Evaluation of refraction angle resolution in X-ray phase imaging method

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2021-08-02
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: Okamoto, Hiroyuki, Naito, Erina, Mizuno, Kaoru
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00063404

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



X線位相イメージング法における屈折角分解能の評価

岡本 博之, 内藤 愛莉奈¹⁾, 水野 薫²⁾

KEY WORDS

Phase contrast imaging, Refraction contrast, Synchrotron radiation, Resolution

はじめに

これまでX線イメージングの分野では主に減弱差, つまりX線を電磁波として捉えた際の振幅変化を利用 してきた。一方,物質を透過する際に生じる位相変化 を捉え,画像化する研究も進められている¹⁻⁴⁾。軽元素 からなる物質を電磁波が通過する際でも,位相変化に ついては比較的大きいことが知られている。そこで, 減弱では観察し難い物質内部の情報を得るための手法 として,位相イメージング法が研究されている。

位相変化による現象としては、外形の変化による 屈折や、分解能以下の微細構造による小角散乱など がある。しかし、通常の物体による屈折角、散乱角 は数十µradよりも小さいため、直接検出することは 困難である。そこで、位相イメージング法では特殊な 光学素子を使い、それらの情報を検出している。そ の代表的手法として、拡張型 DEI 法(Multiple-Image Radiography)、タルボ干渉計を利用する方法、スリッ トを利用する方法などがある²⁻⁵⁾。利用する光学素子の 違いにより、位相情報の検出感度(分解能)も異なる ため、それぞれの特徴を生かし、産業や医療分野への 応用が進められている⁶⁻⁸⁾。

これらの位相情報に関する分解能について,最初期 に,屈折角に関する分解能評価方法が Mizuno らによ り提案された⁹⁾。しかし,彼らの方法では物体の大き さに関する概念が取り入れられていなかったため,岡 本らによりそれらも考慮した評価方法が開発された¹⁰⁾。 この方法は様々な濃度のグリセリン水溶液中にアクリ ル板を浸し,板を回転しつつ板のエッジ部分を観測す る方法である。そのため,異なる濃度の水溶液それそ れで,回転角度毎に多数の撮影を繰り返し,分解能曲 線作成に必要なデータを取得するために数時間以上が 必要であった。また,分解能曲線を得るための計算も 複雑であり,決して使いやすい評価方法ではなかった。 そこで本研究では,1回の撮影結果から特定の屈折角 における空間分解能を評価できるように改良し,デー タの取得時間の短縮を試みた。また,分解能曲線をも とめる手順も簡単で,直感的に分かりやすい手法を開 発した。

方法

実験は高エネルギー加速器研究機構放射光科学研究施設(KEK-PF)のBL-14Bで行った。図1に鉛直上方から観察した実験配置図を示す。位相イメージング法の標準的方法とされる拡張型DEI法では,Si単結晶による回折現象を利用する。そこで,ビームラインの特性上,強度,安定性とも良好である20.7 keV単色X線を利用した。次に,回折面を(220)とするSi単結晶製コリメータにより指向性を高めるとともにビームの幅を広げ,試料に照射した。その後,試料で減弱,屈折が生じたX線をSi(220)のアナライザーで回折させ,CCDカメラで検出した。撮影時間は1.0 secとした。CCDカメラの画素サイズは6.4 × 6.4 μm²である。

まず試料を置かず,水平面内でアナライザー角度θ を変化させる。すると、ブラッグの回折条件を満たす θで回折 X 線強度が上がり、外れると下がる¹¹⁾。この 時、CCD カメラの各画素で、図 2 中に実線で示すよ うなロッキングカーブと呼ばれる強度曲線が得られ る。次に試料を置くと、試料と相互作用をした X 線が アナライザーに入射する。この時、試料で減弱が生じ ると CCD カメラに入射する X 線強度が下がるため、

2) 島根大学教育学部

金沢大学医薬保健研究域保健学系

¹⁾ 金沢大学大学院医薬保健学総合研究科

図 2 (a) 破線のように曲線の積分面積が減少する。ま た,屈折が生じるとアナライザーへの X 線入射角が変 化するため,図 2 (b) 破線のように曲線全体がシフト する。そこで,減弱を積分面積の違いとして,屈折を 曲線のシフトとして検出することにより,2つの量を 独立にもとめることが可能である。本研究では,ロッ キングカーブ全体の形状を正確に把握できるように, $\theta \ge 0.49 \mu rad ごとに変化させつつ 200 枚の画像を撮影$ した。それらの画像から,画素ごとに減弱と屈折角の計算を行った。そして,得られた値をそれぞれ画素値として割り当て,減弱像と屈折像を作成した¹²⁾。

KEK-PF BL-14B



図 1. 実験に使用した装置の配置



図 2. 試料との相互作用によりロッキングカーブに生じる変化 ブラッグ条件を中心としたアナライザー角度を横軸,回折 X 線強度を縦軸とする。実線は試料がない時,破線は試料が存在す る時の曲線である。(a)は減弱のみが生じた場合,(b)は屈折の みが生じた場合の強度分布の変化である。

次に、本研究で評価用試料として用いたアクリル板 とグリセリン水溶液を入れるためのアクリル水槽を図 3 (a) に示す。左側に示すアクリル板は幅 10 mm,高 さ 35 mm,厚さ 2 mm であり、間隔 2 mm で 5 本の V字溝が入っている。各溝の幅は、上下方向に 0 ~ 1.7 mm まで直線的に変化する。この溝の 1 つを横に拡大 した模式図を図 3 (b) に示す。V字溝の傾斜角度 α の 大きさは 45°で一定である。この板を、様々な濃度の グリセリン水溶液で満たした水槽に入れ評価用試料と した。なお、X線の屈折角は 1 µrad 以下であり、隣の 溝の影響は受けない。



図3.本実験に使用した評価用試料

(a) 左は V 字溝が刻まれたアクリル板,右はグリセリン水溶液 を入れるためのアクリル水槽である。(b) は溝の 1 つを横に拡大 した模式図である。

ここで, X線領域における相対屈折率 n は 1 に非常に 近いため, その違いを式(1)に示すδで表現する¹¹⁾。

$$n=1 - \delta \cdots (1)$$

X線の屈折角 $\Delta \theta$ は、この相対屈折率についてのδと 溝の傾斜角αから、式(2)で計算可能である⁹⁾。

$\Delta \theta = \delta \tan \alpha \cdots (2)$

この式から、アクリル板を様々な濃度のグリセリン 水溶液中に入れて δ を変化させることで、 $\Delta \theta$ を任意に 制御可能である。なお、本研究では解釈しやすく、溝 の傾斜角を tan α =1,つまり α =45°とした。ここで、 溝の右斜面と左斜面では X 線が屈折する向きが逆にな る。つまり、屈折像においては、溝の左右斜面間にコ ントラストが生じる。そこで、溝を上下方向に観察し、 コントラストが確認できる最小の横幅をもとめること で、当該屈折角についての分解能を評価可能である。 本実験では、グリセリン水溶液濃度を 0 ~ 0.760 g/ml の間で変化させ、結果を総合的に評価することで、物 体の大きさと屈折角分解能の関係を評価した。

結果

図4に、 θ を変化させながら撮影した 200枚の画像 から得た屈折像の一部を示す。図4(a)は蒸留水、(b) は濃度 0.40 g/ml、(c) は 0.65 g/ml のグリセリン水溶 液を使用した結果であり、溝を 2本ずつ示した。いず れも、 $\Delta \theta$ =-0.2 µrad を黒、+0.2 µrad を白に割りあて た。濃度が高くなるほど、溝部分のコントラストは低 くなり、視認しにくくなった。まず、これらの屈折像 の溝横幅が十分大きな部分に ROI をとり, $\Delta \theta$ を計測し, 水溶液濃度 $c \ge \delta$ の関係をもとめた¹²⁾。その関係を図 5 に示した。図より,本試料では式(2)を通じて,水 とアクリル間の δ に対応する $\Delta \theta = \delta = 0.075[\mu rad]$ より小 さい屈折角についての分解能評価が可能である。なお, 異なる α の溝を刻むことで,評価可能な屈折角の範囲 は変更できる。



図 4. 得られた屈折像の一部 (a) は蒸留水, (b) は濃度 0.40 g/ml, (c) は 0.65 g/ml のグリセ リン水溶液を使用した試料の屈折像である。



図 5. 水溶液濃度 c とδの関係

次に、図4の各像において溝を上下方向に観察し、 画像のウィンドウレベルを如何に変化させても視覚的 にコントラストが判別できなくなる読み取り限界位置 をもとめた。その位置を、図4中に黒矢印で示した。 この位置での溝の横幅が、視認できる物体の大きさの 限界 w_{lin} であると決めた。矢印は、濃度が高い程溝の 幅が広い上方へ移動した。この評価を様々な濃度の水 溶液で行い、まとめた結果を図6に示す。縦軸は各濃 度での $\Delta \theta$ 、横軸は w_{lin} である。図中の破線はアイガ イドである。図から、 $w_{lin} \ge \Delta \theta$ の間には相関がみられ た。



図 6. 得られた分解能曲線

考察

一般にX線の屈折角はエネルギーによって変化す る。また、ロッキングカーブの形状は使用するアナラ イザーの種類により異なる。岡本らが分解能評価に使 用した通常型 DEI 法における X線のエネルギーは 31 keV,アナライザーは Si (440) であり本実験と異なる ため、単純に値を比較することに意味は無い¹⁰⁾。しか し、彼らが示した結果と同様に屈折角分解能と物体の 大きさの間には相関があり、小さな物体を対象とする 程、分解能が低下することが確認できた。

一方で, 岡本らの結果では物体が大きくなると, 屈 折角分解能は一定値に近づく傾向を示したが、我々の 結果ではそのような傾向は得られなかった。彼らが使 用した通常型 DEI 法は、アナライザーを3 つの角度に 調整し撮影を行う。具体的には、ロッキングカーブ最 大値と, その半分の強度を示す高角度側と低角度側で 撮影をする。そして、最大強度と高角側、もしくは低 角側の画像の2枚を利用して屈折像をもとめる。その 際、ビームの発散角の影響により、屈折像の左右でコ ントラストが生じることが分かっている。例えば本実 験装置では、アナライザーへの入射角が、発散角によ り水平方向に 1mm あたり 0.2 μrad ずれていた。この ような現象のため,通常型 DEI 法では大きな物体にな るほど屈折によるコントラストが発散角によるコント ラストの影響を受け、判別しにくくなると考えられる。 両者の分解能曲線の特徴の違いは、このような現象を とらえていると考えられる。

また、本測定に必要とした時間は、通常型 DEI 法に 比べ撮影枚数の多い拡張型 DEI 法を使用したにもかか わらず、合計で1時間程度であり、従来の方法に比べ 評価時間を短縮可能であった。

以上より,本評価方法は従来法に比べて,データの 取得時間が短く,解析の過程が簡単で分かりやすく なったため,それに要する時間も短縮でき,より実用 的な手法であることが確認できた。

謝辞

本研究を行うにあたり,実験技術に対して多大なる ご支援をいただいた高エネルギー加速器研究機構の平

文献

- K M Podurets,V A Somenkov, and S Sh Shilstein (1989) : Refraction-contrast radiography, Sov. Phys. Tech. Phys., 34, 654-657.
- 2) M N Wernick, O Wirjadi, D Chapman, et al. (2004) : Multiple-image radiography, Phys. Med. Biol. 48, 3875-3895.
- 3) Momose A, Yashiro W, Harasse S, et al. (2010) : Four-dimensional x-ray phase tomography with Talbot interferometer and white synchrotron light. SPIE proceedings 7804, 780405.
- 4) A Bravin, P Coan, and P Suortti (2013) : X-ray phase-contrast imaging: from pre-clinical applications towards clinics, Phys. Med. Biol. 58 (1), R1-35.
- 5) F A Vittoria, Gibril K N Kallon Dario Basta, et al. (2015) : Beam tracking approach for single-shot retrieval of absorption, refraction, and dark-field signals with laboratory x-ray sources, Appl. Phys. Lett. 106, 224102-1-5.
- 6) 森浩一, 関根紀夫, 佐藤斉, 他(2002): 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.

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 の承認を得て実施しました(課題番号:2018G055, 2020G060)。また,本研究はJSPS 科研費 JP18K12027 の助成を受けたものです。

- 7) Mizuno K, Fujimori A, Okamoto H, et al. (2017) : Determination of minimum detectable refraction angle in X-ray diffraction-enhanced imaging via standard test piece, Jpn. J. Appl. Phys. 56, 066601-1-4.
- 8)築部卓郎,森田紀代造,金子幸裕,他(2021):位 相差X線CT法を用いた心臓大血管の構造研究, 放射光 34(1),12-29.
- 9) Mizuno K, Okamoto H, Kajiwara K, et al. (2006) : Visualization of Hydride in Titanium and Titanium-Aluminide by Refraction-Enhanced X-ray Imaging Technique, Materials transactions 47 (5), 1299-1302.
- 岡本博之,藤森茜,水野薫,他 (2018):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, Journal of wellness and health care 42 (2), 51-58.
- 第田星志(2011):X線散乱と放射光科学 基礎編, 50-60,東京大学出版会.
- 岡本博之,内藤愛莉奈,水野薫,他(2018):X線 位相イメージング法による漆器の観察, Journal of wellness and health care 43(2), 85-88.