

硬 X 線顕微干涉計の構築と顕微位相トモグラフィへの応用

小山貴久	兵庫県立大学大学院物質理学研究科	〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-2-1
辻 卓也	兵庫県立大学大学院物質理学研究科	〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-2-1
吉田圭佑	兵庫県立大学大学院物質理学研究科	〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-2-1
高野秀和	兵庫県立大学大学院物質理学研究科	〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-2-1
籠島 靖	兵庫県立大学大学院物質理学研究科	〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-2-1

要 旨 2種類のゾーンプレート (ZP) を用いた硬 X 線顕微干涉計の光学系を考案し, SPring-8 の兵庫県 ID ビームライン (BL24XU) に構築した。一方の ZP は試料を拡大結像するための対物レンズ, 他方は環状型の ZP を新しく設計し, 参照波形成用 ZP として用いた。得られた干涉図形は, 縞間隔と縞方向を自由に变化させることができ, 視野全体が均一な強度分布を示すフリンジレス (fringeless) な干涉図形とすることも可能である。X 線エネルギー 8 keV において粒径 7 μm のポリスチレン微粒子を鮮明に観察することができ, 位相シフトの検出感度は $\lambda/40$ であった。テストチャートを観察し, 50 nm の Line & Space まで解像できることが確認できた。さらに, 硬 X 線顕微干涉計を顕微位相トモグラフィに応用し, 微細試料の高感度・高分解能三次元観察を行った。

1. はじめに

近年の半導体産業の基盤技術である超精密・超微細加工技術の進歩により, ゾーンプレート (ZP) に代表される高精度の X 線レンズの製作が可能となり, また SPring-8 に代表される第三世代放射光施設の登場により高輝度な X 線源が利用可能となったため, 硬 X 線顕微鏡の開発研究が急速に進んでいる。現在, X 線光学素子を拡大レンズに用いた結像型硬 X 線顕微鏡では 50 nm 以下の空間分解能が得られるようになってきている。X 線顕微鏡は空間分解能の点では電子顕微鏡には及ばないが, 大気中での観察が可能, 深い焦点深度 (数十 μm ~ 数百 μm) を持つなどの点で試料環境の自由度が高く, また, 試料製作が容易, 非破壊内部構造観察が可能といった特徴もある。

通常の結像型硬 X 線顕微鏡では, 物質による X 線の吸収量の違いによって画像のコントラストを得ている (吸収コントラスト)。したがって, X 線をほとんど吸収しないような軽元素で構成される生体軟部組織や有機材料の観察, または, 金属であっても顕微鏡で扱うような微小な試料の観察の場合, 十分な画像のコントラストが得られないという問題がある。一方, X 線が物質を通過する際, 吸収を受けるとともに X 線の位相がシフトし, X 線をほとんど吸収しないような物質であっても十分な位相シフトを起こすことが分かっている¹⁾。これは, 試料の X 線に対する複素屈折率を $n = 1 - \delta + i\beta$ と表すと, 硬 X 線領域では

比較的軽い元素において位相変化の大きさを表す δ は吸収量の大きさを表す β よりも 2 桁から 3 桁ほど大きいことから推測できる。位相シフトを捉えて画像のコントラストとする方法は位相イメージングと呼ばれており²⁾, さらに位相シフトを計測できるよう光学系の高度化を行えば, X 線 CT (Computed Tomography) の技術を組み合わせ, 三次元イメージングへと発展 (位相トモグラフィ) できる。結像系の焦点深度内では, X 線の吸収が試料の吸収係数分布の投影であるのと同じように, X 線の位相シフトが試料の屈折率分布の投影となっているからである。

結像型硬 X 線顕微鏡の位相イメージングを用いた手法としては, Zernike の位相差顕微鏡³⁻⁵⁾ や微分干涉顕微鏡⁶⁾ がある。これらの手法では高い画像のコントラストは得られるものの, 画像のコントラストと位相シフトとの関係は簡単な関数で表すことができないため, 定量的な位相計測は困難である。他の顕微鏡的な位相イメージングの手法には, X 線ホログラフィー^{7,8)}, X 線回折顕微鏡^{9,10)}, 走査型 X 線顕微鏡¹¹⁻¹⁴⁾ などがあり, 高空間分解能かつ定量的な位相情報が得られている。X 線ホログラフィーは, 軟 X 線領域では微小なピンホールを参照光源に用いたフーリエ変換ホログラフィーが行われているが, 透過力が高い硬 X 線領域では透過光や散乱光を抑えることが難しく S/N の高いホログラムはこれまでに得られていない。ZP により微小光源を形成し, これを参照光源に用いたものもあるが, ZP による零次光が重なる低周波数領域が測定できな

いため情報の欠落が生じるという問題がある。X線回折顕微鏡は、X線領域において優れた空間分解能を有しているが、回折強度から反復の位相回復法による試料像再生を行わなくてはならず、直接試料の像を得ることはできない。走査型X線顕微鏡は、試料を1点1点走査させる必要があるので三次元イメージングを考えた場合、膨大な時間がかかるという問題がある。

我々は、顕微鏡の結像面に参照波を重ねた新奇な光学系（顕微干涉計）を考案し、SPring-8の兵庫県IDビームライン（BL24XU）¹⁵⁾に構築した。結像面に参照波を重ねることで、フーリエ変換などの処理を行う必要がなく、二次元像を比較的短時間で得ることができ三次元イメージングへと発展させやすいという特徴がある。本稿では参照波の重ね合わせの方法を説明し、構築した光学系と得られた結果を紹介する。

2. 硬X線顕微干涉計

2.1 2枚のZPによる干涉

結像型のX線顕微鏡はZPなどの結像素子を用いて試料の拡大像（物体波）を画像検出器上に結像する。画像検出器は強度のみしか検出できないため、像のコントラストは試料による吸収量の違い、すなわち波の振幅の変化によって形成される。この結像面に何らかの方法で参照波を重ね合わせることができれば、試料による波の振幅変化とともに波の位相変化も干涉図形という形で同時に記録することができる。AttwoodらはZPと同一平面上に一次元の回折格子を配置し参照波を重ね合わせる光学系を提案した¹⁶⁾。しかしながら、一次元の回折格子を参照波形成素子として用いた場合には球面波と平面波の干涉となってしまう、ZPによる拡大率を大きくした際に、像面において干涉領域が狭くなってしまい、物体波と参照波の振幅が著しく異なってしまふなどの欠点がある。我々は始めに同一基板上に2枚のZPを形成したツインZPを用いることで参照波と物体波を重ね合わせる光学系を考案した。参照波を形成するZPを通常のZPの一部分のみを使用するという工夫で球面波同士の干涉となり、物体波と参照波の振幅が一致し、Youngの干涉計のような等間隔の干涉縞を生じる干涉領域が得られた^{17,18)}。この後、ZPベースの異なる光学系を用いた干涉計が続いて発表された^{19,20)}。

ツインZPを用いた顕微干涉計では、干涉縞の縞間隔が狭くなってしまふという欠点があった。これの改良型として、直径、焦点距離の異なる2枚のZPを焦点位置が重なるように配置することで結像面に参照波を重ね合わせる方法を考案した²¹⁾。ZPは円形の透過型回折格子なので、実像である+1次光の他に回折を起こさずにそのまま直進する0次光や、-1次の焦点から発散する-1次光、他の高次光が同時に発生する。単に2枚のZPを並べただけでは、これらの回折光が複雑に重なり合ってしまう干涉図形

から試料の構造を読み取ることは困難となる。実際にWilheinらによって試みられたが²²⁾、複雑な干涉図形となってしまっている。そこで我々は、試料の拡大像（物体波）を形成するZPの直径の分だけゾーンパターンを形成しない環状ZPを考案・作製し、参照波を形成するZPとして用いることで、2枚のZPの+1次光のみを重ね合わせることを可能とし、不要なフリンジの出ない干涉領域を得た。得られた干涉領域は、縞間隔と縞方向を自由に变化させることができ、視野全体が均一な強度分布を示すフリンジレスな干涉図形とすることも可能である。次節から、この環状ZPを用いた顕微干涉計の光学系を説明し、得られた結果を示す。

2.2 光学系

本研究で構築した環状ZPを用いた顕微干涉計の光学系をFig. 1に示す。実験はSPring-8の兵庫県IDビームライン（BL24XU）で行った。アンジュレータ光からシリコン二結晶分光器を用いて8 keVに単色化し、実験ハッチC1に導く。直径、焦点距離の異なる2種類のZPを焦点位置が点Fに重なるように配置する。参照波用のZPとして、Fig. 2に示すような、中心部分を対物ZP（Objective ZP: OZP）の直径分だけゾーンパターンを形成しない環状ZP（Annular ZP: AZP）を作製した。OZPとAZPのパラ

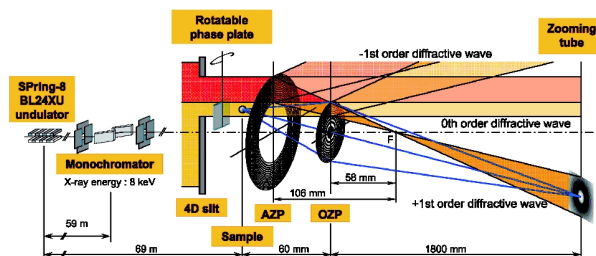


Fig. 1 Experimental setup of the hard X-ray nano-interferometer constructed at Hyogo-ID (BL24XU) of SPring-8. The photon energy used was 8 keV. A 125- μm -thick polyimide film was used as the rotatable phase plate and arranged in the path of object waves.

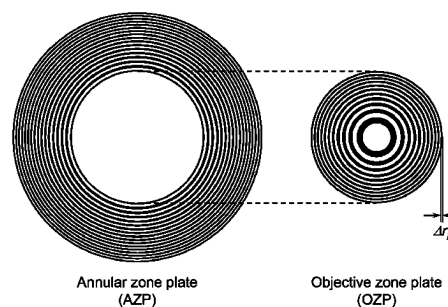


Fig. 2 Schematic diagrams of the AZP and OZP. These are made of tantalum and fabricated by NTT Advanced Technology Corporation. The AZP has no zone in the inner region up to the same size of the outer diameter of the OZP.

Table 1 Parameters of AZP and OZP

	AZP	OZP
Outer diameter	330 μm	180 μm
Outermost zone width (Δr_N)	50 nm	50 nm
Focal length @8 keV	106.4 mm	58.1 mm
Tantalum thickness	0.51 μm	0.8 μm
Ideal diffractive efficiency @8 keV	6.26%	13.6%

メータを **Table 1** に示す。ZP の材質はタンタルで NTT-AT 社に製作を依頼した²³⁾。ZP は Si フレームに支えられた SiN メンブレン上に電子ビームリソグラフィ法で作製されている。これらとスリットを組み合わせることによって、それぞれの ZP の +1 次回折光のみを干渉させることができる。干渉領域を最大とするためには、2 枚の ZP の開口数を一致させればよい。開口数は最外輪帯幅 Δr_N で決まり、ともに $\Delta r_N = 50 \text{ nm}$ に設定した。顕微鏡の空間分解能 Res. も開口数、すなわち最外輪帯幅で決まり $\text{Res.} = 1.22 \Delta r_N$ で与えられるので、約 60 nm の空間分解能が期待できる。ZP の回折効率はその材質の厚さで決まる。そこで、干渉縞の可視度が最大となるように、すなわち、点 F から広がる 2 つの球面波の検出器上での振幅が等しくなるようにそれぞれの ZP のタンタルの厚さを最適化した。

顕微干渉計は空間的、時間的に離れた 2 光束の干渉であるので干渉条件を見積もっておく必要がある。本光学系による最大の空間的な光路差は幾何学的に求められ、鉛直方向に 75 μm (D_V)、水平方向に 12.5 μm (D_H) である。SPring-8 の標準的なアンジュレータ放射光の空間的コヒーレンスは鉛直方向では数百 μm (S_V)、水平方向では 10 μm 程度 (S_H) であるので、本光学系においては鉛直方向では完全にコヒーレント ($S_V > D_V$)、水平方向では同程度 ($S_H \sim D_H$) であり、干渉計測を行うために十分な可視度の干渉縞が期待できる。また、光学系による最大の時間的な光路差も幾何学的に求められ、50 nm 程度である。Si 二結晶分光器のエネルギー分解能から時間的コヒーレンスは 0.5 μm 程度であるので、時間的コヒーレンスの条件は満たされている。この干渉計は 2 つの二次点光源による球面波の干渉であり、2 種類の ZP を焦点位置が点 F に重なるように配置しているため形成される干渉図形をフリッジレスにすることができる。**Fig. 3** に得られた干渉図形を示す。二つの球面波の焦点が完全に一致していれば、検出器上の強度分布は均一となり (**Fig. 3(a), (n)**)、一方 AZP を光軸に対して垂直な平面内で微動させて焦点位置をわずかにずらせば、縞間隔と縞方向を自由に定めることができる (**Fig. 3(b)~(m)**)。OZP によって試料が検出器上に拡大結像され、AZP に入射した X 線は参照波となって検出器上で重なり合い干渉領域が形成される。試料を通った X 線は、試料の形状・密度に応じて位相が変化し、

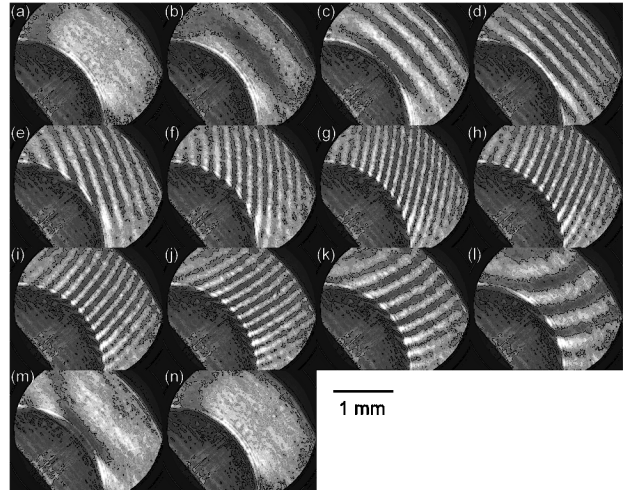


Fig. 3 Interference patterns formed by the nano-interferometer. The fringe period and fringe direction can be varied by slightly aligning the AZP perpendicularly to the optical axis. A fringeless pattern can be obtained when their focal positions are identical.

それに伴い干渉図形も変化する。この変化量を調べることで試料の定量的な位相計測が可能となる。物体波の光路、すなわち OZP に入射する光の光路に位相板を配置して縞走査法²⁴⁾を行えるようにした。位相板を回転ステージに取り付け、回転させることによって実効的な厚さを変化させ、参照波と物体波の相対位相を制御した。また、位相板のエッジからの散乱やフレネル縞の影響を低減させるため、露光中に位相板を上下に 1 μm の範囲でランダムに変位させた。干渉縞の位相をシフトさせた複数の干渉像から再構成を行い、位相シフト像を得た。光学系の倍率は 30 倍とし、干渉像の観察には、画像検出器として浜松ホトニクス社製のズーミング管²⁵⁾を用いた。ズーミング管に入射した X 線は CsI 光電面において光電子に変換される。光電子は電磁レンズにより MCP (Micro Channel Plate: 電子増倍管) 上に拡大結像され増倍される。さらに蛍光体スクリーンで可視光に変換され、CCD カメラで読み出す。拡大用電磁レンズを使用することにより、最大 230 倍まで画像拡大することができ、光電面上での空間分解能は 0.6 μm 程度であり、実際に MTF を測定し確かめている。

顕微干渉計は 2 枚の ZP により形成された 2 つの点光源からの球面波の干渉である。よって、2 つの点光源の相対位置、すなわち 2 枚の ZP 相対位置に高い安定性が要求される。要求される位置精度は点光源のサイズ、すなわち ZP の最外輪帯幅 (50 nm) 程度である。この相対位置の安定性を実現するために、一体型ホルダーを作製し、この両端に 2 枚の ZP を取り付けた。位置調整は、このホルダーをスイベルステージ 2 軸によって支え傾けることで、鉛直、水平の両方向を調整できるようにした。また、空気の対流による干渉縞の変動を防ぐために、装置全体を

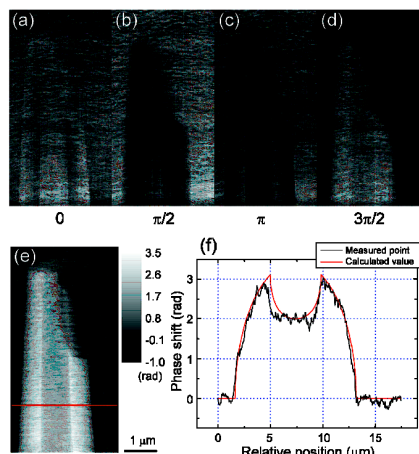


Fig. 4 X-ray micrographs of the tip of the glass capillary: (a)–(d) Interference patterns with $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ phase shift of object waves, respectively. (e) Phase shift image by using 4-step fringe scan. (f) Line profile of Fig. 4(e). The measured line well agreed with the calculated line.

ビニルシートで覆った。

2.3 位相計測

試料に外径約 $12 \mu\text{m}$ 、内径約 $5 \mu\text{m}$ のガラスキャピラリーの先端部を用いた結果を **Fig. 4** に示す。**Fig. 4(a)–(d)** は位相板を回転させ物体波の位相を $\pi/2$ ずつ変化させた4枚の干渉像である。画像検出器の倍率は50倍、露光時間は干渉像1枚あたり40秒である。**Fig. 4(e)** は4枚の干渉像から計算した位相分布像である。ここで、バックグラウンドの位相分布像は計算途中で差し引いてある。グレースケールバーは位相シフト量を表している。**Fig. 4(f)** は**Fig. 4(e)** に示したラインのプロファイルである。この場所は外径 $11.5 \mu\text{m}$ 、内径 $4.8 \mu\text{m}$ である。ガラスの組成を SiO_2 とし、密度を 2.23 g/cm^3 としたときの 8 keV における屈折率の1からのずれ量 δ は 7.31×10^{-6} であるので、これらをもとに計算した理論曲線とプロファイルを比較した。その結果、理論曲線とよく一致していることが確認でき、定量的な位相計測が可能であることが確認できた。

2.4 位相物体の観察

位相物体の観察として粒径 $7 \mu\text{m}$ のポリスチレン微粒子を観察した。ポリスチレンの密度は 1.1 g/cm^3 であり、 8 keV における屈折率の1からのずれ量 δ は 3.85×10^{-6} である。**Fig. 5** に観察結果を示す。**(a)–(d)** は干渉像、**(e)** は位相シフト像、**(f)** は吸収像である。画像検出器の倍率は30倍、露光時間は干渉像1枚あたり40秒である。透過率が99.7%であるので吸収像では観察することはできない。一方、位相シフト像では4つの微粒子を鮮明に観察できている。このことから位相コントラストは吸収コントラストに比べて遥かに高感度であることが確認できた。また、**Fig. 5(e)** でバックグラウンド領域の位相シフトの標準偏差は

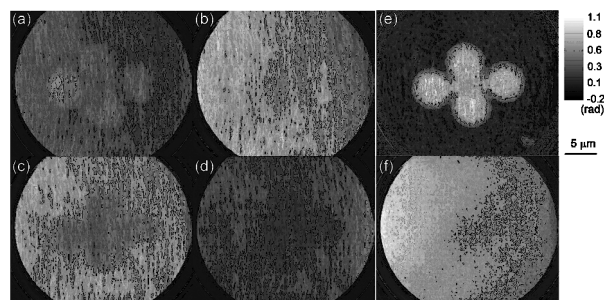


Fig. 5 X-ray micrographs of polystyrene micro-particles: (a)–(d) Interference patterns with $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ phase shift of object waves, respectively. (e) Phase shift image by using 4-step fringe scan. The sample was clearly observed. (f) Absorption contrast image. The sample was hardly observed.

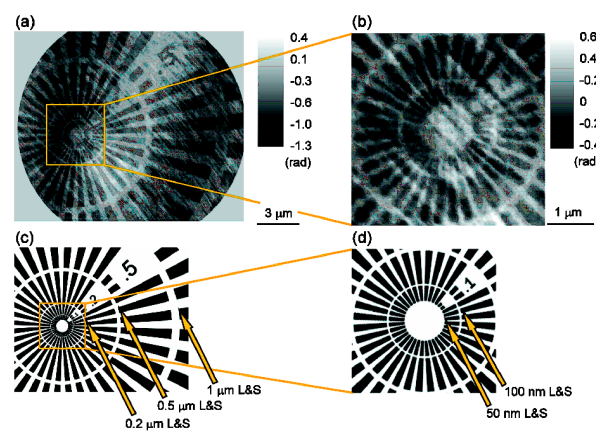


Fig. 6 X-ray micrographs of Siemens star pattern. (a) Phase shift image by using 4-step fringe scan. (b) Enlarged view of center of the pattern. The 50 nm line & space were resolved. (c), (d) Design of the Siemens star pattern.

$\sigma = 0.049 \text{ rad}$ であり、位相検出感度を $\text{MDL} = 2\pi\lambda / (3\sigma)$ で定義すれば $\lambda/40$ となり高い検出感度を実現することができた。

2.5 空間分解能評価

テストチャートとして、NTT-AT 社製の Siemens star pattern を用いた。材質は Ta で厚さは 200 nm である。 8 keV における Ta の δ は 4.03×10^{-5} 、 β は 3.30×10^{-6} であるので、位相シフト量は 0.33 rad 、透過率は95%である。**Fig. 6** に観察結果を示す。**(a)**、**(b)** は位相シフト像で画像検出器の倍率は50倍、露光時間は干渉像1枚あたり4分、4ステップの縞走査から得られた。**(c)**、**(d)** は Siemens star pattern の模式図である。この結果より、 50 nm の Line & Space まで解像できていることがわかった。

3. 三次元観察：Phase tomography への応用

X線の位相シフトは試料の屈折率分布の投影となるので、複数の投影方向から位相シフト像を取得することで試

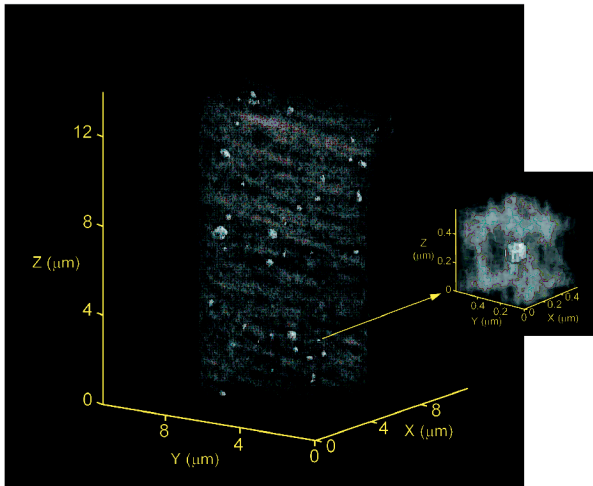


Fig. 7 Phase tomography of a polymer microfiber with the addition of titania nano-particles. In order to make the inner structure visible, polymer component was made translucent by rendering software. The distribution of titania nano-particles was observed clearly.

料の三次元像を再構成することができ、位相トモグラフィが実行できる。ここで、CT再構成のアルゴリズムは入力データが違うのみであって、従来の吸収コントラストCTのアルゴリズムと同じものが使用できる。

3.1 機能性繊維の観察

ポリエステル繊維の中に酸化チタン微粒子を添加することによって繊維の機能性を高めたものがある。微粒子の粒径分布や単位体積あたりの粒子数を制御することにより、繊維の光沢を自由に变化させたり、紫外線吸収効果を持たせたりすることができる。Fig. 7に顕微位相CTの結果を示す。1.8°毎に180°回転させ、それぞれの回転角で4ステップの縞走査を行い、100投影の位相シフト像を取得した。また、10投影ごとに試料を視野から外し、 I_0 の位相シフト像を測定した。画像検出器の倍率は30倍、露光時間は干渉像1枚あたり40秒である。Fig. 7は三次元レンダリング表示させたものである。微粒子の分布がわかるようにポリエステル成分は半透明に表示させてある。微粒子の形状、空間分布がよくわかる。さらに、Fig. 7の右側に微粒子一つの拡大像を示した。粒径約200 nmの微粒子が捉えられていることがわかる。

3.2 珪藻土の観察

珪藻土は、水中を浮遊する植物プランクトンの珪藻が遺骸となって積もったもので、珪酸質の骨格の構造が μm からnmオーダーであることから顕微鏡の標準試料として広く用いられている。珪藻土から珪藻一つを取り出して、細く伸ばしたガラスキャピラリーの先端に付着させた。1°毎に180°回転させ、それぞれの回転角で4ステップの縞走査を行い、180投影の位相シフト像を取得した。また、10

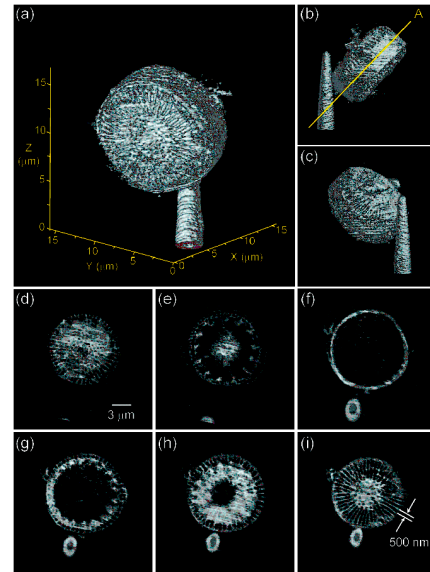


Fig. 8 Phase tomography of a diatom. (a)–(c) Three-dimensional rendering image. (d)–(i) Tomographic slices parallel to the line A in Fig. 8(b).

投影ごとに試料を視野から外し、 I_0 の位相シフト像を測定した。画像検出器の倍率は30倍、露光時間は干渉像1枚あたり25秒である。Fig. 8(a)～(c)は三次元レンダリング像である。Fig. 8(d)～(i)はFig. 8(b)のラインAにおける断面に平行な幾つかの断面である。全体は太鼓状で中身は空洞であり、表面の骨格は中心付近において斑点状の骨格、その周りに放射状の骨格が伸びていることが明瞭に観察できる。

4. まとめ

SPring-8の高輝度アンジュレータ放射光を用いて硬X線顕微干渉計を世界に先駆けて構築した。環状ZPを考案・作製し、これを参照波形成用ZPとして用いることにより、干渉縞の間隔や方向が自由に制御でき、視野全体の強度分布が均一となるフリンジレスな干渉図形までも形成することができた。縞走査法を適用し、試料によるX線の位相変化を定量的に計測することができた。位相検出感度は $\lambda/40$ であり、高い位相検出能力を有していることがわかった。位相物体を観察し、吸収コントラストよりもはるかに高感度であることが確認できた。テストチャートを観察し、50 nmのLine & Spaceまで解像できることが確認できた。機能性ポリマー繊維や珪藻土の三次元観察に応用し、本顕微干渉計が弱吸収試料のナノメートルスケールの非破壊三次元内部構造観察に有効であることを実証した。

謝辞

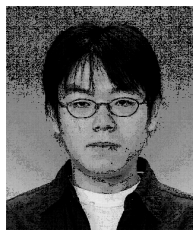
本研究はSPring-8課題番号C06A24XU-3203のもとに行われた。また、SPring-8で実験を行うにあたり、ひよ

うご科学技術協会の皆様には大変お世話になり、ここで改めて感謝したい。

参考文献

- 1) A. Momose and J. Fukuda: *Med. Phys.* **22**, 375 (1995).
- 2) A. Momose: *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 6355 (2005).
- 3) Y. Kagoshima, T. Ibuki, Y. Yokoyama, Y. Tsusaka, J. Matsui, K. Takai and M. Aino: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, L1190 (2001).
- 4) H. Yokosuka, N. Watanabe, T. Ohigashi, S. Aoki and M. Ando: *J. Phys. IV France* **104**, 591 (2003).
- 5) U. Neuhausler, G. Schneider, W. Ludwig and D. Hambach: *J. Phys. IV France* **104**, 567 (2003).
- 6) T. Wilhein, B. Kaulich, E. D. Fabrizio, F. Romanato, S. Cabrini and J. Susini: *Appl. Phys. Lett.* **78**, 2082 (2001).
- 7) 渡辺紀生, 青木貞雄: *放射光* **16**, 1 (2003).
- 8) S. Eisebitt, J. Lüning, W. F. Schlotter, M. Lörger, O. Hellwig, W. Eberhardt and J. Stöhr: *Nature* **432**, 885 (2004).
- 9) J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz and D. Sayre: *Nature* **400**, 342 (1999).
- 10) 西野吉則, 石川哲也: *放射光* **19**, 3 (2006).
- 11) H. N. Chapman, C. Jacobsen and S. Williams: *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 1332 (1995).
- 12) M. Feser, T. Beetz, C. Jacobsen, J. Kirz, S. Wirick, A. Stein and T. Schäfer: *Proc. SPIE* **4506**, 146 (2001).
- 13) H. Takano, K. Uesugi, A. Takeuchi, K. Takai and Y. Suzuki: *J. Phys. IV France* **104**, 41 (2003).
- 14) Y. Kagoshima, K. Shimose, T. Koyama, I. Wada, A. Saikubo, K. Hayashi, Y. Tsusaka and J. Matsui: *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L1449 (2004).
- 15) Y. Tsusaka, K. Yokoyama, S. Takeda, K. Takai, Y. Kagoshima and J. Matsui: *Nucl. Instrum. & Methods A* **467-468**, 670 (2001).
- 16) D. Attwood, K. Halbach and K-J. Kim: *Science* **228**, 1265 (1985).
- 17) T. Koyama, Y. Kagoshima, I. Wada, A. Saikubo, K. Shimose, K. Hayashi, Y. Tsusaka and J. Matsui: *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L421 (2004).
- 18) T. Koyama, H. Takano, Y. Tsusaka and Y. Kagoshima: *Spectrochimica Acta B* **62**, 603 (2007).
- 19) Y. Suzuki and A. Takeuchi: *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 093702 (2005).
- 20) N. Watanabe, M. Hoshino, M. Sato, Y. Takeda, T. Namiki, S. Aoki, A. Takeuchi and Y. Suzuki: *Proc. 8th Int. Conf. X-Ray Microscopy (IPAP, Tokyo, 2006) IPAP Conf. Series 7*, p. 372.
- 21) T. Koyama, T. Tsuji, K. Yoshida, H. Takano, Y. Tsusaka and Y. Kagoshima: *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, L1159 (2006).
- 22) T. Wilhein, B. Kaulich and J. Susini: *Opt. Commun.* **193**, 19 (2001).
- 23) A. Ozawa, T. Tamamura, T. Ishii, H. Yoshihara and Y. Kagoshima: *Microelectron. Eng.* **35**, 525 (1997).
- 24) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: *Appl. Opt.* **13**, 2693 (1974).
- 25) K. Kinoshita, T. Matsumura, Y. Inagaki, N. Hirai, M. Sugiyama, H. Kihara, N. Watanabe and Y. Shimanuki: *Proc. SPIE* **1741**, 287 (1992).

● 著者紹介 ●

**小山貴久**

兵庫県立大学大学院物質理学研究科特任助教

E-mail: koyama@sci.u-hyogo.ac.jp

専門：X 線光学

【略歴】

2007年3月兵庫県立大学大学院物質理学研究科物質科学専攻博士後期課程修了。博士（理学）。同年4月より現職。X 線光学，特に X 線顕微鏡の開発研究に従事。

**高野秀和**

兵庫県立大学大学院物質理学研究科助教

E-mail: htakano@sci.u-hyogo.ac.jp

専門：X 線光学

【略歴】

2000年3月筑波大学大学院工学研究科物理工学専攻修了。博士（工学）。2000年4月財高輝度光科学研究センター協力研究員。2003年4月日本大学文理学部物理学科助手。2004年10月より現職。

**辻 卓也**

兵庫県立大学大学院物質理学研究科博士後期課程在学中

E-mail: rk07m003@stkt.u-hyogo.ac.jp

専門：X 線光学

【略歴】

2007年3月兵庫県立大学大学院物質理学研究科物質科学専攻博士前期課程修了。同博士後期課程在学中。現在，硬 X 線領域における Young 干涉計の開発および空間コヒーレンス評価の研究に従事。

**籠島 靖**

兵庫県立大学大学院物質理学研究科教授

E-mail: kagosima@sci.u-hyogo.ac.jp

専門：X 線光学

【略歴】

1990年3月筑波大学大学院工学研究科物理工学専攻修了。工学博士。同年4月高エネルギー物理学研究所放射光実験施設助手，1996年10月姫路工業大学理学部助教授，2004年4月より現職。X 線光学，特に X 線顕微鏡の開発研究に従事。

**吉田圭佑**

兵庫県立大学大学院物質理学研究科博士前期課程在学中

E-mail: ri06g034@stkt.u-hyogo.ac.jp

専門：X 線光学

【略歴】

兵庫県立大学大学院物質理学研究科物質科学専攻博士前期課程在学中。現在，X 線高速カメラの開発及びイメージングへの応用研究に従事。

Hard X-ray nano-interferometer and its application to high-spatial-resolution phase tomography

Takahisa KOYAMA Graduate School of Material Science, University of Hyogo, 3-2-1 Kouto, Kamigori, Ako, Hyogo 678-1297, Japan
Takuya TSUJI Graduate School of Material Science, University of Hyogo, 3-2-1 Kouto, Kamigori, Ako, Hyogo 678-1297, Japan
Keisuke YOSHIDA Graduate School of Material Science, University of Hyogo, 3-2-1 Kouto, Kamigori, Ako, Hyogo 678-1297, Japan
Hidekazu TAKANO Graduate School of Material Science, University of Hyogo, 3-2-1 Kouto, Kamigori, Ako, Hyogo 678-1297, Japan
Yasushi KAGOSHIMA Graduate School of Material Science, University of Hyogo, 3-2-1 Kouto, Kamigori, Ako, Hyogo 678-1297, Japan

Abstract A hard X-ray nano-interferometer using two types of zone plate has been developed. One is an ordinary zone plate for a microscope objective, and the other is a newly designed zone plate called "annular zone plate" for configuring reference waves. We have succeeded in producing interference fringes with the variable periods up to fringeless pattern. The phase-shift distribution of polystyrene micro-particles could be imaged clearly with the phase sensitivity of $\lambda/40$ at the photon energy of 8 keV. As a result of observing the test-chart, 50 nm line & space pattern was resolved. Furthermore, this interferometer was applied to phase tomography for high-spatial-resolution three-dimensional observation. As the practical applications, some results are presented.
