

【助成 41-06】

がんを早期発見するための高コントラスト・マンモグラフィ装置の開発

研究者 東海国立大学機構名古屋大学大学院医学系研究科 准教授 砂口 尚輝

〔研究の概要〕

今日、医療で利用されている X 線撮影装置は、X 線と物体の吸収による相互作用に基づいた画像を生成しており、空気から骨まで幅広く描出できる。一方で、生体軟組織内の X 線吸収差が小さい構造の描出には不向きであった。これに対して、X 線と物体の位相シフトによる相互作用に基づく屈折コントラスト撮影法は、H・O・C のような低原子番号の元素に対して感度が高く、乳腺のように軽元素で構成される生体軟組織に高いコントラストを生成できる。しかし、この手法は入射 X 線として高輝度で指向性の高い単色 X 線を必要とするため、シンクロtron施設から得られる放射光 X 線が必須であった。本研究では、屈折コントラスト撮影法の臨床応用のために、まず小型の X 線管球から高輝度な単色 X 線を得る手法を開発する。また開発した装置を用いて、単色 X 線視野、エネルギー分解能、強度等を評価した。

〔研究経過および成果〕

連続的なエネルギースペクトルを持つ X 線からある特定の単色 X 線エネルギーを取り出すために、Si 単結晶を用いた X 線回折が利用される。放射光のような指向性の高い X 線を結晶で回折させた場合、ブラッグ条件 $2d \sin \theta_B = \lambda$ (θ_B :ブラッグ角、 d :原子面間隔、 λ :X 線の波長)に従って高輝度な単色 X 線を生成できる。一般的な X 線管球から発生した X 線も同様に結晶で回折できるが、管球から発生した X 線は空間的に発散しているため、結晶表面へ様々な方向からの X 線が入射する。その結果、連続 X 線に含まれる各 X 線エネルギーが各ブラッグ角の方向に回折することになり、均一な単色 X 線の視野が得られない。また、回折強度も非常に弱い。

管球 X 線から一様な単色 X 線エネルギーを持った視野を生成する方式が 1997 年 Zhong らによって提案されている(Z. Zhong et al, NIMA 399, 489-498, 1997)。この方式は、薄い Laue 型 Si 単結晶を次式の曲率半

径になるように湾曲させて光源の前に設置することで、放射状に広がった管球 X 線を同じブラッグ角で結晶に入射させることができる。

$$r(\theta) = R \exp(-\tan(\theta_B) \theta)$$

ここで、 R は光源と結晶中心までの距離、 θ は X 線の伝搬方向を表す。Zhong らはこの形状に結晶を湾曲するために独自の湾曲デバイスを開発し、10cm程度の視野を持った単色 X 線を得ることに成功している。しかし、Zhong らの方式は、焦点サイズが大きい光源を利用しているため、回折 X 線のエネルギーバンド幅 ($\Delta E/E$)が 2%程度と大きい。屈折コントラスト撮影法ではこれよりも一桁以上狭いバンド幅の入射 X 線を必要とする。また、500 μm 程度の厚い結晶を対象としており X 線吸収による強度ロスが大きい。

我々は、マイクロフォーカス X 線光源、厚さ 60 μm の Laue 型 Si 単結晶、新たな結晶湾曲デバイスを用いて、屈折コントラスト撮影法に利用できる単色 X 線生成装置を開発した。これにより、エネルギーバンド幅を1桁

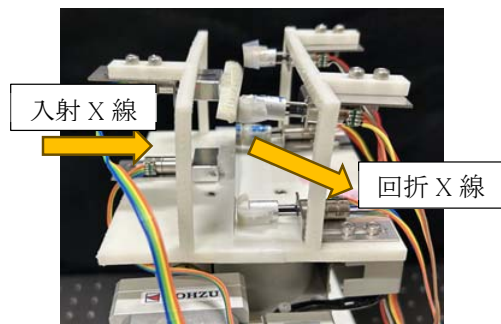


図 1 結晶湾曲デバイス

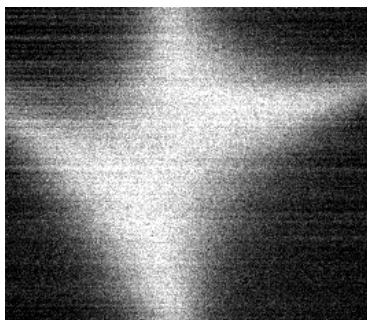


図 2 単色 X 線視野の撮影像

程度狭くでき、X 線強度ロスを低減できる。しかし、同時に、回折が生じる入射角の許容範囲が狭くなり、結晶に歪が生じやすくなるため、結晶の湾曲形状を Zhong らの方式より高精度に調整する必要がある。図 1 は今回試作した結晶湾曲デバイスの写真である。3D プリンタで出力した治具に、6 個のマイクロアクチュエータが設置されており、アクチュエータ先端のアタッチメントにより結晶を押すことができる。Zhong らの方式との違いは、彼らは棒を押し付けて面で結晶を変形させるのに対し、本方式は点で変形する点である。これにより、薄い結晶で生じた局所的な歪みを複数のアクチュエータで分散して解消できる。

図 2 は本方式で湾曲した結晶から回折した単色 X 線視野を X 線カメラで撮影した画像である。単色 X 線エネルギーはモリブデン(Mo)ターゲットの $K\alpha_1$ の 17.479 keV である。X 線カメラの視野、画素サイズ、量子化ビット数、露光時間はそれぞれ $14.6 \times 12.7 \text{ mm}^2$ 、55 μm 、12bit、4 s である。画素値は回折強度を表しており、ひし形状に回折していることが分かる。画像中

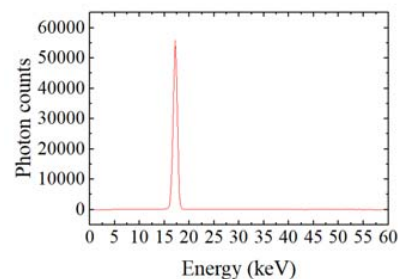


図 3 回折像のエネルギープロファイル

心部における画素値の平均値、標準偏差、変動係数は、それぞれ 406、43、10.6%である。この変動の主要因は X 線の量子ノイズであり、光源の出力や露光時間に依存する。目標は均一な視野の生成であるが、図 2 のように 4 隅が欠けていることから完全な結晶形状の調整には現在至っていない。現在の結晶湾曲デバイスは X 線が入射する結晶前面に上下 2 点、結晶背面で上下左右 4 点のマイクロアクチュエータにより結晶形状を制御しているが、今後背面にアクチュエータを複数台追加して改善したいと考えている。

図 3 は X 線視野内に CdTe 半導体検出器(開口部直径 1.6mm)を設置して 200 s 間光子測定したエネルギープロファイルである。このグラフからピークが 17.5 keV 近辺に存在していることが分かる。CdTe 半導体検出器のエネルギー分解能は約 $3\%(\Delta E/E)$ であるため、曲線の半値幅は実際よりも大きくなっている。そのため、 $\text{MoK}\alpha_1$ と $\text{MoK}\alpha_2$ の分別がつかないが、画像の視野外に強度が半分の $\text{MoK}\alpha_2$ と推測される X 線視野が存在することがわかっており、今回の撮影像は、 $\text{MoK}\alpha_1$ のエネルギーが回折して得られたものだと考えられる。

今後は、結晶湾曲デバイスの改良による視野の拡大を進めた後、屈折コントラスト撮影システムを開発する。同時に、マイクロフォーカス X 線光源よりも高輝度な流体金属ターゲットを用いる X 線光源の利用についても検討し、応用を進めたい。