

Title	マルチスライス法を用いた高分解能3次元X線タイコグラフィ
Author(s)	下村, 啓
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/72368
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (下 村 啓)	
論文題名	マルチスライス法を用いた高分解能3次元X線タイコグラフィ
<p>論文内容の要旨</p> <p>X線タイコグラフィは、コヒーレントなX線を光軸垂直方向に走査した試料に照射して複数の回折強度パターンを測定し、計算機による位相回復計算を実行することで試料像を取得するイメージング法である。現在、放射光施設で幅広く利用されている走査型・結像型X線顕微鏡の空間分解能は、主に光学素子の作製精度に制限されているが、本手法は計算機が理想的な光学素子として機能することで、現存するX線イメージングの中で最高水準の空間分解能が実現されている。また、試料の走査範囲を広げることで、比較的広い観察視野を確保することができる。X線タイコグラフィはコンピューター断層撮影法と組み合わせることで3次元観察法へ拡張することが可能であるが、他のイメージング法では実現の難しい広い視野と高い空間分解能を両立した非破壊3次元イメージング法として確立するためには、(1)3次元再構成に必要な投影角度数の低減、(2)被写界深度による観察可能な試料厚さの制限の解消が課題である。本論文はこれらの課題の解決するマルチスライスX線タイコグラフィの研究に関してまとめたものであり、その内容を要約すると以下のようになる。</p> <p>第1章では、被写界深度を超えた厚い試料を空間分解能を損なうことなく観察可能な手法としてマルチスライスX線タイコグラフィが実証されてから、現在に至るまでの歴史的背景をまとめた。さらに、本手法の更なる高度化に向けた課題を指摘し、本研究の目的について述べた。</p> <p>第2章では、X線タイコグラフィの原理とマルチスライス法を含むその要素技術についてまとめた。また、X線タイコグラフィを3次元イメージング法へ拡張するコンピューター断層撮影法の原理とその要素技術についてまとめた。</p> <p>第3章では、タイコグラフィ測定の高速化に向け、ピクセルアレイ検出器、部分コヒーレントX線を利用したタイコグラフィ測定光学系を構築し、従来に比べ測定時間をそれぞれ1/26、1/6に短縮した研究結果に関してまとめた。</p> <p>第4章では、プリセッション測定を併用したマルチスライスX線タイコグラフィに関してまとめた。マルチスライスX線タイコグラフィは1方向の測定のみで試料の3次元構造を観察することが可能であるが、一般的なタイコグラフィ測定では最大散乱角が非常に小さいため、光軸分解能は面内分解能に比べて3~4桁程度悪い。そこで、試料を歳差運動の軌道の上に配置し測定を行うプリセッション測定により光軸分解能の向上が可能であることを提案し、プリセッション測定のためのマルチスライスタイコグラフィ位相回復計算法を開発した。また、本手法の有用性を計算機シミュレーションにより検討し、4層構造体を利用した実証実験に成功した。さらに、本手法の応用展開として平板状の多層配線試料の3次元観察にも成功した。</p> <p>第5章では、マルチスライス法と逐次近似法を組み合わせた位相回復計算法の研究に関してまとめた。マルチスライス位相回復計算で得られる複数層の投影像を利用した3次元再構成計算を行うことで、必要な投影角度数を低減できることに着目し、これを実現するための3次元マルチスライス位相回復計算法を開発した。また、計算機シミュレーションにより、本位相回復計算法が投影角度数の不足した条件や制限角度条件において、従来法に比べ信頼性の高い試料像の再構成が可能であることを実証した。さらに、Intel社製CPUのタイコグラフィ観察により、制限角度条件下において被写界深度を超えた厚さの試料の高分解能3次元観察が可能であることを実証した。</p> <p>第6章では、本論文で得られた結果をまとめ、結論ならびに将来展望に関してまとめた。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (下 村 啓)			
	(職)	氏	名
論文審査担当者	主 査	准教授	高橋 幸生
	副 査	教授	遠藤 勝義
	副 査	教授	山内 和人
	副 査	教授	安武 潔
	副 査	教授	山村 和也
	副 査	教授	荻 博次
	副 査	教授	桑原 裕司

論文審査の結果の要旨

本論文は、マルチスライス X 線タイコグラフィを 3 次元ナノ構造イメージング法として確立することを目的として、タイコグラフィ測定の高速化に必要な測定技術開発と 3 次元像再構成のための解析技術開発に関する研究成果をまとめたものである。主な成果を要約すると以下の通りになる。

1. 大型放射光施設 SPring-8 において、高速読み出しが可能なハイブリッド型ピクセルアレイ検出器を搭載した X 線タイコグラフィ装置を開発し、直接撮像型 CCD 検出器を搭載した従来の装置と比べ 26 倍程度の測定の高速化を達成している。
2. 部分コヒーレント光源である放射光源のコヒーレント X 線を高い効率で利用する方法を提案している。この方法を用いて、SPring-8 での実験における最適な仮想光源サイズを波動光学計算により決定している。その計算結果に基づき、SPring-8 でタイコグラフィ測定を行ったところ、従来と比べ 6 倍程度の測定の高速化を達成している。
3. マルチスライス X 線タイコグラフィでは、一つの入射 X 線方向の測定で得られた回折強度パターンから光軸方向に分割された複数層の試料像を再構成できるが、面内方向に比べ光軸方向の空間分解能が 10000 倍程度悪いことが課題となっていた。そこで、試料を歳差運動の軌道上に配置するプリセッション測定法を提案し、試料像再構成法としてプリセッションマルチスライス位相回復計算法を開発している。SPring-8 において、4 層構造のテスト試料の測定を行ったところ、光軸方向の空間分解能が 10 倍程度向上することを実証している。さらに、多層配線試料を観察したところ、1.4 μm 間隔で積層された 2 層を面内分解能 10 nm 程度で観察することに成功している。
4. マルチスライス X 線タイコグラフィにおける光軸方向の空間分解能を更に向上させるために、逐次近似法を組み合わせた新規 3 次元再構成法を提案している。この方法を用いることで、3 次元再構成に必要な測定角度数が不足している条件ならびに測定角度範囲が制限されている条件において、従来法に比べ、アーティファクトの少ない試料像の再構成が可能であることを計算機シミュレーションにより示している。また、制限角度条件下で Intel 社製 CPU の X 線タイコグラフィ測定を SPring-8 において実施し、CPU 内の多層配線回路を光軸分解能 240 nm、面内分解能 12 nm で 3 次元的に観察することに成功している。

以上のように、本研究では、マルチスライス X 線タイコグラフィの技術的な課題を解決し、マルチスライス X 線タイコグラフィを厚い試料の 3 次元ナノ構造イメージング法として確立している。これは、今後、次世代放射光施設において実試料・デバイスの 3 次元観察に関する応用研究を展開するための基盤となるもので、意義深いと思われる。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。