

機関番号：32665

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2010

課題番号：21686088

研究課題名(和文) 非対称結晶面を用いたパラメトリックX線源の特性

研究課題名(英文) Study on the property of parametric X-ray radiation
from asymmetric cut-surfaces of the target crystal

研究代表者

早川 恭史 (HAYAKAWA YASUSHI)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：40307799

研究成果の概要(和文)：パラメトリックX線放射(PXR)において放射源となる結晶の非対称性と形状の効果をSi(111)結晶を用いて調べたところ、端が楔状になっている結晶板をターゲットとして用いると強度と空間コヒーレンスがともに優れたX線が得られることがわかった。この結果、回折強調型位相コントラストイメージング実験において、従来よりも短時間で位相像が取得可能になり、世界で初めてPXRを線源としたコンピュータ・トモグラフィ(CT)に成功した。

研究成果の概要(英文)：The asymmetric and the geometrical effects on the radiator crystal for parametric X-ray radiation (PXR) were investigated using Si(111) planes. The results show that the PXR beam emitted from the wedge-shaped edge of the target crystal has high performance with respect to both of the intensity and the spatial coherence. The improvement allows the reduction of the measurement time for phase images in diffraction-enhanced imaging. It led the computed tomography experiment using the PXR source to the world first success.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 10,800,000 | 3,240,000 | 14,040,000 |
| 2010年度 | 7,100,000 | 2,130,000 | 9,230,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 17,900,000 | 5,370,000 | 23,270,000 |

研究分野：加速器科学、放射線物理

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：コヒーレントX線源、単色X線源開発、完全結晶光学系、非対称結晶面

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の申請時において、医療への応用を視野に入れた次世代のエネルギー可変単色X線源の開発の主流は中小規模加速器を用いたレーザ・コンプトン散乱(LCS: laser Compton scattering)であった。それに対し、日本大学では結晶と高エネルギー電子の相互作用によって発生するパラメトリックX線放射(PXR: parametric X-ray radiation)を

原理とするX線源の開発を推進し、自由電子レーザー用の電子線形加速器(リニアック)からの100MeV電子ビームを用いた2結晶型のPXR線源を建設し、2004年より運用を開始していた。

(2) 日大のPXR線源による基礎研究の結果、PXRはエネルギー可変単色性に加え、空間コヒーレンスに優れるという特長があること

がわかってきた。特に回折強調型位相コントラストイメージング (DEI: diffraction-enhanced imaging)による成果がその実証となった。

(3) 日大 PXR 線源の成果を踏まえ、大電流電子リニアックの小型化による医療用 PXR 線源の開発が提案されるようになったが、その実現可能性を高めるためには PXR の発生効率が高くなる条件を探求し、要求されるビーム電流の低減が望まれる。

(4) PXR の発生効率を向上する手法として、放射源であるターゲットとして非対称カットを施した結晶を用いることが理論の研究者から提案されるようになった。特にターゲット結晶のカット面が電子ビームに平行となる grazing 入射と呼ばれる条件での X 線強度の増強が期待されている。日大 PXR 線源において実際に非対称結晶面をターゲットとする試験的な実験を行い、結晶内部吸収の抑制の結果と思われる X 線強度の増強を観測したが、イメージング実験において強い画像のブレが生じるなどの問題も発生し、詳細に最適条件の探索を行うことが求められるようになった。

2. 研究の目的

(1) PXR 発生に用いる非対称結晶ターゲット結晶を幾つか用意し、得られる X 線の強度や空間コヒーレンス、スペクトル分解能などを調べ、最適な非対称条件や形状の推定を行う。特に高強度化については短時間でのイメージングを試み、 $1\sim 2\ \mu\text{A}$ のビーム電流で光子数率 $10^9/\text{s}$ の可能性を検証する。

(2) 非対称結晶面の PXR の発生源としての利用に加え、非対称結晶を分光結晶に用いた X 線ビームの二次的な縮小・拡大を試みる。放射光では一般的となった X 線光学技術ではあるが、PXR ビームに対して実験的に行われた事例がほとんど無いため、日大 PXR 線源を用いて実験を行い、その振舞を調べる。

3. 研究の方法

(1) 本研究で用いるターゲット結晶としては日大 PXR 線源で実績のあるシリコン完全結晶(111)面を採用し、非対称角 6.5° の平板結晶と、結晶の端が楔角 1.15° および 6.5° の楔状となったターゲット(図 1)を用意した。これまでの研究において、平板ターゲットの直角状の端が X 線画像のブレの原因となっていることが示唆されていたため、その抑制を狙って楔形結晶を導入することにした。非対称角を 6.5° の場合、PXR エネルギー 17.5keV で結晶のカット面が電子ビームに平行となる grazing 入射状態になる。この X 線

エネルギーは DEI 法によるイメージング実験が実施しやすいことから、非対称角としてこの値を選んだ。

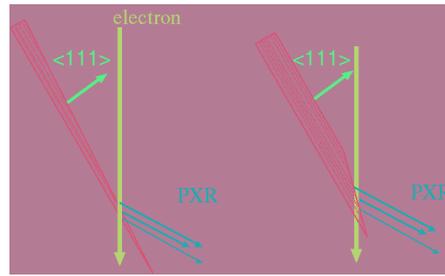


図 1 楔形ターゲット結晶

また、ブラッグケースや非対称結晶での PXR 発生について、遷移放射との干渉効果の存在の可能性を指摘する研究もあったため、 6.5° の楔形結晶については、境界条件に変化を付けるため裏面に Al 蒸着を施したものも用意した。

(2) 各ターゲットを日大 2 結晶型 PXR 線源に導入してリニアックからの 100MeV の電子ビームを照射し、反射用の第 2 結晶によって輸送される X 線ビームの特性を調べ、比較した。行った測定は下記のとおりである。

① PXR 線源の第 2 結晶を回転し、回折曲線を取得した。検出器として大面積半導体検出器を電離箱モードで用いた。

② 既存のイメージングプレートや CCD を用い、Cu 吸収端近傍(9keV)の X 線吸収端微細構造(XAFS)スペクトルを分散型 XAFS 法で測定した。

③ 空間コヒーレンスを評価するため、第 3 分光結晶を用いる DEI 法の位相コントラストイメージング(図 2)を実施した。

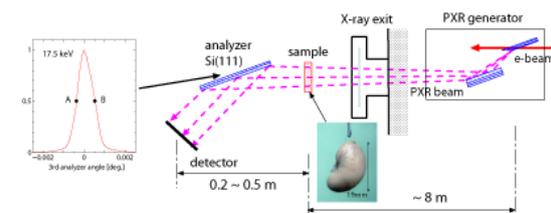


図 2 DEI 実験セットアップ

④ 得られる X 線強度について最も良い条件を選び、フラットパネル検出器(FPD)を用いた短時間イメージングを行った。

(3) DEI と同じ実験セットアップで第 3 分光結晶を非対称角 6.5° の非対称結晶に置き換え、2 次的に拡大・縮小した PXR ビームを CCD で観測した。また、そのスペクトルを PIN-Si 検出器と MCA を用いて測定した。PXR 線源はパルス線源であり、スペクトル用の半導体検出器をそのまま設置すると X 線光子のパイルアップが発生して計測できな

くなるので、Al 板などを吸収体として用い、X 線強度を 1/100 以下にして測定した。

4. 研究成果

(1) PXR 線源第 2 結晶の回折曲線の測定の結果、ターゲットの形状による違いを確認することができた。図 3 は 2 種類の楔形結晶 (1.15° , 6.5°) の非対称となる楔傾斜面に電子ビームを照射した場合の PXR エネルギー 17.5keV における回折曲線を、対称面を表にしてビームを照射した場合と比較したものである。

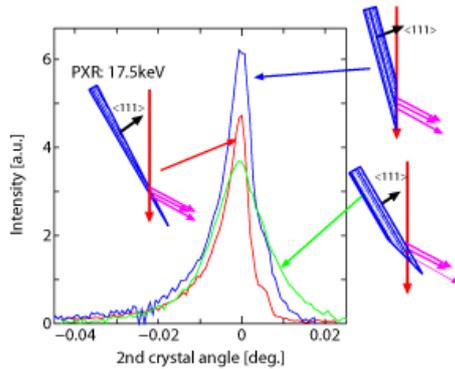


図 3 楔形結晶で発生した PXR に対する第 2 結晶回折曲線

楔形ターゲットの非対称面の場合、対称面に比べ回折曲線の幅が狭くなり、ピークが高くなった。特に grazing 入射となる 6.5° の楔形で顕著であったが、ピーク高の向上は実際に輸送される X 線量の最大値の増加を意味することから、楔形ターゲットの優位性が示す結果といえる。裏面に Al 蒸着したターゲットと蒸着なしのものでは、有意な違いは認められなかった。

一方、同じ 6.5° の非対称面の利用でも、平板型のターゲットでは grazing 入射に近い条件で幅の狭い回折曲線を得るのが困難であった。PXR エネルギー 16.9keV での回折曲線は図 4 のように幅が非常に広く、形状も複雑なものが得られた。

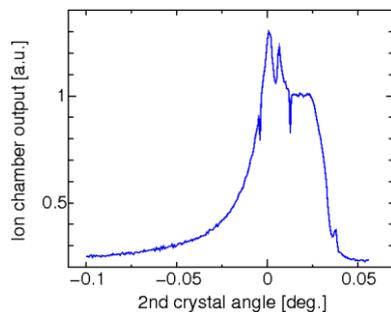


図 4 非対称平板ターゲット結晶の場合の第 2 結晶回折曲線

これらの結果より、2 結晶型 PXR 線源では得られる X 線強度が第 2 結晶の回折による輸送

効率に依存するため、狭い回折幅の得られる楔形ターゲットが有利であることが明らかとなった。

(2) 9keV 付近に吸収端をもつ純銅、酸化銅、酸化イットリビウムの XAFS スペクトルを PXR ビームを用いた分散型 XAFS 法で測定して得られたスペクトルが図 5 である。スペクトル分解能は $3\sim 4\text{eV}$ と見積もられた。従来、同条件で Si(111) 平板ターゲットを用いた場合に得られた分解能 $5\sim 6\text{eV}$ より改善されており、第 2 結晶回折幅が狭くなることと何らかの相関があると推測される。これらの結果から、楔形ターゲット結晶には発生する PXR のスペクトル密度を向上させる効果があることが示唆される。

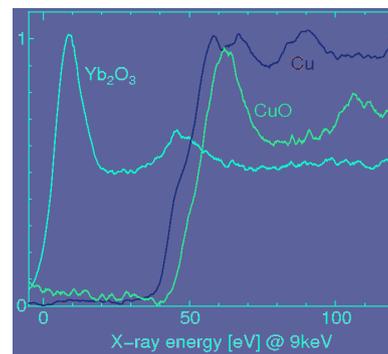


図 5 分散型 XAFS 法で得られた吸収スペクトル

(3) イメージングに関しては、楔形ターゲットの場合は画像のブレが抑制され、明瞭な画像が得られることがわかった。一方、非対称平板ターゲットでは画像に強いブレやボケが生じ、DEI 法で位相コントラスト像を取得するのは困難であった。この空間コヒーレンスの破壊現象は図 4 の回折曲線の複雑さと何らかの相関があると考えられる。

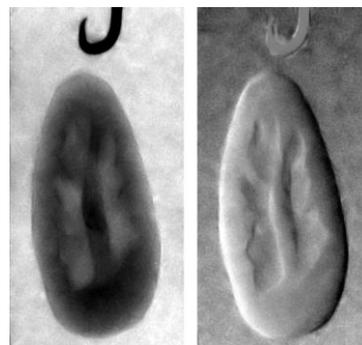


図 6 DEI 法で得られた吸収コントラスト像(左)と位相コントラスト像(右)

楔形ターゲットの場合、楔角 1.15° , 6.5° 共に得られる PXR ビームの空間コヒーレントが保たれ、その結果効率良く DEI 法で位相コ

ントラスト像が得られた。特に 17.5keV では楔角 6.5° のターゲットのほうが X 線強度の面で有利であり、より短時間での測定が可能であった。図 6 は第 3 結晶回折曲線の半値 2 点で得られた DEI 像 2 枚の演算により、X 線の吸収の寄与と屈折の寄与を分離したものである。ここで、試料はマウスの腎臓である。DEI 像 1 枚当りの撮像時間は 30s であり、従って屈折による位相コントラスト像 1 枚を 60s で取得することができた。

従来よりも短時間での位相像の取得が可能となったことから、試料の回転によるコンピュータ・トモグラフィ(CT)実験を加速器のマシナタイム内で実施することが現実的なものとなった。図 7 は試料の回転角ステップ 2° で取得したプロジェクション 90 枚から再構成された位相断層像である。PXR を用いた CT 実験としては世界初の成功であり、数 GeV クラスのシンクロトロン放射光以外の光源を用いた DEI による CT 実験という観点でも稀有な成功例であるといえる。

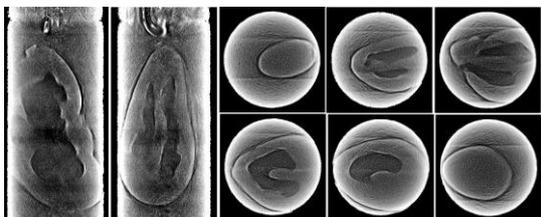


図 7 DEI 法による位相コントラスト像から再構成された CT 断層像

(4) 本研究で用意したターゲット結晶の中では、 6.5° の楔形ターゲットが、17.5keV において得られる X 線強度が最も強くなることから、このターゲットを用いての短時間イメージングを実施した。撮像は一般的な吸収コントラストイメージングで行い、検出器には画素サイズ $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ の間接型 FPD を用いた。電子ビーム電流 $2.6\mu\text{A}$ という条件で得られた典型的な X 線像が図 8 であるが、

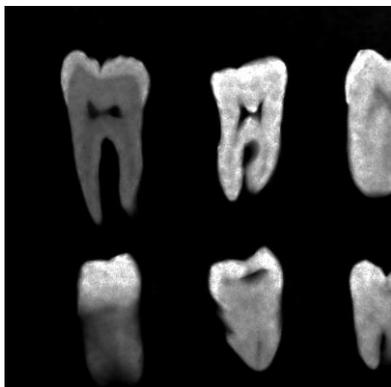


図 8 撮像時間 5s で取得したヒトの歯のスライスサンプル X 線吸収像

ここで試料はヒトの歯のスライスサンプル、撮像時間は 5s である。用いた FPD は使用している CMOS センサーのダークノイズが大きく、それを除算しているが、このノイズが実効的な検出効率を制約している。

得られた X 線の光子数率は $10^7 - 10^8/\text{s}$ の範囲と考えられるが、照射野のサイズが直径 100mm であるため、光子フラックスとしては $10^5 - 10^6/(\text{cm}^2 \text{s})$ 程度である。X 線の単色性の効果もあり、条件を選べば 10s 以下で実用的なコントラストの画像が得られることがわかった。要求される空間解像度にもよるが、一般的な臨床の場合では $100 \sim 200\mu\text{m}$ 程度の解像度でも実用的と思われるので、これくらいの解像度で検出効率が高くノイズの少ない高性能イメージセンサーを導入することができれば、1s 程度での画像取得も十分可能であると推測できる。このような数秒オーダーの撮像時間での X 線像取得の成功は、医療応用を目標とする次世代単色 X 線源開発の競争において、世界的に主流となっている LCS 線源プロジェクトに対しても、PXR 線源が十分な競争力を持っていることを証明するものといえる。

また、現在の日大 PXR 線源は第 2 結晶による X 線ビームの輸送を前提としており、その輸送効率 $1/5 \sim 1/10$ 程度である。従って、ターゲットから放射されている光子数自体は $10^9/\text{s}$ に近いものと見積られるので、加速器・線源システムを新たに開発する際、ターゲットからの PXR ビームを直接利用可能にすれば、電子ビーム電流 $10\mu\text{A}$ で医療診断用としては十分に実用的な単色 X 線源となると推察できる。

(5) PXR ビームを、 $130\text{mm} \times 100\text{mm}$ サイズの 6.5° 非対称結晶を第 3 分光結晶として用いることにより、縮小することを試みた。非対称角 6.5° の場合、X 線エネルギー 17.5keV で縮小率が最大となるはずであるが、このエネルギーで回折ビームを見つけることはできなかった。エネルギーを変更し 16keV で実施したところ、直径 130mm の PXR ビームの中央の幅 30mm の部分を回折し、幅 2mm 程度に縮小したことが確認できた。しかしながら、回折後の光子密度の増加は対称結晶による回折ビームに比べ 2 倍程度にとどまり、回折効率が低いことがわかった。

次に、分光結晶の方位を変え、PXR ビームを拡大することを試みた。その結果、拡大自体は可能であったが、分光結晶の全面同時に回折する状態にはならなかった。これは、対称結晶の場合に成立していた、PXR ビームの円錐状発散とビーム内水平方向エネルギー分散の Bragg 回折条件における補償関係が崩れるためと考えられる。

縮小・拡大された回折 X 線ビームに対し、ス

ペクトル測定を行った結果が図 9 である。PXR エネルギー16keV では、測定点における PXR ビームの水平方向エネルギー分散が約 13eV/mm となるので、幅 30mm のビームを 2mm に縮小した回折ビームはおよそ 400eV のエネルギー広がりを持つことになり、それを反映するスペクトルが実際に得られた。一方、拡大ビームの場合は回折ビームの持つエネルギー広がりが悪くとも 10eV のオーダーとなり、半導体検出器のエネルギー分解能以下であるため、実際に測定されたスペクトル幅は検出器の分解能によるものと考えられる。

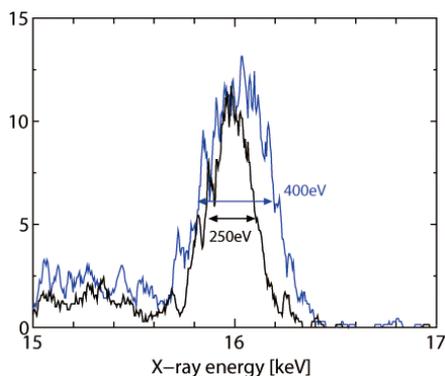


図 9 縮小(青)・拡大(黒)ビームのエネルギースペクトル

(6) 本研究の成果により、端部を楔形に加工して非対称カット面を形成した結晶を PXR 発生源としてターゲットに用いると、得られる PXR ビームのエネルギー密度が向上し、空間コヒーレンスの劣化も抑制されることがわかった。2 結晶型の PXR 線源ではこの効果が第 2 結晶での輸送効率向上に寄与し、利用可能な X 線強度の増加をもたらした。特に、楔の角度が 6.5° となるターゲット結晶を用いた場合、grazing 入射となる 17.5keV で X 線の強度と質が両立した状態となった。本研究の範囲内ではこれが最も良い条件であったが、全体的な振舞いとしては非対称角(楔角)の大きさに敏感に依存しているとはいえなかった。grazing 入射かどうかは本質的な要素ではない可能性がある。今回の成果である、楔形の形状を起点とし、さらに最適な幾何条件を探索する必要がある。また、強度が向上した PXR ビームを用いたイメージング実験では 10s 以下での画像取得が可能となり、ターゲットから発生する PXR の強度が 10%/s に近いことが示唆された。これらの成果は、PXR を原理とする医療用単色 X 線源の実現可能性を強く支持するものであり、LCS 線源に主軸を置く欧米諸国の開発計画との競争においても、日本のオリジナリティと優位性を主張するものである。

非対称結晶を分光結晶として用いた PXR ビームの二次的な縮小に成功し、X 線のスペクトルでも X 線の収集効果が確認できた。しかしながら、劇的な光子密度の増強は得られなかったことから、この光学技術を照射実験のための密 X 線フラックス向上の基盤にするには、分光結晶として用いる非対称結晶の厚さや形状を検討し、回折効率が高くなる条件を探求する必要があることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① Toshiro Sakae, Yasushi Hayakawa (他 17 名, 2 番目), “A Preliminary Study on Low-dose X-ray Imaging Using Parametric X-ray”, *Journal of Hard Tissue Biology* 20, (2011) p31-35, 査読有.
- ② Yumiko Takahashi, Yasushi Hayakawa (他 8 名, 2 番目), “Phase-contrast imaging with a novel X-ray source”, *Proceedings of ICXOM20 (The 20th International Congress on X-ray Optics and Microanalysis)* (Sep. 14-18, 2009, Karlsruhe, Germany), *AIP Conference Proceedings* 1221, (2010) pp.119-123, 査読有.
- ③ 高橋由美子, 早川恭史 (他 5 名, 2 番目), 「パラメトリック X 線を用いた位相コントラスト法による生体軟組織イメージング」, *生体医工学 Vol. 48 No.6 別冊* (2010) pp.566-571, 査読有.
- ④ 早川恭史 (他 8 名, 1 番目), 「楔型ターゲット結晶による PXR 線源の性能改善」, *Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan* (Aug. 4-6, 2010, Himeji, Japan), 2010, p. 788-791, 査読無.

[学会発表] (計 16 件)

- ① Y. Hayakawa, “Improvement in Property of Parametric X-ray Radiation by Use of Wedge-shaped Target Crystal”, *Channeling 2010 (The 4th International Conference: Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena)*, 2010 年 10 月 7 日, Ferrara (イタリア)
- ② 早川恭史, 「パラメトリック X 線放射に基づく低被曝診断治療装置開発」, *生体医工シンポジウム 2010 (JBME2010)*, 2010 年 9 月 11 日, 北海道大学 (札幌)
- ③ 早川恭史, 「楔型ターゲット結晶による PXR 線源の性能改善」, 第 7 回日本加速器学会年会, 2010 年 8 月 5 日, 姫路市文化センター (姫路)

④ Y. Hayakawa, “Proposal of a compact coherent X-ray source for medical use based on an energy-recovery linac and parametric X-ray radiation”, The Physics and Applications of High Brightness Electron Beams 2009, 2009年11月17日, Maui (米国)

⑤ Y. Hayakawa, “Experimental Study on the Property of PXR Emitted From Asymmetric Cut-surface of Si(111) Target Crystal”, The VIII International Symposium <<Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures>> (RREPS-09), 2009年9月10日, Zvenigorod (ロシア)

[その他]

ホームページ等

日経産業新聞

平成22年9月6日(月)掲載

「日大 軟らかい組織もX線撮影」

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・准教授

研究者番号：40307799

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：