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、$\delta=6.4\times10^{-7}$、N=9、$R=5\times10^{-4}$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=53mでアンジュレー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ー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。

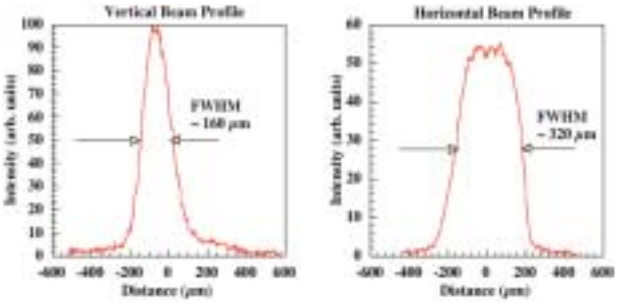

図2. 集光ビーム形状測定結果。X線エネルギーは23keV。

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160μm、水平方向には320μm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0.5mm x 0.5mmの矩形である。また、レンズの透過効率は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12.7μm）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50μm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、スペックルが少ない回折像が得られる。

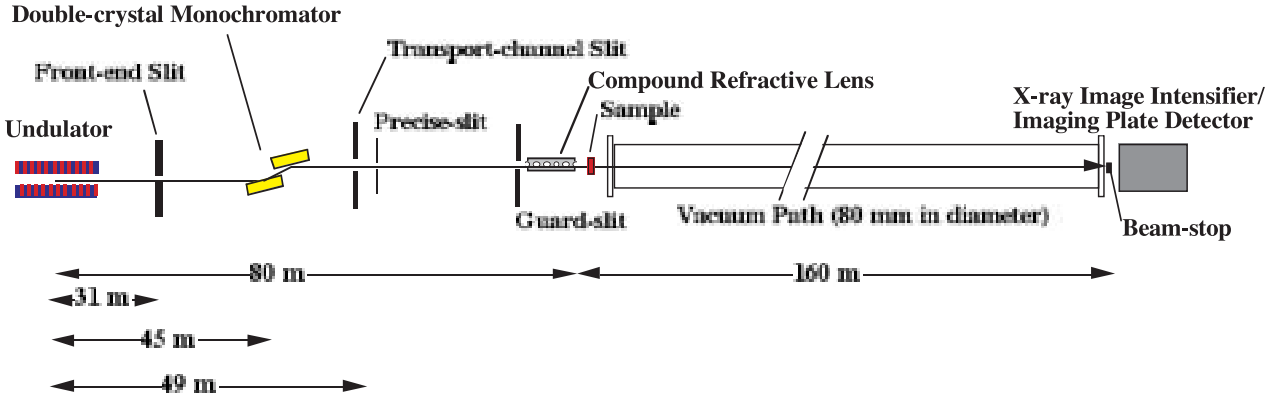

図1. BL20XUにおける屈折レンズによる集光テストと極小角散乱実験の装置構成

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、結像特性の点で好ましくない。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ある。この光学系の特長は、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。

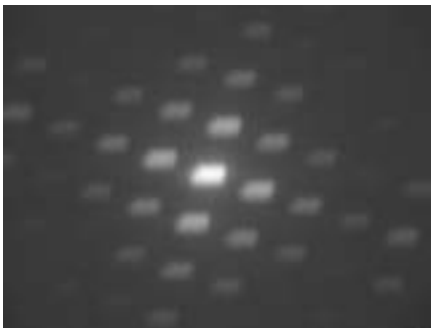

図3. 屈折レンズ集光ビームを用いた極小角散乱。試料は2000line／inchの銅グリッドメッシュ。X線エネルギー 23keV。

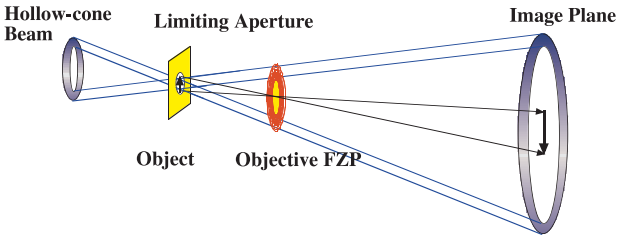

図4. Hollow−cone Illuminationによるケーラー照明

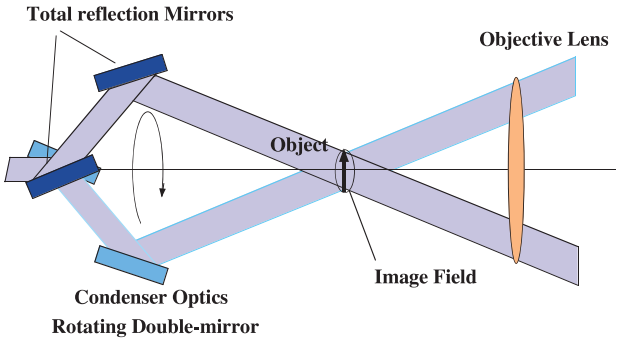

図5. 二枚の平面ミラーによる疑似ケーラー照明を利用した結像顕微鏡光学系

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の円内が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

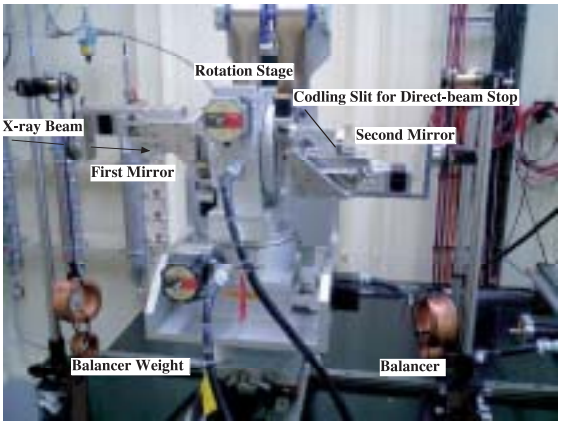

図6. 二枚回転ミラー光学系の装置。BL20XU第二実験ハッチ内。

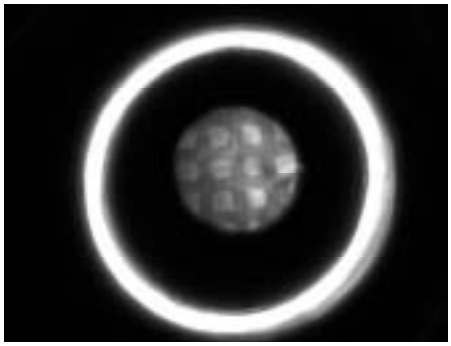

図7. 回転ミラーによる疑似ケーラー照明下で撮影したX線顕微鏡画像。試料は2000メッシュ／インチの電子顕微鏡用銅グリッドメッシュ。X線エネルギー 12.4keV。対物レンズはフレネルゾーンプレート、最外線幅100nm、直径155μm、波長1Å での焦点距離155mm。

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

BL20B2

医学・イメージングI

2006年4月にBL20B2実験ハッチ2に名古屋大学X線天文グループにより大型の垂直ステージが導入された。このステージは耐加重100kg程度、ストロークは1mほどである。主な用途は同グループがSPring-8で進めているX線望遠鏡の較正実験であるが、このステージを必要とするすべてのユーザーが利用可能である。小型の高圧力発生装置などの数十kg程度の重量物を乗せても、ミクロン単位での位置決めが可能である（図1）。また実験ハッチ2内に最大開口50mm（H）x 35mm（V）の大型スリットを導入し、実験ハッチ2及び3においてのビーム成型を容易にした（図2）。

2006A期より、メディカルバイオトライアルユースが開始された。これを受けて、BL20B2では、高速2次元検出器を利用した　in-vivo CT 装置の開発を進めた。これを利用し、大阪大学の松本らはマウス後肢膝関節部の in-vivo CT 撮影を行い、同一個体における骨梁ネットワーク形態の粗鬆化プロセスの観察を行った。測定時間の短縮化は空間分解能とのトレードオフである。今年度は、空間分解能約30μmで15分程度の測定時間を達成したが、現有機でのこれ以上の高速化は困難である。今後は高速取り込みCCDなどを導入して、より短時間での撮影を行い、4次元CTへの進化を目指す。

図1．BL20B2実験ハッチ2に設置された大型Zステージ。X線望遠鏡のハウジングを搭載した状態。

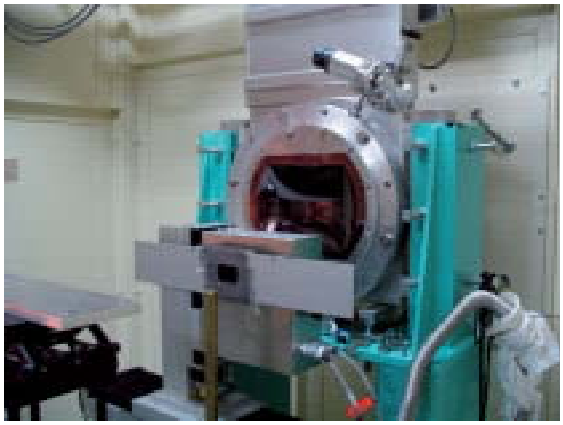

図2．BL20B2実験ハッチ2に設置された大型スリット

利用研究促進部門
バイオ・ソフトマテリアルグループ
上杉健太朗

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1μm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 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1.6μm、直径500μm、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1.0μm、直径155μm、回折効率　16％（8keV、実測値)、焦点距離 f＝100mm（8keV)、
3．X線光学系倍率：約40倍（12keV）～80倍（6keV)、

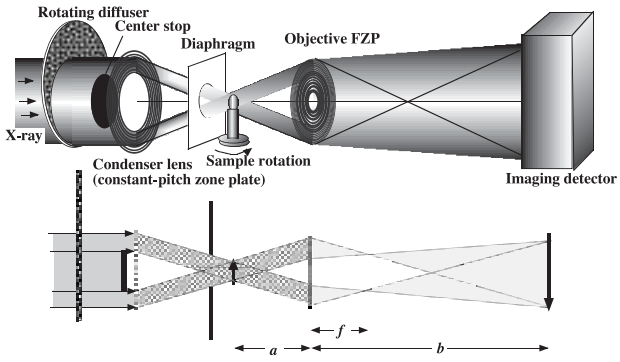

図1．BL47XUでの結像ナノトモグラフィー装置構と光学系の概念図

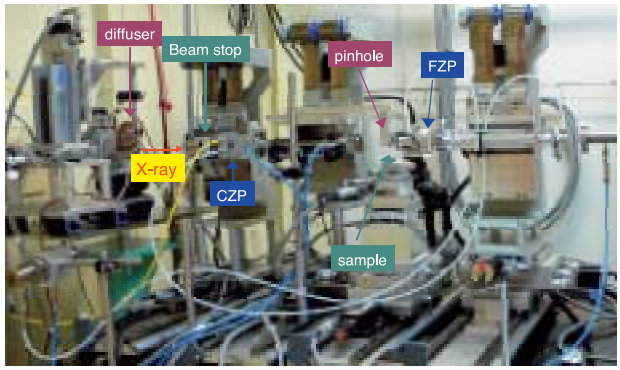

図2．BL47XU第一実験ハッチに設置した結像ナノＣＴ装置。画像検出器はこの写真外の第二ハッチ最下流に設置されている。

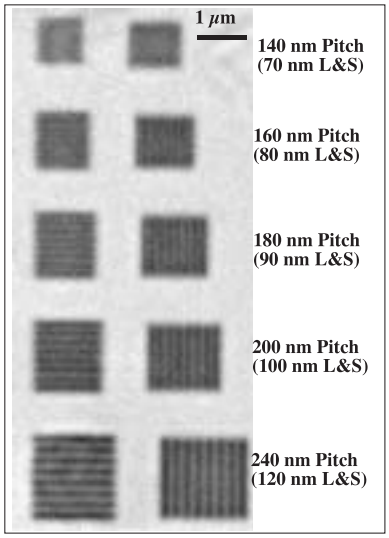

図3．分解能評価用テストパターンの透過Ｘ線顕微胸像（二次元像)。80nmのライン／スペースパターンまで解像されている。Ｘ線エネルギーは8keV。

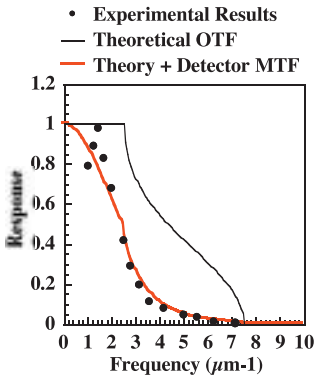

図4．Modulation Transfer Function （MTF） の実測値と計算値。実験値は図３に示す画像データから得られたものである。黒実線は回折理論によるMTF計算値、赤実線は検出器の分解能を考慮したMTF理論値。

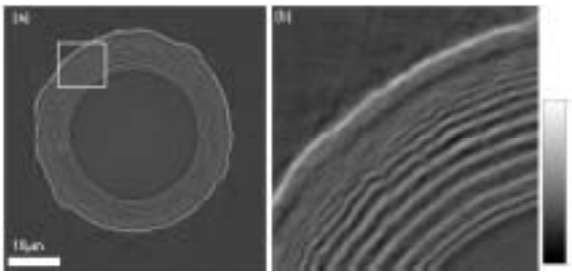

図5．分解能評価用テスト試料のCT像。(b) は (a) 画像中の枠内を拡大したもの。再構成像に見られるもっとも細かい構造は0.15μmライン／スペース。

４．画像検出器：蛍光板（P43（Gd2O2S：Tb+））＋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2.74μm（2x2　binning mode)、空間分解能9.9μm、有効視野5.4mmx3.5mmm、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0.2-0.3μm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