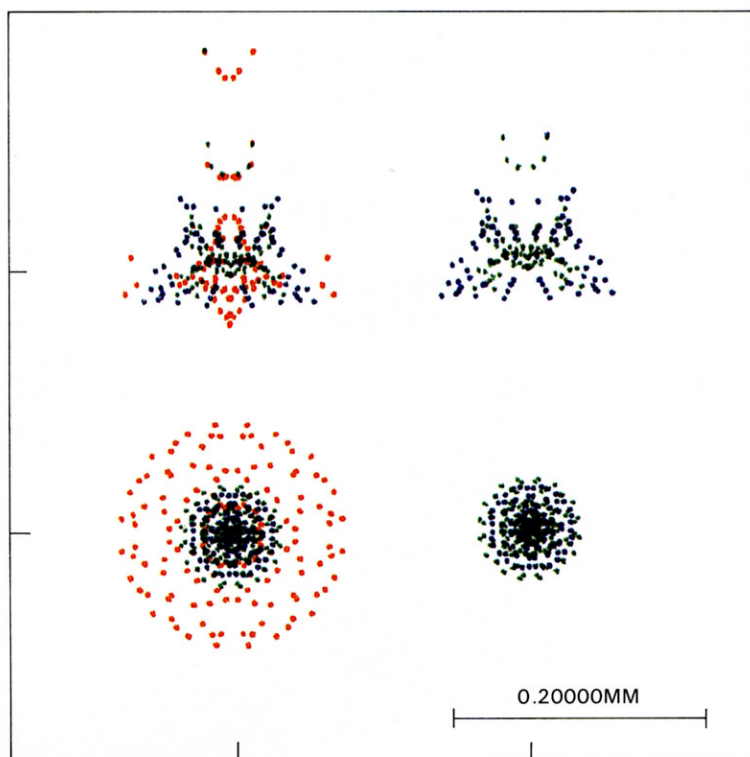


カラー画像における光学系の寄与

The Contribution of Optical Systems in the Color Imaging Instruments

中野智史

オプト事業部光学開発センター



Abstract:

Optical elements and systems play the important role in color imaging instruments, since their performance directly affects the quality of color images. To get a high quality color image, it is necessary to correct the chromatic aberration of the optical system sufficiently and to reproduce the "color" of the object appropriately.

A lens system is designed to minimize various aberrations including chromatic aberrations. Good color balance is achieved by suitable anti-reflection coating. Dielectric filters are useful for color separation and improvement purity of color in the image.

In this paper, some topics concerned with color in imaging instruments such as cameras, digital color copiers, projection TVs and color printers (ex. Nice Print System) are reviewed.

Nakano, Satoshi

Optics R&D Center
Optics Division

1

はじめに

アルバムに貼ってある卒業写真、テレビ画面狭しとターフを駆け抜ける駿馬、カレンダーの中の美しいアルプスの山々などたくさんのカラー画像が私たちを楽しませてくれる。それが本物に近い美しい画像であれば、与える感動もより大きなものになるだろう。その本物を正確に記録再生することが使命であるカラー画像機器において、光学系は物体情報を歪めずに取り込み、出力できる性能をもつことが必要である。

光学系の性能を評価するものとしては、レンズの収差、解像力、透過率、カラーバランスなど数多くある。像がくっきり出ているも色がおかしければカラー画像の意味をなさない。また、色のみがきれいに再現され像がぼやけているという状況は想像しがたい。従って、光学系どの性能がカラー画像のできを左右すると一概に決めることはできず、すべての性能が画質と密接に結び付いているといえる。

光学系は常に、色と形の情報を無限に含む光を対象にしており、カラー画像機器向けに何か特別なことをして

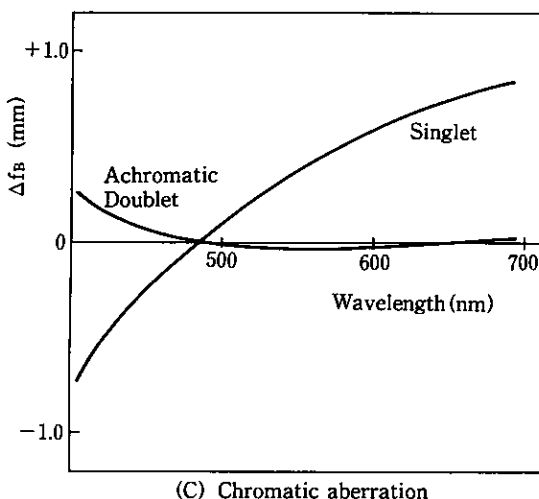
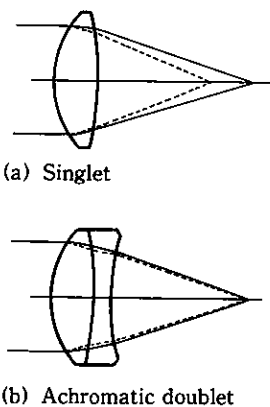


Fig.1 Chromatic aberration of singlet and achromatic doublet

いるわけではないが、機器の特徴にあわせて少しずつ工夫を凝らしている。この小文では、そんな工夫の中でも色に関するものを取り上げ解説する。前半ではレンズやフィルターについての色に関する基礎的な事柄を説明し、後半では、当社が提供しているカラー画像機器を中心に、それらに搭載されているさまざまな光学系についてのトピックスをいくつか取り上げる。

2

レンズと色

光学系の主体はレンズである。ここでは、レンズで色を考えると、必ず問題となる色収差と分光透過率について述べる。

2.1 色収差と色消し

レンズの素材であるガラスは、波長ごとに屈折率が異なるという性質を持っている。これを分散といい、その程度はアッペ数で表される。分散があると、1枚のレンズでも波長ごとに焦点距離が異なるために、物体の像のできる位置や大きさ（倍率）も波長ごとに変わってくる（Fig.1(a)）。これを色収差といい、像の縁での色のにじみやコントラスト低下をもたらす。

単レンズ1枚では色収差は必ず発生する。そこで、互いに異なる分散を持つ複数枚のレンズの組み合わせで色収差を除去（色消し）することを考える。一般にn枚のレンズがある場合、i枚目のレンズの焦点距離を f_i 、アッペ数を ν_i とすれば、色消しの条件は次式で表される¹⁾。

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{f_i \nu_i} = 0$$

例えば、カメラなど光学機器でよく使われる、色消しレンズの基本的なパターンである2枚組レンズ（Fig.1(b)）で、どの程度色収差を改善できるかを、焦点距離 $f=50\text{mm}$ の凸レンズについて単レンズと比較してみる。F線を基準に

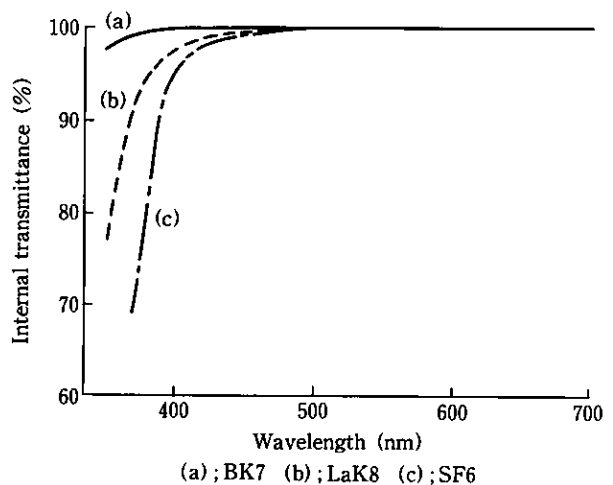


Fig.2 Internal transmittance of typical optical glasses

したバックフォーカスのずれを計算すると、Fig.1(c)のようになり、色消しレンズは単レンズに比べ、ずれを5分の1以下に小さく抑えられることがわかる。なお、実際のレンズ設計の時には、色収差のみに注目するのではなく、他の収差とのバランスを考えながら光学系を最適化している。

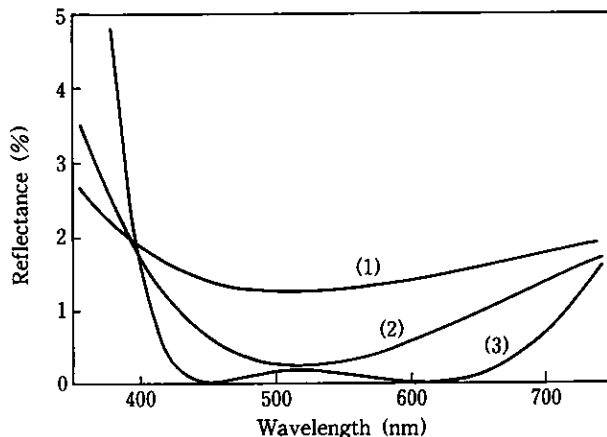
2.2 レンズの透過率とCCI

レンズの色再現の重要なファクターとして分光透過率がある。レンズの分光透過率は、①レンズを構成する材料とその枚数、②レンズ面のコーティング(主に反射防止膜)によって決まる。

レンズの材料としてよく使われるガラスの内部透過率をFig.2に示す²⁾。程度には差があるが、短波長側で光を吸収する傾向は同じである。従って、レンズ枚数が増加すると青の透過率が低下してくる。また、ガラスの屈折率に応じて表面反射があるので実際の透過率はさらに低くなる。そこで、この反射を抑え、少しでも透過率をあげるために反射防止膜が施される。

反射防止膜には、単層膜と高性能な多層膜とがあり、それぞれの分光特性はFig.3のようになっている。単層膜は、レンズより低い屈折率を持つ物質を真空蒸着により1層コーティングする。その反射率曲線は1つの極小値を持ち、レンズの屈折率が高くなるほど、その両側で反射率は急に増加していく。多層膜は、屈折率の異なる物質を組み合わせて5層程度蒸着してつくり、可視波長域全体で非常に低い反射率を実現する。反射防止膜の低反射領域は、膜厚を変えることによって自由に設定できる。

写真レンズの場合、カメラやレンズを交換しても色再現を確保するために、レンズの分光透過率をある範囲内に納めることが必要である。その指標となるものがISOで定められた色特性指数(Color Contribution Index、以下CCIと略す)³⁾である。



(1):Single layer AR coating on BK7 glass ($n_d=1.516$)
 (2):Single layer AR coating on Lak8 glass ($n_d=1.713$)
 (3):Multi layer AR coating on BK7 glass

Fig.3 Reflectance of various anti-reflection (AR) coating

CCIは、レンズの透過率のほかに、フィルムや光源の特性を考慮した写真レスポンスRから求める。

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda}(\lambda) \tau(\lambda) s(\lambda) d\lambda$$

ここに、 $S_{\lambda}(\lambda)$ はCIE昼光D₅₅の分光分布、 $\tau(\lambda)$ はレンズの分光透過率、 $s(\lambda)$ はISOの平均カラーフィルムの分光感度、またフィルムの各感光体が λ_1 から λ_2 の波長範囲で感度を持つとしている。カラーフィルムは青、緑、赤に感じる3種の感光層を重ね合わせてあるので、写真レスポンスもそれに合わせて3つ算出され、その中で最小値と各色の数値との差をとったものがCCIである。数値が大きいほど、その色でのレンズの透過率が大きいことを示している。ISOでは、ISOの標準レンズの分光透過率から求めた値を推奨値としている。その値は、許容幅を含めて表すと、B、G、Rに対して次の通りである。

$$0 \begin{matrix} +3 \\ -4 \end{matrix} / 5 \begin{matrix} 0 \\ -2 \end{matrix} / 4 \begin{matrix} +1 \\ -2 \end{matrix}$$

CCIの調整は、反射防止膜によることが多い。特に単層膜は反射率の波長依存性が大きく、CCIの調整に効果がある。多層膜は、波長域全体にわたり反射率が低いのでCCIの調整能力はない。

レンズのCCIがISOの推奨範囲内であれば、写真の色再現上問題ないとされているが、一眼レフカメラの場合、一本のフィルムでの撮影中にレンズ交換すると、CCIのわずかな違いが写真に反映されることがある。

なお、最近のコンパクトカメラの多くにはプラスチックレンズが用いられている。光学レンズ用のプラスチック素材は、その分光透過率が可視波長域で平坦なので、色の再現性に与える影響が少ないという特徴がある。

3 フィルターの役割と種類

写真の色を調整したり、白色光を青、緑、赤の3色に分解したりするときには、フィルターを用いるのが最も便利である。ここでは、誘電体薄膜の重ね合わせによる干渉の効果をj利用する誘電体干渉フィルターの中で、カラー画像機器によく利用される色分解フィルターについて述べる。

誘電体干渉フィルターは、真空蒸着法によって、屈折率が異なる誘電体の膜を交互に重ね合わせて作る。膜の厚さは0.1 μ mぐらいで10層以上、場合によっては40層近くになる。また、薄膜は意外に強い内部応力を持っており、光学面を歪ませることもある。そこで、圧縮応力を持つ材料と引っ張り応力を持つ材料とを組み合わせて、応力を緩和することが行われる。

色分解フィルターは、その分光特性からエッジフィル

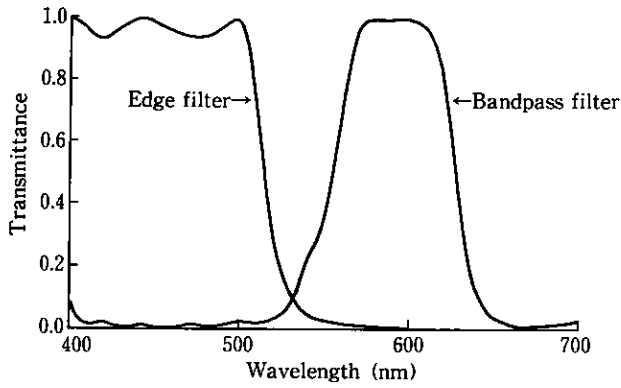


Fig. 4 Spectral transmittance of interference filters

ターとバンドパスフィルターとの2つに大別できる (Fig.4)。光について、ある波長を境に反射波長域と透過波長域とに分けるものをエッジフィルター、ある波長領域の光だけを取り出すものをバンドパスフィルターと呼ぶ。

誘電体干渉フィルターは、ほとんど光を吸収しないので、カラー画像機器ではフィルターを斜入射で使い、反射光と透過光の両方を有効に利用することが多い。

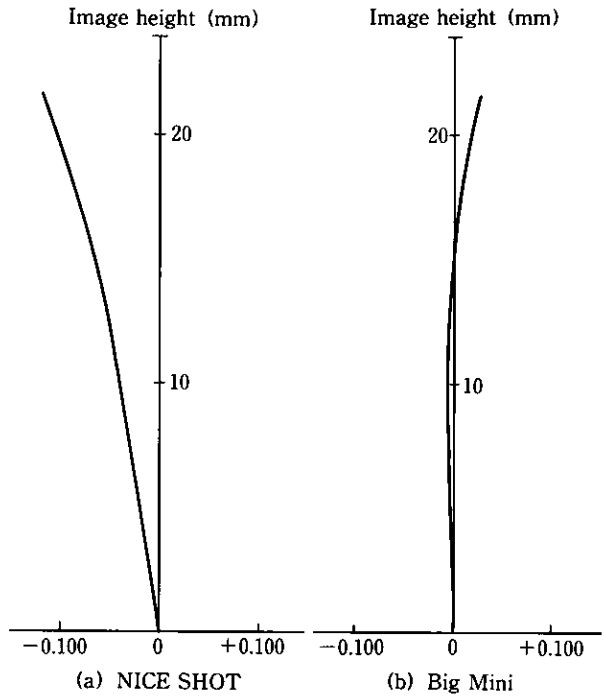


Fig. 5 Chromatic aberration of two cameras

4 カラー画像機器への応用

ここでは、代表的なカラー画像機器を取り上げ、その光学系の特徴や色の問題について紹介する。

4.1 カメラ

カメラレンズにとって、色に悪影響を与えるものは前述のようにまず色収差であり、「ナイスショット」のような単レンズのカメラを除いて、撮影レンズ、ファインダーともに色消しが行われている。

ナイスショットのレンズは、分散が比較的小さいプラスチック素材 (PMMA) でできており、絞も F11.5 と小さいが、単レンズなので必然的に色収差が発生する。Fig. 5 (a) にナイスショット用レンズについて、d 線と g 線の間の色収差を示す。像面上では最大約 0.1mm のズレが生じることがわかる。一方、コンパクトカメラの「ビッグミニ」はレンズ 4 枚構成である。2 枚の凸レンズには分散の小さなガラスを、前側の凹レンズには分散の大きなガラスを用いて色消しをしており、その結果、色収差は Fig. 5 (b) に示すように小さい。しかも、これは絞りを F3.5 にしたときであり、日中の明るいところではほとんど色収差は発生しない。サービスサイズのプリントでは、ナイスショットでも色収差が目立つことはないが、大きく引き伸ばしを行うと色消し有無の差がはっきり出てくる。

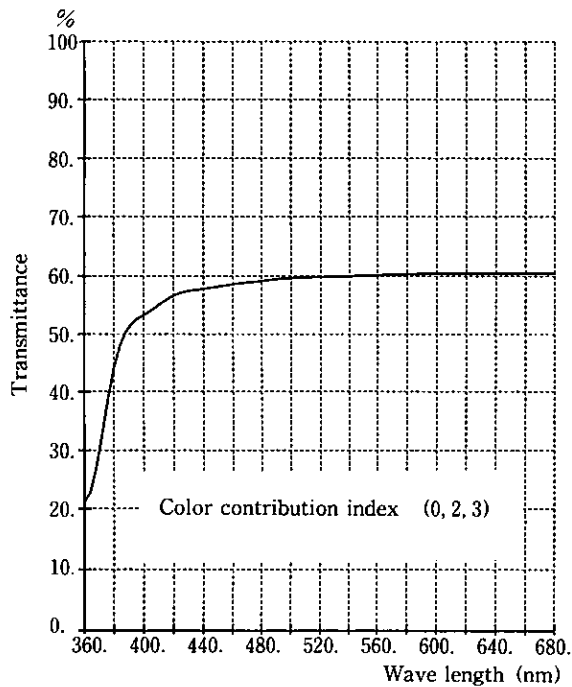
次に、CCI の調整過程の例を Fig. 6 に示す。ある 4 群 6 枚構成のレンズにコーティングをしなかった場合の分光透過率は (a) のようになる。このときの CCI をわかりやすいように 3 線座標上の点で示すと Fig. 6 (d) のようになり、(0, 5, 4) の点で示される ISO の標準レンズとは離れているが、太線

で囲まれた推奨範囲には入っている。ただし、このような非常に低い透過率では実用に耐えない。そこで、全てのレンズ面に同じ単層コーティングを施すと (b) のようになり、透過率は向上するが CCI 値は推奨範囲の端によってしまう。(c) は多層膜を含む色々な反射防止膜を適用し最適化した場合を示しており、コーティングの適切な組み合わせにより、かなり ISO の標準レンズに近づけられることがわかる。

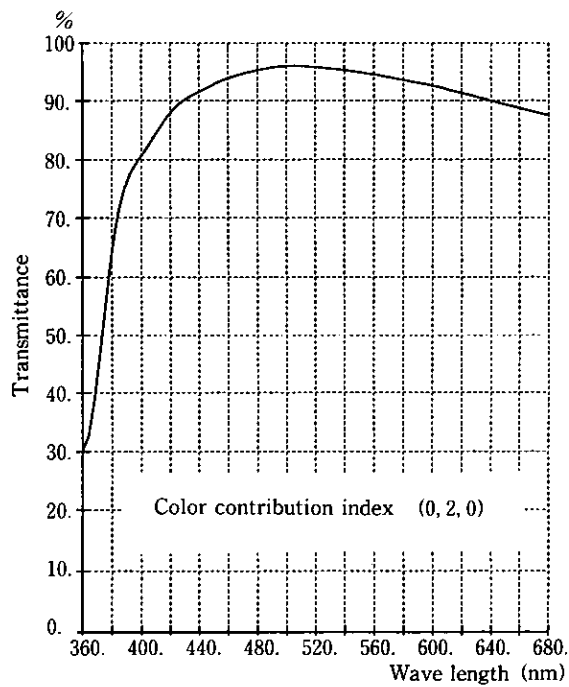
ゴーストとベ어링グレアも写真レンズにとって有害である。どちらも、光学系の中のレンズ面や鏡枠での内部反射光がフィルムに感光してしまうもので、逆光などのきびしい撮影条件の下で発生することがある。これらの発生を事前に回避するために、レンズ設計の際には光線追跡を行ない、内部反射の発生をシミュレートする。Fig. 7 (a) は、太陽への仰角が 45 度になる向きにカメラを設置したと想定し、計算して得られた光線追跡図とゴースト像である。実際にこのレンズで撮影してみると、画面の中央にはっきりした円弧状のゴーストが現れており、シミュレーション結果とよく一致する (Fig. 7 (b))。ゴーストやベ어링グレアの発生を防止するために、ほとんどのレンズ面に施されている反射防止膜も、大きな入射角で光線が入射するとその機能が低下する (Fig. 8)。従って、ゴーストなどの発生に対しては、レンズレイアウトの初期設計、鏡枠の形状の工夫などの比重が大となる。

4.2 VTRカメラ

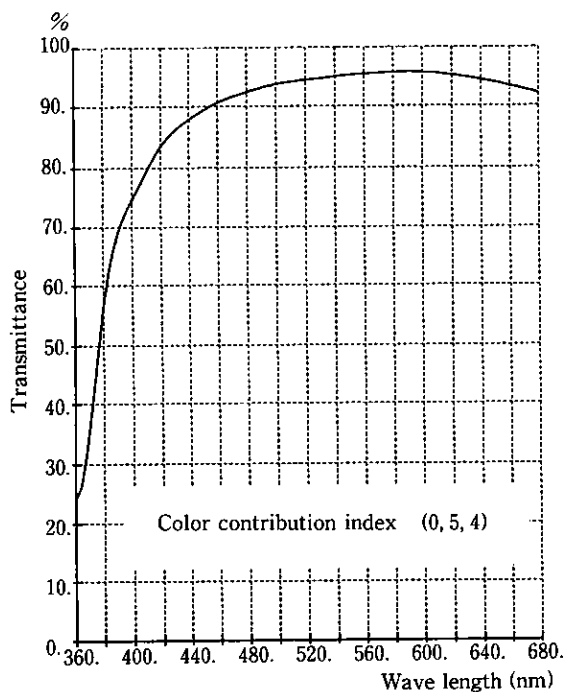
VTRカメラも基本的には、写真用のカメラと同じ光学系である。受光素子の CCD の画素数がフィルムに比べ



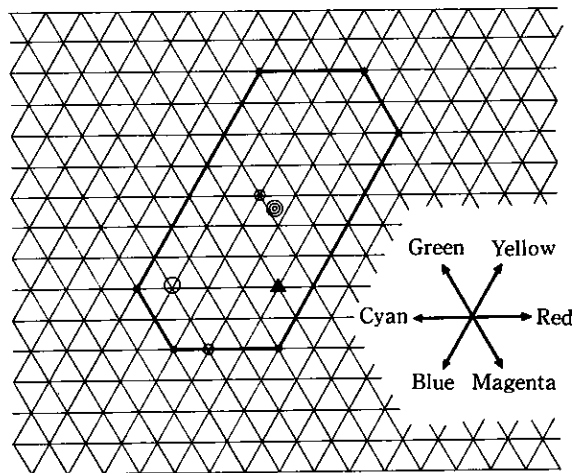
(a) With no AR coating



(b) With all single layer AR coatings



(c) With optimized AR coating system



(d) CCI plotted on a trilinear graph

- ▲ (a)
- (b)
- ◎ (c)
- Origin
- ◎ ISO Standard lens (0, 5, 4)

Fig.6 Variation of CCI by AR coating systems

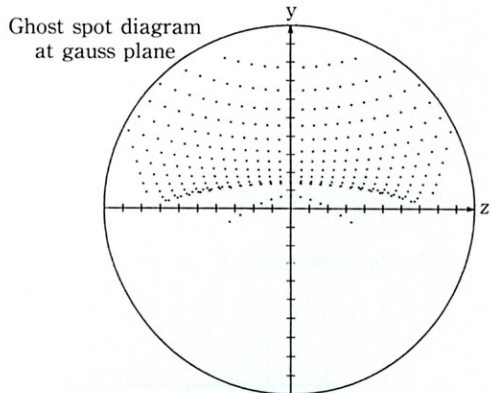
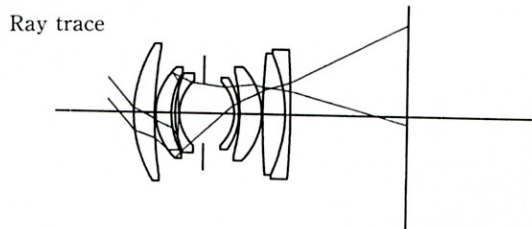
て少ないので解像力に余裕があり、また受光面積が小さいためにレンズ径も小さくできる、ということからズームレンズの高変倍化が可能である。ただし、高変倍ズームレンズは、構造的にゴーストやベリンググレアを発生しやすく、写真カメラと同様に対策がとられる。ビデオカメラの色再現性については、像を取り込んだ後に電氣的に色の調整を行なえるし、また画像再生時にモニタ

ーでも自分の好みの色に調整できるので、CCIはあまり重視せず、受光素子であるCCDの感度を考慮したレンズ設計が行なわれる。

なお、詳しくは今号掲載の宮前の論文を参照されたい。

4.3 カラー複写機

当社のデジタルフルカラー複写機DC-9028には、原稿を読み取るためと、ドラムに情報を書き込むためとの2つ



(a) Simulation of ghost by ray trace and related spot diagram



(b) Example photograph

Fig.7 Ghost simulation and photograph with the ghost

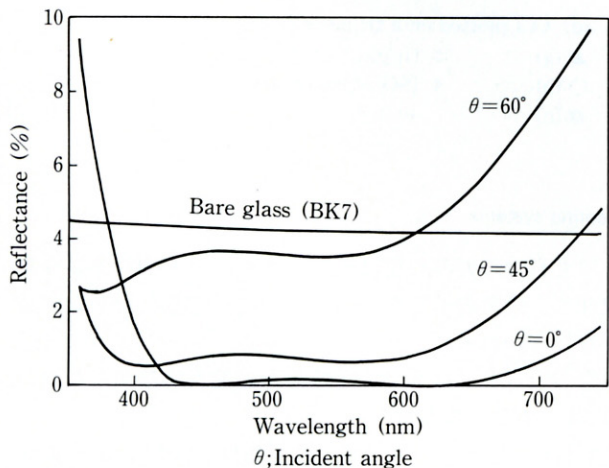
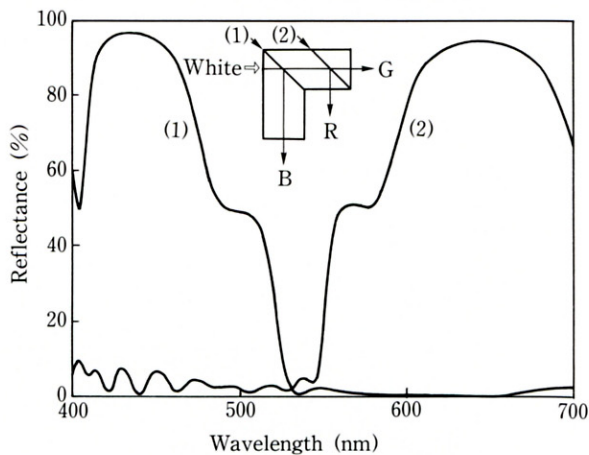


Fig.8 Variation of reflectance of AR coating by incident angle

の光学系が使われている。

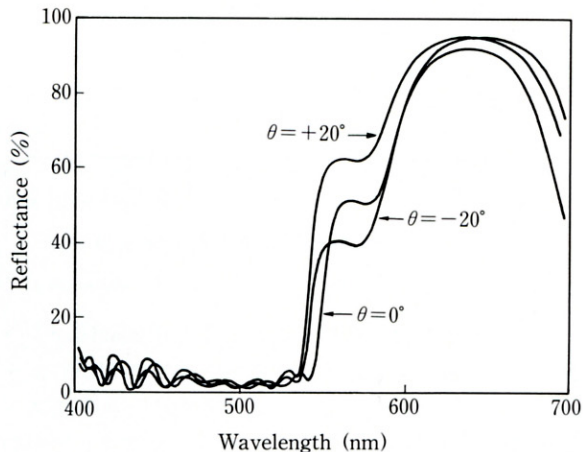
読み取り光学系では、白色光で照明された原稿の内容を、色分解プリズムを使って青、緑、赤の3色に分けて3本のCCDに結像させる。色分解プリズムはFig.9のようなもので、ダイクロミックフィルターを2面に蒸着し接合して作る。フィルターのカット波長や透過率の立ち上がり幅は、それぞれの色のCCDの分光感度に合わせて設定し、膜設計を行う。グラフは立ち上がり途中に肩を持つが、これは光の偏光成分(s偏光とp偏光)により分光特性が異なるために生ずる。

原稿の大きさに応じて、紙面垂直方向に±20度の広がりを持つ光が、Fig.9のプリズムに入射したとすると、ダイクロミックコーティング面での偏光成分比が変わり、分光特性曲線は入射角度に応じFig.10ようになる。垂直入射の時(Fig.9)に比べると、カット波長がシフトしており、また曲線の形状も変化している。結果として原稿の位置



(1); Blue light reflecting di-chroic layer
(2); Red light reflecting di-chroic layer

Fig.9 Spectral reflectance of di-chroic filter for digital color copier



θ ; Incident angle to the surface of the prism in the plane perpendicular to the paper in Fig.9

Fig.10 Reflectance of red reflecting di-chroic filter at oblique incidence

によって、CCDからの出力が大きく上下する可能性がある。この対策として、膜物質の組み合わせを選ぶことでカット波長のシフトが小さくなるようにし、さらに偏光成分が変わったときにも、CCDの出力があまり変わらない分光特性を持つように膜設計を行なう。

一方、書き込み光学系はレーザービームプリンターのものと同様で、概略Fig.11のようにになっている。この光学系には、広画角にわたり像面のゆがみの補正を可能とした「変形シリンダリカルレンズ」が採用されている⁴⁾。このレンズとf θ レンズとの2枚がプラスチックレンズであり、光学系の小型軽量化、コストダウンに大きく貢献している。しかし、温度が変わるとプラスチックレンズの焦点距離や形状などに変化があり、また同時に、光源に使われているレーザーダイオードの発光波長が変わってしまうので、光学系として性能劣化を生じる。そこで、コーリメータレンズに適当量の色収差をもたせ、この特性変化をキャンセルするような工夫がされている。

4.4 プロジェクションテレビ

大画面での迫力ある画像を楽しもうと、わが国でもプロジェクションテレビ(P-TV)が普及しつつある。Fig.12に一般的な構成を示す。青、緑、赤のそれぞれの色のCRTの像を、光学系を介してスクリーンに投影する仕組みで

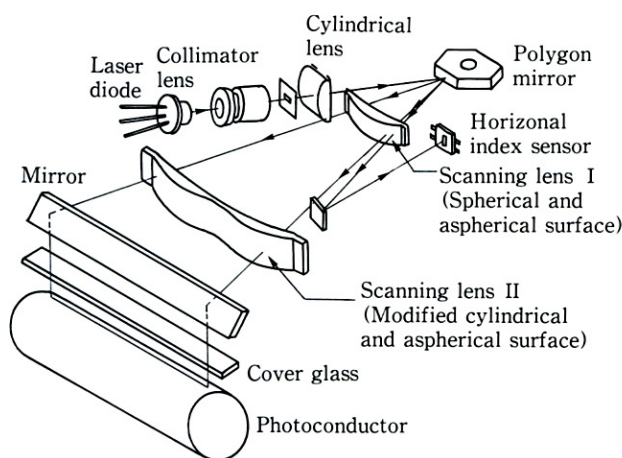


Fig.11 Optical system configuration for recording

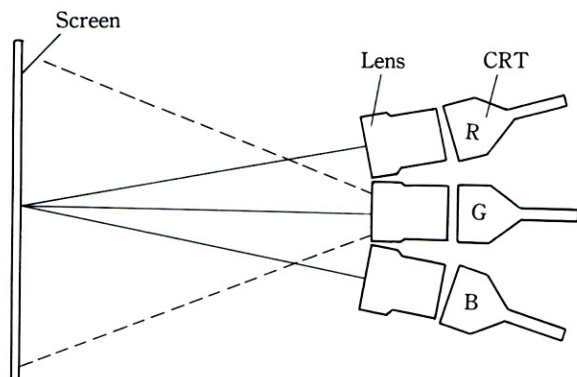


Fig.12 Optical system of P-TV

ある。

各色のCRTは決して単色光源ではなく、ほかの色も放射する。例えば、緑用の蛍光体は、緑のピーク以外に青側と赤側とに発光域を有している (Fig.13)。色収差を補正してもいくらかの残留色収差が存在するので、光源に色の混じりがあると投影した像に悪影響を与える。Fig.14は緑投影用レンズのスポット像をシミュレートしたものであるが、軸上でさえ赤が大きく広がって、像がにじむことを示している (Fig.14(a))。人間の目は緑色に敏感であるので、高画質を必要とするものでは、この色のにじみを除去するために、青と緑の光のみを透過し、赤側の不要光をカットするエッジフィルターを使用する。その場合には、(b)のようになり赤のにじみを無くすることができる。エッジフィルターは、ガラス平面板にコーティングしたものを用いることもあるし、レンズ面に直接コーテ

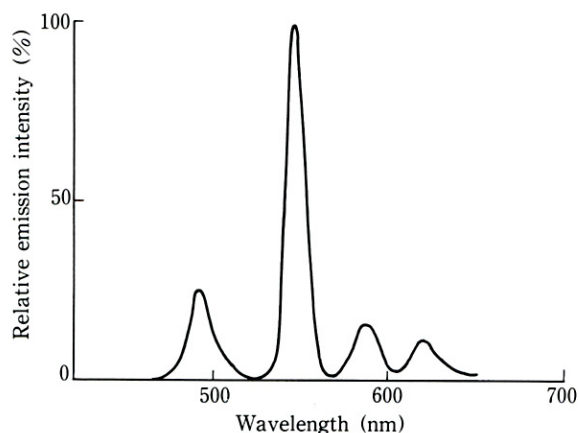


Fig.13 Emission intensity of the phosphor for green display

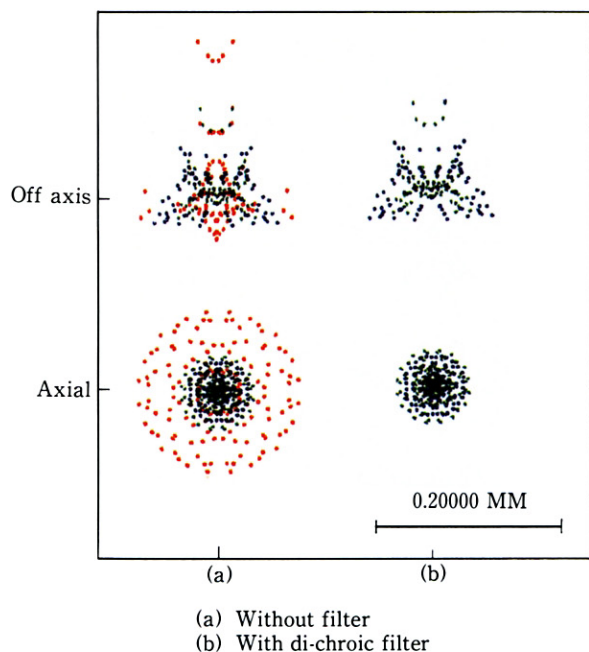


Fig.14 Spot diagram of the lens for P-TV

イングしてしまう場合もある。なお、ハイビジョンのように、さらに高画質が要求される場合には、青側の不要光も同時に除去するバンドパスフィルターが用いられることもある。

4.5 ナイスプリントシステム

ナイスプリントシステム(NPS)では、現像済みのネガをカラーペーパーに焼き付けるときの露光機に光学系が用いられている (Fig.15)⁶⁾。カメラユーザーが撮影したネガの質を、このNPSの露光プロセス内で劣化させることは許されないので、この光学系には当然高い性能が要求される。NPS用に設計されたレンズの性能の例をFig.16に示す。このレンズは、対称型のレンズ配置とすることで色収差がカメラに比べ非常に小さく抑えられている。また他の収差も小さく、特に像面の歪みは極めて小さい。さらに、レンズに入射した光線が光学系内でけられずにすべて露光面上に到達するようにレンズ口径や鏡棒の形状が考えられており、周辺においても光量の低下が少なく、像面全体に同じ明るさで露光できる性能をもつ。レンズ系としては、構成するレンズの口径や枚数について多少奢ったものになっている。

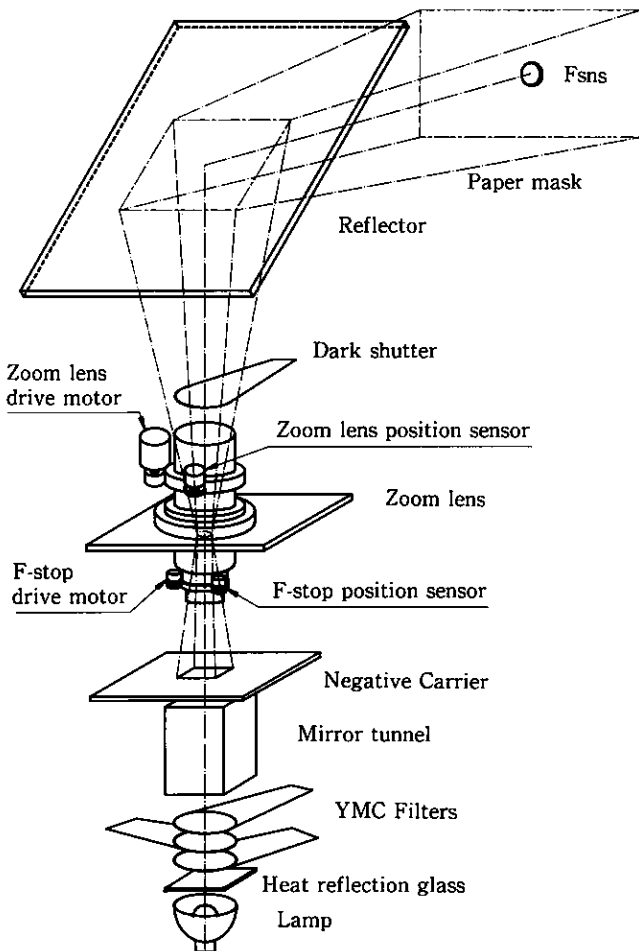


Fig.15 Exposure unit configuration of NPS

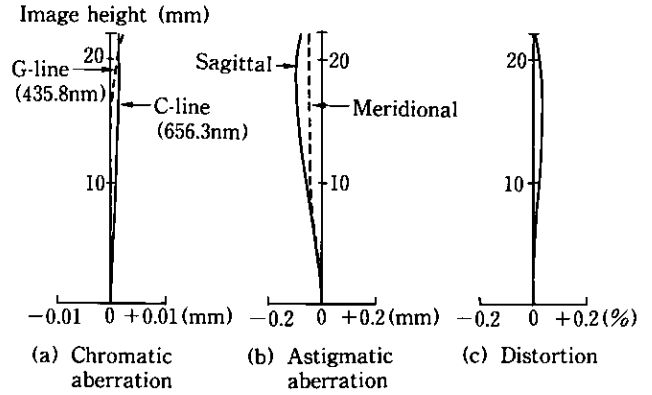


Fig.16 Typical aberration of the lens for NPS

5

むすび

カラー画像に関する光学系の課題とそれにどう対応してきたかを概説した。

今回は話題を色に絞ったが、望ましい光学系を達成するために設計、加工、制御、評価などの技術を総合的に活用することが必要である。当社における光学技術の全般については前号掲載の小島の解説、及びその参考文献を参照されたい⁷⁾。

カメラやホームビデオシステムなど画像機器の進歩には著しいものがあるが、その中で光学系の役割は決して小さくはない。今後も、光技術を応用したデバイスやユニットの開発を通じ、画像システム発展の一助となればと思う。

最後に、本稿をまとめるにあたり数多くの御教示やデータの提供をして頂いたオプト事業部光学開発センターならびにオプト開発グループの諸氏に深く感謝する。

●参考文献

- 1) 鈴木達郎: 光学技術ハンドブック, 68(朝倉書店, 1975)
- 2) Optical Glass Technical Data, (HOYA株式会社, 1984)
- 3) ISO6782(1983)
- 4) 藤田久雄, 山崎敬之: Konica Tech. Rep., 2, 36(1989)
- 5) 辻原進 他: National Technical Report, 33(2), 224(1987)
- 6) 栗本哲也 他: Konica Tech. Rep., 3, 55(1990)
- 7) 小島忠: Konica Tech. Rep., 4, 4(1991)