BL20B2 医学・イメージング I

1. 概要

BL20B2は、偏向電磁石を光源とした中尺ビームライ ンであり、蓄積リング棟内の実験ハッチ1および中尺 ビームライン実験施設実験棟内の実験ハッチ2,3におい て、X線マイクロCTをはじめとするX線画像計測実験 等に利用されている。蓄積リング棟内にある実験ハッチ 1では、高いX線フラックス密度を必要とする高分解能 画像計測や高速・4D画像計測(例えば3次元画像計測+ 時間分解測定)が行われている。一方で、光源から200 m以上離れた場所に位置する実験ハッチ2,3では、X線 ビームの自然発散によって得られる質の高い大面積ビー ムを用いた広視野画像計測や、光源からの長距離伝搬に 伴う高い空間コヒーレンスを利用した位相情報を用いた 画像計測が行われている。

2. 広視野高エネルギー X線マイクロCTの開発

X線マイクロCTは、非破壊で試料内部の様子を高い 空間分解能で可視化することが可能である。X線マイク ロCT計測を行う上で必要なのは、試料の透過投影像で あり、エネルギーチューニングが可能な放射光施設で は、測定対象の試料に対して必要十分な透過率が得られ るように、最適なX線エネルギーを選択して測定を行 う。例えば、主に有機物で構成された試料の場合、試料 の大きさにも依存するが、概ね15~30 keVのX線が用 いられる。一方で、試料中に金属等が含まれる場合や、 試料サイズが大きい場合、十分な透過率を得るために は、より高いX線エネルギーが必要となる。しかし、ビー ムライン二結晶分光器における結晶は、得られるビーム フラックス密度を優先させるため、通常Si(111)平板 結晶が用いられている。Si (111) 面の場合、SPring-8 の標準型二結晶分光器で出力できるエネルギーは37.8 keV までであり、これよりも高エネルギー X 線ビーム の利用のためには、分光器結晶のセッティングを変える 必要がある。その一方で、SPring-8標準型二結晶分光器 では、Si (311) 面を基準として、面切り替えによりSi (111) およびSi (511) 反射が利用できるが、Si (311) 以外の反射面(傾斜配置)では、エネルギー分布に傾き が発生すること、ビームの横幅が不十分であることを理 由に、BL20B2ではほとんど利用されていない。近年の 傾向として、中尺ビームラインBL20B2の特徴である大 面積ビームを利用した、化石のような大型試料の非破壊

高分解能観察といった需要が増えてきており、これらに 対応するために、高エネルギーX線ビームを利用でき る計測環境の整備、および試験計測を行った^[1]。

まず、高エネルギーX線ビームを得るために、Si (511) 面を反射面とした結晶を導入した。形状は平板結晶と し、結晶ホルダーごと通常使用しているSi(111)結晶 と交換できるようにした。なお、第一結晶にはSi (511) 面、第二結晶にはSi(111)結晶によるSi(333)面から の反射を用いた。これにより、標準型の二結晶分光器で 最大113.3 keVまでの高エネルギービームを利用するこ とが可能となる。通常、二結晶分光器の結晶には、無擾 乱鏡面研磨した結晶が用いられるが、Si(511)結晶に よる反射では、結晶反射面を粗面化したもの(以降、ラッ プ研磨結晶,仕上げ面#1200相当)を用いた。これは、 Si (511) 面からの反射の場合、エネルギー分解能が高 い(ロッキングカーブの幅が狭い)ことに伴い、特に 100 keV以上の高エネルギーX線ビームでは、単色ビー ムの強度安定化に長時間を要すること、また単色化され たビーム強度の低下が顕著に現れることによるものであ る。なお、第二結晶のSi(111)結晶もラップ研磨(仕 上げ面#1200相当)を施したものを用いた。

高エネルギービーム強度の評価として、Si (511) 結 晶において無擾乱研磨結晶およびラップ研磨結晶によっ て得られるビームフラックスと、比較のために通常ビー ムラインで利用されているSi (111) 結晶によるビーム フラックスをエネルギーに対してプロットしたものを Fig.1 に示す。Si (511) 結晶による反射では、25 keV以 上において、ラップ研磨結晶の方が高いビーム強度が得 られることがわかる。また、ビームラインエンドステー ション(実験ハッチ3)におけるX線エネルギー113.3 keVでのビームおよび鉛直方向の強度プロファイルを Fig.2に示す。ラップ研磨結晶の採用により、ビーム強 度の向上、およびビーム鉛直方向の有効領域拡大に伴う 有効視野の拡大を達成することができた。その一方で、 ラップ研磨結晶を用いることによる弊害として、粗面化 した結晶によりブラッグ反射されたX線ビームの空間 コヒーレンスは大きく乱される。これにより、光源に近 い蓄積リング棟内の実験ハッチではラップ研磨結晶を用 いたX線画像計測を実施することはできず、光源から 200 m以上離れた下流側実験ハッチのみで実施可能であ る。



露光時間は1 sec

広視野高エネルギー X線マイクロCTのデモンスト レーションとして、ボリビア産のノジュールの測定を 行った。測定したノジュールの外観写真をFig.3 (a) に 示す。X線マイクロCT計測の測定条件は、X線エネル ギー113.3 keV、投影数1800、露光時間2 sec、画素サイ ズ24.7 μm、試料-検出器間距離5 mである。なお、投 影像の縦方向の視野サイズは、Fig.2に示すようにビー ムサイズによって制限されるため、それよりも大きな 試料に対応するため、試料を鉛直方向に走査して複数 回のCT測定を行うことにより、試料全体の計測を行っ た。再構成演算によって得られたノジュールの断面像を Fig.3 (b) に示す。また、試料全体を再構成した3次元 レンダリング像をFig.3 (c) に示す。長径50 mm程度 の化石試料に対して、その内部構造の様子を非破壊かつ



Fig.3 (a) 測定を行ったボリビア産ノジュールの外観写真(b) X線マイクロCTによる断面像(c) 3 次元レンダリング像

3次元で観察できることを確認することができた。

3. まとめと今後の展望

ビームライン二結晶分光器の結晶として、Si (511) ラップ研磨結晶を導入することにより、100 keV以上の 高エネルギーX線ビームを効果的に画像計測に利用で きる環境を構築した。また、高エネルギーX線マイク ロCT計測のデモンストレーションでは、50 mm径程度 の化石試料に対して、その内部構造を詳細に可視化でき ることを確認した。今後の展望としては、単結晶タイプ の蛍光体の導入による高エネルギー画像計測の高効率化 や、高精細画像検出器の導入により、広い計測視野を維 持した上での空間分解能の向上などを行っていく予定で ある。

Reference:

[1]K. Uesugi and M. Hoshino, Proc. SPIE 10391 (2017) 103911D.

JASRI 利用研究促進部門 イメージンググループ

星野 真人、上杉 健太朗