

## 放射光利用技術分野 高輝度 X 線を用いた新しいイメージング技術の開発

本年度の主たる研究内容は、新しいイメージング実験用ビームライン BL20XU の整備と共同利用公開、積層ゾーンプレート性能向上と高エネルギー領域での集光性能評価、画像検出器を用いた走査型暗視野顕微鏡の開発、フレネルゾーンプレートを用いた結像 CT の開発である。

### 1. BL20XU の整備

ビームラインの初期コミッショニングは2000年度に行われたが、2001年度にはマイクロビームや干渉実験のための仮想光源ピンホールの設置、分光器の X 線照射による熱ドリフトを低減するための放射シールド、高エネルギー領域 (37-113keV) の利用を可能にする分光器改造である。BL20XU の特長のひとつは250m 長のビームラインの長さを生かした高い空間コヒーレンスである。図 1 にその空間コヒーレンスを確認するために測定した Gabor 型インラインホログラムの一例を示す。硬 X 線領域でも数100ミクロン以上の可干渉領域が得られており、従来不可能であった硬 X 線での干渉実験が可能になった。

BL20XU の二結晶分光器はいわゆる SPring-8 の標準型であり、分光結晶は Si 111 を液体窒素冷却で使用している。この場合の短波長限界は定位置出射のための機械的なブラッグ角の限界で決められており、37.7keV が限界である。もちろん分光結晶反射面を変えれば高エネルギー領域の利用は可能であるが、分光器のアライメントを行う必要があり、長期間の停止を要し実用的でない。そこで、二結晶分

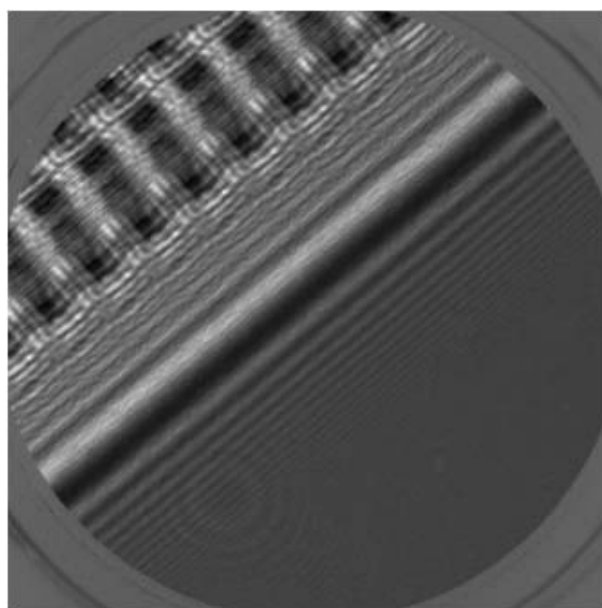


図 1 In-line X-ray Holography  
X-ray energy : 10keV (  $1.24 \text{ \AA}$  ),  
zooming tube x50 , 2:1lens , sample-detector 4.75m

光器の一方の結晶の交換だけで高エネルギー領域の利用を可能とするために、Si 511-333の変則的な二結晶配置を試みた。この場合第一結晶のみを511面結晶に交換するだけの作業であり、分光器調整も第二結晶を基準として行うことができるためはるかに容易である。図 2 に511-333二結晶配置で113keV までの高エネルギー領域に変更して測定した Au-K 吸収端領域の吸収スペクトルを示す。

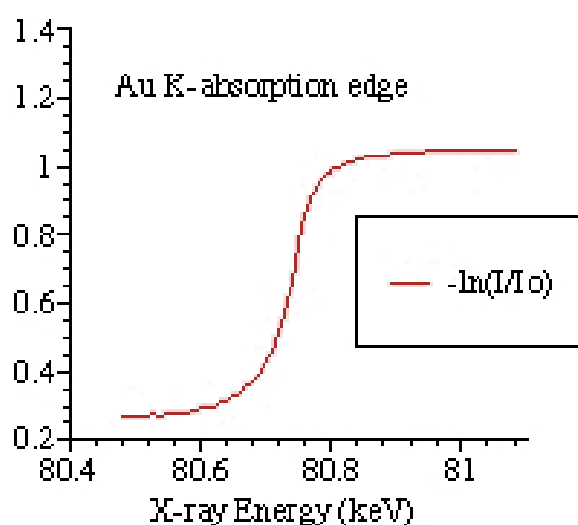


図 2 Absorption Spectra of Gold Foil Measured with Si 511-333 Double-crystal Monochromator

### 2. 積層ゾーンプレートの性能向上

ゾーンプレートのような光学素子の性能基準としては、分解能(マイクロビームの場合は集光ビームサイズ)、回折効率、開口数、利用可能波長域が考えられる。2001年度では最外線幅の小さいゾーンプレートの製作と評価による分解能の向上、及び高エネルギー領域での集光テストを試みた。これまでの多くの実験から、分解能を制限しているものはゾーンプレート自身の精度だけでなく照射ビームの質(空間コヒーレンス)のほうがより重要であることがわかっている。BL20XU によってこれまでにない空間コヒーレンスの良いビームが得られたので、ここで積層ゾーンプレートの性能評価を試みた。図 3 に実験装置の構成、図 4 に最外線幅0.1ミクロンの積層ゾーンプレートによる集光マイクロビームを用いた走査型 X 線顕微鏡像の一例を示す。波長1.0  $\text{\AA}$  において分解能評価用テストパターン0.1 $\mu\text{m}$  の構造まで分解されており、0.1 $\mu\text{m}$  レベルの分解能を持つことが確認できた。

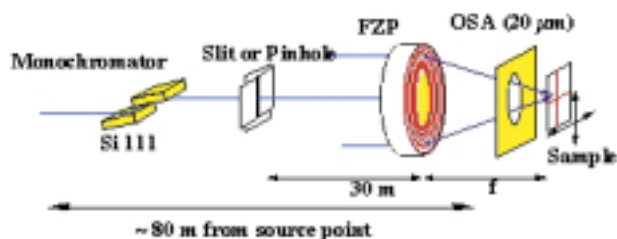


図3 X-ray Microbeam with Fresnel Zone Plate at BL20XU  
 OSA : order selecting aperture .  
 Source size : 50 $\mu\text{m}$  ( vertical , 80m from FZP )  
 10-50 $\mu\text{m}$  Slit/pin-hole ( horizontal , 30m from FZP ) .  
 FZP : Cu/Al sputtered-sliced FZP , Outermost zone width : 0.10 $\mu\text{m}$  ,  
 Diameter : 70 $\mu\text{m}$  , Center Stop : 50 $\mu\text{m}$  gold ,  
 Typical focal length 68mm @1.0 .

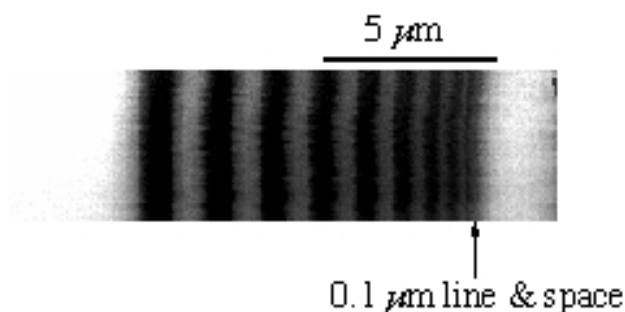


図4 Scanning Microscopic Image of Resolution Test Pattern  
 X-ray wavelength : 1.0 ,  
 256 x 70 pixel , 0.0625 $\mu\text{m}$  /pixel , Dwell time : 0.4s/pixel .

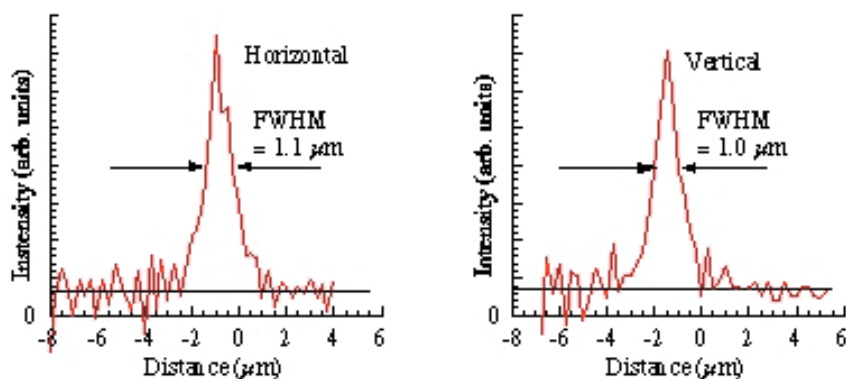


図5 Focused Beam Profiles measured by Knife-edge Scan  
 X-ray Energy : 82keV ( 0.151 $\text{\AA}$  ) , f : 700mm , Cu/Al sputtered-sliced FZP ( 50 layers ) ,  
 Core ( center beam stop ) : Au 50 $\mu\text{m}$  in diameter , Outermost zone width : 0.15 $\mu\text{m}$  , Thickness : 40 $\mu\text{m}$  .

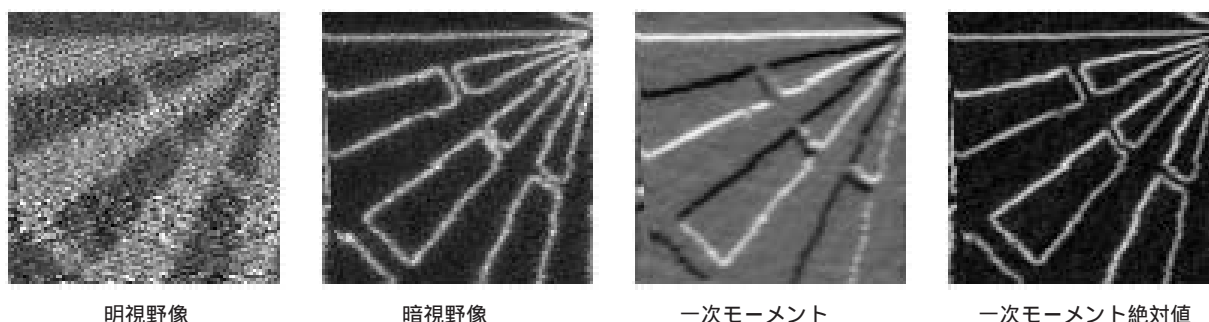


図6 画像検出器を用いた走査型X線顕微鏡

高エネルギー領域の集光特性評価はBL20XUの分光器をSi 511-333の変則二結晶配置にした時に試みた。従来BL47XUで同様の実験を行った結果では集光ビームサイズ4 $\mu\text{m}$ であったが、この際は111反射の基本波をフィルターでカットしていた為、波長純度や空間コヒーレンスに問題があった。また、OSAのアスペクト比が足りないためゾーンプレート回折光の零次光の混入、集光ビームサイズ測定に用いるナイフエッジの精度の問題があり、正確なビームサイズが得られていない可能性があった。今回これらの問題に対する改善を行った結果、図5に示すように82keVのエネルギーのX線において、1 $\mu\text{m}$ の集光ビームサイズが確認された。

### 3. 画像検出器を用いた暗視野顕微鏡の開発

試料を透過するビームを検出する形式の走査型X線顕微鏡では、普通ビーム全強度を情報とするが、単純な強度以外にもビーム位置や強度分布も重要な情報を与える。例えば、透過ビームの進行方向は波面の傾きに対応しており、角度広がりや波面の曲率を示している。したがって、透過X線ビームを画像検出器で測定し、これから各種の演算処理(マスクング、重心演算、高次モーメント演算等)を行うことにより、単純な透過X線計測より高感度な測定が可能である。図6にテストパターンを測定した例を示す。これらの画像は一度の計測でえられたものである。図から分

かるように暗視野像や重心変位演算（一次モーメント）により感度向上がなされている。

#### 4. フレネルゾーンプレートを用いた結像 CT の開発

従来の X 線 CT では高分解能のマイクロ CT であっても X 線の幾何光学的な直進性を仮定した投影像からの再構成で三次元像の計測を行っている。図 7 及び図 8 にその例をしめす。これらの CT 像は結像光学素子として電子線描画で作成されたゾーンプレートであり、ゾーン材料は厚さ 1 ミクロンのタンタルである。測定は X 線エネルギー 8 keV、X 線光学系の倍率 10 倍（図 7）又は 7.6 倍（図 8）で行った。検出器は 1000x1000 画素、1 ミクロン / 画素の可視光変換型冷却 CCD カメラを用いている。CT 画像としての分解能は約 0.5 ミクロンである。

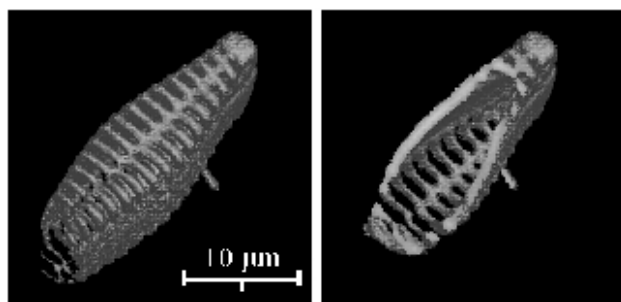


図 7 結像光学系による X 線トモグラフィー（珪藻土）  
diatom “Achnanthis lanceolata”  
8 keV, x10, BM3(x10), voxel size 0.1µm .  
360 projection, exposure time : 60sec/projection .

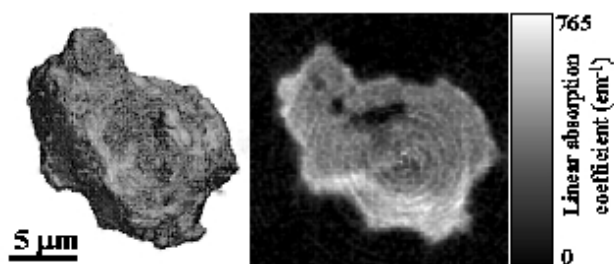


図 8 結像光学系による X 線トモグラフィー（隕石）  
8 keV, x7.61, BM3(x10), voxel size 0.13µm .  
100 projection, exposure time : 15sec/projection .

利用研究促進部門 鈴木 芳生