

キャビテーション気泡崩壊時における圧力波の伝播と周囲気泡の崩壊

Propagation of the Pressure Waves and Collapse of Surrounding bubbles in a Cavitation Bubble Collapse

○齊藤 康弘 (金沢工大) 佐藤 恵一

Yasuhiro SAITO and Keiichi SATO

Department of Mechanical Engineering, Kanazawa Institute of Technology,
7-1 Ogigaoka, Nonoichi, Ishikawa, 921-8501

It is known that a vortex cavitation causes high impact when it collapses. We have observed the collapsing behaviors of vortex cavities in the wake of a circular cylinder by means of an ultra-high-speed video camera that can record the phenomena at the maximum rate of 1 million frames per second. It is observed that the collapse of bubbles propagate into surrounding small bubbles. It is considered that this behavior is based on the pressure waves due to the cavity collapse. In this study, we investigate the detailed propagation behavior of bubble collapse with an image processing technique. As a result, it is found that the propagation velocity of bubbles collapse is on the order of several 100 m/s to 1000 m/s.

Key Words: Vortex cavitation, High-speed video observation, Propagation of bubble collapse, Pressure wave

1. 緒言

キャビテーション気泡がその崩壊時に圧力波あるいは衝撃波を伴うことは広く知られている。この圧力波動・衝撃により流体関連振動、騒音、そして壊食が引き起こされる。このような気泡崩壊関連挙動に関して多くの研究が行われてきている (例えば文献⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾)。

静止液体中の観察においての単一気泡の崩壊時に発生する衝撃波に関して Shima らはリバウンドの際に衝撃波が発生することを示している⁽²⁾。Ellis は超音波キャビテーション気泡群から発生する衝撃波を実験的に観察している⁽³⁾。また宮崎らは超音波振動実験において衝撃波環の存在を観察している⁽⁴⁾。松本らのグループは気泡流中の衝撃波の伝播挙動に関して解析を行い、その集中化作用の可能性を指摘している⁽⁵⁾。一般的な衝撃波と気泡との干渉挙動に関する研究も散見する。また、Field らは一連の研究 (例えば文献⁽⁶⁾) において衝撃波やマイクロジェットがゼラチン内の空孔の連鎖的崩壊を引き起こすことを確かめている。

一方、筆者ら⁽⁷⁾は収縮拡大流路に生じた (比較的厚い剥離域をもつ) クラウドキャビテーションにおいて、そのリエントラント挙動において連鎖的キャビテーション気泡崩壊が起きること、円柱から放出された渦 (クラウド) キャビテーションが崩壊時に気泡崩壊伝播を示すこと、そして磁歪振動子キャビテーションの衝撃波環が成長 (伝播) 様相を示すことを、その概略の伝播速度と共に示している。

近年の技術の進歩とともに高速度ビデオカメラの開発が進み、動的な気泡崩壊挙動観察と衝撃の関係付けが可能となってきた⁽⁸⁾。さらに近年秒間 100 万コマで撮影可能な高速度ビデオカメラが開発され⁽⁹⁾、気泡崩壊時の更なる詳細な挙動観察が可能となり、高速度撮影技術とともにその画像解析技術の向上がのぞまれている。

本研究では、円柱後流に発生する放出形の渦キャビテーションに着目し、渦キャビティ崩壊時近傍での圧力波の伝播挙動および周囲気泡の崩壊挙動に対し観察を行った。特に、渦キャビティ崩壊時近傍に多数存在する微小気泡の崩壊伝播について、画像解析を試みるとともに、その詳細な検討を行

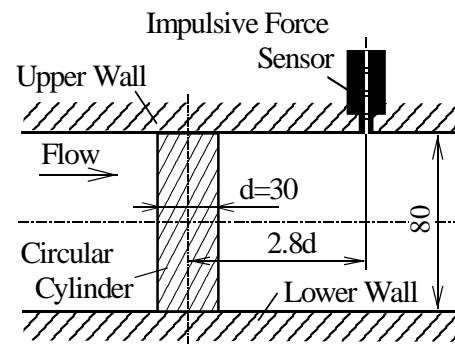


Fig. 1 Test section

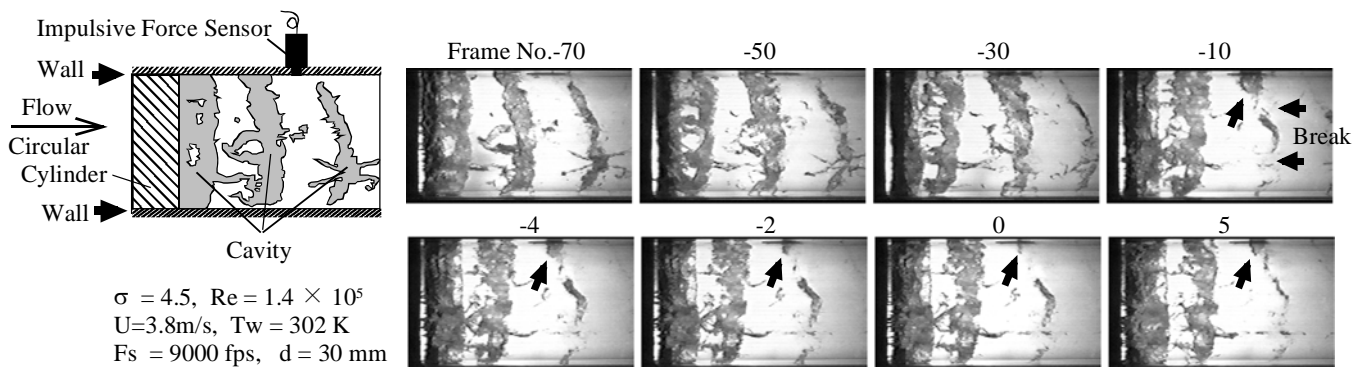


Fig. 2 Cavity collapsing behavior in the wake of circular cylinder

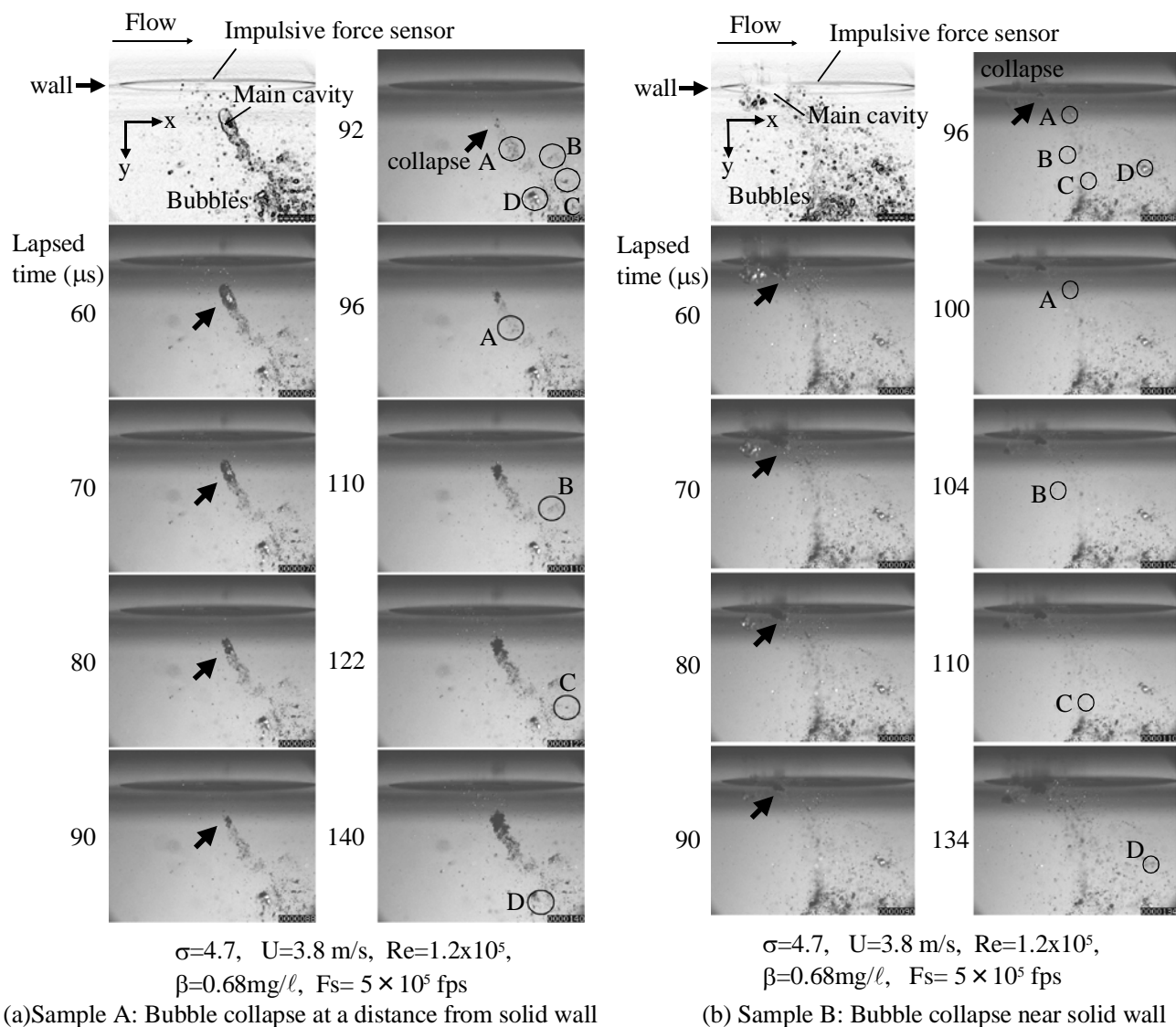


Fig.3 Propagation behavior of bubble collapse

った。

2. 実験装置および方法

本研究で用いた流れ場は図1に示すような80mm×60mmの矩形断面流路である。キャビテータとして直径d=30mmの円柱を流路に対して鉛直に取り付けた。流路拘束比は1/2である。発生するキャビテーションの崩壊様相と衝撃力を同時に計測するため、円柱中心より2.8d下流の上壁面に衝撃力センサーを取り付けた。この位置は放出形渦キャビテーションの崩壊位置に対応する。衝撃力センサーからの出力をトリガー信号として高速度ビデオカメラに入力することで、気泡崩壊時前後の様相を撮影した⁽⁸⁾。

本研究では2種類の高速度ビデオカメラを用いた。最高フレーム速度40,500fpsの高速度ビデオカメラ(KODAK EKTAPRO-4540)および最高フレーム速度1Mfpsの超高速度ビデオカメラ(近畿大, 島津製作所共同開発)⁽⁹⁾である。

本研究で用いているキャビテーション数 σ およびレイノルズ数 Re は以下のように定義した。

$$\sigma = 2(P - P_v) / \rho U^2 \quad (1)$$

$$Re = U \cdot d / \nu \quad (2)$$

ここにPおよびUは一様流部の静圧および流速、 ρ 、 P_v および ν はそれぞれ試料水の密度、飽和蒸気圧および動粘度である。また β およびTwは試料水の溶存酸素量および温度であり、Fsは高速度ビデオカメラの撮影速度である。

3. 結果および考察

3-1 キャビティ崩壊様相と気泡崩壊伝播

図2にFs=9000fpsで撮影したキャビティ挙動を示す。図中のFrame No.0は衝撃検知時を含む映像であり、それ以前を負、以後を正の番号で高速度ビデオカメラのフレーム数に準じて付けている。円柱後流に放出された渦キャビテーションは回転しながら下流に移動して行く。その後、渦キャビティはいくつかの部分に分裂し(Frame No.-10付近)、壁面近傍のキャビティが衝撃力センサー取り付け位置付近で崩壊する(Frame No.-10-0)。また、キャビティのリバウンドも確認される。

この衝撃力センサー取り付け位置の気泡崩壊時近傍の様相を超高速度ビデオカメラを用い 5×10^5 fpsで観察した。代表的な結果を図3に示す。図中の番号は時間(μ s)を示している。図3(a)は主キャビティが壁面から離れて崩壊するもの、また(b)は壁面に衝突するように崩壊するもの

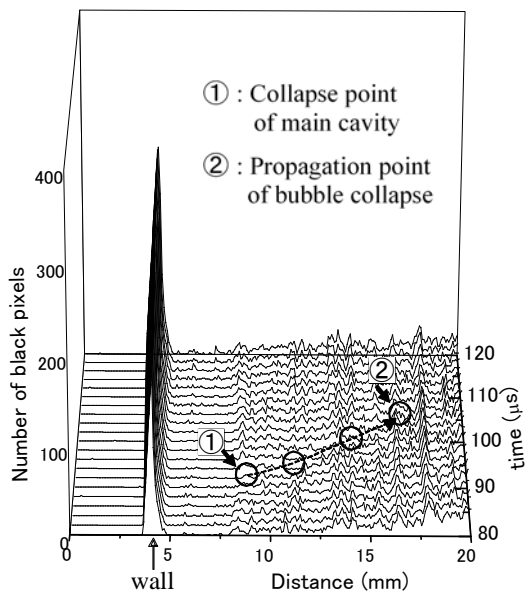
代表的な例を示している。図3 (a) においては $92 \mu\text{s}$ 付近で壁面から離れた位置において主キャビティが崩壊し、リバウンドも確認される ($96 \sim 110 \mu\text{s}$)。その後、主キャビティ

→	0
→	1
→	3
→	5
→	3
→	1

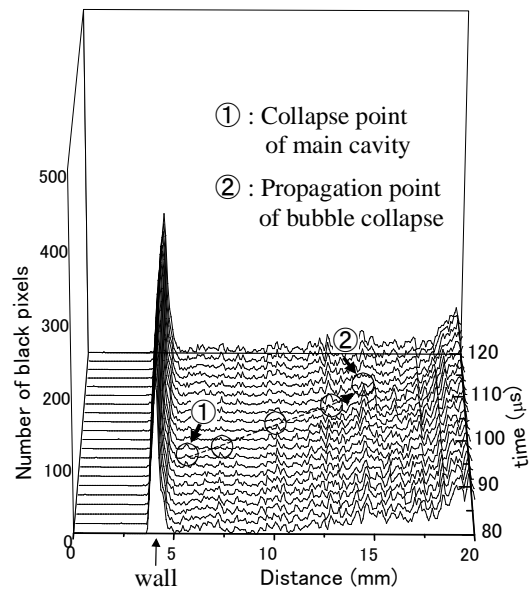
Fig.4 Measurement method

崩壊時に存在している周囲の微小気泡 (図中 A~D) が $96 \mu\text{s}$ には A が、 $110 \mu\text{s}$ には B、 $122 \mu\text{s}$ には C そして $140 \mu\text{s}$ には D という様に順次崩壊してゆく様子が観察される。図3 (b) においても同様に $96 \mu\text{s}$ 付近で壁面近傍において主キャビティが崩壊し、 $100 \mu\text{s}$ には A が、 $104 \mu\text{s}$ には B、 $110 \mu\text{s}$ には C そして $134 \mu\text{s}$ には D が順次崩壊している。このように微小気泡は多数存在し、次々に崩壊伝播してゆく。この伝播速度を計測するため画像解析を行い、全体的な微小気泡崩壊伝播速度の計測を行った。

3-2 気泡崩壊伝播の解析 解析は各時間で得られた画像 (312×260 画素) を白色と黒色に二値化し、気泡に概略相当すると考えられる黒色セルの水平方向 (x 方向) の和を求めることで行った (図4 参照)。つまり、気泡が崩壊すると黒色セル数が減少し、その時間的な変化を計測することで鉛直方向 (y 方向) への平均的気泡崩壊挙動 (伝播速度) を求め

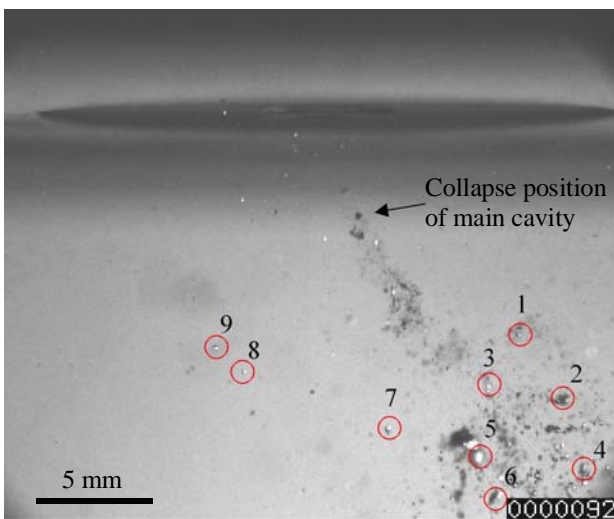


(a) Result of image analysis for Fig. 3(a)

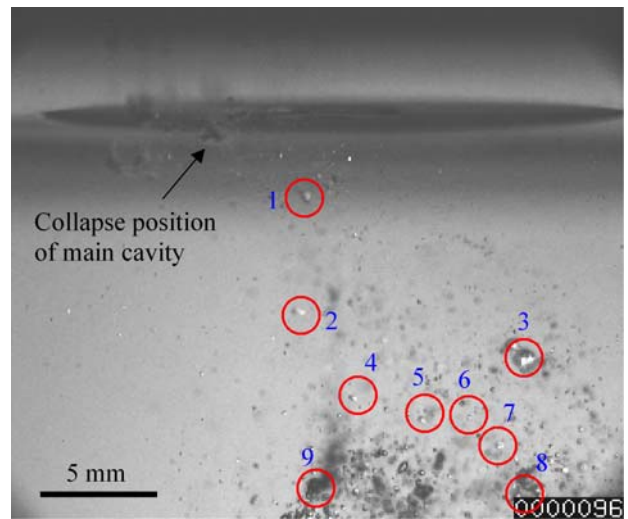


(b) Result of image analysis for Fig. 3(b)

Fig. 5 Result of image analysis



(a) Measured bubbles in Fig. 3(a): Sample A



(b) Measured bubble in Fig. 3(b): Sample B

Fig. 6 Cavity aspects at main cavity collapse

Table 1 Data on bubbles measured in Sample A

Cavity No.	Distance from main cavity collapse point (mm)	Collapse time of bubble t (μs)*	Propagation velocity of bubble collapse Vp (m/s)	Time for bubble collapse tc (μs)	Diameter of bubble d _b (mm)
1	8.6	112	430	8	0.34
2	11.8	120	420	14	0.67
3	9.3	104	770	6	0.65
4	14.5	122	480	12	0.46
5	11.6	146	220	32	0.89
6	13.5	132	340	26	0.59
7	9.2	106	660	10	0.37
8	8.3	100	1040	6	0.28
9	8.3	100	1040	4	0.30

* Main cavity collapses at 92μs in Fig. 3(a)

た。しかし、本画像の場合、気泡は空間的広がりを持ち x-y 平面あるいはy方向に対しある程度傾いた方向に気泡が偏在しているため、解析で得られた y 方向速度は実際の伝播速度の大略の値を与えるものと評価される。

3-3 気泡崩壊伝播速度 図3の画像に関して解析を行った結果を図5に示す。図5は時間経過に対する画像上部からの距離と黒色セル数の関係を示している。図中の左の卓越した部分は衝撃力センサー取り付け壁面の位置に対応する。図中の①は主キャビティ崩壊時とその位置を示す。また、②は代表的な微小気泡崩壊位置（黒色ピクセル数が減少している位置）と時間を示している。時間の経過とともに図中の①点から②点方向へ気泡崩壊（黒色ピクセル数の減少領域）が移動してゆく様子が確認できる。このときの速度を計測したところ本研究の場合、図5 (a) において約 640m/s, (b) において約 670m/s となりほぼ同じオーダーの速度となった。

次に、高速度ビデオ画像を用いて個々の気泡に関して検討を行った。図6では、図3における主キャビティ崩壊時に存在した微小気泡の代表的なものを指定してある。主キャビティが崩壊してから個々の微小気泡が崩壊するまでの時間から速度を求めた結果を表1, 2に示す。本計測では図6中の1~9に関して計測した。その結果、表1, 2に示すように気泡崩壊の伝播速度は 200~1000m/s のオーダーであること、特に大径の気泡においてその速度が遅くなる傾向があることがわかる。この傾向は気泡が大きいと気泡自体の崩壊時間が長くなることに関係すると考えられる。

ついで、個々の気泡の直径より気泡崩壊時間の大略を評価した。その結果を図7に示す。気泡崩壊時間は個々の気泡の変形が始まった時間から崩壊（最小径に達する）までの時間を示している。このとき気泡径の計測誤差は2ピクセル程度つまり 160μm 程度である。ここで図中の実線は Rayleigh の気泡崩壊時間⁽¹⁰⁾で参考のため示す。

$$t_c = 0.915R_{\max} \left(\frac{\rho}{P_{\text{stat}} - P_v} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここに、R_{max} は最大気泡半径そして P_{stat} は周囲液体の静圧である。本研究においては崩壊開始時の気泡半径および試験部一様流部での静圧を用いて気泡崩壊時間を求めた。

4. 結言

円柱後流に発生する放出形渦キャビテーション気泡の崩壊に伴う周囲気泡の崩壊伝播挙動を観察した。

- (1) 渦キャビティ崩壊時に発生する圧力波により周囲気泡に気泡崩壊が伝播することを観察した。
- (2) 高速度ビデオカメラによる気泡画像を2値化することにより時間的な気泡変形挙動を捉えることができた。
- (3) 本研究の場合、気泡崩壊の伝播速度は数 100 から

Table 2 Data on bubbles measured in Sample B

Cavity No.	Distance from main cavity collapse point (mm)	Collapse time of bubble t (μs)*	Propagation velocity of bubble collapse Vp (m/s)	Time for bubble collapse tc (μs)	Diameter of bubble d _b (mm)
1	4.9	102	820	8	0.61
2	8.5	104	1060	8	0.51
3	16.5	134	440	24	1.21
4	12.8	110	910	8	0.30
5	15.1	114	840	6	0.35
6	16.3	114	910	16	0.39
7	18.0	122	690	22	0.45
8	20.7	156	340	-	-
9	15.6	148	300	-	-

* Main cavity collapses at 96μs in Fig. 3(b)

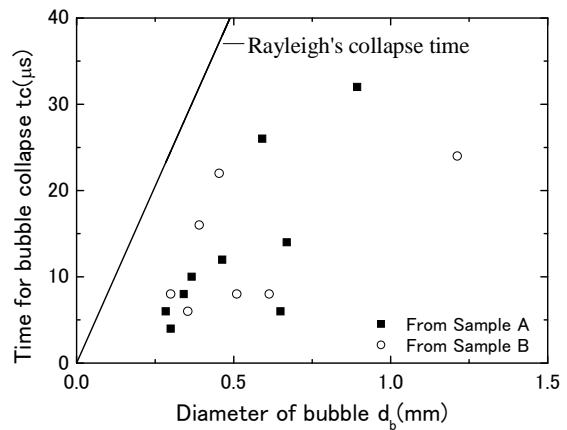


Fig. 7 Bubble collapse time against bubble diameter

1000m/s のオーダーであった。気泡崩壊時間自体は気泡径に依存した。

参考文献

- (1) 赤松・藤川, キャビテーション気泡の挙動と衝撃圧, 機論, 50-450, B(1984), pp.293-299.
- (2) Shima, A., et al., An Experimental Study on Effects of a Solid Wall on the Motion of Bubbles and Shock Waves in Bubble Collapse, Acustica, Vol.48, No.5, (1981), pp.293-301.
- (3) Ellis, A.T., On jets and shock waves from cavitation, proc. 6th Symp. Naval Hydrodynamics, Washington, (1966), pp.137-161.
- (4) 宮崎, ほか2名, 激しい壊食を伴う振動キャビテーションの高速度写真観察, 機論, 57, B(1991), pp.2174-2179.
- (5) 松本, ほか2名, 気泡流中における圧力波の伝播挙動, 機論, 56-525, B(1990), pp.1237-1243.
- (6) Dear, J.P. and Field, J.E., A Study of the Collapse of Arrays of Cavities, J. Fluid Mech., 190(1988), 409-425.
- (7) Sato, K., et al., Observations of Chain-Reaction Behavior at Bubble Collapse Using Ultra High Speed Video Camera, Cavitation and Multi-Phase Flow Forum, ASME, FEDSM2003, (2003), pp. 1-6.
- (8) 佐藤・小川, 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, 63-606, B(1995), pp.3099-3104.
- (9) 江藤, ほか4名, 斜行直線 CCD 型画素周辺記録領域を持つ 100 万枚/秒の撮影素子, 映像情報メディア学会誌, 56-3, (2002), pp.483-486.
- (10) 高山, 衝撃波ハンドブック, シュプリンガー・フェアラーク東京, (1995), pp.382-420.