

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

2019年度 実績報告書

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線トモグラフィを実現することを目指している。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、動的バイオメテックス応用まで、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、それを用いた 5 ms 時間分解能、数 10 μm 空間分解能X線トモグラフィ(ただし、試料は回転してよいとする)の実現を目指している。平成 31 年度(令和元年

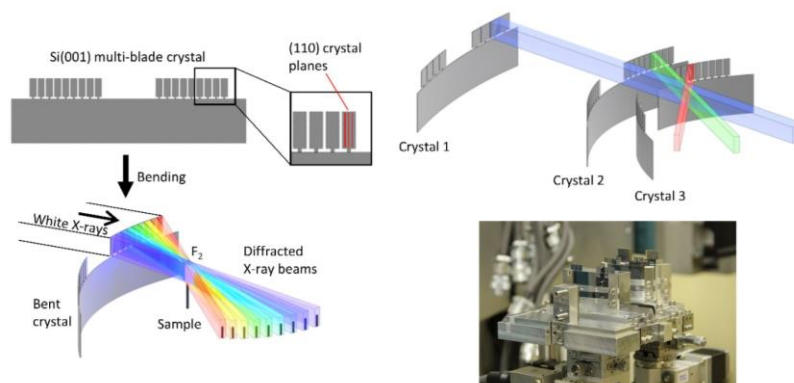


図 1. 開発した三段双曲面型X線マルチビーム光学素子[1]。

度)は、平成 30 年度に引き続き、図 1 に示すようなマルチビーム光学素子およびそのホルダーの開発、マルチビームX線画像検出器の開発、さらには、ミリ秒トモグラフィ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、図 2 のように、1 ms の撮影時間でテスト試料の CT 再構成に成功した[1] ((上) 直径 50 μm タングステンワイヤー ((a) 投影像の例、(b) 三次元再構成像)、(下) アルミ箔試料 ((a) 投影像の例、(b) (a)の→の断面のトモグラム)))。

マルチビーム CT で測定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、以下に述べる 3 つの項目の研究を実施した。一つ目として、本プロジェクトで開発したミリ秒トモグラフィ装置の第一号機で測定データが取得できるようになり、2 種類の試料の測定データの圧縮センシング (Compressed Sensing, CS) 画像再構成を行い、少数

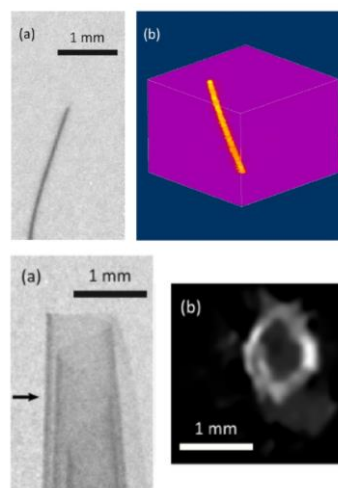


図 2 図 1 のマルチビーム光学素子により 1 ms の撮影時間で取得された CT 再構成像[1]。

方向で角度欠損があり SN 比が悪い投影データから比較的高画質の画像を出すことに成功した。図 3 は、アルミ箔を円筒状に巻いた試料の僅か 32 方向(角度範囲 $[-70^\circ, +70^\circ]$)の投影データから再構成した画像であり、CS によりフィルター補正逆投影 (Filtered Backprojection,FBP) 法と比較して劇的に画質を改善した画像再構成が実現できている。二つ目として、X 線を物体内部の小さな関心領域 (Region of Interest, ROI) のみに照射して CT を実現する「インテリア CT」の基礎理論に関する研究を実施して、従来の厳密解法よりはるかに少ない先験情報で厳密な再構成を行う新手法の発見、混合インテリア-エクステリア問題と命名したインテリア CT を拡張した問題の解の一意性を示す、などの成果を得

た。三つ目として、マルチビーム CT において測定される方向数が少ない「スパースビューCT」投影データや「角度欠損」投影データから高画質の画像再構成を行う新しい CS 画像再構成法として、1) 被写体のトポロジーを先験情報として用いる「トポロジー拘束型画像再構成」、2) 深層学習と CS を巧妙に組み合わせより画質を改善した画像再構成を行う新手法、の構築を行った。更に、非局所 TV 正則化や非線形フィルター正則化など半大域的な正則化に基づく画像再構成法を、一つの統一的視点から体系的な研究を行った。

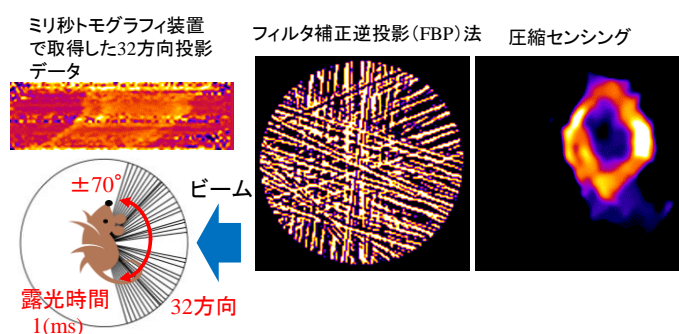


図 3 アルミ箔を円筒状に巻いた試料をミリ秒モグラフィ装置で測定した投影データから画像再構成した結果(従来の FBP 法では何が写っているか全く分からないが、圧縮センシングにより円筒状の構造やアルミ箔の縁が 2 重になっている様子が明確に再構成できた)。

【代表的な原著論文】

- [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.
- [2] W. Yashiro, T. Shirasawa, C. Kamezawa, W. Voegeli, E. Arakawa, and K. Kajiwara, “A multi-beam X-ray imaging detector using a branched optical fiber bundle”, *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 59, No. 3, Paper No. 038003, 2020.
- [3] T. Wang, H. Kudo, F. Yamazaki, and H. Liu, “A fast regularized iterative algorithm for fan-beam CT reconstruction”, *Physics in Medicine and Biology*, vol.64, No.15, Paper No. 145006, 2019

§ 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
 - ・ マルチビーム光学素子による CT データ取得
 - ・ マルチビームX線画像検出器の開発
 - ・ マルチビーム光学系の高効率化の実現可能性についての検討
 - ・ マルチビーム光学系の応用研究のためのフィージビリティ・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)
分担者: 滝沢 穂高 (筑波大学システム情報系、准教授)
研究員: 藤井 克哉 (筑波大学システム情報系、常勤研究員)
RA: 金 鎔采 (筑波大学大学院システム情報工学研究科博士後期課程、学生)
- 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
 - ・ 半大域的及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)「マルチビーム光学素子および制御系開発」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)
- 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系の評価と光学系の最適化
 - ・ σ 偏光型マルチビーム光学系の設計
 - ・ サブ秒元素識別 CT (試料回転あり) の検討