



分野： 工学系 キーワード： 放射光・量子ビーム測定手法・評価・試験法、量子ビーム科学

## 新手法「暗視野X線タイコグラフィ」の実証に成功

～X線イメージングによる世界最高の空間分解能・感度の実現を目指す～

### 【研究成果のポイント】

- ◆ 回折強度パターンのダイナミックレンジ<sup>※1</sup>を 1000 分の 1 程度圧縮する新規X線タイコグラフィ<sup>※2</sup>法を提案・実証
- ◆ 検出器性能によって制限される限界を突破し、世界最高水準の空間分解能・感度を実現
- ◆ 安価にX線タイコグラフィが可能になり、材料・生物試料のイメージング研究の普及・促進に期待

### ❖ 概要

大阪大学 大学院工学研究科の高橋 幸生 准教授(兼任:理化学研究所 チームリーダー)、鈴木 明大 大阪大学大学院生(現:北海道大学 電子科学研究所 助教)らの研究グループは、**暗視野X線タイコグラフィの実証に成功しました。**

X線タイコグラフィは、厚い試料であっても高い空間分解能を発揮できるX線イメージング技術であり、現在、世界中の多くの放射光施設で盛んに研究開発が進められています。X線タイコグラフィの空間分解能と感度を向上させるためには、試料からの回折強度パターンを極めて広い強度ダイナミックレンジで取得しなければならず、高輝度X線光源と高性能な二次元X線検出器が必要です。

今回、本研究グループは、微小構造体からの散乱X線を参照光とするインラインホログラフィ<sup>※3</sup>とX線タイコグラフィを組み合わせることで回折強度パターンのダイナミックレンジを 1000 分の 1 程度圧縮する新手法「暗視野X線タイコグラフィ」(図1)を大型放射光施設 SPring-8<sup>※4</sup>において実証し、生物試料の高空間分解能イメージングに成功しました(図2)。

この成果によって、**比較的安価である光子計数率の小さい二次元X線検出器を用いても、X線タイコグラフィによる高空間分解能・高感度イメージングが可能になり、本手法の普及が期待されます。**また、高性能な二次元X線検出器を駆使することで世界最高性能の空間分解能・感度の実現することが可能となります。

本研究成果は、平成 28 年 10 月 13 日に英国 Nature Publishing Group の Scientific Reports 誌に公開されました。

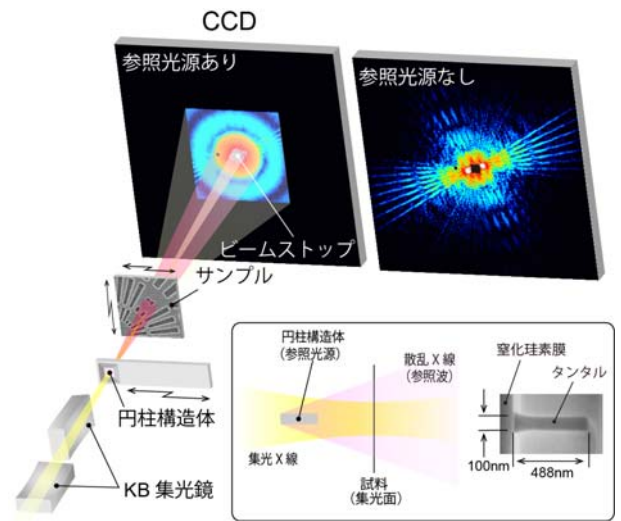


図1 暗視野X線タイコグラフィ測定概念図

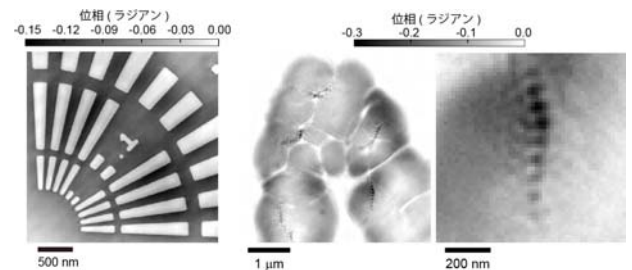


図2 暗視野X線タイコグラフィによって観察したテストパターン(左)ならびに磁性細菌(右)とその拡大像

## ❖ 研究の背景

X線タイコグラフィはX線の可干渉性(コヒーレンス)<sup>※5</sup>を利用したイメージング技術であり、従来のX線顕微鏡では得られない高い空間分解能を有するため、次世代のX線イメージング技術として、近年、放射光施設を中心に盛んに研究開発が行われています。X線タイコグラフィを用いて高い空間分解能と感度で試料を観察するためには、試料の回折強度パターンを広いダイナミックレンジで計測することが必要です。したがって、高輝度コヒーレントX線源と高性能二次元X線検出器の存在が欠かせません。

前者については、現在、世界的に高輝度低エミッタンス放射光源の開発が盛んであり、放射光の可干渉性が向上しています。後者については、特に高エネルギーX線用の二次元X線検出器で、光子計数率の大きなハイブリッド型ピクセル検出器<sup>※6</sup>が登場したことで、短時間でダイナミックレンジの大きな回折強度パターンを取得することが可能になってきました。ただ、ハイブリッド型ピクセル検出器は極めて高価であることに加え、現状の光子計数率では、将来の高輝度放射光源をする際、光子計数率が追いつかなくなることが予測されています。

## ❖ 研究の内容

今回、開発チームは、暗視野X線タイコグラフィという新手法を提案し、それを大型放射光施設 SPring-8 における実験で実証しました。図 1 に暗視野X線タイコグラフィの概念図を示します。暗視野X線タイコグラフィでは、試料の上流に微小円柱構造体を配置します。入射X線は試料を照射する前に、円柱構造体を照射します。その際、円柱構造体によってX線が散乱します。この散乱X線が参照光となって、検出器面上で試料のインラインホログラムを形成します。このインラインホログラムは、試料を透過したX線が有している試料の構造情報を含むため、透過X線を測定せずとも、インラインホログラムで補完できます。透過X線強度は大きいため、金属遮蔽板(ビームストップ)によって透過X線を遮ることで、結果として、回折強度パターンのダイナミックレンジが 1000 分の 1 程度に圧縮されます。したがって、目的の空間分解能と感度を達成するために必要とされる回折強度パターンのダイナミックレンジが従来法と比較して 1000 分の 1 程度小さくて済みます。

今回、SPring-8 での実証実験で得られた試料の観察像を図 2 に示します。検出器として光子計数率の小さな CCD 検出器を用いて 30nm の厚さのタンタルで構成されるテスト試料を 11.5nm の空間分解能(ピクセルサイズ 9.1nm)、0.01 ラジアン位の位相分解能で観察することに成功しました。これは、硬X線を用いたX線タイコグラフィとしては世界最高水準の性能です。また、生物試料として磁性細菌<sup>※7</sup>を観察した結果、細菌の外形ならびに内部に含まれる直径 20-70 nm の微小磁石が数珠状に並んだマグネトソームを可視化することにも成功しました。

## ❖ 今後の期待

諸外国では、高価なハイブリッド型ピクセルアレイ検出器を駆使して、今回の結果と同等の空間分解能と感度を達成しています。今回、比較的安価で光子検出率の小さなCCD検出器を用いて、世界最高水準の空間分解能と感度を達成できたことから、本手法の普及・促進が期待できます。また、暗視野X線タイコグラフィの測定をハイブリッド型ピクセルアレイ検出器で行うことで、世界最高の感度と空間分解能の達成が期待されます。

## ❖ 特記事項

本研究成果は、2016年10月13日に英国科学誌「Scientific Reports」(オンライン)に掲載されました。

タイトル: “Dark-field X-ray ptychography: Towards high-resolution imaging of thick and unstained biological specimens”

著者名: Akihiro Suzuki, Kei Shimomura, Makoto Hirose, Nicolas Burdet and Yukio Takahashi

DOI: 10.1038/srep35060

なお、本研究は、JST 先端計測分析技術・機器開発プログラムの開発課題「暗視野 X 線タイコグラフィ法の開発」(チームリーダー: 大阪大学 大学院工学研究科 高橋 幸生 准教授 開発期間: 平成 26 年度～平成 29 年度)の一環として実施されました。引き続き世界最高の感度と分解能の達成を目指して開発を行います。

## ❖ 用語説明

### ※1) ダイナミックレンジ

識別可能な信号の最小値と最大値の比率。

### ※2) X線タイコグラフィ

コヒーレントX線回折イメージング手法の一つ。X線照射領域が重なるように試料を二次元的に走査し、各点からのコヒーレント回折強度パターンを測定する。そして、回折強度パターンに位相回復計算を実行し、試料像を再構成する手法。

### ※3) インラインホログラフィ

物体光と参照光が干渉して形成されるホログラムを解析して、像を得る方法で、物体光と参照光が同一光路上にあるもの。

### ※4) 大型放射光施設 SPring-8

理化学研究所が所有する、兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高輝度の放射光を生み出す共用施設。SPring-8の名前は Super Photon ring-8 GeV に由来する。放射光(シンクロトロン放射光)とは、荷電粒子が磁場の中で曲がる際に放射される光の一種。SPring-8 では、周回する電子群のサイズが小さいことや高い安定性のため、干渉性の優れたX線が得られる。

### ※5) 可干渉性(コヒーレンス)

波と波が重なり合う時、打ち消し合ったり、強め合ったりする性質。

### ※6) ハイブリッド型ピクセル検出器

パルス計数型検出器をアレイ状に並べた二次元検出器。スイスのパウル・シェラー研究所で開発されたピクセルアレイ検出器 PILATUS は暗電流や読み出しノイズによるバックグラウンドが生じず、6 桁以上のX線光子数のダイナミックレンジが得られること、ピクセル毎にX線光子数がデジタル化される為に読み出し時間が3 ミリ秒程度で行えることが特徴である。

### ※7) 磁性細菌

細胞内に単体鉄やフェライトの微小磁石を作り、磁性を持つ細菌の総称。この磁石はマグネトソームと呼ばれる。