(2) キャビテーション・クラウドは、その発達過程において小渦キャビティのペアリングそして合体挙動を伴いながら成長・放出され、衝撃を発する。

(3) クラウド放出後、上流方向に向かうキャビティ底部のリエントラント運動が観察され、これがクラウド放出の周期性に重要な働きを示すと考えられる。

#### 文献

- (1) Knapp, R. T., Recent Investigations of the Mechanics of Cavitation and Cavitation Damage, Trans. ASME, Vol. 77, (1955), pp. 1045-1054.
- (2) Kubota, S., et al., Unsteady Structure Measurement of Cloud Cavitation on a Foil Section Using Conditional Sampling Technique, Trans. ASME, J. Fluids Eng., Vol. 111, (1989), pp. 204-210.
- (3) Hutton, S. P., Studies of Cavitation Erosion and its Relation to Cavitating Flow Patterns, Int. Symposium on Cavitation, Sendai, (1986), p.21-29.
- (4) 佐藤光太郎, ほか3名, 平板翼に生じる振動キャビテーションの観察, 機論, 65-639, B (1999), pp. 3659-3667.
- (5) Kjeldsen, M., et al., Spectral Characteristics of Sheet/Cloud Cavitation, Trans. ASME, J. Fluids Eng., Vol. 122, (2000), pp. 481-487.
- (6) Le, Q., et al., Partial Cavities: Global Behavior and Mean Pressure Distribution, Trans. ASME, J. Fluids Eng.,



**Fig.9 Periodic shedding behavior of cavitation cloud and the coalescence process (span-view)**

Vol. 115, (1993), pp. 243-248.

(7) 佐藤恵一, ほか4名, 軸対称剥離流れにおける衝撃性気泡の挙動 (円筒オリフィス内流れ), 日本学術会議キャビテーションに関するシンポジウム (第10回), (1999), pp. 145-148.

(8) Sato, K. and Saito, Y., Unstable Cavitation Behavior in a Circular-Cylindrical Orifice Flow, Fourth Int. Symp. on Cavitation - CAV2001, Pasadena, (2001), A9-003, pp. 1-8.

(9) Sato, K., et al., Observations of Unsteady Separated-Type Cavitation in Convergent-Divergent Channel, The 3rd ISMTMF, Fukui, (2001).

(10) Kawanami, Y., et al., Mechanism and Control of Cloud Cavitation, Trans. ASME, J. Fluids Eng., Vol. 119, (1997), pp. 788-794.

(11) de Lange, D. F., et al., On the Mechanism of Cloud Cavitation - Experiment and Modelling -, Proc. Second Int. Symp. on Cavitation, Tokyo, (1994), pp. 45-49.