



# レンズのコスト低減設計

中川 治平

中川レンズデザイン研究所 〒214 川崎市多摩区南生田 2-16-8

(1991年5月25日受付, 1991年8月5日受理)

## Cost Reduction Design of the Lens

Jihei NAKAGAWA

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

(Received May 25, 1991; Accepted August 5, 1991)

$m = \sum(Q_i/h_i)^2$ ,  $\bar{m} = \sum(\bar{Q}_i/\bar{h}_i)^2$  are introduced as the new merit values of a lens quality, where  $Q, \bar{Q}$  are Abbe's invariants,  $h, \bar{h}$  are paraxial ray heights, bar means principal ray's. Reducing to the value of  $m$  or  $\bar{m}$  through the optimization process, we can get a cost reduction design of the lens with high quality. Two examples of zoom lens are shown.

### 1. はじめに

現代のレンズ設計では、高性能・コンパクト・低コストの3条件を満たすことが必須になっている。なかでもレンズのコスト低減は、高性能化やコンパクト化と相反する面があり、簡単に実現できる設計課題ではない。現状試みられている低コスト化の手段としては、廉価な材質への変更、非球面化によるレンズ構成枚数の削減等があるが、製造誤差に対する許容量を大きくすることが決定的に有効である。しかし、そうしたレンズを設計するための方法論が確立されている状況には至っていない。

高性能・コンパクト・低コストの3条件を満足するレンズの設計は、いいかえればスタートに選んだレンズ構成から出発し、大域的なミニマム解に到達することにほかならない。しかし、現行の自動設計法は局所性を前提とするアルゴリズムで構成されており、ローカルミニマム解を探索する能力しかない。大域的なミニマム解へ到達するには、最適化の過程を通してレンズシステムが質的に、ダイナミックに変わっていかなくてはならない。一つの解決法として、レンズ設計の本質、原則を反映する新たな評価量の導入が考えられる。

アップの不変量に近軸光線高を乗じ、その二乗した値の全面の和をとった量は、そうした評価量としての条件を備えたものと考えられる。著者はこの評価量を実際設

計に導入して各種レンズの高性能化を試みてきた<sup>\*1</sup>。今回、これらの評価量が小さくなるように最適化すれば、製造誤差に対する敏感度の小さいコスト低減設計が実現できることを見出したものである。最近のズームレンズに関する特許から、2例を選んで検証を試みた。

### 2. コスト低減のための評価量 $m, \bar{m}$

収差補正の原則は

- (1) レンズ系中の異なった成分による収差の打消し
  - (2) 個々の面の収差の発生をできるだけ小さくする
- の二つに要約できる。特に(2)は高性能化にとって欠かすことのできない原則である<sup>1)</sup>。

これらの原則が個々の設計でどのように実現されているかは、(1)は3次収差係数の総和の値によって、(2)は各面の3次収差係数の絶対値の大きさをみることによって判定できる。しかし、逆に、(2)の原則を設計の過程で具体化する問題となると、解を求めるのがきわめて困難であるといわざるをえない。

今、(2)の原則を定式化するものとして、次のように定義される  $m, \bar{m}$  を考える。

<sup>\*1</sup> 東海大学レンズ設計マニュアル 1980, p.50; 1981, p.60, TOLES マニュアル 1986, 1988, p.63, いずれも  $m$  が A,  $\bar{m}$  が B で表現されている。

$$m = \sum_{i=1}^k (Q_i h_i)^2$$

$$\bar{m} = \sum_{i=1}^k (\bar{Q}_i \bar{h}_i)^2$$

$Q$ はアッペの不変量であり、 $h$ は軸上の近軸光線高である。主光線に関するものはバーをつけて表す。上式は統計学でいう2次の積率(モメント)の形式であるので、モメント  $m$ ,  $\bar{m}$  と呼ぶことにする。

近軸光線の屈折式はスネルの法則の一次近似になっており、光線収差は近軸追跡と光線追跡との差である。したがって追跡する光線の入射角が小さいほどその屈折面で発生する光線収差は小さくなる。軸上近軸光線の入射角に屈折率をかけたものは  $Qh$  であり、任意の軸上光線の入射角は  $Qh$  に比例するので、 $Qh$  が小さいほどその面で発生する収差が小さいことにはほかならない。主光線についてもこの関係は全く同じである。3次収差係数が  $Qh$  または  $\bar{Q}\bar{h}$  の因子を含んでいることから、 $m$ ,  $\bar{m}$  の値が収差に密接に関連していることが推察できる。

$Qh$ ,  $\bar{Q}\bar{h}$  は正負があるので、その自乗をとることによって符号の問題が消失し、絶対値の大きさが強調される利点が生じる。さらに、システム全体の状況を表すには、各面の和をとるのが自然である。

以上から、モメント  $m$  の値が小さいほど、軸上光束に対して(2)の原則が実現された状態に対応すると考えてよい。また各面の入射角が小さい状態は、曲率等が微小変化したときの入射角の変動も小さいことであり、したがって製造誤差による性能の劣化も小さくなると考えられる。同様に、主光線についての入射角  $\bar{Q}\bar{h}$  のモメントをとった  $\bar{m}$  の値は、非点収差や歪曲収差について(2)の原則の実現程度を反映するものであり、いいかえればレンズの広角性を表す一つの指標とみることができる。

$m$ ,  $\bar{m}$  は自乗和で与えられているから常に正の値であり、自動設計の最適化に適した量となっている。また、モメントが最小化されるプロセスでは、一般的に  $Qh$  の大きなところから小さくなっていき、各面のモメントの値が平均化するよう進行する。これは(2)の原則が実現されていくプロセスにほかならない。さらに、モメント  $m$ ,  $\bar{m}$  は近軸追跡の情報だけから計算できる簡便性もまた、評価量として優れた特徴である。

### 3. ダブルテレフォートズームタイプへの適用

はじめに、ダブルテレフォートズームタイプに関する特開平1-197713の実施例で、35ミリ眼レフ用交換レンズ 100~300 mm, F 4.5~5.6 (Table 1, Fig. 1) をス

タートに選び、モメントを加えて最適化を試みる。

このダブルテレフォートズームタイプは最近開発されたズーム方式で、

(a) 全長が短い

(b) レンズ枚数が少ないので低コストになる

(c) 製造精度がゆるいので大量生産に有利になる

といった性質を備え、低コスト性が大きな特徴となっている<sup>2)</sup>。

このズームタイプの完成された設計データでさらに  $m$

Table 1 Start lens data (Tokkaihei 1-197713).

	$r$	$d$	$n$	$\nu$	Max. H
1	112.056	2.000	1.84666	23.83	25.50
2	72.384	7.000	1.51680	64.20	
3	-263.925	0.200			
4	64.399	4.600	1.51680	64.20	
5	148.273	variable			
6	-64.621	1.600	1.72000	52.14	11.00
7	45.548	3.904			
8	65.012	2.800	1.75000	25.14	
9	-272.394	variable			
10	stop	2.200			11.20
11	126.237	1.700	1.84666	23.83	
12	39.719	3.008			
13	113.028	3.400	1.51680	64.20	
14	-66.479	0.500			
15	42.071	4.800	1.49310	83.55	13.00
16	-49.106	variable			
17	157.656	1.700	1.75450	51.57	
18	32.135	1.980			
19	-300.111	3.600	1.67339	29.25	10.50
20	-23.086	1.700	1.75450	51.57	
21	617.139				
	$f$	F	$d_5$	$d_9$	$d_{16}$
	102.5	4.58	5.000	25.268	28.660
	200.0	5.55	36.110	9.398	13.419
	292.0	5.71	55.928	2.000	1.000

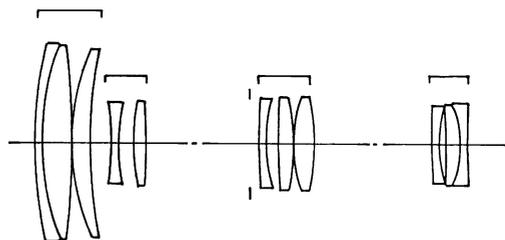


Fig. 1 Lens construction (Tokkaihei 1-197713).

の値が小さくできるかどうか、また  $m$  の値の減少がコスト低減に結び付くかどうか、本理論の有効性の検証に適した例と考え選択した。

自動設計ソフトは TOLES によったが<sup>3)</sup>、最適化のプロセスでは焦点距離やズーム比、レンズ全長などの仕様および硝材を変えないこと、各光線収差はスタート時と同等かそれ以上に補正されていること、を条件に設定した。ただし、 $m$  が大きく変わる条件を作るために各群のパワーとズームスペースは変わってもよいとした。最適化の目標には3次収差係数、ならびに収差補正のポイントになる光線収差を与えた。また、ワイドでFナンバが最小になり、望遠ズームで画角も小さいとあって最短焦点距離の  $m$  のみを目標に加えた。

**Table 2** は設計を終えたレンズデータであるが、このファイナルのデータでは各群のパワーが弱くなり曲率半径が全体に大きくなっている。**Table 3** には両者のワイドおよびテレ状態での各面の  $m$ 、 $\bar{m}$  を示した。なおテレ側の  $m$ 、 $\bar{m}$  は、軸上については

$$h_1 = \frac{\text{テレの入射瞳の最大径}}{\text{ワイドの入射瞳の最大径}}$$

$$u_1 = 0$$

を、主光線は

$$\bar{h}_1 = \frac{\text{テレの入射瞳距離}}{\text{ワイド焦点距離}} \times \bar{u}_1$$

$$\bar{u}_1 = -\frac{(\tan \omega)_{\text{tele}}}{(\tan \omega)_{\text{wide}}}$$

をそれぞれ初期値とし、これらの近軸追跡を行って算出した。ただし  $(\tan \omega)_{\text{tele}}$ 、 $(\tan \omega)_{\text{wide}}$  はワイドおよびテレの最大半画角の正接である。

**Fig. 2** は両者の光線収差図である。なおワイドのFナンバは、収差が小さいので4.5から4に変更した。

製造誤差に対する敏感度の情報は、まともに出すと多過ぎ煩雑になるので次のように整理した。

- (1) 中間状態は省略し、ワイド端とテレ端について焦点距離、バックフォーカス、マージナル球面収差の変化量に限る。
- (2) 製造誤差を以下のように設定し、それに対する上記評価量の変動量を敏感度とする。
  - (a) 曲率半径はニュートン5本に対応する量
  - (b) レンズ厚、空気間隔は 0.05
  - (c) 偏心はシフト 0.05、ティルト 2' とし、各レンズ単体および各群に与える

**Table 4**、**Table 5** はこうしたシミュレーションを実行し敏感度の大きい順に5個のパラメータを選んだ表で

**Table 2** Final lens data.

	$r$	$d$	$n$	$\nu$	Max. H
1	197.956	2.000	1.84666	23.83	25.50
2	107.180	6.420	1.51680	64.20	
3	-223.510	0.200			
4	68.864	4.780	1.51680	64.20	
5	215.835	variable			
6	-58.551	1.600	1.72000	52.14	12.00
7	93.866	2.850			
8	133.447	2.660	1.75000	25.14	
9	-147.820	variable			
10	stop	2.200			12.30
11	163.814	1.700	1.84666	23.83	
12	50.040	5.120			
13	131.113	3.620	1.51680	64.20	
14	-60.897	0.100			
15	48.488	4.740	1.49310	83.55	13.00
16	-73.850	variable			
17	1557.740	1.700	1.75450	51.57	
18	42.942	1.060			
19	70.856	3.400	1.67339	29.25	10.50
20	-57.785	1.700	1.75450	51.57	
21	55.211				

$f$	F	$d_5$	$d_9$	$d_{15}$
102.5	3.97	5.784	25.177	28.190
200.0	5.02	36.894	9.307	12.950
292.0	5.79	56.712	1.909	0.530

ある。

これらの情報を総括すると次のようになる。

- (1) 完成された特許データからのスタートにもかかわらず、 $m$  の値は大幅に小さくなっていること。
- (2) 個々の面の  $m$  の変動を見ると、大きかった  $m$  が激しく変化し、平均化が進んでいる。
- (3) テレとワイドにおける各面のモメントの変化の様相は、大筋において対応する関係にある。
- (4) 最適化では全長等を制約しているので面間隔は大きく変化しないが、曲率半径はダイナミックに変わっているのが認められる。その変化は、小さい曲率半径が大きくなり、研磨しやすくなってコストダウンに有利な方向である。
- (5) ファイナルデータの製造誤差に対する敏感度は、スタートデータに比べて改善された。特にテレ端での焦点距離、バックフォーカスについての変化が著しく、敏感なパラメータほど改善の度合いが大きい。

**Table 3** The values of  $m$  and  $\bar{m}$  at wide and tele states of the Table 1's and Table 2's system.

	Start data				Final data			
	Wide		Tele		Wide		Tele	
	$m$	$\bar{m}$	$m$	$\bar{m}$	$m$	$\bar{m}$	$m$	$\bar{m}$
1	0.84	0.31	4.38	0.09	0.27	0.55	1.02	0.00
2	3.31	0.02	17.30	0.87	1.74	0.13	6.64	0.17
3	0.79	1.98	4.12	0.94	0.66	1.87	2.52	0.66
4	1.10	0.33	5.74	0.13	1.24	0.27	4.73	0.08
5	0.11	1.43	0.56	0.35	0.19	1.50	0.71	0.37
6	5.70	3.73	13.71	1.32	6.10	3.81	11.01	0.91
7	12.17	0.00	5.65	0.50	3.84	0.20	1.23	0.49
8	8.87	0.05	3.16	0.64	2.84	0.32	0.67	0.54
9	0.07	1.25	1.93	0.81	0.51	1.60	2.22	0.62
10	—	—	—	—	—	—	—	—
11	0.79	1.09	0.11	0.82	0.27	1.20	0.11	0.62
12	16.49	1.34	6.00	1.01	8.58	1.42	3.63	0.73
13	6.12	1.29	1.04	0.97	3.26	1.43	0.69	0.73
14	1.87	0.72	4.79	0.54	3.48	0.63	5.66	0.33
15	7.75	1.44	1.51	1.09	3.54	1.52	0.76	0.78
16	17.35	0.25	19.18	0.19	10.24	0.33	12.15	0.17
17	3.13	0.93	4.89	0.52	3.44	0.63	5.40	0.31
18	0.00	6.01	1.14	1.54	0.03	5.14	0.62	1.02
19	1.96	1.61	2.40	0.69	0.34	3.80	0.00	0.84
20	15.23	2.04	39.60	0.04	7.02	0.02	15.25	0.06
21	0.88	3.00	0.47	1.01	0.12	5.86	0.38	1.20
Σ	104.53	28.82	137.68	14.07	57.71	32.23	75.40	10.63

**Table 4** Sensitivities of the Table 1's system.

	Parameter	$\Delta f$	Parameter	$\Delta f_b$	Parameter	$\Delta SA$
Wide	$r_{11}$	-0.32	$d_{16}$	-0.21	L8-S	+0.32
	$r_{12}$	-0.30	$r_{11}$	-0.19	L6-S	-0.28
	$d_{12}$	-0.28	$r_{12}$	-0.17	L4-S	-0.19
	$d_{16}$	-0.27	$r_9$	-0.16	$r_{12}T$	-0.15
	$d_7$	-0.23	$r_8$	-0.16	$r_{16}T$	-0.11
Tele	$d_{16}$	-1.28	$d_{16}$	-0.57	L4-S	-0.32
	$d_{17}$	-0.99	$d_4$	-0.46	L8-S	+0.29
	$d_4$	-0.84	$d_{17}$	-0.42	3G-S	+0.22
	$d_5$	-0.67	$d_5$	-0.39	2G-S	-0.22
	$r_{11}$	-0.67	$r_1$	-0.31	L6-S	-0.15

L, lens element ; G, group ; S, shift ; T, tilt.

**Table 5** Sensitivities of the Table 2's system.

	Parameter	$\Delta f$	Parameter	$\Delta f_b$	Parameter	$\Delta SA$
Wide	$r_{11}$	-0.25	$r_{11}$	-0.13	L8-S	+0.14
	$r_{12}$	-0.24	$r_{12}$	-0.12	L6-S	-0.14
	$d_{16}$	-0.22	$d_{16}$	-0.12	L4-S	-0.10
	$r_9$	-0.18	$r_9$	-0.12	$r_{12}T$	-0.09
	$r_8$	-0.18	$r_8$	-0.11	$r_{16}T$	-0.07
Tele	$d_{16}$	-0.47	$r_{11}$	-0.13	L4-S	-0.30
	$r_{11}$	-0.46	$r_{12}$	-0.12	2G-S	-0.22
	$r_{12}$	-0.44	$d_{16}$	-0.12	3G-S	+0.19
	$r_9$	-0.41	$r_9$	-0.12	L8-S	+0.18
	$r_8$	-0.41	$r_8$	-0.11	$r_{6-T}$	+0.17

なお  $m$  の値と敏感度の大小の傾向が必ずしも一致していないが、これは次のように考えられる。  $i$  面までの3次収差  $\Delta y_i'$  と最終の3次収差  $\Delta y_k'$  の間には

$$\Delta y_k' = \beta_{i+1,k} \Delta y_i' + \Delta y_{i+1,k}'$$

の関係が成立する。ただし  $\Delta y_{i+1,k}'$  は  $i+1$  面以降の系で発生する3次収差、 $\beta_{i+1,k}$  は  $i+1$  面以降の系による倍率を表す<sup>4)</sup>。  $i$  面だけを微小変動させたとき最終の変動は

$$\delta(\Delta y_k') = \beta_{i+1,k} \delta(\Delta y_i')$$

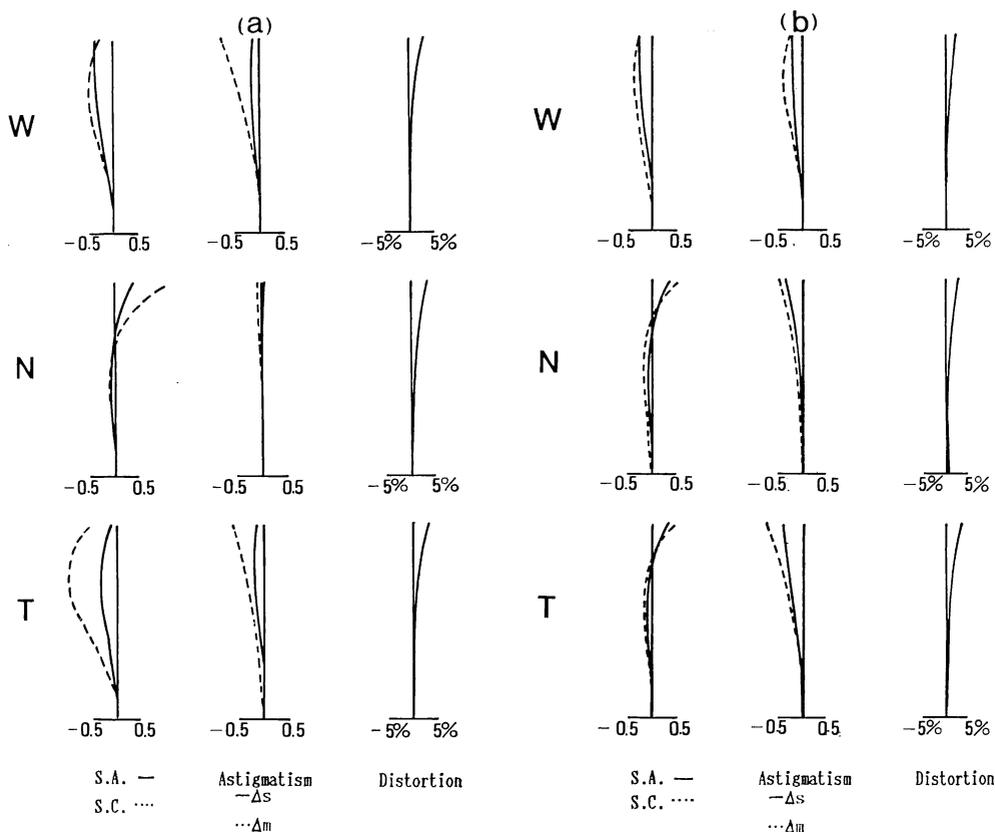


Fig. 2 Aberration curves. (a) Start system, (b) Final system.

である。  $\delta(\Delta y_i')$  は  $m$  が小さいほど小さいとしても、最終収差の変動はこれに  $\beta_{i+1,k}$  (縦収差では二乗) を乗じたものであるから、最終収差の変動すなわち敏感度は必ずしも  $m$  の値と同じ傾向にはならない。

#### 4. コンパクトカメラのズームレンズへの適用

35ミリレンズシャッターカメラは、全自動化と共にいまやズームレンズの装着が必須になっている。これらのズームレンズは、正負の2群で構成されたいわゆるテレフォトタイプをとることによってバックフォーカスを短くしコンパクト化を実現している。しかし、コンパクトさを強調するとそれぞれの群のパワーが強くなり、生産性の低いレンズになりがちである。コンパクトカメラは生産台数が大量であるため、製造誤差に強いレンズがのぞましい。

35ミリコンパクトカメラ用のズームレンズに関する特開昭和 63-153511 の実施例の一つから出発し、 $\bar{m}$  値を小さくして製造誤差のきき量の改善を試みた。本レン

ズは3群形式をとって高倍率化がなされているが、基本的にはテレフォトタイプのズームレンズであり、その仕様は  $f=39.7\sim 101.0$  mm, F 4.66 $\sim$ 6.3 である。

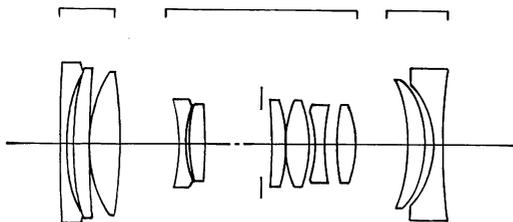
Table 6 はスタートシステムの諸元であり、Fig. 3 はそのレンズ構成図である。Table 7 は  $\bar{m}$  を含めて最適化を行って到達したレンズデータである。設計の過程では、屈折率アッベ数は変数にとらず、各群のパワーおよびズーム時の各群間の主点間隔はスタートと同じ値に保った。最適化の目標の与え方は先のダブルテレフォトズームの場合とほぼ同じ考え方であるが、レンズが広角でありFナンバーが比較的大きいことからワイドの  $\bar{m}$  を目標に加えた。Table 8 はスタートおよびファイナルのワイドおよびテレ状態における各面の  $m$ ,  $\bar{m}$  である。ワイド時の  $\bar{m}$  は10数パーセント小さくなり、特に第3群の各面での変化が著しい。 $m$  は全く考慮しなかったにもかかわらず、最終的に出発時の値より若干小さい値になった。Fig. 4 はそれぞれの光線収差図で、最適化したレンズの非点収差が改善されている点特徴的である。

**Table 6** Start lens data (Tokkaisho 63-153511).

	$r$	$d$	$n$	$\nu$	Max. H
1	349.694	1.500	1.83400	37.16	13.00
2	32.837	1.100			
3	41.771	3.480	1.61700	62.79	
4	298.999	0.200			
5	28.346	5.200	1.51633	64.15	
6	-98.278	variable			
7	-33.230	1.300	1.77250	49.66	
8	21.722	0.800			
9	27.466	2.510	1.80518	25.43	
10	-442.822	9.823			
11	stop	1.913	$\phi/2=4.80\sim6.00\sim7.40$		
12	-145.036	2.800	1.62004	36.25	6.50
13	-30.168	0.100			
14	25.442	4.000	1.58904	53.20	
15	-26.841	1.150			
16	-20.224	1.620	1.74000	28.29	
17	28.173	2.362			
18	56.880	3.290	1.56873	63.16	
19	-20.131	variable			
20	-32.616	3.297	1.78472	25.68	
21	-18.056	1.507			
22	-17.135	1.600	1.77250	49.66	
23	125.422				
	$f$	F	$d_6$	$d_{19}$	
	39.73	4.67	3.80	18.09	
	63.44	5.30	10.84	9.23	
	101.15	6.22	15.82	2.64	

**Table 7** Final lens data.

	$r$	$d$	$n$	$\nu$	Max. H
1	318.390	1.500	1.83400	37.16	11.00
2	33.706	0.740			
3	38.522	3.609	1.61700	62.79	
4	300.642	0.200			
5	31.819	5.339	1.51633	64.15	
6	-92.933	variable			
7	-33.409	1.300	1.77250	49.66	
8	21.828	0.800			
9	31.126	2.648	1.80518	25.43	
10	-548.457	9.735			
11	stop	1.910	$\phi/2=5.00\sim6.20\sim7.40$		
12	109.967	3.690	1.62004	36.25	7.00
13	-35.658	0.100			
14	38.525	3.182	1.58904	53.20	
15	-32.982	0.517			
16	-24.822	1.620	1.74000	28.29	
17	33.214	1.588			
18	52.543	3.147	1.56873	63.16	
19	-22.520	variable			
20	-35.159	2.463	1.78472	25.68	
21	-22.310	3.696			
22	-19.333	1.600	1.77250	49.66	
23	140.725				
	$f$	F	$d_6$	$d_{19}$	
	39.76	4.62	3.008	18.169	
	63.50	5.28	10.048	9.309	
	101.28	6.41	15.028	2.719	



**Fig. 3** Lens construction (Tokkaisho 63-153511).

**Table 9, Table 10** はスタートおよびファイナルシステムの製造誤差に対するききを示すもので、与えた誤差は前と同じである。最大面角の子午像点の変化  $\Delta M$  を新たに付加した。

これらの結果から以下の諸点が指摘できる。

- (1) ダブルテレフォトズームと同様、完成された設計と思われるものでも、モメントを目標に与えれば違った解に到達できることが実証された。

- (2) モメント  $m, \bar{m}$  が小さくなったデータでは、要素間の敏感度の順位が変わっており、量的な面でも焦点距離、バックフォーカスに対する面精度のききが総じて小さくなっている。

### 5. おわりに

アッペの不変量に近軸光線高をかけた量を自乗し、それらの和をとった  $m, \bar{m}$  を導入した。ただし  $m$  は軸上、 $\bar{m}$  は軸外の量である。この  $m$  および  $\bar{m}$  は、レンズ個々の面での収差の発生程度を反映する量と考えることができる。また、その物理的意味が極めて明確であるうえ、近軸追跡の情報だけで計算できる簡便性を有し、評価量としての優れた条件を備えている。最適化の収差目標に  $m$  または  $\bar{m}$  を加え、それらの値が小さくなるようにすることによって、高性能と共に製造コストのかからないレンズが設計できる。

**Table 8** The values of  $m$  and  $\bar{m}$  at wide and tele states of the Table 6's and Table 7's system.

	Start data				Final data			
	Wide		Tele		Wide		Tele	
	$m$	$\bar{m}$	$m$	$\bar{m}$	$m$	$\bar{m}$	$m$	$\bar{m}$
1	0.01	0.87	0.05	0.10	0.02	0.87	0.05	0.10
2	4.49	0.03	16.65	0.25	4.21	0.01	14.32	0.21
3	3.55	0.00	13.17	0.16	3.70	0.00	12.56	0.16
4	0.29	0.50	1.06	0.02	0.20	0.59	0.69	0.04
5	3.45	0.01	12.79	0.13	2.56	0.06	8.70	0.06
6	0.95	1.88	3.54	0.50	0.99	1.86	3.36	0.52
7	2.93	2.39	8.41	0.52	2.90	2.35	7.64	0.53
8	11.79	0.01	27.24	0.00	11.61	0.02	24.52	0.00
9	9.70	0.05	22.19	0.01	8.57	0.08	17.84	0.02
10	0.12	0.83	0.13	0.18	0.25	0.77	0.34	0.17
11	—	—	—	—	—	—	—	—
12	0.02	0.77	0.00	0.17	1.02	0.77	1.72	0.17
13	3.48	0.52	8.88	0.11	3.47	0.48	8.09	0.11
14	2.27	0.92	4.49	0.20	0.52	0.79	0.80	0.18
15	15.56	0.20	37.21	0.04	11.80	0.24	26.04	0.05
16	18.80	0.12	44.60	0.03	14.77	0.18	32.36	0.04
17	2.48	1.62	4.67	0.35	2.38	1.28	4.19	0.29
18	0.76	1.43	1.22	0.31	1.14	1.19	1.85	0.27
19	10.90	0.01	25.49	0.00	10.70	0.04	23.17	0.01
20	3.26	0.00	14.21	0.01	3.55	0.00	13.46	0.02
21	5.28	1.61	34.97	0.06	5.47	0.48	27.22	0.00
22	4.84	1.83	33.54	0.07	4.70	0.82	25.71	0.02
23	0.85	2.50	0.16	0.32	0.85	2.39	0.17	0.31
$\Sigma$	105.78	18.10	314.67	3.54	95.38	15.27	254.80	3.28

**Table 9** Sensitivities of the Table 6's system.

	Parameter	$\Delta f$	Parameter	$\Delta f_b$	Parameter	$\Delta SA$	Parameter	$\Delta M$
Wide	$d_{15}$	-0.30	$d_{15}$	-0.27	L8-S	-0.24	L4-S	+0.35
	$d_{18}$	-0.24	$d_8$	-0.14	L7-S	+0.14	L10S	+0.24
	$d_{21}$	-0.16	$d_{21}$	-0.12	L9-S	+0.13	L11S	-0.18
	$r_{17}$	+0.10	$d_{19}$	-0.09	L4-S	-0.12	L7-S	-0.18
	$r_{16}$	+0.10	$r_{10}$	+0.07	L5-S	+0.07	L6-S	-0.18
Tele	$d_{15}$	-1.41	$d_{15}$	-1.18	L8-S	-1.84	L10S	+0.58
	$d_{21}$	-1.06	$d_{21}$	-0.84	L7-S	+1.06	L11S	-0.54
	$d_8$	-0.82	$d_8$	-0.52	L10S	+0.96	L8-S	-0.43
	$d_{19}$	-0.44	$d_{19}$	-0.41	L4-S	-0.86	L1-S	+0.39
	$r_{17}$	+0.37	$r_{10}$	+0.29	L11S	-0.85	L3-S	-0.31

ズームレンズに関する最近の特許の実施例をスタートに選び、 $m$ ,  $\bar{m}$ を加えた最適化を行って、その効果を具体的に示した。ここではズームレンズのみを例にあげた

が、束縛条件の少ない単体レンズほど大きな効果が得られやすいのはいうまでもない。

$m$ ,  $\bar{m}$ は、新しい視点にたった性能の指標でもある。

Table 10 Sensitivities of the Table 7's system.

	Parameter	$\Delta f^i$	Parameter	$\Delta f_b$	Parameter	$\Delta SA$	Parameter	$\Delta M$
Wide	$d_{15}$	-0.17	$d_{15}$	-0.18	L8-S	-0.19	L4-S	+0.29
	$d_{21}$	-0.13	$d_{21}$	-0.11	L9-S	+0.13	L8-S	+0.18
	$d_{19}$	-0.08	$d_{19}$	-0.09	L4-S	-0.11	L9-S	-0.15
	$d_{10}$	+0.07	$d_{11}$	+0.06	L7-S	+0.09	L6-S	-0.15
	$d_{11}$	+0.07	$d_{10}$	+0.06	L5-S	+0.05	L7-S	-0.15
Tele	$d_{15}$	-0.87	$d_{15}$	-0.78	L8-S	-1.37	L8-S	-0.33
	$d_{21}$	-0.68	$d_{21}$	-0.60	L9-S	+0.90	L11S	-0.33
	$d_{19}$	-0.44	$d_{19}$	-0.41	L4-S	-0.79	L10S	+0.29
	$d_{10}$	+0.32	$d_{14}$	-0.25	L10S	+0.62	L1-S	+0.28
	$d_{11}$	+0.32	$d_{11}$	+0.24	L7-S	+0.61	L9-S	+0.17

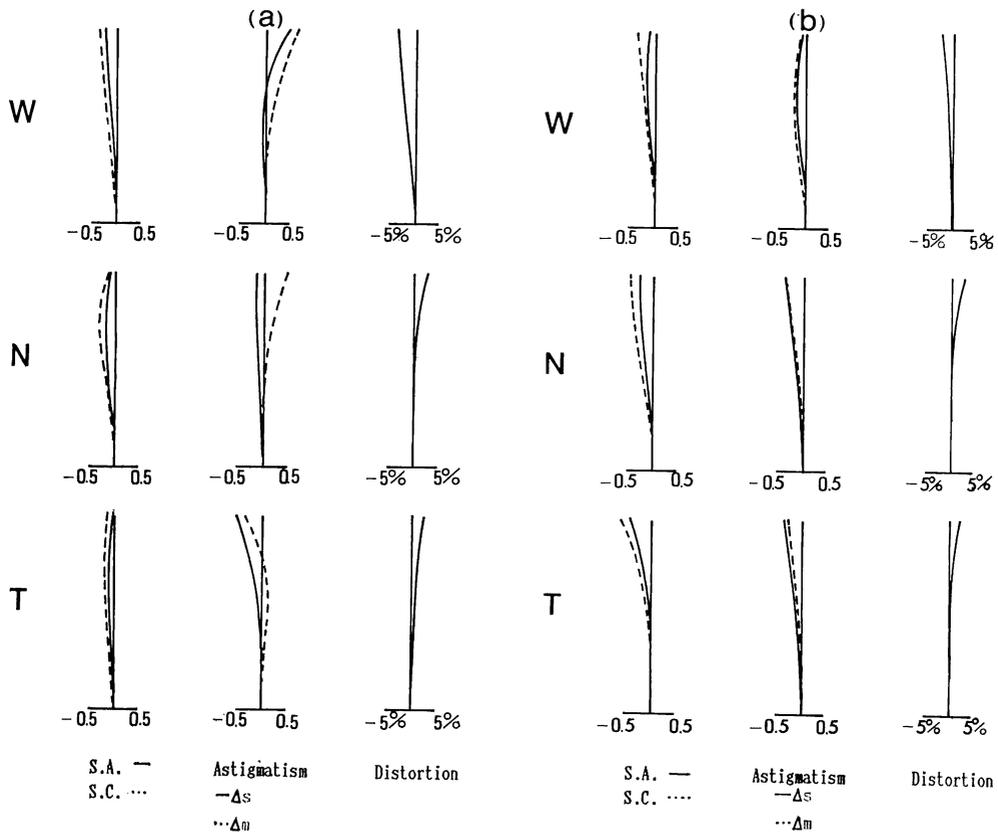


Fig. 4 Aberration curves. (a) Start system, (b) Final system.

レンズ設計に新しい評価量  $m$ ,  $\bar{m}$  を導入することにより、多くの優れたレンズが出現することを心から願うものである。

#### 文 献

- 1) 中川治平：レンズ設計工学(東海大学出版会, 東京, 1986) pp. 49-56.
- 2) 升本久幸：“新規なズームタイプの解析と設計”，光学, 19 (1990) 515-522.
- 3) 金井慎治：“TOLES”，光学系の自動設計と評価技術, 小島 忠, 中村荘一監修 (トリケップス, 東京, 1990) pp. 91-116.
- 4) 中川治平：レンズ設計工学(東海大学出版会, 東京, 1986) p. 64.