

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21089

研究課題名（和文）レンズレスX線カメラの試作と元素分布像への応用

研究課題名（英文）Prototyping of lensless X-ray camera and application to element distribution image

研究代表者

田中 克志（Tanaka, Katsushi）

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：30236575

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）：本研究では集光系を用いないX線の発光部位をイメージングする新たな手法の開発を目指し、カプトン膜上に蒸着したBiによってMURAコードのマスクを作製した。カプトン膜とBiの接着性が不十分で細かなパターンが脱落し、実用に耐えるマスクを作製することができなかった。画像を再構成するためのソフトウェアは模擬データで評価し、正しく再構成できるソフトウェアを作成することができた。さらにソフトウェアの性能向上を図り、実用的な速度で処理することが可能となった。以上より、現時点では不十分なものではあるが、集光系を用いないX線の発光部位のイメージングは十分実用的なものであることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

X線によるイメージングの研究ではX線を透過させることによって生じる吸収・回折・屈折を用いるものがほとんどであり、中にはnmオーダーの分解能を持つイメージング方法が開発されている。一方、蛍光・散乱によって試料から発生するX線を用いるイメージング方法はほとんど研究が進んでいない。本研究はこの分野に新たなイメージング方法を提供するものであり、観察装置の進化により新たな研究テーマ・研究方法を生み出すきっかけとなりうるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to develop a new method for imaging the X-ray emission site without using a lens system by using a MURA code mask with Bi deposited on the Kapton film. Since the adhesiveness between the Kapton film and Bi was insufficient, fine patterns fell off at etching Bi. This makes it impossible to produce a mask for practical use. The software for reconstructing the image was evaluated using simulated data, and we were able to write a software that can be reconstructed correctly. Furthermore, the performance of the software has been improved, and it has become possible to process at a practical speed. It was clarified that the imaging of the X-ray emission site without using a lens system is sufficiently practical, although it is insufficient at present.

研究分野：材料物性

キーワード：レンズレス 画像取得 蛍光X線

1. 研究開始当初の背景

よく知られているように X 線領域では物質の屈折率がほぼ1であり、レンズを用いた光学系を作製することが容易で無い。また、全反射を用いる方法においても臨界角が数度以下であることから集光系が大型となり取り扱いが難しい。このような制約から X 線を用いたイメージングはレントゲン撮像に代表される吸収コントラスト像や屈折コントラスト像以外は難しいとされてきた。屈折や全反射を用いない方法としてフレネルゾーンプレート(FZP)を用いた集光系が開発され、吸収や屈折コントラスト像では数十 nm 程度の高い分解能の達成が報告されている。しかしながら、FZP は焦点深度が浅く、かつ X 線の波長により焦点距離が大きく変わることから、X 線の発光のイメージングにおいては画像取得の際に X 線の波長ごとに都度焦点調整が必要であるなどその用途は限られたものとなっている。

最近、可視光のイメージング分野ではレンズのような集光系を用いない代わりに、コンピュータを用いた画像処理によって像を得るコンピューショナルイメージング法が急速に発展してきている。この方法はピンホールカメラの開口率を向上させるために複数の開口部を設ける「コーデッドアパチャー法」を基とする方法である。2017 年に日立製作所が FZP を集光素子としてでは無く特定のパターンを持った影を作る素子として用いるシステムを発表し(図1)、画像再構成の計算量を劇的に少なくしたことからその可能性が特に注目されるようになった。この方法は集光系を用いないので小型化が可能であることに加え、二次元の受光素子を用いながら光源の奥行きを三次元情報を一度に取得できる。また、FZP の集光系で問題となる焦点の波長依存性も無いという優れた特徴がある。

このレンズを用いないコンピューショナルイメージング法は集光系を用いないことから X 線イメージングに最適な方法である。しかしながら驚くべきことに、X 線のイメージングの研究は集光系を工夫することで良好な実像を結像させる方法論に終始していた。

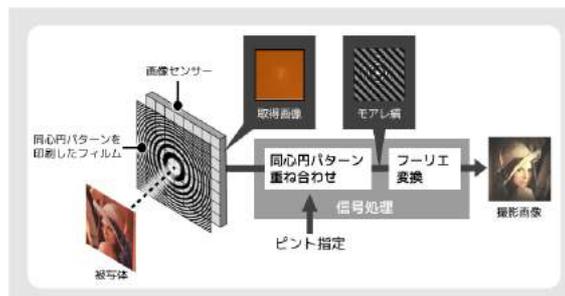


図1 日立製作所が発表したレンズレスカメラの撮影原理図

<https://www.hitachi.co.jp/rd/portal/contents/story/lenless/index.html>

2. 研究の目的

本研究では

- (1) 集光系を用いない X 線の発光部位をイメージングする新たな手法の開発に挑戦する。
- (2) 蛍光 X 線による元素の二次元分布像の取得を試み、性能向上の方策を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では可視光のイメージングで確立されつつあるレンズレスコンピューショナルイメージング法を X 線イメージングに応用し、その適用可能性を検証した。X 線透過能の高いポリイミド膜上に X 線吸収率の大きいビスマスを蒸着後、フォトリソグラフ法によって化学エッチングを施し X 線に対するマスクを作製する。このマスクを X 線領域にも感度がある CCD イメージセンサから適度に離れた位置に設置し、X 線カメラのハードウェアとする。一方、取得した符号化されたイメージから実像を再構成するソフトウェアを作成することで X 線カメラシステムとする。

4. 研究成果

(1) X 線マスクの作製

符号化されたイメージを作るためのマスクとしては、先にあげたフレネルゾーンプレートの他にランダムドットやコーデッドパターンが提案されている。可視光を対象とする場合は光線に対する透過度をほぼ 0%と 100%とすることができるが、透過度が 0%から 100%へと鋭く変化するエッジ効果によるフレネル回折現象が無視できない。一方、X 線が対象の場合ではエッジ効果はほぼ無視できる一方で、マスク部における透過度を 0%とすることは(X 線のエネルギーにも依存するが)ほぼ不可能である。このような特性の違いを検討した結果、本研究では MURA パターンと呼ばれるコーデッドマスクを採用することとした。MURA パターンは $4n+3$ かつ素数であるような次数に対して定義されるパターンである。次数が大きくなるほど分解能は向上するが CCD イメージセンサのピクセルサイズも考慮する必要がある。後述する CCD イメージセンサの大きさが $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ でピクセルサイズが $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ であることを考慮する。次数を 151 とするとマスクの最小線幅を $45\ \mu\text{m}$ とするとマスクの大きさは $6.8\text{mm} \times 6.8\text{mm}$ となる。マスクの最大の穴は $315\ \mu\text{m} \times 315\ \mu\text{m}$ となる。撮影領域を $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ とすると、マスク位置は物体-像面の距離の約 0.315 倍の場所に配置することになる。この時像面は $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ なのでほぼ全面が満たされる。このような考察から次数を 151 としたマスクを作製した。次数 151 の MURA パターンを図 2 に示す。マスクの基材は X 線の透過能が高く機械的強度も高いポリイミドフィルムとし、マスクとするために

蒸着およびその後のエッチングが比較的容易なビスマスを蒸着した。

エッチングには王水を用いた。フォトマスクとの密着性は良好であったが、基材のポリイミドとの密着性が不十分で、どうしても細かなパターンが剥離してしまう結果となった。蒸着前にポリイミド表面をプラズマ処理することで少しは改善されたが、使用に耐えることのできるマスクを作製するにはいたっていない。今後蒸着の前処理、エッチングの条件などさらに検討する必要がある。

(2) CCD イメージセンサーの設置台の作製

購入した CCD イメージセンサは CCD 部を冷却することで熱ノイズを低減させ、測光の直線性を向上させるものである。元々真空機器への装着が想定されているため、大気中では霜が付着してしまう。マスクとして X 線の透過能が高い材質が必須であったことから、マスクを真空隔壁として使用することは困難であった。そのため、マスクの前面・後面(カメラ側)を同時に排気することでマスクに大気圧の負荷をかけることのないジグを作製し、真空引き後乾燥窒素ガスを大気圧まで充填し、その状態を封止することで着霜を防ぐ方法を取った。CCD は可視光にも感度を持つため、X 線の透過能は低下するが、確実に可視光をカットするためにマスク前面に厚さ $20\mu\text{m}$ のアルミフォイルを置き遮光した。このように設置した CCD イメージセンサの全体像を図 3 にしめす。

(3) 実像再構成ソフトウェアの作成

取得した符号化されたイメージから実像を再構成する方法としてはフーリエ変換を用いたデコンボリューション法などが報告されているが、本研究では適用範囲が広く、演算によるアーティファクトが生じにくい最大エントロピー法によるデコンボリューション法を採用することとした。ここでは

i) 初期条件として取得像全体の平均明るさに相当する均一な照度分布を仮定。

ii) 画像取得エリア各点に対応する CCD 像面でのマスクの写像と取得像とのコンボリューションを行い、値が正であるならば指数関数に基づいた照度の増加、負であるならば照度の減少を行う。

iii) ii)の操作を誤差が情報エントロピーから規定される値に近づくまで繰り返し行う。

というアルゴリズムを採用した。また、本研究の後半ではこのソフトウェアを GPGPU に対応させることで高速化した。

図 4 にソフトウェアの評価に用いた蛍光 X 線発光分布と図 2 の MURA パターンを光路途中に置いたときの CCD 像面のシミュレーション結果を示す。この像面のイメージからの再構成では通常の CPU を用いたワークステーションでは $10\text{分}/\text{iteration}$ であったが GPU を用いることにより $1\text{分}/\text{iteration}$ まで短縮することができ、さらに分解能を $10\mu\text{m}$ まで落とすことで $0.5\text{秒}/\text{iteration}$ と短縮することができた。おおまかな像を再構成するのに必要な iteration 数は 10 程度であり、少し遅いもののほぼリアルタイムでの処理が可能となった。これにより、低い分解能で条件設定を行った後、時間をかけて再構成を行うことで、十分実用に耐える測定系を構築することができた。

(4) まとめ

本研究の目的の1つである集光系を用いない X 線の発光部位をイメージングする新たな手法はマスクの作製に未だ不十分な点があり、改善する必要がある。MURA パターンではなくランダムパターンを用いる方法が、マスク作製時の脱落に耐性が高いとも考えられることから、今後ランダムパターンについても検討を行う必要がある。この部分を改善することで元素の二次元分布像の取得が可能であることが明らかとなったことから新たな手法を示すことができたと考えられる。

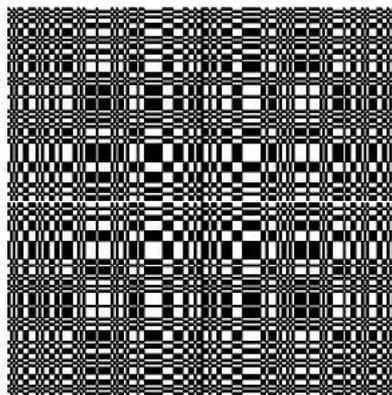


図 2 次数 151 の MURA パターン

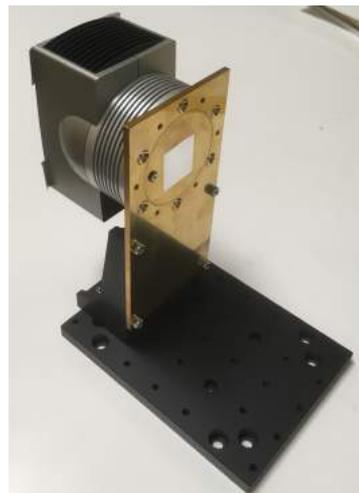
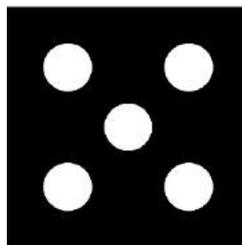


図 3 ガス置換ジグを装着した X 線 CCD イメージセンサ

(a)



(b)

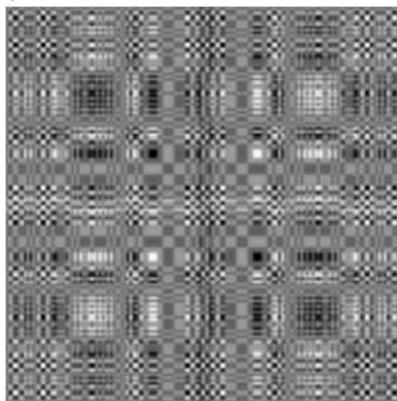


図 4 (a)シミュレーションに用いた蛍光 X 線発光分布。(b)MURA パターンで符号化された像面のシミュレーション結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

神戸大学工学研究科機械工学専攻構造機能材料分野ホームページ
<https://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-mm4/index.html>

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 分 担 者	寺本 武司 (Teramoto Takeshi) (10781833)	神戸大学・工学研究科・助教 (14501)	

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
---------	---------