

研究

新しい光学系のための収差係数の正規化

松居 吉 哉

〒227 横浜市緑区つつじが丘 13-15

(1994年5月20日受付, 1994年7月4日受理)

Normalization of Aberration Coefficients for
New Type of Optical Systems

Yoshiya MATSUI

13-15, Tsutsujigaoka, Midori-ku, Yokohama 227

(Received May 20, 1994; Accepted July 4, 1994)

Normalization of aberration coefficients is a necessary means to make aberration theory a powerful tool for optical design. Until now, three methods of normalization have been used in the routine work of optical design. However, to some kinds of newly developed optical systems, these methods cannot be applied effectively because of special features of such new systems. In this paper, problems of the normalization methods used hitherto are discussed and the new revised method is proposed. The effectiveness of this revised method is illustrated by numerical examples.

1. はじめに

収差論を光学設計の有力な手段として活用するために不可欠なのが収差係数の正規化である。収差係数の正規化とは、計算の対象となる光学系のデータを適切な尺度で与えると同時に収差係数の計算に必要な近軸光線の初期値を適切に設定して、収差係数の値を通して設計者が直観的に結像性能を把握できるようにするための処置である。

正規化の方法として、これまでに正規化(1)から(3)までの3種類の方法¹⁻³⁾が考えられている。正規化(1)というのは、標準的な画角をもち焦点距離が一定の写真レンズを対象に考えられた最も初歩的な方法であって、35 mm カメラの交換レンズやズームレンズなどには適用ができない。この正規化(1)を改良して35 mm カメラの交換レンズやズームレンズにも適用できるように適用範囲を広げたのが正規化(2)であって、画面サイズが一定で焦点距離の異なる結像レンズに適用し、相互の比較ができるように考えられている。ただし、ズームレンズに適用する場合にはズーム中にFナンバーの変わ

らないことが前提になっている。一方、正規化(3)は望遠鏡や顕微鏡の接眼レンズ、あるいは各種のファインダーなどのように、その像を直接肉眼視するような光学系を適用対象とする方法で、光学系の後方に位置する肉眼との関係が考慮されている点で他の正規化とは性格を異にしている。

上記のような3種類の正規化の方法が存在する中で、これまで設計の現場で最も広く使われてきたのが正規化(2)の方法である。しかし、光学系の用途や機能が多様化するのに伴って、その適用対象と考えられる光学系の中にも従来の方法のままでは対応できないものが出てくるようになってきた。例えば、半導体集積回路の焼付けなどに用いられるようになったアフォーカルな結像レンズや、35 mm コンパクトカメラに装着されるようになったズーム中にFナンバーの変化するズームレンズなどがその例である。

以下では、これまでに広く使われてきた正規化(2)の概要を述べた後、現在その適用範囲に関して問題になっている事柄について考察し、そうした問題をすべて解決する新たな改良案について提案することにした。

2. 換算座標による3次の冪級数展開式

まず以下の議論の前提となる換算座標と、それによる光学系の収差表示の形式について簡単に説明する。

光学系は k 個の面から成るものとし、その物体空間における近軸領域の関係は Fig. 1 に示すようになっているものとする。換算座標を定義するのに必要な物体平面と入射瞳平面の上の尺度単位 l_1, λ_1 の値は光学系を通して追跡される物体近軸光線と瞳近軸光線の初期値 $h_1, u_1; \bar{h}_1, \bar{u}_1$ の中に組み込まれる。一方、物体平面上の点 (Y_1, Z_1) から出て光学系を通過する任意の光線が光学系の中の任意の面 ν に関する物体平面と入射瞳平面とに交わる位置の実際の座標をそれぞれ (Y_ν, Z_ν) および $(\overset{*}{Y}_\nu, \overset{*}{Z}_\nu)$ とすれば、これらに対応する換算座標 (y_ν, z_ν) および (η_ν, ζ_ν) は、それぞれの平面上の尺度単位 l_ν, λ_ν を用いてつぎのように定義される。

$$y_\nu \equiv \frac{Y_\nu}{l_\nu}, \quad z_\nu \equiv \frac{Z_\nu}{l_\nu}; \quad \eta_\nu \equiv \frac{\overset{*}{Y}_\nu}{\lambda_\nu}, \quad \zeta_\nu \equiv \frac{\overset{*}{Z}_\nu}{\lambda_\nu} \quad (1)$$

ν 面通過後のこれらに対応する座標にはダッシュをつけて表す。その場合、尺度単位に関してはつぎの関係が存在する。

$$\frac{l_\nu'}{l_\nu} = \beta_\nu, \quad \frac{\lambda_\nu'}{\lambda_\nu} = \beta_{\nu\nu} \quad (2)$$

ここに $\beta_\nu, \beta_{\nu\nu}$ はそれぞれ ν 面に関する物体結像および瞳結像の近軸横倍率である。

収差論によれば光軸の回りに回転対称な光学系の場合、 ν 面に関する光線の収差の y 成分は、換算座標の2次の量を

$$\left. \begin{aligned} u_{1\nu} &\equiv \frac{1}{2}(y_\nu^2 + z_\nu^2) \\ u_{2\nu} &\equiv y_\nu \eta_\nu + z_\nu \zeta_\nu \\ u_{3\nu} &\equiv \frac{1}{2}(\eta_\nu^2 + \zeta_\nu^2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

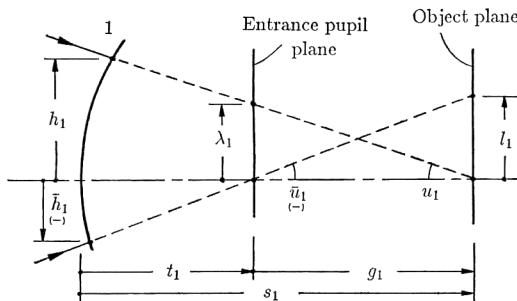


Fig. 1 Geometrical relations among relevant parameters in the object space.

と書くことにすれば、3次の近似でつぎのような形で表される。

$$y_\nu' - y_\nu = - \{ (V_\nu u_{1\nu} + III_\nu u_{2\nu} + II_\nu u_{3\nu}) y_\nu + (IV_\nu u_{1\nu} + II_\nu u_{2\nu} + I_\nu u_{3\nu}) \eta_\nu \} \quad (4)$$

収差の z 成分は、この両辺の y 成分の座標を z 成分の座標に入れ替えることによって得られる。(4)式の右辺は換算座標の3次の項だけから成る収差項であるから、この右辺を0と置いて得られる関係 $y_\nu' = y_\nu$ が近軸結像の関係にほかならない。そこで3次以上の収差を無視すると(1), (3)で与えられる換算座標はすべて光学系の物体空間の換算座標に置換することができる筈である。そのことを念頭に置いて(4)式の両辺を光学系の各面について加え合わせる。そうすると左辺は $y_\nu' \equiv y_{\nu+1}$ という関係が成り立つことから途中の面の項が消失して $y_k' - y_1$ となり、また右辺の3次の収差項は座標がすべて物体空間の座標に統一され、収差係数だけが各面の値の代数和の形になる。そこで光学系全体についての収差の y 成分はつぎのような形で表される。

$$\begin{aligned} \Delta y &\equiv y_k' - y_1 \\ &= - \{ (u_{11} \sum_\nu V_\nu + u_{21} \sum_\nu III_\nu + u_{31} \sum_\nu II_\nu) y_1 + (u_{11} \sum_\nu IV_\nu + u_{21} \sum_\nu II_\nu + u_{31} \sum_\nu I_\nu) \eta_1 \} \quad (5) \end{aligned}$$

この両辺の y 成分の座標を z 成分の座標と入れ替えたものが収差の z 成分になることは(4)式の場合と同様である。

以上の説明で明らかのように、(5)式は換算座標を用いることによって得られた関係であるから、各面の収差係数の中には当然尺度単位の情報が入り込んでいる。また、換算座標は尺度単位のとり方によって変わる相対的な座標であるから、実際の結像との間の関係は尺度単位を具体的に定義することによってはじめて確定する。そして尺度単位をどう定義するかは正規化の条件と密接に関係する。そこで、以下ではこれまでに用いられてきた正規化(2)における取扱いの概要を述べ、それを最近の新しい光学系に適用する上での問題点と、それを解決する方法について考えることにする。

3. 結像光学系のための正規化(2)とその改良

3.1 正規化(2)の概要

収差係数の正規化は、収差係数を計算しようとする光学系のデータの尺度と、換算座標の尺度単位とを光学系の用途に対して適切に設定することによって実現される。これまで用いられてきた正規化(2)の場合、光学系のデータの尺度は画面サイズに対して標準的な画角をも

つレンズの焦点距離を1とするように設定し、また換算座標の尺度単位のうち物体平面とそれに共役な像平面の上の尺度単位については、 β を光学系全体を通しての物体結像の横倍率として

$$l_1 = \frac{1}{\beta}, \quad l_k' = 1 \quad (6)$$

また入射瞳平面とそれに共役な射出瞳平面の上の尺度単位については

$$\lambda_1 = \left(\frac{g_1}{N_1}\right)\beta, \quad \lambda_k' = \frac{g_k'}{N_k'} \quad (7)$$

とそれぞれ設定していた。これに伴い尺度単位の間には Helmholtz-Lagrange 不変量の関係

$$\frac{N_1 l_1 \lambda_1}{g_1} = \dots = \frac{N_k' l_k' \lambda_k'}{g_k'} = 1 \quad (8)$$

が成立していた。

尺度単位を(6)、(7)式のように設定したことから、換算座標で表された物体面と入射瞳面の座標は、つぎのように実際の座標に書き換えられる。

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \bar{Y}_k', & z_1 &= \bar{Z}_k' \\ \eta_1 &= (NA)\cos\phi, & \zeta &= (NA)\sin\phi \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに \bar{Y}_k' 、 \bar{Z}_k' はガウス平面上の理想結像点の座標、 (NA) は像側の開口数、 ϕ はその方位角である。これによって(5)式に示した収差の冪級数展開もつぎのように実際の座標を用いた形に書き換えられる。ただし、光学系が光軸の回りに回転対称であることから物点はY軸上にあるものとしている。

基準波長についての収差：

$$\left. \begin{aligned} \Delta Y &= -\frac{1}{2} \{ I \cdot (NA)^3 \cos\phi + II \cdot \bar{Y}_k' (NA)^2 (2 + \cos 2\phi) \\ &\quad + (2III + IV) \cdot \bar{Y}_k'^2 (NA) \cos\phi + V \cdot \bar{Y}_k'^3 \}, \\ \Delta Z &= -\frac{1}{2} \{ I \cdot (NA)^3 \sin\phi + II \cdot \bar{Y}_k' (NA)^2 \sin 2\phi \\ &\quad + IV \cdot \bar{Y}_k'^2 (NA) \sin\phi \} \end{aligned} \right\} \quad (10a)$$

色収差：

$$\left. \begin{aligned} \Delta Y &= -\{ L \cdot (NA) \cos\phi + T \cdot \bar{Y}_k' \}, \\ \Delta Z &= -\{ L \cdot (NA) \sin\phi \} \end{aligned} \right\} \quad (10b)$$

これら(10a)、(10b)式の右辺の収差係数には尺度単位の情報が含まれているが、それらの値は収差係数の計算に用いられる2本の近軸光線の初期値を Fig. 1 に示したように

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha}_1 &\equiv N_1 \bar{u}_1 = N_1 \left(\frac{\lambda_1}{g_1} \right) \\ \bar{h}_1 &= \left(\frac{s_1}{g_1} \right) \lambda_1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha}_1 &\equiv N_1 \bar{u}_1 = -N_1 \left(\frac{\lambda_1}{g_1} \right) \\ \bar{h}_1 &= -\left(\frac{t_1}{g_1} \right) \lambda_1 \end{aligned} \right\}$$

という関係を満たすように与えることによって近軸光線の追跡値の中に盛り込むことができる。(11)式の右辺の l_1 と λ_1 を(6)、(7)式により消去するとつぎようになる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \beta \\ h_1 &= \left(\frac{s_1}{N_1} \right) \beta \\ \bar{\alpha}_1 &= -\left(\frac{N_1}{g_1} \right) \frac{1}{\beta} \\ \bar{h}_1 &= -\left(\frac{t_1}{g_1} \right) \frac{1}{\beta} \end{aligned} \right\} \quad (12a)$$

とくに物体が無限遠にある場合には(12a)式はつぎのように簡単になる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 0 \\ \bar{h}_1 &= f \\ \bar{\alpha}_1 &= -\varphi \\ \bar{h}_1 &= -\left(\frac{t_1}{N_1} \right) \varphi \end{aligned} \right\} \quad (12b)$$

ここに f は光学系の焦点距離、 φ はその逆数すなわち光学系の屈折力である。

3.2 正規化(2)の改良

上に説明した正規化(2)は画面サイズと開口数が一定で、焦点距離だけが異なる結像光学系を想定して考えられた正規化の方法であった。この条件から若干外れた新しい光学系の一つとしては既に述べたアフォーカルな結像レンズがある。このような光学系では光学系のデータをどのような尺度で与えるかという点だけが問題になるが、この点は従来の正規化(2)の条件を若干変更することで解決できる。すなわち、従来の正規化(2)では画面サイズに対して標準的な画角をもつレンズの焦点距離を1とする尺度で与えるとしていたのをもう少し一般化した形に変更し、画面サイズの最大寸法を1とする尺度で与えるとするればよい。これまでの正規化(2)では、35 mm 交換レンズの場合、標準レンズの焦点距離 40~50 mm を1とするような尺度で光学系のデータを与えていた訳であるが、この値は 35 mm カメラの画面対角線長の 43.2 mm にほぼ対応しているからである。

従来の正規化(2)にとっての基本にかかわる問題は、最近のズームレンズの中にズームングに伴って開口数の大きく変動するものが多くなったことである。また、それとは別に、画面サイズ自体が若干異なる光学系についても、その結像性能の良否を収差係数の値を通して判断

できるようにして欲しいという要望もある。以下、こうした現在直面する課題すべてを解決する方法について考えることにする。

光学系全体の収差係数と光学系の開口数や理想像高との間の関係を考える上での拠り所になるのは換算座標で表された3次の収差展開式(5)である。そこで、光学系によって開口数や理想像高の条件が異なるような場合、換算座標の尺度単位も同時に変えて換算座標の変動範囲が相互に同一になるようにしたとしよう。そのようにして表した(5)式で、もし収差係数の値が同等であったとすると結像性能もそういう変動範囲を揃えた座標のもとで同等であると考えてよいであろう。このことが上に述べた課題すべてを解決する方法を考える手がかりとなる。

今任意の光学系の理想像高と開口数を従来通り \bar{Y}_k' および (NA) と書くのに対して、結像性能を比較する上での基準となる光学系についてのそれらを \bar{Y}_0' 、 $(NA)_0$ と書くことにし、変動範囲に関してつぎのような関係があるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \bar{Y}_k' &= \tau \bar{Y}_0', \quad \tau \equiv \frac{\bar{Y}_k'}{\bar{Y}_0'} \\ (NA) &= \sigma (NA)_0, \quad \sigma \equiv \frac{(NA)}{(NA)_0} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

このように光学系の間で異なる理想像高と開口数の変動範囲を換算座標で同一に揃えるためには、換算座標の尺度単位を(6)、(7)式に代わってつぎのようにとればよい。

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= \frac{\tau}{\beta}, \quad l_k' = \tau \\ \lambda_1 &= \left(\frac{g_1}{N_1} \right) \sigma \beta, \quad \lambda_k' = \left(\frac{g_k'}{N_k'} \right) \sigma \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ただし、この場合には(8)式に示した光学系全体を通しての Helmholtz-Lagrange 不変量がつぎのようになることに注意しておく必要がある。

$$\frac{N_1 l_1 \lambda_1}{g_1} = \dots = \frac{N_k' l_k' \lambda_k'}{g_k'} \equiv \tilde{H} = \tau \sigma \quad (15)$$

尺度単位を(14)式のようにとることにより、(5)式の右辺の換算座標は(9)式に代わってつぎのように実際の座標に書き換えられる。

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \frac{Y_1}{l_1} = \frac{\bar{Y}_k'}{\tau} = \bar{Y}_0', \quad z = \bar{Z}_0' \\ \eta_1 &= \frac{Y_1^*}{\lambda_1} = \frac{(NA)}{\sigma} \cos \phi = (NA)_0 \cos \phi \\ \zeta_1 &= (NA)_0 \sin \phi \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

同様に(5)式の左辺もつぎのように書き換えられ

る。

$$\left. \begin{aligned} y_k' - y_1 &= \frac{1}{l_k'} \Delta Y = \frac{1}{\tau} \Delta Y = \Delta Y_0 \\ z_k' - z_1 &= \Delta Z_0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

そこで収差係数と実際の収差の関係は(10a)、(10b)式に代わってつぎのようになる。

基準波長についての収差：

$$\left. \begin{aligned} \Delta Y_0 &= -\frac{1}{2} \{ I \cdot (NA)_0^3 \cos \phi + II \cdot \bar{Y}_0' (NA)_0^2 (2 + \cos 2\phi) \\ &\quad + (2III + IV) \cdot \bar{Y}_0'^2 (NA)_0 \cos \phi + V \cdot \bar{Y}_0'^3 \} \\ \Delta Z_0 &= -\frac{1}{2} \{ I \cdot (NA)_0^3 \sin \phi + II \cdot \bar{Y}_0' (NA)_0^2 \sin \phi \\ &\quad + IV \cdot \bar{Y}_0'^2 (NA)_0 \sin \phi \} \end{aligned} \right\} \quad (18a)$$

色収差：

$$\left. \begin{aligned} \Delta Y_0 &= -\{ L \cdot (NA)_0 \cos \phi + T \cdot \bar{Y}_0' \} \\ \Delta Z_0 &= -\{ L \cdot (NA)_0 \sin \phi \} \end{aligned} \right\} \quad (18b)$$

これらの式で明らかのように、このような取扱いのもとでは、任意の光学系の結像関係がすべて基準となる光学系の結像関係に換算された形で取り扱われることになるのである。

一方、収差係数の計算に用いられる2本の近軸光線の初期値は、従来と同様に(11)のようにとることになる訳であるが、 l_1 と λ_1 とが従来とは若干異なることから実際の初期値は(12a)式に代わって

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \sigma \beta \\ h_1 &= \left(\frac{s_1}{N_1} \right) \sigma \beta \\ \bar{\alpha}_1 &= -\left(\frac{N_1}{g_1} \right) \frac{\tau}{\beta} \\ \bar{h}_1 &= -\left(\frac{t_1}{g_1} \right) \frac{\tau}{\beta} \end{aligned} \right\} \quad (19a)$$

となり、とくに物体が無限遠にある場合には(12b)式に代わってつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 0 \\ h_1 &= \sigma f \\ \bar{\alpha}_1 &= -\tau \phi \\ \bar{h}_1 &= -\left(\frac{t_1}{N_1} \right) \tau \phi \end{aligned} \right\} \quad (19b)$$

光学系全体の収差係数は従来と同様に光学系を構成する各面の収差係数の和になるが、個々の面の収差係数の計算式は若干変わり、Helmholtz-Lagrange 不変量 \tilde{H} を含んだつぎのような形になる。

基準波長の収差係数：

$$I_v = \frac{1}{\tilde{H}} h_v^4 \left\{ Q_v^2 \Delta_v \left(\frac{1}{N_s} \right) + \phi_v \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 II_v &= \frac{1}{\tilde{H}} h_v^3 \bar{h}_v \left\{ Q_v \bar{Q}_v \Delta \left(\frac{1}{N_s} \right) + \phi_v \right\} \\
 III_v &= \frac{1}{\tilde{H}} h_v^2 \bar{h}_v^2 \left\{ \bar{Q}_v^2 \Delta \left(\frac{1}{N_s} \right) + \phi_v \right\} \\
 IV_v &= III_v + \tilde{H} P_v \\
 V_v &= \frac{1}{\tilde{H}} h_v \bar{h}_v^3 \left\{ \bar{Q}_v^2 \Delta \left(\frac{1}{N_s} \right) + \phi_v \right\} + \bar{h}_v^2 \bar{Q}_v \Delta \left(\frac{1}{N_l} \right) \\
 I_{v'} &= \frac{1}{\tilde{H}} \bar{h}_v^4 \left\{ \bar{Q}_v^2 \Delta \left(\frac{1}{N_l} \right) + \phi_v \right\}
 \end{aligned} \right\} \quad (20 a)$$

色収差係数:

$$\left. \begin{aligned}
 L_v &= \frac{1}{\tilde{H}} h_v^2 Q_v \Delta \left(\frac{\delta N}{N} \right) \\
 T_v &= \frac{1}{\tilde{H}} h_v \bar{h}_v \bar{Q}_v \Delta \left(\frac{\delta N}{N} \right) \\
 L_{v'} &= \frac{1}{\tilde{H}} \bar{h}_v^2 \bar{Q}_v \Delta \left(\frac{\delta N}{N} \right)
 \end{aligned} \right\} \quad (20 b)$$

これらの公式に含まれている \tilde{H} は、(11)と(15)の関係から近軸光線の初期値とつぎの関係がある。

$$\alpha_1 \bar{h}_1 - \bar{\alpha}_1 h_1 = \frac{N_1 l_1 \lambda_1}{g_1} \equiv \tilde{H} = \tau \sigma \quad (20 c)$$

4. 応用 例

4.1 アフォーカルな結像光学系

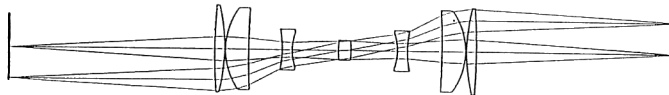
負の角倍率 γ をもつアフォーカルな光学系は近距離にある物体の実像を結像させることができるが、その場合物体面を光軸方向に移動させても横倍率 β が一定 (角倍率 γ の逆数) で変わらないという特長がある。最近この性質に着目して平面的なパターンを一定の倍率 (多くは縮小率) で結像させるためにはほぼアフォーカルな光学系を物・像両空間でテレセントリックな配置にして使うことが行われるようになった。このような光学系では焦点距離は意味をもたないので、光学系のデータは最大画面寸法を1とするような尺度で与えることになる。

収差係数の計算に必要な2本の近軸光線の初期値には(12a), もしくは(19a)式で $\tau = \sigma = 1$ と置いた関係を適用すればよいが、もし光学系が完全にアフォーカルである場合には

$$\beta = \frac{1}{\gamma}, \quad \frac{N_1}{g_1} = 0, \quad \frac{t_1}{g_1} = -1$$

という関係が成立するから初期値はつぎのようになる。

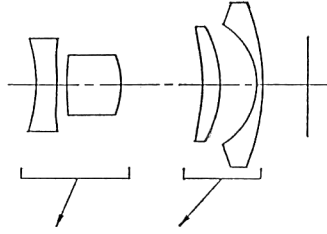
Table 1 Aberration coefficients of a telecentric imaging system (Japanese Patent Application Laid-Open 19317/89 Ex. 1).
 $NA = 0.05495$; $s_1 = -3.18288$, $t_1 = 86.8823$.



$$\left(\begin{array}{cc}
 \alpha_1 = -1.0 & , \quad h_1 = 3.18288 \\
 \bar{\alpha}_1 = -0.0111031 & , \quad \bar{h}_1 = -0.964659
 \end{array} \right)$$

ν	I	II	III	P	V	L	T
1	4.1040	-0.29674	0.02146	0.04272	-0.00464	0.01731	-0.00125
2	0.6583	-0.39285	0.23443	0.12916	-0.21696	0.01318	-0.00786
3	20.9677	-3.94815	0.74342	0.33374	-0.20283	0.04035	-0.00760
4	4.4462	-2.36548	1.25849	-0.02809	-0.65460	0.01588	-0.00845
5	-19.0595	6.78627	-2.41630	-0.22130	0.93914	-0.04999	0.01780
6	-18.0150	-0.13100	-0.00095	-0.44912	-0.00327	-0.05352	-0.00039
7	7.1834	1.31530	0.24084	0.18170	0.07737	0.01433	0.00262
8	7.1836	-1.31531	0.24083	0.18170	-0.07736	0.01433	-0.00262
9	-18.0150	0.13093	-0.00095	-0.44912	0.00327	-0.05352	0.00039
10	-19.0581	-6.78598	-2.41627	-0.22130	-0.93915	-0.04998	-0.01780
11	4.4457	2.36532	1.25845	-0.02809	0.65461	0.01588	0.00845
12	20.9669	3.94812	0.74344	0.33374	0.20284	0.04035	0.00760
13	0.6582	0.39281	0.23441	0.12916	0.21696	0.01318	0.00786
14	4.1039	0.29675	0.02146	0.04272	0.00464	0.01731	0.00125
Σ	0.5703	0.00000	0.16276	-0.02238	0.00002	-0.00491	0.00000

Table 2 Aberration coefficients of a compact-type zoom lens
(Japanese Patent Application Laid-Open 42114/92 Ex. 1).
 $f=1.0\sim 1.83935$, $F. No.=4.1\sim 7.6$, $s_1=\infty$.



($f=1.0$) $\alpha_1=0$, $h_1=1.0$; $\bar{\alpha}_1=-1.0$, $\bar{h}_1=-0.26748$

ν	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>P</i>	<i>V</i>	<i>L</i>	<i>T</i>
1	12.9670	-2.84363	0.21221	-0.60373	0.95454	-0.02609	0.02290
2	-38.1880	7.73811	-1.74105	0.23095	-0.15240	0.00174	-0.01627
3	0.9208	0.49485	0.26593	0.23224	0.26771	0.00857	0.00460
4	25.6161	-5.53754	1.19707	0.84818	-0.44213	0.02755	-0.00596
5	-1.4476	0.70539	0.15807	-0.44332	0.28302	-0.01682	0.00345
6	2.2717	0.08158	0.00293	0.60213	0.02173	0.01675	0.00060
7	-0.9868	-0.47150	-0.22529	-1.19945	-0.68076	-0.00744	-0.00356
8	0.2178	-0.19736	0.17885	0.36852	-0.49602	0.00410	-0.00371
Σ	1.3710	-0.03010	0.04872	0.03552	-0.24431	0.00836	0.00205

($f=1.83935$) $\alpha_1=0$, $h_1=1.0$; $\bar{\alpha}_1=-0.54367$, $\bar{h}_1=-0.14542$

ν	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	$\tilde{H}P$	<i>V</i>	<i>L</i>	<i>T</i>
1	23.8508	-2.84361	0.11537	-0.32823	0.28214	-0.04799	0.02290
2	-70.2411	7.73805	-0.94654	0.12556	-0.04505	0.00321	-0.01627
3	1.6938	0.49485	0.14458	0.12626	0.07913	0.01576	0.00460
4	47.1170	-5.53750	0.65080	0.46113	-0.13068	0.05068	-0.00596
5	-3.3823	2.21154	-0.23242	-0.24102	0.08742	-0.06600	0.01079
6	17.4868	-1.50643	0.12977	0.32736	-0.03938	0.07722	-0.00665
7	-15.9554	-0.40000	-0.01003	-0.65211	-0.01660	-0.05808	-0.00146
8	0.6281	-0.31810	0.16111	0.20035	-0.18307	0.01941	-0.00983
Σ	1.1977	-0.16120	0.01264	0.01930	0.03391	-0.00579	-0.00188

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1=\beta=\frac{1}{\gamma}, \quad h_1=\left(\frac{s_1}{N_1}\right)\beta=\left(\frac{s_1}{N_1}\right)\frac{1}{\gamma} \\ \bar{\alpha}_1=0, \quad \bar{h}_1=\frac{1}{\beta}=\gamma \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Table 1 は公開特許公報に記載されている横倍率が -1, 画面サイズが 40 mmφ のテレセントリックな結像レンズに上に述べた正規化を適用し, 40 mm を 1 とする尺度で光学系のデータを表して収差係数を計算した結果である. 収差係数の値から正規化が妥当なものであることがわかるであろう. この例は完全対称な結像なので収差係数の値も完全に対称な形になっている. またこの表の色収差係数 *L* と *T* の値は基準波長の d 線に対する

F 線の屈折率偏差により計算したものである.

4.2 開口数の変化するズームレンズ

これまでの正規化(2)で想定していたズームレンズは, 画面サイズも開口数も共にズーミング中一定に保たれるものと仮定していた. しかし, ズーム比の比較的大きなズームレンズなどでは, 従来からレンズ径が大きくなり過ぎないように望遠側の開口数を落としたものが多かったし, また最近のコンパクトカメラ用ズームレンズは, 焦点距離に反比例して開口数の変わるものが主流になっている. このように, 従来の正規化(2)はズームレンズへの完全な適用にもともと無理があった訳である. それに対して, 上に提案した改良案は, 開口数の変化に

対応させて適宜 σ の値を変えることにより、正規化をズームリングの全域にわたって完全な形で適用できる。

Table 2 は公開特許公報に記載されたコンパクトカメラ用ズームレンズの実施例に、本報告の改良案を適用して収差係数を計算した結果を示したものである。この例の場合、ズームリングによって焦点距離が 29.0 mm から 53.3 mm へと変化するのに伴って F ナンバーも 4.1 から 7.6 (開口数では 0.12195 から 0.06630) へと変わるので、 σ の値はワイド端で 1 とするのに対してテレ端では開口数の低下に対応させて 0.54367 としている。一方、画面サイズは終始一定であるから τ はワイド端、テレ端とも 1 としている。このレンズの実際の収差補正は、ワイド端とテレ端それぞれの F ナンバーのもとで同程度になるように行われているのであるが、収差係数の値もワイド端とテレ端でほぼ同程度の値になっていて実際の収差補正の状態をそのまま反映していることがわかるであろう。なお、この表の色収差係数 L , T の値は、基準波長の d 線に対する g 線の屈折率偏差により計算してある。

5. おわりに

収差論を光学設計に活用する上で不可欠なのが収差係数の正規化という手段で、これまで正規化(2)と呼ばれる方法が一般に用いられてきたが、最近の多様な光学系には必ずしも対応できなくなっていた。そこで本報告では、これまでの方法の概要を述べた上で、その問題点を解決する改良案を提示した。本報告で提案した方法を用いるには、収差係数の計算式を一部改める必要があるが、それさえ行えば、どのような光学系にも正規化を完全な形で適用できる。その有効性を二つの数値例によって示した。

本報告をまとめるに当たっては、数値例の作成その他キヤノン(株)の須田繁幸氏に大変お世話になった。ここに付記して御礼に代えたい。

文 献

- 1) 松居吉哉: “レンズ設計における収差論の役割と正規化問題”, 光学, **13** (1984) 482-489.
- 2) 松居吉哉: 収差論 (日本オプトメカトロニクス協会, 1989) pp. 63-88.
- 3) Y. Matsui and K. Nariai: *Fundamentals of Practical Aberration Theory* (World Scientific, Singapore, 1993) pp. 66-98.