

## なゆた望遠鏡用可視光分光器 I . 設計

尾崎忍夫、時政典孝

兵庫県立西はりま天文台

### The optical spectrograph for the NAYUTA telescope I. Design

Shinobu OZAKI and Noritaka TOKIMASA

*Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo, Hyogo 679-5313, Japan*

*E-mail: ozaki@nhao.go.jp*

(Received 2006 January 7)

#### 概要

なゆた望遠鏡（口径 2 m）のナスミス焦点に取り付けられる分光器の高分散モードは、エシェル分光器と一般的なロングスリット分光器の狭間の波長分解能 ( $R \sim 7,500$ ) を有している。速度分解能は 40km/s に相当し系外銀河のダイナミクスの詳細研究に適したものとなっている。低分散モードは  $R \sim 1,000$  程度であり、可視域の主立った輝線を一度の露出でカバーできるので、輝線比を用いた輝線放射領域の物理状態の解明に適している。

この分光器は高分散を目指したために、シーイングマッチングを考えると、どうしても光路長が長くなり、光路を折り曲げる必要があった。そこで反射型グレーティングと鏡面コリメーターを用いることで、折り曲げ鏡の数を最小限に抑えている。またコリメーターの方式として軸外し放物面鏡を用いると、視野の端で収差が急激に大きくなる。また、逆ニュートン方式を用いると、折り曲げ鏡によるケラレが発生してしまう。そこで、折り曲げ鏡を用いて軸外し角を小さくし、なおかつ折り曲げ鏡がコリメーターからの射出光をケルことのないように配置することにより、収差を抑えつつ効率の高いシステムとすることに成功した。

#### Abstract

The optical spectrograph attached on the Nasmyth platform of Nayuta telescope has the high dispersion mode in which the spectral resolution is about 7,500, corresponding to the velocity resolution of 40km/s. This mode is suited for the detailed dynamical study of galaxies. Low dispersion mode has  $R \sim 1,000$ . We can get the information of the major emission lines in optical region in a single exposure, so this mode is suited for the study with line ratio.

Taking account of high dispersion and seeing matching, we have long path necessarily and must bend the path. We adopted a reflectance grating and a mirror collimator so as to minimize the number of bending mirrors. An off axis parabola mirror as a collimator has large aberration at the side of field of view. Inverse Newtonian layout of a collimator has large vignetting of a bending mirror. So we adopted the off axis parabola mirror with small off axis angle ( $3^\circ$ ) and bending mirror placed out of collimated beam. Because of this layout, we accomplished the optical design with small aberration and high efficiency.

**Key words:** Spectrograph

## 1. 設計性能緒元

ここで述べる検討の結果、最終的な分光器の基本パラメータは以下の通りである。詳細は後に続く章を参照されたい。

CCD	フォーマット 2 k × 2 k ピクセルサイズ 13.5 $\mu$ m 裏面照射型 AR コート付き
スリット長	5
スリット幅	0.8 、 1.2 、 1.6 、 5
観測波長域	3900 ~ 10000
コリメーター焦点距離	900mm
カメラレンズ焦点距離	341.5mm
グレーティング	反射型グレーティング (1800 本/mm、300 本/mm)

以下に西はりま天文台では平均的であると思われるシーイングサイズに合わせたスリット幅 1.2 を用いたときのパラメータを記載する。

	高分散モード	低分散モード
グレーティング	1800 本/mm	300 本/mm
波長分解能	7500	1000
一度の露出で得られる波長域	400	2600
サンプリング	3pix	3.8pix
$\Delta\lambda$	0.6	4.9
1pix あたり	0.2	1.3

Table 1. 1.2 スリット、5000 における性能

## 2. 分光器基本パラメータの検討

### 2-1. 高分散モードのグレーティングの選択

#### (a) グレーティングでの光の損失

高分散を狙う場合、入射角に対してグレーティングを大きく傾ける必要があるため、コリメーターからの光を全て拾おうとすると、大きなサイズのグレーティングが必要となる。しかしグレーティングはマスターと呼ばれる型を用いて成形されるので、そのマスターのサイズによって製作できる最大サイズが決まってしまう。そのため、既製品を用いる場合は目的とする波長分解能を達成できるかどうかという点と、最大サイズにおいて光を全て拾えるかどうかという点に注意しなければならない。

中心波長を変えるためにグレーティングを傾けることになるが、そのときにどれだけの光を損失するかを評価する。表 2 は高分散モードで使用する候補として挙げられる各グレーティングの最大サイズである。

グレーティング	最大サイズ (H × W mm)
2160 本/mm、500nm ブレーズ	128 × 154
1800 本/mm、500nm ブレーズ	102 × 102
1200 本/mm、1μm ブレーズ	154 × 206

Table 2. 高分散モード用グレーティングの候補とその最大サイズ

グレーティング表面において、溝と垂直方向を X 軸に、平行方向を Y 軸にとる。グレーティングへの入射角を  $\alpha$ 、グレーティング位置での同族光束の直径を  $d$  とすると、グレーティング表面に照射される同族光束の形状は楕円となり、それは以下の式で表される。

$$(x \cos \alpha)^2 + y^2 = \frac{d^2}{4} \quad (1)$$

溝と垂直方向のグレーティングの長さを  $2l$  とすると、グレーティングに光の当たっている面積 ( $S$ ) は以下のようなになる。

$$S = 2 \int_{-l}^l \sqrt{\frac{d^2}{4} - (x \cos \alpha)^2} dx = \frac{d^2}{4 \cos \alpha} (\pi - 2\Phi + \sin 2\Phi) \quad (2)$$

ここで  $\cos \Phi = 2l/d \cos \alpha$  である。

グレーティングで光があふれない場合の同族光束の面積は  $S_i = d^2/4 \cos \alpha$  なので、グレーティングでの光の損失割合は以下の式で表される。

$$\frac{S}{S_i} = \pi - 2\Phi + \sin 2\Phi \quad (3)$$

図 1 は損失割合と中心波長の関係である。2160 本/mm と 1200 本/mm では 6500 Å 付近から急激に損失が増大しているのが分かる。一方 1800 本/mm は既製品の最大サイズが小さいので 5000 Å 付近から損失が始まるものの、損失量の増加は緩やかで 7300 Å をすぎると前二者よりも損失量は少なくなっている。これは中心波長の入射角依存性が緩やかであることに由来する。

またコリメーターの焦点距離が長くなるに従って、光の損失が起こり始める波長が短くなる。

#### (b) グレーティングから射出されるビーム幅

グレーティングから結像光学系に入射する同族光束は楕円になっており、その長直径は分散方向に  $\cos \beta / \cos \alpha$  だけ拡大される。この効果をプロットしたものが図 2 の下に凸の右上がりの曲線である。

先に述べたように、既製のグレーティングにはサイズの制限があり、入射角がある角度以上になるとグレーティングで全ての光を拾えなくなる場合がある。その場合は図 2 右のように、結像光学系に入射する同族光束の最大サイズが楕円の長直径よりも短くなる。結像光学系から見て分散方向を X 軸に、それと垂直方向を Y 軸にとり、もしグレーティングにおいて光があふれなければ、同族光束の形状は下のような式に表せる。

$$\left( x \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right)^2 + y^2 = \frac{d^2}{4} \tag{4}$$

グレーティングで光があふれた場合、図2の右図にあるように、上式の楕円が  $x \pm l \cos \beta$  において切り取られた形状となる。この場合の最大サイズは図中の  $D$  となり、その大きさは以下ようになる。

$$D = \sqrt{d^2 + 4l^2(\cos^2 \beta - \cos^2 \alpha)} \tag{5}$$

このサイズの波長依存性をプロットしたものが、図2において上に凸の曲線である。

二つの曲線の交点の位置でグレーティングから光があふれはじめる。実際と同族光束の最大幅は波長がこの交点よりも小さいときには下に凸の曲線をたどり、交点より大きいときには上に凸の曲線をたどることになる。この図から最大ビーム幅は 2160 本/mm で 132mm、1800 本/mm で 105mm、1200 本/mm で 115mm、1200 本/mm の 2 次光を利用したものでは 161mm 程度と読み取れる。

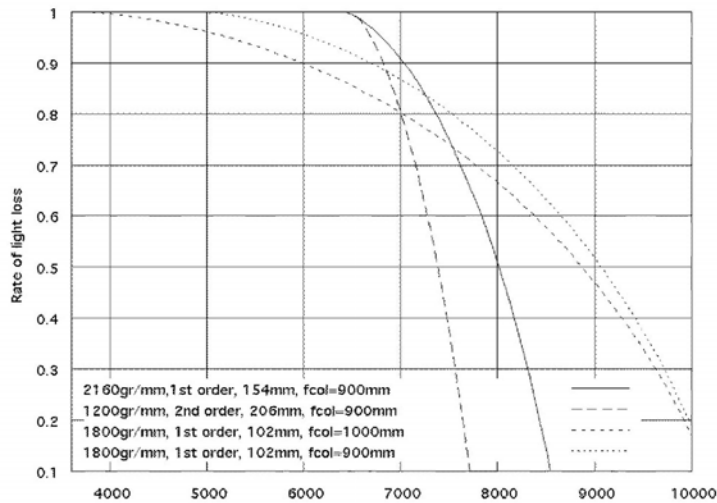


Fig. 1. 中心波長とグレーティングでの光の損失量の関係

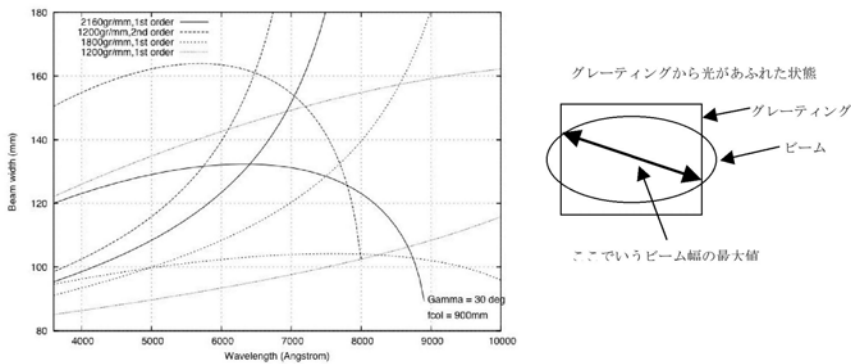


Fig. 2. 横軸は中心波長、縦軸はビーム径。線種はグレーティングの溝密度である。右上がりの下に凸の曲線はグレーティングが傾くことによるビーム径の拡大を表している。上に凸の曲線は中心波長と、ビームがグレーティングからあふれたときの最大のビーム径との関係を表している。

(c) グレーティングの効率

図3の左は2160本/mm、右は1800本/mmの効率である。2160本/mmでは偏光成分によって効率がかかなり違っており、無偏光の光に対する効率は1800本/mmのほうが良い。1200本/mmはピーク波長を過ぎると急激に効率が落ちてしまうことが分かる。

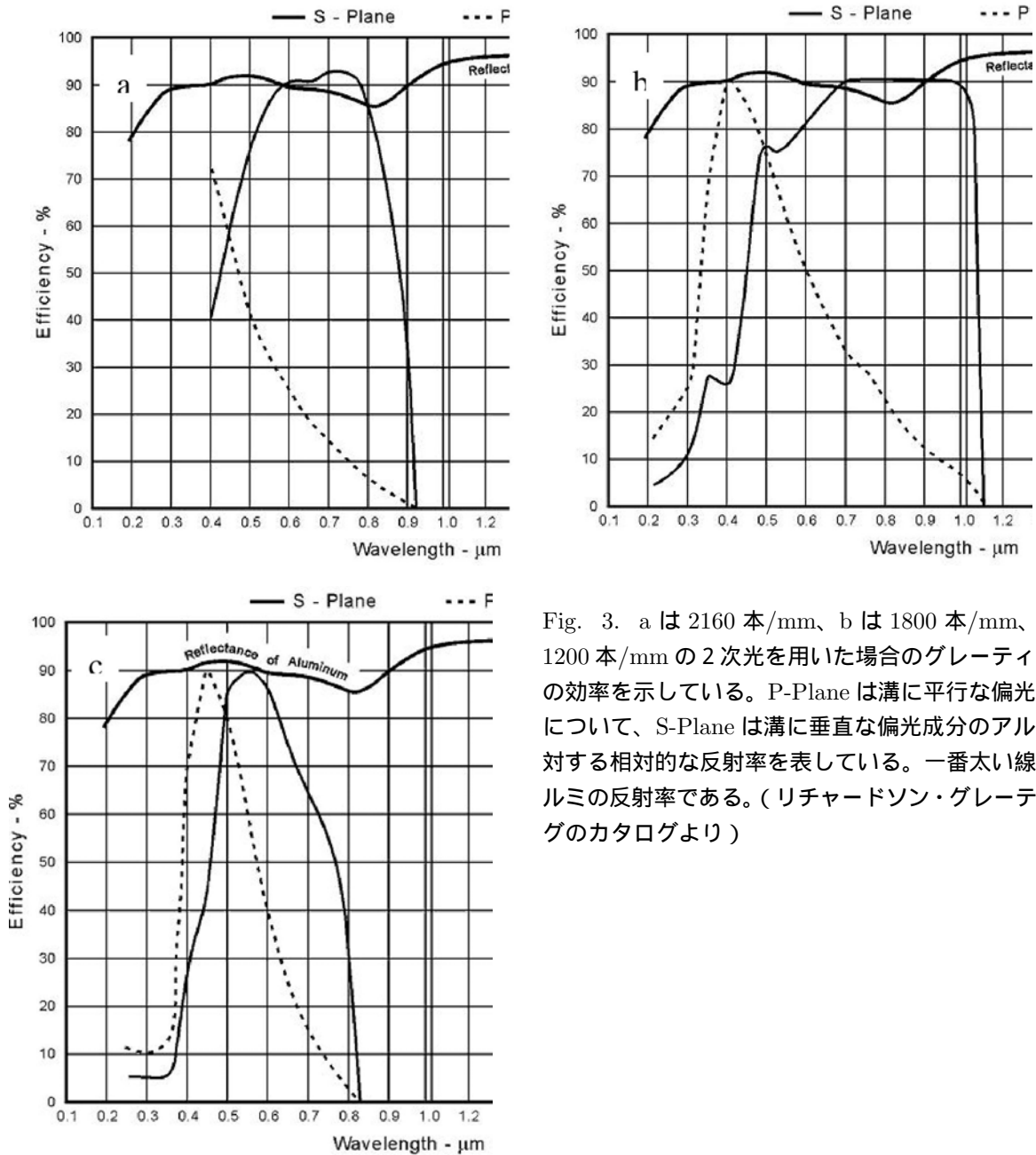


Fig. 3. aは2160本/mm、bは1800本/mm、cは1200本/mmの2次光を用いた場合のグレーティングの効率を示している。P-Planeは溝に平行な偏光成分について、S-Planeは溝に垂直な偏光成分のアルミに対する相対的な反射率を表している。一番太い線はアルミの反射率である。(リチャードソン・グレーティングのカタログより)

## (d) 高分散モードのグレーティングに関するまとめ

A. 1200 本/mm、1 $\mu$ m ブレーズの二次光を用いる場合

- ・ 7000 を過ぎると急激に光を損失する。
- ・ 口径の大きな結像光学系が必要になる。
- ・ 効率のピーク波長からずれると効率が急激に落ちる。
- ・ 二次光を用いるために専用のオーダーカットフィルターが必要となる。

## B. 2160 本/mm、500nm ブレーズを用いる場合

- ・ 7000 を過ぎると急激に光を損失する。
- ・ 偏光成分による効率の違いが大きい。
- ・ グレーティングの効率が低い。

## C. 1800 本/mm、500nm ブレーズを用いる場合

- ・ 他の二つに比べて、長波長側でも効率がそれほど落ちない。
- ・ 他の二つに比べて、短波長から光の損失が始まる。
- ・ 分解能を稼げない。  $f_{\text{col}}=900\text{mm}$  で  $R \sim 7500$ 、  $f_{\text{col}}=1000\text{mm}$  で  $R \sim 10000$  である。

1200 本/mm の二次光を使う案はデメリットが大きいことが分かった。1800 本/mm は分解能を稼げないデメリットはあるが、 $R \sim 7500$  ならば、エシェル分光器と一般的なロングスリット分光器の狭間の波長分解能を狙うという当初の目的は達成できるので、高分散モードでのグレーティングには1800 本/mm で500nm ブレーズのものを用いることにした。

## 2-2. 結像光学系の焦点距離

分光器の縮小率は以下の式で表される。

$$\frac{f_{\text{cam}} \cos \alpha}{f_{\text{col}} \cos \beta} \quad (6)$$

1800 本/mm で500nm ブレーズのグレーティングのブレーズアングルは26.7°である。 $\theta = 30^\circ$  のとき、 $\alpha = 41.7^\circ$ 、 $\beta = 11.7^\circ$ となる。コリメーターの焦点距離を900mm、ピクセルサイズ( $p$ )を13.5 $\mu$ mとする。西はりま天文台の典型的なシーイングサイズ(1.2")は望遠鏡焦点面において140 $\mu$ m( $d_s$ )となる。これが3ピクセルサンプリングとなるためには、以下の式から結像光学系の焦点距離を341.5mmにしなければいけない。

$$f_{\text{cam}} = \frac{3p \cos \beta}{d_s \cos \alpha} f_{\text{col}} = 341.5\text{mm} \quad (7)$$

このとき西はりま天文台のベストシーイングと思われる0.8"は約2ピクセルとなる。

## 2-3. サンプリング

サンプリングは以下の式で求められる。

$$(\text{sampling}) = \frac{d_s f_{\text{cam}} \cos \alpha}{p f_{\text{col}} \cos \beta} \quad (8)$$

西はりま天文台の平均的なシーイングは1 台前半、ベストは1 をきると予想される。図4は2.2節で求めた焦点距離(341.5mm)を用いて、平均的なシーイングサイズと思われる1.2 幅のスリットを用いた場合の、他のグレーティングや中心波長でどの程度のサンプリングとなるかを見積もったものである。1800本/mmの8300 以上では、2ピクセルサンプリングを下回ってしまう。

## 2-4. 波長分解能

図5は各グレーティングを用いた場合の波長分解能を示したものである。2160本/mmを用いると5000でR = 10000程度を達成できることが分かる。また1800本/mmを用いると5000 でR = 7500程度、300本/mmではR = 1000程度となる。

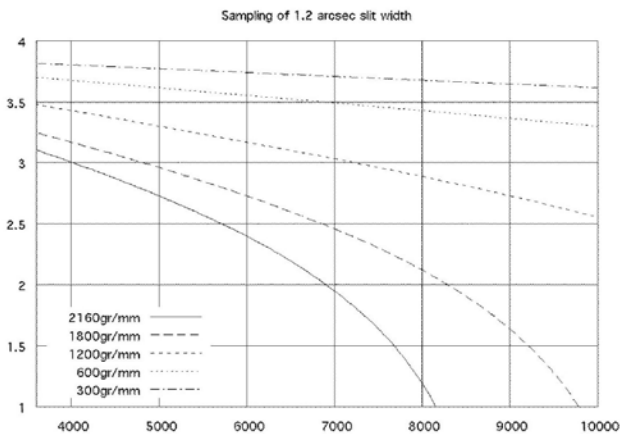


Fig. 4. 1.2 スリットを用いたときの中心波長とサンプリングの関係。線種の違いは溝密度の違いを表している。

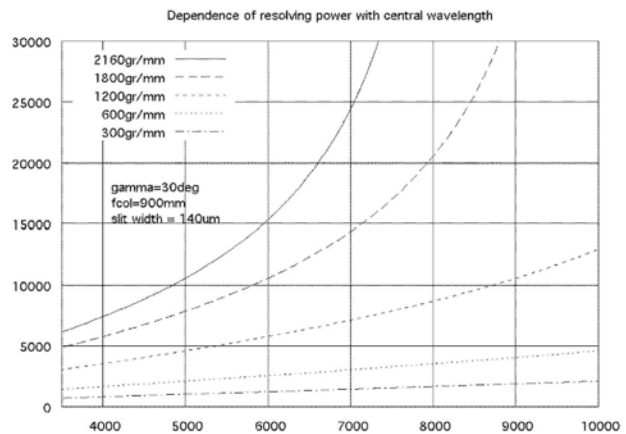


Fig. 5. 中心波長と波長分解能の関係。コリメーターの焦点距離は900mm、1.2 スリット、グレーティングへの入射光束と射出光束のなす角は30°としている。

## 3. 各ユニットの検討

### 3-1. コリメーターの形式の検討

コリメーターの焦点距離は長いので、レンズ系のコリメーターを用いた場合、ナスミス台に収めるためには折り曲げ鏡が少なくとも2枚は必要となり、効率が悪くなる。

鏡面系のコリメーターには軸外し放物面鏡と逆ニュートン方式の二つの形式がある。軸外し放物面鏡を用いると、スリット端での収差が大きくなってしまいうという欠点がある。逆ニュートン方式ではスリット全体にわたって収差は抑えられているが、折り曲げ鏡とそれを支持する構造体によるケラレのために1割弱の光を損失してしまう。また軸外し放物面鏡に比べて鏡が一枚多くなってしまふ。

軸外し放物面鏡は軸外し角を小さくすることにより収差を抑えられる。この場合、スリットやグレーティングが干渉しないようにスリット直後に折り曲げ鏡が一枚必要になる(図にはこの折り曲げ鏡は描かれていない)。しかし、逆ニュートン方式のように折り曲げ鏡とその支持部でのケラレは生じない。この分光器ではこの方式(軸外し角3°)を採用した。

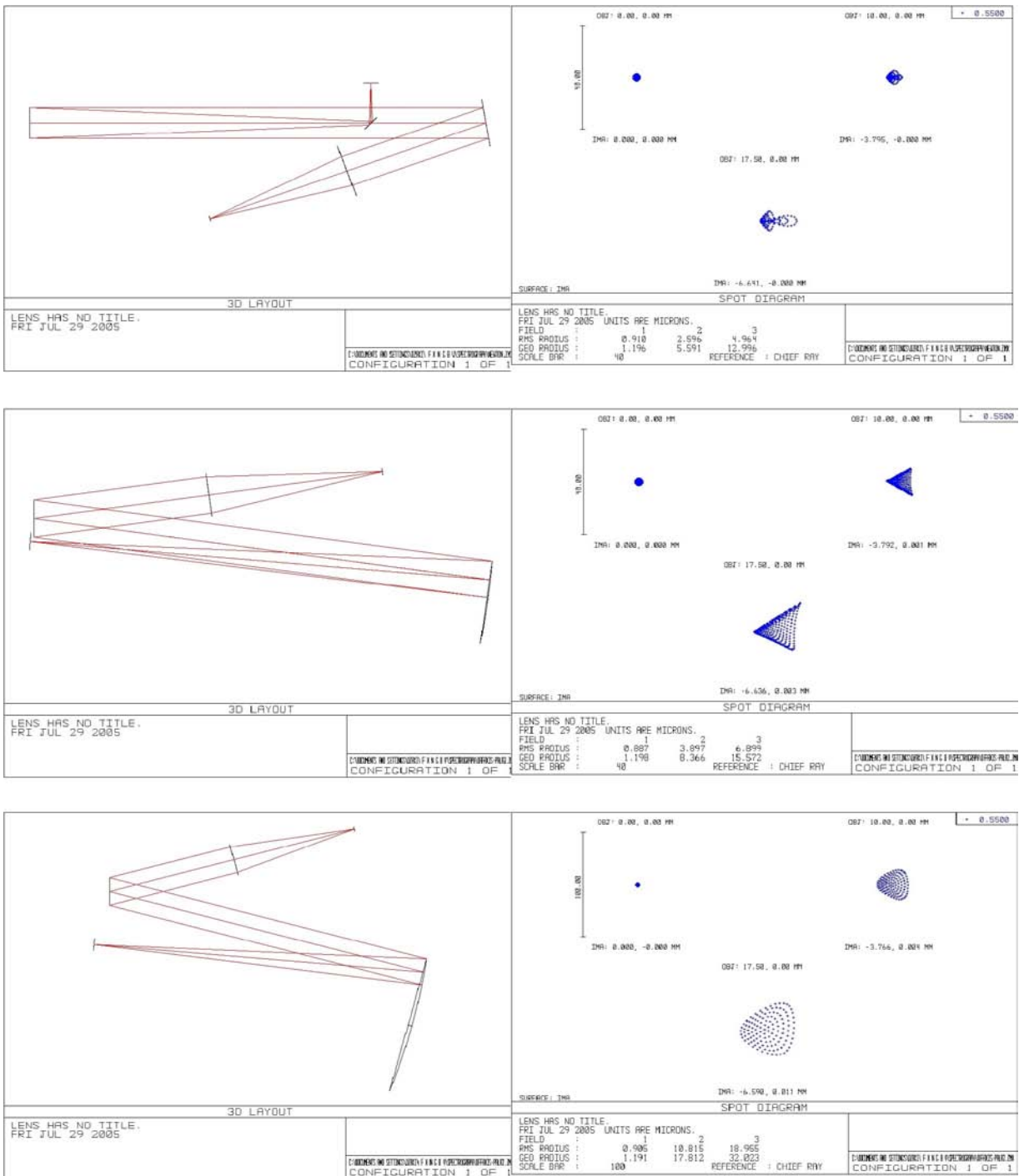


Fig. 6. 上段が逆ニュートン方式、下段が通常の軸外し放物面鏡方式（軸外し角  $10^\circ$ ）、中段が軸外し角を  $3^\circ$  にした場合で、各段の左はレイアウト、右はスポットダイアグラムである。スポットダイアグラムのスケールバーは通常の軸外し放物面鏡方式の場合に  $100\mu\text{m}$  で、他の二つは  $40\mu\text{m}$  である。各スポットダイアグラムにおいて左上のスポットがスリット中央で、右上が中央から  $10\text{mm}$  の場所、下のスポットはスリット端（中央から  $17.5\text{mm}$ ）のものである。



### 3-2. カメラレンズ

コリメーターに比べて焦点距離が短く、レンズ系を用いても折り曲げ鏡の必要はないので、レンズ系を採用することにした。

### 3-3. 校正用光源系の光学系

校正用光源は望遠鏡からの光と同様に F/12 でスリットに入射し、望遠鏡の瞳を再現するように設計した。これにより精度の良いフラット処理を行える。

以下のように各パラメーターをとる。

$l_{CP}$  : 校正用光源系瞳位置と校正用光源系レンズとの距離

$f_C$  : 校正用光源系レンズの焦点距離

$l_{TF}$  : 校正用光源系レンズと望遠鏡焦点面との距離

$D_{CP}$  : 校正用光源系瞳の直径

$l_{PF}$  : 望遠鏡焦点面と望遠鏡射出瞳との間の距離 ; 4755.387mm

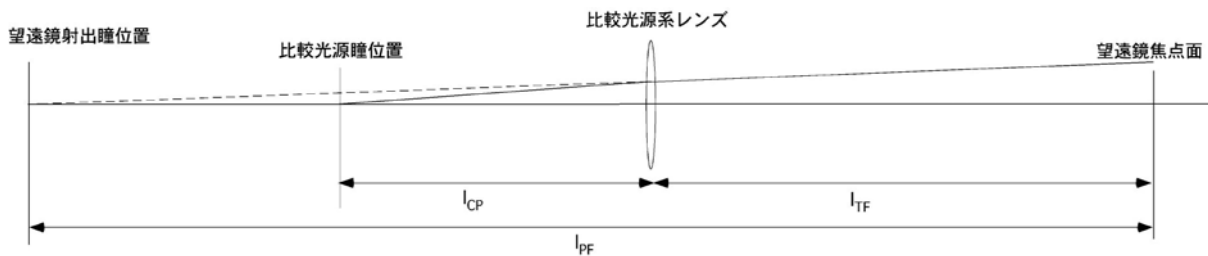


Fig. 7. 各要素の位置関係

このとき校正用光源系射出瞳が校正用光源系レンズによって望遠鏡射出瞳を再現するためには図7のような状況でなければならない。その条件は以下の式になる。

$$\frac{1}{l_{PF} - l_{TF}} - \frac{1}{l_{CP}} = -\frac{1}{f_C} \quad (9)$$

スリット位置で一点に収束する同族光束が校正用光源の瞳から平行に出るという条件をつける（必ずしも必要ではない）と、以下の条件となる。

$$l_{TF} = f_C \quad (10)$$

望遠鏡と同じ F/12 を再現するためには、以下の条件が必要である。

$$D_{CP} = \frac{l_{TF}}{12} \quad (11)$$

分光器内での配置を考えて  $l_{TF} = 250\text{mm}$  とすると、以上の4式から  $l_{CP} \approx 236.9\text{mm}$  と  $D_{CP} \approx 20.8\text{mm}$  となる。

校正用光源系レンズとしてはシグマ光機の口径 60mm で焦点距離 250mm のアクロマートレンズ（品番：DLB-60-250PM）があったので、これを使用することにした。

### 3-4. 校正用光源

フラット光源にはハロゲンランプを用いる。低分散モード時の広い波長域にわたって、同様の S/N を得るためには、観測可能波長域において放射強度がなるべく様な光源が必要になる。ハロゲンランプの色温度として典型的な 3,000K ~ 3,500K では青側で急激に放射強度が落ちるので、ハロゲンランプの中でも色温度の高い 4,700K のものを採用した。

コンパリソンプには、高分散時にも輝線がフレーム内に少なくとも数個存在するように、輝線の数が多い FeNeAr のホローカソードランプを用いることにした。

### 3-5. スリットビューワ/オートガイダー

スリットビューワ/オートガイダー系はスリットユニットからの反射光をリレーレンズにより検出器まで導いている。スリットビューワ/オートガイド系の仕様を表 3 にまとめる。視野 5 分以上はイメージローテータによって一部の光がケラれる。

検出器	SBIG 社製 ST-10XME
フォーマット	2048 × 1472
縮小率	0.28 倍
ピクセルスケール	0.2 /ピクセル
視野	7.1 × 5.1

Table 3. スリットビューワ/オートガイド系の仕様

### 3-6. 大気分散の影響

図 8 は白色光で観測した場合の星像の伸びを評価したグラフである。高度 40° では 2 にもなる。

なゆた望遠鏡には大気分散補正光学系が無い。そこで大気分散の影響を考慮した工夫がなされている。

天体のどこにスリットが当たっているかの確認はスリットビューワを用いるが、大気分散の影響が大きな低高度の天体では、スリットを正確に目標位置にあてるのが困難になってしまう。そこでスリットビューワ光学系にフィルターターレットを設け、観測波長域と近い透過波長のフィルターを用いることにより、得られる天体像の伸びを抑え、スリットを正確に目標位置にあてることが出来るようになってきている。

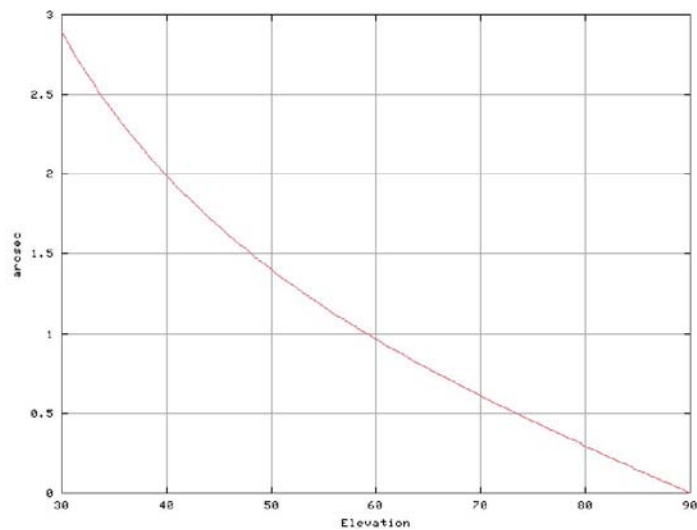


Fig. 8. 縦軸は 3,900 と 10,000 観測した場合の星像位置の角距離。横軸は高度。

大気分散は高度方向に天体像が伸びる現象であり、この影響を考慮してなゆた望遠鏡の観測システムではスリットを高度方向に固定したまま天体を追尾できる観測モードを持っている。

### 3-7. オーダーカットフィルター

オーダーカットフィルターとしてはショット社の WG320、GG495 を採用した。それぞれの内部透過率を図 9 に示す。オーダーカットフィルター切替機構にはフィルターが同時に 4 つまで搭載可能である。

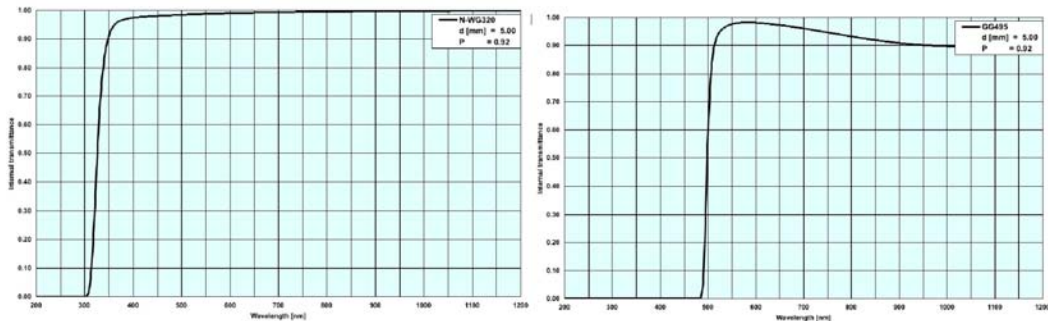


Fig. 9. 当初用意されるオーダーカットフィルター（左：WG320、右：GG495）の内部透過曲線

### 3-8. スリット

スリットは厚さ 3 mm のガラス基板にアルミ蒸着（スリット部だけ蒸着なし）を施したものをを用いている。蒸着面は望遠鏡とは反対側になるように取り付けた。これによって、スリットビューワ・ガイド系ではゴーストが発生することが予想されるが、スペクトルデータにはスリット起源のゴーストは出ないようにする。

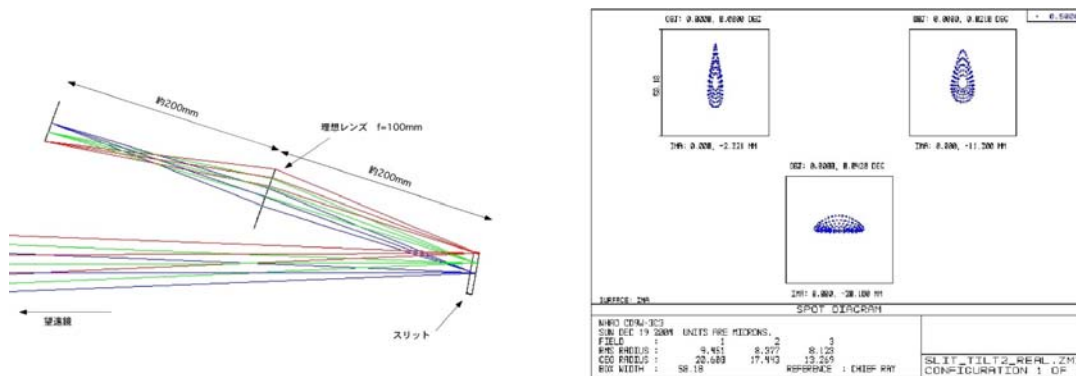
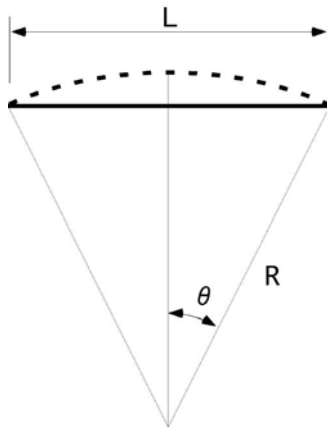


Fig. 10. スリットの許容傾け角の評価。右は傾き角 20 度のときのスポット。

望遠鏡の構造物とナスミス焦点との距離が短い（約 11cm）のでスリットビューワ／ガイド系の光学系を出来るだけ分光器側に近づける必要があった。このためにはスリットの傾け角を大きくする必要があるが、傾けると収差が大きくなってしまふ。スリットをどれだけ傾けられるかを評価するために光学設計評価ソフトを用いて簡単な評価を行った。望遠鏡の焦点位置に厚さ 5mm で裏面にアルミ蒸着したガラス基板を置き、反射光を理想レンズで等倍に結像させた（図 10 左参照）。入射光に対するガラス基板の傾き角が 20° のときのスポットが図 10 右である。図中の四角は一辺が 0.5 である。傾き角が 30° 以上になるとスポットが 0.5 を上回ってしまうので、余裕を見て傾き角は 20° とし、ガラス基板の厚さも面精度が確保できる 3mm とした。

### 3-9. ナスミス台とのインターフェース



ナスミス台は鉄で分光器はジュラルミンであるので熱膨張率の違いによって、分光器の基盤がたわむ可能性がある。熱膨張率の差は基板のたわみだけでなく、支持脚のたわみも生じさせるはずであるが、熱膨張の差が全て基板のたわみになり、ナスミス台や支持脚のたわみは生じないという簡単なモデルのもとに、基板のたわみを計算した。

$\alpha_{\text{ジュラルミン}}$ 、 $\alpha_{\text{鉄}}$ はそれぞれジュラルミンと鉄との線熱膨張係数とする。温度変化 ( $\Delta T$ ) によって基板の長さ (固定点間の長さ) が  $L$  (図中実線) から  $L + \Delta L$  (図中点線) に変化したときの状況が、図 11 のように曲率半径  $R$  で基板がたわみ、基板両端と曲率中心がなす角を  $2\theta$  となったとする。固定点が自由端である場合はたわんだ基板は半径  $R$  の円弧となることが予想される。このとき以下の 3 式が成り立つ。

$$\Delta L = (\alpha_{\text{ジュラルミン}} - \alpha_{\text{鉄}})L\Delta T \quad (12)$$

$$L = 2R \sin \theta \quad (13)$$

$$2R\theta = L + \Delta L \quad (14)$$

Fig. 11. 基板のたわみに関する  
単純化したモデル

ここで  $\sin \theta \approx \theta + \theta^3/6$  という近似を用いると、 $\theta$  は以下のように表せる。

$$\theta \approx \sqrt{\frac{6\Delta L}{L + \Delta L}} \quad (15)$$

理科年表によると、ジュラルミンと鉄の線膨張係数はそれぞれ  $21.6 \times 10^{-6}/\text{K}$  と  $11.8 \times 10^{-6}/\text{K}$  である。年間を通しての温度差を  $40^\circ\text{C}$ 、固定点間の長さ  $800\text{mm}$  (図面より) とすると、上式より  $\Delta L=0.31\text{mm}$  となり、 $\theta \approx 2.8^\circ$  となる。

これは  $800\text{mm}$  離れた光学モジュールは  $2.8^\circ$  程度のアライメントのずれが生じることを意味する。コリメーターとカメラレンズのアライメントは、ZEMAX を用いたシミュレーションからそれぞれ  $0.5^\circ$  と  $0.1^\circ$  の精度が必要であることがわかっているため、 $2.8^\circ$  という量は無視できない。

そこで、ナスミス台への分光器の搭載方法として、スリット位置付近に固定点、スリット方向へ直線的にスライドする点の一つ、自由にスライドする点を 4 点設けることにより、水平方向の熱膨張成分を吸収するようにした。分光器の加重は自由にスライドする 4 点に割り振り、固定点と直線上にスライドする点には加重がかからないようになっている。

## 4. 光学系の詳細設計

図 12 は分光器全体の光学レイアウトである。軸外し放物面鏡の軸外し角は  $3^\circ$  にした。コリメーターからの光束は折り曲げ鏡のすぐ脇をすり抜けてグレーティングへと向かう。グレーティングへの入射角と射出角の差は  $30^\circ$  となっている。

光学設計においてはコリメーター、グレーティング、カメラレンズ込みの評価でスポットの FWHM が 1 ピクセル ( $13.5\mu\text{m}$ ) に収まるようにした。収差を抑えるために、最終レンズはカメラレンズセルとは分離させ、出来るだけ CCD の近くに配置させるようにしている。最終レンズはデュワーのフランジ面に取り付けられる。

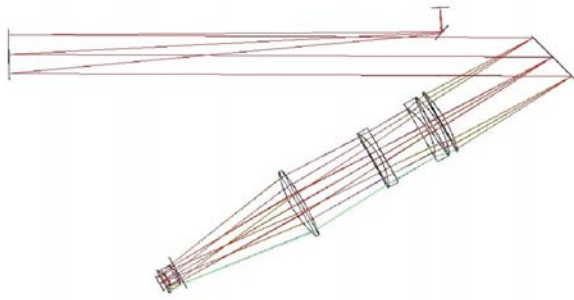


Fig. 12. 軸上色収差の状況

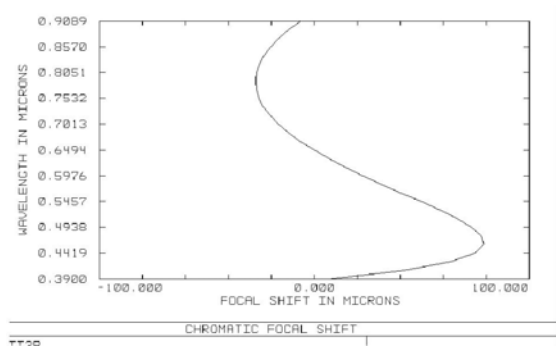


Fig. 13. 光学系レイアウト

レンズと CCD カメラウインドウガラスの AR コーティングは全体のバランスを見て 5000 で最適化した。コリメーター、折り曲げ鏡、スリットはアルミ蒸着だけで、保護膜はつけていない。

図 13 は光学系の軸上色収差の状況である。プラスマイナス  $75\mu\text{m}$  程度に収まっているのがわかる。低分散モードのときにはグレーティングでの角倍率による影響を考慮してもビーム径は最大で 82mm となり、結像光学系の焦点距離 314.5mm を考慮すると、このシフト量は 1.4 ピクセルのボケ量となる。低分散モードでのサンプリングが 3.7 ピクセルであるので、このボケ量を考慮すると 4.1 ピクセルのサンプリングとなる。低分散時に波長の異なる輝線のプロファイルの比較をする場合には注意が必要である。

## 5. 装置レイアウト

図 14 は装置のレイアウトである。スリットビューワー/ガイド系と校正用光源系が収まる前室と分光器メイン光学系が収まる後室に分かれている。グレーティングの切替は垂直方向のスライドベンチにより行われ、最大 3 つまで搭載可能である。

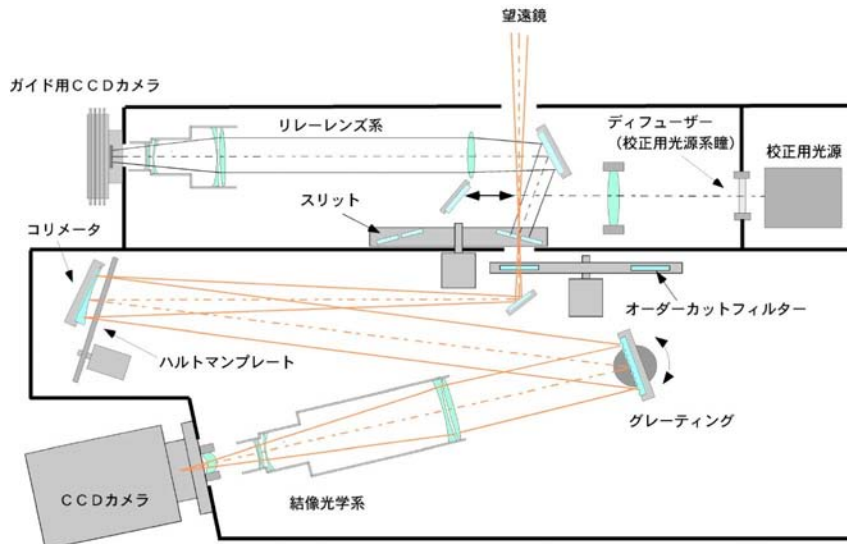


Fig. 14. 可視光分光器レイアウト

## 6. 限界等級

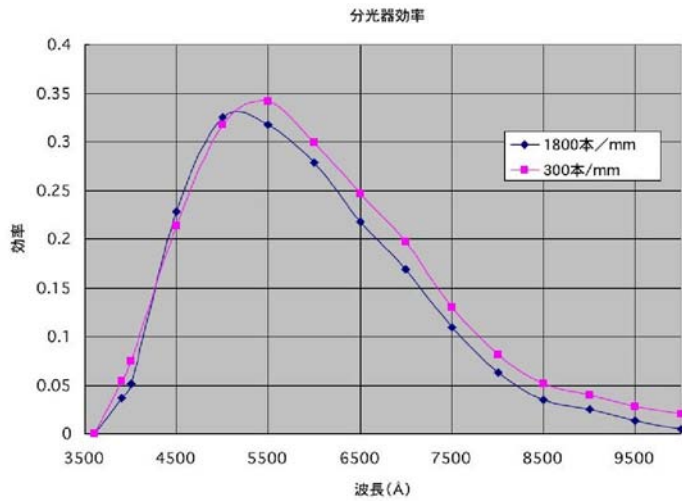


Fig. 15. 予想されるシステム効率

予想されるシステム効率は図15の通りである。主鏡、副鏡、第3鏡、イメージローター内の3枚の鏡は業者より提供された測定値を採用している。スリット、オーダーカットフィルターの透過率は一律で96%と仮定した。折り曲げ鏡とコリメーターは理科年表のアルミの反射率を採用した。カメラレンズの透過率は設計値を採用した。CCDの感度はカタログ値を採用した。これには大気の吸収は含まれていない。

この効率をもとに、予想される限界等級の見積を行った(図16)。シーイングサイズ1.2、スカイ20等級/arcsec<sup>2</sup>、読み出しノイズ8e<sup>-</sup>、暗電流0e<sup>-</sup>/sec、大気その他の減光50%という値を用いている。

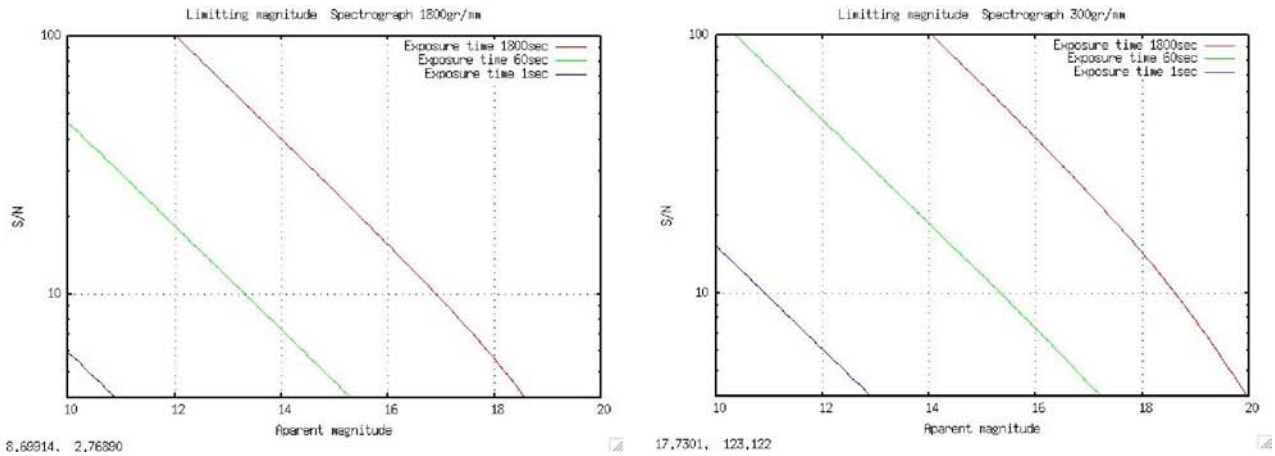


Fig. 16. 予想される限界等級。左は1800本/mm、右は300本/mmのグレーティングを用いた場合。

## 7. CCDカメラ

CCDカメラは可視光撮像装置と同じものを用意した。詳細に関しては「可視光撮像装置 I.設計」を参照されたい。もしも一方に不具合が発生しても、もう一方を用いて運用を続けられるようになっている。

## 8. 制御系

分光器本体は CCD カメラと別系統で制御される。観測装置制御計算機に分光器本体用と CCD カメラ用の制御ファイルとステータスファイル、そして望遠鏡情報ファイルが置かれている。分光器制御計算機と CCD カメラ制御計算機はそれぞれの制御ファイルを読み込むことによって、統合制御システムから制御コマンドを受け取る。装置のステータスはそれぞれの制御計算機がステータスファイルに書き込むことによって、統合制御システムへ受け渡される。CCD カメラ制御計算機では分光器ステータスファイルと望遠鏡情報ファイルから情報を取得し、FITS ヘッダーにしかるべき情報を載せた後、一次ストレージにデータを送る。

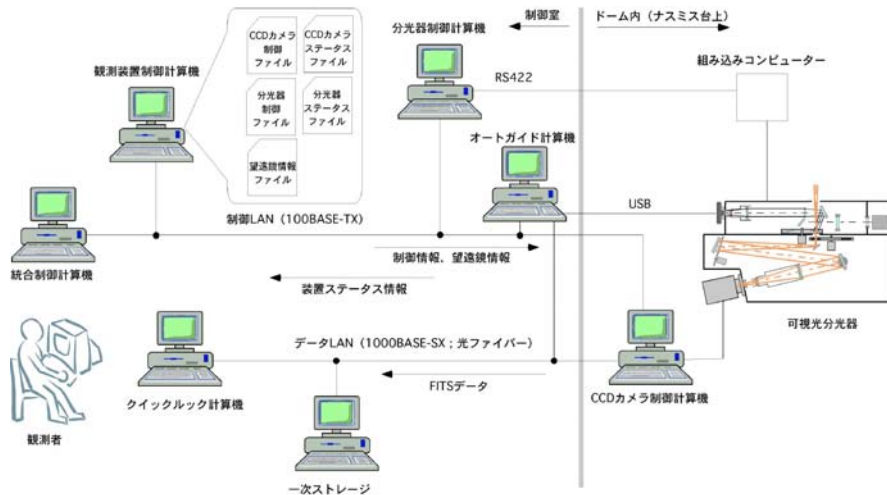


Fig. 17. 制御系のブロックダイアグラム

設計に際してアドバイスをいただいた清水実さん、田中済さん、前原英夫さん、大谷浩さん、海老塚昇さんに感謝いたします。ホロカソードランプの選択にあたってアドバイスと協力をしていただいた川端哲也さんと河北秀世さんに感謝いたします。最後に様々な面でサポートしていただいた西はりま天文台公園の職員の方々に感謝します。

### 《参考文献》

光学の基礎と天文への応用（特に分光器）について書かれた本として以下の2冊を参考にした。

「Astronomical Optics second edition」 Daniel J. Schroeder, Academic Press.

「反射望遠鏡」 山下泰正、東京大学出版

光学に関する基礎的な教科書として以下を参考にした。

「光学入門」 岸川利郎、オプトロニクス社

グレーティングに関しては以下の2冊を参考にした。2冊目にはリトロ条件から外れるにしたがって効率がどのように変化するかという情報が載っている。

「Diffraction Grating Handbook」 Richardson Grating Laboratory.

「Diffraction Gratings and Application」 Erwin G. Loewen and Evgeny Popov, Marcel Dekker Inc.