

【論文】

空間的エネルギー変化を有するn次高調波回折X線の スペクトル評価およびK吸収端画像の取得

横手大輝¹⁾、吉村哉汰¹⁾、前田浩志²⁾

¹⁾ 広島国際大学大学院 医療・福祉科学研究科 医療工学専攻
²⁾ 広島国際大学 保健医療学部 診療放射線学科

要旨

本研究の目的は、空間的エネルギー変化を有するn次高調波回折X線のX線スペクトルとこれを用いて撮像したK吸収端画像を評価することである。K吸収端前後の2つのエネルギー帯の光子により低濃度物質を識別することができるK吸収端差分法の確立を目標に、K吸収端前後の限局したエネルギー帯において、空間的エネルギー変化を有する回折X線を利用するための方法について検討した。X線回折において単結晶に入射するX線が完全な平行光であれば得られる回折光子は単色となるが、X線管から発生する円錐状のX線束では回折時の異なる位置で結晶格子面への入射角度が変化することになるため、空間的にエネルギーが変化する。また、高エネルギー回折X線においては、結晶を透過してきた白色X線との物理的距離が近くなる問題が生じるため、本研究ではn次高調波による回折X線に着目し、これを用いた白金K吸収端画像の取得について検討を行ったので報告する。

キーワード：X線回折、n次高調波、K吸収端、K吸収端差分

Evaluation of x-ray spectra and K-absorption edge images for Nth-harmonic diffracted x rays with spatial energy shift

Hiroki YOKOTE¹⁾, Kanata YOSHIMURA¹⁾ and Koji MAEDA²⁾

Abstract

The purpose of this study is to evaluate x-ray spectra and K-absorption edge images for Nth-harmonic diffracted x rays with spatial energy shift. K-edge subtraction (KES) technique is a new technique for identifying a low-density material. This technique is needed to a large difference of attenuation coefficients for a target material, that is seen in two energy regions on little-lower and little-higher energy for K-absorption edge of a target material. By imaging of those different attenuation, the KES technique shows the image of only target material by subtracting between two images obtained by x rays with lower and higher energies than K-edge energy. Then, we attempted a diffraction method for generating monochromatic x rays with special energy sift. The diffracted monochromatic x rays are produced by Bragg diffraction on a silicon single crystal and are imaged as Laue spot on the reflected position. If the incident x rays are completely parallel, the Laue spot is imaged by a single energy of diffracted x rays. However, x rays irradiated from an x-ray tube are shaped as a conically cone beam. Therefore, depending on the angles between the cone-beamed x rays and a silicon atomic layer, the spatial energy shifts are shown on the Laue spot. Moreover, in case of acquitting high-energy monochromatic diffracted x rays, diffracted and translated x rays are closed a distance. In this study, we focused on the Nth-harmonic diffraction and tried to obtain platinum K-absorption edge images.

¹⁾ Major in Medical Engineering and Technology, Graduate School of Medical Technology and Health Welfare Sciences, Hiroshima International University

²⁾ Department of Clinical Radiology, Faculty of Health Sciences, Hiroshima International University

Keywords: X-ray diffraction, Nth harmonic, K-absorption edge, K-edge subtraction

連絡先：〒739-2695 広島県東広島市黒瀬学園台555-36 広島国際大学 保健医療学部 診療放射線学科
e-mail : k-maeda@hirokoku-u.ac.jp

I. はじめに

放射線診療において単純X線撮影やX線CT撮影に用いられるX線は「白色X線」と呼ばれ、幅広いエネルギーを持った光子の集合体として利用される。光子は、そのエネルギーの違いにより吸収や散乱の確率が異なるため、白色X線を利用する場合、それぞれのエネルギーの含有割合（線質）によっては、被ばく線量を増大させたり、画質を低下させたりするなど、その取扱いに注意が必要な反面、すべてのエネルギーの光子を利用できる分、全光子量は多くなるため、短時間照射での撮影が可能となる利点から現在に至るまで広く利用されている¹⁾。

一方、エネルギーが単一の「単色X線」では、エネルギーに応じた元素ごとの吸収係数が既知であり、また散乱によりそのエネルギーが変化する場合には元のエネルギーとは異なるという理由でその散乱線成分を除外することができるなど、厳密に必要とするエネルギー帯の光子のみを利用することができるため、理論上、最小の被ばく線量で最大の情報量を得ることができると考えられている^{2), 3)}。単色光子を得るには、単一エネルギーの γ 線を放出する放射性物質を利用するか、X線回折という方法で白色X線から単色光子を取り出す方法がある^{4), 5)}。前者の場合、放射性物質の管理などの問題があり実用には向かない。後者のX線回折では、選択するエネルギー値を操作者の意思で決定できるなどの優れた点が多いものの、取り出せる線量の少なさが欠点となり、これまでは実用に供するものとは考えられてこなかった^{6), 7)}。Sarnelliらは、回折準単色光子を用いた研究において、スペクトロメータによる光子数データから疑似画像化した準単色X線撮影を報告している⁸⁾。一方、近年の画像取得技術の発展により、フルデジタルでのX線撮影も可能と

なり、受像系の感度も飛躍的に向上していることが報告されているため^{9), 10)}、白色X線と比較して線量率が低下する回折X線による画像取得について新たな可能性も見えてきている¹¹⁾。

そこで我々は、このX線回折技術によって得られた単色X線と最新の高感度受像系を組み合わせることで、新たな画像取得技術の開発について研究してきた¹²⁾。ここで、X線回折とは、結晶に入射した白色X線のうちBragg条件を満たすエネルギーの光子のみが鏡面反射した位置に単色X線として現れる現象のことである¹³⁾。このとき、結晶格子面に対する白色X線の入射角度を変化させることで、抽出できる回折X線のエネルギーを自由に変化させることが可能である。また、原理上、回折結晶（モノクロメータ）に入射するX線束がすべて平行光であるとすれば、すべての回折光子が同じエネルギーとなるが、一般のX線装置から照射されるような、結晶に対して円錐状にコリメートされた白色X線を照射した場合には、空間的なエネルギー変化を有する回折X線が抽出可能となり、これをK吸収端と呼ばれるエネルギーの変化に伴う急激な吸収落差現象にも利用できる可能性に着目した。これまでの先行研究では、この空間的なエネルギー変化を有する回折X線を利用したK吸収端差分画像の取得や実効原子番号の近い物質の画像上での弁別に関する検討が行われてきた¹⁴⁾。

次に、K吸収端とそれを高低にまたぐように空間的なエネルギー変化を伴う単色光子をX線回折により抽出し、K吸収端差分画像を取得する場合、K吸収端のエネルギーは元素の原子番号が大きくなるにつれそのエネルギーが大きくなるため、目的となるK吸収端を比較的高いエネルギー帯にもつ高原子番号の物質を対象とする時、結晶格子面への白色X線の入射角度が極めて小さ

くなり、結晶をそのまま透過してきた白色X線と回折したX線との物理的距離が近くなり、回折X線のみを利用するには困難さが伴う。そこで、X線回折を示すBragg条件において、目的とするエネルギーの光子とその整数n倍のエネルギーをもつ光子が同時にこの条件を満たすことに着眼し、X線回折におけるn次高調波の利用について検討を行った。同一エネルギーの回折X線を抽出する際、n次高調波利用時には1次高調波利用時と比較して、より大きな入射角度で目的とするエネルギーをもつ回折X線を抽出することが可能になる。そのため、結晶を透過してきた白色X線と結晶で回折した回折単色X線との位置的な分離を容易にするという目的においては、X線回折におけるn次高調波を利用することが最も有効な方法であると考えられた。加えて、X線回折時には、使用する結晶の格子配列によって特定の次数でのみ回折光子が得られなくなる“消滅測”とよばれる現象が生じる場合がある¹⁵⁾。本研究では、この消滅測が原因でX線回折時に2次の高調波が得られないシリコンSi単結晶・面方位{1, 1, 1}というモノクロメータを用いることで、1次高調波を利用する場合と比較して、より大きな入射角度で目的とするエネルギー帯の回折X線を抽出することのできる3次高調波を利用することが可能か検討した。これは、比較的高いエネルギー帯である78.4 keVにK吸収端をもつ白金Ptを対象とした先行基礎研究でも生体内でのPt製剤の分布を画像上で検出することが可能になるのではないかと考えられたためである¹⁶⁾。

しかし、X線回折における3次高調波を利用した画像取得を行う場合、同時に発生する低次数での高調波が不要になることが新たな問題点として考えられた。特に、生体内における極めて薄い濃度のPt製剤を検出する場合においては、この不要となるエネ

ルギーを有する光子により画像コントラストが低下するのではないかと考えられたため、純粋な3次高調波のみを抽出することが必要であると考えられた。ここで、本研究ではこの不要となる1次高調波を選択的に除去するための方法として金属フィルターを挿入する方法を提案し、その有用性についても検討した。これは、物質での質量減弱係数の値は光子エネルギーの増大に伴い指数関数的に減少するため、1次高調波のエネルギー帯と近い値にK吸収端をもつ物質を付加フィルターとして挿入することで、低次数での高調波の光子数を効果的に減少させることが可能となり、純粋な3次高調波のみを利用することが可能になると考えられたためである。

そこで、本研究ではX線回折におけるn次高調波を利用したPt製剤検出のための初期検討として、白金K吸収端と等しいエネルギーをもつ3次高調波回折X線の抽出および空間的エネルギー変化を有する3次高調波回折X線を利用した白金K吸収端画像の取得について検討を行ったので報告する。

II. 理論

1. X線回折とn次高調波

本項では、X線回折の原理およびn次高調波を利用するに至った背景について詳しく述べる。X線回折とは、結晶に入射した白色X線のうち式(1)に示すBragg条件を満たす波長の光子のみが鏡面反射した位置に単色X線として現れる現象のことである。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \cdots(1)$$

式(1)におけるdは結晶格子面間隔、 θ は結晶格子面への白色X線の入射角度、 λ は回折を起こすX線の波長、 n は反射次数（正の整数）のことである¹³⁾。ここで、結晶格子面間隔dが既知の場合、回折されるX線の波長 λ は結晶格子面への白色X線の入射角

θ にのみ依存するため、この入射角 θ を変化させることで任意の波長（つまり、言い換えると任意のエネルギー）を有するX線のみを抽出することが可能となる。なお、式(1)における結晶格子面間隔 d はSi単結晶のような立方晶の場合、式(2)より求められる¹⁷⁾。

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad \dots(2)$$

ここで、式(2)における a は立方晶の格子定数、 h, k, l は立方晶におけるミラー指数のことである。本研究でモノクロメータとして用いたSi単結晶・面方位 $\{1, 1, 1\}$ の格子定数は0.357 nmであり¹⁸⁾、 h, k, l の値はすべて1であるため、式(2)より結晶格子面間隔 d は0.357 nmとなる。

式(1)では、任意の波長 λ のX線に対して、 $1/n$ 倍の波長のX線も同時にBragg条件を満たすことが示されている。ここで、プランク定数を h 、真空中での光速を c とすると、光子エネルギー E と波長 λ の間には式(3)に示す反比例の関係が成り立つ。そのため、モノクロメータに照射する白色X線の構成によっては、回折X線の最小エネルギー E に対して、整数 n 倍のエネルギーを有する白色X線も同時にX線回折を起こす。このとき、目的とするエネルギーの光子とその整数倍のエネルギーを持つ光子によって、スペクトル上で等間隔に並ぶ「 n 次高調波」が抽出可能になる。

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad \dots(3)$$

比較的高いエネルギー帯である78.4 keVにK吸収端をもつPtを対象として、そのK吸収端と等しいエネルギーを有する回折X線を抽出する場合、式(1)および式(2)より1次高調波利用時には結晶格子面への白色X線の入射角 θ が約 1.4° と非常に浅くなる。そのため、結晶を透過してきた白色X線と回折X線の物理的距離が近くなり、両者の

分離が困難になり、回折X線のみを利用することが困難となる。その一方で、例えば3次高調波利用時には約 4.3° と結晶格子面への白色X線の入射角 θ を理論上約3倍にすることが可能になるため、両者の分離を容易に行うことができ、白色X線の影響を受けることなく回折X線のみを利用することが容易となる。

2. 回折X線の空間的エネルギー変化とK吸収端の利用

一般のX線装置から照射される白色X線は円錐状にコリメートされており、その照射野内において結晶格子面に対する入射角度が連続的に変化するため、この現象を利用することで空間的エネルギー変化を有する回折X線を抽出することが可能となる。ここで、回折X線の空間的エネルギー変化とは、抽出された回折X線の照射野内において照射野の上縁から下縁にかけて限局したエネルギー帯で連続的にエネルギーが変化する現象のことである。

X線回折では、前述したように結晶格子面への白色X線の入射角 θ が変化すると抽出される回折X線のエネルギーが変化する。ここで、結晶格子面に対して円錐状にコリメートされた白色X線を照射したとき、照射野中心部に対して照射野上縁・下縁部では白色X線の結晶格子面への入射角 θ が変化する。このとき、照射野中心部に対して、照射野上縁部では白色X線の結晶格子面への入射角 θ が小さくなり、照射野下縁部では白色X線の結晶格子面への入射角 θ が大きくなる。そのため、抽出される回折X線での照射野中心部に対して、照射野上縁の位置における光子エネルギーは低く、照射野下縁の位置における光子エネルギーは高くなる。この現象を利用することで、限局した範囲のエネルギー帯において、連続的にエネルギーが変化する回折X線の抽出が

可能になる。

この空間的エネルギー変化を有する回折X線を利用し、対象物質のK吸収端前後の範囲を含むエネルギーを有する光子のみを抽出した場合、画像上で物質のK吸収端に起因した吸収落差現象が生じる。単一元素における光子の吸収量は、K吸収端よりわずかに低いエネルギーを有する光子で小さくなり、K吸収端を境にそれよりわずかに高いエネルギーを有する光子では格段に大きくなる。そのため、この現象を利用しX線回折後の照射野中心部でのエネルギーが対象物質のK吸収端と等しくなるように回折X線を抽出することで、照射野中心で物質のK吸収端に起因する急激な濃度変化が生じた画像を取得することが可能となる。

このK吸収端画像において、照射野中心部のエネルギーに対して低エネルギーとなる上縁側の領域（L領域）での画像濃度値は高くなり、照射野中心部に対して高エネルギーとなる下縁側の領域（H領域）の画像濃度値は低くなる。ここで、L領域およびH領域において平坦な画像濃度をもつ一定のピクセル範囲を得ることができれば、L領域からH領域の画像濃度値を差分することで高いコントラストをもつK吸収端差分画像の取得も可能になる。

3. 付加フィルターによるスペクトルの純単色化

X線回折におけるn次高調波を利用する場合、目的以外の低次数での高調波が発生することについて考慮する必要がある。本研究のように3次高調波のエネルギーが白金K吸収端と等しくなるように回折X線を抽出する場合、同時に26.2 keV付近のエネルギーを有する1次高調波も抽出される。前述した空間的エネルギー変化を有する回折X線によって取得されるK吸収端画像では、K吸収端前後のエネルギーを有する光子によ

り吸収落差現象が生じるため、それ以外のエネルギーを有する光子はK吸収端画像取得時において不要となる。

本研究では、この不要となる1次高調波を除去するための方法として抽出された回折X線と検出器の間に金属フィルターを付加することを提案する。ここで、1次高調波を除去するために金属フィルターを用いる場合、3次高調波が同様に除去され過ぎることのないようにする必要がある。つまり、フィルター材質には1次高調波の吸収量が大きく、3次高調波の吸収量は小さくなるようなものを選定する必要がある。そのため、本実験では1次高調波のエネルギー帯と近い18.0 keVにK吸収端をもつジルコニウムZrを付加フィルターとして採用した。

III. 実験方法

1. 回折X線スペクトルの測定

回折X線スペクトル測定時の実験配置図をFig.1に示す。

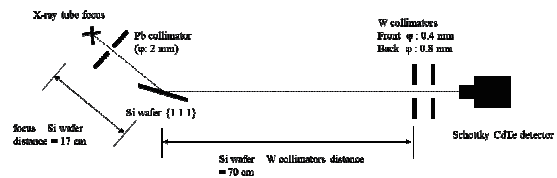


Fig.1 スペクトル測定時における実験配置図

1次高調波回折X線および3次高調波回折X線のスペクトル測定時における実験配置図を示す。

X線発生装置には、通常の診断領域で使用されているX線管装置(日立 U-6CE-55TB)とインバーター式高電圧発生装置(日立 DHF-153 II)を組み合わせたものを使用した。本実験ではモノクロメータとしてSi単結晶・面方位{1, 1, 1}を用いた。X線スペクトル測定装置であるSchottky型CdTe検出器(EMFジャパン EMF123)の前面には、36 mmの間隔で厚さ2 mmの2つのタングステンコリメータを配置した。X線管焦点-Si単結晶間距離は17 cmとし、Si単結晶-タ

ングステンコリメーター間距離は70 cmとした。タングステンコリメーターは、コリメーター径が0.4 mmと0.8 mmのピンホールを組み合わせて使用した。

照射条件は、管電圧100 kVで一定とし、管電流および照射時間は検出器でのパイルアップが生じないように調整した。Si単結晶に照射する白色X線は、直径2 mmの穴が空いた鉛板でコリメートした。Si単結晶への白色X線の入射角度は約1.4°とし、1次高調波のエネルギーが78.4 keV付近となるように回折X線を発生させ、スペクトルの測定を行った。同様にSi単結晶への白色X線の入射角度を約4.3°に調整し、3次高調波のエネルギーが78.4 keV付近となるように回折X線を発生させ、スペクトルの測定を行った。取得したスペクトルにストリッピング補正¹⁹⁾を行った。

2. 白金K吸収端画像の取得

白金K吸収端画像取得時の実験配置図をFig.2に示す。

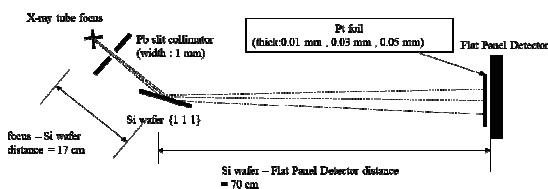


Fig.2 白金K吸収端画像取得時における実験配置図

白金K吸収端前後の限局したエネルギー帯にて空間的エネルギー変化を有する3次高調波回折X線を抽出し、それを利用したPt箔のK吸収端画像取得時における実験配置図を示す。

X線発生装置からの白色X線を幅1 mmのスリットを開けた鉛板でコリメートした後、Si単結晶・面方位{1, 1, 1}に照射し、空間的なエネルギー変化を有する回折X線を発生させた。このとき、X線管焦点-Si単結晶間距離は17 cmとし、3次高調波の照射野中心部での光子エネルギーが78.4 keVとなるようにSi単結晶への白色X線の入射角

度は約4.3°とした。

その後、発生した回折X線をFlat Panel Detector(キャノン CXDI-31)に照射し、照射野についての確認を行った。得られた照射野の画像を用いて汎用画像解析ソフトであるImageJにより矩形状のROIを設定し、画像ピクセル値プロファイルを作成した。このプロファイルを用いて画像濃度が大きく変化しない領域について確認し、利用できる照射野(有効照射野)の範囲を定めた。その後、有効照射野の範囲内にPt箔を配置し画像を取得した。このときの照射条件はSi単結晶-FPD間距離70 cm, 管電圧100 kV, 管電流100 mA, 照射時間1.25 secとし、10枚の画像を取得した。このとき、回折X線を利用する場合には白色X線を利用する場合と比較して検出器に入射する光子数が少なくなり、画像ノイズが増加することが考えられたため、この10枚の画像を用いてImageJにより加算平均画像および画像プロファイルを作成した。本実験では、厚さが0.01 mm, 0.03 mmおよび0.05 mmのPt箔を使用し、それぞれの厚さにおいて上記の方法で画像取得および画像プロファイルの作成を行った。

3. Zrフィルター付加によるスペクトルおよび画像の変化

まず、Pt箔の有無による回折X線スペクトルの変化を評価する目的で、III.1項と同様の方法によりタングステンコリメーターの前面に厚さ0.01 mmのPt箔を配置し、スペクトル測定を行った。その後、厚さ0.01 mmのPt箔を配置した状態で、厚さ0.1 mmのZrフィルターをSi単結晶から検出器側に10 cm離れた位置に配置し、同様の方法でスペクトル測定を行った。

さらに、III.2項と同様の方法でSi単結晶からFPD側に10 cm離れた位置に0.1 mmのZrフィルターを配置し、0.01 mmのPt箔の

加算平均画像の取得および画像プロファイルの作成を行った。

IV. 結果

1. n次高調波回折X線スペクトル

取得した回折X線スペクトルとPtの質量減弱係数²⁰⁾を重ね合わせたグラフをFig.3, Fig.4に示す。なお、Fig.3およびFig.4におけるPtの質量減弱係数は離散データから内挿したものである。1次高調波利用時および3次高調波利用時において、ともにPtのK吸収端と等しいエネルギーをもつ回折X線を抽出することができた。PtのK吸収端と等しいエネルギー帯において、1次高調波利用時にはピークから裾野にかけてエネルギーが大きく広がっているのに対して、3次高調波利用時には急峻なピークをもつスペクトルが得られた。また、3次高調波利用時

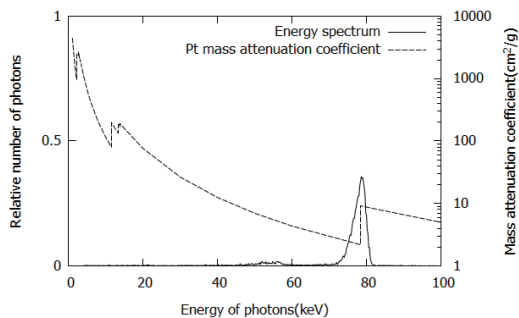


Fig.3 1次高調波利用時での回折X線スペクトル

Si単結晶・面方位{1, 1, 1}によるX線回折において、白金K吸収端と等しいエネルギーを有する1次高調波を抽出した場合でのX線スペクトルを示す。

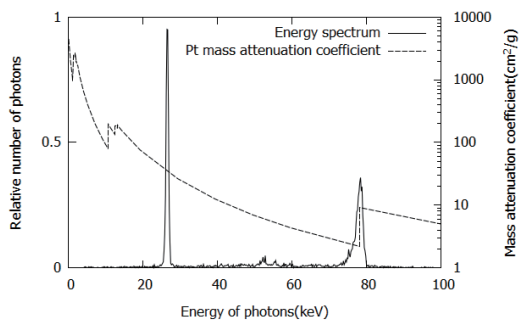


Fig.4 3次高調波利用時での回折X線スペクトル

Si単結晶・面方位{1, 1, 1}によるX線回折において、白金K吸収端と等しいエネルギーを有する3次高調波を抽出した場合でのX線スペクトルを示す。

において、スペクトル上に2次高調波が観測されていない理由としては、前述したSi単結晶・面方位{1, 1, 1}の結晶格子配列に起因した消滅測によるものである。

2. K吸収端画像および画像プロファイル

照射野の画像および画像プロファイルをそれぞれFig.5-Fig.7に示す。画像上の横方向のプロファイルにおいて、Si単結晶・面方位{1, 1, 1}の結晶格子配列に起因した

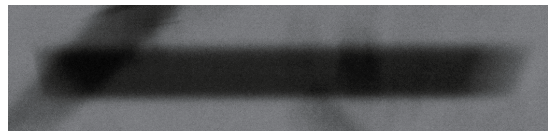


Fig.5 照射野画像

白金K吸収端前後の限局したエネルギー帯で空間的エネルギー変化を有する3次高調波回折X線によって得られた照射野の画像を示す。

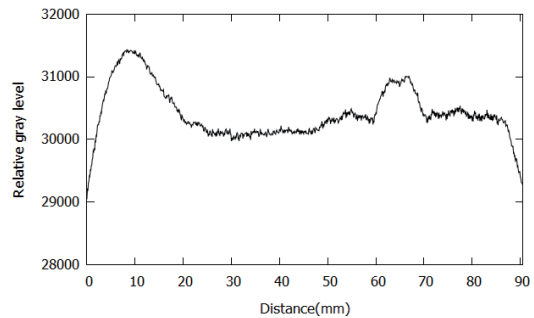


Fig.6 照射野での画像プロファイル（横方向）

白金K吸収端前後の限局したエネルギー帯で空間的エネルギー変化を有する3次高調波回折X線によって得られた照射野の画像における照射野内での横方向の画像プロファイルを示す。

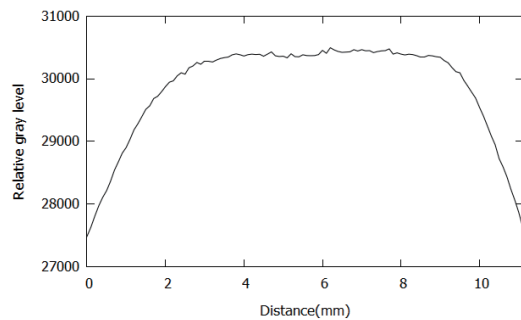


Fig.7 照射野での画像プロファイル（縦方向）

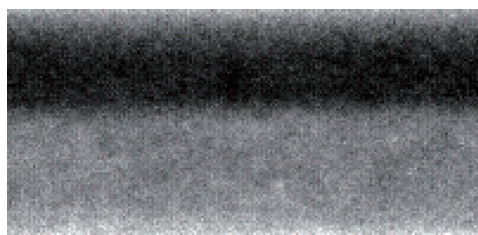
白金K吸収端前後の限局したエネルギー帯で空間的エネルギー変化を有する3次高調波回折X線によって得られた照射野の画像における照射野内での縦方向の画像プロファイルを示す。

干渉模様にもともなうプロファイルの乱れがみられたが、それ以外の位置では約20 mmの範囲において濃度分布が平坦であった。この範囲において縦方向のプロファイルを得た結果、約6 mmの濃度分布が平坦な範囲を確保することができた。本実験ではこの範囲を有効照射野とし、白金K吸収端画像の取得を行った。

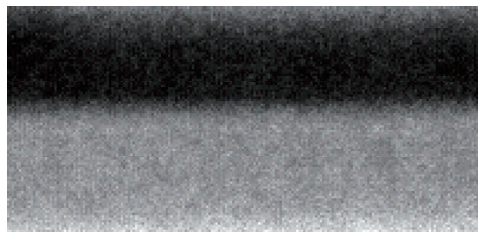
各厚さにおけるPt箔の加算平均画像をFig. 8(a)-(c)に、画像プロファイルにPtの質量減弱係数20)を重ね合わせたグラフをFig. 9(a)-(c)にそれぞれ示す。なお、Fig. 9におけるPtの質量減弱係数は離散データから内挿したものである。すべての条件において、照射野中心部でPtのK吸収端に起因する吸収落差現象が生じた画像を取得することができた。また、Ptの質量減弱係数の値を反



(a) 0.01 mm Pt



(b) 0.03 mm Pt



(c) 0.05 mm Pt

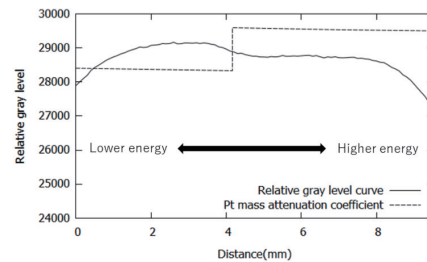
Fig.8 各厚さにおける白金K吸収端画像

白金K吸収端前後の限局したエネルギー帯で空間的エネルギー変化を有する3次高調波回折X線によって得られた0.01 mm (a), 0.03 mm (b), 0.05 mm (c)のPt箔のK吸収端画像を示す。

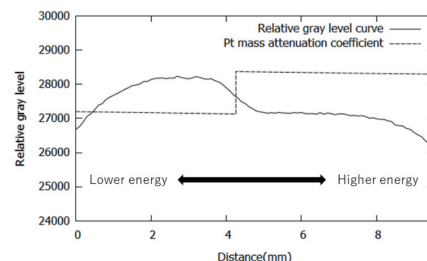
映した画像プロファイルを得ることができた。Fig.9より、K吸収端前後のL領域とH領域の間での画像濃度差は、0.01 mm厚では約400, 0.03 mm厚では約1000, 0.05 mm厚では約1800とPt箔の厚さが厚くなるほどその値は大きくなった。

3. Zrフィルター付加によるスペクトルおよび画像の変化

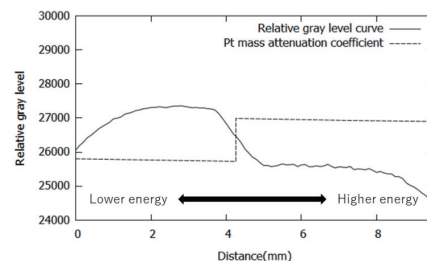
回折X線のみでのスペクトル、0.01 mmのPt箔を挿入した場合でのスペクトルおよび0.01 mmのPt箔と0.1 mmのZrフィルターを挿入した場合でのスペクトルを重ね合わせたものをFig.10に示す。0.01 mmのPt箔を挿



(a) 0.01 mm Pt



(b) 0.03 mm Pt



(c) 0.05 mm Pt

Fig.9 各厚さにおける白金K吸収端画像での画像プロファイル

白金K吸収端前後の限局したエネルギー帯で空間的エネルギー変化を有する3次高調波回折X線によって得られた0.01 mm (a), 0.03 mm (b), 0.05 mm (c)のPt箔のK吸収端画像における有効照射野内の縦方向での画像プロファイルを示す。

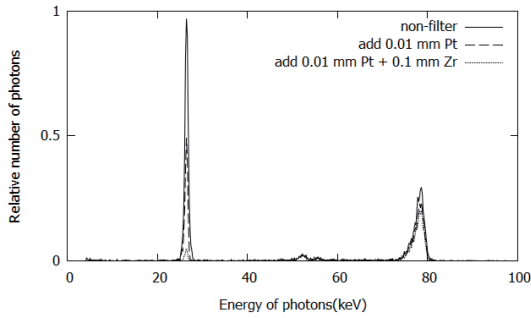


Fig.10 3次高調波利用時での回折X線スペクトルの比較
白金K吸収端と等しいエネルギーを有する3次高調波回折X線利用時において、0.01 mmのPt箔および0.01 mmのPt箔と0.1 mmのZrフィルターが存在する場合でのスペクトルの変化を示す。

入した後でのスペクトルでは挿入する前と比較して、1次高調波での光子数は約51 %に減少し、3次高調波での光子数は約81 %に減少した。0.01 mmのPt箔と0.1 mmのZrフィルターを挿入した場合には0.01 mmのPt箔のみを挿入した場合と比較して、1次高調波での光子数は約9.9 %に減少し、3次高調波での光子数は約85 %に減少した。

0.1 mmのZrフィルターを付加した場合での0.01 mmのPt箔の加算平均画像および画像プロフィールをFig.11 , Fig.12に示す。K吸収端前後のL領域とH領域の間で約500の画像濃度差が生じており、0.1 mmのZrフィルターを挿入することで0.01 mmのPt箔のみで取得された画像と比較して画像濃度差が大きくなった。



Fig.11 0.1 mm Zrフィルターを付加した場合の0.01 mm PtでのK吸収端画像

0.1 mmのZrフィルターを付加した場合での、白金K吸収端前後の限局したエネルギー帯で空間的エネルギー変化を有する3次高調波回折X線によって得られた0.01 mmのPt箔のK吸収端画像を示す。

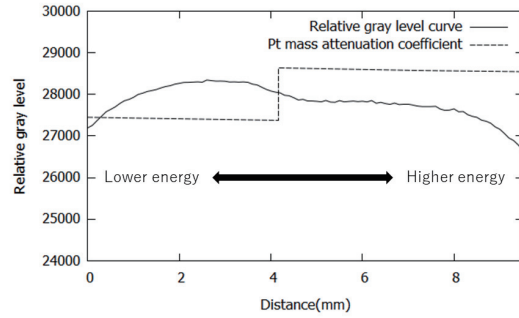


Fig.12 0.1 mm Zrフィルターを付加した場合の0.01 mm PtでのK吸収端画像における画像プロフィール

0.1 mmのZrフィルターを付加した場合での、白金K吸収端前後の限局したエネルギー帯で空間的エネルギー変化を有する3次高調波回折X線によって得られた0.01 mmのPt箔のK吸収端画像における有効照射野内の縦方向での画像プロフィールを示す。

V. 考察

1. 回折X線スペクトル

1次高調波利用時にピークから裾野にかけてエネルギーの広がりが大きくなった理由としてはX線回折時の角度変動によるものだと考えられる。本実験で使用した一般のX線装置からのX線束は円錐状に広がっているため、照射野中心部に対して照射野上縁・下縁部では白色X線のSi単結晶への入射角度が変化する。ここで、照射野中心部に対して照射野上縁・下縁部での角度変化が 0.1° である場合、照射野上縁から下縁にかけて、1次高調波利用時には約11 keVのエネルギー変化が生じてしまうのに対して、3次高調波利用時には約3.6 keVの変化しか生じない。そのため、3次高調波を利用することでFig.4に示したように、より限局的に目的とするエネルギー帯の光子のみを抽出可能になることが明らかとなった。

PtのK吸収端と等しいエネルギーを有する回折X線を抽出する際、1次高調波利用時には白色X線の結晶への入射角度が約 1.4° と非常に浅くなるのに対し、3次高調波利用時には約 4.3° と大きな入射角度での抽出が可能となる。そのため、回折X線を利用する際に問題とされていた結晶を透過して

きた白色X線と回折X線の物理的距離についても、理論上では本研究と同様の条件において、1次高調波利用時には約3.5 cmと非常に小さくなるのに対し、3次高調波利用時には約11 cmと大きな距離を確保することが可能となる。本研究では、このようにX線回折における3次高調波を利用した場合においても目的とするエネルギー帯のX線を抽出できたことから、n次高調波を利用することで結晶を透過してきた白色X線と回折X線の分離がより容易になったと言える。

2. K吸収端画像および画像プロファイルの評価

本研究では、白色X線と比較して線量率が低下する回折X線での画像取得を行うということを考慮して、K吸収端画像取得時において10枚の画像を取得し、この10枚の画像を用いて加算平均画像を作成した。その結果、すべての条件において1回の照射によって得られる画像と比較して相対的雑音分散が約8-9 %に減少し、ノイズによる大きな値の変動がみられない画像プロファイルを得ることができた。このように回折X線を利用し、H領域およびL領域においてノイズによる大きな値の変動がみられないK吸収端画像を得ようとする複数回にわたる照射を必要とすることが難点となる。そこで、MSCT (Multi Slice Computed Tomography) 撮影の原理を応用して360° もしくは180° 回転しながら走査し、画像取得を行う方法が有効であると考えられる。X線CT撮影では、多方向からX線ビームにより走査し、得られた投影データ (光子の減弱率の対数値) を基にした計算処理により、各ピクセルにおける物質の線減弱係数を求め、画像化している。ここで、例えば180° の回転走査による画像取得を行う場合においてステップ角度を2° とした場合

には90方向からの投影データを得ることができ、これらを用いて画像再構成を行うことになるため、回折X線を利用する場合に問題となる1方向あたりでの線量率の低下を補うことが可能になると考えている。このように、CT撮影の原理を応用することが可能となれば、画像ノイズの影響を低減させることが可能となり、わずかな画像コントラストしか得られないことが予想されるPt製剤においても検出が可能になると考えられる。また、MSCT撮影の原理を応用することで、本研究と同様の方法によりK吸収端差分画像を取得する際に問題となるL領域とH領域の平面上での位置が異なるという影響をほとんど無視することができるようになるとも考えている。さらに、ほとんど同位相でエネルギーの異なる2種類の画像を一度の走査で取得することが可能になるとも考えている。

本研究ではこれらのことより、MSCT撮影の原理を応用した空間的エネルギー変化を有する3次高調波回折X線を利用することでPt製剤を検出することを最終的な目的としている。しかし、V.1項で述べたように回折X線と結晶を透過してきた白色X線の物理的距離は、理論上、Si単結晶-検出器間距離が70 cmの場合において約11 cmであるため、生体を対象とした場合、撮影する範囲によっては結晶を透過してきた白色X線が被写体に照射されてしまう可能性があることが予想される。また、臨床へ適用する際に空間的なエネルギーの変化量が制限されることになれば、利用できる照射野範囲も同時に制限されるため、現在のX線CT装置のような時間分解能を得ることが困難になることが予想される。そのため、臨床で適用するためにはこれらの点についてさらなる検討を行っていく必要があると考えている。

本研究で使用した3種類のPt箔のうち、

生体内における極めて濃度の薄いPt製剤と最も近い条件となるのは0.01 mmのPt箔である。Fig.8(a)に示したように0.01 mm厚のPt箔により取得したK吸収端画像では他の条件と比較してL領域とH領域の間で高い画像濃度差を得ることができなかつた。そこで、画像取得時と同様の条件でスペクトル測定を行った結果、0.01 mmのPt箔では、1次高調波のほとんどが吸収されることなく透過してくることが明らかとなった。このことより、3次高調波利用時において不要となる1次高調波がK吸収端画像での画像濃度差に影響を与えているのではないかと考えられた。そこで、Zrフィルターを付加することで1次高調波を除去し、同様の方法で画像取得を行った結果、Zrフィルターを挿入した場合には、Zrフィルターを挿入しなかった場合と比較してL領域とH領域の間での画像濃度差の値が増加した。このことより、1次高調波が画像濃度差に影響を与えていることが明らかとなり、3次高調波利用時において不要となる1次高調波を除去することの有用性を示すことができた。しかし、Fig.10に示したように1次高調波を除去する目的で金属フィルターを用いる場合、必要とする3次高調波の光子数も減少する。そのため、本研究と同様の方法で画像取得を行う際には、目的に応じて最適なフィルター厚を選択することが望ましく、さらに検討を行っていく必要がある。

VI. まとめ

本研究では、X線回折における3次高調波に着目し、目的とするエネルギーを有する回折X線の抽出および吸収落差現象の生じたK吸収端画像の取得について検討を行った。その結果、X線回折における3次高調波を利用することで結晶を透過してきた白色X線と回折X線の分離を容易にしつつ、より限局的に必要なエネルギー帯のX線を抽

出することが可能になることを明らかとした。また、Pt箔の厚さが厚くなるほどK吸収端による吸収落差の効果を大きくすることができ、より高い画像濃度差を有するK吸収端画像を得ることができたことから、本研究と同様の手法を用いることでPt製剤の検出も可能になることが示唆された。さらに、1次高調波を金属フィルターで除去することにより、K吸収端画像での画像濃度差をより明瞭にすることが可能であることを明らかとした。これより、生体内における極めて薄い濃度のPt製剤を検出する場合においても、あらかじめ1次高調波を除去することでより高いコントラストをもつK吸収端差分画像が得られることが示唆された。

参考文献

- (1) Kunio Doi: Diagnostic imaging over the last 50 years: research and development in medical imaging science and technology, *Phys. Med. Biol.* 51, R5-R27, 2006
- (2) Baldelli P, Taibi A, Tuffanelli A et al.: Dose comparison between conventional and quasi-monochromatic systems for diagnostic radiology, *Phys. Med. Biol.* 49(17), 4135-4146, 2004
- (3) Abudurexiti A, Kameda M, Sato E et al.: Demonstration of iodine K-edge imaging by use of an energy-discrimination X-ray computed tomography system with a cadmium telluride detector, *Radiological Physics and Technology*, 3(2), 127-135, 2010
- (4) 岡崎篤：連続X線を用いた回折実験，*日本結晶学会誌*, 14, 140-148, 1972
- (5) 長尾真人, 楠本韶：白色X線応力法，*日本材料学会誌*, 26(285), 576-583, 1977
- (6) 千川純一, 藤本勲：テレビ撮像技術のX線回折への応用，*日本物理学会誌*, 25

- (4), 321-324, 1970
- (7) 雨宮慶幸, 神谷信夫, 宮原諄二: 輝尽性蛍光フィルムのX線回折への応用, 応用物理, 55(10), 957-961
- (8) Sarnelli A, Taibi A, Tuffanelli A et al.: K-edge digital subtraction imaging based on a dichromatic and compact x-ray source, *Phys. Med. Biol.* 49, 3291-3305, 2004
- (9) 横井知洋, 高田忠徳, 市川勝弘: 直接型および間接型Flat Panel DetectorsとComputed Radiographyにおける物理的評価を利用した画質同一化の試み, 日本放射線技術学会雑誌, 67(11), 1415-1425, 2011
- (10) Bacher K, Smeets P, Bonnarens K et al.: Dose Reduction in Patients Undergoing Chest Imaging: Digital Amorphous Silicon Flat-Panel Detector Radiography Versus Conventional Film-Screen Radiography and Phosphor-Based Computed Radiography, *American Journal of Roentgenology*, 181(4), 923-929, 2003
- (11) 幸田勝博, 宮原諄二: イメージングプレートへの応用, *RADIOISOTOPES*, 41(1), 35-40, 1992
- (12) 倉本卓, 前田浩志, 中原佑基, 他: ビームハードニング特性を考慮したエネルギー差分法の検討, 医療工学雑誌, 4, 9-16, 2010
- (13) 加藤誠軌: セラミックス基礎講座3 X線回折分析, 95-96, 内田老鶴圃, 東京, 1997.
- (14) MAEDA K et al.: A new method of K-edge subtraction by using diffracted x rays with spatial energy sift, *Proceeding of IFMBE* 39, 2012.
- (15) 加藤誠軌: セラミックス基礎講座3 X線回折分析, 100-101, 内田老鶴圃, 東京, 1997.
- (16) Maeda K and Ueda Y: Evaluation of detectability for low density drugs by using a diffracted monochromatic x ray, *Japanese Journal of Medical Physics*, Vol. 33, Sup3, 83, 2013.
- (17) 黒田司: 結晶・表面の基礎物性, 13-15, 日刊工業新聞社, 東京, 1993
- (18) 黒田司: 結晶・表面の基礎物性, 43-46, 日刊工業新聞社, 東京, 1993
- (19) 前田浩志, 松本政雄, 谷口明 他: 高分解能Schottky CdTe検出器を用いた診断領域X線スペクトルの測定とその補正, *医学物理学*, 24(2), 49-60, 2004.
- (20) 前越久 (監修): 光子減弱係数データブック, 108, 日本放射線技術学会, 京都, 1995