水中及び液体金属中流れ系におけるキャビテーション初生と 壊食に関する基礎的研究*

矢田 浩基^{*1}, 金川 晃大^{*2}, 服部 修次^{*3}

Cavitation Inception and Erosion in Flowing System of Water and Liquid Metal

Hiroki YADA^{*1}, Akihiro KANAGAWA and Shuji HATTORI

^{*1} Japan Atomic Energy Agency,
1 Shiraki, Tsuruga-shi, Fukui, 919-1279 Japan

The cavitation erosion in liquid metals is important for the safety and reliability of nuclear reactors and industrial machinery. However, an evaluation method of cavitation erosion in liquid metal has so far not been established. This study clarifies the incipient condition of cavitation in a liquid metal. A cavitating liquid jet test apparatus in a liquid metal was developed. A cavitating liquid jet was issued from an orifice nozzle with a hole of 0.6mm diameter. PbBi-68 was used as liquid metal. The tests were carried out in water using various nozzles with different shapes to obtain the nozzle shape effect on the incipient number and the erosion rate. It was found that the incipient cavitation number in tap water and PbBi-68 is almost the same regardless of the flow velocity. When the cavitation number is defined by an equation as $2(p_d - p_v) / \rho v^2$ (p_d : downstream pressure, p_v : vapor pressure, ρ : density, v : throat velocity), the incipient cavitation number becomes a constant regardless of the nozzle shape. Cavitation erosion tests were carried out with different nozzle shapes. It was concluded that the erosion rate can be qualitatively estimated by the output voltage of an acceleration sensor.

Key Words : Cavitation, Jet, Nozzle, Cavitation Inception, Cavitation Erosion, Liquid Metal Flow, Low Melting Alloy

1. 緒 言

液体金属流れ系でのキャビテーションに関する研究は、水中に比べ特殊なケースであることや実験の困難さから、水中のキャビテーション研究に比べ、ほとんど行われていない。しかし、磁わい振動試験による水中及び鉛ビスマス中、ナトリウム中での壊食試験では、鉛ビスマス中での壊食速度は水中の約 10 倍、ナトリウム中では 2~5 倍となることが報告⁽¹⁾されており、液体金属中でのキャビテーションに関する研究は、ナトリウムを冷却材とする高速増殖炉機器の健全性確認や、水銀を使用する核破砕中性子源ターゲット容器の問題⁽²⁾を解決する上で非常に重要である。配管や流体機械でのキャビテーション壊食を予測、防止するためには、キャビテーションの初生条件を十分に知る必要がある。

液体金属中でのキャビテーション初生に関する研究では、神山ら⁽³⁾が水中と水銀中のキャビテーション初生について実験を行い、水中と水銀中では初生キャビテーション数がほぼ等しくなることを報告している。Belahadji ら⁽⁴⁾はベンチュリ管を用いた水銀中でのキャビテーション壊食試験を行い、SUS316L のピット発生速度と流速の関係について検討しているが、キャビテーション初生条件についての検討は行っていない。近年では、Ardiansyah⁽⁵⁾らが、ナトリウム流動試験ループと内径 6.5mm、長さ 20mm のベンチュリ管を用いて実験を行い、200℃~400℃におけるナトリウム中でのキャビテーション初生条件について、キャビテーション数を $2(p_d - p_v) / \rho v^2$ (p_d : 下流圧, p_v : 蒸気圧, ρ : 密度, v : のど部流速) で定義したとき、いずれの温度条件においてもキ

* 原稿受付 2011 年 12 月 28 日

^{*1} 正員, (独) 日本原子力研究開発機構 (〒919-1279 福井県敦賀市白木 1)

^{*2} 福井大学大学院工学研究科

^{*3} 正員, フェロー, 福井大学大学院工学研究科 (〒910-0017 福井県福井市文京 3-9-1)

E-mail: yada.hiroki@jaea.go.jp

ャビテーション数がほぼ 1 まで低下するとキャビテーションが発生すること、温度の上昇により初生キャビテーション数がわずかに増加すること、液体ナトリウム流への Ar ガス注入を行っても初生キャビテーション数に変化がないこと⁽⁶⁾を報告している。液体金属中キャビテーションに関するこれまでの研究は、全てベンチュリ管を用いて行われている。キャビテーションの発生条件は、試験装置のキャビテーション発生部の形状により異なることが知られており、液体金属流れ系でのキャビテーション初生についての統一的な見解を得るためには実験データが少なすぎることから、実験データの更なる拡充が望まれる。

本研究では内部流体に液体金属を使用可能なループ型のキャビテーション試験装置を開発し、水中と Bi, Pb, Sn, Cd からなる融点が 68℃の低融点合金（以下、PbBi-68）中でのキャビテーション初生条件について噴流試験により実験的に検討を行った。また、水中試験により、ノズルの形状がキャビテーション初生及び壊食速度に及ぼす影響についても検討した。

2. 試験装置及び試験方法

2・1 試験装置

水中キャビテーション試験については、ASTM G134-95⁽⁷⁾に準拠した試験装置により行った。水中キャビテーション試験装置の概略図を図 1 に示す。

液体金属中キャビテーション試験は、試験流体の性質上、水中キャビテーション試験装置をそのまま使用して行うことはできない。そこで、本研究ではまず液体金属流れ系で噴流キャビテーション発生試験が可能な試験装置の開発を行った。緒言で述べたようにこれまでに行われた液体金属中キャビテーション試験はそのほとんどがベンチュリ管を用いて行われているが、本研究では ASTM G134-95 準拠の試験装置による水中キャビテーション試験と結果が比較できるよう噴流によりキャビテーションを発生させることとした。

液体金属中キャビテーション試験装置は、内部流体に液体金属を使用するため、液体金属を溶融・貯蔵するためのタンク、配管内での凝固を防ぐために液体金属の融点以上に系統全体を昇温できるヒータが必要となる。そこで本試験装置には液体金属の流路となる貯蔵タンク、ポンプ、キャビテーション試験部、バルブ、フィルタ部、アキュムレータのほぼ全ての箇所ラインヒータを取り付けた。ヒータはそれぞれの部位でブロックに分かれており、熱電対で測定した配管外面温度を基に設定温度となるよう自動で制御を行った。装置の運用上、全ての箇所同じ設定温度とできないことから、キャビテーション試験部上部で液温を熱電対により直接測定し、その値を試験温度とした。また、液体金属の流路となる全ての部位を保温材で被覆した。

液体金属は取扱い及び廃棄に注意が必要なため水中キャビテーション試験装置のように内部流体をそのまま排出できないこと、及び液体金属の酸化を防ぐ観点から系統内は不活性ガス雰囲気にできるよう閉ループ構造とする必要がある。試験流体には融点が 68℃である PbBi-68 を使用した。PbBi-68 は試験装置内部で凝固し、閉塞が起こっても湯せんで取り除くことができるなど、比較的取扱いが容易である。PbBi-68 の物性値及び成分を表 1 及び表 2 にそれぞれ示す。

Fig. 1 Water test circuit

Table 1 Physical properties of PbBi-68

Freezing point [°C]	Boiling point [°C]	Density at 20°C [kg/m ³]
68.4	575	9380

Table 2 Chemical composition of PbBi-68 (mass%)

Bi	Pb	Sn	Cd
50	26.7	13.3	10

Fig. 2 Liquid metal test circuit

Fig. 3 Test section A

開発した液体金属中キャビテーション試験装置の概略図を図 2 に示す。試験装置の運用方法は、次のとおりである。まず、1 の貯蔵タンクに固体の PbBi-68 を入れ、ヒータの入熱で溶融させる。1 の貯蔵タンクに 16 の Ar ガスタンクより Ar ガスを加圧することにより、溶融した PbBi-68 は系統内に充填され、2 の高圧ポンプによって循環する。ポンプには高い圧力で試験ができるようダイアフラム式ポンプを用いているが、ダイアフラム式ポンプは脈動が発生することから、圧力条件を安定させるため、9 のアキュムレータで脈動を軽減している。4 のキャビテーション試験部にはノズルが設置されており、ノズルの上流側、下流側の圧力差により、キャビテーションを発生させる構造である。上流圧は高圧ポンプの周波数、下流圧は 6 及び 7 の弁により調整する。

図 3 に水中及び PbBi 中のキャビテーション試験部の概略図を示す。キャビテーション試験部は、オリフィス構造となっており、ノズル内径は 0.6mm である。当初、ASTM G134-95 準拠の内径 0.4mm のノズルを用いて試験を行う予定であったが、PbBi-68 中試験の際、PbBi-68 が断熱膨張により凝固し、ノズル部が閉塞したことから試験可能なノズル形状の検討を行い、閉塞が生じず、かつキャビテーションを発生可能なノズル形状として、内径 0.6mm のノズルを採用した。

キャビテーションの発生を検知する方法は、気泡の発生や崩壊といった気泡挙動の可視化による方法、AE センサ、加速度センサ等を使用した気泡崩壊時の衝撃力により生じる振動を測定する方法、キャビテーション発生時に生じる音響をマイクロフォン等により音響的に検出する方法等、様々な手法が用いられているが、ここでは、加速度センサによる検出方法を用いた。加速度センサによるキャビテーションの検出は水山ら⁽⁸⁾、服部ら⁽⁹⁾による研究や、ポンプの壊食量評価での使用実績がある。本研究ではノズルを設置しているフランジに加速度センサを取付け、キャビテーションの発生を検出した。

2・2 試験方法及び試験条件

キャビテーション発生試験は、試験部に設置されているノズルの上流圧と下流圧を調整することにより、キャビテーション数を変化させ、それぞれのキャビテーション数でのキャビテーション発生の有無を調べた。流速 V は ASTM G134-95 に規定されている式 (1) より導かれる式 (2) を用いて算出した。また、ここでのキャビテーション数 σ_p はキャビテーションの状態を表す無次元数であり、式 (3) により定義される値である。

$$\frac{1}{2}\rho V^2 = p_u - p_d \quad (1)$$

$$V = \sqrt{\frac{2(p_u - p_d)}{\rho}} \quad (2)$$

$$\sigma_p = \frac{p_d - p_v}{p_u - p_d} \quad (3)$$

ρ : 試験液の密度, p_u : 上流圧, p_d : 下流圧, p_v : 試験液の蒸気圧

なお, 水の蒸気圧は $5.60 \times 10^3 \text{ MPa}$ を用い, 鉛ビスマス合金の試験温度 105°C での蒸気圧は非常に小さいため 0 としてキャビテーション数を算出した.

キャビテーションの初生を検出するため, TEAC 製の電圧出力タイプ加速度トランスデューサ (703FB) を試験部に両面テープで固定し, TEAC 製の圧電型加速度トランスデューサ用アンプ (SA-16) で増幅し, オシロスコープ (YOKOGAWA DL708E) で出力電圧の 0.5 秒間または 1 秒間の RMS (Root Mean Square) 値を測定した. 水中での試験は, 液温 35°C , 流速を 48, 51, 55, 60 m/s で一定に保持し, 上流圧, 下流圧を調整することにより σ_p を 1.0 から 0.2 まで 0.2 刻みで減少させた各条件で試験を行った. PbBi-68 中での試験は, 液温を $105 \pm 5^\circ\text{C}$ で制御し, 流速を 28, 31, 34, 37, 40 m/s で一定に保持し, $\sigma_p = 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1, 0.08, 0.06, 0.04$ の各条件で試験を行った. なお, PbBi-68 中試験での流速は, PbBi-68 の密度が水の約 9 倍大きいことから水中試験に比べ, 小さくなる.

3. 試験結果及び考察

3・1 水中及び液体金属流れ系におけるキャビテーション初生試験

図 4 に水中キャビテーション初生試験における式(2)による流速 48 m/s での加速度センサの出力波形の一例を示す. 図 4(a)は $\sigma_p = 1.0$ での波形で, RMS 値が約 10 mV (RMS 値は 3.1 節では 1 秒間で測定), 最大振幅が約 64 mV である. σ_p が 1.0 以上の条件では RMS 値は多少のばらつきはあるものの, ほぼ同じ値となることから $\sigma_p = 1.0$ の条件で得られる波形はバックグラウンドノイズによるものであると考えられる. 図 4(b)は $\sigma_p = 0.8$ での波形であり, RMS 値が約 12 mV, 最大振幅が約 81 mV となり, $\sigma_p = 1.0$ の波形に比べ $\sigma_p = 0.8$ の波形は振幅が大きい. 従ってキャビテーションの発生が観察される. 図 4(c)の $\sigma_p = 0.2$ になると RMS 値が約 59 mV, 最大振幅が約 401 mV と振幅がさらに大きくなり, 激しいキャビテーションが生じる. 同様に図 5 に PbBi-68 中キャビテーション初生試験における流速 40 m/s の条件での加速度センサの出力波形の一例を示す.

図 5(a)は $\sigma_p = 0.6$ の波形である. 振幅 50 mV 程度のランダムな波形が約 0.15 秒おきに発生し, 間欠的なキャビテーションが発生していることが分かる. 図 5(b)は $\sigma_p = 0.4$ の波形であり, 振幅 75 mV 程度の波形が連続して発生している. 図 5(c)は $\sigma_p = 0.08$ の波形であり, 振幅 100 mV を超える波形が連続して発生している. このようにキャビテーション数が小さくなるにつれ, キャビテーションは発達し, 出力波形の振幅は大きくなる.

Fig. 4 Acceleration sensor output wave pattern in tap water

Fig. 5 Acceleration sensor output wave pattern in PbBi-68

Fig. 6 Relation between RMS and cavitation number (in water)

Fig. 7 Relation between RMS and cavitation number (in PbBi)

図6は水中のキャビテーション数 σ_p と加速度センサにより検出したRMS値との関係図で、図中の破線はRMS値のバックグラウンドノイズを示している。バックグラウンドノイズはポンプの回転、配管の流力振動等により発生しており、試験条件次第で変化するものと考えられるが、ここではキャビテーション数が1.0を超えるとRMS値はほぼ一定の値となることからキャビテーション数1.0の時のRMS値をバックグラウンドノイズとした。水中の試験では、いずれの流速条件においてもキャビテーション数0.8～0.6付近を境にキャビテーション数が減少するにつれてRMS値がバックグラウンドノイズを超えて増加し、キャビテーション数0.6以下ではRMS値の急激な増加が見られる。従って、初生キャビテーション数は0.8～0.6であると考えられる。

図7はPbBi-68中のキャビテーション数 σ_p と加速度センサにより検出したRMS値の関係である。流速31m/s～40m/sの条件ではキャビテーション数0.8～0.6付近を境にキャビテーション数の減少と共にRMS値の増加が見られ、水中試験と同様に初生キャビテーション数は0.8～0.6であると考えられる。流速28m/sのデータについては、他の流速とは異なった挙動を示しており、キャビテーション数0.6以上ではRMS値はほぼバックグラウンドノイズと同じであり、キャビテーション数0.6～0.4付近でキャビテーションが初生する。これはキャビテーションの発生における流速の下限界であることが考えられる。

図8は、Lecoffre⁽¹⁰⁾により報告されている配管内径断面積 S とノズル孔断面積 S_1 の面積比 S_1/S とキャビテーション数の関係である。図中の σ_1 はノズル孔直後の配管壁面上の圧力から求めたキャビテーション数であり、 σ_2 はノズル孔から下流側に配管直径の10倍下流の位置でのキャビテーション数である。図よりキャビテーション初生については S_1/S の増加と共に σ_2 が増加することが分かる。今回の試験結果の妥当性を検証するため試験結果を図8にプロットした。合わせて水山⁽⁸⁾の試験結果もプロットしている。本研究及び水山らの研究ではノズル下流部で圧力を計測していることから、得られたキャビテーション数はLecoffreらが報告している σ_2 に相当する。本研究で用いた試験装置は、配管直径8.0mm、ノズル孔直径0.6mmであることから S_1/S は約0.0056、初生キャビテーション数は0.6～0.8としてプロットした。水山らの試験では、試験部の配管直径49.5mm、オリ

フィス内径 24.75mm であり S_1/S は約 0.25, 初生キャビテーション数は 2.4 と報告されている. 本研究及び水山らの初生キャビテーション数は図中の初生キャビテーション数を示す曲線の延長に位置することから, 本試験結果は Lecoffre らの結果の傾向と一致する.

図 9 は, 初生キャビテーション数とレイノルズ数の関係を表したグラフである. レイノルズ数はノズル内平均流速とノズル内径の積を流体の動粘度で除して求めた. 図には今回の試験結果である流速 48m/s~60m/s の水中試験データ, 流速 31m/s~40m/s の PbBi-68 中試験データをプロットしている. プロット点は代表点のみ範囲 (0.8~0.6) を示しており, 他の点も同じ範囲である. 合わせて, 神山ら⁽³⁾の水銀中及び水中のデータ, Ardiansyah ら⁽⁵⁾のナトリウム中のデータをプロットしている. 本試験結果はレイノルズ数が水中で約 $3.2 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$, PbBi-68 中で約 $5.8 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$ の範囲となり, 初生キャビテーション数は水中, PbBi-68 中ともに約 0.7 と等しく, 流速依存性も見られない. 神山ら⁽³⁾はベンチュリ管を用いて, 水及び水銀中でのキャビテーション初生条件について検討を行っており, 水中ではレイノルズ数が約 $7.5 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^5$ の範囲において初生キャビテーション数が約 1.0~1.1 となること, 水銀中ではレイノルズ数が約 $1.8 \times 10^5 \sim 3.15 \times 10^5$ の範囲において初生キャビテーション数が約 0.9~1.0 となることを報告している. 水中と水銀中では初生キャビテーション数はほぼ等しくなり, 流速依存性は見られず, 今回の試験結果と同様の傾向が見られる. 図中の cavi,1 はベンチュリ管のスロート部, cavi,2 は拡管部に発生するキャビテーションを表している. Ardiansyah らのナトリウム中試験⁽⁵⁾は, 各試験温度において種々の静圧で行われており, 初生キャビテーションが約 0.8~1.1 の範囲となっているが流速依存性は見られない. Bonnin や Collinson は水銀やナトリウムで実験を行い, 初生キャビテーション数は水中と比べて大きな差異はないこと, 多穴ノズルやワイヤ・メッシュで発生するキャビテーションにおいても, 水による結果でナトリウムの場合を推定してもよいという実験結果を報告している⁽¹¹⁾.

このように, 同一形状のキャビテーション試験部を用いた試験では, 今回試験液として用いた水, PbBi-68 にかかわらず初生キャビテーション数はほぼ同じ値となる. また, キャビテーション発生の下限界のような低流速域を除いたキャビテーションが安定して発生する流速条件では初生キャビテーション数に対する流速の影響は顕著ではない.

3・2 キャビテーション初生及び壊食におよぼすノズル形状の影響

前節では, 内径 0.6mm のノズルを使用して水中及び PbBi-68 中の初生キャビテーション数の検出に関する実験を行い, 初生キャビテーション数は試験液にかかわらず約 0.7 であることを見出した. このため, 液体金属中の初生キャビテーション試験は, 水中のキャビテーション試験で代用できると考えられる. 水中噴流キャビテーションにおける初生キャビテーション数に関する研究では, 服部ら⁽⁹⁾は, 直径 0.4mm のノズルを使用した実験を行い, 初生キャビテーション数が 1.6 となると報告している. 沼知ら⁽¹²⁾は JIS の管内オリフィスを用いて実験を行い, 開口比が 0.05~0.4 であれば, 初生キャビテーション数は, 開口比によらず $\sigma=2.5$ となることを報告している. このように初生キャビテーション数やキャビテーション発生状態は, 試験部の形状により異なる

Fig. 8 Relation between cavitation number and S_1/S

Fig. 9 Relation between incipient cavitation number and Reynolds number

ようであるが、系統的な研究は行われていない。本節は、液体金属中のキャビテーション壊食に関する研究の前段階として、水中での初生キャビテーション数やキャビテーション発生状態に及ぼすノズル形状の影響について検討した。また、激しくキャビテーションの発生したノズルについては、壊食試験を行った。

試験には図1の水中キャビテーション試験装置を用いた。図10に試験で用いたノズルを示す。ノズルはいずれも図の左側が入口であり、右側が出口である。(a)は前節で使用したノズルで内径0.6mm、ノズル長さ $l=3.0$ mmである。(b)は内径0.4mm、ノズル長さ1.2mmであり、(a)のノズルと比較するためにASTMG-134-95⁽⁷⁾に記載されているノズルプレートと同一形状として製作した。ただし、ノズルホルダーインサート⁽⁷⁾は取付けなかった。

(c)は、ノズルのど部の長さの影響を検討するために(b)のノズル長さを5.0mmとしたノズルである。(d)は、ウォーターノズルとして市販されているノズルであり、内径は0.4mmの入口部から段付きで広がった後、逆テーパ状の構造となっている。服部ら⁽⁹⁾によってキャビテーション噴流試験に用いられた実績があり、一般にはウォータージェット切断用のノズルとして用いられる。(d)のノズルは他の内径0.4mmのノズルと比べキャビテーションが発生しやすいことから、その原因を検討するため、(d)のノズルを簡易的に模擬した(e)のノズル、段付き部のみ部分的に模擬した(f)のノズルを製作した。(g)は今後計画している液体金属中壊食試験で十分な壊食量を得られるようにSoyamaの報告⁽¹³⁾を参考にノズル内径D、長さL、ノズルのど部dの割合を $d:D:L=1:8:8$ として $d=0.6$ mmで製作したノズルであり、本ノズルのみノズルホルダーインサート⁽⁷⁾を使用した。

図11は、本節の試験に用いたキャビテーション試験部を示したもので、ASTM G134-95と同様な形状とした。ただし、(a)のノズルのみ図11とは異なるアクリル製の試験部を使用した。試験に先立ち、各ノズルの性能を把握するため、各ノズルの流量を測定し、流量係数等を評価した。流量係数Cは次式(4)で定義される。

$$C = \frac{Q}{a} \sqrt{\frac{\rho}{2(P_u - P_d)}} \quad (4)$$

Q：流量 (m³/s)，a：ノズル断面積 (m²)， ρ ：試験液密度 (kg/m³)， P_u ：上流圧 (MPa)， P_d ：下流圧 (MPa)

Fig. 10 Shape of nozzles

Fig. 11 Test section B

Fig. 12 Flow characteristic of each nozzles

図 12 に各ノズルの特性を示す. ノズル特性は種々の圧力条件下で流量を測定し, 得られた流量から流量係数, ノズル内部の流速及びレイノルズ数を算出した平均値である. なお, 流量はキャビテーション試験部下流に取付けた流量計により測定した. 図 12(a) は各ノズルの流量係数である. 図 12(a) より Nozzle(d) の流量係数が約 0.97 と大きく, Nozzle(b) が 0.64 と最も低い, それ以外のノズルは 0.70~0.77 と近い値になっている. Nozzle(d) を模擬した Nozzle(e) の流量係数は Nozzle(d) に比べて小さい, これはノズル孔内部の抵抗の影響と考えられる. 図 12(b) は各ノズルの流速及びレイノルズ数である. 流速は Nozzle(d) が 63m/s と他のノズルに比べかなり高く, Nozzle(b) が約 42m/s と最も低く, その他のノズルは 47~50m/s と近い値となる. 一方, レイノルズ数は Nozzle(a), (g) が約 30000 と高く, Nozzle(d) がそれより少し低い約 25000, その他のノズルは 16600~19000 と近い値となる.

各ノズルを用いたキャビテーション初生試験の条件は, 式 (2) で求められる流速 V を 65m/s で一定とし, 上流圧, 下流圧を調整することによりキャビテーション数を 2.2 から 0.2 刻みで減少させた. キャビテーションの検出は前節と同様に加速度センサを用い, 加速度センサの出力電圧により初生キャビテーション数を決定した. キャビテーション数は, 前節の式 (3) から求めた σ_p 及び次式 (5) から求めた σ_v の 2 種類で評価した.

$$\sigma_v = \frac{p_d - p_v}{1/2 \rho V^2} \quad (5)$$

図 13 に各ノズルを用いて, 式(3)より求めたキャビテーション数 σ_p と加速度センサ出力電圧の 0.5 秒間の RMS 値との関係を示す. Nozzle(d) は, $\sigma_p=1.6$ を境に RMS 値が増加していることから初生キャビテーション数は 1.6 近傍であり, 他のノズルよりもキャビテーションが発生しやすい. (d) 以外のノズルの初生キャビテーション数は $\sigma_p=0.8$ 近傍となるが, その中でも (b) のノズルは少し低い. このようにノズルの形状により初生キャビテーション数に違いが生じる. また, Nozzle(d) 及び Nozzle(g) は他のノズルよりも RMS 値が大きく, 激しいキャビテーションが発生している. ここで, 各ノズルの初生キャビテーション数を図 12 のノズル特性と比較すると図 12(b) に示した各ノズルのノズル内流速の傾向と一致する. すなわち, ノズル内流速の最も高い Nozzle(d) は初生キャビテーション数が最も大きく, ノズル内流速の最も低い Nozzle(b) は初生キャビテーション数が最も小さくなる. それ以外のノズルでは流速が近い値であり, 初生キャビテーション数もほぼ同じである. 初生キャビテーション数とレイノルズ数の関係は, レイノルズ数 $10^4 \sim 10^7$ の範囲において種々の試験体を用いた試験が行われており, 一般に初生キャビテーション数はレイノルズ数に対して右上がりであること, レイノルズ数が小さい領域では逆に左上がりの傾向があることが知られている⁽¹⁴⁾. 本試験でのレイノルズは 10^4 オーダーであり, 低レイノルズ数であるが, レイノルズ数が小さいほど初生キャビテーション数が大きくなる傾向は見られない.

図 14 に式 (5) より求めた σ_v と加速度センサ出力電圧の 0.5 秒間の RMS 値との関係を示す. ここでの流速は, 実測の流量からノズル断面における流速を算出した. Nozzle(d) 及び Nozzle(g) の RMS 値は他のノズルに比べ大きいものの, 全てのノズルにおいて初生キャビテーション数は 1.3~1.7 となり, 式(3)を用いてキャビテーション数を評価した場合よりもばらつきが小さくなっている. これは, 式 (5) は実測の流量を用いることによりノズル内部の抵抗が考慮されることによる. すなわち, Nozzle(d) はノズル孔内部の抵抗が小さいため, 図 13 との違いはほとんど見られない, 一方で, Nozzle(d) 以外では, ノズル孔内部の抵抗が大きく, 流速が低下するために初生キャビテーション数が大きくなると考えられる. このように, 式 (5) の流速に基づくキャビテーション数

Fig. 13 Output voltage as a function of σ_p of Eq(3) for different nozzles

Fig. 14 Output voltage as a function of σ_v of Eq(5) for different nozzles

Fig. 15 Relation between mass loss and stand-off distance

Fig. 16 Relation between mass loss and exposure time

で整理すると、ノズル形状、内部抵抗の影響は小さくなり初生キャビテーション数を統一的に評価することができる。沼知ら⁽¹²⁾は、キャビテーション数を σ_v で算出しているがオリフィスでの初生キャビテーション数が2.5で一定になると報告している。沼知らは内径 104.10mm 及び 105.26mm の管に口径 23.33~66.60mm の数種類のオリフィスを用いて試験をしており、一方で本研究では沼知らのオリフィスと比べて非常に小さな管とノズルを使用したために流体のもつエネルギーが小さく、高流速すなわち流速 V が大きくならないとキャビテーションが発生しないため、 σ が 2.5 より小さい値になったと考えられる。

図 15 に Nozzle (a), Nozzle (d), Nozzle (g)を用いて、ノズルと試験片の距離（以下、SOD）を変化させた水中での壊食試験結果を示す。試験片には純アルミを用い、 $V = 184\text{m/s}$, $\sigma_p = 0.025$ の条件で試験を行った。壊食量が最も多くなる SOD（以下、最適 SOD）は Nozzle (a)が 6mm, Nozzle (d)が 15mm, Nozzle (g)が 10mm となる。各ノズルのキャビテーション発生時の加速度センサ出力電圧は、キャビテーション数が 1.0 以下の条件では、Nozzle (a), Nozzle (d), Nozzle (g)の順に高くなっている。本試験結果からは加速度センサ出力電圧と SOD との関係は見られない。各ノズルの最適 SOD での壊食量は、Nozzle (a)は試験時間が 60 分と最も長いにもかかわらず約 8mg と最も少ない、Nozzle (d)は試験時間 30 分で約 44mg, Nozzle (g)は試験時間 10 分で約 94mg となる。従って、Nozzle (g)を用いた場合に最も激しいキャビテーションが発生していることが考えられ、加速度センサにより検出した出力電圧値の傾向と一致する。

図 16 に Nozzle (d), Nozzle (g)を用いた SUS304 試験片の壊食試験結果を示す。試験は $V = 184\text{m/s}$, $\sigma_p = 0.025$, 試験片位置は最適 SOD とした。両ノズルの壊食量は試験時間 0.5~1 時間までは壊食量が非常に少なく、その後、壊食量が急激に増加する。質量減少量-試験時間曲線の最大の勾配と時間軸の交点として定義される潜伏期は、いずれも約 1 時間であり、差は見られない。しかし、単位時間当たりの壊食量が最も多くなる最大速度期での質量減少速度は Nozzle (d)で約 5.9mg/h, Nozzle (g)で約 22.2mg/h となる。従って、壊食速度は加速度センサ出力電圧の大小関係と定性的に一致する。

以上より、本研究で用いたノズルのキャビテーション初生や発生状態に及ぼすノズル形状の影響が明らかになった。今後は、水中で最も壊食速度の大きいノズルを液体金属中のノズルとして使用し、液体金属中のキャビテーション壊食に及ぼす流速の影響等を明らかにする予定である。

4. 結 言

本研究では、液体金属中でのキャビテーション初生条件を明らかにするため、液体金属中で噴流によりキャビテーションを発生させることが可能な試験装置を開発し、内径 0.6mm のノズルを用いて水中及び PbBi-68 中でキャビテーション発生試験を行った。また、キャビテーション初生及び質量減少挙動に及ぼすノズル形状の影響について、種々のノズルを用いて試験を行った。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 水中及び PbBi-68 中での初生キャビテーション数を加速度センサにより検出した。水中、PbBi-68 中での同一形状のノズルを用いた試験では、液体種にかかわらず初生キャビテーション数はほぼ同じ値となる。
- (2) キャビテーション初生に及ぼす流速の影響は、本試験条件の範囲において、キャビテーション発生の下限界のような低流速域を除くキャビテーションが安定して発生する流速条件では、ほとんどない。
- (3) キャビテーション初生に及ぼすノズル形状の影響を検討するため、形状の異なる 7 種類のノズルを用いて、水中試験により各ノズルの初生キャビテーション数を求めた。初生キャビテーション数は、下流圧と実測の流速を用いて算出した σ_v で整理することにより、いずれのノズルを用いてもほぼ同じ値となる。
- (4) 形状の異なるノズルを用いて水中でのキャビテーション壊食試験を行った。各ノズルでのキャビテーションによる壊食速度は加速度センサ出力電圧の大小関係と定性的に一致する。

文 献

- (1) 服部修次, 井上文貴, 渡士克己, 橋本貴司, “液体金属中のキャビテーション壊食に及ぼす液体パラメータの影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.73, No.726 (2007), pp.300-306.
- (2) Futakawa. M, Naoe. T, C.C.Tsai, Kogawa. H, Ishikura. S, Ikeda. Y, Soyama. H, Date H, “Cavitation Erosion in Mercury Target of Spallation Neutron Source”, *Fifth International Symposium on Cavitation* (2003), pp.1-8.
- (3) 神山新一, 山崎堯右, “水銀流のキャビテーションに及ぼす磁場の影響”, 速研報告, Vol.36, No.33(1975) pp.1-16.
- (4) Belahadji.B, Franc.J.P, Michel.J.M, “A Statistical Analysis of Cavitation Erosion Pits”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.113 (1991), pp.700-706.
- (5) Ardiansyah. T, Takahashi. M, Yoshizawa. Y, Nakagawa. M, Miura. K, Asaba. M, “Acoustic Noise and Onset of Sodium Cavitation in Venturi”, *Sixth Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety* (2008), N6P1134.
- (6) Ardiansyah. T, Takahashi. M, Nakagawa. M, “Effect of Argon Gas Injection on Acoustics Noise and Onset of Sodium Cavitation in Venturi”, *The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics* (2009), N13P1217.
- (7) ASTM Designation G134-95, “Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by a Cavitating Liquid Jet”, *Annual Book of ASTM Standards* (2005), pp.576-588.
- (8) 水山成郎, 村瀬道雄, 八木良憲, “配管外部に取り付けた加速度センサーおよび AE センサーによるキャビテーション検知手法の検討”, *INSS Journal*, Vol.11 (2004), pp. 129-136.
- (9) 服部修次, 高橋功治, 張杉杉, 水山成郎, 中村晶, “加速度計を用いた噴流法キャビテーション初生の検出とオリフィスキャビテーションへの応用”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.74, No.746 (2008), pp.43-49.
- (10) Lecoffre. Y, Archer. A, “A Method to Evaluate Cavitation Erosion in Valves”, *Third International Symposium on Cavitation* (1998), pp175-181.
- (11) 加藤洋治, キャビテーション, (1979), p.82, 槇書店.
- (12) 沼知福三郎, 山部正博, 大場利三郎, “管内オリフィスに対するキャビテーションの影響”, 東北大学 高速力学研究所報告, Vol.14, No.136 (1959), 127-136.
- (13) Soyama.H, “Enhancing the Aggressive Intensity of a Cavitating Jet by Means of the Nozzle Outlet Geometry”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 133, Issue 10 (2011), 101301 (11 pages).
- (14) 加藤洋治, 新版キャビテーション, (1999), p.90, 槇書店.