

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560194

研究課題名（和文） 水銀中気泡の発光メカニズムの解明研究

研究課題名（英文） Elucidation of the luminous mechanism for bubbles in mercury

研究代表者

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・研究副主幹

研究者番号：90391333

研究成果の概要（和文）：

本研究は、水銀中のマイクロバブルが収縮・崩壊する際に発光する現象のメカニズムを解明することを目的としている。特に気泡崩壊時の発光現象に伴うキャビテーション攻撃性の定量評価を目的として、発光現象の実験的観察データ収集を行った。想定しうる発光メカニズムとして、気泡が崩壊する時に発光するソノルミネッセンスの数値計算を行った。

また、収縮時の気液界面の摩擦によるトライボルミネッセンスとあわせて、実験的に発光現象の評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

In this research project, we study the light emission mechanism of micro-bubbles by shrinking and collapsing in mercury. In order to evaluate the aggressiveness by cavitation bubble collapsing due to the luminous phenomenon in particular, the luminous phenomenon were experimentally observed. Numerical calculation was carried out for the emission of sonoluminescence bubbles at collapsing.

Experimental results from two types of observation were evaluated at taking account of the sonoluminescence and the triboluminescence.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：混相流・ソノルミネッセンス

## 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、陽子ビームを用いた核破碎中性子源や次世代原子炉の冷却材としての使用が検討・実現されている。その一例として、世界的規模で開発が進められているパルス中性子源としての水銀ターゲットが挙げ

られる。しかしながら、水銀ターゲットへの応用においては、ビーム入射に起因する気泡キャビテーションが原因と思われるターゲット内壁の損傷が大きな問題となっている。

一方で、このキャビテーション気泡は微弱な光を発することが確認されており、発光メ

カニズムの可能性として近年活発に議論されているソノルミネッセンスが挙げられていた。気泡崩壊の発光現象という興味深い物理現象から、気泡崩壊時における局所的な高いエネルギー場が存在することに対して理解が深まりつつあった。そのほかに固液界面における発光現象であることから、摩擦発光現象(トライボルミネッセンス)等もメカニズムの候補として考えられる。

いずれにおいても発光現象はマイクロバブルの収縮・崩壊に伴う損傷現象と深くかわるものであると考えられることから、キャビテーション気泡の損傷を理解するうえでも、発光メカニズムを解明することが、重要であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、マイクロバブル崩壊時に観測される発光現象に着目、液体金属である水銀中におけるキャビテーション気泡の収縮・崩壊による発光現象を定量的に観測し、そのメカニズムを解明することを目的とする。発光現象の定量的評価とあわせて、発光現象とキャビテーション気泡の損傷に対する寄与、及び損傷との相関を明らかにする。

これにより光計測による損傷予測および対策を講じるための技術開発研究が促進できるとともに、マイクロバブルの発光現象であるソノルミネッセンス現象の解明における気泡の動力的観点から見ても学術的意義が大きく、かつ世界的な中性子源開発への寄与が期待できるものである。

## 3. 研究の方法

水銀中の気泡発光現象メカニズムを解明するには、1)気泡発生と発光現象を促進できる実験装置の構築、2)微弱な光を効率よく測定できる観測系の整備、3)精密な理論的予測を行い実験との比較を行う必要がある。

1)に関しては、原子力機構に設置されている電磁式衝撃圧負荷試験装置(MIMTM)を元に、本研究目的に適した改造を行い対応した。本装置は、約120ccの水銀容器内に、電磁力駆動のストライカーを介することで衝撃圧を負荷して、圧力波によるキャビテーション気泡を発生できる装置である。本実験では、水銀/固体界面における発光現象を観測するために、水銀容器上蓋に直径50mmの石英窓を設けた。窓材に石英を用いたのは、水銀の発光波長である紫外域の光に対する透過率を高くするためである。

発光現象を促進するために、水銀容器内の石英窓部に希ガス気泡を導入・付着させるためのガス導入管系を用意、窓部の気泡数を増やすことで発光強度を上げる手法を確立した。

2)に関しては、観測対象が微弱な光であることから光電子増倍管を用いた計測システムを構築する。図1にMIMTM及び計測系の概略を示す。

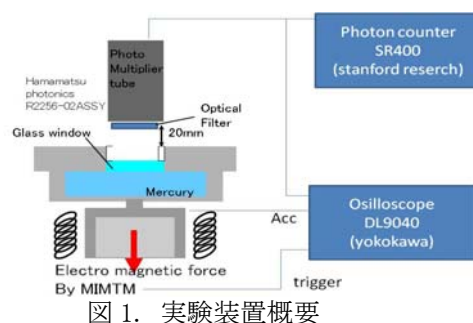


図1. 実験装置概要

発光現象は、光電子増倍管PMT(浜松ホトニクス製H2256)を石英窓上部に固定して遮光した後、MIMTMによる衝撃圧負荷と同期させてオシロスコープ(横河製,DL9040)とフォトンカウンター(Stanford Research SR400)により計測した。

3)に関しては、水銀中におけるソノルミネッセンスの条件を、豊富な水実験のデータから予測する。水中気泡のソノルミネッセンスの理論モデルに水銀条件を当てはめ、水銀におけるソノルミネッセンスの発光現象を明らかにするための数値計算を行った。

## 4. 研究成果

MIMTMによる衝撃圧負荷時に計測したPMTの応答波形例を図2に示す。

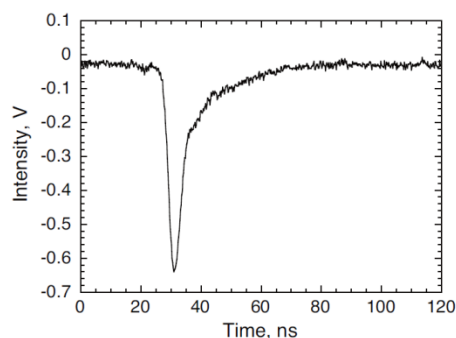


図2. PMTの応答波形例

水銀容器内では、複数の気泡がほぼ同時に崩壊すると考えられるが、図はサンプリングレートが5GS/sであり計測時間が短いことに加えて、波形の重複が見られないことから、光源としては一点から瞬間的に放出された光と考えられる。この結果からPMTによって各気泡の発光を個別に測定しうると判断できる。

次に、発光現象と気泡の収縮・崩壊関係を調べることを目的として、衝撃圧負荷開始か

らの経過時間を変化させた際の気泡挙動の撮影を行った。この場には図1におけるPMTに変えて高速度シャッターカメラ(Nac製, DiCAMPRO)を設置している。図3にその結果を示す。

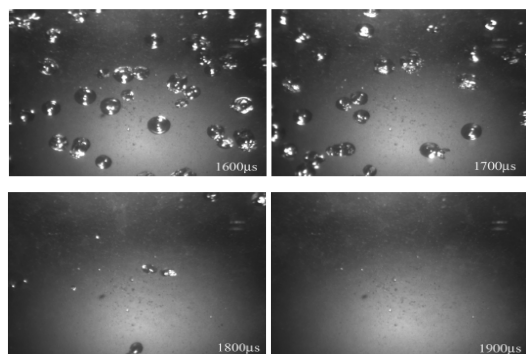


図3. 気泡崩壊時の挙動(1.6ms-1.9ms)

図3から1.7msから1.8msの間に壁面に観測される気泡数が急激に減少していることが分かる。つまり、MIMTMによる衝撃負荷においてはこの間に大部分の気泡が崩壊している。

次に、MIMTM容器底部のストライカーに設置した加速度計の圧力応答とPMTの応答を合わせて図4に示す。

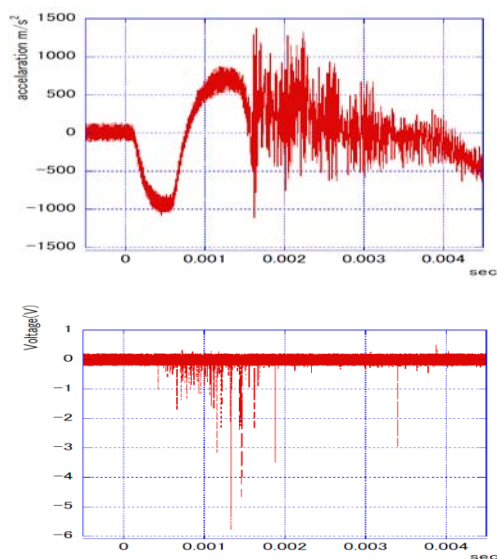


図4. 加速度(上)とPMTの応答波形(下)

図4では、加速度の応答波形は代表的な1回測定の波形であるが、PMTの応答波形は20回測定を重ね描きしている。応答加速度からは1.8ms近辺に水銀中において気泡の崩壊時に発生していると思われる高周波の振動が

計測されている。一方でPMTの応答では、0.5msから1.9msの間に信号が集中していることが分かる。

ソノルミネッセンスを発光機構と仮定した場合の数値計算においては、気泡内ガス種による発光強度の違いを見積もった。その結果を図5に示す。

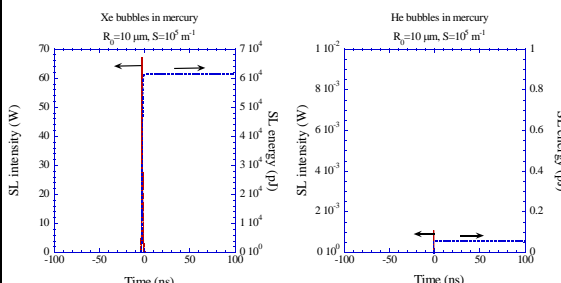


図5. ソノルミネッセンスにおけるガス種による発光強度。左:キセノン、右:ヘリウム

数値計算では、ヘリウムガス気泡とキセノンガス気泡を仮定して発光量を比較した。結果、気泡サイズの変動はほとんど同じ場合において、キセノン気泡の発光量はヘリウム気泡の100万倍に及ぶと推測されることが示された。これは主にガス種のイオン化エネルギーの差に依存している。すなわち、反応で生成されるエネルギーが効率よく発光へと変換させるためには、ガス種のイオンエネルギーが低い方が有利であることを示している。ヘリウムは全元素の中で最も第一イオン化エネルギーが高い(2372.3 kJ/mol)がキセノンはその半分(1170.4 kJ/mol)であるため、気泡内ガスの電離度が大きく異なるためである。

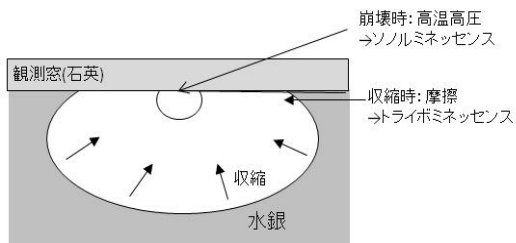
実験的に発光がソノルミネッセンスで発生しているかどうかを検証するために、実際に水銀へガスを混入し発光強度の差を測定した。なお、PMTの波長感度の問題から実験では、水銀、水銀+ネオンの二種類の場合を測定している。なお、水銀の第一イオン化エネルギーは1007.1 kJ/molでありネオンは2080.7 kJ/molである。また、この実験では発光時の波長を測定するために、朝日光学社製の波長フィルター(水銀用:253nm、313nm、365nm、404nm、435nm ネオン用:640nm、717nm)をPMTと石英窓の間に設置して、透過波長を限定した発光強度を測定している。その結果を表1に示す。

気泡	フィルター	光子数(25回測定合計)
水銀	無	2953
水銀	254nm	0
水銀	310nm	0
水銀	365nm	11
水銀	405nm	5
水銀	436nm	0
水銀+ネオン	無	1336
水銀+ネオン	558nm	0
水銀+ネオン	668nm	0

表 1. 水銀、ネオン気泡の発光量

これらの結果からは、水銀単独時の発光量がネオンガス導入時の発光量に比較しても大きいことを示している。イオン化エネルギーの違いによる発光量の差を指摘したソノルミネッセンスの数値計算結果と同じ傾向を示していると考えられるが、各波長フィルタを使用した場合にそれぞれ水銀、ネオン由来の波長光量は極端に減少しており、本実験における気泡内ガスに水銀、ネオン以外のものが含まれていることも示している。この要因として 1) 水銀液中に含まれる不純物、2) 実験容器に水銀、ネオンガスを導入する際に混入する不純物などが考えうる。これらの発光源物質を同定するためには分光器による波長分析が必要であると考えられるが、今回の研究過程においては光量の不足によって分光測定は実現できていない。

一方で、図 4 に含まれる発光時間の情報は非常に重要であり、図 3 の高速度カメラで測



定した気泡挙動と合わせると以下のような現象が起きていると推測される。

図 6. 水銀壁面における発光現象の模式図

本実験体系においては 0.5ms 近辺から 1.7ms までの間は壁面に付着した気泡は収縮過程にある。この間に観測される発光現象はソノルミネッセンスであるとは考えにくく、一方で収縮する水銀気泡と石英窓の摩擦現象は気泡界面において発生していると判断できることからトライボルミネッセンスが主たる発生機構ではないかと推測される。一方で、1.8ms から 2.0ms の気泡が崩壊する時間帯においては、気泡系は十分小さくなっており摩擦現象は非常に限られた部分でしか発生していない。しかしながら、高速度カメラによる観測によって気泡の崩壊が観測さ

れており、加速度の観測からはキャビテーション発生に伴う高周波成分も観測されていることから、この時間に観測される発光現象はキャビテーション損傷との相関があるものと推測される。すなわち、本実験体系における発光現象は、発生する時間によって異なったメカニズムが作用していることを示唆している。これらのメカニズムがソノルミネッセンスであるか、トライボルミネッセンスであるか、もしくはそれ以外の可能性も含めて詳細に検討するためには、ms オーダーの発光スペクトルの測定分析が必要である。

本研究で得られた実験結果からは、キャビテーション気泡崩壊による損傷を発光現象の測定から評価するためには、崩壊時に発生している光量とそれ以外の発光現象とを時間的に厳密する必要があることを示している。

## 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)

[学会発表] (計 1 件)

直江崇、長谷川勝一、二川正敏、日本機械学会関東支部茨城講演会、2010. 8. 27 キャビテーション気泡崩壊に励起されるソノルミネッセンス

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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・研究副主幹  
研究者番号：90391333

### (2) 研究分担者

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) 研究分担者

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

### (4) 連携研究者

安井 久一 (YASUI KYUICHI)

産業技術総合研究所・中部センター・  
主任研究員

研究者番号 : 30277842