

大気圧プラズマジェットの電圧・ガス流量依存性

Dependence of atmospheric pressure plasma jet on applied voltage and gas-flow rate

○佐原純輝¹, 加藤達也¹, 宮本靖孝², 高津幹夫², 浅井朋彦³, 小口治久⁴, 齋藤孝輔⁵, 藤原恭子⁵, 福田昇⁵
*J. Sahara¹, T. Kato¹, Y. Miyamoto², M. Takatsu², T. Asai³, H. Koguchi⁴, K. Saito⁵, K. Fujiwara⁵, N. Fukuda⁵

Abstract: An atmospheric-pressure plasma jet (APPJ), which is expected as an innovative tool in material processing and biomedicine, has several unknown mechanisms such as discharge, reaction to organism, and so forth. We developed the device that generates an APPJ and can control applied voltage and gas-flow rate, and investigated the dependence of APPJ on applied voltage and gas-flow rate by using the device. In this work, we investigate the influence of applied voltage and gas-flow rate on the emission spectrum and the length of an APPJ through the measuring them by cameras. Therefore, intensities of N_2^+ and He emission lines peaks at the flow rate where the length of APPJ is maximum. This fact seems to indicate that N_2^+ is important for physical characteristics of an APPJ.

1. 背景および目的

真空容器を必要としない非熱平衡大気圧プラズマは、低温でかつ化学的活性が高いといった特徴をもち、材料プロセッシングや医療分野における革新的な応用技術として期待されている。大気圧プラズマを生成する装置は多く開発されているが、装置構造が簡単な大気圧プラズマジェット (Atmospheric-pressure plasma jet: APPJ) は、小型でかつ任意の点に照射出来る為、応用分野での注目が特に高い。しかしながら、その放電機構や反応過程の詳細は十分に理解されておらず、現在世界中で基礎および応用に関する研究がされている^[1,2]。

本研究の目標は、APPJ の物理的機構の解明である。今回は、APPJ 生成における印加電圧およびガス流量が生成されるプラズマの性質にどのような影響を及ぼすかを、APPJ の放射光および長さを指標に検証した。

2. 実験装置

本実験で用いた APPJ 生成装置および計測系の概略図を Figure 1 に示す。ガスが通る石英管は長さ 80 mm, 内径 0.6 mm, 外径 1.0 mm で、長さ 5 mm の真鍮製の接地電極および印加電極を被せている。接地電極を石英管先端から 5 mm 離して配置し、接地電極-印加電極間距離を 5 mm に構成した。これらの電極は沿面放電を防ぐ為に絶縁体で覆われている。電極には PC で出力電圧を制御された 33 kHz の高電圧正弦波 (~4.1 kV) が印加されている。APPJ の生成には大気圧下での放電維持が容易なヘリウムガスを使用し、導入するガス流量の調節はマスフローコントローラを介して PC で行われる。

石英管の開口部には石英製の光ファイバーを配置し、

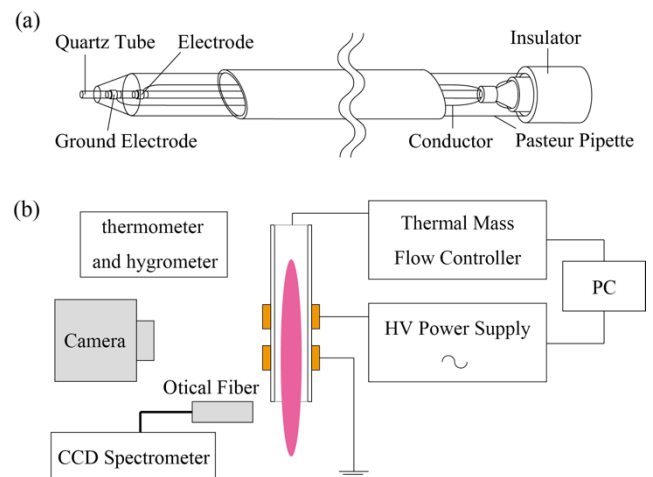


Figure 1. Schematic of (a) the device for APPJ generation and (b) experimental setup.

分光器(分解能 0.957 nm, 波長領域 200 nm ~ 800 nm, 積分時間 1500 ms) を用いて生成された APPJ の分光計測を行った。カメラ(波長領域 300 nm ~ 1100 nm, 露光時間 1/30 s) は下流領域における APPJ の長さ(発光領域)を記録する為に使用した (Figure 2) 。また、大気圧プラズマの性質は湿度に大きく影響する為、実験室に温

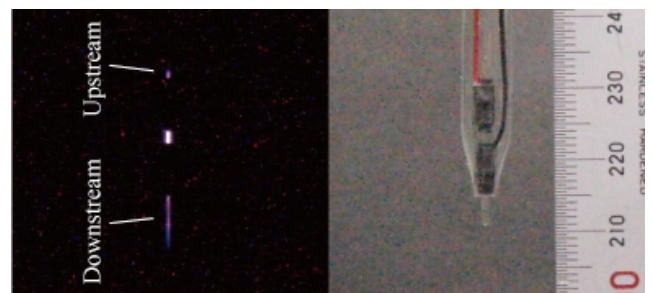


Figure 2. A picture of measuring the length of APPJ.

1: 日大理工・学部・物理 2: 日大理工・院(前)・物理 3: 日大理工・教員・物理 4: 産業技術総合研究所 5: 日大医学部

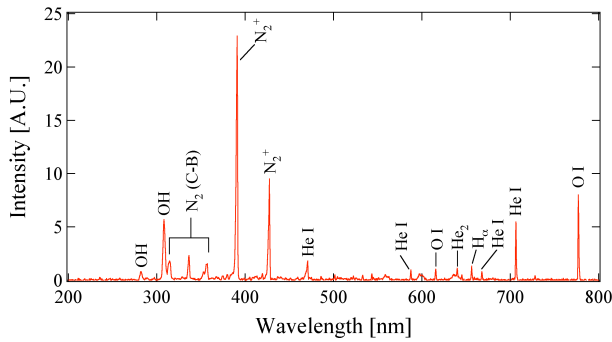


Figure 3. A typical emission spectrum of APPJ in the case of 1.6 L/min flow rate and 3.7 kV applied voltage.

湿度計を設置した. 本研究データは相対湿度 60 %, 室温 24 °C の条件下で計測されたものである.

3. 実験結果

本実験装置で生成した APPJ の典型的な分光結果を Figure 3 に示す. N_2^+ の発光が極めて強く支配的であることがわかる. また表面改質や殺菌などの応用において重要な役割を担うとされる O および OH の存在が確認出来る.

Figure 4 に示すのはガス流量 0.3–2.5 L/min における APPJ の長さとの代表的なスペクトルの強度である. O および OH の発光はガス流量に関して顕著な依存性は確認出来ず, また長さとの関連性はあまり見られない. 一方, APPJ が最長となる流量において, N_2^+ (391 nm, 428 nm) および He I (707 nm) の発光が最大となることが確認できる. 同様の結果が M. Laroussi らによって報告されており^[3], これらの粒子の発光と APPJ の長さとの関係性が示唆される.

N_2^+ (391 nm) および He I (707 nm) の関係を調べるため, 異なる印加電圧下での N_2^+ (391 nm) および He I (707 nm) の発光強度の流量依存性を調べた (Figure 5). N_2^+ の多くは APPJ 中に多数存在する準安定準位のヘリウム He^* とのペニングイオン化 ($He^* + N_2 \rightarrow He +$

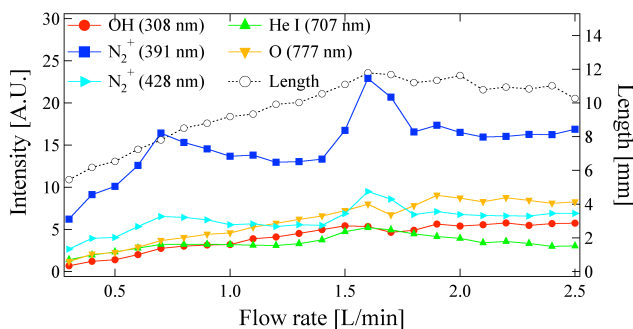


Figure 4. The influence of flow rates on intensities of chosen emission lines. Applied voltage $V = 3.7$ kV.

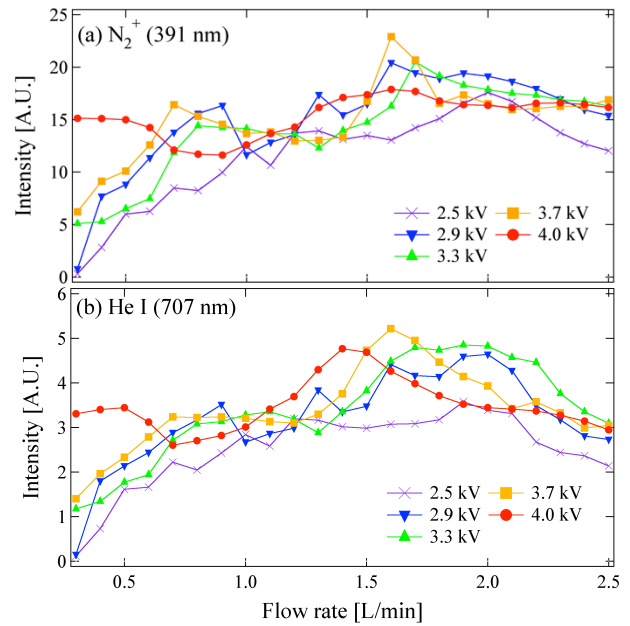


Figure 5. Dependency of (a) N_2^+ and (b) He I emission on a flow rate in different applied voltages.

$N_2^+ + e$) によって生成される^[4]. また, He I (707 nm) の発光は電子遷移 (3^3S-2^3P) によるものであるが, N_2^+ と He I のガス流量・電圧依存性の類似性 (Figure 5), および He^* (2^3S) のエネルギー準位 (19.8 eV) と He (3^3S) のエネルギー準位 (22.7 eV) が近いことから, この発光も He^* の密度に影響を受けると考えられる.

4. まとめ

印加電圧, ガス流量を変化させることで, APPJ の長さおよび発光の様子に違いが見られた. 特に N_2^+ と長さには相関があることが示唆された

5. 謝辞

本研究の一部は, 「日本大学 N. 研究プロジェクト」として実施されたものである.

6. 参考文献

[1] D. J. jin et al., “Influence of gas-flow Reynolds number on a plasma column in a glass tube”, *Phys. Plasma*, Vol. 20, 083513, 2013

[2] 北野勝久他: 「プラズマジェットを用いた殺菌メカニズムと消毒応用」, *静電気学会誌*, Vol. 37, No. 3, pp. 112-116, 2013

[3] N. Mericam-Bourdet et al., “Experimental investigation of plasma bullets”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 42, 055207, 2009.

[4] Wen-Chao Zhu et al., “Characteristics of atmospheric pressure plasma jets emerging into ambient air and helium”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 42, 202002, 2009.