

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03888

研究課題名（和文）流れ場を有する狭隘壁面間におけるキャビテーション損傷抑制効果の解明

研究課題名（英文）Study on mechanism of the cavitation erosion mitigation in narrow gap under flowing condition

研究代表者

直江 崇（Takashi, Naoe）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究副主幹

研究者番号：00469826

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、大強度陽子線に励起される圧力波に起因する核破砕中性子源水銀標的容器内のキャビテーション現象について、平行平板に挟まれた壁面境界の影響を受ける流れ場の損傷形成メカニズムと陽子線強度依存性を解明することを目的とした。平行平板内に水中火花放電により発生させた圧力波励起キャビテーションについて、高速度撮影による現象の可視化、気泡崩壊圧の計測を通じて、気泡の成長・崩壊挙動に及ぼす壁面境界及び流れの影響を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液体金属を標的に用いたパルス核破砕中性子源は、日本の他、米国でも開発が進められており、同様に標的容器のキャビテーションによる壊食損傷が標的の高出力化及び長寿命化を妨げる因子になっている。米国では、先行して狭隘壁構造の標的容器を採用している。狭隘部のキャビテーションによる損傷は、標的容器の寿命に直結するため、中性子源開発に係る国際ワークショップでも注目度は高く、狭隘部におけるキャビテーション損傷の解明と出力依存性に関する評価は、世界的に進められている中性子源開発に大きく寄与する。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to elucidate the mechanism of cavitation erosion in the narrow gap between the parallel wall under the flowing condition, and its proton beam power dependency for the liquid mercury target vessel of the pulsed spallation neutron source. Growing and collapsing behavior of cavitation bubble generated by an electric spark discharge in water was observed using high-speed video camera, and their collapsing pressure was measured as vibration of wall aiming to investigate the effect of gap width and flow velocity on damage formation.

研究分野：機械工学

キーワード：キャビテーション 圧力波 高速度撮影 水中火花放電 壊食損傷

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

大強度陽子加速器研究施設 (J-PARC) に設置されているパルス核破砕中性子源である液体水銀標的に、最大 1 MW の大強度陽子線を入射すると、核破砕反応による中性子の発生と共に、入射エネルギーの約半分が熱に変わるため、水銀の急激な発熱に起因する圧力波が発生する。この圧力波が水銀中を伝ばし、壁面で反射する過程で負圧によるキャビテーションが生じる。このキャビテーションは、標的容器と呼ばれる液体水銀を内包するステンレス鋼製の薄肉容器に激しい壊食損傷を引き起こし、また、損傷の程度は陽子線強度に依存して増大することが数値解析、オフビーム、及びオンビームの損傷実験において確認されている。

同様に液体水銀標的を採用している米国中性子源では、大強度の陽子線入射による標的先端部の熱応力を低減することを目的として、先端部の流速を増加させて冷却効率を高めるために、狭隘流路を有する部分的な 2 重壁の標的容器が考案された。

陽子及び中性子照射を受けた材料の照射後試験に供する試料の採取、及び標的容器の内壁に形成されたキャビテーションによる損傷を確認するために、使用後の容器を切出し、観察を実施するなかで、狭隘流路に接する面では半無限境界の水銀に接する面と比較して著しく損傷が低減されていることが確認された [1]。同様な 2 重壁構造容器が J-PARC でも採用され、使用後に損傷を確認した結果、損傷が陽子線強度に依存しないという従来の定説から逸脱した結果が観測された [2]。

### 2. 研究の目的

本研究は、大強度陽子線に励起され圧力波に起因するキャビテーション現象について、壁面境界の影響を強く受ける流れ場における損傷形成メカニズムと陽子線強度依存性を解明することを目的とした。狭隘壁面間における水中火花放電により模擬的に発生させた圧力波励起キャビテーションについて、高速度撮影による可視化、崩壊圧の計測を通じて、キャビテーション気泡の成長・崩壊挙動に及ぼす壁面境界の影響及び流れの影響を明らかにすることに加えて、キャビテーション気泡の崩壊が引き起こす損傷に対する圧力波の強度依存性の解明を目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 水中火花放電によるキャビテーション気泡の生成と可視化

本研究では、キャビテーションによる気泡の挙動を評価するために、水中で電極間に 6 kV インパルス電圧を印可することでキャビテーションを発生させる水中火花放電法を用いた。可視化には、超高速ビデオカメラ (HPV-X, Shimadzu) を用い、白色照明 (LLBK1-LA-001, Aitech) を光源としたシャドウグラフ法により気泡の挙動を撮影した。電極の周囲に振動加速度計 (PV-90B, Rion) を設置し、放電による電磁ノイズからパルスジェネレータにより高速度撮影のトリガーを生成した。

#### (2) 流路幅と気泡崩壊衝撃力の相関に関する評価 (流れなし)

狭隘流路中のキャビテーション気泡の挙動と衝撃力の関係を把握するための基礎試験として、静止中の気泡挙動を評価した。図 1 に実験体系を示す。水槽内に狭隘流路を模擬したアクリル製の平行平板を設置し、平板の中央部に直径 1 mm の銅ワイヤー製の電極でキャビテーションを発生させた。水槽下部に圧力計 (113B24, PCB Piezotronics) を設置し、平行平板の間隔を変化させた場合の気泡崩壊時の衝撃圧力の変化を測定した。

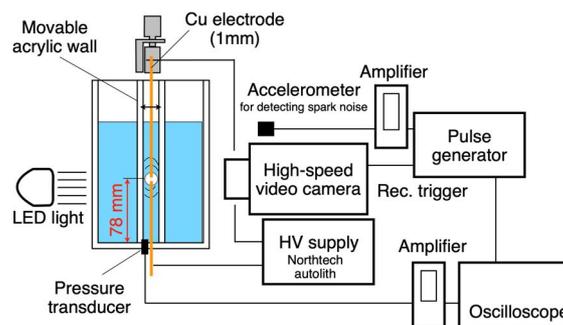


図 1 静止中試験装置概略図

#### (3) 流れ場における気泡崩壊衝撃力に関する評価

図 2 に本研究で用いた流動試験装置の概略図を示す。水銀標的容器の先端部分の狭隘流路構造を、アクリル製の矩形流路により模擬し、試験部の両端を小型の循環ループと接続し、流量・圧力を計測できるようにした。ポンプ出口にはパイパス流路を設け、流路内のバルブ開度を

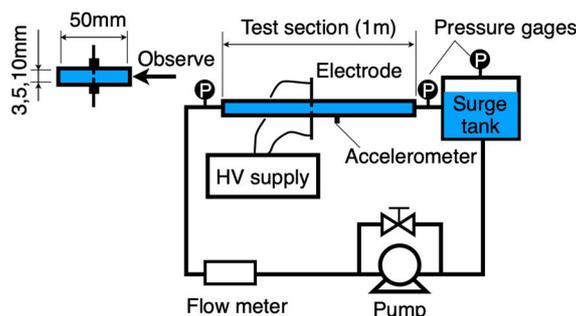


図 2 流動試験装置

調整することで試験部の流量を制御した。矩形流路は奥行きを 50 mm 一定とし、流路高さを 3, 5, 10 mm と変化させた。流路中央部には、直径 3 mm の銅ロッド先端を円錐状に加工した水中火花放電用の電極を挿入するポートを設け、電極間距離を微調整できる機構を付加した。

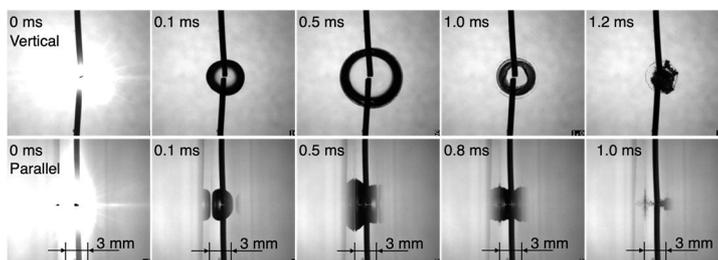


図 3 静止中での気泡挙動（壁面間距離 3 mm）

#### 4. 研究成果

##### (1) 静止中における流路幅と気泡崩壊衝撃力の相関

図 3 に代表的なキャビテーション気泡の挙動として、壁面間距離 3 mm の壁面に対して垂直方向及び平行方向から撮影した結果を示す。なお、垂直方向及び平行方向の画像は個別の気泡を撮影しているため、成長から崩壊までの時間が異なっている。気泡は、約 0.1 ms で壁面に接触し、その後壁面に接触した状態で成長を続け崩壊する。崩壊時には、中央部がくびれながら崩壊していることが分かる。

図 4 に図 3 に示した壁面垂直方向の気泡の中心を通る線のスライス画像を連結することで得た気泡半径の経時変化と圧力計の時刻歴応答を示す。水中火花放電による衝撃圧 (0.1 ms 前後) 及びキャビテーション気泡が崩壊する際の衝撃圧 (1.2 ms 前後) を確認できる。この気泡崩壊時の衝撃圧と壁面間距離の関係を図 5 に示す。図は 10 回の測定の実験値であるが、壁面間距離が大きくなるほど衝撃圧のバラツキが大きくなる傾向が見られた。壁面間距離が 40 mm 以上では、衝撃圧は一定値を示すが、40 mm 以下では壁面間距離が狭くなるほど気泡崩壊時の衝撃力が小さくなる傾向があることを確認できる。

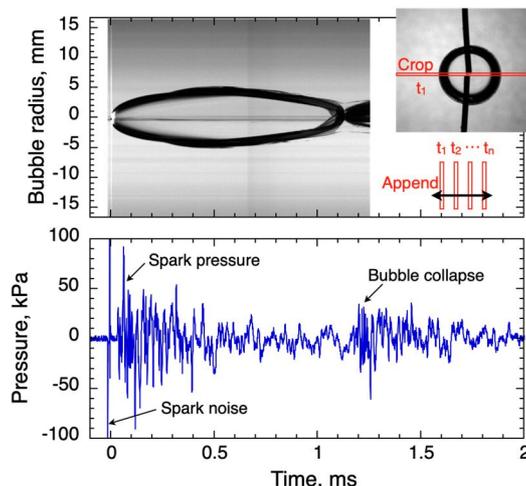


図 4 壁面間距離 (3 mm) における気泡半径の経時変化 (上) と壁面の圧力応答 (下)

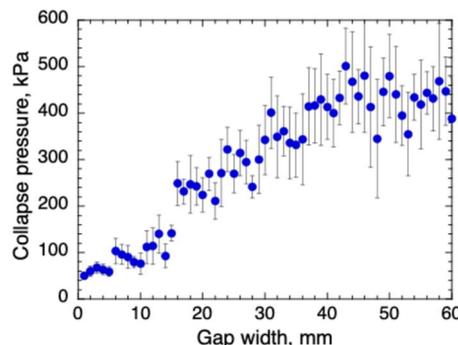


図 5 壁面の最大圧力と壁面間距離の関係

##### (2) 流れ場における流速と気泡崩壊衝撃力の相関

壁面間距離 5 mm、流速 2.5 m/s の流動条件下で撮影した気泡の挙動を図 6 に示す。電極中央部で成長を開始した気泡は、流れの影響を受けて上流側下流側で非対称に成長し、その後中央部がくびれ上下に分裂して崩壊する様子を確認できる。壁面に損傷を形成する支配因子と考えられる気泡崩壊時に放出されるマイクロジェットは、壁面に向かって放出されており、研究開始当初に狭隘流路内部で生じる損傷低減メカニズムと考えていた現象は確認できなかった。

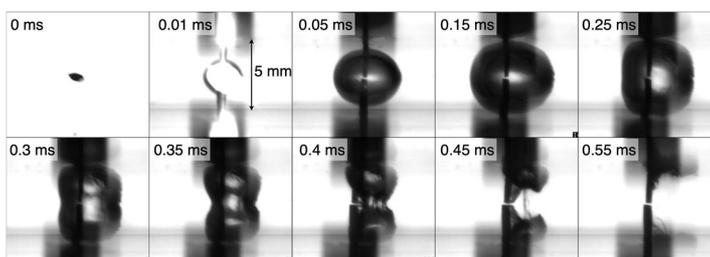


図 6 流動下での気泡挙動（壁面間距離 5 mm 流速 2.5 m/s）

図 7 に電極から下流側に 50 mm の位置に設置した振動加速度計により測定した壁面振動のピーク値と流速の関係を示す。図 4 に示した圧力応答と同様に、振動加速度応答にも、放電時の圧力波による振動と、キャビテーション気泡崩壊時の振動の 2 つのピークがあり、それぞれのピーク値を抽出している。放電時の圧力波に起因する振動にはバラツキがあるが、本研究で実施した流速の範囲では、キャビテーション気泡崩壊に伴う衝撃圧に起因する壁面振動の流速依存性は明瞭ではない。壁面間距離 3 mm でも同様に流速依存性は確認できなかった。

以上の結果から、本研究で実施したキャビテーション気泡の直径と壁面間距離の範囲では、狭隘流路内で生じるキャビテーションに起因する損傷には流速よりも壁面間距離の影響が支配的であると考えられる。出力依存性については、水中火花放電の出力の制御が困難であったため系統的に評価することができていないため、数値解析的な考察を継続していく。

<引用文献>

- [1] D. McClintock, et al., J. Nucl. Mater. 431 (2012) 147-159.
- [2] 直江 崇, 他, JAEA Technology, 2023-22.

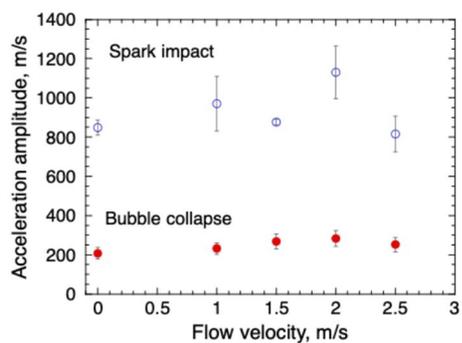


図7 壁面振動加速度と流速の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 直江崇, 涌井隆, 木下秀孝, 粉川広行, 勅使河原誠, 羽賀勝洋	4. 巻 22
2. 論文標題 水銀ターゲット容器内壁のキャビテーション損傷観察に関する技術資料(2)キャビテーション損傷深さの測定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JAEA-Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11484/jaea-technology-2023-022	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takashi Naoe, Takashi Wakui, Hidetaka Kinoshita, Hiroyuki Kogawa, Koichi Saruta, Makoto Teshigawara, Katsuhiro Haga
2. 発表標題 Progress of the cavitation damage inspection for the J-PARC mercury target vessel
3. 学会等名 15th International Workshop on Spallation Materials Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 直江崇, 粉川広行, 涌井隆, 羽賀勝洋
2. 発表標題 中性子ターゲット容器寿命予測
3. 学会等名 第14回 MLFシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Naoe, Hiroyuki Kogawa, Takashi Wakui, Koichi Saruta, Makoto Teshigawara, Hidetaka Kinoshita, Katsuhiro Haga
2. 発表標題 Present status of cavitation damage mitigation techniques for the mercury target vessel at J-PARC pulsed spallation neutron source
3. 学会等名 8th High Power Targetry Workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap <a href="https://researchmap.jp/read0204155">https://researchmap.jp/read0204155</a> ResearchGate <a href="https://www.researchgate.net/profile/Takashi_Naoe">https://www.researchgate.net/profile/Takashi_Naoe</a> JOPSS (研究開発成果検索・閲覧システム) <a href="https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/interSearch">https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/interSearch</a> 物質・生命科学実験施設 研究成果一覧 <a href="https://mlfinfo.jp/ja/publications.html?bl=source">https://mlfinfo.jp/ja/publications.html?bl=source</a>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	梁 輝  (Liang Hui)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------