

電子リニアックを用いたパラメトリック X 線源とその応用

一回折強調イメージングと K 端差分法による元素検出

早川恭史

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

高橋由美子

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

要旨

日本大学電子線利用研究施設では電子リニアックを用いたパラメトリック X 線放射 (PXR) による X 線源を開発し、連続エネルギー選択性を持つ単色 X 線ビームをユーザー利用研究に供給している。PXR ビーム内のエネルギー分散を利用することで、円錐広がりを持った X 線ビームでありながら完全性の高い単結晶を分光結晶に用いた回折強調イメージング (DEI) が可能である。位相コントラストイメージングに加え、DEI の実験系を K 端差分法 (KES) に応用可能な特定元素の K 殻吸収端を跨いだ 2 色交差ビームの形成に利用することができる。この 2 色交差ビームを用いると KES に必要な 2 色の像を同時に取得することが可能で、コンピュータ断層撮像 (CT) により対象元素の 3 次元分布が得られる。

1. はじめに

電子加速器を用いる光源として、シンクロトロン放射光 (Synchrotron Radiation, SR) や自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) 等がよく知られている。加速器光源の特徴として高輝度・高指向性が挙げられるが、挿入光源や分光器との組み合わせにより連続波長選択性を持った単色光源を実現できるところも大きな利点である。しかしながら、いずれの放射原理においても X 線領域までカバーするには数 GeV 領域の電子エネルギーが必要となり、加速器の規模も大きくなる。従来より小型の電子加速器で実現できる X 線源の開発が模索されており、その例としてレーザーコンプトン散乱 (Laser Compton Scattering, LCS) を用いた X 線源開発などがある¹⁾。日本大学電子線利用研究施設 (Laboratory of Electron Beam Research and Application, LEBRA) における X 線源開発もその一環といえる²⁾。日大 LEBRA は 125 MeV 電子リニアックを利用した FEL 放射光施設として設置され、2001年に波長 1.5 μm の近赤外 FEL 発振に成功し、2004年から利用研究にビームを供給している³⁾。FEL の開発と並行して電子リニアックを用いた X 線源の開発が検討されたが、加速器の設計上の最大エネルギーが 125 MeV であることに加え、放射線発生装置としての申請においても 100 MeV を上限とした運転で許可を受けていることから、通常の挿入光源では実現困難なことは明らかであった。また、特徴のある X 線源となるにはエネルギー可変

で単色の X 線源が望ましかったため、パラメトリック X 線放射 (Parametric X-ray Radiation, PXR) と呼ばれる現象を放射源として採用することになった。

PXR は相対論的な荷電粒子が周期構造を持つ結晶媒質を通過する際に生じる放射現象で、外見上は X 線 Bragg 回折の入射 X 線を荷電粒子に置き換えた形である⁴⁾。単色化された回折 X 線が同様に得られ、そのエネルギーは結晶面への荷電粒子の入射角に応じて連続的に変わる。LEBRA では専用ビームラインを持つ 2 結晶型 PXR 線源を開発し、2004年に PXR ビームの取り出しと観測に成功した。それ以降、応用の開拓をしつつ PXR 線源のユーザー利用を進めている⁵⁾。エネルギー可変単色 X 線であることに加え、比較的広い照射野を有しているため応用としてはイメージングが中心となっている。電子リニアックの平均ビーム電流に制約され、平均強度が低く画像取得には時間を要するが、従来では GeV クラスの SR 光源以外では難しいとされていた先端的な X 線イメージングを大学附置施設で可能にした⁶⁾。

2. PXR 線源の特徴

2.1 PXR の発生機構とその特性

相対論的な速度の荷電粒子であれば粒子の種類に依らず PXR は生じるが、X 線源開発の観点から以下では入射粒子として電子のみを考える。PXR は、入射電子の進行方向のローレンツ収縮のために進行方向に対して垂直方向の

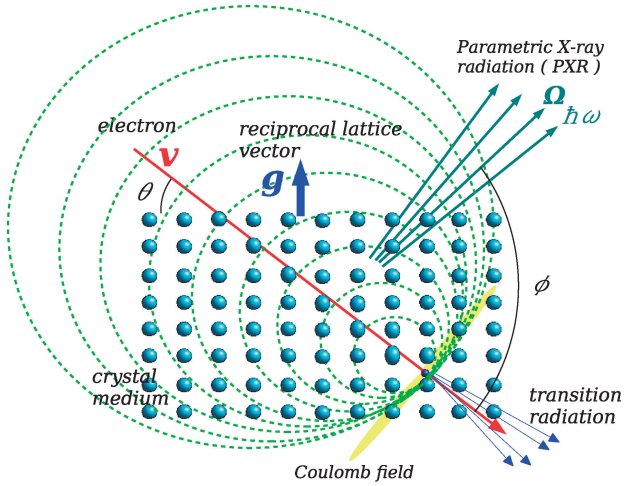


Fig. 1 (Color online) Schematic explanation of the wavefront formation of PXR induced by the electric field of a relativistic electron.

電場が先鋭化し、それにより結晶原子が分極するのに伴う放射と解釈できる。**Fig. 1**に概念図を示すが、結晶の場合は光源となる原子が周期的に並んでいるため、相対論効果により破線にあるような波面が形成される⁷⁾。放射は前方と後方に生じるが、前方は共鳴遷移放射に相当し、その波面間隔(波長)は電子エネルギーに強く依存する。それに対し、後方放射の波面間隔は十分に相対論的な領域では電子エネルギーの変化に鈍感で、光子エネルギーは結晶面間隔と放射方向で決まる。単位ベクトル Ω の方向に放射されるPXRの光子エネルギー $\hbar\omega$ は、入射電子速度を v 、結晶の逆格子ベクトルを g 、真空中の光速を c とすると

$$\hbar\omega = \frac{\hbar c |\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}|}{c - \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega}}, \quad (1)$$

となる。全エネルギー E の電子(静止質量 m)1個が厚さ L の結晶を通過する際に、立体角 $d\Omega$ に放出されるPXR光子数 dN は

$$\frac{dN}{d\Omega} = \frac{e^2 \omega L |\chi_g(\omega)|^2}{2\pi \hbar v (c - \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega})} \cdot \frac{\left| \frac{\omega}{c} \boldsymbol{\Omega} \times \left(\frac{\omega}{c^2} \mathbf{v} + \mathbf{g} \right) \right|^2}{\left\{ \left| \frac{\omega}{c} \boldsymbol{\Omega}_\perp - \mathbf{g}_\perp \right|^2 + \left(\frac{\omega}{v} \right)^2 \gamma^{-2} \right\}^2}, \quad (2)$$

と表される⁸⁾。ここで、 $\gamma = E/mc^2$ 、 $v = |\mathbf{v}|$ 、 $\boldsymbol{\Omega}_\perp$ と \mathbf{g}_\perp はそれぞれ $\boldsymbol{\Omega}$ と \mathbf{g} の \mathbf{v} に対する垂直成分である。 $\chi_g(\omega)$ は結晶の電気感受率のフーリエ成分であり、誘電率は1で近似している。Eq. (2)の放射分布は、 \mathbf{v} と \mathbf{g} の成す面を水平とすると**Fig. 2**のようになり、他の相対論的電子による放射現象と同様に $1/\gamma$ に依存した角度広がりを持ち、中心が凹んだ形となる⁹⁾。中心のPXRエネルギーEq. (1)は、入射電子がX線であった場合にBragg回折条件を満

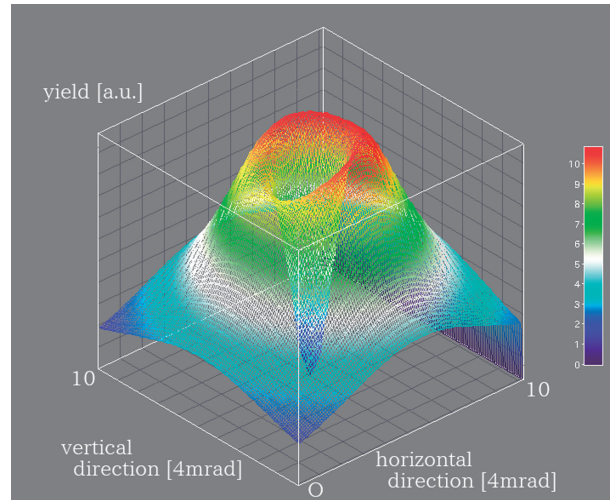


Fig. 2 (Color online) The spatial distribution of PXR from Si(111) planes irradiated with a 100-MeV electron at the Bragg angle of 7.5° .

たすエネルギーと一致し、Bragg回折と同様にBragg角に相当する角度を調整することにより、放射されるX線のエネルギーを選ぶことができる。電子エネルギーは放射の広がり角つまりX線ビームの指向性には影響するが、光子エネルギーは電子エネルギーにはほとんど依存せず、結晶の種類と放射方向で決まる。得られるX線のエネルギーが電子エネルギーに依らないのはPXRの大きな特徴の一つである。単一の電子によるPXR強度の空間分布は中心が弱くなるため、応用面で不利な要因になり得るが、電子ビームは結晶内で多重散乱を受けてmradオーダーの角度広がりを持つようになり、実際に観測されるPXRビームの分布は中心の凹みが埋まり、比較的平坦なビームプロファイルになる。これは応用としてイメージングに向いている要素の一つである。また、Eq. (2)を全立体角で積分した1電子当たりの放射確率は、結晶の種類や厚さに依存するが、概ね $10^{-5} \sim 10^{-4}$ のオーダーである。

2.2 2結晶型PXR線源

結晶を回して電子ビーム軸と結晶面の成す角(これをBragg角と呼ぶことにする)を調整すれば、PXRの光子エネルギーを自由に選ぶことができる。しかし、エネルギーの変化に伴いX線の放射方向も変わるため、日大LEBRAではPXRの放射源の結晶と同じ結晶面による回折でPXRビームを反射し、固定ポートからビームを取り出すことにした。ここで、電子エネルギーがSR光源に比べて低く放射円錐広がり10 mrad程度あるため、結晶の回折で効率良く輸送できるかが問題となる。電子速度と結晶の逆格子ベクトルが水平面上にある場合、PXRビームは水平方向にエネルギー分散を持つ。Bragg角を θ 、水平面上に放射されるPXRと電子ビームの成す角を ϕ とすると、Eq. (1)は

$$\begin{aligned} \hbar\omega &= \frac{\hbar c |\mathbf{g}| \sin \theta}{1 - \beta \cos \phi} \approx \hbar\omega_B + \frac{d(\hbar\omega)}{d\phi} \Delta\theta \\ &\approx \hbar\omega_B \left(1 - \frac{\sin 2\theta}{1 - \cos 2\theta} \Delta\theta \right) \\ &= \hbar\omega_B \left(1 - \frac{\Delta\theta}{\tan \theta} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

と近似できる¹⁰⁾。ここで、 $\hbar\omega_B = \hbar c |\mathbf{g}| / 2 \sin \theta$ は通常の X 線 Bragg 回折のエネルギーと一致する PXR ビームの中心エネルギーである。 $\Delta\theta = \phi - 2\theta$ は微小で、 $\beta = |v|/c \approx 1$ と近似している。このエネルギー分散は PXR ビームの中心軸からの水平方向のずれ $\Delta\theta$ に対して線形なエネルギー変化となっており、空間チャープとも呼べる特性となっている。また、電子速度がビーム軸に対して僅かに傾いている場合にも Eq. (3) と同様な近似が成り立ち、電子ビームにある程度の角度発散があっても、放射される方向が同じなら PXR エネルギーが変わらないという性質がある¹¹⁾。ターゲット結晶から放射された PXR に対し、ターゲットと同じ結晶面の第 2 結晶を (+, -) 平行配置に置くと、円錐広がり角度シフトと Eq. (3) に従うエネルギーシフトが補償し合い、PXR ビーム全体で第 2 結晶の Bragg 回折条件が満たされる。その結果、円錐ビームであるにもかかわらず、完全性の高い平行平板結晶を用いて PXR ビームを高効率で反射することが可能となる。厳密には完全平行配置では回折されず、第 2 結晶の角度を 0.01° 程度小さくずらす必要がある。また、その回折幅は電子エネルギーに強く依存し、エネルギーが低くなるにつれて幅が広がり、ピークでの反射率が低下する。結晶にシリコン (Si) 単結晶を用いる場合、100 MeV の電子で発生した PXR ビームに対する第 2 結晶の最大反射率は、X 線エネルギーにもよるが概ね 10% 程度である¹²⁾。これは単結晶を用いた円錐 X 線ビームの輸送効率としては十分高いものであり、X 線のエネルギー選択性を保ちつつ固定ポートからの取り出しを可能にする。LEBRA では第 2 結晶で角度チューニングが可能な分離型 2 結晶システムを PXR 発生装置として開発し、Fig. 3 のように既存の FEL ビームラインと平行に PXR ビームラインを設置した。PXR ビームは厚さ 2 m の遮蔽壁を介し、加速器運転中に人が立ち入り可能な実験室にある X 線窓から取り出される。専用ビームラインを持った PXR 線源の開発は世界初の試みであり、現時点でも唯一の常設 PXR 線源となっている。

2.3 LEBRA-PXR 線源の仕様と応用

LEBRA では PXR 放射源として、Si(111) もしくは Si(220) の単結晶を用いている。LEBRA-PXR 線源の仕様を Table 1 に示す。パルス型リニアックを用いているためパルス X 線源であり、電子ビームの平均電流が数 μA に制約されることから、X 線光子数率は高々 10^7 個/s のオー

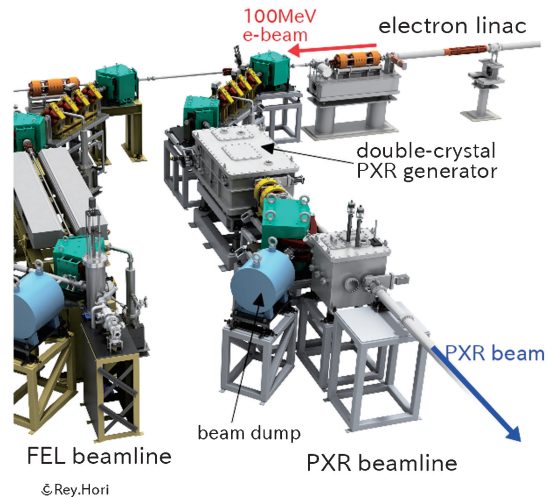


Fig. 3 (Color online) The beamlines (PXR, FEL) of the LEBRA facility.

Table 1 Specifications of the LEBR-PXR source.

Electron energy	100 MeV
Accelerating frequency	2856 MHz
Macropulse beam current	100–130 mA
Macropulse duration	4–5 μs
Repetition rate	2–5 pps
Average beam current	1–3.3 μA
Beam radius on the target	~ 0.2 mm (rms)
PXR energy range	
Si(111) target:	4.0–20.5 keV
Si(220) target:	6.5–33.6 keV
X-ray window	125- μm -thick PET
Irradiation field	100 mm in dia.
Total X-ray photon rate at X-ray window	$\sim 10^7$ /s@17.5 keV

ダーである。加えて、X 線窓はターゲット結晶から 7.3 m 離れており、円錐ビームである PXR は直径 100 mm の窓一杯に広がるため、面積当たりの X 線フラックスは非常に低くなる。従って、従来の X 線回折や散乱実験のように細くコリメートされた X 線ビームを要求する応用には不向きである。一方、直径 100 mm の照射野内の強度分布が比較的均一であるため、必然的にイメージングに基づく手法が応用の中心となっている^{13,14)}。従来の吸収イメージングに加え、位相コントラストイメージング (Phase-Contrast Imaging, PCI) や分散型 X 線吸収微細構造 (X-ray Absorption Fine Structure, XAFS) 測定が試みられている^{15,16)}。

3. PXR を用いた回折強調イメージング

実現した PXR の応用の内、特筆すべきものが PCI の測定手法の 1 つとして知られている回折強調イメージング (Diffraction-Enhanced Imaging, DEI) である¹⁷⁾。DEI は

X線が試料を透過する際に受ける屈折・散乱を下流の分光結晶で測る手法であり、Si単結晶を用いる場合、 $1\ \mu\text{rad}$ オーダーの屈折を検出することができる¹⁸⁾。そのためには平面波的なX線ビームが必要で、実験研究は主に第3世代SR光源を用いてなされてきた。PXRビームの場合、第2結晶を(+, -)に置くのと同様に3番目の分光結晶を(+, -, +)配置に置くことで、円錐ビームでありながら平面波的に回折することができる。第2結晶の段階では回折幅とピーク反射率が電子エネルギーに依存するが、第3結晶の回折幅は 0.001° 程度とSi単結晶自体の幅とほぼ同じで、ピークでの反射率も70~80%になる。このような特性のため、第3結晶を分光結晶とする形で、円錐状のPXRビームを用いたDEIの実施が可能となる。**Fig. 4**はPXR線源を用いたDEI測定系の概念図である。3番目の分光結晶はBraggケース、Laueケース共に可能であり、そこで得られた回折曲線の例を**Fig. 5**に示す。

円錐ビームを用いたDEIには大きな利点がある。SR光源の場合、広い照射野を得るために100 m程度の伝搬距離や非対称結晶を用いたX線ビームの拡大が必要となる。それに対し、PXRでは円錐広がりによって比較的短距離で広い照射野が得られる。LEBRA-PXRの場合、測定系の置き場所の問題でターゲット結晶から距離10 mでDEI実験を実施しているが、X線窓直後でも十分広い照射野が得られる。現状のDEI実験の照射野は20~30 mm四方

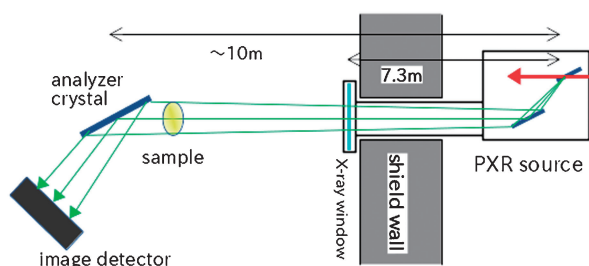


Fig. 4 (Color online) Schematic top view of the setup for DEI using the LEBRA-PXR source.

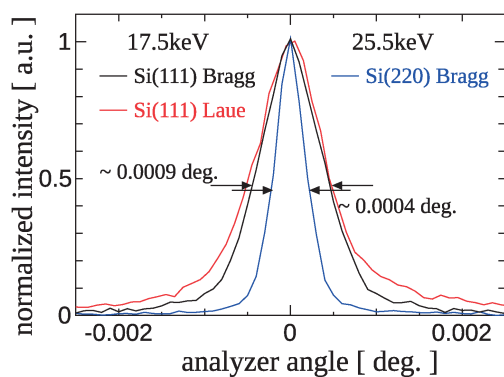


Fig. 5 (Color online) The rocking curves observed at the 3rd analyzer-crystal of the DEI setup.

程度であるが、十分大きな分光結晶を用意することができれば、直径100 mmの照射野が可能である。

LEBRA-PXR線源はSR光源に比べて平均強度が大きく劣るため、X線像の撮像には時間を要する。使用するX線エネルギーにもよるが、分光結晶で回折される像1枚の取得に数10秒~10分程度必要である。分光結晶の角度スキニングを実施すると、1試料の測定時間は数時間に及ぶことが通常となっている。これまでの努力により電子リニアックは安定しており、長時間に渡るDEI実験に特に支障は無い。現在ではDEIはLEBRA-PXR線源の主要な応用の1つとなっており、数多くの実験が実施されている¹⁹⁻²¹⁾。**Fig. 6**に25.5 keVのPXRビームを用いたDEI測定の例を示す。試料はアクリル、発泡スチロール、ポリスチレンでできた棒であり、吸収コントラストが非常に弱い試料である。DEIで得られた像を処理することで位相勾配像(**Fig. 6(c)**)が得られる。発泡スチロールにおいては、X線小角散乱(Small-Angle X-ray Scattering, SAXS)の寄与で強いコントラストが得られる(**Fig. 6(d)**)ことが確認されている²²⁾。

4. K端差分法による元素イメージング

4.1 K端差分法

物質原子によるX線の吸収は、その内殻電子の束縛エネルギーを越えるところで不連続的に変化する。吸収が不連続的に変わるエネルギーは元素毎に固有で吸収端と呼ばれるが、最内殻のK殻の場合が特に吸収の変化が大きく、元素の同定に利用することができる。対象となる元素のK殻吸収端より僅かに高いエネルギーのX線で撮った像と、僅かに低いエネルギーで撮った像の差分を取ると、対象元素が存在する場所のみX線吸収に違いが出る。つ

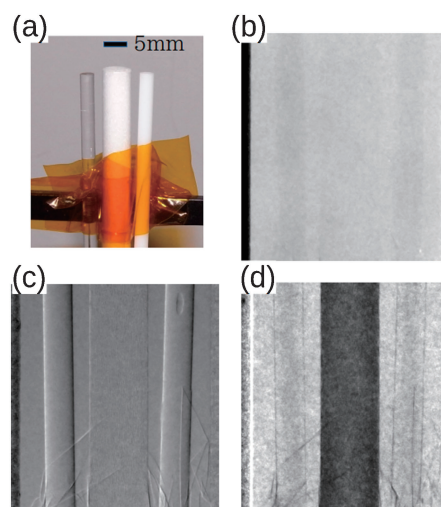


Fig. 6 (Color online) (a) The samples for the DEI experiment using 25.5-keV PXR. (b) The absorption-contrast image. (c) The phase-gradient image. (d) The SAXS-contrast image.

まり、その元素の 2 次元マップが得られることになり、K 端差分法 (K-Edge Subtraction, KES) とも呼ばれる²³⁾。KES をコンピュータ断層撮像 (Computed Tomography, CT) に適用すれば、元素の 3 次元分布が得られる。

KES イメージングは吸収端エネルギーを跨ぐ 2 色の X 線による撮像が必要なことから、単色で連続的にエネルギーを選べる SR 光源で行われてきた。最近、LCS 線源の準単色 X 線を用い、試料前に対象元素フィルターの有無で KES を行う試みも報告されている²⁴⁾。いずれにせよ、加速器光源からの単色化された X 線ビームを用いる場合は 2 色同時撮像は困難であり、別々に 2 種類の撮像をする必要がある。時間的に分離した測定となるため、この方法は temporal-KES と呼ばれることもある。PXR 線源はビーム内に空間チャープに伴うエネルギー幅を有しているが、照射野内のエネルギーを全て吸収端より高く、もしくは低くすることができるため、SR 光源と同じ様に通常の temporal-KES が可能である。PXR の平均強度が低いいため、CT 撮像に少なくとも 1 時間程度は必要となるが、ストロンチウム (Sr) 元素を対象とした temporal-KES-CT を実施し、Sr の 3 次元マッピングに成功している²⁵⁾。

4.2 同時 KES 法

通常の KES では取得される 2 種類の像は時間的に異なるが、2 色像を同時に撮像しようという試みもいくつかなされている。X 線源ではなく画像検出器のレベルでエネルギー分別して KES に相当する処理を行う方法などが試みられている²⁶⁾。SR 光源の場合、カナダ放射光源 (Canadian Light Source, CLS) 等で湾曲結晶ポリクロメーターを用いる方法が開発されている。吸収端近傍にエネルギー分散を持つ収束ビームを作り、焦点に試料を置いて 2 色同時測定する方法であるが、直接得られるのは 1 次元像であり、3 次元 CT には 2 軸掃引が必要となる^{27,28)}。

それに対し、PXR 線源では Fig. 7 のような DEI 測定系を流用した実験系で同時 KES が可能となる。PXR ビーム内の空間チャープによるエネルギー変化は、結晶の種類や X 線エネルギーにもよるが、概ね中心エネルギーの 10 % 程度である。対象元素の K 殻吸収端に PXR ビームの中心エネルギーを調整し、低エネルギー側のみ分光結晶で反射すると、吸収端を跨いだ 2 色交差ビームが形成される。2 本のビームのエネルギー差は数 100 eV ~ 1 keV 程度の KES に適したものであり、その交差点に試料を置くだけで、吸収端上下の像 2 枚が同時に撮像できる。実際には同時に得られる 2 次元投影像には Bragg 角の 2 倍の視差があるが、試料を回転させて 3 次元 CT 撮像を行う場合は、同時に 2 色の断層像が得られるとあって差し支えない。Fig. 8 に実際の測定系の様子を示す。X 線画像検出器には、感度と有効面積に優れたフラットパネル検出器 (Flat-Panel Detector, FPD) を主に使用している。

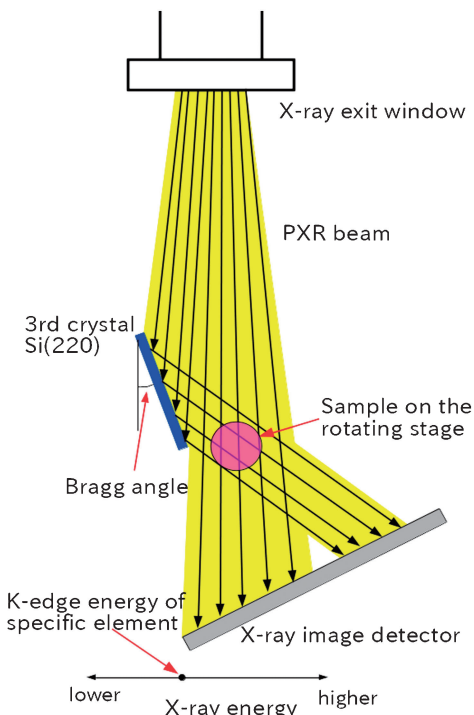


Fig. 7 (Color online) Schematic top view of the setup for simultaneous KES imaging.

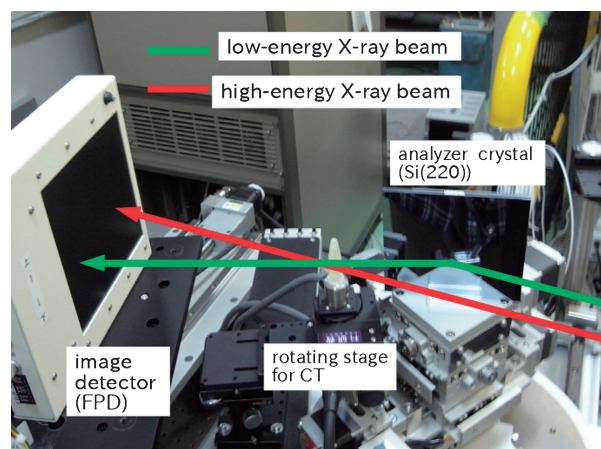


Fig. 8 (Color online) The photograph of the experimental setup for simultaneous-KES CT.

4.3 同時 KES-CT による元素トモグラフィ

Sr を含んだ試料に対して行った、中心エネルギー 16.1 keV の PXR ビームを用いた同時 KES-CT による元素トモグラフィの例を紹介する。Fig. 9(a) に示す試料は、エポキシ樹脂中に白色顔料 SrTiO₃ (STO) で着色したポリエチレン小片 (Sr 元素は重量比で 4.8%) を分散させたものである。これに対して同時 KES 法で得られた投影像 (撮像時間: 20 s) が Fig. 9(b) である。第 3 結晶の反射率がおよそ 75% であるため、2 本のビームで得られる画像の画質に大きな差は無く、差分処理する際の問題が少ない。約 2

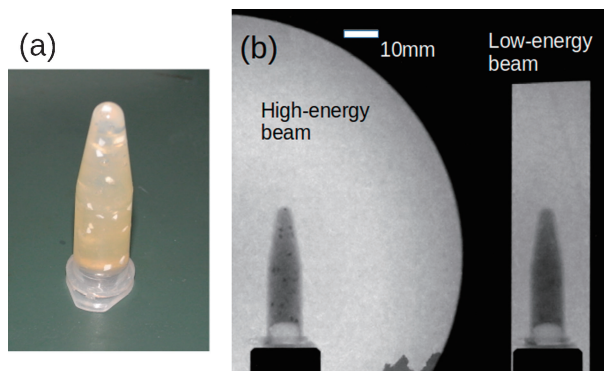


Fig. 9 (Color online) (a) The sample for simultaneous-KES CT at 16.1 keV. (b) A typical projection image of the simultaneous-KES CT measurement.

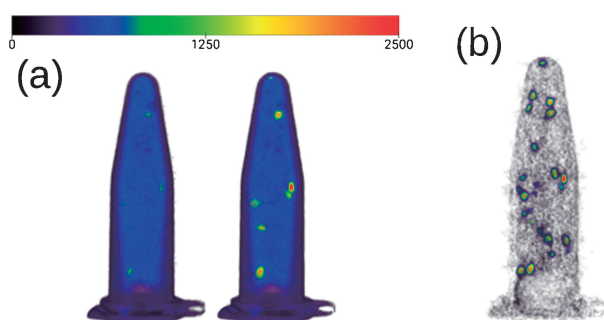


Fig. 10 (Color online) (a) The 3D volume rendering for tomographic images reconstructed from the KES-CT data: (left) low-energy image, (right) high-energy image. (b) The subtraction image corresponding to the Sr elemental distribution.

時間掛けて取得した360枚の投影像（角度ステップ0.5°）から再構成した結果が **Fig. 10(a)** である。画像の明度をエポキシ樹脂の領域で規格化し擬似カラーで表現したボリュームレンダリングであるが、内部が見えるように切断処理を施してある。両者の差分が **Fig. 10(b)** であるが、Sr 元素を含む部分で高いコントラストが得られている。Sr を含まないエポキシ領域にも差分が残っているが、その値は Sr に依るものの1%程度であるので、適当に閾値を設定してやれば不可視化できる。定性的には、KES によって Sr 元素の3次元分布が得られたとってよい²⁹⁾。

KES は吸収による手法のため、蛍光法ほど微量な元素に対する感度は期待できない。しかしながら、Sr 元素の場合に重量比5%程度で非常に高いコントラストが得られたことから、1%以下の濃度に対する検出感度も期待できる。そこで検出感度を定量的に調べるために、**Fig. 11(a)** のような STO で着色したエポキシ樹脂ペレットで構成される試料を用意し、同時 KES-CT 測定を行った³⁰⁾。各ペレットの Sr 元素濃度は重量比で5%、1%、0.5%、0.1%、0%（無着色）である。CT 撮像では **Fig. 10** の場合と同様に、1枚当たり20sの投影像を360枚取得した。再構成された断層像の差分において、各ペレットの領域の明度値をサンブ

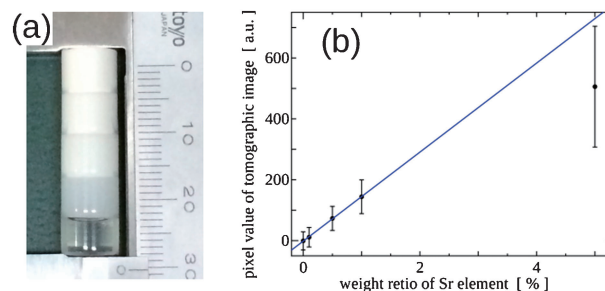


Fig. 11 (Color online) (a) The sample composed of five epoxy pellets containing Sr element of 5%, 1%, 0.5%, 0.1%, and 0% in weight ratios from the top. (b) The image value of the subtraction tomographic image as a function of Sr concentration in the sample.

リングし、その平均をプロットしたグラフが **Fig. 11(b)** である。横軸には Sr 元素の濃度を取っているが、0.1-1%の範囲では差分像の明度値は元素濃度に対して良い線形性を持っており、元素濃度分布の定量分析に応用できる可能性が示唆される。濃度5%で線形から外れエラーが大きいのは、濃度が高すぎて顔料が不均一となったことと、透過光子が少なすぎて吸収係数の計算が不正確になったためと考えられる。

5. おわりに

PXR という現象を線源として利用するためには電子ビーム軌道に結晶ターゲットを挿入する必要があるため、蓄積リングのような周回型加速器では難しい。その意味では電子リニアックに向けた X 線源であるといえるが、X 線の平均強度についてはリニアックの平均電流に制約されてしまう面がある。しかしながら、加速器が十分に安定であれば、測定時間は掛かるものの、DEI や KES のような、これまでは規模の大きな SR 光源施設以外では困難とされていたイメージング実験を大学附置の加速器施設で行うことができる。特に、同時 KES-CT による3次元元素イメージングは SR 光源でも行われていないユニークな手法である。また、リニアックのパルス特性を利用すれば時間依存計測への応用も原理的には可能である。ピコ秒～マイクロ秒領域の時間分解測定への取り組みは今後の課題の1つといえる。質の高い実験データを得るためには、高感度・低ノイズで安定な検出器を導入するなど X 線強度の不足を補う努力が必要となるが、大学附置施設の中規模加速器を用いて先端的な実験手法を実施できることは、放射光科学の裾野を広げるという面でも大きな意義があるものとする。

謝辞

日大 LEBRA の PXR 線源は文科省学術フロンティア推進事業「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」(2000–2007年度)によって開発・整備された。また、PXR による同時 KES 法の研究は、文科省科研費基盤研究(B) (課題番号: 25286087) によってなされたものである。PXR 線源の開発と応用の高度化は、日本大学電子線利用研究施設のスタッフ一同の弛まぬ努力によって成されたものである。特に、2019年5月23日に急逝された佐藤勇先生(KEK 名誉教授, 日本大学元教授)のご尽力とご決断が無ければ、日大 PXR 線源が実現することはなかったであろう。ここに佐藤先生のご功績に深く感謝するとともに、謹んで哀悼の意を捧げる。

参考文献

- 1) P. Oliva, M. Carpinelli, B. Golosio, P. Delogu, M. Endrizzi, J. Park, I. Pogorelsky, V. Yakimenko, O. Williams and J. Rosenzweig: *Appl. Phys. Lett.* **97**, 134104 (2010).
- 2) 日本大学電子線利用研究施設: <http://www.lebra.nihon-u.ac.jp/>
- 3) Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, H. Nakazawa, K. Yokoyama, K. Kanno, T. Sakai, K. Ishiwata, A. Enomoto, S. Fukuda, S. Ohsawa, K. Tsuchiya and M. Kato: *Nucl. Instrum. and Meth. A* **483**, 29 (2002).
- 4) V. G. Baryshevsky, I. D. Feranchuk and A. P. Ulyanekov: *Parametric X-Ray Radiation in Crystals: Theory, Experiment and Application* (Springer Tracts in Modern Physics book series 213) edited by G. Höhler (Springer, Berlin, Heidelberg, 2005).
- 5) 早川恭史: 日本加速器学会誌「加速器」**6**, 166 (2009).
- 6) Y. Hayakawa, Y. Takahashi, T. Kuwada, T. Sakae, T. Tanaka, K. Nakao, K. Nogami, M. Inagaki, K. Hayakawa and I. Sato: *J. Instrum.* **8**, C08001 (2013).
- 7) A. V. Shchagin, X. K. Maruyama: *Parametric X Rays in Accelerator-Based Atomic Physics Techniques and Applications* edited by S. M. Shafroth and J. C. Austin (AIP Press, New York, 1997), ch. 9.
- 8) H. Nitta: *Phys. Lett. A* **158**, 270 (1991).
- 9) A. V. Shchagin, V. I. Pristupa and N. A. Khizhnyak: *Phys. Lett. A* **148**, 485 (1990).
- 10) Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kuwada, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakae, T. Sakai, I. Sato, Y. Takahashi and T. Tanaka: *Nucl. Instrum. and Meth. B* **266**, 3758 (2008).
- 11) Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, A. Mori, T. Kuwada, T. Sakai, K. Nogami, K. Nakao and T. Sakae: *Nucl. Instrum. and Meth. B* **252**, 102 (2006).
- 12) Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa and T. Tanaka: *Nucl. Instrum. and Meth. B* **227**, 32 (2005).
- 13) 末光正昌, 関谷浩太郎, 川島雄介, 関谷恵子, 岡田裕之, 金田 隆, 久山佳代: 歯科放射線 **55**, 76 (2015).
- 14) H. Okada, T. Kaneda, K. Sekiya, Y. Kawashima, M. Sue-mitsu, Y. Hayakawa and T. Sakae: *J. Hard Tissue Biology* **24**, 299 (2015).
- 15) Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, T. Kuwada, T. Sakai, K. Nogami, K. Nakao, M. Inagaki and A. Mori: *AIP Conf. Proc.* **879**: SYNCHROTRON RADIATION INSTRUMENTATION: SRI2006, 123 (2007).
- 16) M. Inagaki, Y. Hayakawa, K. Nogami, T. Tanaka, K. Hayakawa, T. Sakai, K. Nakao and I. Sato: *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 8081 (2008).
- 17) R. Fitzgerald: *Phys. Today* **53**, 23 (2000).
- 18) D. M. Connor and Z. Zhong: *Curr. Radiol. Rep.* **2**, 55 (2014).
- 19) Y. Takahashi, Y. Hayakawa, T. Kuwada, T. Tanaka, T. Sakae, K. Nakao, K. Nogami, M. Inagaki, K. Hayakawa and I. Sato: *X-Ray Spectrom.* **41**, 210 (2012).
- 20) 高橋由美子, 早川恭史, 桑田隆生, 寒河江登志朗, 田中俊成, 早川 建, 佐藤 勇: 生体医工学 **48**, 566 (2010).
- 21) T. Sakae, Y. Takahashi, Y. Hayakawa, T. Tanaka, K. Hayakawa, T. Kuwada, K. Nakao, K. Nogami, M. Inagaki, I. Sato, M. Fukumoto, M. Makimura and H. Yamamoto: *J. Hard Tissue Biology* **19**, 131 (2010).
- 22) Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kaneda, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakae, T. Sakai, I. Sato, Y. Takahashi and T. Tanaka: *J. Phys.: Conf. Ser.* **517**, 012017 (2014).
- 23) A. Sarnelli, A. Taibi, P. Baldelli, M. Gambaccini and A. Bravin: *Phys. Med. Biol.* **52**, 3015 (2007).
- 24) S. Kulpe, M. Dierolf, B. Günther, M. Busse, K. Achterhold, B. Gleich, J. Herzen, E. Rummeny, F. Pfeiffer and D. Pfeiffer: *Sci. Rep.* **9**, 13332 (2019).
- 25) Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kaneda, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakae, T. Sakai, I. Sato, Y. Takahashi and T. Tanaka: *Nucl. Instrum. and Meth. B* **355**, 251 (2015).
- 26) R. Bellazzini, A. Brez, G. Spandre, M. Minuti, M. Pinchera, P. Delogu, P. L. de Ruvo and A. Vincenzi: *J. Instrum.* **10**, C01032 (2015).
- 27) Y. Zhu, N. Samadi, M. Martinson, B. Basse, Z. Wei, G. Belev and D. Chapman: *Phys. Med. Biol.* **59**, 2485 (2014).
- 28) W. Thomlinson, H. Elleaume, L. Porra and P. Suortti: *Physica Medica* **49**, 58 (2018).
- 29) Y. Hayakawa, K. Hayakawa, T. Kaneda, K. Nogami, T. Sakae, T. Sakai, I. Sato, Y. Takahashi and T. Tanaka: *Nucl. Instrum. and Meth. B* **402**, 228 (2017).
- 30) Y. Hayakawa, K. Hayakawa, K. Nogami, T. Sakai, I. Sato, Y. Sumitomo, Y. Takahashi and T. Tanaka: *Phys. Rev. Accel. Beams* **22**, 024701 (2019).

著者紹介



早川恭史

日本大学量子科学研究所 教授
E-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp
専門：加速器科学，放射線物理学

【略歴】

1998年3月京都大学理学研究科物理学第二専攻修了。博士（理学）。1998年4月日本大学原子力研究所助手，同量子科学研究所専任講師，同准教授を経て，2014年4月より現職。



高橋由美子

日本大学工学部理工学研究所上席研究員
E-mail: yumikot@lebra.nihon-u.ac.jp
専門：X線イメージング

【略歴】

1985年4月-1998年3月株式会社東芝勤務。2001年3月総合研究大学院大学数物科学研究科修了。博士（理学）。日本大学理工学部物理学助手，同理工学研究所上席研究員，高エネルギー加速器研究機構研究員，同特別技術専門職を経て，2017年10月より現職。

Diffraction-enhanced imaging and elemental imaging based on K-edge subtraction as applications of a parametric X-ray source driven by an electron linac

Yasushi HAYAKAWA Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University, Narashinodai 7-24-1, Funabashi 274-8501, Japan

Yumiko TAKAHASHI Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University, Narashinodai 7-24-1, Funabashi 274-8501, Japan

Abstract An X-ray source based on parametric X-ray radiation (PXR) at Nihon University has a capability providing an energy-selective monochromatic X-ray beam to users studies. The energy dispersion in the PXR-beam profile allows diffraction-enhanced imaging (DEI) employing perfect monocrystal as an analyzer, even though the PXR beam has a relatively wide radiation-cone. In addition to phase-contrast imaging, the DEI setup can be utilized to form dual-energy crossing beams with slightly different energies across the K-edge of a specific element, which is applicable to K-edge subtraction (KES) imaging. Using the dual-energy crossing beams, we can simultaneously observe 2-color images for KES, and a 3-dimensional distribution of the element is obtained by computed tomography (CT).