

シースガス流による大気圧プラズマジェットの反応過程制御

Control of Reaction Process in Atmospheric Pressure Plasma Jet Using Sheath Gas Flow

1215042 小川 広太郎 (プラズマ応用研究室)
(指導教員 八田 章光 教授)

1. はじめに

大気圧プラズマ技術は、近年、創傷治癒、殺菌に始め、遺伝子導入、癌治療等、医療・バイオ分野への応用が急速に拡大している。プラズマと周囲空気との反応により生成される活性酸素種および活性窒素種(RONS: Reactive Oxygen and Nitrogen Species)が上記の応用への鍵となる。特に、がん治療においてプラズマ由来の RONS は、正常細胞には影響を与えず、がん細胞のみ死滅させるという選択的な抗腫瘍効果を持つと報告され、手術、放射線、抗癌剤、免疫療法に並ぶ新たな癌治療法として注目を集めている[1]。従来、大気圧プラズマの癌治療応用研究に用いられる装置構造は、ガラス管に電極を巻き付けた単電極構造が広く使用されており、ガラス管に He や Ar 等の希ガスを流し、ピーク間電圧数 kV オーダーの交流電圧を電極部に印加してプラズマを生成する。しかし、従来構造では静的な周囲大気へのプラズマガス流の噴出により乱流が生じるため、RONS 生成は制御性に欠ける。そこで本研究では、二重管構造の大気圧プラズマジェットを提案し、中心の He ガス流を取り囲むようにシースガスを流し、ノズル下部における層流形成により気相中の RONS 生成制御に挑戦した。

2. 実験方法と結果

光学実験と流体解析の結果を踏まえ、内径 3.2 mm、外径 4.0 mm の放電管の外側を覆うように内径 8.0 mm、外径 10.0 mm のガラス管を取り付けた二重管構造のプラズマジェットを作製した(図1)。放電管(内管)には He を 0.5 slm 流し、電極部に 7 kV_{p-p}、30 kHz の正弦波を印加してプラズマを発生させ、外管に N₂ を 1.7 slm 流し、シースガス流によるプラズマの伸長効果を確認した。

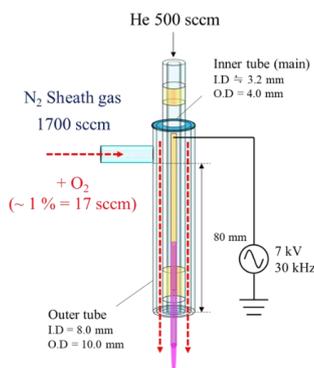


図1 二重管構造大気圧プラズマジェット

極小のガラスキャピラリーを取り付けた差動排気質量分析計を用いてガス組成の空間分布分析を行い、N₂ シースガスの効果を検証した。キャピラリーをガス流に対して垂直に挿入しガスをサンプリングするため、ガス流分布の乱れはないと考えられるが、分析できるのは安定な分子ガスである N₂、O₂、He のみである。図2に示すように吸収分光用の石英セルに、脱イオン化水を 4.1 mL (満水) 入れ、ノズル端と水面との距離を 10 mm、キャピラリー位置を水面から 1 mm の高さに設定してガスの径方向分布を分析した。

中心部は He 分圧が高く、He と N₂ の混合流となっており、プラズマ領域から酸素が排除された。プラズマ照射系において、ガス組成の空間分布を安定に制御することに成功した。

次に、プラズマ領域の酸素濃度を希薄にする N₂ シースガス流への微量な O₂ 添加によって RONS 生成制御を試みた。O₂

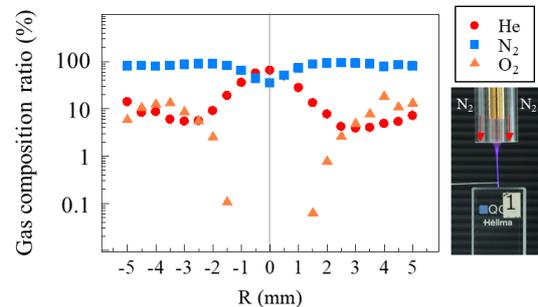


図2 プラズマ照射系における水面近傍のガス組成分布

をプラズマ伸長効果が得られる範囲で 0~17 sccm (最大 1%) まで添加した条件下でプラズマ照射し、紫外吸収分光法でプラズマ処理水中の RONS 生成量について定量分析を行った。照射距離は上述の実験と同様であり、190~340 nm の波長域をプラズマ照射時間である 15 分間、90 秒毎に繰り返し測定した。得られた吸光度スペクトルを波形分離して、プラズマ処理水中に生成する H₂O₂、NO₂、NO₃濃度を定量した[2]。

図3に、O₂ 添加濃度に対する各活性種の生成濃度を示す。H₂O₂ 生成量は O₂ を 0.1% 添加したときに極大値を示すが、さらに添加しても大きな変化は無い。O₂ 添加濃度が増えるにつれ、NO₃ 生成濃度わずかに増加し、NO₂ 生成量は顕著に増大した。NO₂ は気相・気液界面で生成した一酸化窒素(NO)が亜硝酸(HNO₂)を生じ、溶液中における亜硝酸の解離反応を介して生成される[3]。O₂ の添加によって式(1)~(3)の反応が進み、NO₂ 生成量は増大したと考えられる。

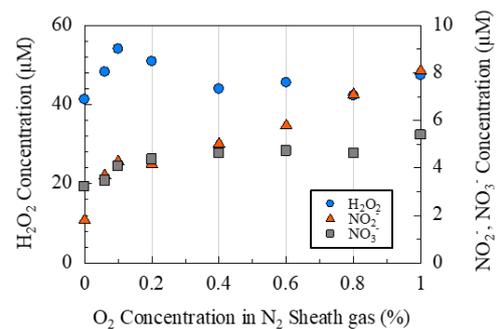
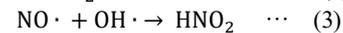
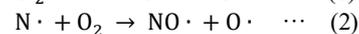
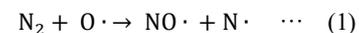


図3 シース窒素流への酸素添加量と RONS 生成濃度の関係

3. まとめ

N₂ シースガス流を用いて層流を形成し、安定したガス流の反応場に反応ガスとして O₂ を添加する事で、気相中での活性種生成、輸送を安定に制御できることを実証した。本研究で提案した手法とその成果は、大気圧プラズマジェットの医療応用に大きく貢献すると期待される。

参考文献

- [1] S. Iseki et al., "Selective killing of ovarian cancer cells through induction of apoptosis by nonequilibrium atmospheric pressure plasma," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 11, p. 113702, 2012.
- [2] J.-S. Oh et al., "UV-vis spectroscopy study of plasma-activated water: Dependence of the chemical composition on plasma exposure time and treatment distance," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 1, p. 0102B9, 2018.
- [3] 石川健治ら, "電子スピン共鳴法を活用したプラズマバイオ反応プロセスの診断", *J. Plasma Fusion Res.* Vol. 93, No. 5, p.246-252, 2017