

## ミラーコロナグラフの概念設計

‘99/07/25 一本 潔 (国立天文台)

‘99/09/06 “

### 0. プロジェクトの目的

本プロジェクトの目的は乗鞍コロナ観測所に口径 12cm のミラーコロナグラフを開発し、

- 1) 下記ミラーコロナグラフの利点を生かした太陽観測 (赤い NOGIS、H $\alpha$  全面観測、赤外線観測) を実現すること、
- 2) 下記技術的課題を克服し、大型ミラーコロナグラフおよびスペースコロナグラフの実現に向けて基盤を確立すること、

である。

#### ミラーコロナグラフの利点

- ・ 色収差がないため多波長での同時観測が可能。
- ・ 大気の散乱光が少なく磁場観測に有利な赤外領域の観測を可能とする。
- ・ 通過型オカルティングディスクを使うことにより光球／彩層の同時観測が可能。
- ・ 主鏡角度制御によりガイド誤差の高速補正が可能。
- ・ 大口径コロナグラフへの技術継承。

#### 技術的課題

- ・ 超低散乱鏡の製作・評価
- ・ 主鏡メンテナンス法の確立
- ・ 主鏡制御によるガイド補正機構の開発

ミラーコロナグラフは現在稼働中の自動コロナグラフと置き換える形で乗鞍 10cm ドーム赤道儀にマウントする。焦点面光学ベンチには

コロナグラフとして

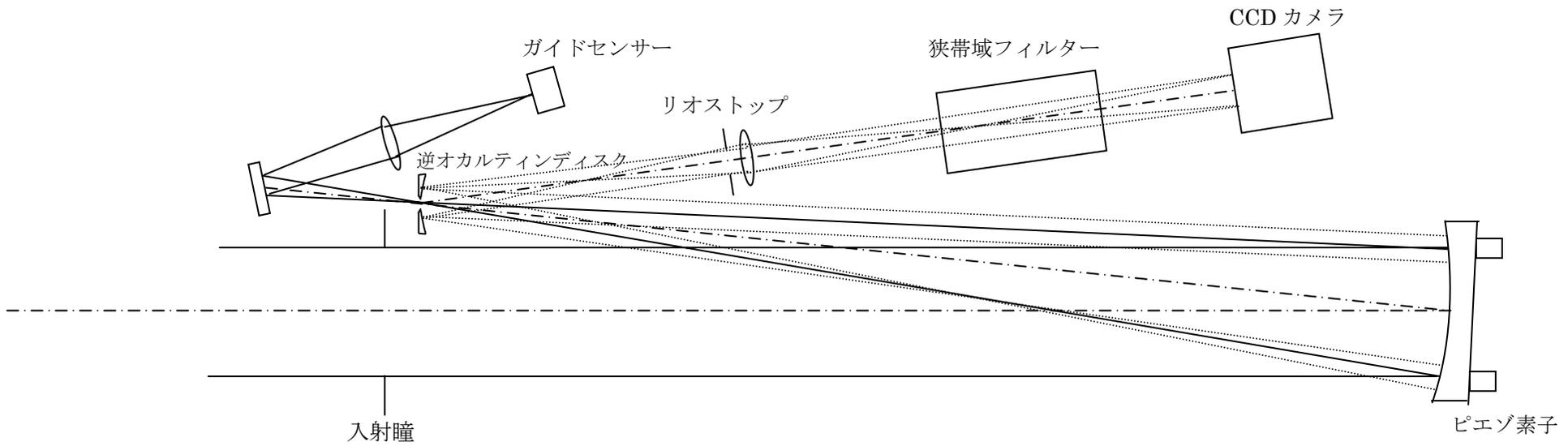
- 1) H $\alpha$  撮像装置
- 2) FeX6374A 速度場観測装置
- 3) 試験用赤外線撮像パス

通過太陽光パスに

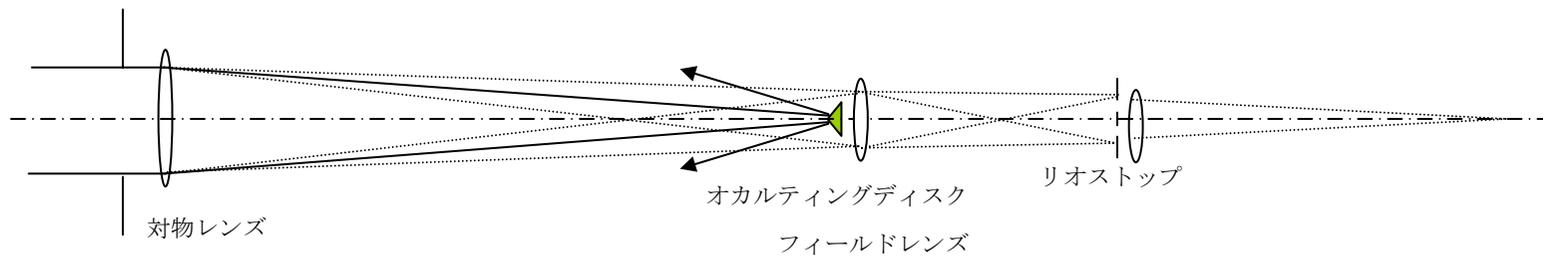
- 1) ガイド用センサー
- 2) H $\alpha$  全面撮像装置

を設ける。

# ミラーコロナグラフ概念図



## [ 従来のコロナグラフ ]



## 1. 光学系パラメータの最適化

### 1-1. 拘束条件とパラメータ表記

入射光束中に遮蔽物を入れないようにするため、主鏡からオカルティングディスクまでを軸はずし光学系とする。

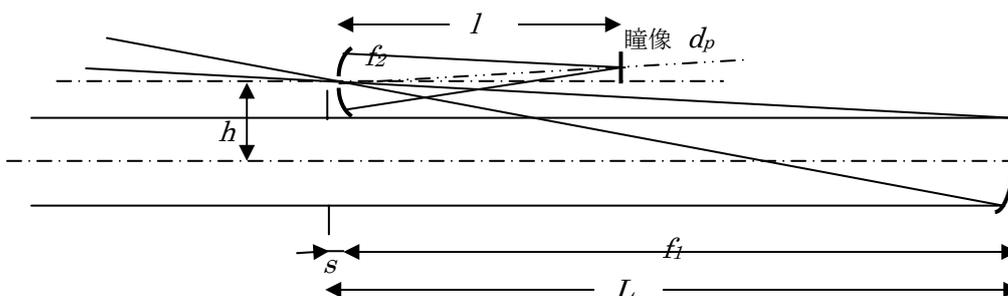


図1. 軸はずし光学系主要パラメータ。

#### 主鏡：

10cm赤道儀にマウントする事を考慮し、主鏡パラメータは以下の値とする。

外径	$D_I = 150\text{mm } \phi$
有効径	$D_{Ie} = 140\text{mm } \phi$
焦点距離	$f_I = 2250\text{mm (F/15)}$

#### 視野：

視野半径は太陽視半径の  $r$  倍を確保する。従って、

$$\text{視野半径} \quad \theta_{FOV} = R_o \times r = 16.3' \times r \quad (R_o : \text{最大太陽視半径})$$

#### 開口絞り：

開口絞りの入射側面には太陽光が当たるので、これを検出器から見える2次鏡（逆オカルティングミラー）と主鏡の間に置くことはできない。従って、主鏡と開口絞りの距離  $L_p$  は  $f_I$  よりも大きくなる ( $L_p = f_I + s$ )。さらに、開口から入射した太陽光はすべて主鏡有効面に当たる必要がある。従って、

$$\text{開口絞りの径} \quad D = D_{Ie} - 2 R_o L_p$$

$s = 10\text{mm}$  とする。このとき、

$$D = 118.6\text{mm}$$

となる。

### オフセット量：

視野と主鏡焦点距離から2次鏡の必要径が決まる。

$$D_2 = 2 \theta_{FOV} f_1$$

例えば、 $r=2$  とすると  $D_2 = 42.7\text{mm}$  となる。

2次鏡が開口からの光を蹴らないためにはオフセット距離 ( $h$ ) を

$$h > (D + D_2) / 2$$

とする必要がある。オフセット距離及び  $D_2$  のマージンを  $h_m$  とする。すなわち、

$$h = (D + D_2) / 2 + h_m$$

主鏡反射光の光軸からのオフセット角は  $\theta_1 = h/f_1$ 、主鏡中心の法線は、 $\phi_1 = \theta_1/2$  の方向を向くことになる。

### 瞳像と2次鏡焦点距離：

2次鏡は穴あきの球凹面鏡 (焦点距離  $f_2$ ) で、これによって2次鏡からの距離  $l$  のところに直径  $d_p$  の瞳像をつくる。主鏡によってつくられる瞳像の主鏡からの距離を  $l'$ 、その大きさを  $D$  とすると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{l'} + \frac{1}{L_p} &= \frac{1}{f_1}, & D' &= D \frac{l'}{L_p} \\ -\frac{1}{l'-f_1} + \frac{1}{l} &= \frac{1}{f_2}, & d_p &= D' \frac{l}{l'-f_1} \\ d_p &= D \frac{l'}{L_p} \frac{l}{l'-f_1} = D \frac{l}{L_p} \frac{1/f_1}{1/f_1 - 1/l'} = D \frac{l}{L_p} \frac{L_p}{f_1} = D \frac{l}{f_1} \end{aligned}$$

従って、

$$l = f_1 \frac{d_p}{D}$$

$$\frac{1}{f_2} = -\frac{1/l' f_1}{1/l' - 1/f_1} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f_1} \left( \frac{1}{f_1} - \frac{1}{L_p} \right) L_p + \frac{1}{l} = \frac{L_p}{f_1^2} - \frac{1}{f_1} + \frac{1}{l}$$

$d_p = 30\text{mm}$  とする。このとき  $f_1 = L_p$ 、 $D = 120\text{mm}$  とすると、 $l = f_2 = 560\text{mm}$  となる。

### 2次鏡の傾き：

2次鏡のできる瞳像の位置にはリオストップが置かれる。主鏡から2次鏡へ向かう光がリオストップによって蹴られないための条件を考える。

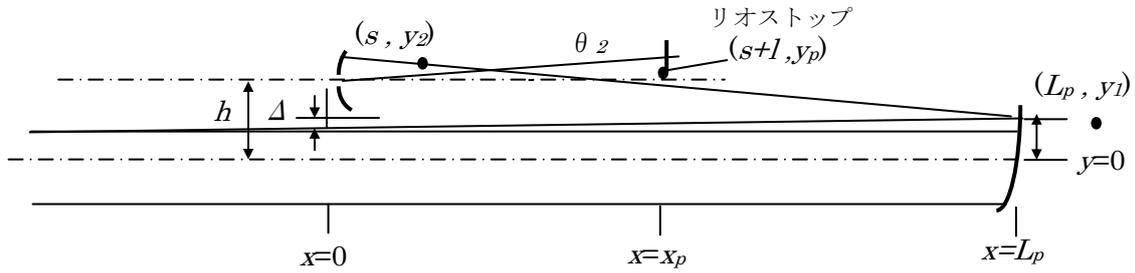


図2. リオストップによる1次反射光の蹴られと2次反射光のオフセット角。

図2のような $(x, y)$  座標を考える。2次鏡による瞳像の下端の位置  $y_p$  は、2次鏡から反射される光の光軸に対する角度を  $\theta_2$  とすると、

$$y_p = h + \theta_2 l - d_p/2$$

となる。

主鏡から2次鏡へ向かう光のうち最も外側を通る光線は図のように主鏡・2次鏡上の点  $(L_p, y_1)$ 、 $(s, y_2)$  をとおる。ここで、

$$y_1 = \theta_{FOV} L_p + D/2 - \Delta \quad \text{or} \quad D_1/2 \quad (\text{小さい方})$$

$$y_2 = \theta_{FOV} f_1 + h$$

蹴られを防ぐために開口の一部をマスクすることを想定し、 $\Delta$ はその深さである。光線を  $y = ax + b$  で表すと、上記2点を通ることから  $y_1 = aL_p + b$ 、 $y_2 = as + b$ 、すなわち  $a = -(y_2 - y_1)/(L_p - s)$  が得られる。瞳位置での光線の  $y$  座標は、

$$y_p' = a(s+l) + b$$

で得られ、リオストップが光を蹴らないための条件は、

$$y_p > y_p', \quad \text{あるいは} \quad y_p = y_p' + \beta$$

となる。ここで  $\beta$  はマージンで 3 mm とする。従って、2次鏡から反射される光および2次鏡のオフセット角は、

$$\theta_2 = (y_p' + \beta - h + d_p/2)/l$$

$$\phi_2 = (\theta_2 - \theta_1)/2$$

となる。

以上、リオストップに至るまでの基本パラメータを表にまとめる。

	表記	値
主鏡外形	$D_1$	150 mm
“ 有効径	$D_{1e}$	140 mm
“ 焦点距離	$f_1$	2250 mm
視野半径	$\theta_{\text{FOV}}$	$16.3' \times r$
“ 指数	$r$	1.5 – 2.0
開口－2次鏡間距離	$s$	10 mm
開口－主鏡間距離	$L_p$	$f_1 + s$
開口径	$D$	$D_{1e} - 2 \theta_{\text{FOV}} L_p$
1次焦点オフセット距離	$h$	$(D + D_2) / 2 + h_m$
“ マージン	$h_m$	5 mm
“ 角	$\theta_1$	$h / f_1$
主鏡オフセット角	$\phi_1$	$\theta_1 / 2$
瞳像サイズ	$d_p$	30 mm
2次鏡－瞳像間距離	$l$	$f_1 d_p / D$
2次鏡直径	$D_2$	$2 \theta_{\text{FOV}} f_1$
“ 焦点距離	$f_2$	$1 / (s / f_1^2 + 1 / l)$
2次鏡反射光オフセット角	$\theta_2$	$\theta_2 = (y_p' + \beta - h + d_p / 2) / l$
2次鏡オフセット角	$\phi_2$	$-(\theta_2 - \theta_1) / 2$
リオストップマージン	$\beta$	3 mm
開口マスクの深さ	$\Delta$	0 mm

## 1－2．主鏡形状

主鏡の形状には球面と軸はずし放物面の2つの選択枝があろう。図3はそれぞれの場合について1次焦点における最良像面の位置と最良像面におけるRMSスポット半径を像高に対してプロットしたものである。これより、最良像面における太陽リムの像質は放物面鏡の方が球面鏡よりも2－3倍良いことがわかる。しかし放物面鏡の場合、最良像面は光軸に対して球面鏡の場合よりも2倍傾いており、その法線は主鏡中心を向いている。

1－1の定式化より、望遠鏡視野( $\theta_{\text{FOV}}$ )と1次焦点オフセット量( $h$ )を与えると、光が蹴られない条件から、2次反射光のオフセット角( $\theta_2$ ) (すなわち2次鏡オフセット角( $\phi_2$ ))が決まる。従って、2次鏡の傾きを最良像面と一致させることは出来ず、その不一致は放物面鏡の場合の方が大きいことになり、2次鏡上での像質は必ずしも放物面鏡の方がよいとはいえない。図4上は3種類の視野について $h$ と $\theta_2$ の関係を示したものである。この関係より各( $h, \phi_2$ )について太陽リムの2次鏡上における像質を求めた(下)。これより、次のことが言える。

- 1) 2次鏡上でのリムの像質は、 $h$ にかかわらず放物面鏡の方が球面鏡よりもよい。ただし $h$ が小さいときその差は小さい。
- 2)  $h$ が小さいほど2次鏡でのリム像質はよい。ただし放物面鏡ではその変化は小さい。
- 3) 視野を大きくすると $\theta_2$ は大きくなるが、2次鏡での像質はあまり変わらない。

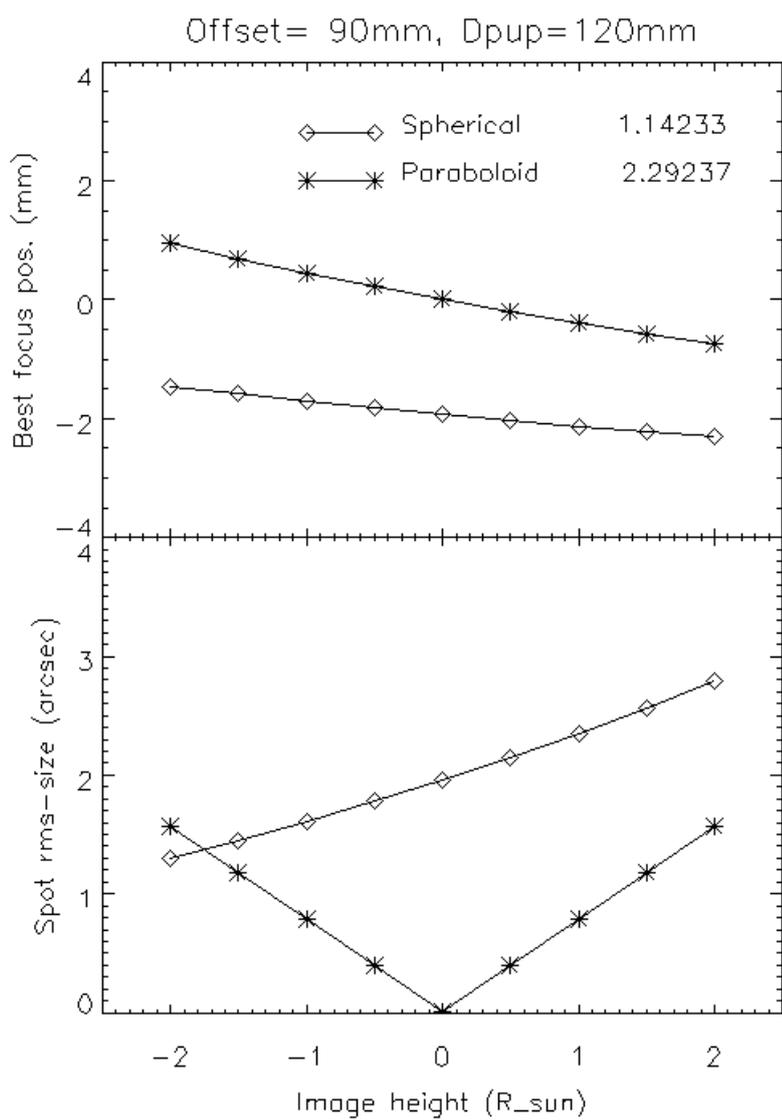


図 3. 球面鏡と軸はずし放物面鏡による 1 次焦点像の RMS スポット直径。上はベストフォーカスの位置をプロットしたもので、線の傾きは最良像面の傾きを表す。軸はずし距離を 90mm、開口を 120mm とした。

放物面鏡の場合最終的な最良像面は CCD に向かう光軸と直交している。また、図 3 に見える軸対象なコマ収差は結像レンズで除去することも可能であろう。これらの理由により CCD における像質は放物面鏡を使った方がよいことが期待できる。

結論：主鏡は軸はずし放物面鏡とする。

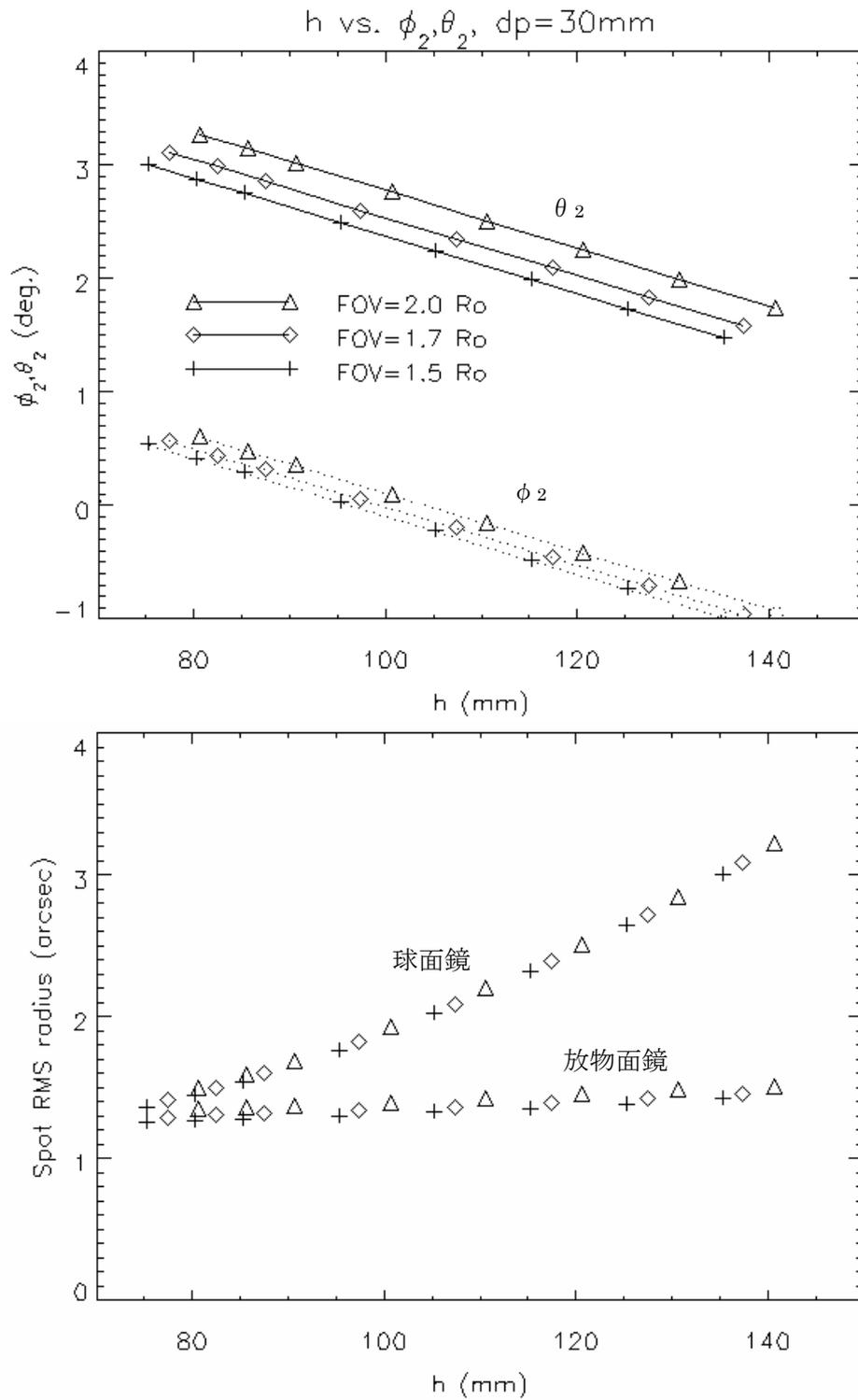


図4. 上：1次焦点オフセット距離 ( $h_m=0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60\text{mm}$ ) に対する2次鏡および2次反射光の必要オフセット角 (光が蹴られない条件より)。下： $h$ に対する2次鏡上での太陽リムのRMSスポット半径 (上下のリムの平均が最良となったとき)。3つの望遠鏡視野角について異なったシンボルで示してある。 $d_p = 30\text{mm}$ 。

### 1-3. 視野／軸はずし量の最適化

視野を大きくとると、光が蹴られないためにより大きな軸はずし量が必要となる。しかし、図4より、放物面鏡を使った場合2次鏡での像質は視野の大きさにほとんどよらないことがわかる。そこで、視野は2倍の太陽半径を確保することにする。

このとき、2次鏡の必要サイズ(42.65mm)から決まる軸はずし距離はマージンを5mmとすると、 $h > 85.62\text{mm}$ となる。一方、軸はずし放物面鏡の製造コストを考えたとき、 $h < 125\text{mm}$ であることが望まれる(必要である)。この範囲で $h$ に対する制約は特にないので、製造上の見通しの良さを優先して、2次鏡の法線がちょうど望遠鏡光軸と平行になるような配置とする( $\phi_2 = 0$ )。図4より、これを満たすためには $h = 110\text{mm}$ であればよいことがわかる。これにより、2次鏡およびリオストップまわりのスペースにも余裕がもてる。このとき $\theta_1 = \theta_2 = 2.802$ 度である。図5に光路図を示す。



図5.  $h = 110\text{mm}$ の対象型配置。リオストップから50mmのところを $f = 400\text{mm}$ の結像レンズをおいた。

## 2. 主鏡面について

### 1-1. 鏡面粗さと散乱光強度

鏡面の粗さ(microripple)を $\sigma$ (RMS, A)とする。このとき散乱光となるエネルギーの割合は光の波長を $\lambda$ とすると、

$$R = 1 - \exp(-(4\pi\sigma/\lambda)^2) \sim (4\pi\sigma/\lambda)^2$$

で与えられる(Astronomical Optics, p209)。主鏡に当たる太陽光強度を $I_o$ ( $\text{erg/cm}^2/\text{A/s/str}$ )とし、散乱を等方的とすると、コロナ画像に被る散乱光強度は、

$$I_s = I_o \times R / \pi$$

となる。(図6)

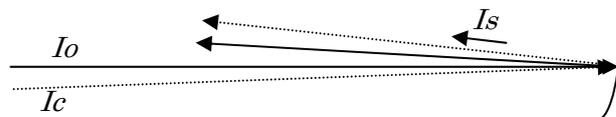


図6. 太陽光球光とコロナ光の反射

図7に鏡面粗さに対する散乱光強度の相対値を3つの波長について示す。太陽コロナの強度は  $I_0$  に対しておおむね  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  程度である。従って、主鏡の面粗さは 2—3Å(RMS)程度まで抑えたい。

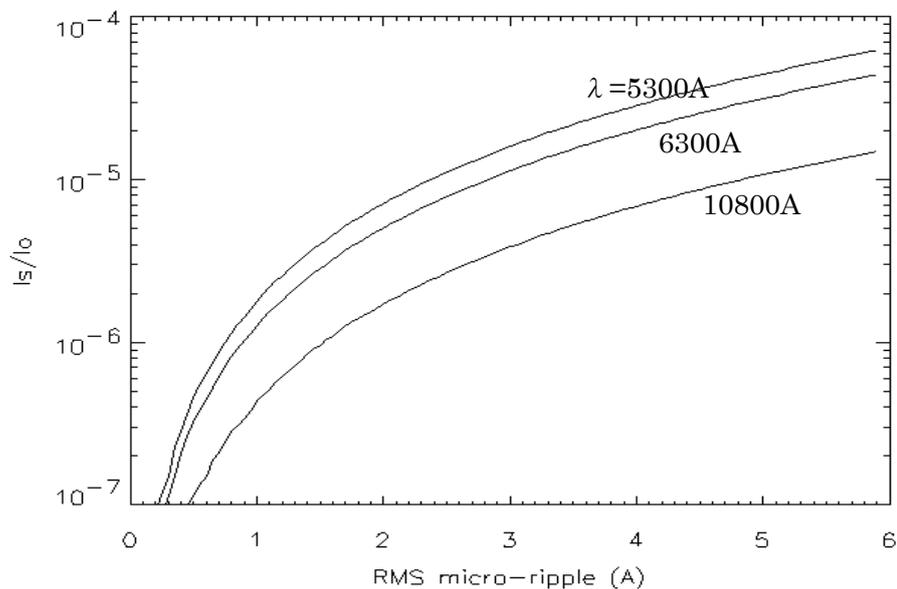


図7. 表面粗さと散乱光強度の関係

波長  $l$  の周期的な microripple は、角度  $\sin(\theta_s) = \lambda/l$  の方向に選択的に光を散乱する。図8は microripple の空間スケール (波長) に対する散乱角を3つの波長について示したものである。我々は太陽リムからの距離が 20 秒角程度より上空のコロナを観測したいと考えているので、観測に大きな影響を与える microripple のスケールはおよそ 10mm 以下である。

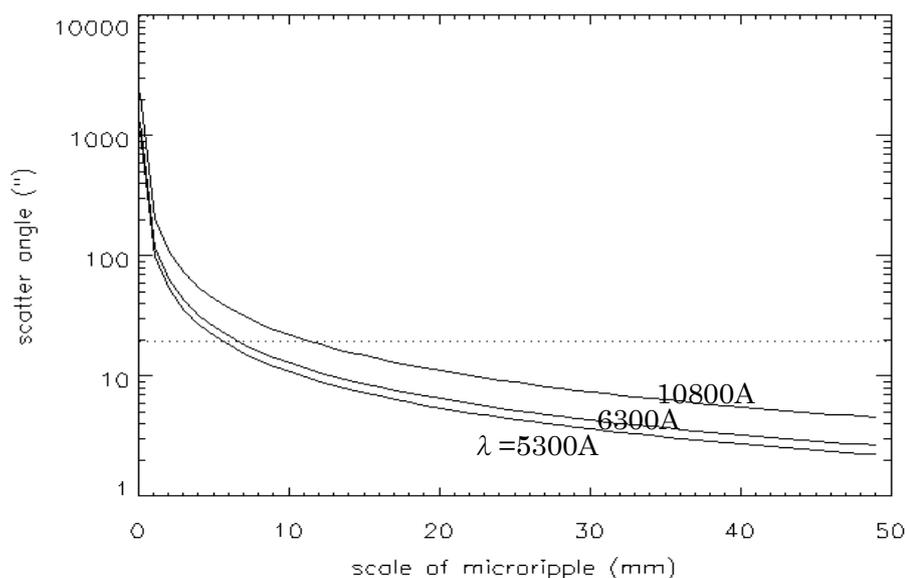


図8. Microripple のスケールに対する散乱角。

## 1-2. 観測波長とコーティング

主鏡コーティングに求められる条件は、

- ・ 観測波長においてできるだけ反射率が高いこと、
- ・ 散乱光が極力小さいこと、
- ・ 主鏡の清掃／メンテナンスが容易におこなえること、

である。

本ミラーの製作は Solar-B (次期太陽観測衛星) 可視光望遠鏡の開発に向けた基礎実験的な意味も大きいので、金属膜にはそこで採用予定の銀を用い、主鏡面は銀+保護コーティングとする。

候補となる保護膜を施した試験ミラーを製作して、散乱光・反射率測定、清掃を繰り返し、最適な保護膜を決定する。

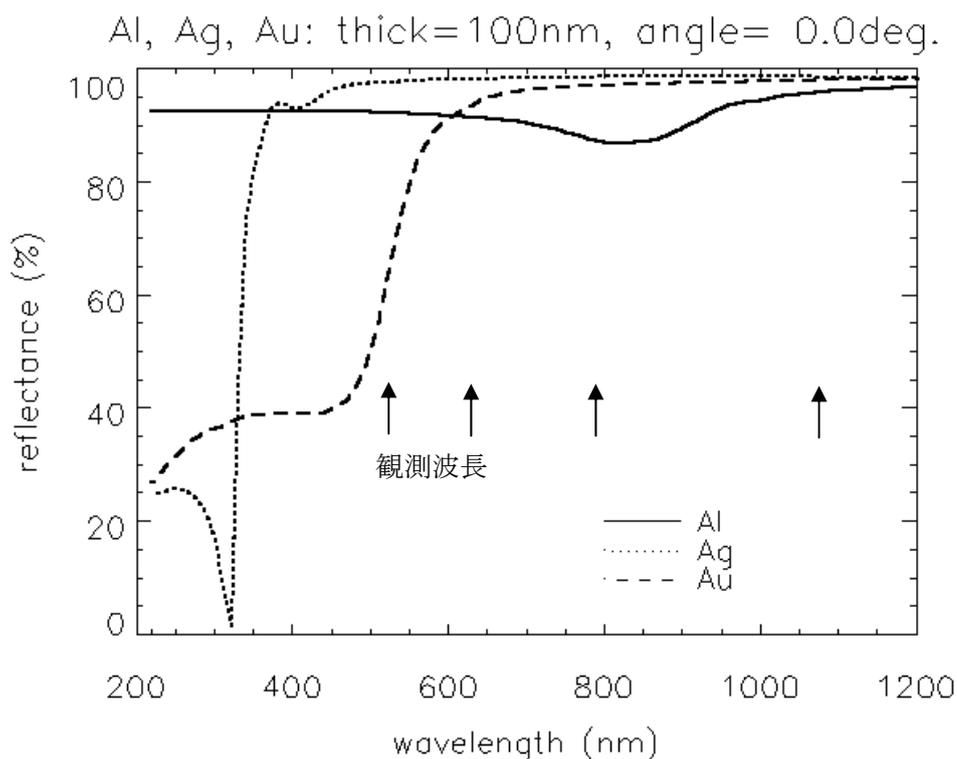


図9. アルミ、銀、金膜の分光反射率。

以上、