

X線管焦点のレスポンス関数

島津製作所

金森 仁志 田中 義宗

(昭和39年8月3日受付)

Optical Transfer Function of Focal Spots in Roentgen Tubes

By

Hitoshi Kanamori, and Yoshimune Tanaka

Radiation Apparatus Division Shimadzu Seisakusho Ltd., Kyoto, Japan

For an investigation of image information of roentgenograms, optical transfer function (O.T.F.) or response function of focal spots in roentgen tubes are obtained as follows: Images of focal spots for various tube currents are photographed through a pin-hole in a lead plate. The density-distributions of the photographs are calibrated into intensity-distributions. The intensity-distributions are transformed into O.T.F. by applying Fourier transformation equation. And then, the above obtained O.T.F. are calibrated using the O.T.F. of the pin-hole.

Transformation of spacial frequency (abscissa of the O.T.F.) is discussed regarding the spacial relationship of objects for actual roentgenography.

I 緒言

X線像の鮮鋭度は、step 状被写体の像のボケや、等間隔にならべた線の解像力、等で表示されていたが、光学で用いられているレスポンス関数 (Optical Transfer Function, 以下 O.T.F. と略す) で表示する方が便利であり、いくつかの成果が公表されている^{1)~5)}。鮮鋭度の評価に周波数解析 (Fourier 変換) を用いて、正弦波に対する周波数応答で表示した曲線が O.T.F. であり、曲線そのものを鮮鋭度の尺度としている。従来の解像力は、O.T.F. 曲線上の1点を表示しているにすぎない。

O.T.F. をX線撮影系にとり入れて鮮鋭度を評価する場合には、これを放射線源、被写体、増感紙、フィルム、肉眼等の各 stage に分解して、それぞれの鮮鋭度を論ずる必要があり、各 stage の O.T.F. がわかっている時は、全 stage の

O.T.F. の積が、系全体の O.T.F. になると云う便利さがある。また、O.T.F. がわかっているならば、その系に入る像がいかなるものであつても、これを通つて出てくる像を求めることができる。

この論文ではX線管焦点の O.T.F. を取扱うが、この問題について Morgan¹⁾ は焦点上の X 線強度分布が短形状の場合の O.T.F. を理論的に求めている。しかし、実際の分布は短形ではない。また、焦点寸法は管電圧ではほとんど変わらない事が解明されている^{5)~6)}。一方筆者等はこれが管電流によつて大きく変ることを見出したので、ここでは、管電流を変えて測定した焦点上の強度分布をもとにして、O.T.F. を求める。さらに、被写体位置と像の鮮鋭度の関係についてのべる。

II 焦点の X 線強度分布の測定

2 mm 焦点の回転陽極 X 線管 (サークレックス 2 C) を使用し、管電圧を 60KVp 一定とし、管電

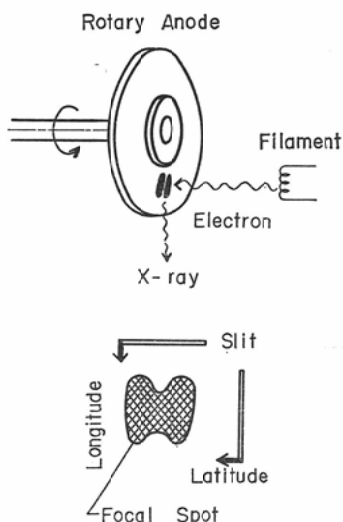


Fig. 1 The formation of a focal spot, and scanning procedures for the spot-image

流を 3mA から 400mA まで、広範囲に変化させた。焦点像を鉛のピンホールで 3 倍に拡大して（距離を 10cm 対 30cm にした）フィルムに感光せしめた。

一般に、X線管焦点では、主焦点と副焦点の関係で、Fig. 1 のように、長さ方向（フィラメントに平行な方向）に 2 本、照射電子密度の高い部分が生じる。そこでマイクロフォトメーターのスリット巾を 20 ミクロンにしぼり、長さが丁度像をカバーするようにし、焦点像を長さ方向と巾方向に走査せしめて、スリットの帯の中の平均透過率を自記記録させた。（Fig. 1 の下図参照。）一方、60 kVp, 100mA の条件を一定として、露出時間を $1/60$ 秒から 25.6 秒まで約 2 倍ずつ変化させて感光させたフィルムと、焦点像のフィルムとを同時現象してフィルムの特性曲線を作り、黒化度を露出量の相対値に換算した。こうして、焦点上の X 線強度分布を求めた。富士間接撮影用フィルムを FD-122 で現像したので、フィルムの鮮鋭度はよく、フィルムの O.T.F. で補正する必要はなかった。ピンホールの径は 0.3mm であるからこれに対しては III で述べたような較正をおこなった。

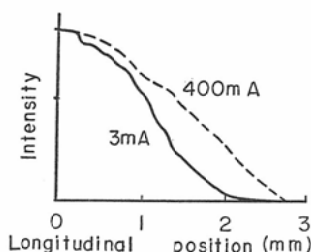
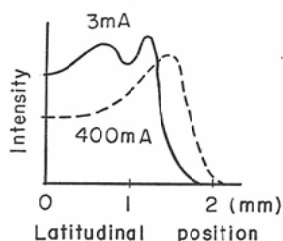


Fig. 2 Measured intensity distributions of focal spots for various tube currents

長さ方向と巾方向の強度分布は、左右対称で、Fig. 2 のようになる。管電流が増加すれば、焦点寸法が大きくなって、2 本の帯が離れてくる。しかし、管電圧をかえてもほとんど変わらない。(5)(6)

III 焦点の強度分布の O.T.F.

Fig. 2 の強度分布 $f(x)$ に

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{2\pi i f x} dx$$

で Fourier 変換をおこない、空間周波数の関数に変換し、 $F(0)$ が 1 になるように適当な係数を掛けて、normalize すれば、焦点の O.T.F. とピンホールの O.T.F. の積を得る。ピンホールは直径 0.3mm の円であるから、それで帯で走査する時の O.T.F. は、像の拡大率を考慮して

$$F(f) = \frac{\pi a J_1(2\pi f a)}{2\pi f}$$

(J_1 は第 1 次のベッセル関数)

$$F(0) = \frac{\pi a^2}{2}$$

$$a = 0.15 \text{ mm} \times (4/3) = 0.2 \text{ mm},$$

となり、Fig. 3 になる。ゆえに、実験で得られた強度分布の O.T.F. を、各空間周波数について、それぞれピンホールの O.T.F. の縦軸で割れば、焦点だけの O.T.F. を得る。巾方向と長さ方向の O.T.F. の代表例をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5 の実線で示した。

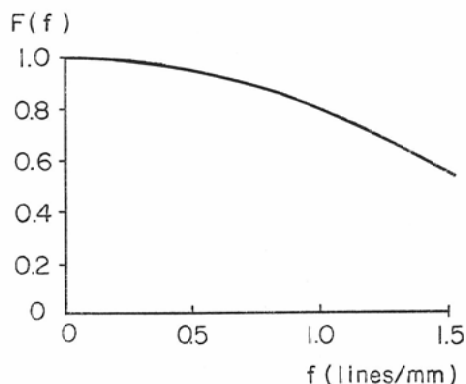


Fig. 3 The optical transfer function of the pinhole used

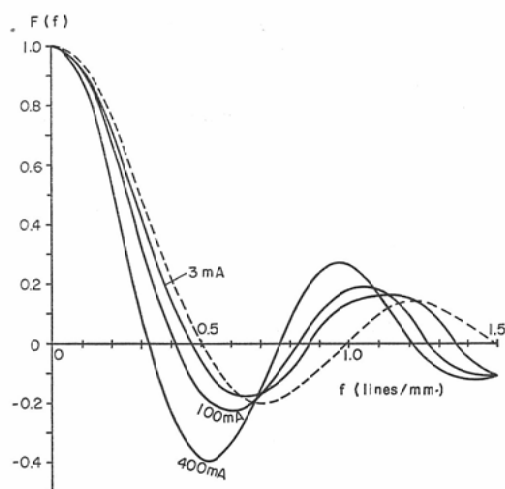


Fig. 4 Optical transfer functions of focal spots with latitudinal scanning

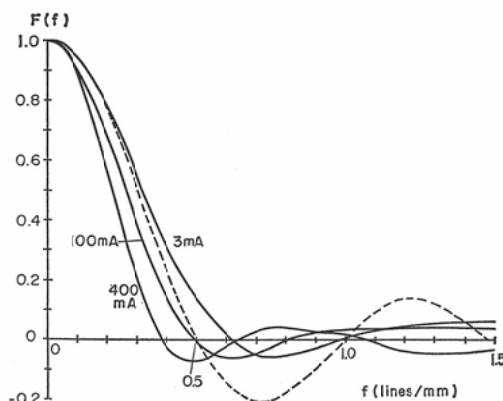


Fig. 5 Optical transfer functions of focal spots with longitudinal scanning

O.T.F. の意味を Fig. 6 に示した。被写体（上段の斜線を施した図）の透過率が、同図の中段のような正弦波の脈動をもつ時に、正弦波のくりかえしが 1 mm に何本あるかを表す数が横軸の空間周波数 f で、Fig. 6 の (b) 列では 2、(c) 列では 4 である。被写体の脈動の振巾を変えずに周波数を増加させると、焦点が大きさをもちつために、隣り同志の谷の像が互に重なりあつて、像の強度分布の振巾が、 A_1 , A_2 のようにだんだん小さくなる。もし、点焦点で距離を充分に離せば、中段の透過率の図がそのまま像になるので、振巾は変らない。この脈動の振巾が縦軸のレスポンスである。周波数が零のときのレスポンス (Fig. 6 の (a) 列のような階段状被写体の像で、edge のボケがなくなつた両端の強度の差) を 1 とし、空間周波数とレスポンスの関係を表した関数が、O.T.F. である。Fig. 6 の像の O.T.F. は同図 (d) のようにな

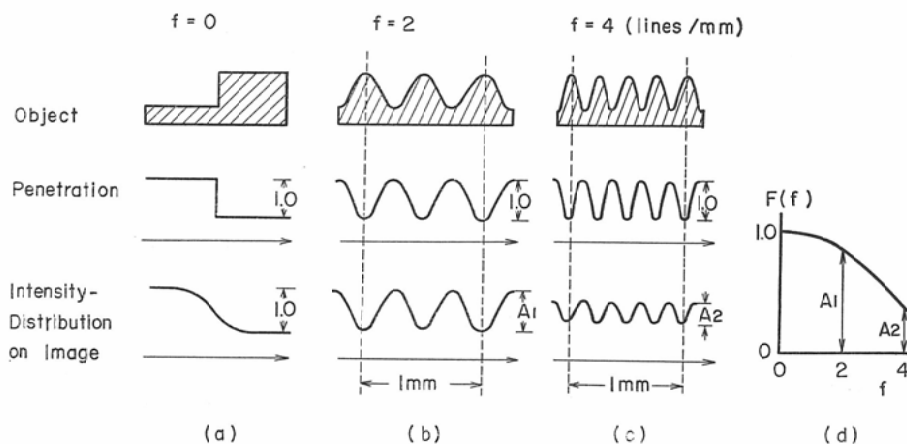


Fig. 6 Illustration of the optical transfer function

る。実際の被写体は、多くの周波数成分の組合わせであり、Fourier変換を施せば周波数成分の割合を求めることができる。

Fig. 4, Fig. 5.によれば管電流が増加するほど、O.T.F. が零になる周波数、すなわち解像しなくなる限界の周波数が減少する。Fig. 7にその関係を示した。これは、mAが増加すれば焦点寸法が大きくなって鮮鋭度が低下する効果をあらわしている。この限界周波数を越えるとO.T.F. が負になり、偽解像を生ずる。巾方向では、O.T.F. が負になるところが顕著に存在するので偽解像も

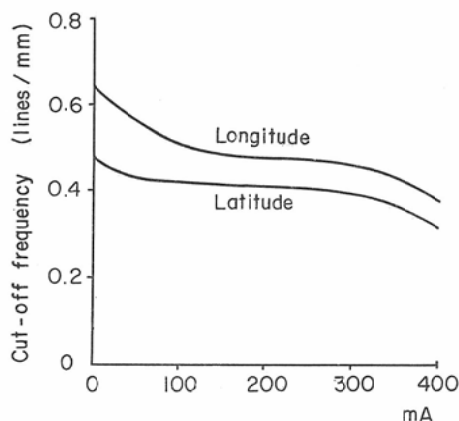


Fig. 7 Cut-off spatial frequencies for various tube currents

顕著になると推定される。長さ方向では、これが顕著でなく、偽解像は生じにくい。さらに周波数が増加すると再び正解像がおこる。偽解像の写真は内田氏が発表しており、この推定と一致している。(7) また、この例では、長さ方向では巾方向よりも鮮鋭度がよくなっている。

焦点の強度分布が巾2mmの矩形状の場合のO.T.F.をFig. 4, Fig. 5.の点線で示した。実線と比較すれば、巾方向では矩形状焦点より偽解像が顕著になり、長さ方向ではその反対の傾向があることがわかる。しかし限界周波数までのO.T.F.は矩形状分布と殆んどかわらない。

IV 被写体の位置と空間周波数との関係

実際の撮影系では、焦点・被写体の距離aは被写体・フィルム間距離bよりも大きいので、Fig.

5の横軸の空間周波数はa/b倍されて増加するので、Fig. 5で表示されるよりも鮮鋭度がよくなる。例えば、a = 170cm, b = 10cmとして400mAで撮影すれば、巾方向の解像しなくなる。周波数は0.34 (line/mm) から

$$0.34 \times (170/10) = 5.8 \text{ (lines/mm)}$$

と増加する。

実際の被写体は厚みをもつものでa/bが厚さ

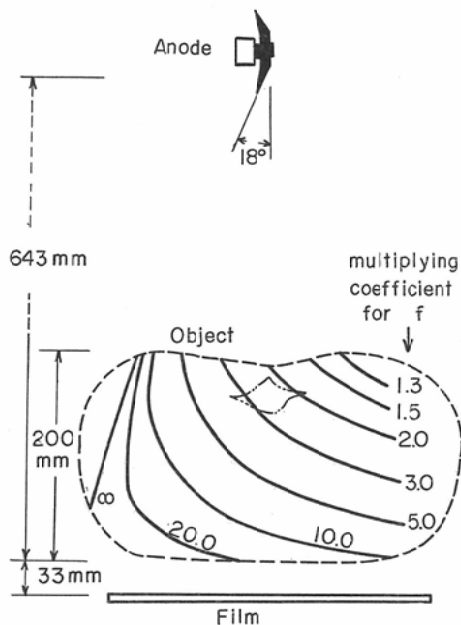


Fig. 8 Multiplying coefficients for longitudinal spatial frequencies for a practical object

によつて変り、フィルムに近い個所ほどa/bが大きいので鮮鋭度がよくなる。巾方向のO.T.F.はこのa/bで補正するだけでよいが、長さ方向のO.T.F.に対しては、焦点面が斜であるから、陰極側から見ると焦点の長さが大きくなり、鮮鋭度が悪くなる効果も、あわせて考えねばならない。Fig. 8に腹部を撮影するときの、長さ方向O.T.F.の横軸の倍率の1例を示した。たとえば、100mAで撮影すれば、倍率20.0と記した線上の点では、長さ方向で

$$0.5 \times 20 = 10 \text{ (lines/mm)}$$

まで解像するが、倍率1.5と記した個所では、0.75 (line/mm) までしか解像できない。

V 結 論

X線撮影系の性能を定量化する研究の一つとして、X線管焦点のレスポンス関数 (O.T.F.) を求めた。レスポンス関数で表示する方法は、ボケや解像力で鮮鋭度を表示する方法よりも適確で、系全体の性能を簡単に知ることができて有利である。ここでは、管電流が増加すれば焦点寸法が大きくなることを見出し、それによつて鮮鋭度が低下する事を O.T.F. を用いて表現した。さらに、被写体の内部の位置によつて、像の鮮鋭度が異なる現象を説明した。本論文が、X線像のイメージインフォーメーションを定量化する研究の一

助となれば幸である。

文 献

- 1) R.H. Morgan: Am. J. Roentgenol. 88, 175 (1960).
- 2) 田島, 畑中: 非破壊検査, 12, 2号, 85 (1963).
- 3) M. Höfert: Acta Radiol. Diagnosis 1, 1111 (1963).
- 4) 滝沢, 土井: 日医放誌, 23, 1029 (1963).
- 5) 内田: 23回日医放学会総会展示発表, 294, 296 (1964), 応用物理, 33巻掲載予定 (1964)
- 6) 花田, 滋賀, 今野, 吉田, 田部: X線管およびX線装置の研究 第5巻 pp. 4-16, X線管協議会発行 (1961年1月).