

解説

X線ホログラフィーの現状

渡辺紀生*, 青木貞雄

筑波大学物理工学系

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

Present Status of X-Ray Holography

Norio WATANABE and Sadao AOKI

Institute of Applied Physics, University of Tsukuba
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 JAPAN

Abstract

Present status of x-ray holographic microscopy is described based on our experimental results. In the soft x-ray region (~ 2 nm), Gabor holographic microscope of a point-projection type was developed at the Photon Factory. 2D and 3D reconstructions could be successfully obtained. In the hard x-ray region (~ 0.1 nm), Gabor and lens-less Fourier transform holographic microscopes with a zone plate were successfully investigated at SPring-8 BL20XU. A $0.2 \mu\text{m}$ line pattern could be resolved. Using a double zone plate interferometer, a hard x-ray lens-less Fourier transform holographic microscope with cone-beam illumination was investigated. A $0.2 \mu\text{m}$ line pattern could be also observed and the phase-shift could be reconstructed.

1. はじめに

ホログラフィーでは、試料からの散乱光と参照光との干渉パターンを記録することによって、試料からの散乱光の位相と振幅を同時に記録する。これを再構成することによって、試料位置での光の波面が得られる。通常の結像法と異なり、試料による光の吸収と位相変化の両方を同時に結像できることが特徴である。

X線ホログラフィーは、試料のミクロな構造を観察する手段として、他の様々なX線顕微鏡とともに進歩してきた。X線ホログラフィーを含めたX線顕微鏡全体に関しては、3年ごとに開催されているX線顕微鏡国際会議のプロシーディングが詳しい¹⁾。今回は2002年にESRF(ヨーロッパ連合)で開催され、次回は2005年に日本の姫路で開催予定である。多数の参加を期待したい。

X線ホログラフィーの方法は、光学的X線ホログラフィーと蛍光X線ホログラフィーに大きく分けられる。前者は、1948年のGaborによるホログラフィーの発明から始まる可視光領域のホログラフィーをX線領域に拡張した方法である。後者は、結晶中の特定部位に存在する原子からの蛍光X線を光源とし、その周囲の原子による散乱波との干渉パターンから結晶構造を再構成する。この方法は現在進展の著しい領域であるが、本学会誌にはすでに林らによる優れた解説^{2,3)}が掲載されているので、本稿では割愛する。

X線を用いたホログラフィーの研究は、Gaborによる発明の数年後より始まった⁴⁾。しかし、その当時はホログラフィーに必要な干渉性の良いX線源と分解能の高い検出器が利用できなかったことから進歩が遅く、1970年代に至ってようやく空間分解能数 μm の再構成像が得られるよ

うになった⁵⁾。その後1970年代後半から80年代にかけての放射光の利用開始および高分解能レジストの出現によって、軟X線ホログラフィーの空間分解能は約50 nmにまで飛躍的に向上した⁶⁾。

軟X線ホログラフィーでは、炭素と酸素の吸収端の間のいわゆるウォーターウインドウ領域において、生物試料を生に近い状態で高分解能観察することを主な目的に開発されてきた。波長数 nm の軟X線領域では、X線レジストとしてポリメチルメタクリレート (PMMA, poly(methyl methacrylat)) が高分解能検出器として使用できる。X線ホログラフィーに関してこれまで報告された中では、PMMAを用いた軟X線Gaborホログラフィーが、分解能では40~50 nmと最も高い値を示している⁷⁾。しかし、ゾーンプレートを用いた結像型軟X線顕微鏡の分解能は現在約30 nmにまで向上しており⁸⁾、軟X線ホログラフィーは現時点ではそれを超える可能性を見出せていないように思える。

硬X線ホログラフィーは、生物や半導体材料などの構造を、位相コントラストにより高分解能で観察することを目的に開発が進められてきた。Fig. 1⁹⁾に示すように、X線に対する屈折率を $n = 1 - \delta - i\beta$ で表すと、硬X線領域では吸収に対応する β と比較して位相変化に対応する δ の方がはるかに大きくなる。そのため、エネルギー数 keV 以上の領域では、一般に吸収で観察するよりも位相変化で観察した方がはるかにコントラスト良く試料を観察することができる。硬X線領域では、第3世代放射光施設のX線アンジュレーターのコヒーレントなX線が利用可能となったこと、およびゾーンプレートなどの硬X線用光学素子の最近の進歩によって、ようやくホログラフ

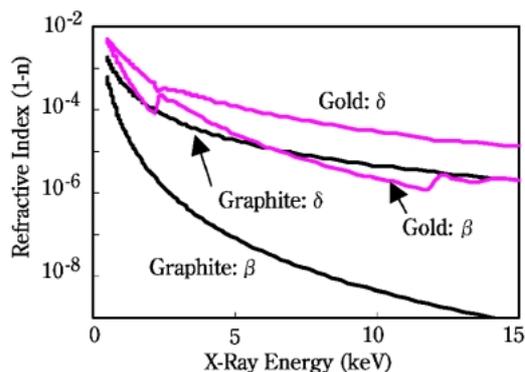


Figure 1. Refractive indices of graphite and gold⁹⁾.

ィー実験を行える環境が整ってきた。

本報では、現在まで行ってきた我々の研究成果をもとに X 線ホログラフィーの現状について紹介したい。

2. X 線光源

光学的 X 線ホログラフィーには、高い時間コヒーレンスと空間コヒーレンスが要求される。時間コヒーレンスは、参照波と物体波との光路長の差の最大値を与える。また、空間コヒーレンスは計測できる物体の大きさやホログラム面の大きさを規定する。

時間コヒーレンスは可干渉距離（コヒーレント長） Δl で表され、 λ を波長として、

$$\Delta l = \lambda^2 / \Delta \lambda$$

となる。波長数 nm で用いられる一般的な回折格子分光器の場合 $\lambda / \Delta \lambda$ は 10^3 程度、0.1 nm 付近の硬 X 線で用いられる結晶分光器の場合は $\lambda / \Delta \lambda$ が 10^4 程度なので、 $\Delta \lambda$ は軟 X 線では数 μm 、硬 X 線では 1 μm 程度である。

一方、空間コヒーレンスは、光源を半径 r の円盤状の単色インコヒーレント光源と仮定した場合、光源から L 離れた平面上の 2 点を通る光線が十分な可干渉性を持つ場合の最大の 2 点間の距離 D で示され、

$$D = 0.16 \lambda L / r$$

で計算できる¹⁰⁾。この式から、空間コヒーレンスは微小な光源をできるだけ離れた距離で使用すると高くすることができる。それには輝度の高い光源が必要となるため、X 線ホログラフィーの研究は X 線光源が X 線管から放射光偏向電磁石光源、そしてアンジュレーター光源へと進歩するのと歩調を合わせて発展してきた。

我々が実験に用いた SPring-8 BL20XU は、X 線アンジュレーター光源と実験位置との距離が 240 m とれるため、通常よりも広い空間コヒーレンス領域が利用できる。この光源のビームサイズは 10 keV で水平方向 384 μm 、垂直方

向 7.1 μm である¹¹⁾。垂直方向に関しては非常に小さいが、実際には 2 結晶分光器の振動のためビームが上下に動くので、露光時間中の平均位置で考えると実質的にはこの値よりもはるかに大きくなる。（この分光器の振動の問題は、ビームライン担当者の努力により、ここ 1 年で非常に安定してきた）そこで、ビームを絞るためにフロントエンドを 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ に絞るか、分光器直後に 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ のクロススリットを挿入している。これらの位置から実験位置までは約 200 m あるので、上式の $2r$ をスリット幅として計算すると、空間コヒーレンスは 10 keV X 線に対して 40 μm 、および 80 μm となる。実際にはこれよりも広い範囲にわたって干渉縞を観察できるが、コントラストは悪くなる。

3. Gabor ホログラフィー

X 線ホログラフィー光学系は、上記のような短い可干渉距離と狭い空間コヒーレンス領域の制約から、これまで行われてきた実験のほとんどが Gabor ホログラフィーか レンズレス・フーリエ変換ホログラフィー光学系であった。

Fig. 2 に Gabor ホログラフィーの光学系を示す。Gabor ホログラフィーでは、試料からの散乱光と試料の周りを通過した光との間の干渉パターンを記録する。試料を点状の物体と仮定すると、検出器面上のホログラムはゾーンプレートパターンとなる。ゾーンプレートはレンズとして作用するので、ホログラムを同じ光で照明してやると元の試料位置に像ができる。ゾーンプレートなので +1 次の焦点の他に -1 次の焦点ができ、これが双子像となって重なることがこの方法の欠点である。このため、比較的小さな粒子状の試料が散らばっているような試料でなければ双子像が重なって再構成像が悪化する。

Fig. 2(a) のように、点光源を用いた拡大投影光学系を用いる方法は、実験室系の微小焦点 X 線発生装置を用いて 1974 年に初めて X 線ホログラフィーの 2 次元再構成に成功した方法である⁵⁾。この方法では、拡大投影の倍率を十分に高くすればホログラフィーの分解能が検出器に依存しなくなる。干渉縞も拡大されるため、X 線 CCD カメラのように感度の高い検出器を使用することが可能となる。このとき分解能は光源の大きさ程度となる。現在では、光源に放射光を用いて、**Fig. 2(b)** のようにゾーンプレートで集光した微小スポットを 2 次光源とした光学系で同様の実験を行うことができる。

Fig. 3 に我々が行ったこのタイプの Gabor ホログラフィーの結果を示す¹²⁾。実験はフォトンファクトリーの BL11A で行い、ビームライン改造前のグラスホッパー分光器からの波長 2.34 nm の軟 X 線を用いて実験を行った。最外輪帯幅 0.25 μm のゾーンプレートで軟 X 線を直径 1 μm のピンホール上に集光して、ピンホールからの透過軟 X 線で試料を倍率 34 倍で背面照射型 CCD カメラに投

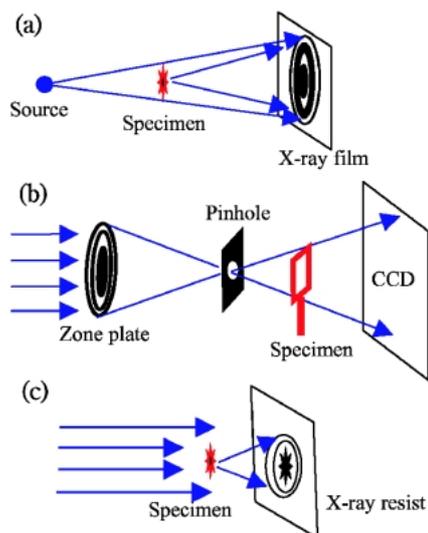
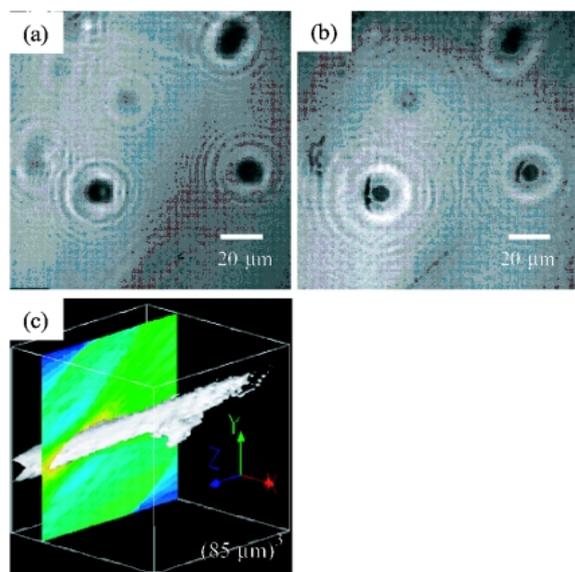


Figure 2. Optical systems of Gabor holography.

Figure 3. (a) Hologram and (b) reconstructed images of human red blood cells by Gabor soft x-ray holography at 2.34 nm. (c) 3D holographic reconstruction of a tungsten wire of 10 μm diameter. It was calculated from 7 projections recorded from -42° to $+42^\circ$.

影した。試料として、ヒト赤血球を用いた。**Fig. 3(a)**はそのホログラム、**(b)**はその再構成像である。露光時間は15分であった。再構成は、フレネル変換による数値計算によって行った。分解能は $1.4 \mu\text{m}$ で、この実験の場合ゾーンプレートへの入射軟X線の平行性が悪いためほとんどピンホール径で決まっていた。

この光学系の特徴として、試料を回転させることにより容易に3次元CTへ拡張できることがある。**Fig. 3(c)**に直径 $10 \mu\text{m}$ のタングステンワイヤーを -42° から 42° まで 14° おきに回転して撮影したホログラムからの3次元再構成像を示す¹³⁾。投影角をかなり制限しているため、一方

Table 1. Zone plate parameters

Outermost zone width	$0.1 \mu\text{m}$
Diameter	$155 \mu\text{m}$
Number of zones	388
First order focal length (10 keV)	125 mm
Zone material and thickness	Ta $1 \mu\text{m}$
Substrate thickness	SiN $2 \mu\text{m}$

向に伸びた再構成像となっているが、双子像に関しては幾つかの方向からの再構成像を加え合わせることでかなり押さえることが出来たのではないと思われる。

光源として空間コヒーレンスの高いX線アンジュレーターを用いてゾーンプレートで縮小すれば、はるかに高い分解能が期待される。実際に、光源としてSPring-8 BL20XUを用い、ゾーンプレートとして**Table 1**に示すスペックのものを用いた同様の実験では、エネルギー10 keVのX線を用いて線幅 $0.2 \mu\text{m}$ のタンタルテストパターンまで分解結像することができている¹⁴⁾。

Fig. 2(c)は、**(b)**とは逆に光源を遠ざけて平行照明とした光学系である。この場合、拡大投影の倍率は1となり、分解能は検出器面上に記録できるゾーンプレートパターンの最外輪帯幅程度となる。従って、分解能を上げるには高分解能な検出器を用いる必要があり、X線レジストとしてPMMAが良く用いられる。この方法では、薄く塗ったレジストを露光・現像し表面にできた凹凸を透過電子顕微鏡か原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて測定する。その値をホログラムの強度に変換して計算によって再構成を行う。PMMAの分解能は軟X線に対しておよそ10 nmと非常に高いため、現在のところ軟X線アンジュレーター光源と組み合わせたこの方法が光学的X線ホログラフィーの中でもっとも高い分解能を与えている。分解能として40–50 nmが報告されている⁷⁾。

何らかの方法でホログラム面上の位相がわかれば双子像のない再構成像を得ることができる。再構成される物体情報には吸収と位相変化があるが、ホログラム面上に記録されるのは強度のみなので、なんらかの物体に関する情報を前提とするが、フレネル変換で結びついた物体面とホログラム面との間の反復処理によって位相情報を回復することがある程度可能となっている。反復処理による位相回復アルゴリズムはGerchberg-Saxton¹⁵⁾やFienup¹⁶⁾らによって開発されてきた。それらアルゴリズムの軟X線ホログラフィーへの適用も行われている¹⁷⁾。

4. レンズレス・フーリエ変換ホログラフィー

4.1 平行照明によるフーリエ変換ホログラフィー

Fig. 4にレンズレス・フーリエ変換ホログラフィー光学系を示す。この光学系では、参照光源と試料を同一平面上に置く。試料を点状の物体と仮定すると、検出器面上の

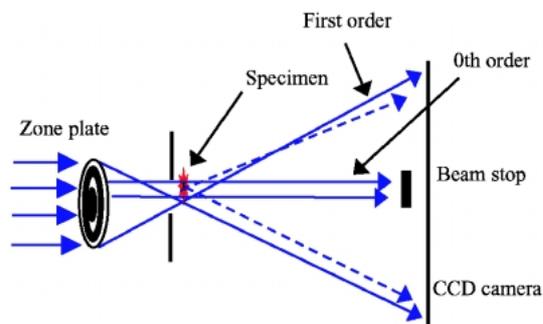


Figure 4. Lens-less Fourier transform holographic microscope.

ホログラムは正弦波格子となる。ホログラムの後ろにフーリエ変換レンズを置いて平行光を入射させると、1次、0次、-1次の回折光が別々の場所に像を結ぶ。従って、インラインホログラフィーで問題となった双子像を分離することができる。また、試料面と検出器との距離を変えることによって干渉縞間隔の増大が可能である。従って、CCDカメラによるホログラムの記録が可能であり、デジタルデータを直接フーリエ変換することにより再構成が行える。

参照光源にピンホールを用いた実験も行われていたが、分解能は参照光源の大きさで決まるため、この方法ではあまり分解能は良くならない¹⁸⁾。より高分解能を得る方法として、ゾーンプレートの集光点を参照光源とし、ゾーンプレートの0次の透過光を試料の照明光に使う方法が開発された。ゾーンプレートは円形の回折格子なので、集光する1次回折光の他にそのまま直進する0次光がある。0次光を試料の照明に用い、1次光焦点を試料のすぐそばに置いて参照光源とすることにより、レンズレス・フーリエ変換ホログラフィー光学系となる。この方法で McNultyらは初めて実験を行い、最外輪帯幅50 nmのゾーンプレートを用いて、金のテストパターンを60 nmの線幅まで再構成して結像させることに成功している¹⁹⁾。

硬X線の領域でも、同様の光学系で ESRFのX線アンジュレーターを用いたレンズレス・フーリエ変換ホログラフィー実験が報告されている²⁰⁾。最外輪帯幅0.3 μm のゾーンプレートを用い、14 keVのX線で15 μm ピッチの金メッシュの像が得られている。ここでは我々の SPring-8 BL20XUにおける10 keV X線を用いた実験結果をもとにこの光学系を紹介する¹⁴⁾。

Fig. 4の光学系において、入射X線はできるだけゾーンプレート全面をコヒーレントに照明している必要がある。検出器の分解能はどれだけ細かい干渉縞を記録できるかを決め、これは参照光源点からどこまで離れた点まで観察できるかを定める。この実験では、ゾーンプレートとして **Table 1**に示した直径155 μm 、最外輪帯幅0.1 μm のものを用いた。その1次焦点面直前に、直径50 μm ピンホールを端から数 μm の位置に集光点がくるように置い

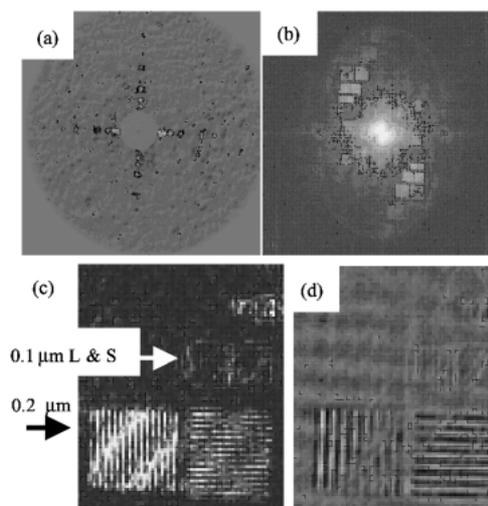


Figure 5. (a) A lens-less Fourier transform hologram of a tantalum test pattern and (b) its reconstruction at 10 keV. These are shown in logarithmic scale. The reconstructed intensity and the real part are shown in (c) and (d), respectively.

た。ピンホールは視野の大きさに直接関係するが、ゾーンプレートの-1次光や3次光をカットするためにはこれ以上大きくはできなかつた。このピンホール自体もX線の散乱体となって結像されるため、出来るだけ試料と同一平面上にあることが望ましい。この実験では、試料の大きさに応じてピンホールを0.5~3 mm程度離して設置した。また試料を透過したダイレクトビーム及び低次の回折光は強度が強過ぎて記録できないため、直径1 mmのビームストップで止めた。ホログラムは試料から5 m下流のビームモニター2 (P43蛍光板+CCDカメラ)で記録した。

Fig. 5に厚さ0.5 μm のタンタル製テストパターンのホログラム及び再構成像を示す。露光時間は3分であった。試料のホログラムは、試料を抜いて記録したホログラムで割ることによってスペックルノイズなどの影響を低減した。**Fig. 5(a)**のホログラムの光学的フーリエ変換を高速フーリエ変換(FFT)で計算することによって、**Fig. 5(b)**の再構成像を得た。

ホログラムをフーリエ変換した結果は、ホログラムの空間周波数を与える。計算される空間周波数の間隔は、ホログラムの一辺の長さを周期とする空間周波数である。従って、ホログラムの一辺の長さに対応する干渉縞を生じる試料面上の距離が再構成像のピクセル間隔となる。これは、**Fig. 5(a)**のようにゾーンプレートの1次光をほぼ全面に受けるように検出器をセットした場合には、ゾーンプレートの最外輪帯幅に等しくなる。この実験の場合では、0.1 μm である。

Fig. 5(c)と**(d)**に、この再構成像の強度及び振幅の実部を示す。0.2 μm の線幅まで分解結像できている。強度分布像では、ラインパターンの本数が倍に見えるが、これはビームストップで低次の回折光をカットしたために像が暗

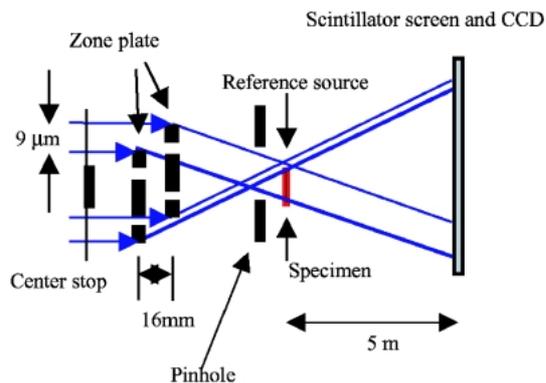


Figure 6. Lens-less Fourier transform holographic microscope with two zone plates.

視野となり、パターンのエッジが強調された結果である。

4.2 発散照明によるフーリエ変換ホログラフィー

レンズレス・フーリエ変換ホログラフィーにおいて試料を平行光で照明すると、照明光が検出器にそのままの強度で入射するために、これをビームストップで止めなければホログラムが記録できない。しかし、照明光を遮ると像は暗視野像となるため、完全な試料の位相情報を得ることは困難となる。そこで、**Fig. 6**のようにゾンプレートを2枚用いて発散光で試料を照明する光学系を作成し実験を行った²¹⁾。この光学系では試料の照明光が参照光と同程度に検出器面上で広がるため、低次の回折光から記録することが可能となる。

ゾンプレートには、**Table 1**の仕様のものを2枚用いた。1枚のときの集光効率、計算では10 keVにて0次光56%、1次光11%となるので、それぞれの1次光焦点への集光効率は、ゾンプレート1枚の時と比較して約半分となる。ゾンプレートは光軸方向に16 mm 離してセットし、それぞれの1次光焦点の中間付近にピンホールを置いて他の次数の光をカットした。また、ゾンプレート手前に直径30 μmのセンターストップを置いて0次光がピンホールを通過しないようにした。

この光学系では、試料を何も入れなくても2つのゾンプレート焦点からのX線の干渉で同心円状の干渉パターンが観察できる (**Fig. 7**)。このパターンの中心は、2つのゾンプレートの中心を結ぶ線上にあるので、片方のゾンプレートを光軸に対して垂直に動かすと、パターンの中心が移動する。実験では、下流側ゾンプレートを光軸に対して9 μm 移動してその集光点を参照光源として用いた。試料は上流側ゾンプレートの集光点からの発散光で照明した。

この光学系も試料面上に参照光源を置いているためレンズレス・フーリエ変換ホログラフィーとなり、ホログラムをフーリエ変換することによって試料面での波面を再構成することができる。しかし、球面波で試料を照明しているため、再構成される波面も球面波となる。この様子を

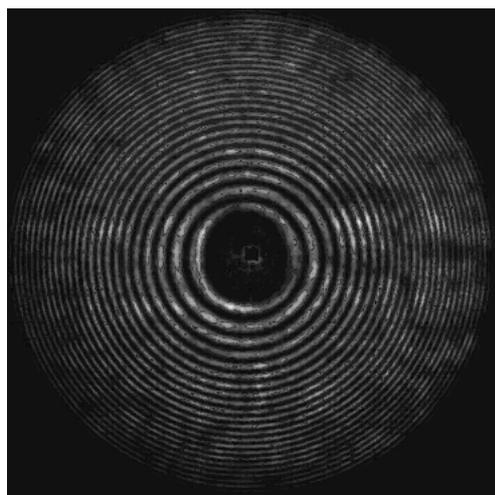


Figure 7. Interference pattern of a zone plate interferometer. Two zone plates were on the optical axis.

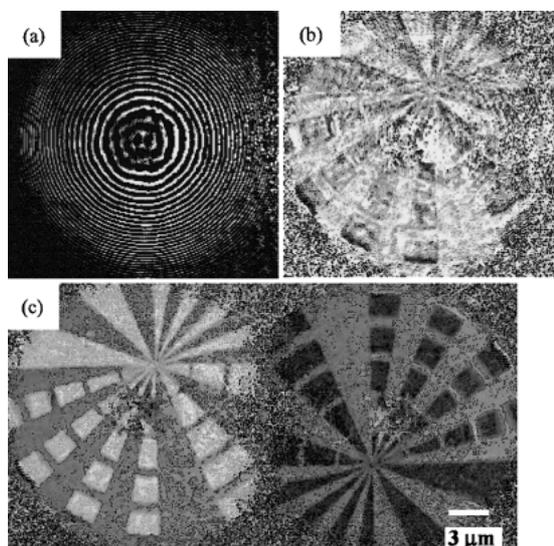


Figure 8. Reconstructed images of a tantalum spoke pattern. (a) Real part of the reconstructed image. (b) and (c) The intensity and the phase image of the reconstructed amplitude divided by the reconstructed one without a specimen. The conjugate image is also shown in (c).

Fig. 8(a)に示す。これは、厚さ0.5 μmのスプーク状タンタルパターンの再構成振幅の実部であり、球面波であるため同心円状パターンとなっている。再構成計算では、試料を入れないときのホログラム再構成像で割ることによって、この球面成分を除去した。**Fig. 8(b)**及び**(c)**にその強度及び位相分布を示す。強度分布では像が乱れてわかりにくい、位相像では半円状の0.2 μm幅のギャップまできれいに結像できている。

Fig. 9に厚さ0.5 μmのタンタルラインパターンの位相再構成像とそのプロファイルを示す。このパターンに対する10 keV X線の位相変化は0.094λと計算されるが、平均

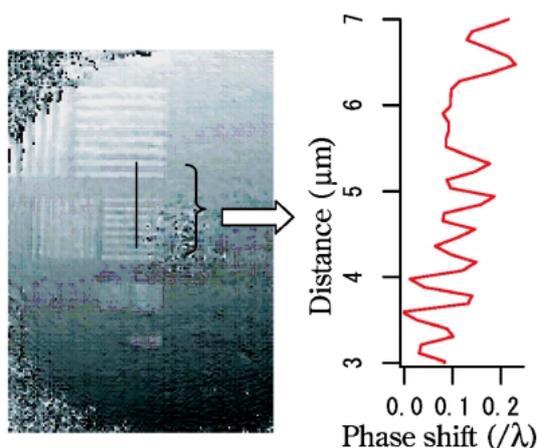


Figure 9. Reconstructed phase image of a tantalum test pattern and its phase profile.

値としてはほぼそれに近い位相変化の値が得られている。このように、この光学系では $0.2\ \mu\text{m}$ 程度の領域の位相変化を測定することが可能となっている。

5. 今後の展望

硬 X 線領域のゾーンプレートでは、十分な集光効率を得るために $1\ \mu\text{m}$ 程度の厚みが必要である。パターン幅に対する厚みの比、すなわちアスペクト比が大きいと、ゾーンプレートの製作が非常に困難となる。現在の技術では、アスペクト比10程度、すなわち $1\ \mu\text{m}$ の厚みに対しては最外輪帯幅 $0.1\ \mu\text{m}$ 程度のところに技術的な壁がある。逆に集光効率が悪くて良いのであればゾーンプレートを薄くすることができるため、軟 X 線で用いられているような高分解能なゾーンプレートを硬 X 線でも用いることができる。

レンズレス・フーリエ変換ホログラフィーにおいては、参照波の振幅は試料からの散乱 X 線と同程度の大きさを持っている場合に最も干渉縞のコントラストが高くなるため、必ずしも強い参照光源を必要としない。前記の実験においては、参照光源であるゾーンプレート集光点をピンホールの外側に置いても、内側にしたときと同様の再構成像を得ることができた。このときピンホールのエッジの透過率は $10\ \text{keV}$ X 線に対して 3.5% であった。

用いるゾーンプレートのタンタルパターンの厚さを $1\ \mu\text{m}$ から $0.2\ \mu\text{m}$ まで薄くすると、 $10\ \text{keV}$ X 線に対して集光効率の計算値は 11% から 0.6% に減少する。しかし、この減少する割合はさきほどのピンホールエッジの吸収によるものよりも小さい。したがって、このような薄いゾーンプレートでもホログラフィーの参照光源を作成する用途としては、硬 X 線領域で十分に使用可能であると考えられる。このゾーンプレートのアスペクト比を10とすると最外輪帯幅は $20\ \text{nm}$ となり、現在軟 X 線領域で使用されているゾーンプレートの最高分解能と等しくなる。このよう

なゾーンプレートを用いることで、硬 X 線レンズレス・フーリエ変換ホログラフィーの分解能は $30\ \text{nm}$ 程度まで向上することが期待できる。

なお、ここで紹介した実験で用いたゾーンプレートは NTT アドバンステクノロジー社で製作されたものである。ゾーンプレートを扱っている会社はあまり無いが、最近 Xradia という会社もゾーンプレートを取り扱うようになっている。現在最外輪帯幅 $50\ \text{nm}$ のゾーンプレートまで扱っている。

参照光源を用いるホログラフィーでは、その大きさが分解能を決める。従って、参照光源の作成にゾーンプレートなどの光学素子を用いると、それによって分解能が制限されてしまう。Fig. 2(c)のように平行照明による Gabor ホログラフィーでは光学素子を全く用いないので、それによって分解能が制限されることは無い。しかし、検出器として用いられる PMMA の分解能は電子ビームリソグラフィーで製作されるゾーンプレートの製作限界も決めているため、状況はそれほど変わらないように思える。このような制限のため、光学的 X 線ホログラフィーの分解能は結像素子を用いた X 線顕微鏡の中で得られている最高の分解能よりも常にわずかに低かった。

X 線ホログラフィーにおいて、参照光源は試料からの散乱 X 線の位相を決めるために必要である。これに対して、試料にコヒーレントな平行 X 線を入射して試料からの散乱 X 線の強度分布をオーバーサンプリングで記録し、反復法によってその位相を決定し像を再構成する方法が最近注目を集めている。Miao らはこの方法で、波長 $1.7\ \text{nm}$ の軟 X 線において直径 $100\ \text{nm}$ の金ドットパターンの試料を再構成することに初めて成功した²²⁾。最近では、SPring-8 BL29XU にて $6.2\ \text{keV}$ X 線を用いて Ni テストパターンを分解能 $8\ \text{nm}$ で結像することに成功している²³⁾。

微細な生物試料の構造を X 線で観察する場合には、放射線損傷が常に問題となる。試料を凍結して観察することによりこの問題はかなり緩和されるが、単分子観察までには対応できない。それに対して、フェムト秒の強力なパルス光源があれば試料が壊れる前にデータを取り終えることができるという考え方があり、コンピューターシミュレーションによりその可能性が示唆されている²⁴⁾。上記の方法は、光学素子による分解能の制限やその耐熱性に関する問題が無いためこの方法に適しており、そのため次世代 FEL 光源の目的の一つとなっている²⁵⁾。

このコヒーレント散乱を用いる方法は、試料の注目している場所からわずかに離れた場所に何か一つ微小で散乱強度の強い点があった場合には、4.1で示したレンズレス・フーリエ変換ホログラフィーと等しくなる。この場合は、その場所が参照光源と見なせるため、記録されたデータをフーリエ変換するだけで像の再構成が行える。一つの参照光源だけでは強度的に無理かもしれないが、それぞれの場所がはっきりと特定できれば多数の散乱体でも参照光源と

して用いることができる。X線レンズレス・フーリエ変換ホログラフィーにおいてこのような多数の参照光源を用いる方法は古くから提案されているが²⁶⁾、実験で成功した報告はまだ無い。

硬X線ホログラフィーの研究開発には、このように分解能の極限を目指す方向と、分解能数10 nm程度で数10 μm 程度の大きさの試料の屈折率分布を測定する方向の2つがあるように思える。どちらも現在急速に進歩しつつある。

謝辞

なお、ここで紹介したSPring-8におけるX線ホログラフィー実験は、横須賀泰輝(筑波大、現・防衛大)、大東琢治(筑波大)、高野秀和(SPring-8、現・日大)、竹内晃久(SPring-8)、鈴木芳生(SPring-8)の方々との共同研究による。それらはSPring-8課題番号2001B0274-NM-np, 2001B0275-NM-np, 2002A0577-NM-np, 2002B0513-NM-npのもとに行われた。また、その研究は平成12-14年度文部科学省科学研究費補助金基盤(B)(2)(課題番号:12450037)の援助を受けて行われた。

参考文献

- 1) 前回のX線顕微鏡国際会議のプロシーディングは、*J. Phys. IV France* 104 (2003).
- 2) 林 好一, 河合 潤, 早川慎二郎, 後藤俊治, 二瓶好正, 合志陽一: *放射光* 11, 361 (1998).
- 3) 林 好一: *放射光* 15, 267 (2002).
- 4) A. V. Baez: *J. Opt. Soc. Am.* 42, 756 (1952).
- 5) S. Aoki and S. Kikuta: *Jpn. J. Appl. Phys.* 13, 1385 (1974).
- 6) C. Jacobsen, M. Howells, J. Kirz and S. Rothman: *J. Opt. Soc. Am. A* 7, 1847 (1990).
- 7) S. Lindaas, M. Howells, C. Jacobsen and A. Kalinovsky: *J. Opt. Soc. Am.* 13, 1788 (1996).
- 8) G. Schneider: *Ultramicroscopy* 75, 85 (1998).
- 9) 計算には、<http://www-cxro.lbl.gov/opticalconstants/>の原子散乱因子リストを用いた。
- 10) M. Born and E. Wolf: *Principle of Optics* 6th ed., p. 511 (Pergamon Press, New York, 1980).
- 11) <http://www.spring8.or.jp/e/facility/bl/insertion/Perfos/BeamSize/Beamsizes.html>
- 12) N. Watanabe, K. Sakurai, A. Takeuchi and S. Aoki: *Appl. Opt.* 36, 7433 (1997).
- 13) N. Watanabe and S. Aoki: *J. Synchrotron Rad.* 5, 1088 (1998).
- 14) N. Watanabe, H. Yokosuka, T. Ohigashi, H. Takano, A. Takeuchi, Y. Suzuki and S. Aoki: *J. Phys. IV France* 104, 551 (2003).
- 15) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton: *Optik* 35, 237 (1972).
- 16) J. R. Fienup: *Appl. Opt.* 21, 2758 (1982).
- 17) G. Koren, F. Polack and D. Joyeux: *J. Opt. Soc. Am. A* 10, 423 (1993).
- 18) S. Aoki and S. Kikuta: *AIP Conf. Proc.* 147, 49 (1986).
- 19) I. McNulty, J. Kirz, C. Jacobsen, E. H. Anderson, M. Howells and D. P. Kern: *Science* 256, 1009 (1992).
- 20) W. Leitenberger and Snigirev: *J. Appl. Phys.* 90, 538 (2001).
- 21) N. Watanabe, H. Yokosuka, T. Ohigashi, H. Takano, A. Takeuchi, Y. Suzuki and S. Aoki: Submitted to AIP Conf. Proc. of SRI2003.
- 22) J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz and D. Sayre: *Nature* 400, 342 (1999).
- 23) J. Miao, T. Ishikawa, B. Johnson, E. H. Anderson, B. Lai and K. O. Hodgson: *Phys. Rev. Lett.* 89, 088303 (2002).
- 24) R. Neutze, R. Wouts, D. Spoel, E. Weckert and J. Hajdu: *Nature* 406, 752 (2000).
- 25) 北村英男, 新竹 積, 石川哲也: *放射光* 16, 65 (2003).
- 26) 青木貞雄: *光学* 3, 235 (1974).



渡辺紀生

筑波大学物理工学系

E-mail: watanabe@bk.tsukuba.ac.jp

専門分野: X線顕微鏡

略歴:

- 1991年3月 名古屋大学大学院理学研究科修士
- 1992年4月 筑波大学物理工学系 助手
- 1994年3月 博士(理学)(名古屋大学)
- 1999年4月 筑波大学物理工学系 講師



青木貞雄

筑波大学物理工学系

E-mail: aoki@bk.tsukuba.ac.jp

専門分野: X線結像光学

略歴:

- 1974年3月 東京大学大学院理学系研究科相関理化学専攻修士 理学博士
- 1974年4月 東京工業大学精密工学研究所 助手
- 1976年4月 東京教育大学光学研究所 助手
- 1978年4月 筑波大学物理工学系 講師
- 1983年2月 筑波大学物理工学系 助教授
- 1994年4月 筑波大学物理工学系 教授