

タルボ干渉計を用いたX線ストロボCTによる力学劣化過程の観察 Observation of mechanical degradation by X-ray stroboscopic CT with Talbot interferometer

呉彦霖*, 高野秀和, 百生敦

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*, Hidekazu Takano, Atsushi Momose

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

1 はじめに

シンクロトロン放射光を用いた動的位相イメージング、および、時間軸を加えた4D位相CTにおける撮影技術は、静的構造観察を超えたダイナミクスの可視化により機能的側面を解析でき、外部刺激下での試料の構造変化をマイクロ秒～サブミリ秒の時間分解能で観察されている [1-10]。

X線 Talbot 干渉計あるいはX線 Talbot-Lau 干渉計は透過X線格子を用いる位相イメージング手法であり、広いスペクトルバンド幅を持つビームについて機能する。10%程度のバンド幅であれば単色X線の場合と同等な画質が得られ、白色シンクロトロン光のバンド幅であっても撮影に十分な位相コントラストが得られる [1,2]。位相イメージング手法では、吸収画像、屈折画像、および散乱画像の独立な三つの画像が共通の測定データから出力される。吸収画像は従来のレントゲン画像に対応し、屈折画像は屈折率実数部が寄与する微分位相画像である。散乱画像は、極小角散乱に起因したデコヒーレンス効果によるものであり、空間分解能以下の微小構造体からの散乱情報を反映した画像である。X線格子の周期と同じ数ミクロンオーダーの構造体分布に最も感度があり、その前後でも広く感度領域があり、この程度のサイズを持つ空孔、繊維構造、亀裂等がある材料で大変有効であることが分かっている。三つの画像モードすべてでCT画像の取得が可能であり、試料の構造・機能の理解に相補的に活用できる。

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にストロボスコピック計測法を組み合わせることにより、周期的応力がかかる試料について、マイクロ秒オーダーの高い時間分解能で動的3次元計測を行う手法を開発してきた。数十Hzの繰り返し伸縮下にあるゴム試料に対して、準可逆的な現象（ゴム試料の疲労劣化）の3次元可視化を行なった。

2 実験

実験は縦型ウィグラービームライン KEK-PF BL-14C において行った。図1に光学系の配置図を示す。撮影モードと同期した高速回転シャッターを導入し、白色光からの熱負荷を9割程軽減した。周期 5.3 μm

の位相格子と振幅格子を用いて Talbot 干渉計を構築し、中心エネルギー28 keV に合わせて、格子間距離を 317 mm (Talbot 次数: 0.5) に設定した。試料は振幅 10 mm かつ繰り返し周波数 24Hz で水平方向に伸縮させると同時に、水平軸周りに回転するものである。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 [11] を適用した。X線検出器にはレンズカップルさせた高速 CMOS カメラ (実効ピクセルサイズは 11.2 μm) (PCO.dimax AG) に 20 μm 厚の P46 (YAG/Ce) X線シンチレーターを結合したシステムを利用し、毎秒 1000 フレームの高速撮像が可能なるものである。X線検出器を回転シャッター、伸縮モーション、試料回転などと同期させ、露光時間 200 μsec で約6分間のストロボ撮影を行った。

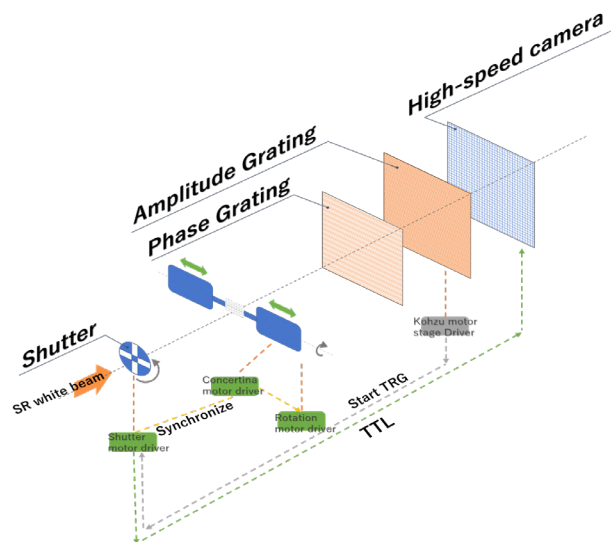


図1：ストロボ位相CT撮影装置の概略図

3 結果および考察

本測定では、24Hz で伸縮するゴム試料について、伸縮動作の特定のフェーズに位相CT撮影を同期させるストロボ撮影を行なった。ゴム試料には天然ゴムを用い、散乱画像を測定した。図2は、12の異なる伸縮フェーズに同期して得られた散乱画像CTをボリュームレンダリングした像である。これらの画

像は時間分解能 200 μsec のストロボ撮影に対応する。ゴムの伸縮比はそれぞれ 133%と 53%である。

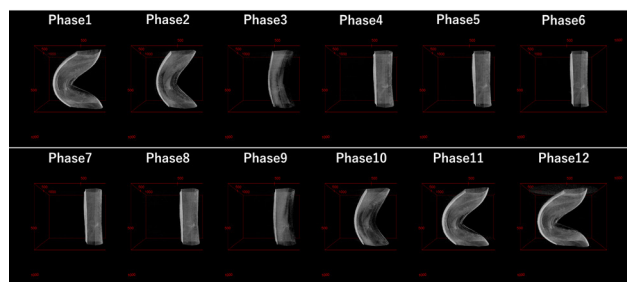


図2：24Hzで伸縮させているゴム試料の特定フェーズに同期させて得られた3次元画像（散乱画像CT）。

図3は、圧縮状態のフェーズに注目し、CT撮影を継続した結果であり、繰り返し伸縮によるゴム試料の劣化過程の追跡を試みたものである。この試料の場合、これより長い耐久試験に対応させるべきであるが、数百 μsec の時間分解能を保ち、数secの時間分解能で劣化過程を追跡できることが判った。

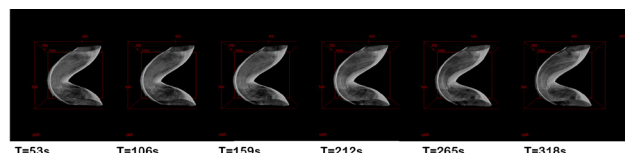


図3：24Hz伸縮モーション下でのゴム試料の変形過程を3次元観察した結果

試料の劣化過程の測定においては白色光による試料への照射ダメージは甚大であり、照射損傷と試料ダイナミクスとの分離が困難であるという問題が残る。この問題の回避のためには、多層膜ミラーなどを用いたピンクビームなどの導入により、干渉計に寄与しない成分を排除することが必要となる。

4 まとめ

BL-14Cのウィグラー白色光を用いたTalbot干渉計とストロボ法を併用することで、周期的な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。さらに、ゴム試料を対象として、24Hz伸縮下での劣化過程（準可逆的な現象）をその場観察することに成功した。なお、試料への照射ダメージを低減するため、多層膜ミラーなどを用いて生成されたピンクビームの利用が有効と考えられる。

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. Rack et al., *J. Synchrotron Radiat.* 21, 815 (2014).
- [4] W. Yashiro et al., *APEX* 10, 052501 (2017).
- [5] Y. Wu et al., *SPIE Proc.* 10391, 0E, (2017).
- [6] M. P. Olbinado et al., *Opt. Express* 25, 13857 (2017).
- [7] M. P. Olbinado et al., *J Instrum* 13, C04004 (2018).
- [8] E. M. Escauriza et al., *Appl. Opt.* 57, 5004 (2018).
- [9] W. Yashiro et al., *APEX* 11, 122501 (2018).
- [10] K. Vegso et al., *Sci. Rep.*, 9, 7404, (2019).
- [11] S. Kibayashi et al., *AIP Proc.* 1466, 261 (2012).

* yanlin.wu.a1@tohoku.ac.jp