



## 解説

# 超高換算電界を有するナノ秒パルス放電プラズマの特徴とその制御

## Characteristics of Nanoseconds Pulsed Discharge Plasma Having Intense Reduced Electric Field and Its Control Techniques

浪平隆男, 龍 輝優, 王 斗艶

NAMIHIRA Takao, RYU Terumasa and WANG Douyan

熊本大学 パルスパワー科学研究所

(原稿受付: 2020年1月20日)

大気圧環境下にて形成される非熱平衡プラズマは、1990年代より、オゾン生成や燃焼・産業排ガス処理など、高エネルギー効率での気相化学反応場を提供できる技術として、数多くの研究が成されるようになってきた。そのような背景の下、非熱平衡プラズマの形成方法としては、直流・交流から始まり、電源技術の進歩とともに、バースト化した交流電圧やコンデンサの単純放電によるパルス電圧、波形成形を施したパルス電圧が利用されるようになり、積極的なプラズマ特性の制御が為されるようになった。本稿では、現状、最も特性制御された非熱平衡プラズマとして、ナノ秒オーダーでの立上り時間及び持続時間、立下り時間を有するパルス電圧で形成される「ナノ秒パルス放電プラズマ」を取り上げ、その現象・物性を、数十から数百ナノ秒の時間領域における汎用パルス電圧によるものと比較しつつ、詳細に説明する。

### Keywords:

Non-thermal plasma, nanosecond, pulsed power, discharge plasma, reduced electric field

### 1. 大気圧環境下にて形成されるプラズマ

平均自由行程が68 nmと非常に短い大気圧環境下にて形成されるプラズマは、電子及びイオン、中性分子・原子の各粒子間の衝突頻度が高いプラズマである。そのプラズマは、全構成粒子が同程度のエネルギーへ到達している「熱平衡プラズマ」と電子のみが極端に高いエネルギーへ到達している「非熱平衡プラズマ」とに大別される。

#### 1.1 熱平衡プラズマ

大気圧熱平衡プラズマの産業応用例として、最も有名なものが、アーク溶接であり、大電流を伴うアークプラズマ (~20,000 K) を熱源とし、母材や溶加材を溶融させることで金属同士を接合している[1]。また、近年では、高効率な熱反応場としての利用も盛んであり、産業廃棄物の処理[2]や金属ナノ粒子の生成[3]など、多くの技術開発が進められている。

#### 1.2 非熱平衡プラズマ

大気圧非熱平衡プラズマの産業応用例としては、オゾン発生器が最も有名であり、オゾンは塩素に替わる次世代の酸化剤として注目され、脱臭[4,5]から浄水[6]、表面処理[7]など多岐にわたり利用されている。代表的なオゾン生成方法は、空気や酸素を満たした金属電極間へ絶縁体(誘電体)を挿入することで得られる誘電体バリア放電(オゾンナイザ放電とも呼ばれる)であり、その放電空間における高エネルギー電子による酸素分子の衝突解離 ( $e + O_2 \rightarrow e + O + O$ ) 及びその酸素原子と酸素分子の結合

( $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$ ) によってオゾンが生成される[8]。

このオゾン生成原理、即ち、高エネルギー電子の気体分子への衝突を起因とした化学的活性種の生成及びその活性種を起点とした連鎖的な化学反応(プラズマ化学反応)が大気圧非熱平衡プラズマの最大の特徴となる。なお、ここでの化学的活性種とは、酸素原子や窒素原子など、他の粒子との反応性が高い状態にある粒子のことを指す。近年では、その特徴を生かして、燃焼排ガスに含まれる窒素酸化物( $NO_x$ )や硫黄酸化物( $SO_x$ )、並びに、産業排ガスに含まれる揮発性有機化合物(VOCs: Volatile Organic Compounds)の直接分解[9]、産業排水との接触による含有着色・悪臭成分である有機化合物の間接分解[10]などの技術開発が進められている。

### 2. 非熱平衡プラズマの形成方法

大気圧環境下における非熱平衡プラズマは、金属電極間へ、直流、交流、及びパルス(間欠)と如何なる電圧を印加しても形成できるが、プラズマ中の電子密度が過多となると、電子とイオン・中性粒子との衝突頻度が増し、最終的に全粒子が熱平衡へ到達する熱平衡プラズマとなる。そのため、直流・交流・パルス電圧による非熱平衡プラズマの形成では、電子密度が過多とならないよう、それぞれ独自の工夫が施されている。

#### 2.1 直流及び交流電圧による非熱平衡プラズマの形成

直流電圧による非熱平衡プラズマの形成(直流コロナ放

電)では、金属電極間へ直列に電流制限抵抗を挿入することで、プラズマ中への電子供給量を制限している。また、交流による非熱平衡プラズマの形成(交流誘電体バリア放電)では、1.2にて述べたように、金属電極間へ誘電体を挿入し、その表面上への電荷蓄積に伴う形成逆電界により電極間電界を打ち消すことで、電子供給量を制限している。

2.2 パルス電圧による非熱平衡プラズマの形成

図1は、空気を満たした金属製同軸円筒電極(内径1.0 mm, 外径76 mm, 長さ10 mm, 外部電極電位GND)へパルス電圧(立上り速度80 kV/40 ns, 時間幅250 ns)を印加した際に、軸方向から撮影される放電様相の経時変化(露光時間200 ps)とその時の内部電極への印加電圧及び電極間の放電電流波形を示している[11]。図1より、パルス放電は、先ず、①電圧及び電流が正特性となる時間領域では、複数のストリーマヘッドと呼ばれる非常に強い電界を有する局所的な空間電荷群(発光領域)が内部線電極から発進し、外部円筒電極へ到達する。次に、②電圧及び電流が一定となる時間領域では、内外電極間全体に渡り複数の放電路が維持される。最終的に、③電圧及び電流が負特性となる時間領域では、内外電極間を局所的に強い閃光を伴うアークが橋絡することとなる。そのため、パルス電圧による非熱平衡プラズマの形成では、パルス電圧の持続時間を短く制御することで、熱平衡プラズマへの移行を抑止することとなる。

なお、それぞれの様相は、経時的には、①内外電極間をストリーマヘッドが進展する期間、②内外電極間の全体で

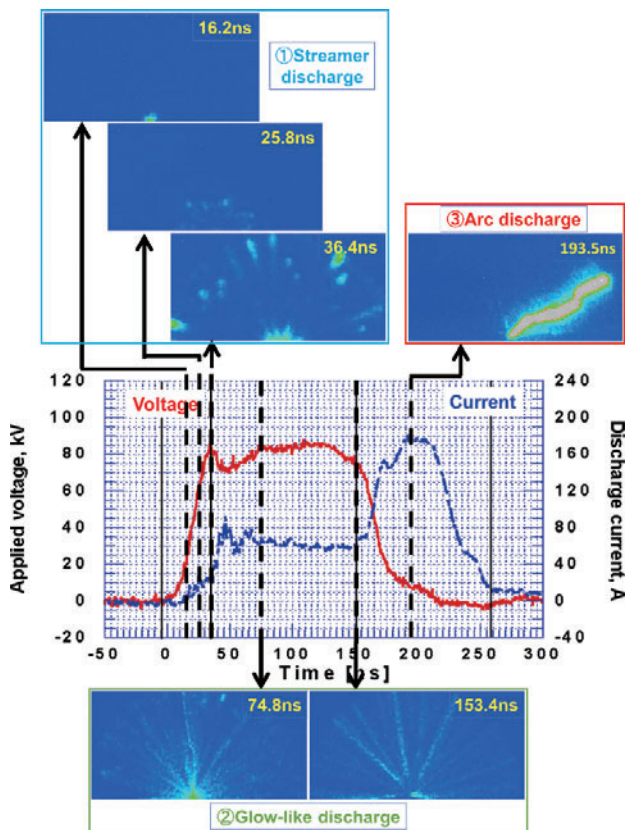


図1 パルス電圧印加時の同軸円筒電極における放電様相の経時変化。

放電している期間、③内外電極間の局所で放電している期間と定義することができ、簡略的に、①ストリーマ放電、②グロー様放電、③アーク放電と呼ぶ。また、現象的には、①②の期間は、1番目に形成されたストリーマヘッドの進展(1次ストリーマ:その構造は、先端にストリーマヘッドを、その後方に大きな導電性を持つストリーマチャンネルを有する。)及び2番目に形成されたストリーマの進展(2次ストリーマ)とも定義される[12]。なお、図1中36.4 nsの撮影像は、経時的にはストリーマ放電となるが、現象的には外部円筒電極付近へ到達している1次ストリーマと内部線電極付近に形成されている2次ストリーマが重複していることがわかる。

3. ストリーマ放電

現在、市販されているパルス電源は、数十 ns の電圧立上り時間及び数百 ns の電圧時間幅を有しており、これにより形成される非熱平衡プラズマは、2.2にて述べたように、①ストリーマ放電及び②グロー様放電の2つの様相から成る。表1は、これら2つの様相における電子エネルギーとイオン・中性粒子エネルギーを示す[12,13]。表1より、①ストリーマと②グロー様、どちらの放電様相とも、電子エネルギーのイオン・中性粒子エネルギーに対する比、即ち、非熱平衡度のダイナミックレンジが非常に大きなものとなっている。また、化学的活性種生成への寄与が小さい中性粒子へのエネルギー移行(加熱)、即ち、プラズマ化学反応におけるエネルギー損失という視点において、①ストリーマ放電は各種粒子密度が低く、その衝突頻度が低いため、②グロー様放電に比べて、より小さいこととなる。これらの事実より、パルス電圧による非熱平衡プラズマの形成には、そのダイナミックレンジの大きさ及び損失の小ささという理由から、第一様相である①ストリーマ放電のみによるものが適していると言える。

3.1 1次ストリーマ

ここでは、2.2にて述べている①ストリーマ放電の主現象となる1次ストリーマについて詳言する。図2には、空気を満たした金属製線対平板電極(線径2.0 mm, 線・平板間距離45 mm, 長さ1,000 mm, 平板電極電位GND)の線電極へパルス電圧(印加開始時刻0 ns, 立上り速度90 kV/50 ns, 持続時間150 ns)を印加した際に、電極長さに対する直角方向から撮影されるストリーマ放電様相の経時変化(露光時間5 ns, 撮影範囲幅50 mm)とその時の電極間への放電電流波形を示している。図2より、電圧印加開始より約23 ns後、先ず、線電極近傍へ1次ストリーマが形成され、しばらくの間、その場にて成長する。次に、電圧印加開始より約31 ns後、1次ストリーマがチャンネルを

表1 異なる放電様相における各種粒子のエネルギー。

| 粒子種      | ①ストリーマ放電           | ②グロー様放電            |
|----------|--------------------|--------------------|
| 電子       | 5-10 eV            | 1-2 eV             |
| イオン・中性粒子 | 28 meV<br>(=320 K) | 35 meV<br>(=400 K) |

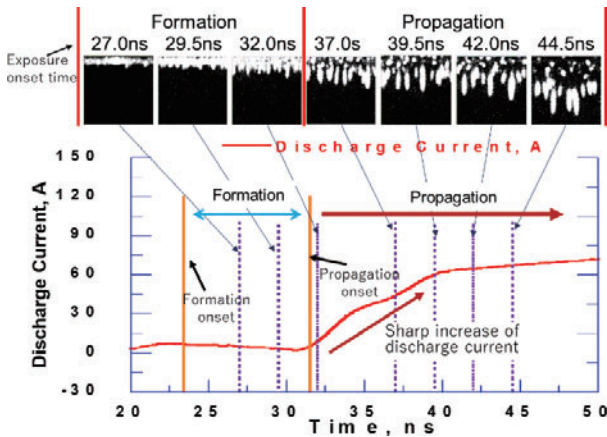


図2 パルス電圧印加時の線対平板電極における1次ストリーマの経時変化。

形成しながら、平板電極へ向けて進展することが確認される。この1次ストリーマの形成・成長及び進展は、Dr. J. Meek によるストリーマ理論にて提唱されており[14]、1次ストリーマの形成する空間電荷電界が外部電界と同等となる際に、その進展が開始されるとなっている。なお、この1次ストリーマの形成・成長様相と進展様相では、放電電流のふるまいも大きく異なり、形成・成長様相では1次ストリーマの単位時間成長率が小さいため、そこへ取り込まれる電子の数が少なく、進展様相ではストリーマヘッドの進展速度が大きくなるため、そこへ取り込まれる電子の数が大きくなることとなる。

3.2 ナノ秒パルス放電

ここでは、高ダイナミックレンジ（高い制御性）及び低熱損失（高いエネルギー効率）という利点を有する1次ストリーマを主体としたストリーマ放電のみの形成方法について述べる。パルス電圧印加時において、ストリーマ放電とグロー様放電の2つの様相は、連続しており、その過渡時間はナノ秒オーダーとなるため、ストリーマ放電のみの形成には、その終了（1次ストリーマの接地極への到達）とともに、如何に速く印加電圧をゼロとするかが重要となる。そのため、ストリーマ放電のみの形成には、ナノ秒での電圧立上り及び立下りを実現できるパルス電源が必要となる。

浪平らは、オゾン生成に代表される非熱平衡プラズマプロセスの高性能化を目的として、2006年、2 ns の立上り及び立下り時間並びに5 ns の持続時間を有するナノ秒パルス電源を開発した[15]。以降、ナノ秒パルス電源による非熱平衡プラズマがストリーマ放電のみで形成されることを実証するとともに、それを「ナノ秒パルス放電」と命名した[16, 17]。現在では、ナノ秒パルス放電によるオゾン生成や窒素酸化物処理のエネルギー効率が、直流コロナ放電や交流誘電体バリア放電など、他の放電法を凌駕することも明らかとなっている[18, 19]。

4. ナノ秒パルス放電の諸特性とその制御

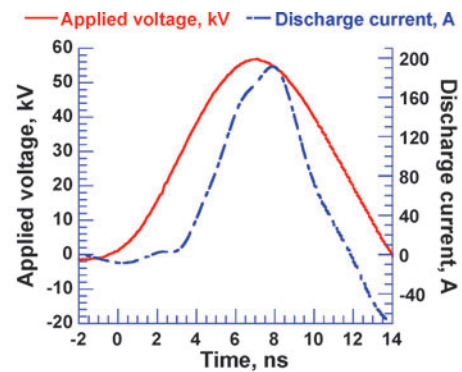
3章で述べたように、グロー様放電を含む一般的なパルス放電に対するストリーマ放電のみのナノ秒パルス放電が

もたらすプラズマ化学反応プロセスへの利点は、「電子エネルギーとイオン・中性粒子エネルギーの非熱平衡度の高さ」及び「熱損失の小ささ」である。

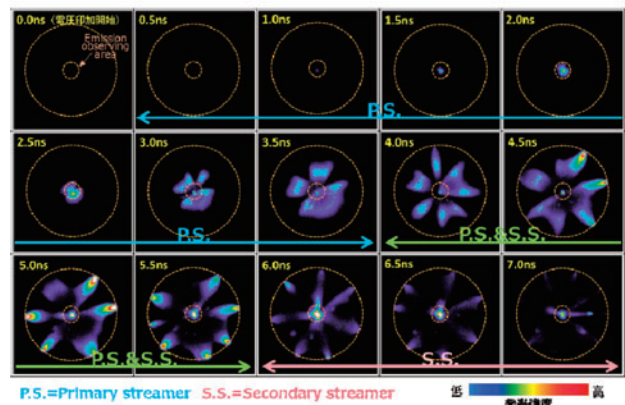
これまでのナノ秒パルス放電に関する研究成果としては、グロー様放電に起因する大きな熱損失を排したことによる、各種プラズマプロセスのエネルギー効率の改善が多くを占めていた[16-19]が、ここ数年、もう一つの利点である粒子間エネルギーの非熱平衡度の高さへ主眼を置いた研究もなされており、ここではその一部を紹介する。

4.1 放電の様相

図3には、空気を満たした金属製同軸円筒電極（内径1.0 mm, 外径60 mm, 長さ15 mm, 外部電極電位GND）へナノ秒パルス放電を形成した際の内部電極への印加電圧及び電極間の放電電流波形（図3(a)）及び電極軸方向から撮影される放電様相の経時変化（図3(b), 露光時間420 ps）を示している[20]。図3(a)より、立上り速度55 kV/6 ns 並びに最大値55 kV, 時間幅8 ns のナノ秒パルス電圧（印加開始時刻0 ns）が電極へ印加されていることがわかる。図3(b)より、ナノ秒パルス放電においても、3.1と同様に、電圧印加開始より1 ns 後、1次ストリーマが内部線電極近傍へ形成され、成長を始めている。その後、電圧印加開始より2.5-3.0 ns 後、1次ストリーマが内部線電極から離れて外部円筒電極へ向けて進展を開始し、4.0-4.5 ns 後には外部円筒電極へ到達している。以降、1次ストリーマは経時とともに消失している。また、電圧印加開始より4.0 ns 後の撮影像における線電極近傍には、既



(a) 印加電圧及び放電電流



(b) 放電様相

図3 ナノ秒パルス放電の形成及びその観測。

に、2次ストリーマが形成されており、それは1次ストリーマの外部円筒電極への到達以降、進展を開始し、その2.5 ns 後（電圧印加開始より7.0 ns 後）には消失している。なお、1次ストリーマに伴う放電電流についても、3.1にて述べたように、形成・成長時（電圧印加開始より1.0から3.0 nsまで）には小さく、その後の進展とともに大きくなっていることがわかる。

#### 4.2 1次・2次ストリーマの換算電界

図4には、図3と同様の条件にて形成したナノ秒パルス放電時の内部線電極近傍（線電極を中心とした半径5 mmの円形領域、Emission observing area）からの発光を分光ストリークカメラにて撮影した像を示す[20]。図4における縦軸及び横軸は、それぞれが波長及び時間を示しており、本像より、それぞれの観測波長における発光強度の経時変化を把握することができる。図4より、ナノ秒パルス放電からの主な発光は、窒素分子(N<sub>2</sub>)の2nd Positive Band (2PB, 313, 316, 337, 353, 357, 371, 375, 380, 394, 399, 406 nm) 及び窒素分子イオン(N<sub>2</sub><sup>+</sup>)の1st Negative Band (1NB, 391 nm) からの輻射光であることが確認できる。このN<sub>2</sub>及びN<sub>2</sub><sup>+</sup>からの輻射光強度の比を利用して、その観測領域の換算電界(Reduced electric field, E/n)を推定することができる[21, 22]。図5には、N<sub>2</sub>-2PBの394 nm及びN<sub>2</sub><sup>+</sup>-1NBの391 nmの輻射光強度より算出されるナノ秒パルス放電時の内部線電極近傍における換算電界の経時推移を示す。なお、図5に関する説明の前に、輻射光観測領域におけるナノ秒パルス放電の様相について考える。図3(b)より、内部電極近傍には、電圧印加開始より2.5-3.0 ns 後までは1次ストリーマ先端(ストリーマヘッド)が、その後、4.0 ns 後までは1次ストリーマチャンネルが、以降、2次ストリーマが存在していることが確認できる。これを踏まえると、図5より、1次ストリーマ先端、即ちストリーマヘッド内に形成される換算電界は最大で約800 Td(平均710 Td)と1次ストリーマチャンネル及び2次ストリーマ内のもの(約330-340 Td)と比較して非常に

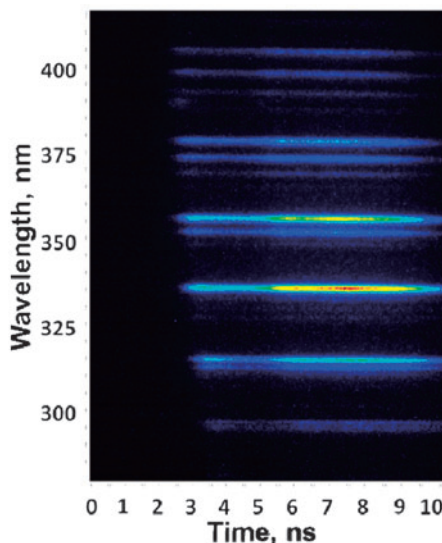


図4 ナノ秒パルス放電発光の分光ストリーク像。

大きな電界となっている。また、本手法で算出される換算電界は、観測領域全体の平均値であり、局所的に存在するストリーマヘッドの場合に、その真の換算電界は約1.4倍となることが報告されている[23]。そのため、ナノ秒パルス放電における1次ストリーマ先端の実際の換算電界は約1,200 Tdと行うことができる。

なお、表2には、市販されているパルス電源（電圧立上り数十 ns）及びナノ秒パルス電源による1次ストリーマが有する換算電界を示す[24, 25]。表2より、ナノ秒パルス放電における1次ストリーマは、汎用パルス放電と比較して、ストリーマヘッドで約1.5倍、そのチャンネルで約10倍の換算電界を有することとなる。これより、2次ストリーマが主となる汎用パルス放電が1-2 eVの低エネルギー電子を多く含有しているのに対し、1次ストリーマが主となるナノ秒パルス放電は19 eV（二項近似ボルツマン方程式解析ソフトウェア bolsig+にて算出した1200 Td時の平均電子エネルギー）の高エネルギー電子を多量に有することが示唆される。

#### 4.3 オゾン生成への適用性

ここでは、プラズマ化学反応によるオゾン生成について考える。酸素を原料としたオゾン生成の場合、式(1)-(3)に示される高エネルギー電子による酸素分子の解離反応(式(1)、式(2))及び酸素原子と酸素分子との結合反応(式(3))によりオゾン分子が生成される。一方、同時に、式(4)に示される高エネルギー電子によるオゾン分子の解離反応も起こる。そのため、プラズマ化学反応によるオゾン生成は、式(1)、(2)、(4)に示される高エネルギー電子による解離反応のつり合いに依存することとなり、式(1)、(2)、(4)、それぞれの衝突断面積は、電子エネルギー20-30 eV、10-15 eV、2-3 eVにて最大とな

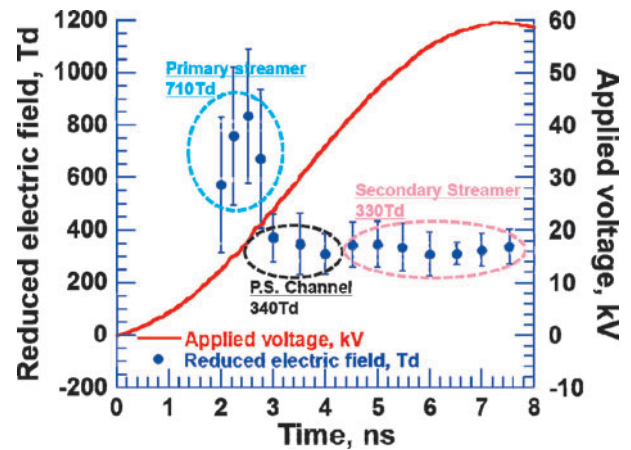
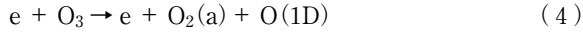
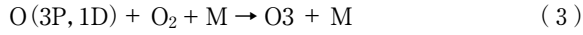
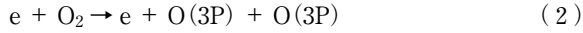
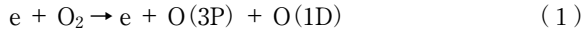


図5 ナノ秒パルス放電中換算電界の経時推移及びその印加電圧。

表2 1次ストリーマ及びそのチャンネル内に形成される換算電界の印加電圧立上り速度依存性。

| パルス電源        | 汎用[24, 25] | ナノ秒       |            |
|--------------|------------|-----------|------------|
| 電圧立上り速度      | 0.02 kV/ns | 0.5 kV/ns | 10.0 kV/ns |
| 1次ストリーマ      | 700 Td     | 800 Td    | 1,200 Td   |
| 1次ストリーマチャンネル | -          | 30-50 Td  | 330-340 Td |

る[26]. よって, 高エネルギー効率でのオゾン生成には, 如何に数 eV の電子生成を抑制し, 十数 eV の電子生成を促進するかが肝要と言える[26]. これより, 汎用パルス放電に対して, 高いエネルギーの電子を多く含有するナノ秒パルス放電は, オゾン生成に適した放電と言える.



4.4 電極形状による放電の制御

図6には, 空気を満たした金属製同軸円筒電極 (内径 0.2 mm or 2.0 mm, 外径 60 mm, 長さ 15 mm, 外部電極電位 GND) へナノ秒パルス放電を形成した際の内部電極への印加電圧及び電極間の放電電流波形 (図6 (a) 及び電極軸方向から撮影される放電様相の経時変化 (図6 (b) (c), 露光時間約 420 ps) を示している[27]. 図6 (a) より, 立上り速度 55 kV/6 ns 並びに最大値 55 kV, 時間幅 8 ns のナノ秒パルス電圧 (印加開始時刻 0 ns) が電極へ印加されていることがわかる. 図6 (b) 及び図6 (c) より, 内径 0.2 mm (b) 及び 2.0 mm (c) の両同軸円筒電極において, 同様のナノ秒パルス電圧が印加されているにもかかわらず, 全く異なる放電様相となっていることがわかる. 0.2 mm の細内径において, 電圧印加開始より約 2.4 ns 後に, 1 次ストリーマが密に形成され, 以降, それが集団的に, かつ円環状に成長し, 約 5.2 ns 後, 外部電極へ向けて速度 6.0 mm/ns にて進展している. また, 2.0 mm の太内径において, 電圧

印加開始より 3.6 ns 後に, 1 次ストリーマが疎に形成され, 以降, それが個々に成長し, 約 4.8 ns 後, 外部電極へ向けて速度 8.9 mm/ns にて進展している. なお, 一般的に, 1 次ストリーマの進展速度とその内部換算電界は相関があることが知られており[28, 29], この場合, 太径の内部電極を有する同軸円筒電極におけるナノ秒パルス放電がより大きな換算電界を有していると言える. これより, ナノ秒パルス放電を形成する電極形状の変更により, 非熱平衡プラズマの空間占積率やその内部換算電界などの制御が可能であることがわかる. また, その他にも, 電極内の雰囲気気体やその圧力, 並びにナノ秒パルス電源の立上り速度や直流重畳化などにて, 形成される非熱平衡プラズマの特性を制御することが可能であるが, 今回は, 紙面の都合上割愛する.

5. まとめ

本稿では, 非熱平衡プラズマの形成制御及びそれによるプラズマ化学反応のエネルギー効率に優れた技術として, ナノ秒パルス放電について言及した. その大きな特徴として, 直流コロナ放電や誘電体バリア放電, 汎用パルス放電が数 eV のエネルギーを有する電子を多量に生成することに対し, ナノ秒パルス放電は十数 eV のエネルギーを有する電子を主に生成することができることが挙げられる. 加えて, そのエネルギーをパルス電圧の立上り速度や最大値, 並びに, 放電電極の形状や雰囲気気体などにより制御できることも挙げられる. そのため, ナノ秒パルス放電は, 応用先に合わせた特性を有する非熱平衡プラズマを生成する技術と言うことができ, 今後, その展開先の拡大が大いに期待される.

参考文献

[1] 西口公之: 溶接学会誌 40, 1206 (1971).  
 [2] 渡辺隆行: プラズマ・核融合学会誌 95, 27 (2019).  
 [3] 三重野 哲: プラズマ・核融合学会誌 94, 516 (2018).  
 [4] W.F.L.M. Hoeben *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. 45, 055202 (2012).  
 [5] F.J.C.M. Beckers *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 41, 2920 (2013).  
 [6] F. Fukawa *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 36, 2592 (2008).  
 [7] S. Samukawa *et al.*, J. Phys. D, Appl. Phys. 45, 253001 (2012).  
 [8] 宗宮 功: オゾンハンドブック (サンユー書房, 2004).  
 [9] J.S. Clements *et al.*, IEEE Trans. Ind. Appl. 25, 62 (1989).  
 [10] S. Kodama *et al.*, Int., J. Plasma Environ. Sci. Technol. 11, d138 (2018).  
 [11] K. Yoshinaga *et al.*, Acta Physica Polonica A 115, 1050 (2009).  
 [12] 金澤誠司: プラズマ・核融合学会誌 84, 348 (2008).  
 [13] S. Okada *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 08JB06-1-5 (2011).  
 [14] J. Meek, Phys. Rev. 57, 722 (1940).  
 [15] T. Namihira *et al.*, "Propagation velocity of ns pulsed streamer discharge in atmospheric air", 1st Euro-Asian Pulsed Power Conference, Chengdu, China, Thu-O 20, Vol.2, pp.574 (2006).  
 [16] 浪平隆男 他: 電気学会論文誌 A 129, 7 (2009).  
 [17] D. Wang *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 38, 746 (2010).

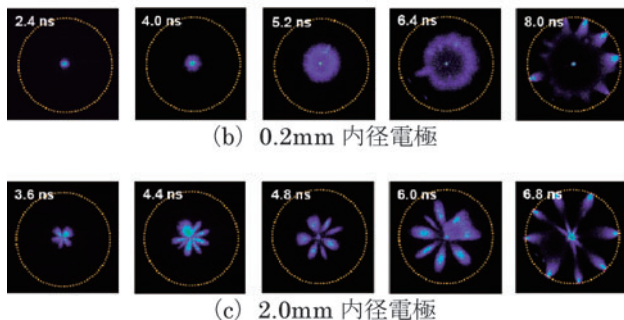
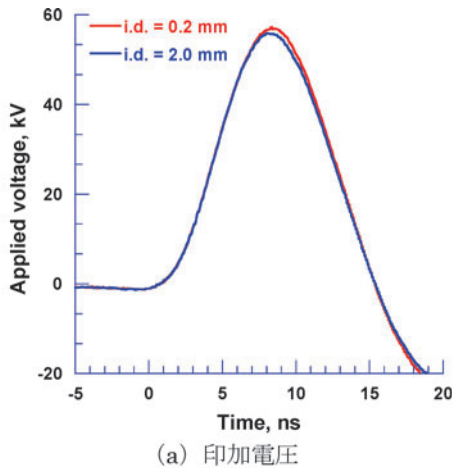



図6 同軸円筒内ナノ秒パルス放電の異なる内部線電極径による形成.

- [18] D. Wang *et al.*, J. Adv. Oxid. Technol. **13**, 71 (2010).  
[19] T. Matsumoto *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **38**, 2639 (2010).  
[20] T. Ryu *et al.*, IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference 2019, 2F2 (2019).  
[21] P. Paris *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **38**, 3894 (2005).  
[22] 西嶋喜代人, 常安暢: 電学論 A **111**, 221 (1991).  
[23] Z. Bonaventura *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. **20**, 035012 (2011).  
[24] Y. Kikuchi *et al.*, IEEJ Trans. Fund. Mater. **136**, 378 (2016).  
[25] A. Komuro *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. **2**, 045002 (2013).  
[26] 葛本昌樹: プラズマ・核融合学会誌 **74**, 1144 (1998).  
[27] 龍輝優 他: 電気学会論文誌 A **139**, 445 (2019).  
[28] F. Tochikubo and H. Arai, Jpn. J. Appl. Phys. **41**, 844 (2002).  
[29] A. Komuro *et al.*, J. Phys. D, Appl. Phys. **48**, 215203 (2015).



なみ ひら たか お  
浪平隆男

熊本大学パルスパワー科学研究所准教授。  
「ナノ秒パルス放電プラズマによる大気・  
水・土の浄化」及び「その産業実用化」に  
関する研究に従事している。現在、愛妻及  
び2人の愛娘、愛犬に嫌われないよう、肉体改良に奮闘中!

おう と えん  
王斗艶



りゅう てる まさ  
龍輝優

2019年4月熊本大学自然科学教育部工学専  
攻博士後期課程入学, 現在に至る。修士  
(工学)。現在, 「高速カメラを用いたナノ  
秒パルスストリーマの物理特性把握」に関  
する研究に従事している。ここ数年, めでたく甥っ子らが4  
人誕生し, 叔父として溺愛。しかし, 遊んだ際はちびっ子た  
ちの無尽蔵のスタミナでヘロヘロに。来年度より, 格好があ  
つ叔父をめざしキックボクシングに通うことを固く決意。