

ナノ秒パルス放電の特性およびその制御

Characteristics of Nanosecond Pulsed Discharge and its Control

龍輝優, 王斗艶, 浪平隆男

Terumasa Ryu, Douyan Wang, and Takao Namihira

熊本大学

Kumamoto University

1. はじめに

非熱平衡プラズマの一つであるパルス放電プラズマは、オゾン生成や排ガス処理等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期待されている。なかでも、近年、本研究Gr.ではパルス幅5 ns, 立ち上(下)がり時間2 nsの極短パルス高電圧を発生可能なナノ秒パルス電源を開発した。その放電主形態はストリーマヘッドの電極間進展(1次ストリーマ)であるため、熱損失が小さく、オゾン生成などで特に高いエネルギー効率を達成している^[1]。しかし、依然としてその放電の実進展挙動は不明瞭な点が多く、放電基礎特性の解明は更なる処理性能の向上及び処理対象の拡大をもたらす。

よって本稿では、ナノ秒パルス放電プラズマの実現象を明らかにすることを目的に、ICCDカメラ、分光器、ストリークカメラなどの観測機器を併用して得られた、進展様相(形状、速度)や分光結果から導出した温度(電子温度、ガス温度)などを網羅的に示すとともに、それらを律する制御因子について議論する。なお、本稿では紙面の都合上、その一部を紹介する。

2. 実験方法

図1にナノ秒パルス放電観測システムの概略図を示す。ナノ秒パルス電源と観測システムは、

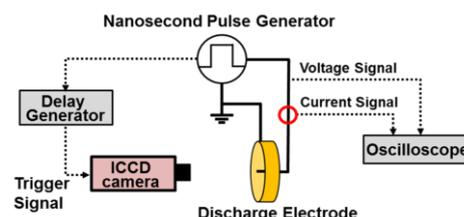


図1. 実験概略図

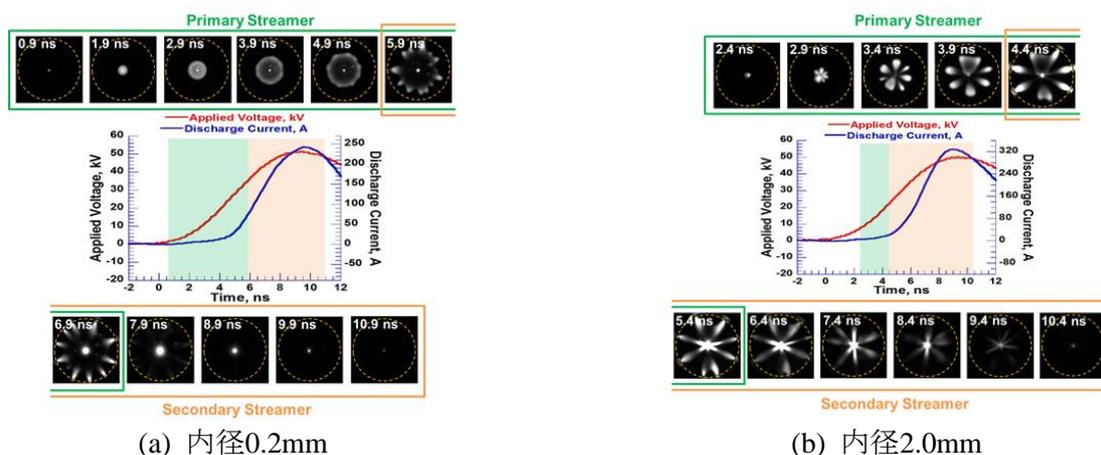
ディレイジェネレータを介してナノ秒以下の精度にて時間同期を行った。放電電極は同軸円筒型とし、内部電極径や N_2/O_2 混合比などをパラメータとして、ストリーマヘッドの進展形状や速度に着目した。

次に分光ストリークカメラを用いて、ストリーマの経時スペクトルを観測し、窒素分子強度比法^[2]を用いて換算電界(=E/N, E; Electric field, N; Gas density)導出した。ここでは、電圧立ち上り速度をパラメータとした。

3. 実験結果及び考察

3.1 進展形状・進展速度

図2に、各電極径(内径1.0mmは割愛)におけるストリーマヘッドをICCDカメラで撮影した進展画像を示す。各画像の左上の時刻は、電圧印加開始時刻を0 nsとした場合のICCDカメラ



(a) 内径0.2mm

(b) 内径2.0mm

図2. 進展画像^[3]

の露光開始時刻である。図2より内径が太くなるにつれて、進展開始時のストリーマヘッドの形状がより明瞭な球状に変化していることが分かる。これは、内部線電極径を太くした場合、ストリーマヘッドの形成時に内部線電極に対して、より高い電圧が印加されている状態、即ち、ストリーマヘッドが高電界を有した状態で進展を開始するためであり、ストリーマヘッド同士がより強く反発し合うことに起因していると考えられる。表1より、ストリーマヘッドの電極間における平均進展速度は、内径0.2 mmでは4.8 mm/ns、1.0 mmでは9.0 mm/ns、2.0 mmでは12.5 mm/nsとなり、内部線電極径が太くなるにつれ著しく増加した。ここで、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いる^[4]。それ故に、ここにおいては、進展速度の増加は多量の電子なだれをより高速に引き寄せる、即ち、より高いエネルギーを有する電子の生成に直結するものと予想される。よって、内部線電極径を太くした場合は、高エネルギー電子を有するストリーマヘッドの形成に適すると考えられる。

続いて、表2には、N₂/O₂混合比を変化させた場合の1次ストリーマの進展速度の結果を示している。表2より、ストリーマヘッドの電極間における平均進展速度はN₂/O₂混合比が等量に近づく程、上昇していることが確認された。これはN₂/O₂雰囲気下では、ストリーマヘッドが有する高電界領域におけるN₂由来活性種からの紫外線放射に伴いO₂の光電離による自由電子が次々と発生する。故に、N₂/O₂が等量に近づく程、N₂由来活性種からの紫外線放射、及びそれに伴うO₂の光電離のバランスが取れたため、ストリーマヘッドの有する電界強度の増加、即ち、その進展速度の増加に直結したものと考えられる^[5]

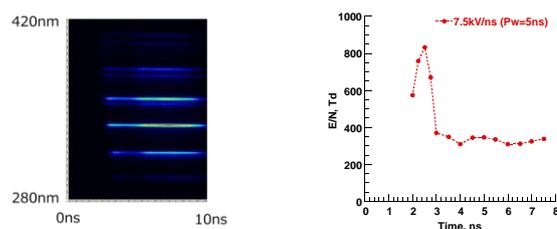
以上の結果より、ストリーマの進展速度 (=

表1. 内部電極径変化

Inner diameter, mm	0.2	1.0	2.0
Formation time, ns	0.6	1.4	2.0
Applied voltage, kV	2.6	5.5	7.2
Average velocity of streamer head, mm/ns	4.8	9.0	12.5

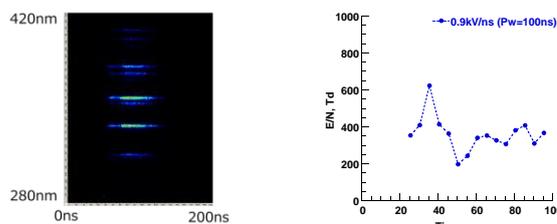
表2. N₂/O₂混合比変化

O ₂ ratio, %	20	40	60	80
Formation time, ns	1.0	0.6	1.1	0.9
Applied voltage, kV	3.3	1.9	4.2	2.8
Average propagation velocity, mm/ns	5.9	6.5	7.1	5.8



(a)分光ストリーク像 (b)経時換算電界

図3. ナノ秒パルス放電 (Vr=7.5kV/ns)



(a)分光ストリーク像 (b)経時換算電界

図4. 一般的なパルス放電 (Vr=0.9kV/ns)

電子エネルギー状態)は電極形状や雰囲気などの条件によって高度制御できるといえる。

3.2 換算電界 (=E/N)

図3及び図4には、電圧立ち上り速度 (Vr) の異なる2種の電源 ((a)7.5kV/ns, 5ns幅, 1000回積算(b)0.9kV/ns, 100幅, 500回積算; 電圧ピークは共に55kV程度)での中心電極近傍におけるE/Nの推移を示している。なお、ファイバーのフォーカスエリアは内部電極近傍直径10mmである。この結果、Vr=7.5kV/nsの条件では最大E/N=832Td, Vr =0.9kV/nsの条件では最大E/N=623Tdを取った。これは、Vrが大きいく程そのストリーマヘッドはより高電界を有した状態で形成及び進展することを示しており、先行研究のシミュレーション結果^[5]を支持している。このことは、Vrが一次ストリーマの電子エネルギー帯を高度制御できる因子の一つであることを意味し、所望の活性種を効率よく発生できるVrが存在することを示唆している。

参考文献

- [1] 浪平隆男 他, 電気学会論文誌A, 129(1), 7-14 (2009)
- [2] P. Paris et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38**, 3894-3899 (2005)
- [3] 龍輝優 他, 電気学会論文誌A, 139(10), 445-452 (2019)
- [4] Komuro et al, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 48(21), 215203 (2015)
- [5] 龍輝優 他, 静電気学会誌, 43(1), 37-42 (2019)
- [6] A. Komuro et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* 54 364004(2021)