

デジタルカメラ用撮像レンズの進展

飯塚 隆之・江口 勝

Progress in Imaging Lens for Digital Still Camera

Takashi IZUKA and Masaru EGUCHI

A number of digital cameras have been well received in the market. We described progress and latest trend in imaging lens for digital camera, single lens reflex type and compact type. In this paper, we focused on high performance, wide angle, high zoom ratio, miniaturization, cost reduction and so on. In addition, we mentioned coating technologies, lens materials and other peripheral technologies.

Key words: digital camera, optical design, zoom lens, aspherical lens, coating

民生用のデジタルカメラとして1995年にカシオからQV-10が発売されて以来、撮像素子の高精細化やパソコンの性能向上に後押しされて、わずか8年でデジタルカメラの出荷台数が銀塩カメラを上回り、カメラ市場の主戦場はデジタル一眼レフカメラに移っている。本報では、コンパクトデジタルカメラとデジタル一眼レフカメラ、それぞれの撮影光学系について解説する。

1. デジタル一眼レフカメラ用光学系

1.1 デジタル一眼レフカメラの普及とフォーマットサイズ

最初のデジタル一眼レフカメラは、1991年にニコンとコダックが共同開発したDSC-100に遡るが、一眼レフカメラにおける銀塩からデジタルへの急激な転換は、価格が20万円を下回るカメラが登場した2003年からであり、そこで使われてきた撮像素子の主役は、APS-Cとよばれるフォーマットであった。対角線長で135フィルムの約3分の2、面積比にすると約2分の1となるフォーマットサイズでの普及は、撮像素子の製造工程で使われる半導体露光装置の露光エリアに起因し、特殊な露光装置や分割露光が必要な135フィルムサイズや中判フィルムサイズに相当する撮像素子の製造は低価格化に不利なためである。

コスト面では有利な小型撮像素子であるが、撮像光学系に不利に働く要素もある。まず、イメージサイズが小さいということは、銀塩カメラと同じ画角を確保するには焦点距離の短いレンズを必要とする。その一方で、撮像素子を小型化しながらも、既存の交換レンズとの互換性を勘案して銀塩カメラと同じフランジバックを採用する場合、特に広角系のレンズでは焦点距離に比べて非常に長いバックフォーカスが必要になる。また、フォーマットサイズに比例して許容錯乱円も小さくなり、要求される解像度も高まる。それは、設計性能のみならず、レンズ加工の面精度や偏心公差にも高い精度が要求されることを意味する。

1.2 要求される性能と収差補正

デジタルカメラでは撮像素子の特性に起因して、光学系の設計にフィルム時代とは異なる配慮を必要とする。そのひとつが撮像素子の分光感度によるものである。銀塩フィルムに比べて撮像素子の分光感度特性は、短波長側、長波長側ともに広がっており、長波長側では赤外光カットフィルターでの抑制が色再現にとって重要である。短波長側の感度特性は400nmを超えて伸びており、h線近傍の残存色収差は輝度差の大きい境界部分に青紫のにじみを発生させる原因となりうる。また、カラーフィルターで各色を空間的に分離して配列している撮像素子では、倍率の色収

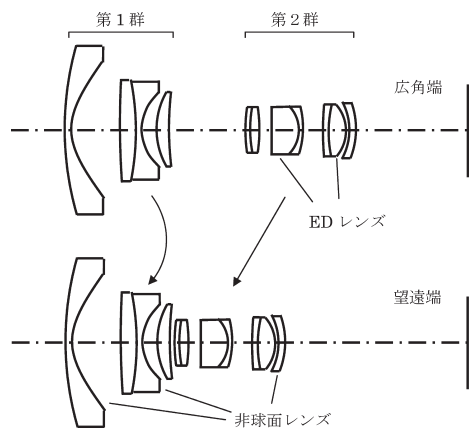


図1 特開 2004-21223 (12-24 mm).

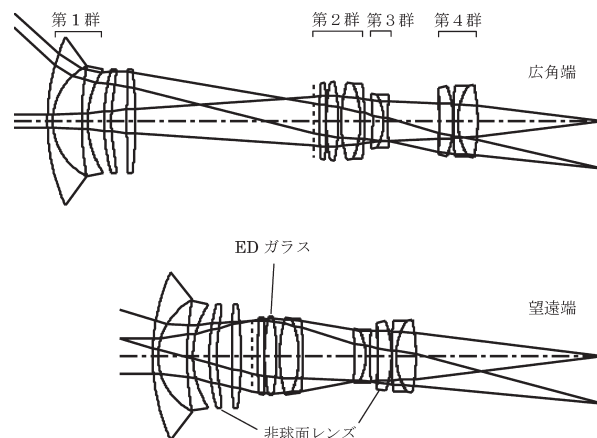


図2 特開 2004-354980 (16-45 mm).

差が目立ちやすい場合があるなど、色収差に対して銀塩よりも厳しい性能が求められる、望遠系に限らず異常低分散ガラスの採用も顕著である。

1.3 デジタル専用レンズの登場

デジタル一眼レフカメラ上市当初は、銀塩カメラ用の交換レンズが用いられていたが、前述の理由から既存のラインナップで不足していた広角レンズを中心に、小さいフォーマットサイズに特化したデジタル一眼レフカメラ専用の交換レンズが発売されている。その先陣を切ったのがニコンから2003年6月に発売された超広角ズームレンズのDX-Nikkor ED 12-24 mm F4である(図1)。ズーム比を2倍に抑えた負レンズ先行の2群ズームで、後群の各正レンズ成分は正負の接合をベースとして収差補正を図っており、製造誤差の軽減を行っている。前群に用いられた大型のガラスモールドレンズに象徴される非球面の適用を特徴とし、中心の強い負のパワーを周辺に向かって徐々に緩和する非球面は、超広角レンズの周辺性能向上に有効である。また、従来は焦点距離が長い望遠レンズに用いられていた異常低分散ガラスを後群に2枚採用して色収差の低減を図っている^{1,2)}。

デジタル一眼レフカメラの本格的な普及が始まると、広角側に対する不足感の解消だけにとどまらず、デジタル専用標準ズームの整備が望まれた。2003年12月にペンタックスから発売されたDA 16-45 mm F4 EDは135フィルム換算で24-70 mmに相当する広角側を重視した標準ズームとして開発された(図2)。負正負正の4群構成で、一般的には第2群と第3群の間に配置される絞りを第2群の物体側に置き、ズームとともに第2群と一体に移動させて射出瞳を像面から遠ざけるとともに、広角化による第1群のレンズ径増大を抑えている。また、多群構成では従前から行われていることだが、第2群と第4群をズーム

ング中に一体で移動させる構造とすることで偏心に起因する性能劣化を緩和している。周辺性能の確保には第1群と第4群に非球面を設け、特に第1群の非球面は広角側における非点収差と歪曲の補正に寄与している。また、このレンズも第2群に異常低分散ガラスを用いることでズーム中の色収差変動を抑えている³⁾。

1.4 標準ズームの変倍比拡大

負群先行タイプで広角側を意識したデジタル専用標準ズームは、変倍比が上がるにつれて正群先行の5群構成が主流となっていく。ニコンから発売されたDX Nikkor ED 18-70 mm F3.5-4.5は銀塩の28-105 mmに相当する正負正負正の5群構成である。第2群にハイブリッド非球面、第3群と第5群に3枚の異常低分散ガラスを採用している。キヤノンからは135フィルム換算で28-135 mmに相当するEF-S 17-85 mm F4-5.6 IS USMが発売されている。同じく正負正負正の5群構成で第4群の一部を手振れ補正のための防振群として、第5群にはガラスモールド非球面の正レンズを用いている(図3、図4)。

これらのような5成分ズームは、銀塩一眼レフカメラ用の標準ズームとして1990年代に多用されたタイプである。前述のニコンの18-70 mmに該当すると思われる特開2005-107262⁴⁾およびキヤノン17-85 mmに相当すると思われる特開2006-47348⁵⁾について、各群の焦点距離と広角側における倍率および入射高さを表1に示し、銀塩時代の28-105 mmおよび28-135 mmの例⁶⁾と比較した。特徴的な差異は、広角側において第4群と第5群の間をアフォーカルに近い状態としていた銀塩時代に対して、デジタル時代ではバックフォーカスを確保するために第4群からの射出を分散状態としている。また、第1群と第2群の合成パワーを負に大きくすることで第3群への入射高さを稼ぐこともデジタル専用レンズの傾向である。

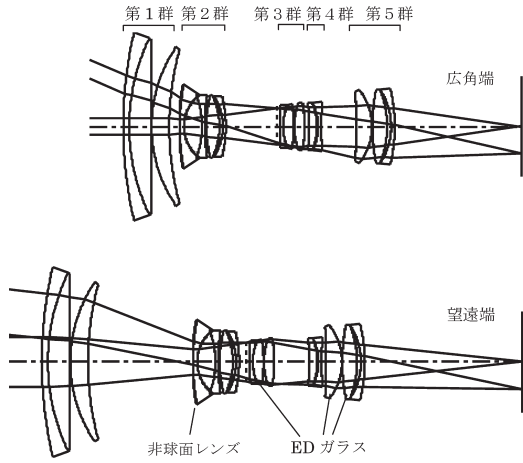


図3 特開 2005-107262 (18-70 mm).

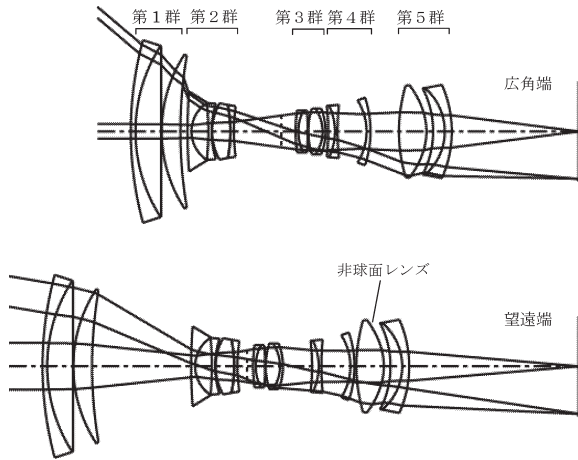


図4 特開 2006-47348 (17-85 mm).

表1 銀塩用レンズとデジタル専用レンズの比較 (4~5倍ズーム).

	銀塩用		デジタル専用		
	28-105	28-135	18-70	17-85	
各群の焦点距離	第1群	79.245	77.200	78.922	66.469
	第2群	-15.462	-14.733	-14.000	-11.200
	第3群	22.096	21.256	25.752	21.934
	第4群	-35.510	-36.989	-38.607	-27.918
	第5群	46.468	59.324	34.341	34.075
各群の倍率	第1群	0.000	0.000	0.000	0.000
	第2群	-0.290	-0.284	-0.258	-0.247
	第3群	-0.959	-0.862	-1.188	-0.999
	第4群	-31.539	10.689	-2.806	-3.126
	第5群	-0.042	0.144	-0.273	-0.343
各群の入射高	第1群	1.000	1.000	1.000	1.000
	第2群	0.899	0.907	0.877	0.882
	第3群	1.856	1.988	2.145	2.418
	第4群	1.709	1.850	2.222	2.511
	第5群	1.672	1.729	2.326	2.537

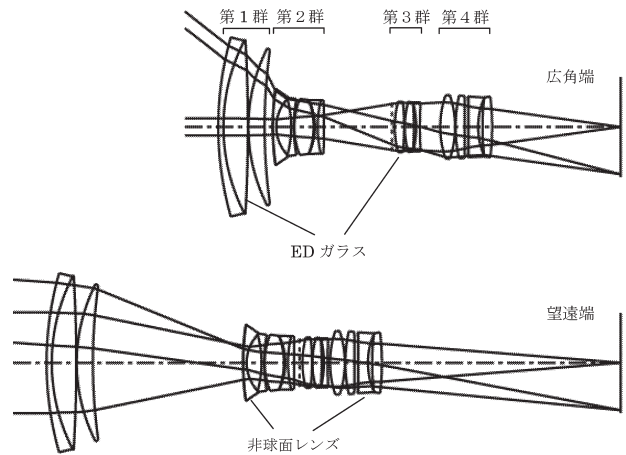


図5 特開 2006-259016 (18-200 mm).

1.5 高倍率ズーム

広角から望遠までを1本でカバーする28-200 mmや28-300 mmに代表される高倍率ズームは、銀塩時代から利便性の高さで多くの支持を受けてきた。

2005年春に相次いで発売されたタムロン AF 18-200 mm F3.5-6.3 XR Di II LDとシグマ AF 18-200 mm F3.5-6.3 DCは、銀塩の28-300 mmに相当する高倍率ズームで正負正正の4成分で構成されるレンズである(図5)。APS-Cデジタル対応の例としての特開2006-259016⁷⁾と、135フィルム対応の例として特開2003-241097⁸⁾の比較を表2に示す。デジタルへの短焦点化は第1群と第2群のパワーのスケールングをベースとしているとともに、絶対的な各群の位置関係を変えず、パワーに対する群間隔を相対的に広げることで第3群への入射高を上げて広角側のバックフォーカスを確保している。

中倍率ズームでは5群構成が主流であったのに対し、高

表2 銀塩用レンズとデジタル専用レンズの比較 (高倍率ズーム).

	銀塩用		デジタル専用		
	28-300 mm (特開 2003-241097)		18-200 mm (特開 2006-259016)		
	28 mm	300 mm	18 mm	200 mm	
各群の焦点距離	第1群	96.962	75.581		
	第2群	-15.076	-11.400		
	第3群	42.914	56.172		
	第4群	68.917	36.650		
各群の倍率	第1群	0.000	0.000	0.000	0.000
	第2群	-0.206	-0.865	-0.210	-0.980
	第3群	-25.448	5.213	3.142	2.016
	第4群	0.057	-0.662	-0.377	-1.279
各群の入射高	第1群	1.000	1.000	1.000	1.000
	第2群	0.943	0.366	0.899	0.335
	第3群	2.296	0.428	2.646	0.433
	第4群	2.207	0.435	2.713	0.447

表3 コンパクトデジタルカメラ用撮像素子。

	大きさ	画素数	画素ピッチ	ナイキスト周波数
1/2.5型 CCD	5.7×4.3 mm	500万	2.2 μm	227 lp/mm
		800万	1.75 μm	286 lp/mm
1/1.8型 CCD	7.3×5.5 mm	800万	2.2 μm	227 lp/mm
		1200万	1.85 μm	270 lp/mm
APS-C サイズ	24×16 mm	1200万	5.5 μm	91 lp/mm

倍率ズームは4群構成で達成している。中倍率の標準ズームでは第3群と第5群を一体化して移動しているが、この方式は広角側の全長短縮という観点で高倍率化には不利となるため、第3・第5群に独立の動きを与えながら第4群の役割を分担させたものと考えられる。

さらには、タムロンからズーム比13を超えるAF 18-250 mm F3.5-6.3 Di IIが発売され、今後のズーム比拡大を期待させている。

2. デジタルコンパクトカメラ用光学系

2.1 コンパクトデジタルカメラの開発動向

拡大しているデジタル一眼レフカメラ市場に対し、頭打ちになるかと思われたコンパクトタイプのデジタルカメラ市場だが、手振れ補正や顔認識などの新たな機能で買い換え需要を創出し、2007年度には世界年間生産台数が遂に1億台を超えると予想されている。しかし、市場の成熟化に伴いカメラの低価格化が進み、光学系の低コスト化が重要な課題となっている。また、広角化や高変倍化など、光学系の付加価値を高めたカメラが増えており注目される。

2.2 撮像素子の高画素化と光学系への要求

コンパクトデジタルカメラの撮像素子は、小型化重視の1/2.5型や画素数重視の1/1.8型など比較的小さいものが使われることが多いが、近年では画素の微細化が進み、最も細かいものは画素ピッチ1.75 μm程度となっている。比較的小さい1/2.5型で800万画素、1/1.8型では1200万画素を有し、画素数で比較すれば大きなフォーマットサイズをもつデジタル一眼レフと同等である(表3)。そのため高解像度のレンズを必要とし、光学系の大型化につながりやすい。

さらに、光学系にはテレセントリック性、つまり撮像素子に垂直入射することが求められる。撮像素子に斜め方向から入射する光が、画素の立体的構造のため蹴られてしまう、あるいは撮像素子直近のカラーフィルター間のクロストークが起るためである。これらの理由により、135フィルムと比べれば圧倒的に小さな撮像素子を使うにもか

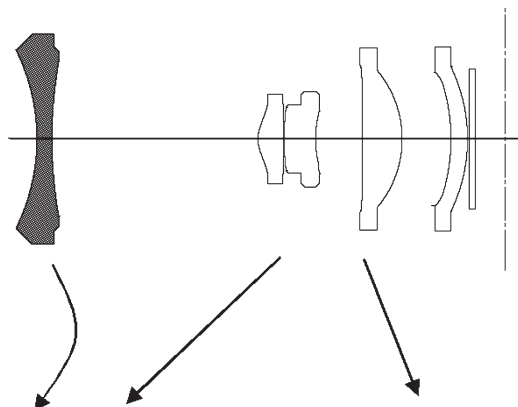


図6 構成枚数の少ない標準ズームの例。

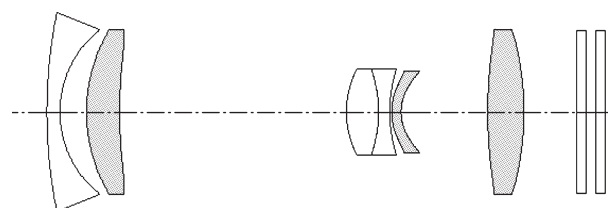


図7 プラスチックレンズを多用した設計例。

わらず、その光学系の厚さは2分の1~3分の1程度にとどまる。

2.3 標準ズームの低価格化

光学系の低価格化としては、レンズ枚数を少なくする方法がある。例えば、標準的な3倍ズームレンズに利用される光学系では、第1群は2~3枚、第2群は3~4枚程度が一般的な構成である。これはズームレンズが各レンズ群を光軸方向に動かして変倍しているため、レンズ群ごとに正レンズと負レンズを組み合わせることで色収差などの諸収差を補正しておく必要があるためである。一方、図6は第1群を1枚で構成した例⁹⁾であり、超低分散のガラスを用いた両面非球面レンズで構成することで第1群内の収差を軽減しており、ズーム全域の色収差が補正できていると思われる。

光学系を低価格にするもうひとつの方法は、プラスチック非球面レンズを用いることである。図7は標準3倍ズームレンズの設計例であるが、6枚レンズ構成のうちで3枚のプラスチック非球面レンズを用いており、大幅な低価格化を図っている。

プラスチックレンズを用いる場合、屈折率と線膨張の温度依存性によるピント変化や光学性能変化が発生しないよう設計的な配慮が必要となる。 N 枚で構成される光学系において、第 i レンズの焦点距離を f_i 、屈折率を n_i 、第 i レンズから像面までの結像倍率を m_i 、レンズ材料の屈折

表4 1°C温度変化によるピント変化。

		A	B	ピント変化
L1	Glass	0.00000	-4.498	-0.00001
L2	Plastic	0.00029	2.113	0.00061
L3	Glass	0.00000	24.804	0.00005
L4	Glass	0.00001	-8.036	-0.00005
L5	Plastic	0.00029	-2.074	-0.00059
L6	Plastic	0.00027	1.465	0.00040
Σ(L1~L6)				0.00039

率変化を dn_i/dt 、線膨張係数を α_i とするとき、ピント変化量 ΔP は次式で表される。

$$\Delta P = \sum \{ (1/(1-n_i) \cdot dn_i/dt + \alpha_i) \times f_i \times (m_{i+1} - m_i)^2 \} \quad (1)$$

レンズ構成を物体側から L1, L2, ..., L6 とすると、L1/L3/L4 はガラス球面レンズであり、L2/L5/L6 はプラスチックレンズである。このレンズ系で式(1)を計算してみると、表4のようになる。ただし、 $A_i = 1/(1-n_i) \cdot dn_i/dt + \alpha_i$ 、 $B_i = f_i \times (m_{i+1} - m_i)^2$ 。A は材料固有の値であり、ガラスに比べてプラスチックは50倍ほど大きい。B は各レンズのピント変化への影響度を示しており、L3 が24.804 と最も大きい。この設計例では B の値が小さい L2/L5/L6 にプラスチックレンズを用いているため、各レンズで発生する温度変化によるピント変化は小さく、L1~L6 合計でも1°C 当たり $0.39 \mu\text{m}$ と非常に小さくなっている。ここで使用した各係数は、ガラスレンズ： $dn/dt = 1.7 \sim 4.3 \times 10^{-6}$ (°C)、線膨張係数 $= 6.2 \sim 8.7 \times 10^{-6}$ (°C)、プラスチックレンズ： $dn/dt = 1.2 \sim 1.4 \times 10^{-4}$ (°C)、線膨張係数 $= 5.5 \sim 7.5 \times 10^{-5}$ (°C) である。

2.4 高倍率ズームの小型化

標準的な3倍程度のズームレンズでは、ズームレンズの小型化技術として、非撮影時にレンズ群間隔を縮める沈胴方式、光軸方向に沈胴収納するだけでなく、レンズ群の一部を光軸上から退避させて収納する方式、プリズムなどで光路を折り曲げてカメラ奥行き方向を薄くする方法(屈曲式)などが採用されていた。近年は3倍ズームレンズだ

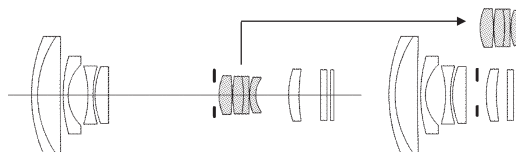


図8 退避式5倍ズームレンズ。

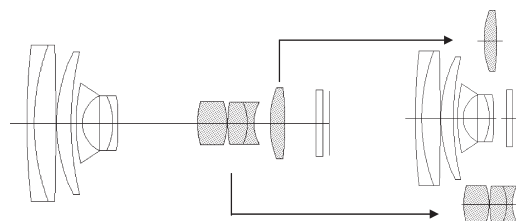


図9 退避式7倍ズームレンズ(リコーホームページ掲載のレンズ図より推察)。

けではなく高倍率ズームにも応用されている。図8は5倍ズームで1つの群を退避したもの、図9は7倍ズームで2つの群を退避した例である。

また、図10は5倍ズーム¹⁰⁾、図11は10倍ズーム¹¹⁾で屈曲式を適用した例である。図10の光学系では光路を二度折り曲げることにより、カメラボディ内での光学系配置の自由度を高めることが可能となる。図11は屈曲式の高倍率ズームである。第1群に正レンズを2枚用いて正の屈折力を増やすことで、レンズ全長を抑え高変倍化を達成している。また、非撮影時には第1群を沈胴収納してカメラの薄型化を図っている。両光学系ともに比較的高倍率ズームであり、標準ズームと比べるとレンズ全長は長くなってしまいが、光路を折り曲げることで、カメラの薄型化を可能としている。

撮像素子が小型であることを利用して、さらに高スペックなズームレンズも開発されており、図12は広角域 $f = 27 \text{ mm}$ (135 フィルム換算焦点距離) からの18倍ズームレンズである。非球面レンズや異常分散ガラス(ED)を多用して高性能化を図っている¹²⁾。

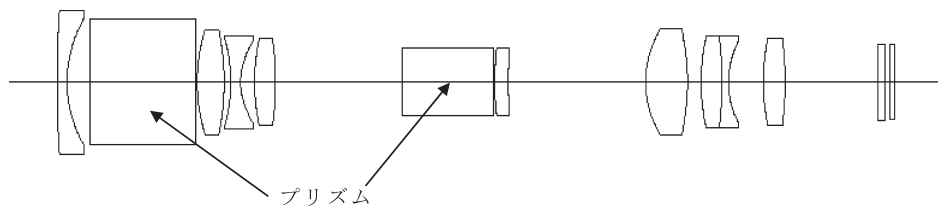


図10 2回屈曲式。

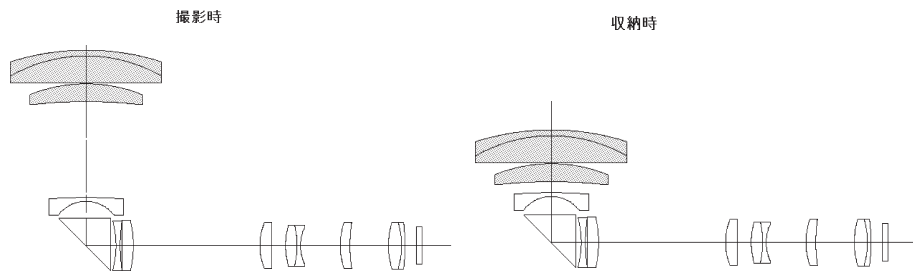


図11 屈曲式と沈胴式を併用した例.

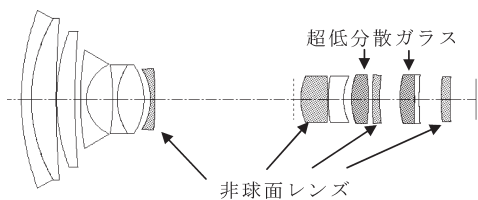


図12 広角高変倍ズームの例.

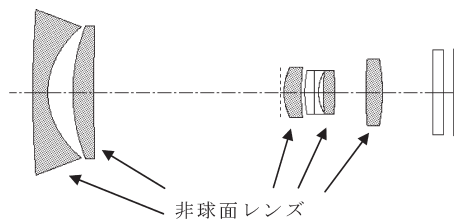


図13 ガラスモールドレンズを多用した例 (パナソニックホームページ掲載のレンズ図より推察).

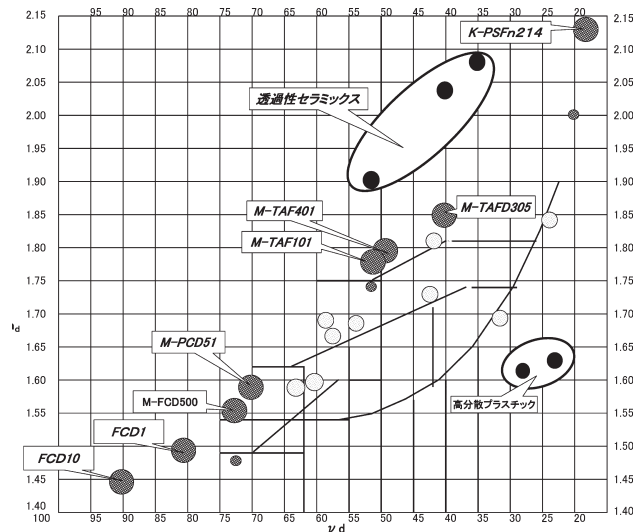


図14 新しいレンズ材料.

3. 周辺技術の開発動向

3.1 非球面・新材料による設計自由度の拡大

ガラスモールドレンズは小径であれば比較的 low コストで高精度な非球面レンズが得られるため、コンパクトタイプのデジタルカメラに多用されている (図13)。1つの撮影光学系に2枚から3枚の非球面レンズが使用されるのが一般的であるが、なかには7枚構成中5枚にガラスモールド非球面レンズを用いたカメラも発売されている。枚数だけでなくモールド用硝材の種類も拡大しており、高屈折率低分散ガラスや高屈折率高分散ガラス¹³⁾、低屈折率異常分散ガラスなどが新しく開発され、光学系の小型化と高性能化に寄与している。

また、高屈折率低分散の透過性セラミックス¹⁴⁾や高分散プラスチックの高屈折率化も進んできている (図14)。これらの材料は通常のガラスとは異なる領域の光学定数を有しており、光学系の小型化・高性能化に有効である。今後、材料開発が進むことと、これらの新材料の利点を最大限利用した光学設計解が出てくるのが期待できる。

3.2 デジタル時代のコーティング

デジタルカメラにとってレンズの反射防止は、フィルムカメラ以上に重要な課題である。その理由は、撮像素子表面の反射率が高いこと、さらに、カバーガラス、赤外カットフィルター、ローパスフィルターなど、フィルムカメラにはなかった反射要因が多数存在することから、各レンズ表面の再反射でゴーストやフレアが発生しやすいためである。銀塩用に開発した交換レンズでも、デジタルカメラへの装着を勘案してレンズのコーティングを見直した製品も多々見受けられる。

コーティングに要求される特性向上として反射率の低減、波長依存性の軽減、角度依存性の緩和があげられる。レンズの表面反射は媒質境界面の屈折率差に起因し、多層膜を利用した反射低減処理を施すのが一般的である。低屈折率の膜と高屈折率の膜を交互に重ね、干渉作用を利用して反射光を相殺する。図15に、高屈折材の屈折率を高めることで反射率を下げた例を示した。ともに7層であるが、550 nm 近辺で比較すると反射率を3分の1程度に下げられる。また、中屈折率材を加えて特性を向上させる方

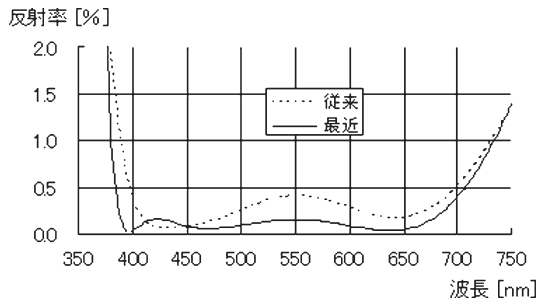


図 15 7層反射防止膜の分光透過率。

法¹⁵⁾もとられる。

基板材料から空気まで傾斜的に屈折率が変化するような多層膜が実現できれば、波長や入射角に依存しない反射率ゼロの理想的な反射防止膜が得られるが、従来の成膜法が適用できる屈折率は、最も低い材料でも 1.37 以上である。さらに低い屈折率の膜が形成できれば、反射防止性能を飛躍的に改善することができる。この考え方を利用したのが、ニコンのナノクリスタルコートである。ゾルゲル法という液相プロセスによって形成される、ナノオーダーの空孔を有する MgF₂ ナノ粒子膜である¹⁶⁾。

一方、反射率・透過率といった光学特性以外の機能を求めた例もある。ペンタックスが 2005 年 12 月に発売した DA FISH-EYE 10-17 mm F3.5-4.5 ED (IF) は、第 1 レンズに防汚性を付与した反射防止膜 SP (Super Protect) コートを採用している¹⁷⁾。この反射防止膜は、通常が多層膜表面に特殊なフッ素樹脂膜を真空蒸着したもので、このフッ素樹脂膜の撥水・撥油効果によって汚れが拭き取りやすいという特徴があり、カメラボディ撮像素子部のゴミ付着対策にも採用されている (図 16)。

3.3 画像処理前提設計

デジタルカメラというシステムを生かして、光学系で補正しきれない収差を画像処理で補正する技術が進んでいる。ディストーションや周辺減光をカメラで撮影後に後処理で補正するソフトウェアは従来から存在していたが、カメラにこの機能をもたせ実時間で補正する機種も発売されている。一般にズームレンズの広角側では樽型に、望遠側では糸巻き型のディストーションが発生する傾向がある。広角を含むズームレンズでは特に、広角側の樽型ディストーションを小さくすることが収差補正上難しい点であった。逆にディストーション補正を後の画像処理に任せれば、他の収差補正が容易になる。周辺減光補正や色収差補正にも同様のことがいえる。これを利用することにより、レンズ系の構成枚数削減や小型化の可能性が出てくる。

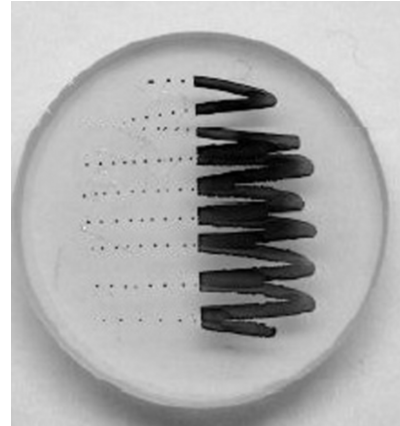


図 16 インク付着性テスト (左: SP コーティング, 右: 通常反射防止膜)。

4. デジタルカメラ用レンズの今後

デジタルカメラは、パソコンモニター上での極端な拡大というデジタル特有の閲覧形態から、銀塩よりも過剰に厳しい評価を受けている。実用上の必要性は別として、レンズにも今後のカメラの画素数増加に連動した高解像化要求が予想される。

デジタル一眼レフ用では APS-C サイズ用の交換レンズに着目したが、遠近感やぼけ感が 135 フィルムと同様に表現できるという点で、135 フィルムサイズ相当のフルサイズとよばれる撮像素子を採用したカメラの需要がある。近年では民生用カメラに採用できる程度に価格が低下しており、今後はフルサイズデジタル用レンズの需要も見込まれる。また、広角側の拡充から高変倍への流れを紹介したが、目的に応じてレンズを交換するのが一眼レフカメラを使う楽しみでもある。利便性を越えた魅力あるレンズの登場にも期待したい。

コンパクトデジタルカメラの光学系については、低価格を追求した普及タイプのズームレンズと、高付加価値を追求したものの二極化が進むと思われる。また、光学系の回折限界から、小型撮像素子では現状以上の高画素化は難しくなる。将来、さらなる高画素化・高画質化を達成するために撮像素子の大型化も進みそうである。実際に、APS-C サイズの撮像素子をもつコンパクトデジタルカメラも発表されている。フォーマットサイズが大きくなった場合、収差補正の難易度が高まり、構成枚数が増え、レンズ系が大型化する恐れがある。レンズ系の小型化技術に加えて、撮像素子の改良により光線入射角条件を緩和するなど、多面的な技術開発が必要となろう。また、画像処理を前提にした利点を最大限に利用したズームレンズの開発も進むと考えられる。

文 献

- 1) 佐藤治夫：“デジタル一眼レフカメラ用交換レンズの光学設計”，光学，**33** (2004) 537-542.
- 2) 佐藤治夫：特開 2004-21223.
- 3) 小織雅和：特開 2004-354980.
- 4) 早川 聡：特開 2005-107262.
- 5) 藤本 誠：特開 2006-47348.
- 6) 田中常文，小川秀樹，小林正史：特開平 5-119260.
- 7) 横井規和，草川徹介：特開 2006-259016.
- 8) 山田康晴：特開 2003-241097.
- 9) 金高文和：特開 2007-156385.
- 10) 西村和也：特開 2007-248951.
- 11) 吉次慶記，美藤恭一：特開 2007-212963.
- 12) 中谷 通，寺田 守：特開 2007-3554.
- 13) 沢登成人：“モールドレンズ用光学ガラス”，光設計研究グループ機関誌，No. 30 (2004) 15-21.
- 14) 田中伸彦，金高祐仁，呉竹悟志：“光学用透光性セラミックス (ルミセラ®)”，光設計研究グループ機関誌，No. 37 (2007) 13-18.
- 15) 新坂俊輔：特開平 10-20102.
- 16) 村田 剛，石沢 均，元山いづみ，田中 彰：“フッ化物ナノ粒子膜による高性能光学薄膜の作製”，Optics Japan 2004 講演予稿集 (2004) pp. 32-33.
- 17) 平川 純：“デジタル用魚眼ズームレンズの開発”，光設計研究グループ機関誌，No. 35 (2006) 9-14.

(2008年1月10日受理)