

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18714

研究課題名（和文）屈折・回折・干渉を用いないエックス（ガンマ）線フーリエイメージング法の実証

研究課題名（英文）Demonstration of X (Gamma) ray Fourier imaging without refraction, diffraction and interference

研究代表者

志村 考功 (Shimura, Takayoshi)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90252600

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：同心円状のフィルタを2次元検出器の前方に配置する光学系を検討し、得られた画像をフーリエ変換を含む画像解析をすることにより、実像を得ることができることを実証した。また、画像解析の際の変数を調整することにより、焦点位置を変更できることも示すことができた。さらに、コースティックネットワーク開口を用いると一度の露光により3次元情報を再構成できることも示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

赤外から低エネルギーX線までのイメージングでは光の屈折・回折・干渉を利用したイメージング法が用いられる。一方で10 keVを越えMeVクラスのX線（線）の領域ではこれらの基本的性質を利用することが困難なため、感度の良いイメージング技術がない。本研究では屈折・回折・干渉を用いないX線（線）イメージング法の実証を目的とする。本手法はX線（線）イメージングの方向を大きく変革・進展させる可能性を有しており、飛躍的に発展する潜在性を有する技術である。

研究成果の概要（英文）：We investigated an optical system in which concentric filters are placed in front of a two-dimensional detector. We demonstrated that a real image can be obtained by analyzing the observed image including Fourier transformation, where the subjects cannot be recognized. We were also able to show that the focal position can be changed by adjusting variables during image analysis. In addition we demonstrated that a three-dimensional image can be reconstructed from a single exposure using a caustic network aperture.

研究分野：X線イメージング

キーワード：X線 イメージング フレネルゾーン開口 コースティックネットワーク開口

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

赤外から可視光を含む紫外光領域までのイメージングでは光の屈折を利用した結像レンズが用いられる。さらに波長が短くなり EUV や X 線では反射や回折を利用した多層膜ミラーやフレネルゾーンプレートが結像光学素子として用いられる。コヒーレント光を利用できる場合はホログラフィやコヒーレント回折イメージングが用いられる。ホログラフィではコヒーレント光を物体に当て、その散乱光(物体光)と光源からの参照光の干渉を利用する。コヒーレント回折イメージングは物体による回折パターンから計算機処理により物体像を再構築する手法である。いずれの場合も屈折・回折・干渉などの光の基本的性質を利用したイメージング手法である。

一方で 10 keV を越え MeV クラスの X 線(線)の領域ではこれらの基本的性質を利用することが困難なため、感度の良いイメージング技術がない。透過型の X 線撮像法は医療や非破壊検査で広く用いられているが、これらは光源からの X 線が被写体を通過した際の吸収率の分布を可視化したものである。そのため、PET(陽電子放出断層撮影)や SPECT(単一光子放射断層撮影)などの核医学検査、原子炉や環境中の放射線核種の計測、宇宙ガンマ線観測などの光源のイメージングには適用することはできない。また、照明光を被写体に照射し、その散乱光でイメージングすることができれば、医療診断や非破壊検査技術としてのさらなる飛躍が期待できる。

この領域のイメージング技術としてコンプトンカメラが用いられている。コンプトンカメラは散乱体と吸収体という 2 種類の検出器で構成される。1 つの光子に対して 2 つの検出器で得られた位置とエネルギーによりコンプトンコーンを形成し、このコーンの重なりから光源位置を特定する。しかし、一般には装置が重く、携行に不便、感度が低く、撮影に時間がかかる、非常に高額などの課題がある。

2. 研究の目的

本研究では屈折・回折・干渉を用いない X 線(線)イメージング法の実証を目的とする。本手法は X 線(線)イメージングの方向を大きく変革・進展させる可能性を有しており、飛躍的に発展する潜在性を有する技術である。

3. 研究の方法

透過率 $T_j(r) = 1/2\{1 + \cos(r^2 + \phi_j)\}$ (ϕ_j は定数, $\phi_j = j\pi/2$, $j=0,1,2,3$) を有する 4 つのフィルタ(FZA: Fresnel Zone Aperture)を考える(図 1)。2 次元検出器の前方にフィルタを配置したとき、無限遠にある点光源からの X 線によりフィルタの影絵が観測される。その測定画像に計算機上で同じパターンを重ねると縞状のモアレ縞が生ずる(図 2)。同様の操作を 4 つの画像に施し、簡単な演算処理を行うと同心円状のパターンを消し、モアレ縞だけを取り出すことができる。これをフーリエ変換すると周波数空間で 1 点を示すことになり、無限遠の光源とこの 1 点が一対一に対応することになる。異なる光源によるモアレ縞はお互いに直交関係にあるために、どんなに重なっていても、また信号強度が弱くてもフーリエ変換により分離でき、光源分布を再構成することができる。再構成画像は

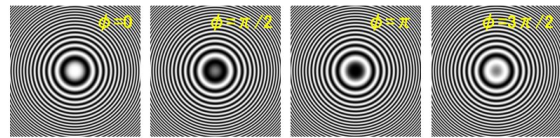


図 1 FZA (Fresnel zone aperture)

$$H = \sum_{k_1=0}^3 \sum_{k_2=0}^3 I_{k_1} \circ C_{k_2} \exp\{-i(\phi_{k_1} - \phi_{k_2})\}$$

をフーリエ変換して得られる。 I_{k_1}, C_{k_2} はそれぞれ測定画像と計算機上で重ねる画像を示す 2 次元実数配列である。演算子 \circ は要素毎の積を示す。この式は

$$\begin{cases} \text{Re}[H] = C_0 \circ (I_0 - I_2) + C_1 \circ (I_1 - I_3) \\ \text{Im}[H] = C_1 \circ (I_0 - I_2) - C_0 \circ (I_1 - I_3) \end{cases}$$

と書き下せる。フィルタの画像の和差積だけで表されており、屈折・回折・干渉などの光の基本的性質を利用しない再構成法である。

また、FZA に加えコースティックネットワーク開口(CNA: Caustic Network Aperture)を用いたイメージング法も検討した。コースティックネットワークとは反射や屈折で生じる光の模様的一种であり、本研究では疑似的なパターンの開口を使

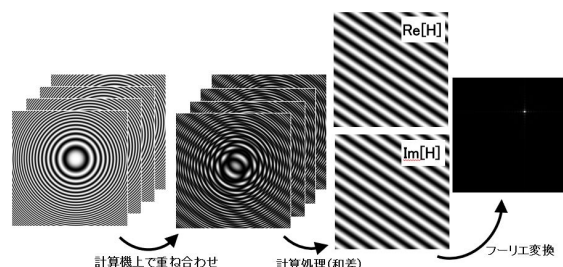


図 2 像の再構成の概要

用した(図3)。点光源が左右、上下、前後に動けばそれに伴い開口の影絵も左右上下、拡大縮小する(図4)。被写体を点光源の集まりと考えれば重なった開口の像を分離することができれば被写体の像を再構成することができる。FZAが4つの開口を用いて測定を行うため開口の移動機構が必要であり実用化に向けての課題となる。一方、CNAは再構成時に逐次計算が必要になるが、1つの開口のみで測定を行うことが可能であり、比較検討を行った。

4. 研究成果

(1) FZAを用いた後方散乱X線イメージング

簡易的に作製したフィルタを図5bに示す。厚さ50 μm のSUS製の板にマスクングし、エッチングにより開口部を形成した。最も細い外周部でも開口幅は100 μm と非常に大きい。このフィルタを用いてSUS製の切り文字「A」「I」(高さ2cm)にX線を照射して散乱X線でイメージングを行った(図5a)。「I」が手前になるように配置している。このとき得られた測定画像を図6aに示す。フィルタの影絵が多重に重なった画像になっているため判別することはできない。この画像に計算機上でフィルタ画像を重ね合わせフーリエ変換した像を図6bに示す。拡大率の大きな画像を重ねると手前に配置した「I」が鮮明になり、拡大率の小さな画像を重ね合わせると奥の「A」が鮮明になっている。本手法により被写体の3次元情報が取得できることがわかる。また、高エネルギーX線用の実験に向けて厚さ1mmのタングステンでのフィルタを作製した。その画像を図7に示す。

(2) CANを用いた後方散乱X線イメージング

この手法では逐次解析法によって画像を再構成する。その概念図を図8に示す。物体を点光源の集合体とみるとセンサーに映し出される測定画像はマスクパターンと画像の畳み込みで表すことができる。まず物体画像を適当に仮定し、マスクパターンと畳み込むことで計算画像を求める。この計算画像と実際の測定画像との差分を求め、この差分を基に仮定する物体を少しずつ変更することで、差分が小さくなり収束するまで逐次的に行う。本研究ではコースティックパターンを後方散乱X線イメージングに適用することで、一度の撮影による画像の再構成を目指した。

本研究に用いたCNAは50 μm 厚のSUS製の板をフォトレジストでマスクングし、エッチングにより作製した。図9に実際に作製したCNAの顕微鏡画像を示す。ほぼデザイン通りにマスクを作製できていることがわかる。

このCNAとX線源の距離をはなしてマスクパターンの測定を行った。得られた画像を2値化し、この画像をマスクパターンの

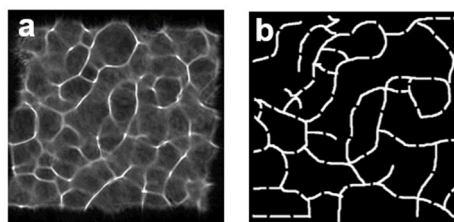


図3 (a) コースティックネットワーク (b) CAN

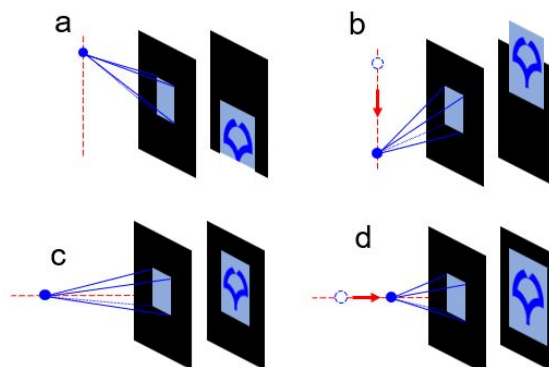


図4 画像再構成の原理. 点光源が上下に動けば開口パターンの像は上下に移動する(a). 点光源が前後に動けば開口パターンの像は拡大縮小する.

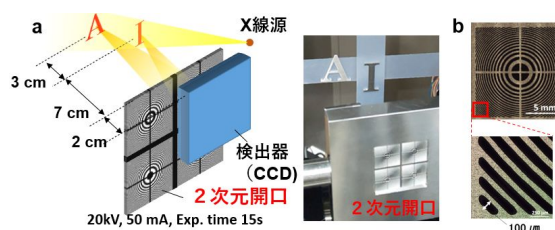


図5 (a)実験配置と測定時の写真 (b) 使用した2次元開口

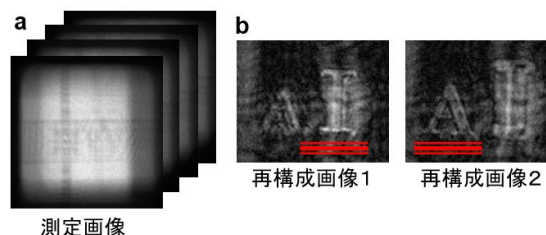


図6 測定画像と再構成画像

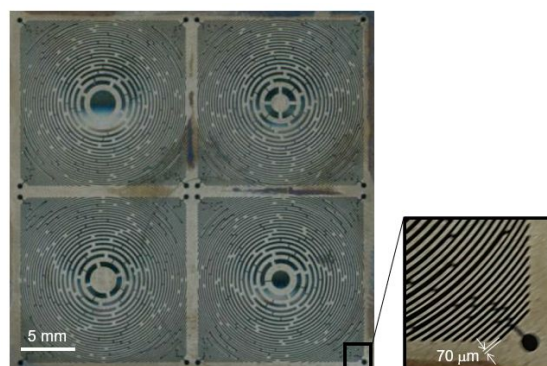


図7 1 mm 厚のタングステン板を用いて作製したFZA

像として再構成計算に使用した。

図 10 に CNA を用いた後方散乱 X イメージングの結果を示す。試料としてステンレス製のアルファベット 'A' と 'I' の文字を使用し、図 10a のように検出器からの位置を前後にずらして配置して、散乱した X 線を検出した。図 10b が CNA を通過して実際に検出された測定画像である。被写体の位置によって CNA を通して検出器に映し出されるパターンの拡大率が変わるので、再構成に使用するマスクパターンの大きさを少しずつ変更することにより、ピントを調節した。遠くにある被写体 'A' には 1.055 倍のマスクパターン、'I' には 1.08 倍のマスクパターンを計算に用いることでそれぞれにピントを合わせた画像を得ることができた。一枚の画像から後方散乱像を取得することができ、計算に使用するマスクパターンの拡大率を変更することによって一枚の画像から奥行き情報を取得できることがわかった。

図 11 に倍率の異なる多数のマスクパターンを用いて 3 次元像の再構成を行った結果を示す。マスクパターンには 1-1.15 倍までの倍率の異なる 31 枚のマスクパターンを用い逐次解析法により 3 次元像の再構成を行った。その結果を図 11(a) に示す。A と I が異なる奥行き場所に再構成されていることを確認することができる。一枚の測定画像(図 11(b))から 3 次元像を再構成できることを示すことができた。

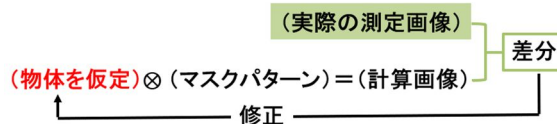


図 8 逐次解析法の概念図

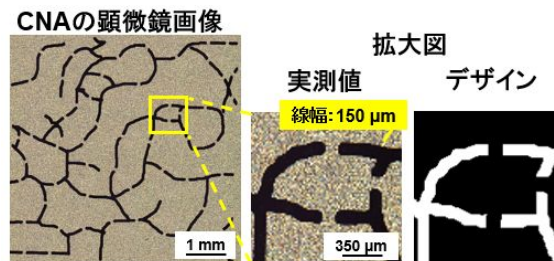


図 9 作製したマスクパターン

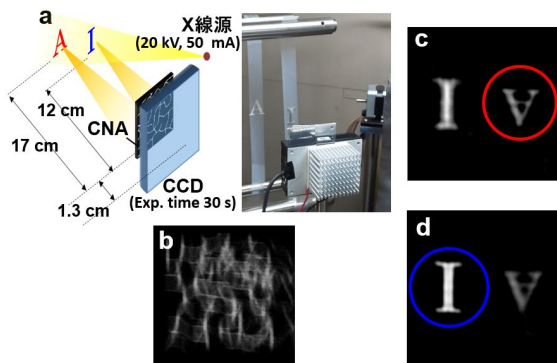


図 10 (a) 実験配置と測定時の写真 (b)測定画像 (c)再構成像 "A" にピント、(d)再構成像 "I" にピント

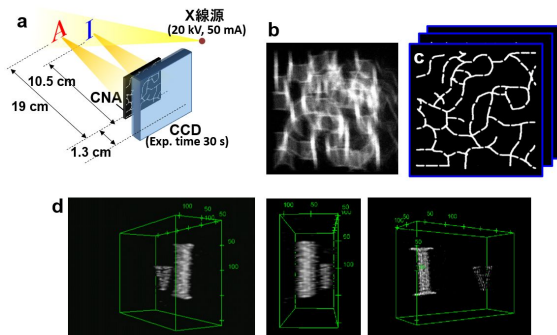


図 11 (a)測定配置 (b)測定画像 (c) 測定に使用した多数のマスクパターン (d)再構成された 3 次元像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 志村 考功, 梶原 堅太郎, 辻 成希, 小林 拓真, 渡部 平司
2. 発表標題 高角散乱X線を用いたライトシート3Dイメージング
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 志村 考功, 梶原 堅太郎, 辻 成希, 小林 拓真, 渡部 平司
2. 発表標題 高エネルギーX線CT計測 -高角散乱X線を用いたライトシート3Dイメージングとの比較検証-
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	渡部 平司 (Watanabe Heiji) (90379115)	大阪大学・大学院工学研究科・教授 (14401)	
研究協力者	小林 拓真 (Kobayashi Takuma) (20827711)	大阪大学・大学院工学研究科・助教 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------