

X線拡大撮影系における散乱線の MTF に関する実験的評価

名古屋大学医学部放射線医学教室

小 原 健

名古屋市立大学医学部放射線医学教室

綾 川 良 雄

(昭和52年4月15日受付)

(昭和52年5月16日最終原稿受付)

An Experimental Evaluation of MTFs of the Scattered Radiation in Magnification Radiography.

Ken Ohara

Department of Radiology, Nagoya University, School of Medicine

Yoshio Ayakawa

Department of Radiology, Nagoya City University Medical School

Research Code No.: 207

Key Words: MTF, Scattered radiation, Magnification radiography

For the purpose of estimating the effect of scattered radiation in magnification radiography, its MTFs were evaluated experimentally, and their empirical formulae were presented and discussed. It was necessary to obtain their numerical data input to the computer when optimal magnification radiography was studied with a computation by convolution of the component's MTF's.

A few empirical formulae on the MTF of scattered radiation in conventional radiography had been proposed, but in magnification radiography none of them were reported since they varied with a lot of factors, that is, the potential, the source-film distance (SFD), the thickness of scatterer, the size of radiation field, magnification ratio, and so on.

MTFs of the magnification radiograms of the test object of Optiker Funk Nr. 5863 taken by a X ray tube having a focal spot of 0.05 mm in nominal size, were obtained changing thickness of the water phantom for 0, 2, 5, 10, 15, and 20 cm as a scatterer, and magnification ratio for 4, 6, 8, and 10.

In the experiment, Kyokko FS or MS intensifying screen and Fuji KX medical film were exposed in this combination at the constant SFD of 100 cm, and in the radiation field of 4×4 cm at the position of 6 cm from the center of the focus.

MTFs obtained experimentally were transformed into the sine-wave one by Coltman's formula, and then the MTF values due to scattering were calculated according to the same magnification ratio by simple division.

Estimating the accuracy of MTFs, errors were smaller than $\pm 10\%$ over the range of spatial frequency ν from 0.5 to 5.0 lp/mm and larger than $\pm 10\%$ above 5.5 lp/mm.

These MTFs were assumed as a function of spatial frequency ν and thickness of the scatterer d . From the above data, the empirical formula approximated in exponential form is shown as,

$$S_c(\nu, d) = \exp(-a(\nu)d),$$

when $a(\nu)$ is a function of spatila frequency.

$a(\nu)$ approximated linearly over the range of ν from 0.5 to 5.5 lp/mm is given, then $S_c(\nu, d)$ is shown, as follows:

$$S_c(\nu, d) = \exp(-(\alpha\nu + \beta)d),$$

when gradient α and intercept β are constant that depended on the magnification ratio.

By using these expressions, MTF values of the scattered radiation derived from various thicknesses of the scatterer can be calculated from one of the unit of scatterer obtained with the same magnification ratio. These results are applicable to a computer calculation to find suitable conditions in mangification radiography.

I. 緒 言

MTF から生体条件をも含めた拡大撮影の至適術式¹⁾を求める場合、特に電子計算機による calculation²⁾を行う場合は、X線管焦点、増感紙-フィルム系や生体運動の MTF の他に散乱線の MTF の数値的处理が必要となる。前三者の数値的取扱いは確立しているが³⁾⁴⁾、後者は照射野の大きさ、撮影電圧、散乱体の厚さ、焦点-フィルム間距離などによつて変化し、これらの条件が多岐にわたるため、数式化は為されていない。また、散乱線に関する報告自体もすくない⁵⁾⁶⁾。拡大撮影の場合、付加した散乱体の厚さの増加で認められる系全体の劣化は、拡大率を上げ、air-gap の効果を大きくすることにより小さく出来る⁷⁾。

この拡大撮影における散乱線の影響と効果の普遍化を計る為、実験的に散乱線の MTF を空間周波数と被写体の厚さの関数として取扱ひ、近似的に両者の関係を明らかにした実験式を求めた。

II. 研究材料及び実験

実験に使用したX線管は単相全波整流コンデンサーバイアス方式、東芝 DRX-89H、焦点寸法は $0.05 \times 0.05\text{mm}$ である。増感紙は極光 FS 及び MS、フィルムは富士 KX、試験体は Optiker Funk 社製の矩形波チャート Nr. 5863 (鉛厚 0.05mm , $0.5\text{lp/mm} \sim 9.5\text{lp/mm}$) を使用した。付加散

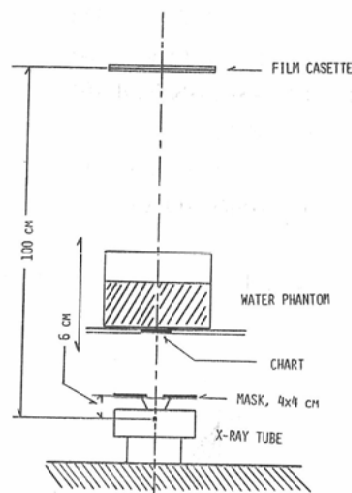


Fig. 1 Geometrical arrangement of the experimental devices.

乱体としては水ファントム（アクリル製、 $50 \times 50 \times 30\text{cm}$ 、厚さ 0.5cm ）を用いた。

実験は Fig. 1 に示す配置で行い、Table 1 に内容を示す。実験条件は焦点-フィルム間距離 (SFD) を 1m と一定にし撮影電圧 120kVp 、照射野は管球上 6cm の位置で $4 \times 4\text{cm}$ である。矩形波チャート像撮影後、一定条件下で現像し、各空間周波数での濃度分布を測定し、X線強度分布に変換した。これより【矩形波レスポンスを算出した後、

Table 1. Experimental materials and conditions.

Magnification Ratio	Screen	Thickness of water Phantom (cm)
4	FS	0, 2, 5, 10, 15, 20
6	MS	0, 5, 10
8	MS	0, 5, 10, 15
10	MS	0, 5, 10, 15

* Film : Fuji-KX, SFD=100cm, 120kVp.

Coltman の変換式を用い正弦波レスポンスを求めた。

III. 研究方法

空間周波数を ν , ある付加散乱体の厚さ d における X線撮影系の MTF を $G(\nu, d)$ とする, $G(\nu, d)$ は被写体面での焦点, 増感紙—フィルム系, 散乱線, および被写体の MTF を夫々 $F(\nu)$, $S_f(\nu)$, $S_c(\nu, d)$ および $O(\nu)$ と置くと,

$$G(\nu, d) = F(\nu) \cdot S_f(\nu) \cdot S_c(\nu, d) \cdot O(\nu) \quad (1)$$

と書くことが出来る。

ここで $d=0$ のとき $S_c(\nu, 0) \div 1$ とみなすと

$$G(\nu, d) = F(\nu) \cdot S_f(\nu) \cdot O(\nu) \quad (2)$$

となる。

従つて, $S_c(\nu, d)$ は (1)式を (2)式で割ることによつて,

$$S_c(\nu, d) = \frac{G(\nu, d)}{G(\nu, 0)} \quad (3)$$

となる。但しチャート法による MTF の測定ではチャートの最低周波数によつて MTF の値が低周波数側で限定される。従つてチャート最低周波数よりも低い周波数における MTF 値を求めるには外挿値を使うこととし, MTF の傾伺から 0lp/mm での MTF 値を求め各 MTF を規格化した。

IV. 研究結果

実験で得られた MTF を Fig. 2 に示す。各 MTF の精度は MTF 値が 0.1 以上の領域では誤差 $\pm 10\%$ 未満, 0.1 未満の範囲で精度は前者よりも悪化する。全体として散乱体の厚さが増す程 MTF 値は低下している。

これらの MTF を各倍率について空間周波数を固定し各散乱体の厚さに対して (3)式の $S_c(\nu, d)$ を片対数で直線近似を行つたものが Table 2 である。この表には各々の空間周波数に対して傾きと相関係数の絶対値を示しある。Fig. 3 には 4 倍拡大についてのものを例示した。ここでは空間周波数 0lp/mm での $S_c(\nu, d)$ の値を 1 に規格化せず切片の値に合せてある。全体に散乱体が厚い部分と薄い部分で高い周波数において指数関数の近似が成立しにくくなつてゆくことがわかる。

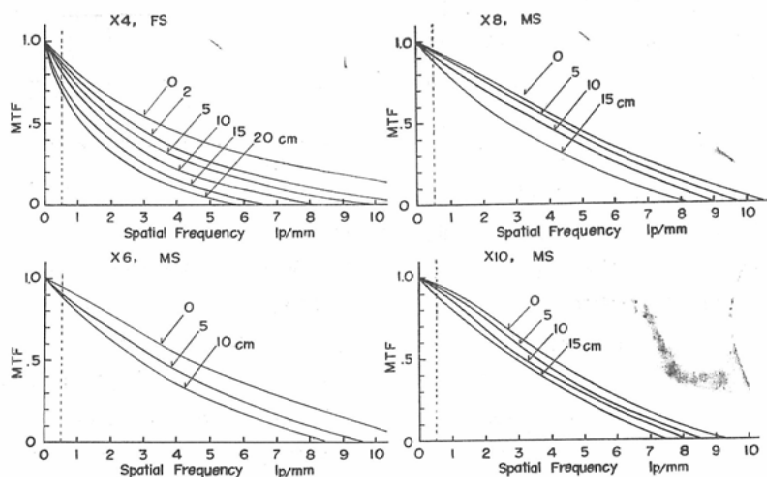


Fig. 2 MTFs of the magnification radiographic system with [scatterer of water phantom in various thicknesses according to the magnification ratios of 4,6,8, and 10.

Table 2. Exponential approximations to MTFs as a function of the thickness of scatterer. All correlation coefficients and gradients are negative, but they are shown as absolute values. The upper of each pair to a spatial frequency indicates a gradient and the below shows a correlation coefficient.

Spatial Frequency (lp/mm)	Magnification Ratio			
	$\times 4$	$\times 6$	$\times 8$	$\times 10$
0.5	0.0116	0.00563	0.00485	0.00493
	0.994	0.969	0.979	0.961
1.0	0.0193	0.0118	0.00909	0.00814
	0.997	0.989	0.980	0.983
1.5	0.0268	0.0170	0.0135	0.0107
	0.996	0.996	0.968	0.993
2.0	0.0335	0.0216	0.0177	0.0150
	0.996	0.999	0.961	0.990
2.5	0.0400	0.0265	0.0213	0.0170
	0.995	0.999	0.954	0.990
3.0	0.0489	0.0319	0.0233	0.0181
	0.996	0.999	0.956	0.995
3.5	0.0563	0.0362	0.0259	0.0202
	0.995	0.999	0.944	0.996
4.0	0.0669	0.0417	0.0294	0.0214
	0.995	0.999	0.952	0.996
4.5	0.0762	0.0477	0.0330	0.0229
	0.991	0.999	0.950	0.994
5.0	0.0780	0.0556	0.0374	0.0284
	0.920	0.999	0.942	0.997
5.5	0.0950	0.0634	0.0416	0.0344
	0.978	0.989	0.953	0.994
6.0	0.134	0.0718	0.0488	0.0452
	0.962	0.999	0.946	0.995
6.5	0.156	0.0892	0.0610	0.0579
	0.967	0.999	0.946	0.983
7.0	0.182	0.101	0.0757	0.0820
	0.966	0.999	0.954	0.979
7.5	0.180	0.125	0.100	—
	0.982	0.999	0.941	—

* $\times 4$ 0.5 lp/mm...4.0 lp/mm, Scatterer-thickness : 0,2,5,10,15,20cm.

4.5 lp/mm, Scatterer-thickness : 0,2,5,10,15cm.

5.0 lp/mm and 5.5 lp/mm, Scatterer-thickness : 0,2,5,10cm.

6.5 lp/mm...7.5 lp/mm, scatterer-thickness : 0,2,5cm.

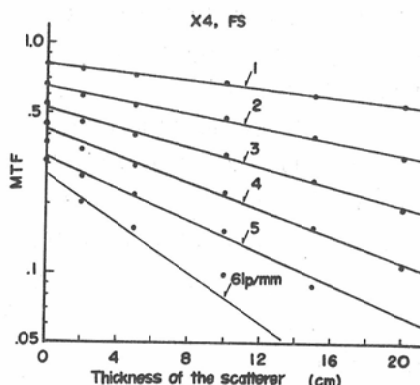


Fig. 3 Semi-logarithmic plots of MTFs of the scattered radiation for four-fold magnification according to thickness of the water phantom (cm) as a scatterer, when the spatial frequency is kept constant. Each line is normalized to the MTF value when the scatterer is not added.

近似式に対する元の MTF 値との差をみると、4 倍拡大については空間周波数 5 lp/mm 以上で、MTF 値の誤差範囲 $\pm 10\%$ を越え、8 倍拡大では 5.5 lp/mm 以上、10 倍拡大では 6.5 lp/mm 以上で上記の範囲を越える。6 倍拡大では実験した範囲

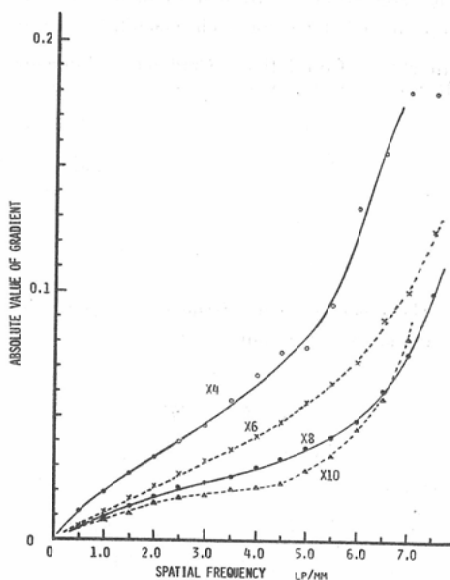


Fig. 4 The absolute values of gradient as a function of spatial frequency for the magnification ratios of 4, 6, 8, and 10. Solid curves for four- and eight-fold magnification and dashed curves for six- and ten-fold magnification.

内の全空間周波数域で指数関数近似が成立している。前三者と合わせてこの近似が成立するのは、空間周波数で 5.5 lp/mm 程度まで言えよう。

この結果から 5.5 lp/mm 以下の空間周波数域で、散乱線の MTF を散乱体の厚さ d と空間周波数 ν の指数関数で近似することが可能になる。また、倍率の大きいもの程傾きの絶対値は小さく、即ち拡大率の大きい程、散乱線の影響がすくないことを表わしている。

Fig. 4は各倍率について傾きの絶対値と各空間周波数についてプロットしたものである。各曲線は高周波数領域で傾きが大きくなるが近似の精度は悪くなる。各曲線は空間周波数の複雑な関数となる様に見えるが 5.5 lp/mm 以下の領域では直線とみなすことが出来よう。この範囲の相関係数、傾き α 及び切片 β を Table 3に示す。

Table 3. Linear approximations to the absolute values of gradients as a function of spatial frequency over the range from 0.5 lp/mm to 5.5 lp/mm for magnification ratios of 4, 6, 8, and 10. The correlation coefficient, gradient, and intercept are tabulated for each magnification ratio.

Magnification Ratio	Correlation Coefficient	Gradient α	Intercept β
4	0.994	0.017	-0.00173
6	0.996	0.011	-0.0005
8	0.997	0.0070	0.0024
10	0.980	0.0051	0.0029

* The range of spatial frequency is from 0.5 lp/mm to 5.5 lp/mm.

V. 考 案

散乱線の MTF を数値的に取扱うことによつて、増感紙—フィルム系やX線管焦点の MTF と組み合わせてX線拡大撮影系の総合評価を行うことができる。ここでは、電圧及び SFD を一定とし照射野の影響は考えずに扱つたが普遍化にはこれらを含めた形式での取扱いが必要となる。

散乱線の MTF を求めるには、直接に散乱線分布を求めフーリエ変換する方法、スリットを用い

て間接的に散乱線分布を求めフーリエ変換を行う方法、及びチャートを用いて散乱体がない場合とある時の MTF から求める方法がある。直接に散乱線分布を求めるのは困難であるが、後二者は比較的簡単である。しかし、スリットを用いる方法は拡大撮影の場合、直接線と散乱線の分離が困難と考えられるためチャート法を採用した。この方法は、規格化の仕方、フィルムスキャン時のノイズ、増感紙使用の場合にみられる MTF 値の高周波数域での制約等により MTF 値が小さい領域では相対的に誤差が増大するので、各 MTF 値が 0.1以上の範囲で考えることとした。

実験条件から、各倍率について焦点—増感紙—フィルム系の MTF は一定とみなせ、散乱線の MTF のみ変化すると考えられる。従つて、厚さ d の散乱体の散乱線 MTF, $S_c(\nu, d)$ は、

$$S_c(\nu, d) \approx b \exp(-a(\nu) \cdot d) \quad (4)$$

と書き表わせる。ここで、 $a(\nu)$ は倍率によつて異り空間周波数の関数となる。 b は $\nu=0$ のときの値で規格化の定数となる。更に、Fig. 4及びTable 3の結果から 0.5 lp/mm の範囲で

$$S_c(\nu, d) \approx b \exp(-(\alpha\nu + \beta) \cdot d) \quad (5)$$

とも表わせる。 b 及び β は $S_c(0, d)=1$, $S_c(\nu, 0)=1$ と規格化した場合 $b=1$, $\beta=0$ となる。 $b \approx 1$, $\beta \approx 0$ とみなせる場合は

$$S_c(\nu, d) \approx \exp(-\alpha\nu d) \quad (6)$$

と表すことが出来る。

(4)式の如く散乱線の MTF が表わされた場合は、ある散乱体の厚さを d_0 とした時、その k 倍の厚さの MTF $S_c(\nu, kd_0)$ を考えることが出来る。この両者の関係は (4)式の成立する範囲において

$$S_c(\nu, kd_0) = S_c^k(\nu, d_0) \quad (7)$$

となり同一倍率において、散乱線の MTF を他の散乱線の MTF から計算出来る。

単純撮影系での散乱線の強度分布は指数関数⁵⁾的であり、その MTF 値は高周波数領域で一定値に近づくと言われている^{5), 6)}。しかし、Fig. 4においては傾きの絶対値 $a(\nu)$ の値は 5 lp/mm 付近から増加している。これは、Fig. 3の 6 lp/mm の

直線のように、散乱体厚0cm のデーターを入れて指数関数近似を行つて得た $a(\nu)$ の値が0cm のデーターを除いて部分的近似を行つて得た $a(\nu)$ の値よりも大きくなつた為と考えられる。従つて、

(5), (6)式を逆フーリエ変換しても散乱線の強度分布を完全には表現できない。我々の得た近似式は散乱線強度分布を指数関数で表した場合とフーリエ変換の関係において逆関係となる。しかし、チャート法による他の結果では(4)式の形で部分的に近似が成立していることを示している⁶⁾。

拡大撮影において、現在の微小焦点管球の水準を考えると5.5 lp/mm 以上10 lp/mm 程度までの散乱線の MTF を求めることは必要と考えられる。本実験では、管球容量の制約もあつて増感紙を使用した、6 lp/mm 以上の散乱線の MTF を求めるには増感紙を用いず拡大撮影系の MTF を算出する必要がある。

VI. 結 論

拡大撮影系の散乱線の MTF について実験的評価を試みた。散乱線の MTF は、拡大率4倍、6倍、8倍及び10倍について散乱体の厚さを変え、撮影系の MTF から算出した。散乱線の MTF は空間周波数0.5 lp/mm から5.5 lp/mm の範囲に

おいて指数関数で近似し得た。

この近似式の成立範囲内で拡大率の等しい散乱線の MTF から厚さの異なる散乱線の MTF を計算し得る。

引用文献

- 1) 綾川良雄, 佐久間貞行, 奥村 寛: 生体条件からみた至適拡大撮影法. 日本医放会誌, 36(2): 148—158, 1976.
- 2) 綾川良雄, 佐久間貞行, 小原 健: 電算機による最適拡大条件の選定. 日本医放会誌, 37(2): 178—184, 1977.
- 3) Doi, K. and Sayanagi, K.: Role of optical transfer function for optimum magnification in enlargement radiography. Japan J. Appl. Phys., 9(7): 834—839, 1970.
- 4) Morgan, R.H.: The frequency response function. Amer. J. Roentgenol., 88(1): 175—186, 1962.
- 5) 土井邦雄: 被写体散乱線の写真効果のレスポンス関数による評価. 放射線像の研究, RII 研究会編, Vol. 2: pp. 90—98, 1969.
- 6) 津田元久: 散乱線のレスポンス関数の測定. 放射線像の研究, RII 研究会編, Vol. 1: pp. 91—95, 1967.
- 7) Ayakawa, Y.: Optimal magnification ratio of direct macroradiography in high magnification. Nagoya J. Med. Sci., 34(3): 227—240, 1972.