

PHASE-CONTRAST IMAGING USING THE LEBRA-PXR SYSTEM AT NIHON UNIVERSITY

Yasushi Hayakawa^{*A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Manabu Inagaki^{A)}, Takao Kuwada^{A)}, Akira Mori^{B)}, Keisuke Nakao^{A)},
Kyoko Nogami^{A)}, Toshiro Sakae^{C)}, Takeshi Sakai^{A)}, Isamu Sato^{A)}, Yumiko Takahashi^{D)}, Toshinari Tanaka^{A)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University,
Narashinodai 7-24-1, Funabashi, 274-8501

^{B)} College of Pharmacy, Nihon University, Narashinodai 7-7-1, Funabashi, 274-8555

^{C)} School of Dentistry at Matsudo, Nihon University, Sakae-cho-nishi 2-870-1, Matsudo, 271-8587

^{D)} College of Science and Technology, Nihon University, Kanda-Surugadai 1-8-14, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308

Abstract

The monochromatic X-ray source based on parametric X-ray radiation (PXR) was developed by using the electron beam from the 125-MeV linac at Nihon University. Using the spatial coherency of the PXR beam, the preliminary experiments on phase-contrast imaging has been carried out. The phase-contrast images have actually been observed by the diffraction-enhancement method using the X-rays of 14 to 18 keV. These results suggest that the PXR beam has a large coherent region which is not consistent with van Cittert-Zernike's theorem.

日大PXR発生装置による位相コントラストイメージング

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では 125MeV 電子線形加速器を基盤としたパラメトリック X 線放射 (PXR) の線源実用化に取り組んできた^[1]。PXR は相対論的な荷電粒子と結晶媒質の間の相互作用によって発生する X 線放射の一種であり、指向性、単色性およびエネルギー可変性という利点を持つ。2004 年 4 月には実際に 100MeV の電子ビームを用いてエネルギー可変な単色 X 線ビームを得るのに成功している。現在までに、Si(111) 結晶を用いて 6~20keV の範囲で単色な PXR ビームの発生を達成しており、2004 年の後半からはユーザー利用実験を開始している^[2]。

LEBRA-PXR システムの場合、電子ビームのエネルギーが比較的低い為に X 線の放射円錐の広がりが大きく、X 線のビームサイズは取り出しポートの真空窓とほぼ同じになっており、その直径は 98 mm である。また、ビームプロファイルは均一なものが得られている。そのため、LEBRA-PXR のビームはイメージングに適しており、実際ユーザー利用実験においても主要な応用となっている^[3]。X 線のエネルギーをコントロールすることにより、LEBRA-PXR では生体試料のような軽元素で構成されたサンプルでも比較的良いコントラストの X 線吸収像が得られてきた。それに加え、PXR の空間コヒーレンスの良さを利用した位相コントラストイメージングを試み、実際に位相コントラスト像の観測に成功した。具体的には、シリコン完全結晶による X 線ブラッグ回折を角度フィルターとして用いるブラッグ反射型の手法で測定を行い、軽元素物質の密度変化に対する高感度やアナライザー結晶の回転によるコントラスト反

転といった現象が観測された。このコントラスト反転は回折型の位相コントラスト法に特徴的な現象であり、PXR の空間コヒーレンスの良さを示唆している。これらについて報告する。

2. 完全結晶による PXR の回折

速さ $v = \beta c$ の電子が Bragg 角 θ で逆格子ベクトル g を持つターゲット結晶に入射した際に発生する PXR のエネルギー $\hbar\omega$ は、

$$\hbar\omega = \frac{\hbar c^* |g| \sin \theta}{1 - \beta \cos \phi} \quad (1)$$

と表される^[1]。ここで c^* は結晶媒質中の光速であり、 ϕ は電子の速度に対する X 線の放出方向の角度である。Bragg 条件 $\phi = 2\theta$ の周辺では、 ϕ が $\Delta\theta$ だけシフトした場合の PXR のエネルギーは、

$$\hbar\omega' \approx \hbar\omega + \frac{d(\hbar\omega)}{d\phi} \Delta\theta \approx \hbar\omega \left(1 - \frac{\Delta\theta}{\tan \theta} \right) \quad (2)$$

と近似することでき、 $\Delta\theta$ に比例したエネルギー分散を持っている^[3]。一方、通常の Bragg 回折条件 $\hbar\omega = \hbar c^* |g|/2 \sin \theta$ において、 θ を $\Delta\theta$ シフトさせた場合に Bragg 回折する X 線のエネルギーは、

$$\hbar\omega'' \approx \hbar\omega + \frac{d(\hbar\omega)}{d\theta} \Delta\theta = \hbar\omega \left(1 - \frac{\Delta\theta}{\tan \theta} \right) \quad (3)$$

と近似される。式 (2) と式 (3) は一次近似の範囲では一致しており、これは、およそ $1/\gamma$ の角度広がりを持つ PXR ビームを、(+, -) と呼ばれる配置に置かれた分光結晶によってそのまま回折されることができるとを意味している。LEBRA の 2 結晶型 PXR 発

* E-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

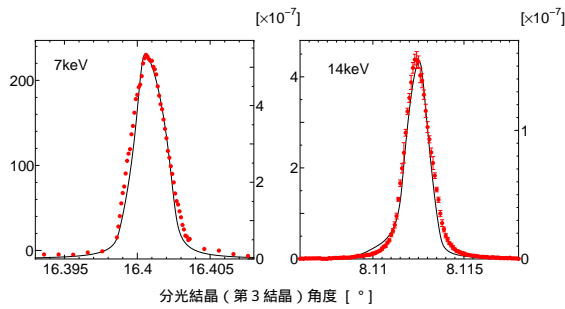


図 1: (+, -, +) 配置でのロッキングカーブ (第 3 結晶)。実線は光線追跡計算の結果である。

生装置はこの性質に基づいている。結晶が 3 つ以上ある場合も同様で、(+, -, +, ...) となる結晶配置の場合には、回折によって効率良く PXR ビームを輸送することができる。図 1 は (+, -, +) 配置に置かれた第 3 結晶の角度スキャン測定で得られた回折曲線である。結晶面としてはすべて Si(111) 面を用いた。測定結果は PXR の運動学的理論と X 線回折の組み合わせによる光線追跡計算と良く一致し、理想的な単色平行 X 線とほぼ同じ回折幅となっている。この特性によって、円錐状の広がりを持つ PXR ビームを用いた回折型の位相コントラストイメージングが可能となる。

3. 回折型位相コントラストイメージング

X 線位相コントラストイメージングは試料媒質を透過する際に受ける X 線の位相シフトを検出することにより試料の僅かな密度差をイメージとして取得する測定法である。透過力の高い X 線を用いて軽元素で構成された物体の構造の情報が得られるため、低吸収線量と高コントラストを兼ね備えたイメージング手法として医療应用到に大きな期待が持たれている。しかし、この手法には単色で平行な空間コヒーレンスに優れた X 線源が必要であり、これが実際の応用にとっては大きな制約となっている。

LEBRA の PXR 発生装置での結晶配置は (+, -) であるので、前節の議論を踏まえると、図 2 のように (+, -, +) 配置のアナライザ結晶の導入により回折型位相コントラストイメージングが可能となる。PXR の場合には対称反射のみで大きな照射野が得られるので、コンパクトでシンプルなセットアップで測定できる。試料を透過した X 線は位相シフトの結果として屈折を受け、それによってアナライザ結晶への入射角が変わる。つまり試料内の密度差を回折角の差として検出することが可能となる。このため、この手法は屈折コントラストとも呼ばれる。図 3 は 14 keV の PXR ビームを用いて測定したジグモの吸収コントラスト像 (図 2 中の (A) で測定) と位相コントラスト像 ((C) で測定) の比較である。検出器としてはイメージングプレート (IP) を用いた。図 3(b) はアナライザ結晶での回折曲線のピーク付近で得られる像であり、アナライザを回転させると図 3(c) のようにコントラストが反転し、暗視野的な像が得られる。図 4 は

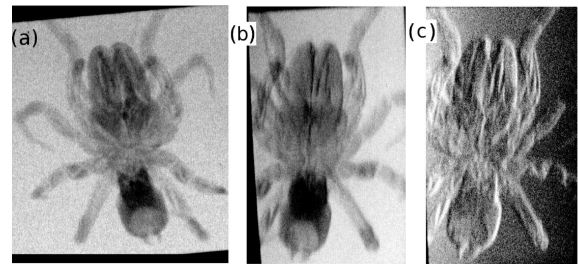


図 3: IP で取得した 14 keV の PXR によるジグモの (a) 吸収コントラスト像および (b,c) 位相コントラスト像。(b)(c) はアナライザ結晶の回転により位相が反転している。

サンプルが直径 2 mm のプラスチックファイバーの場合の結果であるが、位相コントラストではクラックなどが明確に認められる。また、アナライザの回転による位相反転の振舞が広い範囲にわたって一様となっており、PXR ビーム内では X 線の波面がよく揃っていることを示唆している。現在までに 14 keV

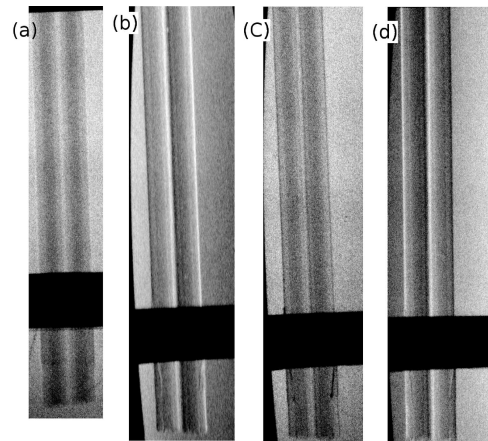


図 4: 14 keV の PXR による直径 2 mm のプラスチックファイバーの (a) 吸収コントラスト像および (b-d) 位相コントラスト像。

から 18 keV の PXR ビームを用いて位相コントラスト像の取得に成功している。

4. 空間コヒーレンス

4.1 van Cittert-Zernike の定理

X 線領域のシンクロトロン放射はインコヒーレント (カオス線源) であるので、高い空間コヒーレンスを得るにはモノクロメータによる単色化の後、数 $10 \mu\text{m}$ のタイトなコリメーションと長い伝播距離 (数 $10 \text{ m} \sim 1 \text{ km}$) が必要である。van Cittert-Zernike の定理によるとインコヒーレントな準単色光でも空間的にコヒーレントな領域が存在し、光源が半径 r の一様な光源の場合、光源より距離 R だけ離れたところでのコヒーレント領域の大きさ d は、波長 λ と光源

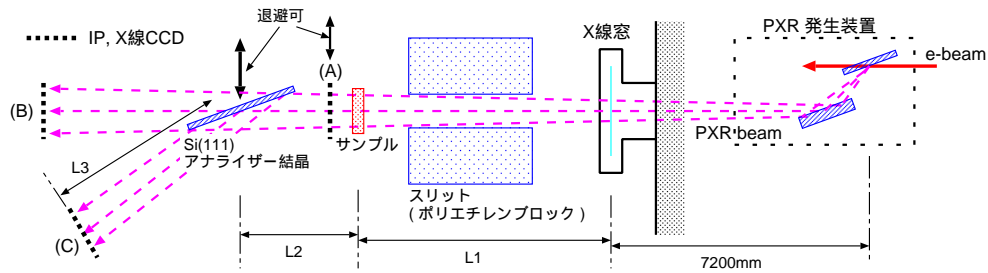


図 2: 回折型位相コントラストイメージングのセットアップ。

を見込む角度 $\Delta\psi$ で大まかに見積もることができ、

$$d \approx \lambda/\Delta\psi = \lambda R/r \quad (4)$$

となる。

LEBRA-PXR システムの場合、X 線源のサイズはターゲット結晶上での電子ビームスポットサイズと同じと考えられ、現在のところせいぜい直径 0.5 mm 程度の集束であると思われる。図 3、4 の測定条件では、X 線のエネルギー 14 keV ($\lambda=0.88 \text{ \AA}$) で測定距離 $R \sim 8 \text{ m}$ であるので、式 (4) による見積では、コヒーレント領域のサイズは $d \sim 3 \mu\text{m}$ 程度である。しかしながら、この値は実際に得られた位相コントラスト像の質とは整合しないと思われ、PXR の場合には単純に上記のような方法では空間コヒーレンスの評価ができないと考えられる。

4.2 スペックル状不均一性

PXR の空間コヒーレンスの良さを示唆する現象として、図 5 のような不均一パターンが観測された。PXR ビームを直接ダイレクト型 X 線 CCD で観測した際に認められたもので、X 線のエネルギーによりパターンの見え方が大きく変わることから、何らかの干渉像の可能性がある。PXR 発生装置の真空槽内に収められていた第 2 結晶を交換したところ、結晶表面に塵や汚れが付着していた。これが不均一パターンの原因の一つであったかもしれない。

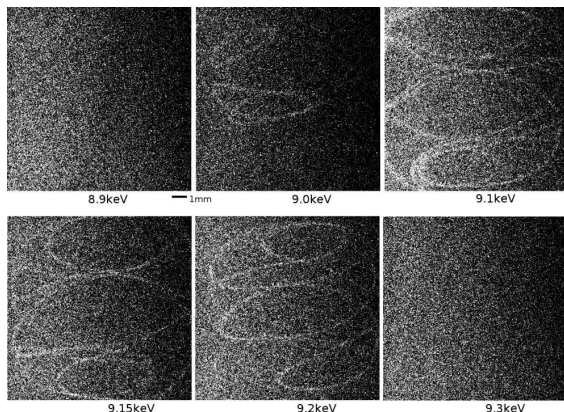


図 5: ダイレクト型 X 線 CCD で観測された X 線分布の不均一性。

また、図 2 の (C) においてサンプルのない状態で

回折された PXR ビームを、シンチレータとイメージインテンシファイア (I.I.) を用いた X 線 CCD で観測したところ、図 6 のようなスペックル状の不均一性が観測された。これは第 2 結晶表面の汚れと CCD の Be 窓の不均一性に起因するスペックルパターンである可能性がある。PXR のコヒーレンスの研究において、この現象は鍵となるかもしれない。

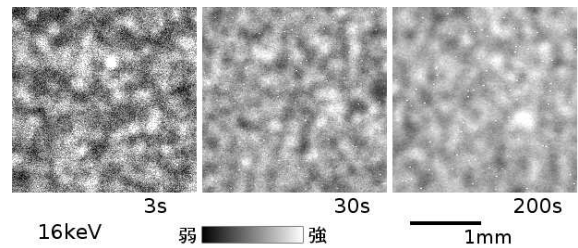


図 6: 第 3 結晶による回折後にシンチレータ付き I.I.CCD で観測されたスペックル状の X 線分布不均一性。

5. まとめ

PXR の回折特性を利用して、PXR による回折強調型の位相コントラストイメージングに成功した。実際に軽元素物質に対する高いコントラストとアナライザ結晶の回転による位相反転現象が観測された。また、スペックル状の不均一パターンも観測されており、空間コヒーレンスに関しては PXR は従来のカオス線源とは異なる性質を持つことが示唆された。

参考文献

- [1] Y. Hayakawa, et al., "Simulations to the project of a PXR based X-ray source composed of an electron linac and a double-crystal system," Nucl. Instrum. Methods B **227**, pp. 32-40, 2005.
- [2] Y. Hayakawa, et al., "PRESENT STATUS OF THE PARAMETRIC X-RAY GENERATOR AT LEBRA", Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 60-62, (Funabashi, Japan), 2004.
- [3] Y. Hayakawa, et al., "Status of the parametric X-ray generator at LEBRA, Nihon University", Nucl. Instrum. Methods B, to be published.