

重粒子線照射で生ずるスクロースラジカルの  
ESR イメージングによる画像解析  
Investigation of Heavy-Ion Induced Sucrose Radical  
Analyzed by ESR Imaging  
(14H340)

中川公一<sup>1</sup>、原 英之<sup>2</sup>、松本謙一郎<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>K. Nakagawa, <sup>2</sup>H. Hara, and <sup>3</sup>K. Matsumoto

### Abstract

We investigated stable radical-production of sucrose radicals produced by heavy-ion irradiations with various LET. The heavy-ion results were compared with X-ray irradiation at the similar dose. The 9 GHz electron spin resonance (ESR) and 2D ESR imaging results suggested that radical species were mostly located inside the sucrose crystal. Fewer radicals were found at injected region of the sucrose crystal. The present ESR and ESR imaging suggest that the radical distribution can vary with changes in LET and absorbed dose. We also demonstrated that the 9 GHz ESR imaging were powerful for the determination of the spatial distribution of paramagnetic species in heavy-ion irradiated sucrose.

### 1. 研究目的

砂糖(スクロース)は人類の究極の甘味料である。二糖類であるスクロースや最も簡単なアミノ酸であるアラニンに放射線を照射すると、室温できわめて寿命の長い(安定な)ラジカルができることはよく知られている。

重粒子線照射でアラニンやスクロースが、どのように安定ラジカルの生成やラジカル特性を示すのか、ラジカルのイメージング解析は不明な点が多い。例えば、生成するラジカルは、重粒子線特有のパラメーターである LET [keV/μm] の変化とラジカルサイトの ESR/EPR 画像変化による解明である。

これまでの ESR 測定では、照射試料内のラジカルの存在や濃度について知ることができたが、試料のどの部分から信号がどれくらい出ているか特定できなかつた。我々は、

照射試料に磁場勾配を掛けて試料内のラジカル分布を特定し、スクロース結晶のどの部分に安定ラジカルが生成するかを探究する。

### 2. これまで得られている結果

スクロースに重粒子線(He イオンや C イオンなど)を照射し、生成したスクロースラジカル量の ESR 解析で、安定ラジカル生成には重粒子線の LET 依存性と重粒子自身の依存性があることをはじめで見出した<sup>1-2</sup>。

### 3. 今年度の研究内容

- ・ **照射試料** 市販のスクロース結晶を用いた。結晶は 9 GHz ESR のキャビティ(空洞共振器)に挿入できるサイズとした。
- ・ **照射** Fig. 1 に結晶への照射方向を示した。重粒子線は C イオン(290 MeV/u)を用いた。LET は 28 と 50 で約 90 Gy とした。X-線照射についても検討した。信号が強くなるため、線量を 60 Gy とした。条件は、0.5 mm Al と 0.3 mm Cu フィルターを用い低エネルギーをカットした。

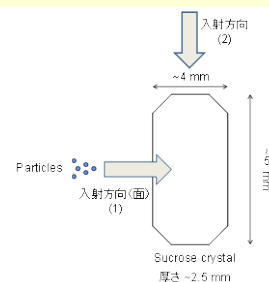


Fig. 1. Schematic illustration of a sucrose crystal (space group  $P2_1$ ) for C-ion and X-ray irradiations. The arrows indicate radiation directions. Approximate crystal sizes were also indicated.

今回は、安定ラジカル生成における C イオンの二つの線量依存性と LET の違いによる安定ラジカル分布などを ESR イメージングで検討した。

#### 4. 今年度の ESR 解析による新たな研究成果

Fig. 2 は、スクロース結晶(約 0.0510 g)に重粒子(C ion) 線及び X-線を照射して生じ、再結合過程を経た安定ラジカルの ESR スペクトルである。同一条件化で室温測定した。X-線照射で得られたスペクトルは、信号の S/N から判断して強かった。C290 イオン照射で得られたスペクトルは、X-線照射で得られた信号よりやや弱く、個々のピークの違いが見られた。

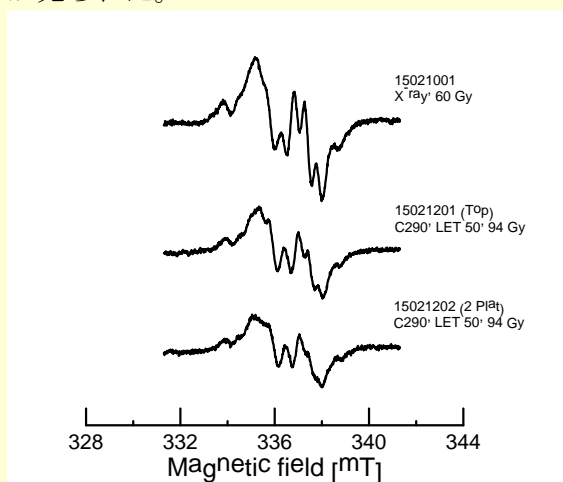


Fig. 2. ESR spectra of X-ray irradiated (top), C-ions at LET 50, 94 Gy (direction (1), middle), and C-ions at LET 50, 94 Gy sucrose (direction (2), bottom) radicals.

Fig. 3 は、スクロース結晶の照射面が方向 (1) から照射した。得られた 9 GHz ESR 画像である。図の上が C290 照射(LET 50, 94 Gy)で、下が X 線照射した結晶である。二つの結晶を横長に上・下に並べて ESR ロッドへ貼り付け、同時に ESR 画像測定を行った。

ESR イメージングの分解能は、スペクトルのピークの線幅から 320  $\mu\text{m}$  程度である。C イオンでは弱く、X 線では全体的にやや強い画像が得られた。これらは、Fig. 2 で得られているスペクトルのそれぞれのラジカルの強度によると考えられる。

Fig. 4 は、スクロース結晶の照射面が方向 (2) から照射した図である。図の上が C290 照射(LET 50, 94 Gy)で、下が X 線照射した結晶である。測定方法は、前述の Fig. 3 の場合と同じである。

C イオンでは、右半分くらいのラジカル画像が得られ、その中ほどがやや強い画像とな

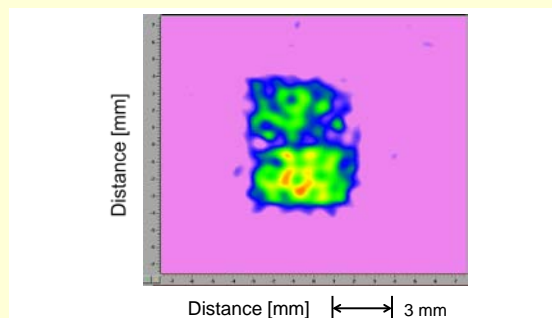


Fig. 3. The ESR imaging of sucrose radicals irradiated by C-ions at LET 50, 94 Gy (top), and X-ray at 60 Gy (bottom). Both crystal sizes were the similar sizes.

っていることが分かる。結晶の大きさは、下の X 線照射した結晶とほぼ同じであるから、照射方向(2)からの炭素粒子は、結晶のほぼなかほど以降で安定ラジカルを作ることができなかったと言える。すなわち、粒子線はこのあたりで止まったと考えられる。

一方、X 線照射した結晶では全体的に強いラジカル画像が得られ、しかも、ラジカル強度が結晶全体に広がっていることが分かる。

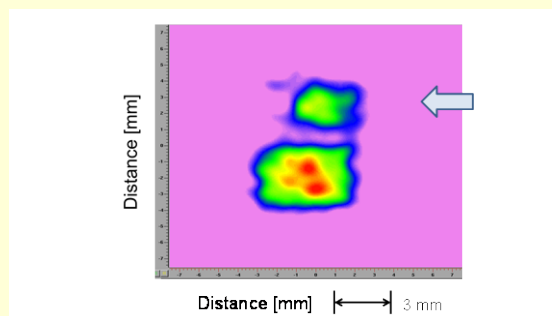


Fig. 4. The ESR imaging of sucrose radicals irradiated by C-ions at LET 50, 94 Gy (top), and X-ray at 60 Gy (bottom). The arrow indicates radiation direction for C ion. Both crystal sizes were the similar sizes.

#### 5. 参考文献

1. K. Nakagawa, K. Kobukai, and Y. Sato, "ESR Investigation of sucrose radicals produced by 0.25–4.5 Gy doses of X-ray irradiation," *J. Radiation Research*, **55**(4), 726-729 (2014).
2. K. Nakagawa, Y. Karakirova, N. D. Yordanov, "Heavy-ion induced sucrose radicals investigated using EPR and UV spectroscopy," *J. Radiation Research*, in press (2015). [Review article]

<sup>1</sup> 弘前大院保健学

<sup>2</sup> ブルカー・バイオスピン(株)

<sup>3</sup> 放医研・先端粒子線生物 P

## 研究成果一覧 (14H340)

### (1) 原著論文

K. Nakagawa, Y. Karakirova, N. D. Yordanov, “Heavy-ion induced sucrose radicals investigated using EPR and UV spectroscopy,” *J. Radiation Research*, in press (2015).  
[Review]

### (3) 学会ポスター発表

### (4) その他成果