

ナノ秒パルス放電方式オゾナイザにおける オゾン生成特性の空間依存性

角 直哉*, 青柳 翼**, 龍 輝優*, 浪平 隆男***,1, 王 斗艶***

(2021年9月21日受付; 2021年11月27日受理)

Spatial Dependence of Ozone Generation Characteristics in Nanosecond Pulsed Discharge Method Ozonizer

Naoya SUMI*, Tsubasa AOYAGI**, Terumasa RYU*,
Takao NAMIHIRA***,1 and Douyan WANG***

(Received September 21, 2021; Accepted November 27, 2021)

Ozone characteristics such as strong oxidation power and no-residual toxicity makes it highly expected as a next generation oxidant. Ozone has been used in industrial wastewater treatments, oxidation of NO_x, wafer cleaning, and so on. Nanosecond (ns) pulsed discharge-based ozonizer which has been developed recent years has achieved the higher ozone generation yield than the other discharge methods. However, this method still cannot clear an issue that the maximum ozone concentration saturates at approximately 40g/m³. The ozone concentration required for water purification application is more than 100g/m³. Therefore, improvement of ns pulsed discharge method is necessary. It is assumed that the main causes of ozone concentration saturation are ozone thermal decomposition due to gas temperature rise and electron impact decomposition of ozone. In this study, we investigated the spatiotemporal change in ozone concentration due to discharge under the condition of less than 700 J/L where spatially uniform thermal decomposition of ozone doesn't occur. The result shows that primary streamers are more suitable for ozone generation than secondary streamers in terms of ozone concentration improvement. Thus, ns pulsed discharge consisting only of primary streamers is considered suitable for ozone generation.

1. はじめに

オゾンはフッ素に次ぐ酸化力を持ち、殺菌や脱臭、脱色、漂白等の優れた効果を発揮する^{1,2)}。また酸素へ自然分解し残留毒性を持たないことから、従来の塩素に代わる次世代の酸化剤として期待される物質である。このような特徴を持つオゾンは、上下水道処理³⁾、NO_x除去⁴⁾、半導体洗浄⁵⁾と多岐にわたって利用されている。オゾンの主な生成方法として最も知られているのは誘電体バリア放電を用いた非熱平衡プラズマの利用^{6,7)}であるが、その製造・運転コストが高価であること^{8,9)}や誘電体バリア放電に伴う大きな熱損失に起因したオゾンの熱分解促進や冷却コストの増大など欠点も多い¹⁰⁾。一方で、パルスパワーを用いたストリーマ放電によるオゾン生成も注目を浴びている。ストリーマ放電によるオゾン生成においては電圧印加時間が短く中性ガスやイオンを比較的加熱しにくい

ため熱損失が小さく、冷却機構が不要という特徴を有している。このパルス放電の中でもナノ秒オーダーの非常に短い電圧持続時間及び電圧の立ち上がり・立ち下がり時間を特徴とするナノ秒パルス電源が開発された¹¹⁾。このナノ秒パルス放電は電圧印加時間の極端な短さ故に1次ストリーマが主体の放電形態となり、熱損失の大きな2次ストリーマの進展を抑制できる^{9,10)}。それにより、ナノ秒パルス放電によるオゾン生成はその他の放電法と比較して高いエネルギー効率を誇ることが実証されている¹²⁾。

しかし、ナノ秒パルス放電方式オゾナイザにおいてはオゾン濃度がおおよそ40 g/m³で頭打ちとなってしまうことが課題となっている。その原因としては、放電発生熱によるオゾンの熱分解、及び低エネルギー電子によるオゾンの電子衝突分解が一般的に推測されるが未だ不明瞭である。半導体の洗浄や上下水道の処理には、100~120 g/m³のオゾン濃度が必要であるとされており、高濃度オゾン生成を可能とするためにその上限を支配する飽和原因を究明し、抑制案を検討することが必要不可欠である。

そこで本稿では、ナノ秒パルス放電方式オゾナイザによる高濃度オゾン生成に向けた知見探索を目的に、時空間的に平衡した熱によるオゾン分解を排除した条件にてナノ秒パルス放電を発生させ、その際のオゾン濃度の時空間推移をレーザー吸光計測実験にて把握した。また、

キーワード：ナノ秒、パルス放電、オゾン、レーザー、時空間分布

* 熊本大学産業ナノマテリアル研究所

(〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1)

Institute of Industrial Nanomaterials, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan

¹ namihira@cs.kumamoto-u.ac.jp

DOI : <https://doi.org/10.34342/iesj.2022.46.1.2>

得られたオゾン生成特性の空間依存性の結果を1次・2次ストリーマ放電形態の特徴を基に考察した。

2. 実験準備・方法

2.1 事前実験

事前実験として、電極内の時空間的に平衡した熱によるオゾン分解を排除できる条件を明らかにする実験を行ったので、ここではその結果を紹介する。

図1には、ナノ秒パルス放電発生時の放電電極内ガス温度の注入エネルギー密度依存性を示す。放電電極として線対円筒型リアクタを用いており、長さ500 mm、線電極外径1 mm、円筒電極内径76 mm、容積2,268 cm³である。今回、リアクタ内への流入ガスはO₂ (99.8%)を用いており、流量はマスフローコントローラーにて1 L/minに固定した。このとき、放電電極へのガスの滞留時間は約136 sである。また、リアクタ出口付近のガス温度を光ファイバー温度計 (FL-2000, Anritsu Meter, Japan) により測定した。なお、印加1パルス当たりの注入エネルギー密度は35 mJ/Lであった。図1より、放電電極への注入エネルギー密度の増加に伴い、ガス温度は比例して上昇し、注入エネルギー密度が1,100 J/L程度にて約55°Cに達することを確認した。このときのガス温度上昇率は3.1×10² K/(J/L)であった。図2に

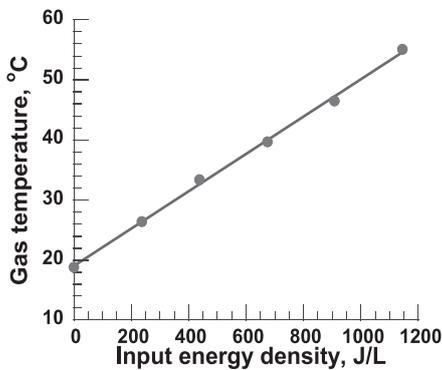


図1 放電中ガス温度の注入エネルギー密度依存性
Fig.1 Dependence of gas temperature on injection energy density during discharge.

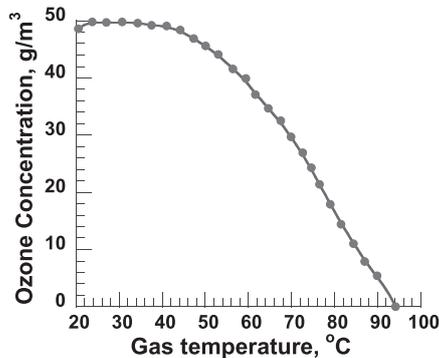


図2 オゾン濃度のガス温度依存性
Fig.2 Dependence of ozone concentration on gas temperature.

は、濃度50 g/m³のオゾンを加熱空間に流入させた際のオゾンの濃度変化を示す。加熱空間として円筒状容器を用いており、長さ490 mm、管径45 mm、容積779 cm³であり、容器を管状電気炉により加熱して温度を調節した。なお、加熱空間へのガスの滞留時間は約47 sである。また、容器出口におけるガス温度を光ファイバー温度計により測定した。図2より、ガス温度が40°Cを超えると徐々にオゾン濃度が減少し、95°Cに達するとオゾンが完全に熱分解されることを確認した。ここで図1から、電極内ガス温度が40°Cに達する注入エネルギー密度はおおよそ700 J/Lである。よって、これらの結果から、ナノ秒パルス放電によるオゾン生成時に、時空間的に平衡した状態におけるオゾンの熱分解は700 J/L以上の注入エネルギー密度において生じることが確認された。なお、40°Cにおけるオゾンの半減期は796分であり¹³⁾、これら2つの事前実験におけるガス滞留時間の差による影響は小さいと考えられる。

以上の事前実験の結果より、時空間的に平衡した状態でのオゾン熱分解を排除できる条件として、700 J/L未達の注入エネルギー密度環境下におけるナノ秒パルス放電によるオゾン生成特性を調査し、更なる高濃度化に向けた飽和要因の解明に努めた。

2.2 オゾン濃度変化観測システム

図3に本実験で用いたナノ秒パルス電源の概略図を示す。本装置は、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、伝送線路により構成されている。詳細な構造及び動作については参考文献を参照願いたい¹⁴⁾。また、図4にナノ秒パルス放電発生時の電圧・電流波形を示す。図4より、およそ2 nsの電圧の立ち上がり及び立ち下がり時間、パルス幅は約5 nsが得られていることが分かる。図5に実験システム概略図を示す。放電電極は、直径0.3 mmのステンレスワイヤを中心電極とし、内径76 mm、長さ1,000 mmの真鍮円筒を外部電極とした同軸円筒構造となっている。放電リアクタ長を1,000 mmとした理由は、ナノ秒パルス放電を用いたオゾン生成研究にて多く使用されているためである。電極への導入ガスはオゾナイザ (ED-OG-R4BW, エコデザイン株式会社) により生成したオゾン化ガス (オゾン濃度20,40,60 g/m³) を用いており、電極内へ封

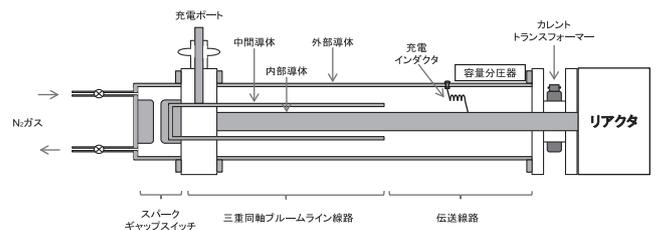


図3 ナノ秒パルス電源の構成
Fig.3 Schematic diagram of nanosecond pulse generator.

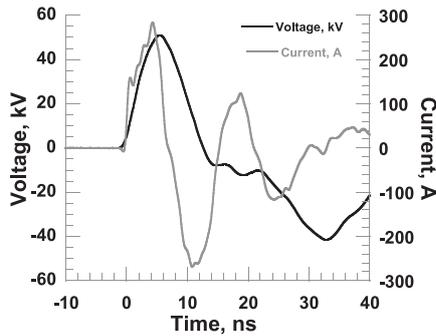


図4 ナノ秒パルス放電の電圧・電流波形
Fig.4 Voltage and current waveforms of nanosecond pulsed discharge.

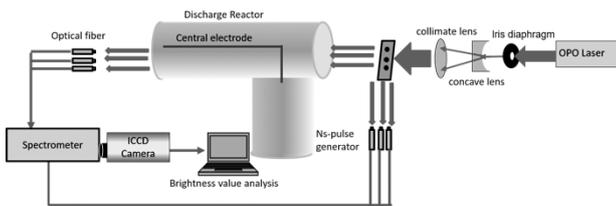


図5 オゾン濃度観測システム
Fig.5 Ozone concentration observation system.

入した状態とした。封入方式としたのは、放電による時空間的オゾン濃度変化に対するガス流の影響を排除するためである。実験時には、中心電極へ正極性のパルス電圧を印加し、その印加電圧は40 kV、繰り返し周波数は10 ppsとした。

放電によるオゾン濃度の変化は、レーザー吸光度法により計測する。オゾンは紫外線など特定波長の光を吸収する性質がある。この性質を利用して電極への入射光と透過光の比からオゾン濃度を算出する方法がレーザー吸光度法である¹⁵⁾。吸光度をAbs., 入射光強度を I_0 、透過光強度を I とおくと、吸光度は次の式(1)で表せる¹⁵⁾。ここでランベルト・ベールの法則より吸光度はオゾン濃度 C と測定光路長 d に比例するので、式(2)で表すことができる¹⁵⁾。 ϵ はモル吸光係数であり、その値は $3,000 \text{ L/mol}\cdot\text{cm}$ である¹⁵⁾。よってオゾン濃度は式(1)、(2)より式(3)のように表すことができる。

$$\text{Abs.} = \log \frac{I_0}{I} \quad (1)$$

$$\text{Abs.} = \epsilon * C * d \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{\epsilon d} \log \frac{I_0}{I} \quad (3)$$

実験において、プローブレーザーにはNd:YAGレーザー (SureliteEx, Continuum) と光パラメトリック発生器 (Horizon OPO, Continuum) で構成されたOPOレーザーを用いている。オゾンは波長200~800 nmの広範囲にわたり吸光特性を持っており、特に波長220~300 nmのハートレー帯に強い吸収特性を持っている¹⁶⁾。本実験では20, 40, 60 g/m^3 と高いオゾン濃度及び1,000 mmと長い光路長を用

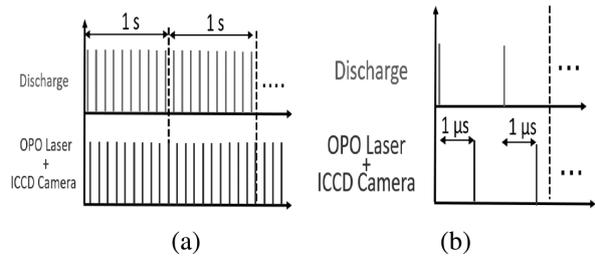


図6 emICCDカメラとレーザー、放電のタイミングチャート (a) 10 Hz 同期, (b) 1放電同期
Fig.6 ICCD Camera + OPO Laser and Discharge time chart (a) 10 Hz, (b) single discharge.

いるため、それ等の条件に合わせた最適波長を導出した。この最適波長は、次の2つの条件を満たす必要がある。1つ目は吸光度法を適用するために、透過光が観測される適度な吸光度であること、2つ目は吸光度の感度が高い $\text{Abs.} < 1$ の範囲内であることである。今回、この2つの条件を満たす波長が320 nmであったため、プローブレーザーであるOPOレーザーの設定波長は320 nmとした。このレーザー光を電極軸方向へ入射し、その透過光(320 nm)の強度を分光器 (IsoPlane320, Princeton Instruments) 付emICCDカメラ (PI-MAX, Princeton Instruments) を用いて計測した。また、レーザー光は電極への入射前にハーフミラー (WSSQ-30C07-10-3, シグマ光機) によりサンプリングされており、このサンプル光 (入射光) も透過光と同様に分光器付emICCDカメラにて計測した。

電極内のオゾン濃度観測位置は、中心電極から外部電極へ向かう径方向に4, 19, 34 mm離れた地点とした。4 mm地点は中心電極近傍、19 mm地点は外部電極と中心電極の間、34 mm地点は外部電極近傍におけるオゾン生成様相を確認するためである。ここでOPOレーザーはパルスレーザーであるため、OPOレーザーとemICCDカメラを時間同期する必要があり、ディレイジェネレーター (DG645, STANFORD RESEARCH SYSTEMS) を用いて駆動周波数10 Hzにて同期させた。なお、OPOレーザーとナノ秒パルス放電も同様に同期しており、ナノ秒パルス放電後1 μs にてレーザーが入射されるように設定した。これらのタイミングチャートを図6に示す。

2.3 予備実験

本研究ではナノ秒パルス放電によるオゾン濃度変化を紫外レーザーにより観測することを目的としているため、予備実験にて放電以外の影響によるオゾン濃度変化の有無を確認した。

図7には、リアクタ内に60 g/m^3 のオゾンを封入し、レーザーを20分間照射した際の各観測位置におけるオゾン濃度の時間推移を示す。図7より、時間経過に従って全ての観測位置においてオゾン濃度の減少が確認され

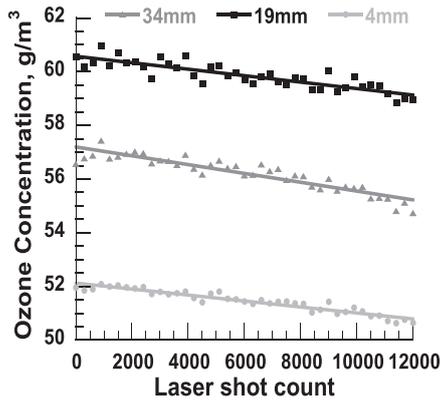
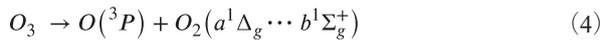


図7 60 g/m³封入時のオゾン濃度時間推移
Fig.7 Dependence of ozone concentration on laser shot counts (60 g/m³ enclosed).

た. このオゾン濃度減少の原因としては, 式(4)に示す紫外光によるオゾン分解反応が考えられ¹⁶⁾, その分解量は各観測位置においてレーザー1ショット当たり $0.5 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-4}$ g/m³ である.

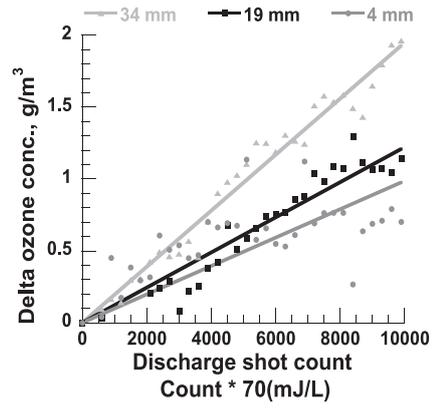


また, 観測位置によって初期濃度が異なっているが, これはオゾンの分子量が酸素より大きく, その質量差によりオゾンが電極下方へ沈降したことが一因だと推測される. なお, 放電の発生熱による電極内空間の屈折率変化がないことも同時に確認している.

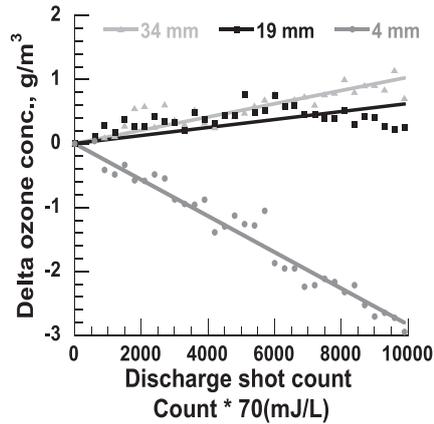
3. 実験結果及び考察

3.1 放電によるオゾン濃度変化

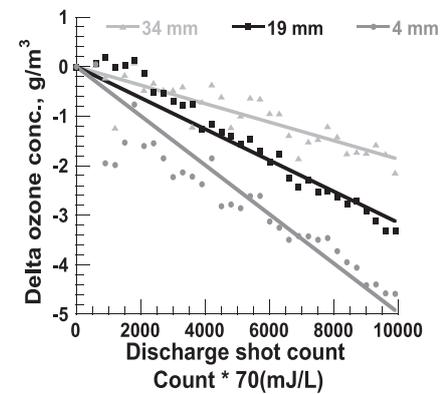
同軸円筒電極内におけるナノ秒パルス放電によるオゾン濃度変化は, 放電300回ごとの移動平均をとり, 初期濃度からの差分を確認した. 図8に, 初期濃度 (a) 20, (b) 40, (c) 60 g/m³ のオゾン化ガス封入時におけるナノ秒パルス放電連続印加時の各観測位置でのオゾン濃度変化量を示す. なお, 図8は2.3節にて述べたレーザー光によるオゾン分解量を既に差し引いている. 図8 (a, 20 g/m³) より, 全ての観測位置においてオゾン濃度は放電回数の増加とともに多少の変動はあるものの上昇している. 図8 (b, 40 g/m³) より, 観測位置4 mm 地点においてオゾン濃度は放電回数の増加に伴って減少し, 19, 34 mm 地点では増加した. 図8 (c, 60 g/m³) より, 全ての観測位置においてオゾン濃度は放電回数の増加に伴って減少した. なお, 表1には, 図8の各条件におけるオゾン濃度変化を直線近似した際の傾き, 即ち, 1回のナノ秒パルス放電によるオゾンの生成・分解特性をまとめたものを示す. 表1より, 外部電極近傍及び低オゾン濃度時に傾きは正となり, その傾きが大きいことが分かる.



(a)



(b)



(c)

図8 放電によるオゾン濃度変化
(a) 20, (b) 40, (c) 60 g/m³封入

Fig.8 Dependence of ozone concentration on discharge shot under different initial concentration conditions.
(a) 20, (b) 40, (c) 60 g/m³ enclosed.

表1 各条件における1ショットごとのオゾン濃度変化量
Table 1 Change of ozone concentration per 1shot.

		オゾン濃度変化量 [$\times 10^{-4}$ (g/m ³)/shot]		
初期濃度		20 g/m ³	40 g/m ³	60 g/m ³
測定位置				
4 mm		0.983	-2.84	-4.97
19 mm		1.23	0.623	-3.15
34 mm		1.95	1.04	-1.87

一方で、中心電極近傍及び高濃度オゾン時に傾きは負となり、その傾きが大きいことが分かる。これは初期オゾン濃度が高く、中心電極に近いほどナノ秒パルス放電によりオゾンが分解されていることを示している。

3.2 オゾン濃度変化に対する考察

3.1の結果を踏まえて考察する。この電極内におけるナノ秒パルス放電時に起こる化学反応は式(5)~(8)が考えられる¹⁷⁾。



式(5), (6)は酸素分子への電子衝突による酸素原子の生成反応及び酸素原子と酸素分子, その他分子(この場合は, 酸素が主と考えられる。)の三体衝突反応によるオゾンの生成反応である。本実験において, 式(7)に示す酸素原子の再結合反応も考えられるため, 放電空間における酸素原子密度は式(9)のように表される。ここで, 初期濃度としてオゾンを 60 g/m^3 封入した際においてもリアクタ内のガス組成は O_2 (97%)/ O_3 (3%) であり, 式(8)により生じる O 原子は式(5)により生じる O 原子に比べて十分小さいため, 今回の実験条件においては無視できると考える。また, k_1 は式(5)の反応速度定数, k_2 は式(7)の反応速度定数, τ は放電パルスの持続時間を表し, $[O_2]$, $[M]$ はそれぞれ酸素分子, 第三体の密度を表し, $[e]_1$ は式(5)の反応を主に引き起こす $6\sim 8 \text{ eV}$ のエネルギー¹⁸⁾を持った電子の密度を表す。

$$[O] = \int_0^\tau (k_1 [O_2] [e]_1 - k_2 [O][O][M]) dt \quad (9)$$

式(6)の反応速度は式(9)の酸素原子密度に比例することを出している。式(8)はオゾン分子への電子衝突によるオゾンの分解反応を示している。また, 本実験は注入エネルギー密度 700 J/L 以下で実施しており, 電極内の平均ガス温度は 40°C 以下と見積もられるため, その熱によるオゾンの熱分解はないものと考えられる。この条件下における放電1回当たりのオゾン濃度変化は $d[O_3]/d\text{Shot}$ と表され, 式(10)のように示される。ここで, k_3 は式(6)の反応速度に依存し, k_4 は式(8)の反応速度に依存し, $[O_2]$, $[O_3]$, $[M]$ はそれぞれ酸素分子, オゾン分子, 第三体の密度を表している。 $[e]_2$ は式(8)の反応を引き起こす $1\sim 2 \text{ eV}$ のエネルギーを持った電子の密度である¹⁸⁾。

$$\frac{d[O_3]}{d\text{Shot}} = k_3 [O][O_2][M] - k_4 [O_3][e]_2 \quad (10)$$

ここで, $[e]_1$ 及び $[e]_2$ は放電ごとに一定供給され, O_2 , M はそれぞれ電極内の主ガスと反応における第三

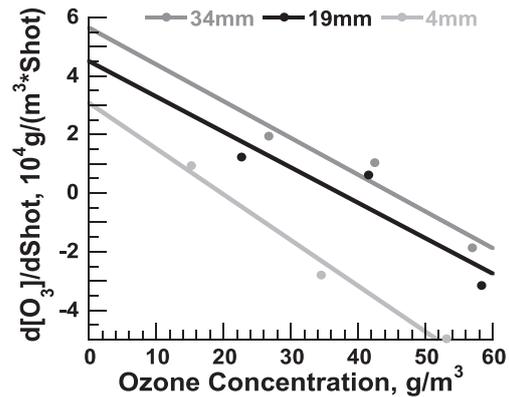


図9 測定位置ごとのオゾン生成特性

Fig.9 Ozone generation characteristics for each measurement position.

体を表すため, $[e]_1$, $[e]_2$, $[O]$, $[M]$ 及び $[O_2]$ はそれぞれオゾン濃度に依存しないパラメータとみなせる。よって, 第1項はオゾン生成を示す定数項, 第2項はオゾンの分解を示す $[O_3]$ に依存する変動項となる。

図9に表1の各観測位置をパラメータとした放電1回当たりのオゾン濃度変化量のオゾン濃度依存性を示す。ここで横軸は $[O_3]$, 縦軸は $d[O_3]/d\text{Shot}$ である。図9において各観測位置とも線形性があり, その近似式は観測位置 4, 19, 34 mm でそれぞれ式(11), (12), (13)となる。

$$\frac{d[O_3-4mm]}{d\text{Shot}} = -1.56e^{-5} [O_3] + 3.08e^{-4} \quad (11)$$

$$\frac{d[O_3-19mm]}{d\text{Shot}} = -1.21e^{-5} [O_3] + 4.51e^{-4} \quad (12)$$

$$\frac{d[O_3-34mm]}{d\text{Shot}} = -1.25e^{-5} [O_3] + 5.65e^{-4} \quad (13)$$

式(11)~(13)より, 図9のY切片 ($[O_3] = 0$) は, 酸素原料下における各観測位置でのオゾン生成・分解特性を示す値と考えられ, 全ての観測位置にて正となり, その値は 34 mm, 19 mm, 4 mm の順で大きい。これは外部電極近傍ほど酸素原料下でのオゾン生成に適した空間であることを示している。この要因として外部電極まで進展する1次ストリーマがオゾン生成に寄与する酸素分子の解離反応に必要な $6\sim 8 \text{ eV}$ 程度の高エネルギー電子をより多く生成できること¹⁸⁾, 及び1次ストリーマは進展に伴い放電電流が増加し¹²⁾, 外部電極に近づくほどストリーマ内の高エネルギー電子数が増大することが考えられる。

式(11)~(13)の傾きはオゾン濃度に対するオゾン分解特性の変化を示している。これはオゾンが高濃度になるにつれて各観測位置におけるオゾン生成能力が低下していることを示している。その値は 4 mm にて最大となり, 19 mm と 34 mm はほぼ同様となった。これから中心電極近傍はその他の位置に比べオゾン存在時のオゾン生成能力が低い, 即ち, オゾンの電子衝突分解が発生してい

ることを示している。この要因として2次ストリーマが大きく関係していると考えられる。2次ストリーマは低エネルギー電子を多く有し、1~2 eV 程度のエネルギーを持った電子が関与するオゾンの電子衝突分解反応を促進する¹⁸⁾。加えて、O₂の振動-並進 (V-T: vibraton-to-translation) 緩和により、中心電極近傍が局所的に高温となりオゾンの熱分解を促進する¹⁸⁾。本実験条件ではオゾン分解に寄与する2次ストリーマが電極中心から5 mm 程度まで進展することが確認されており¹⁹⁾、今回の観測位置条件では4 mm のみはその影響を受けることとなった。

次に、各観測位置におけるX切片 ($d[O_3]/dShot=0$) について考える。X切片はオゾンに関する反応が生成から分解へ転ずるオゾン濃度と考えられ、各観測位置における生成オゾン濃度の最大値と捉えることができる。これは、観測位置4 mm, 19 mm, 34 mm でそれぞれ19.7 g/m³, 37.3 g/m³, 45.2 g/m³ となっており、中心電極より最も離れた位置が最大となっている。よって、ナノ秒パルス放電によるオゾン生成において、今回の実験条件下では、外部電極近傍の空間が最も高濃度のオゾンを生産できる空間であることが明らかとなった。なお、本空間にて生成できる最大オゾン濃度は、45 g/m³程度に留まっており、この値はナノ秒パルス放電方式オゾン生成における飽和オゾン濃度と合致しているため、この考察は妥当であると言える。

4. まとめ

本稿では、ナノ秒パルス放電方式オゾンナイザの更なる高濃度化に向けた知見探索を目的として、光学的手法を用いた同軸円筒型リアクタにおけるナノ秒パルス放電によるオゾン濃度の時空間変化の調査を行った。

その結果、電極内において、1次・2次の両ストリーマが発生する空間のオゾン生成能力は、1次ストリーマのみ発生する空間に比べて低いことが確認された。また、今回の放電条件における最大オゾン濃度が45 g/m³程度であることも一緒に確認された。本結果より、2次ストリーマの発生を抑制²⁰⁾、即ち1次ストリーマのみで構成されるナノ秒パルス放電の実現や更なる高電圧印加などによる1次ストリーマ中電子の高エネルギー化などが生成オゾンの高濃度化へ向けた対策になると考えられる。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 19H05611 の助成を受けたものです。

参考文献

1) 布川史章, 田口正樹, 鈴木 進, 伊藤晴雄: パルスパワ

- ーで駆動した誘電体バリア放電型オゾンナイザのオゾン生成特性. 電気学会論文 A, **133** (2013) 471
- 2) 田中正明, 民田太郎: 両電極冷却円筒オゾンナイザのガス温度. 電気学会論文誌 A, **125** (2005) 823
- 3) 安武重雄: 水処理プロセスへのオゾン処理適用例. 水質汚濁研究, **13** (1990) 806
- 4) 佐野和慶, 吉岡芳夫: オゾン注入法による NO 除去性能の酸素注入と HC 添加効果. 電気学会論文誌 A, **123** (2003) 1030
- 5) 去来川辰彦, 大見忠弘: 半導体分野へのオゾン添加超純水の適用. 神鋼パンテック技報, **37** (1993) 30
- 6) Z. Fang, Y. Oiu, Y. Sun, H. Wang and K. Edmund: Experimental study on discharge characteristics and ozone generation of dielectric barrier discharge in a cylinder-cylinder reactor and a wire-wire reactor. Journal of Electrostatics, **66** (2008) 421
- 7) S. Pekárek: Non-Thermal Plasma Ozone Generation. Acta Polytechnica, **43** (2003) 47
- 8) 石岡久道, 虎口 信, 西井秀明, 山部長兵衛: マイクロギャップ無声放電による高濃度オゾン生成. 電気学会論文誌 A, **122** (2002) 378
- 9) 澁田 哲, 王 斗艶, 浪平隆男, 秋山秀典: ナノ秒パルス放電方式オゾン発生におけるマルチワイヤ電極の特性. 静電気学会誌, **34** (2013) 2
- 10) 野崎智洋: 誘電体バリア放電におけるエネルギー分配機構とヒートマネジメント. J. Plasma and Fusion Res, **85** (2009) 46
- 11) 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
- 12) 浪平隆男, 王 都艶, 松本宇生, 岡田 翔, 秋山秀則: 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** (2009) 7
- 13) J.D. McClurkin, D.E. Maier and K.E. Ileleji: Half-life time of ozone as a function of air movement and conditions in a sealed container. Journal of Stored Products Research, **55** (2013) 41
- 14) 布川史章, 下村直行, 矢野大輝, 寺西健二: ナノ秒パルスパワー電源装置の開発. 電気設備学会誌, **29** (2009) 956
- 15) 水野忠雄: オゾンとは、こんな物質である。化学と教育, **59** (2011) 68
- 16) 鷲田伸明: 光化学と分光計測第10講大気光化学. 分光研究, **40** (1991)
- 17) 八木重典, 田中正明, 田畑則一: 無声放電によるオゾン発生に与える NOx の影響. 電気学会論文 A, **97** (1977) 609
- 18) 小野 亮: 活性種のレーザー計測による大気圧ストリーマ放電の反応機構解明. J. Plasma Fusion Res, **87** (2011) 302
- 19) 龍 輝優, 王 斗艶, 浪平隆男: 同軸円筒電極内ナノ秒パルス放電の挙動特性. 電気学会論文 A, **139** (2019) 445
- 20) E. J. M van Heesch, G. J. J Winands and A. J. M Pemen: Evaluation of pulsed streamer corona experiments to determine the O* radical yield. Journal of Physics D: Applied Physics, **41** (2008) 234015