

〈一般研究課題〉 長尺大気圧プラズマを用いたクリーン表面プロセスの  
開発

助成研究者 名古屋大学 大学院工学研究科 鈴木 陽香



## 長尺大気圧プラズマを用いた クリーン表面プロセスの開発

鈴木 陽香  
(名古屋大学)

### Development of surface cleaning process using long-scale microwave plasma at atmospheric pressure

Haruka Suzuki  
(Nagoya University)

#### Abstract :

Application of non-thermal atmospheric-pressure plasma to large surface treatment have been given much attention. For these reasons, uniform, large are and high density non-thermal plasma source is required. Among various plasma production techniques, microwave plasma source using waveguide is a strong candidate for that, because microwave plasma has long lifetime of electrode compared with DC or RF discharges and can produce high density plasma due to large power density. So far, we developed a microwave plasma source using a waveguide with micro-gap slot with 1-meter length under control of the propagation of the electromagnetic waves in the waveguide in one direction. Production of a meter-scale plasma at atmospheric pressure by molecular gas was succeeded [1]. In this study, the detailed structure of the plasma inside the slot and its spatial distribution in the longitudinal direction investigated by operating the microscope parallel to the slot, and the results of hydrophilization treatment of PET film using the plasma source are reported.

#### 1. はじめに

半導体やガラス、金属、プラスチックといった様々な材料基板表面の有機物汚染をプラズマにより分解・除去することが可能である。さらに、プラズマは薬品を使用せず、化学的に活性な状態を

作り出せることから、環境負荷が低く、低温でのプロセスを行うことができる。従来、このようなプラズマプロセスは真空容器内で減圧プラズマを用いて行われてきたが、真空装置の導入及び維持に要するコストが課題となっていた。高価な真空容器が不要な大気圧プラズマ装置は次世代のフィルムプロセス装置として期待されるが、従来技術では処理速度や処理面積に限界があり、実用化に向けてプラズマ生成・応用技術のさらなる向上が求められている。大気圧プラズマの生成方法は様々なものが提案されているが、誘電体バリア放電をはじめとして短パルス放電による方式のものが多く、そのため、時空間的に不均一なプラズマになりやすく、十分な処理効率が得られないことが問題となっていた。このような中、著者はマイクロ波放電に着目した。マイクロ波放電は高密度のプラズマを容易に生成できる一方で、定在波の発生により電磁界の不均一な分布が生まれ、空間的に均一な大規模プラズマの生成が困難であった。そこで、新たな電磁波伝送系を考案し、これによりメートル級幅を均一かつ高速に処理できる新たなマイクロ波大気圧プラズマ源を提案し、様々なガスにより高密度・長尺・均一なプラズマ生成に成功した[1,2]。

本装置の有用性を実証するために、幅広フィルムプロセスに対応した低環境負荷かつ低コストの高速表面洗浄技術の実現を目的とする。本研究が成功すれば、大気圧のプラズマプロセス技術を飛躍的に発展させることから、学術的だけでなく工業的な観点からも研究の意義は非常に大きい。

## 2. 実験方法

まず、生成されたプラズマの空間均一性の評価を行った。図1にプラズマ生成装置の概略図を示す。詳細な構造は参考文献[1]に示している。電磁波電力を伝送する導波管の壁面に長尺かつ幅が狭い穴(スロット)を設ける。このスロットが設けられた導波管に、導波管壁小穴から導波管内にArガスを導入し、マイクロ波電力(900 W)を入射すると、スロット内に電界が発生し、これにより電子が加速され、プラズマが生成される。図2に生成されるプラズマの一例を示す。メートル長に渡って、大気圧プラズマが生成されている。このプラズマは、0.1mm程度の狭いギャップ間で生成されるために、1mに渡って空間分布の均一性を調査するためには精細な計測が求められる。具体的には、図3のように長尺装置の長手方向に沿って駆動レールを設け、光学顕微鏡を取り付けた。顕微鏡の拡大倍率は20倍とした。レールに沿って顕微鏡を掃引し、写真を撮影し、画像解析を行うことにより、スロット長手方向のプラズマの発光強度均一性を評価した。

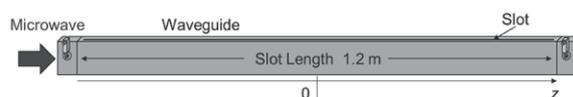


図1. メートル長尺大気圧マイクロ波プラズマ装置

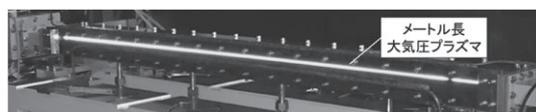


図2. 生成されたプラズマの一例

また、本装置を用いた表面処理性能を評価するため、表面処理実験の一例として、PETフィルムの表面親水化処理を行った。図4のようにスロット下部に設置された可動ステージを用意し、この上に処理対象物を載せ、長尺プラズマ近傍を横切るようにスライドさせることで、プラズマを照射し、処理を行った。処理対象物としてはPETフィルムを用い、処理前に脱イオン水で表面の洗浄を行った。スロットとフィルム基板との距離は1.5 mmとした。スロット中央から10 cm間隔に並べた5枚のPETフィルムを親水化処理し、接触角を測定することで濡れ性を評価した。

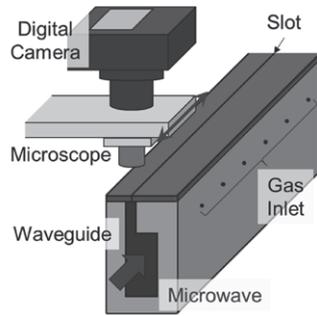


図3. 長尺方向空間分布顕微測定系

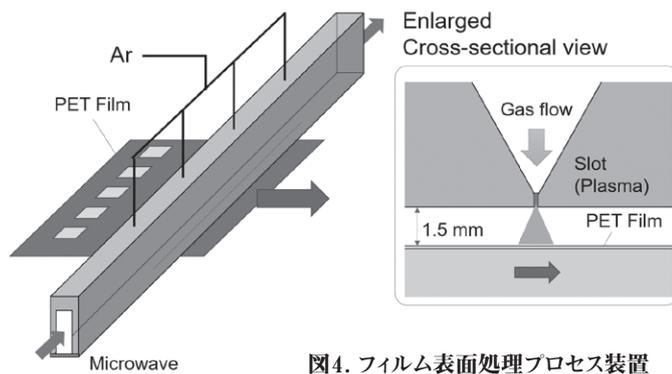


図4. フィルム表面処理プロセス装置

### 3 実験結果

#### 3.1 長尺方向発光分布計測

顕微鏡を用いて導波管中央から±30 cmの範囲の発光強度の空間分布計測を行った。撮影された写真の一例を図5に示す。画像解析から、スロット幅のばらつきは±6%程度に収まっており、スロット幅は高い均一性があることが確認された。また、発光強度解析を行った例を図6に示す。x軸はスロット幅方向、z軸はスロット長手方向、縦軸は発光強度を示している。x軸方向に対しての変化を見ると スロット壁近傍で発光強度がわずかに増加していることが確認できる。これはスロット近傍に電子エネルギーの高い領域が生成されるためと考えられる。また、z軸方向に対する変化を見ると、ほぼ一定であることが確認できる。スロット中央部 (x=0 mm) における発光強度を評価したところ +z方向に向かって発光強度はわずかに低下していたが、そのばらつきは±5%以内と高い空間均一性を有していた。

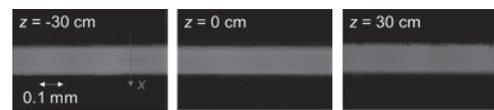


図5 撮影されたプラズマ発光

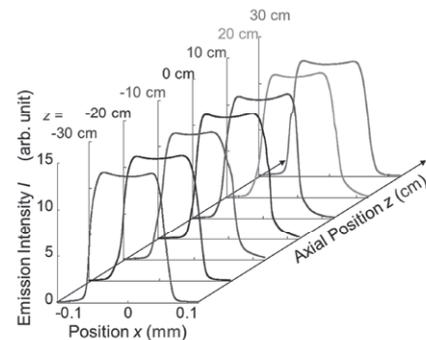


図6. プラズマ発光強度空間分布

#### 3.2 PETフィルム表面親水化処理実験

樹脂フィルムにプラズマを照射するとプラズマの科学活性種やイオン、UVの効果により、表面の有機物汚れが分解されたり、化学結合が変化したりすることにより、表面の濡れ性が向上する。本実験の親水処理例を図7に示す。濡れ性が向上し、液滴の接触角が減少していることがわかる。また、樹脂フィルム基板上に熱的なダメージは確認されなかったことから、プラズマ照射による温度上昇は小さく、低温で処理されていると考えられる。

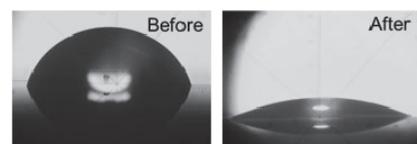


図7. 表面親水化の例

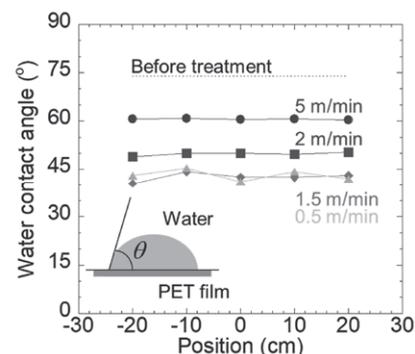


図8. 接触角空間分布

図8に基板の送り速度を変化させた際の、処理後フィルムの水接触角の空間分布を示す。プラズマの空間分

布と同様に処理の長手方向及び基板の送り方向の空間均一性も良好であることが確認された。また、処理速度の上昇とともに処理効率は低下しているが、これはプラズマ照射時間が短くなるためと考えられる。図9に速度依存性を示す。照射時間に足する処理効率を評価するために、実効的なプラズマ処理幅を測定した。具体的には透明なステージ及び基板を用いて、処理を行う距離までステージをプラズマに近づけ、写真を撮影し、画像解析から処理幅を求めた。その結果、プラズマが照射されている幅は1mm程度であった。この値と、処理速度の依存性から処理時間に対する依存性を求めたところ、図10のようになり、約100 ms以内にフィルム表面の親水化処理が完了していることが明らかとなった。これは先行研究と比較して、非常に高速な処理であった。

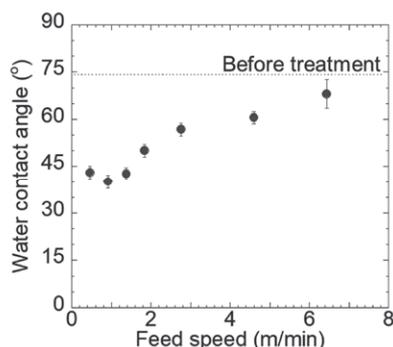


図9. 送り速度依存性

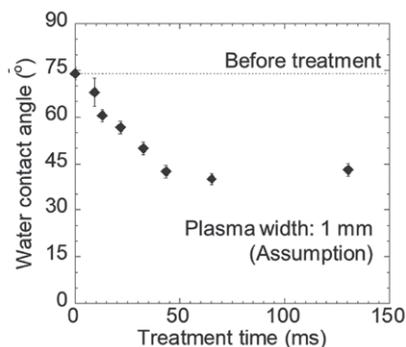


図10. 処理時間依存性

#### 4. まとめ

本研究では、長尺に渡って生成された大気圧マイクロ波プラズマの空間分布計測および、これを用いたフィルム処理実験を行った。どちらも、高い空間均一性が確認され、フィルム処理においては低温処理である一方で、処理速度は非常に高速であった。このように、メートル長に渡って、均一な大気圧マイクロ波プラズマを生成し、それを幅広処理に応用する例は多くなく、今後、難分解性有機物の除去処理など、さらに高度な表面処理への応用が期待される。

#### 参考文献

- [1] New line plasma source excited by 2.45 GHz microwave at atmospheric pressure, *Appl. Phys. Express*, **8**, 036001, 2015, H. Suzuki, S. Nakano, and H. Toyoda (他3名)
- [2] An approach to line-shaped nitrogen plasma production at atmospheric pressure by slot-excited microwave discharge, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**, 116001, 2017, H. Suzuki and H. Toyoda.