

圧力変化を受けるガス過飽和液体中の気泡生成

辻野 智二・井上健次郎・堀 光 晴*

Bubble Generation in Oversaturated Liquid-Gas Solutions Subjected Pressure Variation

Tomoji TSUJINO, Kenjiro INOUE and Mitsuharu HORI *

(Received September , 2001)

The study of champagne phenomenon has received considerably attention in relation to the development of Compressed Air Energy Storage plant. In this paper, the density of bubble number and bubbling phenomenon under the condition of decompression are clarified by using the experimental apparatus which makes oversaturated liquid-gas solutions in a high pressure vessel. Then the experiments about two phase flow of oversaturated liquid-gas solutions are conducted. The microbubbles with 20-100 μm in diameter are observed behind a triangular exit set in channel flow. It is found that the growth rate of microbubbles is influenced by an additional gas pressure.

Key words : CAES, bubble, two phase flow, champagne phenomenon, bubble number density

1. 緒 論

近年, 我が国を含めて世界各国の電気エネルギーの消費は増加の一途を辿っている. 現在使われている発電方式の中では火力発電の割合が大きく, 世界の大多数の国でも火力発電の割合がトップを占めている. このため, 火力発電によって大気中に排出される二酸化炭素は膨大な量に達しており, 我が国でのエネルギー転換部門からの排出量は年間約 9800 万 t に達している. これは, 我が国の二酸化炭素総排出量の 34.5% を占め, 中でも発電による二酸化炭素排出量の割合は 25% に達している^(1,2). 今後の電気エネルギーの増産には, 地球環境保全の観点に立った新しいエネルギー開発が強く期待されており, 近い将来に向けて多様なエネルギー開発が進められている.

圧縮空気貯蔵・ガスタービン発電システムは, 電気使用の負荷平常化と二酸化炭素発生量抑制をねらいとする近未来エネルギー源として注目されている^(3,4). この発電システムは, 夜間や休日のオフピーク時の余剰電力を利用して圧縮空気をつくり, それを地下空洞に貯蔵しておき, 昼間の電力需要ピーク時にこれを取り出して, ガスタービンを回して発電するというシステムである. 通常ガスタービン発電では, ガスタービンから発生する動力の一部を使って空気圧縮機を駆動し高圧空気を作っているが, タービン全発生動力の 60 ~ 70% が空気圧縮機の駆動に使われるため, 残りの 30 ~ 40% が発生電力となるに過ぎない. これに対し, 圧縮空気貯蔵・ガスター

* 阿蘇北中学校

ビン発電システムでは、空気圧縮プロセスと発電プロセスはクラッチ切り替えによって分岐され、深夜や休日の余剰電力により貯蔵された圧縮空気は、発電時に取り出され直接ガスタービンの駆動に使用される。従って、発電時のみを考えれば同じ投入量で通常のガスタービンに比べて2～3倍の電気を得ることができる。つまり、このシステムは、ガスタービン発電所と一体となった圧縮空気エネルギー貯蔵 (Compressed Air Energy Storage) システムであり、エネルギーの一層の有効利用を目指すものと言える⁽⁵⁾。

ドイツ、アメリカなどの諸外国においては、この圧縮空気貯蔵・ガスタービン発電システムは、すでに実用化に供されている⁽⁶⁾。我が国では、実用化に向けた検討の結果、システムの主構造部の一つとなる地下空洞は、地下500～600mに建設する予定となっている⁽⁷⁾。この場合、地下水圧で圧縮空気を封じ込める方式が最も現実的である。昼間、地下空洞は水で満たされているが、夜間の余剰電力を利用して、地下空洞へ圧縮空気を送入する。この際、高圧ガスで飽和した水が、地上に向かって上昇するとき、減圧に伴ってガスの過飽和状態を招き、発泡現象^(8,9)が起こると指摘されている。いわゆる「シャンペン現象」が発生するのである。このシャンペン現象により、管路系の振動の誘発やエネルギーの損失を招くことが予想されるため、その現象の解明と対策が緊急の課題となっている⁽¹⁰⁻¹²⁾。

本研究では、上記課題に関する実験的研究を行うことを目的として、始めにガス過飽和液体生成・試験装置を設計・試作する。ここでは、液体を満たした容器内を加圧・減圧することにより、静止液体中における発泡の様相等の観察を行い、シャンペン現象に関する基礎的知見を得る。

次いで、ガス過飽和液体のチャンネル内気液二相流れに関する実験的考察を行う。ここでは、圧縮空気貯蔵・ガスタービン発電システムの管路流動状態のシミュレーションとして、作成した供試液体のチャンネル内流れで発生する気泡の挙動について明らかにする。また、実験では空気のほかに二酸化炭素も供試液体として用いているが、これは、二酸化炭素の海洋貯蔵に関する研究とも関連している^(13,14)。近年の二酸化炭素の排出量は膨大なものとなっているため、大気中排出に代わって、海洋や地中に隔離することが提案されている。海洋への隔離法としては、貯留法と溶解法が提案されている。溶解法の一つである気体溶解法は、400～500m以浅の海洋へ二酸化炭素を吹き込み、その上昇過程で二酸化炭素を溶解させ、周りの海水より重くなった二酸化炭素溶解海水の沈降拡散を期待するものである。その際、溶解海水が上昇気泡と共に海面まで運ばれる可能性もあるなど、二酸化炭素の拡散現象を伴う気液二相流れの解明が強く望まれている^(15,16)。よって、ここでは二酸化炭素ガス過飽和液中における気泡の拡散成長のメカニズムについても言及する。

2. 実験装置と方法

圧縮空気貯蔵・ガスタービン発電システムでは、地下数百メートルに空気貯蔵のための圧気タンクを設置する。タンク内には水が貯留されているが、このタンク内に圧縮空気を送入することによりタンク内の水は、地上まで流出することになる。地下高圧条件下の水はガスで飽和しているため、このガス飽和水が上昇と共に減圧され、発泡現象が生ずるものと考えられる。本研究では、この発泡現象のモデル化を行うために、ガス過飽和液体生成・試験装置の設計・試作を行った。図1には試作したガス過飽和液体生成・試験装置の概略図を示す。

高圧容器①は、材質 SUS304 であり、直径 150mm、高さ 350mm の円筒形状で、その内容積は

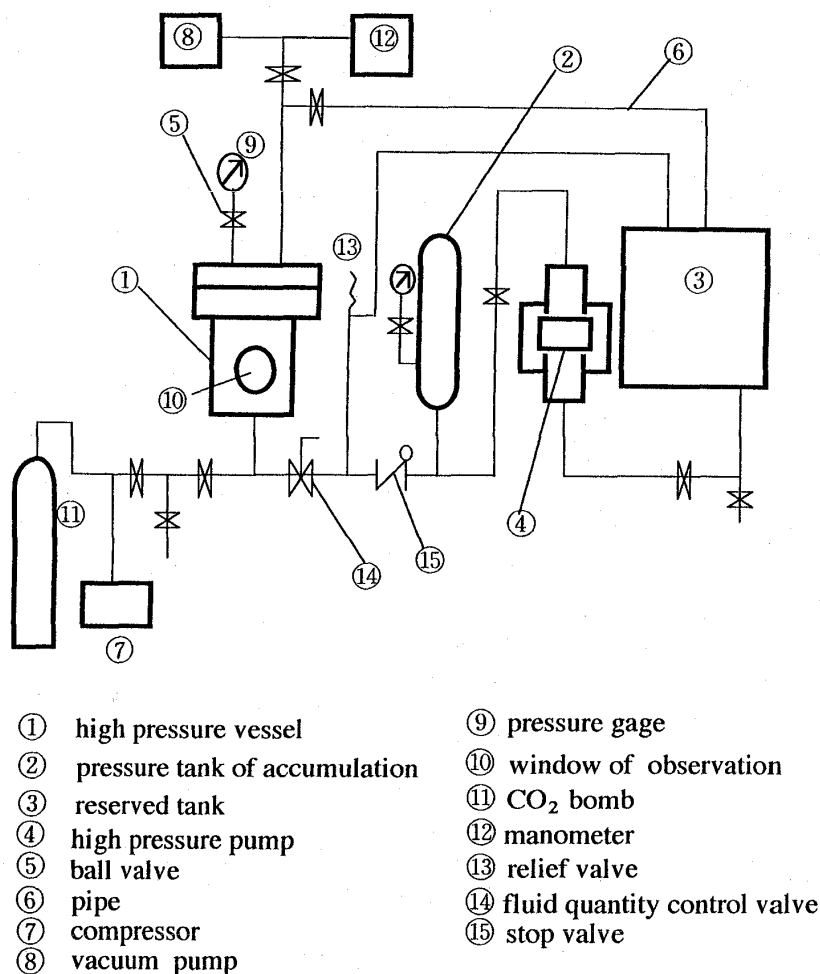
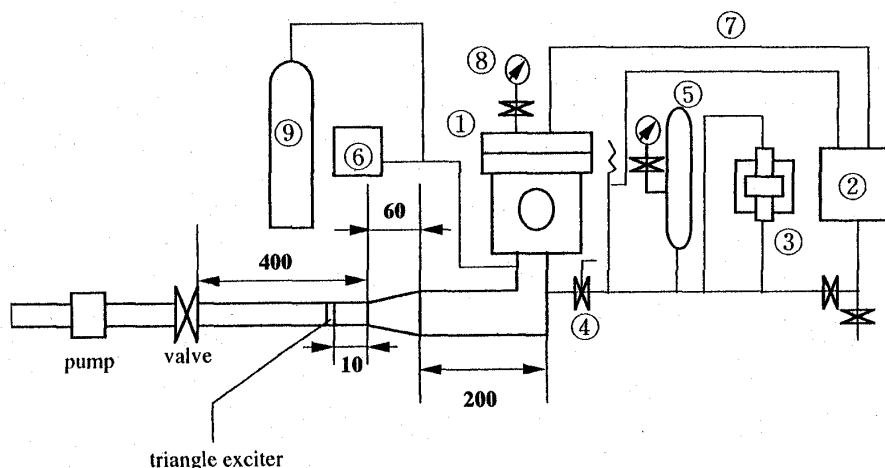


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus about oversaturated liquid-gas solutions

$6.04 \times 10^{-3} \text{m}^3$ である。この高圧容器は、10MPa まで耐圧可能であり、パイロットプラントにおける地下約 1000m までの圧力条件に対応することができる。この容器の中央部には、2 箇所に対称の観察用窓⑩を設けており、そこには、最大耐圧 10MPa、直径 75mm、厚さ 25mm の高圧用ガラスが埋め込まれている。ガスを貯留する蓄圧タンク②は材質 SUS304 であり、直径 50mm、高さ 300mm の円柱形状である。貯水タンク③は材質 SUS304 で、そのサイズは横 170mm、縦 300mm、高さ 300mm である。高圧容器内の加圧を行う加圧ポンプ④は、最大圧力 5MPa である。空気の圧送入にはコンプレッサー⑦、高圧容器内減圧には真空ポンプ⑧を用いている。圧力計⑨はブルドン管圧力計である。二酸化炭素の高圧容器への圧送入には CO₂ ボンベ⑪を用いている。高圧容器減圧の際の容器内圧力計測には U 字管水銀マンオメータ⑫を使用している。管路系には、ボールバルブ⑤、リリーフバルブ⑬、流量制御バルブ⑭および逆止バルブ⑮が配置されている。高圧パイプ⑥は材質 SUS304 であり、その外径 9.53mm、内径 3.18mm、最高使用圧力は 414MPa の高圧用である。

静止液中の気泡生成に関する実験の手順を以下に示す。高圧容器①に、水道水 $5 \times 10^{-3} \text{m}^3$ を入れた後、コンプレッサー⑦により 500kPa の空気、二酸化炭素の場合は、CO₂ ボンベ⑪により供試気体を圧送入する。その後、加圧ポンプ④を作動させ高圧容器内を加圧する。実験条件とする加圧力は $P_g=1, 2$ および 3MPa である。高圧容器内圧力が実験条件の加圧値 P_g に到達した後、高圧

容器内の供試液体に溶解させるために一昼夜静置する．次いで，手動ボールバルブ⑤を開き，容器内圧力を大気圧まで減じる．さらに，圧力差を増大させるため，真空ポンプ⑧を用いて，高压容器内圧力を 10kPa まで減圧し，その際に生ずる発泡現象を写真撮影し観察する．減圧に際しては，大気圧まで戻した後，2 分間静置し，その後，約 10kPa/min の速度で減圧する．減圧の所要時間は約 15 分である．写真撮影は観察用窓より 100mm の位置で接写する．光源は反対側に設けられた観察用窓後方に置かれている．



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

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus for two phase flow with channel

図 2 は，ガス過飽和液体チャンネル型流動装置を示す．このチャンネル型流動装置は，供試液体の二相流動特性の解析に用いる．高压容器①にて生成された供試液体は，高压容器より 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 の収縮管を置いて，流れの乱れを抑制している．なお，高压容器下部に取り付けた矩形管は断面積 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．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，断面積は底辺 3mm × 高さ 1.5mm）を流路測定部に取り付けている．その位置は，チャンネル入り口から 10mm の位置である．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の先端に，実体顕微鏡を取付け，得られた画像データは，ビデオモニターにより出力する．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，ポンプ電源のシングルインバータおよびゲートバルブを用いた．また，気液二相流れの写真観察は，モータードライブ付きカメラを用い，閃光時間 4 μ s の高速ストロボを同期発光させた瞬間写真撮影によ

る。

流動する液中の気泡生成に関する実験の手順を以下に示す。静止液中の実験の場合と同様に、まず、ガス過飽和液体生成・試験装置を用いて供試液体を作成する。次いで、高圧容器①内を大気圧まで減圧した後、チャンネル内を流動させ、生成する気液二相流れの実験を行った。流量の制御は、測定部後方の下流に設置したポンプと制御バルブによる。本実験では、加圧力 P_g の最大圧は 2MPa、最小圧は 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 \sim 295K である。

3. 実験結果と考察

3. 1 静止液中の気泡数密度に及ぼす加圧力の影響

ガス過飽和液体生成・試験装置を用いて、圧力変化を受ける静止液体中で発生する気泡群の観察を行った。その結果を図3に示す。ここでは供試液体は空気である。図の縦軸は気泡数密度 N 、

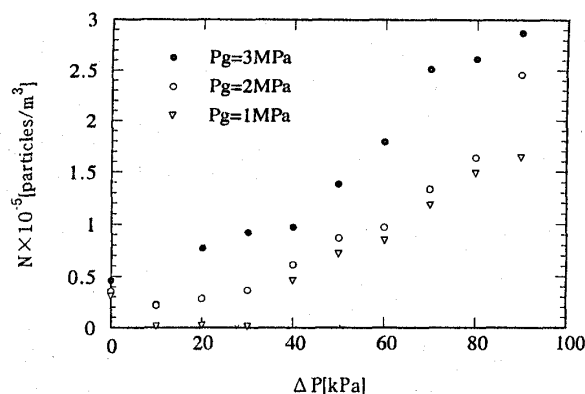


Fig.3 Relation between decompression ΔP and bubble number density N (air)

横軸は減圧度 ΔP を表している。気泡数密度 N は、写真により観察された気泡群を単位体積あたりに換算した値であり、減圧度 ΔP は、大気圧 P_{at} から高圧容器内圧力を減じた圧力の大きさである。図からわかるように、いずれの加圧力においても、減圧度が増加するにつれて気泡数密度 N は大きくなり、その傾向は加圧力 P_g が大きいほど、より顕著である。 $P_g = 1\text{MPa}$ では、高圧容器を大気圧まで戻した瞬間 ($\Delta P = 0$) で気泡群の発生が見られるが、その後 ΔP を増加しても、 $\Delta P = 30\text{kPa}$ まではほとんど気泡は発生しない。 $\Delta P = 40\text{kPa}$ にて再び、気泡群が観察され、その後、 $\Delta P = 90\text{kPa}$ に至るまで気泡数密度 N の値は徐々に増加している。 $P_g = 2\text{MPa}$ においては、減圧大気圧状態下 ($\Delta P = 0$) で気泡群が観察される。 $\Delta P = 10\text{kPa}$ で気泡数密度 N の値は減少しているが、その後、 $\Delta P = 90\text{kPa}$ まで緩やかに増加している。 $P_g = 3\text{MPa}$ においても、 ΔP の増大と共に、気泡数密度 N は増加する。

気泡数密度 N を加圧力の観点から比較してみる。例えば、 $\Delta P = 40\text{kPa}$ のときの $P_g = 3\text{MPa}$ での N の値は、 $P_g = 1\text{MPa}$ の約 2 倍、 $P_g = 2\text{MPa}$ のときの約 1.6 倍の値を示す。また、 $\Delta P = 80\text{kPa}$ の $P_g = 3\text{MPa}$ における気泡数密度 N は、 $P_g = 1\text{MPa}$ の約 1.7 倍、 $P_g = 2\text{MPa}$ の約 1.6 倍の値となる。このように、減圧が進むにつれ気泡数密度 N が増加する要因としては、液中に含有

している過飽和な空気により発生する微細気泡が圧力差によって可視化可能なサイズに成長したこと、減圧によりガス拡散が促進され、気泡成長率が大きくなったことが挙げられる。また、加圧力 P_g が大きいほど、気泡数密度 N の値が大きくなる要因は、供試液体中に含有された気体の量が多いためと考えられた。

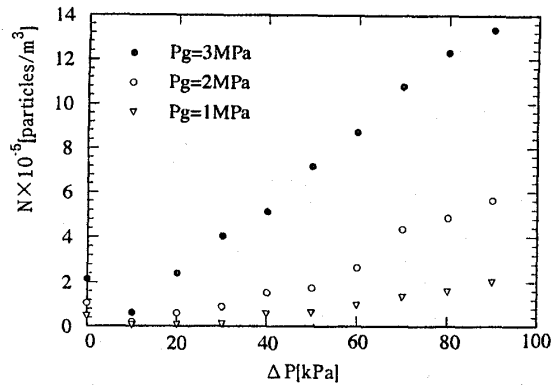


Fig.4 Relation between decompression ΔP and bubble number density N (CO_2)

図4は、供試ガスとして二酸化炭素を加圧溶解させたときの気泡数密度 N と減圧度 ΔP との関係を加圧力 P_g をパラメータとして示す。図より、いずれの加圧力 P_g とも、減圧度が増加するにつれて気泡数密度 N は大となることがわかる。その傾向は、加圧力 P_g が大きいほど顕著となり、減圧の進行に伴い、 $P_g = 1, 2$ および 3MPa の気泡数密度 N の差は大となる。

$P_g = 1\text{MPa}$ の場合、減圧大気圧条件下 ($\Delta P = 0$) において気泡群が若干観察されるが、 $10\text{kPa} \leq \Delta P \leq 30\text{kPa}$ の範囲では減圧度が増加しているにもかかわらず、気泡群は、ほとんど観察されない。その後、 $\Delta P = 40\text{kPa}$ で気泡群が観察され、 $\Delta P = 90\text{kPa}$ まで気泡数密度 N は徐々に増加する。 $P_g = 2\text{MPa}$ においては、減圧大気圧条件下 ($\Delta P = 0$) で気泡群が観察され、 $\Delta P = 10\text{kPa}$ で気泡数密度 N は減少し、その後、 $\Delta P = 90\text{kPa}$ まで減圧度の増加に伴い、緩慢に増加している。 $P_g = 3\text{MPa}$ の時も同様に、減圧大気圧条件下 ($\Delta P = 0$) で気泡群が観察され、 $\Delta P = 10\text{kPa}$ で気泡数密度 N は減少しているが、それ以降 $\Delta P = 90\text{kPa}$ まで N の値は増加している。この気泡数密度 N の増加率は他の加圧条件と比較して、顕著に大となる。例えば、 $\Delta P = 40\text{kPa}$ で気泡数密度 N を比較してみると、 $P_g = 3\text{MPa}$ の N の値は、 $P_g = 1\text{MPa}$ のときの約8倍、 $P_g = 2\text{MPa}$ の約3倍となる。減圧度が2倍になる、 $\Delta P = 80\text{kPa}$ では、 $P_g = 1\text{MPa}$ における N の値の約7.5倍、 $P_g = 2\text{MPa}$ の約2.4倍となる。このような減圧度の増加に伴う気泡数密度 N の増加は、液中の溶存ガスの過飽和度が大きくなり、かつ減圧によるガス拡散現象の促進が要因となって、微細気泡の発生、および気泡成長率の増大につながったと考えられる。また、気泡数密度 N の値が大となる原因は、加圧力 P_g が大きいほど供試液体中溶存ガスの量は増加するためと考えられた。

3. 2 空気泡および二酸化炭素気泡の数密度の比較

図5には、 $P_g = 1\text{MPa}$ における気泡数密度 N と減圧度 ΔP との関係を空気と二酸化炭素の場合について対比している。図より、どちらの供試ガスにおいても減圧度が大きくなるにつれ、気泡数密度 N が増加する傾向を示すことがわかる。空気の気泡数密度 N の値は、二酸化炭素に比べて低下する。いずれのガスにおいても、大気圧条件の $\Delta P = 0$ での気泡群が観察された後、 $10\text{kPa} \leq \Delta P \leq 30\text{kPa}$ の範囲では、気泡群は、ほとんど観察されない。 $\Delta P \geq 40\text{kPa}$ になると、気泡群

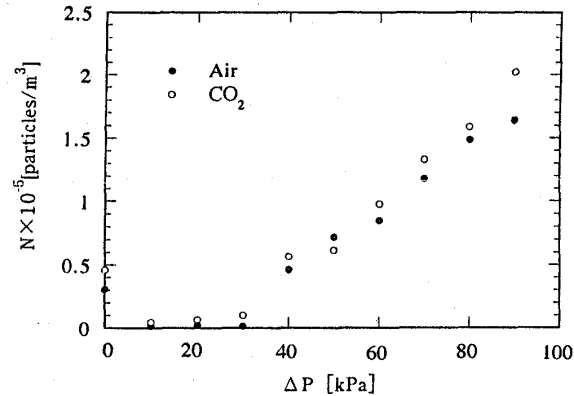


Fig.5 Comparison of number density between air bubble and CO₂ bubble ($P_g=1\text{MPa}$)

が発生し、その気泡数密度 N は ΔP の増加と共に徐々に増加する。また、 $\Delta P = 90\text{kPa}$ における二酸化炭素の気泡数密度 N は空気の場合に比べて、約 20% 増加している。二酸化炭素の気泡数密度 N が空気よりも大きくなる要因としては、液体中の溶存ガス量が大いことによると考えられる。

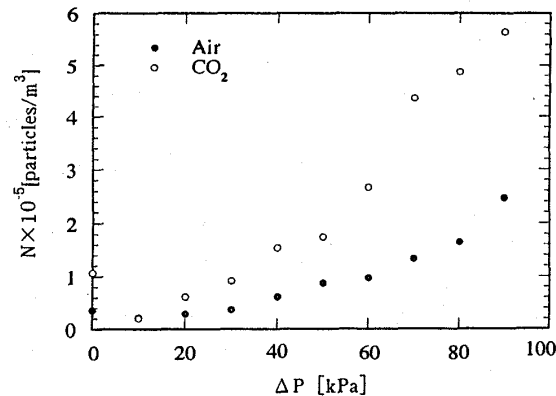


Fig.6 Comparison of number density between air bubble and CO₂ bubble ($P_g=2\text{MPa}$)

図 6 は、空気と二酸化炭素の気泡数密度 N を加圧力 $P_g = 2\text{MPa}$ の場合について対比している。図からわかるように、減圧過程が進むに従って、気泡数密度 N は空気、二酸化炭素共に増加する。空気の場合、 $\Delta P = 0$ の大気圧条件下で気泡群が観察され、 $\Delta P = 10\text{kPa}$ で気泡数密度 N の値は減少する。その後、 $\Delta P = 20\text{kPa}$ から $\Delta P = 90\text{kPa}$ の範囲での気泡数密度 N の値は緩慢な増加を示している。二酸化炭素の場合、 $\Delta P = 0$ の大気圧条件下で気泡群が観察された後、空気の場合と同様に、 $\Delta P = 10\text{kPa}$ で気泡数密度 N の値は減少するが、 $10\text{kPa} \leq \Delta P \leq 90\text{kPa}$ の範囲においては、気泡数密度 N は顕著な増加を示す。空気と二酸化炭素の気泡数密度 N を各減圧点で比較してみると、空気の場合は二酸化炭素よりも低下する。また、減圧度が大となるに従って、空気と二酸化炭素の気泡数密度 N の差は顕著に大となる。例えば、 $\Delta P = 40\text{kPa}$ の場合、二酸化炭素の気泡数密度 N は空気の約 3 倍、 $\Delta P = 80\text{kPa}$ では、約 2.6 倍の値を示す。以上のように、二酸化炭素の方が空気よりも気泡数密度 N が大となる要因は、同加圧力条件においても、供試液体中に溶解する二酸化炭素の量が空気よりも大であるためと考えられた。

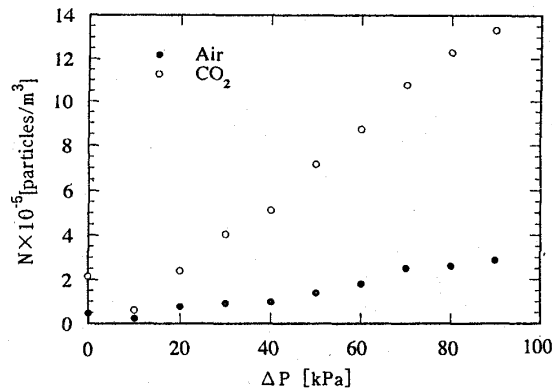


Fig.7 Comparison of number density between air bubble and CO₂ bubble ($P_g=3\text{MPa}$)

図7は、加圧力 $P_g = 3\text{MPa}$ での気泡数密度 N と減圧度 ΔP との関係を示す。図より、減圧度の増加と共に、気泡数密度 N は空気、二酸化炭素と共に増加することがわかる。空気の場合、大気圧 $\Delta P = 0$ で気泡が発生し、 $\Delta P = 10\text{kPa}$ で気泡数密度 N は減少し、その後、 $20\text{kPa} \leq \Delta P \leq 90\text{kPa}$ の範囲において緩慢な増加を示す。二酸化炭素では、大気圧 $\Delta P = 0$ で気泡が発生し、空気の場合と同様に、 $\Delta P = 10\text{kPa}$ で気泡数密度 N の値は減少する。その後、 $20\text{kPa} \leq \Delta P \leq 90\text{kPa}$ まで、気泡数密度 N の増加率は顕著に大となる。また、各減圧点での気泡数密度 N の値は、二酸化炭素の方が空気よりも高い値を示し、減圧が進むに従って、二酸化炭素と空気との気泡数密度 N の値の差は顕著となる。これらの供試液体を比較してみると、 $\Delta P = 40\text{kPa}$ における二酸化炭素の気泡数密度 N は空気の約5倍、 $\Delta P = 80\text{kPa}$ では、約4.5倍の値を示す。このように、気泡数密度 N が供試気体の種類により異なる結果を生じるのは、二酸化炭素と空気の液体に対する溶解度に差異があるためと考えられる。本実験では、供試液体 $5 \times 10^{-3}\text{m}^3$ 供試気体 500kPa を圧送入すが、水中へのガスの溶解度から算出すれば、空気の場合、溶存ガス量は約 $0.475 \times 10^{-6}\text{m}^3$ 、二酸化炭素では約 $22 \times 10^{-6}\text{m}^3$ となる。

3. 3 気泡数密度と最大圧力との関係

図8は、気泡数密度 N と最大圧力比 P_R との関係を空気と二酸化炭素の場合について比較する。

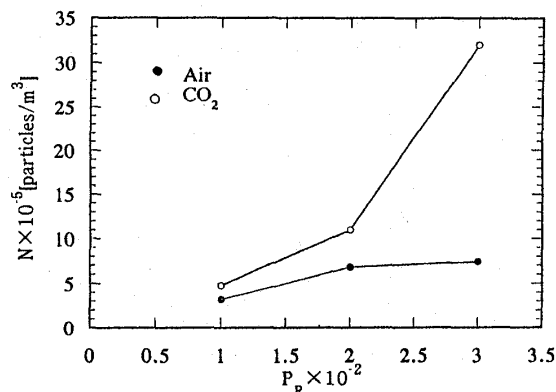


Fig.8 Relation between bubble number density N and ratio of maximum pressure P_R

最大圧力比は $P_R = P_g/P_d$ であり、 P_d は最大減圧値を示し、その大きさは $P_d = 10\text{kPa}$ である。図

からわかるように、数密度 N は最大圧力比 P_R と共に増加傾向を示す。圧力比 P_R が $10^2 \sim 3 \times 10^2$ に増加すると、気泡数密度 N は、緩慢に増加し、数密度 N の値は約 2.6 倍となる。二酸化炭素においては、その増加傾向は著しく、 $P_R = 3 \times 10^2$ の気泡数密度 N の値は、 $P_R = 10^2$ の場合の約 6.4 倍となる。圧力比が大きい方が、気泡の成長は促進される。

3. 4 発生する気泡の大きさの分布

図 9 は、各圧力条件下で発生した気泡の数密度 N と気泡直径 d との関係を示す。供試ガスは空

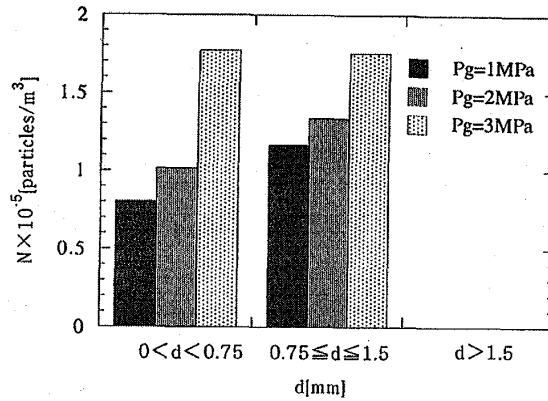


Fig.9 Histogram of the size of generated bubbles
(air, $\Delta P = 90\text{kPa}$)

気、減圧度 $\Delta P = 90\text{kPa}$ である。図より、いずれの加圧力 P_g とともに、 $0 < d < 0.75\text{mm}$, $0.75\text{mm} \leq d \leq 1.5\text{mm}$ の気泡が発生しており、 $d > 1.5\text{mm}$ の気泡は発生しないことがわかる。 $0 < d < 0.75\text{mm}$ の範囲の気泡について見ると、 $P_g = 1\text{MPa}$ に比べて、 $P_g = 2\text{MPa}$ になると N の値は約 20% 増加、 $P_g = 3\text{MPa}$ では約 2.3 倍増大している。また、 $0.75\text{mm} \leq d \leq 1.5\text{mm}$ の気泡サイズの気泡数密度 N を比較してみると、 $P_g = 3\text{MPa}$ の気泡数密度 N の値は、 $P_g = 1\text{MPa}$ の場合の約 1.4 倍、 $P_g = 2\text{MPa}$ の約 1.3 倍を示す。なお、 $d > 1.5\text{mm}$ の範囲の気泡は観察されない。 $P_g = 1\text{MPa}$ の条件下では、 $0.75\text{mm} \leq d \leq 1.5\text{mm}$ の気泡数密度 N は $0 < d < 0.75\text{mm}$ の気泡に比べて、約 1.5 倍となるが、 $P_g = 3\text{MPa}$ では気泡数密度の差は見られない。

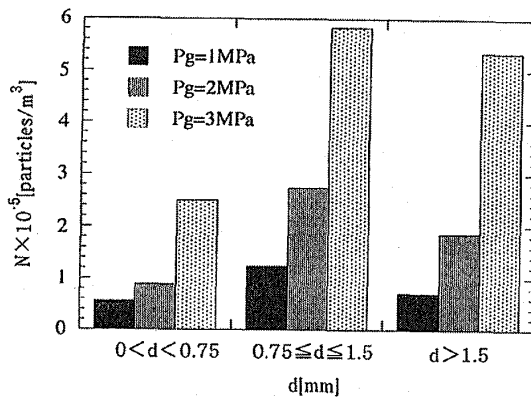


Fig.10 Histogram of the size of generated bubbles
(CO_2 , $\Delta P = 90\text{kPa}$)

図 10 は、気泡数密度 N と発生する気泡径の関係をヒストグラムで示す。供試ガスとして二酸化炭素、減圧度は $\Delta P = 90\text{kPa}$ の条件である。気泡直径が $0 < d < 0.75\text{mm}$ の範囲では、いずれのパラメータでも気泡は発生しており、加圧力が大きいほど、気泡数密度 N の値は大となる。 $P_g = 3\text{MPa}$ の気泡数密度 N の値は、 $P_g = 1\text{MPa}$ の場合の約 8 倍、 $P_g = 2\text{MPa}$ の約 2.4 倍を示す。気泡直径が $0.75\text{mm} \leq d \leq 1.5\text{mm}$ の場合でも同様に、加圧力が大きいほど、気泡数密度 N の値は大となる。 $P_g = 3\text{MPa}$ の気泡数密度 N の値は、 $P_g = 1\text{MPa}$ の場合の約 5 倍、 $P_g = 2\text{MPa}$ の約 2.5 倍の値を示す。気泡直径 $d > 1.5\text{mm}$ でも、上記二つの加圧力の場合と同様に、 $P_g = 3\text{MPa}$ の気泡数密度 N の値が最大となる。その大きさは、 $P_g = 1\text{MPa}$ のときの約 6.5 倍、 $P_g = 2\text{MPa}$ の約 2.6 倍の値になる。

次に、各加圧力における気泡数を比較してみると、 $P_g = 1\text{MPa}$ では、 $0.75\text{mm} \leq d \leq 1.5\text{mm}$ の気泡生成率が高く、 $0 < d < 0.75\text{mm}$ 、 $d > 1.5\text{mm}$ の気泡数の約 2 倍の値を示す。 $P_g = 2\text{MPa}$ においては、 $0.75\text{mm} \leq d \leq 1.5\text{mm}$ の気泡数密度 N の値が最大となる。次いで、 $d > 1.5\text{mm}$ 、 $0 < d < 0.75\text{mm}$ の気泡が多数出現している。 $P_g = 3\text{MPa}$ では、 $0.75\text{mm} \leq d \leq 1.5\text{mm}$ の気泡の出現が最大となる。 $d > 1.5\text{mm}$ の気泡数もかなり多い値を示している。 $0 < d < 0.75\text{mm}$ の気泡は、これら二つの範囲の気泡数と比較して、約 1/2 の生成率に留まっている。このように、大加圧力の方が、気泡数密度 N が大きくなる要因は、供試液体中に含まれるガスの量が多いこと、およびガスの拡散促進によると考えられた。また、 $0.75\text{mm} \leq d \leq 1.5\text{mm}$ の気泡の出現が最大となるのは、気泡の表面張力および供試液体中の溶存ガス量に関係していると考えられた。

3. 5 気泡群の様相の観察

図 11 は供試気体空気、 $P_g = 3\text{MPa}$ において発生した気泡群の様相を示す。図(a)は減圧度 ΔP

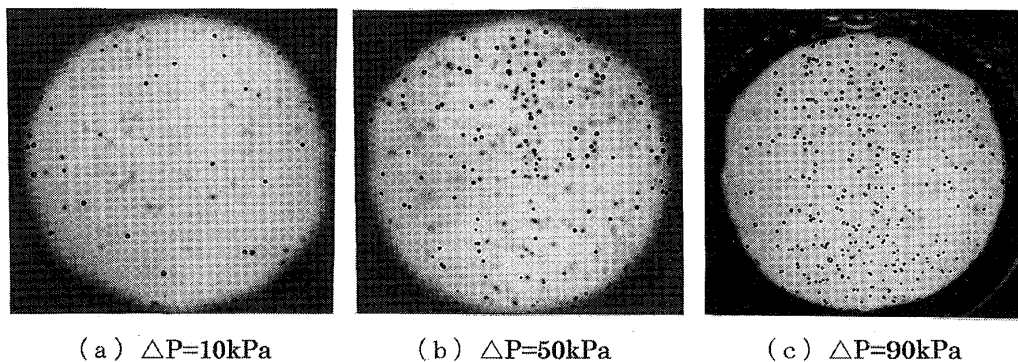


Fig.11 Cloud of air bubbles

$= 10\text{kPa}$ であるが、直径約 1mm の球状気泡が観察される。減圧度が $\Delta P = 50\text{kPa}$ へと大きくなる図(b)では、気泡数は顕著に増加しているが、気泡径の増加はあまりみられない。さらに減圧度が進行し、最大減圧値となる $\Delta P = 90\text{kPa}$ の図(c)に達すると、気泡数は、 $\Delta P = 50\text{kPa}$ の場合よりも、若干増加していることがわかる。気泡径は $0.5 \sim 1.5\text{mm}$ 程度のものが観察される。

図 12 には供試気体二酸化炭素、加圧力 $P_g = 3\text{MPa}$ において、発生した気泡群の様相を示す。前図と同様、図(a)から図(c)へと減圧度が増大する。減圧度 $\Delta P = 10\text{kPa}$ の図(a)では、球状気泡が観察され、その気泡サイズは直径 $0.5\text{mm} \sim 1\text{mm}$ 程度であるが、約 1.5mm の気泡も観察される。図(b)の $\Delta P = 50\text{kPa}$ の条件下では気泡数は顕著に大となる。このとき観察される気泡径は $0.5 \sim$

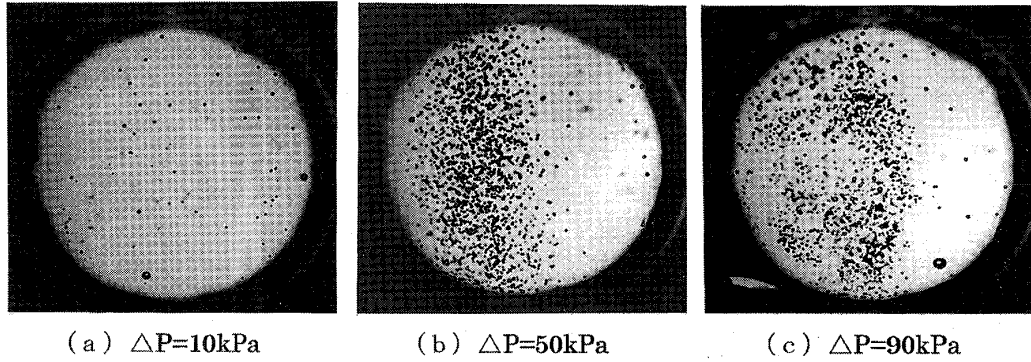
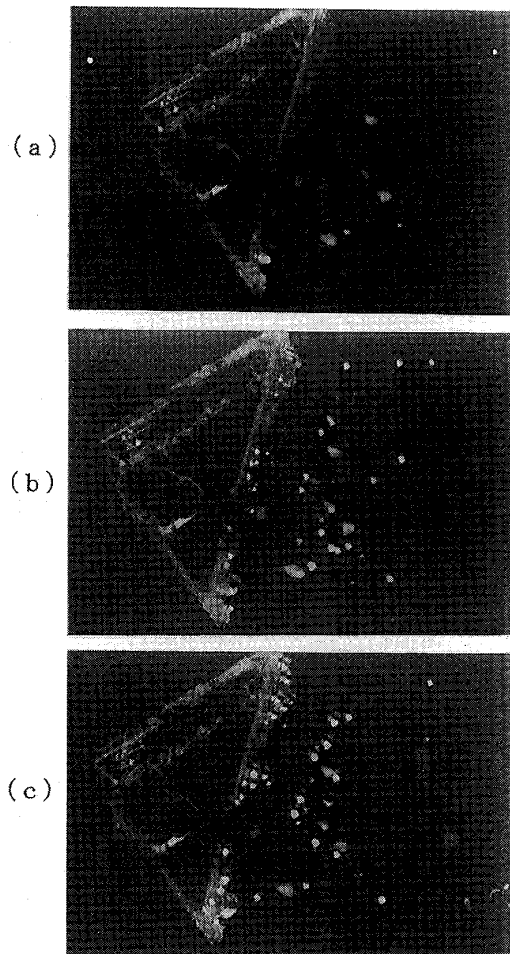


Fig.12 Cloud of CO₂ bubbles

1.5mm 程度である．さらに減圧度が $\Delta P = 90\text{kPa}$ と大きい図(c)では，気泡数はさらに増加し，気泡径もより成長している．

3. 6 流動する液中で生成する微細空気泡群の観察

これまでのキャビテーション現象，気液二相流現象などの観察、可視化の実験では $10\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ の微細気泡の観察はほとんどされておらず，知見は非常に少ない．図 13 には，三角柱背後で生成する微細気泡群の様相を微細気泡観察装置で得た結果を示す．実験条件は，加圧力 $P_g = 1\text{MPa}$ ，平均流速 $v = 2.3\text{m/s}$ ，供試気体は空気である．液体は図の左から右方向へと流れ，図の三角柱の底辺の長さは 3mm である．図(a)～(c)の時間間隔は各 0.5 秒である．



図(a)は試験開始直後に相当しており，三角柱背後に，わずかに微細気泡が観察される． 0.5 秒後の図(b)においては，直径約 $20 \sim 100\mu\text{m}$ の微細気泡が観察され，その数も増加している．また，三角柱の壁端部にも気泡の形成が見られる．さらに時間が進み，図(c)になると，三角柱背後で生成された気泡は図(b)で観測される気泡よりも成長しており，気泡サイズが約 $40 \sim 200\mu\text{m}$ の球状気泡となって下流に向かって流れている．このような気泡生成のメカニズムとしては以下のように考察できる．流体の流れは，三角柱後端部にて剥離し，渦を発生しているものと考えられる．剥離域においては，流れのよどみ状態が維持されるため生成気泡は流出しにくく，かつ界面張力の作用により，三角柱壁面に付着し成長する．

Fig.13 Behavior of microbubbles
($v=2.3\text{m/s}$, $P_g=1\text{MPa}$)

3. 7 流動条件下における微細気泡の成長に及ぼす加圧力の影響

微細気泡観察装置を用いてチャンネル内三角柱エキサイター背後において生成・成長する気泡の観察を行うことにより得られた、微細気泡の成長過程の結果を図14に示す。ただし、供試

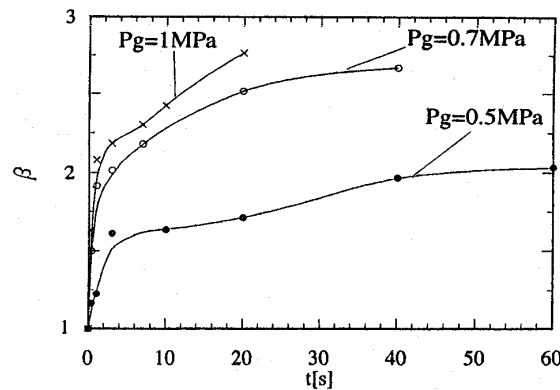


Fig.14 Effect of additional pressure P_g on the growth of microbubbles
($v=0.5\text{m/s}$, $d_o=24\mu\text{m}$)

気体は空気、気泡初期直径 $d_o = 24\mu\text{m}$ 、平均流速 $v = 0.5\text{m/s}$ である。図の縦軸は気泡サイズ β ($= d/d_o$, d : 気泡直径, d_o : 気泡初期直径), 横軸は経過時間 $t(\text{s})$ を表している。

図からわかるように、気泡の成長は $0 < t \leq 3\text{s}$ の初期段階において急峻な立ち上がりを示している。その成長率は加圧力 P_g が大きいほど大となる。例えば、 $t = 3\text{s}$ で比較してみると、 $P_g = 1\text{MPa}$ の β の値は、 $P_g = 0.5\text{MPa}$ の約2倍、 $P_g = 0.7\text{MPa}$ の約1.2倍の値を示している。また、いずれの加圧条件下においても、 $t > 3\text{s}$ の範囲で気泡の成長はより緩慢な傾向が見られる。すなわち、気泡は、発生した直後に顕著な成長をするが、 $t > 3\text{s}$ の範囲では、比較的ゆっくりと成長することがわかる。

これらの現象を生む要因としては、成長の初期における微細気泡周りのガス濃度勾配が大きいために、気泡の拡散現象が促進され、気泡直径の増大につながっているものと考えられる。また、加圧力 P_g が大きいほど、供試液体に含まれるガス含有量が大きくなるため、気泡成長が促進しているものと思われる。

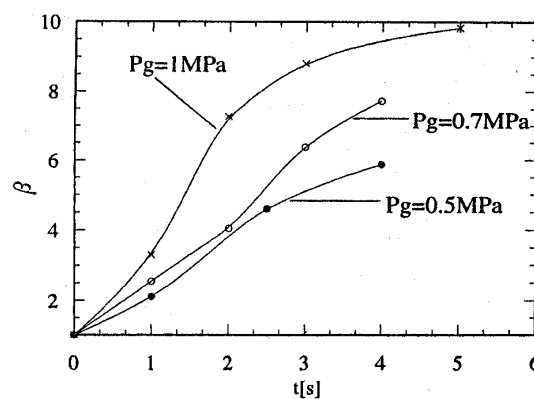


Fig.15 Effect of additional pressure P_g on the growth of microbubbles
($v=1\text{m/s}$, $d_o=24\mu\text{m}$)

図 15 には平均流速 $v = 1\text{m/s}$ における気泡径の無次元量 β と時間 t との関係を示す．ここでは、気泡初期直径 $d_0 = 24\mu\text{m}$ 、加圧力 $P_g = 0.5 \sim 1\text{MPa}$ である．図より、時間の増加に伴い β の値は増加し、その増加率は加圧力 P_g の値が大きいほど大となることからわかる． $P_g = 1\text{MPa}$ では、 $t < 2\text{s}$ で気泡の成長率は大きい、 $2\text{s} \leq t < 5\text{s}$ では気泡の成長は、緩慢となり、 $t = 5\text{s}$ における気泡直径は最大値 $\beta \doteq 10$ に達する． $P_g = 0.7\text{MPa}$ における気泡の成長はほぼ線形的であり、 $t = 2\text{s}$ で気泡初期直径の約 4 倍、 $t = 4\text{s}$ で約 8 倍の大きさになる． $P_g = 0.5\text{MPa}$ では、気泡の成長率はやや低下し、 $t = 4\text{s}$ で気泡初期直径の値の約 6 倍の大きさになる．

ヘンリーの法則によれば、加圧力に比例して、水中に加圧溶存する空気含有量が増加する．従って、加圧力 P_g の値が大きいほど飽和濃度との差が大きくなるため、拡散効果が強く現れ、気泡の成長率を大きくする原因となっている．

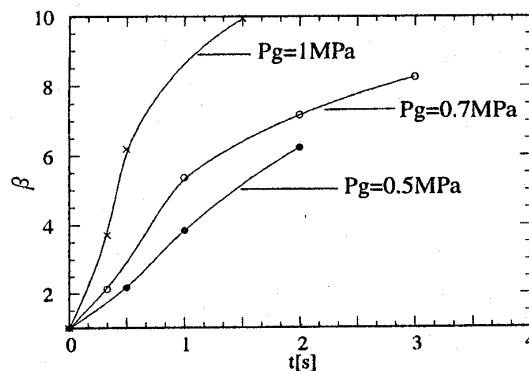


Fig.16 Effect of additional pressure P_g on the growth of microbubbles

図 16 は平均流速 $v = 2.3\text{m/s}$ 、加圧力 $P_g = 0.5 \sim 1\text{MPa}$ 、気泡初期直径 $d_0 = 24\mu\text{m}$ における気泡の成長過程を示す．図からわかるように、 $P_g = 1\text{MPa}$ での気泡の成長は、 $t < 0.6\text{s}$ まで急峻な立ち上がりを示し、その後、 $0.6\text{s} \leq t < 1.5\text{s}$ で気泡の成長率はやや低下するものの、 $t = 1.5\text{s}$ での気泡サイズは $\beta \doteq 10$ となる． $P_g = 0.7\text{MPa}$ での気泡成長は、 $t < 1\text{s}$ まで気泡成長率は比較的大となるが、その後緩慢な成長を示す．比較的低圧条件の $P_g = 0.5\text{MPa}$ では、 $P_g \geq 0.7\text{MPa}$ の結果と比べて、気泡成長率は低下している．いずれの加圧条件下においても、 $t < 1\text{s}$ で気泡の成長率が大となる傾向がみられる． $t = 1\text{s}$ での $P_g = 1\text{MPa}$ の気泡直径の β の値は、 $P_g = 0.7\text{MPa}$ の値の約 1.6 倍、 $P_g = 0.5\text{MPa}$ の約 2 倍の値を示す．

4. 結 論

新エネルギー開発研究の一つとして注目されている圧縮空気貯蔵・ガスタービン発電システムにおいて発生するシャンペン現象の解明、および二酸化炭素溶解法に関連して実験研究を行った．

ガス過飽和液体生成・試験装置を試作し、液圧力差によって生ずる静止水中の発泡現象に関する基礎実験を行った．次に、三角柱をエキサイターとするチャンネル型測定部、流量制御部等を付設し、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) 加圧力 P_g が大きいほど液体へのガス溶解量が増大し、発生する気泡の数密度は大となる．

- (2) 減圧度 ΔP の増加に伴って気泡数密度が増大する．これは、微細気泡が減圧に伴って成長すること、およびガス過飽和度が大きくなり、ガスの拡散現象が促進されたことに起因する．
- (3) 二酸化炭素は空気に比べて、水中への溶解量が大となるため、気泡数密度は有意に増加する．
- (4) 供試ガスが空気の場合、直径 $0.5\text{mm} \leq d \leq 1.5\text{mm}$ の大きさの気泡が観察される．二酸化炭素の場合、直径 $0.5\text{mm} \leq d \leq 1.5\text{mm}$ の大きさの気泡数は空気の場合に比べて増加し、さらに $d > 1.5\text{mm}$ の球状気泡も多数観察される．
- (5) ガス過飽和液体の流れは、三角柱後端部にて剥離し、その際、直径約 $20 \sim 100\mu\text{m}$ の微細空気泡が生成する．
- (6) 微細空気泡の成長は、 $0.6\text{s} < t < 3\text{s}$ 程度の短時間内で促進され、その成長速度は加圧力 P_g が大きいほど増加する．
- (7) 流速が 0.5m/s から 2.3m/s まで大きくなると、空気泡の成長率は、約4倍増加する．高速流域では、気泡壁面近傍におけるガス濃度勾配の高い状態が維持され、その結果、ガスの質量移動量が増大するものと考えられた．

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．

文 献

- (1) 総務庁統計局：世界の統計，大蔵省印刷局，1995．
- (2) 科学技術庁：科学技術白書，大蔵省印刷局，1998．
- (3) 鈴木・伊藤：エネルギー貯蔵システム，エネルギー・資源学会，1992，pp.15-41．
- (4) 飯島：最近のCAESの研究動向，——CAES-G/T発電の研究動向と技術開発成果——，新エネルギー財団，1996，pp.27-33．
- (5) 幸田：ACC-CAES発電システムの性能予測，——CAES-G/T発電の研究動向と技術開発成果——，新エネルギー財団，1996，pp.35-49．
- (6) Pollak R.,: Status of First U.S.CAES Plant, EPRI Journal, No.12 1988, pp.49-52.
- (7) 沢田：CAES-G/T発電パイロットプラントの現状，——CAES-G/T発電の研究動向と技術開発成果——，新エネルギー財団，1996，pp.69-130．
- (8) 林：新構想の深部の軟岩での地中タンク（水没方式）の工夫の概念，電力土木，No.219，1989，pp.27-45．
- (9) 辻野・島・藤川：減圧した水中におけるガス性キャビテーションの発生に関する研究，東北大学流体科学研究所報告，Vol.15，1994，pp.1-9．
- (10) 辻野・楠瀬：シャンペン現象に関する気泡力学的解明，混相流シンポジウム論文集，Vol.13，1994，pp.277-280．
- (11) 田中：電力中央研究所・水理部における二相流研究，混相流，Vol.10，No.3，1996，pp.309-312．
- (12) 那須川：CAESガスタービンの動的シミュレーション，——CAES-G/T発電の研究動向と技術開発成果——，新エネルギー財団，1996，pp.51-68．
- (13) 綾：高圧水中における二酸化炭素の溶解挙動，伝熱研究，Vol.34，No.134，1995，pp.38-45．
- (14) 指宿：地球環境問題とその対策，——CO₂の分離回収，有効利用と隔離——，日本機械学会論文集，Vol.98，No.917，1995，pp.247-250．
- (15) 綾・山根：水中を上昇する単一CO₂液泡の溶解速度，混相流シンポジウム論文集，Vol.13，1994，pp.211-214．
- (16) 菊地・高橋・斎藤：垂直円管内気液二相流における炭酸ガスの吸収，混相流，Vol.10，No.3，1996，pp.282-285．