



硬 X 線集光ビームを用いた高分解能回折顕微法の開発とその将来展望

高橋幸生 大阪大学大学院工学研究科 附属フロンティア研究センター
〒565-0841 大阪府吹田市山田丘 2-1

要旨 X線回折顕微法はコヒーレント X線散乱と位相回復計算を組み合わせたレンズレス X線顕微法であり、電子顕微鏡では観察が困難な厚い試料の電子密度分布を高空間分解能で観察できるという特長を持つ。本研究では、高精度全反射ミラーによって形成される高密度硬 X線集光ビームを駆使した高分解能回折顕微法を開発し、銀ナノキューブ粒子を使ったデモンストレーション実験において世界最高分解能 3 nm を達成した。次世代光源 X線自由電子レーザーを光源として用いることで究極的な X線回折顕微法が実現すると期待される。

1. はじめに

X線顕微鏡は X線の高い透過性と短波長性を活かし、厚い試料の内部構造を非破壊で観察できる方法として広く用いられている。特に、近年の放射光科学において、その技術的な進展は目覚ましい。一方、原子分解能を達成している電子顕微鏡と比べると X線顕微鏡は空間分解能の面で大きな遅れをとってきた。これは、X線が電子線と比べてその進行方向を変えることが困難、すなわち、優れたレンズを作製することが困難であることに起因する。この問題を回避して、原理的に X線波長程度の分解能を達成可能なのが、本稿で述べる X線回折顕微法である。

X線回折顕微法は、レンズの代わりにコヒーレント X線散乱と位相回復計算を用いる。X線回折顕微法の原理については、西野、石川の詳細な解説記事¹⁾があるのでそちらを参照して頂きたい。X線回折顕微法の歴史は比較的浅く、1999年の Miao らの報告²⁾が契機となって、世界中の放射光施設で実験が行われるようになり、これまで多くの報告がなされてきた。筆者は2006年頃から西野らと共同で SPring-8 において X線回折顕微法の研究を開始し、位相回復アルゴリズム³⁾、装置開発、材料科学⁴⁾、生物学応用⁵⁾と幅広く研究を展開してきた。

本稿では、特に最近行ってきた全反射ミラーにより形成される硬 X線集光ビームを利用した高分解能回折顕微法の開発について紹介し、次世代光源への展開を含めた将来展望について最後に述べる。

2. X線回折顕微法の高空間分解能化

試料に照射される X線を単色平面波とし、試料が微小で 1 回散乱近似が適用でき、試料による X線吸収が無視

できるとする。このとき、十分遠方で観測される散乱強度は逆空間をエバルト球で横切った断面での構造因子の二乗に比例する。X線回折顕微法で高分解能を達成するには、X線波長： λ と観測散乱強度の最大散乱角： θ_{\max} で表される $\lambda / \{2 \sin(2\theta_{\max})\}$ が小さいことに加えて、位相回復計算の一意性の高いことが要求される。すなわち、実験的には高い S/N 比で高 q 回折強度データを測定することが必要である。しかしながら、Porod 則で知られるように、小角散乱強度は q のべき乗に比例して減衰するため、高分解能を達成するためには、高フラックス密度のコヒーレント X線が必要となる。これまで我々の行ってきた SPring-8 の BL29XUL での実験では、ピンホールスリットを通過した X線を使用してきたが、フラックス密度は十分とは言えない。例えば、5 keV の単色 X線を使ってマイクロメートルサイズの金属微粒子を測定する場合、20–30 nm の空間分解能を得るのに、1 時間程度の X線照射が必要であった。

3. X線集光ビームを用いた回折顕微法

既存の放射光源を使って、高フラックス密度の X線を得る唯一の方法が X線を集光することである。放射光用の代表的な集光光学素子として、全反射集光ミラー、屈折レンズ、フレネルゾーンプレートなどが知られ、これらを利用した回折顕微法はすでに多数報告されている。Robinson らは、全反射ミラーで集光した X線を用いることで、金属ナノ結晶からのコヒーレントブラッグ回折パターンのコントラストが向上することを報告した⁶⁾。Schroer らは、屈折レンズで集光した X線を、金ナノ粒子に照射し、その前方散乱強度を測定し、5 nm 分解能で試料像を再生した⁷⁾。これらの実験では、孤立試料を集光点に設置

し、試料への平面波照明を想定している。一方、Nugentらは、集光点から離れたフレネル領域に試料を配置し、幾何学的暗部の回折強度と明部のホログラムデータを同時に取得することで、像再生の一貫性が向上することを示した⁸⁾。この方法は、非孤立物体の測定に応用でき、彼らは、特にこの方法をKeyhole Imaging⁹⁾と名付けた。また、孤立物体に限定されない方法として忘れてはならないのが、Ptychography¹⁰⁾であり、試料をコヒーレントX線ビームで走査し、走査の際に重なる領域を実空間拘束として活用し、走査した範囲の試料像を再構成する。Pfeifferらはゾンプレートにより集光されたX線ビームを使ったPtychography測定を行い、改良したPtychography用位相回復アルゴリズムにより、試料像の再構成と同時にプローブ光の波動場の精密化を報告した¹¹⁾。また、ごく最近、Keyhole ImagingとPtychographyを組み合わせて、更なる位相回復計算の収束性向上を目指した手法も提案された¹²⁾。

4. 全反射ミラーにより集光した硬X線ビームを用いた高分解能回折顕微法の開発

4.1 波動光学シミュレーションによる実現可能性研究¹³⁾

X線全反射集光ミラーは他の集光素子と比べて、集光効率の高いことが特長である。Kirkpatrick-Baez (KB) ミラー¹⁴⁾は、2枚の楕円形状ミラーからなる2次元集光素子であり、KBミラーにより微小サイズに集光された高フラックス密度の放射光X線は走査型X線顕微鏡のプローブ光としてよく用いられる。回折顕微法測定に求められるX線はフラックス密度の高いことに加えて、試料サイズと同程度の空間コヒーレンス長を有している必要がある。集光によりコヒーレントなX線ビームを形成するには、回折限界で集光しなければならない。SPring-8のような部分的にコヒーレントなX線を用いて回折限界に近い集光を実現するには、仮想的な光源のサイズを十分に小さくする必要があり、その結果、集光に寄与するX線がごく僅かとなってしまふ。研究開始当初、我々は、果たしてSPring-8で集光して“意味のある”回折顕微法実験が行えるのかについて疑問に思っていた。そこで、波動光学シミュレーションにより、高分解能回折顕微法の実現可能性を検討することにした。

SPring-8のBL29XUL¹⁵⁾で光源から約100 m離れた実験ハッチ2にKBミラーを設置することを想定し、次の事を考慮してKBミラーを設計した。(i)集光点のフラックス密度が大きくなるように幾何学的縮小倍率を大きくする。(ii)ミラーへのX線斜入射角を小さくし、かつ表面粗さの小さなミラーとすることでミラーからの寄生散乱を抑える。Table 1は、設計した2枚の楕円ミラーの設計パラメータ

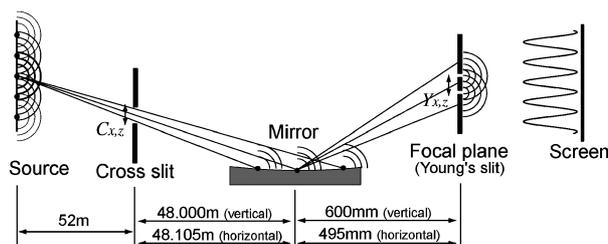


Fig. 1 Schematic view of source, elliptical mirror, and slit arrangement in the present simulation. x and z correspond to the horizontal and vertical directions, respectively.

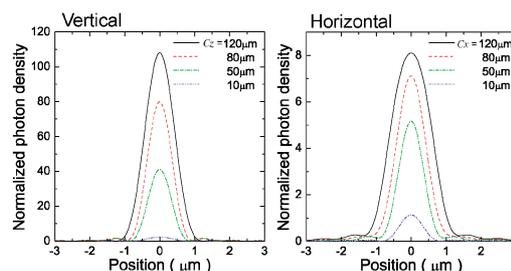


Fig. 2 Photon density profiles of x rays focused by first and second mirrors in Table 1, which are calculated one dimensionally in the vertical and horizontal directions when cross-slit sizes are 10, 50, 80, and 120 μm in arrangement drawn in Fig. 1.

である。このミラーは、所謂、微小集光スポット形成に特化した高NAミラーとは異なり、理想的な波面形成に特化した低NAミラーであると言える。

Fig. 1はシミュレーションの概略図である。X線は8 keVの完全単色、すなわち、時間コヒーレンス長は無量大とした。光源はカオス光源とし、光源強度を垂直方向6 μm 、水平方向301 μm の幅のガウス分布（アンジュレータ出口での電子ビームサイズを想定）で与えた。光源から下流52 mにクロススリット（光学ハッチ内のクロススリットを想定）を配置し、スリットから約48 m下流（実験ハッチ2）にミラーを配置した。光源各点から発するX線球面波を伝播させ、観測点では光源各点に由来するX線の強度の和を計算した。

Fig. 2に集光点での光子密度分布を示す。光子密度は、クロススリット位置での光子密度で規格化されており、縦軸の値は、クロススリット位置に対する光子密度の増加の割合に対応する。クロススリットの開口サイズによらず、半値幅1 μm 程度に集光されることが分かる。また、クロススリットの開口サイズを大きくすることで、集光に寄与する光子数が増加し、焦点での光子密度が増加していくことが分かる。また、ミラーの開口サイズが $\sim 100 \mu\text{m}$ であることから、スリット開口サイズを100 μm 以上としても光子密度の大きな変化は見られなかった。ここで、注目すべき点は、垂直方向は水平方向に比べて1桁程光子密度が大きいということである。これは、垂直、水平方向で光

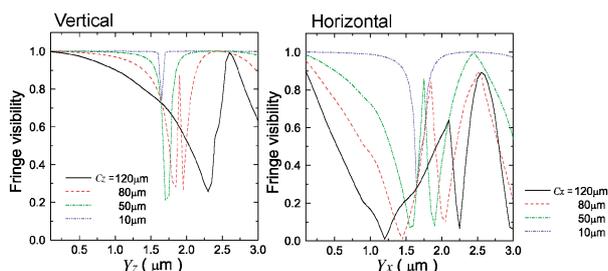


Fig. 3 Double-slit interval dependence of visibility calculated in the vertical and horizontal directions. The center of the double slit is on the optical axis.

源サイズが異なることに由来している。

次に集光点での空間コヒーレンスについて調べた。**Fig. 1**に示すように集光点にはヤングスリットを配置し、後方での干渉縞から Fringe visibility を計算した。**Fig. 3**に Fringe visibility のヤングスリット間隔依存性を示す。垂直、水平方向ともに、48 m 上流のクロススリットの開口サイズの増加と共に、集光ビーム内の空間コヒーレンスが低下する。また、水平方向は垂直方向と比べてコヒーレンスの低下が顕著である。これも、集光光子密度と同様に光源サイズに関係している。また、ヤングスリット間隔が $\sim 1.5 \mu\text{m}$ を超えると Fringe visibility の変化が複雑になる。これは、集光メインビーム周りのサテライト成分の影響による。

以上のシミュレーション結果より、2枚のミラーを組みあわせて2次元集光すれば、集光径 $\sim 1 \mu\text{m}$ で、光子密度を数百倍程度まで増加できると言える。また、クロススリットが集光ビーム内のX線光子密度と空間コヒーレンスを制御する役割を担い、クロススリットを適切な開口サイズとすることで、集光ビーム径以下のサイズ試料に空間的にコヒーレントなX線を照射できることが分かる。しかしながら、2桁以上フラックス密度を増加させるには、試料サイズが $\sim 200 \text{ nm}$ 以下でないコヒーレント照射することが困難である。すなわち、集光ビーム径より十分小さなサイズ試料でなければ、集光して“意味のある実験”は行えないと言える。

4.2 KBミラーを備えた回折顕微法装置の開発¹⁶⁾

KBミラーを使って高密度にX線を集光するには、理想形状に近く、高いX線反射率をもったミラーである必要がある。よって、出来る限り形状誤差、表面粗さの小さいミラーであることが望ましい。大阪大学の山内教授のグループで開発されたElastic Emission Machining (EEM)技術¹⁷⁾は、形状誤差、表面粗さをナノメートルオーダーまで小さくすることのできる画期的な加工技術であり、現在、株式会社ジュイテック¹⁸⁾からEEM加工により作製したミラー（商品名：OSAKA MIRROR）を購入することができる。我々は、**Table 1**のデザインのミラーを2008年

Table 1 Parameter of designed elliptical mirrors

	First mirror	Second mirror
Maximum glancing angle (mrad)	1.30	1.05
Acceptance width (mm)	113	90
Focal length (mm)	600	495
Length of major axis (m)	48.600	48.600
Length of minor axis (mm)	6.708	4.880

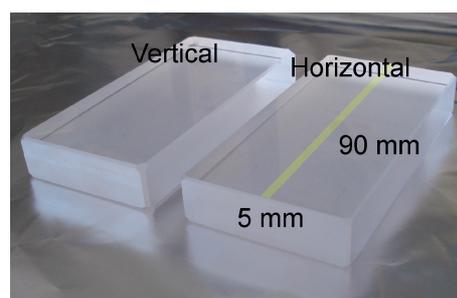


Fig. 4 Appearance of elliptical mirrors fabricated by EEM technique.

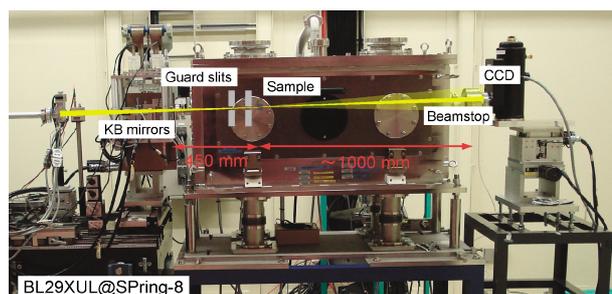


Fig. 5 Appearance of coherent x-ray diffraction microscope with KB mirrors at BL29XUL in SPring-8.

度に購入した。**Fig. 4**にミラーの外観および形状誤差分布を示す。ミラーの材質は合成石英であり、ミラー有効領域は $5 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ であり、形状誤差 1 nm (P-V)、表面粗さ 0.11 nm (RMS)である。X線斜入射角を $\sim 1 \text{ mrad}$ となるように設計しているため、表面に金属コーティングせずに $\sim 10 \text{ keV}$ のX線について99%以上の高い反射率が得られる。

このミラーを備えた集光ユニットを回折顕微法装置に組み込み、高分解能回折顕微法装置を構築した。**Fig. 5**に装置の外観を示す。KBミラーを備えた集光ユニットを大気中に設置し、カプトン窓を通して、真空チャンバー内でX線は集光される。集光点に、サンプルを配置し、その前方散乱強度を試料から約1 m下流に設置される直接撮像型CCD検出器 (Princeton Instruments PI-LCX1300) で測定する。

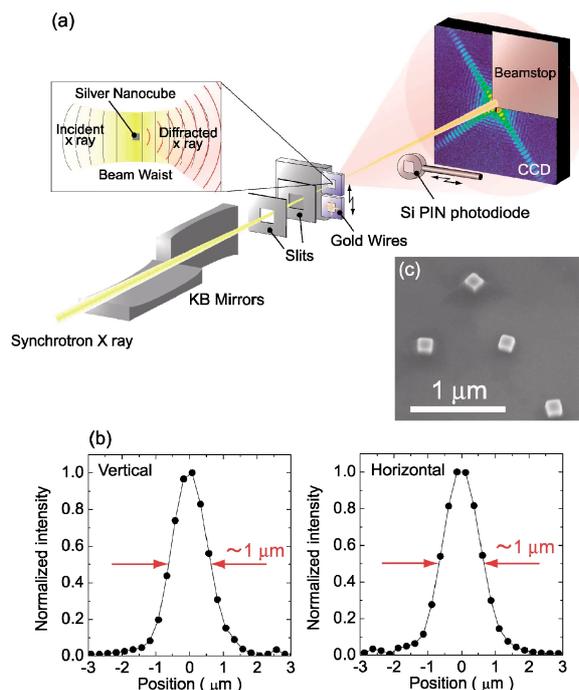


Fig. 6 (a) Experimental setup for coherent x-ray diffraction pattern measurements of silver nanocube using x rays focused by KB mirrors. The nanocube was placed at the center of the beam waist. (b) Intensity distribution profile along vertical and horizontal directions of the focused beam. The profile was derived by differentiating the x-ray absorption distribution of the gold wires at 250 nm intervals. (c) SEM image of silver nanocubes.

4.3 銀ナノキューブを用いた高分解能回折顕微法のデモンストレーション実験¹⁹⁾

開発した高分解能回折顕微法装置を用いたデモンストレーション実験を SPring-8 の BL29XUL にて行った。試料にはポリオール還元法により作製された 200 nm 以下のサイズの銀ナノキューブ粒子を用いた²⁰⁾。この銀ナノキューブは単結晶であり、表面は原子レベルで平滑な {100} 面で構成される。3 章で述べたように、200 nm 以下のサイズの孤立試料を測定する場合、集光によるフラックス密度の増加を期待できる。Fig. 6(a) に実験配置を示す。集光ビームプロファイル測定のための金ワイヤーもしくは銀ナノキューブを並進ステージにより集光点に配置することができる。Si111 の二結晶分光器により X 線エネルギーを 12 keV に単色化し、ミラーより 50 m 上流に設置されるクロススリットの開口を 100 μm とした。Fig. 6(b) にワイヤースキャン法にて計測した水平方向、垂直方向の集光プロファイルを示す。両方向とも半値幅で ~1 μm に集光できている。集光ビームスポットを二次元のガウシアン分布と仮定すると、集光点におけるフラックス密度は $\sim 1.0 \times 10^4$ ph/s/nm² であると見積もられた。Fig. 6(c) に銀ナノキューブの走査型電子顕微鏡像を示す。チャージアップ防止のためにカーボン蒸着した SiN メンブレンチップに銀

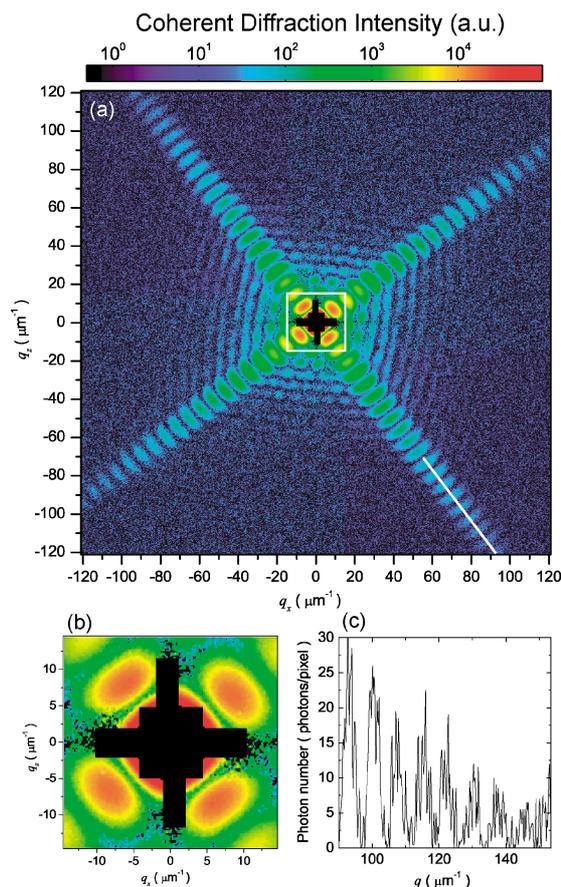


Fig. 7 (a) Coherent diffraction pattern of silver nanocube in 1251×1251 pixels. q is defined as $q = 2 \sin(\Theta/2)/\lambda$, where Θ is the scattering angle and λ is the x-ray wavelength. (b) Expanded image of the area inside the square in (a). (c) q dependence, along the white line indicated in (a), of photon numbers detected at one pixel of the CCD detector for the high- q diffraction measurement.

ナノキューブを滴下し、孤立したナノキューブの位置座標をスケーラー搭載の光学顕微鏡により決定した。その位置座標を元に、ナノキューブに X 線集光ビームを照射した。ナノキューブからの散乱 X 線強度を CCD 検出器で測定し、散乱強度が最大となる場所、すなわち、Fig. 6(a) の挿入図にあるように、ナノキューブが集光ビームの中心となるように配置した。このとき、集光ビーム径よりナノキューブのサイズが十分に小さいため、振幅も位相も一様な平面波によって照明されると近似できる。

回折パターン測定は CCD のダイナミックレンジが十分でないため、低波数と高波数に分けて測定され、それぞれ X 線照射時間は 100 秒、800 秒であった。また、ビームストップで測定できない領域の一部は、回折パターンの中心対称性を利用して補完された。Fig. 7(a) は、実験で得られた銀ナノキューブの回折パターンである。十字状の斑点模様が低波数から高波数領域に伸びているのが分かる。このパターンは、光学の教科書になら必ず載っている矩形開口からのフラウンホーファー回折パターンと同じである。そ

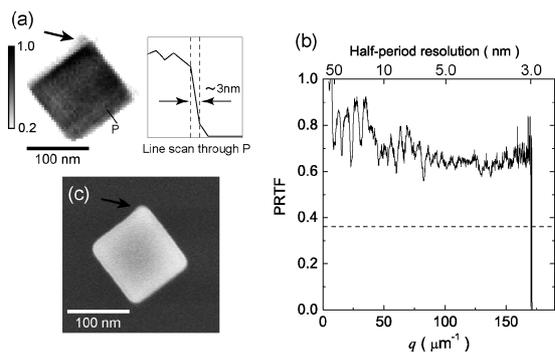


Fig. 8 (a) Projection image of the silver nanocube reconstructed from the diffraction pattern in Fig. 7(a) in which a line scan through an edge shown in the inset demonstrates the resolution of ~ 3 nm. The reconstructed image is normalized by the maximum value of image intensities and is displayed in gray scale. (b) Phase retrieval transfer function (PRTF) for the reconstructed image of (a). The half-period resolution of the image of (a) is 3.0 nm, where the PRTF drops to a value of $1/e$. (c) SEM image of the silver nanocube.

の強度分布は sinc 関数の二乗に従うことが知られている。**Fig. 7(b)**は回折パターンの中心部分を拡大したものであり、中心の黒い領域がビームストップおよびミラーからの寄生散乱により、ナノキューブからの回折強度を測定できなかった領域である。中心スペックルは、試料の外形に関する情報を多く含んでおり、ビームストップによるデータ欠如領域が中心スペックルの中に収まっていることが、一意的な像再生を行う上で重要であることが知られている²¹⁾。この回折パターンは概ねその条件を満たしており、信頼性の高い像再生を行うことができる。また、**Fig. 7(c)**は**Fig. 7(a)**の高波数領域の回折強度分布の断面であり、縦軸が800秒のX線照射で検出された光子数である。回折強度が $145 \mu\text{m}^{-1}$ 付近で5つの光子が観測されており、これは回折パターンが ~ 3 nmの構造を分解できたことを意味する。

次に、回折パターンから試料像の再構成を行った。試料像の再構成には Hybrid Input Output アルゴリズム²²⁾を用いた。乱数発生により作成した5つのランダムな電子密度分布から出発し、それぞれについて再構成を行い、それらを平均化することで最終的な試料像を得た。**Fig. 8(a)**が再構成された像であり、銀ナノキューブの四角い形を確認できる。今回の測定では、最大散乱角度が 1° 程度であり、エバルト球を平面で近似できるため、投影近似を適用できる。すなわち、得られた再構成像は銀ナノキューブの電子密度分布の投影像とみなせる。この再構成像には、矢印で示してある位置にバンプ構造を確認できる。一方、**Fig. 8(b)**に同じナノキューブのSEM像を示すが、同じバンプ構造を確認できる。再構成像のエッジの断面を調べたところ、エッジ分解能は ~ 3 nmであった。また、位相回復の信頼性を表す位相回復伝達関数を使った解析²³⁾においても、3 nm分解能を達成していることを確認できた

[**Fig. 8(c)**]。これまでX線回折顕微法では、10 nmを超える分解能^{7,24)}が報告されているが、この3 nm分解能はそれらを上回る世界最高の分解能である。

5. まとめと将来展望

本稿では、全反射ミラーにより集光した硬X線ビームを利用した高分解能回折顕微法の開発について紹介した。今回の銀ナノキューブの測定では、投影近似の適用できる範囲であったため、単一フレームの回折強度データからの二次元像の再構成が可能であった。今後、より高波数領域の回折データを取り扱う場合は、エバルト球の曲率を考慮しなければならない。よって、二次元再構成像を取得する場合、試料を微小角度回転させ、複数のフレームデータを収集することで、逆空間のある平断面での強度データを構築する必要がある。筆者の試算によると、現状のSPring-8の光源性能、検出器性能で、試料として銀ナノキューブ粒子を用いれば sub-nm 空間分解能を達成できる。しかしながら、高密度で単純な形状の粒子を用いて空間分解能の向上を目指すことより、本手法を活かした応用研究を積極的に遂行することこそ重要であると筆者は考える。原子分解能を達成している電子顕微鏡との差別化を図るために、本顕微法の特長である「電子密度」や「歪分布」(ブラッグ反射を利用した場合)の定量評価が可能といった点を活かしたインパクトのある応用研究を展開していきたい。現在、形状制御合成法により作製された金属ナノ粒子の三次元観察を行っており、電子密度分布を定量することによって、形状制御合成プロセスのメカニズムの解明に取り組んでいる。また、ブラッグ回折を利用した金属材料内部の歪場のイメージングにも取り組んでいる。

本研究では、孤立物体にX線平面波を照明し、前方散乱強度を測定する回折顕微法を紹介したが、現在、PtychographyやKeyhole imagingといった孤立物体に限定されない手法の開発が盛んである。このような測定の場合、試料照明光が平面波でないため、あらかじめ照射関数を決定するか、位相回復計算の過程で照射関数の推定解を導出する必要がある。生物試料のように軽元素で構成される散乱体の場合、試料像の再構成が困難とされてきたが、つい最近、生物試料であっても定量的像再生が可能であるという報告がなされた²⁵⁾。今後、ミラー光学系による硬X線集光ビームを使って、このような測定がどこまで適用可能であるのか検討する必要があるであろう。

現在、次世代光源としてX線自由電子レーザー施設がSLAC, DESY, SPring-8で建設中である。回折顕微法はX線自由電子レーザーを用いれば、空間分解能、時間分解能の面でその性能が飛躍的に向上することが期待されている。SLACでは2009年度から軟X線自由電子レーザーのユーザー利用実験が開始されており、すでにウィルスやナノ結晶のシングルショット測定が行われ、有望な結果が得られ

たと聞いている。近い将来、日本の硬X線自由電子レーザーをOSAKA MIRRORで集光し、究極的なX線イメージング実験が実現することを願っている。

謝辞

本稿で述べたX線回折顕微法の研究は、理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センターの石川哲也センター長、西野吉則専任研究員、京都大学大学院工学研究科の松原英一郎教授、大阪大学大学院工学研究科の山内和人教授のグループとの共同研究によるものである。放射光利用実験は、SPring-8の理化学研究所専用ビームラインBL29XULを利用して行われた。大阪大学大学院生の古川隼人君（現：富士通）、久保英人君（現：宇部興産）、堤良輔君、榊茂之君（現：東京大学大学院）には放射光実験をサポートして頂いた。心から感謝を申し上げる。また、本研究は、科学技術振興調整費の委託事業「若手研究者の自立的な研究環境整備促進」プログラムおよび科学研究費若手研究Aの支援の下、遂行された。

参考文献

- 1) 西野吉則, 石川哲也: 放射光 **19**, 3-14 (2006).
- 2) J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz and D. Sayre: *Nature (London)* **400**, 342-344 (1999).
- 3) Y. Takahashi, Y. Nishino and T. Ishikawa: *Phys. Rev. A* **76**, 033822 (2007).
- 4) Y. Takahashi, Y. Nishino, T. Ishikawa and E. Matsubara: *Appl. Phys. Lett.* **90**, 184105 (2007).
- 5) Y. Nishino, Y. Takahashi, N. Imamoto, T. Ishikawa and K. Maeshima: *Phys. Rev. Lett.* **102**, 018101 (2009).
- 6) I. Robinson, F. Pfeiffer, I. Vartanyants, Y. Sun and Y. Xia: *Opt. Express* **11**, 2329 (2003).
- 7) C. G. Schroer, P. Boye, J. M. Feldkamp, J. Patommel, A. Schropp, A. Schwab, S. Stephan, M. Burghammer, S. Schoder and C. Riekel: *Phys. Rev. Lett.* **101**, 090801 (2008).
- 8) G. J. Williams, H. M. Quiney, B. B. Dhal, C. Q. Tran, K. A. Nugent, A. G. Peele, D. Paterson and M. D. de Jonge: *Phys. Rev. Lett.* **97**, 025506 (2006).
- 9) B. Abbey, K. A. Nugent, G. J. Williams, J. N. Clark, A. G. Peele, M. A. Pfeifer, M. de Jonge and I. McNulty: *Nat. Phys.* **4**, 394 (2008).
- 10) J. M. Rodenburg, A. C. Hurst, A. G. Cullis, B. R. Dobson, F. Pfeiffer, O. Bunk, C. David, K. Jefimovs and I. Johnson: *Phys. Rev. Lett.* **98**, 034801 (2007).
- 11) P. Thibault, M. Dierolf, A. Menzel, O. Bunk, C. David and F. Pfeiffer: *Science* **321**, 379-382 (2008).
- 12) D. J. Vine, G. J. Williams, B. Abbey, M. A. Pfeifer, J. N. Clark, M. D. de Jonge, I. McNulty, A. G. Peele and K. A. Nugent: *Phys. Rev. A* **80**, 063823 (2009).
- 13) Y. Takahashi, Y. Nishino, H. Mimura, R. Tsutsumi, H. Kubo, T. Ishikawa and K. Yamauchi: *J. Appl. Phys.* **105**, 083106 (2009).
- 14) P. Kirkpatrick and A. V. Baez: *J. Opt. Soc. Am.* **38**, 766 (1948).
- 15) K. Tamasaku, Y. Tanaka, M. Yabashi, H. Yamazaki, N. Kawamura, M. Suzuki and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*: **467-468**, 686-689 (2001); see also BL29XUL outline in SPring-8 website <http://www.spring8.or.jp>.
- 16) Y. Takahashi, R. Tsutsumi, H. Kubo, Y. Nishino, H. Mimura, S. Matsuyama, T. Ishikawa and K. Yamauchi: *Proc. SRI2009* (submitted).
- 17) K. Yamauchi, H. Mimura, K. Inagaki and Y. Mori: *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 111-117 (2002).
- 18) <http://www.j-tec.co.jp/>
- 19) Y. Takahashi, Y. Nishino, R. Tsutsumi, H. Kubo, H. Furukawa, H. Mimura, S. Matsuyama, N. Zettsu, E. Matsubara, T. Ishikawa and K. Yamauchi: *Phys. Rev. B* **80**, 054103 (2009).
- 20) Y. Sun and Y. Xia: *Science* **298**, 2176-2179 (2002).
- 21) J. Miao, Y. Nishino, Y. Kohmura, B. Johnson, C. Song, S. H. Risbud and T. Ishikawa: *Phys. Rev. Lett.* **95**, 085503 (2005).
- 22) J. R. Fienup: *Appl. Opt.* **21**, 2758-2769 (1982).
- 23) H. N. Chapman, A. Barty, M. J. Bogan, S. Boutet, M. Frank, S. P. Hau-Riege, S. Marchesini, B. W. Woods, S. Bajt, W. H. Benner, R. A. London, E. Plonjes, M. Kuhlmann, R. Treusch, S. Dusterer, T. Tschentscher, J. R. Schneider, E. Spiller, T. Moller, C. Bostedt, M. Hoener, D. A. Shapiro, K. O. Hodgson, D. V. D. Spoel, F. Burmeister, M. Bergh, C. Chaleman, G. Hultdt, M. M. Seibert, F. R. N. C. Maia, R. W. Lee, A. Szoke, N. Timneanu and J. Hajdu: *Nat. Phys.* **2**, 839-843 (2006).
- 24) J. Miao, T. Ishikawa, E. H. Anderson and K. O. Hodgson: *Phys. Rev. B* **67**, 174104 (2003).
- 25) K. Giewekemeyera, P. Thibault, S. Kalbfleisch, A. Beerlink, C. M. Kewish, M. Dierolf, F. Pfeiffer and T. Salditta: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **107**, 529-534 (2010).

● 著者紹介 ●



高橋幸生

大阪大学大学院工学研究科特任講師（常勤）
理化学研究所播磨研究所 客員研究員（兼務）
兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 特任講師（兼務）
E-mail: takahashi@wakate.frc.eng.osaka-u.ac.jp
専門：コヒーレントX線光学、位相回復、X線構造解析

【略歴】

2002年3月東北大学大学院工学研究科修士課程修了、2004年9月同博士後期課程修了、博士（工学）：期間短縮、2002年4月-2004年9月日本学術振興会特別研究員DC1、2004年10月-2005年3月日本学術振興会特別研究員PD、2005年4月-2007年3月理化学研究所 基礎科学特別研究員、2007年4月より現職。同年4月より理化学研究所播磨研究所 客員研究員（兼務）、2010年2月より兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 特任講師（兼務）。

Development of high-resolution diffraction microscopy using focused hard X-ray beam and a perspective

Yukio TAKAHASHI Frontier Research Center, Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1-1 Yamada-oka, Suita 565-0862, Japan

Abstract X-ray diffraction microscopy is a lensless x-ray microscopy combining coherent X-ray scattering and phase retrieval calculation, allowing to visualize the electron density distribution of thick objects with a high spatial resolution because of its high penetration power and short wavelength. In this study, we developed the high-resolution diffraction microscope using hard X-rays focused by total reflection mirrors, and realized a 3 nm spatial resolution in the demonstration experiment using the silver nanocube as a sample. By using X-ray free electron lasers, ultimate x-ray diffraction microscopy will realize by using focused hard X-ray free electron lasers.
