

イメージング研究分野

BL20XU

医学・イメージング II

1. 長焦点屈折レンズによる集光と極小角散乱カメラへの応用

BL20XUでは光源から80mに第一実験ハッチ、245mに第二実験ハッチが設置されている。この条件で、最下流実験ステーションでのビーム集光を実現するために屈折レンズによる集光テストを試みた。レンズは曲率半径0.5mmの両凹面球面ベリリウムレンズである。これを9枚直列に配置したCompound Refractive Lensの光学系を構成した。屈折レンズの計算上の焦点距離は、次式で表される。

$$f = R/2N\delta,$$

ここで、 f ：焦点距離、 R ：曲率半径、 N ：ミラーの段数、 δ ：屈折率の1からのずれである。ここで、X線エネルギー23keVでの値、 $\delta = 6.4 \times 10^{-7}$ 、 $N = 9$ 、 $R = 5 \times 10^{-4} \text{m}$ を用いると、計算上の焦点距離は43mになる。図1に示すように、レンズは光源から80mの第一ハッチ内に置き、ここからさらに160m下流に集光する光学系である。この条件では、ニュートンのレンズ公式

$$1/a + 1/b = 1/f,$$

から、 $f = 53 \text{m}$ でアンジュレタ発光点が最下流実験ステーションに結像されることになる。しかしながら、レンズ形状の工作誤差もあり、実際にはレンズ段数9枚で23keVでの垂直方向の集光が最適化された。水平方向にはアンジュレタ光源サイズが大きいため、フロントエンドスリット水平開口を0.1mmとして、このスリット像が結像される光学系とした。この場合、図に示すようにフロントエンドスリットは光源から31m地点にあり、非点収差により水平方向の集光点は垂直方向の集光点と一致しない。この問題を解消するため、レンズをおよそ3度光軸から傾けて、レンズ自体に非点収差

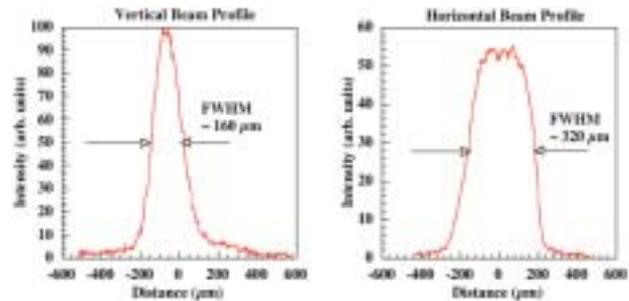


図2. 集光ビーム形状測定結果。X線エネルギーは23keV。

を発生させることにより、光学系全体の非点収差を低減させることを試みた。

集光ビーム形状の測定結果を図2に示す。X線エネルギーは23keVである。垂直方向には半値幅 $160 \mu\text{m}$ 、水平方向には $320 \mu\text{m}$ の集光ビームが実現されている。この条件での第一ハッチにおけるレンズへの入射ビーム形状は $0.5 \text{mm} \times 0.5 \text{mm}$ の矩形である。また、レンズの透過効率9枚で約80%であった。

図3にこの集光ビームによる極小角散乱のテスト結果を示す。試料は通常極小角散乱カメラのカメラ長較正に用いているグリッドメッシュ（ピッチ $12.7 \mu\text{m}$ ）である。この像から見積もられる小角散乱カメラ光学系の分解能は23keVにおいて、周期長 $50 \mu\text{m}$ 程度に相当する。また、この場合、第一ハッチに置かれる試料への照射ビームサイズは約 0.5mm であるため、コリメータにより角度分解能を得る光学系に比べて試料位置での実効試料サイズを基準とした相対的なコヒーレンスが低いために、スペckルが少ない回折像が得られる。

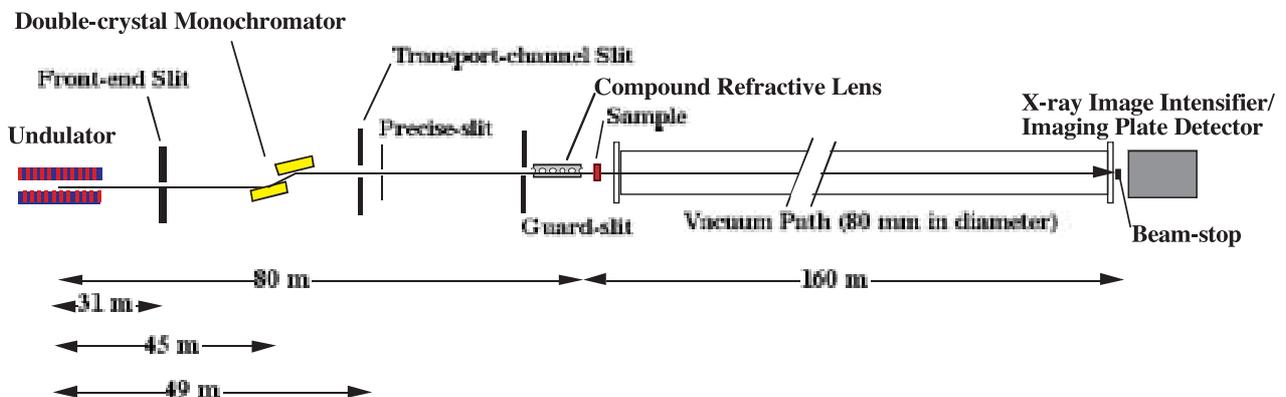


図1. BL20XUにおける屈折レンズによる集光テストと極小角散乱実験の装置構成

2. 回転ミラー光学系によるケーラー照明結像顕微鏡

X線結像顕微鏡を低エミッタンス光源で行う場合、そのままではコヒーレント平行照明に近い照明になるため、結像特性の面で好ましくない。また、通常の集光光学系を用いた臨界照明では、数値開口 (NA: numerical aperture) をマッチングさせた時には集光点が必然的に小さくなってしまいうために十分な視野がとれない。

結像顕微鏡の照明光学系として最適なものの一つがケーラー照明であり、具体的には図4に示すような対物レンズのNAにマッチングさせた収斂角を持つHollow-cone形状の照明光である。エミッタンスが小さく平行光に近い光源に対してケーラー照明を擬似的に実現する方法として、図5に示すように二枚の平面ミラーで結晶の (+-) 配置に似た二回反射光学系を構成し、この光学系を光軸回りに回転させる方法が

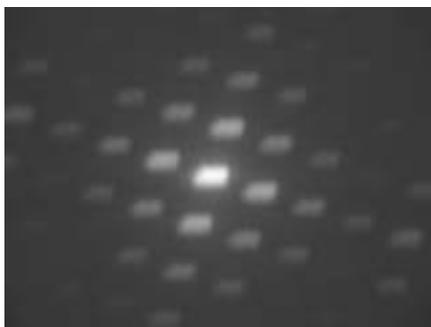


図3. 屈折レンズ集光ビームを用いた極小角散乱。試料は2000line/inchの銅グリッドメッシュ。X線エネルギー 23keV。

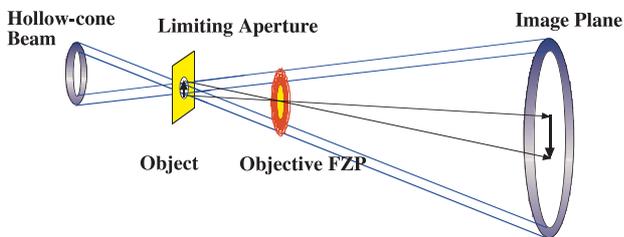


図4. Hollow-cone illuminationによるケーラー照明

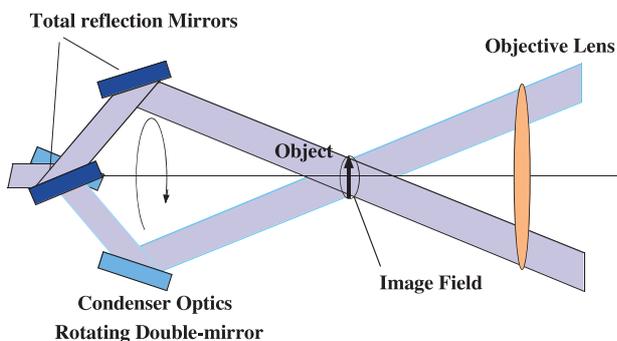


図5. 二枚の平面ミラーによる疑似ケーラー照明を利用した結像顕微鏡光学系

ある。この光学系の長所は、固定焦点を持つ集光光学系によるケーラー照明と異なり、ミラー角度の調整より広い範囲で対物レンズとの開口数マッチングが得られることである。

実際にBL20XUハッチ内で組み立てた装置を図6に示す。図左からX線ビームが入射し、二枚のガラス平面ミラーで反射され右側にある試料を照明する (写真は視野の関係で回転ミラーのみを示している)。X線波長1Åにおいて、最外線幅100nmのフレネルゾーンプレートを対物レンズとして行った実験結果を図7に示す。試料は銅グリッドメッシュ、メッシュピッチ12.7μmである。図中央の直径50μmの円内に有効視野になっている。その外側のリングはフレネルゾーンプレート対物レンズの零次回折光であり、Hollow-cone照明の輪帯に対応している。照明系の数値開口 (NA: numerical aperture) は対物レンズのNAの半分程度として、視野と分解能が両立する条件で実験したものである。回転ミラーは約10秒で360度回転する。実際の露出時間はこのミラーの1回転に一致するように、回転速度とCCDカメラシャッター時間を調節した。

図から明らかなように、視野全体が均一に照明されているだけでなく、結像特性も視野内で一定に保たれており、結像顕微鏡としてほぼ理想的な照明光学系が実現されている。ただし、現状では回転速度が十分でなくマイクロCT顕微鏡の

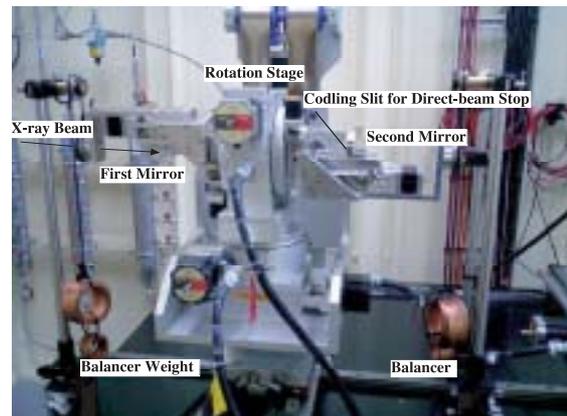


図6. 二枚回転ミラー光学系の装置。BL20XU第二実験ハッチ内。

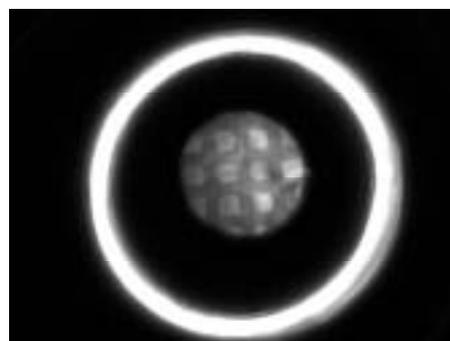


図7. 回転ミラーによる疑似ケーラー照明下で撮影したX線顕微鏡画像。試料は2000メッシュ/インチの電子顕微鏡用銅グリッドメッシュ。X線エネルギー 12.4keV。対物レンズはフレネルゾーンプレート、最外線幅100nm、直径155μm、波長1Åでの焦点距離155mm。

ように高速撮影が必要な用途には十分ではなく、今後さらなる開発が必要である。

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