

計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の
開発と応用

2017年度採択研究代表者

2020年度 年次報告書

矢代 航

東北大学 多元物質科学研究所
准教授

超圧縮センシングによるミリ秒X線トモグラフィ法の開発

§1. 研究成果の概要

本プロジェクトでは、研究代表者らがこれまで先駆的に開発を進めてきた硬X線の位相を利用した高感度イメージング法の一つであるX線回折格子干渉法を発展させて、マルチビーム化と最先端の高度情報処理技術により、試料を高速で回転することなく、前人未踏の ms オーダーの時間分解能、10 μm の空間分解能の4D (3D+時間) X線トモグラフィ(CT)を実現することを目指してきた。繰り返しが不可能な非平衡系のダイナミクスをそのまま観察できるという特長を活かして、生命・材料科学における新規現象の発見から、インテリジェント材料の開発、動的バイオメティクス応用まで、基礎研究から新規イノベーション創出に至る新たなフロンティアの開拓を目標としている。

本プロジェクトでは、3年目の中間目標として、単結晶型(第一世代)マルチビーム光学素子の開発と、それをを用いた 5 ms 時間分解能、数 10 μm 空間分解能X線 CT(ただし、試料は回転してよいとする)の実現を目指してきた。2020年度は、2019年度に引き続き、マルチビーム光学素子およびそのホルダーの開発と高度化、マルチビームX線画像検出器の開発、さらには、ミリ秒 CT 実現のために必須である、少数の投影方向からの投影像による CT 再構成を可能とする「超圧縮センシングトモグラフィ」に関する基礎的な研究などを実施し、中間目標を大きく上回る 1 ms の撮影時間で、かつ試料回転なしで 38 μm の空間分解能での CT 再構成に成功した。

ミリ秒 CT のためのマルチビーム光学系で取得した投影データから CT 画像を生成する画像再構成技術に関しては、「ミリ秒トモグラフィ装置画像再構成」、「不完全投影データトモグラフィの解の一意性・安定性」、「超圧縮センシング画像再構成」の3つの大テーマについて研究を実施した。特に、「混合インテリア-エクステリア問題」と命名した本 CREST において世界で初めて提起した新しい不完全投影データからの画像再構成問題の解の一意性と安定性を解明したこと、本 CREST で構築した「3D-改良型非局所 TV」と命名した新しい圧縮センシング画像再構成法の有効性を汎用医療用コーンビーム CT 装置実機データで示したこと、広いクラスの線形方程式ソルバーと組み合わせ圧縮センシング画像再構成に用いる反復法の構築が可能な新しい数学的枠組みの構築、の3つが顕著な成果として挙げられる。

§2. 研究実施体制

(1)「ミリ秒X線トモグラフィ実証」グループ

- ① 研究代表者: 矢代 航 (東北大学多元物質科学研究所、准教授)
研究員: 梁 暁宇 (東北大学多元物質科学研究所)
技術補佐員: 高橋 真麗子 (東北大学多元物質科学研究所)
- ② 研究項目: ミリ秒X線トモグラフィの実証に向けた以下の項目に関して研究を実施
 - ・ π 偏光型マルチビーム光学系による CT データ取得
 - ・ マルチビームX線画像検出器の開発
 - ・ π 偏光型マルチビーム光学系の高効率化および σ 偏光型マルチビーム光学系の実現可能性の検討
 - ・ マルチビーム光学系の応用研究のためのフェージビリティ・スタディ

(2)「画像再構成」グループ

- ① 主たる共同研究者: 工藤 博幸 (筑波大学システム情報系、教授)
主な研究参加者: 滝沢 穂高 (筑波大学システム情報系、教授)
研究員: 藤井 克哉 (筑波大学システム情報系、常勤研究員)
- ② 研究項目: 主たる共同研究者である工藤らが提唱している既存の圧縮センシング (CS) を発展させた枠組みの「超圧縮センシングトモグラフィ」を基礎として、以下の項目に関して研究を実施
 - ・ ミリ秒トモグラフィ装置で取得した測定データの画像再構成
 - ・ 不完全データトモグラフィにおける解の一意性と安定性の新しい理論構築
 - ・ 半大域的および大域的正則化に基づく圧縮センシング画像再構成法の構築

(3)「投影型 CT 用マルチビーム光学系開発」グループ

- ① 主たる共同研究者: ヴォルフガング・フォグリ (東京学芸大学教育学部、准教授)
主な研究参加者: 荒川 悦雄 (東京学芸大学教育学部、教授)
- ② 研究項目: マルチビーム光学素子およびその制御系の開発に向けた以下の項目に関して研究を実施
 - ・ π 偏光型マルチビーム光学素子の高度化
 - ・ σ 偏光型マルチビーム光学系の設計・原理実証

(4)「走査型 CT 用マルチビーム光学系開発」グループ

- ・ 走査型 CT のための 2 ビーム化光学系の設計および原理実証

【代表的な原著論文情報】

[1] W. Voegeli, K. Kajiwara, H. Kudo, T. Shirasawa, X. Liang, and W. Yashiro, “A Multi-beam X-ray optical system for high-speed tomography”, *Optica*, vol. 7, No. 5, pp.514-517, 2020 (2020年5月プレス発表).

[2] R. Mashita, W. Yashiro, D. Kaneko, Y. Bito, and H. Kishimoto, “High-speed rotating device for X-ray tomography with 10 ms temporal resolution”, *J. Synchrotron Rad.* 28 (2021) 322-326 (2021年3月プレス発表).

[3] T. Shirasawa, X. Liang, W. Voegeli, E. Arakawa, K. Kajiwara, and W. Yashiro, “High-speed multi-beam X-ray imaging using a lens coupling detector system”, *Appl. Phys. Express* 13 (2020) 077002 (Spotlights 論文に選出).