

X線ストロボ位相 CT による動的観察

Dynamic observation using X-ray stroboscopic phase CT

呉彦霖^{1,*}, 高野秀和¹, 百生敦¹

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

Yanlin Wu^{1,*}, Hidekazu Takano¹, Atsushi Momose¹

¹MRAM Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba, Sendai, 980-8577, Japan

1 はじめに

X線吸収イメージングでは、軽元素から構成されている生体組織や高分子などの弱吸収物体に対して十分なコントラストを得ることが困難である。それに対して、弱吸収物体を格段に高いコントラストで描出できるX線位相イメージング及び位相 CT の重要性は広く認知されるようになった。通常の静的撮影では、試料の内部構造のみが得られるが、その構造変化や機能を考察するために、X線位相 CT に時間スケールを加えた 4D 位相 CT への展開が要求されている。しかしながら、多くのX線位相イメージング法では、X線に単色性と平行性を要求するために高速撮影に必要な光量を賄うことが難しい。これに対して、広いX線エネルギーバンド幅でも機能するX線 Talbot 干渉計による位相イメージングは、白色放射光においても適用可能であり、高速X線 CMOS カメラによる高速撮影と組み合わせることで、動的な 4D 位相 CT に展開されている [1, 2]。

X線 Talbot 干渉計を利用して X 線位相変化を定量的に測定する方法としては、縞走査法 [3] とフーリエ変換法 [1] の二手法が考えられる。1枚の投影像からX線位相シフトを取得できるフーリエ変換法は、モアレ干渉縞の位相を複数分割して取得した投影像から位相シフトを取得する縞走査法と比較すると、高速イメージングへの応用が容易であるが、空間分解能及び画質における劣化が生じる。X線透過格子を並進させる縞走査法を、高速位相イメージングに適用するための撮影法として、連続縞走査法が提案されている [4]。X線透過格子を格子の 1 周期分並進させながら、その間に被写体を連続的に N 回転することで、格子の移動による振動を誘起せずに高速位相 CT を可能とする方法である。ここで、 N は 3 以上の整数である。フーリエ変換法に比べて時間分解能は N 倍大きくなるが、空間分解能や画質において優れる。この連続縞走査法によりサブ秒～数秒程度の時間分解能でかつ高空間分解能の 4D 位相 CT が実現されている [4]。さらに、Talbot 干渉計にストロボ法導入することで、周期的な動きを持つ試料についてマイクロ秒の高い時間分解能で動的撮影ができることも実証した [5]。

本研究では、白色放射光を用いた Talbot 干渉計を用いた 4D 位相 CT をさらに高度化し、連続縞走査

計測法とストロボスコーピックな計測法を組み合わせることにより、マイクロ秒オーダーの繰り返し現象を高速で 3 次元計測する手法の開発を目的とした。

2 実験

実験は KEK-PF BL-14C において行った。図 1 に光学系の配置図を示す。縦型ウイグラーからの白色光を使用し、熱負荷を低減するため、撮影に同期する高速回転シャッターを導入した。周期 $5.3 \mu\text{m}$ の位相回折格子と振幅格子で Talbot 干渉計を構築し、干渉に寄与する中心エネルギーを 28 keV とし、格子間の距離は 317 mm (Talbot 次数: 0.5) に設定した。図 2 に示したように、ストロボ高速伸縮回転装置は振幅 10 mm かつ 24Hz で試料を水平方向に伸縮させるとともに水平軸を回転軸として回転するものであり、53 秒間に試料を 3 回転させ、その間に格子を一周期並進することで連続縞走査法を行った。高速 CMOS カメラ (PCO.dimax AG) にレンズ光学系を介して高速応答の P46 (YAG/Ce) X線シンチレーターを結合した検出器 ($11.2 \mu\text{m}/\text{pixel}$) を回転シャッターと伸縮モーション、試料回転と同期させ、露光時間 200 マイクロ秒でのストロボ撮影を行った。

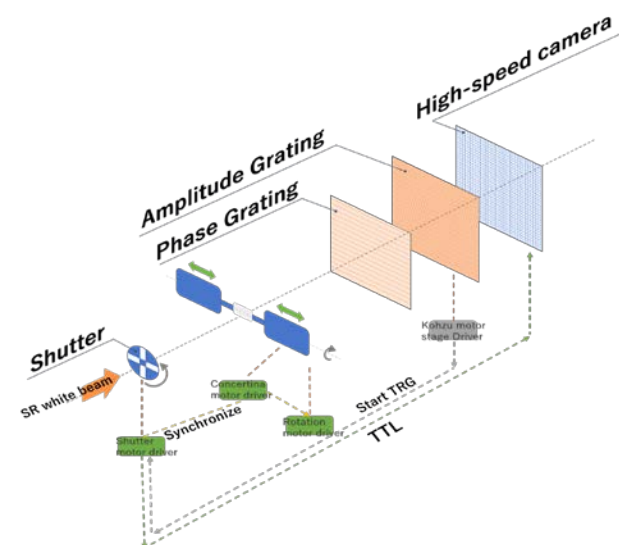


図 1 : 実験光学系の概略図

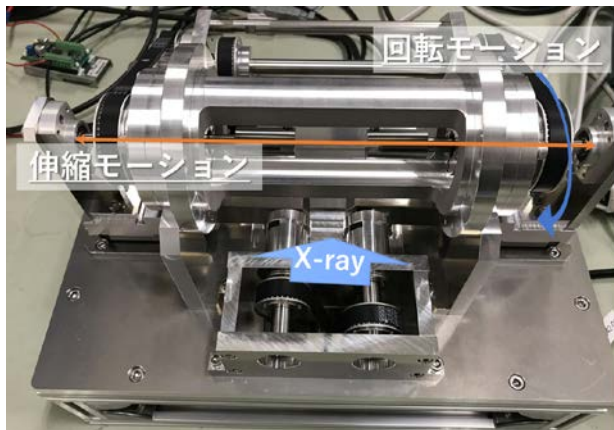


図 2 : ストロボ用高速伸縮回転装置

3 結果および考察

本測定では、24Hz で繰り返される伸縮応力下での試料変形において、特定のフェーズのみ位相 CT データを取得するようにタイミングを同期することより、ストロボ撮影での投影像を取得し、位相 CT を実現した。スポンジ試料で得られた測定結果例を図 3 に示す。スポンジ試料は細い繊維で構成されており、散乱に対して敏感となるため、位相像ではなく干渉縞の鮮明度変化を可視化する散乱像を用いた。スポンジ試料を同間隔の 3 フェーズ（伸長、ニュートラル、圧縮）で得られた散乱像で再構成した 3 次元画像をボリュームレンダリングした像を表示した。

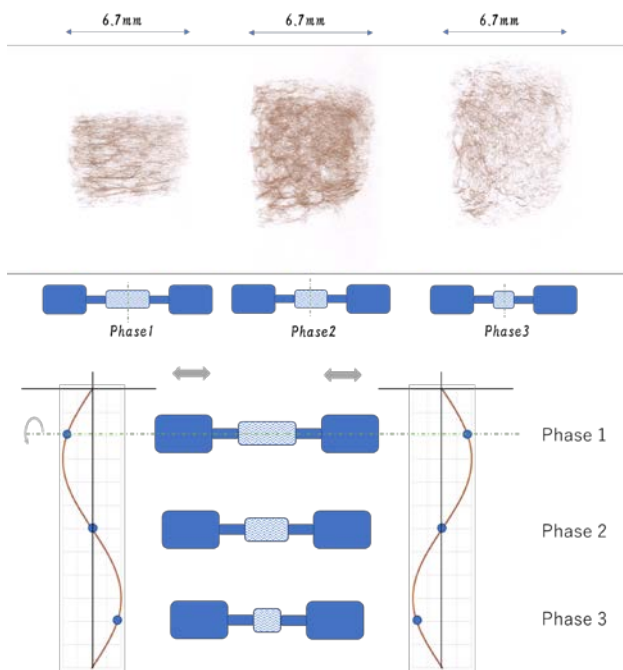


図 3 : 24Hz で伸縮させているスポンジ試料のストロボスコーピック X 線位相 CT の結果

図 4 は、ストロボ装置にアクリル棒を取り付けて測定を行った断層像を示した。24Hz の高速振動による motion blur や装置の振動の影響を含めても、伸

縮方向とその垂直方向で、各 80 μ m 程度の空間分解能が達成されていることを示した。

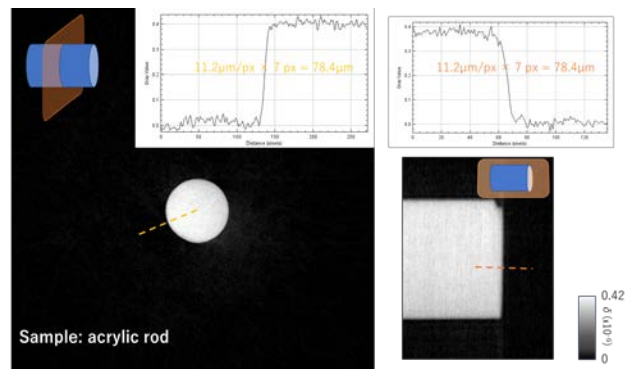


図 4 : 24Hz で動作させているアクリルロッド試料のストロボスコーピック X 線位相 CT の結果

4 まとめ

BL-14C のウィグラー白色光を用いて Talbot 干渉計を構築し、連続縞走査法とストロボ法を併用することで、弾性の高い試料の繰り返し現象を高速・高空間分解能で 3 次元位相計測を行った。

今後の展開として、準可逆的な現象（振動下の材料の劣化など）の観察を目的に、数十 Hz の振動変形下にあるゴム試料に対して、更なる安定化した装置で、ストロボスコーピック位相 3 次元計測していきたい。

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 (JPMJER1403) の支援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]. A. Momose et al., JJAP 42, L866 (2003).
- [4]. S. Kibayashi et al., AIP Proc. 1466, 261 (2012).
- [5]. M. Olbinado et al., APEX 6, 096601 (2013).

* yanlin@tohoku.ac.jp