

## 第 4 編 増感紙・蛍光板

第 1 章	解 説	土 井 邦 雄	1 頁
第 2 章	X 線撮影系のレスポンス関数 ( 3 - 6 ) (I) X 線用蛍光板	土 井 邦 雄 佐 柳 和 男	2
第 3 章	被写体透過後線質による 増感紙のレスポンス関数 ( 4 - 3 )	宇 山 茂 樹 林 周 二	11
第 4 章	X 線撮影系のレスポンス関数 IV 増感紙と写真フィルム の組み合わせ ( 8 - 3 )	土 井 邦 雄	15

## 第 4 編 増感紙・螢光板

### 第 1 章 解 説

放射線像を肉眼で直接観察するか、あるいは写真像として記録する場合、螢光板や増感紙が数拾 keV の X 線をわずか数 eV の可視光に変換する媒体として広く用いられている。この時、画像伝達の立場からながめると螢光板や増感紙は、マクロには線型に取り扱うことのできる低空間周波フィルターである。この空間周波数特性を鮮鋭度と呼び、便宜的にこれを単一値で表現する提案や測定が、古くから H. Nitka, G. Rudinger et al., J. Meiler 等の多くの人達によってなされてきている。これらの鮮鋭度評価尺度は、その理論的根拠と測定法等に問題があって、ついにレスポンス関数の出現をみたわけである。レスポンス関数については、アメリカでは J. W. Coltman, R. H. Morgan et al., K. Rossmann et al., C. H. Dyer 等が、ヨーロッパでは M. Höfert, H. Schober, R. Röhler, H. Pulvermacher, W. Oosterkamp, A. Bouwers 等が、日本では宇山、津田、竹中、土井等が、基本的なデータを測定し、測定法も各種開発された。現在では、K. Rossmann によると、ICRU が主体になって増感紙のレスポンス関数の標準測定法や標準測定値を定めようとしている段階にまできている様である。

増感紙に関する問題点は、増感紙がいつも両面塗布フィルムとサンドイッチして用いられることによって生ずる写真測光に起因する誤差と、2 枚の増感紙の特性を 1 本の曲線で表現すること、およびマイクロデンシトメーター光学系の焦点深度等である。これらは、測定の精度向上と共に明るみに出て来たもので、本質的にはたしてレスポンス関数が定義できるかどうかと言うことも含めた重要な点である。(土井記)

## 第2章 X線撮影系のレスポンス関数(I) X線用蛍光板

大日本塗料株式会社研究部

土井邦雄

キャノンカメラ(株)研究部

佐柳和男

### 1. 緒言

近年、一般写真光学系を主として、画像評価にレスポンス関数が広く用いられるようになってきたが、X線撮影系についても、その個々の element の画像伝達特性の評価および全系列における各 element の合成<sup>1)</sup>などに、このレスポンス関数の手法がとり入れられつつある。

X線撮影系におけるボケを生ずる因子は多数あるが、たとえば間接撮影については、X線管焦点、散乱線、蛍光板、レンズおよびフィルムなどがあって、それらはおのおの性質の異なる異種のボケの要素である。つまり、これらを空間的な領域で考えると、縦軸にX線強度や光の強度などの異なる尺度をとり、画像の伝達には多重積分を行わねばならないが、空間周波数領域では、これらを同一尺度で表わし、多くの異質のボケの element の合成が容易である。従来、この系では単一評価尺度が主として用いられてきたので、個々の element の性質は表示できても、全体としての合成は仲々困難が多かった。

一方、この系において特に注意すべきことは、この系の element のいくつかは、空間領域における分布の変換が非線型ということである。

この研究では、X線像から可視光像への変換に使用される蛍光板のレスポンス関数を求め、X線撮影系における他の element を考慮した表示についても検討する。

蛍光板では、入力X線強度に対して出力可視光強度は比例することが知られており、一般の線型レスポンス関数が適用できると考えられるが、蛍光板は蛍光体粒子層からなるために時間的な変化までも考えると、蛍光体の build up や decay が導入されて、完全な線型とはいえず難くなるが、これらの影響が negligible な領域では一応線型として取り扱うことができる。また、蛍光板のボケは主としてこの粒子層内の光の散乱と層の粒状構造によって生じていると考えられている。

今までに試みられたこの蛍光板あるいは直接撮影に用いられる蛍光増感紙のレスポンス関数測定法には、可変幅の金属製スリットを移動させながらX線を間歇的に露出し、矩形波入力を得る移動スリット法<sup>2)</sup>、金属製矩形波テストチャートを用いる方法<sup>3)</sup>、クサビ形金属片を往復運動させて周期的正弦波状X線入力を得る方法<sup>4)</sup>およびX線量子の fluctuation による granularity transfer を利用する方法<sup>5)</sup>などがある。

以上の方法は、ほとんどが写真フィルムを使用しなければならないが、この研究では蛍光板がX線から光への像変換系であることに着目し、この出力光を利用して光電変換を行ない、レスポンス関数を求める方法を試みた。つまり、蛍光板にスリットを通過したX線を照射し、この線像強度分布関数を光電的にフーリエ変換する方法によって、蛍光板のレスポンス関数を測定する。

### 2. 測定方式および測定装置

蛍光板の線像強度分布関数は、写真フィルムなどと同様に、対称および等方的であり、蛍光板の位置によらないと考えられるので、蛍光板のレスポンス関数測定にはこの線像強度分布関数をフーリエ変換して求め

る方法を適用した。フーリエ変換は面積型正弦波チャートを用いるマスクング法によって行なった。

蛍光板の線像強度分布関数を  $f(x)$ 、蛍光板とチャートの座標軸のズレを  $x'$ 、チャートを透過した光を  $T(x')$  とすると、 $T(x')$  は

$$T(x') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \{1 + \cos 2\pi\nu(x' - x)\} dx \quad (1)$$

で与えられ、この式から  $f(x)$  のフーリエ変換  $|F(\nu)|$  は正規化すると、

$$|F(\nu)| = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \quad (2)$$

で与えられる。これによって、 $T_{\max}$  および  $T_{\min}$  から容易に  $|F(\nu)|$  を求めることができる。これは、写真レンズなどで広く用いられているものと全く同じ方法<sup>6)</sup> である。

測定装置の外観を Fig. 1 に示す。

Fig. 2 は、この装置の原理図を示す。

X線は6 mm厚、100 $\mu$ 幅の真鍮製スリットを通りぬけたあと、正弦波チャートを密着した蛍光板に照射される。蛍光板とチャートは、X線入射に対して垂直方向に走査される。(走査速度0.5 mm/sec) 正弦波チャートを透過した蛍光板の発光は、鉛ガラスおよび拡散板を通して光電

子増倍管に入り、光電流変化が記録されるが、一方、蛍光板を透過したX線は鉛ガラスに吸収される。この測定法が、レスポンス関数測定に適用できるためには、走査の間に線像強度分布関数が変化しないということが必要条件であるが、蛍光板では一応満足されていると考えられる。

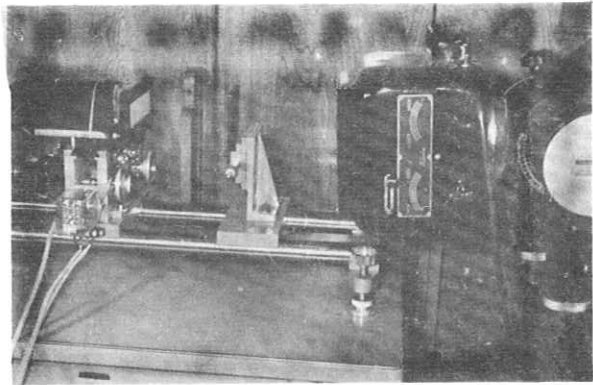


Fig. 1 Photograph of direct scanning apparatus.

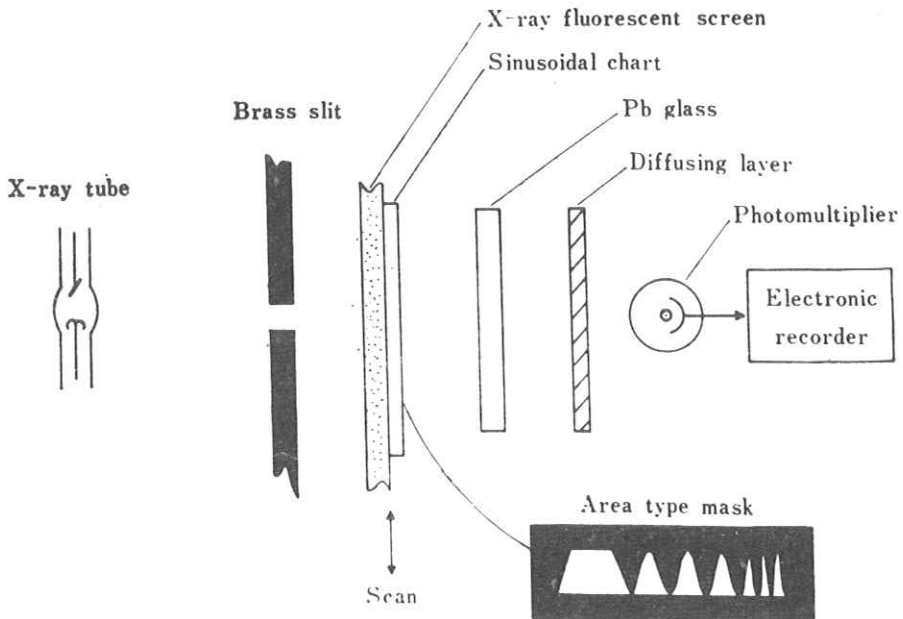


Fig. 2 Schematic diagram of direct scanning apparatus for measurement of optical transfer function of x-ray fluorescent screen.

測定装置の配置は、X線管球とスリットの距離 100 cm, スリットと蛍光板との距離 1 cm, 管球の焦点  $2.0 \times 2.0 \text{ mm}^2$  にとると、スリットの蛍光板上における拡大倍率は 1.01, また、X線管焦点の蛍光板上における縮小倍率は 0.01 である。

X線には、大阪レントゲン社製 Sirius 910T を用い、1 mm Al をフィルターとして使用した。鉛ガラスを透過するX線は、70 kVP において1%以下である。光電子増倍管は、頭部型東芝 7309 を用いた。

この測定法は、以下の測定結果に示されるごとく従来のもより、精度および取り扱いの容易さの点においてすぐれている。

### 3. 測定結果と検討

#### 3.1 測定結果

蛍光板において、X線入力と可視出力との関係が線型であるかどうかは、その線像強度分布関数が入力X線強度に依存するかしなないかを調べればわかる。これは、X線管電流を変化させた場合の正規化レスポンス関数の変化を調べても同様のことがわかる。

Fig. 3 は、70 kVP におけるX線管電流を 0.2 mA から 5 mA まで変化させた場合の蛍光板（大日本塗料製、極光 CINE）のレスポンス関数を示す。これらは、ほとんど一致しており、蛍光板を線型として取り扱ってもよいという考えが確認された。

Fig. 4 は、X線管電圧を変化させた時の同上の蛍光板のレスポンス関数を示す。管電圧の上昇は、低空間周波数の成

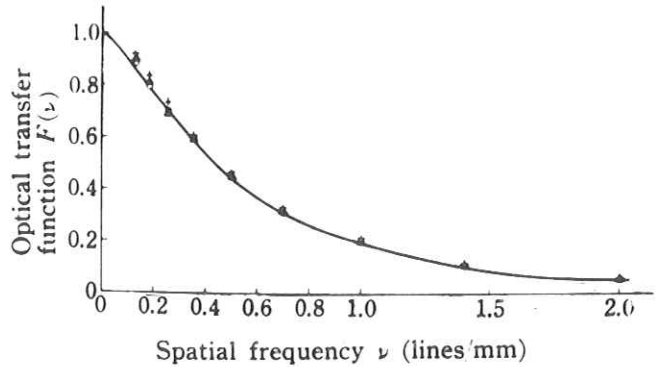


Fig. 3 Optical transfer curves of x-ray fluorescent screen (Kyokko CINE) measured by direct scanning apparatus. X-ray tube currents are varied from 0.2 mA to 5 mA at 70 kVP. (+ 5 mA, ▲ 1 mA, ○ 0.2 mA)

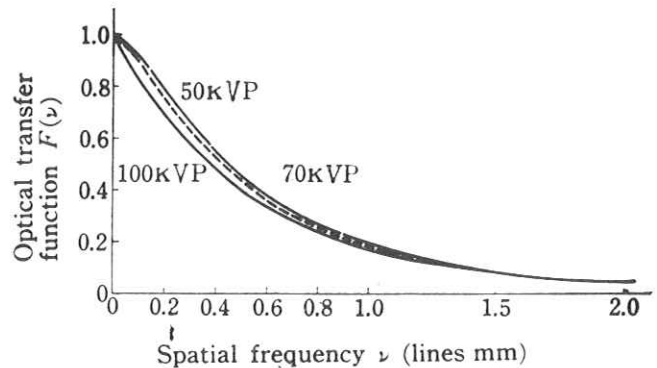


Fig. 4 Optical transfer curves of x-ray fluorescent screen (Kyokko CINE) when x-ray tube voltages are varied from 50 kVP to 100 kVP.

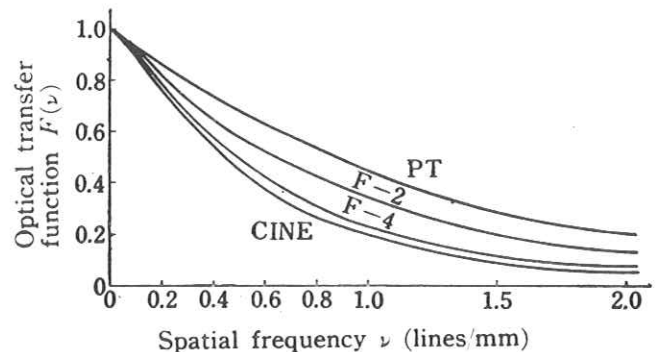


Fig. 5 Optical transfer curves of several commercial fluorescent screens at 70 kVP.

分を減衰させていることがわかる。これは、X線管電圧の変化が蛍光体のX線吸収係数を変化させ、蛍光板内の発光層の位置分布が影響されたためだと考えられる。

Fig. 5 は、市販されている各種蛍光板のレスポンス関数を示す。感度の高いものほど、つまり明るい蛍光板ほどレスポンス関数は低く出ているが、この順位は、従来の単一評価尺度によるものと一応対応はついている。これは曲線の形があまり変わらないからであり、したがって3.2で述べるような数式表示が可能になる。

X線間接撮影においては、蛍光板の感度の不足は一般に被写体への露出X線量を増加することによって補うことができるので、画像の伝達を取り扱うには正規化されたレスポンス関数を用いれば良いと考えられるが、一方、X線透視では蛍光板の発光<sup>\*</sup>が弱いので、眼の暗順応をさせた後で蛍光板を観察するのが通常である。このような明るさの領域では、Weber Fechner's law が適用されず、Fechner fraction が大きくなるので、レスポンス関数の表示には蛍光板の明るさを考慮する必要がある。そのためには、レスポンス関数を正規化せず、一定入力に対する線像強度分布関数をフーリエ変換したものを、縦軸に明るさの単位をとって相対的に用いると良いのではないと思われる。

眼のレスポンス関数が平均輝度に強く依存することを考えると、この明るさの相対値を用いる表示法は有用である。また、蛍光板の画像再現特性として、鮮鋭度とエネルギー変換効率が同時に表示できると非常に便利である。

Fig. 6 は、縦軸に蛍光板の光束発散度をとった時の蛍光板のレスポンス関数を示す。ただし、一定強度のX線入力に対する蛍光板の平均輝度をBとすると

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = B \quad (3)$$

となるように、線像強度分布関数  $f(x)$  を定義する。

3.2 蛍光板のレスポンス関数の近似  
 蛍光板のレスポンス関数は、管電圧の変化やフィルターの有無によって若干変化するが、その中のいくつかは指数関数でよく近似できる。

Fig. 7 は、測定結果と指数関数曲線を示す。指数関数からのズレは、低空間周波数の方が大きくなっている。

(3) 式の平均輝度  $B$  と定数  $A$  を用いると、レスポンス関数  $F(\nu)$  は近似的に

$$F(\nu) = B \exp(-A\nu) \quad (4)$$

で与えられる。

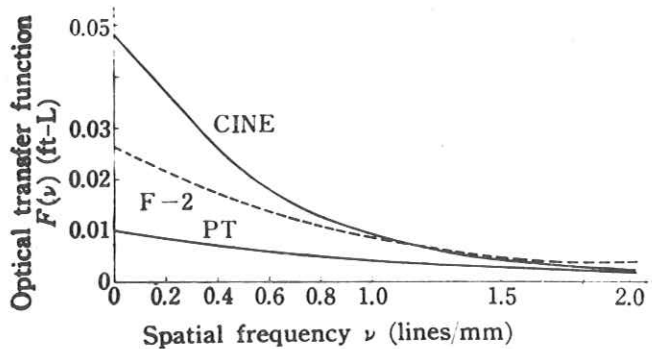


Fig. 6 Optical transfer curves of several fluorescent screens expressed by relative emission values of the screen. Exposure conditions: 70 kVP, 5 mA, 10 cm water phantom.

\* 通常のX線透視では、蛍光板の平均輝度は、約 0.001 ~ 0.01 ft-L

これから、蛍光板の画像再現特性は、 $A$  および  $B$  を代表値として容易に決定できることがわかる。また、線像強度分布関数  $f(x)$  は (4) 式をフーリエ逆変換して求められ、ローレンツ型関数となる。線像強度分布および点像強度分布の半値幅をそれぞれ  $w_{1/2}$  および  $d_{1/2}$  とすると、これらの値も、この蛍光板の画像再現特性を表示する代表値<sup>7)</sup>となる。

Table 1 は、市販されているいくつかの蛍光板についてこれらの定数を求めたものである。

### 3.3 Error の検討

#### 3.3.1 有限幅のスリット

スリット幅を  $2a$  とすると、これの正観化されたレスポンス関数は、

$$S(\nu) = \frac{\sin 2\pi a \nu}{2\pi a \nu} \quad (5)$$

と与えられる。また Absorption unsharpness<sup>8)</sup> によるスリット部分の広がりが  $\Delta a$  は、測定系の幾何学的構成によって決定され、この実験条件下では  $\Delta a/a = 0.006$  となり、きわめて小さい。

スリット上の蛍光板上への拡大倍率は 1.01

だから、これは考慮する必要ないと考えられる。よって、スリットのレスポンス関数として (5) 式をそのまま用いると、 $2a = 100\mu$  では、 $\nu = 1.0, 2.0 \text{ lines/mm}$  で、おのおの  $S(\nu) = 0.98, 0.94$  である。

(5) 式の確認をするため、 $100\mu$  のスリットで測定した蛍光板のレスポンス関数を基準として、 $2a = 250, 400, 600, 1000, 2000\mu$  の各スリットのレスポンス関数を、実測値から計算によって求めた。

Fig. 8 は、得られた結果を示す。

実線および点線は、それぞれ (5) 式による計算値のグラフを示し、各プロット点が実験から得られた点である。スリット幅が大きくなると、(5) 式の計算によく一致するが、小さくなると外れてくるのがわかる。この原因は、レスポンス関数測定装置の光軸方向と X 線の放射方向との不一致によるスリット幅の変形と考えられるが、狭いスリットでは、レスポンス関数は計算値より高い方向にあるので、蛍光板のレスポンス関数測定では、スリット幅の補正は省略できると考えられる。

#### 3.3.2 Decay および Built up

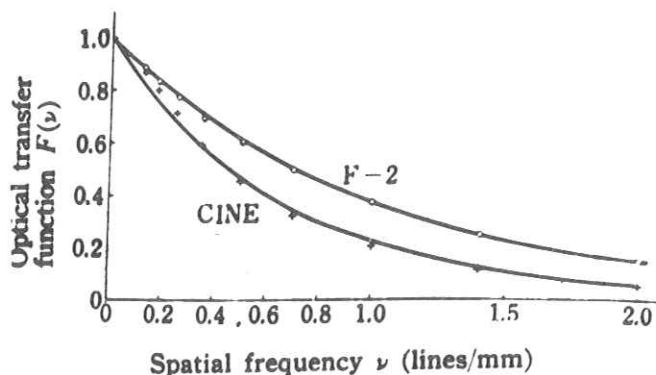


Fig. 7 Approximation of the optical transfer curve by an exponential function. Two exponential curves and experimental points are shown.

Table 1 Characteristic constants for optical transfer functions of several commercial fluorescent screens at 70 kVP in eq. (4).

constants	$A$ (mm)	$B$ (ft-L)	$w_{1/2}$ (mm)	$d_{1/2}$ (mm)
<b>screens</b>				
Kyokko PT	0.8	0.010	0.25	0.19
Kyokko F-2	1.0	0.026	0.32	0.24
Kyokko F-4	1.4	0.042	0.45	0.34
Kyokko CINE	1.5	0.046	0.48	0.37
Patterson CB-2	1.4	0.033	0.45	0.34

螢光体の時間的な過渡現象として、decay および build up が error として導入される。これらの現象はそれぞれ fast な成分と slow な成分から成っているが、明るさのレベルが低い slow decay および瞬間的に起こる fast build up は考慮しなくてもよいと考えられる。

螢光体の fast decay を  $i(t)$  とし、 $v$  の速度で走査すると、decay curve は、 $x = vt$  の変換を受けて、空間的に  $i_s(x)$  の分布を持つことになる。

螢光板の decay のない状態の線像強度分布関数を  $f(x)$  とし、この fast decay によって変調を受けて観測される非対称の線像強度分布関数を  $f_m(x')$  とすると、 $f_m(x')$  は次式の convolution 積分で与えられる。

$$f_m(x') = \int_{-\infty}^{\infty} i_s(x) \cdot f(x' - x) dx \quad (6)$$

よって、fast decay も空間周波数領域で考えることができる。つきに decay curve  $i_s(x)$  を

$$i_s(x) = i_0 \exp(-kx/v)$$

$$\text{ただし } x \geq 0$$

とすると、これのフーリエ変換  $I_s(\nu)$  は、正規化すると

$$I_s(\nu) = \frac{k^2 - 2\pi i k v \nu}{k^2 + 4\pi^2 v^2 \nu^2} \quad (7)$$

で与えられる。

この振幅成分  $|I_s(\nu)|$  および位相成分  $\varphi(\nu)$  は

$$|I_s(\nu)| = \frac{k}{(k^2 + 4\pi^2 v^2 \nu^2)^{1/2}}$$

$$\varphi(\nu) = \tan^{-1} 2\pi v \nu / k$$

で与えられる。 $v = 0.5 \text{ mm/sec}$  および  $k = 10^2 \text{ sec}^{-1}$ \* を用いると、 $\nu = 2.0 \text{ lines/mm}$  では、 $|I_s(2.0)| = 0.99$  および  $\varphi(2.0) = 0.06 \text{ (radians)}$  となる。これだけの error は、ほとんど negligible と考えられる。

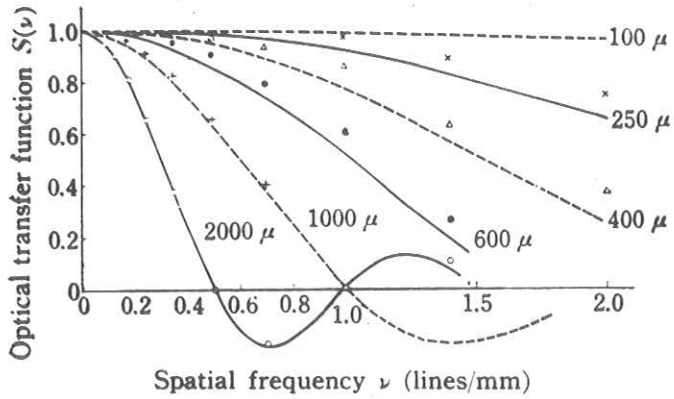


Fig. 8 Comparison of optical transfer curves of finite slit between calculations and experiments. Solid and dotted lines show calculations from eq. (5), and experimental points are shown on each line. (○ 2000μ, + 1000μ, ● 600μ, Δ 400μ, × 250μ)

\* 第1次近似として、decay curve に指数関数を用いると、通常の螢光板では  $k \approx 10^2 \text{ sec}^{-1}$  以上である。



螢光板上で、同一箇所の X 線照射されている時間  $t$  は  $t=2a/v$  で与えられ、 $2a=100\mu$  および  $v=0.5\text{mm/sec}$  を用いると、 $t=0.2\text{sec}$  となる。つまりこれから螢光体の slow build up の問題になる時間は 0.2 秒とすることになるが、この極く短時間で slow build up<sup>9)</sup> は negligible である。

### 3.3.3 X 線管焦点

X 線管焦点は、螢光板上に投影されており、スリットおよび decay などと同様に、この空間分布のフーリエ変換をレスポンス関数で取り扱うことができるが、縮小倍率 0.01 を用いると、焦点の分布は  $0.02 \times 0.02\text{mm}^2$  となって、 $\nu=2.0\text{ lines/mm}$  以下の空間周波数ではほとんど影響ないと考えられる。

### 3.3.4 X-ray quantum fluctuation

測定中の x-ray quantum fluctuation<sup>10)</sup> は、一定時間および一定領域内に照射される全 X 線量子数によって決定される。

照射部分の面積は、スリット幅  $0.1\text{mm}$  およびスリット長  $20\text{mm}$  を用いると  $2\text{mm}^2$  となる。

空間周波数  $\nu=2.0\text{ lines/mm}$  は、 $v=0.5\text{ mm/sec}$  の速度で走査されると、 $f=\nu \cdot v=1.0\text{ cycle/sec}$  の電気信号に変換される。時間領域内の標本化定理<sup>11)</sup>によれば、この信号を完全に定めるには、 $1/2f=0.5\text{ sec}$  ずつ隔たる点の sampling が必要なので、これを一定時間として用いる。

単位時間および単位面積あたりに到達している平均 X 線量子数<sup>10, 12)</sup>として、 $10^4\text{ 個/mm}^2 \cdot \text{sec}$  を用いると、測定中に照射される全平均 X 線量子数  $N$  は

$$N=2 \times 0.5 \times 10^4=10^4$$

となる。

X 線量子は、random に Poisson 分布にしたがって fluctuation を生じているとすれば、この標準偏差  $\sigma$  は、 $\sqrt{N}$  で与えられる。また相対的な fluctuation は  $\sigma/N=1/\sqrt{N}$  となり、 $N=10^4$  を用いると、 $\sigma/N=0.01$  が得られる。

レスポンス関数測定時のこの程度の fluctuation は、ほとんど問題ないと考えられる。

## 4. 結 言

線像強度分布を光電的にフーリエ変換する方法によって、螢光板のレスポンス関数を測定し、従来主として用いられた写真フィルムを用いる方法に比べて、容易に測定できることがわかった。

X 線管電流を  $0.2\text{mA}$  から  $5\text{mA}$  まで変化させた時、螢光板のレスポンス関数はすべて一致し、これにより螢光板において、X 線入力と可視光出力の関係が線型であることを示した。

X 線管電圧の変化は、若干レスポンス関数を変化するが、これは線質の変化によって螢光板のレスポンス関数を変化したためと考えられる。

X 線透視に使用される螢光板では、縦軸に光束発散度を取り、螢光板の明るさを考慮したレスポンス関数表示を用いることを提案した。

螢光板のレスポンス関数は指数関数で良く近似ができ、螢光板の明るさを考慮すると、2つの定数で螢光板の画像再現特性を表示することができる。

測定に関する誤差は、有限なスリット幅によるもの、X線管焦点によるもの、X線量子の fluctuation によるものおよび蛍光体の build up と decay によるもののおのおのについて検討し、空間周波数 2 lines/mm 以下では、影響の小さいことがわかった。

最後に、本研究に御援助をいただいた大日本塗料(株)茅ヶ崎工場の各位に感謝致します。

#### 文 献

- 1) R. H. Morgan: Am. J. of Roentgenology 88, 175 (1962)
- 2) 土井邦雄: 応用物理 33, 50 (1964)
- 3) J. W. Coltman: J. Opt. Soc. Am. 44, 468 (1954)
- 4) M. Höfert: Acta Radiologica 1, 1111 (1963)
- 5) K. Rossmann: J. Opt. Soc. Am. 52, 774 (1962);  
K. Rossmann: Am. J. of Roentgenology 90, 863 (1963)
- 6) カメラ工業技術研究組合編: 写真レンズとレスポンス関数 (1961)
- 7) R. C. Jones: J. Opt. Soc. Am. 48, 934 (1958)
- 8) K. Rossmann and H. E. Seemann: Am. J. of Roentgenology 85, 366 (1961)  
; K. Rossmann: *ibid.* 87, 387 (1962)
- 9) H. Kallmann and J. Dresner: Phys. Rev. 114, 71 (1959)
- 10) R. E. Sturm and R. H. Morgan: Am. J. of Roentgenology 62, 617 (1949)
- 11) S. Goldman: *Information Theory*, Prentice-Hall (1953)
- 12) H. M. Cleare, H. R. Splettstosser and H. E. Seemann: Am. J. of Roentgenology 88, 168 (1962)

#### 質 問 討 論

山根: 使用装置は?

土井: シリウスの全波整流部分を用いた。

内田: 画角特性は斜交軸だけを求めたのか?

土井: そうだ。

金森: 一回の測定時間は?

土井: 約3分である

津田: 残光はあるか?

土井: ある。exp. でおちるとした。

村田: チャートは蛍光板に密着か?

土井: そうだ。

内田: 一度光に変えて、焦点のレスポンスを求めているが、フィルム法とどちらが精度がよいと思うか?

土井: 蛍光法がよいと思う。

村田: 蛍光板でみるのが実際であるから、この方法がよいのではないか。

大上：フォトマルの光をひろう角度は？

土井：ヘッドオンタイプフォトマルとスクリーンの間は約1cmで拡散板を使っている。

大上：拡散板が白いと反射でレスポンス関数が悪くなるのではないか？

土井：考えられる。

村田：測定中X線は安定しているか？

土井：安定していないから数回の平均をとる。

金森：蛍光板では測定中の電源の変動もあり精度はフィルム法がいいと思う。

土井：応用物理10月号に発表しているから、こまかいことはみていただきたい。

Scanning 速さは0.5 mm/secである。

### 第3章 被写体透過後線質による増感紙のレスポンス関数

奈良医大 宇山茂樹・林 周二

増感紙のレスポンス関数が増感紙の種類及び管電圧によって変化することは、既に土井(極光)により報告されているが、被写体を考慮した、つまり被写体透過後の線質に就いては未だ明らかにされていない。本実験では被写体として軟部組織に等価な phantom である water (5, 10, 15 cm)を用い、被写体透過後の線質による各種増感紙のレスポンス関数を求めた。

レスポンス関数の測定方法は、Fig. 1 に示すように cassette に 2mm Cu Edge を密着撮影し、そのふちの像の濃度分布を microphotometer を用いて Scanning, Time-scale Intensity に変換微分の上、Fourier 変換を行う方法によった。

使用装置：器具及び材料

X線装置：日立製 500mA型 単相全波 (0.3×0.3 mm)

測定器：ナルミ製マイクロホトメーター(巾 10μ, 高さ200μ)

現像機：コダック製M<sub>4</sub>型 自動現像機

増感紙：極光 FS HS

フィルム：コダック製 Blue Brand

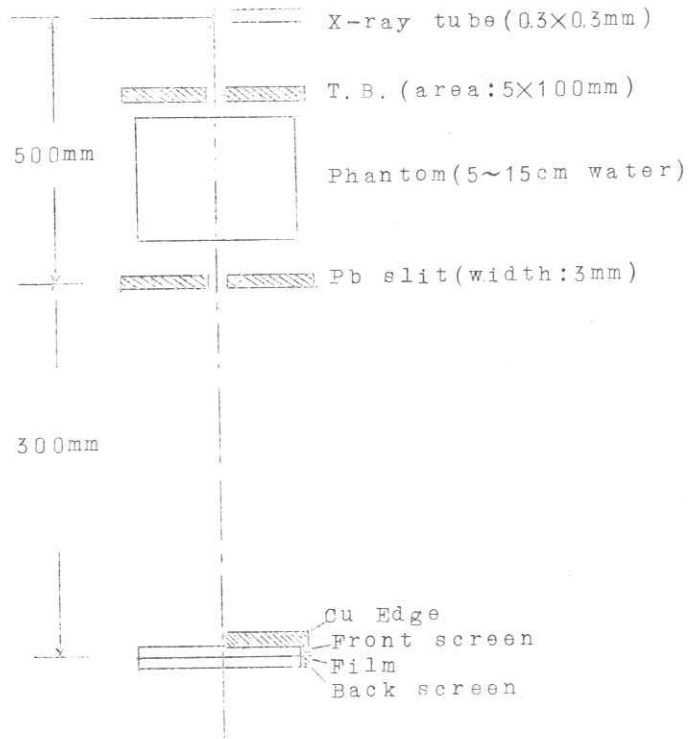


Fig. 1

Fig. 1の測定系に於て、X線管焦点、増感紙、フィルムのレスポンス関数をそれぞれ  $F(\omega)$ ,  $H(\omega)$ ,  $D(\omega)$  とすると合成系のレスポンス関数は

$$P(\omega) = F(\omega) \cdot H(\omega) \cdot D(\omega) \quad (1)$$

で与えられ、これから  $H(\omega)$  を求めることができるが、増感紙に於て問題になる空間周波数領域では、 $F(\omega)=D(\omega) \div 1$  と考えて良く、従って(1)式は  $H(\omega)=P(\omega)$ となり増感紙のレスポンス関数が求められる。

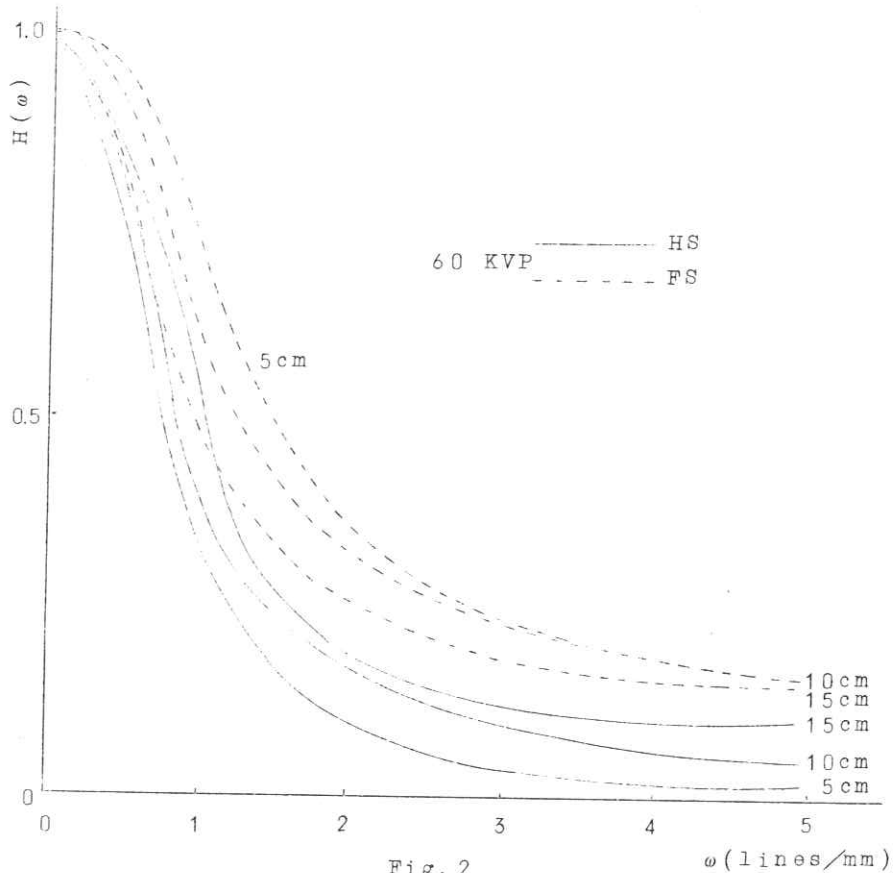


Fig. 2

60 KVP の場合

- (1) FS では高周波になるに従い、厚さによる  $H(\omega)$  の差はなくなっているが、HS ではその差はあまりない。
- (2) FS では厚い被写体の方が  $H(\omega)$  が悪く、HS では逆に厚い方がよくなっている。
- (3) (0~1 lines/mm)では、HS, 15 cm被写体の方がFS, 15 cmの場合よりも良い傾向にある。
- (4) 被写体が薄くなるに従いFSとHSの差は大きくなり、厚くなると差は次第に小さくなっている。

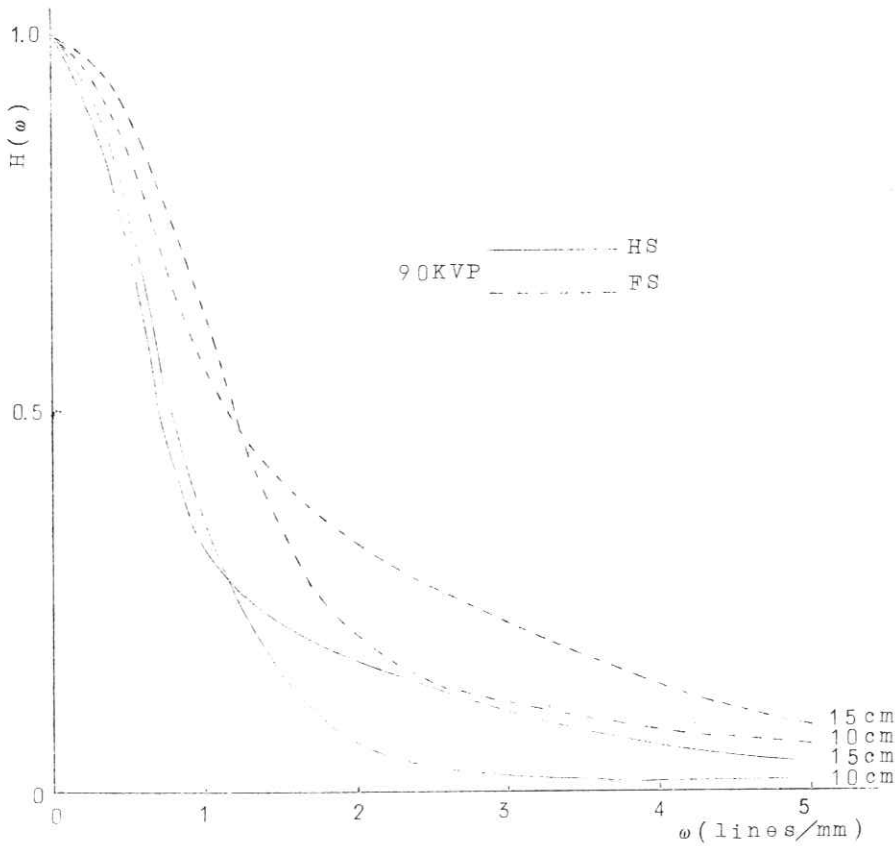


Fig. 3

90 KVP の場合

(1) HS, FSとも(2~5 lines/mm)において厚い被写体の方が  $H(\omega)$  が良く、逆に(0~1 lines/mm)では薄い被写体の方が良くなっている。

60 KVP と 90 KVP の比較

(1) 10 cmでFS, HSとも(1.5~5 lines/mm)で60 KVPの方が良く、(0~1 lines/mm)では殆んど変わらない。

(2) 15 cmではHS, FSとも(4~5 lines/mm)で60 KVPの方が良くなっており、低周波ではFSは90 KVP, HSは60 KVPの方が良い。

以上の変化は蛍光体層中に於けるX線の Effective absorption coefficient が原因となり、Front 及び Back に於ける発光層の位置分布が変化する為であろうと思われる。

結 論

1. 被写体と増感紙を組合せた系での増感紙のレスポンス関数は被写体の厚さ、構成物質、増感紙の種類、

管電圧等により複雑な変化を生ずる。

2. 被写体透過後に於けるX線のスペクトル分布は空間的にも複雑な変化を受けており、従って透過後X線強度分布との Convolution 積分は成立しない。これは増感紙が強度（但し、単色か或いはスペクトル分布関数形が同じ場合）に対しては線形な系であるのに反し、同一強度でも線質が異なる場合には線形性並びに不変性を満たさなくなり、所謂非線形 System を形成するからである。

### 質 問 討 論

竹中：極光でもこうなったか？

土井：やってないがフィルターを厚くすると変る。

竹中：フロント・バックそれぞれ別に測定し、あとで並列結合したものと一度に測定したものと大して変わらない。

伊藤：実験の測定精度再現性はどうか？

宇山：2回の測定では一致した。

土井：Rossmannによると10 $\mu$ のスリットでとってフーリエ変換したところには4%のエラーが考えられると言う。

村田：エッジから数値微分をするときのエラーが大きいのではないか？

金森：カブリ濃度と濃度差について教えて下さい。

宇山：カブリ0.15，濃度差は1.0位のところであった。

津田：どうして散乱線を除いたか？

宇山：入力X線のステップ function（線質によるもの）をとりたかったからだ。

津田：実際には散乱線が入るから低周波部ではわるくなるのではないか？

佐柳：被写体構造に比して散乱線分布はどうなるか？

土井：フレヤーと考えてよい。

村田：一次散乱は変るが二次散乱以降はフレヤーであろう。

高橋：線質が変わったときこの図のようになると解釈してよいか？

宇山：よい。

高橋：これでよいのが実際によいのか？HS，FSの差はレスポンス函数であまりないが写真ではFSの方がはっきりしている。レスポンス函数のいい点は？

佐柳：今迄判っていることを一つ一つの函数にわけて掛算することができるようになる。

金森：フロントバックを並列結合したと言われるが、その具体的方法は？

宇山：フロントとバックを別々にグラフをとってフーリエ変換したのち足して1に規格化した。

土井：大上氏は前回並列結合には否定的であった。

## 第4章 X線撮影系のレスポンス関数 (IV) 増感紙と写真フィルムの組み合わせ

大日本塗料(株)研究部 土井邦雄

## 1. 緒言

一般写真光学系で鮮鋭度の取り扱いに、レスポンス関数の手法が、大きな成果を収めているため、最近X線撮影系でも多くの異なったボケの要素を光学系の空間周波数特性として表示しようとする試みが行なわれている。(1~3)

X線写真の画質をかなり支配する増感紙と写真フィルムのレスポンス関数は、すでに各種の測定原理にしたがって求められているが<sup>4~8)</sup>、この系では増感紙と写真フィルムの組み合わせを画像変換系として1つのものと考える方法と、増感紙および写真フィルムのそれぞれを単独の光学系とみなす方法の2つがあって、両者の関係はまだ明らかにされていない。また、各人が勝手に定義した方法を用いているため、線型だとか非線型だとか議論がでてきているが、この事情は、写真フィルムのレスポンス関数が、R. L. Lambert<sup>11)</sup>によって effective exposure に関して明確に定義される以前の状態に似ている。そこでこの系のレスポンス関数を、線型に取り扱える領域で定義し、従来のものとの対応を明確にしておく必要がある。

この系の点像の広がりには、主として3つの段階からなると考えられ、それらは増感紙の蛍光膜内の光の拡散、double coat の写真フィルム乳剤中の光散乱、および増感紙表面と写真フィルム間の相互反射に起因するものである。

本研究では、増感紙と写真フィルムの組み合わせのレスポンス関数を、線型に取り扱う立場から最も合理的な方法で定義し、これと増感紙、光相互反射過程、および写真フィルムの各レスポンス関数との関係を求める。また、この系のレスポンス関数を実測し、光相互反射過程のレスポンス関数を分離する。

## 2. 増感紙と写真フィルムの組み合わせ系のレスポンス関数の定義

この系で線型あるいは非線型などの議論の起こる原因は、double coat の写真フィルムによる写真測光、およびこの系の特性を1本のレスポンス関数曲線で表現することに起因する問題である。簡単のため、1次元で、単位インパルス状X線が、この系に入射した時、フロントおよびバック側の写真フィルム中の露光分布すなわち線像強度分布をそれぞれ  $O_f(x)$  および  $O_b(x)$  とし、フロントあるいはバック側乳剤の単独での特性曲線を  $D_1 = f_1(E)$  とすると、両面の乳剤を分離せず、これを同時に測定する時<sup>\*</sup>の特性曲線は、

$$\begin{aligned} D_2 &= f_1(E) + f_1(kE) \\ &= f_2(E) \end{aligned}$$

となる。ただし

\* 両面乳剤フィルムのセンチメートルで問題になる光学系の焦点深度については、ここでは考えず、理想的な光学系を用いて測定されたとする。



$$k = \int_{-\infty}^{\infty} o_f(x) dx / \int_{-\infty}^{\infty} o_b(x) dx$$

$$k \leq 1$$

とする。従来は、両面乳剤フィルムを用いて測光する場合、単独の乳剤層中の露光分布  $o_f(x)$  および  $o_b(x)$  まで言及することなく、両側に記録された像を、 $f_2(E)$  を用いてただ1つの有効露光量分布  $o(x)$  を求めているが、この  $o(x)$  は、

$$o(x) = f_2^{-1} [f_1\{o_f(x)\} + f_1\{o_b(x)\}] = \varphi\{o_f(x), o_b(x)\} \quad (1)$$

である。この様子を Fig. 1 に示すが、 $o_f(x)$  と  $o_b(x)$  は、2回の写真特性曲線による変換を受けることになり、 $o(x)$  との関係は、一般には複雑であるが、 $\varphi$  によって与えられる。

X線像の問題を線型な領域で取り扱おうためには、(1)式の関係は、線像だけでなく一般の被写体についても要求されるから、任意の関数  $i(x)$  を入力 X線強度分布とすると、

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} i(x'-x) \cdot \varphi\{o_f(x), o_b(x)\} dx \\ &= \varphi \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} i(x'-x) \cdot o_f(x) dx, \int_{-\infty}^{\infty} i(x'-x) \cdot o_b(x) dx \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

が成立しなければならない。つまり、(2)式の成立しない状況では、 $o(x)$  を用いて線型なレスポンス関数は定義できないことになる。つきに、この条件を具体的な例によって検討する。

(i)  $f_1(E) = \gamma \log E + c$  では、( $\gamma, c$  は定数)

$$f_2(E) = \gamma \log kE^2 + 2c$$

$$o(x) = \left[ \frac{1}{k} o_f(x) \cdot o_b(x) \right]^{1/2}$$

となって、任意の  $o_f(x), o_b(x)$  に対しては、明らかに、(2)式は成立しない。

(ii)  $f_1(E) = k_1 E + k_2$  では、( $k_1, k_2$  は定数)

$$f_2(E) = k_1(1+k)E + 2k_2$$

$$o(x) = \frac{1}{1+k} \{o_f(x) + o_b(x)\}$$

となって、この場合は、(2)式は成立する。しかし、この  $f_1(E)$  は、一般の写真感光材料には期待できない。

(iii)  $o_f(x) = o_b(x)$  では、

$$f_2(E) = 2f_1(E)$$

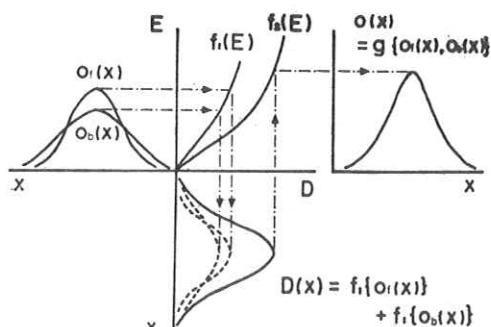


Fig. 1 Illustration of sensitometric image conversions for a double coated photographic film in radiographic film in radiography. Effective exposure distribution  $o(x)$  is generally given as a nonlinear connection of  $o_f(x)$  and  $o_b(x)$  through two different characteristics curves.  $f_1(E), f_2(E)$ : characteristic curves of a single and the double coated photographic films, respectively.

$$o(x) = o_f(x) = o_b(x) = \frac{1}{2} \{ o_f(x) + o_b(x) \}$$

となって、任意の  $f_1(E)$  に対して、(2) 式は成立する。

(IV) 両面に記録したフィルムから、反対側の乳剤をはがして、別々に像を求めて、定数  $k_3$  を用い

$$\begin{aligned} o(x) &= k_3 f_1^{-1} [f_1 \{ o_f(x) \}] + k_3 f_1^{-1} [f_1 \{ o_b(x) \}] \\ &= k_3 \{ o_f(x) + o_b(x) \} \end{aligned}$$

とすれば、(ii)と同様に(2)式は成立し、 $f_1(E)$  に依存しない。そこで(IV)による  $o(x)$  を増感紙と写真フィルムの組み合わせ系の出力と定義する。定数  $k_3$  は、正規化条件によって任意値をとり得る。

この定義の有利な点は、この系のレスポンス関数が写真特性曲線に依存することなく独立に線型な領域で取り扱えることは、いうまでもなく、さらに、3項に示されるように、増感紙、写真フィルムおよび相互反射過程との関係が明確である。さらに、(iii)の条件の成立する場合、つまりフロントおよびバック側の線像強度分布が等しい時には、従来の方法で求めたものが、この新しい定義のものと一致する。また、フロントおよびバックの増感紙のレスポンス関数が異なっても、(iii)の条件は、低コントラストあるいは低空間周波数の被写体について近似的に成立する。したがって、この定義は、より厳密なものであるが、従来の方法は、これを近似的に用いていたことになる。

この系で得られたレスポンス関数曲線と特性曲線を用いて fine detail reproduction を計算する場合は、低コントラストあるいは低空間周波数の被写体以外は困難で、厳密に求めるには、2本のレスポンス関数を定めておかねばならない。しかし、どの位まで近似できるかは、実際の被写体について、計算してみる必要がある。K. Rossmann<sup>12)</sup> は、従来の方法で線像強度分布を測定し(非線型と考えられるが)、これから階段応答を計算して実験とのよい対応をみている。これは単位段階関数を低空間周波数の被写体と見なせば、よい近似で成立すると考えられる。

### 3. 光相互反射過程のレスポンス関数

H. Schöber<sup>8~10)</sup> および W. F. Berg<sup>8, 10)</sup> は、増感紙と写真フィルムを単独の光学系として考え、それぞれのレスポンス関数を単に乗算して最終的なものとする考えに反対しているが、その根拠の1つは、フロントおよびバック側増感紙の発光が、それぞれ反対側の写真フィルム乳剤中にも潜像を作り、増感紙から写真フィルムへの像の伝達が非常に複雑だということにある。このため増感紙のレスポンス関数を、写真フィルムから独立にフロントおよびバックの additive combination として求めることはできないとした。K. Doi<sup>8)</sup> は、増感紙のレスポンス関数を、光電的に、フロントおよびバックの additive combination として求めたが、増感紙と写真フィルム間の光の相互反射過程については、それ自身線型なボケの系としてレスポンス関数を求めればよいと主張した。

ここでは、2項の定義にしたがって、増感紙と光相互反射過程のレスポンス関数の関係を求める。

#### 3.1 各成分のレスポンス関数との関係

増感紙と写真フィルムの配置を Fig. 2 のようにとり、像の伝達を空間周波数領域で考える。簡単のため1次元で、単位インパルス状X線入力に対するフロントおよびバック側増感紙の発光の応答を、それぞれ  $I_f(\nu)$  および  $I_b(\nu)$  とする。写真フィルムのフロントまたはバック側乳剤の単位インパルス状露光による潜像を  $F(\nu)$  とする。<sup>\*</sup> つぎに増感紙表面とフィルム間の相互反射による散乱光の成分を考える。フロント

側増感紙の単位インパルス状発光によるフロントおよびバック側写真乳剤への露光分布を、それぞれ  $R_{ff}(\nu)$  および  $R_{fb}(\nu)$  とする。ただし、 $R_{ff}(\nu)$  は、バック側増感紙の表面および写真乳剤からの反射成分およびこれらの間の多重反射の成分をすべて含み、また  $R_{fb}(\nu)$  についても、すべての相互反射の効果を含んで定義する。バック側増感紙の発光による散乱光の成分も上と同様に、バックおよびフロント側乳剤への露光分布をそれぞれ  $R_{bb}(\nu)$  および  $R_{bf}(\nu)$  とする。

つきに、片側の増感紙による相互反射の成分  $R_f(\nu)$  および  $R_b(\nu)$  を

$$\begin{cases} R_f(\nu) = R_{ff}(\nu) + R_{fb}(\nu) \\ R_b(\nu) = R_{bb}(\nu) + R_{bf}(\nu) \end{cases} \quad (3)$$

とすると、単位インパルス状X線の入力に対する最終的なフロントおよびバック側乳剤中の潜像  $O_f(\nu)$  および  $O_b(\nu)$  (これが2項の  $o_f(x)$ ,  $o_b(x)$  のフーリエ変換で与えられる)は、

$$\begin{aligned} O_f(\nu) &= I_f(\nu) \cdot R_{ff}(\nu) \cdot F(\nu) + I_b(\nu) \cdot R_{bf}(\nu) \cdot F(\nu) \\ O_b(\nu) &= I_f(\nu) \cdot R_{fb}(\nu) \cdot F(\nu) + I_b(\nu) \cdot R_{bb}(\nu) \cdot F(\nu) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで、各单位インパルスに対する応答、 $I_f(\nu) + I_b(\nu)$ ,  $F(\nu)$ ,  $R_f(\nu)$ ,  $R_b(\nu)$  および  $O_f(\nu) + O_b(\nu)$  を、それぞれ  $\nu=0$  における値が1であるように正規化された関数とする。(2項(IV)で  $k_3=1$  に対応する)すると、これらの各画像伝達過程の応答は、通常の光学系のレスポンス関数と同じものである。

増感紙と写真フィルムの組み合わせ系の最終的な出力  $O(\nu)$  は、(3)を用いて、2項の定義から

$$\begin{aligned} O(\nu) &= O_f(\nu) + O_b(\nu) \\ &= \{ I_f(\nu) \cdot R_f(\nu) + I_b(\nu) \cdot R_b(\nu) \} \cdot F(\nu) \end{aligned} \quad (5)$$

となるが、相互反射によるレスポンス関数  $R_f(\nu)$  と  $R_b(\nu)$  については、フロントおよびバック側で起こる光の散乱過程が対称である<sup>\*\*</sup>とすれば、 $R(\nu) = R_b(\nu) = R_f(\nu)$  において、全く同じものとみなし、上式は

$$O(\nu) = \{ I_f(\nu) + I_b(\nu) \} \cdot R(\nu) \cdot F(\nu) \quad (6)$$

となる。これから、増感紙と写真フィルムの組み合わせのレスポンス関数は、単一層の写真乳剤層、光の相互反射過程、および additive combination で与えられる増感紙の各レスポンス関数の積から求められることがわかる。

\* 写真フィルム自身に関して、非線型の意見もあるが、ここでは、比較的低空間周波数に限って、線型として扱う。(前頁分)

\*\* フロントおよびバック増感紙は、大抵の場合、同一物質からできており、 $R(\nu)$  に影響する光学定数は同じと考えられる。フィルムについても同様に考えられる。

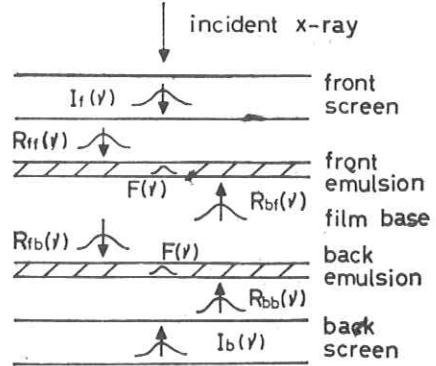


Fig. 2 Illustration of multiple scattering process in screen-film combination by OTF.

**Table 1** Relations of optical scattering steps between W. F. Berg's experiment and this treatment.

Berg's data in two experiments	a	b	c	d	e
	100	30~35	15~20	70~80	20~25
Equivalent constants in eq. (7)	$R_{ff1}(0)$	$R_{ff2}(0)$	$R_{ff3}(0)$	$R_{fb1}(0)$	$R_{fb2}(0)$
Reduced constants from Berg's data	0.425~0.384	0.128~0.135	0.064~0.077	0.298~0.308	0.085~0.096

3.2 光相互反射過程の解析

光の相互反射過程について、もう少し立ち入って考え、光の散乱過程を細分化すると、 $R(\nu)$ は

$$R(\nu) = \sum_{m=1}^{\infty} R_{ffm}(\nu) + \sum_{m=1}^{\infty} R_{fbm}(\nu) \quad (7)$$

と書ける。W. F. Berg<sup>10)</sup>は、Fig. 3 に示される5つの過程に分離して、effective exposureの比を求める実験を行なった。 $R_{ffm}(\nu)$ では、 $m=1, 2, 3$ および $R_{fbm}(\nu)$ では、 $m=1, 2$ に細分化した。得られた比は、 $\nu=0$ における値に相当するから、これを換算し、まとめると Table 1が得られる。W. F. Bergの実験は、 $R_{ff1}(\nu)$ 以外の項の $R(\nu)$ への寄与が想像以上に大きいことを明らかにしたが、これらの空間周波数成分と、増感紙のレスポンス関数との関係は明らかではなかった。

H. Schoberの主張の1つは、 $R_{ff1}(\nu)$ 以外の項が negligible の場合のみ、増感紙のフロントとバックの additive combination が許されるとしていたが、3.1と3.2の考察からは、他の散乱過程が存在しても、なお、additive combination は成立する。

4. 実験および討議

4.1 実験結果

この系のレスポンス関数測定手順は、2および3から以下の3種の方法が考えられる。

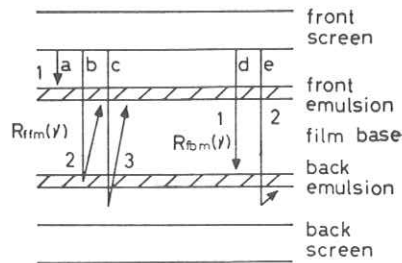
(i) 両面に像の記録された写真フィルムを、それぞれ反対側を剥離して $O_f(\nu)$ 、 $O_b(\nu)$ を独立に求め、これらを加えて $O(\nu)$ を求める。

(ii)  $I_f(\nu)$ 、 $I_b(\nu)$ を独立に求め、これを結合してから、 $R(\nu)$ 、 $F(\nu)$ を乗算し、 $O(\nu)$ を求める。

(iii) 低コントラストのチャートを用いて像を記録し、両面の像を1つのものとして $f_d(E)$ を用いて $O(\nu)$ を求める。

最後の(iii)は、従来と同じ測定法で、近似的なものとなる。ここでは、 $O_f(\nu)$ 、 $O_b(\nu)$ 、 $I_f(\nu)$ 、 $I_b(\nu)$ を測定し、 $O(\nu)$ を求め、また(ii)の場合に必要な $R(\nu)$ を最終的に求める。

X線は、70KVp(1mmAl)で曝射し、増感紙は、極光 FS および HS を用い、またフィルムは、



**Fig. 3** Optical interaction terms obtained by W. F. Berg's experiment. a, b, c, d, and e: Berg's notation.

Kodak の Blue Brand を用いた。レスポンス関数は、線像強度分布を数値計算によりフーリエ変換して求めた。得られたレスポンス関数曲線の再現性は、2回の独立な実験から、 $\sigma = 0.022$  である。線像強度分布は、30 micron 幅、1 mm 厚の鉛スリットを用いて、X線曝射し、現像後マイクロデンシトメーターで黒化度を測定したあと、片面乳剤の特性曲線を用いて露光量分布を求めた。 $O_f(\nu)$  と  $O_b(\nu)$  は、現像後、フィルムを5%の次亜塩素酸ナトリウム溶液を用いて剝離した後、測定した。 $I_f(\nu)$  と  $I_b(\nu)$  の測定は、片面塗布のフィルムに、増感紙をシングル状態で用い、反対側を黒色の吸収体を密着させてX線曝射を行なった。この測定では、 $R_{ff1}(\nu)$ 以外の相互反射過程は含まれていないと考えられ、また  $R_{ff1}(\nu) = 1$  とみなせる。

Fig. 4は、HS の場合の正規化した形での  $O_f(\nu)$ ,  $O_b(\nu)$ ,  $I_f(\nu)$ ,  $I_b(\nu)$  を示す。 $I_f(\nu)$  と  $I_b(\nu)$  は、かなり異なるが、 $O_f(\nu)$  と  $O_b(\nu)$  は、ほぼ同じになっている。これは、この系での  $R(\nu)$  がかなり影響するために生じたものである。ここで求めた  $I_f(\nu)$  と  $I_b(\nu)$  には、フィルム自身のレスポンス関数  $F(\nu)$  が含まれているが、ここで考えている空間周波数領域では、 $F(\nu) = 1$  とした。

Fig. 5は、(i)の方法で求めた HS および FS のレスポンス関数  $O(\nu)$  を示す。Fig. 6は、HS および FS における  $R(\nu)$  を示す。ただし、 $R(\nu)$  は、(5), (6)式から

$$R(\nu) = \frac{O_f(\nu) + O_b(\nu)}{I_f(\nu) + I_b(\nu)} \quad (8)$$

によって求めた。HS と FS では、相当異なる  $O(\nu)$  を示すが、 $R(\nu)$  はほとんど一致している。これらにおける増感紙と写真フィルム間の光散乱の過程は、全く同じ効果であると考えられるので、この実験結果は、予想されるものと一致している。したがって、ここで求めた  $R(\nu)$  は、(ii)の方法で  $O(\nu)$  を求める時に使用することができる。

#### 4.2 近似的計算との比較

$R(\nu)$ の原因は、主としてフィルムベースを拡散する光の拡がりによるものであるから、臨界角以上の全反射および多重反射を考えなければ、近似的に、この過程のレスポンス関数は計算される。

完全拡散面\*上の点光源から  $l$  だけ離れた  $(x, y)$  面上の照度分布  $r_l(x, y)$  は、逆自乗則を考慮して

$$r_l(x, y) = \frac{k \cdot l^2}{(x^2 + y^2 + l^2)^2} \quad (k; \text{定数})$$

である。これを点像強度分布とすると、レスポンス関数  $R_l(\nu)$  は、

$$R_l(\nu) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r_l(x, y) e^{-2\pi i \nu y} dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r_l(x, y) dx dy}$$

\* 通常の増感紙は、螢光体塗布密度が相当大きいので、完全拡散面に近いと考えられる。

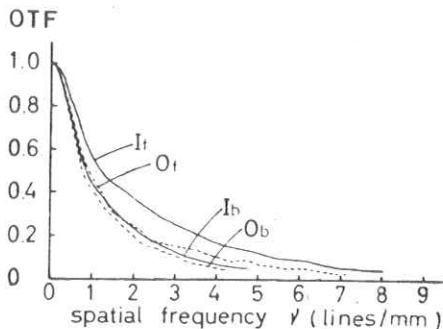


Fig. 4 OTFs obtained by Fourier transforms of line spread functions in normalized form.  $O_f(\nu)$  and  $O_b(\nu)$  include multiple scattering effect.  $I_f(\nu)$  and  $I_b(\nu)$  are OTFs of the intensifying screens. Screen: Kyokko HS, Film: Kodak Blue Brand.

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{l^2 e^{-2\pi i \nu y}}{2(y^2 + l^2)^{3/2}} dy$$

$$= 2\pi l \nu K_1(2\pi l \nu) \quad (9)$$

となる。 $K_1$  は変形された Bessel 関数を示す。

Fig. 3 の  $R_{ff1}(\nu)$  は、 $l=0$  と考えてもよいから、空間周波数に依存しない定数となるが、Fig. 6 における成分から、大体  $R_{ff1}(\nu) \approx 0.60$  である。この値は Table 1 とは大分異なっているが、これは、W. F. Berg と実験条件\* が異なっているためと考えられる。 $R_{ff1}(\nu)$  が、かなり大きいので、 $R_{ff2}(\nu)$ 、 $R_{ff3}(\nu)$  は反対に小さくなり、残りの寄与は、 $R_{fb1}(\nu)$ 、 $R_{fb2}(\nu)$  を主に考えると、この成分は、フィルムベースの厚さで定まる光の拡散による項である。そこで、 $R(\nu)$  は、(9) を用いて

$$R(\nu) = 0.60 + 0.40 \times 2\pi l \nu K_1(2\pi l \nu) \quad (10)$$

となり、 $l$  はフィルムベースの厚さで与えられる。(10)式と実験値との比較を Fig. 7 に示す。 $l = 0.20\text{mm}$  のものが良い一致を示している\*\*。この方法は、近似的なものであるが、よい対応を示しており、 $R(\nu)$  の形は、フィルムの厚さ  $l$  によって大きく変化する。

以上から、増感紙と写真フィルムの組み合わせ系でのレスポンス関数の改良には、光の相互反射の成分に着目すると、(10)式で第2項が零であるか、または  $l$  を小にして高空間周波数までフラットにするかが考えられる。これの具体的な方法としては、着色フィルムを用いるか、あるいは、フィルムの厚さを薄くすることが考えられる。

### 5. 結 論

増感紙と写真フィルムの組み合わせ系のレスポンス関数を、写真特性曲線に依存せず、線型な領域で新しく定義した。この定義を与えると、増感紙、写

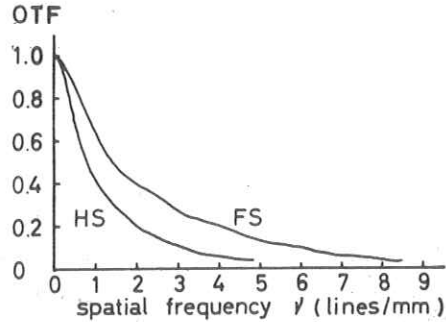


Fig. 5 OTFs,  $O(\nu)$ , of two screen-film combinations.

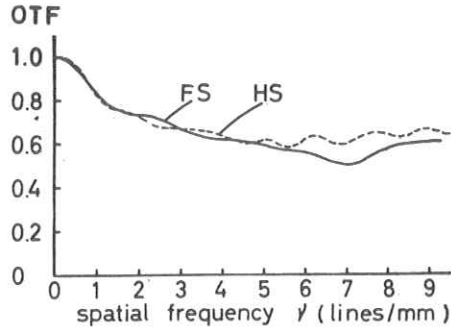


Fig. 6 OTFs,  $R(\nu)$ , of multiple scattering combinations in two screen-film combinations.  $R(\nu)$  are calculated from eq. (8). Screens: Kyokko HS and FS.

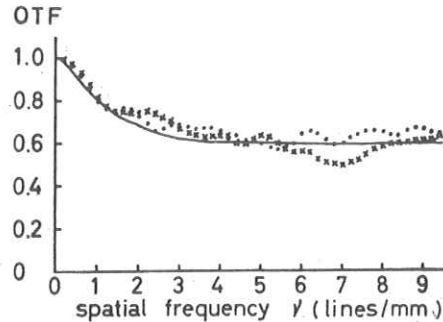


Fig. 7 Comparison of OTFs,  $R(\nu)$ , of multiple scattering processes between experiments (dots) and calculations (solid line) from eq. (10).

\* W. F. Berg は、実際の増感紙を用いず、反射用台紙を代用している。

\*\* 実際のフィルムベースは、 $0.20 \sim 0.23\text{mm}$  厚である。

真フィルム、およびこれらの中の相互反射の各レスポンス関数との関係が明確であり、この系の要素の解析が容易になる。従来方法は、新しい定義の近似的なものであり、低コントラストあるいは低空周波数の場合に適用される。

増感紙と写真フィルムの組み合わせについて、2種の異なる試料のレスポンス関数を測定した。組み合わせ系の結合されたレスポンス関数は相当異なっていたが、これらの相互反射による成分は、ほぼ同じものが得られ、理論的予想と一致した。相互反射によるレスポンス関数を近似的なモデルを用い、フィルムベースの厚さの関数として計算したが、実験との比較は、よい一致を示した。

最後に、御討議下さった早稲田大学大頭仁助教授、東京大学猿渡健郎氏および当社研究部鳥生敬郎博士、坂本壽氏に深く感謝致します。

#### 文 献

- 1) 土井邦雄, 佐柳和男: 応用物理 33(1964)721.
- 2) 土井邦雄: *ibid* 33(1964)50; 34(1965)190, 663.
- 3) 土井邦雄: 非破壊検査 14(1965)201, 245.
- 4) M. Höfert: *Acta Radiologica (diagn)* 1 (1963)1111.
- 5) K. Rossman: *Phys. in Med. & Biol.* 9(1964)551.
- 6) K. Rossmann: *J. Opt. Soc. Am.* 52(1962)774.
- 7) R. H. Morgan *et al.*: *Am. J. Roentgenology* 92(1964)426.
- 8) K. Doi *et al.*: *Japan. J. appl. Phys.* 4 suppl. 1(1965)183; *Proceedings of the Conference on Photographic and Spectroscopic Optics*, 1964.
- 9) H. Schöber *et al.*: *ibid* 178.
- 10) W. F. Berg and A. Spühler: *ibid* 196.
- 11) R. L. Lambert: *J. Opt. Soc. Am.* 49(1959)425.
- 12) K. Rossmann *et al.*: *ibid* 54(1964)187.

#### 質 問 討 論

竹中: フィルム線源間距離, スリット増感紙間距離, 線像の変換方法, 粒状性, 積分の方法は?

土井: 1 m, 1 cm, 強度変換して片方100等分位, スムージングした。梯型公式

高橋: ロイアルブルーとKXでRFがことなるがフィルムを1とするのはどうかと思う。

土井: フィルムのちがいでなく他の要因の方が多と思う。

高橋: メーカー名, HS, FSでなく増感率のように簡単に表わされる様にならないか?

土井: 正確な一次のものでなく, 二次的なものでもイメージ・クオリティを簡単に表わされるようにしたい。今後のことなるが。

高橋: Back から来るのが40%もあるとのことだがそんなにあるのか。

土井: 増感紙の代りに白紙をおいたものでは20~40%のデータがある。

金森：I がリニア，R がリニア，F がかわるのか？

土井：10 lines/mm までを問題にすれば変らないという議論もある。

高橋：国産のフィルムはいいと思うが，ロイヤルブルーは高感度だが粒状性は大きいと思われる。大きければ O. T. F. に関係するのではないか？

土井：画質を示すには O. T. F. と粒状性の二つにわけると必要がある。

金森：非線型の問題だが強度分布に変換してからやれと言うことか？

土井：非線型の解釈だが量子再現の途中で曲線を 2 本用いるということと考えていたとすれば。

金森：反射率にきいてくるか又 Front. Back の増感紙の線像強度分布を同じと考えてよいか？

土井：きいてくる。同じでない。

$I = I_f + I_b$  で  $I_b$  と  $I_f$  の強度分布がちがうことが問題になる。



