

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360088

研究課題名(和文)陽子線励起圧力波による水銀中キャビテーションとその抑制手法に関する包括的研究

研究課題名(英文)Comprehensive study on mercury cavitation by proton beam-induced pressure waves and its mitigation techniques

研究代表者

二川 正敏(Futakawa, Masatoshi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARCセンター物質生命科学ディビジョン・研究主席

研究者番号：90354802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、液体水銀中にガスマイクロバブルを注入することにより、核破砕中性子源の水銀標的内に生じる陽子線励起圧力波、及びそれにより誘発するキャビテーションを低減するメカニズムを定量的に究明して、水銀標的の実用的な防護策を構築することを目的とした。すなわち、壁面近傍の流動気泡群分布、変動する弾性構造体と不均一気泡群との緩衝効果を加味した圧力波伝ば、壁面近傍流れ場でのキャビテーション気泡の成長・崩壊挙動、注入気泡条件と固体壁面損傷の相関について検討し、メガワット級の核破砕中性子源の実現に対して大きな障壁となるキャビテーションによる損傷を低減するための技術を構築した。

研究成果の概要(英文)：The purpose in this study is to develop the practical protection technologies for mitigating the pressure waves by using the microbubble injection technique in the liquid mercury spallation neutron source. In order to investigate the mitigation technologies from the viewpoints of distribution of injected bubbles near the wall, the pressure wave propagation including the damping effect resulted from the interaction between elastic walls and inhomogeneous distributed bubble cloud were examined. Furthermore, the behavior of cavitation bubbles in the narrow channel and the relationship between the injected bubble condition and the damage at the wall were systematically investigated through the numerical calculations and experiments.

研究分野：工学

キーワード：マイクロバブル キャビテーション 損傷 圧力波

1. 研究開始当初の背景

近年、液体金属はその高い伝熱特性と冷却効率が注目され、様々な原子力・高エネルギー施設において使用が検討されている。その一例となるのが、国際的に開発が進められている液体水銀を標的に用いた核破碎型中性子源である。しかしながら、研究代表者らが実験的に予測したように、核破碎中性子源では、キャビテーション損傷とそれによる標的の寿命低下が大きな問題となっている。すなわち、陽子線の入射に伴う水銀の急激な熱膨張によって強力な圧力波が放射され、その結果引き起こされるキャビテーションが、水銀を封じ込める容器の寿命を著しく縮める。現在、日米欧の研究者らがこの問題の解決を目指した研究を展開している。

液体金属中におけるキャビテーション損傷は、従来の水中におけるものに比べ構造物に極めて大きなダメージを与えると共に、壁面近傍を流れる水銀と固体表面の相互作用が損傷度合いを決める重要な因子となることが推測される。従って、強い衝撃圧を受ける流動水銀中でのキャビテーションを抑制し、損傷を低減するための技術を開発すること、そして、その損傷抑制技術が持つ基本メカニズムを解明し、性能最適化を図ることが緊急の課題である。

2. 研究の目的

これまでに、液体水銀中におけるキャビテーション損傷試験や、流動水銀中へ陽子線を入射する実験及び解析を通じて、液体水銀中に分散させたマイクロバブルが、目覚ましい衝撃圧低減効果を持つことを実証した。しかしながら、流動下で強い負圧を受ける液体中で発生するキャビテーション気泡の挙動や、その弾性壁面との相互作用、不均一な分布を持ったマイクロバブル群が持つ圧力波低減効果、予備解析により予測されたマイクロバブル群の崩壊から来る強い衝撃圧などについては、未解明な点が多く残っている。それ故、これまでに得られた知見を基に、実環境条件を一層考慮した上で、気泡注入による圧力波低減効果を最大限発揮せしめる技術の確立を目的とし、以下の項目に関する研究を継続することにした。(1) 壁面近傍の流動気泡群分布、(2) 変動する弾性構造体と不均一気泡群との干渉効果を考慮した圧力波伝ばに関する実験的・解析的評価、(3) 壁面近傍流れ場でのキャビテーション気泡の成長・崩壊挙動及び損傷の評価、(4) 注入気泡条件と固体壁面損傷の相関評価。各項目の物理時間領域を図1に示す。これらの項目について課題解決に取り組み、マイクロバブルによる実用可能な圧力波抑制技術の構築を行った。

3. 研究の方法

(1) 壁面近傍の流動気泡群分布

水銀中で発生する圧力波を気泡群あるい

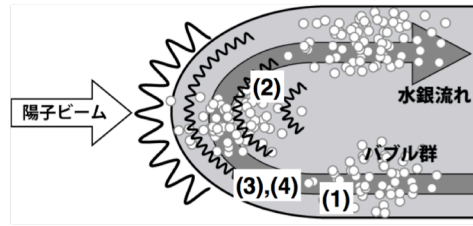


図1 水銀標的における圧力波の物理時間領域

は、ガス膜で吸収し、壁面でのキャビテーションの発生を防ぐための検討として、水銀標的に実装可能な気泡生成器、及びガス膜発生部の形状や流動条件を検討した。まず、可視化が容易な水ループを用いた可視化実験を実施した。気泡生成器に関しては、水銀の旋回流によって気柱を粉砕する旋回流型気泡生成器について、これまでに検討したよりも気泡生成器を通る水銀の流量が低下することから、気泡生成器での水銀流動抵抗を増大することなく、生成気泡径を小さくするために、旋回羽根の枚数や角度、及びコア直径の異なるものを複数個製作し、気泡生成器の形状とバブルサイズの相関を評価した。さらに、ガス膜を生成するための基礎実験を水ループを用いて実施した。

(2) 変動する弾性構造体と不均一気泡群との干渉効果を考慮した圧力波伝ばに関する実験的・解析的評価

マイクロバブルの注入条件である水銀流速、気泡注入量、及び気泡サイズを系統的に変化させて気泡条件と圧力波によって形成される損傷との相関について、米国の核破碎中性子源開発チームとの国際共同実験としてロスアラモス国立研究所の加速器を用いた陽子線入射実験を実施した【文献①】。気泡流中での圧力波の伝ばを評価するために、水銀流路の外壁の振動をレーザードップラー振動計により非接触計測し、気泡条件と圧力波によって励起される振動との相関を調べた。

一方、実環境で気泡生成器によって生成されるマイクロバブルは、気泡半径に分布を持っている。そこで気泡半径に分布を持つ液体中での圧力波伝ば・減衰を評価するための解析コードを開発し、陽子線入射実験の体系で圧力波抑制効果の気泡条件依存性について検討した。

(3) 壁面近傍流れ場でのキャビテーション気泡の成長・崩壊挙動及び損傷の評価

圧力波によって激しいキャビテーション損傷が形成される標的容器の先端部の損傷を低減するための方策として、容器先端部分を、狭隘流路を有する二重壁構造にし、水銀の流速を増加させることにした。水銀の流速が速くなると、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攻撃性が低下す

ると期待される．そこで，狭隘流路内に発生するキャビテーション気泡の挙動と，流路幅との関係について明らかにするために，狭隘流路を模擬した二重平板を設置し，平板のギャップ及び圧力波の強度を系統的に変化させた水銀中キャビテーション損傷試験を実施した．また，二重壁構造の容器における内壁側の損傷や破損について，伝ばする圧力波の非接触計測から非破壊的に検出するための検討として，内壁の損傷を模擬した上述の二重平板の体系，及び二重壁構造の水銀標的容器の圧力波伝ば解析を実施した．

(4) 注入気泡条件と固体壁面損傷の相関評価
 (2) で実施した陽子線入射実験により得た固体壁面の損傷の観察結果を精査し，気泡注入条件と損傷の相関について考察した．また，注入マイクロバブルの主たる気泡半径，及びボイド率に対するキャビテーション気泡の攻撃性について評価するために，マイクロ及びマクロ時間空間スケールの負圧に対するキャビテーション気泡の応答を解析した．

4. 研究成果

(1) 壁面近傍の流動気泡群分布

図1に壁面の濡れ性を変化させて幅0.1 mmのコーターによりガス膜を生成した計測結果の一例を示す．気体/液体の流量比は0.1であり，水滴の壁面接触角はそれぞれ 15° ， 90° である．濡れ性の低下により気泡が壁面近くに存在する時間が長くなったために，気泡の成長が進み，気泡が大きくなっていることが分かる．また，出口近傍では気体が膜のように広がっている様子も確認できる．水銀の壁面接触角は約 130° であり，水銀中では浮力は大きい物の容易にガス膜が形成できると考えられる．

旋回流型気泡生成器では，水銀流量低下による旋回流速低減による流動抵抗について，旋回羽根の角度の異なる生成器を複数試験した．この結果，旋回羽根の枚数を4枚から2枚にし，コア直径を従来の半分とすることにより，水銀流量が低減しても，従来の生成器と同等の水銀流動抵抗で，従来と同等の気泡を生成することを可能とした．気泡生成に加えてガス膜を形成することで圧力波及びキャビテーション損傷の低減効果が更に助長されると考えられる．

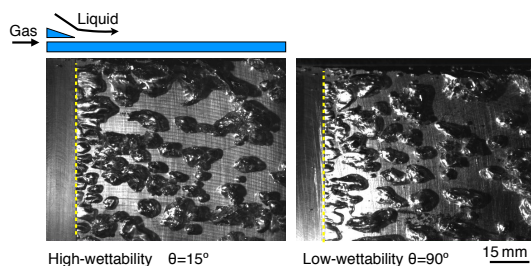


図1 コーターによるガス膜形成の一例

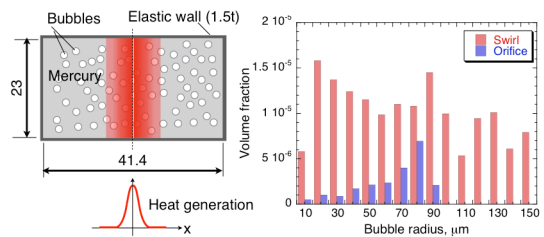


図2 圧力波伝ばの解析体系と気泡半径分布

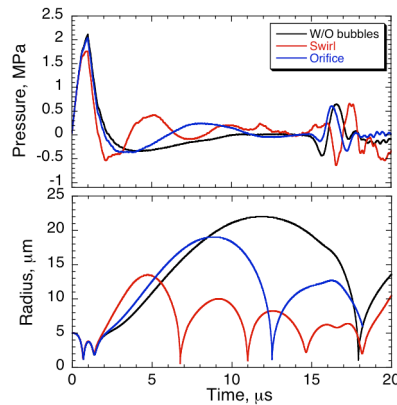


図3 弾性壁の圧力応答とキャビテーション気泡の挙動

(2) 変動する弾性構造体と不均一気泡群との干渉効果を考慮した圧力波伝ばに関する実験的・解析的評価

文献①の実験を再現する矩形断面の水銀流路中(図2左側)に，図2右に示すような気泡半径に分布がある気泡群を分散させた解析モデルを作成し，陽子線入射を模擬した熱入力(1.45 J/cc)を負荷した場合における壁面での圧力応答を評価した．図3に長手方向中央壁面における圧力応答と，その圧力に対する初期半径 $5\ \mu\text{m}$ のキャビテーション気泡の時刻歴応答を示す．ボイド率が低いため，正の圧力は気泡注入により殆ど低減されていないことが分かる．一方，負気泡注入によって負の圧力の持続時間が低下し，結果としてキャビテーション気泡の成長が抑制されている．陽子線入射実験においても，わずか100回のビーム入射であるが，気泡注入によりキャビテーション気泡の攻撃力が抑制されたことを示唆する損傷痕深さの低下が観測された．

(3) 壁面近傍流れ場でのキャビテーション気泡の成長・崩壊挙動及び損傷の評価

図4に示すような狭隘流路構造を模擬した平行平板を設置した水銀容器内で 10^6 回の衝撃的な負圧を負荷し，形成されたキャビテーション損傷を観察した．図5にレーザー顕微鏡による高倍率観察結果の一例と表面の深さ分布より得た最大最小深さから導出した最大粗さ R_z を示す．560W/pulse条件では，壁面間距離の増加と共にピットが増加し， R_z も大きくなっていることが分かる．各壁面間距離において，パワーと R_z の関係を比較すると，

1.0 mm 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、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、壁の影響により圧力勾配が生じ、キャビテーション気泡が非対称に成長することに加え、マイクロジェットの放出方向が変化することに起因すると考えられる。

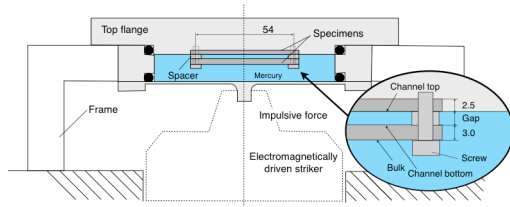


図4 水銀中損傷試験体系

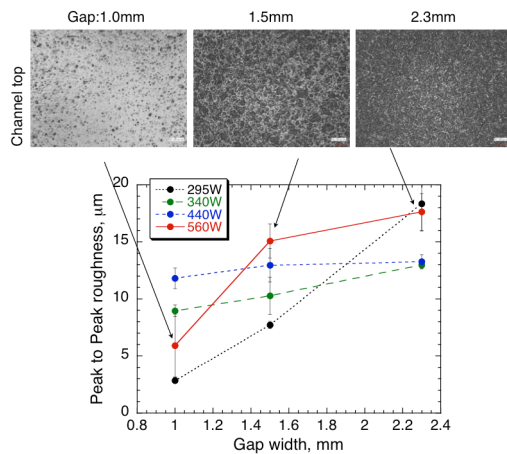


図5 損傷痕深さと狭隘部ギャップの関係

(4) 注入気泡条件と固体壁面損傷の相関評価
 気泡注入条件下で測定した水銀中のマクロ時間スケールの圧力応答に対するキャビテーション気泡半径の時刻歴応答を Keller の式により評価した結果を図 6(上)に示す。注入気泡が膨張時に放射する圧力により負圧値が上昇したことで、キャビテーション気泡の膨張が抑えられ、気泡半径を初期半径で規格化した膨張率は数倍程度であることが分かる。一方、気泡注入時の陽子線入射を模擬したマイクロ時間スケールにおける圧力応答(図 6下)では、初期半径 $50\mu\text{m}$ のキャビテーション気泡の成長が抑制されているが、その効果は十分でなく、気泡を注入しても初期半径 $1\mu\text{m}$ 以下気泡が爆発的に成長し、損傷を形成する懸念がある。

<引用文献>

① B. Riemer, 他 11 名, Small gas bubble experiment for mitigation of cavitation damage and pressure waves in short-pulse mercury spallation targets, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 450, 2014,

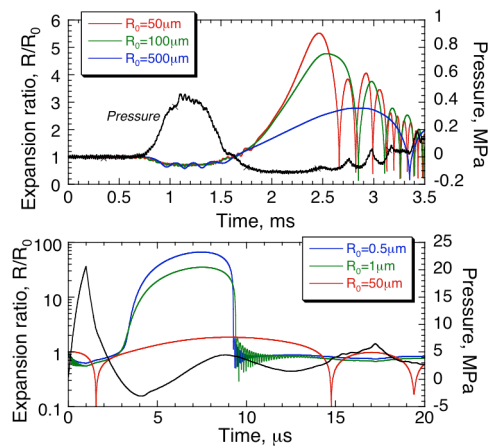


図6 マクロ及びマイクロ時間スケールの負圧に対するキャビテーション気泡の応答

pp. 192-203.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件)

① H. Kogawa, T. Naoe, H. Kyotoh, K. Haga, H. Kinoshita, M. Futakawa, Development of microbubble generator for suppression of pressure waves in mercury target of spallation neutron source, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 査読有, 掲載可, DOI:10.1080/00223131.2015.1009188

② M. Futakawa, Material issues relating to high power spallation neutron sources, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 査読有, Vol. 74, 2015, pp.012001-1-7, DOI: 0.1088/1757-899X/74/1/012001

③ M. Futakawa, T. Naoe, H. Kogawa, K. Haga, K. Okita, Cavitation erosion induced by proton beam bombarding mercury target for high-power spallation neutron source, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 査読有, Vol. 57, 2014, pp.365-370, DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.05.014

④ 直江崇, 二川正敏, 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, *日本機械学会論文集*, 査読有, Vol. 80, 2014, pp.fe0025-1-12, DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0025

⑤ M. Futakawa, T. Naoe, Dynamic responses of a solid wall in contact with a bubbly liquid excited by thermal shock loading, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 査読有, Vol. 35, 2011, pp.1177-1183, DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.04.004

[学会発表] (計 21 件)

① T. Naoe, H. Kogawa, T. Wakui, K. Haga,

M. Teshigawara, S. Meigo, H. Kinoshita, M. Futakawa, H. Takada, Effects of gas microbubbles on pressure wave mitigation in the JSNS mercury target, The 12th International Workshop on Spallation Materials Technology (IWSMT-12), October 19-23, 2014, Bregenz (Austria)

- ② T. Naoe, Z. Xiong, M. Futakawa, Very high-cycle fatigue of the mercury target vessel for the spallation neutron source, The 12th International Workshop on Spallation Materials Technology (IWSMT-12), October 19-23, 2014, Bregenz (Austria)
- ③ S. Hasegawa, K. Okita, M. Futakawa, T. Naoe, Effect of microbubbles on pressure wave mitigation -multiscale simulation for on-beam experiment at WNR2011, The 11th International Workshop on Spallation Materials Technology (IWSMT-11), November 6-9, 2012, Gent (Belgium)
- ④ M. Futakawa, T. Naoe, H. Kogawa, K. Haga, K. Okita, Cavitation erosion induced by proton beam bombarding mercury target for high power spallation neutron source, International Symposium on Cavitation (CAV2012), August 13-16, 2012, Clarke Quay (Singapore)
- ⑤ M. Futakawa, T. Naoe, H. Kogawa, T. Wakui, K. Haga, Mercury cavitation and its mitigation technique for high power pulse spallation neutron sources, WIMRC 3rd International Cavitation Forum 2011, July 4-6, 2011, Warwick (UK)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1件)

名称：スタティックミキサー

発明者：阿部敏達

権利者：同上

種類：特許

番号：2011-173892

出願年月日：2011年8月9日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 1件)

名称：液体金属ターゲット用旋回流型マイクロバブル発生装置及び流体装置

発明者：阿部敏達, 粉川広行, 二川正敏, 直江崇, 羽賀勝洋, 長谷川勝一, 浦野裕太

権利者：筑波大学, 日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：5594680

出願年月日：2010年1月27日

取得年月日：2014年8月15日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

二川 正敏 (FUTAKAWA, Masatoshi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARC センター物質生命科学ディビジョン・研究主席

研究者番号：90354802

(2) 研究分担者

京藤 敏達 (KYOTOH, Harumichi)

筑波大学・システム情報工学研究科(系)・
教授

研究者番号：80186345

沖田 浩平 (OKITA, Kohei)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：20401135

羽賀 勝洋 (HAGA, Katsuhiro)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARC センター物質生命科学ディビジョン
中性子源セクション・研究主幹

研究者番号：20354730

粉川 広行 (KOGAWA, Hiroyuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARC センター物質生命科学ディビジョン
中性子源セクション・研究副主幹

研究者番号：00354738

直江 崇 (NAOE, Takashi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARC センター物質生命科学ディビジョン
中性子源セクション・研究員

研究者番号：00469826

涌井 隆 (WAKUI, Takashi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARC センター物質生命科学ディビジョン
中性子源セクション・研究員

研究者番号：50377214

長谷川 勝一 (HASEGAWA, Shoichi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARC センター物質生命科学ディビジョン
中性子源セクション・研究副主幹

研究者番号：90391333

(3) 連携研究者

松本 洋一郎 (Matsumoto, Yoichiro)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：60111473

金子 暁子 (KANEKO, Akiko)
筑波大学・システム情報工学系・講師
研究者番号：40396940

田仲 伸厚 (TANAKA, Nobuatsu)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号：30323207

佐藤 治道 (SATO, Harumichi)
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製
造プロセス研究部門・研究員
研究者番号：90357145

渡辺 正夫 (WATANABE, Masao)
北海道大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：30274484