

光学器械を使う人のために

—第2回 カラの焦点を生かして使うには—

吉田 正 太 郎*

2-1 テレセントリック結像

前回に説明したように、レンズには前側焦点 F と後側焦点 F' と、ふたつの焦点がありますが、望遠鏡でも顕微鏡でもカメラでも、いっぽうの焦点だけしか使っていません。

ところが、測定顕微鏡や投影測定機などのように、物体の形状や大きさを正確に測定するときには、もうひとつの焦点（カラの焦点と言うことにしましょう）のほうも利用します。

たとえば物体を拡大投影する場合を考えましょう。図6において O を物体、 L を投影レンズ、 P をスクリーン上にできた像とし、後側焦点 F' に絞り S を入れます。レンズ、絞り、スクリーンの位置は固定していて、物体のほうを移動させてピントを合わせることにします。

絞りの中心を通る光線のことを主光線といいます。これを図に実線で記入しました。すぐわかるように、絞り S が後側焦点に置いてあるときは、物体側の主光線が光軸に平行になります。ピント合わせが不正確であれば、スクリーン上の像はいくらかピンボケになりますが、それでも主光線はそのままですから、像のボケ中心 P は変わりません。したがって、形状寸法の測定では誤差が起りません。

つぎに図7の場合のように、前側焦点 F に絞り S を置けば、像側の主光線が光軸に平行になります。スクリー

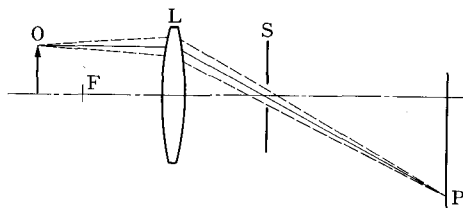


図 6

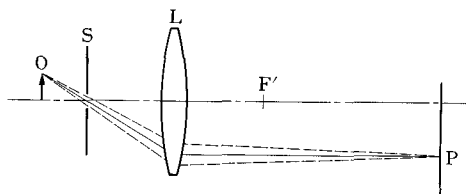


図 7

ンを前後に動かしてピントを合わせる方式なら、ピント合わせに誤差があっても形状寸法の測定値は正確です。

図6または図7のように、物界または像界の主光線が光軸に平行になる場合のことをテレセントリック結像といい、精密測定には広く用いられています。

2-2 測定顕微鏡

物体の形状や寸法を測定する顕微鏡を測定顕微鏡といい、これはいろいろな目的に使用されています。マイクロメーターなどと異なる大きな特長は、測定圧がないので変形しやすいものでも測れること、カムやネジのような複雑な形状のものでも測れること、ごく小さいものでも測定できること、光学系の倍率を変更して精度や感度を高められることなどです。

図8はその構造原理で、 K はコンデンサー、 B_1 が透過照明用のテレセントリック絞り、 L がコリメーター・レンズ、 B_2 が測定側のテレセントリック絞りです。 B_1 は L の焦点にありますから、ほぼ平行光束になって試料を照明します。試料から顕微鏡対物レンズまでの距離は作動距離といい、太い丸棒や雄ネジの直径を測るときには、これが大きくないとこまるわけです。対物レンズは3倍が標準ですが、必要に応じて1倍、5倍、10倍も用いられています。

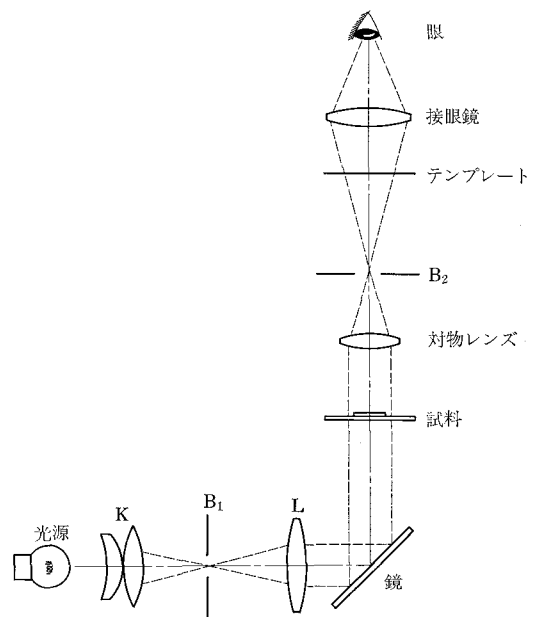


図 8

* Shotaro Yoshida

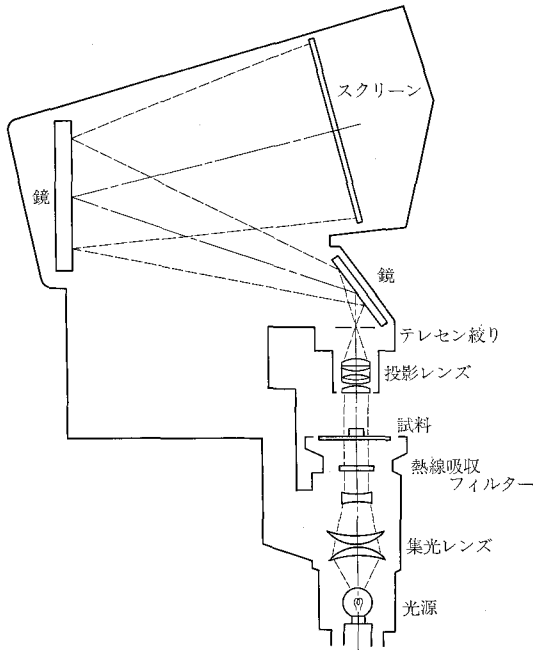


図 9

B_2 は対物レンズの後側焦点に置いたテレセントリック絞りで、これが測定誤差の防止に非常に役立っています。不透明物体の表面を上から照らす（落射照明）ときには B_1 が使えないので、 B_2 の絞りは特に有効です。

2-3 万能投影測定機

測定顕微鏡は 1 人でしか観測できませんが、図 9 のような万能投影測定機では測定者の疲労も少く、いちどに多数の人が観測することもでき、写真記録も可能です。投影するには強力な照明が必要ですから、照明側には熱線吸収フィルターを入れます。試料を平行光束で照明し、図のようにテレセントリック絞りを使って測定誤差を防いでいます。

万能投影測定機は、スクリーンの直径 20 cm くらいから 100 cm くらいまで、投影倍率 5 倍から 1000 倍くらいまでの多くの機種が世界各社で生産されていて、なかには部品を水平に一直線に配置したものや、リレー・レンズを使って作動距離を特に長くしたものもあります。どの機種でもテレセントリック絞りは外部からは見えません。

投影レンズは歪曲が少ないことが必要で、JIS 規格では、スクリーンの直径の 95% のところで $\pm 0.5\%$ 以内と定められています。一般の写真レンズや映写レンズでは、視野の周辺部で歪曲 $\pm 0.5\%$ くらいがふつうで、 $\pm 0.1\%$ といえれば最高級のレンズです。測定用の投影レンズに要求されるきびしさがわかると思います。

2-4 T-UMP 1000

私は十数年前に T-UMP 1000 という世界最大級の万能投影測定機の投影レンズを設計したことがあります。T-UMP とはツガミ・ユニバーサル・メジャリング・プロジェクターの略字で、1000 はスクリーンの直径 mm です。

スクリーンに投影された像は、ふつうは肉眼で観察しますから、視野のいずれの部分においても像の大きさの誤差が 0.1 mm 以内なら満足です。しかし、半径 500 mm の映像で誤差 0.1 mm といえれば 0.02% に相当します。投影機が大型になればなるほど、ますます歪曲収差をきびしくおさえなければなりません。しかも、レンズの歪曲収差は、視野中心からの距離の約 3 乗に正比例して急増するのがふつうです。もちろん、解像力や色消しは、それ以前の問題です。

レンズの設計とは要するに、レンズに所要の性能（仕様、スペック）を与えるために、レンズの構造と、各面の曲率半径 r 、肉厚と間隔 d 、ガラスの屈折率 n を決定することです。かなりの努力ののち、私はなんとか目標値を満足する設計を完成することができました。

このような大型投影機を実際に製作するためには、レンズの光学設計とともに、レンズの研磨や、光軸と間隔の調整という、やっかいな総合技術も欠くことができません。これを完成できたのは、津上の長年にわたる精密加工技術の力でした。もちろん、研磨も自社内で、自社製の研磨機で行ない、検査も社内でした。

T-UMP の投影レンズは 5 倍、10 倍、20 倍、50 倍、100 倍の 5 本がありましたが、なかでも 5 倍が、設計も製作もいちばん困難でした。5 倍のとき、試料の最大直径は 20 cm ですが、テレセントリック照明では物体を照らす光束が光軸にほぼ平行ですから、投影レンズの口径は物体の直径より少し大きくなければなりません。5 倍の投影レンズは口径 23 cm でした。

解像力も色収差も歪曲も、きびしく補正しなければなりませんから、特殊な光学ガラスを使って、6 枚ないし 7 枚構成のガウス型にするわけです。クラウン・ガラスとして重クラウン SK16 とランタン・クラウン LaK8 を、フロントには重フリント SF8 を使ったことを記憶しています。レンズが重いので、調整のほうもたいへんでした。もちろん、コンデンサーのほうも大きいのです。

T-UMP は、自動車のロータリー・エンジンなどの部品の検査に実力を発揮しました。

説明をつけ加えておきますと、50 倍や 100 倍の投影レンズは、ふつう一般の写真レンズのように、物体無限遠として設計したレンズとほとんど同じ構造形式になりますから、たくさんのノウハウが蓄積されていて、設

計は比較的容易です。ところが10倍とか5倍という近距離用のレンズの構造は、物体無限遠の設計とは大きく変わってきます。接写用のマクロ・レンズなどが非常に高価なもののためです。

マクロ・レンズで正確な形状の写真を撮影したいというとき、テレセントリック絞りを応用してはどうでしょう。その分だけ暗くなるのはやむをえませんが、

2-5 倍率計

無限遠にピントを合わせてある望遠鏡や双眼鏡を青空に向けて、接眼鏡の20cmほど後ろからのぞくと、明るい円形が見えます。これをラムスデンの円といい、ピント・グラスで捕えることができます。これは、接眼鏡によって生じた対物レンズ（または反射鏡）の実像で、光学的には望遠鏡の射出瞳（シャジュツヒトミ）です。

そうして、対物レンズの有効径と、ラムスデンの円の直径（ヒトミ径）の比が、望遠鏡の倍率です。

ヒトミ径の測定には図10のような倍率計（ダイナメーター）を用います。Aはラムスデンの円、Bはガラス板に刻んだ1目0.1mmの尺度、Cはそれを拡大して見る接眼鏡です。接眼鏡の後側焦点に置いたDの孔はテレセントリック絞りになっていますから、ラムスデンの円と尺度の面がいくら不一致でも、誤差なしにヒ

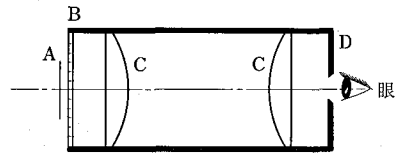


図 10

トミ径を測定できるわけです。

顕微鏡用の目盛り接眼鏡の目盛ガラス板を使って、上記のような倍率計を自作することもできます。

望遠鏡の鏡筒内に余計な絞りが入っている疑いがあれば、対物レンズの上に透明尺度（ふつうの1mm目盛でよい）を置いて、いっしょに測定すれば、ほんとうの有効径がわかり、したがって正確な倍率が得られます。

倍率計では接眼鏡の前側焦点には尺度があり、後側焦点にはテレセントリック絞りがあって、ふたつの焦点とも役に立っているわけです。

今回は、カラの焦点にテレセントリック絞りを置くことの効用を説明しました。

カセグレン副鏡（双曲面）のカラ焦点は、なにか役に立つでしょうか。

惑星の楕円軌道のカラ焦点は、トランス・プルトニオン惑星の発見に役立つかもという研究がありますが、これはどうなるでしょうか。

天体観測専門誌

天文ガイド

3月号 定価450円＋税 2月5日発売！

ニュー・フェース・テストレポート
協栄産業製オリジナル31cmドブソニアン

原哲也さんの解説
“宇宙のひも”とは何か？

カスタムクラフト
カメラの作り方

放物面の鏡の表面の精度を表わす数値
“ラムダ”について

カラーで紹介
厳冬期の千畳敷

- 宇宙の新しい謎 ●奇妙な星の話
- 天体写真テクニック…など情報満載！

新刊案内

天文年鑑1987

ポケットサイズのB6判 定価520円
ワイド版：見やすいB5判 定価1000円

入門スターウォッチング

全天星座図、ミニ星座早見、星座カード、解説書がワンセット！
●藤井旭／構成 定価1200円

星空ガイド1987

見開き2ページでひと月ごとの夜空を紹介するカレンダー。
●藤井旭／企画・構成 定価690円

万能星座早見 '87・'88

●切りぬく本 外枠と組み合わせれば何通りにも使える便利な一冊。 藤井旭／企画・構成 定価690円

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
電03(292)1221 振替東京7-128