



Title	回折限界条件を満たすX線アダプティブ集光光学系の開発
Author(s)	後藤, 拓実
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/69553
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

博士学位論文

回折限界条件を満たす
X線アダプティブ集光光学系の開発

後藤 拓実

2018年1月

大阪大学 大学院工学研究科
精密科学・応用物理学専攻

論文目次

第1章 序論	
1.1 研究の背景と目的	5
1.2 本論文の構成	6
第2章 二段開口数可変光学系	
2.1 ビームサイズ可変光学系の設計コンセプト	7
2.2 二段開口数可変光学系の構造	7
2.3 二段開口数可変光学系のビームサイズ変更の原理	9
2.4 結言	11
第3章 高精度圧電素子駆動型形状可変ミラー	
3.1 圧電素子駆動型形状可変ミラー	12
3.1.1 圧電効果と圧電材料について	12
3.1.2 圧電素子によるミラー基板の変形	15
3.1.3 開発した高精度圧電素子駆動型形状可変ミラー	16
3.1.4 形状可変ミラーの変形精度	18
3.1.4.1 形状可変ミラーホルダー	18
3.1.4.2 形状可変ミラーの変形試験	19
3.2 二段開口数可変光学系における形状可変ミラーの形状創成プロセス	21
3.3 結言	23
第4章 形状可変ミラーの時間安定性	
4.1 形状可変ミラーのドリフト現象	24
4.2 印加電圧の変化に対する形状可変ミラードリフトの評価	25
4.3 超過電圧印加法による形状可変ミラードリフト抑制法の提案	28
4.3.1 超過電圧印加時の形状可変ミラードリフトの計測実験	28
4.3.2 超過電圧値を変更した場合の形状可変ミラードリフトの計測実験	30
4.4 超過電圧印加時間とドリフト収束時の分極量変化に成り立つ関係性の考察	32
4.4.1 指数関数近似を用いた圧電素子ドリフトパラメータについての考察	32
4.4.2 超過電圧印加時間とドリフト収束時の分極量変化の関係性	35
4.4.2.1 τ_3 の時定数を持つ項の分極の総変化量のみについて検討した場合	35
4.4.2.2 全ての項の分極の総変化量について検討した場合	36
4.5 結言	38

第 5 章 高精度 at-wavelength 形状計測システムの開発	
5.1 At-wavelength 形状計測法	39
5.2 波動光学シミュレーションを用いた	
X 線ペンシルビームスキャン法の計測精度の検討	41
5.3 高性能 X 線ビームモニターの開発	44
5.4 X 線ビームモニターの性能評価試験	46
5.5 X 線ペンシルビームスキャン法による	
at-wavelength 計測システムの計測精度評価実験	47
5.6 結言	50
第 6 章 二段開口数可変光学系による X 線ビームの形成	
6.1 二枚の形状可変ミラーによる二次元集光実験	51
6.1.1 二次元集光光学系の装置構成	51
6.1.2 X 線ペンシルビームスキャン法による形状可変ミラーの形状修正	52
6.1.3 集光ビームプロファイルの評価	53
6.2 二枚の形状可変ミラーによる二段一次元集光実験	54
6.2.1 二段一次元集光光学系の装置構成	54
6.2.2 二段光学系における X 線ペンシルビームスキャン法	55
6.2.3 X 線ペンシルビームスキャン法による形状可変ミラーの形状修正	56
6.2.4 集光ビームプロファイルの評価	56
6.3 二段開口数可変光学系による X 線ビームの形成	57
6.3.1 二段開口数可変光学系の装置構成	57
6.3.2 二段開口数可変光学系による可変集光実験	58
6.3.2.1 可変集光実験	58
6.3.2.2 ペンシルビームスキャン法による形状誤差の修正結果	60
6.3.2.3 集光ビームプロファイルの評価	62
6.3.2.4 形状可変ミラーの時間安定性評価	64
6.3.3 コリメート光の形成実験	65
6.3.3.1 コリメート光形成の後段ミラーの形状調整法	65
6.3.3.2 実験結果	66
6.4 結言	68
第 7 章 機械曲げ機構と長尺圧電素子駆動型ミラーを組み合わせたハイブリット X 線アダプ ティブ集光システムの開発	
7.1 形状可変ミラー長尺化の必要性	69
7.2 圧電素子駆動型形状可変ミラーの長尺化についての検討	69

7.3 ハイブリット型変形機構をもつ形状可変ミラー	72
7.4 長尺圧電素子駆動型ミラーの作製	73
7.4.1 長尺圧電素子駆動型ミラーの構造についての検討	73
7.4.2 長尺圧電駆動型ミラーの電極配置についての検討	75
7.5 機械曲げ機構の開発	78
7.5.1 ミラーベント部	78
7.5.2 重力たわみ補正機構	79
7.5.3 ミラークランプ部の構造	81
7.5.3.1 ミラーのねじれが集光性能に与える影響	81
7.5.3.2 ミラークランプ部の構造	84
7.5.4 長尺圧電素子駆動型ミラーとの接点部の構造	85
7.6 ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの動作試験	86
7.6.1 重力補正機構の動作試験	86
7.6.2 ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの変形試験	86
7.7 結言	88
第 8 章 ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの集光性能の評価	
8.1 一次元可変集光実験	89
8.1.1 一次元集光光学系の装置構成	89
8.1.2 X 線ペンシルビームスキャン法による形状修正結果	91
8.1.3 集光ビームプロファイルと X 線反射像の評価	92
8.2 二次元集光実験	94
8.2.1 二次元集光光学系の装置構成	94
8.2.2 X 線ペンシルビームスキャン法による各ミラーの形状修正結果	96
8.2.3 二次元集光ビームプロファイルの評価	98
8.3 結言	100
第 9 章 総括	101
参考文献	
謝辞	

1.序論

1.1 研究の背景と目的

1895年に Wilhelm Conrad Röntgen により X 線が発見され、その高い透過性を利用した人体の投影写真は、世界に大きな反響を与えた。1913年に William David Coolidge により発明された Coolidge 管の発明により X 線は実用化されるようになり、X 線と物質の相互作用や各種分析技術などの研究が確立されていった。そして 1970 年代に入り、シンクロトロン放射光を用いた X 線の利用技術が確立され、SPring-8 に代表されるアンジュレータが組み込まれた第三世代放射光施設では、実験室の X 線源の約 10^{12} 倍の輝度をもつ X 線が利用できるようになったことで X 線による分析・顕微技術は大きな進歩をとげ、現在の科学技術の発展には欠かせないものになっている。この優れた X 線光源を有効利用するために欠かすことのできない技術が X 線集光技術である。超精密加工技術で作製された、回折[1-3]、屈折[4]、反射[5-8]などの光の現象を利用した X 線集光光学素子が開発され、これらと第三世代放射光源を組み合わせることで非常に高感度かつ高分解能な X 線顕微法が実現している[9,10]。

現在、X 線光源は新たなブレークスルーを迎えつつある。世界中の第三世代放射光施設は稼働から 20 年以上たっており、施設の老朽化にともない改良・発展を行う計画が進められている[11-13]。その特徴のひとつとして、光源性能が向上することによって、従来の光源に比べ輝度が 10~100 倍向上することが見込まれている[14]。輝度の向上に伴い測定のスループットの向上期待できることから、一度の実験期間中に、一つの試料を複数の方法を用いて分析・観察を行う X 線による複合分析の技術の利用が期待される。また、アメリカ、日本、韓国、ドイツで X 線自由電子レーザー施設 (X-ray Free Electron Lasers ; XFELs) [15,16]が稼働したことにより、第三世代放射光施設の 10^9 倍のピーク輝度かつほぼ完全な空間コヒーレント光であるというきわめて優れた性質をもつ X 線が利用可能になったことから、さまざまな分野で新たな知見をもたらすことが期待される[17]。このような X 線光源の発展に応じて X 線光学素子も次世代光源に最適なものへと発展していく必要がある。X 線分析は、実験方法や試料のサイズによって求められる集光径やワーキングディスタンスなどの光学パラメータが異なるため、それぞれの実験系に最適な集光光学素子とその都度用意する必要がある。そのため、既存の X 線集光光学素子による光学系を用いて、前述のような X 線複合分析を行うことは、時間効率の観点からほぼ不可能に近い。一方、XFEL では、Coherent Diffraction Imaging (CDI) [18]を用いた X 線イメージングの研究が行われているが、その光源性能を最大限に生かした有意性のある成果は、残念ながら非常に少ない。この理由は、既存の光学系では、試料に最適なサイズの集光ビームを照明できていない点にある。これは、集光ビームサイズが最適でない場合、照射光子密度の低下や、明視野領域の拡大といった問題を引き起こし、高感度イメージングには欠かすことのできない低次から高次に至る回折光の均等な検出を妨げるためである。また、XFEL では、構造上多数のビームラインを設計す

ることが難しいため、集光サイズの異なる光学系を多数配置することも難しい。このような観点から、あらゆる実験に応じて、任意に光学パラメータを変更することができる多機能性を有したアダプティブ光学系の重要性が近年高まってきている。

X線領域のアダプティブ集光光学素子として、ミラー基板に対して力を加えることで、ミラー形状を変形させる形状可変ミラーの開発が行われている。現在放射光施設で利用されている形状可変ミラーは、機械曲げミラー[19-21]と圧電素子駆動型ミラー[22-25]の2種類に分けられる。しかし、機械曲げミラーに関しては、その構造上ミラー形状を目標形状の3次関数までの近似形状に変形することしかできないため[26]、汎用性に欠ける。圧電駆動型ミラーは、ミラー基板に接着された圧電素子に電圧を加えることで変形を行うものである。複数の圧電素子を接着する、もしくは、圧電素子上の電極配置を工夫することで、任意の非球面形状へと変形することが可能であるが、現状で回折限界を満たす精度で形状を制御できている例は報告されていない。

本論文は、高精度で形状を制御することが可能な形状可変ミラーを開発し、開口数を変更することで、回折限界条件を維持しながらアダプティブにビームサイズを変更できることのできる、二段の Kirkpatrick-Baez (KB) ミラー[27]により構成された開口数可変光学系の開発を目標とし行った成果についてまとめたものである。

1.2 本論文の構成

本論文は、ビームサイズを任意で変更することのできる開口数可変光学系の光学系の開発と、XFELへの応用のために必要な長尺かつ高精度変形が可能な形状可変ミラーの開発についてまとめたものである。

第2章では、二段開口数可変光学系の解説とビームサイズ可変の原理について述べる。

第3章では、二段開口数可変光学系を構成する光学素子である圧電素子一体型形状可変ミラーの変形原理および開発した形状可変ミラーの概要を述べる。

第4章では、開発した形状可変ミラーの時間安定性の向上に関する研究について述べる。

第5章では、最終的な変形精度を決定する高精度 at-wavelength 形状計測システムの開発のについて述べる。

第6章では、開発した形状可変ミラーを用いて二段階開口数可変光学系を構築し行った X線の集光実験およびコリメート光形成実験の結果について述べる。

第7章では、長尺形状可変ミラーの開発を目指し、新たなハイブリット X線アダプティブ集光システムの設計検討を行った結果について述べる。

第8章では、開発したハイブリット X線アダプティブ集光システムを用いて X線の集光実験を行った結果について述べる。

第9章では、本論文の総括を行っている。

2.二段開口数可変光学系

本章では、開発を行う X 線ビームサイズ可変な光学系である二段開口数可変光学系についてコンセプトおよびその作動原理について述べる。

2.1 ビームサイズ可変光学系の設計コンセプト

一般的に試料を測定する際には、全体像からナノスケールの局所的な観察・分析が求められる。そのため、ビームサイズ可変光学系にはサンプルサイズと同程度～sub 100 nm の集光ビームサイズの制御を行えることが望ましい。そして、X 線吸収分光法など X 線のエネルギーを変更する実験系にも対応可能であることが望ましい。ビームサイズの変更には、スリットなどで光量を制限する方法が考えられるが、この場合は開口数とビームサイズが回折限界の関係を満たさない。また、デフォーカスビームを利用する場合もビームサイズの変更時に試料位置が変わってしまうため、分析ごとに試料位置の再調整が必要となり、非常に非効率的である。

そこで、上記の観点をふまえた上で、開発を行うビームサイズ可変光学系の設計コンセプトを以下に示す。

1. 100 nm ~ 100 μm オーダーで集光ビームサイズが可変。
2. X 線のエネルギーを変更した場合も影響を受けない (色収差の無い光学系)。
3. 常に回折限界サイズのビームを供給する。
4. ビームサイズは常に光学系の開口数の値により決定される。
5. ビームサイズ変更時に、光量 (フラックス) の損失がない。
6. ビームサイズ変更時に試料位置 (焦点位置) が移動しない。

この 6 点に基づき光学系の設計を行った。

2.2 二段開口数可変光学系の構造

前項で述べたような性能を満たす光学系として、一次元に二枚ずつ、合計で四枚の形状可変ミラーにより構成された二段 KB ミラー光学系を提案する[28,29]。図 2.1 と図 2.2 に光学系の概念図および概略図を示す。我々が提案する光学系は、まず、光源から発せられた X 線を形状可変ミラー1により中間焦点に一度集光を行う。この際、形状可変ミラー1の形状は光源と中間焦点を焦点とした楕円形状をとる。その後、発散した X 線を形状可変ミラー2により最終焦点位置に再度集光する。この際、形状可変ミラー2の形状は、中間焦点と最終焦点を焦点にもつ楕円形状に変形させる (図 2.2 (a))。形状可変ミラー1と形状可変ミラー2の間にある中間焦点の位置を変化させると形状可変ミラー2の開口数 (Numerical Aperture : N.A.) が変化する仕組みとなっており、回折理論に従って波動光学的にビームサイズを変化させることができる。ビームサイズ変更の理論については事項にて詳しく説明する。本光学系は、ビームサイズ変更の際に形状可変ミラー1の開口数は変わらないため、常に光量のロ

スなく動作を行うことが可能である。また、中間焦点を焦点とする放物面へと形状可変ミラー2を変形させることで、平行ビームの形成が可能であるため(図 2.2 (b)), 試料位置では最大で形状可変ミラー2の開口と同サイズの大きさのビームを供給することができる。

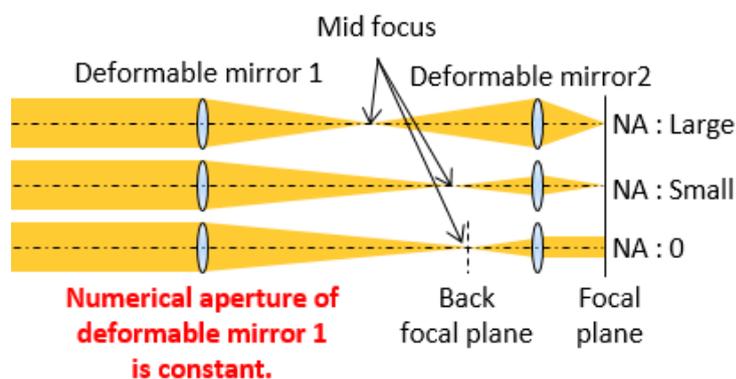
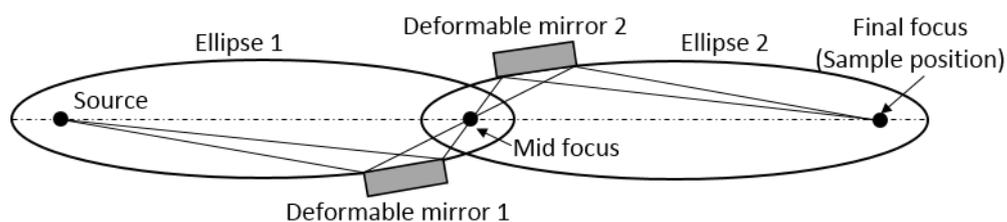
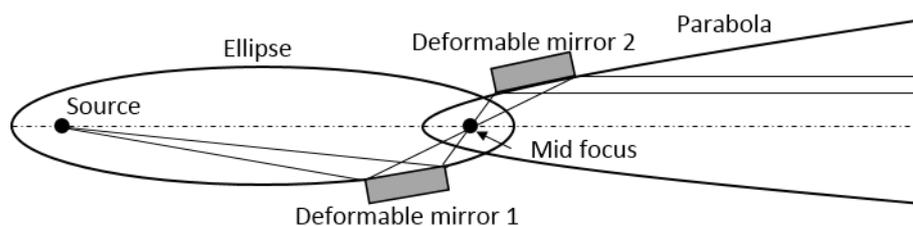


図 2.1 二段開口数可変光学系の概念図



(a) 集光ビーム形成時



(b) 平行ビーム形成時

図 2.2 二段開口数可変光学系の概略図

また本光学系は、形状可変ミラーにより構成された光学系であるため、アライメント誤差などによって生じる波面の乱れ等もリアルタイムで観測し修正することができるため、常に回折限界を維持しながら、ビームサイズを変更することが可能となる。

2.3 二段開口数可変光学系のビームサイズ変更の原理

本項では、本光学系のビームサイズ変更の原理について述べる。X線の波長 λ 、ミラーの開口数を $N.A.$ としたとき、ミラー光学系における回折限界集光ビームサイズ w (Full width at Half Maximum : FWHM) は式(2.1)にて与えられる[30].

$$w = 0.44 \frac{\lambda}{N.A.} \quad (2.1)$$

ほとんどの放射光実験では、X線のエネルギーを選択して行うため、X線の波長は実験ごとに固定である。つまり、回折限界を維持しながら集光径を制御するためには、開口数 $N.A.$ を変更することが望ましい。ミラーの開口数 $N.A.$ は、ミラーの開口サイズを a 、ミラーの焦点距離 F_b としたとき式(2.2)となる。

$$N.A. \approx \frac{a}{2F_b} \quad (2.2)$$

斜入射ミラー光学系においてミラーの開口サイズ a は、ミラー中心での斜入射角を θ 、X線を反射するミラーの有効領域の長さを l としたとき式(2.3)となる。

$$a = l \sin \theta \quad (2.3)$$

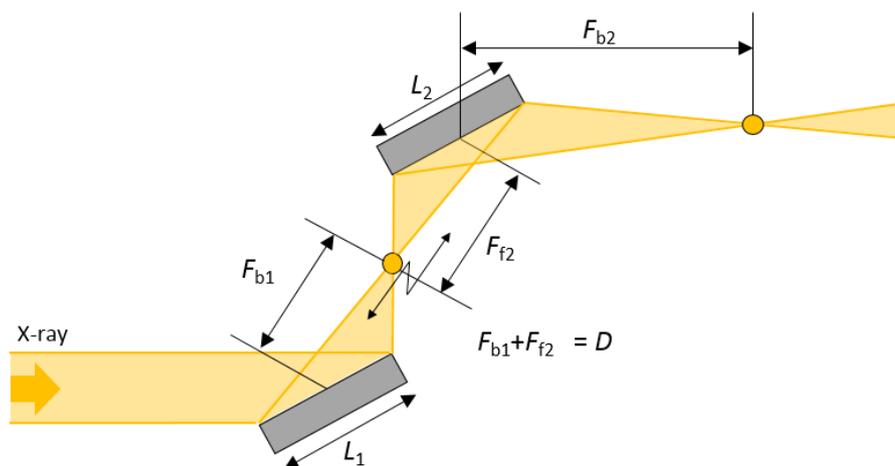
よって、光学系の開口数 $N.A.$ は最終的に式(2.4)で書き表せる。

$$N.A. = \frac{l \sin \theta}{2F_b} \quad (2.4)$$

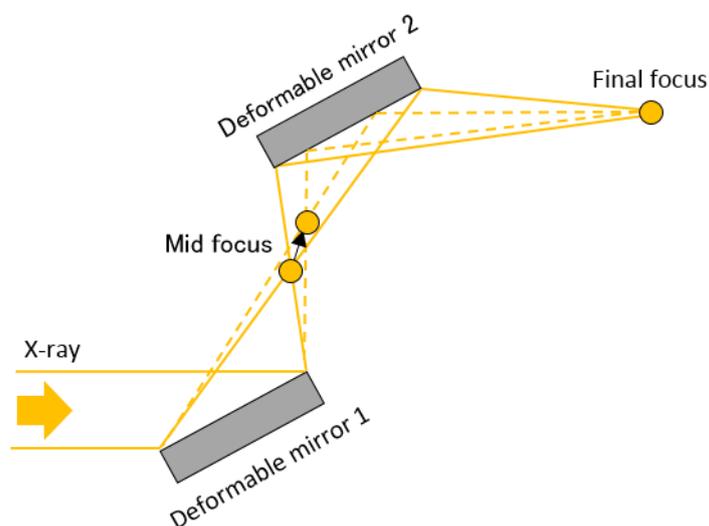
本光学系のコンセプトは、集光径を変更した場合にも試料位置は不動であるため、入射角 θ や焦点距離 F_b は固定である。またスリットやピンホールなどで有効領域を制限した場合でも開口サイズは変化可能だが、光量のロスが生じ、ビーム強度が低下してしまう。これらの課題を解決するために、本光学系は次のような手順で開口数の変更を行う。図 2.3(a)に二段開口数可変光学系の各パラメータを示す。形状可変ミラー1の開口数を $N.A._1$ 、開口サイズを a 、後ろ焦点距離を F_{b1} 、形状可変ミラー2の前焦点距離を F_{f2} 、後ろ焦点距離を F_{b2} 、2つのミラー間の距離を D としたとき、光学系全体の開口数を $N.A._{total}$ は式(2.5)で表せる。

$$N.A._{total} = N.A._1 \frac{F_{f2}}{F_{b2}} = \frac{aF_{f2}}{2F_{b1}F_{b2}} = \frac{aF_{f2}}{2(D - F_{f2})F_{b2}} \quad (2.5)$$

図 2.3(b)のように中間焦点位置を形状可変ミラー2に近づけた場合を考えると、 F_{f2} の値が小さくなるため、式(2.5)にしたがって光学系全体の $N.A._{total}$ の値が小さくなり、集光径を増大させることができる。このような、二段の開口数可変システムをとることで、集光径を変えた場合でも本光学系は、形状可変ミラー1の開口サイズすなわち反射する光量は変わらず、また試料位置である最終焦点の位置を移動させることもない。



(a) 二段開口数可変光学系の光学パラメータ



(b) 形状可変ミラー2の開口数変更時の概念図

図 2.3 二段開口数可変光学系の開口数変化の仕組み

2.4 結言

本章では，本研究で開発する二段開口数可変光学系の概要について述べた．

- (1) 開発するビームサイズ可変光学系の設計コンセプトを放射光実験に求められる機能を満たすために①100 nm ~ 100 μm オーダーのビームサイズ可変を達成する．②X線のエネルギーを変更した場合も影響を受けない（色収差の無い光学系）．③常に回折限界サイズのビームを供給する．④ビームサイズは常に光学系の開口数の値により決定される．⑤ビームサイズ変更時に，光量（フラックス）の損失がない．⑥ビームサイズ変更時に試料位置（焦点位置）が移動しない．の6点として設計を行った．
- (2) ビームサイズ可変光学系として，4枚の形状可変ミラーから構成される二段開口数可変光学系として提案し，ビームサイズ可変の原理を述べた．

3.高精度圧電素子駆動型形状可変ミラー

二段開口数可変光学系では，回折限界を達成可能な精度で任意の非球面形状へと高精度に変形を行うことが可能な形状可変ミラーが必要となる．現在，放射光施設では，機械曲げ機構により駆動する形状可変ミラー，圧電素子駆動の形状可変ミラーが開発されてきたが，自由に形状を変形させかつ高精度変形が可能なミラーは現状報告されていない．本章では，二段階開口数可変光学系を構成する光学素子として開発を行った高精度圧電素子駆動型ミラーについて説明する．

3.1 圧電素子駆動型形状可変ミラー

二段開口数可変光学系構築のためには，回折限界集光を達成可能な精度で自由にミラー形状の変形が行える形状可変ミラーが求められる．そこで，我々は，ナノメートル精度での動作が可能な圧電素子を駆動源とする形状可変ミラーの開発を試みた．本項では独自開発した圧電素子駆動型形状可変ミラーについての構造および変形原理について説明する．

3.1.1 圧電効果と圧電材料について

圧電素子に応力が加わるとその生じたひずみに応じて，電圧が発生する．これを圧電効果といい，圧力センサー，加速度計などに応用されている．一方，圧電素子に電圧を印加した際には印加した電圧の大きさに応じてひずみが発生する．これを逆圧電効果といい，この現象を利用した振動子や圧電アクチュエータは様々な用途で用いられている．圧電アクチュエータは，小型かつ即応性があり，変位をナノメートルスケールの高分解能で制御できるといった利点がある．圧電材料としては焼結体のセラミック材がよく用いられ，中でもチタン酸ジルコン酸鉛 (lead zirconate titanate, PZT, 組成式： $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$)はその大きな圧電特性からアクチュエータとしてよく利用されている[31,32]．また近年では，圧電単結晶体の研究も盛んに行われており，マグネシウムニオブ酸・チタン酸鉛固溶体 (magnesium niobate-lead titanate, PMN-PT, 組成式： $(1-x) [\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]-x[\text{PbTiO}_3]$)は PZT の 6 倍程度の圧電定数を持つものも報告されている [33,34]．

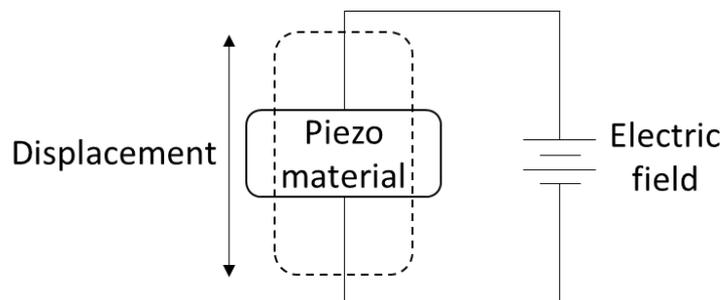


図 3.1 逆圧電効果

3.1.2 逆圧電効果により発生する応力の算出[32,35,36]

圧電素子に応力 T を加えると、式(3.1)の応力—ひずみ関係式に従ってひずみ S が発生する。

$$S = sT \quad (3.1)$$

s: 弾性コンプライアンス

このとき、圧電効果が発生するため、加えた応力 T に応じて電気変位 D が発生する。

$$D = dT \quad (3.2)$$

d: 圧電定数

また、圧電素子に電界 E を与えた場合は、式(3.3)にしたがって電気変位が生じる。

$$D = \varepsilon E \quad (3.3)$$

ε : 誘電率

このときに逆圧電効果によって発生するひずみ S は式(3.4)で表せる。

$$S = d^t E \quad (3.4)$$

(添え字 t は転地行列を表している。)

以上の関係をまとめたものを圧電方程式といい、式(3.5)および式(3.6)で表される。

$$S = sT + d^t E \quad (3.5)$$

$$D = dT + \varepsilon E \quad (3.6)$$

これらの圧電方程式を電界と応力の関係式に書き直すと、

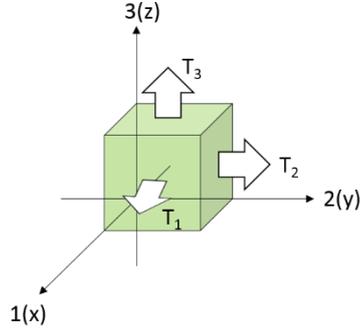
$$T = s^{-1}S - s^{-1}d^t E \quad (3.7)$$

式(3.7)となる。ここで弾性コンプライアンスの逆行列は弾性定数 Y であるので、

$$T = YS - Yd^t E \quad (3.8)$$

式(3.8)に書き直すことができる。このように、圧電素子に発生する応力は、圧電素子の弾性定数、ひずみ、圧電定数、与えた電界によって記述することができる。図 3.2 に示されるように分極方向に対して 3 軸を与えた座標系をとる場合、行列式を用いて式(3.9)を表すと、

(a)



(b)

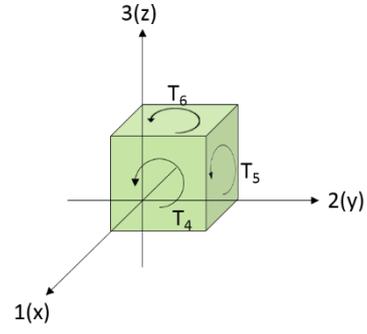


図 3.2 圧電素子の応力の成分 (a) 縦方向, (b) せん断方向

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

$$- \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

(2.12)式の行列成分の一部は、圧電素子の1軸, 2軸に関する対象性から、0または同値とみなせるので、(2.13)式のように簡略化することができる。

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

$$- \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

3.1.2. 圧電素子によるミラー基板の変形[36]

図 3.3 のようにミラー基板に圧電素子を接着して構成される構造の形状可変ミラーは、圧電素子の分極方向に対して電圧を印加することで、屈曲変位型の圧電アクチュエータとして動作する。3(z)軸に対して電圧を印加するため、 $E_1 = E_2 = 0$ を式(3.10)に代入することと同意である。また、圧電素子はミラー基板に対して接着・固定されており、変形量は極微小であることから変位 S はほぼ 0 であるとみなせる。よって圧電素子によってミラー基板に曲げモーメントを発生させる応力 T_1 は式(3.11)となる。

$$T_1 = -(Y_{11}d_{31} + Y_{12}d_{31} + Y_{13}d_{33})E_3 \quad (3.11)$$

さらに圧電素子のポアソン比を ν としたとき式(3.12)となり、応力は弾性率、圧電定数、ポアソン比、電界で表せることがわかる。

$$T_1 = -(Y_{11}d_{31} - \nu Y_{11}d_{31} - \nu Y_{33}d_{33})E_3 \quad (3.12)$$

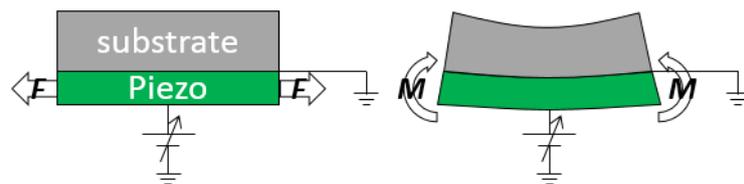


図 3.3 圧電素子によるミラー基板の変形

次に、形状可変ミラーを目標形状へと変形させる場合について考える。

形状可変ミラーは、前述したように、楕円や放物面などの非球面形状へと変形させる。非球面形状は、場所ごとに曲率が異なる。そこで目標形状の曲率 $\frac{1}{R(x)}$ は、目標形状を $y(x)$ としたとき、目標形状の二階微分をとることでもとめることができる。(式(3.13))

$$\frac{1}{R(x)} = \frac{d^2y(x)}{dx^2} \quad (3.13)$$

材料力学における梁の曲げ理論において、曲げモーメント分布 $M(x)$ と曲率の関係は、ミラー基板の弾性率を Y_m 、断面二次モーメントを I_m としたとき式(3.14)で表すことができる。

$$M(x) = Y_m \times I_m \times \frac{1}{R(x)} \quad (3.14)$$

次に、ミラー基板のある場所で曲げモーメント M を発生させるために必要な力を F とすると、ミラーの基板の厚みを t_m 、圧電素子の厚みを t_p としたとき式(3.15)で表せる。

$$M = F \frac{(t_m + t_p)}{2} \quad (3.15)$$

F は圧電素子によって発生する力であるので、圧電素子の断面積を S 、幅を w 、印加電圧を V とすると、式(3.16)で表せる。

$$\begin{aligned} F = T_1 \times S &= (Y_{11}d_{31} - \nu Y_{11}d_{31} - \nu Y_{33}d_{33}) \times \frac{V}{t_p} \times S \\ &= (Y_{11}d_{31} - \nu Y_{11}d_{31} - \nu Y_{33}d_{33}) \times V \times w \end{aligned} \quad (3.16)$$

ここで、式(3.13)～(3.16)をまとめると曲率 $\frac{1}{R}$ と電圧の関係式は式(3.17)のようになり、目標形状へと変形するために必要な電圧を求めることができる。(Y_p は圧電素子の弾性率)

$$\frac{1}{R} = \frac{Y_p d_{31} w_p \frac{(t_m + t_p)}{2}}{Y_m I_m} V \quad (3.17)$$

このように、圧電素子に印加する電圧を制御することによって、ミラー上の曲率を制御することができる。二段開口数光学系においては、任意の非球面形状へとミラーを変形させる必要がある。非球面形状は、場所ごとに曲率が異なるため、開発する形状可変ミラーは、ミラー上に複数の曲率を作り出せるような構造が必要となる。

3.1.3. 開発した高精度圧電素子駆動型形状可変ミラー

圧電素子は電圧を印加することで膨張・収縮するため、複数の電極を取り付け、これらに加える電圧を制御することで、自由曲面への変形を実現する。このような形状可変ミラーの設計には、圧電素子一枚一枚が分離している圧電素子分離型と一枚の圧電素子上に複数電極を配置した圧電素子一体型のそれぞれが考えられる。圧電素子分離型は圧電素子一枚一枚のサイズは比較的小さなものとなり、大型のミラーにも適用が可能であるが、圧電素子間の隙間に短周期の無視できない **junction effect** と呼ばれる形状誤差が発生することが知られている。X線の集光を行う際にミラー上に短周期の形状誤差が存在する場合、集光結果に悪影響を及ぼす為[37]、微小集光を行うミラーへの適用は困難だと考えられる。圧電素子一体型の構造は作製可能な圧電素子の大きさに制限があることからミラーの大型化は困難であるが、電極間に発生する短周期の形状誤差は圧電素子分離型に比べて小さいという特徴を持つ[38]。この為、本研究で用いる形状可変ミラーは圧電素子一体型の構造のものを使用し

た。ミラーの構造として、基板の片面のみに圧電素子を接着したモノモルフ構造と基板の両面に圧電素子を接着したバイモルフ構造が存在するが、今回熱的な安定性に優れ、かつ大変形が可能であるバイモルフ構造のミラーを用いた。開発した形状可変ミラーの概略図を図 3.4 に示す。X 線反射面を基板中央部として、圧電素子を基板表裏に 2 枚ずつ、対称になるように接着した構造とした。X 線の反射面となる面にはマグネトロンスパッタ法によって 100 nm 厚の Pt 薄膜がコーティングされている。圧電素子上には Cr 電極をマグネトロンスパッタ法によって作製した。図 3.5 に形状可変ミラーの写真を示す。また、ミラーの各種パラメータは表 3.1 の通りである。基板裏面に接着された圧電素子は全面に電極が設けられており、一様な曲率を作り出し目標の非球面形状の二次関数成分の形状創成を担当する。基板表面接着された圧電素子には、18 個の Cr 電極を設けており、印加する電圧を制御することで曲率の分布を作り出し、残りの短周期の形状創成を担当し、非球面形状へと変形させる。また X 線反射面は、超精密加工法の一つである Elastic Emission Machining (EEM)[39]を用いて、ミラー基板上にもともと存在する短周期の形状誤差（三次関数より高次の多項式成分）を取り除くことで変形の精度を向上させている。

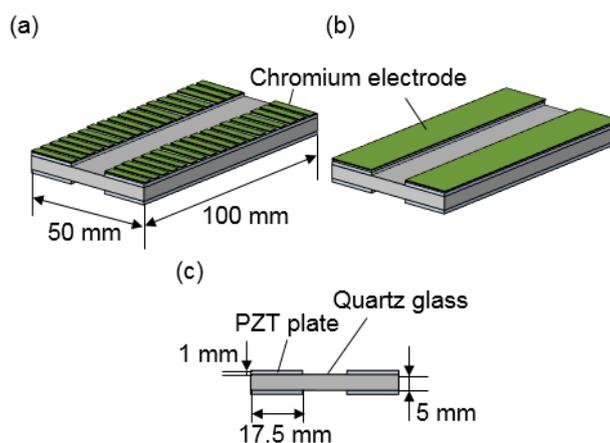


図 3.4 形状可変ミラーの概略図 (a) 表面, (b)裏面, (c)側面

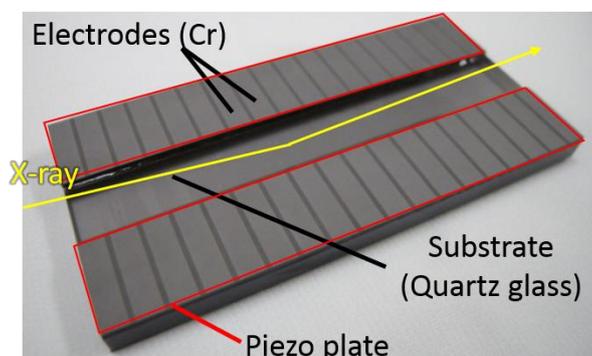


図 3.5 圧電素子駆動型高精度形状可変ミラー

表 3.1 形状可変ミラーのパラメータ

Mirror substrate	
Material	Quartz glass
Length [mm]	100
Width [mm]	50
Thickness [mm]	5
Young's modulus [GPa]	90
Piezo plate	
Material	Lead zirconate titanate (PZT)
Length [mm]	100
Width [mm]	17.5
Thickness [mm]	1
Young's modulus [GPa]	80
Piezoelectric coefficient [m/V]	-135×10^{-12}
Electrode	
Material	Chromium
Length [mm]	4.8
Width [mm]	17.5
Gap length of each electrode [mm]	0.8

3.1.4. 形状可変ミラーの変形精度

3.1.4.1. 形状可変ミラーホルダー[40]

形状可変ミラー保持および電圧印加を行うために図 3.6 に示すミラーホルダーを開発した。形状可変ミラーに電圧を印加するためには、表面の圧電素子上 36 点、裏面で 2 点の電極に接点をとり電圧を印加する必要がある。しかし、その際にミラーとの接触で生じる圧力によって基板に変形が生じてはならない。そこで、図 3.7 に示すばねを利用した電圧印加ユニットを作製した。圧電素子との電氣的な接点となる各ばねのばね定数は 3 mN/m と非常に低い値に設定してあり、すべてのばねが 1 mm 押し込まれた状態でも、ミラー基板に自重たわみ以上の負荷がかからないようになっている。また、形状可変ミラーは、垂直方向、水平方向はともにベッセル点で支持されている。水平方向は転倒を防止するために、形状可変ミラーの反対側からばねを押しつけることで支えられている。



図 3.6 形状可変ミラーホルダー

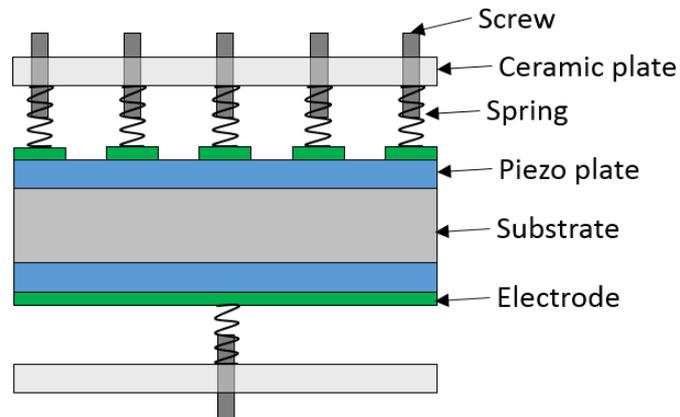


図 3.7 電圧印加ユニット

3.1.4.2 形状可変ミラーの変形試験

形状可変ミラーの変形試験は、可視光干渉計を用いた形状フィードバックシステムを用いて行った。形状可変ミラーの変形制御には、フィゾー型干渉計(Zygo VeriFire XPZ)による形状フィードバックシステムを用いた。図 3.8 に形状フィードバックシステムの構成を示す。

使用したフィゾー型干渉計はφ12インチの参照面を有しており、100 mm 長の形状可変ミラーの表面形状を一度に測定することが可能である。またこのフィゾー型干渉計は RS-232C を介したシリアル通信によって、パソコンから制御を行えるようになっている。パソコンからは電圧印加ユニットに対する制御も行っており、D/A コンバータ PCI カード(National Instruments PCI-6723)および出力用端子台(National Instruments BNC2110, BNC-2115)を介して、最大で±10 V の電圧出力が可能となっている。この出力した電圧を、さらにバイポーラ高圧電源ユニット(関西電子 KE0.25-0.5BP)を用いて増幅した後に圧電素子に印加している。

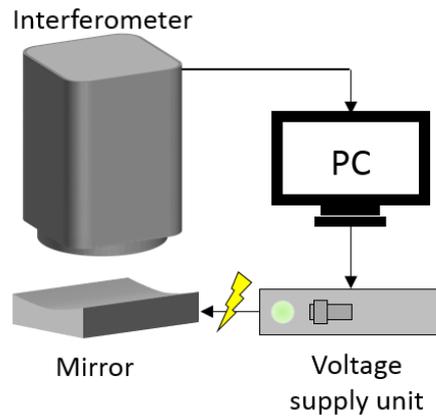


図 3.8 形状フィードバックシステム

変形試験時のミラーの目標形状は表 3.2 のパラメータを光学系の条件を満たす深さ約 4 μm の楕円形状とした。図 3.9 に目標変形形状と形状誤差を示す。形状誤差は rms 0.98 nm, PV (Peak-to-Valley) 2.5nm であった。この結果から本ミラーは数 nm オーダーで形状を制御できることが示された。

表 3.2 目標楕円形状のパラメータ

a*	25.6 m
b*	23.23 mm
Glazing incidence angle**	4 mrad
Focal length***	620 mm
*Ellipse $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$	
** At centre of mirror.	
***Distance from centre of mirror.	

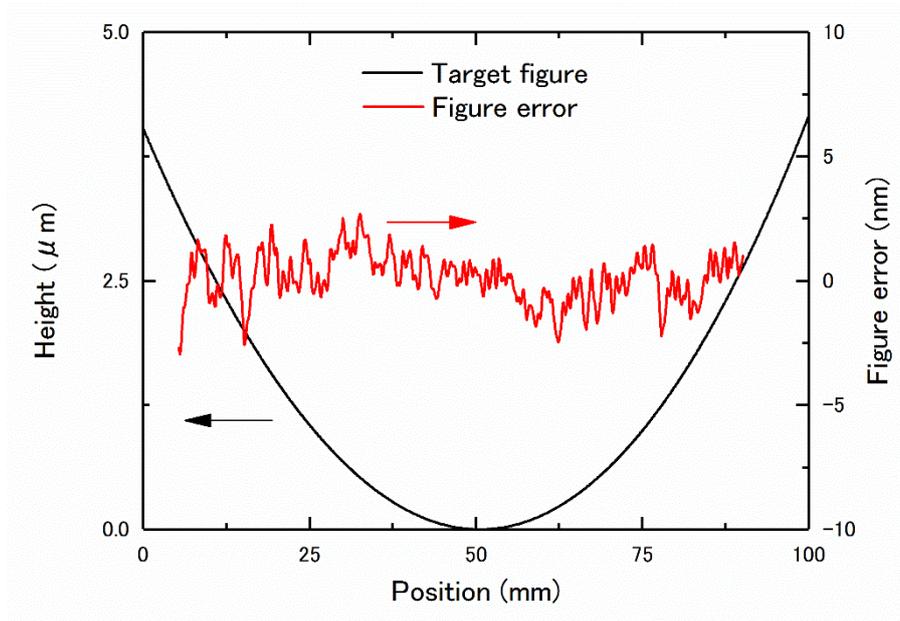


図 3.9 変形試験時の目標楕円形状と変形完了時の形状誤差

3.2 二段開口数可変光学系における形状可変ミラーの形状創成プロセス

X 線集光光学系において回折限界集光を達成するためには、レイリーの 4 分の 1 波長則 (式(3.18)) [30]に基づく、入射角 4 mrad、入射 X 線のエネルギー 10 keV (波長 1.24 Å) の場合、許容される形状誤差高さは 3.9 nm となる。

$$h = \frac{\lambda}{8 \sin \theta} \quad (3.18)$$

h : 許容形状誤差高さ, λ : 入射 X 線の波長, θ : 斜入射角

そのため、形状可変ミラーの形状制御は非常に高い精度で行う必要がある。しかし、二段開口数可変光学系は、四枚の形状可変ミラーで構成される光学系のため、前項で示したような可視光干渉計を用いた形状フィードバックシステムを構築するためには、放射光施設ビームライン中の集光装置に 4 台の干渉計を組み込まなければならず、これは、費用や装置構成の点で現実的ではない。また、干渉計で精度よく計測することのできる形状深さにも限界があるため、他の形状計測法を採用することが望ましい。そこで、我々は、次に示す二段階の形状創成プロセスを考案した。

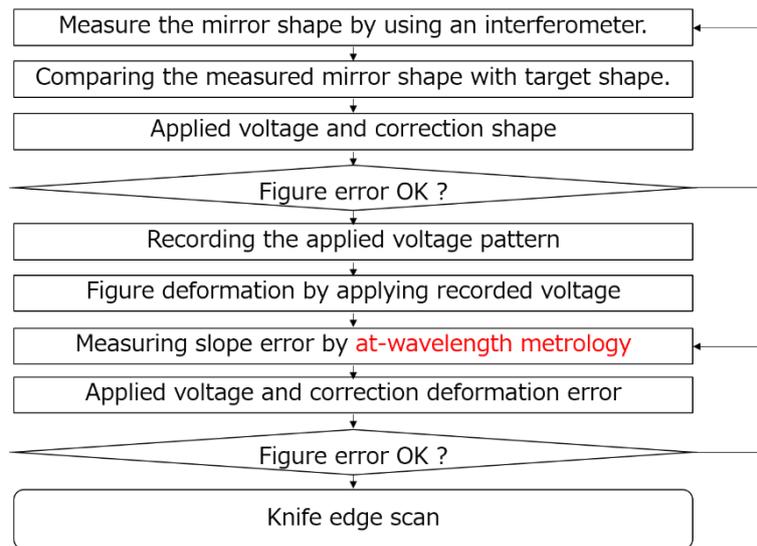


図 3.10 二段開口数可変光学系における形状可変ミラーの制御プロセス

図 3.10 に形状創成プロセスのフローチャートを示す。まず、オフライン (大学の実験室中) で干渉計により、ミラー形状を計測しながら変形を行い目標の形状へと変形させる。この際、印加電圧をそのつど修正し、目標形状へと変形させたときの印加した電圧パターンを記録する。その後、オンライン (放射光施設のビームライン中) での形状制御に移る。オンラインの形状制御では、はじめにオフラインで取得した電圧パターンを印加し、ミラーを変形させる。この際に生じる変形誤差を、X 線自身をプローブとする at-wavelength 形状計測法により計測する。この計測結果に基づき、ミラーの形状誤差を修正することでミラーを回折限界集光が可能な形状へと変形させる。この形状創成プロセスにおいて、最終的に変形精度を決定するものは、at-wavelength 計測法の計測精度となるため、高精度に形状計測が可能なシステムの構築を行う必要がある。At-wavelength 計測システムの開発については、第 5 章で詳述する。

3.3 結言

本章では、二段開口数可変光学系を構成する光学素子として開発した圧電素子駆動型ミラーについて述べた。

- (1) 開発した圧電素子駆動型形状可変ミラーの構造および駆動原理について述べた。
- (2) 形状可変ミラーの精密制御のために開発したミラーホルダーとその構造について述べた。
- (3) 可視光干渉計を用いた形状フィードバックシステムによる変形試験の結果、ミラー形状を $PV2.5\text{ nm}$ の精度で目標の楕円形状を創成することに成功した。
- (4) 二段開口数可変光学系において、回折限界条件を満たす精度で4枚の形状可変ミラーを制御するために考案した二段階の形状創成プロセスについて示した。

4.形状可変ミラーの時間安定性

前章で示したように開発した形状可変ミラーは、回折限界条件で集光を達成する性能があることを示した。しかし、一般的に圧電素子は一定の電界を印加した際に徐々に誘起されるひずみ量が増加し続ける現象が発生する。本研究で用いる形状可変ミラーにおいては、時間経過とともに形状が変形し続けるため、照射ビームの形状が徐々に崩れてしまい、回折限界集光径が維持できなくなることを意味する。そのため、長時間の実験や測定を行う際に徐々にビーム形状が変化してしまい、X線の照射位置のずれやプローブ光サイズの増大といった問題がおこり、分解能悪化の原因となる。本章では、圧電素子のドリフト現象と形状可変ミラーを制御する際のその問題点について述べる。そして、定電圧印加時のミラー形状のドリフト測定実験を行った後、その考察結果から考案した電圧印加パターンによるドリフト抑制法について述べる。

4.1 形状可変ミラーのドリフト現象

圧電素子は即応性、高分解能駆動が可能であるが、電圧を印加した際に、時間経過とともに変位が変化し続けるドリフト現象が生じる。形状可変ミラー裏面の電極に 500V 印加した際の形状をフィゾー型干渉計により計測した結果を図 4.1 に示す。

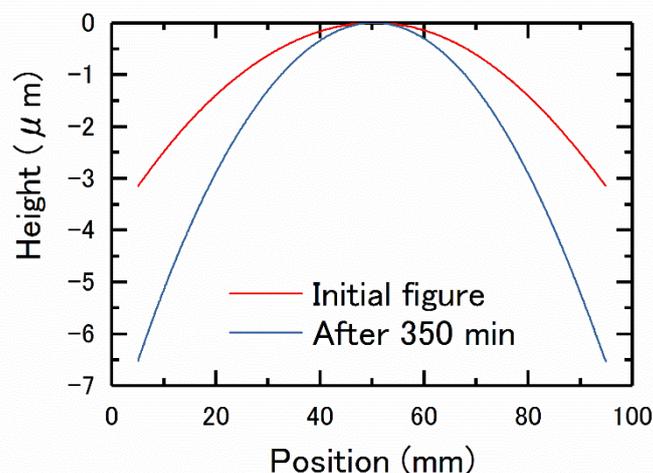


図 4.1 500 V 印加時の形状可変ミラーの形状ドリフト

500 V の電圧を印加した場合、350 分の間に PV 値で $3.4\mu\text{m}$ の二次関数形状の変形が生じていることが分かる。図 4.2 は、500 V の電圧印加後の形状からの変形量の PV 値をドリフト量と定義し、縦軸に、ドリフト量、横軸に電圧印加からの経過時間プロットしたものである。

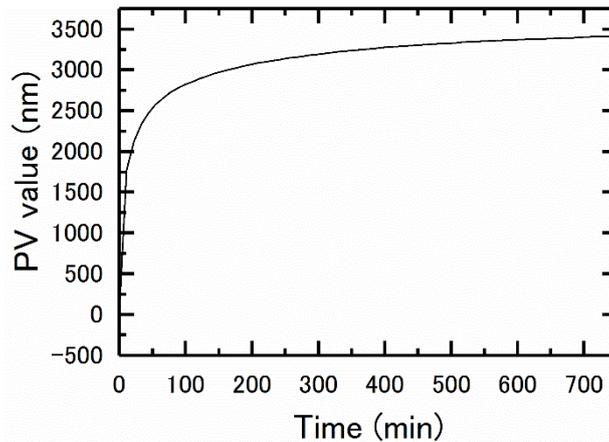


図 4.2 500 V 印加時の形状可変ミラーの形状ドリフト量

この実験結果から、電圧印加から 700 分経過後もミラー形状は変形し続けていることが分かる。X 線ミラーは、X 線の波長と同程度の形状精度が求められたため、このようなドリフトが発生する状況では回折限界集光を維持することは不可能である。

一般的に、圧電素子のドリフト現象への対処法は、変位のフィードバックシステムの構築がある。ドリフトによる変位を補正するフィードバックシステムとしては、静電容量型変位計やひずみゲージなどの変位センサーを用いる方法が一般的であるが、硬 X 線集光光学素子に必要とされる nm オーダーの精度で計測を行うのは難しい。また可視光干渉計によりミラー形状を計測することも考えられるが、前章で述べた理由から干渉計によるフィードバックシステムの構築は難しい。

そこで、本研究では変位フィードバックシステムを用いることなく、ミラー形状の時間安定性向上させる手法の開発を行った。

4.2 印加電圧の変化に対する形状可変ミラードリフトの評価

形状可変ミラーのドリフトの挙動を調査するため、印加電圧を変化した際のドリフト量を評価した。実験方法を以下に示す。形状可変ミラーのドリフト量の測定は、まず、ある電圧を印加後ドリフトが収束した状態を確認する。このときに印加していた電圧値を初期電圧と定義する。その後目標電圧を印加する、ミラー形状は、形状可変ミラーの裏側の電極にのみ電圧を印加し、二次関数形状に変化させた。表面の電極は接地させ、チャージアップによるミラー形状の影響を与えないようにしている。ミラー形状はフィゾー干渉計によって電圧印加直後から 10 分おきに精密計測した。この際、電圧印加直後の形状から 10 分おきに計測される形状の差分をとることで、電圧印加直後からのミラー形状のドリフト量を得た。得られた 10 min おきのミラー形状の変化量を二次関数で近似したものを $y(x)$ とすると、3 章で述べた梁の曲げ理論から $y(x)$ の二回微分は、曲率 $\frac{1}{R}$ 、曲げモーメントを与えるのに必要な力 F 、ミラー基板の厚さの半分で表される腕の長さ L 、ミラーのヤング率 E_m 、ミラーの

断面二次モーメント I_m で表せ,

$$\frac{d^2y(x)}{dx^2} = \frac{1}{R} = \frac{F \times L}{E_m \times I_m} \quad (4.1)$$

となる. また, F は応力 σ と圧電素子の断面積 S_p の積で表せるので,

$$\frac{F \times L}{E_m \times I_m} = \frac{\sigma \times S_p \times L}{E_m \times I_m} \quad (4.2)$$

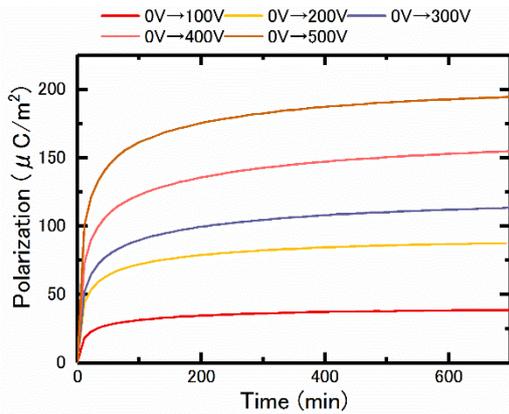
となる. ここで, 圧電定数 d_{31} は応力と分極 P により

$$d_{31} = \frac{P}{\sigma} \quad (4.3)$$

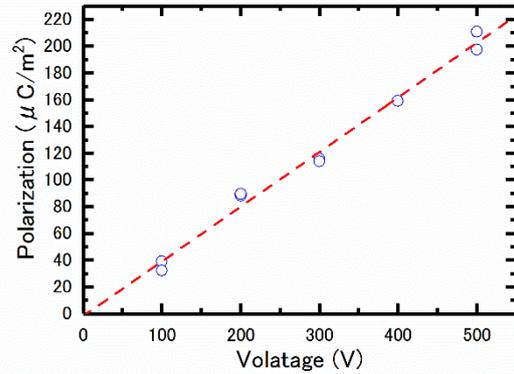
と表せる[31]. これらの式から,

$$P = d_{31} \times \sigma = d_{31} \times \frac{E_m \times I_m}{S_p \times L} \times \frac{d^2y(x)}{dx^2} \quad (4.4)$$

となり, ミラー形状の変化量から, 圧電素子の分極の変化量を算出することができる. 本実験では分極の変化量でドリフトを評価することで, ミラーの計測長などが変わった場合でも比較できるようにした. 初期電圧値を 0V とし, そこから正方向の電圧変化を与えた場合のドリフト量の測定結果を図 4.3 (a)に示す.



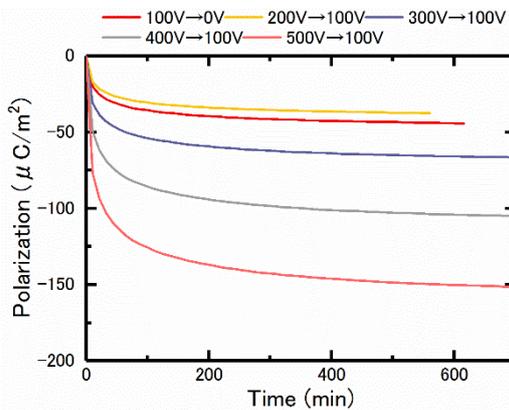
(a) 測定された分極の時間変化,



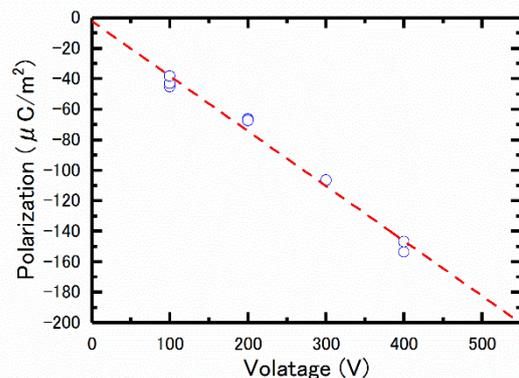
(b) 印加電圧の変化量に対するドリフト収束時の分極の変化量

図 4.3 正方向の電圧変化を与えた場合のドリフト測定結果

横軸は電圧印加後からの経過時間を、ミラー裏側の圧電素子 2 枚の分極の総変化量を縦軸に示している。実験結果からドリフトの収束時間は印加電圧の大きさに関係なくほぼ同じであるという結果が得られた。また、目標電圧でドリフトが収束したときの分極の総変化量は図 4.3 (b)に示すように電圧の変化量に比例していることが分かる。次に負方向に印加電圧を変化させた場合の計測結果を図 4.4 に示す。



(a) 測定された分極の時間変化



(b) 印加電圧の変化量に対するドリフト収束時の分極の総変化量

図 4.4 負方向の電圧変化を与えた場合のドリフト測定結果

負方向に印加電圧を変化させた場合に関しても同様にドリフトの収束時間は印加電圧の大きさに左右されずほぼ同じであった。また、図 4.4(b)に示すように目標電圧でドリフトが

収束したときの分極の総変化量も同様に電圧変化量に比例している。これらの実験から、我々の開発した形状可変ミラーに発生するドリフトは、ドリフトの収束時間は印加した電圧の大きさに依存せず、ドリフト量は変化させた電圧の大きさに比例するということが示された。

4.3 超過電圧印加法による形状可変ミラードリフト抑制法の提案

前述の実験結果から、形状可変ミラーのドリフトは、①印加電圧を変化させた方向と同じ向きに生じる、②変化させた印加電圧の大きさに分極量の総ドリフト量は比例するという2つの特性があるといえる。そこで、あらかじめ目標電圧でドリフトが収束するまでに必要な分極変化を、目標電圧より大きな電圧(超過電圧)印加し与えておくことで、目標電圧を印加した際にはドリフトが起きない状態を作り出せるのではないかと考えた。このような圧電素子の電圧印加パターンによる圧電素子の変位制御は類似の先行研究[41]でも示されており、フィードバック機構を構築することが困難な我々の形状可変ミラーの制御法にとっても、ドリフト抑制のための有効な手段であると考えた。

4.3.1 超過電圧印加時の形状可変ミラードリフトの計測実験

初期電圧を0V、目標電圧を100V、超過電圧を500Vとしたときのドリフト計測実験を行った。ドリフトの計測は目標電圧を印加した瞬間より開始している。目標電圧超過電圧の印加時間を40秒、400秒、10分、20分、25分、60分と変更して実験を行った結果について、図4.5に示す。

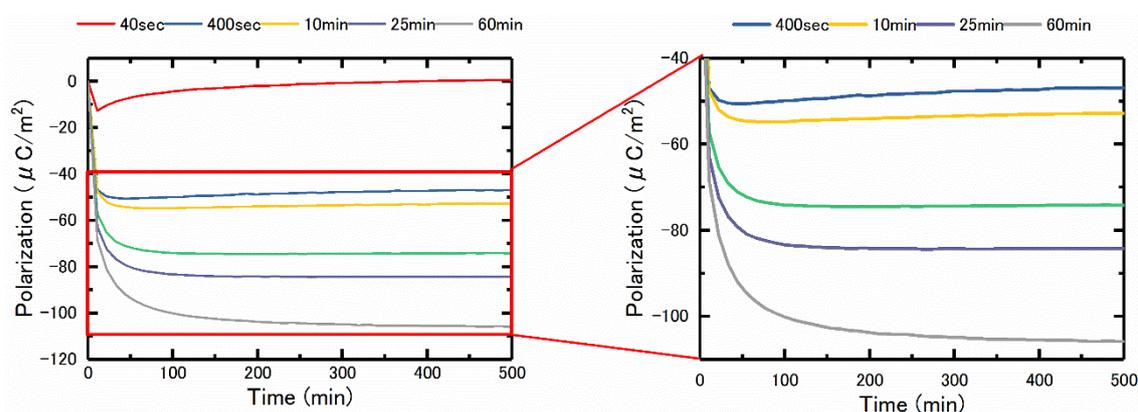


図 4.5 超過電圧の印加時間を変更した場合の分極の変化量

実験結果から、超過電圧500Vを25分印加した時には、目標電圧印加後100分ほどで分極の時間変化が起きなくなったことが分かる。しかし、超過電圧の印加時間が25分よりも短い場合では、プラス方向のドリフトが存在しており、逆に超過電圧の印加時間が25分よりも長い場合では、マイナス方向のドリフトが存在している。

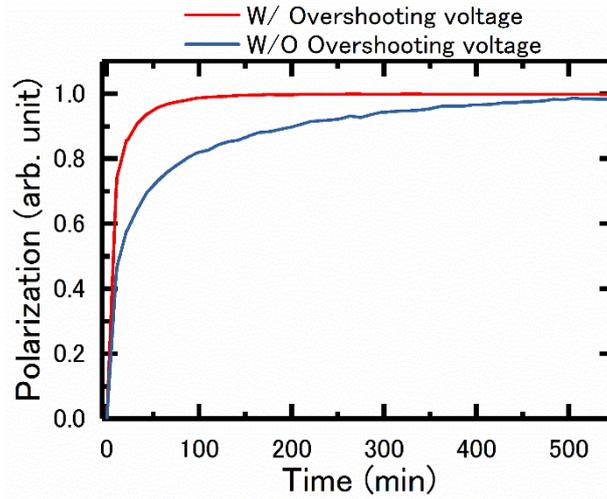


図 4.6 超過電圧を印加した場合の形状可変ミラードリフトの比較

図 4.6 は、目標電圧 100 V を印加した場合に計測されたドリフトと超過電圧 500 V を 25 分印加した後、目標電圧 100 V を印加した場合に計測されたドリフトを比較したものである。各計測結果は測定された分極ドリフトの最大値で規格化されている。超過電圧を印加することで、電圧印加から 100 分経過以降はドリフトが抑制できていることが分かる。このことから、超過電圧を適切な時間印加した場合のみ、長期的な形状可変ミラーのドリフトを完全に抑制できていることが分かる。

4.3.2 超過電圧値を変更した場合の形状可変ミラードリフトの計測実験

次に超過電圧の大きさを変更した場合についての調査を行った。初期電圧を 0V，目標電圧を 100V，超過電圧を 300V，400V，500V と変えた場合のドリフト計測結果を図 4.7 に示す。

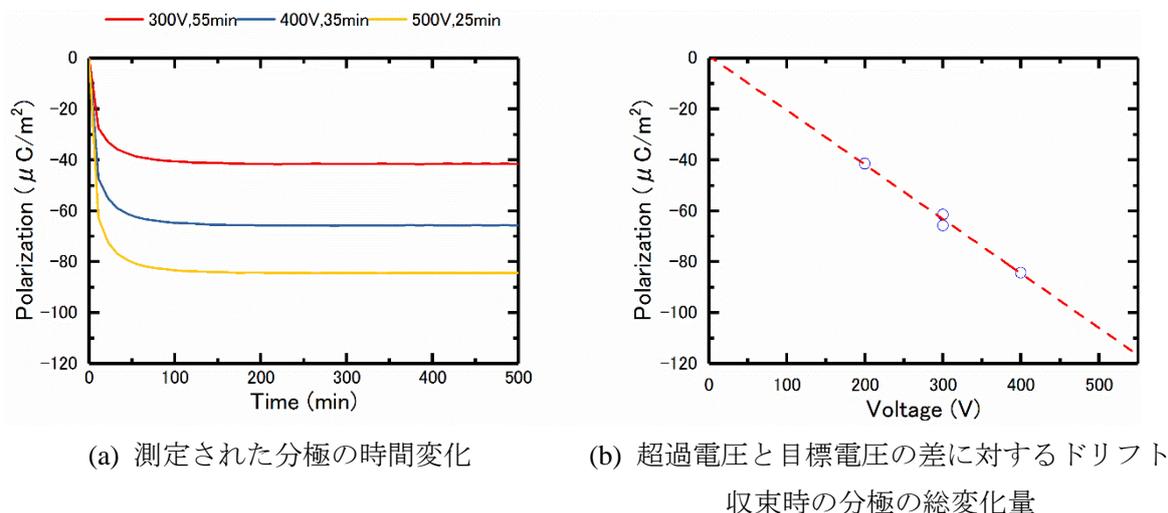
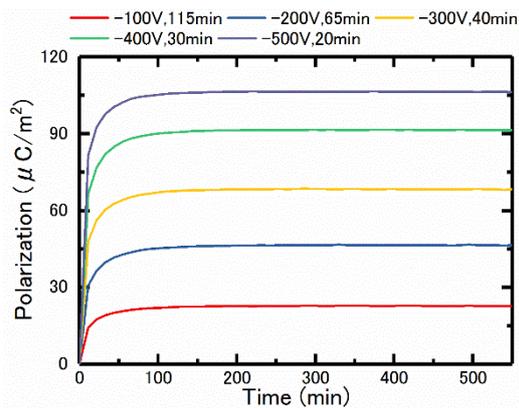


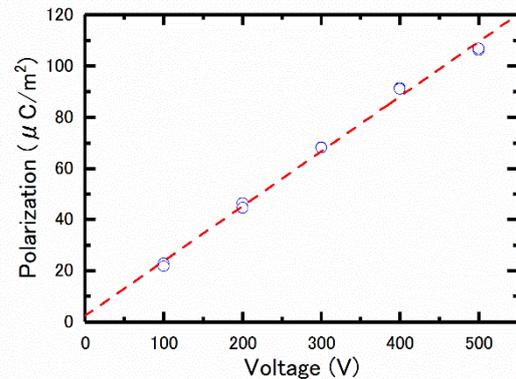
図 4.7 超過電圧変更時の分極の時間変化 (正方向への電圧変化)

500 V を 25 分，400 V を 35 分，300 V を 55 分印加した時，100 分以降の分極の変化が起きていないことから，超過電圧の値を変更した場合でも適切な時間印加することで長期的なドリフトを抑制できていることが分かる。また，図 4.7 (b) はドリフトが収束したときの分極の変化量を示しており，これは超過電圧から目標電圧に変えたときの電圧変化量 (超過電圧 - 目標電圧) に比例していた。次に目標電圧を負方向へと変化させる場合のドリフト抑制も超過電圧を印加することで同様に行うことができるか調査した。

初期電圧として 100 V，目標電圧として 0 V を印加する際，超過電圧として -100 V，-200 V，-300 V，-400 V，-500 V をそれぞれ印加し，長期的なドリフトを完全に抑制できた結果を図 4.8 に示す。



(a) 測定された分極の時間変化



(b) 超過電圧と目標電圧の差に対するドリフト
収束時の分極の総変化量

図 4.8 超過電圧を印加した場合の形状可変ミラードリフトの比較 (負方向への電圧変化)

この結果から、負方向の電圧変化をさせる場合でも、-500 V は 20 分、-400 V は 30 分、-300 V は 40 分、-200 V は 65 分、-100 V は 115 分という、それぞれの超過電圧に対して適切な印加時間が存在することが分かった。また、負方向の電圧変化を与えた場合も同様に、図 4.8(b) に示すように、ドリフトが収束したときの分極の変化量は超過電圧から目標形状の電圧に変えたときの電圧変化量に比例していた。

またこれまでの実験の結果から、”超過電圧により、目標電圧に変えたときにドリフトとして生じる分極を前もって処理する”という考えのもと、目標電圧を印加する前に超過電圧を一定時間印加したが、長期的なドリフトと短期的なドリフトを同時に抑制することができなかった。このことから、発生するドリフトは収束時間の異なる何種類かに分けることができると考えられる。

4.4 超過電圧印加時間とドリフト収束時の分極量変化に成り立つ関係性の考察

これまでの実験結果から示されたことについて整理すると、

- ① 圧電素子ドリフトは指数関数的な時間変化の挙動を示す.
- ② 分極の総ドリフト量は印加した電圧値に比例する.
- ③ 目標電圧に対して、超過電圧を適切な印加時間加えるとドリフトは収束する.
- ④ 超過電圧の値を変えた場合印加時間を変更することで同様にドリフトは収束している.
- ⑤ 超過電圧を加えた場合でも、100分程度の分極のドリフトが起こり、その総量は、超過電圧値と目標電圧値の差に比例する.

という5点が挙げられる.

そこで、これらを定量的な考察をおこなうため、指数関数近似を行い、各パラメータについて検討をした.

4.4.1 指数関数近似を用いた圧電素子ドリフトパラメータについての考察

前項までの実験結果からドリフトは指数関数的な挙動が示唆された. 指数的に減衰する量 x は一般に、初期値 x_0 、時間 t 、時定数 τ を用いて、式(4.5)のように時間の関数として表すことができる.

$$x = x_0 \times \exp \frac{-t}{\tau} \quad (4.5)$$

また、収束する時間の違うドリフトが存在するということから、ドリフトは複数の指数関数の足し合わせにより表現できることも予想される. そこで、分極の変化量 y はドリフトにより変化した分極の総量を y_0 、各時定数で表されるドリフトにより変化した分極の総量を A_n としたとき、式(4.6)のように表せる.

$$y = y_0 + \sum_n A_n \times \exp \frac{-t}{\tau_n} \quad (4.6)$$

図 4.9 に、初期電圧 0V から目標電圧 400V を印加したドリフト計測結果について、指数関数フィッティングを行った結果を示す. (a)は計測値であり、 $n=1,2,3$ で近似した際の残差を(b)に示す.

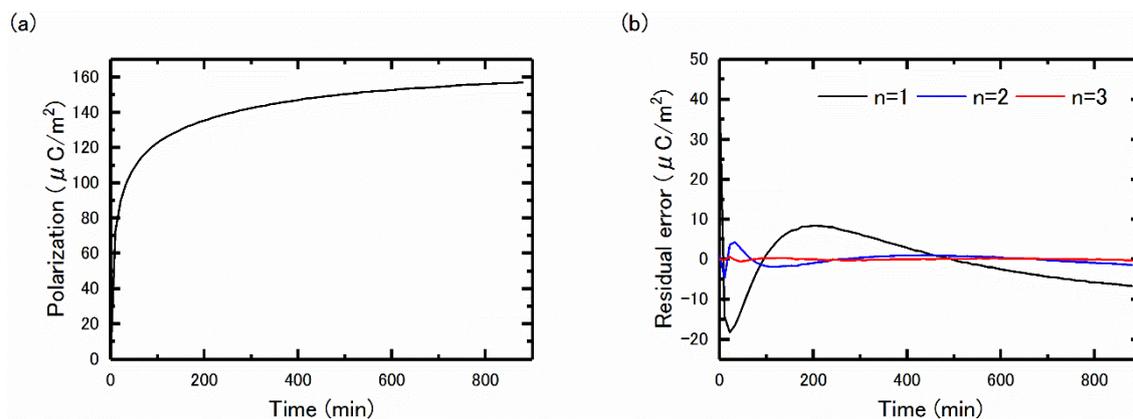


図 4.9 (a) 400 V 印加した際のドリフトの計測値, (b) 計測値と近似式の残差

図 4.9(b)より, ドリフトは $n=3$ の時, ほぼ残差が無く近似できることが分かった.

$$y = y_0 + A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + A_3 \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) \quad (4.7)$$

各圧電素子のドリフト結果に対して, 式(4.7)のように, 3つの指数関数からなる式を用いて近似を行った. 表 4.1 と表 4.2 に定電圧印加時に計測した結果について, 式(4.7)のフィッティングを行った際の各パラメータを示す. この結果から, 圧電素子のドリフトは, 5分, 35~40分, 200分以上の3つの時定数成分で表すことができることがわかる. ここで, 正の電圧変化の時定数に関する標準偏差を求めると, τ_1 が 0.38, τ_2 が 2.82, τ_3 が 29.2 となり, 変動係数を求めると, τ_1 が 7.5%, τ_2 が 7.8%, τ_3 が 11.2%となった. また負方向の電圧変化についても標準偏差を求めると, τ_1 が 0.3, τ_2 が 2.75, τ_3 が 20.53 となり, 変動係数を求めると τ_1 が 5.5%, τ_2 が 7.8%, τ_3 が 8.8%となった. これらのズレの原因としては, ヒステリシスの影響が大きいと思われる. 初期電圧は形状が安定するまで十分な時間おいてから実験を行っているが, 初期電圧の前の電圧はそろっておらず, そこでヒステリシスの影響が現れていると考えられる. しかし, 計測データ点数が 10 分間隔であるので, 各時定数には大きなばらつきでは無いと考えられる.

表 4.1 正方向の電圧変化を与えた場合のドリフト計測結果に対する近似関数のパラメータ

Applied voltage pattern	y_0 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	A_1 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_1 [min]	A_2 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_2 [min]	A_3 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_3 [min]
0 V \rightarrow 100 V	39.2	-17.6	5.79	-11.3	40.1	-10.3	251
0 V \rightarrow 100 V	32.2	-12.3	4.41	-11	31.9	-8.91	216
0 V \rightarrow 200 V	88.3	-39.1	5.00	-25.9	32.1	-23.4	226
0 V \rightarrow 200 V	89.7	-39.6	5.14	-26.1	34.7	-24	237
0 V \rightarrow 300 V	116	-48	5.42	-34	37.6	-33.8	278
0 V \rightarrow 300 V	114	-53.2	5.25	-33	38.7	-27.7	270
0 V \rightarrow 400 V	159	-69.3	5.43	-44.4	39.3	-45.5	304
0 V \rightarrow 500 V	211	-92.7	4.92	-57.3	36.0	-60.8	301
0 V \rightarrow 500 V	197	-91.8	4.78	-57.2	34.9	-48.4	258

表 4.2 負方向の電圧変化を与えた場合のドリフト計測結果に対する近似関数のパラメータ

Applied voltage pattern	y_0 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	A_1 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_1 [min]	A_2 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_2 [min]	A_3 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_3 [min]
100 V \rightarrow 0 V	-45	18.7	5.92	13.6	36.1	12.7	237
100 V \rightarrow 0 V	-43	18.5	5.76	12.8	38.1	11.7	250
200 V \rightarrow 100 V	-38.2	14.7	5.03	12.3	31.9	11.1	213
300 V \rightarrow 100 V	-66.2	26.2	5.05	20.3	29.7	19.7	190
300 V \rightarrow 100 V	-67.3	28.3	5.41	20.7	35.9	18.3	237
400 V \rightarrow 100 V	-106	45.3	5.36	32.9	35.1	28.3	240
500 V \rightarrow 100 V	-154	72.3	5.19	44.2	36.4	37	246
500 V \rightarrow 100 V	-147	66.5	5.45	43.7	38.0	36.6	257

次に、超過電圧印加時に各パラメータについて調査した。その際、各指数関数の時定数は、定電圧印加時に求めた際に得た各時定数の平均値に固定することで、各時間での圧電素子ドリフトがどのように変化するかを調べた。表 4.3 は初期電圧値 0V から超過電圧を印加した後、目標電圧 100 V を印加した際の計測結果について指数関数フィッティングを行った際の各パラメータを、表 4.4 は初期電圧値 100 V から超過電圧を印加し、目標電圧 0 V を印加した際の計測結果について指数関数フィッティングを行った際の各パラメータを示す。

表 4.3 (0V→超過電圧→100V)の電圧変化を与えた場合のドリフト計測結果に対する近似関数のパラメータ

Overshooting voltage	y_0 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	A_1 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_1 [min]	A_2 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_2 [min]	A_3 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_3 [min]
500 V, 25 min	-84.2	65.6	5.40	18.8	35.2	-0.253	234
400 V, 35 min	-65.7	48.6	5.40	17.1	35.2	-0.0946	234
400 V, 35 min	-61.6	44.0	5.40	17.6	35.2	-0.0132	234
300 V, 55 min	-41.5	27.0	5.40	14.5	35.2	0.02	234

表 4.4 (100V→超過電圧→0V)の電圧変化を与えた場合のドリフト計測結果に対する近似関数のパラメータ

Overshooting voltage	y_0 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	A_1 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_1 [min]	A_2 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_2 [min]	A_3 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	τ_3 [min]
-500 V, 20 min	106	-85	5.12	-21.7	36.1	0.592	260
-500 V, 20 min	107	-85.8	5.12	-21.5	36.1	0.583	260
-400 V, 30 min	91.4	-67.8	5.12	-23.8	36.1	0.199	260
-400 V, 30 min	91.2	-68	5.12	-23	36.1	-0.21	260
-300 V, 40 min	68.2	-48	5.12	-20.5	36.1	0.298	260
-300 V, 40 min	68	-48.3	5.12	-19.9	36.1	0.107	260
-200 V, 65 min	46.5	-29.7	5.12	-16.5	36.1	-0.34	260
-200 V, 65 min	44.5	-27.8	5.12	-16.5	36.1	-0.18	260
-100 V, 115 min	22.7	-13.5	5.12	-9.02	36.1	-0.22	260
-100 V, 115 min	21.8	-12.5	5.12	-9.25	36.1	-0.088	260

この結果から、超過電圧を印加することにより、最も遅い時定数である τ_3 の係数である A_3 が2桁ほど小さくなっていることが分かる。これにより、収束まで長時間かかるドリフトに関する分極の変化量が小さくなっており、超過電圧を印加しなかった場合と比較して早くドリフトが収束したことが定量的に示された。

4.4.2 超過電圧印加時間とドリフト収束時の分極量変化の関係性

4.4.2.1 τ_3 の時定数を持つ項の分極の総変化量のみについて検討した場合

これまでの実験結果から、超過電圧印加時間とドリフト収束時に成り立つ関係について考察する。前述の結果から分極の変化量は、3つの指数関数の足し合わせを用いて表すことが示唆された。また、超過電圧を適切な時間印加したとき時定数 τ_3 の項に関するドリフトのみ抑制できた。これらの結果から、超過電圧による時定数 τ_3 の項に関する分極の変化量が、初期電圧から直接目標電圧に至るために必要な分極の変化量と等しくなったのではないかと

と考えた．一定時間の超過電圧によってあらかじめ与えた分極の変化量を P_1 ，初期電圧から直接目標電圧を印加した際の分極の総変化量を P_2 ，超過電圧から目標電圧に変える時に生じる分極の変化量 P_3 とした場合について整理した表について表 4.5 および表 4.6 に示す．また，各値は表 4.1 ~ 4.4 にまとめた係数と式(4.7)から求めた．

表 4.5 (0V→超過電圧→100V)の電圧変化を与えた場合の τ_3 の項に関する分極の変化量のつり合い

Overshooting voltage	P_1 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	P_2 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	P_3 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	$P_2 + P_3$ [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]
500 V, 25 min	5.01	10.9	-0.253	10.65
400 V, 35 min	5.5	10.9	-0.0539	10.85
300 V, 55 min	6.25	10.9	0.02	10.92

表 4.6 (100V→超過電圧→0V)の電圧変化を与えた場合の τ_3 の項に関する分極の変化量のつり合い

Overshooting voltage	P_1 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	P_2 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	P_3 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	$P_2 + P_3$ [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]
-500 V, 20 min	4.65	9.44	0.588	10.03
-400 V, 30 min	5.69	9.44	-0.00439	9.44
-300 V, 40 min	5.94	9.44	0.203	9.64
-200 V, 65 min	6.88	9.44	-0.257	9.18
-100 V, 115 min	7.34	9.44	-0.153	9.29

$P_2 + P_3$ が P_1 と等しくなっているとは言えず， $P_1/(P_2 + P_3)$ を計算すると，負の電圧変化に関して 46%~79%，正の電圧変化に関して 47%~57% となった．これらの結果から， τ_3 に関する分極の変化のみについての検証では，超過電圧と分極の変化についての関係は説明できない．

4.4.4.2 全ての項の分極の総変化量について検討した場合

τ_3 のみの分極の変化量では， $P_1/(P_2 + P_3)$ の関係が成り立たないことが分かった．全ての分極の変化量と超過電圧印加時間の関係を検証する．前項と同様に，一定時間の超過電圧による分極の総変化量を P_I とし，初期電圧から直接目標電圧にする際の分極の総変化量を P_2 ，超過電圧から目標電圧に変える時に生じる分極の総変化量を P_3 としたときの各分極量を，初期電圧から目標電圧へ正方向の電圧変化をさせる場合に関して表 4.7 に，初期電圧から目標電圧へ負方向の電圧変化をさせる場合に関して表 4.8 に示す．

表 4.7 (0V→超過電圧→100V)の電圧変化を与えた場合の(0V→超過電圧→100V)の分極の総変化量

Overshooting voltage	P_1 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	P_2 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	P_3 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	$P_2 + P_3$ [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]
500 V, 25 min	123	40.4	84.4	124.8
400 V, 35 min	106	40.4	63.3	103.7
300 V, 55 min	87.1	40.4	42.2	82.6

表 4.8 (100V→超過電圧→0V)の電圧変化を与えた場合の(100V→超過電圧→0V) の分極の総変化量

Overshooting voltage	P_1 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	P_2 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	P_3 [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]	$P_2 + P_3$ [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]
-500 V, 20 min	129	36.8	110	146.8
-400 V, 30 min	119	36.8	88.4	125.2
-300 V, 40 min	101	36.8	66.3	103.1
-200 V, 65 min	83.8	36.8	44.2	81
-100 V, 115 min	61.2	36.8	22.1	58.9

表の通り，正方向の電圧変化においては， $P_1/(P_2+P_3)$ が 98%~105%，負方向の電圧変化に関しても 88%~104%となった．これらの結果から P_1 に対して P_2 と P_3 を足し合わせた値とほぼ等しくなるときに圧電素子のドリフト現象が収束していることが分かる．

ここで，各分極量の概念まとめると図 4.10 となり，これらの分極量については目標電圧の値と超過電圧の値を決めることで，事前の実験結果から求めることができることから，前章で示した形状創成プロセスにおいては，放射光施設での実験前に目標電圧と超過電圧の印加時間をあらかじめ決定しておくことで，効率的かつ安定的なミラー形状の創成が可能となる．

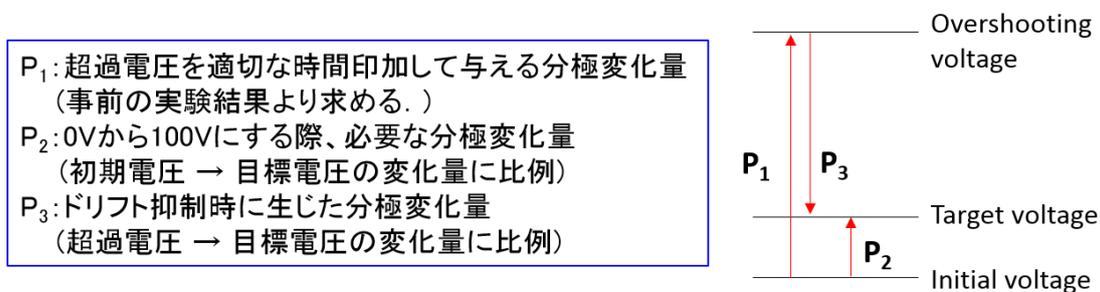


図 4.10 各分極量の概念図

4.5 結言

本章では，形状可変ミラーの時間安定性向上法に関する研究結果について述べた．

- (1) 形状可変ミラーのドリフト現象についての問題点について述べた．現状発生している形状ドリフトは電圧印加後 700 分経過後も生じており，また生じたドリフト量も回折限界集光を維持できない大きさであった．
- (2) 定電圧印加時のミラー形状のドリフト計測実験を行い，ミラー形状のドリフト量は印加電圧の大きさに比例するが，収束時間は電圧の大きさに依存しないことを発見した．
- (3) 目標電圧印加前に一定の時間超過電圧を印加することで，100 分程度で形状ドリフトを収束させることに成功した．
- (4) ドリフトが抑制できる超過電圧の印加時間は，一定時間の超過電圧印加によって生じた分極の変化量(P_1)，超過電圧から目標電圧へと電圧を変化させたときに起こる分極の変化量(P_2)，初期電圧から目標電圧へと電圧を変化させたときに生じる分極の変化量(P_3)の関係が $P_1 \doteq P_2 + P_3$ の条件を満たすような時に収束することがわかった．

5. 高精度 at-wavelength 形状計測システムの開発

3章で述べた形状可変ミラーの二段階の形状制御法において、最終的な形状精度を決定するのは、放射光ビームライン中で行う at-wavelength 形状計測法の計測精度となる。本章では、二段開口数可変光学系において形状可変ミラーの計測法として最も適していると思われる X 線ペンシルビームスキャン法に注目し、回折限界集光条件を満たす精度で、形状計測が可能なシステムの開発を行った結果について述べる。

5.1 At-wavelength 形状計測法

レイリーの4分の1波長則に基づくと入射 X 線のエネルギー10 keV (波長 1.24 Å), 入射角 4 mrad の場合, 集光 X 線ミラーが回折限界集光を実現するために許容できる形状誤差は, 3.9 nm である。前項で述べたように, 形状可変ミラーの最終的な変形精度は at-wavelength 形状計測法の計測精度に依存するため, 数ナノメートルの形状誤差の検出が可能なシステムを構築する必要がある。しかし, 前述したとおり干渉計 4 台を用いてのシステムは現実的ではないため, 本研究では, X 線を用いた at-wavelength 形状計測法を用いることを考案した。二段開口数可変光学系において 4 枚の形状可変ミラーを制御するためには, ①回折限界集光が可能な精度で形状誤差の計測が可能, ②計測時間が短い, ③開口数を変更した場合でも計測精度は変わらないという 3 点を満たす計測法が必要であるといえる。表 5.1 は X 線ミラーの形状計測に利用されている代表的な at-wavelength 形状計測法についてまとめたものである。

表 5.1 各種 at-wavelength 形状計測法

	計測精度	計測時間	開口数
位相回復法[42,43]	○	×	△
Grating 干渉法[44,45]	○	○	×
X 線ペンシルビームスキャン法[46,47]	△	○	○

位相回復法は, 焦点近傍の強度ビームプロファイルを複数計測し, この計測された強度プロファイルを再現する波面収差を計算により求め, ミラーの形状誤差を算出する方法である。計測精度は高いが複数の位置で集光ビームの計測を行う必要があり計測に時間がかかる。また, 開口数が大きくなるほど強度プロファイルの正確な測定は難しくなる。

Grating 干渉法は, 回折格子を用いて行う Shearing 干渉法の一つである。X 線集光ビームの波面計測には, 焦点下流側に位相回折格子を配置することで, 回折格子の周期長と X 線のエネルギーによって決まる Talbot 距離の位置にできる自己像 (周期的な X 線の強度パター

ン) を計測することで波面収差の算出を行う方法が用いられている。ミラー全長の波面を一括で計測できるため、計測時間も短く、測定精度も高いが、開口数の小さな光学系には適応することができないため、開口数の大きさを制御する二段開口数可変光学系の形状計測システムとして用いることは不向きである。

X 線ペンシルビーム法はミラーのいくつかの区間に分割し、その区間ごとにスリットにより制限された X 線を照射し、反射した X 線の位置を焦点位置で計測する。その後、スリットをスキャンしていくことで X 線の照射位置を変えていき、ミラーの各区間での傾斜誤差を求める手法である。図 5.1 に X 線ペンシルビームスキャン法における計測の概念図を示す。

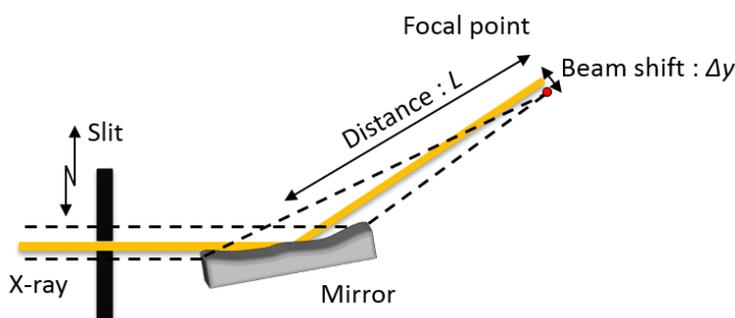


図 5.1 X 線ペンシルビームスキャン法の計測概念図

ミラーが理想的な形状をしている場合、すべての区間において反射した X 線は焦点位置で 1 点に集まる。しかし、ミラーに形状誤差がある場合、X 線の反射軌道にはその誤差によって区間ごとにずれが生じる。焦点からのずれ量は形状誤差 (傾斜誤差) の高さに比例しており、図 5.1 に示すように、焦点位置での X 線のずれを Δy 、反射位置から焦点までの距離を L とするとき、傾斜誤差 θ は、式(5.1)で表すことができる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{2L} (L \gg \Delta y) \quad (5.1)$$

すべての区間における傾斜誤差分布がわかれば、形状可変ミラーの補正電圧分布に変換し、形状を修正することが可能である。

X 線ペンシルビームスキャン法は、本プロセスに求められる計測手法の 3 点の条件をほぼ満たすが、現状報告されている計測精度では、回折集光を達成することができない。そこで、本研究では、回折限界条件を満たす計測精度を持つ、X 線ペンシルビームスキャン法による形状計測システムの構築を行った。

5.2 波動光学シミュレーションを用いた X 線ペンシルビームスキャン法の計測精度の検討[48]

はじめに、X 線ペンシルビームスキャン法の計測精度向上のために必要な要素について検討する。X 線ペンシルビームスキャン法は形状誤差の影響により生じる反射光の位置ずれを検出する方法である。そのため、光線追跡を用いた計算では、ミラー各点における焦点での軌道ずれはひとつの点に決定され、幾何光学的な検出限界は存在しない。しかし、実際の測定系では、検出器のピクセルサイズの制限や、間接撮像型のビームモニターにより計測を行うことによる、シンチレータによる像のボケが原因となり検出可能な傾斜誤差には制限があることが予想される。そこで、表 5.2 に示すようなパラメータで、集光ミラーの形状を、X 線ペンシルビームスキャン法によって計測した場合の測定精度について Fresnel-kirchhoff の回折積分に基づく波動光学シミュレータ[30,49]を用いて検討を行った。

表 5.2 シミュレーションに用いた X 線ペンシルビームスキャン法によるミラー形状測定系の各種パラメータ

Mirror length (mm)	38
Grazing incidence angle at center (mrad)	5.5
Source - Mirror (mm)	45000
Mirror - Focus (mm)	130.7
Number of segmented section on mirror	16
Pixel size of a detector (nm)	250
Incident X-ray energy (keV)	10

ペンシルビームスキャン法のシミュレーションを行う際に入力した形状誤差は、PV1 nm の 2 周期の sin 波形状である。まず各ミラー領域で反射した際の焦点での強度プロファイルを求めた後、ビームモニターのボケ量 (Point spread function : PSF)として半値幅 10 μm , 20 μm , 50 μm のガウシアン関数を仮定し計算で得られた強度プロファイルにコンボリューションすることで、実際のビームモニターで得られる像を再現した。その後、重心演算を行うことで X 線の軌道ずれを算出し、各領域の傾斜誤差および形状誤差を算出した。図 5.2 にシミュレーション結果を示す。

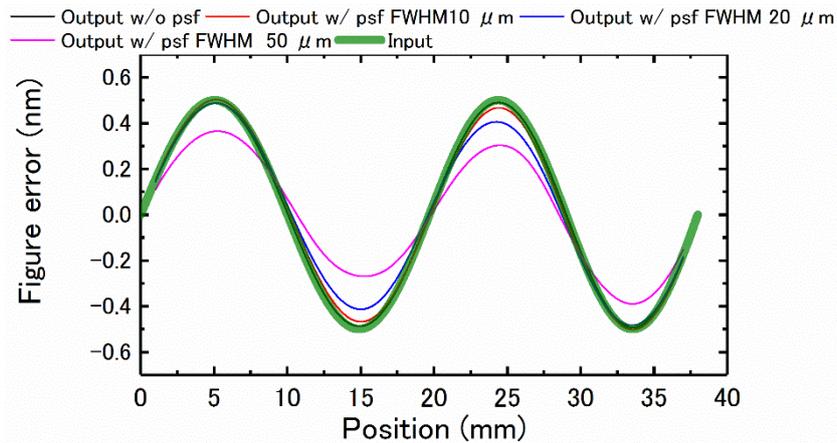
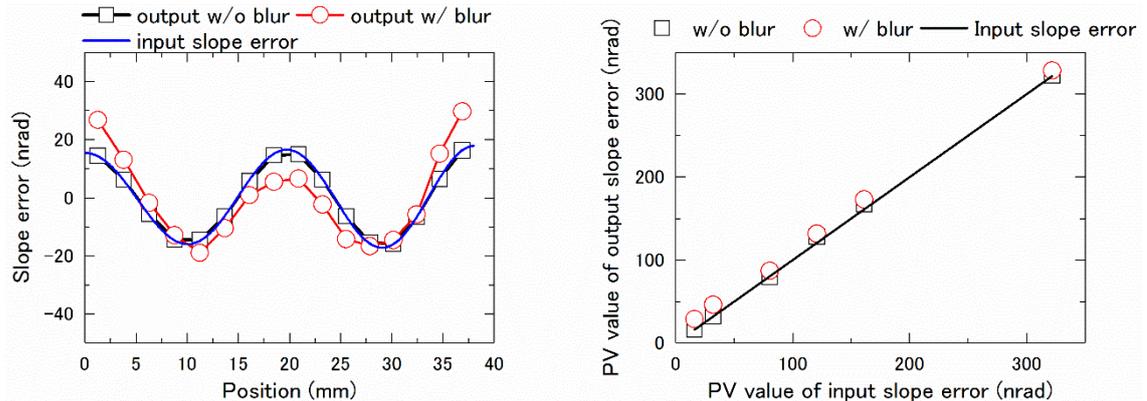


図 5.2 ボケ量を考慮したペンシルビームスキャン法のシミュレーション結果

入力した形状誤差は緑の線で表されており、シミュレーション結果から半値幅 $10\ \mu\text{m}$ のボケ量であれば $\text{PV } 1\text{nm}$ の形状誤差は十分に検出できている。しかし、ボケ量が $20\ \mu\text{m}$ より大きくなると設計したピクセルサイズでは、形状誤差の影響でずれる X 線の軌道ずれ量がボケによる広がりによって埋もれてしまい計測精度が悪化していくことがわかる。回折限界集光達成可能な精度で形状誤差を検出するためには、集光ビームを測定するビームモニターのボケ量を $10\ \mu\text{m}$ 以下にすることが必要である。

つぎに、ビームモニターが $10\ \mu\text{m}$ のボケ量を持つ場合に関して検出可能な傾斜誤差の閾値を調査した。先程と同様に 2 周期の \sin 波の形状誤差をミラーに入力し、 \sin 波の PV 値を変更してシミュレーションを行った。結果を図 5.3 に示す。



(a) PV 37 nrad の傾斜誤差を入力した際のシミュレーション結果

(b) ビームモニターが半値幅 10 μm のボケ量を持つ場合のペンシルビームスキャン法の傾斜誤差の検出限界

図 5.3 ボケ量 10 μm のビームモニターの場合のビームモニターの検出限界

図 5.3 (a)は傾斜誤差で PV 37 nrad, 形状誤差に換算すると PV 0.125 nm の形状誤差を入力した際に X 線ペンシルビームスキャン法を行った場合の各ミラー領域で検出された傾斜誤差の分布をプロットしたものである。

ボケ量がない場合は完全に入力した傾斜誤差と一致しているが, ボケを与えた場合は, 正確に計測できなくなっていることがわかる。

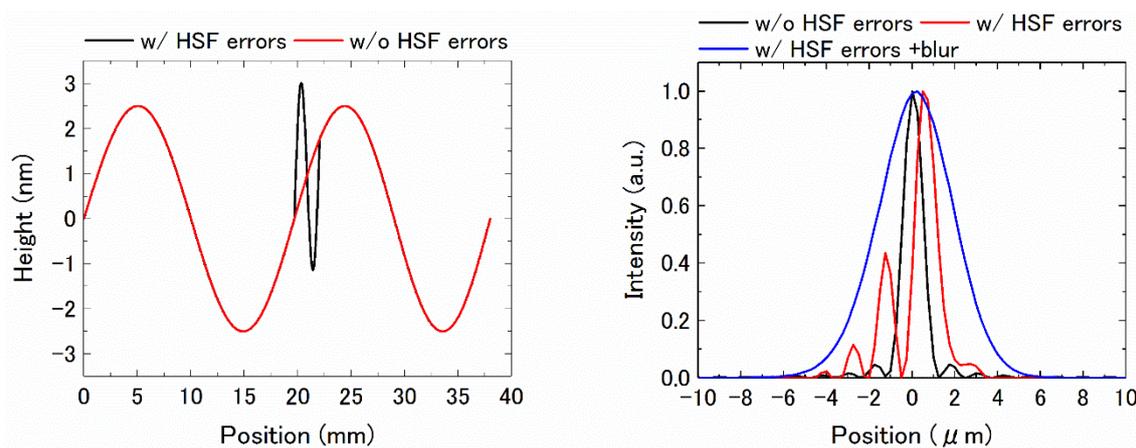
図 5.3 (b)は入力した傾斜誤差の PV 値を横軸に, シミュレーションにより検出された傾斜誤差の PV 値を縦軸にとったものである。ボケがない場合は入力した値に対して同じ PV 値を検出しているが, ボケを与えた場合は, 傾斜誤差の PV 値で 80 nrad 以下の値を入力した場合は正しく検出できていないことがわかった。しかし, 傾斜誤差の PV 値 80 nrad は形状誤差に算出すると PV 0.25 nm の形状誤差を意味しているため, ビームモニターに 10 μm のボケ量を存在していても回折限界集光を達成するためには十分な精度で形状誤差を計測できることがわかる。

最後に, 制限した照射領域内にミラーが高周期の形状誤差を持っている場合についてのシミュレーションを行った。ミラー全体に入力した形状誤差は PV5 nm の 2 周期の sin 波形形状である。高周期の形状誤差は 9 番目の区間に PV4 nm の sin 波を入力した (図 5.4 (a))。

図 5.4 (b) は 9 番目の区間に X 線が照射された場合の焦点での強度プロファイルを示している。高周期の形状誤差により大きなサテライトピークが形成されていることがわかる。ボケ量を再現した場合, サテライトピークは全く検出できなくなっている。

最後に各領域で検出された傾斜誤差分布を図 5.4 (c) に示す。ボケのあるなしにかかわらず, ミラーの照射領域の中に大きな形状誤差を持つ場合は正確な傾斜誤差の分布は測定できていない。以上の結果から, X 線ペンシルビームスキャン法の測定精度を向上のためには, 集光ビームを計測するビームモニターのボケ量を少なくすることと, ミラーに高周期な

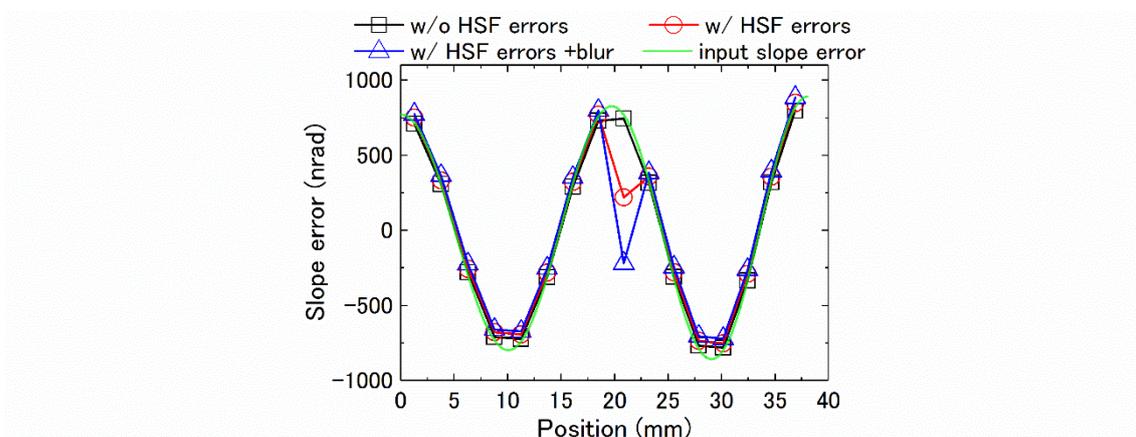
形状誤差を持たせないようにすることが重要であることがわかった。ミラー上の高周期な形状誤差については3章で述べたように、EEMにより三次関数より高次の成分は取り除かれているため問題にはならない。そこで、X線ペンシルビームスキャン法の高精度化を目指し新たにビームモニターの開発に取り組んだ。



(a) 入力した形状誤差

(b) 焦点での強度プロファイル

(9番目の区間に形状誤差を高周期の形状誤差を入力)



(c) 検出された傾斜誤差分布

図 5.4 照射領域内に高周期成分の形状誤差を持つ場合のシミュレーション結果

5.3 高性能 X 線ビームモニターの開発

X線ペンシルビームスキャン法において形状計測精度を高度化するためにはビームモニターの計測精度が重要となる。そこで、焦点位置での X 線位置検出用のビームモニターを開発した (図 5.5 (a))。ビームモニターは図 5.5 (b) に示すようにシンチレータ (YAG セラミ

ックス (厚み 50 μm) および, ミラー, レンズ, CMOS カメラ (CS-52M, Bitran) により構成されている. X 線の透過により YAG セラミックスが発光し, その光をミラーおよびレンズにより CMOS カメラ上に導くことによって X 線の位置を可視化することができる. 重心位置計算精度の向上のため, レンズの倍率は 10 倍を選択し, 2次元検出器の CMOS カメラはピクセルサイズが 2.5 $\mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$ と小さいものを使用している. また, X 線の間接撮像型ビームモニター的设计指針として分解能はレンズの回折により起因されるボケと, 焦点深度に起因するボケによって式 (5.2) のように表すことができる. レンズの N.A.は, YAG セラミックスの厚みから決定できるボケ量を最小にできる 0.2 を選択した[50].

$$R = \sqrt{\left(\frac{p}{N.A.}\right)^2 + (qzN.A.)^2}$$

R : 空間分解能 (μm) (5.2)

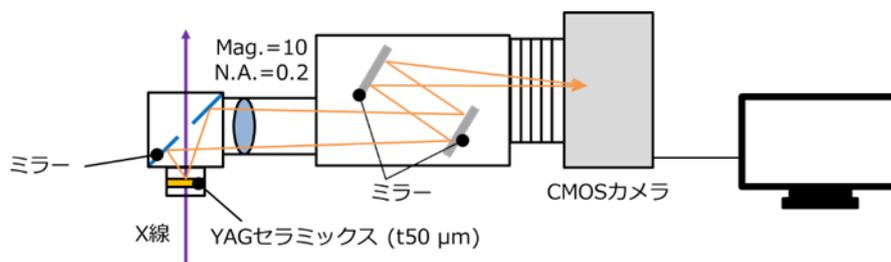
z : シンチレータの厚み

N.A.: レンズの開口数

$p = 0.18, q = 0.075$



(a) 全体写真



(b) X 線ビームモニターの構成図

図 5.5 開発した高性能 X 線ビームモニター

5.4 X線ビームモニターの性能評価試験[51]

開発したビームモニターの性能評価実験を SPring-8 BL29XULEH3 において行った。はじめに、X線の重心位置の測定精度の評価実験を行った際の実験装置構成を図 5.6 に示す。性能評価はビームモニターの上流側に配置されたスリットおよびピンホール(Ni, 50 μm 厚, 穴径 20 μm) によって X 線を制限し、ピンホールの移動量とビームモニターによって観測された X 線重心位置の移動量の比較をとることで行った。またスリット上流には高次光カットのための全反射ミラーが挿入されている。ピンホールは、1 nm フィードバックステージ(シグマテック, FS-1050SPX)に取り付けられており、図 5.7 に示す X, Z の 2 方向について 10 nm 間隔で走査した。

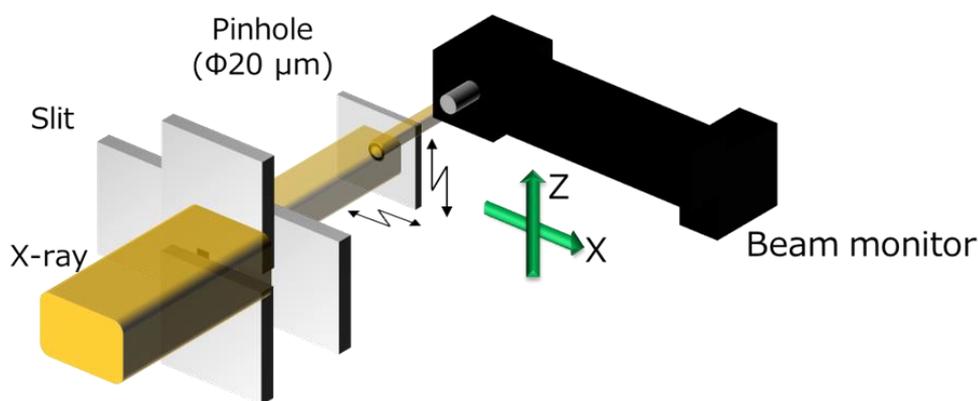
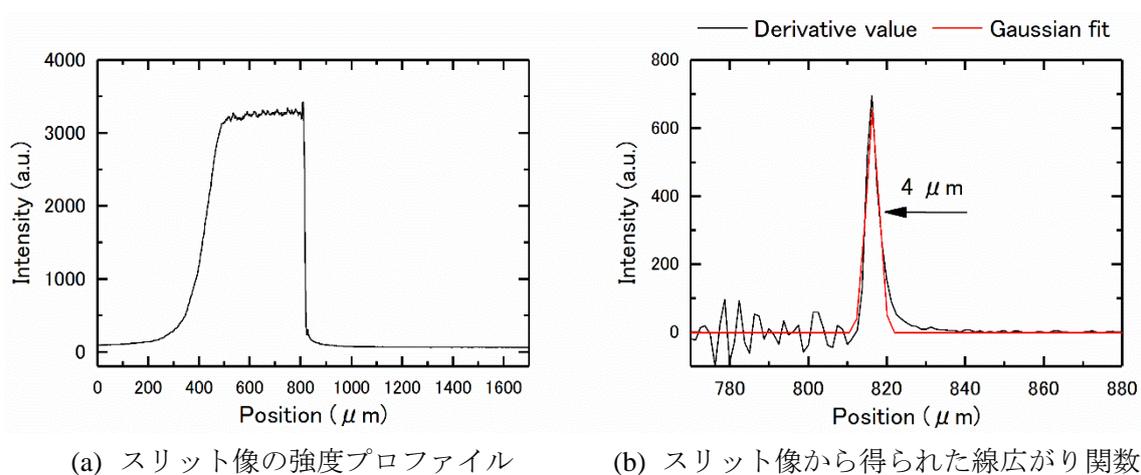


図 5.6 重心位置測定精度評価実験の装置構成

はじめに、スリット像から線広がり関数 (Line spread function : LSF) を求め、開発したビームモニターのボケ量の評価を行った。



(a) スリット像の強度プロファイル

(b) スリット像から得られた線広がり関数

図 5.7 ビームモニターのボケ量評価

図 5.7 (a) は観察されたスリットのエッジ像のラインプロファイルである。この強度分布を微分し、ガウシアン関数でフィッティングすることで LSF の値を見積もった結果を図 5.7 (b) に示す。この結果からビームモニターのパケ量は半値幅 $4\ \mu\text{m}$ のガウシアン関数で表現できることがわかり、目標の値を満たしていることが示された。

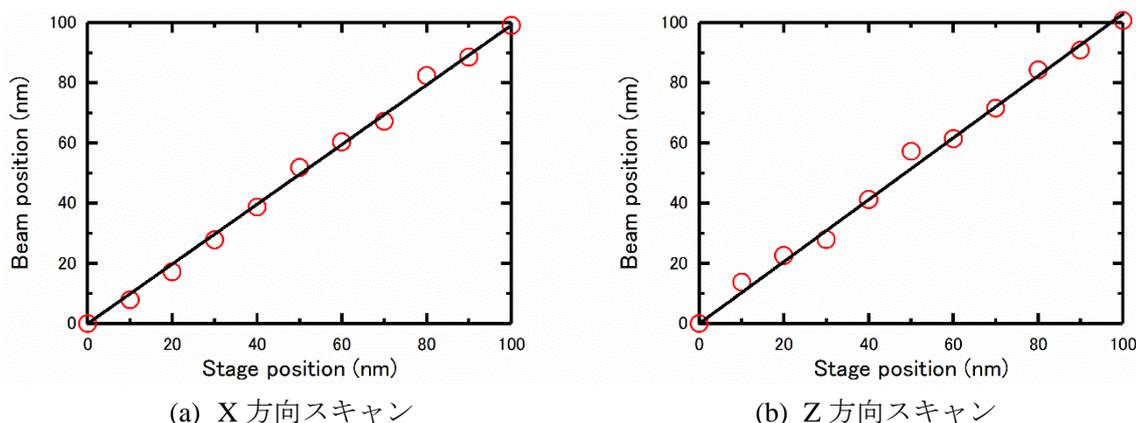


図 5.8 ビームモニターの性能評価試験結果

図 5.8 はステージの移動量を横軸、ビームモニターで検出された X 線重心位置の移動量を縦軸にプロットしたものである。ピンホールの移動量と X 線の重心位置の移動量は相関関係があり、開発したビームモニターは $10\ \text{nm}$ の精度で X 線位置の検出ができることが示された。

5.5 ペンシルビームスキャン法による at-wavelength 計測システムの計測精度評価実験[48]

開発したビームモニター用いて集光ミラーの計測実験を行った。実験系の装置構成を図 5.9 に示す。今回計測対象とした集光ミラーは表 5.3 に示すパラメータをもつ楕円形状に EEM を用いて加工されている。TC1 スリットを仮想光源とし、ミラー上流にペンシルビームスキャン用のスリット、焦点位置にビーム軌道計測用のビームモニターが配置されている。また同時に測定精度のクロスチェックを行うために、グレーチング干渉計を用いた波面計測システムを構築した。焦点位置から $25.71\ \text{mm}$ 下流にタンタル製回折格子(周期長 $2.5\ \mu\text{m}$, NTT Advanced Technology Corporation),回折格子から $1270\ \text{mm}$ 下流の位置に自己像を計測するための CCD カメラ(AA20MOD and ORCA-flash 4.0, Hamamatsu Photonics)が配置されている。

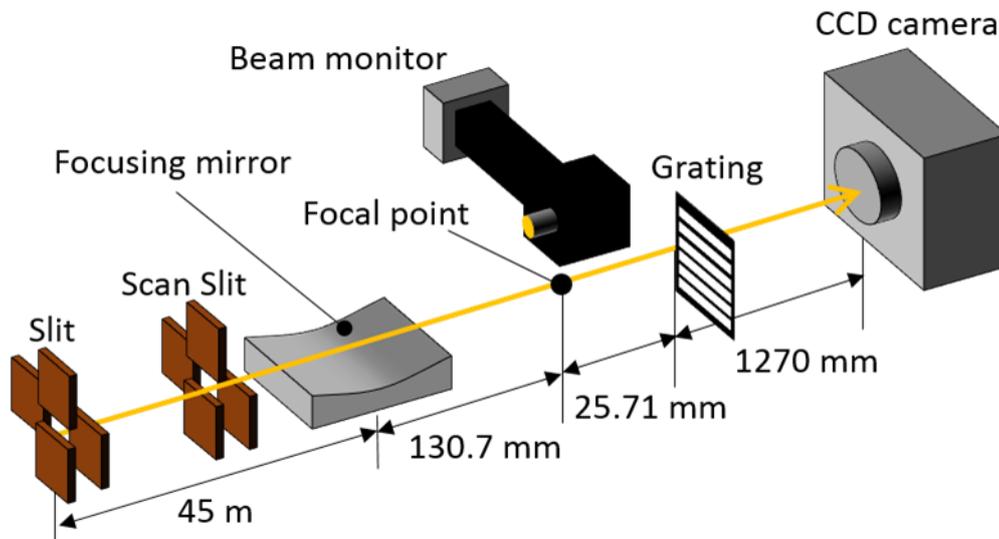


図 5.9 ペンシルビームスキャン法の計測精度評価実験の装置構成

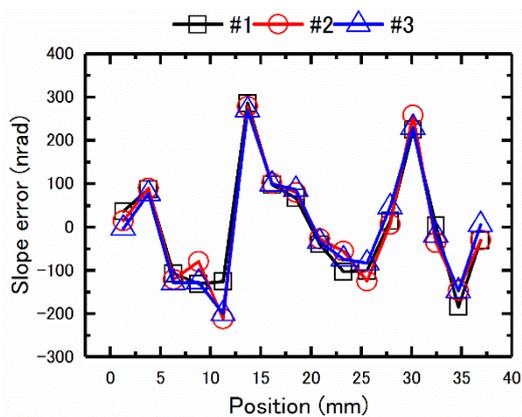
表 5.3 計測した集光ミラーの設計パラメータ

a^a (m)	22.57
b^a (m)	13.34×10^{-3}
Grazing incidence angle at center (mrad)	5.5
Focal length from mirror center (mm)	130.7
Mirror length (mm)	38
Maximum concave depth (μm)	3.88
Numerical aperture	8.00×10^{-4}

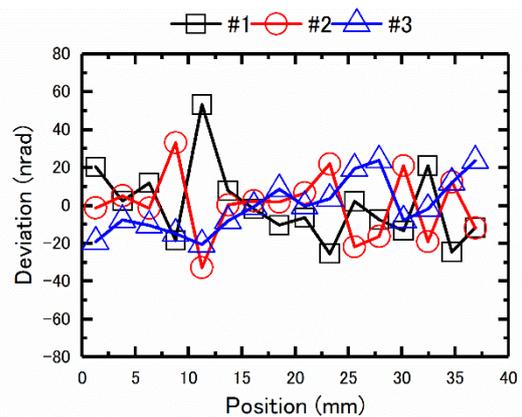
a Ellipse $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$

ペンシルビーム法の計測の際には、スキャンスリット幅を $13 \mu\text{m}$ とした。このスリット幅は、ミラーを長手方向に 16 分割するスリットサイズである。スリット幅と同じ間隔でスリットを走査させビーム軌道の測定を行い、16 点での傾斜誤差の計測を行った。

図 5.10 (a) にペンシルビームスキャン法を用いて傾斜誤差の計測を 3 回行った結果について示す。RMS 129 nrad, PV 477 nrad の傾斜誤差を検出することに成功している。また図 5.10 (b) は 3 回の計測においてミラーの各領域で計測された傾斜誤差の偏差を示している。この結果から構築したペンシルビームスキャン法による計測システムの計測再現性は $\sim 40 \text{ nrad}$ であることが示された。



(a) 計測された傾斜誤差分布



(b) X線ペンシルビームスキャン法の測定再現性の測定再現性

図 5.10 X線ペンシルビームスキャン法による集光ミラー傾斜誤差の測定結果

次に、図 5.11 に可視光干渉計、X線ペンシルビームスキャン法、グレーチング干渉計で計測した形状誤差を示す。可視光干渉計の場合の形状誤差は、Relative Angle Determinant Stitching Interferometry (RADSI) [52]および Micro Stitching Interferometry (MSI) [53] の二つのステッチング手法から得られたデータより算出している。X線ペンシルビームスキャン法の場合の形状誤差は、計測された16点の傾斜誤差のデータを使用し、スプライン補間アルゴリズムを利用して積分することで算出した。グレーチング干渉計の場合は、回折格子を周期長の1/5ずつ(500 nm)スキャンさせながら CCD カメラにより自己像を撮像し、縞走査法[54]を用いて導出した位相誤差から形状誤差を算出した。X線ペンシルビームスキャン法による形状計測により、PV1 nmの精度でミラー形状誤差の計測に成功した。また上記3手法によって計測されたミラーの形状誤差は0.5nmの精度で一致しており、構築したX線ペンシルビームスキャン法による at-wavelength 形状計測システムは回折限界集光を保障する1 nmの計測精度を有することが示された。

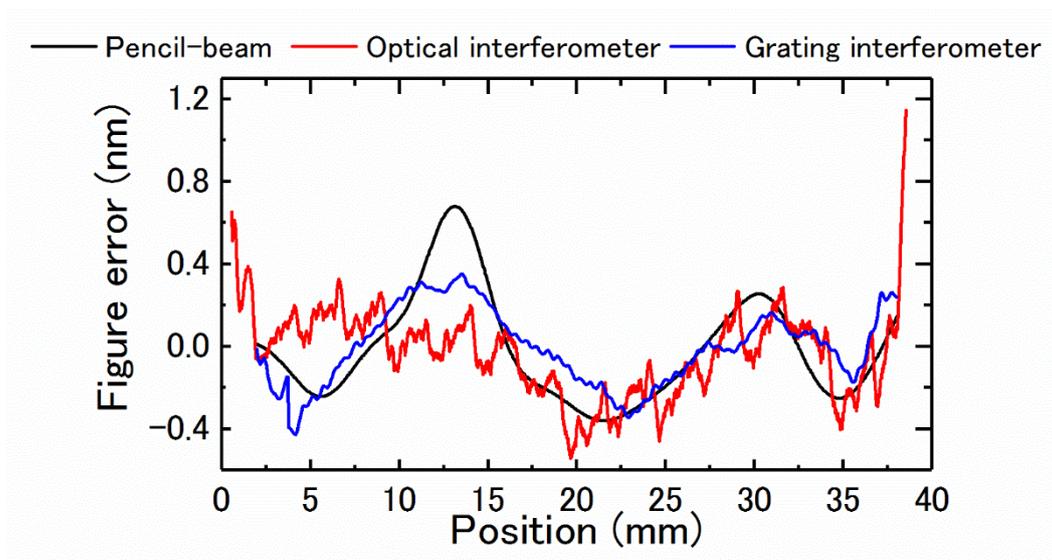


図 5.11 各種形状計測法で検出された集光ミラーの形状誤差

5.6 結言

本章では、二段開口数可変光学系の最終形状を決定する at-wavelength の計測に用いる、X 線ペンシルビームスキャン法による形状計測システムの開発について述べた。

- (1) 最終的な形状精度を決定する at-wavelength 形状計測法として X 線ペンシルビームスキャン法を採用し、波動光学シミュレーションから高精度計測を実現するために必要な要素について検討した。
- (2) X 線ペンシルビームスキャン法の高精度化を目指し、X 線の位置を計測するビームモニターを開発した。性能評価実験の結果、ビームモニターのボケ量は許容値以下で作製でき、また X 線の重心位置を 10 nm の分解能で決定できることが判り、形状可変ミラーの形状測定を行うために必要な精度を有していることがわかった。
- (3) 開発したビームモニターを用いて X 線ペンシルビームスキャン法による at-wavelength 形状計測システムを構築し、集光ミラーの形状計測を行った。その結果ペンシルビーム法で PV 1.0 nm の形状誤差の計測に成功した。計測された形状誤差は、他の 2 つの方法で計測された結果とよく一致しており構築したシステムは回折限界集光を実現するために必要な精度の形状計測を行えることを示した。

6. 二段開口数可変光学系による X 線ビームの形成

本章では、SPring-8 にて形状可変ミラーを用いてアダプティブ集光光学系を構築し、第3章で述べた形状制御プロセスを通してミラー形状を高精度に制御し、集光実験を行った結果について示す。まず、形状可変ミラーの集光性能評価のため、KB ミラー光学系を構築し、二次元集光実験を行う。その後、二段一次元集光光学系を構築し、二段光学系での回折限界集光実験を行う。最後に4枚の形状可変ミラーを用いて二段二次元 KB ミラー光学系を構築し、可変集光実験とコリメート光の形成実験を行った。集光実験はすべて SPring-8 BL29XUL EH3 で行っている。

6.1 二枚の形状可変ミラーによる二次元集光実験[51]

6.1.1 二次元集光光学系の装置構成

二枚の形状可変ミラーを用いて、二次元集光光学系を構築し集光実験を行った結果について示す。なおこの光学系は二段開口数可変光学系の前段ミラー光学系を想定して行った実験である。実験時の装置構成を図 6.1 に示す。装置は上流側から、ペンシルビームスキャン法を行う際に形状可変ミラーに照射する X 線を制限するためのスキャンスリット、および、入射する X 線の強度をモニターするためのイオンチャンバー、形状可変ミラーにより構成された KB ミラー光学系、焦点位置に配置されたペンシルビームスキャン法の際に集光ビームを計測するビームモニター、集光ビームプロファイル計測を行う金ワイヤー ($\phi 200 \mu\text{m}$)、集光ビーム強度を計測するための PIN フォトダイオード、そしてビーム軌道をモニターするための CCD カメラにより構成されている。各ミラーのパラメータは表 6.1 に示す。各ミラーの理想形状は楕円であり(図 6.2)、使用した X 線のエネルギーは 10 keV である。

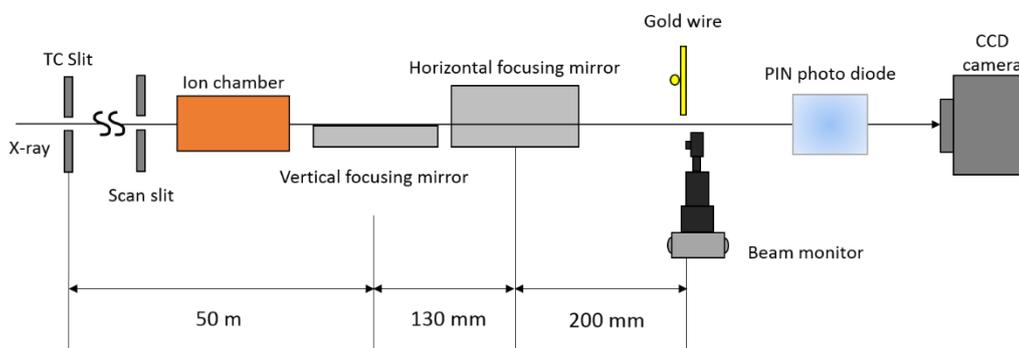


図 6.1 二次元集光装置の構成図

表 6.1 各ミラーのパラメータ

	Vertical focusing mirror	Horizontal focusing mirror
Source – Mirror (mm)	50000	50100
Mirror – Focus (mm)	330	200
Glazing incidence angle at center (mrad)	4	4

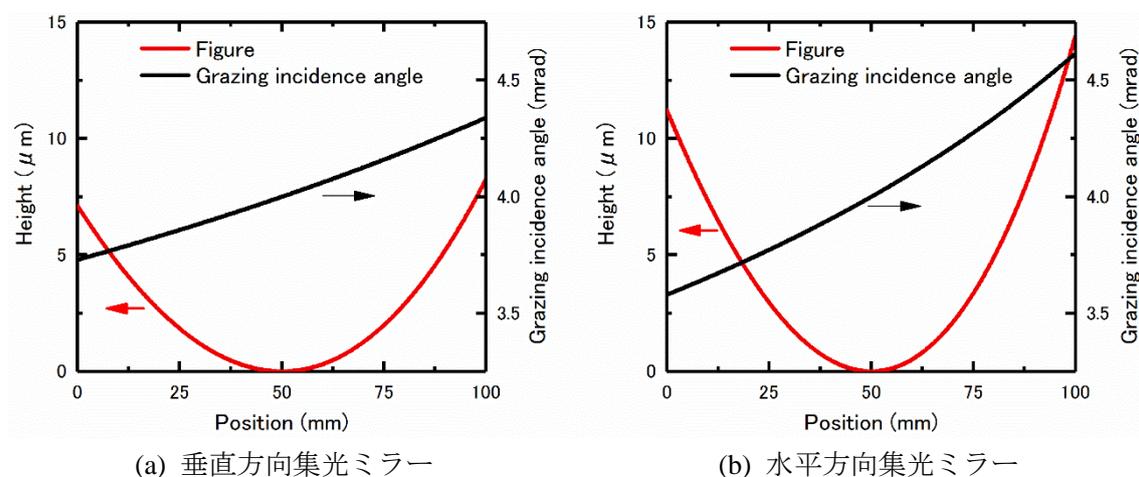
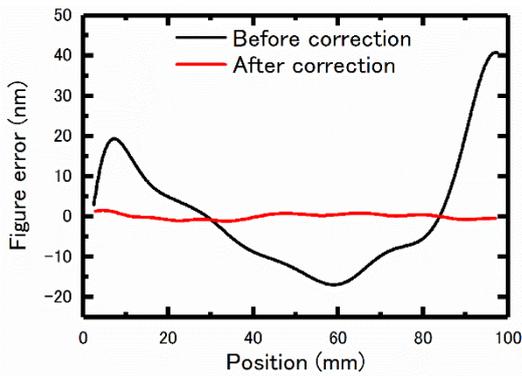


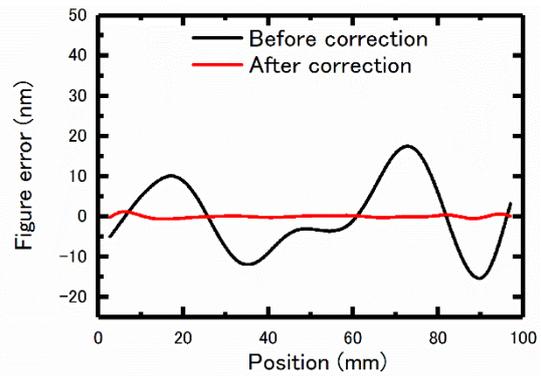
図 6.2 KB ミラーの理想楕円形状

6.1.2 X線ペンシルビームスキャン法による形状可変ミラーの形状修正

オフラインで作成した電圧パターンの印加後、X線ペンシルビームスキャン法により形状誤差を計測し修正を行った。この際、形状可変ミラーの上流側にあるスリット幅を $20\ \mu\text{m}$ とし、スリット位置を移動させることでミラー各部 20 点での傾斜誤差の測定を行った。形状可変ミラーの形状修正結果を図 6.3 に示す。図 6.3 の黒線は電圧パターンを印加した際の各ミラーの変形誤差を示しており、垂直方向集光ミラーでは PV60 nm、水平方向集光ミラーでは PV40 nm の変形誤差があることがわかる。形状修正後の形状誤差は図 6.3 の赤線で示されるものであり、どちらのミラーにおいても PV2 nm の高精度で形状を修正することに成功した。なおこの結果は、レイリーの 4 分の 1 波長則に基づく許容誤差 3.9 nm (入射 X 線のエネルギー: 10 keV, 入射角 4 mrad) を充分満たしている。



(a) 垂直方向集光ミラー

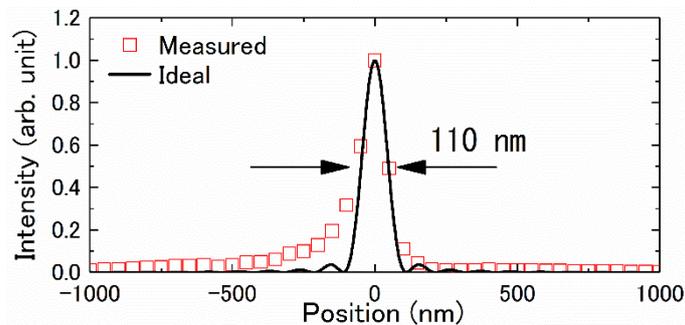


(b) 水平方向集光ミラー

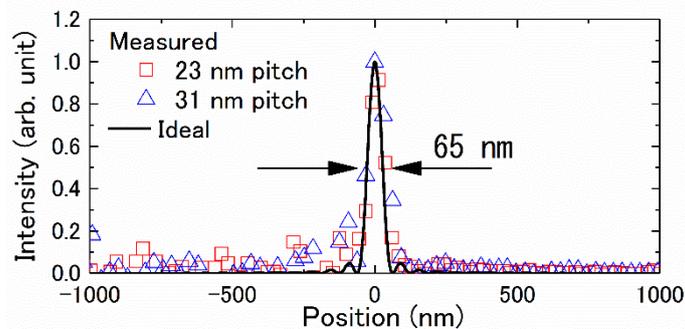
図 6.3 X 線ペンシルビームスキャン法による形状誤差の計測結果

6.1.3 集光ビームプロファイルの評価

形状修正後，焦点位置で明視野ワイヤースキャン法を用いて集光ビームプロファイルの評価を行った．なお集光プロファイル計測時には光源スリット(TC slit)幅を $10\ \mu\text{m}$ として集光プロファイルの計測を行っている．結果を図 6.4 に示す．プロットは実測値，黒線は Fresnel-Kirchhoff の回折積分に基づく波動光学計算[30,49]により求められる理想集光プロファイルである．垂直方向で半値幅 $110\ \text{nm}$ ，水平方向で半値幅 $65\ \text{nm}$ と理想集光径 ($98\ \text{nm}$ (垂直) \times $58\ \text{nm}$ (水平)) と同等なサイズの集光ビームの形成に成功した．



(a) 垂直方向強度プロファイル



(b) 水平方向強度プロファイル

図 6.4 焦点位置での集光ビームプロファイル

以上の結果から、オフラインの電圧パターン作成とオンラインでのペンシルビームスキャン法を用いた形状修正法により、開発したミラーはナノメートル精度で形状を制御し、回折限界集光を達成できる性能を持つことが分かった。

6.2 二枚の形状可変ミラーによる二段一次元集光実験[55]

6.2.1 二段一次元集光光学系の装置構成

前段ミラー光学系において形状可変ミラーによる回折限界条件でのナノビーム形成が可能であることが示された。次に二枚の形状可変ミラーを用いて、二段一次元集光光学系を構築し集光実験を行った結果について示す。実験時の装置構成を図 6.5 に示す。装置は上流側から、形状可変ミラー上に照射する X 線を制限するためのスリット、および、入射する X 線の強度をモニターするためのイオンチャンバー、前段水平集光形状可変ミラー、中間焦点位置に配置されたペンシルビーム法を行うためのビームモニター、後段水平集光形状可変ミラー、最終焦点位置にペンシルビーム法を行うためのビームモニター、集光プロファイル評価用の金ワイヤー($\phi 200 \mu\text{m}$)、集光ビーム強度を計測するための PIN フォトダイオード、そしてビーム軌道をモニターするための CCD カメラにより構成されている。各ミラーのパラメータは表 6.2 に示す。各ミラーの理想形状は楕円であり(図 6.6)、使用した X 線のエネルギーは 10 keV である。

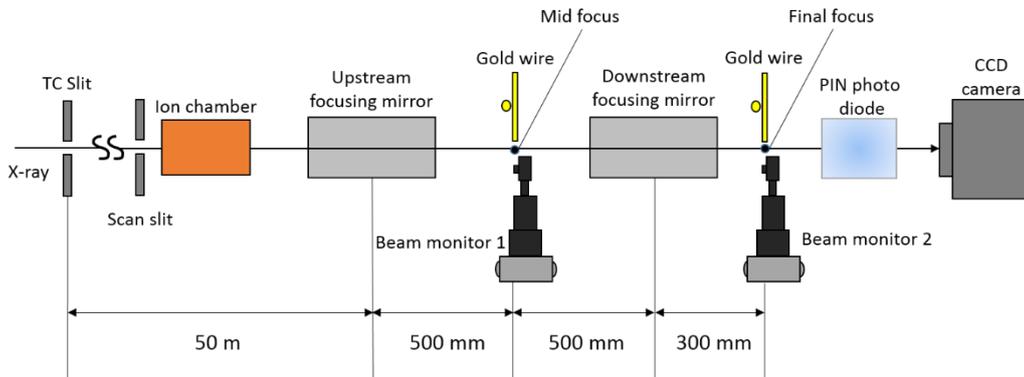


図 6.5 二段一次元集光装置の構成図

表 6.2 各ミラーのパラメータ

	Upstream focusing mirror	Downstream focusing mirror
Front focal length (mm)	50000	500
Back focal length (mm)	500	300
Glazing incidence angle at center (mrad)	4	4

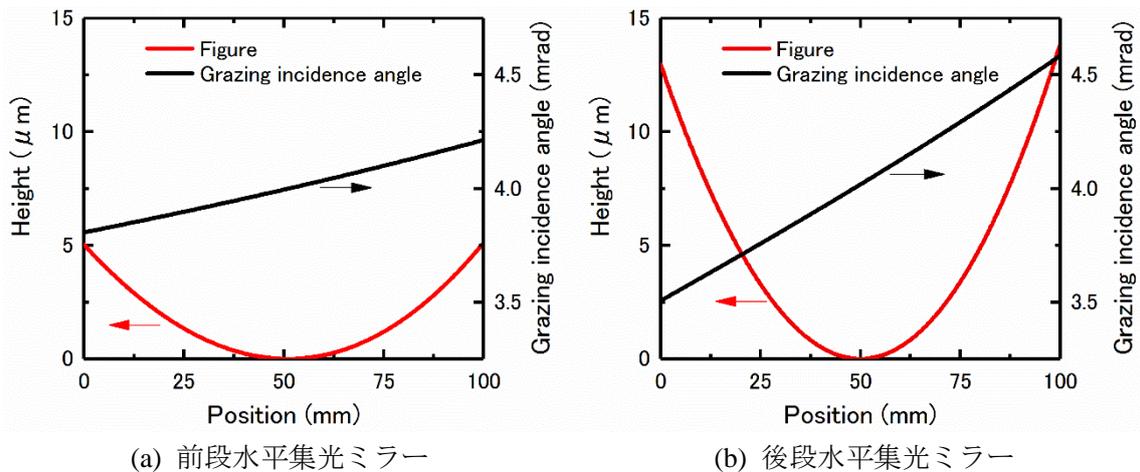


図 6.6 各ミラーの理想楕円形状

6.2.2 二段光学系における X 線ペンシルビームスキャン法

二段光学系の場合、X 線ペンシルビームスキャン法による傾斜誤差の計測は前段集光ミラーの焦点と後段集光ミラーの焦点の 2 箇所で行う。中間焦点での計測を行った際は前段ミラーの傾斜誤差の情報を、最終焦点での計測では、前段ミラーと後段ミラーの傾斜誤差の情報が足し合わさった情報が得られる。通常は、前段集光ミラーの形状修正を行った後に、後段集光ミラーの形状修正を行うことで、両方のミラーを回折限界達成可能な精度で形状を制御する。しかし、中間焦点を後段集光ミラー側に近づけ N.A.を小さくした場合、後段集光ミラーの反射領域、つまり、有効なミラー長は 10 ~ 20 mm と短くなってしまう。そのため、後段ミラー基板上に周期構造を作るために利用可能な電極数は、ミラー中央部に配置された数個と少なくなるので、短周期形状の形状創成を行うことが困難になる。その際には、最終焦点で計測された傾斜誤差の情報から、二段開口数可変光学系の波面補正機能を利用し、前段集光ミラーの高周期の形状を調整することで、最終的な波面を補償し回折限界集光を達成することが可能である。

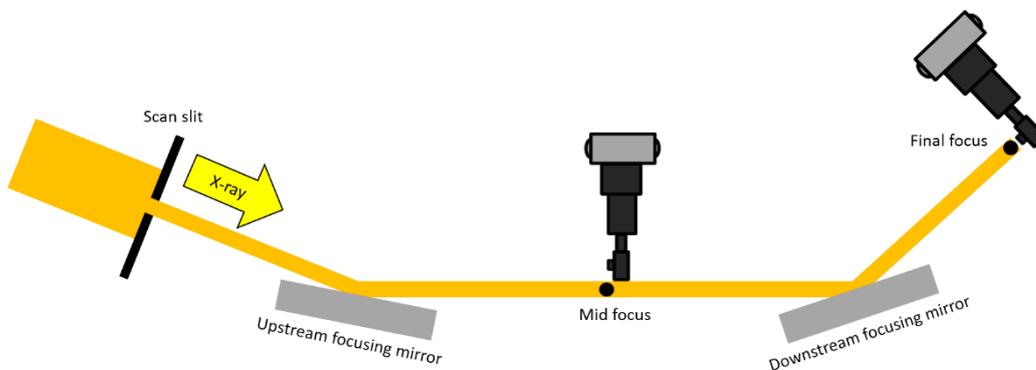


図 6.7 二段光学系における X 線ペンシルビームスキャン法

6.2.3 X線ペンシルビームスキャン法による形状可変ミラーの形状修正

X線ペンシルビームスキャン法による計測はスリット幅を $20\ \mu\text{m}$ とし X線の照射領域をミラー全長の 20 分の 1 として、スリット位置を移動させることでミラー各部の 20 点で傾斜誤差の測定を行った。

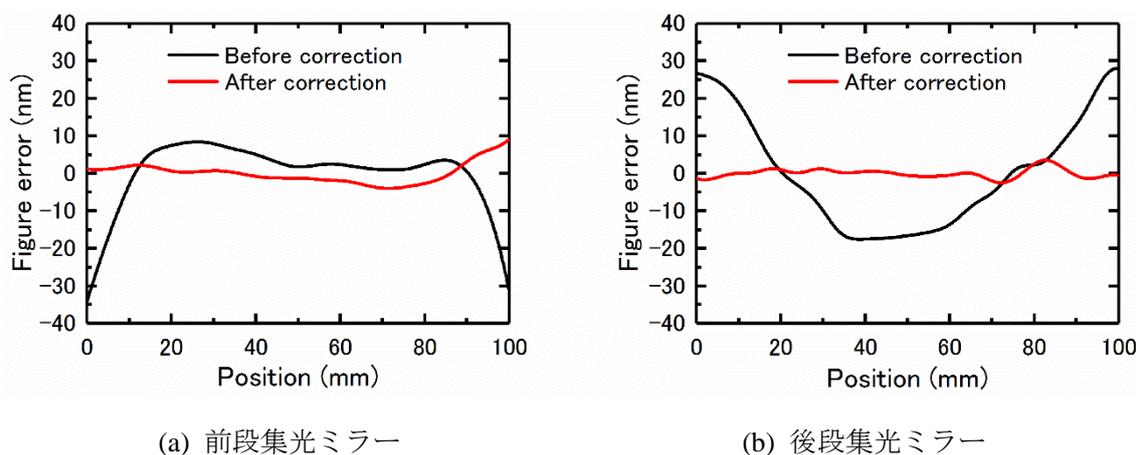


図 6.8 X線ペンシルビームスキャン法による形状修正結果

形状可変ミラーの形状修正結果を図 6.8 に示す。図 6.8 の黒線は電圧パターンを印加した際の各ミラーの変形誤差を示しており、前段水平方向集光ミラーでは $PV41\ \text{nm}$ 、後段水平方向集光ミラーでは $PV45\ \text{nm}$ の変形誤差があることがわかる。その後、X線ペンシルビームスキャン法による計測と形状修正を行った。なお、後段水平集光ミラーの形状誤差は最終焦点で計測されるものであるため、前段形状可変ミラーの形状誤差も含まれている。形状修正後の形状誤差は図 4.7 の赤線で示されるものであり、前段水平方向集光ミラーでは $PV9\ \text{nm}$ 、後段水平方向集光ミラーでは $PV3\ \text{nm}$ の精度で形状を修正することに成功した。

6.2.4 集光ビームプロファイルの評価

形状修正後、最終焦点位置で明視野ワイヤースキャン法を用いて集光ビームプロファイルの評価を行った。結果を図 6.9 に示す。なお集光プロファイル計測時には光源スリット幅を $10\ \mu\text{m}$ とし集光プロファイルの計測を行っている。プロットはワイヤーの送りピッチを $17\ \text{nm}$ 、 $21\ \text{nm}$ としたときの実測値、黒線は波動光学計算により求められる理想集光プロファイルである。図に示すように、最終焦点において半値幅 $90\ \text{nm}$ という理想集光径 ($86\ \text{nm}$) に近い集光ビームの形成に成功した。以上の結果から、形状可変ミラーによる二段集光光学系においても回折限界集光の達成が可能であることが示された。

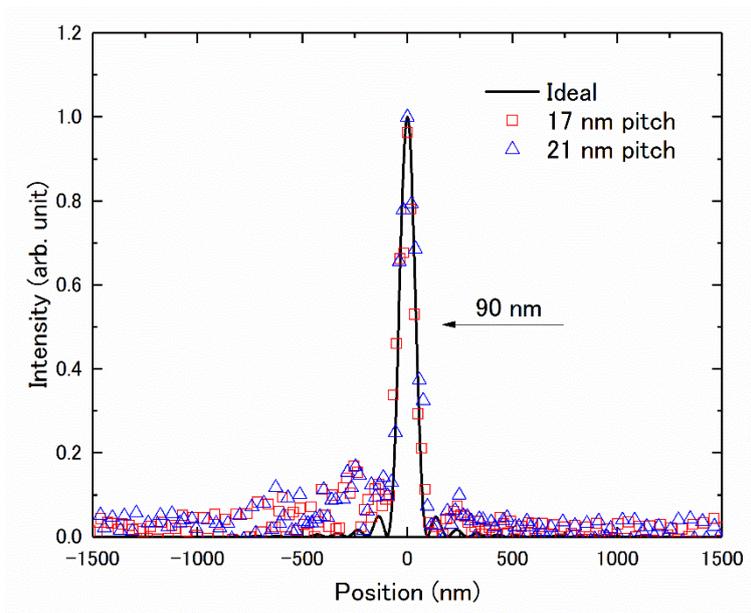


図 6.9 最終焦点で計測された集光ビームプロファイル

6.3 二段開口数可変光学系による X 線ビームの形成[54,55]

6.3.1 二段開口数可変光学系の装置構成

以上2つの実験から、ビームライン中でも高精度に形状を制御し、回折限界集光が可能であることが示された。そこで4枚の形状可変ミラーを用いて二段二次元集光光学系を構築し、光学系のNAを変化させることで集光径を変化させる実験を行った。実験時の装置構成を図6.10に、装置の写真を図6.11に示す。装置は上流側から、形状可変ミラー上に照射するX線を制限するためのスリット、入射するX線の強度をモニターするためのイオンチャンバー、前段KBミラー光学系、中間焦点位置に配置されたペンシルビームスキャン法を行うためのビームモニター1 (BM1)、後段KBミラー光学系、最終焦点位置にペンシルビーム法を行うためのビームモニター2 (BM2) および集光プロファイル評価用の金ワイヤー (ϕ 200 μm)、集光ビーム強度を計測するためのPINフォトダイオード、ビーム軌道をモニターするためのCCDカメラ、そして、コリメート光形成実験の際に用いるビームモニター3 (BM3) によって構成されている。

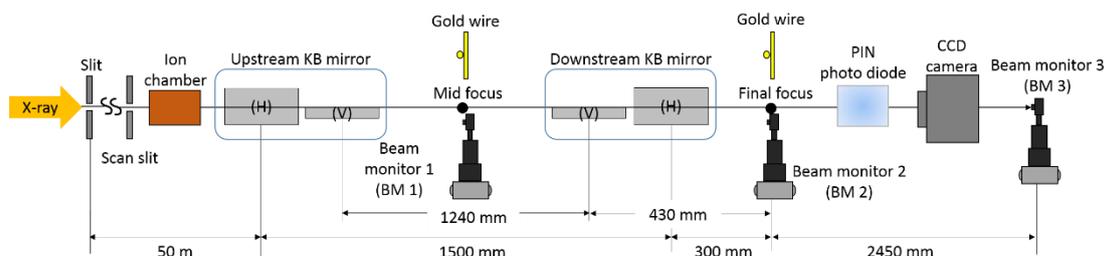


図 6.10 二段開口数可変光学系の装置構成

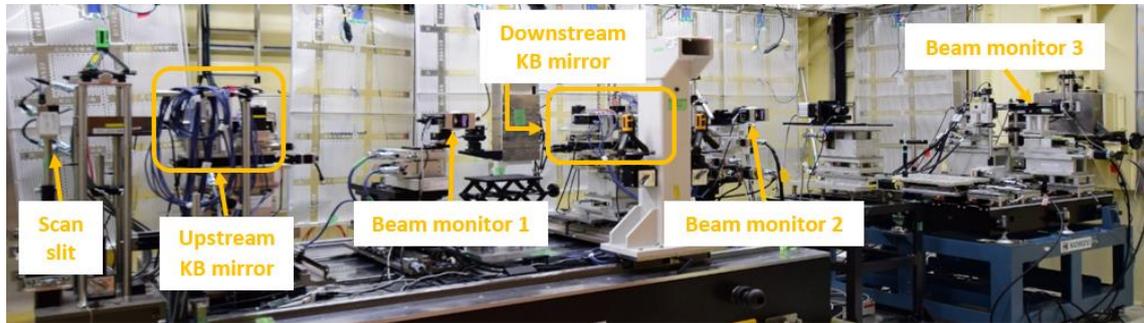


図 6.11 二段開口数可変光学系の装置写真

4 枚のミラーは上流側から水平方向集光ミラー，垂直方向集光ミラー，垂直方向集光ミラー，水平方向集光ミラーの順番で配置されている．本光学系において，垂直方向集光ミラー間距離は 1240 mm，水平方向集光ミラー間距離は 1500 mm，後段水平方向集光ミラー焦点距離は 300 mm，後段垂直方向集光ミラーの焦点距離は 300 mm，すべてのミラーの斜入射角は 4 mrad でそれぞれ固定されている．また入射 X 線のエネルギーは 10 keV である．

6.3.2 二段開口数可変光学系による可変集光実験

6.3.2.1 可変集光実験

可変集光実験の際には表 6.3 に示される 3 つの光学系のパラメータを設計し実験を行った．

表 6.3 可変集光実験時の光学系の設計値

	Horizontal	Vertical
Source- Upstream mirror (mm)	50000	50130
Upstream mirror-Mid focus (mm)		
Mode I	750	620
Mode II	1000	870
Mode III	1250	1120
Upstream mirror- Downstream mirror (mm)	1500	1240
Downstream mirror-Final focus (mm)	300	430
Beam monitor 2 - Beam monitor 3 (mm)	2450	2450
Grazing incidence angle at center (mrad)		
Upstream mirror	4.0	4.0
Downstream mirror	4.0	4.0

各実験系条件における NA を表 6.4 に示す. 開口数比率 (Aperture ratio) は後段ミラー全領域を照明した際を 1 としている. 理想集光サイズは波動光学計算により求めた. 垂直方向では 148 nm ~ 1423 nm, 水平方向では 108 nm ~ 530 nm の集光ビームを形成できる設計となっている.

表 6.4 各実験条件における開口数と理想集光ビームサイズ

	Mode I		Mode II		Mode III	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
NA ($\times 10^{-4}$) ^a	5.33	3.72	2.67	1.60	1.07	0.409
Aperture ratio	1.00	1.00	0.50	0.43	0.20	0.11
Ideal spot size in FWHM (nm)	103	148	209	353	530	1423

^a $NA = L \sin \theta / (2f)$

L : ミラー上の X 線照明領域, θ : 斜入射角, f : 焦点距離

図 6.12 に各実験条件における 4 枚のミラーの理想形状を示す. 前段ミラーは最大曲げ量 4 μm , 最小曲げ量 2 μm , 後段ミラーは最大曲げ量 30 μm , 最小曲げ量 10 μm の形状の変形を実現する必要がある.

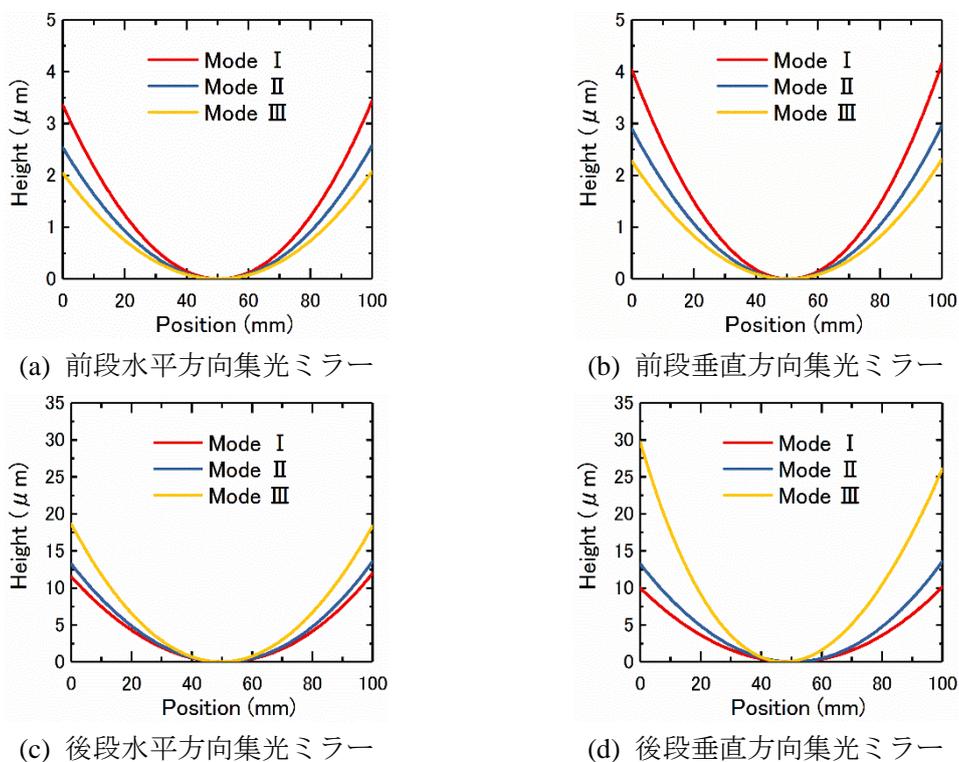


図 6.12 各実験条件での理想ミラー形状

6.3.2.2 X線ペンシルビームスキャン法による形状誤差の修正結果

X線ペンシルビームスキャン法による形状誤差の計測は、前段ミラーは中間焦点に設置したビームモニターで、後段ミラーは最終焦点に設置したビームモニターでそれぞれ行った。X線の照射領域は上流ミラーの20分の1とし、20点で傾斜誤差の測定を行った。各実験条件におけるX線ペンシルビームスキャン法による形状誤差の計測結果を図6.13～図6.15に示す。黒線はX線ペンシルビームスキャン開始時の各ミラーの形状誤差を示しており、最大で20 nm程度の形状誤差があることがわかる。これらの形状誤差をX線ペンシルビームスキャンの計測に基づき、赤線に示すようにPV2 nm以下に修正した。またMode IIIの後段形状可変ミラーの短周期形状は波面補償機能を利用し、前段形状可変ミラーの電圧を修正することで補正した。

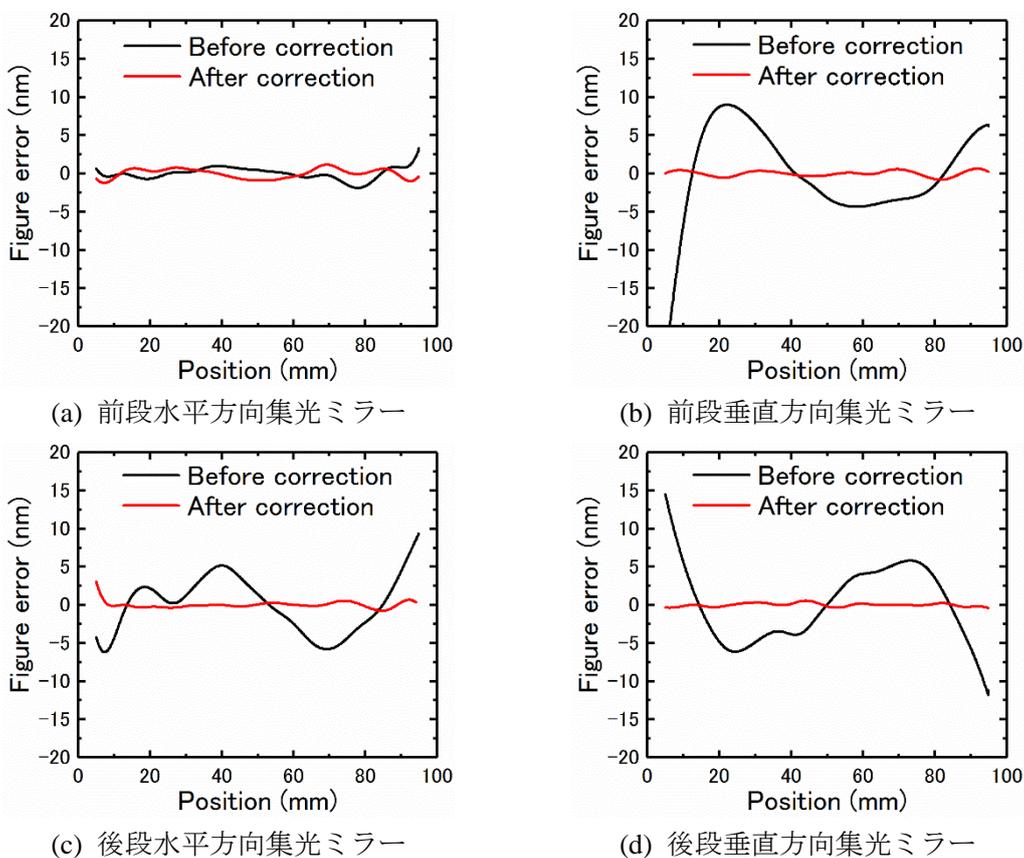
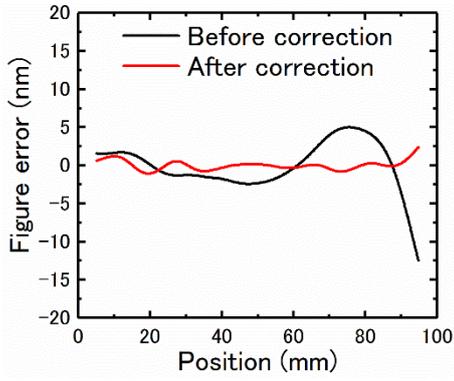
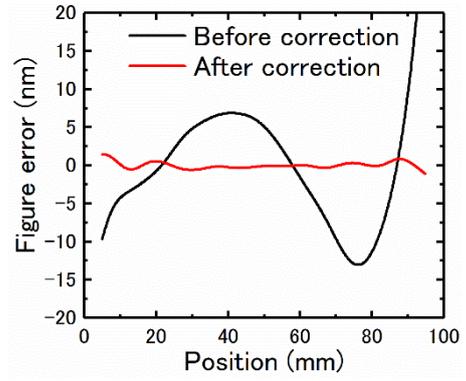


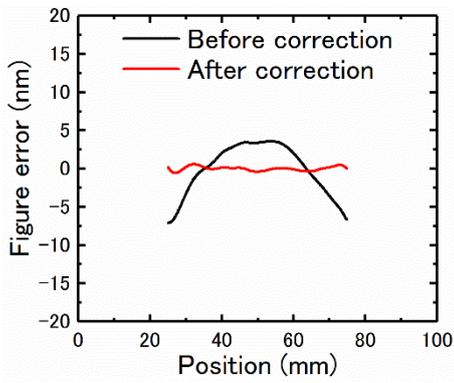
図 6.13 ペンシルビームスキャン法による形状修正結果 (Mode I)



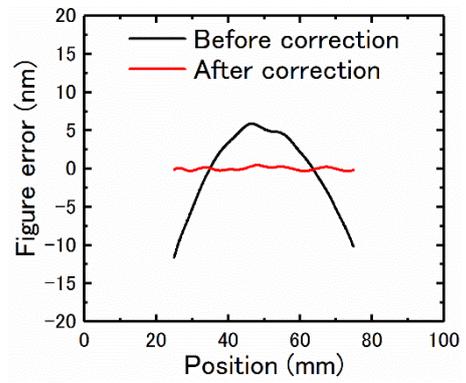
(a) 前段水平方向集光ミラー



(b) 前段垂直方向集光ミラー



(c) 後段水平方向集光ミラー



(d) 後段垂直方向集光ミラー

図 6.14 ペンシルビームスキャン法による形状修正結果 (Mode II)

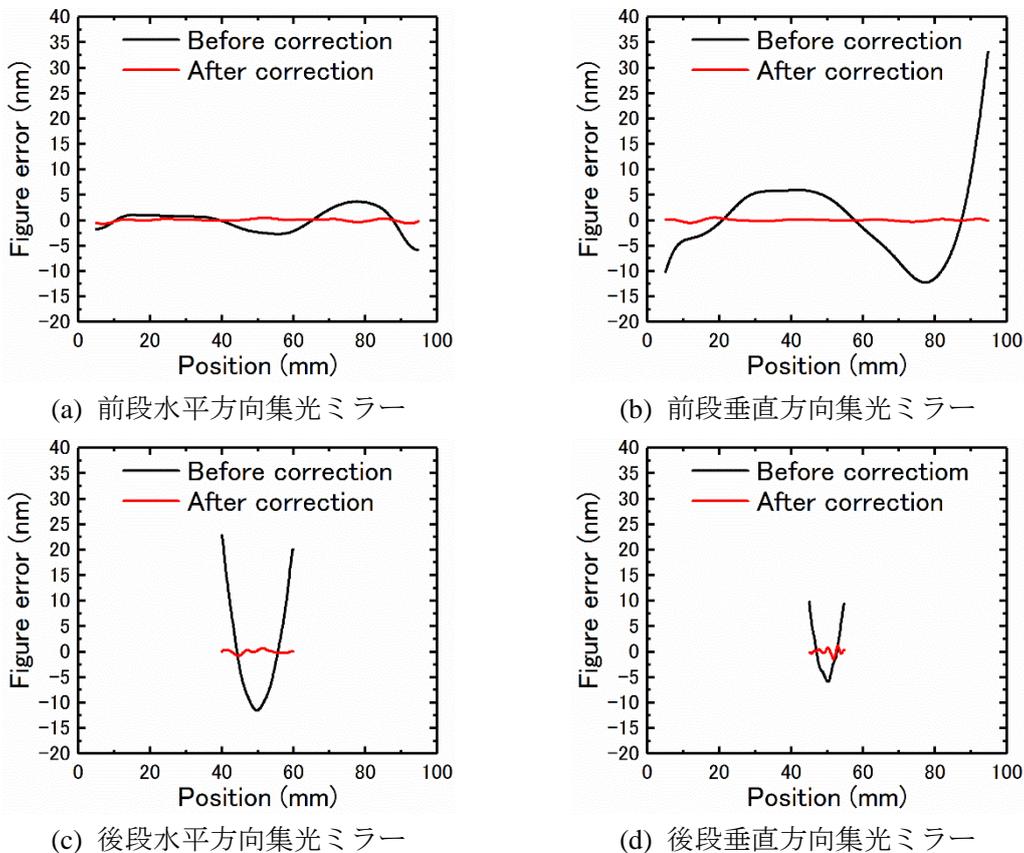


図 6.15 ペンシルビームスキャン法による形状修正結果 (Mode III)

6.3.2.3 集光ビームプロファイルの評価

各ミラーの形状誤差の修正完了後、最終焦点位置において集光ビームプロファイルの計測を行った。Mode I, II では暗視野ナイフエッジスキャン法[56]を、Mode III では明視野ワイヤースキャン法を用いている。これらのビーム径の測定手法は計測する集光径の大きさから使い分けをした。計測の際の光源スリット幅は $10\ \mu\text{m}$ 角に設定している。また、最終焦点から $1.3\ \text{m}$ 下流に設置した CCD カメラ(AA50MOD, リレーレンズ: 2 倍, シンチレータ: P43($10\ \mu\text{m}$), CCD: ORCA-R2, 実効ピクセルサイズ: $3.05\ \mu\text{m}/\text{pixel}$)で、プロジェクション像を取得した。図 6.16 に Mode I~III の集光ビームプロファイルの計測結果を示す。計測から得られた集光ビームプロファイルと波動光学シミュレーションによる計算結果は良い一致を示しており、ほぼ回折限界集光を達成できていることが判る。また、プロジェクション像から求めた CCD 上でのビームサイズと、Mode I のプロジェクション像サイズを基準としたときの、各 Mode の開口比をそれぞれ表 6.5 に示す。この結果より、確かに N.A. は予想したとおりに変更されており、想定した光学系が構築できていることが確認された

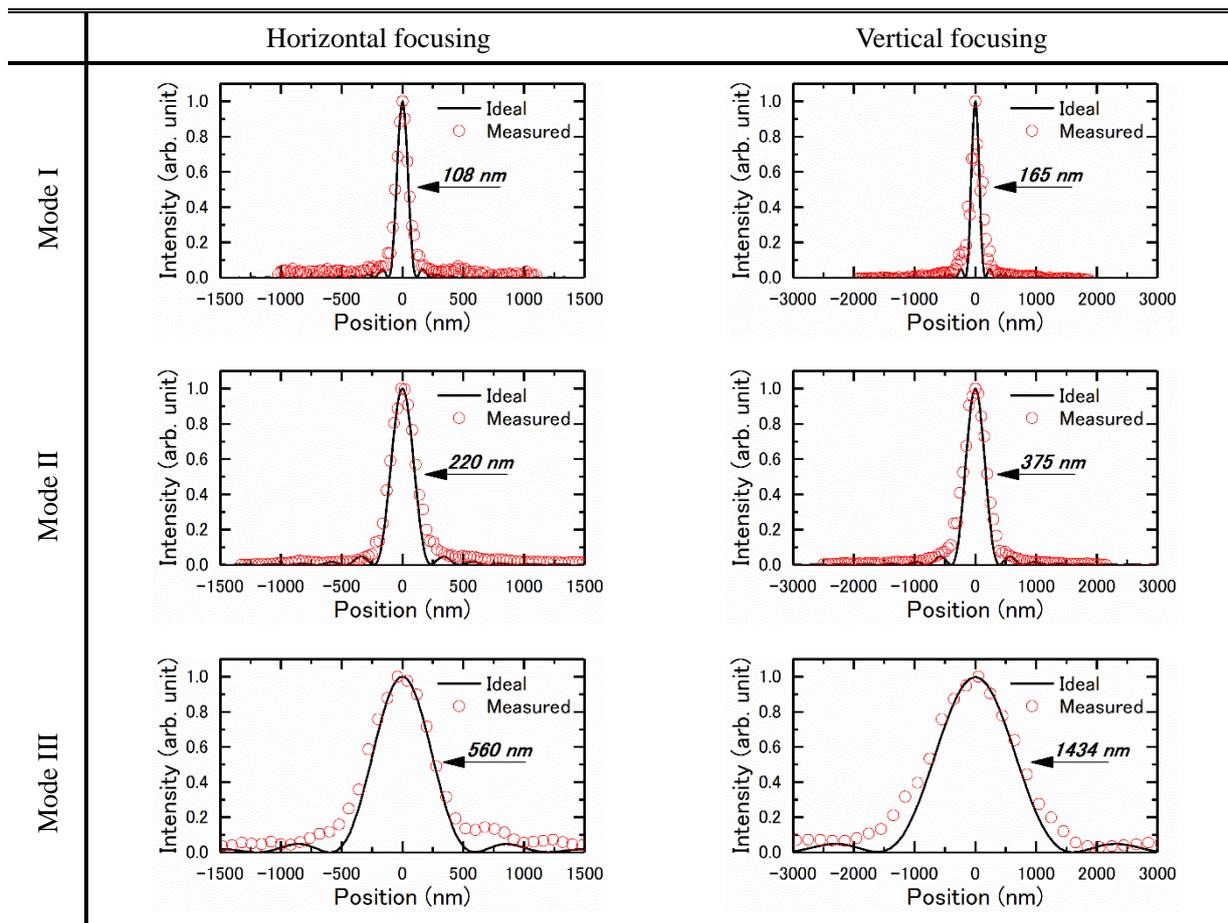


図 6.16 各実験条件において計測された集光ビームプロフィール

表 6.5 プロジェクション像のサイズから求めた開口数比率

	Beam size on CCD		Aperture ratio	
	Horizontal (μm)	Vertical (μm)	Horizontal	Vertical
Mode I	1220	857	1	1
Mode II	580	365	0.475	0.425
Mode III	250	82	0.205	0.096

次に開口数の比率を横軸，集光径の半値幅を縦軸にとったときのグラフを図 6.17 に示す。直線は開口数比率を変えた場合の各方向の理想集光径を表している。いずれの開口数比率においても理想値と非常によく一致を示していることがわかり，本光学系は NA 制御により最終焦点位置で任意サイズの回折限界集光径を形成できる性能があることを示している。

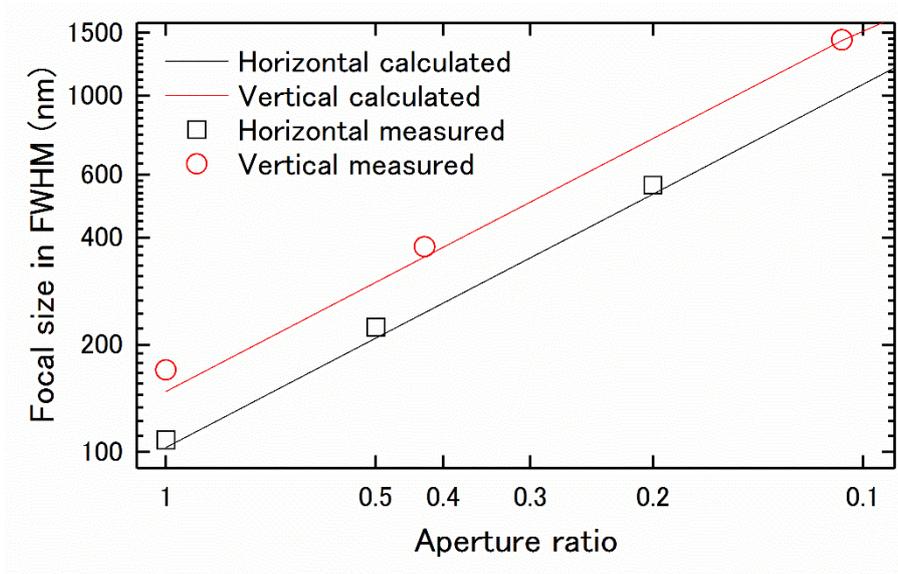


図 6.17 開口数比率と最終焦点での集光径 (半値幅)

6.3.2.4 形状可変ミラーの時間安定性評価

最後に X 線ペンシルビームスキャン法により形状安定性の評価を行った結果について示す (図 6.18) . 例として, 後段水平集光ミラーの Mode II 形状の計測結果を示す. 2.5 時間経過後の形状は修正直後と比較してもほとんど変わっておらず, ドリフト量も PV 0.6 nm とごくわずかであるため本光学系は安定した回折限界集光ビームの供給ができることが示されている.

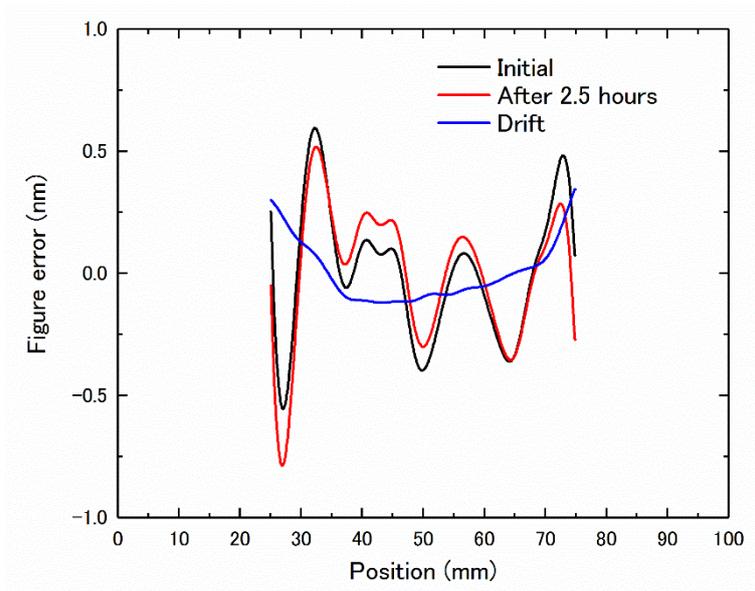


図 6.18 形状可変ミラーの時間安定性

6.3.3 コリメート光の形成実験

二段開口数可変光学系は、後段ミラーの形状を放物面形状とすることで、最大で後段ミラーの開口数サイズまでのコリメート光の形成が可能である。そこで集光実験の際と同じ実験系を使用して数百 μm サイズの X 線ビームの形成を試みた。コリメート光の形成実験は、集光実験の際に設計した Mode I と Mode III の条件で行い、入射 X 線のエネルギーは 10 keV である。

6.3.3.1 コリメート光形成の後段ミラーの形状調整法

コリメート光形成の際、X 線ペンシルビームスキャン法によるミラー形状の最適化は次のように行った。まず初めに、中間焦点に設置したビームモニターを利用して、前段 KB ミラーを楕円に変形させた。ここまでの手順は、集光ビームを掲載させた集光実験の際と同じである。集光ビームを作り出す手順と異なるのはここからである。次に、後段ミラー下流に置かれた 2 つのビームモニターを用いて X 線ペンシルビーム法によって、平行度を計測する (図 6.19)。スキャンスリットを走査した際に生じるビーム位置移動量 Δz が 2 つのビームモニターで一致した場合、ビームは平行であることを意味する。一方、2 つのビームモニターで異なる移動量を示した場合、平行でないことを意味する。この際、ミラー各照射領域でのビームの平行度をミラー近傍に配置されたビームモニター 2 (BM2) で計測されたビーム移動量 Δz_1 、ミラー遠方に配置されたビームモニター (BM3) で計測された移動量 Δz_2 と BM 間距離 L を用いて $(\Delta z_1 - \Delta z_2) / L$ の数式に従って決定できる。この平行度分布が最小になるように後段ミラーの形状を制御した。

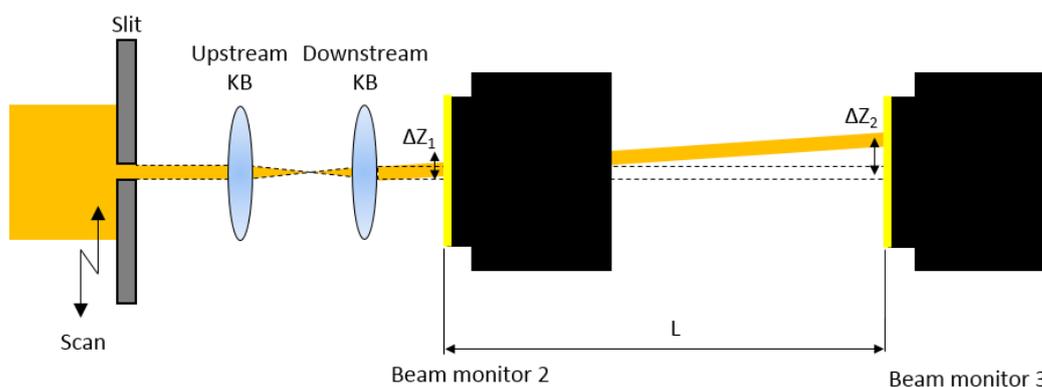
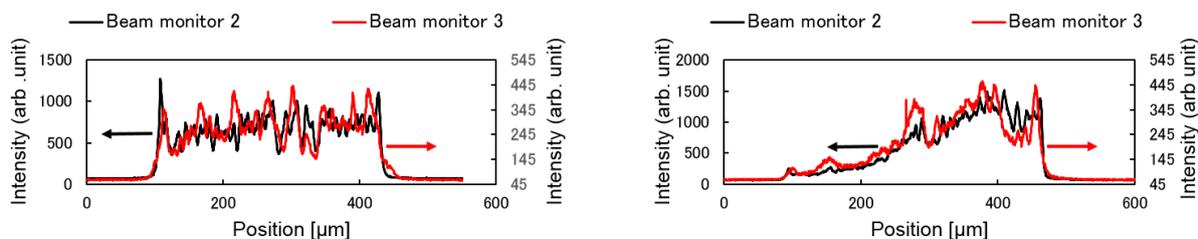


図 6.19 X 線ペンシルビームスキャン法を利用したコリメート光の平行度計測

6.3.3.2 実験結果

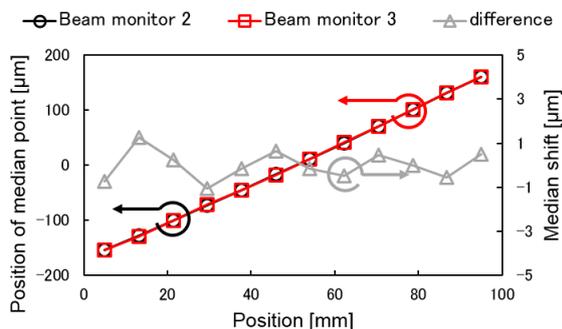
図 6.20 (a), (b)に Mode I の条件でビームモニター2 およびビームモニター3 で一次元強度プロファイルを示す。これらの結果から示されるように、2450 mm 先での X 線ビームのサイズは変化していないことがわかる。またこの際に計測された X 線のビームサイズは 314 μm (水平方向) \times 358 μm (垂直方向)であった。次に X 線ビームの平行度の評価を X 線ペンシルビームスキャン法により行った。スリットを $\sim 25 \mu\text{m}$ に設定し、スリットサイズと同じピッチで 1 2 回走査させた。図 6.21 に測定結果を示す。X 線軌道ずれの標準偏差(σ)は 0.63 μm (水平方向), 0.71 μm (垂直方向)となり、 2σ の値から平行度を計算すると、水平方向で 0.51 μrad 、垂直方向で 0.58 μrad であった。図 6.22 に Mode III の実験条件で計測された同様の結果を示す。Mode III の条件で計測された X 線サイズは 127 μm (水平方向) \times 65 μm (垂直方向)であった。また、同様に X 線平行度の確認を X 線ペンシルビームスキャン法により行った。この際のスリットサイズは 20 μm でスリットサイズと同じピッチで 18 回操作させた。図 6.23 (a),(b)に測定結果を示す。X 線軌道ずれの標準偏差(σ)は 2.6 μm (H), 1.9 μm (V)となった。水平方向に関しては、形状の修正中に上段水平方向ミラー上流側 12 mm \sim 16.8 mm の電圧を制御する印加ユニットが出力値の最大に達してしまったため十分な形状修正が行えなかった。これは、後段ミラーの形状誤差を前段ミラーで補正したために、前段ミラーの変形量が予想よりも大きくなったためである。この影響が生じている最初の 3 点を除くと水平方向の X 線軌道ずれの標準偏差は 0.47 μm となった。以上の結果から平行度を計算すると、水平方向で 0.47 μrad 、垂直方向で 1.6 μrad となった。



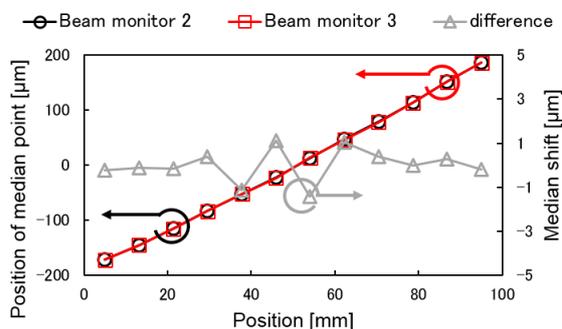
(a) 水平方向強度プロファイル

(b) 垂直方向強度プロファイル

図 6.20 各ビームモニターにより観測されたコリメート光の一次元強度プロファイル (Mode I)

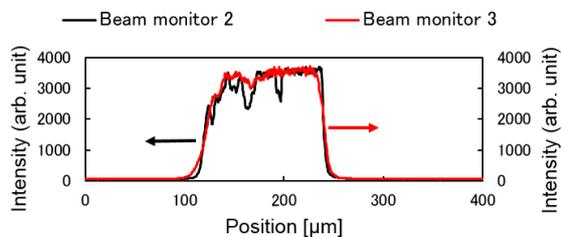


(a) 水平方向

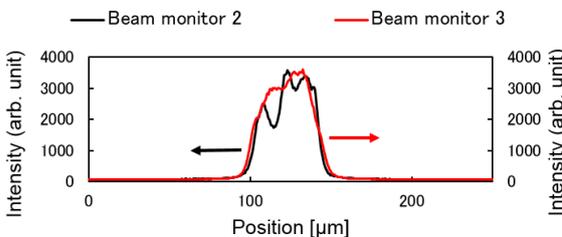


(b) 垂直方向

図 6.21 X 線ペンシルビームスキャン法により計測されたコリメート光の平行度 (Mode I)

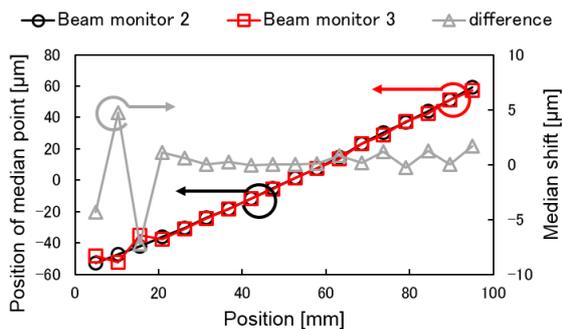


(a) 水平方向強度プロファイル,

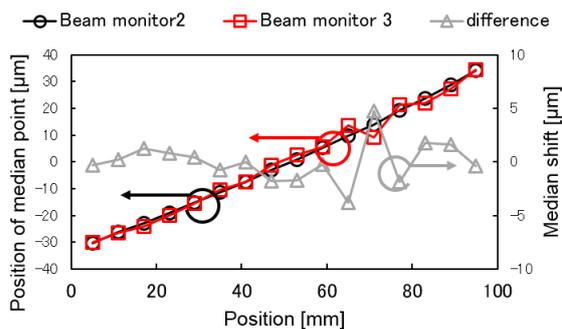


(b) 垂直方向強度プロファイル

図 6.22 各ビームモニターにより観測されたコリメート光の一次元強度プロファイル (Mode III)



(a) 水平方向



(b) 垂直方向

図 6.23 X 線ペンシルビームスキャン法により計測されたコリメート光の平行度 (Mode III)

以上の結果から二段開口数可変光学系を用いることで、二種類の異なるサイズかつ $1 \mu\text{rad}$ の平行度を有する X 線コリメート光の形成に成功した。よって、本光学系は数百 μm ~ 100 nm サイズの X 線ビームの形成が可能であることが証明でき、様々な実験系に装置構成を変更することなく対応できる光学系の構築が可能となった。

6.4 結言

本章では、形状可変ミラーを用いてX線ビームの形成実験を行った結果について述べた。

- (1) 二枚の形状可変ミラーによる KB ミラー集光光学系を構築し、集光実験を行った。ペンシルビームスキャン法の計測結果に基づきミラー形状の修正を行った結果、PV 2 nm の精度での形状修正に成功した。また形状修正の完了後、明視野ワイヤースキャン法により集光プロファイルを計測した結果、10 keV のエネルギーを持つ X 線を半値幅で 65 nm (水平方向) × 110 nm (垂直方向) とほぼ回折限界と同等な大きさの集光ビームの形成に成功した。
- (2) 二枚の形状可変ミラーを用いて二段一次元集光光学系を構築し、集光実験を行った。中間焦点と最終焦点の二箇所でペンシルビームスキャン法による形状計測を行い、ミラー形状を修正した結果、前段ミラーで PV9 nm、後段ミラーで PV 3 nm の精度で形状を制御することに成功した。また最終焦点で明視野ワイヤースキャン法により集光プロファイルを計測した結果、10 keV のエネルギーを持つ X 線を半値幅 90 nm という回折限界と同等な大きさの集光ビームの形成に成功した。
- (3) 四枚の形状可変ミラーにより、二段開口数可変光学系を構築し、NA を変えることで集光径のサイズを制御する集光実験を行った。3 つの実験系を設計し、それぞれの条件において最終焦点でビームプロファイルの計測を行った。その結果水平方向で 108 nm ~ 560 nm、垂直方向で 165 nm ~ 1434 nm という 3 つの異なるサイズの回折限界に近い集光ビームの形成に成功した。また集光ビームサイズの変化は、開口数比率の変化とよい一致を示していた。
- (4) 集光実験と同じ光学系を用いてコリメート光の形成を試みた。2 台のビームモニターを用いたペンシルビームスキャン法を利用することで、後段ミラーの調整を行ったところ、平行度 1 μ rad 以下を有する 314 μ m (水平方向) × 358 μ m (垂直方向) と 127 μ m (水平方向) × 65 μ m (垂直方向) の 2 つの異なるサイズのコリメート光の形成に成功した。以上の結果から、二段開口数可変光学系は、数百 μ m ~ sub 100 nm サイズという広範囲で任意サイズの X 線ビームを供給可能であることを実証できた。

7. 機械曲げ機構と長尺圧電素子駆動型ミラーを組み合わせたハイブリット X線アダプティブ集光システムの開発

これまでに述べたように、我々は、高精度に変形可能な形状可変ミラーおよび制御プロセスを開発し、任意に X線サイズを制御できる二段開口数可変光学系の構築に成功している。しかし、開発した形状可変ミラーのミラー長は 100 mm 程度であるため、実験装置の構成については非常に自由度の低い光学系となってしまう。そこで、本章では、X線アダプティブ集光光学系の更なる応用をめざして、長尺かつ高精度に変形可能な形状可変ミラーを実現するハイブリット X線アダプティブ集光システムの設計・開発を行った結果について述べる。

7.1 形状可変ミラー長尺化の必要性

2章で示したように、一般に X線の集光径は、光学素子の開口数で決定される。ここで、ミラーのワーキングディスタンス (W.D.) を導入して式(2.1)~(2.4)をまとめると、回折限界集光ビームサイズ w は式(7.1)の様に示すことができる。

$$w = \lambda \times \frac{1 + 2 \frac{W.D.}{l}}{\sin \theta} \quad \left(W.D. = f - \frac{l}{2} \right) \quad (7.1)$$

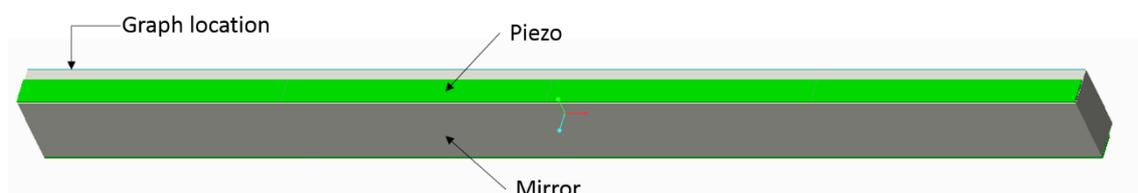
l : ミラー長, λ : 波長, θ : 入射角

W.D.: ワーキングディスタンス, f : 焦点距離

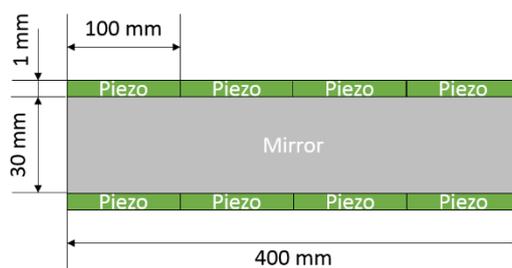
ワーキングディスタンスは実験装置を構成する上でサンプル周辺の装置の自由度を向上させるために大変重要なパラメータである。しかし、現状の 100 mm 長の形状可変ミラー光学系において、エネルギー 10 keV、入射角 4 mrad の条件において sub-50 nm の集光径を達成するためには、ワーキングディスタンスは 50 mm 以下にする必要があり、装置構成は制限されてしまう。また、入射角を大きくすることでの対応は、X線の臨界角の制限や、形状可変ミラーの変形量の増大といった原因から望ましくない。そこで、微小な回折限界集光径を達成しつつ実験装置の自由度を高めた形状可変ミラー光学系の応用展開を進めていくためには、形状可変ミラーの長尺化は必須の課題であるといえる。

7.2 圧電素子駆動型形状可変ミラーの長尺化についての検討

はじめに、長尺形状可変ミラーの構造として、今までの構造と同様に圧電素子にミラー基板を接着した構造を検討した。しかし、圧電定数が一様である圧電素子の作製長さは最大で 200 mm 程度とされており、高精度な変形が可能な長尺形状可変ミラーを作ろうとした場合には複数枚の圧電素子を継いで並べる必要がある。しかし、複数の圧電素子をつなぎ合わせて作製ミラーの場合、圧電素子間の隙間部分で変形の発生しない領域が存在し、また隙間の影響で断面二次モーメントが不連続であるという原因から、**junction effect** と呼ばれる圧電素子隙間と同周期の大きな変形の誤差が生じることが知られている。そこで、まず有限要素法 (Finite Element Method : FEM) シミュレーションを用いて **junction effect** による変形誤差の調査を行った。



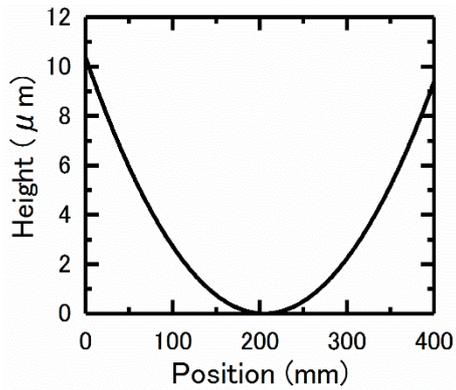
(a) 形状可変ミラーシミュレーションモデルの構造 (1/2 モデル)



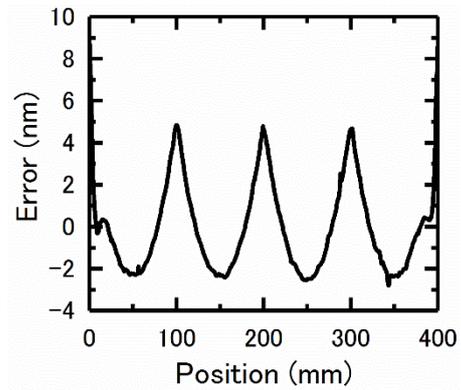
(b) 側面図

図 7.1 FEM シミュレーションモデル

シミュレーションには、長さ 400 mm、幅 30 mm、厚さ 30 mm のミラー基板を想定し、長さ 100 mm、幅 10 mm、厚み 1 mm の圧電素子を表面に 4 枚×2 列、裏面に 4 枚×2 列を貼りあわせた構造のモデルを想定した。図 7.1 に 1/2 シミュレーションモデルと断面図を示す。電圧を 500 V 与えた場合の変形について調査を行った。図 7.2 (a)はすべての圧電素子に 500 V を印加した場合のミラー基板中心の変形量を示しており、10 μm の変形量が得られる。図 7.2 (b)は、得られた変形量から 2 次関数形状を引いたものである。圧電素子隙間と同じ周期で PV6 nm の大きさで回折限界集光達成のためには、無視できない変形誤差が生じていることが分かる。



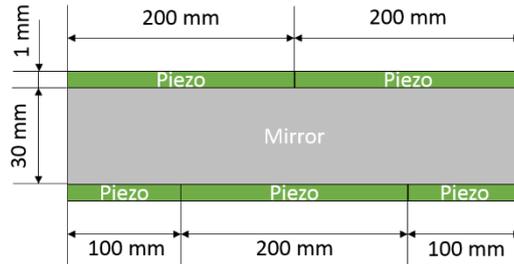
(a) 500 V 印加した際の変形量



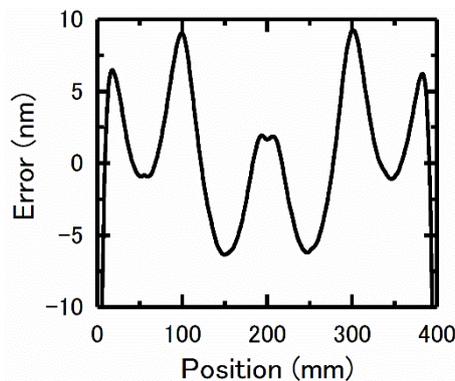
(b) 生じた短周期誤差

図 7.2 FEM シミュレーション結果

次に、図 7.3 (a) のように圧電素子の隙間位置を表面と裏面で異なる位置にした場合の変形シミュレーションを行った結果について示す。印加した電圧は同じ 500 V とした。図 7.3 (b) は計算により得られた変形量から二次関数成分を引いたものである。今回も圧電素子隙間と同じ周期で大きな変形誤差が生じてしまうことが示された。



(a) シミュレーションモデル側面図



(b) 生じた短周期誤差

図 7.3 圧電素子隙間の位置を変えた際の FEM シミュレーション

前項までのシミュレーション結果から、圧電素子をつなぎ合わせ、圧電素子のみで曲げようとしても、隙間部分で欠落した断面二次モーメントと変形しない領域の影響は大きく、構造的な見地からその欠落した断面二次モーメントを補えるような構造を提案することは現実的に難しいと考えた。そのため、圧電素子のみで頼らないような形状可変ミラーの開発が必要であると考えた。そこで、電圧 500 V を与えた際に発生する曲げモーメントを直接基板両端に与えた場合の変形シミュレーションを行った結果について図 7.4 に示す。シミュレーションモデルは図 7.1 で示したものを使用した。

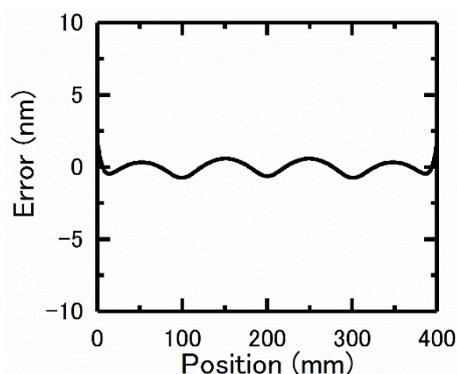


図 7.4 基板両端に曲げモーメントを与えた場合の変形誤差

周期的な変形誤差は生じているが、PV1 nm 以下と変形誤差が抑制されていることが分かる。

この結果に基づき次項より示すハイブリット型変形機構を持つ形状可変ミラーの考案を行った。

7.3 ハイブリット型変形機構をもつ形状可変ミラー

両端に曲げモーメントを与えるコンセプトは、機械曲げ機構により変形を行う形状可変ミラーと同義である。機械曲げミラーは梁の曲げ理論における両端に異なる 2 つの曲げモーメントを加える系を考える場合、図 7.5 のようなモデルで表すことができる。

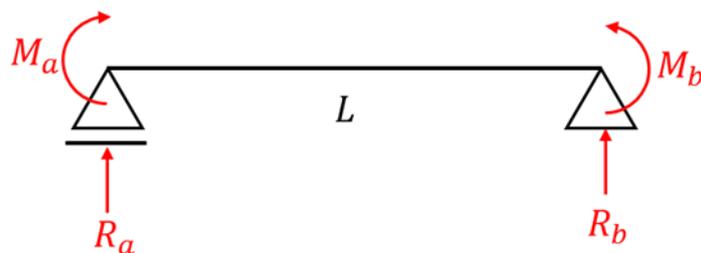


図 7.5 梁の曲げ理論における機械曲げミラーの単純モデル図

M_a, M_b ははりの両端に与える曲げモーメント, R_a, R_b は各支点に加わる反力, E はヤング率, I は断面二次モーメント, L ははりの長さ, x, y ははりの各座標を表している. ミラーのたわみ量 y は式 (7.2) で与えられるような三次関数で表現できる[35].

$$y = \left(\frac{1}{6} \left(\frac{M_b - M_a}{L} \right) x^3 + \frac{1}{2} M_a x^2 \right) / EI \quad (7.2)$$

つまり, 機械曲げ機構は 3 次関数成分までの形状創成に寄与することができる. そこで, 高精度変形を実現させるため, 機械曲げ機構と長尺圧電駆動ミラーを組み合わせたハイブリット X 線アダプティブ集光システムを考案した(図 7.6).

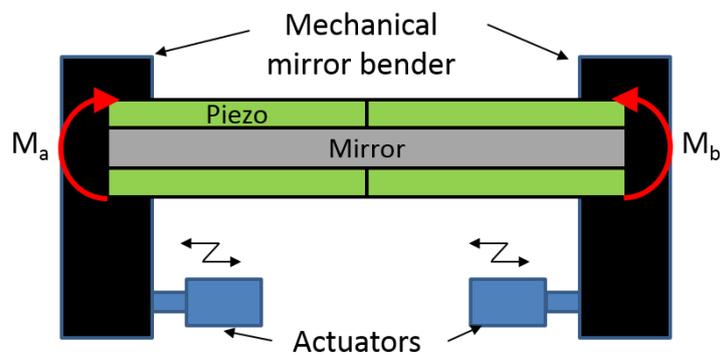


図 7.6 アダプティブ X 線集光システムの概略図

ハイブリット X 線アダプティブ集光システムのコンセプトは,

1. 機械曲げ機構によって梁の曲げ理論に従って目標形状の三次関数を変形させる.
2. 機械曲げ機構によって曲げきれなかった形状誤差・高周期形状を圧電素子によって修正する.

という 2 つの機構を用いたものになっている. また, 圧電素子によるドリフトの影響についても, 圧電素子の力に頼る部分が少ない本手法は, 圧電素子の制御という意味でとても有効なものであると考えている. またこの構造に類似したものがすでに報告されているがその変形精度は, 回折限界集光を達成するためには十分ではなく実用化にはいたっていない.

7.4 圧電素子駆動型ミラーの作製

7.4.1 圧電素子駆動型ミラーの構造についての検討

まずミラー基板として, 長尺ミラーかつ機械曲げ機構で力を加えた場合でも, 破損の影響が無いようにするという観点から, 長さ 400 mm, 幅 30 mm, 厚み 30 mm のクリアセラム基板とした. クリアセラムは熱膨張係数がゼロのガラスセラミック材である. また, これまで

の 100 mm 長ミラーを開発してきた際に得られた知見から、開発する圧電素子駆動型ミラーは温度変化による形状の変形を最小限とする圧電素子をミラー基板に対して対称に接着するバイモルフ構造とする。次に、圧電素子接着面についての検討を行った。長さ 100 mm、幅 10 mm、厚み 1 mm のミラー基板表面と裏面に接着したモデル (図 7.7 (a)) とミラー基板の側面の二面に接着したモデル (図 7.7 (b)) に対してミラー基板両端に曲げモーメントを与えた場合の変形誤差を FEM シミュレーションにより計算した。結果を図 7.8 に示す。ミラー側面に圧電素子を接着し、ミラー基板中心部から圧電素子隙間位置を離れた位置とすることで、周期的な変形誤差を抑制できることが分かった。また側面に接着した構造とすることで、圧電素子への電圧との接点の確保、ミラーのクランプ方法、ミラー反射面の最終加工等も行いやすいと思われるため、本研究では、ミラー基板側面の二面に圧電素子を接着する構造を採用した。

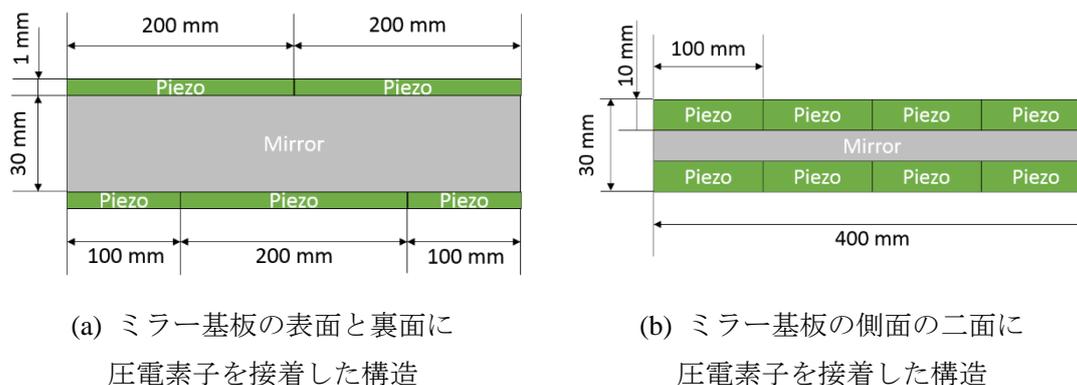


図 7.7 FEM シミュレーションモデルの側面図,

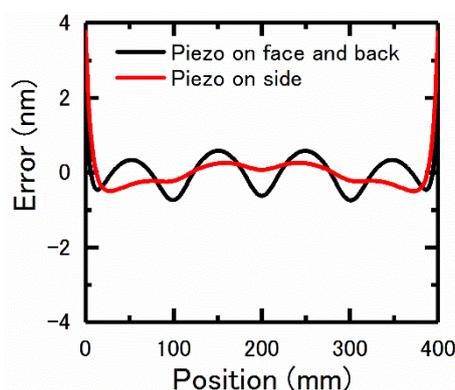


図 7.8 圧電素子の接着面の違いによる短周期の変形誤差

次に、圧電素子の隙間位置の違いにより生じる変形誤差の違いについて調査した。図 7.9 (a) ~ (c)のように長さ 100 mm と 200 mm、幅 10 mm、厚み 1 mm の二種類の圧電素子を組み

合わせた構造について検討を行った. 図 7.9 (a)は長さ 100 mm の圧電素子のみを 1 列につき 4 枚接着したもの, 図 7.9 (b) は長さ 200 mm の圧電素子 1 列につき 2 枚を接着したもの, 図 7.9 (c) は長さ 100 mm と 200 mm の圧電素子を使用し, 上列は長さ 200 mm の圧電素子を 2 枚, 下列は 100 mm 長の圧電素子を 2 枚, 200 mm 長の圧電素子を接着し圧電素子間の隙間位置を変えた構造となっている.

各モデルに対して, ミラー基板両端に曲げモーメントを与えた場合の変形誤差を FEM シミュレーションにより計算した結果を図 7.9 (d)に示す. 上部と下部で圧電素子隙間位置をずらす構造をとった場合, 変形誤差が最も少なくなるという結果となった. そのため, 本研究では, 図 7.9 (c)に示すように圧電素子を接着した構造とした.

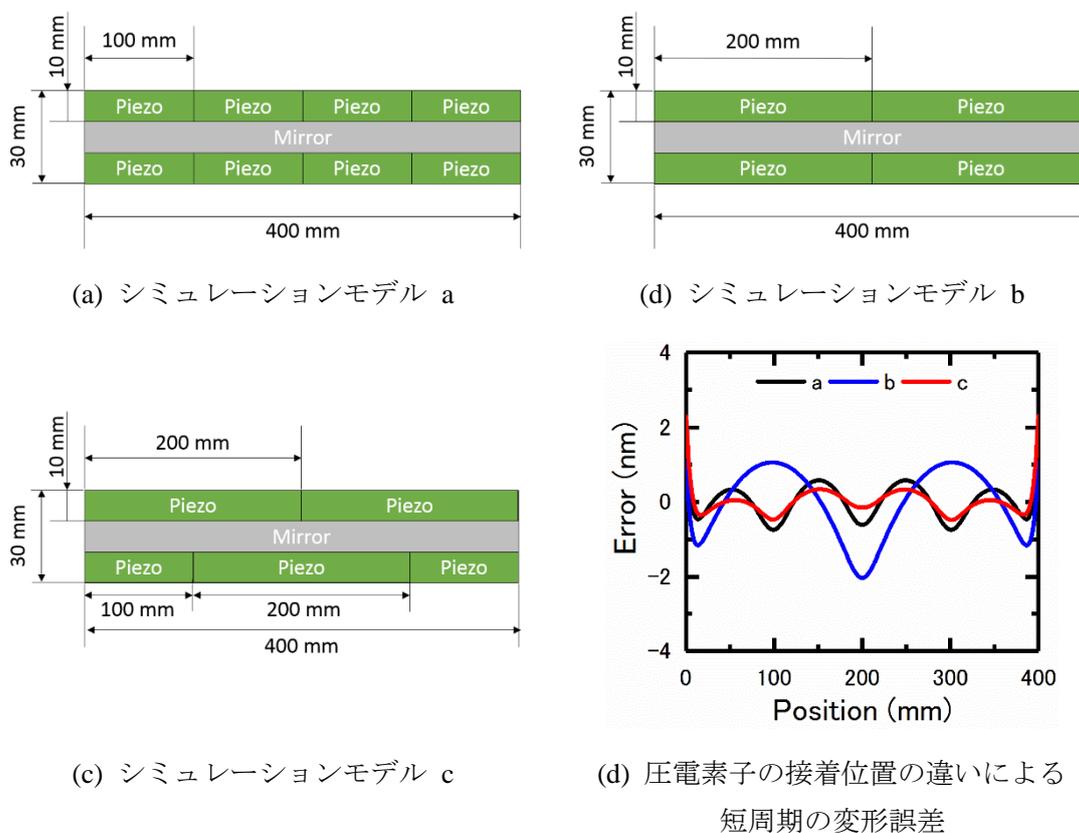
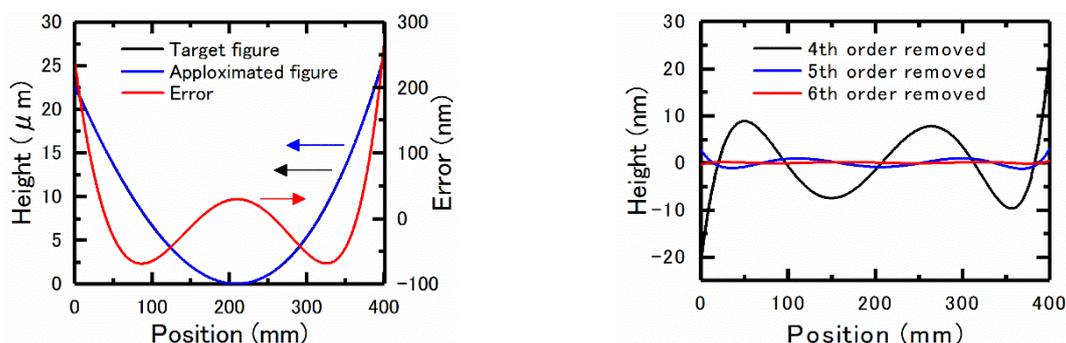


図 7.9 圧電素子の接着場所の違いによる短周期誤差の調査

7.4.2 圧電素子駆動型ミラーの電極配置についての検討

2 章で示したように, 圧電素子上の一つの電極はミラー表面上に一つの曲率を作り出すことができる. 楕円や放物面形状は, 非球面であるため, 複数の電極を設け, 曲率の分布をミラー表面上に作り出さなければならない. しかし, 作製可能な電極数は有限であるため, 許容値をみたす形状に近似して変形させる必要がある. そこで, ある楕円形状を想定した場合, 多項式フィッティングを行うことで, 楕円形状への変形に必要な電極の数を推定した.

図 7.10 (a)は理想楕円形状と梁の曲げ理論により近似した形状である。この目標形状は SPring-8 BL29XUL EH3 で集光実験を行うことを想定し光源—ミラー間距離 50 m, 中心入射角 1.5 mrad, 焦点距離 640 mm として設計した形状である。初等梁の曲げ理論による近似結果から, ミラー基板を平面から変形させた際には, ミラー上流端に 7.49 N・m, ミラー下流端に 14.5 N・m の曲げモーメントを与える必要があることが分かった。この結果から, 機械曲げ機構による変形では, PV300 nm 程度の形状誤差が残るため, この誤差を圧電駆動型ミラーにより修正する必要がある。そこでこの誤差に対して多項式フィッティングを行った結果について図 7.10 (b)に示す。これにより, 六次関数形状に変形させることで, PV1 nm 以下の精度で楕円形状に近似できることが分かった。六次関数形状に変形させることは最低 5 つの曲率を作るつまり, 5 つの電極が必要であるということが示された。そこで, この結果と電極の寸法, 制御可能な電源のチャンネル数をふまえて各圧電素子の列につき 20 個, 合計 80 個の電極を取り付け最大で 10 周期の形状へと変形できることが可能な圧電駆動型ミラーを作製した。



(a) 目標楕円形状と梁の曲げ理論に基づく
フィッティング結果 (b) 残った誤差に対する多項式フィッティング
結果

図 7.10 圧電素子駆動型ミラーの電極数の検討

作製した長尺圧電素子駆動型ミラーを図 7.11 に各種ミラーパラメータを表 7.1 に示す。X 線の反射領域はミラー基板中央部に位置する。反射領域にはモリブデン(厚さ 70 nm)をマグネトロンスパッタリング法により成膜した。圧電素子表面には電極として Cr をマグネトロンスパッタリング法により作製した。

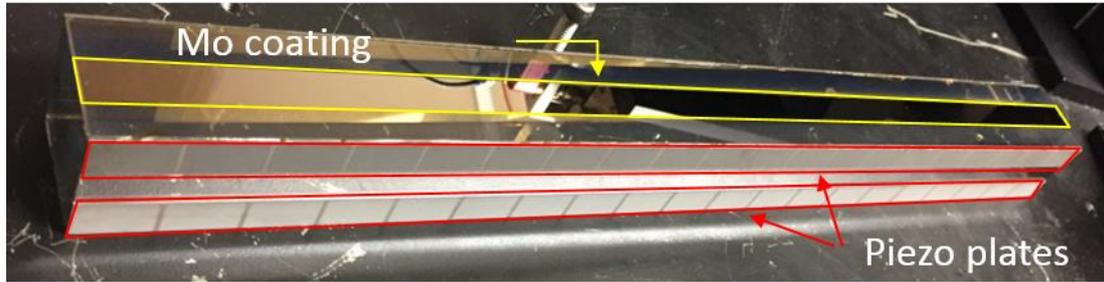


図 7.11 作製した長尺圧電素子駆動型ミラーの写真

表 7.1 作製した長尺圧電素子駆動型ミラーのパラメータ

Mirror substrate	
Material	CREARCERAM-Z (OHARA INC.)
Length (mm)	400
Width (mm)	30
Thickness (mm)	30
Young's modulus (GPa)	90
Piezo plate	
Material	Lead zirconate titanate (PZT)
Length (mm)	200 or 100
Width (mm)	10
Thickness (mm)	1
Young's modulus (GPa)	80
Piezoelectric coefficient (m/V)	-135×10^{-12}
Electrode	
Material	Chromium
Length (mm)	19.05
Width (mm)	10
Gap length between each electrode (mm)	1
Number of electrode	80

7.5 機械曲げ機構の開発

次に作製した機械曲げ機構について図 7.12 に示す。以下に、ミラーベント部、重力補正システム、ミラーランプ機構についての説明を行う。

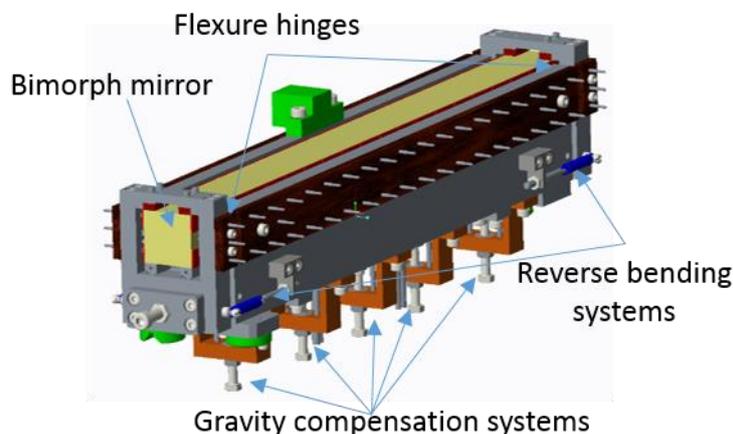


図 7.12 開発した機械曲げ機構の概略図

7.5.1 ミラーベント部

ミラーベント部は、弾性ヒンジと piezo アクチュエータからなる機構によって構成されている。弾性ヒンジを含むミラーホルダーはステンレスブロックをくりぬいた一体型の構造であり、高い剛性と安定性を目指した。弾性ヒンジは R2.5mm、厚み 1mm、幅 5mm の寸法で、ワイヤー放電加工により作製した。弾性ヒンジの駆動は piezo アクチュエータ (P-841, Physic Instrumente) により行われ、弾性ヒンジの回転軸からアクチュエータ先端までの距離は 40 mm である。ミラー基板両端に異なるモーメントを加えるために、2 台の piezo アクチュエータがミラー下部に配置されており、加えた力は圧縮ロードセル (TCLB-500L-M-V-TYM, 東洋測器) によってモニターする仕組みとなっている。また、piezo アクチュエータの最大推力は 1000 N であるため、前項で求めた曲げモーメントを加えるためには十分な性能を備えている。また、ミラーの初期形状を調整するための引張バネによる逆ベント機構が両端に取り付けられている。

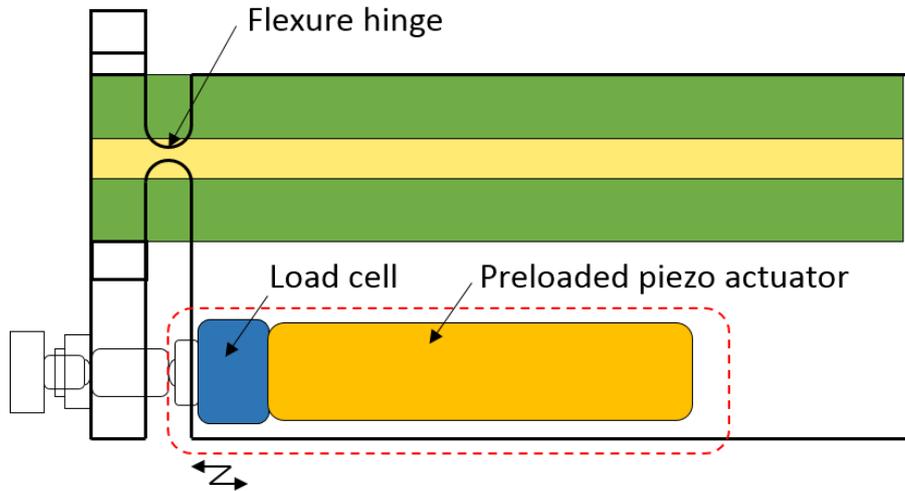


図 7.13 ミラーベント部についての概略図

7.5.2 重力たわみ補正機構

ミラーが長尺化することと、機械曲げ機構に組み込む際のクランプによる両端固定の影響により自重たわみの影響が無視できなくなる。このときのミラーの自重たわみの量は図 7.14 のような固定端の梁のたわみ $y(x)$ を考えると(7.2)式で与えられる。ここで、本ミラー基板において発生する自重たわみ量を計算すると最大のたわみ量は PV 250 nm となり、回折限界集光を行うためには無視できない大きさとなってしまふ (図 7.15)。そこで、この重力たわみを補正する機構として図 7.16 のように等荷重を与える支持点を設けることで重力たわみを補正する機構を考案した。

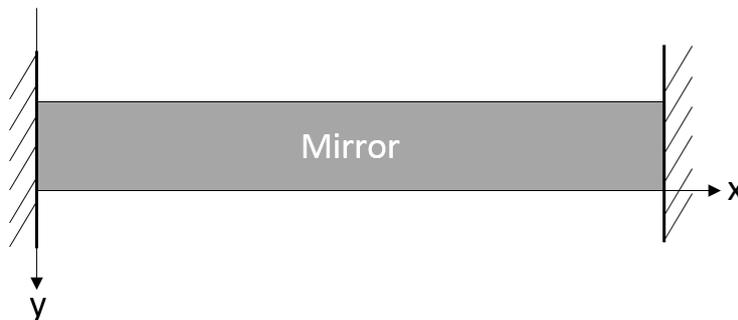


図 7.14 ミラークランプ時の梁モデル

$$y(x) = \frac{wL^2x^2}{24EI} \left(1 - \frac{2x}{L} + \frac{x^2}{L^2} \right) \quad (7.2)$$

L : ミラー全長, E : ヤング率,
 I : 断面二次モーメント, w : 等分布荷重

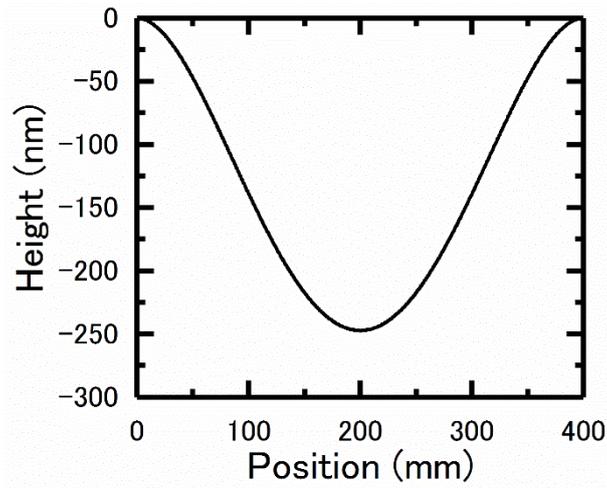


図 7.15 ミラーに発生する自重たわみ

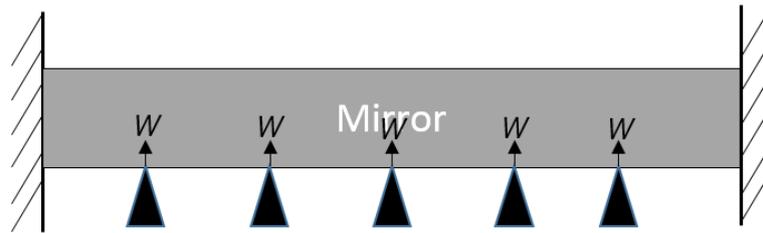


図 7.16 等荷重を与える支持点のイメージ図

図 5.17 のような 1 点の加重支持点によって変形するたわみ量は、(5.3)式で表すことができる。

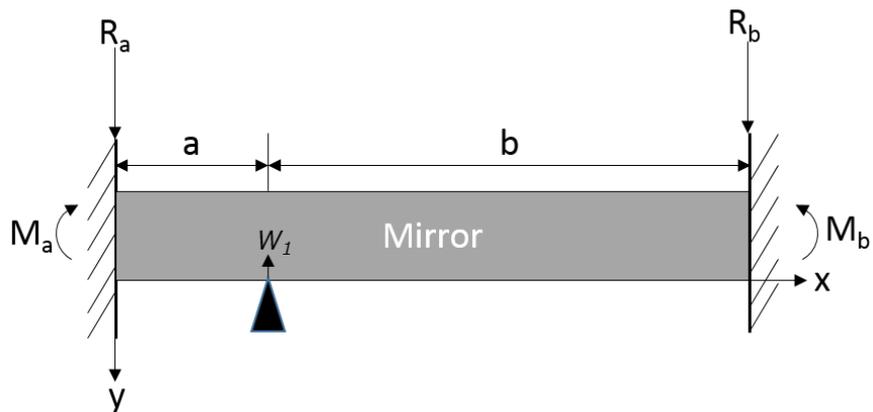


図 7.17 1 点の荷重支持点により荷重を与える際の両端固定梁にかかる荷重図

$$y_1(x) = -\frac{1}{EI} \left(\frac{R_a x^3}{6} - \frac{M_a x^2}{2} \right) \quad (x \leq a)$$

$$y_1(x) = -\frac{1}{EI} \left(\frac{(R_a - w_1)x^3}{6} - \frac{(M_a - w_1 a)x^2}{2} + \left(\frac{-R_a L^2}{2} + M_a L + w_1 L \left(\frac{L}{2} - a \right) \right) x + \frac{(R_a - w_1)L^3}{3} + \frac{(-M_a + w_1 a)L^2}{2} \right) \quad (a < x \leq b) \quad (7.3)$$

L : ミラー全長, E : ヤング率,
 I : 断面二次モーメント, w_1 : 等分布荷重

ここで, n 点の支持点で等荷重を与えて支持した場合, ミラー両端でのたわみ量とたわみ角が 0 に成ることと, $0 < x < L$ の範囲内では連続的な変形をするという境界条件を考慮したとき, ミラー全体のたわみ量は各場所での(7.3)式の足し合わせで与えられる. そこで, 自重たわみを補正するために必要な支持点の数を計算により求めた. 結果を図 7.18 に示す. 支持点を 5 点としたとき重力たわみと補正形状の差分は PV 0.2 nm 以下となり十分無視できる程度に補正できることが分かった. そこで, 機械曲げ機構には図 7.12 のようにミラー裏側から圧縮コイルバネ (バネ定数 1.222 N/mm) によって荷重を加える支持機構を 5 つ配置している.

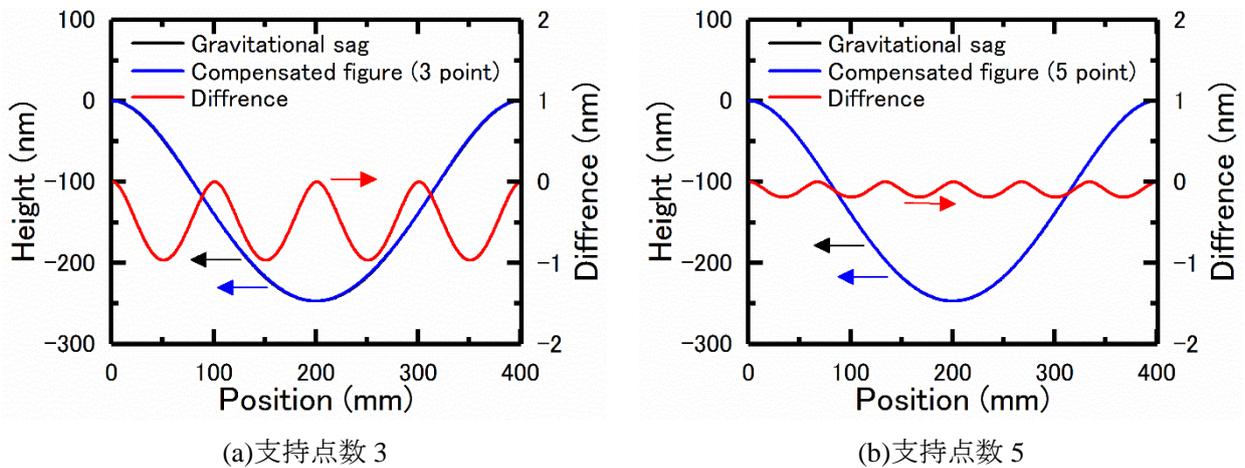


図 7.18 等荷重支持点によるミラー自重たわみの補正

7.5.3 ミラークランプ部の構造

7.5.3.1 ミラーのねじれが集光性能に与える影響

ミラーのクランプ時に発生するミラー形状の変形としてミラーのねじれ成分への影響が考えられる. そこで, Fresnel-Kirchhoff の回折積分に基づく二次元波動光学シミュレーションを行いミラーのねじれが集光性能に与える影響を調査した. 図 7.19 (a)に想定した KB ミラ

一による二次元集光光学系を示す。クランプによるミラーのねじれ成分は、図 7.19 (b)のように中心をねじれ各 0 rad として、ミラー両端 (クランプ部分) に行くにしたがってねじれが大きくなっていくような成分と仮定した。ねじれ成分は水平方向集光ミラーのみに与えた。表 7.2 に各ミラーのパラメータをまとめる。

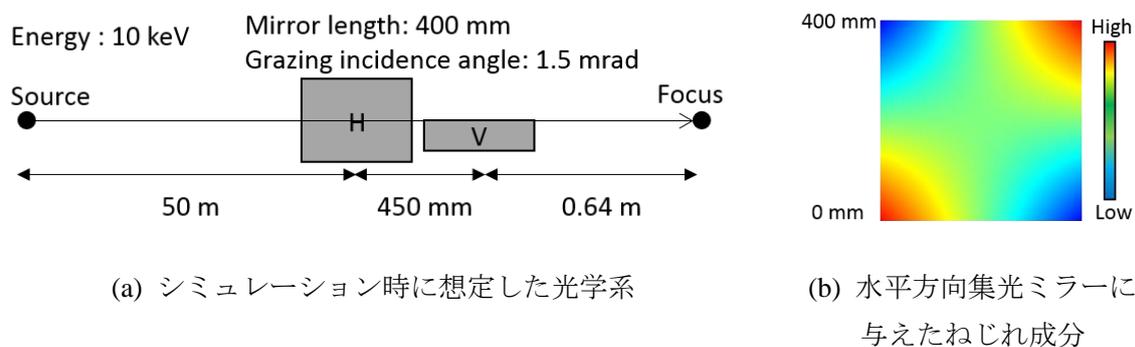


図 7.19 二次元波動光学シミュレーションによるミラーねじれ成分許容値の検討

表 7.2 シミュレーションに用いた KB ミラー光学系のパラメータ

	Horizontal	Vertical
Source- mirror (m)	50	50.45
Mirror center - focus (m)	1.09	0.64
Grazing incidence angle at center (mrad)	1.5	1.5

図 7.20 にシミュレーションにより得られた焦点面での強度プロファイルを示す。ねじれ量の大きさはミラー端部での最大のねじれ角度を示している。最大 10~20 μrad のねじれ角をもつねじれ成分を与えた場合には集光ビームにはまったく乱れが生じていないが、30 μrad 以上のねじれ角を持つ成分を与えた場合は、集光ビームの形状が崩れ始めていることがわかる。

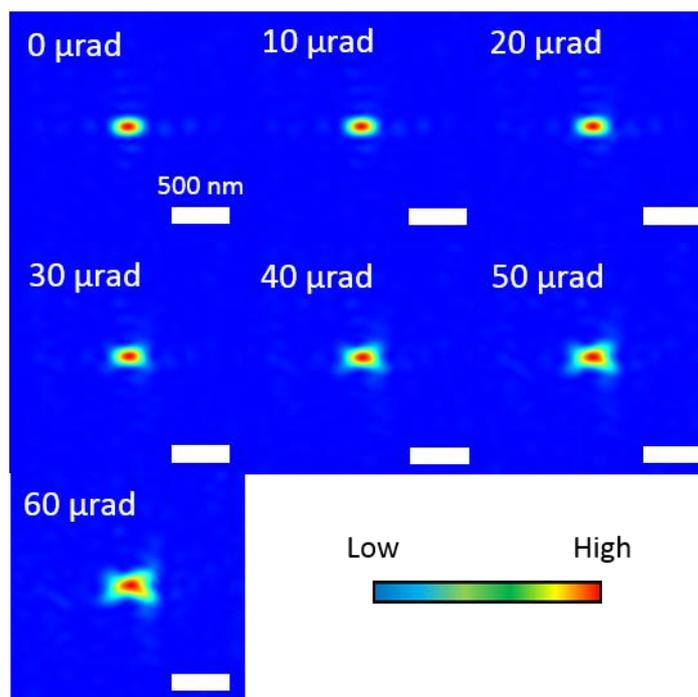


図 7.20 波動光学シミュレーションにより得られた各ねじれ量を与えた場合の焦点面での強度マップ

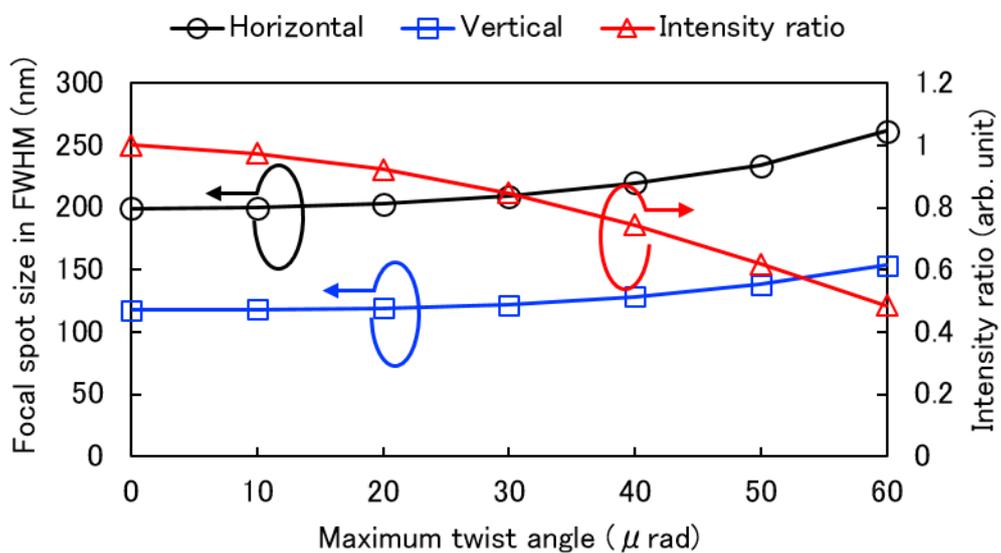


図 7.21 ねじれ量と集光ビームサイズおよび強度比の関係

図 7.21 は与えたねじれ量と集光径の半値幅およびねじれ角 0 の場合の最大メインピーク強度を 1 とした際のピーク強度比を示したものである。強度マップ像と同様に、最大ねじれ角 $20 \mu\text{rad}$ より大きいねじれ成分を与えた場合は、集光

径は増大し、メインピークも理想値に比べて 80 % 以下に落ち込んでいく結果が示された。以上の結果から、ミラーのねじれ角度は $20 \mu\text{rad}$ 以下、本ミラーの場合は幅 30 mm の両端で高低差 600 nm 以下に抑制するようにする必要があることが示された。

7.5.3.2 ミラークランプ部の構造

機械曲げ機構のクランプ部の構造を図 7.22 に示す。ミラークランプ部は、ミラー反射面側のリファレンス板に、ミラー底面側に配置されたクランプブロックを押し当てることでミラーを固定する仕組みとなっている。ミラーのねじれ量が最小となるようにリファレンス板の厚みを調整することで、 $20 \mu\text{rad}$ 程度にねじれ角度を抑制し、その後はクランプブロックの締め付けトルクの値を微調整することで、クランプ時のミラーに発生するミラーのねじれを抑制する仕組みとなっている。図 7.23 に実際にミラーをクランプした際に 12 inch の参照面を持つフィゾー干渉計 (Verifire XPZ, Zygo Corp.) によりミラー形状を計測した結果について示す。計測時の強度像もねじれのようなフリンジのゆがみは発生していないことが分かる。また、各赤線と緑線上の形状プロファイルを図 7.23 (b) に示す。計測可能な 280 mm の区間において見られた最大のねじれ角度は $3.2 \mu\text{rad}$ であり、十分に許容できる値に抑えられていることが分かる。

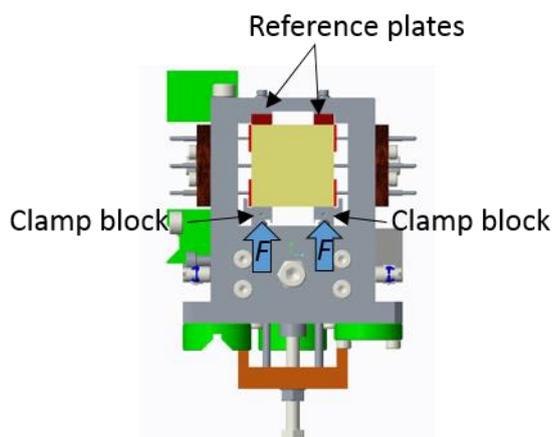
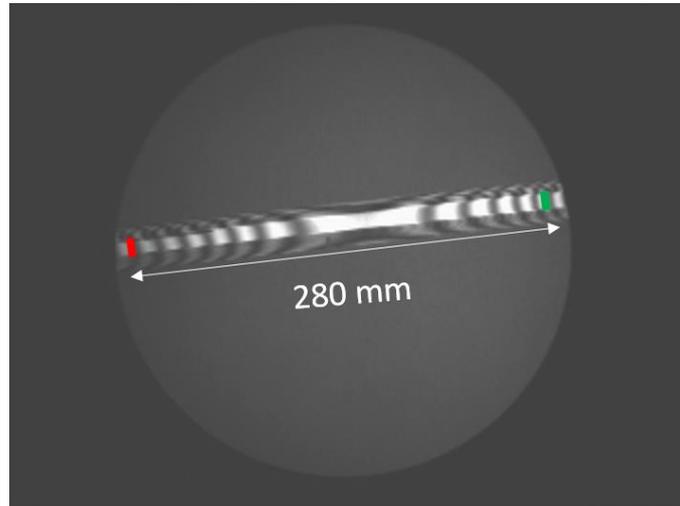
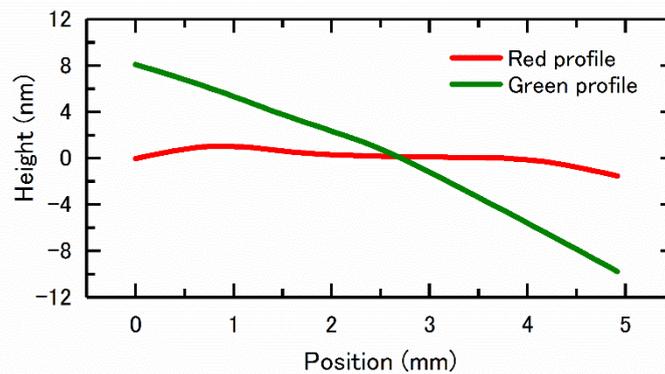


図 7.22 ミラークランプ部の構造



(a) ミラークランプ時の干渉計の強度像



(b) 各線上の形状プロファイル

図 7.23 可視光干渉計によるミラーねじれ成分の計測結果

7.5.4 長尺圧電素子駆動型ミラーとの接点部の構造

長尺圧電素子駆動型ミラーとの接点部はこれまでに開発してきたミラーホルダーと同様にセラミックプレートに固定したネジの先にバネ定数 3 mN/m のものを取り付け計 80 個の電極と接点を取っている。

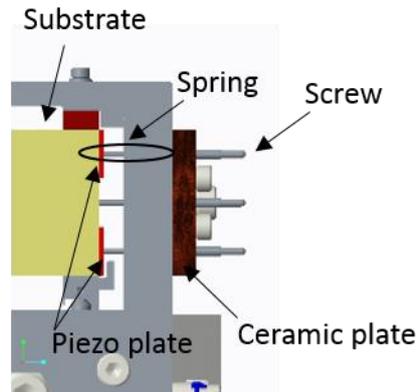


図 7.24 長尺圧電素子駆動型ミラーとの接点部

7.6 ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの動作試験

7.6.1 重力補正機構の動作試験

まず重力補正機構の動作テストを行った。実際の重力たわみ量を計測することは非常に困難であるため、ミラー面を重力の影響を受けない向きに置き、重力補正機構を作動させない場合と作動させた場合の形状の差分をとることで重力補正機構により変形させた量を求め、計算値から求められる重力たわみ量との比較を行った。図 7.25 に試験結果を示す。補正機構は PV 8 nm の精度で重力たわみを補正できていることが分かる。なおこの残った誤差は圧電素子による修正で十分修正できる程度であるので、ミラー形状の調整には問題は生じない。

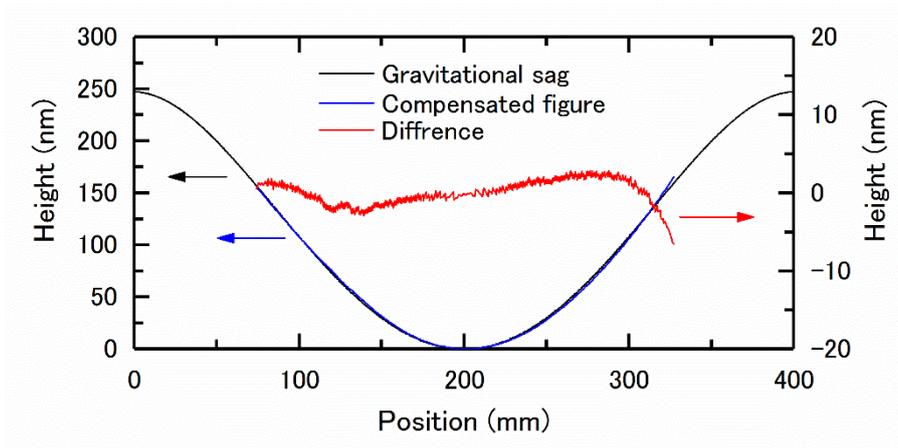


図 7.25 重力補正機構の動作試験結果

7.6.2 ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの変形試験

次に実際にミラー形状への変形テストを行った結果について述べる。目標の楕円形状は表 7.3 の設計値をもつ楕円形状とした。ミラーの計測は、6 inch の参照面を持つフィゾー型干渉計 (GPI XP/D, Zygo Corp) を用いてスティッチング計測を行い、ミラー全長の形状を算

出した。図 5.26 に変形試験の結果を示す。黒線は目標の楕円形状を示している。機械曲げ機構を用いて変形させた際の形状誤差を青線で示す。M 型の四次関数形状の形状誤差が残っており、機械曲げ機構によって三次関数成分の変形を行えたことがわかる。なおこの残った形状誤差は、ミラー基板のもともと持っている形状誤差と目標楕円形状の三次関数成分をのぞいた誤差を足し合わせたものを意味している。その後、圧電駆動型ミラーに電圧を印加して形状を修正した結果を赤線で示す。その結果 PV4 nm の精度で楕円形状の創成に成功した。

表 7.3 変形試験時の目標楕円形状の設計パラメータ

a*	25.6 m
b*	23.23 mm
Grazing incidence angle**	3 mrad
Focal length***	1200 mm

*Ellipse $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$
 ** At center of mirror
 *** Distance between center of mirror

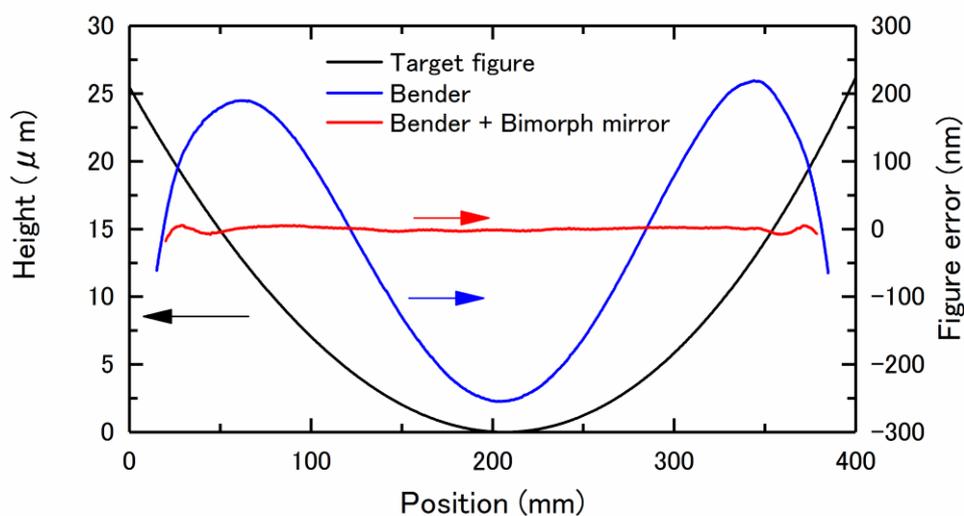


図 7.26 変形試験の結果

7.7 結言

本章では、形状可変ミラーの汎用性向上のために必要な長尺形状可変ミラーの設計・開発を行った結果について述べた。

- (1) 形状可変ミラーの長尺化の必要性について示した。
- (2) 形状可変ミラーの長尺化を行うために問題となる、圧電素子隙間間に発生する **junction effect** の影響について **FEM** シミュレーションを用いて示した。また、シミュレーション結果から、基板端面に直接モーメントを与えることで、**junction effect** の影響を緩和できることを示した。
- (3) **FEM** シミュレーションにより得られた知見から、機械曲げ機構と圧電素子駆動型ミラーを組み合わせたハイブリットな変形機構を持つハイブリット X 線アダプティブ集光システムを提案した。
- (4) **FEM** シミュレーションの結果から、機械曲げによる変形誤差が最小となるように、圧電駆動型ミラーの圧電素子の接着構造を決定し、また目標の変形形状となる三次関数以上の形状誤差に基づき 1 列につき 20 個の電極を持つ長尺圧電素子駆動型ミラーの開発を行った。
- (5) 高精度変形を実現するために、ミラーベント部として、弾性ヒンジとピエゾアクチュエータからなる機械曲げ機構の開発を行った。また機械曲げ機構には重力補正機構を組み込み、自重たわみを補正できる構造とした。また、ミラーのクランプ部はミラーにねじれを発生させにくい構造とし、実際にクランプした際に発生したねじれ量は、波動光学シミュレーションより得られた許容値と比較しても十分小さい値であった。
- (6) 重力補正機構の動作テストの結果、ミラーの自重たわみは、**PV 8 nm** 精度で補正することに成功した。この圧電駆動型ミラーにより十分できるおおきさである。
- (7) ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの変形試験を行った。干渉計を用いて計測を行った結果、機械曲げ機構は目標の形状の三次関数成分までの形状創成が行えることを確認した。残った形状誤差は圧電駆動型ミラーにより修正し、**PV 4nm** の精度での形状創成に成功した。

8. ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの集光性能の評価

本章では、開発したハイブリット X 線アダプティブ集光システムを用いて SPring-8 にて一次元集光実験と二次元集光実験を行った結果について述べる。

8.1 一次元可変集光実験

8.1.1 一次元集光光学系の装置構成

SPring-8 BL29XUL EH3 において開発したハイブリット X 線アダプティブ集光システムの集光性能の評価を行った。実験時の装置構成を図 8.1 に示す。装置は上流側から、ペンシルビームスキャン法を行う際に X 線を制限するためのスキャンスリット、および、入射する X 線の強度をモニターするためのイオンチャンバー、ハイブリット X 線アダプティブ集光システム、焦点位置に配置されたペンシルビームスキャン法の際に集光ビームを計測するビームモニター、集光ビームプロファイル計測を行う金ワイヤー ($\Phi 200 \mu\text{m}$)、集光ビーム強度を計測するための PIN フォトダイオード、そしてビーム軌道をモニターするための CCD カメラ (AA50MOD, リレーレンズ: 2 倍, シンチレータ: P43($10 \mu\text{m}$), CCD: ORCA-R2, 実効ピクセルサイズ: $3.1 \mu\text{m}/\text{pixel}$) により構成されている。アダプティブ X 線集光システムは垂直方向に集光する向きに設置した。また図 6.2 には集光装置の全体と X 線アダプティブ集光システムの写真を示す。

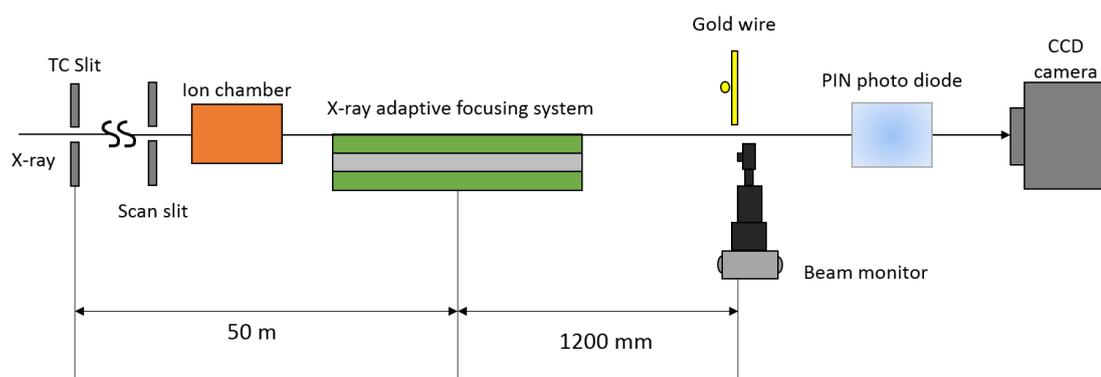
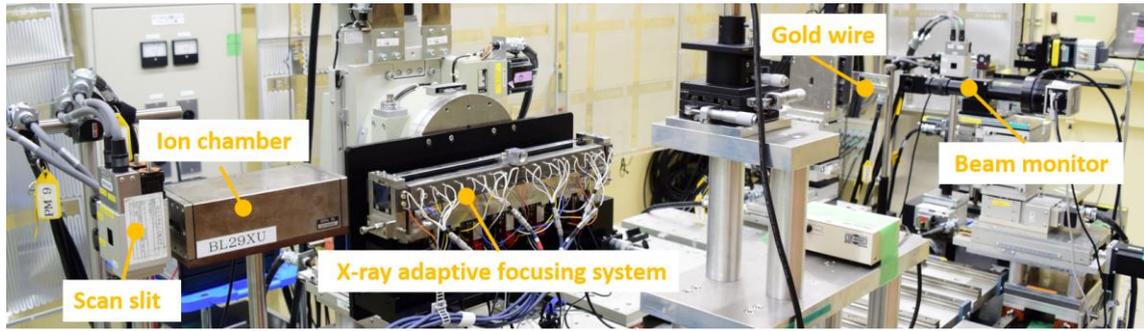
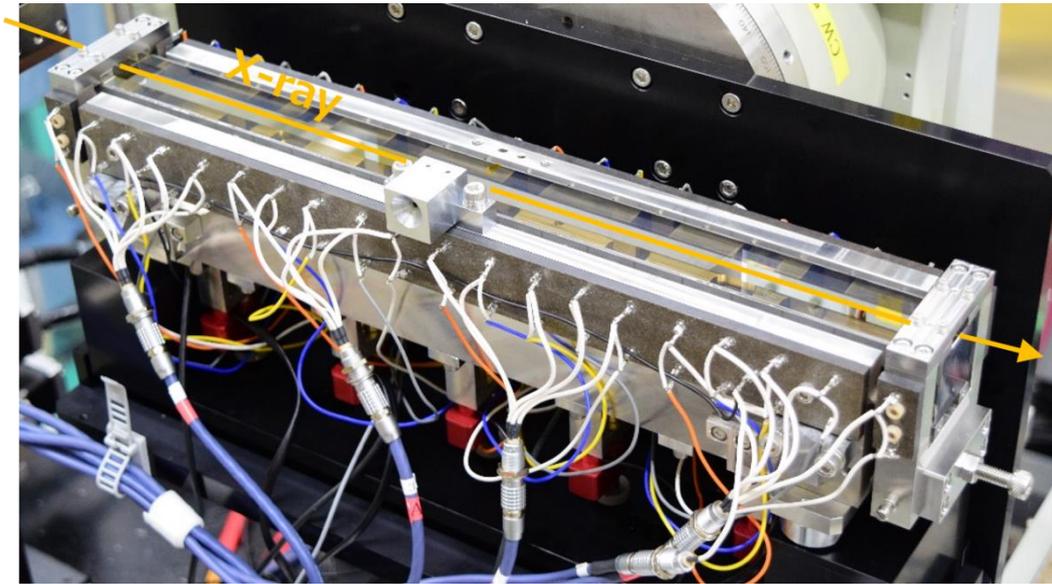


図 8.1 一次元集光装置の構成図



(a) 集光装置写真



(b) ハイブリット X 線アダプティブ集光システム

図 8.2 一次元集光実験時の写真

集光実験は、ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの入射角を 3 mrad と 1.5 mrad の 2 つの異なる楕円形状を設計し、それぞれの形状に変形させた後集光実験を行った。表 8.1 にアダプティブ集光システムのパラメータと図 8.3 に各入射角条件における理想形状を示す。入射角の変更時は最大で 10 μm の変形が必要になる。入射 X 線のエネルギーは 10 keV である。

表 8.1 ハイブリット X 線アダプティブ集光システムのパラメータ

Source – Mirror (mm)	50000
Mirror – Focus (mm)	1200
Grazing incidence angle at center (mrad)	3 or 1.5

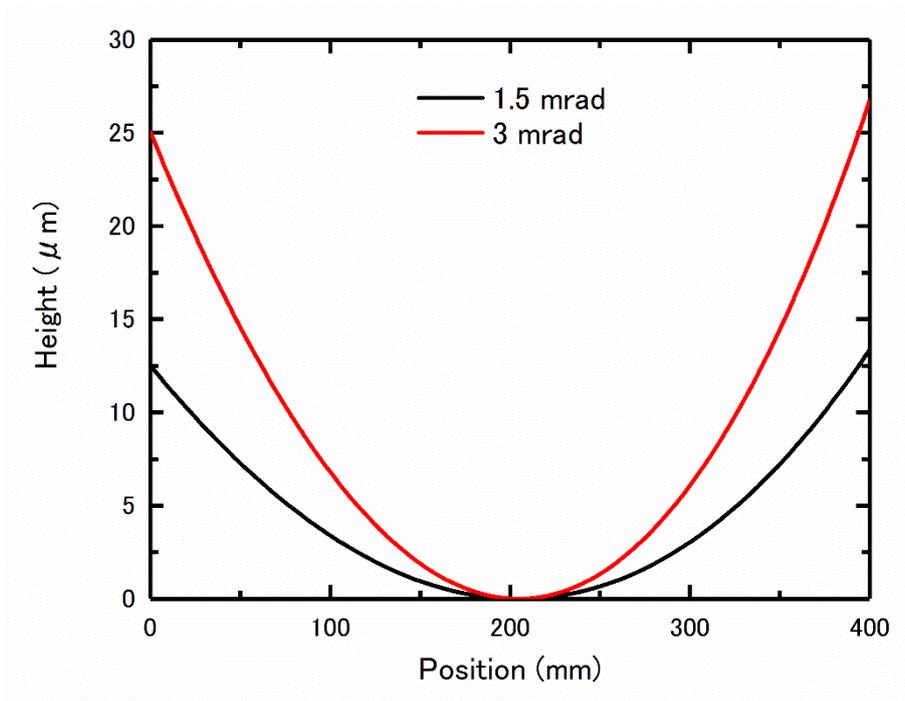
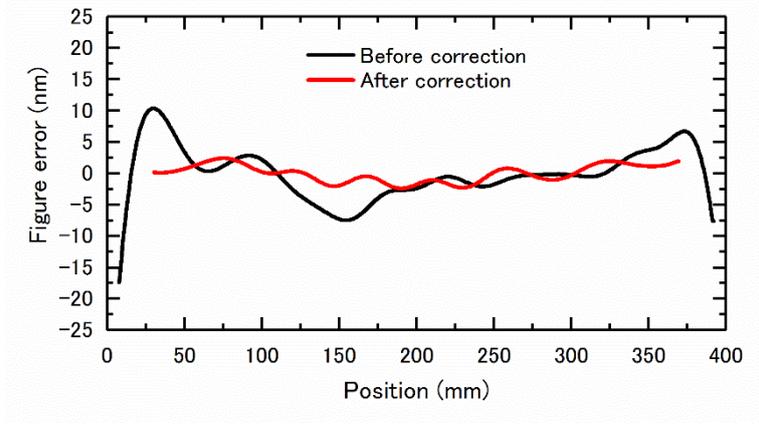


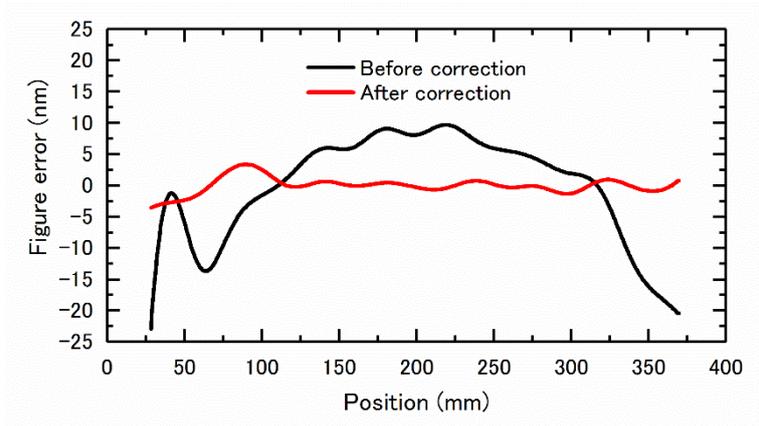
図 8.3 各入射角条件における理想楕円形状

8.1.2 X線ペンシルビームスキャン法による形状修正結果

ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの目標形状への変形は次のような手順で行った。まず、大学の実験室で干渉計による計測を行いながら、ミラー基板両端に与える曲げモーメントと圧電駆動型ミラー各電極への印加電圧を最適化する。その後、SPring-8 の集光装置に組み込んだ後に、実験室で得られたものと同じ値の曲げモーメントと印加電圧を加える。その後、X 線ペンシルビームスキャン法により形状計測を行いその結果に基づき、形状の修正を行った。図 8.4 に各入射角における計測された形状誤差を示す。はじめの変形誤差は入射角 3 mrad の場合 PV25 nm、入射角 1.5 mrad の場合 PV30 nm だったものが、最終的には各入射角条件において PV3 nm と PV7 nm の精度で目標の楕円形状へと変形させることに成功した。



(a) 入射角 3 mrad

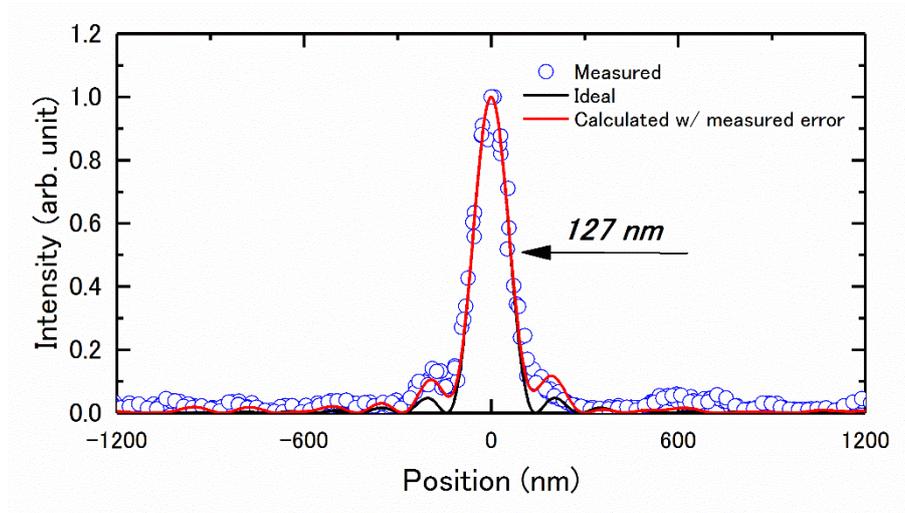


(b) 入射角 1.5 mrad

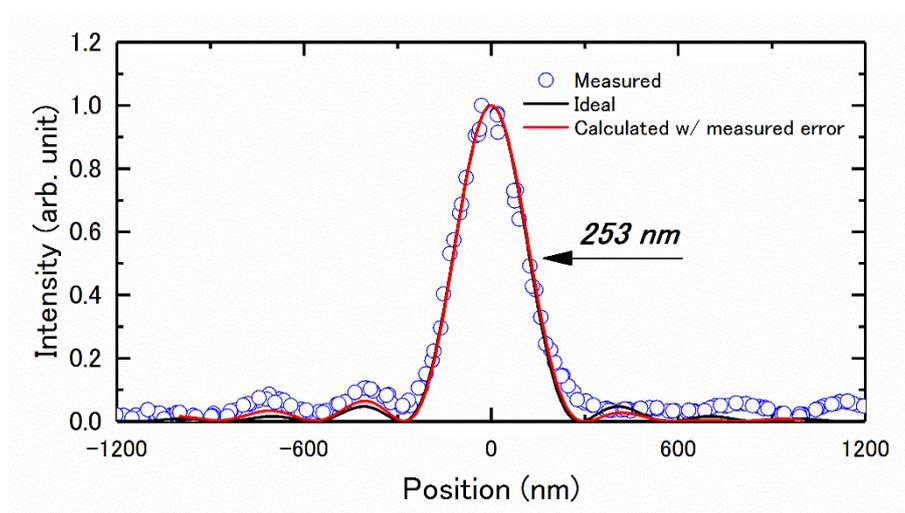
図 8.4 X 線ペンシルビームスキャン法により計測された形状誤差

8.1.3 集光ビームプロファイルと X 線反射像の評価

形状の修正後焦点位置で明視野ワイヤスキャン法により集光ビームプロファイルの評価を行った。図 8.5 に計測された集光ビームプロファイルを示す。各入射角において実測値を丸のプロットで、黒線は理想集光ビームプロファイルを示している。入射角 3 mrad のとき半値幅 127 nm, 入射角 1.5 mrad のとき半値幅 253 nm という非常に回折限界集光に近いサイズの集光ビームを形成に成功した。また、赤線は X 線ペンシルビーム法スキャン法により計測された形状誤差を考慮した際の集光ビームプロファイルを計算した結果である。計測されたビームプロファイルはどちらの入射角条件においても、X 線ペンシルビームスキャン法により計測された形状誤差を考慮した場合の計算結果ともよい一致を示している。



(a) 入射角 3 mrad



(b) 入射角 1.5 mrad

図 8.5 焦点位置での集光ビームプロファイル

次に、入射角 3 mrad の際に CCD カメラによって計測した反射像を図 8.6 に示す。反射像と CCD の強度プロファイルからもわかるようにスペックルも発生しておらず、開発したハイブリット X 線アダプティブ集光システムは短周期の変形誤差を生じさせずに、高精度な変形が行えていることがわかる。

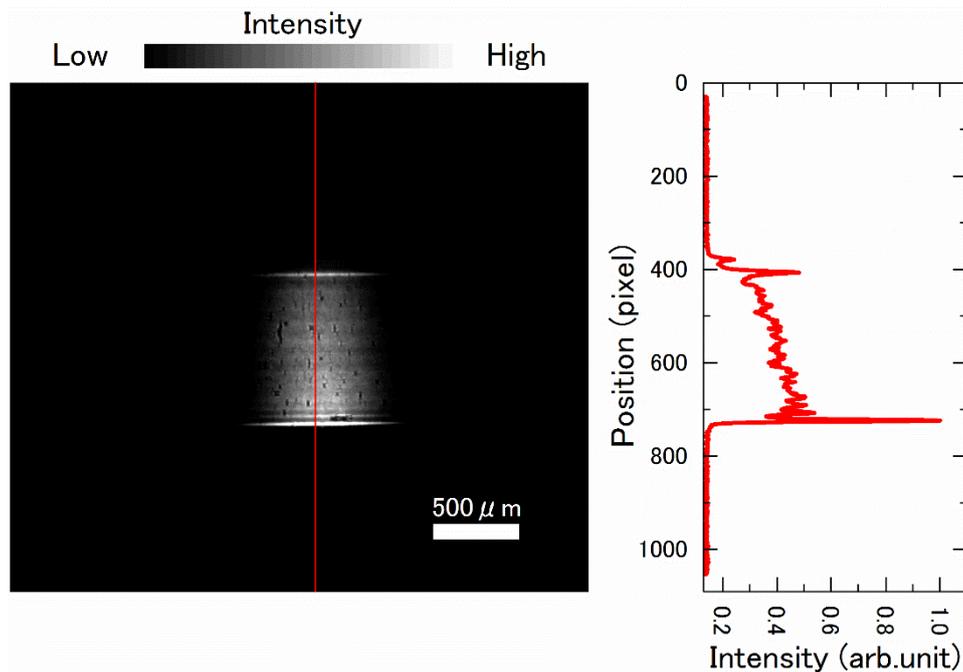


図 8.6 入射角 3 mrad の際に CCD カメラにより計測された反射像

8.2 二次元集光実験

8.2.1 二次元集光光学系の装置構成

次に二台のハイブリット X 線アダプティブ集光システムを用いて KB 配置の光学系を組むことで二次元集光実験を行った結果について示す。図 8.7 に二次元集光装置の装置構成を示す。装置は上流側から、スキャンスリット、および、イオンチャンバー、垂直方向集光用ハイブリット X 線アダプティブ集光システム、水平方向集光用ハイブリット X 線アダプティブ集光システム、焦点位置に配置されたペンシルビームスキャン法の際に用いるビームモニター、集光ビームプロファイル計測を行う金ワイヤー ($\Phi 200 \mu\text{m}$)、集光ビーム強度を計測するための PIN フォトダイオード、そしてビーム軌道をモニターするための CCD カメラにより構成されている。図 8.8 には集光装置全体と KB 配置されたハイブリット X 線アダプティブ集光システムの写真を示す。

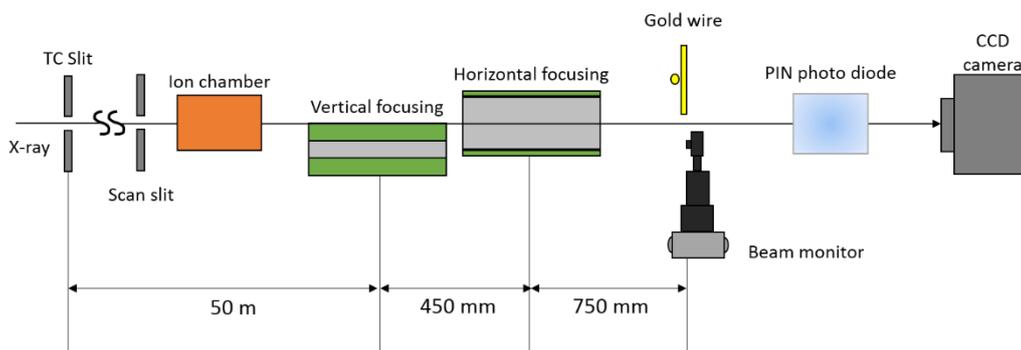
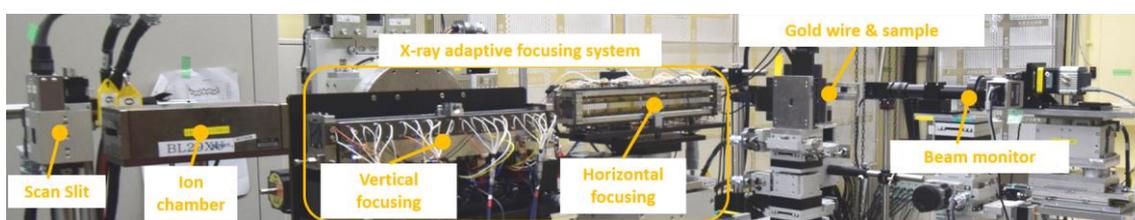
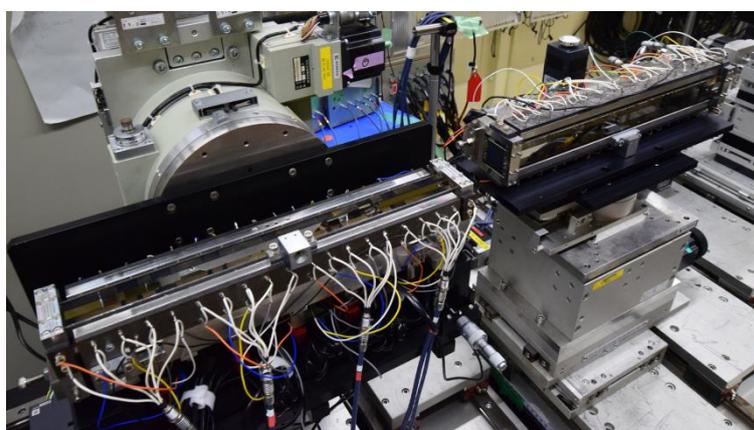


図 8.7 二次元集光光学系の装置構成



(a) 二次元集光装置全体写真



(b) KB 配置されたハイブリット X 線アダプティブ集光システム

図 8.8 二次元集光実験時の写真

集光実験は、焦点位置で垂直・水平方向ともに同程度のサイズの大きさの集光ビームが得られるように表 8.3 に示すパラメータをもつ楕円形状を設計し、それぞれのハイブリット X 線アダプティブ集光システムを目標の楕円形状に変形させた後集光実験を行った。図 8.9 に理想形状を示す。入射 X 線のエネルギーは 10 keV である。

表 8.3 ハイブリット X 線アダプティブ集光システムのパラメータ

	Vertical	Horizontal
Source- Mirror (mm)	50000	50450
Mirror-Focus (mm)	1200	750
Grazing incidence angle at center (mrad)	3.0	1.5
Ideal spot size in FWHM (nm)	135	166

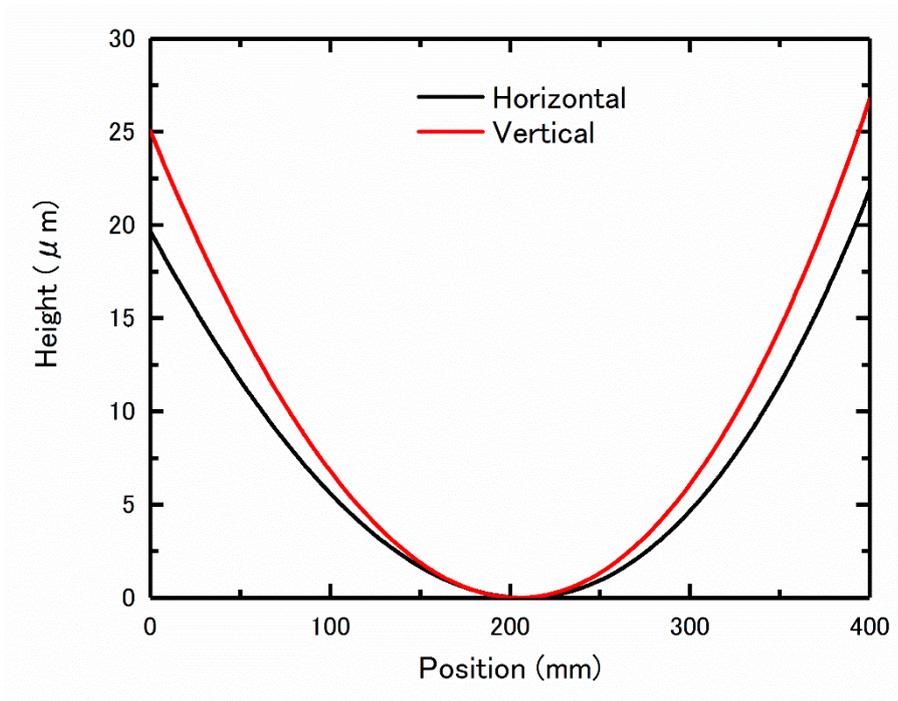
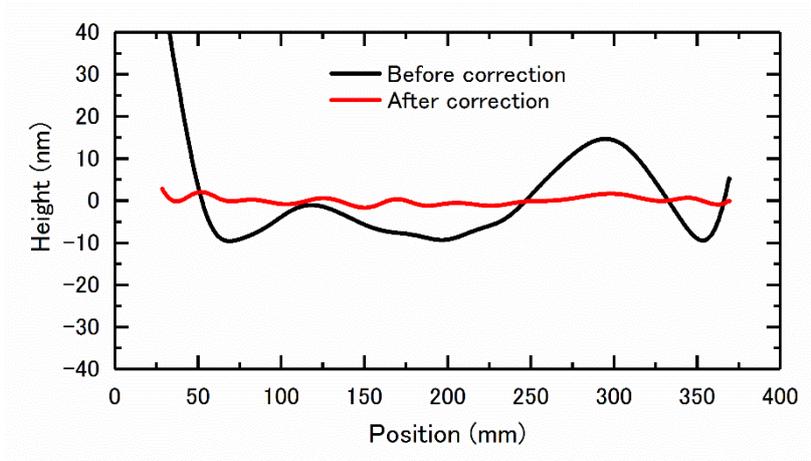


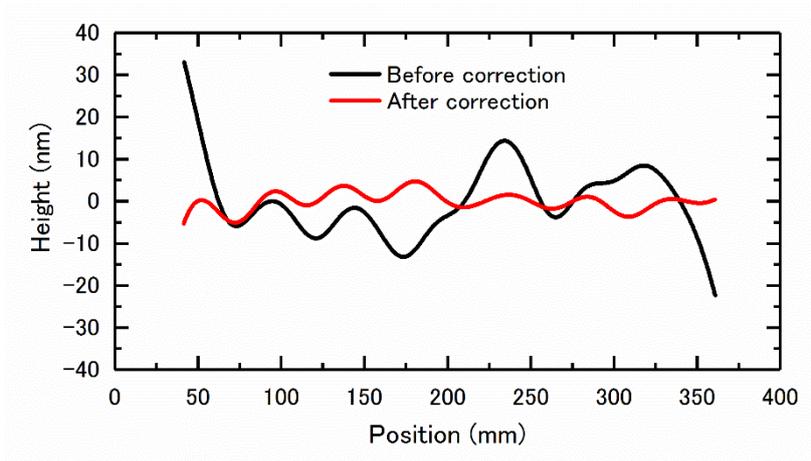
図 8.9 各ミラーの理想楕円形状

8.2.2 X 線ペンシルビームスキャン法による各ミラーの形状修正結果

各ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの変形手順は一次元集光実験時と同じように行った。X 線ペンシルビームスキャン法による計測結果を図 8.10 に示す。黒線が初期の形状誤差、赤線が修正後の形状誤差を示している。垂直方向集光システム、水平方向ともに PV50~60 nm の形状誤差を PV 3 nm (垂直), 10 nm (水平) の精度で修正することができた。



(a) 垂直方向集光

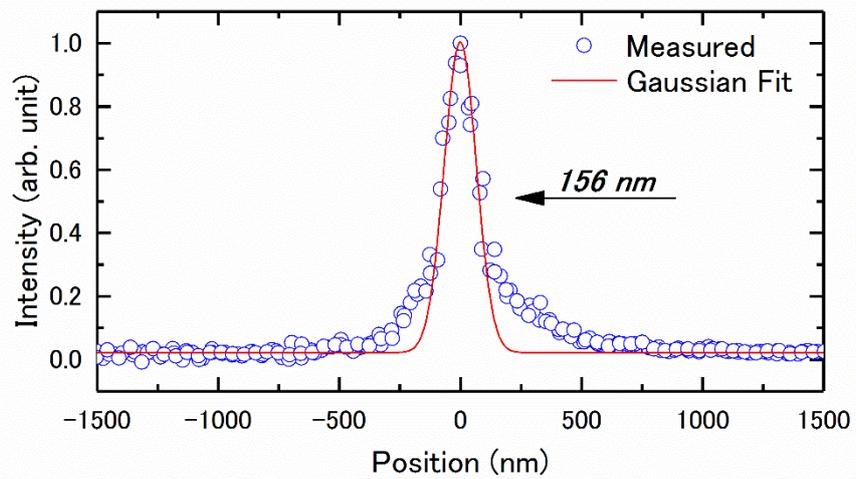


(b) 水平方向集光

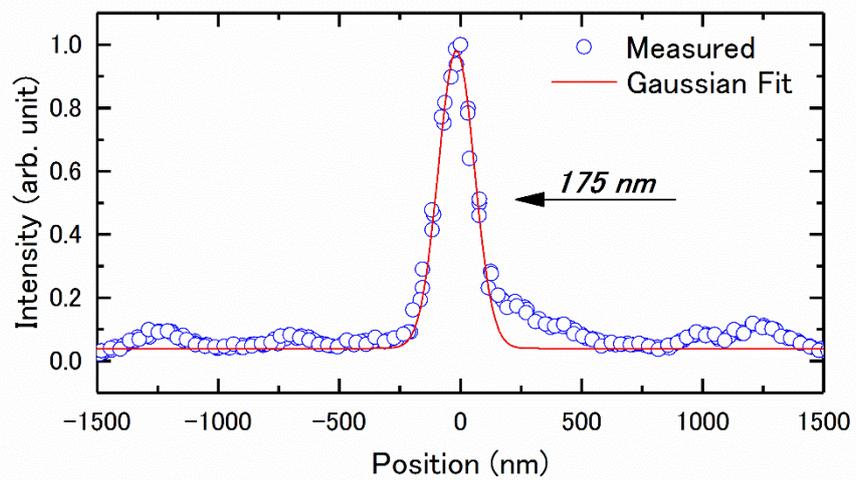
図 8.10 X 線ペンシルビームスキャン法により計測された形状誤差

8.2.3 二次元集光ビームプロファイルの評価

形状の修正が完了した後、焦点位置で明視野ワイヤースキャン法により集光ビームプロファイルの計測を行った。その結果半値幅で 156 nm (垂直)× 175 nm (水平)の二次元集光ビームが形成されていることを確認した。回折限界集光径よりやや大きくなったことと垂直方向ビームの裾野が大きくなった原因は KB 配置のアライメント精度が不十分であったことが考えられる。



(a) 垂直方向



(b) 水平方向

図 8.11 計測された二次元集光ビームプロファイル

次に、この二次元集光ビームの空間分解能および安定性の評価を行うために、走査顕微法を用いて $1\ \mu\text{m}$ 厚のタンタル製 X 線テストチャート (XRESO-100, NTT-AT) のスターチャートパターンを観察した。テストチャートを $100\ \text{nm}$ ピッチでスキャンした際の X 線の透過強度を PIN フォトダイオードにより計測した強度マップを図 8.12 に示す。1 番目の円構造の最内の最小寸法構造は $100\ \text{nm}$ 、2 番目の円の最内の最小寸法構造は $200\ \text{nm}$ であり、どちらの寸法構造も明瞭に得られていることから、ワイヤースキャンの結果確からしいことが確認できる。また、スキャン方向は図の上部から下方向に向かってラスタースキャンを 1 時間行っている。全域にわたって像の大きなゆがみなどは発生しておらず、非常に安定した集光ビームの供給が行えていることが確認できる。

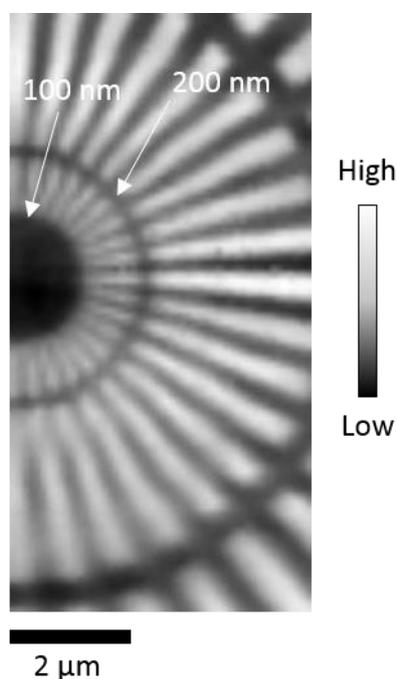


図 8.12 スターチャートパターンの透過 X 線強度マップ
(イオンチャンバーにより計測した入射 X 線の強度で規格化されている。)

8.3 結言

本章では、開発したハイブリット X 線アダプティブ集光システムを用いて SPring-8 にて集光光学系を構築し、その集光性能の評価を行った結果について述べた。

- (1) ハイブリット X 線アダプティブ集光システムを用いて一次元集光光学系を構築し、ミラーの入射角を変えることで、異なるサイズの集光ビームの形成を目指した。ペンシルビームスキャン法により形状の修正の結果、入射角 3 mrad の場合は PV3 nm, 入射角 1.5 mrad の場合は、PV7 nm の精度で形状を創成することに成功した。形状の修正後焦点位置で明視野ワイヤースキャン法により集光ビームプロファイルを測定した結果 10 keV のエネルギーを持つ X 線を入射角 3 mrad の場合は半値幅 127 nm, 入射角 1.5 mrad の場合は半値幅 253 nm という異なる 2 つのサイズをもつ回折限界に近いサイズの集光ビームの形成に成功した。また、焦点後方で X 線反射像の計測結果から、周期的な誤差形状によって引き起こされる X 線の強度の変調は確認されず、開発したアダプティブ X 線システムは圧電素子の隙間間の影響を受けることなく高精度にミラー形状を制御できていることが分かった。
- (2) 2 台のハイブリット X 線アダプティブ集光システムを KB 配置で設置することで、二次元集光光学系を構築し、二次元集光ビームの形成実験を行った。ペンシルビームスキャン法での修正の結果、ミラー形状を PV3 nm (垂直), PV 10 nm (水平)の精度で形状を制御することに成功した。また焦点での明視野ワイヤースキャン法による集光ビームプロファイルの計測を行った結果、半値幅で 156 nm (垂直) × 175 nm (水平) の二次元集光ビームの形成が行えていることを確認した。その後、タンタル製のテストチャートを走査顕微法により観察を行った結果 100 nm ~ 200 nm の構造をもつスターチャートパターンの透過 X 線強度像を明瞭に得ることができた。この走査顕微法による像の取得は約 1 時間かけて行ったが、走査範囲全域にわたって明瞭な像を取得できており、本集光システムは安定したビームの供給が行えていることが示された。

9.総括

本論文は、高精度で形状を制御することが可能な形状可変ミラーを開発し、開口数を変更することで、回折限界条件を維持しながらアダプティブにビームサイズを変更できることのできる、二段の Kirkpatrick-Baez ミラーにより構成された開口数可変光学系の開発を目標とし行った成果についてまとめたものである。

第1章では、研究の背景と目的を述べた。

第2章では、二段開口数可変光学系の解説とビームサイズ可変の原理について述べた。

- (1) 開発するビームサイズ可変光学系の設計コンセプトを放射光実験に求められる機能を満たすために①100 nm ~ 100 μm オーダーのビームサイズ可変を達成する。②X線のエネルギーを変更した場合も影響を受けない(色収差の無い光学系)。③常に回折限界サイズのビームを供給する。④ビームサイズは常に光学系の開口数の値により決定される。⑤ビームサイズ変更時に、光量(フラックス)の損失がない。⑥ビームサイズ変更時に試料位置(焦点位置)が移動しない。の6点として設計を行った。
- (2) ビームサイズ可変光学系として、4枚の形状可変ミラーから構成される二段開口数可変光学系として提案し、ビームサイズ可変の原理を述べた。

第3章では、二段開口数可変光学系を構成する光学素子である圧電素子一体型形状可変ミラーの変形原理および開発した形状可変ミラーの概要を述べた。

- (1) 開発した圧電素子駆動型形状可変ミラーの構造および駆動原理について述べた。
- (2) 形状可変ミラーの精密制御のために開発したミラーホルダーとその構造について述べた。
- (3) 可視光干渉計による形状フィードバックシステムを用いた変形試験の結果、ミラー形状を PV2.5 nm の精度で目標の楕円形状を創成することに成功した。
- (4) 二段開口数可変光学系において、回折限界条件を満たす精度で四枚の形状可変ミラーを制御するために考案した二段階の形状創成プロセスについて示した。

第4章では、開発した形状可変ミラーの時間安定性について述べた。

- (1) 形状可変ミラーのドリフト現象についての問題点について述べた。現状発生している形状ドリフトは電圧印加後 700 分経過後も生じており、また生じたドリフト量も回折限界集光を維持できない大きさであった。
- (2) 定電圧印加時のミラー形状のドリフト計測実験を行い、ミラー形状のドリフト量は印加電圧の大きさに比例するが、収束時間は電圧の大きさに依存しないことを発見した。
- (3) 目標電圧印加前に一定の時間超過電圧を印加することで、100 分程度で形状ドリフトを収束させることに成功した。
- (4) ドリフトが抑制できる超過電圧の印加時間は、一定時間の超過電圧印加によって生じた分極の変化量(P1)、超過電圧から目標電圧へと電圧を変化させたときに起こる分極の変化量(P2)、初期電圧から目標電圧へと電圧を変化させたときに生じる分極の変化量(P3)の関係が $P1 \simeq P2 + P3$ の条件を満たすような時に収束することがわかった。

第5章では、二段開口数可変光学系の最終形状を決定する at-wavelength の計測に用いる、X 線ペンシルビームスキャン法による形状計測システムの開発について述べた。

- (1) 最終的な形状精度を決定する at-wavelength 形状計測法としてペンシルビームスキャン法を採用し、波動光学シミュレーションから高精度計測を実現するために必要な要素について検討した。
- (2) X 線ペンシルビームスキャン法の高精度化を目指し、X 線の位置を計測するビームモニターを開発した。性能評価実験の結果、ビームモニターのボケ量は許容値以下で作製でき、また X 線の重心位置を 10 nm の分解能で決定できることが判り、形状可変ミラーの形状測定を行うために必要な精度を有していることがわかった。
- (3) 開発したビームモニターを用いて X 線ペンシルビームスキャン法による at-wavelength 形状計測システムを構築し、集光ミラーの形状計測を行った。その結果ペンシルビーム法で PV 1.0 nm の形状誤差の計測に成功した。計測された形状誤差は、他の 2 つの方法で計測された結果とよく一致しており構築したシステムは回折限界集光を実現するために必要な精度の形状計測を行えることを示した。

第 6 章では、形状可変ミラーを用いて X 線ビームの形成実験を行った結果について述べた。

- (1) 二枚の形状可変ミラーによる KB ミラー集光光学系を構築し、集光実験を行った。X 線ペンシルビームスキャン法の計測結果に基づきミラー形状の修正を行った結果、PV 2 nm の精度での形状修正に成功した。また形状修正の完了後、明視野ワイヤースキャン法により集光プロファイルを計測した結果、10 keV のエネルギーを持つ X 線を半値幅で 65 nm (水平方向) × 110 nm (垂直方向) とほぼ回折限界と同等な大きさの集光ビームの形成に成功した。
- (2) 二枚の形状可変ミラーを用いて二段一次元集光光学系を構築し、集光実験を行った。中間焦点と最終焦点の二箇所 X 線ペンシルビームスキャン法による形状計測を行い、ミラー形状を修正した結果、前段ミラーで PV9 nm、後段ミラーで PV 3 nm の精度で形状を制御することに成功した。また最終焦点で明視野ワイヤースキャン法により集光プロファイルを計測した結果、10 keV のエネルギーを持つ X 線を半値幅 90 nm という回折限界と同等な大きさの集光ビームの形成に成功した。
- (3) 四枚の形状可変ミラーにより、二段開口数可変光学系を構築し、NA を変えることで集光径のサイズを制御する集光実験を行った。3 つの実験系を設計し、それぞれの条件において最終焦点でビームプロファイルの計測を行った。その結果水平方向で 108 nm ~ 560 nm、垂直方向で 165 nm ~ 1434 nm という 3 つの異なるサイズの回折限界に近い集光ビームの形成に成功した。また集光ビームサイズの変化は、開口数比率の変化とよい一致を示していた。
- (4) 集光実験と同じ光学系を用いてコリメート光の形成を試みた。2 台のビームモニターを用いた X 線ペンシルビームスキャン法を利用することで、後段ミラーの調整を行ったところ、平行度 1 μ rad 以下を有する 314 μ m (水平方向) × 358 μ m (垂直方向) と 127 μ m (水平方向) × 65 μ m (垂直方向) の 2 つの異なるサイズのコリメート光の形成に成功した。以上の結果から、二段開口数可変光学系は、数百 μ m ~ sub 100 nm サイズという広範囲で任意サイズの X 線ビームを供給可能であることを実証できた。

第 7 章では、アダプティブ集光光学系のさらなる応用展開のために、必要な長尺形状可変ミラーの設計・開発を行った結果について述べた。

- (1) アダプティブ集光光学系の実験装置の自由度を高め、さらに応用展開・発展していくためには、形状可変ミラーの長尺化が必須であることを示した。

- (2) 形状可変ミラーの長尺化を行うために問題となる，圧電素子隙間に発生する **junction effect** の影響について FEM シミュレーションを用いて示した．また，シミュレーション結果から，基板端面に直接モーメントを与えることで，**junction effect** の影響を緩和できることを示した．
- (3) FEM シミュレーションにより得られた知見から，機械曲げ機構と圧電駆動型ミラーを組み合わせたハイブリットな変形機構を持つ長尺形状可変ミラーである X 線アダプティブ集光システムを提案した．
- (4) FEM シミュレーションの結果から，機械曲げによる変形誤差が最小となるように，圧電駆動型ミラーの圧電素子の接着構造を決定し，また目標の変形形状となる三次関数以上の形状誤差に基づき 1 列につき 20 個の電極を持つ圧電駆動型ミラーの開発を行った．
- (5) 高精度変形を実現するために，ミラーベント部として，弾性ヒンジとピエゾアクチュエータからなる機械曲げ機構の開発を行った．また機械曲げ機構には重力補正機構を組み込み，自重たわみを補正できる構造とした．また，ミラーのクランプ部はミラーにねじれを発生させにくい構造とし，実際にクランプした際に発生したねじれ量は，波動光学シミュレーションより得られた許容値と比較しても十分小さい値であった．
- (6) 重力補正機構の動作テストの結果，ミラーの自重たわみは，PV 8 nm 精度で補正することに成功した．この圧電駆動型ミラーにより十分できるおおきさである．
- (7) ハイブリット X 線アダプティブ集光システムの変形試験を行った．干渉計を用いて計測を行った結果，機械曲げ機構は目標の形状の三次関数成分までの形状創成が行えることを確認した．残った形状誤差は圧電駆動型ミラーにより修正し，PV 4nm の精度での形状創成に成功した．

第 8 章では，開発したハイブリット X 線アダプティブ集光システムを用いて SPring-8 にて集光光学系を構築し，その集光性能の評価を行った結果について述べた．

- (1) ハイブリット X 線アダプティブ集光システムを用いて一次元集光光学系を構築し，ミラーの入射角を変えることで，異なるサイズの集光ビームの形成を目指した．X 線ペンシルビームスキャン法により形状の修正の結果，入射角 3 mrad の場合は PV3 nm，入射角 1.5 mrad の場合は，PV7 nm の精度で形状を創成することに成功した．形状の修正後焦点位置で明視野ワイヤースキャン法により集光ビームプロファイルを測定した結果

10 keV のエネルギーを持つ X 線を入射角 3 mrad の場合は半値幅 127 nm, 入射角 1.5 mrad の場合は半値幅 253 nm という異なる 2 つのサイズをもつ回折限界に近いサイズの集光ビームの形成に成功した。また, 焦点後方での X 線反射像の計測結果から, 周期的な誤差形状によって引き起こされる X 線の強度の変調は確認されず, 開発したアダプティブ X 線システムは圧電素子の隙間間の影響を受けることなく高精度にミラー形状を制御できていることが分かった。

- (2) 2 台のハイブリット X 線アダプティブ集光システムを KB 配置で設置することで, 二次元集光光学系を構築し, 二次元集光ビームの形成実験を行った。X 線ペンシルビームスキャン法での修正の結果, ミラー形状を PV3 nm (垂直), PV 10 nm (水平)の精度で形状を制御することに成功した。また焦点での明視野ワイヤースキャン法による集光ビームプロファイルの計測を行った結果, 半値幅で 156 nm (垂直) × 175 nm (水平) の二次元集光ビームの形成が行えていることを確認した。その後, タンタル製のテストチャートを走査顕微法により観察を行った結果 100 nm ~ 200 nm の構造をもつスターチャートパターン透過 X 線強度像を明瞭に得ることができた。この走査顕微法による像の取得は約 1 時間かけて行ったが, 走査範囲全域にわたって明瞭な像を取得できており, 本集光システムは安定したビームの供給が行えていることが示された。

以上, 本研究では, X 線アダプティブ集光光学系として, 高精度形状可変ミラーによって構成された二段の KB ミラー光学系による開口数可変光学系の開発を行った。その結果, 常に回折限界集光を満たす条件でビームサイズの変更を行うことができる性能をもつ光学系の開発に世界で始めて成功した。また, アダプティブ集光光学系の更なる応用展開を目指すため, 長尺かつ高精度変形が可能な形状可変ミラーの開発を行い, 機械曲げ機構と圧電駆動型ミラーの組み合わせによる変形機構をとることで, 回折条件下で集光径の変更を行える性能を持つことを示した。これらの X 線アダプティブ集光光学系を用いることで, 実験装置の構成を変更することなく, 測定条件や, 試料サイズに最適な集光径を選択供給した X 線分析装置の構築が可能となる。これにより, 次世代の高輝度放射光源における新たな X 線分析法の開拓や, XFEL のようなビームライン数の少ない施設での利用・応用展開に大きな貢献ができることが期待できる。

参考文献

- [1] H. Yan, V. Rose, D. Shu, E. Lima, H. C. Kang, R. Conley, C. Liu, N. Jahedi, A. T. Macrander, G. B. Stephenson, M. Holt, Y. S. Chu, M. Lu, and J. Maser, *Opt. Express*, **19**, 16, 15069-15076 (2011).
- [2] T. Chen, Y. Chen, C. Wang, I. M. Kempson, Y. S. Chu, Y. Hwu, and G. Margaritondo, *Opt. Express*, **19**, 21, 19919-19924 (2011).
- [3] C. David, S. Gorelick, S. Rutishauser, J. Krzywinski, J. Vila-Comamala, V. a. Guzenko, O. Bunk, E. Färm, M. Ritala, M. Cammarata, D. M. Fritz, R. Barrett, L. Samoylova, J. Grünert, and H. Sinn, *Sci. Rep.*, **1**, 57 (2011).
- [4] C. G. Schroer, O. Kurapova, J. Patommel, P. Boye, J. Feldkamp, B. Lengeler, M. Burghammer, C. Riekel, L. Vincze, A. van der Hart, and M. Küchler, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 124103 (2005).
- [5] H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Yamamura, Y. Mori, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 51903 (2007).
- [6] H. Mimura, S. Handa, T. Kimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, H. Yokoyama, S. Matsuyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Nat. Phys.*, **6**, 122 (2009).
- [7] H. Yumoto, H. Mimura, T. Koyama, S. Matsuyama, K. Tono, T. Togashi, Y. Inubushi, T. Sato, T. Tanaka, T. Kimura, H. Yokoyama, J. Kim, Y. Sano, Y. Hachisu, M. Yabashi, H. Ohashi, H. Ohmori, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Nat. Photonics*, **7**, 1 (2012).
- [8] H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, T. Koyama, K. Tono, Y. Inubushi, T. Togashi, T. Sato, J. Kim, R. Fukui, Y. Sano, M. Yabashi, H. Ohashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Nat. Commun.*, **5**, 3539 (2014).
- [9] S. Matsuyama, H. Mimura, H. Yumoto, Y. Sano, K. Yamamura, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 93107 (2006).
- [10] Y. Takahashi, Y. Nishino, R. Tsutsumi, H. Kubo, H. Furukawa, H. Mimura, S. Matsuyama, N. Zetzu, E. Matsubara, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Phys. Rev. B*, **80**, 54103 (2009).
- [11] Argonne National Laboratory. Conceptual Design Report Advanced Photon Source Upgrade Project. (2011).
- [12] ESRF. ESRF Upgrade Programme Phase II (2015 - 2019) White Paper. (2015).
- [13] RIKEN SPring-8 Center, SPring-8-II Conceptual Design Report (2014).
- [14] M. Yabashi, K. Tono, H. Mimura, S. Matsuyama, K. Yamauchi, T. Tanaka, H. Tanaka, K. Tamasaku, H. Ohashi, S. Goto, and T. Ishikawa, *J. Synchrotron Radiat.*, **21**, 5 (2014).
- [15] P. Emma, R. Akre, J. Arthur, R. Bionta, C. Bostedt, J. Bozek, A. Brachmann, P. Bucksbaum, R. Coffee, F. Decker, Y. Ding, D. Dowell, S. Edstrom, A. Fisher, J. Frisch, S. Gilevich, J. Hastings, G. Hays, P. Hering, Z. Huang, R. Iverson, H. Loos, M. Messerschmidt, A. Miahnahri, S. Moeller, H. Nuhn, G. Pile, D. Ratner, J. Rzepiela, D. Schultz, T. Smith, P. Stefan, H. Tompkins, J. Turner,

- J. Welch, W. White, J. Wu, G. Yocky, and J. Galayda, *Nat. Photonics*, **4**, 641 (2010).
- [16] T. Ishikawa, H. Aoyagi, T. Asaka, Y. Asano, N. Azumi, T. Bizen, H. Ego, K. Fukami, T. Fukui, Y. Furukawa, S. Goto, H. Hanaki, T. Hara, T. Hasegawa, T. Hatsui, A. Higashiya, T. Hirono, N. Hosoda, M. Ishii, T. Inagaki, Y. Inubushi, T. Itoga, Y. Joti, M. Kago, T. Kameshima, H. Kimura, Y. Kirihara, A. Kiyomichi, T. Kobayashi, C. Kondo, T. Kudo, H. Maesaka, X. M. Maréchal, T. Masuda, S. Matsubara, T. Matsumoto, T. Matsushita, S. Matsui, M. Nagasono, N. Nariyama, H. Ohashi, T. Ohata, T. Ohshima, S. Ono, Y. Otake, C. Saji, T. Sakurai, T. Sato, K. Sawada, T. Seike, K. Shirasawa, T. Sugimoto, S. Suzuki, S. Takahashi, H. Takebe, K. Takeshita, K. Tamasaku, H. Tanaka, R. Tanaka, T. Tanaka, T. Togashi, K. Togawa, A. Tokuhisa, H. Tomizawa, K. Tono, S. Wu, M. Yabashi, M. Yamaga, A. Yamashita, K. Yanagida, C. Zhang, T. Shintake, H. Kitamura and N. Kumagai, *Nat. Photonics*, **6**, 540-544, (2012).
- [17] K. Tamasaku, E. Shigemasa, Y. Inubushi, T. Katayama, K. Sawada, H. Yumoto, H. Ohashi, H. Mimura, M. Yabashi, K. Yamauchi, and T. Ishikawa, *Nat. Photonics*, **8**, 313-316 (2014).
- [18] J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz, and D. Sayre, *Nature*, **400**, 342-344, (1999).
- [19] S. Yuan, M. Church, V. V. Yashchuk, K. a. Goldberg, R. S. Celestre, W. R. McKinney, J. Kirschman, G. Morrison, T. Noll, T. Warwick, and H. Padmore, *X-Ray Opt. Instrum.*, **2010**, 1-9, (2010).
- [20] R. Barrett, R. Baker, P. Cloetens, Y. Dabin, C. Morawe, H. Suhonen, R. Tucoulou, A. Vivo, and L. Zhang, *Proc. of SPIE*, **8139** 813904 (2011).
- [21] M. Vannoni, I. Freijo Martín, and H. Sinn, *J. Synchrotron Radiat.*, **23**, 4, 855-860, (2016).
- [22] .R. Signorato, O. Hignette, and J. Goulon, *J. Synchrotron Radiat.* **5**, 797 (1998).
- [23] O. Hignette, A. Freund, and E. Chinchio, *Proc. of SPIE* **3152**, 188 (1997).
- [24] T. Kimura, S. Handa, H. Mimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, S. Matsuyama, K. Inagaki, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**, 72503 (2009).
- [25] K. J. S. Sawhney, S. G. Alcock, and R. Signorato, *Proc. of SPIE*, **7803**, 780303 (2010).
- [26] J. Susini, *Opt. Eng.* **34**, 2, 361-376 (1995).
- [27] A. V Baez and P. Kirkpatrick, *J. Opt. Soc. Am.* **6**, 9, 766-774 (1948)
- [28] S. Matsuyama, T. Kimura, H. Nakamori, S. Imai, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Proc. of SPIE*, **8503**, 850303 (2012).
- [29] T. Kimura, S. Matsuyama, K. Yamauchi, and Y. Nishino, *Opt. Express* **21**, 8, 9267-9276 (2013).
- [30] M. Born and E. Wolf, *光学の原理 II*. (東海大学出版会, 2006).
- [31] K. Uchino and J. R. Giniewicz, *マイクロメカトロニクス 圧電アクチュエータを中心に*. (森北出版, 2007).
- [32] 内野研二, *圧電/電歪アクチュエータ*. (森北出版, 1986).

- [33] S. E. Park and T. R. Shrout, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **44**, 5, 1140–1147, (1997).
- [34] 松下三芳, 舘義仁, 岩崎洋介, 大口径高変換効率圧電単結晶 PMN-PT, *JFE 技報.No 8* (2005 年 6 月) p. 43–48.
- [35] 株式会社富士セラミックス. 富士セラミックス テクニカル・ハンドブック.
- [36] 吉田総仁, 弾塑性力学の基礎 (共立出版, 1997).
- [37] S. G. Alcock, J. P. Sutter, K. J. S. Sawhney, D. R. Hall, K. McAuley, and T. Sorensen, *Nucl. Instrum. A*, **710**, 87–92, (2013).
- [38] H. Nakamori, S. Matsuyama, S. Imai, T. Kimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 053701 (2012).
- [39] K. Yamauchi, H. Mimura, K. Inagaki, and Y. Mori, *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 4028 (2002).
- [40] H. Nakamori, S. Matsuyama, S. Imai, T. Kimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Nucl. Instrum. A*, **710**, 93 (2013).
- [41] N. Henmi, *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, **5**, 1, 70-79 (2011).
- [42] J. R. Fienup, *Appl. Opt.* **32**, 1737–1746 (1993).
- [43] T. Kimura, H. Mimura, S. Handa, H. Yumoto, H. Yokoyama, S. Imai, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Komura, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 12, (2010).
- [44] S. Matsuyama, H. Yokoyama, R. Fukui, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, W. Yashiro, A. Momose, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Opt. Express*, **20**, 22, 24977–86, (2012).
- [45] R. Fukui, J. Kim, S. Matsuyama, H. Yumoto, Y. Inubushi, K. Tono, T. Koyama, T. Kimura, H. Mimura, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Synchrotron Radiat. News*, **26**, 5, 13–16, (2013).
- [46] O. Hignette, A. Freund, and E. Chinchio, *Proc. of SPIE* **3152**, 188 (1997).
- [47] J. P. Sutter, S. G. Alcock, and K. J. S. Sawhney, *J. Synchrotron Radiat.* **19**, 960 (2012).
- [48] T. Goto, S. Matsuyama, H. Nakamori, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Synchrotron Radiat. News*, **29**, 4, 32–36, (2016).
- [49] 鶴田匡夫 : 応用光学 I, 培風館, (1999).
- [50] T. Martin and A. Koch, *J. Synchrotron Radiat.*, **13**, 2, 180–94, (2006).
- [51] T. Goto, H. Nakamori, T. Kimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, and S. Matsuyama, *Rev. Sci. Instrum.*, **86**, 43102, (2015).
- [52] H. Yumoto, H. Mimura, S. Matsuyama, S. Handa, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 6, 63712, (2006).
- [53] K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Ueno, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa, and Y. Mori, *Rev. Sci. Instrum.*, **74**, 5, 2894, (2003).

- [54] S. Toyooka, M. Tominaga, *Optics Communications*, **51**, 2, 68-70, (1984).
- [55] T. Goto, S. Matsuyama, H. Nakamori, T. Kimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Proc. of SPIE*, **9208**, 920802, (2014).
- [56] S. Matsuyama, H. Nakamori, T. Goto, T. Kimura, K. P. Khakurel, Y. Kohmura, Y. Sano, M. Yabashi, T. Ishikawa, Y. Nishino, and K. Yamauchi, *Sci. Rep.*, **6**, 24801, (2016).
- [57] T. Goto, S. Matsuyama, H. Nakamori, H. Hayashi, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Proc. of SPIE*, **9965**, 165, 996502, (2016).
- [58] Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takano, and H. Takenaka, *Jpn. J. Appl. Physics*, **44**, 4, 1994–1998, (2005).
- [59] T. Kimura, H. Ohashi, H. Mimura, D. Yamakawa, H. Yumoto, S. Matsuyama, T. Tsumura, H. Okada, T. Masunaga, Y. Senba, S. Goto, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Nucl. Instrum. A*, **616**, 2–3, 229–232, (2010).

謝辞

本研究を遂行するに当たり、ご指導ならびにご鞭撻を賜りました、大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 山内和人教授、松山智至助教に深く感謝の意を表します。また、日頃のご指導ならびに有益なご助言を賜りました、大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 佐野泰久准教授、大阪大学工学研究科附属超精密科学研究センター 高橋幸生准教授に厚く御礼申し上げます。また、有益なご教示を賜りました遠藤勝義教授、安武潔教授、山村和也教授、荻博次教授、桑原裕司教授、森川良忠教授、渡部平司教授をはじめとする大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻、大阪大学工学研究科附属超精密科学研究センター、および大阪大学大学院工学研究科生命先端工学専攻の諸先生方に深く感謝いたします。また、数々のご助言とご協力を頂きました株式会社ジェイテックコーポレーション 中森紘基博士、北海道大学電子科学研究所 西野吉則教授、木村隆志助教に深く感謝いたします。

本研究を遂行するに当たり、数々のご助言をいただきました理化学研究所放射光科学総合研究センター 石川哲也センター長に深く感謝いたします。さらに、SPring-8 での実験において多くのご助言、ご指導を頂きました理化学研究所放射光科学総合研究センター 放射光イメージング利用システム開発ユニット 香村芳樹ユニットリーダー、ビームライン研究開発グループ ビームライン開発チーム 矢橋牧名チームリーダーに厚く御礼申し上げます。

ミラーベンダーの設計・開発に当たりまして多大なご協力をいただきました株式会社トヤマ遠藤克己社長、園山純生様、秋山和輝様、花嶋宏起様、竹中久貴博士、原玲丞様、坪田幸士様に厚く御礼申し上げます。

また、日頃より本研究の遂行にご協力いただいた、今井将太氏、小手川竜郎氏、林宏樹氏、山口浩之氏をはじめとする大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 山内研究室の卒業・修了生および在学中の諸兄に深く感謝いたします。また、日頃の研究活動の事務的なご支援を頂きました久保英里子様、寺井嘉奈子様に心より感謝いたします。

形状可変ミラーの加工、形状可変ミラーの開発、ビームモニターの開発において数々のご協力をいただきました株式会社ジェイテックコーポレーション、夏目光学株式会社、株式会社富士セラミックス、有限会社オプトキューブに深く感謝いたします。

本研究の一部は、JST CREST「コヒーレント X 線による走査透過 X 線顕微鏡システムの構築と分析科学への応用」、グローバル COE プログラム「原子論的生産技術の創出拠点」、科学研究費補助金基板研究(S)「高精度形状可変ミラー光学系の構築と X 線自由電子レーザーのアダプティブ集光」及び日本学術振興会科学研究費補助金(特別研究員奨励費 DC1)の支援により行われました。ここに感謝いたします。

最後に、本研究の遂行に当たっては家族の終始変わらぬ温かい励ましがあつたことを記し、ここに感謝の意を表します。