

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

岡本 博之, 藤森 茜*, 国岡 由紀**, 森川 公彦***, 水野 薫***

KEY WORDS

Phase contrast imaging, X-ray DEI method, synchrotron radiation, refraction angle resolution, phantom

はじめに

X線は Wilhelm Conrad Röntgen によって 1895 年に発見後、様々な分野で利用されている。その中で画像を得る主な使用法は、X線の減弱差、すなわち「X線波」の振幅の変化を観察する方法であった。一方で近年、屈折率の異なる物質を透過する際に生じる位相変化を捉える方法の研究が進んでいる¹⁵⁾。代表的な方法として、屈折角の変化を検出し画像化する方法が有る。しかし、X線領域では、物体による屈折角は数 μrad よりも小さく、直接屈折像を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、屈折コントラスト法である。この方法は、軽元素からなるX線の減弱が少ない物質でも検出できることから、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⁾。これらの手法では、いかに小さい屈折角までコントラストを発生させて観察できるかという屈折角に関する分解能が重要となる。にもかかわらず、これらの手法について、撮影条件の変化に伴う分解能の変化を評価した報告はほとんど存在しない。

屈折コントラスト法は、減弱を用いた方法とは撮像原理が異なるため、分解能の評価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、屈折角に関する分解能の評価用試料(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、まず屈折角に関する分解能評価のためのファントムの形状が岡本により提案され、その後 Mizuno らにより理論的裏付けがなされた^{12,13)}。そこで、我々は開発されたファントムを使用して、屈折コントラスト法において重要な光学素子であるアナライザーの設定条件が異なると、屈折角分解能が

どのように変化するかを評価した。なおアナライザーとは、物体によりわずかに生じたX線の屈折に対して、コントラストを発生させて画像化する光学素子の一つであり、高純度のSi結晶から作製される。本研究により、これまで経験的に分解能が良いと思われ使用されてきた設定条件を、客観的に評価することが可能になった。

方法

屈折コントラスト法の中でも、Diffraction Enhanced X-ray Imaging method (DEI法)は屈折角変化の検出能力が比較的高い上に、定量的な解析が行いやすいことが知られている¹⁴⁾。そこで、本研究でも DEI法を用いた。

実験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)のビームライン 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。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 31keV のX線を得た。その後、回折面(440)とした非対称反射 Si 単結晶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、ファントムに照射した。X線がファントムを透過すると、減弱と屈折が生じる。これらの情報を持ったX線を、Si(440)単結晶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。

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線が式(1)で示すようなブラッグ条件を満たす角度 θ_B でアナライザーに入射すると、回折現象が起こる¹⁵⁾。

金沢大学医薬保健研究域保健学系

* つくば国際大学医療保健学部

** 北陸産業活性化センター

*** 鳥根大学総合理工学部

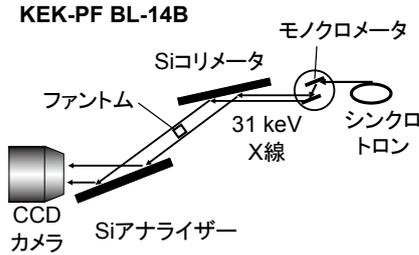


図1. 使用した DEI 法装置の配置

シンクロトロン光源より発生した白色光はモノクロメータで 31keV に単色化され、Si コリメータで幅を広げた上で平行度を増しファントムに照射する。ファントムにより屈折したX線は、アナライザーによって屈折角を強度変化に変換され、CCD カメラで撮影される。

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

そこで、 θ_B 付近でアナライザーを回転させながら回折 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。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 線をアナライザーに照射しつつ鉛直軸で回転した際の、回折 X 線の強度変化を図2に示す。

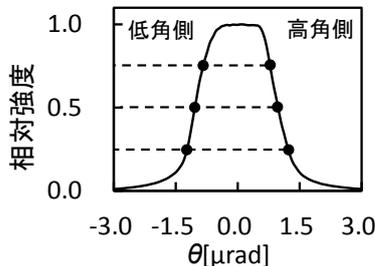


図2. アナライザーのロッキングカーブ

アナライザーの角度を、ブラッグ条件を中心として変化させると、ロッキング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。

横軸はブラッグ条件からの回転角度の変化、縦軸は回折 X 線の相対強度で、曲線はロッキングカーブと呼ばれる。DEI 法では、例えば、回折強度が最大強度の半値になるようにアナライザー角度を調整した後、回折 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し、曲線に沿って回折強度も変化する。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。現実には、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。そこで通常は、高角側と低角側

で得られた像を差分して減弱の影響を低減する。

次に、岡本や Mizuno らにより提案され、本実験で使用したファントムの形状を、図3に示す^{12・13}。X 線は矢

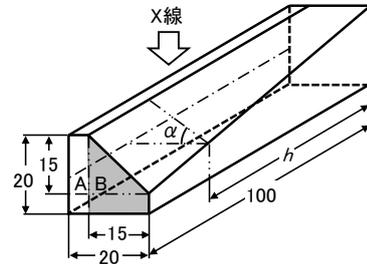


図3. 屈折角分解能評価用ファントム

光学的考察からデザインされたファントムの形状。サイズの単位は mm である。X 線は矢印方向から照射する。平らな A 部分と、傾斜している B 部分からなり、両者の境界では厚さが等しくなっている。B 部分の傾斜角度は 0° から 45° まで連続的に変化している。

印方向から照射する。X 線照射面側の B 部分は傾斜角度 α が 0° から 45° まで連続的に変化している。ファントムは、X 線についての光学的考察を元にデザインされており、B 部分での屈折角の大きさ $|\Delta\theta|$ は $\alpha = 0^\circ$ の位置からの距離 h との間に、

$$|\Delta\theta| = \delta \frac{h}{100} \quad (2)$$

の関係がある。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、式(3)のように屈折率 n を無単位の量である δ により表現することが多い。

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

つまり、DEI 法により平らで屈折が起きない A 部分と屈折が起きる B 部分の境界近傍を撮影し、2つの間にコントラストが判別できる限界の h の値をもとめることで、屈折角に関する分解能を評価できる。なお、実験に使用した 31keV において、ファントムの材質であるアクリルの $\delta = 3.0 \times 10^{-7}$ である¹⁶。また、A、B の境界位置では両者は同じ厚さになるので、AB 間でのコントラストの有無によって分解能を評価するのであれば、減弱の影響を除ける。そのため、本実験では差分処理は行わなかった。

まず、ファントムが無い状態で、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 1/4、2/4、3/4 になるように各々調整した。その後、ファントムを設置し撮影を行った。この際、本実験で使用した CCD カメラの視野は水平方向 8.5mm、鉛直方向 6.4mm であるため、ファントムを 5mm 間隔で鉛

直方向に移動しつつ、20回に分けて撮影を行った。

結果

ファントムのA、B境界近傍を相対強度2/4の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、 $h=0\sim 60\text{mm}$ の範囲を示している。矢印はA、Bの



図4. DEI法によるファントムの像

相対強度2/4の高角側で撮影した、ファントムのA部分とB部分の境界近傍の像。 $h=0\sim 60\text{mm}$ の範囲を示している。矢印はA部分とB部分の境界である。

境界である。 h の値が大きい程、境界部分でのコントラストは高く、小さい程コントラストは低くなっている。

得られた結果から、限界の h の値をもとめるため、次のような判断を行った。まず、境界近傍のA、Bの各部分で h 方向に沿って強度分布をもとめ、それぞれ $I_A(h)$ 、 $I_B(h)$ とする。次に、得られた各 $h-I$ 曲線について、平均値を中心とした分散 V をもとめる。さらに、式(4)に従って、2つの部分の強度差 $\Delta I(h)$ をもとめる。

$$\Delta I(h) = I_A(h) - I_B(h) \quad (4)$$

そして、 h を増したとき初めて式(5)を満足する位置をコントラストが判別できる h の限界値 h_{\min} とした。

$$V < \Delta I(h)^2 \quad (5)$$

得られた h_{\min} の値を式(2)に適用することで、屈折角分解能が得られる。表1に、今回使用した条件について得られた h_{\min} の値と屈折角分解能を示す。得られた分解能の値は、いずれも $0.1\mu\text{rad}$ のオーダーであった。

表1. アナライザーの各回折条件で得られた判別限界値 h_{\min} と屈折角分解能

撮影条件		$h_{\min}[\text{mm}]$	分解能 $[\mu\text{rad}]$
1/4	低角	28	0.75
	高角	28	0.75
2/4	低角	15	0.41
	高角	14	0.38
3/4	低角	28	0.76
	高角	28	0.75

考察

結果より、KEK-PFのビームラインBL-14Bにより31keVでDEI法の実験を行う場合、およそ $0.1\mu\text{rad}$ のオーダーまでの屈折角を検出できることが分かった。また、分解能が最も良いのは低角、高角ともにアナライザーを最大強度の2/4に設定した時であった。X線回折理論によると、理想的なロッキングカーブは最大強度に近いほど傾きの絶対値が増す¹⁷⁾。そのため、最大強度に近い条件ほど屈折角を回折強度の変化に変換する際の効率が良くなり、屈折角分解能は増すと予想される。しかし、得られた結果はこの予想とは異なっていた。これは、現実の実験においては、光源からのX線ビームの振動、コリメーターやアナライザーなどの光学系の揺らぎ等が存在するため、理想的なカーブにならないことが予想される。改めて、図1に示したロッキングカーブを観察すると、最大強度の2/4に比べて最大強度付近での傾きの絶対値は小さくなっている。つまり、DEI法で通常使用されるアナライザーの回折条件である、最大強度の2/4位置付近が最も分解能が良いことが定量的に示された。このことは今回の評価により、初めて確認することができた。さらに、2/4位置に設定した結果において、高角側の分解能が若干良いことが分かった。この結果は、X線回折理論によるロッキングカーブの非対称性から予想される結果と一致している。このことから、前述した、減弱の効果を除くために両者の差分像をとる際には、注意が必要であることが分かった。

謝辞

本研究を行うにあたり、光学系の設置等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)。

文献

- 1) E. Foester, K. Goetz, and P. Zaumseil, Krist: 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, 佐藤齊, 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, 巻潤千穂, 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, 066601-1-4, 2017
- 14) 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
- 15) B. D. Cullity, 松村源太郎(訳): 新版 X 線回折要論, アグネ, pp 98-129, 1961
- 16) Center for X-Ray Optics: Index of Refraction, http://henke.lbl.gov/optical_constants/getdb2.html
- 17) 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 141-178, 2011

**Diffraction condition dependence of refraction angle resolution
in X-ray refraction contrast imaging method**

Hiroyuki Okamoto, Akane Fujimori*, Yuki Kunioka**, Kimihiko Morikawa***, Kaoru Mizuno***