

氏 名 石綿 元

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 1382 号

学位授与の日付 平成 22 年 9 月 30 日

学位授与の要件 複合科学研究科 統計科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 高輝度放射光屈折コントラスト撮影技術における撮影  
情報増大のための基礎理論の構築

論文審査委員 主 査 准教授 瀧澤 由美  
教授 田村 義保  
准教授 三分一 史和  
助手 沖津 康平（東京大学）  
名誉教授 石黒 真木夫

## 博士論文の要旨

近年、屈折コントラスト撮影技術を CT へ拡張した研究及び、マンモグラフィーへの応用を目指した技術開発が行われている。本研究は、その撮影について得られる情報量の増大と被ばく量の低減を目的として行われたものである。

本研究は、高輝度放射光を用いた屈折コントラスト画像形成法によるマンモグラフィーの開発を行っている安藤教授（総研大名誉教授、東京理科大学教授）のプロジェクトの一環として発想された。その屈折コントラスト画像形成は、物体を透過する X 線のある特定の方向への屈折の測定値から逆問題を解くかたちの手続きとして与えられている。本研究では X 線の任意の方向への屈折を測定できるようにし、統計的画像形成に結びつけることを目指す基礎研究として進めてきた。安藤プロジェクトにおける屈折角測定法では生体等の撮影対象を通過して屈折した光を、アナライザーと呼ばれる角度分析のためのシリコン結晶板にあてて回折させ、ロックングカーブによって対象物での屈折を観測していた。そこで、角度情報を得るために重要なロックングカーブに注目し、情報量を増やすことができないかを検討してきた。ロックングカーブは Ewald-Laue 理論によって導かれた平面波の逆空間での強度分布であるため、平面波面内以外の方向の情報は得られない。代わりに別方向への反射波を利用することで角度情報を増やすことを考え、シリコン結晶の物理学的な性質からアナライザーでの反射波を多波へと拡張することを試みてきた。また、X 線の撮影画像をコンピュータシミュレーションによって得るために従来技術で用いられてきた平面波理論である理論ではなく近年多波に拡張されている高木-Taupin 理論に基づく動力学的理論を用いてきた。

本論文は、屈折コントラスト撮影法から得られるデータ（情報）を増大させ、シリコン結晶の物理学的な性質からアナライザーでの反射波を多波へと拡張することにより、従来の光の吸収法や単一波では得られない 2 次元的な波面の揺らぎをも捉えた鮮明な画像を得る方法について述べている。この方法によって医療診断等の精度を上げること及び被ばく量の軽減が期待できる。

本論文は全 11 章 130 頁よりなり構成は次のとおりである。

第 1 章では本研究の社会的背景と必要性、目的、概要について述べ、第 2 章では屈折コントラスト撮影法に対して本研究がどのようにデータ増大のためのアプローチを行ったかを概説する。第 3 章～第 5 章では、新しく提案する多波回折を用いた撮影法を研究開発していく上で必要な基礎的事項、回折理論について述べている。まず第 3 章では、多波回折が成立する理由であるシリコン結晶構造と X 線回折について説明し、第 4 章では、線動力学理論の基礎となっている Ewald-Laue 理論について概説し、本研究が対象とした「ロックングカーブ」について説明している。第 5 章では、近年になって多波回折に拡張され、かつ線形性があり発展性の高い理論として本研究において一貫して注目してきた高木-Taupin 理論について解説する。

第 6 章では、世界最高輝度といわれる Spring-8 において行った多波回折の実験系、方法、実験結果について述べ、多波へ拡張された高木-Taupin 理論について今後の研究の利用に耐えることを明らかにしている。

第 7 章では、前章までの事項をふまえて、新しい多波回折を用いた屈折撮影技術の研究

開発のため、高木 Taupin 理論を回折画像のシミュレーション研究への適用について述べている。第 8 章では、第 7 章を受けてコンピュータシミュレーションによって得られた回折画像について、その応用の可能性を探るためにも本研究によって明らかにすべき必要が生じた事項についての内容を説明し、その過程で明らかになった新しいロッキングカーブの求め方と高木-Taupin 理論の関係について報告している。この 7 章と 8 章が本研究の屈折撮影技術に関する中心部分であり、Acta Crystallographica Section A66 (2010) 484-488. (インパクトファクター2.051) に第 8 章の部分が掲載されている。

第 9 章と第 10 章において本撮影法がどのように活用できるかの研究成果がまとめられている。第 9 章において第 7 章、第 8 章で得られた本研究におけるシミュレーション結果を受けて屈折コントラスト撮影法への応用の可能性および有効性について議論を行い、第 10 章では実際の医療診断における応用に向けて本方法を応用することによって観測対象内の 3 次元屈折率分布を推定するための基礎データが得られることを議論している。第 11 章で本研究のまとめと今後の研究課題について述べている。

## 博士論文の審査結果の要旨

博士論文審査委員会は石綿元氏の学位申請論文の審査を8月11日午後3時より約2時間にわたり行い審議の結果申請論文は学位の要件を満たしていると判断した。その概要は下記の通りである。

### (1) 学位申請論文の概要

本研究は、高輝度放射光を用いた屈折コントラスト画像形成法によるマンモグラフィの開発を行っている安藤教授（総研大名誉教授、東京理科大学教授）のプロジェクトの一環として発想された。その屈折コントラスト画像形成は、物体を透過するX線のある特定の方向への屈折の測定値から逆問題を解くかたちの手続きとして与えられている。本研究ではX線の任意の方向への屈折を測定できるようにし、統計的画像形成に結びつけることを目指す基礎研究として進めてきた。安藤プロジェクトにおける屈折角測定法では生体等の撮影対象を通過して屈折した光を、アナライザーと呼ばれる角度分析のためのシリコン結晶板にあてて回折させ、ロッキングカーブによって対象物での屈折を観測していた。そこで、角度情報を得るために重要なロッキングカーブに注目し、情報量を増やすことができないかを検討してきた。ロッキングカーブはEwald-Laue理論によって導かれた平面波の逆空間での強度分布であるため、平面波面内以外の方向の情報は得られない。代わりに別方向への反射波を利用することで角度情報を増やすことを考え、シリコン結晶の物理学的な性質からアナライザーでの反射波を多波へと拡張することを試みてきた。また、X線の撮影画像をコンピュータシミュレーションによって得るために従来技術で用いられてきた平面波理論である理論ではなく近年多波に拡張されている高木-Taupin理論に基づく動力学的理論を用いてきた。

本論文は、屈折コントラスト撮影法から得られるデータ（情報）を増大させ、シリコン結晶の物理学的な性質からアナライザーでの反射波を多波へと拡張することにより、従来の光の吸収法や単一波では得られない2次元的な波面の揺らぎをも捉えた鮮明な画像を得る方法について述べている。この方法によって医療診断等の精度を上げること及び被ばく量の軽減が期待できる。

本論文は全11章130頁よりなり構成は次のとおりである。

第1章では本研究の社会的背景と必要性、目的、概要について述べ、第2章では屈折コントラスト撮影法に対して本研究がどのようにデータ増大のためのアプローチを行ったかを概説する。第3章～第5章では、新しく提案する多波回折を用いた撮影法を研究開発していく上で必要な基礎的事項、回折理論について述べている。まず第3章では、多波回折が成立する理由であるシリコン結晶構造とX線回折について説明し、第4章では、線動力学理論の基礎となっているEwald-Laue理論について概説し、本研究が対象とした「ロッキングカーブ」について説明している。第5章では、近年になって多波回折に拡張され、かつ線形性があり発展性の高い理論として本研究において一貫して注目してきた高木-Taupin理論について解説する。

第6章では、世界最高輝度といわれるSpring-8において行った多波回折の実験系、方法、実験結果について述べ、多波へ拡張された高木-Taupin理論について今後の研究の利用に

耐えることを明らかにしている。

第7章では、前章までの事項をふまえて、新しい多波回折を用いた屈折撮影技術の研究開発のため、高木 Taupin 理論を回折画像のシミュレーション研究への適用について述べている。第8章では、第7章を受けてコンピュータシミュレーションによって得られた回折画像について、その応用の可能性を探るためにも本研究によって明らかにすべき必要が生じた事項についての内容を説明し、その過程で明らかになった新しいロッキングカーブの求め方と高木-Taupin 理論の関係について報告している。この7章と8章が本研究の屈折撮影技術に関する中心部分であり、Acta Crystallographica Section A66 (2010) 484-488. (インパクトファクター2.051) に第8章の部分が掲載されている。

第9章と第10章において本撮影法がどのように活用できるかの研究成果がまとめられている。第9章において第7章、第8章で得られた本研究におけるシミュレーション結果を受けて屈折コントラスト撮影法への応用の可能性および有効性について議論を行い、第10章では実際の医療診断における応用に向けて本方法を応用することによって観測対象内の3次元屈折率分布を推定するための基礎データが得られることを議論している。第11章で本研究のまとめと今後の研究課題について述べている。

## (2) 学位申請論文の評価

本論文は、屈折コントラスト撮影法に多波回折を応用させることで撮影時に得られるデータを増大させることおよび、被ばく量軽減を目指して行われたものである。

Sping-8 を用いて実際の実験を行っていること、高度な並列コンピュータシミュレーションを駆使して多次元データ処理を行っていること、新しい方法によって従来法に比し鮮明な画像が得られていることにより、本研究は3次元屈折コントラスト推定技術に関する研究として優れていると判断できる。このような新しい撮影法に基づくデータがあつて初めて形成可能な画像も多い。さらに、多波解析で情報を増やすことができることを示せたことは本研究が世界で初めてであり、実験系により制限されるデータ取得の現場において、新しいデータ取得法としても有効で、被ばく量軽減へ道を開いた。

本論文が提案する方法が医療診断のための屈折画像形成の標準手法となる可能性、具体的にはマンモグラフィーよりも信頼性の高い乳がん検診の可能性等を与えると考えられ、将来性は高い。従来のスカラー量計測からのトモグラフィー画像形成を拡張することになるベクトル値方向データからの統計的トモグラフィー画像形成法の研究、並列コンピューティング、多次元データ解析の方法論が医療診断技術の現場に貢献する研究として評価できる。

## (3) 試験結果

複合科学研究科における課程博士の授与に係わる論文審査等の手続き等に関する規程第10条に基づいて口述による試験を実施した。この結果、出願者は博士(学術)の学位を授与するに十分な学識を有するものと判断し、合格と判定した。