

錐形状電極間の距離が 水噴流駆動放電電極の耐久力に与える影響

小松 真

(受理 2015年 8月25日)

Effect of spark gap to endurance of electrodes
with quadrangular pyramid shape used as water jet generator

Makoto Komatsu

We conducted experimental study on dissection performance for soft materials of water jet driven by underwater spark discharge between stainless-steel electrodes which had 1.2 mm diameter square pyramid tip. Dissection performance was validated by pressure measurement and direct current resistance (DCR). Parameters were number of sparks and initial gap of electrodes, and we investigated effect of these parameters to static electrical environment and endurance of electrodes and jet generator. Reactor lead to electrodes was two-hundredfold diluted saline. Charge voltage and capacitance of discharge capacitor were 5.9 kV and 0.2 μ F, respectively. Pressure measurements with a piezo device were carried out at 2.5 mm from water exit of jet generator. Pyramid tip of electrodes became blunt or flat after some dozen sparks, and distance between electrodes after 45 sparks did not depend on initial gap of electrodes. Although pressure of jet correlate roughly with DCR value under the condition of 1.25 mm initial gap of electrodes, there were no correlation with 1.40 mm initial gap of electrodes. On the other hands, average pressures among 40-45 sparks were almost same with all initial conditions, and we could evaluate dissection performance of the jet from the results of pressure measurements.

1. 背景

ウォータージェットの技術は、コアンダ効果を利用した切開技術として、医用でも昔から研究されているが^[1]、感染症の防止とそれに伴う使用水量低減の観点から、現在ではパルス的な噴流が通常使用される。内視鏡を併用したメスとしての使用^[2]のほか、近年では針なし注射への応用^[3-4]などで注目されている分野もある。また近年のTURの技術^[5]でも通電時に局所的な沸騰と気泡発生を伴い、切開時にマイクロジェットの関与が想定される。これらは装置形状などに依存する強さを持つジェッ

トを利用したものである。ジェットの状態を変える際には機器形状に依存するような、比較的大きな条件変更が必要であり、またパルスジェットの汎用化には現象面も含め、まだ解決すべき部分がある。一方ロボットアーム等の手術においては、外科手術の技術と並行して専用の操作技術が必要である。手術の自動化や技術の一般化はまだ発展途上の状況であり、現状はまだ個人の技量に依存する段階である。より複雑な形状や個体差に対応する切開において、自動化や技術の一般化には、より安全に運用できる動作範囲を持った切開技術が必要であり、そのためにはフレキシブルな切開範囲を持つ技術と、切開過程の更なる詳細な現象解明が必要となる。

放電により発生する噴流は、単純形状の条件下で上記の要件を満たすポテンシャルを持つと考えているが、噴流の生成が放電時の気泡の挙動に左右され、不安定な要素を持つことも事実である。当方では希釈生理食塩水をリアクタとした水中火花放電によるジェットを、医用をはじめとする軟物質切開技術へ応用することを考案し、それに関わる研究を続けている。昨年までの実験ではワイヤー対向電極を使用していたが、電極の消失が激しく、それが噴流の不安定さにつながる一因ではないかと考えられた。

そこで本研究では、電極間距離がワイヤー電極に比べ変化しにくく、かつ不平等電界を実現できる錘形状の先端を持つ電極を用いた放電を行い、回数に対するジェットの変動を圧力計測により確認し、噴流発生器としての耐久性と安定性が改善されるか検証した。

また異なる初期電極間距離によって、放電回数に対するジェットの挙動が変わる結果が予備試験で得られたため、本実験では同時に初期電極間距離の条件を2条件設定し、電極周りの環境を代表する静的パラメータの計測を行い、初期電極間距離が与える電極周辺への影響と耐久力への影響についても調べた。

2. 実験方法

Fig. 1 (a)は本実験で用いた噴流駆動用電極の断面図である。電極は太さ 1.2 mm 径で先端が四角錐形状であり、SUS304 製であった。また陽極と陰極は対向配置されていた。この形状と配置は以前の電極がワイヤー形状であった^[6]ところから変更を加えた部分であり、過去に問題視された耐久性の改善と、それに伴う放電現象の安定化を視野に入れたものである。Fig. 1 (b)に示した実験系は前述の過去の実験とほぼ同じ構成である。ただし本実験ではノズルは設けず、電極を固定する絶縁体材料 (PE 製) に 1.0 mm 径の穿孔部を設け、そこから飛び出す噴流のよどみ圧を計測した。これより周囲の空気の巻き込みが少ない状態で、平面上の穿孔部から噴流が発生する形となっている。電極間に導入したリアクタは 200 倍希釈した生理食塩水 (導電率 $52.6 \pm 1.9 \text{ SD}$ [mS/cm]) であり、実験ごとに内部を十分な水量でフラッシュした。

電極周りの状況を表現するのに、電気的な静的パラメータで表現することを視野に入れつつ、気泡の電極間への混入を察知しこれを事前に抑える目的で、実験ごとに LCR メーター (Instek LCR-915) を用いた 2 点計測法による簡易計測を行った。JIS 規格に基づいた $1 \text{ V} \cdot 1 \text{ kHz}$ の条件で、高インピーダンス時に適用される並列等価回路^[7]を考えた時の直流抵抗 (Direct current resistance, DCR) 値、静電容量値 C_p 、インダクタンス値 L_p 、抵抗成分値 R_p について計測した。本実験の放電にかかわる条件は過去の実験^[6]にそって、放電電圧は 5.9 kV、放電コンデンサー容量は $0.2 \mu\text{F}$ であった。

放電電圧は高電圧プローブ (Tektronix P6015A)、噴流のよどみ圧はピエゾ素子 (PCB 113B26) により計測した。ピエゾ素子は穿孔部出口前方 2.5 mm に配置し、事前に放電によるノイズの影響を受けないことを確認した。

Fig. 1 (a)の電極は本実験では 6 個体用意し、初期電極間距離 d [mm] により 2 種類・3 個体ずつ

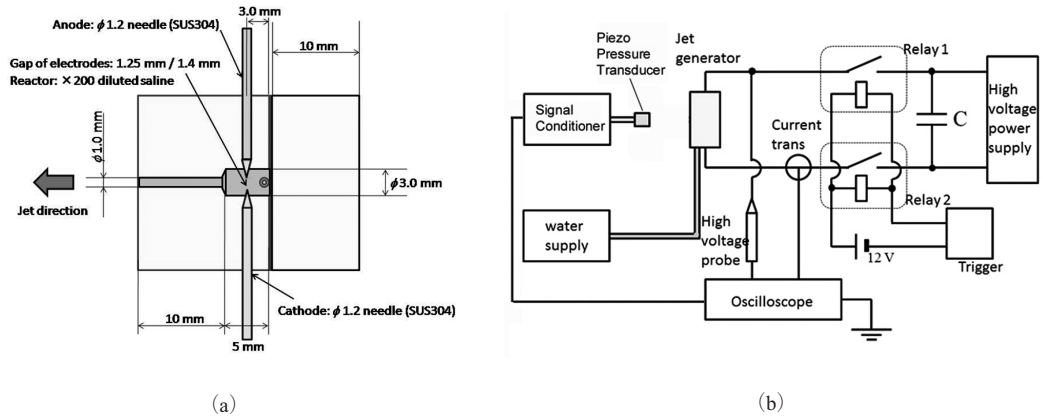


Fig. 1 実験装置：(a) 噴流駆動用電極断面，(b) 実験系

に分類した。これにより $d = 1.25 \text{ mm}$ と $d = 1.40 \text{ mm}$ の各条件におけるサンプル数は各3ということになった。

圧力計測は不安定な放電回数 1 - 3 は除外し放電回数 4 - 5, 21 - 25, 41 - 45 の時に実施し，その時の直前に計測した静的パラメータ，および同時に計測した電圧波形を合わせて現象を考えることとした。本実験では装置上の構造の問題と，ノイズの問題から電流計測を行うのが困難であったので，実施していない。

3. 実験結果

Fig. 2 は計測された圧力波形と電圧波形の一例である。圧力波形は細かい振動がある形状をしており，これは現象によるものと考えている^[6]。一方電圧波形に注目すると，火花遅れが数 ms 程度のオーダーで発生していたが，その間に電極間の電圧が低下していき，放電電圧が 5.9 kV からやや減衰する傾向があった。

Fig. 3 は放電回数に対する実験直前の静的な電気的パラメータをまとめたものである。Rp 値は回数による変動がそこまで大きくないが，放電回数の増加に伴い Cp 値の増加と Lp 値の減少がみられ，リ

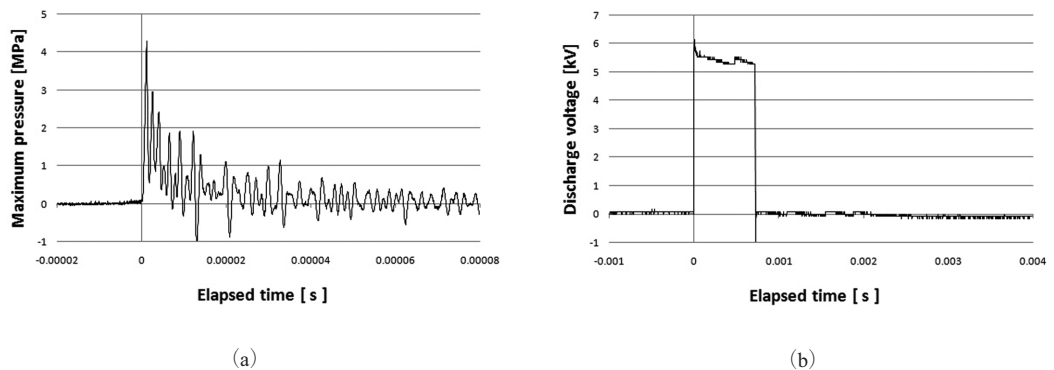


Fig. 2 計測結果の一例 ($d = 1.25 \text{ mm}$, Trial 2, 放電回数 43)；(a) ピエゾ素子による圧力波形，(b) 放電電圧波形

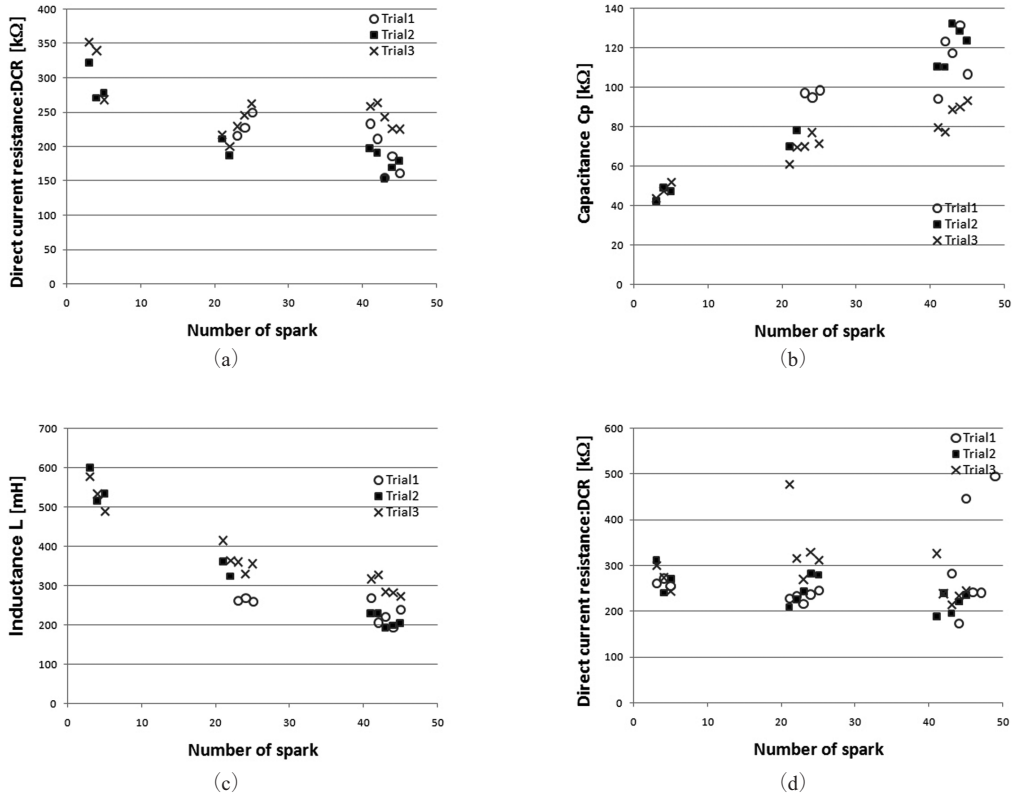


Fig. 3 放電回数に対する実験直前の電極周囲の電気的な静的パラメータの関係：
 (a) 回数-DCR値： $d=1.25$ mm, (b) 回数-Cp値： $d=1.25$ mm,
 (c) 回数-Lp値： $d=1.25$ mm, (d) 回数-DCR値： $d=1.40$ mm

アクタンスの値は回数に大きく依存する結果となった。その結果 DCR 値の減少につながったと考えられ、これはインピーダンスの式と矛盾しない。ただし $d=1.40$ mm の場合、Cp 値・Rp 値・Lp 値の変化傾向は $d=1.25$ mm の場合と類似していたにもかかわらず、放電回数に伴う DCR 値の変化は $d=1.25$ mm に比べ非常に小さく、ほぼ一定または緩やかに減少していく傾向にあった。

Fig. 4 は放電前と放電回数 45 後の電極の拡大写真である。数十回の放電により大きな形状変化がみられ、電極の先端部は鈍頭化・平坦化していた。写真より電極間距離を計測した結果を Table 1 にまとめた。放電回数 45 後の電極間距離は $d=1.25$ mm, $d=1.40$ mm とあまり差

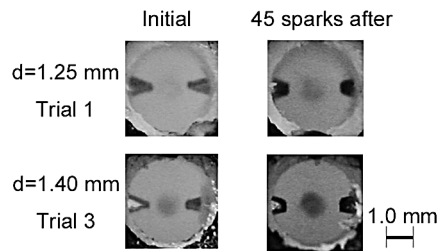


Fig. 4 放電前後の電極形状の拡大写真

Table 1 電極間距離の変化 (3 サンプルの平均)

	Initial [mm]	45 sparks after [mm]
$d=1.25$ mm	1.26 ± 0.01 SD	1.91 ± 0.03 SD
$d=1.40$ mm	1.39 ± 0.02 SD	1.92 ± 0.02 SD

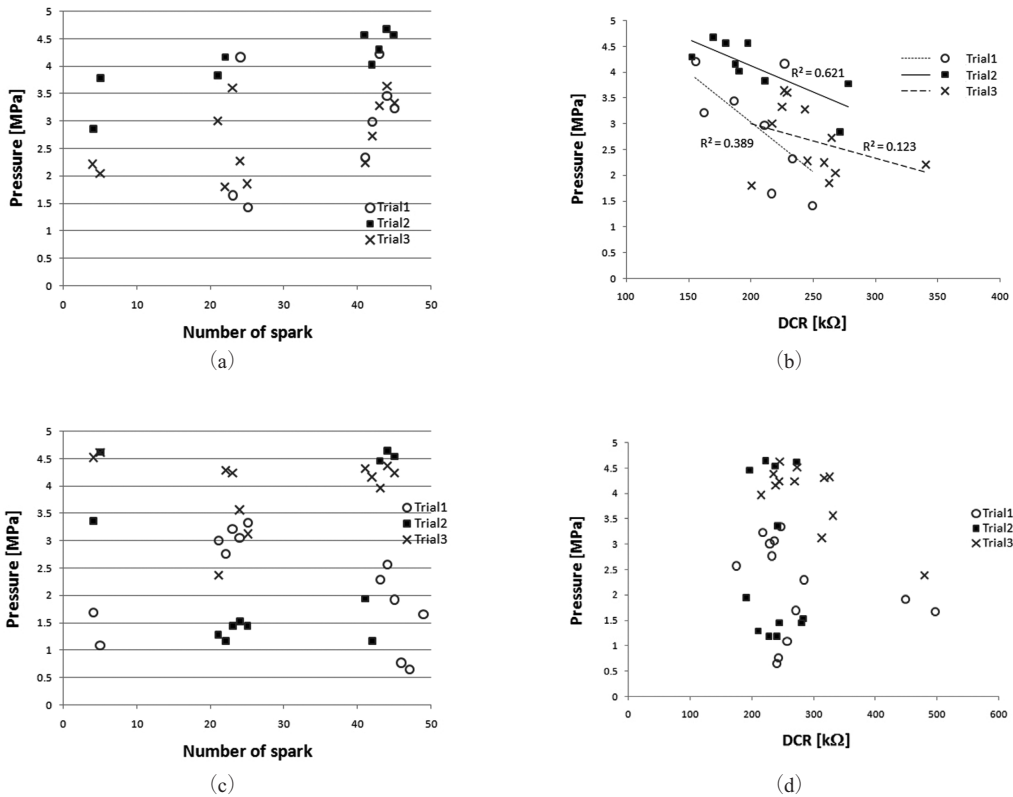


Fig. 5 放電回数・DCR値と最大圧力の関係:
 (a) 回数-最大圧力: $d = 1.25$ mm, (b) DCR値-最大圧力: $d = 1.25$ mm,
 (c) 回数-最大圧力: $d = 1.40$ mm, (d) DCR値-最大圧力: $d = 1.40$ mm

がない状態であった。これにより電極消失の割合は $d = 1.25$ mm のほうが大きい。

Fig. 5 は放電回数および DCR 値と圧力値の関係である。 $d = 1.25$ mm の条件では放電回数・DCR 値に対する相関がある程度認められた。特に DCR 値との相関では相関係数が 0.7 を超えるサンプルもあり、放電回数よりも実験直前の DCR 値のほうが圧力との相関がより強いものと判断できた。一方で $d = 1.40$ mm では相関が認められず、ばらつきも $d = 1.25$ mm に比べ大きい傾向があった。

電圧波形より 2 μ s の間に 2 kV 以上の変化があった部分を放電部と判断し、火花遅れを求めた結果を Fig. 6 にまとめた。火花遅れは d の値にかかわらず、放電回数とともに増加する傾向があり、これは過去の当方の実験結果と一致している。一方で火花遅れをパラメータとして圧力に注目すると、その相関はあまり明確ではない。 $d = 1.25$ mm の条件では薄い相関が認められる 1 個体もあったが、 $d = 1.40$ mm では相関が認められず、火花遅れが噴流の強さに関与しているとは認められない結果となった。

Fig. 7 は Fig. 4 をはじめとして、放電回数が多くなった場合に初期電極間距離による差が縮小していることから、放電回数 40-45 時に注目し $d = 1.25$ mm と $d = 1.45$ mm の計測結果の平均値を抽出して比較したものである。 $d = 1.25$ mm のほうが DCR 値について平均値が小さく、火花遅れと最大圧力の平均が大きい結果となったが、その差は 5 % 有意水準の t 検定で両者に差が認められない程度 ($p = 0.185$) であった。

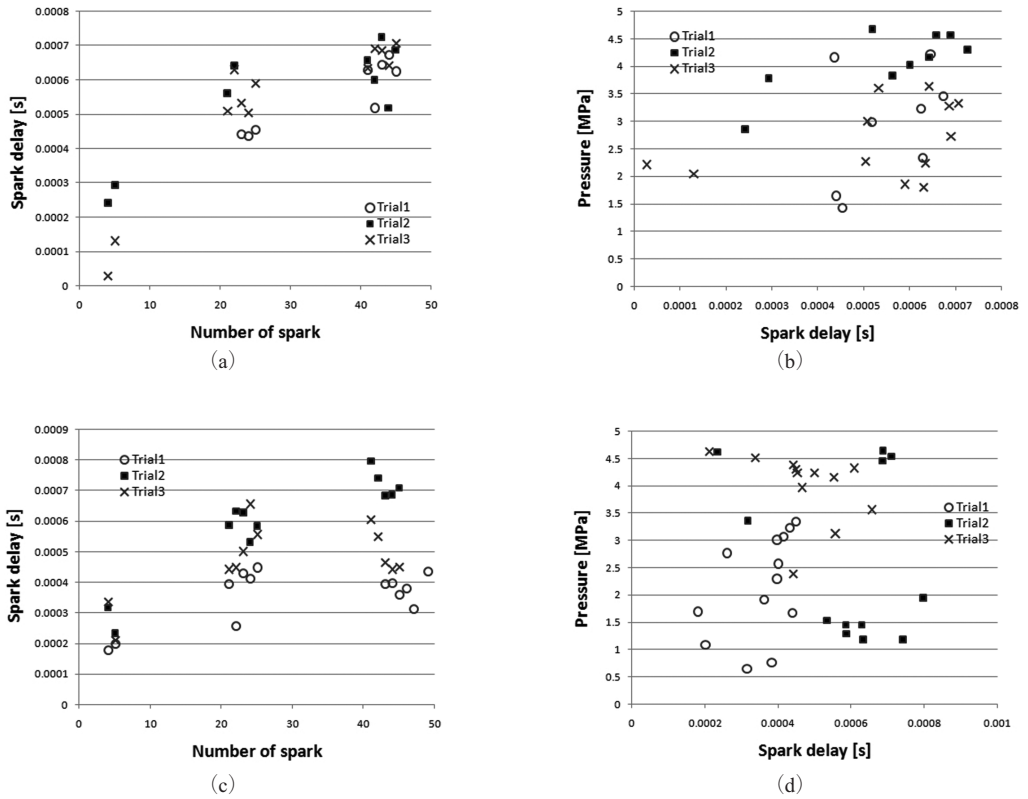


Fig. 6 放電回数・火花遅れと最大圧力の関係：
 (a) 回数－火花遅れ： $d = 1.25 \text{ mm}$ ，(b) 火花遅れ－最大圧力： $d = 1.25 \text{ mm}$ ，
 (c) 回数－火花遅れ： $d = 1.40 \text{ mm}$ ，(d) 火花遅れ－最大圧力： $d = 1.40 \text{ mm}$

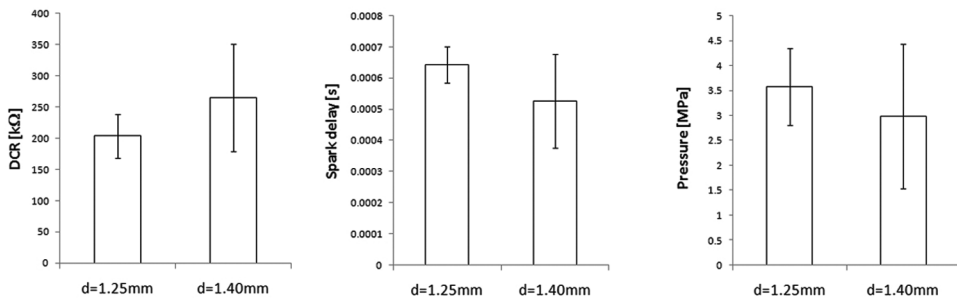


Fig. 7 放電回数40～45回時における $d = 1.25 \text{ mm}$ と $d = 1.40 \text{ mm}$ の各種パラメータ比較結果

Table 2 最大圧力が 0.3 MPa 以下の割合

	総データ数 N	計測不能数 (<0.3 MPa)	計測可能数 ($\geq 0.3 \text{ MPa}$)
$d = 1.25 \text{ mm}$	45	8	37
$d = 1.40 \text{ mm}$	49	3	46

本実験では、発光とピエゾ素子表面の水滴存在から、全データ点でジェットの発生を確認しているが、ピエゾ素子の設定から 0.3MPa 以下の圧力を計測できなかった。そこで最大圧力が 0.3MPa 以下であったために計測不能となった点数を Table 2 にまとめた。

$d = 1.25 \text{ mm}$ のほうが 0.3MPa 以下の回数が多いが、Fisher 検定の結果^[8-9]では 5% 有意水準における有意差は認められなかった。データ数の少なさから直観的には $d = 1.25 \text{ mm}$ のほうが圧力計測不能回数が多く、ジェットが不安定である印象があったが、検定の観点からはそれが決定的ではないという結果となった。

4. 考察と結論、および今後の課題

今回、過去の実験から変更を加えた部分は、電極形状と電極間距離である。前回実験時に使用したワイヤー電極と比較して、電極形状・電極間距離の変動は小さく、また切開に必要な圧力も確保されているため、耐久性の面では改善された可能性が高いと予想している。ただし詳細は、今後引き続き行う予定である寿命計測の結果を待つ必要があるだろう。なお、ジェットの駆動力が気泡の破碎であるため、現象は思ったほど安定せず、本電極形状を用いても現象の安定化は別途工夫が必要であると判断すべき結果であった。

これにかかわる直接的な実験結果として、まず注目すべきは電極間距離の変化であり、本実験の放電回数 45 後の電極間距離は、初期の電極間距離に関係なくほぼ同じであることである。これより電極の消失についてある程度は火花放電である限り避けられないものの、初期の電極間距離がどうであれ最終的に一定の電極間距離に収束し、やがて放電不能に至ることが想定される。また圧力値に注目しても、放電回数 45 後における本実験の条件 $d = 1.25 \text{ mm}$ と $d = 1.40 \text{ mm}$ では、決定的な違いがみられず、いずれも強い噴流を生成可能であった。これらの結果より、ある範囲内であれば初期の電極間距離によらず、電極の寿命にそれほどの違いが生じないと想定される。放電回数や DCR と最大圧力について、 $d = 1.25 \text{ mm}$ のほうにより強い相関があったのは、電極の消失量が安定するまでの過渡領域であった可能性があり、本実験で計測した静的パラメータでは判断できない影響も考慮しなくてはならないだろう。本結果での検定では決定ではなかったものの、圧力が 0.3MPa 以下で計測不能であった回数も $d = 1.25 \text{ mm}$ の方が多く、放電回数 25 以下では放電も大変不安定であったと判断できる。ただしその要因の特定は容易でないと考えられ、少なくとも予想されるのは放電回数を重ねると、現象・電極間距ともにある一定の条件に収束することだけである。これを踏まえれば $d = 1.40 \text{ mm}$ がより収束条件に近かったため、逆に相関が見られなかった可能性もある。ただし、これは同時に本実験条件では $d = 1.40 \text{ mm}$ のほうが電極の消耗量は少ないと予想される結果でもある。

次に電極形状について注目すべきは、電極先端が比較的鈍頭になっても、本実験条件では放電が可能であったことである。過去の実験で円柱の電極では効果的にジェットが発生しないことがわかっているが、今回の実験条件では、厳密でなくともある程度の電界集中があれば火花放電は発生し、電極の寿命とはその要件を満たせる期間の長さを意味するものと考えられる。ただし回数に対する鈍頭化の過程は明らかにならず、表面状態の違いまたは材料の変更でもその過程は変動しうる。

DCR 値と圧力計測結果以外の実験直前の静的なパラメータ、および火花遅れに注目すると、放電回数に対する変化傾向は初期電極間距離の値にかかわらず同様であった。これより電極周りの環境の全体的なバランスが放電には大きく関わり、少なくとも静的なパラメータについては何か決定的な一要因が存在するとは考えにくい。火花遅れについても、あくまで放電までの遅れ時間であり、噴流の特性は直接的には放電時の気泡の状態や配置に依存するので、あまり大きな関与はないと考えられる。以上より噴流に対する直接的な影響因子は電極の配置と形状のほか、静的にはフラッシュだけでは完

全に除去しきれない残留電化などの影響・電極の固定に用いる絶縁体表面の状態とリアクタに対する濡れやすさなど、材料的なものも合わせて考える必要があり単純ではない。ただし、電極周りが単純形状であらかじめジェットの圧力値に対応する DCR 値の見積もりが取れれば、実験直前の DCR 値計測で電極周囲の環境を予想することは可能であり、特に問題となる電極周囲の気泡の存在を目視なしで見分ける場合などに利用できる。

なお、実験装置にはノズルがないので、周囲からの空気の巻き込みがなく噴流の速度は従来の実験より遅いと考えられる。実際ノズルを使用すれば、それがストレート形状だとしても、もう少し性能の向上が期待できる。

参考文献

- [1] 松下通明 他, “【外科診療における材料・器具・装置のすべて】装置 ウォータージェットメス”, 外科67巻12号, 1528-1532 (2005).
- [2] 中野 徹 他, “レーザー誘発パルスウォータージェットメスによる安全に食道内視鏡的治療を行うための基礎的研究”, *Gastroenterological Endoscopy* 52, Suppl. 2, 2407 (2010).
- [3] Y. Yamanishi et al., *IEEE Nanotech. Mag.* 6 (2), 20-24 (2012).
- [4] H. Kuruki et al., “Simultaneous Ablation and Injection by Electrically-induced Mono-dispensed bubble Knife for Biomedical Applications”, *Proc. MEMS 2013*, 209-212 (2013).
- [5] オリンパスメディカルシステムズ (監修 三木 誠, 庵谷尚正), “TUR in saline : TURis”, オリンパスメディカルシステムズ技術資料, p. 4 (2005).
- [6] 小松 真, “水噴流駆動時のワイヤー対向放電電極の劣化”, 平成27年電気学会全国大会講演論文集, 第3分冊, 10 (2015).
- [7] Agilent Technologies Co. Ltd., “エンジニアのためのインピーダンス測定の8つのヒント”, *Agilent Technical Note 346-4*, <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/00-2395.pdf>, p. 3 (2002).
- [8] 青木繁伸, “正確確率検定 Exact test”, 青木繁伸 <http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/LaTeX/ExactTest.pdf>, pp. 1-27 (2005)
- [9] 青木繁伸, “Fisher’s exact test(Extended)”, <http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/exact/fisher/getpar.html> (2002)