金属体に沿って伝搬するマイクロ波による高密度プラズマ生成*

上坂 裕之^{*1,†}・飯田 齊^{*1}・梅原 徳次^{*1}Generation of High-density Plasma by Microwaves
Propagating Along Metal Surface

Hiroyuki KOUZAKA, Hitoshi IIDA and Noritsugu UMEHARA

Department of Mechanical Science and Engineering, Graduate School of Engineering
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-0814 Japan

(Received November 10, 2005, Accepted February 11, 2006)

We found high-density plasma generated by microwaves propagating along metal surface at a negative voltage against a grounded chamber. Magnetic probe measurement showed that 2.45-GHz microwaves propagated as surface waves that were guided by the interface between the high-density plasma and underdense region in ion sheath surrounding the metal surface. The same phenomenon was demonstrated to occur in a narrow metal tube 7.5 mm in inner diameter, where surface waves were considered to propagate along the interface between a high-density plasma column in the tube and underdense region in ion sheath formed along the inner wall of the tube.

1. はじめに

0.1~100 Pa 近辺の減圧下で生成される低温・非平衡プラズマは、材料の表面処理に幅広く用いられてきた¹⁾。中でも、電極間に電圧を印加することで生成されるグロー放電は最も古くから利用され、現在も産業上の様々な場面で使用されている。直流グロー放電を用いた表面処理装置では、被処理基板を陰極に、減圧チャンパー壁をグラウンドにするのが一般的である。また、印加電圧をパルス状や数 MHz 以上の高周波として与えることもあり、そのような場合は基板が絶縁物であっても安定した放電が可能となる。これら電圧印加方式によるグロー放電は、物体そのものを電極としてその表面に沿って均一なプラズマを生成することができる。それゆえ複雑/三次元形状物の表面処理には、多くの場合電圧印加方式が用いられる²⁾。しかし電圧印加によって得られるプラズマの電子密度は一般に 10^9 – 10^{10} cm⁻³程度と低く¹⁾、高速な表面処理が期待できない。そこで、形状物面に沿って均一かつ高密度なプラズマ生成法が望まれてきた。

我々はそのような要望を満たすため、金属面に沿って伝搬するマイクロ波による高密度プラズマ生成法を提案した。本方法ではプラズマと金属面との間に存在するシース内の低電子密度層（比誘電率 ~ 1 ）が表面波モードのマイクロ波をガイドする誘電層となることを利用する³⁻⁵⁾。つまり、金属面をさや状に取り囲むイオンシース形状に沿ってマイクロ波を表面波モードで伝搬させ、当該金属面形状に沿った高密度表面波プラズマ生成を行わせるのである。これまでの研究で我々は、そのようなマイクロ波伝搬及び高密度プラズマ生成が負電位にある金属棒に沿って顕著に起こることを発見した^{4,5)}。ここで負電位を印加したのは、金属面を覆うシースの幅を拡大するためであり、電圧を印加しなければシース幅

は極薄く、事実上表面波をガイドする誘電層として機能しなかった⁵⁾。つまり、負電圧とマイクロ波を金属面で重畳することにより、金属沿面マイクロ波伝搬とそれによる高密度表面波プラズマの生成が可能となったのである。従来の表面波プラズマ源は全て誘電体（石英管やアルミナ円板）をアンテナとし、その表面に沿ってプラズマを生成する⁶⁾。これに対して我々の方法は負電位を与えた金属面で表面波プラズマを生成することが出来る。よってこの新しいプラズマを MVP (Microwave Voltage coupled Plasma) と称する。本研究では MVP を利用して、細い金属管の内面に高密度プラズマ柱を生成可能であることを報告した。

2. 実験装置

Fig. 1 に直径150 mm、長さ500 mmの高真空チャンパーを備えた MVP 生成装置を示す。チャンパー内の圧力は接続された油拡散ポンプによって 10^{-4} Pa 台まで排気可能である。チャンパーの一端には真空をシールする石英板を介して WX-39D 同軸導波管が接続されており、ここから2.45 GHz マイクロ波が投入される。プラズマを生成する金属アンテナ（外径10 mm、長さ300 mmのグラファイトロッド及び外径9.5 mm、内径7.5 mm、長さ50 mmのステンレス鋼製チューブ）は、チャンパーの中心軸に沿って挿入され、その一端は上記石英板に接している。アンテナ部のもう一端には、負電圧を印加するための配線が接続されている。プラズマの軸方向分布を知るため、半径30 mmの位置でリングミュアプローブを軸方向に沿って挿入した。本プローブは直動機構を備えており、プローブ先端は $z=18\sim 318$ mmの間を移動できる。また、 $z=100$ mmの位置には磁気プローブ（1ターン、プローブ径1 mm）を径方向に挿入した。プローブ先端位置を径方向に移動することで2.45 GHz マイクロ波の周方向磁界成分 $|B_\theta|$ の半径方向分布を測定する。

3. 結果と考察

まずグラファイトロッドをアンテナとした高密度プラズマ

* 平成17年11月10日 第46回真空に関する連合講演会にて発表

^{*1} 名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻
(〒464-0814 名古屋市千種区不老町)[†] 連絡先 E-mail: kousaka@mech.nagoya-u.ac.jp

Fig. 1 Schematic of the MVP (Microwave Voltage coupled Plasma) source, presently investigated.

の生成結果を示す。ロッドの一部は Fig. 1 のように絶縁物（アルミナ）で覆われ、プラズマにさらされる有効ロッド長は190 mm である。Ar ガス導入によってチャンバー内の圧力を5.7 Pa に保ち、負電位を印加しない状態で200 W のマイクロ波を投入した。ここで入り口石英板付近でのプラズマ点火を確認したが、このプラズマは石英板の表面を半径方向に伝搬する表面波によって生成されている。次に、ロッドの負電位 V_t を 0 から -200 V まで徐々に増加した。Fig. 2 は $V_t = 0, -100, -200$ V におけるプラズマ柱内電子密度 n_e の軸方向分布を示している。本図より明かなように、負電位の増加に伴って高密度プラズマ柱がロッドに沿って伸展した。

Fig. 3 に $V_t = -200$ V における $|B_\theta|$ の半径方向分布を示す。比較のため、 $V_t = 0$ V の場合とプラズマが点火していない場合においても同じ測定を行い、Fig. 3 へプロットした。プラズマが存在しない場合、分布は半径に反比例している。これはマイクロ波がロッド外周とチャンバー内壁とをそれぞれ内外導体とする同軸モードで伝搬したことを示している。電圧を印加しない場合 ($V_t = 0$ V) は、マイクロ波ほとんど検出されなかった。これは石英板近傍で生成される高密度の表面波プラズマによってマイクロ波が吸収され、チャンバー内に深く進入しなかったためである。一方、 $V_t = -200$ V ではマイクロ波のエネルギーが中心から10-20 mm 程度の距離に集中している。これは印加負電位によって拡大したシース内の低電子密度層が誘電層として機能し、マイクロ波が低電子密度層と高密度プラズマとの境界を表面波として伝搬したからである⁵⁾。つまり金属棒へマイクロ波と負電位を重畳投入することで、棒表面に沿っての表面波伝搬、及び高密度プラズマ生成が可能となったのである^{4,5)}。

このような現象はあらゆる金属面に於いても再現可能であると考えられる。例えば、細い金属管の内面にそのような表面波を伝搬させ、高密度プラズマ柱を維持することが可能であるはずである。そのような細管内高密度プラズマ生成が可

Fig. 2 Axial distribution of plasma electron density along the graphite rod, at an Ar gas pressure of 5.7 Pa with an input microwave power of 200 W.

Fig. 3 Radial distribution of azimuthal magnetic field component, B_θ of 2.45-GHz microwaves, obtained at $z = 100$ mm by using a magnetic probe with a loop antenna 1 mm in diameter. Here, B_{θ_std} is the value of B_θ obtained at $r = 20$ mm for $V_t = -200$ V.

能であることを示すため、Fig. 1 のグラファイト棒をステンレス鋼製の細管（内径7.5 mm）に置き換え、同様の実験を行った。まず Ar ガス圧力を50 Pa とし、50 W のマイクロ波を投入することで石英板近傍にプラズマを点火した。その後、細管への負電圧印加を開始し、放電が不安定になる手前 ($V_t = -162$ V) まで電圧を上げた後、再び 0 V へと戻した。本実験において管表面でプラズマから集電される電流 I_t の印加電圧 V_t への依存性を Fig. 4 に示す。また、図中 A, B, D, E, F 点におけるプラズマの状態を $z = 100$ mm に設けられた窓からの写真で示した。まず、0 V から A, B 点を経て C 点 ($V_t = -148$ V) までは円管内でプラズマは発生せず、円管外のプラズマが Fig. 2 の結果と同様に電圧増加に伴って伸展した。負電圧が C 点まで達した時、円管外プラズマ柱は円管の先端まで到達し、これをトリガーとして円管内のプラズマ柱が点火された。円管外を伸長してきた高密度プラズマ柱が円管内にまで回り込んだと考えられる。点火後は、C' → D → E → F 点 ($V_t = -45$ V) と電圧を変化させても管内プラズマ柱が維持された。即ち一旦点火すれば -45 V から -162 V の幅広い電圧にわたって管内プラズマが維持可能であった。最大電圧点 D 点から電圧を下げて行く時、C' 点を超えて電圧を下げると円管外プラズマ柱は先端には達しなくなった (E, F 点の写真参照)。それでも円管内プラズマ柱が

Fig. 4 Total current, I_t collected from plasma vs. the negative voltage, V_t supplied to the stainless-steel tube (9.5 mm in outer diameter, 7.5 mm in inner diameter, and 50 mm in length).

生成維持されつづけたことを考えると、円管内プラズマ柱は点火後、石英板と接する根元から入り込んだマイクロ波によって生成維持されていたと推測される。また、C→C'点における円管内プラズマ点火時に、電流はほぼ1.7倍に増加した。円管内プラズマ柱点火により、プラズマから集電する表面積が1.8倍になったことを考慮すると、この電流増加はほぼ全て集電面積の増大によるものと考えられる。この推測が成り立つには、管内外のプラズマ電子密度のオーダーがほぼ同程度でなければならないが、実際そうであると我々は考えた。即ち、管内の電子密度は直流放電で生成されるような 10^9 – 10^{10} cm^{-3} 程度の低電子密度ではなく、高密度マイクロ波プラズマになっていると考えた。実際、D, E, F各点の状態でマイクロ波だけをOFFにすると管内外のプラズマが共に消失したので、管内プラズマが単なる直量放電（ホローカソード放電含む）でなかったことは明らかである。ちなみにC'点における管内外のプラズマ電子密度が n_c で一定であると仮定し、集電面積（円管内外表面積の和）と電流を無衝突

シース理論の式に代入すると、 $n_c = 1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ と算出された。

比誘電率1の誘電層に沿って2.45 GHz表面波が伝搬するための条件は、接するプラズマの電子密度が $n_e > 1.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ となることである⁶⁾。概算した電子密度 n_c はそのような条件を満たしている。また円管内プラズマ柱は、マイクロ波投入電力がなければ生成維持されなかった。これらを総合すると、円管内プラズマ柱は円管内壁シース内の低電子密度層（比誘電率1）と高密度プラズマ柱（ $\sim 1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ）との間を伝搬する表面波によって生成維持されていたと考えられる。

4. ま と め

従来の表面波プラズマ源は全て誘電体（石英管や円盤）をアンテナとし、その表面に沿って高密度プラズマを生成する⁶⁾。対して本研究では、金属面で表面波プラズマが生成可能となる方法を紹介した。まず、マイクロ波が負電位にあるグラファイト棒に沿って表面波として伝搬し、棒に沿った柱状高密度プラズマを生成することを示した。得られたプラズマ柱は印加電圧の増加に伴って伸長した。次に、棒に換えてステンレス鋼管（外径9.5 mm、内径7.5 mm、長さ50 mm）を用い、同様の実験を行った。負電位の増加とともに管外面に沿った柱状高密度プラズマが根元から伸張し、一方の端まで伸張した時点で、管内に高密度プラズマ柱が点火された。この管内プラズマ柱の密度は約 $1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ と算出された。本方法は細い管内に高密度プラズマを生成する方法として有望である。

謝辞

本研究はNEDO産業技術研究助成事業〔H15年度採択、Fund No. 03A27007a〕からの援助を受けて遂行された。

〔文 献〕

- 1) M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg: *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Wiley-Interscience, New York, 1994).
- 2) A. Ander: *Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition* (Wiley-Interscience, New York, 2000).
- 3) J. J. Laurin, G. A. Morin and K. G. Balmain: *Radio Sci.* **24** (1989) pp. 289–300.
- 4) H. Kousaka, J. Xu and N. Umehara: *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) pp. L1052–L1055.
- 5) H. Kousaka, N. Umehara, K. Ono and J. Xu: *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) pp. L1154–L1157.
- 6) Yu. M. Aliev, H. Schlüter and A. Shivarova: *Guided-Wave-Produced Plasmas* (Springer, Berlin, 2000).