

科学技術の進歩とカメラ産業の変遷

池田 英生

目次

第1部 カメラ産業を支配した技術基盤の変遷

はじめに

第1章 カメラ製品技術の変遷

- 1 はじめに
- 2 銀塩フィルムカメラ時代のカメラ製品構成技術の変遷
- 3 フィルムカメラからデジタルカメラへの過渡期
- 4 デジタルカメラへの道
- 5 まとめ

第2章 カメラ産業における技術的変革の推移

- 1 撮像素子とデジタルカメラへの息吹
- 2 固体撮像素子利用の模索としての静止画カメラ

第3章 銀塩フィルムの次世代への挑戦（APS プロジェクト）

- 1 背景
- 2 プロジェクト発足時における成果活用に対する共通認識
- 3 APS プロジェクト終了後の顛末

第4章 デジタルカメラにおける技術戦略の変遷

- 1 デジタルカメラ誕生と産業構造の変化
- 2 大型撮像素子開発とデジタルカメラ
- 3 多様化する事業基盤とデジタルカメラ事業の形態

第1部をまとめるに当たって

第2部 カメラ産業にみる薄膜技術の多様な進展

第1章 はじめに

- 1 光学薄膜への歩み
- 2 日本光学工業㈱における歩み

第2章 光学産業の基幹技術として光学薄膜技術の浮上

- 1 光学薄膜生産に必要となる技術環境の刷新
 - 2 光学反射防止膜の量産技術の確立—日本光学工業㈱の事例
 - 3 反射防止膜の広帯域化と多様な光学硝材への対応
- 第3章 デジタル一眼レフ用撮影レンズ技術としての反射防止膜薄膜技術の更なる飛躍
- 第4章 薄膜技術を中核にした基盤研究の足跡

第3部 レンズ設計からみた技術環境の変遷

- 第1章 レンズ設計ニーズとその取組への序曲
- 第2章 戦後の産業復興と新たな息吹
- 1 日本光学工業㈱の産業復興の技術的基盤とその歩み
 - 2 レンズ計算とレンズ設計の取組み
 - 3 光学とレンズ設計の取組み
- 第3章 産官学オープンイノベーションによる先端的レンズ設計法、評価法の構築
- 第4章 電子計算機の積極的活用から生まれた新領域
- 第5章 日本光学工業㈱での電子計算機導入による技術計算での事例と実績
- 第6章 レンズ設計、光学薄膜設計領域での新たな電子計算機利用の試み
- 1 光学会社での技術分野における電子計算機による新たな試みの例
 - 2 自動補正手法の応用と挑戦

終わりに

第1部 カメラ産業を支配した技術基盤の変遷

はじめに

産業の牽引役となった、学術分野、産業を支えた技術、次世代の芽として育成、強化された領域を、第2次世界大戦時を第Ⅰ世代、戦後から1960年初頭を第Ⅱ世代、1960年代から1995年までを第Ⅲ世代、1995年以降2010年以前までを第Ⅳ世代、2010年以後から近未来を第Ⅴ世代として読み解いていく中で、どのような変化を辿ったかを切り口にして、カメラ産業の動向を洞察するため、開発の源流を筆者自身の切り口で、下記のように捉えている。

	学術分野	産業基盤技術	発展する技術	特記事項
Ⅰ ～1945	理論科学 物理 数学 化学	機械	電気 通信 光学	軍需産業への技術 集約
Ⅱ 1946～57/60	実験科学 応用物理 電気・電子工学	機械 電機 光学 計測	計算機 計算技術	レンズ設計と光学 理論、レンズ評価 技術の乖離
Ⅲ 1964～95	シミュレーション 材料 半導体工学	電子工学 精密工学	電子計算機（超高 速大型からマイコ ン）領域の拡大 エンジニアリング プラスチック	大量生産に対応で きる生産技術の確 立
Ⅳ 1995～2010	大規模／大容量デー タ処理科学 ナノテクノロジー 材料工学	半導体（素子）技 術 ソフトウェア	高集積半導体 システム化技術 インターネット技 術 事業プラットフォームの創出 大型撮像素子	他業種からの参入 生産性向上と為替 リスクの縮小化 製品の法務的視点 からの対策
Ⅴ 2010/15～	人工知能による疑似 人機能 大量データ取り扱う アルゴリズム、	固体電池、 SiC半導体技術 新素材（カーボン 等）を利用した新 機能	材料評価技術 IOT技術による人 機能の代行	高度人工知能 ソフトの普及 環境基準の遵守 自動認識・自動操 作

（筆者作成）

カメラ産業の推移と現在の位置づけ、将来を読み解くことを、この半世紀弱、直接に技術中心に関わり取得した知見を中核にして述べる。

日本のカメラ産業における昭和から平成の時代の盛衰を述べる上で、他産業に比べ、顕著なカメラ技術について特徴と言える下記の事項に、留意する必要があると捉えている。

- ① 個々の企業の徹底した企業秘密の中で、自前主義による開発で、製品化した時点で始めて公開（開示）されてきている。（官/学と距離間があり、極めて閉鎖的色彩が強い）
- ② 少なくとも昭和世代は、主要各社とも協会社を組織化し、技術が流布しないような縛りが科せられていた。
- ③ 部品の電子化の兆しがでた当初から、玉石混淆の特許出願の競争になり、どのメーカーをとっても、自社技術で他社特許に抵触しないで、製品化は不可能な状態になり、特定企業間で、相互許諾契約のもとで、製品化を進めることが繰り返されてきた。
これは、近視眼的に視れば最適解であったが、長期的視野では業界を、たこつぼ化させている。
- ④ 上記の事情から製品カタログは重要で有り、訴訟においては、最も重要な役割を果たした。併せて、企業ホームページで開示し、技術の開示があったか否かは重要で有り、その証拠資料としてホームページから削除後も、製品保護の上で権利主張ができるように必要に応じて使用できるように法的な手立てが整備・強化していった。各企業とも、昭和末期から、製品の企業権利を米国等海外でも耐えるような手立てがとられた。

第1章 カメラ製品技術の変遷

第1節 はじめに

ダゲレオタイプから始まって約150年続いたフィルムカメラをデジタルカメラがほぼ置き換え、そのデジタルカメラでさえ30年後にはスマホに席捲される市場となった。

そのような現状を踏まえ、学識経験者や各メーカーの努力の足跡を簡単に解説する。

被写体像を記録するには、被写体像を感材に導入する「光学系」、それを受ける「感材」、さらにそれらを固定し、さらに余計な光が入り込まないようにする「光密構造体」が必須である。

また露出を決める基本3要素を「シャッタータイム」、「絞り値」、「感度」と仮定義した。

以上を形成するもの以外の要素は、以上の目的を確実に達成するため、便利にするための自動化、あるいは写真記録に直接は関与しない補助要素である。

現在のデジタルカメラにはフィルム時代の技術が基本となっているものが多いため、先ずそ

の発展について説明をする。

太古から人類が洞窟などに絵を描いて来たのは有名であるが、それが楽しみのためか、芸術なのか、記録の意図があったのか今では定かではない。

記録のための機材の起こりは紀元前から存在していたピンホール映像にヒントを得たカメラオプスクラ（図1）で、眺めたりなぞったりする道具であった。

感光材料の開発は欧州にてスタートし、フランス人化学者ニエプスが先陣を切って画像の固定に成功したのは1827年とされ、その技法を用いた機材はダゲレオタイプ（図2）として知られている。

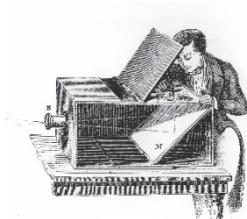


図 1

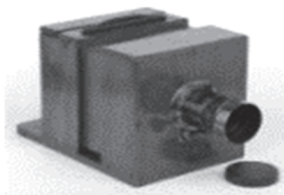


図 2



図 3

その後さまざまな感光材料と、写真機やレンズが発展したが、当初は取り置きが利かない湿版だったため、撮影者は撮影行為だけでなく、撮影の前後の準備作業を行うための広範な特殊技能と高度なノウハウを持つ必要があった。

しかも大きなカメラとガラス板を持ち、化学反応を起こさせる際に必須な暗黒状態を作るテント様のものまでも持ち運ばなければならない重労働であった（図3）。

機材を備えた写真館に希望者には来てもらう様式も始まった。

日本では欧米に少し遅れた江戸時代に写真館として同様の文化が花開いた。

その後湿版が乾版に発展して飛躍的に保存性が高まったことで大衆化が図られ、アマチュア写真家が増えて来たものの、大きな流れを作ったのは米イーストマン・コダックであった。

ロールフィルム入りのカメラを提供し、撮影後にそのまま送れば現像プリントを済ませ、新たなフィルムを詰めたカメラが返送されるというビジネスモデルを作った（図4）。

写真機導入初期は以上のような撮影自体も「専門家」の介入による行為だったものが、その後ライカを代表とする小型カメラ（図5）が工夫され、一気に市場が広がった。

感材は形状ではシートフィルム、ロールフィルム、インスタントフィルムなど、発色はモノクロ、カラー、その他にネガやポジ、微粒子や高感度など種々の開発が行われ、用途に応じて

自由に選択できるようになった。



図 4

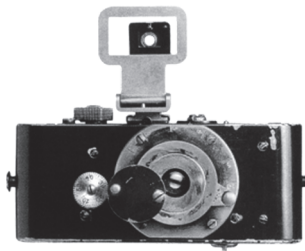


図 5



図 6

機材では、例えば今ではマニュアル機の代表にも見えるニコン F (図 6) は、掲げた開発理念「最良の品質、使い良さと多能性、自動化の追求」で如実に分かるように、当時でさえ「便利」にすることが大命題であったことが分かる。

この実現のためにあらゆる技術的な工夫を凝らしたのが写真機材の原点に存在した。

その後写真の用途が増えると共に、写真とは直接関係のない機構、材料、電子、ソフトなど周辺技術が発展することによって現在のカメラ、レンズ、アクセサリに至った。

本稿では、先ずフィルムカメラの発展に寄与した技術（光学技術、メカ技術、電子技術）を述べ、続いてデジタルカメラにまで貢献した共用技術の進展、中間にはフィルムからデジタル時代への橋渡しに寄与した技術を述べ、最後にデジタルカメラ特有の発展技術について述べる

第 2 節 銀塩フィルムカメラ時代のカメラ製品構成技術の変遷

1. 感材

感材についても簡単に記すべきではあるが、本稿の主題はデジタルカメラ技術であるため、また筆者にその知見が乏しいためもあって省略する。

しかし、今やフィルム自体がほぼ不要となったものの、長年に渡って化学的な試行錯誤、写真術とも言われたノウハウの中、競合間で切磋琢磨のうでで完成したフィルムによる画像表現は、人類には非常に馴染みが良い普遍的な表現である。

それは最新のデジタルカメラでも最重要なパラメーターの一つとして現存することから、フィルムの企画開発に携わった先人に深く敬意を表するものである。

2. レンズ（光学系）

第 3 部として記載。

3. フィルム給送

本来撮影行為には無関係な作法を自動化する対象として、フィルム巻上げの自動化があった。

強力で小型の DC（直流）モーターと制御用半導体の実現が背を押した。

その後フィルム巻き戻しや、失敗し易いフィルム装填までもが自動化された。

特に 35mm フィルムを使用したカメラにおいては、横幅 36mm の画面を光学軸に正確に停止させる制御方式が発展し、通常電池を使用する小型一眼レフでは 13 コマ／秒もの高速連続撮影が可能となった。

初期はモータードライブとしてカメラに脱着できるアクセサリであったが、駆動の効率化などのためにカメラ本体に組み込まれるようになり、現在に至る。

フィルムの高速巻上げ、高速巻き戻し時には、フィルムと圧板間に静電気が容易に発生してスタティックマークと呼ばれる放電の痕跡をフィルムに残す欠点があったが、摺動面のコーティングを模索して軽減する苦労もあった。

これらの技術は、フィルムを必要としないデジタルカメラに発展した現在は既に無用なものとなった。

しかしながらフィルム巻上げ時の急速スタート時と急速ブレーキでも正確なフィルム位置を制御する技術、さらにその際の振動をも軽減する技術は、シャッターチャージや AF（オートフォーカス）などモーター駆動機構の残っているデジタルカメラにおいても応用されている。

4. ストロボ

その次に自動化されたのは、面倒な計算を省くためのストロボ自動調光技術である。

そもそも照射範囲が限定される手の掛かる光の回り方を考えるだけでなく、発光量、使用フィルムの感度、被写体までの距離、絞り値をいちいち計算するのは大変面倒で経験を要する機材であったが、被写体からの反射光を利用して電氣的に発光を停止させる「調光」によって解放された（図 7）。

Xe（キセノン）管の発光を途中停止できる半導体素子の開発、近年では複数のストロボを制御できる巧みな細工も活用の一助になっている。

もちろんストロボで照射される主要被写体の明るさを計測し、最適なタイミングを指示するアルゴリズムの発展が不可欠であった。

それによって現在では、飛躍的な高感度対応も相まって、かつての暗所の撮影を可能とする単なる補助光ではなく、クリエイティブな作品を得るためのライティングとして有用な機材になっている。



図 7

さらに複数のストロボを有線あるいは無線で連携した撮影を行い、効果的なライティングが可能となっているのは、高速通信技術のたまものである。

フィルム時代には本撮影に先立つ光の回り方の確認は撮影者のノウハウに委ねられており、精々ポラロイドフィルムで確認できる程度であったが、デジタルカメラ時代には自由に事前確認が可能のため、作品作りは飛躍的に便利となった。

なお本来は一般名称である「電子閃光器」あるいは「エレクトロニックフラッシュ」と称するべきであるが、長年の間に事実上一般名称化している「ストロボ」を使用した。

5. フレーミング（ファインダー）

当初はレンズを介してカメラ内のスリガラス状に被写体像を投影して撮影範囲の確認と構図、ピント合わせなどを行い、同一面に感光乾板を置いて撮影を行った。

単なる四角い枠で構図を観る簡便なものもあったが、その後レンズ光軸に平行に設置した光学ファインダーが発展した。

光学方式にもさまざまな工夫がなされ、カメラの主流となった（図8）。

撮影レンズとは異なるもう一本のレンズを介して上方から観察するウエストレベル方式（二眼レフ）も一時ではあったが存在した（図9）。

一方、観察するシーンと実際に写る画面とが一致する一眼レフカメラも発達し、用途に合わせた様々な形態の交換ファインダーが発売されていたが、デジタルカメラ時代には激減した。

背面モニターを可動式にすることで様々な確認アングルが選べるためである。



図 8



図 9

レンズ交換式カメラでの主流は、巧妙な機構による距離計連動式レンジファインダーと、一眼レフに代表されるペンタプリズムを用いたファインダーであった。

しかし前者は特に望遠レンズではパララックス（観察画面と撮影画面との不一致）が顕著となるため、解決手段として現在でも一眼レフカメラが重宝されている。

これは現代のレンズ交換式デジタルカメラにも有用な形式で、被写体の自然な光をそのまま観察できて目にも優しく、撮影領域がフィルムあるいは撮像センサーと同一 100%視野、精密なピント状態の観察も可能なまでに完成している。

被写体の確認だけでなく、初期は指針式メーター、現在は LCD（液晶）表示などを用いた露出条件やピント状況、カメラの設定状態も一目で分かるインジケーターが発展して現在に至る。

デジタルカメラ時代には、光学ファインダーだけでなく、撮像結果や設定状態をリアルタイムで LCD などによるモニターで確認できる手段となったが、それについては後述する。

6. シャッター

感材の感度が高まって露出時間が短くなり、かつその精度も必要となると、レンズ内あるいはカメラ内に設置する高性能なシャッターが開発された。

レンズ内の絞りを兼用したり、類似形状の専用シャッターを設けたため、レンズシャッターカメラと称されたこともある（図 10）。

比較的高級なカメラには感材の直前を走行する複数枚のシャッター幕を左右に走行させて露出時間を生成するフォーカルプレーンシャッターが主流となった。

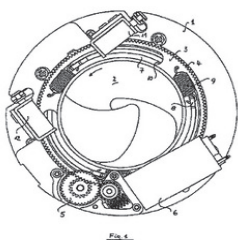


図 10

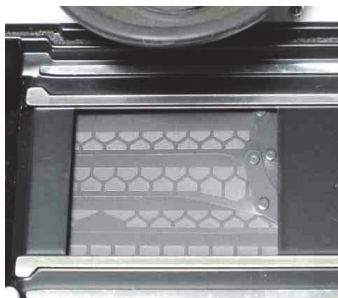


図 11

鉄やアルミ、あるいはゴム引きの布幕から始まったシャッター羽根（幕）の材料は、丈夫さを求めるためにチタンが使用されたり、さらに高速なシャッタータイムを得るためにプラスチックや炭素繊維複合材も使用されている（図 11）。

LCD などによる電子化（固体化）も繰り返し考案されているが、コントラストが不足して完全な暗黒と完全な透明を達成するには程遠く、アイデアのみの状況である。

デジタル時代には撮像センサー自体にシャッター機能を持たせる技術が実用化されており、それについては後述する。

7. レンズ（絞り）

固定絞りの時代から複数枚の羽根による構造に至って現在でもそう変わりはないが、自動露出のための電動駆動化がボディとの協働によって採用され、ソレノイド併用のバネ方式から始まって、現在の主流はステッピングモーターとなっている。

シャッターチャンス重要な静止画では急速な絞り駆動が必須であるが、同時に無音撮影も求められるためである。

さらに同じ機材を動画撮影に対応するため、スチルカメラとは異なるスムーズな絞り駆動と、本体のマイクに余計な駆動音が届かないように絞りの駆動制御にはさらなる腐心が必要である。

また前項のシャッター同様、LCD などによる電子化（固体化）には成功していない。

8. 露出調節

勘と経験に頼っていた時代を経て、フィルムラチチュードが問題になった時代から単体露出計、セレン光電池、CdS（硫化カドミウム）などの測光用センサーをカメラに内蔵させて指針を動かすなど、シャッタータイム・絞りとの連動機構を備えた発展があった。

その後 AE（automatic exposure：自動露出）化が求められ、メーター抑え込み方式のシャッ

ター優先式自動露出、光・シャッタータイム共に対数的に変化する数値をアナログ回路で処理する絞り優先、さらに両方式を備えた両優先方式やプログラムモードなどに進化した(図 12)。

測光用センサーは、初期はカメラの一部に置かれていたが、TTL (through the lens : レンズを通した光を利用する) 方式、特に一眼レフでは反射ミラーの裏側やファインダー光学系に組み込む方式が採用された。

また被写体の一部を測光するだけの単純な方式から、撮影画面を複数に分けて測光し、特有のアルゴリズムを介して露出量を決定する「マルチパターン測光」も主流となった。

測光センサーは SPD (シリコンフォトダイオード) を複数の領域に分けたものから、専用の CCD (charge coupled device : 電荷結合素子) 撮像センサーにてはるかに微細な測光ができるものも実用化されている。

デジタルカメラの中には、測光専用素子を設けず、撮像センサー自体の信号を用いて露光量を算定するものもあり、レンズ一体型デジタルカメラやミラーレスカメラは全てその方式である



図 12

9. 焦点調節

完全目測であった焦点合わせは、単独距離計、カメラボディと一体化させた二重合致式の連動距離計、ボケを拡大して見せる工夫を加えた焦点板上で被写体を観ながらレンズの距離環を手で回す手動方式の後、AF に発展した。

まず焦点検出方法として超音波、赤外線による三角測量などが編み出され、その後一眼レフに実用化された専用 AF センサーをカメラの床下部に設けた位相差方式で集大成された(図 13)。

位相差検出方式は焦点のズレ方向が検出できるので、レンズ駆動の高速化と相まってスポーツ撮影にも適するピント合わせが可能と

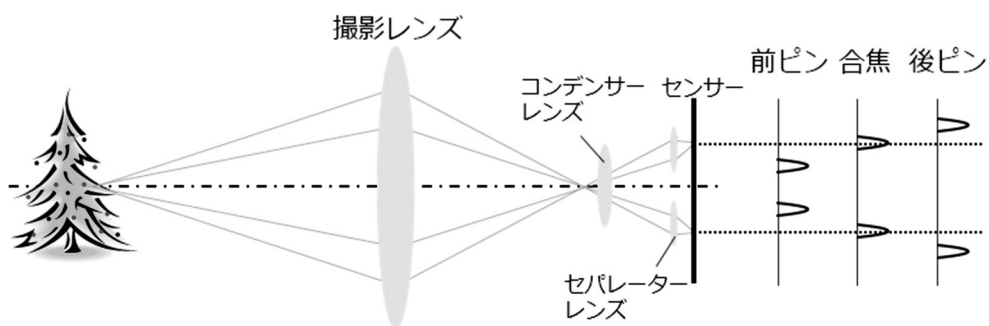


図 13

さらにデジタル時代にはフィルム一眼レフ時代からの位相差 AF が高度に発展し、測距範囲の拡大と微細化による高精度化が図られている。

一方レンズ固定式デジタルカメラにおいては、先の方式を経て撮像センサー出力の一部のコントラストを検出するコントラスト AF (図 14) が主体となった。

その後レンズ交換式、レンズ固定式を問わず、撮像センサー自体に焦点検出機能を埋め込んで被写体とピンポイント検出位置をこの上なく一致させ、先のコントラスト検出方式では不可能だった焦点ズレの方向を検出できる像面位相差 AF 方式 (図 15) として発展している。

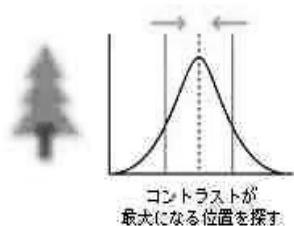


図 14

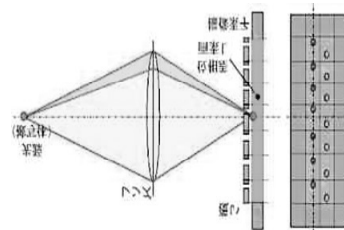
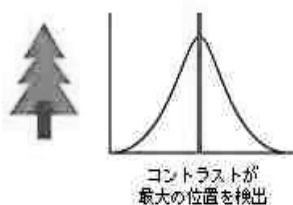


図 15

いずれの検出方法においても、レンズの焦点合わせに関わるレンズ群を高速に移動させるアクチュエータが重要になり、初期の DC モーターから、音が静かでしかもレンズに最適な構造の円環型超音波モーター (図 16)、さらにはステッピングモーターなどが使用されている。



図 16

単に静止被写体にピントを合わせるだけでなく、不規則にかつ高速に移動する被写体にピントを合わせるため、刻々変化する被写体の位置情報を検出かつ記憶して遠近のみならず左右上下の将来位置を予測する駆動方式が主流となっている。

なお遠方のカーブを高速でターンするスポーツカーと、親の近くで走り回る幼児とは、像面における被写体の移動速度は類似しており、決して後者の撮影が容易と言う訳では無い。

10. 手ぶれ防止

フィルムカメラの時代から、被写体がブレていることはカメラあるいはレンズに組み込まれた角速度センサー、加速度センサーによる検出が主流である。

今では5方向（ヨー・ピッチ・ローリング・シフト）のブレ検出が必要なため、それぞれのセンサーは複数ペアが設けられている。

補正駆動の主流はレンズ内の一部の補正レンズ群を、ブレた方向と逆に移動させる光学補正方式（図 17）が主力である。

デジタルカメラでは撮像センサーならではの方式が工夫されているがそれは後述する。

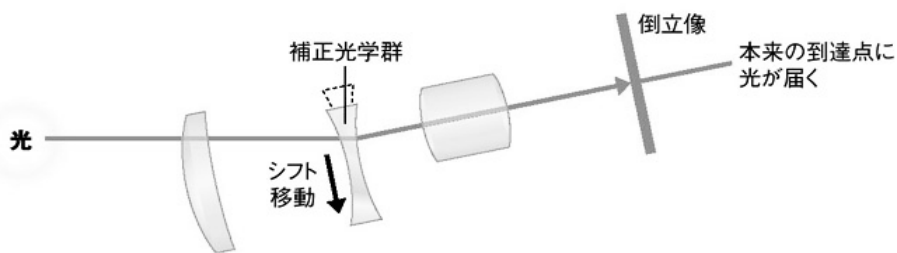


図 17

11. 電池

前述のストロボを除き、フィルムカメラは元々機械式であったために電源は一切不要であったが、次第に機能が増えるに従って電池が必要となって来た。

初期は一般に市販されている円筒型のマンガンあるいはアルカリ乾電池や水銀ボタン電池がフィルム給送、メーター駆動などに使用された。

その後銀電池、リチウム一次電池に置き換わり、充電式電池としては NiCd（ニカド）電池、NiMH（ニッケル水素）電池を経て、環境規制に対応できるリチウム電池が多用されている。

電池消耗を気にする必要のない純機械式カメラの長年の習慣があったため、カメラやレンズの内部機構の効率化、電子回路の省電力化を図り続け、電池寿命の向上には神経を使っている。

そのため電池メーカーとの緊密に連携によって高容量で大電流の取り出せる専用電池の開発を続けている。

中でも充電式リチウム電池は、電池セルの電圧が高いことから高度な電子回路が必要なデジタルカメラの主流である。

初期は電池セルの温度を認識する程度であったが、その後電池残量を正確に知りたいと言う要望に応えるために充放電電流を積算したり、充放電回数をカウントして電池自体の劣化なども表示している。

これは交信用接点を設けて電池とカメラおよび充電器間でデータ交信を行って可能となる機能である。

さらに電池パック内に設けられた特殊な ID 信号をカメラが認識し、模倣電池の使用を排除して誤動作や発火を防止する工夫も付加されている。

12. 材料

初期のカメラは筐体として木、表皮として皮革や丈夫な紙から始まり、日本では表具師らが製作したものであったが、堅牢性と精度が必要になるにつれて真鍮、アルミ、マグネシウム、チタンなど様々な金属、さらにコストダウンと軽量化のためにエンジニアリングプラスチック、軽量化と強度を両立できる炭素繊維複合材が採用されている。

ダイキャスト製法によるアルミが主力であったが、近年ではより軽いマグネシウムがチクソモルディング製法で作られ、中級機以上のカメラやレンズの骨格に多く使われている。

なお金属による骨格やカバー類は、高速高機能なデジタルカメラの内部で発生する、撮像センサーや画像処理エンジンの熱を外部に放散する役目も負っている。

13. 電子回路と実装技術

カメラの自動化競争は '70 年代後半から盛んになった。

それ以前はディスクリート（トランジスターや抵抗などが個別部品として組み合わされた）

構成でメーター指針などを駆動する比較的簡易なものであった。

半導体製造装置の発展に伴って IC 化が始まると、他電気製品に交じってカメラの電子化のために導入された。

初期の IC (integrated circuit : 集積回路) はバイポーラーなどのアナログ回路が基本であったが、80 年代になるとデジタル回路や LCD 制御を行うために CMOS (complementary metal-oxide semiconductor : 相補型金属酸化膜半導体) などによるデジタル回路も採用された。

本格的な CPU (central processing unit : 中央処理装置。いわゆるマイコン、プロセッサ) が導入されたのは、複雑な対数計算や様々な条件下での露出計算が必要なマルチパターン測光が採用された頃からである。

その後カメラとレンズ間に通信が必要となり、LCD 表示やフィルム給送のためのモーターが内蔵されてシーケンス制御が一般化されると電子回路の主役は CPU となった。

デジタルカメラにおいては、画像処理エンジン内の CPU が画像信号を扱う処理全般を受け持ち、それ以外の処理を外付けの CPU が行っており、それらの周辺にはセンサー類とそのインターフェース回路と言う構成に変化して来ている。

ところで半導体類が搭載される FPC (flexible printed circuit : 可撓性回路基板) や多層リジッド基板 (硬質基板) とその実装組立て装置による高密度実装の牽引役となったのは、実は'70 年代のカメラであった。

多層リジッド基板と両面 FPC をサンドイッチした実装回路は、それまで宇宙用あるいは軍用でしか使われなかった最先端のものであった (図 18)。

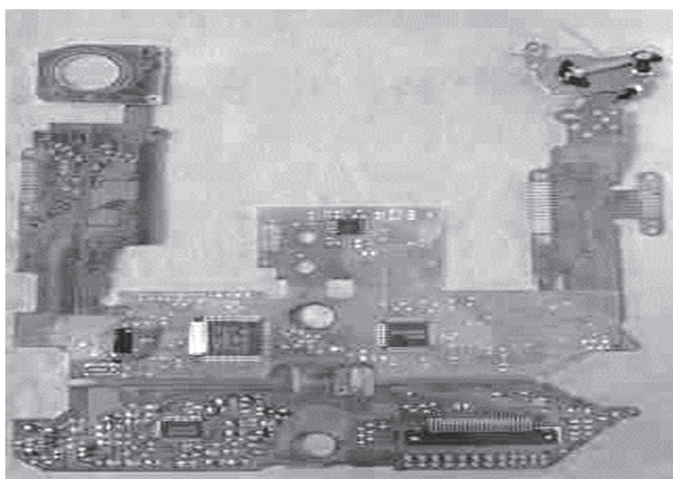


図 18

14. 耐環境

地上専用のカメラやレンズでも、ある程度の防滴性・防塵性を備えていなくてはならない。

純メカニズムで構成されていた時代には、結露や雨水が侵入しても当座の作動は可能であったが、いずれ内部機構が錆びて故障に至る問題があった。

その後前述した自動化機能が採用されると、内部には水分に弱い電子回路や電源回路が追加され、瞬時に作動停止することが散見された。

そのため、実際の雨量と時間を規定し、内部に水分が侵入しないよう、仮に侵入したり結露が発生しても問題のない工夫を凝らした。

前者は O リング、シーリングと撥水塗料の塗布、後者は回路のインピーダンス（信号に対する抵抗値）を下げるなどの工夫である。

さらに水中カメラではさらに高度な O リング、撥水塗料を施した機種が開発された。

高度で微細な電子回路を必要とするデジタルカメラでは、以上の工夫が集大成されているのは言うまでもない。

なお裏蓋を開けてフィルム交換しなくてはならないフィルムカメラはその大きな開口部の防水性とメンテナンスに気を使わなくてはならなかったが、電池やメモリーカード用の小さな開口部で済むデジタルカメラの防滴性確保は比較的容易となった。

また 36 枚程度で撮影が終わるため、複数台を持って潜ったり、頻繁に水上に出てフィルム交換をしなくてはならないフィルムカメラと異なり、メモリー容量と電池残量が続く限り撮影が続けられるデジタルカメラによって水中撮影そのものは非常に便利になった。

一部ではあるが特殊な環境として、宇宙や極地（北極、南極など）で使用されるカメラやレンズも開発された。

何れも試験条件は地上より厳しく、極端な高温あるいは低温での確実な作動、激しい振動に耐える事などである。特に極地では乾燥状態での作動、宇宙用は真空中での作動と宇宙線への耐性が特殊な作動条件であった。

15. マウント

レンズ交換式カメラではレンズとカメラを連結するマウントが重要な存在であった。

初期はスクリュー（ネジ式）マウントであったが、迅速なレンズ交換のためにバヨネット（少ない回転角度で着脱可能な機構）マウントが考案され、現代のデジタルカメラにも継承されている。

カメラの自動化のためにはカメラ本体とレンズは互いの認識が必要であり、初期は機械的な

切り欠きやレバーがその役を担った。

近代になって AF などの一層高度な工夫が必要になったことからマウントに接点を設け、カメラとレンズそれぞれに搭載された CPU が通信を行い、互いの状態をリアルタイムに認識するようになった。

AF 以外には AE 制御するための光学情報などがレンズからボディに、ボディからレンズには露光開始や終了などのシーケンス情報などが転送されている。なお過渡期のマウントには機械式信号と電子接点の両方を備えた複雑なマウントシステムを装備したカメラも存在した(図 19、図 20)

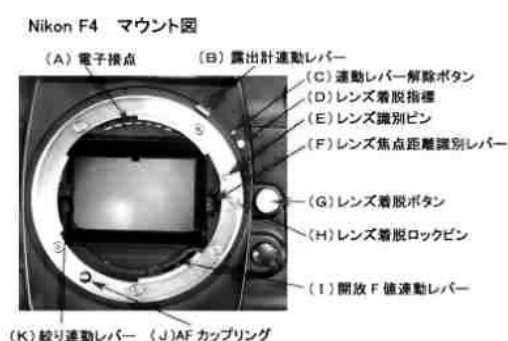


図 19



図 20

第3節 フィルムカメラからデジタルカメラへの過渡期

1. システムカメラ

レンズ交換やファインダー交換が出来る一眼レフカメラはシステムカメラとして発展した。用途が非常に拡大したため、レンズは焦点距離数千 mm の超望遠から 180 度以上の画角をカバーする魚眼タイプまで、ファインダーは通常のアイレベル、ウエストレベル、アクションなどだけでなく、焦点面を ITV カメラや CCD カメラで撮像し、遠距離で観察できるリモートファインダーまで商品化がされた。

また手持ち撮影ではなく、長期間の無人撮影を可能にするためのリモートコントロールや長寿命のバッテリーパックなども考案された。

ストロボについては前述した通りである。

デジタルカメラ時代にはフィルム時代の何れもが共用でき、さらに発展してユーザーの要望に依っている。

用途が非常に拡大したため、レンズは焦点距離数千 mm の超望遠から 180 度以上の画角をカ

バーする魚眼タイプまで、ファインダーは通常のアイレベル、ウエストレベル、アクションなどだけでなく、焦点面を ITV カメラや CCD カメラで撮像し、遠距離で観察できるリモートファインダーまで商品化がされた。

また手持ち撮影ではなく、長期間の無人撮影を可能にするためのリモートコントロールや長寿命のバッテリーパックなども考案された。ストロボについては前述した通りである。

デジタルカメラ時代にはフィルム時代の何れもが共用でき、さらに発展してユーザーの要望に応えている。

なお、リモートファインダーについては、デジタルカメラでは撮像中のデータあるいは撮像した結果のデータを転送する方式に置き換わっている。

リモートコントロールは、かつてのようなシャッターを切るだけの単純機能ではなく、例えば Wi-Fi とスマートフォンを用いてカメラの各種機能を設定でき、同時に画面をモニターしながらカメラを動作させるまで発展して来ている。

2. 電子カメラ及び電子画像電送機

デジタルカメラ時代の前には、短期間ではあるが電子カメラと電子画像電送機の時代があった。

電子カメラは電子スチルビデオカメラ、通称マビカ（ソニー商標：図 21）に端を発する機材で、撮像センサー（当時は CCD）の信号を 2 インチのフロッピーディスクに FM（frequency modulation：周波数変調）記録する方式であった。

当時はフィルムカメラ全盛で、未だ電子カメラ特有の要素技術が未熟かつ高価でもあったため、一部の報道機関が迅速な報道を行う用途にとどまっていた（図 22）。

画素数が少なく画像処理も満足ではなかったため、新聞の網点印刷でさえその粗が目立ち、紙面には「電子カメラで撮影」などの弁解めいたキャプションが必要であったのは今では一世の感がある。

一方高精細な画像を送るために現像したフィルムをスキャン（走査）し、電話回線で送る電子画像電送機（フィルムダイレクト電送機：ニコン商標）も報道機関で使用された（図 23）。

それまでは印画紙を巻き付けてスキャニングする大型のドラム式電送機が必要であったのを、現像したフィルムが使える形式であったために小型化と迅速化に貢献した。

いずれもカメラメーカーにとっては、それまでに経験の浅かった撮像・画像処理・伝送のノウハウを掴む端緒として、以降のデジタルカメラの開発に貢献した。



図 21



図 22

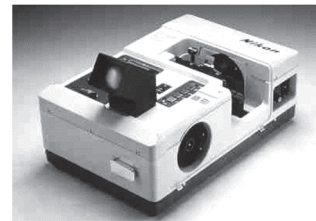


図 23

第4節 デジタルカメラへの道

1. 撮像センサー

以上のように簡便化、小型化、価格低下、他力化作戦で一般人への普及を図ってきた図式は、現像・プリントを感材メーカーなどに頼っていたフィルム全盛時代を変貌させ、現在のデジタルカメラ時代に至る。

フィルムカメラでは、撮影後のワークフローの多くは現像所などの DPE (development printing enlargement : 現像・焼き付け・引き伸ばし) 業者に委ねられ、写真機材は正確な露出と焦点合わせなどを実現するだけで済んでいた。

しかし撮像センサーが内蔵され、その撮像結果をカメラ内の画像処理エンジンで処理するデジタルカメラは、いわば現像所をも引き受ける立場に大変わりした。一部には小型プリンターを内蔵するデジタルカメラもあることから、それは全てのワークフローを達成したことになる。

またフィルムカメラ特有のフィルム装填などの作法が不要となり、その場で結果確認が出来ることでユーザー層が飛躍的に拡大し、生産数も増えることになった。

カメラメーカーはフィルムカメラ時代から培ってきたノウハウをさらに洗練化、不可能だった機能性能を取り入れて一層便利にした。

デジタルカメラ特有の技術を習得することにも腐心したのは言うまでもなく、さらに確実に歩留まり向上する工夫を凝らして機材単価を引き下げる努力を続けている。

また前述の焦点検出機能だけではなく、電子シャッター機能をも持たせて無音化、省スペースに貢献できる技術も発達して来ているが、実用化はローリングシャッター止まりであるため、グローバルシャッターの実現が待たれる。

初期は CCD センサーが主流で、製造ノウハウを持っていた少数の半導体メーカーでしか製造はできなかった。

駆動には多種の電源が必要なことからカメラで使用するには苦勞が伴ったものの、2000 年代

前半まで多くのデジタルカメラに使用されていた（図 24）。

一方単一電源で駆動可能な CMOS センサーも存在はしていたが、その回路上の特性からスイッチングノイズを除去しきれず、画質をそう問わない特定の分野でのみ使用されていた。

その後後者の欠点が大幅に改善されて十分な画質が得られ、さらに画像処理エンジンが高度な機能になったことも相まって超高感度対応まで可能となったことから 35mm フルサイズカメラに本格採用されて以降、殆どが CMOS センサーに置き換わっている。

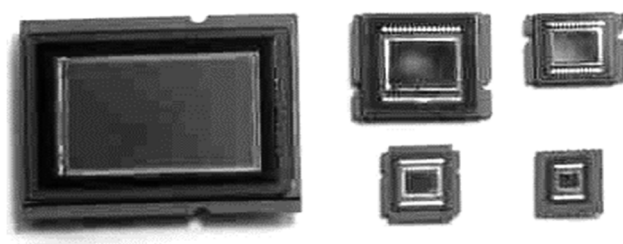


図 24

なおデジタルカメラの撮像センサーを単に「CCD」、「CMOS」と呼ぶ傾向があるが、それらは半導体の機能と構造を表現しているだけゆえ、いずれにも「センサー」などを付けるのがふさわしい。

撮像センサー上のピクセル単位に設けられている微細な SPD（シリコンフォトダイオード）は元々明るさだけを検知するものゆえ、カラーフィルターをその前面に設けて色信号として検知しなくてはならない。

Foveon X3
ダイレクトイメージセンサーの基本構造

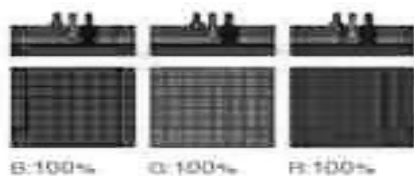


図 25

ベイヤー式イメージセンサーの
基本構造

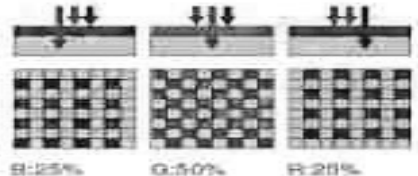
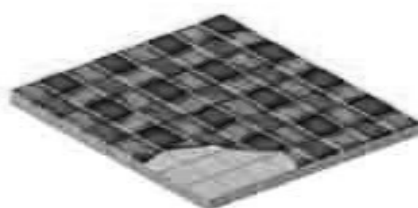


図 26

カラーフィルターを用いず半導体の深さ方向で RGB を個別に認識するユニークな撮像センサーに FOVEON（米 Foveon 社商標）センサーが存在するが、ポピュラーではない（図 25）。

先のカラーフィルターの主流は RGB 三色を配置したベイヤー配列（Bayer：発明者名。図 26）が主流である。

4 色目のフィルターを追加したり、配列のパターンを変えてサイズの異なるフォトダイオードを追加するなど、ベイヤー配列の欠点を補う方式も提案されているが、いずれも特定メーカーのデジタルカメラに実用化されている状況である。

もともと撮像センサーは半導体の中でも巨大な面積のもので、一枚のシリコンウエハー（ケイ素主体の薄い基板）からの取り数が少なく、かつ留まりも低かったために非常に単価が高い時代があったが、製造台数の増加と共に半導体製造装置類の進化によって、歩留まり向上とコストダウンが図られ、現在の生産台数に至っている。

このコストダウンの図式は、後述の背面モニターや EVF 用の LCD、さらに画像処理エンジンなどについても同様である。

2. フレーミング（ファインダー） …デジタルカメラの場合

先に述べた、光学ファインダーだけでなく、撮像結果をリアルタイムに LCD などに表示するデジタルカメラならではの手段を述べる。

電子カメラおよび初期のデジタルカメラには光学ファインダー（OVF：optical view finder）のみ設けられていたが、その後背面にモニターLCDが配置されてようやく大衆化が始まった（図 27）。

これは写る画像を事前確認できるだけでなく、写った画像を楽しむと言う新たなニーズを見出したからでもある。

その後しばらく光学ファインダーと背面モニターによるライブビューが混在する時期があったが、殆どのレンズ固定式カメラから光学ファインダーがなくなり、背面モニターによるライブビューや、小型モニターを組みこんだ EVF（electronic view finder：電子ビューファインダー）方式を併用する形式に切り替わった。

一方レンズ交換式、特に一眼レフデジタルカメラにおいては、光学式ファインダーと背面モニターの両方式が採用されている。

背面モニターは、通常の静止画撮影だけでなく、動画を撮る際に便利なものである。

さらにミラーレスカメラは、一眼レフカメラの特徴であったミラーと光学ファインダーを構造的に取り去って小型化を図り、背面モニターだけで撮影したり、EVF 化したファインダーで視認するものである。



図 27

3. 手ぶれ防止 …デジタルカメラの場合

検出したブレを補正する方式は、レンズの補正光学系を駆動する方式の他、撮像センサー自体を VCM などのアクチュエータで移動させる方式（図 28）、撮像信号中から被写体のブレを認識し、毎コマの撮像画面から切り出してしまう方法も考案されている。

ただ後者は画素数が減少する大きな欠点がある（図 29）。

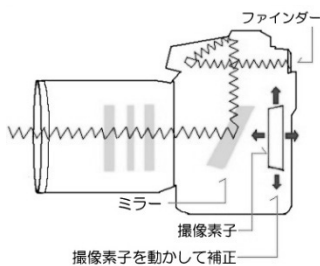


図 28



図 29

4. マウント …デジタルカメラの場合

前項で述べたレンズ交換式カメラのマウント形式は、一部を除いて、メーカー独自のものであり、しかも永続的なビジネスの元になるものであるゆえ、デジタルカメラにおいてもその良否と発展性が重要である。

フィルム、デジタルを問わず、一眼レフカメラに必須であったミラーはその名の通りにミラーレスデジタルカメラには不要となることから、マウントを変更するのが最適である。

カメラを薄くできることがミラーレスカメラの特徴ではあるが、一方で一眼レフカメラメーカーには従来の多種多様な交換レンズを資産としていることもあり、最新のミラーレスカメラに従来レンズを装着できるマウントアダプターが重要な存在となる。

カメラメーカー純正のマウントアダプターはカメラ側、レンズ側双方に電子接点を備え、内

部に信号変換用の電子回路互を設けて互いの互換性を確保している（図 30）。

5. 画像記録

デジタルカメラは、初期には画素数が少なく、一方で安価なメディアが無かったため、メモリーを内蔵している機種から始まった。

利便性を求めてパソコンとの共用を図った PCMCIA（Personal Computer Memory Card International Association）準拠の大型メモリーカード（図 30）を経由した後、CF（compact flash）カードが主流となった。

半導体メモリーが低容量で高価な時代には小径のハードディスクを組み込んだ CF カードサイズのマイクロドライブ（図 31）も存在した。

入手性が悪い市場での拡販を図るために 1MB（メガバイト）、2MB、精々 16MB の CF カードが同梱されている機種もあったが、現在の画像一枚の容量を考えると隔世の感がある。

CF カードに対抗し、カメラのさらなる小型化と薄型を目指してスマートメディア、マルチメディア、SD、メモリースティックなどが相次いで提案された。

この中では耐久性に難のある薄型カードが姿を消し、現在では SD（secure digital あるいは super density）カード（図 32）の入手性が最良で主流を築き上げ、さらなる高速化の発展も続けている。

一方、接点が多く、高速化に限界が見えて来た CF カードに置き換わる CFAST、XQD を採用するデジタルカメラが販売されているが、それらを統合する次世代版として CFexpress（図 33）が開示されている。



図 30



図 31



図 32



図 33

6. 画像処理

いわゆる画像処理エンジンの中核は画像処理であり、代表的には図 34 に示すように、撮像センサーから出力された RAW データを「ホワイトバランス」、「補間」、「色空間」、「階調」、「輪郭」、「ノイズリダクション」、「フォーマット変換」などの処理を順次行う機能を持っている。

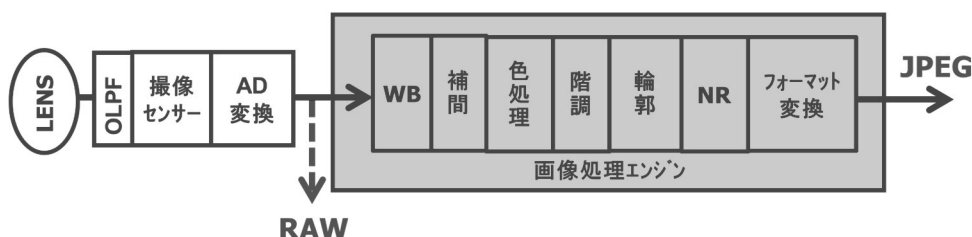


図 34

ホワイトバランス処理ブロックに入力する前段階の信号は RAW データと呼ぶ撮像信号からの（ほとんど）生の信号であり、パソコンなどでユーザーが自由に処理できるものである。

そのため RAW データそのものを保存しておけば、後々の任意の時期での画質トレンドに合わせた加工処理が行えるなど、非常に融通が効くものである。

その代わり、データが圧縮されていないために大容量であることに留意が必要である。

RAW データは撮像センサー毎に異なるものであることから、メーカーが各カメラごとに提供する独自のアプリケーションで現像するのが最適であるとされている。

しかし一方でメーカー間の融通性を持たせる考えをもとに規格化された RAW データ形式も存在するが、市場では少数派である。

フォーマット変換ブロックの出力はいわゆる JPEG データと呼ばれ、それ以前の画像変換がすべて完了しているもので可逆性はない。

その代わりに小容量であるため伝送などの負荷にはならず、しかもパソコン・モニター・カメラ・スマートフォンなど市場に存在するほとんどの機器で使う業界共通の便利なデータ形式である。ここに至る説明は後述する。

メーカーや折々のカメラにもよるが、画像処理エンジン内には上述の画像処理の他に、「メモリーカード通信」、「EVF 表示」、「背面モニター表示」、「レンズとの交信」、「タッチパネルからの受信」、HDMI・WiFi・Blue Tooth などの「外部通信」、「シャッター駆動」、音や LED などでの「表示」などの機能を持たせている。

それ以外の機能、例えば「電源制御」、「バッテリーとの交信」、「ストロボとの交信」、「各種スイッチからの受信」、「リモコン機能」などを別設したプロセッサ（CPU）に持たせていることもある。

7. 動画

デジタルカメラ特有の長所の一つは、初期の撮像センサーの多くがムービー用の撮像素子を

転用したこともあって、静止画と動画を記録する発想に無理がないことである。

レンズ固定式の、特に小型なデジタルカメラは画像センサーが小型であって高速駆動が容易であり、さらに画質の許容度も高いことから、ごく初期から両機能を持っていた。

レンズ交換式デジタルカメラでは、一般に撮像センサーが大きいため以上の逆であって採用が出遅れたが、撮像センサーの高速駆動と画像処理エンジンの能力が高まった時点で採用が始まった。

なお一眼レフデジタルカメラでは、ムービーカメラ同様に背面モニターを見ながらの撮影として使用されるが、被写体光路にミラーが介在しているため、動画モード時にはミラーアップをしなくてはならない。

その点ミラーレスデジタルカメラはスムーズな静止画モード・動画モードの行き来が可能で親和性は高い。

レンズ固定式あるいは交換式を問わず、大型撮像センサーのデジタルカメラは高感度に強く、自ずとレンズも高性能であり、さらに被写界深度が狭い表現が記録できるなどのことから、多くの TV-CM などの撮影機材として重用されている。

もちろん 4K や 8K の動画記録に対応しているのが現在の流行である。

第5節 まとめ

1. 画像の楽しみ方

初期のデジタルカメラはデバイスや画像処理の技術が伴わなかったために、表現の範囲が狭くフィルムに及ばなかった時代があった。

その後の画像処理技術の深耕によって先ず「オート」、「スタンダード」、「ニュートラル」、「ビッド」、「ポートレート」、「モノクローム」など基準となるモードが用意されるようになった。

また撮影後にパソコンで画像処理を行って調整を行わなければならない時代を経て、カメラ自体に画像モードを用意すること、例えばフィルム名を直接指定してそのフィルム特有の表現を忠実に再現できるモード、あるいはすべてのパラメーターを自在に設定できる「カスタム」が可能となって撮影後の効率化を図ると同時に、自在な表現設定を可能とした。

また元々レンズ固定式デジタルカメラで多く用意されていた「セピア」、「単色」、「グラフィート」など多種多様な表現をも楽しめるモードも一般化されている。

2. 標準化

デジタルカメラ黎明期、画像フォーマットについて様々な国やメーカーからの独自提案による乱立が始まったが、日本電子工業振興会 (JEIDA) で互換性問題について議論が開始されて世

界標準化に導くなど、日本国内のメーカーや学術経験者が結集して標準化に成功した。

「お客様に迷惑が掛からないように」を最終目的としてメーカー同士が歩み寄り、発展性のあるフォーマットを仕立てあげた重要な成果である。

これによってデジタルカメラやスマホなどの撮影機器、パソコンやタブレット PC などの処理機器、プロジェクターやモニターなどの表示機器、データを仲介するメモリーや通信装置まで、フォーマットの存在を気にする必要がなくなっている。

現在その標準規格は日本電子情報技術産業協会（JEITA）とカメラ映像機器工業会（CIPA）によって共同管理されている。

以上の紆余曲折については大川元一氏が詳述されている論文（後述）を参照されたい。

なおCIPAは、デジタルカメラをはじめとする映像関連機器の開発、製造・販売に携わる会員によって構成される業界団体で、1954年に発足した日本写真機工業会（JCIA）に端を発しており、戦後の混乱期に乱立したカメラ製造業をいち早く自主的に律し、世界的な産業に導いた実績を今もなお受け継いでいる。

現在では国内外の関連メーカー・学術団体による国際団体として活動が続いている。

【参考文献】

- 1) 日本カメラ博物館
- 2) 神立尚紀著 カメラの歴史（講談社）
- 3) 豊田堅二著 カメラメカニズム講座（日本カメラ社）
- 4) 大川元一著 デジタル・スチルカメラの技術発展の系統化調査（国立科学博物館）
- 5) カメラ映像機器工業会（CIPA）HP
- 6) ニコン全一眼レフカメラ発売年表／仕様（By キンタロウ）
- 7) 東京工芸大学芸術学部（元）学部長 内藤明講義録
- 8) 東京工芸大学芸術学部 非常勤講師 後藤哲朗講義録

【図、表の出典】

図 1～3、8、21、31 日本カメラ博物館資料

図 4 Eastman Kodak Company HP

図 5、4、17、25 LEICA CAMERA AG HP

図 6～7、11～12、16、18～20、22～24、30、32、34（株）ニコン HP、製品説明資料

図 9 Rollei GmbH HP

図 10 (株) タムロン HP

図 27 カシオ (株) HP

図 28、29 パナソニック (株) HP

図 25、26 (株) シグマ HP

図 33 ProGrade Digital Inc. HP

図 13～15、17 参考文献 3. 8

第 2 章 カメラ産業における技術的変革の推移

第 1 節 撮像素子とデジタルカメラへの息吹

1970 年前後からアメリカン電話通信株式会社 (AT&T) ベル研究所で開発に着手した CCD (Charge-Coupled Device) は、当時で 5 億ドル規模の研究開発投資を行ない、メインメモリー (DRAM) 中心に開発が進められていた。

ベル研究所の親会社 AT&T の DRAM 開発が、通信への布石に繋がらないとの判断から、方針変更され中断になり、技術の一部は米国の RCA, Fairchild Semiconductor 等の民間企業に流出した。

2 次元撮像素子の源流は、不明確な面もあるが、レンズから入力する光を画像信号に 2 次元的にとらえる固体撮像素子 CCD の特許出願 (特公昭 57-32547 等) に注目したい。デジタル静止画入力に繋がるインタライン転送方式が示されている。

他方、1972 年に発売された MOSLSI 電卓が累計 1000 万台に達し、1980 年代にかけ、MOSLSI 大量生産技術が確立された。

DRAM、MOSLSI、ビデオカメラ撮像素子 CCD 等の半導体需要は、小型カラービデオカメラ、ハイビジョンテレビ、ノートパソコン等の急速な普及、電子事務機器とのシステム化により拡大の一途を辿った。

1975 年にコダックから電子スチルカメラの提案があったが、市場で見ることはなかった。

放送業界は、放送用機材としてビデオカメラ中心にその周辺機器が商用化された。

一眼レフカメラを中心にする静止画は、成熟化の傾向が強く映像・画像の世界と閉鎖された世界の中で、オリンピック等の世界競技に現場からリアルな送信に苦慮されていた。フィルムを現場で現像し、1 次元のアレー型光電素子で読み込み送信された。

米国では自国特許権の権利行使による自国産業を保護するプロパテント時代に有り、知的財産権の活用が活発化し、懲罰的な権利行使が一般的になった。

第2節 固体撮像素子利用の模索としての静止画カメラ

ソニーから1981年にビデオカメラ用CCDを撮像素子、記憶媒体として2インチ磁気ディスクを記録媒体に記録するレンズ交換式スチルカメラが発表された。フィルムのいないカメラの時代との到来との憶測を呼び、数社から技術発表され、これを契機に、「電子スチルカメラ懇談会」(17社参加)が発足した。他方、米国を中心に個人発明家、日本の特許戦略に秀でた企業等から、固体撮像素子を前提にするデジタルカメラのコンセプト、固体撮像素子の要素技術を先取りして多数の特許出願が行われた。

銀塩カメラと同じ撮影レンズで被写体をフィルム面に、同サイズの固体撮像素子で取り込み、固体撮像素子で作られる電気信号を生画像として、画像処理により、フィルム現像に相当する電気信号処理により画像を得る。それを記憶し、ファインダーで表示する。特許は、画像圧縮、補間処理およびその回路の半導体、およびそのチップ化について急激に増えた。

1984年に開催されたロサンゼルスオリンピックで、電子スチルカメラが、ソニー・朝日新聞、キヤノン・読売新聞で実証試験が行われた。

半導体を使用する製品の新たな需要は、1985年からの数年で、量産用のステッパー(半導体露光製造装置：メーカー：ニコン、キヤノン、GCA、日立、等)は縮小倍率1/4から1/5.5インチ主流から、半導体需要の山谷を超える毎(ムーアの法則)に6インチ、8インチを視野に移行、併せて、1回に露光できる画面サイズも□10mm~15mm から□17.5mm~20mmへと進化し、価格の低減と高密度化する半導体需要の拡大に対応していった。

1987年11月に、カシオ時計㈱(電子スチルカメラ懇談会メンバー)から(アナログ式)電子スチルカメラVS101発売された。しかし、売り切れず、事業撤退をしている。

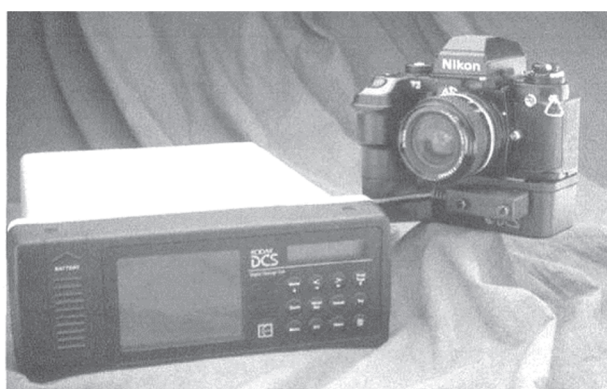


図3 Kodak DCS100

図1 (参考文献2)、展示会カタログ



図2 (参考文献2)、商品カタログ

イーストマン・コダック社は、1991年にKODAKブランドで、撮像素子で得られる生画像の、電気信号を画像化することに着手し、入手できる最大の撮像素子 CCD(14X9.3mm、130万画素)を用い、当時の銀塩カメラ企業の最先端銀塩一眼レフシステム(複数社)を、デジタルカメラに改造し市販した。(図1)画像処理についての一連のイーストマン・コダック社特許の実証と画像圧縮に関する各社に共通する技術ノウハウ蓄積になっている。

1995年にニコン、富士フイルムの共同開発で、イーストマン・コダック社の動きに触発されて、専用ボディの中に縮小リレー光学系により35mm通常レンズによる光像を2/3インチ、130万画素、CCD撮像素子面に集めるレンズ交換デジタルカメラが発売された。

(図2)1996年には、ミノルタは縮小光学系と3色分解プリズムにより、R、G、Bに分け、その各々を1/2インチ35万画素の3枚のCCD撮像素子に分解し画像処理を行う方法を取り、デジタル一眼レフとして製品化が行われた。

いずれも、高額で、銀塩撮影に比較して、カメラの操作性、再生される画像の質において満足させられなかった。

【参考文献】

- 1) 越智成之 「CCD誕生40周年」 映像メディア学会誌 vol65 no5 (2011) 691
- 2) 越智成之 「デジタル一眼レフカメラの歴史と発展」 映像メディア学会誌 vol 61、no.3 (2007) 266-270
- 3)
- 4) 発明協会 戦後日本のイノベーション100選 デジタルカメラ 概要 (2016)
水島昌洋「電子スチルカメラ懇談会の活動とビデオフロッピー規格」
テレビジョン学会誌 Vol.39、No.9』(1985年) 756頁
青島矢一・福島英史 「異業種からのイノベーション カシオのデジタルカメラ(QV-10)開発」 伊丹敬之 外3名編『ケースブック 日本企業の経営行動 3 イノベーションと技術蓄積』(有斐閣、1998年) 361頁

第3章 銀塩フィルムの次世代への挑戦（APS プロジェクト）

第1節 背景

銀塩フィルム業界では、次世代の対応が必要不可欠な状況あった。

具体的には、

- ① 古くて新しい課題として、写真フォーマットの問題（縦：横比）は35mm ライカサイズ（3;2）の普及と標準化され、他のサイズの提案は、普及できていなかった。
- ② 米国発ソニー、RCA 等のビデオカメラが家庭へ浸食し、フィルムによる市場を凌駕した。特に、ビデオカメラ、ノートパソコン、ハイビジョンテレビを連動したシステム化する市場で競えること
- ③ 米国発のプロパテント時代にあり、工業所有権（知的財産権）行使した事業展開が、社会ニーズとして必須の条件になっていた。
- ④ 米国メーカーから日本メーカーへ自動焦点検出方式、CCD 固体焦点検出素子、CCD 撮像素子、マイクロコンピュータ制御等に関する特許等で訴訟が多発しており、各企業共、独自に開発戦略を組み立てることを難しくしていた。

等の銀塩カメラ業界として危機感があった。

5社（富士フィルム、イーストマン・コダック、キヤノン、ミノルタ、ニコン）が、新規格のカセット専用フィルム（IX240）に対して、各社が分担して広範囲に取得する特許を共有し、工業所有権に裏付けられた商品開発を連携して行う。

他方、第3者に特許パッケージを許諾することで、新たな事業基盤・規模の確立と拡大の方策が起案された。

1992年に、特に、イーストマン・コダック社は業界において、世界規模で銀塩カメラ、デジタルカメラ事業を主導したい等の思惑を伺わせ、共同開発プロジェクトの活動が発足した。

第2節 プロジェクト発足時における成果活用に対する共通認識

5社の共通認識は、下記の3点を期待していた。

- ① 小型カセット専用フィルム（IX240）露光面積16.7X30.2mm、縦横比（9;16）、プリント時に縦横比（3;2）、（4;3）も選択できるフィルムの利便性と小型化によるフィルム原価の低減
- ② 小型コンパクトカメラで市場参入、事業利益はコンパクトカメラ以外の新サイズレンズ交換式カメラ、新機能付きフィルム、および新たな事業と期待したカセットフィルムをメディア媒体とした応用機器による市場拡大。

- ③ 参加企業の利点として、特許戦略の優位性（参加企業の役割分担をした出願、参加企業間での特許許諾、第三者特許に対する対応、相互許諾出願）が積極的にされた。

- ・カメラメーカー側で先行的開発
- ・銀塩カメラの電子化の促進（レンズ・ボディ間の電気信号、接点の変更）により次世代への対応
- ・交換レンズ群データの蓄積（レンズ群の特許で独自性を発揮）
- ・プロジェクトの進行状況を把握した新製品の開発

等の事項が共通認識であった。

第3節 APS プロジェクト終了後の顛末

APSカメラは、当初の予定より、1年遅れて、1996年4月に発表された。

具体的には

- 1) フィルムが小型であることの特長を生かし、コンパクトカメラが、プロジェクト5社およびライセンスを許諾された8社から発売された。
- 2) キヤノン、ニコン、ミノルタ、および遅れて、オリンパス、旭光学、京セラからはレンズ交換可能な一眼レフカメラ
- 3) カセットフィルムは、日本市場では、富士フィルム、コニカから、発売された。35mmフィルムと比べて撮影面積が小さいことから、画質が劣る・交換レンズの互換性の問題から新たな市場形成は無理であった。一方、同時期に不参加企業のリコーより、既存の35mmフィルムを使用する超薄型小型カメラGRシリーズが発表されヒット商品になっている。
- 4) フォトプレイヤーという、現像済みのカートリッジを装着して、テレビへ映し出す装置が発売され、BGM、カット間効果をつけた自動スライドショーの機能が付加された。

しかし、新たな提案としていた、「視ること」を切り口に計画されたフィルム上でのズームング等プロジェクト発足時のフィルム粒状は技術的に製品仕様に至らず、小型化できる画面で従来フィルムサイズの35mmを超えることができなかった。

この結果、カメラ仕様は当初より縮小せざるを得なくなり、一眼レフへの展開がアマチュア向けサービスサイズと限定的になり、事業収益の期待が薄れた。併せて、フィルム技術の完成度の低さからロイヤリティを下げざるを得なかった。結果的にカメラ事業としての収益構造構築の糸口に、育成できなかった。

どのメーカーも、発売から10年足らずで、撤退を余儀なくされた。IX240 カセットフィルム

は、供給責任問題もあり、2013 年まで店頭で売られた。

他方、デジタルカメラで立ち上がる隣接事業をほぼ想定した展開で有り、結果的には、周辺事業開発の助走期間になった。

第4章 デジタルカメラにおける技術戦略の変遷

第1節 デジタルカメラ誕生と産業構造の変化

APS カメラの製品発表を前にして予期しない形で、異業種カシオからデジタルカメラ QV-10 (図3) が、1994 年 11 月に発表され、1995 年 5 月に発売された。



図3 (<http://www.itmedia.co.jp/news/articles/1805/19/news012.html>)

それは真に

- ① 見たこと残したい→忠実を記録として残す
- ② 記録したものを即時にみる
- ③ 多人数で同時に見る
- ④ 記録を同時に伝えられる

②、③、④の古来からの願望を満たす第1歩と位置づけられた。QV-10は、25万画素、1/5インチCCD撮像素子上にレンズが回転できるスイバル機能で光情報を撮りと撮影画像が裏面1.7インチ液晶表示し、96枚を2Mフラッシュメモリに記憶できる仕様であったが、ビジネスユースの領域でも受け入れられた。当初月産300台の予定が前評判もあり月産3000台で発売されたが、ノートパソコンに画像が取り込めることが、引き金になり6ヶ月後に月産10000台に引き上げられ、業界に衝撃を与えた。注目すべきは、カメラの仕様以上に、カメラの使用される環境を液晶テレビからノートパソコンに変更したアーキテクチャー戦略は注目すべき視点と云える。

家電業界から画像処理回路、ビデオカメラ用撮像素子ベースにするグループ、カシオ計算機（株）の場合、カメラ業界とのしがらみがなく、時計部門からの発案で、デジタルカメラを情報機器、パソコンとの情報端末として、1980年代中頃から技術者の独自の読みと才覚から独自にデジタルカメラの試作を試み、商品化の際、必須となる技術相互の組み合わせや、見落とされ、気がつけば避けることのできない特許群を取得し、それを切り札にした参入であった。

カメラメーカーの大部分は、カメラ組み立ての延長としてフレキシブル電装基板が組み立てられた。

他方、開発サイドでは、

- ・特許問題についての不安感（潜在的なリスクは博されていたが、米国のサブマリン特許の存在の懸念）
- ・画像処理チップ、撮像素子の入手先の問題、
- ・アマチュア層が許容できる価格（カシオ計算機価格を参考にすると）

等の問題の指摘や半導体技術の進歩を指標にすると、商品寿命を短く、垂直立ち上げで、定めた期間で売り抜くことが必達となり、事業形態が変化した。

この事実を超えての事業化の道には異業種との共同開発、または、部品ベースでのOEM供給、委託生産、製品ベースでのOEMと幾つかの形態が起案され、製品仕様（自社特許での保護できる範囲）と特許と販売時期から組み合わせて決定された。

この時期から、デジタルカメラの周辺の事業として、撮影結果の蓄積、撮影結果の出力としてプリントの事業化に、本格的に取り組まれ、銀塩プリントを超える手法の開発に取り組まれ、カラープリンターおよびインク、トナー、プリント用紙等の消耗品を対象にする事業が創出された。

1995年 カシオ計算機「QV-401」（38万画素：65,000円）

1997年 オリンパスより「キャメディアC-1400L」

1997年 ニコンから「COOLPIX100・300」

1998年「COOLPIX900」（130万画素 1/2.7インチ）

1999年「COOLPIX950」（200万画素：124,800円）

2000年代になると、自社一貫生産は、イーストマン・コダック社を始めとする電機業界向けられていた問題特許が、日本製デジタルカメラ各社に対しての訴訟が多発したことが遠因になり、OEM製品を業の中核にしていた、家電メーカーが特許補償の問題が引き金に、解散吸収の憂き目に遭った。

第2節 大型撮像素子開発とデジタルカメラ

映像階調度と肉眼視に近い画像度を保持する上で、大型撮像素子の必要性が議論されだした。

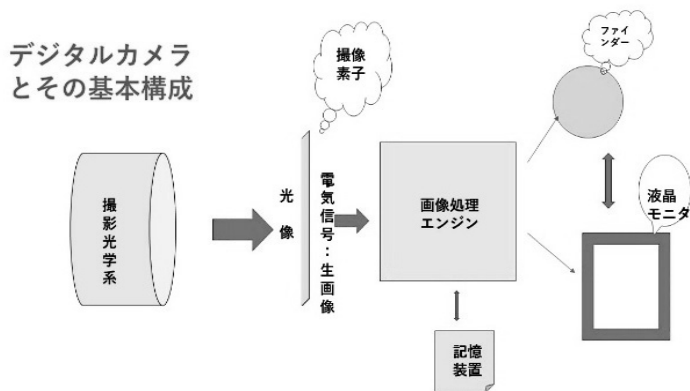


図4 デジタルカメラの基本構成（筆者仕様の概念図）

35mm フィルムと同じ撮像素子サイズを用いることは、これまでの銀塩一眼レフレンズ群において、画像周辺領域での光量の不足、色収差、コマ収差が欠点になり、画質的に見劣りが懸念された。

併せて、ディスプレイ上の解像力として、理想的には 300dpi を充つことを条件に、デジタルカメラ撮像素子数の算出が、一般的に行われた。異なるサイズの撮像素子で、主要一眼レフメーカー間でフォーマットとして、APS サイズが合意点として、レンズデータの蓄積、特許的視点を含めた資産の活用できることから暗黙の合意点になったとも云える。

1995 年に、撮像素子へのデジタルカメラ開発の議論の俎上になり、ある部分では、銀塩カメラとの競えるようになった。ニコンからほぼ APS フォーマットを一回露光で対応できるステッパー（半導体露光装置）の販売を発表された。

デジタルカメラを事業として、離陸への課題として、1970年代、80年代からの半導体、撮像素子、固体撮像素子カメラ、画像信号処理、処理用ワンチップコンピュータの特許は数千件に及び、どの企業も100件を超える問題となる特許をもち、どの企業も1社で解決できない状態であり、誰が鑑みても特許抵触問題を引き起こす状態にあった。

銀塩カメラに1986年から1995年に渡る大型特許訴訟案件の解決のため、企業にとって事業経営の視点から積極的な対策が、多面的にとられた。また、市場形成のための協力関係あり方として相互特許許諾を事前に協議することが、活発に行われ、自社の特徴をベースに他社技術の利用方法を開発段階で内容を評価し、決定する手法がとられた。

ただ、オープンイノベーション的な発想で共同での「もの作りや独立に分担の範囲を予め定めた開発」でなく、親会社と協力会社間の取引の範囲にとどまっていた。

他方、半導体露光装置は、市場が活性化し、フイルドサイズ25X33mm、解像度250nm、ウェハーサイズ200φ、スループット50枚/時、光源KrFの量産用ステッパ（半導体露光装置）を販売が始まっていた。ニコンではNSR-201シリーズとして、1997年にスループット80枚/時にあげた同一仕様の露光装置へと発展した。

キヤノンは1997年ニコンとほぼ同じ仕様のFPA-4000ESIが、ASMLから両社の仕様を上回る（解像度220nm、スループット96枚/時）の発売を、1999年にニコンから解像度150nm、ウェハーサイズ300φ、2000年にキヤノンから解像度130nm、ウェハーサイズ300φに性能をあげた装置が発売され、日本メーカー2社で世界市場の7割近くのシェアを専有していた。

この事実は、ニコン、キヤノンが半導体メーカーの取り込みや自社開発の道を大型撮像素子について、相互に商談と最先端技術、事業の接点を持っていたこともあり、デジタル一眼カメラ開発一歩先に進める立ち位置を確保する切っ掛けになった。

半導体製造技術の1980年代後半からの10年間で飛躍的な進歩は、従来からの開発の主流にあったCCDと開発の源流と同時期であったCMOSがこれまでの欠点を克服し、半導体素子としての特徴を生かし、高速読み出しの可能性と、特許問題に対して、十分な対応が可能であることに着目され、その開発は、撮像素子分野で、注目され、独自の工夫が始まった。

ニコンでは、1999年に大型撮像素子23.7x15.6mm（以下、DXサイズという）CCD、266万画素、4.5コマ/秒、プロ用デジタル一眼レフカメラNikon D1、2001年DXサイズCCD、530万画素、3コマ/秒のNikon D1x、03年に、ニコン独自にCCDを凌駕する画像信号処理を可能にするCMOSとも異なる大型撮像素子を開発し、Nikon D2Hに搭載した。（DXサイズLB-CAST410万画素）、07年に36x23.9mmフルサイズCMOS 1260万画素搭載のNikon D3を発売へと変化し、2002年から2007年の間に一般用3シリーズ10機種の発売が行われている。半導体の線幅の微細化は画像処理回路搭載メモリの大容量化に寄与し、1年ないし2年でカメラの性能は大きく変わり、前の世代は陳腐化し、高額から低価格化が進みデジタル一眼レフカメラに新たな1ページを開いた。

注）ウェハーサイズはスループットに対応しており、最大サイズではない。

デジタル一眼レフの最初の差別化のターゲットとして撮像素子に焦点が当てられた。

従来からのCCDの問題点として、画素情報の読み出し方に起因する遅さを銀塩フィルム並みにすることへの努力として、光電素子からの情報の読み出し方に着目した。

銀塩カメラからデジタルカメラへの変化は、従来からのカメラ産業に大きな変化をもたらし、現在も次の大きな次世代への変化を起こしていると言っても過言ではない。

その際、先ず第1波として、銀塩カメラからデジタルカメラへの転換は、カメラの技術的機能面、生産技術面、市場面からの変革が企業淘汰・再編成の波にさらされた。

1995年から2005年間は銀塩一眼からデジタル一眼に主役が変わる年代と捉えると同時に、製品開発は、大型化撮像素子、画像処理回路の高集積化と半導体技術が、その大枠とボトルネックを決めた。

半導体製造装置、特に、半導体露光装置が、デジタルカメラの根幹となる要素技術を左右し、大型撮像素子、画像処理回路のクロックスピード、記憶容量を技術的に裏付けて開発ができた。その意味で、ステッパー（半導体露光装置）を自社製品としていたニコン、キヤノンは有利な立場にあった。

また、ソニー、東芝を始め、電機メーカーは、撮像素子、プロセッサ特許で10年以上にわたる特許訴訟合戦で大型撮像素子を中心に踏み出すことを鈍らせていた。

CCD 応答性の問題の解決と従来技術での特許訴訟を避けた新たな撮像素子の開発競争が2002年頃から開始され、一括露光からスキャニング方式にステッパー（半導体露光装置）も変わっていく中で、ニコン、キヤノン独占市場であった半導体露光機市場に2000年にSVGLを吸収しASMLは本格参入し、積極的にダブルステージを駆使した装置により、高密度化とウェハーサイズの拡大が図り、ニコン、キヤノンの顧客以外の韓国、台湾半導体メーカー、ファンドリーに牙城を造り、新たな、日本メーカーに対する挑戦が2005年以降に起きた。

納入メーカーが日本、韓国に拡大してゆき、スマートフォン開発領域の拡大を容易にもした。

同時期に、コニカミノルタ映像グループを吸収し、特許訴訟に区切りをつけたソニーが大型撮像素子事業の拡大と新撮像素子構造として光取り込み方法に工夫した大型撮像素子開発を積極的に進め、撮像素子供給メーカーを増やしていった。

2007年にパナソニック社が主導してマイクロ・フォーサーズシステムとして、電子素子（ファインダー表示を液晶、有機EL）のみで、デジタル一眼カメラ（所謂、ミラーレス一眼）を提唱し参加を募った。

第3節 多様化する事業基盤とデジタルカメラ事業の形態

デジタルカメラ立ち上げ時は、一部のグループでしか懸念していなかった隣接領域の通信・コンピュータ業界から発展する事業領域から派生する新たな事業の関わり方が、真に、経営における技術戦略の要であり、企業力として表面化した。

各社が構想したデジタルカメラ事業は、横一線で始まったが、撮像素子の供給と市場での事

業規模への対応に注力され、銀塩カメラ産業の中核にいた企業にとっては、技術的にも生産規模においても、その市場の構造変化に直面した。自社デジタルカメラ事業の位置づけは、多様に業態を変化した企業では事業規模を変化させた。

日本企業のいずれも隣接領域にあった、コンピュータ、携帯電話、通信事業の中で構想され事業ドメインへ構想と乖離していた。その要因は、

- ① 構想を推し進める投資への展開に事業に投資する資金的な制約が一企業規模をこえた。
- ② 半導体露光製造装置開発で、日本勢が市場確保で後れをとったことが、他業種の動的把握と情報から遠ざけられた。
- ③ 1990年代後半から2010年頃までの日本独特の目標管理に裏付けられた、企業もそれに所属する開発リーダも、行動を、自力主義か丸投げ方式の徹底が加速され、企業グループと委託企業で完結させる事業開発行動から脱却できず、事業自体の硬直化を招き、自己製品を中核においた事業開発に終始し、その成果で企業成果とする事に甘んずる結果となった。
- ④ 銀塩カメラに提起されたプロパテントにより引き起こされた1990年代前後の一連の訴訟問題で各社が負った傷とその癒やし方が、先鋭的な事業開発力を鈍らせる結果になっている。
- ⑤ オープンイノベーション的活動や、日本版インダストリ4.0に相当する自己の責任範囲を全うすることにより大きな果実を結実させる努力は隅に追いやられた。

他方、

- ・ *見たこと残したい→忠実を記録として残す*
- ・ *記録したものを即時に視る*
- ・ *多人数で同時に視る*
- ・ *記録を同時に（双方向で）伝えれる*
- ・ *異なる遠方の地点の人と情報を共有化して歓談ができる*

とのニーズが、インターネットの普及、携帯電話にアクセサリ的についていたカメラ機能が半導体の高集積化画像処理回路の実現とアップル社が挑戦した新たな商品コンセプトの商品展開により、携帯電話販売戦略が市場に受け入れられた。

【参考文献】

- 1) 越智成之 「CCD 誕生 40 周年」 映像メディア学会誌 vol65 no5 (2011) 691
- 2) 高橋 一雄 「露光装置技術についての系統化調査」

国立科学博物館技術の系統化報告 vol6 march (2006) 135～164

3) 高橋 一雄 精密工学会誌 「縮小露光装置とその技術の進展」 vol.73 no.1 (2007)
28～31

4) 越智成之著 「イメージセンサー技術と実用化戦略」

5) <http://www.itmedia.co.jp/news/articles/1805/19/news012.html>

第1部をまとめるに当たって

第1部については、カメラ産業の推移の中で、「2010年以降の急激な市場構造の変化を、日本企業としてどのように捉えるべきか」を課題にしています。

現在までのカメラ産業の基軸になってきた技術を的確に記述するため、
本第1部、第1章は、銀塩カメラ、デジタルカメラの開発を直接主導し、自身がカメラ開発に
長年、銀塩、デジタル一眼レフシステム製品を具現化された見識のもとに、株式会社 ニコン
フェロー後藤哲朗氏から提供戴いた資料等を基にまとめています。

貴重な資料の取捨選択へのご尽力に感謝し申し上げます。

第2部 カメラ産業にみる薄膜技術の多様な進展

第1章 はじめに

第1節 光学薄膜への歩み

イギリスの Cook、レンズ設計者として著名な H.D.Taylor 等は 1861 年に写真レンズが年を経るにつれて「やけ」が生じ、その反射光の色が暗い灰褐色、または青色のとき、最も反射率が減少し、それだけ透過率が良くなることを確認した。¹⁾

1886 年 Lord Rayleigh は硝子を研磨した後長い間放置しておく、と、表眼での光の反射が少しだけ低減することを発見 → 硝子表面層の屈折率が経年変化によって低下²⁾

1892 年 H. D. Taylor が、硝子表面層に化学処理を施すことで反射を制御する方法を考案

1930 年代 硝子表面での反射低下についての本格的な研究開発が始まる。

1934 年 G. Bauer が、表面層が硝子の屈折率の平方根の値をもち、かつ 4 分の 1 波長の光学厚さを持つとき、反射率が 0 になることを示した。³⁾ この事実は反射防止膜の原点であり、干渉効果を利用する多層反射防止膜に発展する。

1938 年 K. B. Blodgett は、アラキジン酸カドミウムとアラキジン酸からなる薄膜をアルコー

ルに浸すことで、アラキジン酸を溶かし出して、多孔質な低屈折率の光学薄膜を作り出す方法⁴⁾や同時期に、油を作動液とした油拡散ポンプの実用化されたことにより高真空状態を硝子ベルジュアで可能になり、具体的な応用研究は軍需産業からの要請に答え、第2次世界大戦中に米国、独で飛躍的に発展した。

また、現在の最先端の反射防止膜の構成する考え方に、古典的な方法にさかのぼり、低反射率を形成するヒントになっている事実は、その時代の気候環境を踏まえて見直すことの示唆にもなる。

1940年代全般には、すでに2、3層の多層反射防止膜が理論的に確立されていた。⁵⁾

第2節 日本光学工業(株) (以下「日本光学」という)における歩み

海軍の国策に基づいた技術の継続を色濃く残した日本光学においても、終戦時に、薄膜技術者として第2次世界大戦前から、この分野で実績を残した藤野技師(のちの研究所所長)が中心になり、社内固有技術として今日までの日本光学(ニコン)のコアとする技術的基盤として伝承された。戦後の当社の事業基盤の一角となるカメラ、光学顕微鏡等光学機器用のレンズ、プリズム、フィルターへの光学薄膜として、多様な発展を続けている。

氷晶石、MgF₂(フッ化マグネシウム)が、第2次大戦後～1950年代に抵抗加熱方式の蒸発源により試みられ一般化した。中心波長は、目視により、ブルー、アンバー、マゼンタ色に色の強度変わる変化から読み取り制御された。

文献

- 1) H. D. Taylor: The adjustment and Testing of Telescope Objectives Ind. ed.
T. Cook Press. York. England
- 2) Lord Rayleigh: Proc. Ray. Soc. A41 275 (1887) la
- 3) G. Bauer; Ann. Physics 5 19 434 (1934)
- 4) K. B. Blodgett; Phys.Rev.35 391 (1939)
- 5) C. H. Cartwright, A. F. Tuner: Bull. Am. Phys. Soc. 13 10 (1938)
- 6) 天野佐一郎: 真空ジャーナル 112 5 (2007) 28

第2章 光学産業の基幹技術として光学薄膜技術の浮上

第1節 光学薄膜生産に必要な技術環境の刷新

カラーフィルムの普及により、カラー化への対応は、カメラ撮影被写体の輝度を正確に計測することが、被写体を忠実に再現するうえで必要不可欠になり、測光方式の検討（中央重点測光/平均測光方式）とその測光センサーの導入が始まった。

同時に日本製カメラがフィルムに対して撮影レンズがどのように発色するかの規格化の一環として、当時の計量研に、分光透過率測定標準機と測定試料が用意され、標準試料を介して光学各社、測定器メーカーの自記分光光度計による測定の際、可視周辺波長で生ずる受光器の劣化による測定誤差の校正が積極的に各社で行われ、可視域についての RGB 発色分布と撮影レンズ分光透過率がユーザに開示された。結果的には、日本製品の品質保証の仕組み作りが行われた。

この波及効果は、撮影レンズ技術（光学系設計、鏡筒設計）にも訴求され、可視域（400nm～700nm）で撮影レンズ分光透過率確保と R-G-B バランスが要求されることになり、レンズ面の反射防止膜特性と強く関わりをもつことになった。その実施は、各社各様の方式で競い実施され、日本の真空蒸着装置関連産業として、大きく成長することになった。

具体的方策として、

- ① 撮影レンズ焦点面の測光方法の追求
 - ・撮影画面全域に対する平均測光
 - ・撮影画面の中央域に撮像の重要部がくることを前提とした中央重点測光
 - ・画面を多分割に分け測光し、撮影被写体のシーン別にコントラストから加重平均する分割測光
 - ② 屈折率領域/分散領域の拡大（高屈折率化、低分散化 中屈折率、低分散領域の充実）、硝材毒性成分（Cd, Th, Pb, Te 等）を常用可能な成分に置き換えた常用硝種の拡大
 - ③ 撮影レンズの硝材の内部分光吸収の削減、特に、可視域の周辺領域の改良
 - ④ 反射防止域での低反射率可視域・広帯域化、
 - ⑤ 屈折率（1.5 から 1.83）に対し同程度の反射防止膜特性
- 等と基本に戻っての再開発が 1965 年から 70 年にかけて実施された。

この分野でも電子計算機の積極的な利用、新たな蒸着技術の可能性、新たな蒸着物質の開発

が積極的行われた。

設計の立場から日本光学では、光学多層膜の解析的手法による自動設計プログラム開発とこれを利用した光学多層膜の実施への挑戦が行われた。日本光学においても、NRCC との技術交流は、当時として知るよしもなかった東欧圏（当時はソ連連邦を含む共産圏）の資料を入手したり、日本では予期もしない楕状の干渉フィルター、可視域全体のは超狭帯域で連続的に抽出できる干渉フィルターは、注目された。

古い技術の持つ奥深さと日本及び米国、西欧の電子銃蒸着の蒸発源、坩堝、蒸着物質に対する最適溶融方法の情報、およびプラズマ蒸着の息吹等の側面を吸収し企業化へと模索が始まった。

第2節 光学反射防止膜の量産技術の確立—日本光学の事例²⁾

日本光学においては、

① 大量生産時代に対応して、カメラ用交換レンズ生産の一貫として多層反射防止膜生産に挑戦

② 新技術への挑戦

した時期と捉えている。

特に、多層反射防止膜レンズの全面的展開の決断は、これまでと生産規模が桁違いに大きく、多層反射防止膜の全面的な採用は、蒸着時間が長くなる問題が引き金になり、レンズの生産工程に抜本的な見直しが、全社プロジェクトとして始まった。

当時のカメラボディ生産のベルトコンベア方式（タクトタイム管理：ベルト・コンベアへの投入と搬出を効率化することにより効率を最大化する）を参考に、レンズ一貫工場として、レンズ加工工程（研削、研磨）⇒レンズ洗浄工程⇒蒸着工程⇒レンズ部組鏡筒の工程を具体化した。（当時の桜電子工業、現：栃木ニコンが、子会社として発足し、工場新設し、最適な生産工程が新設された。）

レンズ洗浄、レンズ支持ドームホルダへのセッティング等の前工程、多層反射防止膜形成工程、後工程としてレンズの取り外し、レンズ裏面工程として前工程に戻す）その中核になる、多層反射防止膜製造工程（「レンズ洗浄⇒蒸着準備（数十個の未処理処理レンズをドーム（下地ホルダー）にセットする）⇒表面蒸着⇒レンズの再セット裏面蒸着⇒蒸着終了⇒レンズの下地ホルダよりの取り出し」を如何に効率よく、連続的に、標準データに対する許容範囲の厳守を前提に、最少人数で同工程を機動的に稼働させる工夫が施された。

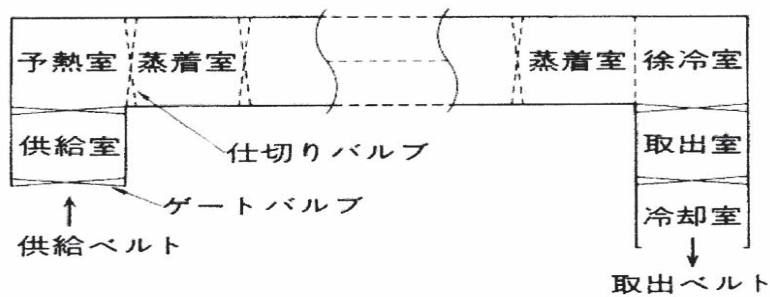


図 1 (参考文献 2 記載)

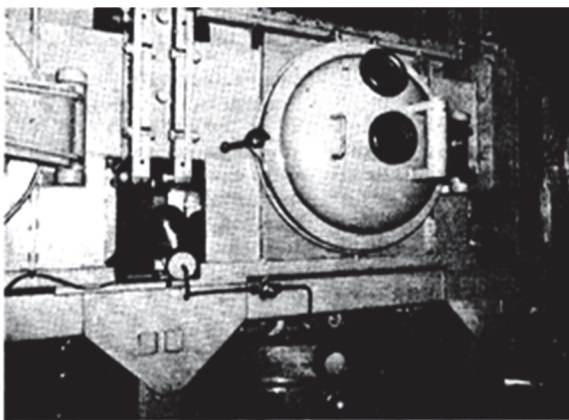


図 2 (参考文献 2 記載)

特に、レンズ硝材別に複数の反射防止膜について標準化（標準コストの導入）を目的とする規格委員会を設置し、実稼働時の状態を反映させた。レンズ設計時からできあがったレンズの品質保証までの工程を、レンズ機種単位に、トータル的に管理項目を設定して、ロット管理が行われた。

ニッコールレンズの信頼向上に繋ぐことができた先見性のあるプロフェッショナルな行動は、当時の業界を超えたモデルケースになっていた

特記すべきは、如何に短縮させるかを多層膜形成工程にメスを入れ、従来の 1 つの真空光学薄膜装置で多層膜を形成する 1~2 層を、なるべく同じくなる膜形成時間で行い真空を破らないで、次ぎの真空室に搬送する複数の真空室で構成される装置を米国等の大型装置の実情を参考に、5 つの同一の真空室で構成され、中央 3 室で膜形成を行う連続蒸着装置を国産第 1 号機として開発し投入した。(図 1、2)

反射防止膜として、単層膜、2 層反射防止膜 2 種類、3 層反射防止膜の各 2 種類を準備し、標準規格化した。

同装置室と洗浄工程と直結した作業空間にレンズドームに未処理光学部品にセッティングを行う作業の準備室をもうけ、レンズドーム（下地ホルダー）を常に複数個準備する工程の中継として設置し、工場の生産性を上げた。

各社でも規模の大小はあるが、同様な取り組みを技術的、経営的に投資できるか否かで、第2次大戦後の多数の誕生した中小のカメラメーカーが、淘汰される引き金になり、幅広い技術を有するか、米国等から先端技術を導入した大手カメラメーカーに集約された。

第3節 反射防止膜の広帯域化と多様な光学硝材への対応

1970年代の誘電体多層反射防止膜の生産性の効率化と低反射率の要請は、膜厚制御が反射率の振幅の極値（極大値・極小値）検出方式から絶対反射率測定検出方式の制御が、測光方法、装置実働時の蒸着材料とその光学常数をデータベースとしての活用が始まった。

その結果、最も再現性に安定で、生産工程において、環境問題に安心かつ安価な蒸着材料の高屈折率物質と低屈折率物質の2物質を選定した広帯域多層反射防止膜の実用化が同業他社と競われた。

反射防止膜の量産化の視点から、独自に等価膜理論から追求した安定な2物質（ TiO_2 と SiO_2 または、 MgF_2 ）で $\lambda/4$ 以下の膜厚制御に必要な単色測光技術を電子計算機制御により実蒸着時の最適制御に結びつけその実用化を試みた。

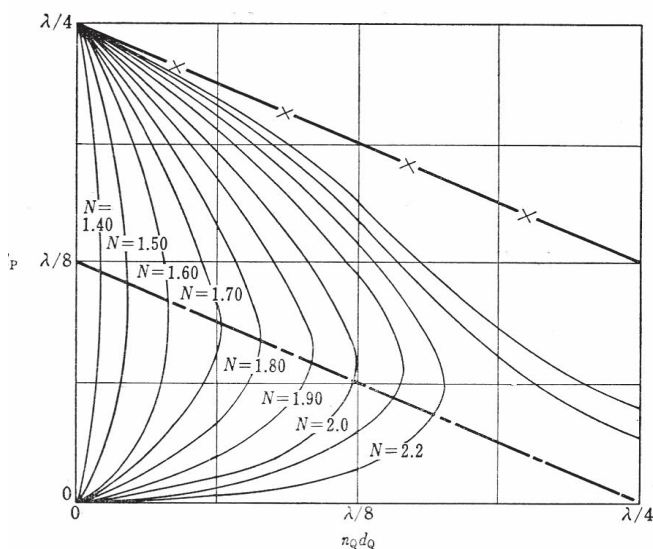


図 5・10 対称3層膜 $(n_P d_P, n_P) * (n_Q d_Q, n_Q) * (n_P d_P, n_P)$

筆者著書 参考文献3. P86に記載（独自に計算し作成）

具体的には、

$$n_s/\lambda/4/\lambda/2/\lambda/4/n_0 \rightarrow n_s/\lambda/\alpha/\lambda/\beta/\lambda/\alpha/\lambda/2/\lambda/4/n_0$$

従来 $\lambda/4$ の屈折率を等価 3 層膜、等価簡易 2 層膜で表現した 9～11 層の多層反射防止膜が実用化され、0.3 から 0.6% に可視域全体の表面反射率に押さえ込めるようになった。(図 3 ; 実施例)

それに沿って 1980 年代には本仕様専用連続装置として、搬入準備室(ドーム設置レンズの予備加熱)、搬出準備室(ドーム設置レンズの徐冷)を左右に配し中央に蒸着室の構成の 3 層連続装置に変遷した。

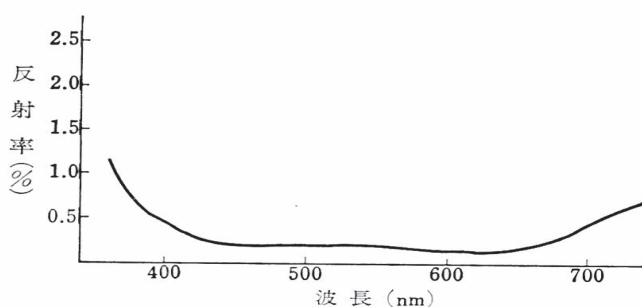


図 6.12 等価膜置換による反射防止膜最適化の例〔式 c〕
 $n_s (=1.65) * (\alpha, 1.38) * (\beta, 2.0) * (\alpha, 1.38) * (0.5, 2.0) * (0.25, 1.38) * n_0 (=1)$
 ただし $\frac{2}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{4}$

図 3 実施例 (参考文献 3 P110 に記載 筆者独自の設計計算の事例)

参考文献

- 1) S. Fujiwara: J. Opt. Soc. Am. 53 880, 1317 (1963)
- 2) 江崎賛平 真空 17 401 (1975)
- 3) 藤原史郎編 光学薄膜 (共立出版) 第Ⅱ編 (石黒浩二、池田英生、横田英嗣) 108～110、151～158 (1994)
- 4) 池田英生 特許出願公告 特公昭 49-19814
- 5) 池田英生 実務表面技術 32 437 (1985)

第3章 デジタル一眼レフ用撮影レンズ技術としての反射防止膜薄膜技術の更なる飛躍

1990年代後半から、反射防止膜はデジタル一眼レフカメラの本格的な事業開発の一環として、画像の質感、色再現性を向上させるため、大型撮像素子を含むカメラ筐体と鏡筒および、撮影光学系の考察が積極的に進められた。新たな視点、すなわち、反射率低減策に戻り、現行の反射防止膜の問題点の把握と、その対策に言及された。少なくとも、可視域入射角度 30 度以下での入射光（レンズ面との交点でその法線との角度）の反射防止の機能として、低反射（可視域で 0.5% 以下）化の要請は、撮影レンズ、測光素子、撮像素子の反射表面、筐体におよんだ。

具体的には、撮影領域に太陽などの強い光線があると光源付近にフレアと呼ばれる白ぼけした領域が、また光源から離れた場所にはゴーストと呼ばれる迷光が現れる。

デジタルカメラの撮像面で反射された光がレンズ側に戻り、レンズ表面で再び反射されることで、フレアやゴーストが発生する。その他にレンズ枚数が増えると、各レンズ表面で発生する反射光も迷光となり、フレアやゴーストになる（図4）。

デジタル一眼カメラの場合、各社の取組の違いはあったが、太陽などの強い光源があるときの光源付近の白ぼけ（ゴースト）はなるべく小さく、その他の要因で発生するゴースト及び全てのフレアをなくすることへの取組が行われた。



図4 筆者撮影によるゴースト、フレアの例

薄膜全体の光学的膜厚 2λ を超えていることは、カメラ用交換レンズ大口径化、短焦点化の要請を充たそうとするレンズの場合、レンズ面への入射角（レンズ面法線に対する角度）が大きくなり、薄膜の表面および界面で発生する振幅と位相を調整し、干渉させることが長波長側できなくなり、垂直入射に対する低反射化は、逆に反射増加膜になる問題は、重要課題となった。

この問題の解決は、反射防止膜を構成するトータル膜厚をなるべく薄く、高々 $1/2\lambda \sim 3/2\lambda$ に、大気媒体になるべく近づけた低屈折率膜を作れないかの課題が浮き彫りになった。

射を制御する基本に戻って、再チャレンジが

- (a) 空気層に触れる層の屈折率を如何に媒質としての空気の屈折率に近づける
- (b) 入射した光を如何にして表面に出ない構造にするか（針を束ねて、真上から視ると黒く見える現象）

の具現化として、半導体製造プロセスで培われた、高精度な表面処理技術/表面加工手法を駆使した挑戦が始まった。

(a)の具現化は、微粒子構造を造り、微粒子間の空孔を利用することにより、巨視的な膜屈折率を従来から空気層の隣接層として用いられている MgF_2 の屈折率 1.39 より低い実用膜を得て、新たな、反射防止膜へと発展した。

(b)の具現化は、光学的膜厚（膜屈折率と物理的膜厚の積） $\lambda/8 \sim 3\lambda/4$ を目安にする長さ 300nm～1000nm の模擬針状を間隔 5nm～200nm で形成することが開発課題となり、その実用化画に向けて、各社で自社のコア技術を駆使した取組が有り 2010 年頃から実用化された。

特に、ニコン、キヤノンの 2 社が、半導体露光装置用投影レンズの反射防止膜として、露光光源波長域に対して反射利率 0.1%以下に石英レンズ、蛍石等への達成、キヤノンは情報機器光ピックアップレンズに対する反射防止膜の簡便な手法に展開することを狙って基礎研究から着手した。基礎研究は半導体露光プロセスを使用し、基礎研究から大口径写真レンズまでの実用化まで、約 10 年前後掛けて、デジタルカメラ撮影レンズに実用化し、また、同業他社でも同様のコンセプトの反射防止膜が、これまでのタイプと併用して使用されている。

参考文献

- 1) 奥野丈晴 光学 40 1 (2011) 11
- 2) 村田 剛 「フッ化マグネシウムナノ粒子を用いた高性能反射防止膜の研究」
(名古屋大学) 甲 9592 号 (2012/3/26) 28

- 3) 村田 剛 光学 40 1 (2011) 17
- 4) 村田 剛 日本写真学会誌 73 5 (2010) 243
- 5) 菊田久雄 光学 40 1 (2011)

第4章 薄膜技術を中核にした基盤研究の足跡

カメラへの薄膜技術の活用は、業界に先駆け積極的な活用が行われた。

Nikon SP におけるレンジファインダに視られるビームスプリッタとしての光学多層膜技術は抵抗加熱方式での薄膜技術の頂点であった。

1960 年頃からの、実施された反射防止膜の規格化、量産化、広帯域化、低反射率のレンズ屈折率に対する自由度の確保と共に、1970 年代は、薄膜開発部門への要請としてどの企業においても、製品への主要構成部品の新たな機能として、光電変換、表示、離散的情報の抽出から連続的な抽出の可能性の追求が、大きな課題になった。一眼レフフィルムカメラの要素機能の自動化は、薄膜を取り扱う技術者、開発部門にとって、新たな飛躍への場となった。

1) 露出自動化への道を開いた金属薄膜抵抗体

機能の大衆化としての普及型高級機一眼レフ Nikomat EL に 1972 年発売に合わせ、自動露出制御導入をレンズ絞りと連動させる手段として、当時の日本光学の度器技術と金属薄膜技術を融合し、ASA 感度や絞り値の情報を露出制御回路に伝える耐熱、耐湿、耐経時変化等に安定かつ機械的強度が確保を意図し、ガラス基板と日本光学固有技術として培った刻線技術を組み合わせ、硝子円盤基板抵抗体 (FER) の開発に取組みが行われた。

抵抗値がブラシの回転と共に指数関数的に変化させる抵抗体に注目した。ASA セットリングや絞り間を動かし、ASA 感度や絞り値を動かすと抵抗体上の摺動ブラシ位置が移動し抵抗値が変化する。

この抵抗値により規定される電流を取り出し制御が行うため、抵抗体部は、外形 25mm、内径 8mm、厚さ 1mm のドーナツ型ガラス基板上に蛇行する抵抗層と抵抗層状に外周に向かって放射状に並んだ貴金属導電タップを、さらに最上層に保護膜を薄膜形成し、経時変化を極力抑え、Nikomat EL に標準搭載された。

2) ピンホールミラーの開発

Nikon F3 の開発過程で、撮影レンズを通過する光を偏光に影響されることなく、ボディ内で正確に中央重点測光することが議論された。交換レンズに左右されない高精度の測光方式

を追求として、当時の高卒入社の新人から、何気ない発言となった「針穴のような穴を開けたらどうなの」がヒントになり、偏光に影響を受けない中央重点測光用ミラーの開発が開始され、回折現象に影響されない最適な大きさ長径 30 ミクロン、短径 20 ミクロンの楕円ホールを数万個開けたコの字型に分布させたミラーを Nikon F3 の一眼レフミラーとして標準搭載された。

3) 薄膜素子の延長から始まった自動焦点検出素子

薄膜開発部門へのカメラ開発部門からの要請として、一眼レフカメラのスプリットイメージ、フレネルによる量け量からの検出に相当する合焦検出、後ピン、前ピンの判断信号を表示できるセンサーの開発が要請され、焦点検出手法、光電変換素子として、何を用いるか、最適な手動操作より速く、その正確性の確保を第一義とし、Nikon Fxx の交換式ペンタ部として、商品化を図ることを目標に、その取組が始まった。

Nikon では極めて、オーソドックスに 1 対の 5 分割くさび形 SPD（シリコンフォトダイオード）をフィルム焦点面と共役の位置に置きその SPD 上の左右の位置ずれから焦点検出を行うことから始まった。

本開発に着手した 1970 年半ば、カメラ用の露出検出方法に特徴を持たせるため、分割測光素子、その処理が急速に進んだ。その中で回路素子の半導体化の機運が醸成されていた。振り返ってみると、オープンイノベーション的な位置づけで、現在も先進的な企業活動をする某社と、お互いの開発テーマを遂行する中で、自社の製品開発を行った成功例としての成功体験になった。共同開発先においては、SPD 廻りの半導体開発型事業を切っ掛けに、半導体部門として事業を立ち上った。

SPD 素子を介して、取り込まれる画像位置情報を高速に繰り返し演算処理から、レンズ駆動信号を連続的に提供することにより、レンズ駆動の自動化を可能にできる領域に達成することができた。ただし、SPD 素子の分割数は高々 5 分割程度にとどまり、素子形状に工夫を凝らした。この開発は、1983 年に NikonF3AF として商品化された。

同時に、この開発時に習得した、自動焦点検出素子手法とその具現化の中心になった技術陣は、日本光学の銀塩一眼レフカメラ、デジタル一眼レフの自動焦点システム開発の主役として、羽ばたいた。

4) エレクトロクロミック素子への取組

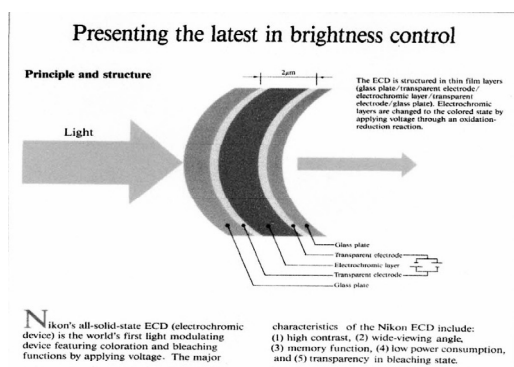
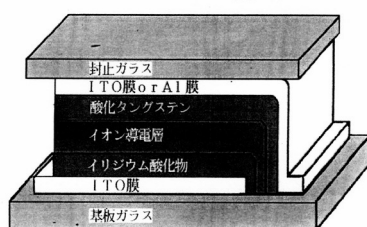
日本光学工業でも酸化インジウム膜の透明導電膜としての可能性の追求が始まり、72 年に面積抵抗 $10\Omega/\square$ 以下透過率 92% 強、1974 年に $8\Omega/\square$ に成功した。

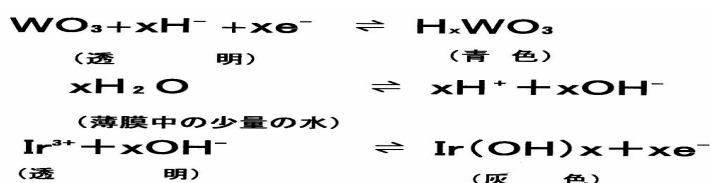
当時の STN 型液晶素子に変わる視認性がよく、記憶型の表示素子、小絞り機能が期待できる新たな素子としてエレクトロクロミック素子が、透過型で、かつ膜構造の中での酸化還元反応で閉じた膜構造での可能性を追求できることから作動時の高耐久性が期待でき、社内ですら独自に提案できた。また、エレクトロクロミック構成する膜構成材料の選択により、カラーセンターをニュートラル化にでき来る可能性があること、従来の光学多層膜と組み合わせが容易にできる。

カメラへの応用を最終目標として、当時の新技術開発事業团委託開発の形式で 5 年間 2 億 3 千万円の委託開発費の基で、1976 年から取り組まれた。

F4 ファインダー用表示素子として使用されたが生産性を含めるトータルの評価した費用対効果の面で短命に終わった。しかし、市場に製品として組み込まれた素子は、現在でも機能していることを確認されている。

他方、追試を重ねニコンが排除したエレクトロクロミック層構造により自社開発を行ったトヨタは、トヨタ車（3 車種）でドアミラーとして自社開発を行い、標準搭載された。なお、数年間当社の特許パッケージに特許収入を得た。





(エレクトロクロミック素子についての Nikon からの外部発表資料から)

参考文献

- 1) 丹羽達夫 「全固体型エレクトロクロミック素子に関する研究」
(名古屋大学) 甲 9558 号 (2011/3/25)

第 3 部 レンズ設計からみた技術環境の変遷

第 1 章 レンズ設計ニーズとその取組への序曲

1917 年に、日本光学工業（株）が藤井レンズを吸収し国策で創立の翌年、日本のレンズ開発の創始者、砂山角野が入社する。

英国で B&S 社の現場を体験した海軍関係者の日本光学工業（株）入社とドイツ大技術者（レンズ設計、光学計算、機械技術、設計製図、レンズ研磨、プリズム平面研磨）の 8 名の招聘が、日本の光学技術に大きく寄与した。

【参考文献】

- 1) Nikon 光の肖像 20 (2017)

第2章 戦後の産業復興と新たな息吹

第1節 日本光学工業(株)の産業復興の技術的基盤とその歩み

日本光学工業(株)の場合、創業時から戦前、戦中にレンズ設計に直接携わり業務の中で培われた洞察力和設計判断ができる技術者集団が、光学レンズに関する技術的資産、設備的資産を継承し、戦後の事業展開で優位な立場にたてたと言える。

特に、光学レンズに関する技術資産として、

レンズデータ・レンズ設計法技術、レンズ原器
光学ガラス製造・加工技術、
光学薄膜製造技術、
レンズ、プリズム加工技術、及び、レンズ組み立て技術
測距技術

等の資産を活用して、銀塩カメラ、顕微鏡、測量機器事業に進出できた。

併せて、人的資産として、創業時に砂山氏の直属部下として配属され、設計一筋のレンズ設計グループが、引き続き在職し（レンズ設計法に長けた1人は離職）、定性的であったが、ザイデル収差補正後の残収差のバランスから、レンズの癖、味を見通せる設計専門技術者が引き続き在籍した。

1960年代初めに、最後の設計者が退職されるまで、設計判断と測定器からのデータと収差バランスからの判断をレンズの「味」としてまとめる上で重要な指針となり、定量化に取り組みられた。

第2節 レンズ計算とレンズ設計の取組み

日本光学工業（株）では、アッベから始まり、幾何光学手法から脈々と続く、膨大な四則演算に置き直した繰り返し計算であったが、Berek 流レンズ計算の高精度化を意図して、累積誤差を少ない表現方法として、浮動小数点方式により指数部と仮数部に分け、2 進法で行うことが始められた。

実際のレンズを想定した光線を（軸上、最大画角に対して、100%、7 割、5 割の角度で、2 次元的、3 次元的に、遠点、近点および中間距離から、これまでの 2 次元的な光線追跡に加えて、3 次元的な光線追跡を行い、2 次元（メリディオナル面）から予測される 3 次元的イメージとの合致度を確かめた。

計算要員（検算要員を含め 2 人一組）が一本の光線を担当させ、与えられたレンズ構成に対して、多数の各種光線のため、延べ何百人もの計算要員により計算された。



● 女子工員計算風景

図 1（産業史、光学会社社史）

その結果は複数の設計主任の下に集められ、ザイデル 5 収差が、どのような挙動になるかを、個々の角度の光線追跡結果から計算され、課長の下ではじめて、結像面全体のザイデル 5 収差のプロファイルとした（当時の設計ノートより）。2 次元的な評価及び判断がなされた。その結果で、どの曲面、どの中心厚等の変化を指示され、同じ計算が繰り返された。

設計技師が納得できる結像面分布に到達した時点が、設計完了であった。6 ヶ月、2 年に及ぶ場合もあった。

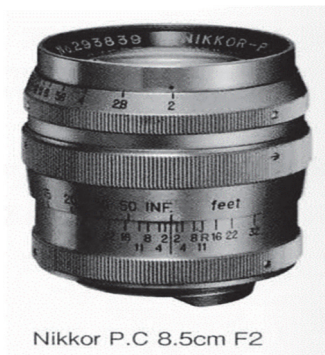


図 2 Nikon 社史

設計結果を検証するため、レンズ設計の結果を基にレンズ加工、鏡玉組立・調整を経て、試作レンズとなり、その評価は、「テストチャートの撮影距離を定めた撮影」、「検査室から予め定められている定点の実撮影」の結果から、解像度、分解能、周辺光量の劣化度、写真としての「味」等の検査項目を定めて評価が行われた。評価は、経験に頼る特定の専門家の判断になっていた。

不合格の場合、レンズ鏡筒、レンズ組み立て時の問題の点検、レンズ個々の加工精度等の点検による不備が見出されない場合、再設計として、レンズ計算プロセスでの再設計計算、ガラスの再溶解等と、新たな指示がだされた。（図 2）は、上述の結果生まれた Nikon レンズの実例。

第 3 節 光学とレンズ設計の取組み

1 日本光学工業㈱での足跡

日本光学工業㈱では、1960 年に西独 Zuse 社^注から最新型電気機械式リレー計算機 Z11 が導

入された。同計算機の実データ形式は 2 進化浮動点方式が指数部+仮数部で 6 桁を保証し、紙テープで 200 ステップ前後のプログラム入力により計算手順を指示できた。短命であったが、当時のレンズ設計の初期設定として近軸計算を担い、処理能力と計算の信頼性から重宝がられた。

注 西独 Zuse 社の計算機の源流は第 2 次世界大戦中のドイツで飛行物体の流体計算に使われ、世界大戦直前に 2 進化浮動小数点演算で処理されフィルム形式のプログラムが採用された当時の最先端の計算機 Z3 として著名であり、敗戦と共に IBM 社が技術的援助を名目に傘下入れ、民生用リレー計算機 Z4 として開花させた。

1950 年に、ライツ社レンズ設計計算に対応するため、仮数部 6 桁採用の 2 進化浮動点方式がとられた Z5 が発売されていた。

レンズの味は、商品差別化の上でも重視された。光学理論に直結できるアプローチからの追求は、あまりにも難解で、未解決な膨大な波動理論計算の壁に遭遇していた。

他方、産業界の実務的アプローチは、光学レンズ設計手法は徹底して計算を単純化し、人海戦術と長年培った専門的な評価者の判断は経験と感性により培われ、属人的な部分であった。

その一方、人材の育成と最先端の光学設計実情を体験し、取得する目的もあり、若手研究者宮本健郎氏（日本光学→名古屋大学→東大→成蹊大学）を米国の光学研究のメッカとして著名なロチェスター大学光学研究所に留学し、Ph.D 論文²⁾として、大型電子計算機を活用したレンズ設計法、レンズ評価法を幾何光学的手法によって得た点像分布を物理光学的手法で処理により波動光学の結像理論による評価法としてまとめ、光学分野での電子計算機活用の指針を日本光学に残した。1938 年 4 月に、核融合の分野へ転出し、狭義の光学から離れた。

【参考文献】

- 1) Nikon 光の肖像 20 (2017)
- 2) 宮本健郎 応用物理 28 123 (1959)

第 3 章 産官学オープンイノベーションによる先端的レンズ設計法、評価法の構築

1963 年 OKITAC 5090 の発売により、日本光学工業(株)を筆頭に、業界各社および写真機工業会研究組合に、同電子計算機を導入と各社のレンズ設計技術は、性能表の技術、最適化の技術、光学系の synthesis の技術、の 3 種類に区分し、電子計算機の利用の共通テーマとして積極的に検討された。

他方、日本光学工業(株)は、電子計算機工業会幹事会社（技術計算）として、プログラム言語

の方向付け、次世代計算機への基本仕様（計算桁数）への取り組みを行う一方、海外、特に、大容量メモリ/高速計算が新たなアルゴリズムの基で電子計算機を駆使する研究動向に注目し、米国ソフトウェア開発動向、必要な技術導入を探ることが指示され、あらゆる機会を捉えた社外との接触を密にした活動が始まっていた。特に、大学等の研究機関との接触を密にした学会活動が積極的に活用された。

1963 年から 68 年にかけて、カメラ用写真レンズ産業分野は、電子計算機の普及への国家的施策の中で、技術計算における先端領域として位置づけられ、国と連携した取り組みが行なわれた。大学、公的研究機関、大手カメラメーカーで構成する（財）写真機工業会を設立し、産官学共通の問題として、性能表の技術、最適化の技術、光学系の synthesis の技術について、波動光学と幾何光学の関連付けを中心に、学（東京大学生研、東京教育大光研、大阪大学工学部応用物理）、官（機械試験所）で行われた最新の研究結果が反映されていて、各社で顕著な成果を上げた。

特に、大学側メンバーとして、東京大学生産技術研究所、東京教育大光学研究所、大阪大学工学部応用物理研究室、が中心になり、各社からの手法的情報を持ち寄り、各社において自社開発で未達な領域のプログラム開発、各社のレンズ設計データの取り扱い方で、5 次から 7 次の高次収差係数論を駆使して設計理論が、真剣に議論された。

その結果が、国際会議の開催につながれたことは、如何に、産業界が熱を帯びていたものかを、後日に理解する上で、特質すべきことと言える。

また、大学、各社からの若手常任メンバーは後日、大きく羽ばたいている。

他方、この活動の成果として、世界の電子計算機システムが IBM 主導のもと $1\text{ byte}=8\text{ bit}$ $1\text{ W}=4\text{ byte}$ とルール化する動きが加速していた時期に、レンズ計算の必要桁数を充たすことができないこと、レンズ設計計算のための $1\text{ W}=36\text{ bit}$ 必要不可欠であるとの結論にいたり、 $1\text{ W}=4\text{ byte}$ 型計算機と別にすることの重要性を提言し、日/米の電子計算機メーカーで配慮された。

64 年に国際光学会議が開催され、レンズ設計法に関する日・米・欧の著名な研究者が一堂に集まり、戦後のわだかまりの解消や今日現在振り返って、レンズ計算と電子計算機のあり方に意見を共有化できたこと、レンズ評価測定機について共有化できた等産官学の各当事者にとって、実り多いものであった。

また、量子光学的視点からパラメータの独立性を探る手段として、現代のスーパーコンピュータを使用したシュミレーションで用いられる乱数を駆使する斬新な発想の提案もあった。

電子計算機と理論物理的展開を融合させるかの成果は、国際会議、応用物理学会の重点テーマとして 1960 年代中心に活発になり革新的な進歩を見た。一つは波動方程式のフーリエ級数展開であり、無限級数展開を有限級数展開で精度良く収斂させる手法、フーリエ積分の高速計算が中心であった。

京都大学数理科学研究所を中核に、現在のオープンイノベーションセンター的役割を産官学に展開し、電子計算機と物理工学、機械工学、化学工学、応用物理分野で電子計算機を介して相乗的な進歩を果たし、日本の産業基盤形成に重要な役割を果たした。各社の開発プログラムは各社の持つ固有技術を集約化していった。

1960 年代後半からの電子計算機の処理スピードの高速化とメモリ容量の増大、計算機のマルチ化、プログラム言語のフォートラン、アルゴ 60 等の大衆化と共に、電子計算機自身がオペレーティングシステムのユーザへの非公開化の加速によりブラックボックス化し、道具化したことは、大きな進歩を遅らせてしまい今日に至ったのではなかろうかとも、感じています。

光学レンズ設計において自動収差補正、レンズ結像評価、鏡筒組み立ての容易さを加味したレンズ鏡筒への誤差に対する許容度を加味した自動収差補正が設計手法として一般的になり、1970 年代に市販光学設計ソフト CODEV[®]等の代表的な光学設計ソフトウェアとして誕生している。

【参考文献】

- 1) 宮本健郎 応用物理 28 123 (1959)
- 2) H. H. Hopkins Proc. Roy. Soc. A. 208, 263 (1951)
- 3) 辻内順平 光応用技術 (JOEM) II-4 63

第 4 章 電子計算機の積極的活用から生まれた新領域

大型電子計算機（大容量、高速演算処理）を駆使する中で、新たな概念から事象を追求する手段として、これまでの理論で理詰めには詰めるのではなく、現象をブラックボックス化し、入力とその結果の出力にのみ注目し、仮想の関数（入力変数に従って結果を関数値として扱うこと）に徹した利用方法が、仮想と実技術の橋渡しの役割を果たし、20、21 世紀計算機工学分野として、発展の始まりともなった。

光学分野でも大輪として開花する基盤になっている。

レンズ設計の場合、光線追跡結果としての幾何光学収差（球面収差、非点収差、コマ収差、

歪曲収差等) を関数値の一つとし、その関数を構成する変数をレンズの曲面すなわち、曲率で有り、レンズの中心厚、レンズ間間隔、レンズ屈折率として取り扱うことの試みは、光学レンズ設計への電子計算機積極的利用の第一歩として、取り組まれた。

2 次元的に幾何光学的収差バランスから全体を判断した設計手法が、一般の設計者が電子計算機による収差計算の試行錯誤、三次元的に多くの光束を光学系に入射させ、どのように結像するかを幾何光学的結像の点像としての設計者の主観的な評価からフーリエ変換の手法を用い、何通りかの数理的工夫により、客観的な結像評価へと発展する。(図3)

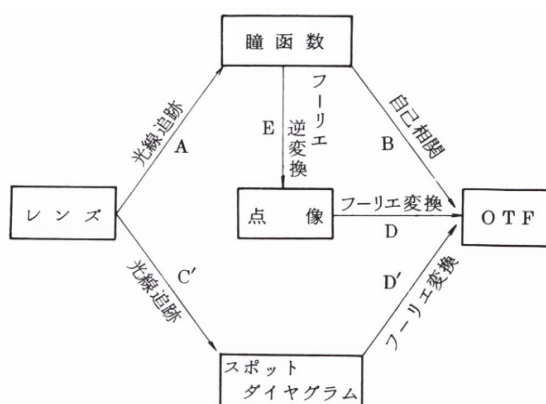


図3 (参考文献 1)

第5章 日本光学工業(株)での電子計算機導入による技術計算での事例と実績

1962年入社技術者を一例に、1973年3月末日まで電子計算機と関わりのある業務を通じて、新たに取得できた領域と関わった業務の足跡を述べる。

電子計算機との関わりを中核にした業務は、下記のⅠ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの切り口で、その技術的、技術ブレークスルー的側面から述べる。

- Ⅰ 電子計算機選定、導入、電子計算機使用環境を最適化に関わる一切の業務
- Ⅱ 光学設計、光学設計から派生する業務の電子計算機の移行^{註1)}とその検証^{註2)}

註1：設計計算は、自ら設計者をファイリングした内容を厳守した内容を、プログラミングしたソフトウェアを使用

- 尚、ファイリング内容は、① データ桁数とその保証精度
- ② 計算精度小数点以下の桁数の保証

③ 要望される対象業務最低工数

註2：ファイリング内容に沿っての検証、

合格：業務を電子計算機に移行→設計部門から希望時期の提示→要員移動

不合格：計算結果に起こる差異

- ・ 計算機に起因する桁数方式、演算方法、データ表現の差異による計算の不一致→筆者の担当として対応
- ・ 開発したソフトウェアに起因する自らのソフトウェアのアルゴリズムか、計算機に付与された基本関数ソフト化の見極め
- ・ 期待される工数に至らない場合、設計部門と再協議

III 将来への布石として、研究開発、応用開発課題の構築

- ・ 波動光学的手法による結像評価を幾何光学的方法で構築する
- ・ 回転対称非球面光学系を含むレンズ計算
- ・ 収差係数計算の構築

同時に、

I 世代（機械語）（1960年～62年）

2次元的な固定焦点レンズに対する光線追跡計算及び収差計算

II 世代（アッセンブラ）（1962年～66年）

2次元/3次元的な固定レンズに対する光線追跡計算及び収差計算、幾何光学のレンズ評価計算（スポットダイアグラムを中心に）

III 世代（フォートラン）（1965年以降）

- ① 2次元/3次元的にズームレンズを含む撮影レンズに対する光線追跡計算及び収差計算、幾何光学のレンズ評価計算
- ② 薄肉密着系に対するザイデルあるいはブッフダール高次収差係数を駆使しレンズタイプ創出の示唆を、厚肉系への変換および最適化設計を経て見いだした。

等の光学設計計算手法を具体的にすると共に、光学理論に裏打ちされた設計技術を具体的に利用できるようにして、設計者に日常的に使用できるレベルへの改良を日常的に行った。

その結果、カメラ用撮影レンズ、および顕微鏡対物レンズ光学設計の結果を飛躍的に向上させた。

電子計算機利用が、光学設計部門に定着したことにより、第3世代のコンピュータ（FACOM270-30）以降、レンズ設計において大きく寄与し、カメラ事業部計画をダイナミックな対応が70年代後半からの計画に寄与した。

レンズ設計上の改革は、

- ① 定量的な評価尺度として、OTFが設計時、レンズ試作に、OTF測定器の使用が定着した。
- ② 回転対称非球面レンズを組み込んだ設計計算が、通常レンズ設計計算と同様にでき、定着した。
- ③ 社内設置の電子計算機を使用しても、色収差の結像評価、ズームレンズを想定した対応ができるようになった。
- ④ 反射防止膜使用選択によりゴースト像の削減、カラーフィルムによるカラーバランスを定量的に評価ができる
- ⑤ 測光方法による結像面での簡易評価法が定着できた。

等の計算プログラムを使いこなせる、若手レンズ設計者が、主導的な役割を果たした。

（良い意味で、学歴を超えて、新しい技術対応力による世代交代の切っ掛けになった）

第6章 レンズ設計、光学薄膜設計領域での新たな電子計算機利用の試み

第1節 光学会社での技術分野における電子計算機による新たな試みの例

レンズ設計、光学多層膜設計において、専門家により、過去の知見をもとに、初期設定を行い、初期設定を変形し所望の領域に到達する、自動補正。

- 1) レンズ設計の場合 下記のプロセスを連続的に行うことを、社内外の電子計算機を利用して効率的に行うことを模索した

- ① 初期設定を解析的レンズ設計理論、
例えば、薄肉密着系を元に3、5、7次収差係数を逐次選択し、厚肉系とした初期設定を行う。
- ② 厚肉系レンズ収差計算 光線追跡計算（2次元的：メリディオナル光線、3次元：スキューレー）による基本的な収差形状の把握。

無限遠物体から垂直入射、設計仕様画角（設計画角の100%、70%、50%）および中間物

点（3 から 5 m）、近距離物点から計算される。

- ③ レンズ評価計算 物点からの多数の光線を追跡し、想定像面での集まりから評価を行う
 - ・単なる像面での集まりを視覚的に診て、評価する（スポットダイアグラム）
 - ・スポットダイアグラムを強度分布として定量化する
 - ・スポットダイアグラム計算を基に、レンズ瞳を考慮して、周波数成分に対し分解能、解像力評価を行う。（OTF 計算）
- ④ レンズ公差決定のための評価計算

光学薄膜の場合、初期設定に注力して、膜構造を定めた。

- ① 図式解法を中心にした対話型入力による方法、
- ② 光学薄膜の性質に注目した解析合成法、例えば、特性として薄膜の高反射率領域、リップルに着目させ構成する
- ③ 電磁波としてとらえたフーリエ級数展開法

等が初期設定手法としてあげられる。

初期設定を行われた膜構造に対して基板、媒質条件を定め、波長毎に透過率、反射率、位相成分等を計算

第 2 節 自動補正手法の応用と挑戦

電子計算機の特長を生かし最も発展した分野の一つで有り、現在も日進月歩で進歩している分野で、人間の指向の仕方として、連続的な指向からある閃きの基での、全く異なったアプローチに取りかかる過程をどのようにモデル化できるかで、今後も大きな伸びしろがあると期待できる分野と言える。

現在もパラメータの選び方を数学的要素から「ものづくりの過程での実データ」を、自らの開発過程で得ることにより、パラメータ間の従属性の把握から独立性のある有効パラメータを変数に選ぶ工夫等が鍵になり、実用解に近づける秘訣にもなっている。

当初は、パラメータは独立と仮定し、線形的に変動するとの過程のもとに組み立てられた。レンズ設計においては、レンズパラメータとなる光学系における各レンズの曲率、レンズ中心厚、レンズ材料屈折率及びレンズ間隔を独立変数の候補とし、各種収差、例えば、指定された、画角、像高毎の球面収差、非点収差、コマ収差、歪曲収差等の個々をレンズパラメータの関数値として取扱い、各関数値に目標値与え、最適化を行う手法により、レンズの収差補正が提案され、効率的なものに改良されっていった。

① 独立変数の変数として取り扱うか否かの選択

どのレンズパラメータを選ぶかは、設計者の腕の中に有り、特定のレンズ間において、連動性が有り、それを見抜くことも設計者の経験に頼っていた部分も大きい。

② 異種のパラメータの取扱方

具体的には曲率系、レンズ厚/レンズ間隔、レンズ材料（硝材屈折率）等のパラメータと収差の動きに影響度の違いを苦慮する必要があった。

③ 改良の目安を単一評価尺度できる指標と最適化の手法を連動させる。

等のことから、最小自乗法近似を想定した組み立てから始められた。

初期にはパラメータ 20 前後、評価対象収差 30 を目処に始められたが、変数パラメータ 40 から 90、収差 60 から 150 程度を目安にすることが一般的に行われた。

この背景になったのは長年のレンズ設計手法がシステムティックに計算機上に乗せることができたことであり、電子計算機的高速化と大容量化が急速に進められたこと、ソフトウェア言語の普及により、一層のきめ細かい対応に工夫がもたらせられた。

光学薄膜の場合、目標特性をどのように分解するか、薄膜理論から解析的に捉えることが重要になる。

【参考文献】

- 1) 辻内順平 光応用技術 (JOEM) II-4 63
- 2) J. Pegis, D. S. Greyand T. P. Vogl: in Recent Advances in Optimization Techniques (John Wiley & Sons) 46 (1966)
- 3) BOSTON-CDC NRCC への出張者報告資料 (1968、1970、1972)

終わりに

本原稿をまとめるに当たって、産業界における筆者らが、どちらかと言えば、真っ正面から見据え、全体を総括する機会として、テーマ設定をして戴き、我々の報告に対し、問題提起とまとめ方について、具体的な示唆を戴いた専修大学社会経済学研究所の諸先生方に謝意を申し上げます。

また、本稿は、その示唆を十分に消化していない部分もありますが、更なる研鑽によりご期待に添いたいと、筆者ら一同念じています。