

Title	高精度形状可変ミラーを用いたアダプティブ集光光学系の開発
Author(s)	中森, 紘基
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61778
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

博士学位論文

高精度形状可変ミラーを用いた
アダプティブ集光光学系の開発

中森紘基

2017年1月

大阪大学大学院工学研究科

目次

1. 序論.....	1
1.1. 研究の背景と目的.....	1
1.2. アダプティブ光学素子.....	2
1.3. 本論文の構成.....	2
2. 二段アダプティブ集光光学系.....	5
2.1. アダプティブ集光光学系の設計思想.....	5
2.2. 光学系の構成と NA 可変の仕組み.....	7
2.3. 波動光学シミュレーションによる実現可能性の検討.....	9
2.3.1. シミュレーション手法.....	9
2.3.2. シミュレーション結果.....	9
2.4. 形状可変ミラーの形状計測方法の検討.....	11
2.4.1. 各種計測方法の比較.....	11
2.5. 結言.....	13
3. 高精度形状可変ミラーの開発.....	15
3.1. 圧電素子の特性.....	15
3.2. 圧電素子によるミラーの変形方法.....	16
3.2.1. 圧電素子による基礎的な変形.....	16
3.2.2. ミラーの曲面形状への変形方法.....	18
3.3. 形状可変ミラー設計指針の検討.....	19
3.3.1. シミュレーションによる構造の基礎検討.....	20
3.3.2. 実証実験の準備.....	21
3.3.3. 結果と考察.....	23
3.4. 集光用形状可変ミラーの開発.....	27
3.5. 形状可変ミラー用ホルダの開発.....	29
3.6. 形状可変ミラー変形試験.....	31
3.6.1. 実験のセットアップ.....	31
3.6.2. 実験結果.....	31
3.7. 結言.....	33
4. アダプティブ集光光学系の実験装置の開発.....	35
4.1. シミュレーションを用いた実験装置設計指針の検討.....	35
4.2. 実験装置の構成.....	40
4.2.1. 定盤および二段集光光学系配置.....	40
4.2.2. KB ミラーマニピュレータ.....	41
4.2.3. チルトセンサユニット.....	44
4.2.4. ペンシルビームスキャン用ビームモニタ.....	47
4.2.5. スキャンユニット.....	49
4.3. 結言.....	51

5. アダプティブ X 線集光実験.....	53
5.1. 集光実験の手順	53
5.1.1. 形状可変ミラーの調整手順.....	53
5.1.2. 二段光学系の調整手順.....	54
5.2. 2 枚の形状可変ミラーを用いたアダプティブ集光実験.....	57
5.2.1. アダプティブ KB ミラー集光光学系を用いた集光実験	57
5.2.2. アダプティブ二段一次元集光光学系を用いた集光実験.....	60
5.2.3. アダプティブ二段一次元集光光学系を用いた波面補償集光実験	62
5.2.4. 実験のまとめ.....	65
5.3. 二段アダプティブ集光光学系開発の現状.....	66
5.3.1. 実験条件.....	66
5.3.2. 実験結果.....	66
5.4. 結言	68
6. 総括.....	69
参考文献.....	73
謝辞.....	76

1. 序論

1.1. 研究の背景と目的

光学顕微鏡は 16 世紀末、Hans Janssen, Zacharias Janssen 親子によって発明された。顕微鏡を表す“Microscope”は古代ギリシャ語で「小さい”μικρός”」と「見る”σκοπεῖν”」を意味し、その名の通り、肉眼では観察が困難な微細構造を可視化する技術である。17 世紀には Galileo Galilei が虫を観察したという記録が残っている。

20 世紀に入ると可視光を用いた光学顕微鏡だけでなく、1938 年には Ernst Ruska により、電子線を試料に照射する電子顕微鏡(Electron Microscopy)¹が開発された。また、1980 年代には Gerd Binnig, Heinrich Rohrer により、探針を試料に近づけて表面形状を観察する、走査プローブ顕微鏡(Scanning Probe Microscopy)が開発された^{2,3}。これらの功績に対し、1986 年にノーベル物理学賞が授与されている。今日の電子顕微鏡では、電子レンズ(対物レンズ・中間レンズ)の焦点距離を変えることで、像の倍率を変化させることができる。この機能により、1 台の電子顕微鏡で原子 1 個を観察できる高分解能像と、比較的広い範囲の電子回折像を同時に取得することを可能としている⁴。

一方、X 線を光源とする X 線顕微鏡は、1948 年に Paul Kirkpatrick と Albert Baez により Kirkpatrick-Baez(KB)ミラー光学系とともに開発された⁵。X 線は物質に照射すると、透過 X 線・散乱 X 線・蛍光 X 線・放出電子といった現象が発生する。また、その短波長性は微細な構造解析を、高い透過性は内部構造の分析を可能とし、優れた光源であるといえる。近年では第 3 世代放射光の稼働により、高輝度・高コヒーレンス・低エミッタンスな X 線を利用できるようになった。また計測・加工技術の発展により高精度な光学素子(レンズ⁶、ラウエレンズ⁷、フレネルゾーンプレート⁸、全反射ミラー⁹、多層膜ミラー¹⁰)が開発され、50 nm 以下の回折限界集光が達成されている。これら第 3 世代放射光源と光学素子を組み合わせることで、極限まで集光した X 線による走査型 X 線顕微鏡¹¹や、試料全体に集光 X 線を照射する X 線回折顕微鏡¹²は、電子顕微鏡に匹敵する分解能を獲得している。

第 3 世代放射光施設は稼働開始から 20 年近くが経過し、施設のアップグレードという新たなフェーズを迎えようとしている^{13,14,15}。アップグレードにより 10~100 倍の大幅な高輝度化が見込まれている¹⁶。輝度の向上はすなわち測定時間の短縮を意味しており、時間短縮により、1 回のビームタイム中に 1 つの試料に対する様々な分析を行うことも可能となる。たとえば、試料全体像を回折顕微鏡で取得して位置を特定した後、走査型顕微鏡により元素分布を取得するような複合分析技術は、X 線顕微鏡の強力なツールになると期待できる。しかし前述の通り、回折顕微鏡と走査型顕微鏡では求められる集光径が異なるため、それぞれに適した光学系が必要であり、この実現には電子顕微鏡における電子レンズに相当するような、光学パラメータ可変なアダプティブ集光光学系が必要不可欠である。また、このような光学系があれば、様々な大きさの試料を一つの光学系で分析することも可能となる。

1.2. アダプティブ光学素子

近年、光学パラメータ可変なアダプティブ光学素子として、シリコンや合成石英の基板に荷重を加えて変形させる形状可変ミラーの研究が進んでいる^{17,18,19}。形状可変ミラーは大きく機械曲げミラーと圧電素子ミラーの2種類に分類される。前者は曲げ機構を用いて基板の両端にモーメントを加える形状可変ミラーである²⁰。変形形状は基板の形状と基板に加えるモーメントにより決定され、直方体ミラーでは3次関数、台形ミラーでは4次関数の変形が可能である^{21,22,23}。これまでに本ミラーを用い、100 nm以下の集光が達成されている^{24,25}。しかしこれら機械曲げミラーでは、変形できる形状が制限されており、決められた集光ミラーの形状に近似変形することしかできないため、汎用性に問題がある。

一方後者は基板に圧電素子を接着し、逆圧電効果により変形する形状可変ミラーである^{26,27,28}。圧電素子はそれ自体がナノメートルオーダーの変形精度をもち、電極の配置を工夫することで様々な形状を作り出すことができる。これまでに本ミラーを用いて数 μm のX線集光が達成されている。

しかし現状ではいずれの形状可変ミラーにおいても、変形精度の低さから回折限界集光を達成できる形状可変ミラーは開発されていない。本研究では、回折限界集光が可能な高精度形状可変ミラーを開発する。また、形状可変ミラーを用いた、回折限界条件下で集光径可変なアダプティブ集光光学系の構築を最終目標としている。

1.3. 本論文の構成

本論文は、回折限界条件下で集光径可変なアダプティブ集光光学系の開発と、その構築に必要な不可欠な高精度形状可変ミラーの開発についてまとめたものである。以下に本論文の構成を述べる。

第2章では、従来の光学素子における問題点を提示し、形状可変ミラーを用いたアダプティブ集光光学系の設計について述べている。また、波動光学シミュレーションを用いた可変集光の実現可能性の検討と、形状可変ミラーの形状修正に用いる計測方法の検討についても述べている。

第3章では、アダプティブ集光光学系の光学素子である圧電素子駆動型の高精度形状可変ミラーの開発について述べている。高精度に変形可能な形状可変ミラーの構造の検討と、圧電素子上電極の最適化を行っている。また、キネマティックにミラーの支持と電圧印加用電極の接触を行うためのミラーホルダの開発も行い、干渉計を用いた形状フィードバック制御を用いて形状可変ミラーの性能評価を行っている。

第4章では二段アダプティブX線集光実験で用いる装置の開発について述べている。まず波動光学シミュレーションを用いて光学系の許容アライメント誤差を求め、各制御軸の分解能を決定している。これらに基づき、集光装置の設計・製作を行っている。また、形状可変ミラーの形状計測に用いる高精度ビームモニタの開発も行っている。

第5章では、第3章と第4章で開発した形状可変ミラーと実験装置を用いた、アダプティブ集光実験について述べている。まず2枚の形状可変ミラーを用いてアダプティブKB集光光学系とアダプティブ二段一次元集光光学系による集光実験を行い、基礎検討を行っている。また、それらの結果をフィードバックして行われたアダプティブ二段KB集光実験について、論文を引用して紹介している。

第6章では、本論文の総括を行う。

2. 二段アダプティブ集光光学系

本章では、開発を目指す集光径可変な光学系であるアダプティブ集光光学系について、コンセプトおよび可変集光の原理について述べる。また、本光学系の実現可能性について、波動光学シミュレーションを行い検討する。また、アダプティブ集光光学系を構成する形状可変ミラーの制御に必要な波面計測法であるペンシルビームスキャンの原理についても述べる。

2.1. アダプティブ集光光学系の設計思想

まず、従来のミラー光学系において、集光径を変更する場合の問題点について検討した。一般に、集光光学系の回折限界集光径は式(2.1)から求められる²⁹⁾。

$$w = 0.44 \frac{\lambda}{NA} \left(NA \cong \frac{a}{2f_b} \right) \quad (2.1)$$

w : 集光径(FWHM; Full-Width at Half-Maximum)

λ : 波長

a : 開口サイズ

f_b : 焦点距離

式(2.1)に基づき、回折限界条件下で集光径を変化させる方法を考えると、一定波長 λ で集光を行う場合、開口サイズ a 、もしくは焦点距離 f_b を変える必要がある。ミラー光学系の場合、開口サイズ a はミラーの長さ l と斜入射角 θ より、 $a = l \sin \theta$ で表される。

図 2.1.1 に示すように、開口サイズ a はミラーに照射される光の大きさを入射スリット等で制限することで変えることができる。開口サイズ a と集光系は反比例の関係にあることから、開口サイズ a を小さくすることで集光径は大きくなる。しかし、この方法で開口サイズ a を変えると光量のロスが発生し、集光径を大きくするに伴って光の強度が弱くなる。

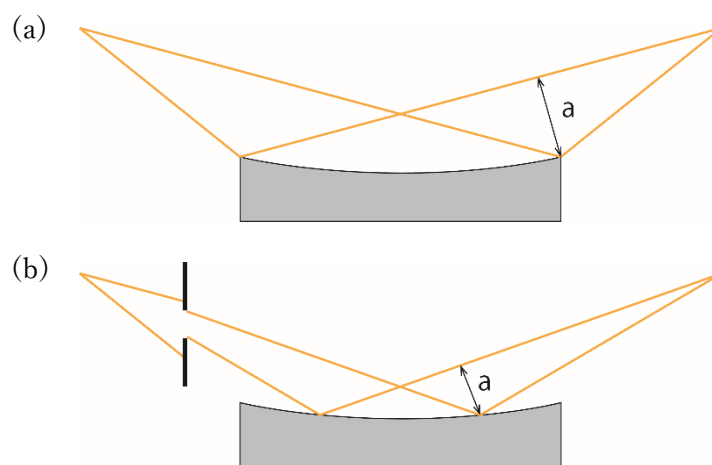


図 2.1.1 開口サイズによる集光径の変更 (a)集光径小 (b)集光径大

一方ミラー形状が可変ならば、図 2.1.2 に示すように別の楕円形状を作り出すことで、焦点距離 f_b を変えることができる。焦点距離 f_b と集光径は比例の関係であり、短くすると集光径は小さくなる。しかし、焦点距離により集光径を変化させると、サンプルや検出器の取り付け位置を光軸方向に大きく変更する必要がある。また、集光径を大きく変化させるためには、焦点距離を大きく変化させる必要があり、通常実験スペースが限られていることを考慮すると、この方法を選択することは難しい。さらに、従来の形状可変ミラーでは変形精度が十分ではないため、回折限界集光は達成されていない。

以上より、単純な光学系では、実用的なアダプティブ集光光学系を構築することが難しく、さらに、これを可能にする高精度形状可変ミラーは存在していない。新しいアダプティブ集光光学系の提案(本章で詳述)と高精度形状可変ミラーの開発(3章で詳述)が必要である。

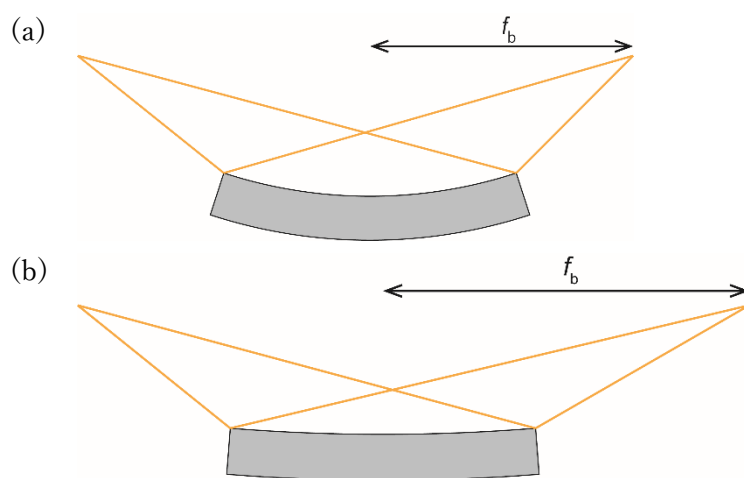


図 2.1.2 焦点距離による集光径の変更 (a)集光径小 (b)集光径大

本章では、以下のコンセプトに基づき、新たなアダプティブ集光光学系を提案・設計した。

- ① 集光径は数十 nm～数 μm で可変
- ② 集光径を変化させても、常に回折限界条件を満たす集光が可能
- ③ 集光径を変化させても、焦点位置が不変
- ④ 光量のロスがない(光量を制限するピンホールやスリットを用いない)

2.2. 光学系の構成と NA 可変の仕組み

第 2.1 節に示した条件を満たす光学系として、二次元で 4 枚の形状可変ミラーを用いた二段アダプティブ集光光学系を提案する^{30,31}。光学系の概略図を図 2.2.1 に示す。まず、光源からの X 線を上流形状可変ミラーで中間焦点に集光する。このとき、上流ミラー形状は光源と中間焦点を焦点にもつ楕円となる。その後、拡散した X 線を下流形状可変ミラーで最終焦点に集光する。このときも、下流ミラー形状は中間焦点と最終焦点を焦点にもつ楕円となる。

光源と最終焦点位置、ミラー位置、ミラー入射角は不変で、さらに、中間焦点を共有するという条件の下、中間焦点の位置を変化させるように 2 枚の形状可変ミラーを楕円形状に再変形させると、下流ミラーの照明領域が変化する。この結果、NA (Numerical Aperture) が変化し、最終焦点での集光径が変化する。

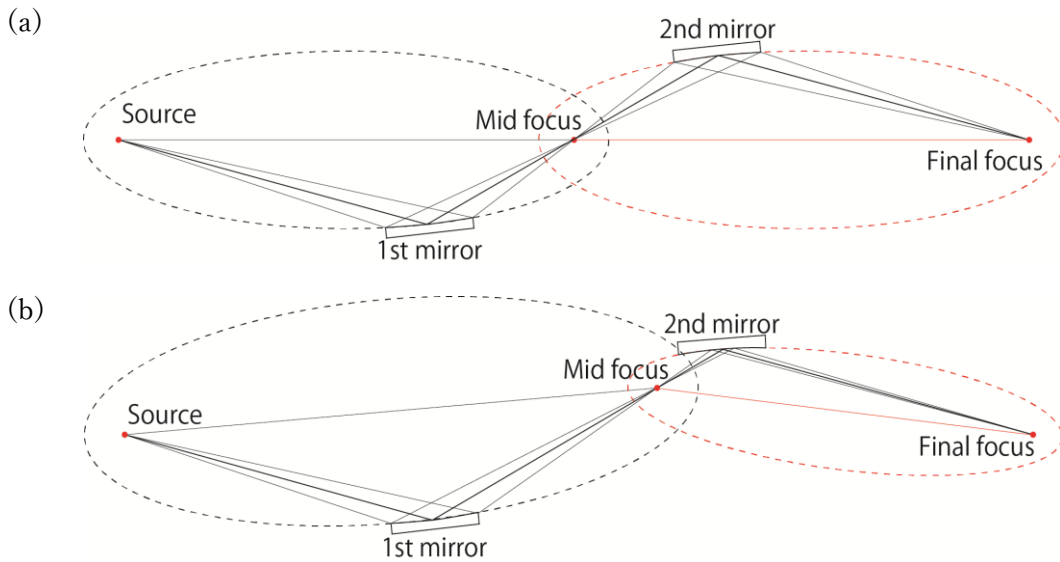


図 2.2.1 中間焦点をもつ二段光学系の概略図

(a)NA 最大の時, (b)NA を小さくしたとき

図 2.2.2(a)に示すように、上流ミラー開口サイズ(*MirrorAperture1*)と中間焦点距離 L_1 、下流ミラー開口大きさ(*MirrorAperture2*)とミラー間距離 L の関係より、第一焦点を、

$$\frac{\text{MirrorAperture1} \times (L - L_1)}{\text{MirrorAperture2} \times L_1} = 1 \quad (2.2)$$

の位置にしたとき、下流ミラーの NA は最も大きくなり、最終焦点の集光径は最小となる。一方、図 2.2.2 (b)に示すように中間焦点位置を下流側に移動したとき、

$$\frac{\text{MirrorAperture1} \times (L - L_1)}{\text{MirrorAperture2} \times L_1} < 1 \quad (2.3)$$

となり、下流ミラーの NA は小さくなり、集光径は大きくなる。ここで *MirrorAperture1*, *MirrorAperture2*, L は一定であるとすれば、NA の変化は L_1 によって決定されることがわかる。つまり、 L_1 を大きくすることで NA は小さくなり、より大きな集光径を得ることができる。

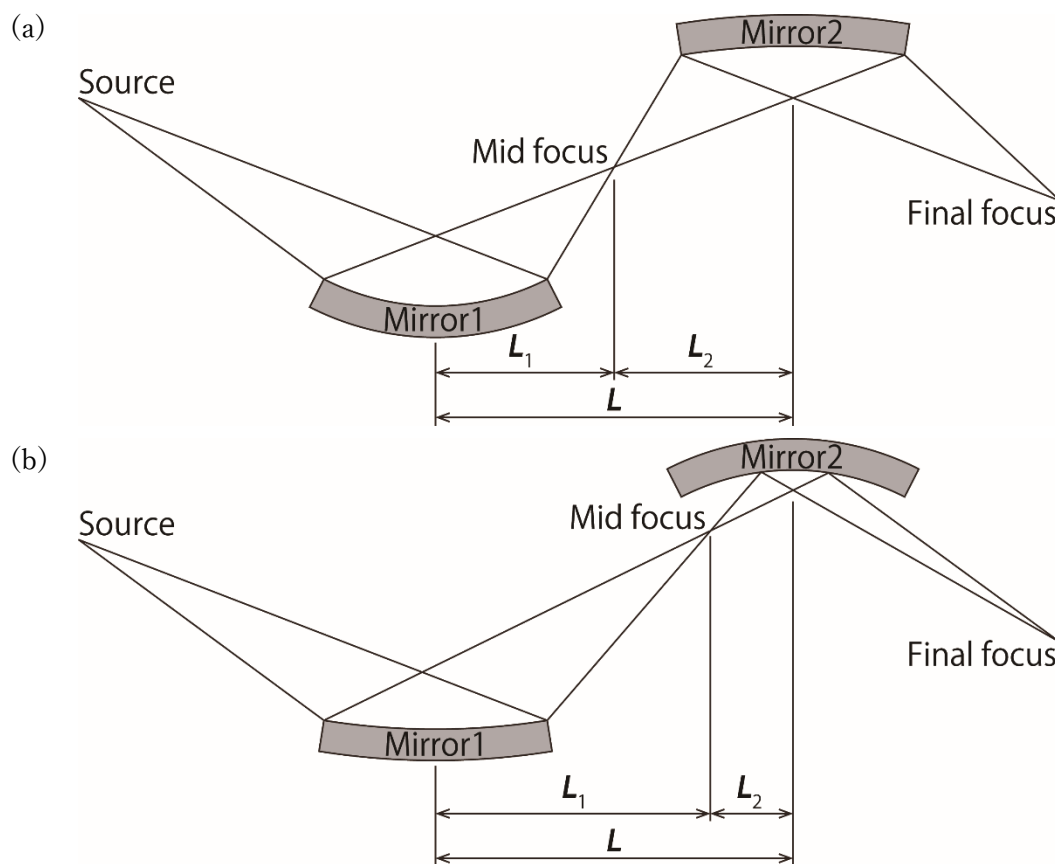


図 2.2.2 二段光学系による集光径の変更
(a) NA 最大のとき, (b) NA を小さくしたとき

本光学系では、集光径を変化させても、上流ミラーで反射する X 線の量は変わらないため、光量のロスはない。また、最終焦点は固定できるため、集光径の変化に合わせてサンプルを光軸方向に移動させる必要も無い。さらに形状可変ミラーの特徴として、波面補償の機能も兼ね備えているため、ビームライン上に存在する波面収差(モノクロメータや高調波カットミラー等の形状の不完全さによって発生)を補償することもできる。形状可変ミラーの表面形状をナノメートル精度で制御することで、常に回折限界条件下での集光が可能である。

2.3. 波動光学シミュレーションによる実現可能性の検討

光学系の実現可能性を調べるため、波動光学シミュレータを構築し、計算を行った。

2.3.1. シミュレーション手法²⁹

シミュレーションには、式(2.4)に示す Fresnel-Kirchhoff の回折公式を用いた。

$$U_2(r_2) = -\frac{i}{2\lambda} \int_{W_1} U_1(r_1) \frac{e^{-ikr}}{r} (1 + \cos \theta) ds \quad (2.4)$$

式(2.4)は、伝播元領域 W_1 の波動場 $U_1(r_1)$ から位置 r_2 の波動場 U_2 への伝播を表している。ここで λ , k , r はそれぞれ波長, 波数, r_1 と r_2 の距離である。 $1 + \cos \theta$ は傾斜角因子で、硬 X 線の反射は角度が非常に小さく、 $1 + \cos \theta \cong 2$ ($\theta \cong 0$)と近似できる。

2.3.2. シミュレーション結果

シミュレーションに用いた二段アダプティブ集光光学系は実際の実験を想定している。光学系の概略図を図 2.3.1 に示す。ミラーはすべて長さ 100 mm, 入射角 4 mrad とした。また、X 線のエネルギーは 10 keV, 光源は点光源とした。中間焦点位置は上流垂直集光ミラー中心から 620 mm 下流を標準位置とした。中間焦点距離を変更することで、最終焦点での集光径を変えられることを、シミュレーションを使って調べた。中間焦点位置が標準のときを Mode I, 250 mm 下流のときを Mode II, 500 mm 下流のときを Mode III とする。

シミュレーション結果を図 2.3.2 に示す。その結果、中間焦点距離を下流に 0.5 m 移動することにより、NA 最大の時に比べて水平集光は 5 倍, 垂直集光は 10 倍まで集光径(FWHM)を予想通りに変化させることができ、本光学系は有効に機能することを確認できる。

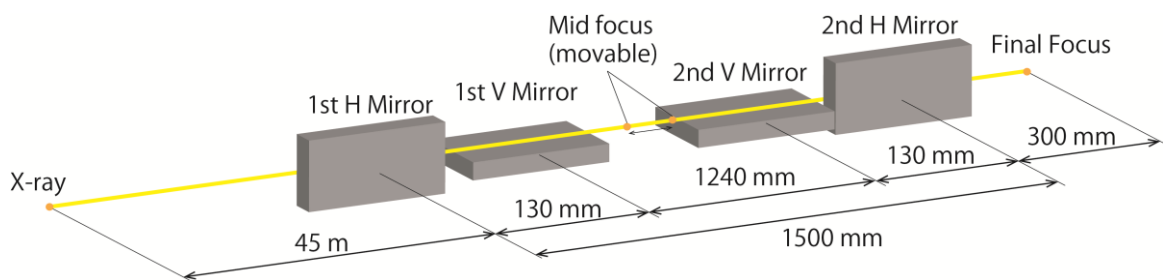


図 2.3.1 アダプティブ集光光学系のシミュレーションモデル

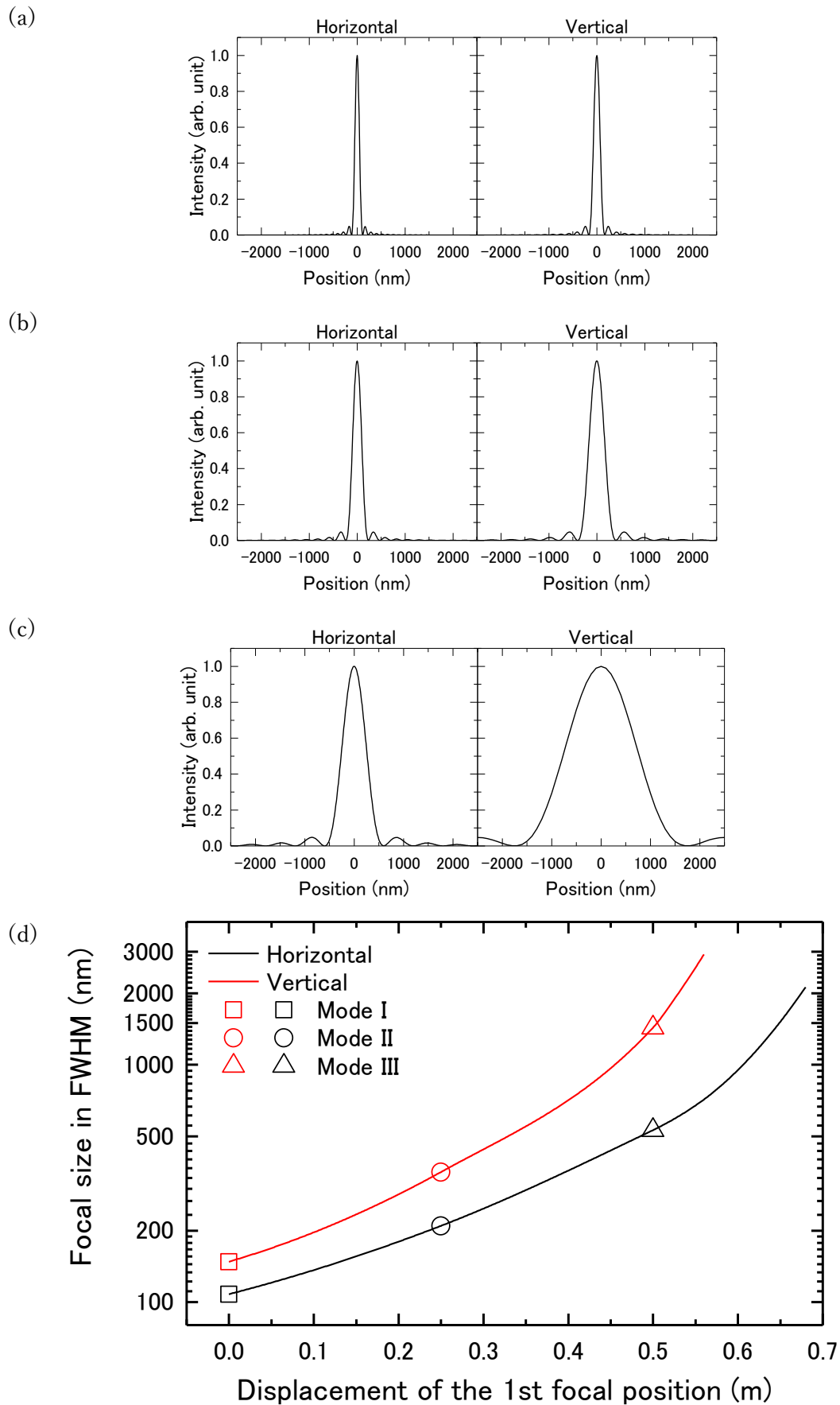


図 2.3.2 中間焦点距離移動量 (a)0m (b)0.25m (c)0.5m のときの最終焦点集光プロファイル

(d) 中間焦点距離の移動と最終焦点の集光径変化の関係

2.4. 形状可変ミラーの形状計測方法の検討

2.4.1. 各種計測方法の比較

レイリーの4分の1波長則²⁹⁾にもとづくると、10 keVのエネルギー、4 mradの集光ミラーの回折限界集光を実現する許容形状誤差は3.9 nmである。前述の通り、形状可変ミラーは波面補償の機能も兼ね備えている。形状可変ミラーで回折限界集光を行える精度まで変形するには、ミラーの形状誤差を正確に計測する必要がある。各ミラーにフィゾー型干渉計のような形状計測機を設置することができれば、形状を常にモニタし、形状制御にフィードバックすることができる。しかし、ミラーの枚数分の計測機が必要となり、高コストかつシステムが大がかりになるため容易ではない。そこで本研究ではX線を用いたAt-wavelength波面計測法を用いてミラーの形状誤差を計測し、形状修正することを提案する。波面計測法はいくつかあるが、本光学系に必要な条件は、

- ① 回折限界集光が可能な精度
- ② 比較的短時間で計測可能
- ③ 様々なNAに対応
- ④ 計測と変形の自動化が容易

とする。表 2.4.1 に各種計測法の特徴を示す

表 2.4.1 各種 At-wavelength 計測法の特徴

	精度	NA	自動化	計測時間	コスト
位相回復法 ^{32,33)}	○	△	×	×	○
Talbot 干渉計 ^{34,35)}	○	×	○	○	△
ペンシルビームスキャン ^{36,37)}	△	○	○	△	○
フィゾー型干渉計(参考)	○	○	○	○	×

位相回復法は、集光ビームの焦点付近の強度プロファイルを複数計測し、この強度プロファイルを再現できる波面収差を計算によって求める手法である。計測精度は高いが、大NAの光学系では計測が難しい。また、ビームウエストの計測に時間がかかり、自動化も難しい。

Talbot 干渉計は、回折格子を用いたシアリング干渉計の一種である。集光ビームの波面計測の場合、焦点下流に位相回折格子を設置し、さらに後方で発生する自己像と呼ばれる明瞭な周期的強度パターンを計測する(Single-grating interferometer)。縞解析ではフーリエ変換法や縞走査法などの通常の干渉計で用いられる解析手法が適用できる。このタイプは、NAの小さい光学系への適用が難しいという点を除けば理想的である。小さいNAにも対応させるためには、自己像の周期に応じた吸収格子(つまり通常の Talbot 干渉計)を検出器直前におくことで可能となるが、この場合は汎用性が低いため適さない。

ペンシルビーム法は集光ミラーをいくつかの区間に分割し、それぞれで反射したX線の位置を焦点位置でビームモニタにより計測することで、ミラー上の傾斜誤差を幾何学的に求める手法である。図 2.4.1 にペンシルビームスキャンの計測原理を示す。ミラー上に誤差がな

い場合、反射した X 線はすべて焦点位置で一点に集まる。しかし、ミラーに形状誤差(傾斜誤差)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。反射位置から焦点までの距離を L 、焦点位置での X 線のずれを dx としたとき、傾斜誤差 θ は、式(2.5)から求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{dx}{2L} \quad (L \gg dx) \quad (2.5)$$

この計測と計算を、分割した全ての領域において行うことで、ミラーの形状誤差分布を求められる。得られた形状誤差分布をもとに、形状可変ミラーを制御することで、正しい形状に変形することが可能となる。

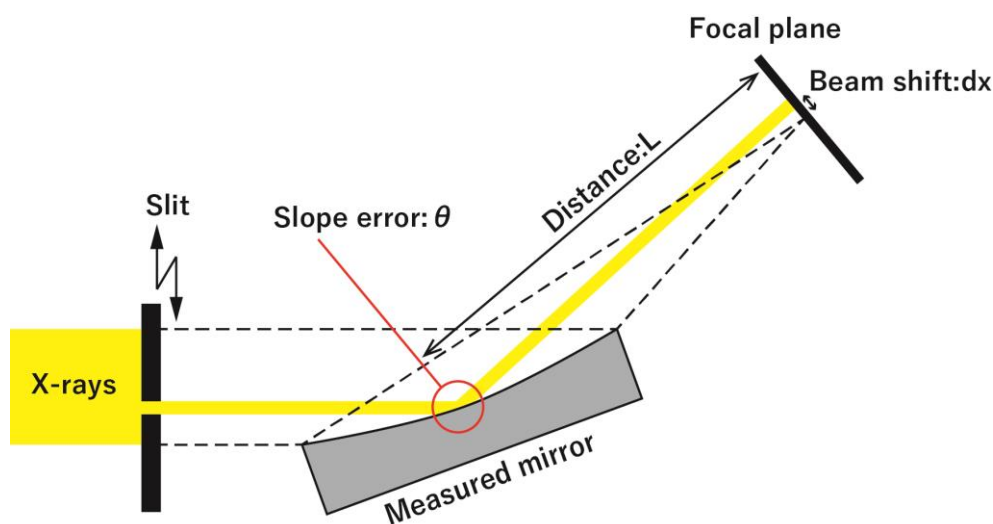


図 2.4.1 ペンシルビームスキャンによるミラー上傾斜誤差分布の計測原理

ペンシルビームスキャンはほぼ全ての条件を満たす。精度面で他の手法よりも劣ると言われているが、X線の位置を計測するビームモニタの性能等に依存するので、高精度化は可能であると判断した。そこで本研究では、要求精度を十分に満たすペンシルビームスキャンシステムを構築し、形状可変ミラー制御のための波面計測法とすることとした。

回折限界集光を行うためには少なくとも目標とする集光径(FWHM)の5分の1の位置のずれを検出する必要がある。本光学系では、100 nm が最小集光径であるため、その5分の1である 20 nm をビームモニタの必要精度とした。第4章でビームモニタの開発について詳述する。

2.5. 結言

本章では、本研究において開発を目指す二段アダプティブ集光光学系の概要について述べた。

- (1) 従来の光学素子・光学系による可変集光の問題点を示し、開発するアダプティブ集光光学系のコンセプトを、①数十 nm~数 μm の可変集光、②常に回折限界集光、③焦点位置不変、④光のロスがない、とした。
- (2) 4枚の形状可変ミラーを用いた二段アダプティブ集光光学系を提案し、その可変集光原理を述べた。また、波動光学シミュレーションにより本光学系の実現可能性を確認した。
- (3) 形状可変ミラーの制御に用いる波面計測法について、3種類の At-wavelength 計測法の特徴を示し、ペンシルビームスキャンを採用することとした。また、ペンシルビームスキャンの計測原理と、本光学系における必要精度について示した。

3. 高精度形状可変ミラーの開発

波面を高精度に制御し、回折限界条件で集光径可変なアダプティブ集光光学系を構築するためには、高精度変形が可能な形状可変ミラーが必要である。これまでに、機械・圧電素子駆動の形状可変ミラーの開発が報告されている。しかし、それらの変形精度は回折限界集光を達成するものではなかった。

本章では大変形かつ高精度な変形を可能とする形状可変ミラーの設計・開発を行う。まず、圧電素子を用いた形状可変ミラーについて、設計指針の基礎的検討を行う。そして得られた設計指針に基づいて、X線集光用形状可変ミラーを作製し、変形性能を評価する。

3.1. 圧電素子の特性^{38, 39}

圧電素子には、応力を受けて歪みが生じたときに電圧を発生する圧電効果があり、超音波センサや加速度センサなどの各種センサに用いられている。一方、圧電素子に電圧を加えたときに歪みが生じる現象を逆圧電効果と呼び、超音波モータや各種圧電アクチュエータに用いられている(図 3.1.1)。表 3.1.1 に示すように、ステッピングモータなど従来のアクチュエータに比べ、圧電アクチュエータは小型で応答が早く、高分解能、高出力といった利点を持つため、近年の小型モータ、制震技術などの各分野において積極的に使用されている。特にジルコン酸チタン酸鉛(PZT: $\text{Pb}(\text{Zr-Ti})\text{O}_3$)は大きな圧電性、誘電率、強誘電性をもつ。その圧電性の大きさから、アクチュエータやセンサなどの圧電素子として広く用いられている。

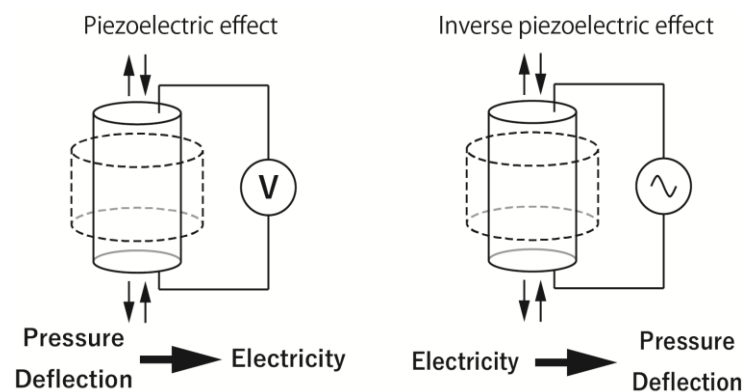


図 3.1.1 圧電素子の基本機能

表 3.1.1 各種アクチュエータの変位制御性³⁸

	Range	Accuracy	Force	Response
Air cylinder	100 mm	100 μm	0.1 N/mm ²	10 sec
Oil cylinder	1000 mm	10 μm	100 N/mm ²	1 sec
Pulse motor	1000 mm	10 μm	300 N	100 msec
Piezoelectric actuator	100 μm	10 nm	30 N/mm ²	0.1 msec

3.2. 圧電素子によるミラーの変形方法

3.2.1. 圧電素子による基礎的な変形^{39,40}

材料に応力 \mathbf{T} が加わると、材料力学における応力-ひずみ関係式に従って $\mathbf{S} = s\mathbf{T}$ (s : 弾性コンプライアンス) のひずみが発生する。圧電素子の場合、圧電効果により、加えた応力 \mathbf{T} に比例した電気変位 $\mathbf{D} = d\mathbf{T}$ (d : 圧電定数) が生じる。また、電界 \mathbf{E} を加えると $\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}$ (ε : 誘電定数) の電気変位が生じ、その際に逆圧電効果によってひずみ $\mathbf{S} = d^t\mathbf{E}$ も発生する。以上の関係をまとめると、圧電素子に生じる圧電効果は、式(3.1)の関係式でまとめられる。

$$\begin{aligned}\mathbf{S} &= s\mathbf{T} + d^t\mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= d\mathbf{T} + \varepsilon\mathbf{E}\end{aligned}\quad (3.1)$$

式(3.1)を、この電界-応力関係を明示するように変形すると、

$$\mathbf{T} = s^{-1}\mathbf{S} - s^{-1}d^t\mathbf{E}\quad (3.2)$$

となる。ここで弾性コンプライアンス s の逆行列は弾性定数 Y であるため、

$$\mathbf{T} = Y\mathbf{S} - Yd^t\mathbf{E}\quad (3.3)$$

と書き直すことができる。圧電素子に生じる応力は、圧電素子の弾性定数、ひずみ、圧電定数、印加電圧によって記述できることが分かる。

この関係を、図 3.2.1 に示すように分極方向を 3 軸とする座標系をとり、すべての成分を行列式で表すと、式(3.4)となる。

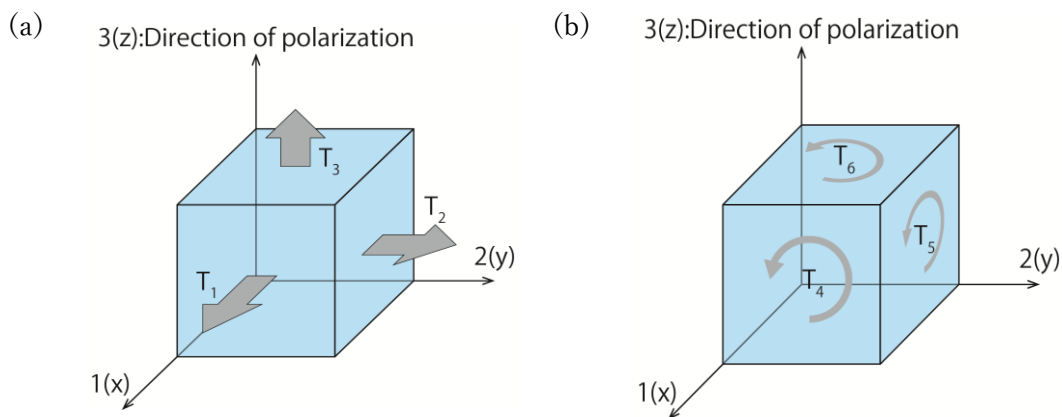


図 3.2.1 応力の成分 (a)縦方向, (b)せん断方向

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

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

分極された圧電素子では3(z)軸は回転対称軸であり、3(z)軸と垂直な面内では等方性となる。そのため、式(3.5)のように簡素化することが出来る。

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{12} & Y_{11} & Y_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Y_{13} & Y_{13} & Y_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

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

さらに、図 3.2.2 に示すように、本研究で開発する形状可変ミラーはミラー基板に圧電素子を接着される構造であり、圧電素子の分極方向 (3(z)軸) に対して電圧を印加するため、 $E_1=E_2=0$ を代入することに相当する。また、圧電素子はミラー基板に固定されているため、圧電素子自体の変形量はほぼ0と考えることができ、変位 $S=0$ とできる。以上より、ミラー基板に曲げモーメントを生じさせる応力 T_1 は式(3.6)となる。

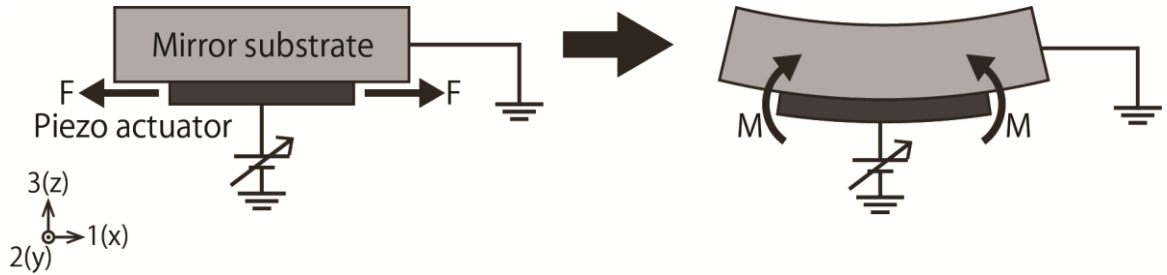


図 3.2.2 圧電素子による形状可変ミラーの変形

$$T_1 = -(Y_{11}d_{31} + Y_{12}d_{31} + Y_{13}d_{33})E_3 \quad (3.6)$$

さらに圧電素子のポアソン比を ν とすると、式(3.7)で表される。

$$T_1 = -(Y_{11}d_{31} - \nu Y_{11}d_{31} - \nu Y_{33}d_{33})E_3 \quad (3.7)$$

3.2.2. ミラーの曲面形状への変形方法⁴¹

形状可変ミラーによる集光を行うためには、楕円などの非球面形状へ変形する必要がある。非球面形状は曲率の分布を持った形状である。圧電素子に1種類の電圧を印加すると、一つの曲率に変形する。そのため、非球面形状へ変形するには、ミラー長手方向に分布をもつ電圧を印加することが必要である。ミラーを変形するための電圧の算出は、梁の曲げ理論に基づいて行う。梁理論による変形計算は、以下に示す①～⑤の手順で行う。

- ① 式(3.8)は変形形状を二階微分し、変形形状の曲率分布を求める式である。ここで $1/R$ は曲率を、 $y(x)$ は変形形状を表している。

$$\frac{1}{R} = \frac{-\frac{d^2y(x)}{dx^2}}{\left\{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right\}^{3/2}} \quad (3.8)$$

- ② オイラーの梁理論に基づく曲げモーメントと曲率の関係式から、①で求めた曲率分布に変形するために必要な曲げモーメント分布 M を算出する。式(3.9)において Y_m はミラー基板の弾性率、 I_m はミラー基板の断面二次モーメントをそれぞれ示している。

$$M = \frac{Y_m I_m}{R} \quad (3.9)$$

- ③ ミラー基板に曲げモーメントを加えるために必要となる力 F は、式(3.10)より求められる。 F は圧電素子により加えられる力で、 t_m はミラー基板の厚さ、 t_p は圧電素子の厚さである。

$$M = F \frac{(t_m + t_p)}{2} \quad (3.10)$$

- ④ 式(3.11)から、ミラー基板に加える力 F を発生させるために必要となる、圧電素子への印加電圧の分布 V を求める。圧電素子によって発生する力は、印加した電圧によって生じる応力と圧電素子の断面積の積で表すことができる。式中において、 τ は圧電素子に生じる応力、 S_p は圧電素子断面積、 V は印加電圧、 w_p は圧電素子幅を示している。

$$F = \tau \times S = (Y_{11}d_{31} - \nu Y_{11}d_{31} - \nu Y_{33}d_{33}) \frac{V}{t_p} S_p = (Y_{11}d_{31} - \nu Y_{11}d_{31} - \nu Y_{33}d_{33}) V w_p \quad (3.11)$$

⑤ 以上をまとめると、目標形状に変形するには、式(3.12)に示す電圧分布が必要とわかる。

$$V(x) = \frac{Y_m I_m}{Y_p d_{31} w_p} \frac{(t_m + t_p)}{2} \frac{1}{R} \quad (3.12)$$

3.3. 形状可変ミラー設計指針の検討⁴²

前述の通り、形状可変ミラーを非球面形状へ変形するには、複数の電圧を印加できる構造が必要である。形状可変ミラーは、構造として分類した場合、図 3.3.1 に示すように圧電素子分離型と圧電素子一体型に分類できる。

圧電素子分離型は、複数の圧電素子が基板に接着されている。圧電素子の作製サイズには制限があるが、この構造では比較的短い圧電素子で構成されているため、大型のミラーであっても作製可能である。しかし、圧電素子間の隙間には変形の発生しない領域があり、また隙間があるため断面二次モーメントも不連続で、隙間の周期と一致した短周期の変形誤差が生じると予想される。

一方、圧電素子一体型は、基板に接着された1枚の長い圧電素子上に、複数の電極が取り付けられている。分離型のような隙間がないため、断面二次モーメントは一様である。分離型と同様に変形できない領域は有しているが、変形誤差の少ない滑らかな変形が期待できる。しかし、圧電素子の最大長さは150 mm程度であり、長い圧電素子が必要な本構造では大型化は難しいという欠点を持つ。

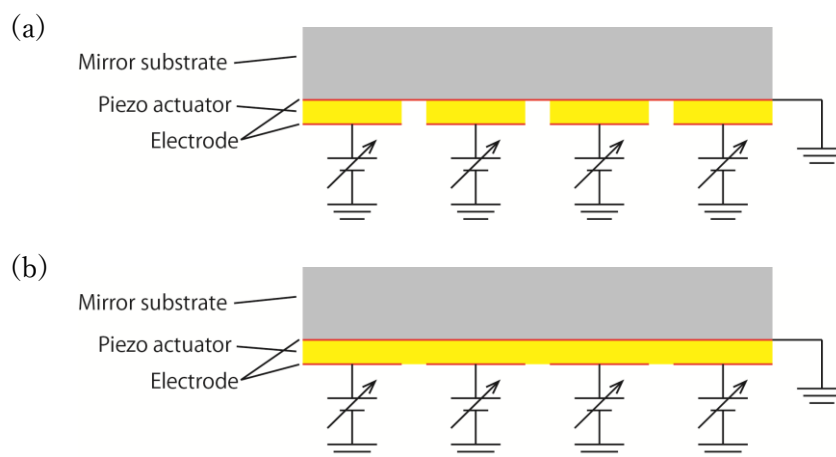


図 3.3.1 形状可変ミラーの構造 (a)圧電素子分離型 (b)圧電素子一体型

3.3.1. シミュレーションによる構造の基礎検討

まず、図 3.3.1 に示した構造の違いによって基板変形がどのように変化するかを検討するために、基礎的な有限要素法(FEM: Finite Element Method)シミュレーションを行った。FEMのシミュレーションソフトには PTC Creo を用いた。

シミュレーションには、長さ 200 mm、厚さ 5 mm の合成石英基板の長手方向に、図 3.3.2(a) に示す(1) 2 枚の圧電素子(長さ 99.5 mm、厚さ 1 mm)の間に 1 mm の隙間がある場合(圧電素子分離型)と、図 3.3.2(b)に示す(2)1 枚の圧電素子(長さ 200 mm、厚さ 1 mm)の中心に 1 mm の変形しない(電極のない)部分がある場合(圧電素子一体型)を想定した。

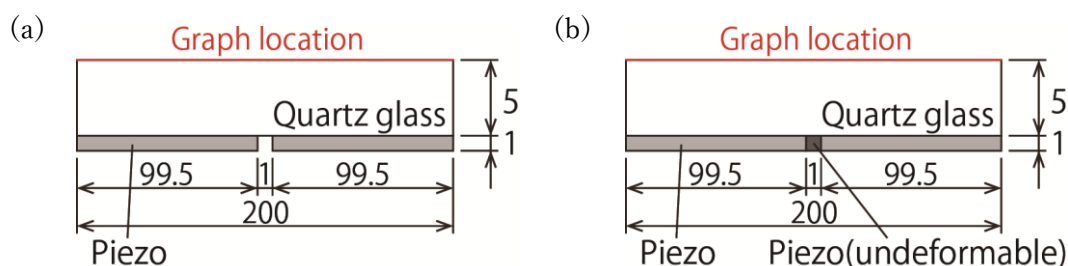


図 3.3.2 シミュレーションに用いたモデル (a)圧電素子分離型, (b)圧電素子一体型

それぞれ圧電素子によりミラー表面が $10\ \mu\text{m}$ 変形したときの短周期の変形誤差を計算した。結果を図 3.3.3 に示す。分離型では $10\ \mu\text{m}$ の全体変形に対して $1.5\ \text{nm}$ の変形誤差がある (0.15%)。対して一体型では $10\ \mu\text{m}$ の全体変形に対して $0.3\ \text{nm}$ の変形誤差 (0.03%) であった。この違いは断面二次モーメントが一樣でないことに起因すると考えられる。以上の結果より、分離型より一体型の方が短周期の変形誤差が少ないことを確認した。

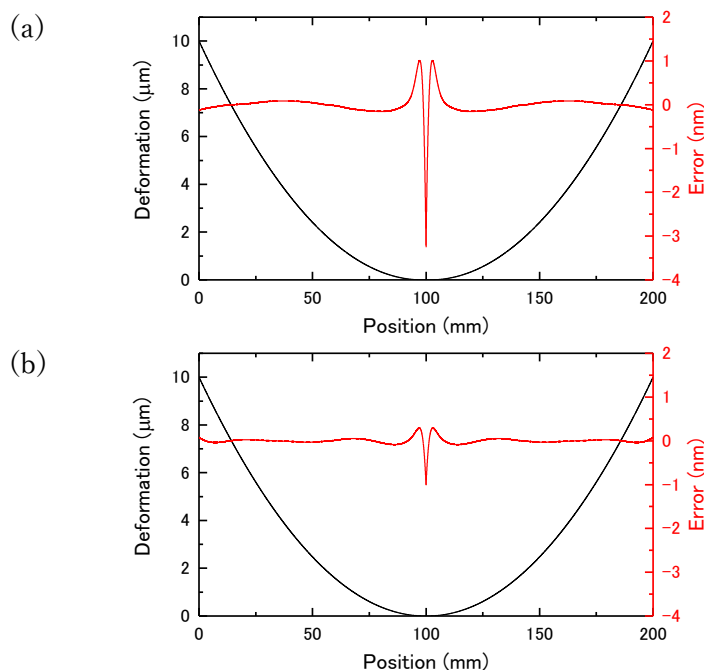


図 3.3.3 FEM シミュレーション結果 (a)圧電素子分離型 (b)圧電素子一体型

3.3.2. 実証実験の準備

圧電素子分離型、圧電素子一体型の2種類のミラーを用いて、変形により発生する短周期の形状誤差の検証を、FEM シミュレーション、干渉計による計測、X線を用いたプロジェクション像観察により行った。それぞれの形状可変ミラーのパラメータを表 3.3.1 に示す。圧電素子は基板の裏面のみに2列接着した。それらの概略図を図 3.3.4 に示す。それぞれの形状可変ミラーで長さ等が異なるのは、本来別の目的で作製されたミラーのためであり、適切に比較すれば問題は生じない。

表 3.3.1 試作形状可変ミラーの各種パラメータ

	Separated	Integrated
Mirror substrate		
Material	Quartz glass	
Length (mm)	150.0	100.0
Width (mm)	50.0	50.0
Thickness (mm)	10.0	5.0
Piezoelectric actuator		
Material	PZT	
Length (mm)	7.5	100.0
Width (mm)	20.0	17.5
Thickness (mm)	1.0	1.0
Number of parts	18 × 2	2 × 2
Electrode length (mm)	7.5	4.8

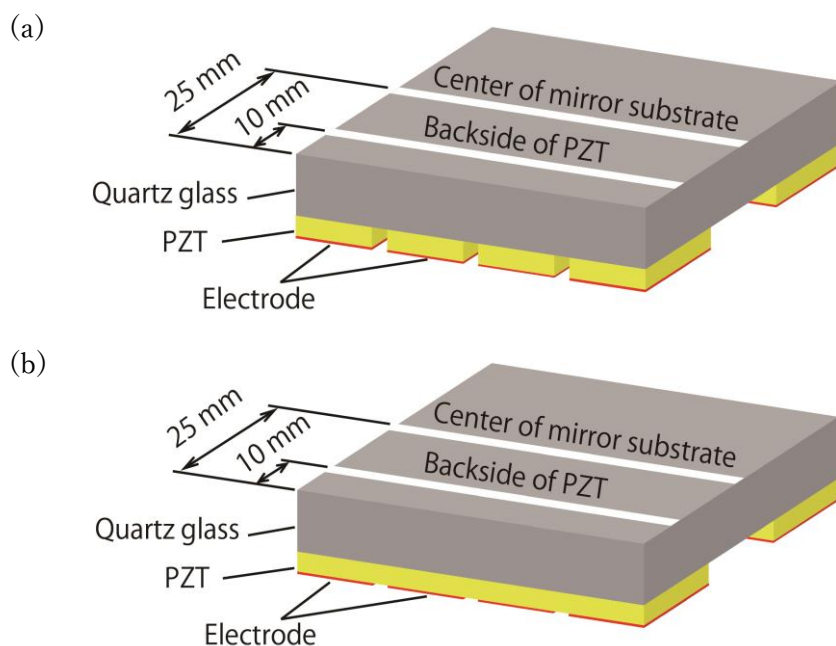


図 3.3.4 形状可変ミラーの加工領域 (a)圧電素子分離型と(b)圧電素子一体型

3.3.2.1. FEM シミュレーション

まず、用意した形状可変ミラーを変形したときに発生する短周期の形状誤差を予測するため、有限要素シミュレーションを行った。圧電素子の膨張・収縮は近似的に等方的な変形とした。圧電素子内の電界分布は無視し、分離型では圧電素子全体が、一体型では電極直下の圧電素子のみが変形するとした。圧電素子とミラー基板の間の接着層の影響は無視した。電圧を 250 V 印加したときの形状から、空間周波数 $670 \sim 5000 \text{ m}^{-1}$ の短周期形状誤差のみを抜き出した。

3.3.2.2. 干渉計による計測

圧電素子・電極の隙間によって生じる短周期の形状誤差を正確に計測するために、Microstitching Interferometry (MSI)⁴³による計測と Elastic Emission Machining (EEM)⁴⁴による加工を用いて、基板上に存在する短周期の形状誤差を取り除いた。長周期形状は圧電素子の変形によって制御できるため、空間周波数 $670 \sim 5000 \text{ m}^{-1}$ の形状のみに注目している。評価した領域は、図 3.3.4 に示した基板中央、圧電素子直上である。EEM 加工前後の短周期形状を図 3.3.5 に示す。最大 PV10 nm あったものが、PV1 nm 以下まで減少させることに成功している。計測時の室温は $25.0 \text{ }^\circ\text{C}$ に固定し、温度差によって発生する変形の影響を可能な限り低減させた。この結果、測定再現性は PV1 nm であった。

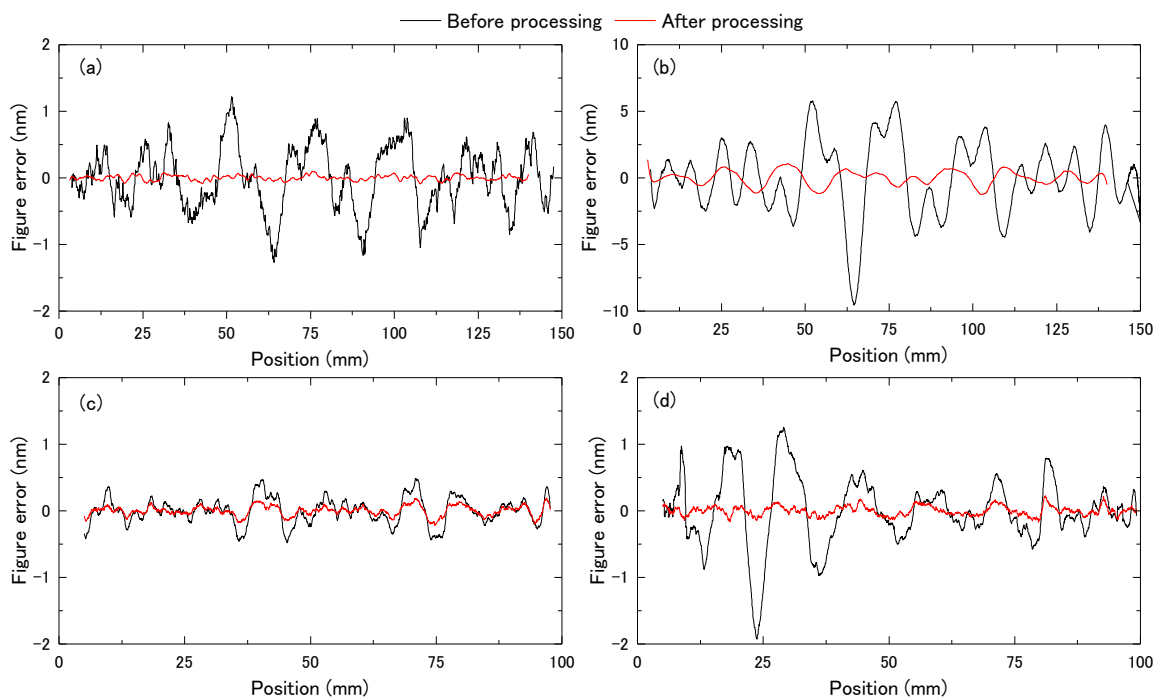


図 3.3.5 形状可変ミラーの加工前後の短周期形状
 (a), (b)圧電素子分離型, (c), (d)圧電素子一体型
 (a), (c)ミラー基板中心, (b), (d)圧電素子直上

3.3.2.3. X線反射像の観察

X線ミラー上に短周期の形状誤差が存在する場合、X線反射像に影響を及ぼすことがこれまでにわかっている⁴⁵。これはインラインホログラフィとして理解できる。わずかな形状誤差が干渉の結果大きな強度変調を引き起こすため、高感度に形状誤差の存在を知ることができる。発生する短周期変形誤差が、X線の反射にどのような影響を及ぼすのかを調べるために、SPring-8 BL29XUL EH4(仮想光源からの距離1 km)において、図 3.3.6 に示す実験配置、条件によって、形状可変ミラーから反射したX線像を観察する。電圧0 Vと250 Vを電極に印加し変形させた形状可変ミラーに、15 keVのX線を反射させ、反射像をCCDカメラ(浜松ホトニクス株式会社, C4880)とズーム管(浜松ホトニクス株式会社, C5333)によって計測した(ピクセルサイズ: 1.2 μm)。計測時の実験ハッチ内の温度は、MSI計測時の温度と同じ25.0 $^{\circ}\text{C}$ に設定した。

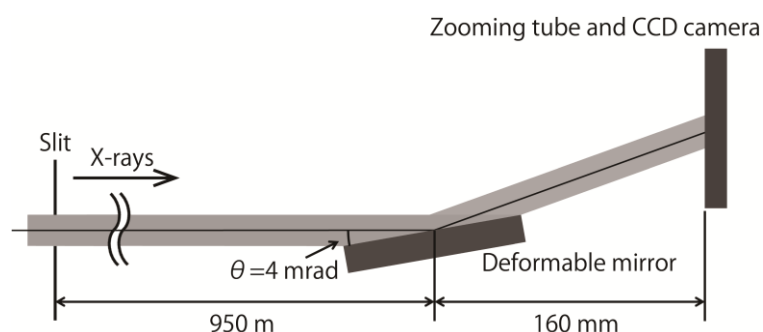


図 3.3.6 X線反射像観察の実験構成

3.3.3. 結果と考察

3.3.3.1. 干渉計による計測とFEMシミュレーション結果

まず、図 3.3.7 に干渉計による形状計測とシミュレーションの結果を示す。これらの結果を比較すると、両者は良い一致を示しており、形状計測とシミュレーションが正しく行われていることを示している。250 Vの印加によって一体型では全体で4.5 μm 、分離型では全体で7 μm の円筒形状へと変形した。分離型では、基板中心でPV1.5 nm、圧電素子直上でPV20 nmの短周期の変形誤差が圧電素子の隙間と同じ周期で発生した。一方、一体型では、圧電素子直上でPV1 nmの短周期の変形が電極の隙間と同じ周期で発生したが、基板中心では発生していなかった。以上より、基板長さの違いや変形量の違いを考慮すると、短周期変形誤差は分離型の方が一体型より10倍大きく、また、圧電素子直上より基板中央の方が10倍大きいことが確認できた。

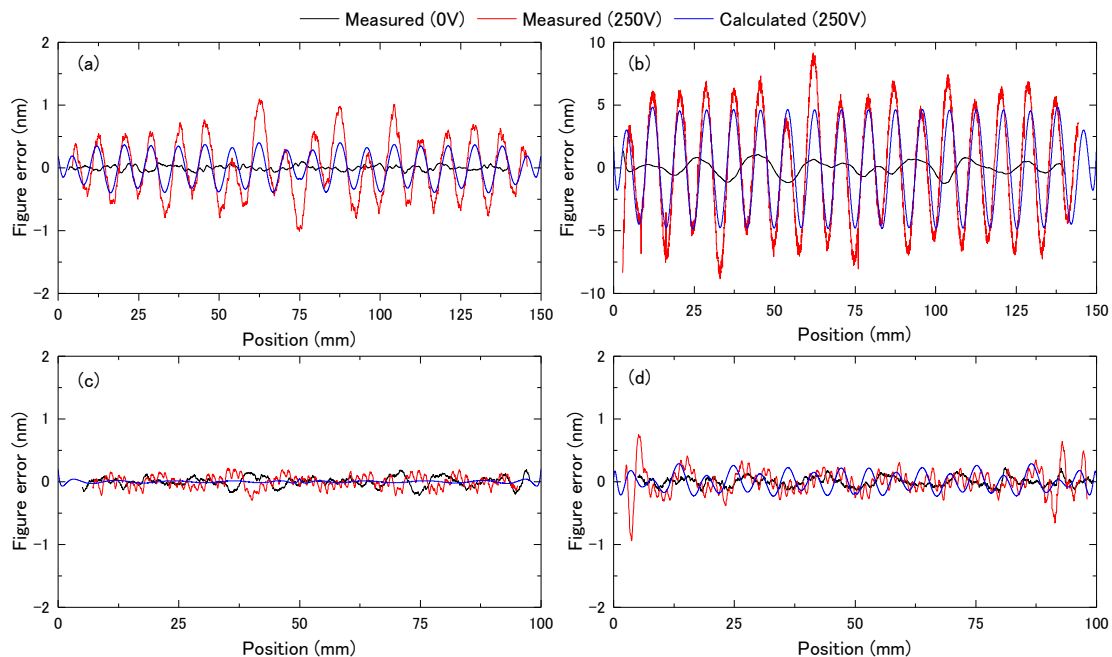


図 3.3.7 有限要素法解析と干渉計による計測結果
 (a), (b)圧電素子分離型, (c), (d)圧電素子一体型
 (a), (c)ミラー基板中心, (b), (d)圧電素子直上

3.3.3.2. X線反射像の観察

図 3.3.8 と図 3.3.9 に、圧電素子分離型と圧電素子一体型の X 線プロジェクション像をそれぞれ示す。圧電素子分離型では、圧電素子直上・基板中心の両方でスペックルノイズが現れ、圧電素子直上の方が基板中心よりもノイズが 10 倍以上の大きさとなった。一体型では、圧電素子直上ではわずかにスペックルノイズが現れたが、基板中心では現れなかった。これらの結果は、干渉計による計測と、FEM シミュレーションの結果と同じ傾向を示している。以上より、圧電素子一体型構造が高精度変形に最適であると、実験的に確証を得ている。

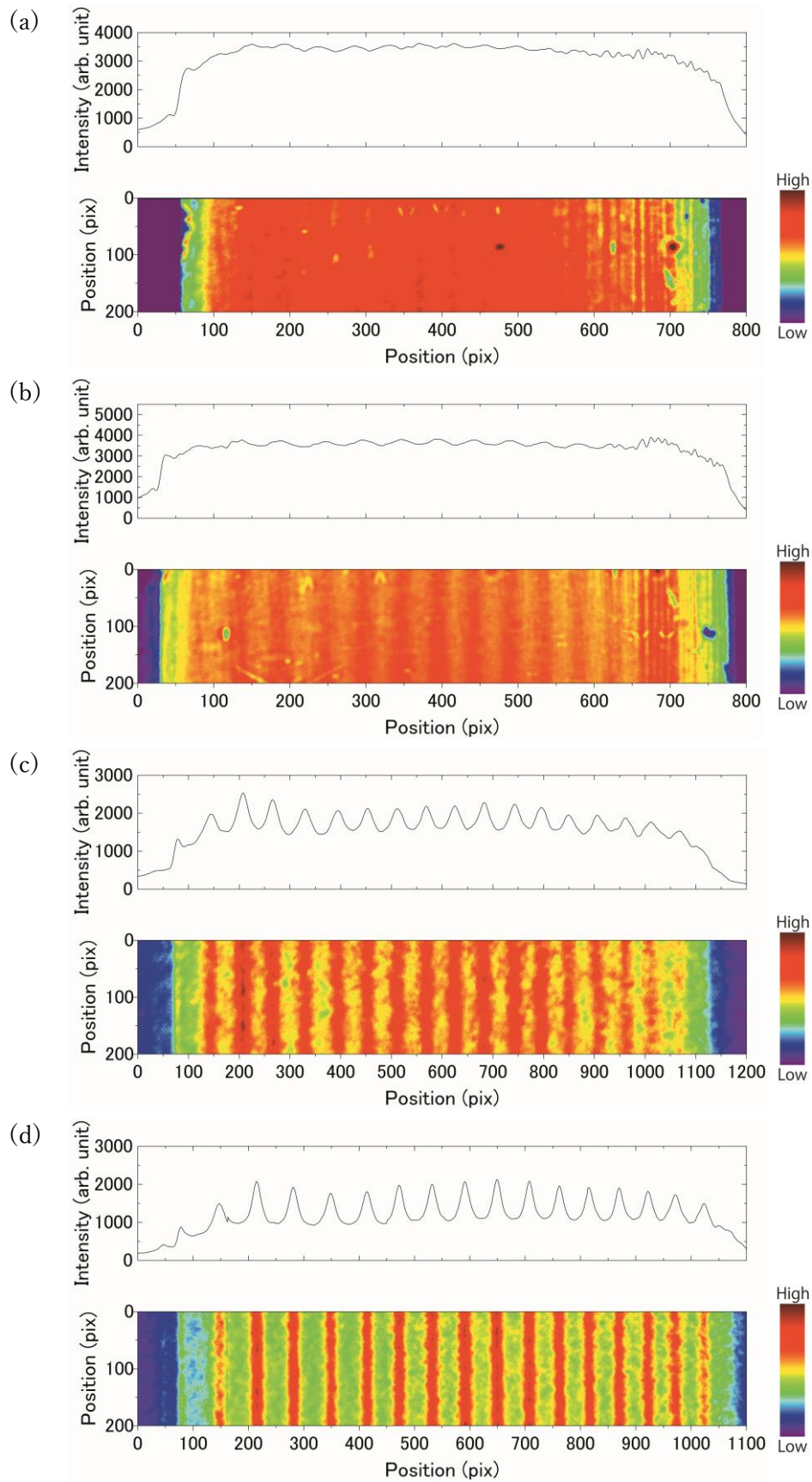


図 3.3.8 圧電素子分離型形状可変ミラーからの X 線反射像

(a), (b)ミラー基板中心 (c), (d)圧電素子直上 (a), (c)電圧印加なし (b), (d)電圧 250V 印加

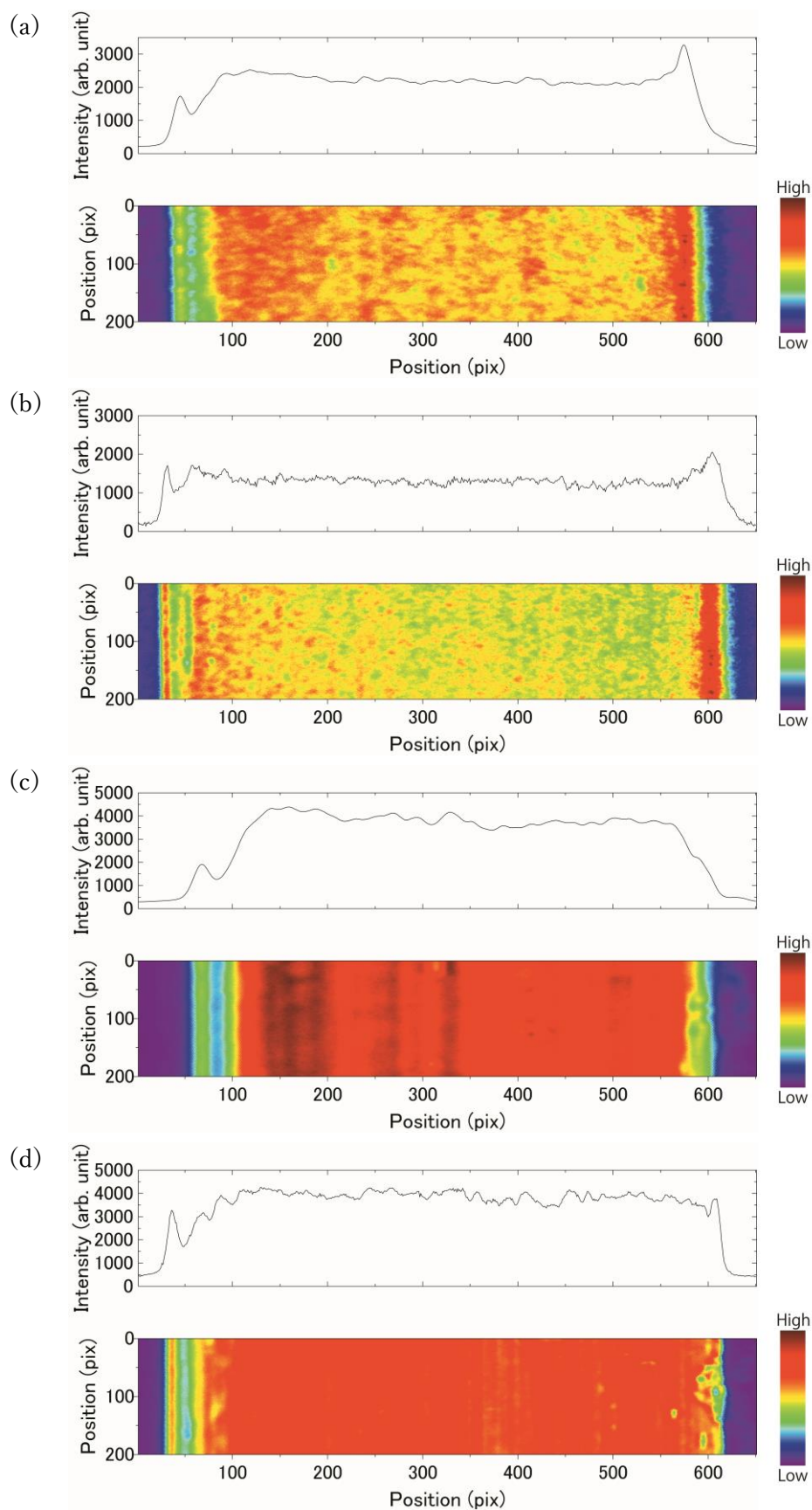


図 3.3.9 圧電素子一体型形状可変ミラーからの X 線反射像

(a),(b)ミラー基板中心, (c),(d)圧電素子直上 (a),(c)電圧印加なし, (b),(d)電圧 250V 印加

3.4. 集光用形状可変ミラーの開発

前項で得られた結果をもとに、高精度かつ大変形を可能とする集光用形状可変ミラーを開発する。温度変化による形状の不安定性を最小限に抑制するため、圧電素子は表裏に2枚ずつ対称になるように接着したバイモルフ構造とする。

X線反射領域は2枚の圧電素子間のミラー基板中央部に位置する。反射領域には白金(厚さ50 nm)をマグネトロンスパッタリングにより成膜した。圧電素子表面には電極としてCrを成膜した。電極に印加する電圧をそれぞれ制御することで、形状可変ミラーの表面形状を自由曲面へと変形する。

前述の通り、形状可変ミラーの電極1つは、ミラー表面を1つの曲率に変形することができる。楕円形状は非球面のため、曲率が連続的に変化するが、電極は有限であるため近似して変形する必要がある。そこで、任意の楕円形状を仮定して多項式フィッティングを行うことで、変形に最低限必要な電極数を推定した。その楕円形状と多項式フィッティング結果を図3.4.1に示す。結果より5次関数形状に変形することで、PV1 nm以下の精度で楕円形状に近似できることがわかる。これは最低4つの電極が必要であることを意味する。

そこで、変形可能とする形状、電極のサイズ、電源のチャンネル数を総合的に勘案して、18個の電極を取り付け、最大9周期のサイン形状へと変形可能な形状可変ミラーとした。9周期より高周期の形状は、EEM加工により取り除くこととした。作製した形状可変ミラーを図3.4.2に、そのパラメータを表3.4.1に示す。

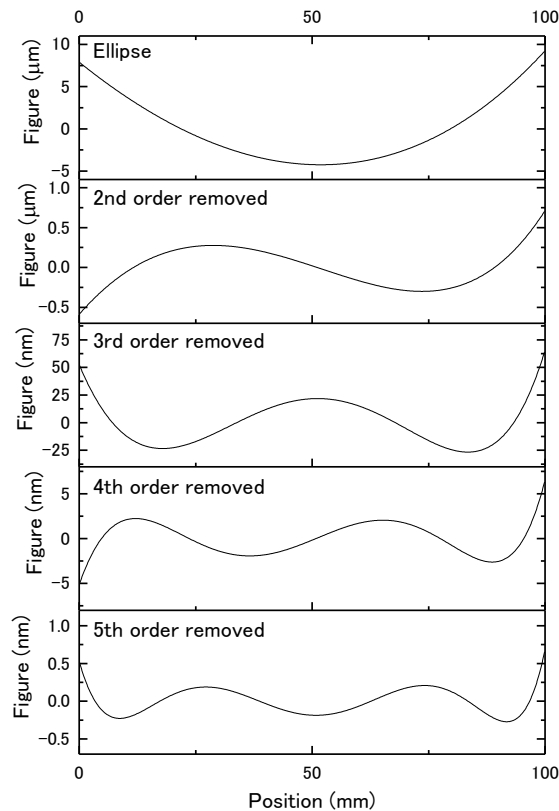


図 3.4.1 楕円形状の多項式フィッティング

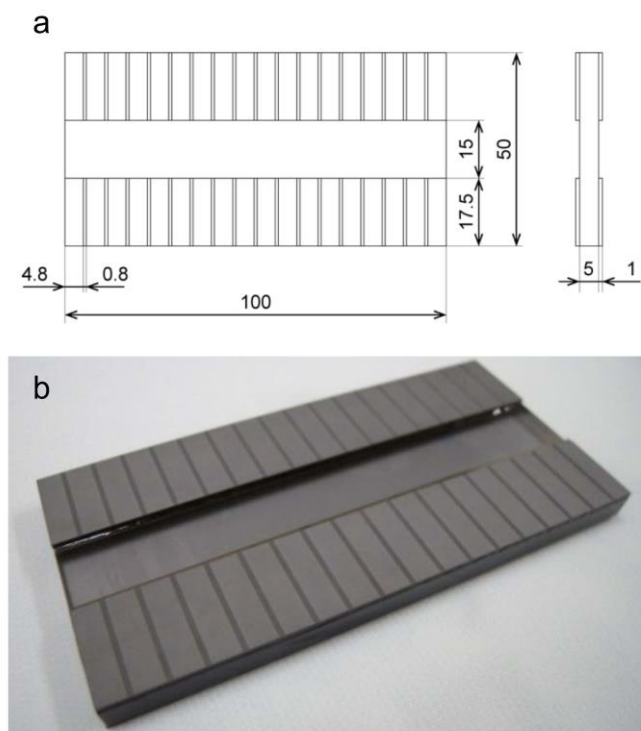


図 3.4.2 (a)形状可変ミラーの概略図, (b)作製した形状可変ミラーの写真

表 3.4.1 形状可変ミラーの各種パラメータ

Mirror substrate	
Material	Quartz glass
Length (mm)	100
Width (mm)	50
Thickness (mm)	5
Piezoelectric actuator	
Material	PZT
Length (mm)	100
Width (mm)	17.5
Thickness (mm)	1
Number of PZT	2×2
Electrode	
Material	Chromium
Length (mm)	4.8
Width (mm)	17.5
Number of electrode	18

3.5. 形状可変ミラー用ホルダの開発

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 点と裏面の圧電素子上 2 点の電極に確実に接点を取り、電圧を印加する必要がある。一方、その際に接点の接触で生じる荷重によって基板に変形が生じてはならない。そこで、図 3.5.1 に示すような、ばね電極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ばね電極のばね定数は 0.003 N/mm と、非常に低い値に設定してあり、すべてのばね電極が 1 mm 押し込まれた状態でも、ミラー基板に自重以上の負荷がかからない設計となっている。

ここで、表 3.4.1 に示した設計の形状可変ミラーにおいて、表側の各電極中心にばね電極を 1 mm 押しつけたとき(各電極中心に 0.003 N の点荷重)の、ミラー中心での変形量を FEM により計算した。計算結果を図 3.5.2 に示す。変形形状は 2 nm 以下のほぼ二次関数の形状で(図 3.5.2(a))、二次関数形状を除去すると $\text{PV}0.2 \text{ nm}$ 以下となり(図 3.5.2(b))、集光に影響しない程度の変形であるといえる。

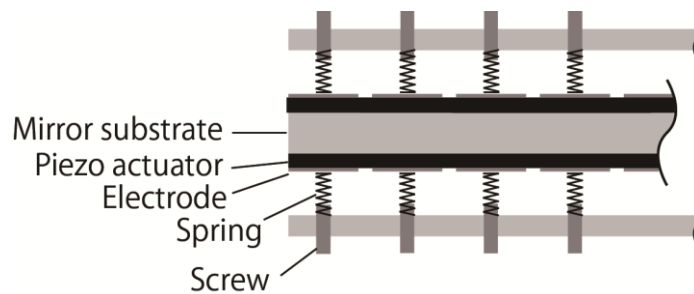


図 3.5.1 電圧印加ユニット (断面図)

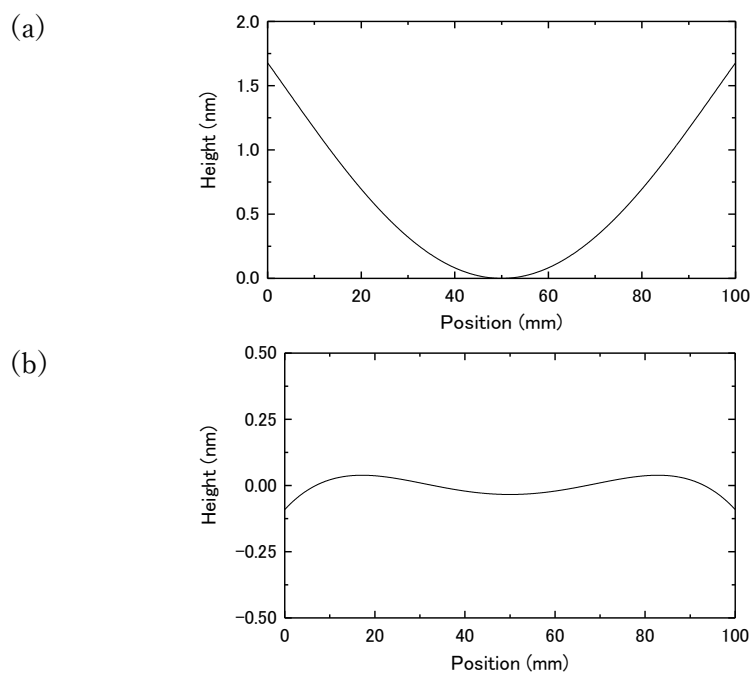


図 3.5.2 (a)電極ばねによる変形形状 (b)二次関数除去形状

また、支持点は形状可変ミラーに対して図 3.5.3 のように設定する。垂直集光ミラーでは垂直方向支持用に 3 点のベッセル点、位置決め用に水平方向には 2 点のベッセル点と光軸方向には 1 点で支持されている。水平集光ミラーでは垂直方向には 2 点のベッセル点、水平方向には 3 点、位置決め用に光軸方向の 1 点で支持されている。水平方向には転倒防止として、形状可変ミラーの表側からばねにより支持されている。以上の設計より開発した形状可変ミラー用ホルダを図 3.5.4 に示す。

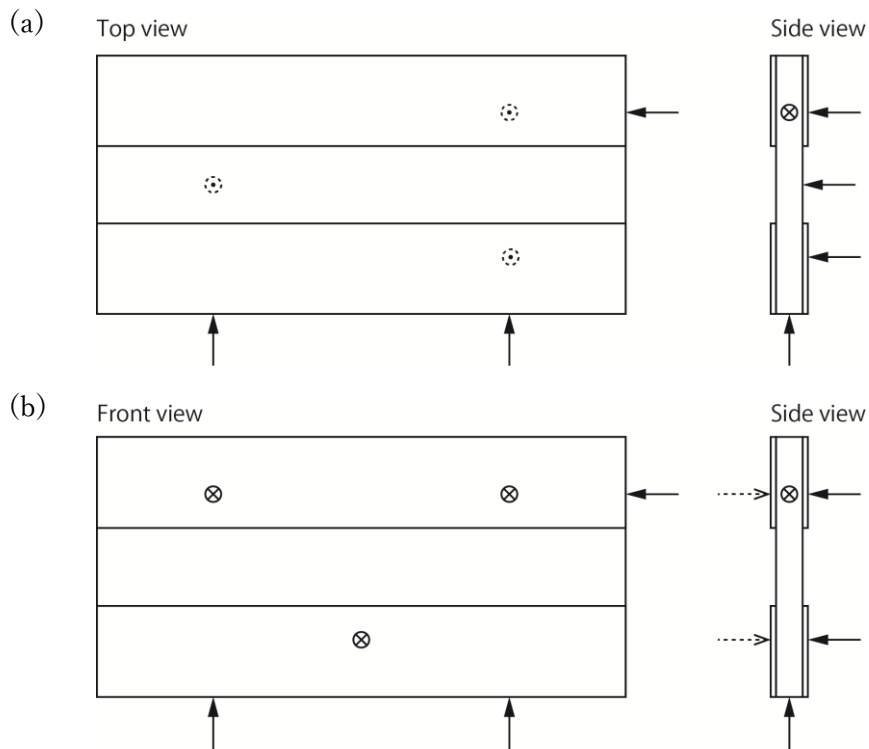


図 3.5.3 形状可変ミラー支持方法 (a)垂直集光ミラー (b)水平集光ミラー

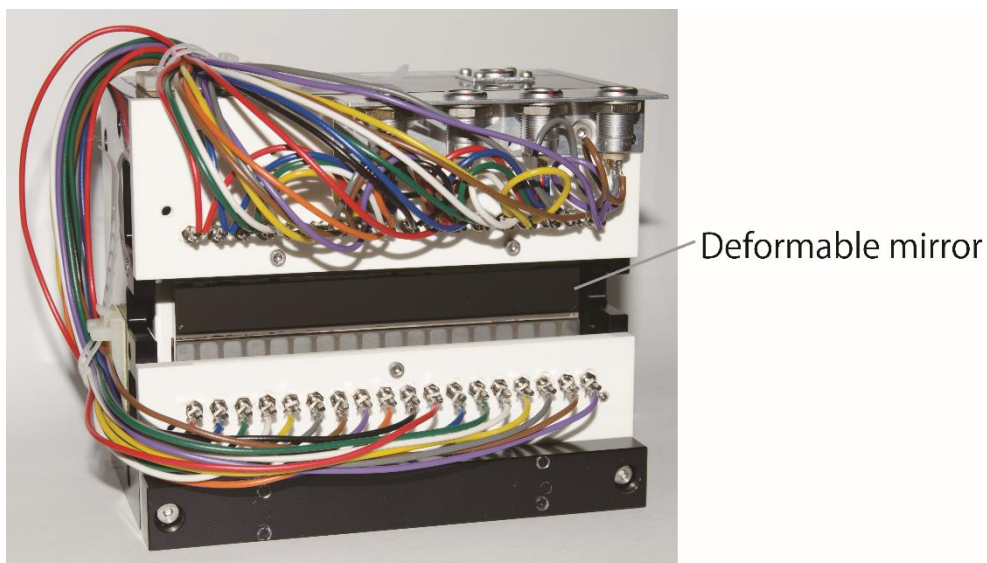


図 3.5.4 開発した形状可変ミラー用ホルダの写真

3.6. 形状可変ミラー変形試験

3.6.1. 実験のセットアップ

干渉計と電圧印加ユニットを用いた形状制御システムを開発し、形状可変ミラーの楕円形状への変形試験を行った。図 3.6.1 に形状制御システムの構成を示す。計測にはフィゾー型干渉計 (Zygo Corp. Verifire XPZ) による Relative Angle Determinable Stitching Interferometry (RADSI)⁴⁶ を用いた。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、PC から制御を行う。PC 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 (National Instruments; NI 9264, NI cDAQ-9188) を介して、 ± 10 V の電圧出力が可能となっている。この ± 10 V の電圧を、さらに電源ユニット (関西電子 KE0.25-0.5BP) により ± 250 V に増幅したうえで圧電素子に印加している。

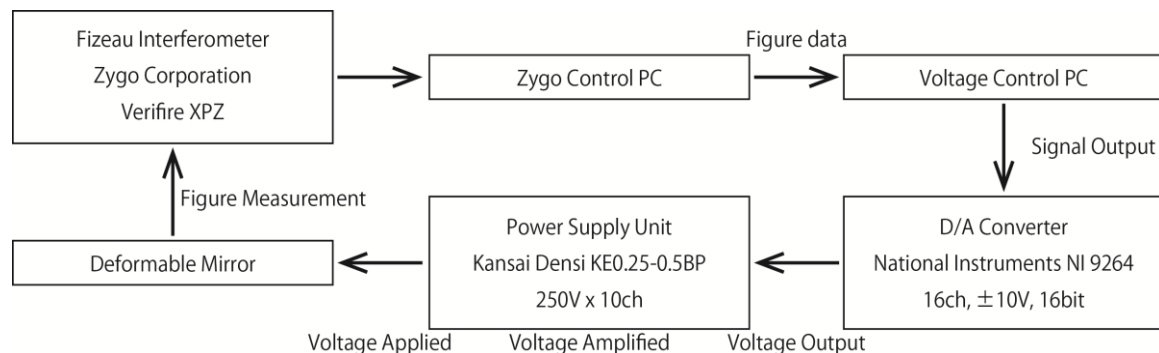


図 3.6.1 形状可変ミラー変形の形状制御システム

3.6.2. 実験結果

深さ $3.5 \mu\text{m}$ の楕円形状に変形した結果を図 3.6.2 に示す。PV2 nm 以下の精度で形状を変形できおり、これはエネルギー 10 keV 、斜入射角 4 mrad の光学系におけるレイリーの 4 分の 1 波長則から計算される許容誤差を十分に満たしている。

また、得られた変形誤差がミラー上にある場合の波動光学シミュレーションを行い、集光特性を推定した。用いた光学系は光源－ミラー中心距離 45 m 、ミラー中心－焦点距離 0.3 m 、入射角 4 mrad 、X 線のエネルギー 10 keV とし、光源は点光源を想定した。結果を図 3.6.3 に、ミラー上に変形誤差のある場合と、理想的な場合の集光ビームプロファイルを示す。形状誤差がある場合にも、ビームプロファイル形状は理想時とほぼ変わらず、回折限界集光が達成されていることがわかる。以上より、本ミラーは回折限界集光のために十分な変形精度をもっていることを確認できる。

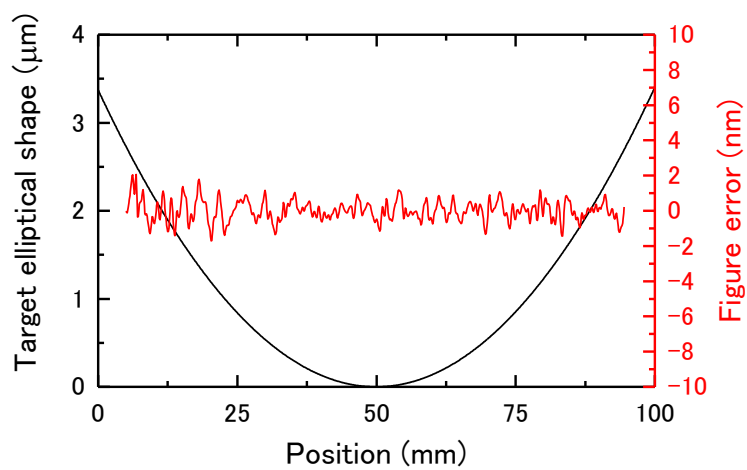


図 3.6.2 形状可変ミラーの変形試験結果

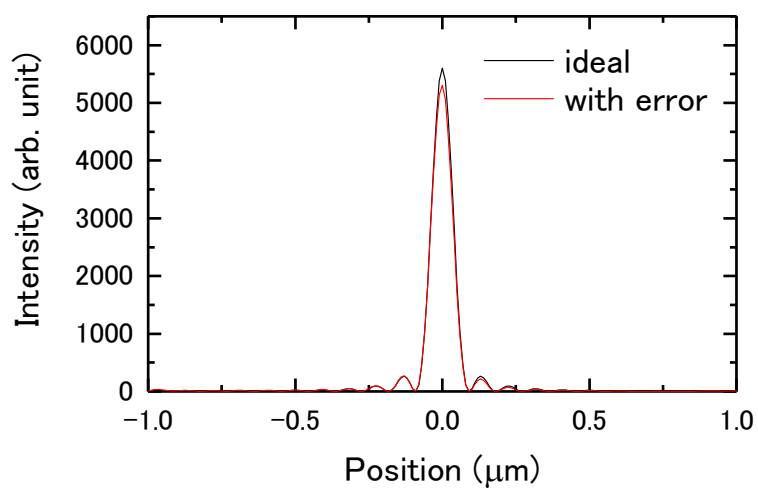


図 3.6.3 波動光学シミュレーション結果

3.7. 結言

本章では、高精度形状可変ミラーの設計、開発、評価について述べた。

- (1) 形状可変ミラーの駆動に用いる圧電素子の説明と駆動原理、形状可変ミラーの変形原理について述べた。
- (2) 圧電素子分離型、圧電素子一体型の2種類の圧電素子構造について、FEMシミュレーション、干渉計による形状計測、X線反射像を使った形状計測により設計指針の検討を行い、圧電素子一体型がより適した構造であることを確認した。
- (3) 変形目標形状に基づく電極数の検討を行い、高精度変形が可能な形状可変ミラーを設計した。18個の電極を取り付けて最大9周期のサイン波形状を変形可能な形状可変ミラーを製作した。
- (4) 形状可変ミラーの意図しない変形量をPV0.2 nm以下に抑える支持と電圧印加のためのミラーホルダを設計・製作した。
- (5) 干渉計による形状可変ミラーの形状フィードバック制御を行い、目標とした楕円形状にPV2 nm以下の精度で変形させることに成功した。また、波動光学シミュレーションによって回折限界集光を達成できることを示した。すなわち、形状可変ミラーを許容形状誤差以下に変形できることを意味する。

4. アダプティブ集光光学系の実験装置の開発

本章では、SPring-8にて構築した二段アダプティブ集光光学系の装置開発について述べる。硬 X 線回折限界集光実験では、集光ミラーのアライメントに高い精度が求められる。そのため本章では、まず許容アライメント誤差について議論し、その後これを達成できる実験装置について示す。また、ビームプロファイル評価のためのワイヤスキャン法や、形状可変ミラーの形状を計測するためのペンシルビーム法のシステムについても述べている。後者は形状可変ミラー制御を高精度化するためにもっとも重要なシステムであり、これを実現するための高分解能ビームモニタの開発についても述べる。

4.1. シミュレーションを用いた実験装置設計指針の検討

本光学系を実現するための装置設計の指針となる光学系の許容アライメント誤差を、波動光学シミュレーションにより求めた。許容アライメント誤差は、図 4.1.1 に示す入射角・焦点深度・直角度・面内回転の 4 種類について検討した。

波動光学シミュレーションには表 4.1.1 のようなモデルを仮定した。X 線のエネルギーは実際の実験で使用する 10 keV、光源は 45 m 上流に設置した点光源とした。Fresnel-Kirchhof の回折公式を用いて光源から垂直集光ミラー、垂直集光ミラーから水平集光ミラー、水平集光ミラーから焦点面への伝播計算を行った。

図 4.1.2~図 4.1.6 に垂直および水平集光ミラーのパラメータに対して、入射角・焦点深度・直角度・面内回転のアライメント誤差を与えたときのビームプロファイルを示す。

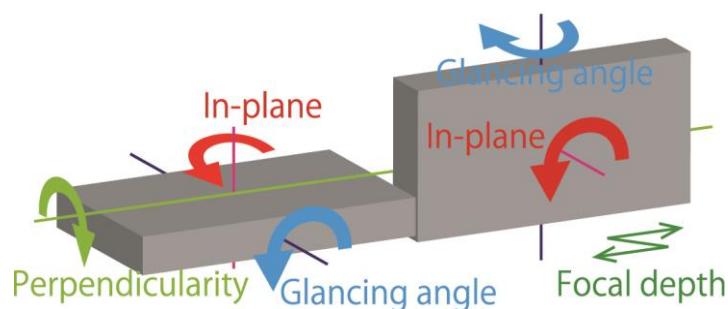


図 4.1.1 シミュレーションで想定したアライメント誤差

表 4.1.1 許容アライメント誤差計算に用いた光学モデル

	垂直集光ミラー	水平集光ミラー
光源－ミラー間距離※	45 m	45.13 m
ミラー－焦点間距離※	330 mm	200 mm
入射角※	4 mrad	4 mrad

※ミラー中心を基準とする値。

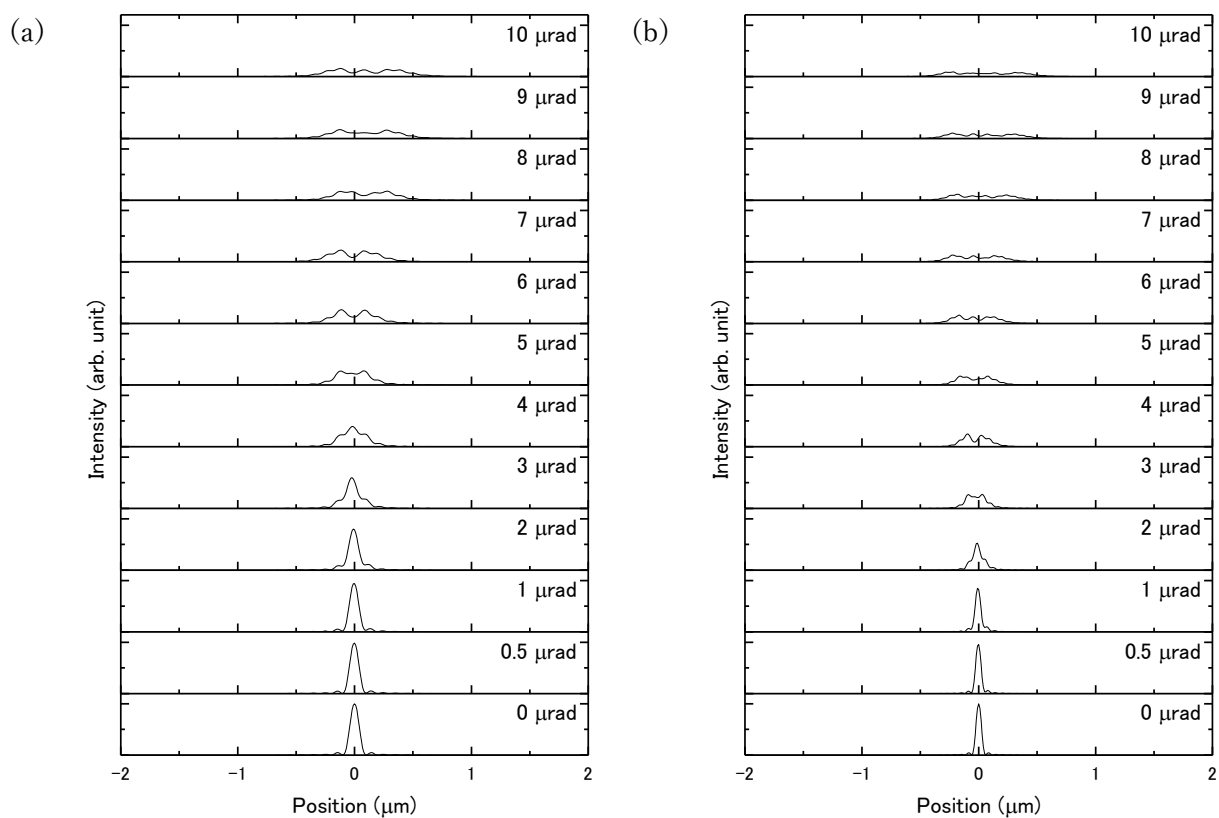


図 4.1.2 入射角誤差を与えたときの集光プロファイル

(a)垂直集光ミラー, (b)水平集光ミラー グラフ中の値は与えた入射角誤差

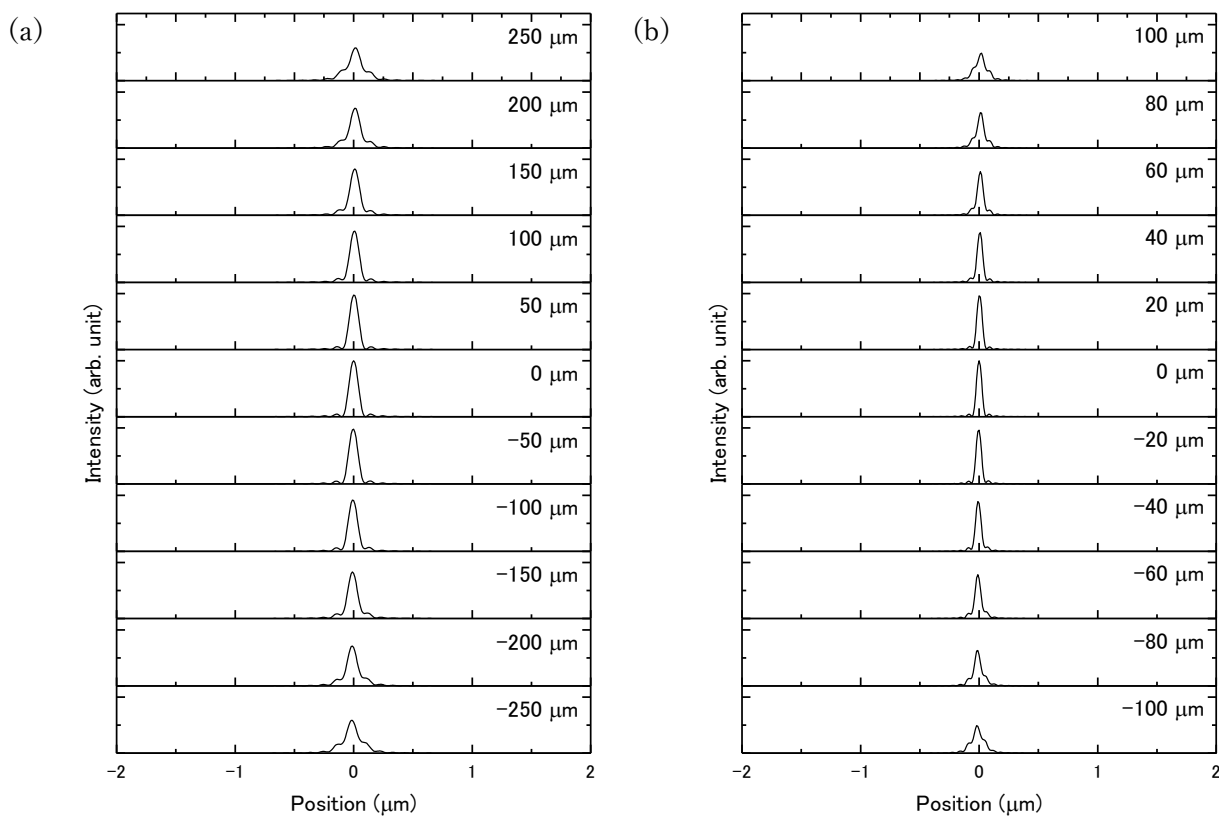


図 4.1.3 焦点深度誤差を与えたときの集光プロファイル

(a)垂直集光ミラー, (b)水平集光ミラー グラフ中の値は与えた焦点深度誤差

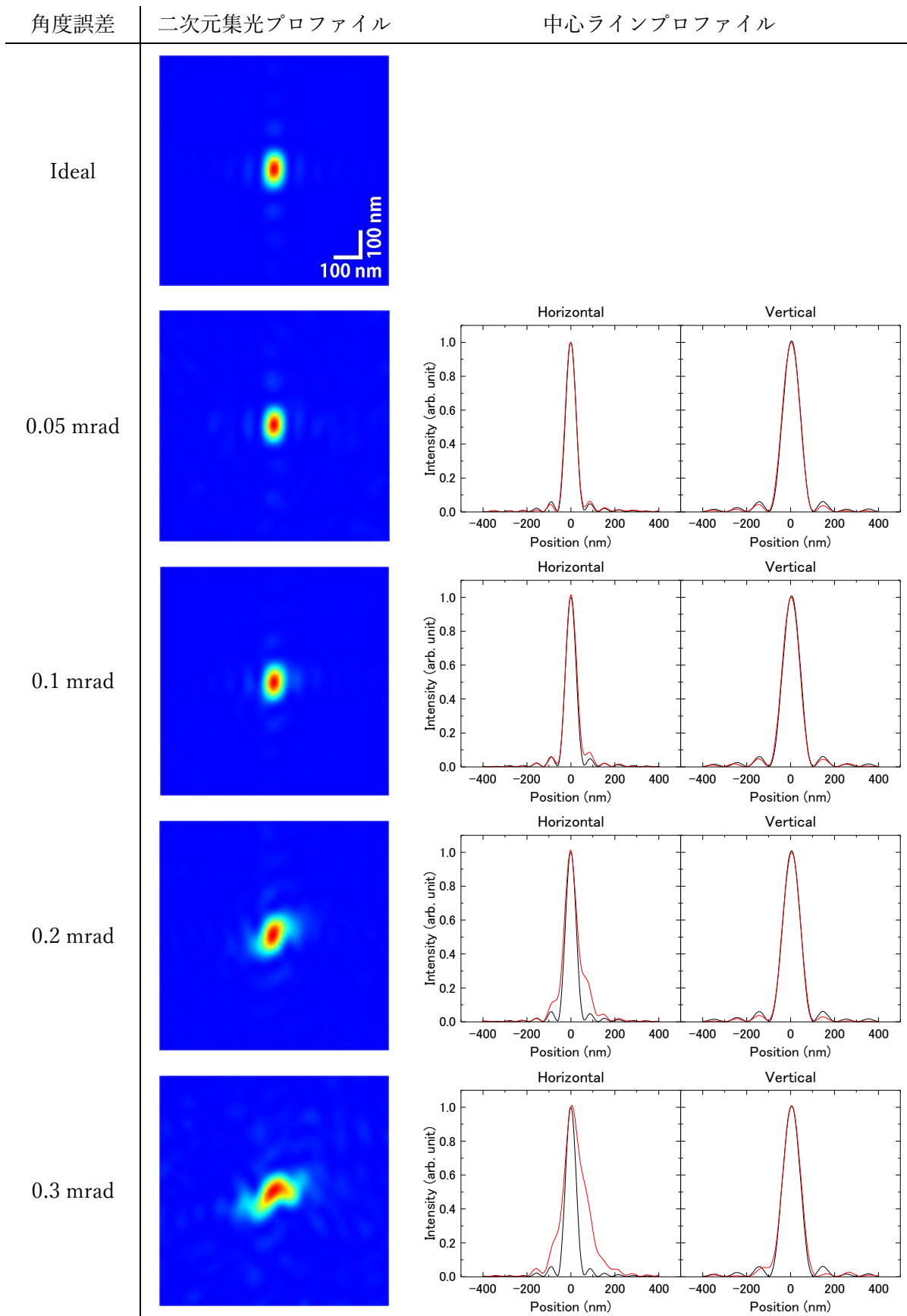


図 4.1.4 直角度誤差があるときの二次元集光プロファイル
 黒線：理想集光プロファイル，赤線：誤差を含んだ集光プロファイル

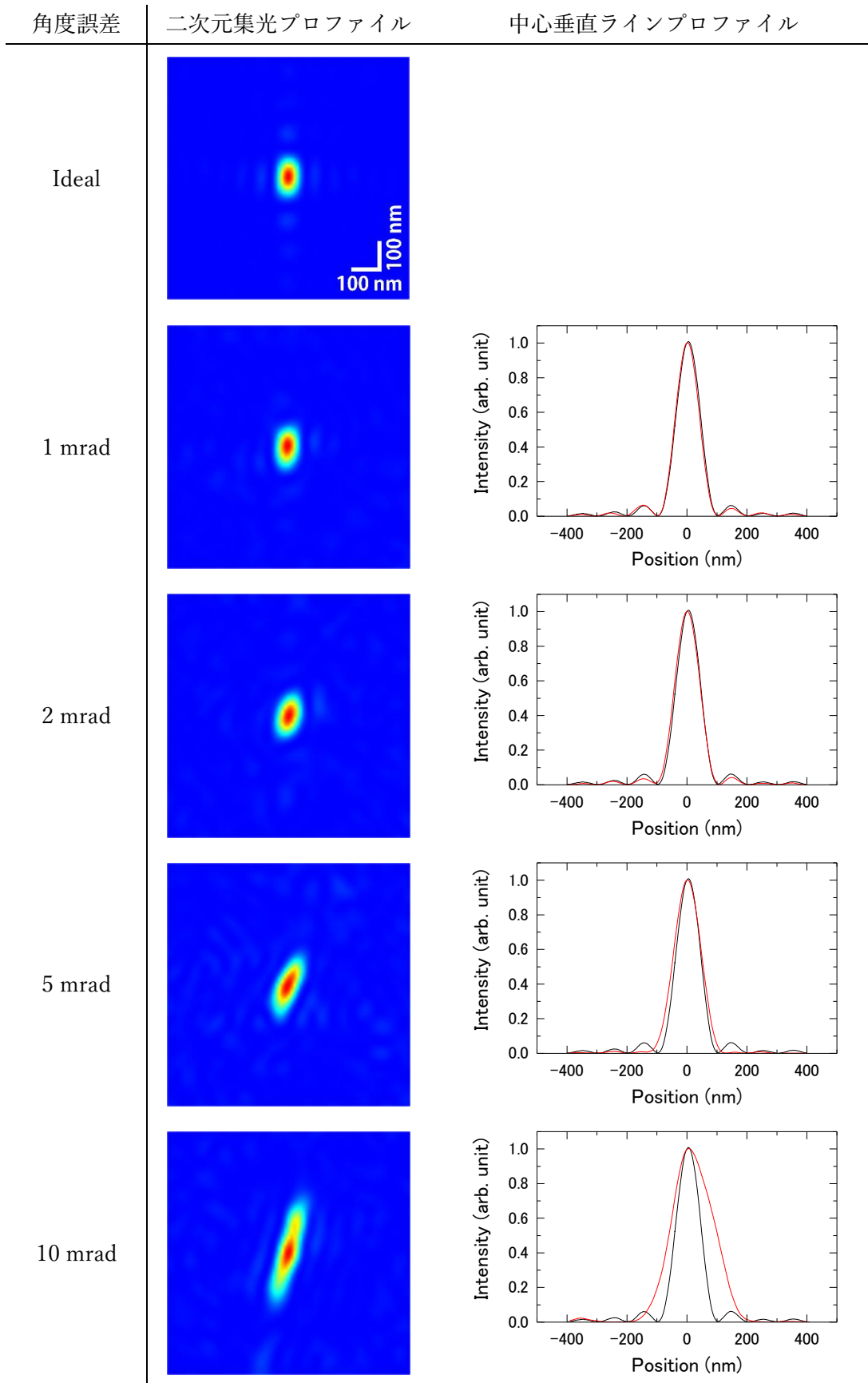


図 4.1.5 垂直集光ミラーに面内回転誤差があるときの集光プロファイル
 黒線：理想集光プロファイル，赤線：誤差を含んだ集光プロファイル

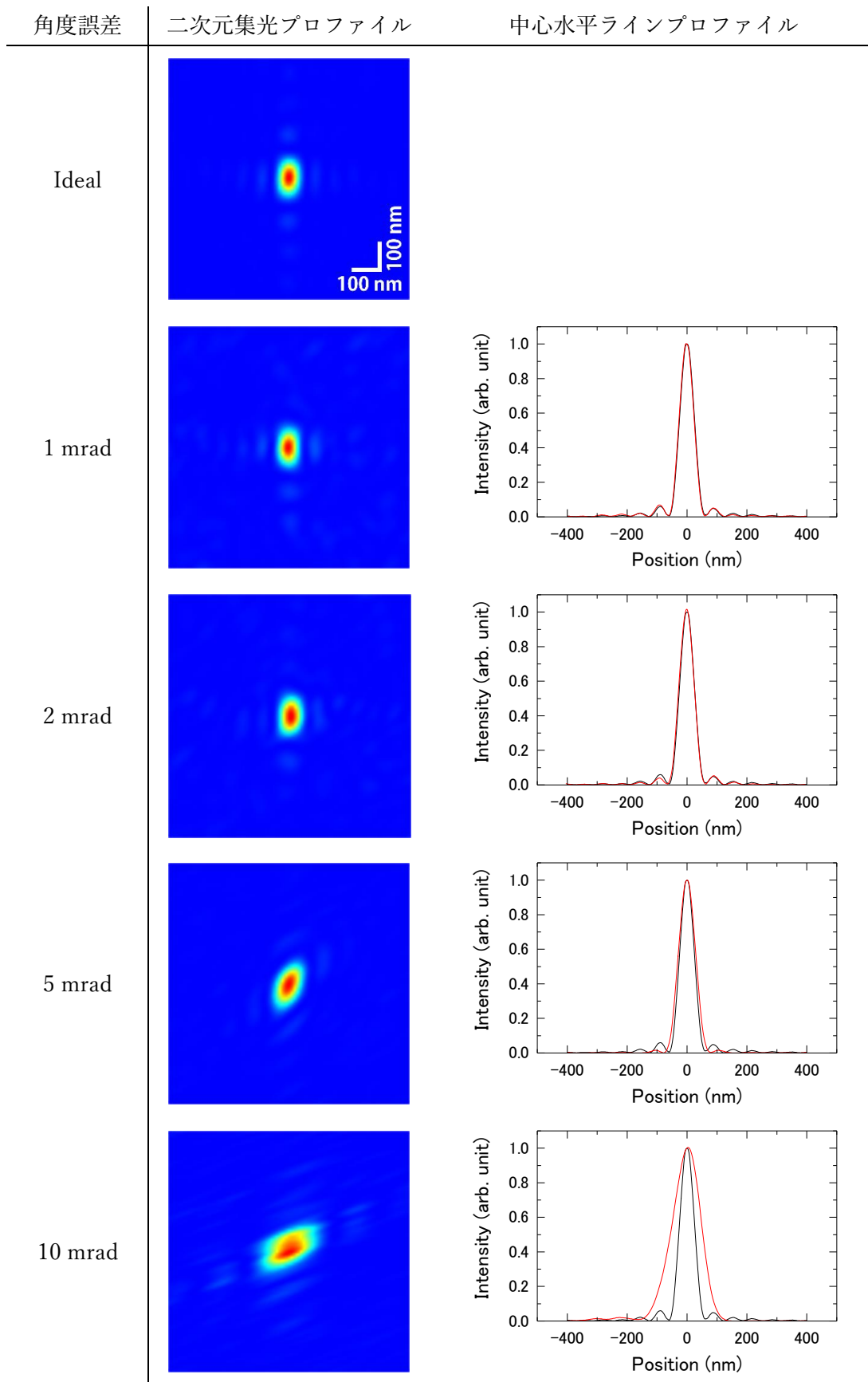


図 4.1.6 水平集光ミラーに面内回転誤差があるときの集光プロファイル
 黒線：理想集光プロファイル，赤線：誤差を含んだ集光プロファイル

許容アライメント誤差の定義を、集光プロファイルの半値幅が理想時の 1.2 倍以内のときとすると、波動光学シミュレーションによる解析結果より、各許容アライメント誤差は表 4.1.2 のようになる。これよりミラーマニピュレータの各軸は、表 4.1.2 の許容できるアライメント誤差よりも小さい分解能で制御、調整できる必要がある。

表 4.1.2 許容アライメント誤差

	垂直集光ミラー	水平集光ミラー
入射角	$\pm 1 \mu\text{rad}$	$\pm 1 \mu\text{rad}$
焦点深度	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 40 \mu\text{m}$
直角度	$\pm 0.1 \text{ mrad}$	
面内回転	$\pm 2 \text{ mrad}$	$\pm 2 \text{ mrad}$

4.2. 実験装置の構成

4.2.1. 定盤および二段集光光学系配置

二段集光光学系において形状可変ミラーを高精度にアライメントするために、専用定盤を設計・製作した。定盤は耐振動性を向上するため、石定盤(2.3 t)を採用した。図 4.2.1 と図 4.2.2 に定盤および二段集光光学系配置の全体写真を示す。定盤の大きさは L2.5 m×W1.5 m×H1 m で、上流側から、入射スリットおよびイオンチャンバー設置用テーブル、上流 KB ミラー用手動 X ステージ、上流スキャナ用自動 X ステージ、下流 KB ミラー用手動 X ステージ、下流スキャナ用自動 X ステージ、検出器等設置用テーブルで構成されている。すべてのステージは光軸方向に移動可能なりニアガイド上に設置している。上流スキャナ用ステージは、光軸方向に移動することで、二段光学系の中間焦点(上流 KB ミラーの焦点)位置の変更に対応できる。

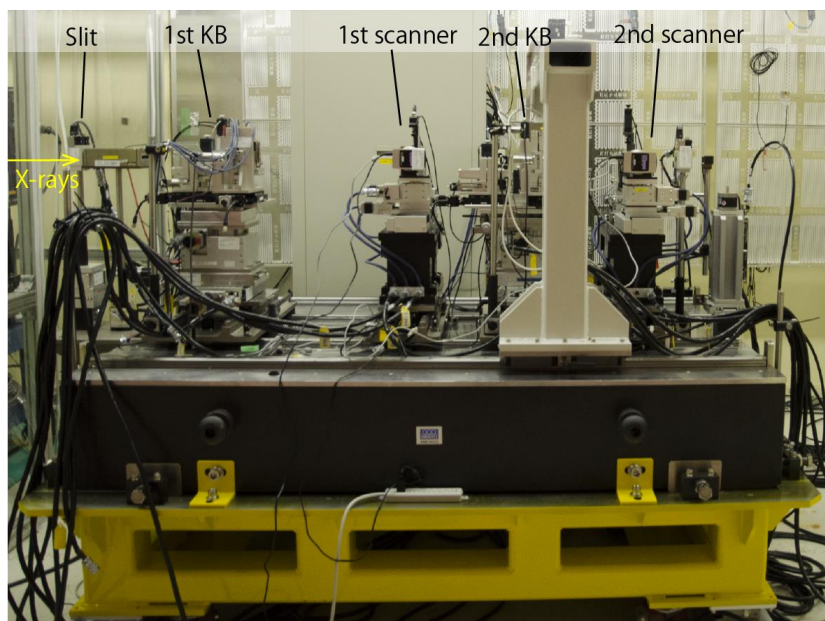


図 4.2.1 定盤および二段集光光学系配置 横方向

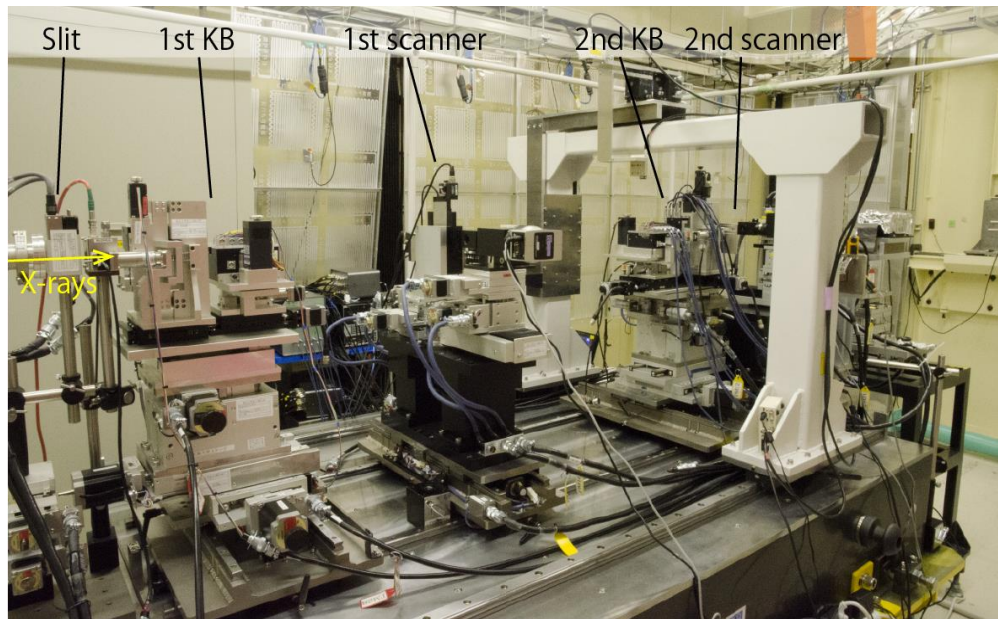


図 4.2.2 定盤および二段集光光学系配置 斜め方向

4.2.2. KB ミラーマニピュレータ

KB ミラーを高精度にアライメントするための、KB ミラーマニピュレータ⁴⁷を開発した。マニピュレータは図 4.2.3 に示すように上流 KB、下流 KB とで異なる制御軸の配置とする。

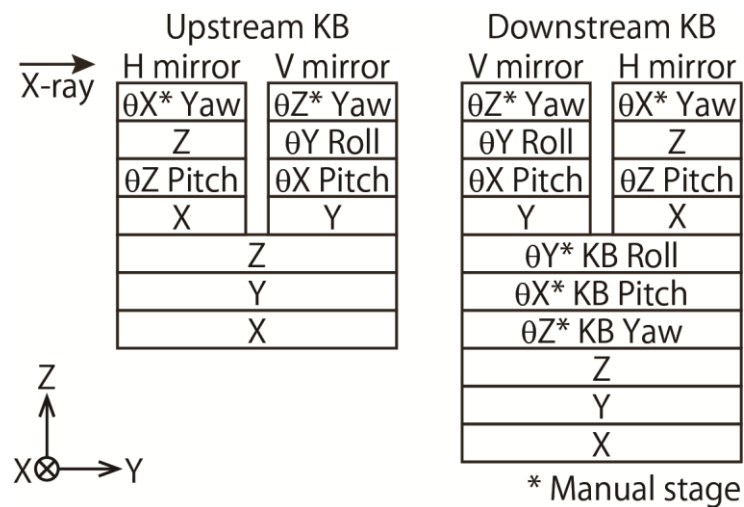


図 4.2.3 ミラーマニピュレータの制御軸の構成

以下に各 KB ミラーマニピュレータの制御軸の詳細について述べる。

① 上流 KB ミラーマニピュレータ

上流 KB ミラーマニピュレータの制御軸の概略図を図 4.2.4 に示す。面内回転 Yaw・入射角 Pitch 軸は垂直および水平集光ミラーに取り付けている。直角度 Roll・光軸方向 Y は水平集光ミラーに、水平方向 X・鉛直方向 Z は垂直ミラーに取り付ける。これらは水平・垂直集光ミラーの相対位置を調整するため、片方のミラーのみに取り付けている。マニピュレータ

は X・Y・Z 軸ステージ上に設置し、全体の位置を調整できる構造とした。面内回転は高精度が求められないため手動ステージとし、その他は自動ステージとした。

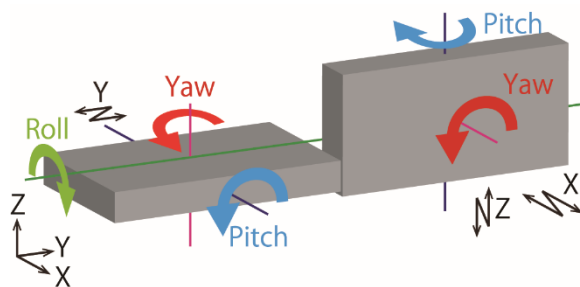


図 4.2.4 上流 KB ミラーマニピュレータ

② 下流 KB ミラーマニピュレータ

下流 KB ミラーの水平・垂直集光ミラーは、上流 KB ミラーとは逆の配置にしている。これによって、中間焦点に対して対称なミラー配置を取ることができる。

下流 KB ミラーのアライメントについては、上流 KB ミラーと基本的に同様であるが、上流ミラーと異なる点は、図 4.2.3 に示したように、下流 KB ミラーマニピュレータは全体の Yaw・Pitch・Roll を粗調整するための手動軸を取り付けていることである。上流 KB ミラーで反射した光は、元の光軸からずれているために、本粗調整機構を取り付けた。すなわち図 4.2.5 に示すように、Yaw・Pitch により、上流 KB ミラーによる光軸のずれ分(上流ミラー入射角の 2 倍)を傾け、Roll により 2 つの KB の相対的な光軸回りの回転を調整する。

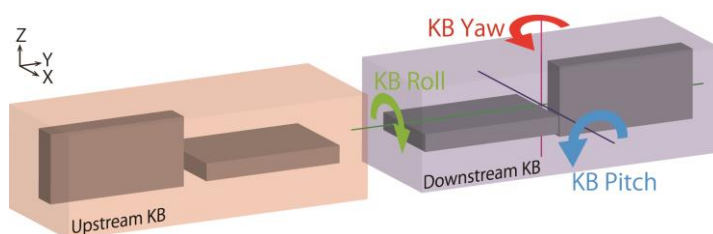


図 4.2.5 下流 KB 全体角度のアライメント軸

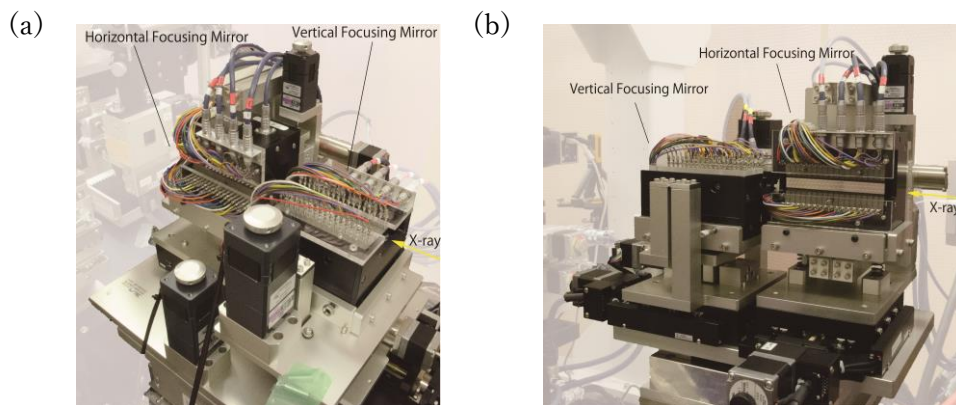


図 4.2.6 (a)上流および(b)下流ミラーマニピュレータ

本マニピュレータは、第 4.1 節で推定した許容アライメント誤差よりも小さい分解能で制御しなければならない。図 4.2.6 に開発した上流・下流 KB マニピュレータの写真を、表 4.2.1 に制御軸の性能を示す。本マニピュレータを使用することで、許容アライメント誤差の範囲内でミラーのアライメントを行うことができる。

表 4.2.1 ミラーマニピュレータ制御軸の性能

	水平集光ミラー調整軸	垂直集光ミラー調整軸
	※ミットヨ MHT3-6.5	※ミットヨ MHT3-6.5
Yaw	分解能：150 μ rad(0.01mm/70mm) 許容誤差： ± 2 mrad	分解能：150 μ rad(0.01mm/70mm) 許容誤差： ± 2 mrad
Roll	—	オリエンタルモーター DRL42PA2-04NG 分解能：38 μ rad (0.004mm/106mm) 許容誤差： ± 0.1 mrad
Z	神津精機 XA07A-R2H-1J 分解能：1 μ m	—
Pitch	ハーモニックドライブシステムズ LA-30B-10-F-SP 分解能：0.1 μ rad 許容誤差： ± 1 μ rad	ハーモニックドライブシステムズ LA-30B-10-F-SP 分解能：0.1 μ rad 許容誤差： ± 1 μ rad
Y	—	駿河精機 KX1250C-R 分解能：0.5 μ m 許容誤差： ± 40 μ m
X	駿河精機 KX1250C-R 分解能：0.5 μ m	—
KB Roll (下流のみ)	オリエンタルモーター DRL42PA2-04NG 分解能：22 μ rad (0.004mm/186mm)	
KB Pitch (下流のみ)	※ミットヨ マイクロジャッキ 分解能：50 μ rad (0.01mm/209mm)	
KB Yaw (下流のみ)	※ミットヨ MHL1-25 分解能：60 μ rad (0.01mm/157mm)	
Z	神津精機 KHI-9	分解能：0.1 μ m
Y	神津精機 XA25A-R1	分解能：1 μ m
X	神津精機 XA25A-R1	分解能：1 μ m

※印は手動ステージ

自動ステージの分解能はすべてハーフステップ

4.2.3. チルトセンサユニット

上流・下流 KB ミラー内の直角度, KB 同士の Roll を調整するために図 4.2.7 に示すようなチルトセンサユニットを定盤上に設置する. チルトセンサユニットは門構造体で, 定盤両端のリニアガイド上に設置している. 柱部分に水平集光ミラー用 1 台, 梁部分に垂直集光ミラー用 2 台の, 合計 3 台のオートコリメータ ((株)カツラ・オプト・システムズ オートコリメータ: KT7030, 数値化ユニット: IP-8010 分解能: $2.91 \mu\text{rad}$) を設置している. 上流・下流 KB ミラーマニピュレータで垂直・水平集光ミラー配置の順番が異なるため, 2 台の垂直集光ミラー用オートコリメータを, 位置をずらして設置している. 水平集光ミラー用オートコリメータは共通である.

門構造体は移動させるとリニアガイドのうねりにより変形し, 同じ姿勢を保たない. そのためオートコリメータを門構造体に直接設置すると, 水平・垂直オートコリメータの相対角度が変化し, 直角度のミスアライメントにつながる. それを解消するため, オートコリメータは別の剛性の高い部材上に取り付け, その部材と門構造体の固定を柱部分の一カ所とすることで, 門構造体のうねりによる変形が水平・垂直オートコリメータの相対角度に影響しない構造とする.

門構造体をリニアガイド上で 200 mm 移動させ, 直角基準ミラー(材質: 合成石英, 直角度精度: $20 \mu\text{rad}$)を測定したときの直角度計測の再現性の結果を図 4.2.8 に示す. 直角度の再現性は $10 \mu\text{rad}$ 程度で安定しており, 許容アライメント誤差 $\pm 0.1 \text{ mrad}$ に対して直角度のアライメントに十分な性能をもつことがわかる.

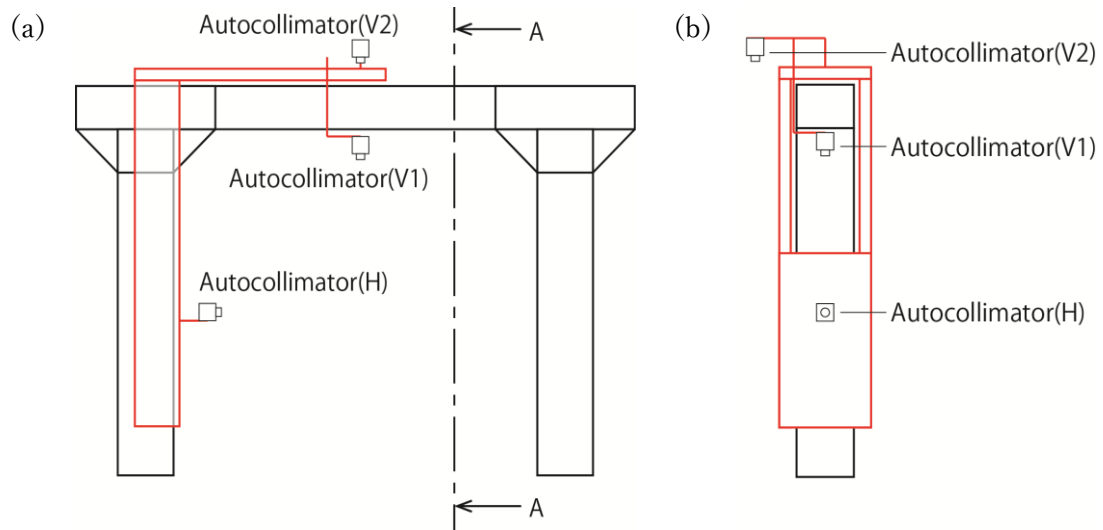


図 4.2.7 チルトセンサユニット

(a)門構造体を光源方向から見た図, (b)断面 A-A から見た図, (c)全体写真

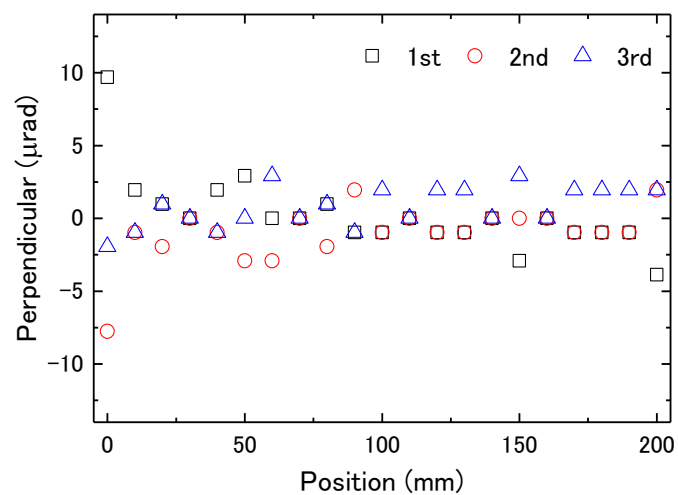


図 4.2.8 門構造体を移動したときの直角度計測の再現性

また、以下と図 4.2.9 に、オートコリメータによる KB ミラーの直角度調整手順を示す。

- ① 上流水平集光ミラー(H1)に水平集光ミラー用オートコリメータを合わせる
- ② 門構造体を移動し、直角基準ミラーを水平オートコリメータに合わせる
- ③ 上流垂直(V1)・下流垂直(V2)オートコリメータを直角基準ミラーに合わせ、水平オートコリメータと垂直関係を作る
- ④ 門構造体を上流 KB 上へ移動し、上流垂直集光ミラーを上流垂直オートコリメータに合わせる
- ⑤ 門構造体を下流 KB 上へ移動し、下流マニピュレータの全体 Roll 軸により下流水平集光ミラーを水平オートコリメータに合わせる
- ⑥ 下流垂直集光ミラーを下流垂直オートコリメータに合わせる

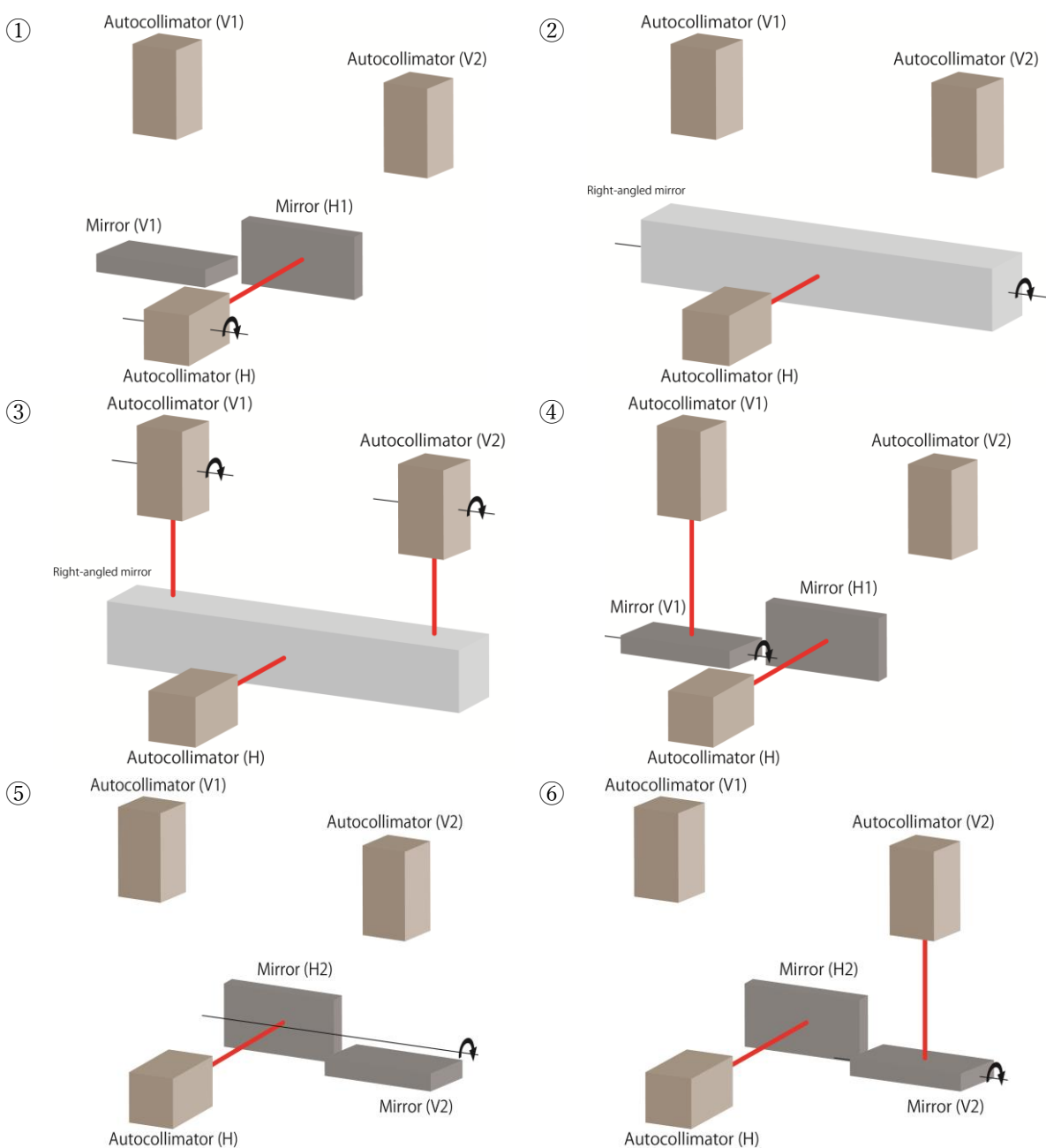


図 4.2.9 オートコリメータによる KB ミラーの直角度調整手順

4.2.4. ペンシルビームスキャン用ビームモニタ⁴⁸

ペンシルビームスキャンの高精度化には、焦点での X 線の位置のずれを検出できるビームモニタが重要である。ビームモニタは X 線を可視光に変換するシンチレータ、可視光を拡大結像するレンズ、光の位置を検出するカメラで構成される。

4.2.4.1. ビームモニタの設計

シンチレータは、感度と耐放射性を考慮し、厚さ 50 μm の Ce:YAG セラミックスとした。シンチレータが厚みを持つことに加え、レンズの開口数(NA)に依存した回折のため、ボケが発生する。シンチレータの厚みに対してレンズの NA を最適に選択することでボケを最小にすることができる^{49,50}。レンズは式(4.1)より、Ce:YAG セラミックスの厚み(50 μm)において分解能 R が最小になる 0.2 のものを選択した。この式から期待できる空間分解能は 1.17 μm である。1.17 μm を十分に解像するため、CMOS カメラは 2.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、レンズは 10 倍のものを採用した。このときの実効ピクセルサイズは 250 nm/pixel である。開発したビームモニタの仕様を表 4.2.2 に示す。

$$R = \sqrt{\left(\frac{p}{NA}\right)^2 + (qzNA)^2} \quad (4.1)$$

R : spatial resolution (μm)

z : thickness of the scintillator (μm)

NA : numerical aperture

$p = 0.18\mu\text{m}, q = 0.075$

表 4.2.2 開発したビームモニタの仕様

Scintillator	Ce:YAG ceramics (thickness: 50 μm)
Lens	$\times 10$ (NA: 0.2)
Camera	CMOS (Bitran CS-52M; 2048 pix \times 1536 pix, 2.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)

開発したビームモニタの写真、概略図を図 4.2.10 に示す。光路内にミラーを配置することで、ビームモニタの小型化を実現している。カメラで検出した画像を重心計算することで、ピクセルサイズ以上の精度で X 線の位置を検出することが可能である。

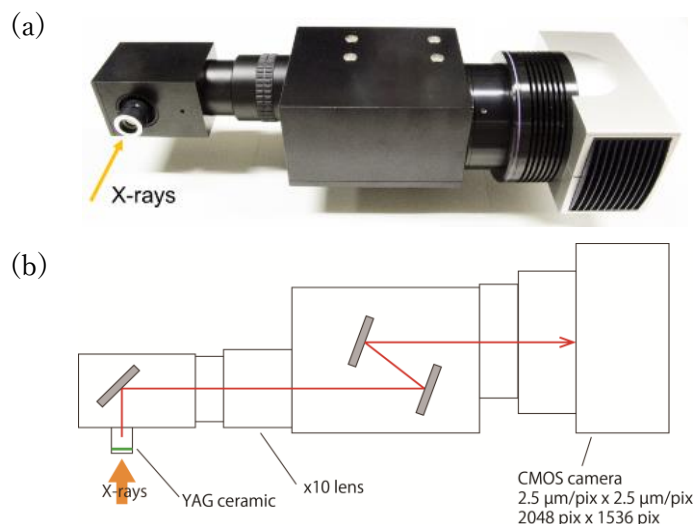


図 4.2.10 開発したビームモニタの(a)写真と(b)内部の光学系概略図

4.2.4.2. ピンホールを用いた性能評価実験

SPring-8 BL29XUL EH3(仮想光源からの距離 45 m)において、開発したビームモニタの基本性能評価を行った。実験の装置構成を図 4.2.11 に示す。ピンホール(材質: Ni, 厚さ: 50 μm , 穴直径: $\phi 20 \mu\text{m}$)により 10 keV の X 線を切り出して、それをビームモニタで撮影した。ピンホールを動かしたときのビームモニタ上での X 線の重心の移動量をグラフ上にプロットした。ピンホールはフィードバックステージ(位置決め精度: 1 nm, シグマテック FS-1050SPX)に取り付け、10 nm 間隔で x, z 方向に走査した。その結果を図 4.2.12 に示す。ピンホールの移動量と重心位置の変化は相関関係があり、開発したビームモニタには 10 nm の位置検出精度があることを確認できる。これは、想定している光学系において、約 30 nrad の精度でスロープエラーを計測できることを示している。形状可変ミラーの修正を誤差 2 nm 以下で行うために、十分な精度を持つことがわかる。なお、システムに組み込む際は、シンチレータは取り外してサンプルユニットに取り付けている。

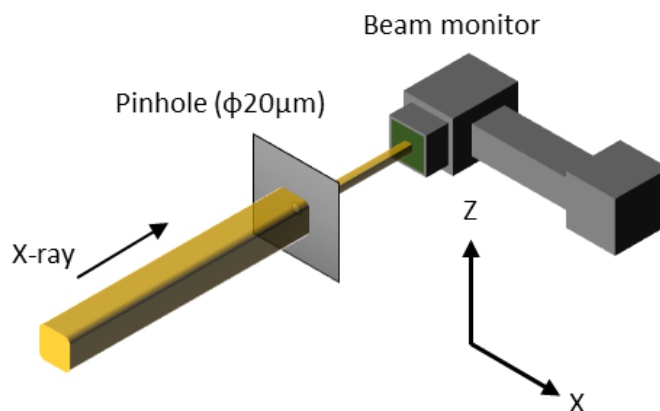


図 4.2.11 ビームモニタ性能評価用の実験セットアップ

表 4.2.3 に顕微鏡ユニット制御軸の性能を示す。

表 4.2.3 顕微鏡ユニット制御軸の性能

中間・最終焦点共通	
θX	シグマ光機 KSPT-606MRH
θY	シグマ光機 GOHT-60A60BSR
Z	神津精機 ZA10A-W2 分解能：0.25 μm
Y	神津精機 XA10A-R1 分解能：0.25 μm
X	神津精機 XA10A-L1 分解能：1 μm

※さらに最下段の X ステージは共通，分解能 1 μm

4.2.5.2. サンプルステージユニット

サンプルステージにはワイヤとシンチレータが配置されている。ワイヤを用いた明視野ワイヤスキャンによって，集光ビームプロファイルの評価を行う。上述したようにシンチレータは顕微鏡と組み合わせてペンシルビームスキャンに用いる。

集光 X 線のビームプロファイルを高精度に計測するため，水平(X)・垂直(Z)方向にはナノメートル精度のフィードバックステージを用いている。最小集光径の違いから，中間焦点は位置決め精度 5 nm，最終焦点は位置決め精度 1 nm のフィードバックステージを用いている。フィードバックステージ上にはサンプルホルダが設置されている。サンプルホルダには明視野スキャン用の金ワイヤ($\phi 200 \mu\text{m}$)とペンシルビームスキャン用シンチレータ(Ce:YAG セラミック)を配置している。フィードバックステージは，サンプルの角度調整用チルトステージ($\theta X \cdot \theta Y \cdot \theta Z$)，サンプル変更用 X ステージ，焦点方向調整用 Y ステージ上に配置した。表 4.2.4 にサンプルステージユニット制御軸の性能を示す。また，図 4.2.14 に製作したスキャンユニットの写真を示す。

表 4.2.4 サンプルステージユニット制御軸の性能

	中間焦点	最終焦点
ビームプロファイル計測ステージ	5 nm フィードバックステージ (シグマテック FS-1050SPX)	1 nm フィードバックステージ (シグマテック FS-1050SPX(MD))
θX	神津精機 SA10A-RS	
θY	分解能：20 μrad	
Y	神津精機 XA10A-R1	分解能：0.25 μm
X	神津精機 XA10A-R1	分解能：0.25 μm
θZ	神津精機 RA10A-W	分解能：350 μrad

※さらに最下段の X ステージは共通，分解能 1 μm

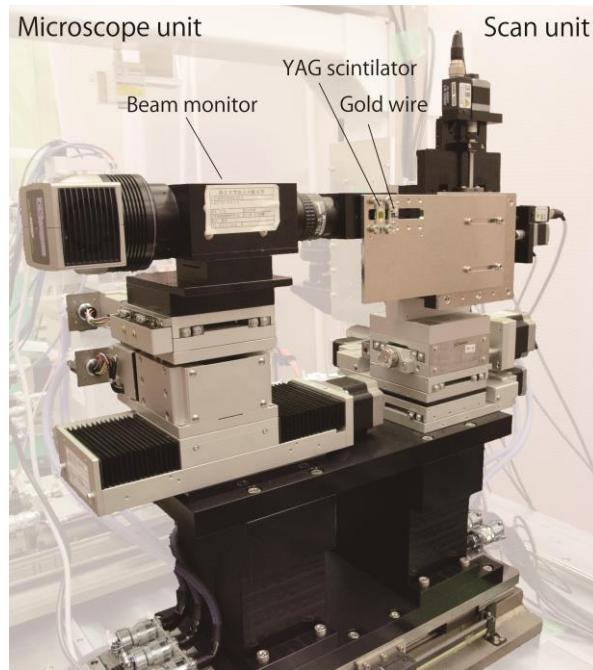


図 4.2.14 製作したスキャンユニット

4.3. 結言

本章では，SPring-8における集光実験で用いる定盤，KBミラーマニピュレータ，チルトセンサユニット，スキャンユニットについて，要求精度の検討および設計について述べた。

- (1) 波動光学シミュレーションにより入射角・焦点深度・面内回転・直角度の許容アライメント誤差を求め，装置設計の指針を得た。
- (2) 設計指針に基づきアクチュエータやステージを選定し，ミラーのアライメントを行うマニピュレータを設計・製作した。また，直角度のアライメントを行うための門構造チルトセンサユニットを設計・製作した。その再現性を評価し，アライメントに十分な性能をもつことを確認した。
- (3) ペンシルビームスキャンを高精度に行うため，X線の位置を計測するビームモニタを開発した。ピンホールを用いた性能評価を行った結果，10 nmの分解能を有することが判り，形状可変ミラーの形状誤差を計測するための性能を満たしていることを確認した。
- (4) 焦点位置に設置する，ビームモニタ・サンプルステージを搭載したスキャンユニットを設計・製作した。ペンシルビームスキャンに用いるシンチレータは，ワイヤスキャンを行うサンプルステージにワイヤと同じ平面上に取り付けた。これによりペンシルビームスキャンとワイヤスキャンを迅速に切り替えることを可能とした。

5. アダプティブ X 線集光実験

本章では、SPring-8 において、第 3 章で述べた形状可変ミラーと、第 4 章で述べたシステムを用いてアダプティブ集光光学系を構築し、集光実験を行った結果について述べる。

まず、形状可変ミラーの集光特性と、ペンシルビームスキャンによる形状修正を評価するため、2 枚の形状可変ミラーを用いたアダプティブ KB ミラー集光光学系を構築し、二次元集光実験を実施する。次に、2 枚の形状可変ミラーを用いたアダプティブ二段一次元集光光学系を構築し、上流ミラーで中間焦点に集光し発散した X 線を下流ミラーで再度集光する実験を行う。さらに、アダプティブ二段一次元集光光学系において、上流形状可変ミラーの形状誤差による波面誤差を下流形状可変ミラーで修正する波面補償実験を行う。これらの光学系は、開発を目指すアダプティブ集光光学系(4 枚の形状可変ミラーで構成)の上流 KB および二段水平集光を想定して行っており、これらの実験で得られた知見をアダプティブ集光光学系の開発にフィードバックする。実験はすべて SPring-8 BL29XUL EH3(光源からの距離 45 m)で行う。最後に、アダプティブ集光光学系開発の現状について、すでに報告されている論文を引用して簡単に紹介する。

5.1. 集光実験の手順

5.1.1. 形状可変ミラーの調整手順

形状可変ミラーの調整は、図 5.1.1 に示すフローチャートに沿って行う。

① 粗調整電圧の決定

2.4 項で述べたように、SPring-8 における形状可変ミラーの計測には At-wavelength 形状計測法であるペンシルビームスキャンを用いる。しかしビームタイム中に、形状可変ミラーに電圧を印加しない状態からペンシルビームスキャンで目標楕円形状に変形するには、長時間を要する可能性がある。そこで SPring-8 における形状可変ミラー調整の時間を短縮するため、事前に 3.6 項に示した可視光干渉計による形状制御システムを用いて、目標楕円形状に変形するために必要な粗調整電圧を決定する。

② 実験ハッチへの移動と設置

電圧の決定後、SPring-8 の実験ハッチ内へ形状可変ミラーを移動し、設置する。

③ 粗調整電圧の印加

①で決定した粗調整電圧を形状可変ミラーへ印加し、目標楕円形状への大まかな変形を行う。

④ 各アライメントの調整

形状可変ミラーの面内回転・入射角・直角度などのアライメントを調整する。

⑤ 形状可変ミラーの計測

形状可変ミラーに粗調整電圧を印加すると、圧電素子のヒステリシスの影響により、数十 nm の変形誤差が発生する可能性がある。その変形誤差をペンシルビームスキャンにより計測する。

⑥ 形状可変ミラーの修正

ペンシルビームスキャンにより計測した変形誤差を、形状可変ミラーに印加する電圧を調整し、修正する。

形状可変ミラーが目標精度を満たすまで⑤・⑥を繰り返し、形状修正の完了後、ワイヤスキャンにより集光ビームプロファイルの評価を行う。アダプティブ KB 集光光学系の場合、上記の調整を垂直・水平集光形状可変ミラー両方で行う。

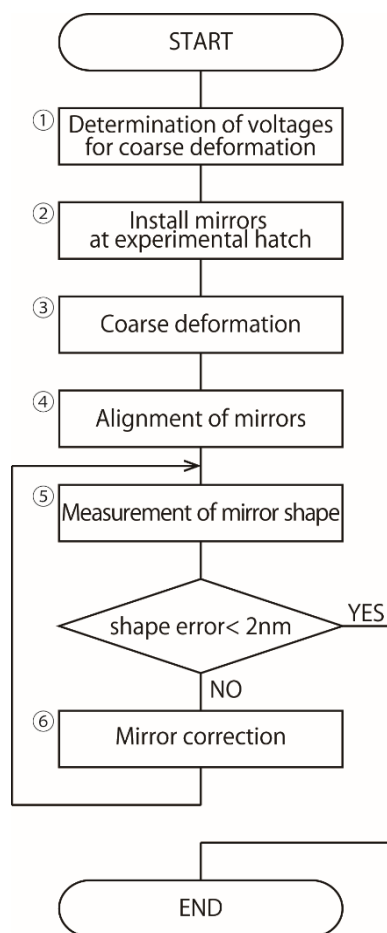


図 5.1.1 形状可変ミラーの調整手順

5.1.2. 二段光学系の調整手順

二段光学系における形状可変ミラーの調整は、図 5.1.2 に示すフローチャートに沿って行う。①粗調整電圧の決定から④各アライメントの調整までは 5.1.1 項に述べた手順と同様で、上流・下流ミラーを同時に行う。形状可変ミラーの変形調整は、⑤上流ミラーの計測と修正、⑥下流ミラーの計測と修正を分けて行う。

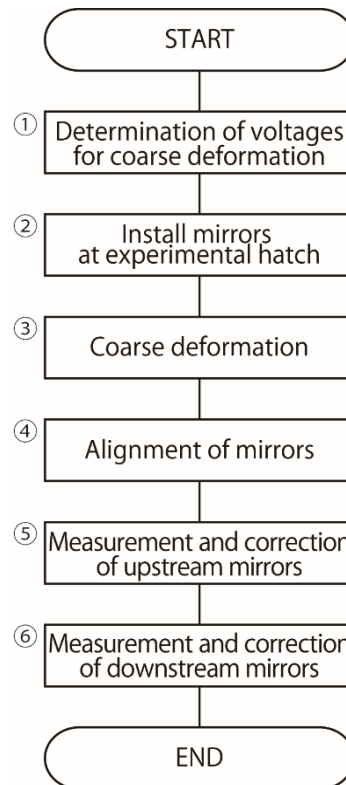


図 5.1.2 二段光学系の調整手順

二段光学系の調整には、以下に示すような通常の集光実験とは異なる特有の考慮すべき点がある。

(1) 上流形状可変ミラーの誤差による反射のずれ

上流形状可変ミラーに大きな誤差がある場合、下流形状可変ミラーの計測と修正に問題が生じる可能性がある。これは、図 5.1.3 に示すように、上流形状可変ミラーの誤差によりペンシルビームの反射方向が理想からずれ、下流形状可変ミラーでの反射位置にずれが生じるためである。ここで実線はペンシルビームの理想的な軌道を、破線は上流形状可変ミラーの誤差によりずれた軌道を示している。下流形状可変ミラーの反射位置のずれにより、計測結果と下流形状可変ミラーの電極位置の対応がずれ、正常な変形が難しくなる。正常な変形を行うためには、この軌道のずれを下流形状可変ミラーの電極すき間の大きさ以下にする必要

があり、上流形状可変ミラーの許容傾斜誤差は $\frac{\text{電極すき間の大きさ} \times \text{ミラー斜入射角}}{\text{ミラー間距離}}$ 以下となる。本二

段光学系における水平集光の場合、条件を満たす上流形状可変ミラーの傾斜誤差は

$\frac{0.8 \text{ mm} \times 4 \text{ mrad}}{1.5 \text{ m}} = 2 \text{ } \mu\text{rad}$ 以下となる。すなわち、上流形状可変ミラーを許容誤差以内に修正し

た後に、下流形状可変ミラーの修正を行う必要がある。

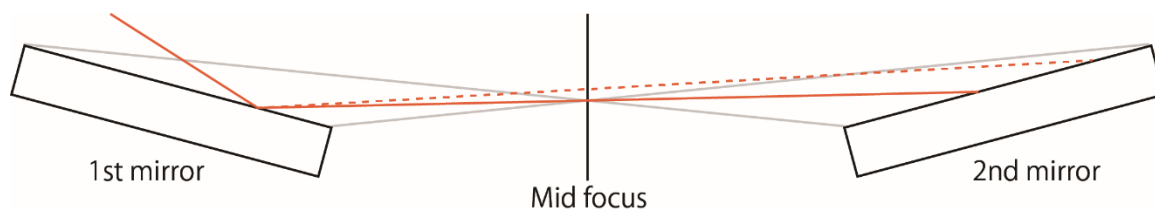


図 5.1.3 上流ミラーの形状誤差による反射のずれ

(2) 上流形状可変ミラーの反射角度誤差による軌道のずれ

また、図 5.1.4 に示すように、上流形状可変ミラーの反射角度誤差により反射方向への軌道ずれが発生する可能性がある。ここで実線は理想的な軌道を、破線は上流形状可変ミラーの反射角度誤差によりずれた軌道を示している。この角度誤差は、上流形状可変ミラー修正時のミラー変形によるものと、上流形状可変ミラーの入射角ドリフトにより発生する可能性がある。この場合も上記と同様に、下流形状可変ミラーでの反射位置にずれが生じ、計測結果と下流形状可変ミラーの電極位置の対応がずれ、正常な変形が難しくなる。この位置ずれは中間焦点のビームモニタで監視することが可能である。ずれを下流形状可変ミラーの電極すき間の大きさ以下にするためには、中間焦点での位置ずれを

$\frac{\text{上流ミラー焦点距離} \times \text{電極すき間の大きさ} \times \text{斜入射角}}{\text{ミラー間距離}}$ 以下とする必要がある。本二段光学系における水平集光

の場合、中間焦点における位置ずれ $\frac{0.75 \text{ m} \times 0.8 \text{ mm} \times 4 \text{ mrad}}{1.5 \text{ m}} = 1.6 \text{ } \mu\text{m}$ を検出する必要がある。開

発したビームモニタは 10 nm の位置検出精度があるため、ビームモニタで中間焦点の X 線位置を常に確認することで、ずれを抑制することが可能である。

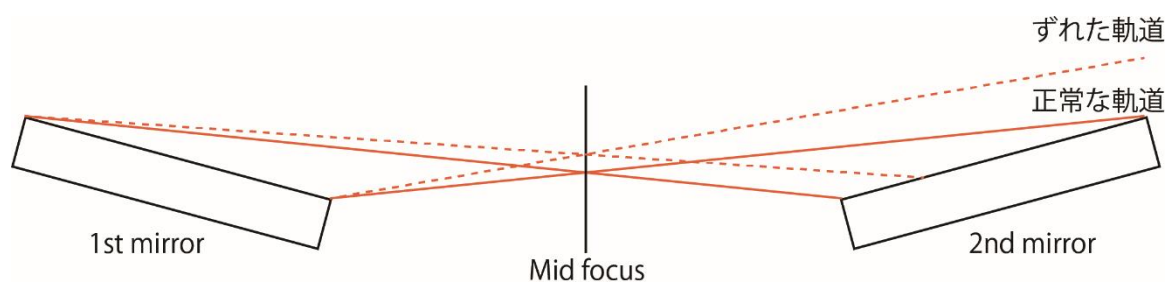


図 5.1.4 上流ミラーの角度誤差による位置のずれ

5.2. 2枚の形状可変ミラーを用いたアダプティブ集光実験

5.2.1. アダプティブKBミラー集光光学系を用いた集光実験⁵¹

5.2.1.1. 実験条件

長さ 100 mm の形状可変ミラー2枚(水平集光・垂直集光)を仮想光源から 45 m 下流の位置に 130 mm 離して KB 配置する. ミラーの入射角は 4 mrad とした. 図 5.2.1 に KB 集光光学系の概略図を示す. ミラー上流 200 mm にペンシルビームスキャンに用いるスリット(Incident slit)を配置する. また, 水平集光ミラー中心から 200 mm 下流位置を焦点とし, 焦点位置にはペンシルビームスキャンに用いるビームモニタと, ワイヤスキャンに用いる金ワイヤ($\phi 200 \mu\text{m}$)を配置した. 焦点より下流には, ワイヤスキャン時に X線強度を計測する PIN フォトダイオードを配置する. TC スリットによって形成した仮想光源サイズは $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ である. 理想集光径(回折限界)は水平 58 nm \times 垂直 98 nm である. 図 5.2.2 に焦点における理想集光プロファイルを示す. 図 5.2.3 に水平・垂直集光形状可変ミラーの電圧を印加しないときの実際に計測した形状と設計形状を示す. 形状は RADSI および MSI を用いて計測した.

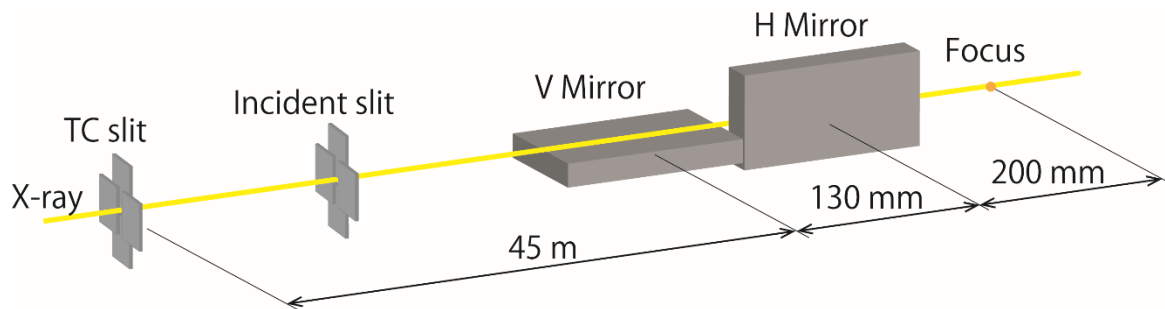


図 5.2.1 KB 集光光学系の概略図

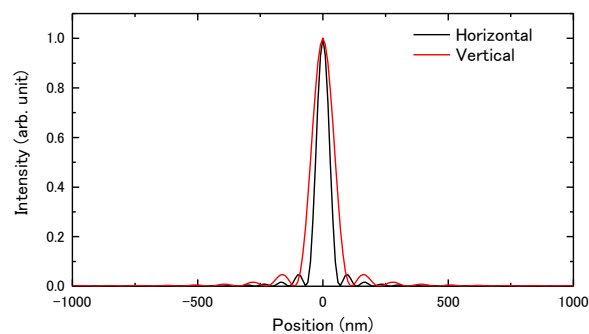


図 5.2.2 焦点面における理想集光プロファイル

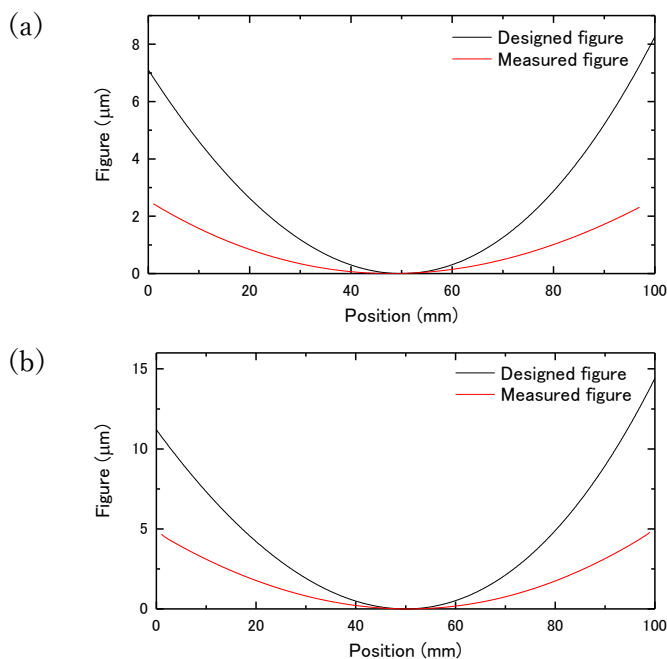


図 5.2.3 形状可変ミラーの形状と設計形状 (a)垂直集光ミラー (b)水平集光ミラー

5.2.1.2. 実験結果

5.1 節に示した流れに沿って、形状可変ミラーの変形を精密調整した。ペンシルビームスキャン時のビームモニタの露光時間は 200 msec、入射スリットサイズは $20\ \mu\text{m}$ とする。これはミラー開口 $400\ \mu\text{m}$ を 20 分割した大きさに相当する。

各形状可変ミラーに対して形状修正を行った結果を図 5.2.4 に示す。黒線はペンシルビームスキャン開始時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。ペンシルビームスキャンにより推定した 40-60 nm 程度の形状誤差を、形状可変ミラーの印加電圧を調整することで赤線に示すように PV2 nm 以下に修正することができる。これはレイリーの 4 分の 1 波長則によって与えられる許容形状誤差(3.9 nm)を満たしている(X 線エネルギー：10 keV、入射角：4 mrad)。

形状修正後、焦点位置において明視野ワイヤスキャン法⁹によりビームプロファイルを計測した。計測時の光源幅は $10\ \mu\text{m}$ とした。垂直・水平集光のビームプロファイルを図 5.2.5 に示す。赤点が計測結果、黒線は波動光学計算によって計算した理想集光プロファイルである。集光径(FWHM)は水平方向 65 nm、垂直方向 110 nm で、ほぼ回折限界の集光ビームを得ることができる。

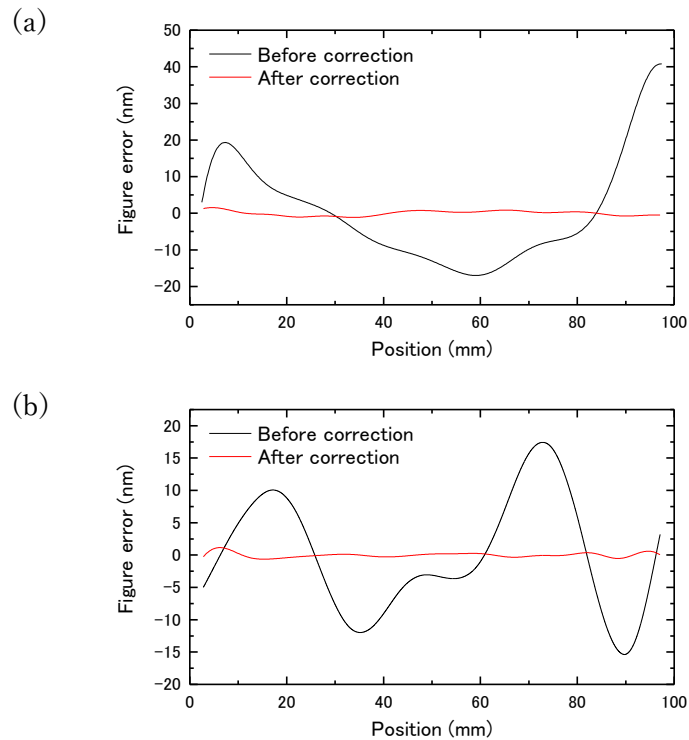


図 5.2.4 ペンシルビームスキャンによって計測した形状誤差

(a)水平集光ミラー (b)垂直集光ミラー

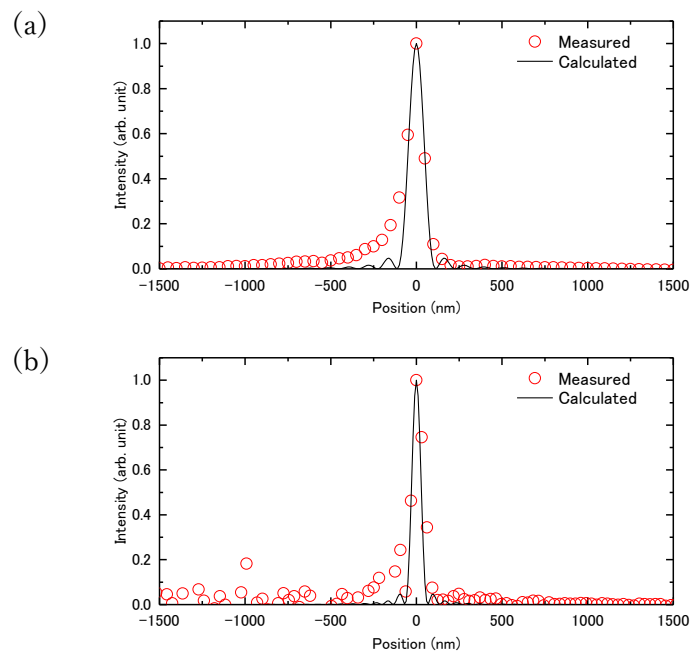


図 5.2.5 集光ビームプロファイル (a)垂直集光 (b)水平集光

以上より、ペンシルビームスキャンによる形状可変ミラーの形状修正を 1 nm レベルで高精度に行うことが可能であり、開発した形状可変ミラーは、数十 nm オーダーの回折限界集光を達成できる性能をもつことが示された。

5.2.2. アダプティブ二段一次元集光光学系を用いた集光実験

5.2.2.1. 実験条件

2枚の形状可変ミラーを仮想光源から45 m 下流の位置に水平集光方向に配置した。上流ミラーから1.5 m 離れた位置に、下流ミラーを反射面が同じ方向を向くように配置した。ミラーの入射角は4 mrad とした。図 5.2.6 に二段一次元集光光学系の概略図を示す。上流ミラーより200 mm 上流の位置にペンシルビームスキャンに用いるスリット(Incident slit)を配置する。中間焦点は上流ミラー中心から750 mm 下流、最終焦点は下流ミラー中心から300 mm 下流とし、それぞれにペンシルビームスキャンに用いるビームモニタと、ワイヤスキャンに用いる金ワイヤ($\phi 200 \mu\text{m}$)を設置する。また、TC スリットによって形成した仮想光源サイズは水平 $10 \mu\text{m}$ である。本光学系における理想集光径(回折限界)は、中間焦点 207 nm と最終焦点 91 nm である。図 5.2.7 に中間焦点および最終焦点における理想集光プロファイルを示す。また、図 5.2.8 に上流・下流ミラーの設計形状を示す。

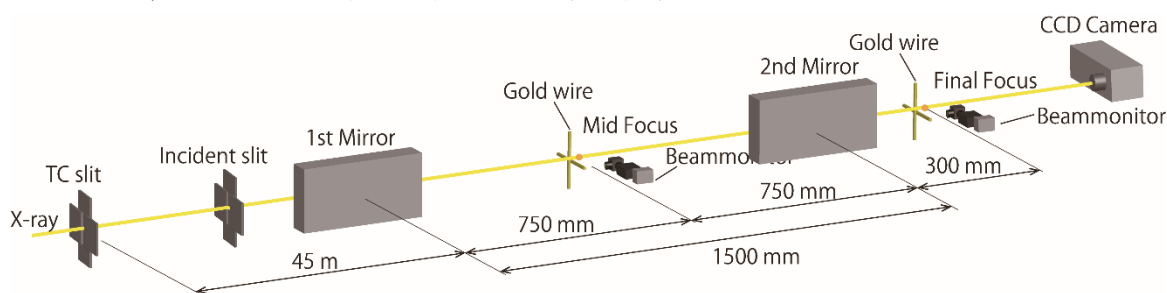


図 5.2.6 二段一次元集光光学系の概略図

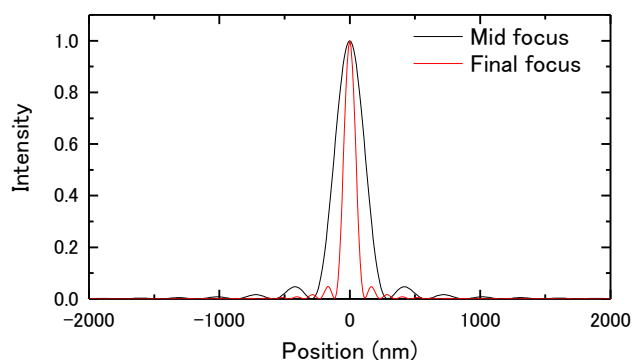


図 5.2.7 中間焦点と最終焦点の理想集光プロファイル

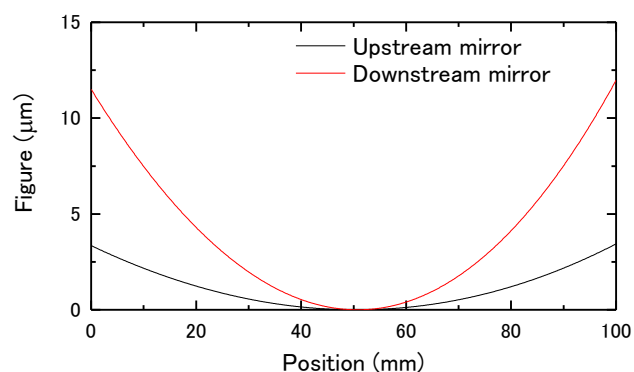


図 5.2.8 上流・下流形状可変ミラーの設計形状

5.2.2.2. 実験結果

5.1 節に示した調整手順に沿って、まず中間焦点でペンシルビームスキャンの結果に基づき上流形状可変ミラーの変形を調整し、中間焦点においてビームプロファイルの計測を行った。さらに最終焦点のペンシルビームスキャンを行い下流形状可変ミラーの変形を調整し、最終焦点においてビームプロファイルの計測を行った。図 5.2.9 に上流・下流形状可変ミラーの変形調整前後のペンシルビームスキャンで計測した形状誤差を示す。中間焦点・最終焦点両方のペンシルビームスキャンにおいて形状誤差 2 nm 以下の結果が得られ、上流・下流形状可変ミラーともに許容誤差内に収まることがわかる。図 5.2.10 に示すビームプロファイル計測結果から中間焦点において集光径 230 nm (FWHM)、最終焦点において集光径 108 nm (FWHM) に集光されており、両方の焦点において回折限界に近い集光を達成されていることがわかる。

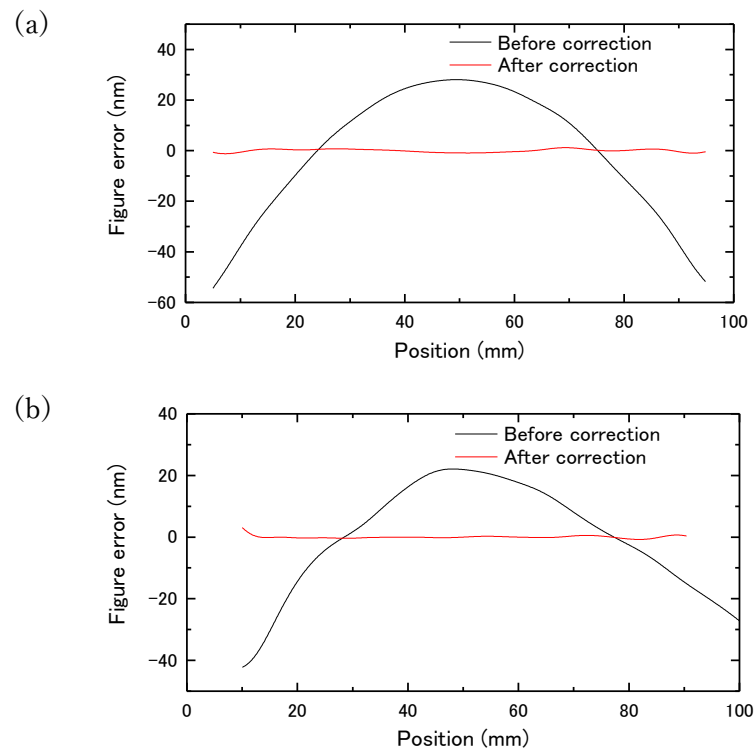


図 5.2.9 ペンシルビームスキャンによって計測した形状誤差
(a) 上流ミラー, (b) 下流ミラー

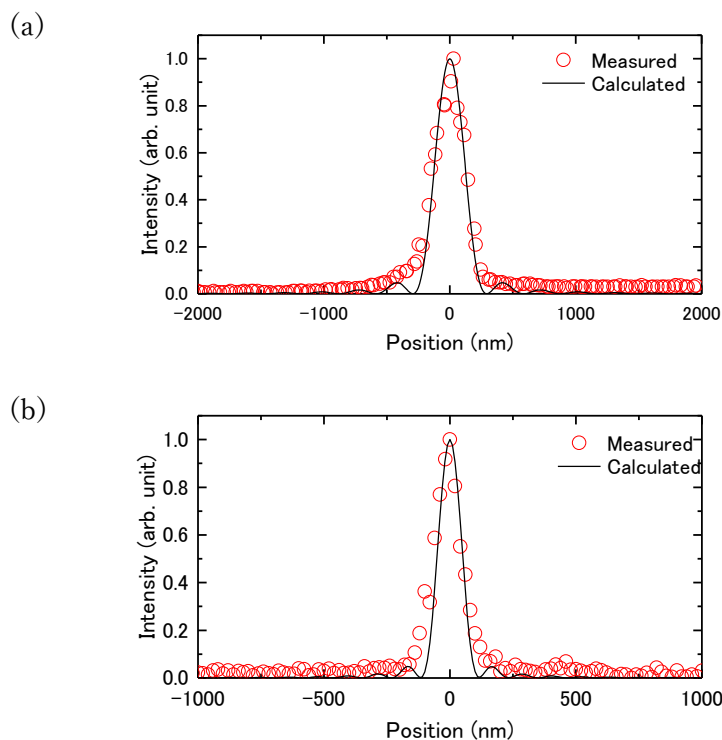


図 5.2.10 集光ビームプロファイル (a) 中間焦点, (b) 最終焦点

5.2.3. アダプティブ二段一次元集光光学系を用いた波面補償集光実験⁵²

5.2.3.1. 実験条件

二段光学系の場合、最終焦点でのペンシルビームスキャン結果は上流・下流形状可変ミラー両方の形状誤差を含んだ結果となっており、上流形状可変ミラーに形状誤差がある場合でも、下流形状可変ミラーの調整で最終的な波面収差の補正を行うことができる。このような波面補償の考え方は、修正が難しいミラーが光学系に存在する場合に非常に有効な手段となる。例えば第 2 章で述べたように、中間焦点を下流へ移動したとき (NA が小さくなる) は下流形状可変ミラーの照射領域が小さくなり、電極個数が少なくなるため、圧電素子で変形可能な周期は少なくなる。その場合、下流形状可変ミラーで低周期の形状を調整し、上流形状可変ミラーで高周期の形状を調整することで、上流・下流形状可変ミラーを相互に波面補償することが可能である。

本実験では、上流形状可変ミラーの形状誤差による波面誤差を、下流形状可変ミラーで修正する波面補償実験を行う。2 枚の形状可変ミラーを仮想光源から 45 m 下流の位置に水平集光方向に配置した。ミラーの入射角は 4 mrad とし、上流形状可変ミラーから 1 m 離れた位置に、下流形状可変ミラーを反射面が同じ方向を向くように配置した。図 5.2.11 に光学系の概略図を示す。上流ミラーより 200 mm 上流の位置にペンシルビームスキャンに用いるスリット (Incident slit) を配置する。中間焦点は上流ミラー中心から 500 mm 下流、最終焦点は下流ミラー中心から 300 mm 下流とし、それぞれにペンシルビームスキャンに用いるビームモニタと、ワイヤスキャンに用いる金ワイヤ ($\phi 200 \mu\text{m}$) を設置する。また、TC スリットによっ

て形成した仮想光源サイズは水平 $10\ \mu\text{m}$ である. 本光学系における理想集光径(回折限界)は, 中間焦点 $138\ \text{nm}$ と最終焦点 $86\ \text{nm}$ である. 図 5.2.12 に最終焦点の理想集光プロファイルを, 図 5.2.13 に上流・下流ミラーの設計形状を示す.

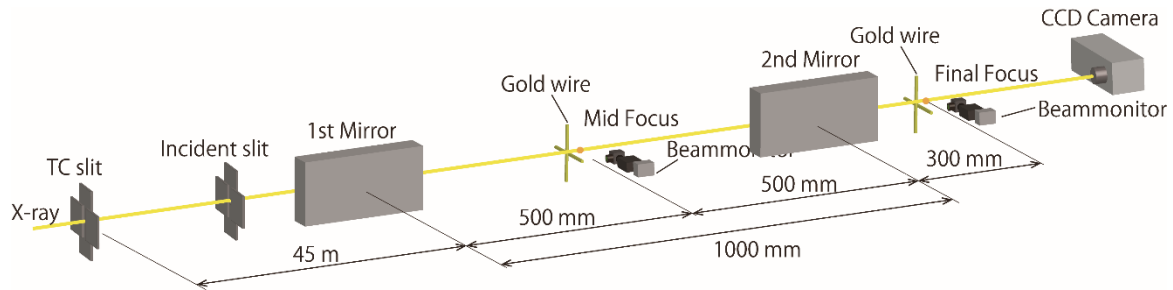


図 5.2.11 二段一次元集光光学系の概略図

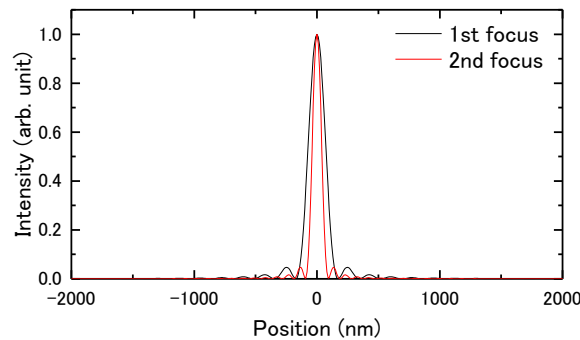


図 5.2.12 最終焦点の理想集光プロファイル

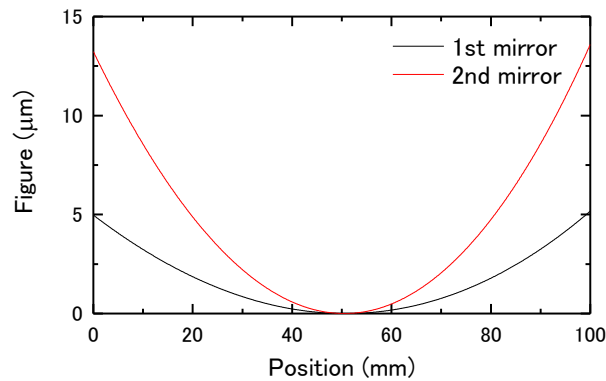


図 5.2.13 形状可変ミラーの設計形状

5.2.3.2. 実験結果

5.1 節に示した流れに沿って, まず中間焦点でペンシルビームスキャンの結果に基づき上流形状可変ミラーの変形を調整し, 形状誤差 PV $5\ \text{nm}$ 程度まで修正する. そして最終焦点のペンシルビームスキャンにより計測される上流・下流形状可変ミラーの形状誤差による波面誤差に基づき, 下流形状可変ミラーを調整することで波面補償を行う. 図 5.2.14 に上流・下流ミラーの変形調整前後のペンシルビームスキャンで計測した形状誤差を示す.

図 5.2.15 に中間焦点・最終焦点において、ワイヤスキャンにより取得した集光ビームプロファイルを示す。図 5.2.15(a)に示す中間焦点におけるビームプロファイルは、上流形状可変ミラーの誤差により大きく乱れており、半値幅は理想集光径 138 nm に対して 180 nm 程度となっている。一方、図 5.2.15(b)に示す最終焦点におけるビームプロファイルは、理想集光径に近い集光径 90 nm(FWHM)に集光されており、回折限界に近い集光を達成されていることがわかる。以上のことから、上流形状可変ミラーによる波面誤差を、下流形状可変ミラーの調整により補償し、最終焦点において理想集光を達成していることがわかる。

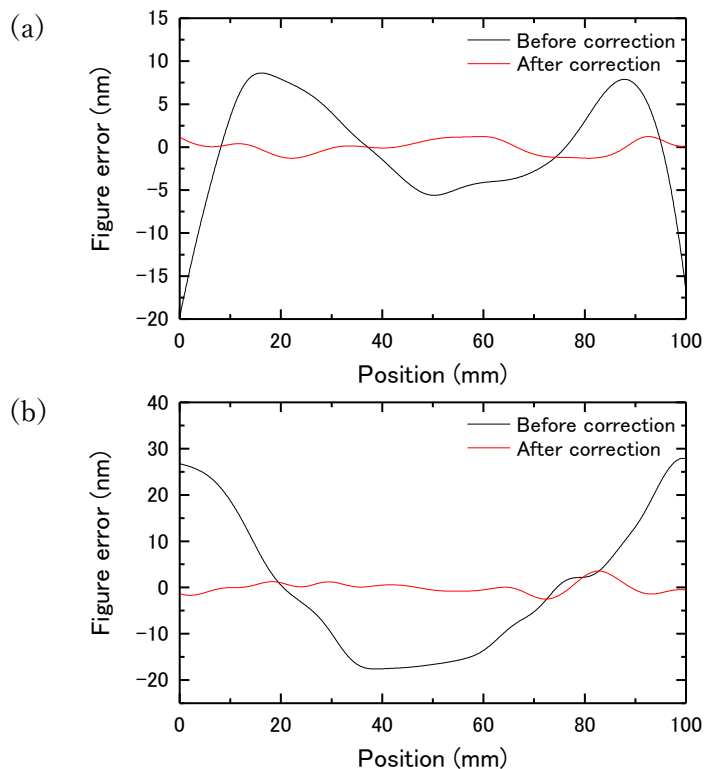


図 5.2.14 ペンシルビームスキャンによって計測した形状誤差
(a) 上流ミラー, (b) 下流ミラー

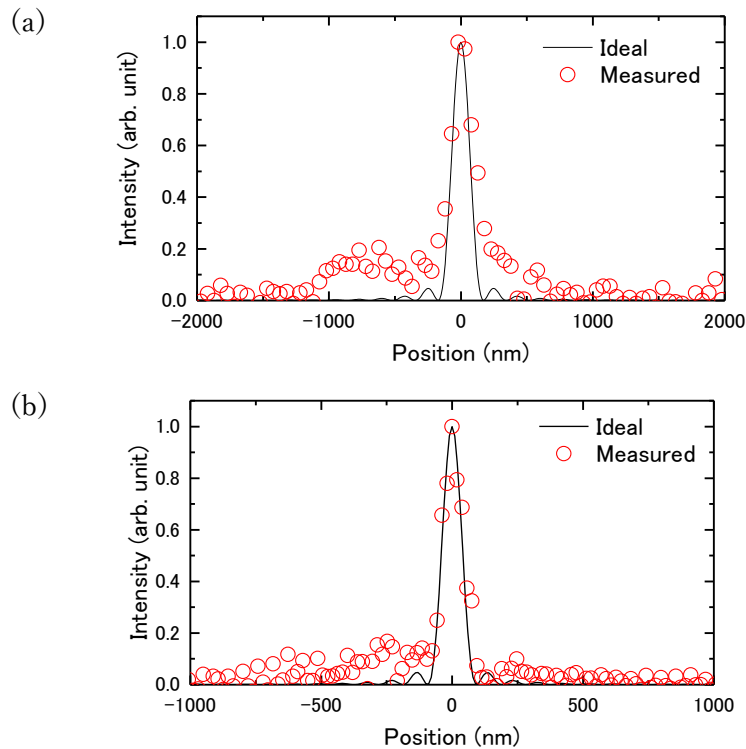


図 5.2.15 集光ビームプロファイル (a) 中間焦点, (b) 最終焦点

5.2.4. 実験のまとめ

これまで2枚の形状可変ミラーを用いて3種類の集光実験を行った。

アダプティブ KB ミラー集光実験では、水平・垂直集光形状可変ミラーをペンシルビームスキャンにより調整し、回折限界集光を達成した。提案した形状可変ミラーの調整方法が有効であることを示した。また、形状可変ミラーによる回折限界集光が可能であることを示した。

アダプティブ二段一次元集光実験では、2種類の集光実験を行った。まず上流・下流形状可変ミラーを許容形状誤差以内に調整して中間・最終焦点両方で回折限界集光を達成し、二段光学系の調整手順を確立した。

また、上流形状可変ミラーを許容以上の形状誤差を含んだ状態とし、下流形状可変ミラーで上流形状可変ミラーによる波面誤差も補正する波面補償実験を行い、最終焦点で回折限界集光を達成した。二段光学系において波面補償が有効に機能することを示した。

以上より、二段アダプティブ集光光学系による可変集光実験を行うための手順を確立した。

5.3. 二段アダプティブ集光光学系開発の現状

2016年に、二段アダプティブ集光光学系を用いた可変集光実験が Matsuyama らにより、Scientific Reports に報告されている⁵³。報告にある実験は、本研究の成果と、新たに開発された形状可変ミラーの圧電素子ドリフトの抑制方法を用いて行われている。報告では1回のビームタイム中に3種類の集光ビームの形成を行っており、ここで簡単に紹介する。

5.3.1. 実験条件

報告では、本研究で開発した高精度形状可変ミラーを4枚用いて、第2章で述べた二段アダプティブ集光光学系が構築されている。実験は SPring-8 BL29XUL EH3 (光源からの距離 45 m) で行われた。光学系の概略図を図 5.3.1 に、設計パラメータを表 5.3.1 に示す。本光学系では、上流形状可変ミラーの変形により中間焦点の焦点距離を移動させることで、下流形状可変ミラーの NA を変化させ、最終焦点位置での回折限界集光径を変化させることができる。

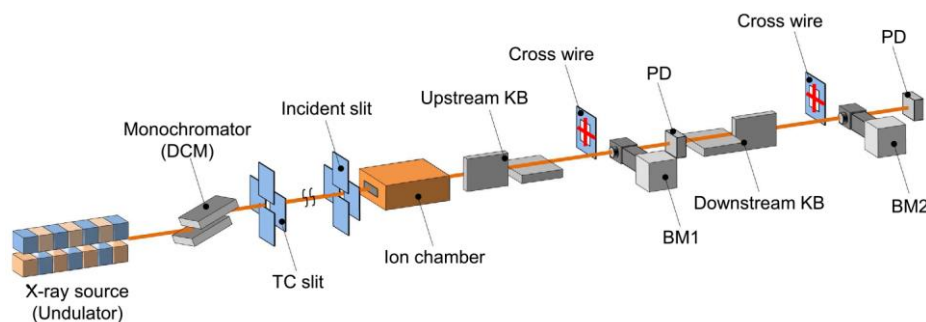


図 5.3.1 二段アダプティブ KB 集光光学系の概略図⁵³

表 5.3.1 光学系の設計パラメータ⁵³

	Horizontal focusing	Vertical focusing
Source-1st mirror (mm)*	50000	50130
1st mirror-mid focus (mm)*		
Mode I	750	620
Mode II	1000	870
Mode III	1250	1120
1st mirror-2nd mirror (mm)*	1500	1240
2nd mirror-final focus (mm)*	300	430
Grazing-incidence angle (mrad)**		
Upstream mirror	4.0	4.0
Downstream mirror	4.0	4.0

5.3.2. 実験結果

著者らは、ペンシルビームスキャンによる計測結果に基づいて各ミラーの形状修正を行い、最終焦点において集光ビームプロファイルの計測を行っている。図 5.3.2 に3種類 (Mode I~III) の集光ビームプロファイル計測結果を示す。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されていることがわかる。

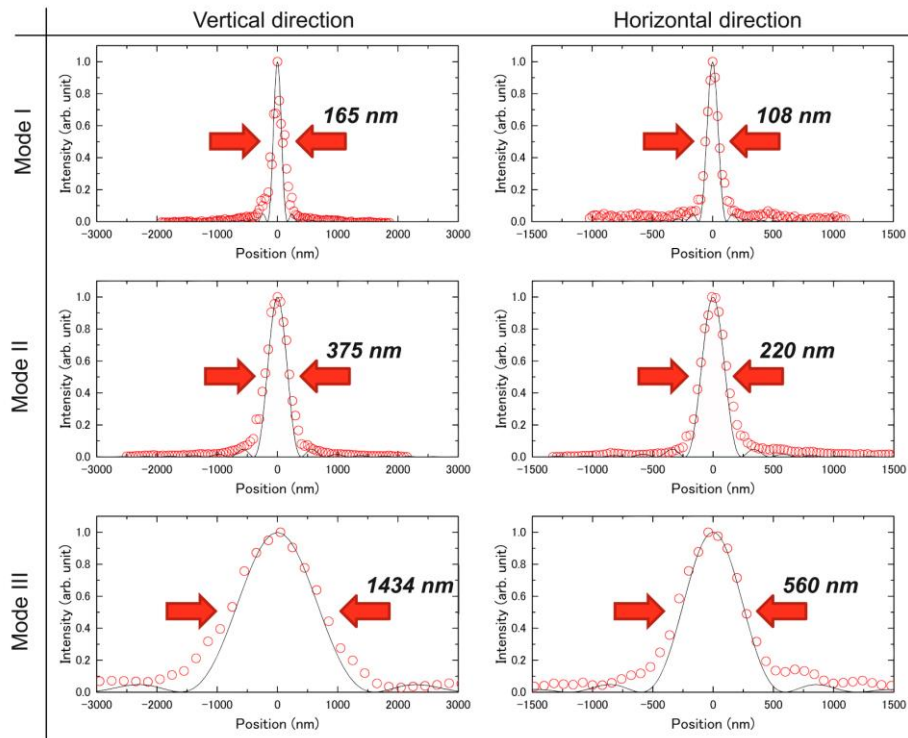


図 5.3.2 集光ビームプロファイルの理想値と計測結果⁵³

また、下流 KB ミラーにおける、全開口を 1 としたときの各 Mode での開口の比率を横軸、集光径の半値幅を縦軸としたときのグラフを図 5.3.3 に示す。いずれも開口比と集光径の半値幅の比率は計算値とよい一致を示している。これらの実験結果より、本光学系は NA を変化させることで、最終焦点位置で所望の集光径に変えることのできる NA 可変型の集光径可変光学系であることが示された。最終焦点位置を移動させることなくナノからミクロンまでの集光径を自在に制御できるため、実験設備のセットアップを変えることなく様々な集光径で試料の分析を行い、短時間で多くの知見を得られることが期待される。

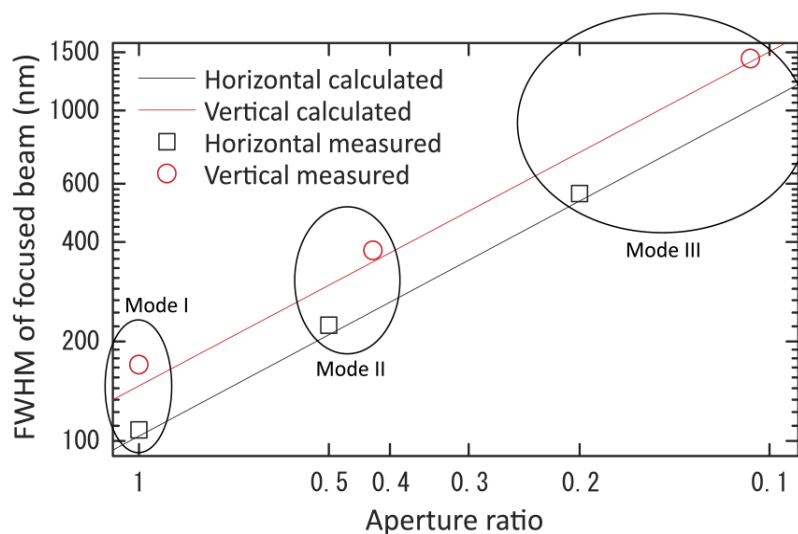


図 5.3.3 最終焦点における集光径(半値幅)と下流 KB の開口比率の関係⁵³

5.4. 結言

本章では, SPring-8 BL29XUL EH3(光源からの距離 45 m)において, これまでに開発した形状可変ミラーおよび集光システムを用いて行った 3 種類の集光実験について述べた.

- (1) 2 枚の形状可変ミラーを用いたアダプティブ KB ミラー集光光学系を構築した. ペンシルビームスキャンの計測結果に基づき各ミラーの形状修正を行い, 理想形状に対して形状誤差 PV2 nm 以下にすることができた.
- (2) KB 集光光学系において形状修正後, ワイヤスキャンにより集光プロファイルを計測した. この結果, 光源サイズが $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ のとき, 集光径(FWHM)は水平方向 65 nm \times 垂直方向 110 nm で, ほぼ回折限界の集光径が得られた. 開発した形状可変ミラーは 1 nm レベルで形状修正することができ, ほぼ回折限界集光が可能な性能を有することを証明した.
- (3) 二段水平一次元集光光学系において中間焦点のペンシルビームスキャンにより上流形状可変ミラーを, 最終焦点のペンシルビームスキャンにより下流形状可変ミラーの変形をそれぞれ調整し, 中間焦点と最終焦点においてワイヤスキャンにより集光プロファイルを計測した. この結果, 光源サイズ $10\ \mu\text{m}$ のとき, 中間焦点の集光径(FWHM)は 230 nm, 最終焦点の集光径(FWHM)は 108 nm となり, 回折限界に近い集光を達成した. 二段集光光学系においてペンシルビームスキャンは有効に機能し, 形状可変ミラーの調整, 回折限界集光が可能であることを確認した.
- (4) 二段水平一次元集光光学系において, 上流形状可変ミラーの形状誤差による波面誤差を下流形状可変ミラーの調整で補正する波面補償実験を行った. 上流形状可変ミラーは PV5 nm 程度の許容以上の形状誤差を含んだ状態とし, 中間焦点での集光径(FWHM)は 180 nm(理想集光径 138 nm)となった. 最終焦点におけるペンシルビームスキャンにもとづき下流形状可変ミラーの調整を行った結果, 最終焦点での集光径(FWHM)は 90 nm となり, 回折限界に近い集光を達成した. 二段光学系において 2 枚の形状可変ミラーで相互に波面誤差を補正する波面補償が有効に機能することを確認した.
- (5) これまでに報告されている 4 枚の形状可変ミラーを用いた二段アダプティブ集光実験について紹介した. この実験では, 本研究の成果と新たに開発された形状可変ミラーの圧電素子ドリフト抑制方法を用いて 3 種類の回折限界可変集光実験に成功している.

6. 総括

本研究の目的は、回折限界条件下で集光径可変なアダプティブ集光光学系を開発することである。アダプティブ集光光学系として二段アダプティブ集光光学系を提案し、それを構築するための高精度変形が可能な形状可変ミラーを開発した。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。

第2章では、本研究において開発を目指す二段アダプティブ集光光学系の概要について述べた。

- (1) 従来の光学素子・光学系による可変集光の問題点を示し、開発するアダプティブ集光光学系のコンセプトを、①数十 nm~数 μm の可変集光、②常に回折限界集光、③焦点位置不変、④光のロスがない、とした。
- (2) 4枚の形状可変ミラーを用いた二段アダプティブ集光光学系を提案し、その可変集光原理を述べた。また、波動光学シミュレーションにより光学系の実現可能性を確認した。
- (3) 形状可変ミラーの制御に用いる波面計測法について、3種類の At-wavelength 計測法の特徴を示し、ペンシルビームスキャンが最適であるとわかった。また、ペンシルビームスキャンの計測原理と、本光学系における必要精度について示した。

第3章では、高精度形状可変ミラーの設計、開発、評価について述べた。

- (1) 形状可変ミラーの駆動に用いる圧電素子の説明と駆動原理、形状可変ミラーの変形原理について述べた。
- (2) 2種類の圧電素子構造について、FEM シミュレーション、干渉計による形状計測、X線反射像を使った形状計測により設計指針の検討を行い、圧電素子一体型がより適した構造であることを確認した。
- (3) 変形目標形状に基づく電極数の検討も行い、高精度変形が可能な形状可変ミラーを設計した。18個の電極を取り付けて最大9周期のサイン波形状を変形可能な形状可変ミラーを製作した。
- (4) 形状可変ミラーの意図しない変形量を PV0.2 nm 以下に抑える支持と電圧印加のためのミラーホルダを設計、製作した。
- (5) 干渉計による形状可変ミラーの形状フィードバック制御を行い、目標とした楕円形状に PV2 nm 以下の精度で変形させることに成功した。また、波動光学シミュレーションによって回折限界集光を達成できることを示した。これはつまり、許容形状誤差以下で形状可変ミラーを変形できることを意味する。

第4章では、SPring-8における集光実験で用いる装置について、要求精度の検討および設計を述べた。

- (1) 波動光学シミュレーションにより許容アライメント誤差を求め、装置設計の指針を得た。

- (2) 設計指針に基づきアクチュエータやステージを選定し、ミラーのアライメントを行うマニピュレータを設計・製作した。また、直角度のアライメントを行うための門構造チルトセンサユニットを設計・製作した。その再現性を評価し、アライメントに十分な性能をもつことを確認した。
- (3) ペンシルビームスキャンを高精度に行うため、ビームモニタを開発した。ピンホールを用いた性能評価を行い、形状可変ミラーの形状誤差を計測するための性能を満たしていることを確認した。
- (4) 焦点位置に設置する、ビームモニタ・サンプルステージを搭載したスキャンユニットを設計・製作した。ペンシルビームスキャンに用いるシンチレータは、ワイヤスキャンを行うサンプルステージにワイヤと同じ平面上に取り付けた。これによりペンシルビームスキャンとワイヤスキャンを迅速に切り替えることを可能とした。

第5章では、SPring-8において、これまでに開発した形状可変ミラーおよび集光システムを用いて行った3種類の集光実験について述べた。

- (1) 2枚の形状可変ミラーを用いたアダプティブKBミラー集光光学系を構築した。ペンシルビームスキャンの計測結果に基づき各ミラーの形状修正を行い、理想形状に対して形状誤差PV2 nm以下にすることができた。
- (2) KB集光光学系において形状修正後、ワイヤスキャンにより集光プロファイルを計測した。この結果、光源サイズが $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ のとき、集光径(FWHM)は水平方向65 nm×垂直方向110 nmで、ほぼ回折限界の集光径が得られた。開発した形状可変ミラーは1 nmレベルで形状修正することができ、ほぼ回折限界集光が可能な性能を有することを証明した。
- (3) 二段水平一次元集光光学系において中間焦点のペンシルビームスキャンにより上流形状可変ミラーを、最終焦点のペンシルビームスキャンにより下流形状可変ミラーの変形をそれぞれ調整し、中間焦点と最終焦点においてワイヤスキャンにより集光プロファイルを計測した。この結果、光源サイズ $10\ \mu\text{m}$ のとき、中間焦点の集光径(FWHM)は230 nm、最終焦点の集光径(FWHM)は108 nmとなり、回折限界に近い集光を達成した。二段集光光学系においてペンシルビームスキャンは有効に機能し、形状可変ミラーの調整、回折限界集光が可能であることを確認した。
- (4) 二段水平一次元集光光学系において、上流形状可変ミラーの形状誤差による波面誤差を下流形状可変ミラーの調整で補正する波面補償実験を行った。上流形状可変ミラーはPV5 nm程度の許容以上の形状誤差を含んだ状態とし、中間焦点での集光径(FWHM)は180 nm(理想集光径138 nm)となった。最終焦点におけるペンシルビームスキャンにもとづき下流形状可変ミラーの調整を行った結果、最終焦点での集光径(FWHM)は90 nmとなり、回折限界に近い集光を達成した。二段光学系において2枚の形状可変ミラーで相互に波面誤差を補正する波面補償が有効に機能することを確認した。

- (5) これまでに報告されている 4 枚の形状可変ミラーを用いた二段アダプティブ集光実験について紹介した。この実験では、本研究の成果と新たに開発された形状可変ミラーの圧電素子ドリフト抑制方法を用いて 3 種類の回折限界可変集光実験に成功している。

開発した二段アダプティブ集光光学系により、常に回折限界条件下で集光径を変更することに世界で初めて成功した。本光学系を用いることで、実験の構成を変更することなく試料に最適な集光径を選択して、X 線分析を行うことが可能となる。

また今後、XFEL(X-ray Free Electron Laser)の光学系として利用することも期待できる。XFEL のビームライン数は、蓄積リングがないという構造上、第 3 世代放射光施設と比べると極めて少ない(SPring-8 では 40 ビームライン以上だが、SACLA では 5 ビームライン)。そのため、導入できる集光光学系の種類は限られており、汎用性が良いとは言えない。たとえば現在 SACLA で利用できる集光 X 線は 50 nm と 1 μm の 2 種類^{54, 55}、LCLS では 100 nm と 1 μm の 2 種類である。その点、アダプティブ集光光学系の導入はこの制限を取り払い、様々な集光径を供与できる可能性がある。

参考文献

1. Ruska, E. Electronic Microscope. (1942).
2. Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, C. & Weibel, E. Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Phys. Rev. Lett.* **49**, 57–61 (1982).
3. Binnig, G. & Quate, C. F. Atomic Force Microscope. *Phys. Rev. Lett.* **56**, 930–933 (1986).
4. 田中信夫. 電子線ナノイメージング 高分解能TEMとSTEMによる可視化. (内田老鶴圃, 2009).
5. Kirkpatrick, P. & Baez, A. V. Formation of optical images by X-rays. *J. Opt. Soc. Am.* **38**, 766–774 (1948).
6. Schroer, C. G., Kurapova, O., Patommel, J., Boye, P. & Feldkamp, J. Hard x-ray nanoprobe based on refractive x-ray lenses. *Appl. Phys. Lett.* **124103**, 87–90 (2005).
7. Huang, X. *et al.* 11 nm hard X-ray focus from a large-aperture multilayer Laue lens. *Sci. Rep.* **3**, 3562 (2013).
8. Suzuki, Y., Takeuchi, A., Takenaka, H. & Okada, I. Fabrication and Performance Test of Fresnel Zone Plate with 35 nm Outermost Zone Width in Hard X-Ray Region. *X-Ray Opt. Instrum.* **2010**, 1–6 (2010).
9. Mimura, H. *et al.* Efficient focusing of hard x rays to 25 nm by a total reflection mirror. *Appl. Phys. Lett.* **90**, 51903 (2007).
10. Mimura, H. *et al.* Breaking the 10 nm barrier in hard-X-ray focusing. *Nat. Phys.* **6**, 122–125 (2010).
11. Matsuyama, S. *et al.* Trace element mapping of a single cell using a hard x-ray nanobeam focused by a Kirkpatrick-Baez mirror system. *X-Ray Spectrom.* **38**, 89–94 (2009).
12. Takahashi, Y. *et al.* High-resolution diffraction microscopy using the plane-wave field of a nearly diffraction limited focused x-ray beam. *Phys. Rev. B* **80**, 54103 (2009).
13. Argonne National Laboratory. Conceptual Design Report Advanced Photon Source Upgrade Project. (2011).
14. ESRF. ESRF Upgrade Programme Phase II (2015 - 2019) White Paper. (2015).
15. RIKEN/JASRI. SPring-8 Upgrade Plan Preliminary Report. (2012).
16. Yabashi, M. *et al.* Optics for coherent X-ray applications. *J. Synchrotron Radiat.* 976–985 (2014). doi:10.1107/S1600577514016415
17. Susini, J., Förstner, G., Zhang, L., Boyer, C. & Ravelet, R. Optimization and theoretical performance of an adaptive x-ray mirror. *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 423 (1992).
18. Susini, J., Marot, G. & Zhang, L. Conceptual design of an adaptive x-ray mirror prototype for the ESRF. *Physics (College Park, Md)*. 489–492 (1992).
19. Susini, J., Baker, R., Krumrey, M., Schwegle, W. & Kvick, A. Adaptive x-ray mirror prototype: First results. *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2048–2052 (1995).

20. Zhang, L., Hustache, R., Hignette, O., Ziegler, E. & Freund, A. Design optimization of a flexural hinge-based bender for X-ray optics. *J. Synchrotron Radiat.* **5**, 804–7 (1998).
21. Eng, P. J., Newville, M., Rivers, M. L. & Sutton, S. R. Dynamically Figured Kirkpatrick Baez X-Ray Micro-Focusing Optics. *Proc. SPIE* **3449**, 145–156 (1998).
22. Howells, M. R. *et al.* Theory and practice of elliptically bent x-ray mirrors. *Opt. Eng.* **39**, 2748–2762 (2000).
23. Hignette, O. *et al.* Submicron focusing of hard X-rays with reflecting surfaces at the ESRF. *Techniques* **4499**, 105–116 (2001).
24. Hignette, O., Cloetens, P., Rostaing, G., Bernard, P. & Morawe, C. Efficient sub 100 nm focusing of hard x rays. *Rev. Sci. Instrum.* 1–5 (2005). doi:10.1063/1.1928191
25. Barrett, R. *et al.* Reflective Optics for Hard X-ray Nanofocusing Applications at the ESRF. *Synchrotron Radiat. News* **29**, 10–15 (2016).
26. Susini, J., Labergerie, D. & Zhang, L. Compact active/adaptive x-ray mirror: Bimorph piezoelectric flexible mirror. *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 2229–2231 (1995).
27. Signorato, R., Hignette, O. & Goulon, J. Multi-segmented piezoelectric mirrors as active / adaptive optics components. *J. Synchrotron Radiat.* 797–800 (1998).
28. Signorato, R. & Ishikawa, T. R & D on third generation multi-segmented piezoelectric bimorph mirror substrates at Spring-8. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res.* **468**, 271–274 (2001).
29. Born, M. & Wolf, E. *光学の原理II*. (東海大学出版会, 2006).
30. Kimura, T., Matsuyama, S., Yamauchi, K. & Nishino, Y. Coherent x-ray zoom condenser lens for diffractive and scanning microscopy. *Opt. Express* **21**, 379–382 (2013).
31. Matsuyama, S. *et al.* Development of piezoelectric adaptive mirror for hard x-ray nanofocusing. *Proc. SPIE* **8503**, 850303 (2012).
32. Fienup, J. R. Phase-retrieval algorithms for a complicated optical system. *Appl. Opt.* **32**, 1737–1746 (1993).
33. Kimura, T. *et al.* Wavefield characterization of nearly diffraction-limited focused hard x-ray beam with size less than 10 nm. *Rev. Sci. Instrum.* **81**, (2010).
34. Yashiro, W., Takeda, Y., Momose, A. & Interferometry, A. C. X. T. Efficiency of capturing a phase image using cone-b. *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 2025–2039 (2008).
35. Matsuyama, S. *et al.* Wavefront measurement for a hard-X-ray nanobeam using single-grating interferometry. *Opt. Express* **20**, 24977 (2012).
36. Hignette, O., Freund, A., Chinchio, E., Synchrotron, E. & Facility, R. INCOHERENT X-RAY MIRROR SURFACE METROLOGY. *SPIE Proc.* **3152**, 188–199 (1997).
37. Sutter, J., Alcock, S. & Sawhney, K. In situ beamline analysis and correction of active optics. *J. Synchrotron Radiat.* **19**, 1–9 (2012).
38. 内野研二 & 石井孝明. マイクロメカトロニクス. (森北出版, 2007).
39. 内野研二. 圧電/電歪アクチュエータ. (森北出版, 1986).

40. 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.
41. 黒木剛司郎. 材料力学. (森北出版, 1999).
42. Nakamori, H. *et al.* Experimental and simulation study of undesirable short-period deformation in piezoelectric deformable x-ray mirrors. *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 53701 (2012).
43. Yamauchi, K. *et al.* Microstitching interferometry for x-ray reflective optics. *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 2894 (2003).
44. Yamauchi, K., Mimura, H., Inagaki, K. & Mori, Y. Figuring with subnanometer-level accuracy by numerically controlled elastic emission machining. *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 4028 (2002).
45. Yamauchi, K. *et al.* Wave-optical evaluation of interference fringes and wavefront phase in a hard-x-ray beam. *Appl. Opt.* **44**, 6927–6932 (2005).
46. Mimura, H., Yumoto, H., Matsuyama, S., Yamamura, K. & Sano, Y. Relative angle determinable stitching interferometry for hard x-ray reflective optics Relative angle determinable stitching interferometry for hard x-ray reflective optics. **45102**, (2005).
47. Matsuyama, S. *et al.* Development of mirror manipulator for hard-x-ray nanofocusing at sub-50-nm level. *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 0–5 (2006).
48. Goto, T. *et al.* Hard X-ray nanofocusing using adaptive focusing optics based on piezoelectric deformable mirrors. *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 43102 (2015).
49. Martin, T. & Koch, A. Recent developments in X-ray imaging with micrometer spatial resolution. *J. Synchrotron Radiat.* **13**, 180–194 (2006).
50. Koch, A., Raven, C., Spanne, P. & Snigirev, A. X-ray imaging with submicrometer resolution employing transparent luminescent screens. *J. Opt. Soc. Am. A* **15**, 1940–1951 (1998).
51. Nakamori, H. *et al.* X-ray nanofocusing using a piezoelectric deformable mirror and at-wavelength metrology methods. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* **710**, 93–97 (2013).
52. Goto, T. *et al.* Development of a one-dimensional two-stage focusing system with two deformable mirrors. *Proc. SPIE* **9208**, 920802 (2014).
53. Matsuyama, S. *et al.* Nearly diffraction-limited X-ray focusing with variable-numerical-aperture focusing optical system based on four deformable mirrors. *Sci. Rep.* 4–11 (2016).
54. Mimura, H. *et al.* Generation of 1020 W cm⁻² hard X-ray laser pulses with two-stage reflective focusing system. *Nat. Commun.* **5**, 3539 (2014).
55. Yumoto, H. *et al.* Focusing of X-ray free-electron laser pulses with reflective optics. *Nat. Photonics* **7**, 43–47 (2012).

謝辞

本研究を遂行するに当たり、終始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、松山智至助教に深甚の謝意を表します。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、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、森田瑞穂教授、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・応用物理学専攻および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 理論支援チーム 玉作賢治専任研究員、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。

また、日頃より本研究の遂行に労を厭わずご協力いただいた横山光氏、今井将太氏、後藤拓実氏、小手川竜郎氏、林宏樹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、日頃の事務的なご支援を頂きました橘弓子秘書、久保英里子秘書、寺井嘉奈子秘書に心より感謝いたします。

形状可変ミラーの加工、KB ミラーマニピュレータの開発において数々のご協力を頂いた株式会社ジェイテックコーポレーション 津村尚史社長、岡田浩巳部長、青野真也次長、小野貴弘次長に深く感謝いたします。また、形状可変ミラーの開発において数々のご協力をいただきました夏目光学株式会社、株式会社富士セラミックス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」、および日本学術振興会科学研究費補助金(特別研究員奨励費 DC2)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。