# 京都大3.8m新望遠鏡用高速撮像分光器の光学設計と評価

広島大学大学院理学研究科

高エネルギー宇宙可視赤外線天文学研究室

M175131

松場祐樹

指導教官 川端弘治 主查 川端弘治 副查 澤田正博

2019年2月

京都大学の口径 3.8m 新技術望遠鏡「せいめい」が完成しつつある。この望遠鏡は大口径ながら素早く目標 天体に向けられる高い駆動性能と多数の搭載装置を短時間で切り替え可能なナスミス焦点装置切替機によっ て、突発的な天体現象に適した観測を即時に行う機能を有する。本研究の高速撮像分光器は、その切替機 に取り付けられる観測装置の一つで、高速撮像分光器の光学系概観図撮像と超低分散分光の二つのモード で最短 10 ミリ秒オーダーの可視光観測を行う装置である。この二つの観測モードは、光学系に再結像光学 系を採用し、分散素子とフィルターを出し入れ可能とすることで選択的に実施することができる。ただし、 装置切替機から制約条件が課されており、平面鏡で光路を折り曲げてコンパクトな構成とする必要がある。 さらに、装置焦点切替機の設計が進むに連れて、必ずしも当初搭載予定のスペースをすべて使えない可能 性が生じ、光学系の大幅な見直しが必要となった。

そこで本研究では、装置切替機に適した高速撮像分光器の光学系の設計案を複数構築し、それぞれの性能 と実現性を公差解析と呼ばれるレンズの製造誤差や設置ジオメトリ精度をもとに評価し、最適な設計案を 提供するとともに、装置切替機の設計へフィードバックすることを目指した。光学系案として採用したの は、光路を2回折返して出来る限り省スペース化したA案と、光路の折り曲げは1回だけに留め収差の増 加を抑えたB案の二つである。A案は全体的にコンパクトではあるが、分散素子等の切り替え機構も余裕 をもって構成できるようにした。A案の最適解において、視野全域の結像性能(RMSスポット半径)はお よそ9µmであり、公差解析に基づくモンテカルロシミュレーションにより、99.99%以上の製造確率で要 求される結像性能(22µm以下)を満たすことが判った。B案の最適解では、像視野位置で結像性能約8µm を達成し、こちらも高い製造確率で要求結像性能が満たされている。今後は、装置切替機の最終案に合わせ てA案とB案の比較検討を行い、選定すると共に、レンズの製作や光学系保持機構、駆動機構の開発・組 上げを進めていく。

概 要

# 目 次

第1章	序論	7
1.1	天文観測のモードと等級システム	7
	1.1.1 撮像観測	7
	1.1.2 分光観測	8
	1.1.3 等級システム	9
1.2	京都大学大学院理学研究科附属天文台岡山天文台	9
	1.2.1 せいめい望遠鏡	9
	1.2.2 ナスミス焦点切替機	11
1.3	高速撮像分光器	13
	1.3.1 高速撮像分光器の科学的意義	13
	1.3.1.1 ブラックホール X 線連星	14
	1.3.1.2 恒星フレア	14
	1.3.2 かなた望遠鏡の高速撮像分光器	15
1.4	せいめい望遠鏡用高速撮像分光器の概念設計	16
1.5	本研究の目的	17
笛り音	<b>宣油提佈公坐翌の亜式桝能と坐谷記計</b>	10
- 5 4 早	同述版像力元品の安水住能と元子設計	19
2.1	安水江惊 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	19
2.2	(戦心設計) C 土安 コノ ハーネノト	20
		21
		22
	2.2.3 波長分散系子	23
		24
	2.2.5 尤字系于切督機構	24
		25
2.3	基本となる光字設計案と課題	26
第3章	光学設計と公差解析	28
3.1	光学性能評価方法と設計手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
	3.1.1 スポットダイアグラム	28
	3.1.2 光線追跡ソフト ZEMAX	29
	3.1.3 光学系の最適化	31
3.2	3.1.3       光学系の最適化	31 32

	3.2.1	光学系の公差パラメータ	2
	3.2.2	ZEMAX による公差解析	5
	3.2.3	逆感度解析とモンテカルロシミュレーションによる光学系の製造確率 38	8
3.	3 光学系	系配置案AとB	0
3.	4 <b>公差</b> 解	释析:配置案 Α	9
3.	5 公差解	释析:配置案 B	0

66

# 第4章 まとめと今後

# 図目次

1.1	木星の撮像観測 (赤外線 H バンド $1.638 \mu m$ ) $\ldots$	7
1.2	木星の撮像観測 (赤外線 Y バンド $1.035 \mu m$ )	7
1.3	分光観測の撮影データ。縦軸が波長方向で横軸が空間(スリット長)方向に対応している	8
1.4	せいめい望遠鏡 [3]	10
1.5	せいめい望遠鏡の主鏡と第3鏡 [3]	10
1.6	望遠鏡焦点図	11
1.7	ナスミス焦点切替機の取り付け外観図...............................	12
1.8	ナスミス焦点切替機と小型装置フランジの外観図 [21]	12
1.9	大型装置フランジ外観図 [21]	12
1.10	小型装置フランジと観測装置取り付けスペース図	13
1.11	Kepler 衛星観測データの比較 (実線:1分 cadence (ステップ時間) 破線:30分 cadence)[10]	14
1.12	フレア星 EV Lac B バンド (445nm) での観測 [10] [14]	15
1.13	高速分光観測によるスペクトルの変化 [10] [14]	15
1.14	広島大学の高速撮像分光器 [19]	16
1.15	小型装置フランジの 2slot 分を使用した場合の光学系配置 ...............	17
9.1	亭沛提像公米器の概念設計図	20
2.1	同述1000111001111111111111111111111111111	20 21
2.2		21 22
$\frac{2.5}{2.4}$	$     コルスタット      \Delta ( \pm 忠 皖 \square) 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 $	22
2.4	コルスタット $\Delta$ (実出品版) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	22
$\frac{2.0}{2.6}$	コンパーンレンハロ	$\frac{22}{22}$
2.0	旧高速分光器のプリズム [28]	22
2.8	旧高速分光器のグリズム [28]	-0 23
2.9	波長領域とバンド [2]	24
2.10	アクチュエータ外観図 [26]	25
2.11	ターレット外観図 [27]	25
2.12	ORCA-Flash4.0 V3 デジタル CMOS カメラ外観図 [24]	26
2.13	ORCA-Flash4.0 V3 デジタル CMOS カメラ寸法図 [25]	26
2.14	、 小型装置フランジの搭載制限図	27
3.1	スボットダイアグラム (色の違いは波長の違いを表す)	28
3.2	ZEMAX での光学系 3D 表示	29

3.3	レンズデータエディタ	29
3.4	瞳面 (x,y) と正規化された瞳座標 (Px,Py) の関係	30
3.5	ZEMAX での評価関数の設定表	32
3.6	レンズの偏芯	33
3.7	ディセンタしたレンズ図....................................	34
3.8	ティルトしたレンズ図	34
3.9	図 3.2 の G1 の公差オペランド表	35
3.10	ホルダー形状と補正面の関係 (補正面 1)	36
3.11	ホルダー形状と補正面の関係 (補正面 3)	36
3.12	ZEMAX での感度解析結果例 (図 3.9 の結果)	37
3.13	シミュレーションによる性能値ごとの製造確率 (図 3.9 の結果)	39
3.14	光学系配置案 A の小型装置取付フランジ搭載時の外観図 (CAD)	40
3.15	光学系設置案 A のレンズデータエディタ	41
3.16	初期案を1回折り返しで搭載した場合の外観図 (CAD)	42
3.17	光学系配置案 A のスポットダイアグラム .................................	43
3.18	視野位置と RMS スポット半径値	43
3.19	波長と RMS <b>スポット</b> 半径値	44
3.20	光学系配置案 B の小型装置取付フランジ搭載時の外観図 (CAD)	44
3.21	光学系配置案 B のレンズデータエディタ	45
3.22	光学系設置案 B のスポットダイアグラム	47
3.23	視野位置と RMS スポット半径値	47
3.24	波長と RMS <b>スポット</b> 半径値	48
3.25	プリズム (R=20) による分光観測時のスポットダイアグラム。プリズムによる分光の特徴で	
	ある低波長側の波長分解能が高くなる様子がスポットダイアグラムからわかる。	48
3.26	グリズム (R=120) による分光観測時のスポットダイアグラム。グリズムにより分光では、波	
	長分解能に波長依存性がないことがスポットダイアグラムからわかる。	49
3.27	コリメータレンズホルダー案...................................	49
3.28	逆感度解析結果 (結像性能 $10\mu m$ ) $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	50
3.29	コリメータレンズ感度解析結果	50
3.30	カメラレンズホルダー案	51
3.31	配置案 A のカメラレンズ公差オペランド表................................	51
3.32	配置案 A の感度解析結果 (ワースト公差)	52
3.33	セミレンズホルダーの例	52
3.34	コリメータレンズホルダー案....................................	53
3.35	カメラレンズホルダー案	53
3.36	曲率半径公差オペランド表....................................	53
3.37	厚み公差オペランド表	53
3.38	レンズのディセンタ・ティルトオペランド表.............................	54
3.39	偏芯・イレギュラリティ・屈折率・アッベ数公差オペランド表	54

3.40	調節後の結像性能と製造確率 (正規分布) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	55
3.41	曲率半径公差・厚み公差のグレード表...................................	55
3.42	結像性能と製造確率 (均一分布)	56
3.43	調節後の結像性能と製造確率 (均一分布)	56
3.44	ゆとりをもたせた光学設置案 A の曲率半径公差・厚み公差のグレード表.......	57
3.45	曲率半径公差オペランド表....................................	57
3.46	図 3.43 の厚み公差オペランド表	58
3.47	図 3.43 のレンズのディセンタ・ティルトオペランド表	58
3.48	図 3.43 の偏芯・イレギュラリティ・屈折率・アッベ数公差オペランド表.......	58
3.49	公差による良像範囲での RMS スポット半径の変化 (均一分布の 100 回のシミュレーション	
	による)	59
3.50	視野中心での公差による波長ごとの RMS スポット半径の変化	60
3.51	良像範囲端 2.5' での公差による波長ごとの RMS スポット半径の変化	60
3.52	逆感度解析結果 (結像性能 $8\mu m$ )	60
3.53	感度解析結果	61
3.54	配置案 B のワースト公差表	61
3.55	調節面を導入した光学系配置案 B の結像性能と製造確率	62
3.56	光学設置案 B の曲率半径公差・厚み公差のグレード表..............	63
3.57	曲率半径公差オペランド表....................................	63
3.58	厚み公差オペランド表	63
3.59	レンズのディセンタ・ティルトオペランド表..............................	64
3.60	偏芯・イレギュラリティ・屈折率・アッベ数公差オペランド表	64
3.61	公差による良像範囲での RMS スポット半径の変化 (均一分布の 100 回のシミュレーション	
	による)	65
3.62	視野中心での公差による波長ごとの RMS スポット半径の変化	65
3.63	良像範囲端 2.5' での公差による波長ごとの RMS スポット半径の変化	65



1.1	せいめい望遠鏡データ [4][5] ...................................	10
1.2	せいめい望遠鏡に搭載予定の観測装置データ [6] [7] [8] [9]	11
1.3	広島大学高速撮像分光器のデータ [20] [9]	16
2.1	高速撮像分光器の要求仕様 $(1'$ は $1$ 分角で $60$ 分の $1$ 度、 $1''$ は $1$ 秒角で $60$ 分の $1$ 分角を表す)	19
2.2	高速撮像分光器の概念設計仕様・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
2.3	搭載予定プリズムデータ [20] [28]	23
2.4	搭載予定グリズムデータ [20][28]	23
2.5	天文観測に使用されるバンドと波長の対応表 [1]	24
2.6	浜松ホトニクス製の ORCA-Flash4.0 V3 デジタル CMOS カメラの仕様表 [25]	26

# 第1章 序論

# 1.1 天文観測のモードと等級システム

天文学では天体現象で放射された電磁波に対し、その天体の形状や組成を知るといった、それぞれの研 究目的に合わせた観測方法を取る。その観測方法は様々であるが、ここでは主に用いられる撮像、分光の2 つの方法を挙げる。また観測した天体の明るさの定義ついてもこの章で触れる。

#### 1.1.1 撮像観測

撮像とは天体を観測する最も基礎的な手段である。この方法は 天体からの光に対し、フィルターと呼ば れる特定の波長帯のみを透過する光学素子を使い、その波長帯での天体の光量、つまり明るさの情報を得る ことができる。また撮像は天体の形状のまま検出器面に結像するため、その形状やある波長帯の光が天体の どの位置から放射されているか知ることができる。そのため撮像観測では天体形状の定量化やその位置の導 出に使用される。図 1.1 と図 1.2 は、かなた望遠鏡と InGaAs 製検出器に H、Y バンドフィルターを組み合 わせて撮像した木星の画像である。この 2 つを比較すると波長による放射領域に違いがあることがわかる。



図 1.1: 木星の撮像観測 (赤外線 H バンド 1.638µm)



図 1.2: 木星の撮像観測 (赤外線 Y バンド 1.035µm)

#### 1.1.2 分光観測

分光とは、天体からの光を波長ごと分け、ある波長領域内の光の波長強度分布を知ることができる観測 手法である。一度に観測できる波長帯の範囲は、検出器の大きさやプリズムといった波長分散素子の分散の 大きさに依存し、波長分解能の違いから低分散分光、中分散分光、高分散分光といった分光法式に分けられ る。

低分散分光は、低分散 ( $R(=\frac{\lambda}{\Delta\lambda})=100$ 程度)の波長分散素子を使用することで広い範囲の波長帯の強度 を一度に観測し、放射された光の波長帯の全体像を知ることに役立つが、波長分解能が低いため、あるスペ クトル線の詳しい形状を知ることは難しいという短所がある。高分散分光は、高分散 (R=10000程度)の 波長分散素子を用いることで、波長分解能が高く、波長ごとの強度を詳細に調べることができるため、光 量が低い吸収線や輝線の強度を知ることができる。しかし、検出器に検出できる波長範囲が狭くなるため、 一度に広い波長範囲を観測することができず、また光学系の全長が長くなるという欠点を持つ。

中分散分光は中分散(R=1000程度)のは波長分散素子を使用し、高分散と低分散の中間的な性質を持つ。



図 1.3: 分光観測の撮影データ。縦軸が波長方向で横軸が空間 (スリット長) 方向に対応している

分光観測は、主に以下の性質を知るために行われる。

i) 温度・密度

光学的に厚い天体は、その温度のみに依存した連続スペクトルの放射(黒体放射)を示す。このことから、連続光放射の波長依存性を分光によって知ることでその温度を導出できる。また、分光観測によって導出されるスペクトル線の強度比からも温度やガス密度が推定できる。

ii) 組成

高温ガスはその物質固有のスペクトル線(輝線)を放射する。また物質は連続スペクトルの光に対し て特定の波長を選択的に吸収するため、吸収された連続スペクトルはその波長の光度のみが暗くなっ た暗線が観測される。分光観測を行うことで、輝線や吸収線の有無やその波長を特定することでき、 天体の組成やその周囲の組成を理解に役立つ。

iii) 速度

観測者から相対的に運動する天体のスペクトルは、その視線速度に依存した波長偏移を起こす。これを光ドップラー効果といい、その偏移量を分光観測で導出することで、天体または天体現象の速度や天体までの距離の推定を可能にする。

#### 1.1.3 等級システム

天体の明るさの指標として等級というものがある。これは明るさを、流束密度  $F_{\lambda}$  [ $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ ] また は  $F_{\nu}$  [ $Wm^{-2}Hz^{-1}$ ] として表した場合、基準となる明るさの流束密度  $F_{0\lambda}$  ( $F_{0\nu}$ ) の比として表したもので ある。

$$m = -2.5 log_{10} \left( \frac{F_{\lambda}(F_{\nu})}{F_{0\lambda}(F_{0\nu})} \right)$$
[23]

この式での *m* が等級であり、基準となる流束密度の等級が 0 等となる。また 5 等級増えた場合、明るさが 100 分の 1 になるように定義されている。

等級の基準として、ベガ等級と AB 等級の二つある。

ベガ等級はこと座の α 星であるベガの見かけの明るさを基準とするもので、波長によってベガの明るさが 異なるため、2 つの波長が大きく差がある場合には、その 2 つの波長での等級がともに 0 等であっても、流 束密度が大きく異なるという短所を持つ。

AB 等級とはすべての波長の明るさの基準を絶対的流束密度によって 10<sup>3.56</sup> [Wm<sup>-2</sup>Hz<sup>-1</sup>] とした等級シス テムであり、異なる波長間での明るさの差を比較しやすい。

### 1.2 京都大学大学院理学研究科附属天文台岡山天文台

ここでは京都大学理学研究科附属天文台と宇宙物理学教室が開発し、最近完成した岡山県浅口市にある 口径 3.8m せいめい望遠鏡と、その望遠鏡に多数の装置を取り付け可能としたナスミス焦点装置切替機につ いて述べる。

#### 1.2.1 せいめい望遠鏡

せいめい望遠鏡は国内で初めて分割鏡を用い、3.8m という大口径化を実現した東アジアでもっとも大き い可視赤外線望遠鏡である。この望遠鏡は、丈夫で軽量な構造を持つ超軽量架台を採用し、3.8m という大 口径ながら素早く目標天体に望遠鏡を向けることができるという高い機動性を持つ。 望遠鏡焦点はカセグレン焦点がなく、二つのナスミス焦点のみ有するが、ナスミス台に装置切替機を取り 付けることで、一つの焦点に様々な観測装置を設置し、多様な観測手法が取れるシステムとなっている。こ れらの特徴は、突発天体に代表される、天体の突発的な明るさの変化に対し、素早く反応し、大口径ならで はの小さな光度変化をも捉え、その現象に適した観測手法を即座に行えるということから、突発現象の物 理背景を様々な形からの究明が期待されている。

将来的に、この望遠鏡には7機の観測装置が搭載される見込みである。(表 1.2.1)



図 1.4: せいめい望遠鏡 [3]



図 1.5: せいめい望遠鏡の主鏡と第3鏡 [3]

項目	仕様
光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡の有効径	$3783 \mathrm{mm}$
合成焦点距離	$22692.39\mathrm{mm}$
合成 F 値	6.00
視野	$\phi  12'$
	$\phi 1$ °(補正レンズ有)
架台	経緯台
観測波長	$0.35$ - $4.2~\mu m$
焦点系	ナスミス焦点 × 2

表 1.1: せいめい望遠鏡データ [4][5]

装置名	観測波長	観測手法
ファイバー型可視光面分光装置 KOOLS-IFU	可視光 (400-1000nm)	低・中分散面分光
可視光高分散分光器	可視光 (360-1050nm)	高分散分光
近赤外相対測光分光器	近赤外 (0.86-2.1 µm)	測光、中分散分光
近赤外偏光撮像装置	近赤外 (J,H,Ks バンド)	偏光撮像
視線速度精密測定装置		高分散分光
惑星撮像装置 SEICA	近赤外 (Y,J,H バンド)	撮像、高分散分光
高速撮像分光器	可視光 (400-800nm)	撮像、低分散分光

表 1.2: せいめい望遠鏡に搭載予定の観測装置データ [6] [7] [8] [9]



図 1.6: 望遠鏡焦点図

### 1.2.2 ナスミス焦点切替機

ナスミス焦点切替機は、せいめい望遠鏡のナスミス台に取り付けられる装置で、1つの焦点に複数の観 測装置を搭載可能にし、使用する観測装置を即座に切り替えることができる装置である。これにより装置 を即座に切り替えることが可能なことから、多様な観測手法を提供できる。



図 1.7: ナスミス焦点切替機の取り付け外観図







図 1.9: 大型装置フランジ外観図 [21]

図 1.8 は望遠鏡側から見たナスミス焦点切替機図であり、その中央部のドーナツ型のものが小型装置 フランジである。また図 1.9 は、図 1.8 を反対側から見た図で、中央部に大型装置フランジが見える。 図 1.7 のようにナスミス焦点切替機には、望遠鏡側に複数の小型装置を搭載できる小型装置フランジがあ り、その外側に大型の観測装置を設置する大型装置フランジが取り付けられている。小型装置フランジの観 測装置を使用する場合、小型装置フランジに取り付けられている第4鏡がナスミス焦点を結ぶ光路中に現 れ、この鏡で反射角を変えることで装置の切り替えを行う仕様となっている(図 1.10)。小型装置フランジ には最大で4台の観測装置が搭載可能である。大型装置フランジは1つの大型の観測装置を光軸方向に取 り付ける。この観測装置を使用する場合には、第4鏡を使用せず、そのまま望遠鏡の光を観測装置内に入射 させる。

これによりせいめい望遠鏡は多数の観測装置を同時に搭載可能であり、多種多様な観測手法が整う望遠鏡で あることがわかる。

本研究の高速撮像分光器は小型装置フランジに搭載予定である。



図 1.10: 小型装置フランジと観測装置取り付けスペース図

### 1.3 高速撮像分光器

ここでは、高速撮像分光器の特徴と高時間分解能観測(高速観測)によって拓かれるサイエンスについて、 関連する天体現象に触れながら説明していく。また、本研究で開発をおこなう高速分光器のプロトタイプと 言える広島大学かなた望遠鏡に搭載されている高速撮像分光器の仕様と運用状況を紹介し、新しい装置で どういった仕様を満たす必要があるのか述べていく。

#### 1.3.1 高速撮像分光器の科学的意義

高速撮像、高速分光観測は、10msecのオーダーで天体現象を捉える観測手法である。この観測手法は、 秒~分程度のオーダーで変化するタイムスケールの短い天体現象に対し有効で、通常の観測手法では見られ ない短時間の光度変化の様子まで捉えることができる(図 1.11)。また短時間の増光現象に対し高速分光観 測を行うことで、波長ごとの増光を捉えられ、これにより増光の波長依存性等の情報を得ることができる。 他にも、X線やガンマ線等様々な波長領域との光度変化と比較した、増光の遅れ時間からの天体の内部構 造の推定といった様々な研究領域で活用されており、今後も活躍が期待されている観測装置である。



図 1.11: Kepler 衛星観測データの比較 (実線:1分 cadence (ステップ時間) 破線:30分 cadence)[10]

#### 1.3.1.1 ブラックホール X 線連星

ブラックホール X 線連星とは、ブラックホールと伴星とよばれる恒星からなる連星系のことを指し、その活発な時期に X 線で大きな増光が見られることからその名前がついている。連星とは2つ以上の星が重力で互いを束縛し、その共通の重心周りを公転運動している系である。ブラックホール X 線連星は連星系の中でも近接連星系とよばれる星同士が接触してしまうほど近くを公転しているような連星で、そのため 伴星から放出された物質がブラックホールの重力圏に供給されていると考えられている。その物質は角運動量をもってブラックホールの重力圏に供給されるため、ブラックホールの周りを回りながらガスの粘性によって角運動量が徐々に外側に運ばれ、ゆっくりとブラックホールに降着していく。そのためブラックホー ルの周りには降着円盤とよばれるブラックホールを中心としたドーナツ型の円盤が形成されており、その物質がブラックホールに降着していき、重力ポテンシャルの開放されることで、X 線や可視光等で明るく輝いている。

そのような構造をもつブラックホール X 線連星は、時折可視光で数十倍から数百倍もの増光がみられる 爆発現象が突発的に発生する。これは降着円盤の熱的な構造の変化が起こっていると解釈されており、増光 は立ち上がりから数時間程度で極大を迎える。そのためこの増光を高時間分解能で観測を行うことは、降着 円盤の構造の変化とその原理の解明に重要となると考えることができる。そこでこの爆発現象に対し、高 時間分解能分光観測を連続して行い、増光がみられる輝線の波長の偏位の変化を降着円盤の軌道を考慮し て解析することで、その構造と伴星等の構造を調べる手法が取られる。また、可視光での増光を高時間分解 能で追うことで、X 線と増光の様子のズレから降着円盤等の内部構造の推定が行われる。

このように高時間分解能観測から解明が期待される物理現象がブラックホール X 線連星にあり、本研究の高速撮像分光器の高速観測が有効である。

#### 1.3.1.2 恒星フレア

恒星フレアとは、恒星の明るさが短時間(数秒-数時間程度)に突然増光する現象である。太陽フレアもこの一種であると考えられており、恒星の種類によっては太陽フレアと比べ数桁大きいエネルギーをもつフレアを起こすことが確認されている。

恒星フレアは太陽フレアと同様に磁気リコネクションとよばれる磁力線の変化(繋ぎ変え)によって引き 起こされると解釈されているが、その発生機構の観測的研究が現在も続けられている。詳細な発生のメカ ニズムとしては、太陽のコロナのように恒星の外層にあるプラズマが、その周囲の磁力線のつなぎ変えに よるエネルギーの開放によって、加速され、衝突し、その運動エネルギーが熱エネルギーとなり、超高温 プラズマが生成されるというものであり、爆発的現象と考えられている。この高温プラズマ(1000-2000万 度)から軟 X 線が放射され、また加速されたプラズマが周囲のプラズマによって軌道が曲げられることで硬 X 線が生成される(制動放射)。また恒星フレアでは、紫外線、可視光、電波といった様々な波長領域と H<sub>α</sub> 線で増光が観測される。

この恒星フレアに対し、高速観測によってフレア発生時の立ち上がりから詳細に捉えることは、その発生 機構の観測的研究への貢献につながる。高速観測は高時間分解能で恒星フレアによる増光の変動を見るこ とができるため、増光から減光までのフレアの様子を詳細に見ることができる。また低分散分光観測を行う ことで、増光の様子を広い波長範囲で調べることができるため、波長ごとの増光の大きさやスペクトル輝 線の変動がわかる。これらの観測データは、増光に寄与した恒星フレアの発生部の星全体との面積比やそ の温度、また輝線の強度変化の時間的なズレからフレア発生機構の情報を間接的に推測することができる。

高速撮像分光器が完成し、大型のせいめい望遠鏡に取り付けられれば、暗い恒星フレアでも観測可能と なり、フレア発生機構の観測的研究の進歩への貢献が期待される。

図 1.13 の赤線はフレア時のスペクトル、緑線は通常時スペクトルを示す。主に短波長である青色側の増 光が見て取れる。



図 1.12: フレア星 EV Lac B バンド (445nm) で の観測 [10] [14]



図 1.13: 高速分光観測によるスペクトルの変化 [10] [14]

#### 1.3.2 かなた望遠鏡の高速撮像分光器

広島大学が所有する東広島天文台の 1.5m かなた望遠鏡にも、2007 - 2008 年に開発された高速撮像分光 器が搭載されている。1100×600×864 の外寸を持つこの装置は光軸と平行にナスミス焦点に取り付けられ おり、最大の特徴として、1 フレームあたり 27.1 msec-10sec の露出時間で、最大 35.8 frame/sec のフレー ムレートで高速連続観測が行える。また、波長分解能、*R* = 155 のグリズムと *R* = 70 のプリズムの 2 つの 分散素子を搭載しており、それぞれ 360-1000nm,430-690nmの波長域で高速低分散分光観測ができる。こ の装置はこれまでにも、様々な突発現象や依頼観測で使用されており、かなた望遠鏡の観測装置のひとつと して今後も活躍が期待される。

本研究の高速撮像分光器は、この広島大学の高速撮像分光器を小型化かつ性能向上を目指して設計が行 われた。図 1.3.2 にはより詳細な高速撮像分光器の性能をまとめた。以降ではこの装置性能と比較しつつ、 本研究の高速撮像分光器の仕様を説明していく。

	項目	仕様
	視野	$2.6' \times 2.6'$
	観測波長	プリズム R=70-10 (360nm-1000nm)
A REAL PROPERTY AND A REAL		グリズム R=155 (430nm-690nm)
Alt - A BELLE	観測モード	<b>撮像</b> 分光
	搭載焦点	ナスミス焦点
	露出時間	$27.1 \text{ msec} \sim 10 \text{ sec}$
	フレームレート	35.8  frame/sec
	限界等級	プリズム 15.7 mag
		グリズム 12.4 mag

図 1.14: 広島大学の高速撮像分光器 [19] 表 1.3: 広島大学高速撮像分光器のデータ [20] [9]

#### せいめい望遠鏡用高速撮像分光器の概念設計 1.4

せいめい望遠鏡用高速撮像分光器の光学設計は、京都大学の木野勝氏および野上大作氏によって、William Herschel Telescope の ACAM の設計データをもとに行われた。これは、1.2.2 章で触れた小型装置フランジ の2 slot 領域の90度分すべて使用し、平面鏡で光路を一度折り曲げることで、限られた装置フランジのス ペースに入る設計となっている (図 1.15)。光学系はレンズ G1 と G2 によって一度望遠鏡の光を平行光と し、レンズG3-6で検出器に結像する再結像光学系である。また平行光領域にフィルターと分散素子を出し 入れすることで観測モードの切り替えを行い、分散素子は、波長分解 R=20 のプリズムと R=150 のグリズ ムの二つを使用する仕様になっている。この点は、かなた用と同じであるが、視野は 5' × 5' で約2倍広い 視野を一度に観測できる改善が施されている。検出器は、かなた用よりも露出時間が短く設定でき、フレー ムレートの高いものを採用している。



図 1.15: 小型装置フランジの 2slot 分を使用した場合の光学系配置

この設計においては、レンズ製造の際に発生する製造誤差(公差)がまだ考慮されていなかった。レンズ 等の光学素子は、公差が0.1mm 程度であったとしても要求された性能(結像の質など)を満たせなくなる 場合もあるため、製造誤差の考慮は非常に重要となる。また設計段階では、性能が高い光学系であっても、 公差を考慮した際、その公差の値が小さすぎて製造が不可能であるため、設計した光学系が実現ができな い場合や製造可能であるがその費用が高額となってしまう問題も発生する。そのため光学設計では、公差 を考慮した性能の評価とその公差を値の導出が必要であるため、本研究の高速撮像分光器の光学設計でも、 公差を考慮した実現性の評価しなければならない。

さらに、小型装置フランジの設計がその後変更され、図 1.15 の配置が事実上困難となり、光学設計の改良を余儀なくされた。

#### **1.5**本研究の目的

本研究では京都大学せいめい望遠鏡用高速撮像分光器の概念設計に対し、その実現性の評価を行い、ナ スミス焦点切替機に搭載し、要求性能を満たした光学系を設計することを目的とする。 実現性の指標として、以下2点を考慮する。

i) 設計精度 (公差)

現在の概念設計ではレンズ製造の際に発生する製造誤差(公差)が考慮されていない。理論上で算 出された光学性能は、レンズの寸法を0.001mm単位で最適化した理想的な状態の性能値であるため、 レンズが造られる際に生まれる設計誤差から、その性能値は当然悪化する。そのため性能変化値の許 容範囲から製造時に発生する設計誤差の許容値を算出し、その値から光学系の実現性を評価する必要 がある。

ii) ナスミス焦点切替機の小型装置フランジへの搭載

ナスミス焦点切替機の小型装置フランジには最大で4台の観測装置が搭載可能であるが、小スペー

スに多数の装置を搭載する影響で装置の大きさに制約が課されている。そのため、概念設計の光学系 のレンズ配置のみならず、撮像や分光観測用の光学コンポーネントの設置やその切り替えを行える機 構を考慮した高速撮像分光器全体が小型装置フランジに取り付け可能であるか評価する必要がある。

さらに、性能の実現性の評価に関連して、光学系保持機構の設計精度や最適な機構設計案を提供すると ともに、まだ確定していないナスミス焦点装置切替機の設計や機構について具体的にフィードバックするこ とを目指した。

# 第2章 高速撮像分光器の要求性能と光学設計

この章では本研究の高速撮像分光器の光学設計や性能評価を行うにあたり、天文学遂行上満たさなけれ ばならない要求仕様を述べる。また要求される仕様から観測装置に必要となる構成要素について触れ、そ の性能と役割について説明していく。

### 2.1 要求仕様

本研究の高速撮像分光器は、撮像と分光の二つのモードで可視光観測を行えるほか、小型装置フランジ に搭載可能な装置外寸に収めなければならない。要求性能に関連して、せいめい望遠鏡がある土地のシー イング(地球大気による星像の乱れ)や観測対象によって表 2.1 のような仕様が求められる。

項目	仕様
観測モード	<b>撮像</b> 分光
観測波長	400-800 nm
波長分解能	R=20
	R=150
視野	良像範囲 $\phi 5'$
	ケラレなし □5′
結像性能	1″
スリット	幅 2″ × 長さ 10″ 以上
交換素子	
スリット	スルー, 2″ スリット
フィルター	V, R, I, 2 次光カット
分散素子	スルー, R=20, R=150

表 2.1: 高速撮像分光器の要求仕様 (1'は1分角で 60分の1度、1"は1秒角で 60分の1分角を表す)

表 2.1 から観測波長は可視域全域をカバーし、視野は □5' と旧型よりも約 2 倍広いことがわかる。分光 観測は波長分解能が、R=20 と 150 の、極低分散・低分散分光を行う仕様である。結像性能は典型的なシー イングの半分の 1" となっており、この値が本研究で行う観測装置光学系の結像性能評価の指標となる。

また必要な仕様として交換素子という形でスリットやフィルター等の光学素子が必要となる。これは高速 撮像分光器が二つのモードを選択的に行えるようにするためであり、そのためには撮像時と分光時それぞれ に必要な光学素子が切り替えられる機構を導入する必要がある。交換素子のスリットとは望遠鏡焦点位置 に配置され、観測視野範囲を切り替える光学素子で、撮像用の大開口マスクと分光観測用の 2<sup>11</sup> スリットの 2 種類が必要である。同様に分散素子は、撮像用の単純開口と先に述べた 2 種類の分散素子を切り替え可能 な状態として配置する。フィルターは撮像用に V,R,I の特定の波長帯のみを透過させるフィルター 3 種類 と分散素子の 2 次光をカットするフィルターを搭載する。

検出器は高速観測の要求仕様として、§1.3.2 で述べた広島大学の旧型高速分光器と同程度の連続高速観測 (フレームレート: 35.8 frame/sec) が行え、また露出時間がミリ秒オーダを持つ検出器を要求仕様とする。

# 2.2 概念設計と主要コンポーネント

§1.4 でも触れたが、せいめい望遠鏡用高速撮像分光器の初期光学設計は京都大学の木野勝氏および野上 大作氏によって行われた。この設計では装置光学系を平面鏡で一度折り返すことで、小型装置フランジの2 スロット領域の 90 度分スペースに収まり、また二つの観測モードを選択的に行うため、余裕を持って分散 素子等の切替機構が構成できるようになっている。性能に関しても、要求仕様を満たした観測視野の改善が なされ、視野全域で要求結像性能を達成している。(図 2.1,表 2.2.6)

2.2節では高速撮像分光器の光学系を成す主要コンポーネントについて、図2.2を元に説明していく。

検出器 G6-8 カメラレンズ G3-5 G2 G1 平面鏡
 ナスミス焦点 装置切替機

項目	仕様
観測モード	<b>撮像</b> 分光
観測波長	400-800 nm
波長分解能	プリズム R=20
	グリズム R=150
視野	良像範囲 $\phi 5'$
	ケラレなし □5′
ピクセルスケール	$0.143^{\prime\prime}/pixel$
結像性能	<b>視野中心</b> 8.6/44″
	<b>良像範囲端</b> 9.9/44″
	観測視野端 9.9/44″
露出時間	$1 \text{ msec} \sim 10 \text{ sec}$
フレームレート	40  frame/sec
スリット	幅 $2''  imes$ 長さ $10''$ 以上
スリット	スルー, 2″ スリット
フィルター	V, R, I, 2 次光カット

図 2.1: 高速撮像分光器の概念設計図

表 2.2: 高速撮像分光器の概念設計仕様



図 2.2: 高速撮像分光器の光学系と分光の様子

図 2.2 は高速撮像分光器光学系で使用される光学素子(反射鏡を除く)と 概念設計光学系との対応を示した図である。(光線の色は光源の位置の違いを表す)

#### 2.2.1 焦点マスク

マスクとは、観測装置の観測視野を制限する開口を定める光学素子である。図 2.2 のようにこのマスク は望遠鏡焦点位置に配置される。これは望遠鏡焦点位置では観測視野内の天体像が結像されているため、観 測したい天体の周りに不要な光が通過しないように制御することが容易だからである。そのため、観測モー ドによって観測視野を意図的に狭める必要がある場合、観測を行う視野位置の光のみを通すためにその視 野の焦点位置にスリットないし孔が開いたマスクを使用する (図 2.3)。撮像観測では視野を制限する必要が ないが、観測視野外の迷光がレンズに侵入することを防ぐため、観測視野を制限するマスクが使用される。 分光時では、本研究の高速撮像分光器は図 2.2 のように光を波長ごとに X 軸の正と負方向に分ける仕様の ため、高速撮像分光器では X 軸方向の視野を制限するスリットが用いられている。図 (2.2) 上部の観測視野 の様子はスリットによって観測視野内の一部の視野の光のみを透過させたイメージ図である。





図 2.3: 分光スリット図 (望遠鏡側)

図 2.4: 分光スリット図 (検出器側)

図 2.3 は HONIR で用いられている分光用スリットマスクである。図上で線のように見えている僅かな隙 間を開けて分光を行う視野の光を取り込んでいる。また図 2.4 のように、焦点位置から拡散する光をけら ないように隙間には勾配がつけられている。

### 2.2.2 レンズトレイン

本研究の高速撮像分光器は、望遠鏡によって結像された光線をコリメータレンズ(G1-G2)で平行光とし、 カメラレンズ(G3-G8)のよって再度結像させる再結像光学系を採用している。またプリズムやグリズムの 波長分散素子やフィルターはコリメータレンズによって平行光となった光線中に配置される。再結像光学系 を採用し、平行光部に光学素子を置く最大の理由は性能の低下を最大限減らすためである。高速撮像分光 器は内部を真空にして使用しないため、光学素子等にホコリ等のゴミが僅かながらも付着する可能性があ る。それらのゴミは物理的に光線を遮蔽したり、特定の光線の光路を変化させてしまうため、観測装置の性 能や測定結果に悪影響を及ぼす。平行光部に光学素子を置くことは、ホコリ等の像を実際上消すことができ るため、観測データの影響を最小限に抑えることができる。フィルターも同じ理由により、平行光部に配 置することが望ましい。他にもコリメータレンズによって、観測視野の光束幅が最小となる瞳が形成され、 その位置に分散素子を置くことはコスト低減や波長分解能の向上にもつながる。



図 2.5: コリメータレンズ図

図 2.6: カメラレンズ図

図 2.5 は望遠鏡焦点から瞳面までの寸法、図 2.6 は瞳面から像面までの寸法を表している。 カメラレンズではトリプレットを採用しており、G3-5 の三枚のレンズは接着されている。

#### 2.2.3 波長分散素子

高速撮像分光器の波長分散素子として、旧型の高速カメラと同じプリズム(R=20)とグリズム(R=150) を使用する。プリズムには BK7 と F2 の 2 種類の光学ガラスを貼りあわせたものを使用し、接着面と射出 面を傾けることで特定の方向にのみに分散させた分光を行う仕様である。(図 2.2 の場合、Y 軸を回転軸と して傾けることで、x方向に分散させる。)またプリズムは光学ガラスの特性上、短波長側の屈折率が大き くなるため、波長によって波長分解能は異なる。

グリズムは透過型の回折格子の一つで、プリズムの出射面に回折格子を施すことで、目的の波長を直進 させた分光が可能である。使用するグリズムには、BK7の光学ガラスの出射面に溝角10度で200本/mm のグレーティングを分散方向に施してあり、波長 550nmの光を直進させ、プリズムと同様の方向に分光を 行う仕様である。またグリズムは回折格子の原理から、波長による波長分解能の変化が小さいが、回折効率 が波長によって異なるため、透過率は波長によって変化する。



図 2.7: 旧高速分光器のプリズム [28]

項目	仕様
素材	BK7 + F2
透過率	85% <b>以上</b>
直透過率	$\lambda = 600 nm$
波長分解能	R=70-10
	$(\lambda = 400 - 800nm)$
観測波長	400-800nm

表 2.3: 搭載予定プリズムデータ [20] [28]



項目	仕様
素材	BK7
透過率	50-75 % 以上
直透過率	$\lambda = 550 nm$
波長分解能	$R{=}155(H\alpha)$
観測波長	$(\lambda = 450 - 680 nm)$
グレーティング	溝 200 本/mm (溝角 10°)
ブレーズ波長	$505 \mathrm{nm}$

図 2.8: 旧高速分光器のグリズム [28] 表 2.4: 搭載予定グリズムデータ [20][28]

2.2.4 フィルター

図 2.2 の位置に撮像用のフィルターと分光用の 2 次項カットフィルターが配置される。撮像観測では、天体からの光に対し特定の波長帯 (バンド) に関する情報を得るため、フィルターよばれる特定の波長帯のみを選択的に透過させる光学素子を使用する。本研究の高速撮像分光器では、V,R,Iの3種類のフィルターが 搭載予定である。分光時は、2 次項カットフィルターを使用することで回折格子による1 次項のみが透過さ せ、検出器面での色の重なりを防いでいる。



図 2.9: 波長領域とバンド [2]

		可視光									
バンド	В	V	Rc	Ic	Y						
中心波長 $[\mu m]$	0.445	0.551	0.659	0.806	1.035						
波長幅 $[\mu m]$	0.101	0.083	0.157	0.154	0.157						

表 2.5: 天文観測に使用されるバンドと波長の対応表 [1]

#### 2.2.5 光学素子切替機構

撮像と分光の二つのモードの切り替えを行うための光学素子切替機構として一軸アクチュエータ(図 2.10)を導入する。アクチュエータとは、コンピュータで制御可能な精密位置決定装置である。高速撮像分 光器ではアクチュエータを光軸に対して垂直に配置し、その駆動部に光学素子を取り付ける。そしてレール の上に配置された駆動部がコンピュータの電気信号によって一軸上を移動することで、光路上に現れる光学 素子の切り替える仕様になっている。

光学素子の切り替えには、多数の光学素子を搭載可能なターレット (図 2.11) と呼ばれる切替機構もある が、観測装置外寸が大きくなり、光軸の垂直な方向でのコンパクトさが求められる本研究の観測装置に適さ ない場合があることからアクチュエータを使用することとなった。アクチュエータは、搭載可能な光学素子 数は少ないが、切替機構として専有スペースが少ないため、これを複数配置することで、要求された光学素 子枚数の搭載仕様を満たす。現状ではスリット用、波長分散素子用、フィルター用に2台で、計4台が搭載 予定である。

また本研究の高速撮像分光器は旧型と異なり、重力方向が変化することからアクチュエータの選定の際に は注意が必要である。





図 2.10: アクチュエータ外観図 [26]

図 2.11: ターレット外観図 [27]

#### 2.2.6 CMOS カメラ

高速撮像分光器の光学系の検出器として、高速読み出しが可能な浜松ホトニクス製の ORCA-Flash4.0 V3 デジタル CMOS カメラを使用する。この検出器は最短で 10msec の読み出しが可能で、1 秒間に 40 枚 の連続高速観測分光観測を行うことができる。またフレームレート 100 枚/秒までアップグレードをするこ とができるため、旧型よりも詳細な高速観測の体制が整っている。また、CMOS カメラ自身で冷却を行え るため、観測装置内部を真空にする必要がなく装置構成がコンパクトになる。

検出器のサイズは図 (2.13) の寸法図で示されているように、125 mm × 85 mm × 85.5 mm であるため、 高速撮像分光器の光学系全長は 845mm となり、この大きさを考慮した装置構成を考える必要がある。



図 2.12: ORCA-Flash4.0 V3 デジタル CMOS カ メラ外観図 [24]

図 2.13: ORCA-Flash4.0 V3 デジタル CMOS カ メラ寸法図 [25]

項目	仕様						
有効画素数	$2048\times2048$						
画素サイズ	$6.5~\mu m  imes 6.5~\mu m$						
有効素子サイズ	13.312 mm $\times$ 13.312 mm						
露出時間	$1 \operatorname{msec}$ - $10 \operatorname{sec}($ スタンダードスキャンモード $)$						
	3 msec - 10 sec(スロースキャンモード)						
読み出し時間	10 msec(スタンダードスキャンモード)						
	30 msec(スロースキャンモード)						
フレームレート	40  frame/sec						
冷却温度	-10 (ペルチェ冷却、強制空冷)						
飽和電荷量	30000 electrons						
読み出しノイズ	1.0 electrons median, 1.6 electrons $rms(スタンダードスキャンモード)$						
	0.8 electrons median, 1.4 electrons $rms($ スロースキャンモード)						
暗出力不均一性 (DSNU)	$0.3 \ electrons \ rms$						
感度不均一性 (PRNU)	0.06% rms (15000 electrons 時)						
	0.3% rms (700 electrons 時)						
リニアリティエラー	$0.5~\%~({\rm EMVA~1288~standard})$						
ビンニング	$1 \times 1,  2 \times 2,  4 \times 4$						

表 2.6: 浜松ホトニクス製の ORCA-Flash4.0 V3 デジタル CMOS カメラの仕様表 [25]

# 2.3 基本となる光学設計案と課題

この章では高速撮像分光器の要求仕様に対して、それを満足した光学設計について主要コンポーネント 一つ一つに触れながら、説明を行った。これから高速撮像分光器の概念設計に対して、公差解析を実施し、 要求された性能の実現性の評価を行う必要がある。しかしせいめい望遠鏡が完成し、ナスミス焦点装置切 替機の設計が進むに連れて、高速撮像分光器の概念設計案で要求されたスペースをすべて使えない可能性 が浮上した。そこで本研究では、この章で触れた概念設計の他に、より装置外寸がコンパクトとなり、最新 のナスミス焦点装置切替機の小型装置フランジに適した光学系の設計を新たに行い、複数の光学系案を構 築していく。

最新のナスミス焦点装置切替機搭載の課題は、以下の点が挙げられる。

i) ピックオフミラー・ピックオフミラーステージ

図 2.14 の赤枠の部分がピックオフミラー(第4鏡)とピックオフミラーステージの搭載部分である。 この位置を第4鏡が移動するため、この近隣には観測装置の搭載を避ける必要がある。また鏡で光路 を折り曲げる際、角度によっては赤枠部分の近くを通るため、その位置にどの主要コンポーネントが 来るか注意する必要がある。(光学素子切替機構であるアクチュエータはある程度の幅を要求するた め)

ii) 望遠鏡焦点位置

望遠鏡焦点位置は小型装置フランジの中心位置から 350mm の位置(緑色の円)にあり、図 2.14 の ように望遠鏡焦点の一部はピックオフミラー・ピックオフミラーステージに存在する。そのため望遠 鏡焦点位置にスリットの設置する条件があることから、観測装置の入射窓(光線進入部)の位置に制限 が生まれている。これは光学系配置案の構築に対し、重い制約である。



図 2.14: 小型装置フランジの搭載制限図

小型装置フランジは内径が 450mm、外径が 1500mm である。 観測装置はこの外径よりはみ出してはならない。

# 第3章 光学設計と公差解析

この章では、まずナスミス焦点装置切替機の小型装置フランジ搭載に向けた光学設計方法とその光学性 能の評価方法を述べる。その後、光学性能の実現性の評価方法である公差解析の手法について説明し、最後 に光学設計とその評価結果をまとめていく。

## 3.1 光学性能評価方法と設計手法

3.1.1 スポットダイアグラム

スポットダイアグラムとは光学系の結像性能の表記法の一つである。この表記法は、点光源から放たれ る無数の光線1本1本がレンズ等の光学素子を経た後の像面上の到達位置を視覚的に表したものである。そ のため、光線の結像の様子やその密度(強度分布)を直感的、視覚的に把握することができる。またスポッ トダイアグラムでは、RMSスポット半径と呼ばれる主光線(入射瞳の中心を通る光線。本研究の光学系で は望遠鏡の主鏡の中心を通る光線がこれにあたる)とそれぞれの光線との距離の値を二乗平均平方根した値 を用いて結像性能を表す。これは RMS スポット半径の大きさが光線の密度を表し、スポットの密度(光線 の密度)が光の強度に比例することから、結像性能の良さを表す指標となる。

他の点では、光学設計を行う際に光学系を構成するそれぞれのレンズによる収差(理想結像からズレ)を それぞれのレンズで打ち消し合い、優れた結像性能を生み出しているが、スポットダイアグラムの様子か らザイデル 5 収差(§3.1.3 参照)や色収差の中で大きく寄与しているものをある程度判断することも可能で ある。



図 3.1: スポットダイアグラム (色の違いは波長の違いを表す)

#### 3.1.2 光線追跡ソフト ZEMAX

光学設計と公差解析には光線追跡ソフト ZEMAX を使用した。ZEMAX は、ある視野からの光を多数の 光線として扱い、その1本1本の光線が ZEMAX 上で配置したレンズや回折格子等の光学素子を通る経路 を計算するソフトである。これにより、多数の光線追跡を行うことで、その光学系の性能を解析しながら光 学設計を行うことができる。ZEMAX ではスポットダイアグラムとして結像や分光の様子を視覚的、また は数値として性能を評価することができる。また理想結像からのズレである収差の影響を示すグラフの作 成やレンズがもつザイデル5 収差の収差係数の値の計算も可能であり、光学設計に必要なツールが備わって いる。

本節では、ZEMAX での光学素子のパラメータや配置に関する表示について記述する。



#### 図 3.2: ZEMAX での光学系 3D 表示

レンズデータエディタ
 「一タエディタ
 「一タエディタ
 」
 「「」
 「」
 「」
 「」
 「」
 「」
 「」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 」
 』
 」
 』
 』
 」
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』
 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

 』

福泉	[編末(ℓ) /)//(3) 表示(V) ////(H)														
Ē	Ξ:タイプ	コメント	曲率半径		厚み		ガラス		半径		コーニック		バラ0(未使用)	バラ1(未使用)	
物	標準		無限		無限				0.000		0.000				
1	標準		無限		100.000		6		26.000		0.000				
絞	標準		326.276	۷	19.999	۷	BK7		25.000		0.000				
3	標準		-1170.947	۷	50.000	۷			25.510		0.000				
4	標準		47.224	۷	8.741	۷	BK7		22.714		0.000				
5	<b>標</b> 準	30	-142.004	۷	0.395	۷			22.340		0.000	5			
6	標準		-123.236	۷	20.060	۷	F2		22.274		0.000				
7	標準		110.246	۷	100.034	۷			18.335		0.000				
像	標準	81. 	無限		С. (1 <mark>7</mark>		0		0.029		0.000				

図 3.3: レンズデータエディタ

i) レンズデータエディタ

図 3.3 は、ZEMAX で光学系の構成を編集するツールである。ここで光学素子を配置し、そのパラ メーターの変更することで光学設計を行っていく。注意が必要な点は、パラメーターは、番号で指定 された面のパラメータとして取り扱われ、レンズとしてのパラメータは2つの面の一部のパラメータ で構成されている点である。この点については、レンズに作成に使用される以下のパラメータについ て触れながら、詳しく説明する。

またパラメータの符号は光線の進行方向を正としている。

- 曲率半径

「曲率半径 」はその面の曲率半径の値である。レンズは2つの曲率を持った面で構成されて

いるため、図 3.2 の G1 のレンズの「曲率半径」のパラメータは、図 3.3 の面番号 2(絞) と面番号 3 の曲率半径で指定されている。

- 厚み

厚みと記述されたパラメータは、指定面から次の面までの距離を表す。つまり図 3.2 の G1 の レンズの厚さは、図 3.3 の面番号 2(絞)の「厚み」パラメータで指定されている。また面番号 3 の「厚み」は G1 と G2 の二つのレンズ距離を表す。

- ガラス

「ガラス」では、指定面から次の面までの硝材を示している。硝材の指定は光学素子の屈折 率や透過率のパラメータを決めている。図 3.2 の G1 のレンズの硝材は、図 3.3 の面番号 2(絞) の「ガラス」で指定されている。

- 半径

「 半径 」では、その面と光軸の交点を中心とした半径の値を用いて、面の大きさを表す。

- コーニック

コーニックとはその面の形状を取り扱うためのパラメータである。コーニックの値によって、 レンズの曲面を球面、楕円、放物面、双曲面で表すことができる。本研究の観測装置光学系に は、加工が安価で組み上げ・調節がし易いよう、すべて球面レンズを採用する方針とし、コー ニック定数を使用していない

ii) 視野·瞳座標定義

本研究で使用した ZEMAX 設定では、視野座標と瞳座標を規格化して表示してある。3つの光源が 無限遠に存在し、その視野角が (x,y)=(0 °, 0 °)、(3 °, 0 °)、(0 °, 5 °) であるとき、円形の視野で 正規化を行った場合、それぞれの視野は、(Hx,Hy)=(0, 0)、(0.6, 0)、(0, 1) のように最大視野角の値 5 °を1 として規格化されている。

また瞳座標も同様に表され、レンズデータエディタで指定された瞳面が円形で半径が 9mm の場合、 図 3.4 のように瞳座標は正規化されている。この規格化された視野座標と瞳座標は、光源から放たれ る無数の光線の制御に使用され、次の節で触れる最適化にも使用される。



図 3.4: 瞳面 (x,y) と正規化された瞳座標 (Px,Py) の関係

#### 3.1.3 光学系の最適化

結像光学系の設計で最も重要になるのは、収差と呼ばれる理想結像からのズレをどの程度修正できるか、 である。理想結像とは点光源から放射された光線がレンズによって一点に結像されることであり、これは 屈折の公式であるスネルの法則の sin 関数を一次近似して計算する近軸理論から導かれる。しかし、実際の 点光源は一次近似の sin 関数の値と実際の sin 関数の値の差から点ではなく広がりを持って結像される。そ の広がりが収差であり、sin 関数を 3 次近似した結像で現れる収差をザイデル 5 収差という。ザイデル 5 収 差は球面収差、コマ収差、非点収差、像面歪曲、歪曲収差といった種類の収差に分類でき、それぞれの収 差は各々のレンズのパラメータによって当然異なっている。光学設計では、各々のレンズで発生する収差 を打ち消し合うことで、結像性能を高めているが、収差はレンズパラメータによって複雑に変化するため、 要求性能を満たす最適なパラメータを導出することは容易ではない。そのため昨今の光学設計では、計算 機を用いて繰り返し演算を行い、要求性能に対し最適なパラメーターを探し出す方法を取る。

本研究でも要求性能を満たす光学系を構築するために、ZEMAX を用いてレンズパラメータの最適化を 行った。ZEMAX での光学系の最適化は以下の通りに行われる。

最適化の流れ

- i) 任意のレンズパラメータを変数として定義する
   3.1.2 項で上げた面のパラメータを固定値ではなく「任意」として変数指定する。レンズ素材も
   変更することができるが、屈折率はガラス素材特有の値で連続的なパラメーターではないためガラス素材に関しては、代替テンプレートで指定されたガラス素材から選ばれ、完全な任意とはで
   きない。
- ii) 評価関数と呼ばれる設計目標をパラメータで設定する

評価関数と呼ばれる設計目標を設定する。設計目標には結像性能、光学系の全長や光線の角度 など複数の指定が可能である。この設計目標値の達成度を表したものを評価関数といい、次式で 定義される。

$$MF^2 = \frac{\Sigma W_i (V_i - T_i)^2}{\Sigma W_i}$$
[31]

MF で表された評価関数は数値で表された設計目標値  $V_i$  とその計算によって得られた値  $T_i$ 、及 びその設計目標で設定された重み  $W_i$  によって表される。

図 3.5 には、ZEMAX で設定された設計目標例を示す。EFFL は焦点距離の設計目標で、TTHI は指定した二つの面範囲に含まれる面の厚さを指定する設計目標である。また TRAC とはある 視野座標からある瞳座標位置を通った光線と全体の光線の重心との距離を指定する設計目標であ り、多数の光線を取り扱うことで、結像性能の設計目標として機能している。 🧐 メリット ファンクション エディタ: 1.756683E-002

編集(E) フール(I)	表示(V) ハル	/(H)									
オペランド #	タイプ		波長	Hx	Hy	P×	Py	目標値	重み	現在値	寄与率
1: EFFL	EFFL		2					500.000	0.000	148.582	0.000
2: TTHI	TTHI	2	6					100.000	0.000	99.195	0.000
3: TTHI	TTHI	7	7					100.000	0.000	100.034	0.000
4: OPLT	OPLT	2						100.000	10.000	100.000	0.000
5: OPLT	OPLT	3						100.000	10.000	100.034	0.120
6: MNSD	MNSD	2	7					15.000	10.000	15.000	0.000
7: DMFS	DMFS										
8: BLNK	BLNK	デフォルト評価関	数: RMS スポッ	ト半径 セントロイ	下 GQ 6 リング (	3 アーム 全体の重	み = 10000.0000				
9: BLNK	BLNK	観野 1 のオペラ:	ンド。								
10: TRAC	TRAC		1	0.000	0.000	0.184	0.000	0.000	897.053	2.809E-004	7.281E-004
11: TRAC	TRAC		1	0.000	0.000	0.412	0.000	0.000	1888.943	6.528E-003	0.828

図 3.5: ZEMAX での評価関数の設定表

- iii) ZEMAX の演算によって評価関数の値が改善されたパラメータに変更される ZEMAX によって評価関数が極小となるように繰り返し計算が行われ、光学系の最適化が行われる。最適化で、評価関数の値に改善が見られるパラメータに変更される。これにより光学系は設計目標に近づいた光学系に改良される。
- iv) iii) の結果から評価関数を見直し、再度 i)-iii) の作業を行う 指定回数または無限回数の演算によって改善された光学系の性能から、評価関数で指定した設計 目標やその重み付けの数値を見直し、再度最適化を行う。

#### 3.2 公差解析

公差解析とは、製造時に発生する指定寸法値や指定性能値のズレをどの程度許容できるか、また光学系 を組み上げる時にどの程度の精度で光学素子を配置する必要があるのか算出することである。その算出し た公差の値からレンズ品質や光学系保持機構の寸法精度や許容される偏芯度、傾きなどがわかり、製造のコ ストや製造の実現性といった面から光学系の実現性の評価が行うことができる。この節では、その公差解析 で取り扱う光学系の公差パラメータと ZEMAX による公差解析手法について述べていく。

#### 3.2.1 光学系の公差パラメータ

公差解析ではレンズパラメータの公差の他に、レンズホルダー等の光学系保持機構の公差や光学系の組 み立ての際に発生するレンズの配置ズレといった機械工作精度や人的な調整不足に対する許容値の算出も 行う。公差解析では、以下の公差パラメータを考慮し、性能の実現性を評価する。

- レンズの公差パラメータ
  - i) 曲率半径

曲率半径は、レンズのパワーや光線の光路長を決めるパラメータである。レンズ品質(製造コ スト)と公差の値の目安としては、標準グレードで±0.5%、精密グレードで±0.1%、精密グレー ドで±0.1%、高品質グレードで±0.01%とする[29]。 ii) レンズの厚み

このパラメータはレンズの厚さの公差を表し、曲率半径と同様に光路長の変化に影響する。レンズ品質 (製造価格) と公差の値の目安としては、標準グレードで± 0.20mm、精密グレードで ± 0.05mm、高品質グレードで± 0.01mm とする [29]。

iii) 偏芯

偏芯とはレンズの機械軸 (レンズの幾何学的な中心軸) とレンズの光学軸 (レンズの両面の曲 率中心を結んだ軸)のズレのことである。ズレの大きさは主に角度で表され、その大きさの程度 がレンズの品質となる。レンズ品質 (製造価格) と公差の値の目安としては、標準グレードで 3'、 精密グレードで 1'、高品質グレードで 0.5' とする [30]。

また iX) のティルトはレンズの機械軸と光軸との傾きで光学系を組み立て時に発生する公差で あるが、偏芯は、本来一致させる必要があるレンズの光学軸と機械軸の間に発生する製造誤差で ある。



図 3.6: レンズの偏芯

iv) イレギュラリティ

イレギュラリティとはレンズ面の真球度を表す公差パラメータである。レンズの曲率はすべて の面で等しいとは限らない。場所によってある程度、曲率にばらつきが生まれるため、そのバラ つきの程度を考慮する必要がある。

v) 屈折率

屈折率にも公差が考慮される。屈折率の公差パラメータによる光学性能の変化は、レンズの パワーや収差補正に大きく影響する。屈折率でのレンズ品質は他のパラメータと異なり、屈折 率のばらつきで表された光学ガラスの均一性で区別され、数字が大きいほど高品質である5段 階の等級で表される。等級と屈折率の最大のバラつきの関係は、0等級で± $50 \times 10^{-6}$ 、1等級 で± $20 \times 10^{-6}$ 、2等級で± $5 \times 10^{-6}$ 、3等級で± $2 \times 10^{-6}$ 、4等級で± $1 \times 10^{-6}$ 、5等級で± $0.5 \times 10^{-6}$ とする。[29]。

vi) アッベ数

アッベ数とは、ガラス材料の波長による屈折率の違い(分散)を定量的に示した値である。アッ

べ数 *ν*<sub>D</sub> は以下の式で表され、値が大きいほど分散が小さいことを示す。

 $\nu_D = \frac{n_{d(\lambda = 588nm)} - 1}{n_{f(\lambda = 486nm)} - n_{C(\lambda = 656nm)}}$ 

- レンズホルダーの公差と組み立て許容値
  - vii) レンズ間の距離 (レンズホルダーの寸法公差) レンズ間の距離を正確に再現するには、レンズを精密に配置するレンズホルダーの寸法公差を 導出する必要がある。またレンズホルダー形状によって公差の値が代わるため、解析の際は注意 が必要である。
  - viii) ディセンタ

この公差パラメータは、レンズホルダーにレンズを取り付ける際に発生する光学系の光軸とレンズの機械軸との平行移動ズレを考慮したものである (図 3.7)。この公差パラメータはレンズ単位で与えられる。



図 3.7: ディセンタしたレンズ図

ix) ティルト

この公差パラメータは、ディセンタと同様にレンズを取り付ける際に発生するもので、光軸と レンズの機械軸との傾きズレを考慮したものである (図 3.8)。この公差パラメータもレンズ単位 で与えられる。



図 3.8: ティルトしたレンズ図

#### 3.2.2 ZEMAX による公差解析

ZEMAX の公差解析では、3.2.1 項で上げた公差パラメータに最大値と最小値を設定して、解析を行う。 この解析によって得られる情報としては、公差パラメータごとの指定性能変化量(感度解析)、設定性能値 に対応する公差パラメータ値(逆感度解析)、公差パラメータの最大値と最小値の範囲で行われるモンテカ ルロシミュレーションによる、性能値ごとの光学系製造確率がある。この項では、ZEMAX での公差パラ メータと調節面の設定法、感度解析について述べる。

#### 公差パラメータの設定

ZEMAX での公差解析では、オペランドと呼ばれるパラメータで公差値を制御する。本研究の公差解 析は 3.2.1 項で挙げた公差パラメータを以下のオペランドで設定した。図 3.9 は図 3.2 の G1 レンズに 対して設定されたオペランドの例である。



図 3.9: 図 3.2 の G1 の公差オペランド表

#### i) **TRAD**

曲率半径は TRAD というオペランドで制御する。このオペランドは、レンズデータのエディ タで設定された面の曲率半径の公差を mm で与える。一枚のレンズには曲率面が 2 面あるため、 2 つの TRAD オペランドが使用される。

ii) **TTHI** 

このオペランドは面の厚みパラメータの公差を mm で与える。TTHI では公差を与える面 (オ ペランド3行目) と調節面 (オペランド4行目) を設定する。調節面とは公差によって変化した寸 法の量を補う面であり、例えば、公差設定面が 5mm 増加した場合、調節面での厚みは-5mm 少 なくなる。このように調節面を設定することは、レンズの厚さの公差によって発生する、光学素 子間の距離の変化を考慮することができる。しかし調節面の設定はレンズホルダーの形状によっ て変わり、その設定によって公差による光学性能の影響が変化する (図 3.10、図 3.11) ため、そ れを考慮したオペランドを設定する必要がある。それゆえ、TTHI の公差値から適切なレンズホ ルダー形状がわかる。



図 3.10: ホルダー形状と補正面の関係 (補正面 1) 図 3.11: ホルダー形状と補正面の関係 (補正面 3)

図 3.10 と図 3.11 のように、レンズの厚さが公差によって増えた際、レンズホルダーの形状により 公差オペランド TTHI で設定する補正面が変わることがわかる。当然、補正面の違いによって 光学性能の変化量は変わるため、レンズホルダーの形状の選択も公差解析では重要になる。

iii) TEDX TEDY

このオペランドはレンズのディセンタを設定するオペランドで、単位は mm である。このオ ペランドの 3 行目と 4 行目で面番号を指定し、その範囲にある面でディセンタを与える。

iv) TEDX TEDY

このオペランドはレンズのティルトを設定するオペランドで、単位は度である。面の指定方法は ディセンタと同様である。

v) TIRX (TIRY)

このオペランドはレンズのエッジ厚み差の値を示し、公差パラメータの偏心を別量で表している。TIRX は光軸を Z 軸とした場合の XY 平面 (レンズデータエディタでの面) での X 軸のエッ ジの厚さの差を表す。光学系が回転対称であれば、TIRX のみで偏心による公差を考慮できてい る。またレンズホルダーのあてで固定されるレンズ面の曲率中心とレンズホルダーの光学軸は構 成上一致するため、TIRX のオペランドはレンズの片面のみを指定する。TTHI と同様にオペラ ンドの設定には注意が必要である。

vi) **TIRR** 

このオペランドは面のイレギュラリティを表す。この値対して、1:1の割合で面ダレとアス と呼ばれる面のイレギュラリティを表す指標を設定する。

vii) TIND

レンズの屈折率の公差パラメータを設定するオペランドである。

viii) TABB

アッベ数の公差パラメータを示すオペランドである。

調節面の設定

公差解析では、コンペンセータと呼ばれる調節面の設定ができる。コンペンセータは、公差によって 設定光学性能が悪化した光学系において任意で指定した調節面の厚みを変更することで、設定性能値 の最適化を行う。これにより、公差による光学性能の悪化をある程度まで補償することができ、算出 公差の値にゆとりを持たせることができる。

• 感度解析

感度解析は一つのオペランドの最大値 (または最小値) を公差の値として光学系に取り入れた場合の指 定した性能変化値を算出する。光学系をなすすべてのパラメータに対し、一つのパラメータにだけ公 差を取り入れるので、その性能変化量の大きさはそのパラメータにおける性能に対する敏感さを表す ことになる。ZEMAX では、すべての公差パラメータで感度解析を行い、性能変化量を算出し、光学 系における敏感さを性能変化量のワースト順位 (ワースト公差) として示す (図 3.12)。調節面を指定 している場合は、コンペンセータによる最適化を行った設定性能値を感度解析結果として表示する。



図 3.12: ZEMAX での感度解析結果例 (図 3.9 の結果)

#### 3.2.3 逆感度解析とモンテカルロシミュレーションによる光学系の製造確率

• 逆感度解析

逆感度解析とは許容性能値を設定し、その性能値に対応する公差の値を算出する解析である。この 方法によって、許容性能値を超えた公差に関してその値の厳格化を行うことができる。また、逆感度 解析による公差の厳格化の様子から感度解析と同様に光学系におけるパラメータの敏感さを比べる指 標にもなる。逆感度解析は以下の手順で行われる。

i) 許容性能の設定

逆感度解析の最初の手順として、許容性能値を設定する。設定性能として RMS スポット半径 (結像性能)、RMS 波面収差や評価関数等あり、ここで設定された値を超えた公差パラメータは、 許容性能を満たすように公差値が厳格化される。

ii) 一つのパラメータに最大 (または最小) 値の公差を含んだ場合の性能値の算出

感度解析と同様に、光学系をなすパラメータの一つに公差オペランドで設定された最大値(または最小値)の公差を取り入れ、設定性能値の算出を行う。調節面を設定してる場合、設定性能値の算出の前にコンペンセータによる調節面の最適化を行い、最適化時の性能値が算出される。

iii) 公差の厳格化

その性能値がi)で設定した許容性能値以下であるなら、iv)の手順に移る。もし、許容性能値 を超えていた場合、その公差の最大(または最小)値を設定性能の許容値に収まるまで厳格化す る。

iv) 一つの公差パラメータに対する逆感度解析の終了

公差パラメータのその最大値と最小値それぞれで許容性能値以下になれば、そのパラメータの 逆感度解析は終了する。その後は次のパラメータの逆感度解析が行われ、最後のパラメータが終 了後は、v)に移る。

v) ワースト公差の算出

逆感度解析で厳格化された公差値でのワースト公差が算出され、感度解析と同様にそれぞれ の公差パラメータの最大値と最小値での性能値表が作成される。

このように逆感度解析が行われるが、この解析では、設定した許容性能値を満たすのは光学系をなす 面のパラメータの一つに公差を取り入れた場合のみであるため、すべてのパラメータに公差を取り入 れた場合に許容性能値を満たすとは限らない。すべてのパラメータに公差を取り入れた場合の光学性 能の評価は、次のモンテカルロシミュレーションによる光学系の製造確率によって行われる。 • モンテカルロシミュレーションによる光学系の製造確率

この解析では、モンテカルロシミュレーションを使用して各面パラメータにその公差範囲の乱数を 与え、その組み合わせでの総合的な光学系性能を算出する。そしてそれを複数回行うことで、光学性 能値ごとの製造確率を導出することができる。つまりこの解析ではシミュレーション上で、公差を持っ た多数の光学系(観測装置光学系)を製造し、その製造された一つ一つの光学系の性能値とその光学系 の個数から製造確率を算出している。本研究ではこの製造確率値を高速撮像分光器の光学性能実現性 の評価法の一つとして使用する。この方法を用いた公差解析は以下の手順で行われる。

i) 光学系パラメータに公差を与える

モンテカルロシミュレーションによって、公差オペランドで設定された最大値から最小値の公 差範囲の乱数を面パラメータが与えられる。この作業はすべての公差オペランドで行われる。ま た乱数の与え方として、最小値と最大値までの範囲を±2σとした正規分布、公差範囲のすべて の値の確率を平均化した平均分布、最小値と最大値を最も確率を高くした放物線分布がある。

ii) 公差を含む光学系の性能評価

公差を含んだ光学系の性能を、設定された性能値で算出する。設定される性能値は感度解析と 同様である。

- iii) 指定回数のシミュレーションi)、ii) の作業を指定回数数行う。ここで指定回数分の光学系が製造される。
- iv) シミュレーション結果から製造確率の導出 指定回数分のシミュレーション結果から、性能値ごとの製造確率が算出される。また指定回数 中でのベストとワースト性能値も表示される (図 3.13)。

190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200	$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	
作成された	-光線追跡可能なモンテカルロ ファイル数: 200	I
公称値 ベスト マ→ス→スト 平均 編差:	0.04083929 0.03973409 長式行 88 0.07118597 武行 141 0.04515726 0.00640748	
90% > 80% > 50% > 20% > 10% >	0.05589800 0.05033342 0.04235428 0.04011301 0.03990883	
実行完了		

図 3.13: シミュレーションによる性能値ごとの製造確率 (図 3.9 の結果)

v) 解析の終了、または公差値の変更

iv)の結果から公差の厳格化、もしくはゆとりのある公差の値に変更し、i)-iv)を繰り返す。

# 3.3 光学系配置案AとB

本研究では最新のナスミス焦点装置切替機への搭載に適した高速撮像分光器の光学系のデザインとして、 平面鏡で光路を2回折り返すことで、初期案の光学系のパラメータを変えることなく、出来る限り小スペー ス化を施したA案と、光学系のパラメータを変更することで平面鏡の折り返しを1回だけに留め、A案よ り省スペースかつ収差による結像悪化を抑えたB案を作成した。ここでは、A案とB案それぞれの光学デ ザインの特徴ととその光学性能について説明していく。

#### ● 光学系配置案 A

図 3.14 は、図 2.14 の右側の 90 °領域に光学系配置案 A を配置した図である。光学系配置案 A(図 3.15) では初期の光学系案を平面鏡で 2 回の折り返すことで、小型装置取付フランジに搭載可能になってい る。ここでは設置案 A を図 3.14 のように構成した理由とその光学性能について説明していく。



図 3.14: 光学系配置案 A の小型装置取付フランジ搭載時の外観図 (CAD)

福泽	乗(E) ソルフ(S 〒・24ノー	) 表示(V) ヘルフ(H)	曲本地对	E V.		12 97	h
<u>н</u>	リ・ダイフ 挿浴	1774	田平平1室 毎限1	(字の) 毎月1	<u> </u>		1990
4の	1点:半	DDIM(這時後結本統)	-1 000E+004	-9700.000	MIRROR	1990 194	-1 035
φχ.φ 9	1点竿 / / / / / / / / / / / / / / / / / / /		-2224 779	2000.000	MIRROR	500.115	-1.000
- 2		これが、主人を設め組み取り		2900.000	minion	256 210	0.000
	- 漂洋	TEL EDUNG(調査結合占面)	無限	97 000		200.210	0.000
5	座檀ゴレーク		ATTEN A	0.000	-	0.000	0.000
6	一種進	平面反射镜 1	₩BR	0.000	MIRROR	49.222	0.000
7	座槽ブレーク	1 page a second	2000140	-86.077	-	0.000	
8*	標準	G1レンズの表面	-930.226 V	-10.000	S-BSL7	39.331	0.000
9*	標準	G1レンズの裏面	205.563 V	-173.957		39,560	0.000
10*	標準	G2レンズの表面	-214.806 V	-10.000	S-BSL7	33.226	0.000
11*	標準	G2レンズの裏面	-618.232 V	-105.000		32.597	0.000
12.	座標ブレーク			0.000	-	0.000	
13	標準	平面反射鏡2	無限	0.000	MIRROR	36.358	0.000
14.	座標ブレーク			15.000	-	0.000	
15	標準		無限	0.000		22.277	0.000
16,	座標ブレーク			0.000	-	0.000	
17*	標準		無限	0.000		25.000 U	0.000
18,	座標ブレーク			0.000	-	0.000	
<b>新グ</b>	レーティング		無限	0.000		25.000 U	0.000
20,	座標ブレーク			0.000	-	0.000	
21*	イレギュラ		無限	0.000		25.000 U	0.000
22,	座標ブレーク			0.000	-	0.000	
23	標準	PUPIL	無限	20.000		22.277	0.000
24	標準	GBレンズ	80.536 V	14.000	S-FPL53	23.885	0.000
25	標準	G4レンス	-85.016 V	5.000	S-BAL3	23.640	0.000
26	標準	は5レンスの表面	53.33U V	14.000	S-FPL53	23.566	0.000
27	標準	は5レンズの裏面	-196.845 V	117.740	0.007.0	23.874	0.000
28	信件	したレンスの表面	49.927 4	12.000	S-BSL7	24.8/1	0.000
29	「「「「「「」」「「」」「「」」「「」」「「」」「「」」「」」「「」」「」」「	LIDレンズの表面 (201)、ゴの志石	-121.741 V	0.052	C LAL 2	24.038	0.000
30	信华	G21 と デの東西	39.289 V	10.000	S-LAL7	20.175	0.000
٥1 وو	信华	し/レンスの表面 (01.) マの志石	-120 466 9	4.000	C DGL D	17.244	0.000
90	1点/毕 /西洋	uoレンスの表面 (01.).ズの東面	-120.466 V	4.000	1160-0	17.245	0.000
	1県半 挿准	いったへくへの表面	17.000 V ##KR	18 000		12.000	0.000
(使	· 「県平 		無限			9.866	0.000

図 3.15: 光学系設置案 A のレンズデータエディタ

- 光学レイアウト

レンズデータ エディタ: コンフィグ 1 / 3

i) 望遠鏡焦点位置

高速撮像分光器では、まず望遠鏡焦点位置にマスクを設置し、アクチュエータで切り替えを行 うため、焦点位置が §2.3 で説明した設置不可領域から最も離れる位置から光線を取り入れるよ うにした。それによりアクチュエータが配置可能なスペースを確保でき、焦点マスクの交換が行 える。

ii) 第一鏡の位置と反射角

第一鏡はコリメータレンズ前に置き、光線を90°方向に反射させるように配置した。コリメー タレンズの全長は、図2.5のように望遠鏡焦点位置から約497mmであるため、コリメータレン ズより後で鏡によって光路を折り返す場合では、鏡が小型装置フランジからはみ出してしまう。 またコリメータレンズのG1とG2の間に反射鏡を置くことは、鏡の設置誤差による光学性能の 影響から光学系の構成上望ましくない。そのため、A案ではコリメータレンズ前に鏡を配置し た。

次に反射角であるが、その角度は光学系の寸法と機構の作業スペースの理由から定めた。当 初は、初期の光学系案を1回の折り返しのみで小型装置取付フランジに搭載できる光学系レイ アウトを構築することを目指した。しかし、図3.16のように、一回の折り返しでは、波長分散 素子やフィルターの切替機構の充分なワークスペースを確保できず、またワークスペースを確保 する反射角では光学系が装置フランジからはみ出してしまう。そのため、光学系配置A案では 2回の折り返しを採用し、また折り返しによる光学素子の配置できないスペースを最小限にする ため、その角度を 90°とした。



図 3.16: 初期案を1回折り返しで搭載した場合の外観図 (CAD)

iii) 第二面鏡と反射型波長分散素子

ii)の理由により、2回の折り返しで初期の光学系を小型装置取付フランジに搭載する。またii) と同様な理由により、反射鏡の位置はコリメータレンズとカメラレンズの間とする。しかし、2 回の折り返しを採用することで透過型波長分散素子の搭載スペースの確保が難しくなっている。 この問題に対して、反射型の波長分散素子を使用することで解決を目指す。つまり、第2鏡の位 置に、鏡、R=20、R=150の反射型波長分散素子を切り替え可能な状態として設置することで、 撮像と分光の二つの観測モードを行う仕様とした。

- 光学性能
- i) 結像性能

光学配置案 A 案の結像性能は表 2.2.6 で触れたように、RMS スポット半径値 (図 3.17) が視野 中心で 8.6µm と要求の 22µm を十分満たしている。光学系の結像性能が要求より大幅に良い点 は公差の許容値にゆとりを生むため、性能の実現性を高める。また、図 3.18 をみると、観測視 野全域で RMS スポット半径が 10µm 以下を達成しており、視野角の増加に伴うスポット値の変 化も緩やかである。波長ごとの結像様子では、視野中心で 0.46µm から 0.56µm の波長の結像が  $10 \mu m$ を超えており、RMS スポット半径が $0.5 \mu m$ あたりで最大を迎えることがわかる (図 3.19)。



図 3.17: 光学系配置案 A のスポットダイアグラム

左から視野中心、良像範囲端、観測視野端のスポットダイアグラムである。



図 3.18: 視野位置と RMS スポット半径値



図 3.19: 波長と RMS スポット半径値

● 光学系配置案 B

光学系配置案 B は初期の光学系案のパラメータを変更することで、図 3.20 のように 1 回のみの平面 鏡の折り返しによって、図 2.14 の右下の狭い領域に搭載可能である。これにより小型装置取付フラン ジのスペースを無駄なく使え、他装置搭載スペースを広く確保できている。ここでは光学系配置案 B の光学設計方針と達成性能、光学レイアウトについて説明していく。



図 3.20: 光学系配置案 B の小型装置取付フランジ搭載時の外観図 (CAD)

🥝 レンズラ	データ エディタ	י: דרעב	グ1/3
絙焦(F)	いしづい	表示(\/)	ヘルプ(H)

7	5. 21 / -2	+	1111 1211 121 121	ET %.		1124		14/07	
μ πeter	4:2/12	1774	田平平1宝	厚め	7.PB	477		平1宝 (m/2日)	10200
初	標準		無限	*	КРК.			無限	0.000
¥2*	標準	PRIM(望遠鏡王鏡)	-1.000E+004	-3700.	000	MIR	KUR	1890.184	-1.035
2	標準	2ND(望遠鏡副鏡)	-3334.779	3000.	000	MIR	ROR	501.115	-2.731
- 3	標準		無限	2900.	000			257.210	0.000
4	標準	TEL. FOCUS(望遠鏡焦点面)	無限	189.	549 \	/		24.357	0.000
5*	標準	G1レンズの表面	502.341 V	20.	000	S-B	3L7	40.959	0.000
6*	標準	G1レンズの裏面	-477.373 V	55.	881 \	/		41.463	0.000
7*	標準	G2レンズの表面	208.052 V	8.	600	S-B	3L7	41.599	0.000
8*	標準	G2レンズの裏面	無限	55.	015 \	/		41.298	0.000
9,	蛮標ブレーク			0.	000		-	0.000	
10	標準	平面反射鏡1	無限	0.	000	MIR	ROR	40.773	0.000
11)	密標ブレーク			0.	000		-	0.000	
12	標準		無限	-60.	000			35.842	0.000
13	標準		無限	-89.	999			29.892	0.000
14,	密標ブレーク			0.	000		-	0.000	
15*	標準		無限	-0.	000			25.000 U	0.000
16,	座標ブレーク			0.	000		-	0.000	
斤グ:	ノーティング		無限	0.	000			25.000 U	0.000
18,	密標ブレーク			-0.	000		-	0.000	
19*	イレギュラ		無限	0.	000			25.000 U	0.000
20,	蛮標ブレーク			0.	000		-	0.000	
21	標準	PUPIL	無限	-20.	000			20.968	0.000
22	標準	GSレンズ	-86.691 V	-10.	000	S-FP	.53 S	22.995	0.000
23	標準	G4レンズ	56.849 V	-20.	000	N-	(F9 S	22.961	0.000
24	標準	G5レンズの表面	-39.525 V	-20.	000	S-FP	.53 S	28.399	0.000
25	標準	G5レンズの裏面	189.763 V	-76.	308 \	/		24.112	0.000
26	標準	GGレンズの表面	-96.673 V	-20.	000	N-S	3K2 S	26.881	0.000
27	標準	GBレンズの裏面	87.076 V	-5.	741 \	/		25.755	0.000
28	標準	G7レンズの表面	-42.131 V	-12.	000	N-LA	34 S	20.471	0.000
29	標準	G7レンズの裏面	-137.124 V	-3.	285 \	/		16.899	0.000
30	標準	G8レンズの表面	76.726 V	-2.	000	S-B	SL7	16.240	0.000
31	標準	G8レンズの裏面	-21.303 V	-5.	459 \	/		13.661	0.000
32	標準		無限	-18.	000			13.473	0.000
像	標準	検出器面	無限		-			9.878	0.000

図 3.21: 光学系配置案 B のレンズデータエディタ

- 光学設計方針
- i) レンズ

B 案の光学設計では使用するレンズの枚数を初期案と同じ、またはそれ以下となるようにし、 硝材以外の面パラメータに関してすべて変数指定することで同程度の光学性能を目指した。また 初期案では安価で、可視光の透過率が高い硝材である BK7(S-BSL7)を多く使用しており、コス ト面の考慮から最適化による硝材の変更は、BK7よりも金額的に5倍を超えない硝材に留めて 行うよう試みた。

ii) 光学系寸法と反射鏡枚数

光学設計案 A ではコリメータレンズの全長が小型装置取付フランジに適していないことから、平 面鏡による折り返しを 2 回必要とした。そこで B 案ではコリメータレンズの全長を短くし、一 枚の折り返しで装置フランジに搭載可能な光学系となるよう評価関数にコリメータレンズの全長 を制限する設計目標を設定する。

iii) 瞳位置と光学素子切替機構

B 案では、平面鏡の配置と透過型波長分散素子とその切替機構の作業スペースを確保する必要があることからコリメータレンズからカメラレンズまでの距離を装置フランジに収まる範囲で長くする必要がある。そのためにはコリメータレンズのよって作られる瞳位置を原案よりも離れた場所に配置しなければならない。望遠鏡の焦点距離はコリメータレンズの焦点距離に比べ、非常に大きいことから、瞳の位置はおおよそコリメータレンズの焦点距離によって決まる。これにより、瞳の位置をコリメータレンズから離れた位置に置くには、コリメータレンズの焦点距離

を初期案よりも長くすれば良い。そのため評価関数の設計目標として、コリメータレンズを1回の折り返しで小型装置取付フランジ搭載可能な寸法で、かつ初期の光学系案より長い焦点距離に する。

- 光学レイアウト
- i) 望遠鏡焦点位置

光学系設置案 B は A 案と同様に、望遠鏡焦点位置にマスクを設置し、アクチュエータで切り 替えを行うため、焦点位置が §2.3 で説明した設置不可領域から最も離れる位置から光線を取り 入れるようにした。

ii) コリメータレンズと反射角

コリメータレンズの焦点距離を長くし、かつ小型装置フランジ搭載可能な寸法にするよう評価 関数で設定したことで、コリメータレンズのG1とG2は平面鏡の近くに配置しされている。こ れにより第一鏡の折り返し角によっては、反射光がコリメータレンズで物理的に遮られる(けら れる)ため、反射角はコリメータレンズがレンズホルダーに取り付けられた場合でも、光線がけ られない70度とした。また焦点距離を伸ばすことで、平面鏡からカメラレンズの間に透過型分 散素子とフィルターを十分配置できるスペースも構築できている。

iii) 透過型波長分散素子とフィルター

表 2.2.6 で要求された波長分散素子をカメラレンズの近くの瞳位置に配置し、フィルターを瞳 位置付近に配置する (図 3.20)。瞳位置では、平行光の光束径が最も小さく、入射瞳座標が同じ光 線が集まるため、この位置に透過型波長分散素子を設置することはコストの抑制や分光精度を向 上させることができる。そして光束径が比較的小さいその付近にフィルターを配置することで、 こちらもコストの抑制に努めた。

また瞳位置では、アクチュエータによって光学素子の切り替えが可能なワークスペースも存在 することが、図 3.20 からわかる。

- 光学性能
- i) 結像性能

光学設置案 B 案の結像性能は、A 案と比べ、視野中心と良像視野端の RMS スポット半径値 (図 3.22)で若干ではあるが改善しており、視野中心で 8.0µm を達成している。A 案と同様に光 学系の結像性能が要求より大幅に良いため、公差の許容値にゆとりを与えている。また、観測視 野全域で、長波長側の 0.8µm の結像性能が短波長に比べ、2 倍程度数値が大きいことが、図 3.23 からわかる。同様に図 3.24 でも、長波長側になるにつれ、結像性能が低くなることから、製造 誤差による波長分解能への影響の程度が波長によって異なることが懸念される。



図 3.22: 光学系設置案 B のスポットダイアグラム

左から視野中心、良像範囲端、観測視野端のスポットダイアグラムである。



図 3.23: 視野位置と RMS スポット半径値



図 3.24: 波長と RMS スポット半径値

#### ii) 分光の様子



図 3.25: プリズム (R=20) による分光観測時のスポットダイアグラム。プリズムによる分光の特徴である低 波長側の波長分解能が高くなる様子がスポットダイアグラムからわかる。



図 3.26: グリズム (R=120) による分光観測時のスポットダイアグラム。グリズムにより分光では、波長分 解能に波長依存性がないことがスポットダイアグラムからわかる。

# 3.4 公差解析:配置案A

ここでは光学設置案Aの公差解析結果を示す。公差解析によって要求性能に対する公差値を導出することは、結像性能に対して敏感な公差パラメータとその値を知ることができる。そしてこの値からレンズを取り付けやすく、かつ敏感な光学パラメータを理想に近い状態で配置することのできる適切なレンズホルダーの形状の設計へフィードバックを行うことが可能である。本研究の公差解析では、まず取り付けやすいレンズホルダー形状で公差パラメータを設定し、その値をもとに公差による結像性能の影響を最も小さくできる適切なレンズホルダー形状と要求された性能を満たす公差値の算出する。

• コリメータレンズホルダー形状と結像性能に対し繊細な公差パラメータ

コリメータレンズは G1 と G2 の 2 枚であるため、図 3.27 のように、それぞれレンズホルダー開口 部から G1 と G2 を取り付け可能なレンズホルダーの形状で解析を行うこととした。



図 3.27: コリメータレンズホルダー案

図 3.27 のレンズホルダー形状に搭載した場合の公差オペランドを用いてコリメータレンズの敏感な 公差パラメータを算出する。算出法として、§3.2.3 で挙げた逆感度解析と感度解析を用いた。図 3.28 は、一つの公差による RMS スポット半径 (結像性能) が 10µm より大きくならないように、厳格化が 行われた公差オペランド表である。



図 3.28: 逆感度解析結果 (結像性能 10µm)

まずレンズホルダー形状の選定に関する指標となる公差オペランドの TTHI と TIRX について議論 する。それぞれで設定した初期公差は±0.2mm で、ホルダー形状によって変化する公差オペランド は6と8番目の TTHI と18、19番目の TIRX である。唯一逆感度解析によって数値が変化している 公差オペランドは6番の TTHI であるが、この値は§3.2で触れたレンズ品質の標準グレード程度で あるため、結像性能に対して高感度なパラメータではない。



図 3.29: コリメータレンズ感度解析結果

次に感度解析結果から結像性能に対して敏感なコリメータレンズの取り付け公差パラメータを調べていく。図 3.29 はレンズ取り付け精度を示すディセンタとティルトの結像性能に対する敏感さを示す 感度解析結果である。図から公差オペランド最小値と最大値の性能変化の様子からコリメータレンズ に要求される取り付け精度が低いことがわかる。これらの結果から配置案 A のコリメータレンズホル ダー形状のとして取り付けが容易な図 3.27 を採用する。

カメラレンズホルダーの選定

カメラレンズホルダーの形状も同様に行う。カメラレンズは結像性能を決めるコンポーネントであ

るため、当然であるがコリメータレンズよりも公差の値は厳格化される。そのためレンズホルダー形 状から公差による結像性能への影響を減らし、また公差のグレードを抑制する必要がある。



図 3.30: カメラレンズホルダー案

取り付けやすさから図 3.30 で示したホルダー形状で公差オペランドを設定した (図 3.31)。そして コリメータレンズと同様に結像性能における感度解析を行った。図 3.32 は感度解析によって算出され たカメラレンズの公差パラメータのうち、レンズホルダー形状で決められる厚み、偏芯、レンズ取り 付け精度を示すティルトとディセンタでの結像性能に対するワースト順位である。

オペランド 非	タイプ	-	-	-	公称値	波長	-	コメント
1 : TWAY	TWAY	-	-	-	-	0.633		デフォルト テスト波長。
2: TTHI	TTHI	5	4	-	10.000	-0.500	0.500	デフォルト厚み公差:G1の厚さ公差
3: TTHI	TTHI	6	4	-	178.957	-0.500	0.500	レンズホルダーG1の当ての位置の設計誤差
4: TTHI	TTHI	7	8	-	10.000	-0.500	0.500	G2の厚さ公差
5: TTHI	TTHI	8	6	-	120.000	-0.500	0.500	レンズホルダーG2の当ての位置の設計誤差
6: TTHI	TTHI	20	16	-	117.740	0.000	0.000	G8-5の当ての位置の設計誤差
7: TTHI	TTHI	17	16	-	14.000	-0.500	0.500	G3の厚み公差
8: TTHI	TTHI	18	16	-	5.000	-0.500	0.500	G4の厚み公差
9: TTHI	TTHI	19	16	-	14.000	-0.500	0.500	G5の厚み公差
10: TTHI	TTHI	20	26	-	117.740	-0.500	0.500	G6の当ての位置の設計誤差
11 : TTHI	TTHI	21	26	-	12.000	-0.500	0.500	G6の厚み公差
12: TTHI	TTHI	22	26	-	0.052	-0.500	0.500	G6-7の当て(リング)の位置の設計誤差
13: TTHI	TTHI	28	26	-	10.000	-0.500	0.500	G7の厚み公差
14: TTHI	TTHI	24	26	-	2.721	-0.500	0.500	G7-8の当て(リング)の位置の設計誤差
15: TTHI	TTHI	25	26	-	4.000	-0.500	0.500	G8の厚み公差
16: TEDX	TEDX	5	6	-	0.000	-0.500	0.500	G1のXディセンタ
17: TEDY	TEDY	5	6	-	0.000	-0.500	0.500	G1のYディセンタ
18: TETX	TETX	5	6	-	0.000	-0.500	0.500	G1のXティルト
19: TETY	TETY	5	6	-	0.000	-0.500	0.500	G1のYティルト
20: TEDX	TEDX	7	8	-	0.000	-0.500	0.500	G2のXディセンタ
21 : TEDY	TEDY	7	8	-	0.000	-0.500	0.500	G2のYディセンタ
22: TETX	TETX	7	8	-	0.000	-0.500	0.500	G2のXティルト
23: TETY	TETY	7	8	-	0.000	-0.500	0.500	G2のYティルト
24 : TEDX	TEDX	17	20	-	0.000	-0.500	0.500	G8-5のXディセンタ
25: TEDY	TEDY	17	20	-	0.000	-0.500	0.500	G8-5のYディセンタ
26: TETX	TETX	17	20	-	0.000	-0.500	0.500	G8-5のXティルト
27: TETY	TETY	17	20	-	0.000	-0.500	0.500	G8-5のYディセンタ
28: TEDX	TEDX	21	22	-	0.000	-0.500	0.500	GBのXディセンタ
29: TEDY	TEDY	21	22	-	0.000	-0.500	0.500	GBのYディセンタ
30: TETX	TETX	21	22	-	0.000	-0.500	0.500	G8のXテイルト
31 : TETY	TETY	21	22	-	0.000	-0.500	0.500	GBのYティルト
32: TEDX	TEDX	28	24	-	0.000	-0.500	0.500	G7のXディセンタ
33: TEDY	TEDY	28	24	-	0.000	-0.500	0.500	G7のYディセンタ
34 : TETX	TETX	28	24	-	0.000	-0.500	0.500	G7のXティルト
35: TETY	TETY	28	24	-	0.000	-0.500	0.500	G7のYティルト
36 : TEDX	TEDX	25	26	-	0.000	-0.500	0.500	G8のXディセンタ
37: TEDY	TEDY	25	26	-	0.000	-0.500	0.500	G8のYディセンタ
38: TETX	TETX	25	26	-	0.000	-0.500	0.500	G8のXティルト
39: TETY	TETY	25	26	-	0.000	-0.500	0.500	G8のYティルト
40: TIRX	TIRX	5	-	-	0.000	-0.500	0.500	G1の偏芯
41 : TIRX	TIRX	8	-	-	0.000	-0.500	0.500	G2の偏芯
42: TIRX	TIRX	17	-	-	0.000	-0.500	0.500	G8の偏芯
43: TIRX	TIRX	18	-	-	0.000	-0.500	0.500	G4の偏芯
44: TIRX	TIRX	19	-	-	0.000	-0.500	0.500	G5の偏芯
45: TIRX	TIRX	22	-	-	0.000	-0.500	0.500	G6の偏芯
46: TIRX	TIRX	24	-	-	0.000	-0.500	0.500	67の偏芯
47: TIRX	TIRX	26	-	-	0.000	-0.500	0.500	G8の偏芯

図 3.31: 配置案 A のカメラレンズ公差オペランド表



図 3.32: 配置案 A の感度解析結果 (ワースト公差)

図 3.32 より、G6-G8 のレンズ間の距離を示す公差パラメータが結像性能に対し、感度が高いことが わかる。また取り付け精度に関しても、G6-G8 に関するパラメータが多く、また G3-5 と G6 間の距 離についても性能に敏感であることから、G6-8 に対して取り付け時に調節が容易に行えるような機 構を取り入れる必要がある。そこで、図 3.33 のように、案 2 のカメラレンズホルダーに対してセミレ ンズホルダーという形で小型の G6-8 専用のレンズホルダーを制作し、そのセミレンズホルダーごと カメラレンズホルダーに取り付ける機構にする。これにより、G6-G8 の取り付けを精度良く行うこと ができ、また G3-5 とのレンズ間距離の調節を行うことができる。これにより、カメラレンズの形状 としてセミレンズホルダー機構を取り入れた案 2 のレンズホルダーを採用する。



図 3.33: セミレンズホルダーの例

#### 要求性能を満たす公差値の導出

レンズホルダーの形状が決まったので、これから要求性能を満たす光学系の公差の値を導出する。



図 3.34: コリメータレンズホルダー案

図 3.35: カメラレンズホルダー案

公差値の導出には、高速撮像分光器光学系の要求性能である結像性能 1"以下を目標として行った。 天球上の角度の 1"はせいめい望遠鏡の焦点距離と高速撮像分光器光学系の縮小率により、44µm に 相当するため、公差解析の目標は、良像範囲 ( $\phi$ 5')で RMS スポット半径が 22µm 以下となることを 条件としたときのモンテカルロシミュレーションによる製造確率 99.9%が達成されることとなる。図 3.36 - 図 3.39 は目標を満たした公差オペランド表で、図 3.40 はモンテカルロシミュレーションによ る製造確率 (正規分布)の算出結果である。(調節面の指定は行っていない)

オペランド 非	タイプ	面	-	-	公称値	最小	最大	コメント
2 : TWAY	TWAY	-	-	-	-	0.688	-	テスト波長(イレギュラリティ等公差解析で使用)
8: TRAD	TRAD	5	-	-	930.226	-5.000	5.000	G1の表面曲率半径公差
4: TRAD	TRAD	6	-	-	-205.563	-0.200	0.200	G1の裏面曲率半径公差
5: TRAD	TRAD	7	-	-	214.806	-0.100	0.100	G2の表面曲率半径公差
6: TRAD	TRAD	8	-	-	618.232	-1.000	1.000	G2の裏面曲率半径公差
7: TRAD	TRAD	17	-	-	80.536	-0.080	0.030	G8の表面曲率半径公差
8: TRAD	TRAD	18	-	-	-85.016	-0.100	0.100	G3-4の曲率半径公差
9: TRAD	TRAD	19	-	-	53.330	-0.040	0.040	G4-5の曲率半径公差
10: TRAD	TRAD	20	-	-	-196.845	-0.200	0.200	G5の裏面曲率半径公差
11: TRAD	TRAD	21	-	-	45.527	-1.000E-002	1.000E-002	GBの表面曲率半径公差
12: TRAD	TRAD	22	-	-	-121.741	-0.100	0.100	GBの裏面曲率半径公差
13: TRAD	TRAD	23	-	-	35.295	-0.020	0.020	G7の表面曲率半径公差
14: TRAD	TRAD	24	-	-	101.143	-0.100	0.100	G7の裏面曲率半径公差
15: TRAD	TRAD	25	-	-	-120.466	-0.400	0.400	G8の表面曲率半径公差
16: TRAD	TRAD	26	-	-	17.508	-0.020	0.020	G8の裏面曲率半径公差

図 3.36: 曲率半径公差オペランド表

オペランド #	タイプ	面	調整	-	公称値	最小	最大	コメント
17: TTHI	TTHI	5	4	-	10.000	-0.200	0.200	デフォルト厚み公差:G1の厚さ公差
18: TTHI	TTHI	6	4	-	173.957	-0.100	0.100	レンズホルダーG1の当ての位置の設計誤差
19: TTHI	TTHI	7	8	-	10.000	-0.200	0.200	G2の厚さ公差
20: TTHI	TTHI	8	6	-	120.000	-0.200	0.200	レンズホルダーG2の当ての位置の設計誤差
21 : TTHI	TTHI	20	16	-	117.740	-0.100	0.100	G8-5の当ての位置の設計誤差
22: TTHI	TTHI	17	16	-	14.000	-0.100	0.100	G8の厚み公差
23: TTHI	TTHI	18	16	-	5.000	-0.200	0.200	G4の厚み公差
24: TTHI	TTHI	19	16	-	14.000	-0.100	0.100	(5の厚み公差)
25: TTHI	TTHI	20	26	-	117.740	-0.030	0.030	G6の当ての位置の設計誤差
26: TTHI	TTHI	21	26	-	12.000	-0.050	0.050	GBの厚み公差
27: TTHI	TTHI	22	26	-	0.052	-0.080	0.080	G8-7の当て〈リング〉の位置の設計誤差
28: TTHI	TTHI	23	26	-	10.000	-1.000E-002	1.000E-002	G7の厚み公差
29: TTHI	TTHI	24	26	-	2.721	-1.000E-002	1.000E-002	G7-8の当て(リング)の位置の設計誤差
30: TTHI	TTHI	25	26	-	4.000	-1.000E-002	1.000E-002	G8の厚み公差

図 3.37: 厚み公差オペランド表

オペランド #	タイプ	面 1	面 2	-	公称値	最小	最大	コメント
31 : TEDX	TEDX	5	6	-	0.000	-0.100	0.100	G1のXディセンタ
32: TEDY	TEDY	5	6	-	0.000	-0.100	0.100	G1のYディセンタ
33: TETX	TETX	5	6	-	0.000	-0.200	0.200	G1のXティルト
34 : TETY	TETY	5	6	-	0.000	-0.200	0.200	G1のYティルト
35: TEDX	TEDX	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のXディセンタ
36: TEDY	TEDY	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のYディセンタ
87: TETX	TETX	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のXティルト
38: TETY	TETY	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のYティルト
39: TEDX	TEDX	17	20	-	0.000	-0.100	0.100	G8-5のXディセンタ
40: TEDY	TEDY	17	20	-	0.000	-0.100	0.100	G8-5のYディセンタ
41 : TETX	TETX	17	20	-	0.000	-0.100	0.100	G8-5のXティルト
42: TETY	TETY	17	20	-	0.000	-0.100	0.100	G8-5のYディセンタ
43: TEDX	TEDX	21	22	-	0.000	-0.050	0.050	GBのXディセンタ
44: TEDY	TEDY	21	22	-	0.000	-0.050	0.050	G6のYディセンタ
45: TETX	TETX	21	22	-	0.000	-0.100	0.100	G6のXティルト
46: TETY	TETY	21	22	-	0.000	-0.100	0.100	GBのYティルト
47: TEDX	TEDX	28	24	-	0.000	-0.050	0.050	G7のXディセンタ
48: TEDY	TEDY	23	24	-	0.000	-0.050	0.050	G7のYディセンタ
49: TETX	TETX	23	24	-	0.000	-0.050	0.050	G7のXティルト
50: TETY	TETY	23	24	-	0.000	-0.050	0.050	G7のYティルト
51 : TEDX	TEDX	25	26	-	0.000	-0.100	0.100	G8のXディセンタ
52: TEDY	TEDY	25	26	-	0.000	-0.100	0.100	G8のYディセンタ
53: TETX	TETX	25	26	-	0.000	-0.050	0.050	G8のXティルト
54: TETY	TETY	25	26	-	0.000	-0.050	0.050	G8のYティルト

図 3.38: レンズのディセンタ・ティルトオペランド表



図 3.39: 偏芯・イレギュラリティ・屈折率・アッベ数公差オペランド表

公称値 ベスト ワー均 平 準 編 差	: 0.00901170 : 0.00817993 試行 : 0.02967639 試行 : 0.01197385 : 0.00288695	3936 555
98% > 90% > 80% > 50% > 20% > 10% > 2% >	0.02014578 0.01597966 0.01392392 0.01111350 0.00965995 0.00920110 0.00870194	

図 3.40: 調節後の結像性能と製造確率 (正規分布)

図 3.40 は、公差オペランドの最大値から最小値の範囲で公差が正規分布しているときの良像範囲 ( $\phi$ 5') における、ある結像性能値の製造確率を示している。98%確率で約 20 $\mu$ m の RMS スポット半径 の性能を持つ光学系を製造できることが示され、要求性能を満たしていることがわかった。

• 公差値による性能の実現性評価

要求性能を満たした図 3.36 - 図 3.39 の公差値をもとに実現性の評価を行う。評価方法として、§3.2 でふれた公差グレードとその公差値をもとに、図 3.36 - 図 3.39 の公差のグレードを確認し、また実 現が容易ではない最高グレードを超えた公差値になっていないか判断する。

オペランド	面番号		公称值	標準	精密	高品質	公差値	判定		
TRAD	5		930.226	4.651	0.930	0.093	5	標準		-
	6		-205.563	1.028	0.206	0.021	0.2		-	高品質
	7		214.806	1.074	0.215	0.021	0.1			高品質
	8		618.232	3.091	0.618	0.062	1	-	精密	-
	17		80.536	0.403	0.081	0.008	0.03	-	-	高品質
	18		-85.016	0.425	0.085	0.009	0.1	-	精密	-
	19		53.33	0.267	0.053	0.005	0.04	-	-	高品質
	20		-196.845	0.984	0.197	0.020	0.2	-	精密	-
	21		45.527	0.228	0.046	0.005	0.01	-	-	高品質
	22		-121.741	0.609	0.122	0.012	0.1		-	高品質
	23		35.295	0.176	0.035	0.004	0.02		-	高品質
	24		101.143	0.506	0.101	0.010	0.1	-	-	高品質
	25		-120.466	0.602	0.120	0.012	0.4	-	精密	-
	26		17.503	0.088	0.018	0.002	0.02	-	精密	-
				±	±	±				
ттні	5	4	10	0.2	0.05	0.01	0.2	標準	-	-
	6	4	173.957	0.2	0.05	0.01	0.1	-	精密	-
	7	8	10	0.2	0.05	0.01	0.2	標準	-	-
	8	6	120	0.2	0.05	0.01	0.2	標準	-	-
	20	16	20	0.2	0.05	0.01	0.1	-	精密	-
	17	16	14	0.2	0.05	0.01	0.1	-	精密	-
	18	16	5	0.2	0.05	0.01	0.2	標準	-	-
	19	16	14	0.2	0.05	0.01	0.1	-	精密	-
	20	26	117.74	0.2	0.05	0.01	0.03		-	高品質
	21	26	12	0.2	0.05	0.01	0.05		精密	-
	22	26	0.052	0.2	0.05	0.01	0.03	-	-	高品質
	23	26	10	0.2	0.05	0.01	0.01	-	-	高品質
	24	26	2.721	0.2	0.05	0.01	0.01	-	-	高品質
	25	26	4	0.2	0.05	0.01	0.01	-	-	高品質

図 3.41: 曲率半径公差・厚み公差のグレード表

図 3.41 は、採用したレンズホルダー案での曲率半径公差と厚み公差のグレード表である。標準、精密、高品質の順番でレンズの品質が向上し、それに伴いレンズ製造価格も高くなる。図 3.41 を見ると、高品質グレードを大幅に超えた公差の値がないことから、要求性能を満たすこの光学系を製造で

きることがわかる。しかし、レンズ品質で最も高い高品質グレードが 13 箇所も存在するため、レン ズ製造費用面に関して、実現が容易とは考え難い。またモンテカルロシミュレーションでは公差が正 規分布しているという仮定をしたが、実際正規分布は最も楽観的な分布であるため、均一分布による 製造確率も算出した (図 3.42)。図 3.42 からわかる通り、均一分布では 99%の確率で要求性能を持つ 光学系を製造できていない。そこで、コンペンセータを導入し、検出器面を調節面として最適化を行 うことで公差にゆとりを持たせることにする。

公称値 ベスト ワースト 平均 標準偏差	: 0.00901170 : 0.00832776 試行 ! : 0.03805427 試行 8; : 0.01371023 : 0.00386190	918 831
98% > 90% > 80% > 50% > 20% > 10% > 2% >	0.02461977 0.01906033 0.01632081 0.01268100 0.01058693 0.00989762 0.00911585	

図 3.42: 結像性能と製造確率 (均一分布)

• 調節面を導入した公差解析

検出器面を調節面として導入した均一分布のモンテカルロシミュレーションによる解析で要求結像 性能を満たす光学系を99%の確率で製造でき、ゆとりある公差値の算出を行った。調節面の調整範囲 は±2mmとして行い、その範囲で検出器面を移動させることで光学性能の最適化を行う。図3.43 は、 最適化後のある光学性能値における製造確率と調節面の移動量を示している。図3.44 は、図3.43 の 製造確率を持つ光学系の曲率半径公差と厚み公差に関するレンズ品質をまとめたものである。

作成された光線追跡可能なモンテカルロ ファイル数: 1000

公称値 : ベスト : ワースト : 平均 : 標準偏差:	0.00817792 0.00904486 試行 0.02009920 試行 0.01235815 0.00176387	607 570
コンペンセージ 厚み、面 27: 公称値: 最小 王 天 王 均 : 標準偏差:	×統計: 17.973562 16.654305 18.899615 17.788114 0.376413	

18%	>	0.01660076
30%	>	0.01471261
30%	>	0.01365941
50%	>	0.01218266
20%	>	0.01082676
0%	>	0.01031696
2%	>	0.00948333

図 3.43: 調節後の結像性能と製造確率 (均一分布)

オペランド	面番号			公称値	一般	精密	曲精密		公差値	判定		
TRAD	5			930.226	4.651	0.930	0.093	3	5	一般		-
	6			-205.563	1.028	0.206	0.021		1	一般		-
	7			214.806	1.074	0.215	0.021		1	一般		-
	8			618.232	3.091	0.618	0.062	2	3	一般		-
	17			80.536	0.403	0.081	0.008	3	0.4	一般		-
	18			-85.016	0.425	0.085	0.009	)	0.4	一般		-
	19			53.33	0.267	0.053	0.005	5	0.3	一般		-
	20			-196.845	0.984	0.197	0.020	)	1	一般		-
	21			45.527	0.228	0.046	0.005	5	0.2	一般		-
	22			-121.741	0.609	0.122	0.012	2	0.6	一般		-
	23			35.295	0.176	0.035	0.004	1	0.2	一般		-
	24			101.143	0.506	0.101	0.010	)	0.5	一般		-
	25			-120.466	0.602	0.120	0.012	2	0.6	一般		-
	26			17.503	0.088	0.018	0.002	2	0.09	一般		-
					±	±	±					
TTHI	5	4	L .	10	0.2	0.05	0.01		0.2	一般	-	-
	6	4	1	173.957	0.2	0.05	0.01		0.2	一般		-
	7	8	3	10	0.2	0.05	0.01		0.2	一般	-	-
	8	6	5	120	0.2	0.05	0.01		0.2	一般	-	-
	16	20	)	20	0.2	0.05	0.01		0.2	一般		-
	17	20	)	14	0.2	0.05	0.01		0.2	一般	-	-
	18	20	)	5	0.2	0.05	0.01		0.2	一般	-	-
	19	20	)	14	0.2	0.05	0.01		0.2	一般	-	-
	20	26	5	117.74	0.2	0.05	0.01		0.2	一般	-	-
	21	26	5	12	0.2	0.05	0.01		0.2	一般	-	-
	22	26	5	0.052	0.2	0.05	0.01		0.1	-	精密	-
	23	26	5	10	0.2	0.05	0.01		0.1	-	精密	-
	24	26	5	2.721	0.2	0.05	0.01		0.1	-	精密	-
	25	26	5	4	0.2	0.05	0.01		0.2	一般	-	-

図 3.44: ゆとりをもたせた光学設置案 A の曲率半径公差・厚み公差のグレード表

図 3.43 より、コンペンセータを導入することで、1000 回のシミュレーション試行で製造した A 案 光学系の結像性能がすべて要求性能を満たしている。また図 3.44 の公差の算出値見ると、曲率半径公 差では一般グレード (標準グレード)の公差のみであり、そして厚み公差のグレードでは精密グレード が 3 箇所だけである。この結果から調節面を導入することで、要求されるレンズ品質を大幅に低下さ せることができた。しかし、要求性能を満たす公差オペランドのうち、図 3.47 から G6-G8 のレンズ に関して高い設置精度を要求していることがわかる。そのため高速撮像分光器の光学系として配置案 A を採用する際は G6-8 のセミレンズホルダーで高い精度の調節を行う必要がある。

オペランド #	タイプ	面	-	-	公称値	最小	最大	コメント
1: COMP	COMP	27	0	-	18.000	-2.000	2.000	調節面の設定
2 : TWAV	TWAV	-	-	-	-	0.633	-	テスト波長(イレギュラリティ等公差解析で使用)
3: TRAD	TRAD	5	-	-	930.226	-5.000	5.000	G1の表面曲率半径公差
4: TRAD	TRAD	6	-	-	-205.563	-1.000	1.000	印の裏面曲率半径公差
5: TRAD	TRAD	7	-	-	214.806	-1.000	1.000	G2の表面曲率半径公差
6: TRAD	TRAD	8	-	-	618.282	-8.000	8.000	G2の裏面曲率半径公差
7: TRAD	TRAD	17	-	-	80.536	-0.400	0.400	G8の表面曲率半径公差
8: TRAD	TRAD	18	-	-	-85.016	-0.400	0.400	G8-4の曲率半径公差
9: TRAD	TRAD	19	-	-	53.330	-0.300	0.300	G4-5の曲率半径公差
10: TRAD	TRAD	20	-	-	-196.845	-1.000	1.000	G5の裏面曲率半径公差
11 : TRAD	TRAD	21	-	-	45.527	-0.200	0.200	GBの表面曲率半径公差
12: TRAD	TRAD	22	-	-	-121.741	-0.600	0.600	GBの裏面曲率半径公差
13: TRAD	TRAD	23	-	-	35.295	-0.200	0.200	G7の表面曲率半径公差
14: TRAD	TRAD	24	-	-	101.143	-0.500	0.500	G7の裏面曲率半径公差
15: TRAD	TRAD	25	-	-	-120.466	-0.600	0.600	G8の表面曲率半径公差
16: TRAD	TRAD	26	-	-	17.503	-0.090	0.090	G8の裏面曲率半径公差

図 3.45: 曲率半径公差オペランド表

オペランド 非	タイプ	面	調整	-	公称値	最小	最大	コメント
17: TTHI	TTHI	5	4	-	10.000	-0.200	0.200	デフォルト厚み公差:G1の厚さ公差
18: TTHI	TTHI	6	4	-	178.957	-0.200	0.200	レンズホルダーG1の当ての位置のIB計誤差
19: TTHI	TTHI	7	8	-	10.000	-0.200	0.200	G2の厚さ公差
20: TTHI	TTHI	8	6	-	120.000	-0.200	0.200	レンズホルダーG2の当ての位置の設計誤差
21 : TTHI	TTHI	20	16	-	117.740	-0.200	0.200	G8-5の当ての位置の設計誤差
22: TTHI	TTHI	17	16	-	14.000	-0.200	0.200	G8の厚み公差
28: TTHI	TTHI	18	16	-	5.000	-0.200	0.200	G4の厚み公差
24 : TTHI	TTHI	19	16	-	14.000	-0.200	0.200	G5の厚み公差
25: TTHI	TTHI	20	26	-	117.740	-0.200	0.200	G6の当ての位置の設計誤差
26: TTHI	TTHI	21	26	-	12.000	-0.200	0.200	GBの厚み公差
27: TTHI	TTHI	22	26	-	0.052	-0.100	0.100	G8-7の当て(リング)の位置の設計誤差
28: TTHI	TTHI	28	26	-	10.000	-0.100	0.100	G7の厚み公差
29: TTHI	TTHI	24	26	-	2.721	-0.100	0.100	G7-8の当て(リング)の位置の設計誤差
30: TTHI	TTHI	25	26	-	4.000	-0.200	0.200	G8の厚み公差

図 3.46: 図 3.43 の厚み公差オペランド表

オペランド 非	タイプ	面 1	面 2	-	公称値	最小	最大	コメント
31 : TEDX	TEDX	5	6	-	0.000	-0.200	0.200	G1のXディセンタ
32: TEDY	TEDY	5	6	-	0.000	-0.200	0.200	G1のYディセンタ
33: TETX	TETX	5	6	-	0.000	-0.200	0.200	G1のXティルト
84 : TETY	TETY	5	6	-	0.000	-0.200	0.200	G1のYティルト
35: TEDX	TEDX	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のXディセンタ
36: TEDY	TEDY	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のYディセンタ
37: TETX	TETX	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のXティルト
38: TETY	TETY	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のYティルト
39: TEDX	TEDX	17	20	-	0.000	-0.200	0.200	G3-5のXディセンタ
40: TEDY	TEDY	17	20	-	0.000	-0.200	0.200	G3-5のYディセンタ
41: TETX	TETX	17	20	-	0.000	-0.200	0.200	G3-5のXティルト
42: TETY	TETY	17	20	-	0.000	-0.200	0.200	G3-5のYディセンタ
43: TEDX	TEDX	21	22	-	0.000	-0.050	0.050	GBのXディセンタ
44: TEDY	TEDY	21	22	-	0.000	-0.050	0.050	GBのYディセンタ
45: TETX	TETX	21	22	-	0.000	-0.100	0.100	G6のXティルト
46: TETY	TETY	21	22	-	0.000	-0.100	0.100	G6のYティルト
47: TEDX	TEDX	23	24	-	0.000	-0.050	0.050	G7のXディセンタ
48: TEDY	TEDY	28	24	-	0.000	-0.050	0.050	G7のYディセンタ
49: TETX	TETX	23	24	-	0.000	-0.050	0.050	G7のXティルト
50: TETY	TETY	23	24	-	0.000	-0.050	0.050	G7のYティルト
51: TEDX	TEDX	25	26	-	0.000	-0.050	0.050	G8のXディセンタ
52: TEDY	TEDY	25	26	-	0.000	-0.050	0.050	G8のYディセンタ
58: TETX	TETX	25	26	-	0.000	-0.050	0.050	G8のXティルト
54: TETY	TETY	25	26	-	0.000	-0.050	0.050	G8のYティルト

図 3.47: 図 3.43 のレンズのディセンタ・ティルトオペランド表



図 3.48: 図 3.43 の偏芯・イレギュラリティ・屈折率・アッベ数公差オペランド表

公差解析で算出される結像性能は、設定した視野範囲の視野中心、視野端と視野端を1と規格化し

た Hy=0.7 の位置であるため、すべての視野を考慮していない。そこで良像視野範囲すべての領域で 結像性能を満たしていることを確かめるため、公差による視野ごと RMS スポット半径の変化の様子 を調べた。図 3.49 は、調節面を導入した均一分布によるシミュレーションで製造された光学系の RMS スポット半径と視野の関係で、1 本の線それぞれがシミュレーションによって製造された光学系の結 像性能を表している。



図 3.49: 公差による良像範囲での RMS スポット半径の変化 (均一分布の 100 回のシミュレーションによる)

図 3.49 から、すべての良像視野範囲で要求結像性能を満たしていることがわかる。また RMS スポット半径の変化の様子から、視野中心から離れるにつれて公差によって結像性能の低下する傾向が見られた。これは設計値での光学系で行われていた収差の補正が、公差によってうまく行えなくなった結果である。収差は視野中心から離れる (視野角が大きくなる) につれて大きなるので、この傾向は一般的なものである。

次に公差による分光観測への影響を確認するため、波長ごとの RMS スポット半径の変化を調べた。 図 3.49 で、中心から離れるにつれて公差によって結像性能が悪化していくことが示されたので、視野 中心と良像範囲端 (2.5') の様子から影響を調べることにした。図 3.62 と図 3.63 は、それぞれ視野中 心と良像範囲端 (2.5') での観測波長 (0.4 – 0.9µm) ごとの公差による結像性能の変化を表した図であ る。シミュレーションの条件は図 3.49 と同様に行い、同じ光学系の性能を表す。

59





図 3.50: 視野中心での公差による波長ごとの RMS スポット半径の変化

図 3.51: 良像範囲端 2.5' での公差による波長ご との RMS スポット半径の変化

視野中心では、すべての観測波長範囲で要求を満たしていることを図 3.50 から確認できた。また、 結像性能変化の様子から短い波長が公差の影響を受けやすいことが図 3.51 からわかる。分光観測にお いて結像性能は波長分解能を決める一つのパラメータであるため、この光学系の特性として視野中心 から離れるにつれて、短波長側の波長分解能が下がる傾向があると判断できるが、その波長の RMS スポット半径が要求性能程度であれば、分光観測へ影響は軽微である。

### 3.5 公差解析:配置案B

ここでは、配置案 A の光学系のパラメータを変更することで、1回の平面鏡よる折り返しで、よりコン パクトな光学系レイアウトになった光学案 B の公差解析について述べていく。レンズの構成が A 案と同じ であるため、同様の解析手法で行っていく。

コリメータレンズの選定

配置案 B でも同様に G1 と G2 のコリメータレンズに対して、図 3.27 のレンズホルダー形状として 公差オペランドを設定して解析を行う。

図 3.52 は逆感度解析 (結像性能 8µm) によって、厳格化された光学案 B でのレンズホルダー案の 公差オペランド表である。オペランド番号 6 の G1 厚み公差の厳格化の様子から、結像性能に対する G1 の厚みの感度はあまり高くないことがわかる。また、図 3.53 から、コリメータレンズの公差オペ ランドには結像性能に対し、高感度なものが存在しないことから、配置案 B も A 案と同様に図 3.27 を採用する。



図 3.52: 逆感度解析結果 (結像性能 8µm)



図 3.53: 感度解析結果

カメラレンズの選定

カメラレンズの選定でも、A 案と同様に図 3.30 のレンズホルダーの形状に対応した公差オペランド を設定し、感度解析によるワースト公差と結像性能悪化の様子から形状の選定を行う。



図 3.54: 配置案 B のワースト公差表

図 3.54 から、A 案のように G6-8 のレンズの厚みや取り付け精度を示す公差オペランドがワースト 公差上位に来ており、その変化量の大きさから結像性能において敏感なパラメータであることがわか る。そのため配置案 B もサブレンズホルダーを使用した、図 3.30 のレンズホルダーを採用する。

要求性能を満たす公差値の算出
 配置案 A の公差解析で調節面を使用しなかった場合、多くで高品質グレードのレンズ品質を必要と

した。高品質グレードは、厚みや曲率半径に多く、それらは焦点距離を決定するパラメータであるゆ えに、要求性能が結像性能で、調節面によって補償できない場合には当然公差の値は厳格化される。 そのため、設置案 B の公差解析では、初めから調節面を使用して要求結像性能を満たす公差の値を算 出した。図 3.57 - 図 3.60 は B 案の公差オペランドの表である。

作成された光線追跡可能なモンテカルロ ファイル数: 1000

公称値 ベスト ワースト 平均 標準偏差	: 0.00756588 : 0.00835845 試行 : 0.02292087 試行 : 0.01351382 : 0.00238104	178 660
コ厚公最 アンみ いた で 値 に 大 り 準 に 一 代 の で い た り の 称 小 大 切 の の お い の の が い た い の の お い た い の の の 引 の で の の の の の の の の の の の の の の	<u>マ</u> ータ統計: 27: 18.026715 : 16.914375 : 19.507337 : 18.037983 : 0.372901	
98% > 90% > 80% > 50% > 20% > 10% > 2% >	0.01893159 0.01683764 0.01543170 0.01327472 0.01150163 0.01066885 0.00926857	

図 3.55: 調節面を導入した光学系配置案 B の結像性能と製造確率

光学系配置案 B の曲率半径公差・厚み公差のグレードを図 3.56 に示す。配置案 B の公差は、光学 設計の段階で収差補正の指標となる収差係数の値が案 A と比べ、大きいことから公差グレードが高く なることが懸念されたが、厚みの公差パラメーターで精密グレードを一つのみ採用するだけであり、 レンズ品質を大幅に抑えることができている。また、A 案と比べ G6 の偏芯で精密グレードになって いるが、レンズ取り付け精度では、B 案のほうが高い精度を必要とするレンズの数が少ない。B 案は、 全体的な公差パラメーターがほぼ標準グレードとなっており、公差による価格の増加を抑えることが できている光学系である。

オペラント	* 面番号		公称值	標準	精密	極精密	公差値		判定		
TRAD	5		503.341	1 2.517	0.503	0.050		2.5	標準		
	6		477.373	3 2.387	0.477	0.048		2.4	標準		
	7		208.052	1.040	0.208	0.021		1	標準		
TERN	8		8	3 20.000	12.000	6.000		20	標準		
TRAD	17		86.961	0.435	0.087	0.009		0.4	標準		
	18		56.849	0.284	0.057	0.006		0.3	標準		
	19		39.525	0.198	0.040	0.004		0.2	標準		
	20	)	189.763	0.949	0.190	0.019		1	標準		
	21		96.673	3 0.483	0.097	0.010		0.5	標準		
	22		87.076	0.435	0.087	0.009		0.5	標準		
	23		42.131	0.211	0.042	0.004		0.2	標準		
	24		137.124	0.686	0.137	0.014		0.7	標準		
	25		76.726	5 0.384	0.077	0.008		0.4	標準		
	26		21.303	3 0.107	0.021	0.002		0.1	標準		
				±	±	±					
TTHI	5	4	10	0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	e	4	173.957	7 0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	7	8	10	0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	8	6	120	0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	16	20	20	0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	17	20	14	1 0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	18	20	5	0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	19	20	14	0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	20	26	117.74	0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	21	. 26	12	2 0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	22	26	0.052	2 0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	23	26	10	0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-
	24	26	2.721	L 0.2	0.05	0.01		0.1	-	精密	-
	25	26	4	1 0.2	0.05	0.01		0.2	標準	-	-

図 3.56: 光学設置案 B の曲率半径公差・厚み公差のグレード表

オペランド #	タイプ	面	-	-	公称値	最小	最大	コメント
1: COM	P COMP	27	0		18.000	-2.000	2.000	調節面の設定
2 : TWA	V TWAV	-	-	-	-	0.633	-	テスト波長(イレギュラリティ等公差解析で使用)
3: TRA	D TRAD	5	-	-	502.341	-2.500	2.500	G1の表面曲率半径公差
4: TRA	D TRAD	6	-	-	-477.373	-2.400	2.400	G1の裏面曲率半径公差
5: TRA	D TRAD	7	-	-	208.052	-1.000	1.000	G2の表面曲率半径公差
6 : TFR	N TFRN	8	-	-	0.000	-20.000	20.000	G2後面の平面度公差
7: TRA	D TRAD	17	-	-	86.691	-0.400	0.400	G8の表面曲率半径公差
8: TRA	D TRAD	18	-	-	-56.849	-0.300	0.300	G8-4の曲率半径公差
9: TRA	D TRAD	19	-	-	39.525	-0.200	0.200	G4-5の曲率半径公差
10: TRA	D TRAD	20	-	-	-189.763	-1.000	1.000	G5の裏面曲率半径公差
11: TRA	D TRAD	21	-	-	96.673	-0.500	0.500	GBの表面曲率半径公差
12: TRA	D TRAD	22	-	-	-87.076	-0.500	0.500	GBの裏面曲率半径公差
13: TRA	D TRAD	23	-	-	42.131	-0.200	0.200	G7の表面曲率半径公差
14: TRA	D TRAD	24	-	-	137.124	-0.700	0.700	G7の裏面曲率半径公差
15: TRA	D TRAD	25	-	-	-76.726	-0.400	0.400	G8の表面曲率半径公差
16: TRA	D TRAD	26	-	-	21.303	-0.100	0.100	G8の裏面曲率半径公差

図 3.57: 曲率半径公差オペランド表

オペランド #	タイプ	面	調整	-	公称値	最小	最大	コメント
17: TTHI	TTHI	5	4	-	20.000	-0.200	0.200	デフォルト厚み公差:G1の厚さ公差
18: TTHI	TTHI	6	4	-	55.881	-0.200	0.200	レンズホルダーG1の当ての位置の設計誤差
19: TTHI	TTHI	7	8	-	8.600	-0.200	0.200	G2の厚さ公差
20: TTHI	TTHI	8	6	-	205.014	-0.200	0.200	レンズホルダーG2の当ての位置の設計誤差
21 : TTHI	TTHI	20	16	-	76.308	-0.200	0.200	G8-5の当ての位置の設計誤差
22: TTHI	TTHI	17	16	-	10.000	-0.200	0.200	G8の厚み公差
23: TTHI	TTHI	18	16	-	20.000	-0.200	0.200	(4の厚み公差)
24 : TTHI	TTHI	19	16	-	20.000	-0.200	0.200	G5の厚み公差
25: TTHI	TTHI	20	26	-	76.308	-0.200	0.200	G8の当ての位置の設計誤差
26: TTHI	TTHI	21	26	-	20.000	-0.200	0.200	GBの厚み公差
27: TTHI	TTHI	22	26	-	5.741	-0.200	0.200	G6-7の当て(リング)の位置の設計誤差
28: TTHI	TTHI	23	26	-	12.000	-0.200	0.200	いの厚み公差
29: TTHI	TTHI	24	26	-	8.285	-0.100	0.100	G7-8の当て(リング)の位置の設計誤差
30: TTHI	TTHI	25	26	-	2.000	-0.200	0.200	G8の厚み公差

図 3.58: 厚み公差オペランド表

				-			-	
オペランド #	タイプ	面 1	面 2	-	公称値	最小	最大	コメント
31 : TEDX	TEDX	5	6	-	0.000	-0.200	0.200	G1のXディセンタ
32: TEDY	TEDY	5	6	-	0.000	-0.200	0.200	G1のYディセンタ
33: TETX	TETX	5	6	-	0.000	-0.200	0.200	G1のXティルト
34 : TETY	TETY	5	6	-	0.000	-0.200	0.200	G1のYティルト
35: TEDX	TEDX	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のXディセンタ
36: TEDY	TEDY	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のYディセンタ
87: TETX	TETX	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のXティルト
38: TETY	TETY	7	8	-	0.000	-0.200	0.200	G2のYティルト
39: TEDX	TEDX	17	20	-	0.000	-0.100	0.100	G8-5のXディセンタ
40: TEDY	TEDY	17	20	-	0.000	-0.100	0.100	G8-5のYディセンタ
41: TETX	TETX	17	20	-	0.000	-0.200	0.200	G8-5のXティルト
42: TETY	TETY	17	20	-	0.000	-0.200	0.200	G8-5のYディセンタ
43: TEDX	TEDX	21	22	-	0.000	-0.050	0.050	G8のXディセンタ
44: TEDY	TEDY	21	22	-	0.000	-0.050	0.050	G6のYディセンタ
45: TETX	TETX	21	22	-	0.000	-0.100	0.100	G6のXティルト
46: TETY	TETY	21	22	-	0.000	-0.100	0.100	GBのYティルト
47: TEDX	TEDX	28	24	-	0.000	-0.100	0.100	G7のXディセンタ
48: TEDY	TEDY	23	24	-	0.000	-0.100	0.100	G7のYディセンタ
49: TETX	TETX	23	24	-	0.000	-0.100	0.100	G7のXティルト
50: TETY	TETY	23	24	-	0.000	-0.100	0.100	G7のYティルト
51 : TEDX	TEDX	25	26	-	0.000	-0.100	0.100	G8のXディセンタ
52: TEDY	TEDY	25	26	-	0.000	-0.100	0.100	G8のYディセンタ
53: TETX	TETX	25	26	-	0.000	-0.100	0.100	G8のXティルト
54 : TETY	TETY	25	26	-	0.000	-0.100	0.100	G8のYティルト

図 3.59: レンズのディセンタ・ティルトオペランド表



図 3.60: 偏芯・イレギュラリティ・屈折率・アッベ数公差オペランド表

§3.3 の光学系設置案 B の結像性能でもふれたが、配置案 B は光学系の特性とした長波著側になる につれて結像性能が悪くなっている。そのため、公差による結像性能の変化を波長ごとに算出し、分 光観測の性能となる波長分解能の影響を調べる必要がある。また A 案と同様に、本研究での公差解析 上、RMS スポット半径値で示されている値は良像視野範囲すべてを考慮されていないため、公差に よる視野ごとの結像性能の変化の様子を調べる。



図 3.61: 公差による良像範囲での RMS スポット半径の変化 (均一分布の 100 回のシミュレーションによる)

図 3.61 から、良像視野端付近で要求性能を満たしていない光学系がいくつか製造されているのがわ かる。これは設置案 B の長波長側結像性能の公差のよる影響を調べるため、解析の際に観測観測波長 範囲を超えた 0.9µm までを考慮しているため、実際の値より性能がある程度悪い値が算出されてい る。しかし、同様に 0.9µm までを考慮した図 3.49 では製造された光学系すべて要求性能を満たして いることから光学系配置案 B は A 案に比べ、公差のよって視野端側の結像性能の悪化が大きいこと がわかる。



図 3.62: 視野中心での公差による波長ごとの RMS スポット半径の変化

図 3.63: 良像範囲端 2.5' での公差による波長ご との RMS スポット半径の変化

# 第4章 まとめと今後

本研究では、高速撮像分光器の初期の光学設計案に対し、開発が進むナスミス焦点装置切替機への搭載 に適した光学レイアウトを構築した。構築案としては、初期の光学系案の光学パラメータを変更することな く、光路を平面鏡で2回折り曲げることで最新の焦点装置切替機に搭載可能にした光学系配置案Aと、初 期の光学設計案に対し、再度光学設計を行うことで平面鏡による光路の折り曲げを一回に留め、かつ焦点装 置切替機の狭いスペースで装置を搭載可能とした光学系配置案Bである。またこの二つの案に対して、公 差と呼ばれる製造誤差を考慮した要求光学性能の実現を評価し、A案とB案ともに検出面を調節可能な状 態とすることで、要求を満たし、費用を抑えた高速撮像分光器光学系が製造可能なことを示した。今後は開 発中のナスミス焦点装置切替機の最終案に合わせて、それぞれの案で比較検討を行い、選定するとともに レンズの製作やレンズホルダー等の光学系保持機構、駆動機構の開発・組み上げを行っていく。

謝辞

まず最初に、本研究に携わってくださった皆様に感謝申し上げます。

指導教官の川端先生には、卒業研究から3年間大変お世話になりました。天文学研究室であるにかかわ らず、装置開発だけしたいという私のわがままを叶えてくださりありがとうございます。おかげさまで、設 計ソフトの CAD と光学系設計ソフトの ZEMAX を使えるようになり、毎日楽しく装置開発に勤しむこと ができました。そしてこの装置開発研究は、将来に対する考え方を見直す機会となり、重要な経験であった と改めて感じております。今まで本当にありがとうございました。

深沢先生には研究室生活に関して、大変お世話になりました。人生で一度きりの大学研究をこの研究室で 過ごすことができて良かったと感じています。夏の学校や忘年会など様々な研究室行事は大変思い出深く、 ほうれん草が忘れられません。3年間ありがとうございました。

京都大学の野上先生、木野先生には本研究の高速撮像分光器開発に携わる機会をいただき、ありがとう ございました。本研究を通じて光学や光学設計を学ぶことができ、大変貴重な経験となりました。 研究室のみんなにもお世話になりました、ありがとう。

# 参考文献

- [1] 森裕樹 2017 年度修士論文 突発天体の広い視野多バンド探索に向けた国産大面積近赤外線検出器の 性能評価(広島大学)
- [2] http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/ iwamuro/LECTURE/OBS/atmos.html
- [3] 京大 3.8m 望遠鏡 京都大学 http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/index.html
- [4] 外部評価発表資料(2012 年 8 月 6 日)基本方針および概念設計 http://www.kusastro.kyotou.ac.jp/psmt/document/Kyoto1208review\_02.pdf
- [5] 外部評価発表資料(2012 年 8 月 6 日)計画の全般 http://www.kusastro.kyotou.ac.jp/psmt/document/Kyoto1208review\_01r2.pdf
- [6] KOOLS-IFU 研究会 資料 http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/ kazuya/p-kools/overview/kools-IFU-20171031.pdf
- [7] SEICA 京都大学 http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/instWS/3rd\_instWS/matsuo.pdf
- [8] 近赤外偏光撮像装置 http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/kentou/47th/47\_nagata2.pdf
- [9] 2017 年度 岡山ユーザーズミーティング 発表資料集
- [10] https://www.nayoro-obs.jp/binarystar2017/slides/S2-1\_Nogami.pdf
- [11] http://www.oao.nao.ac.jp/oaoweb/wp-content/uploads/p03\_oaoum10\_kuramoto.pdf
- [12] http://www.asj.or.jp/geppou/archive\_open/1996/pdf/19960201c.pdf
- [13] http://www2.nao.ac.jp/ takedayi/HDS\_seminar/pub/hds061116.pdf
- [14] 蔵本 哲也、京都大学 2012 年度 修士論文 フレア星の高時間分解能低分散分光観測による恒星フレア発 生機構の研究
- [15] シリーズ現代の天文学 第10巻「太陽」日本評論社 2012
- [16] 1m 級望遠鏡による突発天体・現象の観測 野上 大作 http://www.spaceguard.or.jp/RSGC/results/sgr2pdfs/nogami.p
- [17] 岡田千穂 2016 年度 修士論文 エディントン限界に近い低質量 X 線連星 Sco X-1の 状態遷移と 硬 X 線放射の観測 広島大学
- [18] 宇宙科学入門 第2版 尾崎洋二 2013

- [19] https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/ nogami/HSspec/
- [20] https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/ nogami/HSspec/Presen\_asj/asj2008b\_poster.pdf
- [21] 装置ローテータの進捗状況 装置ローテータへの観測装置の設置 第47回望遠鏡および観測装置会議 2018年9月8日 http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/kentou/47th/47\_nakatani.pdf
- [22] 分光器のしくみ (Spectrometer) http://www.wakayama-u.ac.jp/ atomita/class/CosmicSpectra/observe/s\_meter
- [23] シリーズ現代の天文学 第15巻「宇宙観測I 光・赤外天文学」日本評論社 2014
- [24] 浜松ホトニクス ORCA-Flash4.0 V3 デジタル CMOS カメラ C13440-20CU https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/C13440-20CU/index.html
- [25] ORCA-Flash4.0 V3 デジタル CMOS カメラ カタログ (ライフサイエンス用) https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/SCAS0120J\_C13440-20CU.pdf
- [26] MiSUMi-VONA web カタログ 一軸アクチュエータ LX15 カバータイプ https://jp.misumiec.com/vona2/detail/110302307840/?clkid=clkid\_basic\_shape\_template
- [27] 千代延真吾 2006 年度修士論文 かなた望遠鏡用 1 露出型偏光撮像装置 HOWPol の筐体及び駆動機 構の開発 (広島大学)
- [28] 小松智之 2007 年度卒業論文 かなた望遠鏡用高速分光器の駆動系制御ソフトウェアの開発 (広島大学)
- [29] Edmund optics worldwide 光学仕様への理解 https://www.edmundoptics.jp/resources/applicationnotes/optics/understanding-optical-specifications/
- [30] Edmund optics worldwide 球面レンズに向けた精密な公差 https://www.edmundoptics.jp/resources/application-notes/optics/precision-tolerances-forspherical-lenses/
- [31] ZEMAX 光学系設計ソフトウェア ZEMAX の基本的な使用方法