



円筒オリフィス内部に発生する 非定常キャビテーション挙動の可視化*

齊藤 康弘¹, 佐藤 恵一¹

Visualization of Unsteady Cavitation Behavior in Circular Cylindrical Orifice

Yasuhiro SATO and Keiichi SATO

ABSTRACT

Cavitation is one of the most important phenomena in the high-speed liquid flow. When cavitation appears in the flow, it causes some troubles like a performance decrement of the fluid machine, vibration, noise, and cavitation damage. So, it is necessary to observe the cavity behavior to solve such problems. In this study, an experimental research was performed about behavior of the cavitation inside a circular cylindrical orifice. The aspect of the cavitation developing on the inner wall was observed by the high-speed video camera with a laser sheet method. As a result, unsteady shedding behavior of vortex cavity was characteristically observed. In addition, pairing and coalescence behavior of vortex cavitation on the separated shear layer were clearly observed with the laser sheet method.

Keywords : Cavitation, Laser sheet, Circular cylindrical orifice, Internal flow

1. 緒 論

キャビテーション気泡の挙動を観察することは、キャビテーション発生に伴う振動、騒音そして壊食などの問題の解決に非常に重要である。これまで多くのキャビテーション挙動の観察がさまざまな物体（翼や円柱など）周りの流れ場において行われている。

これまでのキャビテーション流れ挙動の可視化・観察の代表例をいくつか挙げるとまず、高速度写真を用いて Knapp はキャビテーションとその内部に発生しているリエントラント流れを観察している¹⁾。横溝は円柱キャビテーションによる壊食機構を高速写真と関連付け示している²⁾。また Ceccio らは固体境界近傍においてトラベリング気泡の詳細な挙動を観察している³⁾。

また、大場・伊藤らは瞬間写真を用いてベンチュリを通る流れ、そしてちょう形弁まわりにおいて生じるキャビテーションの様相を観察している^{4),5)}。さらに宮崎らは電わい振動キャビテーションに関して振動の各位相におけるキャビテーション様相を瞬間写真観察し、壊食との関連付けを行っている⁶⁾。

さらに高速度ビデオカメラを用いて観察した例を挙げると、著者の一人らはキャビテーション崩壊時の衝撃と高速度ビデオカメラとを同期させる工夫により、気泡崩壊様相の動画観察とそのときの衝撃計測を同時に行っている^{7),8)}。また大場らは高速度ビデオカメラで撮影した画像からキャビテーションまわりの局所的な速度を求めている⁹⁾。さらに Laberteaux らは超高速度 CCD カメラを用いて 10^5 フレーム毎秒のオーダの撮影速度でキャビテーション気泡の崩壊挙動を観察している¹⁰⁾。

このように多くのキャビテーション気泡の観察が試みられているが、非定常な振動・放出挙動を呈するキャビテーションの一連の挙動・その機構に関して未知な点がまだ多く残されている。特に円筒オリフィスのような軸対称な内部流れにおいて非定常なキャビテーションの動的な観察した例は著者らの研究^{11),12)} のほか少ない。そこで本研究では、円筒オリフィス入口部に発生するキャビテーションの可視化を通して詳細な観察を行った。特にレーザシートを用いてキャビテーションの断層的挙動観察を行い、その挙動の非定常性について検討を行った。

2. 実験装置および方法

実験は Fig. 1 に示されるキャビテーショントンネルを用いて行われた。トンネルは圧力制御タンクによりタン

* 原稿受付 2002年8月5日

¹ 正会員 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)

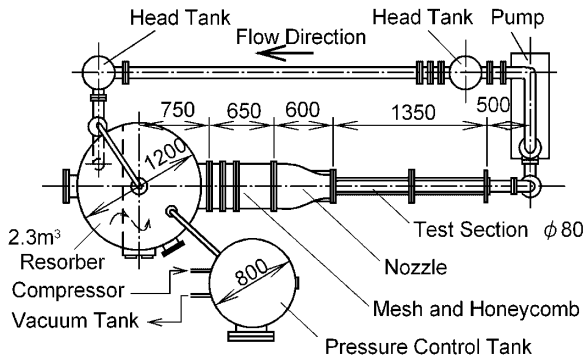


Fig. 1 Cavitation tunnel.

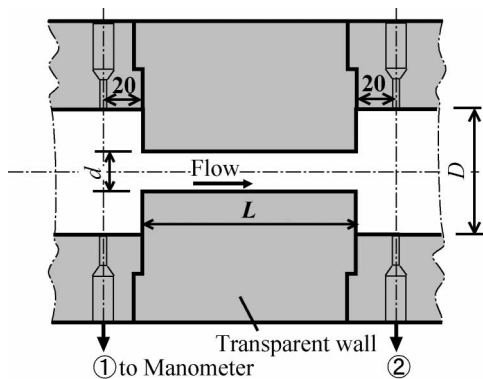


Fig. 2 Details of test section.

ネル全体の圧力を調整し、キャビテーションの発生状態を制御することができる。試験流路部は直径 $D = 80$ mm の円形断面を持っており、そこに Fig. 2 に示されるような $d = 22$ mm、長さ $L = 100$ mm の入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おり、その位置で基準圧力の計測が行われている。

様相の観察は主に高速度ビデオカメラ (KODAK EX-TAPRO MODEL4540, 最高フレーム速度 40500 fps : frames per second) を用いて行われた。本研究において高速度ビデオカメラの撮影速度は、主に 9000, 13500 そして 18000 fps を用いた (照明は連続光を用いた。したがって 1 コマ当りの露光時間は撮影コマ数のほぼ逆数に対応する)。キャビテーションの可視化のための光源として、メタルハライドランプ (PHOTRON HVC-SL 150W) とアルゴンイオンレーザ (SOC GLG3482 4W) が用いられた。特にアルゴンイオンレーザは Fig. 3 に示されるように円筒レンズを介してシート状に広げられ、円筒オリフィス軸に対し平行にオリフィス中心断面に照射された。このときレーザシートの厚みは約 3 mm であった。

キャビテーションの可視化実験は、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 σ そしてレイノルズ数 Re_t は以

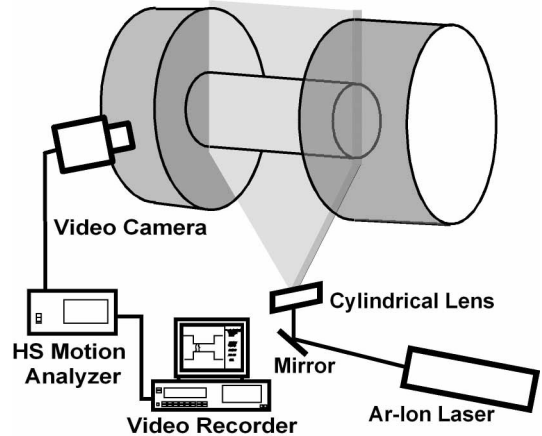


Fig. 3 Laser sheet observation system.

下のような定義である。

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

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

ここに、 P_1 および 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 および ν はそれぞれ試料水の飽和蒸気圧および動粘度、そして $U_t (= 4Q / \pi d^2)$ 、 Q : 流量) は絞り部内の平均流速である。また、試料水の温度および溶存酸素量をそれぞれ T_w および β 、そして高速度ビデオのフレーム速度を Fs で表す。

3. 結果

3.1 非定常キャビテーション挙動の可視化

円筒オリフィス内部に発生するキャビテーションを通常のメタルハライドランプとレーザシートを用いて可視化した。円筒オリフィスのような軸対称流れ場においてキャビテーションは壁面に沿って円周状に存在するため、キャビティ背面部の挙動の観察は困難である。そこでキャビティをレーザシートによって可視化する工夫を行った。Fig. 4 (a) にはレーザシートを用いたキャビテーション可視化結果、また Fig. 4 (b) には通常のライトにおけるキャビテーション可視化結果を示す。これらの画像は異なる実験におけるものであるが、キャビティ挙動においてほぼ同位相のものを示している。

Fig. 4 (a) に示すレーザシートによる可視化に関しては、レーザを試験部下方から照射しているため下側のキャビティのみ明瞭に可視化されているので、その部分を拡大して示している。通常の照明と比較すると、キャビティは円周状に存在しているにもかかわらずキャビティ内部のはく離せん断層上に生じている渦キャビティの挙動を明瞭に捉えることができた。このときキャビティ底部 (キャビティの側壁面側) においてキャビティが上流側へ崩壊してゆくりエントラント運動 (Frame No. 4~16) とキャビティの非定常な放出挙動が確認された。

Fig. 4 (b) は撮影カメラと同方向から照明し、キャビ

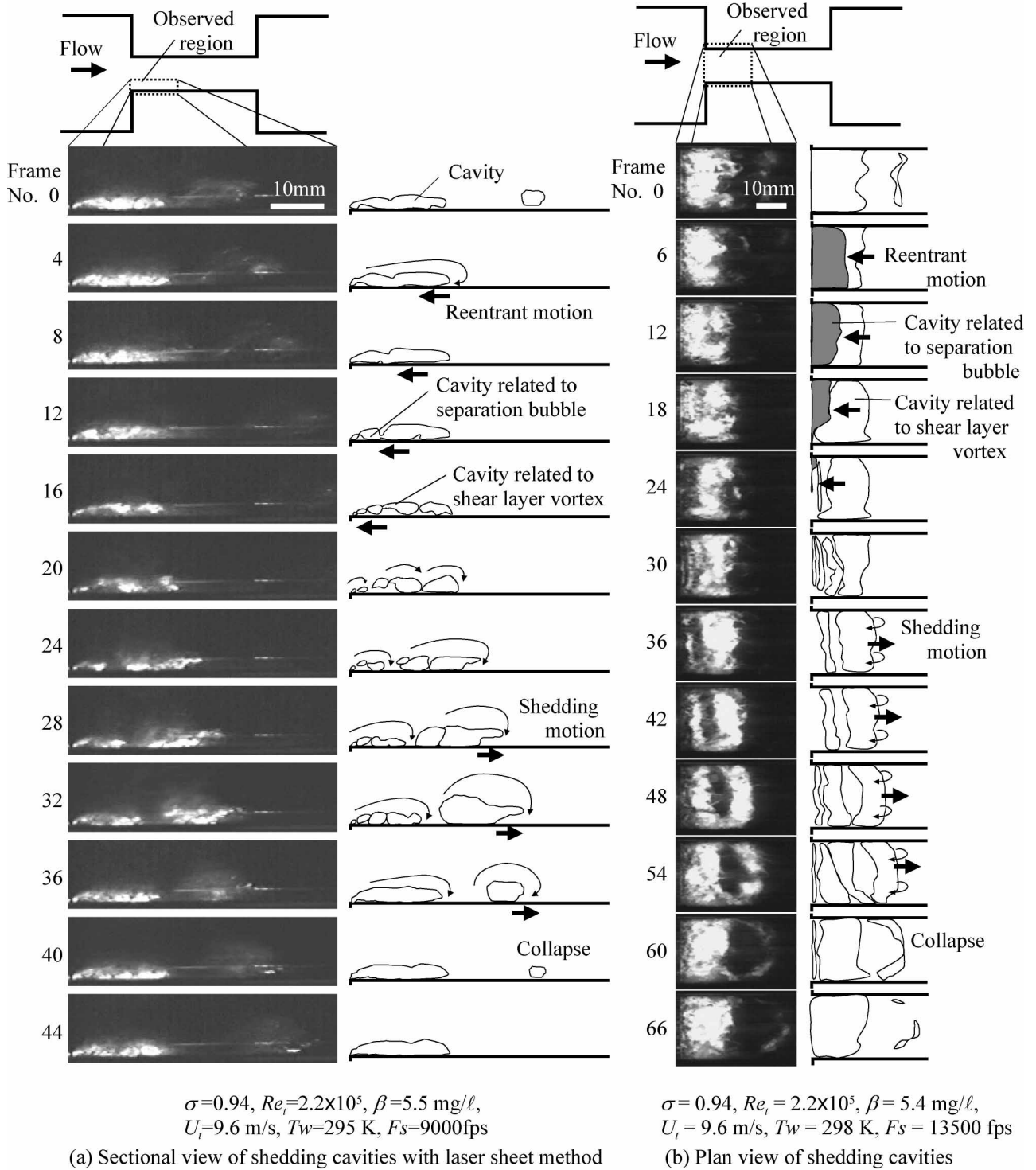


Fig. 4 Observation of shedding cavities.

ティ全体の観察を行った結果を示している。図中の白い部分がキャビティである。この可視化法ではキャビティの全体的な挙動の観察に対して明瞭な情報を得ることができる。この可視化結果からキャビティは円筒全体にほぼ一様に存在していることがわかる。また、Fig. 4(a)と同様にリエントラント運動を伴う非定常放出挙動が観察された。これらの可視化観測をもとにキャビティの非定常挙動に関して検討を行った。

3.2 キャビティのリエントラント挙動と放出挙動

Fig. 5はキャビティの放出が明瞭に観察された $\sigma = 0.94$ において試験部上下方向からメタルハライドライトを用いて照明することでキャビティ底部（キャビティの側壁面側）の観察を行った結果を示している。ここでは上部のキャビティ様相について説明する（Frame No. 6以降はNo. 0の画像の上半分のみを示している）。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^{11), 12)}が始まる（図中の黒矢印）。その後、リエントラ

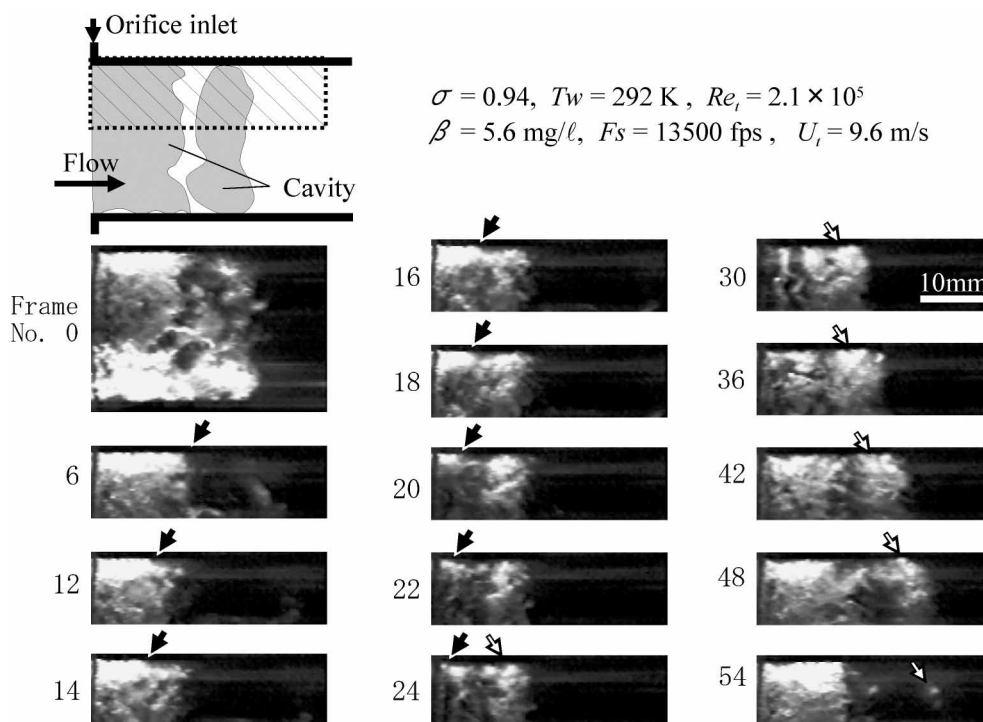


Fig. 5 Behavior of re-entrant motion and cavity shedding.

ント運動は上流方向へ向かい (Frame No. 6~ 24), 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. このキャビティのリエントラント挙動は Fig. 4 (b) Frame No. 6~ 24 に示される様に円筒全体にはほぼ一様に見られる. このときリエントラント運動の平均速度 U_r は $U_r = 11 \text{ m/s}$ と評価され, この値はオリフィスのど部平均流速 $U_f = 9.6 \text{ m/s}$ 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. リエントラント運動, キャビティの合体・成長そして放出は自励振動的に周期的に放出されることが注目される^{12), 14)}. また放出キャビティの平均移動速度は約 10 m/s であった. 縮流係数 0.62 を考慮したオリフィス入り口縮流部の流速 U_c は $U_c = 16 \text{ m/s}$ と評価され, 渦キャビティの移動速度 U_v と絞り部主流速度 U_c との比 U_v/U_c は約 0.6 と評価される. この値は Kiya らによって厚板まわりの流れにおいて示された渦の移動速度における結果と一致する¹³⁾. 同様の結果が Fig. 4(a) に示されるレーザシートによる可視化結果からも観察される.

3.3 キャビティ放出挙動の詳細

前節で示したキャビティ挙動に関してレーザシートを用い, さらに詳細に観察を行った. 可視化画像をより明瞭に, さらに定量的に評価するために, コンピュータによる画像解析は非常に重要な手法の一つである. 得られた可視化画像の処理を行い, キャビティ挙動をより明瞭に観察しようと検討した. ここではキャビテーション発

達過程^{11), 12)} におけるサブ・キャビテーション領域に対応するキャビテーション数 $\sigma = 1.0$, そしてキャビティが比較的大規模に発達し非定常な放出が明瞭に確認された遷移キャビテーション領域に対応する $\sigma = 0.94$ の場合の特徴的な結果をそれぞれ Fig. 6, 7 に示す. 特に後者の条件は高衝撃性を示すものとして注目される^{11), 12)}. 得られた画像は Fig. 6(a) に示されるように高速度ビデオカメラの特性により白黒画像である. その画像においてキャビティをよりわかりやすくするため階調を反転したものを Fig. 6(b) に示す. この反転画像をさらに2値化処理した. その際, 全 256 階調に対し閾値を変化させることにより Fig. 6(c), (d) に示すような画像を得ることができた. 閾値を数種類変化させ検討を行った結果, 閾値の低い場合 (すなわち, 閾値が暗いレベルにある場合) は渦キャビティ1つ1つの挙動を, また高い場合は全体的なキャビティの輪郭を捉えられる傾向にあることがわかった. これらの図を参考に渦キャビティ挙動と輪郭を決定し Fig. 6(e) に示す模式図を作成した. はく離せん断層上に発生している特徴的な渦キャビティがある程度明瞭に捉えられている.

図中の白矢印で示される白い塊の部分が渦キャビティに対応している. 撮影位置はオリフィス入口部の壁面近傍である. 流れ場形状から円周状にキャビティが存在しているにもかかわらず, 通常の照明とは異なり, 剥離せん断層上に生じている渦キャビティが比較的明瞭に観察される. その渦キャビティは数個存在し, それが下流側に移動してゆき放出される様子が観察される. この時キャビティのペアリング (Fig. 6 : Frame No. 4, No. 16, No. 24, Fig. 7 : Frame No. 8, No. 20, No. 24) そして

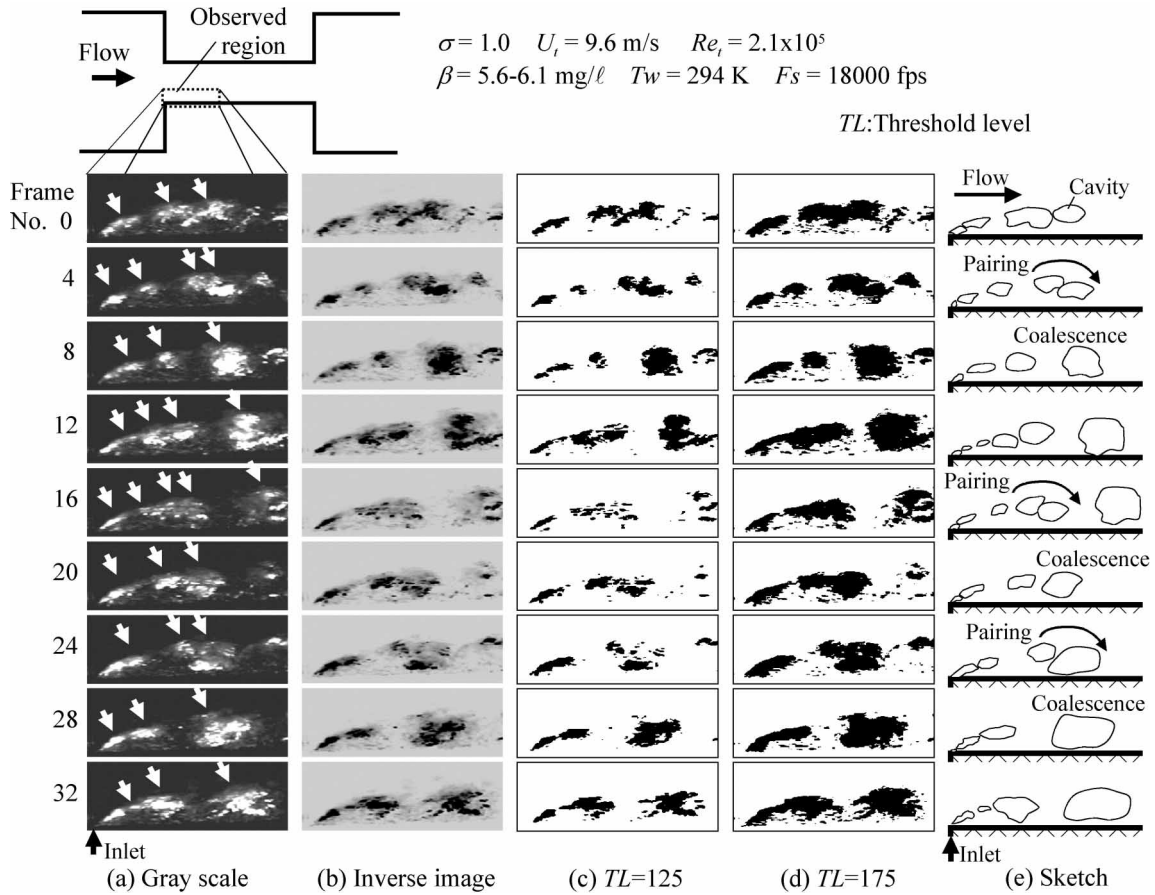


Fig. 6 Detailed observation of cavity behavior using laser sheet method at $\sigma = 1.0$.

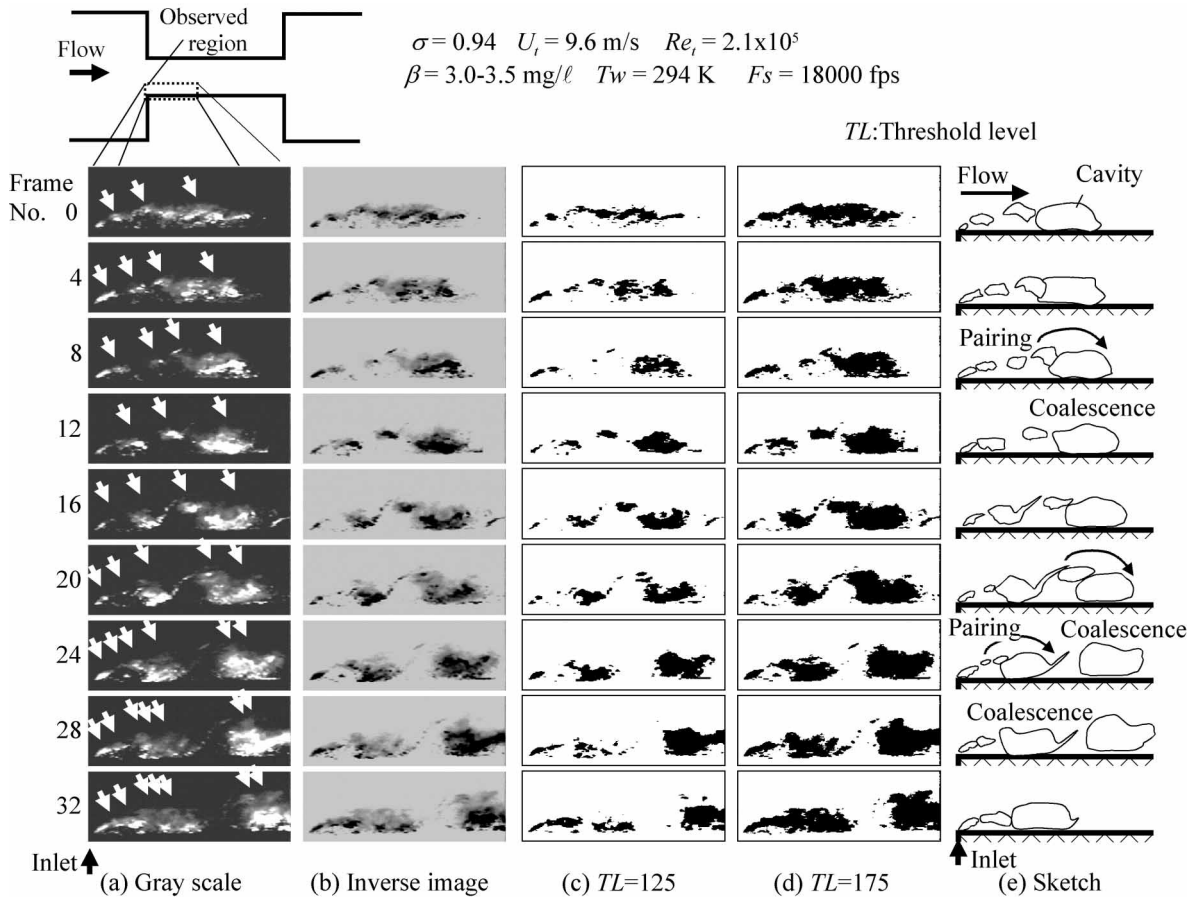


Fig. 7 Detailed observation of cavity behavior using laser sheet method at $\sigma = 0.94$.

合体挙動 (Fig. 6 : Frame No. 8, No. 20, No. 28, Fig. 7 : Frame No. 12, No. 24, No. 28) も観察された。放出されるキャビティ放出周波数は Fig. 6 の場合、約 830 Hz であるのに対し Fig. 7 の場合は約 270 Hz 程度である。また放出されたキャビティ移動速度は Fig. 6 において $U_b = 9.0$ m/s 程度そして Fig. 7 の場合においては $U_b = 9.4$ m/s 程度と評価され、互いにかかなり近似した速度であった。Fig. 6 の高キャビテーション数状態 (キャビテーションが比較的未発達な状態) においてはキャビティは発生から放出までに数個の渦キャビティが合体し放出される。一方、Fig. 7 のキャビテーションが比較的大規模に発達する状態においては、まず、せん断層領域において複数個のキャビティが合体し付着形キャビティへと成長し、そして放出時にさらに数個の渦キャビティが合体し放出されてゆく。つまりキャビティは合体する渦キャビティが多いほど大きく成長するが放出されるまでの時間が長くなる傾向にある。したがってキャビティの移動速度が同じであってもキャビティ放出周波数に差が生じることになる。

4. 結 論

円筒オリフィス内部に生じるキャビテーションの非定常挙動の観察を試みた。以下に得られた主要な結果を示す。

- (1) レーザシートを用いることによりキャビティ断面の様相を可視化し、特にはく離せん断層上のキャビティ挙動を明瞭に観察することができた。
- (2) 円筒オリフィスのような軸対称の内部流れ場においても物体まわりの流れ場と同様の非定常なキャビティ挙動が存在する。
- (3) キャビティは非定常な周期的放出挙動を呈し、放出時にはリエントラント挙動を伴い、大規模に放出される。
- (4) 大規模なキャビティは小渦キャビティがペアリング・合体しながら大きく成長し、下流へ放出される。この挙動はキャビテーションの発達状態に依存して変化する。

参 考 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) 横溝利男: 円柱キャビテーションの列状壊食と気ほう流動について, 機論, 49-444, B (1983) pp. 1574-1583.
- 3) S. L. Ceccio and C. E. Brennen: Observation of the Dynamics and Acoustics of Travelling Bubble Cavitation, J. Fluid Mech., Vol. 233 (1991) pp. 633-660.
- 4) 大場利三郎, 伊藤幸雄: ベンチュリのキャビテーションの挙動 (低乱れにおけるジョンソン効果), 機論, 45-398, B (1979) pp. 1429-1434.
- 5) 伊藤幸雄, ほか5名: ちょう形弁まわりに発生するキャビテーション流れパターンの観察, 機論, 54-508, B (1988) pp. 3317-3324.
- 6) 宮崎啓, ほか2名: 激しい振動を伴う振動キャビテーションの高速写真観察, 機論, 57-539, B (1991) pp. 2174-2179.
- 7) 佐藤恵一, 近藤伸司: 流れ中での固体壁近くの渦キャビテーション気泡崩壊・衝撃挙動 (特に, 壁面方向への気泡様相), 機論, 63-606, B (1997) pp. 372-377.
- 8) 佐藤恵一, 小川直哉: 流れ中でのキャビテーション気泡の崩壊時近傍の挙動 (衝撃力との同時計測), 機論, 61-589, B (1995) pp. 3099-3104.
- 9) 大場光太郎, ほか4名: 画像処理による渦キャビテーション解析, 可視化情報, Vol. 14, 54 (1994) pp. 179-184.
- 10) Laberteaux, K. R., et al.: High Speed Digital Imaging of Cavitating Vortices, Experiments in Fluids, 24 (1998) pp. 489-498.
- 11) Sato, K., et al.: Impulsive Behavior of Cavitation bubbles in a Circular — Cylindrical Orifice Flow, Cavitation and multiphase flow forum, ASME, FED-251, 11023 (2000).
- 12) Sato, K. and Saito, Y.: Unstable Cavitation Behavior in a Circular-Cylindrical Orifice Flow, JSME International Journal, Ser. B, Vol. 45, No. 3 (2002) pp. 638-645.
- 13) Kiya, M. and Sasaki, K.: Structure of a Turbulent Separation Bubble, J. Fluid Mech., Vol. 137 (1983) pp. 83-113.
- 14) Sato, K., et al.: Observation of Unsteady Separated - Type Cavitation in Convergent — Divergent Channel, The Third International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flow, Fukui (2001) pp. 203-210.