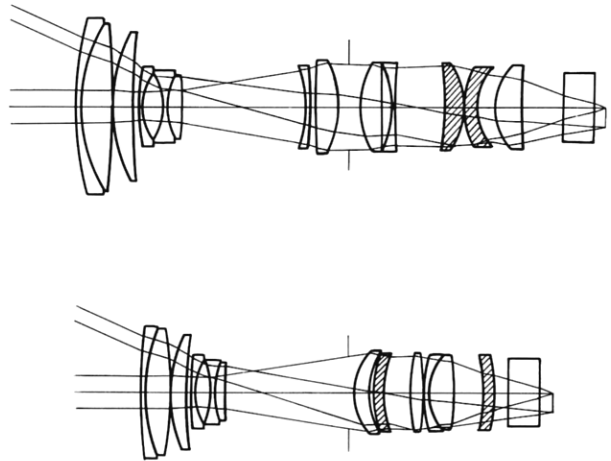


ビデオカメラ用光学系の色特性

Chromatic Characteristics of Optical Systems for Video Cameras

宮前 博

オプト事業部オプト開発グループ



Abstract:

An improvement in correction of chromatic aberration of a zoom objective for a video camera is described.

Pictures of high intensity light source in a dark setting are taken well now because of the appearance of highly sensitive cam-corders. However the image of such a lamp at night sometimes accompanies harmful 'purple flare' around it.

This phenomenon is caused by the residual chromatic-spherical aberration of the optical system, since such a light, usually composed of a high intensity discharge mercury lamp, has strong line spectrums in the shorter wavelengths.

We have developed a new zoom objective whose axial chromatic-spherical aberration has been suppressed more than the old type, by means of the application of two plastic aspherical lenslets with weak refractive power.

Some other general characteristics of color image formation of video cameras with a single image sensor are also reported in this article.

Miyamae, Hiroshi

Optics Development Section

Optics Division

1

まえがき

ここ数年、民生用の小型一体型ビデオカメラの市場が急速に広がり、各メーカーとも、コンパクト化、高画質化、高付加価値化に向けて凌ぎを削っている。当社オプト事業部でも、1982年以降、ビデオカメラ用のさまざまな光学系を開発、量産¹⁾している。

ビデオカメラの画質を考えると、カラー画像としての視点を避けて通ることはできない。本稿ではまず単板式カメラ用光学系の色特性について解説し、さらに我々が開発した新しいタイプのズームレンズの色収差補正について述べる。

2

単板式カメラ光学系の色特性

ビデオカメラに要求される色特性の項目は、

①色再現性

②画像の鮮鋭性に関する色特性

の2つに大別できる。民生用として一般的な単板式カメラでは、①を決定する要因として、光源の分光特性、光学系の分光透過率、撮像素子の分光感度、信号処理系によるBGR各色の利得バランス（ホワイトバランス）等があり、②の要因としては、光学系のMTF、色収差、点像

分布、撮像素子の素子周期と色フィルタ分布、色信号処理回路特性等が挙げられる。また上記以外に光学系の不要光の色や信号処理系での色ノイズ等も、色特性として含まれる。以下では、これらのうち光学系の設計に関連の深い項目について述べる。

2.1 撮像素子のフィルタ構成と光学系の分光特性

単板式ビデオカメラでは、Fig.1に示すように画素毎に所定の分光透過率を有する色フィルタが装着され、隣合う複数の画素信号を演算することにより輝度成分と色差成分を抽出する方式が主流である。このようなフィルタ構成は、補色市松フィルタ又はモザイクフィルタと呼ばれており原色系のフィルタに比べ感度が高い。Fig.2に代表的なCCDのフィルタの分光感度特性を挙げる。実際には、赤外域まで裾野をひいた素子そのものの分光感度がこれに重なるため、光路中に赤外カットフィルタを配置することが必要となる。短波長側はレンズ硝材の透過率が支配的であって、レンズ設計上、透過率の良い高屈折率硝材の選択やコーティングの最適化などの配慮が必要となる。Fig.3に、これらの分光特性を示す。実線は当社のズームレンズの分光透過率の設計値例である。

現行のビデオカメラはホワイトバランス機能を持っており、レンズ単独でのカラーバランスは銀塩フィルム用のスチルカメラ程厳密には要求されないが、S/N確保のため信号処理による利得補償には限度があり、通常450～600nmの波長範囲で平坦な分光透過率特性が必要とされる。

多層膜コーティングは日だつゴーストやフレアスポットの低減という観点で適用されることが多い。これらの不要光は反射面の分光反射率の影響を受け特定の分光分布を持つので、輝度だけでなく発生色にも注意する必要がある。

2.2 光学系のMTF²⁾と色収差の評価

MTFは光学系の空間周波数特性を総合的に表す重要な評価項目である。特に波長による結像性能の相違（色収差）を考慮するため、各波長毎の値をシステムの分光感度に応じたウエイトで加重平均したものを白色光MTFと

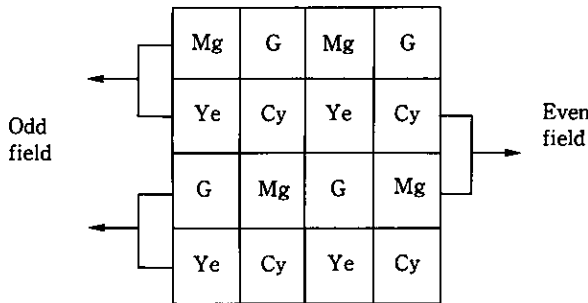


Fig. 1 Typical color filter arrangement of an image sensor

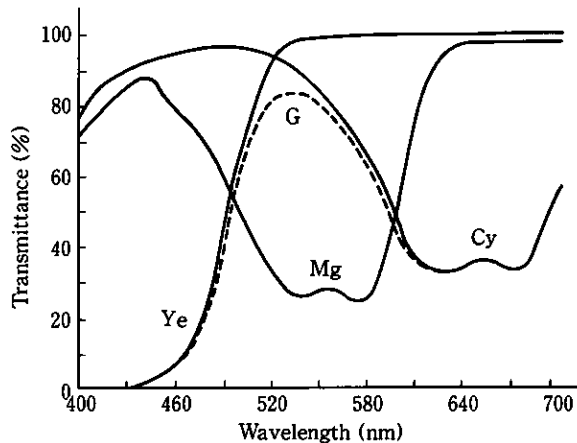


Fig. 2 Spectral transmittance of color filters

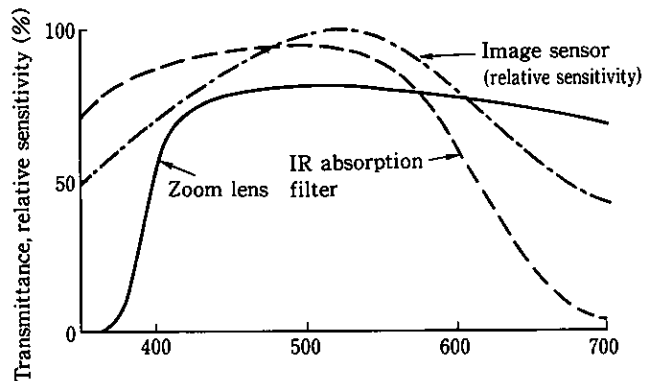


Fig. 3 Spectral transmittance of a zoom lens and an IR absorption filter, and relative spectral sensitivity of an image sensor without color filters

称する。ビデオカメラの光学系では、録画方式によって定まる最高水平解像度に対応する空間周波数を撮像素子のサイズから求め、それ以下の周波数でのMTFを十分に高くするように光学設計を行う。例えば、1/3インチの撮像素子で高画質録画方式での最高水平解像度430TV本に対応する空間周波数は60本/mmとなる。白色光MTFは画像を波長ウェイトを通じてモノクロ化した場合の評価であり、周波数毎の位相変化に対する色度変化等を問題にする場合には、各原色に対するMTF値を比較評価することが必要となる³⁾。

最近、CCDの高感度化や信号処理のS/N比向上に伴ってカメラの感度向上が著しく、面光源物体が主体の通常シーンの撮影だけでなく、街灯等、低輝度背景中の高輝度点光源が撮影される機会が増えている。空間的広がりを持つ面光源物体の結像評価にはMTFが有効であるが、露出オーバーの点光源像やコントラストのはっきりした境界の像の評価は、周辺の色着きも含めて収差図やスポットダイヤグラムによって行う必要がある。この点に関する我々の最近の成果については第3章以降に詳述する。

2.3 撮像素子と偽色信号⁴⁾⁵⁾

撮像素子を用いたカメラでは撮像素子上を一定の画像周期 p でサンプリングしながら画像信号を取り出しているが、 f の分布の最大値が $1/2p$ (ナイキスト限界) を越えたところではモアレの周波数成分が像の周波数成分に重なり合い、折返し歪みに基づく偽信号が発生する。(1/3インチ33万有効画素のCCDでは $f = 1/2p = 70$ 本/mm) 同様に、色フィルタの繰り返し周期が np の場合、これに対するナイキスト限界は $1/2np$ となるため、物体が白黒であっても像の周期が $1/2np$ を越えると、いわゆる偽色信号が発

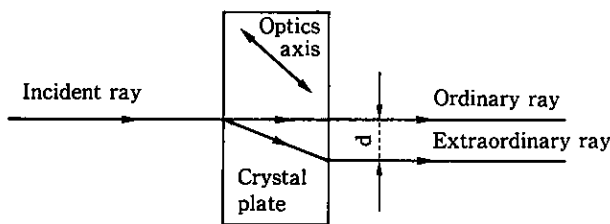


Fig.4 Separation of a ray in a crystal plate

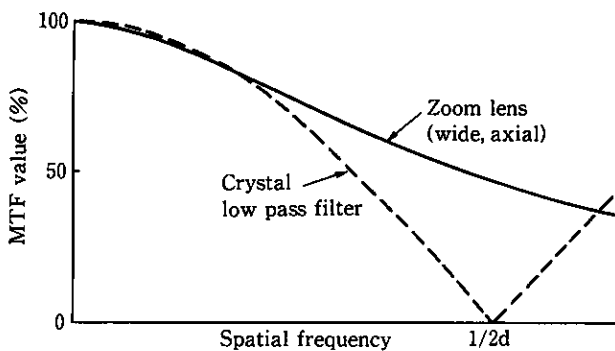


Fig.5 MTF of a zoom lens and a crystal plate

生する。これらの偽信号を抑制するため、通常は水晶板の複屈折性を用いた光学的なローパスフィルタが使われる。Fig.4にその原理を示す。光軸に平行な光線は、水晶板内を真っ直ぐに進む常光線と光学軸の方向に依存して斜めに進む異常光線とに別れ、通過後の分離幅 d は厚みに比例する。 $d = p$ とすれば偽信号を抑制できる。水晶板と代表的なズームレンズのMTF (広角端、軸上) をFig.5に示す。レンズにくらべ、ローパスフィルタによるMTFの低下がかなり大きいこと、偽色信号の抑制効果もあることがわかる。実際には異なる分離幅方向を持つ複数の水晶板を貼り合わせ、縦、横、斜め方向に総合的にローパス効果を持たせながら、ナイキスト限界以上のレスポンスも抑制している。

3 新しいズームレンズタイプと色収差⁶⁾

3.1 ビデオカメラの新しいズームレンズタイプ

民生用ビデオカメラのズームレンズとしては、従来、Fig.6(a)に示すように物体側から順にそれぞれ、正、負、負、正、正の屈折力のレンズ群を有する5群構成のもの

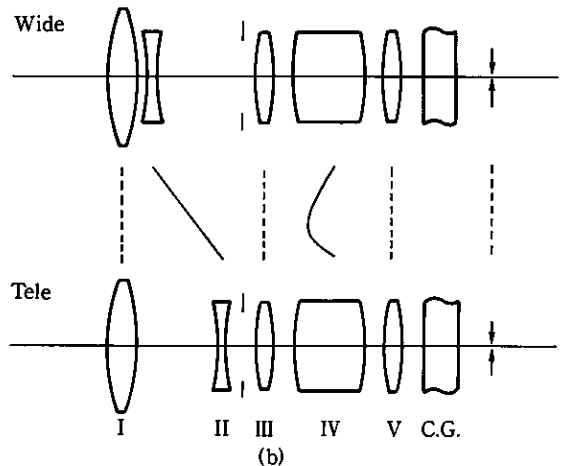
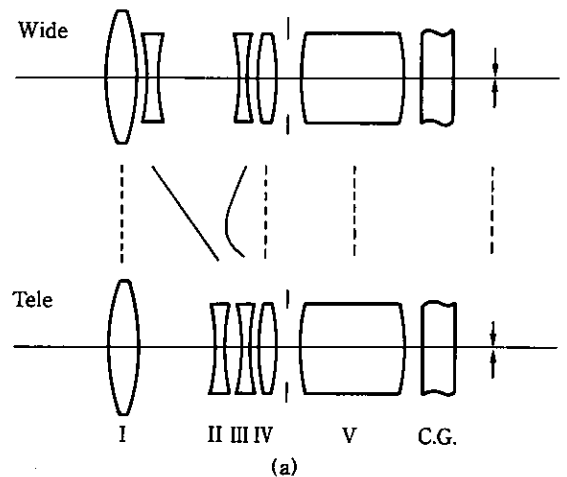


Fig.6 Types of cam-corder zoom lens

が殆どであった。負の第2群は変倍のため、負の第3群は変倍に伴う焦点位置の補正のために光軸に沿って移動する。図中、C.G.(カバーガラス)は、ローパスフィルタ及び、赤外カットフィルタ等の部材を表す。

これに対して最近では、負の第3レンズ群を廃止しフォーカスレンズ群としての第4群に焦点位置補正機能を併せ持たせるように構成させた新しいレンズタイプが次第に採用されつつある。この構成をFig.6(b)に示す。このようなタイプのズームレンズの特徴として、

- ①可動群が2群と少なく構造が簡単であり、焦点位置補正機能をフォーカシングと同様電氣的な制御に委ねることで、機械的なカム構造が不要となり、コスト的に有利である。
- ②負レンズ群が第2群のみであるため、レンズ全長の短縮化、レンズ群間の偏芯誤差感度の低減に有利である。
- ③第3、4群の屈折力が強い光学設計上ベツツパール和が確保しやすく、コンパクト化を計りやすい。
- ④非球面レンズの適用により枚数低減、性能向上が計りやすい。

などが挙げられる。図中に示すように、固定の第5群が置かれることもある。

3.2 新開発のズームレンズ

我々は、S-VHSやHi 8等の高画質化と、高密度1/3インチCCDに対応するために、非球面プラスチックレンズを用いた新タイプのコンパクト高性能ズームレンズの開発に成功している。Fig.7に当社にて開発した新旧タイプの設計例を示す。いずれも非球面プラスチックレンズを2枚(斜線)使い、1/3インチCCD用で、焦点距離 $f = 7 \sim 42$ mm、ワイド端のFナンバーはF1.4のほぼ同仕様のレンズであるが、旧タイプの(a)に比べ、新タイプの(b)はレンズ枚

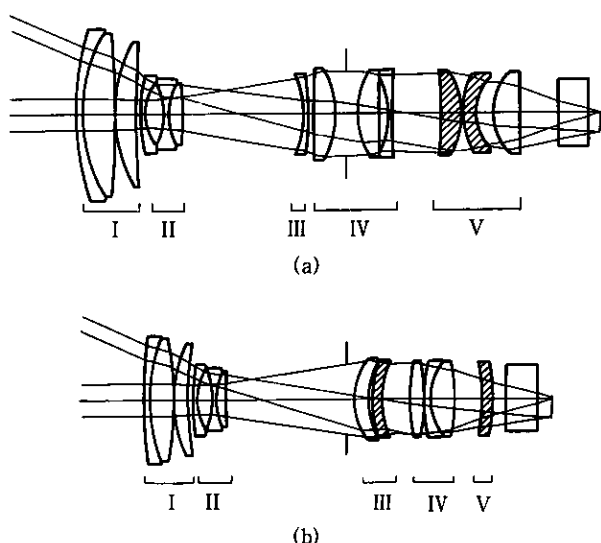


Fig.7 Cross sections of Konica zoom lenses for cam-corders

数の低減(13→12枚)にもかかわらず、大幅なコンパクト化を達成していることが分かる。

3.3 プラスチックレンズと色収差

プラスチックの屈折率は外界の温度や湿度によって変化するため、プラスチックレンズの適用に当たっては、素材の特性に応じて正レンズと負レンズを適当に組合せて、屈折率変化に伴う結像位置の変化を光学的に補正する必要がある。また、ズームレンズ全系の色収差を良好に補正するためには各レンズ群の色収差を補正する必要があり、各レンズ群に正レンズと負レンズが必要となる。

Fig.7(a)の例では正の屈折力を持つ第5群に正負の2枚のプラスチックレンズを導入し、屈折率変化に伴う結像位置の変化を補正しつつ、第5群の色収差を補正している。しかし光学系に求められる要求が厳しくなってくると、この構成には次のような問題が生ずる。

現在実用化されている光学用プラスチックレンズの素材は数種類に限られており、温度や湿度による結像位置の変化と色収差とを同時に補正しようとすると、プラスチックレンズの屈折力が正負共に強くなり球面収差の発生が大きくなる。こうした単色収差を補正することは非球面の導入によって可能であるが、球面収差と同時に発生する球面収差の色収差の高度な補正までは困難である。

Fig.8に典型的な街灯用の高圧水銀ランプの発光スペクトルを示す。Fig.9(a)に示すような球面収差の色収差をもつレンズで夜の街灯を撮影するとき、 $\lambda = 400 \sim 450$ nm付近の強い輝線によって、通常撮影ではあまり問題にならない短波長域の点像の広がりが紫色のフレアとして再現されてしまう。この現象は、同様な短波長輝線スペクトルが存在する蛍光灯でも認められ、ホワイトバランスが色

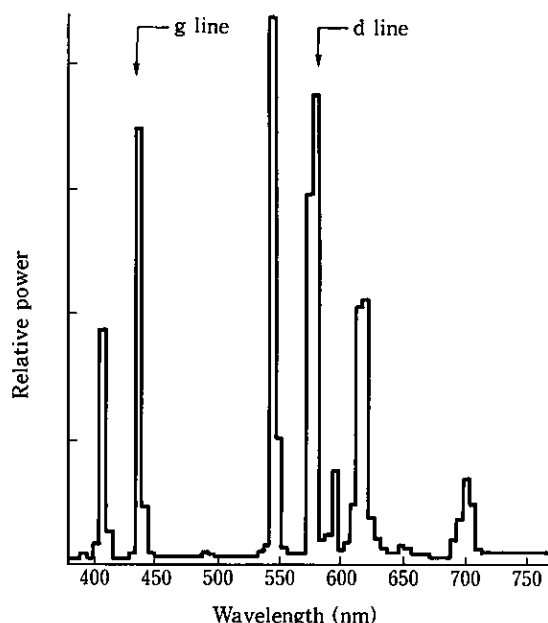


Fig.8 Relative spectral power distribution (in 5nm bands) of a high intensity discharge mercury lamp

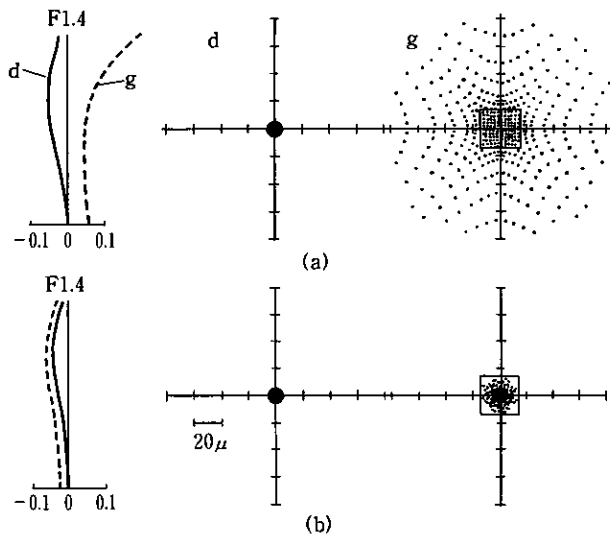


Fig. 9 Spherical aberration and spot diagrams of the lenses shown in Fig. 7

信号の帯域圧縮後にとられるため点像周辺部が低域として強調されること、背景と点像の中心部との輝度レベル差が大きいため感度レベルの低い紫色の部分のみがカメラの飽和強度に達せずに色再現されることによって更に強まると考えられる。

屈折力の弱い非球面プラスチックレンズのみを用いれば上述の問題がなくなり性能向上やコンパクト化を達成できるが、Fig. 6 (a)のレンズタイプではレンズ枚数が増えてしまい、コストアップを招いてしまう。そこで我々は、レンズ枚数の低減に有利なFig. 6 (b)のレンズタイプに屈折力の弱い2枚の非球面プラスチックレンズを適用した設計を行った。これをFig. 7 (b)に示す。2枚の非球面プラスチックレンズのうち、絞り近くに位置するレンズが主に球面収差の補正に寄与し、像面近くのレンズは非点収差や像面湾曲の補正に寄与している。

Fig. 7の両レンズの球面収差図とスポットダイヤグラムをFig. 9に挙げる。但し、ベストデフォーカス位置はd線(波長 $\lambda=588\text{nm}$)に対する結像位置に一致するとした。近軸的な軸上色収差にそれほどの差はないが、新タイプ(b)では、開口の明るい部分で球面収差の波長による差、特にd線に対する短波長側のg線(波長 $\lambda=436\text{nm}$)の球面収差の差が小さいため、旧タイプで見られるg線の点像の広がり大幅な改善が見られる。

撮像素子としてモザイクフィルタ型を想定すると、色フィルタの繰り返し周期 $2p$ に対応して、スポットダイヤグラムに現れた球面収差を含めた軸上色収差の大きさの許容値はほぼ $4p$ 四方と考えられる。高画質タイプとして現在実用化されている1/3インチ有効画素数33万の撮像素子では、 $4p \approx 30\mu\text{m}$ となる。図中の矩形はこの大きさを示しており、(b)でのg線点像の大きさが許容範囲に入ることが分かる。

3.4 非球面モールドガラスレンズの適用

一般にガラスレンズはプラスチックレンズに比べ種類が圧倒的に豊富で、高屈折で低分散の硝材を用いることができるため、プラスチックレンズに比べ色収差補正上は有利といえる。従って、上述のような色収差の改良は、最近適用が相次いでいる非球面モールドガラスレンズによっても可能である。しかし、プラスチック非球面レンズは軽量な上に安価であり、厳しいコスト低減を要求されるビデオカメラ用ズームレンズでは極めて有効である。今後ともそれぞれの利点を生かす設計開発を行う必要がある。

4

むすび

民生用単板式小型ビデオカメラ用光学系の色特性、新しいズームレンズタイプでの色収差補正の改良について述べた。一般に、色特性に関しては光学系と並んで信号処理の比重も高く、総合的な色特性の改善には双方からのアプローチが必要である。光学設計上の新しい技術としては、不均質媒質の色収差補正への応用⁷⁾が検討されているが、まだ実用化には至っていない。

多板式カメラ⁸⁾については割愛したが、ダイクロイックプリズムによる色分解、レジストレーションの調整、軸上色収差の規格等、色に関連した技術的な要素は多い。

色特性に限定せず、高画質化の観点からは、AFに要求される光学系の特性⁹⁾、撮像素子上のオンチップマイクロレンズの影響¹⁰⁾、小絞り時の回折現象による解像劣化なども課題となる。特に最後の点は今後撮像素子の画素が小さくなるにつれ影響が大きくなると考えられ、軸外の劣化程度¹¹⁾や軽減策であるアイリス上のNDフィルタの副作用⁴⁾など、慎重な検討が必要となる。

今後も、高精細スチルビデオやハイビジョン、静止画、動画のデジタル化など、システムの高品位化に対応した高性能コンパクトな光学系の開発に努める所存である。

●参考文献

- 1) 小島 忠: Konica Tech. Rep., 4, 14 (1991)
- 2) 松居吉哉: レンズ設計法, p68, 共立出版(1972)
- 3) 朝枝 剛: 光学技術コンタクト, 17, 31 (1979)
- 4) 佐柳和男: 画像解析応用編, 日本オプトメカトロニクス協会(1987)
- 5) 小川恵央 他: TV学会技報, TEBS101-9, (1985)
- 6) 宮前 博: 光学系の設計と評価, トリケップス(1991)
- 7) 青木法彦 他: 第16回光学シンポジウム予稿集, p39(1991)
- 8) 村上 隆: 固体撮像素子用色分解光学系の設計, 日本工業技術センターセミナー資料T-2334, (1989)
- 9) 坂野 誠: AFシステム開発, 日本工業技術センターセミナー資料T-2590, (1990)
- 10) 青木 正 他: National Technical Report, 36, 3(1990)
- 11) 宮前 博: 第16回光学シンポジウム予稿集, p19(1991)