

デジタルカメラの光学技術

小山 剛 史

過去 10 年間のデジタルカメラの発展は著しく、あっという間にフィルムカメラの性能を凌駕してしまった。ちょうど自動車における 20 世紀の 100 年分を、デジタルカメラは 10 年で駆け抜けたかのような感すらある。

その過程において、光学関連技術の寄与は決して少ない。

ここでは、デジタルカメラ発展の過程を光学の観点から振り返るとともに、デジタルカメラの今後にも思いを馳せてみたい。

1. 競争と発展の歴史

10 年前といえば、一眼レフカメラは一般的にはまだフィルムカメラが主流であり、プロ用の高級機を皮切りに、デジタル化が加速する黎明期であった。一眼レフタイプのデジタルカメラが一般にも急速に普及し始めたのは、2003 年ごろからである。

その後も、撮像素子（センサー）の画素数拡大もあって性能向上は著しく、撮像した画像を PC 上で大きく引き伸ばして観察するというデジタルならではの厳しい観察条件に適応するため、レンズについても性能向上の傾向にある。

一方でコンパクトデジタルカメラは、10 年前にはすでに市場ではフィルムカメラを席巻しており、画素数が 4~5 メガの機種まで現れ始めていた。しかし主流は 2 メガ 3 倍ズーム機であり、スペック的には、現在から見ると隔世の感がある。

その後、コンパクトデジタルカメラでは、まず徹底した薄型化競争が始まった。フィルムカメラでは、パトローネ（フィルムマガジン）の大きさがカメラの薄型化を阻んでいたが、撮像素子の採用によってその呪縛から解放され、レンズの小型化技術が進展して、一気に薄型化が加速した。また焦点距離レンジの拡大も進み、現在では、広角（ワイド）化や 30 倍を超える超高倍ズームの登場など、目を見張るものがある。

さらには、近年一眼レフカメラの光学ファインダーに不

可欠なミラーをなくし、スペースを詰めることで小型化を狙った、ミラーレスといわれる一眼レフとコンパクトカメラの中間に位置付けられる製品も登場し、市場に一定の影響をもつに至っている。

この 10 年間で、多くの歴史あるメーカーがこの業界から撤退し、一方で性能・スペックが凄まじいばかりに向上した。まさに競争と発展の歴史が凝縮されているのである。

2. デジタルカメラの光学技術、この 10 年のキーワード

それでは、これらの発展がどのような技術によってなされたのか、光学の観点から振り返ってみたい。

2.1 非球面の効率的導入

非球面レンズは、フィルムカメラの時代から 1 枚で球面レンズ 2、3 枚の効果といわれていたが、当然コストの問題があった。比較的ローコストな非球面製法としてガラスモールドがすでに普及していたが、10 年前ではモールド可能な寸法や形状に制約があり、まずは $\phi 5\sim 15$ と小口径がメインのビデオレンズやコンパクトデジタルカメラからさかんに導入された。

しかし、数年前から $\phi 30$ 前後以上の中大口径のガラスモールドも本格的に普及するようになり、以前から使われていた研削など他の製法の非球面レンズとも相まって、一眼レフの交換レンズに使用される数量は大きく伸びている。

この結果、レンズの撮像性能向上、焦点距離レンジの拡大などのスペック向上、および小型化などに効果をもたらしてきた。

2.2 新硝材の開発とその活用

光学設計者にとって硝材の選択は、料理人にとっての食材の選択にも比すべき重要なものである。この 10 年のデジタルカメラの光学系の進展に関しても、新硝材の開発は重要なポジションを占める。2004 年には高屈折率のガラスモールド用硝材が開発され、特にコンパクトデジタルカメラの凹レンズとして使われて、その小型化と高性能化との両立に貢献した。その後も高屈折率材、異常分散

材などの中に多くの新硝材が開発され、交換レンズも含めたさまざまなレンズのハイスペック化に貢献している。

2.3 コーティング技術の発展

レンズの表面につけるコーティングには、反射防止、レンズの保護などのさまざまな目的があるが、長年大きな進展がみられなかった。ところがここ数年で、新しい低屈折率の膜材を使用した反射防止効果の大きい多層膜が、各社から製品搭載され始めた。

2009年には、表面に特殊な微細構造を設けることによる反射防止コート（SWC）も製品化された。これは、光の波長以下の微細構造を特殊な製法でレンズ表面に作ることで、反射防止性能を多層膜よりも向上させたもので、微細光学素子の民生品への応用例としては画期的なものと思われる。

また近年は、ごみ付着防止効果が高いコーティングも使用され始めてきている。

2.4 設計・シミュレーション技術の向上

表に出ない技術要素としてこの10年間で大いに変化したものは、やはりコンピューターの計算速度向上に関するものである。複数のレンズ群が複雑な動きをするズームレンズや非球面を多用する光学系の場合、設計上のパラメーターが多く、最適解に行きつくまでのプロセスに時間がかかる。しかし昨今では、進化したアルゴリズムを高速演算することにより、大量の計算を効率よく行えるようになった。

また、実機の試作を待たずに、シミュレーションの段階でそのレンズの素性を把握でき、設計へのフィードバックを早期に行える項目が増えたことも、開発期間短縮のみならず、最終製品のスペックや品質の向上に好影響を与えたといえる。

2.5 設計上の工夫

前述したように、フィルムを使わないことによって、特にコンパクトデジタルカメラでは、大きさ（特に厚さ）の自由度が広がった。これを生かすべく、高屈折率硝材の採用や非球面の多用などの設計上の工夫が進歩したが、光学系の構成自体を工夫するものも現れた。

2002年には、撮像光学系を途中で90度折り曲げる屈曲タイプのカメラが登場した。

また、2003年には、レンズ収納時に撮像光学系の一部を光学系の配置から退避させることで薄型化を達成したのも登場した。

さらに2010年には、この屈曲および退避の双方をうまく組み合わせ、ズーム比10倍ながら非常に薄型のカメラも製品化されている。

2.6 画像処理技術との融合

フィルムカメラの時代に、覆い焼きなどプリント時の工夫を経験された方は少なくないであろう。デジタル時代になって、これらよい画像を得る工夫の数々は自動化されてきた。特にコンパクトデジタルカメラでは、画面の周辺が暗くなる傾向を自動補正する周辺光量補正が比較的早期に導入されたが、このほかにも、色の滲みを軽減する補正や、画像の歪みを補正する歪曲補正などが、次々に製品に搭載されてきた。

もちろん、これらは光学設計を楽にするためのものではなく、むしろこの効果を最大限に生かすべく新しい設計手法への転換・発展を促がすものであった。

現在のコンパクトデジタルカメラの主流が、広角（ワイド）から始まるズームレンズを搭載しながらも、小型・薄型ボディを達成している背景には、これら画像処理技術と光学設計との融合の効果が少なくない。

3. その先の未来へ

デジタルカメラの時代になって、フィルムカメラでは困難もしくは苦勞したことが、より手軽に行えるようになった。例えば、撮ったその場で再生して確認できる、何枚でも撮り直しができる、小さなボディに高性能・ハイスペックのレンズを搭載できる、撮った後で画像を編集することが容易、などである。

しかし、これらはいずれもフィルムを撮像素子で置き換えただけのもので、いわばフィルムカメラの延長であり、発展形である。今後は、これら正統的な発展形とともに、デジタルならではの処理による新しい機能の実現に向けた努力も不可欠であろう。

そして、その際でも、被写体情報の入力手段としての光学系は重要な役割を担うことは、いうまでもない。

(2011年11月25日受理)

半導体露光装置 — この 10 年の歩み —

松山知行

1965年、ゴードン・ムーア博士は「半導体の集積度は18か月で倍増する」という、いわゆるムーアの法則を提唱した¹⁾。これは今でも実現され続けている。この半導体の高集積化を推進してきた微細化技術の中心が光リソグラフィー技術であり、その主役は半導体露光装置が担ってきた。

1. 結像光学系の技術の進化

1.1 結像光学系

ここ10年の前半は、半導体の微細化に対応すべく、露光装置における結像光学系では、解像力の向上、収差低減が求められてきた。それらを実現するために、結像光学系では、ArF（フッ化アルゴンエキシマーレーザー：波長193nm）投影レンズに非球面レンズが本格的に採用されるようになった。これは、非球面加工および計測技術が、投影レンズに求められるだけの精度に達したことによる。これにより、NA（numerical aperture、開口数）が0.8を超える投影レンズが実現されるまでになった²⁾。投影レンズの光学設計も非球面を前提としたものとなり、各面の収差発生量を極力抑えながら全体として収差バランスを最適化するというそれまでの思想から、収差を非球面で補正するという思想に変わった。その結果、パワー配置もそれ以前の投影レンズから若干変化した（図1）。また、高NA化路線の劇的なステップとして、液浸投影レンズの採用がある。このステップで、半導体露光装置製造各社は反射屈折投影光学系を採用した。各社ともその思想や得意分野の違いなどから、それぞれ異なるタイプの反射屈折光学系を提案した（図2）。その結果、複数のタイプの反射屈折投影光学系でNA 1.35を実現することとなった。この液浸投影レンズは本来、F2エキシマーレーザー（波長157nm）を光源とする露光装置向けに提案された³⁾が、F2露光装置が成功することはなかった。その原因は、157nmの波長で使用できる光学材料である蛍石結晶の光学特性的な課題であった。それまで蛍石結晶は光学的に均質とされていたが、結晶軸に対して大きな角度で入射する場合の真性複屈折の存在がJ. Burnettによって指摘された⁴⁾。この真性複屈折はレンズ

設計の工夫により補正することが可能であったが、結局は内部ひずみ起因の複屈折の存在による結像性能への影響が、F2露光装置の実現を妨げた。その後、さらなる高NAを目指して高屈折率光学材料や高屈折率液体の開発が行われたが、実用には至っていない。おもな原因は高屈折率液体の透過率の不足であろう。その結果、NA 1.35のArF投影レンズは、半導体露光装置の歴史の中で、最大NAに達している。

1.2 照明光学系

照明光学系におけるこの10年のトピックスは、変形照明光源の進化と偏光照明の出現であろう。どちらも特定のパターン形状に対してコントラストを向上させ、露光量誤差や焦点ずれに対する許容値、いわゆる露光余裕度を向上させる技術であり、投影レンズのNA向上のスピードとムーアの法則の乖離を埋める施策となっている。

高NA結像を扱う際には、いわゆるベクトル効果による像コントラストの低下が顕著になってくる。これは、像面上で干渉し、パターンを形成する光束同士の電場ベクトルのうち、互いに打ち消しあう成分が増加し、スカラー理論で予測される像コントラストを実現できなくなる現象である。この影響を低減させて像コントラストを向上させようというのが偏光照明結像である⁵⁾。具体的にはTE偏光による結像を実現し、像面上で干渉し合う電場ベクトルを平行にすることで、高NA結像時のコントラストの劣化を防いでいる。実際の露光装置では、求めるパターン形状に応じて光源内の偏光状態を最適化し、その結像における露光量余裕度を拡大している。この偏光照明技術と、前述の液浸技術を融合することで、露光量余裕度と焦点深度の双方を同時に拡大することを可能にした（図3）。

2. 最近の動向

2.1 SMO

前述のように、ArF液浸露光機のNAは踊り場に達している。限られたNAをさらに有効に使い、結像パターンの微細化を少しでも進めようというのが、このSMO（source mask optimization）技術⁶⁾である。所望のパターンをウェ

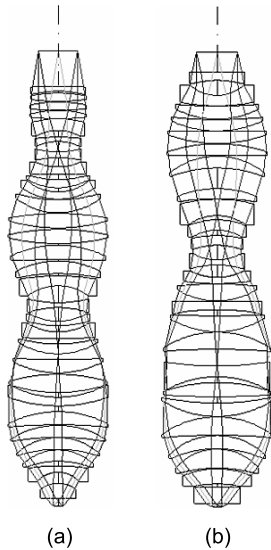


図1 (a) 最終世代ArF全球面投影レンズ (JP-2000-121933), (b) 初期ArF非球面採用投影レンズ (JP-2004-252119).

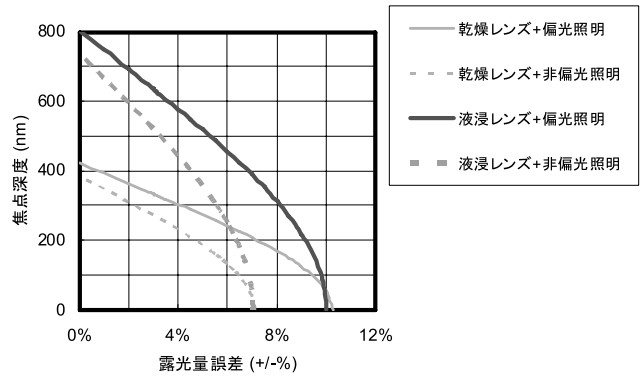


図3 空間像シミュレーションベース ED ツリー評価による偏光照明と液浸化の効果.

る。本来はすでに主力露光機として活躍するはずであったが、光源、感光剤等の周辺技術の開発進捗の影響などにより、まだ主力とはなっていない。ただし、そのポテンシャルは期待すべきところである。

半導体露光装置における光学系の役割は、決して「マスク上のパターンを忠実にウェハに転写する」ことではなく、「ウェハ上に欲しいパターンを目標通りに生成すること」である。そのことを明確に意識させられたこの10年であった。ムーアの法則もパターンの微細化が目的ではなく、ビジネスとして成立させるために結果的に微細化のトレンドを歩むというものである。SMO やダブルパターンニングに代表される ArF 液浸露光の延長技術が生き延びるのか、あるいは EUVL が主力露光機として活躍するのか、まさに今、時代の分岐点にいる。

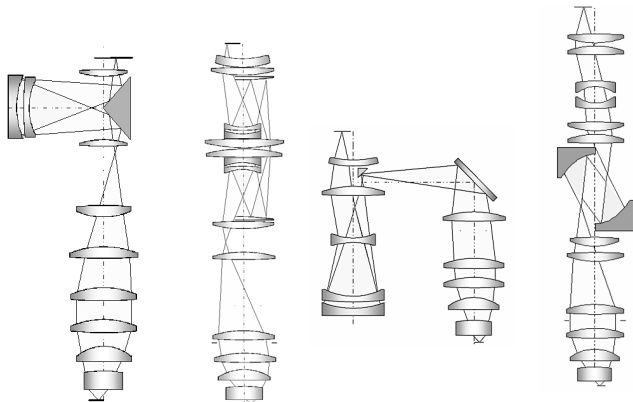


図2 反射屈折投影光学系レイアウト例.

ハに実現するために、照明光源とマスク形状を同時に最適化し、その解は複雑な光源形状や、所望パターンとは似ても似つかぬマスク形状となる。

2.2 ダブルパターンニング⁷⁾

ダブルパターンニングとは、光学分解能で決定される最小ピッチよりも高い分解能をもつパターンを露光後のプロセス(加工)で実現する技術のひとつで、露光パターンを半ピッチずらしてパターン形成 (pitch splitting) したり、膜形成 (spacer process) することにより達成される。

2.3 EUVL

次世代の露光技術として長年にわたって期待され続けているのが、波長 13.5 nm の極短紫外光を用いる EUVL (extremely ultra violet lithography) 露光機である。もはや透過部材は存在せず、光学系はすべて反射鏡で形成され

文 献

- 1) G. Moore: "Cramming more components onto integrated circuits," *Electronics*, **38** (1965) 114-117.
- 2) T. Matsuyama, Y. Ohmura and D. M. Williamson: "The lithographic lens: Its history and evolution," *Proc. SPIE*, **6154** (2006) 615403.
- 3) M. Switkes and M. Rothschild: "Resolution enhancement of 157 nm lithography by liquid immersion," *J. Microlith. Microfab. Microsyst.*, **1** (2002) 225-228.
- 4) J. H. Burnett, Z. H. Levine and E. L. Shirley: "Intrinsic birefringence in calcium fluoride and barium fluoride," *Phys. Rev. B*, **64** (2001) 241102.
- 5) 松山知行: "偏光照明と超高 NA 結像", *O plus E*, **27** (2005) 768-772.
- 6) T. Matsuyama, T. Nakashima and T. Noda: "A study of source & mask optimization for ArFscanners," *Proc. SPIE*, **7274** (2009) 727408.
- 7) 井上壮一: 「第 15 回 STS Award」受賞論文紹介 (5) Double Patterning 技術開発戦略と課題, SEMI (2009).

(2011 年 12 月 2 日受理)

分子イメージング時代の顕微鏡・内視鏡技術

橋 本 武

ここ 10 年、ポストゲノム時代における生命現象解明の主演は、生きた生体内で起きる生物学的プロセス（シグナル伝達、相互作用、代謝等）を細胞レベルあるいは分子レベルで可視化・定量化する分子イメージング技術である。そしてその目的は、基礎研究で疾患原因の解明を行い、その成果を現実の臨床における診断や治療に効果的につなげていくことであり、そのための研究（トランスレーショナルリサーチ）が世界的に活性化している。この分子イメージング技術の核となっているのは、蛍光や化学発光を利用する光、陽電子放射を利用する PET (positron emission tomography), 磁気共鳴を利用する MRI (magnetic resonance imaging), 超音波等のイメージング機器、およびこれら機器に用いる疾患関連分子に特異的なプローブ等、多岐にわたる¹⁾。本稿ではこれらのなかで、筆者と関わりの深い光を用いた分子イメージング技術、その中でも特に、顕微鏡や内視鏡関連技術の近年の進展を概説する。

1. 他分野技術とのシナジーによる顕微鏡の進展

生物学や医学の研究者達の多様なニーズに応えてきた顕微鏡、そのさらなる発展に寄与したのが、ノーベル賞受賞で一躍有名になった GFP (green fluorescent protein) をはじめとする蛍光プローブ、およびチタンサファイアレーザーで代表される超短パルス光源の登場である。

1.1 GFP の登場 — 生かしたまま観察^{2,3)}

初めに述べたように、生体は細胞内外のさまざまな分子が相互作用しながら、その機能を維持している。したがって、疾患と正常の細胞におけるこれら分子の出入りや相互作用を観察し比較すれば、疾患原因の特定ができ、それを正常に戻す方法を発見することが治療につながると考えられている。そして、当該研究に近年多用されているのが、GFP をはじめとする生物由来の蛍光タンパク質である。これらは、観察したい目的分子（タンパク質）の遺伝子に蛍光タンパク質の遺伝子を融合し、それを観察対象の生体内に直接遺伝子導入し、生体内で発現（遺伝子の情報を細胞

における構造および機能に変換）させて使用する。従来の蛍光色素のように試料を固定せず（殺した状態にせず）、生かしながら観察できることが最大の特徴である。つまり、細胞内外の目的分子の動的挙動を、蛍光タンパク質からの蛍光を標識として、直接観察できるようになったのである。実際の観察には、蛍光顕微鏡、インキュベーター顕微鏡、レーザー走査型蛍光顕微鏡等が用いられている^{*1}。

1.2 超短パルス+非線形顕微鏡 — より深部を観察

600~1300 nm の波長域は「生体の窓」(optical window) とよばれ、生体の透過性が最も高く、生体観察向きの波長帯である。まさにこの波長域をもつ光源が、チタンサファイアレーザーである。ただし、前述の GFP 等生体で多用される蛍光色素の多くは、この波長帯では直接励起できず、そこで非線形光学過程の一種である二光子励起蛍光を顕微鏡に持ち込む。二光子励起蛍光顕微鏡では、1 個の蛍光色素分子が吸収波長（可視域）の 2 倍の波長（生体の窓の波長）の光子 2 個を同時に吸収して蛍光を出す。この 2 個の光子が同時に存在する確率は、励起光強度の 2 乗に比例し、また一般的な蛍光色素の二光子吸収断面積はきわめて小さいため、尖頭値の高いフェムト秒の超短パルス光の利用が効果的であり、かつ対物レンズの焦点位置近傍のみで蛍光が観察される。焦点近傍のみ蛍光色素が励起されること、さらに励起レーザーの平均強度が低いことにより、生体の侵襲や蛍光色素の褪色の少ない生体向きの観察が可能となる。図 1 にマウス大脳皮質の神経細胞の観察例を示す。生体の窓をうまく利用することで、700 μm 以上の深部観察が可能となった^{4), *2}。

非線形過程を利用した顕微鏡としてはほかに、二次の非線形過程を用いた第二高調波 (SHG) 顕微鏡、三次の非線形過程を用いた CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering) 顕微鏡等が開発され、先進的な研究者達に利用され始めている⁴⁾。

2. 顕微鏡技術を内視鏡へ

胃カメラからスタートした内視鏡も今やビデオ内視鏡と

オリンパス(株) 研究開発センター (〒192-8512 東京都八王子市久保山町 2-3) E-mail: ta_hashimoto@ot.olympus.co.jp

*1 実際の画像例 <http://www.olympus.co.jp/jp/lisg/bio-micro/product/lcv110/ap.cfm>

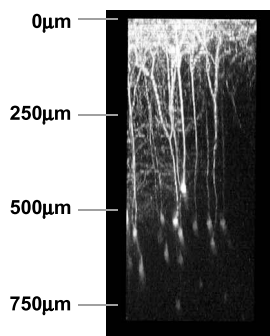


図1 二光子励起蛍光顕微鏡の観察例。(標本提供:産業技術総合研究所脳神経情報研究部門脳神経遺伝子研究グループ 亀山仁彦氏・落石知世氏・清末和之氏・海老原達彦氏)

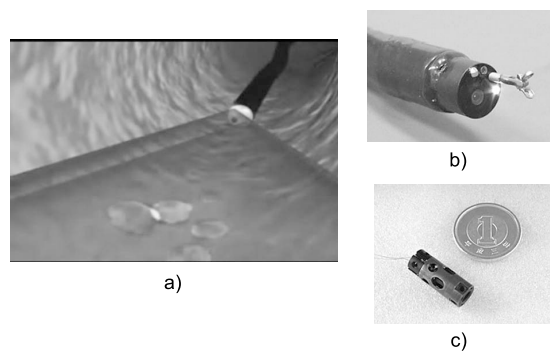


図2 分子イメージング内視鏡の概要. a) 分子イメージングの内視鏡応用のイメージ図, b) プロトタイプ内視鏡の先端部分, c) 小型分光素子.

なり, ハイビジョン相当の高画質をすでに達成している. さらに内視鏡は観察機能にとどまらず, 例えば早期の癌に対しては, 腹部を切ることなく内視鏡のみで治療できる, 患者に負担をかけない新しい低侵襲治療法として脚光をあびている^{*3}. 以下に, さらなる診断能の向上を目指した近年の内視鏡の進展を概説する.

2.1 特殊光観察 — 波長選択機能を内視鏡に

顕微鏡がもつような波長選択機能を内視鏡に搭載したものが, 特殊光観察である. その代表例として, 狭帯域光観察 (NBI: narrow band imaging) 技術について以下に解説する. NBI は光の生体組織への深達度を考慮して, 観察光の分光特性を調整することで観察機能の向上を狙う技術である. 生体組織に観察光が入射すると拡散的に伝播するが, 生体組織の吸収・散乱特性が強いと光は内部まで深く伝播することなく, 反射光として観測される. その吸収・散乱特性は強い波長依存性を持ち, 波長が短いほど散乱特性が強くなることから, 多くの研究者より報告されている. 一方で内視鏡には, 面順次照明方式とよばれる, モノクロ CCD と RGB 間欠照明によりイメージングを行う方式がある. NBI では, この面順次照明方式に用いられている B フィルターを, ヘモグロビンの吸収極大を中心波長 (415 nm) として, それより長波長側の光をカットするように, 半値幅を約 40 nm に狭帯域化する. これにより, B チャネル画像では光の深達度を表層に限定することができ, 粘膜表面の微細構造や毛細血管構築像の再現能が向上し, さらなる診断能の向上が期待される^{*4}.

2.2 分子イメージング内視鏡 — 超早期診断への挑戦

さらに, 顕微鏡で培った分子イメージング技術の臨床適

用を最終ゴールとして開発を行っているのが, 分光ビデオ内視鏡システムである (図2). このシステムは, 先端部外径 10 mm のビデオスコープの先端部に直径 6.9 mm の世界最小の「小型分光素子」を搭載し, 通常観察 (白色光) に加え, 600~800 nm の波長帯域で, 癌に関連する複数の分子情報を蛍光観察することが, 可能となっている. 癌に由来する複数の生体内分子の変化を, 蛍光プローブ, 自家蛍光と散乱光のそれぞれの波長域でとらえることで, 2 mm 程度の超早期段階での癌を発見することを目的としている^{*5}.

究極の光学性能を追い求める技術開発は今なおさかに行われており, 例えば本稿で紹介できなかった超解像顕微鏡なども, 見逃せない近年のトピックスである⁵⁾. われわれが取り組むこれらの機器が, 基礎から臨床に至る多くの研究者や医療従事者を通じて, 癌を初めとする疾患の克服につながり, 患者の QOL 向上に少しでも役立つことを期待している.

文 献

- 1) 佐治英郎 (編): ますま広がる分子イメージング技術 (メディカルドゥ, 2008).
- 2) 宮脇敦史 (編): GFP とバイオイメージング (羊土社, 2000).
- 3) 宮脇敦史 (著): 蛍光イメージング革命 (学研メディカル秀潤社, 2010).
- 4) 藤田克昌: “非線形マイクロコピー”, バイオメディカルフォトニクス—生体医用光学の基礎と応用— (電気学会, 2009) pp. 139-154.
- 5) 藤田克昌: “超解像顕微鏡の進展”, 生物物理, **50** (2010) 174-179.

(2011年12月1日受理)

*2 実際の画像例 <http://www.olympus.co.jp/jp/lisg/bio-micro/product/fv1000mpe/ap.cfm>

*3 参考「おなかの健康ドットコム」 <http://www.onaka-kenko.com>

*4 参考 (観察例) <http://www.olympus.co.jp/jp/news/2006b/nr061226evissj.cfm>

*5 参考 URL <http://www.olympus.co.jp/jp/news/2007b/nr071015videoscopej.cfm>

事務機光学系

酒井 浩司・木村 鉄也

ここ 10 年におけるネットワークの完備、新しいモバイル系ツールの登場は、情報のやり取りの様相をすっかり変えてしまった。このような背景は、事務機にも少なからず影響を与えている。例えば、ファックスはオフィスから消えつつあり、複写機がその代わりをするようになった。今や、スキャナーで原稿を電子化し、ネットワークを介して相手に直接その情報を送るのが、当たり前 optical になっていく。

また、企業の社会貢献として「環境」への配慮が一段と求められ、その上で「機能が優れていて、安くて、小さい」というユーザーの希望に応えることが、メーカーの果たすべき役目となってきた。

さて、事務機の代表といえるプリンターやスキャナー、あるいは近年になって急速に普及したプロジェクター、TV 会議システムなどには、よく知られているように、さまざまな種類の光学系が搭載されている。オフィスに求められるこれら製品のスタイルが時代とともに変容するのであれば、その心臓部ともいえる光学系も、時代に合わせて新しい技術を投入していかざるを得ない。残念ながらそのすべてを本稿で概観することはできないが、ここでは、筆者が専門としているスキャナーとレーザー方式/LED 方式のプリンターに絞って、その技術トレンドをみてみよう。

まず、事務機光学系で押さえておかなければならない大きな流れに「カラー化」がある。業務上のコンテンツがパソコンで作成されること、またデジタルカメラが普及したことによって、プリンターから出力される画像は、もはやカラーが当たり前の時代になった。原稿がカラーであれば、それを読み取るスキャナーがカラー対応になるのも当然といえよう。特に、スキャナーにおけるカラー化の動きはここ 4、5 年で急速になっていて、モノクロ複写機であっても、搭載されているスキャナーはカラー対応のものがほとんどである。

以上のことを踏まえ、ここからはスキャナーとプリンターに分けて技術動向を俯瞰してみたい。

1. スキャナー光学系

スキャナー光学系は、光源、ミラー、レンズ、CCD で構成されており、原稿からの反射光をレンズで集めて CCD で読み取るというのが基本的な機能である。スキャナー光学系で大きく変わったのは、何といても光源であろう。これまで主流だった「キセノンランプ」に代わって、今や「LED 照明」が席卷しつつある¹⁾。中でも、青色 LED が量産化されたことにより、黄色蛍光体と組み合わせて白色 LED が実現でき²⁾、カラー スキャナーに採用可能となったことが、この転換に大きな拍車をかけた。LED 照明は消費電力が従来の約 3 分の 1 に抑えられるので、省エネに大きく貢献できる。また、LED の用途が、液晶テレビ、パソコン、携帯電話の表示部バックライトと広がってきたことを背景に、技術開発が著しく進んでおり、LED そのものの効率向上と低コスト化が期待できる。

小型化の流れも加速され、「縮小光学系」における CCD 画素が小面積になったほか³⁾、複数の自由曲面ミラーを用いた新しい方式も登場した⁴⁾。

また、密着イメージセンサー (CIS 方式) が近年になって搭載されだしたのも、小型化の要求によるものである。CIS 方式は、光源、レンズアレイ、撮像素子アレイだけで構成されているため、縮小光学系に比べて小型であるが、これまで事務機光学系にはあまり使われていなかった。被写界深度が浅いことがその理由であるが、小型である特性を生かして低速複写機の読み取り部に採用されたのを皮切りに、高速複写機における ADF (auto document feeder) の裏面側の読み取り部へと、徐々に広がりをみせ始めている。さらに、CIS 方式の弱点であった被写界深度についても改善の提案がなされており⁵⁾、今後注目すべき技術といえよう。

なお、スキャナーには「原稿をいかにきれいに速く読み取るか」が求められるが、これは画像処理の話がメインになるので、ここでは触れない。

2. プリンター光学系

プリンター光学系の構成は、レーザー (LD) 方式と LED

方式の2種類に大別できる。LD方式の光学ユニットは、LDから放射された光ビームを光偏向器によって走査することで、感光体上に画像を形成することが基本的な機能である。したがって、プリンターには「高画質の原稿をいかに速く出力するか」が強く求められるが、発光点を集積化した「LDアレイ」が広く実用化され⁶⁾、高画質化と高速化の両立は比較的容易に達成されるようになった。また、発光点配列を二次元化して、その集積化を飛躍的に拡大したVCSEL (vertical cavity surface emitting laser) の登場も、ここ10年内の大きなトピックといえよう⁷⁾。このようなマルチビーム化は書き込み密度を1200 dpiから2400 dpi、4800 dpiへと高めることとなり⁸⁾、各電子写真機器メーカーがプロダクション・プリテイング市場へ参入する大きな足がかりとなった。

そして、高画質化の追求は、温度による光学系の焦点位置変動をいかに抑えるか、という新たな技術課題を生み出した。これについては、レンズが樹脂化されているというメリットを生かし、回折面を積極的に利用するという新しい解決方法が展開されつつある⁹⁾。

一方で、ドットを感光体上の狙いの位置に形成するために、光ビームの照射位置のずれを機械構造や電気制御で補正する方法が考案されている。このように、プリンター光学系は、そこに含まれる光学素子について議論するだけでは不十分で、システム全体の視点が欠かせない。

また、「オーバーフィールド光学系」という新しいタイプの登場や¹⁰⁾、光偏向器の代用として「MEMSミラー」が製品搭載されたことも¹¹⁾、特筆すべき技術といえよう。さらに、高画質化へ向けて、従来の赤外LDよりも感光体上のビームスポットを絞ることのできる青色LDが、超高速連続紙プリンターに用いられた¹²⁾。

さて、カラープリンターの場合、複数の感光体を要する「タンデム方式」が主流であるが¹³⁾、これに適応したプリンター光学系にはどのようなものがあるだろうか。単純に考えれば、同一の光学ユニットを感光体の本数に対応して配備すれば事足りる。しかしこの場合、すべての部品を感光体の本数分だけ用意しなければならない。このような背景から、いかに部品を集約させて、点数を削減しコストダウンを狙うか、という技術のトレンドが生まれた。ここ最近では、光学ユニット内で発熱体にもなりうる光偏向器を1つだけ用いるタイプが多くみられ、上下、左右から光ビームを光偏向器に入射させ、4つの光路に分岐してそれぞれの感光体に導いている。特に、上下方向から光偏向器の反射面に向かって光ビームが近づきながら入射するタイプは

「斜入射光学系」とよばれ¹⁴⁾、タンデム方式に好適な光学ユニットのひとつのスタイルとして定着した感がある。

もちろん、部品点数の削減は、光学ユニットの小型化にも資するところが大きい。光源、光偏向器、走査レンズといった光学素子を1つの光学ユニット内に収めるため、小型化にも限界がある。この点、LED方式の光学ユニットは優位といえよう¹⁵⁾。この光学ユニットはLEDアレイとレンズアレイの2つがおもな部品であり、レイアウトの際に広いスペースを必要としない。しかも、光偏向器が不要で、省エネに貢献できる点においてもメリットがある。このようなバックグラウンドを武器に、LED方式のプリンターは、着実にラインナップを増やしてきている。

現時点で将来展望を予測することは難しいが、事務機という括りで光学系を俯瞰してみると、どうやら緩やかに成熟期に入ってきたように思える。それだけ、ここ10年の事務機光学系は、その進歩が著しかったといえよう。

しかし、冒頭でも述べたように、オフィス環境が刷新されるに伴い、事務機のあり方はどんどん変わっている。電子書籍の普及やクラウド・コンピューティングの確立といったようなことが事務機に無縁であるはずがなく、時代背景に即して各メーカーはユーザーに新しい価値を提供していくことになろう。それに伴い、事務機光学系もさらに進歩していくに違いない。

文 献

- 1) 安藤 良ほか：富士ゼロックステクニカルレポート、**20** (2011) 124.
- 2) Y. Narukawa: Opt. Photonics News, **15** (2004) 24.
- 3) 神代敏明ほか：リコーテクニカルレポート、**32** (2006) 83.
- 4) 菅 隆之ほか：Imaging Conference Japan. Ser. 107 (日本画像学会, 2011) p. 113.
- 5) 河野裕之ほか：Imaging Conference Japan. Ser. 107 (日本画像学会, 2011) p. 117.
- 6) R. Thornton et al.: Appl. Phys. Lett., **56** (1990) 1623.
- 7) 植木伸明ほか：富士ゼロックステクニカルレポート、**16** (2006) 11.
- 8) 酒井浩司ほか：リコーテクニカルレポート、**37** (2011) 81.
- 9) 稲垣義弘：コニカミノルタテクニカルレポート、**1** (2004) 83.
- 10) 内海克郎ほか：富士ゼロックステクニカルレポート、**10** (1995) 173.
- 11) Y.-C. Fu: International Conference on Digital Printing Technologies, Ser. 22 (IS&T and ISJ, 2006) p. 589.
- 12) 三矢輝章ほか：リコーテクニカルレポート、**31** (2005) 133.
- 13) K. Hirakura et al.: International Conference on Digital Printing Technologies, Ser. 7 (IS&T and ISJ, 1991) p. 49.
- 14) 森上祐介ほか：コニカミノルタテクニカルレポート、**3** (2006) 15.
- 15) 伊藤克之ほか：沖テクニカルレビュー、**72** (2005) 80.

(2011年11月23日受理)

眼科検査装置の発展 — 光干渉断層計を主として —

秋 葉 正 博

眼は片眼で 1 億個以上の視細胞 (100 メガピクセルに相当) から構成される高精細かつ複雑な光学装置であり, その眼球を光を用いて計測する「光学計測」は, 最も目に優しい検査手法であるといえる。OA 作業の増加に伴い, 眼は毎日酷使され, 眼の不調を訴えて眼科医に通院するケースが多くなっている。大学病院や総合病院の眼科を訪れると, 視力検査から高度な眼底診断機器まで, さまざまな検査装置が並んでいることがわかる。この 10 年間で, 基本的な診察スタイルは変わらないが, 新たな検査機器や治療器械が開発され, 順次導入および更新がなされている。眼底検査機器でいえば, 光干渉断層計 (optical coherence tomography: OCT)^{1,2)}, 眼底自発蛍光撮影装置³⁾ や超広視野共焦点検眼鏡⁴⁾ が台頭し, 病変理解の向上や診療方針の決定に寄与している。なかでもこの 10 年で最も進化を遂げた機器は OCT であろう。OCT は従来の眼底写真や共焦点検眼鏡に新たな深さ方向の次元 (z 方向) を加え, 病変の三次元的な取り扱いを可能とした。本稿では, この 10 年の眼科装置の進歩として, 日本発の技術でもある OCT に焦点をあて解説する。

1. 眼科分野における OCT の進歩

10 年前は, まだ第一世代のタイムドメイン方式の OCT 装置を用いて断層画像を撮像していた。当時の眼科医からは, “OCT は本当に眼科診断に役に立つのか?” というもやもや感が拭い去れない状態で診断が進められていた。その後, OCT 研究者の精力的な研究や眼科機器メーカーの尽力, 必要とするデバイスの技術開発が進み, 2006 年に周波数ドメインの OCT が上市されるようになった。この OCT により, 断層画像を「計測する」といった感覚から「三次元情報を映し出す」といった感覚に様変わりし, 現在の眼科臨床診断の革命機器となった⁵⁾。撮影した臨床断層画像は縦切りの網膜像を見るばかりか, ソフトウェアにより網膜層構造の厚みが定量化されたのち, 正常眼データベースと照合され医師の診断を支援するまでに向上した。2008 年に「眼底 3 次元画像解析」として診療報酬に加えられた

ことから, OCT による診断のインパクトの大きさがうかがえる。

タイムドメイン OCT 全盛の時代, 光学関連の諸先生方からは「OCT はただの白色干渉計だろう」「赤外分光の延長だろう」などと揶揄されていた。その傍ら, 現行の周波数ドメインの OCT が主流となると, 干渉信号がコンピュータ上で演算され, 複素信号を取り扱うようになった。干渉信号の強度信号のみならず位相成分を用いた信号処理手法が検討されると, 諸先輩方の干渉計測に関する知恵や経験, さまざまな研究事例を参考として OCT 技術が進歩してきたように思える。まさに現在の OCT は“巨人の肩の上に立つ”(現代の学問は多くの研究の蓄積の上に成り立つ) 技術なのである。

2. OCT の技術開発動向

OCT をはじめとする眼科機器は種々のデバイスの開発とともに進歩している。OCT 用光源として用いられている高輝度発光ダイオード (SLD) は, 適度な出力と十分な波長帯域を持ち合わせたものが安定供給されるようになった。また, OCT 用光源として種々の中心波長の波長掃引光源やスーパーコンティニューム光源⁶⁾ の選択の可能性も検討できる。一方, 網膜の微細構造を観察するために, 眼球内での波面の乱れを補正する補償光学デバイスの実用化も特筆すべきものがあり, 共焦点検眼鏡や OCT, 眼底カメラに搭載され, 研究が進められている⁷⁾。眼球の動きを実時間で補正するためのトラッキング技術も実用化された。

今後の技術開発課題として, さらなる親和性, 高侵達性が挙げられる。患者の不快感を低減するために高速化の研究も進められており, 眼科用途として現行製品の 2~4 倍高速な眼底 OCT 装置の開発が期待されている。近年では, 従来の $0.8 \mu\text{m}$ 帯の光源に代わり, より長波長領域である $1 \mu\text{m}$ 帯の光源を用いることで, 眼底のより深部の描出が期待されている⁸⁾。波長 $1 \mu\text{m}$ の光は, 不可視であることも考慮すると, 患者にやさしい検査装置になる⁹⁾。また, 最近では眼球全体の構造を可視化する新しい光源および検出システムの開発も報告されており, 数年前まで困難とされ

てきたさまざまな技術課題が、波長掃引光源の技術開発によりようやく具現化されようとしている¹⁰⁾。

現行の OCT は光学的な干渉計により散乱光を収集し、その信号をコンピューターで演算し、像を作り出すまでの“システム化”を行う必要がある。つまり、OCT 装置を完成させるためには、光学のみならず、計測ソフトウェアや電気回路、機械設計、解析ソフトウェア、そして統計処理などの、分野をまたいだ技術融合が必要とされる。それゆえ、OCT 技術者には高い専門性のほかに、異分野を股にかけ、新たな発見を意欲的に推進できる技術者が必要とされる。先人の考案した情報を特定の仕事の達成に応用する能力こそが、今後の OCT 技術者に求められていると感じる。

3. 眼科装置への期待

眼科分野において、OCT は緑内障の早期診断や全身疾患のスクリーニングに効果を発揮すると予測されている。緑内障に関するこれまでの研究により、視野異常が発生する以前に網膜構造に微弱な変化が起こり、OCT はそのわずかな変化を高感度にとらえることができる¹¹⁾。また、加齢黄斑変性症の治療においても、その治療効果の程度を判定するのは OCT 断層画像からの定量的な数値である。特に、眼底は全身疾患の検査の窓として期待されており、生活習慣病に関連する動脈硬化や糖尿病と眼底との関係を調べようと試みられている¹²⁾。例えば、眼底は視神経を通して脳へとつながる。視神経の OCT 所見から脳機能の状態が定量的に診断できるようになれば、かつて難病といわれていた脳の病気の理解や治療手段を変える新しい発見が生み出されるであろう。OCT はさらなる高速化、高画角化、高精細化、高効率化、視機能診断への応用など、進化し続けている分野である。現在の OCT 装置は発売開始されてから 5 年しか経っていないが、3 年前の断層画像がもはや古臭く感じてしまうほどである。検査器械の未来の進化を予想することは困難であるが、唯一無二の方法は現在の状況をよりよく理解し、技術開発動向を絶え間なく調査することであると思う。今後も OCT は、眼科業界のみならず、産業界を牽引していく技術であることはいうまでもない。

OCT の眼科応用は Prof. Fujimoto らによる論文発表後、驚異的な早さで臨床現場へと技術移転された。これは、

OCT の内視鏡応用などと異なり、研究者自ら被検眼となり OCT データを取得し、眼科医の興味が湧く研究発表を先行してきたからである。技術サイドで独自の機器開発を進め、その結果に目を輝かせ、医師が自ら歩み寄るといった研究が進められた新事例であろう。10 年後は、OCT 技術がより進歩し、検診などで多くの人の目に触れ、認知されていくと予想される。われわれはまさに、技術者と医師が連携して OCT の進歩に情熱を傾け、10 年後の未来に向けて進歩を遂げようとする、その始まりを見ている。その変革期が、まさに“今”なのかもしれない。

文 献

- 1) 丹野直弘：“光コヒーレンス断層画像化法と生体映像への応用”，光学，**28** (1999) 116-125.
- 2) W. Drexler and J. G. Fujimoto: “State-of-the-art retinal optical coherence tomography,” *Prog. Retin. Eye. Res.*, **27** (2008) 45-88.
- 3) 白木邦彦：“眼底自発蛍光の臨床応用”，臨床眼科，**62** (2008) 113-121.
- 4) M. Kernt, U. C. Schaller, C. Stumpf, M. W. Ulbig, A. Kampik and A. S. Neubauer: “Choroidal pigmented lesions imaged by ultra-wide-field scanning laser ophthalmoscopy with two laser wavelengths (Optomap),” *Clin. Ophthalmol.*, **4** (2010) 829-836.
- 5) 板谷正紀：“眼科における光干渉断層計の進歩”，日本レーザー医学会誌，**28** (2007) 146-159.
- 6) S. Ishida and N. Nishizawa: “Quantitative comparison of contrast and imaging depth of ultrahigh-resolution optical coherence tomography images in 800-1700 nm wavelength region,” *Biomed. Opt. Express*, **3** (2012) 282-294.
- 7) M. Zacharria, B. Lamory and N. Chateau: “Biomedical imaging: New view of the eye,” *Nat. Photonics*, **5** (2011) 24-26.
- 8) A. Unterhuber, B. Povazay, B. Hermann, H. Sattmann, A. Chavez-Pirson and W. Drexler: “*In vivo* retinal optical coherence tomography at 1040 nm-enhanced penetration into the choroid,” *Opt. Express*, **13** (2005) 3252-3258.
- 9) M. Hirata, A. Tsujikawa, A. Matsumoto, M. Hangai, S. Ooto, K. Yamashiro, M. Akiba and N. Yoshimura: “Macular choroidal thickness and volume in normal subjects measured by swept-source optical coherence tomography,” *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, **52** (2011) 4971-4978.
- 10) V. Jayaraman, J. Jiang, H. Li, P. Heim, G. Cole, B. Potsaid, J. G. Fujimoto and A. Cable: “OCT imaging up to 760 Khz axial scan rate using single-mode 1310 nm MEMs-tunable VCSELs with >100 nm tuning range,” *CLEO 2011, Laser Applications to Photonic Applications*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011) paper PDPB2.
- 11) 特集号「OCT によって緑内障診療の何が変わるか」，臨床眼科，**64** (2010) 119-166.
- 12) “眼科と生活習慣病（総説 わかりやすい臨床講座）”，日本の眼科，**81** (2010) 1008-1019.

(2012 年 2 月 6 日受理)

光学ガラスのこの 10 年

蜂谷 洋一

この 10 年でデジタル光学機器は飛躍的な進歩を遂げた。デジタル化はコンパクトカメラにとどまらず、一眼レフカメラ、ビデオカメラ、監視用カメラなどに波及し、すべての分野で小型化、高性能化、高機能化を実現している。レンズはカメラにとって目の役目を果たす重要な部品であるが、カメラとともに大きく進歩を遂げてきた。

本稿では、光学ガラスのこの 10 年の進歩について、

- ① 無鉛ガラス、② 高屈折率ガラス、③ 異常分散ガラス、④ 非球面レンズをキーワードに述べる。

1. 無鉛ガラス

光学ガラスが誕生して以来、鉛は光学ガラスにとって欠かせない成分であった。鉛は安価でありながら、光学ガラスの屈折率を高めると同時に分散を高め、溶融性を向上する成分であった。しかしながら、工業製品に使用される鉛の有害性が指摘され、光学ガラス各社は 1990 年代に無鉛ガラスを開発して切り替えを図った。鉛とまったく同じ役割をする代替成分はないが、酸化チタンや酸化ニオブなどを組み合わせることにより、鉛のもつ高屈折、高分散の特徴を実現したのである¹⁾。これらの代替成分は鉛に比べて高価な上、透過率特性に劣るという欠点はあるが、現在では、特殊用途以外の光学ガラスは無鉛ガラスに完全に切り替わっている。

2. 高屈折率ガラス

上述の鉛含有光学ガラスには高屈折率ガラスは多くあったが、無鉛ガラスへの切り替えの際にその多くは姿を消した。これは単に無鉛ガラスの開発が間に合わなかったというだけではなく、透過率が低いために当時の銀塩フィルムカメラ用としては使えなかったという事情もあった。

しかしながら、昨今のデジタル化された光学機器では、光学系の小型化のために高屈折率レンズは不可欠となっている。銀塩フィルムカメラでは透過率の低さが問題となることもあっても、デジタルカメラ、とりわけコンパクトデジタルカメラでは画像処理による補正も可能であるため、一気に高屈折率ガラスの需要が高まった(図

1)。HOYA では高分散の FDS 系高屈折率ガラスや低分散の TAFD 系高屈折率ガラスを開発し提供している。また、両者の中間の分散特性をもつ高屈折率ガラスもあり、高屈折率ガラスの幅広いニーズに応える。例えば、屈折率が 2.0 のガラスが 3 種類あり、分散特性が異なるというように、レンズの用途と光学設計に応じた選択が可能となっている。

3. 異常分散ガラス

カメラレンズ光学系で生じる色収差をなくすためには、分散特性の異なる凹凸レンズを複数枚組み合わせる。すなわち、高分散ガラスと低分散ガラスが必要とされる。分散特性の差が大きいほど色収差補正は効果的であるとされるため、アッベ数が 65 以上の低分散ガラスへの要求が強まっている。特に異常分散性を有する低分散ガラスは、高度な色収差補正に有効である。以前は異常分散ガラスは高価であり、それゆえ高級なレンズにしか使えなかった。しかし近年は、需要の高まりとともに供給量も増えて身近なガラスとなり、価格も手ごろになってますます使用量が増えている。HOYA では屈折率性能の異なる FCD 系異常分散ガラスのラインナップを取り揃えている。特に、蛍石に近い光学特性を有する光学ガラスの開発成功により特殊低分散ガラスの用途が一気に広がった。また、屈折率の高い異常分散ガラスの登場により新たな光学設計が提案されている²⁾。

4. 非球面レンズ

光学系に非球面レンズを導入すれば球面収差の除去が容易で、光学系のレンズ枚数低減および高性能化が可能となる。HOYA のモールドレンズ用光学ガラスの n_d-v_d ダイアグラムを図 2 に示す。初期のころは M-BACD 系ガラスで凸レンズが非球面化され現在に至るが、デジタルカメラでの高精細化が進むなか、小型でコンパクトな状態を維持しつつ、さらなる高性能、高精細化のために、非球面レンズの使用枚数が増えた。その際、上述の高屈折率ガラスと異常分散ガラスの導入がきわめて有効である。広角・高ズームを実現するために、前玉に高屈折率低分散の凹メニスカ

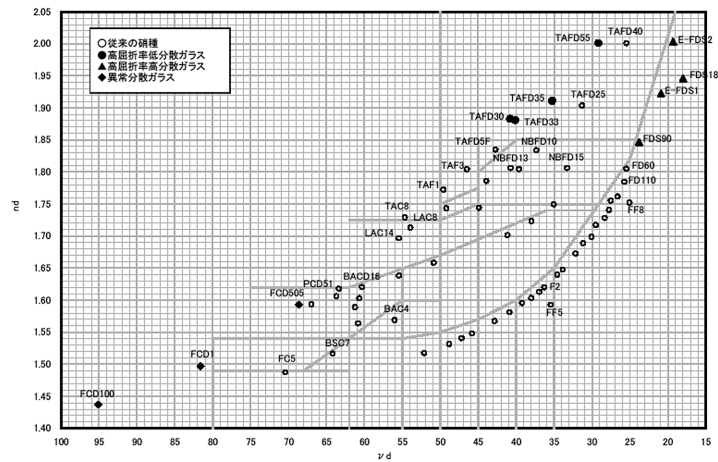


図1 光学ガラスの n_d - v_d ダイアグラム *1.

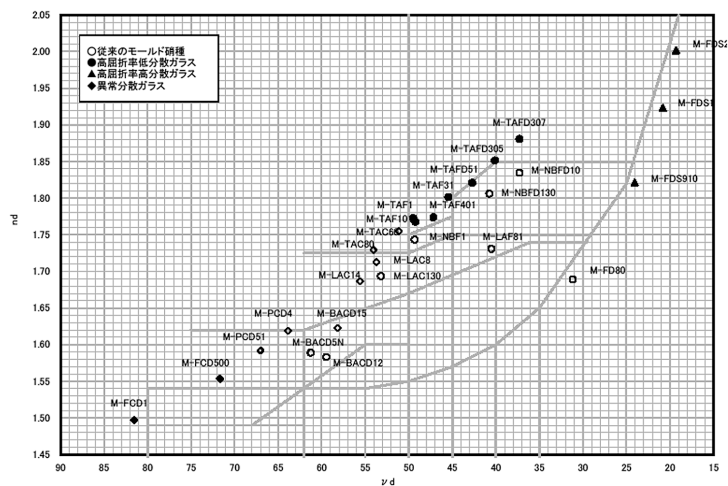


図2 モールドレンズ用ガラスの n_d - v_d ダイアグラム. HOYA 光学ガラスカタログ (2011)

ス非球面レンズおよび高屈折率高分散の凸メニスカス非球面レンズがよく使用される。また、色収差を補正し高解像度を実現するために、中玉に異常分散性をもつ非球面レンズがよく使用される。このようなトレンドに対応すべく、HOYAでは高屈折率低分散のM-TAFD系ガラス、高屈折率高分散のM-FDS系ガラス、異常分散ガラスのM-FCD系ガラスを開発し提供している。現在では、多くのデジタルカメラに、これらの新しいガラスからなるレンズが搭載されている。最近では、小型化・高倍率化・広角化に対応して、薄肉化したメニスカスレンズが好んで使用されている。

本稿を執筆している時点において、ガラスレンズにとって最も憂慮すべき話題は、レアアース・レアメタルの価格高騰である。高屈折率低分散の光学ガラスにとって、酸化ランタンなどのレアアースは欠かせない原料であるとも

に、レンズの研磨にも酸化セリウムが必要である。研磨用酸化セリウムの代替に関する技術開発は進んでいるが、光学ガラス成分としての酸化ランタンには無鉛化のときのように代替原料が実質ないため、事態は深刻である。光学ガラス各社は調達先の確保にも苦慮しているが、しばらくはこの状況が続くと予想されている。

しかしながら、この逆境に屈せず、価値ある光学ガラス製品の開発を通じて、日本の光学技術の新たな進展を支えていきたいと筆者は願っている。

文 献

- 1) 蜂谷洋一：“光学ガラスの鉛代替”，ガラスおよびフォトニクス材料討論会講演要旨集，47 (2006) 56-57.
- 2) 伊藤大介：“超高倍率ズームレンズの設計”，日本写真学会誌，74 (2011) 72-76.

(2011年11月24日受理)