

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 山崎裕史

干渉計測やイメージング技術は線源の技術革新によって全く新しい展望が拓かれる。X線領域においては、第3世代放射光施設の出現によって、X線回折顕微鏡、ホログラフィなどX線コヒーレンスを積極的に利用する研究が進められている。位相と振幅がよく定義されたX線を試料に照射することにより、試料に起因する情報を位相に乗せて観察することができる。X線コヒーレンスの本格的な利用に伴って、コヒーレンスを必要以上に劣化させずに試料まで運ぶという、ビームライン技術としての基盤的な光学系の開発が要求されている。しかし、最も標準的な分光素子である結晶に対して、そのコヒーレンス特性は明らかにされていない。これは、次世代放射光のコヒーレンス特性を十分に発揮できる光学素子を設計する上で解決すべき問題である。また、具体的な応用に要求されるX線コヒーレンスを作り出すことも今後のX線光学の課題のひとつである。

本論文では、「動力的回折によるX線コヒーレンスの伝播と解析」と題して、完全結晶の回折におけるX線コヒーレンスの伝播を理論的に明らかにし、また、X線コヒーレンスを実験的に解析する手法を確立している。

第1章「序論」では、重要なX線光学素子である分光結晶に関して、コヒーレンスに対する機能の理解には波動光学的な扱いが必要であることを述べている。X線コヒーレンスの特徴を可視光や粒子線と比較して議論した後、本論文の目的と構成を述べている。

第2章「コヒーレンス」では、波束の概念を用いて相互コヒーレンスを定式化し、ビームの相互コヒーレンスが観測点で測定可能な波数ベクトルの分布によって記述できることを示している。一方、可視光領域における標準的なコヒーレンスの取り扱いでは、X線の相互コヒーレンスを記述するのに不十分であることも述べている。

第3章「完全結晶によるX線波束の回折」では、X線コヒーレンスを厳密に扱うための準備として、時間的にも空間的にも構造をもつ一般的な入射波に対する完全結晶の回折理論が構築されている。回折の基礎方程式として時間微分項を含むように拡張したTakagi-Taupin方程式を採用し、この方程式の厳密解を解析的に求めている。

第4章「完全結晶の回折におけるコヒーレンスの伝播」では、Braggケースの回折におけるX線相互コヒーレンス関数の変化が定式化されている。回折によって波動場が回折ベクトル方向に変化するのに応じて、コヒーレンスの時間成分と空間成分が混ざり合うことが示されている。回折ベクトル方向のコヒーレンス長の変化についてのシミュレーションでは、結晶内への波動場の浸入がコヒーレンスに与える影響を無視できないことが示されている。

第5章「X線波面分割干渉計による相互コヒーレンスの解析」では、X線コヒーレンスを実験的に調べる方法のひとつとして、不等間隔ギャップをもつ変形Bonse-Hart干渉計を用いる方法が開発されている。まず、有限なコヒーレンスをもつX線が入射するときの干渉計の性質が、第3章の動力的回折理論を用いて記述されている。その結果、干渉計の回

折ベクトル方向のコヒーレンス長を干渉縞の可視度から数値的に解析できることが示された。実験では異なるコヒーレンス長をもつX線を用意して干渉縞を記録し、波面分割干渉計の機能を確認している。

第6章「ロッキングカーブ測定によるX線相互コヒーレンス関数の解析」では、X線コヒーレンスのより簡便な解析方法として、完全結晶を使って測定されるロッキングカーブから相互コヒーレンス関数を抽出する方法が開発されている。第3章の結果を用いて、測定されるロッキングカーブのプロファイルが入射波の相互コヒーレンス関数を用いて定式化された。逆問題として、測定されたロッキングカーブから回折ベクトル方向の相互コヒーレンス関数を抽出できることが示されている。完全結晶の複数の回折面を用いることにより、相互コヒーレンス関数を時間遅延と空間的隔たりの関数として解析することが可能になった。この方法をシリコン2結晶分光器で単色化したアンジュレータ放射光に適用し、相互コヒーレンス関数の時間・空間構造を明らかにしている。

第7章「将来展望」では、本研究の延長上にある課題として、結晶を使用したX線コヒーレンスの制御、光源評価へのX線回折の応用、動力学的回折理論の拡張について議論されている。

第8章「総括」として以上の研究の要約がまとめられている。

本研究は、X線の相互コヒーレンスをはじめて定量的に扱ったものである。X線コヒーレンスに対する結晶光学素子の機能が理論的に明らかにされ、かつ、相互コヒーレンスを実験的に解析する手法が確立された。これにより、X線コヒーレンスを制御、加工する目的で光学素子を設計することが可能になった。本論文の成果は、次世代放射光の基盤的光学系の開発を通して、あらゆるX線位相利用計測の進展に寄与するものである。

さらに、X線コヒーレンスを厳密に扱うための準備として、時間的にも空間的にも構造をもつ一般的な入射波束に対する完全結晶の回折理論を構築した。従来の動力学的回折理論では完全にコヒーレントな入射波動場のみを対象としていたが、本研究により動力学的回折理論はその適用範囲を大幅に拡大したことになる。

よって、本論文は博士(科学)の学位請求論文として合格と認められる。