

# 軸上点像評価法によるレンズシステムの最適化

中川 治平

中川レンズデザイン研究所 〒214-0036 川崎市多摩区南生田 2-16-8

## Optimization by the Axial Point Images Evaluation Method in Lens Design

Jihe NAKAGAWA

Nakagawa Lens Design Laboratory, 2-16-8, Minamiikuta, Tama-ku, Kawasaki 214-0036

We propose a new method to optimize lens systems evaluating spherical aberrations on the several axial point images in place of off-axial images. This axial point image evaluation method (APE method) was proved effective for a double Gauss lens and a retrofocus wide angle lens. The method can be extended to other types of lens systems.

### 1. はじめに

通常レンズの設計は像面上に設定した数個の評価点の収差を補正して行われる。これに対して本論は、軸外像点を評価する従来の設計方式を新しい視点からとらえ直し、異なる距離にある複数の軸上物点に共役な像点を評価点とし、それらの球面収差を適切にコントロールしてレンズシステムを最適化する方法を提案する。本法はレンズタイプを問わず適用できるが、ここではダブルガウスレンズとレトロフォーカス広角レンズの最適化例をとおしてその有効性を示す。

### 2. 収差補正の新しい視点

入射瞳に近い光軸上の点Pを考えれば、それぞれの画角の光束はPを通る光線を含んでおり、Pを通る共通項によってこれらの光線をひとまとめにした光束は、Pを物点とする軸上光線束とみなすことができる。収差があるシステムでは、画角 $\theta$ でレンズに入る光束のPを通る光線 $l$ は像高 $y=f \cdot \tan \theta$  ( $f$ は焦点距離)の理想像点を外れて進行するが、そのズレがこの光線の横収差である。他方、同じ光線をPを発する軸上光束の光線として考えれば、光線 $l$ と同じところで像面と交わってから、球面収差のために、Pの共役点P'を外れたところで光軸と交わり進行する。したがって、画角 $\theta$ の光束でPを通る光線の像高 $y$ の像点に対する横収差は、光軸と $\theta$ の角度で軸上物点Pを発する光線の像点P'における球面収差に対応しており、P'での球面収差が小さくなれば像高 $y$ の像点での横収差も小さくなり、横収差が小さくなればP'での球面収差も小さくなる。

さらに、物点Pの軸上光束は $\theta$ の異なる光線の集合であるから、P'における球面収差が補正されれば $\theta$ に対応した軸外像点に対しての横収差が補正され、適切に選んだ複数個の軸上の共役点間の球面収差を補正することによって上光線から下光線までの横収差が補正される。

以上のように軸外像点の横収差の補正と軸上像点の球面収差の補正は等価的である。主として光軸上の点像の球面収差を評価、補正の対象とする方法が筆者らの提案であり、以降、本方法を軸上点像評価法(axial point images evaluation method, 略してAPE法)と呼ぶ。

球欠成分については、Conradyが補助軸を導入し、補助軸上の物点を発する光線の球面収差から子午・球欠両成分の3次収差を導出した<sup>1)</sup>過程に示されているように、球面収差が補正されれば収差の球欠成分も必然的に小さくなるので問題はない。

### 3. APE法による最適化例

トリプレットタイプ、ガウスタイプ、望遠タイプ、レトロフォーカスタイプのレンズについて本方式による最適化を試み、いずれも良好な結果が得られた。ここではガウスタイプとレトロフォーカスタイプレンズのケースについて報告する。

ガウスタイプのスタートデータには、U. S. Patent No. 2824494<sup>2)</sup>を用いた。Table 1は焦点距離を100としたレンズデータである。入射瞳より物体側にある軸上物点の像点の球面収差が下光線の横収差に、入射瞳より像側にある軸上物点の像点の球面収差が上光線の横収差に対応するの

Table 1. Double Gauss lens data U. S. Patent No. 2824494. Focal length: 100.02, back focus: 72.45,  $F$  number: 1.84, field angle:  $48.4^\circ$ .

	$R$	$D$	$N$	$\nu$	Max ray heights
1	54.831	6.71	1.67000	47.2	27.59
2	156.250	1.27			26.80
3	39.670	8.93	1.69350	53.5	24.83
4	168.322	3.52	1.66450	35.9	23.96
5	25.890	10.21			19.19
6	Stop	11.00			18.97
7	-30.200	3.17	1.63980	34.6	18.36
8	90.179	11.88	1.65840	50.8	20.89
9	-41.871	0.20			21.60
10	2358.490	5.25	1.7447	44.7	24.00
11	-77.238				24.44

Table 2. Optimized lens data by the APE method starting from Table 1 data. Focal length: 100.08, back focus: 71.95,  $F$  number: 1.86, field angle:  $48.4^\circ$ .

	$R$	$D$	$N$	$\nu$	Max ray heights
1	61.080	5.15	1.80420	46.5	27.45
2	132.160	1.27			26.80
3	43.362	8.50	1.69350	53.5	25.11
4	186.230	5.74	1.66450	35.9	24.26
5	28.320	11.25			19.41
6	Stop	12.78			19.00
7	-27.712	1.50	1.63980	34.6	18.32
8	176.200	11.00	1.64850	53.0	20.80
9	-35.000	0.20			21.60
10	437.520	5.73	1.74470	44.7	24.00
11	-94.227				24.61

で、物点 $\infty$ のほかに、 $-20$ 、入射瞳 $+35$ および $+135$ の物点を加えた4つのポジションを設定して最適化を行った。第2、第4ポジションをどう設定するか検討されねばならない課題であるが、ここで与えた物点 $-20$ は最大像高の7割の像高の像点を形成する光束の周縁上光線が通る軸上物点に相当し、 $135$ は5割の像点に集まる光束の周縁下光線が通る軸上物点に相当する。また、各軸上物点から出る光束は従来方式が与えるシステムの有効径に従って制限されたとした。

第1ポジションについては5つの3次収差係数とマージナル球面収差を補正のターゲットとした。特にAPE法だけではペッツバル和が制御できないので、その値が大きくならないようにすることが必要である。写真レンズ用のガウスタイレレンズは瞳の球面収差が大きくアンダーしており、これを補正すればかえってフレア成分が大きくなる傾向があるので、第3ポジションの球面収差は状況のみをみただけとし、第2、第4ポジションの3次球面収差係数とマージナル球面収差をターゲットに設定して最適化を行っ

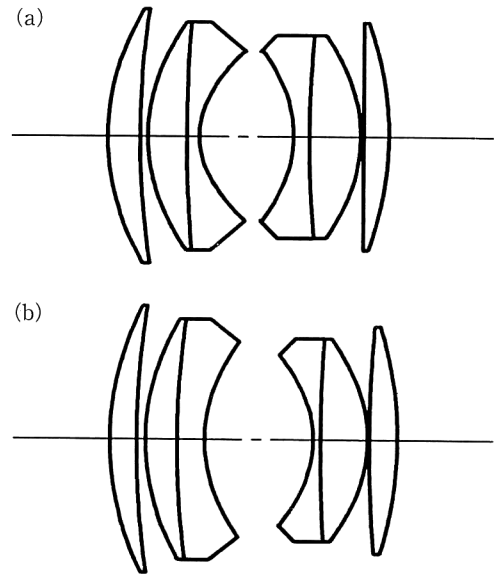


Fig. 1. Configurations of the double Gauss type lens systems. (a) U. S. Patent No. 2824494, (b) optimized system by the APE method.

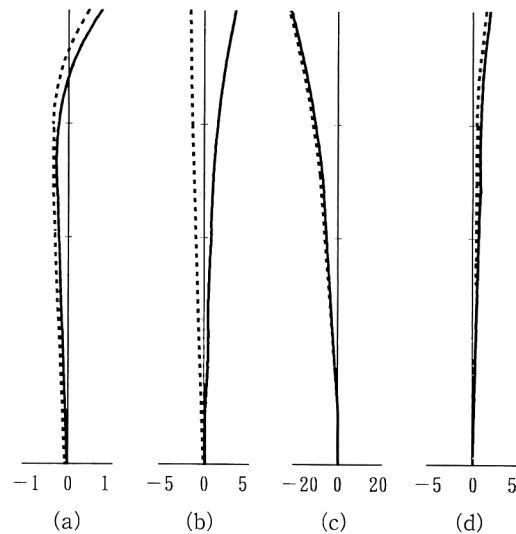


Fig. 2. Spherical aberration curves of the double Gauss systems. Object distances (a)  $\infty$ , (b)  $-20$  mm, (c)  $35$  mm (entrance pupil), (d)  $135$  mm. Solid line: starting system, dotted line: optimized system.

た。最終段階では従来方式の助けを借りてコマ収差カーブのかたちを整えた。

最適化後のレンズデータを Table 2 に示す。Fig. 1 はレンズ構成図、Fig. 2 は4つのポジションの球面収差カーブ、Fig. 3 は中間画角のコマ収差のカーブで、いずれも実線はスタート時、破線は最適化後を示す。本方式を適用した最適化の効果は Fig. 3 に顕著に現れている。

レトロフォーカス型広角レンズは特公昭 51-13573<sup>3)</sup> をスタートデータにした。Table 3 は焦点距離を  $100$  とした

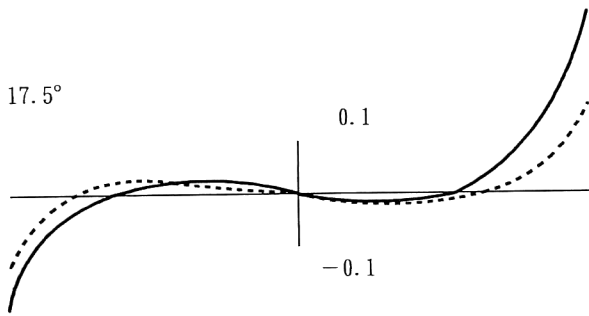


Fig. 3. Lateral aberration curves at middle field angle from the data of Table 1 and Table 2. Solid line: starting system, dotted line: optimized system.

Table 3. Retrofocus wide angle lens Japan Patent Sho 51-13573. Focal length: 100.00, back focus: 107.34,  $F$  number: 2.85, field angle:  $62.0^\circ$ .

	$R$	$D$	$N$	$\nu$	Max ray heights
1	161.100	4.20	1.51680	64.2	40.36
2	41.900	27.80			31.63
3	68.100	36.10	1.71300	54.1	25.00
4	-133.300	10.00			21.24
5	Stop	7.50			19.00
6	-58.300	4.40	1.74077	27.5	18.11
7	143.600	3.90			18.40
8	-76.700	7.20	1.77279	49.7	18.48
9	-46.400	0.30			19.50
10	305.600	6.70	1.71300	54.1	27.07
11	-109.950				27.93

Table 4. Optimized lens data by the APE method starting from Table 3 data. Focal length: 100.04, back focus: 107.55,  $F$  number: 2.85, field angle:  $62.0^\circ$ .

	$R$	$D$	$N$	$\nu$	Max ray heights
1	624.500	4.20	1.51680	64.2	35.91
2	55.150	18.57			30.24
3	72.950	37.80	1.80420	46.5	25.00
4	-394.860	13.00			19.07
5	Stop	7.50			17.50
6	-45.180	4.40	1.78472	25.7	17.01
7	488.600	3.00			18.53
8	-146.500	11.70	1.77279	49.7	19.32
9	-45.650	0.30			22.00
10	174.890	7.65	1.71300	54.1	26.49
11	-222.240				27.36

レンズデータであり、軸上物点として $\infty$ , 28.2, 入射瞳 48.2, および 68.2 を設定した。物点 28.2 は最大像高の像点に集まる光束の周縁上光線が通る軸上物点に相当し、68.2 は 7 割の像点に集まる光束の周縁下光線が通る軸上物点に相当する。

ターゲットにした収差はガウスタイプの場合と基本的に同じであるが、本例では第 3 ポジションすなわち瞳の球面

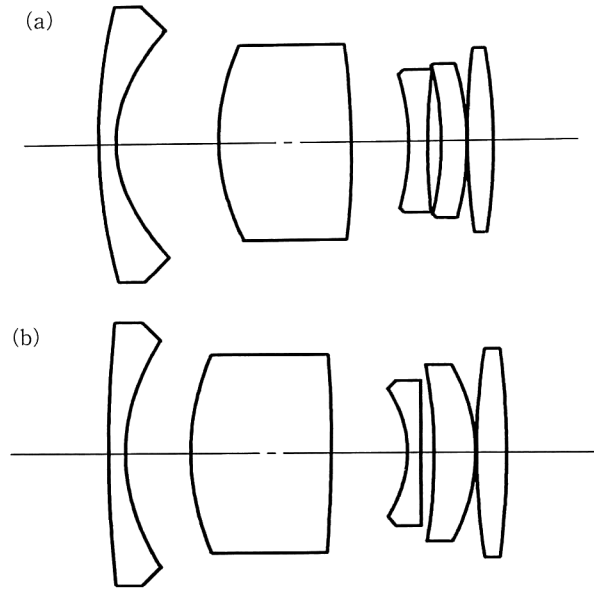


Fig. 4. Configurations of the retrofocus type wide angle lens systems. (a) Japan Patent Sho 51-13573, (b) optimized system by the APE method.

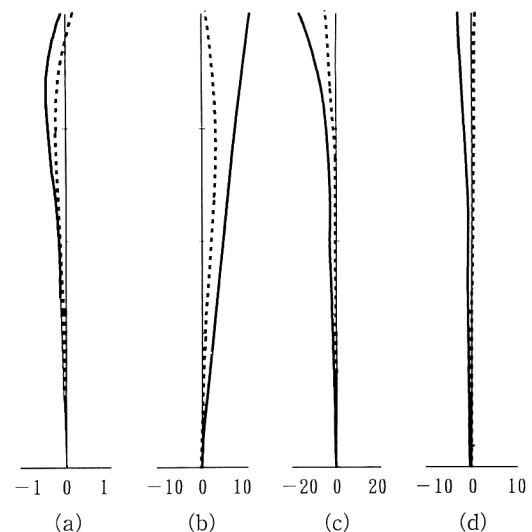


Fig. 5. Spherical aberration curves of the retrofocus type wide angle lens systems. Object distances (a)  $\infty$ , (b) 28.2 mm, (c) 48.2 mm (entrance pupil), (d) 68.2 mm. Solid line: starting system, dotted line: optimized system.

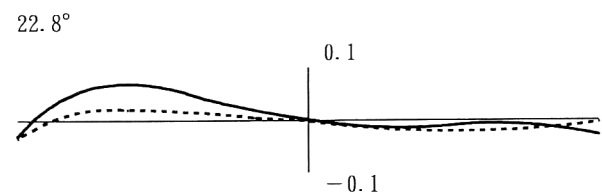


Fig. 6. Lateral aberration curves at middle field angle from the data of Table 3 and Table 4. Solid line: starting system, dotted line: optimized system.

収差も小さくなるようにした。最適化後のデータを Table 4 に、レンズ構成図を Fig. 4 に示す。Fig. 5 には 4 ポジションにおける最適化前後の球面収差を示し、Fig. 6 に最適化の前と後の中間画角のコマ収差を示した。Fig. 6 のカーブに本方式の有効性が如実に示されている。

#### 4. おわりに

現行の設計法式を視点を変えて見直し、新しい収差補正の方式を提案した。光軸に直交する像面上に評価点をとる従来方式に対し、本方法は評価点が光軸上にあるところに特徴がある。軸上物点の効果的な設定とそれらの球面収差の補正状態など検討課題が残されているが、本方法は主たる補正の対象を球面収差に単純化し、軸上点像の球面収差の補正状態に対応づけて軸外横収差曲線の形状の特異性が

解釈できるなどのメリットがあり、レンズ設計に新しい可能性を加えることができた。

本方法による最適化の経験が十分でなく、レンズ性能の評価・測定が像面上の代表点で行われている現状では、現行設計方式と併用するのがより实际的であり効果的であるが、実践例が示しているように、新しい視点によるレンズシステム最適化の方式として活用が可能である。

#### 文 献

- 1) A. E. Conrady: "The five aberrations of lens system," Mon. Not. R. Astron. Soc., **79** (1918) 60.
- 2) G. Klemt: U. S. Patent No. 2824494 (1958).
- 3) 清水義之：特公昭 51-13573 (1976).