静止水銀中の狭隘部における圧力波誘起キャビテーション損傷*

直江 崇^{*1}, 二川 正敏^{*1}

Pressure wave-induced cavitation erosion in narrow channel of stagnant mercury

Takashi NAOE^{*1} and Masatoshi FUTAKAWA^{*1} Japan Atomic Energy Agency
2-4, Shirane, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195 Japan

Received 9 December 2013

Abstract

The pressure waves which is caused by high-intensity proton beam injection into mercury is a critical issue to keep the steady operation in the high-power spallation neutron source, because the pressure waves induces cavitation and imposes severe erosion damage on the target vessel due to bubble collapsing. A double-walled structure of the beam window portion is adopted for the advanced mercury target vessel in the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). The double-walled structure which has the narrow gap between the inner and outer walls is expected to reduce cavitation erosion in the beam window portion by deforming the shape of cavitation bubbles due to the flowing and gap boundary effects. In order to understand the cavitation damage in the narrow gap, cavitation damage tests of the type 316 stainless steels were conducted using mechanically-induced pressure waves under stagnant mercury with parametrically changing gap width and machine power. Furthermore, numerical simulation was carried out to estimate the pressure and cavitation bubble behavior in the narrow channel. The results showed that the clear damage reduction which was attributed to the deformation of bubble collapse due to the channel wall boundary was confirmed. On the other hand, the damage in the narrow gap was not directly related to the imposed power. The severe damage caused by the secondary cavitation bubble collapse predicted through the numerical simulation was observed at the lowest power.

Key Words : Narrow channel, Cavitation erosion, Mercury, Spallation neutron source

1. は じ め に

大強度陽子加速器施設(Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC)の物質生命科学実験施設(Materials and Life Science Experimental Facility, MLF), 及び米国の核破砕中性子源(Spallation Neutron Source, SNS)では, ターゲット材の中性子収率, 常温で液体であること, 及び冷却性に優れているという観点から, 液体金属である水銀を核破砕ターゲットに用いている(Ikeda, 2009, McManamy, 2010). 大強度の陽子線(MLF の定格運転出力は, 1 MW, パルス幅 1 μ s で 25 Hz)が水銀に入射すると, 入射するエネルギーの約半分が核破砕反応による中性子の発生に使われ, 残りの半分は熱に変わる. その際, 水銀中には急激な発熱によって局所的な圧力上昇に起因する圧力波が発生する. この圧力波が水銀を包含する SUS316L 製の容器(ターゲット容器)へと伝ばする過程で, キャビテーション気泡が発生し, ターゲット容器壁面を著しく損傷させる(Futakawa, et al., 2003a). 容器構造材料の観点から, 材料表面を硬化することによって, ある程度損傷の形成を抑制できることが分かったが, 数億回にも及ぶ陽子線入射に対しては, その効果は十分ではない(Naoe, et al., 2008a). 一方, 流体力学に基づいて, 圧力波そのものを抑制するという観点から, 水銀中へマイクロバブルを注入することに圧力波の抑制効果(Skala and Bauer, 1995, 沖田他, 2006)に着目し, 陽子ビーム入射及び非入射環境での損傷試験を通じて, マイクロバブルの注入によって損傷が著しく低減されることを明らかにした(Naoe, et al., 2008b, Futakawa, et al., 2008, Riemer, et al., 2008). また, 同実

* 論文 No.13-00850 [DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0025]

^{*1} 正員, (独)日本原子力研究開発機構 (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)
E-mail: naoe.takashi@jaea.go.jp

Fig. 1 Schematic of the conceptual design for the double-walled structure of the advanced mercury target vessel in the MLF.

験により、水銀を流動させた場合は、停滞時と比較して明らかに損傷が少ないこと、さらに、流速の増加と共に損傷が少なくなることが分かった(Naoe, et al., 2008b).

水銀ターゲットでは、水銀を循環して熱交換器により陽子ビーム入射に起因する熱を除去しているが、先述した実験結果を踏まえて、MLFでは、水銀中へマイクロバブルを注入するための改良を行うことに加えて、損傷が激しくなる容器先端部を二重壁構造化することで狭隘流路を形成し、水銀の流速を増加させることにした(図1参照)。水銀の流速が増加すると、壁面近傍の圧力勾配が大きくなり、キャビテーション気泡の崩壊時に放出されるマイクロジェットの影響性が低下すると期待される。既に狭隘流路を備えた二重壁構造のターゲット容器を採用しているSNSでは、使用後の容器先端部を切断して観察した結果、主流部では厚さ3mmの内壁が貫通するほどの激しい損傷が形成されていたのに対して、比較的流速が速い狭隘流路側ではほとんど損傷が確認されなかったという報告がある(McClintock, et al., 2012)。その一方で、水銀で満たされた矩形容器内に、狭隘流路に見立てた平板を、4点支持により2mmの間隔を隔てて設置し、水銀を流動させない状態で陽子線入射実験を行った結果、狭隘部に他の部分よりも激しい損傷が観測されたという狭隘流路構造によってキャビテーション損傷が加速される懸念を示す結果(Riemer, et al., 2008)も報告されており、狭隘流路による二重壁構造が、確実にキャビテーションによる損傷を低減できるのかは明らかになっていない。

狭隘部でのキャビテーション気泡の挙動については、これまでに多くの報告例がある(Shima and Sato, 1980, Chahine, 1982, Ishida, et al., 2001, Quinto-Su, et al., 2009)。例えば、Ishida, et al. (2001)は、2枚の接近させた平行平板の内部で、水中で火花放電により発生させたキャビテーション気泡に対して、平板のギャップと気泡の位置を系統的に変化させて気泡の挙動を高速度撮影し、ギャップ/最大気泡半径の比が3.0以下である場合に、気泡が壁の影響を受けて変形することを示している。また、Quint-Su, et al. (2009)は、レーザーを集光することによって発生させたキャビテーション気泡の高速度撮影を行い、ギャップ/最大気泡半径が約0.26のとき、気泡の成長から崩壊までの時間が長くなること、及び壁に対して平行に崩壊することを示している。一方で、狭隘部で圧力波によって生じるキャビテーション損傷についての報告例はほとんど無い。

本研究では、二重壁構造の狭隘流路内部におけるキャビテーション気泡の挙動と、それによって形成される損傷について理解するために、狭隘部のギャップ及び負荷圧力を変化させた損傷実験を静止水銀中で実施し、損傷の程度を比較した。また、狭隘部でのキャビテーション気泡の成長、崩壊挙動を高速度ビデオカメラを用いて観察すると共に、実験結果を考察するための数値解析を実施した。

2. 実験方法

2・1 狭隘部のキャビテーション損傷試験

狭隘部に生じるキャビテーションによって形成される損傷について調べるために、電磁式衝撃圧負荷試験装置(electro-Magnetic Impact Testing Machine: MIMTM)を用いた損傷試験を行った。MIMTM試験部の概略を図2に示す。ダイヤモンド状の底板(厚さ1mm)に固定したマグネシウム合金製のストライカーに電磁誘導により衝撃力を負荷することで水銀で満たされた直径100mm、高さ15mmのステンレス鋼製の容器内に衝撃圧を発生させる装置である(Futakawa, et al., 2003b)。ストライカーを下方に動作することにより、容器内を負圧にし、水銀中にキャビテーションを発生させることができる。ストライカーには帯域幅1Hz~25kHzの振動加速度計(RION製、PV-90B)を設置し、キャビテーション気泡の崩壊によって励起される高周波数の振動をサンプリング周波数1

Fig. 2 Schematic of the MIMTM test section. Strong tension is rapidly imposed to the mercury through the stainless steel diaphragm with a thickness of 1mm, which is connected to the electromagnetically driven striker.

MHz で計測した。衝撃圧の強さ及び負荷時間は、電磁コイルへの供給電力によって制御可能である。試験片には、損傷観察面に鏡面研磨を施した SUS316 の平板($60 \times 60 \text{ mm}^2$, 厚さ 2.5 mm 及び 3.0 mm)を用いた。狭隘流路構造を模擬するために、試験片の四隅を水銀容器上部のフランジにボルトにより固定した。

キャビテーション損傷に及ぼす狭隘部のギャップの影響について調べるために、2 枚の平板の間に厚さ 1.0, 1.5, 2.3 mm のスペーサーを挿入し、ギャップを精度良く設定して損傷試験を実施した。また、衝撃圧の強さ(負圧の持続時間)に対する損傷の差異を比較するために、電磁コイルへの供給電力(以後、パワーと称する)を 295, 340, 440, 560 W/pulse と変化させた。衝撃圧の負荷回数は、 10^6 回、負荷時間間隔は、J-PARC における水銀ターゲットへの陽子線入射周期と同じ 25 Hz とした。各試験は、試験片表面を 4 分割して行い、試験時以外は、試験片表面が損傷を受けないようにポリイミドテープで保護した。

試験後は、試験片表面に付着した水銀を除去するために、エタノール中で超音波洗浄を施した後、レーザー顕微鏡(キーエンス製, VK-9510)を用いて表面観察を行った。衝撃圧負荷の特性上、損傷に分布が生じ、試験片中心から外側に離れるに従い損傷が少なくなる傾向があるため、本実験では、試験片中心から 5mm 離れた位置で $1 \times 1 \text{ mm}^2$ の範囲に形成される損傷を比較した。

2・2 キャビテーション気泡の観察

狭隘部におけるキャビテーション気泡の成長・崩壊挙動を可視化するために、高速度ビデオカメラ(Nac 製, Memrecamfx RX-6)及びメタルハライドランプ(Nac 製, UF-3250NAC)を用いて高速度撮影を実施した。水銀は、不透明であるため、MIMTM 水銀容器の上部フランジ中央に直径 40 mm, 厚さ 20 mm のガラス窓を設置し、ガラス面に付着する気泡を観察した。電磁コイルへの供給電圧を撮影開始のトリガーとして同期し、撮影フレーム速度は 10^4 f/s とした。

3. 実験結果および考察

3・1 損傷のギャップ及びパワー依存性

衝撃圧の負荷回数 10^6 回の損傷試験後の 4 分割された試験片全体の写真を図 3 に示す。ここで、図 2 に示した狭隘部上面、下面、水銀容器側の面をそれぞれ Channel top, Channel bottom, Bulk side と称する。Channel top 及び Channel bottom(図 3(a), (b))では、560 W/pulse 条件(図中 1, 2, 4 の領域)で損傷の程度にギャップによる差が生じている。また、過去に実施した狭隘部が無い場合の損傷試験では、パワーの増加と共に損傷が激しくなることを確認している(直江他, 2005)が、本実験では、560 W/pulse よりも低いパワーである 340 W/pulse のギャップ 1.0 mm で形成された損傷と比較して激しいように見える。試験片全体を比較すると、Channel top 及び Channel bottom(図 3(a), (b))では、光沢のない損傷面の領域がギャップにより変化している。これは、ギャップによって試験片周囲の圧力分布が変化したこと起因すると考えられる。一方、Bulk side(図 3(c))では、ギャップによらず、ほぼ同程度の損傷が形成されている。

レーザー顕微鏡による高倍率の表面観察結果の一例として、試験片中心から固定穴方向へ約 5 mm 離れた位置での各試験条件における全焦点画像を図 4 に示す。560 W/pulse 条件でギャップを変化させた場合の結果(図中右側)を比較すると、ギャップ 1.0 mm では、キャビテーションによって形成された Channel top のピットの数が、

Fig. 3 Macroscopic image of the damage tests specimens after 10^6 impacts. Numerical symbols in the figure denote the conditions of gap widths and powers: 1: 2.3 mm gap at 560 W/pulse, 2: 1.0 mm gap at 560 W/pulse, 3: 1.5 mm at 340 W/pulse, and 4: 1.5 mm gap at 560 W/pulse. The apparent damages in the (a) channel top and (b) channel bottom at 560 W/pulse are changed by the gap width.

Fig. 4 Microscopic images of the specimen surfaces at approximately 5 mm from the specimen center after 10^6 impacts in various conditions. The damage of channel top and bottom is clearly smaller than that of the bulk side. The damage degree on the channel top and bottom increases with the increasing in the gap width. 340 and 440 W/pulse cases observed more severe damage than that of 560 W/pulse case.

Channel bottom と比較してやや多い。これは、キャビテーション気泡の核となる水銀中に存在する微小な気泡が浮力の影響で上部に多く存在したためであると考えられる。また、損傷の程度は、ギャップの増加と共に増加している。Channel top と Bulk side を比較すると、ギャップ 1.0 mm では、Bulk side と比較して明らかに損傷が少ないことが分かる。しかしながら、ギャップ 1.5 mm 及び 2.3 mm では、視野全体に損傷が分布しており明瞭な差は確認できない。

ギャップを一定として、パワーを変化させた場合(図中左側)を比較すると、Channel top の方が全てのパワーで Channel bottom と比較してピットの数が多くなっていることが分かる。また、Channel top 及び Channel bottom では、最もパワーが高い 560 W/pulse の場合と比較して、340 及び 440 W/pulse 条件の方が激しい損傷が形成されているように見える。一方、Bulk side では、表面全体に複数のピットが重畳した損傷が形成され、損傷の差異を画像で比較することは困難である。

試験片表面に形成された損傷の程度を定量的に評価するために、レーザー顕微鏡を用いて表面粗さを計測した。ギャップ 1.0 mm 及び 2.3 mm の 560 W/pulse 条件における深さコンター及びコンター破線部の深さプロファイルを図 5(a),(b)にそれぞれ示す。ギャップ 1.0 mm で形成された損傷の深さ(図 5(a))は、ギャップ 2.3 mm(図 5(b))と比較して浅いことが分かる。深さコンターの撮影領域($281 \times 216 \mu\text{m}^2$)における最大最小深さから最大粗さ R_z を導出

Fig. 5 Depth contours and depth profiles of the damaged surfaces for 560 W/pulse. Measured locations of the depth profiles are shown as dashed line in the depth contour.

Fig. 6 Change in the surface roughness R_z as a function of the gap width. R_z for (a) channel top is smaller than that of (b) bulk side independently of the power and gap width. Except the case of 560 W/pulse, R_z for the channel top is decreased in accordance with decreasing the gap width.

した。Channel top 及び Bulk side におけるギャップと最大粗さの関係を図 6(a),(b)に示す。ここで、 R_z は $1 \times 1 \text{ mm}^2$ の領域で計測した 5 枚の画像の平均値である。また、図 6(a)と図 6(b)は縦軸のスケールが異なる。Channel top の R_z は、ギャップ及びパワーに関わらず、Bulk side と比較して小さい。560 W/pulse 条件を除いて、Channel top の R_z は、ギャップの増加と共に増加する傾向が見られるが、そのギャップに対する R_z の増加率はそれぞれのパワーで異なる。また、ギャップ 1.0 mm の 560 W/pulse では、他の条件と比較して明らかに R_z が小さい。また、Bulk side は、560 W/pulse 条件を除いて、ギャップによらずほぼ同等の R_z であった。一方、560 W/pulse では、他の条件と比較するとばらつきが大きい。これは、表面全体に塑性変形によるピットが形成され、繰返し衝撃圧が負荷されることにより、部分的に壊食が生じたことによるものと考えられる。なお、衝撃圧の負荷回数 10^6 回は、狭隘部が無い場合の 560 W/pulse の条件において、キャビテーション損傷によって質量減少が発現し始める回数である(Futakawa, et al., 2003b)。

さらに、各ギャップにおいて、パワーと R_z の関係を比較すると、ギャップ 1.0 mm の Channel top では、最も高いパワーである 560 W/pulse での R_z が、340, 440 W/pulse と比較して小さい。また、ギャップ 2.3 mm では、最も

パワーの低い 295 W/pulse の R_z が全ての条件の中で最大値を示した。これは、詳細は後述するが、ギャップの影響によりキャビテーション気泡の成長が妨げられたことに起因すると考えられる。

3・2 振動加速度

ストライカーに設置した加速度計により得た振動加速度の計測例として、パワー560, 295 W/pulse 条件でのギャップ 1.0 及び 2.3 mm の結果を図 7 に示す。ここで、時刻 0 は、MIMTM 電磁コイルへの電力負荷を開始した時刻である。560 W/pulse では、1.5 ms 程度までストライカーの振動に伴う加速度の変化を確認できる。その後は、高周波数成分が重畳している。この高周波数成分は、キャビテーション気泡の崩壊に起因するものと考えられる。これまでに著者らは、ハイパスフィルタにより抽出した高周波数成分のエネルギーを損傷エネルギー E と定義し、式(1)に基づき導出した結果、損傷エネルギーと試験片表面に形成される損傷との間に良い相関があることを確認している(Futakawa, et al., 2004)。

$$E = \left(\int_{t_1}^{t_2} |a| dt \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 a はハイパスフィルタ後の加速度(本実験ではカットオフ周波数 15 kHz)、 t は時間、添字 1 及び 2 は、それぞれ計測の開始と終了時刻である。ただし、本実験で計測される高周波数成分は、狭隙部だけでなく Bulk side で励起される振動も含まれている。295 W/pulse(図 7(a))では、1.5 ms から 4.0 ms で観測される高周波数成分の振

Fig. 7 Time histories of response acceleration at the striker. Acceleration resulting from the dynamic responses of the striker is recognized approximately up to 1.5 ms. And then the remarkably high-frequency components resulting from the cavitation bubble collapse are superimposed on the dynamic response of the striker.

Fig. 8 Change in the normalized damage energy normalized at 560 W/pulse with 2.3 mm in gap width as a function of the gap width. Normalized damage energy is increased with the gap width in each power range.

Fig. 9 Collapse behavior of the cavitation bubbles in contact with the glass wall for (a) the narrow channel with 1.0 mm gap and (b) without narrow channel. In the case of 1.0 mm gap, it is recognized that the bottom plate is seen through a large bubble. It can be seen that the microjet is emitted in parallel with the wall.

幅は、ギャップ 1.0 mm と比較して 2.3 mm の方が明らかに大きい。この差は、図 6 (a)に示した R_z の差と対応している。295 W/pulse(図 7(b))では、4.0 ms 以前の高周波数成分は、ギャップによる顕著な差が見られない。しかしながら、ギャップ 2.3 mm では、4.0 ms 以後に 560 W/pulse のギャップ 1.0 mm よりも振幅の大きな高周波数成分が観測された。これは図 6(a)において、 R_z が最も大きかったことと対応している。

衝撃圧の負荷回数 10^5 回ごとに計測した振動加速度波形を用いて、式(1)により損傷エネルギーを導出した。560 W/pulse のギャップ 2.3 mm 条件で規格化した損傷エネルギーとギャップの関係を図 8 に示す。ここで、560 W/pulse のギャップ 1.5 mm は、保存エラーによるデータ欠損である。規格化した損傷エネルギーは、全てのパワーにおいてギャップの増加と共に増加する傾向が見られる。それぞれのギャップについて比較すると、損傷エネルギーの順位は、パワーの順位と対応しており、図 6(a)に見られたパワーの順位が逆転するような傾向は見られない。これは、前述したように、振動加速度は、狭隘部だけでなく、Bulk side で励起される振動を含むためである。

3・3 狭隘部での気泡の挙動

高速度ビデオカメラにより撮影した 560 W/pulse 条件におけるギャップ 1.0 mm 及び狭隘部が無い場合の気泡崩壊挙動を図 9(a),(b)に示す。ここで、時刻 0 は最終フレームである。ギャップ 1.0 mm(図 9(a))では、気泡がギャップ幅以上に膨張し、下部側に設置してある流路の表面を確認できる。また、気泡が崩壊する際に放出される損傷を形成する主因と考えられるマイクロジェットが、観察面に対して平行に吹き出しているように見える。なお、ギャップ 1.0 mm では、壁面と平行に吹き出すマイクロジェットを捕らえるために、照明の角度を変更したため、ギャップ無しの結果(図 9(b))とコントラストが異なっている。マイクロジェットが壁面と平行に吹き出す場合は、壁面に負荷される衝撃力は著しく低下すると推察される。このことが、狭隘部でバルク側と比較して R_z が小さくなったことに寄与していると考えられる。

4. 数 値 解 析

4・1 圧力応答の解析

295 W/pulse のギャップ 2.3 mm で観測された振動加速度波形(図 7(b))の大振幅の高周波数成分の発生時刻は、同じパワーの同じパワーのギャップ 1.0 mm 及び 560 W/pulse 条件の結果比較して遅れており、また、狭隘部では、図 6(a)に示したように最もパワーが低いにもかかわらず R_z が最大となった。本節では、なぜ最低パワーで最大

Fig. 10 Flow diagram for calculating the pressure and the cavitation bubble behavior.

の損傷が形成されたかについて、圧力応答に焦点を置いて調べた。狭隙部のギャップは1~2.3 mm であり、圧力センサーのケーシングとの干渉により、実験的に圧力応答を計測することが困難であった。そこで、図 10(a)に示すように、MIMTM 水銀容器内の圧力応答を FEM 解析コード LS-DYNA を用いて解析的に導出した。MIMTM 水銀容器の下部底板の中心部にストライカーの振動を模擬した加速度を負荷した際の圧力応答を解析した。ストライカー部分で実測した MIMTM の各パワーにおける振動加速度波形に対して、重畳する高周波数成分を除去するために、10 kHz のローパスフィルタを通過させた波形を解析の入力条件として用いた。解析モデルは、8 接点ソリッド要素の 1/4 対象モデルであり、総要素数、最小要素寸法は、それぞれ約 20 万、 $0.2 \times 0.2 \times 1.0$ mm である。水銀要素には、水銀の蒸発あるいはキャビテーションの発生による水銀の剛性変化を、カットオフ圧力として考慮できる ELASTIC FLUID モデルを用いた。本研究では、これまでに行った、狭隙部が無い場合の圧力計測結果に基づいてカットオフ圧力を -0.12 MPa とした(Naoue and Futakawa, 2013)。

4・2 キャビテーション気泡挙動の簡易解析

解析により得た狭隙部での圧力応答に対するキャビテーション気泡の挙動を評価するために、気泡半径の時刻歴変化を Keller の式により簡易的に評価した(図 10(b))。気泡半径の変化は、単一気泡であり、壁面の影響が無いと仮定して、次式により求めた(Brennen, 1995)。

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{C_L}\right) R \ddot{R} + \left(\frac{3}{2} - \frac{\dot{R}}{2C_L}\right) \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(1 + \frac{\dot{R}}{C_L}\right) (P_b[t] - P_{ex}[t + R/C_L] - P_0) + \frac{R}{\rho C_L} \dot{P}_b[t] \quad (2)$$

ここで、 R 及び $R[t]$ は時間依存の気泡半径、 C_L は液体の音速、 ρ は液体の密度、 P_{ex} は周囲圧力(解析の入力値)、添字 0 は初期状態、ドットは時間微分である。 P_b と P_g は、気泡界面の液体側、ガス側の圧力であり、次式で表される。

$$P_b[t] = P_g - \frac{2\sigma + 4\eta\dot{R}[t]}{R[t]} \quad (3)$$

Fig. 11 Time histories of pressure at the center of the channel top at 295 W/pulse with 1.0 mm and 2.3 mm gaps calculated using LS-DYNA. In the case of 2.3 mm gap, the pressure takes the negative value lower than the cut-off pressure from 0.6 to 1.0 ms and from 3.1 to 3.7 ms.

Fig. 12 Time histories of cavitation bubble radii calculated by the Keller equation. In the case of 1.0 mm gap, explosive cavitation bubble growth is not recognized.

Fig. 13 Relationship between the normalized bubble radius, R_{max}/R_0 , and the power calculated by the Keller equation. Normalized bubble radius in 2.3 mm gap case decreases with increasing in power.

$$P_g[t] = \left(P_0 - P_V + \frac{2\sigma}{R[t]} \right) \left(\frac{R_0}{R[t]} \right)^{3\kappa} + P_V \quad (4)$$

ここで、 σ は表面張力、 η は粘性係数、 κ は比熱比、 P_V は蒸気圧である。計算には、300 K の水銀の物性値、 $\rho=13528$ kg/m³、 $P_V=0.28$ Pa、 $\sigma=0.47$ N/m、 $\eta=1.52 \times 10^{-3}$ Pa·s、 $\kappa=1.402$ 、 $P_0=0.1013$ MPa をそれぞれ用いた(日本機械学会, 1983)。

4・3 解析結果

図 11 に 295 W/pulse ギャップ 1.0 mm 及び 2.3 mm の Channel top における圧力応答の解析結果を示す。ギャップ 1.0 mm では、負圧がカットオフ圧力まで到達していないことが分かる。一方、ギャップ 2.3 mm では、負圧は、0.6~1.0 ms 及び 3.1~3.7 ms でカットオフ圧力に到達している。これは、水銀容器内の圧力波が試験片の外周から回り込んで狭隙部に達するため、試験片外周部からの入射面積の差によって生じる差であると考えられる。図 11 に示した圧力応答を入力に用い、気泡核半径を 50 μ m として求めたキャビテーション半径の時刻歴変化を図 12 に示す。ギャップ 1.0 mm では、キャビテーション気泡は、成長せずに振動しているだけである。これは、キャビテーションの気泡核半径に依存するが、ギャップ 1.0 mm ではキャビテーション気泡が成長する圧力(Blake の臨界圧力)に達しないためである(Blake, 1949)。一方、2.3 mm の場合は、爆発的な気泡の成長と崩壊が 2 度生じてい

る。また、最大気泡半径は2度目(3.1~4.1 ms)の気泡の方が1度目(0.6~1.2 ms)よりも大きいことが分かる。さらに、2度目の気泡崩壊のタイミングは、図 7(b)に見られた高周波数成分の発生時刻と対応している。

同様に、他のパワー、ギャップにおいても圧力応答を解析し、キャビテーション気泡の挙動を求めた。一例として、560 W/pulse のギャップ 2.3 mm の結果を図 12 に示す。パワーの低い 295 W/pulse の方が最大気泡半径が大きくなることが分かる。また、気泡半径の時刻歴応答より最大気泡半径を導出した。パワーと最大半径との関係について、初期半径で規格化した結果を図 13 に示す。ギャップ 2.3 mm では、パワーが高くなるに従い最大半径が小さくなる傾向が見られた。キャビテーション気泡崩壊時に発生する衝撃圧力は、初期半径が同じ場合、最大半径に比例する(Akhatov, 2001)。従って、295 W/pulse で解析的に予測された二回目のキャビテーション気泡が、損傷の形成に大きく寄与し、560 W/pulse よりも激しい損傷を形成したと考えることができる。一方、ギャップ 1.5 mm 及び 1.0 mm では、解析で得られた試験片近傍での圧力は Blake の臨界圧力に到達せず、顕著なキャビテーション気泡の成長は生じない結果となった。しかしながら、実験では、図 4 に示したように、ギャップ 2.3 mm と比較して程度は少ないが、キャビテーションによる損傷が形成されており、実験結果と対応する解析結果が得られていない。本解析は、壁面の影響が無いと仮定した簡易解析であり、壁の影響による気泡の変形、また、それに伴う衝撃力の変化を再現できていないためと考えられる。

5. お わ り に

狭隘流路内部でのキャビテーション損傷と気泡の成長・崩壊挙動について、壁面のギャップと衝撃圧の強度(パワー)を変化させた静止水銀中での実験と圧力応答に焦点を置いた数値解析により調べた。その結果、狭隘部に形成される損傷は、バルク側と比較して小さくなることを実験的に確認した。これは、キャビテーション気泡の境界条件である壁面間の距離の影響を強く受けているためであると考えられる。また、形成される損傷の程度は、衝撃圧の強度に直接相関は見られず、ギャップ 2.3 mm では、最も低いパワーで最も激しい損傷が観測された。さらに、数値解析により圧力応答及びキャビテーション気泡の成長・崩壊挙動を調査した結果、パワーが低い場合でも2回目のキャビテーションにより激しい損傷が形成されることを示唆した。

狭隘流路を有する二重壁構造の水銀ターゲット容器では、低い陽子ビームパワーで激しい損傷が生じる可能性があることに注意しなければならない。次のステップとして、狭隘部でのキャビテーション損傷について流動条件下で評価する計画である。

なお、本研究の一部は JSPS 科研費 23360088 の助成により行われた。

文 献

- Akhatov, I., Lindau, O., Topolnikov, A., Mettin, R., Vakhitova, N., Lauterborn, W., Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble, *Physics of Fluids*, Vol. 13, No. 10 (2001), pp. 2805–2819.
- Blake, F., G., The properties of gaseous solutions as revealed by acoustic cavitation measurement, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 21, No. 4 (1949), p. 464.
- Brennen, C. E., *Cavitation and Bubble Dynamics*, Oxford University Press, New York (1995).
- Chahine, G.L., Experimental and asymptotic study of nonspherical bubble collapse, *Applied Scientific Research*, Vol. 38 (1982), pp. 187–197.
- Futakawa, M., Kogawa, H., Hino, R., Date, H., Takeishi, H., Erosion damage on solid boundaries in contact with liquid metals by impulsive pressure injection, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28 (2003a), pp. 123–135.
- Futakawa, M., Naoe, T., Kogawa, H., Tsai, C., Ikeda, Y., Pitting damage formation up to over 10 million cycles off-line test by MIMTM, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 40, No.11 (2003b), pp. 895–904.
- Futakawa, M., Kogawa, H., Hasegawa, S., Naoe, T., Ida, M., Haga, K., Wakui, T., Tanaka, N., Matsumoto, Y., Ikeda, Y., Mitigation technologies for damage induced by pressure waves in high-power mercury spallation neutron sources (II) -Bubbling effect to reduce pressure wave-, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 45, No. 10 (2008), pp. 1041–1048.
- Futakawa, M., Naoe, T., Kogawa, H., Damage diagnostic of localized impact erosion by measuring acoustic vibration, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 41, No.11 (2004), pp. 1059–1064.

- Ikeda, Y., J-PARC status update, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 600 (2009), pp. 1–4.
- Ishida, H., Nuntadusit, C., Kimoto, H., Nakagawa, T., Yamamoto, T., Cavitation bubble behavior near solid boundaries, Proceedings of Fourth International Symposium on Cavitation (CAV 2001), June 20–23 (2001), California Institute of Technology, Pasadena, CA USA.
- McClintock, D., Riemer, B., Ferguson, P., Carroll, A., Dayton, M., Initial observations of cavitation-induced erosion of liquid metal spallation target vessels at the Spallation Neutron Source, Journal of Nuclear Materials, Vol. 431 (2012), pp. 147–159.
- McManamy, T., SNS October 2008 status, Journal of Nuclear Materials, Vol. 398 (2010), pp. 10–14.
- Naoe, T., Futakawa, M., Shoubu, T., Wakui, T., Kogawa, H., Takeuchi, H., Kawai, M., Mitigation technologies for damage induced by pressure waves in high-power mercury spallation neutron sources (I) -Material surface improvement-, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 45, No. 7 (2008a), pp. 698–703.
- Naoe, T., Ida, M., Futakawa, M., Cavitation damage reduction by microbubble injection, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 586 (2008b), pp. 382–386.
- 直江崇, 二川正敏, 小山智史, 粉川広行, 池田裕二郎, 気泡崩壊誘起音響振動を用いた壊食損傷評価, 実験力学, Vol. 5, No. 3 (2005), pp. 280–285.
- Naoe, T., Futakawa, M., Optically observation of mercury cavitation bubble collapsing, Experimental Thermal and Fluids Science, Vol. 44 (2013), pp. 550–555.
- 沖田浩平, 高木周, 松本洋一郎, 気泡を含む液体金属中における熱衝撃に伴う圧力波の伝播, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 52, No. 716 (2006), pp. 885–892.
- Quinto-Su, P.A., Lim, K.Y., Ohl, C.-D., Cavitation bubble dynamics in microfluidic gaps of variable height, Physical Review E, Vol. 80 (2009), pp. 047301–1–4.
- Riemer, B., Haines, J., Wendel, M., Bauer, G., Futakawa, M., Hasegawa, S., Kogawa, H., Cavitation damage experiments for mercury spallation targets at the LANSCE – WNR in 2005, Journal of Nuclear Materials, Vol. 377 (2008), pp.162–173.
- Shima, A., Sato, Y., The behavior of a bubble between narrow parallel plates, Journal of Applied Mathematics and Physics, Vol. 31 (1980), pp. 691–704.
- Skala, K., Bauer, G., On the pressure wave problem in liquid metal targets, Proceedings of 8th International Collaboration on Advanced Neutron Source (ICANS-XIII), Villigen, Switzerland, Oct. 11–14 (1995), pp. 559–576.
- 日本機械学会編, 流体の熱物性値集 (1983), p. 193.

References

- Akhatov, I., Lindau, O., Topoluikov, A., Mettin, R., Vakhitova, N., Lauterborn, W., Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble, Physics of Fluids, Vol. 13, No. 10 (2001), pp. 2805–2819.
- Blake, F., G., The properties of gaseous solutions as revealed by acoustic cavitation measurement, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 21, No. 4 (1949), p. 464.
- Brennen, C. E., Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford University Press, New York (1995).
- Chahine, G.L., Experimental and asymptotic study of nonspherical bubble collapse, Applied Scientific Research, Vol. 38 (1982), pp. 187–197.
- Futakawa, M., Kogawa, H., Hino, R., Date, H., Takeishi, H., Erosion damage on solid boundaries in contact with liquid metals by impulsive pressure injection, International Journal of Impact Engineering, Vol. 28 (2003a), pp. 123–135.
- Futakawa, M., Naoe, T., Kogawa, H., Tsai, C., Ikeda, Y., Pitting damage formation up to over 10 million cycles off-line test by MIMTM, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 40, No.11 (2003b), pp. 895–904.
- Futakawa, M., Kogawa, H., Hasegawa, S., Naoe, T., Ida, M., Haga, K., Wakui, T., Tanaka, N., Matsumoto, Y., Ikeda, Y., Mitigation technologies for damage induced by pressure waves in high-power mercury spallation neutron sources (II) -Bubbling effect to reduce pressure wave-, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 45, No. 10 (2008), pp. 1041–1048.
- Futakawa, M., Naoe, T., Kogawa, H., Damage diagnostic of localized impact erosion by measuring acoustic vibration, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 41, No.11 (2004), pp. 1059–1064.
- Ikeda, Y., J-PARC status update, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 600 (2009), pp. 1–4.
- Ishida, H., Nuntadusit, C., Kimoto, H., Nakagawa, T., Yamamoto, T., Cavitation bubble behavior near solid boundaries,

- Proceedings of Fourth International Symposium on Cavitation (CAV 2001), June 20–23 (2001), California Institute of Technology, Pasadena, CA USA.
- McClintock, D., Riemer, B., Ferguson, P., Carroll, A., Dayton, M., Initial observations of cavitation-induced erosion of liquid metal spallation target vessels at the Spallation Neutron Source, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 431 (2012), pp. 147–159.
- McManamy, T., SNS October 2008 status, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 398 (2010), pp. 10–14.
- Naoe, T., Futakawa, M., Shoubu, T., Wakui, T., Kogawa, H., Takeuchi, H., Kawai, M., Mitigation technologies for damage induced by pressure waves in high-power mercury spallation neutron sources (I) -Material surface improvement-, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 45, No. 7 (2008a), pp. 698–703.
- Naoe, T., Ida, M., Futakawa, M., Cavitation damage reduction by microbubble injection, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 586 (2008b), pp. 382–386.
- Naoe, T., Futakawa, M., Koyama, T., Kogawa, H., Ikeda, Y., Erosion damage evaluation using acoustic vibration induced by micro-bubble collapse, *Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics*, Vol. 5, No. 3 (2005), pp. 280–285 (in Japanese).
- Naoe, T., Futakawa, M., Optically observation of mercury cavitation bubble collapsing, *Experimental Thermal and Fluids Science*, Vol. 44 (2013), pp. 550–555.
- Okita, K., Takagi, S., Matsumoto, Y., Propagation of pressure waves, caused by a thermal shock, in liquid metals containing gas bubbles, *Transactions of the JSME, Series B*, Vol. 52, No. 716 (2006), pp. 885–892 (in Japanese).
- Quinto-Su, P.A., Lim, K.Y., Ohl, C.-D., Cavitation bubble dynamics in microfluidic gaps of variable height, *Physical Review E*, Vol. 80 (2009), pp. 047301-1–4.
- Riemer, B., Haines, J., Wendel, M., Bauer, G., Futakawa, M., Hasegawa, S., Kogawa, H., Cavitation damage experiments for mercury spallation targets at the LANSCE – WNR in 2005, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 377 (2008), pp.162–173.
- Shima, A., Sato, Y., The behavior of a bubble between narrow parallel plates, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, Vol. 31 (1980), pp. 691–704.
- Skala, K., Bauer, G., On the pressure wave problem in liquid metal targets, *Proceedings of 8th International Collaboration on Advanced Neutron Source (ICANS-XIII)*, Villigen, Switzerland, Oct. 11–14 (1995), pp. 559–576.
- The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *JSME Data Book: Thermophysical Properties of Fluids* (1983), Japan Society of Mechanical Engineers, p.193 (in Japanese).