

光学器械を使う人のために

—第 6 回 対物レンズの色収差—

吉 田 正 太 郎*

6-1 屈折率と Abbe 数

レンズやプリズムは、ガラス、人造結晶、光学プラスチックなど、無色透明均質な材料で作りますが、いずれの場合も、透過光線の波長が長いほど屈折率が小さくなりますから、屈折率をしめすには、光線の波長を指定しなければなりません。

フランホーフェル (1787~1826) の時代には、太陽光線のスペクトルの暗線の波長を基準にしました。しかし光学工場ではスペクトル・ランプのほうが便利なので、現在は表 1 の波長が採用されています。Ross (後記) はフランホーフェル線の原型、それに日本の小原光学硝子製造所と、西ドイツの Schott 社の基準波長をしめしました。

C 線に対する屈折率は n_c 、F 線に対する屈折率は n_F というように書きます。このとき、つぎの式で定義される ν_a を Abbe 数といい、光学材料の色分散の程度をしめす大切な定数です。 ν_a は、略して ν と書くときもあります。

$$\nu_a = \frac{n_a - 1}{n_F - n_C} \quad (2)$$

現在使用されている光学ガラスの大部分は n_a が 1.446 から 1.953 まで、 ν_a が 20.9 から 81.6 までの間です。人造結晶では蛍石が n_a 1.434, ν_a 95.2, 弗化リチウムが n_a 1.392, ν_a 98.4 など、ガラスと大きくかけはなれています。

6-2 収差曲線の描きかた

図 31 のようにレンズの後側焦点を F' とし、光軸から h_1 だけはなれた入射光線が、レンズを通過したのち P' で光軸に交わるとします。 h_1 を入射高 (ニューンジャコウ, incidence height), u' を集散角 (vergence angle) といいます。 a は縦 (光軸方向) の球面収差, b は横 (光軸に直角の方向) の球面収差です。 h_1 を縦軸, a を横軸にとってグラフを描けば、収差曲線が得られます。

基準とする色 (昔は D 線, 今は d 線がふつう) の後側焦点 F' を原点にして、各色の球面収差の曲線を重ねれば、球面収差と色収差を同時に表示することができます。

表 1 屈折率測定の基本波長

スペクトル線の記号			色	波 長 (nm)	元 素	備 考
Ross	小 原	Schott				
	1014	t	赤 外	1013.98	Hg	
		s	赤 外	852.11	Cs	
	A'		赤	768.19	K	
	b	r	赤	706.519	He	
B			赤	687.0		大気中の酸素の吸収線
C	C	C	赤	656.279	H	H_α , 複線
	C'	C'	赤	643.84696	Cd	カドミウム・レッド
D	D	D	黄	589.294	Na	D_1, D_2 の複線
	d	d	黄	587.562	He	
	e	e	緑	546.074	Hg	
E			緑	527.0	Fe	
F	F	F	青	486.133	H	H_β
	F'	F'	青	479.992	Cd	カドミウム・ブルー
	g	g	青	435.835	Hg	
G'	G'		紫	434.047	H	H_γ
			紫	410.174	H	H_δ
h	h	h	紫	404.656	Hg	
H			紫	396.9	Ca	
	365	i	紫 外	365.015	Hg	

* Shotaro Yoshida

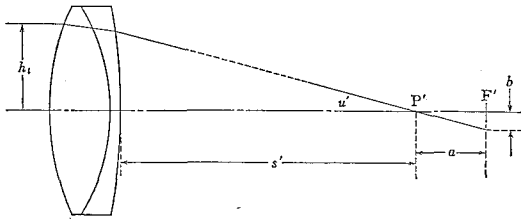


図 31 収差曲線の作りかた。入射高 h_1 を縦軸に取り、縦の球面収差 a を横軸を取って、曲線を描きます。

6-3 望遠鏡対物レンズの収差曲線の例

図 32 は特九七式 15 cm 望遠鏡の対物レンズです。これは旧日本陸軍が使用した最良の双眼望遠鏡で、対物レンズは有効径 150 mm, 焦点距離 1200 mm, F 8 です。接眼鏡を交換して 25 倍, 50 倍, 100 倍に切り換えられます。対物レンズと接眼鏡の間に、厚さ 168 mm の正立プリズムがはいります。

私は戦時中に大宮（埼玉県）の陸軍造兵廠でこのレンズを研磨したので、データはよくわかっています。ガラス材料は凸レンズが硼珪クラウン BK7, 凹レンズがフリント F2 です。そのほかの詳細は「望遠鏡光学」（誠文堂新光社 1978 年）に記しました。

口径 15 cm または 12 cm の双眼望遠鏡は今でも観光、航海、彗星発見などに広く用いられていますが、それらの対物レンズも BK7 と F2 の組み合わせがふつうです。

図 33 も同じく BK7 と F2 を組み合わせた、F 12.5 の対物レンズで天体望遠鏡用として標準的なものです。

さて図 34A は、図 32 の対物レンズそのものの収差曲線です。いろいろなレンズの性能を比較できるように、収差曲線は $f=100$ に換算して描くのがふつうです。

d 線のところに点線で記入してある曲線は、つぎの式であらわされる OSC です。

$$OSC = \frac{h_1}{\sin u'} - f \quad (3)$$

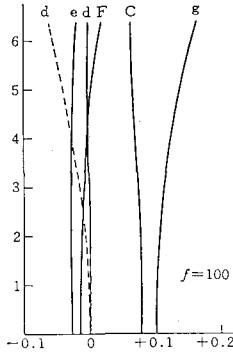


図 34A 特九七式 15 cm 双眼望遠鏡の、対物レンズだけの収差曲線

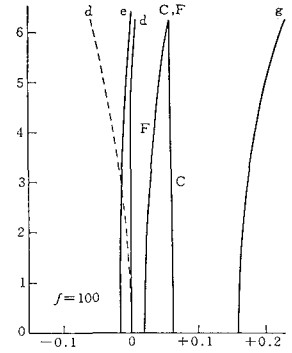


図 34B 特九七対物レンズに正立プリズムを組み合わせたときの収差曲線

球面収差のない光学系において、任意の h_1 に対して $h_1/\sin u'$ が f に等しいときは、コマ収差がありません。これを正弦条件といいます。そこで (3) 式の値はコマ収差が多いか少ないかをしめす目安とされ、これを正弦条件不満足量 (Offence against the Sine Condition, 略して OSC) といいます。そうして、球面収差は実線で、OSC は点線で描くことになっています。

つぎに図 34B は、特九七対物レンズに正立プリズムを組み合わせたときの収差曲線です。正立プリズムを入れたために C 線と F 線の球面収差が接近したことに注目しましょう。g 線は少しはなれていますが、青色の一部は厚い正立プリズムで吸収されることと、青空のなかに青色がついても目立たないこととで、眼視用としてはまったく無害です。

正立プリズムがあってもなくても、OSC (したがってコマ収差) は変化しません。

つぎに図 35 は、図 33 の対物レンズの収差です。同じガラス組み合わせでも F 12.5 になると、球面収差も色収差も非常に減って、星像がシャープになります。

図 36 は軽バリウム・フリント BaLF 3, クルツ・フリント KzF 6, クラウン K7 を用いた 3 枚合わせアポクロマト対物レンズの収差曲線です。

また図 37 は、なかの 1 枚に螢石 (fluorite) を用いた、3 枚合わせアポクロマトの収差です。この対物レンズは F 10 で、b 線から h 線まで可視光線全域にわたって非常に収差が少く、眼視にも写真にも最良の星像が得られます。

螢石は直径 25 cm くらいまでの人造結晶が得られますが、脆くてショックに弱く、軟かくて精密研磨がむずかしく、光学ガラスにくらべて非常に膨脹係数が大きいなどの問題点があるので、望遠鏡対物レンズとしては口

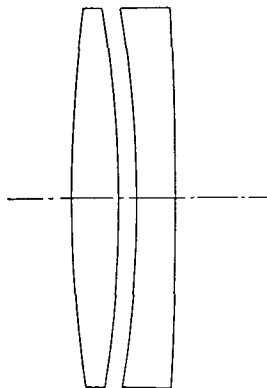


図 32 特九七式 15 cm 双眼望遠鏡の対物レンズ

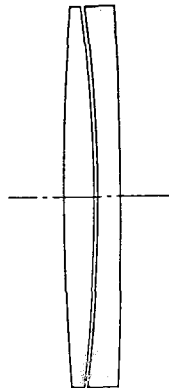


図 33 BK7-F2 のうす肉アポクロマト対物レンズ

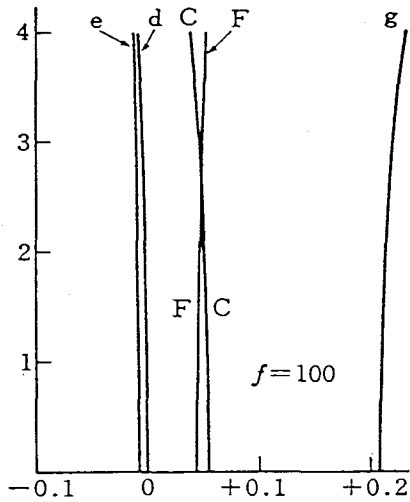


図 35 BK7-F2 の、うす肉アクロマート対物レンズの収差曲線

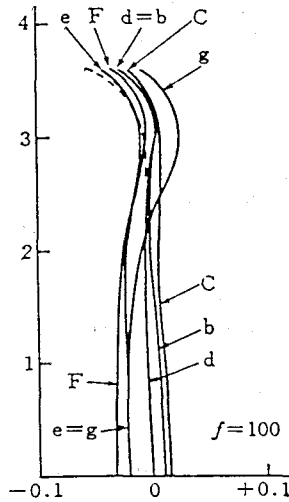


図 36 3 枚合わせアポクロマート対物レンズの収差曲線の一例

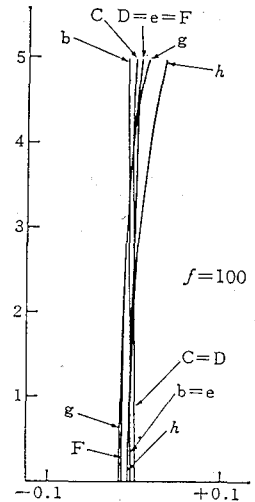


図 37 螢石入り 3 枚合わせアポクロマート対物レンズの収差曲線

径 15 cm くらいまでが限界です。

以上いずれの例を見てもわかるように、望遠鏡対物レンズにおいては、球面収差と色収差は同時に考えなければなりません。軸上色消だけ良くても、球面収差が残っている星像は鋭くなりません。

6-4 ヤーキス天文台 40 インチ対物レンズの収差

収差曲線の描きかた見かたがわかったところで、ここでは世界最大の屈折望遠鏡である ヤーキス天文台の 40 インチ対物レンズの収差を調べてみましょう。

この対物レンズは A. Clark (1832~1897) と助手 R. Lundin が 1887 年に研磨し、1897 年にワナー・スウェージー社が赤道儀式望遠鏡に組み立てました。対物レン

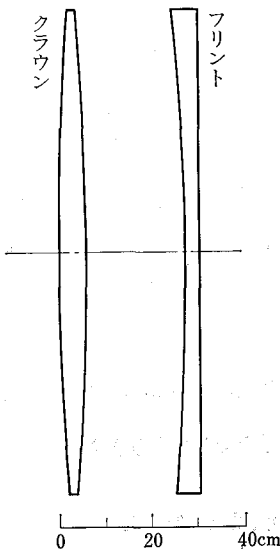


図 38 ヤーキス天文台の 40 インチ対物レンズ

表 2 ヤーキス 40 インチ対物レンズのデータ

(Ap. J. 76, 184~201, 1933)

$r_1 = +$	6886.7 mm	$d_1 = 58$ mm (± 0.5 mm)
$r_2 = -$	6886.7	$d_2 = 215.2$ (± 0.2)
$r_3 = -$	6090.0	$d_3 = 28$ (± 1.0)
$r_4 = +$	1209290	

線	波 長	屈 折 率 (10°C)	
		クラウン	フリント
C	656.3 nm	1.513193	1.610092
D	589.3	1.515797	1.614866
F	486.1	1.522032	1.626824
G'	434.1	1.527065	1.636989
h	404.7	1.530882	1.645006

ズガラス材は、フランスのパラ・マントア社製のプレート・ガラスです。脈理は現代の光学ガラスより多いでしょう。

各面の曲率半径等は表 2 のとおりです。曲率半径 r は Lundin の測定値に F. E. Ross が少し補正を加えたもの、肉厚間隔 d は Ross と F. R. Sullivan が測定した値、屈折率は、対物レンズと同じガラスで磨いたプリズムを連邦標準局 (U.S. Bureau of Standards) で実測したものです。

レンズの形状は図 38 のとおりで、ガラスの肉厚が極度にうすく、クラウンは対称型の両凸レンズになっており、レンズ間隔が非常にはなれています。研磨しやすいことを最重点とし、ガラス材料がうすいことと、金枠の工作精度を考えて、このような形にしたのでしょう。

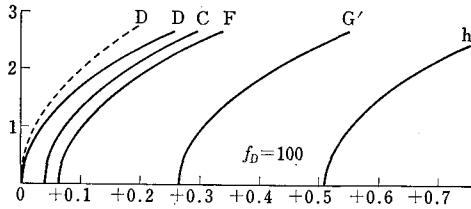


図 39 ヤーキス天文台の 40 インチ対物レンズの収差

そこで表 2 の r と d と n を使って収差量を計算して曲線を描いてみると図 39 のとおりで、これも $f=100$ に換算してあります。

色収差も球面収差も、現代の対物レンズとは比較できないほどの大量です。各色とも球面収差は非常な補正過剰で、 S' (図 31) は周辺のほうが光軸上よりも 0.251 (C線) から 0.294 (h線) も伸びています。実際の f_D は 19354.94 mm ですから、球面収差の実寸は 48.5 mm (C線) ないし 56.5 mm (h線) に相当し、これは Ross の計算ともよく一致しています。

6-5 40 インチ屈折望遠鏡で三角視差を測る

図 39 を見てわかるように C, D, F 各線の球面収差が近いので、眼視用の色消であることは明らかです。この望遠鏡は現在、赤い微光星の固有運動と三角視差の写真測定に用いられていますが、それにはコダック 103a-G 乾板に、ショット GG 14 A フィルターを組み合わせ

て、黄色光だけを使っています (「宇宙の広さは測れるか」59. 地人書館 1985 年)。

しかし波長域を制限しても、球面収差のほうはどうにもなりません。原板上の星像はみな、中心部に向かってしだいに濃度を増した不飽和 (unsaturated) なものになります。そこで $600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ の範囲を、 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ のピクセルに分けて、デジタル測光によって自動的に星像中心を決定します。

ヤーキス天文台の三角視差測定の詳細な手続等は、A. J. の下記の巻号に発表されています。

L. T. G. Chiu: A. J. 82, 842~848 (1977 年).

L. H. Auer and W. F. Van Altena: A. J. 83, 531~537 (1978 年).

J. F. Lee and W. Van Altena: A. J. 88, 1683~1689 (1983 年).

また、このような方法を実際に適用して測定した三角視差の値は、W. F. Van Altena et al: A. J. 91, 1451~1455 (1986 年) などに発表されていますが、その平均誤差は ± 0.0034 ないし ± 0.0021 秒角におさまっています。1000 光年という距離が、やっと確実なものになってきたわけです。

また、最近のテストによると、コダック IIIa-J 乾板と IIIa-F 乾板は、位置測定の精度が、ほかの乾板の少なくとも 2 倍に向上するといえます。

(工学研究者対象)

天文学における観測技術・機器開発の体制についてのアンケート集計結果

東京大学大学院理学系研究科天文学専門課程院生会

対象	東京大学	約 170 名, 回収 26 通, 回収率約 15% (工学部とその附属研究機関と宇宙科学研究所の工学系研究室の教官のうちから、天文学に関係ありそうな分野について 4 人に 1 人を無作為抽出)
	名古屋大学	120 名, 回収 37 通, 回収率 31% (工学部の全講座に対し, 1 講座 1 名ずつ無作為抽出)
	京都大学	45 名, 回収 8 通, 回収率 18% (工学部の天文に関係のありそうな講座に対し, 4 人に 1 名ずつ無作為抽出)
	大阪大学	約 120 名, 回収 21 通, 回収率約 18% (工学部, 基礎工学部, 産業科学研究所, レーザー核融合センターのうち天文機器開発に関連のありそうなところから 1 講座約 1 名ずつ無作為抽出)
	合計	約 455 名, 回収 92 通, 回収率約 20%

集計をご覧になるにあたっての注意

- i) 身分別集計で、その他と無記入のものは、全体の中にも入っています。
- ii) 記述式回答は重複するものは避けるように選択し、まとめて載せました。なお、意見の多い順には並んでいません。
- iii) 集計表中“はい”は Y, “いいえ”は N, 両方は両, 無回答や“わからない”は? と記してあります。

回答者の分布	単位	人								
所屬及び年齢:	全体	東大	名大	京大	阪大	20代	30代	40代	50代以上	無記入
	92	26	37	8	21	4	28	27	30	3