

## ストロボスコピック X線位相 CT 法の開発 Development of Stroboscopic X-Ray Phase Tomography

高野 秀和<sup>1,2</sup>, Margie P. Orbinado<sup>1</sup>, 呉彦霖<sup>1,2</sup>, 矢代航<sup>1,2</sup>, 百生敦<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>東北大学多元物質科学研究所, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

<sup>2</sup>JST-ERATO, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

Hidekazu Takano<sup>1,2</sup>, Margie P. Orbinado<sup>1</sup>, Yanlin Wu<sup>1,2</sup>, and Wataru Yashiro<sup>1,2</sup>, Atsushi Momose<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>IMRAM Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba, Sendai, 980-8577, Japan

<sup>2</sup> JST-ERATO, 2-1-1 Katahira, Aoba, Sendai, 980-8577, Japan

### 1 はじめに

X線の物体による位相変化の度合いは、吸収のそれに比べて非常に大きい。この位相変化量をイメージングに利用することで、吸収の差では見分けが付きにくい僅かな密度差を可視化することが可能となる。我々は、このような位相コントラスト法をさらに推し進め、位相変化量の定量計測を行う位相イメージング法の開発を行っている。3次元計測法であるトモグラフィ技術と組み合わせることで、屈折率の定量評価が可能となる。位相変化の定量法には様々なアプローチがあるが、我々は主に回折格子を利用した干渉計をベースとした測定法の開発を行っている。

回折格子に光波を照射すると、その光の空間コヒーレンスが回折格子の周期程度以上であるとき、Talbot 効果によりその後方場の決められた場所に自己像と呼ばれる格子像が形成される。入射波面が位相物体によって乱されると、その乱れに応じて自己像（格子像）は歪む。そこに自己像と同じピッチを有する振幅格子を作用させ、アナライザーとして用いることにより、波面計測が可能となる。このような Talbot 干渉計では、他の干渉計測法と比べて高い空間コヒーレンス度を必要としないばかりか、時間コヒーレンス（単色度）についても制約が緩く、10%以内の単色度であれば性能への影響は無視できる。放射光光源においては、分光器を使用することなく白色光のままでも計測が可能であるため、その大強度性を活かした計測が可能である。

我々はこれまで、Talbot 干渉計を利用した位相トモグラフィを大強度の白色放射光へ応用することで、高速な時系列データの取得が可能となる4D位相CT法の開発を行ってきた[1,2]。サブ秒～秒オーダーでの時間分解能を持つ3次元計測を実現してきたが、繰り返し現象であれば、さらに高速（ミリ秒オーダー）の現象を捉えることが可能である。本課題では、白色放射光を用いた Talbot 干渉計について、ストロボスコピックな測定法を組み合わせることにより、繰り返し現象を高速で3次元計測する手法の開発を試みた。

### 2 実験

実験は BL-14C において行った。ウィグラーからの白色光を使用し、強度調整と低エネルギー成分をカットするためフィルター（Al: 4 mm 厚）を用いた。実験光学系を図1に示す。ピッチ 5.3 μm の位相回折格子で自己像を生成、同じピッチの吸収回折格子をアナライザーとする Talbot 干渉計を構成した。格子間の距離は 326 mm に設定しており、干渉に寄与する中心エネルギーは 28.8 keV である（Talbot 次数: 0.5）。試料は水平方向の振動ステージに固定され、振動ステージはさらに水平軸を回転軸とする回転ステージ上に設置された。振動ステージは振幅 0.58 mm、振動数 45.45 Hz で動作させ、回転ステージは 180° 当たり 5.45 s の速度で回転させた。弾性の高い試料を用い、試料の先に固定壁を設置すると、試料は回転しながら振動による圧縮を繰り返す。検出器には可視光変換タイプの X 線画像検出器を用いた。高速応答の P46 (YAG/Ce) 蛍光板を利用しており、最後段に高速 CMOS カメラ (pco. dimax S4) を接続し、振動ステージと同期した波形生成器で 33 倍 (1500 Hz) の外部信号を入力し、そのフレームレートで動作させた。蛍光板上での実効的画素サイズは 11.2 μm であった。

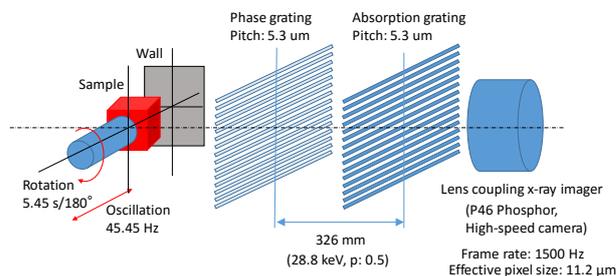


図1：実験光学系の概略図

干渉計では、一般的に参照光の位相1周期分を分割してずらす縞走査法が用いられるが、最低でも3つの走査点を必要とするため高速現象の撮影には不向きである。一方、干渉縞を検出器で解像可能であるとき、縞の歪みを直接観測できるために一度の測定で位相計測が可能である。この方法はフーリエ変

換法と呼ばれ、高速計測には向いているが、その空間分解能は検出される干渉縞のピッチで制限される。本測定では、位相格子と振幅格子の面内回転方向をわずかにずらすことによりモアレ干渉縞を生成し、フーリエ変換法を適用した。干渉縞のピッチは 160  $\mu\text{m}$  程度に調整して測定を行った。本測定で得られた投影像の例を図 2 に示す。観察試料としてスポンジを用いた。

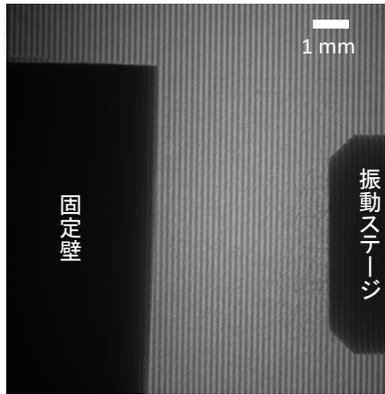


図 2 : Talbot 干渉計により撮影された投影像の例

### 3 結果および考察

本測定では、45.45 Hz で繰り返される振動現象を 33 分割で観測していることになる。試料は 5.45 s で半回転しているため、各分割点は投影角  $180^\circ$  にわたり投影数 250 の画像が得られる。ゆえに、各分割点を CT 再構成することにより、振動現象 1 周期分の 3 次元画像が得られる。得られた画像例を図 3 に示す。この処理では、位相計測ではなく干渉縞の鮮明度変化を可視化するビジビリティ像を用いた。試料の散乱に対して敏感な像となる。各分割点で得られたビジビリティ像の投影像を CT 再構成して 3 次元表示した。図 3 (b) が最も収縮、図 3 (e) が最も伸長している場所であり、(a) と (c)、(d) と (f) は、それぞれ前後 2.7 ms 時点での分割点の 3 次元像を示している。実際には 3 3 セットの CT 3 次元データが得られており、その時間間隔は 0.67 ms となっている。画像の上下方向はフーリエ変換法により空間解像度が限られているが、圧縮伸長する繰り返し現象を高速で捉えることに成功した。

本手法では、ビジビリティ像だけでなく本来の目的である位相像（微分位相像）、吸収像を測定データより同時に得ることができる。また、連続縞走査法[3]を組み合わせることにより、フーリエ変換法による空間分解能のロス無くした測定法も将来的に導入していきたい。

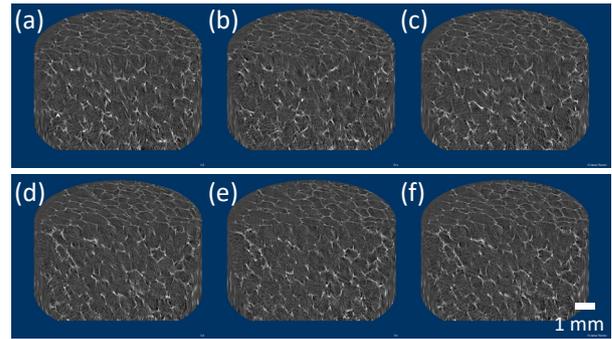


図 3 : スポンジ試料のストロボ CT 像

### 4 まとめ

BL-14C のウィグラー白色光を利用した Talbot 干渉計を構築し、ストロボスコーピック法を適用することで繰り返し現象の高速 3 次元観察を行った。

### 謝辞

本研究は JST-ERATO 百生量子位相イメージングプロジェクトの助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] A. Momose *et al.*, *Opt. Express* **17**, 12540 (2009).
- [2] A. Momose *et al.*, *Opt. Express* **19**, 8423 (2011).
- [3] S. Kibayashi *et al.*, *AIP Proc.* **1466**, 261 (2012).

\* momose@tage.tohoku.ac.jp