

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

龍 輝優*, 山口 仁志*, 王 斗艶**, 浪平 隆男**¹

(2018年9月13日受付; 2018年12月13日受理)

Effects of Gas Composition Ratio of Nitrogen and Oxygen on Nanosecond Pulsed Discharge Behavior

Terumasa RYU*, Hitoshi YAMAGUCHI*, Douyan WANG** and Takao NAMIHIRA**¹

(Received September 13, 2018; Accepted December 13, 2018)

Non-thermal plasmas have been actively studied for various applications. The observation of a discharge plasma is an essential aspect for understanding the plasma physics of this growing field. Generally, a pulsed discharge having 100s ns pulse duration consists of streamer, glow, and arc discharge phases. It is well known that a streamer head always has the highest electric field in the entire discharge process. Furthermore, the streamer head produces a variety of radical species according to feeding gas composition. In the recent study, a nanosecond pulsed power generator having 5 ns pulse duration was developed and showed great advantages regarding energy efficiency for ozone generation and NO removal over conventional discharge methods. However, the underlying mechanisms of these high energy efficiencies are not well understood. Therefore, the present study focused on the effects of gas composition ratio of nitrogen and oxygen in a coaxial reactor on the phenomena of nanosecond pulsed discharge. In the experiment, the discharge propagation process was observed using a high-speed gated emICCD camera. As the result, the gas composition ratio significantly affected the discharge propagation process. This can be explained due to each characteristic of nitrogen and oxygen such as UV radiation, electron attachment, and photoionization.

1. はじめに

非熱平衡プラズマは、選択的に電子を加速させ、周りのガス組成に応じた反応性に富んだ化学的活性種（ラジカル）を生成可能である。なかでもパルス放電プラズマが、オゾン生成や排ガス処理において高効率な処理を実現しており、新たな環境浄化技術として継続した研究がなされている¹⁻⁸⁾。特に、パルスストリーマ放電中におけるストリーマヘッドと呼ばれる空間電荷部分が、放電過程の中でも最も高い電界を持ち、それ故、多種のラジカル生成に大きく寄与している⁹⁾。一般的に、電圧印加時間が数十から数百ナノ秒オーダーのパルス放電は、ストリーマヘッドの金属電極間進展（ストリーマ放電）からストリーマヘッドの対向電極到達に伴う電極間での全体放電（グロー放電）へのフェーズ転移が起きる。その

グロー放電中は空間中のイオンや中性粒子が加熱され、結果としてエネルギーの熱損失を生じていた¹⁰⁾。

しかしながら、近年、浪平・王らは、放電形態をほぼストリーマ放電のみで留めることを可能にした「ナノ秒パルス電源」という電圧印加時間が5 nsの極短パルス発生装置を開発した¹¹⁻¹⁴⁾。その応用研究成果の一例として、図1にナノ秒パルス放電及び他の電氣的放電プラズマによる酸素原料と空気原料オゾン生成に対する特性比較を示す^{13, 14)}。本特性比較は縦軸に電極への注入エネルギーに対するオゾンの生成効率（オゾン収率）、横軸にオゾン生成濃度を取っており、マップの右上に位置するほど優れたオゾンナイザと言える。図1より、ナノ秒パルス放電法は、用いる原料ガスに関わらず、現存するオゾ

キーワード：ナノ秒パルス、ストリーマ、進展様相、混合ガス

* 熊本大学大学院自然科学研究科

(〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1)

Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Chuo-ku, Kumamoto, Japan

** 熊本大学パルスパワー科学研究所

(〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1)

Institute of Pulsed Power Science, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Chuo-ku, Kumamoto, Japan

¹ namihira@cs.kumamoto-u.ac.jp

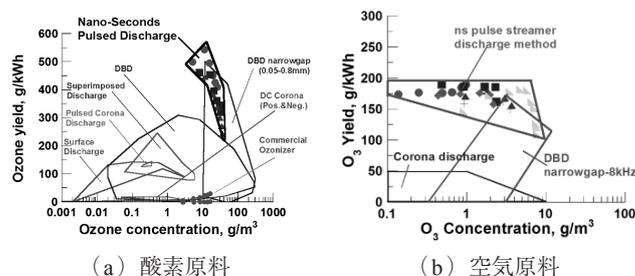


図1 放電法による (a) 酸素及び (b) 空気原料オゾンナイザマップ

Fig.1 Characteristics map of ozone generation based on discharge plasmas. (a) Oxygen-fed. (b) Dry air-fed.

ン収率データの最高値を示している。しかし、ナノ秒パルス放電を用いたオゾン生成においては、現状、最大生成オゾン濃度が酸素原料で 40 g/m^3 程度、空気原料で 10 g/m^3 程度に留まっており、実用化の際に求められる生成オゾン濃度 (120 g/m^3 以上)¹⁵⁾ には達していないため、その濃度向上が期待されている。ここで図1から、原料ガスによって、オゾン収率及びオゾン濃度が劇的に変化しており、オゾン生成におけるガス組成は極めて重要なパラメータであることが推測される。しかし、これまで原料ガスの窒素及び酸素ガス組成比を変化させた場合のナノ秒パルス放電の基礎・応用研究報告例は皆無である。

よって本稿では、放電電極内雰囲気ガスのガス組成比に焦点を当て、各ガス組成におけるナノ秒パルス放電中、特に、ストリーマヘッドの電極間進展特性についてその詳細を明らかにすることを目的とする。また、 N_2 ガスと O_2 ガスが放電に与える電気的特性の差異を基に、考察を図った。

2. 実験方法

2.1 ナノ秒パルス発生装置

図2に、本実験で用いたナノ秒パルス発生装置の概略図を示す。本装置は自爆型高圧スパークギャップスイッチ (SGS)、三重同軸ブルームライン線路、ブルームライン線路から負荷へエネルギーを転送する低インダクタンス伝送線路より構成されている。SGS内は絶縁ガスとして SF_6 を充填し、 SF_6 ガス圧力により、ナノ秒パルス発生装置の出力電圧を調整する。なお、SGSのギャップ間隔は 1 mm に固定されている。ブルームライン線路本体部は外部導体、中間導体、内部導体の三重同軸構造となっており、充電電極を通して中間導体を充電できる。また、外部導体は接地されており、内部導体はインダクタLを介して外部導体と接続されている。ブルームライン線路と伝送線路内は、絶縁及び誘電媒体としてシリコンオイル (KF-96, Shin-Etsu Chemical, Japan) にて充填されており、その単位長さ当たりのインダクタンスとキャパシタンス計算値は、それぞれ 140 nH/m 、 216 pF/m である。なお、これらの値より算出される本ナノ秒パルス発生装置全体の特性インピーダンスは 50Ω となる。また、ブルームライン線路長は 500 mm であり、これより算出されるパルス幅は 5 ns となる。

2.2 パルス放電観測システム

図3にナノ秒パルス放電観測システムの概略図を示す。ナノ秒パルス電源により放電電極内でナノ秒パルス放電を形成した。ナノ秒パルス電源と emICCD カメラ (PI-MAX4:1024EMB, Princeton Instruments, USA) は、ディレイジェネレータ (DG645, Stanford Research Systems,

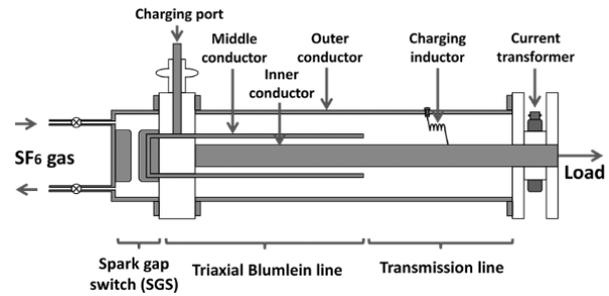


図2 ナノ秒パルス発生装置の概略図
Fig.2 Schematic diagram of the nanosecond pulse generator.

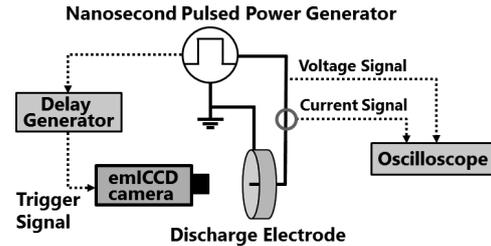


図3 パルス放電観測システムの概略図
Fig.3 Schematic diagram for imaging system for the nanosecond pulsed discharge.

USA) を介して時間同期を行った。本実験では、emICCDカメラの露光時間を 0.42 ns に固定した。放電電極は、内部高電圧電極に外径 1.0 mm のステンレス線、外部接地電極に内径 60 mm の真鍮管を用いた同軸円筒型とした。また、内部電極長は 15 mm とし、ストリーマヘッドの鮮明な撮影を行うために、先端 1.5 mm 以外は、カプトンシートにて被覆した。なお、放電電極は窓材などで密閉構造としている。今回、放電電極内への雰囲気ガスとしては、 N_2 ガス (N_2) 及びガス比を 20% ずつ変化させた N_2 と O_2 の混合ガス ($20, 40, 60, 80\%-\text{O}_2/\text{N}_2$)、 O_2 ガス (O_2) の6種類を用いた。なお、本実験で用いた N_2 及び O_2 ガスの純度は、それぞれ 99.99% 及び 99.5% である。雰囲気ガスの流量は、マスフローコントローラー (8500MC, KOFLOC, Japan) を用いてすべて 4.0 L/min (0.1 MPa) に制御した。その他の計測機器に関しては、電極間の印加電圧及び放電電流を、容量分圧器とカレントトランスフォーマー (MODEL CT-F1.0, Bergoz Instrumentation, USA) を介して 4 GHz の最大周波数帯域と 20 Gsamples/sec の最大サンプリングレートを有するデジタルオシロスコープ (RTO2044, ROHDE&SCHWARZ, Germany) にて記録した。

3. 実験結果

3.1 波形解析

図4(a)に計測電流波形 ($I_{\text{measurement}}$) を示す。この計測電流は式(1)で示されるように、同軸円筒電極への変位

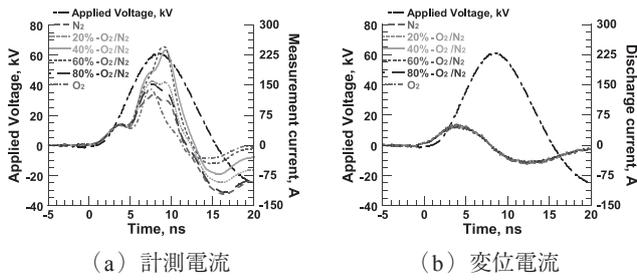


図4 計測電流と変位電流波形
Fig.4 Waveforms of measurement current and displacement current into coaxial electrode.

電流 ($I_{displacement}$) と放電電流 ($I_{discharge}$) の和であり、放電電流導出のためには、式(2)によって算出される変位電流を、計測電流から減算する必要がある。なお、式(2)中の $V_{measurement}$ と $C_{electrode}$ はそれぞれ同軸円筒電極への印加電圧と式(3)によって得られたキャパシタンス値である。ここで、式(3)における V と i は放電を発生させない状態での電圧電流波形を示している。結果として、電極内のキャパシタンス値は、全ガス組成において 3.8 pF 前後であり、それに伴い変位電流も図4(b)のように、同様の波形となった。

$$I_{measurement} = I_{displacement} + I_{discharge} \quad (1)$$

$$I_{displacement} = C_{electrode} \frac{dV_{measurement}}{dt} \quad (2)$$

$$C_{electrode} = \frac{1}{V} \int i dt \quad (3)$$

図5にナノ秒パルス放電時の典型的な電極への印加電圧及び放電電流波形を示す。図5より、全ガス組成にて 60 kV の正極性パルス電圧が内部電極へ印加されていることが確認される。また O_2 (40%) / N_2 及び O_2 (60%) / N_2 の場合において、放電電流の最大値が特に大きくなっているが、これはストリーマヘッドの電極間橋絡後のグロー放電時に、電極間がより導電性の高いプラズマチャンネルにて導通したためと考えられる。

3.2 ストリーマヘッドの進展様相

図6に全ガス組成におけるストリーマヘッドの進展様相を、電極軸方向からemICCDカメラにて撮影したフレーミング像を示す。なお、各画像のコントラストは、著しく発光輝度が小さい O_2 以外は一定である。ここで T ns とは、各ガス組成においてパルス電圧印加後、内部電極近傍へ初めてストリーマヘッドの形成を確認できた時刻であり、図5における電圧電流波形の時間軸と一致している。なお、図6より、全ガス組成において、ストリーマヘッドは、内部電極近傍への形成後、外部電極へ向けて進展し、外部電極へ到達している ($T+4$ ns 程度) ことが確認される。

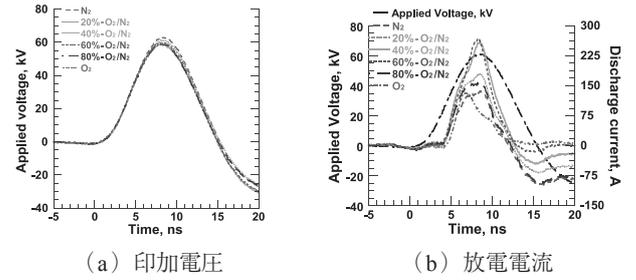


図5 ナノ秒パルス放電時の印加電圧及び放電電流波形
Fig.5 Waveforms of applied voltage to and discharge current into coaxial electrode.

	T ns	T + 1 ns	T + 2 ns	T + 3 ns	T + 4 ns
N_2	T = 1.1 ns				
20%- O_2 / N_2	T = 1.0 ns				
40%- O_2 / N_2	T = 0.6 ns				
60%- O_2 / N_2	T = 1.1 ns				
80%- O_2 / N_2	T = 0.9 ns				
O_2	T = 4.2 ns				

図6 全ガス組成でのナノ秒パルス放電画像
Fig.6 Framing images of the nanosecond pulsed discharge in different gas composition ratios.

また、図6より、 N_2 及び O_2 の場合、ストリーマヘッドは進展途中にて枝分かかれし、その径が小さいことがわかる。また、ストリーマヘッドと内部電極間は常に発光していることより、ストリーマヘッドとその進展後方に形成されるストリーマチャンネルはほぼ同様のプラズマ状態であることが推測される。一方、 N_2/O_2 混合ガスの場合、ストリーマヘッドは枝分かかれせず、特に 20%- O_2/N_2 と 80%- O_2/N_2 において、その径が大きくなっていることが確認される。また、ストリーマヘッドの内部電極から外部電極へ向けた進展とともに、ストリーマチャンネル部の発光が弱くなっていることより、 N_2/O_2 混合ガスにおいては、 N_2 及び O_2 とは異なり、ストリーマヘッドがストリーマチャンネルに比較して、より高いエネルギー状態であることが予想される。なお、全ガス組成において、ストリーマヘッドとストリーマチャンネル部の発光輝度は、 N_2 の場合に最も大きく、 O_2 比が増加するにつれ、その発光輝度は小さくなっている。

3.3 ストリーマヘッドの進展速度

ここでは、図6の各フレーミング像より、ストリーマヘッドの進展速度の解析を行った。図7にはその解析事例を示す。解析では放電画像の輝度分布からストリーマヘッドの進展距離を算出しており、具体的には、図7(a)のように放電電極内の内部電極 (P₁) を中心とし、外部電極 (P₄₀₀) までを円環状に400等分し、各円環領域での積算輝度値を内部電極からの距離毎に配列することで、図7(b)のような発光強度分布を得た。なお、図7(b)において、その輝度値の最も高い位置をストリーマヘッドの到達位置とし、中心電極表面からその到達位置までの距離をストリーマヘッド進展距離とした。この解析をストリーマヘッドの進展開始から進展終了まで、0.1 ns 毎に行った。なお、それぞれの時間において3回の計測平均値を進展距離とした。

図8に各ガス組成でのフレーミング像の撮影開始時間とストリーマヘッド進展距離との関係を示す。また、表1にはストリーマヘッド進展開始時の諸パラメータ及びストリーマヘッド平均進展速度をまとめている。なお、表1における進展開始電界Eは式(4)を用いて算出した。

$$E = \frac{V_{\text{applied}}}{r \times \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (4)$$

ここで、 V_{applied} はストリーマヘッドの形成が確認された時間における電極への印加電圧、 R_1 は内部電極の半径 (= 0.5 mm)、 R_2 は外部電極の半径 (= 30 mm)、 r は一次ストリーマが形成される位置、即ち、内部電極表面 (= R_1) である。

図8より、各ガス組成において、ストリーマヘッドが内部電極近傍にて形成され (大きなシンボル)、それが外部電極へ向けて進展していることが確認される。また、全ガス組成にて、ストリーマヘッドの進展とともにその傾き (= 距離 / 時間、速度) の度合いが変化しており、進展初期 (~10 mm 程度) では線形的な増加が確認されるが、進展中期 (10~20 mm 程度) 以降にて、その傾きは指数的に増加していることがわかる。この急激な速度増加は、ファイナルジャンプと呼ばれる現象であり、ストリーマヘッドの先端と外部電極間に形成される高い電界に起因するものである¹⁶⁾。次に、表1よりN₂及びN₂/O₂混合ガスにおいて、その進展開始時間は 0.85 ± 0.25 nsであった。また、O₂においては、その時間がN₂及びN₂/O₂混合ガスと比較して、3 ns程度遅くなっている。この差異は、N₂とO₂の放電開始電界 (= ストリーマ形成電界) の違いを反映していると考えられ¹⁷⁾、それぞれにおける電界は 1.5 ± 0.6 kV/mm と 18.2 kV/mm であっ

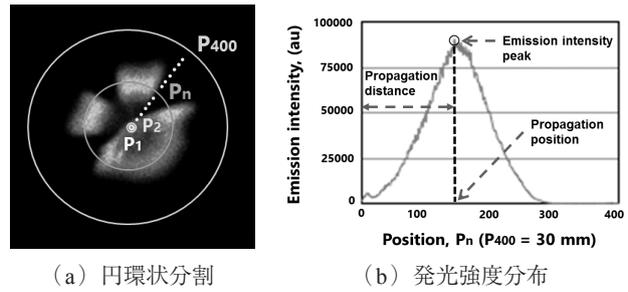


図7 ストリーマヘッド進展距離の解析法
Fig.7 Analysis method for propagation distance of streamer head.

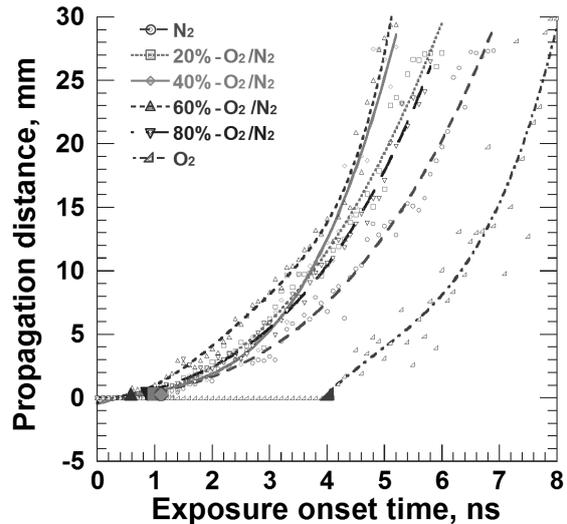


図8 ストリーマヘッド進展距離の時間依存
Fig.8 Time dependence of propagation distance of streamer head in coaxial electrode.

表1 進展開始時の諸パラメータと平均速度
Table 1 Streamer onset characteristics in different gas compositions.

O ₂ ratio, %	0	20	40	60	80	100
Formation time, ns	1.1	1.0	0.6	1.1	0.9	4.2
Applied voltage, kV	4.2	3.3	1.9	4.2	2.8	37.2
Electric field, kV/mm	2.1	1.6	0.9	2.1	1.4	18.2
Average propagation velocity, mm/ns	5.2	5.9	6.5	7.1	5.8	8.1

た。また、ストリーマヘッドの電極間における平均進展速度はN₂では5.2 mm/ns、N₂/O₂混合ガスでは5.8-7.1 mm/ns、O₂では8.1 mm/nsであり、N₂からN₂/O₂混合ガス、O₂と大きくなっている。

4. 考察

本節では、ストリーマヘッドの進展に与えるN₂とO₂の影響を考察する。まず、N₂の特性として、電子衝突励起された際に、紫外線を放射することで、基底状態へと戻ることが良く知られている¹⁸⁾。また、O₂の特性と

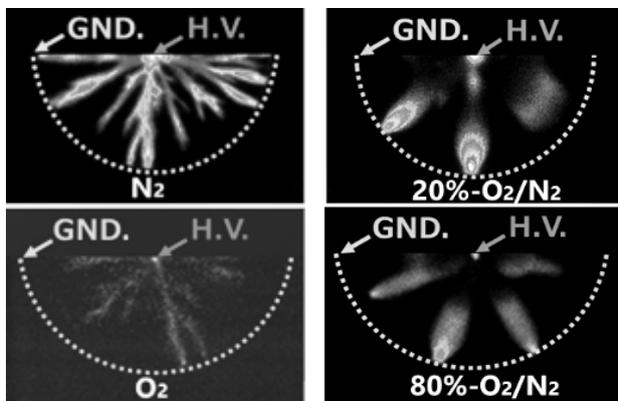
しては、紫外線により光電離を起こすこと¹⁹⁾、並びに、電子親和力が高いことが挙げられる。

よって、 N_2/O_2 混合ガス中の放電においては、電子衝突により励起された N_2 から放射される紫外線により、 O_2 が光電離を起こし、その結果として、空間へ新たな電子が供給されることとなる。更に、その電子が電界にて加速され、新たに N_2 を励起するという循環により、ストリーマヘッドが進展していると考えられる。以上の N_2 と O_2 の特性を基に、3節に記述した実験結果の考察に入る。

4.1 ストリーマヘッドの枝分かれ

図9には N_2 及び O_2 の場合と N_2/O_2 混合ガスの場合におけるストリーマヘッドが外部電極へ到達する直前の放電フレーミング像の一例を示す。なお、 N_2/O_2 混合ガスの放電像は、紙面の都合上、20%- O_2/N_2 及び80%- O_2/N_2 のみを示す。図9より、ストリーマヘッドは(a) N_2 及び O_2 においてのみ、枝分かれていることが確認される。これについて考察を行うと、まず、 N_2 の場合には、ストリーマヘッド近傍に存在する自由電子は、電界による N_2 からの電離電子、宇宙線や放射線による自然電離に起因する偶発電子、並びに、不純物などによる少量の光電離電子¹⁹⁾である。また O_2 の場合には、ストリーマヘッド近傍に存在する自由電子は、 N_2 と同様に、 O_2 からの電離電子、偶発電子、並びに、少量の光電離電子である。即ち、 N_2 若しくは O_2 雰囲気下においては、ストリーマヘッドの進展に大きな影響を及ぼす自由電子が、確率的に発生する偶発電子および少量の光電離電子に依存しており、その分布がストリーマヘッドの進展方向を決定する要因となるため、枝分かれするものと考えられる。これを図示すると図10(左図)のようになる。

一方、 N_2/O_2 混合ガスでは、ストリーマヘッド近傍へ



(a) N_2 及び O_2

(b) N_2/O_2 混合ガス

図9 外部電極へ到達する直前の放電像

Fig.9 Framing images taken just before fully bridge of streamer head.

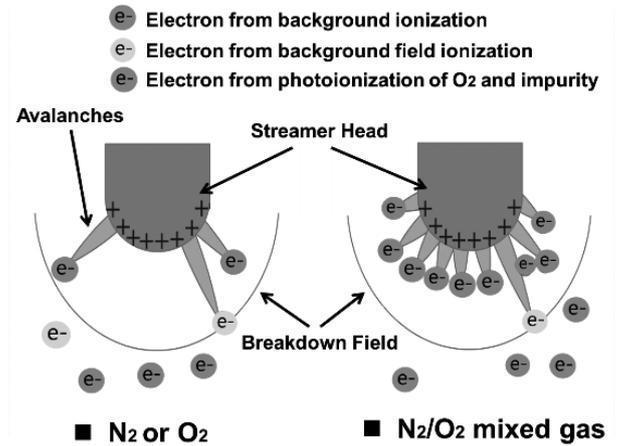


図10 ストリーマヘッドの枝分かれについて
Fig.10 Branching mechanism of streamer head.

O_2 の光電離にともなう自由電子が多量に存在するため、ストリーマヘッドは、その有する電界の向きと同方向へ枝分かれせずに進展する(図10(右図))。

4.2 ストリーマヘッドの進展速度

表1より、ストリーマヘッドの進展速度は N_2 に対して、 N_2/O_2 混合ガスの方が大きいことが確認される。これは4.1節への記述のように、 N_2/O_2 混合ガスにおいては、 O_2 の光電離プロセスにより、ストリーマヘッド近傍へ自由電子が多量に供給されることに起因すると考えられる。ストリーマヘッドの進展速度は、その有する電界強度と相関性があることは知られており^{20,21)}、ここにおいては、ストリーマヘッドが有する高電界領域への自由電子取り込み量がストリーマヘッドの有する電界強度の増加、ひいては、その進展速度の増加に直結しているためである。なお、 N_2/O_2 混合ガスにおいて、その組成比が等分となるにつれて(40%- O_2/N_2 及び60%- O_2/N_2)、ストリーマヘッド進展速度が増加したのは N_2 からの紫外線放射と O_2 からの光電離電子の供給の調和が取れたためだと考えられる。

一方、 O_2 においては、特に、その平均進展速度が大きくなっているが、これは、ストリーマヘッド形成時の電極表面電界が大きくなっており、その初期速度が大きくなったためと考えられる。

5. まとめ

本稿では、ナノ秒パルス放電によるオゾン生成の高性能化を目的として、最適な原料ガスを模索するために、ストリーマヘッドの進展様相に雰囲気ガス N_2/O_2 組成が与える影響について調査した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・ N_2 及び O_2 の単一ガス雰囲気下において、ストリーマヘッドの進展方向は偶発電子および少量の光電離電子の存在位置へ大きく依存するため、枝分かれすることとなり、また、その径は N_2/O_2 混合ガス雰囲気下に比べて小さくなる。
- ・ N_2/O_2 混合ガス雰囲気下においては、 O_2 の光電離による自由電子供給量の増加のため、ストリーマヘッドは直進し、その径は太くなる。また、 N_2/O_2 ガス組成比が同等となるにつれ、その進展速度は大きくなり、これは、より高い電界を有するストリーマヘッドの形成を意味している。

よって、今後、50%- O_2/N_2 下におけるオゾン生成を試みることで、ナノ秒パルス放電方式オゾン発生器の更なる性能向上が期待される。

参考文献

- 1) S. Samukawa, M. Hori, S. Rauf, K. Tachibana, P. Bruggeman, G. Kroesen, J.C. Whitehead, A.B. Murphy, A.F. Gutsol, S. Starikovskaia, U. Kortshagen, J. Boeuf, T.J. Sommerer, M.J. Kushner, U. Czarnetzki, and N. Mason: The 2012 plasma roadmap, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **45** [25] (2012) 253001
- 2) T. Namihira, S. Tsukamoto, D. Wang, S. Katsuki, R. Hackam, H. Akiyama, Y. Uchida, and M. Koike: Improvement of NOx removal efficiency using short-width pulsed power, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **28** (2000) 434-442
- 3) D. Wang, T. Namihira, S. Katsuki, and H. Akiyama: Dependence of NOx removal by pulsed streamer discharge on the input energy density to nitric oxide ratio, *J. Advanced Oxidation Technologies*, **8** [2] (2005) 248-254
- 4) A. Komuro, R. Ono, and T. Oda: Behaviour of OH radicals in an atmospheric-pressure streamer discharge studied by two-dimensional numerical simulation, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **46** (2013) 175206
- 5) F.J.C.M. Beckers, W.F.L.M. Hoeben, T. Huiskamp, A.J.M. Pemen, and E.J.M. van Heesch: Pulsed corona demonstrator for semi-industrial scale air purification, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **41** [10] (2013) 2920-2925
- 6) W.F.L.M. Hoeben, F.J.C.M. Beckers, A.J.M. Pemen, E.J.M. van Heesch, and W.L. Kling: Oxidative degradation of toluene and limonene in air by pulsed corona technology, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **45** [5] (2012) 055202
- 7) J.S. Clements, A. Mizuno, W.C. Finney, and R.H. Davis: Combined removal of SO_2 , NOx, and fly ash from simulated flue gas using pulsed streamer corona, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **25** [1] (1989) 62-69
- 8) F.J.C.M. Beckers, W.F.L.M. Hoeben, A.J.M. Pemen, and E.J.M. Van Heesch, "Low-level NOx removal in ambient air by pulsed corona technology," *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **46** [29] (2013) 295201
- 9) Z. Bonaventura, A. Bourdon, S. Celestin, and V.P. Pasko: Electric field determination in streamer discharge in air at atmospheric pressure, *Plasma Source Sci. Technol.*, **20** (2011) 035012
- 10) S. Okada, D. Wang, T. Namihira, S. Katsuki, and H. Akiyama: Spatiotemporal distribution of nitrogen rotational temperature during pulsed discharge in air, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50** [8] (2011) 08JB06-1-5
- 11) D. Wang, S. Okada, T. Matsumoto, T. Namihira, and H. Akiyama: Pulsed Discharge Induced by Nanosecond Pulsed Power in Atmospheric Air, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **38** [10] (2010) 2746-2751
- 12) T. Matsumoto, D. Wang, T. Namihira, and H. Akiyama: Performances of nano-seconds pulsed discharge, *Acta Phys. Pol. A*, **115** [6] (2009) 1101-1103
- 13) 浪平隆男, 王斗艶, 松本宇生, 岡田翔, 秋山秀典: ナノ秒パルス放電プラズマの特性とその応用展開, 電気学会論文誌 A, **129** [1] (2009) 7-14
- 14) D. Wang, T. Namihira, and H. Akiyama: Recent Progress of Nano-Seconds Pulsed Discharge and its Applications, *J. Advanced Oxidation Technologies*, **14** [1] (2011) 131-137
- 15) 宗宮功: オゾンハンドブック, サンヨー書房 (2004)
- 16) H. Pepin, D Comtois, F. Vidal, C. Y. Chien, and A. Desparois: Triggering and guiding high-voltage large-scale leader discharges with sub-joule ultra laser pulses, *Physics of Plasma*, **8** (2001) 2532
- 17) G. Wormeester, S. Pancheshnyi, A. Luque, S. Nijdam, U. Ebert, "Probing photo-ionization: Simulations of positive streamers in varying $N_2:O_2$ -mixtures: *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **43** (2010) 505201
- 18) A. Luque, U. Ebert, C. Montijn, and W. Hundsdorfer: Photoionization in negative streamers: fast computations and two propagation modes, *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 081501
- 19) S. Mijdam, F.M.J.H. van de Wetering, R. Blanc, E.M. van Veldhuizen, and U. Ebert: Probing photo-ionization: experiments on positive streamers in pure gases and mixtures, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **43** (2010) 145204
- 20) F. Tochikubo and H. Arai: Numerical simulation of streamer propagation and radical reactions in positive corona discharge in N_2/NO and $N_2/O_2/NO$, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) 844-852
- 21) A. Komuro, K. Takahashi, and A. Ando: Numerical simulation for the production of chemically active species in primary and secondary streamers in atmospheric-pressure dry air, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **48** (2015) 215203