

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286087

研究課題名(和文)パラメトリックX線による元素識別トモグラフィの実現

研究課題名(英文)Study on element-sensitive tomography using parametric X-ray radiation

研究代表者

早川 恭史 (HAYAKAWA, Yasushi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：40307799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：日本大学のパラメトリックX線源(PXR)の特性を利用することで、特定元素の3次元分布が取得できることを実験的に実証した。K殻吸収端差分(KES)法と呼ばれる手法に基づき、試料中のSr元素の3次元分布をX線コンピュータ断層像(CT)として取得することができた。最初はPXRのエネルギー選択性を利用して、SrのK殻吸収端前後のCT撮像を個別に行い、その差分としてSrの分布を得た。次に、PXRビーム内のエネルギー変化を利用して2色交差ビームを形成し、吸収端前後の断層像を同時に取得する実験を実施した。その結果より、Srの3次元分布を取得できることが確認された。

研究成果の概要(英文)：Detecting a three-dimensional (3D) distribution of a specific element has been experimentally demonstrated using the parametric X-ray (PXR) source at Nihon University. Based on the K-shell edge subtraction (KES) method, the 3D-distributions of Sr element in the samples were obtained as computed tomography (CT) images. First, 2-color CT experiments were independently carried out at the X-ray energies above and below the Sr K-shell absorption edge using tunability of the PXR source. The Sr distribution was obtained from the subtraction between these CT images. Next, the experiment for simultaneous KES-CT was performed using dual-energy crossing beams based on the spectral property of the PXR beam. The result shows that the Sr distribution can be obtained by this unique method.

研究分野：加速器科学

キーワード：量子ビーム測定手法 PXR 単色X線 CT 元素分析

1. 研究開始当初の背景

(1) 新奇な発生原理によるエネルギー選択性を持った単色X線源の開発が期待され続けており、パラメトリックX線放射(PXR)と呼ばれる現象を利用したのもその1つである。PXRは相対論的な荷電粒子と結晶の相互作用で生じるX線放射現象であり、日本大学では電子リニアックからの100MeV電子ビームを利用したPXR線源の開発に取り組み、実現した。常設線源としては世界初であった。このPXR線源は照射野が直径10cm以上確保できるためイメージング用途に適しており、高度なイメージング技術への応用が試みられた。特に完全結晶を用いて試料によるX線の屈折を検出する回折強調イメージング(DEI)に成功し、PXRの主要な応用として確立しつつある。特にPXRを用いた撮像で位相コントラストや小角散乱コントラストを実際に取得できたことは、世界でもユニークな成果であった。

(2) 近年のX線画像検出器の性能向上や日大PXR線源における安定性向上の努力により、PXRを用いてのコンピュータ断層像(CT)撮像が現実的なものとなってきた。DEIと単色X線CTという従来はシンクロトロン放射光を用いて研究されてきた高度なイメージング技術が可能となり、さらにPXR線源に固有な応用の開拓が期待される状況となっていた。

2. 研究の目的

(1) PXR線源の特性を利用し、特定元素の吸収端を跨いだ2色交差ビームを形成して2つのCT像を同時に取得し、その差分によって特定元素の3次元分布が得られることを実験的に実証する。

(2) 研究目的を達成するため、マイルストーンとして以下の研究目標を設定する。

PXRを用いた大照射野CT撮像実験

DEI実験セットアップを利用したステレオグラム実験

CT撮像において、PXRのエネルギー選択性利用したK殻吸収端差分法(KES)を導入し、特定元素識別の可能性の確認  
KES法が適用できる2色交差ビームを用いた同時CT撮像(KES-CT)の実現とその評価

特に研究目標は通常のシンクロトロン放射光源でも前例が無い。達成すればPXRの特徴を生かすというだけでなく、他の原理に基づくX線源では困難な非常にユニークな成果になり得る。

3. 研究の方法

(1) まず、研究目標の取り組みとして、PXR線源から取り出した直径100mmのPXRビームを用いた単色X線CT撮像を実施した。そのために、大面積(128mm x 128mm)のフ

ラットパネル検出器(FPD)を導入し、熱ノイズの特性を調べた上で測定を行った。試料としては生体試料等を用意したが、大面積撮像の利点を生かすという観点では試料は直径30~40mm程度のサイズとなり、軽元素物質といえどもある程度エネルギーの高いX線を用いる必要がある。そのため、PXR放射源としてはSi(220)結晶を選び、25keV近辺のエネルギーのPXRビームを用いて実験を実施した。ここで、本加速器からの電子ビームに関しては、研究全体を通してエネルギー100MeVという条件であった。測定は回転ステージで試料を0.5~1°程度の角度ステップで回転と投影像の撮像を繰り返すという方法で実施した。

(2) ステレオグラム等の実験を実施するためにはPXRビームから交差ビームを形成する必要がある。DEIで用いる実験系を利用した交差ビーム形成の概略を図1に示す。PXRビ

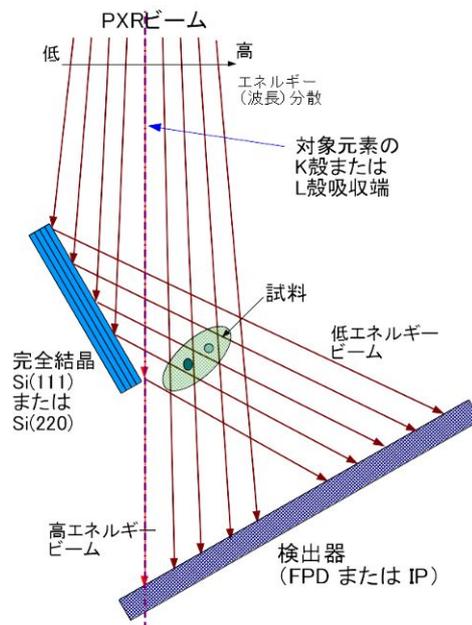


図1: DEI実験系を利用したX線交差ビーム形成の概念図。PXRビームの中心エネルギーを特定元素の吸収端に合わせると、吸収端を跨いだ2色の交差ビームとなる。

ームの低エネルギー側をDEI分光結晶で反射することにより、交差ビームを実現した。本研究代表者らのこれまでの研究成果として、PXRビーム内の空間的なエネルギー変化(空間チャープ)と円錐状のビーム発散が補償しあう関係により、平面波と同じように完全結晶で回折可能ということが分かっている。PXR線源はエネルギーが連続的に選択可能なX線源であり、その特徴を生かしてPXRビームの中心エネルギーを正確に特定元素の吸収端に調整することにより、吸収端を跨いだ2色の交差ビームが実現する。

2本の交差ビームの交差点に試料を設置することにより、研究目標の視差のあるステレオグラムの実験が可能となる。2次元像を

取得すればよいので、画像検出器としてまずは設置しやすいイメージングプレート(IP)を用い、次に最終的な目標のために大面積 FPD による撮像の準備も進めていくことにした。

(3) 研究目標 を実施するため、実証実験においては対象とする元素をストロンチウム(Sr)とした。これは K 殻吸収端のエネルギーが 16.1keV であり、この近傍のエネルギーの X 線の透過力を考慮すると、軽元素で構成される試料なら直径 1~2cm 程度のサイズが許容できる。また、このあたりのエネルギーの PXR ビームの強度が相対的に強いという線源側の事情もある。Sr は白色顔料として入手可能な SrTiO<sub>3</sub>(STO)の形態で用いることにした。

研究目標 の段階では、研究目標 と同様にシンプルな CT 撮像を PXR の中心エネルギーを変えることによって実施した。X 線の強度を優先し、PXR 線源には Si(111)面を選んで実験を行った。K 殻吸収端より低エネルギー側の測定として 15.5~15.6keV、高エネルギー側の測定として 16.6~16.7keV に調節して実験を行った。PXR ビームは比較的安定しており、試料や回転ステージに関しては、エネルギー変更に伴って調整する必要はなかった。

研究目標 を実現するため、研究目標 で実現した実験系の精度をさらに高めるとともに、画像検出器として大面積 FPD を導入した。X 線ビームの交差点には CT 撮像のための回転ステージを設置したが、DEI 実験における分光結晶に要求される角度精度(0.0001°)と比較して、CT 撮像の投影像取得の際の回転角度精度は 0.01°程度で十分であるため、小型ステージを選択した。また、Sr 元素 K 殻吸収端での Bragg 角が大きく反射ビームの面積が大きくなるという利点から、PXR 線源として Si(220)結晶を用いることにした。

(4) CT 撮像結果からの 3 次元断層像の再構成は、測定終了後にデジタルノイズ処理などと

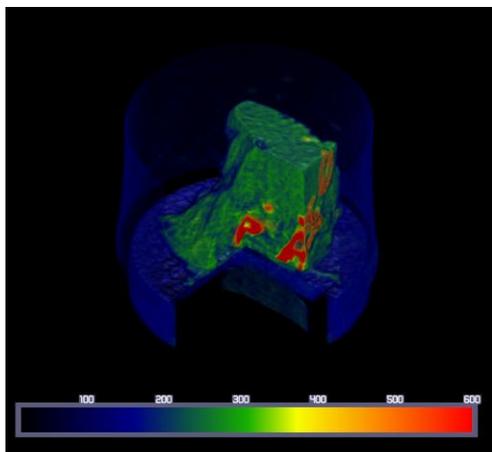


図 2: 中心エネルギー25keV の PXR ビームを用いた、犬 2 前脚の腫瘍部の断層像

ともにポストプロセスとして行った。再構成アルゴリズム自体は高度化の対象ではないため、従来のフィルタ補正逆投影法を用いることにした。

#### 4. 研究成果

(1) 研究目標 で得られた主要な成果は、PXR ビームを用いた病理組織の 3 次元断層像の取得である。試料としては倫理面での扱いが容易な動物の病理組織を用いた。図 2 は犬前脚の腫瘍周辺の組織に対し、中心エネルギー25keV の PXR ビームを用いて CT 撮像を実施した結果得られた 3 次元断層像のカットモデル表示である。検出器として大面積 FPD を用い、投影像 1 枚当たり 20s の露光で撮像し、計 360 枚の投影像から再構成した結果である。局所的に密度が高い骨(爪)が原因のアーチファクト(スターノイズ)はみられるものの、現実的な加速器マシンタイム内で軟組織の断層像が比較的視認性良く得られた。また、このような実験を通して大型 FPD の特性を学び、暗電流ノイズ処理や安定な空冷方法といったノウハウを蓄積することができた。

(2) 研究目標 においては、交差ビームを形成すればよいので、選択する PXR エネルギーに制約はないが、KES 実験の準備も兼ねて中心エネルギー16.1keV で実験を行った。図 3 にその典型的な結果を示す。反射される低

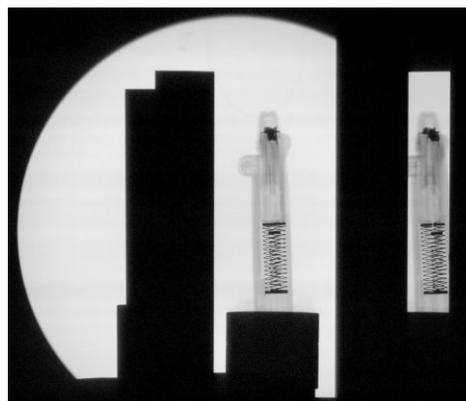


図 3: ボールペンを試料として取得したステレオグラム画像。検出器として IP を使用。

エネルギービームのサイズは分光結晶のサイズで制約されるため、試料には細長く照射野におさまりやすいボールペンを用いた。画像検出器として IP を用い、撮像時間 10 分で得られたものである。視差は Bragg 角の 2 倍となるので、およそ 14°であるが、これを考慮して立体視用のアナグラムを作成した。最終的には CT 撮像を試みるので、3 次元情報に関する試みはこの程度にとどめた。

(3) 研究目標 として Sr を標的要素とした実験を実施し、KES 法を適用して実際に Sr 元素を特定できる 3 次元断層像の取得に成功した。試料としては、木製の人形(マトリョー

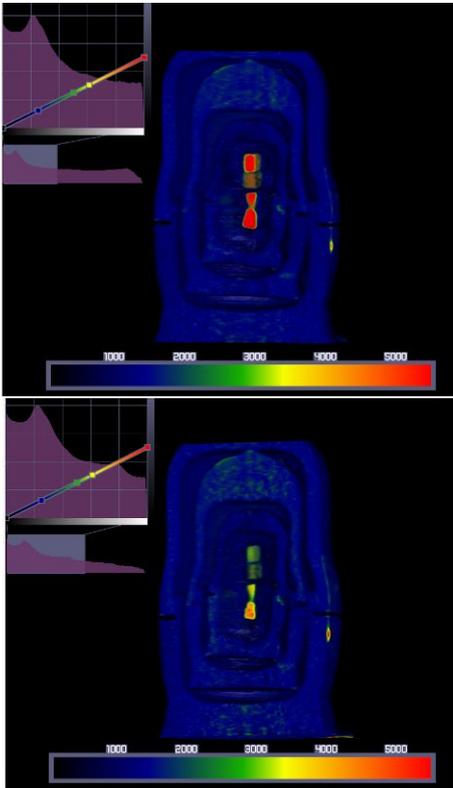


図 4: 16.7keV (上) および 15.5keV (下)の PXR ビームを用いた CT 実験の結果として得られた 3 次元断層像の比較。

シカ)に封入した、STO 着色ポリエチレンペレットを用いた。このペレット自体の比重は  $1.0\text{g/cm}^3$  で、Sr 元素の重量比は 4.8%であった。図 4 はこの試料を 16.7keV と 15.5keV の PXR ビームを用いて行った CT 撮像実験の結果である。いずれも 1 枚 10s の露光時間で取得した 360 枚の投影像から再構成したものである。Sr の K 殻吸収端のエネルギーを跨いでの比較であるため、ペレットのみ明確に吸収コントラストが異なるのがわかる。

図 5 は図 4 の 2 つの断層像の差分を取ったものである。両者のコントラストを木材の領域で規格化して調整したうえで、画像の引き算を行った。人形の着色に使われた顔料には

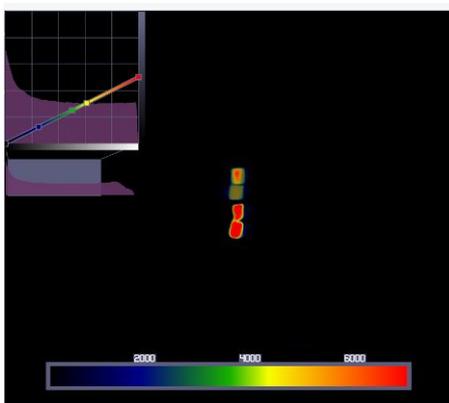


図 5: 吸収端を跨いだ 2 色の断層像の差分をとったもの。木材の領域で規格化してから画像演算を行った。

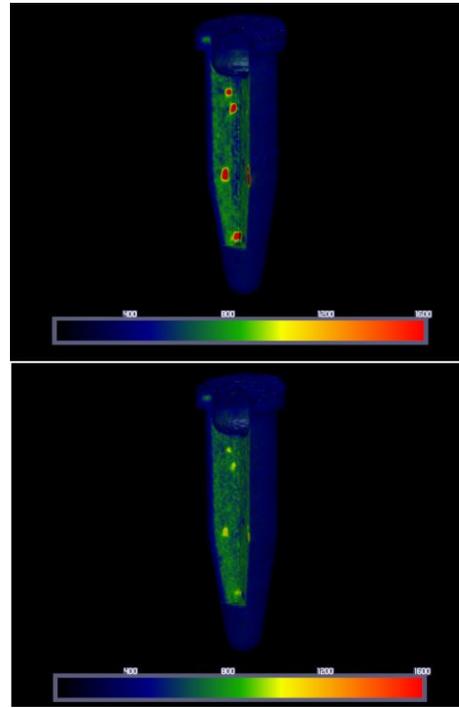


図 6: 交差ビームを用いて取得した 2 色 CT 像。上図が Sr-K 殻吸収端に対し高エネルギー側のビームによるもの、下図が低エネルギー側のビームによるものである。

比重の高いものも含まれており、1 つの断層像だけでは Sr を含んだものかどうかまでは判別できないが、2 つの断層像の差分を取ることによって、Sr を含むのがペレットのみであることが明確にわかる。また他の実験で同様の実験を実施したところ、重量比で 0.6%の濃度の Sr の 3 次元分布を明瞭に取得することができた。(雑誌論文 )

(4) 研究目標 と同様な実験は通常のシンクロトロン放射光施設で実施可能であり、新規性は小規模の施設における実績の少ない線源を使用した点に留まる。しかし、研究目標は放射光施設でも前例が無く、湾曲結晶ポリクロメータを用いて 2 次元像を取得した例が海外の放射光施設で実施されたのが最近報告されている程度である。

研究目標 のステレオグラムと同様に、PXR ビームの中心エネルギーを 16.1keV にして実施した 2 色交差ビーム同時 CT 撮像実験の結果の一例を図 6 に示す。試料として、研究目標 でも使用した STO 着色ポリエチレンペレットを細かく破碎し、それをエポキシ樹脂で固めてポリプロピレンチューブに封入したものを用意した。画像検出器として大型の FPD を利用し、図 3 と同様に 1 枚の画像で 2 色の投影像を取得した。投影像は 1 枚当たり 20s の露光時間で測定し、360 枚取得した。2 つの断層像は、投影像から別々に切り出し、個別に再構成して得られたものである。吸収端を跨いだことにより、Sr を含んだペレットの破片の場所でコントラストが大きく変化しているのがわかる。

この測定で得られる2つの断層層の間には、ステレオグラムで言及したように Bragg 角の2倍だけ視差が生じる。今回の場合は、視差は 23.1° となるので、この角度だけ画像回

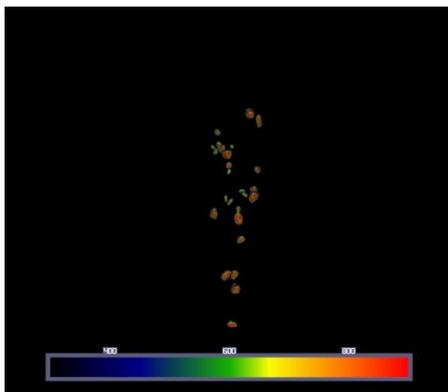


図 7: 交差ビームで得られた 2 つの断層像の差分をとったもの。エポキシ樹脂の領域で規格化してから画像演算を行った。

転を施して KES 法を適用し、差分を取ったのが図 7 である。エポキシ樹脂の領域でコントラストの規格化を行って画像の引き算処理を行った。Sr を含んだポリエチレンの破片のみが明瞭に残り、この手法により 3 次元元素イメージングが可能であることを実証した結果となった。視差に伴う画像の回転も、PXR のエネルギー設定に基づいて Bragg 角から算出した値を使うことで、特に支障となる点は見られなかった。ただし、検出器のノイズや温度変動に起因したアーチファクトといった問題も見られた。対象元素の濃度が低い場合は、このような問題について改善する必要があると思われる。

(5) 今回は比較的 Sr 濃度の高い試料を用いているが、シンクロトロン放射光源を用いて行われている KES 法による 3 次元元素分布の測定を PXR 線源でも可能なことを実験的に実証することができた。特に、最終的な目標であった、吸収端前後でエネルギーが近接した単色性の良い 2 本の交差ビームを形成した上での KES 手法の適用は、世界的に見てもユニークな成果であり、特に CT 撮像まで至って 3 次元元素分布まで得られたことは、PXR 線源特有の応用の開拓という観点でも大きな進展であったといえる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kaneda, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakae, T. Sakai, I. Sato, Y. Takahashi, T. Tanaka, Element-sensitive computed tomography by fine tuning of PXR-based X-ray source, Nucl. Instr. and Meth. B

355 (2015) 251-256, 査読有, DOI:

10.1016/j.nimb.2015.03.010

T. Kaneda, K. Sekiya, M. Suemitsu, T. Sakae, Y. Hayakawa, Y. Kawashima, N. Hirahara, H. Muraoka, K. Ito, T. Muramatsu, M. Ishida, H. Okada, Preliminary Clinical Application Study of Parametric X-rays in Diagnostic Imaging, International Journal of Oral-Medical Sciences 14 (2015) 8-12, 査読有, DOI:

10.5466/ijoms.14.8

Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kaneda, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakae, T. Sakai, I. Sato, Y. Takahashi, T. Tanaka, X-ray Imaging Based on Small-angle X-ray Scattering Using Spatial Coherence of Parametric X-ray Radiation, Journal of Physics: Conference Series 517 (2014) 012017

1-6, 査読有, DOI:

10.1088/1742-6596/517/1/012017

〔学会発表〕(計 16 件)

Y. Hayakawa, Novel Imaging Techniques Using an Exotic X-Ray Source with Spatial Chirp, The 10th Asian Meeting on Biomedical Synchrotron Radiation Imaging (AMS12015) (2016 年 2 月 19 日 ~ 22 日) 山形大医学部 (山形県山形市)

Y. Hayakawa, Dual energy computed tomography for element analysis based on K-shell absorption edge using the LEBRA PXR, MASR 2015 (8th International Symposium on Medical Applications of Synchrotron Radiation) (2015 年 10 月 5 日 ~ 9 日) Villard de Lans (フランス)

Y. Hayakawa, Element-sensitive Computed Tomography by Fine Tuning of PXR-based X-ray Source, The 6th International Conference Channeling 2014 - Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena (2014 年 10 月 5 日 ~ 10 日) Capri (イタリア)

Kaneda T., Clinical application of parametric X-ray in diagnostic imaging: Preliminary study, 96th Annual Meeting, Scientific Sessions and Exhibition, American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons (2014 年 9 月 7 日 ~ 12 日) Honolulu (米国)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川 恭史 (HAYAKAWA, Yasushi)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 40307799

(2)研究分担者

金田 隆 (KANEDA, Takashi)  
日本大学・歯学部・教授  
研究者番号： 40185947

高橋 由美子 (TAKAHASHI, Yumiko)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器  
研究機構・物質構造科学研究所・研究員  
研究者番号： 70339258

境 武志 (SAKAI, Takeshi)  
日本大学・理工学部・助手  
研究者番号： 20409147

(3)連携研究者

寒河江 登志郎 (SAKAE, Toshiro)  
日本大学・歯学部・教授  
研究者番号： 20112948