

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K12027

研究課題名(和文)単スリットを用いた位相イメージング法の開発

研究課題名(英文)Development of X-ray phase imaging method using a single slit

研究代表者

岡本 博之 (Okamoto, Hiroyuki)

金沢大学・保健学系・准教授

研究者番号：20272982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、次世代の医療用X線イメージング法として期待されている位相コントラスト法について、より実用的な手法を開発することであった。繊細な光学素子を用いず、単スリットと高分解能CCDカメラのみの単純な光学系から成る装置を作製した。そして、従来の位相イメージング法と同様に吸収像、屈折像、散乱像を得ることができた。加えて、繊維質の存在や繊維性の強さも検出できることを確認した。精密な調整が不要な装置であるにも関わらず、様々な位相情報を取得できる有用な装置であることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、次世代のX線イメージング法として期待されている位相コントラスト法の開発が進んでいる。しかしそれらの手法の多くは精密な調整が必要な光学素子を用いているため、様々な環境下にある医療や産業の現場において使用するには至っていない。本研究ではその問題を解決するため、繊細な光学素子を使用せずとも位相像を得ることが可能な装置を提案したことに意義がある。今後、更なる改良を加えることで低吸収物体のイメージングを必要とする、医療を始め、食品、農業など、広い分野へ応用可能になると考える。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop a more practical method for phase contrast imaging, which is expected to become the next generation medical X-ray imaging method. We fabricated an apparatus consisting of a simple optical system with only a single slit and a high-resolution CCD camera, without using delicate optical elements. Then, absorption, refraction, and scattering images were obtained as in the conventional phase imaging method. In addition, we confirmed that the presence of fibrous material and the strength of fibrosis could be detected. Despite the fact that the device does not require precise adjustment, it was confirmed that it is a useful device that can acquire a variety of phase information.

研究分野：生体医工学関連

キーワード：X線 放射光 位相イメージング 屈折像 散乱像 散乱異方性 繊維状物質 分解能評価

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

X線透視法は非破壊検査が可能であるため、医療も含めた多くの分野で利用されている。しかし、これまでの減弱差を利用する方法では、軽元素からなる軟組織等については観察しにくいという欠点も有った。そこで、減弱の小さい物質でも観察可能な X 線位相イメージング法が注目されている。その代表的手法として、拡張型 DEI (Diffraction enhanced X-ray imaging) 法やタルボ干渉計を利用する方法がある。拡張型 DEI 法については、位相情報を高感度に検出可能であるが、一方で、Si 単結晶による回折現象を利用するため単色 X 線ではしか利用できないという欠点がある。そのため、管球タイプの X 線発生装置を使用する医療分野には向かない。また、タルボ干渉計を利用する方法については、管球タイプの X 線発生装置を使用可能であるが、光学系が複雑であり、精密な調整も必要である。このように従来の位相イメージング法においては、単色 X 線が得られる放射光のような光源や繊細な光学素子が必要であるという問題があった。そのため、装置を移動することが困難である。そこで、医療分野で重要な位置を占める CT (Computed Tomography) 装置を構築する際には、試料を回転し CT 像を得ていた。一方で、医療分野において患者を回転させることはできないため、繊細な光学系を持つ従来の位相イメージング法では臨床用 CT を実用化することは困難であった。

2. 研究の目的

背景において述べたように、位相コントラスト法は非破壊で有益な情報を検出できる可能性をもちつつも、応用にあたっては、その光学系の繊細さがネックとなることが予想される。そこで本研究は、現時点で実現できていない位相イメージング法の臨床応用を目標に置き、単純な光学系を持ち、繊細な調整が不要な位相イメージング装置を開発することを目的とする。また、装置の原理が明快で、測定された量も定量的で再現性がある方法になることを目指す。加えて、従来法で得られる吸収像に加え、屈折像や散乱像などの位相像を同時に取得できる手法を目指す。

本研究では、吸収像、屈折像、散乱像を同時に取得するため光学系に最低限必要な物を、単スリットと高分解能 CCD カメラ、試料移動機構のみであると考え、装置を作製する。一方で、本光学系のみで位相像を得るためには、CCD カメラの空間分解能は十分ではない。そこで、得られた画像に統計処理を加えることで、位相像を得ることを可能とする。本研究では、第一段階として、装置及び処理ソフトの開発を行う。次に、第二段階として、開発した装置により得られる画像の分解能評価を通じて撮影条件の最適化を行う。そして、第三段階として、より実用化に近づくため、高エネルギー条件での撮影技術の開発を行う予定であった。しかし、研究期間途中で世界的に蔓延した新型コロナウイルス感染症(COVID-19)のため、研究遂行に必須の施設である高エネルギー加速器研究機構での実験が困難となったため、予定していた高エネルギー条件での撮影技術の開発の研究を十分進めることが出来なかった。そのため、本報告書では第二段階までの成果を中心に報告を行う。

3. 研究の方法

本研究の主な実験は高エネルギー加速器研究機構放射光施設 (KEK-PF) BL-14B で行った。開発した装置の概略を図 1 に示す。幅 $d=10 \sim 50 \mu\text{m}$ の単スリットに $15 \sim 30 \text{ keV}$ の単色 X 線を照射し線状に整形後、試料に照射する。その後、試料を透過した X 線は距離 $L=500 \sim 1000 \text{ mm}$ 離れた空間分解能が数 μm の CCD カメラに記録される。線状ビームを使用するため、試料全体の像を得るには、スキャンと撮影を繰り返す。スリットを通過した X 線は、発光点の広がりやスリットでの回折等により、スリット幅よりも数倍広がった線状の像になる。この像の y 軸(上下)方向の強度分布を図 2 中に実線で示す。試料を設置後に X 線を照射すると、相互作用により強度分布は変化する。試料により吸収が生じると 積分強度が変化、試料により屈折が生じると 分布中心の変化、試料により散乱が生じると 分布の広がりの変化が生じる。それぞれの変化を図 2 中に破線で示す。実際には、これらの相互作用が同時に生じ、分布は図 2 破線のように変化する。そこで、強度分布を統計学における確率密度関数に置き換え、 $I(y)$ の変化を期待値の変化、 σ の変化を標準偏差の変化として計算し、それぞれの像を得る。すなわち、CCD カメラで得られる強度分布を統計的に処理し、吸収像、屈折像、散乱像の 3 つを同時に得る。本方法は、相互作

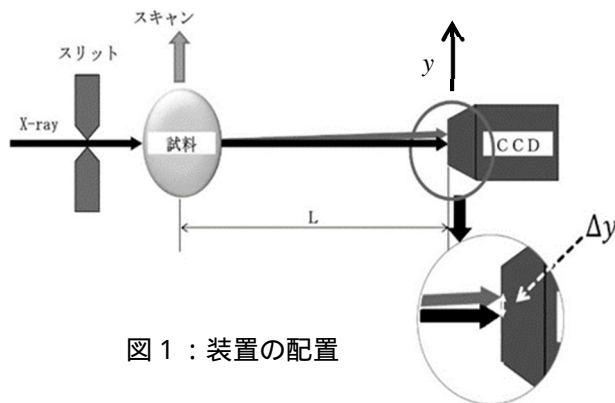


図 1 : 装置の配置

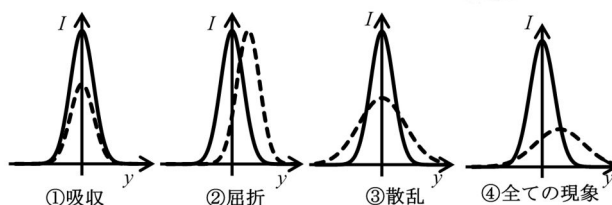


図 2 : CCD カメラ上で観測される強度分布の変化

用と観測される量の関係、および定量性が明らかであり解釈が容易であるという特徴を持つ。

4. 研究成果

(1) 分解能評価方法の開発と撮影条件の最適化

まず、装置の製作と平行し、位相情報検出能（分解能）の評価を行うための評価用試料（ファントム）の開発を行った。開発したファントムは以下で記述する2種類である。また、撮影条件を変えつつファントムにより分解能評価を行い、最適条件を探した。使用したX線エネルギーは20.7 keV、比較対象の拡張型 DEI 法で使用した Si 結晶の回折面は(220)である。

屈折角分解能評価用ファントム

試料による X 線の屈折角をどの程度まで検出可能か（屈折角分解能）調べるため、図3のようなアクリル製ファントムを制作した。傾斜角 α の部分で X 線が屈折する。そこで、 α が異なるファントムを複数個用意し、観察可能な α の範囲を調べることで、屈折角分解能を得ることができる。試料と CCD カメラ間距離 L 、およびスリット幅 d を変化させて分解能を調べた。 L とともに分解能は向上したが約 0.8 m 以上では変化しなくなった。また、 d は 20 μm を使用したときに最も分解能が向上した。 $L=0.8\text{ m}$ 、 $d=20\text{ }\mu\text{m}$ の条件で分解能は 0.15 μrad であった。

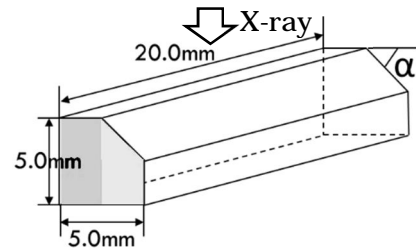


図3 屈折角分解能評価用ファントム

散乱角分解能評価用ファントム

試料による X 線の散乱角をどの程度まで検出可能か（散乱角分解能）調べるため、図4のようなファントムを制作した。減弱率が水と同等になるように調整された発泡性樹脂をくさび型に加工し、水中に沈める。その後、樹脂中に存在する数 μm の泡による X 線の散乱が観察可能な厚みの範囲を調べることで、散乱角分解能を得ることができる。 L 、および d を変化させて分解能を調べた。 L とともに分解能は向上したが約 0.6 m 以上では大きく変化しなくなった。また、 d は 20 μm を使用したときに最も分解能が向上した。 $L=0.6\text{ m}$ 、 $d=20\text{ }\mu\text{m}$ の条件で分解能は 0.17 μrad であった。

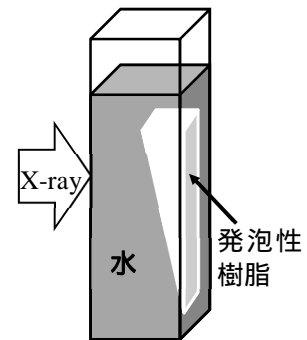


図4 散乱角分解能評価用ファントム

撮影条件の最適化

屈折角分解能、散乱角分解能の測定結果から、撮影の最適条件は $L=0.8\text{ m}$ 、 $d=20\text{ }\mu\text{m}$ であると判断した。一方、同じ評価方法を用いて事前に得た拡張型 DEI 法による屈折角分解能は 0.005 μrad 、散乱角分解能は 0.021 μrad であった。屈折角分解能においては約 20 倍、散乱角分解能においては約 8 倍の違いが見られた。

(2) 散乱の異方性を利用した繊維質の検出

試料中に繊維状の組織が存在すると、繊維と平行方向の散乱は小さく、垂直方向の散乱は大きくなる。つまり、散乱の異方性を評価することにより、繊維質を検出可能である。そこで、図5に示すような回転ステージに試料を設置し、X線進行方向を軸として方位角 ϕ の違いによる散乱角の変化を検出した。その結果、繊維状物質の散乱角は、図6のように方位とともに変化した。一点鎖線は繊維の方向を示している。

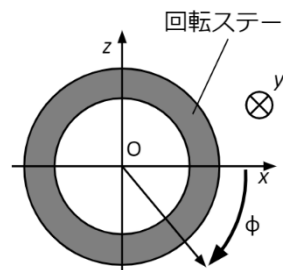


図5 散乱角異方性測定用回転ステージ

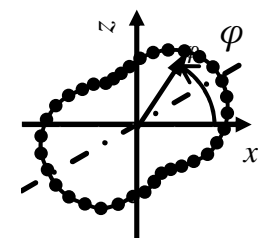


図6 散乱角異方性と繊維方向の関係

本研究において開発した手法を使用して漆器の撮影を行ったところ、図7のような像を得た。(a)減弱像、(b)屈折像、(c)散乱像、(d)異方性(繊維)像である。漆器にはその製作工程を反映し、減弱が大きな部分、等方的散乱が生じる部分、異方的散乱が生じる繊維部分が存在している。

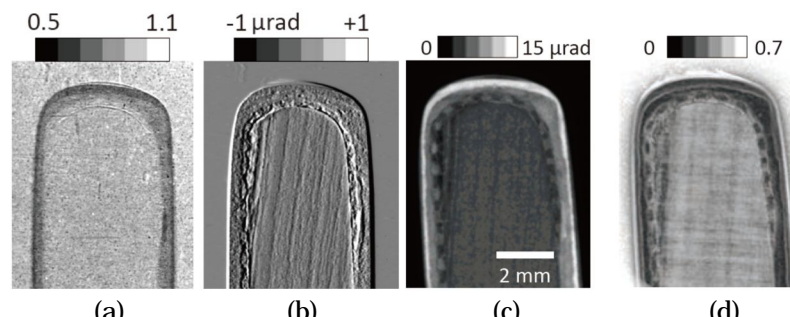


図7 漆器の(a)減弱像、(b)屈折像、(c)散乱像、(d)異方性像

得られた画像を観察すると、それらの特徴が適切に評価されていることが分かった。

得られた結果から、本研究で開発した単スリットを利用した位相イメージング法は、回折を利用した拡張型 DEI 法に比べると分解能は劣っていた。しかし、光学系が単純で有ることに加え、従来法と同様の位相像も得られることを確認できた。以上より、本研究で開発した手法は繊細な調整が不要でありつつも位相像が得られる、大変有用な手法であることが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 岡本 博之, 内藤 愛莉奈, 水野 薫	4. 巻 45
2. 論文標題 X線位相イメージング法における屈折角分解能の評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of wellness and health care	6. 最初と最後の頁 47-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 岡本博之, 内藤愛莉奈, 水野薫	4. 巻 44
2. 論文標題 線位相イメージング法による漆器中の繊維状物質の検出	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of wellness and health care	6. 最初と最後の頁 97-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 岡本博之, 藤森茜, 森川公彦, 水野薫	4. 巻 43
2. 論文標題 X線位相イメージング法により得られる散乱像の分解能評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of wellness and health care	6. 最初と最後の頁 101-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 岡本博之, 内藤愛莉奈, 水野薫	4. 巻 43
2. 論文標題 X線位相イメージング法による漆器の観察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Wellness and Health Care	6. 最初と最後の頁 85-88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 岡本 博之, 藤森 茜, 森川 公彦, 水野 薫	4. 巻 42
2. 論文標題 X線屈折コントラスト法における屈折角分解能のサイズ依存性評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of wellness and health care	6. 最初と最後の頁 51-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 内藤愛莉奈、岡本博之、水野薫
2. 発表標題 位相イメージング法の屈折角分解能サイズ依存性評価
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 像拡大 X 線位相イメージング法による漆器の観察
2. 発表標題 岡本博之、内藤 愛莉奈、森川公彦、水野薫
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本博之, 藤森茜, 森川公彦, 水野薫
2. 発表標題 X 線位相イメージング法による輪島塗の観察
3. 学会等名 第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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