

# ガス過飽和液体の気液二相流動に関する研究

辻野 智二 · 井上健次郎

## Study of Two-Phase Flow in Oversaturated Liquid-Gas Solutions

Tomoji TSUJINO and Kenjiro INOUE

(Received September 2, 2002)

In the field of bioengineering, gas-liquid two-phase flow in the system of blood circulation has received considerable attention. The number of patient of decompression disease has increasing lately with an increment of leisure divers. Several clinical investigations of decompression disease have been described in the literature, but there has been only a little amount of information about the crisis mechanism of the illness. In the present paper, the experiments of two-phase flow in oversaturated liquid-gas solutions are conducted in order to clarify the physical mechanism of the decompression disease. The behaviors of cavities air and carbon dioxide formed behind an exciter in the measuring channel are made clear.

**Key words :** two-phase flow, bubble, cavity, decompression disease, cavitation

### 1. 緒 論

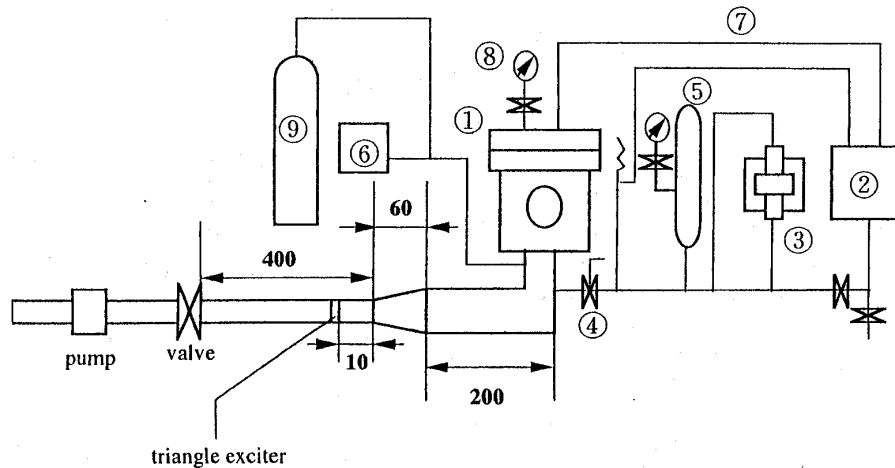
高速のキャビテーション流れ及びスラグ流, 環状流等の気液二相流は, 各種流体機器, 軽水炉の冷却剤流動, バイオリアクタ等における工学・工業上の課題とも関連し, 研究が進展している. 最近では, 均質媒体モデルを用いた数値シミュレーション<sup>(1)</sup>, 気液二相流を構成する気泡周囲の乱流構造<sup>(2)</sup>, スラグ流の定式化<sup>(3)</sup>, 気泡の合体・分裂を考慮した二相流解析<sup>(4)</sup>の論文が報告されている. 生体工学の分野においても, 血液循環系における気液二相流が注目されている. 例えば, 開心術時の体外循環, 血液透析及び人工心肺使用時における気泡混入は, 末梢循環系障害の原因となるため重要な課題となっている<sup>(5)</sup>. また, 急性心筋梗塞等の重症性, 緊急性の高い症例に即応できる補助循環システムに利用するマイクロ血液ポンプにおけるキャビテーション発生<sup>(6)</sup>, 人工弁周りのキャビテーション気泡の発現<sup>(7,8)</sup>など, 人工臓器におけるキャビテーションも今日的課題と言える.

一方, レジャーダイバーの増加と共に, 潜水病の発症件数の増加も注視されている. 潜水病等の減圧症では, 高圧条件下から大気圧条件下に戻ったときに, 血液中のガス濃度が過飽和となり, 拡散促進により気泡が形成され, 気泡塞栓を招くものと考えられている. これまで, 減圧症の研究は, 対象療法的なものが主であり, その発症機序についての報告は少なく<sup>(9,10)</sup>, 十分な知見は得られていない.

本研究では, 減圧症の物理的メカニズムの解明を目途として, チャンネル内を流れるガス過飽和液体中で発生する空気及び二酸化炭素キャビティの挙動並びに微細気泡の成長について実験的検討を行ったので, その結果を報告する.

## 2. 実験装置と実験方法

本研究で使用するガス過飽和液体チャンネル型流動装置を図1に示す。高压容器①にて生成されたガス過飽和液体は、高压容器①より260mm下流に置かれた測定部チャンネルを通して流出する。測定部チャンネルの上流には、長さ60mmの収縮管を置き、流れの乱れを制御している。なお、高压容器下部に取り付けた角柱管は、断面積10mm×10mmで、その長さは200mmである。収縮管出口の断面積は、高さ3mm×幅9mmであり、測定部チャンネルに連結されている。流量調節は流路下流に設置した制御バルブとポンプを用いて行う。



- |                                 |                        |
|---------------------------------|------------------------|
| ① high pressure vessel          | ⑥ compressor           |
| ② reserved tank                 | ⑦ pipe                 |
| ③ high pressure pump            | ⑧ pressure gage        |
| ④ valve                         | ⑨ CO <sub>2</sub> bomb |
| ⑤ pressure tank of accumulation |                        |

Fig.1 Schematic diagram of apparatus with channel flow of oversaturated liquid-gas solutions

図2には、測定部チャンネルの詳細図および微細気泡観測装置を示す。測定部チャンネルの断面は、高さ3mm×幅9mmであり、このチャンネル内部にはアクリル製三角柱エキサイター（高さ3mm、断面は底辺3mm×高さ1.5mm）を取り付けている。その位置は、チャンネル入り口から10mm下流である。気液二相流れの観察には、微細気泡観察装置を用いた。この装置は、3-CCDカラービデオカメラ（Victor KY-F55）の先端に、実体顕微鏡（Nikon SMZ-2T）を取り付けたものであり、得られたデータは、ビデオモニターにより出力し画像化した。照明装置には、二対のファイバランプからなる実体顕微鏡用ファイバ照明装置を用いた。作動流体の流量・流速の制御には、ポンプ（IWAKI 渦巻き型マグネットポンプ MD-6型）、シングルインバータ（IWAKI FE-100型）およびゲートバルブ（口径15mm）を用いた。また、気液二相流れの写真撮影は、モータードライブ付カメラ（Nikon F-801S）を用い、閃光時間4 $\mu$ sの高速ストロボ（STROBOSCOPE TYPE MS-230A）を同期発光させた瞬間写真撮影による。

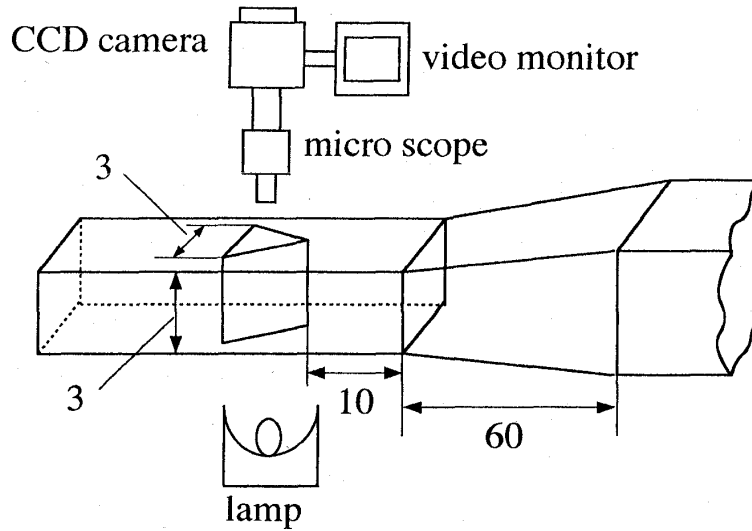


Fig.2 Measurement part and visible device

実験の方法を以下に記す。高压容器①に水道水  $5 \times 10^{-3} \text{m}^3$  を入れた後、供試気体が空気の場合はコンプレッサー⑤、また、二酸化炭素の場合は  $\text{CO}_2$  ボンベ⑨を用いて高压容器①内に気体を圧送する。次に、加圧ポンプ③を用いて高压容器①内を加圧し、実験条件の加圧値まで上昇させる。なお、水中におけるガスの過飽和濃度状態を得るため、実験条件の加圧条件下で一昼夜静置する。次に、高压容器①内を大気圧まで減圧した後、チャンネル内気液二相流れの実験を行った。本実験では、加圧力  $P_g$  の最大値は 2MPa、最小値は 0.3MPa としている。チャンネル内の平均流速は、 $v = 0.5 \text{m/s} \sim 2.3 \text{m/s}$ 、供試液体の液温は 293K ~ 295K である。

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1 空気キャビティの発達の様相

ガス過飽和液体は、三角柱後端部にて剥離し、渦の発生、およびよどみ部を形成する。そこで発生した微細気泡群は時間の経過と共に成長・合体し、キャビティを形成する。図 3(a), (b), (c) は、三角柱背後のキャビティの発達の様相を示す。供試気体は空気、平均流速  $v = 0.5 \text{m/s}$ 、加圧力  $P_g = 2 \text{MPa}$  の条件である。供試液体は図の左側から右側へ流れ、図の左端に位置する底辺 3mm の三角柱背後に生成したキャビティが観察される。図 (a) ~ (c) の時間間隔は各 2 秒である。

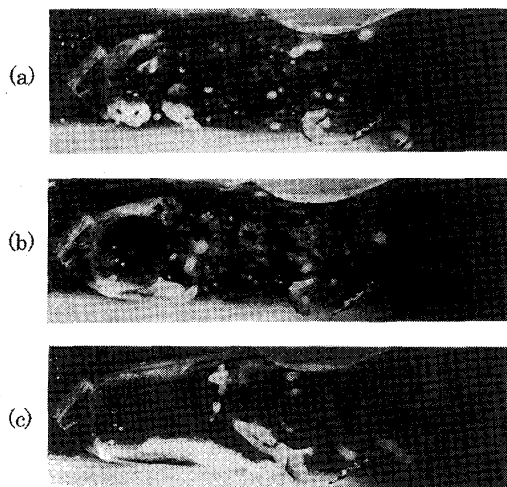


Fig.3 Patterns of development of air cavities ( $v = 0.5 \text{m/s}$ ,  $P_g = 2 \text{MPa}$ )

図からわかるように、時間の経過に伴い、三角柱背後のキャビティ長さは増加するが、いずれの図においても、キャビティの表面状態、キャビティ形状およびキャビティ後方の様相はそれぞれ異なっている。図 (a) に見られるキャビティは、長さ  $L \approx 2.5 \text{mm}$ 、最大幅約 3.5mm であるが、その形状は不規則・不安定で

ある。キャビティの後端も不規則な形状を示し、その後方には直径0.1～0.5mm程度の球状気泡が多数発生し、後方に流れていくのが観察される。時間の経過した図(b)のキャビティでは、長さが $L \approx 4.3\text{mm}$ 、最大幅約4mmとなり、その表面は比較的滑らかになる。しかしながら、その後端の表面は不規則形状であり、そこから分離した直径0.1～0.5mm程度の球状気泡が下流に向かって流出している。さらに時間が経過した図(c)のキャビティは、より発達し、その長さは $L \approx 8.7\text{mm}$ 、最大幅約5mmに達する。このキャビティの気液界面は比較的滑らかになるが、キャビティの後端形状は大きく湾曲している。

このようにキャビティの成長が促進される要因は、次のように考えられる。キャビティの発達に伴い、キャビティ表面積が増大する。そのため、気泡界面におけるガス拡散による mass flow が増加し、またキャビティ内に微細気泡が合体・流入しているものと思われる。

図4(a), (b), (c)は、平均流速 $v = 2.3\text{m/s}$ 、加圧力 $P_g = 2\text{MPa}$ の条件下における三角柱背後の空気キャビティの発達の様相を示す。前図と同様、図中左端は三角柱であり、液体の流れは左から右へ向かう。図(a), (b)および(c)の時間間隔は各2秒である。

図(a)のキャビティは、三角柱付着部から下流に向かって拡大した形状となり、そのキャビティ後端からは直径0.1～0.4mmの球状気泡が多数発生し、後方に流れていくのが観察される。また、直径1.8mm程度の非球状気泡も出現している。この図におけるキャビティの長さは約5mm、キャビティ最大幅は後端近傍で約4mmとなる。図(b)は図(a)より2秒後の様相である。前図との比較から、時間の経過に伴って、キャビティ長さは後流に向かって発達することがわかる。キャビティの長さは約6.5mm、その最大幅は約5mmとなる。キャビティ後端には直径約4mmの楕円形状の気泡が隣接しており、さらにその後方には直径約1.5mmの気泡が流出している。さらに時間が経過した図(c)においては、キャビティはより発達し、その長さ約14.5mm、最大幅はキャビティ中腹で約5.2mmとなる。後端は比較的滑らかに閉じた形状となるが、キャビティ側面から下流に向かって約0.1～0.2mmの微細気泡群が発生し、後方へ流れる。図(a)から図(c)まで時間が経過するに従って、三角柱背後のキャビティ長さは約5mmから14.5mm程度まで成長しており、その成長速度は $2.4\text{mm/s}$ となる。

このようにキャビティの成長が、より促進される要因は、キャビティの発達に従って、キャビティ表面積が増大するため、気泡界面におけるガスの拡散量が増加すること、さらに、流速の増加によって、キャビティ界面近傍のガス濃度境界層における濃度勾配が、比較的高く維持されるためと考えられた。

図5(a), (b), (c)には、平均流速 $v = 2.3\text{m/s}$ 、加圧力 $P_g = 0.7\text{MPa}$ の条件下における三角柱背後の空気キャビティの様相を示す。図の左側から右側へ供試液体は流れ、図の左端の三角柱背後にキャビティが付着している。図(a)～(c)の時間間隔は2秒である。図(a)のキャビティの長さは $L \approx 9.8\text{mm}$ 、キャビティ最大幅は約4.5mmであり、キャビティ側面およびキャビティ後端は不安定である。図(a)より2秒後の図(b)のキャビティは、三角柱付着部から後方に拡大した形状

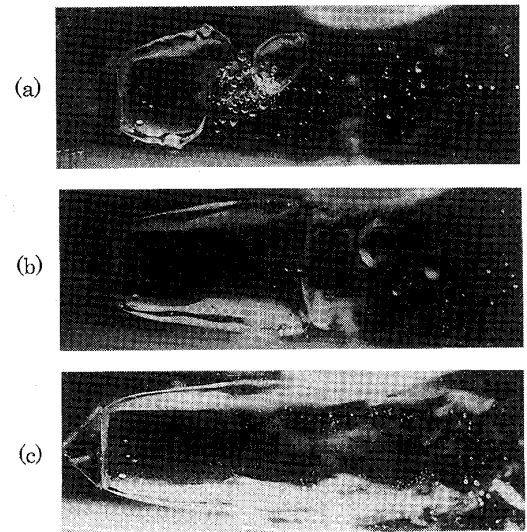


Fig.4 Patterns of development of air cavities  
( $v=2.3\text{m/s}$ ,  $P_g=2\text{MPa}$ )

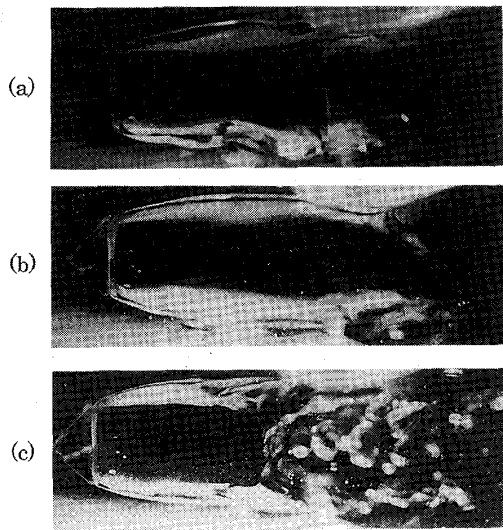


Fig.5 Patterns of development of air cavities ( $v=2.3\text{m/s}$ ,  $P_g=0.7\text{MPa}$ )

をしており、長さ  $L \doteq 10.5\text{mm}$ 、幅約  $4.8\text{mm}$  である。キャビティ表面は滑らかで、キャビティ形状は安定しており、後端はほぼ滑らかに閉じた形となる。

さらに時間が経過した図(c)においてはキャビティ表面は滑らかであるが、キャビティは長さ約  $L \doteq 6.5\text{mm}$ 、幅約  $4.8\text{mm}$  となり、キャビティ長さは減少する。キャビティの崩壊が起きている後端は湾曲状になり、直径約  $1 \sim 1.5\text{mm}$  の球状気泡が後方に多数流れていく。時間の経過と共に、キャビティは発達し安定するが、その後キャビティの長さがこのように収縮する要因は、次のように考えられる。キャビティは一定時間安定に存在し得るが、成長と共に形状抵抗が大きくなり、また界面張力も低下するため不安定性を増す。その結果、キャビティの崩壊に移行する。

### 3. 2 空気キャビティ長さの時間的変化

図6は、空気キャビティの成長から収縮・消滅に至る過程を平均流速  $v$  をパラメータとして示す。図の縦軸はキャビティ長さ  $L$ 、横軸は時間  $t$  を表わす。供試液体は空気、加圧力  $P_g = 0.7\text{MPa}$  である。図からわかるように、時間の経過と共に、キャビティは成長し、キャビティ最大長さ  $L_{max}$  を経た後、収縮・消滅に至る。平均流速  $v = 0.5\text{m/s}$  のとき、形成されるキャビティは、時間  $t < 4\text{s}$  間で成長する。  $4\text{s} \leq t \leq 7\text{s}$  の範囲で、キャビティ長さは最大値  $L_{max} \doteq 5\text{mm}$  で安定するが、その後、キャビティは徐々に収縮し、  $t \doteq 11\text{s}$  で三角柱背後から剥がれて後方に流れ、消滅する。

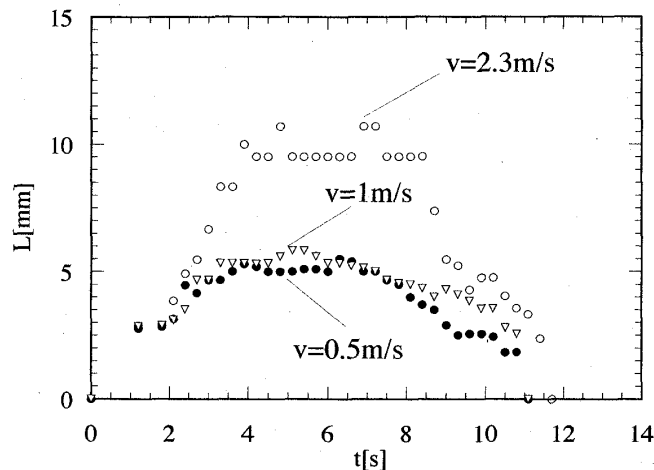


Fig.6 Effect of flow velocity  $v$  on the variation with time of length of air cavities ( $P_g=0.7\text{MPa}$ )

平均流速  $v = 1\text{m/s}$  においても  $v = 0.5\text{m/s}$  の場合と類似の傾向がみられる。すなわち、このときのキャビティは、  $t < 4\text{s}$  の範囲で成長率が比較的大きいが、その後キャビティ長さは、  $L \doteq 5.2\text{mm}$  の安定状態となり、  $t = 5\text{s}$  で最大値  $L \doteq 5.8\text{mm}$  に達する。  $t \geq 6\text{s}$  でキャビティ長さは徐々に収縮し、  $t \doteq 11\text{s}$  で三角柱背後から離脱し、消滅する。

高流速条件である平均流速  $v = 2.3\text{m/s}$  では、キャビティ発生後、時間  $t < 4\text{s}$  の範囲において、急速に成長する。  $4\text{s} \leq t \leq 8.5\text{s}$  の範囲で、キャビティ長さは  $L \doteq 9.5 \sim 10.5\text{mm}$  ではほぼ一定となる。その後、キャビティ長さは急速に減少し、  $t = 11.5\text{s}$  で三角柱背後から離脱・消滅する。

いずれの流速条件においても、キャビティは発生後成長し、形状の安定期を経た後、収縮・消滅する傾向を示すことがわかる。このようなキャビティの成長から消滅に至る過程は次のように考察される。三角柱背後で流れの剥離が起こり、渦を生成し、その渦のコアが核となって気泡発生に至る。また、三角柱の壁面の表面核がソースとなり気泡発生に至ることも考えられる。このように三角柱近傍で発生した気泡は、液体中に溶存する過飽和ガスの拡散効果により、急速に成長すると共に、隣接する気泡との合体も促進され、より大きなキャビティへと成長していく。この際、平均流速が大きいほど、乱れ効果による拡散促進現象が生じる。また、キャビティの表面積が大きいほど、質量流量が大となるため、成長率が大きくなる。キャビティが成長し、ある大きさまで達すると、気液間の表面張力および気固間の界面張力の影響が低下し、キャビティの形状は不安定性を増し、キャビティの部分的欠落が起こる。それらは流れ方向の局所的なせん断力を伴い、流れの不安定性も増すため、キャビティの収縮が進行し、しいては、固体壁からの離脱・消滅に至るものと考えられる。

図7には、加圧力  $P_g = 2\text{MPa}$  の条件下における空気キャビティの成長から消滅に至る過程を示す。縦軸はキャビティ長さ  $L$ 、横軸は時間  $t$ 、平均流速  $v = 0.5$  および  $2.3\text{m/s}$  である。時間の経過と共に、キャビティ長さは増加し、キャビティ最大長さ  $L_{max}$  に達した後、キャビティは収縮・消滅に至る。平均流速  $v = 0.5\text{m/s}$  におけるキャビティは、  $t < 3\text{s}$  の範囲で成長率が大きい。  $3\text{s} \leq t \leq 10\text{s}$  の範囲においてキャビティ長さは  $L \doteq 8 \sim 9\text{mm}$  のほぼ一定の値を示すが、その後、  $t > 10\text{s}$  に置いてキャビティはゆっくりと収縮し、  $t = 14.5\text{s}$  でキャビティは消滅する。

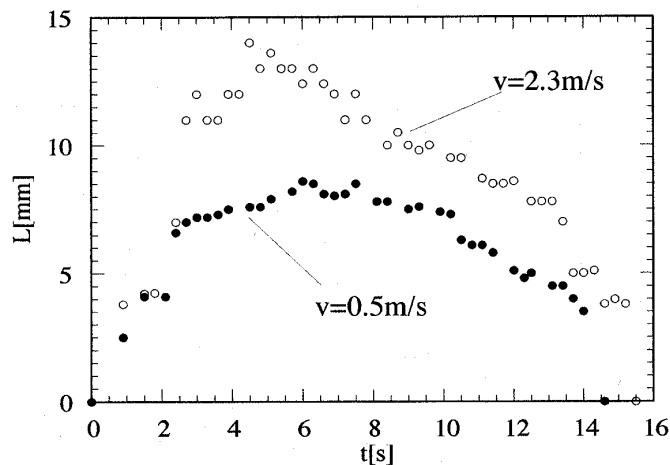


Fig.7 Effect of flow velocity  $v$  on the variation with time of length of air cavities ( $P_g=2\text{MPa}$ )

平均流速  $v = 2.3\text{m/s}$  の場合には、キャビティ発生後、  $t < 3\text{s}$  までにキャビティは急峻に成長し、  $t = 4.5\text{s}$  で最大値  $L \doteq 14\text{mm}$  に達する。  $3\text{s} \leq t \leq 10\text{s}$  の範囲では、キャビティ長さは  $10.5\text{mm} \leq L \leq 14\text{mm}$  となる。その後、  $10\text{s} < t \leq 15.5\text{s}$  の範囲において、キャビティ長さは徐々に減少し、  $t = 15.5\text{s}$  で消滅する。前図と比べ、加圧力  $P_g$  が大きいので、液中に溶存している空気量は大きくなっている。従って、初期におけるキャビティの成長率並びにキャビティの最大長さはいずれも前図の結果より大きくなっている。

### 3.3 空気キャビティの最大長さに及ぼす加圧力の影響

図8には、空気キャビティの最大長さ  $L_{max}$  に及ぼす加圧力  $P_g$  の影響を平均流速  $v$  をパラメータとして示す。図からわかるように、加圧力  $P_g$  の増加に伴いキャビティの最大長さ  $L_{max}$  も増大する。 $P_g < 0.5\text{MPa}$  の範囲におけるキャビティ最大長さは、いずれの流速においても  $L_{max} = 4 \sim 5\text{mm}$  であるが、 $P_g \geq 0.5\text{MPa}$  においては、流速  $v$  による影響が強くなり、 $v$  が大きいほど、 $L_{max}$  の増大率は大きくなる。

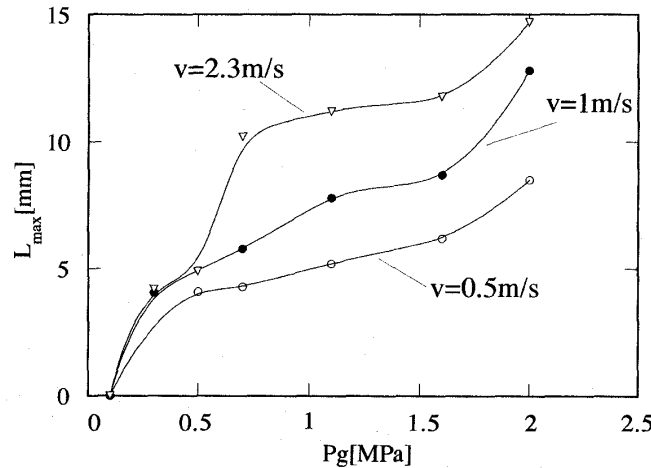


Fig.8 Effect of additional pressure  $P_g$  on the maximum length of air cavities

$v = 2.3\text{m/s}$  では、加圧力が  $0.5\text{MPa} \leq P_g \leq 0.7\text{MPa}$  の範囲で、キャビティ最大長さの成長率が著しいが、 $0.7\text{MPa} < P_g \leq 1.6\text{MPa}$  においては成長は緩やかになる。しかし、 $P_g > 1.6\text{MPa}$  における成長率は比較的大となる。加圧力  $P_g = 1\text{MPa}$  から  $2\text{MPa}$  まで2倍増加すると、キャビティ最大長さは約1.5倍となる。 $v = 1\text{m/s}$  でのキャビティ最大長さは、 $P_g = 0.5\text{MPa}$  において、 $L_{max} \approx 5\text{mm}$  であるが、 $P_g = 1\text{MPa}$  において  $L_{max} \approx 7.5\text{mm}$ 、ガス加圧力  $P_g$  が4倍の  $P_g = 2\text{MPa}$  においては、 $L_{max}$  の約2.5倍に成長する。 $v = 0.5\text{m/s}$  におけるキャビティ最大長さは、 $P_g = 0.5\text{MPa}$  において  $L_{max} \approx 4\text{mm}$  となるが、 $P_g$  がさらに増加しても  $L_{max}$  の増加率は小さく、 $P_g = 2\text{MPa}$  においても  $L_{max}$  は  $8\text{mm}$  にまでしか至らない。

### 3.4 空気キャビティの最大長さに及ぼす平均流速の影響

図9はキャビティ最大長さ  $L_{max}$  に及ぼす平均流速  $v$  の影響を加圧力  $P_g$  をパラメータとして示す。図より、平均流速  $v$  の増加と共にキャビティの最大長さは増加することがわかる。その傾向は、加圧力  $P_g$  が大きいほどより顕著となる。 $P_g = 0.3\text{MPa}$  の場合  $v = 0.5\text{m/s}$  以下ではキャビティは形成されず、 $v = 1\text{m/s}$  において、約  $4\text{mm}$  のキャビティが三角柱背後に発生する。その後、流速が増加してもキャビティの最大長さは変化しない。 $P_g = 0.5\text{MPa}$  においては、 $v \geq 0.5\text{m/s}$  におけるキャビティ最大長さはほぼ一定である。 $P_g = 0.7 \sim 1.6\text{MPa}$  の範囲におけるキャビティ最大長さ  $L_{max}$  と流速  $v$  との関係は比較的類似していると言える。

加圧力  $P_g$  が大きい程、 $L_{max}$  の値は大となる。例えば、平均流速  $v = 1\text{m/s}$  におけるキャビティ最大長さは、 $P_g = 0.7, 1$  および  $1.6\text{MPa}$  では、それぞれ約  $6\text{mm}, 8\text{mm}$  および  $9\text{mm}$  となる。 $P_g = 2\text{MPa}$  では、 $v \leq 1\text{m/s}$  における  $L_{max}$  の成長率は大きくなり、流速の増加と共に、キャビティはより発達することを示している。 $1\text{m/s} < v \leq 2.3\text{m/s}$  においては、キャビティの成長率は比

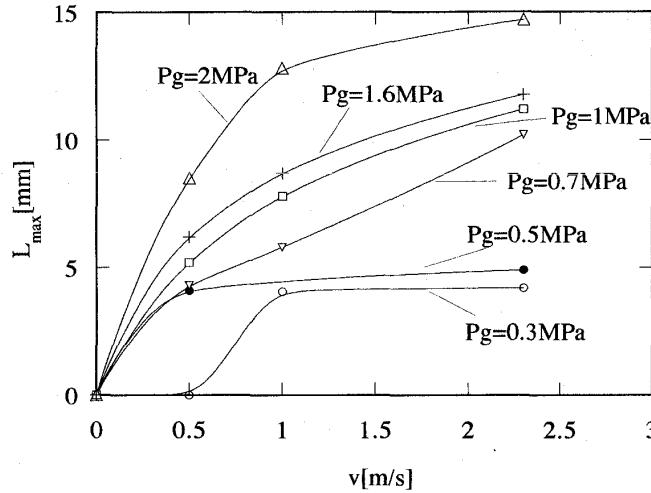


Fig.9 Effect of flow velocity  $v$  on the maximum length of air cavities

較的穏やかである。キャビティ最大長さの発達は、加圧力  $P_g$  が小さい  $P_g < 0.5$  MPa の場合には、流速による影響は比較的少ない。一方、 $P_g \geq 0.7$  MPa の大きい加圧力条件の場合には、キャビティ最大長さは流速による影響を受けやすいものと考えられる。

### 3. 5 二酸化炭素キャビティの発達の様相

図 10(a)~(h) は平均流速  $v = 2.3$  m/s, 加圧力  $P_g = 0.7$  MPa の条件下における三角柱背後の二酸化炭素キャビティの発達の様相を示す。図中の左端は底辺 3mm の三角柱であり、供試液体の流れは、左から右へ向かう。図(a)~(h)の時間間隔は各 0.3 秒である。図からわかるように、(a)~(h)へと時間が経過するに従って、キャビティの長さは増加するが、キャビティ後端およびキャビティ後流の様相は各々異なっている。しかし、おおむねキャビティ最大幅は約 4.8mm であり、キャビティ側表面の様相は滑らかである。

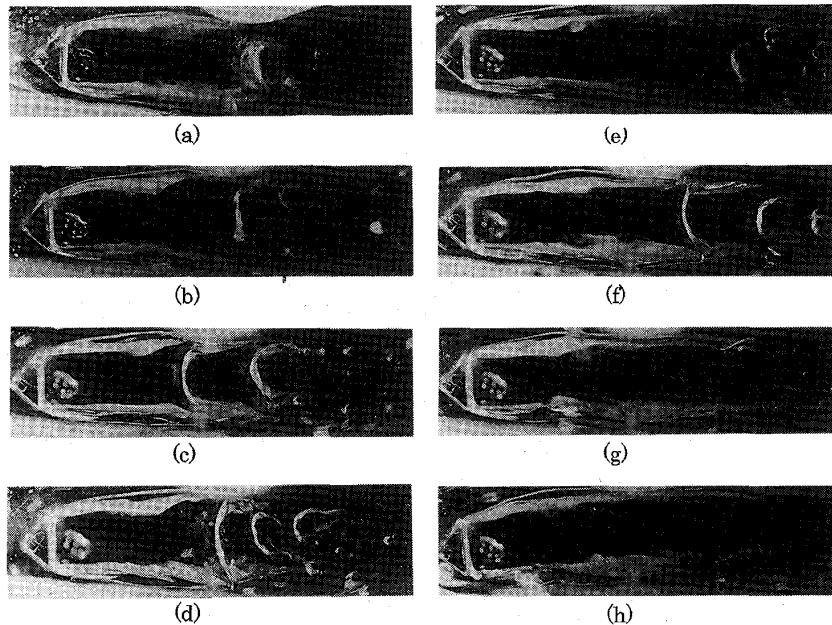


Fig.10 Patterns of development of CO<sub>2</sub> cavities ( $v=2.3$  m/s,  $P_g=0.7$  MPa)



以下に各図の考察を述べる。図(a)のキャビティは三角柱背後付着部から下流に向かって拡大した形状で、キャビティ長さ  $L \approx 8.2\text{mm}$  である。また、キャビティ後端は不規則であり、キャビティ後方には、直径  $1 \sim 1.5\text{mm}$  程度の球状気泡が出現している。0.3秒後の図(b)では、キャビティ長さは  $L \approx 8.5\text{mm}$  であり、キャビティ後端は不規則で、その後方には、直径  $2\text{mm}$  程度の非球状気泡並びに直径約  $1\text{mm}$  の球状気泡が観察される。さらに図(c)になると、キャビティ長さは  $L \approx 13.9\text{mm}$  となる。キャビティ後端の気泡も成長しており、直径約  $3\text{mm}$  の非球状気泡が後方に流れていくのが観察される。また、キャビティの中腹では、キャビティが膜を形成し、付着している。さらに、時間が経過し図(d)では、キャビティ長さは前図(c)と同程度であるが、キャビティ後端は不安定さを増し、後方の気泡形状も不安定な非球形状を示す。図(e)においては、キャビティ長さはさらに成長し、 $L \approx 14.1\text{mm}$  に達する。このキャビティ後端には、流れ方向に変形した気泡が観察される。図(f)における、キャビティ長さは  $L \approx 15\text{mm}$  に達する。湾曲したキャビティ後端から、直径約  $2\text{mm}$  の気泡が後方に向かって流れている。図(g)は、図(a)から1.8秒後になるが、キャビティ長さは図(a)の約2倍の長さ  $L \approx 16.7\text{mm}$  に達する。キャビティの側面には、若干波形状が現れ、キャビティ後端は不規則である。図(h)においては、キャビティ長さは最大値  $L_{max} \approx 18\text{mm}$  に達する。比較的安定し閉じた後端を有する形状となるが、側面の一部に不安定を示す波形が見られる。

上記のように、キャビティの成長が促進される要因は、キャビティの発達に伴い、キャビティの表面積は増大するため、気泡界面におけるガスの拡散量が増加すること、また、微細気泡のキャビティ内合体・流入が起こることが考えられる。

### 3. 6 微細空気泡および微細二酸化炭素気泡の成長曲線の比較

図 11 は、微細空気泡と微細二酸化炭素気泡の成長過程の対比を示す。図中、横軸は時間  $t$ 、縦軸に気泡直径無次元量  $\beta$  を示す。なお、実験条件は、平均流速  $v = 0.5\text{m/s}$ 、加圧力  $P_g = 0.5$  および  $0.7\text{MPa}$  であり、観察された気泡初期直径は  $d_o = 24 \mu\text{m}$  である。二酸化炭素気泡は非常に短い時間内 ( $P_g = 0.5\text{MPa}$  では  $0 < t \leq 0.14\text{s}$ ,  $P_g = 0.7\text{MPa}$  では  $0 < t \leq 0.17\text{s}$ ) で成長し、その成長率は  $P_g = 0.5\text{MPa}$  では約  $15/\text{s}$ ,  $P_g = 0.7\text{MPa}$  においては約  $20/\text{s}$  となる。一方、空気泡は  $0 \leq t \leq 10\text{s}$  の範囲で成長しており、その成長率は  $P_g = 0.5\text{MPa}$  では約  $0.18/\text{s}$ ,  $P_g = 0.7\text{MPa}$  に

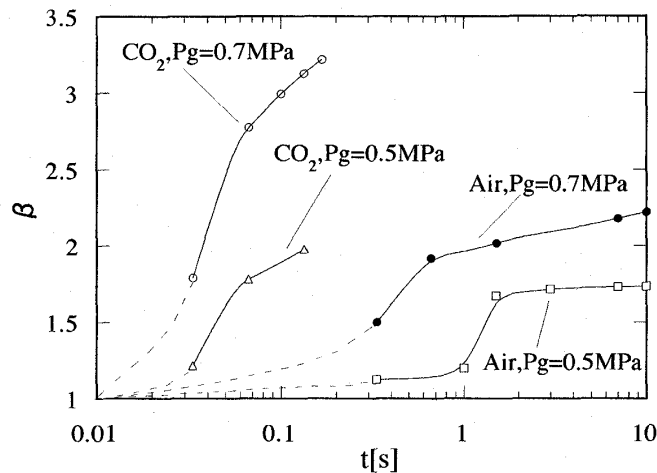


Fig.11 Comparison of growth curves between micro air bubbles and micro CO<sub>2</sub> bubbles ( $v=0.5\text{m/s}$ ,  $d_o=24\mu\text{m}$ )

において約  $0.23/s$  である。従って、二酸化炭素気泡の成長速度は空気泡に比べて  $P_g = 0.5\text{MPa}$  では約 83 倍、 $P_g = 0.7\text{MPa}$  において約 87 倍にもなることがわかる。このように、気泡の成長が異なる要因として以下のことが考えられる。水に対する二酸化炭素の溶解度は空気に対して約 46 倍であり、二酸化炭素の過飽和度が非常に大きくなるため、気泡成長率はこのような差異が生ずるものと考えられた。

図 12 は、平均流速  $v = 1\text{m/s}$  における微細空気泡と微細二酸化炭素気泡の成長曲線を加圧力  $P_g$  をパラメータとして示す。気泡初期直径は  $d_0 = 24\ \mu\text{m}$  である。時間の経過に伴い、気泡サイズも大となるが、二酸化炭素気泡と空気泡ではその傾向は異なる。二酸化炭素気泡の成長は  $t \leq 0.2\text{s}$  以内の非常に短い時間内で行われ、 $P_g = 0.5\text{MPa}$  および  $P_g = 0.7\text{MPa}$  におけるその成長率は、各々  $10/s$  および  $32/s$  となる。それに対し、空気泡の成長には  $5 \sim 6$  秒と比較的長い時間を要し、成長率も  $P_g = 0.5\text{MPa}$  において  $1/s$  となり、二酸化炭素気泡の成長率の約  $1/10$  となる。また、 $P_g = 0.7\text{MPa}$  における成長率は  $1.5/s$  であり、二酸化炭素気泡成長率の約  $1/20$  になる。

図 13 には、平均流速  $v = 2.3\text{m/s}$  における空気泡と二酸化炭素気泡の成長曲線を示す。気泡初期直径  $d_0 = 24\ \mu\text{m}$  である。加圧力  $P_g = 0.5\text{MPa}$  で空気泡と二酸化炭素気泡の成長率を比較して

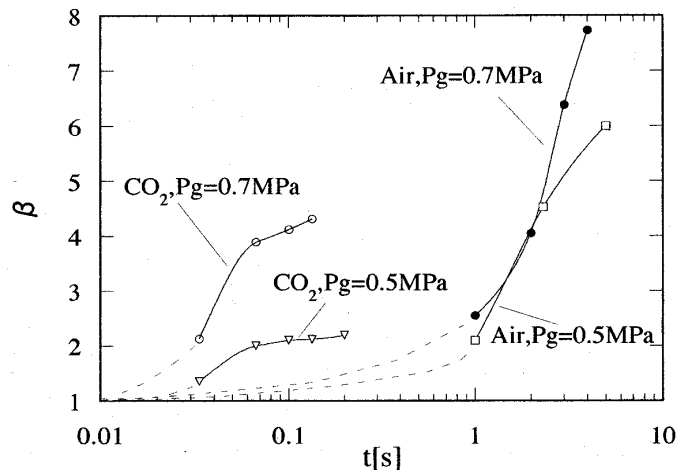


Fig.12 Comparison of growth curves between micro air bubbles and micro  $\text{CO}_2$  bubbles ( $v=1\text{m/s}$ ,  $d_0=24\ \mu\text{m}$ )

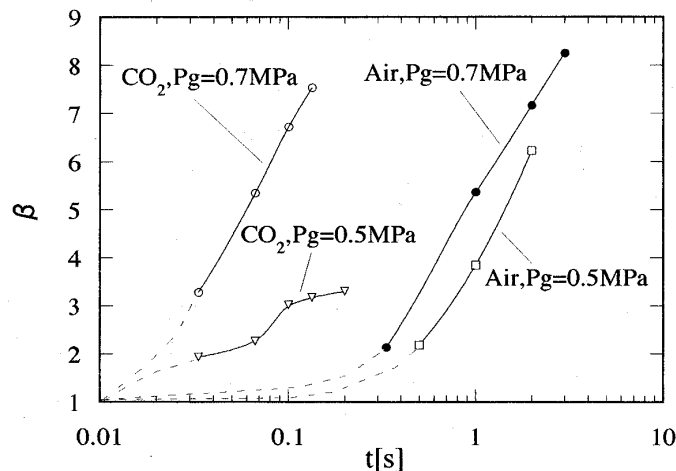


Fig.13 Comparison of growth curves between micro air bubbles and micro  $\text{CO}_2$  bubbles ( $v=2.3\text{m/s}$ ,  $d_0=24\ \mu\text{m}$ )

みると、二酸化炭素気泡は  $15/s$ 、空気泡は  $2.9/s$  となり、成長率において約 5 倍の差があることがわかる。また、加圧力  $P_g = 0.7\text{MPa}$  での気泡成長率は、二酸化炭素気泡  $65/s$ 、空気泡  $2.8/s$  となり、二酸化炭素気泡は空気泡の成長率の約 23 倍にもなる。

#### 4. 結 論

ガス過飽和液体流動装置に、三角柱をエキサイターとするチャンネル型測定部、流量制御部などを付設し、ガス過飽和液体を作動流体とするチャンネル内気液二相流れについて実験的研究を行った。得られた結果を以下に述べる。

- (1) ガス過飽和液体は、三角柱後端にて剥離し、渦の発生およびよどみ部を形成する。その際、発生した微細空気泡群は、時間の経過と共に成長・合体し、キャビティを形成する。試験開始直後に観察される空気泡の直径は  $20 \sim 100\mu\text{m}$  であり、二酸化炭素気泡の直径は  $20 \sim 200\mu\text{m}$  である。
- (2) 空気キャビティは、幅  $4 \sim 5\text{mm}$ 、長さは  $14\text{mm}$  程度まで発達する。キャビティ表面は比較的滑らかであるが、その後端は不安定になりやすい。
- (3) 空気キャビティは、約  $2.4\text{mm}/s$  の成長速度で成長・発達し、キャビティ最大長さ  $L_{max}$  を経た後、収縮・消滅に至る。空気キャビティ最大長さ  $L_{max}$  は、加圧力  $P_g$  および平均流速  $v$  が大きいほど長くなる。
- (4) 二酸化炭素キャビティは、幅約  $4.8\text{mm}$  で、長さは  $18\text{mm}$  程度まで発達する。キャビティ表面は滑らかであるが、その後方部からは直径  $1 \sim 2\text{mm}$  程度の気泡が流出する。
- (5) 二酸化炭素キャビティ最大長さ  $L_{max}$  は、同一実験条件における空気の場合よりも長くなる。
- (6) 微細二酸化炭素気泡の成長速度は、空気泡の場合の約  $5 \sim 87$  倍になる。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号 12650174）を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 井小萩：均質媒体モデルによるキャビテーション流れの数値予測，Cavitation，キャビテーションに関するシンポジウム（第11回），pp.97-98（2001）。
- 2) 藤原・菱田：管内気液二相流の微細乱流構造，日本機械学会論文集（B），68-668，pp. 1143-1150（2002）。
- 3) 坂口・浜口・赤対・富山・南川・細川：鉛直管内気液二相スラグ流における大気泡長さ，液体スラグ長さ，スラグユニット長さ並びにスラグ周期の推算式，混相流，15-3，pp.288-295（2001）。
- 4) 竹田：DEMを用いた気泡・液滴の分裂・合一シミュレーション，混相流，15-4，pp.373-377（2001）。
- 5) 辻野・三浦：ガス塞栓に対する高気圧酸素治療の力学的メカニズム，日本機械学会論文集，56-525，pp.1415-1418（1990）。
- 6) 辻野・三浦・浦西・塚本・平井：左心補助用マイクロ血液ポンプの試作に関する研究，ターボ機械，30-8，pp.479-485（2002）。
- 7) 三浦・辻野：二葉式機械弁におけるキャビテーション気泡の生成とその動態，人工臓器，29-2，pp.379-383（2000）。

- 8) 辻野・三浦・井小萩・中村：高速拍動流条件下における人工弁のキャビテーション発生, *Cavitation, キャビテーションに関するシンポジウム (第11回)*, pp.19-22 (2001).
- 9) 辻野・島・三浦・辻野：振動・減圧環境下の液体中における気泡発生に関する研究, *混相流*, 8-4, pp.301-305 (1994).
- 10) 辻野・三浦・井小萩・堀尾：細管内における微小気泡の流動現象, *日本機械学会九州支部講演論文集*, No.018-1, pp.83-84 (2001).