

軸調整不良の共軸球面光学系の収差 (第 5 報)

テッサー型写真レンズの偏心による収差

木内 政蔵, 三宅 和夫,* 林 敏治**

The Aberration of Decentred Optical System, V.

The Aberration of a Tessar-type Photographic Objective due to Decentering.

Masazô KIUCHI, Kazuo MIYAKE and Toshiharu HAYASHI

ABSTRACT:—The aberration formula for decentred optical system were applied to a Tessar-type photographic objective. The aberrations were calculated for the cases in which the center of curvature of each refracting surface shifted separately from the intended optic axis by a 1000th part of focal length of the whole system. The results showed that the decentring of the 1st, 3rd, 4th and 7th refracting surfaces had a large effect upon all of the aberrations. In the decentring which occurred from a lateral shift of a component lens (or cemented lens), the effects of its refracting surfaces contributed additively to the coma and distorsion and subtractively to the astigmatism. If the decentring was due to a tilt of a component lens, the relations were reversed. Several results were checked by trigonometrical ray tracing. (Received March 1, 1952)

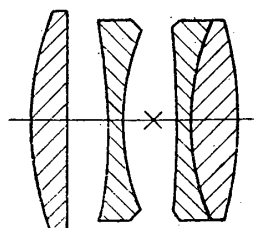
§ 1. 序

共軸球面光学系における Seidel の収差式を, 各屈折球面に偏心がある場合に拡張した, 三次の偏心系収差式を第 1 報より第 3 報⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾に与え, その最も簡単な光学系への応用として, 望遠鏡対物レンズに適用した結果を第 4 報⁽⁴⁾に示したが, 引続いてテッサー型写真レンズの各種収差の偏心による変化を計算した.

写真レンズの偏心による収差の中で, コマについては Epstein⁽⁵⁾が開きの大きい光線束の一部分をなす細い光線束, 又は角度の大きい細い光線束に対して計算法を与え, テッサー型及びハイパーゴンに対して計算している.

§ 2. 計算

我々が計算の対象としたテッサー型写真レンズ



第 1 図
第 1 表

$f=1,000\tau$ 1:4.5

$r_1=+0.27619$	$d_1=0.0400$	$n_1=1.0$
$r_2=\infty$	$d_2=0.0457$	$n_2=1.6116$
$r_3=-0.61559$	$d_3=0.0181$	$n_3=1.0$
$r_4=+0.25285$	$l_1=0.0319$	$n_4=1.5773$
$r_5=-1.95181$	$l_2=0.0267$	$n_5=1.0$
$r_6=+0.26510$	$d_5=0.0152$	$n_6=1.5284$
$r_7=-0.39203$	$d_6=0.0523$	$n_7=1.6230$
		$n_8=1.0$

は芦田がその著書⁽⁶⁾に引例したもので, 第 1 図にその構造を, 第 1 表にその諸要素を再掲する.

* 東京大学理学部物理教室

** 東京大学教養学部物理教室

計算の順序, 方法は第 4 報と同様で, 第 3 報の 5~13 式 (以下 (III-5) などの如く略記して引用する) を用いる. その際, これらの収差式では光学系の軸は有効絞りの中心を通るとしているの
で, 偏心面が絞りの位置の前にあるか後にあるかで, 式の形が異なる事に注意しなければならない. 第 1 図に示す如く採用したテッサー型写真レンズの例では第 2 レンズと第 3 レンズの間,

即ち第 4 面と第 5 面との間に絞りがあるので, (III-10, 12), 及び (13) 式で, 第 1~第 4 面の偏心には上の形を, 第 5 面以下の偏心には下の形を用いる.

偏心がない場合の Seidel の領域における収差をあらわす Seidel の係数の値は, 偏心系での収差を計算するのに必要であるので, 第 2 表に再掲した. 下の表は入射瞳の位置 t_1 がそれぞれ,

第 2 表 Seidel の 項

$$f=1.0007 \quad s_1=\infty$$

ν	s_ν'	h_ν/h_1	Q_ν	$A\left(\frac{1}{ns}\right)_\nu$	$\varepsilon_\nu+\delta_\nu$
1	+0.727 ₈	+1.000 ₀	+3.620 ₇	+0.852 ₆	+0.276 ₂
2	+0.426 ₈	+0.945 ₀	-2.343 ₂	+1.441 ₀	-0.451 ₆
3	+0.935 ₃	+0.843 ₈	-4.248 ₇	-1.946 ₃	-0.247 ₀
4	-1.774 ₇	+0.827 ₅	+4.518 ₄	-1.254 ₇	+0.423 ₂
5	-1.872 ₆	+0.854 ₈	+0.033 ₁	+0.196 ₁	+41.499 ₁
6	-3.584 ₆	+0.861 ₈	+6.575 ₀	+0.174 ₇	+0.401 ₁
7	+0.875 ₀	+0.874 ₃	-3.693 ₇	+1.312 ₃	-0.115 ₀

ν	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
1	+11.177 ₁	+3.037 ₀	+0.852 ₆	+1.374 ₁	+0.615 ₀
2	+ 6.310 ₈	-2.849 ₉	+1.287 ₀	0.000 ₀	-0.581 ₂
3	-17.813 ₉	+4.399 ₇	-1.086 ₇	-0.594 ₆	+0.415 ₂
4	-12.011 ₆	-5.083 ₄	-2.151 ₃	-1.447 ₅	-1.523 ₀
5	+ 0.000 ₁	+0.004 ₈	+0.197 ₈	-0.177 ₁	+0.858 ₅
6	+ 4.165 ₂	+1.670 ₈	+0.670 ₂	+0.143 ₉	+0.326 ₆
7	+10.464 ₁	-1.203 ₆	+0.138 ₄	+0.979 ₂	-0.128 ₅
Σ	+2.291 ₈	+0.025 ₅	-0.091 ₉	+0.277 ₉	-0.017 ₅

t_1	ΣII	ΣIII	ΣIV	$\frac{\Sigma III + \Sigma IV}{2}$	$\frac{\Sigma III - \Sigma IV}{2}$	ΣV
+0.011 ₁	0.0	+0.001 ₃	+0.185 ₇	+0.093 ₅	-0.092 ₂	-0.017 ₆
+0.145 ₈	-0.308 ₆	+0.125 ₉	+0.227 ₂	+0.176 ₆	-0.050 ₆	-0.023 ₃

コマの係数 ΣII_ν を 0 にする位置にある時, 及び実際の絞りの位置から近軸光線による追跡で物空間に戻した位置にある時の値である. 次に偏心系の収差を計算するために導入した補助量で, (III-9) で定義される p_ν , q_ν , f_ν , g_ν の値を第 3 表に示した.

第 3 表 p, q, f, g

$$f=1.0007 \quad t_1=+0.1458$$

ν	p_ν	q_ν	f_ν	g_ν
1	+2.214 ₄	+2.214 ₄	-0.322 ₈	-1.322 ₈
2	0.0	+2.214 ₄	0.0	-1.322 ₈
3	-0.791 ₄	+1.423 ₁	+0.049 ₂	-1.273 ₆
4	-1.889 ₃	-0.466 ₃	+0.086 ₅	-1.187 ₁
5	-0.231 ₄	-0.697 ₇	-0.008 ₆	-1.195 ₇
6	+0.307 ₅	-0.390 ₂	+0.015 ₆	-1.180 ₁
7	+1.389 ₅	+0.999 ₃	+0.129 ₇	-1.050 ₁

偏心の与え方も前報と同じで, 7 つの屈折球面の中で任意の 1 面のみが偏心しているとした場

合の収差係数を計算し, それらの相互の比較によりどの面の偏心の影響が大きいかを調べた. 実際の偏心量としては $b_\nu=f/1000$ (f は全系の焦点距離) $c_\nu=0$ の場合を取扱った. これは $f=20\text{cm}$ のものでは 0.2mm , $f=5\text{cm}$ のものでは 0.05mm だけ屈折面の球心が軸から外れている場合であり, 傾きにすれば第 4 表の第 2 列に示した値になる.

尚, 前報と同様に偏心がおこっている子午面内の物点のみを取扱った. 又数値の桁数を適当にするため, 収差式の係数の表では f を 1.0007 に, 収差量を与える表では f を 100.07 にした.

§ 3. プリズム作用

偏心の影響の中で最も大きくあらわれるのはプリズム作用による像全体としての横方向へのフレで, 収差式 (III-5) の左辺にある $(1/n_1)p_\nu b_\nu$ の項がそれに相当する. 従つて第 3 表の p_ν の値で同一偏心量に対する各屈折面の影響の大小が知れる. 第 4 表のプリズム作用の項は $b_\nu=f/1000$ の

第 4 表 偏心率, プリズム作用
 $f=100.07$ $b_v=f/1000$

ν	偏 心 角	プ リ ズ ム 作 用
1.	+12' 27''	+0.221 ₄
2	0' 0''	0.0
3	- 5' 35''	-0.079 ₁
4	+13' 36''	-0.188 ₉
5	- 1' 46''	-0.023 ₁
6	+12' 58''	+0.030 ₈
7	- 8' 46''	+0.138 ₉
7追跡		+0.139 ₀

時の収差式より計算した像面上での横方向への移動, 及び第 7 面のみ光線追跡をした結果を示した。この作用により偏心がある時は視野の中心が軸から外れた物点に対応する。それで製作時の調整には通常レンズを廻転させて屈折像又はレンズの表面からの反射像が動かない, 即ちプリズム作用がなくなるまで心合わせを行つていようである。しかし光学系全体としてのプリズム作用が 0 になつても一般にはなお各面の偏心が残る, 又像の動揺にも見得る限界があるので, それが各種収差に以下述べるような影響を与える。

前報と同様に以下の光線追跡による偏心系の収差の計算では像面上の収差量からこのプリズム作用による収差量を差引いて求め, 収差式の右辺による結果と比較した。

§ 4. 球面収差, コマ

球面収差は収差式によれば偏心によつて変化しない。このことは例えば入射高 $h=7.8$ で軸に平行に入射した光線に対し, 三角追跡を行つた結果によれば, 偏心のない場合の横方向球面収差は f の百分率で -0.0315 であるのが第 1 面又は第 7 面が $f/1000$ だけ偏心した場合にそれぞれ -0.0319 , -0.0317 となることと合致する。

コマについては前報までに詳しく述べてあるので説明は省略する。偏心により視野全体に一樣なコマが附加されるが, その大きさをあらわす係数 $F_{\zeta\zeta}$ (III-9 式右辺第 2 項) を第 5 表に示した。

$F_{\zeta\zeta}$ その他の偏心の一次の量に比例する係数は, b_v/r_v に比例する項の偏心面についての和であるので, 唯一面だけの偏心を考える際には, b 又は b/r を外に出した方が, 偏心の影響の大きさを比較するのに便利である。即ち第 5 表で, $F_{\zeta\zeta}/b_v$

第 5 表 コマの係数, コマ
 $f=1.0007 : f=100.07$, $h=7.8$, $\omega_1=0^\circ$, $b_v=f/1000$

ν	$F_{\zeta\zeta}/b_v$	$F_{\zeta\zeta} r_v/b_v$	コ マ
1	-18.6 ₆	-5.16 ₄	+0.017 ₁
2	0.0	+4.64 ₃	0.0
3	+12.00 ₆	-7.39 ₁	-0.011 ₀
4	+22.11 ₀	+5.59 ₁	-0.020 ₂
5	+ 0.51 ₃	-1.00 ₁	-0.000 ₅
6	- 5.24 ₀	-1.38 ₉	+0.004 ₈
7	-13.41 ₄	+5.25 ₉	+0.012 ₂
7追跡			+0.013 ₀

は各屈折面の中で何れか 1 つの面が光学系の軸より垂直方向に同じ量だけ平行に移動 (以下平行移動と略記) した場合における収差への影響の相互の大小を与え, $F_{\zeta\zeta} \cdot r_v/b_v$ は屈折面が同じ角だけ軸に対して傾いた (以下軸の傾きと略記) ときの大小を与えるものである。その結果第 1, 3, 4 及び 7 面の影響が大きいことが知れる。

次に構成部分をなす 1 枚のレンズ, 又は貼合わせレンズが一体となつて偏心した時の $F_{\zeta\zeta}$ は, それを構成する各屈折面に対する値の代数和で与えられる。テッサー型寫真レンズを物空間側より, 第 1 レンズ, 第 2 レンズ, 第 3 レンズ対に分けて考える時, 平行移動の偏心に対しては両面の影響は大体加算的になつていて, 特に第 2 の凹レンズの偏心の影響が著しいことが知れる。レンズの軸の傾きによつて起る偏心に対しては逆に両面の作用が打消し合う傾向にある。

一例として $h=7.8$ で軸に平行に入射する光線に対し, 第 1 面及び 7 面の $f/1000$ の偏心によつておこるコマの量 (第 4 報第 3 図に b で示した量) を計算すれば第 5 表の第 4 列の如くなる。

§ 5. 非点収差

偏心により附加される項の係数の意味と吟味は第 1 報, 第 4 報でなしたので省くが, 偏心量の一次の項と二次の項の係数をそれぞれ第 6 表の上下に示した。後者による収差量は物点の軸からの距離に依らず, 軸上の物点に対してもあらわれるが, 茲で取扱つた程度の偏心量で, 視角が 15° 程度では大体前者より 2 桁程小さく, 無視されるものである。それで偏心量の一次の項の係数から, コマの場合と同様に偏心を 2 つに分けて論ぜられる。同じく第 1, 3, 4 及び 7 面の偏心の

第 6 表 両像面の彎曲の係数

 $f=1.0007$

ν	$Y_{\eta\eta}/b_v$	$Z_{\zeta\zeta}/b_v$	$Y_{\eta\eta} \cdot r_v/b_v$	$Z_{\zeta\zeta} \cdot r_v/b_v$
1	-9.812	-4.889	-2.710	-1.350
2	0.0	0.0	-2.914	+0.011
3	-7.710	-1.428	+4.746	+0.879
4	+10.616	+3.721	+2.684	+0.941
5	-0.810	-0.498	+1.581	+0.973
6	-2.062	-0.420	-0.547	-0.111
7	+10.877	+3.880	-4.264	-1.521

ν	Y_{η}/b_v^2	Z_{ζ}/b_v^2
1	+49.755	+13.001
2	0.0	0.0
3	-11.340	-5.933
4	-77.105	-25.405
5	+0.316	+0.120
6	+13.388	+4.571
7	+51.734	+17.344

影響が大きい。しかし各レンズ毎に考える時の両面の寄与はコマの場合と逆で、レンズの平行移動には両面の影響が反対符号で減殺する傾向にあるが、レンズの軸の傾きには加算的である。

特定の画角について非点収差の両像面の彎曲の値の偏心による変化(偏心系-共軸系)を求めると第7表の如くなる。光線追跡による結果は絞りの位置で軸を切るような光線に対して計算した。二つの表の上欄はそれぞれ偏心がない場合の子午

第 7 表 両像面の彎曲

 $f=100.07$ $b_v=f/1000$

ω_1	0°	$+12^\circ 34'$	$-12^\circ 34'$
$\delta s_{11}'$	収差式	0.0	-0.313
	追跡	0.0	-0.170

ν	$\delta s_{11}'$ の変化 (偏心系-共軸系)		
1	-0.0025	-0.221	+0.216
2	0.0	0.0	0.0
3	+0.0006	-0.171	+0.172
4	+0.0039	+0.241	-0.233
5	-0.0000	-0.018	+0.013
6	-0.0007	-0.047	+0.045
7	-0.0026	+0.240	-0.245
7 追跡	-0.0023	+0.248	-0.253

第 7 表 続き

ω_1	0°	$+12^\circ 34'$	$-12^\circ 34'$
$\delta s_{11}'$	収差式	0.0	-0.565
	追跡	0.0	-0.439

ν	$\delta s_{11}'$ の変化 (偏心系-共軸系)		
1	-0.0007	-0.110	+0.108
2	0.0	0.0	0.0
3	+0.0003	-0.032	+0.032
4	+0.0013	+0.084	-0.082
5	-0.0000	-0.011	+0.011
6	-0.0002	-0.010	+0.009
7	-0.0009	+0.086	-0.087
7 追跡	-0.0006	+0.087	-0.089

的及び球欠的像面彎曲で、 $\pm 12^\circ 34'$ は Seidel の式で計算出来る範囲を越えているようであるが、偏心による収差の変化については、この程度の偏心では、一例として計算した第7面の収差式と追跡の結果の比較に見られる如く、かなりの一致を示している。子午的像面彎曲の変化は球欠的のその大体2倍程度に大きい。

§ 6. 歪み

偏心により Seidel の項に附加される、偏心量について一次及び二次の項の係数の値を、これまでと同様に第8表に掲げる。考えられる程度の

第 8 表 歪みの係数

 $f=1.0007$

ν	Y_{yy}/b_v	$Y_{yy} r_v/b_v$	Y_y/b_v^2
1	-4.082	-1.127	+4.308
2	0.0	+2.575	0.0
3	+3.426	-2.100	+3.122
4	+5.183	+1.311	-27.283
5	+0.895	-1.746	+0.014
6	-1.380	-0.366	+2.961
7	-4.191	+1.643	-14.471

偏心量ではやはりその一次の項が支配的であり、その係数の値により、前述の収差と同様に偏心の影響の大小が判定される。又レンズ毎に考えた時の傾向はコマの場合と同じで、非点収差の時とは逆であり、特に第2レンズの平行移動による偏心の影響が著しい。

歪みをあらわすのに第4報と同じく子午方向

における倍率の差をとり, $\omega_1 = \pm 12^\circ 34'$ での偏心による収差の変化を非点収差と同様に第 9 表に示した. 偏心がない場合の収差量は小さいが, これ位の偏心で既にそれと同程度の変化を受ける.

第 9 表 歪 み

$$b_v = f/1000$$

ω_1	0°	$+12^\circ 34'$	$-12^\circ 34'$
収差式	0.0	+0.058	+0.058
歪み 追跡	0.0	+0.050	+0.050

歪みの変化 (偏心系-共軸系)			
ν			
1	-0.0002	-0.046	+0.045
2	0.0	0.0	0.0
3	-0.0002	+0.038	-0.038
4	+0.0012	+0.059	-0.056
5	-0.0000	+0.010	-0.010
6	-0.0001	-0.015	+0.015
7	+0.0007	-0.046	+0.047
7 追跡		-0.046	+0.048

§ 7. 結語

テッサー型寫眞レンズの 7 つの屈折球面のうちの何れか 1 面が偏心した場合の, 各種収差への影響を偏心系収差式により調べ, 相互に比較した. 概して第 1, 3, 4 及び 7 面の偏心の影響が

(1952 年 3 月 1日受理)

大きい. 又若干の光線三角追跡により $f/1000$ 程度の偏心量では収差式が偏心による収差の変化をよく表わすことを確めた.

次に各構成レンズ毎の偏心を考える時, コマ及び歪み収差の変化は, レンズが系の軸から平行移動した偏心の時にはレンズの構成球面の寄与が加算的に, レンズが系の軸に対して傾いた偏心の時には減殺的になるが, 非点収差による両像面の彎曲の変化に対しては何れもその逆の傾向にある. それで各レンズが正しく磨かれているとすれば, 収差の模様により逆にどのレンズがどの様に偏心しているかを推定することも可能と思われる.

偏心による収差の変化は $f/1000$ 程度の偏心で既に元来の収差量と概ね同程度である.

本研究には文部省科学研究費の補助を受けた.

文 献

- (1) 木内政藏, 石黒浩三, 三宅和夫: 理工研報告, 1 (1947), 154.
- (2) 木内政藏, 三宅和夫: 理工研報告, 3 (1949), 77.
- (3) 木内政藏, 三宅和夫, 林敏治: 理工研報告, 5 (1951), 75.
- (4) 木内政藏, 三宅和夫, 林敏治: 理工研報告, 5 (1951), 199.
- (5) L. I. Epstein: *J. Opt. Soc. Amer.* 39 (1949) 847.
- (6) 芦田静馬: 物理実験学, 第 5 卷, 光学レンズ 274 頁.