東京大学大学院 理学系研究科天文学専攻 修士論文

近赤外線面分光装置SWIMS-IFUの開発

学籍番号 35-176119

河野志洋

指導教員 本原顕太郎 准教授

2019年1月

概 要

近年、銀河形成進化の研究において空間分解した波長情報を取得可能な面分光装置による観測が盛ん に行われている。特に近赤外線では、可視光に比べてダストによる減光を受けにくいことや、遠方銀 河の観測において静止系可視域の輝線が多く観測されることから、銀河形成進化において重要な観測 手法となっている。そこで我々は、近赤外線二色同時多天体分光・撮像装置 SWIMS(Simultaneouscolor Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) に面分光の機能を追加する光学ユニットであ る SWIMS-IFU の開発を行った。SWIMS-IFU は広い視野と広い波長帯を有しており、既存の近赤 外線面分光装置の中で観測効率が高いことが特徴となっている。

SWIMS-IFU はイメージスライサー方式の面分光装置となっており、スライスミラーアレイ・瞳ミ ラーアレイ・スリットミラーアレイの3つのミラーアレイを有している。これらのミラーアレイがも つ個々のミラーを個別に製作し組み上げる場合、相対的な位置ずれを抑えるのが非常に困難であり、 結像性能の劣化を招く恐れがあるため、SWIMS-IFU ではこれらのミラーアレイの一体加工を行う。 一般に鏡面は研磨加工によって作製するが、ミラーアレイは複雑な形状を有しているため研磨による 加工は困難である。そのため、超精密加工機による切削加工に目を付け、製作可能性の検証を行った。

平面鏡で構成されるスライスミラーアレイについては刃先形状が平らな回転工具であるフラット エンドミルを用いて加工可能であることが既に実証されている。しかし、瞳ミラーアレイとスリット ミラーアレイについては曲面鏡を有しているためフラットエンドミルを用いた加工では製作が困難 である。また、ミラーは階段状に並んでいるため、工具とミラーの干渉を避けるために小回りの利く 工具を用いる必要がある。そこで、刃先形状が円形となっており様々な角度で加工が可能なボールエ ンドミルに着目した。本研究で行った試験加工では以下の2点を主な目的とした。

(1) ボールエンドミルを用いたミラーアレイー体加工の実証:様々な加工条件で鏡面加工を行った ところ適切な加工条件下では要求精度を満たす結果が得られ、ボールエンドミルによるミラーアレ イの加工が可能であることが実証された。また、ミラー間の相対位置については、今回の加工試験で は加工プログラム原点と加工機の回転軸とのずれにより、最大で100µm ほどのずれが見られたが、 加工前の調整を工夫することにより改善できると見込まれる。

(2) 低温環境下での最適な母材の検討:比較として Ni-P メッキ、RSA6061、A6061 の3種類に対して鏡面加工を行った。Ni-P メッキは鏡面母材として多く使用されているが、ベースとなる金属との熱膨張係数の差が生じてしまうため低温環境において鏡面にひずみが生じる恐れがある。そのため、単一の金属を鏡面加工することが望ましい。表面精度はすべての母材で要求精度を満たすことが確認できたが、A6061 では析出物などによる加工面の荒れが大きく見られた。RSA6061 では Ni-P メッキに比べると若干の荒れが生じているが、大きな差は見られなかったため、RSA6061 を用いて鏡面を加工可能であるといえる。

以上の加工実験からボールエンドミルによる RSA6061 を母材とするミラーアレイの加工可能性が 実証された。RSA6061 は他の工具でも同様に使用可能であると考えられるため、SWIMS-IFU は光 学素子に RSA6061 を用い、熱膨張係数が等しい A6061 を支持構造に用いることで低温下でも歪み が抑えられることが期待される。

目 次

第1章	序章	4
1.1	空間分解した近赤外線分光観測で期待されるサイエンス............	4
1.2	近赤外線輝線を用いた近傍銀河の観測的研究................	5
	1.2.1 近赤外線水素分子輝線の放射過程	5
	1.2.2 水素分子輝線を用いた物理状態の推定	6
1.3	面分光装置の原理....................................	9
	1.3.1 マイクロレンズアレイ方式	9
	1.3.2 ファイバーアレイ方式	10
	1.3.3 イメージスライサー方式	10
		10
第2章	SWIMS-IFU	12
2.1	SWIMS	12
2.2	SWIMS-IFU 概観	12
2.3	光学系	15
	2.3.1 光学系詳細	17
	2.3.2 光学性能	22
2.4	機械系	24
	2.4.1 公差解析	25
	2.4.2 機械系詳細	27
第3章	鏡面加工試験	30
3.1	要求精度	30
3.2	加工手法	31
3.3	加工面測定	35
3.4	表面精度解析	35
3.5	うねりが及ばす結像性能への影響.................................	38
3.6	母材の比較	41
第4章	スリットミラーアレイ加工試験	43
4.1	加工手法	43
	4.1.1 チャンネルごとの加工条件	44
4.2	加工面測定	48
4.3	形状誤差	50
	4.3.1 スリットミラーアレイにおける形状誤差	53
4.4	4.3.1 スリットミラーアレイにおける形状誤差	53 54
$4.4 \\ 4.5$	4.3.1 スリットミラーアレイにおける形状誤差 表面粗さ	53 54 57

	4.7	加工手法の検討	60
第	5章	総括	63
謝	辞		65
付	録 A A.1 A.2	超精密加工機・測定機器 超精密加工機	70 70 71
付	録 B B.1 B.2	測定データ Zygo Verifire	74 74 79
付	録 C	解析データ	81

第1章 序章

近年、可視光・近赤外線領域において面分光装置 (Integral Field Unit, IFU) による観測が活発に 行われている。面分光観測では観測天体の空間情報を失わず、空間二次元に渡る波長情報を一度の露 出で取得することができるため、銀河など広がった天体を空間分解する詳細な研究を行う上で非常に 有利である。ここでは本研究で開発を行っている近赤外線面分光装置の観測的意義と面分光装置の原 理について概観する。

1.1 空間分解した近赤外線分光観測で期待されるサイエンス

面分光観測では観測天体を2次元的に空間分解したスペクトル情報を取り出せることが大きな特 徴となっている。近赤外線による観測を行うことで可視光では透過できないような光学的に厚い領域 からの放射を観測することができ、近傍のダストに覆われた領域や、遠方宇宙の静止可視域の観測に 適している。また、遠方銀河に対しては静止系可視域の重要な輝線を観測することができる。以下 に、近赤外線面分光による観測例を挙げる。

- z~2にある銀河の Hα 輝線を観測することで力学構造を調べ、銀河衝突と星形成活動の関係 を探る。
- 遠方銀河におけるクランプ状の星形成領域の力学構造や回転曲線を観測することで銀河の形成・ 進化を探る。
- 重力レンズ効果を利用した高い空間分解能での遠方銀河の分光観測。z~3にある遠方銀河での観測事例あり。
- 近傍銀河における LIRG/ULIRG などのダストが多い銀河の数百 pc スケールで空間分解した 星形成活動を調べ、空間分解した Star formation main sequence(SFMS)のような関係を探る。
- 補償光学を用いた高空間分解能によって近傍 AGN の力学構造を調べ、AGN まわりのガスの 運動やアウトフローから AGN 活動の原因や母銀河へのフィードバックを探る。
- 近傍銀河の大規模サーベイによる面分光データの統計的な研究。
- 銀河系内の超新星残骸や星雲に対する力学構造の調査。

以上のように、遠方から近傍まで観測対象の赤方偏移に応じた空間分解能や波長によって様々なサ イエンスが期待される。さらにここでは近赤外線領域の輝線を用いることができる近傍銀河におい て期待されるサイエンスについて述べる。

輝線	波長
[P II]	$1.18 \mu { m m}$
[Fe II]	$1.25 \mu { m m}$
${ m Pa}eta$	$1.28 \mu { m m}$
[Fe II]	$1.64 \mu { m m}$
$Pa\alpha$	$1.88 \mu { m m}$
$H_21-0S(2)$	$2.03 \mu { m m}$
He I	$2.06 \mu { m m}$
$H_21-0S(1)$	$2.12 \mu \mathrm{m}$
${ m Br}\gamma$	$2.17 \mu m$
$H_21-0S(1)$	$2.22 \mu \mathrm{m}$

図 1.1: 近赤外線における主な輝線 (または吸収線)

1.2 近赤外線輝線を用いた近傍銀河の観測的研究

輝線はある原子や分子が放射する特定の波長の光であり、放射源である物質の種類によって放射メ カニズムが異なるため観測された天体やその内部領域がどのような状態にあるかを推定することが できる。輝線を観測するためには、撮像観測では輝線を観測するために専用のフィルターを用意する 必要があり、なおかつ赤方偏移の影響により観測対象が制限されてしまうため、予め想定していた輝 線や天体においてしか観測することができない。一方で分光観測では波長分解能による制限は受け るが観測波長内に収まるすべての輝線を取得することが可能である。

表 1.1 に近赤外線における代表的な輝線 (または吸収線) を示す。様々な輝線が存在するが、特に Paα や Brγ などの水素原子の再結合線は可視光における Hα 輝線などと同様に星形成領域のトレー サーとして用いることができ、近赤外線は可視光に比べて透過しやすいため減光の影響を受けにくい というメリットがある。また、He I は放射されるために 24.6 eV 以上の電離光子が必要であり、OB 型星や Supernova(SN)、AGN のトレーサーや Brγ との比を取ることで星形成領域の年齢推定に用い ることができる。以下では特に水素分子輝線の観測によって期待されるサイエンスに注目する。

1.2.1 近赤外線水素分子輝線の放射過程

近赤外線領域に現れる水素分子による輝線は回転振動遷移から発生する禁制線である。回転と振動を考慮した時の水素分子が持つエネルギーは量子数 v と回転量子数 J を用いて、

$$E(v,J) = \left(v + \frac{1}{2}\right)h\nu + BJ(J+1)$$

と表される。Bは回転によるエネルギー準位の係数である。近赤外線ではS枝 ($\Delta v = \pm 1, \Delta J = +2$)の輝線が観測される。このエネルギー差は

$$\Delta E = E(v+1, J+2) - E(v, J)$$
$$= E_v + B(4J+6)$$

のように表される。この遷移によって生じた輝線において例えば、 $v: 1 \to 0, J: 2 \to 0$ の遷移で生じた輝線は 1-0S(0) と呼ぶ。このような水素分子輝線は宇宙空間においては (1) 衝撃波や X 線加熱などによる衝突励起、(2)UV 放射による蛍光励起の大きく二つのメカニズムによって励起される。し

たがって、水素分子輝線を観測し、どちらの励起メカニズムによって生じているのかを診断すること により、観測された領域がどのような状態にあるのかを推定することが可能となる。

1.2.2 水素分子輝線を用いた物理状態の推定

近赤外線における水素分子輝線は衝撃波やX線、UV放射に対して感度を持っているため、異なる準位の水素分子輝線の情報や、他の輝線との比較によって観測された領域の物理状態を推定することができる。以下に水素分子輝線を用いた物理状態の推定手法についてまとめる。

1. 各エネルギー準位の柱密度を用いた推定

ある2準位間の遷移による水素分子輝線強度を測定することで遷移前のエネルギー準位にある 水素分子の柱密度 N_{vi}を以下の式を用いて推定することができる。

$$N_{vj} = \frac{4\pi j}{A\Omega}$$

f は水素分子輝線のフラックス、A は放射率、 Ω は aperture size である。これを複数の水素 分子輝線に対して計算することで、様々なエネルギー準位に存在する水素分子の柱密度を求め ることができる。柱密度を統計的重み gvi で割った値を遷移前のエネルギー準位のもつエネル ギーに対してプロットすると図1.2が得られる。この分布は仮に水素分子が熱的な要因(衝突励 起)のみで励起され輝線を放出しているとすれば、熱的な分布に従うことが知られており、図 中においては直線的な分布となる。したがって、直線でフィットすることが出来れば励起メカ ニズムは衝突励起であると判断できるが、図 1.2 に示している分布は高エネルギー側を直線で フィットすることが出来ていない。これは高エネルギー側までフィットを行うこと自体は可能 であるが、そこから推定される温度が非常に高くなり、水素が分子として存在することができ なくなるためである。このような高エネルギー側で熱的な推定以上に水素分子が存在している 場合は UV 放射による水素分子の励起が考えられる。したがって、これらの分布を観測領域の 密度、UV 強度、温度をパラメータとしてフィットすることにより、その領域の物理状態を推 定することが可能となる。しかし、高エネルギー準位の水素分子輝線は一般に強度が弱く観測 することが困難である。また、2-1S(3)の輝線はX線による加熱が支配的な領域では他の輝線 に比べて抑制されることが知られており、これを利用することで衝撃波による励起と X 線加熱 による励起を区別することができる (Krabbe et al., 2000)。

2. $\mathbf{Br}\gamma$ との比を用いた推定

上述した手法では複数の水素分子輝線を用いて観測領域の物理状態と共に衝突励起か UV 放射による励起かの診断が可能であるが、UV 励起の推定には高エネルギー準位の水素分子輝線 の観測が必要となる。比較的強度の強い低エネルギー準位の水素分子輝線 (1-OS(1) など) は衝突励起に対して特に感度をもっているため、衝撃波や X 線加熱の良いトレーサーとなる。一 方で UV 放射は星形成領域から強く放射されるため、水素の再結合線をトレーサーとして用 いることができる。したがって、水素分子輝線と再結合線の比をとり、その大小によって励起 状態の診断をすることができる。輝線のペアとしては比較的強度の強い 1-OS(1)2.122 μ m と波 長の近い Br γ 2.166 μ m を使用する。観測領域が星形成領域でなく、衝撃波などが卓越している 場合 Br γ はあまり観測されず、1-OS(1)/Br γ の値は大きくなる。一方で星形成領域においては Br γ が強くなり、水素分子輝線は図 1.3 に示すような HII 領域と ISM の境界面に形成される Partially Ionized Zone(PIZ) から放射されるため、近似的には HII 領域の表面積と体積の比が 1-OS(1)/Br γ の値となる。一般に 1-OS(1)/Br γ > 1 の場合は衝突励起、1-OS(1)/Br γ < 1 の場 合は星形成領域での UV 放射による励起であると診断される。

第1章 序章



図 1.2: 各回転振動準位における水素分子の柱密度 (Davies et al., 2003, Figure 3)。黒いマークが実 測値、灰色のマークがモデルからの推定値である。また、2本の直線はそれぞれ異なる温度における 熱的な効果のみを考慮したモデルである。



図 1.3: 水素分子輝線と再結合線の比を説明する PDR モデル (Puxley et al., 1990, Figure 2)



図 1.4: 空間分解した銀河における星形成領域、SN-like 領域、AGN 領域の H₂/Brγ vs. [Fe II]/Brγ 分布 (Colina et al., 2015, Figure 5)

3. [Fe II]1.64µm/Brγ を用いた推定

[Fe II]1.64µm は近赤外線で観測されると同時に、低エネルギー準位の水素分子輝線と同様に衝撃波やX線加熱による励起を受ける。特に衝撃波を受けると鉄を含んだダストが破壊されアバンダンスが増加するため [Fe II] 輝線は強くなる。図 1.4 に H₂/Brγ vs. [Fe II]/Brγ 空間における空間分解した星形成領域、SN-like 領域、AGN 領域の分布を示す。このように星形成領域においては再結合線が強くなるため、左下の領域に集中する。一方で SN による衝撃波や AGN から放射される X 線による加熱を受けた領域では水素分子輝線と鉄輝線が強まるため右上の領域に分布する。両者には若干の違いが見られ、空間分解したときに分布の傾きが異なっている (Colina et al., 2015)。また、水素分子輝線と鉄輝線は励起メカニズムは良く似ているが空間分布が異なる例も観測されており、NGC5728 の中心核領域では水素分子輝線がアウトフローが ISM に衝突する領域とアウトフローに直交する円盤領域で観測されているのに対し、鉄輝線はアウトフローと ISM の衝突領域のみで強く観測されている (Durré and Mould, 2018)。鉄輝線 に関しては衝撃波によるダスト破壊の影響を受けることが示唆される。

観測領域の励起状態を知る手段としては可視光領域の星雲輝線を用いた BPT diagram が用いられる ことが多いがこの手法では星形成領域による影響と衝撃波による影響を切り分けることが難しい。し かし、水素分子輝線を用いた診断ではこの星形成領域と衝撃波を切り分けることは容易である。これ を利用して、銀河中心からのアウトフロー内部における星形成を初めて観測した事例もある (Maiolino et al., 2017)。このように水素分子輝線を用いた銀河の観測は主に AGN や中心核付近のアウトフロー をターゲットとして行われている。これは水素分子輝線の強度があまり強くなく、放射源としても高 エネルギー現象が生じやすい中心核付近に多いためである。銀河全体に目を向けた観測例としては 銀河同士の銀河衝突による衝撃波を観測するものがあり、アンテナ銀河においてガスが流入してき



information within each slice/sample

図 1.5: 面分光装置の代表的な 3 つの方式 (Allington-Smith and Content, 1998, Figure 1)

ている領域で衝突励起を示す 1-0S(1)/Brγ の比が観測されている (Herrera et al., 2011)。また、銀 河同士の銀河衝突の進行度と銀河内の衝撃波領域の割合に相関があることが BPT diagram からの診 断で知られており (Rich et al., 2015)、銀河衝突が中間赤外線領域の水素分子輝線を強めるという報 告もある (Petric et al., 2018)。これらのことから、近赤外線面分光装置を用いて合体中の銀河全体 を空間分解し、水素分子輝線による診断を利用して銀河のどの領域に銀河衝突の影響が現れており、 星形成や銀河の力学状態にどのような影響を与えていることを調べられることが期待される。銀河 全体を観測しなければならないため、広い視野をもつ面分光装置が必要となる。

1.3 面分光装置の原理

面分光の基本的な原理は、結像面において光学的に像の分割を行い、各領域に対して分散をかける ことによって空間的なスペクトルを得ることである。現在稼働している面分光装置の方式は像分割の 手法によって図 1.5 に示すようにマイクロレンズアレイ方式、ファイバーアレイ方式、イメージスライ サー方式の主に 3 種類に分類される。それぞれの方式について原理と特徴を述べる (Allington-Smith and Content, 1998, Allington-Smith, 2006a)。

1.3.1 マイクロレンズアレイ方式

結像面にマイクロレンズを格子状に並べたアレイを配置し天体像を分割する。アレイの形状に従っ て分割された瞳像が形成され、それらに分散をかけることで検出器面でスペクトルを取得すること ができる。この方式ではスペクトルも格子状に並ぶため、適切な傾きやバンドパスフィルターを加 えなければ隣合うスペクトルとの重なりが生じる。また、検出器面上におけるスペクトルの最大長 さについては幾何学的な制約が存在し、瞳像のサイズと隣り合う瞳像間の距離の比によって決まる。 分割数を変化させずにスペクトルの長くするためには速いF値をもつマイクロレンズと分光装置が 必要となってくるが、これらは一般に製作が困難になるため、マイクロレンズアレイ方式の面分光装 置は広波長帯・低分散か狭波長帯・高分散のスペクトルで良い観測に適している。他の方式と比較す ると構造がシンプルで製作しやすい反面、スペクトルを傾けて重なりを避けなければならないとい う性質上、スペクトルを検出しないピクセルが生じてしまうため検出器面の有効面積の観点から効 率の劣る方式となっている。

1.3.2 ファイバーアレイ方式

マイクロレンズアレイ方式とは異なり、結像面にファイバーのアレイを配置し天体像を分割する方 式である。ファイバーで導入された光はファイバーの柔軟性を活かして一列に並べられ、分光装置へ 送られる。この"疑似スリット"の再構成により、ロングスリット分光と同様に分散をかけることが 可能となり、領域間でのスペクトルの重なり合いを気にすることなく、検出器全面に渡るスペクトル を取得することができるため、検出器面を効率的に利用することが可能となる。また、ファイバーア レイは個々のファイバーの配置を観測対象に応じて組み替えることもでき、多天体面分光を実現する ことが可能である。

しかし、ファイバーの構造上コア部分に入射した光のみを通すため、空間を離散的にサンプルする ことになる。この時の filling factor はコア/クラッド比に依存するが、隣り合うファイバー間のクロ ストークを避けるためにはクアッドに十分な厚みを持たせる必要があり、現実的な filling factor は ~ 70% となる。また、ファイバーを通過した光については focal ratio degradation(FRD) と呼ばれ る F 値が速くなる現象が知られており、FRD が生じることによって情報量が失われること、下流の 分光装置が複雑になることが問題になる。FRD を抑えるためには F/5 より速い光線を導入する必要 があるが、望遠鏡焦点面の光線は一般には F/8 より遅いため前置光学系によって F 値を調整したの ちファイバーに導入しなければならない。これらの問題はマイクロレンズアレイと組み合わせること によって解消できることが知られている。望遠鏡焦点面に配置したマイクロレンズアレイによって集 光しファイバーアレイに導入することで filling factor の問題を解決し、マイクロレンズによって F 値も調整することができるというものである。

このようにファイバーアレイ方式は従来のスリット分光との親和性も高く、検出器面を効率的に利 用することができるが、空間サンプリングや光量ロスにおいて問題が生じてしまう方式となってい る。しかし、この問題についてはマイクロレンズアレイ方式との組み合わせにより解消可能なため非 常に有用な方式といえる。ただし、マイクロレンズアレイやファイバーアレイは冷却環境下での耐久 性に乏しいため赤外線観測目的での利用は困難である。

1.3.3 イメージスライサー方式

イメージスライサー方式は光学系を反射系 (ミラー)のみで構成可能であるため、冷却環境下での 利用が求められる赤外線観測において有利な方式である。最初に提案された方式では望遠鏡結像面 に角度の異なる短冊状のミラーが並べられたイメージスライサーと呼ばれる素子を配置することで 天体像を短冊状に分割し、それらを下流の分光器に一列に (光線を平行に)導入させることで2次元 空間情報を1次元的に変換し、分光することでそれぞれの領域において空間情報を連続的に保つこ とが可能となるというものである (Krabbe, 1996)。しかし、この方式ではミラーがすべて平面鏡で 構成されているため、下流の光学系が大きくなってしまうことや既存の分光装置に組み込むことが困 難であるという問題があった。そこで瞳ミラーに曲率を持たせることでイメージスライサー上での 像を分光器に導入する前に再結像させる方式が提案された (Content, 1997)。この方式では瞳ミラー によってスリットマスク位置に結像させることで疑似スリットを構成することができ、スリット分光 と同様のシステムを用いて面分光を行うことが可能となる。疑似スリット像が波長方向に重ならず、 空間方向も連続的な情報が得られるため、イメージスライサー方式は波長方向、空間方向ともに情報 量が他の方式に比べ最も大きくなる方式である。しかし、複雑な形状の光学素子が必要となるため高 度なミラー製作技術が求められ、技術的な困難を有している。

現在稼働中の近赤外線面分光装置はマイクロレンズアレイ方式として Keck/OSIRIS(Larkin et al., 2003)、イメージスライサー方式に VLT/SINFONI(Eisenhauer et al., 2003)、VLT/KMOS(Sharples et al., 2004)、Gemini/GNIRS(Allington-Smith et al., 2006b)、Gemini/NIFS(McGregor et al., 2003)、KPNO・GTC/FISICA(Eikenberry et al., 2004)、Bok/WIFIS(Sivanandam et al., 2012)があり、イメージスライサー方式が多数となっている。このうち OSIRIS、SINFONI、GNIRS、NIFS は補償光学による補正をすることが可能となっており、高い空間分解能を得ることができる。

第2章 SWIMS-IFU

2.1 SWIMS

二色同時多天体分光撮像装置 SWIMS(Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) (Konishi et al., 2012, Konishi et al., 2018, Motohara et al., 2014, Motohara et al., 2016, Terao et al., 2016) は東京大学がチリ共和国のチャナントール山山頂に建設中の東京アタカマ天文 台 (TAO)6.5m 赤外望遠鏡 (Yoshii et al., 2010) の第一期観測装置である。TAO6.5m 望遠鏡は標高 5640m に建設されるため最も標高の高い天文台となる。

SWIMS は 0.9-1.4µm と 1.4-2.5µm の二色を同時に撮像・分光することができる。SWIMS の仕様 値を表 2.1 に示す。青側 (短波長側) と赤側 (長波長側) の光学系にはそれぞれ 3 つのフィルターホイー ルがあり、合わせて 4 枚の広帯域、8 枚の中帯域、10 枚の狭帯域のフィルターをそれぞれ搭載してい る。これらの多様なフィルターを用いて一度の露出で 2 色の撮像を行うことができるため時間効率が 高いのが特徴である。また、フィルターホイールには分光用のグリズムを搭載しており、0.9-2.5µm の広い波長帯のスペクトルを一度に取得することが可能である。望遠鏡焦点面には多天体分光ユニッ ト (MOS ユニット) が搭載されており、カルーセル内に 22 枚のスリットマスクを格納することがで き、ロボットアームによる交換が可能である (Takahashi et al., 2014)。それぞれのマスクには約 30 の天体を導入しスペクトルを取得することができる。

SWIMS は後述する面分光装置を除くすべての機構が完成しており、観測が可能な状態にある。実際に 2018 年の 5 月にはすばる望遠鏡のカセグレン焦点に搭載し、試験観測を行った。ファーストライト時に取得した星形成領域 S106 を図 2.1 に示す。J、H、Ks バンドで取得したデータを三色合成したものである。TAO6.5m 望遠鏡の完成後はチリ共和国に輸送し、ナスミス焦点への搭載が予定されている。

2.2 SWIMS-IFU 概観

本研究で開発を行っている近赤外線面分光装置 SWIMS-IFU(Kitagawa et al., 2014, Kitagawa et al., 2016, Ozaki et al., 2012) は SWIMS に面分光の機能を付加する光学ユニットである。SWIMS で は多天体分光装置として望遠鏡焦点面にスリットマスクをセットするユニット (MOSU) が配置され ている。MOSU では観測天体に適したスリットマスクをロボットアームによって交換するシステム が組まれており、22 枚のマスクをカルーセルに格納することができる。このカルーセルに面分光ユニットを格納することにより、観測からの要求に応じて多天体分光と面分光の柔軟な切り替えを可能 にすることを計画している。これを実現するには、コンパクトかつ軽量な光学系と SWIMS で分光 可能なシステムの設計が必要となるため、SWIMS-IFU はイメージスライサー方式を採用している。

SWIMS-IFU の仕様値は表 2.2 に示す通りである。SWIMS は最終的に TAO6.5m 望遠鏡に搭載さ れるが、試験観測等を兼ねてすばる望遠鏡での観測を行う。そのため、それぞれの望遠鏡における仕 様値を示した。また、すばる望遠鏡搭載時は SWIMS 検出器が半分の 2 枚で観測を行うため、検出 器面上に落ちるチャンネル数が減り、視野が半分ほどとなる。SWIMS-IFU は SWIMS の焦点面に置

	TAO6.5m 望遠鏡	すばる望遠鏡
観測波長	$0.9-1.4\mu m$ (Blue arm)	, 1.4-2.5 μ m (Red arm)
検出器	HAWAII-2RG(短波長・長新	皮長側にそれぞれ4枚ずつ)
撮像		
視野	8.6' imes 4.3'	6.6' imes 3.3'
ピクセルスケール	0.126'' /pixel	0.096'' /pixel
フィルター		
Broad	$Y(1.01\mu m), J(1.25\mu m), J(1.$	$H(1.64\mu m), Ks(2.14\mu m)$
Medium	$J1(1.17\mu m), J2(1.29\mu m), J2($	$H1(1.50\mu m), H2(1.62\mu m),$
	H3(1.74 μ m),K1(2.03 μ m)	$, K2(2.17 \mu m), K3(2.31 \mu m)$
Narrow	NB1244, NB1261, NB1	292, NB1326, NB1630,
	NB1653, NB1875, NB1	1945, NB2137, NB2167
限界等級 (AB)	Y=25.0, J=24.2, H=23.5, Ks=23.8	Y=25.3, J=24.5, H=23.7, Ks=24.0
分光		
視野	$2.7' \times 4.3'$	2.8' imes 3.3'
グリズム	26.7 deg, 210 本/mm(Blu	ue), 22 deg, 110.5 本/mm
波長分解能	$\lambda/\Delta\lambda\sim700-1000(1$	Blue), $500 - 900$ (Red)
限界等級 (AB)	Y=23.3, J=22.4, H=22.2, Ks=21.9	Y=23.6, J=22.7, H=22.5, Ks=22.2

表 2.1: SWIMS の仕様値

	TAO6.5m 望遠鏡	すばる望遠鏡
観測波長	0.9-1.4 μ m (Blue a	rm), 1.4-2.5 μ m (Red arm)
波長分解能	$\lambda/\Delta\lambda \sim 1000 - 15$	500(Blue), 800 - 1400(Red)
視野	$17.2'' \times 12.8''$	$14'' \times 10.4''(14'' \times 5.2'')$
スライス数 (チャンネル数)	26	26(13)
スライス幅	0.5''	0.4''
F 値		12.2
スループット	>70	$\%(\lambda = 1\mu m)$
重さ		< 900g
サイズ	170 ×	$\times 220 \times 60 \mathrm{mm}$

表 2.2: SWIMS-IFU のパラメータ



図 2.1: SWIMS のファーストライト画像 (S106 の J, H, Ks 三色合成)(Konishi et al., 2018, Figure 7)



図 2.2: 各面分光装置の視野の比較

かれ、マスクと同様に扱うため、SWIMS-IFU から SWIMS 本体へ導入される光線は F 値が望遠鏡 と同等でなければならない。したがって、SWIMS-IFU から出射される光線の F 値は 12.2 となるよ う設計されている。重さとサイズに関する制約は表にある通りであり、交換機構のロボットアームが 取り扱えるか否かが制約の条件である。この制約を満たすように母材や機械系のデザインを決定し なければならない。

図 2.2 に現在稼働中または開発が行われている近赤外線面分光装置と SWIMS-IFU の空間分解能 と視野のパラメータ空間における分布を示す。分解能に関して複数のモードが存在する面分光装置 に関してはそのモードの内最も視野が広いものと狭いものを図示している。SWIMS-IFU について は TAO6.5m 望遠鏡搭載時とすばる望遠鏡搭載時の 2 パターンを示している。大口径望遠鏡に搭載さ れている面分光装置は全般的に狭い視野を高い空間分解能で観測する設計となっていることがわか る。対して SWIMS-IFU は比較的広い視野と中間的な空間分解能を持っており、空間的に広がった 天体の観測やサーベイ観測に適しているといえる。また、観測時の積分時間に直接的に関わる集光力 ($\propto D^2$)を視野にかけた空間的な観測効率をそれぞれの近赤外線面分光装置で比較すると図 2.3 に示 す結果が得られる。この指標においては SWIMS-IFU が最も高い値を示しており、この観点からも 観測効率が高いことがわかる。また、SWIMS の特徴として 0.9-2.5 μ m の波長域を一度の露出で取得 することが必要であるため、その点においても有利であるといえる。

2.3 光学系

SWIMS-IFU の光学系の全体像は図 2.4 に示すもので、サイズは 150mm×185mm×50mm、前置 光学系・スライスミラーアレイ・瞳ミラーアレイ・スリットミラーアレイの4つのコンポーネントで 構成される。



図 2.3: 各面分光装置の空間的な観測効率 (集光力 $A \times$ 視野 Ω)の比較



図 2.4: SWIMS-IFU の光学系。望遠鏡からの光は PO0 で SWIMS-IFU に導入され、前置光学系 (PO1,PO2)、スライスミラーアレイ (S1)、瞳ミラーアレイ (S2)、スリットミラーアレイ (S3) を介し て SWIMS 本体へと導入される。

2.3.1 光学系詳細

前置光学系は望遠鏡による天体像をスライスミラーアレイに合わせて拡大を行う光学系であり、 SWIMS-IFU に光を導入するピックオフミラー (PO0)、2枚のレンズレット (PO1)、スライスミラー に結像させる球面鏡 (PO2) から成る。拡大率は 2.6 倍となっている。

スライスミラーアレイは前置光学系による結像面に配置されており、扇状に開いた 26 面の平面鏡 によって像を短冊状に分割する。この結像面における視野は 17.2"×12.8" となるように前置光学系 で調整されており、1 スライスの見込む視野は 17.2"×0.5" となるため、スライス幅はシーイングサ イズと同程度となっている。なお、すばる望遠鏡搭載時には望遠鏡の焦点距離が長くなること、検出 器アレイが 2 枚で構成されることから視野は 14"×5.2" となる。

分割された像はそれぞれのスライスに対応する瞳ミラーアレイの各面で瞳像を形成する。瞳ミラー アレイは12面の球面鏡と16面の軸外し楕円面鏡で構成されている。光学系全体のサイズ要求を満 たすために外側の面に対応する光線は大きく反射されており、この影響により中心の像に比べて結像 性能が悪化する傾向にある。これを回避するために、スライスミラーと後述するスリットミラーを焦 点とする軸外し楕円面鏡を外側の面に採用しており、均一な結像性能の確保を実現している。

スライスミラーアレイで分割された天体像は望遠鏡焦点面に配置されたスリットミラーアレイの 各面において再結像することで、疑似的なアーチ状のロングスリットを構成する。スリットミラーア レイのすべて面はそれぞれ曲率半径や反射角の異なる球面鏡となっており、それぞれのスライス像や スライス像内の位置によって主光線の方向を調整することで SWIMS 内のストップで光線が遮蔽さ れることを防いでいる。

それぞれのコンポーネントの光学パラメータは表 2.3,2.4,2.5,2.6 にまとめる通りである。X,Y の座 標原点は望遠鏡光軸、Z の座標原点はスライスミラーアレイの中心である。回転角は基準の法線ベ クトルが Y 軸に平行であるとした時の面の法線方向を示すものである。チャンネル番号の定義は図 2.5 に示すようにスライスミラーの上端を Ch+13 とし、上側 13 チャンネルを Ch+1 ~ +13、下側 13 チャンネルを Ch-1 ~ -13 とする。以降の瞳・スライスミラーアレイは対応するスライスミラー アレイのチャンネルと同じ番号を振る。



図 2.5: チャンネル番号の定義

	Tilt Z[deg]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Tilt Y[deg]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Tilt X[deg]	-41.500	7.000	7.000	7.000	7.000	-176.500
	Z[mm]	-16.838	-15.770	-15.524	-15.463	-15.073	0.000
票情報	Y[mm]	-65.000	-56.305	-54.300	-53.803	-50.627	72.135
情報と座標	X[mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
置光学系の面	[開□ [mm]	15 imes 15	$\phi 12.0$	$\phi 12.0$	$\phi 12.0$	$\phi 12.0$	52 imes 36
表 2.3: 前	曲率半径 [mm]	I	36.572	-18.753	-11.784	-11.133	191.762
	材質	RSA6061	${ m BaF2}$	${ m BaF2}$	S-NPH2	S-NPH2	RSA6061
	面タイプ	平面鏡	レンズ	レンズ	レンズ	レンズ	球面鏡
	コンポーネント	PO0	PO1-1(前)	PO1-1(後)	PO1-2(前)	PO1-2(後)	PO2

	Tilt Z[deg]	-22.135	-20.012	-18.008	-16.097	-14.260	-12.481	-10.748	-9.054	-7.389	-5.748	-4.125	-2.514	-0.910	0.910	2.512	4.121	5.741	7.378	9.036	10.724	12.447	14.216	16.041	17.937	19.922	22.024
ず う。	Tilt Y[deg]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
軸周りの順に彳	Tilt X[deg]	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500
周り、X	Z[mm]	-6.500	-5.980	-5.460	-4.940	-4.420	-3.900	-3.380	-2.860	-2.340	-1.820	-1.300	-0.780	-0.260	0.000	0.780	1.300	1.820	2.340	2.860	3.380	3.900	4.420	4.940	5.460	5.980	6.500
回転は Z 軸	Y[mm]	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492	-67.492
嫖情報。 回	X[mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
の面情報と座	開口 [mm]														0.52×24												
イスミラーアレイ(曲率半径 [mm]														I												
き2.4:スライ	面タイプ														平面鏡												
₩	チャンネル	Ch-13	Ch-12	Ch-11	Ch-10	Ch-9	Ch-8	Ch-7	Ch-6	Ch-5	Ch-4	Ch-3	Ch-2	Ch-1	Ch+1	Ch+2	Ch+3	Ch+4	Ch+5	Ch+6	Ch+7	Ch+8	Ch+9	Ch+10	Ch+11	Ch+12	Ch+13

第2章 SWIMS-IFU

	Tilt $Z[deg]$	22.202	20.062	18.046	16.125	14.280	12.495	10.758	9.060	7.392	5.750	4.125	2.513	0.910	-0.910	-2.511	-4.118	-5.737	-7.372	-9.028	-10.714	-12.436	-14.203	-16.028	-17.926	-19.916	-22.027
	Tilt Y[deg]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
員に行う。	Tilt X[deg]	-179.049	-178.607	-178.235	-177.914	-177.631	-177.379	-177.151	-176.944	-176.754	-176.578	-176.414	-176.262	-176.119	-175.986	-175.862	-175.75	-175.639	-175.539	-175.448	-175.366	-175.296	-175.237	-175.195	-175.173	-175.177	-175.219
軸周 りの順	Z[mm]	22.829	23.162	23.448	23.695	23.909	24.094	24.254	24.391	24.507	24.603	24.680	24.740	24.782	24.806	24.811	24.798	24.768	24.719	24.651	24.561	24.447	24.308	24.141	23.939	23.698	23.409
周り、乙酮	Y[mm]	25.493	31.829	37.295	42.023	46.105	49.611	52.592	55.087	57.127	58.733	59.923	60.709	61.099	61.069	60.619	59.772	58.522	56.857	54.759	52.207	49.171	45.612	41.479	36.705	31.197	24.826
可転は X 軸	X[mm]	91.125	83.875	76.625	69.375	62.125	54.875	47.625	40.375	33.125	25.875	18.625	11.375	4.125	-4.125	-11.375	-18.625	-25.875	-33.125	-40.375	-47.625	-54.875	-62.125	-69.375	-76.625	-83.875	-91.125
座標情報。回	開口 [mm]				4.5 imes 4.5										4.5 imes 4.5									4.5×4.5			
アレイの面情報と	曲率半径 [mm]				~ 69										70.000									~ 69			
表 2.5: 瞳ミラー	面タイプ				軸外し楕円面鏡										球面鏡									軸外し楕円面鏡			
	チャンネル	Ch-13	Ch-12	Ch-11	Ch-10	Ch-9	Ch-8	Ch-7	Ch-6	Ch-5	Ch-4	Ch-3	Ch-2	Ch-1	Ch+1	Ch+2	Ch+3	Ch+4	Ch+5	Ch+6	Ch+7	Ch+8	Ch+9	Ch+10	Ch+11	Ch+12	Ch+13

第2章 SWIMS-IFU

	g] Tilt Z[deg]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	000000000000000000000000000000000000000
	Tilt Y[de	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0000
	Tilt X[deg]	42.248	42.469	42.654	42.810	42.945	43.060	43.158	43.243	43.315	43.374	43.422	43.459	43.486	43.502	43.506	43.500	43.483	43.454	43.413	43.352	43.281	43.194	43.087	42.956	42.796	49 508
を標情報	Z[mm]	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	27.313	97 313
面情報と厚	Y[mm]	-21.135	-15.130	-9.8970	-5.328	-1.352	2.086	5.028	7.504	9.538	11.151	12.354	13.152	13.561	13.550	13.121	12.303	11.080	9.450	7.401	4.911	1.959	-1.485	-5.462	-10.028	-15.248	-21.232
- 7 1 1 0	X[mm]	91.525	84.235	76.945	69.655	62.365	55.075	47.785	40.495	33.225	25.955	18.685	11.415	4.125	-4.165	-11.455	-18.745	-26.015	-33.285	-40.595	-47.845	-55.115	-62.425	-69.675	-76.945	-84.235	-91.525
くリットミラー	開口 [mm]														7.0 imes 7.25												
表 2.6: >	曲率半径 [mm]	-62.566	-63.208	-63.701	-64.086	-64.380	-64.606	-64.778	-64.906	-65.001	-65.062	-65.099	-65.124	-65.042	-65.014	-65.068	-65.005	-64.927	-64.821	-64.677	-64.493	-64.258	-63.956	-63.570	-63.079	-62.434	-61.608
	面タイプ														球面鏡												
	チャンネル	Ch-13	Ch-12	Ch-11	Ch-10	Ch-9	Ch-8	Ch-7	Ch-6	Ch-5	Ch-4	Ch-3	Ch-2	Ch-1	Ch+1	Ch+2	Ch+3	Ch+4	Ch+5	$^{\mathrm{Ch+6}}$	Ch+7	Ch+8	Ch+9	Ch+10	Ch+11	Ch+12	Ch+13



図 2.6: スライスミラーアレイが配置される結像面におけるスポットダイアグラム。行はスライス (チャンネル) による違い、列は視野による違いを示しており、色は 0.9µm,1.1µm,1.25µm,1.35µm,1.45µm のそれぞれの波長を表している。

2.3.2 光学性能

以下で述べる光学性能はすばる望遠鏡搭載時のものである。図 2.6 にスライスミラーアレイが配置 される結像面におけるスポットダイアグラムを示す。視野中心におけるスポットダイアグラムはチャ ンネルに依らず RMS 半径が ~ 0.02″ ほどであり、シーイングに比べて十分な結像性能を示してい る。一方で、両端のチャンネルにおける視野の端では中央のチャンネルの視野中心を中心とする動径 方向の収差が大きく表れており、RMS 半径は ~ 0.05″ と増大している。しかし、シーイングに対し ては小さな像となっており、性能に与える影響は小さいものと考えられる。

望遠鏡焦点面であるスリットミラーアレイでの各チャンネル・視野における結像性能は図 2.7 に 示す通りである。1.1µmの波長におけるスポットダイアグラムの結果を示している。色は同じチャ ンネル内における視野の違いを表しており、視野中心とスリットミラーアレイを正面から見た時の 左端と右端の視野におけるスポットダイアグラムの RMS 半径である。像の FWHM は RMS 半径 の 1.7 倍に相当するのでシーイングサイズよりも小さい 0.3″ 以内に像が収まっていることがわかる。 Ch-13 ~ -7 と Ch+7 ~ +13 の結像性能が中央のチャンネルから不連続になっているのは瞳ミラー が軸外し楕円面鏡に切り替わっている影響である。図 2.8 にすべての瞳ミラーを球面鏡とした場合の スリットミラーアレイにおける結像性能を示す。軸外し楕円面鏡を用いない場合では端のチャンネル になるほど結像性能が悪化しており、FWHM 換算で 1.0″ もの広がりをもった像となってしまって いる。これは狭い空間にイメージスライサー型の面分光システムを導入するためにスライスミラー





図 2.7: スリットミラーアレイにおける各チャン ネルのスポットダイアグラム半径。両端の14チャ ンネルのは軸外し楕円面鏡を採用している。

図 2.8: 瞳ミラーをすべて球面鏡としたときのス リットミラーアレイにおける各チャンネルのス ポットダイアグラム半径

の反射角を大きくした弊害であり、装置自体をコンパクトに抑え十分な性能を確保するためには軸外 し楕円面鏡の導入は不可欠である。

図 2.9 に瞳像が形成される SWIMS 内部のストップにおけるスポットダイアグラムを示す。中央の チャンネルでは視野による違いが見られず、主光線がほぼ光軸に一致しているため、ストップによる 光線のケラレは生じていない。一方で、両端のチャンネルでは主光線の光軸からのズレや円の歪みが 見て取れ、特に視野端の瞳像が遮蔽を受けてしまっている。3 視野の合計で~0.5% ほどの光量ロス が設計の段階で生じている。また、中央のチャンネルで見られるように瞳像はストップの径に比べ て一回りほど小さくなっている。この瞳像は望遠鏡副鏡の像に相当するため瞳像とストップとの隙 間からは大気からの熱放射が流入することになり、ノイズとして検出される。この大気からの熱放 射の寄与を見積もるために、構造上避けることのできない望遠鏡からの熱放射に対する比を考える。 大気と望遠鏡からの熱放射のフラックスは以下の式で表すことができる。

$$F_{atm} = B(\lambda, T_{atm})\Omega_{atm}S_{pix}\epsilon_{atm}$$
$$F_{tel} = B(\lambda, T_{tel})\Omega_{tel}S_{pix}(1 - r_{tel}^2)$$

 $B(\lambda,T)$ はある波長、温度における黒体放射、 Ω は望遠鏡焦点面からみこむ立体角、 S_{pix} は検出器の 1ピクセルがもつ面積、 ϵ_{atm} は大気の放射率、 r_{tel} は望遠鏡鏡面の反射率である。これらのフラック スの比を瞳像の遮蔽率を関数としてプロットしたものを図 2.10 に示す。大気温度 T_{atm} は 255K,望遠 鏡温度 T_{tel} は 270K を仮定し、大気の放射率は 5%,望遠鏡の反射率は 95% とした。なお、大気から の熱放射の影響を確認したいため、分母の望遠鏡からの熱放射は遮蔽が発生していない (遮蔽率 0%) の時の設計上加味すべき望遠鏡からの熱放射の値で固定している。遮蔽率が 0%の時の大気からの熱 放射の寄与は 1.0 μ m で 0.3%ほどであり、観測波長の中で最も大気からの寄与が大きい 2.5 μ m にお いても 3%以下となっており、十分に無視できる量の流入であると考えられる。また、図 2.10 に見ら れるように遮蔽率が高くなるとストップ内における瞳像が占める割合が減少するため、相対的に大気 からの熱放射の寄与が大きくなるが、遮蔽率が 20%程度になっても 6%程度の寄与であるため、望遠 鏡からの熱放射が支配的であり、大気からの熱放射の影響はないと考えられる。

また、SWIMS 検出器面における各視野のスポットダイアグラム半径を図 2.11 に示す。チャンネル や視野間で大きなずれはなく、均一な結像性能が得られている。最も大きなスポットダイアグラムを



図 2.9: SWIMS 内のストップにおけるスポットダイアグラム。青は視野中心、緑・赤は視野端を表 す。スループットは3視野の平均値を示す。





図 2.10: SWIMS-IFU 搭載時に検出器に流入す る望遠鏡からの熱放射と大気からの熱放射の比

図 2.11: SWIMS 検出器面におけるスポットダイ アグラム半径

示しているチャンネルで像の FWHM は 0.25" 程度となっている。これは 3pixel にまたがる像のサ イズとなっており、シーイングが 0.5" 程度であることを考えると十分な結像性能であるといえる。

2.4 機械系

SWIMS-IFU においては MOS ユニットによる交換機構により、その重量とサイズに非常に厳しい 制約がかかっている。光学的にはサイズ制約に収まる光学設計が実現しているが、光学系を十分なア ライメント精度を保ちながらも軽量な構造によって組み上げなければならない。そのため、それぞれ の光学素子をどのような構造によって固定するかは非常に重要な問題となる。この固定方法を考える ためにはそれぞれの光学素子が設計値からずれた際にどれだけ光学性能に影響を与えるのかを知らな ければならない。そこで SWIMS-IFU に対して公差解析を行った。各光学素子の組み立て方式や公 差等を提供のもと、実際の計算は国立天文台先端技術センター (ATC)の都築俊宏氏に行って頂いた。

2.4.1 公差解析

公差解析とは、光学系を構成する光学素子に対して製作するにあたって生じうる設計値からのず れ (公差)を与えたときに光学性能に及ぼす影響を見積もるものである。一般的に考えられる公差は 空間 3 軸に対するシフトと回転やレンズやミラーなどの曲率・屈折率のずれなどがある。

設定

図 2.12 に公差解析において同様のシフト・回転をするブロックの概略図を示す。これらのブロック は複数の光学素子で構成されており、一体加工や組み込みによってシフトと回転に関して同一の動き をする光学素子のまとまりである。ブロック A はピックオフミラーとスライスミラーアレイ、ブロッ ク B は PO2 と瞳ミラーアレイ、ブロック C はスリットミラーアレイで構成される。SWIMS-IFU を 組み上げるベースとなるベースプレートに対して 3 つのブロックがそれぞれ独立して固定され、ブ ロック A はさらにレンズレットを支えるレンズホルダーの土台となる構成となっている。また、スラ イスミラーアレイはブロック A に組み込むことを予定しているため、単独での公差も考慮する。そ れぞれのシフトに関する公差は位置決めピンによって固定されている場合は ±20µm、面同士の押さ えつけで固定されている場合は ±10µm と設定している。なお、押さえつけ面を超精密加工によって 製作できる場合は ±2µm とした。回転角の公差は固定している 2 点間の距離に対して回転方向の位 置決定精度から求まる角度を公差として設定した。それぞれの構造体の重心に相当する点を回転中 心とした。また、SWIMS-IFU 以外の望遠鏡と SWIMS 本体については設計値のまま解析を行った。

各光学素子の公差の影響を見るための指標には SWIMS 内のストップにおける瞳像の遮蔽率を採 用した。また、公差解析をする上で、各光学素子に公差を与えるとスライスミラーアレイにおいて 光線がスライスから落ちてしまい光線追跡が不可能になってしまうケースが多く見られた。そこで、 公差解析を行う際の視野は固定された視野ではなく、スライスミラーアレイの各スライスにおいて短 手方向の中心を通る中央と両端の3視野を定義するものとした。このようにすることで SWIMS 内 のストップによる遮蔽以外の光量ロスを除外することができる。また、SWIMS-IFU ではスライスミ ラーアレイが事実上の視野絞りとなっているため、この視野の定義方法は問題にはならないと考えら れる。

モンテカルロ解析

設定した公差をモンテカルロ法により各光学素子にランダムに分配することで、公差に従って製作された SWIMS-IFU が何パーセントの確率で要求値を満たすのかという合格率を求める。要求値 は瞳像の遮蔽率が 5%以下であることとした。公差の確率分布には一様分布とした。一般的に考えら れるものとしては他にガウス分布と放物線分布があるが、ガウス分布は設計値が最も確率が高くな る楽観的な推定となってしまい、放物線分布は設計値になる確率は 0%という非常に悲観的な推定と なるため、公差の範囲内の値を一様にとる、現実的な確率分布である一様分布を採用した。波長は 1.1µm を使用し、Ch-13,-1,+13 の 3 チャンネルに対して解析を行った。試行回数は 1000 回とし、 計算には Zemax を用いた。

図 2.13 に結果を示す。横軸は遮蔽率であり、縦軸はその遮蔽率以下を満たす試行の割合である。そ れぞれのチャンネルには3つの視野があるが、その中で最も遮蔽率の高い視野の値を参考にした。つ まり、3 視野のうち 2 視野が遮蔽を受けていなくとも、1 視野が 5%の遮蔽を受けていればそのチャ ンネルは 5%の遮蔽を受けたとして扱う。要求値の 5%に着目すると中央のチャンネルである Ch-1 では 98.0%と非常に高い合格率が得られている。Ch-13 は Ch-1 ほどではないが 81.3%と 8 割以上



図 2.12: 公差解析で用いた光学素子のブロック (資料提供:都築俊宏 (ATC))

		Ch-13			Ch-1		Ch+13					
	視野1	視野 2	視野 3	視野1	視野 2	視野 3	視野1	視野 2	視野 3			
最大値	9.9%	11.2%	9.9%	8.4%	8.6%	9.0%	13.6%	18.6%	10.3%			
最小値	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%			
平均	1.7%	2.2%	1.7%	0.6%	0.5%	0.6%	2.3%	5.6%	1.4%			
分散值	2.1%	2.5%	2.0%	1.2%	1.1%	1.2%	2.4%	3.7%	1.9%			
平均 +2σ	6.0%	7.3%	5.6%	3.1%	2.6%	3.0%	7.0%	12.9%	5.1%			

表 2.7: モンテカルロ解析における各視野の遮蔽率の統計量。単位はすべて%である。試行回数は 1000 回。(資料提供:都築俊宏 (ATC))

の十分な合格率が得られている。しかし、Ch+13 では合格率が低く、46.7%と半分を切る値となっている。この原因としては両端のチャンネルでは視野ごとに瞳像がズレてしまっており、中央のチャンネルに比べて遮蔽を受けやすいことがある。さらに、Ch+13 においては視野のうちの一つが設計値において 4%の遮蔽を受けており、遮蔽率 5%以下は非常に厳しい要求となっている。

表 2.7 にそれぞれの視野におけるモンテカルロ解析での統計量を示す。この表から Ch+13 の視野 2 がとりわけ平均値や分散値が大きくなっており、Ch+13 の合格率を低くさせている要因であることがわかる。Ch+13 の視野 1、3 の結果は Ch-13 で得られている結果と遜色なく、視野 2 を除けば Ch+13 も 8 割以上の合格率が期待される。また、Ch-1 は平均的な遮蔽率が 1%以下となっており、公差の影響を受けにくいチャンネルであることがわかる。

感度解析

モンテカルロ解析により、SWIMS-IFUの代表的なチャンネルにおいて公差から受ける総合的な影響を見つもることができた。感度解析では個々の公差が光学性能 (遮蔽率) に与える影響を調べ、どの光学素子の公差が合格率を下げる要因となっているのかを調べる。ある公差の自由度に対しての



図 2.13: モンテカルロ解析の結果 (資料提供:都築俊宏 (ATC))

Ch-13		Ch-1		Ch+13	
公差	遮蔽率	公差	遮蔽率	公差	遮蔽率
ブロック A, X 回転	4.1%	ブロック A, X 回転	1.1%	ブロック A, X 回転	4.6%
ブロック B, X 回転	2.9%	ブロック B, X 回転	0.1%	ブロック B, X 回転	3.5%
ブロック B, Z 回転	1.6%	-	-	ブロック B, Z 回転	2.1%
スライスミラー, X 回転	1.5%	-	-	スライスミラー, X 回転	2.0%
ベースプレート, Y 回転	1.2%	-	-	スライスミラー, Y 回転	1.6%

表 2.8: 3 つのチャンネルに対する感度解析結果 (資料提供:都築俊宏 (ATC))

み、その自由度がもつ最大の公差を与え、他の自由度に関しては設計値とする。そうした時の光学性 能を確認することでその自由度が与える影響のみを評価することができる。これをすべての自由度 に対して行う。なお、ここで評価する遮蔽率は設計値からの増加分であり、例えば Ch+13 の視野 2 の場合は 4%からの増加量を評価している。

表 2.8 に感度解析の結果を示す。示している公差は遮蔽率の増加量が大きい上位 5 つの公差であ り、遮蔽率はそれぞれのチャンネルにおける 3 つの視野のうち最も増加量が大きかった視野の値を示 している。Ch-1 については二つの公差のみで遮蔽率の増加が見られたため、3 位以降は示していな い。この結果からブロック A と B の X 軸回転の影響が大きいことが見て取れる。X 軸回転はそれぞ れのブロックのあおり角に相当する回転であり、この回転を抑える構造もしくは調整機構を設計する ことで合格率の向上を見込むことができると考えられる。

2.4.2 機械系詳細

現在の SWIMS-IFU の機械系案を図 2.14 に示す。レンズホルダーについては未設計であるため表示していない。SWIMS に搭載する際はこのユニットに望遠鏡からの光を導入する小窓を空けたカバーを被せる。公差解析時の設定からの変更点はブロック A をブロック C(スリットミラーアレイ)の上に取り付ける構造とした点、ブロック B を構成していた PO2 と瞳ミラーアレイを分離した点で



図 2.14: SWIMS-IFU の機械系案

ある。この変更によりブロック A はブロック C からの積み上げ誤差の影響を受けてしまうが、Y 軸 方向にブロック A の土台を伸ばすことで X 軸周りの回転を抑えることができるメリットがある。ま た、ブロック A とブロック B の固定箇所と PO2 と瞳ミラーアレイの固定箇所にはシムを挟んで固 定することを考えており、このシムの厚さを超精密加工によって調整することであおり角の調整を行 うことができる。これらの構造や調整機構により、感度解析で大きな影響力をもった公差の影響を抑 えられることが期待される。

図 2.15 にミラーアレイの三次元 CAD モデルを示す。(a) はピックオフミラーとスライスミラーア レイの構造体である。これらは一体加工で製作することを予定している。上部の盛り上がった斜面が ピックオフミラーの鏡面であり、その両側のネジ穴はレンズボルダーを固定するためのものである。 中段にある螺旋階段状の構造がスライスミラーアレイであり、土台の形状はこのスライスミラーアレ イの加工性によって制限される。スライスミラーアレイはフラットエンドミルによる製作を行う予 定であり、各鏡面は 5° ほど下を向いているため工具を下側から近づける必要がある。そのため、土 台は工具との干渉を避けるように設計しなければならない。(b) は PO2 ミラーの構造体である。下 部の足構造は瞳ミラーアレイの形状に合わせて設計されており、瞳ミラーアレイ上にピンとネジに より固定する。(c) は瞳ミラーアレイの構造体を裏面 (Z 軸方向) から見たものである。両端の耳がミ ラーアレイ部分よりも薄くなっており、この耳構造をベースプレートに固定しミラーアレイ全体を支 える。この図の背面側に PO2 ミラーを取り付ける。(d) はスライスミラーアレイの構造体を裏面か ら見た図である。(a), (b), (c) は検討段階のモデルであるが、このスライスミラーアレイのモデルは 実際に SWIMS-IFU に搭載するモデルとなっている。両端の耳の役割は瞳ミラーアレイと同様であ り、瞳ミラーアレイの耳の接地面とスリットミラーアレイの耳の接地面は同一面となる。スリットミ ラーアレイでは構造をベースプレートに対して3点で固定するために図の下側の一部を切り取り、耳 と同様の働きをする面を加えている。また、構造体の軽量化のために肉抜きを行っている。スリット ミラーアレイの鏡面は上部に連なる斜面部分である。



図 2.15: 三次元 CAD モデル: (a) ピックオフミラー+スライスミラーアレイ (案)、(b)PO2(案)、(c) 瞳ミラーアレイ (案)、(d) スリットミラーアレイ

第3章 鏡面加工試験

SWIMS-IFUではミラー同士の相対的な位置ずれを抑えるためにスライスミラーアレイ・瞳ミラー アレイ・スリットミラーアレイをそれぞれ一つの母材から加工する一体加工を試みている。これらの ミラーアレイは前述したように非常に複雑な形状を有しているため、小回りの利かない加工手法で は製作が困難であることが予想される。鏡面加工では一般的に研磨加工が用いられるが、その性質上 小さな面や干渉の恐れがある複雑形状にはあまり向かない。そこで我々は近年発達してきた超精密切 削加工による鏡面加工に注目した。

既存の面分光装置の開発においては超精密切削加工による鏡面仕上げはフライカットが用いられている。図 3.1(a) に示すように、この手法は刃先の付いた円盤を高速回転させることにより加工を行う。この手法では刃が高速で金属表面を切り取ることが出来る上、回転軸から刃先までの距離が長いため刃先の軌跡の曲率半径が大きく高い表面精度を比較的得やすいというメリットがある。しかし、工具そのものが大きくなってしまうため小さな構造を加工する際には加工物との干渉を避けることが非常に難しくなり、SWIMS-IFUの加工には不向きである。この問題を解決するために我々は図 3.1(b),(c) に示すエンドミルを採用した。

エンドミルは回転軸の先端に刃先が取り付けられた構造となっており、フラットエンドミルでは回 転軸に直交する面上を刃先が回転するため平面を加工することに適している。ボールエンドミルで は円形の刃先が取り付けられており、刃先の軌跡は球面となる。したがって、加工面に対して様々な 姿勢で加工が可能であり、球面と接する点で加工することができるので自由曲面を加工することが比 較的容易である。これらの加工方法では工具自体が小さいため複雑な形状の加工物との干渉を避け やすい。しかし、特にボールエンドミルでは1回転で切削する領域が小さくなるためフライカットな どに比べて加工時間が長くなる傾向がある。

各ミラーアレイの鏡面形状からスライスミラーアレイにはフラットエンドミルを、瞳ミラーアレイ とスリットミラーアレイにはボールエンドミルを使用する。フラットエンドミルによるスライスミラー アレイの加工実験は既に行われており (Kitagawa et al., 2016, Kitagawa, PhD thesis)、SWIMS-IFU におけるスライスミラーアレイを一体加工で加工可能であり、なおかつ十分な表面精度が得られるこ とが実証されている。この章では瞳ミラーアレイとスリットミラーアレイの加工可能性を検証するた めに行ったボールエンドミルによる加工実験について報告する。

3.1 要求精度

鏡面の表面精度に対する要求値は一般に形状誤差と表面粗さの2つによって定義する。形状誤差 は理想面に対する実際の面のずれを表現したものであり、理想面からの残差の最大値と最小値の差で ある P-V 値 (peak to valley)を考えることが多い。結像時の PSF が回折限界像に十分近くなるため には光の波面の P-V 値がその波長の λ/4 以下であることが指標の一つとして要求される。反射面で ある鏡面の場合、鏡面形状を反射方向に2倍に拡大した形状が波面に転写されるため鏡面の形状誤 差としては λ/8 以下である必要がある。したがって、SWIMS-IFU での観測波長は 0.9-2.5μm であ



図 3.1: 工具による刃先形状の差

るので SWIMS-IFU 内の各ミラーの満たすべき形状誤差は 100nm 以下となる。この波面に反映され る形状の空間周波数は波長に依存し、高空間周波数成分は回折の影響で波面には現れない。そのた め、形状誤差としては加工面の低空間周波数成分の P-V 値を評価する。

表面粗さは鏡面が理想面からの偏差がどれだけあるのかを表現したものであり、一般的に RMS 値 や算術平均粗さ Ra を用いることが多い。鏡面において散乱光の割合は以下の式に従って表面粗さに 依存する (Allington-Smith, 2006a)。

$$S = 1 - e^{-(4\pi\sigma/\lambda)^2}$$

σは各反射面の表面粗さである。この割合の光量が失われるため下流の分光器に入射する光の割合 (スループット)は鏡面の母材に依存する反射率を用いて、

$$\eta(\lambda) = \prod_{k}^{n} R_{k} e^{-(4\pi\sigma/\lambda)^{2}}$$

と表される。n は反射面の枚数、 R_k は各反射面における反射率である。散乱光は直接光量のロスに 繋がる上、迷光となり性能を劣化させる可能性があるため、十分抑えることが重要である。反射率を 98%とし、SWIMS-IFU内に5枚の鏡面があることを踏まえてスループットを計算すると、もっとも 散乱の影響を受けやすい 0.9 μ m において $\sigma = 10$ nm で 82%、 $\sigma = 5$ nm で 88%となる。SWIMS-IFU に要求されているスループットは 70%以上であり、超精密切削加工によって得られる典型的な表面 粗さは 10nm RMS であるため、満たすべき表面粗さとしては 10nm RMS 以下が要求される。この 散乱には細かなスケールでの加工面の乱れが寄与するため、形状誤差と対比させて加工面の高空間 周波数成分の RMS 値を表面粗さとして評価する。

3.2 加工手法

図 3.2 に加工に用いた工具の顕微鏡画像を示す。刃先は一枚刃の単結晶ダイヤモンドで構成された ボールエンドミルである。前述したようにボールエンドミルは自由曲面を加工することが可能であ るが、要求精度 (形状誤差 < 100nm PV, 表面粗さ < 10nm RMS)を満たす鏡面を加工可能かどうか は確認されていない。そこで平面鏡・球面鏡・楕円面鏡のボールエンドミルによる試験加工を行っ た。また、母材による表面精度の違いを確認するために A5052 に施した Ni-P メッキと結晶粒の細 かな特殊アルミ合金 RSA6061 に鏡面加工を行った。Ni-P メッキは他の面分光装置の鏡面母材とし



図 3.2: 光学式顕微鏡を用いて撮影した加工に用いたボールエンドミル。刃先形状の曲率半径は 0.5µm。

て一般的に用いられているのものである。RSA6061 はアルミ合金 A6061 と同一の組成を持ちなが ら急速冷却製法によって細かな結晶粒を実現したアルミ合金であり、近年、RSA6061を用いて表面 粗さ 10nm RMS 以下の鏡面を加工したという報告がなされている (Dubbeldam et al., 2006)。 加工 物として 5mm×5mm の面積を持つ 45°の斜面を用意し、図 3.3 に示すように加工機に取り付けた。 図中の軸はワークから工具を見た時の移動方向を示している。使用した加工機は理化学研究所が所 有している ULG-100D(5A)(東芝機械) である。加工機の軸構成は図 3.4 に示す通りであり、スピン ドルは Y 軸方向に鉛直下向きに取り付け、ワークは B 軸天板に取り付けた。加工手順として始めに 45°の斜面に 5mm×5mm の平面鏡を Ζ 軸方向に 2μm 切り込むことで加工を行った。この平面鏡加 工において切削する際の駆動軸はX軸であり、ピッチ送り方向はY,Z軸とした。次に球面鏡と軸外 し楕円面鏡はこの平面鏡を削り込むようにして作製した。それぞれのサイズは ø2mm であり、球面 鏡の曲率半径はスリットミラーアレイにおける代表的な値である 65mm とし、軸外し楕円面鏡は瞳 ミラーアレイにおける Ch-13 の形状を試作として加工した。曲面鏡加工において切削する際の駆動 軸は Y,Z 軸であり、ピッチ送り方向は X 軸方向である。切り込み量は 3µm を 3 回、1µm を 1 回の 合計 10µm とした。加工パスは常に同一の方向から加工するパスを採用した。行き帰りの往復で加 工する方が加工時間を短縮することができ効率的であるが、加工機の特性により行きと帰りのパス が若干異なってしまい想定している形状・精度が得られない恐れがあるため一方向のパスを採用して いる。この加工におけるパラメータを表 3.1 に示す。加工によって理論的に得られる P-V 値 Rz は刃 先半径 *R* とピッチ *d* を用いて、

$$R_z = \frac{d^2}{8R}$$

と計算することが出来る。RMS 値は数学的に P-V 値の 1/5 程度になることから 10nm RMS を得る ために必要なピッチは 14 μ m となるが、実際に得られる値は理論値の 2 倍程度になることから仕上 げピッチは 10 μ m と設定した。

図 3.5 に加工後の Ni-P メッキを施したワークピースを示す。斜面が平面鏡、左上の円形の凹みが 球面鏡、右下の凹みが軸外し楕円面鏡である。超音波洗浄機による洗浄後、形状誤差と表面粗さの評 価のため測定を行った。

10	く 5.1: 加工时のハファース
工具	単結晶ダイヤモンドボールエンドミル
刃先半径	$500 \mu { m m}$
回転数	20000rpm
送り速度	$100 \mathrm{mm/min}$
仕上げピッチ	$10 \mu { m m}$
母材	Ni-P メッキ (A5052), RSA6061
加工形状	平面・球面・軸外し楕円面

表 3.1: 加工時のパラメータ



図 3.3: 鏡面加工試験時のセットアップ



図 3.4: 加工機 (ULG-100D(5A)) の軸構成



図 3.5: 加工後のワークピース。A5052 に Ni-P メッキを施したもの。


図 3.6: Ni-P メッキに加工した平面鏡の干渉計による測定結果

3.3 加工面測定

加工面の表面精度は干渉計 Zygo NewView 7200 を用いて測定を行った。図 3.6 は Ni-P メッキ に加工した平面鏡の表面測定結果である。測定範囲は 700 × 525µm となっており、全面に対しての P-V 値は ~ 100nm、RMS 値は 9.9nm が得られている。一方で、図 3.7 に示した RSA6061 における 平面鏡の表面測定結果では、全面に対しての P-V 値は ~ 600nm、RMS 値は 9.4nm が得られている。 この大きな P-V 値については局所的なピークによるものであり、切りくずの付着や表面についた傷 などによるものであると考えられ、測定面の印象からも RSA6061 の方が細かな凹凸が多くあること が見て取れる。これらの図は測定時のセットアップの関係上向きが 90° 回転していることに注意して パターンを見ると、加工方向と直交するピッチ送り方向に ~250µm 周期のうねりが現れていること が見て取れ、P-V 値に大きく寄与していることが予想される。

また、軸外し楕円面鏡の測定結果を図 3.8,3.9 に示す。表示されている測定面は実際の測定データ を4次多項式でフィットした時の残差である。軸外し楕円面鏡に関しても平面鏡で得られた測定結果 と同様のものが得られており、RSA6061の表面精度は Ni-P メッキに比べて、特に P-V 値が大きく なっている。加工面に見られる細かな凹凸も RSA6061の方が多く見られ、平面鏡での傾向と同一で ある。球面鏡の表面精度も軸外し楕円面鏡と同等の測定結果が得られており、加工形状による表面精 度の差はあまり生じていない。

3.4 表面精度解析

これらの測定から要求される表面精度のうち、形状誤差は加工機の駆動精度や加工中の温度変化 などに依存する表面形状の大きな空間スケールでのうねりによるものであり、表面粗さは工具による 加工痕といった小さな空間スケールでの表面の乱れによるものであると考えられる。そのため、測定 した表面情報を周波数解析することによって長周期成分と短周期成分に分け、長周期成分の P-V 値 を形状誤差、短周期成分の RMS 値を表面粗さとして評価した。

NewView 7200 を用いて、stitching により 1mm×1mm のデータを新たに取得した。stitching は



図 3.7: RSA6061 に加工した平面鏡の干渉計による測定結果



図 3.8: Ni-P メッキに加工した楕円面鏡の干渉計による測定結果



図 3.9: RSA6061 に加工した楕円面鏡の干渉計による測定結果



図 3.10: 左は元の加工面、右は周波数解析により長周期成分と短周期成分に分離し再構成した加工面。

		Ni-P	RSA6061
平面	形状 (P-V)	43nm	47nm
	粗さ (RMS)	$6.8 \mathrm{nm}$	$7.5\mathrm{nm}$
楕円面	形状 (P-V)	37nm	43nm
	粗さ (RMS)	$5.8 \mathrm{nm}$	7.4nm

表 3.2: 周波数解析後の加工面に対して測定した形状誤差と表面粗さ。

少しづつ視野をずらしながら取得した複数枚のデータをフィッティングによって重ね合わせ、大きな 視野での測定データを取得する手法である。今回の測定では隣接する測定範囲が 20%の重なりを持 つように視野を移動させた。この測定データをフーリエ変換し、20μm 周期を境界として長周期と短 周期をそれぞれ逆フーリエ変換によって表面形状を再構成した (図 3.10)。この試験加工では加工ピッ チを 10μm としているため 20μm を境界とすることで加工痕と全体的な形状を切り分けることがで きる。それぞれから測定した形状誤差と表面粗さを表 3.2 に示す。形状誤差は 1mm 四方の測定範囲 で~40nm P-V が得られている。周波数解析前に比べて 1/2 以下に減少しているが、これは細かな 切りくずなどの付着物や結晶粒界によるへこみが低周波数成分では除去され、加工そのものによる全 体的なうねりのみが残されているためであると考えられる。また、表面粗さについても同様に 1mm 四方の測定範囲で~7nm RMS が得られており、要求精度を満たす結果が得られた。平面鏡と楕円 面鏡といった形状による差はあまり見られず、曲面鏡であっても十分な精度で加工可能であることが 確認できた。以上の結果からボールエンドミルによる鏡面加工が可能であることが示唆される。

3.5 うねりが及ばす結像性能への影響

加工面には~250µm 周期、振幅~20nm のうねりが現れており、形状誤差に大きく寄与してい る。要求形状誤差に対しては十分な精度の表面が加工できているが、要求精度は規則的な繰り返しパ ターンに対する制約は与えておらず、今回見られた周期的なうねりが光学的に影響を及ぼすか否かは 判断できない。このようなうねりが光学性能に及ぼす影響は二つ考えられる。一つは加工面で反射す る光線の方向がバラついてしまい、像をぼかしてしまう幾何光学的な影響がある。もう一つは周期的 なパターンによって反射した光線が干渉を起こし、像面に干渉によるパターンが現れてしまう波動光 学的な影響である。一般的にこれらの影響は波長に依存し、どちらか一方の影響が現れる。例えば、 ある表面精度の鏡面を用いた時、X線のような短波長の電磁波では幾何光学的な影響を受けやすく、 電波のような長波長では幾何光学的な影響は表れにくくなる。

この幾何光学的な結像評価の限界は幾何光学的な像広がりと波動光学的な像広がりを比較すること で推定することができる (Shibuya et al., 2005)。幾何光学的な像広がりは加工表面の測定データか ら各測定点において局所的な傾きを算出したとき、その傾きの分布に従うことが知られている。つま り、傾きがガウス分布に従って分布している場合、その FWHM が像の広がりに相当する。一方で、 波動光学的な像広がり φ はビーム径を D とすると回折によって像が広がるため、波長と焦点距離か ら以下の式で表される。

$$\phi\approx\frac{\lambda f}{D}$$

どの周期長の加工パターンが幾何光学的に影響を及ぼすかは、その周期長もしくは評価長で切り取った領域での局所的傾きの分布と回折による像広がりを計算したとき、どちらの像広がりが大きくなるかで判断することができる。

RSA6061の楕円面鏡の測定データを用いて、この周期的なうねりの評価を行った。ある周期長 P のうねり成分を取り出すために、まず測定データに対して周波数解析を行い、P をカットオフ波長



図 3.11: 周期長が 250µm のうねりにおける局所的な傾きのヒストグラム



図 3.12: ピッチが 10µm の加工痕における局所的な傾きのヒストグラム



図 3.13: 加工面のフーリエ変換によってスリットミラーアレイ上で推定される像。log スケールで 表示。

として低周波数成分 (うねり曲線) と高周波数成分 (粗さ曲線) に分割した。その上で、低周波数成 分から周期長の 2 倍の長さを評価長として一辺の長さが評価長の正方形領域を切り出し、うねりの ある方向に局所的な傾きを計算した。局所的な傾きの算出には米国機械学会 (American society of mechanical engineers, ASME) における表面粗さの規格に基づき 5 次の Savitzky-Golay 法を用いた。 この手法では n 番目のデータ点における高さを z_n 、データ点間のピッチを dx とすると傾き Δ_n が以 下の式により計算される。

$$\Delta_n = \frac{1}{60dx}(z_{n+3} - 9z_{n+2} + 45z_{n+1} - 45z_{n-1} + 9z_{n-2} - z_{n-3})$$

この計算により求めた傾きから像のばらつきを求める。今回加工した鏡面は SWIMS-IFU において 瞳ミラーアレイとスリットミラーアレイに用いるものであり、スリットミラーアレイについては結像 面であるため、瞳ミラーアレイにこの鏡面を用いることを想定して像への影響を計算する。瞳ミラー アレイとスリットミラーアレイ間の距離は 47.5mm とする。

図 3.11 に周期長が 250µm のうねりにおける傾きのヒストグラムを示す。250µm 以上の低周波数 成分では細かな周期成分が失われているため、正弦波由来の傾きのヒストグラムが現れ、図に示して いるような両端が卓越したプロファイルが得られる。このような分布に従って、光線がばらつくこ とを考えると像が二つに分裂することが予想される。両端のピークの幅は~400µrad となっており、 このことから像はスリットミラーアレイ上で 38µm の広がりとなる事が推測される。一方で、250µm の開口に対する回折による像広がりを計算すると 210µm となる。したがって、瞳ミラーアレイにお いてこの長周期のうねりは幾何光学的には影響しないことがわかる。

また、図 3.12 に加工痕由来の傾きのヒストグラムを示す。加工痕のピッチは 10μm である。評価 長が 20μm となっているため、サンプル数が少なくなっており隙間のあるプロファイルとなっている がおおよその分布としてガウシアンでフィットを行った。長周期のうねりに対して高さ方向の変化が 大きいため、分布の FWHM は 10mrad となっており、幾何光学的な像広がりは 960μm となること が推測される。しかし、開口が 10μm と小さいため、回折による像広がりは 5.2mm となるため、加 工痕により形成されるパターンは幾何光学的な影響を及ぼさないことが推測される。

加工面の波動光学的な評価を行うために、500µm 四方の測定データを貼り合わせ 4mm 四方の仮 想的な加工面データを作成した。これは瞳ミラー面における瞳像が φ4mm であり、瞳像のフーリエ 変換が像となるためである。フーリエ変換をする上で加工面の高さ方向の情報は位相のずれとして 組み込んだ。これにより推定したスリットミラー面上での像を図 3.13 に示す。中心の Airy disk に 加えて横方向に二つのサイドピークが出来ていることが見て取れる。第一暗環は観測波長 1µm にお いては 250µrad の位置に形成される。二つのサイドピークは第一暗環に対して 8 倍と 16 倍の位置に 形成されている。250µm のうねりによって形成される 1 次の干渉縞は角度方向で 4mrad の方向とな るため、外側のサイドピークはこの 250µm のうねりによるものであると考えられる。したがって、 もう一方のサイドピークは 500µm 周期のパターン由来であり、測定データをモザイク状に張り合わ せた影響と考えられる。したがって、実質的に像面に現れるサイドピークは外側の 1 組のみとなる。 このサイドピークの強度は中心の第二暗環より内側の強度に比べて 1/500 程度となっており実用上 は十分無視できると考えられる。

3.6 母材の比較

表 3.2 を見ると、母材に関してはどちらも鏡面として使用可能な精度の面が得られているが、 RSA6061 よりも Ni-P メッキの方が良い精度が得られている傾向が見て取れる。この母材による 違いを確認するために Ni-P メッキと RSA6061 のそれぞれの加工面を光学式顕微鏡の暗視野を用い て測定した。図 3.14、3.15 は実際に得られた画像の色調を反転させたものである。図中の黒い箇所 が削りかすや穴などが表面上に存在している部分である。Ni-P メッキの測定では大小の点が見られ るだけであるが、RSA6061 の表面には点に加えて線状の箇所が見られる。この画像においてエンド ミルの加工方向は横方向であるため、切りくずや析出物などがエンドミルに引きずられてできた傷で あることが考えられる。これは RSA6061 が Ni-P メッキに比べて非常に柔らかく傷つきやすいため 起こるものであると考えられ、形状誤差や表面粗さの差はこの柔らかさによる表面精度の乱れに起 因していることが示唆される。また、RSA6061 では鏡面の拭き取り等を行うことによっても鏡面を 傷つけてしまうことが予想されるため、取り扱いに関しても Ni-P メッキ以上に注意が必要となる。



図 3.14: 暗視野顕微鏡による Ni-P メッキの加工面の測定結果。



図 3.15: 暗視野顕微鏡による RSA6061 の加工面の測定結果。

第4章 スリットミラーアレイ加工試験

鏡面加工試験においてボールエンドミルによる曲面鏡の加工が可能であることを確認したが、瞳 ミラーアレイやスリットミラーアレイのような複雑な形状をもつミラーアレイに対して鏡面を加工 可能かどうかが SWIMS-IFU を製作する上で重要となる。ミラーアレイ加工で障害となりうる問題 は工具とワークの干渉と干渉を避けたパスでの鏡面の加工性の2点である。

4.1 加工手法

図 4.1 に加工に用いたワークを示す。実際に SWIMS-IFU に搭載するスリットミラーアレイを模 して製作したワークであり、鏡面の相対的な位置関係は実機と同一の設計となっている。この加工 試験の主な目的はミラーアレイを製作することが可能であるかどうかの検証であるため、母材には A6061 を用いた。A6061 は RSA6061 と組成が同一のアルミ合金であるため、鏡面加工に適している とされる RSA6061 と表面精度を比較出来ることが期待される。

図 4.3 に加工時の全体像を示す。加工機は鏡面加工試験で用いたものと同じ ULG-100D(5A) を使 用した。スピンドルはワークとの干渉を避けるために X 軸に対して下向きに 20° 傾けて取り付けた。 スリットミラーアレイの加工ではミラー間の段差と工具との干渉を避けるために図 3.4 に示す加工機 の B 軸を回転させ、ワークと工具の位置関係を調整する必要がある。そのため、工具中心と B 軸の 回転軸の位置合わせ、ワークと B 軸の回転軸の位置合わせを正確に行う必要がある。この加工では 加工機に取り付ける前に 3 次元測定機によって治具に打った位置決めピンを基準として複数の面と の距離を計測した。これにより、加工機取り付け後もポイントチェッカーなどによる計測を行うこと で加工機との位置関係を知ることが可能である。以下に調整の手順をまとめる。

調整手順

- 1. 治具の外周を電気マイクロメータで触りながら B 軸を回転させ、治具中心と B 軸回転軸のず れを計測する。治具の位置を修正しながらずれが検出できなくなるまで繰り返す。
- 2. 治具のワーク取り付け面が Z 軸と平行になるように凸構造の側面を電気マイクロメータで測定 することで調整し、その位置を B 軸の回転角 0° と定義する。

工具	単結晶ダイヤモンドボールエンドミル
刃先半径	$500 \mu { m m}$
回転数	20000rpm
送り速度	100mm/min
ピッチ	$10\mu\mathrm{m}$
母材	A6061
加工形状	球面 ×26

表 4.1: スリットミラーアレイ試験加工時のパラメータ



図 4.1: スリットミラーアレイ試験加工で加工したワーク

- 3. B 軸を 90°, -90° に回転させ、それぞれの角度において治具のワーク取り付け面と凸構造の側 面をポイントチェッカーで測定することで治具中心と B 軸回転軸のずれ量を割り出す。そのず れ量を補正する方向に治具を移動させ固定する。固定後1~3の測定を繰り返し、ずれている ようであれば再度調整を行う。
- 4. B 軸を 45°, -45° に回転させ、それぞれの角度においてワーク取り付け面の任意の点にボール エンドミルの Z 軸座標値を固定し、当たるまで近づけてその位置を記録する。2 点間の X 軸方 向の差からボールエンドミル座標における B 軸回転軸位置を算出しその位置を原点とする。

治具の外周が治具中心を原点とする精度の良い円柱に加工されている場合、手順3は行う必要がないが設計の不手際により外周の精度が出ていなかったため、手順3を加えることで割り出しの追い込みを行っている。

スリットミラーアレイの加工試験として実機と同一の角度と曲率半径を持った 26 面の曲面鏡を加 工した。それぞれの鏡面のサイズは 6.7mm×5mm であり、球面の深さが 145μm となるように切り 込んだ。加工ピッチは荒加工用に 200μm, 中仕上げに 50μm, 仕上げに 10μm の 3 段階を用意し、荒 加工を 10μm の切り込みで 140μm の深さまで行い、中仕上げと仕上げをそれぞれ 3μm, 2μm の切り 込みで行い、鏡面を仕上げた。

4.1.1 チャンネルごとの加工条件

当然ながら加工時に工具とワークの干渉は回避しなければならず、複雑形状の鏡面加工では特に パスに対して制限が生じるため、鏡面を仕上げるための理想的なパスでの加工が難しくなる状況が 予想される。そのため、スリットミラーアレイ試験加工では加工条件による表面精度への影響を調べ るために8種類の加工条件でそれぞれのミラーの加工を行った。

加工条件は表4.2 にまとめる通りである。加工方向とピッチ方向の定義は図4.4 に示すように一本 一本の加工パスを辿る方向と加工パスの移っていく方向である。加工軸はエンドミルが金属表面を切 削しているときに同時に駆動している軸である。工具が段差と干渉しないように段差に沿った平行な パスで加工をするため、B軸が0°の時はX軸とY軸の2軸のみで加工し、Z軸方向にピッチを送る



図 4.2: (1) 回転する治具の外周を電気マイクロメータ (緑) で測定することで治具中心のずれを見積 もる。(2) 電気マイクロメータで凸構造の側面の X 軸に対する平行度を測定し、B 軸を回転すること で可能な限り平行にする。取り付け面は直交関係にあるため Z 軸に平行となる。(3)B 軸を 90°, -90° に回転させた時の取り付け面と凸構造の側面の座標をポイントチェッカー (青) で測定し軸ズレ量を 測定する。図は -90° 回転時の側面測定。(4)B 軸を 45°, -45° に回転させた時の取り付け面に対して Z 軸を固定した工具 (赤) をあて、それぞれの座標から工具に対する回転軸座標を求める。図は 45° 回転時。



図 4.3: スリットミラーアレイ加工時のセットアップ。スピンドルは水平に対して下向きに 20° 傾け て取り付けており、スリットミラーアレイを固定する治具は B 軸を回転軸として回転する天板に乗 せている。



図 4.4: 加工時の模式図と加工方向・ピッチ方向の定義

パスになる一方で、B軸を回転させた時は3軸を同時駆動させなければ段差に平行に加工することは できない。後者の場合のピッチ送りはX,Z軸を用いて行う。一般に加工機にはそれぞれの軸が特有 の癖(振動や特定の位置での座標ズレなど)を持っており、同時に駆動させる軸が多いほど振動が大 きくなったり、理想的な座標からのズレが加わったりするため加工面が荒くなる傾向がある。

加工方向は切削時にY軸が鉛直方向に対してどちらの方向に駆動しているかを区別したものであ る。使用している加工機でラスタースキャンのように交互に加工方向を変えるパスで加工をすると一 方のパスでしか加工が出来ていない、つまり、一方のパスが切り込みすぎることでもう一方のパス が加工面に当たらないことが確認されている。この原因として、加工機のY軸は鉛直方向に取り付 けられており、上昇か下降かによって重力から受ける影響が異なることなどが考えられる。したがっ て、この試験加工では常に一定の方向に加工をするパスを採用しているが、どちらの方向に加工をす るのが適切かは自明でない。この影響を確認するためにY軸がどちらの向きに加工しているのかで 加工条件を区別した。なお、X軸・Z軸も同時に駆動しているためそれらの進行方向もY軸の方向 を変えることにより反転している。

また、パスのピッチを Z 軸のどちらの方向に送るかによって加工条件を区別した。スリットミラー アレイがアーチ状の形状をしているため、加工に際して段差がない側から段差に向けてピッチを送っ ていく方がパスの設計ミスやワークがズレていた場合に大きく切り込む恐れが少ないと考え、右側 チャンネルと左側チャンネルでピッチ方向を変更した。

このピッチ方向の変更は回転工具による加工においてはアップカットとダウンカットと呼ばれる加 工手法の違いを生じさせる。模式図を図 4.5 に示す。アップカットは切削済みの領域から切り込みを 始め、切り上げることで切削を行う手法である。この手法では理論的には厚みが0の状態で切削を始 めるため刃先がワーク表面をこすってしまうことが考えられる。ダウンカットと比較すると切削距離 が長くなってしまうことや切削部分を切り離す際の厚みが大きくなるため工具が振動してしまう恐 れがある。利点としては切削後の表面精度が比較的高くなることが挙げられる。ダウンカットはアッ プカットとは逆向きに切り込む加工手法であり、始めの厚みが最も大きく、徐々に減少して厚みが0 の時に切削部分が切り離される。工具に対して無理な力が加わりにくく、切削長も短くなるため工具 が長持ちしやすい加工手法となる。一般には工具が傷つきにくいダウンカットを採用するが表面精度



図 4.5: アップカット/ダウンカットの模式図

チャンネル	加工軸	加工方向	ピッチ方向
$Ch-13 \sim -8$	$X,Y,Z(B45^{\circ})$	-Y	+Z
$Ch-7 \sim -5$	$X,Y,Z(B45^{\circ})$	+Y	+Z
Ch-4	$X,Y(B0^{\circ})$	+Y	+Z
$Ch-3 \sim -1$	$X,Y(B0^{\circ})$	-Y	+Z
$Ch+1 \sim +3$	$X,Y(B0^{\circ})$	-Y	-Z
Ch+4	$X,Y(B0^{\circ})$	+Y	-Z
$Ch+5 \sim +7$	$X,Y,Z(B-45^{\circ})$	+Y	-Z
$Ch+8 \sim +13$	$X,Y,Z(B-45^{\circ})$	-Y	-Z

表 4.2: スリットミラーアレイ試験加工における加工条件

が得られるのはアップカットであるため両者の違いも検証する。

図4.6に加工後のスリットミラーアレイを示す。図の最も左の鏡面が Ch-13 であり、右端が Ch+13 となっている。Ch-11 の鏡面が他の面に比べてサイズが小さいことが見て取れるが、これはワークの設計ミスにより 150µm ほど設計値から斜面が低くなってしまっていたため、相対的に切り込み量が減少しているからである。また、この加工では工程の終盤にエンドミルが折れてしまうアクシデントがあり、途中で加工が終了してしまったため、Ch-7~-5 は荒加工のみで終了してしまっている。そのため Ch-7~-5 は鏡面にはなっておらず、切り込み量も相対的に 5µm ほど少なくなっている。スリットミラーアレイは加工機から取り外し後、超音波洗浄機による洗浄を行った。

4.2 加工面測定

加工表面の測定は Zygo NewView 7200 を用いて Ch-8, -4, -1, +1, +4, +5, +8 に対してそれぞれ 3 回ずつ測定を行い、700 × 525µm と 140 × 100µm の視野でのデータを取得した。分解能はそれぞ れ 1.1µm, 0.2µm である。また、Zygo Verifire を用いて Ch-7, -6, -5 以外のすべてのチャンネルの 鏡面全面に対して測定を行った。

加工表面測定とは別に各球面鏡の相対的な位置関係を測定するために3次元測定機による測定を



図 4.6: 加工後のスリットミラーアレイ



図 4.7: 三次元測定機によるスリットミラーアレイ 測定の様子



図 4.8: 各チャンネル測定時の測定パターン。球面 鏡の面情報を格子状に測定した。

行った。測定は3次元測定機に非接触式測定器 (PFU-3(三鷹光機))を搭載し、すべてのチャンネル の球面形状を格子状にスキャンすることによって行った。測定の様子とスキャンパターンを図 4.7 と 図 4.8 に示す。PFU-3 は測定面に照射したレーザーの反射光を測定することにより加工面の高さ情 報を得るため測定面はレーザーに対してある程度直交している必要がある。そのため角度調整用ス テージを用いてスリットミラーアレイに角度をつけて固定した。3次元測定器の平面移動 (XY 平面 移動)における軸とスリットミラーアレイのアライメントは段差の境界が Y 軸に平行になるように測 定機側で補正を加えた。

4.3 形状誤差

Verifire で測定したデータに対して球面フィットを行い、その残差の P-V 値を測定した。Verifire の分解能は 50µm 程度であるため加工痕などの表面粗さに寄与する高周波数成分は平均化されてい ると考え周波数解析は行わなかった。また、局所的な突起や穴が存在すると P-V 値が非常に大きな 値をとるが、形状誤差測定の観点からは不適切であると考えられるため、3σ 以上の大きな値を取っ ているデータ点については除外して解析を行った。この章では代表的なチャンネルのカラーマップ を示すが、すべてのチャンネルのカラーマップは §B.1 を参照されたい。それぞれのチャンネルで算 出した形状誤差を加工条件ごとに平均したものを表 4.3 に示す。要求精度である 100nm P-V に近い 値を示しているものは Ch-4 と Ch+8 ~ +13 であるがこれらの加工条件に共通するものは見られな い。また、中央の 6 チャンネルは 200nm P-V を超えるほどの大きな値を示しており、加工条件から は二軸制御かつ-Y 方向への加工が形状を悪化させることが示唆される。

図 4.9 に Ch-12 と Ch+12 のカラーマップを示す。P-V 値はそれぞれ 158nm, 104nm であり、加工 条件ごとの結果に従って Ch+12 の方が大きなうねりのない面が仕上がっている。両者のカラーマッ プを比較すると特に Ch-12 には細かな縦縞が生じており、この縦縞が両者の P-V 値の差に寄与し ていることが考えられる。この縞は 200µm の周期で現れており、荒加工 (ピッチ 200µm) を行った 際に生じた加工変質層によるものであることが推察される。切削加工では切削する際に加わる加工 面への力によって材料にエネルギーが与えられ、他の領域とは物理的・化学的に性質のことなる層が 形成される。この層は切り込み量と同程度の深さまで形成されることが知られているため、10µm の 切り込み量で荒加工を行った場合には仕上げ加工で合計 10µm 以上切り込まなければ荒加工で形成 された加工変質層の影響を除去することができない。今回の加工では 10µm 切り込みの荒加工に対 して仕上げ加工では合計 5µm しか切り込んでいないため、加工変質層の影響が残り、測定されたよ うな周期的な縞が現れたと考えられる。しかし、切り込み量に関してはいずれのチャンネルも同じ

チャンネル	P-V[nm]
$Ch-13 \sim -8$	158
$Ch-7 \sim -5$	_
Ch-4	98.6
$Ch-3 \sim -1$	276
$Ch+1 \sim +3$	229
Ch+4	151
$Ch+5 \sim +7$	128
$Ch+8 \sim +13$	104

表 4.3: Verifire での測定データを基にした加工条件ごとの P-V 値



図 4.9: Ch+12(左図) と Ch-12(右図) の球面差し引き後のカラーマップ

であり、Ch+12 を含む他のチャンネルでも Ch-13 ~ -8 ほどはっきりとではないが 200μm の周期 的な縞が現れている。加工変質層の形成は切削時の最大剪断応力や切削抵抗に依存するため、特に Ch-8 ~ -13 で縦縞が強く現れていることには他の加工条件による影響が考えられる。

また、どちらにも同様に横縞が現れていることがわかる。ボールエンドミルでの加工においては曲 面の法線方向と工具の回転軸方向に応じてボールエンドミルの刃先のどの位置で切削を行うかが変 化する。したがって、曲面加工の場合は曲面上を移動するにつれて刃先の使用箇所が変化するため、 加工面に刃先の輪郭が転写されることになる。ここで見えている横縞は今回用いた工具の輪郭精度 に依存する縞模様であると考えられる。

両者に共通する点として、角度は異なるが斜め方向の縞模様も確認できる。それぞれの面を加工す る際に B 軸が 45°, –45° に回転していることを考慮すると斜め縞は加工機の Z 軸に直交している。 つまり、この斜め縞は Z 軸の駆動精度に依るものであると考えられ、加工機の Y 軸は Z 軸と一体と なっていることを考慮すると Z 軸のずれが切り込み量 (Y 軸のシフト) に影響を与えていると考えら れる。B 軸の回転角が 0° で加工されている面にはこれらの斜め縞は現れていない。

次に、図 4.10 に Ch-1 と Ch-4 のカラーマップを示す。P-V 値はそれぞれ 243nm, 98.6nm であ る。Ch-1 における大きな P-V 値はランダムに形成された山や谷によって生じていることがわかる。 また、縦の加工方向に注目すると他のチャンネルのカラーマップに比べて波打っており、なおかつ、 そのうねりが横方向に揃っていないことが見て取れる。これは工具が切削時に加工面から力を受け、 切り込み方向に振動していることが一つの原因であると考えられる。

工具が切削時に受ける抵抗力(切削抵抗)は主分力、背分力、送り分力の3要素からなる。主分力 と背分力は加工面を剪断する力に対して工具に加わる力であり、剪断力の工具刃先の進行方向成分が 主分力、それに対し直交する成分が背分力となる。したがって、主分力は工具回転方向とは逆向きに 加工面から受ける力であり、背分力は加工面に対して垂直な方向に加わるためすべての加工条件にお いて同様に考えることができる。送り分力は工具送り方向、つまり加工方向に対して逆向きに加わ る力である。Ch-1とCh-4を比較したときに切削抵抗の要素のうち異なるのは送り分力のみとな る。工具回転軸は加工面の法線に対して約25°傾いているため、それぞれのチャンネルにおける合成 切削抵抗の向きは背分力と送り分力の大きさの比がある関係にあるとき、図4.11に示すような工具 回転軸に対する関係を持つことが推測される。主分力は切り込み方向に影響を与えないためここで は考えない。Ch-4の加工条件では合成切削抵抗は回転軸方向を向くため工具そのものに支えられる が、Ch-1の加工条件では回転軸に対して直交方向に力が加わり、工具がたわんでしまうことが考え



図 4.11: 加工方向の違いによる切削抵抗の差

られる。そのため工具にビビり振動が発生し、Ch-1の加工面に見られるような加工パターンが生じたと考えられる。ただし、切削抵抗の大きさは実測しなければ知ることは難しく、実際の合成抵抗の向きがこのような関係になっているかは定かではない。

加工方向だけを考えれば Ch-13 ~ -8 と Ch+8 ~ +13 も Ch-1 と同様のビビり振動が発生すると 考えられるが、実際に得られた加工面でそのようなパターンは現れていない。これは B 軸を回転さ せたために加工面の法線に対する工具回転軸の角度が大きくなり、工具回転軸から離れた刃先での加 工、つまり、速い切削速度で加工が行われたため切削抵抗が小さくなったことが要因の一つであると 考えられる。なお、加工面に対する工具回転軸の傾きは、B 軸が 0° のときは 25° の傾き、45°(-45°) のときは 45° の傾きとなるため、1.7 倍程度後者の方が切削速度が速くなる。

図 4.10 に示した Ch-4 は今回加工した球面鏡の中で P-V 値が最小であったチャンネルである。カ ラーマップを見ると Ch+12 で見たものと同様の横縞が現れている。また、斜め縞は見られないが、 Ch+12 では見られなかった大きな縦縞が現れており、Z 軸のずれがこの縦縞として現れていること が推測できる。Ch-4 で得られた P-V 値は要求精度を満たしているため工具の輪郭精度や Z 軸のず れはスリットミラーアレイの精度には影響しないことが期待される。



図 4.12: Ch+1 の局所的な傾きのヒストグラム。 青線はガウシアンによるフィット結果。

チャンネル	角度誤差 [mrad]
$Ch-13 \sim -8$	0.72
$Ch-7 \sim -5$	—
Ch-4	0.37
$Ch-3 \sim -1$	0.74
$Ch+1 \sim +3$	0.65
Ch+4	0.39
$Ch+5 \sim +7$	0.66
$Ch+8 \sim +13$	0.42

表 4.4: ヒストグラムの半値全幅から算出した加 工条件ごとの角度誤差

4.3.1 スリットミラーアレイにおける形状誤差

鏡面の要求精度は §3.1 で述べたように形状誤差と表面粗さが定義されており、形状誤差について は鏡面反射後の光線の波面形状に対して与えられる要求であった。しかし、スリットミラーアレイに おいては結像面に配置されるため、波面形状に対して形状誤差として定義される P-V 値はあまり意 味をなさないことが考えられる。そもそも結像面での反射において鏡面形状は主光線が反射される方 向を決定するという意味をもつため、形状誤差は P-V 値での定義よりも局所的な傾き (slope error) での定義が意味合いとして適切であることが考えられる。スリットミラーアレイにおいて反射角度が 変化することによって生じる影響は SWIMS 内のストップ位置における瞳像が位置ずれを起こすこ とが考えられ、瞳像の一部がストップによる遮蔽を受けることで光量ロスが生じる。

スリットミラーアレイに反射され SWIMS に導入される光線の F 値は 12 となっているため、主光 線と外側の光線がなす角は 42mrad となる。したがって、仮に主光線の導入角が 42mrad ずれると、 瞳像はその半径分だけずれてしまい、瞳像の 60%ほどが遮蔽を受けることが予測される。この遮蔽 を 3%に抑える角度誤差を計算すると 2.0mrad となるため、スリットミラーアレイ鏡面における角 度誤差の要求精度は反射による効果を考慮して 1.0mrad とする。角度誤差の評価方法は Verifire で 取得した 5 × 5mm のデータに対して §3.5 で行った処理を同様に行う。ただし、周波数解析による空 間周波数の分割は行わず、測定データの横方向と縦方向に計算した傾斜角をまとめてヒストグラム としてプロットし、ガウシアンによるフィットを行った (図 4.12)。表 4.4 に加工条件ごとの角度誤差 の結果を示す。すべての加工条件で 1.0mrad 以下を達成していることがわかり、P-V 値が大きかっ た Ch-3 ~ +3 でも他のチャンネルと同程度の角度誤差が得られている。一方で Ch-13 ~ -8 では P-V 値は中程度の値であったが、比較的大きな角度誤差が得られている。

これらの角度誤差の影響を与える要因を調べるために測定データの横方向と縦方向のそれぞれに 対して周波数解析を行い、各周期長における振幅を求め、その振幅を周期長で割ることにより角度誤 差への寄与を確認した。図 4.13 に代表的なチャンネルにおける結果を示す。左に示す 2 枚の図が比 較的大きな角度誤差をもつチャンネルであり、右の 2 枚が小さな角度誤差をもつチャンネルとなって いる。Ch+2 を除く、3 つのチャンネルにおいて横軸方向のプロットで周期長 200μm にピークが立っ ているが、これは荒加工の影響が残っているためであると考えられる。Ch-12 では荒加工由来の由 来のパターンが大きな寄与を持っており、これにより角度誤差が大きくなっている。また、Ch+2 は 他のチャンネルに比べて短い周期 (< 100μm) のパターンによる寄与が卓越していることが見て取れ



図 4.13: Ch-12(左上),-4(右上),+2(左下),+4(右下) における横軸 (X 軸) と縦軸 (Y 軸) 方向への角 度誤差の周期長分布

る。この原因としては、P-V 値を大きくしている要因の一つとして考えられた工具のビビり振動が 挙げられる。

今回設定した要求精度をすべてのチャンネルで満たしてはいるが、角度誤差を大きくしている要因も P-V 値と同様に加工面と工具間の姿勢、荒加工によって生じる加工変質層であることが示唆され、これらを改善することが表面精度を向上させる上で優先的な問題であることが考えられる。

4.4 表面粗さ

NewView 7200 で取得したデータから切り出した 500×500µm の領域に対して行った球面フィット からの残差に対して周波数解析を行い、低周波数成分と高周波数成分を分離した。カットオフ周波数 は 10µm の加工ピッチに対して 2 倍の 20µm とし、形状誤差に寄与するうねり成分を取り除くこと でエンドミルによる加工痕由来の表面粗さを測定した。それぞれの加工条件における RMS 値の平均 を表 4.5 に示す。マイナスのチャンネルでは RMS 値が比較的小さくなっており、Ch-13 ~ -8, -4 では要求精度の 10nm RMS を満たす結果が得られている。一方で Ch+13 ~ +8 では 23.3nm RMS と粗い表面に仕上がっている。

図 4.14 に Ch+1 と Ch-1 の 100×100µm 範囲でのカラーマップと横軸方向の断面図を示す。両者 の表示スケールは同じであるが Ch+1 のカラーマップはコントラストが高くなっており、加工痕一つ

チャンネル	RMS[nm]
$Ch-13 \sim -8$	9.9
$Ch-7 \sim -5$	—
Ch-4	7.2
$Ch-3 \sim -1$	13.2
$Ch+1 \sim +3$	14.3
Ch+4	12.7
Ch+5 \sim +7	15.6
Ch+8 \sim +13	23.3

表 4.5: NewView7200 での測定データを基にした加工条件ごとの RMS 値

一つの左側が高く、右側が低くなっていることが見て取れる。断面を確認すると Ch-1 は円の連な りとなっているが、Ch+1 はのこぎりの刃のようなギザギザな形状をしている。これらの加工条件の 差はピッチの送り方向のみであり、アップカットとダウンカットの加工手法の差がこのような加工面 として現れていることが考えられる。Ch-1 における加工表面は 100×100µm の視野での測定を行っ たマイナス符号のチャンネル (Ch-4, -8) で同様のものが見られており、これらのチャンネルにおけ る加工条件は加工痕に対して同等であることが考えられる。、また、Ch+8 では図 4.15 に示すような 加工痕が見られた。Ch+1 の加工痕では横方向にのみのこぎり状の形状が見られていたが、Ch+8 で は横方向に加えて縦方向にもギザギザのパターンが現れている。表面粗さは Ch+8 で最も悪くなっ ていることから、このギザギザの有無が表面粗さに大きく影響していることが測定結果から示唆さ れる。

加工痕のパターンは横と縦の二方向に対するアップカットとダウンカットの差で説明することがで きる。母材の粘性が大きい場合や柔らかい場合は切削を行った後の加工表面は刃先が通過した領域の 母材が切り取られるだけではなく、刃先が切り抜ける方向に引っ張られたり押されたりすることで延 びてしまい突起 (バリ)が生じてしまう。アップカットの場合は刃先が未切削領域に向かって切り抜 けるためバリは未切削領域に発生し、その後の加工で除去されることが期待される。一方で、ダウン カットの場合は既に切削された領域に向かって刃先が切り抜けるために生じたバリが除去されずに 仕上げ面に残ってしまう。つまり、刃先が切り抜ける方向と加工におけるピッチ方向・加工方向の関 係性により加工痕の形状が決定することが考えられる。

今回の加工条件における加工痕への影響を具体的に考える。図 4.14 に示す Ch+1,-1 において刃 先が切り抜ける方向は工具が時計回りに回っているために図の左方向となる。したがって、バリは 個々の加工痕の左側に生じるので加工方向は影響せず、ピッチをどちらに送るかがバリの有無に影 響する。実際に見えているように Ch+1 では右方向にピッチを送るためバリが残ってしまっている が、左方向にピッチを送る Ch-1 ではバリが除去されている。図 4.15 に示す Ch+5,+8 では B 軸が -45°回転しているため刃先が切り抜ける方向は左上の方向になる。そのため、加工痕を 4 方向に分 割した時、左と上にバリが生じることになる。これらのチャンネルの加工条件では Ch+1 と同様に ピッチを右方向に送っているため左側のバリは両者とも除去されていない。上側に生じているバリに 関しては Ch+5 では加工方向が上方向であるため除去されているが、Ch+8 では下方向に進行して いるためバリがそのまま残ってしまっている。測定結果から表面粗さはこのバリの有無に依存してい るため、刃先の切り抜ける方向に合わせた加工パスの設計が必要となる。



図 4.14: 100×100µm 領域の Ch+1(左上図) と Ch-1(右上図) の球面差し引き後の高周波数成分。下 段はそれぞれのチャンネルにおける横軸方向の断面図。両者の山の形状を比較すると Ch-1 は左右 対称だが、Ch+1 は左側が急になっていることがわかる。



図 4.15: 100×100µm 領域の Ch+5(左図) と Ch+8(右図)の球面差し引き後の高周波数成分

4.5 鏡面位置の相対誤差

3次元測定器を用いて取得した各チャンネルの鏡面データから、実際に加工した鏡面の設計値に対 する相対的なズレを算出する。光学設計における球面鏡の設計パラメータは主光線の反射角を定め る平面とある曲率半径をもつ球とその平面の接点の座標である。加工した球面鏡の位置のずれはこ の接点に相当する座標を算出し、比較する必要がある。まず、それぞれのチャンネルの測定データに 対して設計値の曲率半径を用いて球フィットを行い、球の中心座標を求めた。接点の座標は中心座標 から接平面の法線を延ばし、球との交点を求めればよいが、法線の向きはスリットミラーアレイに対 する測定器の座標系の回転が分からなければ正確に求めることはできない。そこで以下の解析手順 に従って測定器の座標系と設計座標系を一致させるための回転角を算出した。

解析手順

- 1. 三次元の回転角を設定し、球の中心座標を回転させる。
- 2. 回転後の座標系を正しいとして定義された法線を用いて接点の座標を算出する。
- 3. 接点の座標は設計値からチャンネルが並ぶ向きに直線上に並び、その方向に対して間隔が定義 されているため、その条件に合うよう手順1,2を繰り返し回転角をフィットする。

以上のようにして求めた回転角を用いて算出した接点座標を設計値と比較する。各軸に対して設計 値からのずれ量を求めた。このずれ量は相対的なものであるので中心 2 チャンネルのずれ量が最も小 さくなるようにオフセットを加えた。図 4.16 にチャンネルごとのずれ量のプロットを示す。軸構成は 設計座標の定義に従う。表示している誤差は測定点を球面フィットする際のフィッティング誤差であ り、X,Y,Z 軸それぞれに対しておよそ 17 μ m,11 μ m,11 μ m となっている。X 軸方向のずれ量を見ると 両側のチャンネルが中央のチャンネルに対してずれていることが分かる。Ch-7~-5 は荒加工で終 了しているため無視するとマイナス側の Ch-13~-8 が 100 μ m ずれており、逆側の Ch+5~+13 は -100 μ m ずれている。Z 軸方向のずれ量も同様に両側と中央のチャンネルがそれぞれ異なるずれ 量を持っていることが見て取れ、Ch-13~-5 が中央のチャンネルに対して 40 μ m、Ch+4~+13 は 60 μ m だけずれている。Z 軸方向の位置は切り込み量に依存しないため、Ch-7~-5 のずれ量に オフセットは見られない。Y 軸方向のずれ量は仕上げ加工を行ったほぼすべてのチャンネルで ±5 μ m 程度に収まっているが、他の軸で見られている 3 つのグループごとにオフセットがあることが見て取 れる。Y 軸方向は直接的に切り込み量に依存するため、Ch-7~-5 は 5 μ m ほどオフセットが生じ ている。また、Ch-4 は -50 μ m ほどずれているが、加工の際に他のチャンネルに比べて 50 μ m 多く 切り込んだためである。

図 4.16 に見られる 3 つのチャンネルのグループは B 軸の回転角が異なるグループと一致するため、 この測定で見られた設計値からのずれは加工プログラムにおける回転軸中心と実際の回転軸中心が 一致していないために見られるズレであることが考えられる。図 4.17 に回転軸がズレているときに 生じる影響の模式図を示す。回転軸は紙面奥行き方向であり、図の平面は回転軸に直交するある平面 である。左の図は回転角が 0° の時の位置関係であり、青丸の箇所を回転後に加工することを考える。 反時計回りに加工位置を回転させると右図の青丸の位置に移動する。加工プログラムの回転軸が一 致している場合は当然回転後の加工位置は青丸で示された加工すべき位置と一致するためズレるこ とはない。しかし、加工プログラムの回転軸が実際の回転軸に対して赤バツの位置にずれている場 合、回転後の加工プログラム上の位置は右図の赤丸の位置に移動してしまうため、そのまま加工して しまうと本来加工すべき位置とは異なる位置を加工してしまう。回転後のミラーアレイは実線で示 すような傾き1の直線上に並ぶため、ミラーアレイの座標系における設計値からのずれ量を $\Delta x, \Delta z$



図 4.16: 各軸の設計値からのずれ量。座標構成は右下図に示す。



図 4.17: 加工プログラム上の回転軸中心 (赤バツ) と実際の回転軸中心 (青バツ) が一致していないと きに生じる加工位置のずれの模式図。ワークが回転することにより、ワークの X 軸は X' 軸に移る。



図 4.18: 回転軸のオフセット補正後の各軸の設計値からのずれ量

とすると B 軸の回転角が -45° と 45° であるとき以下のように表される。

$$\Delta x_{-45^{\circ}} = -\frac{2-\sqrt{2}}{2}dx + \frac{\sqrt{2}}{2}dz, \qquad \Delta z_{-45^{\circ}} = \frac{\sqrt{2}}{2}dx + \frac{2-\sqrt{2}}{2}dz$$
$$\Delta x_{45^{\circ}} = -\frac{2-\sqrt{2}}{2}dx - \frac{\sqrt{2}}{2}dz, \qquad \Delta z_{45^{\circ}} = -\frac{\sqrt{2}}{2}dx + \frac{2-\sqrt{2}}{2}dz$$

これらの式からプログラム中心が X 軸方向にずれると、それぞれの回転角において加工位置が X 軸 方向に同様にずれる一方で Z 軸方向には逆方向にずれることがわかる。また、プログラム中心の Z 軸方向のずれは加工位置を X 軸方向に関してそれぞれの回転角で逆方向にずらすことがわかる。こ れを踏まえて図 4.16 を確認すると、X 軸方向のずれは逆向きのオフセットが支配的であり、Z 軸方 向のずれは同一方向のオフセットが支配的であることからプログラム中心が Z 軸方向に大きくずれ てしまっていたことが推測される。

これらのずれ量をもとに上式を用いて回転軸のオフセットをフィッティングにより計算するとX軸 方向に 12µm、Z 軸方向に 147µm であることが示唆される。このオフセットを差し引いた時に得られ る設計値からのずれ量を図 4.18 に示す。鏡面の加工位置精度はそれぞれの軸で分散値を計算すると X 軸が 5.9µ、Z 軸が 3.8µm となっている。Z 軸の球面位置は両端のチャンネルではチャンネル間の ばらつきが非常に小さく、分散値が 0.54µm 程度となっているが、中央のチャンネルではチャンネル 間でのばらつきが大きいため全体として分散値が 3.8µm となっている。X 軸と Z 軸でデータ点のば らつきは異なっており、チャンネル間で傾向の違いが見られるが、ほぼすべてのチャンネルがフィッ ティング誤差の範囲内で設計値に一致している。

4.6 加工母材の比較・検討

2つの試験加工では Ni-P メッキ、RSA6061、A6061 の三種類の母材に対して加工を行った。表面 精度の観点からは低周波数成分における形状誤差 100nm P-V 以下、高周波数成分における表面粗さ 10nm RMS 以下を Ni-P メッキと RSA6061 では満たすことが確認された。また、A6061 においても 加工条件次第では十分な表面精度を満たすことが確認された。しかし、表面精度の測定に用いた干渉 計は高さ方向の急激な変化に弱く、小さな切りくずや析出物、結晶粒界などによる穴は測定できない ことが多い。そのような測定できない領域は表面精度の算出に加味されないため、影響を考慮するこ



図 4.19: 鏡面加工した A6061 の顕微鏡画像

とができていない。細かな凹凸の有無や量を確認するために顕微鏡による加工表面の測定を行った。 スリットミラーアレイ試験加工で鏡面加工を行った A6061 の加工表面の顕微鏡による測定結果を図 4.19 に示す。§3.6 で示した Ni-P メッキ (図 3.14) と RSA6061(図 3.15)の同一倍率での測定結果と比 較すると、引っかき傷はあまり見られないが比較的大きな散乱体が多く確認される。これは A6061 内部に含まれる析出物が加工表面に現れていることや、A6061 がもつ大きな結晶粒が影響している ものと考えられる。したがって、A6061 を光学面に用いることは不向きであり、凹凸の少ない Ni-P メッキや RSA6061 が適しているといえる。

Ni-P メッキと RSA6061 は同様の表面精度が得られることが鏡面加工試験において確認された。同様の表面精度や凹凸の有無が得られている場合、光学面としては硬さが優れている Ni-P メッキを用いる方が光学面が傷つきにくく取り扱いやすいためメリットが大きい。しかし、赤外線観測装置においては光学面が冷却環境下に置かれるため、メッキ加工を施した光学面ではベースの金属との熱膨張係数の違いにより光学面が歪んでしまう恐れがある。そのため、赤外線観測用の光学面は単一の金属で製作することができれば冷却環境下における歪みの影響を抑えることができる。今回用いたアルミ合金 RSA6061 では要求精度を十分に満たす表面精度が得られており、金属としては比較的軽量かつ丈夫であるため光学面として用いることに適しているといえる。また、A6061 と組成が同一であるため熱膨張係数も等しく、A6061 を支持構造として用いることが加工である。以上の点から、SWIMS-IFU の光学素子には母材として RSA6061 を採用する。

4.7 加工手法の検討

スリットミラーアレイ試験加工の加工面測定から表面粗さに関してはアップカットとダウンカット の差が大きく影響していることがわかった。各加工条件における加工方向とピッチ方向のアップカッ トとダウンカットを表 4.6 にまとめる。表面粗さが 10nm RMS を下回ったものは Ch-13 ~ -8 と

衣 4.0: スリットミノーノレイ試験加工におりる加工条件に対応するノッノカットとダリンカット					
チャンネル	加工軸	加工方向	ピッチ方向	アップカット/ダウンカット (UC/DC)	
$Ch-13 \sim -8$	$X,Y,Z(B45^{\circ})$	-Y	+Z	加工方向:UC、ピッチ方向:UC	
$Ch-7 \sim -5$	$X,Y,Z(B45^{\circ})$	+Y	+Z	加工方向:DC、ピッチ方向:UC	
Ch-4	$X,Y(B0^{\circ})$	+Y	+Z	加工方向:-、ピッチ方向:UC	
$Ch-3 \sim -1$	$X,Y(B0^{\circ})$	-Y	+Z	加工方向:-、ピッチ方向:UC	
$Ch+1 \sim +3$	$X,Y(B0^{\circ})$	-Y	-Z	加工方向:-、ピッチ方向:DC	
Ch+4	$X,Y(B0^{\circ})$	+Y	-Z	加工方向:-、ピッチ方向:DC	
$Ch+5 \sim +7$	$X,Y,Z(B-45^{\circ})$	+Y	-Z	加工方向:UC、ピッチ方向:DC	
$Ch+8 \sim +13$	$X,Y,Z(B-45^{\circ})$	-Y	-Z	加工方向:DC、ピッチ方向:DC	

表 4.6: スリットミラーアレイ試験加工における加工条件に対応するアップカットとダウンカット

Ch-4 であり、これらはアップカットのみで加工されている。一方で表面粗さが最も悪かったものは Ch+8 ~ +13 であり、両方向に対してダウンカットによる加工がなされている。したがって、両方 向に対してアップカットとなるような加工パスを考える必要がある。

また、形状誤差に関しては Ch-4 と Ch+8 ~ +13 において要求精度である 100nm P-V に近い値 が得られている一方で Ch-3 ~ +3 では 200nm P-V を超える粗い面が得られている。この差は切削 抵抗による工具のビビり振動が影響していることが考えられる。ビビり振動はスリットミラーアレ イの加工においては加工方向と工具の回転軸との位置関係に依存する。加工方向は良好な表面粗さ を得るための加工条件の制約を受けているため、加工方向によって切削抵抗の向きを変えることは できない。しかし、B 軸を回転させることによって加工面と工具の位置関係を変えることができる。 これにより、工具回転軸に垂直な方向に加わる抵抗力の大きさが変化する。また、ボールエンドミル の刃先が加工面にどの角度で接するかが変化し、大きな角度で接する場合は切削速度が速くなるた め切削抵抗そのものが小さくなる。これらを考慮すると今回の加工条件においては B 軸を -45°も しくは 45°回転させて加工した時がビビり振動を生じさせる切削抵抗が小さくなるといえる。実際 に B 軸を回転させて加工した時がビビり振動を生じさせる切削抵抗が小さくなるといえる。実際 に B 軸を回転させて加工した時がビビリ振動を生じさせる切削抵抗が小さくなるといえる。実際 に B 軸を回転させて加工したチャンネルの形状誤差は比較的小さな値を示している。試験加工の結 果から形状誤差には加工変質層の影響もあることが示唆されている。この加工変質層の影響を取り除 くためには荒加工時の切り込み量とそれに対する仕上げ加工の切り込み量を調整する必要がある。

以上の点から実際に SWIMS-IFU に搭載するスリットミラーアレイを加工する際の加工条件は表 4.7 に示すものが適当であると考えられる。加工機のストロークによる制約から両端のチャンネルを 加工するためには B 軸の回転は避けられない。また、スリットミラーアレイ試験加工における中央 の6 チャンネルで見られたように切削速度が遅い場合は工具のビビり振動による影響が表面精度の 悪化として現れる恐れがあるため、中央のチャンネルも B 軸を回転させた状態で加工すべきである と考えられる。そのため、マイナス側のチャンネルは 45° に回転、プラス側のチャンネルは –45° に 回転させる。その状態で加工するとボールエンドミルの刃先は Z 軸の正方向に向かって切り抜ける ため、加工機の軸構成において X 軸の負方向からワークを見た時、マイナス側のチャンネルでは加 工面の左下に向かって切り抜け、プラス側のチャンネルでは加工面の左上に向かって切るけることに なる。要求精度を満たす表面粗さを得るためには加工方向とピッチ方向に対してアップカットを行う 必要がある。そのため、ピッチはチャンネルに関わらずすべて Z 軸正方向に送る必要があり、加工 はマイナス側のチャンネルでは Y 軸負方向に、プラス側のチャンネルでは Y 軸正方向に向かって行 う必要がある。

また、加工変質層による表面精度の悪化を防ぐために切り込み量も変更しなければならない。今回 の加工において仕上げ面には 200µm ピッチの荒加工と 50µm ピッチの中仕上げ加工の影響が見られ た。加工変質層は切り込み量程度の厚さを持つことから、それぞれの加工における切り込み量以上

チャンネル	加工軸	加工方向	ピッチ方向	アップカット/ダウンカット (UC/DC)
$Ch-13 \sim -1$	$X,Y,Z(B45^{\circ})$	-Y	+Z	加工方向:UC、ピッチ方向:UC
$Ch+1 \sim +13$	$X,Y,Z(B-45^{\circ})$	+Y	+Z	加工方向:UC、ピッチ方向:UC

表 4.7: SWIMS-IFU 搭載用スリットミラーアレイの加工条件案

の切り込みを仕上げ加工では行わなければならない。合計で145µmの切り込みを行うことを考える と、130µmまで10µmの切り込み量で荒加工を行ったのち、5µmと2回の3µm切り込みを行うこ とで中仕上げ加工に入る段階で加工変質層の厚さが3µm程度となる。ここから中仕上げ加工と仕上 げ加工をそれぞれ2µm切り込みで行うことにより、合計の切り込み量を145µmとしたまま最終的 な仕上げ加工でそれまでに生じた加工変質層を取り除くことができる。加工時間に対する影響も比 較的小さい。具体的には、切り込みの回数は荒加工が2回分増えるだけであり、荒加工は1チャンネ ルあたり約7分の加工時間を要するため、加工時間が約6時間長くなるだけで済む。例えば、中仕 上げを1回分増やすと加工時間は約12時間長くなってしまう。

ミラーアレイを一体加工で行うことのメリットとしてミラー間の相対位置が加工機の精度で精密 に決定することが出来る点がある。しかし、今回行ったスリットミラーアレイの試験加工では加工機 の回転軸とプログラム上の回転軸が一致していなかったために、加工条件として B 軸の回転角が異 なるチャンネル間で鏡面位置がずれていることが確認された。この回転軸の不一致を修正しなければ 精度の高いミラーアレイを製作することは出来ない。そこで以下の手順に示すような調整方法を提 案する。

回転軸調整手法

- 1. 工具を加工機に取り付け、B 軸天板上に回転軸 (Y 軸) に垂直な平面をもつワークを取り付け る。場合によっては垂直な平面を取り付けた工具によって加工する。
- 2. 工具中心を目測で B 軸中心に合わせ、その位置での X,Z 機械座標を記録する。
- 3. 工具を高速回転させ、ワークに当たるまで Y 軸を動かす。当たったところで Y 軸を止め、B 軸 を 180°回転させる。これにより、ワークに半円の軌跡が描かれる。
- 4. ワークを取り外して顕微鏡等で半円を測定し、加工開始点と円中心の位置関係を求める。
- 5. 加工開始点の座標が手順2で記録したものであり、円中心が実際のB軸回転中心であるので記録した座標に求めたオフセットを加えることで、工具中心を回転軸中心に一致させる。

この手法により、工具中心と回転軸中心のずれは 10µm 以下に抑えることが期待されるため、異なる B 軸回転角で加工したチャンネル間同士のずれも 10µm 以下に収まると考えられる。

第5章 総括

近赤外線面分光はダスト減光の影響が少ないことや、遠方宇宙の可視光域の輝線を捉えることが できることなどから、近年、銀河形成進化の研究において非常に重要な手法となっている。特に近傍 銀河においては、近赤外線領域の輝線を空間分解して捉えることにより、星形成領域の物理状態や力 学的な運動を詳細に調べることができ、銀河進化における星形成の関わりを解き明かすことが期待 される。

本研究では近赤外線二色同時多天体分光・撮像装置 SWIMS に搭載する近赤外線面分光装置 SWIMS-IFU の開発を行った。SWIMS-IFU は既存の近赤外線面分光装置の中で比較的広い視野を有してお り、望遠鏡の集光力を考慮した観測効率では最も効率の良い装置となっている。また、SWIMS の特 徴として 0.9-2.5µm の広い波長帯を一度の露出でカバーすることができるため、その点でも非常に 効率的な観測を行えることが期待される。現在、光学系の設計は終了しており、機械系の設計を進め ている。機械系設計に伴って行った公差解析では、スライスミラーアレイや PO2、瞳ミラーアレイ があおり角に対して影響を受けやすいことが分かっており、高いスループットを実現するためにはこ れらの光学素子の設計に注意する必要がある。スリットミラーアレイの機械系設計は完了しており、 その他のコンポーネントに関しても公差解析をベースとした設計を行っている。

SWIMS-IFUの開発におけるポイントは3つのミラーアレイの製作にある。SWIMS-IFUはコン パクトな面分光装置となっているため、スライスミラーアレイの角度範囲や瞳ミラーアレイの軸外 し楕円面鏡、瞳・スリットミラーアレイの階段構造など複雑なミラーアレイ形状を持った設計となっ ている。一方で、ミラーアレイのミラーを個別に製作し、組み上げると相対的な位置関係の誤差が大 きくなってしまう恐れがあるため、一体加工を行う必要があるが、複雑形状のミラーアレイを一体加 工により製作することが開発上困難な点となっている。

平面鏡で構成されるスライスミラーアレイについてはフラットエンドミルを用いた超精密加工に よって製作可能なことが実証されていたが、曲面鏡をもつ瞳ミラーアレイ・スリットミラーアレイ についてはフラットエンドミルによる加工が困難である。そこで、工具と加工物の干渉を避けやす い、小回りの利くボールエンドミルを採用し、曲面鏡の実証試験を行った。平面・球面・軸外し楕円 面の鏡面加工を行い、干渉計による表面測定を行った。測定した加工面に対し、20μmを境界値とし て低周波数成分と高周波数成分に分割し、前者の P-V 値を形状誤差、後者の RMS 値を表面粗さと して評価した。結果として、3 種類すべての面において要求精度 (形状誤差 < 100nm P-V, 表面粗さ < 10nm RMS)を満たす鏡面が得られ、曲面鏡の加工が可能であることが確認できた。

次に、実際に搭載するものを模したスリットミラーアレイに対して様々な加工条件で鏡面加工を 行ったところ、表面精度に明らかな差が見られた。形状誤差を抑えるためには切削抵抗のかかる向き と工具の位置関係を調整し、加工変質層の影響が無くなるように切り込み量を設定する必要がある ことが示唆された。また、表面粗さは個々の加工痕におけるバリの有無が大きく影響していることが わかり、粗さを向上させるためには加工面に対してアップカットで切り込むようにパスを設計しなけ ればならないことが分かった。ミラー間の相対的な位置関係については加工機の性質上ミラーアレイ を回転させて加工しなければならないため、加工機の回転軸と加工パスにおける回転軸を一致精度 が強く影響しており、セットアップ段階での高い調整精度が求められる。 また、二つの加工試験を通して鏡面母材として Ni-P メッキ、RSA6061、A6061 を鏡面加工し比較 した。干渉計による測定ではすべての母材に対して要求精度を満たす鏡面が得られたが、特に A6061 では析出物や切りくずなどによって加工面上に細かな凹凸が多数見られた。RSA6061 においても Ni-P メッキと比較すると凹凸が多く見られたが、光学性能を劣化させるほどではないと判断される。 RSA6061 を用いることで単一の母材から SWIMS-IFU を製作することが可能となり、冷却下におけ る歪みが抑えられることが期待されるため、母材には RSA6061 を用いる。

今後の開発予定は、本研究からスリットミラーアレイの加工可能性が示されたため、スリットミ ラーアレイの試験加工における問題点を修正した上で実際にSWIMS-IFUに搭載するスリットミラー アレイをRSA6061を用いて製作する。また、瞳ミラーアレイは基本的な構造がスリットミラーアレ イと同様であるため加工可能であると考えられ、スライスミラーアレイに関しても既に加工可能性が 示されているため、ミラーアレイについては機械系設計が終了次第、製作工程に入ることができる。

謝辞

はじめに本論文の作成にあたり、多くのご指導や助言をいただいた指導教官である本原顕太郎准 教授に深く感謝いたします。

理化学研究所の山形豊教授、東京電機大学の森田晋也教授には SWIMS-IFU のミラー製作や機械 系設計に関して多くの助言をいただきました。これまであまり関わりの無かった機械加工分野につい て多くの情報や考え方をご教示いただくことで本研究を実りあるものにすることができました。

理化学研究所の細畠拓也氏、竹田真宏氏には加工機の取り扱いについてのご指導やミラー試作を 行う際に技術的な面で数多くのサポートをしていただきました。非常にスムーズに加工を進めるこ とができました。

国立天文台の尾崎忍夫氏、東京大学の高橋英則氏には SWIMS-IFU 開発チームとして、開発して いく中で生じる様々な問題点について議論をさせていただきました。

国立天文台の都築俊宏氏にはSWIMS-IFU の公差解析を行う上で、細かな設定まで議論を重ね、技術的な協力をしていただきました。ありがとうございました。

小西真広氏、加藤夏子氏、寺尾恭範氏、櫛引洸佑氏には SWIMS チームとして常日頃から大変お 世話になりました。ありがとうございました。

最後に、日々の生活から研究活動まで支えて下さり、応援していただいた家族や友人、天文学専攻 のみなさまに深く感謝いたします。

参考文献

- Allington-Smith, J. and Content, R. (1998). Sampling and Background Subtraction in Fiber-Lenslet Integral Field Spectrographs. PASP, 110:12161234.
- [2] Allington-Smith, J. (2006a). Basic principles of integral field spectroscopy. New Astronomy Review, 50, 244-251
- [3] Allington-Smith, J. R., Content, R., Dubbeldam, C. M., Robertson, D. J., and Preuss, W. (2006b). New techniques for integral field spectroscopy - I. Design, construction and testing of the GNIRS IFU. MNRAS, 371:380394.
- [4] Colina, L., Piqueras López, J., Arribas, S., Riffel, R., Riffel, R.A., Rodriguez-Ardila, A., Pastoriza, M., Storchi-Bergmann, T., Alonso-Herrero, A. and Sales, D. (2015), Understanding the two-dimensional ionization structure in luminous infrared galaxies - A near-IR integral field spectroscopy perspective. A&A 578, A48
- [5] Content, R. (1997). New design for integral field spectroscopy with 8-m telescopes. In Ardeberg, A. L., editor, *Optical Telescopes of Today and Tomorrow*, volume 2871 of Proc. SPIE, pages 12951305.
- [6] Davies, R.I., Sternberg, A., Lehnert, M. and Tacconi-Garman, L.E. (2003). Molecular Hydorogen Excitation in Ultraluminous Infrared Galaxies. ApJ, 597, 2, 907-922
- [7] Dubbeldam, C. M., Robertson, D. J., Ryder, D. A. and Sharples, R. M. (2006), Prototyping of Diamond Machined Optics for the KMOS and JWST NIRSpec Integral Field Units, In *Optomechanical Technologies for Astronomy*, volume 6273 of Proc. SPIE, page 62733F.
- [8] Durré, M. and Mould, J. (2018), The AGN Ionization Cones of NGC 5728. I. Excitation and Nuclear Structure. ApJ, 867, 2, 149
- [9] Eikenberry, S. S., Elston, R., Guzman, R., Julian, J., Raines, S. N., Gruel, N., Boreman, G., Glenn, P. E., Hull-Allen, C. G., Hoffman, J., Rodgers, M., Thompson, K., Flint, S., Comstock, L., and Myrick, B. (2004). FISICA: the Florida image slicer for infrared cosmology and astrophysics. In Moorwood, A. F. M. and Iye, M., editors, *Ground-based Instrumentation for Astronomy*, volume 5492 of Proc. SPIE, pages 12641273.
- [10] Eisenhauer, F., Abuter, R., Bickert, K., Biancat-Marchet, F., Bonnet, H., Brynnel, J., Conzelmann, R. D., Delabre, B., Donaldson, R., Farinato, J., Fedrigo, E., Genzel, R., Hubin, N. N., Iserlohe, C., Kasper, M. E., Kissler-Patig, M., Monnet, G. J., Roehrle, C., Schreiber, J., Stroebele, S., Tecza, M., Thatte, N. A., and Weisz, H. (2003). SINFONI - Integral field spectroscopy at 50 milli-arcsecond resolution with the ESO VLT. In Iye, M. and Moorwood, A. F. M., editors,*Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, volume 4841 of Proc. SPIE, pages 15481561.

- [11] Herrera, C.N., Boulanger, F. and Nesvadba, N.P.H. (2011), From large scale gas compression to cluster formation in the Antennae overlap region. A&A, 534, A138, 13
- [12] Kitagawa, Y., Ozaki, S., Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Tateuchi, K., Todo, S., Kato, N., and Yoshikawa, T. (2014), Concept and optical design of the near-infrared integral eld unit for SWIMS, In Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation, volume 9151 of Proc. SPIE, page 91514P.
- [13] Kitagawa, Y., Yamagata, Y., Morita, S., Motohara, K., Ozaki, S., Takahashi, H., Konishi, M., Kato, N., Kobayakawa, Y., Terao, Y., and Ohashi, H. (2016), Fabrication of a wide-field NIR integral field unit for SWIMS using ultra-precision cutting, In Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation, volume 9912 of Proc. SPIE, page 991225.
- [14] Kitagawa, Y. (2017), The Development of a Near-Infrared Integral Field Unit for Spatially Resolved Studies of Starburst Galaxies, Ph.D thesis.
- [15] Konishi, M., Motohara, K., Takahashi, H., Tateuchi, K., Kitagawa, Y., Kato, N., Aoki, T., Doi, M., Handa, T., Kamizuka, T., Kawara, K., Kohno, K., Koshida, S., Minezaki, T., Miyata, T., Morokuma, T., Sako, S., Soyano, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Tanaka, M., Tarusawa, K., and Yoshii, Y. (2012). Design and development of SWIMS: a near-infrared multi-object spectrograph for the University of Tokyo Atacama Observatory. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*, volume 8446 of Proc. SPIE, page 84467P.
- [16] Konishi, M., Motohara K., Takahashi, H., Kato, N., Terao, Y., Ohashi, H., Kono, Y., Kushibiki, K., Tateuchi, K., Kitagawa, Y., Todo, S., Aoki, T., Doi, M., Kamizuka, T., Kohno, K., Minezaki, T., Miyata, T., Morokuma, T., Sako, S., Soyano, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Tanaka, M., Tarusawa, K., Koshida, S., Ohsawa, R., Uchiyama, M., Mori, T., Yamaguchi, J., Yoshida, Y. and Yoshii, Y. (2018), Development status of the simultaneous two-color near-infrared multi-object spectrograph SWIMS for the TAO 6.5m telescope, In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*, volume 10702 of Proc. SPIE, page 1070226.
- [17] Krabbe, A. (1996). New MPE near-infrared astronomical imaging spectrometer:3D. In *Imaging Spectrometry II*, volume 2819 of Proc. SPIE, 243-253.
- [18] Krabbe, A., Sams III, B., Genzel, R., Thatte, N. and Prada, F. (2000). Near infrared imaging spectroscopy of NGC 1275. A&A, 354, 439
- [19] Larkin, J. E., Quirrenbach, A., Krabbe, A., Aliado, T., Barczys, M., Brims, G., Canfield, J., Gasaway, T. M., LaFreniere, D., Magnone, N., Skulason, G., Spencer, M., Sprayberry, D., and Weiss, J. (2003). OSIRIS: infrared integral field spectrograph for the Keck adaptive optics system. In Iye, M. and Moorwood, A. F. M., editors, *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, volume 4841 of Proc. SPIE, pages 16001610.
- [20] Maiolino, R., Russell, H.R., Fabian, A.C., Carniani, S., Gallagher, R., Cazzoli, S., Arribas, S., Belfiore, F., Bellochi, E., Colina, L., Cresci, G., Ishibashi, W., Marconi, A., Mannucci, F., Oliva, E. and Sturm, E. (2017), Star formation inside a galactic outflow. Nature 544, 7649

- [21] McGregor, P. J., Hart, J., Conroy, P. G., Pfitzner, M. L., Bloxham, G. J., Jones, D. J., Downing, M. D., Dawson, M., Young, P., Jarnyk, M., and Van Harmelen, J. (2003). Gemini near-infrared integral field spectrograph (NIFS). In Iye, M. and Moorwood, A. F. M., editors, *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, volume 4841 of Proc. SPIE, pages 15811591.
- [22] Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Kato, N. M., Kitagawa, Y., Kobayakawa, Y., Terao, Y., Ohashi, H., Aoki, T., Doi, M., Kamizuka, T., Kohno, K., Minezaki, T., Miyata, T., Morokuma, T., Mori, K., Ohsawa, R., Okada, K., Sako, S., Soyano, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Tanaka, M., Tarusawa, K., Uchiyama, M. S., Koshida, S., Asano, K., Tateuchi, K., Uchiyama, M., Todo, S., and Yoshii, Y. (2016). NIR camera and spectrograph SWIMS for TAO 6.5m telescope: overview and development status. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 9908 of Proc. SPIE, page 99083U.
- [23] Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Tateuchi, K., Kitagawa, Y., Todo, S., Kato, N. M., Ohsawa, R., Aoki, T., Asano, K., Doi, M., Kamizuka, T., Kawara, K., Kohno, K., Koshida, S., Minezaki, T., Miyata, T., Morokuma, T., Okada, K., Sako, S., Soyano, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Tanaka, M., Tarusawa, K., Uchiyama, M., and Yoshii, Y. (2014). Development of a simultaneous two-color near-infrared multi-object spectrograph SWIMS for the TAO 6.5-m telescope. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, volume 9147 of Proc. SPIE, page 91476K.
- [24] Petric, A.O., Armus, L., Flagey, N., Guillard, P., Howell, J., Inami, H., Charmandaris, V., Evans, A., Stierwalt, S., Diaz-Snatos, T., Lu, N., Spoon, H., Mazzarella, J., Appleton, P., Chan, B., Chu, J., Hand, D., Privon, G., Snaders, D., Surace, J., Xu, K. and Zhao, Y. (2018), Warm Molecular Hydrogen in Nearby, Luminous Infrared Galaxies. ApJ, 156, 6, 295
- [25] Puxley, P.J., Hawarden, T.G., and Mountain, C.M., (1990), Molecular and atomic hydrogen line emission from star-formation galaxies. ApJ, 364:77-86
- [26] Rich, J.A., Kewley, L.J. and Dopita, M.A. (2015), Galaxy mergers drive shocks: an integral field study of GOALS galaxies. ApJ, 221:28
- [27] Sharples, R. M., Bender, R., Lehnert, M. D., Ramsay Howat, S. K., Bremer, M. N., Davies, R. L., Genzel, R., Hofmann, R., Ivison, R. J., Saglia, R., and Thatte, N. A. (2004). KMOS: an infrared multiple-object integral field spectrograph for the ESO VLT. In Moorwood, A. F. M. and Iye, M., editors, *Ground-based Instrumentation for Astronomy*, volume 5492 of Proc. SPIE, pages 11791186.
- [28] Shibuya, M. (2005). Effect of Fine Undulation of Wavefront Aberration. Japan Society of Applied Physics, 34, 3, 124-131.
- [29] Sivanandam, S., Chou, R.C.Y., Moon, D., Ma, K., Millar-Blanchaer, M., Eikenberry, S.S., Chun, M., Kim, S.C., Raines, S.N. and Eisner, J. (2012). The Development of WIFIS: a Wide Integral Field Infrared Spectrograph. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for As*tronomy IV, volume 8446 of Proc. SPIE, page 84464S.

- [30] Takahashi, H., Konishi, M., Motohara, K., Kato, N. M., Tateuchi, K., Kitagawa, Y., and Todo, S. (2014), Development of multi-object spectroscopy unit for simultaneous-color wide-eld infrared multi-object spectrograph, In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astron*omy V, volume 9147 of Proc. SPIE, page 91476N.
- [31] Terao, Y., Motohara, K., Konishi, M., Takahashi, H., Kato, N., Kitagawa, Y., Kobayakawa, Y., Ohashi, H., Tateuchi, K., and Todo, S. (2016), NIR camera and spectrograph SWIMS for TAO 6.5m telescope: array control system and its performance, In *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII*, volume 9915 of Proc. SPIE, page 99151W.
- [32] Yoshii, Y., Aoki, T., Doi, M., Handa, T., Kawara, K., Kato, D., Kohno, K., Konishi, M., Koshida, S., Minezaki, T., Mitani, N., Miyata, T., Motohara, K., Sako, S., Soyano, T., Tanabe, T., Tanaka, M., Tarusawa, K., Bronfman, L., Ruiz, M. T., and Hamuy, M. (2010). The University of Tokyo Atacama Observatory 6.5m telescope project. In *Ground-based and Airborne Telescopes III*, volume 7733 of Proc. SPIE, page 773308.

付 録 A 超精密加工機·測定機器

A.1 超精密加工機

本研究では理化学研究所が所有する ULG-100D(5A)(東芝機械)を用いて鏡面加工を行った。図 A.1 に全体像を示す。軸構成は X,Y,Z 軸の並進 3 軸と B,C 軸による回転 2 軸となっており、5 軸での制 御が可能となっている。並進軸はリニアモーターによって駆動しており、回転軸は空気軸受けを用い た回転機構となっている。主な仕様は表 A.1 に示す通りである。



図 A.1: 超精密加工機 ULG-100D(5A)

	ストローク	加工送り速度	最小単位	真直度	繰り返し精度
X軸	$450 \mathrm{mm}$	$3000 \mathrm{mm/min}$	0.1nm	$0.3 \mu \mathrm{m}/450 \mathrm{mm}$	± 50 nm
Y軸	$150 \mathrm{mm}$	$1000 \mathrm{mm/min}$	0.1nm	$0.2 \mu \mathrm{m} / 150 \mathrm{mm}$	± 50 nm
Z 軸	$300 \mathrm{mm}$	$1000 \mathrm{mm/min}$	0.1nm	$0.2\mu\mathrm{m}/300\mathrm{mm}$	± 50 nm
B軸	$\pm 100 \deg$	1080 deg/min	0.00001deg	-	$\pm 0.00056 \text{deg}$
C軸	無限	36000 deg/min	0.00001deg	-	$\pm 0.0014 \text{deg}$

表 A.1: ULG-100D(5A) の仕様値
A.2 測定機器

加工後の表面測定に用いた測定機器をまとめる。表面精度の測定にはレーザー干渉計である Zygo 社製の NewView 7200(図 A.2) と VerifireQPZ(図 A.3) を用いた。これは測定面にレーザーを照射し、 その反射光と参照光との干渉を測定することにより表面形状をナノメートルレベルで測定するもの である。NewView 7200 は 10 倍対物レンズを用いた場合に視野が 700×525µm と小さいが分解能が 高い一方で、VerifireQPZ は分解能は劣るが φ20mm と広い視野を有しているため、本研究では表面 粗さの測定に前者を、形状誤差の測定に後者を用いた。なお、NewView 7200 においても stitching 機能により複数の測定データを張り合わせることで広い視野を得ることができるが、フィッティング 誤差が生じるため本来の形状とは異なる面が得られることがある。

スリットミラーアレイの鏡面位置の測定には Mitsutoyo 社製の 3 次元測定器 LEGEX(図 A.4) と三 鷹光器製の非接触式測定器 PFU-3(図 A.6) を用いた。PFU-3 は測定面にレーザーを照射し、その反 射光のピントが合う位置をその点における高さ情報として測定する装置となっているが、測定範囲は スリットミラーアレイの幅をカバーすることができない。そこで、PFU-3 を LEGEX に搭載するこ とにより、大きなストロークでの非接触測定を行った。レーザーの反射を利用するため測定面はレー ザーに対して ±10° 以内の傾きに抑える必要がある。

加工表面の凹凸の様子を確認するために Meiji Techno 社製の光学式顕微鏡 ML5830 を用いた。この顕微鏡では暗視野による測定が可能となっており、表面に生じた凹凸による散乱を強調して観察することが出来る。



⊠ A.2: NewView 7200(Zygo)



 \boxtimes A.3: Verifire QPZ(Zygo)



図 A.4: 3 次元測定器 LEGEX(Mitsutoyo)

付 録 A 超精密加工機 · 測定機器



図 A.5: PFU-3(三鷹光器)



図 A.6: ML5830(Meiji Techno)

付 録 B 測定データ

B.1 Zygo Verifire

Zygo Verfire を用いて測定したスリットミラーアレイ試験加工における球面鏡のデータを以下に示 す。この図は測定データの球面フィットからの残差を求め、球面中心を基準に 5mm 四方で切り出し たものである。



図 B.1: Ch-13 の Verifire による測定データ



図 B.2: Ch-12の Verifire による測定データ



図 B.3: Ch-11 の Verifire による測定データ



図 B.4: Ch-10の Verifire による測定データ



図 B.5: Ch-9の Verifire による測定データ



図 B.7: Ch-4の Verifire による測定データ



図 B.6: Ch-8の Verifire による測定データ



図 B.8: Ch-3の Verifire による測定データ



図 B.9: Ch-2の Verifire による測定データ



図 B.11: Ch+1 の Verifire による測定データ



図 B.13: Ch+3の Verifire による測定データ

100 75 50 25 шШ 0 E -25 -50 -75 -100 0 2 1 3 mm

図 B.10: Ch-1 の Verifire による測定データ



図 B.12: Ch+2の Verifire による測定データ



図 B.14: Ch+4 の Verifire による測定データ





図 B.15: Ch+5 の Verifire による測定データ





図 B.17: Ch+7 の Verifire による測定データ

4

3

2

1

0 -

ò

шШ

100

75

50

25

0 8

-25

-50

-75

-100



図 B.18: Ch+8の Verifire による測定データ



図 B.19: Ch+9 の Verifire による測定データ

3

図 B.20: Ch+10 の Verifire による測定データ

100



図 B.21: Ch+11 の Verifire による測定データ

図 B.22: Ch+12 の Verifire による測定データ



図 B.23: Ch+13 の Verifire による測定データ

ш

B.2 Zygo NewView 7200

Zygo NewView 7200 において 50 倍のレンズを用いて測定したスリットミラーアレイ試験加工に おける球面鏡のデータを以下に示す。この図は測定データの球面フィットからの残差を求め、球面中 心を基準に 100μm 四方で切り出したものである。



図 B.24: Ch-8の NewView 7200(50 倍) による測 図 B.25: Ch-4の NewView 7200(50 倍) による測 定データ



図 B.26: Ch-1の NewView 7200(50 倍) による測 定データ 図 B.27: Ch+1の NewView 7200(50 倍) による測 定データ



図 B.28: Ch+4 の NewView 7200(50 倍) による測 図 B.29: Ch+5 の NewView 7200(50 倍) による測 定データ



図 B.30: Ch+8の NewView 7200(50 倍) による測定データ

付 録 C 解析データ

Zygo Verifire で測定したデータに対して横軸と縦軸に対して周波数解析を行い、ある周期長をもった加工によるパターンが加工面の傾斜に対してどれだけの寄与を持つかを算出した。測定ができなかった Ch-7 ~ -5 を除くすべてのチャンネルに対して行った解析結果を図示する。



図 C.1: 各周期長における加工パターンの傾斜への 寄与 (Ch-13) 図 C.2: 各周期長における加工パターンの傾斜への 寄与 (Ch-12)



図 C.3: 各周期長における加工パターンの傾斜への 図 C.4: 各周期長における加工パターンの傾斜への 寄与 (Ch-11)



図 C.5: 各周期長における加工パターンの傾斜への 図 C.6: 各周期長における加工パターンの傾斜への 寄与 (Ch-9)



図 C.7: 各周期長における加工パターンの傾斜への 寄与 (Ch-4) 図 C.8: 各周期長における加工パターンの傾斜への 寄与 (Ch-3)



図 C.9: 各周期長における加工パターンの傾斜への 図 C.10: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch-2)



図 C.11: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch+1) 図 C.12: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch+2)



図 C.13: 各周期長における加工パターンの傾斜へ ^図 C.14: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch+3)



図 C.15: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch+5) 図 C.16: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch+6)



図 C.17: 各周期長における加工パターンの傾斜へ 図 C.18: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch+7)



図 C.19: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch+9) 図 C.20: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch+10)



図 C.21: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch+11) 図 C.22: 各周期長における加工パターンの傾斜へ の寄与 (Ch+12)



図 C.23: 各周期長における加工パターンの傾斜への寄与 (Ch+13)