

マンモグラフィで使用しているX線について知ろう！

ーX線スペクトルについて知ろうー

小国町立病院 医療技術部 放射線科 ○今野 祐治(Konno Yuji)

【はじめに】

X線スペクトルはX線のエネルギー（光子エネルギー）に対するX線強度（光子数）をとったもので、X線エネルギースペクトルとも呼ばれる。測定はX線管から放射され検出器に飛び込んでくるX線光子が、どのようなエネルギーの光子が何個あるかという頻度分布で求められる。X線スペクトルは線質を表しており、画像のコントラストや被ばくについて関連があるが、自施設での測定がまだ一般的でないことから理解を深めることが難しいのが現状である。そこで、本稿ではX線の発生原理や撮影条件等の変化がX線スペクトルにどう影響するかなどについて振り返っていきたい。

【ターゲットがX線スペクトルに与える影響】

・X線の発生

X線管からX線が発生する過程の模式図をFig.1に示す。X線管は陰極と陽極が封入されているガラス製の真空管であり、それぞれの先端にはフィラメントとターゲットが内蔵されている。フィラメントから発生した熱電子が、陽極と陰極の間に加えられた高電圧で加速されターゲットに衝突すると、熱電子が持っているエネルギーの一部がX線になって放射される。乳房撮影用のX線管では、ターゲットにW（タングステン）、Mo（モリブデン）、Rh（ロジウム）などが用いられる。またフィルタはX線管の外に配置され、Mo、Rh、Ag（銀）などが用いられている。

次に原子の簡易的な模式図をFig.2に示す。原子は+（正、プラス）の電荷を帯びた原子核を中心とし、その周囲に-（負、マイナス）の電

荷を帯びた電子が存在している。原子の中の電子は原子核の周囲に電子殻という層をなして存在している。電子殻は原子核に近い方からK殻、L殻、M殻といい、その電子殻に存在している電子を軌道電子という。軌道電子は原子核に近いほど強い結合エネルギーで結合している。

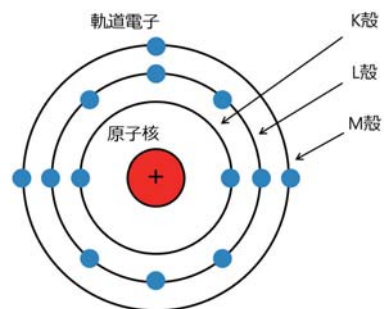


Fig.2 原子の簡易的な模式図

・連続X線

連続X線は、加速した熱電子がターゲットの原子核のクーロン場の影響を受けて制動を受け、強く曲げられ、運動エネルギーを失ったときに放射される（Fig. 3）。制動には、完全に制動を受けるものからわずかなものまで色々な程度があり、様々なエネルギーのX線が発生することから連続スペクトルを示す。また、最大エネルギーはターゲット物質に依存せず、管電圧に依存した値となる。

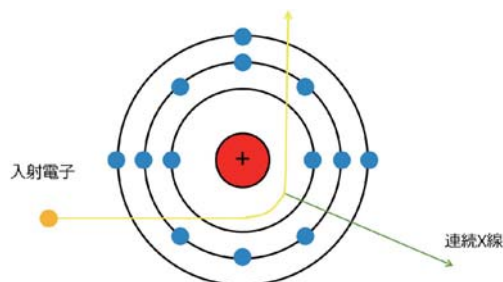


Fig.3 連続X線の発生過程

・特性X線

特性X線は、電子がターゲットの中の原子のK殻、L殻などの軌道電子と衝突し、軌道電子を原子の外に放出して軌道電子の移動が行われるときに発生する（Fig. 4）。特性X線のエネルギーは軌道電子が放出された軌道と移動が行われる

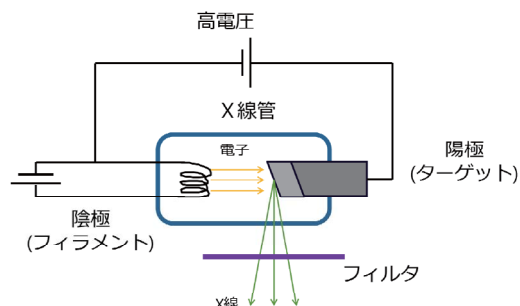


Fig.1 X線が発生する過程

軌道の軌道間の結合エネルギーの差であり、線スペクトルを示す。物質の軌道電子は、その物質に特有な固有のエネルギーを持っているので、特性X線のエネルギーはターゲットの種類に依存し固有の値となる (Table 1)。L殻からK殻に電子が移動した際に放出されるものを K_{α} 線、M殻からK殻に電子が移動した際に放出されるものを K_{β} 線と呼ぶ。

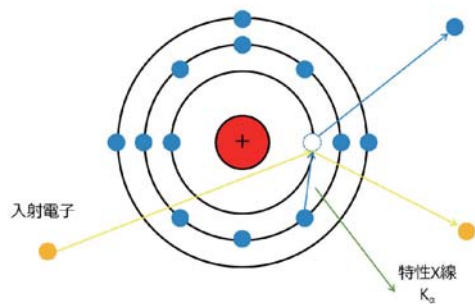


Fig.4 特性X線の発生過程

Table 1. ターゲットの種類による特性X線のエネルギー

ターゲット	原子番号	K_{α} [keV]	K_{β} [keV]
Mo	42	17.5	19.6
Rh	45	20.2	22.7
W	74	59	67

【フィルタがX線スペクトルに与える影響】

・フィルタとの相互作用

X線管から放出されたX線はフィルタを透過してから被写体（人体）に入射される。X線がフィルタを透過する際には、フィルタ物質との相互作用が起こる。相互作用には光電効果、コヒーレント散乱、コンプトン散乱、電子対生成があるが、マンモグラフィ領域のエネルギーでは光電効果が起こりやすい。

・光電効果

光電効果は、フィルタに入射したX線光子が物質中の軌道電子に衝突し、持っているエネルギーをすべて軌道電子に与えて光子自身は消滅し、軌道電子を原子の外に放出する現象であ

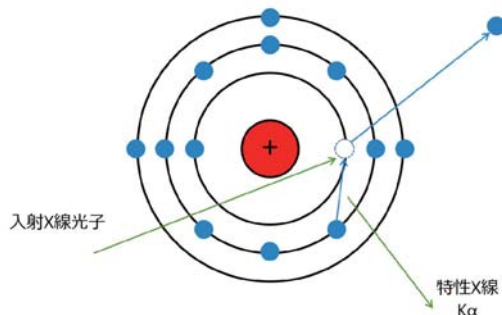


Fig.5 光電効果の発生過程

る (Fig.5)。入射X線光子のエネルギーが結合エネルギーより大きいときに発生する。

・吸収端

吸収端は、入射光子エネルギーが軌道電子と原子核との結合エネルギーを超えると減弱係数が急激に大きくなる現象である。よって、吸収端以上のエネルギーを持つ光子はフィルタに吸収されX線強度が減少する。ターゲットがMoのとき、Moフィルタ使用時のX線スペクトルをFig.6に示す。なお、X線スペクトルのデータは加藤らにより制作されたフリーソフト「MoXS-6」から取得している³⁾。このソフトはマンモグラフィ用X線管から放射されるX線スペクトルを計算し表示するプログラムであり、計算されたスペクトルの最大値を100%とした相対値で表示される。ターゲットの種類による吸収端のエネルギーをTable 2に示す。

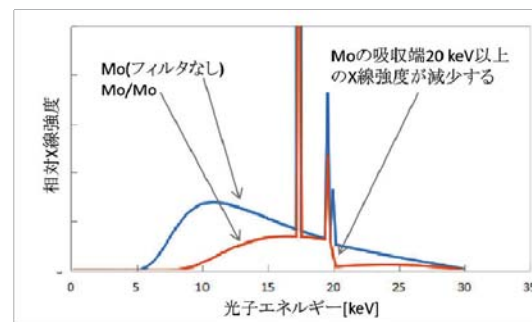


Fig.6 Moフィルタ使用時の X 線スペクトル

Table 2. ターゲットの種類による K 吸収端のエネルギー

ターゲット	原子番号	K吸収端[keV]
Mo	42	20.0
Rh	45	23.2
Ag	47	25.5

・フィルタの役割

乳房内組織の密度と光子エネルギー20 keVにおける線減弱係数をTable 3に示す。マンモグラフィは乳房の組織間のX線吸収差が小さいため、低エネルギーのX線が用いられている。しかし、X線のエネルギーが低すぎると被ばくは増加し、逆に高すぎるとコントラストが低下する。天野らの報告⁴⁾による光子エネルギー18 keVにおける脂肪、乳腺、乳管癌の線減弱係数に対する、違う光子エネルギーにおけるそれぞれの線減弱係数の散布図をFig.7に示す。光子エネルギーが増加するに従い、線減弱係数の差が小さくなっていることが確認できる。フィルタの役割は低エネルギー成分のX線と吸収端以上の高エネルギー成分のX線を吸収すること

Table 3. 乳房内組織の密度と線減弱係数

組織・構造物の種類	密度[g/cm ³]	線減弱係数[cm ⁻¹]
乳腺組織	1.035	0.80
脂肪組織	0.93	0.45
乳癌腫瘍	1.045	0.85
石灰化	2.20	12.5

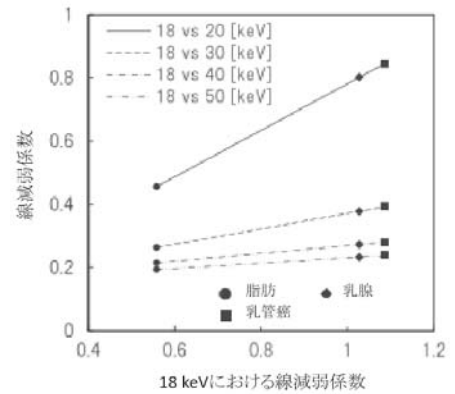


Fig.7 18 keV に対するエネルギーごとの各組織の線減弱係数

で、被ばくを低減させることとコントラストを向上させることである。

【X線スペクトルの変化】

X線管から放出されるX線スペクトルはターゲット、フィルタ、管電圧、管電流などで変化する。

ターゲットが変化した場合、X線スペクトルの形状は大きく変化する。ターゲットがMoのときのX線スペクトルをFig.8、ターゲットがWのときのX線スペクトルをFig.9に示す。X線強度はターゲット物質の原子番号に比例し変化する。また、前述した通り、ターゲットによって特性X線のエネルギーも変化する。Moの特性X線のエネルギーは $K_{\alpha}=17.5$ keV, $K_{\beta}=19.6$ keVであり、2種類の特性X線が含まれていることが確認できる。しかし、Wの特性X線のエネルギーは $K_{\alpha}=59$ keVと $K_{\beta}=67$ keVであるため、マンモグラフィ領域の管電圧では特性X線が発生しない。

次に、ターゲットがMoのとき、フィルタをMoからRhに変化させた場合のX線スペクトルをFig. 10に示す。フィルタがMoからRhに変化することで吸収端が20.0 keVから23.2 keVに変化し、高エネルギー成分のX線が増加する。これにより乳腺密度が高い場合などにコントラストをあまり低下させることなく、少ない線量での撮影が可能になる。

次に、管電圧が変化したとき、X線強度は管電圧の2乗に比例し変化する。また管電圧に応じて光子の最大エネルギーが変化する。（管電圧30 kVのとき、光子の最大エネルギーは30 keVである。）

管電流が変化したとき、X線強度は管電流に比例し変化する。光子の最大エネルギーは変化しない。

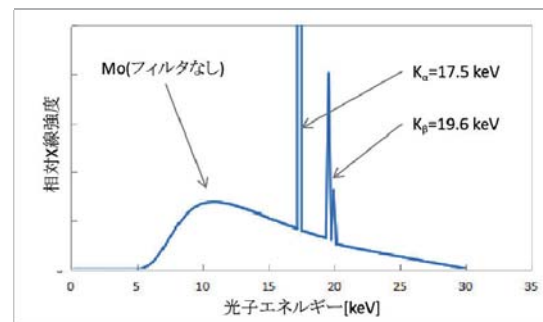


Fig.8 管電圧30 kVにおけるMo（フィルタなし）のX線スペクトル

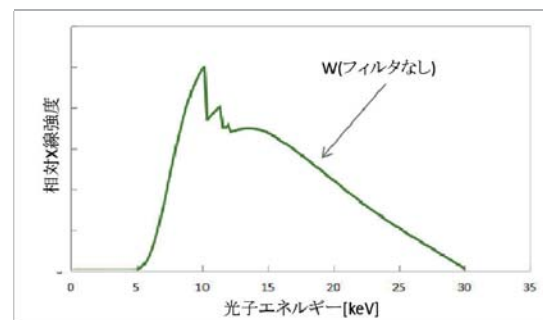


Fig.9 管電圧30 kVにおけるW（フィルタなし）のX線スペクトル

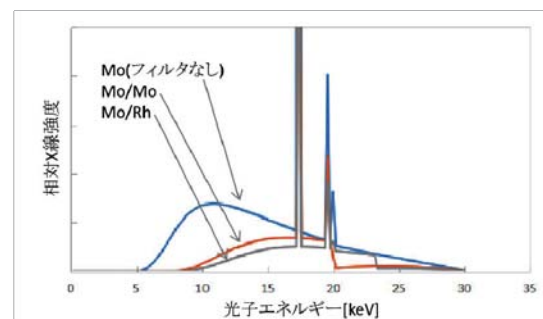


Fig.10 管電圧30 kVにおけるフィルタによるMoのX線スペクトルの変化

【まとめ】

本稿では、「マンモグラフィで使用するX線について知ろう！」というテーマのもとで、X線スペクトルについて報告を行った。X線スペクトルは実際に測定できる施設が少ないことや物理分野が関係することから、馴染みが薄く苦手意識を持っている方が多いのではないだろうか。しかし、X線スペクトルはターゲットとフィルタの組み合わせ、管電圧など読み取れる情報が多く、被ばくやコントラストとも関連があることから、X線スペクトルを理解することはマンモグラフィに限らずX線を用いた画像診断において有用であると考ええる。

【参考文献・図書】

- 1) 撮影部会 乳房撮影ガイドライン普及班 監修. 放射線医療技術学叢書 (39) 乳房撮影精度管理マニュアル. 日本放射線技術学会出版委員会, 京都, 2023:2-8.
- 2) 東田喜治編 診療放射線技術選書 医療画像検査技術学 改訂3版 南山堂, 東京, 2007:2-12, 248-252, 274.
- 3) 加藤秀起. 藤井茂久. 白川誠士, 他. モリブデンターゲットX線管から放射されるX線スペクトルの推定計算式, 日本放射線技術学会雑誌 2011;67 (3) :193201.
- 4) 天野貴司, 大倉保彦, 原内一, 他: デジタルマンモグラフィにおける最適な光子エネルギーの解析, 医用画像情報学会雑誌 2013;30:88-94.