

修士学位論文

中間赤外線イメージスライサ搭載型分光器MIRSISの スライサ光学系システムの評価と光学調整

2009年度
(平成21年度)

茨城大学大学院理工学研究科

自然機能科学専攻

08NM225Y

富田 皓一

ABSTRACT

我々は $10\mu\text{m}$ 帯のイメージスライサ搭載型分光観測装置 MIRSIS の開発を行っている。MIRSIS はスライシングミラーという、僅かに角度の異なる 5 枚の反射スリットの集合体を使用して、 $22''\times 4.5''$ (IRTF 搭載時) の視野の面分光を可能にし、これまでの装置に比べて効率のよい観測を行うことができる。

光学系は役割ごとに前光学系、撮像系、スライサ系、分光系に分けることができる (Okamoto et al. SPIE 2006)。前光学系は観測光が初めに通過する部分で、迷光を除去するための cold stop と観測光を撮像系とイメージスライサ分光系のどちらに導入するかを切り替える切替鏡が設置されている。撮像系は観測天体の撮像を行うためのもので、分光用天体の捕捉も目的としている。スライサ系はスライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーで構成されていて、観測光はスライシングミラー上で結像している。スライシングミラーは視野を 5 つに分割しそれぞれを異なる方向に反射させ、これを 5 つの球面鏡からなる瞳ミラーで擬スリットミラー上に像を一行に並べ直して再結像させる。そして、擬スリットミラーで一行に並べ直した観測光の方向を揃えて分光系に入射させる。このようにすることで、あたかも 1 つのスリットを通過した光線のように扱うことができる。分光系に入射した観測光は分散素子によって分光され、検出器でスペクトルデータを取得する。

スライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーの単体評価はすでにされている (Mitui et al. SPIE 2008)。本論文ではこれらをスライサシステムとして組み立てた状態での光学調整と性能評価を行った。スライシングミラーは厚さが $300\mu\text{m}$ のアルミ板で、断面の長さが 14mm (実際の使用範囲は 7.5mm) の範囲を精密切削して製作され、MIRSIS では 5 枚 (A~E とする) 重ねて使用する。瞳ミラーは $30.0\text{mm}\times 48.50\text{mm}$ のアルミブロックの表面を精密切削して製作され、5 つの異なる球面鏡を形成する (各瞳ミラーの大きさは約 $9.7\text{mm}\times 30\text{mm}$)。擬スリットミラーは $6\text{mm}\times 7\text{mm}\times 2\text{mm}$ のガラスに金蒸着をした平面鏡を 5 個使用し、各々の位置、角度が決められたマウントに固定される。これらのミラーはアルミで製作されたベースプレート上に位置決めピンで配置される。スライサ系の光学調整は光学定盤にベースプレートを取り付けた状態で行う。具体的には、まずスケール上で光線が一行に並ばず、スケール短辺方向の上下にズレていたため、一行に並ぶようスライシングミラーの選定を行った。スライシングミラー選定の結果、スケール上で光線が一行に並ぶようになった。スケール上で像が短辺方向にズレた原因は、スライシングミラーの保存方法もしくは、金蒸着時の熱膨張による反りとみられること、および擬スリットミラーの設置精度によるものであることがわかった。その後、光学設計値から各スライスミラーごとに特徴的な入射光線 (スライスミラーの中心、両端に入射する光線計 9 本) を選び、これらを再現するため光学定盤上での光線通過位置に直径 1.0mm のピンホールを 225mm 離して 2ヶ所に設置した。そして、この 2 つのピンホールを通過するようにレーザーを入射させ、擬スリットミラーからの出射光の位置を間隔が 2.0mm 刻みのスケールで読み取ると (測定値)。測定値と光学設計値の出射光位置を比較してズレが最小になるように瞳ミラーと擬スリットミラーの配置を調整した。光学調整の結果、スケールの長辺方向はスライシングミラー A,C,E を反射する光線について瞳ミラーの目標設置角度精度 0.04° 内に収めることが出来た。スケールの短辺方向はスライシングミラー C を反射する光線のみ瞳ミラーの目標設置角度精度 0.04° 内に収めることができた。スケールの長辺方向、短辺方向で目標精度内に収まらない原因として、擬スリットミラーの設置精度に問題があることが分かった。ただし、これらのズレを考慮しても実用には問題がないことも分かった。

MIRSIS 全体の光学調整は、簡易 3 次元測定器を用いてミラーホルダに取り付けた位置マーカ (真球) を基準に各ミラー面を相対的に扱う手法で行う。これは、佐藤圭悟修士論文で開発された。この測定を茨城大学で行うために簡易 3 次元測定器の立ち上げ及び、相対位置測定を行った。立ち上げた簡易 3 次元測定器を使用して真球と平面鏡のミラー面向き、曲面鏡のミラー面向きと位置の相対位置を測定することができた。この情報をもとに、MIRSIS 全体の光学調整を行うことができる。

目 次

1	イントロダクション	1
1.1	中間赤外線観測	1
1.2	赤外線観測装置	2
1.3	データキューブ	3
1.4	イメージスライサ型分光器	4
1.5	次世代型中間赤外線分光装置 MIRSIS	5
2	MIRSIS 光学系	8
2.1	概要	8
2.2	前光学系	8
2.3	撮像系	10
2.4	スライサ系	11
2.5	分光系	12
2.6	光学部品の詳細	14
2.6.1	反射鏡	14
2.6.2	スライサ系ミラー	16
2.6.3	レンズ	20
3	スライサ系の光学調整と性能評価	21
3.1	目的	21
3.2	光学調整・光学性能評価の方針	21
3.3	再現する入射光	22
3.4	測定装置	23
3.4.1	ピンホール・スケールの設置	26
3.4.2	レーザー照射装置	32
3.5	使用するスライシングミラーの選定	37
3.5.1	目的	37
3.5.2	像のずれの考察	37
3.5.3	スライシングミラー選定測定の方法	41
3.5.4	スライシングミラー選定測定の結果	42
3.6	光学調整手法	44
3.6.1	各ステージの相関関係	44
3.6.2	入射光座標を様々に変えたときの座標測定	49
3.6.3	測定系設置誤差補正量の決定と入射光座標の決定	50
3.6.4	瞳ミラーと擬スリットミラーの調整	52
3.6.5	擬スリットミラーの調整	59
3.7	光学調整と測定結果	61
4	MIRSIS 光学調整	71
4.1	目的	71
4.2	光学調整の原理	71
4.3	簡易 3 次元測定器	72
4.4	簡易 3 次元測定器の駆動と座標取得	77
4.5	解析手法	78
4.5.1	球面フィッティング	79
4.5.2	平面フィッティング	79
4.5.3	曲面鏡フィッティング	80
4.5.4	平面鏡と真球の相対位置取得	82

4.5.5	曲面鏡と真球の相対位置取得	84
4.6	ミラーと真球の相対位置取得の結果	86
4.6.1	平面鏡と真球の相対位置取得測定	86
4.6.2	曲面鏡と真球の相対位置取得測定	90
5	まとめと今後の展望	94

目 次

1.1	大気の窓	1
1.2	スリット分光型の赤外線観測装置 (佐藤圭悟修士論文より引用)	2
1.3	観測視野の様子 (左) とスリット上での様子 (右)(佐藤圭悟修士論文より引用)	2
1.4	データキューブ	3
1.5	観測視野の様子 (左) とスリット上での様子 (右)	3
1.6	イメージスライサの原理	4
1.7	スリット型の分光 (右) とイメージスライス型の分光 (左) で得られるデータキューブ	5
1.8	MIRSIS 全体図 (入射光側)	6
1.9	MIRSIS 全体図 (入射光裏面)	6
2.1	前光学系光学設計図 (望遠鏡の入射光が最初に通過する面)	8
2.2	前光学系光学設計図 (図 2.1 で示す光学定板 1 の裏面)	9
2.3	回転機構の間略図 (佐藤圭悟修士論文より引用)	9
2.4	MIRSIS で使用する cold stop	10
2.5	撮像系光学設計図	11
2.6	スライサ系光学設計図	12
2.7	分校系光学設計図 (スライサ系側)	13
2.8	分校系光学設計図 (分光用検出器側)	13
2.9	曲面鏡の作成法 (佐藤圭悟修士論文より引用)	14
2.10	スペーサーの模式図 (佐藤圭悟修士論文より引用)	15
2.11	スライシングミラーをベースマウントに取り付けた様子	16
2.12	5 枚のスライシングミラーの名称	16
2.13	アルミ枠とカバーの設置	17
2.14	製作された瞳ミラー	17
2.15	擬スリットミラー設置マウント	18
2.16	擬スリットミラー押さえの模式図	18
2.17	擬スリットミラーの固定	19
2.18	瞳ミラーのプラットホーム上での固定	19
3.1	擬スリットミラーの調整幅	21
3.2	FM5 上で見たときのスライシングミラー C に入射 (緑) する光線 (赤) の光学設計図	22
3.3	再現する入射光の模式図	23
3.4	実際の測定系	23
3.5	光学設計系の座標軸	24
3.6	ベースプレートのシム板を用いた設置の模式図	24
3.7	測定系の光路	25
3.8	製作したピンホール・スケール設置治具	26
3.9	ピンホール・スケール設置治具取り付けの模式図	27
3.10	ピンホール・スケール設置治具 1,2 の光学定盤への設置	27
3.11	製作したピンホール板	28
3.12	ピンホールの番号	29
3.13	製作したスケール 2	31
3.14	ピンホール・スケール設置治具の位置決めピン位置	32
3.15	実際のレーザー照射装置 (左) とレーザー照射装置の模式図 (右)	32
3.16	X 軸ステージ	33
3.17	Z 軸ステージ	33
3.18	実際の回転ステージ (左) と回転方向と基準の模式図 (右)	34
3.19	実際の回転ステージ (左) と回転方向と基準の模式図 (右)	35
3.20	Z 軸ステージ上に固定したレーザー	35

3.21 レーザーホルダを用いたレーザー固定の模式図	36
3.22 レーザー Z 軸ステージ設置の模式図	36
3.23 スライディングミラーに入射させるレーザーの模式図	37
3.24 スケール 1 上での像	37
3.25 スライディングミラーの傾きと反りの模式図	38
3.26 スライディングミラーが傾いているときの光線の挙動	38
3.27 スライディングミラー断面の切削によるずれ (Mitsui et al. 2008 より引用)	39
3.28 スライディングミラーの保管	40
3.29 擬スリットミラーの押え方による傾き	40
3.30 ピンホールを外したときの測定系	41
3.31 スケール上での像 (スライディングミラー OLD)	42
3.32 スケール上での像 (スライディングミラー NEW)	42
3.33 スライディングミラー選定後のスケール上での像	43
3.34 スライディングミラーに均等なレーザー光が当たったときの回折像 (上) と片側にはみださないときの回折像 (下)	45
3.35 回折像あり (左) と回折像なし (右)	45
3.36 回折像が確認できた X' 座標と θ' 座標をプロットしたグラフ	46
3.37 回折像を確認できた X' 座標と Z' 座標をプロットしたグラフ	47
3.38 回折像が確認できた Z' 座標と θ' 座標をプロットしたグラフ	48
3.39 スケール上で測定できる光線例	49
3.40 瞳ミラーに使用するシム板とシムリングの設置場所	52
3.41 使用するシム板とシムリングの例	53
3.42 瞳ミラーに使用するシム板とシムリング (デフォルト)	54
3.43 瞳ミラーを X_h 軸の正の方向に動かした場合の各ミラーとスケール上における光線の挙動	55
3.44 瞳ミラーを X_h 軸の負の方向に動かした場合の各ミラーとスケール上における光線の挙動	56
3.45 瞳ミラーを Z_h 軸を回転軸として時計回りに回転させた場合の各ミラーとスケール上における光線の挙動	57
3.46 瞳ミラーを Z_h 軸を回転軸として反時計回りに回転させた場合の各ミラーとスケール上における光線の挙動	58
3.47 瞳ミラーの下にシムリングやシム板をはさんだ場合の各ミラーとスケール上における光線の挙動	59
3.48 擬スリットミラーの反射位置	60
3.49 瞳ミラーに使用するシム板とシムリング (光学調整後)	61
3.50 Z_{S1} 軸方向のずれの許容	66
4.1 真球を 3 つ取り付けた様子 (前光学系カメラミラー 2)	71
4.2 簡易 3 次元測定器	72
4.3 簡易 3 次元測定器と PC の接続	73
4.4 レーザー測距計 (Y 軸) の測定の様子	74
4.5 光学机に X 軸、Z 軸を設置した様子	75
4.6 スクリーンにレーザーを照射した様子 (30cm 離れているとき)	76
4.7 スクリーンにレーザーを照射した様子 (140cm 離れているとき)	76
4.8 プログラム「3dm3.pl」の操作画面	77
4.9 ディレクトリ構造	78
4.10 spiral モードのスキンの様子 (佐藤圭悟修士論文より引用)	78
4.11 (4.9) 式で考えている状況 (図 2.9 参考)	80
4.12 ミラー面の測定座標点のみから考えられるミラーの設置状態と Z' 軸の状態 (佐藤圭悟修士論文より引用)	81
4.13 Y'' 軸の設定	82
4.14 四隅の測定の模式図	83
4.15 曲面鏡と真球の相対位置取得の模式図	84
4.16 固定平面鏡 (FM2) の真球位置と番号	86
4.17 固定平面鏡 (FM3) の真球位置と番号	87

4.18 固定平面鏡 (FM5) の真球位置と番号	87
4.19 固定平面鏡 (FM6) の真球位置と番号	88
4.20 固定平面鏡 (FMI) の真球位置と番号	89
4.21 Grating の真球位置と番号	89
4.22 前光学系カメラミラー 1 の真球位置と番号	90
4.23 前光学系カメラミラー 2 の真球位置と番号	91
4.24 分校系コリメータミラー 2 のマウント面	91
4.25 分光系コリメータミラー 2 の真球位置と番号	92
4.26 分光カメラトロイダル鏡の真球位置と番号	93

表 目 次

1.1	MIRSIS 仕様 (Okamoto et al.2006 引用)	7
2.1	平面鏡データ (佐藤圭悟修士論文より引用)	14
2.2	曲面鏡データ (佐藤圭悟修士論文より引用)	15
2.3	曲面鏡高さの光学設計値と実測値、及びホルダと曲面鏡の間にはさむスペーサー量	15
2.4	前光学系コリメータデータ	20
2.5	撮像像カメラレンズデータ	20
3.1	ピンホールの製作に使用した XYZ 系の座標	30
3.2	スケール 1 上の像の座標 (スライシングミラー OLD)	42
3.3	スケール 1 上の像の座標 (スライシングミラー NEW)	43
3.4	選定したスライシングミラー	43
3.5	スケール 1 上の像の座標 (スライシングミラー選定・設置後)	43
3.6	測定系の設置誤差 (θ' 方向)	51
3.7	X_{S1} 軸方向の測定結果	62
3.8	X_{S1} 軸方向位置のずれと角度のずれ	63
3.9	Z_{S1} 軸方向の測定結果	64
3.10	Z_{S1} 軸方向の位置のずれと角度のずれ	65
3.11	X_{S2} 軸方向の測定結果	67
3.12	X_{S2} 軸方向位置のずれと角度のずれ	68
3.13	Z_{S2} 軸方向の測定結果	69
3.14	Z_{S2} 軸方向位置のずれと角度のずれ	70
4.1	X 軸スライドガイドと Z 軸スライドガイドのスペック	74
4.2	FM2 のフィッティング結果	86
4.3	FM3 のフィッティング結果	86
4.4	FM5 のフィッティング結果	87
4.5	FM6 のフィッティング結果	88
4.6	FMI のフィッティング結果	88
4.7	Grating のフィッティング結果	89
4.8	前光学系カメラミラー 1 のフィッティング結果	90
4.9	前光学系カメラミラー 2 のフィッティング結果	91
4.10	分光系コリメータミラー 2 のフィッティング結果	92
4.11	分光カメラトロイダル鏡のフィッティング結果	92

1 イントロダクション

1.1 中間赤外線観測

赤外線は $1\mu\text{m}$ から $200\mu\text{m}$ までの電磁波で、特に $1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ までを近赤外線、 $3\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ までを中間赤外線、 $30\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ までを遠赤外線という。本論文では中間赤外線で天文観測を行うための観測装置について述べる。

中間赤外線は 300K 程度の物体の熱放射のピーク波長である。ウィーンの変位則より、絶対温度 $T[\text{K}]$ の物体が黒体放射をしていると仮定したとき、放射のピーク波長 λ_{max} は以下のように書くことができる。

$$\lambda_{\text{max}} \doteq \frac{2900}{T} [\mu\text{m}] \quad (1.1)$$

ウィーンの変位則から、 300K (常温) 程度の物体の熱放射のピーク波長は $10\mu\text{m}$ 程度と求めることができる。また、赤外線は可視光に比べダストによる減光が小さく、星間空間における透過率が良い。そのため、内側のダストが中心星によって温められ数百 K 程まで上昇する原始惑星系円盤や、中心星の周りをダストや分子雲が覆っている星形成領域の観測に適している。地上で中間赤外線の観測を行うとき、 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 、 $16 \sim 25\mu\text{m}$ 、の波長帯で観測を行う。これは、他の波長帯に比べ透過率の高い“大気の窓”が存在しているためである。(図 1.1 参照)

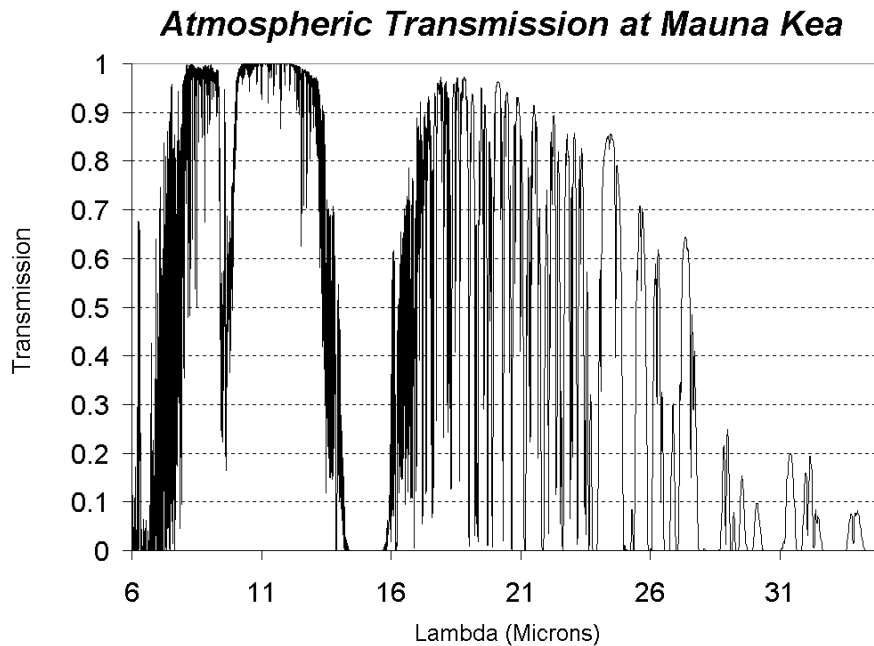


図 1.1: 大気の窓

(<http://www.iac.es/project/CCam/Atmosphere.html> より引用)

図 1.1 は縦軸に透過率、横軸に波長をとっている。宇宙望遠鏡で観測を行うと、大気の窓の影響を無視することができるが、ロケットによる打ち上げが必要なため地上望遠鏡に比べコストがかかる。また、望遠鏡をロケットで打ち上げるので大きさにも制限がある。そのため、望遠鏡を巨大化することができないというデメリットもある。星間空間の透過率は、赤外線よりも電波領域の方が高い。しかし、空間分解能の点では赤外線の方が電波より高分解能を実現しやすい。空間分解能とは、観測対象をどれだけ細かく見ることができるかを表した指標で観測波長 $\lambda[\text{m}]$ と望遠鏡の口径 $D[\text{m}]$ から (1.2) 式のように表すことができる。

$$(\text{空間分解能}) = 1.22 \frac{\lambda}{D} [\text{rad}] \quad (1.2)$$

(1.2) 式で得られる値が小さい方が、観測対象をより細かく見ることができている。つまり、短い波長で、口径が大きい望遠鏡を使用することで空間分解能は上昇する。

1.2 赤外線観測装置

次に、実際の観測に用いられる赤外線観測装置について述べる。一般的に用いられている赤外線分光観測装置の構造として、スリット分光型の例を図 1.2 示す。

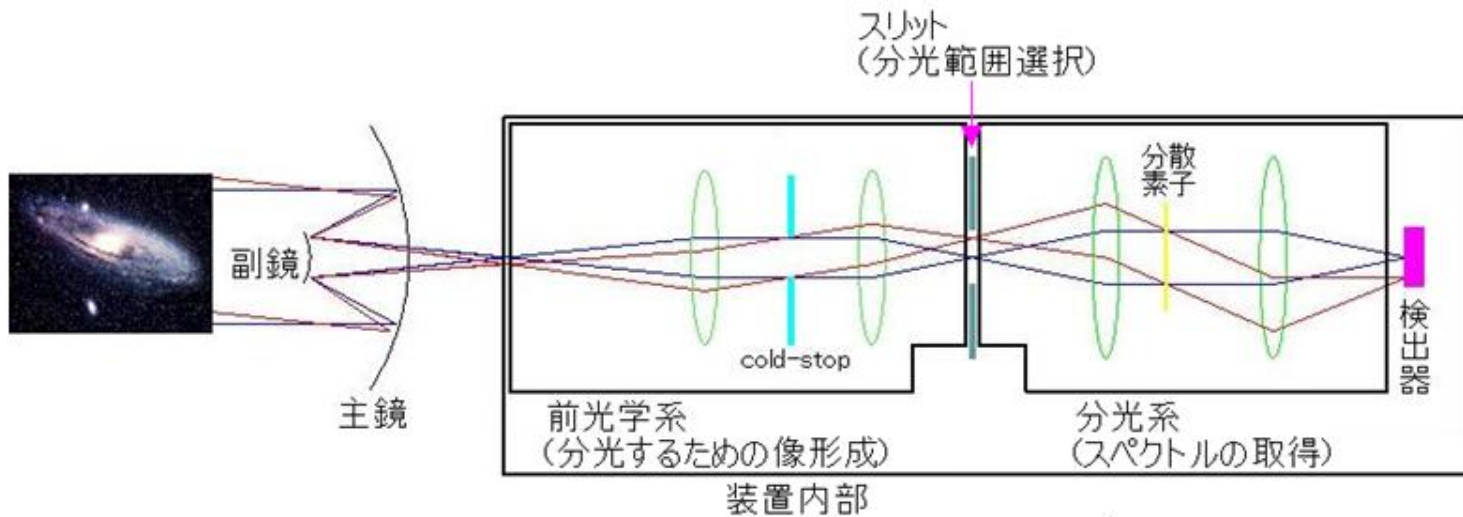


図 1.2: スリット分光型の赤外線観測装置 (佐藤圭悟修士論文より引用)

図 1.2 において、青と赤の線は天体からの光である。青は光軸に平行で望遠鏡に入射してくる光線。赤は僅かに異なる方向から望遠鏡に入射する光線である。スリット型観測装置の内部を役割で大きく分けると、前光学系と分光系の 2 つに分けることができる。スリット分光の場合、前光学系と分光系の間にスリットが設置される。前光学系には cold-stop と呼ばれる機構がある。cold-stop は、望遠鏡の副鏡を反射せずに観測装置内部に入射してきた光線（迷光）を以降の光学系に入射させないように遮っている。この、副鏡に反射せずに装置内に入射してくる光線で最も強い光源は副鏡の支持機構（スパイダー）である。スパイダーは常温の物体なので、ウィーンの変位則から $10\mu\text{m}$ 付近にピークを持つ熱放射をしていて、赤外線観測において非常に放射率の高い物体である。これは観測光ではない不必要な光なので、検出器から見えないようにしなければいけない。副鏡に反射した光のみを観測することを赤外線望遠鏡においては、「副鏡を瞳にする」と言う。また、cold-stop には副鏡の像が形成される。これは、図で、副鏡の端に当たっている赤と青の光線があたかも副鏡から放射された光線と考えたとき、最初のレンズによって cold-stop の端に結像していることから確認できる。よって、副鏡を反射せずに装置内部に入射してくる余分な背景光（迷光）を効率的に排除することができる。背景光の排除は最終的に得られる観測データの劣化を防ぐ。そのため、観測装置の性能向上に重要な部分である。

cold-stop を通過した観測光は一度結像する。この結像する位置でスリットを当て、観測対象の視野の中から分光する範囲（スリットの開口を通過させる観測光）を決める。スリット上の観測光の様子を図 1.3 に示す。



図 1.3: 観測視野の様子 (左) とスリット上での様子 (右) (佐藤圭悟修士論文より引用)

スリットを通過した光は分光系に入射する。分光系に入射した光は分散素子 (回折格子など) で波長ごとに分散をかけられる。波長分散はスリットに垂直な方向に行われる。そして、分散された光は後ろの光学系により検出器上で結像する。

スリット分光型の観測装置ではスリットで観測範囲を決めている。そのため、スリットを通過できなかった視野を観測することができない。スリット分光器で観測視野全体のデータを取得するためには、スリットのあてる位置を少しずつ変えながら観測するスリットスキャンを行う必要がある。

1.3 データキューブ

観測によって得られるスペクトルデータを扱う際、データキューブ (図 1.4) を用いるとわかりやすい。データキューブとは、観測範囲の視野の縦と横を X,Y の 2 軸とし、更にその各点において波長の 1 軸を加えた直方体である。これにより、格納されたデータを可視的に見ることができる。

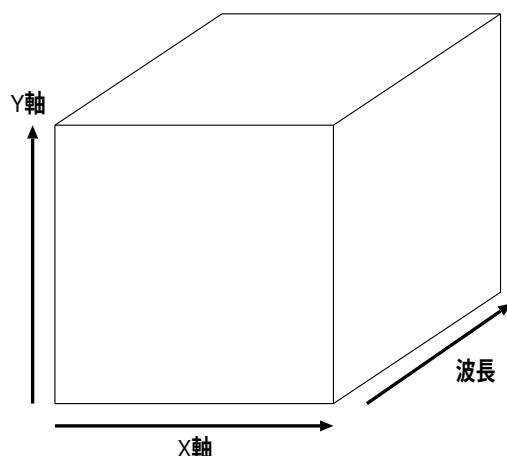


図 1.4: データキューブ

例えば、前項で扱ったスリット型分光器で、スリットが図 1.2 のようにあたっているとき、データキューブで観測データがある部分は図 1.5 になる。

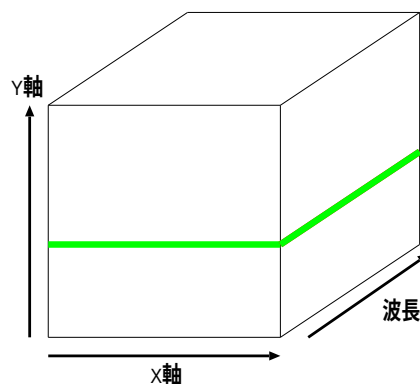
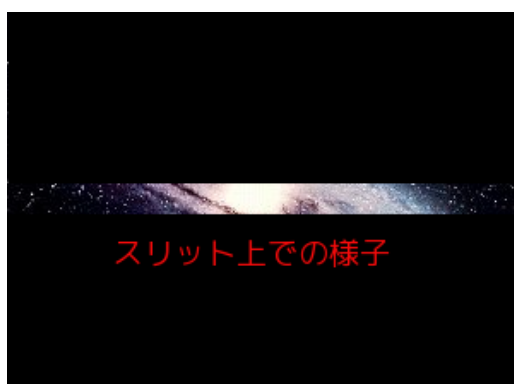


図 1.5: 観測視野の様子 (左) とスリット上での様子 (右)

図 1.5 において緑で示したところが天体からのデータが格納されている部分である。スリット型分光器はスリットで分光する範囲を決め、その範囲の全ての光を通す。そのため、全波長域のデータを取得することができる。データキューブ上では X,Y 平面においてスリットで決めた範囲の全波長データが取得できていることがわかる。逆に、スリットで遮った部分は緑で示した以外の部分で、この部分のデータを取得することはできない。

1.4 イメージスライサ型分光器

スリット型分光観測装置の場合、前項でも示したように、スリットを通過できなかった光は観測されずに失われてしまうので、データキューブ上には乗らなかった。このようなスリット型分光観測装置で原始惑星系円盤や星形成領域などの広がった天体全体を観測するためには、スリットスキャン観測を行う必要があり、十分な観測データを取得しようとする、望遠鏡を長時間使用する必要がある。天体観測に用いられる口径 8m を越える大型望遠鏡は世界に数台しかなく、簡単に製作できない。しかしながら、大型望遠鏡で観測を望む観測者は多い。そのため、観測者はなるべく短時間で観測目標を達成する必要がある。また、現在口径 30m の超大型望遠鏡 TMT(Thirty Meter Telescope) の建設が計画されている。完成すれば、さらに数の限られた超大型望遠鏡となるので、観測効率の向上は必要不可欠である。では、観測効率を向上させるためにはどのような原理の分光装置を開発すべきなのだろうか。例えば面分光器や多面体分光器が考えられる。このうち面分光器の 1 つとして考えられるのがイメージスライサ型の分光器である。

イメージスライサは次世代型の分光観測装置用に考えられている技術である。先に述べたスリット型分光器との最大の違いは、図 1.2 でスリットが置かれていた位置にスライシングミラーが置かれることである。スライシングミラーを用いた観測装置のしくみを図 1.6 に示す。

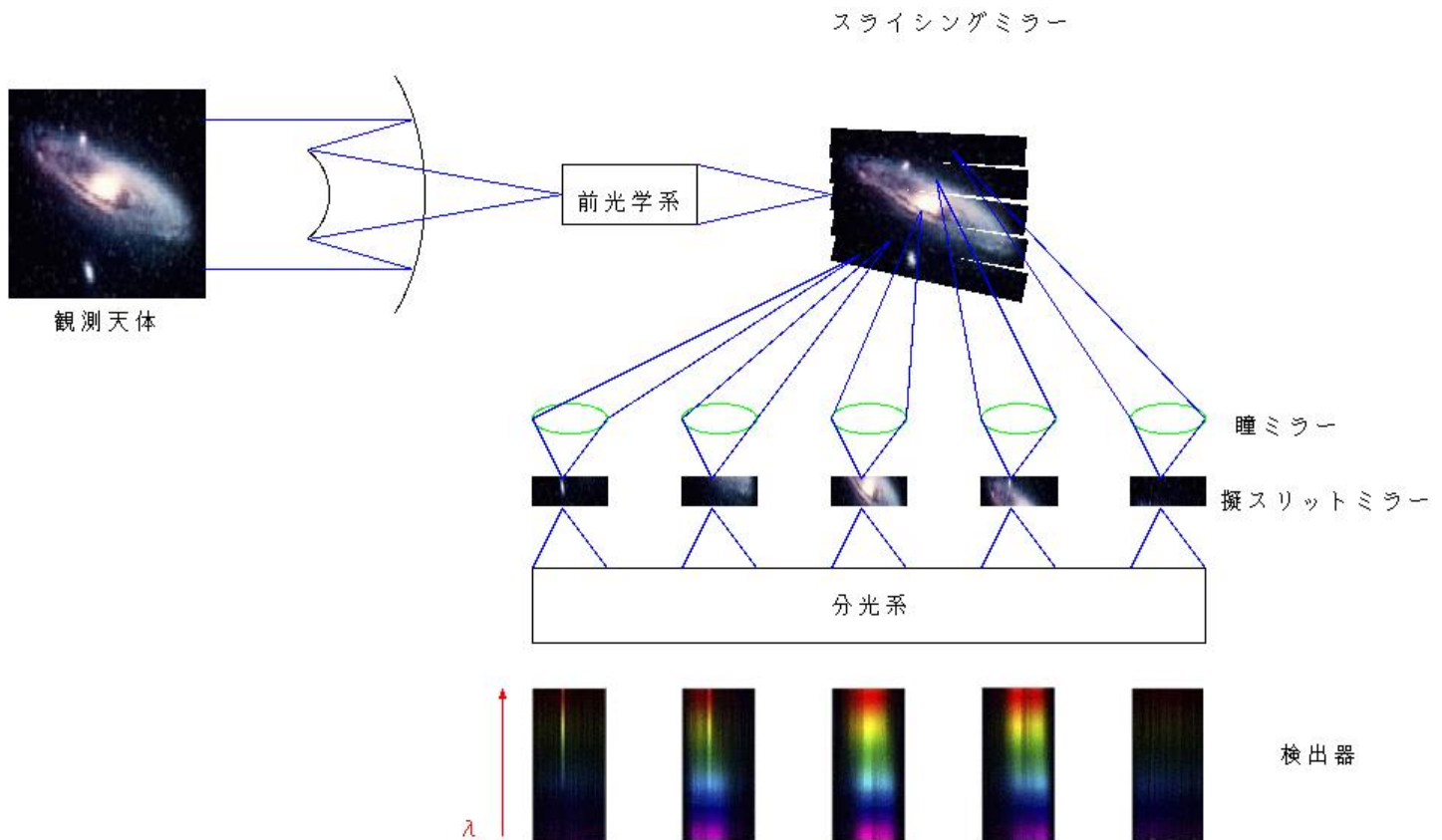


図 1.6: イメージスライサの原理

スライシングミラーとは、僅かに角度の違う反射スリットの集合体のことである。装置内に入射した天体からの光は、前光学系によってスライシングミラー上に結像するように光学設計される。スライシングミラー面上で結像した光はスライシングミラーの傾きによって、異なる方向に反射する。これにより、視野全体を分割することができる。反射した各々の光は瞳ミラーによって、擬スリットミラー上で再び結像する。瞳ミラーはスライシングミラーから擬スリットミラーまでの光路で瞳となる位置に置かれる。これは、イメージスライサを小型化するための工夫で、この型をアドバンストイメージスライサとよぶ (Content et al. 1998) そして、スライシングミラーで分割された視野を擬スリットミラー上に一列に並べ直して結像させる。擬スリットミラーは瞳ミラーからの光の方向を揃えて、後ろの分光系に入射させるための反射鏡の集合体である。擬スリットミラーから反射された光は、あたかもスリット分光のスリットを通過した後のような光に見える。このため、擬スリットミラーから後ろの分光系は従来のスリット型分光装置と同じで、入射した光は、分散素子によって分光されて、検出器上で結像し、スペクトルデータを取得する。

1.2 節で扱ったスリット型分光器はスリットを通過した光のみ分光することができる。これに対し、イメージスライス型の分光器はある範囲の視野全体の分光をすることができる。これを面分光と呼ぶ。全視野の各点において全波長データが取得可能になるので、従来のスリット型分光器に比べ観測効率が飛躍的に上昇する。これをデータキューブで示すと、図 1.7 のようになる。図 1.7 において、緑で示したところが天体からのデータが格納されている部分である。スリット型の分光 (右) はスリットを通過した光のみを分光するので、視野の一部しかデータが得られていない。それに対し、イメージスライス型の分光 (左) は視野全体を同時に分光することができる。

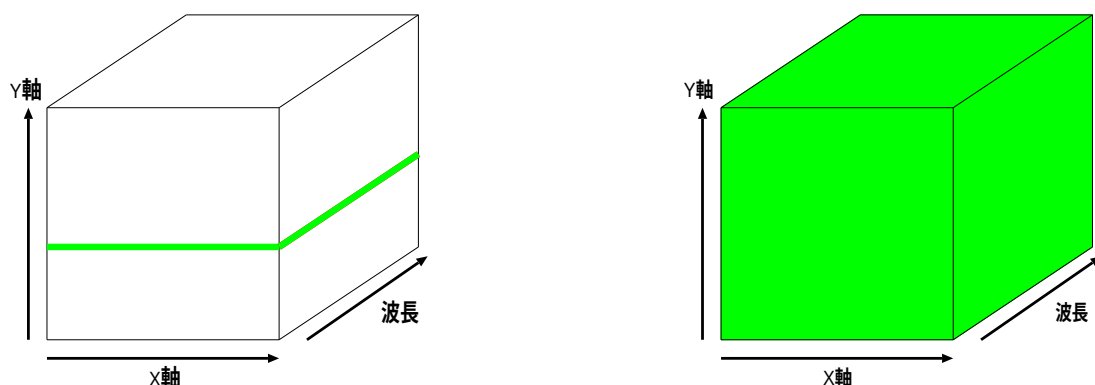


図 1.7: スリット型の分光 (右) とイメージスライス型の分光 (左) で得られるデータキューブ

1.5 次世代型中間赤外線分光装置 MIRSIS

ここまで、イメージスライス型の分光器の必要性を説明してきた。現在、我々はイメージスライス型の分光器を搭載した観測装置のプロトタイプ MIRSIS (Mid InfraRed Spectrometer with an Image Slicer) の開発を茨城大学、宇宙航空研究開発機構、国立天文台、東京大学の共同開発で進めている。開発を通して、イメージスライス型分光器の開発に必要な要素技術を確認し、この装置を用いた試験観測によって観測とデータ解析の手法を確認するのが目的である。MIRSIS は $8\mu\text{m}$ ~ $13.5\mu\text{m}$ の中間赤外線における撮像とイメージスライス型の面分光を行うことができる。装置完成後は広島の 1.5m かなた望遠鏡、ハワイ・マウナケア山の 3.2m IRTF 望遠鏡、8.2m すばる望遠鏡での試験観測が予定されている。

図 1.8、図 1.9 に MIRSIS のデューワー内部の概略を表した図である。最も外側の紫色で示したのが光学系を収めるデューワーの枠で、外壁を取り付ける。MIRSIS の大きさは $65\text{cm} \times 51\text{cm} \times 32\text{cm}$ である。光線は入射窓より装置内部に入射する。入射した光線は内部のミラーで反射され、検出器で観測データを取得する。光線は赤、黄、オレンジ、ピンクで表されていて、各々が折れ曲がっているところにミラーが設置してある。光学系は T 字型に組まれた 2 枚の光学定盤に立体的に配置される。光学系の詳しい説明は 2 章で述べる。また、この装置の仕様を表 1.1 に示す。

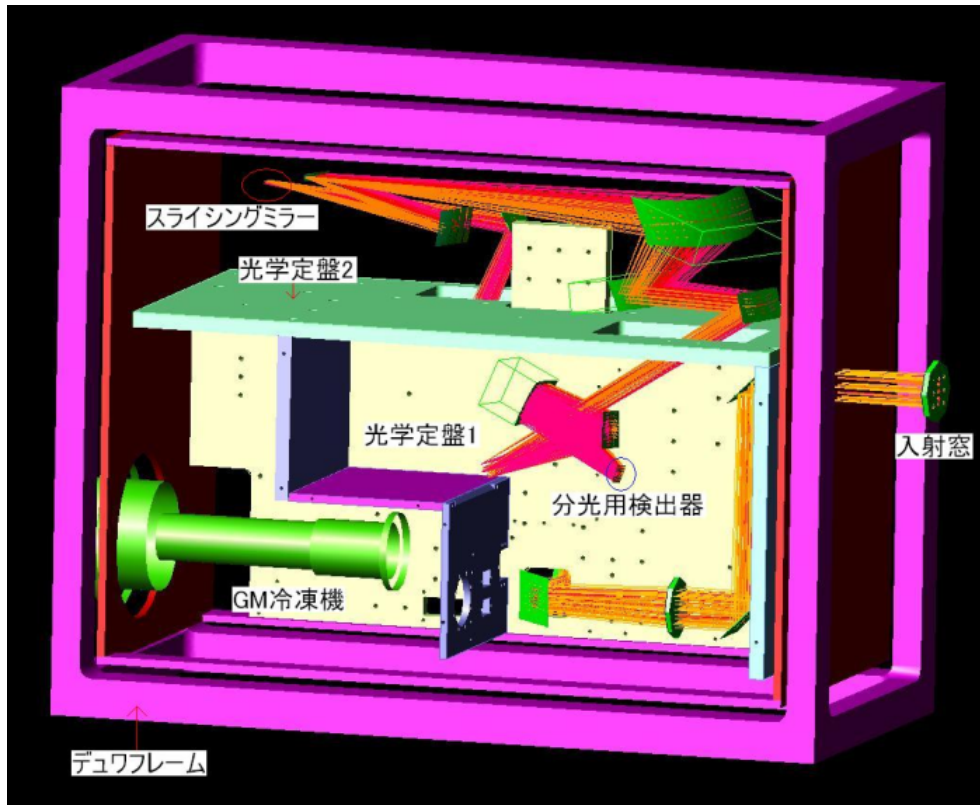


図 1.8: MIRSIS 全体図 (入射光側)

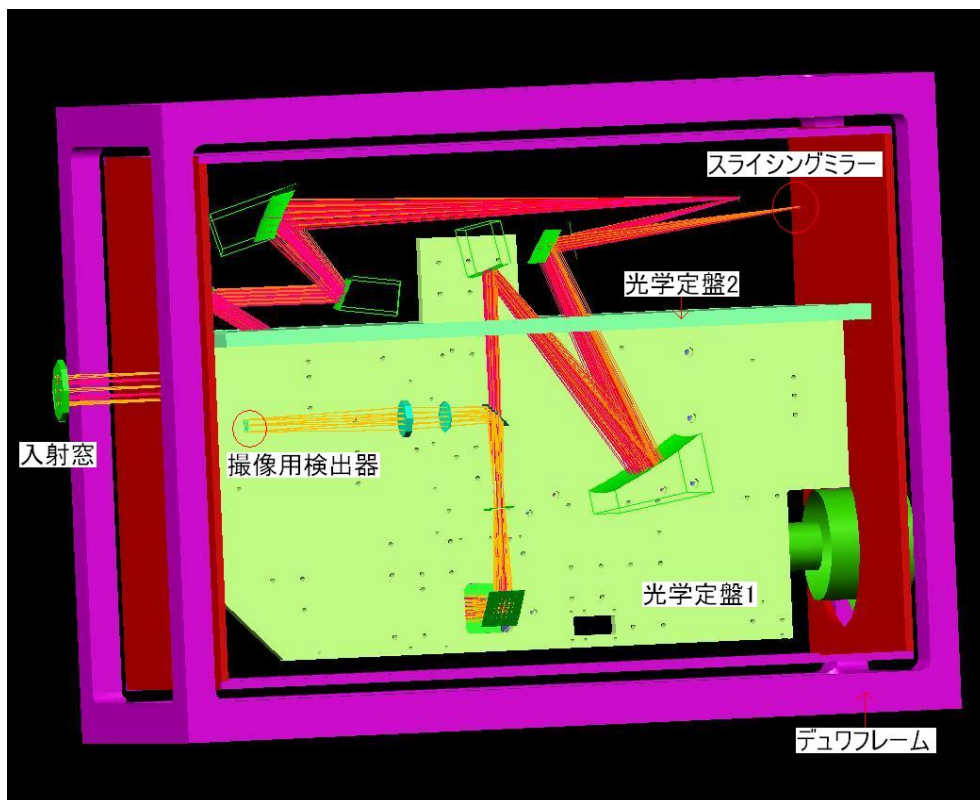


図 1.9: MIRSIS 全体図 (入射光裏面)

MIRSIS 仕様	
観測波長	7.8~13.5 μ m
デュワーサイズ	65cm $\times$ 51cm $\times$ 32cm
光学系サイズ	29cm $\times$ 43cm $\times$ 29cm
冷却	GM 冷凍機を使用、4K まで冷却可能
	検出器 (6K)
	光学系 (30K)
	radiation shield(40K)
分光モード (イメージスライサ)	
スライスマラーの枚数	5 枚
ピクセルスケール	0.45"/pix(@IRTF),0.2"/pix(@すばる)
視野	22" $\times$ 4.5" (@IRTF)
検出器	Si:As 320 $\times$ 240 Array
スペクトル分解能	$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 200$
スライシングミラー上の F 値	23.1
擬スリットミラー上での F 値	17.3
最終 F 値	7.7
撮像モード	
ピクセルスケール	0.31"/pix(@IRTF)
視野	40" $\times$ 40"
検出器	Si:As 128 $\times$ 128 Array
スペクトル分解能	$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 10$
最終 F 値	16.5

表 1.1: MIRSIS 仕様 (Okamoto et al.2006 引用)

2 MIRSIS 光学系

2.1 概要

MIRSIS の光学系は役割によって全体を 4 つのパートに分けることができる (Okamoto et al.2006)。前光学系、撮像系、スライサ系、分光系である。

前光学系は観測光が初めに通過する部分である。前光学系には cold stop が配置されていて、迷光の除去を行う。cold stop の後に、観測光を撮像系に導入するかスライサ系に導入するかを切り替える切替鏡が配置されている。

撮像系に観測光を導入する場合は cold stop の後に切替鏡を配置する。撮像系は観測天体の撮像を行うためのもので、分光用天体の捕捉も目的としている。

スライサ系は前光学系のあとに配置され、スライシングミラーが設置されている。スライサ系は 1.4 節で述べた光学的功能を持たせてある。スライサ系に観測光を導入する場合は cold stop の後の切替鏡を取り除く。

スライサ系を通過した観測光は分光系へ進む。このとき、観測光はあたかもスリットを通過したかのようにみえる。分光系に入射した観測光は分散素子によって分光され、検出器でスペクトルデータを取得する。

各々のパートごとの光学的功能を実現する光学部品は T 字型に組まれた 2 枚の光学定盤上に立体配置される。使用する光学部品は反射鏡が 17 個、レンズが 3 個、フィルターが 8 枚、grating(回折格子)である。これらの光学部品が光学定盤に固定される。本章では 4 つに分けた各パートごとの役割、相互関係、構成要素の詳細 (光学部品) について述べる。なお、以下で示すのは IRTF 搭載時の光学系であり、すばる・かなた望遠鏡搭載時は前光学系の一部を置換して使用する。

2.2 前光学系

前光学系はゲルマニウムの入射窓、入射平面鏡 (FM1)、4 個の固定平面鏡 (FM2,FM3,FM4,FM5)、前光学系コリメータレンズ、シャッター、N バンドフィルター、cold stop、切り替え鏡、2 個の曲面鏡 (前光学系カメラミラー 1、前光学系カメラミラー 2) で構成される。図 2.1、2.2 に前光学系の光学設計図を示す。抜粋した観測光を赤、黄、オレンジ、ピンクで示している。各光学部品の役割について観測光が通過する順に述べていく。

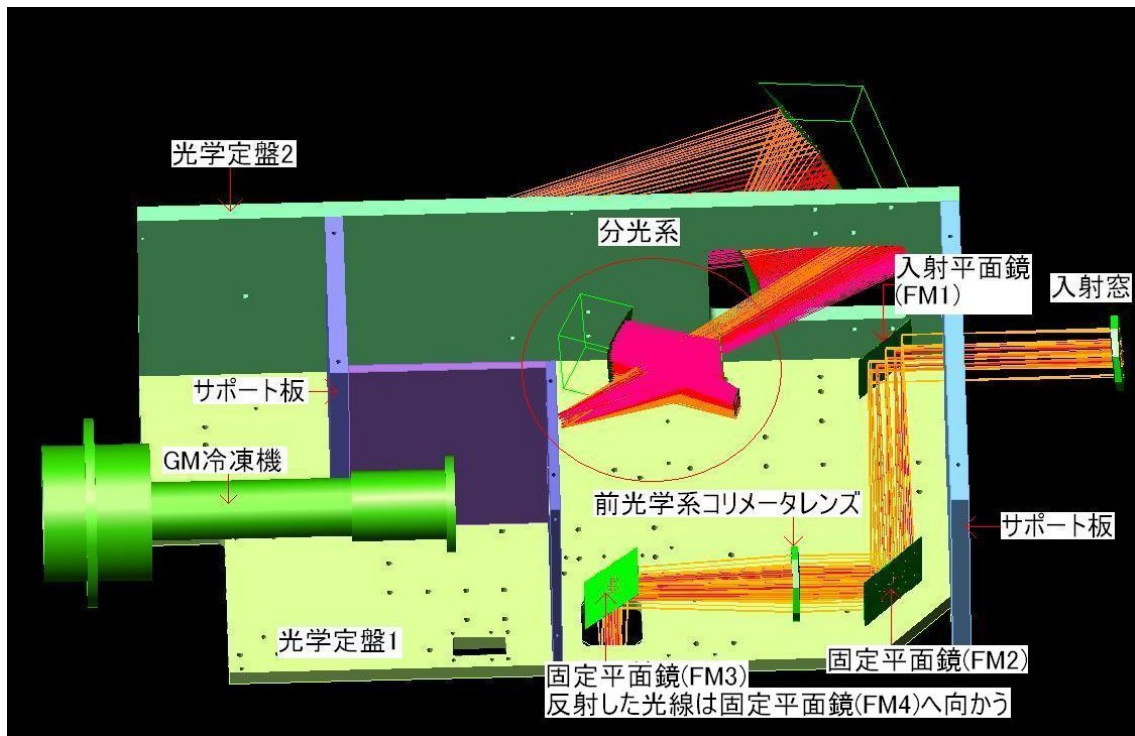


図 2.1: 前光学系光学設計図 (望遠鏡の入射光が最初に通過する面)

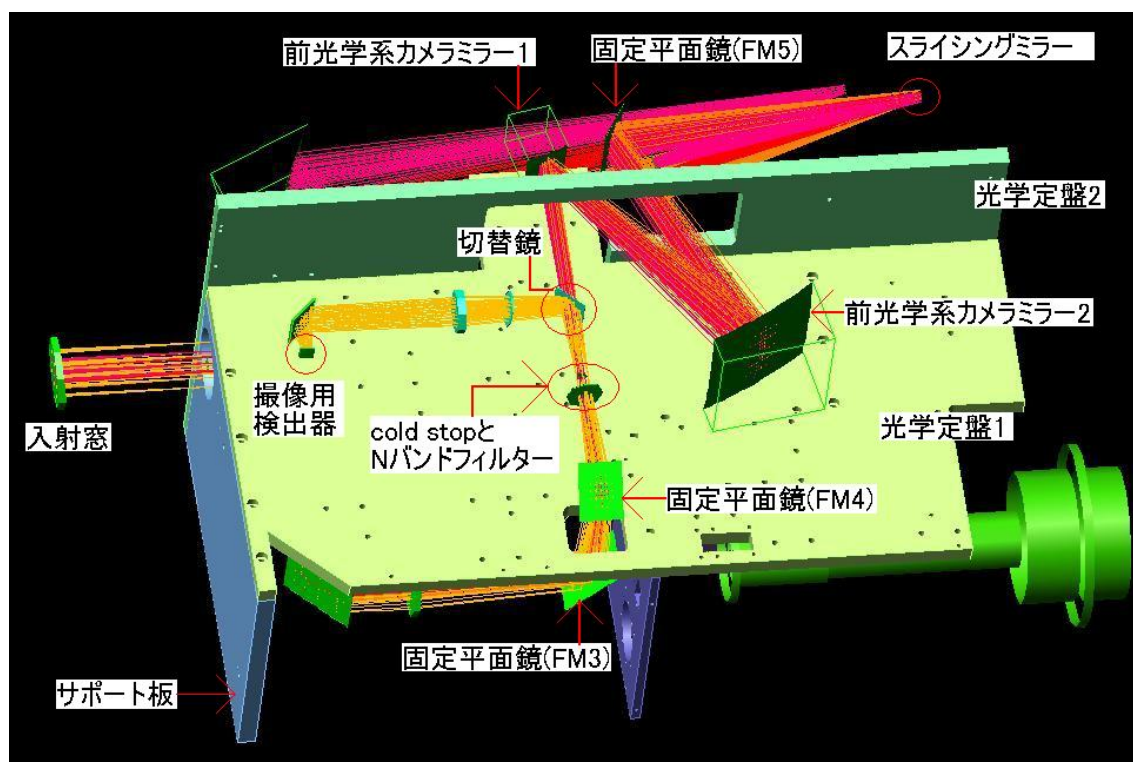


図 2.2: 前光学系光学設計図 (図 2.1 で示す光学定板 1 の裏面)

観測光はゲルマニウムの窓 (入射窓) を通過して装置内に入射する。入射窓の波長透過域は $6.25\mu\text{m} \sim 16.67\mu\text{m}$ である。装置内に入射した観測光は最初に入射平面鏡 (FM1) に当たる。観測装置を望遠鏡に取り付けただけでは望遠鏡の光軸と装置内部の光軸が合っていないため視野のずれや観測光のケラレなどの問題を生じる。そのため、観測光が最初当たる入射平面鏡に、望遠鏡の光軸と、装置内部の光軸を合わせる機構を持たせてある。具体的には、入射平面鏡のミラー面の中心を回転中心として長辺方向と短辺方向の 2 軸回りに回転する機構を持たせてある。この回転機構の模式図を図 2.3 に示す。

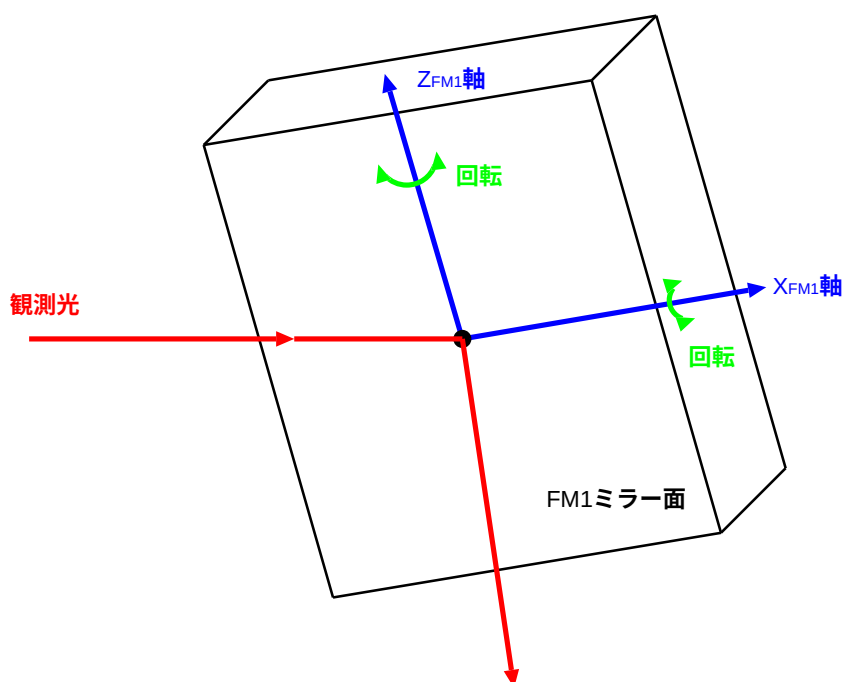


図 2.3: 回転機構の間略図 (佐藤圭悟修士論文より引用)

入射平面鏡を反射した観測光は固定平面鏡 (FM2) に当たる。固定平面鏡は光学定盤に固定された曲率を持たないミラーで、反射の法則によって光路を折り曲げる。固定平面鏡 (FM2) を反射した観測光は前光学系コリメータレンズを通過する。望遠鏡からの光は入射窓の後ろで一度結像しているが、前光学系コリメータレンズを通過すると平行光になる。前光学系コリメータレンズを通過した観測光は 2 個の固定平面鏡 (FM3,FM4) で反射された後、N バンドフィルターを通過する。使用する N バンドフィルターの波長透過域は $7.4\mu\text{m}\sim 13.4\mu\text{m}$ である。N バンドフィルターを通過した観測光はすぐ後ろの cold stop を通過する。cold stop は観測装置内の副鏡の像位置に置かれる絞り (瞳) で、副鏡に反射して装置内部に入射した光のみを後ろの光学系に通す役割を担っている。MIRSIS で使用する cold stop は直径が 8.1mm である (図 2.4)。

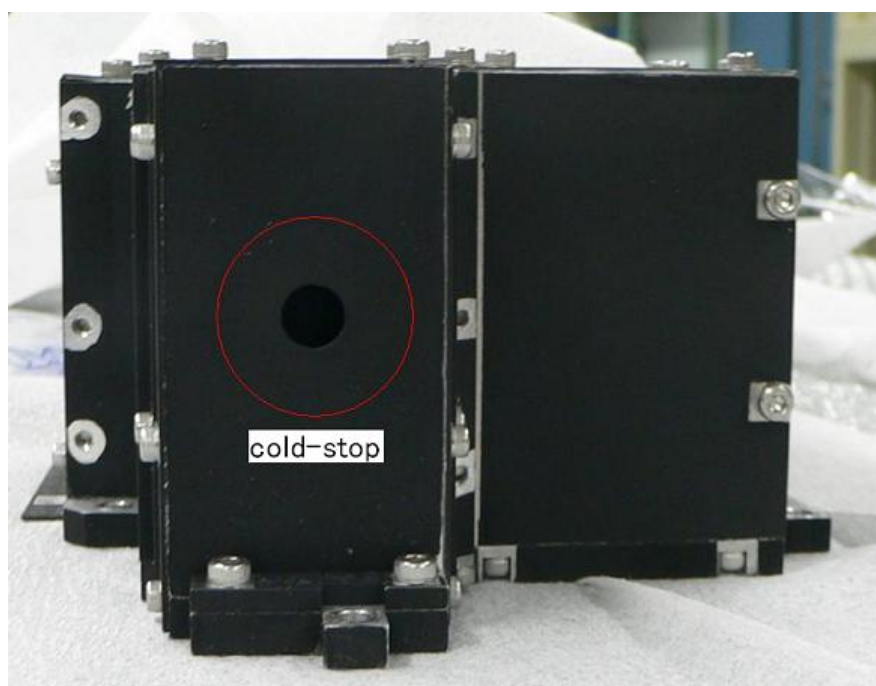


図 2.4: MIRSIS で使用する cold stop

cold stop と前光学系カメラミラー 1 の間には切替鏡が設置される (図 2.2 参照)。切替鏡はステップモーターの回転軸に繋がったボールねじ上にマウントされた固定平面鏡である。モーターを回転させると、切替鏡の位置を変移させることができる (Okamoto et al. 2008)。切替鏡は撮像観測とイメージスライサによる面分光観測の観測モード切り替えを行う。撮像観測を行う場合は、cold stop と前光学系カメラミラー 1 の間に切替え鏡を配置し観測光を撮像系に折り曲げる。イメージスライサによる面分光観測を行う場合は cold stop と前光学系カメラミラー 1 の間に切替鏡を配置せず、観測光を前光学系の後半およびスライサ系に導入する。この場合、cold stop 通過後、前光学系カメラミラー 1 と前光学系カメラミラー 2 の組によって、平行光だった観測光をスライシングミラー上に結像させる。前光学系カメラミラー 1 は凸面鏡、前光学系カメラミラー 2 は凹面鏡で各々が異なる曲率を持つ。固定平面鏡 (FM5) は前光学系ミラー 2 とスライシングミラーの間に設置され、光路の折り曲げを行う。

2.3 撮像系

撮像系は撮像フィルター、撮像系カメラレンズ、固定平面鏡 FMI、Si:As BIB 128×128 array 撮像用検出器で構成される。図 2.5 に撮像系の光学設計図を示す。撮像系内の観測光を黄で示している。各光学部品の役割について観測光が通過する順に述べていく。

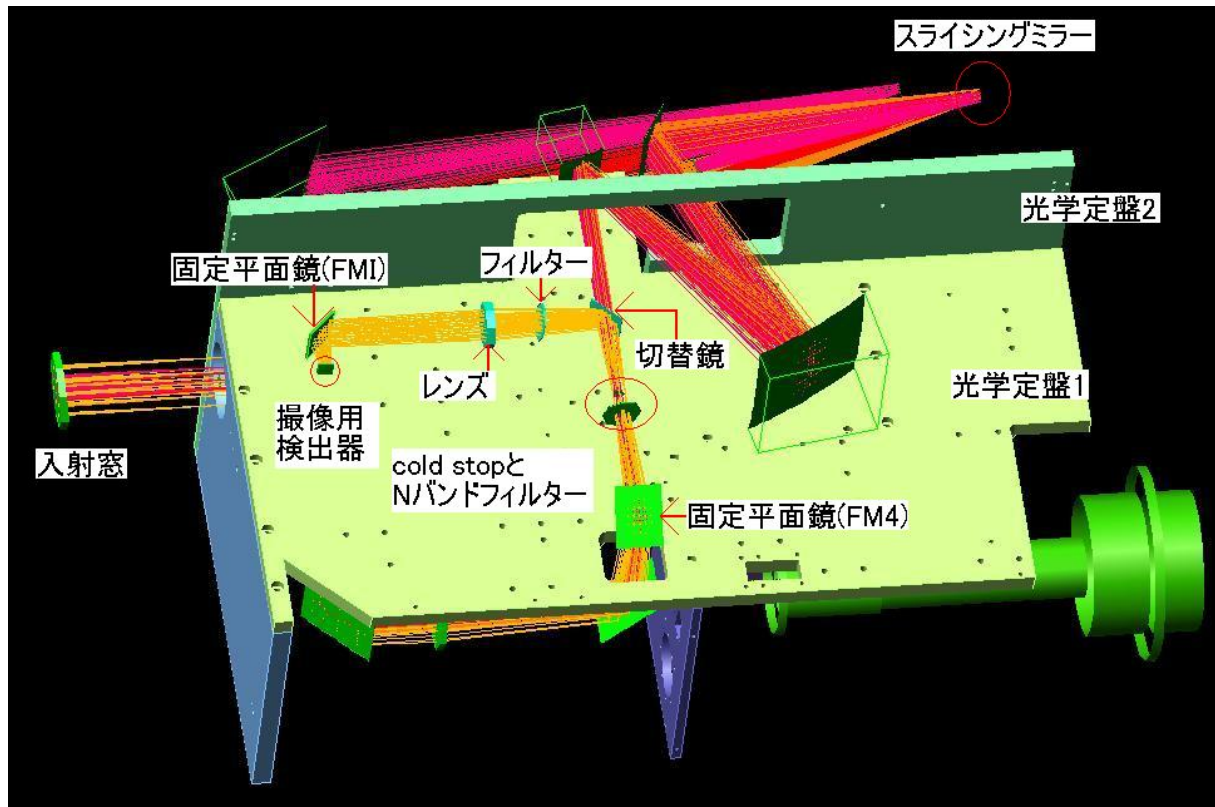


図 2.5: 撮像系光学設計図

切替え鏡によって反射した観測光は撮像フィルターを通過する。撮像フィルターはダーク（目隠し）フィルターを含めて6枚の間で交換可能である。撮像フィルターを通過した観測光は撮像系カメラレンズで結像される。撮像系カメラレンズは、天体撮像用と瞳撮像用のレンズの2種類から選択できる。これらの撮像系カメラレンズはステップモーターと1個の中継ギアによって回転するレンズホールに取り付けられ、用途によってレンズを切り替る (Okamoto et al. 2008)。レンズを通過した光線は固定平面鏡 (FM1) によって光路を折り曲げられ、Si:As BIB 128×128 array 撮像検出器上に結像される。

2.4 スライサ系

スライサ系はスライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーで構成される。図 2.6 にスライサ系の光学設計図を示す。スライサ系内の観測光を赤、オレンジ、ピンクで示している。各光学部品役割について観測光が通過する順に述べていく。

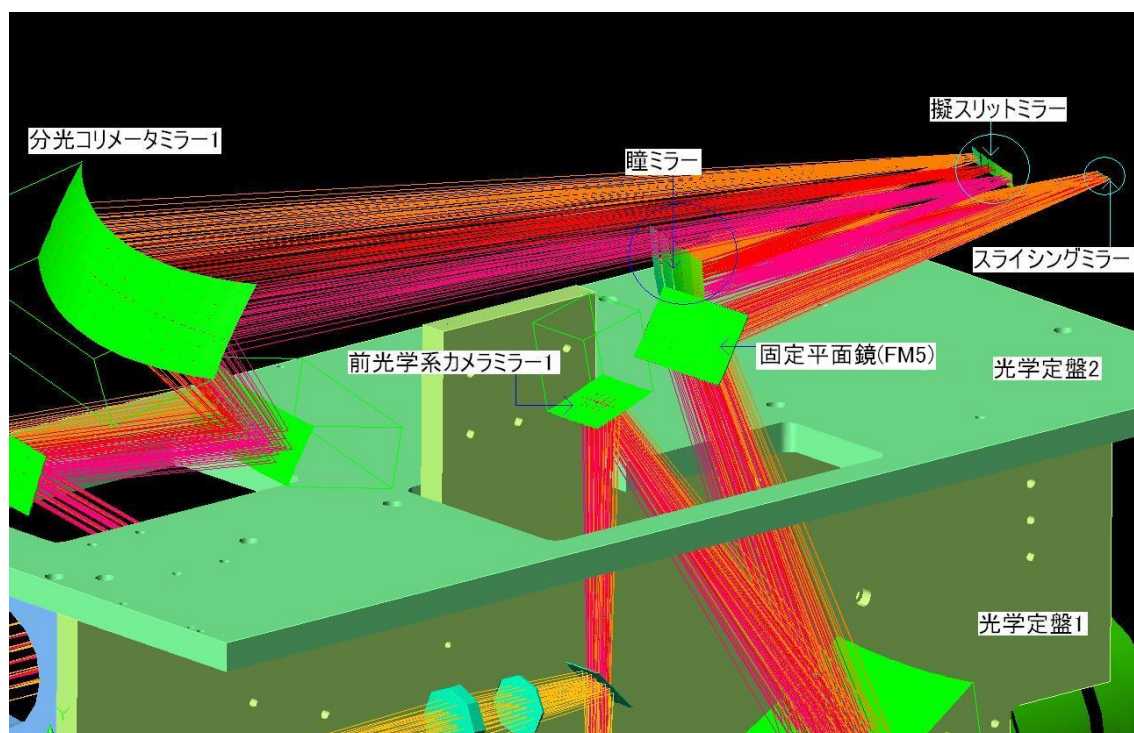


図 2.6: スライサ系光学設計図

観測光は、前光学系カメラミラー 1、2 の組によってスライシングミラー上で結像している。MIRSIS は 5 枚のスライシングミラーを使用しており、それぞれの大きさは幅 $300\mu\text{m}$ 、使用範囲の長さが 7.5mm (実際には 14mm 長の範囲を持つ) で 3 度ずつ異なる方向を向いている (Okamoto et al. 2008)。そのため視野は 5 分割されて 5 つの異なる方向に反射する。スライシングミラーを反射した各々の観測光は 5 つの球面瞳ミラーによって 5 つの擬スリットミラー上に再結像する。このとき、スライシングミラーで分割された視野を擬スリットミラー上に一列に並べ直して結像させている。擬スリットミラーは 5 つの固定平面鏡を使用して一列に並べ直した観測光の方向を揃えて分光系に入射させる。擬スリットミラーを反射した観測光は、あたかも 1 つのスリットを通過したかのように扱うことができる。

2.5 分光系

分光系は 2 個の固定平面鏡 (FM6, FM7)、3 個の曲面鏡 (分光コリメータミラー 1、分光コリメータミラー 2、分光カメラトロイダル鏡)、Grating(回折格子)、Si:As IBC 320×240 array 分光用検出器で構成されている。図 2.7、2.8 に分光系の光路図を示す。分光系内の観測光を赤、オレンジ、ピンクで示している。各光学部品役割について観測光が通過する順に述べていく。

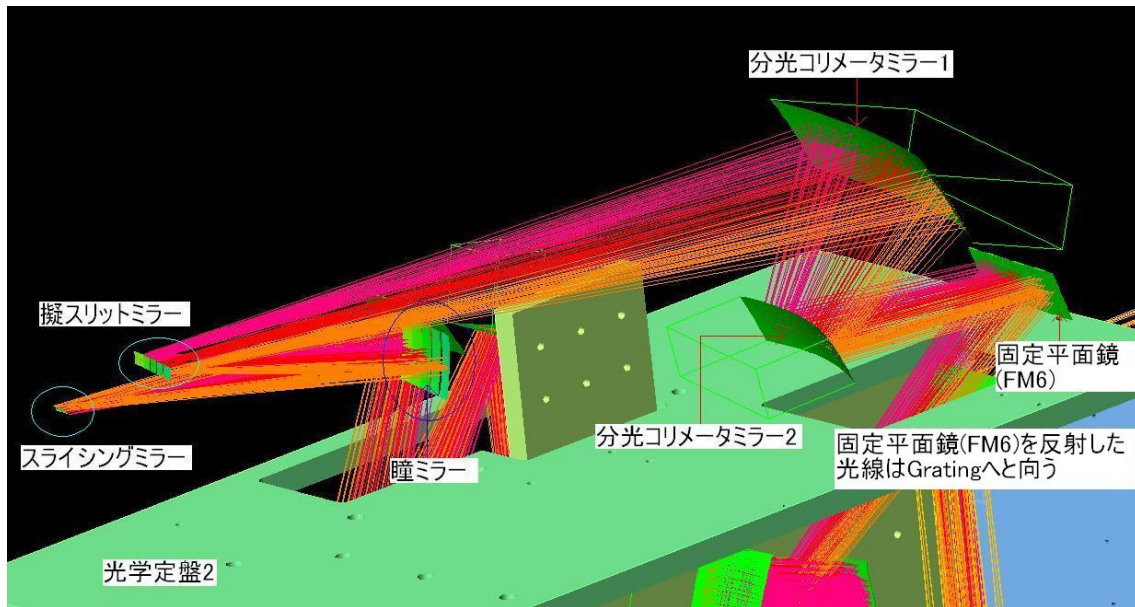


図 2.7: 分校系光学設計図 (スライサ系側)

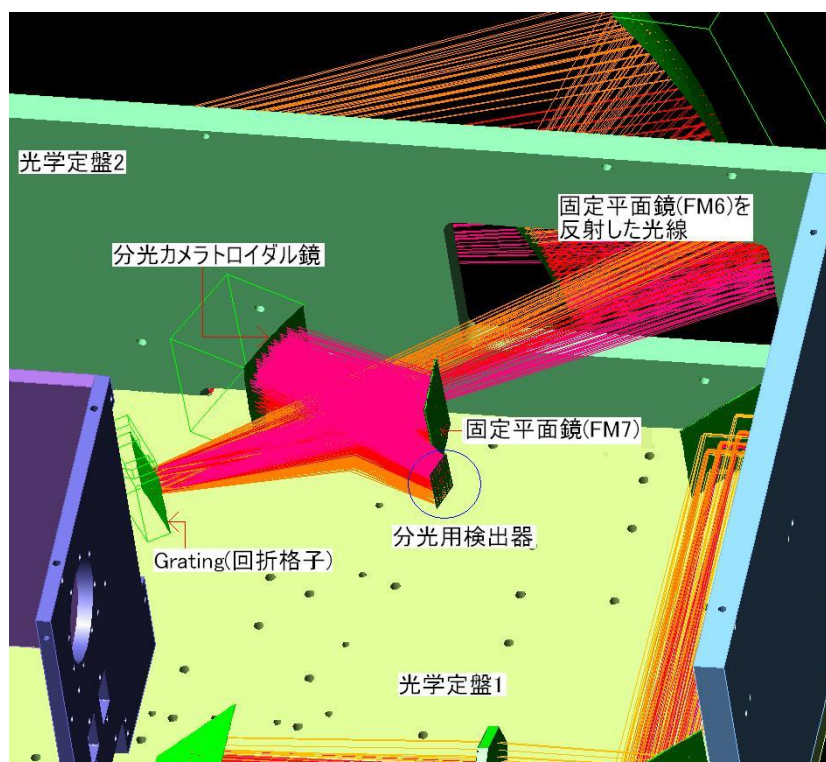


図 2.8: 分校系光学設計図 (分光用検出器側)

擬スリットミラーを反射した観測光は分光コリメータミラー1、分光コリメータミラー2の組によって、平行光にされる。分光コリメータミラー1は凹面鏡、分光コリメータミラー2は凸面鏡で曲率がそれぞれ異なる。平行光化された観測光は固定平面鏡(FM6)で光路を折り曲げられ、Grating(回折格子)で波長分散をかけられる。擬スリットミラーで観測光が一行に並べられた向きと垂直な方向に波長分散される。Gratingと分光カメラトロイダル鏡の間には固定平面鏡(FM7)が設置されて光路を折り曲げる。分光カメラトロイダル鏡は観測光をSi:As IBC 320×240 array 分光用検出器上に結像する。分光カメラトロイダル鏡は凹面鏡で2軸方向にそれぞれ異なる曲率を持っている。

2.6 光学部品の詳細

ここまで、MIRSIS の光学系全体を 4 つのパートに分けたときの各部の光学的機能と、その光学的機能を実現している光学部品について述べてきた。本節では各光学部品のスペックと光学定盤への固定方法について述べる。

2.6.1 反射鏡

MIRSIS で使用している反射鏡は全部で 17 個である。内訳は入射平面鏡が 1 個、固定平面鏡が 8 個、曲面鏡が 5 個、スライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーである。ここでは入射平面鏡と固定平面鏡を合わせて単に平面鏡と呼ぶ。スライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーは次の小節でまとめる。本小節では平面鏡と曲面鏡のスペックと光学定盤への固定方法について述べる。

平面鏡は曲率を持たず、反射の法則に従って光路を折り曲げるために使われている。MIRSIS で使用する平面鏡は直方体のガラスに金蒸着をして製作されている。平面鏡は全部で 9 個 (入射平面鏡が 1 個、固定平面鏡が 8 個) 使用していて、それぞれ大きさが異なる。使用する各平面鏡の名称と大きさを表 2.1 に示す。FM1 が入射平面鏡で、それ以外は固定平面鏡である。

ミラー名称	ミラーの大きさ (縦 × 横 × 高さ)[mm]
FM1	40 × 50 × 8
FM2	45 × 55 × 8
FM3	50 × 60 × 10
FM4	30 × 40 × 6
FM5	30 × 50 × 8
FM6	30 × 75 × 10
FM7	30 × 36 × 6
FMI	25 × 25 × 5
切替鏡	20 × 25 × 5

表 2.1: 平面鏡データ (佐藤圭悟修士論文より引用)

MIRSIS で使用する曲面鏡はアルミブロックを精密切削した後金蒸着をして製作されている。切削加工とはブロックから指定した形を工具で削り出す方法である。この製作法の模式図を図 2.9 に示す。

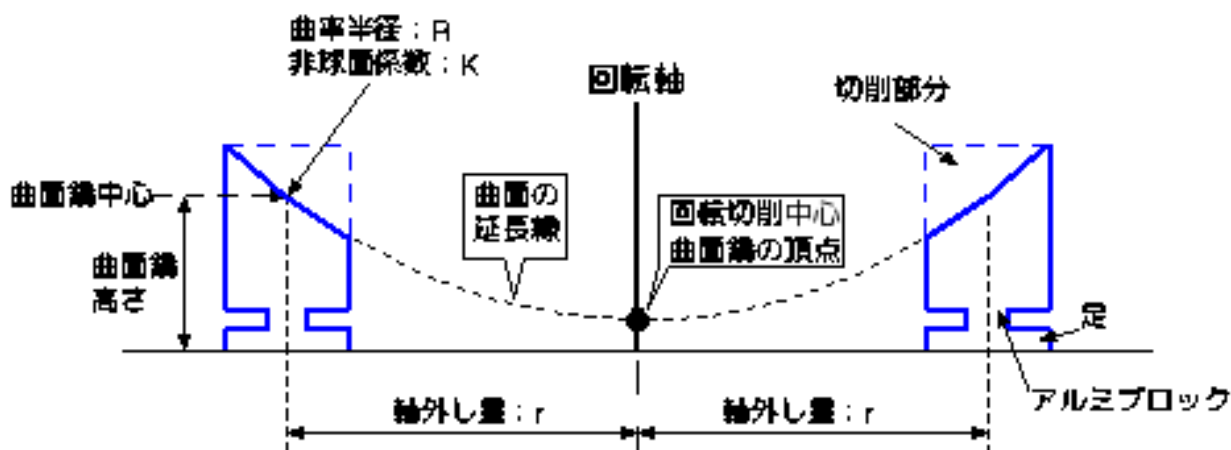


図 2.9: 曲面鏡の作成法 (佐藤圭悟修士論文より引用)

曲面鏡の製作法については佐藤圭悟修士論文で述べられているが、4 章の光学調整と関係するのでここでも述べることにする。曲面鏡の切削は図 2.9 のように回転中心から等間隔に 2 つのアルミブロックを設置している。図 2.9 において、足とはネジ穴があげられている部分で、アルミブロックをホルダに留めて固定している。そして、切削したい

部分に刃がくるように工具を設置する。アルミブロックが2ヶ所に設置されているのは、回転切削時にアルミブロックの位置がぶれないようにバランスをとるためである。

このような加工をするため、曲面鏡は同じものが各2個ずつ製作される。製作された2つの曲面鏡のうち実際の天体観測に用いる曲面鏡を“実機用”、もう一方の曲面鏡を“テスト用”と呼ぶことにした。MIRSISで使用する曲面鏡は凹型と凸型合わせて5個で各々が異なった曲率を持っている。表2.2に実機用の各ミラーの名称と大きさ、曲率、非球面係数を示す。高さの値は佐藤圭悟修士論文で行われた曲面鏡の高さ測定によって得られた実測値である。

ミラー名称	ミラー大きさ (縦 × 横 × 高さ)[mm]	曲率 [mm]	非球面係数
前光学系カメラミラー 1(凸)	30 × 30 × 37.81	302.222222	-7.716049(回転双曲体面)
前光学系カメラミラー 2(凹)	80 × 80 × 38.32	385.998760	-0.123317(回転楕円体面)
分光コリメータミラー 1(凹)	30 × 140 × 25.76	212.778639	-0.384321(回転楕円体面)
分光コリメータミラー 2(凸)	25 × 90 × 36.19	172.666667	-2.151111(回転双曲体面)
分光カメラトロイダル鏡 (凹)	40 × 50 × 35.07	190.32290,184.560059	なし

表 2.2: 曲面鏡データ (佐藤圭悟修士論文より引用)

平面鏡、曲面鏡はT字型に組んだ光学定盤上の光学設計位置に固定して使用する。表2.1、表2.2で示したように、各々のミラーは大きさ、形が異なっている。そのため、各々の形にあわせた専用の設置用部品を使用して、光学定盤に固定していく。反射鏡を直接取り付けの設置用部品をミラーホルダ、ミラーホルダを光学定盤に取り付ける設置用部品をミラーマウントと呼ぶ。ミラーホルダ、ミラーマウントはアルミで製作されている。平面鏡は金蒸着面の裏側を厚さ0.2mmのリン青銅の板バネで押さえている(佐藤圭悟修士論文)。曲面鏡では足(図2.9参照)にあけられているネジ穴を使ってミラーホルダに固定する。曲面鏡をミラーホルダに固定するときホルダと曲面鏡の間にスペーサーをはさむものがある。スペーサーは曲面鏡の光学設計値と実測値の差を埋めるために使用するアルミの板である(図2.10)。表2.3に曲面鏡の高さの光学設計値と実測値(実機用)、はさむスペーサー量を示す。前光学系カメラミラー1、前光学系カメラミラー2、分光カメラトロイダル鏡は光学設計値よりも測定した高さの値が大きいため、スペーサーをはさむ必要はない。分光コリメータミラー1、分光コリメータミラー2は表2.3で示したスペーサーをミラーとマウントの間にはさむ。

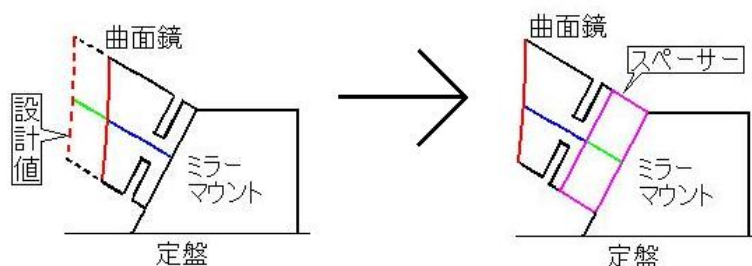


図 2.10: スペーサーの模式図 (佐藤圭悟修士論文より引用)

ミラー名称	高さ (光学設計値)[mm]	高さ (実測)[mm]	両方の差	設置するスペーサー量 [mm]
前光学系カメラミラー 1	37.79	37.81	-0.02	不要
前光学系カメラミラー 2	29.32	38.32	-9.0	不要
分光コリメータミラー 1	39.91	25.76	14.15	14.15
分光コリメータミラー 2	47.67	36.19	11.48	11.48
分光カメラトロイダル鏡	35.00	35.07	-0.07	不要

表 2.3: 曲面鏡高さの光学設計値と実測値、及びホルダと曲面鏡の間にはさむスペーサー量

2.6.2 スライサ系ミラー

MIRSIS で使用している反射型ミラーのうち、スライサ系で使用されるスライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーの3つ合わせてスライサ系ミラーと呼ぶことにする。本小節ではスライサ系ミラーのスペックと光学定盤への固定方法について述べる。

● スライシングミラー

スライシングミラーは1枚の厚さが $300\mu\text{m}$ 、大きさ約 $210\text{mm} \times 35\text{mm}$ のアルミ板で、断面の長さ 14mm (使用範囲は 7.5mm) の範囲を精密切削して鏡面が切削され、製作後に赤外線反射率を高めるため鏡面に金蒸着を施してある。(Mitui et al. 2008)。スライシングミラーはアルミで製作されたベースマウントに重ねて設置する。設置位置はベースマウント内に立てられている位置決めピンで決められている。位置決めピンによるスライシングミラーの設置精度は $20\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ より良い精度である (Okamoto et al. 2008)。図 2.11 に5枚のスライシングミラーをベースマウントに納めた状態を示す。

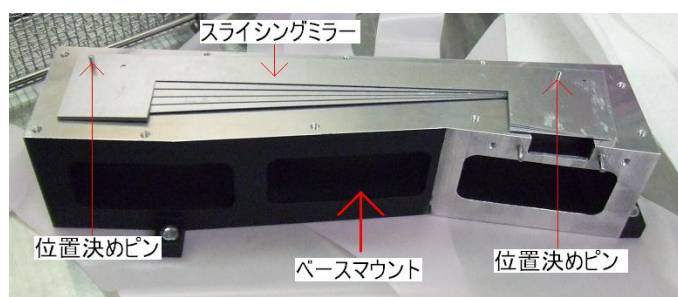


図 2.11: スライシングミラーをベースマウントに取り付けた様子

5枚のスライシングミラーを区別するため重ねたとき一番下のスライシングミラーから A,B,C,D,E とアルファベットを付ける。(図 2.12)。

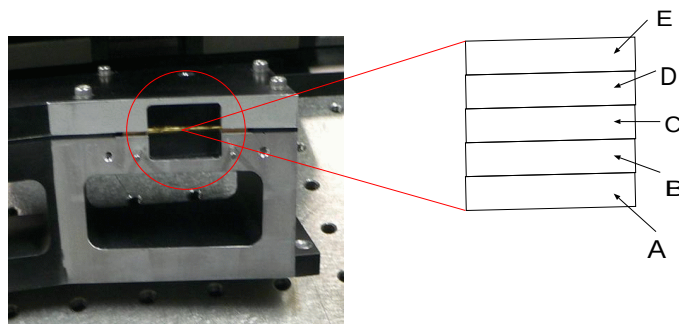


図 2.12: 5枚のスライシングミラーの名称

ベースマウントに設置されたスライシングミラーは上からアルミカバーで抑えて固定する。このとき、スライシングミラーの厚さ分マウントとカバーの間にすき間ができる。このすき間を埋めるために、厚さが 1.5mm のアルミの枠でスライシングミラーの周りを囲う。図 2.13 にアルミの枠と、カバーをベースマウントに設置した様子を示す。このスライシングミラーを設置した状態のベースマウントをスライシングミラーマウントと呼ぶことにする。

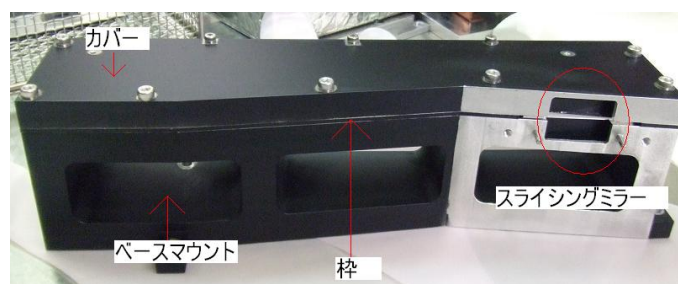


図 2.13: アルミ枠とカバーの設置

● 瞳ミラー

瞳ミラーは $48.50\text{mm} \times 30.0\text{mm}$ のアルミブロックの表面を精密切削した後、金蒸着をして製作されている (Mitui et al. 2008)。瞳ミラーは1つのアルミブロックの中に5つの鏡面を持ち、それぞれ曲率の異なる球面鏡である。曲率の範囲は 158.110mm から 158.800mm で、各瞳ミラーの大きさは約 $9.7\text{mm} \times 30\text{mm}$ である (okamoto et al. 2008)。図 2.14 に製作された瞳ミラーを示す。瞳ミラー鏡面に向かって左から順に A~E のアルファベット付ける。これは、スライシングミラーのアルファベットと対応しており、スライシングミラー A を反射した光線は次に瞳ミラー A を反射する。B~E についても同様である

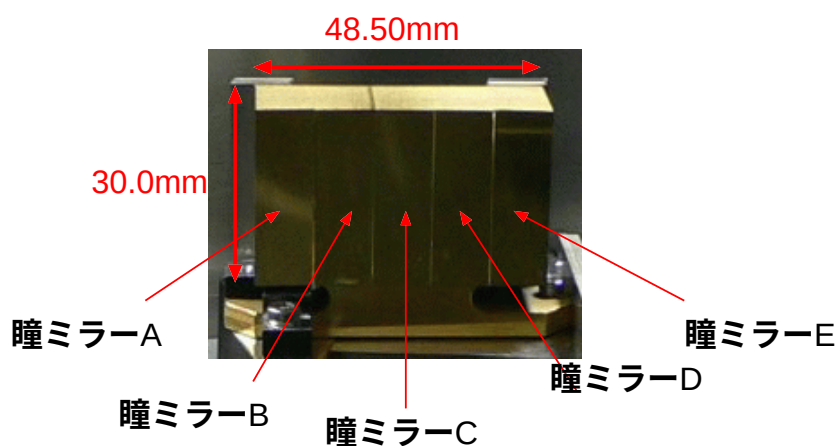


図 2.14: 製作された瞳ミラー

● 擬スリットミラー

擬スリットミラーは $7\text{mm} \times 6\text{mm} \times 2\text{mm}$ のガラスに金蒸着をした平面鏡を5個使用している。擬スリットミラーは各々の位置、角度に合わせて台座が作られているマウントに設置する。このマウントはアルミで製作されている (図 2.15)。

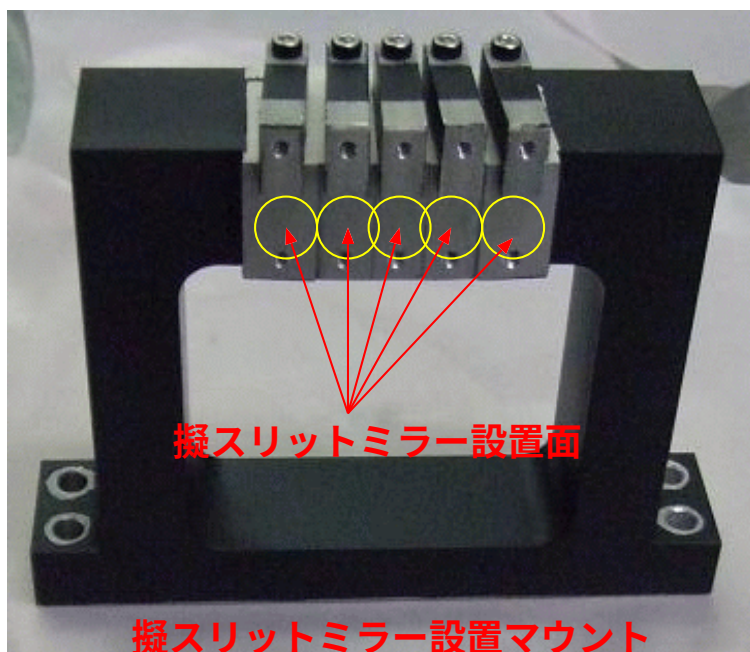


図 2.15: 擬スリットミラー設置マウント

擬スリットミラーは0.2mmのリン青銅の板バネと厚さが0.1mmのシムリングでマウントに固定する。擬スリットミラーは高さが2mmなので、リン青銅の板バネとシムリングのみでは高さが足りず固定できない。そのため、高さ補正治具(リン青銅用とシムリング用)を使用する。図 2.16 に擬スリットミラーを固定する様子の模式図、図 2.17 に実際に擬スリットミラーをマウントに固定した様子を示す。

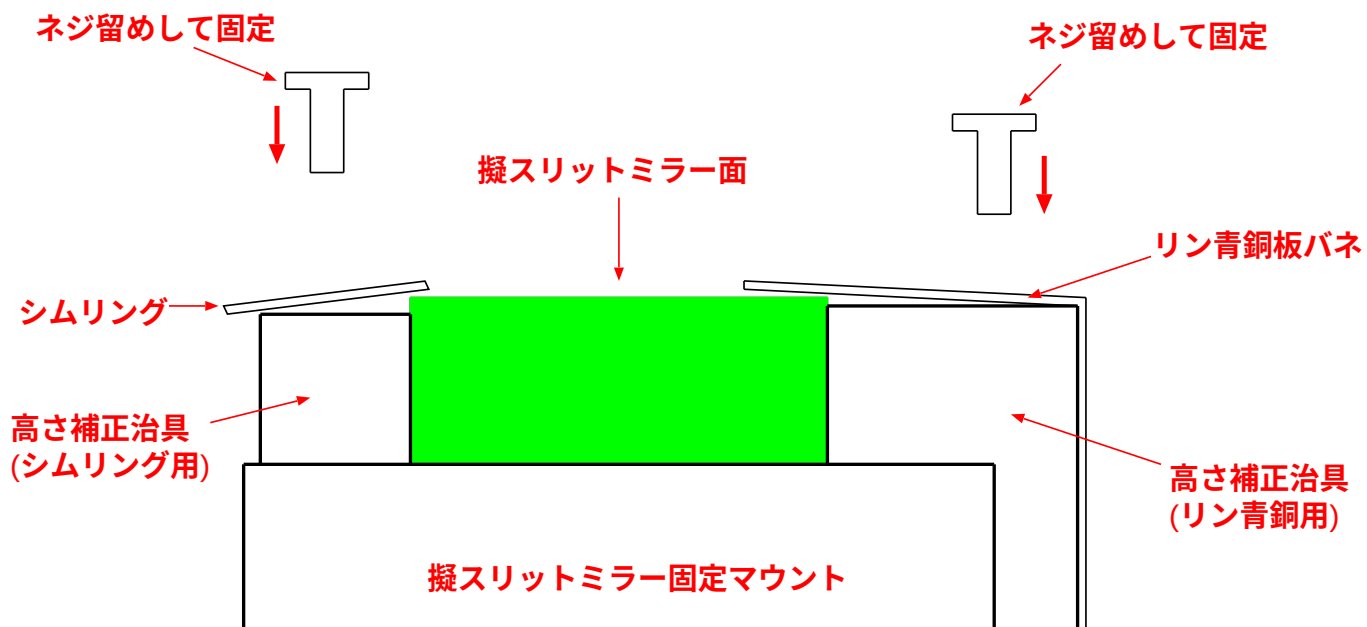


図 2.16: 擬スリットミラー押さえの模式図

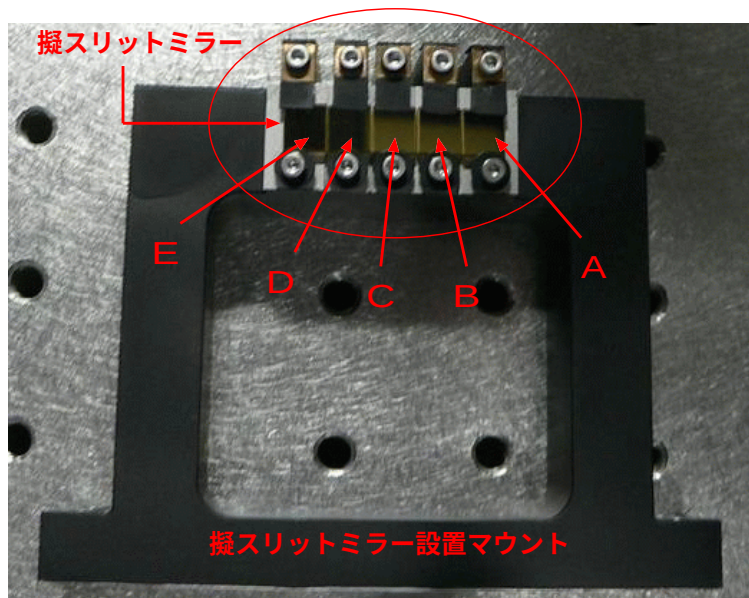


図 2.17: 擬スリットミラーの固定

擬スリットミラーは鏡面に向かって右から順に A～E のアルファベット付ける (図 2.17)。アルファベットはスライシングミラー、瞳ミラーのアルファベットと対応しており、スライシングミラー A、瞳ミラー A を反射した観測光は次に擬スリットミラー A を反射する。B～E についても同様である。擬スリットミラーを設置した状態のマウントを擬スリットミラーマウントと呼ぶことにする。

スライシングミラーマウント、瞳ミラー、擬スリットミラーマウントは、これらを一体で乗せるためのアルミ台座に固定される。このアルミ台座をベースプレートと呼ぶ (Okamoto et al. 2008)。そして、3 種のミラーを取り付けたベースプレートを光学定盤に固定する。

スライシングミラーマウントと擬スリットミラーマウントの設置位置は、ベースプレート上に立てられた位置決めピンで決められている。位置決めピンを使用することで、取り外しを行って再設置をするときに再現性を出すことができる。瞳ミラーをベースプレートに固定するとき、鏡面に向かって左側は固定用アルミブロックを使用して固定する (図 2.18 参照)。右側は瞳ミラーにあいているネジ穴でネジ留めする。

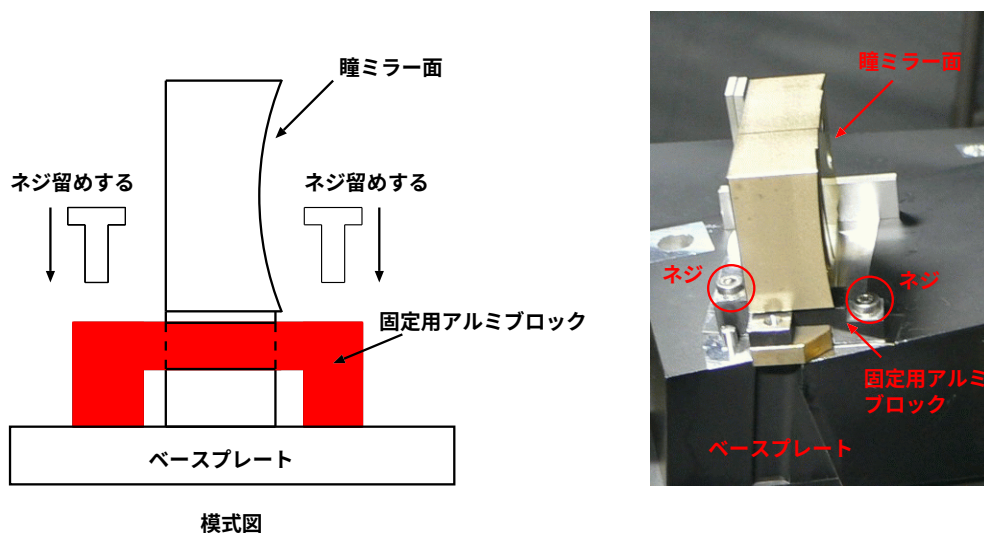


図 2.18: 瞳ミラーのプラットホーム上での固定

2.6.3 レンズ

レンズは前光学系のコリメータ部 (平行光化系) と撮像系のカメラ部 (結像系) の2ヶ所で使用している。

前光学系コリメータレンズには IRTF 用とすばる望遠鏡用の2つがあり、各々で仕様が異なる。レンズの材質はどちらもゲルマニウム製で表面に反射防止コーティングが施してある。IRTF 用とすばる望遠鏡用の前光学系コリメータレンズの仕様を表 2.4 にまとめる。前光学系コリメータレンズは各々の型に合わせて製作したレンズホルダに収めたものを光学定盤に設置する。ただし、すばる用前光学系コリメータレンズは図 2.2 の固定平面鏡 (FM4) の位置に置かれる。

	IRTF 用	すばる用
有効径 [mm]	50	50
実直径 [mm]	55	55
曲率半径 (入射側)[mm]	349.86(凸)	219.990(凸)
曲率半径 (出射側)[mm]	577.98(凹)	895.856(凹)
中心厚さ [mm]	4.65±0.02	5.00±0.02
レンズ端厚さ [mm]	5.22	3.69

表 2.4: 前光学系コリメータデータ

撮像系カメラレンズには天体撮像用と瞳撮像用の2つがあり、各々で仕様が異なる。レンズの材質はどちらもゲルマニウム製で表面に反射防止コーティングが施してある。天体撮像用と瞳撮像用の撮像系カメラレンズの仕様を表 2.5 にまとめる。撮像系カメラレンズはレンズホイールに収めたものを光学定盤に固定する (Okamoto et al. 2008)。

	天体撮像用	瞳撮像用
有効径 [mm]	25	25
実直径 [mm]	30	30
曲率半径 (入射側)[mm]	921.00(凸)	109.97(凸)
曲率半径 (出射側)[mm]	660.16(凸)	244.96(凹)
中心厚さ [mm]	6±0.02	5.04±0.02

表 2.5: 撮像系カメラレンズデータ

3 スライサ系の光学調整と性能評価

3.1 目的

スライサ系はスライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーをベースプレートに設置し、組み合わせることで初めてスライサ系としての機能を発揮する。これまで、スライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーの各ミラーの単体での評価はすでにされている (Mitui et al. 2008) が、スライサ系全体としての光学調整 (光学部品の設置位置の光学設計値からのズレが許容誤差範囲内になるようにすること) や光学性能評価はまだ行われていない。MIRSIS はスライサ系の製作技術の確立とともに、必要性能を実現できるか評価することが開発の主目的のひとつである。そのため、スライサ系全体としての光学調整を行い光学性能評価を行う必要がある。

本章ではスライサ系全体の光学調整の手法と測定結果、および得られた光学性能について述べていく。

3.2 光学調整・光学性能評価の方針

スライサ系全体の光学調整はスライシングミラーに入射する光線を再現し、擬スリットミラーから出射した光線の出射光位置を測定する。そして、これが光学設計値に近づくようにする。調整後に出射光位置の誤差からスライサ系としての光学性能を評価する。

図 2.6 で示した光学設計情報をもとに、スライシングミラーの入射光と擬スリットミラーの出射光の設計位置情報を得ることができる。これらの情報をもとに、実際に組み立てたスライサ系上で入射光を再現すれば、ベースプレート上の正しい位置、角度でスライサ系ミラー 3 種が設置されているときのみ出射光は設計位置にくるはずである。出射光の測定位置と設計位置に誤差があるときは、スライサ系ミラーの設置位置を調整する。

ただし、スライシングミラーはベースプレート上に位置決めピンを使ったマウントシステムを介して固定される (2.6.2 参照) ため位置を調整できない。ベースプレートの位置決めピン穴加工の位置精度が $10\mu\text{m}$ 以内、ピンの打ち込みによる傾き精度が $10\mu\text{m}$ 以内、マウントの位置決めピン用穴の公差が $2\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ なので、スライスミラーの設置精度は集積公差を計算すると $17.3\mu\text{m}$ 以内である。

擬スリットミラーは図 2.16 のようにマウントに固定され、マウントは位置決めピンでベースプレートに設置される (マウントの設置精度はスライスミラーと同様で $17.3\mu\text{m}$ 以内)。マウントへの擬スリットミラーの固定は銅の板バネとシムリングのネジ留めで決まる。擬スリットミラーの調整幅は 0.1mm でミラーの短辺方向のみ調整することが出来る (図 3.1 参照)。

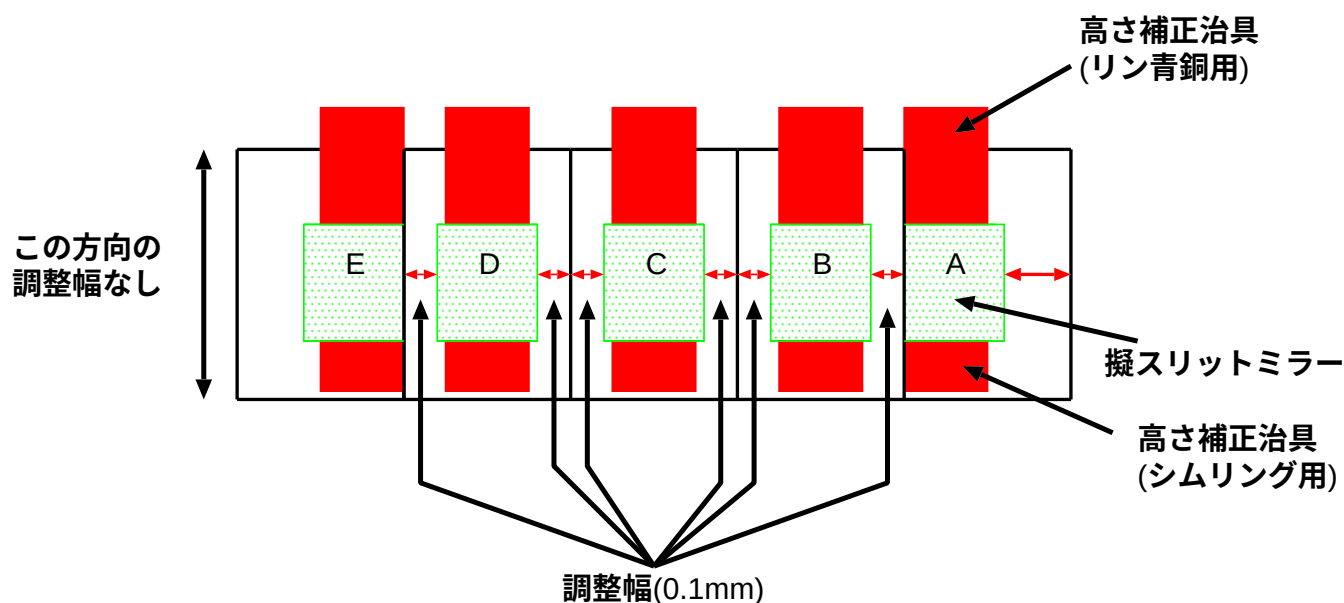


図 3.1: 擬スリットミラーの調整幅

瞳ミラーは取付ネジ3点でベースプレートに固定(図 2.18 参照)され、それぞれに調整幅がある。調整幅は、瞳ミラーに向かって右側のネジが0.1mm、左側の固定用アルミブロックが0.75mmである。よって、スライサ系からの出射光が設計図出射位置からずれた場合は瞳ミラーと擬スリットミラーの位置を調整することで設計出射位置に近づける。この瞳ミラーと擬スリットミラーの位置調整がスライサ系の光学調整である。また、こうして光学調整をした後もなお残る出射光位置のずれの測定から性能評価を行う。佐藤圭悟修士論文での検討から光学調整の目標精度は位置精度が0.1mm以内、角度精度が0.04°である。これは、Si:As IBC 320×240 array 分光用検出器上で10ピクセルのズレに相当する。

3.3 再現する入射光

本節は、再現する入射光について詳しく述べる。

各スライシングミラーの全長は7.5mmで、幅が0.3mmである。光学設計図では長さ方向の中央、および中央から両端へ3.8mmずつずれた点に収束する光線追跡を行っている。この3点はいずれもスライシングミラーの幅方向に対して中央にある。よって、これらの点への収束光については光線の設計位置を読み取ることが可能である。なお、両端付近に収束する2点は厳密にはスライシングミラー使用範囲の両端よりも0.05mmずつ外側に位置している。しかし、スライサ系の各光学部品は光線ビーム系に対して余裕を持たせて作ってあるので、これら2点を通る光線で調整を行えば、他の実際に使用する光線に対してもケラレなく調整できたことになる。そのため、これらの光線を再現する。

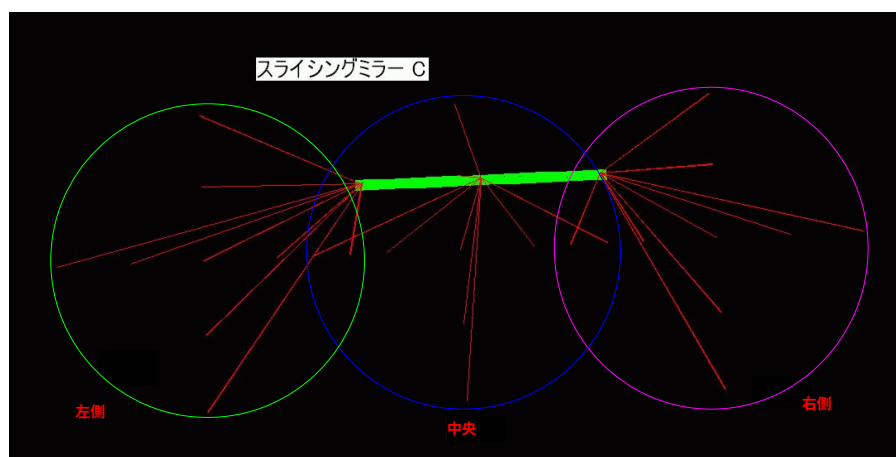


図 3.2: FM5 上で見たときのスライシングミラー C に入射 (緑) する光線 (赤) の光学設計図
(3つの丸はスライスミラーの3点内に収束する光線のおよその範囲を示す)

例としてスライシングミラー C に入射する光線の光学設計図を図 3.2 に示す。図 3.2 は上記した3点に収束する入射光束を表している。各光束は本来 cold stop の形状で決まるため円形(図 2.4 参照)だが、光学設計では図 3.2 のように各点につき9本の光線を追跡している。ここでは各スライシングミラーにつき27本の入射光の中から9本の光線を選んだ。選んだ入射光はビームの最も外側に位置しているもの8本とスライシングミラーの中央に入射する光軸に平行な1本である。設計図に描かれていない無数の入射光は全て選んだ8本の入射光を囲む包絡線の内側にある。そのため、選んだ入射光について光学調整を行えば調整が済んだものとみなすことができる。図 3.3 は各点に収束する9本の光線で、固定平面鏡 (FM5) の位置で見たときを表している。赤丸は光学設計で描かれている入射光のうち再現する光線、黒丸が再現しない光線である。

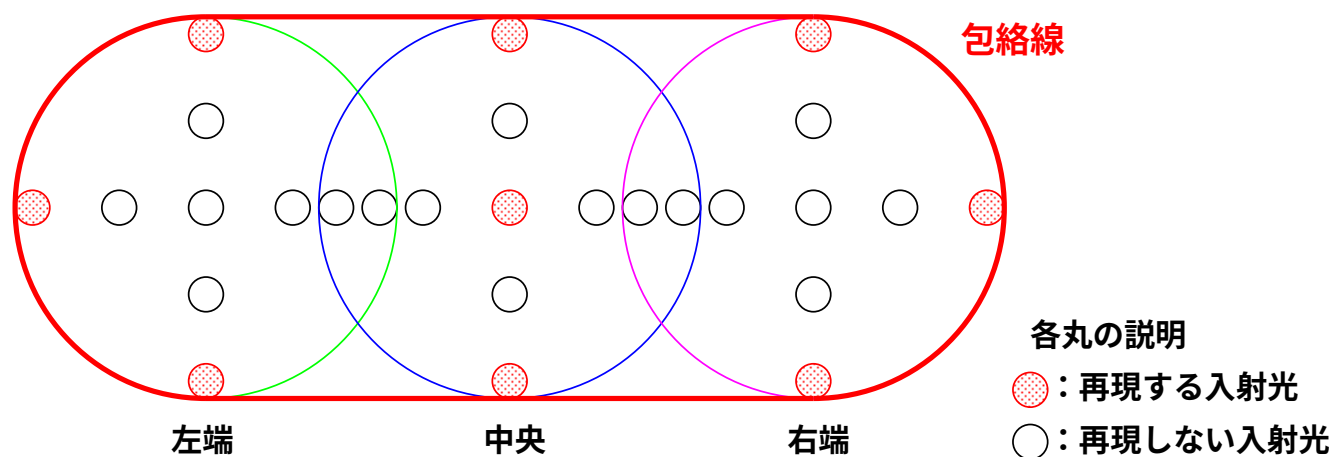


図 3.3: 再現する入射光の模式図

3.4 測定装置

3.3 の測定原理を実現するための測定装置について述べる。

入射光の再現にはピンホール (3.4.1 に詳述) と、位置移動ができるステージと角度移動ができるステージにレーザーを組み合わせたレーザー照射装置 (3.4.2 に詳述) を使用する。そして、出射光をスケールで読み取る。図 3.4 は実際の測定系である。測定系の座標軸と光学設計系の座標軸を区別するため光学設計系の座標軸を XYZ 系 (図 3.5)、測定系の座標軸を X'Y'Z' 系とする。XYZ 系は図 3.5 のように定義されていて、X 軸は光学定盤 2 の短辺方向、Y 軸は光学定盤 2 の長辺方向に平行である。

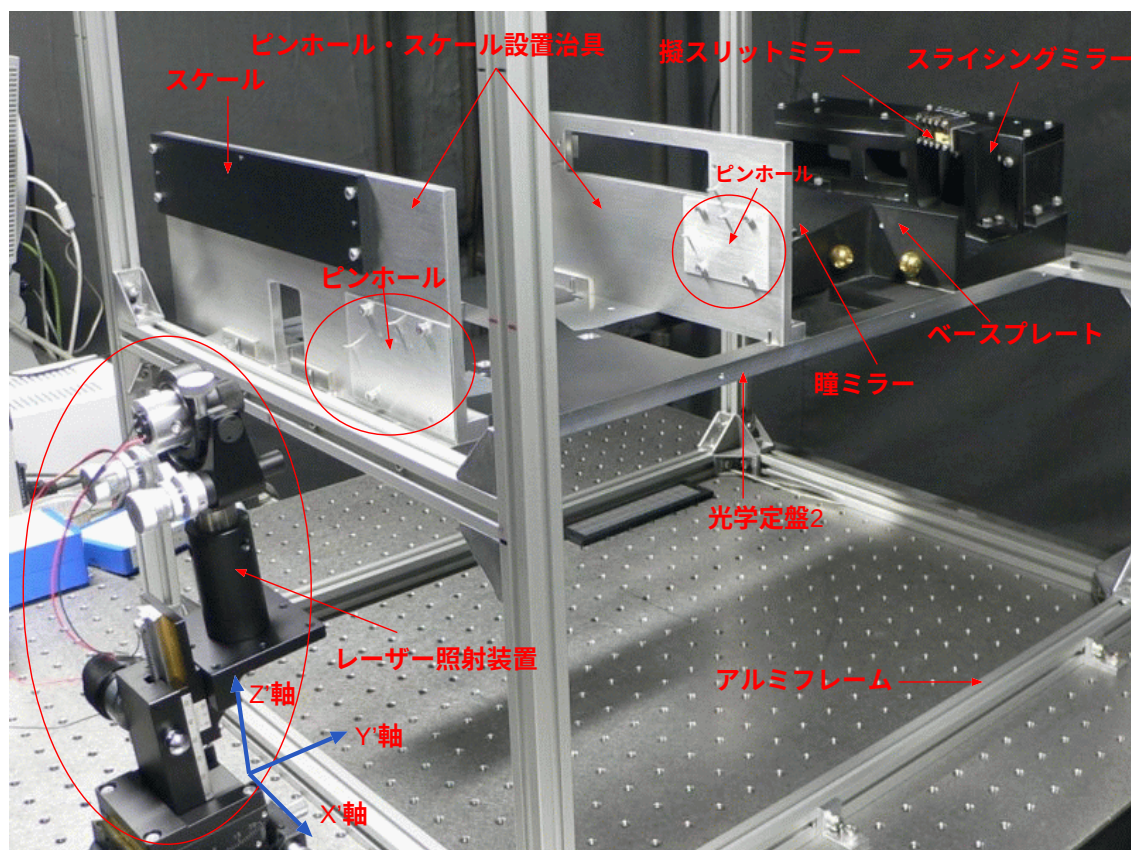


図 3.4: 実際の測定系

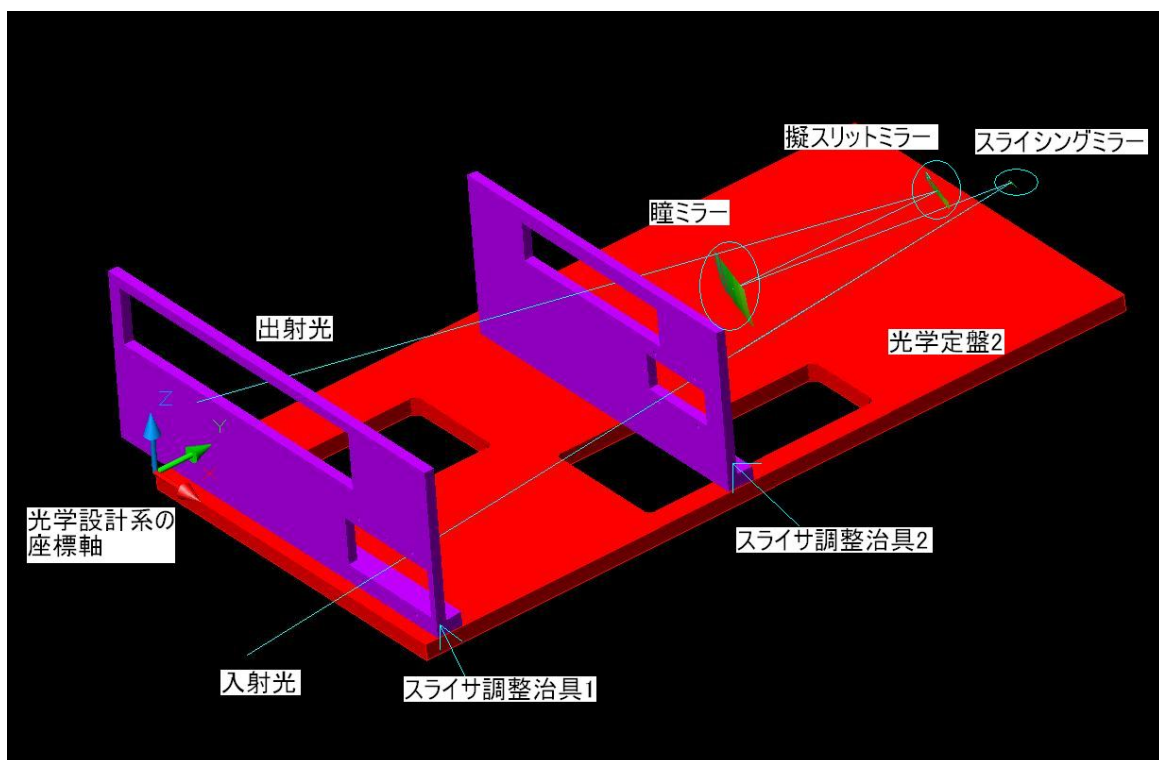


図 3.5: 光学設計系の座標軸

本測定で基準としているのは光学定盤2である。スライサ系ミラー3種を設置したベースプレートは、光学定盤の位置決めピンと実測で厚さ 3.5mm のシム板 (実測で 1.96mm、1.44mm、0.09mm を重ねている) を用いて設計通りに光学定盤2に設置している。シム板は3.6.4に詳述する。このときの位置決めピン穴の位置精度が $50\mu\text{m}$ 程度、ピンの取り付け精度が $10\mu\text{m}$ 程度、反射防止の黒塗り塗装の皮膜の厚さが $20\mu\text{m}$ 程度なので、光学定盤上の設置精度は $54.8\mu\text{m}$ 以内である。また、前述したようにベースプレート上にはスライシングミラーと擬スリットミラーマウントが位置決めピンにより再現性良く $17.3\mu\text{m}$ 以内の精度で設置される。よって、これらのミラーの光学定盤上の設置精度は $57.4\mu\text{m}$ 以内と見込まれる。ベースプレート設置の模式図を図 3.6 に示す。

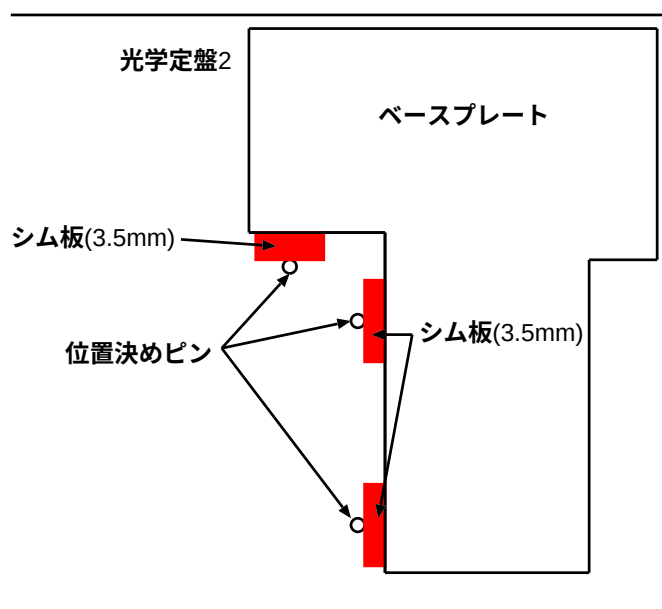


図 3.6: ベースプレートのシム板を用いた設置の模式図

一方、ピンホールと位置測定用のスケールは光学定盤 2 上にピンホール・スケール設置治具を用いて各 2ヶ所に設置される。これらも光学定盤 2 に位置決めピンを介して設置し、その精度は 3.4.1 で後述するようにピンホール板は $514\mu\text{m}$ 以内、スケールは $112\mu\text{m}$ 以内と見込まれる。また、ピンホールの設置誤差による再現光線の角度精度は 0.0067mm 、スライシングミラー上での位置精度は 0.063mm である。レーザー照射装置はアルミフレームの外側に設置する。レーザー照射装置から、光学定盤 2 上に設置した 2ヶ所のピンホールを通過してスライシングミラーに光線が入射するようにレーザーを照射する。これにより、3.3 で選択した光線を実験的に再現する。レーザー照射装置のステージは X', Z', θ', ϕ' 方向に位置、角度を変えることで光線がピンホールを通過できるようにしてある。測定系の座標軸は図 3.4 に示した通りで、 X 軸ステージの移動方向に X' 軸、 Z 軸ステージの移動方向に Z' 軸をとり、この 2 軸に垂直でスライサ系を設置した方向に Y' 軸をとってある。 θ' は回転軸が Y' 軸の向きを基準とした回転角を表す。 ϕ' は回転軸が X' 軸方向で Z' 軸を基準とした回転角を表す。これらは 3.4.2 節で詳述する。光学定盤 2 の外側からレーザーを照射すると、図 3.7 で示す光路を通過して、最後にスケールで測定する。

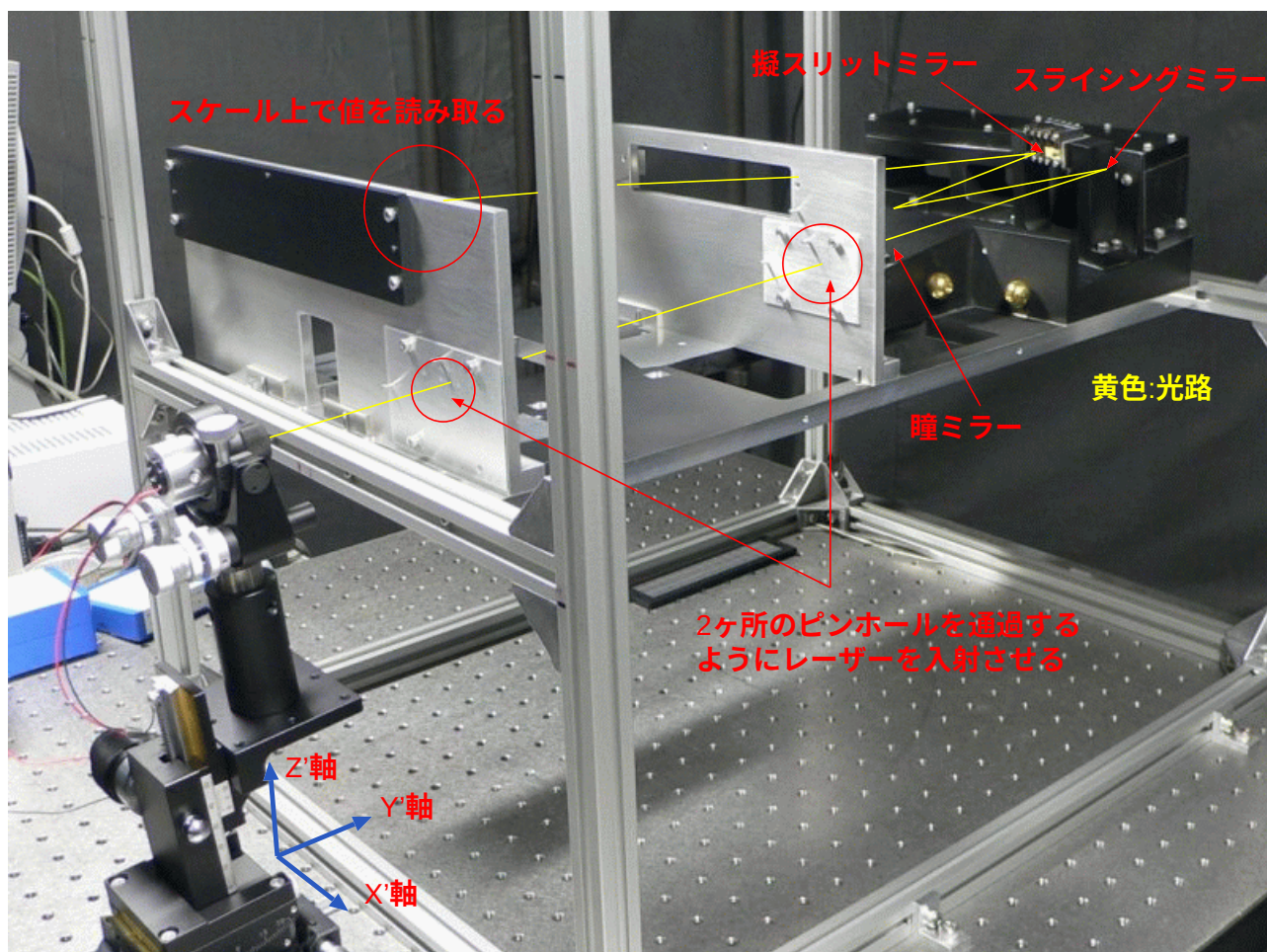


図 3.7: 測定系の光路

以下で、各部品や各装置について詳しく述べていく。

3.4.1 ピンホール・スケールの設置

- ピンホール・スケール設置治具 (図 3.8)

ピンホール・スケール設置治具はピンホール板とスケールを光学定盤 2 上に固定するために使用する。これはアルミで製作されていて、入射光が通過する位置と出射光が通過する位置に穴があいている。ピンホールは光学定盤上に 2ヶ所設置するので、ピンホール・スケール設置治具は 2つ製作されている。光路上でスライシングミラーに遠い方をピンホール・スケール設置治具 1、近い方をピンホール・スケール設置治具 2 とする (図 3.8 参照)。

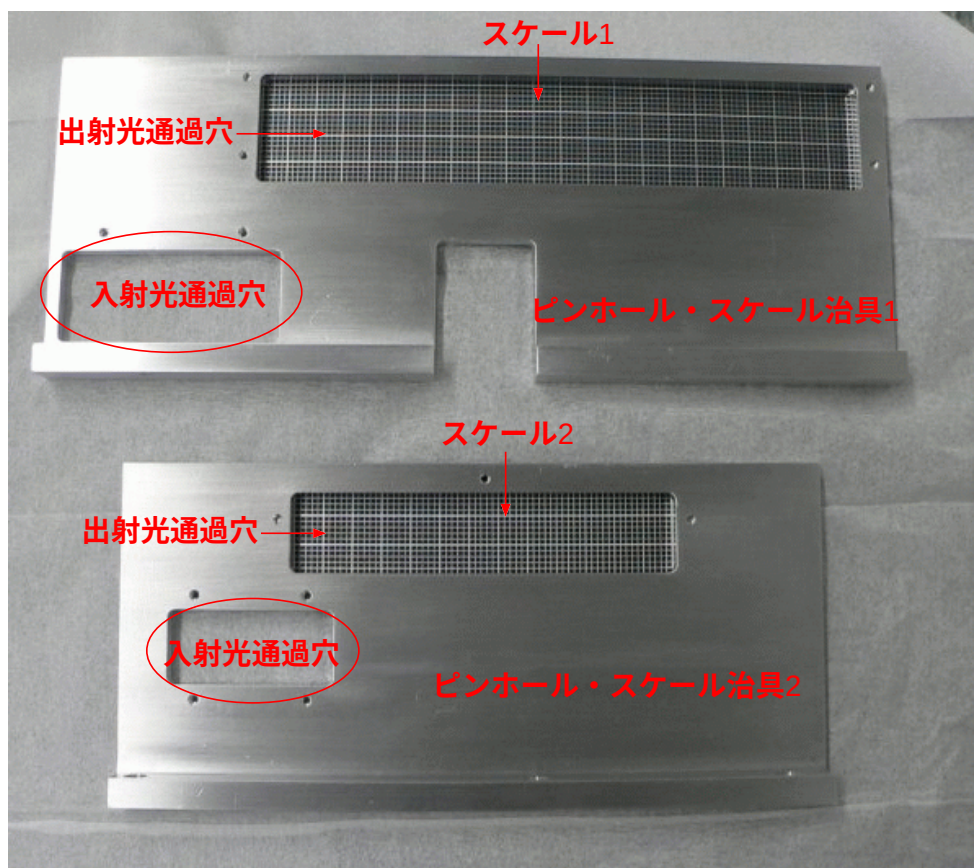


図 3.8: 製作したピンホール・スケール設置治具

ピンホール・スケール設置治具 1,2 は光学定盤 2 の位置決めピンとシム板を使用して固定し、再現性が出せるようになっている。このときの設置の模式図を図 3.9 に示す。位置決めピンの穴位置精度が $100\mu\text{m}$ 程度、ピンの取り付け精度が $10\mu\text{m}$ 程度、本来 2.0mm のシムを使用するところを 1.95mm のシムを使用しているので光学定盤 2 への設置精度は $112\mu\text{m}$ 程度と見込まれる。また、実際に設置した様子を図 3.10 に示す。ピンホール・スケール設置治具 1,2 はピンホール板の間隔が 225mm になるように設置されている。

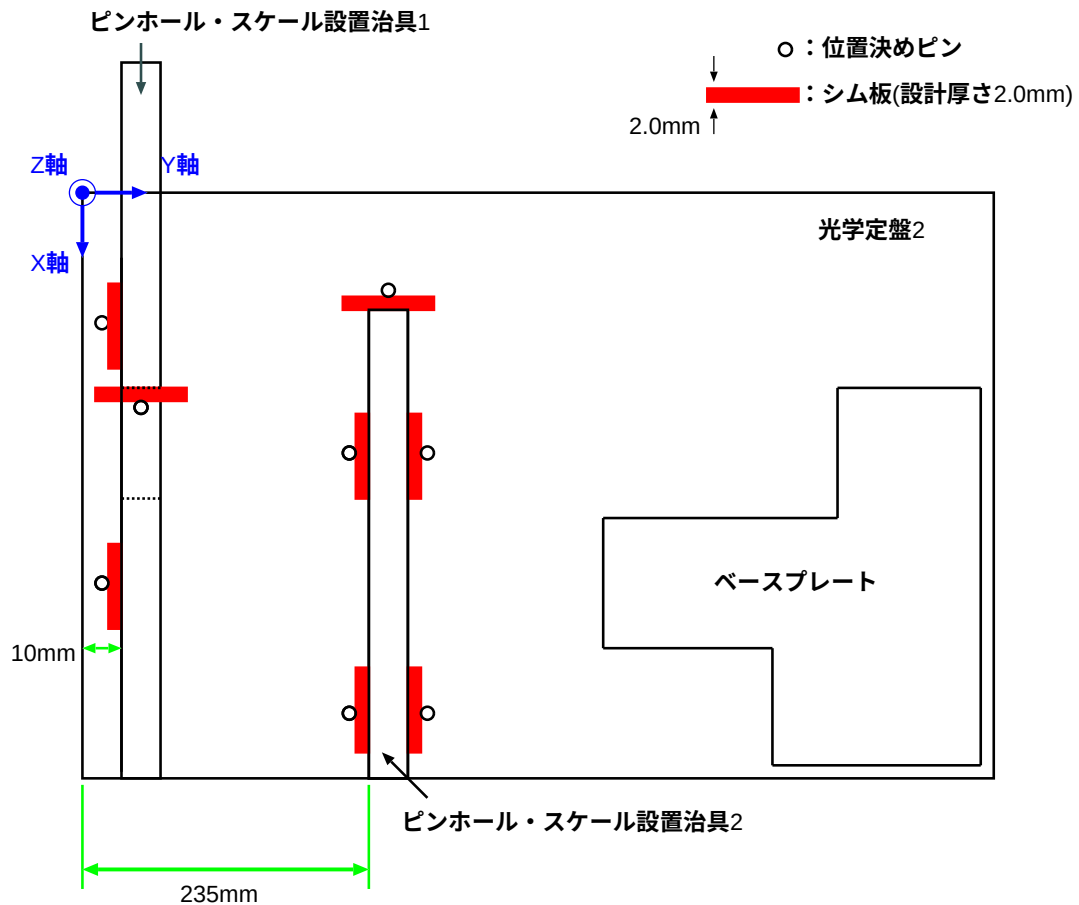


図 3.9: ピンホール・スケール設置治具取り付けの模式図

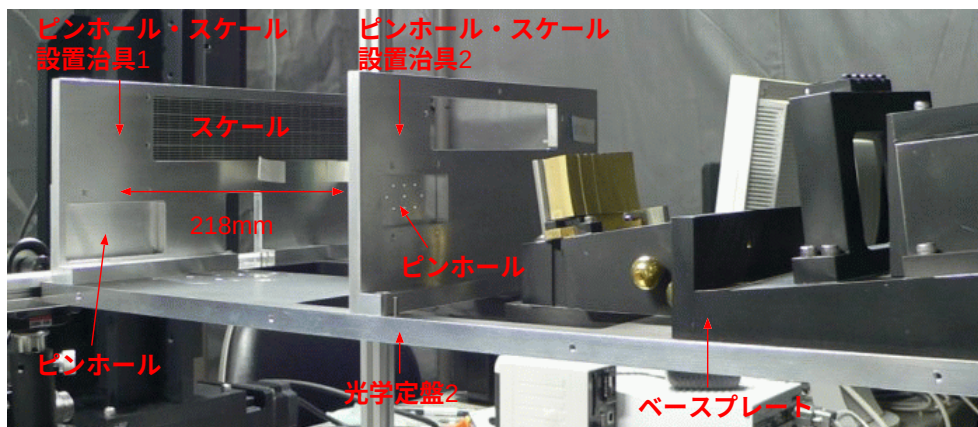


図 3.10: ピンホール・スケール設置治具 1,2 の光学定盤への設置

● ピンホール

ピンホールの直径は1.0mmで、厚さ1.0mmのアルミ板上に製作されている。このアルミ板をピンホール板とよぶことにする。ピンホール板は光学定盤上で入射光が通過する位置にピンホール・スケール設置治具を用いて2ヶ所に設置する(図3.7)。

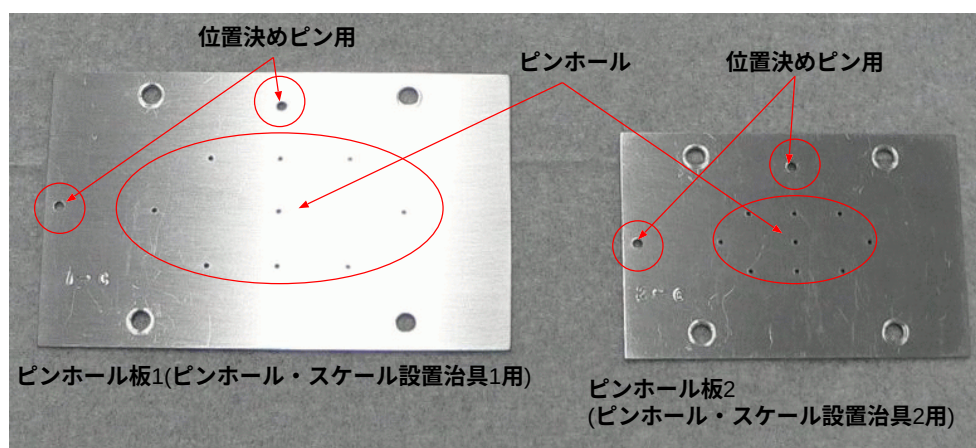


図 3.11: 製作したピンホール板

図 3.11 は製作したピンホール板である。ピンホール・スケール設置治具 1 に取り付けるピンホール板 1 の大きさは 91mm×55mm、ピンホール・スケール設置治具 2 に取り付けるピンホール板 2 の大きさは 68mm × 45mm である。5 枚のスライシングミラーに入射する光線は位置や角度がそれぞれ少しずつ異なっているので、スライシングミラーごとにピンホール板を用意する。そして、各板ごとに 3.3 で選んだ入射光の通過位置に合わせてピンホールを製作している。測定のときはスライシングミラーごとにピンホール板を付け変えて使用する。ピンホール板の設置位置はピンホール・スケール設置治具の位置決めピンで決まっている。位置決めピン穴の位置精度が 50 μ m 程度、ピンの取り付け精度が 10 μ m 程度、ピンホール板の取り付け穴の公差が 10 μ m 程度なのでピンホール板の XZ 面に平行な面内の設置精度は 52 μ m 程度と考えてよい。ピンホール板を付け変えてもこの精度で再現性をだすことができる。しかし、ピンホール板を設計する際、その厚さを考慮せず設計したので、その中心位置は 0.5mm(厚さの半分) だけ位置がずれている。そのため、実際のピンホール板の Y 軸方向の設置精度は 0.5mm である。ピンホールの位置がずれることによる再現光線の角度精度は 0.0067 度以内で、レーザーから 535mm 離れたスライシングミラー上での位置精度は 0.067mm 以内である。

入射させるスライシングミラーとピンホール板の対応を間違わないように各ピンホール板に「1(もしくは 2)-スライシングミラー名のアルファベット」の刻印がされている。1 はピンホール板 1、2 はピンホール板 2 を示している。アルファベットがスライシングミラー名 (図 2.12) を表していて、A~E までである。

また各スライシングミラーで再現する 9 本の入射光を扱いやすくするためピンホールに 1~9 までの番号をつけた。ピンホール番号は図 3.12 で示すようにつけた。図 3.12 は刻印のある面を上にして見ている。ピンホール番号の振り方は全てのピンホール板で同じである。各入射光は「スライシングミラーのアルファベット (図 2.12)-ピンホール番号」で表す。例えば「C-9」といったら、ピンホール番号 9(中央のピンホール) からスライシングミラー C に入射する光線を示している。

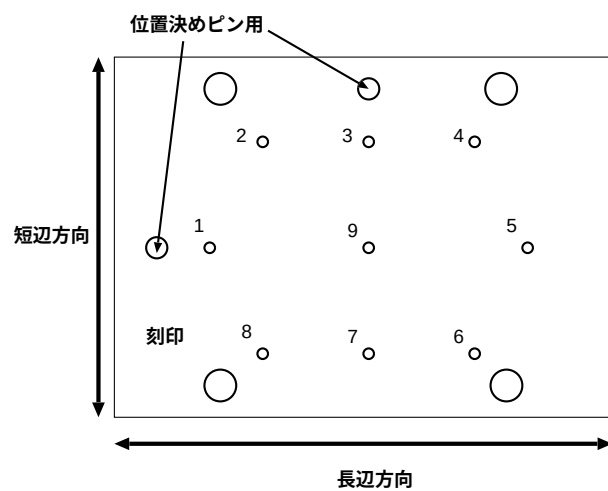


図 3.12: ピンホールの番号

また、ピンホール板を製作するときに使用した各ピンホールの座標を表 3.1 にまとめる。ここで示す座標は XYZ 系での値である。

ピンホール番号	ピンホール板 1(X,Y,Z)[mm]	ピンホール板 2(X,Y,Z)[mm]
A-1	(190.8,10.0,27.1)	(200.2,235.0,51.3)
A-2	(201.3,10.0,37.7)	(205.9,235.0,57.0)
A-3	(215.0,10.0,37.7)	(215.0,235.0,57.0)
A-4	(228.6,10.0,37.7)	(224.1,235.0,57.0)
A-5	(239.2,10.0,27.1)	(229.8,235.0,51.3)
A-6	(228.6,10.0,16.3)	(224.1,235.0,45.5)
A-7	(215.0,10.0,16.3)	(215.0,235.0,45.5)
A-8	(201.3,10.0,16.3)	(205.9,235.0,45.5)
A-9	(215.0,10.0,27.1)	(215.0,235.0,51.3)
B-1	(190.8,10.0,28.2)	(200.2,235.0,52.1)
B-2	(201.3,10.0,38.7)	(205.9,235.0,57.8)
B-3	(215.0,10.0,38.7)	(224.1,235.0,57.8)
B-4	(228.6,10.0,38.7)	(224.1,235.0,57.8)
B-5	(239.2,10.0,28.2)	(229.8,235.0,52.1)
B-6	(228.6,10.0,17.4)	(224.1,235.0,46.3)
B-7	(215.0,10.0,17.4)	(215.0,235.0,46.3)
B-8	(201.3,10.0,17.4)	(205.9,235.0,46.3)
B-9	(215.0,10.0,28.2)	(215.0,235.0,52.1)
C-1	(190.8,10.0,29.3)	(200.2,235.0,52.8)
C-2	(201.3,10.0,39.8)	(205.9,235.0,58.5)
C-3	(215.0,10.0,39.8)	(215.0,235.0,58.5)
C-4	(228.6,10.0,39.8)	(224.1,235.0,58.5)
C-5	(239.2,10.0,29.3)	(229.8,235.0,52.8)
C-6	(228.6,10.0,18.5)	(224.1,235.0,47.0)
C-7	(215.0,10.0,18.5)	(215.0,235.0,47.0)
C-8	(201.3,10.0,18.5)	(205.9,235.0,47.0)
C-9	(215.0,10.0,29.3)	(215.0,235.0,52.8)
D-1	(190.8,10.0,30.4)	(200.2,235.0,53.5)
D-2	(201.3,10.0,40.9)	(205.9,235.0,59.2)
D-3	(215.0,10.0,40.9)	(215.0,235.0,59.2)
D-4	(228.6,10.0,40.9)	(224.1,235.0,59.2)
D-5	(239.2,10.0,30.4)	(229.8,235.0,53.5)
D-6	(228.6,10.0,17.4)	(224.1,235.0,46.3)
D-7	(215.0,10.0,17.4)	(215.0,235.0,46.3)
D-8	(201.3,10.0,17.4)	(205.9,235.0,46.3)
D-9	(215.0,10.0,30.4)	(215.0,235.0,53.5)
E-1	(190.8,10.0,31.6)	(200.2,235.0,54.3)
E-2	(201.3,10.0,42.0)	(205.9,235.0,59.9)
E-3	(215.0,10.0,42.0)	(215.0,235.0,59.9)
E-4	(228.6,10.0,42.0)	(224.1,235.0,59.9)
E-5	(239.2,10.0,31.6)	(229.8,235.0,54.3)
E-6	(228.6,10.0,20.8)	(224.1,235.0,48.5)
E-7	(215.0,10.0,20.8)	(215.0,235.0,48.5)
E-8	(201.3,10.0,20.8)	(205.9,235.0,48.5)
E-9	(215.0,10.0,31.6)	(215.0,235.0,54.3)

表 3.1: ピンホールの製作に使用した XYZ 系の座標

● スケール

スケールは光学定盤 2 上で、擬スリットミラー出射光の延長上にピンホール・スケール設置治具を用いて 2ヶ所に設置できる (図 3.7 参照)。ピンホール・スケール設置治具 1 に設置するスケールを「スケール 1」、ピンホール・スケール設置治具 2 に設置するスケールを「スケール 2」と表記する。スケール 1 を使う際は、光線を遮らないようにスケール 2 は設置しない。各スケールは厚さが 5.0mm のアルミ板に黒アルマイト塗装をした後、2.0mm 刻みで溝が彫ってあるため溝の部分は銀色になっている。溝幅は 0.2mm と 0.4mm で彫ってある。長さが 10 の倍数になる部分の溝幅は 0.4mm で、他の部分は 0.2mm である。溝位置の加工精度は 0.01mm 程度、スケールの溝の両端間の長さの誤差は 0.05mm 程度である。図 3.13 は製作したスケール 2 である。スケール 1 の座標軸は長辺方向を X_{S1} 軸、短辺方向を Z_{S1} 軸と定義する。スケール 2 の座標軸は長辺方向を X_{S2} 軸、短辺方向を Z_{S2} 軸と定義する (図 3.13 参照)。スケール 1、スケール 2 の座標軸の原点は共に溝の最も右下にとってある。XYZ 系でスケール 1 の原点は $(X,Y,Z)=(-35.0,10.0,71.4)$ 、スケール 2 の原点は $(X,Y,Z)=(71.0,235.0,77.7)$ の位置にある。この座標軸は設置誤差のため測定系 $X'Y'Z'$ の座標軸とわずかに異なっている。スケール 1 の大きさは 240mm × 49mm で長辺方向に 220mm、短辺方向に 42mm まで読むことができる。スケール 2 の大きさは 150mm × 35mm で長辺方向に 130mm、短辺方向に 28mm まで読むことができる。スケールの設置位置も位置決めピンで決められている。位置決めピン穴の位置精度が 50 μ m 程度、ピンの取り付け精度が 10 μ m 程度、スケールの取り付け穴の公差が 10 μ m 程度なのでスケールの設置治具への設置精度は 52 μ m 程度である。スケールを付け変えてもこの精度で再現性をだすことができる。また、スケール座標の読み ($X_{S1}Z_{S1}$ 系、 $X_{S2}Z_{S2}$ 系) の XYZ 系に対する誤差 (すなわち、光学定盤に対するスケールの設置誤差) は設置治具の設置誤差が 112 μ m 程度、スケールの設置誤差が 52 μ m なので、およそ 123.7 μ m といえる。

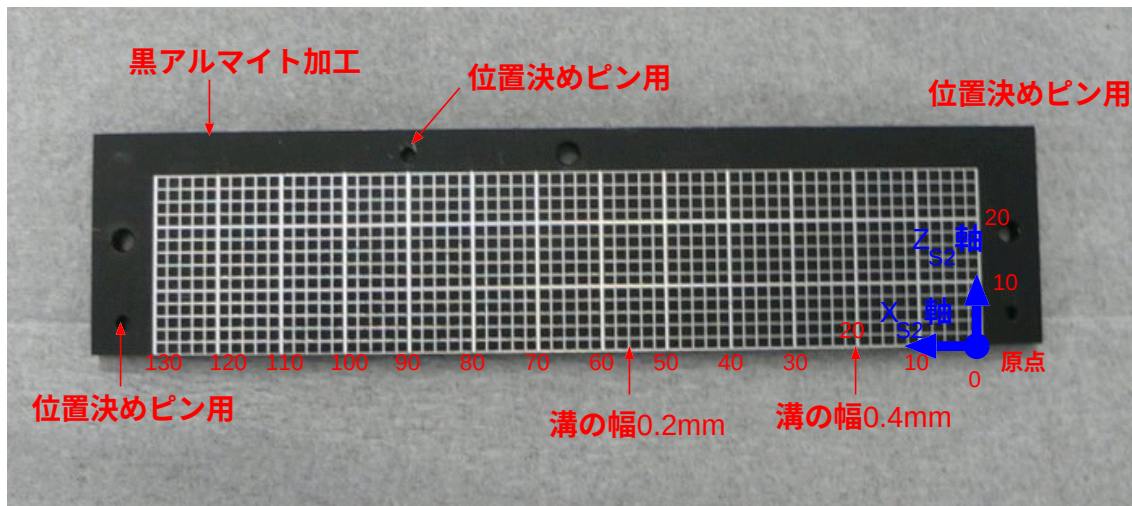


図 3.13: 製作したスケール 2

上記してきた設置治具上のピンホール板とスケールの設置位置と設置の様子を図 3.14 に示す。また、設置治具の光学定盤への設置誤差と、ピンホール板の設置治具への設置誤差からピンホール板の光学定盤に対する設置誤差は 514.4 μ m、スケールの光学定盤に対する設置誤差は 123.7 μ m になる。

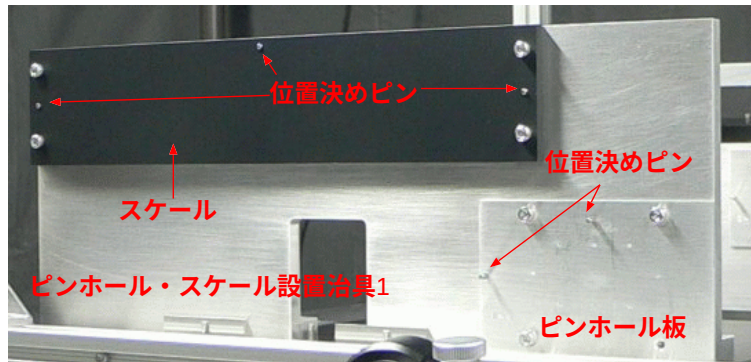


図 3.14: ピンホール・スケール設置治具の位置決めピン位置

3.4.2 レーザー照射装置

本小節ではレーザー照射装置の全体像を示した後に、各部品の詳細について述べる。

レーザー照射装置は位置移動ができるステージと角度移動ができるステージにレーザーを組み合わせたものを使用する。レーザーはレーザーホルダに納められている状態でステージに設置される。図 3.15 は実際に組み立てたレーザー照射装置 (左) とその模式図 (右) である。模式図は図 3.15 の実際に組み立てたレーザー照射装置を Y' 軸方向から見た図になっている。図 3.15 にレーザー照射装置の座標系も定義してある。レーザー照射装置は X' 軸方向に移動が可能な X 軸ステージ、Z' 軸方向に移動が可能な Z 軸ステージ、Z 軸方向に回転軸を持つ回転ステージ、X 軸方向に回転軸を持つゴニオステージを組み合わせている。Z 軸ステージはゴニオステージの上に乗せて使用している。このため、ゴニオステージを回転させると Z 軸ステージの移動方向と Z' 軸の向きがずれてしまう。しかし、今回ゴニオステージは $4.5^\circ \sim 7.3^\circ$ の限られた範囲でしか使用しないので、傾きの効果は無視することにした。そして、組み合わせたステージにレーザーを設置してある。以下では、各装置について詳しく述べる。

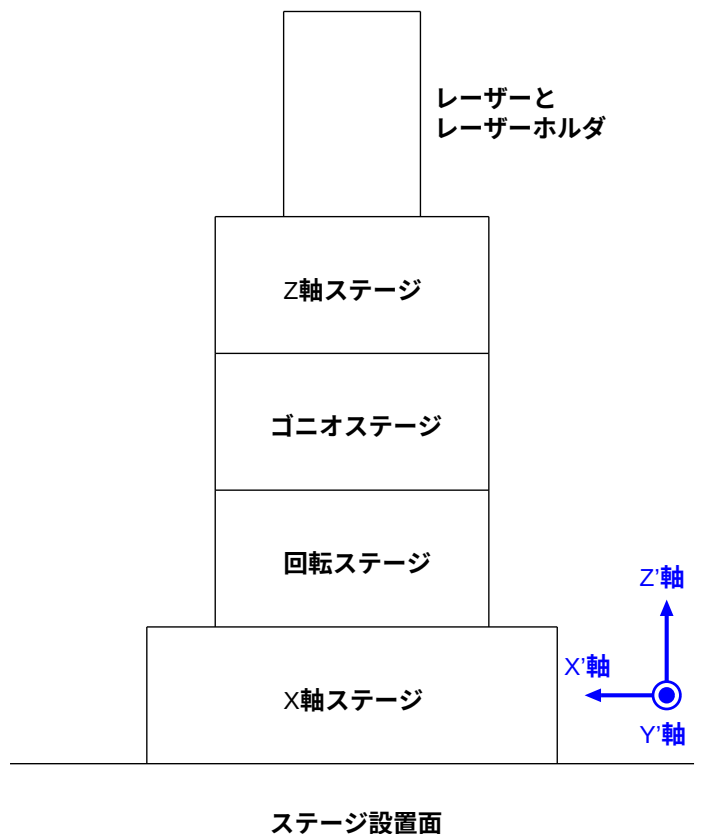
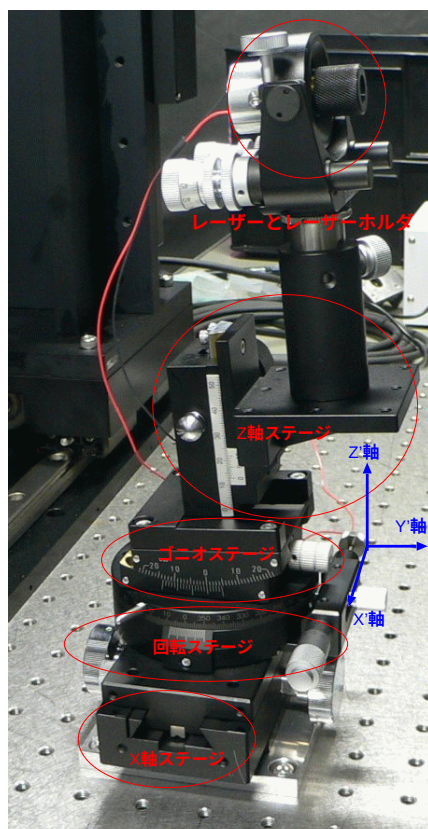


図 3.15: 実際のレーザー照射装置 (左) とレーザー照射装置の模式図 (右)

- X 軸ステージ

X 軸ステージは図 3.15 の座標軸で X' 軸方向に移動するステージである。図 3.16 は実際の X 軸ステージで駿河精機社製 (型番:B06-1N) を使用している。X 軸ステージの可動域は $\pm 50\text{mm}$ である (カタログ値)。主尺は 1mm 刻みで記載されており、副尺で 0.1mm まで読むことができる。中央の送り用ツマミを回転させることでステージが移動する。このときの移動精度は $40\mu\text{m}$ である。また、X 軸ステージの光学測定用機への設置精度はネジ穴のアソビ分で、 $250\mu\text{m}$ である。X 軸ステージの読みを X' 座標とする。

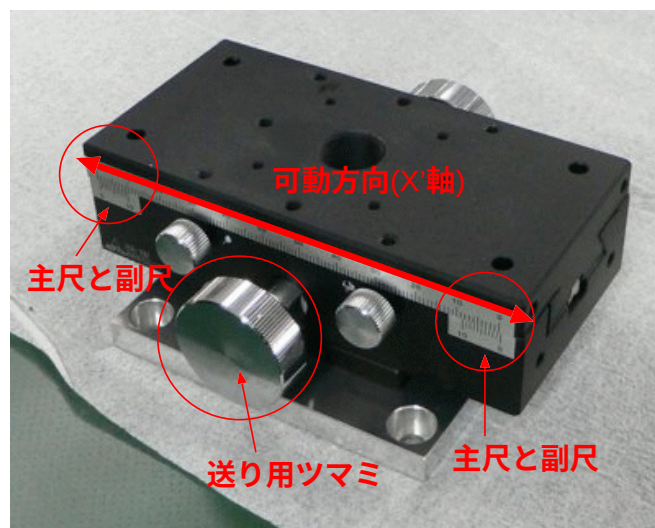


図 3.16: X 軸ステージ

- Z 軸ステージ

Z 軸ステージは図 3.15 の Z' 軸方向に移動するステージである。図 3.17 は実際の Z 軸ステージでシグマ光機社製 (型番:TAR-60703D) を使用している。Z 軸ステージの可動域はカタログ値で $0\text{mm}\sim 33\text{mm}$ と記載されているが、実際は $0\text{mm}\sim 36\text{mm}$ まで使用することができる。主尺は 1mm 刻みで記載されており、副尺で 0.1mm まで読むことができる。送り用ツマミを回転させることでステージが移動する。このときの移動精度は $20\mu\text{m}$ である。また、Z 軸ステージのゴニオステージへの設置精度はネジ穴のアソビ分で、 $250\mu\text{m}$ である。Z 軸ステージの読みを Z' 座標とする。

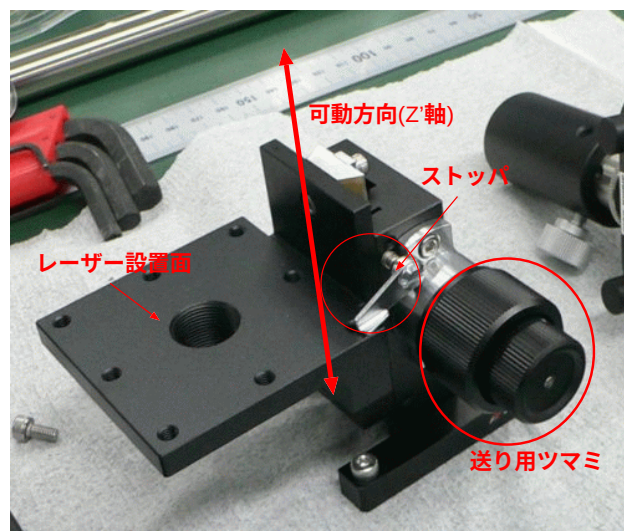


図 3.17: Z 軸ステージ

● 回転ステージ

回転ステージは図 3.15 の Z' 軸を回転軸に回転するステージである。図 3.18 の左が実際の回転ステージで駿河精機社製 (型番:B43-85N) を使用している。回転ステージは大きく値を変えられることができる粗動と、微小に値を変えられることができる微動の 2 種類の移動法がある。図 3.18 の粗動クランプを緩めると回転ステージを粗動することができる。回転ステージは粗動で 360° 回転することができる。値は主尺は 1° 刻みで記載されていて、副尺で 0.1° まで読むことができる。しかし、粗動で回転ステージを回転させてしまうと位置の再現性を出すことができない。今回は粗動は使用せず、微動のみ使用する。微動は図 3.18 で示したマイクロメーターを回す。マイクロメーター 1 目盛りで、回転ステージ 0.012° の回転に相当する。微動のみで使用したときの回転範囲は $\pm 5^\circ$ である。回転の基準は Y' 軸方向を 0° とした。しかし、ステージの設置誤差と粗動による再現性不良から $\theta'=0^\circ$ の方向は必ずしも Y' 軸とは一致していない。回転ステージの X 軸ステージへの設置誤差はネジ穴のアソビ分で、 $250\mu\text{m}$ である。回転ステージの読みを θ' 座標とする。

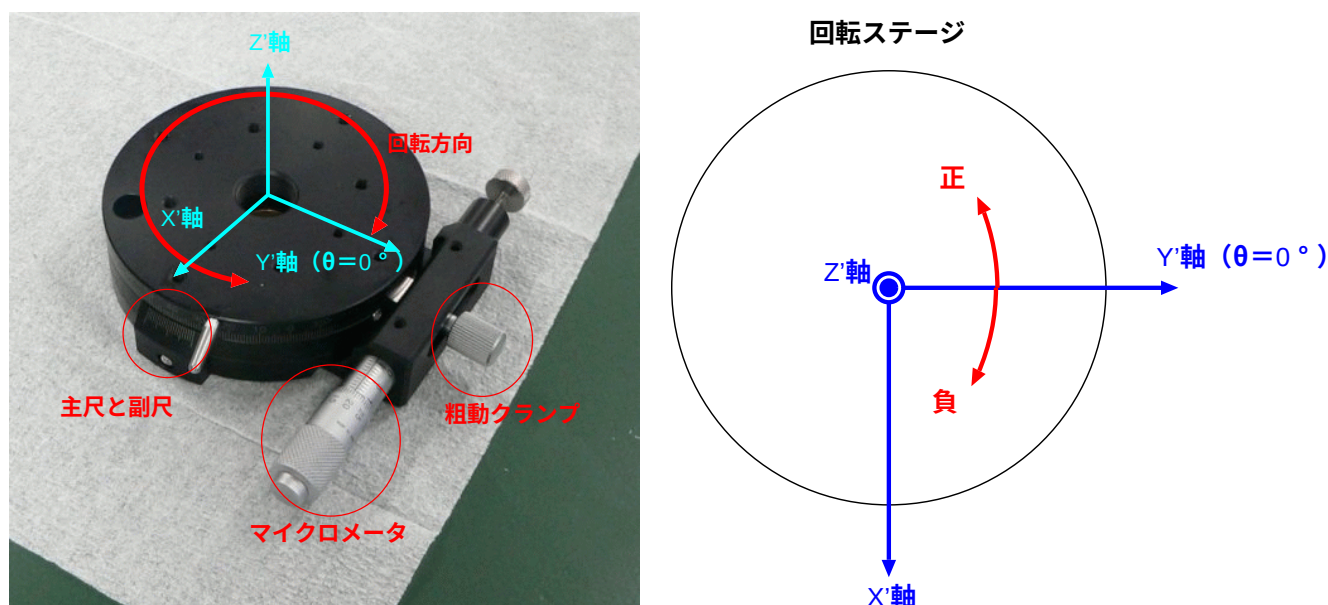


図 3.18: 実際の回転ステージ (左) と回転方向と基準の模式図 (右)

● ゴニオステージ

ゴニオステージは図 3.15 の X' 軸まわりに回転するステージである。図 3.19 の右が実際のゴニオステージで駿河精機社製 (型番:B54-60UN) を使用している。ゴニオステージの回転軸は X 軸方向で、ステージ面から Z 軸方向に 60mm 上にある。回転中心からステージ面に下ろした垂線と Z' 軸方向が一致したときを 0° とする。ゴニオステージの可動域は $\pm 20^\circ$ である (カタログ値)。主尺は 1° 刻みで記載されており、副尺で 0.1° まで読むことができる。送り用ツマミを回転させることでステージが移動する。ゴニオステージから得られる座標を ϕ' 座標とする。

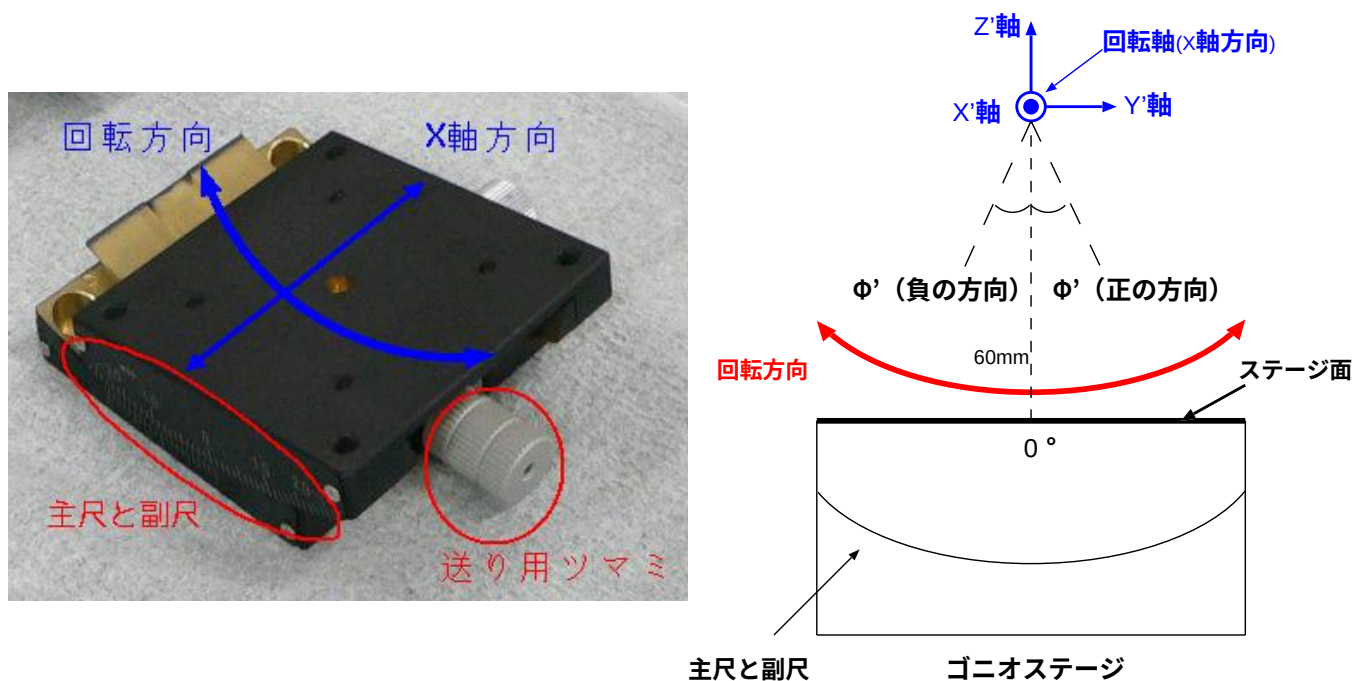


図 3.19: 実際の回転ステージ (左) と回転方向と基準の模式図 (右)

● レーザー

レーザーはエドモンドオプティクス社製 $VLM^{TM}2$ 回折クロスラインジェネレーターモジュール (型番:54030-K) を使用し、固定用のレーザーホルダ、ジンバル式精密ミラーホルダ (シグマ光機社製 型番:MHAN-30DM)、ロッドスタンド (シグマ光機社製 RS-20-30) を組み合わせて、Z 軸ステージに設置する。これらを組み合わせたものをレーザーユニットとよぶ。図 3.20 は実際にレーザーを Z 軸ステージに設置した様子である。

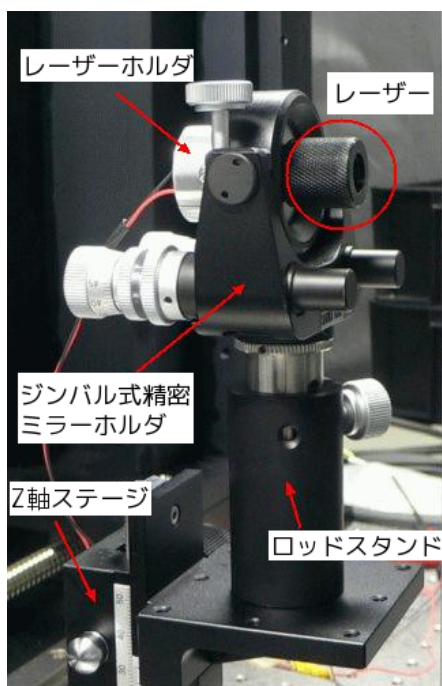


図 3.20: Z 軸ステージ上に固定したレーザー

レーザーユニットは以下で述べるような構造になっている。まず、レーザーはレーザーホルダではさみ固定している (図 3.21)。レーザーを固定したレーザーホルダは、ネジリングで左右からはさむようにしてジンバル式精密ミラーホ

ルダに固定される (図 3.22)。本来、このジンバル式精密ミラーホルダは直径 30mm、厚さ 10mm 以内の光学素子を固定するが、レーザーの直径が 14.76mm(カタログ値) なので、レーザーホルダを介して取り付ける。レーザーを取り付けたジンバル式精密ミラーホルダをロッドスタンドに挿入して固定し、これらを Z 軸ステージに取り付ける (図 3.22)。

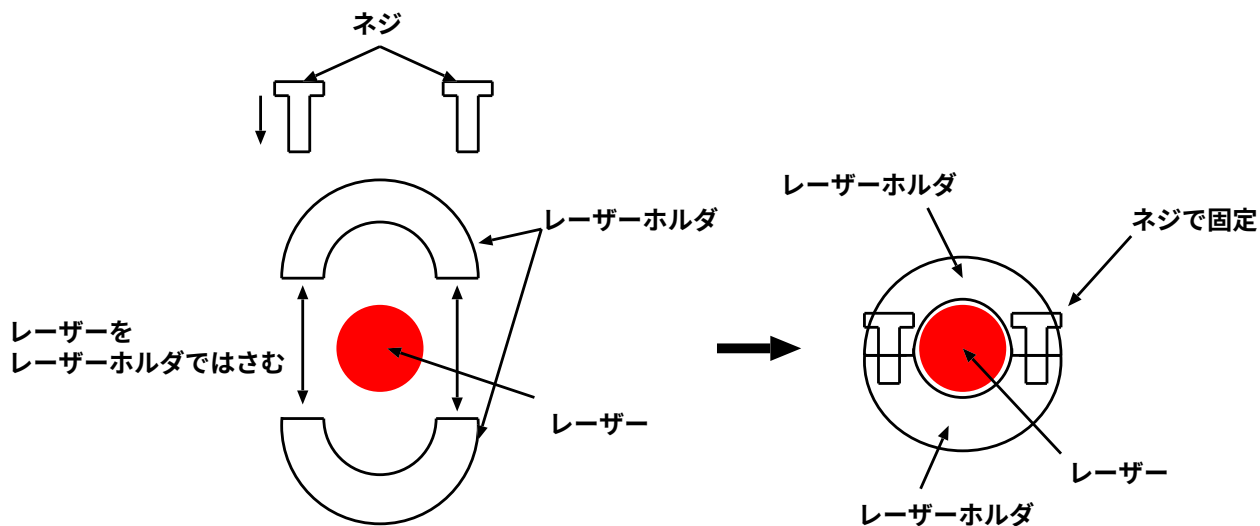


図 3.21: レーザーホルダを用いたレーザー固定の模式図

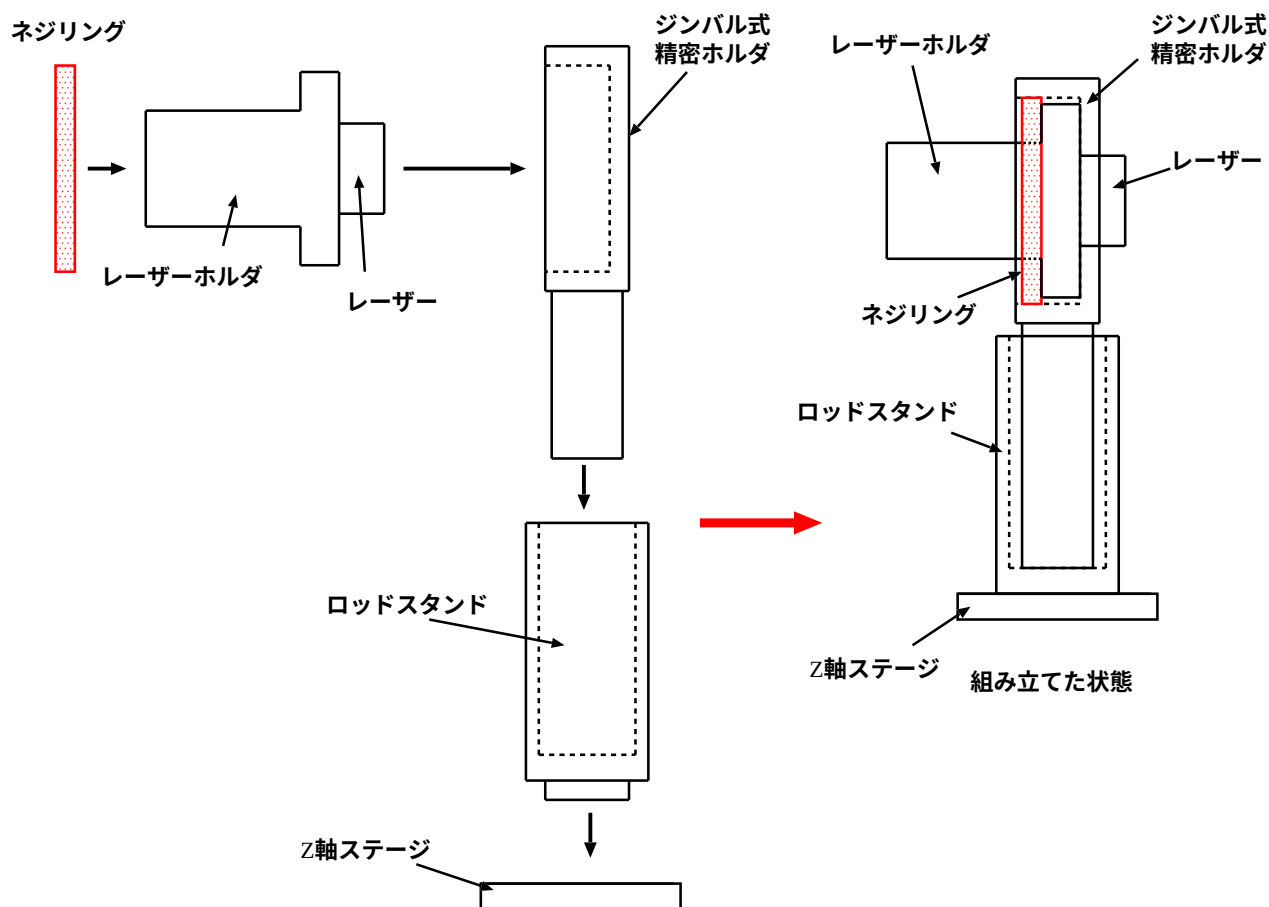


図 3.22: レーザー Z 軸ステージ設置の模式図

3.5 使用するスライシングミラーの選定

3.5.1 目的

スライシングミラーは A~E の 5 枚で 1 組のミラーで (図 2.12 参照)、A~E の各スライシングミラーは 2 枚ずつ製作されている。使用するのは 2 枚のうち 1 枚のみなので、より製作精度のよいスライシングミラーを選ぶ必要がある。スライシングミラーを選定するため、ピンホールを設置せず、図 3.23 のように 5 枚のスライシングミラー全てにレーザーが当たるように光線を入射させる。このときのビーム径は 3mm 程度である。

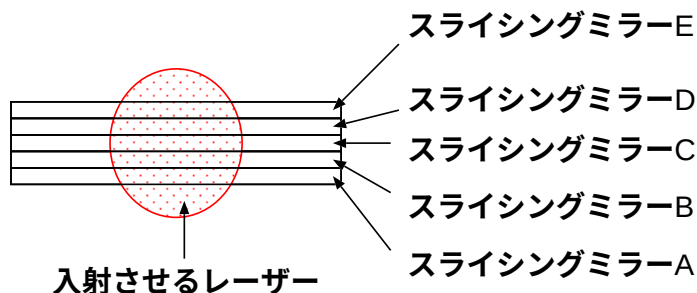


図 3.23: スライシングミラーに入射させるレーザーの模式図

スライシングミラーは入射光を 5 つの異なる方向に反射させるだけなので、完璧に設置されていれば、擬スリットミラーから出射した光線は横一列に並ぶはずである。しかし、実際にはスライシングミラーの精度の問題で光線を入射（このときは C-9 の光線を模擬）させたときスケール 1 上で像が横一列に並ばず上下にずれてしまう (図 3.24)。このため、スケール 1 上で像が横一列に並ぶようにスライシングミラーを選定する必要がある。像が X_{S1} 軸方向に伸びているのはスライシングミラー当たる長辺方向のビームの長さによるもので、 Z_{S1} 軸方向にはミラーから反射した明るい像の上下に回折像が見えている。

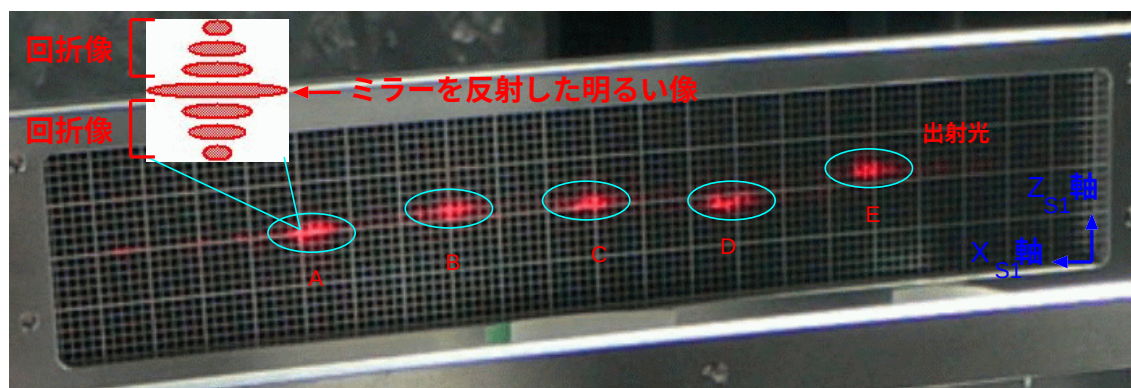


図 3.24: スケール 1 上での像

本節では像が上下にずれてしまう理由を考察した後、使用するスライシングミラー選定のために行った測定とその結果について述べる。

3.5.2 像のずれの考察

なぜ、スケール 1 上で像が上下にずれてしまうのか考察する。スライシングミラー C を基準にとると、スケール上で Z_{S1} 軸方向に最大約 $\pm 2\text{mm}$ のずれがあった。このようなずれが生じる原因として以下の 3 つのことを考察する。

1. スライシングミラーのミラー鏡面は精密切削でミラー板に垂直に製作したが、これが垂直より傾いている
2. スライシングミラーが反っているために面が傾いている。

3. 擬スリットミラーの設置精度

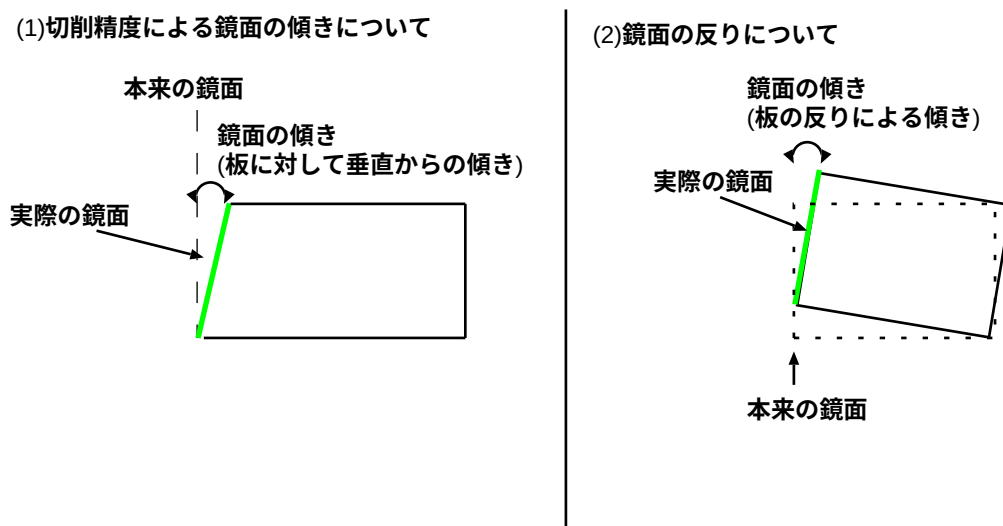


図 3.25: スライシングミラーの傾きと反りの模式図

上記でスライシングミラーの傾き (1) とスライシングミラーの反り (2) とは図 3.25 のような状況を考えている。まず、スライシングミラーのミラー鏡面が切削により本来のミラー位置より傾いている可能性について考察する。スライシングミラーから光路で 769.4mm 離れているスケール上で像が 2mm ずれるためには、スライシングミラーが本来の鏡面位置より θ_1 傾いてなければいけない。このときの光線は図 3.26 に示すような挙動を示す。

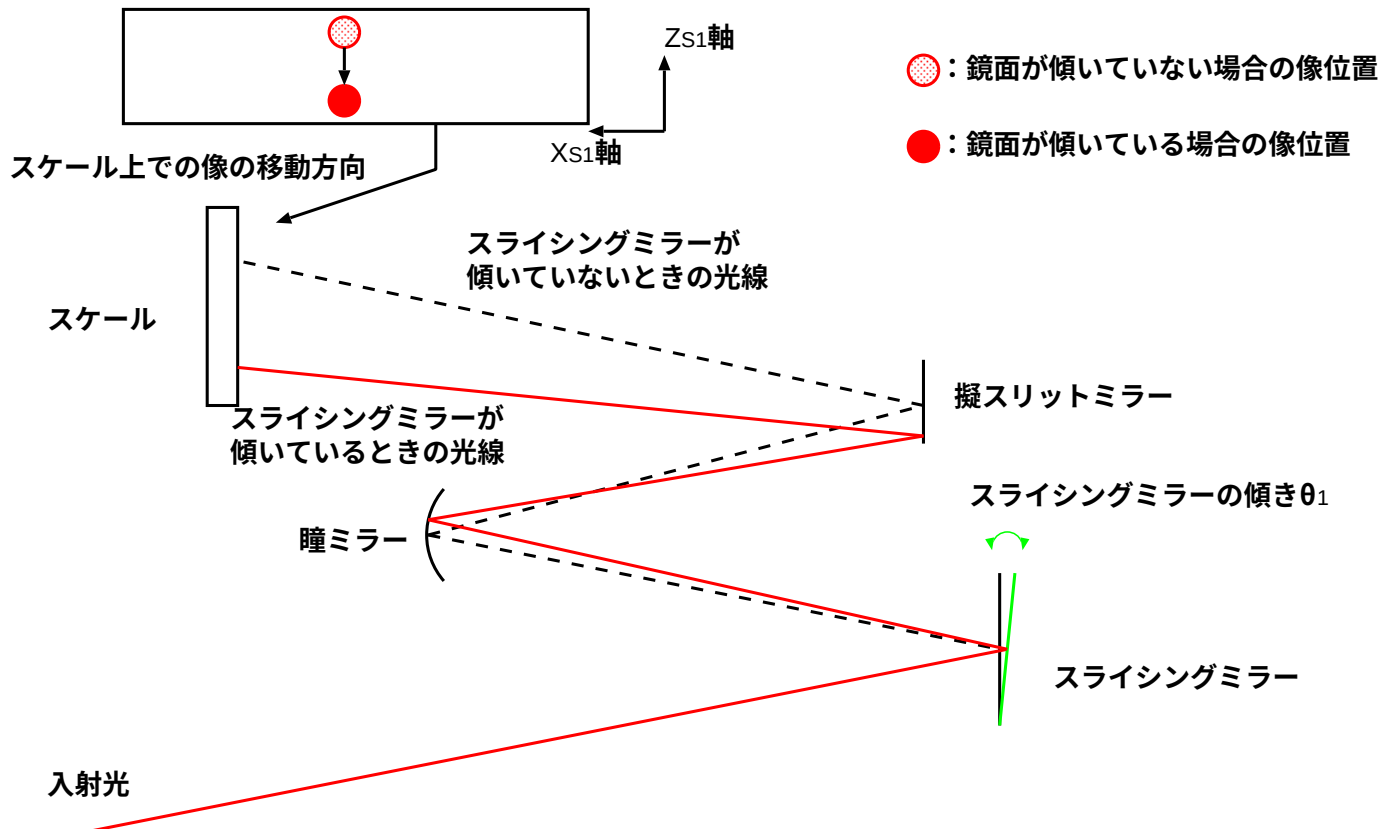


図 3.26: スライシングミラーが傾いているときの光線の挙動

この θ_1 を計算すると (3.1) 式の結果を得る。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{2}{769.4} = 0.149^\circ \quad (3.1)$$

スライシングミラーは厚さが $300\mu\text{m}$ の薄いアルミ板を治具ではさみ断面を精密加工している。図 3.27 に製作後の鏡面高さを垂直断面に垂直方向から観察した図を示す。図 3.27 は縦軸が鏡面高さ、横軸が切削方向を示している。このときの断面高さのずれは $0.05\mu\text{m}$ よりも小さい。少しずれが大きいところでも $0.1\mu\text{m}$ 程度である (Mitsui et al. 2008)。このとき、スライシングミラーの断面直交からのずれ θ'_1 は (3.2) 式のようにになる。

$$\theta'_1 = \tan^{-1} \frac{0.1}{300} = 0.0191^\circ \quad (3.2)$$

測定から予測されるミラー面の傾き θ_1 はスライシングミラー鏡面の傾き精度 θ'_1 より約 8 倍大きい。このため、製作上のスライスミラー鏡面の傾き精度だけで像の位置がスケール 1 上で Z_{S1} 軸方向にずれたとは考えにくい。

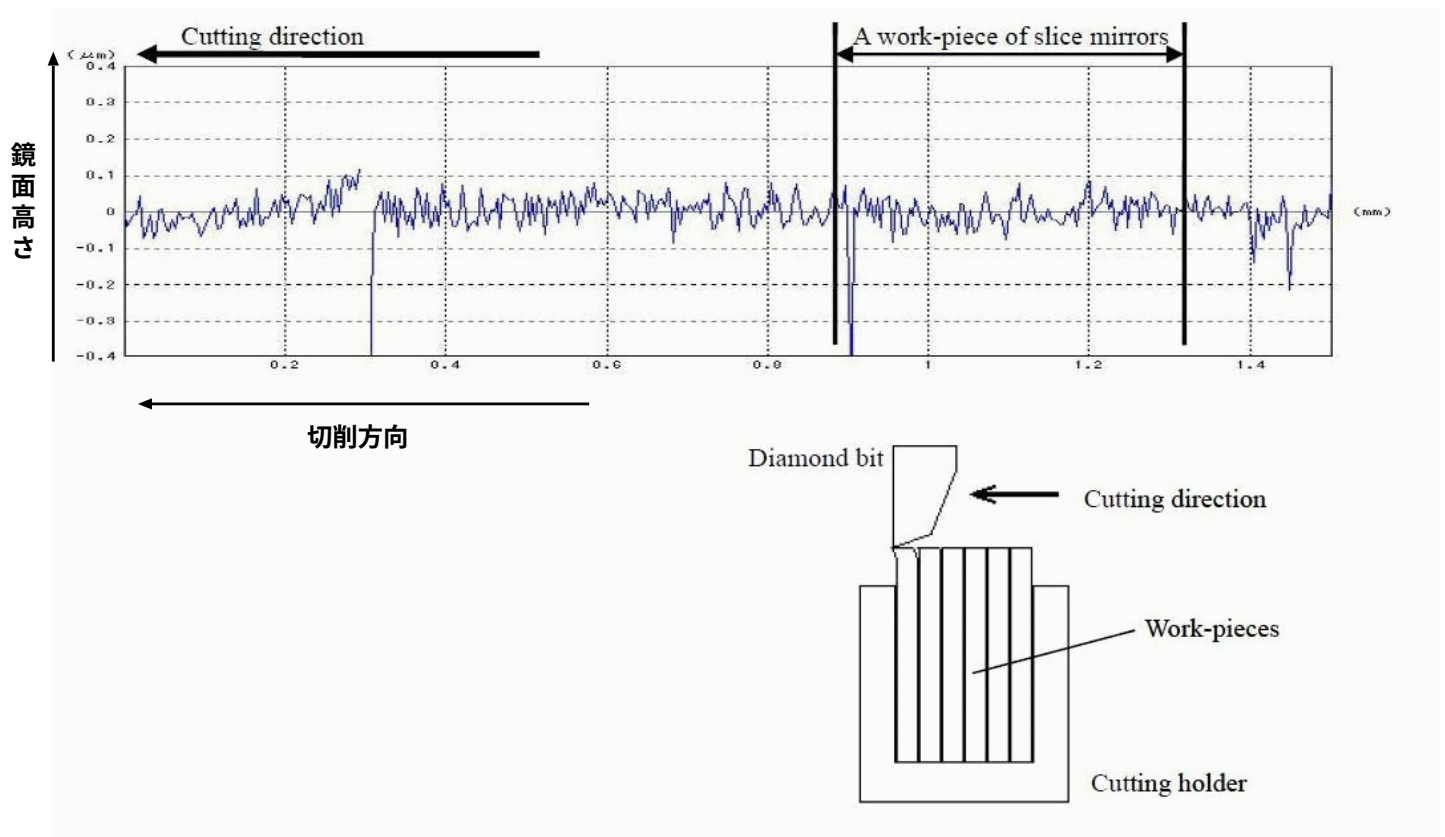


図 3.27: スライシングミラー断面の切削によるずれ (Mitsui et al. 2008 より引用)

次に、スライシングミラーの反りによる影響を考察する。実際に保管されていたスライシングミラーを取り出すと反りが確認され、またミラーによって反り方が異なっていた。この反りの原因は不明だが、スライシングミラーは製作後、ネジで 3ヶ所に力を加えた状態で保管されている (図 3.28) ので、反りが生じた可能性がある。他にスライシングミラーに金蒸着をする際、不均一に熱膨張し反りを生じた可能性がある。

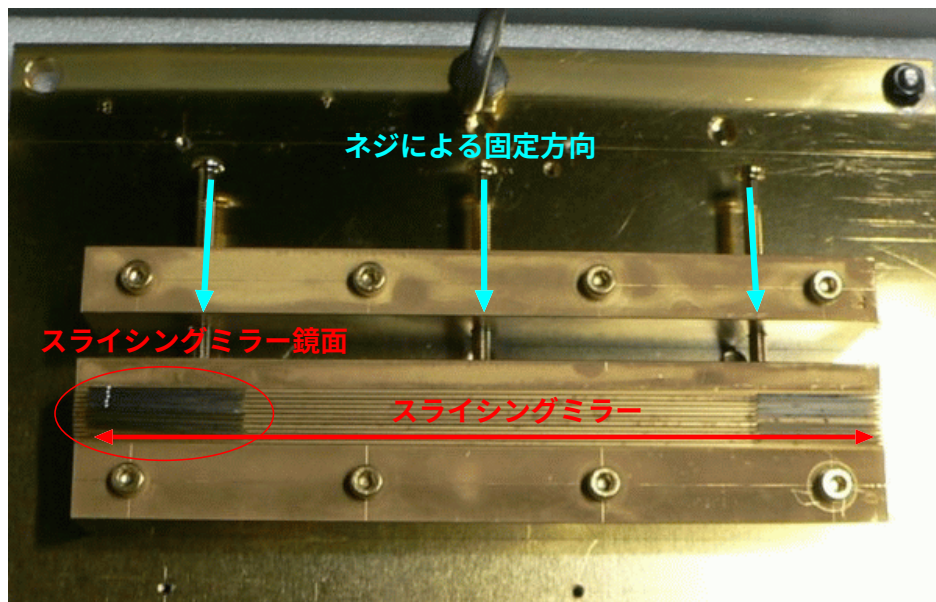


図 3.28: スライシングミラーの保管

反りによる影響を確認するため、2組のスライシングミラーにピンホールを外した状態で C-9 の光線を入射させてスケール 1 上の像位置を測定した。2組のスライシングミラーでスケール 1 上に出来た像の位置が異なっていた。このことから、反りの影響が実際にスケール上にできる像の位置に影響を及ぼしていると推測される。この測定について 3.5.3 で詳述する。

最後に擬スリットミラーの影響を考察する。擬スリットミラーは 2.6.2 で述べたように、各々の位置、角度に合わせて製作した平面のマウントに上から板バネとシムリングでしっかりと押え付けて固定している。そのため、本測定時は擬スリットミラーの設置位置によってスケール 1 上に出来る像位置に影響を及ぼさないと考えていた。しかし、光学調整で擬スリットミラーの調整を行うと像位置が変わったため擬スリットミラーもスケール 1 上に出来る像位置に影響を及ぼすことが分かった。これは、板バネとシムリングの押さえる強さに違いがあると鏡面が傾くためと考えられる (図 3.29)。図 3.29 は本来の鏡面位置を赤の破線、傾いた鏡面位置を緑線で表した。また、他にも擬スリットミラー面の裏面や、設置するマウント面が平ではないために鏡面が傾いてしまった可能性が考えられる。

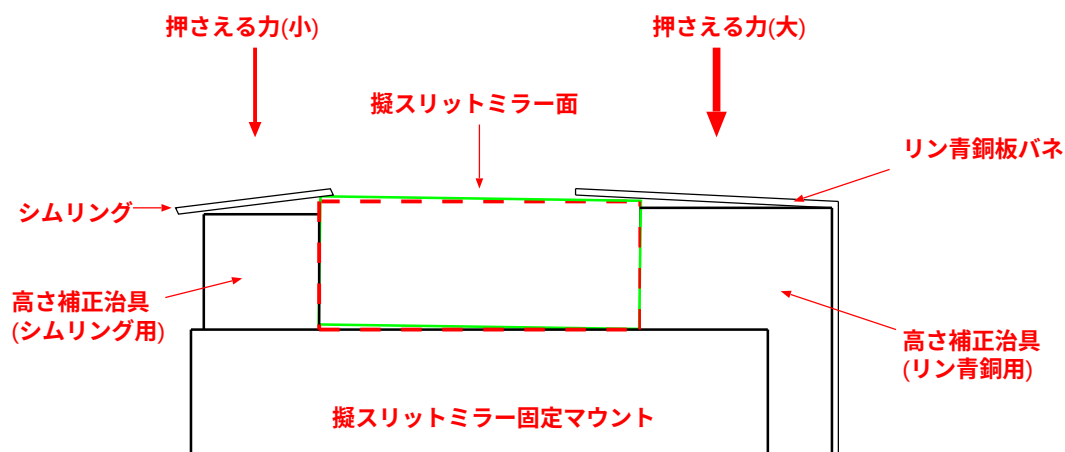


図 3.29: 擬スリットミラーの押え方による傾き

3.5.3 スライシングミラー選定測定の方法

スライシングミラーの選定は、図 3.23 のように 5 枚のスライシングミラー全体にレーザーを当て、スライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーを反射したレーザーがスケール上にできる像を測定する (図 3.24 参照)。入射させるレーザーのビーム径は 3mm 程度である。スライシングミラーの幅合計は 1.5mm である。

1 組のスライシングミラー (区別のため先に測定を行うスライシングミラー組を OLD とよぶ) の測定後、もう 1 組のスライシングミラー (区別のため後に測定する組をスライシングミラー NEW とよぶ) と取り換えてスライシングミラー全体にレーザーを当て、スケール上にできる像を測定する。2 組のスライシングミラーを測定後、擬スリットミラーからの出射光が直線状になるスライシングミラーを選定する。

測定には、擬スリットミラーの出射光測定と同じ測定系を使用する (図 3.4 参照)。入射させるレーザーは C-9 の光線を再現する。ただし、5 枚のスライシングミラーにレーザーを当てる必要があるためピンホールは取り外して使用する。ピンホールを取り外したときの測定系を図 3.30 に示す。レーザーを入射すると、図 3.7 と同じ光路を通過してスケール上に 5 つの像ができる。

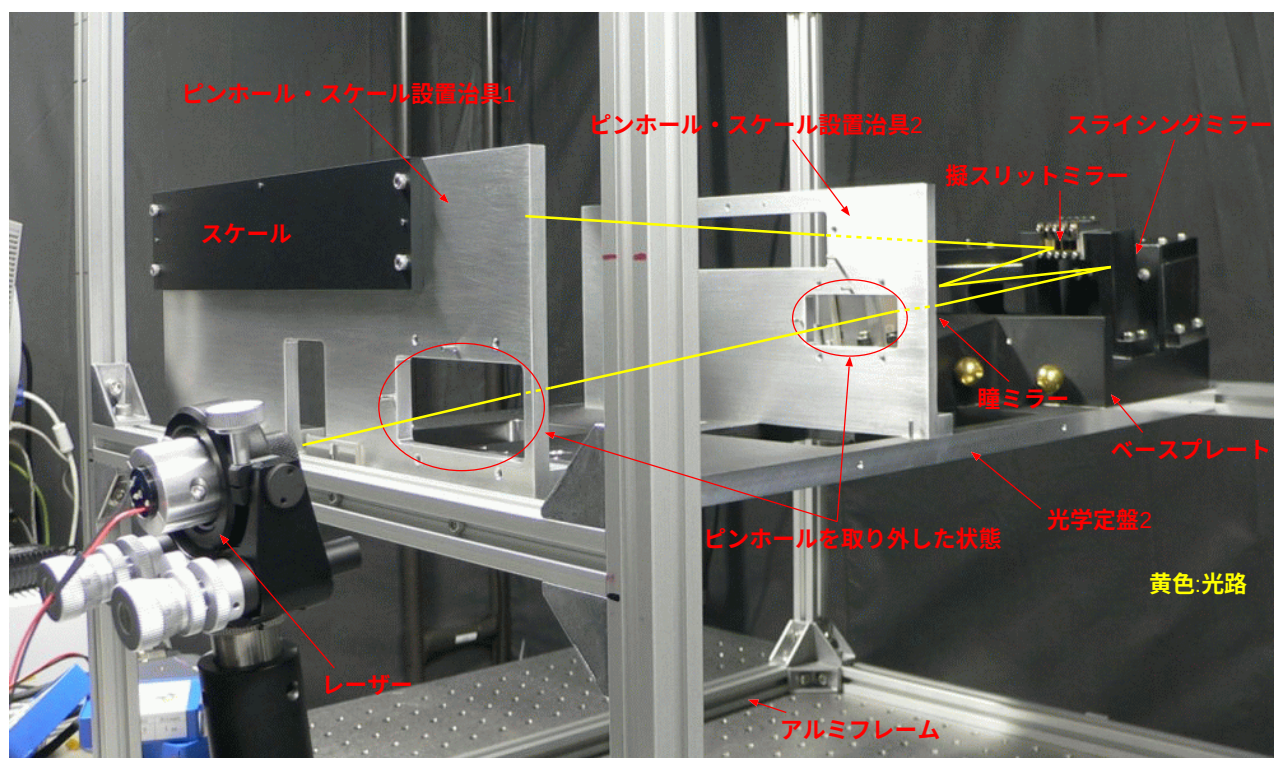


図 3.30: ピンホールを外したときの測定系

3.5.4 スライシングミラー選定測定の結果

3.5.3 で述べた測定装置を用いて測定を行う。以下に測定結果を示す。

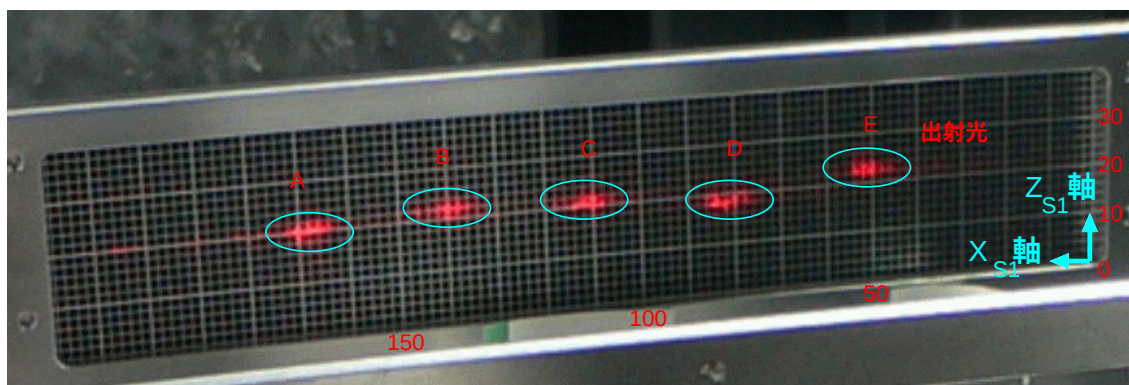


図 3.31: スケール上での像 (スライシングミラー OLD)

図 3.31 はスライシングミラー OLD にレーザーを入射したときスケール 1 上にできた像である。水色の円で囲んだものが左から A,B,C,D,E のスライシングミラーを反射した像になっている (スライシングミラーのアルファベットの振り方は図 2.12 を参照)。各スライシングミラーのスケール上での像の位置を表 3.2 にまとめる。測定は広がった像の幅の中から中央の位置 1 点を読んだ。このとき、スケールの読み取り精度は 1.0mm 程度である。

スライシングミラー名	X_{S1} 座標 (測定値)[mm]	Z_{S1} (測定値) 座標 [mm]
A	168	20.5
B	140	22.0
C	111	20.5
D	84	18.5
E	52	22.5

表 3.2: スケール 1 上の像の座標 (スライシングミラー OLD)

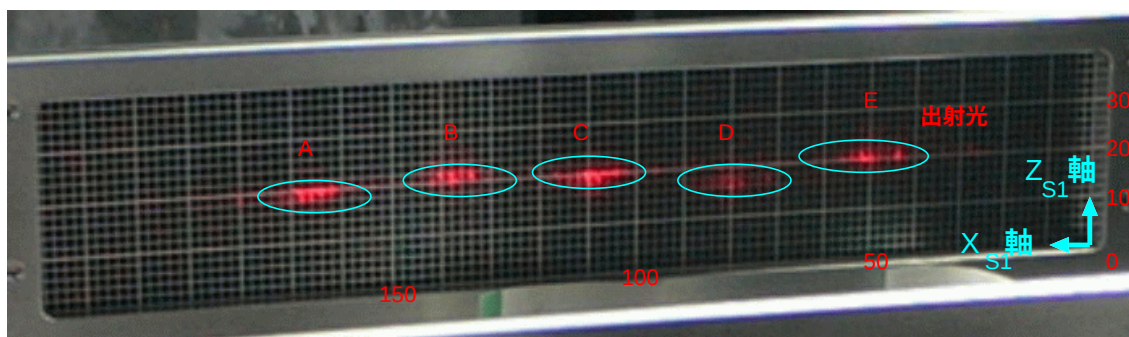


図 3.32: スケール上での像 (スライシングミラー NEW)

レーザーの位置、擬スリットミラーをスライシングミラー OLD の測定時のまま固定してスライシングミラー NEW に対して同様の測定を行った結果、スケール 1 上にできた像が図 3.32 である。水色の円で囲んだものが、左から A,B,C,D,E のスライシングミラーを反射した像になっている。像の位置を表 3.3 にまとめる。

スライシングミラー名	X_{S1} 座標 [mm]	Z_{S1} 座標 [mm]
A	166	19.0
B	138	21.0
C	110	19.0
D	80	17.0
E	52	20.5

表 3.3: スケール 1 上の像の座標 (スライシングミラー NEW)

以上の測定結果から、スライシングミラー OLD と NEW の両方で擬スリットミラーから出射した光線がスケール上で直線に並んではない。そこで、OLD と NEW の Z_{S1} 軸方向の測定結果から、出射光ができるだけ直線上に並ぶようにスライシングミラーを選定する。表 3.4 に選定したスライシングミラーをまとめる。

スライシングミラー名	選定したスライシングミラー (OLD か NEW)	Z_{S1} 座標 (表 3.2, 表 3.5 より)[mm]
A	スライシングミラー OLD	20.5
B	スライシングミラー NEW	21.0
C	スライシングミラー OLD	20.5
D	スライシングミラー OLD	18.5
E	スライシングミラー NEW	20.5

表 3.4: 選定したスライシングミラー

選定したスライシングミラーを設置して、これまでと同様のレーザーを入射させたときのスケール 1 上の像が図 3.33 である。水色の円で囲んだものが、左から A,B,C,D,E のスライシングミラーを反射した像になっている。擬スリットミラーからの出射光はスケール 1 上でほぼ直線になった。スケール 1 上での像の位置を表 3.5 にまとめる。ただし、スライシングミラー D の出射光は表 3.2、表 3.3 で見られたのと同様に、他のスライシングミラーの出射光よりも Z_{S1} 軸方向で低い値を示した。

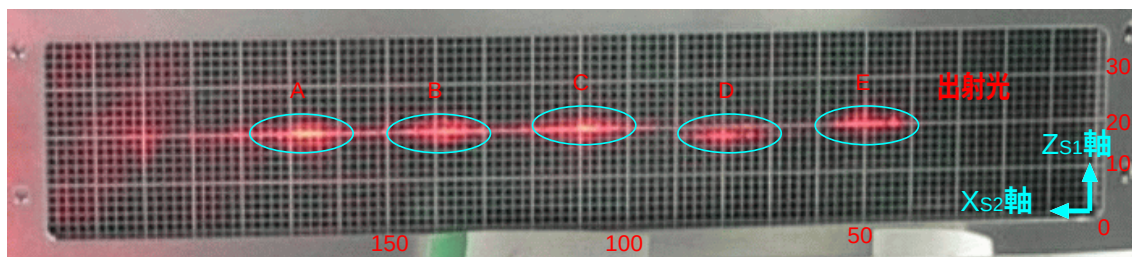


図 3.33: スライシングミラー選定後のスケール上での像

スライシングミラー名	X_{S1} 座標 [mm]	Z_{S1} 座標 [mm]
A	166	20.5
B	138	20.5
C	110	20.5
D	80	18.5
E	52	20.5

表 3.5: スケール 1 上の像の座標 (スライシングミラー選定・設置後)

3.6 光学調整手法

本節ではこれまで述べてきた測定装置を用いて行ったスライサ系光学調整手法について述べる。調整は以下の流れで行った。

1. 各ステージ座標の関連性測定
2. 入射光座標を様々変えたときの (X', Z', θ', ϕ') 座標測定
3. 測定系設置誤差補正量の決定と入射光座標の決定
4. 3 の入射光で出射光位置の測定、及び瞳ミラーによる調整

入射させるレーザー光は (X', Z', θ', ϕ') の 4 つの座標の組合せで決まる。そこで、4 つの座標の関連性を明らかにし、入射光座標を様々に変えたときの (X', Z', θ', ϕ') 座標の測定を行う。また、この結果をもとに測定系 (= $X'Y'Z'$ 系) の設計系 (= XYZ 系) に対する設置誤差を決めて、これを補正した入射光座標を決定した。そして、決定した入射光座標のレーザーを用いて出射光位置の測定を行った。もし、測定した出射光位置が光学設計値の出射光位置と異なっていた場合、光学設計値の出射光位置に測定値が近づくように瞳ミラーを調整した。以下で上記 1~4 の詳細について述べる。

3.6.1 各ステージの相関関係

入射させるレーザー光の位置と向きは測定系の座標軸で定義される X' 座標 (X 軸ステージの値)、 Z' 座標 (Z 軸ステージの値)、 θ' 座標 (回転ステージの値)、 ϕ' 座標 (ゴニオステージの値) の 4 つ座標で決まっている。しかし、4 つの座標の関連性の分からない状態で入射光座標の測定を行うと膨大な時間を要してしまう。そこで入射光座標の測定に入る前に各座標の関連性を調べる。ここでは、そのために行った測定を述べ、ピンホール C-9(番号の付け方は 3.4.1 参照) に入射させたレーザーの測定データを例に各座標の関連性について考察する。

● 測定手法

光学定盤 2 に設置した 2 枚のピンホール板から同じ番号 (番号の付け方は図 3.12 を参照) のピンホール 1 組を選び、2 枚のピンホール板を通過するようにレーザーを入射する。そして、瞳ミラーの前にスクリーンを置き、スライシングミラーの反射光を目視で測定する。図 3.34 上で示すようにスライシングミラーの短辺方向に対して均等にレーザー光が入射した場合、図 3.35 の左側のように上下に回折による干涉縞の現れた明るい像 (回折像とよぶ) が瞳ミラー前のスクリーンにできる。このような干涉縞が現れるのは、スライシングミラーの厚さ $300\mu\text{m}$ に対して、ビーム系約 3mm の干涉性の高いレーザー光を入射してそれがミラーという開口を通るためである。このため、ミラー両端で回折が起こる。 Z', ϕ' 座標を変化させるとレーザー光はスライシングミラーの短辺方向に移動するため、ミラー上のレーザー光が片側にはみださなくなり、上下どちらかの干涉縞の回折像が消える (図 3.34 の下図)。このため、上下の回折像が確認できる範囲を測定する。 X', θ' を変化させると、レーザー光はスライシングミラーの長辺方向に移動する。よって、上下の干涉縞は消えないがピンホールからレーザーが外れていくので光量が少なくなり、回折像が薄くなっていき、やがて消える。このため、明るい回折像の確認できる範囲を目視で測定する。測定は以下のように行った。

1. 4 つの座標から値を変化させる 2 つの座標と、測定中は値を変えない 2 つの座標を選ぶ。
2. 値の変え方は、一方の座標を固定し、もう一方の座標を変化させ回折像の出来る範囲を測定する。
3. 測定後先ほど固定した座標を微小に変化させ固定し、もう一方の座標を変化させて回折像の出来る範囲を測定する。
4. 得られたデータをグラフにプロットして、相関関係をみる。

座標の選び方はどれも任意である。

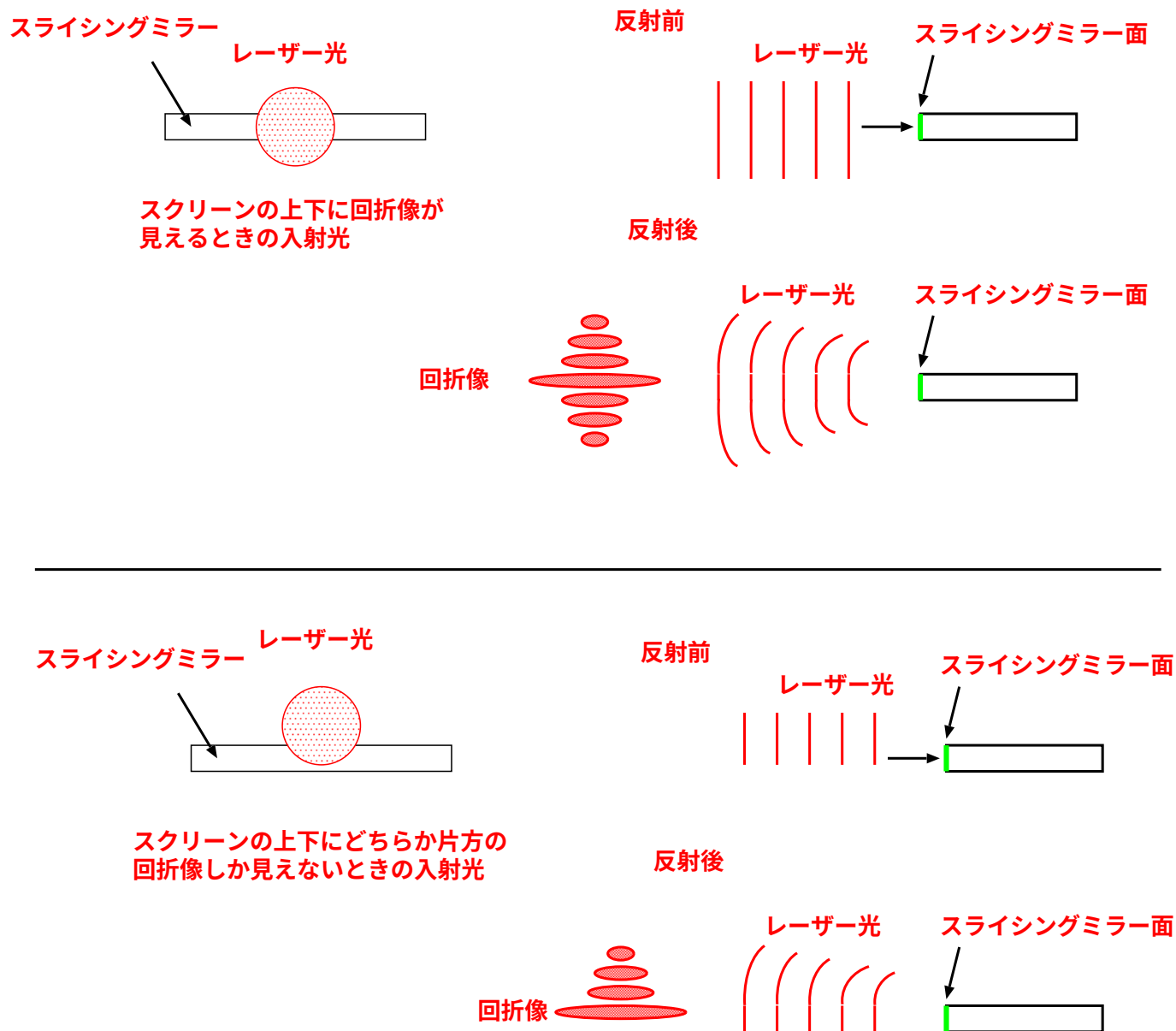


図 3.34: スライシングミラーに均等なレーザー光が当たったときの回折像 (上) と片側にはみださないときの回折像 (下)



図 3.35: 回折像あり (左) と回折像なし (右)

- 測定 1: X' - θ' の相関の検証

Z' 座標、 ϕ' 座標を固定して、 X' 座標と θ' 座標を変化させる。測定は θ' 座標を 0.024° 刻みで変化させ、各 θ' 座標において回折像が出来る X' 座標の範囲を測定した。図 3.36 は X' 座標を横軸、 θ' 座標を縦軸にとり回折像が確認できたときの座標をプロットしたグラフである。 X' 座標の測定範囲は $8.1\text{mm} \sim 10.0\text{mm}$ 、 θ' 座標は $-0.192^\circ \sim 0.072^\circ$ である。図 3.36 は θ' 座標が小さくなるとそれに伴って x 座標の範囲が増加していくことがわかった。 X' 座標と θ' 座標の間には負の相関があることが分かる。

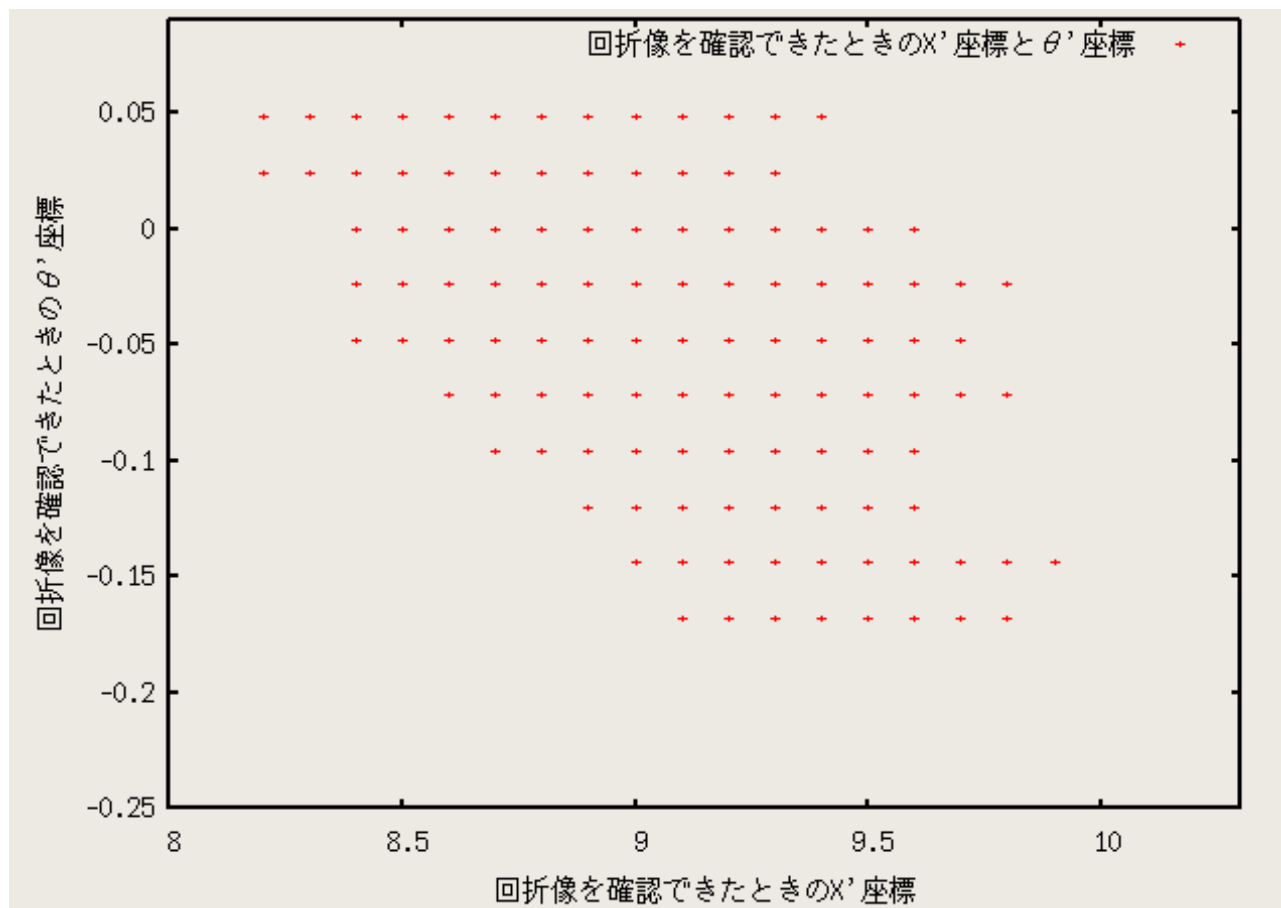


図 3.36: 回折像が確認できた X' 座標と θ' 座標をプロットしたグラフ

- 測定 2: X'-Z' の相関の検証

θ' 座標、 ϕ' 座標を固定して、X' 座標と Z' 座標を変化させる。測定は Z' 座標を 0.2mm 刻みで変化させ、各 Z' 座標において回折像が出来る X' 座標の範囲を測定した。図 3.37 は X' 座標横軸、Z' 座標を縦軸にとり回折像が確認できたときの座標をプロットしたグラフである。X' 座標の測定範囲は 7.8mm~10.0mm、Z' 座標の測定範囲は 18.6mm~21.4mm である。図 3.37 より、X' 座標と Z' 座標の間には相関関係を見ることができなかった。

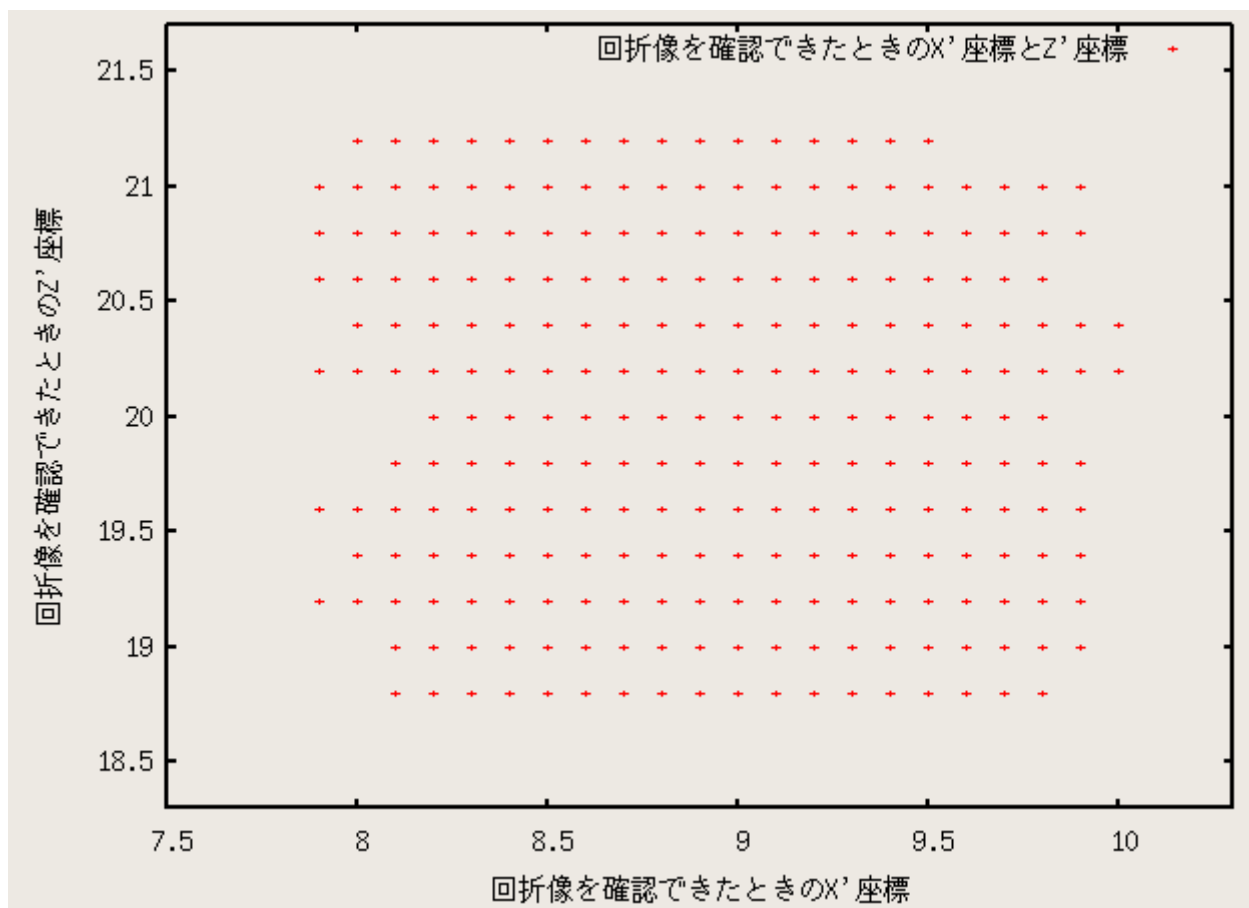


図 3.37: 回折像を確かできた X' 座標と Z' 座標をプロットしたグラフ

- 測定 3: θ' 座標と Z' 座標の検証

X' 座標、 ϕ' 座標を固定して、 θ' 座標と Z' 座標変化させる。測定は Z' 座標を 0.2mm 刻みで変化させ、各 Z' 座標において回折像が出来る範囲の θ' 座標を測定した。図 3.38 は θ' 座標を横軸、 Z' 座標を縦軸にとって回折像が確認できたときの座標をプロットしたグラフである。 θ' 座標の測定範囲は $-0.192^\circ \sim 0.096^\circ$ 、 Z' 座標の測定範囲 18.6mm $\sim$ 21.4mm である。図 3.38 より、 θ' 座標と Z' 座標の間には相関関係を見ることができなかった。

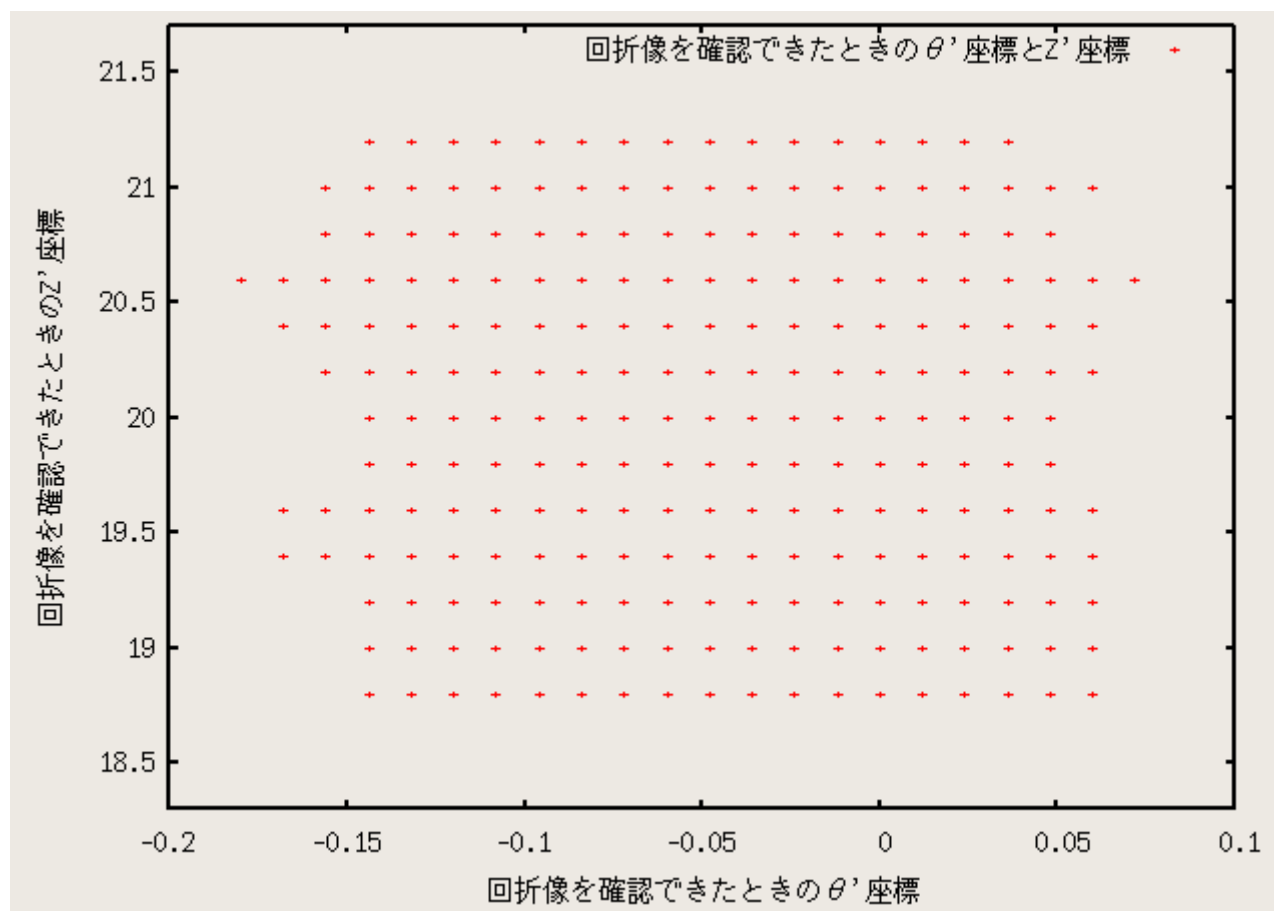


図 3.38: 回折像が確認できた Z' 座標と θ' 座標をプロットしたグラフ

- 測定 4: ϕ' とその他の座標の相関の検証

ϕ' 座標と X' 座標、 Z' 座標、 θ' 座標の相関関係も測定した。しかし、 ϕ' 座標は角度が 0.1° 単位でしか変化させることが出来ず、角度が 0.1° 変わるとレーザーから 576mm 離れたスライシングミラー上で、レーザーの位置が 1.0mm 変わるため、測定しているスライシングミラーから外れてしまう。このため、 ϕ' 座標は 1 つの値しかとれないことがわかった。

以上の測定結果から X' 座標と θ' 座標の間には相関関係をみることができ、 Z' 座標と X' 座標、 Z' 座標と θ' 座標の間に相関関係がみられなかった。このため、 X' 座標と θ' 座標を測定するときはこの 2 つを同時に測定する必要がある。また、 ϕ' 座標は各入射光につき 1 つの値しかとれないことが分かった。この結果を入射光座標の測定に用いた。まず、 ϕ' 座標は 1 つの値しかとれないため、最初に値を決定することが出来る。 Z' 座標は X' 座標と θ' 座標の間に相関関係がないため、 ϕ' 座標の次に決めることにする。決め方は、 ϕ' 座標を固定し、 Z' 座標の値を変えたときに回折像の確認できる範囲を測定する。測定した範囲の平均を Z' 座標とする。最後に、決定した Z' 座標、 ϕ' 座標を固定し相関関係のある X' 座標、 θ' 座標の 2 つの値を変えて回折像の確認できる範囲を測定する。測定した範囲の平均を X' 座標、 θ' 座標とする。このようにすることで、入射光座標測定にかかる時間を大幅に削減することが出来る。入射光座標測定は次節で詳述する。

3.6.2 入射光座標を様々に変えたときの座標測定

3.3,3.4 で述べた原理、装置により選んだ設計上の光線をレーザーで再現し、出射光のスケール上の位置を測定していく。このとき、入射光は光学定盤 2 に設置した 2ヶ所のピンホールを通過するようにレーザーの (X', Z', θ', ϕ') を選ぶ必要がある。しかし、光線的设计値は XYZ 系での値であり、一方で光学設計で使用している座標軸と測定系の座標軸は必ずしも一致していない。この理由としてレーザー照射ステージや光学定盤 2 の光学机への設置誤差や、光学定盤上のピンホールの設置誤差から相対的に軸の向きがずれていること、および、レーザー座標にはピンホール位置からのオフセットがあることなどが挙げられる。このため光学設計図から入射させるレーザーの (X', Z', θ', ϕ') を設計値からすぐには計算することができない。また、ピンホールの直径 (1.0mm) はスライシングミラーの厚さ (0.3mm) に比べて大きいので、図 3.39 のようにレーザーの位置や角度をわずかに変化させても光学定盤 2 上に設置した 2ヶ所のピンホールを通過してスライシングミラー、瞳ミラー、擬スリットミラーを反射後、スケール上に像を作る (測定できる)。この複数本ある光線の中から使用する光線を 1 本に絞る必要がある。

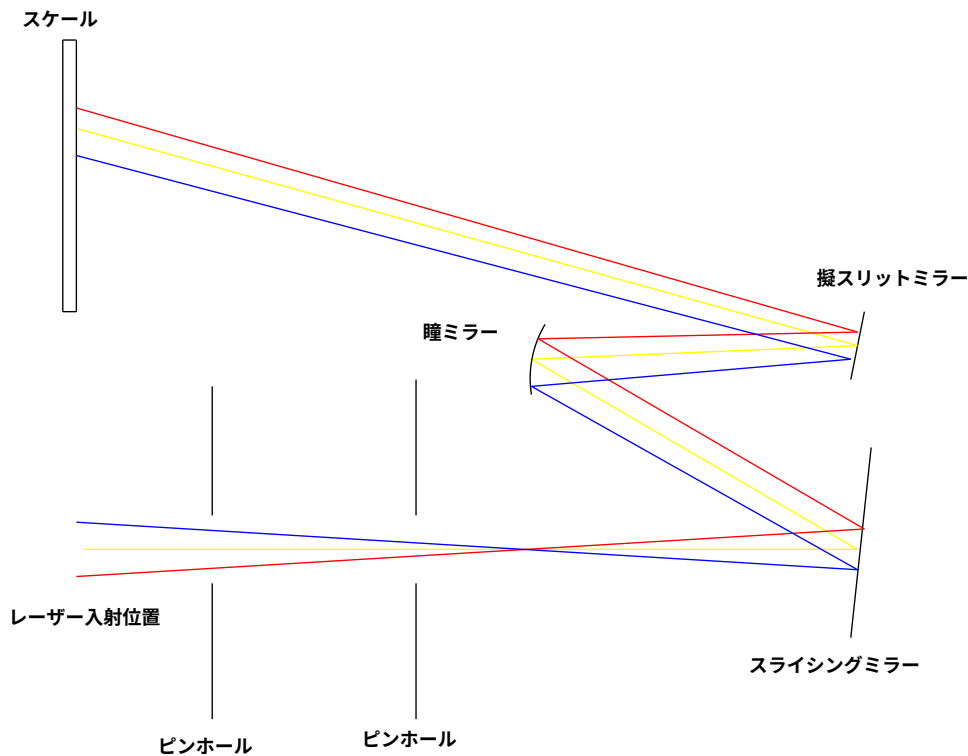


図 3.39: スケール上で測定できる光線例

そこで、3.6.1 で述べた相関関係を利用して、以下のような測定から使用する光線 1 本を決定した。

1. 追跡する光線を 1 つ選び、該当の 1 組のピンホールにレーザーを入射させる。
2. ϕ' 座標を 0.1mm ごとに変化させて、スライシングミラーにレーザーを照射する。瞳ミラー前方に 3.6.1 の測定の時と同様にスクリーンを置き、光線の様子を目視で確認する。レーザーが入射させているスライシングミラーに均等に当たる (図 3.34) ときは、上下に回折の現れた像がスクリーンにできる (回折像)。この回折像を示す ϕ' 座標の範囲を求める。これは基本的に各光線で 1 つずつしかなかったなのでそれを入射光の ϕ' 座標とする。
3. ϕ' 座標を 2 で決めた値に固定して、 Z' 座標を変化させて回折像が出来る範囲を測定する。測定した Z' 座標の範囲の平均を入射光の Z' 座標とする。
4. Z' 座標と ϕ' 座標と θ' 座標を固定して、 X' 座標を変化させて回折像が出来る範囲を測定する。
5. 4 の測定を、4 で使用した θ' 座標から 0.024 °刻みで増加させて測定を繰り返す。これを X' 座標を変化させても回折像が現れなくなるまで測定する。

6. 5と同じ測定を θ' 座標が減る方向についても行う。回転角度は -0.024° 刻である。

7. 4~6までの測定で得た X' 座標と θ' 座標の平均を入射光の X' 座標、 θ' 座標とする。

ピンホールは5枚の各スライシングミラーに9組ずつあるので、全45組のピンホールについて上記した測定を行い、入射させるレーザーの (X', Z', θ', ϕ') を決めた。なお、 θ' の値は3.6.3で述べるように後で補正を行う。

3.6.3 測定系設置誤差補正量の決定と入射光座標の決定

本測定に最も影響を与える成分は θ 座標である。 θ が 0.012° (マイクロメータで1目盛り分)異なると、最終的にスケール上に表れる像が X_{S1} 軸方向に実測で0.6mm程度ずれるため、 θ 座標の値をできるだけ正確に決める必要がある。

3.6.2で入射光座標の測定について述べた。光学設計図の座標軸と測定系の座標軸の向きが一致しているならば、測定から求めた θ 座標は光学設計値の θ 座標と等しくなるはずである。しかし、実際はレーザーの設置誤差や測定系の設置誤差で光学設計値の θ 座標と一致しない。3.6.2の手法で求めた θ' 座標と光学設計値の θ 座標のズレは測定系の Z' 軸を回転軸とする回転方向の設置誤差(光学定盤に対するレーザー照射装置の相対的なもの)を示していると考えられる。そこで、45本の光線に対しての光学設計値の θ 座標と測定値の θ' 座標の差 $\theta - \theta'$ を平均したものを、測定系の設置誤差として採用する。表3.6は光学設計値の θ 座標、3.6.2の手法で求めた θ' 座標(表では測定値と明記)、差(光学設計値-測定値)、差を平均したものを示す。この表より、測定系の設置誤差は $0.0408^\circ \pm 0.019^\circ$ である。以後、入射光の θ を再現するため、入射させるレーザーの θ' 座標は光学設計値 θ から設置誤差 0.0408° を引いた値とする。

ピンホール番号	光学設計値 (θ)[$^{\circ}$]	測定値 (θ')[$^{\circ}$]	差 $\theta-\theta'$ [$^{\circ}$]
A-1	2.409	2.383	0.0263
A-2	1.162	1.136	0.0262
A-3	0	-0.0373	0.0373
A-4	-1.162	-1.214	0.0515
A-5	-2.409	-2.462	0.0526
A-6	-1.167	-1.231	0.0643
A-7	0	-0.0324	0.0324
A-8	1.164	1.128	0.0355
A-9	0	-0.0488	0.0488
B-1	2.409	2.379	0.0301
B-2	1.162	1.148	0.0140
B-3	0	-0.0378	0.0378
B-4	-1.162	-1.210	0.483
B-5	-2.409	-2.481	0.0724
B-6	-1.164	-1.230	0.0659
B-7	0	-0.0299	0.0299
B-8	1.164	1.130	0.0342
B-9	0	-0.0655	0.0655
C-1	2.409	2.387	0.0216
C-2	1.161	1.141	0.0202
C-3	0	-0.0456	0.0456
C-4	-1.161	-1.219	0.0582
C-5	-2.409	-2.474	0.0648
C-6	-1.161	-1.231	0.0700
C-7	0	-0.0460	0.0460
C-8	1.161	1.149	0.0121
C-9	0	-0.0497	0.0497
D-1	2.406	2.391	0.0152
D-2	1.161	1.161	0.000
D-3	0	-0.0553	0.0533
D-4	-1.161	-1.213	0.0520
D-5	-2.406	-2.464	0.0576
D-6	-1.164	-1.221	0.0567
D-7	0	-0.0372	0.0372
D-8	1.164	1.139	0.0253
D-9	0	-0.043	0.043
E-1	2.402	2.4	0.0020
E-2	1.161	1.154	0.0072
E-3	0	-0.0329	0.0329
E-4	-1.161	-1.211	0.0502
E-5	-2.402	-2.471	0.0690
E-6	-1.166	-1.226	0.0602
E-7	0	-0.0413	0.0413
E-8	1.166	1.142	0.0237
E-9	0	-0.04	0.0400
設置誤差 (差の平均)	-	-	0.0408 $\pm$ 0.019

表 3.6: 測定系の設置誤差 (θ' 方向)

3.6.4 瞳ミラーと擬スリットミラーの調整

3.6.2,3.6.3の方法で決めた (X', Z', θ', ϕ') の座標のレーザーを入射させたとき、出射光位置の測定値が光学設計値の出射光位置と一致しなかった場合、瞳ミラーの位置と擬スリットミラーを調整して測定値を光学設計値に近づける。ここではこの調整について述べる。

- 瞳ミラーの調整

ベースプレート上で瞳ミラーの位置は図 3.40 のように位置決めピンと瞳ミラーの間にはさむシム板と、ベースプレートと瞳ミラーの間にはさむシム板とシムリングの厚さで決定される。シム板やシムリング(図 3.41)の厚さを変更することで瞳ミラーの位置を微調節できる。

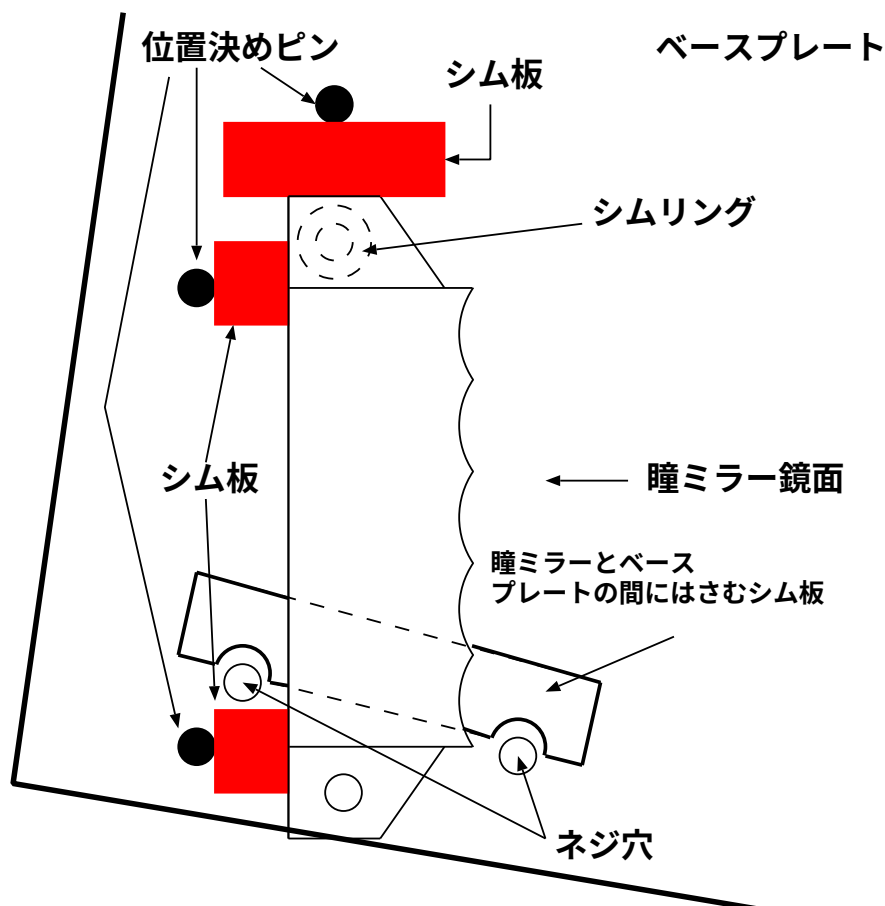


図 3.40: 瞳ミラーに使用するシム板とシムリングの設置場所

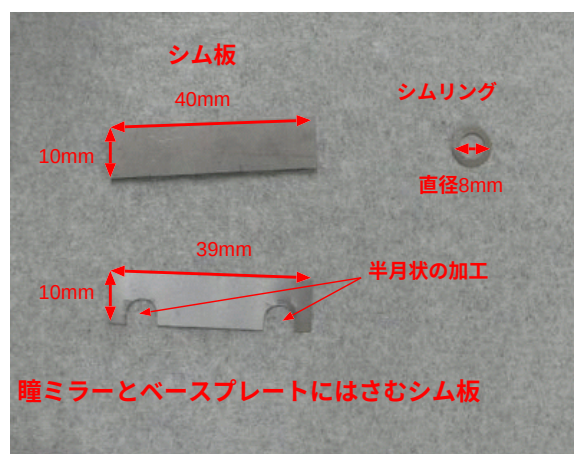


図 3.41: 使用するシム板とシムリングの例

図 3.41 は調整で使用するシム板とシムリングの例である。シム板、シムリングの形状は同様に厚さのみが異なる。シム板はステンレスで製作された直方体 (10mm× 40mm × 厚さ) の板で、厚さが 6 種類 (実測で 1.96mm、1.44mm、0.96mm、0.47mm、0.19mm、0.09mm) ある。瞳ミラーとベースプレートの間にはさむシム板は直方体 (10mm× 39mm × 厚さ) の板でネジとの干渉を防ぐため、ネジにあたる 2ヶ所を半月状に切り取ってある (図 3.41 参照)。厚さは 2 種類あり、実測で 0.09mm、0.04mm ある。シムリングは MISUMI 社製のステンレスで製作された直径 8mm のリングを使用する。シムリングは厚さが 7 種類 (1.0mm、0.5mm、0.3mm、0.2mm、0.1mm、0.05mm、0.01mm) ある。シムリングの厚さは MISUMI の表示値である。微調整用にシムテープを使用する。シムテープは MISUMI 社製のステンレスで製作された長さ 1m、幅 12.7mm の板で長さ方向に切って使う。シムテープは厚さが 3 種類 (0.05mm、0.02mm、0.01mm) ある。シムテープの厚さは MISUMI の表示値である。

ベースプレート上に瞳ミラー用の位置決めピンは 3 本立てられており、デフォルトでは、各位置決めピンと瞳ミラーの間には 3.5mm のシム板をはさみ、ベースプレートと瞳ミラーの間にはシムリングとシム板を 0.5mm はさむように設計されている (図 3.42)。

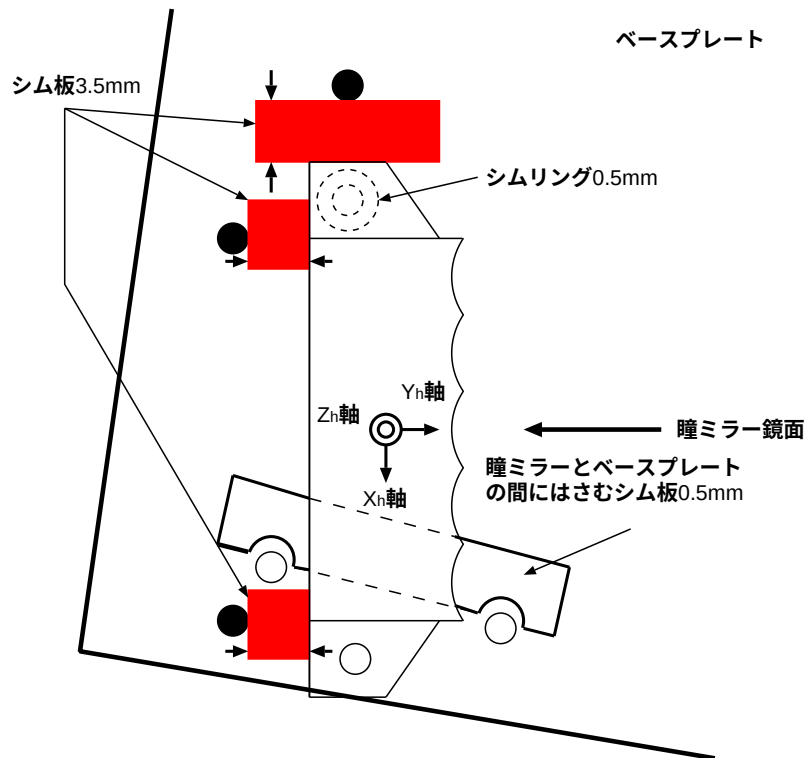


図 3.42: 瞳ミラーに使用するシム板とシムリング (デフォルト)

シム板やシムリングの厚さを変更して瞳ミラーの位置を変更したとき、瞳ミラー面上、擬スリットミラー面上、スケール上でのレーザーの挙動について考察する。これらを実際の挙動と比較して瞳ミラーの調整を行っていく。

図 3.43、図 3.44、図 3.45、図 3.46 の点線で示したものが移動前の瞳ミラーの位置と光路、赤色の線で示したものが瞳ミラー移動後の光路である。瞳ミラーを図 3.42 内で示した X_h 軸の正の方向に動かした場合は図 3.43 のような挙動を示す。瞳ミラーをこの方向に動かすためには側面のシム板の厚さを増加させる。

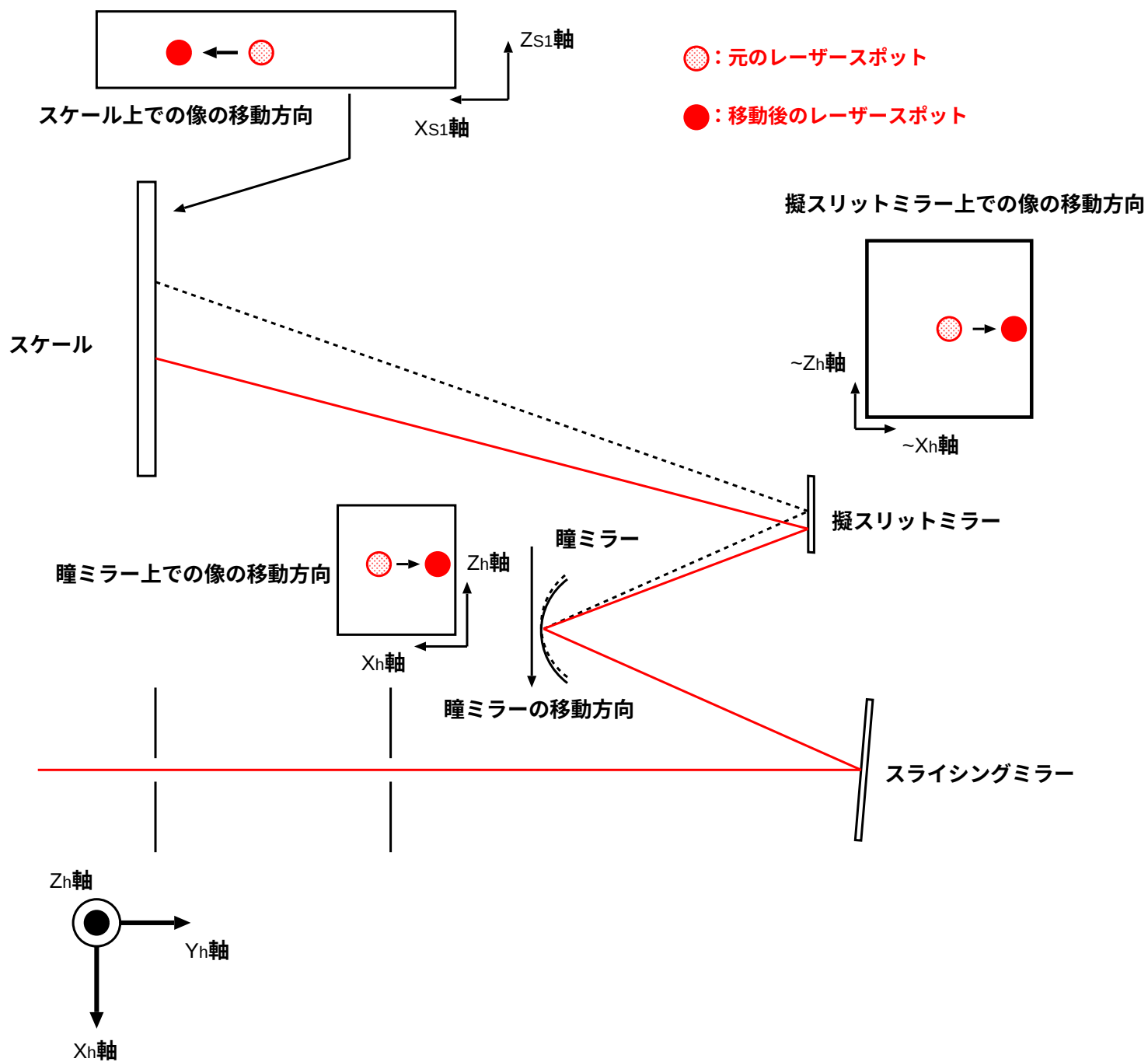


図 3.43: 瞳ミラーを X_h 軸の正の方向に動かした場合の各ミラーとスケール上における光線の挙動
(点線:移動前、赤線:移動後)

瞳ミラーを図 3.42 内で示した X_h 軸の負の方向に動かした場合、各ミラー上では図 3.44 のような挙動を示す。瞳ミラーをこの方向に動かすためには側面のシム板の厚さを減少させる。

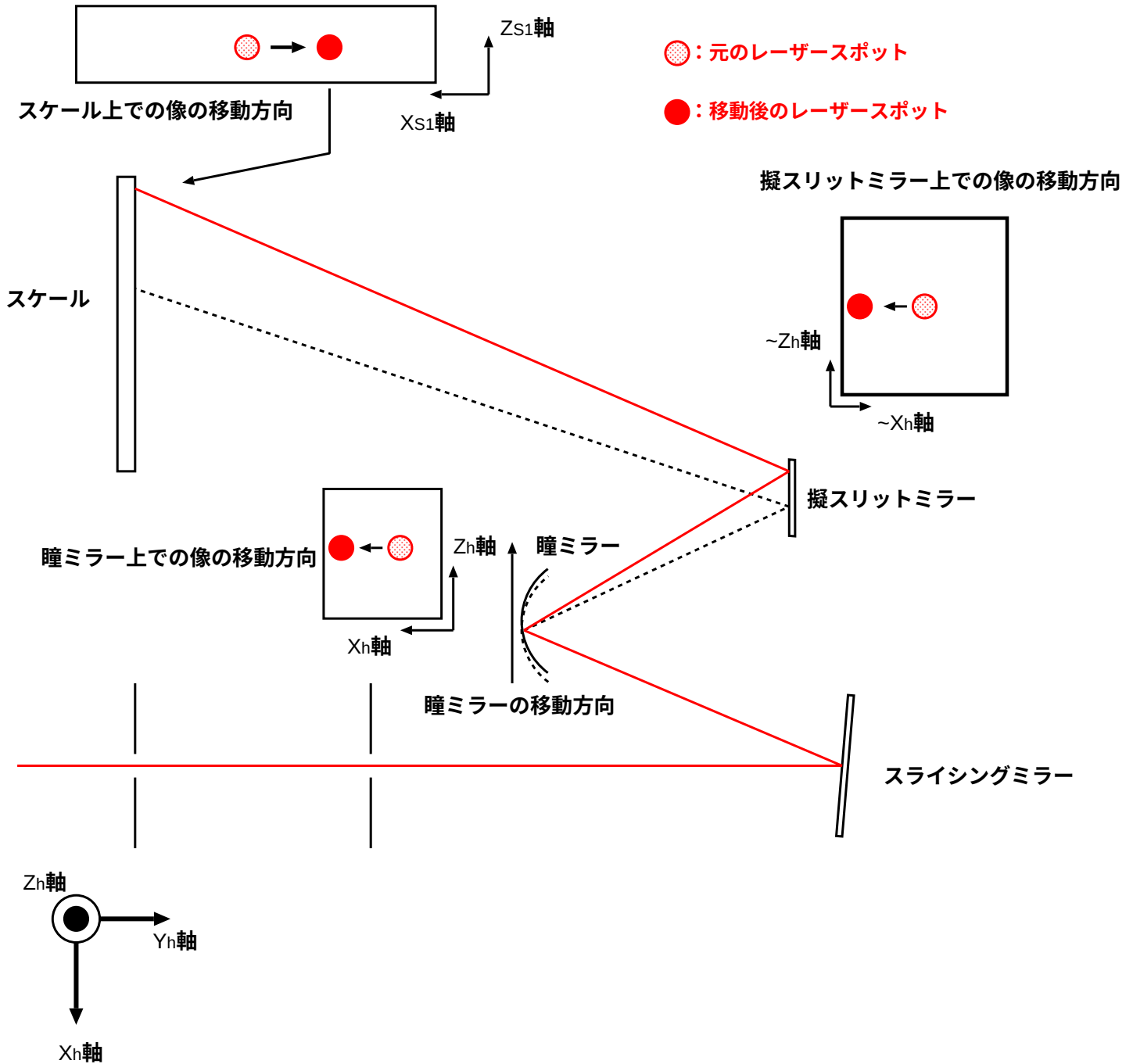


図 3.44: 瞳ミラーを X_h 軸の負の方向に動かした場合の各ミラーとスケール上における光線の挙動
(点線:移動前、赤線:移動後)

瞳ミラーを図 3.42 内で示した Z_h 軸を回転軸として時計回り及び半時計回りに回転させた場合、各ミラー上で光線はそれぞれ図 3.45、図 3.46 のような挙動を示す。瞳ミラーを時計回りに回転させるためにはミラー面に向かって左側の背面シム板の厚さを増加させるか、右側の背面シム板の厚さを減少させる。半時計回りに回転させるためには左側の背面シム板の厚さを減少させるか、右側の背面シム板の厚さを増加させる。

はさむ背面シム板を 0.01mm 変えると瞳ミラーは $\theta_{\text{回転}} = 0.024^\circ$ 回転する。ミラー面の角度が $\theta_{\text{回転}}$ ずれると、出射光の角度はミラー面が回転する前と比べて $2\theta_{\text{回転}}$ ずれる。瞳ミラーからスケール 1 までの距離はおよそ 585mm である。このとき、スケール 1 の X_{S1} 軸方向のズレ量 $X_{\text{ズレ}}$ を見積もると、以下のようになる。

$$X_{\text{ズレ}} = 585 \times \tan 2\theta_{\text{回転}} = 0.49\text{mm} \quad (3.3)$$

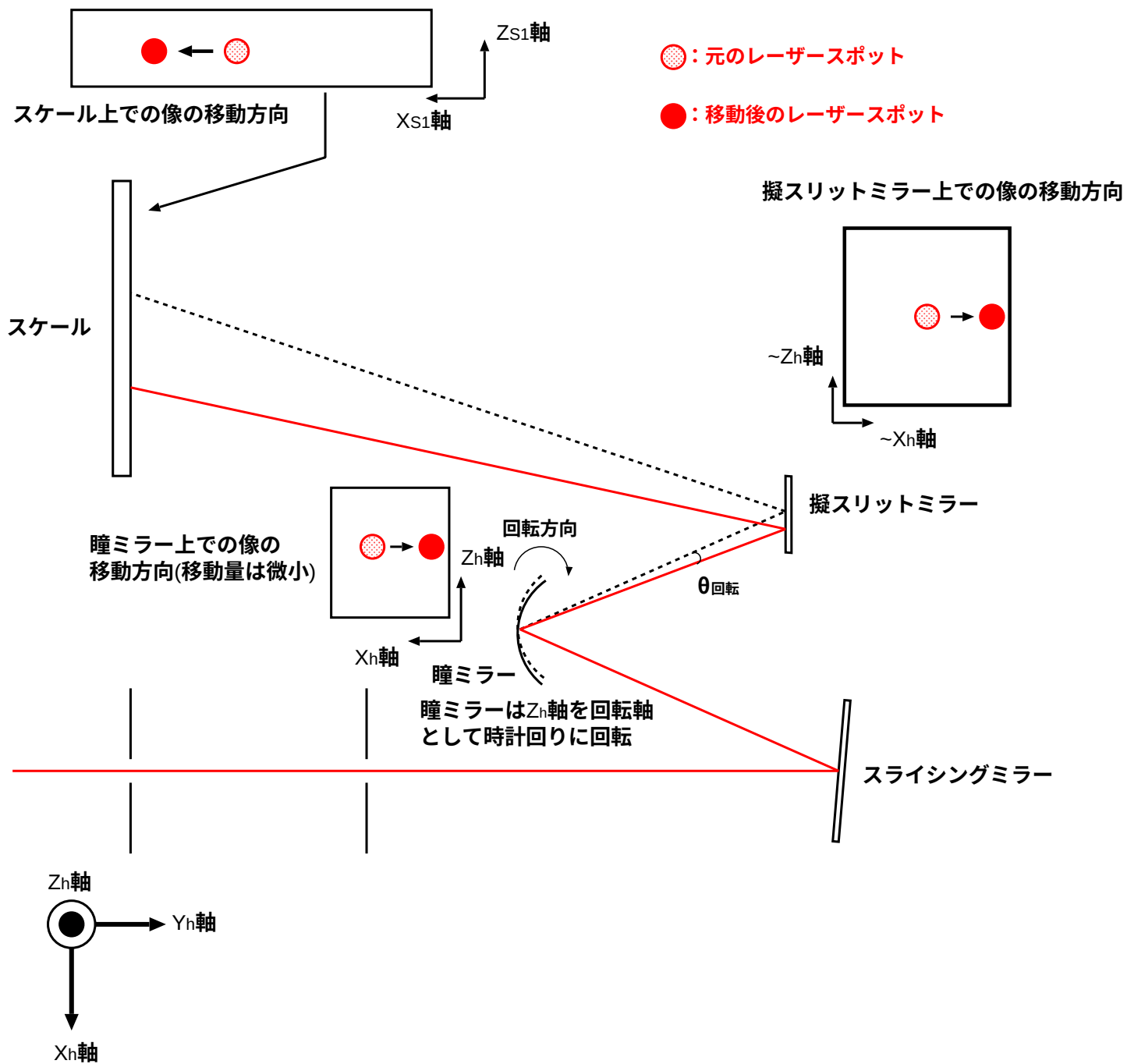


図 3.45: 瞳ミラーを Z_h 軸 を回転軸として時計回りに回転させた場合の各ミラーとスケール上における光線の挙動 (点線:移動前、赤線:移動後)

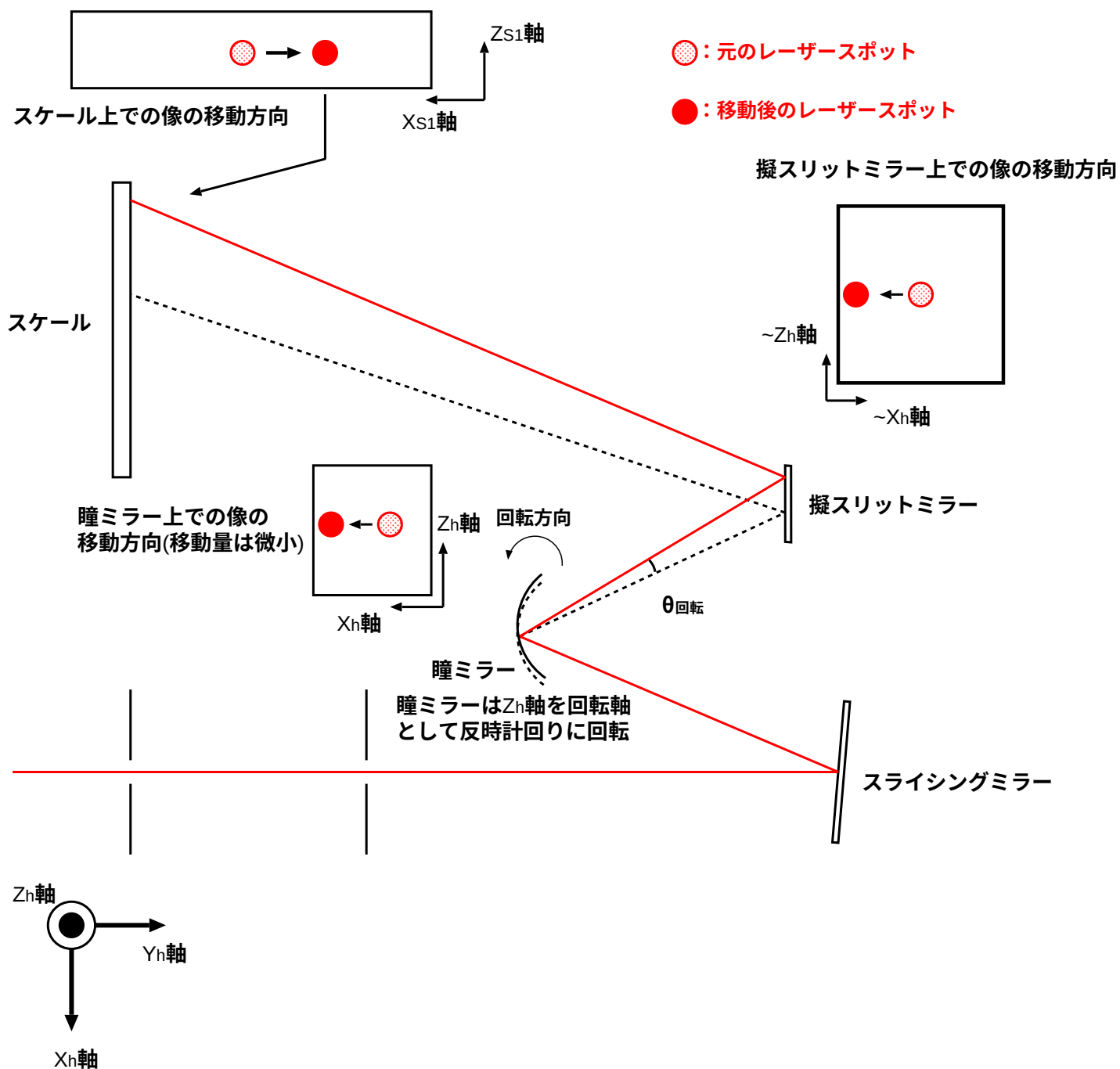


図 3.46: 瞳ミラーを Z_h 軸 を回転軸として反時計回りに回転させた場合の各ミラーとスケール上における光線の挙動 (点線:移動前、赤線:移動後)

また、瞳ミラーの下にシムリングやシム板をはさむと、スケール 1 上の Z_{S1} 軸正の方向に像が移動する。このときの挙動を図 3.47 に示す。

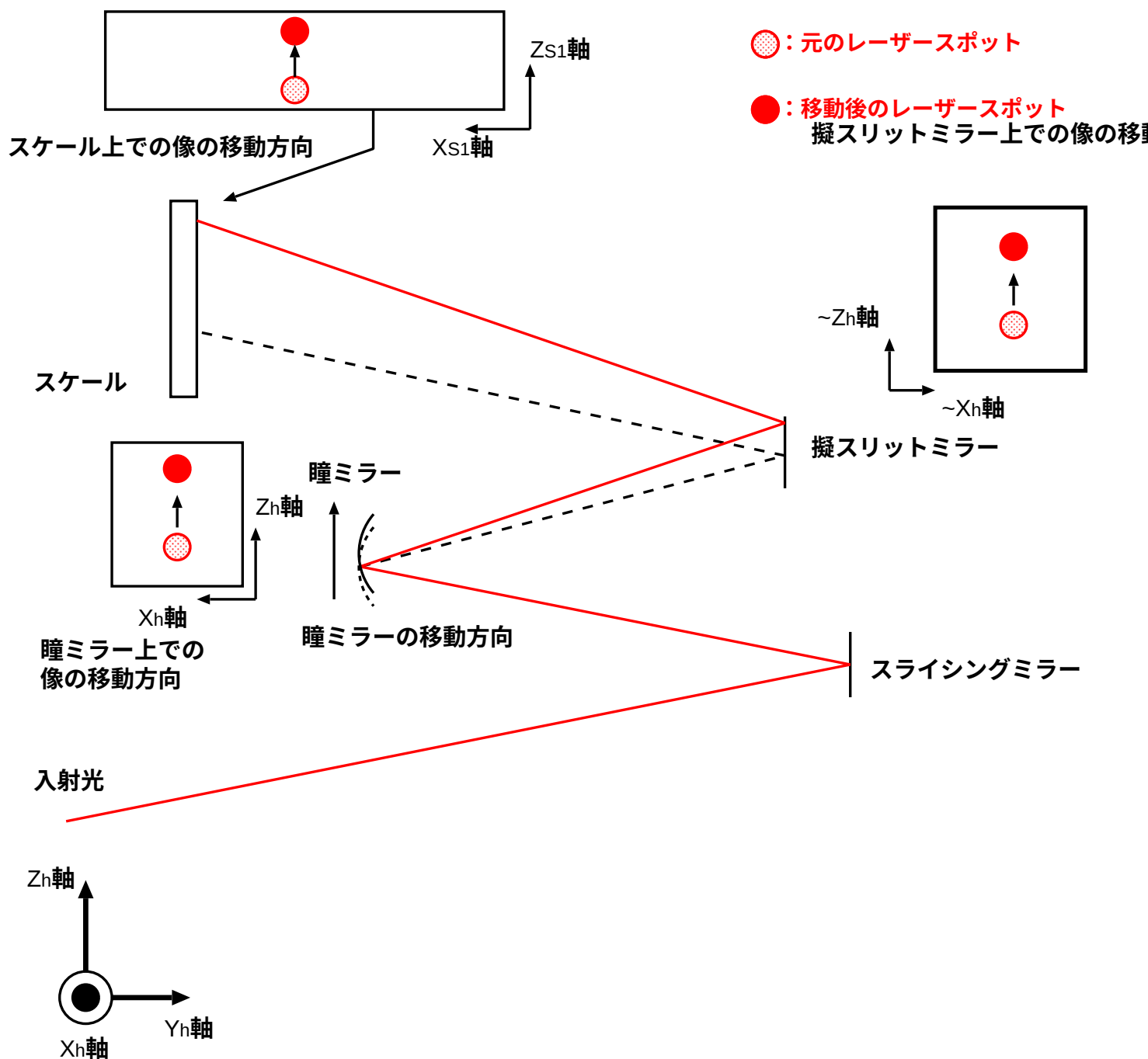


図 3.47: 瞳ミラーの下にシムリングやシム板をはさんだ場合の各ミラーとスケール上における光線の挙動

3.6.5 擬スリットミラーの調整

擬スリットミラーの設置位置は位置決めピンなどで明確に決められていない。再現する入射光はミラー短辺方向中央と、中央から両端へ 2.4mm ずつずれた位置に結像する。そのため、瞳ミラーを反射した光線が擬スリットミラーでケラレない位置に結像するように調整する。ケラレがあるときとないときの模式図を図 3.48 に示す。

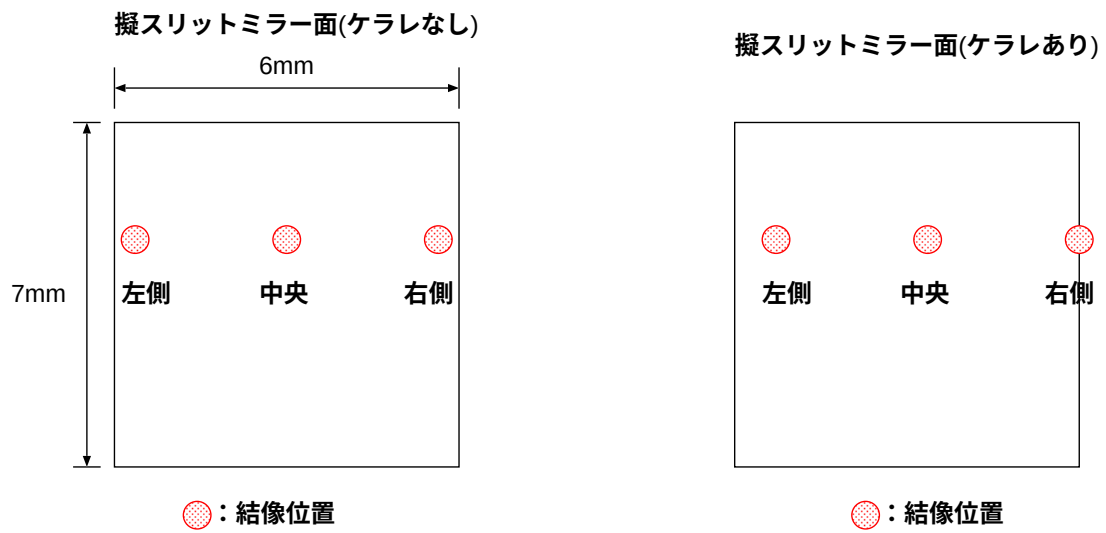


図 3.48: 擬スリットミラーの反射位置

以上をもとに測定をしながら前述のシムを用いて調整を繰り返し、調整範囲内で光学設計の出射光位置に最も近く瞳ミラーと擬スリットミラー位置に調整した。

3.7 光学調整と測定結果

スライサ系として最終的な光学調整終えた状態で行ったスケール 1、2 の出射光位置の測定結果について述べる。瞳ミラーの光学調整の結果、図 3.49 で示すような厚さのシム板、シムリングをはさむ。

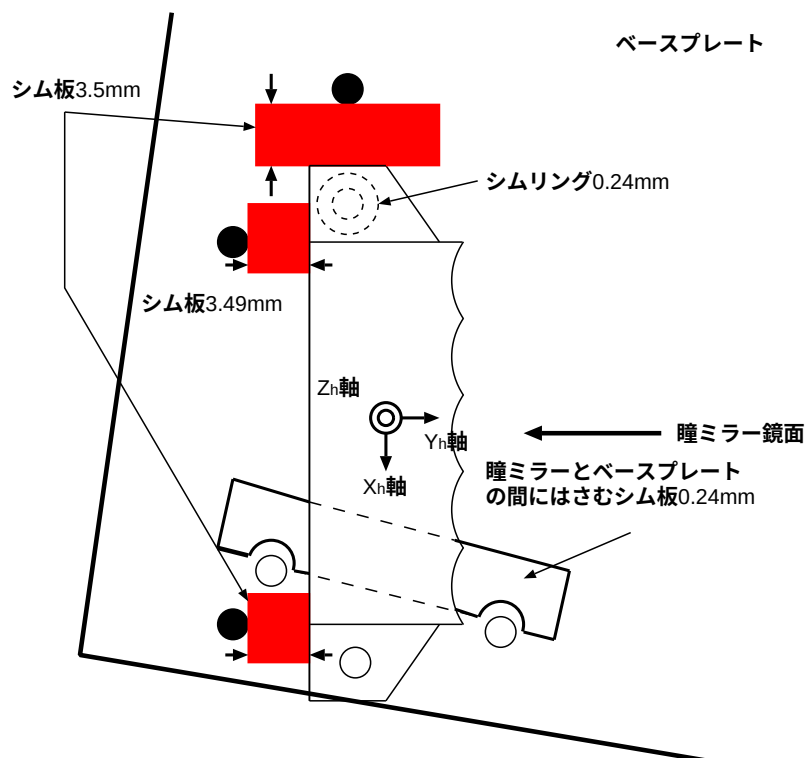


図 3.49: 瞳ミラーに使用するシム板とシムリング (光学調整後)

測定した出射光位置を表 3.7、表 3.9、表 3.11、表 3.13 にまとめる。

● スケール 1 上の X_{S1} 軸方向の測定結果と考察

表 3.7 では、スケール 1 上の X_{S1} 軸方向における出射光座標の光学設計値、測定値、光学設計値と測定値の差 (ズレ量) を示してある。ここで光学設計値はスケール 1 が光学定盤に対して誤差がない状態で設置されている場合に光線が通過する予定位置である。

ピンホール番号	光学設計値 (X_{S1} 軸方向 [mm])	測定値 (X_{S1} 軸方向 [mm])	差 (ズレ量)[mm]
A-1	167.52	167.5	0.02
A-2	180.90	181.0	-0.1
A-3	168.87	169.0	-0.13
A-4	156.74	157.0	-0.26
A-5	169.46	169.5	-0.04
A-6	156.12	156.0	0.12
A-7	168.19	168.0	0.19
A-8	180.19	180.0	0.19
A-9	168.52	168.5	0.02
B-1	139.12	139.5	-0.38
B-2	152.83	153.0	-0.17
B-3	140.47	141.0	-0.53
B-4	127.98	128.5	-0.52
B-5	141.04	141.0	0.04
B-6	127.29	127.5	-0.21
B-7	139.73	139.75	-0.02
B-8	152.06	152.0	0.06
B-9	140.09	140.0	0.09
C-1	110.71	111.0	-0.29
C-2	124.76	125.0	-0.24
C-3	112.06	112.0	0.06
C-4	99.21	99.5	-0.29
C-5	112.62	112.75	-0.13
C-6	98.46	98.5	-0.04
C-7	111.27	111.0	0.27
C-8	123.93	124.0	-0.07
C-9	111.66	111.5	0.16
D-1	80.54	81.5	-0.96
D-2	95.11	96.0	-0.89
D-3	82.10	83.0	-0.9
D-4	68.90	70.5	-1.6
D-5	82.83	84.0	-1.17
D-6	68.07	69.0	-0.93
D-7	81.23	82.0	-0.77
D-8	94.21	94.5	-0.29
D-9	81.67	83.0	-1.33
E-1	50.36	50.0	0.36
E-2	65.46	64.0	1.46
E-3	52.13	52.0	0.13
E-4	38.58	39.0	-0.42
E-5	53.03	53.0	0.03
E-6	37.68	37.5	0.18
E-7	51.19	51.0	0.19
E-8	64.49	63.0	1.49
E-9	51.68	51.5	0.18

表 3.7: X_{S1} 軸方向の測定結果

光学設計値と測定値の差からズレ量の平均と標準偏差を計算した。そして、求めたズレ量と瞳ミラーからスケール 1 までの距離より瞳ミラーの設置角度のズレ $\theta_{X_{S1}}$ を計算した。このとき、擬スリットミラーの位置と向きは正しいと仮定している。これを表 3.8 にまとめる。

スライシングミラー番号	平均 [mm]	瞳ミラーの角度のズレ $\theta_{X_{S1}} [^\circ]$
A	0 ± 0.15	0.0
B	-0.18 ± 0.25	-0.017
C	-0.06 ± 0.25	-0.0058
D	-0.98 ± 0.37	-0.093
E	0.40 ± 0.65	-0.037

表 3.8: X_{S1} 軸方向位置のずれと角度のずれ

瞳ミラーの角度のズレの目標精度は 0.04° である (佐藤圭悟修士論文)。A,B,C,E では目標精度内に瞳ミラーの位置を収めることができた。しかし、D は目標精度を達成することができなかった。瞳ミラーは 1 つのアルミブロックに 5 個の球面鏡を形成しているので、瞳ミラーの位置が誤っているとは考えにくい。他にスライサ系で調整が可能なミラーは擬スリットミラーのみである。そのため、D が目標精度内に収まらなかったのは、擬スリットミラーの取付が悪い可能性がある。

- スケール 1 上の Z_{S1} 軸方向の測定結果と考察

表 3.9 では、スケール 1 上の Z_{S1} 軸方向における出射光座標の光学設計値、測定値、光学設計値と測定値の差 (ズレ量) を示してある。ここで光学設計値は上述した X_{S1} 軸方向における意味と同様である。

ピンホール番号	光学設計値 (Z_{S1} 軸方向 [mm])	測定値 (Z_{S1} 軸方向 [mm])	差 (ズレ量)[mm]
A-1	18.57	19.0	-0.43
A-2	31.16	32.5	-1.34
A-3	31.50	33.0	-1.5
A-4	31.85	33.5	-1.65
A-5	18.59	20.5	-1.91
A-6	6.00	7.0	-1.0
A-7	5.81	7.0	-1.19
A-8	5.63	6.5	-0.87
A-9	18.55	20.0	-1.45
B-1	19.41	19.0	0.41
B-2	32.12	31.0	1.11
B-3	32.51	32.0	0.51
B-4	32.90	33.0	-0.1
B-5	19.39	19.5	-0.11
B-6	6.66	6.5	0.16
B-7	6.43	6.5	-0.07
B-8	6.21	5.5	0.71
B-9	19.36	19.5	-0.14
C-1	20.24	20.5	-0.26
C-2	33.05	33.0	0.05
C-3	33.51	33.5	0.01
C-4	33.99	34.5	-0.51
C-5	20.19	21.0	-0.81
C-6	7.31	7.5	-0.19
C-7	7.04	7.0	0.04
C-8	6.78	7.0	-0.22
C-9	20.17	20.5	-0.33
D-1	21.13	21.0	0.13
D-2	34.12	34.0	0.12
D-3	34.64	34.0	0.64
D-4	35.34	34.0	1.34
D-5	20.19	20.0	1.02
D-6	7.94	6.5	1.44
D-7	7.63	7.0	0.63
D-8	7.33	7.5	-0.17
D-9	21.01	20.5	0.51
E-1	22.02	24.0	-1.98
E-2	35.19	36.5	-1.31
E-3	35.77	37.0	-1.23
E-4	36.38	37.0	-0.62
E-5	21.84	23.0	-1.16
E-6	8.56	9.0	-0.44
E-7	8.21	9.0	-0.79
E-8	7.88	9.5	-1.62
E-9	21.88	23.0	-1.12

表 3.9: Z_{S1} 軸方向の測定結果

光学設計値と測定値の差からズレ量の平均と標準偏差を計算した。そして、求めたズレ量と瞳ミラーからスケール 1 までの距離より瞳ミラーの設置角度のズレ $\theta_{Z_{S1}}$ を計算した。このとき、擬スリットミラーの位置と向きは正しいと仮定している。これを表 3.10 にまとめる。

スライシングミラー番号	平均 [mm]	角度のずれ [°]
A	-1.26 ± 0.45	-0.12
B	0.28 ± 0.44	0.028
C	-0.25 ± 0.28	-0.024
D	0.63 ± 0.56	0.060
E	-1.14 ± 0.48	-0.11

表 3.10: Z_{S1} 軸方向の位置のずれと角度のずれ

3.5 章で述べたスライシングミラーの選定後、光学調整で擬スリットミラーの設置位置を調整したところ、スケール 1 上での像が上下 (Z_{S1} 軸方向) にばらついてしまった。 Z_{S1} 軸方向の像位置のずれが大きいため、スライシングミラー C の位置が目標精度内に収まるよう調整した。その結果、B と C は目標精度内に収まった。しかし、D のスライスマミラーで目標精度より 1.5 倍、A、E で目標精度より約 3 倍大きな値を示した。このずれによる問題を考察する。

擬スリットミラーを出射した光線の、 Z_{S1} 軸方向のずれが分光コリメータミラー 2 上で図 3.50 に示す設計ビーム範囲からのズレ a が分光系の全光学系部品での最大のズレになる。擬スリットミラーから分光コリメータミラー 2 までの距離は 469mm、擬スリットミラーから出射した光線の角度のズレを $\theta_{Z'_{S1}}$ とすると、分光コリメータミラー 2 上でのズレ a は (3.4) 式で表すことができる。

$$a = 469 \times \theta_{Z'_{S1}} \quad (3.4)$$

擬スリットミラーを出射した光線は分光系の分光コリメータミラー 1,2 の組で平行光にされる。平行光になった光線は grating で分散をかけられ、分光カメラトロイダル鏡で検出器上に結像する。これらの光学部品を理想的なものとすなわち無収差とする。さらに、瞳ミラー反射後に擬スリットミラー上で結像した光線の位置が設計上の位置と仮定する。すると、擬スリットミラーを出た光はケラレの起きない限り全て検出器上の設計位置に結像するはずである。これは物体上の 1 点から出た光は像上の 1 点に収束するという無収差光学系の持つ性質による。各光学部品は設計上、光束があたる範囲の周囲に余裕を持たせて作ってある。分光コリメータミラー 2 は光学設計上、 Z_{S1} 軸方向に 4mm の余裕がある。最も余裕の少ないのが固定平面鏡 (FM7) で 1.8mm である。今回の測定で、擬スリットミラーから出射した光線の角度のズレの最大値は $\theta_{Z_{S1}} = 0.12^\circ$ で、489mm 離れた分光コリメータミラー 2 上で光線は設計位置よりも 1.0mm だけ Z_{S1} 軸方向にズレる。これは、ミラーの範囲内に収まるずれであるので、光線はケラレなく検出することが可能である。ただし、実際の光学部品は収差を持つので検出器上での像の劣化は起きてしまう。

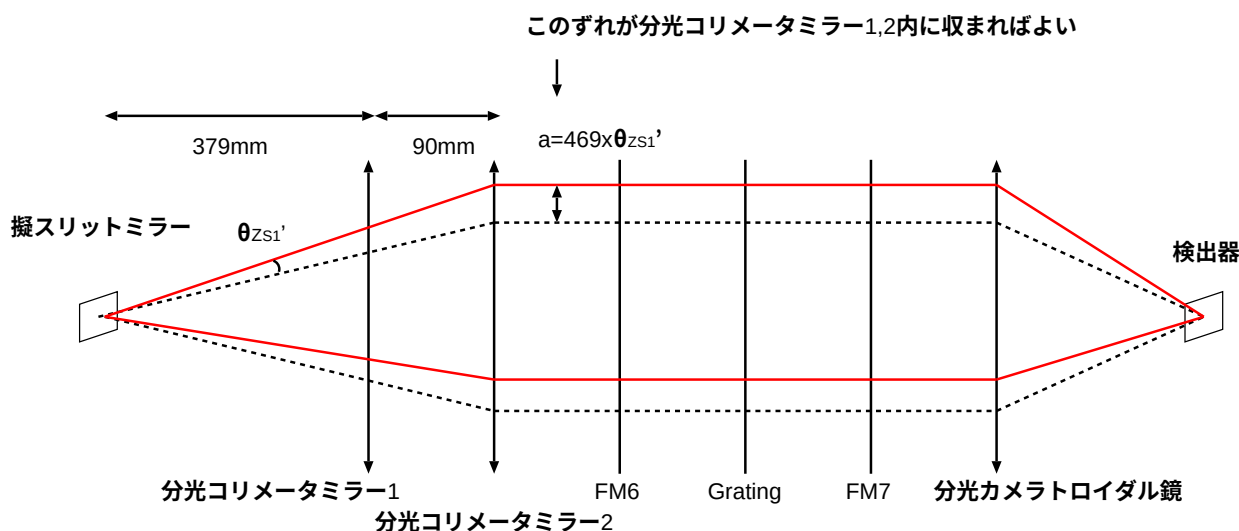


図 3.50: Z_{S1} 軸方向のずれの許容

上記の考察では擬スリットミラー上で結像した光線の位置が設計上の位置と仮定したが、この結像位置が Z_{S1} 軸方向にズレている場合を考える。結像位置が Z_{S1} 軸方向にズレると検出器上での結像位置が変化する。これは検出器上で各スライシングミラーのスペクトルが波長方向にずれることと対応している。擬スリットミラー上の結像位置のズレは大きく見積もっても 0.5mm 程度で、このときの検出器上でのズレは擬スリットミラー上の F 値が 17.3、最終 F 値が 7.7 より、0.22mm ズれる。このズレは検出器 1 ピクセルの実際の大きさが $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ なので、4.5 ピクセルのズレに相当する。MIRISIS では分光用検出器の 1 ピクセルあたりの分解能を $0.025\mu\text{m}$ にとっている。観測波長はおよそ $7.8\mu\text{m} \sim 13.5\mu\text{m}$ なので、使用するピクセル数は 228 ピクセルである。そのため、両端に 6 ピクセル程度の余裕が確保してある。よって、このズレは実用上問題がないといえる。

- スケール 2 上の X_{S2} 軸方向の測定結果と考察

表 3.11 では、スケール 2 上の X_{S2} 軸方向における出射光座標の光学設計値、測定値、光学設計値と測定値の差 (ズレ量) を示してある。ここで光学設計値は上述した X_{S1} 軸方向における意味と同様である。

ピンホール番号	光学設計値 (X_{S2} 軸方向 [mm])	測定値 (X_{S2} 軸方向 [mm])	差 (ズレ量)[mm]
A-1	105.33	105.5	-0.17
A-2	111.81	112.0	-0.19
A-3	104.51	104.5	0.01
A-4	97.15	97.5	-0.35
A-5	103.32	103.5	-0.18
A-6	96.85	97.0	-0.15
A-7	104.17	104.25	-0.08
A-8	111.44	111.5	-0.06
A-9	104.33	104.25	0.08
B-1	88.09	88.5	-0.41
B-2	94.76	95.0	-0.24
B-3	87.26	87.5	-0.24
B-4	79.68	80.0	-0.32
B-5	86.05	86.5	-0.46
B-6	79.35	80.0	-0.65
B-7	86.89	87.0	-0.11
B-8	94.36	94.5	-0.14
B-9	87.07	87.5	-0.44
C-1	70.84	71.0	-0.16
C-2	77.70	78.0	-0.30
C-3	70.00	70.25	-0.25
C-4	62.21	62.5	-0.29
C-5	68.77	69.0	-0.23
C-6	61.85	62.0	-0.15
C-7	69.61	69.5	0.11
C-8	77.28	77.5	-0.22
C-9	69.80	70.0	-0.20
D-1	52.55	53.5	-0.96
D-2	59.69	60.0	-0.32
D-3	51.79	53.0	-1.21
D-4	43.79	45.0	-1.22
D-5	50.64	51.0	-0.36
D-6	43.40	44.0	-0.61
D-7	51.37	52.0	-0.63
D-8	59.24	59.5	-0.26
D-9	51.59	52.5	-0.92
E-1	34.25	34.0	0.25
E-2	41.67	42.0	-0.33
E-3	33.58	34.0	-0.42
E-4	25.36	26.0	-0.64
E-5	32.51	33.0	-0.49
E-6	24.94	25.5	-0.56
E-7	33.13	33.0	0.13
E-8	41.20	41.0	0.20
E-9	33.37	33.5	-0.13

表 3.11: X_{S2} 軸方向の測定結果

光学設計値と測定値の差からズレの平均と標準偏差を計算した。そして、求めたズレ量と瞳ミラーからスケール 1 までの距離より瞳ミラーの設置角度のずれ $\theta_{X_{S2}}$ を計算した。このとき、擬スリットミラーの位置と向きは正しいと仮定している。これを表 3.12 にまとめる。

スライシングミラー番号	平均 [mm]	角度のずれ [°]
A	-0.12 ± 0.13	-0.019
B	-0.33 ± 0.17	-0.053
C	-0.19 ± 0.12	-0.030
D	-0.72 ± 0.37	-0.11
E	-0.22 ± 0.34	-0.034

表 3.12: X_{S2} 軸方向位置のずれと角度のずれ

測定結果より、A,C,E のみが目標精度内に収まることがわかった。しかし、すべてのスライシングミラーでスケール 1 での測定よりも角度のずれが大きくなった。スケール 2 はスケール 1 よりもスライシングミラーに近い位置に設置しあるため光路が 225mm 短くなっている。0.04 度という精度を実現するためには設計値と測定値の差 (ズレ量) を 0.25mm 以下にしなければいけない。今回の測定は読み取り精度が 0.5mm 程しかないので、より精度のよい測定を行う必要があると考えられる。

- スケール 2 上の Z_{S2} 軸方向の測定結果と考察

表 3.13 では、スケール 2 上の z_{S2} 軸方向における出射光座標の光学設計値、測定値、光学設計値と測定値の差 (ズレ量) を示してある。ここで光学設計値は上述した z_{S1} 軸方向における意味と同様である

ピンホール番号	光学設計値 (Z_{S2} 軸方向 [mm])	測定値 (Z_{S2} 軸方向 [mm])	差 (ズレ量)[mm]
A-1	11.96	12.5	-0.54
A-2	18.06	18.5	-0.44
A-3	18.27	19.0	-0.73
A-4	18.48	19.0	-0.52
A-5	12.06	13.0	-0.94
A-6	5.94	6.5	-0.56
A-7	5.83	6.0	-0.17
A-8	5.72	6.0	-0.28
A-9	11.94	13.0	-1.06
B-1	12.46	12.0	0.46
B-2	18.65	18.0	0.65
B-3	18.89	19.0	-0.11
B-4	19.14	19.0	0.14
B-5	12.54	12.0	0.54
B-6	6.33	6.0	0.33
B-7	6.20	6.0	0.20
B-8	6.06	5.5	0.56
B-9	12.46	12.0	0.46
C-1	12.96	13.0	-0.04
C-2	19.23	19.0	0.23
C-3	19.51	19.0	0.51
C-4	19.80	19.5	0.30
C-5	13.02	13.0	0.02
C-6	6.72	6.5	0.22
C-7	6.56	6.5	0.06
C-8	6.40	6.25	0.15
C-9	12.97	13.0	-0.03
D-1	13.50	13.5	-0.0050
D-2	19.87	20.0	-0.13
D-3	20.19	20.0	0.19
D-4	20.52	20.0	0.52
D-5	13.53	13.0	0.53
D-6	7.11	6.0	1.11
D-7	6.93	6.5	0.43
D-8	6.74	6.5	0.24
D-9	13.49	13.0	0.49
E-1	14.03	15.0	-0.97
E-2	20.51	21.0	-0.49
E-3	20.87	21.0	-0.13
E-4	21.24	21.5	-0.26
E-5	14.04	14.0	0.04
E-6	7.50	7.5	0
E-7	7.29	7.5	-0.21
E-8	7.08	7.5	-0.42
E-9	14.01	15.0	-0.99

表 3.13: Z_{S2} 軸方向の測定結果

光学設計値と測定値の差からズレの平均と標準偏差を計算した。そして、求めたズレ量と瞳ミラーからスケール 1 までの距離より瞳ミラーの設置角度のズレ $\theta_{Z_{S2}}$ を計算した。これを表 3.14 にまとめる。

スライシングミラー番号	平均 [mm]	角度のずれ [°]
A	-0.58 ± 0.29	-0.094
B	0.36 ± 0.24	0.058
C	0.16 ± 0.18	0.025
D	0.37 ± 0.36	0.058
E	-0.38 ± 0.38	-0.058

表 3.14: Z_{S2} 軸方向位置のずれと角度のずれ

測定結果より、C のみが目標精度内に収まることが分かった。また、スケール 2 の測定 (表 3.14) とスケール 1 の測定 (表 3.10) を比べてみると、D 以外はズレ方が系統的である。これも、スケール 2 上の X_{S2} 軸方向の考察と同様で、スケール 2 が擬スリットミラーに近い読み取り精度が不足していることが効いていると考えられる。

以上の結果をまとめると、 X_{S1} 軸方向、 X_{S2} 軸方向について、A,C,E はスケール 1、2 の両方で目標精度内に収まる調整が出来た。B はスケール 1 では目標精度に収まったが、スケール 2 では目標精度より 1.5 倍ほど値が大きくなってしまった。これは、スケール 2 での読み取り精度の問題の可能性が高い。D はスケール 1、2 の両方で同方向に目標精度の 2 倍大きな値を示した。これは、スライシングミラーの向きの精度が悪いのか、擬スリットミラー D の設置誤差が大きいのと考えられる。

また、 Z_{S1} 軸方向、 Z_{S2} 軸方向については、スケール 1、2 で C が目標精度内に収まるように調整した。調整の結果、C はスケール 1,2 で目標精度内に収まったが、他の光線はおおよそ目標精度内に収まらなかった。擬スリットミラーを調整すると、スケールの Z_{S1} 軸方向 (Z_{S2} 軸方向) に像が動くことと、各測定結果のずれが系統的であることから、擬スリットミラーの設置誤差が大きいものと考えられる。ただし、以上の誤差を踏まえても P.65,66 で行った考察からこれらの光線はケラレなく分光系を通過し、検出器上のほぼ設計位置に結像すると期待される。よって、スライサ系の光学調整はおおよそ十分で、スライサ系としての性能も実用上問題のないレベルだと現段階では判断することが出来る。

4 MIRSIS 光学調整

4.1 目的

本章では MIRSIS 光学系全体の光学調整について述べる。MIRSIS 全体の光学調整は佐藤圭悟修士論文で開発された 3 次元座標を取得できる簡易 3 次元測定器と位置マーカー (真球) を使用した手法で行う。この測定手法を茨城大学で実現するための測定装置の立ち上げと、立ち上げた測定装置を用いてミラーデータの取得を開始したので、これらについて述べる。

4.2 光学調整の原理

MIRSIS は光学定盤上に光学部品が密集し立体配置されているため、ミラー面を直接測定して光学調整を行うことができない。そこで、佐藤圭悟修士論文で真球を位置マーカーとして使用し、ミラー面の向きと位置を相対的に扱う手法を確立した。本節ではこの測定手法の原理について佐藤圭悟修士論文を参考、引用しつつ述べる。

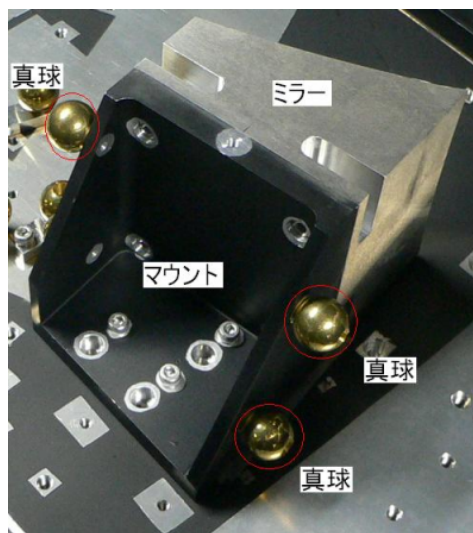


図 4.1: 真球を 3 つ取り付けた様子 (前光学系カメラミラー 2)

まず、図 4.1 のように各ミラーのホルダもしくはマウントに真球を 3 つ取り付ける。ホルダとはミラーを収める部品で、マウントとはホルダを光学定盤に固定するための部品である。ミラーはホルダ及びマウントに取り付けた状態だが、光学系としては組み立てていない状態である。その上で、各ミラーごとにミラー面と真球の 3 次元座標を取得することで次のことがわかる。

- 得られた真球表面の座標データに球面の式をフィッティングすることで各真球の中心座標を得ることができる。
- 3 つの真球の中心により形成される平面を特定できる。
- ミラー面座標データに各ミラーの面形状をフィッティングすることで、ミラー位置を特定でき、上記の平面に対するミラーの相対的な位置と向きを知ることができる。

測定後、ミラーを光学系として組み立てていく。ミラーとマウントを分解せずかつ、ホルダ及びマウントに取り付けた真球を取り外さなければ、得られた真球とミラー面の位置関係は変わらない。そのため、光学定盤にミラーを設置しても、3 つの真球を測定することで上記の情報からミラーの位置と向きを対応させることができる。つまり、ミラー面方向に障害があっても 3 つの真球を通してミラーの位置と向きがわかるので調整が可能になる。

4.3 簡易 3 次元測定器

4.2 で述べた光学調整法を実現するためには、ミラー面と真球の 3 次元座標を取得する必要がある。3 次元座標を取得するために簡易 3 次元測定器を使用する。このシステムは、佐藤圭悟修士論文において宇宙航空研究開発機構 (JAXA) でシステムを組み、性能評価をして、十分実用できることを確かめた。今回、同じシステムを茨城大学で使用するために新たに立ち上げた。本節ではこの簡易 3 次元測定器の詳細と使用法について述べる。

この簡易 3 次元測定器は、可動式の X 軸スライドガイド (駿河精機社製 KS112-600)、Z 軸スライドガイド (駿河精機社製 KS-312-300) にレーザー測距計 (KEYENCE 社製 LK-G 500) を Y 軸に加えることにより、レーザーの照射した地点の 3 次元座標 (X,Y,Z) を取得できるようにしたものである (図 4.2)。ここで、XYZ 系は 3 章に出てきたものとは異なる。X 軸スライドガイド、Z 軸スライドガイドはステッピングモーターで変位し、PC で制御されている。レーザー測距計 (Y 軸) はコントローラに接続し、コントローラに表示される値を PC で読み取る。図 4.3 に簡易 3 次元測定器に使用する各装置と制御用 PC の接続を示す。

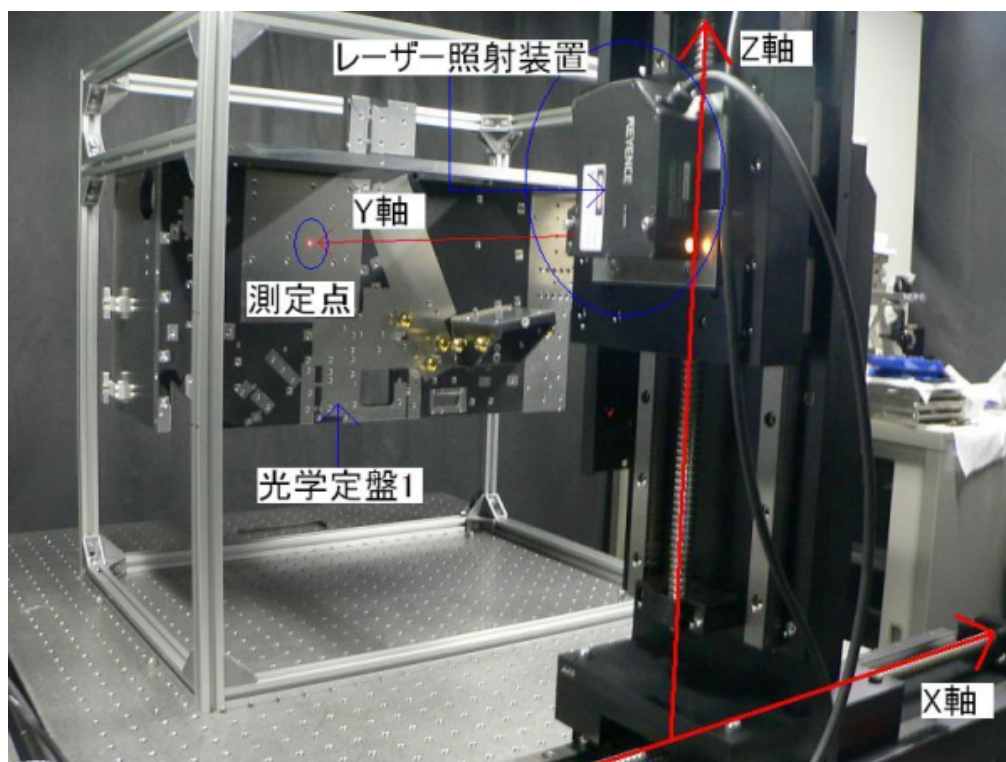


図 4.2: 簡易 3 次元測定器

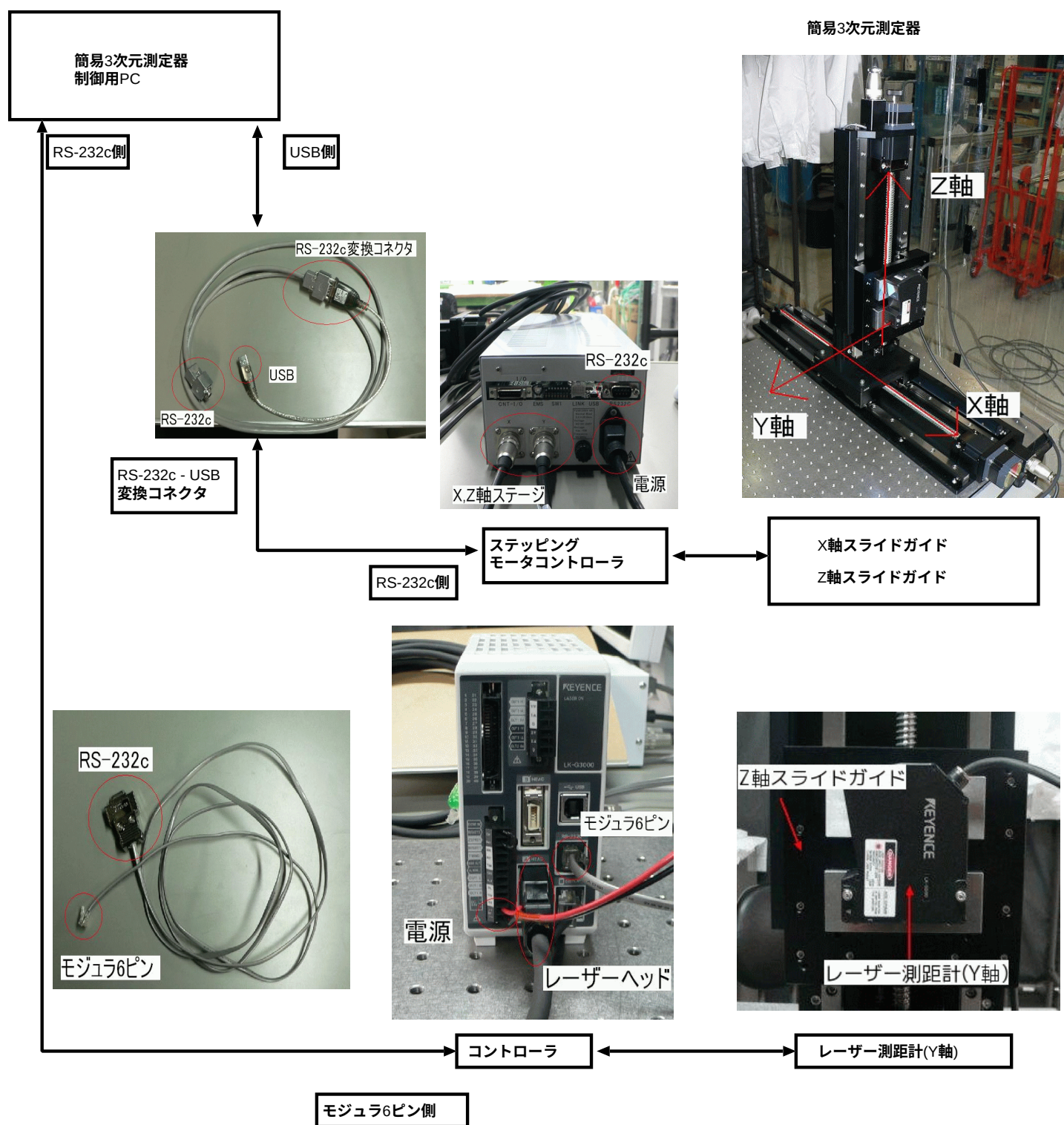


図 4.3: 簡易 3 次元測定器と PC の接続

ここで、使用する各部品のスペックを表 4.1 にまとめる。ここに記載した値はすべてカタログ値である。

	X 軸スライドガイド	Z 軸スライドガイド
可動域	0~600[mm]	0~300[mm]
分解能 (1 パルスでの移動量)	10[μm /パルス]	10[μm /パルス]
一方向位置決め精度	50 μm 以内	30 μm 以内
繰り返し位置決め精度	$\pm 1 \mu\text{m}$ 以内	$\pm 1 \mu\text{m}$ 以内

表 4.1: X 軸スライドガイドと Z 軸スライドガイドのスペック

X 軸スライドガイドと Z 軸スライドガイドは 2 軸のコントロールが可能なステッピングモータコントローラ (駿河精機社製 DS102) に接続する。ステッピングモータコントローラは PC で制御されて、PC から送られてくるパルス数だけモータを回転させて各軸を変位させる。ステッピングモータコントローラと PC の接続には RS-232c - USB 変換ケーブルを用いる。ステッピングモータ側に RS-232c ケーブルを接続し、途中で USB に変換して PC に接続する (図 4.3 参照)。

Y 軸で使用するレーザー測距計の測定範囲は基準距離 497.5mm から - 249mm~498mm で、分解能は 0.001mm である。レーザー測距計は専用のコントローラに接続して使用する。コントローラと PC の接続には片側がモジュラ 6 ピン、もう一方が RS-232c のケーブルを使用する。コントローラ側がモジュラ 6 ピン、PC 側に RS-232c を接続する (図 4.3 参照)。

レーザー測距計はレーザーを照射して、測定物に当たり戻ってきた反射光を受光窓で受ける。このとき、照射したレーザーと反射光の角度 α を見ている。そして、三角測量によって反射面までの距離測定を行っている。このときの様子を図 4.4 に示す。

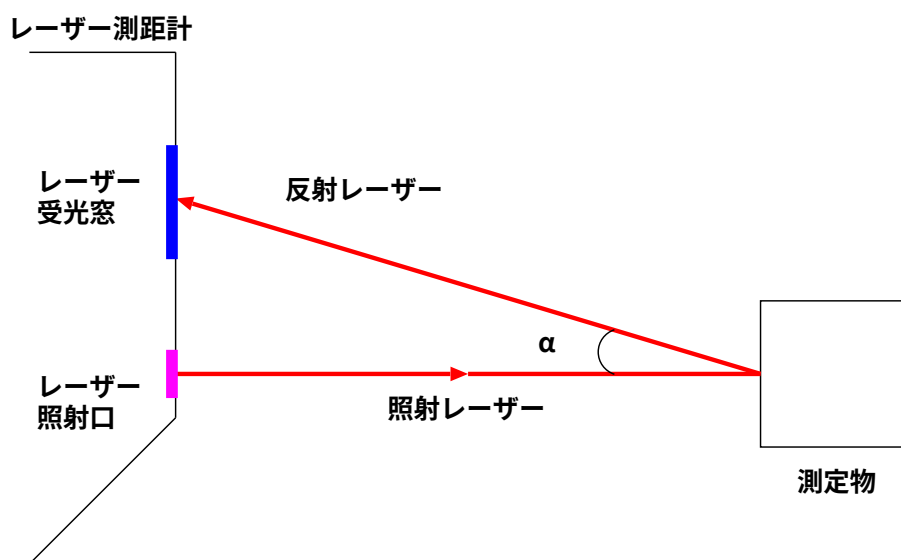


図 4.4: レーザー測距計 (Y 軸) の測定の様子

● 測定系のセットアップ

座標系は直交座標系をしていなければいけないので、簡易 3 次元測定器を組み立てる際、X,Y,Z 軸が直交するように組まなければならない。佐藤圭悟修士論文を参考に簡易 3 次元測定器を組み立てた。

簡易 3 次元測定器はほぼ水平に設置されている光学机に設置する。まず、X 軸スライドガイドを光学机の 1 辺にはほぼ平行になるように設置する。設置した X 軸スライドガイドに対して鉛直に動く Z 軸スライドガイドを取り付ける。Z 軸スライドガイドをのせる X 軸スライドガイドのステージ面の平面度は 10 μm である。ステージ面の幅は 180mm なので X 軸スライドガイドと Z 軸スライドガイドは 0.03 2°角度精度で取り付けることが出来る。光学机に X 軸、Z 軸を設置した様子を図 4.5 に示した。

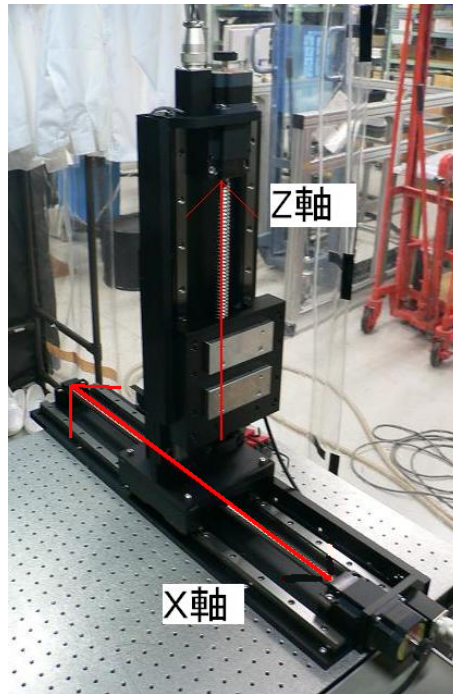


図 4.5: 光学机に X 軸、Z 軸を設置した様子

最後に、Z 軸ステージにレーザー測距計を Y 軸として取り付ける。X 軸と Y 軸 (レーザーの向き) の直交性は X 軸スライドガイドと Z 軸スライドガイドのネジ穴のアソビとネジ穴の間隔で決まる。ネジ穴のアソビが 0.5mm、間隔が 150mm なので、角度精度は 0.19° 程度である。Z 軸と Y 軸の直交性はレーザー取付の自由度のために取付だけでは精度良く決められなかった。そのため、レーザーが Z 軸と垂直に照射されるようにするため、ステージにスクリーンを取付たもの (以下スクリーンと呼ぶ) を利用し調整した。スクリーンにはレーザーを照射する目印となるように直径 1mm 程度の点を作った。具体的な手順は以下の通りで、佐藤圭悟修士論文を参考にした。

1. 光学机上でスクリーンをレーザーから 30cm 程度離れたところに置く。Z 軸にレーザー (Y 軸) を設置し、レーザー光が目印として設定した点に照射されるように高さと向きを調整する。スクリーンにレーザーを照射した様子を図 4.6 に示す。

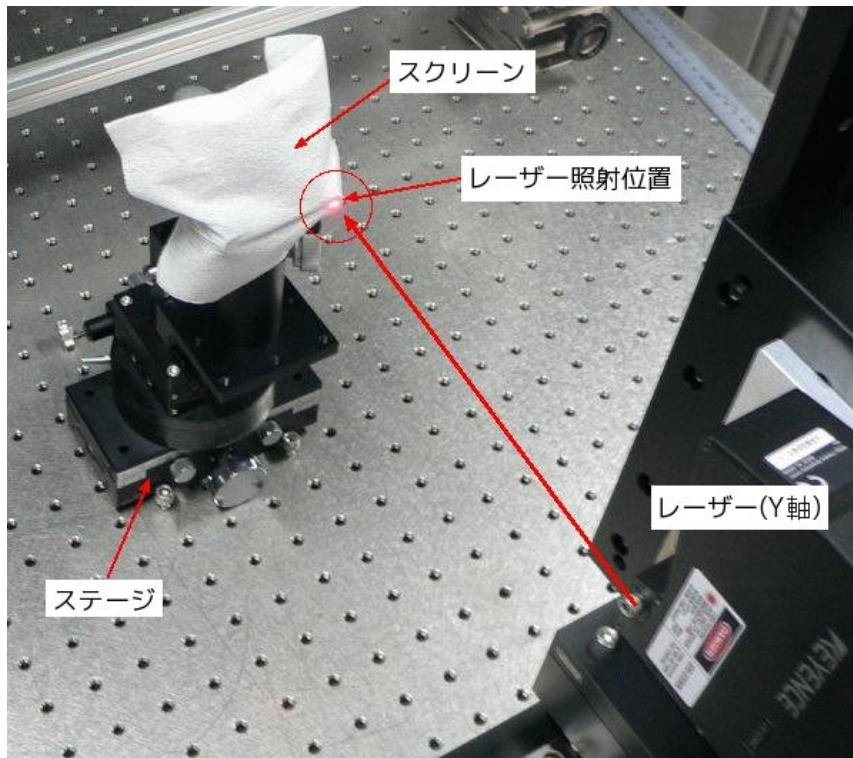


図 4.6: スクリーンにレーザーを照射した様子 (30cm 離れているとき)

2. スクリーンを 140cm 程度離れたところに置き、目印として設定した点に照射されているか確認する。このときスクリーンの XY 面からの高さは変わらないものとみなした。設定した目印位置にレーザーが照射されれば、レーザーと Z 軸は垂直になっているものとみなした。140cm 離れたスクリーンにレーザーを照射したときの様子を図 4.7 に示す。

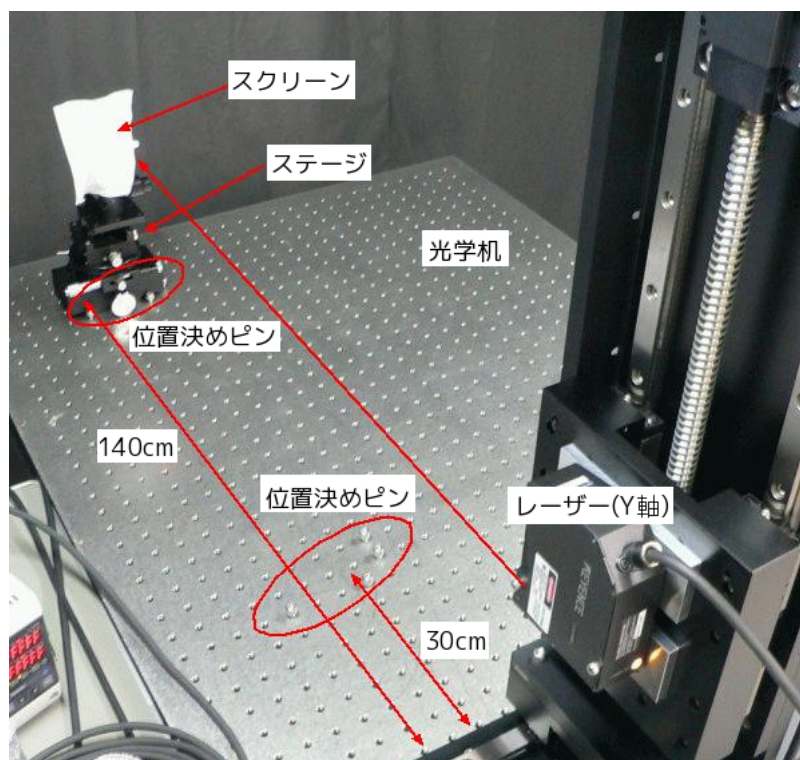


図 4.7: スクリーンにレーザーを照射した様子 (140cm 離れているとき)

3. 2の測定時にレーザー光が目印位置からずれているならば、この時点においてレーザー光の角度を調整しスクリーンを再びレーザーから30cm程度のところに持ってくる。このとき目印位置にレーザーが照射されればレーザーとZ軸は垂直になっているものとみなした。

上記のような作業を繰り返しレーザー光の角度(Y軸)とZ軸が垂直になるように調整した。スクリーンを前後移動させるとき、常に同じ位置で計測するために位置決めピンで設置位置を決めて行った。図4.7に位置決めピンの位置と位置決めピンでステージを固定している様子を示した。この調整により、Z,Y軸の直交性は精度0.15°以内で実現できた。

4.4 簡易3次元測定器の駆動と座標取得

簡易3次元測定器は接続したPCで制御され自動で3次元座標を取得する。座標の取得にはJAXA/ISASの片坐宏一氏が開発したプログラムを使用している。プログラム名は「3dm3.pl」で、起動すると図4.8に示す操作画面が起動する。

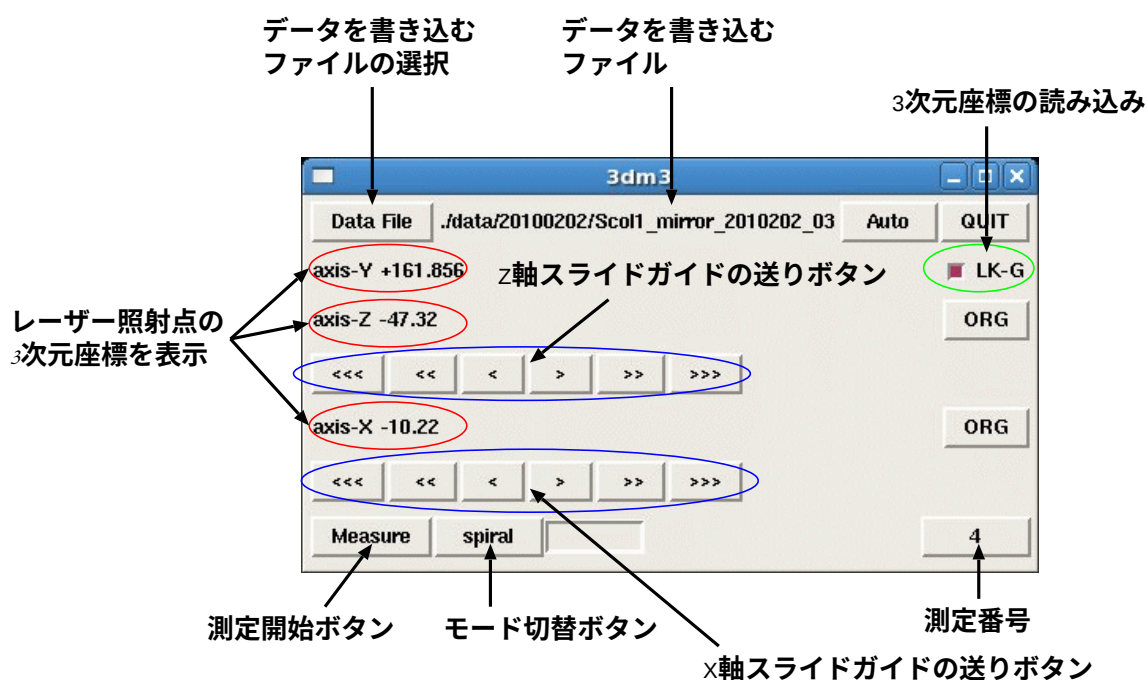


図 4.8: プログラム「3dm3.pl」の操作画面

図4.8において緑で囲んだ「LK-G」にチェックを入れるとレーザーが照射している位置のX,Y,Zの各座標を取得してくる。図4.8はチェックをいれた状態である。赤で囲んだaxis-X,axis-Y,axis-Zは各軸と対応している。表示されている数字がレーザーを照射している地点の3次元座標である。X軸スライドガイドとZ軸スライドガイドは青で囲んだボタンを押して移動させ、測定点にレーザーを照射する。不等号の数が多いほど変位速度が速くなる。axis-Zの下にある<向きおよび>向きのボタンを押すとそれぞれ図4.2のZ軸方向正および負の向きに動く。axis-Xの下にある<向きおよび>向きのボタンを押すとそれぞれ図4.2のX軸方向負および正の向きに動く。「Measure」ボタンを押すと現在axis-X,axis-Y,axis-Zに表示されている3次元座標を取得する。取得したデータは指定したテキストファイルに自動で書き込まれる。書き込ませるテキストファイルは左上の「Data File」ボタンを押すと選択することができる。このとき、プログラム「3dm3.pl」とテキストファイルは図4.9で示すディレクトリ構造にしておく。

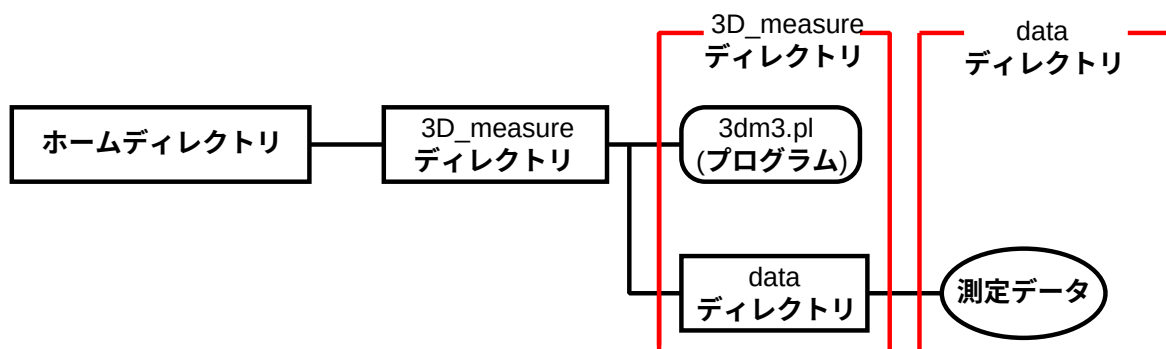


図 4.9: ディレクトリ構造

テキストファイルには「測定番号 X 座標 Y 座標 Z 座標」の順にデータが書き込まれる。測定番号は測定対象を区別するために使用する。例えば3つの真球を測定するときは最初に測定する真球の測定番号は01、2番目に測定する真球の測定番号は02、3番目に測定する真球の測定番号は03というように測定対象を変更するたびに測定番号を増やさなければならない。この測定番号は解析プログラムで使用する。図 4.8 の右下の4と表記されているボタンを押すと変更できる。プログラム「3dm3.pl」にはいくつかの測定モードが搭載されている。MIRSIS の光学調整ではその中から spiral モードを使用する。spiral モードは任意の測定点 (初期位置) から、スキャン幅 a [mm] で X、Z 方向に自動スキャンさせながら各点でレーザーにより Y 座標を測定するモードである。spiral モードのデータ取得の様子を図 4.10 に示す。図 4.10 で点 1 が初期位置で黒線に沿って、途中の赤点の場所でのデータを順に測定していく。「Measure」の左側のボタンを押すとモード変更することが出来る。図 4.8 では「spiral」になっている。

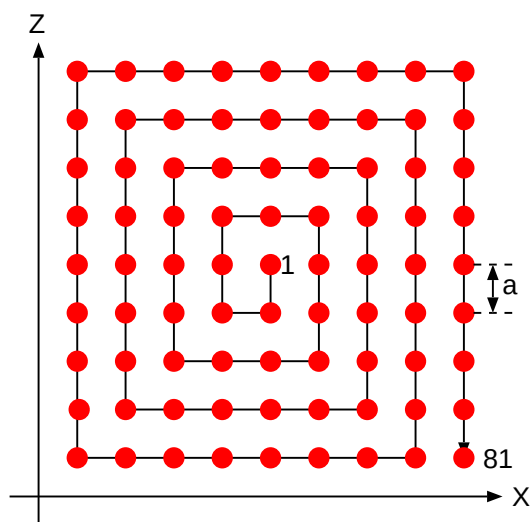


図 4.10: spiral モードのスキャンの様子 (佐藤圭悟修士論文より引用)

4.5 解析手法

簡易 3 次元測定器で得られた 3 次元座標データにフィッティングを行い、真球とミラー面の位置解析を行う。データのフィッティングは最小二乗法を用いている。これは、測定座標データとモデル座標 (ここでは球面、平面、曲面の各ミラーが任意の方向、位置を持つことで決まる予想ミラー面座標) の残差の 2 乗和が最小になるフリーパラメータの組を探すことである。本節では球面、平面、曲面鏡のフィッティング法について述べたあと、平面鏡と真球の相対位置取得法と曲面鏡の相対位置取得法について述べる。

4.5.1 球面フィッティング

球面の中心座標 (C_x, C_y, C_z) 、半径 R としたとき、球面上の点 (X, Y, Z) は (4.1) 式をみたす。

$$(X - C_x)^2 + (Y - C_y)^2 + (Z - C_z)^2 = R^2 \quad (4.1)$$

一方で、球表面を簡易 3 次元測定器で測定して得られる測定座標を (X_{sp}, Y_{sp}, Z_{sp}) とすると (4.2) 式になる。

$$(X_{sp} - C_x)^2 + (Y_{sp} - C_y)^2 + (Z_{sp} - C_z)^2 = R'^2 \quad (4.2)$$

右辺が R ではなく R' になっているのは測定誤差によって、球面から少しずれたところ (球中心から R' のところ) にくることを想定している。ここで、 $R' - R$ が測定座標 (X_{sp}, Y_{sp}, Z_{sp}) とモデル座標 (C_x, C_y, C_z) のずれ、すなわち各測定点に対する残差である。多数の測定点に対する残差の 2 乗和が最小になるように真球の中心座標 (C_x, C_y, C_z) を求める。光学調整で使用する真球の直径は 15.875mm と値がわかっている。 $R=7.9375\text{mm}$ で固定し、フリーパラメータを中心座標 (C_x, C_y, C_z) の 3 つにしてフィットする。

4.5.2 平面フィッティング

平面の方程式は係数 a, b, c と平面上の点 Q の位置ベクトル $\mathbf{Q} = (X, Y, Z)$ から (4.3) 式で表すことができる。

$$aX + bY + cZ + 1 = 0 \quad (4.3)$$

(4.3) 式でフリーパラメータは係数 a, b, c の 3 つである。(4.3) 式から平面の法線と同じ向きのベクトルは $\mathbf{M} = (a, b, c)$ と表すことができる。 $\mathbf{M}$ と $\mathbf{Q}$ を用いて (4.3) 式を書き直すと (4.4) 式になる。

$$\mathbf{M}^t \mathbf{Q} + 1 = 0 \quad (4.4)$$

ここで t は転置行列をとることを示す。平面の法線ベクトル $\mathbf{N}$ は長さが 1 のベクトルなので、(4.5) 式で表すことができる。

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{M}}{|\mathbf{M}|} = \frac{\mathbf{M}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (4.5)$$

簡易 3 次元測定器で平面上の点 P を測定して得られる測定座標を $\mathbf{P} = (X_{pl}, Y_{pl}, Z_{pl})$ とする。点 P から (4.3) の平面に垂線の足を下ろしたときの平面上の点が Q とする。点 P から点 Q までの距離を k とすると (4.6) 式で表すことができる。

$$^t \mathbf{Q} = ^t \mathbf{P} + k ^t \mathbf{N} \quad (4.6)$$

(4.4) 式を (4.5) 式、(4.6) 式を代入すると (4.7) 式になる。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}^t \mathbf{P} + k(\mathbf{M}^t \mathbf{N}) + 1 &= 0 \\ \mathbf{M}^t \mathbf{P} + k\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} + 1 &= 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

(4.7) 式より、測定点 P から平面までの距離 k は (4.8) 式になる。

$$k = -\frac{\mathbf{M}^t \mathbf{P} + 1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (4.8)$$

(4.8) 式はフリーパラメータ a, b, c と測定点 P の座標のみで表された式である。そして、この k の値が測定点 P における測定座標とモデル座標のずれ、すなわち残差になり、多数の測定点の k の 2 乗和が最小になるように a, b, c の値を決める。

4.5.3 曲面鏡フィッティング

曲面鏡は設計値として与えられる曲率 $R[\text{mm}]$ 、非球面係数 K からミラー曲面の形が (4.9) 式のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\rho'^2 - 2RZ' + (1 + K)Z'^2 &= 0 \\ Z' &= \frac{R - \sqrt{R^2 - (1 + K)\rho'^2}}{1 + K}\end{aligned}\quad (4.9)$$

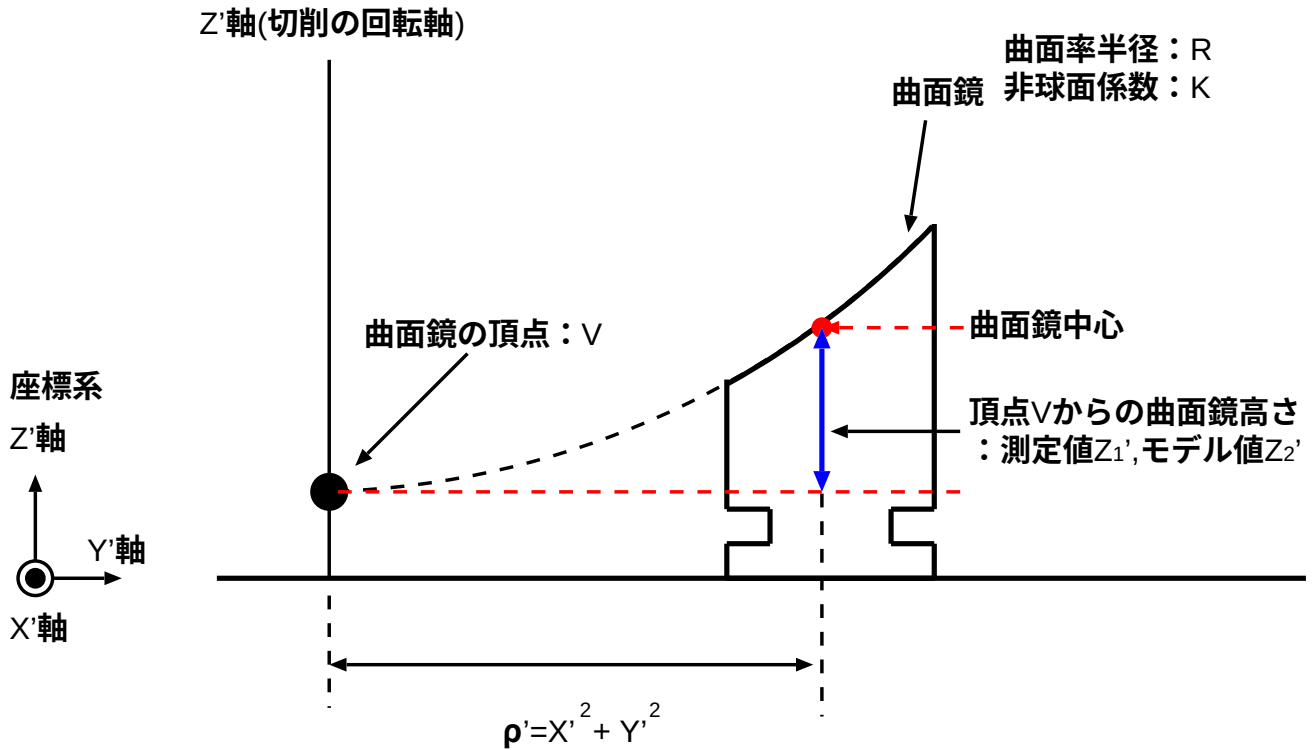


図 4.11: (4.9) 式で考えている状況 (図 2.9 参考)

(4.9) 式は曲面鏡の頂点に原点があり切削回転軸を Z' 軸とした $X'Y'Z'$ 直交座標系での回転曲面を表す式である。 ρ' は $\rho'^2 = X'^2 + Y'^2$ であり、 Z' は頂点 V からの曲面鏡面までの高さである (図 4.11 参照)。フリーパラメータは曲面鏡の頂点の位置 V で $\mathbf{V} = (V_{X'}, V_{Y'}, V_{Z'})$ の 3 成分を持っている。図 4.12 のように 3 次元測定器でミラー表面座標の測定を行い、測定座標 $P(X, Y, Z)$ を得る。フィッティングでのモデルミラー座標 (X', Y', Z') は (4.9) 式のミラー面がミラー頂点 V のところで、 Z' 軸向きに設置された状態の座標である。一方、簡易 3 次元測定器 (XYZ 系) でミラー表面を測定し、得られた測定座標 $P(X, Y, Z)$ のみで Z' 軸 (切削の回転軸) を求めると図 4.12 のようにに赤線と青線のミラー曲面の違いが微小過ぎて Z' 軸 (切削回転軸) が区別できない場合がある。そこで、ミラーが設置されている平面の法線と Z' 軸の向きを平行であると仮定し、軸ずれのパラメータをゼロにしてフィットする。

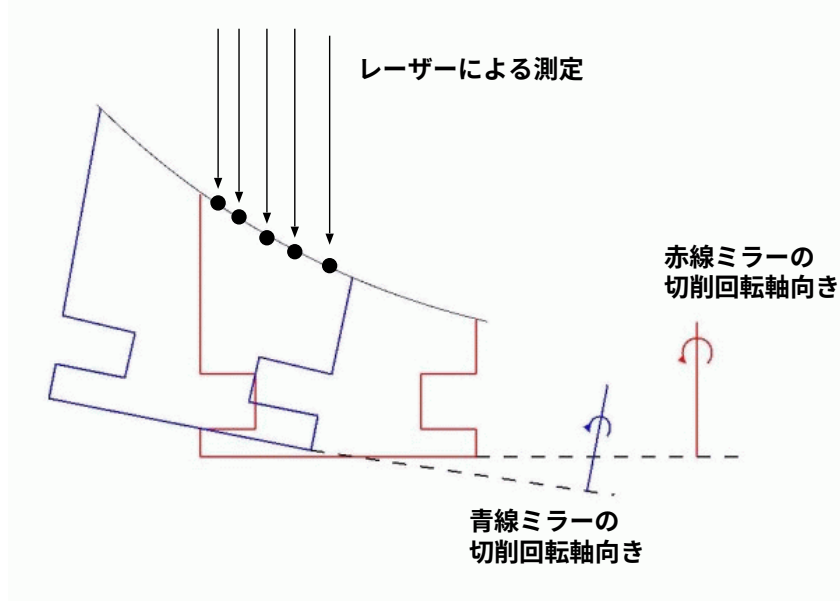


図 4.12: ミラー面の測定座標点のみから考えられるミラーの設置状態と Z' 軸の状態 (佐藤圭悟修士論文より引用)

曲面鏡のフィッティングは、まずミラーを設置する平面を測定し、4.5.2 で述べた平面フィッティングから法線ベクトル $\mathbf{N}$ を得る。平面の法線ベクトル $\mathbf{N}$ と曲面鏡上の点 P の測定座標 $\mathbf{P}=(X, Y, Z)$ と曲面鏡の頂点 V から測定点 P までの曲面鏡高さ Z'_1 は (4.10) 式で表すことができる。

$$Z'_1 = (\mathbf{P} - \mathbf{V}) \cdot \mathbf{N} \quad (4.10)$$

次に (4.9) 式よりモデル座標から計算される頂点 V からみた P の (X', Y') におけるモデル曲面鏡高さ Z'_2 を求める。(4.9) 式で R, K は定数 (ミラーの設計値を用いる) なので ρ' を求めればよい。 ρ' は $\mathbf{P}-\mathbf{V}$ の XY 平面の成分の長さで、(4.11) 式のように表すことができる。

$$\rho'^2 = |\mathbf{P} - \mathbf{V}|^2 - Z_1'^2 = (\mathbf{P} - \mathbf{V}) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{V}) - Z_1'^2 \quad (4.11)$$

(4.9) 式よりモデル曲面鏡高さ Z'_2 は (4.12) 式で表すことができる。

$$Z'_2 = \frac{R - \sqrt{R^2 - (1 + K)\rho'^2}}{1 + K} \quad (4.12)$$

多数の測定点に対する残差 $Z'_2 - Z'_1$ の 2 乗和が最小になるように頂点 V を決める。

MIRSIS で使用する曲面鏡のなかで、分光カメラトロイダル鏡のみ、2 つの曲率半径 R_1, R_2 [mm] を持った曲面鏡である。 R_1 は $X'Y'$ 面内でみた曲率、 R_2 は $Y'Z'$ 面内でみた曲率である。(詳しくは佐藤圭悟修士論文参照)。これは円錐曲線ではない形を回転した形状をしているため他の曲面鏡のように (4.9) 式では表すことができない。そのため分光カメラトロイダル鏡のフィッティングは、(4.13) 式を用いる。このとき、頂点 V からの曲面鏡高さの測定値は (4.10) 式で、モデル高さは次の (4.13) 式で表せる。

$$Z'_2 = R_1 \sqrt{(\sqrt{R_2^2 - Y'^2} - R_2 + R_1)^2 - X'^2} \quad (4.13)$$

R_1, R_2 にはミラーの設計値を用いて、あとは他の曲面鏡と同様に、多数の測定点に対する残差 $Z'_2 - Z'_1$ の 2 乗和が最小になるように頂点 V を決める。

4.5.4 平面鏡と真球の相対位置取得

平面鏡と真球の相対位置の取得については佐藤圭悟修士論文にある通りだが測定データの解析で使用するのでここで再度述べておく。ここから図中のベクトル表記と合わせるため、ベクトルは太字ではなく文字の上に矢印を付ける形で表す。

簡易 3 次元測定器で平面鏡面と 3 つの真球表面の 3 次元座標を取得する。4.5.1 で述べた手法で、得られた真球の 3 次元座標を球面の式にフィッティングして真球の中心 C_1, C_2, C_3 の座標を取得する。4.5.2 で述べた手法で、得られた平面鏡の 3 次元座標を平面の式にフィッティングして法線 $\mathbf{N} = \vec{N}$ (ミラーの向き) を取得する。真球の中心 C_1, C_2, C_3 の、測定座標系の原点に対する位置ベクトルを $\vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_3$ と考える。この 3 つの位置ベクトルから直交座標系 $X''Y''Z''$ を作る。 X'', Y'', Z'' 軸方向の単位ベクトルを $\vec{X}'', \vec{Y}'', \vec{Z}''$ とする (ここでの X'', Y'', Z'' は 4.5.3 で出てきたものとは無関係である)。 C_1 から C_2 に向かう単位ベクトルを $\vec{V}_{12}$ 、 C_2 から C_3 に向かう単位ベクトルを $\vec{V}_{23}$ とすると、 $\vec{V}_{12}$ と $\vec{V}_{23}$ は次のように表すことができる。

$$\vec{V}_{12} = \frac{\vec{C}_2 - \vec{C}_1}{|\vec{C}_2 - \vec{C}_1|} \quad (4.14)$$

$$\vec{V}_{23} = \frac{\vec{C}_3 - \vec{C}_2}{|\vec{C}_3 - \vec{C}_2|} \quad (4.15)$$

直交座標の X'' 軸を $\vec{V}_{12}$ と同じ向きにとる。そして、 $\vec{V}_{12}$ と $\vec{V}_{23}$ を用いて、 X'' 軸に直交するように Y'' 軸を定める。 $\vec{V}_{12}$ と $\vec{V}_{23}$ の始点を合わせて考えると、図 4.13 のように Y'' 軸を設定することができる。

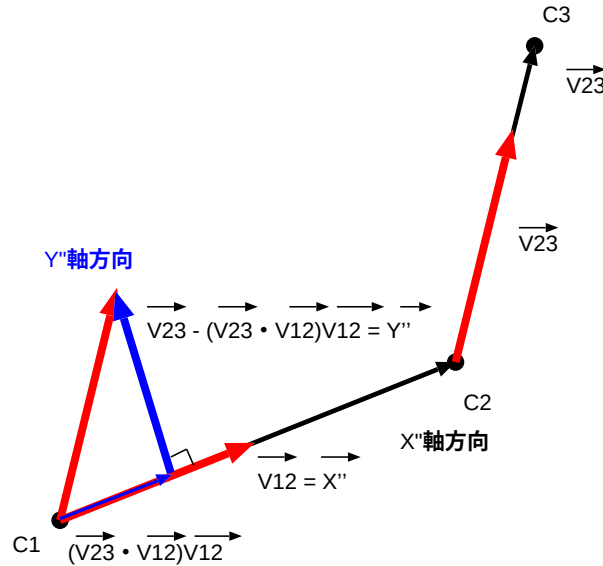


図 4.13: Y'' 軸の設定

これを式で表すと $\vec{X}''$ は (4.16) 式、 $\vec{Y}''$ は (4.17) 式のようにになる。

$$\vec{X}'' = \frac{\vec{V}_{12}}{|\vec{V}_{12}|} \quad (4.16)$$

$$\vec{Y}'' = \frac{(\vec{V}_{23} - (\vec{V}_{23} \cdot \vec{V}_{12})\vec{V}_{12})}{|\vec{V}_{23} - (\vec{V}_{23} \cdot \vec{V}_{12})\vec{V}_{12}|} \quad (4.17)$$

直交する $X''Y''$ 軸を求めることができた。この 2 軸の外積から直交座標系 $X''Y''Z''$ を決めることができる。ここで、外積 $\vec{V}_{12} \times \vec{V}_{23}$ の方向は $\vec{X}'', \vec{Y}''$ の外積 $\vec{X}'' \times \vec{Y}''$ と同じ向きである。よって、 $\vec{Z}''$ は式 4.18 のように書くことができる。

$$\vec{Z}'' = \vec{X}'' \times \vec{Y}'' = \frac{\vec{V}_{12} \times \vec{V}_{23}}{|\vec{V}_{12} \times \vec{V}_{23}|} \quad (4.18)$$

この互いに直交する $\vec{X}'', \vec{Y}'', \vec{Z}''$ を用いて、平面フィッティングで求めた平面鏡 ((4.3) 式) の法線ベクトル $\vec{N}$ は (4.19) 式で表すことができる。

$$\vec{N} = a\vec{X} + b\vec{Y} + c\vec{Z} = a''\vec{X}'' + b''\vec{Y}'' + c''\vec{Z}'' = \alpha\vec{V}_{12} + \beta\vec{V}_{23} + \gamma(\vec{V}_{12} \times \vec{V}_{23}) \quad (4.19)$$

(4.19) 式の $a''\vec{X}'' + b''\vec{Y}'' + c''\vec{Z}''$ は、考えている平面の法線ベクトルを3つの真球の中心 C_1, C_2, C_3 の座標によって形成された $X''Y''Z''$ 座標系の上で表したものであり、これを測定ですぐに得られる真球間の相対位置ベクトル $\vec{V}_{12}, \vec{V}_{23}$ を用いた表記に変換した。このようにすることで、3つの真球の中心 C_1, C_2, C_3 の座標から直接平面鏡の法線ベクトル $\vec{N}$ を求めることができる。

また、法線ベクトルだけでは同じ法線ベクトルを持つ、無数の平行平面を表すので、実際の平面鏡面を1つに示さなくてはならない。それには、平面鏡が通る1点を指定すればよい。この1点として有限の大きさの長方形を持つ平面鏡の四隅の重心を使う。こうすることで平面を1つに特定することができると同時に、実際の平面鏡範囲を示すこともできる。具体的には平面鏡の位置を取得するため簡易3次元測定器で平面の四隅 T_1, T_2, T_3, T_4 の座標を測定しそれらの重心 G を計算する。平面の四隅の座標はその付近のミラー面範囲よりやや広い範囲の表面座標を細かいピッチでスパイラルスキャンする (図 4.14)。

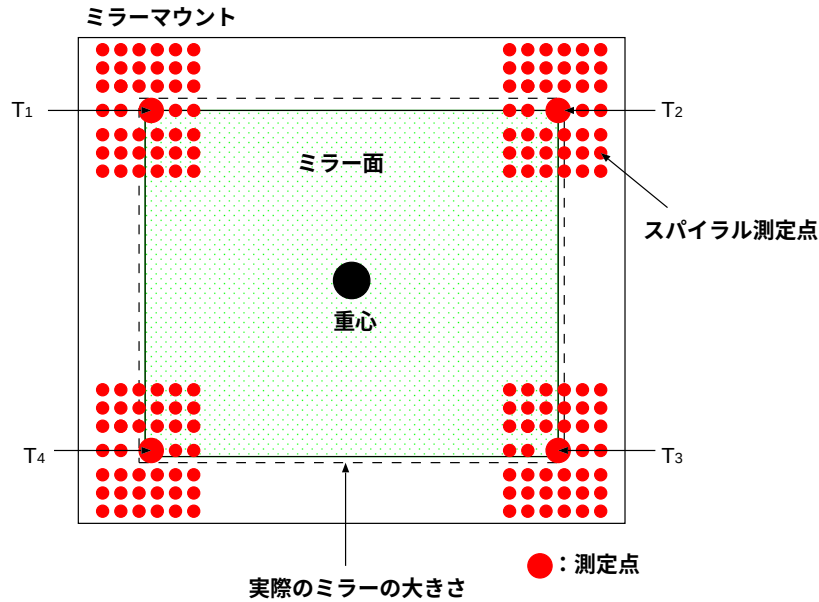


図 4.14: 四隅の測定の模式図

四隅の座標の測定系の原点に対する位置ベクトルを $\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{T}_3, \vec{T}_4$ とする。このとき四隅の重心の測定系の原点に対する位置ベクトル $\vec{G}$ は以下の式で表すことができる。

$$\vec{G} = \frac{\vec{T}_1 + \vec{T}_2 + \vec{T}_3 + \vec{T}_4}{4} \quad (4.20)$$

また、四隅の重心 G の3真球中心による重心 ($= \frac{\vec{C}_1 + \vec{C}_2 + \vec{C}_3}{3}$) に対する相対位置ベクトルを $\vec{X}''\vec{Y}''\vec{Z}''$ 系で表せば (4.21) 式になる。

$$\vec{G} - \frac{\vec{C}_1 + \vec{C}_2 + \vec{C}_3}{3} = \rho\vec{V}_{12} + \sigma\vec{V}_{23} + \tau(\vec{V}_{12} \times \vec{V}_{23}) \quad (4.21)$$

これで、3つの真球の中心を測定するだけで平面鏡の位置と向きを知ることができる。

4.5.5 曲面鏡と真球の相対位置取得

曲面鏡と真球の相対位置の取得については佐藤圭悟修士論文にある通りだが測定データの解析で使用するのでここで再度述べておく。

簡易 3 次元測定器で曲面鏡面と 3 つの真球とミラーマウントの曲面鏡設置面 (ここではマウント面とよぶ) の 3 次元座標を取得する。4.5.3 で述べた通り、曲面鏡のフィッティングの際、曲面鏡設置面の法線の情報が必要になるので、マウント面を測定する必要がある。また、曲面鏡を設置してしまうとマウント面が隠れてしまい測定することが出来ない。そのため、以下の手順で測定を行う。

1. 曲面鏡をマウントに取付ない状態で、3 つの真球と曲面鏡マウントのマウント面を測定し、3 つの真球とマウント面の法線の相対位置を取得する
2. 曲面鏡をマウント面に設置後、3 つの真球と曲面鏡面を測定し、真球と曲面鏡頂点の相対位置を取得する

1,2 で測定している真球は同じもので、1,2 の間で外すことなく曲面鏡マウントに設置してある。このときの模式図を図 4.15 に示す。

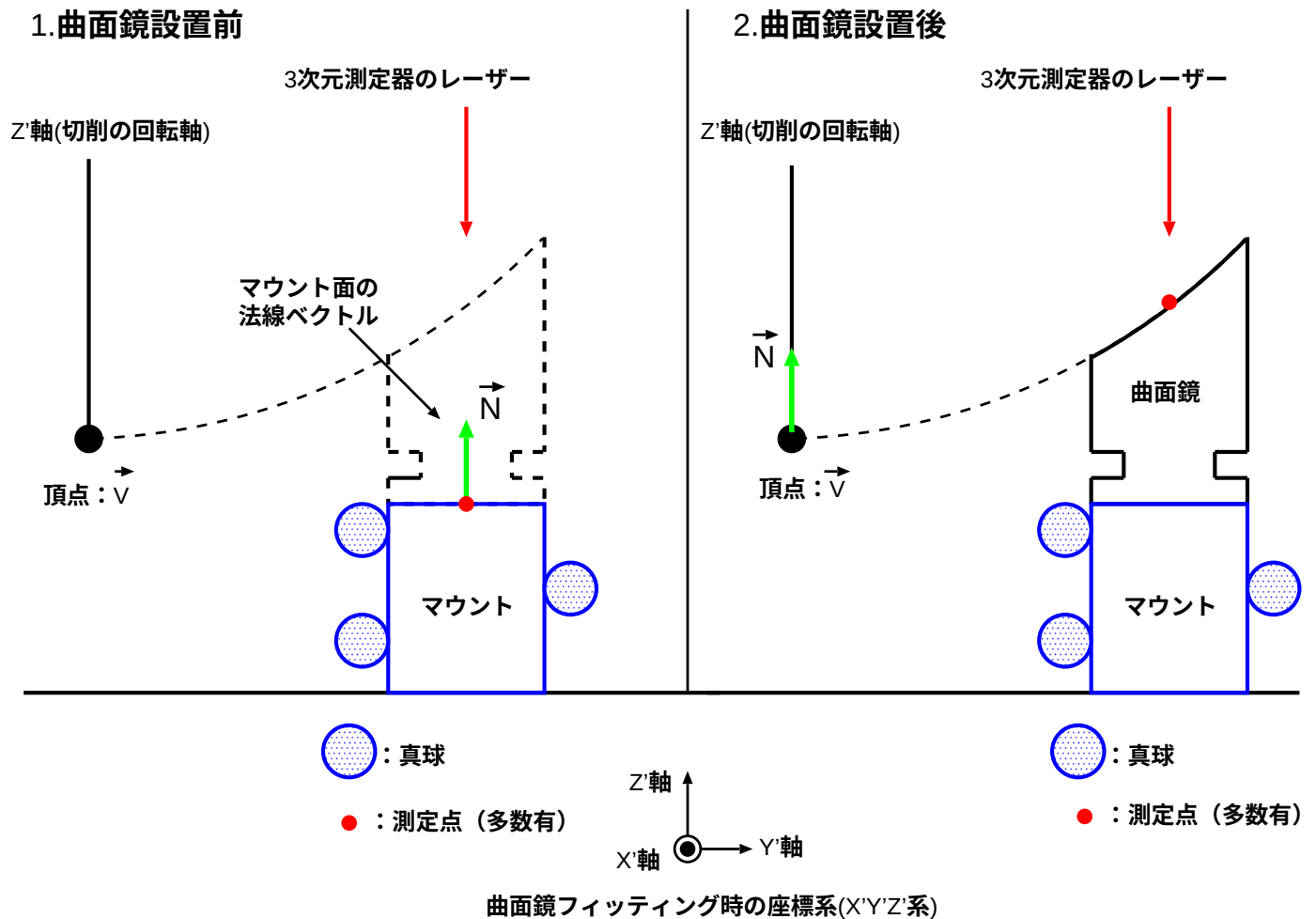


図 4.15: 曲面鏡と真球の相対位置取得の模式図

まず、曲面鏡をマウント面に設置していない状態で 3 つの真球とマウント面の 3 次元座標を測定し、真球と法線の相対位置を取得する (図 4.15 左)。この相対位置取得の手法は 4.5.4 で述べた平面鏡面がマウント面になるだけで考え方は同様である。4.5.1 で述べた手法で、得られた真球の 3 次元座標を球面の式にフィッティングして 3 つの真球の中心 C'_1, C'_2, C'_3 の座標を取得する。4.5.2 で述べた手法で、得られたマウント面の 3 次元座標を平面の式にフィッティングしてその法線ベクトル $\vec{N}$ を取得する。真球の中心の測定系の原点に対する位置ベクトルを $\vec{C}'_1, \vec{C}'_2, \vec{C}'_3$ とする。3 つの位置ベクトルから図 4.13 と同様に直交座標系 $X'''Y'''Z'''$ をつくる。このときの X''' 軸、 Y''' 軸、 Z''' 軸 方向の単位

ベクトルを $\vec{X}''', \vec{Y}''', \vec{Z}'''$ とする。 C'_1 から C'_2 に向かう単位ベクトルを $\vec{V}'_{12}$ 、 C'_2 から C'_3 に向かう単位ベクトルを $\vec{V}'_{23}$ とすると、 $\vec{V}'_{12}$ と $\vec{V}'_{23}$ は (4.14),(4.15) 式と同様に以下の式で表すことができる。

$$\vec{V}'_{12} = \frac{\vec{C}'_2 - \vec{C}'_1}{|\vec{C}'_2 - \vec{C}'_1|} \quad (4.22)$$

$$\vec{V}'_{23} = \frac{\vec{C}'_3 - \vec{C}'_2}{|\vec{C}'_3 - \vec{C}'_2|} \quad (4.23)$$

(4.22),(4.23) 式を用いて X''' 軸、 Y''' 軸、 Z''' 軸 は以下の式で表すことができる。

$$\vec{X}''' = \frac{\vec{V}'_{12}}{|\vec{V}'_{12}|} \quad (4.24)$$

$$\vec{Y}''' = \frac{(\vec{V}'_{23} - (\vec{V}'_{23} \cdot \vec{V}'_{12})\vec{V}'_{12})}{|\vec{V}'_{23} - (\vec{V}'_{23} \cdot \vec{V}'_{12})\vec{V}'_{12}|} \quad (4.25)$$

$$\vec{Z}''' = \vec{X}''' \times \vec{Y}''' = \frac{\vec{V}'_{12} \times \vec{V}'_{23}}{|\vec{V}'_{12} \times \vec{V}'_{23}|} \quad (4.26)$$

(4.24),(4.25),(4.26) 式で表した $\vec{X}''', \vec{Y}''', \vec{Z}'''$ を用いて、 4.5.4 のときと同様に法線ベクトル $\vec{N}'$ を表すと (4.27) 式になる。

$$\vec{N}' = a\vec{X} + b\vec{Y} + c\vec{Z} = a'''\vec{X}''' + b'''\vec{Y}''' + c'''\vec{Z}''' = \alpha'\vec{V}'_{12} + \beta'\vec{V}'_{23} + \gamma'(\vec{V}'_{12} \times \vec{V}'_{23}) \quad (4.27)$$

これで、 α', β', γ' の係数と 3 つの真球の中心座標からマウント面の法線ベクトル $\vec{N}'$ を求めることができる (XYZ は測定系の座標系である)。

次に、曲面鏡をマウント面に設置後、 3 つの真球と曲面鏡面の 3 次元座標を測定し、真球と曲面鏡頂点の相対位置を取得する。得られた真球の 3 次元座標を球面の式にフィッティングして真球の中心座標 C'_1, C'_2, C'_3 を取得する。先程と同様に真球の中心 $\vec{C}'_1, \vec{C}'_2, \vec{C}'_3$ を空間上のある点を原点とした位置ベクトルとして考え、直交座標系 $X'''Y'''Z'''$ をつくる。このときの X''' 軸、 Y''' 軸、 Z''' 軸 方向の単位ベクトルを $\vec{X}''', \vec{Y}''', \vec{Z}'''$ とする。先に測定から取得している係数 α', β', γ' と 3 つの真球の位置ベクトルから、マウント面の法線ベクトル $\vec{N}'$ を計算する。4.5.3 で述べた手法で、得られた曲面鏡面の 3 次元座標を曲面の式にフィッティングして頂点 $\vec{V}'$ を取得する。 $\vec{X}''', \vec{Y}''', \vec{Z}'''$ を用いて頂点 $\vec{V}'$ の 3 真球中心の重心に対する相対位置ベクトルを表すと、 (4.28) 式になる。

$$\vec{V}' - \frac{\vec{C}'_1 + \vec{C}'_2 + \vec{C}'_3}{3} = \mu\vec{V}'_{12} + \nu\vec{V}'_{23} + \xi(\vec{V}'_{12} \times \vec{V}'_{23}) \quad (4.28)$$

$\frac{\vec{C}'_1 + \vec{C}'_2 + \vec{C}'_3}{3}$ は 3 真球中心の重心の位置ベクトルである。これで、 3 つの真球の中心座標を測定するだけで曲面鏡の位置と向きを知ることができる。

4.6 ミラーと真球の相対位置取得の結果

立ち上げた簡易 3 次元測定器で各ミラーと真球の座標測定とフィッティングを行い、相対位置の取得を行った。

4.6.1 平面鏡と真球の相対位置取得測定

平面鏡のミラーマウントに設置してある 3 真球の中心の測定系に対する位置ベクトル $\vec{C}_1, \vec{C}_2, \vec{C}_3$ から平面鏡の法線ベクトル $\vec{N}$ を計算するための係数 α, β, γ を測定から求めた。なお、測定は各ミラーごとに 3 回測定を行い、得られた各係数の平均を最終結果とする。

- 固定平面鏡 (FM2)

表 4.2 に FM2 ミラー面と真球のフィッティングから得られた係数の結果を示す。また、図 4.16 に固定平面鏡 (FM2) の真球の位置と番号を示す。

	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	平均 ± 標準偏差
α	-0.00430225	-0.00554383	-0.00335410	-0.00439973 ± 0.00109761
β	0.00938788	0.00992758	0.00781550	0.00904365 ± 0.00109731
γ	-0.999965	-0.999961	-0.999976	-0.999967 ± 0.000008

表 4.2: FM2 のフィッティング結果

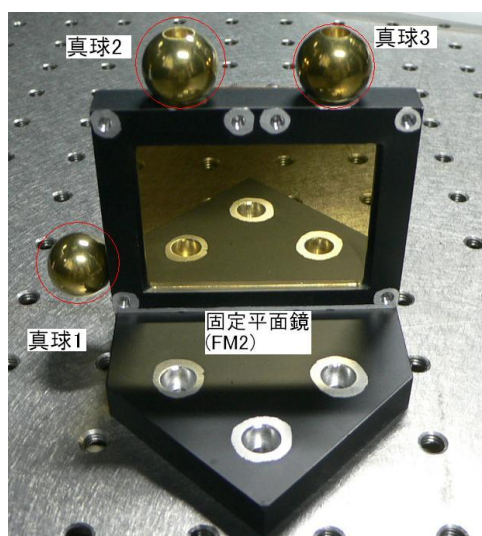


図 4.16: 固定平面鏡 (FM2) の真球位置と番号

- 固定平面鏡 (FM3)

表 4.3 に固定平面鏡 (FM3) ミラー面と真球のフィッティングから得られた係数の結果を示す。また、図 4.17 に固定平面鏡 (FM3) の真球の位置と番号を示す。

	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	平均 ± 標準偏差
α	-0.470689	-0.470892	-0.470796	-0.470792 ± 0.000101
β	0.392328	0.392129	0.392382	0.392279 ± 0.000133
γ	-0.772257	-0.772176	-0.772421	-0.772285 ± 0.000125

表 4.3: FM3 のフィッティング結果



図 4.17: 固定平面鏡 (FM3) の真球位置と番号

- 固定平面鏡 (FM5)

表 4.4 に FM5 ミラー面と真球のフィッティングから得られた係数の結果を示す。また、図 4.18 に固定平面鏡 (FM5) の真球の位置と番号を示す。

	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	平均 $\pm$ 標準偏差
α	-0.635477	-0.635341	-0.631930	-0.634249 $\pm$ 0.002010
β	-0.202807	-0.202491	-0.212142	-0.205813 $\pm$ 0.005483
γ	-0.797097	-0.797232	-0.799560	-0.797963 $\pm$ 0.001384

表 4.4: FM5 のフィッティング結果

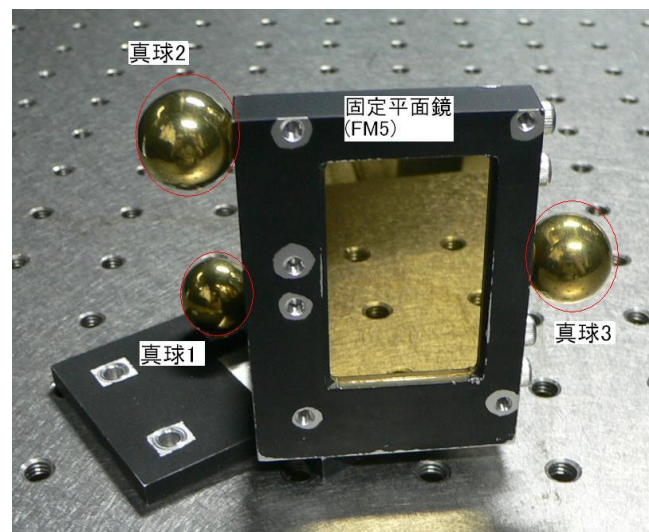


図 4.18: 固定平面鏡 (FM5) の真球位置と番号

- 固定平面鏡 (FM6)

表 4.5 に FM6 ミラー面と真球のフィッティングから得られた係数の結果を示す。また、図 4.19 に固定平面鏡 (FM6) の真球の位置と番号を示す。

	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	平均 $\pm$ 標準偏差
α	0.936930	0.937066	0.936372	0.936789 ± 0.000368
β	-0.264780	-0.264779	-0.262428	-0.263996 ± 0.001357
γ	-0.105133	-0.103565	-0.117122	-0.108607 ± 0.007416

表 4.5: FM6 のフィッティング結果

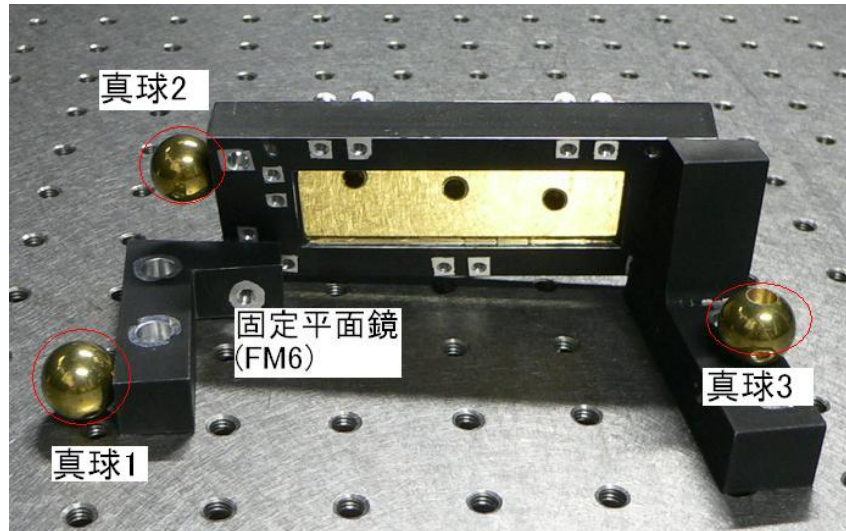


図 4.19: 固定平面鏡 (FM6) の真球位置と番号

- 固定平面鏡 (FMI)

表 4.6 に FMI ミラー面と真球のフィッティングから得られた係数の結果を示す。また、図 4.20 に固定平面鏡 (FMI) の真球の位置と番号を示す。

	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	平均 $\pm$ 標準偏差
α	-0.248922	-0.247165	-0.247391	-0.247826 ± 0.000957
β	0.508169	0.506494	0.506770	0.507144 ± 0.000898
γ	-0.900622	-0.900981	-0.901006	-0.900870 ± 0.000215

表 4.6: FMI のフィッティング結果

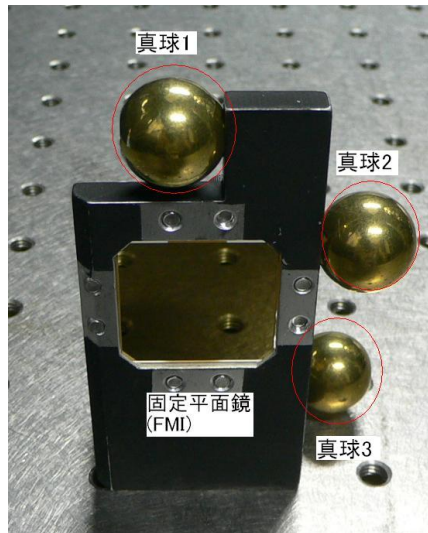


図 4.20: 固定平面鏡 (FMI) の真球位置と番号

- Grating

表 4.7 に Grating と真球のフィッティングから得られた係数の結果を示す。また、図 4.21 に Grating の真球の位置と番号を示す。

	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	平均 $\pm$ 標準偏差
α	0.0732918	0.0810894	0.0828247	0.0790686 ± 0.005078
β	-0.848602	-0.844774	-0.843066	-0.845480 ± 0.002835
γ	-0.533823	-0.539797	-0.542315	0.538645 ± 0.004362

表 4.7: Grating のフィッティング結果

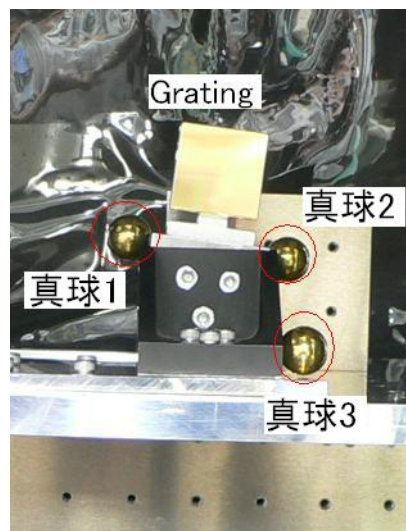


図 4.21: Grating の真球位置と番号

測定の結果、 α, β, γ の係数を求めることができた。ただし、測定結果から固定平面鏡 (FM2) の誤差が大きいため、もう一度測定を行う必要がある。固定平面鏡 (FM4) は真球の設置位置に問題があり測定が出来なかったので設置位置を修正後測定を行う必要がある。また、真球の位置ベクトルからミラーの重心を計算するための係数 ρ, σ, τ を取得できていないので測定をする必要がある。

4.6.2 曲面鏡と真球の相対位置取得測定

曲面鏡のミラーマウントに設置してある3真球の中心の測定系に対する位置ベクトル $\vec{C}_1', \vec{C}_2', \vec{C}_3'$ からマウント面の法線ベクトル $\vec{N}'$ を計算するための係数 α', β', γ' と、曲面鏡の頂点の位置を計算するための係数 μ, ν, ξ を測定から求めた。なお、測定は各ミラーごとに3回測定を行い、得られた各係数の平均を最終結果とする。

● 前光学系カメラミラー1

表 4.8 に前光学系カメラミラー1と真球のフィッティングから得られた係数の結果を示す。また、図 4.22 に前光学系カメラミラー1の真球の位置と番号を示す。

	測定1回目	測定2回目	測定3回目	平均 ± 標準偏差
α'	-0.985852	-0.988810	-0.986464	-0.987042 ± 0.001562
β'	-0.182326	-0.186247	-0.183284	-0.183952 ± 0.002045
γ'	0.506648	0.505775	0.506616	0.506347 ± 0.000495
μ	-13.9907	-14.4411	-13.0422	-13.8247 ± 0.7141
ν	16.0410	15.1768	16.8510	16.0229 ± 0.8373
ξ	24.5369	24.5213	25.43000	24.8294 ± 0.5202

表 4.8: 前光学系カメラミラー1のフィッティング結果

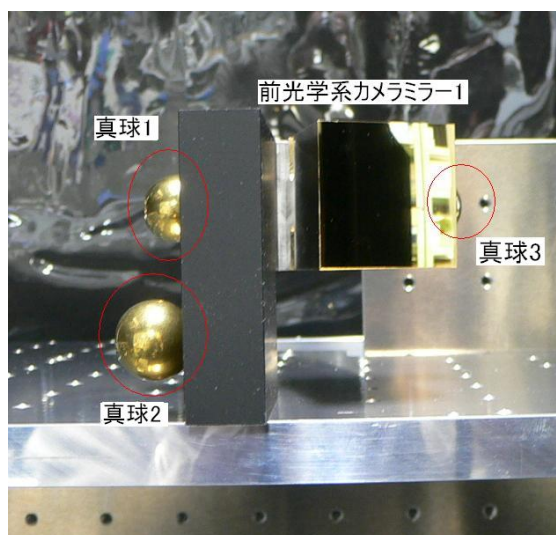


図 4.22: 前光学系カメラミラー1の真球位置と番号

● 前光学系カメラミラー2

表 4.9 に前光学系カメラミラー2と真球のフィッティングから得られた係数の結果を示す。また、図 4.23 に前光学系カメラミラー2の真球の位置と番号を示す。

	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	平均 $\pm$ 標準偏差
α'	0.369018	0.369981	0.369879	0.369626 ± 0.000529
β'	0.0374927	0.0374892	0.0378287	0.0376035 ± 0.000195
γ'	0.935318	0.934948	0.935042	0.935101 ± 0.000193
μ	-70.6532	-70.3649	-70.7439	-70.5873 ± 0.1979
ν	-173.468	-173.475	-173.545	-173.496 ± 0.043
ξ	42.9917	42.8789	42.9845	42.9517 ± 0.0632

表 4.9: 前光学系カメラミラー 2 のフィッティング結果

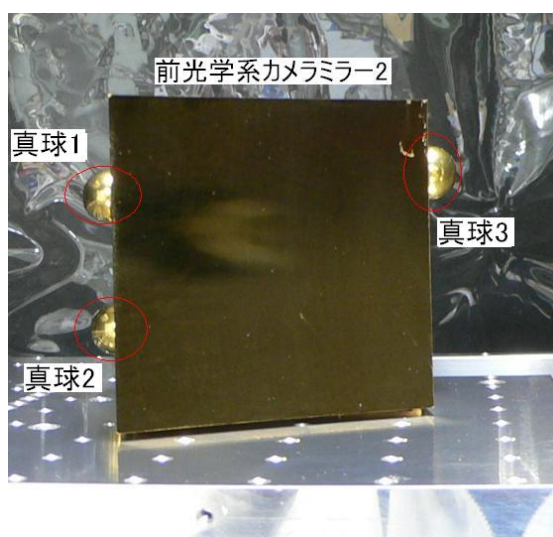


図 4.23: 前光学系カメラミラー 2 の真球位置と番号

● 分光系コリメータミラー 2

分光系コリメータミラー 2 のマウント面は図 4.24 で示すように、中央に 3ヶ所ネジ穴があいている。そのため、図 4.24 の赤で示した部分が平面として測定可能だったので、左右 2 回ずつ測定して平均した。表 4.10 に分光系コリメータミラー 2 と真球のフィッティングから得られた係数の結果を示す。測定 1 回目と 2 回目が右側の平面、測定 3 回目と 4 回目が左側の平面である。また、図 4.25 に分光系コリメータミラー 2 の真球の位置と番号を示す。

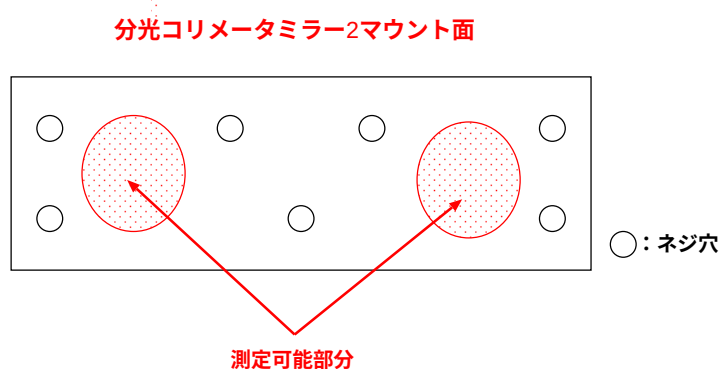


図 4.24: 分光系コリメータミラー 2 のマウント面

	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	測定 4 回目	平均 ± 標準偏差
α'	0.390932	0.379362	0.373887	0.386109	0.382572 ± 0.008821
β'	-0.351576	-0.356792	-0.331843	-0.345223	-0.346358 ± 0.013168
γ'	-0.903987	-0.906133	-0.913709	-0.907010	-0.907700 ± 0.00512
μ	77.9810	77.8061	77.7922	-	77.8597 ± 0.1053
ν	-74.2157	-74.0317	-73.9915	-	-74.0796 ± 0.1196
ξ	-32.6550	-32.7035	-32.6729	-	-32.6772 ± 0.0245

表 4.10: 分光系コリメータミラー 2 のフィッティング結果

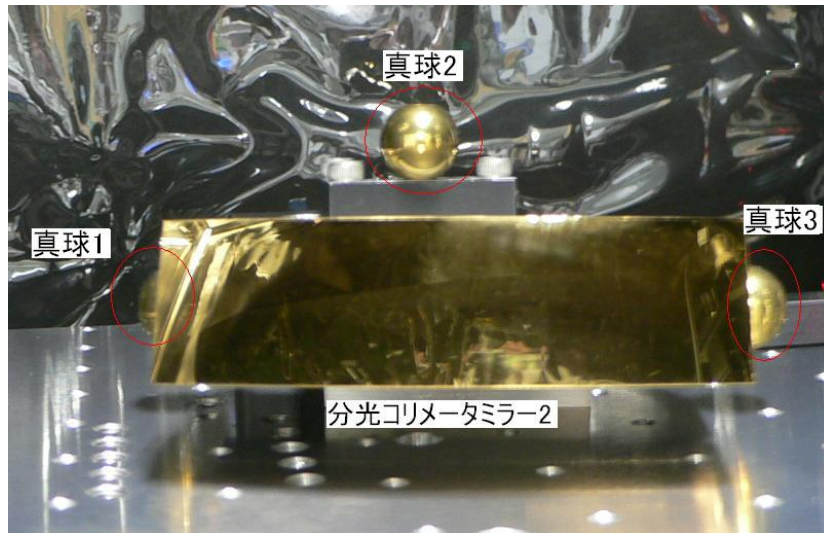


図 4.25: 分光系コリメータミラー 2 の真球位置と番号

- 分光カメラトロイダル鏡

表 4.11 に分光カメラトロイダル鏡と真球のフィッティングから得られた係数の結果を示す。また、図 4.26 に分光系コリメータミラー 2 の真球の位置と番号を示す。

	測定 1 回目	測定 2 回目	測定 3 回目	平均 ± 標準偏差
α'	0.622054	0.629024	0.624756	0.625278 ± 0.003514
β'	0.713025	0.722604	0.730910	0.722180 ± 0.008950
γ'	-0.746735	-0.739148	-0.736042	-0.740642 ± 0.005501
μ	28.4754	28.2917	28.1847	28.3173 ± 0.1470
ν	57.8687	57.7625	57.9257	57.8523 ± 0.0828
ξ	-16.6169	-16.7345	-16.6989	-16.6834 ± 0.0603

表 4.11: 分光カメラトロイダル鏡のフィッティング結果

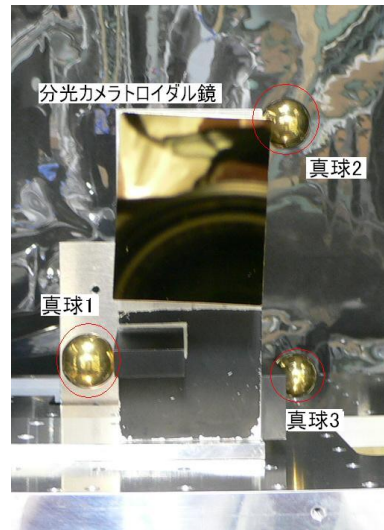


図 4.26: 分光カメラトロイダル鏡の真球位置と番号

測定の結果、 $\alpha', \beta', \gamma', \mu, \nu, \xi$ の係数を求めることができた。ただし、分光コリメータミラー 1 は測定系 (XYZ 系) に対する設置位置に問題がありフィッティングがうまくいかなかったので、設置位置を修正後測定を行う必要がある。

以上の結果から、組み上げた簡易 3 次元測定器で各ミラーと真球を関連付ける係数の取得をすることができた。しかし、FM4 と分光コリメータミラー 1 について、真球の相対位置関係を取得できていない。固定平面鏡 (FM4) は真球の設置位置に問題があったので修正する必要がある。分光コリメータミラー 1 は測定系 (XYZ 系) に対する設置位置に問題があったため、測定データをうまくフィッティングすることができなかった。そのため、設置位置を修正する必要がある。平面鏡は真球の位置ベクトルからミラーの重心を計算するための係数 ρ, σ, τ を取得できていないので測定をする必要がある。また、固定平面鏡 (FM2) の誤差が大きいため、もう一度測定を行う必要がある。そして、ここで求めた係数を用いると、どの程度の精度でミラー位置を決めることが出来るかを評価しなければいけない。すべてのミラーについて必要な測定と評価が終われば、今後は MIRSIS 全体の光学調整を行うことが出来る。

5 まとめと今後の展望

本研究では MIRSIS のスライサ系全体の光学調整と性能評価と、MIRSIS 全体の光学調整を行うための簡易 3 次元測定器の立ち上げ及び各ミラーと真球の相対位置の測定を行った。

スライサ系の光学調整はスライシングミラーの選定と、ピンホールを使用して光学設計の入射光を再現し、出射光の位置を測定した。スライシングミラーの選定では反りの影響を確認するため、2 組のスライシングミラーを測定してスケール 1 上で光線が一行に並ぶように選定した。この結果、スライシングミラー A,B,C,E でズレなく像を横一行に並べることが出来た。

ピンホールを使用した出射光位置の測定では、スケール 1 の X_{S1} 軸、2 の X_{S2} 軸方向の出射光位置のズレ量を瞳ミラーの角度のずれに換算したとき、瞳ミラー A,C,E を目標精度 (0.04°) 以内におさめることができた。瞳ミラー B と D のズレに関しては誤差値が目標を超えた。この原因としてはミラー面が一体となって調整できる瞳ミラーではなく、各々が独立して調整できる擬スリットミラーの設置誤差によるもの大きいと考えられる。 Z_{S1} 軸、 Z_{S2} 軸方向は出射光位置に大きなずれがあったが、光線は分光系でケラレなく反射することがわかった。ただし、これは光学系が収差を持たない場合で、実際の光学系は収差を持つため、検出器上で像が劣化してしまう。そのため、 Z_{S1} 軸、 Z_{S2} 軸方向は今後も調整する必要があるだろう。スライシングミラー選定後に擬スリットミラーを調整すると、スケール 1 上で一行に並んでいた出射光が Z_{S1} 軸の上下にズレた。これは、擬スリットミラー面の裏面や、ミラーを設置するマウント面が平らではないために、設置角度がずれている可能性があることが分かった。他にも擬スリットミラーの押え方が不均一なためミラー面が傾いている可能性もある。また、擬スリットミラーの設置は位置決めピンなどで決められていないため、再現性を出すことが出来ない。よって、再現性をだせる機構が必要と考えられる。これらは今後改善する必要があるだろう。

立ち上げた簡易 3 次元測定器で各ミラーと真球の相対位置の測定を行った。今回取得した相対位置関係を用いて、MIRSIS 全体の光学調整を行うことが出来る。ただし、平面鏡は真球の位置ベクトルからミラーの重心を計算するための係数 ρ, σ, τ を取得できていないので測定をする必要がある。また、真球の設置位置の問題から固定平面鏡 (FM4) の測定と、ミラーマウントの設置位置の問題から分光コリメータミラー 1 は測定を行っていない。そのため、問題を修正後、測定を行って係数を取得する。すべてのミラーについて必要な測定が終われば、MIRSIS 全体としての光学調整を行うことが出来る。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々の御指導、御協力を賜りました。

岡本美子氏には赤外線天文学の基礎から最先端の装置開発まで幅広く御指導していただきました。また、本論文を仕上げるにあたり、辛抱強く熱心に御指導して頂きました。心から感謝いたします。ありがとうございました。

ISAS/JAXA の片坐宏一氏には光学系、プログラミング、データ解析など、本論文を執筆する上で欠かせない知識について丁寧に御指導していただきました。国立天文台先端技術センターの岡田則夫氏と三ツ井健司氏にはスライサ系の測定を進める上で有益な御助言を頂きました。同研究室の百瀬宗武氏には電波天文学の基礎からプライベートな講義まで御指導していただきました。また、本研究を進める上で有益な御助言をいただきました。そして、同期の土佐政宗君をはじめとする宇宙観測研究室の先輩、後輩、宇宙理論研究室の皆様とは共に切磋琢磨し、とても有意義な時間を過ごすことが出来ました。皆様の御支援なしに本論文を書き上げることは出来ませんでした。心から、感謝いたします。ありがとうございました。

最後に、私の大学院進学に賛成し、いつも支えてくれた家族に心から感謝致します。ありがとうございました。

参考文献

- [1] <http://www.iac.es/project/CCam/Atmosphere.html>
- [2] 佐藤圭悟, 茨城大学大学院理工学研究科自然機能科学専攻修士論文.2007
- [3] Robert Content 「Advanced Image Slicer for Integral Field Spectroscopy with UKIRT and GEMINI」 SPIE 3354 , 1998
- [4] Yoshiko Kataza Okamoto, Hirokazu Kataza, Kenji Mitsui, Takashi Onaka 「Development of a test N-band image slicer: optical design」 SPIE 6269 , 2006
- [5] Yoshiko Kataza Okamoto, Hirokazu Kataza, Keigo Sato, Kei Manabe, Kenji Mitsui, Norio Okada, Mitsuhiro Fukushima, Tetsuo Nishino, Koji Tomita, Masamune Tosa, and Takashi Onaka 「Development of mid-infrared spectrometer with an image slicer (MIRSIS) for ground-based astronomy: developing optical and mechanical mounts」 SPIE 7014 , 2008
- [6] Kenji Mitsui, Norio Okada, Mitsuhiro Fukushima, Tetsuo Nishino, Yoshiko Kataza Okamoto, Hirokazu Kataza, and Takashi Onaka 「Fabrication of slicer optics of mid-infrared spectrometer with an image slicer (MIRSIS) for ground-based astronomy」 SPIE 7014 , 2008