

International Training Program  
アメリカ テキサス大学ダラス校 派遣報告

東京工業大学総合理工学研究科創造エネルギー専攻  
氏名 李 鉀

近年、大気圧下におけるプラズマジェット (APPJ) は、簡単な構造で、専用の真空排気系を必要としないこと、および生物医学処理のようなアプリケーションの可能性があることから、新たなプラズマ技術として注目されている。ほとんどの APPJs は不活性ガスのみか反応ガスも含めた混合物ガスを使用する。例えば、多くの研究者が化学的なラジカルを発生させるため、わずかな反応ガスを混入させたヘリウムまたはアルゴンでプラズマを生成している。その方法では、不安定性、特にグロー放電からアークへの変遷を避けることができる。

しかし、経済的な観点から、窒素や空気のようにそれほど高価でないガスを使用することが望ましい。最近、Kolb *et al* [3] は、医療への応用を目指して、マイクロホロカソードを用いた大気圧下約 2cm に達するプラズマジェットを開発した。Hong と Uhm [4-8] は医用材料を処理するための装置を設計した。その装置では、窒素か空気のどちらかを使用して長さ 2cm 以上のプラズマプルームを生成することができる。

大気圧でグロープラズマプルームを生成する場合に重要となることは、グロー放電からアークへの変遷を避けることである。大気圧下ではグロー放電が容易にアークなる。この問題は、熱または電氣的な不安定性を抑制することで解決できる。また、放電域を 1mm 以下にすると、大気圧で安定なグロー放電を得られる可能性がある。他の手段は、電極の強制冷却とヘリウムやアルゴンような不活性ガスの使用である。さらに、不安定性の発展には時間がかかるので、パルス電源を利用して放電時間を短くすれば、不安定性を避けることができる。この他には、ガス速度を高めて滞留時間を短縮する方法もある。

そこで本研究の目的は、窒素か空気を使用して大気圧でプラズマジェットを発生させることができる装置を開発し、発生しているプラズマ特性を

理解するためにプラズマプルームインピーダンスを測定することである。

図 1 に示すように、このプラズマジェットの装置は電極、誘電体、及び交流電源から構成される。内側電極には中心に 0.8 mm の穴があるアルミニウムチューブを使用する。Macor 製の誘電体管は、内側の電極とねじで固定されている。外側の電極は厚さ 2 mm のアルミニウムディスクで、中心に 0.5 mm の穴が開けられている。中心に 0.8mm の穴があり、厚さが 2 mm の誘電体円板は 2 つの電極間に挿入されている。すべての部品は、移動や落下を防ぐために互いに固定されている。変圧器はネオン電球用昇圧トランス (ピック電圧  $V_{p-p}$ :  $6\sqrt{2}$  kV、周波数: 60 Hz) を使用した。空気または窒素が内側の電極中を流れ、外側の電極の穴から排出される。高電圧を印加すると放電が発生し、最大 2 cm の長さに達するプラズマジェットが形成される (図 1 の挿入写真に示される)。

プラズマプルームのインピーダンス測定に関して、ここで、我々は簡単な方法を考えている。図 2 はプラズマインピーダンス測定のための装置と等価回路を示している。銅製の並列ディスクには信号発生器 (Tektronix CFG250) からの正弦波電圧 (周波数: 175 kHz、ピック電圧  $U_{p-p}$ : 10V) を印加しておき、ディスク間でプラズマを挿入した際の電流変化からプラズマプルームのインピーダンスを求める。等価回路では、プラズマを  $C_0$  と並列に接続した抵抗  $R_p$  と考える。プラズマジェットの挿入前後での総インピーダンスを  $Z_{off}$ 、 $Z_{on}$  と仮定すると、以下の方程式を得ることができる。

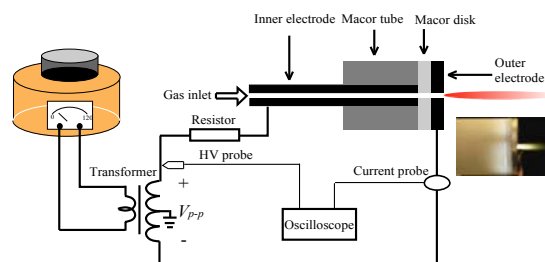


Fig.1 Schematic presentation of a plasma jet device at atmospheric pressure. The insert is the photograph of the plasma jet at 2.8 l/m N<sub>2</sub> flow.

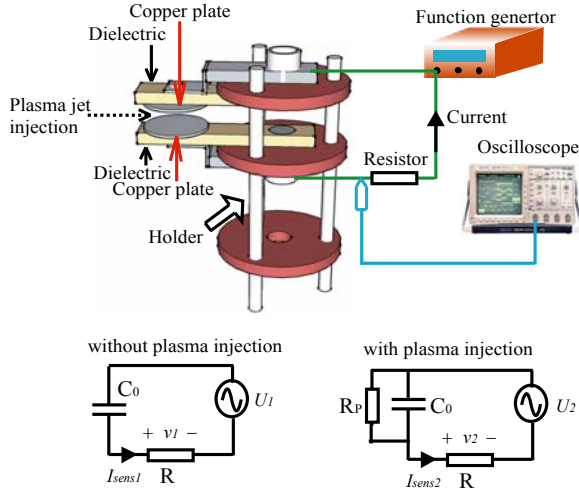


Fig.2 Setup schematic (upper) and equivalent circuit (lower) for plasma impedance measurement.

$$U_1 = I_{sens1} Z_{off} = \frac{v_1}{R} \sqrt{R^2 + 1/w^2 C_0^2} \quad (1)$$

$$U_2 = I_{sens2} Z_{on} = \frac{v_2}{R} \sqrt{R^2 + \frac{2RR_p + R_p^2}{R^2 w^2 C_0^2 + 1}} \quad (2)$$

ここで、 $C_0$ は並列ディスクの静電容量、 $v_1, v_2$ はプラズマ挿入前後の抵抗 $R$ における測定電圧、 $U_1, U_2$ はそれぞれ信号発生器の出力電圧である。測定の間、我々は、 $U_1$ と $U_2$ を等しく保つ。それゆえに、 $R_p$ 値は(1)と(2)式から求められる。

$$\left(1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}\right) \left(1 + R^2 w^2 C_0^2\right) R_p^2 + 2RR_p - \left[\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 \left(R^2 + \frac{1}{w^2 C_0^2}\right) - R^2\right] = 0 \quad (3)$$

$$R_p = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4)$$

ここで、 $a, b, c$ は、それぞれ(3)式の二次の係数、一次の係数、及び定数項である。

窒素を流した場合の放電開始電圧は約  $V_{p-p} \sim 4\sqrt{2}$  kV となった。電圧を約  $5\sqrt{2}$  kV に上げると、安定した窒素プラズマプルームを得ることができた。一般に、プラズマプルームの長さは主に印加電圧、流量、および気体種類に依存する。窒素の場合のプラズマプルームの長さの流量への依存を図3に示す。2.8 l/m の流量で最大 1.7 cm の長さの

プラズマプルームを得た。また、この流量での窒素プラズマプルームのレイノルズ数はこの式 ( $Re = D \cdot v \cdot \rho / \mu$ ) から計算される。ここで、 $D$  は特性長或いは穴径、 $v$  は窒素の速度、 $\rho$  は窒素の密度 ( $1.149 \text{ kg/m}^3$ )、 $\mu$  は室温 20 度における大気圧での窒素の粘性 ( $1.78 \times 10^{-5} \text{ kg/m s}$ ) である。計算した Reynolds number は約  $7.7 \times 10^3$  となり、生成したプラズマは乱流であることが分かる。また、流速を変化させると、プラズマプルームの長さが減少した。流量が少ない場合は、ガス速度が遅いので、発生しているプラズマ全体を放電域から吹き出させることができない。一方、流量が多い場合はガス速度が速すぎることから、より強い乱流が形成されるため、プラズマプルームが短くなる。 $6\sqrt{2}$  kV の電圧を印加した場合は、放電が吹き出されず閉じ込められるため、安定なプラズマプルームを形成することができない。また、空気が内側の電極中に混入した場合も、安定したプラズマジェットを生成させることができない。これは、空気には酸素が含まれているため、窒素に比べて不安定性が高まるためである。これらを防ぐためには、より精度の高い機械加工が求められる。

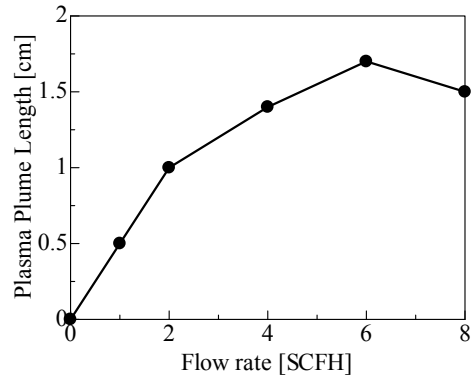


Fig.3 Dependence of visible jet length on nitrogen flow rate.  $V_{p-p} \sim 5\sqrt{2}$  kV.

図 4 に、典型的な放電条件 (窒素の流速 : 2.8 l/m、 $V_{p-p} : 5\sqrt{2}$  kV) でのプラズマジェットの電圧と電流の波形を示す。電圧と電流は高電圧プローブ (Tektronix P6015) と電流モニター (Model: IPC CM-10-MG) で測定した。針 — 平板間での放電のように、電流のスパイクは横軸で不規則に現れる。そして、平均幅は数百 ns になる。

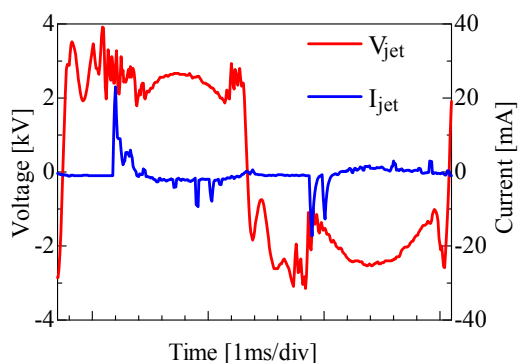


Fig.4 Waveforms of measured voltage and discharge current for this plasma jet system. N<sub>2</sub> flow: 2.8 l/m; V<sub>p-p</sub>: 5√2 kV.

図5は、抵抗  $R$  に流す電流  $I_{sens}$ 、放電電圧  $V_{jet}$ 、および放電電流  $I_{jet}$  の波形を示す。電流  $I_{sens}$  のスパイクと電流  $I_{jet}$  のパルスは同時に起こることが分かり、プラズマの挿入後は、図2に示す並列ディスクのインピーダンスが変化することが確認できる。電流  $I_{sens}$  の変化によってインピーダンスを計算する方法は(3)式に示したとおりである。しかしながら、図5に見られるように、プラズマ挿入後の電流  $I_{sens}$  のスパイクは 80  $\mu$ A となっており、ノイズの影響を受けている可能性がある。この原因は、使用した変圧器容量が小さいために外側の電極をアースできないためである。このままでは、インピーダンスの測定に対して過剰の誤差を生じることになる。

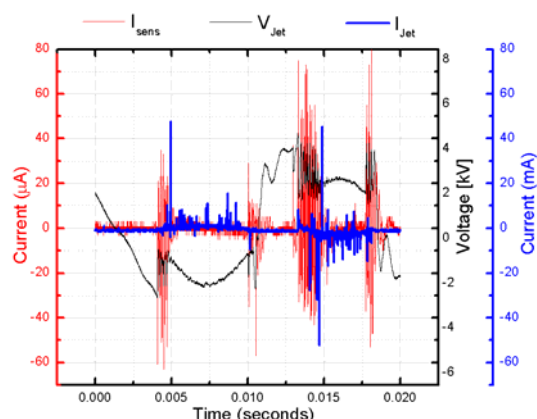


Fig.5 Measured waveforms of  $I_{sens}$ ,  $I_{jet}$  and  $V_{jet}$ . Conditions: N<sub>2</sub> flow ~ 2.8 l/m; V<sub>p-p</sub> ~ 5√2 kV.

今回我々は、簡単なプラズマジェット装置を設

計し、窒素を使用した安定なプラズマジェットを発生させることに成功した。しかしながら、プラズマインピーダンスの測定は、プラズマの挿入に伴うノイズの発生により、困難であった。よって、今後はノイズの低減を目指した測定回路の改良を行う必要がある。また、印加電圧や流量、気体種類を変化させた際のプラズマブルーム長や放電波形についての調査も進める予定である。さらに、空気プラズマジェットを形成させるためには、より精度の高い機械加工か再設計が必要であるかもしれない。上記に加えて、プラズマジェットの生成原理だけではなく、表面処理と生物医学処理における様々なアプリケーションも、これから、徹底的で研究に値します。

文献

- 1 M.Laroussi and T. Akan, Plasma Process. Polym. 4, 777-788 (2007).
- 2 J. Laimer and H. Stoeri, Plasma Process. Polym. 4, 266-274 (2007).
- 3 J. F. Kolb, A.-A. H. Mohamed, R. O. Price, R. J. Swanson, A. Bowman, R. L. Chiavarini, M. Stacey, and K. H. Schonenbach, Appl. Phys. Lett.92, 241501(2008).
- 4 Y. C. Hong and H. S. Uhm, Appl. Phys. Lett. 89, 221504 (2006).
- 5 Y. C. Hong and H. S. Uhm, Phys. Plasmas 14, 053503 (2007).
- 6 Y. C. Hong, H. S. Uhm and W.J.Yi, Appl. Phys. Lett. 051504 (2008).
- 7 Y. C. Hong *et al.*, Phys. Plasmas 16, 123502 (2009).
- 8 B.Qi *et al.*, Appl. Phys. Lett. 89, 131503 (2006).

研究以外のこともこの旅行から学びました:

私はアメリカのテキサス大学ダラス校 (UTD) に二ヶ月間留学しました。このような機会を与えて下さり、心から感謝致します。UTD で経験したことは、将来の研究にとって、とても役立つと思います。以下の五つに、この旅行から感銘を受けたものをまとめました:

### 1. 日米での先生への接し方の違い

私は中国から日本にやって来て、日本で研究が始まった後、大方の日本人学生が彼らの教授に質問する時に、とても緊張していることを知りました。一方、私が UTD へ行くと、学生は教授と友人のように接しており、質問なども気軽にでき雰囲気がありました。日本でもそのような雰囲気の中で、積極的に教授と交流することで、彼らから多くを学ぶことができれば良いと思います。

### 2. ゼミの有効利用

UTD では毎週水曜日に、グループ会議があり、同様に東工大でもゼミを開きます。これらの比較から、私はゼミの意味を深く知りました。まず、ゼミで重要なことは発表を静かに聞くことではなく、活発に議論を行うことです。特に、留学生にとっては、日本語が下手ということを議論に参加しない口実としてはなりません。重要なことは、知識を学んで、身につけることです。また、ゼミは、他の学生の研究の内容や進捗等がわかる良い機会でもあります。それらの研究テーマは自分と異なることもあります。それらの研究によって新たなアイデアを思いつくかもしれません。とにかく、研究について皆で積極的に議論する場を作ること、一人で研究するよりも良い結果を得ることができます。

### 3. 研究への取り組み方

UTD で私がとても驚いたことは、彼らが昼食時にさえ彼らの実験について話し続けるということです。彼らはなぜ彼らの研究にそれほど夢中になるのでしょうか? その理由は、彼らが自分の研究をととても好きで、興味を持っているからです。そしてそのことが、研究で良い結果を得ることにつながっています。重要なことは研究に興味を持ち、常に研究の問題点について考えることです。

### 4. 研究や人生への前向きな姿勢

自分の研究や人生にとって、このポイントが重

要です。前向きな思考の人がアメリカには多いように感じました。もちろん国によって、人々の考え方が違うけれど、積極的な人ほど消極的な人に比べて、好機を掴みやすくなります。博士の学生は、人生の中で研究生活に費やす時間が多いです。そのため、博士にとって、前向きな姿勢で研究に取り組むことはとても重要です。

### 5. 良い人生態度を学ぶ

アメリカでの滞在時間で、私は、多くのアメリカ人の博士と友達になり、また、以前中国にいた時知り合ったアメリカ人の友人にも再会しました。私は彼らの熱意と明るい振る舞いに感銘を受けました。人生は平坦な道ではなく、いくつもの困難や苦勞があります。その上、悪いことも起こる可能性があります。博士の三年間では、研究だけではなく、卒業後に社会に踏み込むために向けているいろいろな準備を整えたほうが良いです。博士課程では、研究と良い人生態度を学ぶことが等しく重要です。

今回のインターンから私は多くのことを勉強しました。しかし、言うは易し行なうは難しという諺があります。今後、私は今回の留学から学んだことを生かせるように、努力していきます。