

大気圧 LF プラズマジェットへの予備電離法の適用 Application of pre-ionization technique to atmospheric-pressure LF plasma jet

○笠井芳幸¹, 田中郁行², 小林大地², 浅井朋彦³, 佐原純輝⁴, 徳永智彦⁵, 藤原恭子⁵, 小口治久⁶
*Y. Kasai¹, F. Tanaka², D. Kobayashi², J. Sahara³, T. Asai⁴, T. Tokunaga⁵, K. Fujiwara⁵, H. Koguchi⁶

Abstract: In application study of atmospheric-pressure LF plasma jet in medical and material research, reproducibility of plasma is one of the most important issues of development. Currently, the repeatability of irradiation effect is not sufficient and kind of gas species are limited because of ionization properties. In order to solve those problems, pre-ionization (PI) techniques employing dielectric barrier discharge (DBD) has been applied to the LF plasma jet system

1. 背景・目的

大気圧 LF プラズマジェット (以下, LF ジェット) (Figure 1.) は, 真空容器を必要とせず, 低温で化学的活性が高いために医療や材料など様々な分野へ応用され研究が進められている^{[1] [2]}. しかし, プラズマの照射効果の再現性の低さや, プラズマ生成に使用できるガス種が制限されることなどの課題がある. 特に医療分野では LF ジェットのガスフローにより培養液の pH 濃度が変化してしまう報告もある. ガス流量を小さくすることでこの問題は解決するが, 低圧で安定したプラズマを生成しようとする印加電圧を上げることとなり, LF ジェットの低温特性が失われたり, 装置内でのアーキングの発生などの問題が生じる. また, 材料の分野では, より安価な Ar を安定にしようできることで, コストを抑えることができるほか, 材料の表面改質に寄与するガスを積極的に導入することが可能となり応用の幅が広がるのが期待される. そこで, 本研究では, LF ジェットの上流に誘電体バリア放電 (以下, DBD) を用いた予備電離法を適用することで, ガス流量の低減, 動作ガスの選択性の向上を試みた^{[3] [4]}.



Figure 1. A picture of LF plasma jet

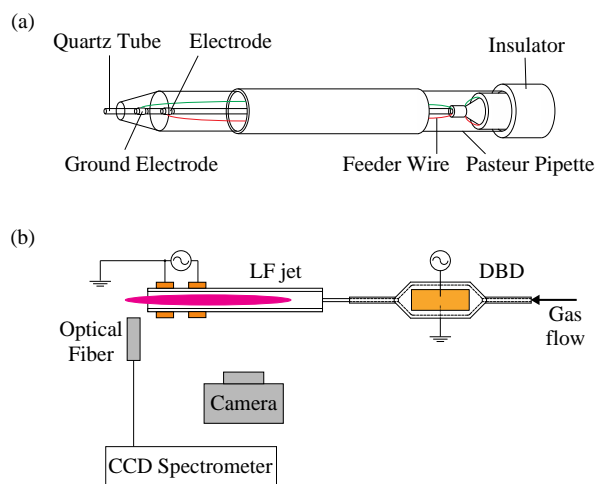


Figure 2. Schematic of (a) the device for LF jet generation and (b) experimental set up for pre-ionization

2. 実験装置

本実験で用いた LF ジェット生成装置および計測系の概略図を Figure 1 に示す. ガスを通る石英管は長さ 80mm, 内径 0.6mm, 外径 1.0mm で, 長さ 5mm の真鍮製の接地電極および印加電極を被せている. 接地電極と印加電極の距離は 5mm としている. さらに, 予備電離用の電極として DBD を用いており, その電極は LF ジェットの印加電極より上流に 250mm 離れたところに位置している. LF ジェットと DBD の電極にはそれぞれ 20kHz の高電圧正弦波 ($\sim 12\text{kV}$) が印加されており, それぞれ別々に制御が可能である. また, プラズマの生成には He, Ar, Ar+O₂ (1%), の 3 種を使用する. なお, 導入するガス量はマスフローメーターを用いて制御している.

石英管の開口部には石英製の光ファイバーを配置し, 分光器 (分解能 0.957nm, 波長領域 200nm~800nm) を用いて生成された LF ジェットの分光計測を行った.

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 : ウシオ電機株式会社
5 : 産業総合研究所 6 日大医学部

カメラは LF ジェットの長さ（発光領域）を記録するために使用している。

3. 実験結果

Table 1. は予備電離の有無，ガス種による LF ジェットの生成可否をまとめたものである。この時の LF ジェット，DBD の初期印加電圧は 11kV，ガス流量は 3.00L/min である。△は，印加電圧を上げることでプラ

Table 1. Pre-ionization effecting on gas of LF jet

Gas	w/o PI	w/ PI
He	○	○
Ar	△	○
Ar + O ₂ (1%)	×	△

ズマが生成可能であったことを意味している。この表より，Ar 系のガスでは予備電離なしではプラズマを生成することが困難であったが，予備電離によりその生成を容易にすることができている。また，Ar と O₂(1%) の混合ガスでプラズマの生成が可能になったことにより，酸素系ラジカルの生成量の増加が見込まれ，材料分野での照射効果の向上が期待される。

Figure 3. は，動作ガス He，ガス流量 0.5~3.0 L/min における予備電離の有無による LF ジェットの生成可能電圧の変化を示した。予備電離の効果として LF ジェットの印加電圧を下げる事ができていることが確認できる。他の動作ガスでも同様の傾向が得られることが予測される。また，低流量でも安定してプラズマを生成することができていることが確認された。

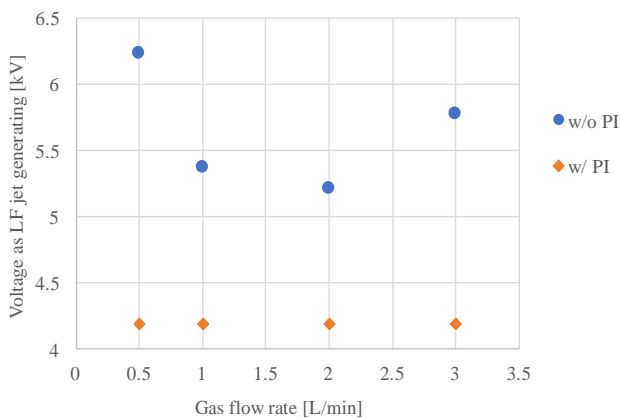


Figure 3. Dependency of pre-ionization on the discharge voltage of LF jet (Gas: He)

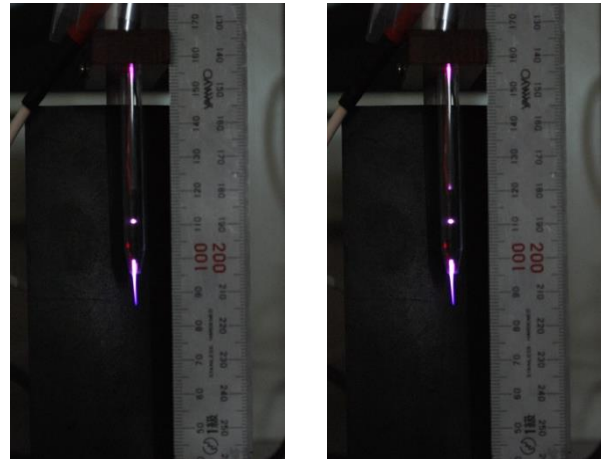


Figure 4. Pictures of LF jet plasma with right and without left PI

(LF : 6kV, DBD : 9kV, Gas flow rate : 3.0 L/min)

予備電離の有無による LF ジェットの発光の様子を Figure 4. に示す。予備電離ありのプラズマは上流部の発光量が増えていることが確認できる。このことから予備電離によりプラズマの生成量が増加していることが期待される。

4. まとめ、今後の展望

DBD による予備電離により，LF ジェットのガス選択性の向上，ガス流量の低減，印加電圧の低減，プラズマ生成量の増加が確認された。現在は，生成されたプラズマを定量的に評価するために分光による電子密度を行なっている。今後は，それらのプラズマの定量的な比較を行い予備電離の最適化を行っていく。

また，予備電離システムの評価終了後，医療，材料分野での照射対象に LF ジェットを適用し，予備電離による照射効果の違いを検討する計画である。

5. 参考文献

- [1] 佐原純輝：「非熱平衡大気圧プラズマジェットの開発とその応用」，日本大学院理工学研究科 修士論文，2015
- [2] 秋元郁哉，岡田真実，田中郁行，菱田大輝，佐原純輝，平塚傑工，小口治久，浅井朋彦：「非熱平衡大気圧プラズマによる DLC 除膜に関する研究」
- [3] 日本学術振興会プラズマ材料科学第 153 委員会：「大気圧プラズマ基礎と応用」，オーム社，2009
- [4] 北野勝久，浜口智志：「低周波大気圧マイクロプラズマジェット」，応用物理学会誌，Vol.77. No. 4, 2008