## 大気圧マイクロ波プラズマの大面積かつ高速表面処理への応用

# Application of atmospheric pressure microwave plasma to large area and high-speed surface treatment

鈴木 陽香<sup>1,2</sup>, 小笠原知裕<sup>1</sup>, Chu Manh Hung<sup>1</sup>, 岩田 悠揮<sup>1</sup>, 豊田 浩孝<sup>1,2,3</sup> Haruka Suzuki<sup>1,2</sup>, Tomohiro Ogasawara<sup>1</sup>, Manh Hung Chu<sup>1</sup>, Yuki Iwata<sup>1</sup>, and Hirotaka Toyoda<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学工学研究科,<sup>2</sup>名古屋大学低温プラズマ科学研究センター,<sup>3</sup>核融合科学研究所 <sup>1</sup>Department of Electronics, Nagoya Univ., <sup>2</sup>cLPS, Nagoya Univ., <sup>3</sup>NIFS

## 1. はじめに

近年の電子デバイス需要の高まりとともに、 非熱平衡大気圧プラズマを用いた低コストで 高速の洗浄、表面改質、成膜等の表面処理が注 目されている。このような背景により、空間的 に均一で、高密度かつ大規模で、放電ガス種を 選ばない大気圧プラズマ装置が求められてい る。大気圧下で生成されるマイクロ波放電は比 較的容易に高密度のプラズマを生成できるこ とから、上述のプラズマ源としての利用が期待 できる。一方で、大気圧マイクロ波プラズマは 装置構造によってはマイクロ波の波長(1~0.01 m)に依存した定在波が発生しやすく、電磁界 分布が空間的に不均一になり、均一なプラズマ を生成することが困難になる。特に、大気圧の ような高圧力下では衝突が高頻度で生じるた め、プラズマが拡散しづらく、不均一な電磁界 の分布を反映しやすい。この問題を解決するた めに我々は、マイクロ波の伝搬方向を制御する ことにより、定在波の発生を抑制し、進行波の みにより均一なプラズマを生成する長尺スロ ット型マイクロ波プラズマ装置(大気圧マイク ロ波ラインプラズマ)を開発した [1-4]。これ までに、この装置を用いて、波長の長さ(0.12m) を優に超える 1 m長の希ガス放電プラズマの 生成に成功した。また、矩形導波管の断面構造 を非対称構造とすることにより、スロット部で の電磁界強度を増加させ、希ガスよりも放電が 困難である窒素分子ガスを用いてメートル長 のプラズマ生成に成功するとともに、プラズマ の空間均一性についても確認している。

今回の報告では、本プラズマ装置を用いた大 面積表面処理の実証を目的として、PETフィル ムやポリイミドフィルム等の樹脂フィルムに 酸素添加アルゴンプラズマを照射した際の、表 面親水化やアッシング、及びその空間分布の調 査について述べる。

#### 2. 実験装置

図1に実験装置の概略図を示す。アルゴン(28 slm)と酸素(アルゴン流量に対して0~3%)の 混合ガスを、スロットを配した導波管(スロッ ト長:30~60 cm, スロット幅:0.1 mm) に、導波 管壁に設けたガスマニホールドから導入する。 導波管の両端は気密窓導波管によりガス封止 されている。スロット部の導波管の断面構造は 上述のように、非対称構造としている。また、 定在波抑制のため、規格導波管と非対称断面導 波管は電磁界シミュレーションに基づいて設 計された整合器導波管を介して接続し、導波管 内電力伝搬は一方向に制御されている。ここに、 パルスマイクロ波電力(2.45 GHz, ピーク電力: <4.2 kW, パルス周波数: 50 kHz, デューティー 比:10%)を入射することによりスロットにライ ン状のプラズマが生成される。処理対象物とし てフィルムサンプルを導波管長手方向に5 cm 間隔で5枚、全長20 cmに渡って可動式ステージ (幅1 m,長さ0.5 m,掃引幅: 0.8 m,掃引速度: < 10m/min) 上に並べ、ステージを掃引してプ ラズマに照射した。サンプルとスロットの距離、 及び掃引速度は実験ごとに制御されている。 例として、スロット長を60 cmとしたときのア ルゴンプラズマの発光をFig.2に示す。



Fig.2. Atmospheric pressure microwave line plasma.

### 3. 実験結果

ポリイミドフィルムをステージに載せ、1回 掃引してプラズマを照射した後のフィルム表 面の水接触角の空間分布をFig.3に示す。酸素添 加量は2.5%、パルスマイクロ波のピーク電力を 4.2 kW、掃引速度9 m/min、スロットとフィルム サンプル間の距離を0.5 mmとした。未処理のフ ィルムの接触角は70°であり、プラズマ照射後 に水接触角が低下した。また、20 cmの範囲で 均一な親水性が得られていることがわかる。次 に、掃引速度を変化させてフィルムをプラズマ に照射させた。別の実験により、プラズマの照 射幅を測定したところ、約0.8 mmであったため、 この値を用いて処理時間に対する依存性を評 価した。その結果をFig.4に示す。接触角は処理 時間の増加とともに減少し、50 ms程度で飽和 角14°に達し、非常に高速で処理が完了してい ることが明らかになった。また、1回掃引処理 ではフィルムへの熱ダメージや変形などは確 認できなかった。

次に、ポリイミドフィルムを同様に広幅20 cmに渡って並べ、複数回掃引し、酸素添加プラ ズマ処理を実施することにより、樹脂を分解す るアッシング処理を行った。酸素添加量は2.5%、 パルスマイクロ波のピーク電力を4.2 kW、ステ ージ掃引速度1m/minとし、処理時間が24sとな るよう複数回掃引処理を行い、処理後のフィル ム表面の削れ深さを段差膜厚計にて測定した。 処理時間から換算したアッシングレートの長 手方向分布をFig.5に示す。縦軸はアッシングレ ートで、長手方向各部において0.7 µm/min程度 となっており、長手方向に均一であることが確 認された。高速の親水化やアッシング処理は酸 素ラジカルの寄与が大きいと考えられ、本装置 は高密度の酸素ラジカルを広幅に供給してい ると考えられる。

#### 4. まとめ

大気圧マイクロ波ラインプラズマ装置を用 いた大面積表面処理の実証を目的として、例と して酸素添加アルゴンプラズマにより樹脂フ ィルムの高速親水化処理、及びアッシング処理 を実施し、処理の均一性が確認されたことから、 本研究のプラズマ装置の広幅フィルムプロセ スへの応用が期待できる。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費JP16H03893, JP18K13531 の助成を受けたものです。



Fig.5. Spatial profile of ashing rate.

#### 参考文献

- [1] H. Suzuki et al.: *Appl. Phys. Express*, **8**, 036001, 2015.
- [2] H. Suzuki et al.: Jpn. J. Appl. Phys., 55, 01AH09, 2016.
- [3] H. Suzuki et al.: Jpn. J. Appl. Phys., 56, 116001, 2017.
- [4] H. Suzuki et al.: Jpn. J. Appl. Phys., 59, 016002, 2020.