

論 文

パラレル電極型ストリーマ放電装置の放電特性に関する研究

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; 2006年1月16日受理)

Characteristics of Parallel Type Streamer Corona Discharger

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

(Received July 7, 2005 ; Accepted January 16, 2006)

In recent years, the researches on decomposition technology of the bad smell and detrimental chemical substances in air using electric discharge plasma are done actively. Positive streamer coronas are very effective for the treatment of smell and volatile organic compounds. It is very important to get stable streamer coronas instead of glow coronas by optimizing electrode geometry. However, it is not easy to generate stable streamer corona in needle-to-plate electrode system. In this paper, the discharging characteristics of a parallel type streamer corona discharger were studied to optimize the geometric conditions for generation of streamer corona. As a result, optimum condition about electrode geometries was obtained. The discharger can generate stable streamer coronas for longer operation even if abrasion and erosion of discharging electrode occurred.

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, 常温下でも高い電子の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, コイルやポ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.

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. 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, ストリーマ放電は最も有利な放電形態と考えられる. 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にも, 高い性能を発揮できると考えられる.

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 μ s 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, 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, 周辺

キーワード: 直流ストリーマ, パラレル電極型放電装置, 電界調整極板, 耐久性

* (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

の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る。

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⁹⁾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。この反応器の形態を応用すれば、比較的容易に大風量向けの反応器を構成することが可能である。また、直流高圧電源は、既に多くの用途で広く普及していることから分かるように、安価で、取り扱いも極めて容易である。従って、電源も含めたコスト面でのメリットを十分に享受することができると考えられる。すなわち、ストリーマの汎用性が高まり、一般家庭や店舗などで使われる空調機器のような民生用途でも、ストリーマ技術を活用することが可能となってくる。

民生用の機器は、寿命が非常に長く、最低でも数年の単位になる。従って、直流ストリーマを利用するには、機器の寿命に見合うだけの放電の耐久性を確保しなければならない。電極構造を最適化して直流ストリーマを安定化しても、それを長期間持続するためには、放電の持続に伴う形状等の経時変化を克服する必要がある。

そこで我々は、直流電圧でも長期間安定してストリーマ放電を発生させるために、電極の消耗による影響を受けにくいパラレル電極型ストリーマ放電装置を考案した⁹⁾。本稿では、その概要と、電極形状を最適化するための実験的検討結果について述べる。

2. パラレル電極型ストリーマ放電装置の概要

針状平板電極の針状放電極に正の電圧を印加すると、放電極先端の曲率半径が小さい場合、放電はグローコロナになる。先端の曲率半径を大きくすると、コロナ開始電圧でストリーマ放電が発生し、さらに電圧を上げるとグローコロナになって火花放電に至る。曲率半径をさらに大きくすると、ストリーマ放電にならず、グローコロナから火花放電になる¹⁰⁾。すなわち、ストリーマ放電を安定して発生させるのに最適な曲率半径と電極間隔の関係が存在する。

しかし、正ストリーマの放電極は、電離によって発生した電子が、正の電位により引き寄せられて集中する場所である。そのため、放電極の表面は、高速電子による強力なスパッタ作用を受けて、急速に消耗し後退する。図1に、この状況を模式的に示す。ストリーマを安定的に発生させるために初期の電極形状を最適化しても、運転時間が経過するにつれて電極の先端部は後退し、図のように、ギャップ長や先端部の曲率が次第に変化する。そして、構造的条件がストリーマの発

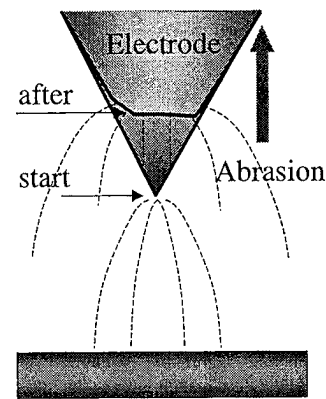


図1 放電極の長期使用による消耗

Fig.1 Abrasion of electrode through the long time discharging.

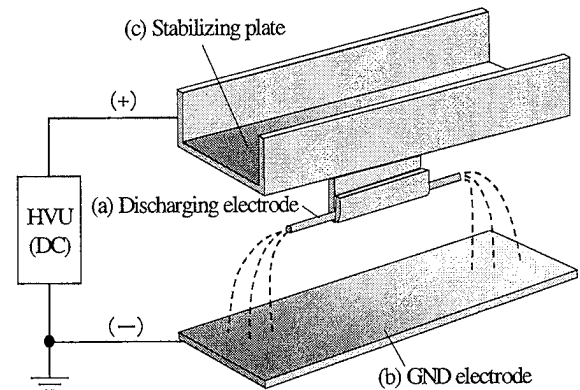


図2 パラレル電極型放電装置の概要

Fig.2 Diagram of parallel type streamer discharger.

生条件を逸脱すると、ストリーマは発生しなくなり、他の放電形態に移行する。従って、電極が消耗しても曲率半径や電極間隔が変化しないことが直流正ストリーマ放電装置としての必要条件である。

そこで、今回考案したパラレル電極型放電装置では、直径が変化しない細い棒電極を放電極とし、その棒状電極を対向電極と平行に設置して、放電極が消耗しても電極間隔と曲率半径が変化しないようにした。さらに、放電極から見て対向電極の反対側に、放電極と同電位の電界調整電極を天井状に配置して放電極先端への電界集中を弱め、曲率半径が大きい場合と実質的に同じ効果を与えた。これにより、直流電圧でも安定してストリーマ放電を発生させることができると考えられる。パラレル電極型放電装置の構造を図2に示す。

3. 放電特性の評価

3.1 影響因子の抽出

上述のような放電装置の構造を任意に形成したとしても、

必ずストリーマ放電が生起するとは限らない。形状によっては、グローコロナ放電や火花放電となる場合もあるため、放電装置を構成する各部材は、ストリーマの安定的・長期的な形成のために、所定の寸法と位置関係で配置される必要がある。

平行電極型放電極において、放電特性に関わる主なパラメータは、次の4種類と考えられる。

A：電界調整極板と放電極との間隔

B：放電極と対向電極との間隔

D：放電極の径

L：放電極の長さ

これらを、図3に示す。なお、電界調整極板の横幅は、放電特性に影響を与えるパラメータの一つであると考えられるが、実験条件数を抑えるため、本稿では7mmに固定して評価を行うこととした。

3.2 試験電極の構成

厚さ3mmの2枚のステンレス板の間に、厚さ1mmのステンレス板を挟み、幅7mmの電界調整電極を構成した。間に挟まれた1mmの板には、対向電極側に7mm張り出す凸部が設けられていて、その端面に、放電極となる切断したタングステン線を、一端のみを突き出させた形で貼付した。この構成においては、中央の板を両側の板に対して少しずつずらすことで、Aの値を変えることができる。なお、Aが7mmよりも小さい場合には、電界調整電極の幅方向の中央に、1mm幅の凹部が生じる。そのため、この面を導電性テープで覆い、実質的に平面を形成した。

対向電極は、幅50mm、長さ80mmのステンレス板とし、そのほぼ中央が、放電極先端の真下になるように、両者を固定した。

3.3 実験方法

各パラメータの組み合わせにより電極配置の初期設定値を表1のように仮決めした。まず、この組み合わせからA、B、Dのうちの一つだけを変化させた放電極をそれぞれ作製し、各電極の放電特性を取得した。ここで得られた放電特性を、相互に比較することにより、ストリーマをより安定的に発生させるための、A、B、Dの最適値を決めた。次に、Lの影響を調べる際は、得られたA、B、Dの最適形状に対して、Lの値だけを変化させ、放電特性を測定した。

放電特性の取得においては、直流高圧電源（関西電子社製；KEP2007P03S）を用いた。電極に直流電圧を印加して、印加電圧を変えながら電流値を測定した。電圧値および電流値は、電源に具備されているモニタ出力により得た。電圧モ

ニタ端子は、分圧抵抗を介して高電圧出力を $1/10^4$ に変換した電圧を出力する。また電流モニタ端子は、回路の接地側に直列挿入した抵抗（10k Ω ）の両端電圧として出力する。この抵抗には0.1 μ Fのコンデンサが並列に接続され、電流値を平滑化している。これらをデジタルマルチメータ（横河電機社製；7532-02）で測定し、電圧・電流とも単位時間あたりの平均値として取得した。

4. 実験結果

4.1 A（電界調整極板と放電極との間隔）の影響

Aを4.2~5.0mmで変化させたときの放電特性を図4に示す。Aが小さいほど放電開始電圧は高くなり、放電開始から電圧上昇に対する電流の上昇率（特性曲線の傾き）はわずかに急になった。これは、Aが小さくなることにより、放電の起点となる放電極先端部が電界調整極板の影響を強く受け、放電極先端の電界集中が緩和されることの影響と考えられる。A=5.0mmでは、5.7kV付近で電流値が最大となり、それ以上の電圧では、電圧が高くなるにつれて電流値は低下した。また、ストリーマの発光・放電音とも、電流のピークを過ぎると次第に弱くなった。このことから、放電極と電界調整極板とが遠くなり、放電極先端への電界集中が強まった結果、ストリーマからグローコロナへと徐々に移行したものと考えられる。このように、強いストリーマを持続させるためには、Aの値に上限が存在することが分かった。

4.2 B（放電極と対向電極との間隔）の影響

Bを5.0~6.0mmで変化させたときの放電特性を図5に示

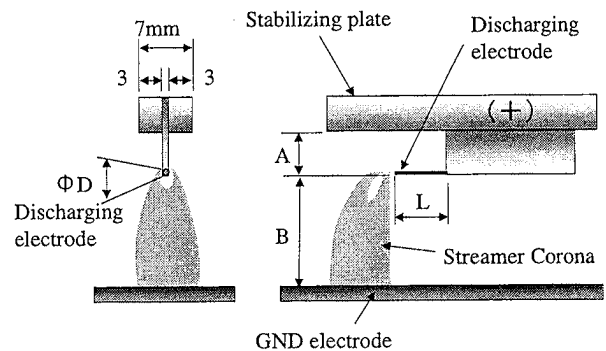


図3 平行電極型放電装置の主要パラメータ

Fig.3 Geometrical parameters of parallel type discharger.

表1 電極パラメータの初期設定値

Table 1 Basic formation of electrode for experiment.

| A | B | D | L |
|-----|-----|-------|-----|
| 5mm | 5mm | 0.2mm | 8mm |

す。放電開始からの特性曲線の傾きは、どの場合もほぼ同じであったが、放電開始電圧は、B が大きいほど高くなった。B=6.0mm では電圧が約 5.5kV のとき電流値がピークとなり、それ以上電圧を上げると次第に電流値は低下した。このとき、前節と同様に、電流値の低下を反映するように発光や放電音は弱くなった。B を長くすることで、電極間全体での電界の不等性が増すことになり、徐々にグローコロナ放電へと移行したと考えられる。

4.3 D (放電極の径) の影響

放電極の径を 0.14~0.4mm の間で変化させたときの放電特性を図 6 に示す。径を太くするにつれて、放電開始電圧は明白な上昇を示し、放電特性の傾きは急になった。径が 0.14mm では放電開始直後から、発光や放電音といったストリーマの特徴が全く見られなかった。放電極の先端に電界が過度に集中したため、ストリーマ形成に不適切な形状となったためと考えられる。逆に、径が 0.4mm の場合は、放電開始からわずかに印加電圧を増したところで、すぐに火花放電に移行した。

4.4 A, B, D の最適な組み合わせ

機器に組み込み、実際に動作する状況を想定した場合、電圧変化に対する電流変化の傾きが大きくなると、放電雰囲気わずかな変化によって動作点が大きく変化することになるため、所望するポイントで安定的に動作させることが難しくなる。また、放電電圧が過度に上昇することは、火花放電に至る危険性が増すことや、より長い絶縁距離を構造面で確保する必要があるなど、実用上の課題を多く伴う。さらに、D が大きいと、長期に亘る放電で電極先端が消耗した場合や、異物が付着した場合に、その形状変化の影響が無視できなくなり、放電特性の経時的変化が大きくなる可能性がある。

以上の点を鑑みて、ストリーマ放電を安定的に発生させることのできる A, B, D の組み合わせを、表 2 のように選定した。B=6.0mm は、A と D とが表 1 の値で組み合わせられた場合には、図 4 のように、ストリーマが弱くなる傾向を示すが、A を 5.0mm から 4.6mm に縮小することで、放電極先端の電界集中が緩和し、安定なストリーマを発生できるものと考えられた。

4.5 L (放電極の長さ) の影響

表 2 の形状の電極を作製し、L を 1.5~8.0mm に変化させて、放電特性を取得した。

放電特性の測定結果を図 7 に示す。L が小さくなるほど、放電開始電圧は高くなった。しかし、その様相は、L が 3mm から 2mm の間を境に、大きく異なる。L が 8.0mm から 3.0mm まで小さくなる間は、電圧の上昇はごくわずかで、特性曲線の傾きの変化もほとんど見られない。しかし、L が 3.0mm よ

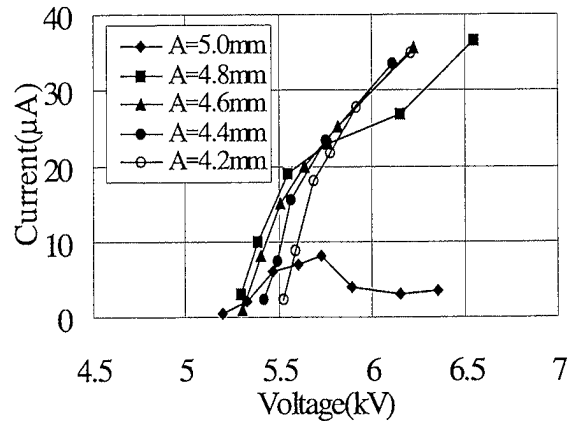


図 4 A の変化と放電特性

Fig.4 Discharging characteristics depends on A.

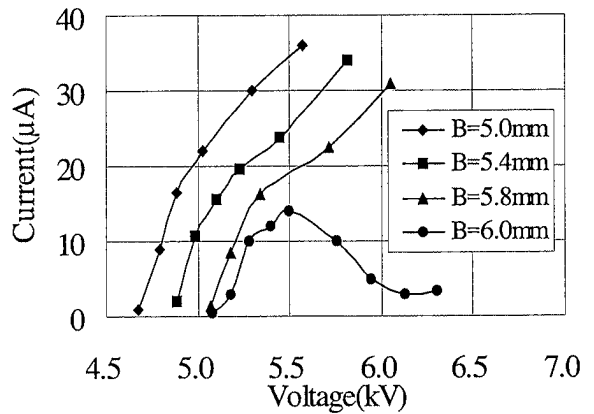


図 5 B の変化と放電特性

Fig.5 Discharging characteristics depends on B.

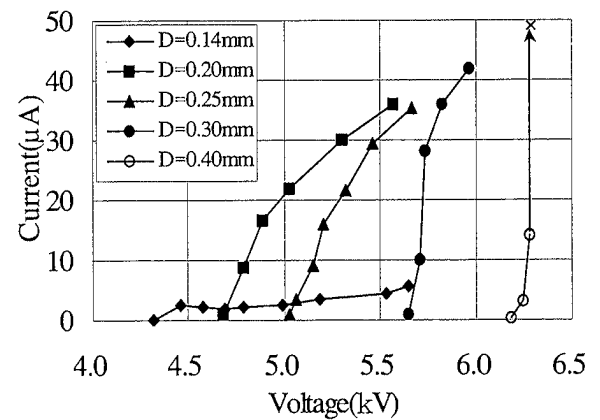


図 6 D の変化と放電特性

Fig.6 Discharging characteristics depends on D.

りも短くなると、放電開始電圧が急激に上昇するとともに、特性曲線の傾きも一気に急になっていくことが分かる。このことは、放電極の長さが短くなるにつれて、電極を水平に支えている根元の部分と電極先端との距離が接近し、先端の電界集中が緩和されることの作用として説明できるが、図7の結果は、その影響が、ある長さを境目にして急に強くなることを示唆している。

放電を長期間継続させる場合、放電極は次第に消耗して長さが短くなっていくので、それとともに放電電圧は上昇する。しかし、図7より、長さが3mm以上では、ほとんどその寸法的影響は無視できることになる。従って、初期の電極長を決める場合には、所望の放電時間を経過しても3mm以上の長さが残るように、消耗速度から勘案して電極長設定を行う必要がある。

5. ストリーマを搭載した空気清浄装置の性能

5.1 装置の構成

以上のような実験結果をもとに、ストリーマ放電装置の構造を決めて、作製した電極を図8に示す。放電極にはタングステン線を用い、これをステンレスの薄板を折り曲げた部分に挟み込んだ後、潰してかきしめることにより、固定した。

次に、使用した空気清浄装置の構成を、図9に示す。処理される空気は、まず、プレフィルタを通り、ここで繊維状の塵埃など粗大粒子が除去される。その後段には、微小粒子に帯電処理を行うイオン化部と、上述のストリーマ部とが並列に配置された放電ユニットが設けられる。ストリーマ部では、流入したガス分子を瞬時に分解除去するとともに、多量の活性基を生産し、下流側に放出する。一方、イオン化部で帯電された粉塵粒子は、その下流にある静電フィルタに到達し、ここでほとんどの粉塵が除去される。

ストリーマ放電部から発生した活性基は、静電フィルタを通過し、さらに後段の触媒部に到達する。そのため、ストリーマ部を通らずに放電ユニットを通過したガス分子も、触媒上において多量の活性基と効率よく反応し、分解処理される。本装置では、触媒として、二酸化マンガと活性炭をハニカム状の基材に担持加工したものを使用した。また、ストリーマ放電部は、電流値が37μA一定となるよう制御した。

5.2 脱臭性能

このような空気清浄装置を用いて、日本電機工業会規格に基づいてタバコ臭の脱臭性能を測定すると、図10のようになった¹¹⁾。図中の●は、ストリーマ部に通電して所定のストリーマ放電を発生させたときの、1年間の性能の推移を示したものである。一方、◆は、ストリーマ部に全く通電しないで、同様の測定を続けた場合である。ストリーマ放電させて

表2 電極パラメータの最適組み合わせ

Table 2 Optimum formation of electrode for stable streamer corona.

| A | B | D |
|-------|-------|-------|
| 4.6mm | 6.0mm | 0.2mm |

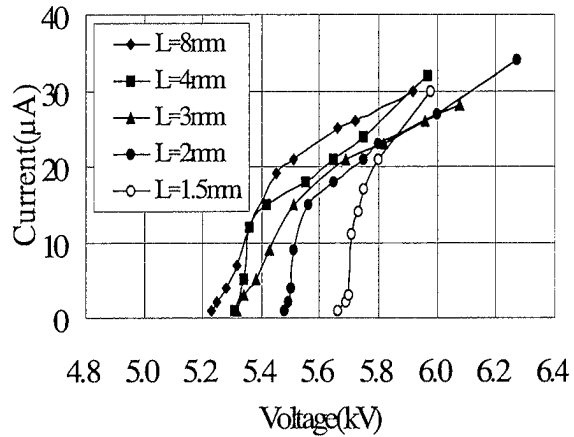


図7 Lの変化と放電特性

Fig.7 Discharging characteristics depends on L.

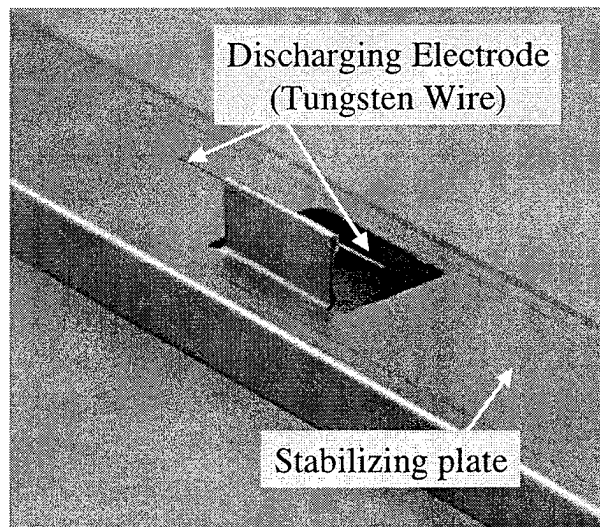


図8 放電極の構造

Fig.8 Application of discharging element.

いない場合、除去効率は早期に低下し、4ヶ月程で50%まで低下した。これは、臭気を分解することができないために、触媒部の吸着能力が飽和し、除去効率が低下したためと考えられる。一方、ストリーマ放電させた場合には、ほとんど性能の低下が見られず、1年後でも90%近い性能を維持することができた。ストリーマの強力な分解作用が、触媒部への臭気成分の蓄積を防いでいるためと推察される。

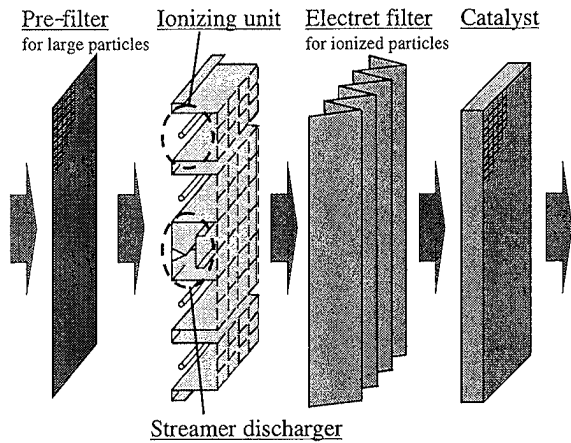


図9 ストリーマを搭載した空気清浄装置の構成例
Fig.9 Air purifying unit based on streamer discharger.

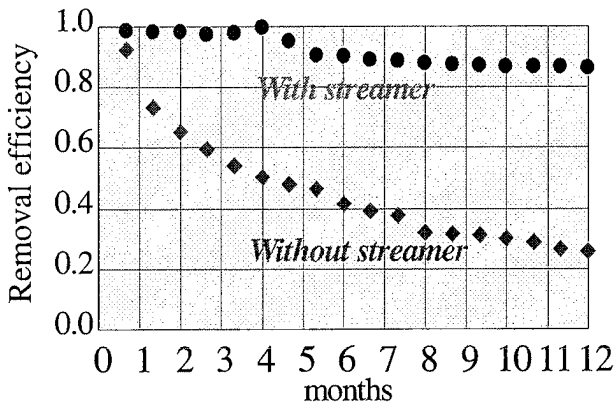


図10 ストリーマを搭載した空気清浄装置の脱臭性能
Fig.10 Effect of air purifier with streamer discharger for a long period.

6. まとめ

ストリーマ放電の安定化と耐久性向上を狙いとして、パラレル電極型放電装置を考案した。この放電装置の主な特徴は、

- ①放電極を対向電極に対して平行に配置するため、電極が消耗しても、電極間距離が不変であること
- ②放電極先端の電界状態を制御する電界調整極板を、放電極の近傍に設けたこと

である。

このパラレル電極型放電装置を用いて、安定的にストリーマ放電を生起させるため、その構造パラメータの最適化を図った。また、電極を最適化したストリーマ放電モジュールを組み込んだ空気清浄装置を作製し、脱臭性能の長期耐久性を評価した。この結果、下記の知見を得た。

- (1) ストリーマ放電の発生に適した、各パラメータの最適な組み合わせを見出すことができた。最適な範囲を逸脱した場合、グローコロナや火花放電に移行する。
- (2) 各部の寸法を変えたとき、それが放電特性に及ぼす影響は、放電極先端部の電界集中／緩和状態として、概ね説明が可能なものであった。
- (3) ストリーマ放電モジュールを組み込んだ空気清浄装置は、長期に亘って高い脱臭性能を維持し、ストリーマを使わない場合との差異は、顕著に表れた。

ストリーマ放電の特性においては、電極の構造以外にも、放電極の酸化による生成物や汚れなどが付着することの影響も考えられる。今後は、それらについても評価を行っていく必要がある。

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, 静電気学会 (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) 茂木完治, 田中利夫, 香川謙吉, 大久保利一: 静電気学会講演論文集'04, 17aB5, 静電気学会 (2004)
- 10) 大重力, 原雅則: 「高電圧現象」, p.97, 森北出版 (1992)
- 11) 日本電機工業会規格: 「家庭用空気清浄機, 附属書1: 脱臭性能試験」 (1995)