

X線屈折コントラスト法における屈折角分解能の サイズ依存性評価

岡本 博之、藤森 茜¹⁾、森川 公彦²⁾、水野 薫²⁾

要 旨

本研究では、X線屈折コントラスト法 (DEI法) における、屈折角分解能のサイズ依存性を評価した。そのために作製した標準試料 (ファントム) は、スクロースもしくはグリセリン水溶液中に沈めた $2 \times 10 \times 30 \text{ mm}^3$ のアクリル板で、長端に沿って回転させる。アクリルと水溶液の間の相対屈折率は、水溶液の濃度を变化させることで調整することが可能である。アクリル板のエッジでは屈折が生じ、その屈折角は板の回転角度により変化する。また、板のエッジ部分をX線透過方向から見た、見かけ上のサイズも、回転角度とともに変化する。つまり、水溶液の濃度と板の回転角度を变化させることで、見かけ上の物体のサイズとX線の屈折角の両方を調整することが可能である。このことを利用して、得られた板のエッジ部分の像のコントラストが観察可能な最小のサイズと屈折角を得た。本研究では、KEK-PFにおける垂直ウィグラービームライン (BL-14B) でDEI法用の光学系を使用した際の、屈折角分解能のサイズ依存性を評価した。使用したX線のエネルギーは31keVである。また、今回の実験で使用したDEI法装置では、0.1 mmよりも大きな物体を観察するためには、X線の屈折角は0.01 μrad 以上必要であることが分かった。一方、それよりも小さい物体を観察するためには、より大きい屈折角が必要であることも分かった。さらに、異なる水溶液を使用して得た分解能曲線の結果には再現性が見られた。

KEY WORDS

Phase contrast imaging, X-ray DEI method, Synchrotron radiation, Resolution, Phantom

はじめに

X線が発見されてから以後100年以上に渡り、様々な分野で利用されている。その中でも、特にイメージングの分野に限れば、X線の減弱差、すなわち「X線波」の振幅の変化を観察するのが主な使用方法であった。一方で、ここ数十年の間、屈折率が異なる物質を透過する際に生じる位相変化を捉え、画像化する方法の研究が進んでいる¹⁻⁵⁾。通常、電磁波などの波動が異なる屈折率を持つ媒質間を通過するならば位相の変化が生じ、屈折現象として観測される。X線も電磁波の一種であるため屈折が生じるが、通常の物体による屈折角は数 μrad よりも小さいため、直接観察することは困難である。そこで、何らかの光学素子を利用して、わずかな屈折に対してコントラストを発生させて画像化す

る手法が考案され、屈折コントラスト法と呼ばれている。この方法は、X線の減弱が少ない軽元素からなる物質でも検出できるため、生体軟組織等の観察用として医学診断への応用や産業への応用などが試みられている⁶⁻¹¹⁾。屈折コントラスト法において位相変化情報の検出感度とは、どの程度の屈折角まで画像上でコントラストを発生させて観察できるかを意味する。つまり、より小さい屈折角までコントラストを観察することができる装置であれば、高感度で屈折角の変化を観察可能である。

一方で、これらの手法は減弱を利用する方法とは撮像原理が異なるため、屈折角に関する分解能の評価方法が最近まで確立されていなかった。さらに、装置開発に主眼が置かれてきたため、分解能の評価用試料

金沢大学医薬保健研究域保健学系

1) つくば国際大学医療保健学部

2) 島根大学総合理工学部物理・材料科学科

(ファントム)の開発も活発ではなかった。そのような状況の中、屈折角に関する分解能評価方法とそのため
 のファントムが岡本や Mizuno らにより提案された¹²⁻¹⁴⁾。
 しかしながら、彼らの評価法では物体のサイズに関する
 概念は取り入れられていなかった。例えば、現在使用
 されている減弱差を用いた医療用画像撮影装置では
 バーガーファントムを撮影し、C-D ダイアグラムと呼
 ばれるサイズ(円直径)とコントラスト(厚さ)の両方
 を考慮した分解能曲線を作成し、分解能の評価が行な
 われている¹⁵⁾。なお、バーガーファントムとは、アク
 リル板に厚さ(深さ)の異なる、様々な直径の円形突
 起(孔)をつけた形状のファントムである。撮影した
 像において観察可能な円の範囲を調べることで、空間
 分解能とコントラストの総合的な視覚評価を行うこと
 が可能である。撮像の元となる物理量や原理は異なる
 が、屈折コントラスト法においても、C-D ダイアグラム
 と同様のサイズとコントラストの両方を考慮した分解
 能曲線が得られると期待できる。また、将来これらの
 イメージング法が実用化された際に、装置評価やメン
 テナンスを行うためには、分解能曲線の取得は必須
 になると考える。

そこで、我々は岡本や Mizuno らにより開発された
 ファントムを参考に、サイズの概念も追加した分解能
 評価方法の開発を試みた^{12,13)}。本手法を応用すること
 で、異なる屈折コントラスト法装置における分解能を、
 直接比較することが可能になると考える。

方法

いくつか存在する屈折コントラスト法の中でも、
 X-ray Diffraction-Enhanced Imaging method (DEI 法)
 は屈折角変化の検出能力が比較的高いことに加え、定
 量的な解析が行いやすいことが知られている¹⁶⁾。そこ
 で、本研究でも DEI 法を用いた。実験には、高エネル
 ギー加速器研究機構の放射光科学研究施設(KEK-PF)
 の垂直ウイグラービームライン BL-14B を使用した。
 図 1 に鉛直上方から観察した実験配置図を示す。まず、
 シンクロトロンから放射された白色 X 線を、モノクロ
 メータで単色化し 31 keV の X 線を得た。その後、回
 折面を(440)とした Si 単結晶製の非対称反射コリメー
 ターで水平方向にビーム幅を広げた上で平行度を増
 し、作製したファントムに照射した。X 線がファントム
 を透過すると数 μrad 以下の屈折が生じる。この情報
 を持った X 線を、Si(440)の対称反射アナライザーで
 回折させて、屈折角を強度の変化に変換し、CCD カ
 メラで撮影した。この装置の中で、屈折像を取り出す
 ために重要な役割を成すのがアナライザーである。以

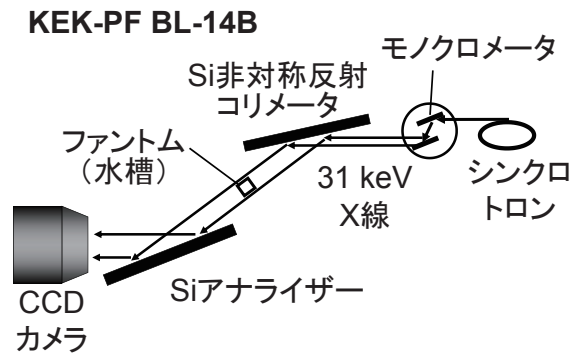


図 1. 実験に使用した装置の配置
 実験に使用した装置を鉛直上方から観察した配置図。シンクロ
 トロンから放射された白色 X 線は、モノクロメータで 31 keV に
 単色化される。その後、Si 単結晶コリメータ、ファントム、アナ
 ライザーを得て、CCD カメラで撮影される。

下にアナライザーの役割を述べる。

X 線回折理論によると、Si 結晶の原子面間の距離を d 、
 入射 X 線の波長を λ としたとき、X 線がこの原子面
 に対して、式(1)で示すようなブラッグ条件を満たす角
 度 θ_B (ブラッグ角) でアナライザーに入射すると、回
 折現象が起こる¹⁷⁾。

$$2d \sin\theta_B = \lambda \quad (1)$$

そこで、 θ_B 付近でアナライザーを回転し、入射角を
 変化させながら回折 X 線強度を測定すると、 θ_B で極
 大値を持つ強度分布曲線を描く。図 2 は、本実験に使用
 した装置について、ファントムが無い状態で、X 線を照
 射しつつアナライザーを回転させた際の、回折 X 線の
 強度分布である。横軸はブラッグ角 θ_B を原点とし
 たアナライザーへの X 線入射角度の変化、縦軸は回
 折 X 線の相対強度である。この曲線はロックン
 グカーブと呼ばれる。DEI 法では、図 2 中に破線
 で示すように、回折強度が最大強度の半値になるよ
 うにアナライ

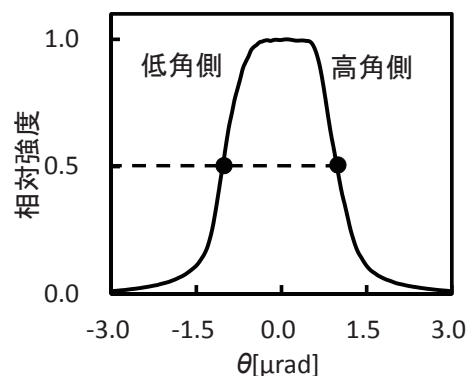


図 2. アナライザーのロックン
 グカーブ
 ブラッグ条件を中心としてアナライザーの角度を変化させ
 ると、ロックンカーブと呼ばれる山形の回折強度曲線を示す。黒
 丸の条件でファントムの撮影を行った。

ザー角度を調整した後、回折したX線をCCDカメラで撮影する。撮影は、ロッキングカーブの高角側と低角側の両方で行う。このとき、ファントム等により水平面内でX線が屈折すると、アナライザーへの入射角が変化するため、ロッキングカーブに沿って回折強度も変化する。つまり、アナライザーは屈折角を回折X線強度の変化に変換する光学素子である。この強度変化は、高角側の場合と低角側の場合で逆転する。なお、CCDカメラで観測される回折X線には、物体による減弱の影響と、アナライザーで屈折角が強度変化に変換された影響の両方が含まれる。そこで、DEI法では減弱の影響を低減するため、高角側と低角側で得られた像を差分して使用することが多い。本研究では、撮影前に、ファントムが無い状態で、図2の低角側もしくは高角側において、アナライザーの角度をロッキングカーブ最大強度の1/2になるように調整した。その後、ファントムを設置し前述の方法で撮影を行った。なお、本実験で使用したCCDカメラの視野は水平方向8.5 mm、鉛直方向6.4 mm、ピクセルサイズは $6.2 \times 6.2 \mu\text{m}^2$ である。

次に、本研究において作製したファントムとその原理を述べる。本研究の参考にした岡本やMizunoらにより提案されたファントムは、光学プリズムに類似しており、X線照射面側の傾斜角度 α が 0° から 45° まで連続的に変化する形状をもつ。このとき、プリズムと同様に、 α が大きいほどX線の屈折角 $\Delta\theta$ は大きくなり、

$$|\Delta\theta| = \delta \tan\alpha \quad (2)$$

なる関係がある。ここで、式(2)左辺 $\Delta\theta$ の単位は無次元のradである。なおX線領域では、通常の物質の屈折率 n は1に非常に近いので、式(3)のように無単位の量 δ を使って、1からの変化で表現することが多い¹⁹⁾。

$$n = 1 - \delta \quad (3)$$

つまり、式(2)によると、DEI法により彼らが開発したファントムを撮影し、傾斜部分とバックグラウンドの間にコントラストが観察できる最小の α をもとめることで、使用した装置において検出可能な最小の屈折角、つまり屈折角分解能を評価することが可能である。一方で、仮に、このファントムに対して単純にサイズ効果の概念を加えるならば、傾斜部分について、様々なサイズ(幅)の物を用意しなければならない。またその際、特に小さいサイズの加工技術において、大変な困難が生じる。そこで我々は、このファントムの原理を応用して、図3に示すような、サイズ概念を導入したファントムを考案した。まず、何らかの水溶液

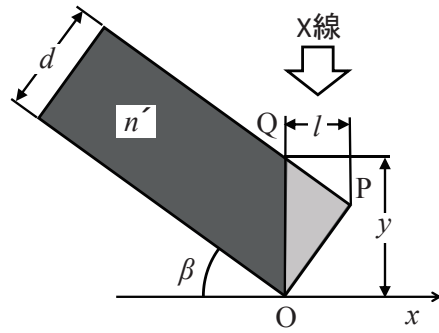


図3. 作製したファントムの概形

板は幅10 mm、厚さ2 mm、長さ30 mmの亚克力製である。スクロースまたはグリセリン水溶液中に沈めて使用する。Pを中心に回転することで、見かけ上のサイズ l と角度 β を変化させる。

(環境媒質)で満たした環境中に、厚さ d の均質な薄板を配置する。このとき、環境媒質と板の材質の相対屈折率 n' を、式(3)を参考にして、 $n' = 1 - \delta'$ と表す。この板に対して、図3の白抜き矢印の方向からX線を照射する。図3では、板を照射方向に垂直に置いた状態から、紙面に垂直な回転軸で角度 β だけ回転させている。図3において、板のエッジ部分に仮想的に三角形OPQを考える。線分OQはX線照射方向と平行で、長さを y とする。このとき、X線照射方向から見込んだ三角形OPQの幅 l は見かけ上のエッジ部のサイズである。これらの中には、幾何学的に式(4)、(5)の関係が成り立つ。

$$l = d \sin\beta \quad (4)$$

$$y = \frac{d}{\cos\beta} \quad (5)$$

また光学的意味においては、岡本、Mizunoらによるファントムの傾斜角 α のtangentは、X線照射方向に対する板の厚みの変化率を表していると考えて良いので、上記の l と y を使って

$$\tan\alpha = \frac{y}{l} \quad (6)$$

と表現できる。式(2)、(4)、(5)、(6)を使ってエッジ部分での屈折角の式をもとめると

$$|\Delta\theta| = \delta' \tan\alpha = \delta' \frac{y}{l} = \frac{\delta'}{\sin\beta \cos\beta} = \frac{2\delta'}{\sin 2\beta} \quad (7)$$

となる。すなわち、板のエッジ部分である三角形OPQで、相対屈折率 δ' と回転角 β に応じた屈折が生じる。一方、エッジ部分以外ではX線照射方向に沿っての厚みに変化が無いので、屈折は生じない。また、板のエッジ部分をX線透過方向から見た、見かけ上のサイズ l も、回転角度とともに変化する。このことから、 β と δ' を適切に調整すれば、式(4)と(7)により、物体のサイズ

l と屈折角 $\Delta\theta$ を独立にコントロールすることが可能である。物質の屈折率は、X線の波長と、物質の電子密度により変化する¹⁸⁾。つまり、構成する元素の種類と比率が異なる物質において、屈折率は違った値になる。そこで、何らかの水溶液の濃度を変化させることにより、溶解度の範囲内で屈折率をコントロールすることが可能である。本研究では、安全性や入手のしやすさ、溶解度の大きさ、水溶液の作成しやすさ等を考慮し、スクロースとグリセリンの水溶液を使用した。そこで実際には、特定の水溶液濃度、つまり特定の δ' について、 β を変化させて撮影を行い、エッジ部が観察可能な β の範囲をもとめる。すると、 β を媒介変数として式(4)、(7)から得られる l と $\Delta\theta$ の関係を表す理論曲線上で、エッジ部が観察可能な範囲と不可能な範囲の境界(分解能)をもとめることができる。同様の実験を様々な濃度、つまり様々な δ' において行なうことで理論曲線は平行移動するため、 l と $\Delta\theta$ で表現される2次元平面を埋めていくことができる。それらの結果から総合的に、エッジ部の観察境界として得られる l と $\Delta\theta$ の点をつなぐことで、屈折角分解能のサイズ依存性曲線が得られる。前述の原理を元に、ファントムを作製した。回転する薄板には、エッジ部分を精密に研磨した幅10 mm、厚さ2 mm、長さ30 mmの亚克力板を用いた。本評価方法においては、板のエッジ部分が正確に直角を成し、かつ平面であることが重要であるため、顕微鏡による観察を行いつつ、定盤上での研磨を繰り返した。また、板の周りの環境媒質として使用した水溶液の濃度は、スクロース水溶液について0.44、0.45、0.46、0.47、0.48 g/ml、グリセリン水溶液について、0.58、0.59、0.60、0.61、0.62 ml/mlである。そして、亚克力板を水溶液が入った亚克力製の水槽に入れ、板のみを回転しX線の入射方向に対して様々な β でエッジ部の撮影を行った。その際に、本実験で使用したDEI法では水平方向の屈折角しか検出できないため、エッジ部分が鉛直になるように調整を行った。その後、 δ' を変化させるため水溶液の濃度を変え、同様の撮影を繰り返した。なお、 β は板面とX線照射方向が垂直であるときを 0° とした。 $|\beta|$ が 10° 以下ではステップ角 0.5° で、 10° 以上ではステップ角 1° で、 $\pm 45^\circ$ の範囲で変化させつつ撮影を行った。なお、本実験で使用した、板を回転するためのパルスモータの角度についての精度は 0.01° である。また、水溶液の濃度調整には、電子天秤とメスシリンダーを使用した。いずれの機器も、本実験を行うために十分な精度を持っている。

結果

まず、亚克力板エッジ部分の加工精度を確認するため、空气中で β を変化させてエッジ部分を観察した。すると、 β を名目上 0.00° にした場合でも、およそ $l=10\ \mu\text{m}$ (CCDカメラ約2ピクセル分)の屈折像が観測された。このことから、パルスモータの回転精度を考慮しても、エッジ部分の平面加工精度は $10\ \mu\text{m}$ 程度である。

次に、スクロース水溶液を使用したファントムの亚克力板エッジ部分を、高角側で撮影した像を図4に示す。図には得られた結果のうち、濃度が0.44、0.45 g/ml、 β が 5° 、 9° の結果のみを示す。いずれも写真左右方向についての中央が板のエッジ部に相当し、上下方向に沿って周囲より暗い部分が観察できる。同じ水溶液濃度である図4(a)と(c)を比較すると、 β が(a) 5° から(c) 9° へ増加するとともに式(4)に従って、 l に相当する暗い部分の幅が大きくなっている。一方で、式(7)に従って屈折角が小さくなるため、周囲とのコントラストは弱くなっている。次に、同じ β である(a)と(b)を比較すると水溶液濃度を(a)0.44 g/mlから(b)0.45 g/mlへと濃く、すなわち δ' を小さくすることで、式(7)に従って屈折角が小さくなるため、コントラストは弱くなっている。一方で、幅には変化が無い。以上のような理由により、図4の4つの像について、エッジ部と周囲のコントラストは(a)で最も強く、(d)で最も弱く観測された。なお、図4の画像の左右にコントラストが生じるのは、使用したX線に発散角が存在するためである。そのため、画像の左右において、図1のSiアナライザーへの入射角が若干異なり、回折強度に差が生じる。本実験では、画像中央でエッジ部を撮影するため、その部分が図2のロッキングカーブの半値(黒丸)になるように調整した。

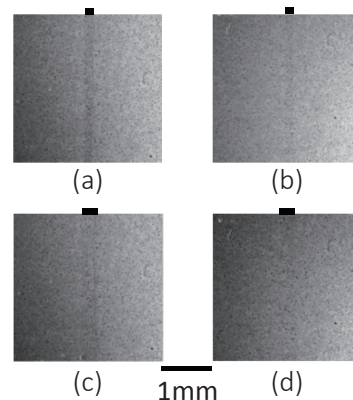


図4. 得られた屈折像
スクロース水溶液中の亚克力板エッジ部で得られた高角側屈折像。(a)と(c)は水溶液濃度が(a)0.44 g/mlの結果、(b)と(d)は0.45 g/mlの結果である。また、(a)と(b)は回転角 β が 5° 、(c)と(d)は 9° である。写真上部の黒線部がエッジ像に相当する。

最初に、得られた結果から解析に必要な δ' をもとめた。そのためまず、式(7)に従い β が小さく、より強いコントラストが得られた像を使ってエッジ部の強度変化を調べ、図2のロッキングカーブに適用し屈折角をもとめた。その後、 β と得られた屈折角を式(7)に適用して、各濃度における δ' を計算した。得られた水溶液濃度と δ' の関係を、スクロースについて図5に、グリセリンについて図6に示す。いずれも、観測された δ' は濃度に対して直線的に変化していた。スクロースについては0.07~0.17、グリセリンについては0.08~0.18の範囲で δ' を調整可能であった。

次に、撮影した像についてエッジ部が判別可能かどうか、次のような方法で判断を行った。まず、図4に示したような像の左右方向に強度分布をもとめ、エッジ部の最大強度を I_E 、バックグラウンドの平均強度を I_B とする。その後、バックグラウンドについて、平均強度を中心とした分散 V をもとめる。そして、式(8)の条件を満たすときエッジ部を判別可能と判断した。

$$V < (I_E - I_B)^2 \quad (8)$$

このようにしてもとめた、判別可能な最小の β を式(7)に適用し、検出可能な最小の屈折角、すなわち屈折角分解能を得た。スクロース水溶液を使用してもとめた屈折角分解能のサイズ依存性曲線を図7に、グリセリン水溶液を使用してもとめた結果を図8に示す。横軸は見かけ上の物体のサイズを、縦軸は屈折角分解能を、それぞれ対数軸を使用して示している。ここで、図7、8中の青、赤、緑の実線と破線は、それぞれ特定の δ' について、 β を媒介変数として変化させたときの、式(4)、(7)から得られるサイズ l と屈折角 $\Delta\theta$ の関係を表す理論曲線である。各濃度での理論曲線上に、ロッキングカーブの高角側 Δ と低角側 \circ で得た分解能の測定結果を、それぞれプロットする。図中の二点鎖線は、各濃度で得られた分解能全体を滑らかに結ぶアイガイドであり、予想される分解能全体を滑らかに結ぶアイガイドであり、予想される分解能曲線である。

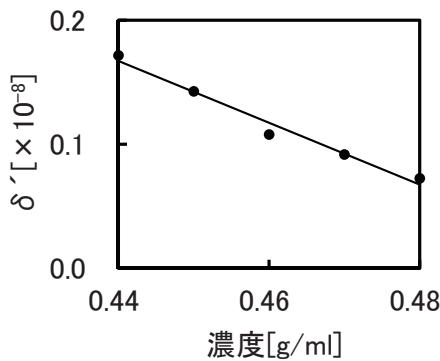


図5. スクロースについて得られた水溶液濃度と δ' の関係
 δ' は濃度とともに直線的に変化する。

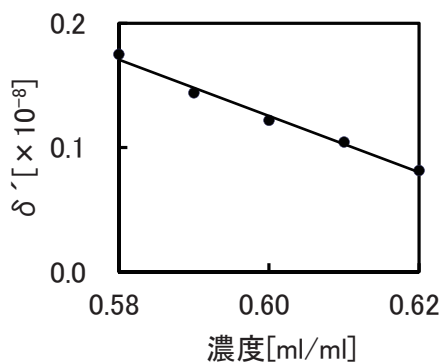


図6. グリセリンについて得られた水溶液濃度と δ' の関係
スクロースの結果と同様に、 δ' は濃度とともに直線的に変化する。

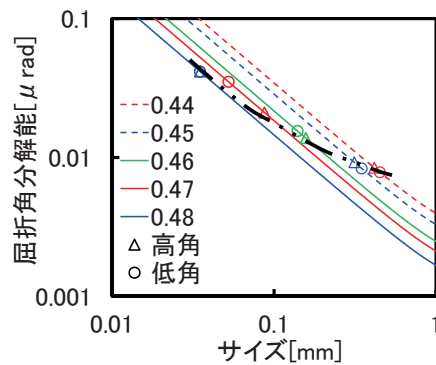


図7. スクロース水溶液による屈折角分解能のサイズ依存性
濃度0.44、0.45、0.46、0.47、0.48 g/mlでもとめた屈折角分解能を、高角側 Δ 、低角側 \circ で示す。横軸は物体の見かけ上のサイズ、縦軸は屈折角分解能をそれぞれ対数表示している。二点鎖線はアイガイドであり、予想される分解能曲線である。

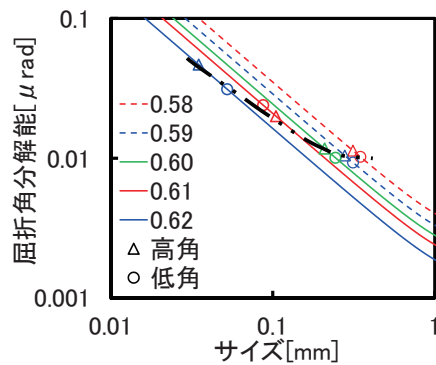


図8. グリセリン水溶液による屈折角分解能のサイズ依存性
濃度0.58、0.59、0.60、0.61、0.62 ml/mlでもとめた屈折角分解能を、高角側 Δ 、低角側 \circ で示す。横軸は物体の見かけ上のサイズ、縦軸は屈折角分解能をそれぞれ対数表示している。二点鎖線はアイガイドであり、予想される分解能曲線である。スクロースを用いた場合に比べ、若干分解能が悪くなっている。

解能曲線である。

図 7、8 とも、ロッキングカーブの高角側と低角側で得られた結果に大きな違いは無かった。また、サイズが 0.1 mm よりも大きな領域において、スクロース水溶液の結果に比べてグリセリン水溶液の結果の方が、わずかに分解能が悪くなった。

考察

KEK-PF のビームライン BL-14B に設置した光学系において、DEI 法における分解能評価を行ったところ、C-D ダイアグラムと同様に、屈折角分解能はサイズに依存することが分かった。また、スクロース水溶液とグリセリン水溶液の環境媒質を用いた実験結果において、得られた分解能の値、およびその傾向には再現性が見られた。このことから、本分解能評価方法は信頼できる結果を得ていると考える。さらに、得られた分解能曲線から、今回の実験で使用した光学系では、0.1 mm よりも大きな物体について、X 線の屈折角が 0.01 μ rad 以上であれば画像上でコントラストが観察できることが分かった。しかし、物体がそれよりも小さいならば、より大きい屈折角でなければ観察できないことも分かった。Mizuno らによるサイズの影響を考慮しない屈折角分解能についての報告には、計算上の間違いが見られる¹³⁾。それを修正すると、我々の実験が行われたのと同じビームライン BL-14B で、同様の DEI 法用装置を使用し、30 keV で得た屈折角分解能は 0.038 μ rad

である。この結果は、使用したエネルギーは若干異なるが、我々が求めた分解能曲線における、大きなサイズでの屈折角分解能と近い値である。

次に、特に 0.1 mm よりも大きなサイズにおいて図 7 の分解能曲線は、図 8 の分解能曲線よりも若干小さい値を示している。つまり、グリセリンを使用した結果の方が、分解能が悪いことを意味する。この結果について、グリセリン水溶液を使用した実験の際には、モノクロメータ設置精度が通常より悪い状況であったことがビームラインの担当者の報告により分かっている。このことが、スクロースを用いた場合に比べ分解能が悪くなった原因の一つと考えられる。このように、今回開発した分解能評価方法を使用すると、同じ光学系を使用する際の、装置の設置精度の違いを検出できる可能性もあることが分かった。このことは、屈折コントラスト法装置の性能を一定に保つための維持管理に、本手法が使える可能性を示唆していると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、光学系の設置等において技術的支援をいただいた高エネルギー加速器研究機構の平野馨一氏に謹んで感謝の意を表します。

本研究は、Photon Factory Program Advisory Committee の承認を得て実施されました（課題番号：2012G134、2014G101、2016G189、2018G055）。

文献

- 1) E. Foester, K. Goetz, and P. Zaumseil: Double crystal diffractometry for the characterization of targets for laser fusion experiments. *Tech.* 15: 937-945, 1980
- 2) K. M. Podurets, V. A. Somenkov, and S. Sh. Shilstein: Refraction-contrast radiography. *Sov. Phys. Tech. Phys.* 34: 654-657, 1989
- 3) V. N. Ingal and E. A. Beliaevskaya: X-ray plane-wave topography observation of the phase contrast from a non-crystalline object. *J. Phys. D, Appl. Phys.* 28: 2314-2317, 1995
- 4) T. J. Davis, D. Gao, T. E. Gureyev, et al: Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard X-rays. *Nature* 373: 595-598, 1995
- 5) D. Chapman, W. Thomlinson, R. E. Johnston, et al: Diffraction enhanced x-ray imaging. *Phys. Med. Biol.* 42: 2015-2025, 1997
- 6) 森浩一, 関根紀夫, 佐藤斉, 他: 放射光 X 線を用いた屈折コントラストによる骨画像, *医学物理* 22(1): 13-20, 2002
- 7) 大原弘, 本田凡, 石坂哲, 他: X 線位相イメージングにおける X 線画像の鮮鋭性向上, *KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT* 1: 131-134, 2004
- 8) 木戸一博, 巻淵千穂, 米山努, 他: タルボ・ロー干渉計による X 線画像技術, *KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT* 8: 82-85, 2011
- 9) 水野薫, 岡本博之, 梶原堅太郎, 他: X 線屈折コントラスト法による Ti および TiAl 合金中の水素化物の可視化, *軽金属* 55(12): 678-681, 2005
- 10) K. Mizuno, H. Okamoto, K. Kajiwara, et al: Visualization of Hydride in Titanium and Titanium-Aluminide by Refraction-Enhanced X-ray Imaging Technique. *Materials transactions* 47(5): 1299-1302, 2006
- 11) 岡本博之, 水野薫: X 線屈折コントラスト法による輪島塗の観察, *金沢大学つるま保健学会誌* 37(2): 51-56, 2013
- 12) 岡本博之: 屈折コントラスト法のポテンシャル, *医用画像情報学会* 29(3): 43-50, 2012
- 13) K. Mizuno, A. Fujimori, H. Okamoto, et al:

- Determination of minimum detectable refraction angle in X-ray diffraction-enhanced imaging via standard test piece. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 56: 066601-1-066601-4, 2017
- 14) 岡本 博之, 藤森茜, 水野薫, 他: X線屈折コントラスト法における屈折角分解能の回折条件依存性, *Journal of wellness and health care* 41(1): 167-170, 2017
- 15) 片山礼司: デジタル X線画像の画質を視る, *医学物理* 36(2): 113-120, 2016
- 16) A. Yoneyama, J. Wu, K. Hyodo, T. Takeda: Quantitative comparison of imaging performance of x-ray interferometric imaging and diffraction enhanced imaging. *Med Phys.* 35(10): 4724-4734, 2008
- 17) B. D. Cullity, 松村源太郎 (訳): 新版 X線回折要論, アグネ, pp 98-129, 1961
- 18) 菊田星志: X線散乱と放射光科学 基礎編, 東京大学出版会, pp 51-54, 2011

Evaluation of sample size dependence on minimum detectable refraction angle in X-ray diffraction-enhanced imaging

Hiroyuki Okamoto, Akane Fujimori¹⁾, Kimihiko Morikawa²⁾, Kaoru Mizuno²⁾

Abstract

We evaluated the sample size dependence on minimum detectable refraction angle in X-ray diffraction-enhanced imaging (DEI). The sample consisted of an acrylic plate measuring $2 \times 10 \times 30 \text{ mm}^3$ with rotation axis parallel to the long edge soaked in an aqueous solution of sucrose or glycerin. The relative refractive index between the acrylic sample and aqueous solution changed with concentration of the solution. The refraction angle occurring at the edge of the acrylic plate was controlled by the rotation angle of the sample. The apparent size of the edge seen from the X-ray transmission direction varied with rotation angle. Therefore, changing the concentration of the aqueous solution and the rotation angle of the plate affected both the apparent size of the sample edge and the X-ray refraction angle. Utilizing these phenomena, the minimum detectable size of the sample edge and refraction angle were determined from the observable weakest contrast of the edge image. In the present study, the minimum sample size vs. the minimum detectable refraction angle curve for 31 keV X-ray was determined using a DEI system constructed in a vertical wiggler beamline (the BL-14B beamline) at the Japanese KEK-PF synchrotron facility. In the DEI apparatus used in this experiment, a refraction angle $> 0.01 \text{ } \mu\text{rad}$ was necessary for detection of specimens $> 0.1 \text{ mm}$. On the other hand, to observe specimens $< 0.1 \text{ mm}$, a larger refraction angle was necessary. The sample size vs. detectable refraction angle curves were similarly obtained when different aqueous solutions were used.