静置水の圧力通減によるキャビテーションの初生* (水中空気含有度と水温の影響)

松 浦 良 紀^{*1}, 谷 林 英 毅^{*2}

Cavitation Inception in Still Water Caused by Gradually Decreased Static Pressure (Effects of Air Content and Temperature in Water)

Yoshinori MATSUURA, Hidetake TANIBAYASHI

Cavitation is principally considered to occur when the pressure is reduced to a certain critical value and is maintained for a certain duration. The present study is therefore intended to investigate an extreme case of maintaining the low pressure for sufficiently long duration. To do this, the pressure in a sealed water container is gradually lowered so as to produce cavitation. The air content and the temperature of the water are systematically varied. The results of the investigation can be summarized as follows. (1) The pressure at the cavitation inception is nearly equal to or less than the published data of vapor pressure of water, and decreases with the air content in water. (2) The superheat increases with decreasing water temperature, and the difference between the vapor pressure and the inception pressure increases with the temperature.

Key Words: Cavitation, Bubble, Fluid Machinery, Vacuum Pump, Cavity, Air Content, Boiling, Reduced Pressure

1. 緒 言

種々の流体機械などに生じるキャビテーションの初生因子として、気泡核(キャビテーション核)の存在、飽和蒸気圧以下の十分低い圧力、キャビテーションの成長時間すなわち低圧の持続時間が挙げられる⁽¹⁾。さらに、この他の支配因子として液体中の気体溶解量、特に空気含有量が挙げられる^{(2)~(6)}。これまでにキャビテーション初生に関する多くの研究が報告されているが、低圧とその持続時間の関係について明らかにされていない。よって、著者らは、キャビテーションの初生機構を解明することを目的として、低圧とその持続時間の影響について調査することにした。

さて、既存の種々のキャビテーション実験について、キャビテーションの発生可能な低圧の持続時間を概算してみると、数十 μ sから数十msの範囲である。よって、この範囲を含めた数 μ sから数十秒の範囲の持続時間について実験・調査を行うことにし、既報^{(7),(8)}では、これらの解明の第一歩として、静止水中において μ sのオーダーで低圧とその持続時間を変化させることがで

きる装置を試作して研究を行った。

引き続き、本報では、低圧の持続時間が数十秒以上の場合の研究を行う。すなわち、空気含有度および水温を調整した密閉容器内の静止液体を大気圧から減圧してキャビティを発生させ、そのときの圧力ならびに水温の計測を行うとともに、キャビティの発生状況を観察した。本実験は、静止液体を対象としているので、流れ場の実験のように気泡核や微小粒子の回流の影響がなく、供試液体が少量で済むため、温度(飽和蒸気圧の変化)などの物性や液体中の溶解空気量の調整など供試液体の条件を容易に管理できるなどの理由から採用することにした。

すなわち、著者らは、先に報告⁽⁹⁾した μ sオーダーでの圧力変化に対する研究成果と本報の成果とを統合することにより、ポンプや船用プロペラなどの流体機械、管路や水路などの流れ場で生じるキャビテーションの発生機構の解明を目指している。

2. おもな記号

d_n : 気泡核の直径

n : キャビティ初生回数

n_0 : 全実験回数

N_n : 気泡核の数密度分布

* 原稿受付 1998年8月3日。

^{*1} 正員, 玉川大学大学院 (☎ 194-8610 町田市玉川学園6-1-1)。

^{*2} 正員, 玉川大学工学部。

E-mail: ura@eng.tamagawa.ac.jp

- f_p : キャビティ初生率 $= n/n_0 \times 100$
 p_i : キャビティ初生時の圧力
 p_v : 飽和蒸気圧
 p_e : 蒸気圧の計測値
 Δp : 圧力差 $= p_v - p_i$
 T_e : 蒸気圧計測時の水温
 T_i : キャビティ初生時の水温
 T_0 : 実験水槽の水温
 T_v : 飽和蒸気圧に対する水温 (飽和温度)
 T_w : 供試水の温度
 ΔT : 過熱度 $= T_i - T_v$
 α : 空気含有量 (大気圧下)
 α_s : 飽和空気量 (大気圧下)
 α/α_s : 空気含有度

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置 図1に実験装置の概略を示す。本装置は密閉された試験容器、真空ポンプ、圧力計、実験水槽、恒温水槽、蒸気用の冷却器から構成されている。供試水の容積は約 30 cm^3 とし、その温度 T_w を恒温水槽によって調整して、真空ポンプ (到達圧力約 1 kPa) で圧力を低下させてキャビティを生じさせる仕組みになっている。試験容器は内壁が清浄な直径 30 mm 、全長 200 mm 、全容積量約 140 cm^3 のバイレックスガラスの試験管を用いている。供試水の温度 T_w は、調温時の試験容器壁面への気泡の付着を防ぐために、後述 (4.2 節) の方法により調整した。

キャビティ初生時の圧力 p_i の計測は U 字管水銀マンメータを用いて大気圧 (フオルタン型水銀気圧計により計測) との差より求め (モニター用としてブルドン管圧力計を使用)、そのときの水温 T_i は棒状精密水銀温度計を用いて計測した。本装置には、蒸気による圧力の計測誤差やポンプの性能低下を抑えるために、試

験容器と計測器および真空ポンプの間に蒸気液化用の蛇管式冷却器を取付けてあり、計測器と真空ポンプへの蒸気の流入を抑えるようにしてある。

この装置によって、供試水の水温 T_w を常温 (約 20°C) から約 50°C の範囲で 10°C おきに、また、水中の空気含有度 α/α_s (3.2 節参照) を $0, 0.6, 1.0$ に調整し、供試水のキャビティ初生時の圧力 p_i を測定した。ここで、供試水の温度 T_w の上限は溶存酸素計の測定範囲の上限から 50°C としている。また、キャビテーションの観察は高速度ビデオカメラ (ナック社製) を用い、録画速度 4500 こま/s で撮影した。

3.2 空気含有度の調整と計測 水中の空気含有度 α/α_s は減圧脱気法により調整した。すなわち、供試水を密閉容器に入れ、常温 (約 20°C) において真空ポンプで減圧し、さらに同時に振とう器でかくはんして脱気を促進した。この操作の時間を変化させて、所望の空気含有度 α/α_s の水を作製した。ここで、空気含有度 α/α_s は水の飽和空気量 α_s に対する空気含有量 α の割合を示す。以下に示す空気含有度 α/α_s は各実験の供試水の温度 T_w における飽和空気量 α_s の値を用いている。

空気含有量 α の測定は溶存酸素計 (東亜電波工業社製 DO-14P) による供試水中の溶存酸素量の測定結果と、Van Slyke 装置の原理を用いて製作した空気含有量測定装置による空気含有量 α の測定結果から両者の相関をあらかじめ求めておき、計測が簡便な溶存酸素計により行った。この空気含有量 α と既存の飽和空気量 α_s とから空気含有度 α/α_s を求めた。

3.3 実験手順 実験は以下の手順により行った。
 (1) 供試水を十分静置後、水温調整用の容器に静かに入れ、恒温水槽により所望の温度 T_w に昇温する。このとき、減圧中に供試水と試験容器との界面に温度差が

Fig. 1 Test set up

生じないようにするために、同時に空の試験容器も昇温させておく。

(2) 供試水調温後、3・2 節の方法により水中の空気含有度 α/α_s を調整し、水温 T_w と空気含有量 α を計測する。計測値が所望の値とならない場合は再び調整する。

(3) 水温 T_w および空気含有量 α を計測後、内壁が清浄な試験容器に供試水を静かに入れ、ゴム栓で密閉する。

(4) 供試水封入後、試験容器を供試水の温度 T_w よりも常に $5\sim 10^\circ\text{C}$ 低い温度 T_0 に保持した実験水槽に入れ、直ちに減圧してキャビティ初生時の圧力 p_i ならびに水温 T_i を計測し、その様相を高速ビデオカメラで観察する。

3・4 実験上の留意点 本実験を行うにあたっては、空気含有度 α/α_s を一定に保つために供試水の取扱いや、実験条件を統一するために試験容器の壁面の状態について、十分注意する必要がある。ここでは、これらに関する実験上の留意点について述べる。

まず、試験容器は市販品の新品の試験管を各実験ごとに使用し、その内部の汚れを事前に除去するため、供試水に触れる部分はすべてアセトンによって十分洗浄した。さらに、各実験の直前には、供試水と同じ水により十分すすぎ洗いを行った。装置内部の供試水は外部の大気に触れることはないの、実験途中での外部からの異物質の混入は防止されている。

次に、供試水については、精製した蒸留水を十分静置して実験に供した。空気含有度 α/α_s を減少させた供試水は、大気圧下では時間の経過とともに空気含有度 α/α_s が増加（飽和に近づく）するため実験ごとに計測を行って、変化量が所望の含有度に対し $+0.05$ 未満に収まる範囲にして実験を行った。

供試水の空気含有度 α/α_s を極度に減少させるとキャビティが生じない場合があるが、実験条件を統一するために低圧の持続時間を一定とし、減圧開始から約 70 s で最低圧に到達するようにして、その後 20 s 間最低圧力で保持した。

4. 実験結果および考察

本実験方法で、供試水を減圧すると、次のような現象が観察される。

- (1) 固液界面（試験容器内の壁面または、温度計の表面上）よりキャビティが生じ、界面でそれが保持された状態となる。
- (2) 固液界面で生じたキャビティが、減圧とともに徐々に成長し、固体面より離脱して静かに浮上する。
- (3) 固液界面で生じたキャビティが、蒸発を伴って急

成長する。

- (4) 水中よりキャビティが生じ、急激に成長する（すなわち突沸となる）。

本報の対象となるものはこれらのうち、(3)と(4)の現象である。以後、この現象をキャビティの初生とし、それが生じた時点をキャビティ初生時、また、このときの圧力をキャビティ初生時の圧力 p_i と呼ぶことにする。(1), (2)の現象は空気含有度 $\alpha/\alpha_s = 1.0$ の供試水を用いた実験において多く観察され、その発生時の圧力は飽和蒸気圧 p_v よりも高く、(3), (4)の現象に比べ格段にキャビティの成長が遅いことから、単なる浮上気泡とみなし、対象外とすることにした。

4・1 蒸気圧の計測 本実験装置の一般性を検出するために、一般的な実験方法⁽¹⁰⁾に従って、各温度ごとに、空気含有度 $\alpha/\alpha_s = 1.0$ の供試水（飽和水）を用いて蒸気圧 p_e および水温 T_e を計測した。ここで、蒸気圧 p_e および水温 T_e は、気化時の吸熱による供試水の温度降下の影響を考慮し、沸騰を定常状態（連続してキャビティが発生）に保持して、圧力と温度が一定となった時点で計測した。標準の飽和蒸気圧曲線⁽¹¹⁾と比較し、計測結果を図 2 に示す。図 2 より、計測した蒸気圧は実線で示す標準の飽和蒸気圧曲線とほぼ等しい値となっている。この結果から、本装置による蒸気圧 p_e の計測に問題ないと考え、これをキャビティ初生時の圧力 p_i の計測に適用することにした。

4・2 壁面および水中から生じるキャビティ キャビテーション発生時に液相において形成されるキャビティは固液界面の状態、すなわち固液界面における壁面核の影響が問題となることが知られている⁽¹²⁾。本実験においても例外ではなく、試験容器の壁面核の影

Fig.2 Measurement of saturated vapor pressure p_e
($\alpha/\alpha_s = 1.0$)

響によって現象が異なることが観察された。しかしながら、壁面核を完全に除去するのは困難であり、現状ではその影響は避けられない。そこで壁面核の影響を低減させるために、試験容器を供試水の温度 T_w よりも低い水温 T_0 の水槽に入れて ($T_0 < T_w$)、試験容器壁面の温度を低下させ、壁面核の成長を鈍くすることにした。すなわち供試水の温度 T_w よりも試験容器の壁面の温度を低下させ、固液界面上における壁面核の成長を抑制し、水中からキャビティが生じるように実験の方法を改良した。

通常の方法および改良した方法によるキャビティ初生前後の様相 (水温 $T_w = 40^\circ\text{C}$ 、空気含有度 $\alpha/\alpha_s = 0$) を図 3 に示す。ここで、通常の方法とは、供試水の調温を直接試験容器を用いて行い、供試水の水温 T_w と同温度 ($T_w = T_0$) の恒温水槽を用いて実験を行う方法を示し、改良した方法とは、供試水を専用の容器で調温して試験容器に移し、供試水の温度よりも低い水温 ($T_0 < T_w$) の水槽を用いて行った実験方法を示す。図 3(a)は通常の方法、図 3(b)は今回改良した方法である。通常の方法では、供試水を昇温する時点で壁面上にキャビティが固着し、それが圧力の低下とともに成長・浮上するため、初めから存在していた遊離気泡が成長したものか、減圧により発生したキャビティかの判別が困難であった。図 3(b)に示す改良した方法では、壁面から生じるキャビティを抑制することができ、ほぼ水中から生じさせることが可能となった。また、初生時のキャビティは通常の方法に比べ、その数は少

Fig.3 Comparison of cavitation inception patterns
($T_w = 40^\circ\text{C}$, $\alpha/\alpha_s = 0$)

なく、初生後瞬時に急成長する。

図 4 は両者の方法を比較するために、 $\alpha/\alpha_s = 1.0$ の供試水を用い、キャビティ初生時の圧力 p_i を計測した結果である。図 4 より両者の結果は、実線で示す標準の飽和蒸気圧⁽¹¹⁾近傍にほぼ位置するが、通常の方法は、標準の飽和蒸気圧よりも高い圧力を示し ($p_v < p_i$)、飽和蒸気圧到達までにキャビティが生じる。一方、改良した方法は、飽和蒸気圧曲線上またはそれよりも低い圧力となり ($p_v \geq p_i$)、飽和蒸気圧 p_v に到達するまではキャビティは生じない。この事実、壁面核によってキャビティの初生が促進されることを示唆し、キャビティ初生時の圧力の計測に対する誤差の影響の一つとして大きく関わることを示す。

これらの結果からキャビティの初生に対して壁面核が支配因子の一つであり、その影響を抑制してキャビティ初生時の圧力 p_i を計測するには上記の改良した方法が有効な方法であるといえる。

4.3 空気含有度および水温の影響 上述のように供試水中の気泡核はキャビテーション初生に対して支配因子となるので、コールター・カウンター (コールター社製 Z1 型) により供試水中の核計測を行った。計測は $T_w = 10, 20, 30, 35^\circ\text{C}$ 、 $\alpha/\alpha_s = 0, 0.6, 1.0$ に変化させて計測した。ここで、核計測時の水温 T_w の上限はコールター・カウンターの計測範囲の上限から 35°C とした。図 5 に供試水の核分布を示す。縦軸は気泡核の数密度分布 N_n (ある核直径間の単位体積当たりの核の個数)、横軸は気泡核の直径 d_n (測定した核直径の上下限値の平均値) を示す。図 5 の核分布は核計測をそれぞれ 5 回行い、その平均値をとった。この測定結果から、核分布に対する水温 T_w および空気

Fig.4 Conventional vs. Present method
($\alpha/\alpha_s = 1.0$)

含有度 α/α_s の変化の影響はあまり認められず、核分布とそれらの相関は得られなかった。

図 6 に改良した方法によって観察したキャビティ初生時および定常的なキャビティ発生の様相を示す。図 6(a) は空気含有度 $\alpha/\alpha_s = 0$ 、図 6(b) は空気含有度 $\alpha/\alpha_s = 1.0$ を示し、水温はそれぞれ $T_w = 40^\circ\text{C}$ である。キャビティ初生時は両者にあまり変化はないが、キャビティ初生直後から定常状態に移移する過程において、空気含有度 α/α_s を極度に減少させると、キャビティの発生個数が減少し、キャビティの大きさ、あるいはその成長速度が著しく大となることを観察された。空気含有度 $\alpha/\alpha_s = 1.0$ の飽和の場合は、キャビティ初生直後に微小な気泡が多く発生し、それが成長して試験容器内を満し、定常状態に達する。このときのキャビティの発生個数は α/α_s を減少させたものと比較すると多いことが認められる。これらの結果は水とは異なる液

Fig.5 Number density distribution function N_n in water

Fig.6 Effect of air content on cavitation inception patterns

体ではあるが、Ward⁽¹³⁾, Mori⁽¹⁴⁾, Forest⁽¹⁵⁾らが行った結果と同様である。

次に、図 7 には空気含有度 α/α_s が異なる供試水のキャビティ初生時の圧力 p_i と水温 T_w の測定結果を示す。実線は飽和蒸気圧⁽¹¹⁾ p_v 、プロットは実験値を示している。図 7 から、すべての水温 T_w において空気含有度 α/α_s の減少とともにキャビティ初生時の圧力 p_i が低下しているのが認められる。

これらの結果からキャビティ初生時の圧力 p_i は、空気含有度 α/α_s によって変動し、その減少とともに低い p_i となり、このときのキャビティは瞬時に生じて爆発的に成長することがわかった。そしてこの後半の事実は、「水中に溶解する空気がキャビティの初生とその成長に大きく関与している」ことを示唆している。

さらに、詳細に空気含有度 α/α_s の影響を示すために、キャビティ初生時の水温 T_i における飽和蒸気圧 p_v からキャビティ初生時の圧力 p_i を減じて求めた差圧 Δp ($= p_v - p_i$) について図 8 に対比してみた。図 8 より、空気含有度 α/α_s の減少に伴い、差圧 Δp が増大していることがみてとれ、最大で $\Delta p = 3\text{kPa}$ となることが認められた。この傾向は水温 T_w が高いほど増大する傾向がある。一方、水温 T_w が低下すると、空気含有度 α/α_s が増加するほど差圧 Δp は減少する。すなわち、キャビティの初生は水温 T_w の低下と空気含有度 α/α_s の増加により安定的となる。

次に、水温の影響について示すために、キャビティ初生時の過熱度 ΔT について整理をしてみた。ここで、過熱度 ΔT はキャビティ初生時の圧力 p_i に相当する飽和温度 T_v を飽和蒸気圧曲線⁽¹¹⁾ から読み取り、キャビティ初生時の水温 T_i から飽和温度 T_v を減じて求めた (すなわち $\Delta T = T_i - T_v$)。図 9 にキャビティ初生時の水温 T_i と過熱度 ΔT の関係を示す。図 9 より、空気含

Fig.7 Effect of air content on cavitation inception pressure p_i

Fig.8 Effect of air content on difference of cavitation inception pressure p_i from vapor pressure p_v

Fig.9 Effect of air content on degree of superheat ΔT

Fig.10 Histogram of cavitation inception rate n

有度 α/α_s が減少すると過熱度 ΔT は大きくなることが見てとれ、その傾向は水温 T_i が低下するほど大きくなる傾向が認められる。

各実験条件ごとに、20 回実験を行い、キャビティ初生回数 n のヒストグラムについて整理した結果を図 10 に示す。破線はキャビティ初生時の水温 T_i の平均値における飽和蒸気圧 p_v である。図 10 より、キャビティ

の初生は空気含有度 α/α_s により変化することが認められる。すなわち、空気含有度が極度に小さい $\alpha/\alpha_s = 0$ はキャビティの初生回数が少なく、 $\alpha/\alpha_s = 0.6, 1.0$ では初生回数が多くなる。また、空気含有度 $\alpha/\alpha_s = 0$ の場合は初生回数が少ないために断定はできないが、全体的な傾向として、低い温度ほど飽和蒸気圧近傍でキャビティが初生していることが認められる。

Fig.11 Effect of air content on cavitation inception rate f_p

空気含有度 α/α_s が減少すると水温 $T_w = 30^\circ\text{C}$ よりも低い温度では、キャビティが生じない場合が多く、キャビティ初生時の圧力 p_i が計測できなかった。そこで、水温 $T_w = 30^\circ\text{C}$ 以下の空気含有度 α/α_s の影響を評価するために、キャビティ初生回数 n を全実験回数 n_0 ($= 20$) で除したものをキャビティ初生率 f_p ($= n/n_0 \times 100$) と定義し、水温 T_i および空気含有度 α/α_s の影響について整理した。キャビティ発生の有無は最低圧に到達後、約 20 s 間最低圧で保持して確認している。図 11 にキャビティ初生率 f_p について整理した結果を示す。図 11 中の温度はキャビティ初生時の水温 T_i である。空気含有度 $\alpha/\alpha_s = 0.6, 1.0$ のキャビティ初生率 f_p は、水温 T_i によらずほぼ一定値を示すが、 $\alpha/\alpha_s = 0$ においては急激な低下を示し、その傾向は水温 T_w が低下するほどより低くなる。これらの結果から、キャビティの初生に対して空気含有度 α/α_s は支配因子の一つであるといえ、 α/α_s の減少とともにキャビティ初生率 f_p が低下し、キャビテーションの発生に影響を及ぼすといえる。特に極度に小さい $\alpha/\alpha_s = 0$ においては、顕著な傾向を示す。

5. 結 論

キャビテーション初生に対する低圧の持続時間の影響を調べるために、持続時間が数十秒以上の場合のキャビティの初生条件を調べた。すなわち数十秒のオーダーの低圧の持続が可能な装置を用い、キャビティ初生時の様相の観察と圧力 p_i ならび水温 T_i の計測を行って、キャビティの初生に対する空気含有度 α/α_s と水温の影響を調べ、次のような知見を得た。

(1) 水中の空気含有度 α/α_s の減少とともに低下するキャビティ初生時の圧力 p_i を定量的に示し、 p_i が飽和

蒸気圧 p_v よりも低くなる ($p_v \geq p_i$) ことを確認した。

(2) 水中の空気含有度 α/α_s を減少させるとキャビティの発生個数は減少し、初生後のキャビティは飽和水 ($\alpha/\alpha_s = 1.0$) のそれよりも急激に成長する。

(3) 空気含有度 α/α_s が減少すると、飽和蒸気圧 p_v とキャビティ初生時の圧力 p_i との差 Δp ($= p_v - p_i$) は大きくなるが、この傾向は水温が増加するほど大きくなる。

(4) 過熱度 ΔT ($= T_i - T_v$) は空気含有度 α/α_s が小さいほど大きな値を取り、水温が低いほど増加する。

(5) キャビティの初生に対する試験容器内壁上の壁面核の影響を調べて抑制方法を検討した。

終わりに臨み、実験に関してご助言をいただいた玉川大学 小倉研治助教授に謹んで感謝の意を表す。また本研究の実験遂行において助力をしていただいた、当時玉川大学流体力学研究室の学部生諸君に謝意を表す。

文 献

- (1) 例えば加藤洋治, キャビテーション (増補版), (1990), 57, 横書店.
- (2) 沼知福三郎・椎名武, キャビテーション発生機構に関する一寄与 (第 1 報), 機論, 3-11, (1935), 177-181.
- (3) 沼知福三郎・黒川恒勝, 翼型のキャビテーション発生に対する空気含有量の影響, 機論, 5-19, (1939), 231-235.
- (4) 大場利三郎・金健泰・浦西和夫, 不飽和水中のキャビテーションの特異な挙動, 機論, 48-430, B (1982), 1025-1031.
- (5) Vukovic, Experiments on the Influence of the Air Content of Cavitation, Escher wyss. Mitt., 13-83, (1940).
- (6) 山崎卓爾, キャビテーション工学, (1983), 90, 日刊工業新聞社.
- (7) 松浦良紀・谷林英毅・小倉研治, インパルスキャビテーションに関する研究, 第 8 回キャビテーションに関するシンポジウム講演論文集, (1995-12), 85-88.
- (8) Tanibayashi, H., Ogura, K. and Matsuura, Y., On the Cavitation Occurring at The Bottom of an Accelerated Circular Cylinder, 3rd Int. Symp. on Cavitation, Vol.1, (1998), 161-166.
- (9) 松浦良紀, 静止液体中で急加速された円柱端面に生ずるキャビテーション, 機論, 64-627, B (1998), 3745-3752.
- (10) 千原秀昭, 基礎物理化学実験, (1988), 33, 東京化学同人.
- (11) 日本化学会, 化学便覧基礎編 II, (1984), 117, 丸善.
- (12) 大場利三郎, キャビテーション核について, ターボ機械, 10-4, (1982), 35-42.
- (13) Ward, C. A., Balakrishnan, A. and Hooper, F. C., On the Thermodynamics of Nucleation in Weak Gas-Liquid Solution, Trans. ASME, Series D., 92-4, (1970), 695-704.
- (14) Mori, Y., Hijikata, K. and Nagatani, T., Fundamental Study of Bubble Dissolution in Liquid, Intern. J. Heat Mass Transfer, 20-1, (1976), 41-50.
- (15) Forest, T. W. and Ward, C. A., Homogeneous Nucleation of Bubbles in Solutions at Pressure above the Vapor Pressure of the Pure Liquid, J. Chem. Phys., 69-5, (1978), 2221-2230.