

# 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. アポダイゼーションFZPの開発

X線顕微CTは、X線結像顕微鏡光学系を利用した高分解能3Dイメージング用CT装置として、BL37XU、BL47XUでユーザー共用実験が実施され、BL20XUでも共用実験に向けた開発が進められている。シンプルな投影光学系を利用したマイクロCTの空間分解能が約1 μm程度に制限されているのに対して、このX線顕微CTは空間分解能100nm前後3Dイメージングが可能であることから、ナノCTとも呼ばれる。対物素子にフレネルゾーンプレート(Fresnel zone plate, FZP)を用いており、様々な分野で利用されている。このナノCTのベースとなるX線結像顕微鏡光学系にはしかしながら、視野周辺部において周期フリッジ、エッジ強調、疑似コントラストが生じやすくデータの定量性を著しく損ねるという問題が指摘されていた。原因は以下のとおりである。結像光学系で得られる像は試料の透過率関数と光学系の点像分布関数(point-spread function, PSF)の畳み込みで表される。ここで、対物素子の開口関数とPSFはフーリエ変換の関係にあり、一般に対物素子は円形或いは矩形の開口を持つので、そのPSFはベッセル関数或いはシンク関数として知られる。これらの関数はメインピークの周囲にリップルと呼ばれる複数のサイドピークを持つが、Off-axis条件(視野周辺部)ではこれが畳み込みの結果試料の位相成分に応じたフリッジノイズを形成する。つまり、理想的な無収差レンズであってもこれらのノイズは発生するというを示し、さらに、位相成分を反映しているので、吸収の小さい試料であっても強いコントラストを生じる。しかし逆にいえば、PSFにリップルがなければノイズの

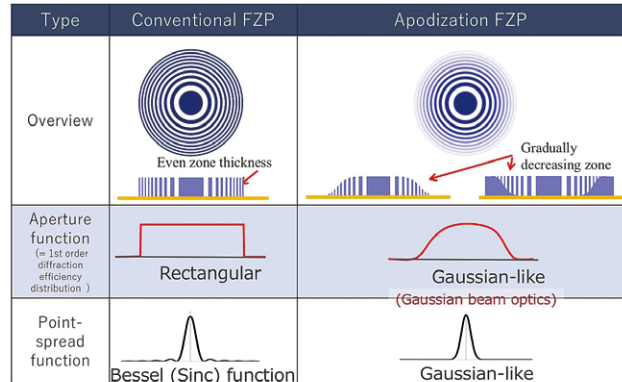


図1 従来のFZP(左側)とアポダイゼーションFZP(A-FZP, 同右側)の模式図。従来のFZPは様なゾーン厚みを持つものに対し、A-FZPは素子周辺部に行くに従い厚みが徐々に小さくなる(上段)。これにより開口関数はガウシアン様の形状(中断)、フーリエ面に相当する点像分布関数もガウシアンを示し(下段)、ガウシアンビーム光学系を形成する。

発生を抑えることができる。リップルの無いPSFの一つにガウシアンがあるが、たとえば、対物素子がガウシアンのような明確な境界を持たない開口をもつとき、ガウシアンのPSFが実現できる。このように、リップルを抑えるためにフーリエ面に適当なフィルタを乗ずることをアポダイゼーションとよぶ。この事を利用して、X線結像顕微鏡のフリッジノイズの除去を目的としたアポダイゼーション機能付きFZPが開発された<sup>[1,2]</sup>。概念図を図1に示す。FZPの開口関数は1次回折効率分布で表すことができる。通常のFZPの場合は、中心から周辺部まで様なゾーン深さを持っており、故に明確な円形或いは矩形で定義される開口関数を持つ(図1左)。一方で、図1右に示すように、素子周辺部にいくにつれてゾーン厚さが小さくなるような構造をFZPが持つ場合、回折効率も周辺部で徐々に低下し、明瞭な境界を持たないガウシアンライクな開口関数、つまり自ずとアポダイズ開口付きFZP(apodization FZP, A-FZP)となる。NTT-ATに製作を依頼したA-FZPの性能評価として、マイクロビームナイフエッジスキャンによって測定した集光プロファイルを図2に示す。8 keVのX線に対して、最外線幅50 nmに対してスポット半値幅55 nmとほぼ回折限界に近い集光が得られていることを示している。また、その裾野を見ると、リップルがかなり抑えられており、ガウシアンに近いプロファイルとなっていることがわかる。このFZPは既にナノCT装置に導入されており、実際に像特性の向

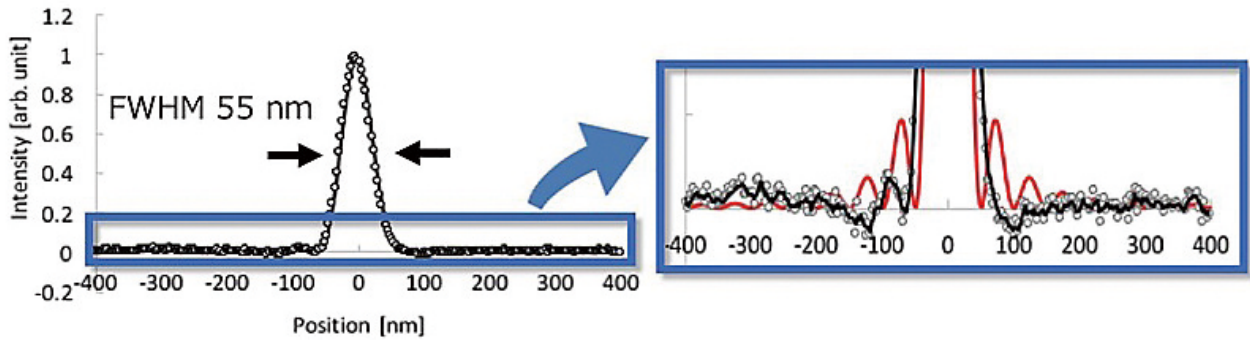


図2 A-FZPによる集光スポットプロファイル (左)。X線エネルギー 8 keV、マイクロビームナイフエッジスキャンにて測定。素子最外線幅 50 nm に対して集光スポットの半値幅 55 nm とほぼ回折限界に近い集光が得られている。右図はプロファイル裾部分の拡大。赤線で示した従来のFZPの集光プロファイル (理論値) と比較して、リップルが抑えられているのが分かる。

上に繋がる成果を挙げている。更に、A-FZPには他の利点がある。この素子は通常のFZPと違って、外周側のゾーン深さを内周側と同じにする必要がないため、より高分解能な素子、あるいはより高効率な素子を作りやすい。FZPを利用したX線顕微鏡は現状10 keV前後のエネルギー領域でしか利用できなかったが、A-FZPのこの特性を利用して、BL20XUにおいて20-30 keV程度の高エネルギー領域X線顕微鏡の開発が進められている。

#### 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.

利用研究促進部門  
 バイオ・ソフトマテリアルグループ  
 竹内 晃久、上相 真之