

BL20XU 医学・イメージング II

BL20XUではX線光学素子開発、投影CTを中心としたイメージング、中尺ビームラインによる高空間コヒーレンスを利用したX線干渉光学などの実験が行われているが、第一実験ハッチとエンドステーション間の160 mの距離を利用した極小角散乱実験も行われている^[1, 2]。BL20XUの光学系はコヒーレンスを損なわないように最小限の光学素子である二結晶分光器だけで構成されている。従来の光学系では図1に示すように高調波カットオフ用の全反射ミラーなどが無いため、小角散乱実験ではほとんどの場合23 keVのエネルギーが選択されていた。これはBL20XUのアンジュレータ周期長が26 mmであるため、高次光が少なく基本波が強い条件 ($K=0.1 \sim 0.2$) での基本波のエネルギーが23 keV程度になるためである。しかしながら、より長周期の構造を他の条件を変えずに計測するためには、低エネルギーでの実験が必要である。BL20XUの現状のアンジュレータでの基本波エネルギー下限は7.62 keVであるが、このような低エネルギー領域では高次光が無視できないため、これまでの小角散乱実験での低エネルギーX線の利用は限定的なものであった。

2012年度では、この低エネルギー領域での小角散乱実験に対応する目的で高次光除去用全反射ミラー光学系を導入した。全反射ミラー光学系は、図1に示すように、第一実験ハッチ内の試料直前に置き、ミラー前後に散乱X線除去を目的とするガードスリットを設置してある。全反射ミ

ラーはシグマ光機製の平面基板であり、ミラー長150 mm、平面精度保証値 $\lambda/10$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)、ミラー素材は厚さ20 mmのパイレックスガラスであり、反射面コートは無く、パイレックスガラス自体を反射面としている。図2に示すように二枚の平面鏡を+-配置とし、個々のミラーは精密ゴニオメータ(神津精機製KTG-15)に設置して角度調整を行っている。二枚のミラー間距離は約250 mm(ミラー中心間距離)であり、視射角4 mradの場合、光軸は上に2 mm平行移動する。

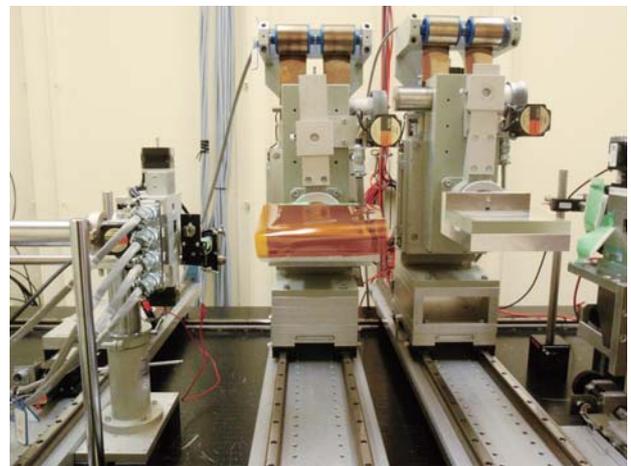


図2 実験ハッチ内に設置した全反射ミラー光学系。写真右側が上流。

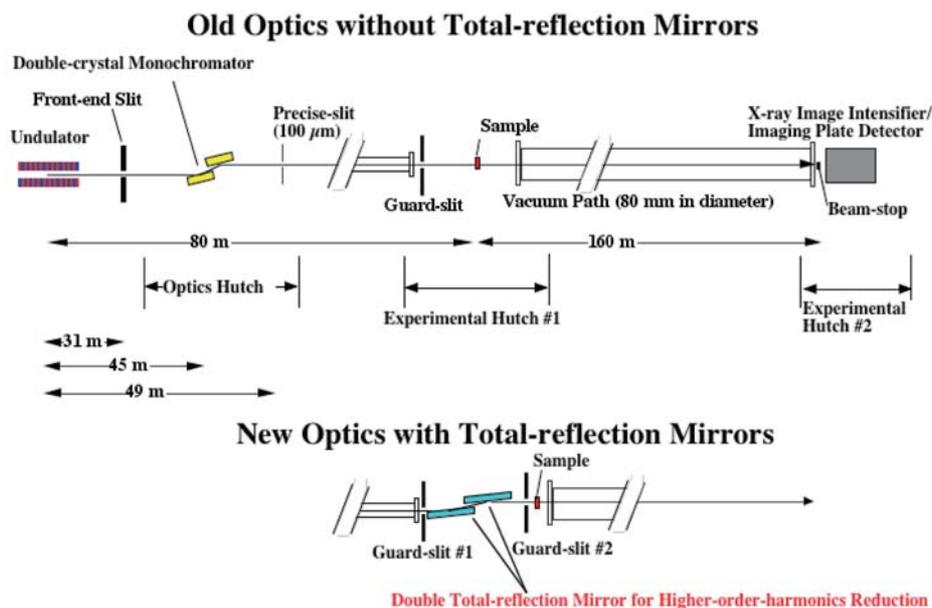


図1 BL20XUにおける極小角散乱光学系の構成。

図3に一枚のミラーのX線エネルギー8 keVにおける、反射率角度依存性を測定した結果を示す。8 keVにおける臨界角（反射率50%となる視射角）は3.80 mradであった。この結果に基づき、視射角3.394 mradでの二回反射の反射率のX線エネルギー依存性を測定した結果を図4に示す。8 keVでの二回反射の反射率0.88に対し、2次高調波に相当する16 keVでは反射率 4.3×10^{-5} 、3次高調波の24 keVでは 2.2×10^{-7} 、4次高調波である32 keVでは 3.5×10^{-8} の反射率であった。結晶分光器はSi(111)反射であり、2次高調波は禁制反射であることを考慮すると、基本波8 keVにおける高次光はほぼ完全に除去できると考えられる。

小角散乱実験用の高調波カットオフミラーとしては、反射率だけでなく反射光の平行性を維持していることも必要で

ある。本光学系は8 keVでの極小角散乱実験を前提としていることから、全反射鏡の有無によるエンドステーションでのビーム形状変化を測定することによって、反射鏡の実用レベルでの精度評価を行った。図5に全反射ミラーから約165 m下流に置いたX線カメラで計測したビームスポット像を示す。従来の実験条件とほぼ同等の全反射ミラーを用いない条件での24 keVにおける像と全反射ミラー（視射角3.394 mrad）を用いた8 keVにおける像である。コリメータの条件は従来使われている23 keVでの実験条件と同一である。ただし、24 keVのX線ビームは8 keVの高次光である333反射を利用することによって生成しているため、実際にはより高次のX線も混在しているが、ミラー性能を評価する上では問題にはならない。図に示すようにミラーで反射された像には僅かな歪みがあり、また

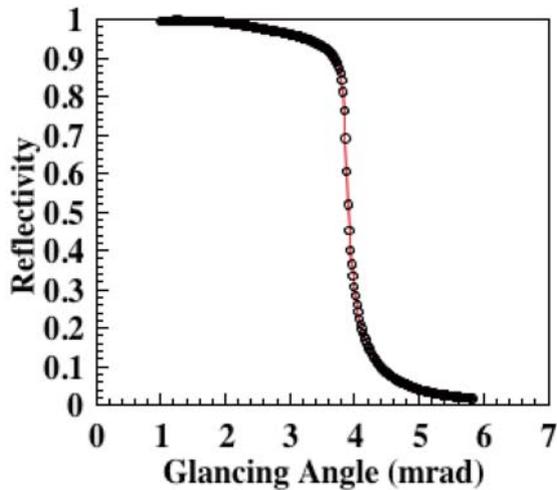


図3 全反射鏡の反射率測定結果。X線エネルギー8 keV。一回反射。

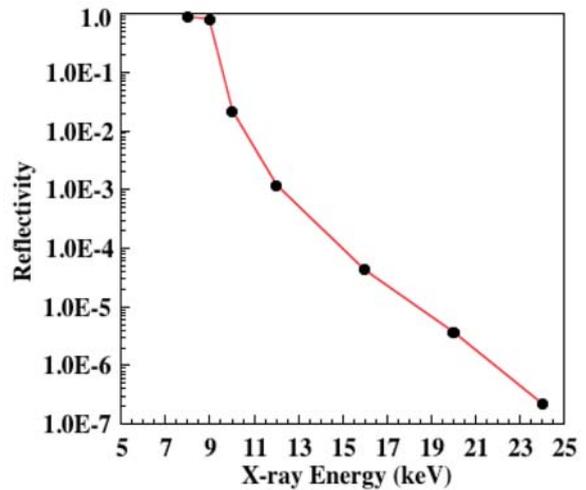
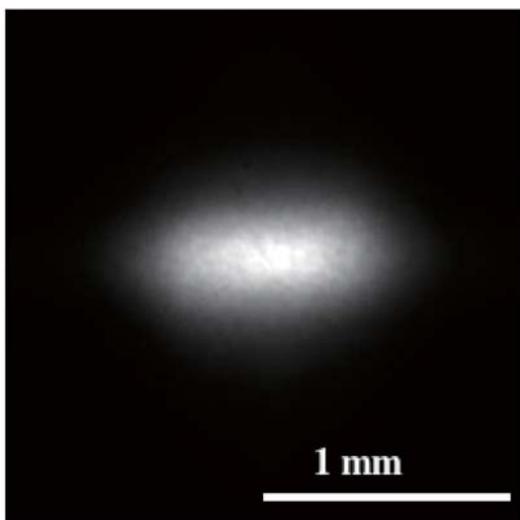


図4 全反射鏡の反射率測定結果。視射角3.394 mrad。一回反射の反射率実測値を自乗して二回反射の反射率としたもの。



24 keV without mirror



8 keV with mirror

図5 エンドステーションでのビームスポット像。

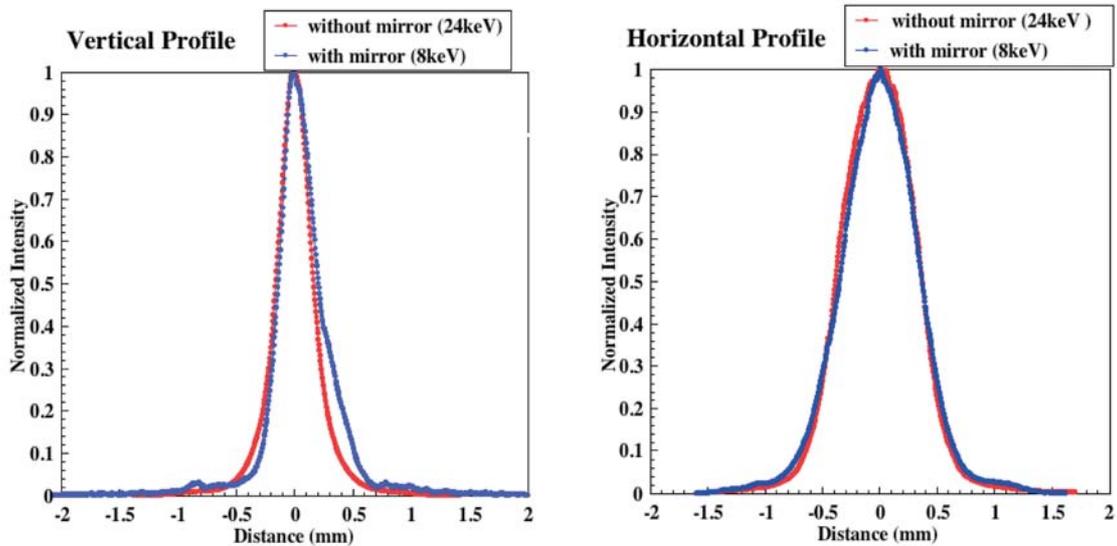


図6 エンドステーションにおけるビームプロファイル。

若干のサイドローブも存在するが、ビームサイズはほとんど変わっていない。図6に水平垂直各方向のビームプロファイルを示すが、半値幅で評価した場合、全反射ミラーによる悪影響はほとんどなく、同一ビームサイズと言って良い。垂直方向のビームサイズはミラー無しの場合に角度広がり換算で半値幅 $2.0\ \mu\text{rad}$ であるのに対し、ミラーで反射されたビームでは $2.1\ \mu\text{rad}$ である。従って反射鏡のスロープエラーとしては $2\ \mu\text{rad}$ より遙かに小さいと考えられる。本装置では市販されている通常の平面ガラス基板をX線反射鏡として用いているが、表面粗度、スロープエラー共に実用上十分な精度が得られていることがわかった。

この全反射ミラーによる高調波カットオフ光学系は既に $8\ \text{keV}$ での極小角散乱実験に利用されており、低エネルギーX線を用いることにより従来の3倍程度まで大きい構造の小角散乱実験が可能であることが確認されている^[3]。

参考文献

- [1] N. Yagi and K. Inoue: *J. Appl. Cryst.* **36** (2003) 783.
- [2] Y. Shinohara et al.: *J. Appl. Cryst.* **40** (2007) S397.
- [3] Y. Shinohara et al.: *J. Synchrotron Radiat.* in press.

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