

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360090

研究課題名（和文） マイクロバブルによる陽子線励起圧力波低減メカニズムの解明

研究課題名（英文） Elucidation on microbubble mitigation mechanism for pressure waves induced by proton beam bombardment

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・研究主席

研究者番号：90354802

研究成果の概要（和文）：本研究では、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圧力波を低減するためのメカニズムを定量的に究明し、実用的な防護策を構築することを目的として、マイクロバブル生成技術、マイクロバブル群中における圧力波伝ば、マイクロバブル相互作用、マイクロバブルと固液界面損傷について検討し、MW 級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 the development of the practical protection technologies for mitigating the pressure waves by the microbubble injection in the liquid mercury spallation neutron source. We investigated the mitigation technologies from the viewpoints of microbubble injection, pressure wave propagation in bubbly liquid, bubble-bubble interaction, and pitting damage. As results, we developed the technique to mitigate the cavitation damage, which becomes barrier to realize the MW-class spallation target.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	9,450,000	2,850,000	12,300,000
2009 年度	3,300,000	900,000	4,200,000
2010 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	15,150,000	4,470,000	19,620,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

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

世界各国で MW 級の核破砕中性子源の開発が行われている。研究代表者らは、近年 MW 級陽子線を水銀核破砕標的に入射した際に生じる圧力波に起因した、従来想定していなかった損傷形態を発見した。この損傷は、固体金属製構造物と液体金属の界面における固液相互作用からくるサブミクロン損傷で

あり、損傷メカニズムの解明と防護策の確立が強く望まれている。一方で、研究代表者らは、水銀中に人工マイクロバブルを注入することにより、圧力波を減少させる機構を数値解析的に予測すると共に、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により、流動水銀中にバブルを注入することで、注入しない場合と比べて圧力波による壁面

振動が半減されることを確認した。

しかしながら、マイクロバブルを高精度で制御し、水銀中に注入する技術は未だ十分でなく、数値計算結果から予測された圧力波の十分な低減効果を確認するには至らなかった。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの研究で得られた知見を基に、気泡注入による圧力波低減効果のメカニズムを解明し、損傷低減化技術を確立することを目的として、図1に示す4つの領域に対して研究を継続した。以下に、各領域の課題を示す。

(1) マイクロバブル生成技術開発

流動条件下において、マイクロバブルの制御が可能な気泡発生装置（ノズル型、ベンチュリ型、旋回流型）を試作し、気泡分布データを取得すると共に、実験データに対する考察を加える。なお、これまでの数値解析によって示された、圧力波抑制効果が十分発揮されると考えられる気泡条件は、半径 50・ μm 以下、気泡体積率（ボイド率） 10^{-3} 以上である。

(2) マイクロバブル群中における圧力波伝ばに関する実験的検証

マイクロバブルを混合した水と圧力波の干渉効果を測定する。さらに、弾性壁面の影響について、開発した数値解析コードの検証を行うと共に、衝撃圧下でのマイクロバブル群及びキャビテーション気泡の振舞いについて明らかにする。

(3) マイクロバブル相互作用の解明

理論解析及び数値シミュレーションにより、衝撃圧下でのマイクロバブル及びキャビテーション気泡の振る舞いを明らかにする。

(4) マイクロバブルと固液界面損傷の定量評価

衝撃圧を水銀に加えて、固体界面近傍に存在した気泡の崩壊挙動を高速度撮影により観察し、ガス気泡及びキャビテーション気泡との差異を明らかにし、損傷に対する攻撃性を評価する。また、気泡発生要素として使用する微細ノズルについて、圧力波、キャビテーション損傷、及び繰返し応力に対する耐久性を評価する。

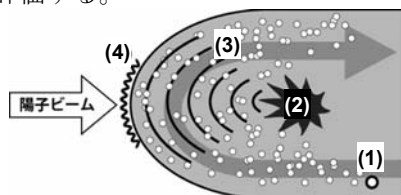


図1 マイクロバブルによる陽子線励起圧

力波低減メカニズムに関する領域

3. 研究の方法

(1) マイクロバブル生成技術開発

流動下におけるマイクロバブル制御技術開発を行うために、水-空気計における気泡実験装置を整備した。ノズル型、ベンチュリ型、旋回流型バブラーを用いて生成した気泡の半径分布、及びボイド率をバックライト法により撮影した画像から評価した。

さらに、気泡半径の制御が可能であるノズル型、及び微細な気泡が生成可能である旋回流型の気泡発生装置について、小型水銀ループを用いた気泡生成実験を行い、アクリル製の流路壁面に付着する気泡の計測から水銀中で生成される気泡半径を評価し、理論式との比較を行った。また、水銀は密度が水に対して約13倍と大きく、生成された気泡が強い浮力により直ぐに上昇してしまうことが懸念される。そこで、ノズル型の気泡発生装置により気泡の上昇速度を実験的に計測し、実機水銀ターゲットにおける気泡発生装置の設置位置について、数値解析により検討した。

(2) マイクロバブル群中における圧力波伝ばに関する実験的検証

気泡混合流体の圧力波伝ばに関する基礎実験として、ノズル型及び旋回流型のバブラーを用いて、矩形流路内に分散させた気泡に対する圧力波の抑制効果を調べた。ここで、圧力波は水中放電法により発生させ、抑制効果について、気泡サイズ、及びボイド率の相関として求めた。

(3) マイクロバブル相互作用の解明

陽子線励起圧力波に対するマイクロバブルの効果を評価するために開発されたPAC-MTコードを用いて、気泡間相互作用、及び弾性壁剛性の影響について解析を行い、気泡半径、ボイド率に対する圧力応答の変化を系統的に調べた。

(4) マイクロバブルと固液界面損傷の定量評価

(1) で使用する小型水銀ループと電磁式衝撃圧負荷試験装置を接続し、衝撃圧負荷部に設置したガラス窓を介して、壁面でのキャビテーション気泡、及び注入ガス気泡の挙動を約10万コマ/秒で撮影し、画像処理により半径の時間変化を評価した。

ノズル型のマイクロバブル生成要素として用いる SUS316 製の微細ノズル ($D_{\text{out}}/D_{\text{in}} = 0.2/0.1 \text{ mm}$) の圧力波及びキャビテーションに対する耐久性を評価するために、水銀中で圧力波負荷試験を行った。また、微細ノズルを流動水銀中に設置する場合、流体振動による疲労破壊が懸念される。さらに、体積に対

する接触面積の比が、バルク材と比較して大きい微細ノズルでは、バルク材の接液面で観測されている水銀浸漬による力学特性変化が顕著に現れると考えられる。そこで、SUS316 製の微細ノズル及び細線に対して水銀浸漬下での疲労試験を行い、水銀との共存性について評価した。

4. 研究成果

(1) マイクロバブル生成技術開発

図2に旋回流型バブラーで計測した壁面に付着した水銀中気泡の写真を示す。また、バブラーから約400mm下流で壁面に付着した気泡の投影面積から、接触角 130° を仮定した気泡体積を導出し、実際の気泡半径分布を推定した結果をノズル型、ベンチュリ型の結果と併せて図3に示す。旋回流型では、半径 $10 \cdot \mu\text{m}$ をピークとした気泡が観測された。一方、ベンチュリ型では、ピーク半径は $30 \cdot \mu\text{m}$ であるが、ばらつきが大きく、 $50 \cdot \mu\text{m}$ 以上の気泡を多く含むことが分かる。なお、ニードル型バブラーは、気泡半径が他のバブラーと比較して大きく、400mmの位置まで到達しなかったため、観測できた位置での気泡半径分布を図示している。

旋回流型バブラーで生成可能な気泡サイズは、流路の絞り比、ベーン角度によって制御可能である。生成される気泡の観測が容易な水を用いた実験により、絞り比、ベーン角を系統的に変化させ、バブラー部での圧力損失、気泡半径を評価し、実機水銀ターゲットに搭載可能な圧力損失 0.1 MPa 以下を満たし、半径 $50 \cdot \mu\text{m}$ 程度の気泡が生成可能なバブラーを開発した。

また、密度及び表面張力を考慮した無次元数を用いることにより、水で行った実験から水銀で生成可能な気泡半径を見積もることが可能であることを水実験、米国核破砕中性子源(SNS)との共同実験として行った実規模水銀ターゲットモデルを用いた気泡生成実験との比較により確認した。しかしながら、実規模モデルを用いた気泡注入実験により、実機ターゲットでは、気泡同士の合泡及び水銀中での強い浮力の影響により、ターゲット先端部において目的(1)に挙げたボイド率 10^{-3} を達成することが困難であることが明らかとなった。

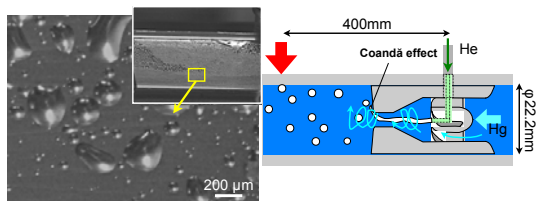


図2 水銀中での旋回流型バブラーによる気

泡生成実験

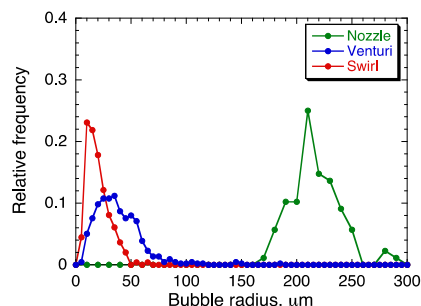


図3 水銀中での気泡半径分布

(2) マイクロバブル群中における圧力波伝ばに関する実験的検証

図4に示す矩形流路内に設置した電極間に約6kVの電圧を印加し、放電させることにより励起される圧力波に対する壁面の衝撃応答を、振動加速度計を用いて計測した。図5に、旋回流型バブラーを用いて、ピーク半径 $50 \cdot \mu\text{m}$ の気泡を注入したときの応答を気泡無しの場合と併せて示す。注入気泡により、立ち上がり部分の振幅が著しく低下している。また、注入する気泡のボイド率増加に伴い、音速が低下するため加速度が最大値を示す時刻が遅れる。一方、ニードル型バブラーでは、気泡の固有振動数が圧力波の周期(最大圧力まで $1.5 \cdot \text{s}$)と比較して低く、十分な圧力波低減効果が確認されなかった。

図5に示した加速度の最大値のボイド率に対する変化を、気泡が無い場合で規格化して図6に示す。ボイド率 2×10^{-4} で、圧力波に励起される壁面の振動が $1/10$ 程度まで低下していることが分かる。また、PAC-MTコードにより評価した壁面近傍の最大圧力を気泡が無い場合で規格化した結果を併せて図6に示す。実験結果は、解析結果で予測された結果と比較して、同じボイド率における圧力波低減効果が顕著に現れていることが分かる。これは、図4に示したように、実験では気泡半径及び空間分布も不均一であるのに対して、解析では均一な状態を仮定したため、解析に比し実験での圧力波の分散効果が強化されたことによると考えられる。また、水銀中の気泡生成実験において 10^{-3} 程度のボイド率を実現することが困難であることが明らかとなったが、実現可能であると見込まれる 10^{-4} 程度でも圧力波抑制効果が十分発揮されることが確認できた。なお、水と水銀の密度、及び表面張力が大きく異なるが、マイクロバブルによる圧力波抑制効果に影響する気泡群の固有振動数は、本研究が対象とする気泡半径・ボイド率の範囲ではほぼ等しくなることから、水を用いた実験により、水銀中の圧力波抑制効果を評価しうることを数値解析

的に確認している。

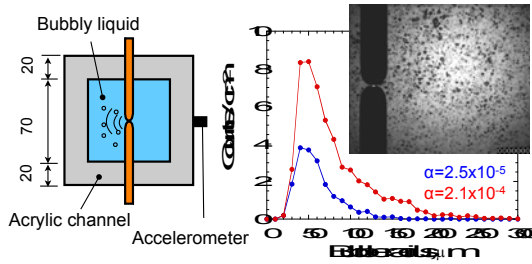


図4 放電法による圧力波実験構成と試験部における旋回流型バブラーで生成した水中の気泡分布

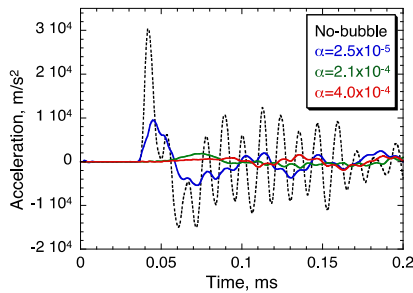


図5 気泡注入による加速度時刻歴応答

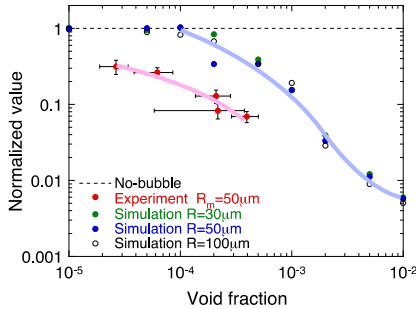


図6 圧力波低減効果に対するボイド率の影響

(3) マイクロバブル相互作用の解明

図7に示すような体系で、半径 $50 \cdot \mu\text{m}$ の気泡を均一に分布させて、MW級の陽子線入射を想定した熱入力 (12J/cc) を与えた場合の弾性壁での圧力応答を図8に示す。ボイド率 10^{-4} 以下では、正の圧力がほとんど低減されないことが分かる。また、ボイド率 10^{-3} では、均一に配置した気泡の共振に起因する強い負圧が発生している。

気泡半径及びボイド率を系統的に変化させて、最大圧力の変化を調べた。ボイド率に対する正圧の最大値の変化を図9に示す。ボイド率の増加に伴い、正圧の最大値は低下する。また、その低下率は気泡半径に依存する。

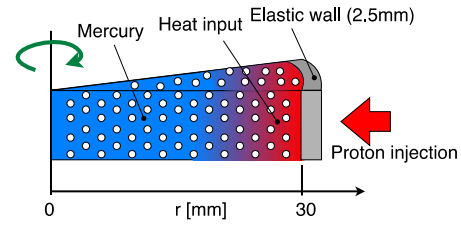


図7 PAC-MTの解析体系 (1次元軸対象)

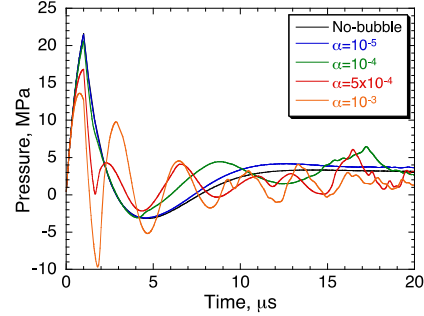


図8 気泡注入による壁面での圧力応答の変化

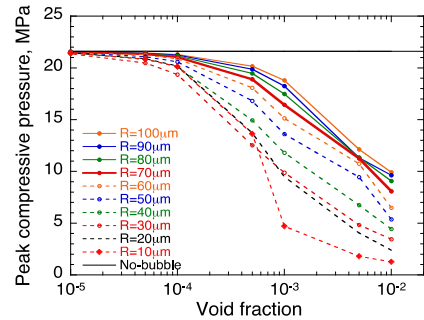


図9 ボイド率による正圧最大値の変化

(4) マイクロバブルと固液界面損傷の定量評価

図10にキャビテーション気泡とガス気泡の時間変化を示す。ガス気泡は、キャビテーション気泡と比較して、膨張率が著しく小さい。また、ガス気泡の崩壊速度は、キャビテーション気泡の崩壊速度と比較して遅いことが分かる。これより、注入したガス気泡が崩壊する際に壁面に負荷される衝撃力は、キャビテーション気泡と比較して低下すると推察される。

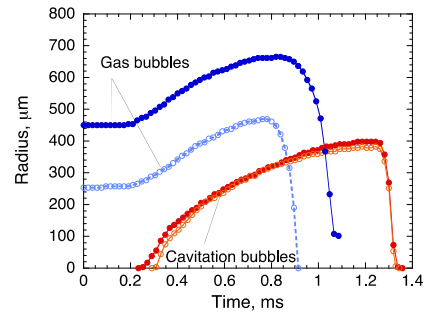


図10 キャビテーション気泡とガス気泡半径の変化

電磁式衝撃圧負荷試験装置を用いて MW 級の陽子線入射時に発生する圧力波に相当する衝撃圧(560 W)を加えた場合と、(2)の数値解析により得たマイクロバブル注入による圧力波低減効果を考慮して、最大圧力が1/10となる衝撃圧を加えた場合(13 W)の微細ノズル表面の損傷を比較した。図 11 に 560 W 条件における 10^7 回衝撃圧負荷後の微細ノズル観察結果を示す。繰り返し負荷される衝撃圧によって、微細ノズル先端が裂けるように破壊すると共に、表面にはキャビテーション損傷が重畳している。組織観察では、ノズル長手方向につぶれたような組織及び製造過程で接合された箇所が見られ、これらを起点として、裂けるように破壊したと考えられる。一方、13 W 条件では、図 11 左に示す試験前の状態と顕著な差は確認されず、マイクロバブルによる圧力波低減効果が発現される場合は、ターゲットノズル材として、十分な強度を有していることを確認した。

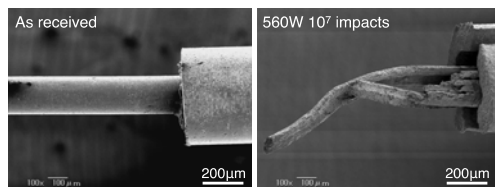


図 11 衝撃圧負荷前後の微細ノズル表面写真

外形 0.2 mm の細線の大気中及び水銀浸漬下での疲労試験結果を図 12 に示す。バルク材では、低サイクル疲労試験において、き裂先端の脆化に起因すると考えられる疲労強度低下が確認されているが、細線では、わずかに疲労強度が増加する傾向が確認された。一方、バルク材の水銀浸漬試験では、水銀浸漬後に水銀に接する極表層部が硬化する現象が確認されている。き裂の発生が疲労破壊に直結するであろう細線では、接液表層部の硬化が疲労強度の増加に寄与したと考えられる。

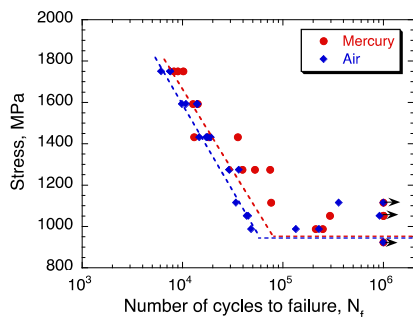


図 14 細線 D=0.2mm の疲労曲線

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① 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
- ② T. Naoe, H. Kogawa, M. Futakawa, M. Ida, Mitigation technologies for damage induced by pressure waves in high-power mercury spallation neutron sources (III) - Consideration of the effect of microbubbles on pressure wave propagation through a water test -, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 査読有, Vol.48, No.6, 2011, pp.865-872,
DOI:10.3327/jnst.48.865
- ③ M. Futakawa, H. Kogawa, S. Hasegawa, T. Naoe, M. Ida, K. Haga, T. Wakui, N. Tanaka, Y. Matsumoto, Y. Ikeda, Mitigation technologies for damage induced by pressure waves in high power spallation neutron sources (II) -Bubbling effects to reduce pressure wave-, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 査読有, Vol.45, No.10, 2008, pp.1041-1048,
DOI: 10.3327/jnst.45.1041

[学会発表] (計 24 件)

- ① M. Futakawa, T. Naoe, H. Kogawa, Impact pressure mitigation in mercury target for pulsed spallation neutron sources, 7-th International Symposium on Impact Engineering (ISIE2010), Warsaw, July 4-7, 2010
- ② M. Futakawa, R&D status on cavitation damage in JSNS of J-PARC/MLF, The 10th International Workshop on Spallation Materials Technology (IWSMT-10), Oct. 2010, Beijing, China
- ③ H. Kogawa, K. Haga, T. Naoe, H. Kinoshita, M. Ida, M. Futakawa, Development of bubble injection technique in JSNS mercury target, International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS-XIX), March 8-12, 2010, Grindelwald, Switzerland

[産業財産権]

○出願状況 (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および流体装置

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

権利者：筑波大学、日本原子力研究開発機構、(株)エールオー

種類：特許

番号：特願 2010-015204

出願年月日：2010年1月27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
中性子源セクション・研究主席

研究者番号：90354802

(2) 研究分担者

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・研究員

研究者番号：90391333

金子 暁子 (KANEKO AKIKO)

筑波大学・システム情報工学研究科・講師

研究者番号：40396940

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・研究副主幹

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

井田 真人 (IDA MASATO)

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
研究副主幹

研究者番号：60391356

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

(3) 連携研究者

松本 洋一郎 (MATSUMOTO YOICHIRO)

東京大学・工学系研究科・教授

研究者番号：6011473

沖田 浩平 (OKITA KOHEI)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：20401135

田中 伸厚 (TANAKA NOBUATSU)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：30323207

竹村 文夫 (TAKEMURA FUMIO)

独立行政法人産業技術総合研究所・エネルギー
研究開発部門・研究員

研究者番号：20313041

岡本 孝司 (OKAMOTO KOJI)

東京大学・新領域造成科学研究科・教授

研究者番号：80204030

村井 祐一 (MURAI YUICHI)

北海道大学・工学系研究科・准教授

研究者番号：80273001