



カメラレンズ設計の転換点たち

元光学機器メーカー勤務
芝山敦史 SHIBAYAMA, Atsushi

私は光学機器メーカーに38年勤務し、その全ての期間、カメラレンズの光学設計とその周辺業務に従事してきた。その間、カメラレンズの光学設計分野で劇的な変化は起きたか/起こせたかと自問してみる。

同じ時期、半導体露光装置では露光光源が次々と短波長化され、液浸化によるNA（開口数）アップがなされ、物理的な限界に挑み続ける技術革新がなされていた。顕微鏡では手品のような方法で回折限界を越える超解像を実現し、そのうちのひとつである超解像蛍光顕微鏡は2014年のノーベル化学賞に輝いた。

カメラレンズはどうか、フィルムが固体撮像素子に変わり、印画紙がプリンターやディスプレイ装置に取って代わったものの、レンズの機能や原理に変化はなく、劇的な変化は起きなかったと感じる。しかし、劇的な変化はなかったものの、いくつか設計が大きく変わった節目があったと感じている。私にとって印象的だったできごとについて年代順に列挙し、それらに関連する技術・製品について振り返ってみたい。

- 1985年～ α ショック 一眼レフのAF化とレンズのIF・RF化
- 1992年 最小構成のズームレンズの実現
- 2000年台半ば コンパクトデジタルカメラのズーム比拡大
- 2000年台後半 超低反射コートの開発ラッシュ
- 2000年台後半 超広角ズームレンズの高性能化
- 2010年台 ミラーレス一眼 フィルムの軛からの解放

① α ショック 一眼レフのAF化とレンズのIF・RF化

私が入社する前年の1985年、「 α ショック」という言葉を生んだミノルタ α -7000の発売を機に、一眼レフカメラのオートフォーカス（AF）化が一気に進んだ。交換レンズの設計では、フォーカス群を軽くすることが必須となり、まず単焦点レンズでインナーフォーカス（IF）、リアフォーカス（RF）化が進んだ。ズームレンズでは、1群繰り出しのフォーカシングが一般的であったが、特に凸先行の高倍率ズームレンズではフォーカス群の重さのほか、最短撮影距離が遠いという問題もあった。これらの問題解決のためズームレンズでもIF・RF化の取り組みがなされた。先駆けたのはMINOLTA AF ZOOM 28-135mm F4-4.5（1985年発売）、フォーカス群の結像倍率をズーミングに伴って巧妙に変化するように設計し、近距離合焦時のズーミング操作でのピント変化を抑制した¹⁾。その後の高倍率ズームレンズではこれとは異なる方式となるが、合焦用移動カムと変倍補正用移動カムの合成でズーミング時のフォーカス移動量の変化を補償するタイプ（Ai AF Zoom Nikkor 35-105mm F3.5-4.5D(IF）（1995年発売）など²⁾が主流となり各社から発売されたが、ミノルタの28-135が開発の起爆剤となったのだろう。ズームレンズのIF化の別のアプローチとしては凹先行の広角ズームの第2群を略アフォーカルとなる間隔で分割した前群でフォーカシングをおこなうタイプ（Ai AF Zoom Nikkor 20-35mm

F2.8D(IF) (1993年発売) など) も開発された³⁾。このタイプは複雑なカムを用いることなく近距離合焦時のズーミングに伴うピント変化を抑制できた。

これまでに述べたズームレンズのフォーカス方式はズーミング操作時のピント変化が実用上起きないので、電源が入っていない一眼レフカメラの光学ファインダーでもピントが維持される。一方、ミラーレスカメラでは電源が入っていないと EVF や背面液晶の画像が表示されないため、非通電時のピント変動は問題とならない。このため、最近のミラーレスカメラ用ズームレンズでは、非線形フォーカスカムを使う代わりにズーム操作に連動して電氣的にフォーカス位置を補正する電子カム方式が主流になっている。

② 最小構成のズームレンズの実現

1992年、ミノルタから APEX90 というフィルムコンパクトカメラが発売された。レンズは 38-90mm, F/3.5-7.7 のズームレンズで、ズーム比、写りとも平凡だが、2群ズームのレンズ構成が前群・後群ともに2枚構成という画期的なもので、球面レンズを組み合わせて収差補正するのではなく、非球面で収差を補正するという思想で設計された⁴⁾。特筆すべきは、このレンズの偏心敏感度だ。それまでの常識では「量産性なし」という判断がなされるほど厳しいものだったが、これが量産できているのであれば、自社でも同じ精度で作れるはずとの思いで製造技術・調整技術を開発した。とはいえ敏感度の高い設計は製造部門には受けが悪く、挑戦的な設計と量産性重視の設計との間を常に揺れていた。

敏感度の高い挑戦的な設計をきっかけに、量産シミュレーション技術も大きく進歩した^{5,6)}。モンテカルロシミュレーションに調整工程のシミュレーションを組み合わせたプロセスシミュレーションで量産性・良品率を推定することで、設計部門・製造部門の溝を埋めた。ともかく、APEX90 は設計思想の革新だけでなく、製造技術・生産技術・量産シミュレーション技術の向上に大きな影響を与えた製品であったことに間違いはない。

③ コンパクトデジタルカメラのズーム比拡大

2000年前後、各社からコンパクトデジタルカメラが多数発売され、市場は活況を呈していた。2000年台前半はズーム比3倍前後が標準的であったが、2000年台後半から7~10倍ズームがあたりまえとなった。一気にズーム比が拡大したのは画像処理による歪曲収差補正のおかげである^{7,8)}。10%を超えるような歪曲収差を画像処理で補正することで、光学設計における収差補正の目標が大きく転換した。結果、沈胴レンズの薄型カメラボディのモデルで30~40倍、レンズが大きなブリッジタイプのモデルで100倍以上のズーム比が実現した。

デジタルならではの画像処理収差補正の技術は、歪曲収差だけでなく、倍率色収差補正や周辺光量低下の補正にも使われ、最近では動画時のブリージング補正や、手振れに伴うパースペクティブ変化の補正にも使われている。もはやカメラの機能として欠かせないものとなっている。

④ 超低反射コートの開発ラッシュ

2000年台は一眼レフカメラがフィルムからデジタルへ移行した時期でもある。デジタル化に伴い顕在化した問題の一つがゴーストの増加だ。デジタルカメラは撮像面付近にローパスフィルター、IRカットフィルター、撮像素子の保護ガラスなどの反射部材が多いだけでなく、撮像面からの反射回折によるドット状のゴーストも発生し、フィルムカメラよりもゴーストが目立ちやすくなった⁹⁾。そのような中で、2005年にニコンよりナノクリスタルコートを用いたレンズ (AF-S VR Nikkor 300mm F/2.8G IF-ED)¹⁰⁾ が、2008年にキヤノンより SWC (Subwavelength Structure Coating) を用いたレンズ (EF24mmF1.4L II USM)¹¹⁾ が、2009年にペンタックス (HOYA) よりエアロ・ブライツ・コーティングを用いたレンズ (smc PENTAX-DA☆ 55mmF1.4 SDM)¹²⁾ がそれぞれ発売され、ゴースト低減を競った。

これらの超低反射コートは材質・製造方法は各社で異なるものの、いずれも最上層に疎な構造の物

質を配置して実効屈折率を下げて空気界面との屈折率差を低減し、従来の蒸着コートに比べて反射率を大幅に低減した。その一方で、製造コストが高く、適用箇所制約も多いため、1本のレンズに多数面適用されることはなかった。このため、ゴーストを十分改善するには、通常が多層膜コートの品質向上や、より現実に近いゴーストの色味・強度のシミュレーション技術開発、ゴーストが発生しにくい光学設計技術など、総合的なゴースト抑制・解析技術の向上が必要であった。

とはいえ、超低反射コートの出現を契機にゴースト低減を謳ったことで、従来の蒸着コート・スパッタコートの品質改善も進み、ゴーストシミュレーション技術、ゴースト低減設計技術の進化と合わせてゴースト性能が大幅に向上した。

⑤ 超広角ズームレンズの高性能化

2007年、ニコンから AF-S Nikkor 14-24mm F2.8 G ED という超広角ズームレンズが発売された。このレンズは前群に大径の非球面レンズ2枚、後群にも非球面レンズ1枚を使い、非常に良好に収差を補正し、当時の単焦点超広角レンズをはるかに上回る結像性能を実現した。そのころの超広角レンズにはサジタルコマフレアがつきものだったが、このレンズは常識破りの結像性能で、一部で「神レンズ」と呼ばれるほどだった。結像性能の向上は光学設計技術、大径ガラスモールド非球面レンズの量産技術、調整を含めた製造技術の賜物であるが、「超広角レンズの性能はこの程度」という思い込みを捨て、プロ用レンズとして妥協のない設計性能・品質基準を求めた結果だと感じている。このレンズの発売後、各社の超広角ズームレンズの結像性能のレベルが格段に上がった。超広角レンズの結像性能の常識を変えたレンズであろう。

⑥ ミラーレス一眼カメラ フィルムの軛からの解放

2000年台前半頃からフィルム一眼レフカメラと同じマウントのデジタル一眼レフカメラが発売されていたが、交換レンズはフィルムカメラと共通であったため、レンズの分光透過率を示す色特性は ISO/CCI の規格¹³⁾を満たす必要があった。しかし、結像性能向上のためにレンズ枚数を増やしたり、同じく結像性能向上のために新開発の高屈折率ガラスを使ったりすると、短波長の透過率が低下して ISO/CCI の推奨規格から外れるといった問題があり、設計制約となっていた。

一方、2010年頃から出現したミラーレス一眼カメラでは、フィルムカメラ特有の色特性の制約がなくなり、レンズ枚数、ガラス材料の自由度が格段にあがった。また、画素数の増大とともにレンズに要求される結像性能も高くなり、一眼レフカメラの時代には 50mm F1.2 の標準レンズ (AI Nikkor 50mm f/1.2S) が 6群7枚構成だったが、ミラーレス一眼カメラ用 (NIKKOR Z 50mm f/1.2 S)¹⁴⁾では実に 15群17枚になり、大きさ、結像性能とも段違いとなっている。

フィルムカメラの色特性の制約からの解放がブレイクスルーとなり、各社ともミラーレス一眼用レンズの結像性能向上が著しい。

以上、私感であるが光学設計・シミュレーションを中心に節目となった技術・製品を挙げた。

蛇足であるが、私の設計経験にはないスマホレンズにも注目したい。ごく短い全長の中に複数のプラスチックレンズを詰め込んでおり、ほぼ全ての面が非球面で、凸レンズとも凹レンズともつかない形状のレンズもある。ペッツバール和による像面湾曲のコントロールや、色消しの定石が通用するのかわからないのか見当がつかない。光学設計が変わった節目の一つなのかもしれない。スマホレンズの光学設計はカメラレンズに比べ論文や学術講演会での発表が少ないが、どなたかスマホレンズの設計について解説してほしいものである。

参考文献

- 1) 得丸祥：“最近の撮影用ズームレンズ” 光学 第18号 第8巻 (1987)
- 2) 稲留清隆, 中辻雅裕：“ズームレンズ系”, 公開特許公報 特開平 4-293008 (1992)
- 3) 辰野亘, 中辻雅裕：“ズームレンズ”, 公開特許公報 特開平 5-173070 (1993)
- 4) 岡田尚士：“非球面を多用した4枚構成ズームレンズ設計技術” 日本写真学会誌, 56巻 5号 (1993)
- 5) 佐々木豊春, 新海雅彦, 東山孝一郎, 田中文基, 岸浪健史：“鏡筒光学製品における統計的公差設計システムの開発”, 精密工学会誌 Vol.64, No.7 (1998)
- 6) 佐々木豊春, 新海雅彦, 東山孝一郎, 田中文基, 岸浪健史：“鏡筒光学製品における統計的公差設計システムの開発 (第2報)”, 精密工学会誌 Vol.65, No.2 (1999)
- 7) 関海克, 青木伸, 江尻公一：“画像処理による歪曲収差補正とパノラマ画像” リコーテクニカルレポート, No.23 (1997)
- 8) 関海克, 白石賢二, 渡辺一光, 福岡宏樹, 大橋和泰：“デジタルカメラにおける画像補正技術”, リコーテクニカルレポート, No.31 (2005)
- 9) 松岡祥平, 飯塚隆之：“撮像素子による反射回折ゴースト”, 第34回光学シンポジウム予稿集 (2009)
- 10) 村田剛, 石沢均, 元山いづみ, 田中彰：“超低屈折率を有するフッ化物ナノ粒子層の導入による反射防止膜の高性能化”, 第34回光学シンポジウム予稿集 (2009)
- 11) 奥野丈晴：“サブ波長構造による高性能反射防止膜“SWC”の開発”, 第34回光学シンポジウム予稿集 (2009)
- 12) 玉田剛章：“多孔質シリカ膜を用いた高性能反射膜『エアロ・ブライト・コーティング』の開発”, 第35回光学シンポジウム予稿集 (2010)
- 13) “ISO 色特性指数(ISO/CCI)による写真撮影用レンズの色特性の表し方”, 日本工業規格 JIS B 7097-1986
- 14) 原田壮基, 中野拓海：“NIKKOR Z 50mm f/1.2 S の開発”, 日本写真学会誌 84巻 3号 (2021)