- 13) Sylvania CRT Catalogue
- 14) L. R. Koller and H. D. Coghill: Electron Excitation of Bilayer Screens, Appl. Phys., **29**, 7 (1958)
- 15) K. C. Adam: Two-Color Alphanumeric Display, Information Display, July/August (1970)
- 16) H. H. Poole 著, 守田訳: 電子ディスプレイシステム
- 17) Multibeam Tube gives Brighter Characters, Electronics, **42**, 11 (1969)

- 18) 丹地, 山中: 文字図形表示用多ビーム陰極線管, テレビ学会電子装置研究委員会資料, No. 75 (1970)
- 19) C. B. Neal: Integrated Flying Spot Color Slide Scanner and Television Receiver, IEEE Trans., **BTR-16**, 1 (1970)
- 20) 原尾, 矢野, 古賀: サンドイッチ形ファイバープレートを採用した普及形ファイバースコープ, E2600 B11, E2611 P Y P, 東芝レビュー, **26**, 5 (1971)

2-5 電子ビーム録画走査の問題

NHK 総合技術研究所 岩 村 総 一

1. ま え が き

CBS で発表した EVR システムに関連して, 最近, 電子ビーム走査によるテレビ画像録画が注目されるようになってきた. 超微粒子フィルムに電子ビームで記録する方法は, 現在のあらゆる記録技術のうちで記録面積密度の最も高いものといえる*. ここでは現行のテレビ標準方式での高密度化の限界, および現行方式にとられない場合, たとえば高精細度テレビの録画ではどこに限界が存在するかを, SN 比, 周辺解像力との関連から推測してみよう.

2. 高密度録画および再生の問題点

ブラウン管スクリーン上の画像をレンズでフィルム上に結像させて記録する光学録画 (図 1) を, 電子ビームを直接フィルムに照射する電子ビーム録画とくらべるとエネルギー変換効率では, 螢光体 P11 の電光変換効率約 10%, レンズの光束捕捉率 0.1~0.2%より, 総合で

図 1 光学録画でのエネルギー捕捉効率

* 記録体積密度をとるとフィルムベース厚が問題となり, 磁気記録にくらべてすぐれているとはいえない.

"2-5 Scanning in Electron Beam Recording" by Sôichi Iwamura (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo)

0.01~0.02%前後であり, 周波数伝送特性は螢光体での“光の滲み”, スクリーン面の“ハレーション”, レンズレスポンス特性あるいはフィルム乳剤面でのイラディエーションなどで低下する.

一方, 伝送 SN 比は, 螢光体の発光むらおよびフィルム粒状性できまってくる. したがって, 電子ビーム録画では

- (1) 録画用エネルギー捕捉の効率化で 10,000 倍
- (2) 高密度記録による単位面積当りのエネルギー密度の集約化 (16mm/EVR フレーム) で 10 倍の条件を生かし,
- (a) 感度が約 1/30 程度であるが, 極微粒子で乳剤層のうすいフィルムを使って粒状性および解像力を向上させ
- (b) ビーム電流を 100 μ A より 0.1 μ A に減らして, ビームアパーチャーレスポンスを向上させているといえよう.

白黒フィルムによる光学録画はほぼ限界近くまで改善された²⁾が, それでもその周波数伝送特性は図 2 の点線

- (1) 光学録画
 - (2) 光学録画用フィルム
 - (3) Minicard (マイクロフィルム)
 - (4) Spectroscopic High Resolution
 - (5) ゼラチン量を減らした (3) のフィルム
- 電子ビーム録画

図 2 光学および電子ビーム録画による周波数伝送特性 (20 kV)

図 3 光学式再生系と電子ビームシンチレーター再生系

に示す程度にしか達していない理由は前に述べたとおり。これに対しフィルム乳剤の種類を変えて電子ビーム録画した場合は、同じ図 2¹⁾ に示すように大幅に改善される。いずれにしても感度の点で現在でも銀塩フィルムしか使えないが、ゼラチン乳剤の代りに蒸着銀塩フィルムを使った例³⁾も報告されている。

一方、このような高密度記録が可能であっても、これを読出す場合が問題になる。飛点走査器 (FSS) の代りに、図 3 のようなシンチレーターを使う方法⁴⁾⁵⁾ が発表されている。この場合、録画と同様の考えで解像力および感度の点ですぐれているが、録画フィルムを真空中に入れる必要があり、取扱い上に難点がある。

ところで、電子ビームの代りにレーザービームを録画および再生に使える可能性がある。後者のビームスポットの限界は回折効果で済むが、波長 $6328\text{\AA}$ のレーザーを使い、絞り $f3$ の光学系で $2.4\mu\text{m}$ と見られているのに対し、電子ビーム録画では現在のタングステンフィラメントを使う限り、Langmuir 効果⁶⁾で $1\mu\text{m}$ が限度といわれている。もちろん走査速度を落せば走査形電頭のように $0.1\mu\text{m}$ にまで到達しよう。

3. 密度記録媒体の読出し

3.1 光学レンズのイメージサイズとレスポンス

電子ビーム録画されたフィルムは現在のところ光学レンズを使って読出されるのがほとんどであるから、レンズにふれてみよう。

電子ビーム録画では収差のため走査フレームの大きさと解像力、つまりビームスポット径との比にはある限界が存在する。これは光学レンズでも同様であって、周辺に行くほど解像力が低下する。

光学レンズは、 F ナンバーが同じならば、焦点距離が

図 4 相似形レンズの空間周波数レスポンスとイメージサイズ

短いほど解像力が良いということはあまり常識化されていない。つまり 35mm スチールカメラ用レンズより同じ F ナンバーの 16mm シネカメラ用のほうが、さらに 8mm タイプ S 用のほうが、光軸上では空間周波数レスポンスは良い。たとえば、図 4 にあるような縮尺率 $2:1$ の相似形のレンズ L_1, L_2 について、その F ナンバーを、

$$F = \frac{a_1}{f_1} = \frac{a_2}{f_2}$$

とする。

ここで、 a_1, a_2 はレンズ L_1, L_2 の口径、また f_1, f_2 は焦点距離であって、レンズの工作精度がレンズ口径に比例して仕上がっているものとする。レンズ L_1 の光軸上の点 O_1 での空間周波数 ν (linepairs/mm) に対するレスポンスはレンズ L_2 の光軸上の点 O_2 での周波数 $\nu/2$ に対するレスポンスと等しいことは幾何光学的常識により直観的に把握できよう。また、一般にレンズは軸上より周辺に行くほど、解像力が下がるが、これは軸対称の原理からレンズ中心からの角度 θ の関数であり、レンズ構成が相似形ならば L_1 の焦面上の点 $P_{1\theta}$ での周波数レスポンス特性と軸上 O_1 での特性との比、つまり、レンズ L_1 における周辺でのレスポンス低下は、レンズ L_2 についても角度 θ が同じとすれば等しい。つまり、焦面上の中心 O におけるレスポンスに対してある許容値 (たとえば 2dB) 以内の低下を呈する領域をイメージサイズと呼べば、レンズ L_2 のイメージサイズは、長さにしてレンズ L_1 の $1/2$ 、面積にして $1/4$ になる。

実際に、EVR 用レンズ $F2.0$, $f_1=15\text{mm}$ および $F2.0$, $f_2=30\text{mm}$ の試作レンズの空間周波数レスポンスの計算値を比較して示すと図 5 のようになる。ここで光質は FSS 用 P16 螢光体とするので、色収差は少なく非点および球面収差のみである。

したがって、レンズ口径を大きくしてイメージサイズ

図 5 規準化したレンズの空間周波数特性

図 6 反射ミラー形電子顕微鏡

図 7 電子ビームの屈折

を拡げてみても、それに対応して軸上でのレスポンスは低下していき、イメージサイズで規準化した相対的レスポンスはあまり変化せず、ちょうどテレビ標準方式(周波数帯域幅)が与えられていて、受像管スクリーンの大きさを拡げていくのと同様といえる。

3.2 反射形電子顕微鏡

1μm 以下を解像するには、解像力および焦点深度からみて、光学的方法では理論的にも実用的にも無理がある。図 6 の反射形電子顕微鏡では、光学レンズと等価な電子レンズまたは磁気レンズを使い、記録媒体表面から出る 2 次電子を蛍光面上に拡大結像させ、その光出力像を観察している。

つまり図 7 で明らかなように、電子ビームの屈折も光線の屈折と同様の式が成立する。

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{V_1}{V_2}} \quad (1)$$

ここで、 v_1, v_2 は速度、 V_1, V_2 は電位である。

故に電子レンズでのイメージサイズと解像力との関係は、図 4 よび図 5 とほぼ同様な特性を示すことが考えられる。これは磁気レンズを用いた場合でもほぼ同様で、反射形電子顕微鏡を実用化するうえでは、この他に像のひずみ、明るさ、焦点深度などの問題がある。

4. ビームスポットとショットノイズ

最近、図 8 のような走査形のもの普及し始めた。これは被写体表面に電子ビームスポットを結像させ、走査させ、その表面から放出された 2 次電子を検出器で受け、この信号で映像管上に像を再現するもので、飛点走査器(FSS)と動作原理が似ている。

一方、図 8 に示すように、被写体の代りに生フィルムのような記録媒体を置けば、これはそのまま電子ビーム録画装置となる。いずれにしても走査スポットの大きさとビーム電流とは密接な関係があり、また、記録画像の SN 比もビーム電流できまってくる。

電子ビーム録画では相互に関連するいくつかのパラメーターがある。第一は信号帯域幅または情報記録速度、第二は信号最大値あるいは SN 比、第三は電子ビームおよび記録材料でできる情報記録密度と感度である。以上の値はシステム設計上重要なパラメーターであって、実際に帯域 4MHz のテレビ信号を SN 比 40dB 以上で録画しようとする、現状の技術レベルであるヘアピン式タングステンフィラメントを使った電子銃を使う限り感度の点で記録材料は銀塩フィルムしかない。ただし、

図 8 走査形電子顕微鏡または電子ビーム録画装置の原理図

その感度は比較的自由に変えることができ、また、一般に感度を下げれば下げるほど粒状性が良くなるが、一方ガンマも高くなる。

したがって、実際の録画装置を設計するにあたっては電子光学パラメーターとして、電流、電流密度、ビームスポット径、および偏向振幅対スポット径比が重要となる。

ところで、電子ビームによる仕上り録画フィルム上のノイズは、フィルム粒状性に起因するものよりも書込みビーム電流 I が微小なため、電流の粒子性によるショットノイズが問題で、信号帯域幅を B とすると、いわゆる Nyquist Interval, $\tau (=1/2B)$ の間に放射される電子数 m は、

$$m = I / (2eB) \quad (2)$$

で表わせ、ポアソン分布を仮定するとショット (RMS) ノイズは $\sqrt{m}$ となり、ビーム電流の SN 比は、

$$(S/N)_I = 20 \log \sqrt{m} \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

となる。よって帯域幅を 4.5 MHz とし、SN 比を 43 dB 以上とするには、

$$I \geq 2.9 \times 10^{-8} \text{ A}$$

となる。

いま、熱陰極電子放射体を用いるとき、その電子光学的輝度 β が問題で、その中心軸上の値を β_0 とすると、

$$\beta_0 = \frac{J_0 e V}{\pi k T} \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 V は電子加速電圧、 J_0 は陰極の飽和電子流密度、 e は電子電荷、 k は Boltzman 定数、 T は陰極温度 (°K) である。

普通のタングステン陰極で $I_0 = 5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{Sterad}$ 、また最近発表⁷⁾されたランタンボライドでは $J_0 = 5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{Sterad}$ に達する。

したがって、レンズ球面収差係数を c とすると、ビームスポット最小到達半径 r は、理論上、

$$r = \frac{c^{1/4}}{\pi^{3/4}} \left(\frac{I}{\beta} \right)^{3/8} \quad (5)$$

で制限される。

c はレンズの口径および焦点距離によるが、 $c = 30 \text{ cm}$ ビーム電流 I (A) とすると、タングステンフィラメントでは、

$$r = \left(\frac{I}{5 \times 10^4} \right)^{3/8} \quad (\text{cm}) \quad (6)$$

で与えられる。前述のようにテレビ録画ではショットノイズの点から少なくとも $3 \times 10^{-8} \text{ A}$ は必要であるが、そのときスポット径 $d = 2r$ の計算値は $0.5 \mu\text{m}$ となる。実際にはレンズの非点収差、中心軸のずれ、電源電圧の変動などでスポットサイズは広がっている。

5. 走査形電子顕微鏡と電子ビーム記録装置

記録媒体の取扱いやすさ、焦点深度、視野の広さなどから見て、図 8 の走査形電子顕微鏡は反射形にくらべ有利な点が多く、また光学顕微鏡にくらべて焦点深度が数十倍も大きいという利点がある。最近、加速電圧 4 kV で解像度 $0.025 \mu\text{m}$ の小形のものがでていますが、これはビーム電流 I を極度にしぼり、走査速度を落し、被写体の 1 画素あたり読出走査時間 τ を長くして画素あたりの読出電荷 $I \times \tau$ を大きくとり、画像の SN 比を上げている。

ところで、走査形では焦点深度が深いというのは、観察ビームの開き角が $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ rad}$ 程度にしているためであるが、この程度の開き角のビームスポットでも大きな範囲にわたって走査すると、偏向による種々の収差が発生して、画面の周辺で解像度が劣化する。一般に、電子レンズ系の構成の複雑さ具合と装置の安定度などを勘案して偏向幅対ビームスポット径の比で 2,000 : 1 前後のものが実用化されている。しかし、電子ビームスポット分布の測定には、これまでいくつかの方法⁹⁾が発表されているものの、一長一短があって、その定量化には多くの問題をかかえている。

一方、電子ビーム記録装置としても同様で、ビーム電流を細く絞って走査速度、つまり記録速度を下げれば、解像力あるいは記録 SN 比を上げられるが、テレビ信号録画の場合、前に述べたように SN 比の点から電流値にはある下限値が存在する。

CBS の EVR システムで使われている電子ビーム録画装置の例では、ビーム電流推定値 $5 \times 10^{-8} \text{ A}$ 前後でビームスポットは $2.5 \mu\text{m} \phi$ ⁹⁾と発表されているが、EVR フィルムフレーム横幅、つまり走査幅 3.2 mm のとき、偏向幅対スポットサイズ比は 1,600 : 1 となっている。

文献¹⁰⁾によれば、理想的なダイナミックフォーカスをかければ、その比は 10,000 : 1 に達するとされている。

ところで、情報読出し、つまり走査電頭の場合、必要に応じて拡大率を変え、あるいは資料を動かして被写体のどの部分でも自由に読出すことができるので、偏向幅対スポットサイズ比は、取扱いのうえですべて制約にはならないことが多い。

これに対し、情報記録として使うときには高解像度を求められることが多い。たとえば、ファクシミリ記録紙のように肉眼で観察するような場合、視野の 1/3,000 まで識別できるといわれているから、“図形の大きさ”対“図形に含まれる最小線幅”の比は、少なくとも数千倍は必要となる。印刷物はこの点充分といえるが、電子ビームスポットを走査して記録するときは問題がある。つま

図9 Fly's Eye による高解像度記録方式

図10 電子ビーム記録における帯電によるラスタースhiftの改善

り、偏向によるスポットの形状ひずみ、あるいはピンクッション（ラスタ）ひずみを小さく保つには、偏向角とビームの開き角が小さいことが必要で、小さい偏向角で広い面積を走査すると、偏向器と記録面、したがって最終レンズと記録面との距離が長くなり、エネルギー密度の高い細いビームスポットが得られなくなる。これはスライド投影機も同様で、焦点距離の短いコンデンサレンズを使い特に輝度の高い照明ランプでスライドをスクリーンに投影しないと、明るい画像が得られない。

GEのFly's Eye方式では、図9のように1個の集束レンズおよび粗偏向板の他に、記録面の近傍に多数の小レンズ群を配置し、おのおののレンズと記録面との間で小さい偏向のみ行ない、小さな図形（解像度480本）を縦横をつなぎ合わせ、 $2\mu\text{m}\phi$ のビームスポットで $25\times 25\text{mm}^2$ の面積を走査記録できる。

これをさらに改良した二重偏向方式¹²⁾も発表されている。また、垂直方向の走査を機械式にして記録媒体に記録する3M社のものもある。

6. 走査フレームと帯電によるラスタースhift

写真フィルム上に電子線で四角形を書こうとしても、フィルム上の帯電電荷によって図10のように台形状にひずんで記録される¹³⁾。つまりフィルム乳剤表面に入射した電子ビームのうち一部は反射電子となって飛び去るが、一部は非弾性衝突を行なって感光核を形成する。この際、フィルム乳剤面は絶縁物に近いので、電子が滞留蓄積し、負の電位分布により、あとから来る電子の進む軌道がゆがめられる。

この帯電ひずみを減少させるには、乳剤面に導電層を

写真1 電子ビーム録画で発生する放電かぶり現象

設け、電荷を逃がしてやる方法¹⁴⁾、あるいはベース面にカーボンブラックなどの導電層を塗布する方法などがある。後者の方法はフィルムベースを誘電体とするコンデンサを形成させ、この導電層に正電荷を誘起させて全体として電荷を中和させるものといえる。

電子ビーム録画用フィルムでは、帯電によるラスタースhiftよりも特に放電防止から導電膜が必要で、ベースにカーボンブラックコーティングをするのが最も一般的な方法である。これはカラーフィルムなどでハレーション防止用にすでに開発され、最近国産の8mmカラーフィルムにも使われている。

導電膜処理をしていないフィルムを電子ビームで録画すると、フィルムに写真1のような放電マークが記録される。この放電機構はまだ推測の域を出ないが、ガラス窓から録画室を覗き込んで観察した結果では、稲妻（可視光）をとまなう放電現象は認められていない。

いま、入射電子ビームがそのままフィルム上に滞留すると仮定すると、たとえばCBSのEVRフィルムの場

図 11 電子ビーム録画の放電かぶり

合、その輝度フレーム ($3.2 \times 2.5 \text{ mm}^2$) 上には電流 ($5 \times 10^{-8} \text{ A}$) $\times$ 時間 (16.6 ms) にあたる電荷 ($8.3 \times 10^{-10} \text{ Coulomb}$) が滞留する。実際には反射して外部に散乱する1次電子、または散乱2次電子の付着、あるいは滞留付着電子の画郭外へのしみ出しなどが考えられるが、これを無視し、図 11 のゲート部分は導体で構成されアース電位にあるとする。

フィルムベース (乳剤層も含む) の厚さを $140 \mu\text{m}$ 、比誘電率 ϵ_s を 4.5 とすると、フィルムの1フレーム当りの静電容量 C_0 は約 2.3 pF であるから、フィルム表面電位 V_s は -370 V になる。

しかし、この滞留電荷を担うフィルムが輪動されてゲート部分からはずれると、その部分の静電容量は急激に減少して数十分の1に低下するから、表面電位はそれに応じて負の方向に増大する。この結果、録画室内を浮遊する反射電子で解離された $\oplus$ イオンが、この部分をたたくことも考えられ、またフィルム表面で照射フレームの内側と外側とで電位傾斜が大きくなって、表面の絶縁破壊を起こし、そのエネルギーで、フィルム現像核が形成されるとも推定できる。

このような放電現象による放電カブリを防止する有効な方法は、乳剤表面に薄い導電層を塗って電荷を速かに逃がすか、あるいはベース側にカーボンブラックを塗って、金属ゲート部分をはずれてもフィルム表面電位の負の増大を起こさせないようにすればよい。

7. む す び

光学顕微鏡にとって代り、ミクロの世界に挑んだ電子顕微鏡技術開発のエネルギーは、その余勢をかって高密度記録の技術開発に向けられようとしており、CBS の EVR あるいは COM (Computer Output Microfilming) は現在、実用化の緒についたばかりといえよう。

最後に、資料¹⁵⁾およびご教示をいただいた日本電子 KK の宮内、田中両氏に厚く感謝する。

(昭和 46 年 7 月 10 日受付)

【参 考 文 献】

- 1) Tarnowski: J. SMPTE, **71**, Oct. (1962) 766
- 2) 岩村: NHK技術研究, **17**, 3 (1965)
- 3) Shepp: PS&E, **11**, 5, Sept.-Oct. (1967)
- 4) Spitzer: Wescon '65, 18.5, Wescon 67, 12/1
- 5) Markevitch: Wescon '65, 18.6
- 6) Beiser: PS&E, **10**, 4, July-Aug. (1966)
- 7) Vogel: Rev. of Sci. Instr., **41**, 4 (1970)
- 8) たとえば、副島: 走査像における分解能, 島津評論, 9 (1969)
- 9) P. Goldmark: Color EVR, IEEE Spectrum, Sep. (1970)
- 10) T. E. Everhart: Nonthermal Electron-Beam Recording, Electron and Ion Beam Science and Technology Conference '64 at Boston, Edited by R. Bakish, p. 344
- 11) S. Newberry: Proc. Fall Joint Computer Conference (1966) 717-723
S. Newberry: Proc. of the National Electronics Conf., Vol. XXIII (1967) 746-751
- 12) 後藤: テレビ学会電子装置研究委資料, 69 (1970)
- 13) 斎藤ほか: 電子線記録における帯電現象の解析, 学振 132 委員会 (1970. 12)
- 14) C. Munaka: Japan J. Appl. Phys., **9** (1970) 1187
- 15) 宮内, 田中: 画像技術, 4 (1970)