

X線屈折コントラスト法における光学的条件と 屈折角分解能のサイズ効果との関係に関する研究 Relationship between optical conditions and size-effect in resolution of refraction angle for X-ray DEI method

岡本博之^{1,*}, 藤森茜², 水野薫³

¹金沢大学医薬保健研究域 〒920-0942 金沢市小立野 5-11-80

²つくば国際大学医療保健学部 〒300-0051 茨城県土浦市真鍋 6-20-1

³島根大学総合理工学部 〒690-8504 松江市西川津町 1060

Hiroyuki Okamoto^{1,*}, Akane Fujimori², Kaoru Mizuno³

¹Kanazawa University, 5-11-80 Kodatsuno, Kanazawa, 920-0942, Japan

²Tsukuba International University, 6-20-1 Manabe, Tsuchiura, 300-0051, Japan

³Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, 690-8504, Japan

1 はじめに

現在、X線の位相変化を利用したイメージング方法としては、屈折を観測する方法が主流となっている。これらの屈折コントラスト法と呼ばれる手法では、何らかの光学素子を利用して、小さな屈折角をコントラストの変化に変換する。これらの手法については、軽元素からなる吸収が少ない物質でも、位相変化については検出しやすいことから、たとえば生体軟組織等の観察用として医学診断への応用や、軽金属についての物性測定への応用などが試みられている[1,2,3]。しかし、この手法の分解能や、そのサイズに対する依存性の評価、及び評価手法の開発は、あまり行われていない。その原因として、屈折コントラスト法は、従来の吸収コントラスト法とは撮像原理が異なるため、分解能やそのサイズ効果の適切な評価法が異なることが挙げられる。そのような背景から、本研究は、定量的な測定が行いやすい、アナライザ結晶を用いるX線屈折コントラスト法

(Diffraction-Enhanced X-ray Imaging: DEI法)について、コントラストに関する分解能評価方法を開発し、さらには将来の医学診断への応用につなげることを最終目標としている[4]。特に今回の研究では、サイズとコントラストの2因子の分解能評価方法を考案し、光学的な条件の変化が分解能とどのように関係するか評価を行った。このような2因子の分解能は、医療分野では、既存の吸収変化を利用したマンモグラフィや、一般撮影において、読影者が異常を視認できるかどうかの判断に重要な影響を与えるといわれている。今回の実験では、光学的条件として撮影に使用するビーム強度の均一性を選んだ。通常、放射光光源から得られるビーム幅は数mmと狭いため、DEI法の撮影に使用できるように、Si非対称コリメータ結晶を利用して幅を拡大している。このとき、同じコリメータでも使用するエネルギーを変更すると、ビーム幅の拡大率が異なるため、強度分布が変化する。本実験では、それを利用して、2因子

の分解能がどのように変化するか調べた。さらに、今回開発した評価用試料(ファントム)が、そのような変化を検出できる能力を持つかも確認した。

2 実験

DEI法とは、試料において屈折したX線の屈折角の変化を、Siアナライザ結晶のロッキングカーブの傾きを利用し、コントラストの変化に変換する方法である。つまりDEI法では、コントラストに関する分解能とは、どれくらい小さい屈折角まで検出できるかという能力を表している。

例えば、図1に示すような均質で、B部分がくさび型をした物体を考える。この物体の屈折率 $n=1-\delta$ の、X線透過方向への積分値を N とすると、式(1)に示すように、 N をX線透過方向と垂直な方向(図1の x 方向)へ微分した値 dN/dx により屈折角 $\Delta\theta$ が決まる。ここで、 α はくさびの傾斜角である。

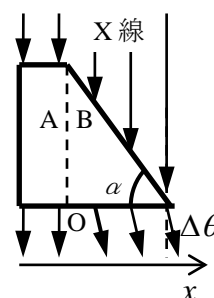


図1：くさび型の物体

$$\frac{dN(x)}{dx} = \delta \tan \alpha = \Delta\theta(x) \quad (1)$$

この物体をDEI法により撮影すると、平坦なA部分と傾斜を持つB部分の境目であるO点でコントラストが生じる。そして、 α を小さくすると、そのコントラストは低くなる。我々はこの原理を元に、以前の課題(2010G140、2012G134)でファントムの開発を行い、幾つかの条件の元で光学系の屈折角に

関する分解能評価を行った[5,6]。本研究ではさらに、サイズと屈折角の2因子の分解能を評価する方法を考案した。

今回使用した方法では、図2のようにシャープなエッジを持つ薄い板を回転させて、角度 β を変化させながら、X線入射方向から、黒いエッジ部分を観察する。すると、観察される屈折像の幅 l が変化するとともに、式(1)における $\Delta\theta$ も変化する。

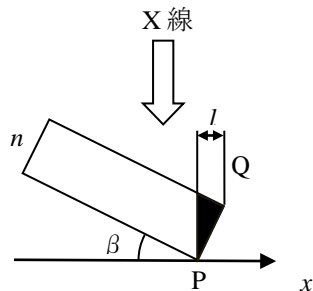


図2：考案したファントムの概略

このとき、板の周りをグリセリン水溶液で満たし、その濃度を変化させる。つまり、様々な相対屈折率 n の状態では β を変化させると、理論上はサイズ l と屈折角 $\Delta\theta$ で表される2次元平面上の全ての条件で、エッジ部分を撮影することが可能である。しかし、現実の撮影画像においては、分解能曲線よりも小さい l と $\Delta\theta$ の値をとる場合、エッジ部分は観察できない。このことから、様々なグリセリン水溶液濃度についてエッジ部が観察できなくなる角度 β を求めれば、得られた結果から総合的に、サイズ効果を考慮した屈折角分解能が得られると考えた。

上記の手法により、PF、BL-14Bで、エネルギー33.0[keV]、34.5[keV]、35.0[keV]を使用して実験を行った。通常、この程度のエネルギー変化では、物質の屈折率の変化は小さいため、屈折角には大きな影響を与えない。一方、実験に使用したSiコリメータ結晶は、(440)面に対し、 10° offでカットされているため、X線のエネルギーを変化することにより、非対象因子 b は大きく変化する。それぞれのX線エネルギーに対して、ビーム幅の拡大率を示す $1/b$ は、15.9、25.1、30.9であり、エネルギーが高い程ビーム幅は広がり、強度分布は均一となる。

それぞれのエネルギーを使用し、グリセリン水溶液中で、2[mm]厚のアクリル板をX線に垂直な $\beta=0$ の状態から 1° ずつ回転させ、エッジ部分と周囲の間にコントラストが観察できなくなる β の限界値を調べた。このとき、観察の限界の判定基準は「エッジ部の両端が見えなくなる角度」とした。

3 結果および考察

まず、エネルギーを変更したとき、Siアナライザ結晶のロッキングカーブを測定した。しかし、エネルギーの変化がわずかなため、顕著な変化は観測できなかった。次に、先に述べた方法により屈折

角分解能のサイズ効果を調べたところ、図3のような結果を得た。

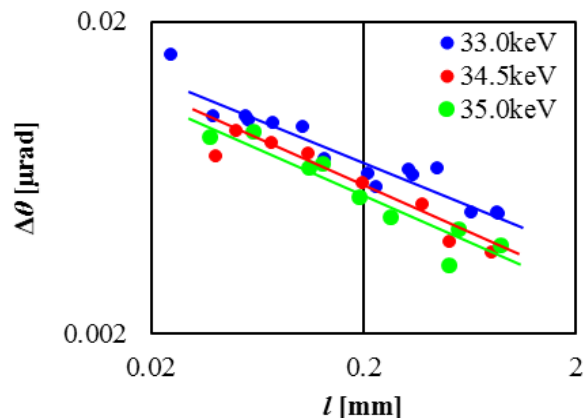


図3：屈折角分解能のサイズ効果

X線エネルギーを33.0~35.0[keV]と増加させていくと、観察限界を表している分解能曲線は順に下がっている。つまり、エネルギーの増加とともに、わずかなエネルギー変化が分解能に与えることが分かった。

4 まとめ

今回、DEI法の光学的な条件により、屈折角分解能のサイズ効果がどのように変化するか調べた。その結果、同じ光学素子を用いた場合には、高エネルギーになる程分解能が良くなることが分かった。これは、コリメータ結晶の非対象因子がエネルギーの増加とともに変化するため、ビーム強度が均一となり、得られるファントムの像が判別しやすくなったためであると考えられる。つまり、DEI法では、わずかなエネルギー変化も分解能に影響を与えることが分かった。また、今回開発したファントムは、このようなわずかな条件の違いに伴う分解能の変化を検出できる、ということも確認できた。

謝辞

この研究に多大な協力をしていただいた、金沢大学の三橋瑛理子氏、望月優菜氏、濱康彦氏、に感謝致します。

参考文献

- [1] J. Davis, D. Gao, TE. Gureyev, et al. : Nature, **373** (1995) 595.
- [2] 安藤正海, 杉山弘: 応用物理 **74**(4), 0446 (2005).
- [3] K. Mizuno, Y. Furuya, K. Hirano, and H. Okamoto, phys. stat. sol. (a) **204**, 2734 (2007).
- [4] E. Foester, K. Goetz and P. Zaumseil, Krist. Tech. **15**, 937 (1989).
- [5] 岡本博之: 医用画像情報学会雑誌 **29**(3), 43 (2012).
- [6] 岡本博之, 水野薫, 森浩一: Photon Factory Activity Report 2011 **29B**, 389-1(2012).

*okamoto@mhs.mp.kanazawa-u.ac.jp