



3次収差論に基づく反射望遠鏡の収差補正

山下 泰正

東京大学東京天文台 〒181 三鷹市大沢 2-21-1

(1984年5月30日受理)

Aberration Correction for Reflecting Telescopes Based on the Third-Order Aberration Theory

Yasumasa YAMASHITA

Tokyo Astronomical Observatory, University of Tokyo,
2-21-1, Osawa, Mitaka 181

1. はじめに

天体望遠鏡の天文観測における役割は目的とする天体の光を集め、その像を得ることであろう。最近の天文学の特徴はガンマ線、エックス線から電波までの広い波長域に観測手段がひろがったことであり、各波長域でそれぞれに特徴的な天体の異なった現象がみられる。地球大気は上層にあるオゾンのために 300 nm くらいより短波長側では不透明になる。また、赤外域では大気が熱放射によって光るので、それを除くには特別な工夫が必要になる。本稿で述べる地上大型望遠鏡で観測するのは、ほぼ 330 nm~1 μm の波長域と考えられたい。赤外域にも大気吸収の窓が幾つかあり、その窓を通して地上から観測することはもちろんできるが、そのための諸注意については述べない。

天体からの光は微弱であり、その光を集めるには大口径の望遠鏡を必要とする。大口径屈折望遠鏡ではレンズ厚による吸収が大きくなるから 1 m 以上の望遠鏡は反射望遠鏡である。反射望遠鏡では通常、副鏡を交換して数個の結像位置を設ける。凹面主鏡の焦点を主焦点と呼び、ここではおもに星野の撮像を行なう。主焦点の近くに副鏡を置いて焦点距離の延長を行ない、主鏡中央の孔をとおして、その背後に焦点を結ばせたものをカセグレイン焦点と呼ぶ。ここには分散度の低い分光器などを取り付けて微光天体の観測を行なう。その光路の途中に斜鏡を置いて望遠鏡の極軸または水平軸に光を導いて結像させるのをクーデ焦点またはナスミス焦点という。とく

にクーデ焦点は望遠鏡を駆動させても動かないので大型の高分散分光器などを置くのに適している。

主焦点またはカセグレイン焦点で撮像観測を行なう場合、写野は広いことが望ましいが、大口径反射望遠鏡では通常角度 30' ないし 1° の写野をもつ。より広写野のものにはシュミット・カメラ¹⁾がある。微光天体の分光観測の場合にも周囲のより明るい星を用いて望遠鏡のガイドをするから広い視野が必要になる。クーデ焦点では明るい星の精細な観測をするから目的の星そのもので望遠鏡のガイドができ、視野は狭くてよい。

地上から観測すると空気の密度ゆらぎによって光の波面が乱れ、星像はある大きさをもつ。これをシーイングという。10 年くらい前までは地上で得られる最良のシーイングは星像直径で角度 1" 程度といわれていたが、最近の精力的な調査によって適地の高山では 0".3 くらいの星像が得られることがわかった。写野全体にわたって、この分解能を得るには望遠鏡自体の収差は 0".2 ないし 0".1 であることが必要である。この許容量は実在する望遠鏡の設計誤差と製作誤差とを合わせたものの 1/2 ないし 1/3 である。そして、0".3 の分解能を得るためには、光検出器自身の分解能にもよるが、10 ないし 20 m の焦点距離が必要である。

微光天体を観測するには F ナンバーの小さい明るい光学系が必要なのももちろんである。したがって天体望遠鏡の光学設計に課せられる条件は、大口径で明るく、広写野にわたって収差のよく除去された光学系ということである。天体は無限遠にあると考えてよいから放物面主

鏡を採用すれば球面収差はゼロであり光軸上では完全な結像が得られる。写野をとるとまず問題になるのはコマ収差であり、主鏡単体ではコマによって写野は著しく狭いものに制限されてしまう。たとえばパロマーの5m望遠鏡のFナンバーはF/3.3であり、コマ像が角度1"以下におさまる写野は光軸から半径1'(焦点面上で半径4.6mm)の範囲内、さらに収差0".2以下の条件をつけるとコマフリーの範囲は上記の1/5になる。

このように反射鏡のコマは著しいものだから、大口徑望遠鏡の歴史はいかにしてコマを補正するかという研究の歴史でもある。1948年に完成したパロマーの5m鏡では主焦点の近くに置いたRoss補正レンズ²⁾でコマを補正している。これは2枚玉で像位置については色消しになっているが、2次スペクトルおよび倍率の色収差は残っている。また、コマはほぼ除去されているが、若干の球面収差が発生している。1965年ごろから建設の始まったキット・ピーク国立天文台などの4m級望遠鏡ではRitchey-Chrétien型を採用している。これは明るいカセグレイン焦点を採用して、ここで広写野の極限の撮像を行なうという考えのもので、主鏡、副鏡の面形状はカセグレイン焦点で球面収差およびコマ収差がゼロになるように決めてある。すなわち、2面反射アプラナートである。残るのは像面彎曲と非点収差でこれらは焦点近くに置いた2枚玉の補正レンズで除去する³⁾。このようにしてF/7くらいの明るさで直径約45'の写野にわたって良好な像を得ている。Ritchey-Chrétien系の主鏡は近似的に双曲面で、主焦点では球面収差をはじめ、あらゆる収差をもつ。これらの収差は分離型の3枚玉補正レンズ系で除去することもできる⁴⁾。3枚玉補正系は像位置および倍率について色消しであり直径約1°の写野にわたってよい像を与える。この型の補正系の球面収差は双曲面主鏡の球面収差を補正するのに適しており、放物面主鏡に対しては4枚玉が必要だと当時いわれていた。レンズフレアに関しては4枚玉は3枚玉の約2倍あり、微光天体の観測には著しく不利である。ところが、コマはレンズベンディングの1次式なのに球面収差は2次式であるという性質をつかかって、放物面主鏡に対しても3枚玉で完全な補正系が作られることが最近になってわかった⁵⁾。その結果、ハワイ・マウナケアにあるフランス・カナダ・ハワイ協同(CFH)の最新の3.6m望遠鏡では再び放物面主鏡を採用している。

鏡だけを使って反射望遠鏡の収差を補正する試みはSchwarzschildの研究⁶⁾に始まり、古くはPaul⁷⁾, Baker⁸⁾などにより、また最近でも多くの優れたデザインが発表

されている。筆者はそのすべてを知っているわけではないが、残念ながら鏡補正系をもつ望遠鏡が実際に作られたことはない。これは、鏡筒の自重撓みによる鏡の位置ずれ、光軸ずれの影響がレンズより大きいこと^{9,10)}、最終像面が入射光束内にできるため、観測者がそこに取りつのが困難だという事情によると思われる。しかし最近では望遠鏡の遠隔制御や自動制御の技術は急速に進歩しており、色収差のない鏡による収差補正の重要性は今後見直されてよからう。

以下では3次収差の範囲内で、2面および3面の鏡をつかった反射望遠鏡の収差補正について一般的に解説する。

2. 3次収差係数

本稿では記号、符号についてはBorn and Wolfの教科書¹¹⁾に従う。系は各光軸の一致する*m*面の反射鏡から成り、平行光束は左から入射し入射瞳は主鏡(第1面)にある。*i*番目の鏡は曲率半径*r_i*(曲率中心が鏡の右にあるとき*r>0*)、球面変形係数*b_i*をもつ。*b*は、*z*軸を光軸、*y*軸を半径方向にとって、鏡面を

$$z = y^2/2r + (y^4/8r^3)(1+b) + \dots \quad (1)$$

と展開したときの4次項の係数で、*b*=-1は放物面、*b*<-1は双曲面、*b*>-1は楕円面、とくに*b*=0は球面をそれぞれ表わす。*i*番目の鏡から(*i*+1)番目の鏡までの距離を*d_i*、媒質の屈折率を*n_i*とする。すべて鏡だから、*i*が奇数のとき*d_i*<0、*n_i*=-1、偶数のとき*d_i*>0、*n_i*=1である。*i*番目の面頂点から光軸に沿って物点および像点までの距離をそれぞれ*s_i*, *s_i'*とすると(物点、像点が鏡の右にあるとき*s, s'>0*)、鏡の結像公式は

$$1/s_i + 1/s_i' = 2/r_i, \quad (2)$$

移行公式は

$$s_{i+1} = s_i' - d_i \quad (3)$$

となる。

各鏡面に入射瞳があるとき(*t_i*=0)のザイデル収差係数は次のように書ける。

$$\text{球面収差: } B_i^0 = -(n_{i-1}/r_i^3) \{b_i + (1-r_i/s_i)^2\} \quad (4)$$

$$\text{コマ収差: } F_i^0 = -(1/r_i^2)(1-r_i/s_i) \quad (5)$$

$$\text{非点収差: } C_i^0 = -1/n_{i-1}r_i \quad (6)$$

$$\text{像面彎曲および歪曲: } D_i^0 = E_i^0 = 0 \quad (7)$$

これらを用いると、一般に入射瞳が主鏡頂点から*t₁*の距離にあるとき(本稿では*t₁*=0)の系の収差係数は

$$B = \sum h_i^4 B_i^0 \quad (8)$$

$$F = \sum h_i^2 F_i^0 + \sum h_i^4 k_i B_i^0 \quad (9)$$

$$C = \sum C_i^0 + 2 \sum h_i^2 k_i F_i^0 + \sum h_i^4 k_i^2 B_i^0 \quad (10)$$

$$D = 2\sum h_i^2 k_i F_i^0 + \sum h_i^4 k_i^2 B_i^0 \quad (11)$$

$$E = 2\sum k_i C_i^0 + 3\sum h_i^2 k_i^2 F_i^0 + \sum h_i^4 k_i^3 B_i^0 \quad (12)$$

と表わせる。ここで h_i は各鏡を切る光束の高さに関するパラメータで

$$h_{i+1}/h_i = s_{i+1}/s_i', \quad h_1 = s_1/(t_1 - s_1) = -1 \quad (13)$$

($s_1 = -\infty$), k_i は入射瞳位置に関するパラメータで

$$k_{i+1} = k_i + d_i/n_i h_i h_{i+1}, \quad k_1 = t_1(t_1 - s_1)/n_0 s_1 = 0 \quad (14)$$

である。歪曲は像の鮮鋭さに無関係だから収差補正の考慮外にする。

3. 2面複合アナスタグマート

2面複合望遠鏡で従来から採用されているものに古典的カセグレイン望遠鏡がある。望遠鏡は明るい系だから、球面収差の除去が最も重要であり、主鏡副鏡の面形状は各鏡固有の球面収差係数がゼロになるように決める。主鏡は $B_1^0 = 0$ とおいて、当然 $b_1 = -1$, すなわち放物面である。合成焦点距離 f と主鏡焦点距離 f_1 との比、すなわち副鏡による焦点距離の拡大率を R とすると、副鏡の形状は $B_2^0 = 0$ とおいて、 $b_2 = -(R+1)^2/(R-1)^2$, すなわち双曲面である。コマは焦点距離 f の1枚鏡のそれに等しく、非点収差は近似的に主鏡のそれに等しい。

Ritchey-Chrétien 望遠鏡ではカセグレイン焦点を重視し、そこで球面収差とコマとがゼロになるように ($B = F = 0$), 主鏡副鏡の面形状を決める。すなわち反射アプラナートである¹²⁾。主鏡頂点からカセグレイン焦点までの距離 ($s_2' > 0$) と f_1 との比を $\zeta = s_2'/f_1$ とおいて、 $1 + b_1 = -2(1 + \zeta)/R^2(R - \zeta)$, $1 + b_2 = -2R\{2R^2 - (R - 1) \times (1 + 2\zeta)\}/(R - 1)^2(R - \zeta)$ を得る。すなわち主鏡副鏡とも双曲面である。非点収差は近似的に主鏡のそれに等しい。

2面複合望遠鏡は主鏡、副鏡の曲率半径 r_1, r_2 , 面形状 b_1, b_2 , および2面間の距離 d_1 の5個のパラメータで決まる。これらを決めるのに、系が与えられた焦点距離 f をもつこと、副鏡における光束の径が与えられた値 h_2 をもつこと、球面収差、コマ、非点収差がないこと ($B = F = C = 0$) の5個の条件を課すと系はユニークに決まる。像面湾曲は残るが、像面においた像平坦化レンズで補正すれば、系はアナスタグマートになる。ここで系の合成焦点距離 f は、最終面番号を m として

$$f = (n_0 s_m' / h_1 / n_m h_m)_{s_1 = \infty} \quad (15)$$

で与えられる。

ここでガウス光学に関係している光学パラメータは r_1, r_2, d_1 の3個だが、条件は f と h_2 の2個しかない。

したがって、この2個の条件から、たとえば r_1, r_2 は d_1 をパラメータとして書ける。他方、 b_1, b_2 は収差のみに関係しているが、除去すべき収差は3個ある。したがって d_1 は収差除去の条件から決まる。実際に(8)~(10)式から

$$B_1^0 = (1/k_2)(F_1^0 + h_2^2 F_2^0) \quad (16)$$

$$B_2^0 = -(1/h_2^4 k_2)(F_1^0 + h_2^2 F_2^0) \quad (17)$$

$$C_1^0 + C_2^0 - F_1^0 + h_2^2(2k_2 - 1)F_2^0 = 0 \quad (18)$$

を得るが、 b_1, b_2 はそれぞれ(16), (17)式の左辺にのみ含まれ、右辺は d_1 をパラメータとして計算できる。そして d_1 は(18)式から決まる。計算の結果は

$$r_1 = -4f/(1 + h_2) \quad (19)$$

$$r_2 = -4fh_2/(1 - h_2) \quad (20)$$

$$d_2 = -2f \quad (21)$$

$$b_1 = 8h_2/(1 + h_2)^3 - 1 \quad (22)$$

$$b_2 = 8/(1 - h_2)^3 - (3 + h_2)^2/(1 - h_2)^2 \quad (23)$$

となる¹³⁾。副鏡頂点から像面までの距離は

$$s_2' = -h_2 f \quad (24)$$

で与えられる。

さらにベッツパウル和をゼロとおくと $h_2 = -(\sqrt{2} + 1)$ となり、このとき像面は平面になる。この解は Schwarzschild のアナスタグマート⁶⁾ として知られているが、第2面が第1面より大きく、収束光束に占める第1面の影が大きいので実用になりにくい。

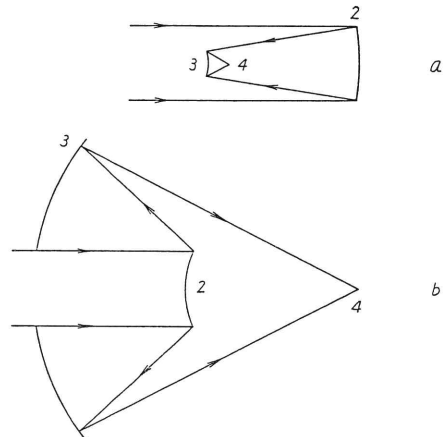


図1 2面反射アナスタグマート
焦点距離 $f=1$, F ナンバー=1.

2: 主鏡, 3: 副鏡, 4: 像面.

光学パラメータの値は次のとおり. a) $h_2 = -0.3$, $r_1 = -5.714$, $r_2 = 0.923$, $d_1 = -2$, $b_1 = -7.997$, $b_2 = -0.672$, $s_2' = 0.3$, 像面曲率半径 $= -0.3973$. b) $h_2 = -4.236$, $r_1 = -1.236$, $r_2 = 3.236$, $d_1 = -2$, $b_2 = b_3 = 0$, 像面曲率半径 $= -1$.

$0 < -h_2 < 1$ の場合には $r_1 < 0, r_2 > 0$, すなわち主鏡副鏡ともに凹面鏡である。 $-h_2 > 1$ の場合には $r_1, r_2 > 0$, すなわち第1面は凸面の発散系で第2面が凹面の収束系である。(22), (23)式の b_1, b_2 は $h_2 = -4.23607$ のとき $b_1 = b_2 = 0$, すなわち主鏡副鏡とも球面になる(図1)。 $-h_2 > 1$ の解は明るい分光器カメラとして有用と思われる。

上述の2面複合アナスタグマートは、一般の物点位置に対する Wynne の研究¹⁴⁾ に含まれているが、天文の世界ではあまり知られていないので、あえて紹介した。

4. 3面複合アナスタグマート (Paul-Baker 型)

3面複合望遠鏡は各鏡の曲率半径 r_1, r_2, r_3 , 球面変形係数 b_1, b_2, b_3 , および鏡間距離 d_1, d_2 で決まる(図2)。ここで主鏡の $r_1 (= -2f_1)$, b_1 は与えられているとする。したがって残ったパラメータは6個である。これらを決めるのに、3章と同様に、 $f = f, B = F = C = 0$ の4条件を課す。第5の条件としてペッツパール和をゼロにする。さらに第6の条件として第1, 第2面の投影を afocal にする。これが Paul-Baker 型で、系は焦点距離 f を決めるとユニークに決まる。答えは

$$r_2 = -2f_1(1 - f_1/f) \quad (25)$$

$$r_3 = 2s_3' = -2f(1 - f_1/f) \quad (26)$$

$$d_1 = -f_1^2/f \quad (27)$$

$$d_2 = 2f(1 - f_1/f)\alpha/\beta \quad (28)$$

$$1 + b_2 = (\beta/\alpha)\{f_1^3/f^3 + 2(f_1/f)(\alpha/\beta - 1)\} \quad (29)$$

$$1 + b_3 = (\beta/\alpha)/\{f_1^2 + 2f^2(\alpha/\beta)\} \times \{f_1^2 + 2f^2(2\alpha/\beta - 1)\} \quad (30)$$

となる¹⁵⁾。ここで s_3' は第3面から合成焦点までの距離、 α, β は

$$\alpha = 1 + f_1(1 + b_1)/4(f - f_1) \quad (31)$$

$$\beta = 1 - f^2(1 + b_1)/2f_1(f - f_1) \quad (32)$$

で与えられる。第2, 第3面の径は

$$h_2 = h_3 = -(1 - f_1/f) \quad (33)$$

である。とくに主鏡が放物面 ($b_1 = -1$) の場合には

$$d_2 = 2f(1 - f_1/f), \quad b_2 = f_1^3/f^3 - 1, \quad b_3 = 0 \quad (34)$$

となり、 $d_2 > 0$ のためには $f > f_1$ でなければならない。また球面主鏡 ($b_1 = 0$) に対しては実用的な afocal の解はない。

放物面主鏡に対する収差補正については、Baker⁸⁾ は次のような考察からその物理的意味を与えている。すなわち、焦点を共有する2枚の放物面鏡による無限遠物点の投影は afocal であり、球面収差、コマ、非点収差について無収差である。第2面からの反射光は平行光束だから、これをシュミット・カメラで受けると完全な結像が得られる。ここで第2面とシュミット・カメラ間の距離は任意だから、シュミット補正板と第2面とを一致させる。その結果、第2面の面形状はグレゴリアンの場合には双曲面、カセグレインの場合には楕円面になる。第3面は本来シュミット・カメラの主鏡だから球面鏡である。一般には系はペッツパール和ゼロの条件を満たさないが、球面鏡の曲率半径を調節することによって平坦結像が得られる。

afocal の条件をはずすと解は無数にある。これらを数値的に解いて、3面の鏡の相対配置および各鏡が他の鏡の上につくる影の大小から検討してみた。結果の詳細は別の論文¹⁵⁾ をみていただくとして、放物面主鏡および Ritchey-Chrétien 主鏡のような弱い双曲面に対しては、実用になりうる解は $f/f_1 = 1.5 \sim 2$, $h_2 = -0.25 \sim -0.3$ のあたりにあり、影の問題だけからは直径約 1° 近い視野がとれる。球面主鏡に対しては $f/f_1 = 0.5$ の近くに実用になりうる解があるが、影の効果が強くて視野直径は約 $30'$ に限られる。

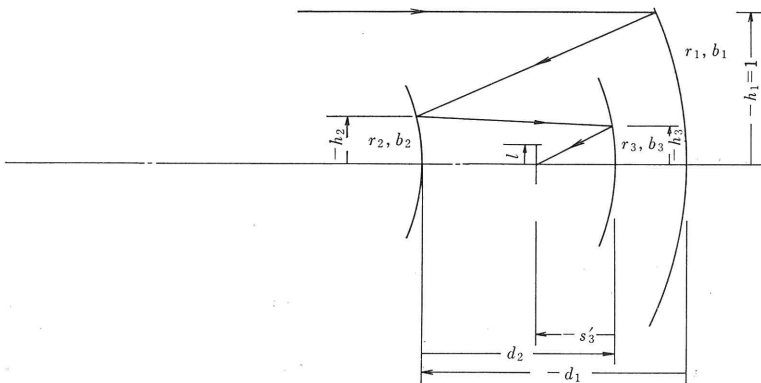


図2 3面反射アナスタグマート

観測の便を考えて、第3面からの収束光を第2面の中央にあけた孔を通して、その後像面を導くという方式がある。Pop-through 型とも呼ばれ、幾つかの設計計算が発表されている¹⁶⁾。上述のペッツパール和をゼロにする解のうち、像位置が第2面に一致するものは $h_2 = -0.5 \sim -0.9$ と第2面の影が著しく大きく、実用的解では像は第2面と第3面の間にできる。そこでペッツパール和ゼロの

条件をはずし、その代わりに像位置が第2面に一致せよ ($-s_3' = d_2$) という条件を課して系の性質を調べた。

このような像位置指定 ($-s_3' = d_2$) の場合には、放物面主鏡に対しては afocal の解はない。実用になりうるのは $f/f_1 = 2$ のあたりだが、第3面の径が第2面の約2倍あり、影の影響が大きくて広い視野はとりにくい。双曲面主鏡に対しては、たとえば $b_1 = -1.09$, $f/f_1 = 2$ の場合には $h_2 = h_3 = -0.2$ のところに afocal の解があり、実用的な解は $f/f_1 = 2 \sim 4$ のあたりにある。影の影響は放物面主鏡の場合より小さいが、平坦像面の場合より大きい。球面主鏡に対しては実用的な解はない。

本節で述べた3面反射望遠鏡では、主焦点またはカセグレイン焦点をつかうことを想定して主鏡に制限をつけたため、前節の2面反射望遠鏡と比べて自由にとれるパラメータは1個増えたにすぎないが、性能の面ではかなりの自由度が与えられている。しかし鏡が3面になった最大の欠点は鏡相互間に及ぼす影の問題である。

5. 鏡を用いた補正系 (Baker-Meinell-Bingham 型)

球面主鏡に対して、2面の鏡を用いて次のような補正系が考えられる。球面鏡の曲率中心に入射瞳を置き、そこに球面収差補正板をおくとシュミット・カメラの解になる。この原理を応用して第2面を凹面鏡とし主焦点を超えてある距離のところに置く。そして曲率半径を仮想的入射瞳の像が主鏡の焦点面上にできるように決める。すなわち実際の入射瞳はこの面内にあり、そこにシュミット補正板と同じように、球面鏡の球面収差を補正するための高次非球面の第3面を置く。第3面の曲率半径は無限大だから固有のコマあるいは非点収差を発生することはない。そして第2面は最終像の収差を極小にするよう非球面化する。

この案は Meinel¹⁷⁾ によって発表されたが、元来は Baker のアイデアだという。また、Bingham¹⁸⁾ は同様の光学配置で放物面主鏡に対する主焦点補正系を考案した。

上述の光学配置をとると主鏡、第2面間距離は

$$d_1 = -(f_1 + d_2) \tag{35}$$

で与えられる。補正系だから主鏡の r_1, b_1 は与えられているとする。したがって決めるべき光学パラメータは r_2, r_3, b_2, b_3 および d_2 の5個である (図3)。これらを決めるのに焦点距離 f 、像位置 ($-s_3' = d_2$)、収差補正 $B = F = C = 0$ の5個の条件を考える。大望遠鏡のためにより自由度をもたせるため、入射瞳は主鏡面にあるとす

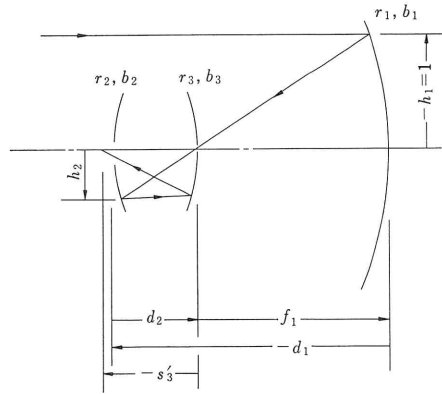


図3 2面の鏡を用いた主焦点補正系

る。

ガウス光学から

$$r_2/2 = d_2 f / (2f - f_1) \tag{36}$$

$$r_3/2 = d_2 f_1 / (f - 2f_1) \tag{37}$$

を得る。これらを用いて $B = 0$ の条件は

$$(1 + b_1) / (8f_1 - (d_2/4f)(2f - f_1)) - \{ (f_1 + d_2)(f - f_1 - d_2) \} = 0 \tag{38}$$

となり、これを解いて d_2 が決まる。一般に、ある f に対して d_2 は2個ある。この d_2 を用いて、 $F = C = 0$ の条件から第2、第3面の球面変形係数は

$$b_2 = - \{ 2f_1^2 / (f_1 + d_2) \} \times [\{ 2f^2 - ff_1 + f_1(f_1 + d_2) \} / (2f - f_1)^3 - f_1^2 / (2f - f_1)^2] \tag{39}$$

$$b_3 = - \{ 2ff_1 / (f - f_1 - d_2) \} \times [\{ 2f^2 - 2ff_1 + f_1(f_1 + d_2) \} / (2f - f_1)^3 - f^2 / (2f_1 - f)^2] \tag{40}$$

となる¹⁹⁾。

とくに放物面主鏡 ($b_1 = -1$) に対する球面収差除去の条件(38)は

$$f = f_1/2$$

となり、 d_2 に無関係である。また、(36)式より $r_2 = \infty$ 、すなわち第2面は平面の非球面 (plano-aspheric) となる。放物面主鏡に対する補正系の解は d_2 をパラメータとして無数にあり、それらは Bingham の研究¹⁸⁾ に一致する。

球面主鏡 ($b_1 = 0$) に対する球面収差除去条件は

$$(f_1 + d_2)f^2 - (f_1^2 + 6f_1d_2 + d_2^2)f + 2f_1^2d_2 = 0 \tag{41}$$

となる。第2面、第3面間距離を $d_2 = 0.15f_1$ にとると、合成焦点距離は $f/f_1 = 0.1742$ と 1.4975 の二つの解がある。 $d_2 \rightarrow 0$ の極限で前者の解は $f/f_1 \rightarrow 0$ に、後者は $f/f_1 \rightarrow 1$ に移行する。前者の解のファミリーでは第2面

は凸の楕円面, 第3面は凹で球に近い楕円面である. 後者のファミリーでは第2面は凹の双曲面, 第3面も凹で非常に強い双曲面である. 入射瞳位置は異なるが, Baker, Meinelの解¹⁷⁾につながるのは後者で, 第3面の強い非球面化はそれがシュミット補正板の役をしているからと考えられる.

6. おわりに

筆者は天文学の観測, なかでも星の分光光学を専攻しているもので, 光学の経験といえば天体用分光器の基本的な光学設計を考えたことがあるくらいで, それとて具体的設計についてはメーカーの方々をお願いしている次第である. しかし最近, いろいろな望遠鏡, 補正系, あるいは明るい分光器カメラの設計を見るにつけ, どうしてそのような光学配置を考えるに至ったかを知りたくて仕方がない. 光学のような歴史の長い学問には種々のノウハウがあって経験がものをいうのはわかっている. しかし, 素人だって基本の理屈ぐらい理解してよいのではないか. 最近の論文には結果だけが書いてあって, そこに至る思考の過程は述べられていない. たとえばレンズ補正系の場合, 像位置色収差, 倍率の色収差, ペッツバル和の補正, 系全体のパワーは各レンズにどのようにパワーを配分するかで決まり, 各レンズのベンディングには関係しない. したがってベンディングは主鏡を含めた全系の球面収差, コマ, 非点収差が消えるように決めることができる. 薄レンズ近似ではレンズ1個についてパワー, ベンディング, 位置の3自由度があり, 上述の七つの条件を満たすには最低3枚のレンズを要する. 他方, 3枚レンズ系には九つの自由度があるから, 二つは任意に選べるはずである. この二つの自由度を実際にはどのように使っているのだろうか. 実際の設計のパワーの配列には正負正の配列と負正負の配列がある²⁰⁾. 主鏡のペッツバル像面は負レンズのそれに相当するからその点からは前者の配列が優れているように思えるが, それぞれの特徴はどうなっているのか, ご教示いただけ

れば幸いである.

本稿で取り扱ったのは3次収差論に基づく反射望遠鏡の解析解である. 望遠鏡は明るい光学系だから高次の収差が問題になり, 上述の解析解をもとにして光学パラメータの最適化を数値的に行なわねばならない. 実際に4章で述べた双曲面主鏡に対する Paul-Baker 型の解は Epps と武田¹⁶⁾とによって高次収差について最適化され, 3次収差論の解は初期設計として有用であることが示された.

文 献

- 1) 広瀬秀雄: シュミット・カメラ (河出書房, 1948).
- 2) F. E. Ross: *Astrophys. J.*, **81** (1935) 156.
- 3) C. G. Wynne: *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **163** (1973) 357.
- 4) C. G. Wynne: *Astrophys. J.*, **152** (1968) 675.
- 5) C. G. Wynne: *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **167** (1974) 189.
- 6) 広瀬秀雄: シュミット・カメラ (河出書房, 1948) p. 112.
- 7) M. Paul: *Rev. Opt.*, **14** (1935) 169.
- 8) J. G. Baker: *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, **AES-5** (1969) 261.
- 9) A. Baranne: *The Construction of Large Telescopes*, ed. D. L. Crawford (Academic Press, London, 1966) p. 97.
- 10) 山下泰正: 東京天文台報, **18** (1976) 24.
- 11) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 5th ed. (Pergamon Press, Oxford, 1975) Chapters IV and V.
- 12) W. B. Wetherell and M. P. Rimmer: *Appl. Opt.*, **11** (1972) 2817.
- 13) 山下泰正, 成相恭二: 東京天文台報, **20** (1983) 10.
- 14) C. G. Wynne: *J. Opt. Soc. Am.*, **59** (1969) 572.
- 15) Y. Yamashita and K. Nariai: *Ann. Tokyo Astron. Obs.*, **19** (1983) 375.
- 16) H. W. Epps and M. Takeda: *Ann. Tokyo Astron. Obs.*, **19** (1983) 401.
- 17) A. B. Meinel: *The Construction of Large Telescopes*, ed. D. L. Crawford (Academic Press, London, 1966) p. 221.
- 18) R. G. Bingham: *Optical and Infrared Telescopes for the 1990s*, Vol. II, ed. A. Hewitt (Kitt Peak National Observatory, Tucson, 1980) p. 965.
- 19) Y. Yamashita and K. Nariai: *Ann. Tokyo Astron. Obs.*, **19** (1984) 463.
- 20) C. Cao and R. N. Wilson: *Astron. Astrophys.* **133** (1984) 37.