

日大 PXR 線源の現状とその特性を利用した応用

早川恭史^{a*}, 早川建^a, 金田隆^b, 河野哲朗^b, 野上杏子^a, 境武志^a, 住友洋介^a,
高橋由美子^a, 田中俊成^a

^a 日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

^b 日本大学大学松戸歯学部 千葉県松戸市栄町西 2-870-1

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA: Laboratory for Electron Beam Research and Application) では 125 MeV 電子リニアックを利用し、パラメトリック X 線放射 (PXR: parametric X-ray radiation) と呼ばれる現象を放射源とするエネルギー可変単色 X 線源を運用している。2005 年に運用を開始して以来、線源としての性能改善とともに、PXR の特徴を生かした応用の開拓に取り組んできた。特に X 線イメージングが主要な応用となっており、エネルギー選択性や単色性、優れた空間コヒーレンスといった特徴を利用した実験が数多く行われている。

PXR は結晶に相対論的な電子が入射することによって生じる電磁放射線現象であり、X 線 Bragg の回折条件に類似して電子の入射角度に応じて放射される X 線のエネルギーが変化し、単色性の高い X 線が得られる。結晶を電子ビームのターゲットとすることで放射源となるが、LEBRA では Si 単結晶をターゲットとして採用している。必要な X 線のエネルギー範囲に応じて、用いる結晶面を選んでいるが、イメージング実験では比較的高いエネルギーが必要なため、2014 年以降は 34 keV までの X 線が得られる Si(220) 面を使用している。

LEBRA-PXR 線源の代表的な応用として、回折強調イメージング (DEI: diffraction-enhanced imaging) が挙げられる。これは PXR 線源のものと同じ結晶面を分光結晶として試料の後方に配置し、分光結晶として用いることで、試料を透過することを受ける X 線の屈折・散乱の影響を画像として測定する手法である。画像検出器の画素毎に回折曲線を観測する異に相当し、位相コントラストイメージングなどの先端的な X 線イメージングが可能である。LEBRA では 2005 年に初めて DEI による位相コントラストイメージングに成功し、それ以降は生体試料に対する有効な測定な手段となっている [1]。また、最近では屈折による位相コントラストイメージングに加え、X 線が受ける超小角散乱で画像のコントラストを作る新しいイメージング手法で成果が得られつつある [2]。これは 0.1~数 μm 領域の粒子状、繊維状の構造を反映し、場所毎の状態の違いを画像のコントラストとして可視化するものである。これも生体試料の観測や分析に有用

と考えられ、予備的な段階ではあるが、精力的に利用研究がなされている。

また近年、フラットパネル検出器 (FPD: flat-panel detector) のように大面積で高効率な X 線画像検出器が比較的安価に入手可能になったことから、3次元のコンピュータ断層撮像 (CT: computed tomography) を LEBRA のマシンタイム内で取得することが現実的となった。X 線量や検出器の効率を考慮するとエネルギー 30 keV 以下での実施が現実的であるので、試料としては軽元素・低密度物質という制約があるが、直径 100 mm という単色 X 線 CT としては比較的大きな視野を取ることができる。CT の場合、現実的な測定時間の関係もあって、従来の吸収コントラストによる撮像が基本となっている。その中で、試料物質の K 殻吸収端を利用した元素イメージングを実現している [3]。これは DEI の測定系を流用し、吸収端エネルギーを挟んだ 2 色の X 線で同時撮像する方法で、シンクロトロン放射光施設でも行われていない、非常にユニークな手法である。Figure 1 は、エポキシ樹脂中に SrTiO₃ を含んだポリエチレン片を分散させた試料に対する測定で、Sr 元素の 3 次元分布が得られていることが分かる。今後の高度応用の主軸になると期待している。

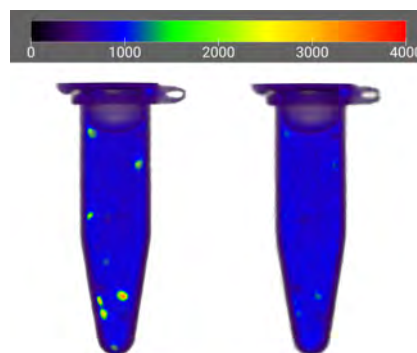


Figure 1: それぞれ、左) Sr-K 吸収端 (16.1 keV) より高エネルギー側、右) Sr-K 吸収端より高エネルギー側の CT 像

References

- [1] Y. Hayakawa et al., J. of Instrumentation **8** (2013) C08001.
- [2] Y. Hayakawa et al., J. Phys.: Conf. Ser. **517** (2014) 012017.
- [3] Y. Hayakawa et al., Phys. Rev. Accel. Beams. **22** (2019) 024701.

*e-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp