

Development of X-ray energy filter using total reflection

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/43086

全反射を利用したX線エネルギーフィルターの開発

岡本 博之, 濱 康彦*, 国岡 由紀**, 森川 公彦***, 水野 薫***

要 旨

CT スキャンにおいて、最も一般的なアーティファクトとして beam hardening があげられる。これは、観察した物体の中央に比べ、周辺部が明るく表示される現象である。低エネルギーの X 線は高エネルギーの X 線に比べると、試料中でより減弱が起るため、平均の X 線エネルギーは増加する。このような理由によって、白色 X 線を用いた CT は定量性が低いといわれている。この現象は、単色 X 線を使用することで解決できる。そこでこの問題を解決するため、全反射現象を利用して、X 線のエネルギー値を任意に設定できるフィルターを開発した。

実験は高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 (KEK-PF) BL-14B と 20B で行った。X 線のエネルギーはビームラインに設置されたダブルクリスタルモノクロメータにより、10 ~ 24[keV] に調整した。ハイパスフィルターとしてポリプロピレン板を、ローパスフィルターとしてガラス板を、それぞれ使用した。フィルター板の設定角度を変えることで、反射率は変化した。フィルターからの X 線の強度分布は、X 線エネルギーとフィルター板の角度を調整することにより、変化した。

結果を説明するため、板の表面が完全な平面であると仮定しシミュレーションを行ったところ、実験結果と一致しなかった。そこで板表面の粗さを考慮して再度シミュレーションを行ったところ、実験結果とよく一致した。このことから、今回開発したフィルターにおいては、板の粗さが強度分布を決める重要な因子であることが分かった。

KEY WORDS

X-ray filter, reflectivity, total reflection, synchrotron radiation

はじめに

1972年に Godfrey Newbold Hounsfield らにより X 線 CT が開発され、改良が繰り返されてきた¹⁾。しかし、現在でも、一般の白色 X 線を用いた CT では beam hardening 等によるアーティファクトが生じるため、定量性が低いといわれている。beam hardening とは均質な物質であっても、観察した物体の中央に比べ、周辺部が明るく表示される現象である。この現象は、低エネルギーの X 線が高エネルギーの X 線よりも減弱しやすいため、平均の X 線エネルギーが増加し、線質が「硬く」なることに起因する^{2,3)}。この問題は、X 線を単色化することにより防ぐことが出来る^{4,5)}。そこで一般の CT では、X 線の余分なエネルギーを除くため、適当な金属フィルターが複数枚使用されている^{2,3)}。しかしながら、この手法は低エネルギーや吸収端直上のエネルギーの X 線を除くことは出来ても、高エネルギー X 線のすべてを除くことはできな

い。そのうえ、任意のエネルギー値の X 線を任意のエネルギー幅で取り出す、といった柔軟な利用法は、もちろん困難である。また、より厳密に単一エネルギーを取り出すには、Si 等の単結晶による回折現象を利用する方法が有る^{6,7)}。しかしながら、この手法は厳密に単色化を行うため X 線強度が弱くなりすぎるといった欠点があり、実用的とは言えない。一方、放射光を利用した実験において高エネルギー X 線を除去するために、X 線反射鏡 (ミラー) がしばしば使用される。ミラーは表面を極めて滑らかに研磨したガラス等の板である。さらに表面に金属の薄膜がコーティングされている物もある⁸⁾。このような板の全反射臨界角はエネルギーに依存することが知られており、エネルギーフィルターの役割を果たすことが出来る。

そこで今回、全反射現象を利用することにより、X 線の回折を利用する方法ほど厳密な単色化では無く、X 線

金沢大学医薬保健研究域保健学系

* 金沢大学医薬保健学域保健学類

** 北陸産業活性化センター

*** 鳥根大学総合理工学研究科

エネルギー値、および、エネルギー幅を任意に設定できるフィルターの開発を試みた。

方法

今回開発したフィルターは、高エネルギーX線をカットするためのローパスフィルターと低エネルギーX線をカットするためのハイパスフィルターの対からなる。いずれのフィルターも、全反射現象を利用している。

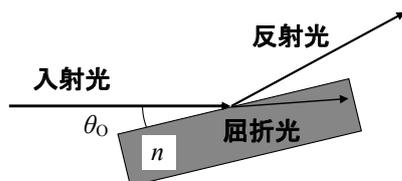


図1. 平板表面での入射光と反射光、屈折光
平板表面への入射光の一部は反射し、一部は板内部へ屈折光として侵入する。このとき、反射率は屈折率 n により決まる。

まず図1のように、表面を精密な平面に研磨した、均一な材質から成る板に対し、視斜角 θ_0 で細いビーム幅のX線を入射する。入射位置は、板の中心であるとする。X線は可視光と同様に電磁波の一種であるので、入射光は表面での反射光と、板内部に侵入していく屈折光とに分かれる。このとき、入射光強度 I_0 と反射光強度 I_r の比

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (1)$$

は反射率として定義されている⁶⁾。つまり、板に入射した光の内 RI_0 だけが反射していく。またこの反射率は、X線が物質へ入射する際の視斜角 θ_0 を小さくするとともに増加し、全反射の臨界角に相当する角度 θ_c で急激に1に近づく。X線に対してこの臨界角は、スネルの法則により

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} \quad (2)$$

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

と書ける。ここで、 n は板の材質についての屈折率の複素表現である。実部は屈折の効果、虚部は減弱の効果を表している。X線については n が1に近いので、1からのズレを δ と β より式(3)のように表記する。また、エネルギーがX線吸収端から離れているならば、

$$\delta = \frac{\lambda^2 r_e N}{2\pi} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\lambda}{4\pi} \mu \quad (5)$$

と書ける⁶⁾。ここで、 λ はX線の波長、 r_e は古典電子半径、 N は単位体積中の電子数、 μ は線減弱係数である。さらに、 λ とエネルギー E の間には、良く知られている

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (6)$$

なる関係が有る。ここで、 h はプランク定数、 c は光速である。つまり、物質ごとに N は異なるので、物質の種類とX線エネルギーにより δ と β は変化する。従って、それに伴い θ_c も変化する。さらに光学的な考察より、均一な物質からなり、理想的に平滑な鏡面を持つ板へ、視斜角 θ_0 でX線が入射した際の反射率 $R(\theta_0)$ は

$$R(\theta_0) = \frac{h - \sqrt{2h - 2(\theta_0/\theta_c)}}{h + \sqrt{2h - 2(\theta_0/\theta_c)}} \quad (7)$$

と書ける。ここで、

$$h = \left(\frac{\theta_0}{\theta_c}\right)^2 + \left[\left\{ \left(\frac{\theta_0}{\theta_c}\right)^2 - 1 \right\}^2 + \left(\frac{\beta}{\delta}\right)^2 \right] \quad (8)$$

である。つまり、反射率は視斜角 θ_0 、物質の種類、X線エネルギー(すなわち波長)によって変化する。物質表面に入射したX線は、この反射率に従って反射が生じるとともに、一部は物質の内部にも侵入していく。物質内部に侵入したX線は深さ方向に、線減弱係数 μ で決められる距離で減衰していく。ただし、現実の板においては完全に平滑な面を作ることは困難であり、ある程度の面の粗さが存在する。そのため、反射率は粗さの影響を受けて変化する事が知られている⁹⁾。

一般の物質について、臨界角は0.1[deg]のオーダーであり、それ以下の視斜角でX線を入射すると全反射が生じる。このように、全反射が生じる視斜角は小さいため、この現象を利用するには、角度を精密に調整することが重要である。また、臨界角の式(2)、(4)から長波長側、つまり低エネルギーで全反射が生じやすいことが分かる。この反射率のエネルギー依存性を利用することにより、エネルギーフィルターを作製することができる。ただし高エネルギーのX線を取り出すためのハイパスフィルターとして使用する際には、図1の板の内部に侵入する屈折光を利用するため、できるだけ減弱の小さい材質を使用する必要がある。そこで、今回の実験ではローパスフィルターの材質としてはガラス(SiO_2)を用いたが、ハイパスフィルターの材質としては減弱の小さいポリプロピレン(C_3H_6)を使用した。

上に述べたような原理に基づき、フィルターを作製する。そのため、まず反射光と透過光の強度計算を行う。反射率 R は前節で述べたように、視斜角とX線エネルギー

によって変化する。つまり、屈折率が分かっている物質についての R は、 θ_0 と E の関数として、 $R=R(\theta_0, E)$ と表せる。また、板の材質のX線減弱率を μ とすると、この値もエネルギーの関数であるので、 $\mu=\mu(E)$ と表せる。

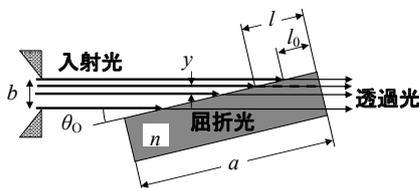


図2. 平板での屈折光と透過光

幅のある入射光は、板表面への入射位置が異なることにより、板中での透過距離も異なる。そのため、透過光の強度をもとめるには、ビーム全体に渡っての平均が必要である。分かりやすくするため、反射光は省略している。

まず、図2に示すように、表面を精密に平面研磨した厚さ d 、長さ a の平板に、視斜角 θ_0 でビーム幅 b の平行X線を入射する。図では分かりやすく反射光を省略してある。板に侵入した屈折光は板内部で減弱した後、板外部へ出ていく。ただし、X線の場合、屈折光の角度変化は臨界角付近であっても0.1[deg]以下であるので、ここでは屈折光および透過光は入射光と同じ方向に進むと考える。板に屈折光として侵入したX線は減弱し、透過光として外部に出る。このとき、ビーム幅 b が十分狭いならば、透過距離を x として、透過光強度は式(1)を用いて式(9)で表せる。

$$I_T = (1 - RI_0)e^{-\mu x} \quad (9)$$

しかしながら、実際にはビーム幅 b は有限である。また、透過距離 x はX線の入射位置によって異なる。そこで、この距離 x が入射位置によりどのように変化するかを計算する。図2に示すように、板へ入射したX線の内、中央から高さ y の位置に入射した光を考える。まず、板の端からの距離 l については

$$l_0 = \frac{1}{2} \left(a - \frac{b}{\sin \theta_0} \right) \quad (10)$$

であるので、

$$l = \frac{1}{2} \left(a - \frac{y}{\sin \theta_0} \right) \quad (11)$$

となる。このことから、透過距離 x は式(13)のように書ける。

$$x = \frac{l}{\cos \theta_0} = \frac{1}{2 \cos \theta_0} \left(a - \frac{y}{\sin \theta_0} \right) \quad (12)$$

ここで全反射が生じる角度は0.1[deg]のオーダーであるので、 θ をラジアン単位で表すならば $\cos \theta \approx 1$ 、 $\sin \theta \approx \theta$ なる近似が使える。そこで、式(12)は

$$x = \frac{1}{2} \left(a - \frac{y}{\theta_0} \right) \quad (13)$$

と変形できる。これから、板に侵入するX線の、ビーム幅 b の内の微小幅 dy に対しての強度 dI_T をもとめると、式(14)のようになる。

$$dI_T = (1 - RI_0)e^{-\mu \frac{1}{2} \left(a - \frac{y}{\theta_0} \right)} \frac{dy}{b} \quad (14)$$

この結果から、ビーム幅 b 全体に渡っての強度をもとめると、式(15)のようになる。

$$I_T = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} dI_T = \frac{2\theta_0(1 - RI_0)}{\mu b} e^{-\mu \frac{a}{2}} \left(e^{\frac{\mu b}{4\theta_0}} - e^{-\frac{\mu b}{4\theta_0}} \right) \quad (15)$$

つまり、式(1)と式(7)、(15)を原理式として使用し、フィルターを設計すれば良い。

結果

実験は、高エネルギー加速器研究機構、フォトンファクトリー、BL-14Bおよび20Bで行った。実験配置の概略を図3に示す。使用したX線は、エネルギー10~24[keV]

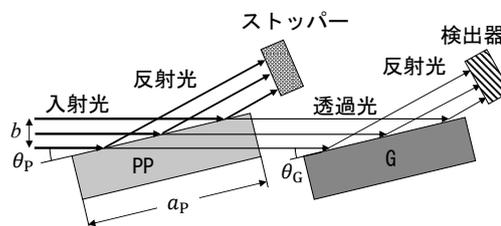


図3. ポリプロピレン板 (PP) とガラス板 (G) を用いたエネルギーフィルター

θ_p と θ_g はポリプロピレン板とガラス板へX線が入射する際の視斜角、 a_p はポリプロピレン板のサイズである。

の単色X線である。一般に使用されるCTの実効エネルギーは約50~70[keV]であるが、今回使用したビームラインにおける単色化分光器は、30[keV]未満にしか対応できないため、このエネルギー範囲でのみ評価を行った。検出器としてはPINダイオードを用いた。ポリプロピレン板からの反射光をカットするためのストッパーとして、3[mm]厚の鉛板を用いた。ハイパスフィルターとしては表面を樹脂用研磨剤にて精密に研磨した40×40[mm²]のポリプロピレン板を、ローパスフィルターとしては、表面が超精密研磨された100×100[mm²]の光学実験用ガラス板(シグマ光機製)を使用した。なお、ガラ

ス板の表面の荒さは規格表により80[nm]以下であるが、自作ポリプロピレン板表面は光沢の程度からガラス板より荒いと思われる。また、ビームの上下幅を絞るためのスリットはタンゲステン製で、スリット幅 $b=10[\mu\text{m}]$ である。測定装置は、振動による角度精度の悪化を防ぐため、質量約100[kg]の安定した鉄制定盤の上に設置した。併せて、測定の間は装置の駆動部分を止めた。

まず、スリットでビームをしぼった後、視斜角 θ_p に調整されたポリプロピレン (PP) 板の中央にX線を照射する。そして、CCDカメラで透過光と反射光のみが同時に観察できることを確認した。ポリプロピレン板表面で反射光と透過光に分かれたX線の内、反射光のみをCCDカメラで確認しつつ、ストッパーによりカットする。次に、ポリプロピレン板に侵入し、透過したX線を視斜角 θ_G に調整されたガラス (G) 板の中央に照射する。そして、CCDカメラで反射光のみが観察できることを確認した後、反射光の強度を検出器により検出する。使用したポリプロピレン板とガラス板はともに、 $0.0001[\text{deg}]$ の精度で角度が調整できる角度調整器に設置されている。方法で述べたように、式(1)、(7)、(15)の原理式から、フィルター板の設置条件を変更すると、最終的に検出器で検出されるX線強度のエネルギー分布が変化すると予想される。そこで、この装置を用いて、表1の3つの設置条件でエネルギーを変化させながら、検出器で強度を測定した。なお、今回使用したX線は単色光であり、照射による熱負荷の影響は小さく、フィルター板の変形ほとんど無視できるとと思われる。

表1 フィルター板の設置条件

条件	PP板視斜角 θ_p [deg]	ガラス板視斜角 θ_G [deg]
1	0.0760	0.0810
2	0.0480	0.0810
3	0.0480	0.0710

実験で得られた、X線エネルギーと2枚の板から成る合成フィルターを通過して検出器で検出されたX線の相対強度の関係を図4に示す。相対強度は、ガラス板で反射したX線の強度を入射X線の強度で規格化してもとめた。

フィルター板の設置条件により、検出されたX線の強度分布は異なっていた。まず、設置条件1では、高エネルギー側、低エネルギー側ともに強度が減少しており、およそ10~21[keV]のエネルギー範囲のX線を取り出すことができた。次に設置条件2では、ポリプロピレン板の視斜角0.0760[deg]を0.0480[deg]からに変化させた。すると、分布の低エネルギー側が狭くなり13~21[keV]のX線を取り出すことができた。さらに設置条件3では、ガラ

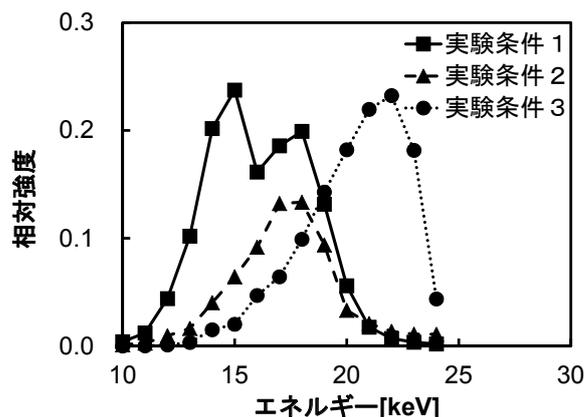


図4. 各実験条件でのX線強度分布
合成フィルターを通過して検出器で検出されたX線の相対強度のエネルギー分布は、フィルター板の設置条件ごとに異なっていた。

ス板の視斜角を0.0810[deg]から0.0710[deg]に変化させた。すると、分布が高エネルギー側へ広がり13~24[keV]のX線を取り出すことができた。このことから、2つの板の視斜角を適切に調整することにより、高エネルギー側、低エネルギー側ともに、フィルターのしきい値を変化させることが可能であることが分かった。

考察

得られた結果が、先に述べた原理式である式(1)と式(7)、(15)により説明できることを示すため、コンピュータ・シミュレーションを行った。各シミュレーションに共通の条件として $b=10[\mu\text{m}]$ 、 $a_p=40[\text{mm}]$ を用いた。また、各板の視斜角としては表1に示した値を用いた。実際の板表面は有限の荒さを持っているが、まず、完全な平面であるとしてシミュレーションを行った。実際の板表面での反射率 R と線減弱率 μ の計算は、Lawrence Berkeley National Laboratory'sにより提供されている計

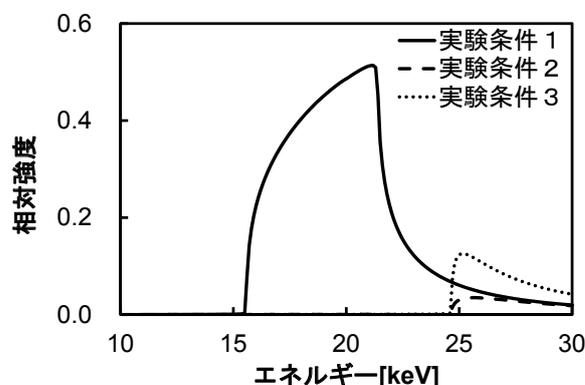


図5. 板が完全平面と仮定したシミュレーション結果
2枚のフィルター板の表面が完全平面であると仮定してシミュレーションを行った、X線相対強度のエネルギー分布。

算システムを利用した¹⁰⁾。シミュレーションにより得られた強度分布の結果を図5に示す。シミュレーションの結果と実験結果の図4を比較すると、特に実験条件2と3において強度分布が異なっていることが分かった。この原因の一つとして、フィルターとして使用した板表面の荒さが考えられる。

通常、板表面の荒さを表す因子 σ は、単位面積当たりの高さ変化の平均二乗値として定義される。つまり、 xy 平面上で z 方向への粗さを考えるならば σ は、

$$\sigma^2 = \frac{\iint \{\Delta z(x, y)\}^2 dx dy}{\iint dx dy} \quad (16)$$

と書ける。このような表面の荒さを考慮した場合、反射率はNevot-Croce因子を乗じなければならない¹¹⁾。そこで、このことを考慮して再度シミュレーションを行った。各板について σ の値を変化させ、実験結果に最も近い強度分布となる値をもとめた。それらの値は、ポリプロピレン板について300[nm]、ガラス板について60[nm]であった。得られたシミュレーションの結果を図6に示す。シ

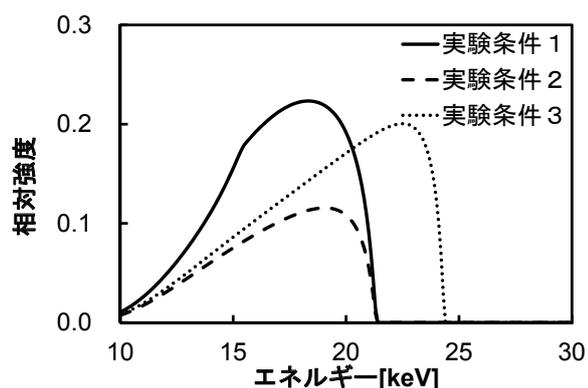


図6. 板表面の荒さを考慮したシミュレーション結果
2枚のフィルター板の表面が粗さを持つと仮定してシミュレーションを行った、X線相対強度のエネルギー分布。最も実験結果に近い粗さを仮定したときのシミュレーション結果を示す。

ミュレーションの結果と実験結果の図4を比較すると、強度分布の形状が良く一致していることが分かった。

今回のフィルター板の設置条件では、得られるX線の相対強度は大きくても0.25程度であった。この、相対強度はエネルギー幅を広げることにより増すことができる。また、図4と5に示したシミュレーション結果を比較し、フィルター板の面精度を上げることも、相対強度を上げる方法の一つと考えられる。

このシミュレーションにより、今回開発した手法をフィルターとして使用するためには、以下のことが重要であると考えられる。

- ①エネルギーの幅を1[keV]の精度で決めようとする際には、板の角度調整に、少なくとも0.001[deg]の精度が必要である。
- ②低エネルギーX線をカットするためのフィルター板は、できるだけ減弱が少なく、かつ精密な平板を保つため、変形が生じない材質が適当である。
- ③フィルターに使用する板は表面ができるだけ滑らかで、真の平面に近い物が良い。また、予め板表面の粗さを評価しておくことが重要である。

上記①で述べたように、仮に今後、開発したフィルターをCTに応用する際には、フィルター板の角度精度を保つための方策として、ステップ回転等の方法を使用し振動を減じる対策が必要になると思われる。また、②で述べたように力学的な変形を防ぐことは重要であるが、さらに、白色光を使用する場合には、熱負荷によるフィルター板の変形を防ぐことも重要である。そのため応用にあたっては、余分なエネルギーのX線を除くため、フィルター板上流に金属フィルターなどの付加フィルターを併用する方法が考えられる。さらに、急な室温変動による板の変形を防ぐため、フィルター部分を恒温状態に管理することも重要と考える。

一般のCTで使用されている50~70[keV]のX線を利用した場合でも、原理式(1)、(7)、(15)から得られる予測としては、同様な結果が得られると思われる。しかし、高エネルギーになるほど、全反射の臨界角が小さくなるため、①で述べたフィルター板の角度調整の精度がより必要になると思われる。また、③で述べた面の荒さの影響がより利いてくるため、荒さ因子を事前に、より厳密に評価する必要が有るとと思われる。

今回開発したフィルターから得られるビームはライン状である。そのため、一般撮影のような2次元像を得る目的で使用することはできない。しかし、線源と微小な検出器が直線的に対向しているようなCTに対しては、十分応用が可能と思われる。また、全反射によるビームの進行方向もほとんど変化が無いので、CT装置の形状を大きく変化させる必要も無いと思われる。

以上の事より、全反射が起こる角度付近で2枚の板を適切な視斜角に設置することにより、任意のエネルギー範囲のX線を取り出すことができ、フィルターとして使用できる可能性が示された。

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、杉山弘氏に謹んで感謝の意を表します。

文 献

- 1) Hounsfield, G. N.: Computerized transverse axial scanning (tomography): Part1. Description of system. Brit. J. Radiol., 46, 1016-1022, 1973.
- 2) 山口功, 市川勝弘, 辻岡勝美, 宮下宗治: CT撮影技術学, オーム社, pp 25-28, 2013.
- 3) 辻岡勝美: X線CT装置の機械工学(6), 日本放射線技術学会誌, 58(7), 904-908, 2002.
- 4) 安岡則武, 木原裕: 夢の光—放射光が開く生命の神秘, 共立出版, pp118-127, 2000.
- 5) 武田徹, 板井悠二, 兵藤一行, 赤塚孝雄: 日本における放射光の医学応用, 放射光, 11(2), 44-50, 1998.
- 6) 菊田星志: X線回折・散乱技術 上, 東京大学出版会, pp 35-75, 1992.
- 7) B. D. Cullity, 松村源太郎(訳): 新版X線回折要論, アグネ, pp 98-129, 1961.
- 8) 石川哲也, 矢橋牧名, スポロフ アレクセイ, 山内和人, 等: コヒーレント照射でのX線全反射ミラー, 放射光, 15(5), 30-36, 2002.
- 9) 櫻井健次: X線反射率測定法入門, 講談社, pp 1-48, 2009.
- 10) Lawrence Berkeley National Laboratory's: The Center for X-Ray Optics, <http://www.cxro.lbl.gov/>
- 11) L.Nevot and P.Croce: Caractérisation des surfaces par réflexion rasante de rayons X. Application à l'étude du polissage de quelques verres silicates, Rev.Phys.Appl., 15(3), 761-779, 1980.

Development of X-ray energy filter using total reflection

Hiroyuki Okamoto, Yasuhiko Hama*, Yuki Kunioka**, Kimihiko Morikawa***, Kaoru Mizuno***

Abstract

Beam hardening is a common artifact in computed tomography (CT). That is, sharply enhanced contour images of a sample are obtained in contrast with images of the central region. As low-energy X-rays are remarkably attenuated in the sample compared to high-energy X-rays, the average energy of X-ray transmission increases. Therefore, it is difficult to quantize the CT image with white X-rays. To resolve this problem, we designed a new type of filter that can tune any X-ray energy using the total X-ray reflection.

The present investigations were performed in the X-ray diffraction station BL-14B and 20B at the Photon Factory (PF) in the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) in Tsukuba, Japan. The X-ray energy used was tuned to 10–24 [keV] with a double crystal monochromator in the beamline. A polypropylene plate and a glass plate are used as high-pass and low-pass filters, respectively. Reflectivity is changed according to the angle of the filter plates. The intensity distribution of X-rays from the filter was varied with the X-ray energy and setting angle.

We simulated the X-ray intensity distribution under the assumption of a completely flat filter plate. However, simulation results did not agree with those of experiments. Therefore, plate roughness was introduced in the previous simulation. The results showed close agreement with the experimental results. It was confirmed that the plate roughness is an important factor for determining the X-ray intensity distribution from the filter.