

機関番号： 82110

研究種目： 若手研究（B）

研究期間： 2008～2010

課題番号： 20760122

研究課題名（和文） 液体金属中キャビテーションに関する理論シミュレーション研究

研究課題名（英文） Theoretical and simulation studies of liquid-metal cavitation

研究代表者

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・研究職

研究者番号： 60391356

研究成果の概要（和文）： 液体金属中で発生するキャビテーションに関する理論シミュレーション研究を通じ、主に複数のキャビテーション気泡が存在する現実的な場での豊かな気泡挙動に関する成果を得た。音による気泡同士の相互作用を考慮したモデルにより、キャビテーション発生の瞬間には様々なパターンの気泡挙動が発現しうることを明らかにした。さらに、気泡同士の相互作用により負の圧力パルスが発せられる可能性や、液体金属中に先在するガス気泡がキャビテーションの発生を押しさえ込む場合があることを見出した。

研究成果の概要（英文）： We have studied theoretically and numerically the dynamic of cavitation bubbles in liquid metals and found that cavitation bubbles reveal a rich dynamics when they interact with each other through sound. We have further found that negative pressure pulses can be generated by bubble-bubble interaction and that pre-existing gas bubbles can suppress the inception of cavitation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 機械工学・流体力学

キーワード： 気泡、キャビテーション、液体金属、壊食、エロージョン、気泡間相互作用、キャビテーション初生

1. 研究開始当初の背景

気泡は人間にとって極めて身近な存在であるが、その振る舞いについてはいまだ未解明な点が多く、そのため機械工学や物理学、医療工学、生物学など、様々な分野において重要な研究対象となっている。とりわけ、圧力波中で体積変化し、相互作用する複数気泡のダイナミクスは、粉体流やカオス系などと並んで古典物理のフロンティアともなっているものである。事実、報告者自身も既報論

文において、複数気泡系には振動位相や共振周波数等の極めて基本的な要素にすら新しい発見の芽が残されているということを描き摘してきた。

気泡はまた、実際的な応用の場において様々な形で利用され、そして、時に問題を巻き起こしてきた。特にキャビテーションによって現れた気泡が持つ強い破壊力は、胆石破壊等の医療技術や水質浄化などに有効利用される一方で、たびたび流体機械の破損事故

を引き起こしてきた。

報告者が属する原子力・高エネルギー科学分野においても、キャビテーション気泡による損傷は重大な問題となっており、例えば液体水銀を中性子発生源とする JSNS (Japan Spallation Neutron Source) の開発においては、高エネルギーの陽子線が水銀に入射した際に発生するキャビテーションが水銀容器の寿命を著しく短縮することが予想されており、水銀を用いた中性子源の実用化に向けて乗り越えるべき大きな課題となっている。

ところが、水中でのものに比べ、液体金属中のキャビテーションを扱った研究事例は世界的に見ても極めて数が少なく、そのため基本的な知見の蓄積が欠如しているのが現状であり、より一層の議論が強く望まれている。

2. 研究の目的

複数の気泡が相互作用する系、すなわち「複数気泡系」が持つ様々な物理的要素のうち、キャビテーション気泡が示す破壊力と強い相関を持つ負圧（負の絶対圧）下での膨張率や崩壊速度の他、気泡同士の相互作用からくる気泡挙動の変化、相互作用する複数気泡が放射する圧力波などについて議論し、液体金属中の気泡挙動に関する基礎的な知見を蓄積する。また、キャビテーション気泡の挙動が液体金属中に発生する負圧に及ぼす効果について議論し、液体金属の限界負圧に関する知見を得る。

さらに、原子力機構 J-PARC センターが水銀中キャビテーションを抑制する目的で試みている「マイクロバブル注入法」を念頭に、ヘリウム気泡が先在する液体金属中のキャビテーション気泡の振る舞いを、異なる種類の気泡間でなされる相互作用までを考慮したモデルによって解き明かす。

議論の対象とする液体金属は主に水銀とするが、ナトリウムやリチウム等、原子力・高エネルギー科学分野での重要な用途を持つ液体金属への展開も視野に入れて議論を進める。また、得られた知見を水の場合と比較することで、液体金属中キャビテーションの独自性を浮き彫りにする。

3. 研究の方法

液体金属中のキャビテーション現象や気泡挙動を、理論と数値シミュレーションによって解析する。解析には主に、coupled Keller-Miksis 方程式と呼んでいる複数気泡モデルを用いる。これは体積変化する球形気泡の運動を記述する Rayleigh-Plesset 型の非線型微分方程式を、気泡自身が放射する圧力波を通じて複数カップリングさせたものである。このモデルを基に、複数気泡の膨張率や崩壊速度、気泡が放射する圧力波などに

関する理論解析および数値シミュレーションを行う。また、液体金属が持つ独自性を浮き彫りにするため、気泡と液体金属の間でなされる熱伝導や、液体金属中でのキャビテーションの発生過程などについて詳細に議論する。

さらに、液体金属中にガス気泡が先在する場合を考え、キャビテーション気泡とガス気泡の相互作用までを考慮に入れた解析により、先在するガス気泡がキャビテーション気泡の発生や運動、液体金属の限界負圧などに与える影響を明らかにする。これに加え、無数の気泡を含む液体中での圧力波伝播を計算できるコードを用い、先在するガス気泡が液体中の圧力変動やキャビテーションに与える効果について補足検討する。

4. 研究成果

(1) 負圧下での複数気泡系のダイナミクス

Coupled Keller-Miksis 方程式を用いて負圧下での複数気泡のダイナミクスについて解析することで、以下のような新しい知見を得た：

- ・気泡の膨張率（最大半径/初期半径）は気泡が崩壊する際の最大収縮速度と良く相関する。
- ・初期半径が大きい気泡は膨張率が比較的低く、そのため最大収縮速度も低くなる。
- ・気泡同士の相互作用により、キャビテーション初生時の気泡の振る舞いが多様に変化する。そして、その変化の仕方は、各気泡の初期半径や気泡間距離などに依存して様々である。

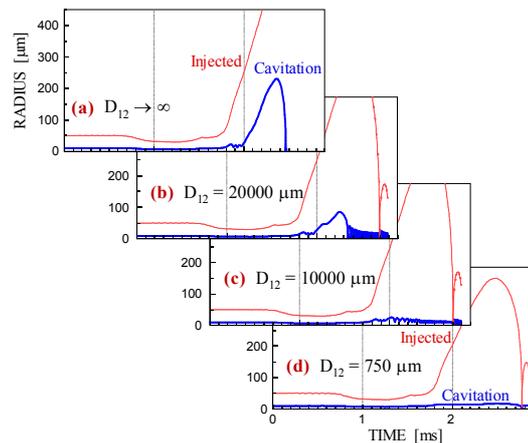


図 1. 相互作用する 2 気泡の挙動。縦軸は気泡半径、横軸は時間、 D_{12} は気泡間距離。気泡同士が接近するにつれ、小さいほうの気泡の急膨張が抑え込まれる。

- ・異なる初期半径を持つ気泡が相互作用するとき、先に急膨張（すなわちキャビテーション初生）を始めた気泡の運動により、後発の気泡の急膨張が抑え込まれる場合がある（図 1）。

・気泡を急膨張させるのに十分な負圧が持続しているにもかかわらず、膨張が中断され崩壊に転ずる場合がある(図2)。また、この過程において、負圧下で気泡が持つ「不安定平衡半径」が重要な役割を担う(図3)。

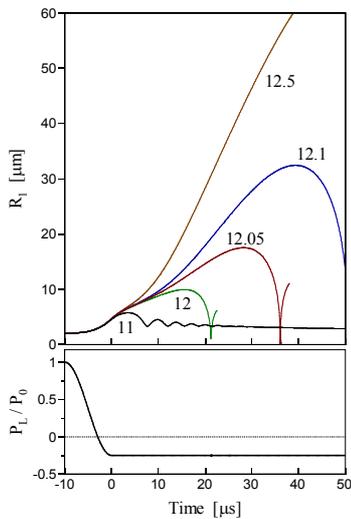


図2. 急膨張の中断。上図は気泡半径、下図は液体圧力を表す。上図中の数字は気泡間距離を両気泡の初期半径の和で割ったもの $[D_{12}/(R_{10}+R_{20})]$ 。気泡間距離が十分に小さい場合、近隣からの気泡(非表示)の影響により急膨張が中断され、収縮に転じる。このような振る舞いは単一気泡では起こりえない。

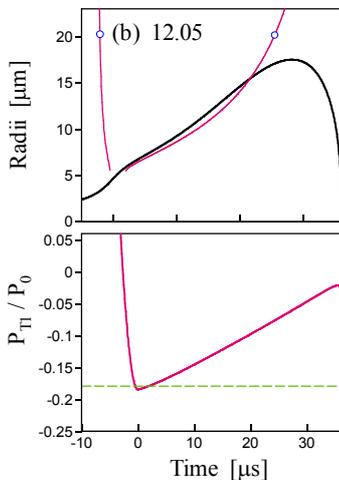


図3. 急膨張の中断と不安定平衡半径。上図は気泡半径(実線)と不安定平衡半径(丸付きの線)、下図は気泡が受ける正味の圧力の時間変化(実線)を表す。上図中の数字は図2と同様。気泡半径が不安定平衡半径に追い抜かれたとき、急膨張の中断が起こる。

・上記した物理は全て、運動する気泡自身が放射する圧力波と、それによる気泡間の相互作用によって引き起こされる。

これらの発見は、「複数の気泡が存在する現実的な場においては、キャビテーションの開始時に起こる現象は非常に複雑で豊かなも

のになり得る」ことを示唆するものである。また、複数気泡系における不安定平衡半径の役割は本研究により世界で初めて明らかにされたもので、今後の様々な方向への発展が期待できるものである。

上述した成果に加え、全ての気泡が同一で、対称に配置され、液体の粘性が無視できると仮定した場合に、非線形連立方程式である coupled Keller-Miksis 方程式が解析的に時間積分できることを見出した。本成果は複数気泡系の基本的性質を分かりやすい形で解き明かすための鍵を与えるものである。

(2) 先在するガス気泡が及ぼす効果

マイクロバブル注入法に関連し、coupled Keller-Miksis 方程式を多数の異種気泡が混在する系にまで拡張し、キャビテーション気泡とヘリウム気泡が相互作用する系での気泡挙動を解析した。これにより、弱い負圧下で現れるキャビテーションについては、十分に大きなヘリウム気泡を用いることで、その発生を適切に抑制することができることを明らかにした。気泡が放射する圧力波を解析することにより、これは先在するヘリウム気泡が液体中の負圧を弱め、キャビテーション気泡の膨張する力を奪うことによるものであることが分かった(図4)。

なお、同様の結果は圧力波伝播コードによっても得られている。これらの成果は、マイクロバブル注入法に新たな最適化指針を与えるものである。

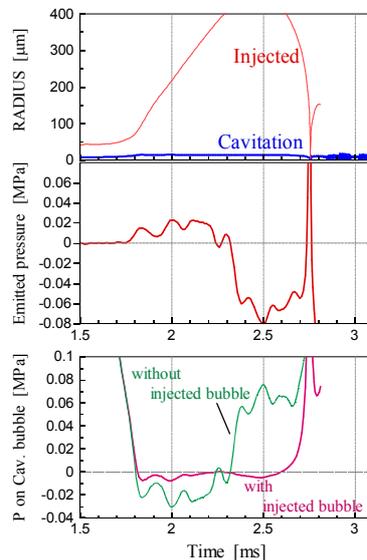


図4. 注入されたヘリウム気泡(Injected)によるキャビテーション抑制と負圧の減少。ヘリウム気泡が放射する圧力波(中図)によりキャビテーション気泡が受ける負圧が減少(下図)、それによりキャビテーションの抑制が起こる。

この検討からはまた、水と水銀の間にある隠された類似性の発見という成果も得られ

た。圧力波伝播コードを用いた解析の結果、気泡の数密度が十分に大きい場合に、両液体中の気泡群が持つ固有振動数がほぼ同値になり、その結果、圧力波に対する気泡群の振舞いが非常に似たものになることを見出したのである。この発見は、毒性を持ち、取り扱いの困難な水銀の代わりに水を用いる代替実験の有用性を示すものである。

(3) 複数気泡系が放つ音、特に負の圧力パルスの生成メカニズム

本研究の副産物として得られた成果に、気泡間相互作用による負圧パルスの生成メカニズムの発見がある。キャビテーション気泡群が崩壊した際にブロードバンドな音響ノイズが発せられることは良く知られているが、その発生メカニズムには未解明な点が残されている。ブロードバンドノイズは一般に正と負の圧力パルスが入り乱れる複雑なものであるが、単一の気泡を仮定した解析からは正の圧力パルスしか発生しないのである(図5)。

報告者は複数気泡系の解析結果の中に負の圧力パルスが現れている例を偶然見つけ、その発生メカニズムの解明に取り組んだ。

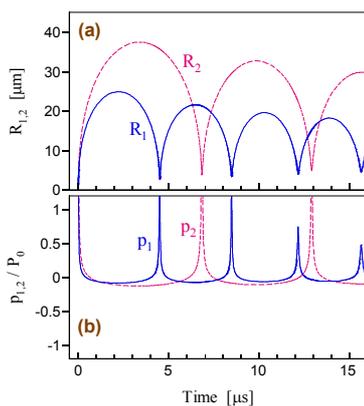


図5. 気泡のダイナミクス(上図)と気泡から放射される圧力波(下図)。気泡同士の相互作用を無視した場合の結果。正の圧力パルスしか放射されていない。

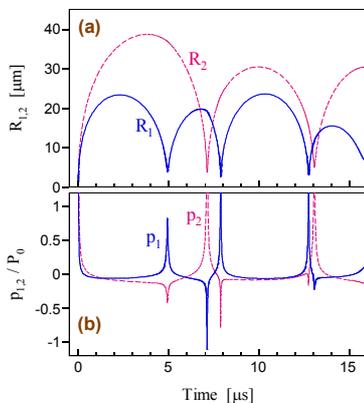


図6. 図5と同様。ただし、気泡同士の相互作用を考慮した場合。正と負両方の圧力パルスが放射されて

いる。

得られた知見は次のようなものである。キャビテーション気泡は崩壊する際に強い正の圧力パルスを放射する。その正圧パルスは液体中を伝わり、近隣の気泡を叩く。この時、圧力パルスは硬い液体から軟らかい気泡に入射することになり、負の圧力パルスとなって反射する。これが報告者の明らかにした負圧パルスの生成メカニズムである。

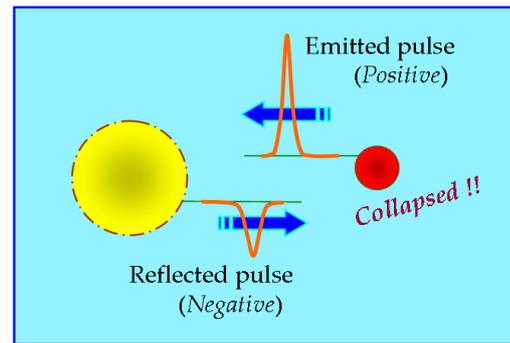


図7. 負圧パルスの生成メカニズム。気泡(右丸)が崩壊すると、正の圧力パルスが放射される。この圧力パルスが近隣の気泡(左丸)に入射すると、位相が反転し、負圧パルスとなった反射波が放射される。

この成果はキャビテーションノイズの発生過程に新たな視点を加えるものであり、また、テッポウエビが自分のハサミを使って放つ雑音のメカニズム解明などにも貢献するものである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- [1] Takashi Naoe, Hiroyuki Kogawa, Masatoshi Futakawa, and Masato 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* **48**(6), pp.865-872 (2011), 査読有り.
- [2] Katsuhiro Haga, Takashi Naoe, Hiroyuki Kogawa, Hidetaka Kinoshita, Masato Ida, Masatoshi Futakawa, Bernard W. Riemer, Mark W. Wendel, David K. Felde, and Ashraf A. Abdou, "Distribution of microbubble sizes and behavior of large bubbles in mercury flow in a mockup target model of J-PARC," *Journal of Nuclear Science and Technology* **47**(10), pp.849-852 (2010), 査読有り.
- [3] Masato Ida, Katsuhiro Haga, Hiroyuki Kogawa, Takashi Naoe, and Masatoshi Futakawa, "Differences and similarity in the

dynamic and acoustic properties of gas microbubbles in liquid mercury and water,” *Journal of the Physical Society of Japan* **79**, 044401 (2010), 査読有り.

- [4] Masato Ida, “Multibubble cavitation inception,” *Physics of Fluids* **21**(11), 113302 (2009), 査読有り.
- [5] Masato Ida, Takashi Naoe, and Masatoshi Futakawa, “On the effect of microbubble injection on cavitation bubble dynamics in liquid mercury,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **600**(2), pp.367-375 (2009), 査読有り.
- [6] Masato Ida, “Bubble-bubble interaction: A potential source of cavitation noise,” *Physical Review E* **79**(1), 016307 (2009), 査読有り.
- [7] Masatoshi Futakawa, Hiroyuki Kogawa, Shoichi Hasegawa, Takashi Naoe, Masato Ida, Katsuhiko Haga, Takashi Wakui, Nobuatsu Tanaka, Yoichiro Matsumoto, and Yujiro Ikeda, “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* **45**(10), pp.1041-1048 (2008), 査読有り.

[学会発表] (計22件)

- [1] 井田真人, “キャビテーション初生における気泡間相互作用の役割,” 第60回理論応用力学講演会, 2011年3月8-10日, 東京工業大学.
- [2] 井田真人, 粉川広行, 羽賀勝洋, 直江崇, 二川正敏, “水銀ターゲット圧力波抑制技術開発の現状,” 第11回核破砕中性子源用材料技術の研究会, 2010年12月15-16日, いばらき量子ビームセンター.
- [3] Masatoshi Futakawa, Masato Ida et al., “R&D status on cavitation damage in JSNS of J-PARC/MLF,” Tenth International Workshop on Spallation Materials Technology, October 18-22, 2010, Beijing, China.
- [4] 井田真人, “Multibubble Cavitation Inception,” 日本機械学会 2010年度年次大会, 2010年9月6-8日, 名古屋工業大学.
- [5] Masato Ida, “Multibubble cavitation inception: Effects of bubble-bubble interaction under negative pressure,” The 20th International Congress on Acoustics, August 23-27, 2010, Sydney, Australia.
- [6] 大川剛, 関本博, 田口紘士, 中山梓介, 井田真人, 二川正敏, “CANDLE 燃焼方式に関する研究(XXV) Pb-208 冷却材を用いた CANDLE 炉心,” 日本原子力学会 2010年春の年会, 2010年3月26-28日, 茨城大学.
- [7] 羽賀勝洋, 直江崇, 粉川広行, 木下秀孝,

井田真人, 二川正敏, “J-PARC 水銀ターゲットの微小気泡注入モックアップ試験(3) ターゲットモデル内の微小気泡分布,” 日本原子力学会 2010年春の年会, 2010年3月26-28日, 茨城大学.

- [8] 木下秀孝, 粉川広行, 羽賀勝洋, 直江崇, 井田真人, 二川正敏, “J-PARC 水銀ターゲットの微小気泡注入モックアップ試験(2) モックアップ試験装置と圧力損失特性,” 日本原子力学会 2010年春の年会, 2010年3月26-28日, 茨城大学.
- [9] 粉川広行, 羽賀勝洋, 直江崇, 木下秀孝, 井田真人, 二川正敏, 村木俊博, 京藤敏達, “J-PARC 水銀ターゲットの微小気泡注入モックアップ試験(1) 微小気泡注入装置の開発,” 日本原子力学会 2010年春の年会, 2010年3月26-28日, 茨城大学.
- [10] 井田真人, 直江崇, 二川正敏, “水銀中気泡群と水中気泡群の類似性: 水銀中圧力波抑制技術に関する水を用いた代替実験の可能性,” 日本原子力学会 2010年春の年会, 2010年3月26-28日, 茨城大学.
- [11] Katsuhiko Haga, Takashi WAKUI, Kokei Hanano, Hiroyuki Kogawa, Takashi Naoe, Masato Ida, Masatoshi Futakawa, “Development of a compact mercury target with bubbling equipment to mitigate pressure waves,” The 19th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, March 8-12, 2010, Grindelwald, Switzerland.
- [12] Hiroyuki Kogawa, Katsuhiko Haga, Takashi Naoe, Hidetaka Kinoshita, Masato Ida, Masatoshi Futakawa, “Development of bubble injection technique in JSNS mercury target,” The 19th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, March 8-12, 2010, Grindelwald, Switzerland.
- [13] Masato Ida, Takashi Naoe, Masatoshi Futakawa, “The Effect of Gas Bubble Injection for Pressure Wave Mitigation in High-Power Neutron Sources - Differences and Similarities between Mercury and Water,” The 19th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, March 8-12, 2010, Grindelwald, Switzerland.
- [14] Masato Ida, “Comparison of bubbles' effects in mercury and water,” The International Workshop on Pulsed Spallation Neutron Sources, Nov. 9-13, 2009, IBARAKI Quantum Beam Research Center, Japan.
- [15] Masato Ida, “Issues in estimating Bubble Distribution in mercury,” The International Workshop on Pulsed Spallation Neutron Sources, Nov. 9-13, 2009, IBARAKI Quantum Beam Research Center, Japan.
- [16] 井田真人, “テッポウエビに学ぶキャビ

テーションノイズ発生法,” 日本機械学会
2009 年度年次大会, 2009 年 9 月 13-16 日,
岩手大学.

- [17] Masato Ida, “Numerical simulation study to predict pressure wave mitigation,” Mitigation of Cavitation Damage in Liquid Metal Spallation Targets, Review of recent activities, developments; discussion of future plans, Feb. 26-27, 2009, The Spallation Neutron Source, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA.
- [18] 井田真人, 直江崇, 二川正敏, “気泡注入による水銀中キャビテーションの抑制,” 日本機械学会第 21 回計算力学講演会, 2008 年 11 月 1-3 日, 琉球大学.
- [19] Norihiro Nakajima, Fumimasa Araya, Akemi Nishida, Yoshio Suzuki, Masato Ida, Tomonori Yamada, Noriyuki Kushida, Gyuhi Kimu, Chiaki Kino, Hiroshi Takemiya, “A large scale simulation for impact and blast loading issues,” International Symposium on Structures under Earthquake, Impact, and Blast Loading 2008, Oct. 10-11, 2008, Arata Hall, Osaka Univ. Japan.
- [20] 井田真人, 直江崇, 二川正敏, “マイクロバブル注入によるキャビテーション抑制の数値的検証,” 日本流体力学会 年会 2008, 2008 年 9 月 4-7 日, 神戸大学.
- [21] 井田真人, “ガスバブル-キャビテーションバブル間の相互作用,” 圧力波・損傷抑制技術開発研究会, 2008 年 7 月 31 日, J-PARC センター.
- [22] 井田真人, “高エネルギー科学におけるキャビテーション問題 - その抑制手法と結合振動子モデルを用いた解析 -,” 京都駅前セミナー ～非線形現象の数理を考える～ 第 8 回, 2008 年 5 月 16 日, キャンパスプラザ京都.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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・研究職
研究者番号: 60391356

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし