

# 解説

## レンズ設計における収差論の役割と正規化問題\*

松居吉哉

キヤノン(株)中央研究所 〒152 東京都目黒区中根 2-2-1

(1984年8月7日受理)

### Role of Aberration Theory in Lens Design and Normalization of Aberration Coefficients

Yoshiya MATSUI

Canon Research Center, Canon Inc.,  
2-2-1, Nakane, Meguro-ku, Tokyo 152

#### 1. はじめに

一般に、設計といわれる仕事は、ストレートには目標に到達することができないような性質のもので、試行錯誤がつきものである。したがって、どのようにすれば目標に接近できるかというアプローチの方法自体が問題になるし、経験の蓄積もまた不可欠の要素になる。レンズ設計は、そうしたなかでも、コンピュータのない時代から数値計算をよりどころにした技術として体系化されてきたところに特色がある。

レンズ設計が数値計算を中心に体系化される出発点になったのが光線追跡の技術であることはよく知られている。しかし、レンズ設計の仕事を着実に進めるためには、何が理想結像なのかということや、光学系の構造と結像に伴う欠陥、いわゆる収差との関連性などについて理解していることが必要である。こうした目的のために導出されたのが近軸理論であり、収差論である。

収差論は光線追跡に比較すると精度的に劣る近似理論であるが、逆にそのことによって、光学系の構造と結像性能との間の関係をマクロに把握するのに適している。最近ではコンピュータが普及して複雑な計算も容易に行なえるようになったために、一般に収差論のような近似理論の価値に対する認識が薄くなり、その結果として生ま

れる無駄が著しく目立つようになってきた。ただ収差論のような近似理論は、その特長に合った使い方をしないと、もっている機能を十分発揮させることができない。収差論が軽視されるようになった一因には、その効果的な使い方についての理解が一般に不足していた点が挙げられるように思う。

最初にも述べたように、設計者にとって経験の蓄積は不可欠の要素である。経験の蓄積が効果的に行なわれるための基本的な条件は、個々の経験がただ雑然と積み重ねられるのではなく、相互に有機的なつながりをもつように、いわば共通の座標系に位置づけられた上で積み重ねられることである。実は収差論はそういう座標系の役割をする機能を備えているのであるが、それを効果的に発揮させるために行なわれるのが収差係数の正規化なのである。

収差係数の正規化という考えは Berek<sup>1)</sup> によってもたらされたのであるが、その後の多様化した光学系に対して、その考えをどう実際に適用したらよいかについて、理論的に考察を加えた例はなかったようである。本稿では、収差論を活用する上で重要な一手段である収差係数の正規化ということについて、その背後にある収差論の構造と関連づけて総合的な解説を試みることにしたい。

#### 2. 収差論とその構造

図1は収差論で用いられる座標の関係を示したものである。光学系の光軸をX軸にとり、光線がこの光軸に垂

\* 本稿は第9回光学シンポジウム特別講演(1984年6月5日、東京大学生産技術研究所)を骨子とし、まとめたものである。

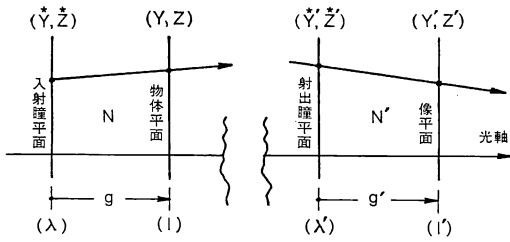


図 1 収差論における座標のとり方

直な物体平面，入射瞳平面と交わる点の座標をそれぞれ  $(Y, Z), (Y^*, Z^*)$  とする．そして光学系通過後の光線が，物体平面，入射瞳平面のそれぞれに共役な像平面，射出瞳平面を通過する点の座標を  $(Y', Z'), (Y'^*, Z'^*)$  とする．

像平面を通過する光線の位置  $(Y', Z')$  は，光学系への光線の入射条件をきめる物体空間の座標  $(Y, Z), (Y^*, Z^*)$  および物体空間と像空間の間に存在する光学系の構成要素の関数である．関数とはいっても，一般にその中味はきわめて複雑であるが，それを何とかまとめた形に整理表現することによって，光学系の構造と結像性能間の関係を明確にしようというのが収差論の立場である．

複雑な関数関係を簡単な形にするのに用いられる手段として冪級数展開がある．光線が光学系を通過する際の経路を取り扱う場合，光線の光軸に対する傾角の sine や cosine に相当する量が頻繁に出てくる．それらを冪級数に展開し，ある次数以上を無視するという近似を適用すれば，上記の複雑な関数をまとめた形に整理することができる．いま，光線の光軸に対する傾角に相当する量を  $u$  とするとき

$$\left. \begin{aligned} \sin u &= u - (1/6)u^3 + (1/120)u^5 - \dots \\ \cos u &= 1 - (1/2)u^2 + (1/24)u^4 - \dots \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

という展開式が成立するが，これらの展開式で，右辺の第1項のみを考慮に入れてまとめたのが近軸理論，そして第2項，第3項までを考慮に入れてまとめたのがそれぞれ3次，5次の収差論にほかならない．

### 2.1 換算座標の導入

光学系の構造と結像性能間の関係を明らかにするのが収差論の目的であるが，そのためには，光学系の個々の面による結像と全系を通しての結像との間の関係づけが必要である．その手がかりは，光学系の中の任意の面によって作られた像がつぎの面への物体として引きつがれるという関係が，物体面，瞳面それぞれの結像について成立していることである．この関係を手がかりにして，個々の面による結像と全系を通しての結像との間の

関係をまとめようとするとき，一つ厄介な問題に直面する．それは，物体の結像と瞳の結像とは，それぞれ個々の面ごとに結像倍率が異なるので，結像関係を一つにまとめる際に一々倍率の換算を行なわなければならないことである．この問題を解決するために考えられたのが換算座標という特殊な座標を用いることである．

ここで，図1にも示しているが，任意の面  $\nu$  に関する物体(像)平面上および入射瞳(射出瞳)平面上に，それぞれ横倍率に対応してきまる尺度単位  $l_\nu(l'_\nu), \lambda_\nu(\lambda'_\nu)$  というものを設定する．換算座標とは，実際の座標をそれぞれの尺度単位の倍数として表わしたものをいうのである．すなわち，物体および像平面上の座標について

$$\left( \begin{matrix} y_\nu \\ z_\nu \end{matrix} \right) \equiv \frac{1}{l_\nu} \left( \begin{matrix} Y_\nu \\ Z_\nu \end{matrix} \right), \quad \left( \begin{matrix} y'_\nu \\ z'_\nu \end{matrix} \right) \equiv \frac{1}{l'_\nu} \left( \begin{matrix} Y'_\nu \\ Z'_\nu \end{matrix} \right) \quad (2a)$$

入射瞳および射出瞳平面上の座標について

$$\left( \begin{matrix} \eta_\nu \\ \zeta_\nu \end{matrix} \right) \equiv \frac{1}{\lambda_\nu} \left( \begin{matrix} Y^*_\nu \\ Z^*_\nu \end{matrix} \right), \quad \left( \begin{matrix} \eta'_\nu \\ \zeta'_\nu \end{matrix} \right) \equiv \frac{1}{\lambda'_\nu} \left( \begin{matrix} Y'^*_\nu \\ Z'^*_\nu \end{matrix} \right) \quad (2b)$$

と書くとき，左辺が換算座標である．言葉と式だけではわかりにくいと思うので，表1に3面から成る光学系についての数値例を示した．この例でわかるように，光学系を通過する任意の光線が，これら各座標面を切る位置を換算座標で表わすと，近軸領域で

$$\left. \begin{aligned} \left( \begin{matrix} y_1 \\ z_1 \end{matrix} \right) &= \dots = \left( \begin{matrix} y_\nu \\ z_\nu \end{matrix} \right) = \left( \begin{matrix} y'_\nu \\ z'_\nu \end{matrix} \right) = \dots \\ \left( \begin{matrix} \eta_1 \\ \zeta_1 \end{matrix} \right) &= \dots = \left( \begin{matrix} \eta_\nu \\ \zeta_\nu \end{matrix} \right) = \left( \begin{matrix} \eta'_\nu \\ \zeta'_\nu \end{matrix} \right) = \dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

という関係が成立する．

(3)式は収差を無視した場合の関係であるから，実際に光線が各座標面を切る位置を換算座標で表わした場合には，(3)式で与えられる値から若干ずれる．このずれが換算座標で表わされた収差である．この収差は，横倍率の影響が除かれているので，その絶対値の大小がそのまま結像の欠陥としての収差の大小を正しく反映してい

表 1 換算座標の数値例 (3面から成る光学系による結像)

物高  $: Y_1 = -100 \text{ mm}$   
 物体平面上の尺度単位  $: l_1 = -20 \text{ mm}$   
 換算座標で表わした物高:  
 $y_1 = -100 \text{ mm} / (-20 \text{ mm}) = 5$

面番号 $\nu$	結像倍率 $\beta$	理想像高 $Y'_\nu$ (実寸, mm)	尺度単位 $l'_\nu$ (mm)	理想像高 $y'_\nu$ (換算 座標)
1	-1/5	20	4	5
2	2	40	8	5
3	1/4	10	2	5

るはずである。

ただここで注意しておきたいのは、換算座標があくまで尺度単位のとりに方に依存する相対的な座標であって、実座標との対応関係は、尺度単位を明確に定義してはじめて確定するということである。実際に尺度単位をどう設定するかについては後で詳しく述べる。

2.2 3次の収差展開式

光学系は光軸の周りに回転対称であるとし、この光学系を通して任意の光線が通過した場合について考える。光線が光学系の中の任意の面 $\nu$ を通過する前後の光線の座標の間の関係は、3次の近似を適用し、換算座標を使って表わすと、最終的につぎの形にまとめることができる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{pmatrix} y_{\nu'} \\ z_{\nu'} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} y_{\nu} \\ z_{\nu} \end{pmatrix} \\ = - \left\{ (V_{\nu}v_{1\nu} + III_{\nu}v_{2\nu} + II_{\nu}v_{3\nu}) \begin{pmatrix} y_{\nu} \\ z_{\nu} \end{pmatrix} \right. \\ \left. + (IV_{\nu}v_{1\nu} + II_{\nu}v_{2\nu} + I_{\nu}v_{3\nu}) \begin{pmatrix} \eta_{\nu} \\ \zeta_{\nu} \end{pmatrix} \right\} \end{aligned} \right\} (4)$$

ここに

$$\begin{aligned} v_{1\nu} &\equiv (1/2)(y_{\nu}^2 + z_{\nu}^2) \\ v_{2\nu} &\equiv y_{\nu}\eta_{\nu} + z_{\nu}\zeta_{\nu} \\ v_{3\nu} &\equiv (1/2)(\eta_{\nu}^2 + \zeta_{\nu}^2) \end{aligned}$$

この式の右辺は  $y_{\nu}, z_{\nu}; \eta_{\nu}, \zeta_{\nu}$  の3次の項のみから成り、これらすべてを0と置いたものが(3)式の上の式の関係、すなわち近軸関係を与える。すなわち、この右辺は3次の収差項で、各項がそれぞれ種類の異なる収差を表わしている。そして各項の前にかかる5個の係数  $I_{\nu}, II_{\nu}, III_{\nu}, IV_{\nu}, V_{\nu}$  がいわゆる3次の収差係数で、各収差への  $\nu$  面の寄与量を表わしている。

上記(4)式は光学系を構成する  $k$  個の面それぞれに対して成立するわけであるが、それらを左辺、右辺それぞれについてすべて加え合せたとする。その場合、左辺については

$$y_{\nu'} \equiv y_{\nu+1}, \quad z_{\nu'} \equiv z_{\nu+1}$$

という関係があることから、途中の項がすべてキャンセルされて、結果は

$$\begin{pmatrix} y_{k'} \\ z_{k'} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

となる。このことから、これに対応する右辺が全系の3次収差を与えることがわかる。一方、右辺を整理するに当たっては近軸領域で(3)式が成立することに注意する必要がある。すなわち、任意の面 $\nu$ の座標と第1面の座標との間にはつぎの関係がある。

$$\begin{pmatrix} y_{\nu} \\ z_{\nu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + (3 \text{ 次以上の収差項})$$

$$\begin{pmatrix} \eta_{\nu} \\ \zeta_{\nu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \zeta_1 \end{pmatrix} + (3 \text{ 次以上の収差項})$$

そこで、右辺を整理する際に座標をすべて第1面の座標に置き換えても、それによる誤差は、いずれも5次以上の項になって無視できるのである。結局、全系の3次収差項は(4)式の右辺と同じ形式にまとめることができる。その場合、座標はすべて第1面の座標にすればよく、また各収差係数は、それぞれ単に各面の値を加え合わせればよいことになる。

2.3 各面の3次収差係数の計算

上に述べたように、換算座標を用いると、光学系全体についての収差係数が、たんに各面の収差係数の代数和になるという簡単な関係が成立する。このことは、各面の収差係数のなかに尺度単位に関する情報が繰り込まれ、それが倍率換算の役割を果たす形になるからである。光学系の個々の面の収差係数を計算するには、一般に物体近軸光線、瞳近軸光線という2本の近軸光線を追跡し、その追跡値を用いて計算する方法が用いられているが、その計算の際には、尺度単位に関する情報も同時に繰り込まなければならないのである。

換算座標の尺度単位の設定には二つの自由度がある。すなわち、最初の空間における尺度単位  $l_1$  と  $\lambda_1$  をどうきめるかである。その他の空間での尺度単位は、すべて横倍率によってきまるからである。

一方、近軸光線の追跡には、光軸上の結像点の位置のみを計算していく方法と、光線の面への入射高  $h$  や光軸に対する傾角  $u, u'$  を用いて計算する方式とがあり、この後者の方法で計算する場合には、第1面への入射高  $h_1$  は任意に選ぶことができる。収差係数を計算する際には物体近軸光線と瞳近軸光線という2本の近軸光線を追跡するわけであるから、それらの第1面への入射高  $h_1$  と  $\bar{h}_1^{*1}$  の中に尺度単位の情報を含めればよいことになる。実際にそれを実現するには、図2に示した関係が成立するように、第1面への入射条件をきめればよい。すなわち、つぎのようにすればよい。

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= (s_1/g_1)\lambda_1, \quad u_1 = \lambda_1/g_1; \\ \bar{h}_1 &= -(t_1/g_1)l_1, \quad \bar{u}_1 = -l_1/g_1 \end{aligned} \right\} (5)$$

こうした初期値のもとに近軸追跡を行なった場合、任意の面 $\nu$ に関する近軸追跡値と尺度単位との関係はつぎのようになる。

\*1 瞳近軸光線に関する量は、物体近軸光線に関する量と区別するために上に bar をつけて表わす。

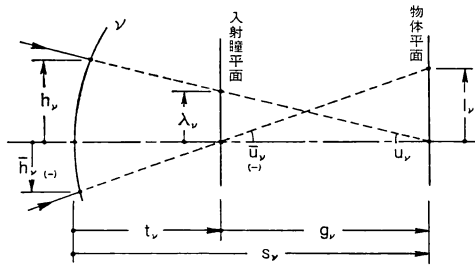


図 2 任意の面に入射する近軸光線と尺度単位の関係

$$\left. \begin{aligned} h_v &= (s_v/g_v)\lambda_v = (s_v'/g_v')\lambda_v' \\ \bar{h}_v &= -(t_v/g_v)l_v = -(t_v'/g_v')l_v' \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ところで、同じ光学系による 2 組の結像の間には Helmholtz-Lagrange の不変量と呼ばれる関係が成立する。いま任意の面  $\nu$  の入射瞳(射出瞳)平面から物体(像)平面までの距離を  $g_\nu(g_\nu')$  で表わすとすると(図 1 および図 2 を参照)、この不変量はつぎのように書ける。

$$\begin{aligned} N_1 l_1 \lambda_1 / g_1 &= \dots = N_\nu l_\nu \lambda_\nu / g_\nu \\ &= N_\nu' l_\nu' \lambda_\nu' / g_\nu' = \dots \equiv H \end{aligned} \quad (7)$$

尺度単位を設定するに当たっては、利用価値の高いこの(7)式を活用しやすいように考慮したほうがよい。そこで、つねに  $H=1$  となるように尺度単位をきめることにする。そうすると尺度単位設定に残された自由度は 1 となり、たとえば  $\lambda_1$  をきめれば尺度単位がすべてきまることになる。この場合、(5)式に含まれている  $l_1$  は、つぎにより  $\lambda_1$  の従属量としてきまる。

$$l_1 = g_1 / (N_1 \lambda_1) \quad (8)$$

(5)式を初期値とする近軸追跡値を用いて任意の面  $\nu$  に関する収差係数を計算する公式は、面  $\nu$  が球面の場合、つぎのような形になる\*2。この公式の  $h_\nu$  と  $\bar{h}_\nu$  のなかに尺度単位の情報が含まれているわけである。

$$\left. \begin{aligned} I_\nu &= h_\nu^4 Q_\nu^2 \Delta(1/Ns), \\ II_\nu &= h_\nu^3 \bar{h}_\nu Q_\nu \bar{Q}_\nu \Delta(1/Ns), \\ III_\nu &= h_\nu^2 \bar{h}_\nu^2 \bar{Q}_\nu^2 \Delta(1/Ns), \\ IV_\nu &= III_\nu + P_\nu, \\ V_\nu &= h_\nu \bar{h}_\nu^3 \bar{Q}_\nu^2 \Delta(1/Ns) + \bar{h}_\nu^2 \bar{Q}_\nu \Delta(1/Nt) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

実際に尺度単位  $\lambda_1$  をどう設定するかについては、後述するように、光学系の用途によっていくつかの方式が考えられる。しかし、 $\lambda_1$  の設定が変わっても、収差係数を計算する際には、たんに近軸追跡の初期値を変えるだけでよく、収差係数の計算公式(9)はどのような場合にも通用するのである。

### 3. 収差係数の正規化

この稿の初めにも述べたが、収差論を活用することによって、設計者の経験が効果的に蓄積されるようにするための重要な手続きが収差係数の正規化である。収差論は設計の見通しを立てるのに適しているのであるから、できるだけ設計者の直観と結びつくような形で活用が望ましいことは当然である。ところで、実際に収差論を使って仕事を進める場合、つねに設計者の目に触れるのは収差係数の値である。そこで、正規化という手続きによって満たされるべき条件として、つぎの二つを挙げることができる。

- i) 各収差係数の値が、そのまま対象とする製品分野における光学系の性能レベルを反映するようになっていくこと。
- ii) 各収差係数の値が、設計者の印象に残りやすい手頃なオーダーになっていること。

一方、収差係数の値が何によって変動するかというと、基本的にはつぎの二つを挙げることができる。

(1) 収差係数を計算するに当たっての光学系データのスケールのとり方。これによって収差係数の数値のオーダーが直接左右される。

(2) 換算座標の尺度単位  $\lambda_1$  のとり方。このとり方によって収差展開式(4)における収差係数と変数それぞれの意味する物理的内容が変わり、したがって収差係数の数値も変わる。

そこで、正規化の手続きを具体的に表現すれば、先に挙げた二つの条件が満たされるように、収差係数の変動要因となるこれら二つの事項について明確なルールを定め、それにもとづいて収差係数を計算するように習慣づけることであるといえる。実際にこれら二つをどう定めるかは、対象とする光学系の用途によっても異なるので、つぎの代表的な二、三の方式について説明しよう。

#### 3.1 結像光学系のための正規化 (1)

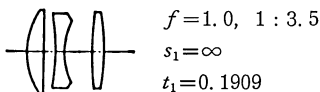
カメラやテレビ撮像系などのように、光学系によって形成される実像がそのまま記録あるいは光電変換されるような場合の光学系についての正規化で、Berek が彼のレンズ設計のテキストで用いた方法\*3 に若干改良を加えたものである。正規化の条件はつぎのとおりである。

- (1) 光学系データは焦点距離が 1 になるような尺度で与える。
- (2) 換算座標の尺度単位  $\lambda_1$  は、光学系の物体側主平面から物体面までの距離を  $g_1$  とするとき  $\lambda_1 = g_1 / g_1$  に

\*2 詳細については文献 2) の pp. 86-87 を参照されたい。

\*3 文献 1) の第 5 章。

表2 F/3.5 のトリプレットの3次収差係数 (文献2) より引用)



$\nu$	$I_\nu$	$II_\nu$	$III_\nu$	$P_\nu$	$V_\nu$
1	10.55745	0.95977	0.08725	1.35862	0.13144
2	5.54642	-3.67409	2.43381	-0.01914	-1.59955
3	-12.71469	5.94956	-2.78397	-0.47905	1.52686
4	-5.66204	-2.07329	-0.75918	-1.38961	-0.78683
5	0.11133	0.19974	0.35837	0.28137	1.14781
6	3.76833	-1.43798	0.54873	0.62124	-0.44646
$\Sigma$	1.60680	-0.07630	-0.11499	0.37343	-0.02672

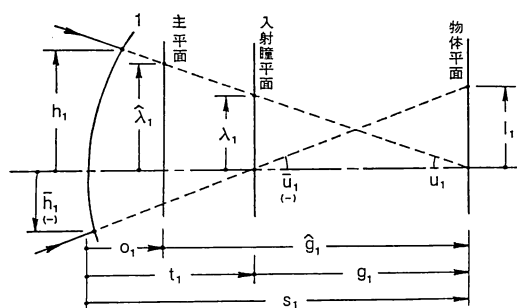


図3 近軸光線の初期値と尺度単位の関係

とる。このことは図3に示したように、物体近軸光線が物体側主平面を切る高さ  $\lambda_1$  を1にとることを意味する。

この正規化条件(2)により、換算座標と実座標との対応関係が確定する。光学系は回転対称であるから、物点をY軸上にとることにして、(4)式を実座標を用いた形に書き換えるとなつぎようになる。

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{\Delta Y}{\Delta Z} \right) &= -\frac{\hat{g}_1}{2N_1} \beta \left[ IR^3 \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix} \right. \\ &+ IIR^2 (N_1 \tan \omega) \times \begin{pmatrix} 2 + \cos 2\phi \\ \sin 2\phi \end{pmatrix} \\ &+ R(N_1 \tan \omega)^2 \begin{pmatrix} (2III + IV) \cos \phi \\ IV \sin \phi \end{pmatrix} \\ &\left. + V(N_1 \tan \omega)^3 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right] \end{aligned} \right\} (10)$$

ここに

$$\begin{aligned} \tan \omega &\equiv Y_1 / \hat{g}_1 \\ R \cos \phi &\equiv (\hat{g}_1 / g_1) Y_1^* \\ R \sin \phi &\equiv (\hat{g}_1 / g_1) Z_1^* \end{aligned}$$

この式で  $\beta$  は横倍率、また  $R$  は主平面上で測った入射瞳半径である。  $s_1 \rightarrow \infty$  のときには  $\beta=0$  となるが、そ

の場合にはつぎが成立する。

$$\{(\hat{g}_1 / N_1) \beta\}_{s_1 \rightarrow \infty} = f \quad (11)$$

一方(10)式に含まれる収差係数は各面の値の和であるが、それを計算するための近軸追跡の初期値はつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= s_1 / \hat{g}_1, \quad u_1 = 1 / \hat{g}_1; \\ \bar{h}_1 &= -(t_1 / N_1) (\hat{g}_1 / g_1), \quad \bar{u}_1 = -(1 / N_1) (\hat{g}_1 / g_1) \end{aligned} \right\} (12)^{*4}$$

表2はFナンバー3.5のトリプレットについて、この方式を適用して計算した収差係数の各面の値と全系の値とを、表の形にまとめたものである。この表から個々の面の収差と全系の収差との間の関係を知ることができる。たとえば、球面収差係数Iに着目すると、正レンズの各面がすべて正の値をもっているのに対して、負レンズの両面は負の値をもち、それらが互いに打ち消し合っていることがわかる。

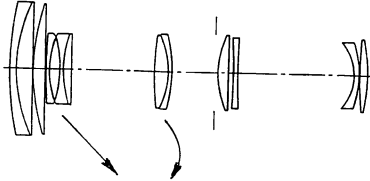
いまは特定の光学系の収差係数についての話であるが、いくつかの同種の光学系について収差係数を比較すると、より広い視野に立った情報が得られる。表3はFナンバーの異なる3種類のトリプレットについて、球面収差係数の比較ができるようにまとめたものである。この表を見ると、Fナンバーの明るいトリプレットほど全系の収差係数の値が小さくなっているだけでなく、正負各単レンズの収差係数の絶対値もまた同時に小さくなっていることがわかる。こうしたことは、新たにトリプレットを設計するような場合、3次収差係数を手がかりにした設計方針を立てるのに役立つであろう。

しかし、いま述べている方式には、最近の多様化した光学系を取り扱うのに致命的な欠点がある。表4は、焦点距離300mmのライカ判用望遠レンズへの適用例で、

\*4 物体が無限遠 ( $s_1 \rightarrow \infty$ ) の場合にはつぎのようになる。  
 $h_1 = 1, u_1 = 0; \bar{h}_1 = -(t_1 / N_1), \bar{u}_1 = -1 / N_1.$



表5 ライカ判用ズームレンズ 70~210 mm F/4 (特開昭 56-42208, 実施例1) の3次収差係数



f=70 mm における値		f=210 mm における値	
f	1.41105	f	4.10689
s <sub>1</sub>	∞	s <sub>1</sub>	∞
t <sub>1</sub>	0.93310	t <sub>1</sub>	3.19244
I	2.15988	I	0.70632
II	-0.14075	II	-0.01649
III	0.06581	III	0.03263
P	0.00813	P	0.00813
V	0.32512	V	-0.30467

さきほど問題になった歪曲が、実際には問題にならないことが一見してわかる。一方、球面収差係数はさきほどに比べて大きくなっているが、このことはこのレンズが標準レンズの6倍の焦点距離で使われるので、球面収差もそれに応じて大きくなるわけで当然のことである。

表5は、焦点距離が70 mm から210 mm まで変化するライカ判用のズームレンズにこの方式を適用した結果で、左側がワイド端、右側がテレ端の収差係数である。光学系のデータは、表4の場合と同様50 mm を1とする尺度で与えてある。歪曲がかなり大きい、ワイド端とテレ端で絶対値がほぼ等しくなるようにバランスをとっていることがよくわかる。

3.3 肉眼観察用の光学系のための正規化

像を肉眼で直接観察する形で使われる光学系について正規化を考える場合には、つぎのような結像光学系との相違点に留意する必要がある。

- i) 肉眼が全体を通しての基準になるので、光学系の焦点距離を尺度の単位にとったりするのは妥当でない。
- ii) 光学系による像がかなり遠方でできるので、収差を像平面上の横収差として表わすのは妥当でない。
- iii) 光学系の後方にある肉眼で見た像の質が問題になるので、収差展開の変数としては射出瞳半径と像側の半面角を用いるのが妥当である。

肉眼観察用光学系のこうした特殊性を考慮に入れ、正規化の条件はつぎのように定める。

(1) 光学系データは、収差係数がほぼ手頃なオーダーの数値になるように絶対寸法を単位にして与える。こ

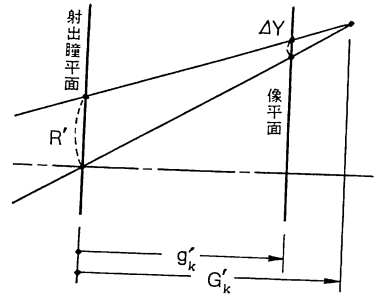


図4 横収差からディオプターで表わした収差への変換

こでは仮りに10 mm を1にとることにする。

(2) 換算座標の尺度単位 λ<sub>1</sub> は、瞳の横倍率を β<sub>p</sub> として λ<sub>1</sub> = 1/β<sub>p</sub> とする。

これにより、まず収差係数を計算するための近軸追跡の初期値はつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= (s_1/g_1)(1/\beta_p), & u_1 &= (1/g_1)(1/\beta_p) \\ \bar{h}_1 &= -(t_1/N_1)\beta_p, & \bar{u}_1 &= -(1/N_1)\beta_p \end{aligned} \right\} \quad (15)^{*6}$$

一方、正規化の条件(2)を(4)式に適用すると実座標で表わした横収差の展開式が得られるが、肉眼観察用光学系の場合、一般に収差はディオプターで表わされているので、そのための変換が必要である。

図4は、光学系の横収差とディオプターで表わした収差との間の関係を示すための図である。この図で、寸法をすべてメートルで表わしたとすると、幾何学的関係から、ディオプターで表わした子午断面の収差 ΔD<sub>M</sub> は横収差とつぎの関係にあることが導かれる。

$$\begin{aligned} \Delta D_M &\equiv N'_k(1/G'_k - 1/g'_k) \\ &= -(N'_k/g'_k)(\Delta Y/R') \end{aligned} \quad (16)$$

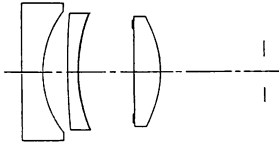
この式で、像空間の屈折率 N'<sub>k</sub> はたんに式の形を整えるために導入されたものである。球欠的断面の収差についてもまったく同じ関係が成立する。

前記(15)式を初期値とする近軸追跡の結果を用いて計算した収差係数と、ディオプターで表わした子午断面の収差 ΔD<sub>M</sub>、および球欠的断面の収差 ΔD<sub>S</sub> との関係は、最終的につぎの形にまとめることができる。この場合、歪曲はディオプターでは表わせない、個別に歪曲率 Dist (%) という形で表わす。

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{\Delta D_M}{\Delta D_S} \right) &= 50 \left[ I R'^2 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right. \\ &\quad \left. + 3 I I R' (N'_k \tan \omega') \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right] \end{aligned} \right\}$$

\*6 入射瞳が無限遠 (t<sub>1</sub> → ∞) で β<sub>p</sub> = 0 の場合つぎのようになる。h<sub>1</sub> = -s<sub>1</sub>/(N<sub>1</sub>f), u<sub>1</sub> = -1/(N<sub>1</sub>f);  $\bar{h}_1 = -f$ ,  $\bar{u}_1 = 0$ 。ただし f は光学系の焦点距離である。

表 6 アルバダファインダーの3次収差係数(特開昭 58-149017, 実施例2)の3次収差係数



ファインダー系	アルバダ系
$s_1 = \infty$ $t_1 = 1.4836$	$s_4 = 0.66$ $t_4 = 1.1633$
I -0.15662(-0.04850)	I 0.15310( 0.31762)
II 0.17639(-0.01480)	II -0.09755(-0.50744)
III 0.12981( 0.54284)	III 0.15791( 1.24372)
P -0.15764(-0.15764)	P -0.74902(-0.74902)
V 1.07427(-0.08151)	V -0.11917(-3.16958)

( )内の数値は非球面の寄与を除去した場合.

$$\text{Dist}(\%) = -50V(N_k' \tan \omega')^2 \left[ \begin{array}{c} 2III + IV \\ IV \end{array} \right], \quad (17)$$

ここに,  $\tan \omega' \equiv \bar{Y}_k' / g_k'$

この式の  $R'$  は射出瞳半径で 10 mm を 1 とした尺度で測ったもの, また,  $\bar{Y}_k'$  は理想像高である.

表 6 はカメラ用のアルバダファインダーに本方式を適用して求めた収差係数を示したもので, 左側がファインダー系, 右側がアルバダ系の収差係数である. アルバダ系の場合には, 第 5 面が物体面となり, 第 4 面が反射面

として作用する形になっている. また, この光学系は第 2, 第 4, 第 6 の 3 面が非球面化されているので, 参考までに非球面の寄与を除去した場合の収差係数の値を併せて示した. この光学系の場合, 非球面がアルバダ系の収差除去に重点を置いて導入されていることがわかる.

#### 4. む す び

レンズ設計における収差論の用途は, 何もここで解説したような面だけに限定されるものではない. これ以外にも, たとえば光学系の最初の概略形状の決定といった重要な応用もある. しかし, 収差論活用の第一歩は, 何と云っても収差係数の値を見ただけでその光学系の性能レベルが直観的に判断できるように, 収差係数に割れることであろう. そのためには, 適切な正規化を適用した収差係数を使用することが大いに役立つはずである.

本稿は基本的な考え方を理解してもらうことに重点を置いたため, 色収差や 5 次の理論についての説明は省いたが, ここで示した取扱いは, もちろんそれらにもそのまま適用できるものである.

本稿が収差論理解の一助になれば幸いである.

#### 文 献

- 1) M. Berek: *Grundlagen der praktischen Optik* (Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1930); 三宅和夫訳: レンズ設計の原理 (講談社, 東京, 1970).
- 2) 松居吉哉: レンズ設計法 (共立出版, 東京, 1972).