

光学的硬 X 線ホログラフィー顕微鏡の開発

渡辺紀生、青木貞雄（筑波大学 物理工学系）

1. はじめに

エネルギー10 keV 近辺の X 線を用いた顕微鏡光学系の開発は、SPring-8 などの第三代放射光光源の利用開始とともにここ数年で飛躍的に進歩し、様々な光学素子でサブミクロンの分解能を持つようになった。このような硬 X 線領域では、試料を吸収の変化で見ると位相の変化で見た方がはるかにコントラストが良く観察できる。X 線ホログラフィーは試料の吸収と位相変化の両方を同時に結像できること・試料から検出器まで光学素子を必要としないことといった特徴がある。ここでは、SPring-8 BL20XU で行ったゾーンプレートを用いた X 線ホログラフィー実験に関して述べる。

2. ガボールホログラフィー

SPring-8 (8GeV, 100mA)、BL20XU は周期長 26 mm, 周期数 173 のリニアアンジュレーターと液体窒素冷却型 2 結晶分光器を持った中尺ビームラインで、光源から下流ハッチの実験位置まで約 250 m 離れている。そのため、比較的広い空間コヒーレンスが得られるという特徴がある。本研究ではこのビームラインを用いてエネルギー10 keV の X 線で実験を行った。

図1にガボールホログラフィーの光学系を示す。この光学系では、ゾーンプレートの集光点からの発散光で試料を検出器面上に拡大投影する。検出器には、ビームモニター2（浜松ホトニクス、P43 蛍光板、6.35 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、C4880 CCD カメラ）を用いた。ゾーンプレートの最外輪帯幅は表1に示すように0.1 μm なのでゾーンプレート自体の理論的分解能は0.12 μm となる。フロントエンドスリット ($0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$) の幾何光学的像の大きさもこの光学系では0.12 μm となり、両者のコンボリューションをとると0.17 μm 程度のスポット径が得られる計算となる。拡大投影の倍率が十分大きければこのガボールホログラフィーの分解能はこのスポット径と同程度となることが期待できる。

図2にタンタル製分解能テストパターンのホログラム及び再構成像を示す。ここではビームライン途中の Be 窓などから発生するスペckルノイズ等の影響を減らすために、試料を抜いたホログラムでまず割ってから再構成計算を行っている。図2から線幅0.2 μm までのパターンを観察す

表1 ゾーンプレートの仕様

Outermost zone width	0.1 μm
Diameter	155 μm
Number of zones	388
First order focal length (10 keV)	125 mm
Zone material and thickness	Ta 1 μm
Substrate thickness	SiN 2 μm

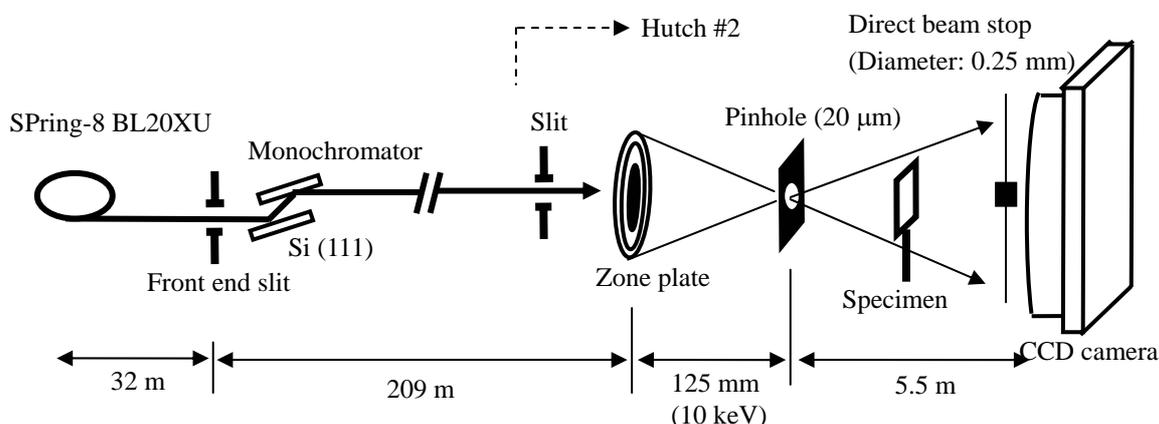


図1 SPring-8 BL20XU における X 線ガボールホログラフィー光学系

ることができており、ほぼ理論的に期待される分解能が得られているといえる。

3. レンズレスフーリエ変換ホログラフィー
ゾーンプレートとビームスプリッターとした図3の光学系にて、レンズレスフーリエ変換ホログラフィーの実験をX線エネルギー10 keVで行った。ゾーンプレートや検出器などは図1のガボールホログラフィー光学系と同じである。図4にタンタル製分解能テストパターンのホログラム及び再構成像を示す。このテストパターンは各線幅に対して縦横それぞれ8本のパターンがあるが、強度分布の再構成パターン図4(c)では倍の本数が観察できる。このことから、それぞれのラインパターンのエッジが再構成されていると考えられる。これは試料を照明しているダイレクトビームを検出器手前のビームストップで止めていることが原因で、そのため暗視野像に近くなっていると考えられる。しかし図4(d)の位相分布の再構成像ではエッジのみでなくパターン全体を観察することができた。

図5にポリスチレンビーズ(直径2.8 μm及び0.8 μm)の再構成像を示す。位相分布再構成像では直径0.8 μmのポリスチレンビーズも再構成して結像させることができた。

4. ゾーンプレートを2枚用いた干渉実験

図3に示したレンズレスフーリエ変換ホログラフィー光学系では、ダイレクトビームを再構成に用いることが出来ないため完全には試料の振幅透過率を再構成することができない。ダイレクトビームも含めたホログラムを記録するために、図6に示す2枚のゾーンプレートを用いた干渉計を作成してテストした。この光学系では図1で示したガボールホログラフィー光学系に参照波をのせる形であるため、このガボールホログラフィーと同じ分解能で双子像の重ならない再構成像が得られると期待される。現段階では、試料を入れない状態で図7のようなゾーンプレートの2つの集光点からの干渉パターンの記録に成功している。

おわりに

なお、本研究の成果は横須賀泰輝(筑波大)、大東琢冶(筑波大)、高野秀和(SPring-8)、竹内晃久

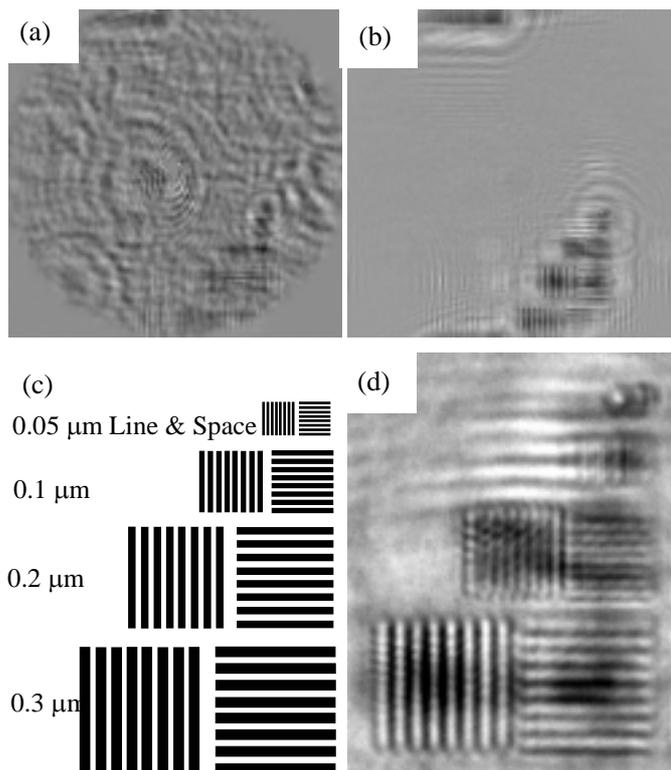


図2 (a) タンタルテストパターンのホログラム(10 keV) 試料を抜いたホログラムで割った結果を対数スケールで表示した。(b) その再構成像、(c) テストパターンの配置図、及び(d) その部分の再構成像の拡大図。0.2 μm 線幅まで識別できている。露光時間：15 s。

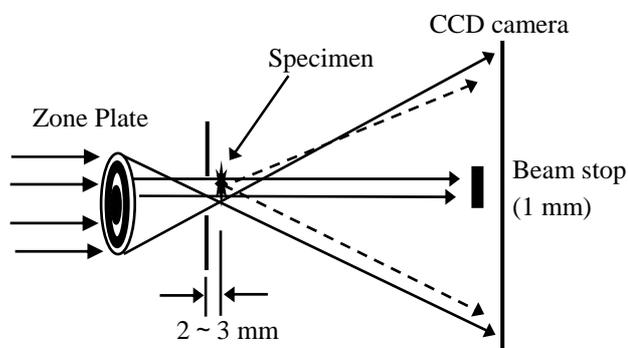


図3 レンズレスフーリエ変換ホログラフィー光学系。

(SPring-8) 鈴木芳生 (SPring-8) の方々との共同研究による。

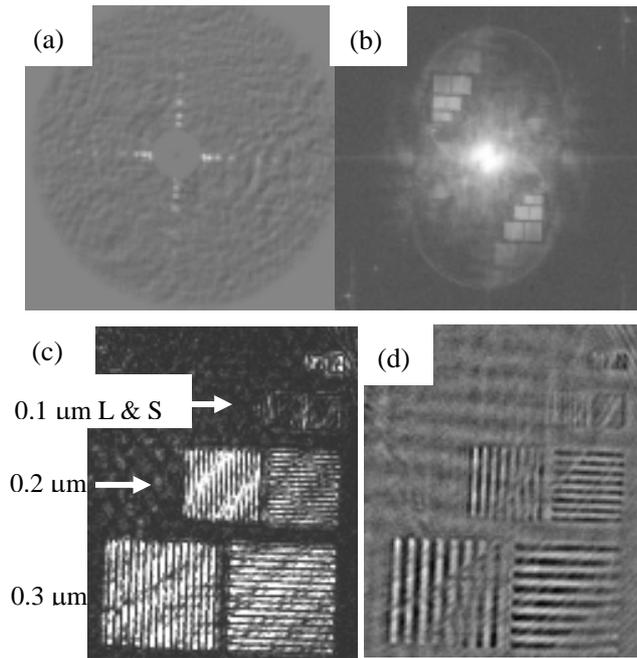


図4 (a) タantalテストパターンのレンズレスフーリエ変換ホログラム(10 keV)、及び (b) その再構成像 (対数スケール表示)。試料手前のピンホールの直径は 50 μm 。(c) 再構成像の図 2 (c) に対応する部分の強度分布イメージ、及び (d) 位相分布イメージ。位相分布は再構成像の (実数部/振幅) のアークサインを示す。露光時間 : 3 min.

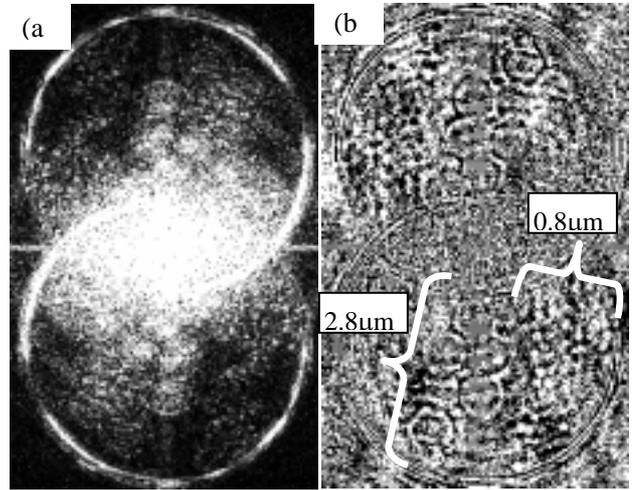


図5 直径 2.8 μm 及び 0.8 μm のポリスチレンビーズのレンズレスフーリエ変換ホログラム再構成像(10 keV)。(a) は再構成像の強度分布、(b) は位相分布を示す。試料手前のピンホールは直径 20 μm のものを用いた。露光時間 : 80 s.

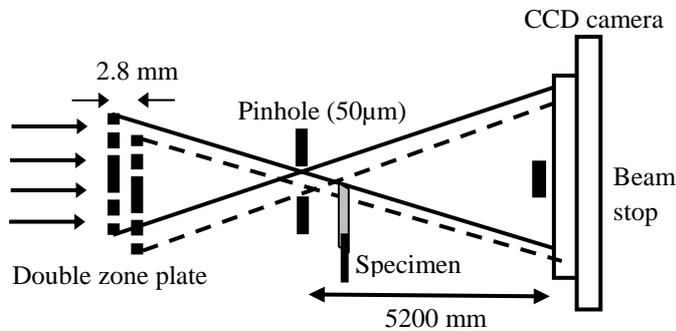


図6 2枚のゾーンプレートを用いた干渉光学系

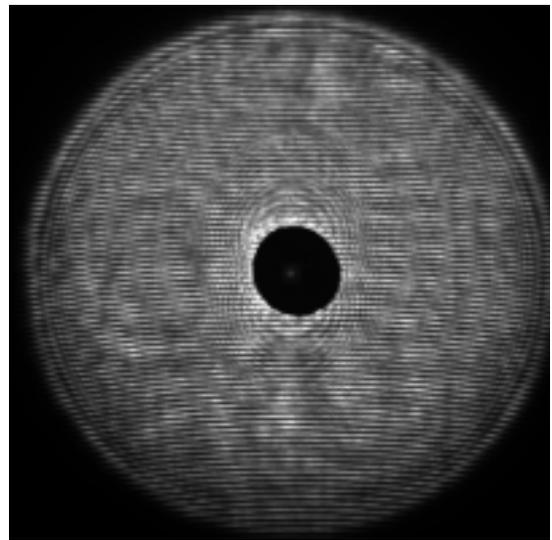


図7 ゾーンプレート焦点間の光軸方向の距離 2.8 mm、下流側焦点の光軸からの距離 10 μm のときの干渉パターン (10 keV)。露光時間 : 20 s.