

## X線高速/高分解能イメージングのためのキャピラリコンデンサの開発 Development of capillary condenser for illumination system of high-speed / high-spatial-resolution x-ray imaging

青山 朋樹<sup>a</sup>, 松永 大輔<sup>a</sup>, 大澤 澄人<sup>a</sup>, 鈴木 芳生<sup>b</sup>, 竹内 晃久<sup>b</sup>, 上杉 健太郎<sup>b</sup>, 寺田 靖子<sup>b</sup>,  
中澤 弘基<sup>c</sup>

Tomoki Aoyama<sup>a</sup>, Daisuke Matsunaga<sup>a</sup>, Sumito Ohzawa<sup>a</sup>, Yoshio Suzuki<sup>b</sup>, Akihisa Takeuchi<sup>b</sup>,  
Kentaro Uesugi<sup>b</sup>, Yasuko Terada<sup>b</sup>, Hiromoto Nakazawa<sup>c</sup>

<sup>a</sup>(株)堀場製作所, <sup>b</sup>(財)高輝度光科学研究センター, <sup>c</sup>(独)物質・材料研究機構  
<sup>a</sup>HORIBA Co Ltd, <sup>b</sup>JASRI, <sup>c</sup>NIMS

放射光を利用した X 線顕微鏡は、照明光量が不足するために CT 測定や、高速イメージングが困難なことがある。本実験では照明光量を向上させるために、全反射型のキャピラリを用いた放射光の集光状態評価を行い、集光強度および集光状態の観察を行った。従来のフレネルゾーンプレート(FZP)<sup>[1]</sup>が直接光比で 2.5 倍程度の集光強度であるのに対し、今回用いた全反射形キャピラリでは直接光比 30.1 倍の集光強度を得ることができた。

キーワード： X 線顕微鏡、キャピラリ、全反射、CT 測定

### 背景と研究目的：

X 線ガイドチューブ (X 線導管) は十～数百ミクロン内径のガラス管の内面で X 線を全反射させて集光させる一種の集光光学素子である。全反射を利用しているため色収差が無く、広い波長域の X 線を集光できる。X 線ガイドチューブにより 10 ミクロン程度のマイクロビームを生成する光学系が開発されている。X 線マイクロビームを用いることで、微小領域を非破壊で迅速に測定できることから、X 線分析顕微鏡は電子デバイスなどの故障解析、異物分析、鑑識、生体材料・文化遺産などの分析、電気電子部品中の有害元素の分析などにおいて広く利用されている。このように X 線ガイドチューブが卓上の装置に組み込まれた実績はあるが、放射光での利用実績はまだ無い。前回の課題 (課題番号：2008B1948) で、このガイドチューブの X 線結像顕微鏡におけるコンデンサー光学系への適用に関する基礎的な実験を行い、X 線ガイドチューブをコンデンサーレンズとして使用できる可能性が確認された。今回は、前回よりも精度を向上させた X 線ガイドチューブを用いることで、コンデンサーレンズとしての性能向上を確認する。

### 実験と結果：

#### キャピラリ集光状態の評価方法

本実験では図 1 のような実験系を用いた。キャピラリ内面に当たった X 線は入射角が臨界角よりも小さいため、強度を失うことなく全反射する。キャピラリ内面に当たらない X 線 (直接光) についてはビームストップを用いて遮蔽する。今回実験に用いたキャピラリはテーパキャピラリ、放物面キャピラリで、放物面キャピラリは理論上、内面で反射した X 線を 1 点に集光できるものである。

キャピラリの集光状態を評価するため、焦点を結ぶ位置 (キャピラリの端から 60mm) とファーフールド (キャピラリの端から 500mm) での X 線の強度分布を CCD カメラにて測定した。キャピラ

リは軸方向の曲がりを矯正するため、Al で作成した V 溝に押し付ける。V 溝の作成精度は $\pm 0.01\text{mm}$  以下である。

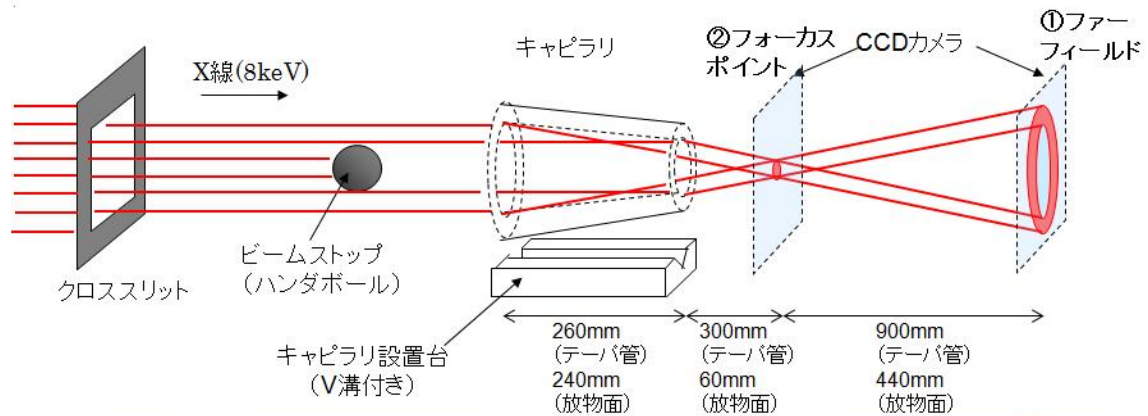


図 1. キャピラリコンデンサによる集光状態の評価

#### ファーフールドでの強度分布

ファーフールドでの CCD 画像を図 2,3 に示す。中心部分の強度が高いのはビームストップが入っていないためである。径と中心の異なる細かい円が複数見られる。円の中心がずれているのは、キャピラリの中心軸がずれているためと考えられる。複数の細かい円が見られるのは、キャピラリ内面が回転対称なうねりを持っているためと推測される。

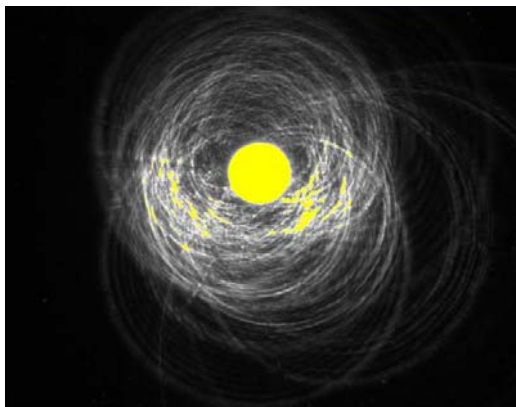


図 2. ファーフールド像 テーパ管

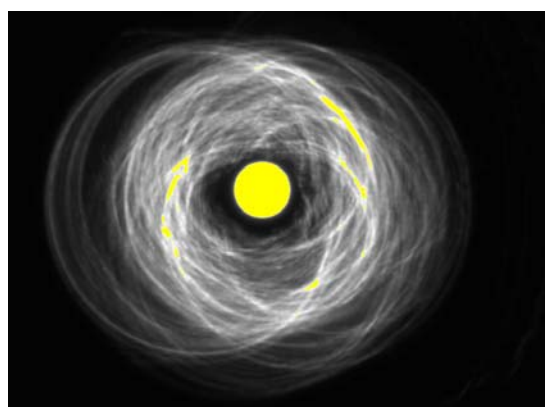


図 3. ファーフールド像 放物面管

#### 焦点位置での集光強度

焦点位置での CCD 画像を図 4,5 に示す。焦点における  $\phi 50\mu\text{m}$  スポットの強度で直接光に対して 30.1 倍、前回実験に用いたテーパ管に対して 2.07 倍の利得を得た。スポットの広がり FWHM で  $48\mu\text{m}$  となった。内面形状及びキャピラリの曲がり最適化することで、理論上は  $\phi 50\mu\text{m}$  スポットの強度で直接光に対して 193.4 倍まで向上させることが可能であり、X 線 CT の測定時間の短縮化、およびマイクロ～ミリ秒の高速/高分解能イメージングを実現することが可能であると考えられる。

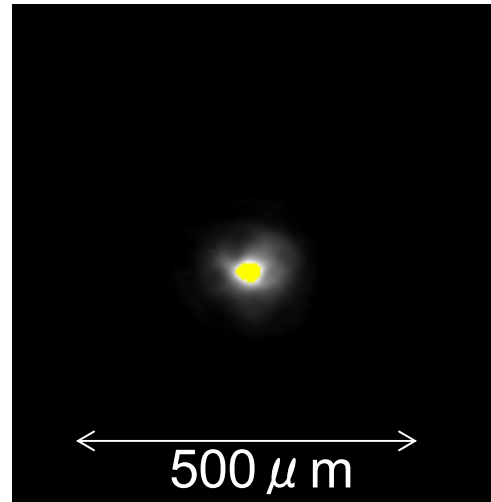
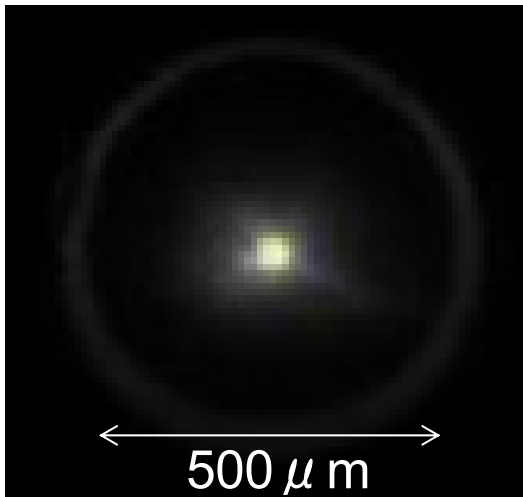


図4. 焦点位置での集光画像 テーパーキャピラリ

図5. 焦点位置での集光画像 放物面キャピラリ

#### 考察：

ファーフールドでの CCD 画像は、理想的なキャピラリが作成された場合、テーパ管で外径：1.486mm、内径：1.286mm、線幅：100 $\mu\text{m}$ の円、放物面管で外形：0.984mm、内径：0.700mmの中空円となる。実験結果（図2、3）では、複数の円（ほぼ真円）に分かれている。前回の実験同様、放物面管にもキャピラリ内面に中心軸に対して回転対称なうねりがあると考えられる。また、複数円の中心位置が異なっていることがわかる。V溝で形状を矯正することでずれの度合いが変化したことから、キャピラリの中心軸がずれていることが分かる。キャピラリをV溝で矯正した後に、焦点位置での集光強度が増加した。これはキャピラリの曲がりやを低減することで理想的な集光状態に近づき、強度が向上したためと考えられる。この複数円の直径と中心位置から曲キャピラリのどの点で反射されたものを逆算することが期待されるが、放物面管のファーフールド画像から円の座標を正確に抽出することは非常に困難であるため、画像から機械的に円を抽出する手法の確立が必要となる。

焦点位置での CCD 画像からテーパ管よりも放物面管のほうが集光中心の強度が高いことがわかる。放物面管は理論上、平行ビームを1点に集光することができるが、上記のような内面のうねりやキャピラリの曲がりによって反射角度、位置が変わるために、1点に集光することができず焦点が広がったものと考えられる。

#### 今後の課題：

ファーフールド画像から内面形状を正確に把握するためにファーフールド画像の解析が必要になる。放物面管のファーフールド画像のように、複数円の抽出が難しい場合についても解析を可能にするため、画像解析手法の確立が必要となる。また、キャピラリのうねり及び曲がりやを低減させるために、キャピラリの内面処理や矯正治具を作成し今回のような CCD 画像を取得することで効果の確認を行う。今回の実験では放物面管を X 線顕微鏡の照明系に用いて評価することができなかったため、再度 X 線顕微鏡の照明系に用いて評価を行う予定である。

#### 参考文献：

- [1] Yoshio Suzuki, Takeuchi Akihisa, Hidekazu Takano, and Hisataka Takenaka, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, No.4A, 2005, 1994-1998