

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

松永 大輔^a, 大澤 澄人^a, 鈴木 芳生^b, 竹内 晃久^b, 上杉 健太郎^b, 寺田 靖子^b, 中澤 弘基^c
Daisuke Matsunaga^a, Sumito Ohzawa^a, Yoshio Suzuki^b, Akihisa Takeuchi^b, Kentaro Uesugi^b,
Yasuko Terada^b, Hiromoto Nakazawa^c

^a(株)堀場製作所, ^b(財)高輝度光科学研究センター, ^c(独)物質・材料研究機構
^aHORIBA Co Ltd, ^bJASRI, ^cNIMS

放射光を利用した X 線顕微鏡は電子デバイス、各種材料などの故障解析、生体材料、文化遺産などの分析において広く利用されている。しかし、照明の光量が不足するため、CT 測定や高速でのイメージングが困難なことがある。照明に全反射型のキャピラリを用いれば、従来に比べ桁程度の光量の利得が見込まれる。今回、照明用の全反射型キャピラリの評価と、実際に全反射型キャピラリを用いて X 線顕微鏡像の撮影を行った。従来のフレネルゾーンプレート (FZP) のコンデンサレンズを用いた場合に比べ、4 倍の光量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 線顕微鏡は微小領域を非破壊で迅速に測定できることから、電子デバイス、各種材料などの故障解析、生体材料、文化遺産などの分析において広く利用されている。X 線管を使用した X 線顕微鏡は従来から利用されているが、光源の大きさによって空間分解能が決まり、数百 nm 以下にはできない。一方、放射光を利用した X 線顕微鏡では空間分解能は対物レンズの焦点サイズで決まる。対物レンズにゾーンプレートを用いれば、50nm 以下の空間分解能を得ることが可能である。しかし、光量が不足するため、CT 測定や高速でのイメージングが困難であった。

X 線結像光学系の照明にキャピラリのような全反射型の光学素子を用いることは、その利用効率の高さから、高い有用性が以前から指摘されている。しかしながら、実際に放射光の結像光学系とのマッチングを最適化できるようなキャピラリの製作は難しかった。全反射型のキャピラリを用いた照明用コンデンサレンズが実用化されれば、CT 測定の高速度並びに、マイクロ～ミリ秒での高速/高分解能イメージングが可能となると期待される。

放射光用全反射型キャピラリを製作し、X 線顕微鏡の照明用コンデンサレンズとして使用して顕微鏡像を撮影し、その有用性を評価する。

実験と結果：

1. キャピラリ集光状態の評価

X 線顕微鏡のコンデンサレンズ用キャピラリとして図 1 のようなキャピラリを作成した。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。

キャピラリの集光状態を評価するため、図 2 のように焦点を結ぶ位置(キャピラリの端から 300mm)とファーフールド(キャピラリの端から 1.2m)での X 線の強度分布を CCD カメラにて測定する。キャピラリは軸方向の曲がりやを矯正するため、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。X 線のエネルギーは 8keV、ビームの発散角は 1×10^{-6} rad である。

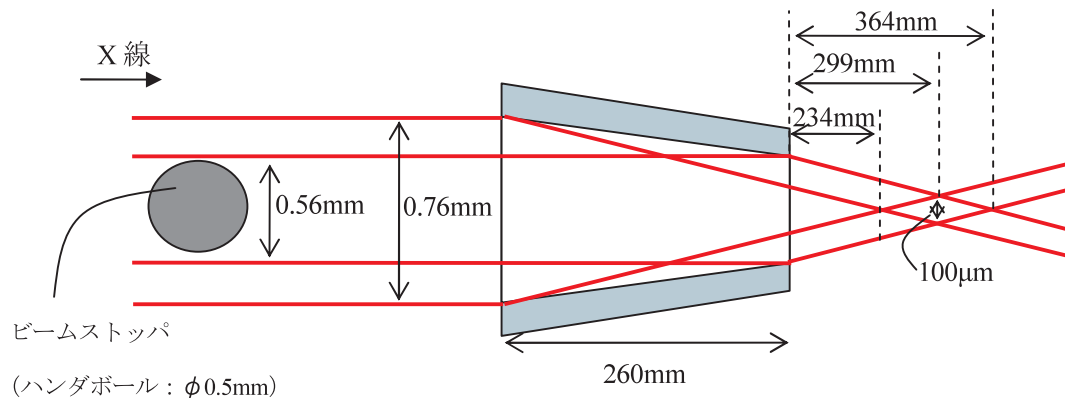


図1 キャピラリコンデンサ

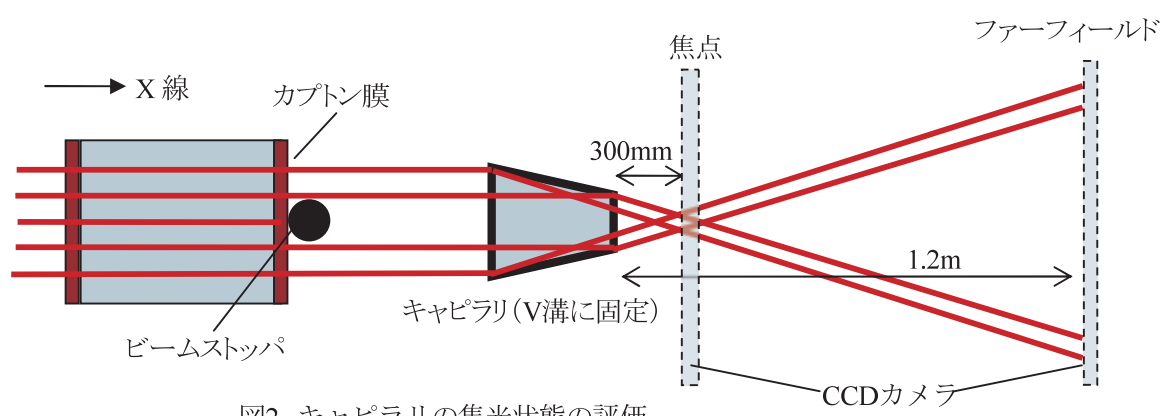


図2 キャピラリの集光状態の評価

キャピラリの中心軸矯正なしのファーフールドでの CCD 画像を図3、キャピラリの中心軸矯正有りのファーフールドでの CCD 画像を図4に示す。真ん中の明るい部分はビームストップが入っていないことによる直接光である。径と中心が異なる、幅の狭い円が重なって見える。円の中心が一致していないのは、キャピラリの中心軸が直線からずれているためと考えられる。いくつもの円が重なって見えるのは、キャピラリ内面にうねりがあるためと考えられる。キャピラリの中心軸の曲がりを矯正することで円の中心は一箇所に集まる(図4)。

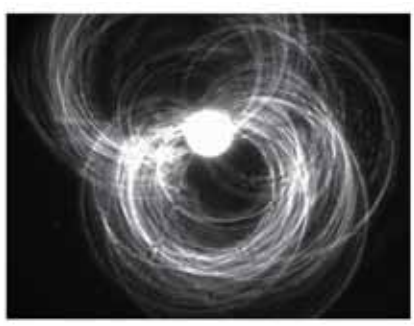


図3 ファーフールドでの CCD 画像(矯正無し)

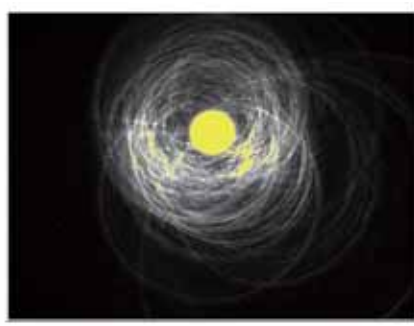


図4 ファーフールドでの CCD 画像(矯正有り)



図5 焦点位置での CCD 画像(矯正有り)

キャピラリの中心軸矯正後の焦点位置での CCD 画像を図 5 に示す。キャピラリの中心軸の曲がり
を矯正することで中心での強度は強くなり、直接光に対してピーク位置で 21 倍、スポットの広がり
は FWHM で横方向 $50\mu\text{m}$ 、縦方向 $35\mu\text{m}$ となった。

2. 顕微鏡像の評価

図 6 のようにキャピラリをコンデンサレンズとして X 線顕微鏡に組み込む。左から入射する X 線は
回転ディフューザーによって散乱されビーム内 X 線量の不均一性が緩和される。キャピラリによ
って集光されない X 線はビームストップにより遮蔽される。キャピラリによって集光された X
線はキャピラリ先端から 300mm 離れたサンプルに照射される。サンプルを透過した X 線はフレ
ネルゾーンプレート (FZP) [1] で拡大される。

Si 上 Ta パターンの X 線顕微鏡像を図 7 に示す。ピッチ : 200nm、線幅 : 100nm のパターン
(図 7 の破線枠内)まで確認することができた。また、直接光を利用した場合に比べ、10 倍、従
来から使用されている FZP コンデンサレンズに比べ、4 倍の光量が得られた。

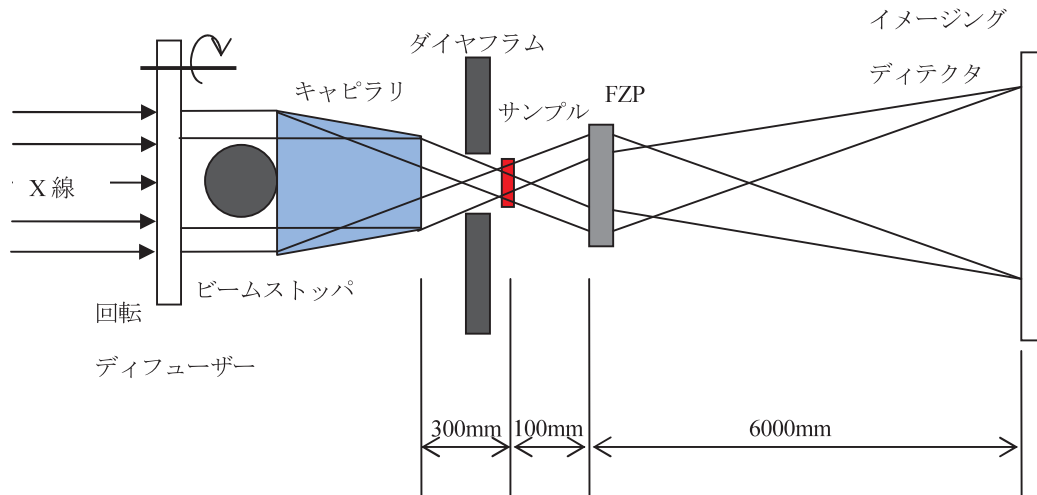


図 6 キャピラリの X 線顕微鏡への組み込み

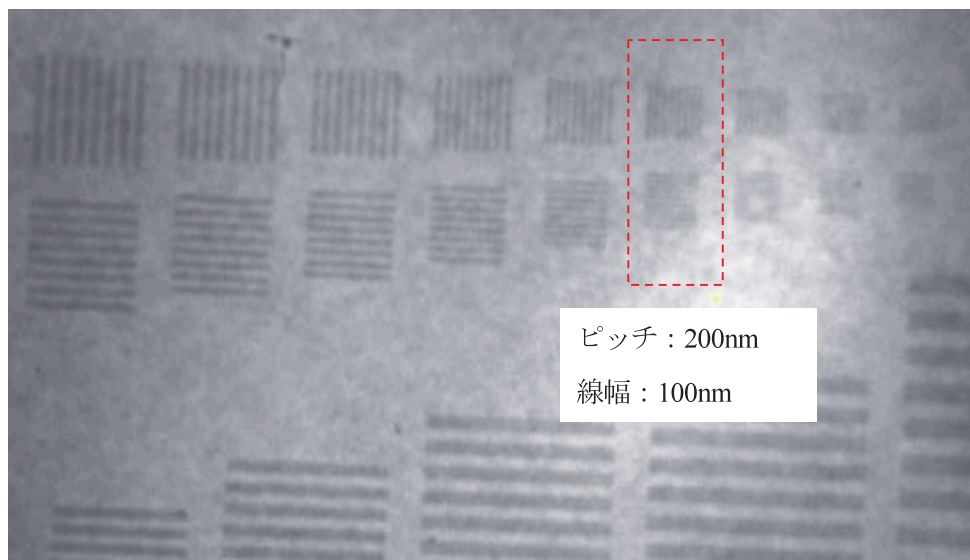


図 7 Ta パターンの X 線顕微鏡像

考察：

図2のファーフィールドでの CCD 画像は、理想的なキャピラリが作成された場合、外径:1.486mm、内径:1.286mm、線幅:100 μm の円となる。実験結果(図3、4)では、複数の円(ほぼ真円)に分かれており、円の直径は1.26mmから2.96mmとなっていた。このことから、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。円の直径が大きくなっているのは内面のうねりによって反射角が変わったためである。また、図3、4の円の中心が異なっていることから、キャピラリの軸がずれていることが分かる。これはキャピラリをV溝で矯正した際に、ファーフィールドにて円の中心が一箇所に集まり、焦点位置にて強度が増加したことも確かめられた。円の線幅がほぼ等しいことから、キャピラリ内面のうねりは周期的であると考えられる。

図2の焦点位置での X 線強度は、理想的なキャピラリが作成された場合、 $\phi 100\mu\text{m}$ の範囲に1/R(半径)の強度分布を持ち(図8)、直接光に対して面積比で26.4倍となる。理論値と実験値で $\phi 100\mu\text{m}$ 内の X 線強度を比較すると、実験値は理論値に対して33%であった。理論的な形状を持ったキャピラリが作成できれば、焦点($\phi 100\mu\text{m}$)での X 線強度は3倍になると予想される。ファーフィールドでの CCD 画像の解析から、X 線強度を上げるには、キャピラリ内面のうねりを小さくし、キャピラリの中心軸を直線に近づけることが必要であることが分かる。

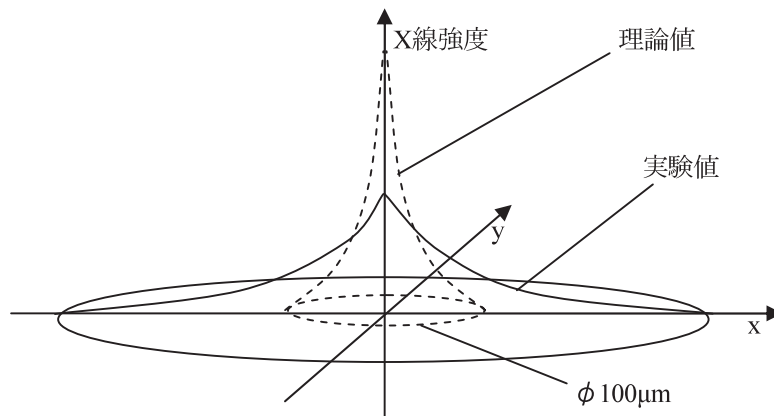


図8 焦点での X 線強度

今後の課題：

キャピラリ内面のうねりを小さくすること、キャピラリの中心軸をより直線に近づけることが今後の課題である。今回の結果から要因を洗い出して、キャピラリ作成方法を改良する。図3、4のようなファーフィールドでの CCD 画像、図5のような焦点位置での CCD 画像を撮影することで、改良したキャピラリの評価を行うことができる。改良したキャピラリを再度 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