テレビ用レンズの二、三の問題*

NHK技術研究所 龍岡 静夫
和久井 孝太郎

テレビ用レンズについて、最近はその特殊性を認めた設計が行なわれるようになったが、使用者側の立場で考えたとき、気がついたいくつかの問題を紹介した。わい曲収差、口径食、解像度については、現在考えられる数字をあげた。また、フレアやレンズが作る偽の信号についてもふれた。

1. ま え が き

テレビジョン放送を開始してから、10年以上の間、毎日レンズを使用しているが、その他の電気系について議論されているほどには、その性能が十分に検討されていない。3インチと4インチ半のイメージオルシコンカメラにはライカ判カメラのレンズに、1インチのビジコンカメラには16mm映画用のレンズにそれぞれ近いものが使われてきたが、最近ようやく、テレビ用レンズの特殊性が考慮されるようになった。だが、テレビカメラを使用する側と、レンズを製作する側とで、まだ気付かれていない問題もあるようなので、ここにそのいくつかを見直して、今後の改良に役立ちたいと思う。

一般に、どんなレンズが理想的であるかは、いろいろにいえると思うが、次のようなとらえ方もあろう。

- 1) 被写体の形を一平面上に正確に投影すること。
- 2) 被写体の明暗を忠実に再現すること。
- 3) 被写体の色彩を忠実に再現すること。
- 4) 見わけられるまでは、十分鮮鋭な解像をすること。
- 5) 被写体にはなかった偽の信号を作らないこと。

筆者紹介

たつ おかしず お
龍岡 静夫 昭和27年、東京大学理学部物理学科卒業。写真写真フィルム株式会社、富士写真光機株式会社を経てNHK技術研究所に入所。現在、物性特別研究室に勤務。TV用レンズの評価と、光メーザーの研究に従事。

わくい こうたろう
和久井 孝太郎 昭和25年、米沢工業専門学校電気通信科卒業。同年NHK勤務、仙台中央放送局を経て、現在、同技術研究所開発部にてテレビカメラの研究に従事。正会員。

これらは何でもないような条件だが、実際にはどれも満足されていない。どの程度まで満足されればよいかという形の問題として残っている。また、レンズ以後の系についても同様なことが考えられるであろう。

ビジコン用レンズは、寸法が小さくなったこと以外には、本質的に変わったことはないで、ここではイメージオルシコンカメラ用レンズについてだけ述べる。

2. テレビ用レンズの画角、明るさなど

テレビカメラに使われているレンズには、焦点距離が35mmから2,000mmのものまでであるが、いつも全部使っているわけではない。図1に用途別の使用例を示したが、スタジオでは焦点距離が200mmのもの(400mmまで使うことがある)まで、中継用には1,000mmから2,000mmに達するものまでが使われている。

画面の寸法は、光電面の直径1.8インチ=45.7mmで大体きまってしまう。オーバースキャンして使用するときでも、画質を問題にするのはこの範囲である。ターゲットでレンズを切り替えるとき、機械的精度から考えて、光軸が1mm程度狂ってしまうことがあるが、現状ではこれも考慮して、画角を広くとっている方がよい。

焦点距離と画面寸法から画角がきまるが、受像機で見える場合の遠近感から考えると、そんなに広い範囲の焦点

図1 イメージオルシコンカメラに使われているレンズの焦点距離と明るさの例
・は特に焦点距離の長いレンズの例

"Several Problems of TV Lens" by Shizuo Tatsuo and Kōtarō Wakui (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo)

* テレビ画質研究委員会(昭38.7)で発表

図 2 中継番組におけるレンズの使用頻度の一例

距離を使うわけではない(図 2)。

図 1 で、 $F4$ の所に横線が引いてあるのは、テレビ用レンズは $F4$ よりも明るくなくてもよいことを示している。現在、市販されている大口径レンズの明るさから考えると、この数字は容易に到達できる明るさのようにみえるが、次節以下で述べる種々の要求を満たすのはそんなに簡単ではない。この数字はむしろ、現在のレンズの性能から決められたものなので、明るくてよいレンズの出現は大いに喜ばしい。

中継用レンズは、ナイターや相撲については被写体の明るさが決まっているので、 $F8$ 程度より明るくなければならない。ここでいうレンズの明るさとは、レンズの透過率を含めたものであって、反射防止膜がついていても空気に接する面数が多いと、 F ナンバーとしてはもっと小さな値を限界にしないと光量が不足する。

反射防止膜は、ガラスよりも屈折率が低い MgF_2 の薄膜を 4 分の 1 波長の厚さに蒸着したもので、 MgF_2 の屈折率がガラスの屈折率の平方根に等しいときは、反射率は 0 となる。実際の光学ガラスの屈折率は 1.5~2.0 の範囲にあり、 MgF_2 の 1.4 の自乗にいつも等しくはない。

また、一つの波長について、反射率を 0 にしても、可視域またはイメージオルシコンの感光域全部については 0 にはならない。さらに、反射防止膜における光の散乱による光の損失を考えると、一面について透過率をよくても 99% ぐらいと考えた方がよい。 m 体からなるレンズの透過率は、この値の $2m$ 乗だから、4 体ならば 92% であまり気にしなくてもよいが、15 体レンズとなると 74% しか光を通さない。実際、ズームレンズの場合、1 絞り程度の差が認められる。

このほか、使用者としては、レンズは小さくて軽いことが希望される。特にズームレンズの場合には、性能の要求と矛盾する面もあるが強く望まれている。強度についても、30 c/s まで 2 G の強さの振動に耐えることが必要とされている。

3. わい曲収差の問題

写真レンズの場合には、四角な被写体もあるので、約 1% 程度のわい曲収差が許容量とされている。航空写真測量とか、製版用のレンズの場合にはもっと許容量は小さい。テレビジョンの場合は、レンズ系以降の偏向ひずみが小さくないので、レンズにだけきびしい条件を与える必要はない。図 3 のような偏向ひずみがあるとき、円に接する部分と、左右のヘリが一致するように偏向系により調整し、その残った量について規格を定めると、

$$\frac{\Delta h_1}{h}, \quad \frac{\Delta l_1}{h} \leq 1\%$$

$$\frac{\Delta h_2}{h}, \quad \frac{\Delta l_2}{h} \leq 2\%$$

という数字を一応の目安とすることができる。ここに、偏向系によるひずみの量は少ないとして、高次の項は省略してある。

レンズのわい曲収差は、普通、図 4 のような曲線で表わせるが、ここでは画面の端 ($r=r_1$) における量 D_1 と、その中間 ($r=r_2=r_1/\sqrt{2}$) での値 D_2 で表わしレンズの収差が偏向ひずみと同等になる条件を求めてみよう。

収差が r の自乗に比例して増加する、いわゆる高次の収差がない場合は $D_1=2D_2$ であり、図 5 のような図では鎖線上の点に相当する。図 5 の 3 組の平行線は、3 種類の偏向ひずみがそれぞれ図に示した値になる状態を示す。これらで囲まれた斜線を施した部分の内側のような収差の量ならば、画面のゆがみは偏向ひずみによるもの以下である。

実際のレンズでは、高次のわい曲収差の大きなものはないから、鎖線から遠くはなれた状態のレンズは少ない。

図 3 偏向ひずみ

図 4 わい曲収差

r の二次の収差だけならば $D_1 \leq 5.5\%$ ($r_1 = 22.86\text{mm}$) または $D_1 \leq 4.2\%$ ($r_1 = 20\text{mm}$) がこの限界である。

テレビジョンでは焦点距離の異なったレンズの組やズームレンズを使うが、これらのわい曲収差の符号が等しいことも必要である。特にズームレンズの場合、画面のへりに平行な直線のそり方が、ズームングの途中で逆になると目だつから符号が変わらないことが必要である。

4. レンズの口径食の問題

はしがきで記した明暗の再現ということは、比較的広い部分を考えてと問題はないようにみえるが、画面全体を見わたすと必ずしも容易ではない。

写真レンズは、何枚かのレンズの組合せで収差の補正をしているため厚くなり、前後のレンズの径を大きくしなければ、斜め方向の光がささぎられ口径食という現象がおこる。これにより画面のはしで暗くなる割合は、レンズの形式によりさまざまだが、大口径レンズの絞り開放のときは $1/3$ 以下になるものもある。口径食による像面上の照度減少は、白黒フィルムで撮影するときは目だたないが、テレビカメラの場合は、 3% 以上減少すれば検出されるので、せっかくの大口径レンズもこの理由だけで絞らないと使えないことになる。

レンズにはこのほか、コサイン 4 乗法則による照度減少の効果が加わるので、口径食はほとんどないものが必要である。この法則は画角 θ の方向の像の照度 I_θ が、画面中央にあるときの照度 I_0 に比べると、

$$I_\theta = I_0 \cos^4 \theta$$

図 5 わい曲収差の許容量

図 6 コサイン 4 乗法則

図 7 リトロホークスのレンズ

という関係で減少することを示している。このことは、レンズに入射する光の量を考えれば、容易に理解される(図 6)。レンズに斜めに光が入るときは、レンズの開口の面積は $\cos \theta$ 倍だけ小さくなったことに等しい。また、被写体側で考えて、Q 点からレンズの方向に送られる光の量は、面の垂線と θ の方向なので、垂直に出る光に比べると $\cos \theta$ 倍だけ少なくなっている (Lambert の余弦法則)。P 点からレンズまでの距離に比べると、Q 点からの距離は $1/\cos \theta$ だけ長いから、光束の立体角は $\cos^2 \theta$ だけ小さい。これら全体を考えると、光の量は $\cos^4 \theta$ だけ減少し、レンズの透過率が方向によらず一定で、口径食がなくても画面のはしの像の照度は減少する。図 7 に示すようなリトロホークス形式のレンズでは、レンズを出た光が光軸となす角度が、入射する角度より少ないので、レンズから出る光だけを考えるとコサイン 4 乗法則に対して有利のように見えるが、上に述べたように普通のレンズと変わらない。

画面中心からの距離 r が 20mm と 22.86mm の位置におけるコサイン 4 乗法則による照度減少の量を計算した結果を図 8 に示す。スタジオ用レンズは 200mm を除いて、どれも検出可能な量だけ暗くなっている。

実際にはこれに口径食が加わるので、さらに暗くなるが、それは単に平均的な明るさが減少することだけではなく、明暗の振幅の信号も減少させたことになる。平均的な意味でシェーディングの補正をただけでは、信号の振幅は増加しないので、ちょうどレスポンス関数 (Optical Transfer Function) が画面のはしで減少したレンズを使ったことと同等になる。

5. 解像度の問題

はしがきに記した色の問題は、レンズの色収差と分光

図 8 コサイン 4 乗則による照度減少

透過率の問題であるが、ここでは省略する。

解像度、または解像力は、写真レンズの場合、1mm あたり数十本の黒白のしまが見わけられることが要求されている。テレビ用レンズでは、帯域の制限からそんなに高い周波数は問題にならない。しかし、電気系の特性と比較できるので、像のコントラストの低下は容易に検出される。ただ見わけられるということ以外に、コントラストをよくという条件がつくと、レンズにとってはやさしい問題ではない。

テレビ信号の周波数を、レンズで用いている空間周波数という単位に換算すると次のようになる。毎秒の像数を F 、走査線の数 n とすると、1 回走査する時間は $1/nF$ である。これに有効走査率 K_h をかけた時間に、スポットが像面の左から右に走るわけで、日本標準規格の場合は $K_h=0.83$ として $K_h/nF=52.7\mu s$ となる。周波数が $f(\text{Mc})$ の正弦波は、この間に $52.7f$ 本の明暗を作ることになるから、画面の横寸法 $d(\text{mm})$ で割ったものが空間周波数 (本/mm) となる。

$$N = \frac{52.7f}{d}$$

オーバーサキャンがないとすると、 $d=1.8'' \times 3/5=36.6\text{ mm}$ だから、

$$N=1.44f$$

となる。また、テレビジョンの水平解像度 (R_H) との関係は、

$$N = \frac{4}{3} \frac{R_H}{2d} = \frac{R_H}{54.3}$$

で与えられる。垂直解像度 (R_V) については、 R_H とのバランスの問題も残っているので、ここではふれない。

図 9 に受像管のレスポンス特性の一例を示したが、 $R_H=280$ 本、イメージオルシコンに換算して $N=5.2$ 本で $-3\text{ dB}(71\%)$ であるので、レンズの解像力の考え方に比べると、ずっと低い空間周波数での、わずかなコントラストの低下を問題にしていることになる。

テレビ送信機の帯域特性 (図 10) から考えても、テレ

ビ用レンズでは、数本/mm 以下の空間周波数に対する特性が最終的に画質に影響を与える。像のコントラストの低下は電気信号として検出されるから、レンズによる特性の低下は、検出可能な値、 -0.5 dB 以下であってほしい。

実用的見地からすると、放送機から電波として放射される以前に、特性の低下を放送局の 8 Mc の帯域を有するモニタで監視するときに、画質の低下として認めるためには、テレビ用レンズとしては 8 Mc 、すなわち 11 本/mm まではあまり特性が低下していない方が有利である。最近のように、VTR の利用が増えたと、 7 Mc (10 本/mm) までは $-0.5\text{ dB}(94\%)$ よりよいレスポンスのレンズが便利である。もちろん、これは口径食による信号成分の低下を含めての値である。

光学工業研究組合で、焦点距離が 50 mm の外国レンズのレスポンス関数を測定した結果¹⁾によれば、絞り開放では、5 本/mm に対し全画面で 70% (-3 dB) 以上のレスポンスを示すものではなく、 $F2.8$ に絞っても 90% (-0.9 dB) をこすものはない。写真とテレビ用では設計方針が違うといっても、 $F4$ から使えるレンズを作るのが容易でないことは想像される。

ここで、フレアやハロについて少しふれよう。フレアはレンズ面での反射、散乱光や、レンズ枠などの反射光

図 9 受像管のレスポンス特性の例 ($R_H=30$ を 0 dB として正規化)

図 10 テレビ送信機の帯域特性

が画面の比較的広い部分にひろがり、像のコントラストを低下させることである。ハロはレンズの収差のために光がひろがる現象で、これを取り除くのが設計の一つの仕事である。どちらも暗い部分を明るくしてしまうので、テレビ用レンズのように低い空間周波数だけを問題にしている場合は有害である。また、どちらも被写体の中の明るい部分が占める割合により、その量が変わってしまう。フレアは反射防止膜のために、普通のレンズでは最大 1% の程度までに減少している。ズームレンズのように面数の多い場合は、 r を 1 面あたりの反射率とすると、次式によってフレアの割合がふえるので注意を要する。

$$\text{フレア率} = \frac{\frac{1-r}{1+(2m-1)r} - (1-r)^{2m}}{\frac{1-r}{1+(2m-1)r}}$$

ここに、 m はレンズの構成体数である。 $r=1\%$ として

写真1 反射形2000mmレンズによる偽信号の発生も、 $m=15$ ならば、フレア率は4% 近くなる。もしも、 r が 2% に近いときは、 $m=15$ で、10% をこえるフレア率となる。だから、レンズの反射防止を可視部の光に重点をおいて行ない、イメージオルシコンのように約 4,000 Å 付近に感度のピークがある受光器を使うと、青い光によるフレアが目立つことがある。

まえがきで述べた5番目の条件は、たとえば**写真1**に見るようなものである。これは反射鏡を含んだレンズで撮った写真で、反射鏡の中央を光が通るため、結像に使われる光束は中心がぬけている。そのため、点のピンボケ像は円盤にならずに輪になる。写真の人の眼のまわりの光った輪は、眼鏡にあたったライトのピンボケの像である。このように、もともとありはしないような形が撮影されると大変見苦しいものである。非点収差の多いレンズでも似た事が経験される。森の中でとった人物の背景のボケ味が見苦しいことがよくある。

このように極端な例でなくても、画面内のレスポンス関数が一樣でない場合は、一樣な模様の被写体でも、レスポンス関数の場所による変化の形で変調されたような形となる。これも、周波数成分からいえば、もともとありはなかった偽の信号を作ったことになる。この量でレンズの評価をしようとする試み²⁾もある。

6. む す び

テレビ用レンズのいくつかの問題を思いつくままに述べてきたが、豊富な経験を有するレンズメーカーが、さらに優秀なテレビ用レンズを作るのに、何かの参考となれば幸いと考える。

終わりに、口径食やフレアについて、種々ご教示いただいた東大理学部の小穴教授、データを提供された NHK 技術現業の諸氏に感謝する。(昭和 38 年 12 月 16 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) カメラ工業技術研究組合：写真レンズのレスポンス関数測定報告，No. 1 (1961)
- 2) 木下，竜岡：応用物理，29 (1960)，195

北欧に進出したコロムビア

医学用カラーテレビジョン装置

北欧の国々は、社会保障の完備した福祉国家として有名であり、病院施設も近代的で優秀な新鋭装置が数多く設置されています。

その中であって、昨夏、スウェーデンの首都ストックホルムにあるカロリンスカ大学病院の Dr. Craaford's Thorax-Klimik に日本コロムビアの医学用カラーテレビ装置一式が設置されて、多大の反響を呼んでおります。写真は無影灯組込型カラーカメラが設置された手術室の一部を示すものです。

—提供 日本コロムビア株式会社—

今月の表紙