

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360035

研究課題名(和文) X線格子を用いた動的X線位相イメージング法の開発

研究課題名(英文) Dynamical X-ray phase imaging with X-ray gratings

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) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：従来のX線撮影では難しい高分子材料や生体軟組織などのおもに軽元素からなる物質について適用できるとしてX線位相イメージングが注目されている。これまでの研究では、撮影の間は動かない被写体の撮影を前提とする応用が行われてきた。しかし、物質の性質や機能に関する情報を得るためには、動的な撮影が望ましい。本研究は、X線透過格子を用いるTalbot干渉計あるいはTalbot-Lau干渉計を用いた高速位相イメージングおよび四次元位相CT(断層撮影法)を実現するための方法を研究した。白色シンクロトロン放射光を用いる方法や繰り返し現象に対応するストロボ方式を開発し、動的X線位相イメージングへの突破口を得た。

研究成果の概要(英文)：X-ray phase imaging has been attracting attention since it can be applied to polymers and biological soft tissues consisting low-Z elements, which are not imaged clearly with conventional X-ray imaging methods. The study performed so far was for static samples during imaging. However, dynamical imaging is desirable to understand the property and function of materials. We studied the methods for high-speed phase imaging and four-dimensional X-ray phase tomography with X-ray Talbot or Talbot-Lau interferometry. More concretely, we developed methods in combination with white synchrotron radiation and stroboscopic methods for periodic phenomena as a breakthrough to dynamical X-ray phase imaging.

研究分野：X線イメージング

キーワード：X線 位相コントラスト トモグラフィ ダイナミクス シンクロトロン放射光 干渉計 Talbot効果

1. 研究開始当初の背景

一般的なX線透視撮影では、被写体を透過するX線強度の大小によってコントラストが与えられる。軽元素から成る物質ではX線吸収係数が小さく、十分なコントラストが得られない。すなわち、高分子材料や生体軟組織についてX線透視画像はあまり有効ではない。1990年代以降、X線の位相コントラスト利用が研究されるようになり、上記の問題を克服するアプローチとして注目されている[1]。最近のデジタル画像技術とも融合し、X線の位相を定量的に画像計測できる「X線位相イメージング」としての発展が特筆される。これに基づき、X線断層撮影法(X線CT)との融合による高感度三次元撮影(X線位相CT)も実現している。しかし、実際に装置化されているX線位相イメージング法はある程度の撮影時間を要するために、これはでは静止している被写体に対する応用が一般的であった。

2. 研究の目的

本研究は、試料の動的様相を高感度で可視化できるようにするため、動的X線位相イメージング手法を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

X線位相イメージングを動的撮影手法に発展させるために、以下の二つのアプローチを研究した。第一は、白色シンクロトロン放射光の利用、第二はストロボ型X線位相イメージングの開発である。以下、それぞれの手法の詳細を述べる。

(1) 白色シンクロトロン放射光の利用

動的撮影を行うためには、強いX線を用いることが望ましいことは言うまでもない。ここで、X線 Talbot(-Lau) 干渉計が広いバンド幅のX線に対して機能するという特徴を活用できる。結晶を用いる位相イメージング法として、Bonse-Hart 型 X 線干渉法や DEI(diffraction enhanced imaging) が知られているが、ブラッグ回折を利用するため、使用できるX線は単色平面波となる。したがって、光源にシンクロトロン放射光を用いるとしても、イメージングに使用できるX線フラックスは限られる。一方、透過格子を用いるX線 Talbot(-Lau) 干渉計ではこの制限がない。放射状のX線が使えることに加え、レーリーの1/4波長則からの考察から、エネルギーバンド幅($\Delta E/E$)が10%程度であっても単色X線の場合と比べて遜色のない位相イメージングが可能である。白色シンクロトロン放射光では、低エネルギー側の空気等による吸収、および、蓄積リングの電子エネルギーに依存する高エネルギー側のカットオフにより、実質的には $\Delta E/E \sim 1$ であるが、生成されるモアレ画像の visibility の低下はあるものの、それでも位相イメージングが十分可能という事実がある[2]。そこで、高エネルギー

加速器研究機構の放射光科学研究施設(Photon Factory)のBL14Cにおいて、白色シンクロトロン放射光を用いた位相イメージング実験を行った。

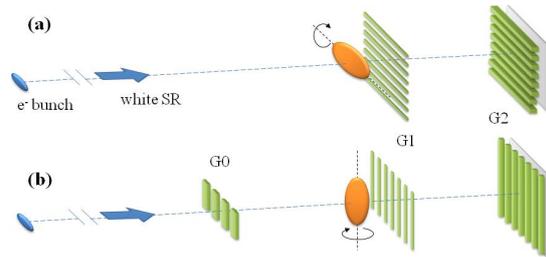


図1 白色シンクロトロン放射光を用いた位相イメージング実験配置。(a) Talbot 干渉計、(b) Talbot-Lau 干渉計。

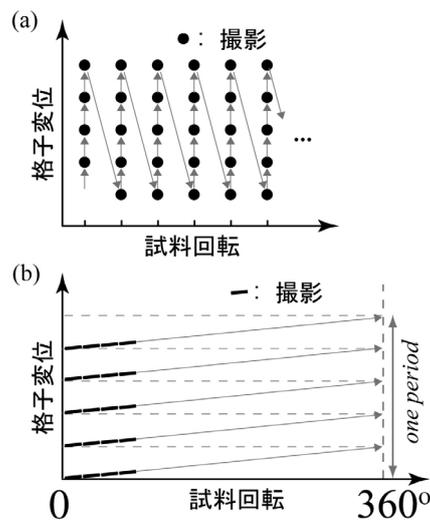


図2 格子並進による縞走査法を適用する位相CTのためのスキャンモード。(a) 従来法、(b) 今回検討したモード。

なお、X線画像検出器にも高速性が必要である。これには、CMOSカメラ(pco.dimax)にレンズ光学系を介してX線シンチレータ(P46, 20 μm)を結合した検出器を使用した。1000fps以上のフレームレートがあり、最小で2 μs の露光時間設定が可能である。静的な試料について位相イメージングを行う場合は、格子並進を伴う縞走査法を適用するのが一般的である。この場合、step-by-stepで格子並進させて複数の画像を計測し、後に演算によって、吸収画像、屈折画像、および、散乱画像を生成する。ただし、高速位相イメージングを目論む本研究においては、この方法を単純に高速化するのは望ましくない。機械的な振動を誘起し、Talbot(-Lau)干渉計に悪影響を及ぼす危険もある。そこで、格子を傾斜することにより細かい回転モアレを生成し、それをキャリアフリンジとして扱うフーリエ変換法が対案として実施可能である[2,3]。ただし、空間分解能がキャリアフリンジ周期に制限されること、および、細かいキャリアフリンジ生成に伴う visibility の低下が引き起こす画質劣化という問題が指摘された。

本研究では、一旦高速位相イメージングには馴染まない判断した縞走査法について再考し、高速位相CTを可能とする格子並進方式を提案して実験的に検証した(図2)。試料の回転と格子の並進をstep-by-stepで行う従来法(図2(a))に対し、本研究では、試料の回転と格子の並進を連続運動で行うようにした(図2(b))。且つ、従来法では、各投影位置で縞走査法を行うために、格子を毎回ホームポジションに戻す動作が伴っていた。これを避けるために、格子並進は定速一方向とし、試料がM周する間に一周分の格子並進を行うようにした。Mは縞走査法のステップ数に対応し、3以上であればよい。なお、X線位相CTを動的撮影に適用する際、言い換えれば四次元位相CTを実施する際、重力の影響が問題とならないように試料を鉛直軸上で回転するのが望ましい。その場合は、格子のラインの方向(一次元格子を使用している)が回転軸に沿って鉛直であることが要求される。このようにX線Talbot干渉計を構成する場合は、水平方向の空間的干渉性の確保が要求される(図1(a))。しかし、シンクロトロン放射光を使う場合は、光源(蓄積リング中の電子バンチ)の形状が水平に広がっているため、水平方向の空間的可干渉距離が実際には格子周期よりかなり小さくなり、X線Talbot干渉計が動作しなかった。そこで、3枚の格子を用いるX線Talbot-Lau干渉計配置(図1(b))を本研究では用いることとした。

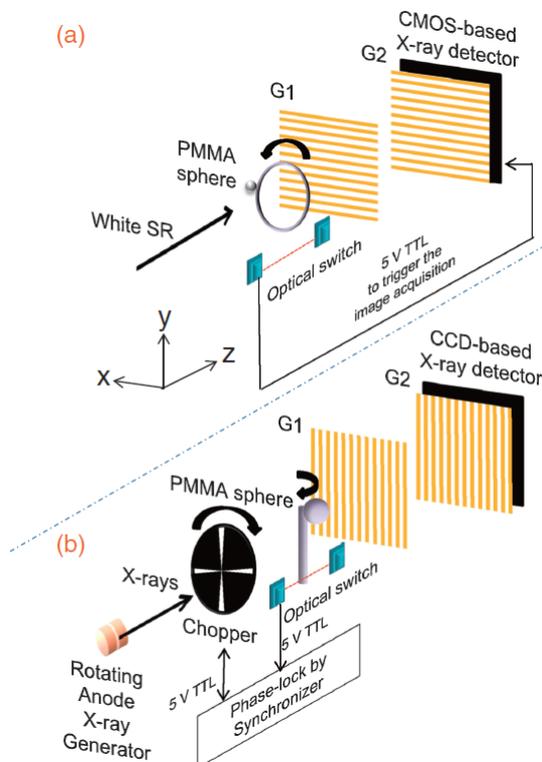


図3 ストロボ型X線位相イメージングの構成。(a) 白色シンクロトロン放射光を用いてカメラトリガを使用するアプローチ、(b) 実験室X線源とチョッパーを用いるアプローチ。

(2) ストロボ型X線位相イメージングの開発

実験室で構築するX線Talbot(-Lau)干渉計では、使用できるX線源の強度の制限のために、上で述べたスタイルの高速化は容易ではない。そこで、繰り返し現象に対する撮影を実現するために、strobo型X線位相イメージングの開発を試みた(図3(b))。具体的には、試料のダイナミクスに関係する繰り返し周波数と同期したチョッパーでX線をパルス化し、画像を積算することにより、繰り返し現象の特定のフェーズに対応する画像をmsの時間分解能で計測した。縞走査法はその状態で通常の格子並進に基づく方式で実施可能である。

また、strobo型X線位相イメージングを白色シンクロトロン放射光を用いるアプローチにも適用し、 μs オーダーの時間分解能達成についても検証した。この場合はチョッパーを用いずに、CMOSカメラのトリガ機能を使用した(図3(b))。

4. 研究成果

(1) 高速位相CT

図2に示したスキャンモードでX線位相CTを行い、それまで使用したフーリエ変換法に基づく位相CT[3]の画像と比較した。まず、図2を適用して得られたモアレ画像および微分位相像(屈折画像)を図4に示す。試料回転と格子並進を同時に行っている状態でもアレ動画像を記録し、試料の各回転角度位置に対応して、縞走査法による演算に必要なフレームを抽出して微分位相像を取得した。ここでは、試料(プラスチック球)を1rpsで回転し、5周する間に格子を1周期並進させた。撮影は500fpsで行った。

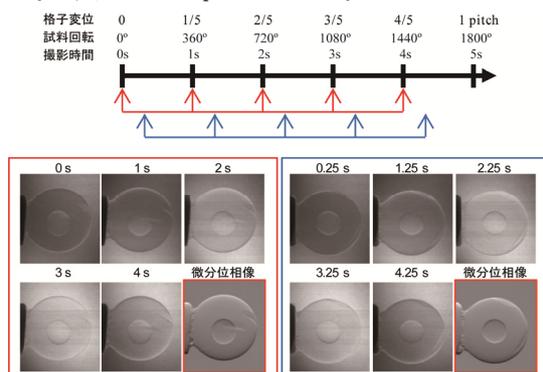


図4 考案した高速位相CTのための縞走査スキーム(図2)によるモアレ画像と微分位相像。試料はプラスチック球(内部に空洞あり)。

この測定データから再構成した位相CT画像を図5に示す。図5(a)が従来から採用していたフーリエ変換法によるもので、図5(b)が今回の結果である。比較のため、両者のスキャン時間は同じにしてある。このように、アーチファクトが少なく、且つ、空間分解能の高い画像が得られるようになった。

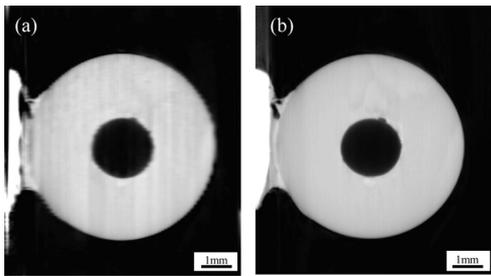


図5 位相CT再構成画像。(a)フーリエ変換法によるもの、(b)図3のデータによるもの。両者でトータルのスキャン時間は同じに設定した。

時分割のX線位相CTを高分子ブレンド試料に現れる相分離構造の粗大化過程の観察に応用した。アルミ管の中でポリスチレン(PS)とPMMAの混合試料を過熱しつつCT計測できる装置を開発し、図1(b)のTalbot-Lau干渉計構成で実験した結果を図6に示す。現時点で必ずしも画質が十分とはいえないが、相分離構造が可視化でき、それが加熱時間と共に成長している様子を三次元的にとらえることができた。

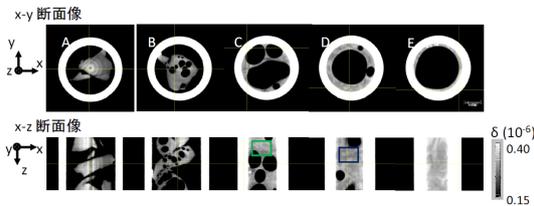


図6 PS/PMMAブレンド試料の時系列位相CT画像。A:加熱前、B:加熱後5分、C:加熱後65分、D:加熱後125分、E:加熱後185分。

動的位相イメージングのもうひとつの例として、ダイラタント現象の観察結果を図7に示す。本実験は位相CTではなく、瞬間的な外力が加わったダイラタント流体(コーンスターチと水の混合体)について、Talbot干渉計によって散乱画像動画を調べたものである。ここでは高い空間分解能を必要としないので、フーリエ変換法を使った。1.7kfpsで撮影し、自由落下の金属棒(画像では白い領域)によるインパクト前後の画像の違いを示した。ダイラタント現象が生じたと思われる瞬間に金属棒の下に信号が現れている。ダイラタント現象に物理的理解は完成しておらず、この信号を解析してその理解に貢献できる可能性があると考えている。

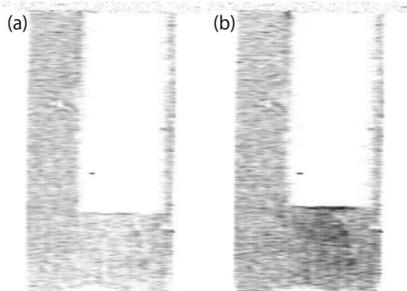


図7 ダイラタント流体(コーンスターチと水の混合体)に外力(金属棒の自由落下)が加わった

再のインパクト前(a)およびインパクト後(b)の散乱画像。撮影のフレームレートは1.7kfps。

(2) ストロボ型X線位相イメージング

実験室におけるデモンストレーション実験として、図3(b)に示すように、定速回転するプラスチック球の撮影を行った。試料回転とチョッパーを同期させ、微分位相像を撮影した結果が図8である。5rpsで回転している直径7.9mmのPMMA球について、45度毎の回転角度位置について、時間分解能5msで微分位相像を示した。

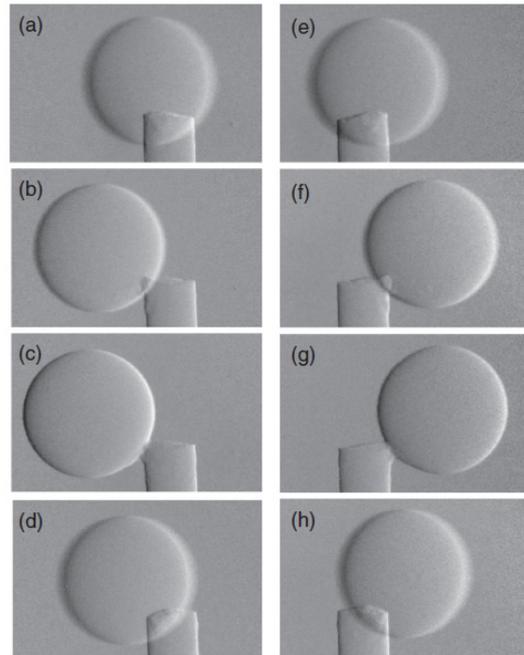


図8 5rpsで回転している直径7.9mmのPMMA球について、45度毎の角度位置における微分位相像。チョッパーを用いたストロボ法で撮影した。

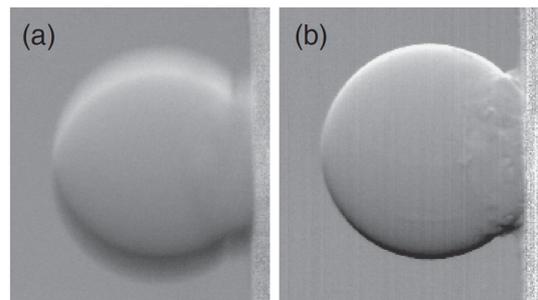


図9 視野を上下方向に1.4m/sで繰り返し横切る直径3.2mmのプラスチック球の微分位相像。(a)時間分解能0.3msによる通常の撮影、(b)カメラトリガ機能を利用した時間分解能8μsのストロボ撮影。白色シンクロトロン放射光使用。

図3(a)に示す白色シンクロトロン放射光を用いたときの結果を図9に示す。直径3.2mmのプラスチック球が半径44mmの円盤縁に接着しており、画面と並行な円軌跡を5rpsで運動している。微分位相像の撮影結果を示す図9では、視野内で球が上から下へ1.4m/sで移動している瞬間を捉えている。図9(a)はストロボ法を使わずに、時間分解能0.3ms(カメラ自体の最高フレームレートに対応

する露光時間)で測定した微分位相像である。カメラトリガを用いたストロボ法により時間分解能8 μ sで得られた画像が図9(b)である。総露光時間は0.3msとしてある。ストロボ法を用いることにより、このように明瞭な画像が得られることを証明した。

以上、動的位相イメージングを行うための幾つかの方法について研究を行い、高速位相CTとストロボ法について技術的な開発が進捗した。高分子ブレンドやダイラタント流体の撮影にも着手でき、今後さらに応用を広げたい。技術的な次の展開としては、ストロボ法によるX線位相CTの実現に着手しており、また、シンクロトロン放射光のパルス性を利用したストロボ法で更なる時間分解能向上も視野に入ってきた。また、白色シンクロトロン放射光は試料へのダメージの面で問題が残っており、X線 Talbot(-Lau)干渉計に適したバンド幅(およそ10%)のビームを作るバンドパスフィルタの開発も検討したい。これまで静的撮影が主であったX線位相イメージングの動的手法への突破口として、本研究は大変有意義な結果が得られたと判断する。

<引用文献>

- [1] A. Momose, "Recent advances in X-ray phase imaging", Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) 6355-6367
- [2] A. Momose et al., "High-speed X-ray phase imaging and X-ray phase tomography with Talbot interferometer and white synchrotron radiation", Opt. Express 17 (2009) 12540-12545.
- [3] A. Momose et al., "Four-dimensional X-ray phase tomography with Talbot interferometry and white synchrotron radiation: dynamic observation of a living worm", Opt. Express 19 (2011) 8423-8432.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① M. P. Olbinado, P. Vagovic, W. Yashiro, A. Momose, "Demonstration of Stroboscopic X-ray Talbot Interferometry Using Polychromatic Synchrotron and Laboratory X-ray Sources", Appl. Phys. Express, 査読有、6 (2013) 096601, DOI:10.7567/APEX.6.096601

[学会発表] (計16件)

- ① 梅本大輝、M. P. Olbinado、矢代航、百生敦、「高速X線 Talbot 干渉計によるビジビリティコントラスト画像を用いたダイラタンシーの観察」、第3回物構研サイエンスフェスタ、2015.3.17、つくば国際会議場(茨城・つくば市)
- ② 村上岳、M. P. Olbinado、矢代航、百生敦、「X線高速位相CTによるポリマーブレ

ンド相分離現象のその場観察」、第28回日本放射光学会、2015.1.11、立命館大学(滋賀県・草津市)

- ③ 村上岳、M. P. Olbinado、矢代航、百生敦、「X線位相CTによるポリマーブレンド相分離現象のその場観察」、第50回X線分析討論会、2014.10.30、東北大学(宮城・仙台市)
- ④ M. P. Olbinado, P. Vagovic, W. Yashiro, A. Momose, "Effect of the X-ray Beam Achromaticity on the Sensitivity of X-ray Talbot Interferometry in Detecting the X-ray Differential Phase Shift: A Comparison between the Employment of π and $\pi/2$ Phase Gratings", 2nd International Workshop on X-ray and Neutron Phase Imaging with Gratings, 2014.1.23, Garmisch (Germany)
- ⑤ M. P. Olbinado, P. Vagovic, W. Yashiro, A. Momose, "Dynamic X-ray Imaging Using Synchrotron Radiation and X-ray Talbot Interferometry via Fringe Scanning: Application to Fast X-ray Tomography of Insects and Visibility Contrast Imaging of a Dilatant Fluid", 2nd International Workshop on X-ray and Neutron Phase Imaging with Gratings, 2014.1.22, Garmisch (Germany)
- ⑥ M. P. Olbinado, P. Vagovic, W. Yashiro, A. Momose, "Stroboscopic X-ray Talbot Interferometry Using White Synchrotron Radiation", 2nd International Workshop on X-ray and Neutron Phase Imaging with Gratings, 2014.1.21, Garmisch (Germany)
- ⑦ 村上岳、M.P. Olbinado、P. Vagovic、矢代航、百生敦、「X線位相CTによるポリマーブレンド相分離現象のその場観察」、第27回日本放射光学会、2014.1.13、広島国際会議場(広島・広島市)
- ⑧ M. P. Olbinado, P. Vagovic, W. Yashiro, A. Momose, "Stroboscopic X-ray Talbot Interferometry", X線ナノ集光技術研究会2013「多次元イメージングへの展開」、2013.11.17、大阪大学(大阪府・北区)
- ⑨ M. P. Olbinado, P. Vagovic, W. Yashiro, A. Momose, "Stroboscopic Approach for the Quantitative X-ray Phase Imaging of Periodic Processes in Soft Materials Using X-ray Talbot Interferometry", The 7th Asia Oceania Forum for Synchrotron Radiation Research, 2013.9.24、イーグレ姫路(兵庫・姫路市)
- ⑩ M. P. Olbinado, P. Vagovic, W. Yashiro, A. Momose, "Stroboscopic Talbot Interferometry for X-ray Phase Imaging of Periodic Processes in Soft Materials", 第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013.9.17、同志社大学(京都府・京田辺市)
- ⑪ M. P. Olbinado, P. Vagovic, W. Yashiro, A. Momose, "Stroboscopic Talbot

Interferometry for Time-Resolved X-ray Phase Imaging of Periodic Processes in Soft Materials”, 22nd International Congress on X-Ray Optics and Microanalysis, 2013.9.3, Hamburg (Germany)

- ⑫ M. P. Olbinado, P. Vagovic, W. Yashiro, A. Momose, “Development of Grating-Based Stroboscopic X-ray Phase Imaging Using Polychromatic Laboratory and Synchrotron X-ray Sources”, Denver X-ray Conference 2013, 2013.8.8, Westminster (USA)
- ⑬ M. P. Olbinado, W. Yashiro, A. Momose, “Stroboscopic X-ray Phase Imaging Using Talbot Interferometry and White Synchrotron Radiation”, 第30回PFシンポジウム, 2013.3.14, つくば国際会議場 (茨城・つくば市)
- ⑭ 名越健誠、矢代航、百生敦、「Talbot 干渉計による白色 SR 位相イメージングのための画像検出器シンチレータ厚の最適化」、第30回PFシンポジウム, 2013.3.14, つくば国際会議場 (茨城・つくば市)
- ⑮ M. P. Olbinado, W. Yashiro, A. Momose, “Stroboscopic X-ray Phase Imaging Using a Talbot-Lau Interferometer with a Laboratory X-ray source”, 2nd International Symposium on Biomedical Applications of X-ray Phase-Contrast Imaging, 2013.1.25, Garmisch (Germany)
- ⑯ M. P. Olbinado, W. Yashiro, A. Momose, “Progress on High-speed Phase Imaging Using an X-ray Talbot-Lau Interferometer and White Synchrotron Radiation”, 第26回日本放射光学会, 2013.1.13, 名古屋大学 (愛知・名古屋市)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 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