

## BL47XU

## 光電子分光・マイクロCT

高分解能画像検出器を用いた等倍投影によるマイクロトモグラフィーはBL20B2やBL47XUを中心に多くのユーザーが日常的に利用する実験装置となっている。等倍光学系では試料自身による回折の影響で実用的な空間分解能は $1\mu\text{m}$ 程度が限界である。より高い分解能を得るためにはX線画像をX線で拡大する手法が必要になる。高空間分解能を必要とする三次元観察のため、当ビームラインでは結像光学系を用いた顕微CTの装置開発を進めていたが、2006年度からこの装置を結像ナノトモグラフィー実験装置として一般ユーザー利用を開始した。

本装置では上に述べた回転ミラー光学系ではなく、装置調整の容易さと実用性の観点から等間隔円形回折格子による照明光学系を採用した。図1に装置構成と光学系の模式図を示す。実験ハッチ内の装置は、コンデンサ照明系、試料、対物素子（FZP：Fresnel zone plate）、そして画像検出器より構成される。試料は対物に対して物体面位置に、検出器は像面位置に設置される。X線光学系の倍率はニュートンのレンズ公式に対して倍率が十分に大きい場合の近似で、

$$M \sim L/f$$

である。ここでLは図に示すように試料から検出器までの距離、fは対物レンズの焦点距離である。倍率Mは装置全体を長くすれば任意の値が可能であり、また、多段の拡大光学系を用いればさらに大きくできる。しかしながら、現実のLは実験ハッチの長さで制限されており、また、現状のX線結像レンズのスループットを考えると多段拡大光学系は実用性がない。したがって、倍率Mはビームライン実験ハッチの全長で制限されてしまうため、実用上の分解能は画像検出器で制限される場合も多い。

BL47XUでユーザー利用に供している結像CT顕微鏡は一種のケーラー照明になっており、視野とOTF（Optical

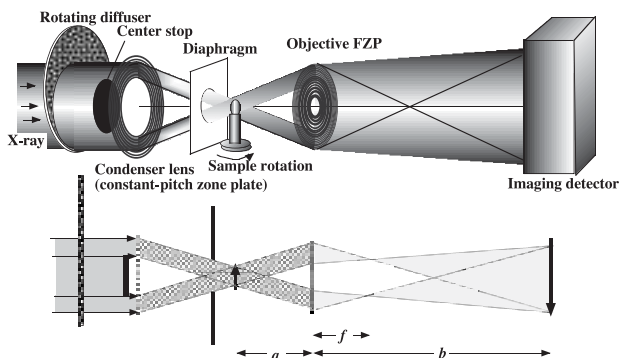


図1. BL47XUでの結像ナノトモグラフィー装置構成と光学系の概念図

Transfer Function) のバランスを考慮し、対物FZPの最外輪帯の二倍周期長の等間隔リングゾーンプレートをコンデンサーレンズとして用いている。また、X線画像検出器としては可視光変換型（間接撮影）CCDカメラを利用している。図2にBL47XU第一実験ハッチに設置した顕微鏡装置の写真を示す。典型的な条件では、

1. コンデンサーゾーンプレート：周期長400nm（線幅200nm）等間隔同心円、ゾーン材料 Ta 厚さ $1.6\mu\text{m}$ 、直径 $500\mu\text{m}$ 、回折効率 約28%（8keV、実測値）、
2. 対物ゾーンプレート：最外線幅100nm、ゾーン材料 Ta 厚さ $1.0\mu\text{m}$ 、直径 $155\mu\text{m}$ 、回折効率 16%（8keV、実測値）、焦点距離  $f=100\text{mm}$ （8keV）、
3. X線光学系倍率：約40倍（12keV）～80倍（6keV）、

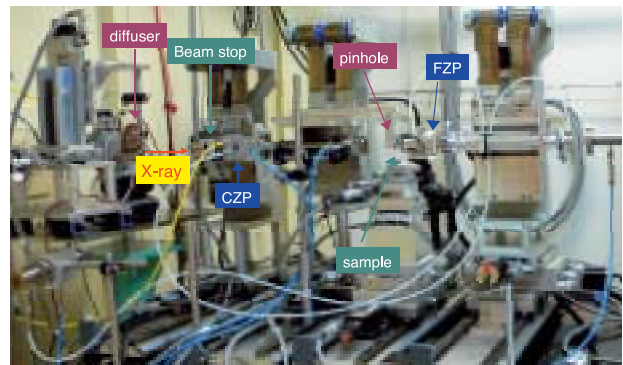


図2. BL47XU第一実験ハッチに設置した結像ナノCT装置。画像検出器はこの写真外の第二ハッチ最下流に設置されている。

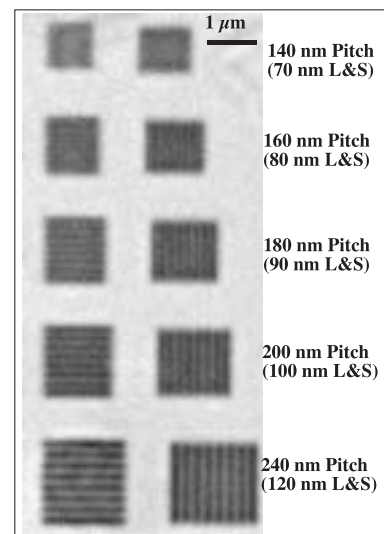


図3. 分解能評価用テストパターン透過X線顕微鏡画像（二次元像）。80nmのライン/スペースパターンまで解像されている。X線エネルギーは8keV。

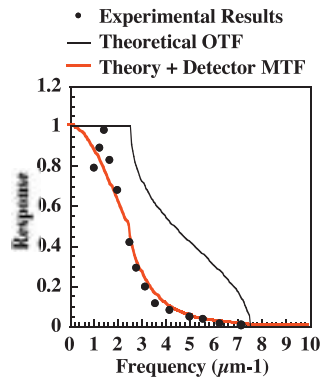


図4. Modulation Transfer Function (MTF) の実測値と計算値。実験値は図3に示す画像データから得られたものである。黒実線は回折理論によるMTF計算値、赤実線は検出器の分解能を考慮したMTF理論値。

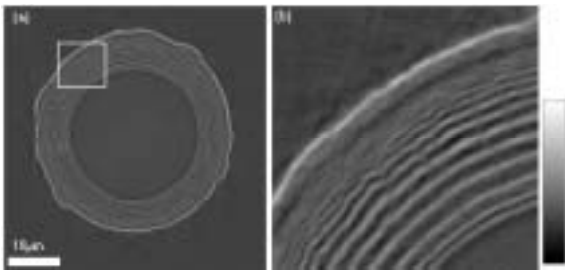


図5. 分解能評価用テスト試料のCT像。(b)は(a)画像中の枠内を拡大したもの。再構成像に見られるもっとも細かい構造は0.15  $\mu\text{m}$ ライン/スペース。

4. 画像検出器：蛍光板 (P43 (Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb<sup>+</sup>)) + リレーレンズ (x4.4) + インターライン型CCD (浜松ホトニクスC4880-41S)、画素サイズ2.74  $\mu\text{m}$  (2x2 binning mode)、空間分解能9.9  $\mu\text{m}$ 、有効視野5.4mmx3.5mm、であり、被写体位置での視野は対物FZPの直径の約1/2になる。この条件で、図3に示すようにテストパターンを用い160nm分解能 (8keV) が確認されており、Modulation Transfer Function の実験値は理論値と非常によく合っている(図4)。CT像計測では回転軸の軸ぶれや長時間測定 (30分程度) によるドリフト等の影響があり、図3に示した解像度がそのまま得られるとは限らない。試料によっては放射線損傷による変形のために正しいCT再構成像を得ることが困難な場合も多い。しかしながら、試料の条件が整っている場合は、図5に示すように再構成像の空間分解能としては0.2-0.3  $\mu\text{m}$ 程度まで達成されている。図4に示されるように、空間分解能はX線光学系でなく検出の分解能によりかなり制限を受けている。この部分の改良が今後の課題である。

利用研究促進部門

バイオ・ソフトマテリアルグループ

鈴木 芳生