

審査の結果の要旨

論文題目：

波面計測に基づく反射型軟X線集光システムの開発

氏 名 竹尾 陽子

本論文は、波面計測に基づく反射型軟 X 線集光システムの開発について行った一連の研究をまとめたものである。

第1章では、本研究の既存研究に対する位置づけ及び方針決めを行っている。まず軟 X 線集光の重要性を述べた後に、既存の集光システムを俯瞰し、大開口中空型回転楕円ミラーがその中でも優れた特質を持つことを示している。その上で、回転楕円ミラーの作製・計測プロセスの開発過程と集光実験の結果を紹介し、今後の発展には波面誤差計測による光学系の適切な評価が不可欠であるとしている。X 線領域の各種波面計測法の中で、回転楕円ミラーが作り出す高 NA 輪帯集光ビームと相性が良いタイコグラフィを用いた波面計測法を選択し、それによる回転楕円ミラー光学系を適切に評価し、そこから得た知見を活用して軟 X 線集光技術をさらに発展させることを本研究全体の目的に据えている。

第2章では、回転楕円ミラーの集光性能が、誤差要因によってどれほど悪化するのかを数値シミュレーションにより定量的に見積もっている。まず誤差の存在しない理想的な光学系の性能を評価し、300 eV における FWHM が 30 nm 以下であり、Fresnel zone plate の代替として十二分に機能することを示している。13 種の誤差とその影響を比較し、波面誤差の空間波長によって応答が大きく異なることを明らかにし、HPD100 nm 以下という目標値の実現のためには、作製プロセス・計測プロセス・設置調整すべてにおいて改善が必要であることを示している。特に既存手法で計測が不可能な項目として、設置角度誤差、直径誤差、テーパ角誤差、中心軸のたわみの4項目を挙げ、これらを波面計測の対象としている。

第3章では、可視光レーザーを光源として用いて、タイコグラフィ波面計測を回転楕円ミラー光学系に適用している。まず、タイコグラフィによって回復された波動場から設置位置誤差及び形状誤差を抽出するための解析手順を確立し、簡易光学系を立ち上げ、全長 120 mm の回転楕円ミラーを用いた波面計測を実施し、十分に高い測定精度を確認している。例えば、長周期形状誤差の測定精度は RMS 8 nm である。

第4章では、SPring-8 の BL25SU-A において、300 eV から 1000 eV の軟 X 線を用いて回転楕円ミラーの集光性能を評価している。まずタイコグラフィを用いて波面誤差を計測し、現状の回転楕円ミラー内面が RMS 10 nm の形状誤差を持つこと、異なる波長を用いて確認

した形状計測精度は RMS 1 nm であることを確認している。全長 40 mm のミラーを用いて、400 eV で達成した集光サイズは約 200 nm × 200 nm である。

第 5 章では、前述の BL25SU-A において空間コヒーレンス度の実測を行っている。Fresnel ミラー光学系を適用し、軟 X 線の広がりを持つビームの計測に有用であることを示している。そして測定結果を検証するために光源の coherent mode decomposition (CMD) データを用いてシミュレータを開発し一致を確認している。

第 6 章では、回転楕円ミラー光学系の 2 種の課題、設置角度誤差に対する許容範囲の狭さとミラー中央部をビームがすり抜けることに起因する効率の低さを解決するために、既存の二段集光システムを発展させた Wolter 型二段集光システムを提案している。設計式を構築し、実際に BL25SU-A において集光実験を実施し得られた集光サイズは 140 nm × 190 nm である。空間コヒーレンスがタイコグラフィ観察の像質に与える影響が示され、CMD を用いたシミュレーションと傾向の一致は理論計算、実験結果の両方が正しかったことの証明である。

第 7 章では、鉛直方向と水平方向で異なる焦点距離を設定することが可能な新しいミラー設計手法を提案している。中空型、平板型一回反射、平板型二回反射の 3 種類の設計方式を示し、それぞれの性能を数値シミュレーションにより予測している。平板型一回反射ミラーにおいて、既存のトロイダルミラー及び astigmatic off-axis mirror に対する軟 X 線集光における優位性は明らかである。

第 8 章では、第 7 章で提案した非点収差制御ミラーを活用し、SPring-8-II を想定したビームライン設計を行い、その性能を CMD シミュレーションに基づいて計算し、本博士論文で開発した研究成果の有用性を示している。

一連の成果は、波面計測に基づき先進的な軟 X 線集光システムを実現させ、さらに、CMD シミュレーションや新しいミラー形状設計手法は、将来の放射光ビームライン開発に不可欠である。

以上のように本研究は X 線光学分野と精密工学分野の発展に大いに貢献するものである。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。