

DEI 法用密度変化分解能評価用ファントムの開発と材質の検討

Evaluation of the quality of the material of the phantom for the DEI methods

岡本博之^{1*}, 水野 薫², 森 浩一³

¹金沢大学医薬保健研究域 〒920-0942 金沢市小立野 5-11-80

²島根大学総合理工学部 〒690-8504 松江市西川津町 1060

³茨城県立医療大学 〒300-0394 茨城県稲敷郡阿見町大字阿見 4669-2

1 はじめに

近年X線により物体を観察する方法として、位相変化を利用する方法が精力的に研究されている。この手法では、軽元素からなる吸収が少ない物質でも位相変化は検出しやすいことから、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]。医療に应用するには、分解能の定量評価は装置性能の変化と患者の経年変化の分離をする、装置の性能を一定の水準に保つ、などから必須の項目と考えられている。しかし、現時点ではこの方法についての分解能定量評価方法は確立されていない。そこで本研究は、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定量評価方法を開発し、さらには将来の医学診断への応用につなげることを目的としている[4]。特に、今回の報告では、既に開発したファントムの材質についての検討を行った。

2 実験

DEI 法とは、試料によるX線の屈折の程度をアナライザ結晶のロッキングカーブを利用し、コントラストの変化に変換する手法である。

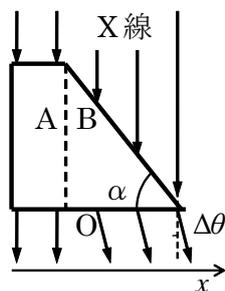


図1：くさび型の物体

例えば、図1に示すくさび状物体の、X線透過方向への試料の屈折率 $n=1-\delta$ の積分値を N とすると、 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 により屈折角が決まる。これを仮に「密度変化」と呼ぶ。この、くさびが均質な材質で出来ているならば、 N は屈折率と厚さの積であるので、X線透過方向への厚さの変化により屈折角

$\Delta\theta$ が決まる。つまり形状を考慮し、くさびの傾斜角 α を使うと、(1)式が得られる。

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

我々はこの関係式を元に、先の課題（2010G140）を利用して図2のような評価用試料（ファントム）を開発した[5]。ファントムはX線に対して傾斜の無いA部分と、端からの距離 h とともに傾斜角 α が変化するB部分からなる。

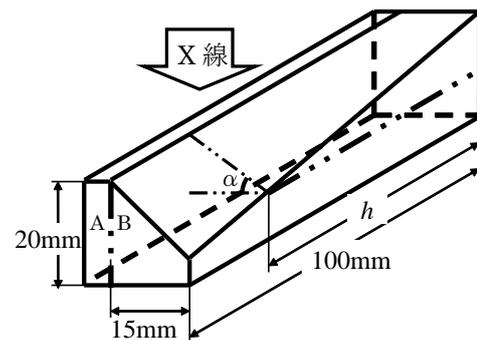


図2：作製したファントムの形状

X線がAを透過しても屈折しないが、Bを透過すると、 α に応じて屈折する。つまり、DEI 法でこのファントムを撮影すると、ABの境界で、コントラストを生じる。このとき、 α が小さいほどコントラストは小さくなり、次第に判別不可能となる。コントラストが判別可能な最小の α の値、つまり h の値を求めることにより、密度変化に関する分解能を得ることが可能となる。ここで、ファントムの形状から分解能と h の関係をもとめると、(2)式のように表せる。

$$\frac{dN(h)}{dx} = \frac{\delta}{100} h \quad (2)$$

我々は今回、ファントム用の材質を検討するため、臨床用ファントムに良く用いられる材質のうち入手しやすいポリプロピレン、アクリル、テフロン、アルミニウム、水等価ファントム用材質タフウォーターの5種類を用いて測定を行った。

実験はKEK-PFのBL-14Bで行った。実験配置の概略を、図3に示す。

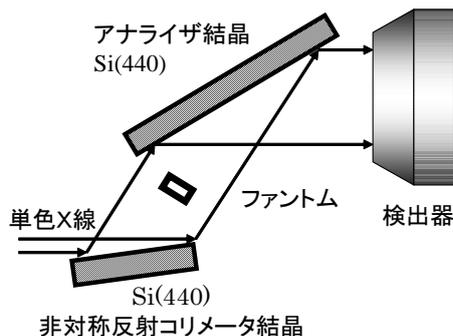


図3：実験に用いた光学系

モノクロメータにより単色化した31keVのX線を、表面が(440)面に対して10°傾いているSi結晶のコリメータにより非対称反射させ、ビーム幅を約9倍広げた。コリメータからのX線はファントムを透過し、わずかに屈折を起こす。この屈折角の変化をアナライザで強度変化に変換しCCDカメラに記録した。このとき、アナライザは強度がロッキングカーブのピーク値の半値になる角度の高角側と低角側の両方に調整し、測定を行った。

3 結果および考察

図4は、アクリル製ファントムについて、 $h=0\sim 45\text{mm}$ の間を撮影して得られた像である。黒矢印がファントムA部分とB部分の境界である。同様の撮影を他の材質についても行った。



図4：アクリルファントムの撮影結果

それぞれの結果について、アナライザの高角側像と低角側像の差分像を取り、 h 方向への強度分布曲線を作製し、AB間のコントラストが判別できる限界の h の値をもとめた。そして、(2)式を用いて分解能 dN/dx の計算を行った。なお、各材質についての δ は h の大きな領域で計測したコントラストから、ロッキングカーブを利用し屈折角 $\Delta\theta$ をもとめ、(1)式を用いて算出した。得られた結果を表1に示す。なお、タフウォーターについては、屈折像を観察することができなかったため、表1には示していない。

表1：得られた分解能

材質	限界 h (mm)	分解能
ポリプロピレン	7.3	1.6×10^{-8}
アクリル	6.3	1.7×10^{-8}
テフロン	4.5	2.0×10^{-8}
アルミニウム	17.0	5.5×10^{-8}

まずタフウォーターについて、測定した全ての h の範囲で屈折像を観察することができなかったのは、

密度調整のため混入されている多くの気泡による屈折が優勢であり、AB境界での屈折像が観察できなかったためと考えられる。つまり、このような材質はファントムに適さないことが分かった。

次に、アクリル、ポリプロピレン、テフロン製のファントムを用いて得られた密度変化分解能は、同様の値を示しており、結果に再現性がみられた。このことから、このファントムの形状は分解能を正しく評価するために適切だと考えられる。しかし、アルミニウムで作製したファントムについては、他より低い分解能を示した。

この原因を考察するため、各ファントムの材質の吸収係数 μ と分解能の関係を調べた (図5)。

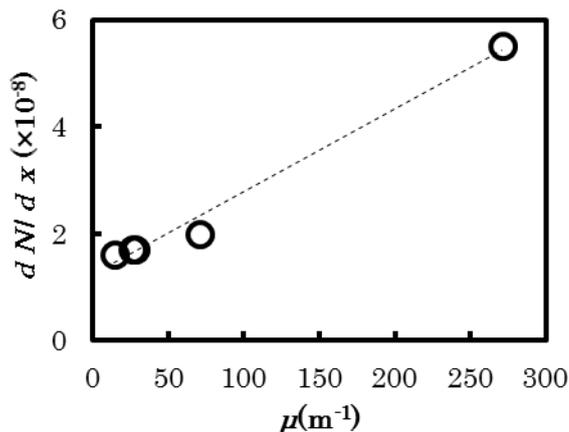


図5：各ファントムで得られた分解能と吸収係数

図5より、吸収係数と分解能の間には、相関がみられることが分かった。これはアルミニウムのように吸収係数が大きい材質では撮影時間が長くなるために、アナライザや光学系の設定条件がずれてくることが一因と考えられる。また、本実験で使用したX線のエネルギーは31keVであるが、ビーム中にはモノクロメータで単色化する際に、わずかながら高調波である62keVのエネルギーのX線も含まれる。そのため、吸収の大きい材質では特に高エネルギーの62keVのX線が強調され、分解能を低下させた可能性も考えられる。このことから、吸収による影響を極力除いた密度変化分解能を得るために適切なファントム材料としては、今回用いた材質の中では、最も吸収が少ない、ポリプロピレンが適切であると考えられる。

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