

シュミット望遠鏡の光学系について

永 山 嘉 重

1. シュミットカメラの原理

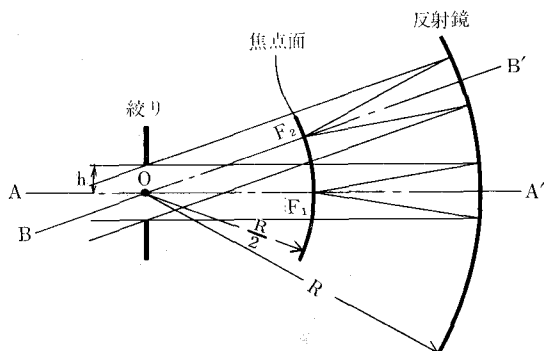
第1図に示す如く球面鏡の曲率中心に絞りをもつような光学系に於て、その絞りが充分小さな場合、即ち近軸光線領域に於ては、その焦点は球面鏡の曲率半径 R の $1/2$ の所 F_1 に結像する。絞りの中心 O を通る光線 $A-A'$ 、いわゆる主光線に対して、絞りを通る上下の光束は対称的に反射し結像されるのでコマ収差は生じない。また主光線に対して球面鏡は対称形であるから非点収差も生じない。光軸 $A-A'$ に対し斜めに入射する $B-B'$ の光線も絞りが球面鏡の曲率中心 O にあるので $A-A'$ と同様に $R/2$ の所 F_2 に結像する。このように球面鏡の曲率中心に絞りをもつ光学系に於てはコマ収差、非点収差をもたない。またこの光学系により天球座標のように無限遠方にある物体の撮影を行なった場合には絞りの中央 O を中心とした相似の球面上に結像されるので歪曲収差も生じない。しかしながら F_1F_2 は球面上に結像されているので像面彎曲収差が存在する。

絞りの大きさを軸光線領域から外し拡大して考えると球面収差が生ずる。この球面収差は絞りの大きさ即ち輪帯の高さ h の三乗に比例した大きさになる。

普通、球面鏡の曲率中心に一面が平面でもう一方の面を非球面で構成された一枚の非球面レンズを置き、絞りを通る光線をそれぞれの三乗に比例させて連続的に角度変化を与える。このようにして球面収差を補正した光学系がシュミットカメラと呼ばれている。

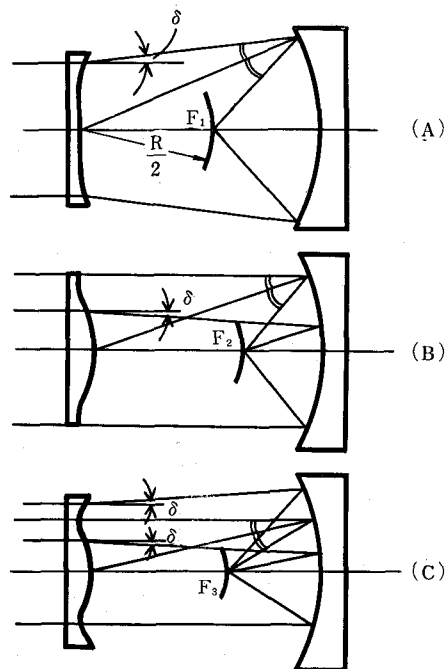
2. シュミットプレートの形状

絞りを通る全ての光線を球面鏡の曲率半径の $1/2$ の点 F_1 に結像させるためには、絞りの周辺に行くほど光線の偏りが外向きに大きくなるような形状、即ち凹レンズ変形のシュミットプレートにすれば良い(第2図-A)。また絞りの周辺の光線が球面鏡により反射され光軸と交わる点 F_2 に全ての光線を結像させるためには内側に光線が偏るような凸レンズ変形のシュミットプレートにすれば良い(第2図-B)。また輪帯の中間を通過する光線が球面鏡により反射され光軸と交わる点 F_3 に全ての光線を結像させるためにはこの中間の輪帯を変曲点



第1図 シュミット望遠鏡の原理

としてそれより外側では凹レンズの作用をなし内側では凸レンズ作用をもつシュミットプレートとすれば良い(第2図-C)。凹レンズ変形のシュミットプレートも凸レンズ変形のものも一種のプリズム作用をなし光線を一方に偏げる。両者は輪帯の中間に変曲点をもつシュミットプレートより変形量が大きくなるので当然分散も大となり色収差による錯乱像も大きくなる。



第2図 焦点の位置によるシュミット補正板の形のちがひ。

* 日本光学工業株式会社
Yoshishige Nagayama: Optical System of Schmidt
Telescope

シュミットプレートの硝子材料はこの意味から屈折率が大きく分散の小さい厚さもできるだけ薄いものを用いることが望ましい。しかしながら天体観測用のシュミット望遠鏡は大口径のものが多く、これら大口径のシュミットプレートの製作に適する泡、脈理、等光学的欠陥の少ないもので、短波長の光も良好に透過させることが必要である。一般にはクラウン系のガラスが用いられる。

シュミットプレートの中性帯を輪帯のどの高さにとるかに関しては、波長範囲、使用する硝子材料の分散等を考慮し、最も適した位置が見出されなければならぬ。

通常この中性帯の位置を決めるには色収差が最小になるといわれているシュトレームグレンの条件¹⁾を適用している。

実際に光線追跡を行なう場合にはシュトレームグレンの条件等を参考にして中性帯の高さを決定し焦点位置が球面鏡の頂点からどの位離れているかを定める。この点から球面鏡の任意の各輪帯に光をあて反射された光が絞りの位置に達した時の光軸からの高さ及び方向を求める。次にシュミットプレートの表面側より平行光線をそれぞれの点に対応する高さに入射させ反射鏡側から来た光と接続させシュミットプレートの屈折率により両者の方向が一致するような傾きを決める。

この点の連続が非球面の形状となるのであり普通 100 点位この位置を求めこれをサンプルポイントとして高次の式(約 10 次~14 次)に展開する。この式がシュミットプレートの形を表わすものであり、光線追跡プログラムの中にレンズデータとして送りこむ。中性帯の位置が変れば非球面の形状も変るのでそれぞれについて基準波長以外の光線をも含んだ追跡計算を行ない最も収差の少ない非球面レンズを決定する。

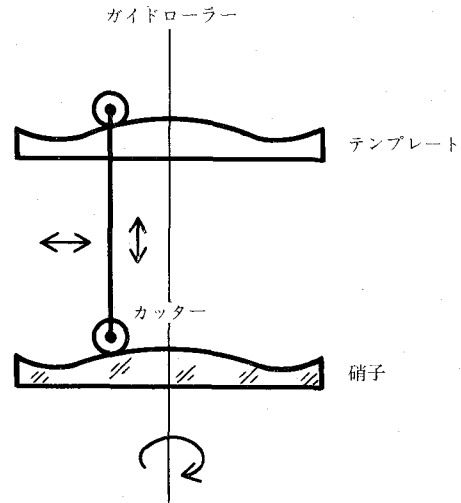
3. シュミットプレートの製作

1) 研削(ダイヤモンドホイールによる成型)

▶テンプレート(型板)による倣い研削

シュミットプレートのように回転対称な非球面レンズの場合には非球面レンズの断面形と同一のシュミットプレートをあらかじめジグボーラー等で精密に加工しておき、これを案内にしてダイヤモンドカッターにて加工する。硝子材料を回転テーブルに取付け、回転させながらその上をダイヤモンドカッターを半径方向に移動させ、切込みは前記プレートを案内にして行なう(第3図)。

このような加工ではテンプレートの半加工精度やダイヤモンドパウダーの粒度によって非球面の精度が決まってしまうのであまり高精度のものには不向きである。この方法で加工された非球面は 10μ 程度の精度しか期待



第3図 テンプレートによって鏡面をけずる。

できない。

▶N.C. (Numerical Control) 装置による研削

成型する非球面の形状、即ち半径方向の変化量と切込み量をあらかじめテープに入れておき、このテープの数値を読みとりカッターを移動させて加工する方法である。この変化量は無限に細かくテープに入れることもできるので、かなり高精度に非球面成型が可能である。硝子材料は回転テーブル上に固定し回転しながら研削加工を行うことは倣い研削の場合と同様である。我々の経験した非球面加工に於いてはほぼ 1μ の精度が確保された。

2) シュミットプレートの検査

研磨加工された非球面レンズは主鏡と組合せ、シュミットカメラとして組立てた状態で星野撮影テストを行なうことが最も良い方法である。しかし研磨工程中にこのようなテストを行なうことはかなり困難であり研磨機に取付けた状態でテストできることが望ましい。

▶テンプレートによるスキ見法

非球面レンズの形状と全く反対の凹凸に加工された金属板のゲージを作りこれを研磨された非球面に直接つき合せ照明光をあて側面より観測する。非球面レンズとゲージのわずかな空隙から通過する光は回折され、眼を一定の方向に置き観察すると回折光が見える。空隙の大きさが異ると回折された光の色が異って見えるのでこの色が同一になるように非球面レンズの凹凸を修正研磨する。

▶シャリング干渉計による横収差測定法

シュミットプレートの平面側をあらかじめ研磨し Al 蒸着を施し反射鏡にしておく。次に非球面側を研磨し研磨機のテーブルにのせたままテーブルを回転し垂直に立てた状態でシュミット光学系が構成されるよう、所定の位置に球面鏡をセットしておく。焦点面に点光源を置き

¹⁾ 「シュミットカメラ」 広瀬秀雄著 物理学集書 8、河出書房 p. 41

実際にカメラとして使用する場合の逆向きに光を送りこむ。非球面レンズの平面側で反射されて再び焦点面に結像する。この光束を総てとらえることができるような開口数をもった球面収差の少ない顕微鏡対物レンズを用い再び結像させる。さらにこの光をシャリング干渉計でとらえシュミットカメラの横収差を干渉縞のまがりとして直接測定する²⁾。

この方法によればシュミットプレートのどの部分の輪帯によって横収差が生じているのかが判別できるばかりでなく、その量を直接読みとることができるので部分的な修正研磨を行なうのに非常に好都合である。

アルバム 1 頁目左側の写真は口径 50 cm F/2 焦点距離 1 m のシュミットカメラの測定例で (A) は前記スキ見法により研磨された装置の横収差であり中性帯付近ではかなり大きな横収差が存在している。(B) はシャリング干渉計により測定した (A) のシュミットプレートを部分的に手作業で修正研磨したものである。横収差の量はかなり縮小されているがかなりのバラツキがある。(C) は NC 装置の研削機により成型されたシュミットプレートを研磨した場合の測定値でシャリング干渉計による測定、ロンキーテスト、ポイントテストを併用し非対称が生じないように機械的に修正研磨されたものである。横収差の量がかなり少なく各輪帯による横収差のみだれが比較的なめらかで所定の非球面カーブに対してかなり忠実にできていることがわかる。

右側の写真は、前記三種の加工法により作られたシュミットカメラによる星像写真で、左右がそれぞれ対応しており (A) では残存の輪帯収差が大きく (B) は星像そのものは小さいが部分修正研磨のバラツキがかなり影

響してアス状になり、(C) の星像が最も良いことがわかる。

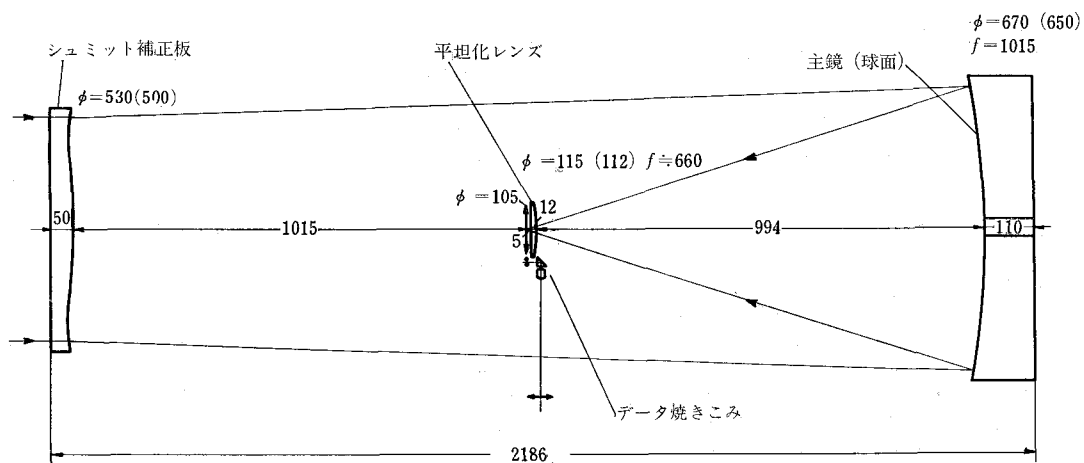
4. 50 cm 彗星写真儀の光学系について

この機械は昭和 39 年に日本光学工業で製作され東京天文台に納入されたもので、口径 50 cm F/2 焦点距離 1 m のシュミットカメラで、光学系の詳細は第 4 図に示す。焦点面は球面で使用する以外に焦点面直前に像平坦化レンズを置き平坦な焦点面に直して乾板等の使用も可能に設計されている。この機械は将来計画されるであろう大型シュミット望遠鏡製作への一つの過程と考へられ種々の検討項目が含まれている。特に光学系のできばえが問題であり 50 cm クラスのものでかなり良い結果が得られないかぎりさらに大型のシュミット望遠鏡の製作はむずかしくなる。

当時は非球面の加工技術、検査技術が未熟であったため、前記スキ見法等によって製作されていた。そのため完成された光学系で星野撮影を行なったがかなり残存収差が認められ口径を 46 cm に絞って使用されていた (アルバム 1 頁目の写真 (A))。

その後非球面の検査技術が進歩し前記シャリング干渉計による測定技術が完成されて昭和 42 年に修正研磨を行なった。この結果輪帯収差はかなり縮小され分解能も向上したが、星像がアス状になりプレートの精密な位置測定に支障をきたすとのことであった (アルバム写真 (B))。

その後 N.C. 装置を備えた非球面研削機が開発されこの装置を使用しシュミットプレートを作り直し昭和 44 年に再度交換した。研磨された非球面レンズは前記のよ



第 4 図 東京天文台堂平観測所シュミット望遠鏡の光学系。
口径 50 cm, F/2 画角 6°, 図中の数字の単位は mm

²⁾ 応物 Vol. 32, No. 3, p. 225.

うにシャリング干渉計による測定，ロンキーテスト，ポイントテスト等併用して精密に研磨された（アルバム写真（C））。

これら研磨工程中に工場で検査測定し製作されたシュミットプレートは実際に撮影された星像を見ても充分実用に供することがわかりほぼ当初の目的が達成されたものと思う。

第5図はこの装置の設計値収差を SPOT で示したものである。(a) は焦点面が球面の場合で基準波長を 4861 \AA (F 線) にとり， 4358 \AA (g 線)， 5876 \AA (D 線)， 6563 \AA (C 線) の各波長について SPOT をとり右端のものはそれらを重ね合せたものである。

図の縦方向には入射角がとってある。 $0^\circ \sim 3^\circ$ までの全ての光線は Vignetting free として計算したものである。実際に製作したものは画角 4° (入射角 2°) までが Vignetting free になっている。図の右下の円は角度 $4''$ に相当する大きさを示したものである。

第5図 (b) は像平坦化レンズを取付け平坦な焦点面とした場合の SPOT で像平坦化レンズを備えた光学系にはかなりコマ収差が発生することが解る。

波長範囲等は (a) と全く同じ条件である。

第5図 (c) は絞りの位置と非球面レンズの形状をわずかに変えてコマ収差を補正したものである。画面周辺部の結像状態もかなり良好に補正され球面焦点面の場合と比較しても充分実用に供されるものと思える。

現在堂平観測所で彗星写真機として使用されている機械は同様に周辺部のコマ収差を補正した装置で像平坦化レンズを取付けた状態で使用されている。

おわりに N.C. 非球面研削機を用いて製作した二、三の非球面レンズを参考までに記せば

(1) イメージ・インテンシファイヤ分光器用シュミットカメラ (岡山 $74''$ 望遠鏡用)

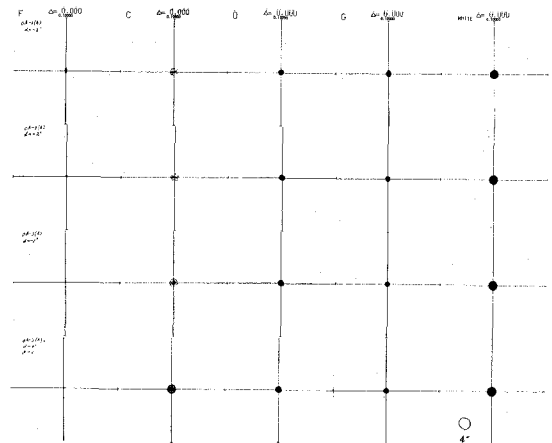
カセグレイン・シュミットタイプ

口径 58 mm F/2.5 $f=142 \text{ mm}$ 画角 6°

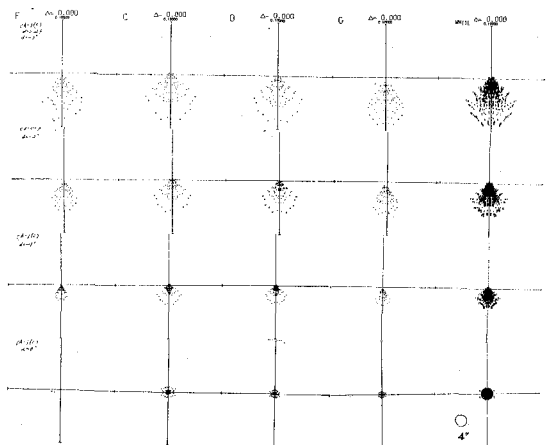
(326 頁へつづく)

第5図

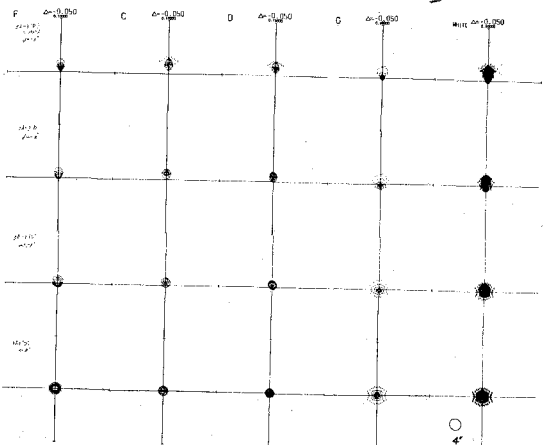
- (a) シュミット光学系による像のスポット図。左が基準波長の F 線で右へ C, D, g 線，縦方向の上から下へ入射角 $3^\circ, 2^\circ, 1^\circ, 0^\circ$ のスポットを表わす。基準波長からはずれるほど，中心からはなれるほど，像がわるくなる。右下の○印の直径が $4''$
- (b) 像面を平面にするための像平坦化レンズをいれる。像は平面になるが，コマ収差が生じて像がわるくなる。
- (c) 補正板の位置と形のわずかな修正でコマ収差がのぞかれる様子を示す。



(a)



(b)



(c)