

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02628

研究課題名（和文）二光束干渉X線顕微位相イメージング・CTの開発

研究課題名（英文）Microscopic X-ray phase imaging/ CT based on two-beam interference

研究代表者

百生 敦（Momose, Atsushi）

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：20322068

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：フレネルゾーンプレートを用いた実験室X線顕微鏡（Carl Zeiss Xradia 800 Ultra）にX線透過格子を導入し、Talbot効果で形成される自己像が試料によって変位することを利用した位相コントラストモードを付加した。縞走査法による位相計測において、正負逆符合の位相像が特定距離ずれて重なり合う二重位相像が生成されるので、これから単純位相像を再構成する複素デコンボリューション法を開発した。これにより、試料によるX線（1.54 nm）の位相シフトを顕微鏡下で画像化することができた。また、残留アーチファクトが軽減される格子設計（周期やduty比など）を再検討し、画質向上のための指針を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のX線画像は試料によるX線の吸収によってコントラストが形成されている。たがって、高分子材料や生体軟組織のX線画像には十分な感度が期待できない。この問題を克服する技術としてX線位相コントラストに基づく位相イメージング技術がある。

本研究は、X線透過格子を用いた位相イメージング技術を導入し、X線顕微鏡による高分解能撮影においても高感度化を実現することを目的とした。顕微鏡学観点でも、光学顕微鏡や電子顕微鏡で使われていない独自の光学系と画像処理手法を開発したことは特徴的である。また、社会的には高分解能で三次元観察を高感度で実現するシステムになるので、様々な研究・開発に有用な機器を提供することになる。

研究成果の概要（英文）：We introduced X-ray gratings into the laboratory X-ray microscope (Carl Zeiss Xradia 800 Ultra) equipped with a Fresnel zone plate. A phase-contrast mode, which extract phase signal from the sample-induced deformation of the self-image formed by the Talbot effect, was appended. By the phase measurement by the fringe-scanning method, a twin phase image that consists of two phase images of opposite sign and sheared by a certain distance is generated. To reconstruct a single phase image from the twin phase image, we developed newly a complex deconvolution method, resulting a phase shift image of a sample with 0.154-nm X-rays under the microscope optics. We also reexamined grating design (period, duty cycle, etc.) to reduce residual artifact, and obtained guidelines for improving image quality.

研究分野：X線光学

キーワード：X線顕微鏡 回折格子 二光束干渉 X線CT デコンボリューション 位相回復

1. 研究開始当初の背景

X線顕微鏡は、波長が極めて短い光を用いる顕微鏡であるため、光学顕微鏡を凌ぐ空間分解能が達成できるとして、長く研究が重ねられてきた。ただし、X線と物質との相互作用は、可視光と物質との相互作用に比べてはるかに弱く、それゆえにX線顕微鏡を構築するための光学素子の選択肢はごく限られたものとなっている。しかしながら、現在ではフレネルゾーンプレート(FZP)がX線に対してレンズ作用を発揮する実用的な素子として使えるようになり、各シンクロトロン放射光施設では広く使われている。また、これを搭載する実験室X線顕微鏡も市販されるようになってきている。X線と物質との相互作用が微弱であることは、X線が物体中を直線的に透過しやすいという性質にもつながっており、これは、物体内部の三次元的可視化を可能とするX線断層撮影法(X線CT)の数学的要請にとっては都合がよい。結果として、X線CTによる三次元撮影をX線顕微鏡下で行うことも可能であり、100nmを下回る空間分解能が実現するに至っている。

ただし、X線顕微鏡におけるコントラストは、X線の減衰の大小に基づく吸収コントラストである。X線吸収係数は、原子番号の約4乗に比例するという事実があるため、軽元素からなる物質では十分なコントラストが得られないという問題があり、高分子材料などの軽い物質のX線顕微鏡観察は容易ではない。X線吸収係数はX線波長の約3乗に比例するという性質もあるので、軟X線領域で顕微鏡を構築して使用するアプローチは考えられる。ただし、軟X線を減衰させずに使うためには、真空環境を整備する要請が伴う。

有力なアプローチとして、X線位相コントラスト技術に期待が寄せられている。特に硬X線領域では、軽元素についていえば、X線位相シフトの相互作用がX線吸収のそれに比べて約千倍大きいという事実があるからである。すなわち、吸収に頼るがゆえのコントラスト不足を位相コントラストで補える。加えて、硬X線は大気中で使えるため、撮影上の制約が決定的に緩和される。

X線顕微鏡における位相コントラスト技術としては、可視光領域と同じくゼルニケ位相差法に基づくものが存在している。ただし、輪郭強調効果による構造の視認性は増すものの、X線位相シフトに対する定量性が乏しいという欠点を克服できていない。位相コントラスト画像からX線位相シフトが定量計測できれば、これをX線CTの入力画像とすることにより、屈折率分布として断層画像が再構成される。これは、かなり良い近似として、電子密度(あるいは、質量密度)に正比例する画像となる。これをX線位相CTと呼んでおり、申請者は、ラジオグラフィとしての測定系においてこれを確立させ、1mg/ccの密度感度を実証してきた。次いで、X線位相CTをX線顕微鏡下で実現するために、X線透過格子を用いて定量的な位相シフト画像計測を可能とするX線Talbot干渉計、あるいは、それに類似するX線光学系をX線顕微鏡と融合させる研究を続けている。

2. 研究の目的

位相コントラスト生成には、空間的干渉性のあるX線が必要であり、シンクロトロン放射光(SR)の利用が有効である。課題代表者らは、SR共同利用施設であるSPring-8において、FZPを用いた結像型X線顕微鏡とX線Talbot干渉計を融合させたシステムを開発し、応用研究も推進している。しかし、SR利用は限られた配分ビームタイムで実施するため、実験室X線源を用いたシステムで、撮影時間が多少長くなっても、いつでも実験が可能であることを重視する利用者も多い。そこで、実験室で稼働するX線顕微鏡位相CTの開発を進めてきた。

課題責任者は、FZPを搭載した結像型X線顕微鏡装置(Carl Zeiss Xradia 800 Ultra(空間分解能50nm))に基づく位相顕微鏡・CTの開発を進める。本装置は回転陽極X線管を採用して実用的な撮影時間を確保している。ただし、回転陽極X線管から生成されるX線は空間的干渉性を有していない。そこで、インコヒーレント光に適用するLau干渉計をXradia 800 Ultraに組み込み、これを用いてX線顕微鏡位相CTを実現する。

3. 研究の方法

図1に本研究で扱う光学系を示す。ベースとなるXradia 800 Ultraは、X線源、コンデンサーレンズ、試料、FZP、および、画像検出器が配置されてX線顕微鏡が構成されており、空間分解能50nmでCT計測が可能である。我々は、位相イメージング機能を付加するために、まず、コンデンサーレンズと試料の間に振幅格子(G0)を配置する。G0をすり抜けたX線は、FZPの背後にG0の像(G0')を形成する。これを仮想的なX線源の配列とみなす。その少し下流に位相格子(G1)を配置し、self-imaging効果によるG1の自己像がFZPによって拡大され、これを画像検出器で撮影する仕組みである。G0'の配列を成す各仮想X線源は、それぞれ少しずつれた自己像を独立に生成するが、それらが強め合って検出器上で重なり合うようにG0の周期が設計されている。これがLau干渉計である。この系においては、G0はコヒーレンスフィルタとして機能しているとみなせる。試料によるX線の位相シフトは、図2(a)のようにG1の自己像を変形させる。これを画像処理することにより、試料の位相画像を獲得する。より具体的には、G1をその

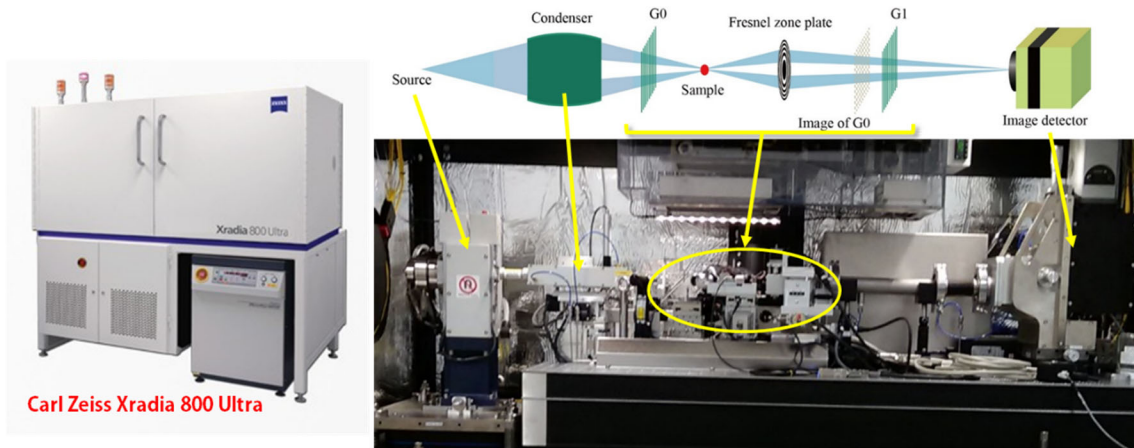


図1 実験室線源とFZPを用いた結像型X線顕微鏡 (Carl Zeiss Xradia 800 Ultra) にX線透過格子 (G0, G1) からなるLau干渉計を融合させた顕微X線位相CT装置。

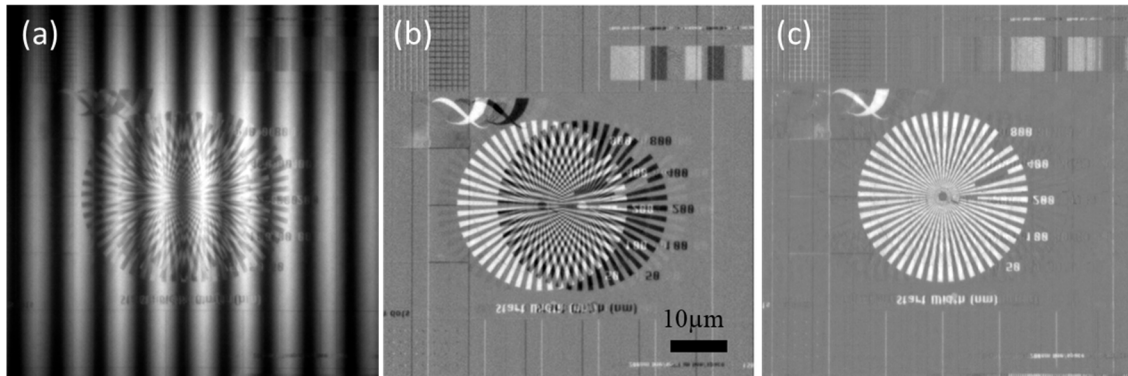


図2 顕微X線位相CT装置で得られる画像: (a)自己像、(b)縞走査計測の出力画像 (twin 位相像)、(c)デコンボリューションにより生成した位相像。

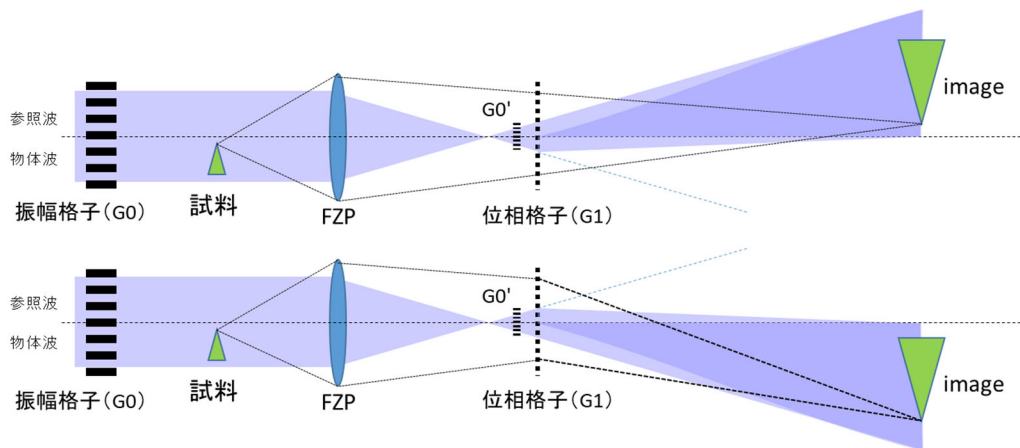


図3 twin 位相像が生成される原理を二光束干渉のモデルで説明する図。

周期の整数分の一ずつ変位させて撮影を繰り返し、縞走査法の手続きに基づいて画素毎に演算処理を行う。

通常、Talbot 干渉計や Lau 干渉計を単独で用いて位相イメージングを行う際には、上記の処理を通じて微分位相像、すなわち波面の傾きを表す画像、が得られる。これをX線CTの入力画像とし、ヒルベルトカーネルを用いたフィルター補正逆投影法 (FBP) で断層画像が再構成される。しかし、顕微鏡との組み合わせの際には、微分位相像ではなく、正負のコントラストを持つ二つの位相像が少しずつ重なった画像 (以降、twin 位相像と呼ぶ) が生成される (図2 (b))。通常は、このずれ量 (以降、シアー量) が空間分解能より小さく、それゆえに微分像として視認されるのに対し、顕微鏡による拡大効果のため、シアー量が空間分解能よりはるかに大きくなっている状態とみなすことができる。twin 位相像を用いてCT画像再構成を行うためには、まず、twin 位相像から単純な位相像に変換する処理が必要となる。これまで、繰り返し演算によるデコンボリューションアルゴリズムを開発した (図2 (c))。ただし、安定に機能するとは言い切れず、試料の大きさや構造に依存して成功率は左右されている。

本研究では、この処理のための新規アルゴリズム開発を行うと共に、格子パラメタを製作可能な範囲で工夫し、シアー量を視野サイズ程度まで広げる光学系の検討を行う。具体的には、狭周期の格子を開発・搭載し、twin 位相像におけるずれ量を視野程度まで広げ、縞走査法の処理を行うだけで直接位相像を取得し、そのまま位相 CT 画像再構成を行うアプローチである。言い方を変えれば、狭周期の格子によって回折波の重なりを緩和し、二光束顕微干涉計を実現するものである。

二光束干涉計としての描像を図 3 に示す。FZP の直径に対して、半分の領域に試料を配置して物体波とし、反対側の半分を参照波と考える。G1 によって生成される 0 次と±1 次の回折波を考える。0 次と+1 次の干涉、および、0 次と-1 次の干涉が twin 位相像の起源である（ただし、全ての波はほぼ前方回折）。回折角 ($\sim\lambda/d$) を大きくすれば（すなわち d (格子周期) を小さくすれば）、twin 位相像の重なりを広げられる。なお、G1 を並進することにより縞走査法を適用するが、±1 次回折波の位相を変化させつつ 0 次回折波の位相には変化を与えないので、一般的な二光束干涉計より優れたロバスト性を有していることも特筆できる。

様々な位相コントラスト生成法の中で、二光束干涉が最も直接的な位相シフト計測を実現し、且つ、最も高い位相感度を実現する。したがって、本開発は、究極感度の顕微位相イメージング・CT のシステムに至るものであると期待される。

4. 研究成果

周期 $2.38 \mu\text{m}$ の狭周期位相格子を用いて、シアー量を大きく設定した効果の検証を、まずシンクロトロン放射光 (SPring-8) を用いて行った。実験は BL37XU にて、 9keV の単色 X 線を用いて実施した。直径 $750\mu\text{m}$ の FZP (焦点距離 1087mm) で拡大率 23.3 の顕微鏡光学系を構成し、FZP の集光点の数十 mm 下流に位相格子を配置した。なお、シンクロトロン放射光の空間的干涉性は十分高いので、G0 格子は必要ない。

図 4 にテストチャートの撮影結果を示す。このシアー量でシーメンススターパターンが正負の位相像で十分に分離する目論見であったが、中央に原因不明の偽像が現れた。最終的には二光束干涉の物理モデルでは説明が付かないと判断し、本課題の前提から見直しを行った。また、さらに狭周期の G1 格子の製作も保留することとした。

考察の結果、デザイン上は矩形形状を持つ位相格子からは、0 次と±1 次の回折波が発生しており、場合によっては、±2 次もそれに加わるため、図 3 の 2 波干涉の描像ではなく、3 波干涉の物理モデル (図 5) における効果を検討した。通常の縞走査法の計測・演算処理では、格子周期の整数分の一のステップで格子並進を行い、各ステップで自己像画像 ($I_k(x)$) を取得し、各画素位置における 1 次のフーリエ係数 ($J_1(x)$) を計算することに基づく。3 波干涉の画像を前提にする場合は

$$\begin{aligned} J_1(x) &= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M I_k(x) e^{-i\xi_k} \\ &= a_{-1} a_0 \alpha(x - \Delta) \alpha(x) e^{-i\beta} e^{-i\{\phi(x-\Delta) - \phi(x)\}} + a_0 a_1 \alpha(x) \alpha(x + \Delta) e^{i\beta} e^{-i\{\phi(x) - \phi(x+\Delta)\}} \\ &= a_{-1} a_0 e^{-i\beta} \eta \left(x - \frac{\Delta}{2} \right) + a_0 a_1 e^{i\beta} \eta \left(x + \frac{\Delta}{2} \right) = g * \eta \end{aligned}$$

と表現できる。ここで、

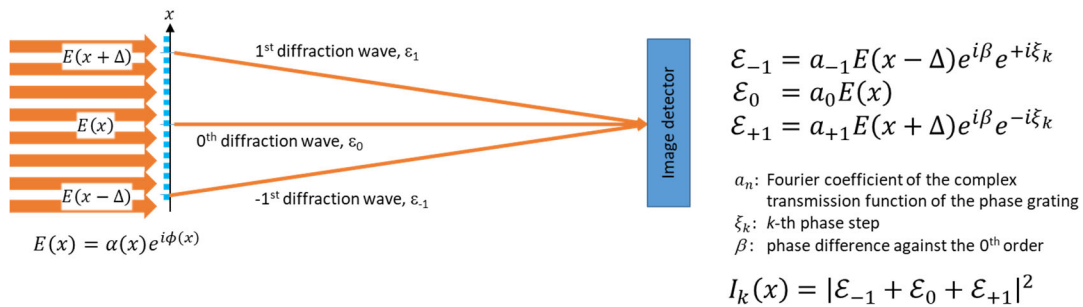


図 5 3 波干涉の物理モデル。

$$\eta(x) \equiv \alpha \left(x - \frac{\Delta}{2} \right) \alpha \left(x + \frac{\Delta}{2} \right) e^{-i\{\phi(x-\frac{\Delta}{2}) - \phi(x+\frac{\Delta}{2})\}}$$

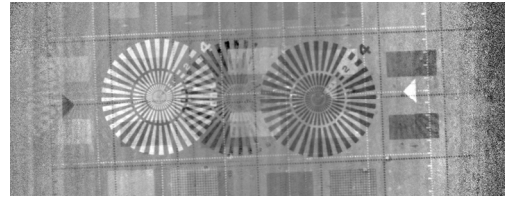


図 4 テストチャートの twin 位相像。シアー距離が大きく設定できているが、中央に偽像が表れている。

$$g \equiv a_{-1}a_0e^{-i\beta\delta}\left(x - \frac{\Delta}{2}\right) + a_0a_{+1}e^{+i\beta\delta}\left(x + \frac{\Delta}{2}\right)$$

であり、*はコンボリューションを示す。2波干渉モデルでは、twin 位相像を $\arg J_1(x)$ で演算するが、吸収が無視できないとき、あるいは、 $a_1 \neq a_{-1}$ 、すなわち、位相格子の回折効率が非対称であるとき、 $\arg[J_1(x)] \neq \phi(x - \Delta) - \phi(x + \Delta)$ であることは明らかである。そこで、複素デコンボリューション演算によりまず $\eta(x)$ を決定し、続いて、

$$\arg \eta(x) = \phi\left(x + \frac{\Delta}{2}\right) - \phi\left(x - \frac{\Delta}{2}\right) = h * \phi$$

$$h \equiv \delta\left(x + \frac{\Delta}{2}\right) - \delta\left(x - \frac{\Delta}{2}\right)$$

であるので、第 2 のデコンボリューション演算処理を施して位相像 $\phi(x)$ を得る二段のデコンボリューションアルゴリズムを考案した。

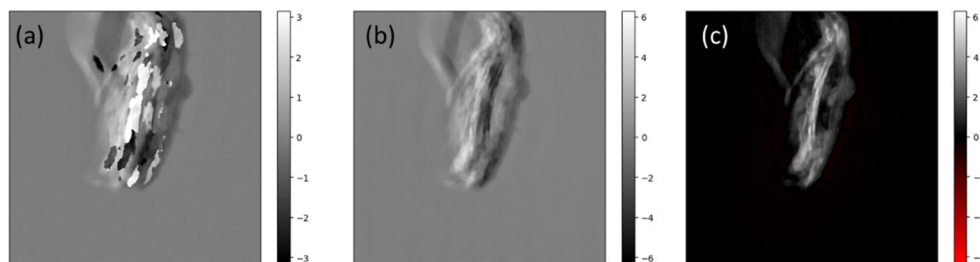


図 6 位相回復処理の結果：(a) 2波干渉モデル、(b) 3波干渉モデル 1st deconvolution, (c) 3波干渉モデル 2nd deconvolution. 試料は珪藻土片。

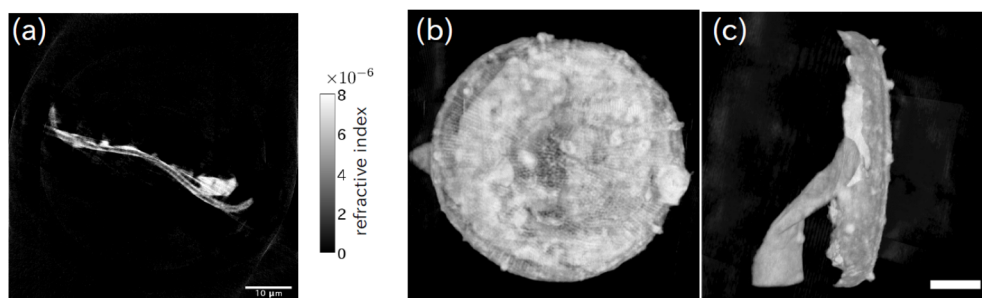


図 7 珪藻土片試料の位相 CT 再構成結果：(a) 断層面、(b), (c) ボリュームレンダリング画像。

図 6 は、Xradia 800 Ultra と Lau 干渉計を組み合わせたシステム (図 1) で得られたデータに上記の二段デコンボリューションアルゴリズムを適用した結果である。2波干渉モデルに基づく処理の結果 (図 6 (a)) では wrapping も生じており、画像が著しく乱れた結果となっている。これに対し、今回開発したアルゴリズムでは、大きく改善されていると判断できる。さらに、試料を回転して位相 CT 画像再構成を行った結果を図 7 に示す。

以上、2波干渉モデルから一歩進めて 3波干渉モデルに立脚し、且つ、二段のデコンボリューションアルゴリズムを開発することで、顕微位相 CT の画像形成に成功した。ただし、画質の観点においては、未だ十分とは言えないと考えている。そうになっている理由のひとつとして、二段デコンボリューションアルゴリズムの適用には、厳密には位相格子の回折効率 (a_1, a_{-1}, a_0) を知らなければならないことが指摘できる。これは、格子自体の製作状況に加えてその設置姿勢にも依存するので、実際に顕微鏡として使用している状況での回折効率を実測することは容易ではない。加えて、格子全面で一様でない可能性があるため、画像として評価しなければならない。2波干渉モデルによる演算で得られた図 4 の偽像を振り返ると、チャートパターン全体が現れていないという特徴がある。このような結果は、位相格子のパターン形状の一様性が不十分であったと推測される。現時点では、図 6, 7 の処理には理論値を用いている。

3波干渉は、 ± 1 次の回折波が干渉しあうために生じる。すなわち、X 線の空間的可干渉距離が周期の 2 倍より長かったと言える。空間的可干渉距離が適度に短くなり、格子周期程度となれば 1 次と 0 次、および、 -1 次と 0 次の干渉のみとなり、当初想定した 2波干渉モデルで記述できるのではないかと考えた。そこで、光学的対策として、G0 格子の duty 比を現状の 1/3 より大きい値を選ぶことを検討した。自己像の visibility が低下することの懸念はあるが、位相回復の面で有利となる可能性がある。そこで、新規に G0 格子の製作を行い、その効果を検証する実験を計画した。遺憾なことであるが、この実験を開始する段階で、Xradia 800 Ultra のチャラー、X 線ロータードライバ、さらに、精密ステージ駆動電源が相次いで故障し、本報告書執筆中においても修理を進めている状況にある。修理が完了し次第、予定の実験を行なう予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ueda Ryosuke, Hashimoto Koh, Takano Hidekazu, Cai Mingjian, Momose Atsushi	4. 巻 11840
2. 論文標題 Reconstruction method for grating-based x-ray phase tomographic microscope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 118400
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2595498	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Momose Atsushi, Ueda Ryosuke, Cai Mingjian, Zhao Zhuoxuan, Kalirai Sam, Stan Maderych, Irwin Jeff, Kawakami Hiroki, Zangi Pouria, Meyer Pascal, B?rner Martin, Schulz Joachim	4. 巻 12242
2. 論文標題 Recent progress in grating-based microscopic x-ray phase tomography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 1224210
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2636393	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 百生敦
2. 発表標題 X線位相イメージング装置の開発
3. 学会等名 京都府中小企業技術センター 令和4年度表面技術セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi Momose, Ryosuke Ueda, Mingjian Cai, Zhuoxuan Zhao, Sam Kalirai, Jeff Irwin, Koichi Matsuo, Hiroki Kawakami, Pouria Zangi, Pascal Meyer, Martin B?rner, Otto Markus, Joachim Schulz
2. 発表標題 Recent progress in grating-based microscopic X-ray phase tomography
3. 学会等名 SPIE Optical Engineering + Applications 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mingjian Cai , 百生 敦 , 上田 亮介 , Sam Kalirai , Jeff Irwin
2. 発表標題 Observation of Graphite Sample by Laboratory-Based X-Ray Phase Tomographic Microscope
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第76回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Momose
2. 発表標題 Development of High-Sensitive X-ray Imaging Based on X-ray Grating Interferometry
3. 学会等名 The 5th symposium for the core research clusters for materials science and spintronics, and the 4th symposium on international joint graduate program in materials science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田 亮介 , 高野 秀和 , 橋本 康 , 蔡 銘鍳, 百生 敦
2. 発表標題 大視野・高空間分解能の2モード測定による局所X線位相顕微トモグラフィ法
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryosuke Ueda , Koh Hashimoto , Hidekazu Takano , Mingjian Cai , Atsushi Momose
2. 発表標題 Reconstruction method for grating-based x-ray phase tomographic microscope
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics 2021, Developments in X-Ray Tomography XIII (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Momose
2. 発表標題 Phase Tomography Based on X-ray Wave Nature: Past and Future
3. 学会等名 ToScA North America 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mingjian Cai, 上田 亮介, 百生 敦
2. 発表標題 Observation of Graphite Sample by Laboratory-Based X-Ray Phase Tomographic Microscope
3. 学会等名 第21回多元研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mingjian Cai, 百生 敦, 上田 亮介, Sam Kalirai, Jeff Irwin
2. 発表標題 Observation of Graphite Sample by Laboratory-Based X-Ray Phase Tomographic Microscope
3. 学会等名 応用物理学会東北支部第76回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Momose
2. 発表標題 Development of High-Sensitive X-ray Imaging Based on X-ray Grating Interferometry
3. 学会等名 The 5th symposium for the core research clusters for materials science and spintronics, and the 4th symposium on international joint graduate program in materials science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 百生敦
2. 発表標題 X線位相イメージング・ X線位相CTの開発
3. 学会等名 2021フォトリクス技術フォーラム第2回研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryosuke Ueda, Koh Hashimoto, Hidekazu Takano, Mingjian Cai, Atsushi Momose
2. 発表標題 Reconstruction method for grating-based x-ray phase tomographic microscope
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics 2021, Developments in X-Ray Tomography XIII (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 百生敦
2. 発表標題 X線および中性子線を用いた 位相イメージングの開発
3. 学会等名 強光子場科学研究懇談会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Momose
2. 発表標題 Phase Tomography Based on X-ray Wave Nature: Past and Future
3. 学会等名 ToScA North America 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mingjian Cai, Hidekazu Takano, Tetsuo Samoto, Atsushi Momose
2. 発表標題 Study on X-Ray Phase Imaging Microscope with a Lau Interferometer Having a Phase Grating
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田亮介, 高野秀和, 橋本康, 百生敦
2. 発表標題 位相回復-CT再構成統合型X線顕微位相CT
3. 学会等名 第20回多元研研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mingjian Cai, 高野 秀和, 佐本 哲雄, 百生 敦
2. 発表標題 Study on X-Ray Phase Imaging Microscope with a Lau Interferometer Having a Phase Grating
3. 学会等名 応用物理学会東北支部 第75回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 百生敦
2. 発表標題 波としてのX線で可視化する - X線位相イメージング -
3. 学会等名 第1回東北大学材料科学ウェビナー(招待講演)
4. 発表年 2020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	上田 亮介 (Ueda Ryosuke)		

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		
米国	Carl Zeiss X-ray Microscopy		