

N₂添加率がオゾン生成特性と放電様相に及ぼす影響

北谷内 達也*, 大澤 直樹**¹, 松田 伸太郎***,
青木 未知子***, 田口 正樹***, 大戸 時喜雄***

(2024年12月4日受付; 2025年4月6日受理)

Effect of N₂ Addition on Ozone Generation and Discharge Aspect

Tatsuya KITAYACHI*, Naoki OSAWA**¹, Shintaro MATSUDA***,
Michiko AOKI***, Masaki TAGUCHI*** and Tokio OHTO***

(Received December 4, 2024; Accepted April 6, 2025)

In Dielectric Barrier Discharge (DBD) type ozone generators, the N₂ addition rates are known to affect streamer discharges and ozone generation characteristics. Ozone is mainly generated and decomposed by streamer discharges. Therefore, we considered that the relation between streamer discharges and ozone generation characteristics would enable higher ozone concentrations and energy savings in ozone generators. We developed a method to evaluate streamer discharges using a high-sensitivity camera and image processing. In this study, the relation between streamer discharges and ozone generation characteristics by changing N₂ addition rates were investigated using the developed observation method. As a result, we confirmed that: (1) A lower N₂ addition rate leads to an increase in ozone concentration but decrease the number of streamer discharge. (2) At the same discharge power, the ozone concentration increased with increasing the effective power density. These results suggest that an ozone concentration and energy efficiency can be improved by reducing the projected area of streamer discharge and increasing the effective power density.

1. はじめに

オゾンはフッ素に次ぐ高い酸化還元電位を有する化合物であり、上下水道における水処理^{1,2)}、食品³⁾ならびに医療分野⁴⁾などで用いられる。オゾンの生成には、紫外線照射、水の電気分解ならびに誘電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge: DBD) 方式がある。その中でも、発生容量 (単位時間で発生できるオゾンの質量) の観点から DBD 方式が主流となっている^{5,6)}。さらに、2050年カーボンニュートラルや脱炭素社会の実現に向けて、DBD 方式オゾン発生装置のオゾン高濃度化および省エネルギー化が求められている。

キーワード: 誘電体バリア放電, N₂添加率, オゾン生成, 放電観察

* 金沢工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻
(〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1)

Graduate Program in Electrical Engineering and Electronics,
Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi,
Ishikawa 921-8501, Japan

** 金沢工業大学工学部電気電子工学科

(〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering,
Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi,
Ishikawa 921-8501, Japan

*** メタウォーター株式会社

(〒290-8511 千葉県市原市八幡海岸通 7 番地)

METAWATER CO., Ltd, 7 Yawata Kaigandori, Ichihara,
Chiba, Japan

¹ n.osawa@neptune.kanazawa-it.ac.jp

DOI: <https://doi.org/10.34342/iesj.2025.49.3.104>

DBD はマイクロ放電の集合体である。マイクロ放電はストリーマ放電と沿面放電で構成され、オゾンはそれらの放電部で生成される⁷⁾。生成されたオゾンは、電子衝突、熱、酸素原子との反応などにより分解されることが知られている⁸⁻¹⁰⁾。高効率でオゾンを生産するには、オゾン生成反応の促進と分解反応の抑制が求められる。そのため、オゾン生成中のストリーマ放電の発生様相がオゾン生成特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。これまでに、筆者らのグループでは、イメージインテンシファイア (Image Intensifier: I.I.) を備えた静止カメラと画像処理ソフトウェア (ImageJ) を用いて、ストリーマ放電の発生本数や直径などの評価手法を構築してきた¹¹⁾。

DBD 方式オゾン発生装置では、原料ガスとして O₂ と N₂ の混合ガスが用いられている。原料ガスが O₂ のみの場合、オゾン濃度が低下し、極端な場合はその濃度がゼロになるオゾンゼロ現象が報告されているが¹²⁾、O₂ に微量の N₂ を添加することでオゾンゼロ現象が解消され、安定したオゾン濃度を得ることができる。また、N₂ 添加率がオゾン生成特性や放電様相に影響を及ぼすことが報告されている^{13,14)}。したがって、放電空間中に多数発生するストリーマ放電の発生様相とオゾン生成特性を有機的に結合させることで、オゾン発生装置の更なるオゾン高濃度化および省エネルギー化が実現できると考えられる。

本研究では、既開発のストリーマ放電の評価手法を用いて、N₂ 添加率がオゾン生成特性やストリーマ放電の発生様

相に及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法

2.1 実験システム

Fig.1 に実験システムを示す。DBD 電極を設置した放電チャンパーには、マスフローコントローラー (SEC-N112MGM, HORIBA) を用いて O₂ と N₂ の混合ガス (全流量: 0.201 L/min) を供給した。N₂ 添加率は 0.1%~数% にするとオゾン濃度が最大になることが報告されている^{13,15)}。オゾン生成特性が良好なときと低下したときの放電様相を比較するために、N₂ 添加率は 0.5%, 3.0%, 10% とした。放電チャンパーの出口圧力は自動圧力調整器 (UR-Z712M-B, HORIBA) により 200 kPa にした。ファンクションジェネレータ (AFG-1022, Tektronix) と高圧アンプリファイア (Model 10/40A-HS, Trek) を用いて、周波数 3 kHz, 印加電圧波高値 6~10 kVp の交流高電圧を ITO 電極に印加した。接地電極には 20℃ の冷却水を供給した。電流は電流測定抵抗 (4.51 kΩ) の電圧降下より測定した。オゾン濃度は、紫外線吸収式のオゾン濃度計 (EG-600, 荏原実業) を用いて 3 回測定した。DBD の撮影は、I.I. (C14245, 浜松ホトニクス) を付けた静止カメラとデジタル遅延パルス発生器 (DG535, Stanford Research Systems) を同期させて、撮影タイミングを調整して行った。

Fig.2 は DBD 電極である。DBD 電極の放電空間長は 0.3 mm とした。電極の左右から原料ガスが供給され、中央のスリットからオゾン化ガス (オゾンおよび未反応の原料ガス) が排出される構造である。誘電体と接地電極の材料は、それぞれホウケイ酸ガラス (厚さ: 1.1 mm) とステンレス鋼 (SUS316L) である。ホウケイ酸ガラスには ITO (Indium Tin Oxide) が成膜されており、これを高電圧電極としている。DBD の発生領域は 50 mm × 50 mm, DBD の観察領域は 30 mm × 30 mm である。

2.2 DBDの撮影タイミング

Fig.3 は、電圧電流波形の一例である。図内の Positive は正のパルス電流が発生している期間、Negative は負のパルス電流が発生している期間である。パルス電流の極性が正または負のときの DBD を撮影するため、ゲート時間は 180° (166.7 μs) とした。DBD の撮影回数はそれぞれ 10 回とした。

2.3 画像処理を用いたストリーマ放電の抽出

ITO 電極を介して撮影されたマイクロ放電は、発光の強いストリーマ放電部と発光の弱い沿面放電部で構成される。オゾンの前駆体である酸素原子は、主に誘電体表面において、一次ストリーマと小ストリーマによって生成されることが報告されている¹⁶⁾。本研究では、ストリーマ放電に注目し、画像処理により ITO 電極を介して撮影された複数のマイクロ放電の写真からストリーマ放電の本数や円

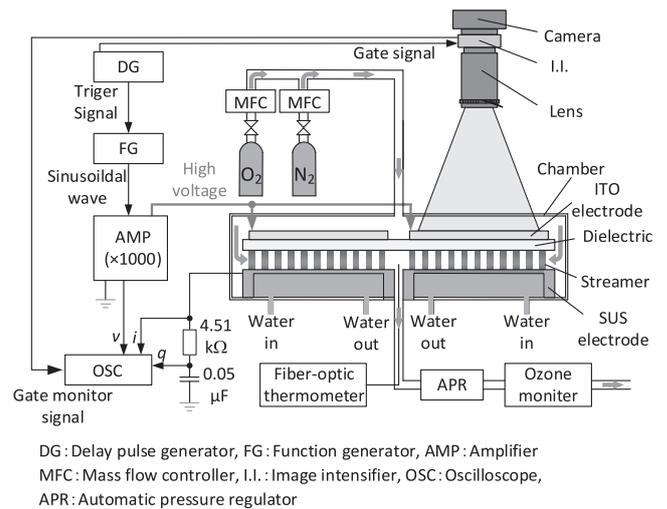


図1 実験システム
Fig.1 Experimental system.

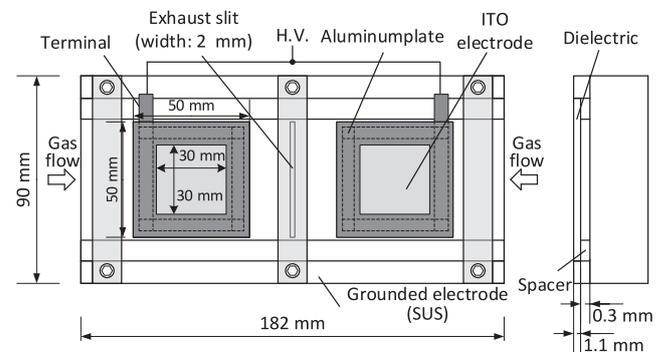


図2 DBD電極
Fig.2 DBD electrode.

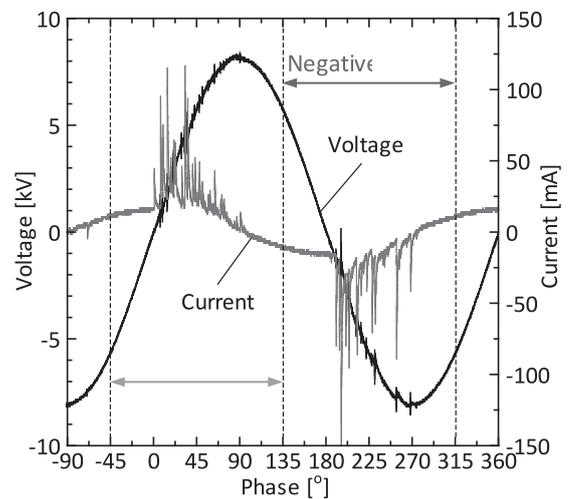


図3 電圧電流波形の一例
Fig.3 Example of a voltage-current waveform.

相当直径の中央値を求めた。画像処理ソフトウェアには ImageJ (Version 1.53e) を用いた。このソフトウェアには、閾値を自動的に決定するアルゴリズムが搭載されている。筆者らは、Maximum Entropy Method と Minimum Method を

組み合わせることにより、グレイスケール化された複数のマイクロ放電の写真から複数のストリーマ放電を一挙に抽出し、二値化した¹⁷⁾。ストリーマ放電の発生本数や円相当直径の中央値の評価には、二値化された画像データを用いた。

2.4 全ストリーマ放電の全投影面積と実放電電力密度

1 サイクル中に発生したストリーマ放電の全投影面積 S_{sta} [cm²] は(1)式のように求めた。

$$S_{sta} = S_{sta}^+ + S_{sta}^- \quad (1)$$

ここで、 S_{sta}^+ ：正極性ストリーマ放電の全投影面積 [cm²]、 S_{sta}^- ：負極性ストリーマ放電の全投影面積 [cm²] である。本研究では、 S_{sta} と Lissajous 図形から求めた放電電力 (P [W]) から、単位ストリーマ放電投影面積当たりの電力密度を(2)式のように求めた。以後、これを実放電電力密度 (p [W/cm²]) と呼ぶことにする。一般的に、放電電力密度が高くなると放電空間内の電子の量が増加するので、O₂ への電子衝突による酸素原子の生成反応が頻発する。このため、放電電力密度が高いと、オゾン濃度が増加することが報告されている¹⁸⁾。しかし、放電電力密度が高すぎると、放電空間の温度が上昇して、オゾンの熱分解が促進されオゾン生成効率が低下する。したがって、実放電電力密度を算出することでオゾン生成に最適な電力密度を評価することができる。

$$p = P/S_{sta} \quad (2)$$

3. 結果

3.1 オゾン生成特性

Fig.4 にオゾン生成特性を示す。本実験では、オゾン濃度の標準偏差は 0.2~0.6 g/m³(N)、オゾン生成効率の標準偏差は 0.1~0.3 g/kWh であり、データのばらつきはほとんど見られなかった。すべての N₂ 添加率において、放電電力を大きくするとオゾン濃度が上昇し、オゾン生成効率は低下した。同一放電電力におけるオゾンの濃度や生成効率は、N₂ 添加率 0.5% と 3.0% がほぼ同等で、10% にすると低くなった。O₂ を原料とした産業用オゾン発生装置では、オゾン濃度が

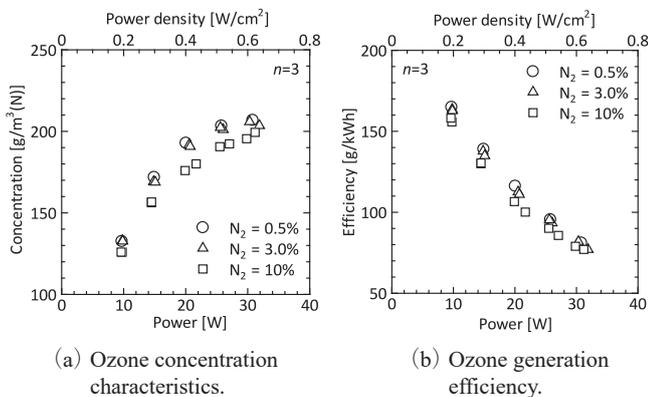


図4 オゾン生成特性 (N₂添加率の影響)
Fig.4 Effect of N₂ addition on ozone generation characteristics.

150 g/m³(N)から 180 g/m³(N)、オゾン生成効率が 100 g/kWh 程度であり⁹⁾、本実験と合致していることが確認できた。

以上より、同一放電電力におけるオゾン濃度やオゾン生成効率は、N₂ 添加率 0.5% と 3.0% のとき最も高くなり、N₂ 添加率 10% では低下した。

3.2 ストリーマ放電の発生特性

Fig.5 に正極性のマイクロ放電写真の一例を示す。印加電圧は 8 kVp である。N₂ 添加率を変えても放電空間一様にマイクロ放電の輝点が観察された。

画像処理により Fig.5 の放電写真からストリーマ放電の発光を抽出して二値化した画像を Fig.6(a), (d), (g) に示す。ここで、Fig.6(b), (e), (h) は画像処理によって抽出されたストリーマ放電の拡大画像であり、Fig.6(c), (f), (i) は画像処理前のマイクロ放電の拡大写真である。ストリーマ放電の発生様相は、マイクロ放電と同様に抽出したスト

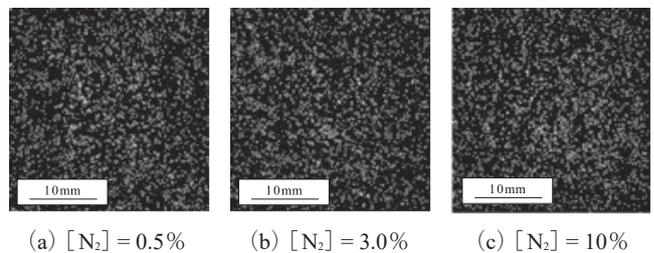


図5 放電写真の一例 (印加電圧 8 kVp, 正極性)
Fig.5 Example of discharge photographs (8 kVp, Positive).

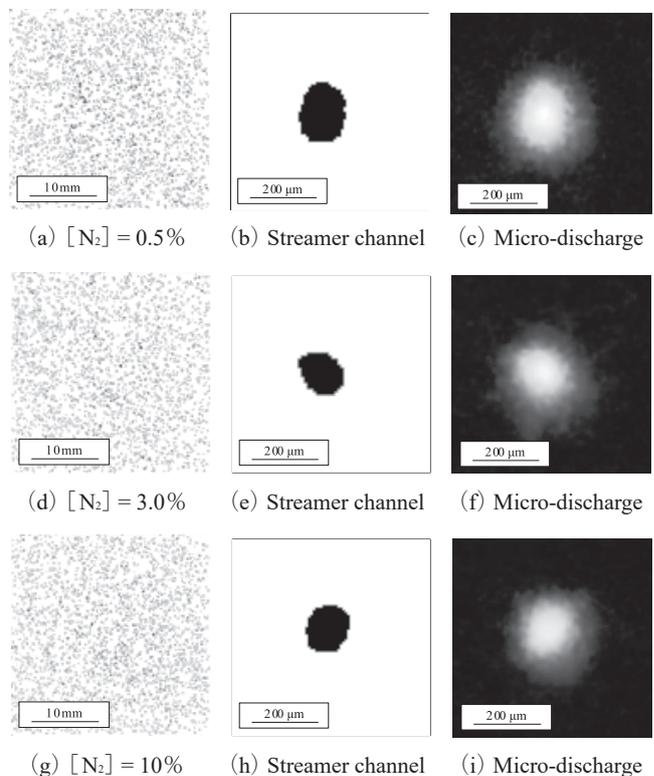


図6 ストリーマ放電の発生様相
Fig.6 Streamer channels extraction image.

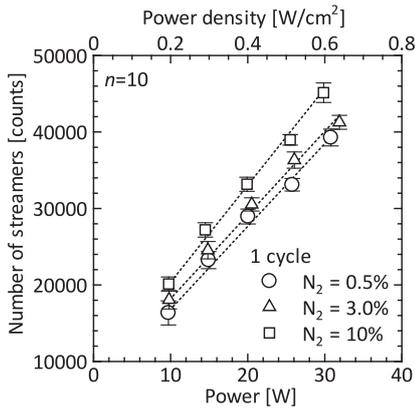


図7 1サイクル中に発生したストリーマ放電の発生本数
Fig.7 Effect of nitrogen addition on the number of streamer channels in one cycle.

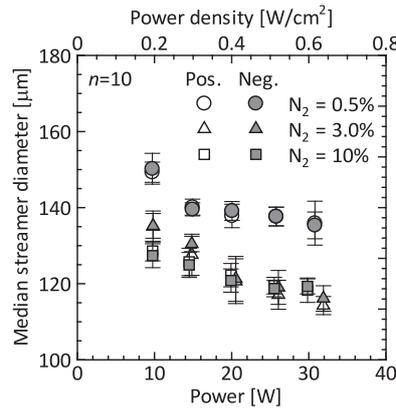


図8 ストリーマ放電の円相当直径の中央値
Fig.8 Effect of nitrogen addition on Median diameter of streamer channels.

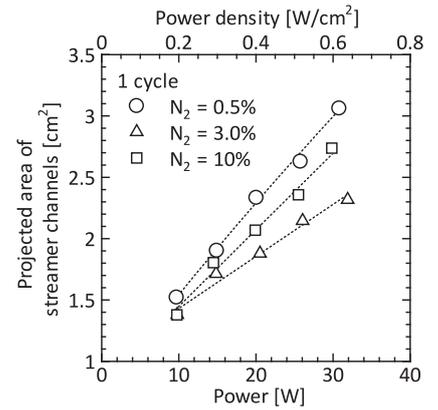


図9 ストリーマ放電の全投影面積の放電電力依存性
Fig.9 Effect of nitrogen addition on total projected area of streamer channels.

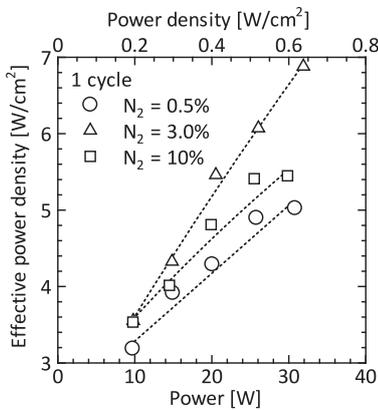


図10 放電電力と実放電電力密度の関係
Fig.10 Relation between discharge power and effective power density of streamer channels.

リーマ放電を計数処理して、ストリーマ放電の発生本数、全投影面積ならびに実放電電力密度を算出した。

Fig.7に印加電圧1サイクル中に発生したストリーマ放電の発生本数を示す。すべてのN₂添加率において、放電電力を大きくするとストリーマ放電の発生本数が増加した。同一放電電力では、N₂添加率を低くするとストリーマ放電の発生本数が少なくなった。

Fig.8に正極性と負極性で発生したストリーマ放電の円相当直径の中央値を示す。正極性と負極性ともに、N₂添加率0.5%の条件では、放電電力を大きくするとストリーマ放電の円相当直径の中央値は138 μmに漸近したのに対し、N₂添加率3.0%や10%の条件では、115 μmに漸近した。

Fig.9に印加電圧1サイクル中に発生したストリーマ放電の全投影面積を示す。放電電力を大きくするとストリーマ放電の全投影面積が大きくなった。同一放電電力では、N₂添加率0.5%、10%、3.0%の順でストリーマ放電の全投影面積が小さくなった。ストリーマ放電の発生本数と全投影

表1 N₂添加率、原料ガスO₂濃度、オゾン濃度ならびに実放電電力密度の関係（放電電力15 W付近）

Table 1 Relation between Effect of nitrogen addition, Oxygen addition, ozone concentration and Effective power density of streamer channels (Discharge power: around 30 W).

Nitrogen addition rate	0.5%	3.0%	10%
Oxygen concentration	99.5%	97%	90%
Ozone concentration	171 g/m ³ (N)	170 g/m ³ (N)	156 g/m ³ (N)
Effective power density of streamer channels	3.92 W/cm ²	4.33 W/cm ²	4.01 W/cm ²

面積の傾向が一致しなかった理由は、N₂添加率はストリーマ放電の発生本数と直径の両方に影響を与えたためである。

Fig.10に放電電力と実放電電力密度の関係を示す。同一放電電力では、N₂添加率0.5%、10%、3.0%の順に実放電電力密度が大きくなった。これは、N₂添加率0.5%、10%、3.0%の順でストリーマ放電の全投影面積が小さくなったためである。

以上より、N₂添加率を増加させると、ストリーマ放電の発生本数および直径に変化することが確認された。この結果、ストリーマ放電の全投影面積が変化し、実放電電力密度にも影響を与えることが明らかとなった。

4. 考察

4.1 N₂添加率と実放電電力密度

ここでは、N₂添加率を0.5%から3.0%や10%に高くすると実放電電力密度が大きくなったメカニズムについて考察する。実放電電力密度が大きくなった要因は、Fig.7に示したように、N₂添加率を高くするとストリーマ放電の発生本数が多くなったことと、Fig.8に示したように、ストリーマ放電の直径が小さくなったことが考えられる。O₂はN₂よりも電子親和力が高く、電子付着により負イオンになりやすいことから¹⁹⁾、N₂添加率の高い条件では、誘電体表面に蓄

積された電子の量が多くなったと考えられる。これにより、N₂添加率を高くすると、ストリーマ放電の発生本数が多くなったと考えられる。また、同一放電電力では、N₂添加率を高くすると、ストリーマ放電の直径が小さくなる傾向を示した。電離エネルギーは、N₂よりもO₂の方が低いことから²⁰、N₂添加率を高くすると電離エネルギーの低いO₂濃度が低くなるため、ストリーマヘッド近傍の光電離領域が縮小すると考えられる^{21,22}。これにより、ストリーマ放電の進展過程における電子なだれの発生数が減少し、ストリーマ放電の径方向の拡散領域が縮小したので、N₂添加率の高い条件では、ストリーマ放電の直径が小さくなったと考えられる。

4.2 オゾン濃度と実放電電力密度

同一放電電力において、実放電電力密度はN₂添加率0.5%、10%、3.0%の順で大きくなり、オゾン濃度はN₂添加率0.5%と3.0%がほぼ同等で、10%にすると低くなった。ここでは、N₂添加率0.5%と3.0%ではオゾン濃度が変わらなかったが10%にするとオゾン濃度が低下した理由について考察する。

まず、N₂添加率0.5%と3.0%では実放電電力密度が上昇したが、オゾン濃度がほとんど変わらなかった理由を考察する。表1に放電電力15 W付近におけるN₂添加率、原料ガスO₂濃度、実放電電力密度ならびにオゾン濃度の関係を示す。N₂添加率を0.5%から3.0%にすると、原料ガス中のO₂濃度が2.5%低下する。O₂濃度と生成されるオゾン濃度が比例関係にあると仮定すれば、オゾン濃度は167 g/m³(N)(=171×(1-0.025))となり、オゾン濃度の低下分は4 g/m³(N)(=171-167)となる。一方、実放電電力密度は3.92 W/cm²から4.33 W/cm²に上昇している。実放電電力密度が上昇すると、O₂と電子の衝突により励起状態の酸素原子O(³P)や基底状態の酸素原子(¹D)の生成が頻発し、オゾンが多く生成される(R11)~(R13)^{23,24}。

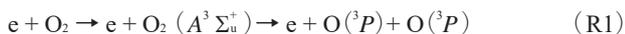


Fig.10とFig.4(a)より、N₂添加率0.5%において実放電電力密度が4.33 W/cm²となるときの放電電力は20 Wであり、放電電力20 Wにおけるオゾン濃度は190 g/m³(N)であることから、オゾン濃度の上昇分は19 g/m³(N)(190-171)となる。以上の計算により、原料ガス中のO₂濃度は低下しても、実放電電力密度の上昇によりオゾン濃度が低下しなかったことを定性的に示すことができた。しかし、定量的には、実放電電力密度の上昇によるオゾン濃度の増加分が多くなった。この計算では、原料ガス中のO₂濃度と生成されるオゾン濃度が比例関係にあると仮定しており、以下に示すように、N₂の解離によって生成されたNやNO_xによるオゾンの分解反応が考慮されていない^{25,26}。



このため、N₂添加率の上昇によるオゾン濃度の低下分が少なく計算されてしまったため、O₂濃度の低下によるオゾン濃度の低下分と実放電電力密度の上昇によるオゾン濃度の上昇分が一致しなかったと考えられる。

次に、N₂添加率を0.5%から10%にすると、実放電電力密度はわずかに上昇したが、オゾン濃度が低下した理由を考察する。先の考察と同様に、N₂添加率を0.5%から10%にすると、原料ガス中のO₂濃度が9.5%低下する。O₂濃度と生成されるオゾン濃度が比例関係にあるとすれば、オゾン濃度は155 g/m³(N)(=171×(1-0.095))となり、オゾン濃度の低下分は16 g/m³(N)(=171-155)となる。一方、実放電電力密度は3.92 W/cm²から4.01 W/cm²にわずかに上昇している。Fig.10とFig.4(a)より、N₂添加率0.5%において実放電電力密度が4.01 W/cm²となるときの放電電力は18 Wであり、放電電力18 Wにおけるオゾン濃度は183 g/m³(N)であることから、オゾン濃度の上昇分は12 g/m³(N)(=183-171)となる。よって、予想されるオゾン濃度は167 g/m³(N)(=183-16+12)となる。以上の計算により、N₂添加率を0.5%から10%にしたときのオゾン濃度低下も原料ガス中のO₂濃度と実放電電力密度の観点から定性的に説明することができた。しかし、定量的には、実放電電力密度の上昇によるオゾン濃度の増加分が多くなった。これも、先の検討と同様、原料ガス中のO₂濃度と生成されるオゾン濃度が比例関係にあると仮定したため、NやNO_xに起因するオゾン濃度の低下分が少なく計算されてしまったためである。今後、定量評価については、実放電電力密度に基づく放電化学反応シミュレーションによる更なる検証が必要である。

本研究により、N₂添加率10%以下のDBD方式オゾン発生装置では、原料ガス中のO₂濃度を高くすることと、実放電電力密度を高めることが重要であることが明らかとなった。Yeらは、金属電極の表面に凸部を設けることにより、ストリーマ放電の発生本数が制御できることを報告している²⁷。したがって、電極表面に適切なサイズの凸部を設けることにより原料ガス中のO₂濃度を高くしても実放電電力密度を高くできる可能性がある。

5. まとめ

高感度カメラと画像処理技術を用いて、N₂添加率を変えたときのストリーマ放電の特性を調べ、オゾン生成特性との関係を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 同一放電電力では、N₂添加率を低くするとストリーマ放電の発生本数が多くなった。また、同一放電電力におけるオゾンの濃度や生成効率は、N₂添加率0.5%と3.0%がほぼ同等で、10%にすると低くなった。
- (2) ストリーマ放電の全投影面積は、N₂添加率0.5%、10%、3.0%の順で小さくなり、実放電電力密度は0.5%、10%、3.0%の順で大きくなった。
- (3) ストリーマ放電の発生本数や直径を制御し、実放電電力密度を最適化することで、DBD方式オゾン発生装置の性能向上が期待できる。

参考文献

- 1) 尾崎 勝：浄水処理における実施例. 水道協雑誌, **64** (1995) 34
- 2) 野口 寛, 清水公一, 塚本慶一：下水二次処理水のオゾン処理, 第33回下水道研究発表会講演集, p.690 (1996)
- 3) 福崎智司, 浦野博水, 竹原淳彦, 平松 実：オゾンによる食品製造装置の易洗浄化処理. 第9回日本オゾン協会年次研究講演会講演集, p.175 (2000)
- 4) 釜瀬幸広：オゾンを活用した内視鏡殺菌機. 静電気学会誌, **35** (2011) 167
- 5) 山部長兵衛：オゾン生成. プラズマ・核融合学会誌, **74** (1998) 134
- 6) 太田幸治, 和田 昇, 葛本昌樹：極短ギャップ両面冷却式オゾン発生器によるオゾン発生特性. 電学論 A, **120** (2000) 695
- 7) 所山太二, 吉岡芳夫：マイクロ放電モデルを用いた排ガス中の放電化学シミュレーションにおける H₂O の影響. 電学論 A, **125** (2005) 402
- 8) 末廣純也, 高橋賢裕, 西 祐也, 丁 衛東, 今坂公宣, 原雅則：無声放電式オゾナイザの極低温冷却による高効率化. 電学論 A, **124** (2004) 791
- 9) S. Jodzis：Application of Technical Kinetics for Macroscopic Analysis of Ozone Synthesis Process. Ind. Eng. Chem. Res., **50** (2011) 6053
- 10) 葛本昌樹：極短ギャップオゾナイザ. プラズマ・核融合学会誌, **74** (1998) 1144
- 11) 大澤直樹, 鈴木涼平, 河井茂充, 青木未知子, 田口正樹：誘電体バリア放電における放電輝点特性とオゾン発生特性の関係, 第30回日本オゾン協会年次研究講演会講演集, p.9 (2021)
- 12) K. Murayama, N. Matsumura, M. Taguchi, Y. Katoh, K. Teranishi, S. Suzuki and H. Itoh：Experimental investigations of the ozone zero phenomenon. Eur. Phys. J. Appl. Phys., **47** (2009) 22814
- 13) 田口正樹：両面誘電体電極オゾン発生器におけるオゾンゼロ現象の発生. 電学論 A, **134** (2013) 279
- 14) 田中正明, 八木重典, 田畑則一：超高感度カメラによる空気, 酸素, 窒素中での無声放電の観測. 電学論 A, **102** (1982) 533
- 15) 村井昭, 田原徳夫：オゾン生成メカニズムの解析 (窒素添加), 第14回日本オゾン協会年次研究講演会, p.1 (2004)
- 16) 高橋剛, 明石治明：AC 大気圧酸素誘電体バリア放電におけるオゾン生成のガス温度分布依存性について, 電学論 A, **131** (2011) 205
- 17) N. Osawa, K. Watanabe, S. Kawai, S. Matsuda, M. Aoki and M. Taguchi：Time Resolved Observation of Streamer Discharges in Dielectric Barrier Discharge by Highly Sensitive Camera and Image Analyzing Procedure. Ozone Sci. & Eng. **47** (2025) 131
- 18) J. Kitayama and M. Kuzumoto：Theoretical and experimental study on ozone generation characteristics of an oxygen-fed ozone generator in silent discharge. J. Phys. D: Appl. Phys., **30** (1997) 2453
- 19) J. D. Skalny, J. Orszagh, N. J. Mason, J. A. Ress, Y. A. Gonzalvo and T. D. Whitmore：Mass spectrometric study of negative ions extracted from point to plane negative corona discharge in ambient air at atmospheric pressure. Int. J. Mass Spectrom., **272** (2008) 12
- 20) 日高邦彦：高電圧工学, p.17, 数理工工学社 (2009)
- 21) 龍 輝優, 山口仁志, 王 斗艶, 浪平隆男：窒素及び酸素ガス組成比がナノ秒パルス放電の挙動に与える影響. 静電気学会誌, **43** (2019) 37
- 22) H. Höft, M. Kettlitz, T. Hoder, K-D. Weltmann and R. Brandenburg：The influence of O₂ content on the spatio-temporal development of pulsed driven dielectric barrier discharges in O₂/N₂ gas mixtures. J. Phys. D: Appl. Phys., **46** (2013) 095202
- 23) B. Eliasson, M. Hirth and U. Kogelschatz：Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges. J. Phys. D: Appl. Phys., **20** (1987) 1421
- 24) 田畑則一：放電によるオゾン発生法に関する考察. 電学論 A, **117** (1997) 1200
- 25) 海賀伸好, 高瀬 治, 藤堂洋子：水処理施設としてのオゾン発生器の改良. 水質汚濁研究, **13** (1990) 647
- 26) U. Kogelschatz：Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. Plasma Chem. Plasma Process., **23** (2003) 1
- 27) Q. Ye, Y. Wu, X. Li, T. Chen and G. Shao：Uniformity of dielectric barrier discharges using mesh electrodes. Plasma Sources Sci. Technol., **21** (2012) 065008