

光学系の面およびレンズ型式の分類*

近藤 文雄

東京光学機械(株) 〒174 東京都板橋区蓮沼町 75-1

(1983年8月10日受理)

Classification of Optical Surfaces and Lens Types

Fumio KONDOH

Tokyo Optical Co., Ltd.,

75-1, Hasunuma-cho, Itabashi-ku, Tokyo 174

We classified the characteristics of lens surfaces in terms of third order aberration coefficients. Various lens types may be sorted by combination of such surfaces. It would be possible to apply our method in preliminary stage of lens design process.

1. ま え が き

レンズ設計を始めるに当たって、要求される仕様を満足できそうなレンズ型式を各種の文献や特許に示されたデータから選択してこれらをスタートデータとすることは通常行なわれる手段である。どの型式や光学硝子の選択が適しているかは収差カーブやレンズタイプの特性を検討したうえで選ばれることになる。

レンズ型式の分類についてはすでに1946年 Kingslake¹⁾が A~Z までの項に分類し、写真レンズを中心として当時存在するすべてのレンズ型式について解説したものがあつた。各項目は多くの小分類を含んでいるので当時のレンズ型式の全貌を伺い知ることができる。Table 1 は当時のおもなレンズ型式を示し、六つの大分類で表わされている。

Fig. 1 は Triplet の中での Tessar type が分類の中でどのように示されているかを示す。日本では通常用いられている何群何枚という表現もこれに準じたものといえる。

その後分類を定量化する動きが行なわれ、1980年に Hoogland²⁾は Petzval 和が一定のレンズ型式では、この値を変えない場合にそのレンズの基本的な特性が失われないことに基づいて、Petzval 和に contribute する bending, spacing および index change の3項目に基準を設けて、レンズ型式を定量化する方法を用いた。

Fig. 2 で Triplet lens からより大口径で広角レンズ

の型式に発展させるとき、図の上段の三つの型式は球面収差の減少には有効であるが、Petzval 和には影響しない。しかし2段目、3段目に示された型式は Petzval 和の減少に役立つ。

このような Petzval 和の減少に役立つ項目を整理して Table 2 をつくり、bending, spacing および index change の各項目に適切な基準と尺度を設定して、各項目がレンズの Petzval 和に contribute する割合を示した。Fig. 3, Fig. 4 はその例を示すものである。彼はさらに reverse Sonnar type のレンズで同じ Petzval 和をもつレンズ型式の後側から光を通し、前のレンズのもつ aplanatic の原型をまったく崩しても、レンズとして成り立ちうることを示している。

2. 3次収差係数によるレンズ面の解析

われわれは1978年に収差の補正された写真レンズでは残留収差量が若干の高次収差補正を考慮すればほぼ3次収差係数に比例することを示した^{3,4)}が、今回これを基盤にしてレンズ面の収差に及ぼす影響を解析し、各レンズ面の3次収差に対する contribution によって面の特性を分類し、さらにその組合せがレンズ型式を構成することをを用いて予備段階でのレンズ型式の評価に役立てようと考えた。

いま Fig. 5 のように k 面からなる光学系を考えてみる。

第 i 面の前後の近軸光線の傾角をそれぞれ β_i, β_{i+1} とし第 i 面での入射高 h_i , および第 i 面への入射角 ϕ_i について、近軸領域では次の諸関係を得る。

* 第8回光学シンポジウム(1983年6月20日、東京)において講演

Table 1 Classification of lens types (R.Kingslake : J. Opt. Soc. Am., 1946).

Singlet (single component with exterior stop) (Types A, B)
Duplet (two similar components about a central stop) (Types D, E, F)
Triplet (three airspaced components) (Types II, J, K)
Quadruplet (four airspaced components) (Types M, N)
Petzval (two dissimilar thin positive components widely separated) (Type P)
Telephoto (widely separated positive and negative components) (Type T)

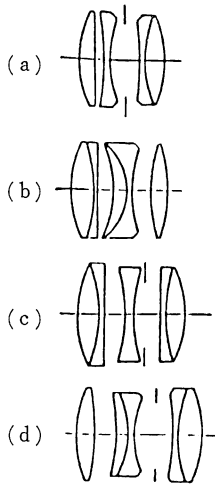


Fig. 1 Subgroups of Triplet.

- (a) Components l-l-c. Rudolph, U. S. 721, 240 (Tessar).
- (b) Components c-c-l. Leitz, Ger. 526, 308.
- (c) Components c-l-c. Booth, U. S. 1, 421, 156 (Pentac).
- (d) Components l-c-c. Altman, U. S. 1, 880, 394.

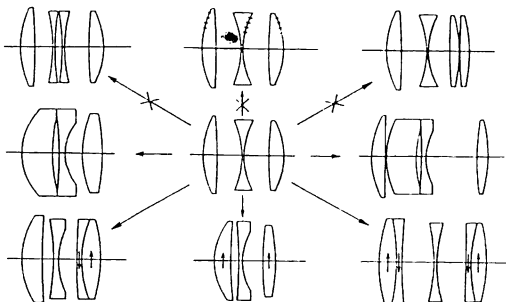


Fig. 2 Development of Triplet (J. Hoogland, 1980).

Table 2 Contribution terms to the Petzvalsum.

Contributions to the Petzvalsum correction :
 by bending = B (unbend lens)
 by spacing = S (axial distances zero)

$$\text{by } \Delta n = N = \sum_1^l \frac{\phi_i}{N_i} - \frac{\sum_1^l \phi_i}{n_{\text{crown}}}$$

$$\text{residual} = P = \sum_1^l \frac{\phi_i}{n_i}$$

$$\frac{1}{n_{\text{crown}}} = \text{Petzvalsum of uncorrected crown lens (for SK 16)}$$

CPC Values of a lens

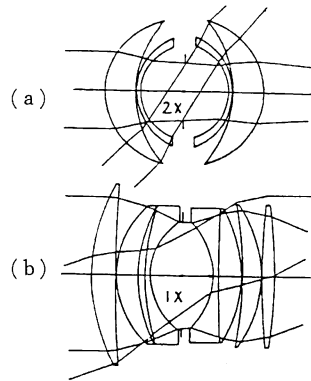


Fig. 3 Contribution to the Petzvalsum (1).

- (a) $C=52, SA 5=50, P5=0.3, B=0.63, S=0.08, N=-0.09, P=0.00$
Topogon F/6.3 $2 \times 45^\circ$
- (b) $C=17, SA 5=0.11, P5=1.0, B=0.17, S=0.13, N=0.07, P=0.19$
Zeiss 50 mm F/1.4 $2 \times 23^\circ$

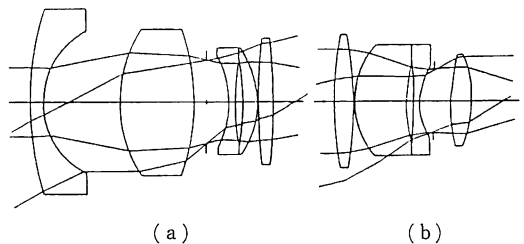


Fig. 4 Contributions to the Petzvalsum (2).

- (a) $C=12, P5=0.7, P=0.12, B=0.02, S=0.43, N=0.04$
35 mm F/2.8 $2 \times 32^\circ$
- (b) $C=11, P5=5.7, P=0.31, B=0.07, S=0.31, N=-0.08$
25 mm F/1.9 $2 \times 13^\circ$

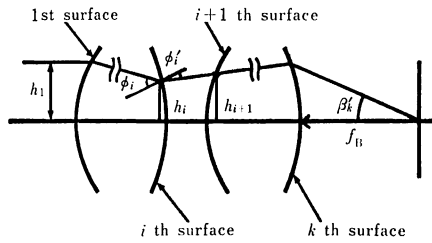


Fig. 5 A photographic lens composed of k surfaces.

$$\beta_{i+1} = \frac{1}{n_{i+1}} \left\{ \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot h_i + n_i \beta_i}{r_i} \right\} \quad (1)$$

$$h_{i+1} = h_i - d_i \beta_{i+1} \quad (2)$$

$$\phi_i = \frac{h_i}{r_i} - \beta_i \quad (3)$$

ここに r_i は第 i 面での曲率半径, n_i, n_{i+1} はそれぞれ第 i 面の前後の媒質の屈折率, d_i は i 面と $i+1$ 面の面間隔である。

これらを用いると 3 次収差係数は, 第 1 面の頂点より入射瞳までの間隔 t ($f=1$) とすれば, 次のようにして求められる。

$$SA_1: S = \sum_1^k S_i = \sum h_i n_i^2 \phi_i^2 \left(\frac{\beta_{i+1}}{n_{i+1}} - \frac{\beta_i}{n_i} \right) \quad (4)$$

$$CM_1: B = \sum_1^k B_i = \sum S_i (\theta_i - t) \quad (5)$$

$$AS: Z = \sum_1^k Z_i = \sum S_i (\theta_i - t)^2 \quad (6)$$

$$P: P = \sum_1^k P_i = \sum \frac{1}{r_i} \left(\frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_{i+1}} \right) \quad (7)$$

$$D: D = \sum_1^k D_i = \sum (P_i + Z_i) (\theta_i - t) \quad (8)$$

ただし

$$\theta_i = \frac{1}{h_i n_i \phi_i} + \sum_{j=1}^i \frac{d_j}{n_j h_j h_{j+1}} \quad (9)$$

である。さらに縦収差の残留量と 3 次収差の係数との関係については, ほぼ

$$SA: \delta S(h_n) = -\frac{Sf}{8\alpha^2} \cdot \sin^2 \beta' \quad (10)$$

$$S_{ag}: \delta(S_{ag}) = -\frac{(P+Z)f}{8} \cdot \tan^2 \omega_m \quad (11)$$

$$A_s: \delta(A_s) = -\frac{2Zf}{8\alpha'^2} \cdot \tan^2 \omega' \quad (12)$$

が成り立つ。

ただし (10)~(12) 式における記号は

α^2 : 高次球面収差の補正項, $1 \geq \alpha^2 \geq 0.7$ であるが通

常 $\alpha^2=0.8$ を用いてもよい。

β' : 球面収差が full correction の場合の入射高が最大のときの光軸となす傾角。

ω_m : Sagittal 像面が軸外で Gauss 像面と交わる像高での半面角。

ω' : 軸外で非点収差がゼロとなる像高での半面角。

α'^2 : 高次非点収差の補正項, $0.9 \geq \alpha'^2 \geq 0.5$ であるが通常は $\alpha'^2=0.7$ を用いてもよい。

f : 後側焦点距離。

(10)~(12) 式の左辺は光線追跡で求めた縦収差量である。

(10)~(12) 式より残留球面収差や S_{ag} 像の曲りの最大量や非点収差量はほとんど 3 次収差係数と比例していることがわかる。(9) 式より

$$\theta_i - t = \frac{1}{h_i n_i \phi_i} + \left(\sum_{j=1}^i \frac{d_j}{n_j h_j h_{j+1}} - t \right) \quad (13)$$

と考えると, 第 1 項は面における影響で, 第 2 項は厚みや空気間隔と入射瞳位置や入射高に関する項である。

結局, 面に関する第 1 項は各面ごとにまちまちに変化するが, 第 2 項は第 1 面より逐次増加する量である。

次に ϕ_i より ϕ_i^3 を求めるとき第 i 面の前後の屈折率に差があれば高次収差 (球面収差) の発生の原因となる。ガラスと空気の接する面等ではとくに大きい現象がある。

また ϕ_i が小さい値をもつ面では (13) 式での $1/h_i n_i \phi_i$ の項が大きい値をもち $\theta_i - t$ 項も大きい。この場合一般に S は小さいので $(\theta_i - t)^2$ や $(\theta_i - t)^3$ のかかる非点収差項 Z や歪曲収差の項 \bar{D} が大きくかつ高次収差も発生しやすい。

このようにレンズの各面ごとに contribute する収差の種類や量が異なるので, これを基準としてレンズ面の分類が可能となる。3 次収差係数の計算値では, この点が変わりにくいので Biogon の例について解説してみる。

3. Biogon type lens の解析

Fig. 6 は Biogon type lens の例でレンズデータをも示してある。Table 3 は 3 次収差係数や $\phi_i^3(\theta_i - t)^2$ 等が記載されており, total の収差係数と各面の収差を割って normalize したものが Table 4 である。Table 4 では 2 未満の値は noise としてゼロとおいてある。

Table 3 では $\theta_i - t$ を $1/h_i n_i \phi_i$ と $\sum^* 1 - t$ にわけて計算値を示しているが $\sum - t$ については Fig. 7 に示す

*1 $\sum(d_j/n_j h_j h_{j+1})$ を Σ と略記する。

Table 3 The third order aberrations of Biogon lens.

S	ϕ	ϕ^3	$1/hn\phi$	$\sum \frac{d}{nh_{k+1}}$	$\Sigma-t$	B	$(\theta-t)^2$	Z	P	$P(\theta-t)$	$Z(\theta-t)$	D
1	1.564	1.867	6.508	-0.536	-0.405	0.150	0.204	0.017	0.027	0.750	0.098	0.101
2	0.033	-0.177	-0.006	3.746	-0.320	-4.066	-0.155	16.531	0.548	-0.255	1.037	-1.191
3	0.238	1.797	5.803	-0.676	-0.300	0.325	0.077	0.106	0.025	1.204	0.392	0.400
4	0.037	-0.318	-0.032	-2.348	-0.254	-2.607	-0.097	6.770	0.253	-0.154	0.349	-0.309
5	-1.140	-1.636	-4.377	0.582	-0.192	-0.775	0.883	0.600	-0.684	0.	0.	0.530
6	-0.821	1.236	1.888	-0.694	-0.264	0.525	-0.431	0.275	-0.226	-1.570	-0.824	-0.943
7	-0.030	-0.412	-0.070	3.751	0.	-3.751	0.111	14.068	-0.416	0.076	-0.264	1.275
8	0.084	1.136	1.467	-0.941	0.031	0.972	0.081	0.945	0.079	0.208	0.202	0.274
9	1.418	-1.111	-1.171	-1.220	0.873	-0.607	-0.577	0.166	0.235	0.510	-0.208	-0.403
10	-1.290	-2.036	-8.445	-1.446	1.337	-0.139	0.179	0.019	0.025	0.236	0.102	0.105
11	0.134	-0.773	-0.378	4.998	3.441	-0.757	-0.128	0.916	-0.123	-0.207	-0.198	-0.315
	0.2283						0.1606		-0.0608	0.2607		-0.1706

Table 4 Surface contribution table of Biogon type lens.

S	B	Z	P	D	ϕ^3	$(\theta-t)^2$	Main contribution
1	7	0	0	3	0	6	+ⓈP*
2	0	0	-9	0	3	0	-ⓉD**
3	0	0	0	5	0	6	+Ⓟ*
4	0	0	-4	0	-3	0	-ZD**
5	-5	5	10	0	0	-4	-ⓈⓉZ*
6	-4	-3	4	-6	3	2	-SBZPD*
7	0	0	6	0	-3	0	+ZD**
8	0	0	0	0	0	0	0 -
9	7	-4	-4	2	0	0	+ⓈBZP-
10	-6	0	0	-3	0	-8	-ⓈP*
11	0	0	-2	0	0	0	-Z
T	-1	-2	1	1	0		

○: large contribution

*: higher order aberration for $S(B)(Z)$

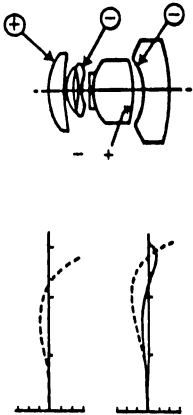
** : higher order aberration for $D(Z)$

ようにレンズの第1面より逐次増加する値となり絞り位置でゼロとなる。これに比べて $1/h_i n_i \phi_i$ の値は面ごとにまちまちで ϕ の値が小さければ結局 $(\theta-t)$ の値が大きくなることになる。

Table 4 を見ると各収差に contribute する面が S については, 1, 5, 6, 9 および 10 面の 5 面であり, その他の収差についてもどの面が打ち消し合っているかがわかる。 ϕ^3 や $(\theta-t)^2$ の値の大きい面は高次収差の発生に関係が深い。 **Table 4** を各面の性質という意味で眺めると, 各面がどのような収差に contribute しているかとか, 高次収差への影響が存在するかどうかがよくわかる。どの面ですどのような収差を生ずるかはレンズの向き, 前

Design example number : 4.06
Patent No. U. S. P. : 2,084,309

	o	t	n	v
1	1.8706	0.1289	1.6716	47.2
2	0.6360	0.0157		
3	3.0030	0.0547	1.6716	47.2
4	1.5901	0.522	1.4645	65.7
5	0.0000	0.0189	1.689	31.0
6	3.8551	0.0755		
7	0.2395	0.189	1.4645	65.7
8	2.4662	0.3774	1.6716	47.2
9	-2.2719	0.0629		
10	-2.1200	0.2516	1.5333	48.9
11	-0.5952			



Stop position : At p.

Fig. 6 Biogon type lens.

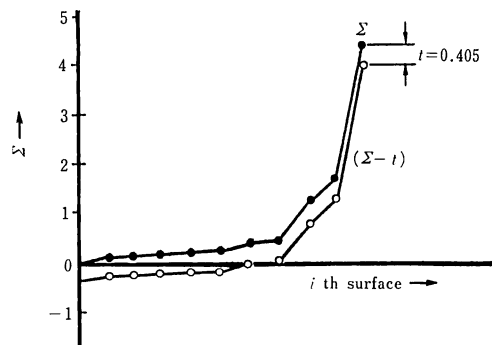


Fig. 7 $\sum(d_j/n_j h_j h_{j+1})-t$, Biogon type lens.

後の媒質などで著しい特徴を持っている。aplanatic 面などもこれらの面分類の一部にすぎない。そしてこれらの面の組合せによって収差補正が行なわれ、光学系が構成されている。

以下 Biogon type (Table 3, 4, Fig. 6) について述べる入射側に2枚の凸レンズを有する Sonnar 型や Gauss 型では第1面が SP 、ともにプラス、第3面が aplanatic であり、第2面と第4面がマイナスの ZD と astigmatism と distortion にきいている。第3レンズは屈折率が低いので凹レンズの作用をしている。5面、6面は絞りに近いのでボケにきく S , BZ 項に大きい影響をもち、7面はゆるい面で ZD に影響をもち、8面は強いけれど貼合せ aplanatic で色消以外には影響しない。このレンズでは9、10面とその前後のガラスの厚みが大きい影響をもち、軸の高次収差の補正に役立っている。9面がほぼ全収差に寄与しているのに反し、10面は SP ともマイナスの高次収差として球面収差に寄与する。いわゆる強い stopper としての働きをもつ。11面の前のガラスの厚みが大きく、 $1/hn\phi$ と $\Sigma-t$ が打ち消し合って全系の ZD の過大となることを防いでいる。面の作用の分業化には注目すべきである。

球面収差の高次収差については1、3面が+に10面が-に大きい影響をもつ。また歪曲収差には2面が-に7面が+に大きく作用する。

4. レンズ面の3次収差への contribution での分類

上記のようなレンズ群の解析にもとづいてレンズ面を分類すると Table 5 が得られる。Table 5 は球面収差係数 S と Petzval 和の大小によって区分した3元配置表で $\theta-t$ は1→4の順に大きくなっている。

すべてのレンズ面はだいたいこの表に分類されるので、 S small を1、 S large を2、 P small を1、 P large を2とし、 $\theta-t$ が1~4の順に大きくなるものとすれば、各レンズ面は11-1、12-3、22-2のように簡単に表現することができる。

さらに符号や高次収差の影響を加えればレンズ面の各収差への contribution は定性的に分類することが可能

Table 5 Surface contributions to third order aberrations.

P	P small		P large	
	$\theta-t$	contribution	$\theta-t$	contribution
S small	1	none	1	P
	2	D	2	PD
	3	ZD, BZ	3	ZPD, BPD
	4	BZD	4	$BZPD$
S large	1	S	1	SP
	2	SB	2	SPD, SBP
	3	SBZ	3	$SBPD, SBZP$
	4	$SBZD$	4	$SBZPD$

となる。これらの面の組合せがレンズのタイプを構成していることからレンズタイプの特徴を解析することが可能である。

レンズ面の組合せ方については+に打ち消す面を状況に応じて位置づけることになる。レンズ枚数が少なければ各レンズ面の各収差への影響は数多くの収差を分担しなければならぬので製作上組立てにくいレンズとなる。

5. ま と め

レンズ面の3次収差係数による解析によって各面の特徴を抽出して分類したが、今回は定性的な分類にとどまった。しかしどの面がどの収差に作用するか、また高次収差を発生する面はどれか等は明らかにすることができた。この組合せによるレンズタイプもその特徴を明らかにすることは可能と思われる。これをさらに定量化できれば予備的な段階でのレンズタイプの評価も可能となりより有効なレンズタイプの発掘にも役立てられるものと思われる。

文 献

- 1) R. Kingslake: J. Opt. Soc. Am., 36, 5 (1946) 251.
- 2) J. Hoogland: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 237 (1980) 216.
- 3) F. Kondoh: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 237 (1980) 120.
- 4) 近藤文雄: レンズの設計技法, 第2版(光学工業技術協会, 1983).