

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

名古屋大学工学研究科電子情報システム専攻  
下枝 弘尚

私は、テキサス大学ダラス校（アメリカ合衆国）の先進材料プロセスセンター（ICAMP）において、液体注入プラズマ装置の電極電圧の測定及びプラズマポテンシャル（ $V_p$ ）の評価に関する研究を行った。液体注入プラズマは、高温超電導体である  $YBa_2Cu_3O_7$  の合成等、溶液を用いた材料合成の新たな手法として期待できる。また、細菌等を液体中に溶け込ませたまま処理できるため、安全かつ高効率なプラズマ殺菌処理技術としても期待できる。本研究では、液体注入プラズマ装置の直流自己バイアス電圧（ $V_{dc}$ ）及びRF（本装置では 13.56 MHz）電圧（ $V_{rf}$ ）の測定を行い、電極位置依存とそれらの結果を用いた  $V_p$  の評価を行った。 $V_{dc}$  はシース領域におけるイオンのエネルギーを決定する重要なパラメータである。また、 $V_p$  は電子温度を決定する重要なプラズマパラメータである。一般的に、 $V_p$  はラングミュアプローブやスマートプローブ、フローティングプローブ等を用いることで計測される。プローブ計測は、プラズマにプローブを挿入することで  $V_p$  を含めた様々なプラズマパラメータを容易に測定することができる。しかしながら、プラズマ中に直接プローブを挿入するため、プラズマの揺らぎ等による測定への影響も懸念される。それに対して、測定した  $V_{dc}$  から、理論的な計算によって  $V_p$  を評価することができ、またこのことは電極電圧（ $V_{dc}+V_p$ ）波形から  $V_p$  を求めることによって Coburn らによって実験的に示されている[1]。したがって、電極電圧を測定することによって、プラズマに非接触な手法で  $V_p$  を評価することができる。

本研究ではまず、マッチングネットワークの改良を行った。これは、電極位置の変化に伴うマッチング条件の変化に対応させ、できる限り入力電力の損失を無くし、プラズマに効率よく電力を供給することによって安定したプラズマ生成を可能にするためである。マッチングネットワーク内

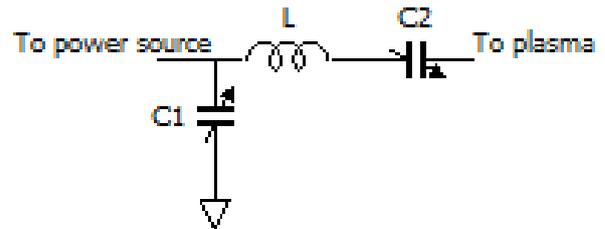


図1 マッチング回路

の回路は、一般的に図1に示すように分岐コンデンサ（C1）と直列コンデンサ（C2）の2つの可変コンデンサとコイル（L）から構成される。コンデンサの容量を変化させることで、プラズマ側の負荷インピーダンスを電源の特性インピーダンス（50 Ω）と等しくする。これによって、反射電力、電力損失を無くすることができる（整合）。しかしながら、プラズマ側の負荷インピーダンスはプラズマインピーダンスや装置等によって決まるため、それらを実際に測定する以外に知ることはできない。したがって、容量範囲の広い可変コンデンサを用いて、試行錯誤的にマッチング条件を決定する場合も少なくない。今回まず、インピーダンスアナライザを用いて使用している2つの可変コンデンサの容量範囲とコイルのインダクタンスを測定した。そして、スミスチャートを用いて使用している可変コンデンサによって整合可能な負荷インピーダンスの範囲を概算し、それをもとにC1に並列に固定コンデンサを接続した。こうすることによって、取り得る容量範囲を変化させてやり、十分な余裕を持たせた状態で可変コンデンサの容量をマッチング条件時の容量へと変化させることができる。また、実際にプラズマを生成しマッチング条件を確認することによって、理論的、実験的にマッチング条件の最適化を行った。その結果、電極位置の変化による負荷インピーダンスの変化に十分対応可能なマッチングネットワークを構築

することができた。

$V_{dc}$  と  $V_p$  との間には、理論的に以下のような関係が成り立つ[2]。

$$V_p = \frac{\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^a}{\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^a - 1} V_{dc} \quad a \leq 2.5 \quad (1)$$

ここで、 $A_1$ 、 $A_2$  はそれぞれ電力が入力されている電極と接地電極の面積である。したがって、式(1)より、測定した  $V_{dc}$  の値と、電力が入力されている電極（ステージ）の面積と接地されているチャンバー内の表面積の比から  $V_p$  を求めることができる。ただし、特にチャンバーが接地されており、 $A_1$  が  $A_2$  よりも大きな装置の場合、そのチャンバーの構造によってはプラズマ-シース界面の条件（イオン電流と電子電流が等しい）を満たさない、もしくは不明な箇所が存在し得る。本実験で用いた装置はその典型的な例であるため、必ずしも上記の面積比が正しいとは言えないが、 $V_p$  のおおよその値を見積もり、その値と Coburn らのような実験的な手法による値と比較することで、各シースの表面積比の評価が可能である。

液体注入プラズマ装置は、13.56 MHz の RF 電源を用いた RF 容量結合型プラズマを生成する。本研究におけるプラズマ生成条件は以下の通りである。Ar 流量を 20 sccm とし、チャンバー内の圧力を約 16 Pa で一定とした。また、RF 電力を 1-20 W まで変化させた。電極位置は、基準位置を 0 cm とし、2.5、5.0 cm と変化させ、各測定を行った。

図 2 に  $V_{dc}$  測定に用いた回路を示す。チョークコイルによって電極電圧の高周波成分 ( $V_{rf}$ ) を除

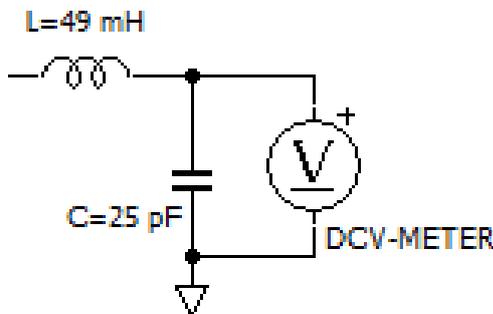


図 2  $V_{dc}$  測定回路

去し、直流成分 ( $V_{dc}$ ) のみを取り出すことができる簡易的な回路である。この回路をマッチングネットワークの出力端に並列に接続し、BNC 端子によってできる限り高周波の漏れやノイズの影響等を減らす工夫をした。また、回路を構築後、ファンクションジェネレータを用いて、マッチングネットワークの出力端からオフセットを加えた 13.56 MHz の正弦波を入力し、そのオフセットのみが測定できることを確認した後で  $V_{dc}$  測定を行った。 $V_{dc}$  は、電極位置に関わらず RF 電力が増加するに従って増加した。これは、RF 電力の増加に伴って放電電圧が増加したためだと考えられる。また、電極位置が 2.5 cm 及び 5.0 cm の時の  $V_{dc}$  は、0 cm の時に比べて若干小さい値を示したここで、面積  $A_1$ 、 $A_2$  の各電極にかかるシース電圧  $V_1$ 、 $V_2$  とそれぞれのシース容量  $C_{sh1}$ 、 $C_{sh2}$  との関係は、

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{C_{sh2}}{C_{sh1}} = \frac{A_2 s_1}{A_1 s_2} \quad (2)$$

となる。 $s_1$ 、 $s_2$  は各シースの厚さである。RF プラズマ中において、イオンシースは RF 電圧に追従できないため、 $s_1$ 、 $s_2$  はほぼ一定の値となる。したがって、 $s_1/s_2 \sim 1$  となり、式(1)において  $a=1$  と仮定できる。このことは、Coburn らの実験結果からも推測できる[1]。よって、式(1)は

$$V_p = \frac{\frac{A_2}{A_1}}{\frac{A_2}{A_1} - 1} V_{dc} \quad (3)$$

となる。測定した  $V_{dc}$  の値を用いて、式(3)より  $V_p$  を算出した。その結果、 $V_p$  も  $V_{dc}$  と同様に RF 電力の増加とともにほぼ線形に増加することがわかった。また、電極位置が 2.5 及び 5.0 cm においては、0 cm と比較して若干  $V_p$  が低下した。これらの  $V_p$  の変化は、電子温度の上昇及び低下によると考えられる。

Coburn らは、図 3 に示すように電極電圧波形から  $V_{dc}$  (図中では  $V_1$ ) と  $V_p$  を求め、電極面積比を変化させることによって実験的に  $V_1=V_p$  と  $V_2=V_p-V_{dc}$  の関係を明らかにした。シース電位と

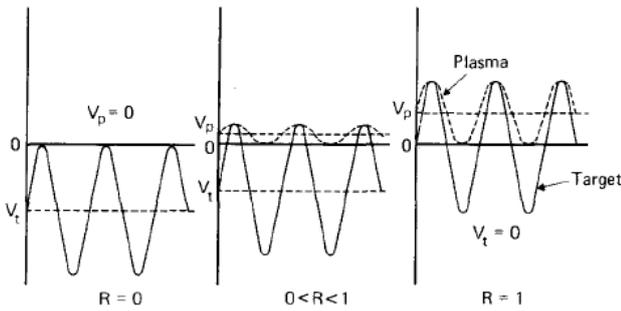


図3 電極電圧波形の電極面積比  $R=A_2/A_1$  依存[1]

$V_p$  はその界面において連続であり、Ar プラズマのように正イオンが支配的であるプラズマにおいては  $V_p > 0$  であることから、図3のように  $V_p$  の平均値を概算することができる。本研究では、プラズマに非接触な  $V_p$  測定手法の精度を高め、前述の理論式を用いて算出した  $V_p$  と比較することによって電極面積比（シース表面積比）の評価を行うために、さらに電極電圧波形、特に  $V_{rf}$  の測定を試みた。一般的に、プラズマ装置の電極電圧の測定には、高圧プローブや分圧器が用いられる。これらの機器は、高電圧を容易に測定可能な電圧に変換する分圧回路を基礎としている。したがって、 $V_{rf}$  測定では簡易的な分圧回路をマッチングネットワークの出力端に並列に接続し、 $V_{dc}$  測定の場合と同様に BNC 端子を介してオシロスコープによって電圧波形を測定した。最も簡単な分圧回路は、図4に示すように、抵抗値の大きな抵抗  $R_1$  と小さな抵抗  $R_2$  を直列に繋ぎ、 $R_2$  にかかる電圧を測定する回路である。回路全体にかかる電圧  $V_0$  と  $R_2$  にかかる分圧  $V_2$  との関係は

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0 \quad (4)$$

で表される。しかしながら、抵抗素子のような一般的な電気素子は、高周波電圧に対しては図5の等価回路に示すようにインダクタンス成分やキャパシタンス成分が影響してくる。例えば、抵抗値  $R=1 \text{ M}\Omega$ 、インダクタンス成分  $L=0.1 \text{ }\mu\text{H}$ 、キャパ



図4 分圧回路

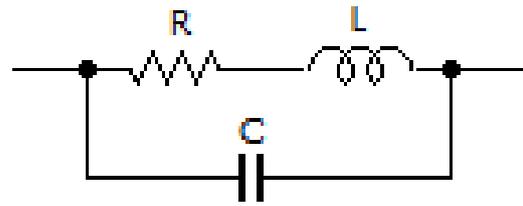


図5 抵抗素子の高周波に対する等価回路

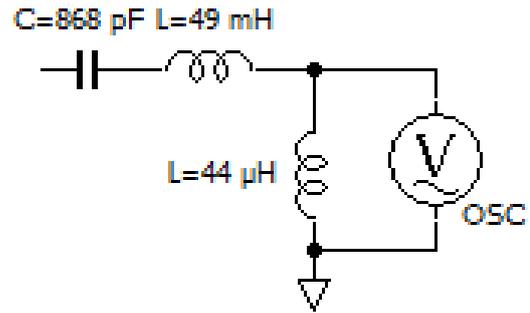


図6  $V_{rf}$ 測定分圧回路

シタンス成分  $C=0.1 \text{ pF}$  を持った抵抗素子を考える。周波数  $f=10 \text{ Hz}$  の低周波電圧に対しては、 $\omega L \ll R, 1/\omega C \gg R$  となり、素子のインピーダンス  $Z \sim R$  となる。しかしながら、 $f=10 \text{ MHz}$  の高周波に対しては、 $\omega L \ll R, 1/\omega C \ll R$  となり、 $Z \sim C$  となる。実際にネットワークアナライザを用いて  $5.4 \text{ M}\Omega$  の抵抗素子のインピーダンスを測定した結果、実数部は周波数の増加に伴って抵抗値が低下し、虚数部は数千程度のマイナス値を示し、MHz 帯ではキャパシタンス成分が大きく影響することを確認した。そこで、本実験では、高周波に対して抵抗の役割を果たすコイルを二つ使用し、図6に示すような分圧回路を構築した。この回路は、直列に接続されたコンデンサによって電極電圧の直流成分を除去し、インダクタンスの異なるコイルによって  $V_{rf}$  を分圧しオシロスコープで電圧波形を測定する回路である。電極電圧の振幅  $V_{rf}$  とオシロスコープで観測した電圧波形の振幅  $V_0$  は理論的に

$$V_{rf} \approx 1114 * V_0 \quad (5)$$

の式で表される。回路を構築後、ファンクションジェネレータを用いて、マッチングネットワークの出力端からオフセットを加えた  $13.56 \text{ MHz}$  の正

弦波を入力し、その正弦波のみが測定できることを確認した。しかし、入力電圧の振幅と出力電圧の振幅から求めた  $V_{rf}$  と  $V_0$  の関係は

$$V_{rf} \approx 71 * V_0 \quad (6)$$

となった。この結果から、今回使用したコイルにおいても、高周波であることによってキャパシタンス成分が影響したことが考えられる。この実験的に求めた式を用いて  $V_{rf}$  を算出し、それをもとに  $V_p$  を評価した。その結果、 $V_p$  は RF 電力が増加するにつれて減少する傾向を示し、10 W 以上の場合において  $V_p$  が負の値を示した。Ar プラズマのようにプラズマ中において正イオンが支配的であるプラズマの  $V_p$  は必ず正の値となることや、入力電力の増加に伴って電子温度が低下することは、前述の  $V_p$  の結果から考えても不適切であると考えられる。この要因として、マッチングネットワーク内で飛び交う高周波によって回路内に誘導電圧が誘起されたこと、また測定波形に高周波ノイズが影響したことが考えられる。

以上の結果から、本研究によって液体注入プラズマ装置の直流自己バイアスを測定し、イオンエネルギーのおおよその知見を得ることができた。また、電極位置の変化に伴う  $V_{dc}$  の変化を明らかにし、測定した  $V_{dc}$  の値から理論的な式を用いて  $V_p$  を同時に評価することができた。しかしながら、今回電極電圧波形から求めた  $V_p$  と比較するには至らなかったため、電極面積比（シース表面積比）を評価することができなかった。正確な  $V_{rf}$  の波形を観測するためには、コイルに比べて損失が少なく、高周波による影響が少ないことが予想されるコンデンサを用いた分圧回路を構築する必要がある。また、ネットワークアナライザによって素子の周波数特性を明らかにする必要がある。そして、本研究のようなプラズマに非接触な  $V_p$  測定手法の精度を高めるためには、プローブ診断などの結果との比較も重要であると考えられる。

本プログラムに参加することで、自分の研究テーマとは異なったテーマで研究を行うことができ、新たな知識や知見を得ることができた。今回行った  $V_{dc}$  の測定では、基本的な電気回路の知識はも

ちろんのこと、いかに高周波の扱いが困難であるかということを感じた。普段の研究においてもこのような知識や経験はもちろん重要ではあるが、このような基礎的な部分に焦点を当てて実際に回路を構築し、試行錯誤を重ねた実験を行う機会はなかなかないのが現状である。そういった意味においても、非常に貴重な時間を過ごすことができたのではないかと感じている。また、これまでプラズマの直流自己バイアスやプラズマポテンシャルといった基礎的なパラズマパラメータを計測したことがなく、これらの測定や測定に際して得た知識や知見は、今後の研究にも十分生かすことができる。具体的には、現在行っているカーボン材料のプラズマ処理プロセスに関する研究において、膜に入射するイオンのエネルギーと処理効果の関係解明や、そのカーボン材料の作製過程におけるイオンエネルギーの評価も可能である。さらに、今回用いた手法はプラズマに非接触であるため、プローブ等にカーボン膜が堆積するといった問題が無い。したがって、このような膜成長プロセスにおけるプラズマパラメータ診断として非常に有効であり、簡易的な回路をマッチングネットワーク内に構築するだけで測定できるため、プローブの挿入が困難な装置構成にも対応できることが期待される。

研究に関するだけでなく、本プログラムを通して自らの視野を広めることができた。派遣先の研究室の人たちとの交流やその雰囲気によって、彼らの研究に対する熱意や、自分の研究に対する誇りのようなものを感じた。それらは今の自分にはまだ足りないものであり、その姿勢を見習うべきだと感じた。また、英語能力の重要性を実感し、それと同時に失敗を恐れずに挑戦していくことがその上達には必要であることを改めて知ることができた。

本プログラムでの経験を今後の研究、さらには人生に生かし、世界で活躍できる技術者、研究者を目指したいと思う。

- [1] J. W. Coburn *et al.*, *J. Appl. Phys.* **43** 4965 (1972).
- [2] *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*

