

# 高速重イオン照射によるヌクレオチド損傷のエネルギー依存性に現れる液体環境の影響

手塚智哉、本郷瑞起、中川創平、今井誠、間嶋拓也、斉藤学<sup>1</sup>、土田秀次<sup>1</sup>

京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科附属量子理工学教育研究センター

## 1. 緒言

放射線の生物影響における初期過程は、細胞内の DNA 分子の損傷過程である。DNA の損傷には鎖切断や塩基損傷、またこれらが数塩基対間に密に形成されたクラスター損傷がある。損傷が DNA 修復酵素によって正常に修復されなかった場合、細胞死や突然変異に至り、人体の放射線障害が誘発される。放射線と DNA の相互作用を理解する上で、特に、DNA の周辺には水分子が配位しているため、液体における生体分子の損傷過程の解明が重要になる。本研究では DNA の部分構造であるヌクレオチド分子を用いて、放射線損傷過程における液体環境の影響を明らかにすることを目的とした。高速重イオン照射によって、生体分子の水溶液と固体の2種類の標的から放出される二次イオンを測定し、両標的の比較から液体環境で見られる生体分子損傷過程の特徴を議論する。

## 2. 実験

実験は、京都大学工学研究科附属量子理工学教育研究センターの 2.0 MV タンデム型ペレットロン加速器を用いて行った。用いたイオンビームは 1.0–6.0 MeV の酸素イオンである。図 1 に水溶液標的を測定する際の実験装置の概略を示す。生体分子標的は、ウリジン 5'-リン酸 (uridine 5'-monophosphate, UMP) で、その水溶液(濃度:  $0.226 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ )を真空内液体分子線法によって真空中に導入

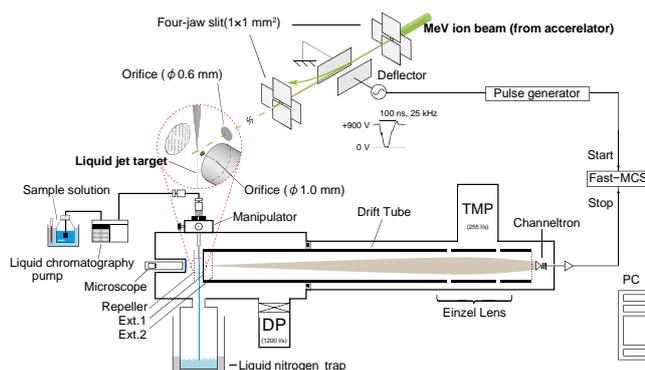


図 1. 水溶液標的における実験装置の概略。

し、加速器からのイオンビームをビームライン上でパルス化して照射した。標的から放出された正の二次イオンを電場によって引き出し、飛行時間型質量分析計によって二次イオンの質量電荷比を決定した。真空中に導入した液体標的は、液体窒素トラップによって凝固し、衝突散乱槽の真空度は  $2 \times 10^{-2} \text{ Pa}$  である。また、質量分析計の部分は、衝突散乱槽と差動排気されており、 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  以下の高真空に保たれている。

固体標的は、シリコン基板上に UMP 水溶液を滴下し、自然乾燥させることで作製した。固体標的の照射実験では、試料台に正電圧を印加した。その他の測定方法は水溶液標的の照射実験と同様である。

### 3. 結果と考察

図 2 に 2.5 MeV  $O^{2+}$  ビーム照射によって、UMP 水溶液及び固体標的から放出された正の二次イオン質量スペクトルを示す。図中に破線で示す二次イオンは両標的のどちらからも観測された二次イオンであり、それらのイオンは、リン酸基が損傷した  $[PO+R]^+$  ( $m/z = 163$ )、リボース部位が損傷した  $C_4H_6O_2^+$  ( $m/z = 86$ )、 $[CH_2O+U]^+$  ( $m/z = 141$ )、 $[C_3H_5O_2+U]^+$  ( $m/z = 184$ )、ウラシル部位が損傷した  $C_2HNO_2^+$  ( $m/z = 71$ )、リン酸基とリボース部位が損傷した  $[PO_2+CH_3]^+$  ( $m/z = 62$ )、 $[PO_3+C_2H_3O]^+$  ( $m/z = 122$ ) であると同一化した。ここで、分子式の R と U はそれぞれ無傷のリボース部位 ( $C_5H_8O_3$ ) とウラシル部位 ( $C_4H_3N_2O_2$ ) を表す。両標的から得られた二次イオンについて、入射粒子数で規格化した二次イオン収量の入射エネルギー依存性を図 3 に示す。水溶液標的では二次イオン収量が入射エネルギーとともに増加する傾向であるのに対し、固体標的の場合は、入射エネルギーが 3.0 MeV 付近で最大となる。こうしたエネルギー依存性の違いは、UMP 分子へのエネルギー付与過程の違いに起因するものである可能性がある。固体標的ではイオンビームのエネルギーが媒質である UMP 分子に直接付与されるのに対し、水溶液標的ではイオンビームのエネルギーは媒質である水分子に付与され、生成される二次電子が UMP にエネルギーを付与すると考えられる。液体の水からの全二次電子生成断面積<sup>[1]</sup>と水溶液標的からの二次イオン収量は、1.5–6.0 MeV の範囲で増加傾向にあるという点において類似している。

発表では、生成される二次電子エネルギーに着目した部分断面積と二次イオン収量との相関について議論する。また、二次イオンの部分構造の有無による分類の二次イオン収量の割合の、水溶液標的と結晶標的との変化についても議論する。

#### 参考文献

[1] E. Scifoni, E. Surdutovich, A. V. Solov'Yov, *Phys. Rev. E*. 81 (2010) 1–7.

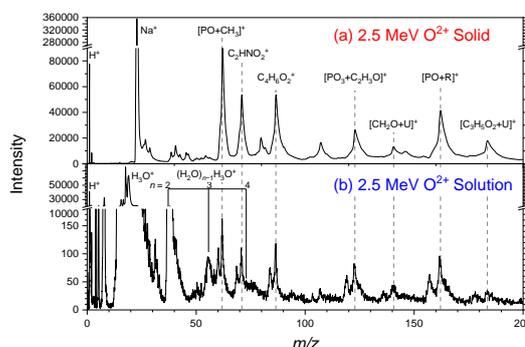


図 2. 酸素ビーム照射による(a)固体標的 (b)水溶液標的からの二次イオン質量スペクトル。

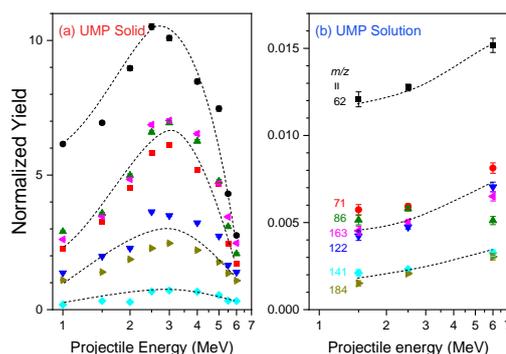


図 3. 両標的から観測された二次イオン収量の(a)固体標的(b)水溶液標的における入射エネルギー依存性。