

.....
 論 文

短ギャップ化による直流ストリーマ放電音の低減

田中利夫^{*1}, 茂木完治^{*}, 香川謙吉^{*}, 大久保利一^{**}

(2005年7月7日受付; 2005年12月20日受理)

Noise Reduction of DC-streamer Discharge Caused by Shortened Gap

Toshio TANAKA^{*1}, Kanji MOTEGI^{*}, Kenkichi KAGAWA^{*}, and Toshikazu OHKUBO^{**}

(Received July 7, 2005; Accepted December 20, 2005)

One way to reduce the noise of DC-streamer discharge was investigated. The relationship with the gap length of the discharge electrodes and the frequency of the discharge sound was indicated: the shorter the length is, the higher frequency becomes. The sound pressure level is also reduced significantly at audible range. These results must be caused by one of the electrohydrodynamic effect of streamer discharge. In streamer discharge, the ion drift may mainly affect the noise characteristics. The time required for ion to traverse the electrode gap may be the important factor to determine the frequency of streamer discharge.

1. はじめに

放電プラズマ, 特に, 低温プラズマと呼ばれる大気圧非平衡プラズマは, 常温下でも高いエネルギーを集中的に供給できる技術として, 近年注目を集めている. 特に, ガス状の有害物質や悪臭を効率良く分解処理する目的においては, 非常に好適な技術として考えられている. これまでに, 様々な形態の反応器が提案されている. 例えば, ベレット状の強誘電体をガラス管に充填した反応器^{1,2)}や, コイルやボルト形状の電極を用いたバリア放電反応器など^{3,4)}が示され, 処理効率の向上や, 除去対象物質の拡大が図られてきた. さらに, 最近では, これらの反応器と触媒を併用する研究が特に活発である^{5,6)}. プラズマの反応に触媒を関与させて相乗効果を引き出し, 反応効率の一層の向上や, 反応自体のコントロールなどを狙いとするものである.

しかし, 多くのプラズマ反応器には, 応用上の課題がほぼ共通して存在する. それは, 処理すべき空気が大量になると, 圧力損失が増大し, スケールの大型化が困難になる点である.

キーワード: 直流ストリーマ, 放電音低減, 高周波化, ギャップ長

* (株)ダイキン環境・空調技術研究所 (591-8511 大阪府堺市金岡町 1304)

Daikin Air-conditioning R&D Laboratory, Ltd., 1304 Kanaoka-cho, Sakai, Osaka 591-8511, Japan

** 大分大学 工学部電気電子工学科 (870-1192 大分市旦野原 700)

Department of Electrical and Electronic Engineering, Oita University, 700 Dannoharu, Oita 870-1192, Japan

¹ toshio1.tanaka@daikin.co.jp

殊に, 触媒体を併用する場合には, それ自身が大きな抵抗体となるため, 特に影響が大きくなる.

この課題に対して最も有利な放電形態が, ストリーマ放電であると考えられる. ストリーマ放電は, 大気圧下でありながら, 電極間全体が電離空間となる唯一の放電形態であって, 電極間の距離を, 比較的広く確保することが可能である. そのため, 空気抵抗を少なく抑えつつ, 被処理空気とプラズマとの接触効率を向上させることができる. また, 電極構成が簡単で, 構造上の制約が少ない. そのため, 構造のアレンジが容易で, 多量の活性基を広い範囲に供給するのに有利である. このような理由から, ストリーマ放電は, 大量の空気を処理する場合でも, 高い性能を発揮すると考えられる.

ストリーマ放電を安定的に発生させるには, 高度な技術と工夫を要する. 既往の研究では, ストリーマ放電を発生させる手段として, 専らパルス電源を用いるのが一般的である. 立ち上がり時間が数十 ns, パルス幅が 1 μs 以下の短パルス電圧を印加することで, 電極間に安定的にストリーマを発生させることができる⁷⁾. しかし短パルス高電圧は, 高い電圧を瞬時に変化させるために, その実現には高機能の部品を用いなくてはならない. そのため, パルス電源装置は, 一般には非常に高価なものとなる. また, 高電圧のパルスを発生させることは, それ自体が強力な電磁ノイズを発することになるため, 電子部品の動作を阻害しないように, 厳重なノイズ対策が必要になってしまう.

これに対し, 直流高電圧を使ってストリーマ放電を発生させる研究が行われている. 李ら⁸⁾は, 針状のストリーマ放電

極を空気の流路方向と同じ向きに配置した反応器を用いて、有害ガスの除去効果を評価し、報告している。この反応器形態を応用すれば、比較的容易に大風量向けの反応器を設計することが可能である。また、電源も含めたコスト面でのメリットも大いに享受できると考えられる。

しかしながら、ストリーマ放電の応用においては、放電音という別の問題を解決する必要がある。ストリーマ放電部からは、通常、耳障りな放電音が発生する⁹⁾。これは、電極間で絶縁破壊する際に、放電エネルギーの一部が空気の振動として失われた結果であり、この現象を防ぐことはできない。一方、一般家庭や店舗などの室内で使用される民生機器の多くは、屋内の空気を循環しながら各種の処理を行うため、設置場所も屋内となる。その運転音は、在室者にとってほとんど気にならないくらいに小さいか、不快感を与えない帯域の音でなければならない。そのため、このような民生機器の場合には、従来、放電音がネックとなり、ストリーマが積極的に搭載されることはなかった。

本研究は、上述のような室内用の機器においても直流ストリーマを利用できるよう、放電音を低減することを目的とする。本報において我々は、電極間隔（ギャップ長）と放電音の周波数との関係に着目した。ギャップ長を縮小することによって放電音は高周波化され、人体の聴覚感度が鈍い帯域へとシフトされる。この効果により、聴感レベルでの放電音を大幅に低減できることが分かった。

2. 音の聴感補正

人体に感じる音の強さが、その音の周波数に依存することは、広く知られている。そのため、機器等が発する騒音の大きさを評価する場合には、人間の実際の感覚に近づけるべく、通常、測定された周波数帯域ごとの音圧に対して、人の聴覚感度の大きさを反映した補正を行い、その上で騒音

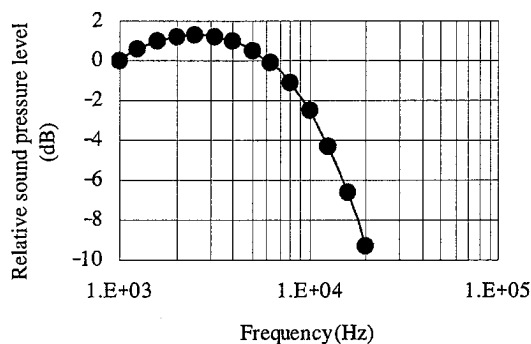


図1 音の聴感補正係数 (A 特性)

Fig.1 Correcting coefficient of A-weighting.

レベルが求められる。図1に、最も一般的なA特性と呼ばれる補正係数を示す¹⁰⁾。1kHzの音を基準として、それよりも強く感じられる周波数では加算、逆に弱く感じられる周波数では減算が、元の音圧値に対してそれぞれ施される。図1は、人間の聴覚が2~3kHzの音に最も敏感であり、それよりも高い音になるにつれて次第に鈍感になっていくことを示している。なお、本論文に記載する音の測定値は、すべてA特性補正を施した後の数値である。

3. 実験方法

3.1 放電音の測定装置

実験装置の概要を図2に示す。上面が開いたアクリル製の容器内に、針対メッシュからなる放電部を設置し、針側に正の直流高電圧を印加してストリーマ放電を発生させた。この放電部の上方1mに、周波数分析装置 (B&K社製 2144) の集音部を設置し、放電音の周波数特性とその音圧を測定した。測定周波数バンドは1/3 オクターブバンドとした。放電回路の接地側に直列に抵抗 (1k Ω) を挿入し、その平均両端電圧から抵抗値を除いて求まる電流値と、電源の二次側出力電圧との積として放電電力を求めた。また放電電流波形を観測する際は、この抵抗の両端電圧をオシロスコープにより観測した。

3.2 電極形状

放電極の形状を図3に示す。針電極は、 $\phi 2\text{mm}$ のニッケル棒の片端を円錐状に80°の角度で削り、長さを7mmとして、ステンレス製のメッシュ電極にギャップ長Gで対向させた。Gは23mm, 9mm, 5mmの3通りとした。放電音の大きさを評価するには、これらを同等の放電電力のもとで比較する必要がある。しかし、Gが小さくなると、低い放電電流でも火花放電が発生しやすくなり、放電電圧の低下を電流値で補うことができない。そこで、Gが小さいときには、放電電力を高

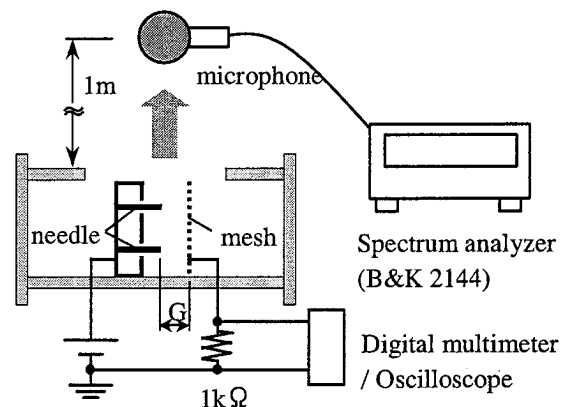


図2 放電音の測定装置

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus.

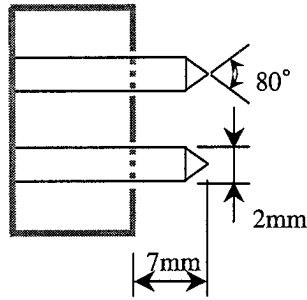


図3 針電極の形状

Fig.3 Shape of needle electrodes.

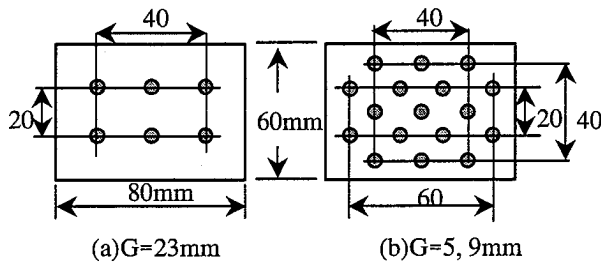


図4 放電極の配置

Fig.4 Placement of needle electrodes.

くするために、針の本数を増やした。

各場合の針電極の配置を図4に示す。電極部の外形は縦60mm、横80mmで、丸印の位置に針電極を配置した。針の数は、G=23mmのとき6本、G=5, 9mmのとき17本とした。ただし、電流波形を観測する際には、インパルス状に流れるストリーマ電流の周期を正確に捉えるため、電極を1本のみ装着して観測を行った。なお、各電極からはストリーマが独立に発生し、電極間での同期性はないと考えられるが、同じ周波数特性を持つ複数の電極を一括して測定しても音圧が変わるだけで、周波数特性の測定結果には影響しない。

4. 実験結果

4.1 放電音スペクトルおよびピーク周波数

ギャップ長 G を 23mm, 9mm, 5mm と変化させたときの放電音の周波数特性を図5に示す。いずれの場合についても、放電電力が約 2W となるように調整した。なお、BG は、測定室内の暗騒音を示している。

G=23mm のとき、ピーク周波数は約 3kHz となった。これは、上述したように、人間の聴覚が最も高い感度を有する帯域である。なお、6.3kHz と 10kHz 付近に見られるピークは、3kHz の倍音が出現したものと考えられる。これに対し、G=9mm では 6.3~10kHz, G=5mm では 10~12.5kHz にピークが出現し、G を小さくするにしたがって、高周波側へとシフトした。

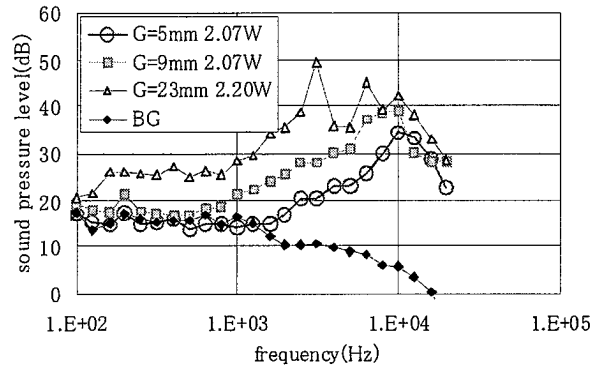


図5 放電音の周波数特性

Fig.5 Spectra of discharging sound.

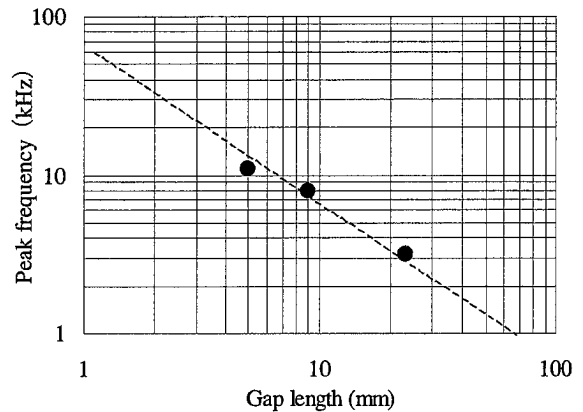


図6 ギャップ長と音のピーク周波数

Fig.6 Relationship between gap length and peak frequency.

表1 ギャップ長と音圧レベル

Table 1 Overall sound pressure level at each gap length.

ギャップ長(mm)	23	9	5
騒音レベル(dB)	52.5	44.5	39.2

ギャップ長とピーク周波数との関係を図6に示す。なお、G=9, 5mm については、ピークと考えられる周波数帯域の中央値 (G=9mm は 8.15 kHz, G=5mm は 11.25kHz) をそれぞれプロットした。図6にはまた、ちょうど反比例の傾きを示す波線を図示した。ギャップ長とピーク周波数との関係は、この直線にほぼ合致しており、両者は反比例に近い関係にあることが示唆された。

図5はまた、放電音が高周波化するにつれて、ピーク周波数やその周辺帯域において、音圧レベルが低下する傾向を示した。各ギャップ長での総合音圧レベルを表1に示す。音圧レベルはGが縮まるに従って、順に小さくなった。

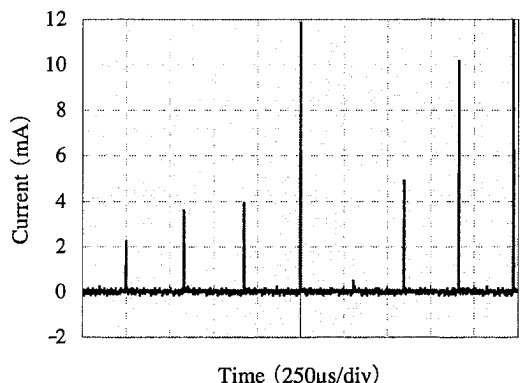


図7 G=23mmの放電電流波形

Fig.7 Waveform of discharging current at G=23mm.

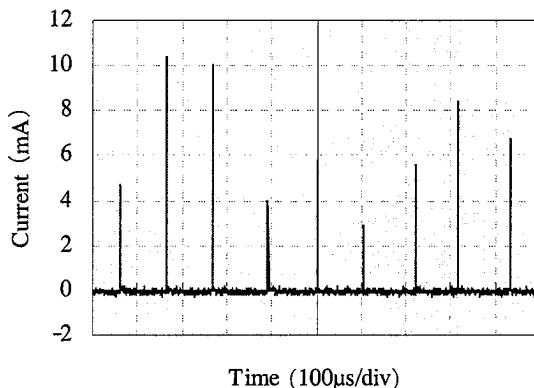


図8 G=9mmの放電電流波形

Fig.8 Waveform of discharging current at G=9mm.

4.2 放電電流波形

針電極を1本のみにして、G=23mm, 9mmの場合について放電電流波形を測定した。放電電力は、針1本当たりの電力が図5の結果を取得したときと等しくなるように、G=23mmのとき、0.40W (17.4kV, 23µA), G=9mmのとき、0.127W (9.74kV, 13µA)とした。

G=23mm, 9mmでの放電電流波形を、それぞれ、図7, 8に示す。放電電流は、両図で示されるようにほぼ一定の周期で流れている。その周期は、G=23mmのとき300~330µs, G=9mmのとき100~130µsとなり、周波数に直すと、それぞれ、3.0~3.3kHz, 7.7~10kHzである。これは、それぞれのギャップ長で得られる放電音のピーク周波数とほぼ一致した。このことから、放電音の周波数の変化は、ストリーマの進展する周期が変化していることに由来すると考えられる。

なお、個々のパルスが示す電流値は、音の周波数ではなく強さに関係すると考えられる。パルス一回ごとに発生する音の強さは異なるが、平均の放電電流値を一定にしておけば、計測される音も平均化されて一定になると考えられる。

4.3 放電電力と音圧レベル

各ギャップ長において、放電電力を変化させたときの放電音レベルを、図9に示す。同一ギャップ長の場合、放電電力が大きくなるにつれて、放電音は大きくなった。また、同一の放電電力においては、ギャップ長が大きいほど放電音が大きくなった。ギャップ長の縮小に伴って、放電音が高周波化し、総合音圧レベルが低減されたものと考えられる。

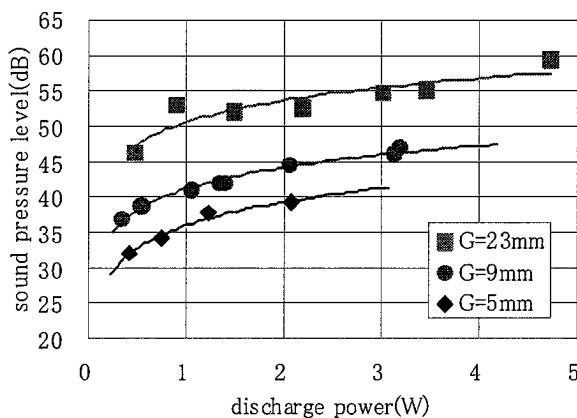


図9 放電電力と音の強さ

Fig.9 Relationship between discharge power and sound pressure level.

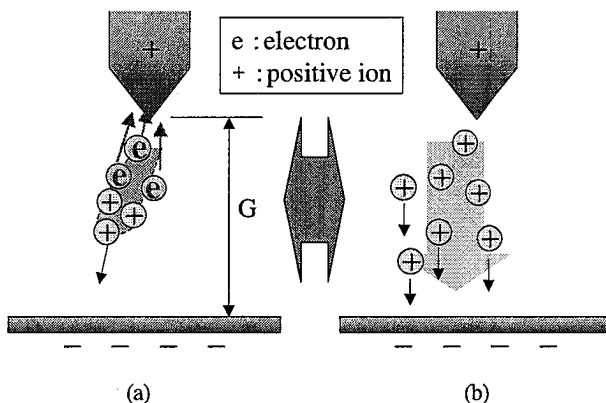


図10 ストリーマの進展・消滅と電荷の残留

Fig.10 Remaining ions after extension and disappearance of streamer.

5. 考察

上記の各実験により、放電音の周波数が、ストリーマ放電電流の繰り返し周波数に一致し、さらにその周波数は電極間

のギャップ長に強く依存することが明らかとなった。その理由として、以下で述べるように、ストリーマが進展し消滅した後には放電空間に残存する電荷の影響が考えられる。

図 10(a), (b)は、正ストリーマ放電が発生しているときの電極間の様子を模式的に示したものである。(a)はストリーマが進展している状態を示し、(b)はストリーマが一旦消滅した後、次のストリーマが進展するまでの間の状態を示している。

ストリーマの初期段階では、(a)のように、進展するストリーマの先端部において激しい電離が発生し、電子と正イオンが生成する。生成した電子は高速で放電極側へ移動し、ごく短時間で空間から消滅する。一方、正イオンは、電子に比べれば移動速度ははるかに小さい。そのため、対向電極への移動に時間を要するので、電極間では(b)の状態が長く続く。こうして電極間に滞在する正イオンは、放電極間の電界に影響を与え、ストリーマの進展する電界条件を一時的に乱すと考えられる。そして、正イオンが電極間を移動し、ストリーマ進展の条件が再び整った時点で、次のストリーマが発生し、(a)の状態となる。つまり、ストリーマの進展周期に対しては、イオンの移動速度が密接に関与していると考えられる。

イオンの平均移動速度は、与えられた電界強度の影響を受ける¹¹⁾。例えば、図 7, 8 の実験時の平均電界強度は、 $G=23\text{mm}$ のとき 7.5kV/mm 、 $G=9\text{mm}$ のとき 10.8kV/mm であり、後者が 44%大きくなっている。実際の平均移動速度がこの比率で異なるとすれば、 $G=23\text{mm}$ でのピーク周波数をもとに試算される $G=9\text{mm}$ でのピーク周波数は約 11kHz となるが、実際には、図 6 で示すように、それよりも低い値が得られている。

これには、放電空間における空間電荷が影響していると考えられる。すなわち、放電によって発生したイオンは、それ自身が空間に電界を形成し、自身の移動速度に影響を与える新たな因子となる。これが、電極間に与えられた平均電界強度と相互に作用した結果、図 6 の関係が得られたものと考えられることができる。

6. まとめ

ストリーマ放電の応用範囲の拡大を狙いとし、人体が感じ

る放電音レベルを低減するために、直流の正ストリーマ電極を用いて、放電音の高周波化を図った。

- (1)ギャップ長を縮小するにつれて、放電音は高周波化した。また、ギャップ長と放電音のピーク周波数との間に、反比例に近い関係が見られた。
- (2)ストリーマ放電電流の繰り返し周波数は、放電音のピーク周波数にはほぼ一致した。このことから、ギャップ長によってストリーマの進展する周期が変化しているものと推察された。
- (3)ストリーマの周期がギャップ長に依存する理由として、ストリーマ消滅後に電極間に滞留する正イオンの影響が考えられる。イオンが放電極周辺の電場を一時的に弱め、ストリーマの進展する電界条件を乱すことが影響していると考えられる。
- (4)短ギャップ化によって放電音を高周波化することで、聴感レベルでの大幅な放電音低減を達成できることが確認された。

参考文献

- 1) 吉田裕史, 丸井善一郎, 青山守行, 杉浦重太, 水野彰: 静電気学会誌, 13 (1989) 425
- 2) 尾形敦, 伊藤大輔, 水野光一, 櫛山暁, 山本俊明: 静電気学会講演論文集'99, 17aB2, 静電気学会 (1999)
- 3) 小田哲治, 山下竜一, 熊田亜紀子, 高橋正: 第 14 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, p.107 (1996)
- 4) 小田哲治, 山路啓, 高橋正: 静電気学会講演論文集'00, 13pB6, 静電気学会 (2000)
- 5) K.Shimizu and T.Oda: *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 35 (1999) 1311
- 6) 市橋篤文, 金賢夏, 水野彰: 静電気学会講演論文集'99, 16aB6 (1999)
- 7) A.Mizuno, Y.Kamase, H.Tsugawa, A.Shibuya and K.Yamamoto: *Proc. Intl. Symp. Plasma Chem.*, 2216 (1987)
- 8) 李鍛, 葉師寺大輔, 金沢誠司, 大久保利一, 野本幸治: 静電気学会講演論文集'00, 13pB3, 静電気学会 (2000)
- 9) 電気学会編: 「放電ハンドブック (下巻)」, p.396, オーム社 (1998)
- 10) 中野有朋: 「低騒音化技術」, p.16, 技術書院 (1993)
- 11) 静電気学会編: 「静電気ハンドブック」, p.1125, オーム社 (1998)