

デジタル一眼レフカメラ用交換レンズの光学設計

佐藤 治 夫

The Optics Design for the Interchangeable Lens of the Digital Single-Lens Reflex Camera

Haruo SATO

These days, imaging devices have been developed rapidly with digital technology and widely spread in the market. Although the digital single-lens reflex cameras have been developed for professional use in the early stage, now these prices are becoming lower and that makes it easier for amateur users to buy. While every camera manufacturer pays more attention to digital cameras, we have also been developed digital camera system to enhance their performance. One of the results of our development is the interchangeable lens, which was specially designed for digital cameras. Following explanation gives you the details of our designing concept of the lens for digital single-lens reflex camera, using our DX-Nikkor ED 12-24 mmF4G (IF) with the peripheral technology as an example.

Key words: optics design, aspherical surface lens, aberration correction, image quality, tone reproduction, lens for digital camera

1. 開発背景

ニコンのデジタル一眼レフ用フォーマットサイズをニコン DX フォーマットと称した。このフォーマットサイズは、35 mm ライカ判の約 2/3 のフォーマットサイズに相当する。ユーザーニーズの観点から、このフォーマットサイズに特化し、その利点を最大限に生かした交換レンズシステムをラインナップする必要があった。

2. スケーリング設計とバランス設計

新交換レンズのシステム化をするうえで最も重要な点は、根幹になる設計思想である。通常、フォーマットサイズが 3 分の 2 になれば、カメラやレンズのサイズも 3 分の 2 程度の大きさにダウンサイジングできる可能性がある。しかし、35 mm ライカ判銀塩カメラを前提に設計された光学系を、そのまま同じフォーマットサイズの CCD (charge coupled device) を装備したデジタルカメラに使用した場合、描写特性上数々の欠点が生じることはよく知られて

いる。したがって、ニコン DX フォーマットに特化したレンズの設計思想は、ただ単にコンパクト化を目的とした「スケーリング設計」を採用しないということである。交換レンズには各スペックに適合した用途があり、ユーザー層がある。したがって筆者らは、3 分の 2 に縮小されたフォーマットサイズがもたらす設計自由度を、「性能向上」「ダウンサイジング」「35 mm 判共用レンズではなしえない仕様」の 3 つの柱に振り分けることにした。筆者らは、この設計思想を「バランス設計」と呼んでいる。

DX-Nikkor ED 12-24 mmF4G (IF) は、バランス設計「3 つの柱」の中で、「35 mm 判共用レンズではなしえない仕様」「性能向上」に軸足をおいて開発したレンズである。筆者らは、DX フォーマットの設計余力を最適にバランス設計することにより、デジタル用に特化した超広角ズームレンズの開発を目指した。

3. 銀塩カメラ用レンズとデジタルカメラ用レンズとの差異

同じ対物レンズである写真レンズとデジタルカメラ用レンズの、光学設計上の相違点はどこにあるか、光学的な相違点を論じる前に、まず画像形成プロセスの違いを理解する必要がある。銀塩写真プロセスで使用される光学系の描写特性は、最終画像の調子再現の影響を考慮し行われてきた。したがって、光学系以降のプロセスの特徴や両システムの相違点を理解し、光学系の設計に反映する必要がある。本稿では画質と階調に着目し、考察する。

3.1 デジタル写真に最適な画質

まず、画像の観察条件を考察する。一般的なユーザーによる画質の良否判定は、銀塩システムによる画像の場合は印画紙またはポジ原稿で行われる。一方、デジタルカメラによる画像では、モニター上の観察による良否判定が多い。デジタル画像は容易に物理量に変換可能なため、より客観的な比較が可能になった。また、デジタル画像は感光材料や現像処理による誤差をもたない。しかも、ユーザーが、モニター上で著しい画像拡大が容易にできる。したがって現状では、デジタル写真システムは銀塩写真よりも厳しい画質の良否判定基準をとらざるを得ない。しかし、本来写真として鑑賞する画像サイズにおいては、画像形成システムの差は関係がないはずである。ある意味、デジタル写真システムは、従来の同等のフォーマットサイズの銀塩写真システムより、高画質を要求されているといわざるを得ない。

3.1.1 階調再現と OTF

銀塩システムの画質評価に、L. A. Jones¹⁾により提案された調子再現 (tone reproduction) という尺度がある。ここでは、写真の画質を調子再現性で判断している。すなわち、光学系に入る被写体 (シーン) の輝度情報が、最終的な画像 (ここでは印画紙上) でどれだけ圧縮・欠落するかを評価する方法である。自然界における平均的なシーンの輝度比は 160:1 であるといわれている。数十年前のデータでは、このシーンを当時の一般的な写真レンズを用いた場合、像面照度域 64:1 程度にまで圧縮されるといわれていた。この比をフレア係数と定義している。この関数の概念はレスポンス関数と等価である。この光学系によって圧縮された情報を、銀塩フィルムや印画紙のガンマ特性やラチチュード (=ダイナミックレンジ) の最適な組み合わせによって変換し、主観的に好ましいと思われる画質を得ていたわけである。したがって、本来光学系の OTF 特性 (正確にはペーリンググレアも含む) は値が高ければよいのではなく、調子再現を考慮した最適解がある。特に低周波数

の信号に対するコントラスト再現性を著しく高めることは、フィルムや印画紙の有するガンマ特性、ラチチュードを逸脱することになり、決して最終画質は向上しない。

一方、デジタルシステムの画像形成はどうか。筆者は、銀塩システムと等価な考え方が成立すると考える。むしろ、撮像素子と画像処理による画像データの客観性と色やガンマ特性の可変による自由度を得たのであるから、銀塩システムと比較して、OTF 特性の最適解を特定しやすい環境になったといえる。

また、調子再現という概念で比較した場合、デジタル画像システムは銀塩システムと比較して、まさっている部分と、現状では劣っている部分の両方を有している。まさっている部分の一例は、粒状性 (デジタルではノイズと表現) である。また、劣っているところの一例は、撮像素子 (CCD, CMOS 等) の画素配列と低ダイナミックレンジであろう。光学設計者は、それらの相違点や条件を考慮し、最適な調子再現が可能な OTF 特性を有する光学系を設計する必要がある。

3.2 収差補正上の留意点

3.2.1 近軸量とザイデル収差

前記のとおり、銀塩システムに対して評価される画像の拡大率が著しく大きくなっていることは否めない。したがって、この点では、従来よりもシャープネスを向上させる必要がある。現状では各社各様の基準をもっていると思うが、そのシステムがどの拡大率まで性能保証をするかによって、シャープネスの評価基準を設定することが望ましい。結果的には、シャープネスにかかわる各収差の補正は、銀塩システムのそれに比較してより良好であることが望ましいのである。

しかし、仮に標準的な画像処理を行ったデジタル画像と、標準的なフィルムを用い、規定の現像処理を行った銀塩フィルムを同一条件でプリントして比較した場合、同じ印象の写真はできあがらない。これは、一般に撮像素子の低ダイナミックレンジを補う目的で、デジタル画像のガンマは銀塩のそれに比較し、明らかに軟調になる特徴があるからである。また、デジタル画像では銀塩における銀粒子による網点現象も起こりえない。したがって、おもにこれらの理由によって、デジタル画像システムでは銀塩システムと比較して、フレアが目立ちやすい。フレアは光学的なフレアとそれ以外のフレアに区別できるが、光学的なフレアの場合、設計上はおもにコマフレアの発生、球面収差の補正状態に因果関係がある。製造時には、特に鏡筒組み込み時に発生する偏芯コマフレアの影響も大きく、製造上の精度も向上する必要がある。

また、一般的な CCD 撮像素子による画像形成システムには特有の留意点がある。ひとつは、光学ローパスフィルター (OLPF) の存在である。OLPF の複屈折によって、カットオフ周波数を設定する。最終的な画像の MTF 特性は、光学系と OLPF との合成された MTF (modulation transfer function) になる。さらに、OLPF は方位性も有しているため、メリジナル像面、サジタル像面という概念では画像評価が難しくなっている。また、OLPF の構造は各社各様であり、ナイキスト周波数の設定もカメラごとに異なるのが実状であるから、一眼レフシステムの場合、すべてに対して同じ特性を有した光学系は、実質困難であることがわかる。また、単に OLPF の厚みの変化のみを考察しても、大画角を有する光学系は像面湾曲および非点収差が変化し、大口径や長焦点レンズは球面収差が変化する傾向がある。これら諸条件を考慮に入れた光学設計をすることが必要になる。

もうひとつの留意点は、CCD 上のマイクロレンズアレイの存在である。マイクロレンズの曲率や構造も各社各様であろうが、共通して考慮すべき留意点がある。マイクロレンズの構造から容易に想像がつくが、光学系の射出瞳の位置が近いと、マイクロレンズで集光された光束が効果的にフォトダイオード部に到達せず、電荷転送部の遮光膜部分にあたってしまい、大幅に感度低下を起こす。この現象によって、光学系で決まるビネッティング以上の周辺減光が起こる。したがって、射出瞳を比較的遠い最適位置に設定した光学設計が必要である。正確には、光学系 (対物レンズ) にマイクロレンズを含めた光線追跡を行い、感度低下を評価すべきである。また、マイクロレンズの発生する球面収差量を評価し、レンズ本体の F ナンバーとの整合性も評価せねばならない。この評価を行えば、開放 F ナンバーがある閾値を超えると、実質的な明るさは増加しないことがわかる。系の明るさの限界が、マイクロレンズアレイを含めた CCD 撮像素子により決まるのである。

3.2.2 色収差

一般的な CCD および CMOS の単板撮像素子の場合、RGB 色フィルターを二次元的に配列させ、画像処理によりカラー画像を得ている。RGB に対応するそれぞれの画素が二次元的な誤差をもつ。したがって、原理的に色ずれが発生する。また、色分解の点でも特徴がある。CCD による色特性においては、RGB の分光感度波長域がディスクリットに分離しているために、各色の分光感度波長がオーバーラップしている銀塩システムに比較して、倍率色収差および色コマによる色にじみ、いわゆるレジストレーションエラーが目立ちやすい。したがって、光学設計的な留意

点としては、銀塩システム対応光学系よりも色収差の残存収差量を減らす必要がある。いわゆるアポクロマト色消しを主体に、軸外に関しても十分な色収差補正を行う必要がある。また、三次元的な色消し、ディフォーカス時の発色 (色つき) も考慮することが望ましい。

色収差を補正する手段は従来からよく知られているが、特に異常部分分散を有する光学ガラス (ED ガラス、蛍石等) を用い、アポクロマトや超色消しを行うことが特に有効である。従来は、長焦点レンズの軸上色収差を補正する目的で、正レンズに異常部分分散を有する光学ガラスを用いていた。しかし、CCD のフォーマットサイズが銀塩システムに比べ小型なものも多く、システム全体の焦点距離が短焦点側にシフトしている。したがって、問題になるのは、倍率色収差と色コマの良好な補正である。設計的な解決策としては、たとえば、レトロフォーカスや凹先行型ズームレンズタイプの場合、前群に異常部分分散を有する光学ガラスを用い、軸外光束に対する色収差を補正する方法がある。

また、シャープネスと色ずれの関係も理解しておかなければならない。MTF 再現性がよい光学系の場合、微小な倍率色収差や色コマ収差でも画像上に色ずれが確認できる。しかし、MTF 再現性の悪い光学系では、同量の色収差を発生させた場合でも、MTF 再現性のよい光学系と比較して色ずれが少なく見える。したがって、倍率色収差や色コマ収差による画像の色ずれは、基準線 (e 線) の収差量に対する相対的な色収差の発生量という見方が必要である。したがって、レンズのシャープネスを向上させると色収差の閾値も厳しくなるのである。

3.3 非球面を用いた設計法²⁻⁴⁾

3.3.1 大口径超広角レンズの設計

対物光学系の設計で最も困難なことは、著しい大画角化と同時に大口径化を行うことである。これは、ザイデル収差を余すところなく補正することにほかならない。難易度が非常に高いがゆえに、通常の射影方式では限界に近い包括角 (画角) $2\omega=118^\circ$ を超えて口径 $F 2.8$ に達する設計解はほとんど報告されていなかった。しかもこの仕様で、高い光学性能を有したままレンズ系を常用可能なほど小型化し、かつ十分な周辺光量を確保することは光学設計者なら多くの困難を有することは理解できるであろう。この困難を打開する効果的な設計方法として、非球面の活用が知られていた。しかし、従来の非球面レンズの設計法で十分な小型化を達成できたとはいえない。また、非球面自身の製造上の難易度が高く、採算性を考慮した場合、設計解は存在するものの、量産性の低いものであった。

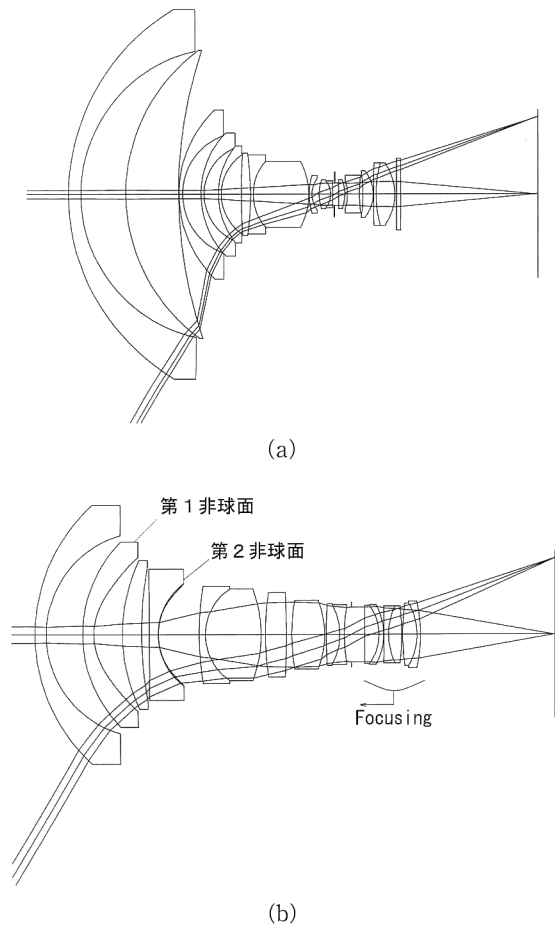


図1 球面系による設計解、(a) Ai Nikkor 13 mm $F5.6$ (球面系のみ)の設計解と非球面使用の設計解、(b) 13 mm $F2.8$ (該非球面使用の設計解)との比較例。

ここでは、現代の量産技術で十分生産できうる非球面レンズの設計解を事例として、非球面を使用した設計法について述べたいと思う。

図1の設計解(a)は従来の球面系による設計例であり、光学系の明るさは $F5.6$ と暗いものであった。また、図1の設計解(b)は以下に説明をする非球面を導入し設計を行った例である。光学系の明るさは $F2.8$ を確保し、絞り2段分の大口径化を達成している。また、設計解(a)(b)の大きさ、前玉径、レンズ枚数を比較すれば、著しくダウンサイジングしたことが理解できる。この非球面の設計方法を採用することで、画角 $2\omega=118^\circ$ を有する超広角レンズの大口径化と小型化を同時に達成できたのである。また、図2に設計解(a)の無限遠合焦時の収差図を示す。さらに、図3に設計解(b)の無限遠合焦時の収差図を示す。明らかに、収差補正のレベルが著しく向上していることがわかる。

次に、図1(b)に示す光学系の基本的な構造から説明する。この光学系は基本的に、発散性の凹群と収斂性の凸群で構成したいわゆるレトロフォーカスタイプである。発散性の凹群は負メニスカスレンズを先頭に、数枚の負レンズと正レンズによって構成し、ワイドコンバーターとしての機能を有している。また、この群では軸上、軸外収差ともに良好な補正を行うために、厚肉の接合レンズを配置し、特徴的な第1非球面レンズ、第2非球面レンズによって軸外収差を中心とした良好な収差補正が行われている。収斂

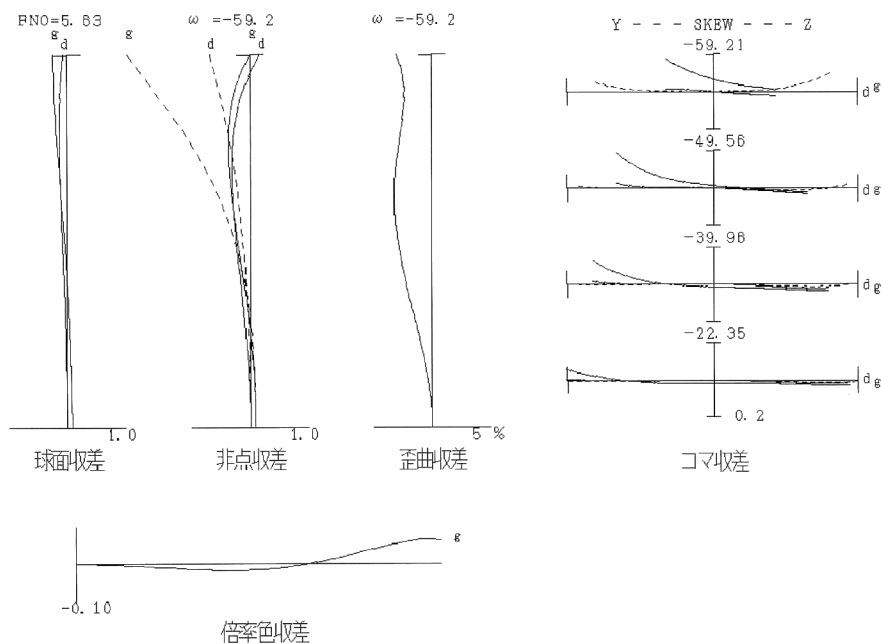


図2 Ai Nikkor 13 mm $F5.6$ の収差図。

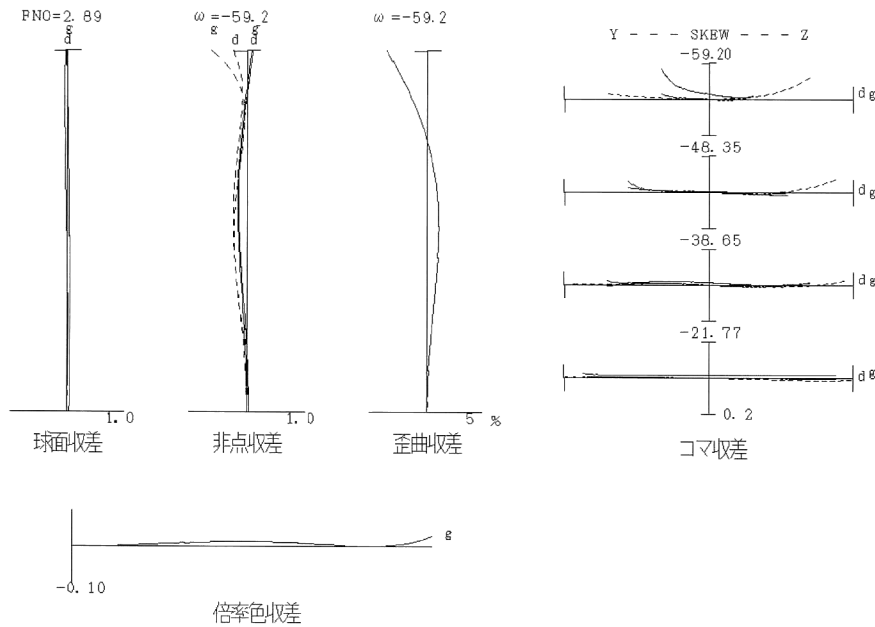


図3 非球面使用設計解 (13 mm F2.8) の収差図。

性の凸群は、光学系全体のマスターレンズ群としての機能をもっている。この後群は、基本的に凸凸凸のトリプレット構造を有している。また、近距離合焦は、この収斂性の凸群全体、または一部を移動することによって行う。

(非球面式)

$$X(y) = (y^2 \cdot C_0 / [1 + (1 - \kappa \cdot C_0^2 \cdot y^2)^{1/2}] + C_2 \cdot y^2 + C_3 \cdot |y|^3 + C_4 \cdot y^4 + C_6 \cdot y^6 + C_8 \cdot y^8 + C_{10} \cdot y^{10} + C_{12} \cdot y^{12} + \dots) \quad (1)$$

この光学系で大口径超広角レンズの解を得られたのは、製造が容易で適切な補正効果をもち備えた非球面レンズの設計方法の採用によるところが大きい。本設計解に採用した非球面の特徴的な設計方法は、前記非球面式で表現した非球面係数における奇数次項 (特に3次項)、高次項 (12次係数、14次係数等)、 κ (円錐定数) の緻密な使い方によるきめ細かな収差補正である。

ここで非球面、特に奇数次項の非球面係数と収差補正の関係若干解説する⁵⁾。一般に非球面は光学系が回転対称なので、偶数次項の級数の和で表現されている。しかしながら、本光学系では、この級数に奇数次項を導入し、収差補正により有効に活用したのである。非球面をメリジオナル面内で考えると、奇数次項では像高 Y の符号によってサグ量 X の値が異なり対称性が成立しないように思えるが、光軸を X 軸とする直行座標 (X, Y, Z) では、 $\rho = \sqrt{Y^2 + Z^2}$ で考えれば符号が一致して対称性が成立する。3次収差は、球面系においても、偶数次項の非球面係数を有

する非球面においても、屈折面が以下のように ρ の偶数次項であるために発生するので、屈折面が奇数次項を含むということは、いままでに存在しない2次収差、4次収差などの偶数次の収差が発生することになる。また、単一曲面でかつ非球面の場合を想定すると、球面収差はまさに非球面係数に対応する。したがって、奇数次項の非球面係数を導入することは、まさに球面系では得られない収差補正効果が得られることにほかならない。

$$X = C2\rho^2 + C4\rho^4 + C6\rho^6 + \dots \quad (2)$$

また、一般的には

$$X = \rho^2 \cdot 1/2r + C4\rho^4 + C6\rho^6 + \dots \quad (3)$$

これに3次項 $C3$ と5次項 $C5$ を加えると

$$X = \rho^2 \cdot 1/2r + C3\rho^3 + C4\rho^4 + C5\rho^5 + C6\rho^6 + \dots \quad (4)$$

となり、たとえば2次の球面収差を導出すると、以下のようになる。

$$\Delta Yk' = 3 \cdot (nk' \cdot uk')^{-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^k (ni' - ni) C3i \cdot hi^3 \right] R^2 \quad (5)$$

ただし、記号は n は屈折率、 u は光軸とのなす角、 $C3i$ は各面における非球面係数の3次項、 h は入射高、 R は入射瞳半径である。したがって、3次の球面収差が入射高の4乗に比例し瞳半径の3乗に比例するところ、2次の球面収

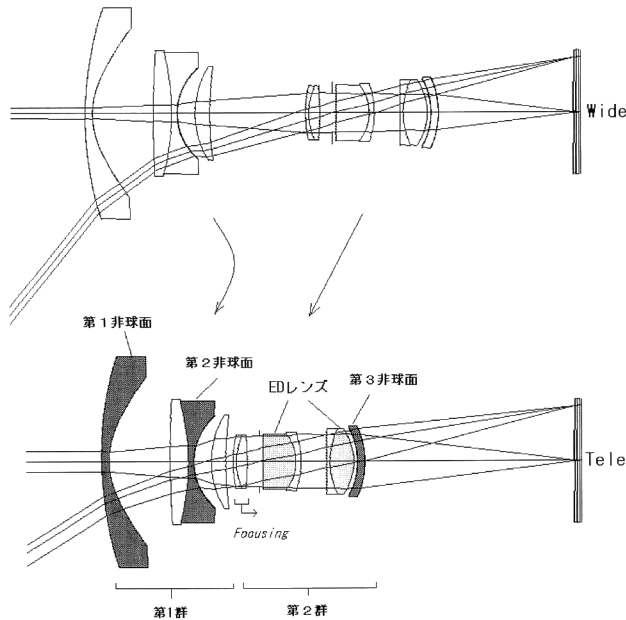


図4 DX-Nikkor 12-24 mm F4の光路図。

差は入射高の3乗に比例し瞳半径の2乗に比例する。したがって、いままで補正しきれなかった低次の収差を非球面係数の3次項を導入することにより補正でき、そのためさらなるスペックアップと高性能化が可能になる。当然、歪曲やコマ収差などの他の収差についても同様である。特に本設計解のように、大口径超広角レンズの発散性レンズ群中の比較的物体側に導入した場合、低次部分の歪曲の補正能力が高い。また、従来では歪曲の像高に対する傾き（微分値）が大きく、いわゆる陣笠形状をしていたが、3次項の導入により格段に改善される。また、コマ収差および球面収差も同様に、低次の収差がより補正できるため、たとえば口径を大きくすることによって生じる入射高の比較的低い部分の負の収差を補正し、最小錯乱円を小さくすることが可能になる。また、大口径化を有利にする意味において、軸上平行光線（Rand光線）に対する偏角 α が大きい面に導入するほど効果が大きいため、その効果を有効活用する意味においても、像面側に凹面を向けた面上記のような非球面を導入することが望ましい。

また、高次項と円錐定数 κ を適切に使用することにも大きな意味がある。まず、 κ を説明する。前記非球面式の第1項をべき級数展開し、 κ に関係する非球面項のみを示すと、以下ようになる。

$$x(y) = \frac{1}{2}(c_0 + 2c_2)y^2 - \frac{1}{8}(c_0^3\kappa + 8c_4)y^4 + \frac{1}{16}(c_0^5\kappa^2 + 16c_6)y^6 + \dots \quad (6)$$

$$\therefore c_0 = \frac{1}{r}$$

したがって、 κ は4次以降の非球面係数に影響を与えることがわかる。また、 κ を積極的に収差補正に使用することは、 κ ひとつの項で低次項から非常に高次の非球面係数まで使用することに近い効果が得られる。特に本設計解のように、低次部分（比較的光軸近傍）の曲率（＝パワー）を強め、高次部分（光軸から離れた最大有効径近傍部分）の曲率（＝パワー）を著しく弱めたい場合、 $\kappa = -1$ から $+1$ 未満、すなわち楕円面から双曲面を基準にした非球面が望ましい。この κ の適切な設定が、歪曲、下方コマ収差、非点収差の良好な補正を補っている。

また、12次以降の高次項は、本設計解のように著しい大画角を有する光学系を実現するために重要な効果をもたらす。本設計解の場合、軸外収差の補正効果の高いより物体側の面に非球面を導入している。したがって、それぞれの像高に対応する軸外光線に対する高さ \bar{h} が十分分離独立し、各光束幅が少ないため高次項のみを著しくコントロールすることによって、各像高に対する光束ごとに比較的独立した収差補正を行うことができる。したがって、従来良好に補正できなかった周辺光束に対する収差を、非球面係数の高次項を有効に使用して良好に補正することが可能になるのである。したがって、高次項の適切な設定は周辺性能改善に効果があり、ごく周辺の歪曲、下方コマ、非点収差を良好に保つことができる。

したがって、本設計解は、 h 、 \bar{h} を考慮した非球面の最適な設定位置と、通常の非球面係数偶数次項に加え、奇数次項、 κ 、高次項をコントロールし、良好な収差補正を可能にしたのである。

3.3.2 DX-Nikkor 12-24 mm F4

まず、図4の光路図を参照いただきたい。このレンズは少ない構成枚数で、かつ収差補正状態が良好で十分な周辺光量を有した超広角ズームレンズの設計解である。最大の特徴は、前項で述べた非球面設計法を用い、いままで製造が困難であった大型のガラスモールド凹レンズの製造を容易にし、かつ光学性能向上を実現したことである。

非球面レンズの製造方法には、大きく分けて以下の4種類があることはよく知られている。

- (1) 光学ガラスのダイレクトプレスにより非球面を成形する製造方式（ガラスモールド非球面レンズ）
- (2) 精研削や研磨により非球面製造する方式（精研削型非球面レンズ）
- (3) ガラス基板レンズの上に非球面をもつ樹脂を成形する製造する方式（複合型非球面レンズ）

(4) 樹脂材料をプレスにより非球面を成形する製造方式
(プラスチックモールド非球面レンズ)

著しい凹面に非球面をもった大型の非球面レンズは、精研削型非球面製造方法では困難である。また、ガラスモールド非球面製造方法では、凹面の最大内径における接線角に制約があった。しかしながら、ガラスモールド製造方法は量産性、コスト、製造精度にメリットが多く、光学設計的にも収差補正上のメリットがあった。

一方、超広角ズームの設計上困難なことは、周辺性能向上の一言に尽きる。特に重要な問題は、ペッツバルサムのコントロールに起因する非点収差と、像面湾曲の補正、さらには周辺光量確保に伴い増大するコマ収差の補正、倍率色収差の補正とディストーションのコントロールである。これらを有効に補正するには、各群の最適なパワー配置と、負の前群の厚肉化である。これらの問題を解決する手段として、この光学系に前項の非球面設計法を応用した。

この光学系の第1非球面の形状は、まず中心では強い凹のパワーをもたせることによって、ペッツバルサムの最適化とバックフォーカスやズーム可変間隔の確保に利用し、非球面の中間部分から周辺部分では著しく曲率が弱くなる形状に変位させる解を導き出した。特に、凹面側に周辺にいくに従って曲率が著しく弱まる非球面を設定したことに特徴がある。同様の効果を物体側の非球面で代用した場合、斜光線がより下がってしまい前玉径が著しく大型化する。また、製造が困難なほど極端に湾曲したレンズ形状になる。したがって、凹面側非球面のメリットが高い。そうすることによって、本来もっていた強い凹のパワーが緩和され、斜光線は緩やかに屈折される。それによって、下方コマ収差、ディストーションなどを抑えることができる。その結果、本設計解に示すように、非球面レンズの中心と周辺部分の厚肉差が比較的少ない形状を実現できた。この非球面設計法を活用することで、収差補正上も、製造上においても、最適な形状にすることが可能なのである。

ガラスモールド非球面の場合、比較的ガラスの中心と周

辺が等厚に近いほうが成形時の面精度は向上する。また、ガラスモールド非球面レンズの場合、数倍の厚肉差で量産の難易度が極端に上昇し、凹面側の接線角が 50° を超えると高精度な面形状を成形できなくなる。また、さらに接線角が増し、曲面が半球に近づくと、成形そのものが不可能になる。この製造条件からも、特に広角レンズの凹群に導入する非球面としては有効な方法である。また、第2非球面は、第1非球面により発生する高次収差やうねりを補正する効果をもたせた。この第1、第2非球面レンズを組み合わせることで、広角側から望遠側に至るまで、良好な軸上・軸外収差補正が可能になっている。

端的に言えば、前項で論じたように、本設計に用いた非球面の設計方法とは、高次項を含む非球面係数と κ などのパラメータを駆使し、性能向上と生産性の向上を共存させたものといえる。

現在、デジタル画像システムは急速に発展し、技術向上がなされている。特に、撮像素子や画像処理の技術革新が華々しい。大部分の研究者・開発者は、長い歴史をもつ銀塩を手本に開発を進めているであろう。しかし、筆者には、研究者や開発者が専門分野の研究に没頭するあまり、周辺技術に対する考察が不足しているように感じられることがある。われわれは、人間の目でよし悪しを判断する「映像・画像」という分野に属している。自分を含めた光学設計者、画像設計者が、専門分野のみならず、視覚工学、色彩工学、写真工学、心理学などの各分野の知識を吸収し、研究することの必要性を強く感じている。

文 献

- 1) 日本写真学会編：写真工学の基礎（コロナ社，1978）pp. 376-412.
- 2) 佐藤治夫：特開 2000-2837（1998）.
- 3) 佐藤治夫：特開 2001-159732（1999）.
- 4) 佐藤治夫：特開 2004-21223（2002）.
- 5) 中川治平：レンズ設計工学（東海大学出版会，1986）pp. 172-191.

（2004年4月6日受理）