

# 水中放電誘起気泡の周囲に発生する キャビテーションの可視化

小松 真

(受理 2017年10月19日)

Visualization of cavitation bubbles around a sphere vapor bubble induced  
by underwater spark discharge

Makoto Komatsu

In present study, a sphere bubble and cloudy bubbles induced by underwater spark discharge were visualized from the frontal direction crossed bubble expanding axis. Visualization method was magnified high-speed imaging at 4000 frames/s of framerate. Discharge unit made of ABS resin including spark discharge electrodes and a pair of PMMA windows were installed in diluted saline at 25 mm from water surface. Measured profiles of discharge current and voltage were compared with the visualized images to confirm bubbles growth caused by hydrodynamic effect. Parameter was distance of PMMA windows varied from 6 mm to 15 mm, and 2 mm of electrode gap and 15 mm of distance between ABS sidewalls for fixing electrodes were constant. 0.2  $\mu$ F high-voltage capacitor was charged at 7.0 kV, and electric energy in the capacitor was used underwater discharge occurred by high-voltage mechanical relay switch. We could obtain visualized images as results indicating no interference of a sphere bubble and cloudy bubble in growth process. And discharge current and voltage were not synchronized generation of cloudy bubbles. Therefore, we can suppose that cloudy bubbles are cavitation in local high speed flow area near solid walls. On the other hands, discharge current with 15 mm of distance between PMMA windows was clearly difference from the current with lower distance. Hence, electrical characteristics induced by discharge depended on geometric initial condition around electrodes in the same as growth of the cloudy bubbles.

## 1. 本研究の背景と目的

当方では医用を視野に入れた放電によるジェット生成装置にかかわる実験研究を実施してきたが、

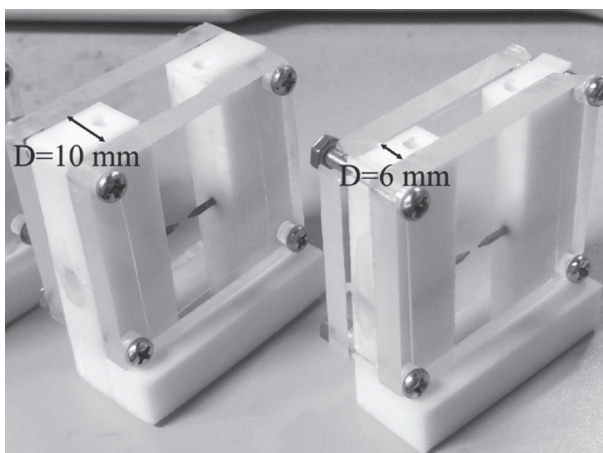
その過程で電極周囲を固定境界で囲み、閉塞の度合いを増すと気泡の成長過程が異なることが、当方の過去に実験より分かっている [1-2]。電極間の放電点に対し壁面が近く、閉塞の度合いが大きい条件の時は、放電点を中心とした球状気泡の半径は小さくなる傾向があるものの、それに代わって壁面に沿ってクラウド状の気泡が生成・成長する。またこの現象が起こる場合には、放電電流が増大するという結果を得ている。この気泡の可視化を行ってきた結果について、これまでは電極側面からの成長写真しかなく、成長した気泡群の球状気泡に対する干渉については不明であった。この気泡群の発生位置は、クラウド状の気泡が高速流によるキャビテーション気泡 [3] なのか、放電時のストリーマなど電氣的要因が支配的である現象なのかを判断するのに重要である。そこで本実験では、これまでの撮影方向と直交する正面断面からの撮影を実施し、壁面近傍に映る気泡群が放電点を中心とする球状気泡に干渉するかどうかを確認し、気泡の成長に流体力学的要素が関わるかを確認した。

## 2. 実験装置・実験方法

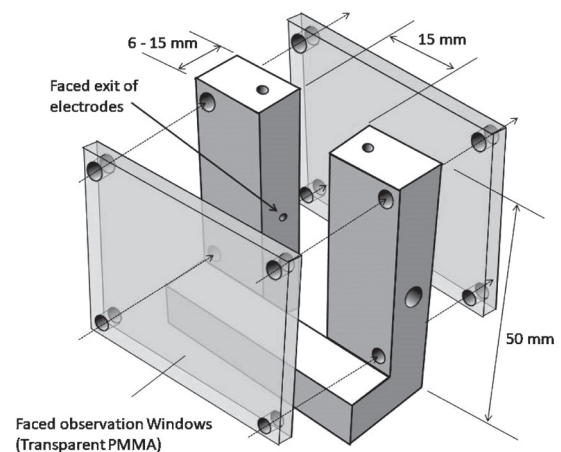
### 2.1 放電電極形状

図1は放電電極の写真およびその3次元図である。電極は1.2 mm 径のSUS304電極で、先端長さ2 mm を四角錐（ピラミッド形状）に加工した。ただしその表面状態や精緻な寸法について詳細なチェックはしていない。この電極は図1の寸法に倣って3Dプリンターで作成したABS樹脂の電極固定具に接着固定した。

この電極固定具は電極周りにABS樹脂の2壁面と、PMMA樹脂の透明な観測窓の2壁面の計4壁面を持っているが、本実験ではそのうち観測窓間の距離をパラメータとし、電極間距離は2 mm，長手方向の壁面長さは50 mm，ABS樹脂の壁面間距離は15 mm に固定した。観測窓間距離は6 mm / 10 mm / 15 mm の3種とした。この実験条件では気泡が必ず重力の影響を受け、水面と電極の放電点の距離は現象に大きな影響を与えるので、固定しておく必要があった。本実験では過去の実験と同じ値である25 mm で一定とした。電極の向きは水面と平行な水平方向とし、気泡崩壊等に伴う水流やジェットが鉛直方向に発生する条件とした。観測窓の破損を防ぐため内側には厚さ1 mm のPEシートを配置した。



(a) 観測窓を配置した電極並びに電極固定具の写真



(b) 電極固定具寸法図

図1 実験装置の写真と幾何学的形状

## 2.2 実験方法

図2は実験系の全体図である。図2(a)に示される計測機器等(カレントトランス・高電圧プローブ・高耐圧リレースイッチなど)の構成は昨年度の実験と同一[1]であるため、ここで再度の説明は省略する。放電は高耐圧リレーをスイッチとし、 $0.2\ \mu\text{F}$ のコンデンサー(トーエイ工業)に高電圧電源(グリーンテクノ, GT20)を用い7.0 kVで充電し蓄電した電荷を放電に使用した。電極近傍の可視化では高速度カメラ(ディテクト, HAS-500)による高速度撮影を4000 Frames/sにて実施した。クラウド気泡の位置を確認するため、可視化は電極の側方断面(流れ方向と平行:図1の観測窓を介して可視化できる方向)と正面断面(流れ方向と垂直:図1における流路の開口端方向)の2方向で同時に実行した。図2(b)は光学系説明図である。光源は側方断面と正面断面に1光源ずつ計2光源を使用し、水槽内に平面鏡を設置し影写真法により撮影した。放電は10倍希釈生理食塩水(導電率1.78-1.80 mS/cm)内での水中放電とした。これは過去の実験により、強い力学的現象が発生するとわかっている条件として採用した。1条件につき5回の実験を実施( $n=5$ )している。

本実験での放電は火花放電であるため、ストリーマが進展し絶縁破壊に至る必要がある。導電率が比較的低い条件でこれを起こす場合、電圧波形には火花遅れと電圧降下が少なからず現れる。それらの影響から、充電電圧は放電電圧よりも必ず低い値となり、一定の値になるとは限らない。また放電現象により直接的にかかわるのは、充電電圧よりも放電電圧であると考えられる。そこで放電電圧、火花遅れを図3のように定義した。トリガー点(少なくとも絶縁破壊には至っている電圧: +440 mV)より-1 us以内の範囲をサンプリング時間40 nsで計測ブロックとして区分し、1ブロック当たり-0.2 kVよりも大きい電圧降下があった点を放電点と定義した。火花遅れは電圧最大点から放電点に至るまでの時間とした。

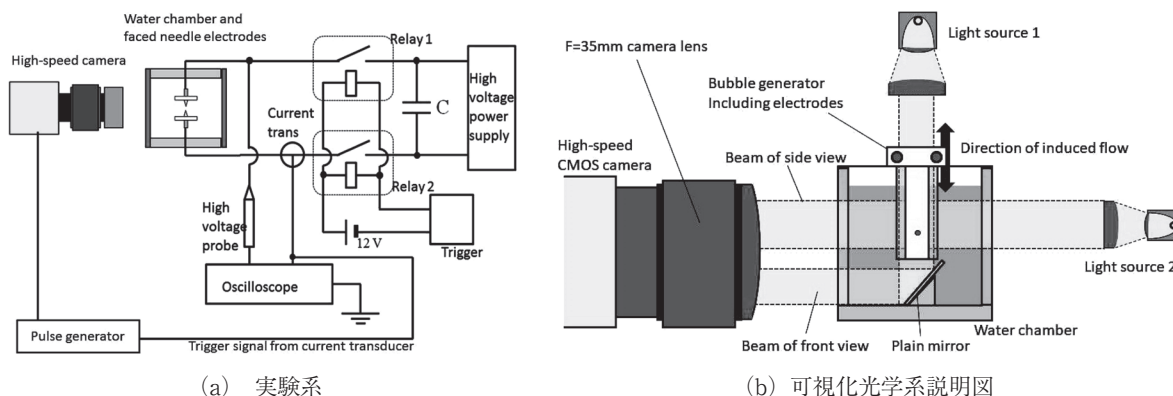


図2 実験系・実験装置

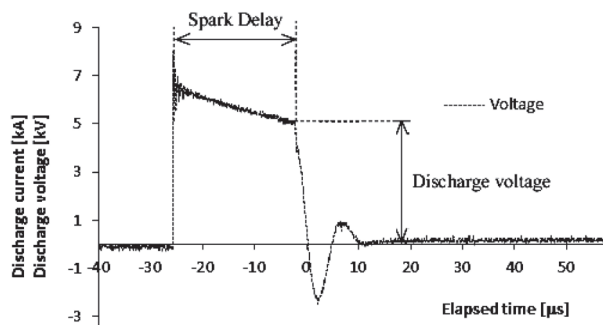


図3 放電電圧・火花遅れの定義図

### 3. 実験結果

図4は高速度可視化の結果であるが、絶縁破壊後  $500 \mu\text{s}$  には放電点を中心とした球状気泡は十分に成長した状態であった。一方で、絶縁破壊後  $1 \text{ ms}$  での側面と正面の可視化結果を比較すると、側面で大きく成長している雲上の気泡群は、正面では大きい影として映っておらず、気泡に干渉することなく正面の長方形断面の四隅で気泡群が新たに発生していることが可視化によりわかった。これは絶縁破壊により直接的に発生した球状気泡が、発生後比較的長い時間が経過してから、その形状を変えたり大きく干渉したりすることなく、球状気泡とは独立して発生していることを意味する。つまり球状気泡以外の壁面に沿って成長する気泡群は、壁面と気泡境界が狭いところや、壁面に近接しているような流れが速くなりやすい領域に、球状気泡と独立して発生しているものと推測される。また放電直後に微小気泡の拡張が観測領域全体にわたりみられたが、これは放電直後に球状気泡に先行して伝播する衝撃波の通過によるキャビテーションであると予想される。

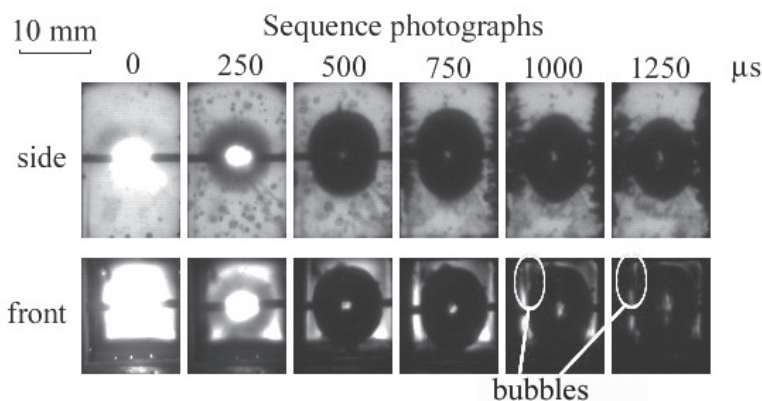


図4 高速度可視化結果：観測窓間距離  $15 \text{ mm}$ ， $n = 2$

図5は図4の現象発生時に同時に計測された電圧・電流波形であるが、火花遅れはあるものの放電時間は条件に大きく依存する様子は見られず、放電電流の発生が半値幅で  $2\text{-}3 \mu\text{s}$  程度、電流の減衰振動の収束まででも約  $20 \mu\text{s}$  程度であった。これらの電氣的な現象は、流体力学的な現象である気泡やジェットの変化に比べかなり速かった。

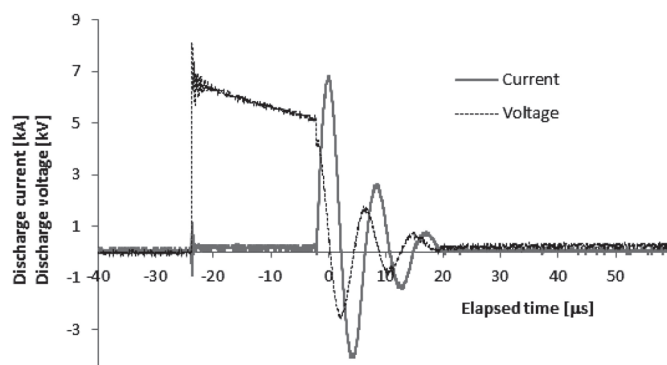


図5 電圧／電流波形：条件は図4と同じ

図5に示される放電電流のピーク値を、パラメータである観測窓間距離でまとめたものが図6である。本実験条件においては、観測窓間距離 15 mm の時に放電電流が約15%有意に小さくなる（有意水準10%, Welch-t検定で $p < 0.1$ ）様子が見られ、放電電流について観測窓距離が 10 mm 以下の場合と 15 mm の時に区別できる結果となった。図7は放電電圧を各条件でまとめたものであるが、これより放電電圧でも放電電流と同様の傾向が見られ、15 mm の時に放電電圧も低い傾向があった。ただし放電電圧は観測窓間距離に対し、負の傾きを持つ線形関係であるものの、有意差は認められなかった。

図8は放電電圧・火花遅れと放電電流のピーク値をまとめたものである。本実験で定義した放電電圧・火花遅れと放電電流のピーク値はかなり相関が強かった。火花遅れと放電電圧および火花遅れと放電電流の関係は負の傾きを持つ線形関係であり、放電電圧と放電電流は強い正の相関が認められた。すなわち、放電電流が大きいほど放電電圧が大きく、火花遅れが小さいといえる。

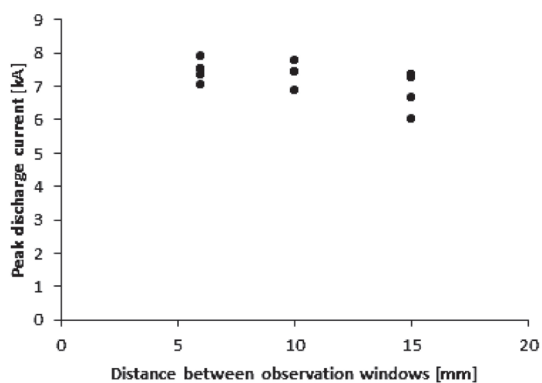


図6 放電電流最大値と観測窓間距離の関係

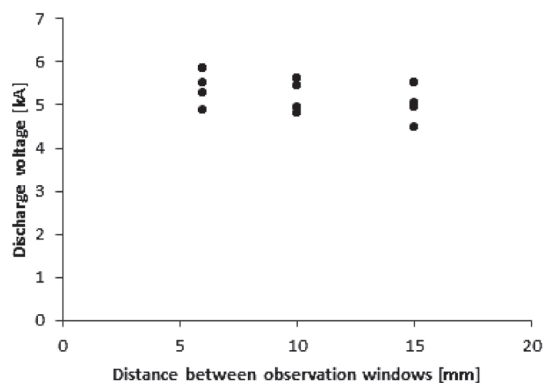
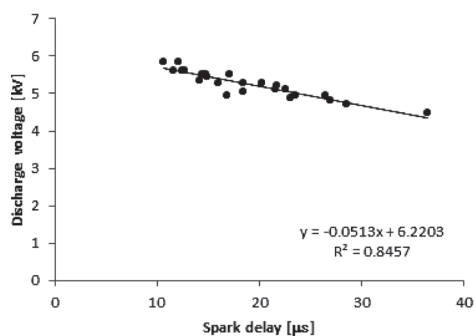
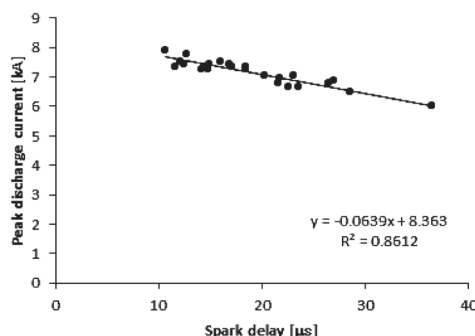


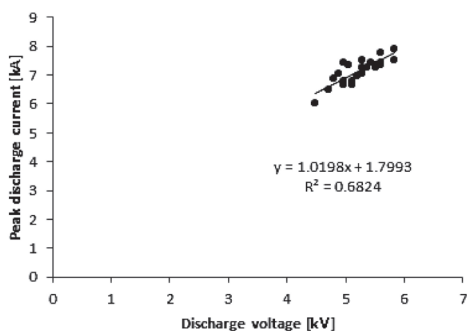
図7 放電電圧と観測窓間距離の関係



(a) 火花遅れ-放電電圧



(b) 火花遅れ-放電電流



(c) 放電電圧-放電電流

図8 放電電流／放電電圧／火花遅れの関係



なお初期条件となる放電直前の状態が放電に関与している可能性や、壁面の表面状態や材質が誘起現象に関与する〔7〕可能性を考慮し、実験直前の段階でLCRメーター（Instek, LCR-915）による簡易的2点法によるDCR値等の計測を行った。その結果、電気的な初期条件は放電には明確には影響せず、電極周囲の幾何条件のほうが関連が明らかと判断される結果だった。またミラーと観測窓損傷防止用のPEシートの有無という外的要因が、計測結果への与える影響についても検証した（ $n=5$ ）ところ、ミラーならびにシートによる放電電圧・電流への影響は認められなかった。

#### 4. 考察

今回の実験により、壁面近傍の気泡群は放電により発生する気泡と干渉しているわけではなく、発生のタイミングも異なることから、発生としては放電によるものではなく、局所的な高速流れに由来するキャビテーション気泡と判断できる。圧力差により気泡が崩壊し、噴流が成長することがジェットの単純な基本原理〔4〕であるが、このとき気泡との境界や壁面の存在で流れにチョークや局所的な高速流が発生し圧力分布が生ずる。壁面近傍や正面断面における四隅は、流路中心部が気泡拡張している際に流れが回り込み、高速流が生じやすい。この高速流に起因しキャビテーションが発生すれば、新たな気液2層の境界面生成により更なる局所高速流が生じ、キャビテーションが成長すると予想される。この現象は衝撃波通過直後に発生するものとは異なり、二次的に発生するいわばセカンドキャビテーションに類するものであると考えられる。

同様の実験が東北大学で行われ、その結果でもセカンドキャビテーションが発生したという報告がある〔5-6〕。本結果のセカンドキャビテーションは発生機序こそその現象と類似しているが発生場所と規模は異なる。東北大学の結果では気泡の上部、つまり噴流下流部に小規模なものが発生しているが、本実験で発生するのは気泡の真横に発生し、その規模は元の球状気泡よりもはるかに大規模なものである。局所的な高速流は流路形状だけでなく、障害物等流れに影響を及ぼすものすべてに依存するため、この違いを引き起こす要因についてこの場で断定することは不可能である。ただしその中でも、東北大学との実験で大きく異なるのは電極の形状と流路断面の形状である。

当方の実験では電極の耐久力と、繰り返し使用による放電特性の変化抑制を考慮して、比較的太めの電極を使用しているが、当然放電で誘起される水流にこの電極は影響を及ぼす。一方東北大学の電極はワイヤー形状であり、放電は1回しかできないが電極が流れに与える影響は少ない。つまり本実験では、電極がセカンドキャビテーションの発生並びに規模の拡大を促進した可能性がある。このことは、この現象を技術的に応用することを考慮した場合、耐久力のある電極の実現にはその大きさが無視できないことを示した結果ともいえる。東北大学との比較では断面形状の違いも考慮する必要がある。正面断面形状が円の場合と四角形の場合では閉塞の生ずる位置およびその度合いが異なり、高速流の生じる位置や程度に違いが生じる。本実験の四角形断面のほうが東北大学の円形断面に比べ閉塞の度合いは小さく、必ず四隅に隙間ができるはずで、これが現象にどう関連するか今後調査・確認の必要がある。

可視化結果からは流体力学的な現象が観測されたが、観測窓間距離が大きくなった場合、放電電流が小さくなる（図6-7参照）ことにも注目すべきである。本結果では電気的な条件が放電電流の違いに与える影響は考えにくく、もっぱら電極周囲の幾何条件が電気的な条件も含めた何らかの影響をもたらす、それが放電電流にも影響すると考えるのが妥当である。現状では衝撃波とそれに付随する荷電粒子の瞬間的な移動も関与していると想定している。水中衝撃波の音速をおよそ1500 m/sと考えれば、弱い衝撃波でも放電点から観測窓までの距離3-7.5 mmを進行するのに約2-5  $\mu\text{s}$ である。これは電流波形から判断して十分に放電に影響を与えうる時間である。本実験以外の計測で放電

直前の電氣的な条件が、放電電流等を与える影響が認められないことから、放電電流は放電後の現象が関与すると考えた場合、高速かつ非線形な現象として、放電に影響を与える可能性が最も高いのは、衝撃波の関わる現象であろう。これも今後検証の必要がある。これらの事象は放電現象およびそれに誘起される流体力学的現象の双方について、流路断面形状の違いにより現象が大きく変わることを意味する。衝撃波などによる力学的効果で荷電粒子が流動し、放電電流が変化すると仮定した場合、放電現象そのものが電極近傍の幾何形状に大きく左右される。これは放電に連動して起こる現象を抑制または利用する場合、電極とその周囲の形状を設計段階で考慮する必要があることを示唆する。

これは同時に気泡サイズの違いによる現象の差異も想定させる。高速流れが発生する要件を満たせば、充電エネルギーを小さくし発生する気泡サイズを小さくしても、流路を細くし全体的に装置をサイズダウンすることで、同様のキャビテーションの発生を誘発できる可能性は十分にある。技術的観点では気泡サイズを調整し、それに合わせ電極固定具並びに流路のサイズを変更し、同様のキャビテーションが起こるか検証し、断面形状を変更した場合の現象変化を調査することは大変意義がある。

## 5. 結論

壁面近傍に沿って進展成長する気泡はキャビテーション気泡群であり、放電による球状気泡とは独立した成長過程を経ることが示された。これは気泡成長により水が押し出されるような空間、正面から見たときに四隅等の空間において、局所的に高速流が生ずることに起因していると考えられ、結果的に電極周囲の形状が気泡成長に影響を与える要因は流体力学的なものであると想定された。またキャビテーション気泡が発生しやすいのは本実験条件では放電点に対しより近い位置に壁面が存在する場合であり、その時に放電電流・放電電圧はより高くなる傾向がある。

## 参考文献等

- [1] 小松 真：気液界面の変位が制限される条件における水中放電時の気泡の挙動，岩手医科大学教養教育研究年報 51 (2016)，11-16.
- [2] 小松 真：固体境界が希釈生理食塩水の放電に与える影響，平成29年電気学会全国大会講演論文集，第3分冊 (2017)，6.
- [3] 加藤 洋治：新版 キャビテーション 基礎と最近の進歩，森北出版 (2016)。
- [4] 日本ウォータージェット学会編：ウォータージェット技術辞典 (1993)，40-71
- [5] Kentaro hayashi et al., Experimental study of water jet formation by electric discharge in tube with various width, Proc. 8 th International Conference on Flow dynamics (2011) 582-583
- [6] 小坂丈俊・孫明宇：水中心爆発気泡現象の初期条件の設定に関する研究，平成22年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (2010) 191-194
- [7] 石川 大樹 他，管壁の微小弾性変形を考慮したレーザー誘起パルス液体ジェットの数値解析モデルの開発及び液体ジェットの特性評価，日本機械学会論文集B 78, 793号 (2012) 1467-1482