

# 技術報告

## 厚肉固有係数の存在範囲

加藤 隆志\*・田中 常文\*\*

\* キヤノン(株)ナノテク研究所 〒211 川崎市幸区鹿島田 890-12

\*\* キヤノン(株)イメージング研究所 〒146 東京都大田区下丸子 3-30-2

(1994年3月10日受付, 1994年5月9日受理)

### The Distribution of the Eigen-Coefficients for a Single Thick Lens

Takashi KATO\* and Tsunefumi TANAKA\*\*

\* Nanotechnology Research Center, Canon Inc., 890-12,  
Kashimada, Saiwai-ku, Kawasaki 211

\*\* Imaging Research Center, Canon Inc., 3-30-2,  
Shimomaruko, Ohta-ku, Tokyo 146

(Received March 10, 1994; Accepted May 9, 1994)

Eigen-coefficients of the lens are known as representation of its shape. The distribution of the eigen-coefficients for a single thin lens is well known. We found that the distribution for a single thick lens is complex. The complex situation depends on thickness of the lens and which surface to be aspheric. We present the example for a zoom lens designed with the distribution of the eigen-coefficients for a single thick lens.

#### 1. はじめに

近年, 非球面レンズは, 生産技術の向上に伴い銀塩カメラ或いはビデオレンズ等に積極的に活用されている。この非球面は, 球面系のみでは補正が不可能な収差を補正したり, 光学系の構成枚数を簡略化する手段などのために導入され, レンズ設計の一自由度として有効な役割を果たしている<sup>2-4)</sup>。

しかしながら非球面の持つポテンシャルをフルに発揮することは, 非常に困難であると言われており, 一般に非球面の導入面数および位置の決定は設計経験と試行錯誤による部分が大きい。またその効果の限界を見極めることも難しい。さらには, 球面系である程度のレンズ設計を行った後, 補正しきれない収差を非球面で補正しようとする方法では, 球面系の設計からの大きな飛躍が期待できない<sup>3,5,6)</sup>。すなわち, 非球面の効果的, 或いは理論的な導入方法が確立されていないのが現状である。

非球面を有効に活用するためには, 球面系をベースにした設計から離れ, 設計初期の段階で, 非球面を導入することを前提とした初期設計を行い, その出発点データ

をもとに最適化を行う方法が有効であると考えられる。そしてその初期設計の段階において, レンズ形状を表現する“固有係数”<sup>2,7-9)</sup>を活用することは, 非球面の特徴, 効果, 限界を見極めるためにも, 非常に効果的であると考えられる。

ところで, 薄肉単レンズにおける固有係数の形状解の存在範囲は従来から良く知られている<sup>10)</sup>。また近似精度の向上を目的として, 薄肉に対して肉厚の1次の項のみを考慮した球面系の固有係数の存在曲線を求めた報告<sup>11)</sup>もある。薄肉系では, 非球面を導入すれば, 3次収差領域において理論上その形状解を求めることが可能である。しかしながら, 薄肉において存在する固有係数の形状解が厚肉化後に存在するとは限らない。

本報告では, 厚肉単レンズにおける固有係数の形状解の存在範囲を調べ, その分布パターンが非球面の導入面の違いによっても, また肉厚によっても異なることを示す。さらに, この固有係数の存在範囲を用いた, 各群単玉構成のズームレンズ設計への応用についても合わせて報告する。

### 2. 固有係数の定義

3次の収差領域においては、全系の収差係数は光学系を構成する各々の群の収差係数の和で表される。群の収差係数は、各々の群の特性行列と固有係数の積で表される。この特性行列は近軸量で決定されるものであり、固有係数は光学系中での群の位置に無関係な、個々の部分系の形状に密接に関係した係数である。ここで言う厚肉固有係数の定義は、部分系の焦点距離を+1、主平面を入射瞳として、主平面における近軸追跡初期値を以下のように与えた場合の収差係数のことである。

$$\alpha=0, h=1, \bar{\alpha}=-1, \bar{h}=0 \quad (1)$$

ただし、 $\alpha, h$  は各々近軸追跡における換算傾角、光線高、また、 $\bar{\alpha}, \bar{h}$  は各々瞳近軸追跡における換算傾角、光線高を表す。また表記はこれまでの収差係数値の表記に添字0を付加し、 $I_0, II_0, \dots$  と表す。

本報告では、凹の焦点距離を持つ群においてもその焦点距離を+1とし、そのため曲率半径および肉厚は符号が反転するように定義する。

### 3. 固有係数の存在範囲

本検討ではまず従来から良く知られている単レンズの薄肉固有係数の存在範囲に対し、厚肉固有係数のそれについても明らかにする。また、非球面の導入面或いは肉厚の違いによる差異も示す。Table 1 に固有係数の存在範囲を算出した、単レンズの条件を示す。なお、 $n$  は屈折率、 $d$  は単レンズの焦点距離を+1とした時の肉厚である。

#### 3.1 薄肉系

薄肉単レンズの固有係数の存在範囲を Fig. 1 に示す。図中 sph. で示す曲線が球面系の固有係数の存在曲線であり、固有係数  $I_0$  は  $II_0$  の2次関数で表される<sup>2,7,10</sup>。ここで非球面を導入すると、その存在曲線は上下に平行移動し<sup>2</sup>、解の存在範囲は理論上無限に広がる。また、非球面を第1面または第2面のどちらに導入しても非球面効果は同じである。なお、Fig. 1 の4次の非球面係数  $B$  (単レンズの焦点距離を+1とした時の値)

Table 1 Condition of a single lens.

	Refractive index, $n$	Thickness, $d$
Convex lens	1.583	0, 0.1-0.3
Concave lens	1.805	0, -0.01 to -0.03

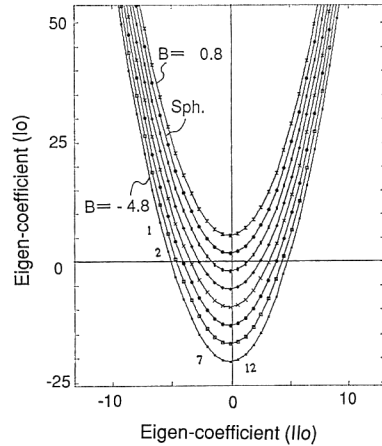


Fig. 1 Single thin lens.

は、 $B=-4.8\sim 0.8$  (0.8 刻み) とした。

#### 3.2 厚肉系

Fig. 2 に肉厚  $d=0.2$  の時の凸単レンズのベンディング時の形状と、それに対応した厚肉固有係数の存在範囲を示す。なお、非球面第1面導入時を(1)、第2面導入時を(2)とし、非球面係数  $B$  の範囲は薄肉時と同じにした。また図中 sph. は球面系の存在曲線であり、Fig. 1 の薄肉時の球面系とは異なった曲線になっている。また非球面を導入すると存在範囲の広がり方が薄肉時とは大きく異なり、図中  $Q_1, Q_2$  の付近では存在曲線に垂直な方向において非球面効果がほとんどなく、存在範囲が広がらないことがわかる。また非球面導入面の違いによっても、存在範囲の様相は異なる。例えば図中  $P$  点に相当する固有係数を満足する形状を単レンズで達成しようとする、第1面に非球面を導入した場合には非球面効果によって存在範囲が広がり、単レンズの形状としての解がある。しかしながら、第2面の場合非球面をいくら導入してもその解を得ることができない。Fig. 3 に、肉厚を変化した場合の結果 (非球面第1面導入時は(1)、第2面導入時は(2)) を示す。図より薄肉の状態から肉厚を増すごとに存在範囲の分布は薄肉のそれと大きく異なってくるのがわかる。

Fig. 4 に肉厚  $d=-0.02$  の時の凹単レンズのベンディング時の形状と、それに応じた厚肉固有係数の存在範囲を示す。なお、非球面第1面導入時を(1)、第2面導入時を(2)とし、非球面係数  $B$  の範囲は、 $B=-32\sim 32$  とした。凸単レンズの場合と同様に、図中 sph. は球面系の場合を示し、Fig. 1 の薄肉曲線とは異なる曲線になる。また図中においてその存在曲線がクロスしているのがわかる。すなわち、このクロスした範囲において

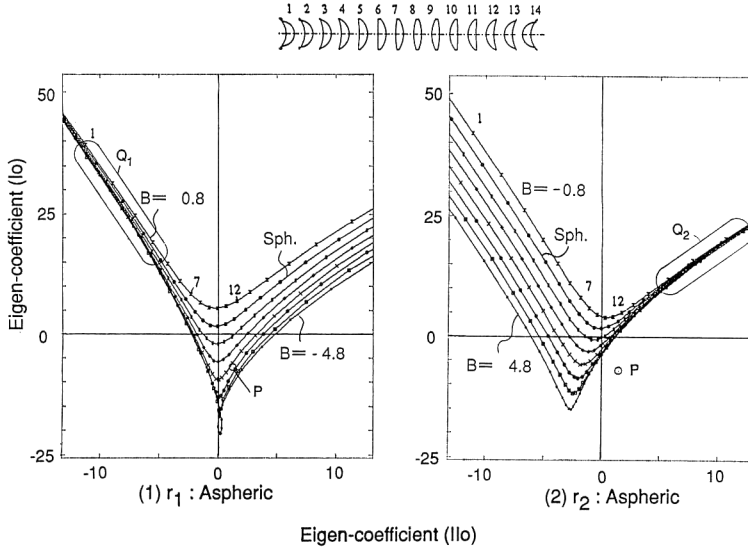


Fig. 2 Distribution of the eigen-coefficients for a single convex thick lens of  $d=0.2$ .

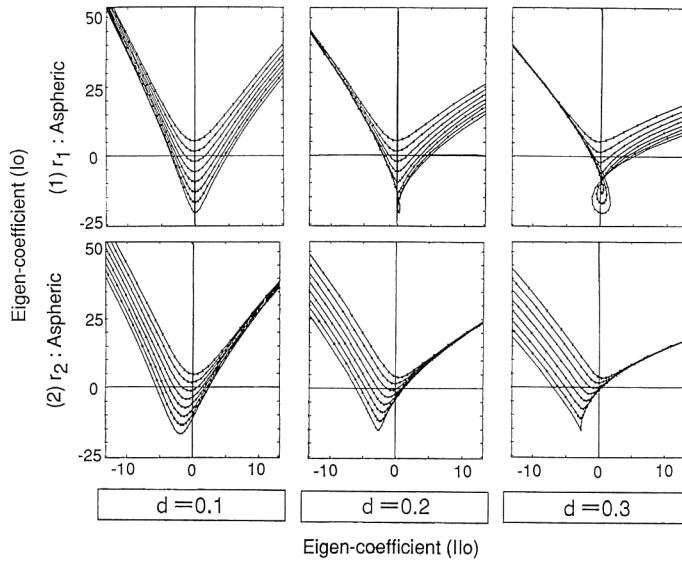


Fig. 3 Distribution of the eigen-coefficients ( $d=0.1, 0.2, 0.3$ : convex lens).

は、ある  $I_0, II_0$  の値を満たす二つのレンズ形状が存在することを意味する。また非球面を導入すると存在範囲の広がり方が凸レンズの時とも大きく異なっている。図中  $Q$  の付近では存在曲線に垂直な方向において非球面効果がほとんどなく、また非球面導入面の違いによっても存在範囲の様相は異なる。

Fig. 5 に、更に肉厚を変化した場合の結果を示す。

3.3 肉厚および非球面の影響

以上のような存在範囲の分布パターンの相違は、

(A) 肉厚変化時の球面系の存在曲線の変化

(B) 非球面係数変化時の存在曲線の変化が原因である。本報告では、特に非球面の効果に関連する(B)について考察する。

まず、固有係数の各面分担値を(2)、(3)式に示す。なお、球面系の存在曲線の様子は、(2)、(3)式において非球面量  $\phi_i=0$  とした場合として表現される。

$$I_0 = (I_{01}^* + \phi_1) + h_2^2(I_{02}^* + \phi_2) \tag{2}$$

$$II_0 = \bar{h}_1(I_{01}^* + \phi_1) + II_{01}^* + h_2^2 \bar{h}_2(I_{02}^* + \phi_2) + h_2^2 II_{02}^* \tag{3}$$

なお、 $I_{0i}^*$ : 球面系第  $i$  面固有係数  $I_0$

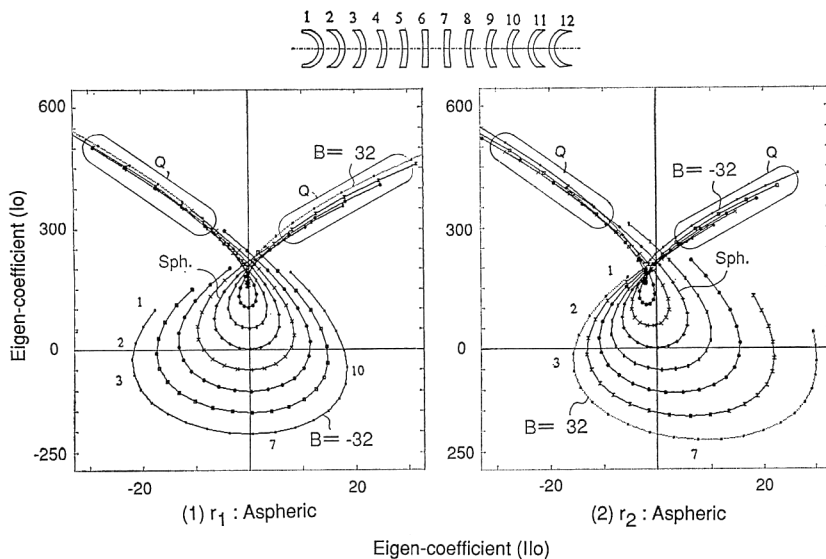


Fig. 4 Distribution of the eigen-coefficients for a single concave thick lens of  $d = -0.02$ .

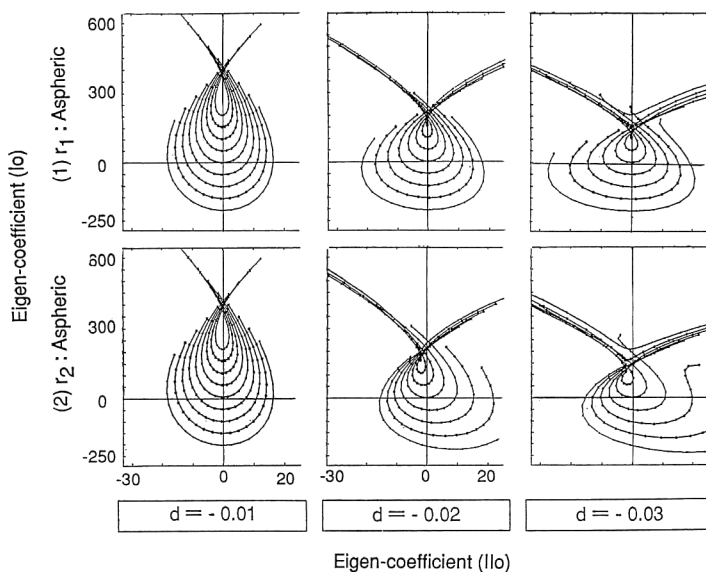


Fig. 5 Distribution of the eigen-coefficients ( $d = -0.01, -0.02, -0.03$ : concave lens).

$II_0^*$ : 球面系第  $i$  面固有係数  $II_0$

$h_i$ : 第  $i$  面近軸追跡高

$\bar{h}_i$ : 第  $i$  面瞳近軸追跡高

$\phi_i$ : 3次非球面量  $= (n' - n) * 8B_i$

Table 2 に (2), (3) 式より求められる薄肉および厚肉系における, 固有係数  $I_0, II_0$  に対する非球面効果の違いを示す。各値は非球面量  $\phi_i$  に対する非球面寄与量を表す。薄肉系では, 近軸追跡高  $h$  は 1, 瞳近軸追跡高  $\bar{h}$  は 0 であり, 非球面量  $\phi$  は  $I_0$  にしか影響しな

Table 2 Aspherical effect for a single lens.

	Thin lens	Thick lens	
		$r_1$ : Aspheric	$r_2$ : Aspheric
$I_0$	$\phi$	$\phi_1$	$h_2^2 \phi_2$
$II_0$	0	$\bar{h}_1 \phi_1$	$h_2^2 \bar{h}_2 \phi_2$

い。つまり,  $I_0$  に対する非球面寄与量は非球面量  $\phi$  そのものであり,  $II_0$  に対しては非球面効果がないということである。よって, Fig. 1 で示したように, 球面系の

存在曲線が非球面を導入することにより  $I_0$  軸方向に  $\phi$  だけ平行移動することになる。また、非球面の導入面の差異による違いはない。

厚肉系では、非球面を第1面に導入した場合には  $I_0$  に対する寄与量は  $\phi_1$  そのもので、薄肉の場合と同様である。しかし、第2面導入時には肉厚の影響により第2面の近軸追跡高  $h_2$  の4乗が影響する。(4)式に、 $h_2$  と肉厚  $d$  との関係を示す。

$$h_2 = (n - d\phi_1)/n \quad (4)$$

$\phi_1$ : 第1面の面屈折力

$II_0$  に関しては、第1面に非球面を導入した時には第1面瞳近軸高  $\bar{h}_1$  が、第2面導入時には第2面の近軸追跡高  $h_2$  の3乗と瞳近軸高  $\bar{h}_2$  の積が非球面効果として寄与するのである。

したがって肉厚による近軸光線追跡値の違いが非球面寄与量の違いとなって表れ、薄肉系と厚肉系とでは非球面効果の大きな違いとなる。以上により単レンズの肉厚がその焦点距離に比して厚い場合、その固有係数の存在範囲は、薄肉に比べその分布パターンが大きく異なるものとなる。

#### 4. 厚肉固有係数を用いた形状決定例

##### 4.1 概要

以上のように明らかになった厚肉固有係数の存在範囲を用いて、3次収差領域によって決定される形状(初期形状)を探索する。本報告では、3枚レンズで構成されるコンパクトカメラ用のズームレンズを例としてとりあげる。なお、形状決定のフローを Fig. 6 に示す。

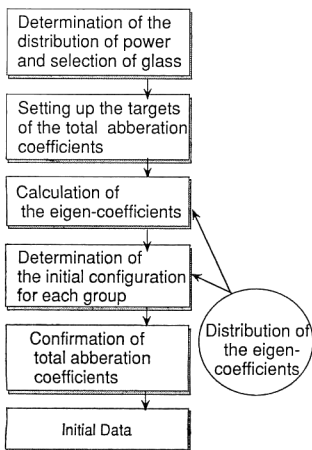


Fig. 6 Flowchart.

##### 4.2 近軸パワー配置, 硝子の選択

本実験例の仕様は  $f 35 \sim 70 \text{ mm}$ ,  $F 4.5 \sim 8.5^{11)}$  の負正負3群3枚構成のズームレンズとする。近軸パワー配置の決定は、各群パワー、主点間隔、倍率等の変数を決定することである。仕様などから実質的に変数の自由度は3であり、例えばこの例では、第1群の焦点距離、広角端第2群倍率、第2群倍率比を変数とした。以上の変数をパラメータとして、全系の1次の軸上色および倍率色収差係数値を評価し、色許容値内に入る硝子の組み合わせを決めた。

##### 4.3 各群厚肉固有係数の算出

次に全系の目標収差係数値の組を与えて、各群に要求される固有係数値を算出する (Fig. 7 参照)。変数として各群の固有係数の  $I_0, II_0$  を選ぶ。したがって、変数は合計6個となり、全系の目標収差係数値を6個与えることにより固有係数を変数とする連立方程式となる<sup>2,12)</sup>。その方程式の解として各群の固有係数値が得られる。なお、特性行列は3次の収差領域においてはその行列要素がすべて定数になり、また本実験においては各群固有係数  $III_0, P_0, V_0, I_0'$  についても定数として扱うため、定数行列として加えてある。この例では固有係数  $I_0, II_0$  を変数とし、目標全系収差係数は広角端および望遠端(広角端からの差分)の球面収差係数  $I$ , コマ収差係数  $II$ , 非点収差係数  $III$  を設定した。

##### 4.4 各群初期形状決定

以上のように、目標全系収差係数を与えて、各群に要求される固有係数値を算出した後、各群ごとに固有係数値を満たす形状を決定する。形状の組み合わせを Fig. 8 に示す。肉厚、非球面導入面の違いにより各々形状が定まる。特に第2, 3群においては、肉厚、非球面導入面を定めると形状が一つ決定されるのに対し、第1群については、肉厚  $-0.03$  の場合には二つの形状が求められる。その二つの形状解は、相反する符号の曲率を持つ。

Fig. 9 は、非球面を第1面に導入した際の、第1群の固有係数の存在範囲を示している。図中の○印は、満

$$\begin{matrix} \text{Targets of the} \\ \text{total aberration} \\ \text{coefficients} \end{matrix} \begin{pmatrix} I_w \\ II_w \\ III_w \\ \Delta I \\ \Delta II \\ \Delta III \end{pmatrix} = \begin{matrix} \text{Characteristic} \\ \text{matrix} \end{matrix} \begin{pmatrix} a_{11} & \dots \\ a_{21} \\ \vdots \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Eigen-} \\ \text{coefficients} \\ \text{matrix} \end{matrix} \begin{pmatrix} I_{01} \\ II_{01} \\ I_{02} \\ II_{02} \\ I_{03} \\ II_{03} \end{pmatrix} + \begin{matrix} \text{Constant} \\ \text{matrix} \end{matrix} \quad c$$

Fig. 7 Calculation of the eigen-coefficients.

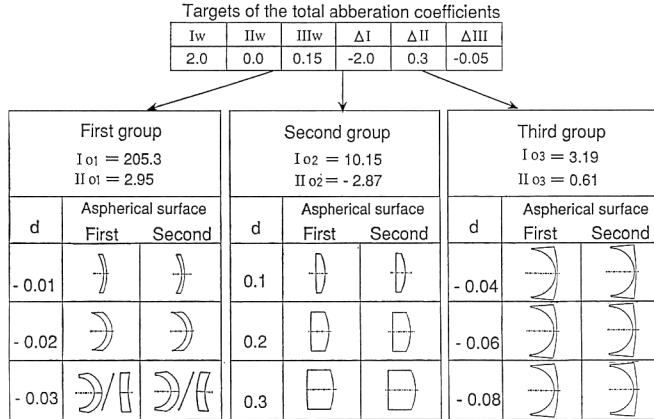


Fig. 8 Determination of lens shapes.

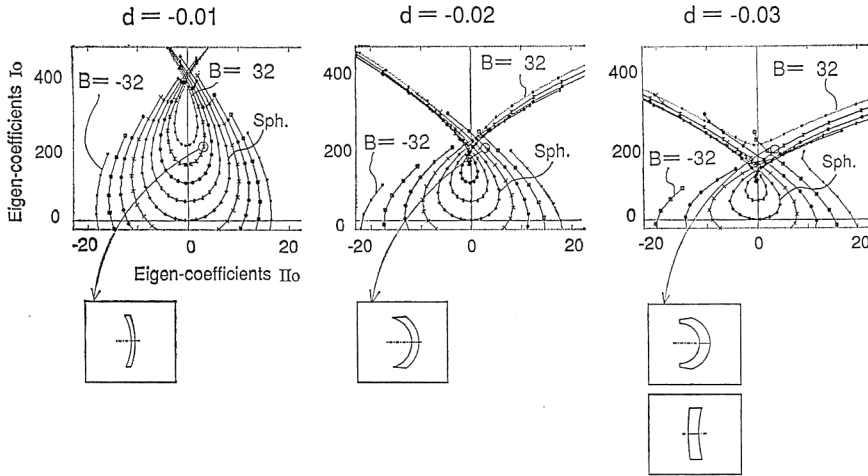


Fig. 9 Distribution of the eigen-coefficients for first group ( $r_1$ : aspheric).

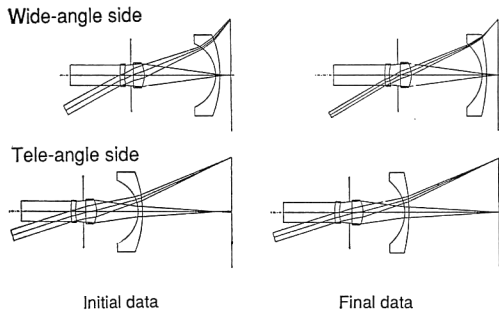


Fig. 10 Shapes of lenses.

Table 3 Comparment of the eigen-coefficients.

	First group		Second group		Third group	
	$I_o$	$II_o$	$I_o$	$II_o$	$I_o$	$II_o$
Initial data	205.3	2.95	10.2	-2.87	3.19	0.61
Final data	196.3	3.49	9.9	-2.88	2.33	0.55

の存在範囲を確認しながら形状を決定することにより、解析的に解を探索できるばかりではなく、非球面導入面や肉厚の決定および収差補正の限界を目で確認することが可能になる。

#### 4.5 設計結果

以上のようにして、初期形状を求めた後、通常の最適化を行った結果を Fig. 10 に示す。またその時の固有係数値を Table 3 に示す。Fig. 11 には最適化後の収差補正の様子を示す。非球面は第 1 群および第 3 群につ

たすべき固有係数の組 ( $I_o, II_o$ ) を表す。肉厚を増していくと、存在範囲は大きく変化する。肉厚-0.02 までは、○印を解とする形状は唯一つしかないが、肉厚 -0.03 になると固有係数の存在曲線がクロスする領域となり、形状も二つ求まることがわかる。このように、固有係数

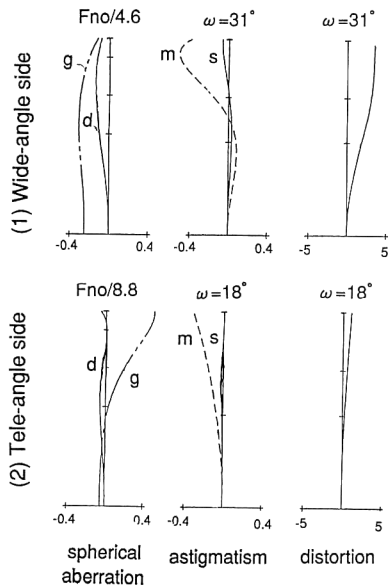


Fig. 11 Ray aberrations (s: sagittal, m: meridional, d: d-line, g: g-line).

いては第1面に、第2群については第2面に導入した。Table 3 からわかるように、最適化後の固有係数値は初期形状の値に対して非常に近い値になっている。このようにして設計初期の段階から非球面を導入することを前提として求めた形状を出発点データとして、収差補正された有効な設計データが得られた。

## 5. ま と め

単レンズの固有係数の存在範囲を探索し、以下の結果を得た。

(1) 各群の焦点距離に比して肉厚が厚い場合、固有係数の存在範囲が特定の範囲、特定の方向においてその広がり方が制限される。また、非球面の導入面によってその効果が異なる。

また、単レンズで構成されるズームレンズの設計に応用した結果、

(2) 本実験例の仕様において、厚肉固有係数を参照する設計手法の有効性を確認した。また、求められた形状を出発点データとして、有効な設計データが得られた。

## 文 献

- 1) 小島 忠：“準厚肉レンズの3次の固有係数”，第31回秋季応用物理学会学術講演会 (1970) p. 205.
- 2) 山路敬三：“ズームレンズの光学設計に関する研究”，キヤノン研究報告，No. 3 (1964).
- 3) 中川治平：“レンズ設計工学 (東海大学出版会，1986) pp. 173-175.
- 4) E.L. Betensky：“Role of aspherics in zoom lens design,” *SPIE Vol. 1354 International Lens Design Conference* (1990) p. 656.
- 5) 大沢 聡：“非球面を多用した4枚構成ズームレンズの開発”，光技術コンタクト，2 (1993) 17.
- 6) 福島 省：“レンズの実際知識 APEX 90 を中心とした撮影レンズにおける最近の非球面技術”，写真工業，11 (1991) 88-95.
- 7) 松居吉哉：レンズ設計法 (共立出版，1981) pp. 126-128.
- 8) 松居吉哉：収差論 (社団法人日本オプトメカトロニクス協会，1987) pp. 109-117.
- 9) 高橋友刀：“ズームレンズの最適化と評価”，ズームレンズの設計と評価 (トリケップス，1991) pp. 85-90.
- 10) 高野栄一：“ズームレンズと収差論”，ズームレンズの設計と評価 (トリケップス，1991) p. 47.
- 11) 伊藤良紀：“特開平 4-123014.
- 12) 高野栄一：“ズームレンズとその周辺—シリーズ[21]—”，光技術コンタクト，10 (1984) 35-37.