

「せいめい」望遠鏡用高速撮像分光器の光学設計と評価

高木健吾、松場祐樹、川端弘治(広島大)、木野勝、野上大作(京都大)

高速撮像分光器は、「せいめい」望遠鏡の小型装置フランジに取り付けられる観測装置の一つで、単純撮像と低分散分光の2つのモードを持ち、最短10msオーダーの可視光観測を行う装置である。装置の取り付けられる小型フランジには最大4台の装置が搭載予定であるため、それらの切り替えを行う装置切替機からの制約と、それに伴う光学系の大幅な見直しが必要になった。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、それぞれの実現性を公差解析により評価し、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。光路を2回折り返し省スペース化したA案と光路の折り曲げを1回にして収差の増加を抑えたB案の2案を考えた。光学配置の考察と公差解析からそれぞれ98%以上の製造確率で要求される結像性能(22um)を満たした設計を行うことができた。その後、製作費削減のためにB案について、変数としていた曲率半径を既存のニュートン原器の値を採用し、光学配置再考察と公差解析を行っている。光学配置の再考察では、松場修論時のB案と同程度のRMSスポット半径を実現しており、許容性能を満たす公差パラメータの解析を行っている。

1.装置概要と目的

高速撮像と低分散分光観測の2つのモードをもつせいめい望遠鏡ナスミス台に取り付けられる装置の1つである。

10msのオーダーで天体現象を捉えることができるために、数秒~数分オーダーで変化する天体に対して有効である。京都大学の木野勝氏・野上大作氏によって初期光学設計が行われたが、そこにはレンズ製造・組み上げ調整時に発生する誤差(公差)の解析は未完であった。=>公差を考慮した性能評価と製造可能な価格の両面を考える。また、装置はナスミス焦点の小型装置フランジに搭載されるが、最大4台の装置が搭載されるために、装置の大きさに制約がある

目的

- (1)設計精度(公差)の評価
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。
- (2)ナスミス焦点切替機の小型装置フランジへの搭載
概念設計の光学系のレンズ配置だけでなく、撮像や分光観測用の光学素子の設置やその切り替え機構を考慮した装置全体がフランジに取り付け可能かを評価する

(図1.2)高速撮像分光器の光学系[1]

2.ナスミス焦点切り替え機

せいめい望遠鏡ではナスミス焦点のみを使用し、複数の装置の切り替えを行うためにナスミス焦点装置切替機を搭載する。

高速分光カメラの搭載される小型装置フランジには4台の装置が搭載予定であるために、装置の小型化が必要である。また、第4鏡と望遠鏡焦点の問題から図2.3のように小型フランジの搭載制限がある。

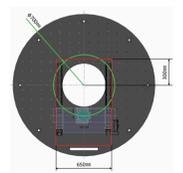
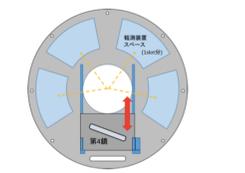
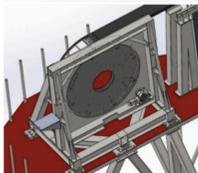
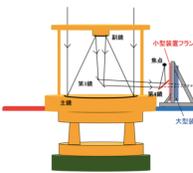


図2.1 ナスミス焦点切替機の取り付け外観図[1]

図2.2 小型焦点切替機とフランジの外観図[2]

図2.3 小型装置フランジと観測装置取付スペース図[1]

図2.4 小型装置フランジの搭載制限図[1]

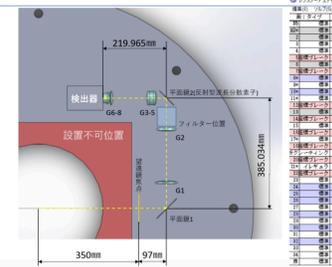
4.光学配置案と公差解析

本研究では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2つの案をデザインした。ここではA案,B案のそれぞれの光学デザインの特徴と光学性能について説明していく。

A案

A案は初期案の光学系のパラメータを変えずに、平面鏡で光路を2回折り返すことで省スペースを施した。

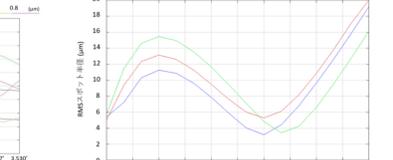
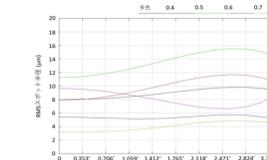
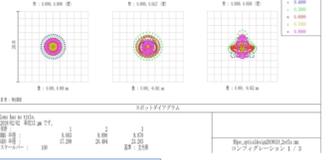
(A-1)光学系配置案Aと光学性能



A案ではアクチュエータの配置可能なスペースを確保するために、第一鏡を置いて光線を90度回転させた。また、配置できないスペースを最小化するために2回の折り返しを採用した。また分散素子の搭載スペースの確保が難しかったために反射型の波長分散素子を使用することで解決を目指した。RMSスポット半径は視野中心(図A-1-3)で8.6umと要求性能を満たしている。また、図A-1-4より観測視野全域でRMSスポット半径を満たしている。また、波長ごとの結像様子では視野中心で0.46um-0.56umの波長の結像が10umを超えており、RMSスポット半径が0.5umあたりで最大になっている。

項目	仕様
口径	φ100mm
視野	φ1.4°
視野中心	8.6/4°
視野半径	8.6/4°
視野直径	17.2/8°
視野高さ	17.2/8°
視野幅	17.2/8°
視野深さ	17.2/8°
視野長さ	17.2/8°
視野幅	17.2/8°
視野深さ	17.2/8°
視野長さ	17.2/8°

(図A-1-2) A案のレンズデータエディタ



(図A-1-3) A案のスポットダイアグラム

(中)図(A-1-4)視野位置とスポット半径

(右)図(A-1-5)波長とスポット半径

(A-2)公差解析

(A-2-1)公差解析によるレンズホルダー形状の選定

公差解析の結果からG6-G8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。=>G6-G8レンズに対して取り付け時に調整が容易に行えるようにセミレンズホルダーを採用した。

(A-2-2)公差解析結果

公差解析の目標は良像範囲で22um以下になることを目標とした。均一分布において98%の確率で16umになっているために要求性能を満たしている。またレンズの公差グレードも一般グレードと3箇所の精密グレードだけである。また良像視野範囲内で行った100回のモンテカルロシミュレーションの結果からも要求性能を満たしていることがわかるが、視野中心から離れることでRMSスポット半径が悪くなることもわかる。

作成された光線追跡可能なモンテカルロ ファイル数: 1000

公差	値	標準偏差
公称値	0.00817792	0.00017792
公差	0.00817792	0.00017792

(表A-2-2-1)結像性能と製造確率 (表A-2-2-2)曲率半径公差・厚み公差のグレード表[1](図A-2-2-3)良像範囲でのスポット半径の変化

3.光学系の最適化と公差解析

光学系の最適化

評価関数が適切になるように、レンズパラメータのいくつかを変数として、光学系のパラメータの最適化を行う

- (1)任意のレンズパラメータを変数として定義する
レンズの曲率半径や厚み、ガラス硝材などのパラメータを「任意」として変数指定する。
- (2)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の指定が必要で、その目標値の達成度を表したものを評価関数という。

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i} \quad [3]$$

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 、およびその設計目標で設定された重み W_i で表現される。

- (3)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
光線追跡ソフトZEMAXを用いて、評価関数が極小となるように繰り返し計算が行われ、光学系の最適化がなされる。これにより光学系は設計目標に近い光学系に改良される。
- (4)(3)の結果から評価関数を見直し、再度(1)-(3)の作業を行う
評価関数で指定した設計目標や重みつけの数値を見直し、再度最適化を行う。

公差解析

製造時に発生する寸法値や性能値のズレや組み上げる時の光学素子の配置の精度を算出する。

感度解析

オペランドの最大(最小)値を公差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解析である。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感度を表す。全ての公差パラメータの感度解析を行ったあと、性能変化量を算出し、光学系における感度を「性能変化量の Worst 公差」として表す。

逆感度解析

許容性能を設定し、その性能値に対応する公差の値を算出する解析である。感度解析と同様に光学系におけるパラメータの感度を調べる指標ともなる。解析手順を以下で説明する。
(1)許容性能の設定
(2)1つのパラメータに最大(最小)値を含んだ場合の性能値の算出
(3)公差の厳格化
(4)1つの公差パラメータに対する逆感度解析終了
(5)Worst 公差の算出
全てのパラメータに対し評価を行う場合は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の評価を行う。

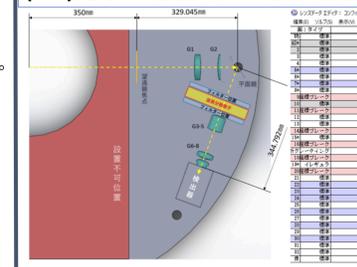
モンテカルロシミュレーションによる光学系の製造確率

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、その組み合わせから総合的な光学系の性能を算出する。本研究では、この製造確率値を高速撮像分光器の光学系性能実現性の評価方法の1つとして使用する。
(1)光学系パラメータに公差を与える
(2)公差を含み光学系の性能評価
(3)指定回数のシミュレーション
(4)シミュレーション結果から製造確率算出
(5)解析の終了or公差値の変更

B案

B案は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を抑えることを目的としている。

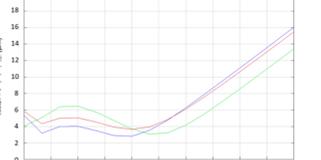
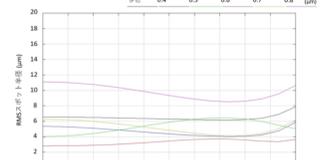
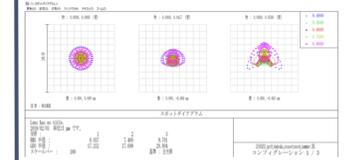
(B-1)光学系配置案Bと光学性能



A案と同様にアクチュエータでの切り替えを行うために、設置不可能領域から最も離れる位置に光線を取り入れるようにした。波長分散素子をカメラレンズ近くの瞳位置に配置することで、製作費の抑制と分光精度の向上を目指した。A案と比較して、視野中心や良像視野端のRMSスポット半径が改善し、8.0umを達成している。視野全域で長波長側(0.8um)の結像性能が短波長側に比べ2倍程度数値が大きい。(図B-1-4) 同様に図B-1-5より、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が波長によって異なることが懸念される。

項目	仕様
口径	φ100mm
視野	φ1.4°
視野中心	8.0/4°
視野半径	8.0/4°
視野直径	16.0/8°
視野高さ	16.0/8°
視野幅	16.0/8°
視野深さ	16.0/8°
視野長さ	16.0/8°
視野幅	16.0/8°
視野深さ	16.0/8°
視野長さ	16.0/8°

(図B-1-1) B案の小型装置取付フランジの搭載図[1] (図B-1-2) B案のレンズデータエディタ



(左)図(B-1-3) B案のスポットダイアグラム

(中)図(B-1-4)視野位置とスポット半径

(右)図(B-1-5)波長とスポット半径

(B-2)公差解析

(B-2-2)公差解析結果

公差によって変化した寸法の量を補う面である調整面を導入することによって要求結像性能を満たす公差の値をゆるく決定するために、はじめから調整面を導入して公差の計算を行った。公差解析の結果から均一分布において98%の確率で18.1umになっているために要求性能を満たしている。また、レンズの公差グレードも一般グレードと4箇所の精密グレードで抑えられている。また良像視野範囲内で行った100回のモンテカルロシミュレーションの結果からも要求性能を満たしていることがわかるが、B案でも視野中心から離れることでRMSスポット半径が悪くなることもわかる。

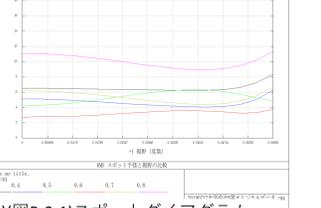
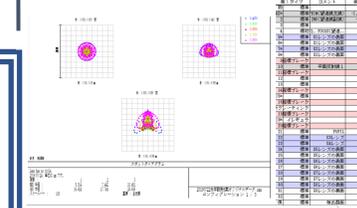
作成された光線追跡可能なモンテカルロ ファイル数: 1000

公差	値	標準偏差
公称値	0.00817792	0.00017792
公差	0.00817792	0.00017792

(表B-2-2-1)結像性能と製造確率 (表B-2-2-2)曲率半径公差・厚み公差のグレード表[1](図B-2-2-3)良像範囲でのスポット半径の変化

(B-3)曲率を既存原器値に固定した場合

B案において、製作費をさげるために、現在存在するニュートン原器にあった曲率半径で固定し、レンズの厚み・ガラスの硝材のパラメータを変数とした。



(左1)図(B-3-1)スポットダイアグラム

(左2)図(B-3-2)視野位置とスポット半径

(左3)図(B-3-3)波長とスポット半径

(右1)図(B-3-4)視野位置とスポット半径

(右2)図(B-3-5)波長とスポット半径

(右3)図(B-3-6)良像範囲でのスポット半径の変化

まとめと今後

まとめ

本研究ではA案,B案ともに要求性能を満たす光学系レイアウトと公差パラメータを設定することができた。現在はB案の光学系レイアウトを用いて、レンズの曲率半径を固定パラメータとして、レンズの厚みやガラスの硝材を変数とした場合でも同程度のRMSスポット半径を実現することができた。しかし、公差解析で求めた98%の製造確率において、要求性能を満たしていない。

今後

製造確率が98%の要求性能を満たす公差パラメータの調整
高速撮像カメラのレンズ作成と性能評価

参考文献:
[1]松場祐樹 2018年度修士論文 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
[2]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)
[3]ZEMAX 光学系設計ソフトウェア ZEMAXの基本的な使用方法

(左下)図(B-3-5)波長とスポット半径

(右下)図(B-3-6)良像範囲でのスポット半径の変化

RMSスポット半径は曲率半径を固定する前と同程度(8um-10um)になった
=>しかし、公差解析においてモンテカルロシミュレーションの結果が要求性能を満たしていない(98%の確率で25.5um)
=>今後公差パラメータを変更することで要求性能を満たすように調整していく