薄窓記録管の諸特性

株式会社松下電器東京研究所

富井 薫・宮崎 栄一

厚さ約 $100\mu\text{m}$ のガラスをフェースプレートとする薄窓記録管を開発した。この記録管は、記録媒体をフェースプレートに密着して記録するので、光利用率は非常に高く、通常の飛点走査管と $F=0.95$ のレンズを組合せ、 $1:1$ に結像した場合に比し、約 20 倍であり、大面積の高速記録が可能である。また、フェースプレートの厚さが非常に薄いため、像の劣化もほとんどなく、5 本/mm (ビーム電流 $30\mu\text{A}$) 以上の解像度が得られた。これらのくわしい特性とその測定法を中心に述べ、テレビ画像の記録例も示した。

1. ま え が き

最近、ファクシミリは、より高速電送が要求されるようになり、従来の機械走査方式から電子走査方式に移りつつある。われわれは、これまで高速ファクシミリ用印刷管として、ファイバー光学記録管、静電記録管を開発してきた。ファイバー光学記録管は光を利用する印刷管であるが、同じく光を利用するものとして薄窓記録管がある。

電子走査ファクシミリの最初の例として、1954年頃、RCA では送信にフライングスポット管 (5WP15) と光電子増倍管を用い、受信にはフライングスポット管の光像を光導電体円筒にあて、これにトナーを着けて普通の紙に転写する方式を開発した。この場合、通信速度を上げるには、フライングスポット管の輝度と光学系の能率と感光材料の感度を向上させねばならなかった。光学系の能率を上げる最も良い方法は、フライングスポット管を記録紙に密着させることである。しかし、普通のフライングスポット管では、フェースプレートが厚いため、光が拡散し記録がぼける。RCA ではこの解決法として 1957 年に薄窓記録管を開発した¹⁾。フェースプレートには $64\mu\text{m}$ 厚のマイカを用い、感光材料には電子写真紙を用いた。一方わが国でも、1956 年に神戸工業から厚さ 0.5mm、有効スクリーン面積 $30\text{mm}\times 10\text{mm}$ のフェースプレートをもつ 40SB 形記録用オッシロ管が発表されている²⁾。しかし、管の機械的強度または解像度の問題があったのか不明だが、その後大きな発展は見られな

かった。1967 年になってテレビ信号中にファクシミリ信号を多重伝送する方式が RCA より発表され、ここにおいて薄窓記録管が再び登場した。

われわれはこの記録管の経済性に注目し、高解像度電子銃と組合せることにより、比較的良質の記録が得られるであろうとの予測のもとに研究を開始し、期待に応えるべき記録管の開発に成功し、その特性の検討を行なったので、ここに報告する。

2. 薄窓記録管の構造と規格

薄窓記録管の頭部構造図を図 1 に示す。フェースプレートの材料として、ガラスの他にマイカが考えられる。耐圧強度はガラスより大であるが、光透過率、記録紙との摩擦による摩耗および、一様な厚さのものを得ることにおいてガラスより困難であるため、われわれはガラスマイクロシートをフェースプレートとして使用すること

図 1 薄窓記録管の頭部構造図
Cross section of the printing head.

"Characteristics of Thin Glass Window Printing Tube" by Kaoru Tomii and Ei-ichi Miyazaki (Matsushita Research Institute, Tokyo Inc., Kawasaki)

写真1 薄窓記録管の外観
Thin glass window printing tube.

図2 薄窓記録管の外形寸法 (単位: mm)
Bulb dimension and base contact of the thin glass window printing tube.

表1 薄窓記録管規格表
Specifications of the thin glass window printing tube.

一般規格	ヒーター電圧(V)	6.3
	ヒーター電流(A)	0.3
	集束方式	電磁
	偏向方式	電磁
	偏向角(deg)	50
定 格	螢光面	ガラスマイクロシートフェースプレート メタルバック
	螢光色	青
	残光性	やや短い
	寸法(mm)	全長(最大) 525 ネック直径(最大) 38.1 バルブ最大口径 253
代表動作例	陽極電圧(V)	15000
	第2グリッド電圧(V)	250
	第1グリッド電圧(V)	-53~-82
	(輝点消去電圧)	
	尖頭陽極電流(μA)	100
	変調電圧(V)	最大 38
	電子ビーム走査幅(mm)	170

にした。厚さは 80~190 μ m のものを使用し、バルブとの接着はフリットを用いている。また、フェースプレートには微粒子の P 22-B 1 螢光体が塗布され、メタルバックを施している。

以下に述べる特性値は、厚さ 180 μ m、屈折率 1.531 のガラスマイクロシートフェースプレートをもつ薄窓記録管について測定したものである。

写真1に薄窓記録管の外観写真、図2に外形寸法を示す。また規格表を表1に示す。

3. 薄窓記録管の特性

薄窓記録管の特性、とりわけ(1)解像度、(2)光の有効利用率が記録上重要な要素である。このうち(2)の項に関しては、高速記録を行なうときの目安となり、螢光体から発した全光出力の何%が記録紙上に到達するかが問題となる。通常のブラウン管の螢光像をレンズ系で結像させて記録する場合と、薄窓記録管による密着記録の場合の、それぞれの螢光有効利用率を比較し、さらに、種々の螢光体と記録紙との組合せによる螢光体から発した光の記録紙上への伝達効率を示す。

3.1 解像度

(1) 発光の広がり

粉末螢光面から発する光は拡散光である。螢光体粒子はフェース内面と部分的にのみ光学的接触をしており、発光の大部分は粒子・フェース内面間の空間を経てフェースプレートに入る。いま、光学的接触係数を α とすると、発光の放射角度特性は次式で与えられる。

$$I(\theta) = \alpha \cos \theta' + (1 - \alpha) \cos \theta [1 - R(\theta)] \quad (1)$$

θ' : ガラスフェースプレート内での法線に対する角度

$R(\theta)$: フレネル反射係数

試作した薄窓記録管について、その放射角度特性を測定すると、図4に示すように、ほぼ $\cos \theta$ 分布をしている。角度が大きくなると、 $\cos \theta$ の値より小さな値を示す

図3 螢光面とフェース内面との光学的接触状態
Optical contact of the settled phosphor to the faceplate.

図4 放射角度特性

Angular distributions of energy emitted from phosphors.

のは、フレネル反射損失のためである。

$\alpha=1$: 光学的接触, $\alpha=0$: 光学的非接触

蛍光体と、フェースプレート内面間の空間の屈折率を n_0 , フェースプレートの屈折率を n_1 とすると、フェースプレート内での角度特性は、

$$I(\theta') = \alpha \cos \theta' + (1-\alpha) \sqrt{1 - (n_1/n_0)^2 \sin^2 \theta'} \{1 - R(\theta')\} \quad (2)$$

上記拡散光が、ある厚さのガラスプレートを通過するとき、ガラスプレートの入射面では、明るさの強度分布は異なる。いま図5に示すように、蛍光面の座標を (x, y) , フェースプレート外面の座標を (x', y') とすると、フェースプレート外面での x' 軸上の強度分布 $B(x')$ は、

$$B(x') = \frac{1}{t^2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} B(r) I(\theta') \cos^2 \theta' \cdot r \cdot dr \cdot d\phi \quad (3)$$

ただし、 $\cos^2 \theta' = t^2 / (t^2 + r^2 + x'^2 - 2rx' \cos \phi)$

$B(r)$: (x, y) 平面での強度分布

図5 発光の広がり説明図

Geometry for determination of point spread function on image transfer through a thin membrane.

(3)式をフーリエ変換することにより、フェースプレート外面までの総合レスポンス関数を求めることができる。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x', y') \exp(-2\pi i \omega x') dx' dy' \quad (4)$$

ω : 空間周波数 (本/mm)

蛍光面上の輝度分布がガウス分布をしていると仮定し(4)式を用いてガラスプレートの厚さ t に対する発光の相対的な広がりを、フェースプレートと蛍光体粒子の光学的接触係数 α をパラメーターとして求めた結果を図6に示す。広がり幅は最高値の $1/e$ になる点の距離とした ($B(r)$ は広がり幅 $100 \mu\text{m}$ なるガウス分布をしていると仮定し、電子計算機により求めたものである)。

(2) 測定法

薄窓記録管のフェースプレート外面上の明るさの強度分布を測定するには、単に蛍光面上の輝点の強度分布を測定する場合と異なり、特に考慮すべき点がある。

蛍光面上の輝点の強度分布を測定するときは、図7に示すように、レンズ系でスリット面に輝点の像を結ばせて、スリットを通過した光をフォトマルで受けて記録計に接続する。このとき、蛍光面上の輝点をシフトさせる

図6 発光点の相対的広がり
Relative spread of spot size.

図7 蛍光面上の輝点の強度分布測定系

System used for measuring the intensity distribution in the spot on phosphors.

方法と、光学系をシフトさせる方法がある。光学系においてスリットを用いて測定するときには、光学系のレスポンス特性が問題となる。いまスリット幅 a 、レンズ倍率 m のとき、螢光面上の空間周波数 ω に対して等価的に $\sin(\pi a \omega / m) / (\pi a \omega / m)$ なるレスポンス特性をもつと仮定すると、被測定物のレスポンス特性の対象となる範囲では、光学系のレスポンス特性は平坦である必要がある。

図4に示したように、螢光面からの発光は完全拡散光であるから、螢光面上のA, B, C点それぞれの点での光放射特性は、図8に示すように相似である。それ故、図7に示した測定系で得られた曲線は、実際の強度分布と相似となる。図8において、斜線を施した部分は、レンズの N.A (Numerical Aperture) によりきまるレンズ系への放射範囲である。

図8 螢光面上の輝点の各点における放射角度特性
Angular intensity distributions of points in the spot on phosphors.

図9 フェースプレート外面像の強度分布測定系
System used for measuring the intensity distribution in the spot on the faceplate.

図10 フェースプレート外面上の各点での光放射角度特性
Angular intensity distributions of points in the spot on the faceplate.

フェースプレート外面像の強度分布を測定するとき、図9に示すように、フェースプレート外面像をスリット面にレンズ系で結像させるような測定法では、実際の強度分布を測定していることにならない。それは図10から明らかなように、フェースプレート外面でのA', B', C'点それぞれの点の光放射パターンが異なるため、レンズ系に放射される光量は、実際の強度とは比例していないからである。

以上のことから、フェースプレート外面上の強度分布を測定する方法として、以下に述べる方法があげられる。

(a) 完全拡散板をフェースプレート外面上に設ける方法

フェースプレート外面上に完全拡散板を設け、各点での光放射角度特性を同一になるようにし、螢光面上の輝点の強度分布を測定するとときと同様に光学系を用いる方法があげられる。

このとき、完全拡散板の厚さは、フェースプレートの厚さにくらべ、無視しうる程度に薄くしなければならない。図11に測定系を示す。

(b) 写真フィルムを用いる方法

写真フィルムをフェースプレートに密着して記録し、その濃度分布を測定し、実際の強度分布を求めるという方法である。しかし、この方法は変換系が多く入り、その間の誤差、フィルムの粒状性、ハレーション、感光乳剤層の厚さ、現像条件によるガンマ特性の影響、現像むらなどのため、誤差が大きい。

(c) 積分球を用いる方法

積分球の入射孔にスリットを設けてフェースプレート外面に密着させ、輝点を移動させて強度分布を測定する方法である。輝点が小さい場合には、輝点の大きさよりも充分小さい幅をもつスリットでなければならず、また

図11 フェースプレート外面像の強度分布測定系
System used for measuring intensity distribution in the spot on the faceplate.

図 12 輝点の強度分布 (実測値)
Measuring intensity distribution of the spot.

フェースプレート外面での各点の光放射特性が異なるため、スリット構造にも細心の注意を払わねばならない。

われわれは、以上のそれぞれの測定法について検討した結果、フェースプレート外面に拡散板を設ける方法を採用して測定した。光学系において、スリット幅 $a=0.02\text{mm}$ 、レンズ倍率 $m=100$ のとき、蛍光面上の空間周波数 $\omega=10$ 本/mm までに対して、レスポンスはほとんど低下しない。それ故、いま、測定しようとする薄窓記録管のビーム直径が、顕微鏡で見て $100\mu\text{m}$ 程度であるから、レンズ倍率 100、スリット幅 $20\mu\text{m}$ で測定して十分な測定結果が得られる。測定結果を図 12 に示す。

図 6 と比較してわかるように、 $\alpha=0$ 、すなわち、蛍光粒子とフェース内面は、光学的接触をしていない場合の曲線上にのり、解像本数は約 5~6 本/mm (ビーム電流 $30\mu\text{A}$) 程度である。

3.2 光の有効利用率

(1) 記録紙上への到達光量

ファクシミリにおいて、通信速度を上げるひとつの要素としては、光学系の能率を上げることである。そこで従来からのフライングスポットスキャナー方式にみられる、通常のブラウン管蛍光面の発光像をレンズ系で結像させて記録する場合と、薄窓記録管のフェースに記録紙を密着させて記録する場合との、記録紙上への到達光量を比較してみる。

(a) 理論

通常のブラウン管蛍光面の発光像をレンズ系で結像する場合、結像点に到達しうる発光の有効放射臨界角半角を θ_{c1} とすると、記録紙上へ到達する光量の割合は⁴⁾、

$$\varepsilon_1 = \frac{\int_0^{\theta_{c1}} I(\theta) \{1 - R(\theta)\}^2 \tau_1(\theta) \tau_2(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (5)$$

$\tau_1(\theta)$ 、 $\tau_2(\theta)$ は、それぞれフェースプレート、レンズ系の光透過率

薄窓記録管のフェースに記録紙を密着させる場合、蛍光体粒子とフェースプレートの光学的接触係数で決定される、記録紙上に到達しうる発光の有効放射臨界角半角を θ_{c2} とすると、記録紙上への到達光量の割合は、次式で与えられる。

$$\varepsilon_2 = \frac{\int_0^{\theta_{c2}} I(\theta) \{1 - R(\theta)\}^2 \tau_1(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (6)$$

(b) 測定法

発光の記録紙上への到達光量の測定には、(1)写真フィルムを使用して、濃度測定することにより求める方法、(2)積分球を用いる方法、などがあるが、ここではこの2つについて検討する。

(i) 写真フィルムを用いる方法 フェースプレートにフィルムを密着させて記録したとき、レンズ系で蛍光面上の輝点が結像された位置にフィルムを置いて記録したときの濃度を比較することにより求める。ここでは解像度を測定するときのように、厳密な要求はなく、フィルムのガンマ特性と現像むらだけに注意すればよい。フィルムを変えると、同一メーカーのフィルムでもガンマ特性が少し異なるため、ガンマ特性測定用パターンを同一フィルムに記録しておく必要がある。

(ii) 積分球を用いる方法 フェースプレートからの光放射特性は、フェースプレートに立てた法線から 90° まで全域にわたっている。そのため、積分球の入射孔の形状に細心の注意を払う必要があるが、実際には全域にわたって放射された光をすべて積分球にとらえることは不可能に近い。

以上のことから、われわれは、写真フィルムを使用して濃度測定することにより比較する方法を採用した。

表 2 発光の有効利用率
Effective efficiency factors of light emitted from phosphor.

	光学的条件	理論値		実験値
		$\alpha=1$	$\alpha=0$	
ε_1 通常のブラウン管とレンズ系の組合せ	レンズ $F=0.95$ 結像倍率 $M=1$ フェース屈折率 1.531	2.2%	5.2%	
ε_2 密着記録	$n=1.531$	42.7%	100%	
$\varepsilon_2/\varepsilon_1$		19.31	19.23	17.7

理論値と実験値を表2に示す。これからわかるように蛍光面から発した光は、ほとんど100%記録紙まで導かれる。理論値を求めるときにフレネル反射係数 $R(\theta)$ を0として計算したため、実験値における $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ の値よりも大きな値を示している。

(2) 伝達効率

記録管の発光有効利用率を論じるとき、蛍光面から発した光の記録紙への到達光量以外に、蛍光体の発光分光特性と記録紙の分光感度とを考慮した、蛍光体から発した光の記録紙への伝達効率も論じる必要がある。

(a) 蛍光体の効率⁵⁾

カソードから放出され加速された電子ビームは、蛍光体にアルミを蒸着してあると、その膜を通過するときに電子ビームのもつエネルギーは減少する。アルミ蒸着膜と加速電圧に対してビームのエネルギーの通過する割合を表3に示す。

表3 ビーム透過率

Fraction of beam energy transmitted through aluminized coating of various thickness.

		アルミ膜厚 (Å)			
		500	1000	2000	5000
ビーム電圧 (kV)	30	0.98	0.96	0.93	0.85
	20	0.97	0.93	0.86	0.70
	10	0.87	0.77	0.57	0.15

一方、アルミを蒸着した蛍光体からの光出力をビーム電流一定にして、加速電圧の関数として示したのが図13である。この図において、直線部分は次式のように表わされる。

$$L = \eta I (V_0 - V_a)$$

L : 光出力, η : 発光効率 (lm/W), I : ビーム電流 (A),

V_0 : 動作電圧 (V), V_a : アルミ膜での吸収のため、相対光出力が零に近づく変曲点のビーム電圧 (V)

図13 ビーム電圧と相対的光出力の関係 (ビーム電流一定)
Relative characteristic of CRT luminous efficiency for beam voltage at constant beam current.

表4 蛍光体の効率
Radiant equivalents for three phosphors.

蛍光体	等価輝度 (出力輝度/出力電力)	絶対効率 (出力電力/起電力)	量子効率 (フォトン/eV)
P-11	140	0.1	0.038
P-16	2.5	0.049	0.015
P-24	360	0.025	0.011

V_s : 光出力が飽和する電圧 (V)

実験より求められた蛍光体の効率を表4に示す。

(b) 蛍光体の残光特性

高速記録になると、水平方向の解像度は伝送系の周波数特性、電子ビームの径などにより決定されるが、垂直方向の解像度は、ビーム径の他に、蛍光体の残光特性が加味されて決定される。すなわち、残光時間が長い蛍光体では、記録画像は垂直方向に尾を引いたようになり、見かけ上解像度が低下したように見える。それ故、使用目的に応じた蛍光体の選定が必要となる。

(c) 伝達効率

伝達効率を論ずるときに、蛍光体の発光分光特性、フェースプレートの分光透過率、記録紙の分光感度特性を考慮せねばならない。

いま $A_\lambda/A_{\max}$ を波長 λ での蛍光体の光出力 (相対的) とすると、全波長にわたった蛍光体の相対的光出力は、次式で表わされる。

$$N_A = \int_0^\infty \frac{A_\lambda}{A_{\max}} d\lambda \quad (7)$$

同様に、記録紙においても $B_\lambda/B_{\max}$ を波長 λ の光に対する相対的感度とすると、全波長にわたった相対的レスポンスは次式で表わされる。

$$N_B = \int_0^\infty \frac{B_\lambda}{B_{\max}} d\lambda \quad (8)$$

フェースプレート透過率においても同様に、

$$N_T = \int_0^\infty \frac{T_\lambda}{T_{\max}} d\lambda \quad (9)$$

以上のことから、蛍光体より放射された光が記録紙へ伝達される相対的なエネルギーは、

$$N_C = \int_0^\infty \frac{A_\lambda}{A_{\max}} \cdot \frac{B_\lambda}{B_{\max}} \cdot \frac{T_\lambda}{T_{\max}} d\lambda \quad (10)$$

となる。よって伝達率は、

$$\kappa = \frac{N_C}{N_A} \quad (11)$$

で与えられる。

蛍光体の発光分光特性、記録紙の分光感度特性を、図14、図15に示す。また(11)式を用いて計算した結果を表5に示す。ただし、われわれの用いたフェースプレートの分光透過率は、波長が3500Åから7000Åの光に対し平坦な特性を示すので、 $N_T=1$ として計算した。

図 14 螢光体の発光分布特性
Relative spectral response of phosphors.

図 15 記録紙の分光感度特性
Relative spectral response of recording papers.

表 5 伝達効率 κ (%)
Phosphor emulsion transfer efficiency.

記録紙	銀塩印画紙	電子写真紙
螢光体		
P-11	87.64	35.84
P-16	71.76	0.72
P-24	36.14	57.33

以上の考察から、記録管用螢光体として P-11 が最も効率良いものであるといえる。われわれは螢光体の粒状性も考慮に入れることにより、P-11 と同一特性を示す P-22 B1 の螢光体を使用することにした。

4. 薄窓記録管によるテレビ信号の記録⁶⁾

テレビ信号の記録方式は、ほとんどが VTR で、わずかに 16mm 銀塩フィルムによるフィルム録画が使われているのが現状である。テレビ信号を画像として記録する方法として、受像管の像をレンズを通して画面と同じ大きさの感光紙に露光することが考えられるが、光の利用率が悪く、高速記録は困難である。薄窓記録管を用いこれに感光紙を密着し、水平は電子走査により、垂直は紙の移動により、テレビ画像の面積積記録も可能となる。

この種のテレビ画像記録法としては、1 フィールド記録と 1 フィールド 1 走査線順次ゲート 1 フレーム記録に大別される。前者は動きのある像の記録が可能であり、後者は約 9 秒間 静止している像でなければ記録できない。

表 6 記録に用いた規格
Specifications used for recording.

	1F, 1H 記録
走査画面の大きさ	136mm×102mm (有効画面 127mm×96mm)
水平走査周波数	15.75 kHz
記録時間	8.75 sec
画線密度	5 lines/mm
紙移動速度	11.6 mm/sec
記録速度	2.15×10^3 m/sec

図 16 実験系統図
Block diagram of testing arrangement.

写真 2 テレビ信号記録例
Recorded television picture.

い。

われわれは後者の記録方法を採用し、薄窓記録管と銀塩印画紙 (クイックコピー用紙) を組合せて記録した。

実験に用いた記録の主な規格を表 6 に、実験の系統を図 16 に示す。フライングスポット走査器には 5 WP 16 ブラウン管を使用している。1 フィールド 1H ゲート回路は $H \cdot D$ を $1/263$ に落し、標準同期と組合せて、入力映像信号を 1 フィールド 1 走査線順次ゲートする。写真 2 に記録例を示す。

5. む す び

われわれが開発したガラスを用いた薄窓記録管の解像度、光の有効利用率と、それを用いたテレビ画像記録例を示した。

解像度は約 5 本/mm 程度で、従来の写真電送、普通の文書を電送する模写電送には十分な性能をもっており光の有効利用率も大であるので、記録速度はテレビの走査速度と同程度まで可能である。

また、機械的強度について当初心配されたが、CES 規格に準じて耐圧テストした結果、3 気圧までは充分耐えうるものであり、他の記録管にくらべ充分経済性のある記録管である。

本薄窓記録管に用いた高解像度電子銃は、NHK 技術研究所で開発された電磁集束 4 極電子銃を基準に、電極寸法を若干変更したものである。薄窓記録管の測定法についてご討議いただいた NHK 技研の大石主任研究員に

感謝の意を捧げたい。また、管の試作開発に当り、当研究所開発部の深山君をはじめとする多くの方々のご協力に対し、ここに感謝する次第である。

最後にご指導、ご協力いただいた前田室長、中野開発部長、武藤試作課長に謝意を表したい。

(昭和 44 年 5 月 14 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) R. G. Olden: A Thin-Window Cathode-Ray Tube For High-Speed Printing With "Electrofax", RCA Rev., **18**, 3 (1957) 343
- 2) 林 清: 特殊オシロ管について, 神戸工業技報, **16** (1956) 19
- 3) N. S. Kapany and D. F. Capellaro: Fiber Optics. VII—Image Transfer from Lambertian Emitters, JOSA, **51**, 1 (1961) 25
- 4) 大石 蔵: 記録管, テレビ誌, **21**, 8 (1967) 541
- 5) Leo Beiser: Energy Transfer From the CRT to Photographic Data Storage and Display Media, 2nd National Symposium on Information Display (1963) 111
- 6) 宮崎栄一, 富井 薫: ファイバー光学記録管による TV 信号の記録, テレビ全大予 (1967)