

ベンチュリを用いたトラベリングバブルキャビテーションの  
挙動に関する研究\*佐藤 恵一<sup>\*1</sup>, 八野 浩司<sup>\*2</sup>, 斎藤 康弘<sup>\*1</sup>

## Inception and Dynamics of Traveling-Bubble-Type Cavitation in a Venturi

Keiichi SATO, Kouji HACHINO and Yasuhiro SAITO<sup>\*3</sup><sup>\*3</sup> Department of Mechanical and Mechanical Systems Engineering, Kanazawa Institute of Technology,  
7-1 Ogigaoka, Nonouchi, Ishikawa, 921-8501 Japan

The inception of cavitation is basically caused by a bubble nucleus which flows into the low pressure region in liquid flow. Therefore the phenomenon is dependent on the tensile strength or the nuclei concentration of tested water. In the present paper, to establish a measurement method of cavitation susceptibility using a venturi tube, the following points are investigated, such as the relation between the occurrence rate of cavitation bubbles and cavitation number, the measurement of positions and local pressure of bubble occurrence, and the high-speed video observation of bubble aspects from inception to collapse. As the result, the main points obtained are as follows. A traveling-bubble cavitation appears dominantly in a nozzle-type venturi with little possibility of flow separation. Cavitation aspects and bubble occurrence rate change with cavitation number and water quality. The various behaviors of traveling bubble cavitation in a venturi are observed using a high-speed video camera system.

**Key Words:** Cavitation Inception, Cavitation Susceptibility, Bubble Dynamics, High-Speed-Video Observation, Venturi Flow

## 1. 結 言

キャビテーション初生が試料水特性, 特に核濃度に強く支配されることは広く知られている。キャビテーション気泡の発生は水中の弱い点, すなわち気泡核から始まる。気泡核の少ない水は大きな抗張力を示す<sup>(1)-(3)</sup>。現在まで, 光学的あるいは音響的観点<sup>(4)(5)</sup>から数多くのキャビテーション核計測方法が提案されているが, 信頼性が高い方法はいまだ発達段階にある。例えば, ホログラフィー法は信頼性のある方法として知られているが, 複雑・高価であり比較的大きな核の計測に限定される。加えて, たとえ核が計測されたとしても, 水の核分布とキャビテーション初生あるいはキャビテーション発生しやすさとの直接の関係を得ることは現段階においては非常に難しい。

一方で, キャビテーション発生に直結する水中の活性核を計測するための有用な, そして単純な方法として小径ベンチュリ管を用いたCSM(Cavitation Sus-

ceptibility Meter)法<sup>(6)-(9)</sup>がある。測定範囲が比較的  
低濃度の気泡核分布に限定されるが, CSM法はその  
簡便性そして有用性のゆえに非常に魅力的である。

一般に, はく離の抑制された流路においては, 気泡核と一対一の関係にあるトラベリングバブル形のキャビテーション気泡の発生が予想される。形状の吟味されたベンチュリ装置が水の抗張力の一般的な特性を計測するための有効な方法を与えることが指摘されている。

本研究では, このようなベンチュリ管を用いて試料水のキャビテーション発生しやすさ<sup>(10)</sup>を計測する方法を確立するために, 比較的径の大きなベンチュリ管を用いて高速度ビデオ観察などの直接計測を通じた気泡観察などを行い, 次に示す基本的な諸観点について検討した。

- (1) キャビテーション数に対するキャビテーション気泡発生計数率の特性
- (2) キャビテーション数に対するキャビテーション気泡タイプ変化
- (3) 気泡発生位置の計測とその局所発生圧の評価
- (4) 初生から崩壊までの気泡様相の観察

\* 原稿受付 2003年3月20日。

\*<sup>1</sup> 正員, 金沢工業大学(〒921-8501 石川県野々市町扇ヶ丘7-1)。\*<sup>2</sup> 学生員, 金沢工業大学大学院。

E-mail: y-sugi@neptune.kanazawa-it.ac.jp

## 2. おもな記号

- $D$ : 上流部直径  
 $d$ : ベンチュリのど部直径  
 $F_s$ : 撮影フレーム速度  
 $N_c$ : キャピテーション気泡発生計数率  
 $P$ : 上流部平均圧力  
 $P_t$ : のど部平均圧力  
 $P_b$ : 飽和蒸気圧  
 $P_x$ : 局所流体圧  
 $Q$ : 流量  
 $Re$ : レイノルズ数  
 $T_w$ : 水温  
 $U$ : 上流部平均流速  
 $U_t$ : のど部平均流速  
 $\beta$ : 溶存酸素量  
 $\nu$ : 動粘度  
 $\rho$ : 密度  
 $\sigma$ : キャピテーション数  
 $\sigma_c$ : 限界キャピテーション数  
 $\sigma_x$ : 局所キャピテーション数

## 3. 実験装置および方法

実験には密閉回流式小形キャピテーショントンネル<sup>(11)</sup>を用い、試験部として図1に示すような主流部直径40 mm、のど部直径10 mmのノズル形ベンチュリ管を用いた。上流・下流部には直径0.5 mmの圧力測定孔が設けられており、マノメータによって圧力計測されている。

気泡様相観察は図2に示されるような計測システムで行われ、高速ビデオカメラシステムとしては、次のA, Bの2種類のものが用いられた。

(1) ビデオカメラA: KODAK EKTAPRO HS Motion Analyzer Model 4540/最高フレーム速度40 500 fps。

(2) ビデオカメラB: 近畿大学・島津製作所<sup>(12)(13)</sup>/最高フレーム速度1 000 000 fps

ビデオカメラAは、キャピテーション気泡の初生

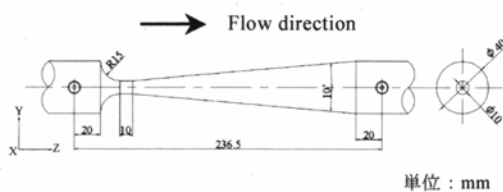


Fig. 1 Test section

から崩壊までの全体様相撮影および気泡発生位置撮影に用いられた。気泡発生位置撮影の場合、二分岐ファイバカメラを用いて、二方向から同時計測を行い、発生位置を決定した。ビデオカメラBは、その高速性を生かして、キャピテーション気泡の崩壊様相の撮影に用いられた。いずれの場合においても、試験部のど部後端より5 mm下流の位置に加速度ピックアップ(TEAC 501 FS/FB)を取付けてキャピテーション崩壊時の衝撃加速度を計測し、それをトリガ信号として高速ビデオカメラシステムを作動させた。このシステムによりキャピテーション気泡の初生様相および初生から崩壊までの様相を撮影・観察した。

さらに、気泡崩壊時に得られた衝撃加速度は高速データ収集システム(KEYENCE NR-350)および波形データ観測ソフトウェア(KEYENCE MEGA VIEW)によってパーソナルコンピュータに記録された。また、試験部近傍に設置したマイクロフォンおよび実験者による聴音により、(可聴音域での)キャピテーション発生数を計測した。

実験はキャピテーショントンネルを大気圧の下で流速を変化、あるいは一定流速の下に減圧させてキャピテーション数を設定し行った。キャピテーション初生実験の場合、トンネルを大気開放状態として流量を設定( $Q=1.18\sim 1.86\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$ )し、流れが安定するまで回流を行った。その後、上流・下流部の圧力を測定し、計測を開始した。減圧下の実験の場合には、流量 $Q$ を $1.00\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$ (上流流速0.796 m/s)一定とし、トンネル内流れが十分安定するまで回流を行った。そしてトンネル内を十分緩やかに減圧し、設定圧力となった時点で減圧を止め、計測を開始した。キャピテーション発生的重要な指標である試験水中の空気含有量は溶存酸素量 $\beta$ の形で溶存酸素メータ(HORIBA OM-14)により実験前後に計測した(最大で0.49 mg/ℓ, 平均すると0.14 mg/ℓの変化が認められた)。

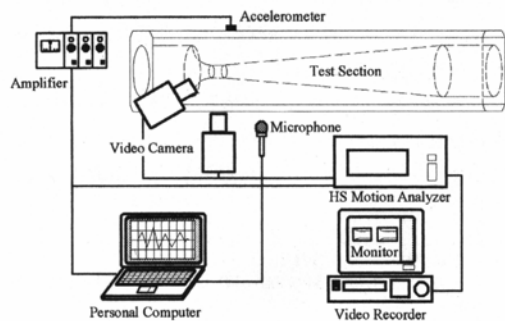


Fig. 2 Measurement and observation system

レイノルズ数  $Re$ , キャビテーション数  $\sigma$  および局所キャビテーション数  $\sigma_x$  として、以下の式を定義する。

$$Re = U \times d / \nu \dots\dots\dots (1)$$

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

$$\sigma_x = 2(P_x - P_v) / \rho U_t^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $P$  は上流部平均圧力,  $P_v$  は飽和蒸気圧,  $P_x$  は局所流体圧,  $U$  は上流部平均流速, そして  $U_t$  はのど部流速である。  $d$  はのど部直径,  $\rho, \nu$  は試料水の密度および動粘度である。

4. 実験結果および考察

4.1 トラベリングバブルキャビテーションの気泡発生位置とその様相 本ベンチュリにおける気泡の初生様相は、壁面上での発生を除けば、ほぼ球形のトラベリングバブルキャビテーションである。この形のキャビテーションは、液中の気泡核に直結していると考えられ、その発生は確率的現象であり統計的ばらつきを示す<sup>(14)</sup>。つまり、臨界値を超える比較的径の大きな気泡核が流入すれば、そのときキャビテーション気泡の発生が観察される。本研究ではキャビテーション

発生しやすさに関する研究の第一歩として、溶存酸素量  $\beta$  の試料水に対して種々のキャビテーション数  $\sigma$  でのキャビテーション気泡発生計数率  $N_c$  の評価を試みた。

その結果を図3(a)に、そしてその模式図を図3(b)に示す。これらの結果より、キャビテーション気泡発生計数率の立上り点は溶存酸素量  $\beta$  に依存し、気泡発生計数率曲線の傾きも溶存酸素量  $\beta$  の増加とともに大きくなることを確認できる。この種のキャビテーションの場合、ベンチュリ内部の圧力は局所的に飽和蒸気圧以下になっているため局所キャビテーション数  $\sigma_x$  は負の値を示し、試験水は抗張力を受けている。

このようにキャビテーション発生に関する気泡発生計数率曲線は、溶存酸素量の影響を大きく受けることが読取れる。ある程度キャビテーション数が減少し、限界キャビテーション数  $\sigma_L$  に達すると、バブルキャビテーション形から付着形キャビテーション形に完全に移行する。これにより、発生パターンを3種類に識別することができる。つまり、キャビテーション数の減少に伴って、領域I(発生がまれなバブルキャビテーション)、領域II(バブルキャビテーション)、領域III(バブルおよび非定常シートキャビテーション)そして限界キャビテーション数以下で領域IV(非定常シートキャビテーション)、というような過程でキャビテーション気泡発生計数率が変化している。付着形のシートキャビテーションはバブルキャビテーションの影響を受けて発生する場合と突如発生する場合の二つの様相を確認することができる。各領域を区分する臨界キ

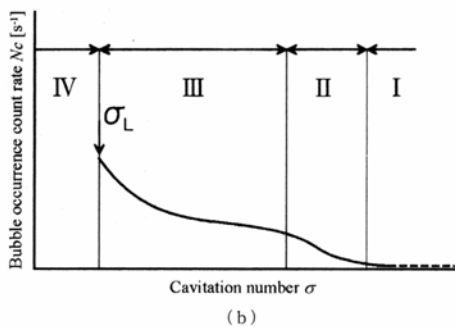
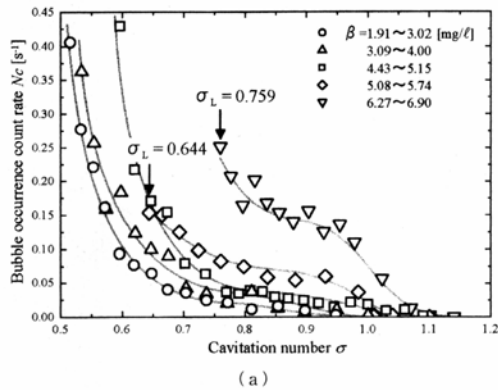


Fig. 3 Relation between bubble occurrence count rate and cavitation number

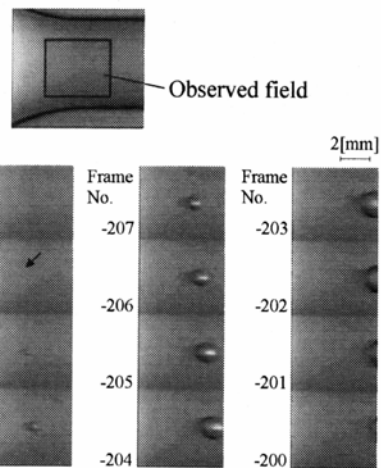


Fig. 4 Occurrence aspect of traveling bubble cavitation

キャピテーション数は溶存酸素量(すなわち空気含有量)によって左右され、その存在は液体強度の観点から注目される。

図4に、代表的なトラベリングバブルキャピテーションの初生様相を示す。ここで、変形速度が早いために気泡の左端がぼやけた様相となっているが、ほぼ球形気泡状を呈している。この様相での気泡初生はほぼFrame No. -210付近であると判断される。ここに、比較的明確に気泡画像が読取れるFrame No. -208から-204までの間の気泡平均成長速度は4.5 m/s程度と概算できる。流路中心部付近で初生した気泡はこのように球形を示すが、壁面付近で発生したものは壁面の影響を受け扁平な形を示す。

**4.2 トラベリングバブルキャピテーションの発生位置と圧力** キャピテーション発生点における抗張力評価をするには、トラベリングバブルキャピテーションの発生位置を調べる必要がある。そのために二分岐ファイバによる二方向同時撮影での発生位置特定を行った。

図5に示すように、下方向映像(a)から水平座標  $X$  を割り出し、横方向映像(b)から垂直座標  $Y$  と流れ方向座標  $Z$  を割り出した。発生位置は得られた各座標より(c)のように示された。なお、原点はのど部先端の円筒中心点である。また、(a)、(b)両方向からの画像において気泡の発生を確認できたときを発生フレームとする。本実験では観察領域全域で十分明りょうな映像を得ており、アクリル樹脂試験部の円筒形状による屈折を考慮して発生位置の計測を行っている。

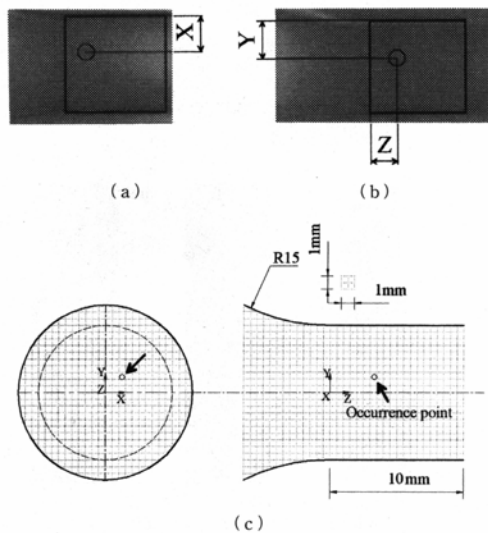


Fig. 5 Measurement method of occurrence position

る。

二つの異なるキャピテーション数における気泡発生位置の測定結果を図6に示す。図6(a)はキャピテーション数が比較的大きい場合、図6(b)は小さい場合の発生位置を示している。これより、キャピテーション数の大小により発生位置分布がやや異なることが観察される。キャピテーション数が大きい場合には発生位置が壁面付近に偏っているのに対し、キャピテーション数が小さい場合にはのど部断面全体にほぼ一様に分布している。これはキャピテーション数が減少(流速が大)したことにより、のど部の平均静圧が低下して、のど部断面全体がより発生しやすい状態となったことに符合する。本実験範囲では溶存酸素量  $\beta$  による発生位置の違いは明りょうには見られないが、今後、いっそうの検討が必要である。また、多くの気泡は流れ中で発生するが、若干の気泡は壁面上に沿って現れる。図6は気泡の中心位置を示しており流路壁面上での発生は流路壁から気泡半径分だけ離れた位置となっている。

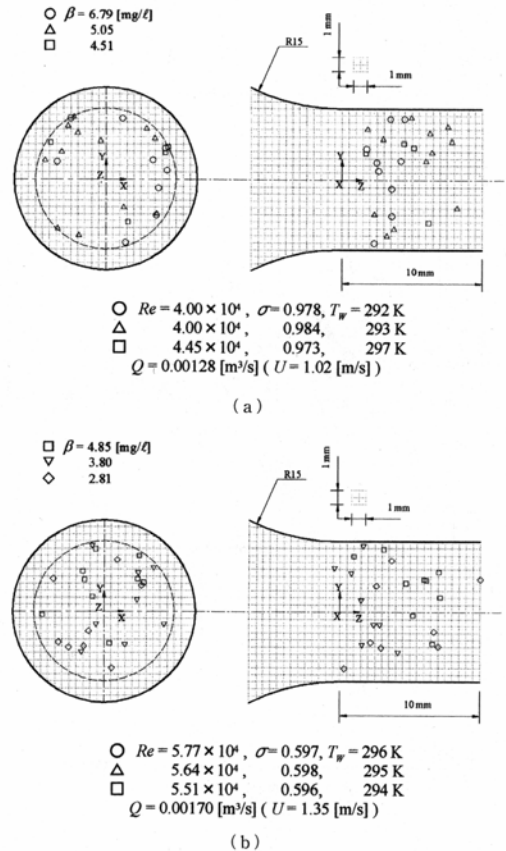


Fig. 6 Bubble occurrence position

ベンチュリ内流れの数値シミュレーションによりこれらの発生位置での局所圧  $P_x$  を算定した。計算には、市販コード (Cybernet Systems Co. Ltd., ANSYS/FLOTRAN 5.7) が用いられた。乱流モデルとして  $k-\epsilon$  モデルを使用し、格子数は 31 200 である。局所圧力の算出には、数値シミュレーション (流速  $U=0.971$  m/s) により算出した圧力係数をもとに、実験時の流速を挿入して求めた。なお、本実験時のレイノルズ数域は  $Re=3.7 \times 10^4 \sim 6.0 \times 10^4$  である。これにより異なる流速下における初生位置での局所圧力  $P_x$  を局所キャピテーション数  $\sigma_x$  の形で算出した。一例として、図 7 に溶存酸素量  $\beta=6$  mg/l 付近での局所キャピテーション数  $\sigma_x$  とキャピテーション気泡発生計数率  $N_c$  の関係を示す。図 7 中の各点は局所キャピテーション数の平均値であり、横線で最大・最小値の範囲を示している。これより、気泡発生計数率が増加するにしたがって局所キャピテーション数の変動幅が大きくなっ

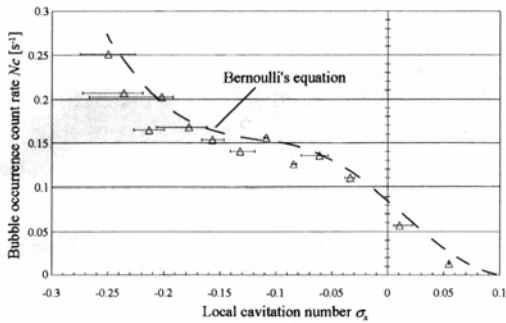


Fig. 7 Relation between local cavitation number and cavitation occurrence count rate near  $\beta=6$  mg/l

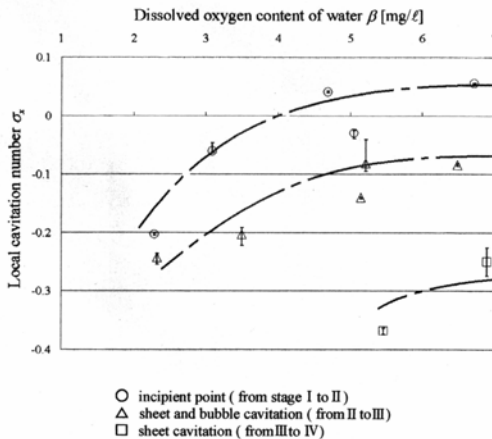
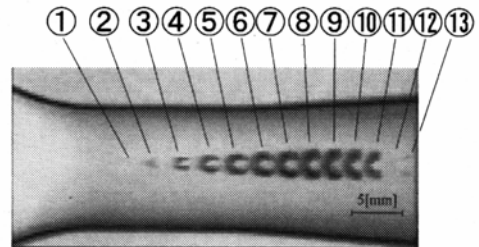


Fig. 8 Local cavitation number against dissolved oxygen content of water

ていることがわかる。これはキャピテーション数の減少につれて発生位置がのど部断面に一樣に分布することにより発生点圧力により大きな違いが生じたためと考えられる。図 7 中に、点線でのど部の流れをポテンシャルコアからなると仮定してベルヌーイの式より求めた概略値を示す。これよりベルヌーイ値は局所圧力を考慮したシミュレーション値よりわずかに高いキャピテーション数評価を与えていることがわかる。

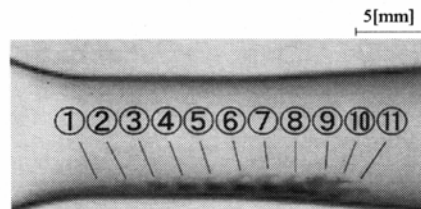
図 3 に示したように、キャピテーションの発生パターンによって気泡発生計数率曲線  $N_c-\sigma$  は四つの領域に分類される。各領域の移行時、すなわちバブルキャピテーションの初生点、付着形キャピテーションが間欠的に発生する点、付着形キャピテーションがほぼ定常的に発生する点での (溶存酸素量  $\beta$  に対する) 局所キャピテーション数  $\sigma_x$  を図 8 に示す。ここで、初生点はキャピテーション気泡発生計数率  $N_c$  が  $0.01$  s<sup>-1</sup> を超えたときとした。

これより、溶存酸素量が高い場合 (本実験の場合、おおよそ  $\beta > 5$  mg/l) には各領域の (移行時の) 臨界局所キャピテーション数がほぼ横ばいなのに対し、溶存酸素量が低くなるとそれらの臨界局所キャピテーション数が急激に小さくなっていることが観察される。前述の図 3 および図 8 より、本実験範囲においては、水質の違い (ここでは溶存酸素量) により、(1) 溶存酸素量が高い場合には各領域の臨界局所キャピテーション数



$Re = 3.15 \times 10^4$ ,  $\sigma = 0.980$ ,  $U = 0.796$  m/s,  
 $\beta = 3.08$  mg/l,  $T_w = 293$  K,  $F_s = 27,000$  fps

(a) Near center of venturi

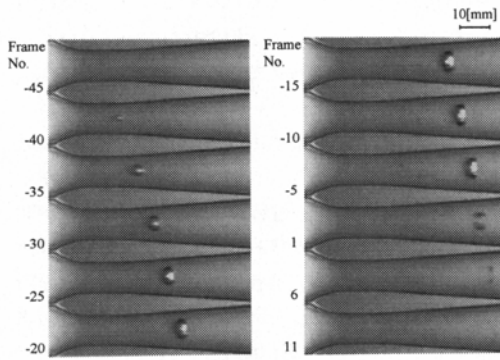


$Re = 3.17 \times 10^4$ ,  $\sigma = 1.04$ ,  $U = 0.796$  m/s,  
 $\beta = 3.34$  mg/l,  $T_w = 293$  K,  $F_s = 27,000$  fps

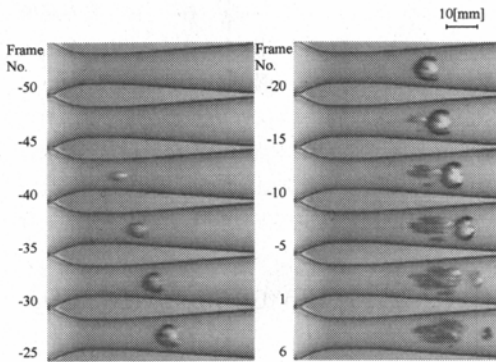
(b) Near wall of venturi

Fig. 9 Life history of traveling bubble cavitation

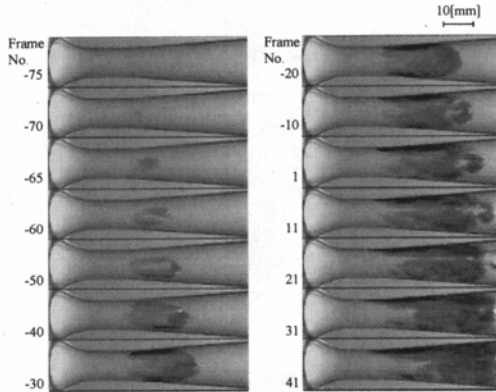
に明りょうな違いがないこと、しかしながら(2)キャピテーション気泡発生計数率に大きな差があること、がわかる。気泡核(数密度)分布は気泡径が小さくなるにつれて指数分布的に大きくなること<sup>(4)</sup>は周知のこ



(a) Traveling bubble cavitation



(b) Transition-type cavitation



(c) Sheet cavitation

Fig. 10 Various types of cavitation in venturi

とであり、通常の空気含有量の高い状態でのキャピテーション計測においては、気泡径の影響よりも気泡数の影響が大であることに符合していると考えられよう。

#### 4.3 トラベリングバブルキャピテーションの成長履歴

図9(a), (b)にベンチュリのど部に生じたトラベリングバブルキャピテーションの成長履歴を4 Frameごとの高速度ビデオ映像(27 000 fps)を重ね合わせた形で示す。図9(a)は、ほぼ流路中央部で発生・成長・崩壊した場合の気泡の成長履歴である。ほぼ①の付近で球形の形で発生した気泡がベンチュリ拡大部付近に進むに従い逆圧力こう配を受け、⑧の気泡付近から下流側(圧力側)から扁平に変形し、⑫付近で崩壊・消滅していくことがわかる。さらに⑬では、リバウンド気泡に相当する黒い二つの残像が読取れ、圧力こう配による非対称変形の存在も指摘される。図9(b)のように壁面近くで発生し、壁面沿いに成長する場合も観察される。この場合、気泡は半球頭状物体上に発生する場合<sup>(15)</sup>と同様に壁面側が平らな半球状を呈する。

図10(a)~(c)に、異なる状況下で観察された壁面近傍での気泡の成長様相を示す。図10(a)はトラベリングバブルキャピテーションの代表的な例である。図10(b)は、ほぼ球形に近い形で Frame No. -45 付近で発生した気泡が No. -25 付近から変形を始め、一部はパッチ状の付着気泡に拡大部付近で移行しながら崩壊している。図10(c)は非定常シートキャピテーションの代表的な例である。

#### 4.4 トラベリングバブルキャピテーションの崩壊様相

この種のキャピテーション気泡の発生はベン

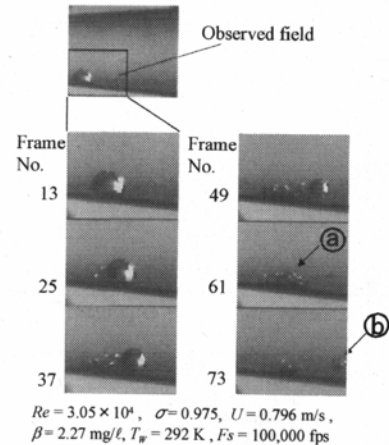


Fig. 11 Bubble collapsing aspect near the wall of venturi

チュリのど部領域で、形状は球形である。発生後、圧力回復部に相当する拡大部付近で崩壊する。図11, 12に、代表的な気泡崩壊様相を示す。いずれも  $10^5$  fpsの超高速ビデオカメラで撮影されたもので、比較的明りょうに気泡崩壊様相をとらえている。

まず図11は壁面近くで崩壊した場合で、先に示した図9(b)あるいは図10(b)に相当する。この場合、気泡は崩壊初期には壁面近くが偏平な半球形状あるいは複合形状をしているが、気泡崩壊が部分的に進むにつれて(おそらくディフューザ部における逆圧力こう配による非対称変形の結果として)上流側から微小気泡群に分裂し、最終的にはほぼ全体を占める微小気泡群 $\textcircled{a}$ とリバウンド気泡 $\textcircled{b}$ として消滅する。壁面方向への非対称変形は認められない。これらは半球頭状物体におけるキャピテーション観察結果<sup>(15)</sup>と類似している。

図12には、流路中心部付近での気泡変形様相を示す。この場合、発生時、球形気泡であったと予想されるが、すでに拡大部に位置し気泡は偏平となっている。これらの様相からわかるように、圧力こう配の影響を受け偏平になるとともに下流部から上流方向へ非対称変形が生じている。Ivanyらの古典的な結果と符合する<sup>(16)</sup>。また、リバウンド挙動時に確認された気泡はFrame No. 86にあるように非対称変形の結果生じたと思われるトーラス状の形状を呈していることがわかる。本実験結果の場合、ここに示すようにいったん消滅状態になった気泡あるいは気泡群はほとんどの場合リバウンド挙動を示すことが観察された。

## 5. 結 言

トラベリングバブルキャピテーションの発生・崩壊

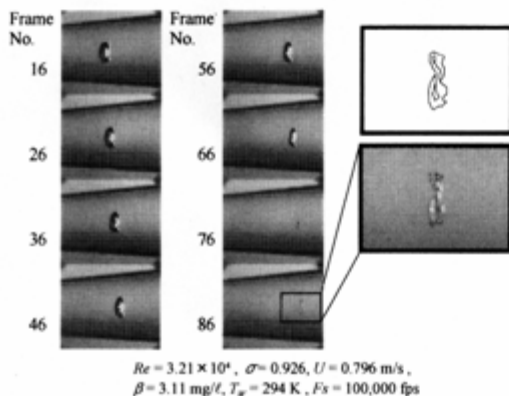


Fig. 12 Bubble collapsing aspect near the center of Venturi

機構とともに、試料水特性との関係を明らかにするために実験的研究を行った。おもな結果は次のとおりである。

(1) キャピテーション核に直接関係するトラベリングバブルキャピテーションの初生特性は、はく離流れを極力抑制したノズル形ベンチュリ管において支配的に現れる。この種類のベンチュリ管では非定常シートキャピテーションが比較的低いキャピテーション数において発生する。

(2) トラベリング形気泡の初生特性は空気含有量(溶存酸素量)のような試料水特性に依存し、水の抗張力と結び付けられる。空気含有量はキャピテーション気泡発生計数率に大きな影響を与える。

(3) キャピテーション数が高い場合、キャピテーション気泡の発生位置は壁面付近にやや偏るが、キャピテーション数が小さい場合には、のど部全体にほぼ一様に分布する傾向がある。

(4) キャピテーション数の減少に対して、キャピテーション気泡発生計数率は、領域I(まれなバブルキャピテーション)、領域II(バブルキャピテーション)、領域III(バブルおよび非定常シートキャピテーション)、そして領域IV(非定常シートキャピテーション)状態へと変化していく。トラベリングバブルキャピテーションはキャピテーション数が比較的高い領域I, IIの範囲でも発生する。

(5) 超高速ビデオカメラにより、トラベリングバブルキャピテーションの発生から崩壊までの詳細な過程を観察した。特に、気泡崩壊時の急激な変形を明りょうにとらえた。

最後に、実験に際しての協力に対して金沢工業大学機械工学科 中尾寛、永田晃一、村田大輔、安田貴博らの諸君に感謝する。また、超高速ビデオカメラの使用に便宜をいただいた近畿大学理工学部の江藤剛治、竹原幸生両氏そして島津製作所に深謝する。なお、本研究は文部科学省科学研究費補助金を受けたことを記す。

## 文 献

- (1) Berthelot, M., Sur Quelques Phenomemes de Dilation Force de Liquids, *Ann. Chimie Phys.*, **30** (1850), 232-237; from Trevena<sup>(2)</sup>.
- (2) Trevena, D. H., *Cavitation & Tension in Liquids*, (1987), 24-25, Adam Hilger.
- (3) Knapp, R. T., Cavitation and Nuclei, *Trans. ASME*, **80** (1958), 1315-1324.
- (4) Billet, M. L., Cavitation Nuclei Measurements with an Optical System, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **108**, (1986), 366-372.
- (5) 高川真一, 音響減衰率からの気泡分布推定方法に関する

- 研究II 実験的研究, 造論, **164** (1988), 66-73.
- (6) Oldenzel, D. M., A New Instrument in Cavitation Research: the Cavitation Susceptibility, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **104** (1982), 136-142.
- (7) Chahine, G. L. and Shen, Y. T., Bubble Dynamics and Cavitation Inception in Cavitation Susceptibility Meters, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **108** (1986), 444-452.
- (8) d'Agostino, L. and Acosta, A. J., A Cavitation Susceptibility Meter with Optical Cavitation Monitoring-Part Two: Experimental Apparatus and Results, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **113** (1991), 270-277.
- (9) Pham, T. M., Michel, J. M. and Lecoffre, Y., A New Design of the Cavitation Susceptibility Meter: the Venturix, *Proc. IUTAM Symp., Bubble Dynamics and Interface Phenomena*, Birmingham, (1993), 277-286.
- (10) Arndt, R. E. A. and Keller, A. P., Water Quality Effects on Cavitation Inception in a Trailing Vortex, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **114** (1992), 430-438.
- (11) 佐藤恵一・角谷和人, キャビテーションの初生値計測に関する一検討, *機論*, **58-549, B** (1992), 1349-1354.
- (12) 江藤剛治・ほか4名, 斜行直線 CCD 型画素周辺記録領域を持つ100万枚/秒の撮像素子, *映像情報メディア学会誌*, **56-3** (2002), 483-486.
- (13) Etoh, T. G., ほか15名, A CCD Image Sensor of 1 Mframes/s for Continuous Image Capturing of 103 Frames, *ISSCC Digest Tech. Paper*, (2002), 46-47.
- (14) Oba, R., Ikohagi, T., Ito, Y., Miyakura, H. and Sato, K., Stochastic Behavior (Randomness) of Desinent Cavitation, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **108** (1986), 438-443.
- (15) Cessio, S. L. and Brennen, C. E., Observations of the Dynamics and Acoustics of Traveling Bubble Cavitation, *J. Fluid Mech.*, **233** (1991), 633-660.
- (16) Ivany, R. D., Hammitt, F. G. and Mitchell, T. M., Cavitation Bubble Collapse Observation in a Venturi, *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, **88** (1966), 649-657.