

微小ジェット駆動源としての管-棒形状 放電電極の性能に対する極性の影響

小松 真¹⁾, 板坂 修平²⁾, 大塚 観喜²⁾,
工藤 諒²⁾, 大地 道旭²⁾, 村上 貴哉²⁾

(受理 2014年10月10日)

Effect of Polarity to Lifetime and Performance of Tube-Rod Spark Electrodes Used
as Micro Water Jet Generator

Makoto Komatsu, Shuhei Itasaka, Kanki Otsuka, Makoto Kudo,
Michiaki Daichi and Takaya Murakami

In present experimental study, we investigated whether polarity of spark electrode effects to micro water jet driven by spark between coaxially-mounted tube electrode and rod electrode or not. Reactor of spark was 22.5 ppm NaCl solution that was ejected from open end of tube electrode as a jet. Spark gap, charge voltage and capacitance for spark discharge were 1.5 mm, +5.9 kV and 0.2 μ F, respectively. Tube electrode of 1.2 mm external diameter and rod electrode of 2.0 mm diameter were made of SUS304 Stainless steel. Performance evaluation of electrodes was conducted as measurement of pressure dropping during 105 times of spark. Pressure sensitive sheets conducted to results of pressure measurement. We can't confirm the effect of polarity in results of pressure measurement. Therefore this study concluded no difference caused by polarity. By contrast, strength of water jet in present condition attenuated after 80 times of spark, and finally jet was too weak to measure pressure at 100 times of spark. When jet had been generated with faced needle electrodes in our other studies, we had confirmed such results after 200 times of spark. Hence, there is high possibility that lifetime of present coaxial electrodes is shorter than faced needle electrodes.

1. 背景

医用で切開に用いるマイクロウォータージェットの駆動源には、レーザーやピエゾ圧電素子などが用いられるが、放電もその駆動方法の一つである。水の浄化などにストリーマ放電を用いる研究においてもリアクタの条件により絶縁破壊が起こることが確認されており^[1]、放電駆動ジェットはそれに付随する力学的効果を利用したものである。放電は非常に低いコストで効率よく切開性能が得られる反面、放電の特性上動作がやや不安定で、使用に際してはその特性の調査が必要と考えられた。電極

¹ 岩手医科大学 共通教育センター 物理学科

² 岩手医科大学 医学部

形状が単純な場合でも詳細が不明な点もあり, 将来的には切開性能を考慮した電極形状の最適化が必要になると予想される。

我々の過去の研究においては, 低コストを生かすには構造が単純な方がよいこと, また制御や見積もりがしやすいことなどを考慮し, 管-棒形状の同軸電極形状を採用した時期があったが, 現在はジェットの強さは主に放電電極間のリアクタの導電率に支配される, ジェットの強さの調整幅が広いなどの理由で, 不平等電界を生ずる電極形状を中心に検討している, その過程で, 電界の集中がジェットに与える影響が無視できず, より電界の集中しやすい形状が放電に有利となる可能性が浮上した, 過去の同軸電極形状では機械的な強度を考え, 棒側の電極をアノードにしてきた, しかし機械的強度が電極の寿命に対し小さな影響しかないとすれば, 電界分布がジェットに与える影響を当然考慮すべきであり, 管側の電極をアノードにしたほうが, 電界集中が少し起きやすくなり, 電極の極性を変えると発生するジェットの性質が異なる可能性が出てきた。

本研究ではこのような背景から, 管-棒形状の同軸電極形状を用いた放電駆動ジェットに対し, 電極の極性の違いが与える影響について実験的に調査した。

2. 理論と実験方法

2-1. 電界強度分布の見積もり計算について

電界強度について, 電位 ϕ に対するラプラス方程式

$$\nabla^2 \phi = 0$$

を円柱極座標 (半径方向 r , 軸方向 z) でガウス-ザイデル法^[2]を用いて解き, その変化量の大きさである

$$|E| = \sqrt{\left(\frac{\partial \phi}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2} \quad (r \neq 0)$$

$$|E| = \left|\frac{\partial \phi}{\partial z}\right| \quad (r = 0)$$

を求める手法で計算した^[3-4], 格子間隔を 0.05 mm, 誤差判定基準値を電位計算時で 1.00×10^{-7} kV とした簡易計算を行い, 検査体積は軸方向 6 mm, 半径方向 6 mm とした, そのため境界条件は電極中心線より 6 mm の位置で 0 V である, 比誘電率は希釈食塩水 (リアクタ) について $\epsilon_w = 80$ (25°C の精製水と同じ), 電極保持材ナイロン 66 についてカタログ値より $\epsilon_n = 4$ とした。

2-2. ジェットの強さの計測方法

図 1 は実験系とジェットを駆動する放電電極断面図である, 電極は外径 1.2 mm・内径 0.9 mm の SUS 304 管形状電極と, 直径 2 mm の SUS 304 棒形状電極であり, その電極間に生理食塩水を 400 倍に希釈した 22.5 ppm NaCl 水溶液 (25°C, 導電率平均 $52 \mu\text{s/cm}$) を導入し, この水溶液をリアクタとして放電することによりマイクロウォータージェットを発生させた, これより管形状電極はジェットのノズルを兼ね, またリアクタそのものがジェットとして放出される流体となっている, 管形状電極の長さは 20 mm でストレートノズル形状となっており, 電極間距離 1.5 mm であった, これらの値は本実験中で固定している。

充電電圧 (グリーンテクノ・GT 20) は +5.9 kV であり, 高電圧キャパシタ (トートイ工業製 0.2

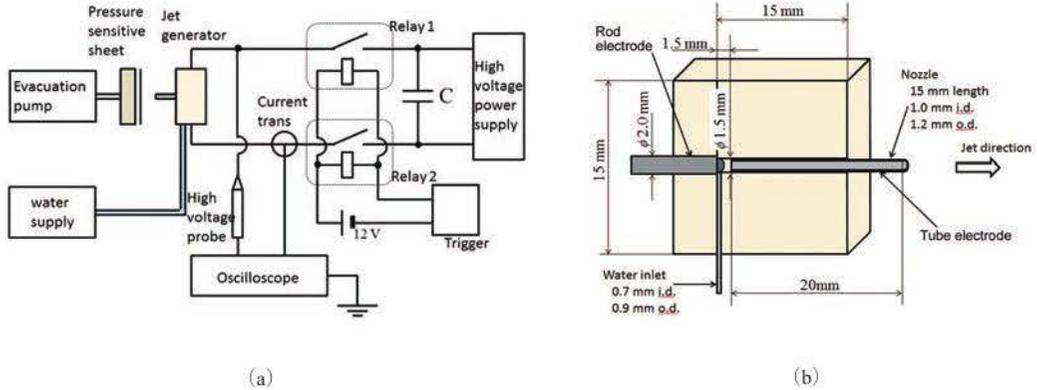


Fig. 1 実験装置:(a) 実験系, (b) 管-棒同軸電極断面図

μF)を高耐圧リレー (Kilovac EV 200) でスイッチングすることで放電した。

本実験では前述の通り、管電極アノードの条件と棒電極アノードの2条件について、その性能を比較した。性能評価はジェットの作用部位に対する圧力計測によるものとし、圧力シート (Fujifilm LLW, 圧力計測範囲 0.5–3.05 MPa) をノズル前方 1.5 mm の位置に設置し、圧力が加わった部位のシートの変色を計測・解析 (FujiFilm FPS-100) した。電極は各条件で3個体用意し、600番耐水研磨紙による電極の研磨以外電極の事前処理は行わなかった。放電回数は1–105回とし、その間の圧力の変化を記録した。実験毎に電極間は電極間体積に比べ十分大きな水量でフラッシュした。

図2は同時に計測された電圧波形である。高電圧プローブ (Tektronix P6015A) で放電電圧を計測した。カレントトランスで電流計測も試みたが、本実験ではLPFがうまく働かなかったので結果としての提示は出来ない状態となった。電圧波形より、細かいノイズが除去し切れていないことから電圧波形を一点に定めることが困難であったため、図のように放電前の一定区間では電圧降下が極めて緩やかであると考え、トリガー前 100–500 μs の 400 μs にわたる区間での平均値を放電電圧とみなした。

なお本実験では火花遅れが大変長いので、放電の瞬間に相当する電圧降下時をトリガーとして計測した。放電直後に必ず反跳のある波形となったが、オシロスコープ (Tektronix TDS1012B) の計測ブロック数などの関係から、その波形の観測と火花遅れの観測が同時に行えなかったため、本実験では火花遅れは計測しなかった。また観察の結果、少なくとも本実験条件ではこの反跳の周期や最低電圧に顕著な違いがなかったため、以降は電圧波形については放電電圧のみに注目する。

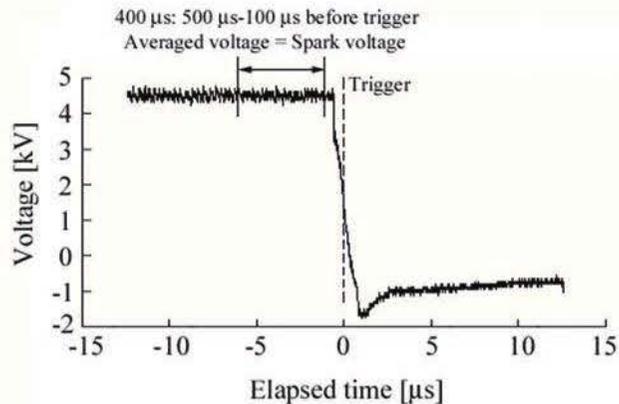


Fig. 2 計測された放電電圧波形の1例 (管電極アノード Trial 3, 放電24回目)

3. 実験・計算結果

3-1. 電界強度分布の見積もり計算結果

図3はガウス・ザイデル法による見積もり計算結果である。あまり大きな差ではないが、電界の強さについて最大値・ 5.0 kV/mm 以上の断面積のいずれでも、管電極アノードのほうが大きい結果となり、少なくとも電界分布については、わずかに従来の棒電極アノードよりも放電に有利な条件であった。ただし棒電極アノードで電界が強い部位は両電極側に分散して存在したのに対し、管電極アノードの条件では管電極側に偏った配置となった。

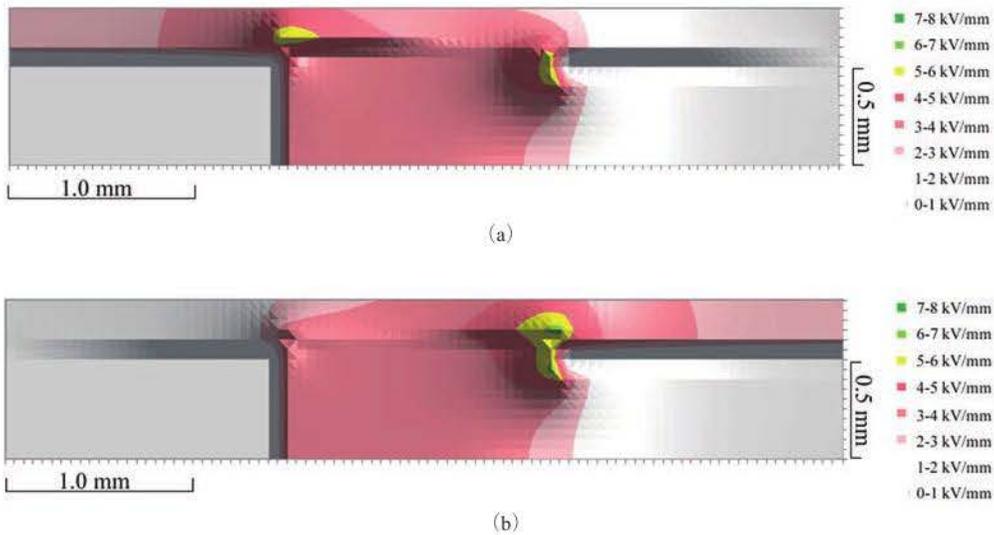


Fig. 3 ガウス・ザイデル法による電極周りの電界強度分布簡易計算結果：
(a) 管電極アノード, (b) 棒電極アノード

3-1. 圧力計測・放電電圧計測結果

図4は圧力計測結果の1例である。圧力シートによる計測はジェット空間分布計測・作用面積が計測でき、電気的なノイズが除去できる反面、履歴の計測ができず圧力計測の上限値があるという特徴がある。特に圧力の上限値については、本実験のジェットが計測レンジに対し極めて強い場合、値の飽和により計測値が保証されないことに注意する必要があることを意味する。これを考慮し、今回は空間分布も考慮した作用荷重でジェットの強さを定性的に検証することとする。詳細は後述する。

図5は計測された作用荷重と放電回数関係図であり、各条件について20回ごと5回ずつ計測した実験点を描画したものである。図6には放電電圧と放電回数関係を示した。

計算では先に述べたとおり、管電極アノードのほうが偏っており、わずかではあるが電界分布の観点では放電には有利であることを示したが、ジェットの強さを直接的にあらわす作用荷重の結果では、管電極アノードの顕著な優位性は見られなかった。また図5で象徴的なこととして、いずれの極性でも圧力計測時のデータのばらつきは大きく、この差は近年採用し始めた対面針状電極の場合よりも顕著であった^[5]。またいずれの極性においても、電極の個体差はあるが放電回数80以上でジェットの威力の減衰が始まり、放電回数100ではジェットの計測が十分にできないレベルまで弱体化した。このような顕著な弱体化は、先の対面針状電極の場合ではどの個体でも起こらなかった。一方で電位差は

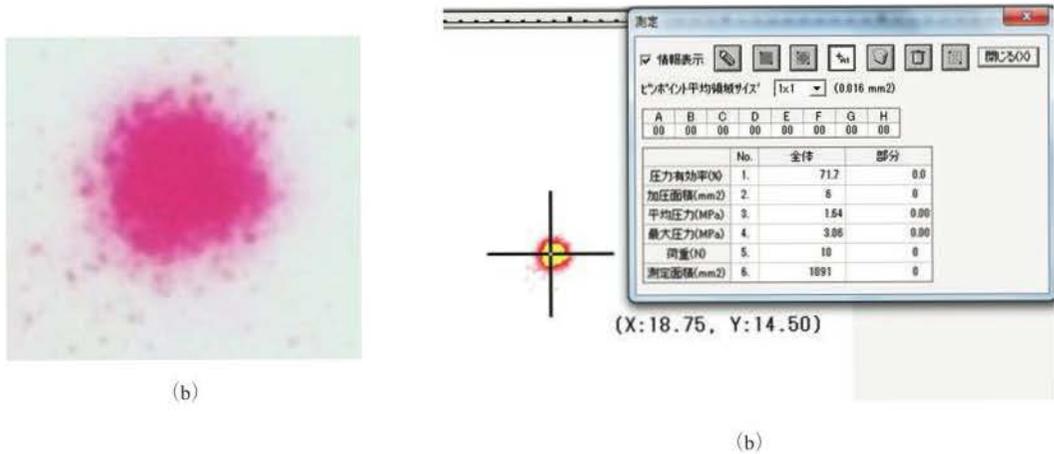


Fig. 4 圧力計測結果の1例(管電極アノードTrial 3, 放電24回目):
 (a) ジェットが作用し変色した圧力シートの解析前写真, (b) FPS100による解析画面

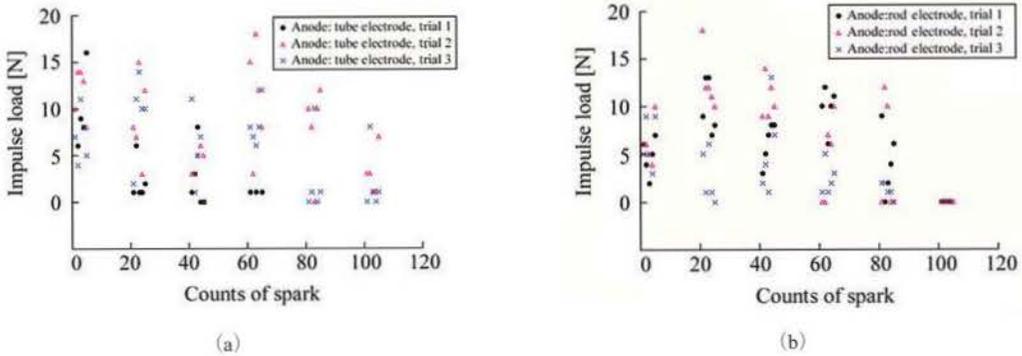


Fig. 5 計測された作用荷重と放電回数との関係:
 (a) 管電極アノード, (b) 棒電極アノード, いずれも3電極個別に区分けた全実験点を描画

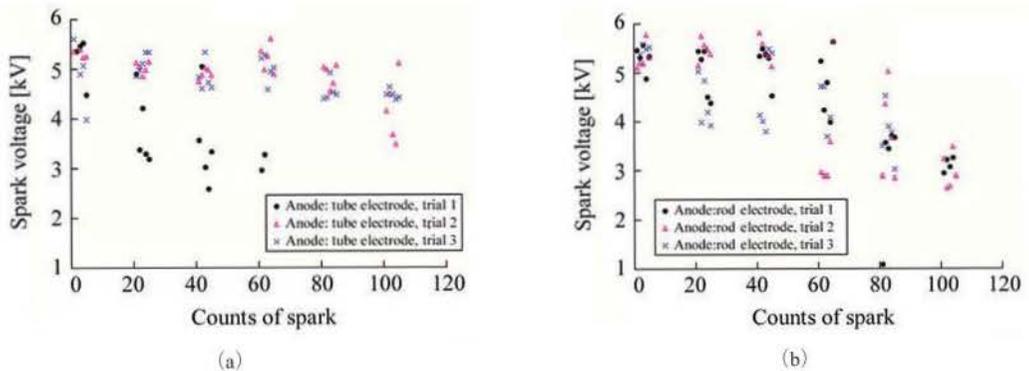


Fig. 6 計測された放電電圧と放電回数との関係:
 (a) 管電極アノード, (b) 棒電極アノード, いずれも3電極個別に区分けた全実験点を描画

放電回数に対し緩やかに下降し、ばらつきもさほど大きくなく極性による差も見られなかった。

4. 考察と結論, および今後の課題

電界強度分布からみれば、計算ではわずかに管電極アノードのほうが、わずかに放電が起りやすいという結果ではあったが、実際はそこまで差がなく、結論としては極性による違いは見られなかった。電界による違いがあっても、個体差の影響も同時に存在し、その誤差に埋もれるような微々たる優位性しか極性の違いでは築けないためこのような結果になったという考え方もできる。

ただし、最近採用し始めた対面針状電極を含め、当方の実験で針状の電極を用いた場合には、少なくとも放電回数約 60 程度でジェットが安定し^[6]、180 程度まで性能が維持できることを確認しているが、今回のような同軸形状電極は放電回数 80 以上では使用できるとは考えにくく、極性に関わらず電極としての寿命は短いと考えてよい。これに関連し、本実験の同軸形状電極について放電電圧に注目すると、図 6 より平均約 4 kV 程度まで下降するとすでにジェットは発生しにくい。一方で対面針状電極についてはこの程度まで電圧が降下してもあまり性能が変動しないことがわかっている。このことも本実験の電極が対面電極に比べ寿命が短いことを示していると同時に、放電電圧そのものよりも電極の形状に依存する何らかの要因の方が、ジェットの力学的作用に対しては支配的である可能性もあり得る。この寿命の短さについては詳細な検討が必要であり、また電極表面の状態を詳しく観察する予定でもあるので、別の議論とする。しかし力学的な影響を考慮し、耐久性から同軸形の電極を採用した経緯もあったが、実際は寿命が短くなるという、相反した結果になった可能性が高いことが明らかになった。対面針状電極の場合、数十回の放電ののちジェットが安定する領域に入るのは、過去の研究も併せるとコンディショニングによる影響が大きい^[7-8]と考えられる。針状電極の場合は放電部位がほぼ一様であるため、コンディショニングされた電極面が放電時に使用され続けることになるが、同軸形の場合放電の位置は一定ではなく、管形状電極の円周上・棒状電極の円筒断面のどこかに放電経路が形成される。形状的にはこの点が最も大きな違いであり、場所によりコンディショニングにもムラが出ると予想される。これにより放電時の力学的効果が安定しないのではないかと考えている。

つまりは放電そのものの不安定さが、力学的効果であるジェットの強さにも影響するという予想なのであるが、この解明には放電の性質をより詳細に調べる必要がある。注目すべきは、放電に時間がかかるほど放電電圧は下がることが確定していることで、ジェットの強さが火花遅れとほぼ確実に何らかの関係があることと、放電降下時に条件により明確なトリチェルパルス^[9]が観察されていることから、コロナ放電より絶縁破壊まで発展する過程である火花遅れに関することであろう。ただ现阶段では計測が難しいので、火花遅れの程度とその時の波形について、計測方法を今後考案する必要がある。

図 7 は管電極アノードの条件下で圧力計測を行った際に、有効とされた作用面積に対する平均圧力と放電回数の関係を示したグラフであるが、その分布は作用荷重の時とは様相が異なり、どちらかといえば放電電圧に類似した、放電回数の増加に伴い緩やかな下降を示している。またここでは示していないが、棒電極アノードの条件下ではばらつきはあるが

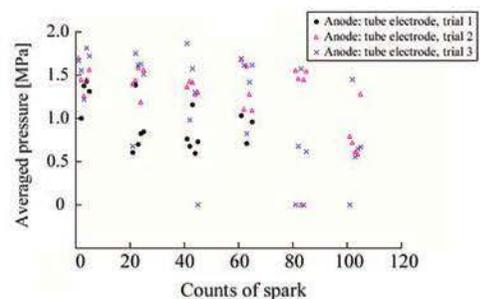


Fig. 7 管電極アノードの時に計測された作用面積に対する平均圧力と放電回数の関係：3電極個別に区分けした全実験点を描画

その下降の程度はさらに緩やかで、平均値はむしろ一定に近いことが分かった。つまりジェットが作用した部位の平均圧力は、放電回数の増加に対し作用荷重ほど大きく下がらないことになる。

これより作用荷重が下降した原因は、有効面積の縮小だけが主な原因ととらえることができ、平均圧力が変わらないため一見すると切開性能は維持できるのではないかと考えられそうである。しかしここで注意すべきは圧力シートの計測限界であり、最大圧力がより大きな値であることが十分にあるということである。その場合本来の平均圧力をもっと大きくなり、本実験結果では過小評価していることになる。この場合最大圧力がより大きいジェットでかつストレートノズルでは、作用面積もより広範囲になることが想定される。これより平均圧力による評価よりも、現段階では定性的には作用荷重による評価や比較のほうが、ジェットの威力については正確に近い可能性が高いと考えている。ただいずれにせよ、圧力シートだけでは正確な検討には限界があることも明らかである。今後より正確に検討するにあたり、別途最大圧についてピエゾ素子を用いた検討を計画している。ただしピエゾ素子では検査面積の関係から、空間的な作用荷重は計測困難なため、本実験結果も併せて比較検討する予定である。さらにどのような圧力計測手法であれ、それ単体では切開性能との因果関係は直接的に示せないで、今後切開性能と関連付けた評価は必須となる。

参考文献

1. Anto Tri Sugiarto, Masayuki Sato, Jan D Skalny, “Transient regime of pulsed breakdown in low-conductive water solutions”, J. Phys. D: Appl. Phys. 34, 3400–3406, 2001.
2. 戸川 隼人, “数値計算演習”, 共立出版, pp.127–141, 1980.
3. 宅間 董, 濱田 昌司, “数値電界計算の基礎と応用”, 東京電機大学出版局, pp.9–30, 2006.
4. 早野 龍五, 高橋 忠幸, “計算物理”, 共立出版, pp.73–76, 1992.
5. 小松 真, “電極間の静電容量と放電経路が低導電率の水中火花放電に与える影響”, 岩手医科大学共通教育研究年報第48号, pp.9–15, 2013.
6. 小松 真, “火花放電駆動パルス水噴流の小型化と安定化”, 平成25年度電気学会全国大会講演論文集, 第3分冊, P. 9, 2013.
7. 山納 康, 大塚 尚弘, 小林 信一, 齊藤 芳男, “スパークコンディショニング処理された陰極と陽極の真空中絶縁破壊特性”, 電学論 A, 126巻 8号, ppp.775–781, 2006.
8. 照井 康輔, 山納 康, 小林 信一, 齊藤 芳男, “電極の表面状態の変化が電界電子放出特性に与える影響”, 電学論 A, 123巻 5号, pp.475–480, 2003.
9. 河村 達雄, 河野 照哉, 柳 父悟, “高電圧工学 (3版改訂)”, 電気学会, オーム社, 2003.

