

## 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

### Behavior of bubble generated by underwater spark under conditions restricting displacement of gas-liquid boundary

小松 真

Makoto KOMATSU

In present study, effect of sidewall arranged around electrodes for underwater spark discharge to growth and behavior of induced bubble was investigated by high-speed photography, measurement of spark current and voltage. Needle faced electrodes were equipped in water chamber filled with 20 times diluted saline solution. Gap of electrodes and distance between discharge spot and water surface of the chamber was fixed at 2 mm and 25 mm, respectively. Charged high-voltage of 0.2  $\mu$ F high-voltage capacitor using spark source was 5.9 kV, and parameter of present experiments was D indicating distance of sidewalls. We could see a standing ellipsoidal bubble under D=8 mm condition and lengthwise growing bubble along sidewalls under D=4 mm condition from high-speed visualized images. By the way, maximum spark voltage and current increased with decrease of D, and current increased with voltage. Both waveforms of spark current and voltage had dumped oscillation and about 2  $\mu$ s of FWHM under all of present conditions. Generation of cavity by negative pressure with local high-speed flow near the sidewalls was one of the causes bringing transition of bubble expansion. However, we should consider the effect of electric field just before underwater breakdown to the transition of bubble expansion at the same time. Because peak value of spark current had similar influence by value of D as the transition of bubble, but oscillating cycle of current waveform was much short in comparison with lifetime of bubble.

#### 1. 本研究の背景と目的

当方ではこれまで医用を視野に入れた、放電によるジェット生成装置に関わる実験を行ってきたが、大きな管径の管内とジェット用の細管内では、ストリーマだけでなく絶縁破壊時に生成される気泡の挙動も部分的にかなり異なることが分かってきた。管径が 15mm の場合は単一気泡であるのに対し[1]、細管ではクラウド状であった。このクラウド気泡は、ストリーマ放電時のブランチ上に生成される気泡分布に近かった[2]。これにより電極近傍の固体境界の存在により、気泡およびジェットが影響を受ける可能性が生じた。このことはこれまで気泡に誘起される力学的効果が期待できない条件下でも、電極周囲の幾何形状次第で利用できる可能性があることを示唆した。たとえば誘起される衝撃波はレアメタル回収時にも使用される技術が研究されている[3]。また絶縁破壊（火花放電）はラジカル生成にも効果が高く、汚水処理などに大きな効果があることが知られている[4-5]。ただしこの方式は欠点も多かったため、これまであまり注目のされなかった分野である。これに対し、当方の過去の実験で少なくとも 1.2mm ニードル形状であれば対向型でも 200 以上の放電に電極が耐えることが判明しており[6]、欠点の一つの改善が臨め、実用に耐える浄化装置等への応用可能性も高まる。これらを踏まえ、本実験では電極近傍に壁面を配置し、気泡の成長が幾何学的に制限を受けるような条件において、電極間距離を固定した対向配置ニードル電極間で水中火花放電を起こした際に、電極近傍の壁面が気泡の成長及び挙動へ与える影響を調べた。

#### 2. 実験装置・実験方法

図 1 は実験装置図である。水槽内に対向電極を設置し、電極間距離を 2.5 mm に、電極から水面までの距離を 25 mm に固定して絶縁破壊（火花放電）を生じさせ、発生した気泡を可視化計測した。高電圧電源（グリーンテクノ, GT20）で 0.2  $\mu$ F の高電圧キャパシタを 5.9 kV で充電した。放電は高耐圧リレーにより機械的に実施し、放電時の気泡を高速度カメラ（楢ディテクト, HAS-500）により 4000 fps で可視化した。シャッター速度

は  $125 \mu\text{s}$  であった。高輝度白色 LED 光源をレンズにより平行化し光源としたが、放電光による CMOS へのノイズを防ぐため、ND フィルターを設置して  $1/2048$  に減光した。気泡可視化と同時に放電電圧 (Tektronix, P6015A) と放電電流 (Stanganes, current translator + 20 db attenuator,  $0.01\text{V/A}$ ) を同時に計測し、そのうち放電電流をカメラトリガとして使用した。カメラトリガとして使用した電流計測値の流出分の誤差は少なくとも  $0.5 \text{ V}$  の出力時で 1%以下であった。水槽内の水、すなわち放電リアクタとして使用した水は 20 倍希釈生理食塩水 ( $\text{NaCl } 0.045\% \text{W/V}$ ,  $0.952 \pm 0.017 \text{SD mS/cm}$ ) であった。

図 2 は電極近傍に壁面を配置した電極の断面図である。本実験では電極は図 2 の 2 種を用意し、電極周囲で最も小さい壁面間距離をパラメータとして扱い ( $D=8 \text{ mm}$  および  $D=4 \text{ mm}$ )、電極および放電点近傍の壁面による影響を観測した。壁面材料は PMMA であった。各条件で 10 サンプルの試行を実施した。実験結果は可視化結果を時系列に整理しその挙動を定性評価するほか、各条件の放電電流と放電電圧を調査し、気泡の挙動との関連を調べた。なお少なくとも今回の試行回数で壁面が破損した様子は確認されなかった。

### 3. 実験結果

図 3 は各条件下の高速度撮影結果である。影の部分が気泡もしくは気泡群である。 $D=8 \text{ mm}$  の条件では管中央部に楕円体形状の気泡が定在する時間があった。また崩壊後の微細気泡も比較的長時間中央部に滞留していた。 $D=4 \text{ mm}$  の条件では様相が大きく異なり、管中央部の気泡の寿命はほぼなく、壁面に沿って大きく気泡が進展する結果となった。電極近傍に壁面が存在することにより、気泡は球または回転楕円体形状を保持することなく、壁面に沿って進展することが明らかであった。ただしこの気泡が単一気泡か気泡群かの判別は難しい。

図 4 は計測された電圧・電流波形の例である。全実験で定性的には同傾向で、波形はすべての条件で減衰振動波形であり、電流波形の最大のピークについて半値幅は  $2 \mu\text{s}$  程度だった。

図 5 は放電電流・放電電圧の 10 サンプルの平均値である。参考値として、壁面がなく対向電極のみを露出させて水中放電した結果を“Free”の条件として並べた。定性的には放電電流は壁面が近くなるほど大きくなる傾向があった。一方壁面による放電電圧への影響は放電電流ほどではなかったものの、定性的には壁面が近くなるほど大きくなる傾向があり、放電電流と同傾向であった。これにより平均電流と平均電圧を比較した場合、電流の増加に伴い電圧も増加する傾向がみられ、放電電圧が保持されることと放電電流を大きくすることは一定の関係があることを示した。

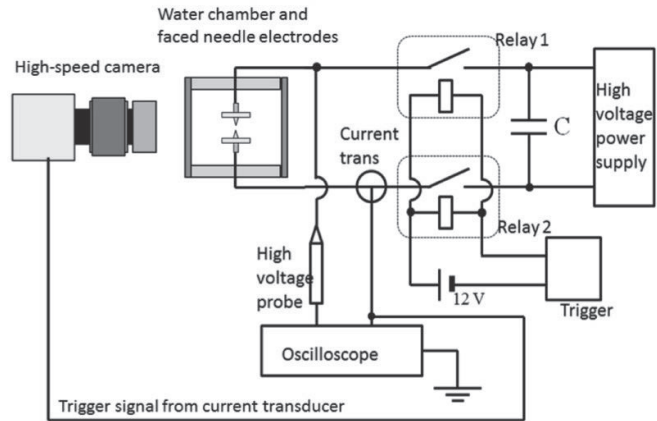


Fig.1 実験系全体図

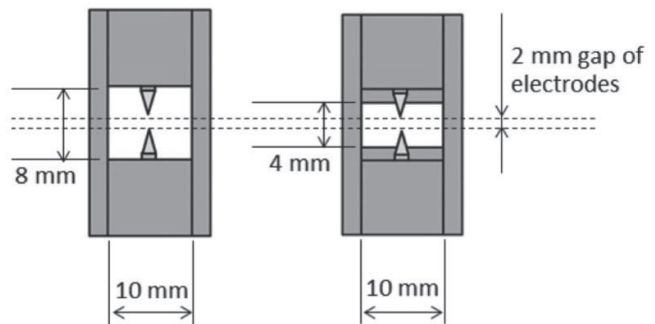
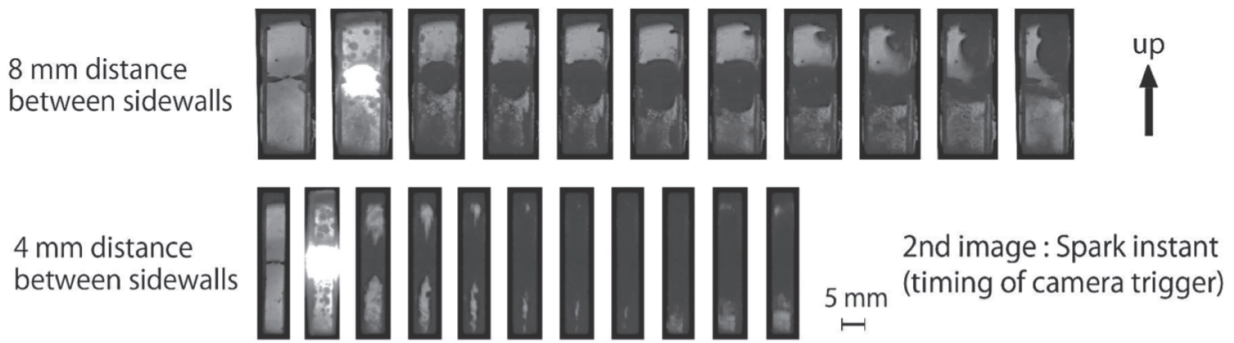
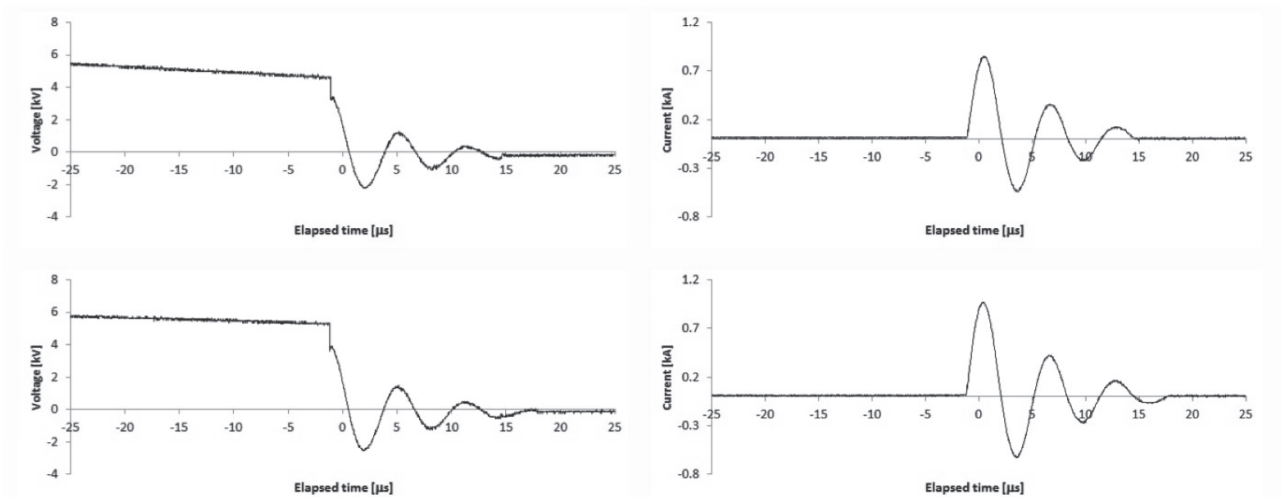


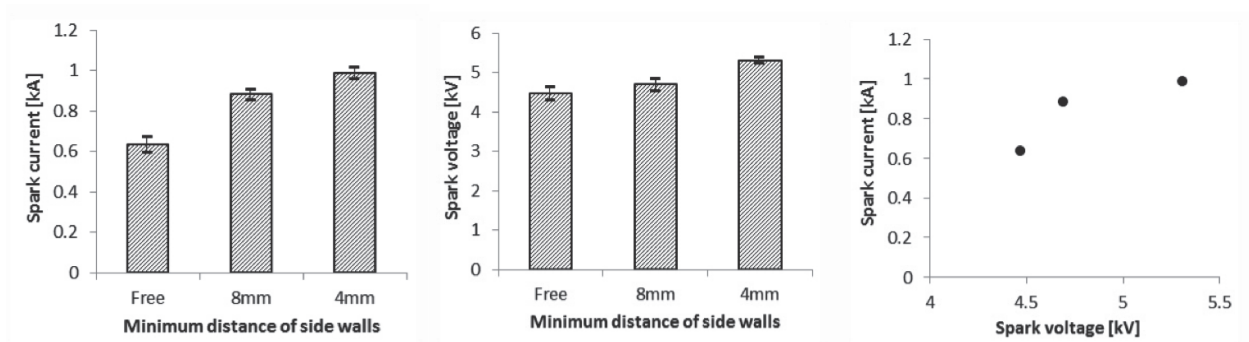
Fig. 2 電極断面図 ; (左) 壁面間距離 8 mm ( $D=8 \text{ mm}$ ), (右) 側壁間距離 4 mm ( $D=4 \text{ mm}$ )



**Fig.3** 高速度撮影結果；(上) 20 倍希釈生理食塩水・D=8 mm・9th/10 trials, (下) 20 倍希釈生理食塩水・D=4 mm・7th/10 trials



**Fig.4** 20 倍希釈生理食塩水中の絶縁破壊で得られる放電電圧・電流波形（各図とも左が電圧波形、右が電流波形）；(上) 20 倍希釈生理食塩水・D=8 mm・9th/10 trials, (下) 20 倍希釈生理食塩水・D=4 mm・7th/10 trials



**Fig 5** 20 倍希釈生理食塩水中の絶縁破壊で得られる放電電流・放電電圧の 10 サンプル平均値；(左)放電電流, (中) 放電電圧, (右) 平均放電電流と平均放電電圧の関係

#### 4. 考察

本実験結果において最も特徴的な現象は、壁面の位置つまり壁面間距離により明確に気泡の成長の仕方が異なることである。D=8 mm の場合は気泡中心部が最も大きく成長するのに対し、D=4mm では壁面沿いの気泡群の成長が早く、中心部の気泡の成長を追い抜くような挙動である。ただし現段階では、真ん中の気泡成長があまり見られない直接的要因として、周囲の気泡の成長が極めて速いのか、周囲の気泡に成長の阻害要因があるのかは結論を出せる状況ではない。原因として、現在のところ考えられることは2種類ある。一つは中心部の気泡が成長するより早く、壁面が存在することにより、キャビテーションが発生する陰圧条件を満たすほどの高速な局所流れが発生していることである。現に実験では放電直後に気泡が管内各所で一時的に発生している現象が見られたが、これは管内の衝撃波背後の陰圧により、リアクタ中に含まれる気泡の核がキャビテーションとなったものと予想される。特に強い衝撃波が発生しやすい環境では高速流れは必ず生じるので、壁面近傍で局所流れが生じることは自然である。この場合、閉塞の度合いが大きい壁面間距離の狭い領域で流れが速くなりやすいのも、また現象として自然なことである。

一方で放電そのものについて注目してみる。まず放電時間だが、半値幅で約 2  $\mu\text{s}$  で、もし放電前にエネルギーの授受が極めて小さければ、気泡発生エネルギー供給ができるタイミングは初めのピークの瞬間しかないと考えてよい。これが特徴的に表れているのは D=8 mm の実験結果であり、管に沿って気泡が細長く進展する様子もない。さらに、電流波形を見ても D=4 mm と D=8 mm についてその半値幅には大差がない。これより本実験条件では気泡発生について継続的にエネルギーが供給される時間は、気泡の寿命に比べかなり短いと予想される。これは指向性・長い照射時間・特定の波長をもつレーザー (Ho:YAG など) 誘起気泡とは特性が大きく異なる。レーザーの場合はパルス幅が長く、一方向に水蒸気泡を生成しながら進行できる場合、管に沿って単一の気泡が細長く成長する傾向がある[7-8]ことが確認されている。つまり本研究で得られた気泡拡張・進展については、瞬間的に供給されるエネルギーで気泡が発生し、その後膨張拡張すると考えるのが妥当で、継続的な放電からエネルギーを得て気泡が広がるとは考えにくい。

一方で、放電形態が気泡の成長に全く関係ないかといえそうでもない。気泡の進展形態にかかる時間が数 100  $\mu\text{s}$  オーダーであるのに対し、放電電流は数 10  $\mu\text{s}$  と極めて短い時間である。にもかかわらず放電電流に影響が出ているのは、流体力学的な効果だけで説明できるとは考えにくい。放電前のストリーマや暗電流から、微小気泡群やプラズマが発生している場合があるなら、それらが絶縁破壊前に気泡の進展に対する何らかの影響を及ぼす可能性は多分に考えられる。特に放電経路の変化は十分にありうる(経路そのもの、または気中放電・液中放電・境界面の沿面放電など)が、管内の水の体積が特に小さい場合には気泡の占有体積は相対的に大きくなり、結果として放電経路に対する気体の割合も相対的に大きくなる。また暗電流やストリーマにより絶縁破壊が起きやすく、かつ気泡がわずかな力学的衝撃で拡張しやすい状況になれば、放電電流の増加と気泡進展形態の変化は同時に起こりうる。これらは絶縁破壊直前の静電界に起因した放電現象の差により、結果的に現象に違いが生じるととらえることもできる。このような電気的な影響を考えた場合、まずは静電界の違い・放電経路の統計的性質などを考慮する必要があるが、火花に発達する前のストリーマの成長経路、および絶縁破壊発生時の火花の経路については、実験と計算の両方を用いて検証を行う必要があるだろう。

以上より、流体力学的観点と放電現象の観点の両方が入り組んでいる現象であることが想定される。特にこれまでの当方の調査では、壁面近傍の局所的な水噴流の速度についてあまり注目をしてこなかったもので、これまでとは少し視点が異なる流体力学的観点からの検証も重要になるだろう。

また連続撮影結果からは、直観的には発光領域が大きい条件では放電電流も大きく、気泡の寿命も長いので、力学的効果も大きいことが想定される。発光領域の分光計測を行ったわけではないので定量的には言えず、また今後精密な分光計測が必要になるだろうが、放電電流の大きさは発光規模に関係すると推察される。

可視化結果より気泡崩壊後の水流を見ると、D=4 mm の場合はよくわからないものの、参考として行った Free

の実験結果より残留気泡の動きから水流が明らかに下方向であることが判明した。今回の実験条件ではそれぞれ重力の影響もあり、放電電極上部の水の重さは無視できない。そのため水面までの距離、すなわち電極上部にある水の質量が大きくなる場合、常に下向きに力が加わっていることになる。ジェットの駆動力にはそれが加算されるため、下向きに水流が進展しやすいと予想される。水流の向きが確認できなかった  $D=4\text{ mm}$  と  $D=8\text{ mm}$  の条件でも、気泡の進展方向とは別に水流は下向きの可能性がある。ただしこの結果は東北大学の結果[9]と部分的に異なっている。単一気泡の生成と崩壊については類似しているが、水流の方向が反転している。東北大学では水面からリアクタをジェットとして上方向（開口方向）に噴出させることを想定し、水面よりジェットを発生させた領域まで広範囲を撮影しているが、ジェットが上向きに発生している。実験条件の違いに注目すれば、まず本実験では壁面間距離が大きいときは  $D=8\text{ mm}$  の条件だが、東北大学の結果では  $D=15\text{ mm}$  以上に相当する条件であり、本実験より壁面間距離がかなり大きい。また電極形状は本研究では繰り返し使用と耐久力を考慮してニードルだが、東北大はディスクのワイヤー形状である。以上のように条件がいくつか違っているものの、水流の方向に違いがある根本的な原因になりうるかどうか、現状では明言ができない。しかしこの事実はかなり重要である。まず考慮の必要があるのは、東北大学の実験結果について、最も早い水流がジェットでそれが上向きに進行するのか、下向きの流れが強く高圧リザーバ層の反作用でジェットが上向きに飛んでいるのか、過去のデータの確認や調査が必要である。また本実験では  $D=15\text{ mm}$  近傍の条件の調査を行っていない。本実験でも、 $D=8\text{ mm}$  と  $D=4\text{ mm}$  でかなりの違いがある。先にも述べたがこの分野は放電現象と流体力学的影響が混在しており、条件により現象が変わりやすいことも十分にあり得る。これより  $D=15\text{ mm}$  にもまた違いがある可能性は多分にある。壁面間距離と気泡成長の関連は不明点も多く、種々の応用のため継続的にかつより詳細に調べていく必要がある。

## 5. 結論

観測窓間距離が  $10\text{ mm}$  の条件に置かれたニードル形状の対向電極において、電極近傍に壁面を配置すると絶縁破壊時に誘起される気泡の成長が球状拡張から壁面進展に変化するが、その壁面間距離における閾値おおよその範囲で特定できた。この現象の原因は本実験では解明が難しかったが、局所的な高速流れによるキャビテーションの発生と、絶縁破壊直前の電界による気泡生成への影響が想定された。

## 参考文献等

- [1] 小坂丈俊・孫明宇：水中点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
- [2] 小田 昭紀 他，非平衡大気圧プラズマのシミュレーション，J. Plasma Fusion Res. Vol.92, No.9 (2016) 682-687.
- [3] 小坂丈俊，文科省科研費，若手研究(B)，レアメタル回収に向けた放電破碎と衝撃波収束を利用した超高効率革新的破碎法の確立，課題番号 15K18300
- [4] 安岡 康一 他，水中プラズマによる化学（有機）プロセス，J. Plasma Fusion Res. Vol.84, No.10 (2008) 679-684
- [5] 川野 修太 他，水中気泡内放電による有機染料の脱色におけるパルス幅の影響についての検討，静電気学会誌，36, 1 (2012) 43-49
- [6] 小松真，平成 25 年度電気学会全国大会講演論文集，第 3 分冊 (2013)，6.
- [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

- [8] T. Hirano et al, "Enhancement of fibrinolytics with a laser-induced liquid jet", *Lasers Surg. and Med.* 29, 360-368, 2001.
- [9] Kentaro hayashi et al., Experimental study of water jet formation by electric discharge in tube with various width, *Proc. 8th International Conference on Flow dynamics* (2011) 582-583