

マルチビーム 4D X 線トモグラフィによる
異種金属接触界面観察への応用とその基盤技術開発
Application of Multi-Beam 4D X-ray Tomography
for Two Metals Contact Interface Observation

矢代 航^{a,b}, 梁 暁宇^b, 梶原 聖太郎^c, 間下 亮^d
Wataru Yashiro^{a,b}, Xiaoyu Liang^b, Kentaro Kajiwara^c, Ryo Mashita^d

^a 東北国際放射光センター, ^b 東北大多元研, ^c (公財)高輝度光科学研究センター,
^d 住友ゴム工業(株)

^a SRIS, Tohoku Univ., ^b IMRAM, Tohoku Univ., ^c JASRI, ^d Sumitomo Rubber Industries Ltd.

工業部品において金属の摩擦摩耗現象を正確に理解することは、部品の高性能化や生産コストの低減、部品不良抑制など多くの効果が期待されている。本研究では、筆者らが開発した放射光マルチビーム光学系（マルチビーム光学素子およびマルチビーム画像検出器）により試料を回転せずに異種金属接触界面の 4D X 線 CT 観察を実現するための基盤技術開発を行った。本実験により、筆者らのマルチビーム光学系で異種金属界面の 4D X 線 CT 観察する際の様々な問題点などが明らかになった。

キーワード： 摩耗、金属、接触界面、X 線 CT、その場観察

背景と研究目的：

工業部品において金属の摩擦摩耗現象を正確に理解することは、部品の高性能化や生産コストの低減、部品不良抑制など多くの効果が期待されている。また、昨今のコンピューター性能進化に伴うシミュレーション技術構築や予測精度向上にも期待が高い。これまでの解析技術によって、摩擦摩耗現象はある程度まで理解が進んでいる状況で、完全な理解には至っていない。この原因として、金属接触界面における三次元凹凸の変形挙動が理解できていないことがあり、この挙動を動的に観察することが求められている。

本研究課題では、以下を目的とした。

- ① マルチビーム4D X線トモグラフィによる金属接触界面のミリ秒時間分解能動的撮影システム検証
- ② 金属接触界面の摩擦摩耗現象に伴う三次元凹凸変形挙動の可視化技術検証

本課題では、図 1 に示すように、摩耗摩擦試験機と、実験責任者らが開発を進めている放射光マルチビーム光学系[1]を用いて、異種金属界面の摩擦摩耗現象をミリ秒時間分解能で三次元観察することを目指した。まずは①において、本実験の実現可能性を検討し、予備実験の結果をフィードバックして撮影系を最適化し、最終的に②の金属接触界面の三次元凹凸変形挙動の可視化を目指した。

上述のように、昨今のシミュレーション技術・解析技術によって、摩擦摩耗現象はある程度まで理解が進んでいる状況であるが、完全な理解には至っていない。この原因として、金属接触界面における三次元凹凸の変形挙動が理解できていないことがあり、この挙動を動的に観察することが求められている。本課題の技術構築によって、これまでブラックボックスで実測不可能であった接触面内部の摩擦摩耗現象をリアルタイムかつ三次元で計測することが可能となると期待された。波及効果は多岐にわたり、中でもシミュレーション技術を飛躍的に進化させることで、工業部品の研究開発を大幅に効率化させ、部品の品質や耐久性向上、製造コストの低減などに繋がる。また、産官学の世界的な取り組みである持続可能な開発 (SDGs) にも重要な一助となると期待される。

実験：

実験は SPring-8 の偏向電磁石からの白色放射光が利用できる BL28B2 で行った。図 1 のように、50 mm (水平) × 5 mm (鉛直) のサイズの白色放射光をマルチビーム化し、マルチビーム光学系のフォーカス位置に摩擦試験機を設置して実験を行った。撮影対象の金属円柱素材としては、SCM435 材 (クロムモリブデン鋼、密度 7.8 g/cm³) と A2020-T4 材 (アルミ) を (アルミ合金、密度 2.8 g/cm³) 使用した。金属円柱や加振機を固定するジグは、A2017-T6 材 (アルミ合金、密度 2.8 g/cm³) を使用した。画像検出器としては、独自に開発したシンチレータベースの間接撮像型マルチビーム X 線画像検出器[2]を用いた (シンチレータ : GADOX)。この X 線画像検出器では同時に 4 投影像を 1 台の高速 CMOS カメラで検出できる。

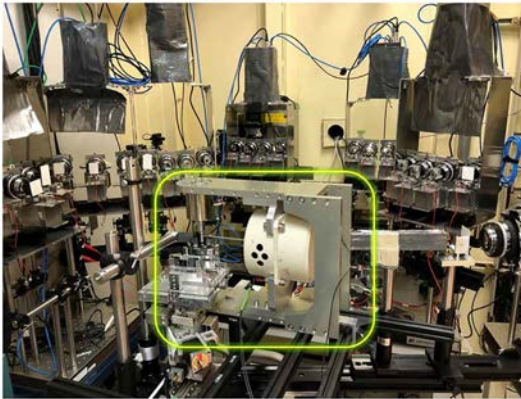


図 1 マルチビーム光学系と摩擦摩耗部 CT 撮影試験用加振システム。

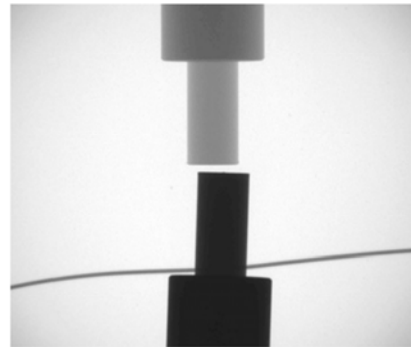


図 2 異種金属接触直前のダイレクトビームによる投影像の例。

結果および考察：

図 2 に、異種金属接触直前に撮像された投影像 (12,800 fps) の例を示す (画像上 : アルミ、画像下 : クロムモリブデン鋼)。著者らが開発したマルチビーム光学系に、比較的大型の試験機を導入してリアルタイム撮影が実現できたのは、今回が初めてで、様々なノウハウを蓄積することができた。現在、マルチビーム 4D X 線トモグラフィのデータ解析を進めている。

今後の課題：

今回の実験で、マルチビーム光学系のデータ較正法、安定性、空間分解能などの問題が明らかになった。特にデータ較正については、ビームタイム中に仮 CT 再構成を行ってデータのチェックができることが望ましく、現在整備を進めている。また、安定性についても、白色放射光照射後のビームドリフトの問題があり、今後光学系を改良することで解決できる見通しである。空間分解能についても、本実験では GADOX を使用したが、感度は高いものの、空間分解能が 70 μm 程度と悪く、期待した構造変化はほとんどみえていない可能性が高い。さらには、位相コントラストを利用することで、イメージング系を高感度化することも課題である。なお、加振によるマルチビーム光学系の振動が懸念されたが、その影響は無視できる程度であることが確認された。今後マルチビーム CT 実験の実験系、解析体制の整備をさらに進めた後に、再度挑戦することで、良好なデータが得られると期待される。

参考文献：

- [1] W. Voegeli *et al.*, *Optica* **7**, (2020) 514 (2020 年 5 月プレス発表、2020 年 11 月第 23 回光設計優秀賞受賞) .
- [2] T. Shirasawa *et al.*, *Appl. Phys. Express* **13**, 077002 (2020) (Spotlights 論文に選出) .