

# 軸調整不良の共軸球面光学系の収差 (第4報)

## 望遠鏡対物レンズの偏心による収差

木内 政藏, 三宅 和夫\*, 林 敏治\*\*

### The Aberration of Decentred Optical System, IV.

The Aberration of a Telescope Objective due to Decentering.

Masazô KIUCHI, Kazuo MIYAKE, and Toshiharu HAYASHI.

**ABSTRACT:**—The aberration formula for decentred optical system given in our previous reports were applied to an ordinary telescope objective. The aberrations were calculated for the cases in which the center of each refractive surface separately moved off the intended axis of the optical system by a 300th part of focal length, and the results were compared among them. The results were also checked by trigonometrical ray tracing. (Received September 19, 1951).

#### § 1. 序

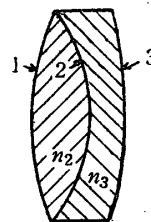
第1~第3報<sup>(1)(2)(3)</sup>で導いた, 偏心がある光学系の Seidel 領域における三次の収差式の, 実際の光学系への応用として, 先ず普通によく用いられる二枚貼合せの望遠鏡対物レンズを取扱い, 三つの屈折面のうちの一つに偏心のある場合をそれぞれ計算して, それらを比較した結果をここに報告する. 一方光線追跡を行つて, 吾々の式によるものとの比較をも行つた.

同種の研究として 1941 年, Thomescheit<sup>(4)</sup>は偏心のある光学系の場合の光線三角追跡の公式をかかげ, それを Fraunhofer 型の二枚合せ望遠鏡に対して適用している. 彼の採用した偏心のとり方は吾々の採用したものと違っているが, 高次の微少量を無視するならば同じ結果を与えるものである.

#### § 2. 計算

吾々が計算に用いた収差式は第3報の(5)~

(13)であり, 以下それを(III-5)の如く引用する. 望遠鏡対物鏡では全体の厚さが小さく, 第1レンズの周縁が有効絞りと考えると考へてもよいので, 有効入射瞳の位置は  $t_1=0$  とおく. また物体距離は  $s_1=\infty$  である. 計算の対象とした二枚貼合せ望遠鏡対物レンズのデータは芦田がその著書<sup>(5)</sup>に発表したもので, 第1図で図示し, 第1表にその諸要素を再掲する. 但し収差量が焦点距離  $f$  の百分率で示されるように数値を計算し直してある.



第1図

第1表

$f=100.000$		
$r_1=+63.834$		$n_1=1.0$
$r_2=-31.311$	$d_1=2.483$	$n_2=1.5725$
$r_3=-260.731$	$d_2=1.242$	$n_3=1.6129$
		$n_4=1.0$

与えた偏心は  $b_v=1/3$ ,  $c_v=0$  とした. 即ち一つの屈折球面の局所軸が系の軸より焦点距離の  $1/300$  だけ子午面上方 ( $y$  方向) にずれていると

\* 東京大学理学部物理学教室

\*\* " 教養学部 "

して、個々の面の偏心による収差の影響を調べた。1 面だけの偏心であるから  $\epsilon_v=0$  としてよい。 $\delta_v=1/3$  は第 1 面ならば 18', 第 2 面ならば 36.6', 第 3 面ならば 4.4' の傾きに相当する。

計算の順序として先ず偏心のない系につき、近軸光線の追跡による  $s'_v, h_v/h_1$  より、 $Q_v, \left(\frac{1}{ns}\right)_v, \epsilon_v, \delta_v$ , 及び  $S_1, S_2, \dots, S_5$ , 及びそれらを用いて

(III-6; 7, 8 参照) Seidel の 5 収差を表わす項を計算すると第 2 表の如くなる。これらの量と、更に (III-9) で定義される  $p, q, f, g$  の 4 つの補助量を用いて偏心による附加項が計算され、第 3 表の結果を得る。但し第 2 表, 第 3 表では桁数を適当にするため  $f=1.0000$  とした。

偏心のある場合の光線三角追跡で、屈折後同一

第 2 表 Seidel の項

$f=1.0000, s_1=\infty$

$\nu$	$s'_v$	$h_v/h_1$	$Q_v$	$\Delta\left(\frac{1}{ns}\right)_v$	$\epsilon_v+\delta_v$
1	+1.7534	+1.0000	+1.5666	+0.3627	+0.6383
2	+2.0659	+0.9958	-5.9320	-0.0678	-0.1574
3	+0.9799	+0.9799	-1.4040	+0.7185	-0.7177

$\nu$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$
1	+0.8901	+0.5682	+0.3627	+0.5703	+0.5956
2	-2.2531	+0.3547	-0.0559	-0.0509	+0.0168
3	+1.3061	-0.9375	+0.6729	+0.1457	-0.5875
$\Sigma$	-0.0569	-0.0146	+0.9797	+0.6652	+0.0249

$t_1=0,$

$\Sigma I_v$	$\Sigma II_v$	$\Sigma III_v$	$\Sigma IV_v$	$\Sigma V_v$
-0.0569	-0.0146	+3.6043	+1.6449	+0.0249

第 3 表 偏心による項

$\nu$	$Y_{\zeta\zeta}/b_v$	$Y_{\eta\eta}/b_v$	$Z_{\zeta y}/b_v$	$Y_{yy}/b_v$
1	-1.4127	+0.0403	+0.07C3	-3.1940
2	+2.0569	-1.1493	-0.3651	+0.4018
3	-0.5873	+1.1523	+0.3093	-0.8121

$\nu$	$Y_{\eta/b_v^2}$	$Z_{\zeta/b_v^2}$	$Y_{y/b_v^2}$	$Y_{0/b_v^3}$
1	+4.2354	+1.4627	+0.3273	-1.3018
2	-4.9897	-1.6890	+0.6833	+1.4636
3	+0.8785	+0.3504	+0.5296	-0.1576

平面内になくなる様な光線の追跡は困難であるので、偏心の起つている  $yx$  面内の物点に対して、同じ子午面内にある光線のみを取扱つた。偏心のある場合の追跡の方法として Thomescheit の与えた公式は、前述の如く吾々と偏心の与え方が異なるので、吾々はこれを偏心面での屈折を取扱う

ときだけ軸を平行移動して追跡した。

§ 3. プリズム作用

偏心の影響のうち収差式の左辺にある  $(1/n)p_\mu b_\mu$  の項は偏心量と同次の量であり、偏心のためのプリズム作用による像全体としてのフレを表わすものである。光学系の軸 (入射瞳の中心を通る) に沿うて入射した光線が最初の偏心屈折面から後はもはや軸に沿うた光線ではなくなることによる。第 4 表にこの光線が像空間に至つて持つ軸との傾角  $u'$ , 軸をきる距離  $s'$ , 及びプリズム作用 (像

第 4 表

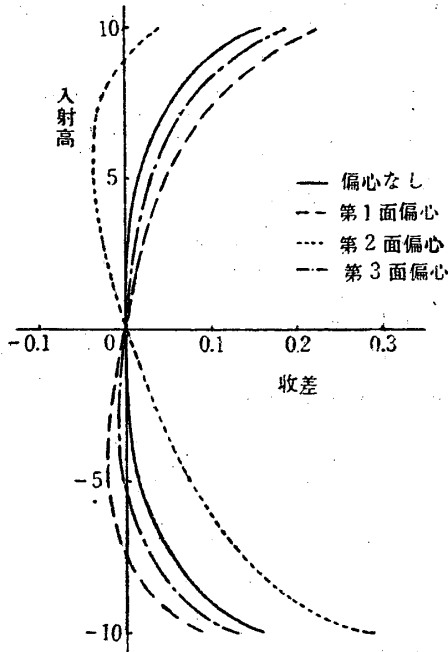
		第1面偏心	第2面偏心	第3面偏心
軸光線	$u'$	-10' 14.5''	+1' 28.6''	-2' 41.6''
	$s'$	-2.3580	-0.7761	-0.0002
プリズム作用	追跡	+0.2989	-0.0424	+0.0768
	収差式	+0.2990	-0.0424	+0.0768

面での横への移動)の量を示した。

このプリズム作用は像全体に一樣なものであるので、以下の光線三角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ゝに得た物空間軸光線の収差量を差引いて収差を求めた。

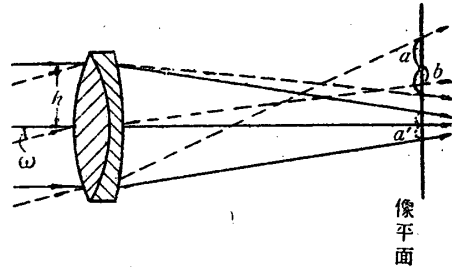
§ 4. 球面収差, コマ

球面収差を表わすのに普通行われるように、軸に平行に入射する光線につき、入射高を縦軸に、それに対する像点と近軸光線の像点との距離を横軸にとれば、光線追跡による結果は第2図の如くなる。偏心のある場合には物空間軸光線を追跡して得る像空間光線を、偏心のない場合の近軸光線に対応すると考えて収差を計算した。



第2図 球面収差

共軸系の場合にはコマはないから軸に対して対称であるが、偏心のある場合には対称が崩れ、丁度前者を傾むけたような形になり、コマが生ずることを示している。しかも第2面が偏心した場合が最も大きく、他に比べてその方向が反対であ



第3図

る。このことは収差式と対応して像平面上での像の有様を考えれば分りやすい。

第3図に示したように、レンズの或輪帯を通る光線により像平面上にできる錯乱円の半径 ( $a, a'$ ) で横方向球面収差を、錯乱円の中心と主光線が像平面をきる点との距離 ( $b$ ) でコマの大きさを表わす。軸に平行に入射する光線、及び  $-5^\circ$  で入射する光線につき、これらの量を計算すると第5表、第6表の如くなる。

第5表 球面収差

$\omega$	$h$	偏心なし	第1面偏心	第2面偏心	第3面偏心
$0^\circ$	10	0.016 <sub>1</sub>	0.015 <sub>8</sub>	0.016 <sub>5</sub>	0.016 <sub>0</sub>
	7.07	0.003 <sub>1</sub>	0.003 <sub>0</sub>	0.003 <sub>4</sub>	0.003 <sub>1</sub>
	5	0.000 <sub>7</sub>	0.000 <sub>6</sub>	0.000 <sub>9</sub>	0.000 <sub>7</sub>
$-5^\circ$	10	0.121 <sub>7</sub>	0.122 <sub>0</sub>	0.116 <sub>5</sub>	0.125 <sub>3</sub>
	7.07	0.094 <sub>6</sub>	0.094 <sub>9</sub>	0.091 <sub>5</sub>	0.097 <sub>1</sub>
	5	0.068 <sub>5</sub>	0.068 <sub>7</sub>	0.066 <sub>5</sub>	0.070 <sub>2</sub>

第6表 コマ

$\omega$	$h$	偏心なし	第1面偏心	第2面偏心	第3面偏心
$0^\circ$	10	0.00	+0.006 <sub>7</sub>	-0.012 <sub>5</sub>	+0.003 <sub>0</sub>
		"	+0.007 <sub>1</sub>	-0.010 <sub>3</sub>	+0.002 <sub>9</sub>
	7.07	0.00	+0.003 <sub>5</sub>	-0.005 <sub>6</sub>	+0.001 <sub>4</sub>
		"	+0.003 <sub>5</sub>	-0.005 <sub>1</sub>	+0.001 <sub>5</sub>
	5	0.00	+0.001 <sub>7</sub>	-0.002 <sub>7</sub>	+0.000 <sub>8</sub>
		"	+0.001 <sub>8</sub>	-0.002 <sub>6</sub>	+0.000 <sub>7</sub>
$-5^\circ$	10	-0.006 <sub>0</sub>	+0.000 <sub>9</sub>	-0.019 <sub>0</sub>	-0.002 <sub>9</sub>
	7.07	-0.000 <sub>3</sub>	+0.003 <sub>3</sub>	-0.006 <sub>1</sub>	+0.001 <sub>3</sub>
	5	+0.000 <sub>4</sub>	+0.002 <sub>2</sub>	-0.002 <sub>3</sub>	+0.001 <sub>2</sub>

収差式 (III-5) で右辺の第 1 項は球面収差を表わす項であるが、共軸系における Seidel の項と同一であり、偏心により球面収差は変わらないことを示している。これは追跡により得られた第 5 表の結果と合致する。

収差式の第 2, 第 3 項はコマをあらわす項で、 $y_1 \Sigma II_v$  の項は共軸系における Seidel のコマを示すものであり、偏心がある場合には  $y_1$  即ち物点の位置によらない視野全体に一樣なコマがこれに合成される。(第 1 報参照)。この uniform coma の大きさを示す係数  $Y_{\zeta\zeta}$  (今の場合  $Z_{\eta\eta}$  は 0 である) は第 3 表に与えたが、球面収差を与える Seidel の係数  $S_1$  に比例するので  $S_1$  の表からでも、第 2 面即ち貼合せの面の偏心の影響が最も大きく、且つその方向が反対であることが知れる。第 6 表の  $\omega$  が  $0^\circ$  の各欄で上は光線追跡で得られた値、下は収差式の係数  $Y_{\zeta\zeta}$  から計算した値である。 $\omega = -5^\circ$  の値は追跡より得たものであり、偏心がない場合のコマもこの入射高では Seidel 域を越えていて、 $y_1 \Sigma II_v$  より計算したものとかなり異っている。しかし或面が偏心した場合の収差量は偏心がない場合の値に偏心による uniform coma、即ち  $\omega = 0^\circ$  における値との代数和になつていて、収差式の結論と合致している。例えば  $h = 10$  における偏心なしの値  $-0.0060$  に、 $\omega = 0^\circ$  での第 1 面偏心の値  $0.0067$  ( $0.0071$ ) を加えて  $0.0007$

( $0.0011$ ) となり、下の  $0.0009$  に対応している。

### § 5. 非点収差

収差式の第 4 項, 第 5 項は非点収差に関する項で入射高の一乗に比例している。更に物点の位置  $y_1$  に関してその 2 乗に比例する Seidel の項の外に、偏心により  $y_1$  に比例する項及び常数項が附加される。常数項の存在により軸上の物点に対しても非点収差があり、子午的像点と球欠的像点とが一致しなくなる。この項は偏心量の 2 乗に比例するものであるが、この程度の偏心では  $y_1$  に比例する項に比して、 $y_1$  の極く小さい近軸域を除いてずつと小さい。後者の係数  $Y_{\eta v}$ ,  $Z_{\zeta v}$  の値を示した第 3 表により、このレンズでは第 1 面の偏心の影響が他の 2 面に比べて小さいことが予想される。収差式より像面のまがり、非点隔差を求めるには、(I-25), (I-27) を用いた。倍率を乗じて像空間における量とし、非点収差の両像面のまがり求め、 $n_1 = 1$ ,  $t_1 = 0$ ,  $s_1 = \infty$  とおくと第 3 報での記号で、

$$\delta s_I' = -f^2 \left\{ \tan^2 \omega_1 \cdot \frac{\Sigma III_v}{2} + \tan \omega_1 \cdot Y_{\eta v} + \frac{Y_{\eta}}{2} \right\}$$

$$\delta s_{II}' = -f^2 \left\{ \tan^2 \omega_1 \cdot \frac{\Sigma VI_v}{2} + \tan \omega_1 \cdot Z_{\zeta v} + \frac{Z_{\zeta}}{2} \right\}.$$

$\omega = 5^\circ, 0^\circ, -5^\circ$  につきこれらを計算した結果が第 7 表の各欄の下の値であり、上は光線追跡より得た値である。両者はよく一致しているが、何

第 7 表 非点収差 像面のまがり

$\omega$		偏 心 な し	第 1 面 偏 心	第 2 面 偏 心	第 3 面 偏 心
$5^\circ$	$\delta s_I'$	-1.364 -1.379	-1.365 -1.381	-1.395 -1.410	-1.332 -1.346
	$\delta s_{II}'$	-0.625 -0.630	-0.624 -0.628	-0.635 -0.639	-0.616 -0.621
$0^\circ$	$\delta s_I'$	0.0 0.0	-0.002 -0.002	+0.003 +0.003	-0.000 -0.000
	$\delta s_{II}'$	0.0 0.0	-0.002 -0.001	+0.001 +0.001	-0.000 -0.000
$-5^\circ$	$\delta s_I'$	-1.364 -1.379	-1.368 -1.383	-1.329 -1.343	-1.399 -1.414
	$\delta s_{II}'$	-0.625 -0.630	-0.628 -0.632	-0.613 -0.618	-0.634 -0.639

れにしても収差曲線上では示し得ない程偏心による非点収差の変化は小さく、 $5^\circ$  の場合で元来の

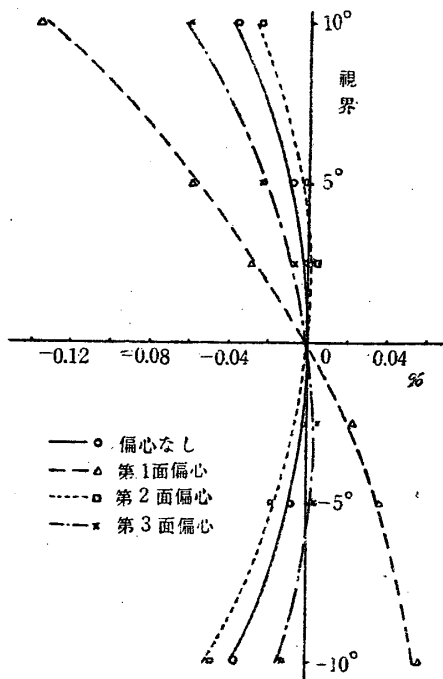
収差量の精々数%までにすぎない。それであり視野の広くない望遠鏡対物レンズでは非点収差に

対する偏心の影響は考えなくて差支えないと思はれる。

§ 6. 歪 み

第 2 報で述べたように収差式の第 6 項は歪みに関する項である。但し最後の  $F_0$  の項は便宜上歪みに入れたが、プリズム作用の追加であり、偏心率の 3 次の項で極めて小さい。共軸系における Seidel の項の外に二つの項が附加されるが、 $F_y$  は偏心率の 2 乗に比例する係数で、この程度の偏心ではやはり小さい。それで  $F_{yy}$  の値から歪みに及ぼす偏心の影響の大小が知れる。

$y$  方向での理想像からの倍率の外れで歪みをあ



第 4 図 歪 み

らわしたのが、第 4 図であり、各曲線は所与の偏心に対して収差式から計算したもの、各点は追跡により得られた値である。偏心がある時歪みは相当大きく変化し、特に第 1 面の影響が著しい。視界角が変化するにつれて歪みは負 (樽型) から正 (糸捲型) になり後再び負に戻る。その間に一对の歪みのない点、即ち正像点が存在し、軸上の物点は正像点でなくなる。これは第 2 報で述べた理論的結果と一致するものである。

§ 8. 結 語

偏心系収差式を普通よく用いられるような望遠鏡対物レンズに適用し、偏心率が  $f/300$  の時の収差量を求め、別に光線三角追跡を行つて結果を比較した。両者により得られた偏心による各種収差量の変化は数量的にも相当よく一致し、偏心系収差式の応用性が示された。

望遠鏡系では偏心による影響は非点収差に対しては僅かであるが、コマ及び歪みに対してはかなり大きいようである。

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, 石黒, 三宅: 理工研報告, 1 (1947), 154.
- (2) 木内, 三宅: 理工研報告, 3 (1949), 77.
- (3) 木内, 三宅, 林: 理工研報告, 5 (1951), 75.
- (4) A. Thomescheit: *Z. f. Instrkde.* 61 (1941), 201.
- (5) 芦田静馬: 物理実験学, 第 5 卷, 光学レンズ p. 278. 河出書房.

(1951 年 9 月 19 日受理)