

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 29 年度は、平成 28 年度に引き続き、中間目標実現に向けた第一世代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線画像検出器の試作、ミリ秒トモグラフィ光学系に関する原理実証実験、さらに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た。

本プロジェクトで開発するマルチビーム光学素子は、湾曲単結晶からの Bragg 反射を利用して白色放射光のマルチビーム化を行い、試料の多方向の投影像を同時に撮影することを目的とするものであり、本年度は単結晶型マルチビーム光学素子およびその湾曲ホルダーの開発を行った。両者について評価と試作を繰り返し行い、改良を進めた結果、大型放射光施設 SPring-8 のベンディングマグネットビームラインである BL28B2 の白色放射光を用いて、 $\pm 70^\circ$ の範囲で、31 方向同時投影(画素サイズ $10\ \mu\text{m}$ 、撮影時間 $5\ \text{ms}$)に成功した(図 1)。

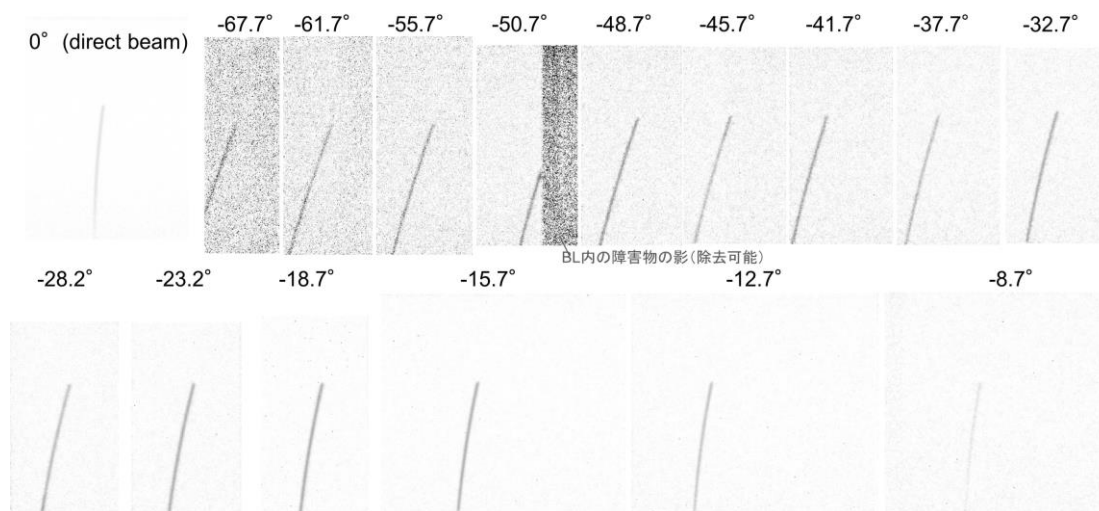


図 1 直径 $50\ \mu\text{m}$ のタングステンワイヤーを複数の方向から投影することに成功した例(透過率像)。画素サイズ $10\ \mu\text{m}$ 、撮影時間 $5\ \text{ms}$ (ただし、ダイレクトビームのみ $12.5\ \mu\text{s}$)。グレースケール:0~1.2。

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 2 つの項目の研究を実施した。一つ目として、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、2 次元 CT に対して知られる厳密解法を世界で始めて平行ビームとコーンビームの 3 次元 CT に拡張することに成功した。二つ目として、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圧縮センシング画像再構成法として、H29 年度に開始した「非局所トータルバリエーション (TV)」に基づく画像再構成法の研究を継続した。特に、評価関数の最小化に用いる反復法の研究に注力して、1) 鞍点問題を解く「非ラグランジアン解法」と名付けた新しい数学的枠組み、2) 高速な反復法として知られる高速 ART (Algebraic Reconstruction Technique) 法の埋め込み、3) 非局所 TV 最小化の効率的解法、などのアイデアを組み合わせて、最終的に計算量 (収束速度・メモリ使用量) を大きく改善した新手法を構築することに成功した。図 2 に、医療用腹部 CT の実画像を僅か 40 方向の投影データから再構成するシミュレーション実験の結果を示す。フィルタ補正逆投影 (FBP) 法と上述の提案手法の再構成画像を示すが、提案手法は超高速に収束して 10~20 回の反復計算で十分な画質の画像が得られている。

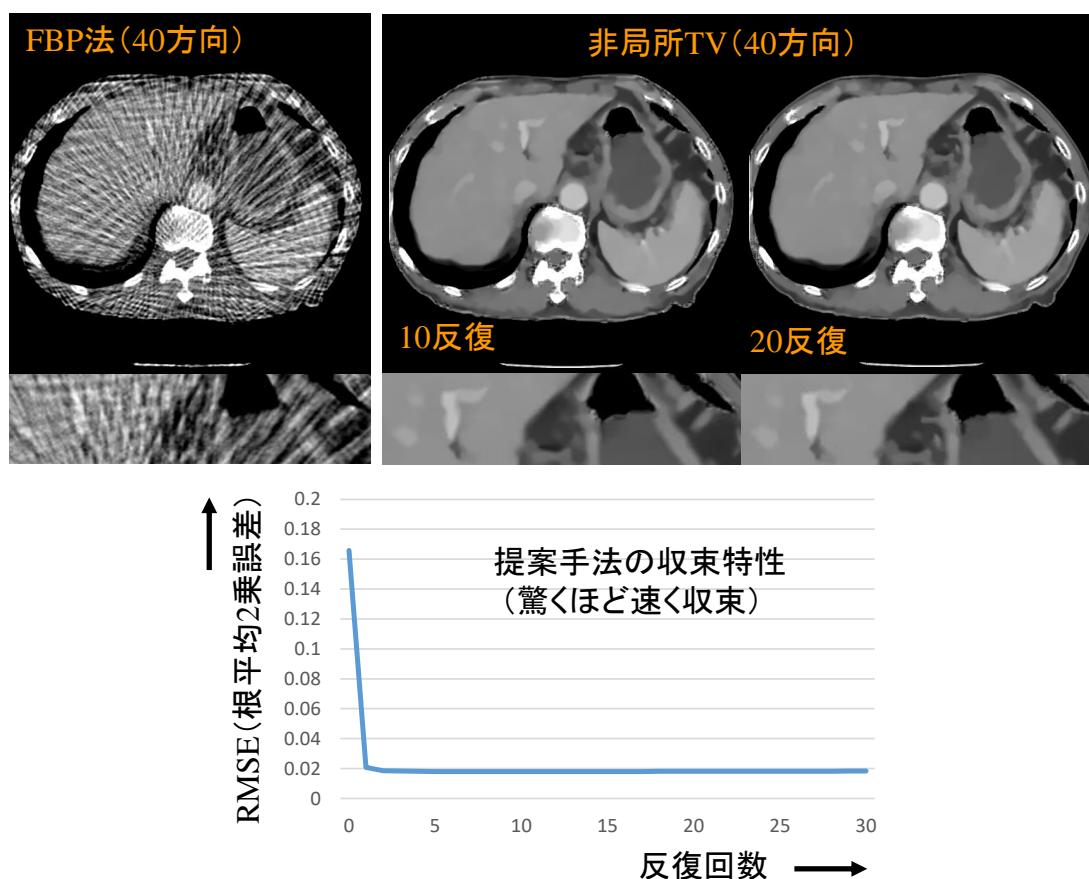


図 2 構築した新しい画像再構成法の高速な収束性と高画質性能を示す例 (医療用腹部 CT 実画像を僅か 40 方向の投影データから再構成するシミュレーション実験結果)。

§ 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)
- 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の作製
 - ・ マルチビーム光学素子ホルダーの作製
 - ・ マルチビーム画像検出器の試作
 - ・ 予備実験(試料選定)用高速同期回転装置の開発
 - ・ ミリ秒X線トモグラフィの光学系の要素技術の原理実証実験

(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)
- 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
 - ・ 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最適化に基づく不完全データトモグラフィ画像再構成法の開発
 - ・ 実験データへの応用研究

(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 助教)
- 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
 - ・ マルチビーム光学素子の設計
 - ・ マルチビーム光学素子ホルダーの設計
 - ・ ミリ秒X線トモグラフィの光学系の要素技術の原理実証実験