

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651105

研究課題名(和文)パラメトリックX線の特性を利用したコーンビームDEI法の高度化

研究課題名(英文)Advanced study on the cone-beam DEI method based on parametric X-ray radiation

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)のパラメトリックX線源(PXR)を用い、コーンビーム拡大効果とX線位相コントラスト法の一種である回折強調型イメージング(DEI)が両立することを実験的に確かめた。実際に21%の拡大率を持った位相勾配像が得られた。

またDEIの高度化として、X線が試料物質から受ける小角散乱を利用したイメージングを試み、これに成功した。試料として発泡スチロールを用い、X線エネルギー25.5keVで実験を行った結果、密度が非常に小さくX線の吸収がほとんど無い発泡スチロールで比較的強いコントラストが得られ、通常のX線像とは本質的に異なる情報が像が反映されることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We experimentally studied on diffraction-enhanced imaging (DEI), which is a kind of X-ray phase-contrast imaging, with a magnification effect based on a cone-like beam from the parametric X-ray (PXR) source at LEBRA, Nihon University. As a result of the experiment, a phase-gradient image was actually obtained with a magnification power of 1.21.

In order to advance the DEI method employing PXR, we successfully demonstrated novel imaging based on small-angle X-ray scattering (SAXS) due to sample materials. In the imaging experiment, styrene foam was used for the sample material irradiated with 25.5-keV X-rays. As the result, relatively strong image-contrast was observed at the styrene-foam region, in which the X-ray attenuation is negligible. Thus, we concluded that the SAXS image by this method reflects different information from that of ordinary X-ray images.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：量子ビーム測定手法 回折型X線位相コントラスト コーンビーム パラメトリックX線放射 小角散乱イメージング

1. 研究開始当初の背景

(1) シンクロトロン放射光の応用研究として、X線位相コントラストイメージングが精力的に研究されていた。回折強調イメージング(DEI: diffraction-enhanced imaging)は位相コントラストを得ることができる代表的な手法であるが、平面波的なX線が必要であるため、もっぱら指向性の高い放射光を用いて基礎研究が行われていた。また、位相コントラストイメージングから派生した、X線が試料物質から受けた小角散乱から画像のコントラストを得る手法が注目されつつあった。

(2) 放射光以外にDEIが可能なX線源として、本研究代表者が中心となって開発した、パラメトリックX線放射(PXR: parametric X-ray radiation)を放射原理とするものが実績を上げつつあった。PXRは相対論的な荷電粒子と結晶物質の相互作用により生じるX線放射現象である。日大のPXR線源は100MeV電子線形加速器を用いたもので、放射光源に比べコンパクトでありながら、エネルギー可変単色性に加え、空間コヒーレンスが高いX線が得られるという特徴があるが、実際にこれを用いたDEI実験に成功し、成果が得られていた。

2. 研究の目的

(1) 日本大学電子線利用研究施設(LEBRA: Laboratory for Electron Beam Research and Application)において開発されたPXR線源は、電子エネルギー100MeVであるため、大型放射光源に比べて円錐広がり大きなコーンビームとなっている。それにもかかわらず、平面波性の要求の高いDEIに成功しており、シンクロトロン放射光源と比べて特徴的な点である。コーンビームの拡大効果と位相コントラストの両立が可能かどうかを検証し、DEIの高度化の可能性を探る。

(2) DEI法は試料物質によるX線の屈折角を測定することにより位相コントラストを得る手法であるが、これは小角散乱の検出にも利用可能と考えられる。この観点から、DEI法に基づく小角散乱コントラストイメージングを試み、画像検出器の画素サイズよりも小さな空間構造の情報の取得が可能かどうかを検証する。

3. 研究の方法

(1) PXRビームを用いたDEI測定において、コーンビームとしての広がりを積極的に利用した拡大イメージングを実施する。PXRの放射源は電子ビームの照射を受けたシリコン単結晶であり、結晶上の電子ビームスポットが線源点に相当する。日大LEBRAのPXR線源では線源点から10m以下の伝搬距離でも比較的広い照射野が得られるが、実質的に直径100mmのX線取出し窓で制限され、ビーム全体の円錐広がり率は13.7mradとなつて

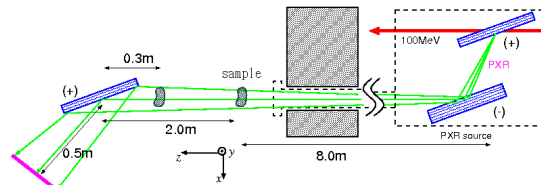


図1: PXRを用いたDEI測定の実験セットアップ。(top view)

いる。図1にDEI実験のセットアップの概略図を示す。この実験において、PXR線源、輸送用反射板、DEIアナライザーには全てSi(220)完全結晶を用いた。線源点からDEIアナライザー結晶までの距離が10.0m、アナライザー-検出器(X線CCD)間の距離は0.5mとし、測定試料を線源点から8.0mおよび9.7mに設置した2種類の測定を行った。前者は後者に対し、幾何学的には21%の拡大イメージが取得できることになる。

円錐広がり効果の効果を広くカバーするために、アナライザー結晶として160mm幅のものを準備したが、実験的には空気によるX線の減衰を少なくしたいのでPXRエネルギー18keVで実施した。Bragg角が10.9°であり、カバーできる円錐角度はおおよそ3mradであったが、10 μ rad程度の完全結晶の回折幅に比べれば十分に大きい。この条件でアクリル樹脂製の棒(直径3mm)を試料として、DEI実験を実施し、円錐広がりによる拡大効果を検証した。

(2) 同じ実験セットアップで、小角散乱イメージングの実証実験を行った。使用した結晶面はSi(220)のままであったが、PXRエネルギーは25.5keVにした。測定試料として図2に示すような軽元素物質を用意した。それぞれの比重は、アクリル樹脂が1.17g/cm³、発泡スチロールが0.16g/cm³、ポリスチレンが0.99g/cm³であった。棒の直径は発泡スチロール棒が6mmで、他の2つは3mmであった。測定自体は通常のDEI実験と同様で、アナライザー結晶の角度を変えながら、回折されるX線像を取得した。

いずれの実験も、電子加速器の運転条件は電子エネルギー100MeV、マクロパルス電流

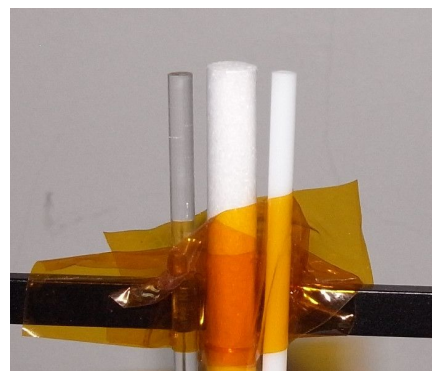


図2: 小角散乱イメージング測定試料。左からアクリル樹脂棒、発泡スチロール棒、ポリスチレン棒。

130~135mA, マクロパルス幅 4.8 μ s, パルス繰り返し 5Hz であった。

4. 研究成果

(1) エネルギー18keV の PXR コーンビームを用いた拡大 DEI 測定の結果として、図3に示すような位相勾配(微分位相)像が得られた。図3(a)が線源 - 試料間距離が 9.3m の結果で、(b)が 8.0m の時の結果である。それぞれ、X線 CCD を用いて 300 秒の露光時間(実時間)で取得した DEI 像2枚の演算処理で得られた像であり、X線が試料物質を通過したために生じた屈折角のマップとなっている。これらの位相勾配像は、今回の DEI 測定が 10 μ rad

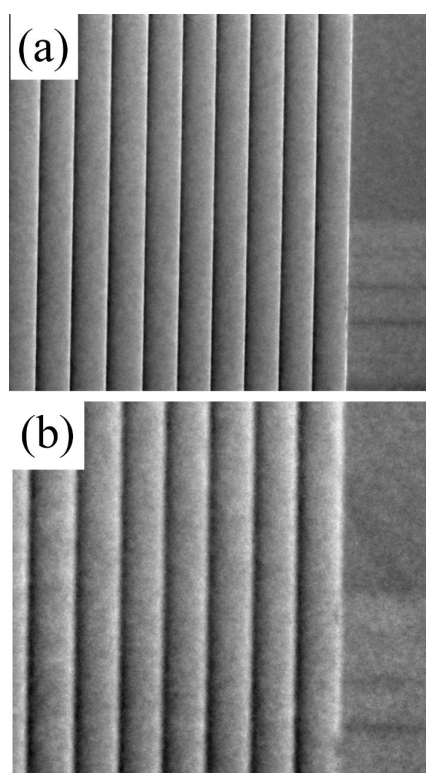


図3: コーンビーム拡大 DEI 実験で得られた位相勾配像。ここで、線源 - 試料間距離はそれぞれ (a) 9.7m, (b) 8.0m である。

領域の X 線の屈折に十分感度があることを示している。拡大率に関しては、実際に幾何学条件で決まる 1.21 倍になっていることが確認された。日大 LEBRA の PXR 線源では X 線ビーム取り出し窓の位置が線源から 7.3m のところであるため、試料をこれ以上線源に近づけるのは難しい。また、コニオメータとアナライザー結晶をより後方に移動するのもスペースの問題で容易ではない。今回の 21% という拡大率は装置上の制約で最大に近いものであるが、十分に有意な拡大効果といえる。DEI は平面波性の要求が強く、シンクロトロン放射光源の中尺・長尺ビームラインで実施されることが一般的となっていることを考えると、DEI において数 10% オーダーの拡大率と 10 μ rad の屈折角検出を両立でき

たことは、世界的にもユニークで新奇な成果といえる。伝搬型の位相コントラストイメージングでは、拡大効果を伴う事例は比較的多くあるが、DEI で有意な拡大効果を示したのは今回が初のケースと思われる。

(2) コーンビーム効果を利用した拡大 DEI の実証は達成したが、図3にあるように、拡大像において試料のエッジ部で明瞭度の低下が見られた。コーンビームの拡大効果を利用すれば、試料を線源の 1m 以内に設置すれば単純に 10 倍以上の拡大像が得られるはずであるが、このエッジのボケはこのような応用を制約する要因になる。そこで、比較検証のために、拡大 DEI と同じ試料を用いた伝搬型位相コントラストイメージングを、イメージングプレート(IP)を検出器として行った。図4がその結果で、試料 - 検出器間距離は(a)が 2cm, (b)が 2m である。距離を離すことによる拡大率は 20% で、拡大 DEI とほぼ同じである。検出器の違いはあるものの、20% の拡大のために伝搬距離を長くとっても試料エッジ部の不明瞭化は認められず、むしろ屈折 X 線との干渉によるエッジ強調効果が優位である。この結果から、拡大 DEI におけるエッジ部の不明瞭化は幾何光学的な像のボケとは異なる要因である可能性が高いことが示唆される。

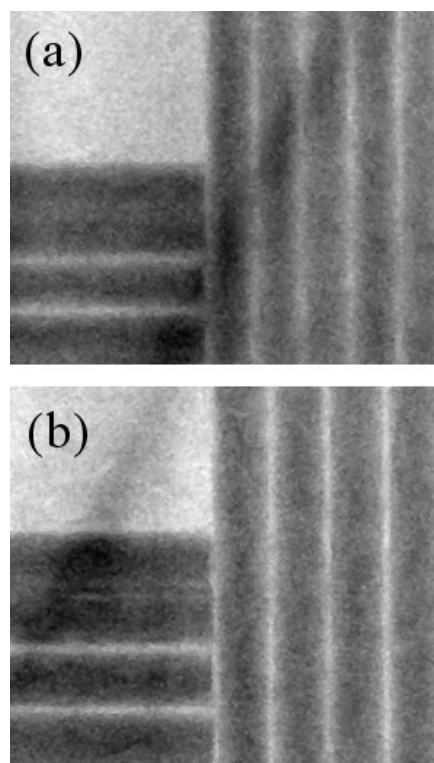


図4: 伝搬型位相コントラストイメージングの結果。試料 - 検出器間の距離はそれぞれ(a) 2cm、(b) 2m である。

(3) 小角散乱イメージングの実証実験において、得られた DEI 像の試料の無い直接 X 線の領域と発泡スチロールの領域から明度をサンプリングし、アナライザー結晶の角度を変数としてプロットしたのが図 5 である。これはそれぞれの領域における、ロッキングカーブの比較となっている。図から明らかなように、発泡スチロール領域のロッキングカーブは幅が広がり、ピーク頂も直接 X 線領域に比べて有意に低くなっている。しかしながら、ピークの中心位置にはほとんど違いがない。この結果から、発泡スチロールを透過した X 線は試料物質による小角散乱の影響を強く受けていると推察できる。散乱角が数 μrad 程度であるため、一般に極小角散乱と呼ばれている領域である。

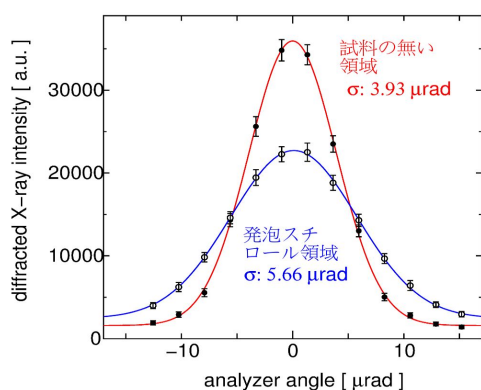


図 5：小角散乱イメージングにおける、直接 X 線領域と発泡スチロール領域のロッキングカーブの比較。

小角散乱に起因する画像のコントラストとして、ロッキングカーブの中心角度から $8\mu\text{rad}$ ずれた両側の画像の平均を取り、それとピークにおける画像との差で定義することにした。ここで、 $8\mu\text{rad}$ は直接 X 線に対するロッキングカーブの 2σ に相当する値である。簡単な定義ではあるが、画素毎のロッキングカーブの幅の広がりをピーク高の変化として定量化したものである。この定義で得られた小角散乱コントラスト像を、通常の吸収コントラスト像および位相勾配像を空間積分することによって得られた位相コントラスト像と比較したのが図 6 である。図からわかるように、図 2 の試料に対し、それぞれコントラストが大きく異なる画像が得られた。図 6(a) と (b) の吸収コントラストと位相コントラストは試料物質の密度に依存するものであり、実際にアクリル樹脂、ポリスチレン、発泡スチロールと密度の大きな順にコントラストが強くなっている。位相コントラストは吸収コントラストよりもはるかに感度が高く明確に試料の構造を反映しているが、得られる情報は原理的には吸収コントラストと同等である。一方、小角散乱コントラスト像では、発泡スチロールで極めて強いコントラストが得られた。物質密度を考慮すると、このコントラストは X 線の吸収や位相シフ

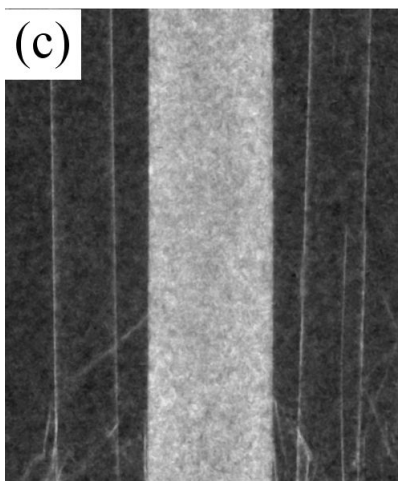
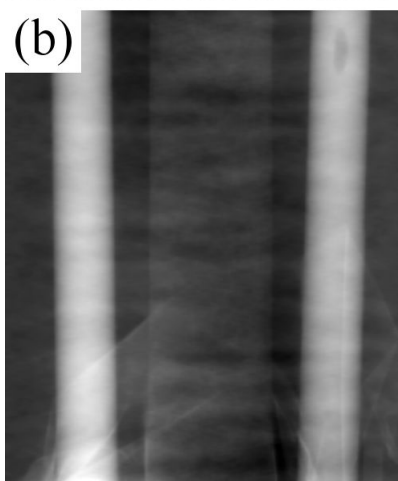
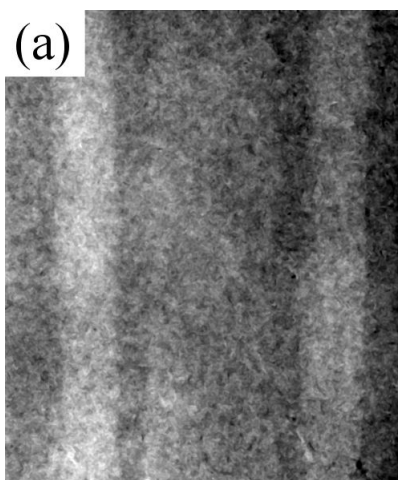


図 6：(a) 吸収コントラスト像；(b) 位相コントラスト像；(c) 小角散乱コントラスト像。試料は図 2 に示されるもので、PXR エネルギーは 25.5keV であった。

トとは異なる変化によるもので、小角散乱に基づくものと考えられる。しかも、吸収が極めて小さい物質に対しても高い感度があることがわかる。簡単な定義ではあるが、試料の物性的な違いで領域分けするには十分である。このコントラストは、タルボ干渉計を使って得られるビジビリティコントラストと本質的に同じ情報を有していると考え

られる。

ここでもう一つ、アクリル樹脂やポリスチレン樹脂の棒のエッジの部分でもかなり散乱の効果が強いことが示唆される。屈折によるピークシフトの影響が強く出ている可能性もあるが、エッジ部のみ不連続的に強い効果であり、小角散乱に類似した現象である可能性が高い。拡大 DEI で拡大率を大きくするために伝搬距離を長くするとエッジの不明瞭化が生じたが、試料のエッジで生じる散乱が原因とも考えられる。今回の結果はそれを示唆するものともいえる。

(4) DEI を用いた小角散乱イメージでは、散乱角をアナライザ結晶の角度で計測することができる。図 5 の横軸 θ を散乱による運動量変化 $q=(4\pi/\lambda)\sin(\theta/2)$ に変換し(λ は X 線の波長), Guinier プロットに相当するものに変換したのが図 7 である。このプロットからは、小角散乱の散乱体となっている微粒子の慣性半径 R_g に相当するものとして、 $1\mu\text{m}$ という値が得られた。アナライザ結晶自体の回折幅を含んでいるため、実際の粒子サイズはこれより大きいと思われるが、測定に使用した X 線 CCD の画素サイズ $24\mu\text{m}$ よりも小さいことは確実と考えられる。この結果は、DEI による小角散乱イメージングによって検出器の空間分解能より小さな構造に対する定量的な分析の可能性を示唆するものである。

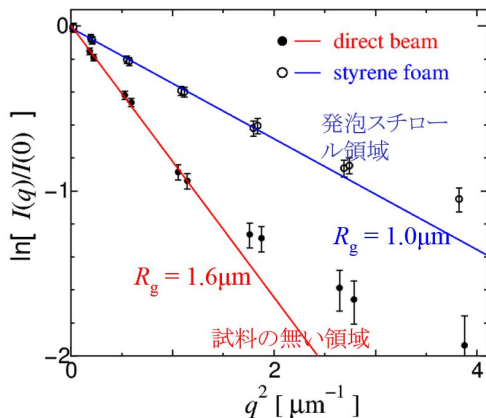


図 7：直接 X 線の領域と発泡スチロール領域における Guinier プロットの比較。

(5) 本研究課題を実施した結果、PXR 線源のコーンビーム広がりを利用して、DEI で拡大像が取得可能であることが実証された。同時に、試料のエッジ部で散乱の効果が強く、拡大率を大きくした場合に空間分解能を制約する要因になりうるという示唆も得た。また、試料による小角散乱を積極的に利用することにより、イメージ検出器の画素サイズよりも小さな空間構造に起因したコントラストが得られ、構造のサイズに関する定量的な情報もえられることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Yasushi Hayakawa, Yumiko Takahashi, Takao Kuwada, Toshiro Sakae, Toshinari Tanaka, Keisuke Nakao, Kyoko Nogami, Manabu Inagaki, Ken Hayakawa, Isamu Sato, X-ray imaging using a tunable coherent X-ray source based on parametric X-ray radiation, Journal of Instrumentation Vol. 8, 2013, C08001 1-13, 査読有,

DOI: 10.1088/1748-0221/8/08/C08001

Y. Hayakawa, K. Hayakawa, M. Inagaki, T. Kaneda, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakae, T. Sakai, I. Sato, Y. Takahashi, T. Tanaka, Computed Tomography for Light Materials Using Monochromatic X-ray Beam Produced by Parametric X-ray Radiation, Nucl. Instr. and Meth. B 309, 2013, 230-236, 査読有,

DOI: 10.1016/j.nimb.2013.01.025

〔学会発表〕(計 9 件)

早川恭史, PXR 円錐ビームを用いた極小角散乱イメージング, 第 20 回 FEL と High-Power Radiation 研究会 (2014 年 3 月 13 日 ~ 3 月 14 日, 日本大学理工学部, 東京)

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, The X International Symposium "Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures" (RREPS-13) (2013 年 9 月 23 日 ~ 9 月 28 日, セバン, アルメニア), 招待講演

Yasushi Hayakawa, Yumiko Takahashi, Takao Kuwada, Toshiro Sakae, Toshinari Tanaka, Keisuke Nakao, Kyoko Nogami, Manabu Inagaki, Ken Hayakawa, Isamu Sato, X-ray imaging using a tunable coherent X-ray source based on parametric X-ray radiation, MASR 2012 (7th International Symposium on Medical Applications of Synchrotron Radiation) (2012 年 10 月 17 日 ~ 10 月 20 日, 上海, 中国), 招待講演

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: 4 0 3 0 7 7 9 9

(2) 研究分担者

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： 7 0 3 3 9 2 5 8

中尾 圭佐 (NAKAO, Keisuke)
日本大学・理工学部・助教
研究者番号： 3 0 4 4 0 0 3 5