

BL20XU 医学・イメージングⅡ

1. 概要

BL20XUはハイブリッド型アンジュレータを光源にもつ全長約250 mの中尺ビームラインである。蓄積リング棟内にある実験ハッチ1（光源より80 m）および中尺ビームライン実験施設内にある実験ハッチ2（光源より245 m）があり、両方でマイクロCTや、これにX線回折を組み合わせたXRD-CT、各種in-situ, operandoイメージング測定が実施されている。どちらのハッチを使うかは必要とされるフラックス密度、視野、コヒーレンス等に応じて使い分けられているが、極小角散乱実験や、現在開発中の高エネルギー X線結像顕微鏡では両方のハッチを利用した実験も行われている。

2. 高エネルギー X線結像顕微鏡の開発

BL37XU, 47XUにて開発・共用利用されている、フレネルゾーンプレート（Fresnel Zone Plate, FZP）を光学素子として用いた結像型X線顕微CT装置はX線3次元イメージングとして現在100 nm近い空間分解能を達成しており、材料科学、生物、医療、隕石、鉱物、電池等産業利用と幅広い用途に利用されている。この装置はしかしながら、X線エネルギー領域が10 keV前後に限られ、それより高いエネルギー領域では実施されていない。これは、高倍率・高空間分解能・高効率が必要とされるX線結像光学系が、以下に挙げる2つの原因により高エネルギー領域では実現が難しかったためである。一

つ目は、高エネルギー領域では高い効率のFZPを製作することが難しいことである。効率が最大となるFZPのパターン厚みは、X線のエネルギーに近似的に比例しており、高エネルギー化に伴いFZPのパターンも厚くするのが望ましい。一方でFZPの製作は技術的にパターンのアスペクト比で制限されており、分解能を維持、つまりFZPの最外線幅を維持したままFZPの厚みを増やすことは難しい。二つ目は、高エネルギー化に伴い、高倍率化が難しくなることである。FZPの焦点距離はX線エネルギーに比例するため、倍率を保ったままエネルギーを上げると、鏡筒長も長くする必要がある。現状、BL37XUやBL47XUの鏡筒長はそれぞれ約27 m, 7 mであるが、これらは実験ハッチの位置や大きさで制限されており、これ以上長い鏡筒長は望めない。

他方、主に材料（特に金属材料やセラミック）、鉱物、デバイスを観察する目的で、より高エネルギー領域での利用を望む声は多い。これに答えるために、BL20XUで高エネルギー領域での高倍率X線顕微鏡が開発された。ここで、上記2つの技術的問題は、次のように解決された。まず前者の問題については、我々により開発されたアポダイゼーションFZPを導入した^[1,2]。この素子は図1に示すように、通常のパターン厚みが一定のFZPと異なり、パターン幅が比較的大きい素子中央部では、パターン幅が狭い周辺部に比べて厚みを徐々に増す構造になっている。このような構造であればアスペクト比の制限を破ることなく部分的に通常よりも厚いパターンの素子の製作が可能であり、結果、高エネルギー領域でも比較的高い回折効率を得ることができる。後者の問題については、BL20XUの実験ハッチ1と実験ハッチ2を使うことで鏡筒長165 mのX線顕微鏡光学系を構築した。これだけの距離があれば、実験ハッチ1に試料とFZP、実験ハッチ2に検出器を設置すれば数十 keVのエネルギー領域でも百倍以上という十分高倍率なシステムの設計が可能になる。

実際に開発された高エネルギー X線結像顕微鏡のセットアップ概略図を図2に示す。ここで対物素子として用いられているアポダイゼーションFZPのパラメータは以下の通りである。パターン材質Ta、素子中心部パターン深さ2ミクロンであるが、周辺部はより浅いパターン構造となっている。直径620ミクロン、最外線幅100 nmで、NTT-ATに製作を依頼した。このFZPの回折

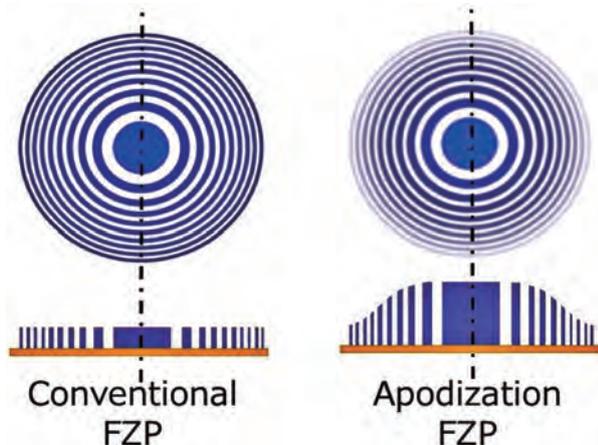


図1 従来のFZP（左側）とアポダイゼーションFZP（A-FZP、同右側）の模式図

従来のFZPは一律なゾーン厚みを持つのにに対し、A-FZPは素子周辺部から中心部に行くに従い厚みが徐々に増す。A-FZPはこれにより高エネルギー領域でも比較的高い回折効率を得ることができる。

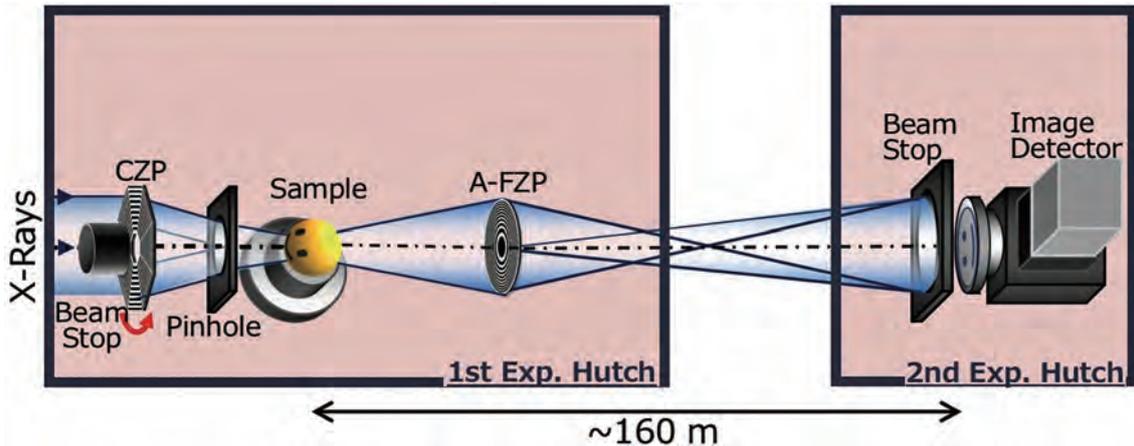


図2 BL20XUに構築した高エネルギー X線結像型 X線顕微鏡光学系の概略図

第一実験ハッチに condenser zone plate (CZP) による照明光学系、試料、対物素子として apodization FZP (A-FZP) が設置され、約 160 m 下流の第二実験ハッチに像検出器が設置される。利用可能な X 線エネルギーは 15-30 keV。

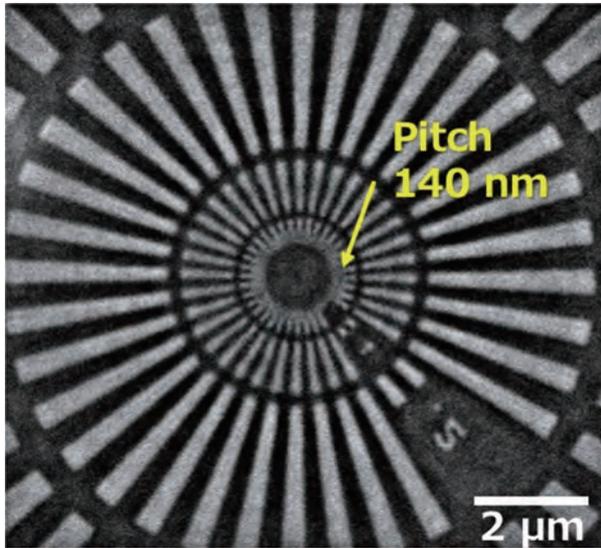


図3 パタン厚さ 0.5 ミクロンの Ta ジーメンススター型テストチャートの X 線像

X 線エネルギー 15 keV、露光 10 秒 × 10、ピクセルサイズ 7 nm。回折限界で決まる空間分解能理論値が 137 nm であるのに対して、像からは約 140 nm ピッチまでのパタンが解像できており、理論値通りのイメージングができていることがわかる。

効率は 20 keV で約 9% である。このシステムを用いた予備実験として得られた像を図 3 に示す。試料は厚み 0.5 ミクロンの Ta で描かれたジーメンススター型テストチャート (NTT-AT 製) である。このセットアップ条件での回折限界で決定される空間分解能は 137 nm であるが、得られた像も丁度 140 nm ピッチあたりまで解像できており、理論値通りのイメージングができていることが確かめられた。

今後はこのシステムを用いて、高エネルギー X 線高分解能 CT 装置、更には広視野な投影型 CT と組み合わせた multiscale CT の開発を行い、ユーザー利用へ供していく予定である。

参考文献

- [1] A. Takeuchi et. al., J. Synchrotron Rad. 24 (2017) 586.
- [2] A. Takeuchi, et. al., J. Phys. Conf. Series 849 (2017) 012055.

JASRI 利用研究促進部門
イメージンググループ

竹内 晃久、上楯 真之