

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「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」
研究課題「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」

研究終了報告書

研究期間 2017年10月～2023年3月

研究代表者: 矢代 航
(東北大学国際放射光イノベーション・
スマート研究センター 教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本チームでは、放射光のマルチビーム化の実現と、従来の圧縮センシングの枠組みを超える超圧縮センシングの概念に基づく CT 再構成法の開発により、試料を高速で回転することなく、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た。世界的に例のない独創的な着想に基づく X 線イメージング系、CT 再構成法をゼロから開発することで、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・材料科学の基礎研究から産業界の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につながると期待された。

3 年目の中間目標としては、単結晶型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 CT (ただし、試料は回転してよいとする) の実現を目指し、 $\pm 70^\circ$ の投影方向 (投影数: 32) をカバーできる三段双曲柱型マルチビーム光学系 (マルチビーム光学素子および画素サイズ 20 μm マルチビーム光学系) を開発し、さらに非常に少数の不完全投影データからの CT 再構成を可能にする超圧縮センシング CT 再構成の基礎・応用研究の成果との融合により、中間目標を大きく上回る、時間分解能 1 ms、空間分解能 40 μm 弱で、かつ、試料を回転することなく CT 再構成ができることを実証した。

最終目標として、1 ms 時間分解能、10 μm 空間分解能で試料を回転することなく CT 再構成を実現することを目指してきたが、最終年度に画素サイズ 10 μm 化に成功し、点拡がり関数の半値全幅の定義で 10 μm の空間分解能 (有効数字 1 桁) が達成できている。 また、本光学系をソフトマテリアルの引張破壊過程の 4D 観察に応用し、試料を回転することなく、引張破壊によって生じたボイド (非平衡状態) を世界で初めて捉えることに成功した。

当初計画立案時点の予想を超える展開も多くみられた。準単色アンジュレータ放射光の使用を想定したマルチビーム光学系の開発 (CT 再構成の原理実証) に成功したことで、近い将来に 10 μs ~ 100 μs 時間分解能、さらには European XFEL の自由電子レーザーを用いれば 1 μs 時間分解能 も実現できる目処が立った (後者は、本チームの成功を受けて、2022 年 6 月より約 4 億円/3.5 年の European Innovation Council プロジェクトがスタート)。

さらに、本プロジェクトで開発したマルチビーム光学系では、各投影ビームのエネルギーが異なるという欠点があったが、そのことを逆に積極的に利用して、各エネルギーに対応する CT 再構成像 が取得できるアルゴリズムが画像再構成グループにより開発された。組成ごとの CT 再構成 も可能であり、実験データで実現可能性が実証された。

CT 再構成法の開発については、本チームで開発したマルチビーム CT では、その原理上以下の 4 つに要約される問題点があり、画像再構成が著しく難しいものであった。

- (1) 特定の角度の X 線の回折強度が著しく弱く投影データの随所に異常データが発生
- (2) X 線のエネルギーが角度に依存して異なる
- (3) 投影方向数がスパースであること
- (4) 4D 観察が目的であり膨大なデータが発生し、高速な圧縮センシング画像再構成法が必要

本チームでは、これらの問題を解決して新しい考え方の画像再構成法を構築して、露光時間 1 ms の超低線量実測データで画像を出すことに成功した。具体的には、(1) の問題に対しては画像再構成の過程で異常部位の場所を自動的に検知して除外して再構成を行う「異常データ検知トモグラフィ (ABD-CT)」を構築し、(2) の問題に対しては画像再構成の過程でエネルギーの補正を厳密に行える「エネルギー補正画像再構成法」を構築した。(3) の問題に対しては圧縮センシングで対応して (1)、(2) と組み合わせた。(4) の問題に対しては、TV 正則化再構成問題を高速に解く「FBP 法組み込み型主双対反復法」、Row-Action 型の「FART-TV (FAST ART-TV) 法」を構築して解決した。マルチビーム CT の開発は本チームが世界初で現状では世界中でごく少数だが、将来世界中に普及した暁には本画像再構成法が必須でプロトタイプになると予想され、顕著な成果と考えられる。

本チームで開発された 4DX 線 CT 法、CT 再構成法は、ハイスループット計測 との相性がよいことも特記に値する。すなわち、本チームの計測技術と情報処理技術の融合によって開拓さ

れた時空間領域は、ブルーオーシャンで、かつ学術・産業応用上極めてニーズが高い領域にあり、国際的にも突出しているが、実材料の非平衡系のビッグデータ取得も可能であるため、近い将来には、非平衡系マテリアルズ・インフォマティクスなどの新しい学理の創生につながり、また物質・材料、資源・エネルギー、医療等、科学技術全般など、学術・産業界のイノベーション創出に様々な形で貢献していくと期待される。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 放射光マルチビーム化による 1 msX 線トモグラフィの実証(論文: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, 514-517 (2020) IF2020 = 11.104)

概要:

放射光マルチビーム化に成功し、超圧縮センシング角度欠損スパースビューCT再構成アルゴリズムとの融合により、試料回転なし 1 ms 時間分解能 CT 再構成を世界で初めて実証した。本成果は、1 ms 時間分解能という前人未踏の領域を開拓しただけでなく、試料回転を不要とすることで、応用範囲を不連続的に拡大した先導的・独創的な成果であり、2020 年 5 月に学術雑誌 *Optica* (IF2020 = 11.104) に掲載され、新聞紙面掲載、国際・国内学会での複数の受賞などにつながった。

2. FBP 法組み込み型主双対反復法の開発(論文:Ting Wang, Hiroyuki Kudo, Fukashi Yamazaki, and Huafeng Liu,” A fast regularized iterative algorithm for fan-beam CT reconstruction,” *Physics in Medicine and Biology*, Vol.64, No.14, Paper No. 145006 (17 pages) (2019) IF2021=4.174)

概要:

圧縮センシング(CS)によるスパースビューCTや低線量CTの画像再構成においては、評価関数最小化に用いる反復解法の収束が非常に遅く計算時間が膨大である問題点実用化の障壁である。本成果では、非反復的 CT 画像再構成法であるフィルタ補正逆投影(FBP)法の構造を解が変化しないように反復的に埋め込むことで、収束を劇的に高速化する手法を世界で初めて提案して「FBP 法組み込み型主双対反復法」と名付け、本 CREST のマルチビームCTにも実用化した。その効果は抜群で他の高速化手法に対し群を抜いており、今後 CS のトモグラフィへの実用を促進すると期待される。

3. 準単色アンジュレータ放射光用狭エネルギーバンド幅 σ 偏光型マルチビーム光学系の開発(特許:特願 2022-147387「断層撮影装置用の多重ビーム分割及びリダイレクト装置、断層撮影装置、及び試料の 3 次元断層画像を取得するための方法」など)

概要:

準単色アンジュレータ放射光を想定して、 ± 100 eV 以内にすべての角度の投影ビームのエネルギーが収まる σ 偏光型マルチビーム光学系を設計・試作し、CT 再構成の原理実証に成功した。大型放射光施設のアンジュレータ光をモノクロメータなしに使用できれば、 $10 \mu\text{s} \sim 100 \mu\text{s}$ 時間分解能で試料回転なし 4DX 線 CT が実現できることが示された。またマルチエネルギーCT再構成アルゴリズムを使用すれば、XAFS CT によって元素の価数分布の 4D 可視化の道も拓けた。なお、欧州の研究参加者により立ち上げられた約 4 億円/3.5 年のプロジェクトが目指している、European XFEL による $1 \mu\text{s}$ 時間分解能マルチビームCTのプロジェクトと基本的に同じコンセプトの光学系(日本、EP で特許出願済み)である。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. X 線マルチビームイメージング光学系の開発(特願 2022-147387 など)

概要:

本プロジェクトで開発したマルチビーム光学系は、それ自体が世界的に前例のないものであり、競合する計測技術が世界的に存在しないため、応用分野での大きな波及効果が期待される。

現状の時空間分解能でも、国内の大企業などから既に多くのフィージビリティ・スタディの相談を受けているが、1~100 μ s 時間分解能の実現も見えてきたことで、今後、材料・生命科学研究への応用研究などを通して、様々な科学技術イノベーションに大きく寄与すると期待している。

2. 「新しい考え方の圧縮センシング(CS)正則化手法を用いたスパースビューCT 画像再構成法」(特願 2020-042154 など)

概要:

現在、スパースビューCT の画像再構成は、トータルバリエーション(TV)正則化に基づき構成された評価関数を、FISTA 法や Chambolle-Pock 法などの反復解法で最小化する手法が世界的に主流である。この手法は、1) 必要な投影データ数を削減する能力が不十分である、2) 反復解法の収束が遅く計算時間が膨大である、の 2 つの問題点があり、実用化の障壁になっている。本研究では、現時点で研究の価値がある「非線形フィルタを用いた CS 正則化手法」、「非局所 TV 正則化手法」に加え、次世代と位置づけられる、1) 「画像の濃度値が 2 値や多値の先験情報」を用いて超スパースビューでの高精度再構成を可能にする 3D-TV+パラメトリックレベルセット(PALS)法、2) 深層学習と TV を組み合わせ更なる画質改善を実現する「CS と深層学習のハイブリッド再構成法」を開発した。スパースビューCT 画像再構成の新しい方向性を拓く成果であり、本プロジェクト内だけでなく、医療診断や非破壊検査などの分野のイノベーション創出に大きく寄与すると期待される。本成果は、学術雑誌「Computers, Materials & Continua (IF2021=3.860)」に論文が掲載され、国際会議 ICCAE2023 の Best Oral Presentation Award、平成 30 年度文部科学大臣表彰(科学技術賞)の受賞などにつながった。

3. 「インテリアCTの画像再構成方法、画像再構成装置、及び、プログラム」(特願 2022-096552)

概要:

インテリア CT においては、X 線を物体内部の小さな関心領域(ROI)に照射した投影データから ROI の画像再構成を行うが、画像再構成逆問題の解が一意に定まらず高精度の画像再構成には被写体に関する何らかの先験情報や補足測定が必要である。本発明では、高精度の再構成を実現するための minimum の先験情報は被写体の断面の「画像の合計値」である驚きの事実を発見した。本手法で用いる先験情報は測定・予想が容易な画像の合計値を表すスカラーのみであり、他の手法と比較して非常に簡便に使用でき多様な CT の応用においてインテリア CT の実用を促進すると期待される。実際に、関連する技術の学術指導を(株)島津製作所に行い、同社の非破壊検査用 CT 装置で製品化された実績がある。

<代表的な論文>

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* 7 (2020) 514-517.

概要:

$\pm 70^\circ$ の投影方向(投影数:32)をカバーできる三段双曲柱型マルチビーム光学素子を開発し、超圧縮センシング角度欠損スパースビューCT 再構成アルゴリズムとの融合により、試料回転なし 1 ms 時間分解能 CT 再構成が実現可能であることを世界で初めて実証した論文。2020 年 5 月に学術雑誌 *Optica* (IF2020 = 11.104)に掲載された(Attention Score: 57)。科学新聞などに紙面掲載(2020.5.22)。第 23 回光設計優秀賞(2020)受賞。また、2 年間 Top downloads、日本光学会「2020 年日本の光学研究」に選出、国際学会 XNPIG2019 Poster Award 受賞。

2. Haytham A. Ali and Hiroyuki Kudo, "Binary tomography reconstruction with limited-data by a convex level-set method," *Computers, Materials & Continua*, Vol. 73, No.2, pp. 3741-3756 (2022) IF2021=3.860

概要:

スパースビューCT や低線量 CT の画像再構成は、トータルバリエーション(TV)正則化に基づき構成された評価関数を、FISTA 法や Chambolle-Pock 法などの反復解法で最小化する手法が世界的に主流である。この手法は、1) 投影データ数を削減する能力が不十分である、2)

反復解法の収束が遅く計算時間が膨大である、の 2 つの問題点がある。本論文では、パラメトリックレベルセット (PALS) 法と呼ばれる濃度数が少ない画像を効率的に表現する画像モデルと超 1 次収束性を持つ準ニュートン法に基づく反復解法を用いて、画質性能や計算時間に優れた新手法を提案した。圧縮センシング CT 画像再構成の新しい方向性を拓く成果と考えられる。本成果は、国際会議 ICCAE2023 の Best Oral Presentation Award、平成 30 年度文部科学大臣表彰 (科学技術賞) などにつながった。

3. Mona Selim, Essam A. Rashed, Mohammed A. Atiea, and Hiroyuki Kudo, "Sparsity-based method for ring artifact elimination in computed tomography," PLoS ONE, Vol.17, No.6, Paper No. e0268410 (2022) IF2021=3.752

概要:

CT 撮影において投影データに異常データが含まれる場合、通常の画像再構成法ではその影響が画像全体に広がり再構成画像は著しく劣化してしまう。メタルアーティファクト、リングアーティファクト、ビームハードニングなどが代表的な例である。現状では、劣化要因毎に設計された経験的な手法で画質改善を行う手法が主流であるが、本論文では異常部位の場所を画像再構成の過程で自動的に検知して除外して再構成を行う「異常データ検知トモグラフィ (ABD-CT)」と名付けた CT 画像再構成の新しい概念を提案して、リングアーティファクト除去の問題に有効であることを示した。このような概念を提案したのは我々が世界初であり、ABD-CT は様々な種類の異常データを統一的に扱える一般性があり、本 CREST で開発したマルチビーム CT にも採用された。今後、CT の多くの応用分野に普及していくと期待される。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

表 3 に研究実施分担表を、また、図 1、図 2 に本プロジェクトの最終年度の研究実施体制、研究実施体制の変遷を示す。

グループ名	研究代表者または主たる共同研究者氏名	所属機関・部署・役職名	研究題目
研究代表者G	矢代 航	国立大学法人東北大学・国際放射光イノベーション・スマート研究センター・教授	ミリ秒X線CTの実証
共同研究者G(1)	工藤 博幸	国立大学法人筑波大学・システム情報系・教授	ミリ秒X線CTの高度画像再構成技術の開発
共同研究者G(2)	虻川 匡司	国立大学法人東北大学・国際放射光イノベーション・スマート研究センター・教授	ミリ秒X線CTの応用研究
共同研究者G(3)	小川 紘樹 *2019年度までさががけに参画。	国立大学法人京都大学・化学研究所・准教授	走査型CT用マルチビーム光学系の開発

表3：研究実施分担表（最終年度）。

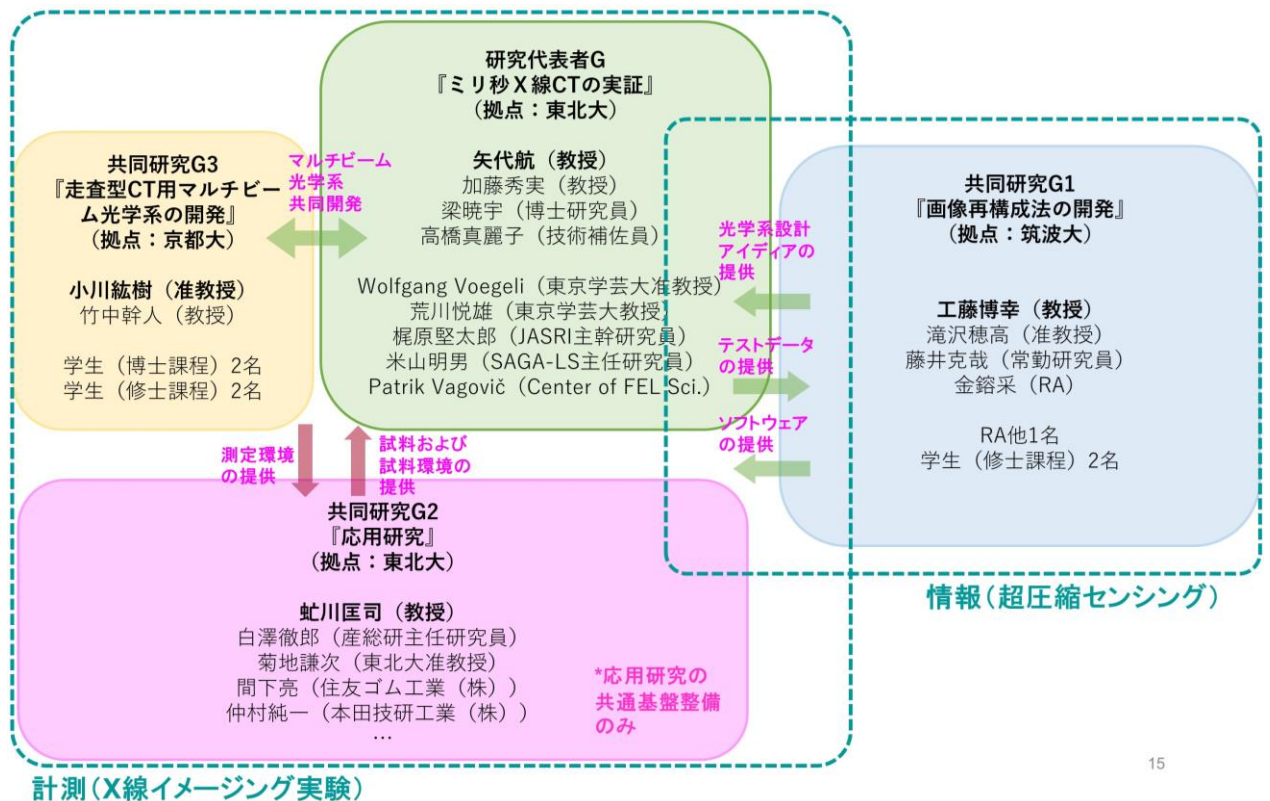









図 1：本プロジェクトの研究体制（最終年度）。

2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
	研究代表者G 『ミリ秒CTの実証』 (拠点：東北大) 			研究代表者G 『ミリ秒CTの実証』 (投影型CT用マルチビーム光学系の開発) (拠点：東北大)  	
	共同研究G2 『投影型CT用マルチビーム光学系の開発』 (拠点：東京学芸大) 			共同研究G2 『応用研究』 (拠点：東北大) 	
	『応用研究』				
			共同研究G3 『走査型CT用マルチビーム光学系の開発』 (拠点：京都大) 		
	共同研究G1 『画像再構成法の開発』 (拠点：筑波大) 				
参画人数	6	18	25	24	25

計測

情報

図2：本プロジェクトの研究体制の変遷。

①「ミリ秒X線 CTの実証」グループ(研究代表者 G)

研究代表者: 矢代 航 (東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター 教授)

研究項目

- ・ミリ秒X線 CT 光学設計
- ・ミリ秒X線 CT の実証実験

②「ミリ秒X線 CTの高度画像再構成技術の開発」グループ(共同研究者 G(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)

研究項目

- ・トモグラフィ画像再構成問題の解の一意性や安定性の研究
- ・新しい正則化の枠組みに基づく圧縮センシング画像再構成法の構築
- ・ミリ秒トモグラフィ装置の画像再構成

③「ミリ秒 X 線 CTの応用研究」(共同研究者 G(2))

主たる共同研究者: 虻川匡司 (東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター 教授)

研究項目

- ・ダイナミクス観察のための共通基盤整備
- ・材料破壊/変形のダイナミクス観察

④「走査型 CT 用マルチビーム光学系の開発」(共同研究者 G(3))

主たる共同研究者: 小川 紘樹 (京都大学化学研究所 准教授)

研究項目

- ・走査型CT用マルチビーム光学素子の設計
- ・走査型CT用マルチビーム光学素子の作製・評価(研究代表者Gと共同)
- ・ゴム材料破壊過程の解明(研究代表者G、共同研究者G(2)と共同)

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

放射光マルチビーム化については、本プロジェクトの独創的なアイデアが起点となって、欧米の放射光施設、X線自由電子レーザー(XFEL)施設でも研究が始められた。特に、European XFEL においては、本プロジェクトの研究参加者であった Patrik Vagovič 博士の研究提案が採択され、2022年6月から約4億円/3.5年のプロジェクトが立ち上がった。このプロジェクトでは、世界で唯一の光源性能を活かして、XFELビームのマルチビーム化により1 μ sの時間分解能の達成が目標となっている。研究代表者の所属機関である東北大学は、このプロジェクトに関して、欧州の関係機関(Center of Free-Electron Laser Science (European XFEL)、DESY、Oxford 大学、Lund 大学)と秘密保持契約(NDA)を締結し、研究代表者である矢代は、European XFEL のプロジェクトにも Associate Partner として参画している。また、特許出願もすでに完了している(EP、日本)。今後は日本側からも研究資金提供を行うとともに、産業界も含めて NDA の輪を広げ、国際共同研究を戦略的に進めていく計画である。

産業界との連携については、本プロジェクトで開発したマルチビーム光学系自体が世界的に前例のないものであり、競合する計測技術が世界的に存在しないため、国内の大企業などから既に多くのフィージビリティ・スタディの相談を受け、限られたビームタイムの合間を縫ってテスト実験を進めてきた(住友ゴム工業(株)の間下亮氏、本田技研工業(株)の仲村純一氏らが研究参加者として参画)。住友ゴム工業(株)に提供いただいたタイヤゴム試料については、試料を回転せずに、試料高速回転 4DX 線 CT の時間分解能(10 ms)を超える 8 ms という時間分解能で、引張破壊過程におけるボイドの生成の可視化に成功している。今後、材料・生命科学研究への応用などを通して、様々な科学技術イノベーションに大きく寄与すると期待している。

画像再構成グループ(筑波大学 共同研究者 G(1))の産学連携に関しては、本プロジェクトで開発済みの画像再構成法などを広く社会で活用してもらうため、最終年度である 2022 年 4 月から橋本康博士に東北大学ナレッジキャスト株式会社(代表取締役:荒井秀和氏)に移籍してもらい、同社の一般顧客・法人向けの一事業として、社会実装を行った。また、公開済みの CT 再構成技術については、株式会社島津製作所、株式会社緑野リサーチに技術指導や共同研究を行い、特に株式会社島津製作所においては非破壊検査用コーンビーム CT 装置に組み込まれ製品化に至った。