

室温・大気圧での局所イオン照射技術の開発

名古屋工業大学 生命・応用化学系プログラム 環境セラミックス分野
大 幸 裕 介

1. テーマ設定の背景

材料などにイオンを照射すると物性が大きく変化することから、様々な工学分野でイオン注入技術の導入が検討されている。近年ではまた体内深部の癌細胞の死滅などにもイオン注入技術が活用されている。しかし特定の微小領域のみにイオンを注入するイオン注入技術は全て高真空での実施が前提であり、装置が大型かつ高額のため非汎用的である。より手軽で簡便にイオン照射処理を実施できれば、工学研究や産業・医療など幅広い分野で新たな実験手法や製品、治療技術の創成に繋がると期待される。

2. 素形材分野との関連性

特定のイオンのみが高い導電率で伝導するガラスを、特にイオン伝導性ガラスと呼ぶ。申請者はこのイオン伝導性ガラス(=素形材)の成形性を積極的に活用して先鋭化加工を施すことで、ガラス先端から室温の大気圧条件でもイオンが放出されることを実証した。イオン照射による炎症やかゆみといった皮膚症状の緩和など新しい治療技術や、イオン照射によって誘起される化学反応を利用した素形材(ガラス、高分子)の新しい加工技術など、様々な分野への研究展開を進めている。

3. 研究開発の成果

イオン伝導性ガラスを独自の先鋭化装置によって数マイクロメートル程度に先鋭化して電圧を印加すると、ガラスの種類や組成に応じて、ガラス中を伝導するイオンが非真空の大気圧においてガラス先端から放出されることを明らかにした。銀ロッドに銀イオン伝導性ガラスを接合して先鋭化し、ロッドと引抜電極(中心に孔の空いた金属板)の間に高電圧を印加すると、およそ

2 kVを超えた辺りからイオン放出に伴う電流が観測され、ターゲットには銀ナノ粒子が析出した。また重量とイオン電流値を同時計測する装置を水晶振動子を用いて設計し、ガラス中を伝導するイオンが先端から放出されることを確認した。さらに大気圧で H^+ や Ag^+ イオンをごく少量(1~2ピコモル)生細胞に直接照射すると未照射と比較して細胞数が増加し、逆に多量のイオン照射では細胞死に至ることを見出した。

3.1 銀イオン伝導性ガラス

銀イオン放出には $AgI-Ag_2MoO_4$ 系ガラスを用いた。水晶振動子微量天秤(QCM)は周波数変化を質量変化に換算するもので、1 Hzがおおよそ1 ngの質量変化に対応する。測定雰囲気(風向や気温、電源ノイズ等)に敏感であり、水晶振動子電極は銅箔を貼ったセル内に設置することで高電圧印加時にも十分な精度の質量測定が可能となった。QCM電極とピコアンメーターを接続することで、質量変化とイオン電流の両方を同時計測可能となる。

室温大気圧下でガラスエミッタに2.5 kVの電圧を印加し、QCM電極をターゲットとしてイオン放出実験を行った結果を図1に示す。点線は Ag^+ イオンのみが放出されていると仮定し、電流値と測定時間の積をファラデー定数(96500 C/mol)で除することで(電流値から)算出した質量、また実線は水晶振動子から求めた質量の時間変化をそれぞれ示している。室温では質量の値が2時間以上、また60℃では4時間以上計算値と合致しており、 Ag^+ イオンのみが長時間ガラスから放出されていることを示している。60℃では室温に比べ、銀ロッドからガラスへ Ag^+ イオンが供給されやすいことが示唆された。

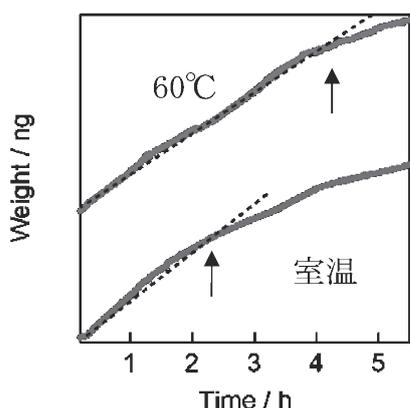


図1 QCM測定結果（点線は電流値から計算した質量、実線は水晶振動子の振動数変化から求めた質量変化を表す）

3.2 生細胞へのイオン照射

大気圧条件では生細胞など真空下では死滅してしまうものに対してイオン照射可能である。図2に銀イオンをマウスマクロファージに5～30秒照射して1、2および3日培養後の生細胞数変化を示す。未照射細胞と比較して、銀イオンを少量（5～20秒）照射すると3日培養後の生細胞数が有意に増加した。マクロファージは血管再生などに関与し、外傷の早期治療や細胞の代謝活性などが期待される。他方、多量（30秒）イオン照射を実施すると、細胞数はむしろ低下した。このような傾向は他の細胞やイオン種でも再現性よく確認されており、細胞形態や代謝活性など多方面から詳細を調べている。

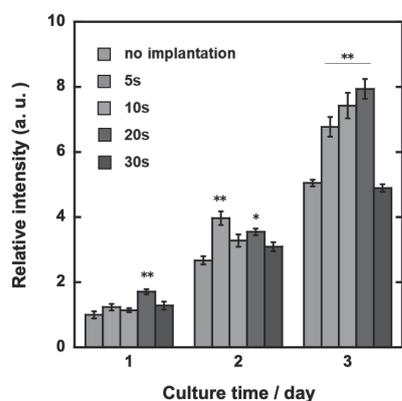


図2 マウスマクロファージ（RAW264）に5～30秒銀イオン照射して1、2、3日培養後の生細胞数

4. 訴求点

一般に局所イオン注入に関する報告や市販装置は全て高真空条件での実施が前提である。大気圧条件では放出されたイオンが大気中の分子などと衝突してエネルギーを失うためであり、大気圧条件でのイオン照射は効果が無い、と見なされていた。また大気圧条件ではおよそ3 kV/mmを超えると放電が生じるため、3 kV/mm以下の印加電圧でイオンを放出させる必要がある。イオン伝導性ガラスを先鋭化したことでガラス先端に10億V/mを超える電界を集中でき、イオン銃を数cm程度の大きさまで小型化するとともに、直径5マイクロメートル程度の微小領域にイオン照射が可能となった。また例えば細胞は真空中では水分を失って失活するが、本技術は大気圧でイオン照射できるため、生細胞に直接イオンを照射することが可能となった。このように本技術は簡便なイオン照射技術として医療、工学、さらに宇宙産業など様々な分野に広く波及効果がある。今後も放出機構や放出寿命、また骨形成に重要なCa²⁺イオンを放出可能な新しいイオン伝導性ガラスの開発などを通じて、イオン照射による炎症やかゆみといった皮膚症状の緩和など、新しい医療技術、また新しい工学技術の発展に資する。

参考文献

Daiko, Y; Segawa, K; Machida, K; Imataka, H; Honda, S; Iwamoto, Y, Palm-Sized Ag⁺ Ion Emission Gun Operated at Room Temperature in Non-Vacuum Atmosphere, *Adv. Eng. Mater.*, 2018, **20**, 1800198.