原著

片面乳剤システムにおける特性曲線の
X線エネルギー依存性の検討天野貴司・末森慎治¹⁾・林 明子・荒尾信一・北山 彰・山下一也論文受付
2000年3月2日論文受理
2000年10月2日

Code No. 521

川崎医療短期大学放射線技術科

1)川崎医科大学附属病院中央放射線部

はじめに

一般に増感紙/フィルム系(以下、受光系)の写真特性を表す特性曲線の形状は、入射するX線エネルギーの変化の影響(以下、線質依存性)に対して「無視できるほど小さい」といわれている^{1,2)}。このことは、一般撮影領域のX線エネルギーを用いた特性曲線作成法が、低エネルギーX線領域の受光系(例えば乳房撮影

系)の特性曲線を構成するときに適用できることを示唆している。

われわれはすでに、「新距離法」という低エネルギーX線領域におけるセンシトメトリー法を提案した³⁾。これは、任意の線源—受光部間距離(source-image distance: 以下、SID)を設定して、その間にいくつかの自由な間隔を設け、その間隔ごとに基準照射と倍数

X-ray Energy Dependence of Characteristic Curve for Single Emulsion System

TAKASHI AMANO, SHINJI SUEMORI,¹⁾ AKIKO HAYASHI, SHINICHI ARAO, AKIRA KITAYAMA, and KAZUYA YAMASHITA

Department of Radiological Technology, Kawasaki College of Allied Health Professions

1)Department of Radiology, Kawasaki Medical School Hospital

Received March 2, 2000; Revision accepted Oct. 2, 2000; Code No. 521

Summary

The objective of this study was to determine experimentally whether a characteristic curve obtained in a one-side emulsifier photo acceptance system is dependent on radiation quality. Experiments focusing on the following three points were carried out to examine the direct effect of x-rays on the direct sensitization of silver halide in film: 1) Relation between x-ray energy and a sensitization factor. 2) Effect of change in a sensitization factor on a characteristic curve. 3) Comparison of characteristic curve forms. X-ray tube voltage was set in a range from 28 kV (mammography) to 80 kV (general imaging). Although it has generally been considered that the dependence of a characteristic curve on radiation quality is small enough to be neglected, a statistically significant difference was observed in the foot and shoulder regions by comparing characteristic curves of 28 kV and 80 kV. The change in the form of the characteristic curve in the foot region was small, however. Thus, it was revealed that it can be applied to effective light exposure transformation such as the modulation transfer function in the characteristic curve obtained by x-ray energy in the general imaging region. A test of the significance of differences was carried out to compare characteristic curve forms, and the effectiveness of the test results are discussed.

Key words: X-ray energy dependence, Intensification factor, Single emulsion system, Characteristic curve

別刷資料請求先: 〒701-0194 岡山県倉敷市松島316
川崎医療短期大学 放射線技術科 天野貴司 宛

照射を行い、Bednarekらの方法⁴⁾(以下、Bednarek法)を援用して特性曲線を作成するものである。

本研究は、この新距離法を用いて片面乳剤受光系の特性曲線の線質依存性を明らかにすることを目的としている。Vybornyは、特性曲線での線質依存性について五つの要因を挙げている⁵⁾。要約すると①フィルムの銀粒子の構成とX線量子のヒット数、②クロスオーバー効果、③増感紙の前面と後面の感度の変化、④X線が直接感光させる効果、⑤増感紙から放出する二次電子の影響、である。②と③は、両面乳剤受光系で発生し、⑤は、X線エネルギーがかなり高い領域で起こる現象である。したがって、実験の対象とする片面乳剤受光系と管電圧では、これらの要因は無視できる。ここでは、増感紙の蛍光には無関係に直接、X線がフィルムのハロゲン化銀に感光を与え黒化する④の要因に着目した。そこで、ある写真濃度における受光系の一義的な感度表示である増感係数(intensification factor: 以下、IF)を用いて、次の3点を中心に実験を行った。

- 1) X線エネルギーとIFとの関係
- 2) IFの変化が特性曲線に与える影響
- 3) 特性曲線の形状比較

管電圧は28kV(乳房撮影系)から80kV(一般撮影系)までを対象とした。得られた結果から片面乳剤受光系の特性曲線の線質依存性について検討と考察を加え、興味ある結論が得られた。併せて特性曲線の形状の比較に対して有意差検定を実施し、その有効性についても論及した。

1. 実験方法および結果

1-1 X線エネルギーと増感係数との関係

管電圧の違いによるX線エネルギーの変化が、IFにどのように影響し、どの程度変化を与えるか明らかでない。そこでわれわれは、受光系の比感度を求めるときの写真濃度域が、[カブリ濃度+ベース濃度+1.0]であることから、写真濃度1.21(カブリ濃度+ベース濃度+1.0)を得るに必要なIFを、照射線量と写真濃度の関係から求めた。また、管電圧だけでは線質を特定できないので、半価層を測定し実効エネルギー[keV]に換算した値を、各管電圧におけるX線エネルギーとした。そして、各実効エネルギーとIFの関係から、IFの差が最も大きい管電圧の特定を行った。

受光系はコダック株式会社製Min-R2000/Min-R2000を用いた。管電圧が35kV以下では乳房撮影用X線装置(東芝メディカル株式会社製MGU-10C(X線管:同社製DRX-B1256EB-Mo, 公称焦点サイズ:0.4mm, Mo, 付加フィルタ:0.03mm, Mo)), 40kV以上では一般撮影用X線装置(東芝メディカル株式会社製

MODEL DC-1050F(X線管:同社製DRX-2924HD, 公称焦点サイズ:1.2mm/0.6mm,W))を利用した。

各管電圧の付加フィルタは、X線センシトメトリーを前提にして、管電流時間積(以下、mAs)は一定で、SIDが350cmのとき写真濃度が「カブリ濃度+ベース濃度+0.01」となる種類(アルミニウム板と銅板)と厚さを設定した。

半価層の測定は、乳房撮影領域ではVICTOREEN社製の高純度アルミニウム板(品番:07-434, 純度:99.99%)を、一般撮影領域には同社製のアルミニウム板(品番:07-430, 純度:99.0%)および銅板(品番:07-431, 純度:99.0%)を用いた。JIS Z4511(1991)と乳房撮影精度管理マニュアル⁶⁾に準じて行った。

IFは、増感紙を使用しない場合(以下、ノンスクリーン)と使用したときに、同一の写真濃度を得るに必要な照射線量の比として次の式で示される⁷⁾。

$$IF = \frac{E_{no}}{E_{sc}} \dots\dots\dots (1)$$

E_{no} はノンスクリーンの照射線量、 E_{sc} は増感紙を使用した場合の照射線量である。

このIFの逆数の%表示を、X線寄与率(x-ray contribution ratio, 以下、XCR[%])とした。これはX線が直接ハロゲン化銀に作用し、写真濃度として寄与した割合である。

IFの測定の方法は、目的とする管電圧と付加フィルタを設定し、SIDを変化させて写真濃度が1.21程度となる距離に、増感紙を使用した受光系を置き12mAsで照射をした。次に、SIDは変化しないで、mAs値だけを前後に1mAsずつ2段階に変化させ、併せて5段階の照射をした。照射後、コニカ株式会社製自動現像機SRX-502(32.9°C, 90秒)で写真処理を行い、コニカ株式会社製濃度計PDA65を用いて写真濃度を測定した。次に、受光系の位置に線量計を置き、受光系に到達した5段階の照射線量を測定した。線量計は、RAMTEC1000D(チャンバ:PTW-FREIBURG TYPE-No.N23344-664)を用いた。この作業を5回繰り返し行い、その平均を測定値とした。

同様の方法で、ノンスクリーンの場合についても行った。増感紙を使用する場合と比較して、感度が非常に低いのでSIDを短くし、mAs値を5倍ほど高く設定した。5段階照射では、mAs値を前後に5mAsずつ変化させて、フィルムへの照射と照射線量測定をした。

Fig. 1は、管電圧28kVの場合の一例で、照射線量と写真濃度の関係を求めている。写真濃度1.21を得るに必要な照射線量 E_{no} と E_{sc} は、それぞれ4.066[μ C/kg]と0.042[μ C/kg]であった。式(1)によって、IFは97.9となり、XCR[%]は1.02であった。

Fig. 1 Relationship between exposure and photographic density.

Table 1 Relationship between effective energy, intensification factor, and x-ray contribution ratio at each tube voltage.

Tube vol. (kV)	28	35	40	50	60	70	80
Eff. ene (keV)	15.8	18.9	25.5	31.4	35.3	40.8	52.3
IF	97.9	101.1	147.8	142.5	140.8	141.9	151.9
XCR (%)	1.02	0.99	0.68	0.70	0.71	0.71	0.66

Tube vol. : tube voltage
 Eff. ene. : effective energy
 IF : intensification factor
 XCR (%) : x-ray contribution ratio (%)

Fig. 2 Relationship between effective energy and intensification factor.

Table 1 に、各管電圧における実効エネルギーと IF, XCR[%]を示した。また、Fig. 2 に、Table 1 の実効エネルギーと IF の関係を図示した。管電圧 28kV (15.8keV) で IF が最も小さく、80kV (52.3keV) で最大となった。

1-2 IF の変化が特性曲線に与える影響

フィルムを露光する増感紙からの蛍光を減少する目的で、増感紙とフィルムの間にフィルタ (以下、蛍光吸収フィルタ) を挿入して、潜像形成に作用する蛍光

の露光量と X 線による直接の露光量のバランスを故意に変化した。蛍光吸収フィルタは、拡散光濃度 0.5 (透過率 31.6%) の遮光用シートフィルムを使用した。理由は、非常に薄い (0.07mm) ため X 線吸収が少なく、しかもマイクロデンシトメータで濃度変動を確認したが、ほとんどバラツキがないためである。その結果 IF と XCR[%] に生じた変化が、特性曲線に与える影響の割合を 80kV を対象にして確認した。また実験 1-1 の結果で、IF の差が最も大きい 80kV と 28kV に対して、特性曲線を作図して IF と XCR[%] を求め、前項の線量計を用いた測定法の結果と比較した。

1-2-1 X 線センシトメトリーの方法

X 線センシトメトリーは新距離法を適用した^{3,8)}。

Fig. 3 に、新距離法を図示した。SID は 40~350cm の範囲とし、X 線管の基準軸上に任意の最長照射距離 d_0 を定め、計測対象である受光系を置く。ある照射条件で X 線を照射 (以下、基準照射) し、受光系への到達線量を E_0 とする。次にカセットだけを横に移動させ、 d_0 を変更しないで E_0 の 1.5 倍の照射 (以下、倍数照射) をする ($1.5E_0$)。同様に任意の距離 d_1 ($d_0 > d_1$, 以下同様) を定め、先の照射条件で基準照射および倍数照射を行う。距離の逆二乗則と空気による減弱の影響を受け、受光系への到達線量は基準照射線量 E_1 ($E_0 < E_1$, 以下同様)、倍数照射線量 $1.5E_1$ ($1.5E_0 < 1.5E_1$, 以下同様) となる。以下順次 $d_2, d_3, d_4, \dots, d_{n-1}, d_n$ と測定距離を任意に定め、基準照射と倍数照射を繰り返す。Fig. 4 は、特性曲線の一例である。(a) は、基準照射部分と倍数照射部分の各写真濃度値を求め、Bednarek 法に

準じてプロットし、曲線近似して階段状につなぎ合わせを行う。つなぎ合わせは写真濃度 1.21 をかならず通るように統一して行った。(b) は、この方法で得られた特性曲線である。ここで、特性曲線の横軸の比露光量 (対数) 間隔は、基準照射線量に対する倍数照射線量の線量比 (対数) で求める。基準照射線量と倍数照射線量の線量比は線量計を用いて計測し、その実測値をもとに比露光量 (対数) 間隔を決定した。

1-2-2 サンプルの作成

管電圧を 80kV、1-1 の項で特定した付加フィルタで

Fig. 3 Schematic representation of the geometric distribution for x-ray sensitometry.

Fig. 4 Method of construction of a characteristic curve using Bednarek's technique.

サンプルを作成した。最長照射距離 d_0 は350cmにし、蛍光吸収フィルタなし(以下、フィルタ(-)), 1枚挿入(以下、フィルタ(+1)), 2枚挿入(以下、フィルタ(+2))の各条件でX線センシトメトリーを行った。基準照射のmAs値は、フィルタ(-): 10mAs, フィルタ(+1): 26mAs, フィルタ(+2): 58mAsとした。そして倍数照射は、基準照射のmAs値をそれぞれ1.5倍した。これをそれぞれ3回ずつ行い、得られた写真濃度を平均して一本の特性曲線とした。

ノンスクリーンのX線センシトメトリーは、タイムスケール法を用いた。SIDを90cmと35cmにして、10mAsから320mAsまで2倍ずつの割合で照射を行い、得られた低濃度域と高濃度域の2本の特性曲線をつなぎ合わせ一本の特性曲線とした。

管電圧が28kVにおいても全く同様にフィルタ(-)とノンスクリーンの特性曲線を作成した。

Fig. 5 に、80kVで蛍光吸収フィルタが異なる3種

類の特性曲線とノンスクリーンの特性曲線を図示した。比感度は、スプリット法を用いて補正した⁹⁾。同様に28kVのフィルタ(-)とノンスクリーンの特性曲線を示した。ただし、80kVと28kVの異なる管電圧では、受光系に同一の照射線量を与えることが困難なため、両者の間で比感度は補正していない。この実験では、IFを感度の増幅率を表す指標と考えているので、ノンスクリーンの特性曲線を重ねて表示した。

Table 2 は、Fig. 5 で求めた写真濃度1.21におけるIFとXCR[%]である。写真濃度1.21を得るのに必要な比露光量(対数)を、計測対象の特性曲線とノンスクリーンについて求め、それぞれを有効露光量変換し、式(1)に代入して算出した。その結果、蛍光吸収フィルタを加えるごとにIFは減少し、それに伴ってXCR[%]は増加した。また、80kVと28kVにおけるフィルタ(-)のIFは、それぞれ144.6と114.0となり、Table 1 の線量計による計測結果とほぼ一致した。

Table 2 Relationship between filter and intensification factor (x-ray contribution ratio) at 80 kV and 28 kV.

Tube vol. (kV)	Eff. ene (keV)	Filter	Photographic density: 1.21	
			IF	XCR (%)
80	52.3	—	144.6	0.70
80	52.3	+1	40.9	2.45
80	52.3	+2	12.5	8.00
28	15.8	—	114.0	0.88

Tube vol. : tube voltage
 Eff. ene. : effective energy
 IF : intensification factor
 XCR (%) : x-ray contribution ratio (%)
 — : non fluorescence filter
 +1 : fluorescence filter one sheet
 +2 : fluorescence filter two sheet

Fig. 5 Change in relative sensitivity according to differences between tube voltage and filter.

Fig. 6 に, 80kV で得られた蛍光吸収フィルタの異なる 3 種類の特性曲線を, 写真濃度 1.21 で正規化して示した. また, Fig. 7 は, それぞれの階調度曲線である. IF の減少に伴い特性曲線の階調がゆるやかになり, 最終的にはノンスクリーンの形状と一致する.

1-3 特性曲線の形状比較

IF の差が最も大きい 80kV と 28kV において, フィルタ (—) の特性曲線をそれぞれ 10 本作成した. 撮影条件は前項に準じた. そして得られた 10 本の特性曲線の平均と, その標準偏差を求めた. また, 特性曲線から求めた階調度曲線に対し有意水準 5% で paired-t 検定をした.

Fig. 8 は, 平均によって得られた特性曲線と, ある特定の比露光量 (対数) 値における写真濃度の標準偏差

Fig. 6 Comparison figure of the characteristic curve according to differences in filter.

Fig. 7 Comparison figure of the gradient curve according to differences in filter.

である. それぞれの特性曲線は, 写真濃度 1.21 で正規化している. また, Table 3 には, Fig. 8 における写真濃度の平均値とその標準偏差, 変動係数 (coefficient of variation, 以下, CV) を示した. CV は最大で約 2% であった.

Fig. 9 は, 階調度曲線と, ある特定の写真濃度値における階調度の標準偏差である. Fig. 9 の階調度の平均値とその標準偏差, そして paired-t 検定をした結果

Fig. 8 Comparison figure of the characteristic curve at 80 kV and 28 kV.

Fig. 9 Comparison figure of the gradient curve at 80 kV and 28 kV.

をTable 4 に示した。低濃度域と高濃度域において有意水準5%で有意差が認められた。

2. 考 察

増感紙の蛍光体は、入射するX線光子エネルギーに応じた吸収発光効率をもち、その違いが増感紙の感度に影響を及ぼす。今回使用したGd系増感紙は、50.2keVにK吸収端がある。また、フィルム自身の感度もX線エネルギーに大きく依存する。フィルム乳剤中のハロゲン化銀は、25.5keVにK吸収端をもち、一般に吸収端付近において感度がピークとなる¹⁰⁾。これ

Table 3 Relationship between photographic density and coefficient of variation at each log relative exposure.

logRE	Photographic density		CV (%)	
	80 kV	28 kV	80 kV	28 kV
0.32	0.22±0.01	0.23±0.01	2.17	2.08
0.45	0.23±0.01	0.24±0.00	2.03	1.71
0.60	0.27±0.01	0.27±0.00	2.03	1.32
0.75	0.34±0.01	0.35±0.01	2.17	1.33
0.90	0.50±0.01	0.51±0.01	1.65	1.25
1.05	0.78±0.01	0.79±0.01	0.79	0.65
1.20	1.22±0.00	1.22±0.00	0.02	0.01
1.35	1.81±0.01	1.80±0.01	0.58	0.53
1.50	2.42±0.01	2.41±0.01	0.58	0.53
1.65	2.90±0.02	2.90±0.02	0.60	0.54
1.80	3.19±0.01	3.22±0.02	0.34	0.53
1.95	3.34±0.01	3.37±0.02	0.31	0.51
2.10	3.43±0.01	3.47±0.02	0.39	0.59
2.25	3.50±0.02	3.55±0.02	0.52	0.64
2.40	3.56±0.02	3.61±0.02	0.61	0.62

logRE : log relative exposure

CV (%) : coefficient of variation (%)

Table 4 Relationship between gradient curve and t-test at each photographic density.

Photographic density	Gradient		Paired t-test
	80 kV	28 kV	
0.25	0.24±0.03	0.20±0.01	0.00
0.50	1.40±0.04	1.35±0.01	0.00
0.75	2.31±0.03	2.26±0.02	0.00
1.00	3.10±0.05	3.05±0.04	0.02
1.25	3.62±0.05	3.58±0.04	0.09
1.50	3.94±0.05	3.91±0.04	0.22
1.75	4.10±0.05	4.09±0.04	0.49
2.00	4.11±0.06	4.12±0.04	0.90
2.25	3.96±0.06	3.99±0.04	0.30
2.50	3.63±0.06	3.68±0.04	0.07
2.75	3.07±0.05	3.13±0.04	0.00
3.00	2.20±0.05	2.35±0.03	0.00
3.25	1.04±0.10	1.25±0.04	0.00
3.50	0.39±0.08	0.60±0.04	0.00

p<0.05

らを複合した状態で受光系の感度が決定され、Fig. 2 のIFに変化を与える。

Fig. 5 において、蛍光吸収フィルタの条件が異なる80kVの三つの特性曲線は、特性曲線の横軸上で等間隔に平行移動し、その位置で比感度が決定する。使用

した蛍光吸収フィルタが、拡散光濃度で0.5であるから、平行移動した間隔もほぼ0.5となった。また、Table 2の80kVと28kVのフィルタ(−)のIFは、それぞれ144.6と114.0であり、1-1の項で得られた線量計を用いて測定したIFの結果は、151.9と97.9であった。異なる手法を用いて測定した値がほぼ一致したことは、実験の妥当性を示すものである。さらに、Fig. 5から分かるように、写真濃度が変わればIFも変化する。したがって、種々の写真濃度のIFは、特性曲線によって容易に算出できる。

周知のように蛍光露光によって得られる特性曲線とX線露光によるものとは、その形状が大きく異なる¹⁰⁾。Fig. 6に示すように、IFの減少に伴いXCR[%]が増加し、その結果、特性曲線の形状に変化が現れた。このことは、受光系に入射するX線エネルギーの変化によってIFが変化した場合、特性曲線の形状に影響を与えることを意味する。しかし、X線写真中の潜像形成にあずかるのは、増感紙蛍光体からの蛍光が大部分であり、X線自身が直接寄与する割合は小さい。用いた受光系は、感度が高くIFが大きいのでXCR[%]はわずかであり、しかもX線エネルギーの変化に対してそれほどXCR[%]は変化しない。したがって、「その影響は無視できる」とVybornyは述べている⁵⁾。このことは、Fig. 8に示した、28kVと80kVの特性曲線の形状において足部でわずかに変化し、直線部ではよく一致していることから理解できる。しかし、この足部のわずかな変化は、IFの違いの影響と考える。肩部での明らかな形状の違いは、Fig. 6の特性曲線の肩部の変化がわずかであることから、IFの影響とは考えられない。

特性曲線を繰り返して作成するときの精密さは、写真濃度のバラツキや使用機器の安定性が影響する。そこでCVを算出して安定性の確認を行った。Table 3に示したように、CVは最大でも2%であり、良好な精密さを保った。また、Fig. 9の階調度曲線は、特性曲線の変動を強調する一面を持っているので、特性曲線の微妙な変化を反映する。特性曲線の形状比較をする目的で階調度曲線に対してpaired-t検定を導入し、形状に有意差の有無を調べた。Table 4に示すように特性曲線の足部における微妙な形状の変化に、統計学的な有意差があることが確認された。このように、特性曲

線の形状を比較する場合、妥当な方法で検定をする必要がある。ここで階調度曲線に検定を適用したのは、特性曲線では、比較する両者を正規化する際に、その位置によって検定結果に違いが生じるためである。本実験でのBednarek法における階段状のつなぎ合わせを写真濃度1.21で統一し、その写真濃度値で正規化した場合には適用が可能であるかもしれないが、異なる手法で得られた特性曲線を比較する場合には、写真濃度と階調度の関係によって求めた階調度曲線を検定することで、この問題を解決できる。

これまで特性曲線の線質依存性は、「無視できるほど小さい」と言われてきた。しかし、今回の片面乳剤システムを対象としたIFの実験から、IFの変化の割合によっては、線質依存性は無視できないことを確認した。しかし、乳房撮影系の特性曲線を作成する場合、現在の乳房撮影X線装置はSIDを自由に变化することができないものもあり、新距離法の適用が困難な場合もある。そのような場合、線質依存性は無視できないが、形状の違いはわずかであるので、一般撮影X線装置を用いて新距離法を適用し、得られた特性曲線の足部と直線部を乳房撮影領域における特性曲線として代替すれば、変調伝達関数(modulation transfer function: MTF)などにおける有効露光量変換には、十分適用が可能になる。

3. 結 論

- 1) 増感係数を用いて片面乳剤受光系の特性曲線の線質依存性を解析した結果、その足部と肩部に統計学的有意差が確認された。
- 2) X線エネルギーと増感係数との関係で、28kVと80kVにおいて最も増感係数に差が生じた。
- 3) 増感係数の変化が特性曲線に与える影響の割合を確認した。
- 4) 特性曲線の形状比較に有意差検定をして、その有効性を論じた。

謝 辞

本研究の一部は、私立大学等経常費補助金特別補助によった。

参考文献

- 1) 土井邦雄：放射線画像の特性と測定．放射線医療技術学叢書(3)，p.8，日本放射線技術学会，京都，(1988)．
- 2) 滝沢達児，加地昭夫：増感紙とX線像のコントラスト．極光X-ray，19，26-30，(1962)．
- 3) 天野貴司，荒尾信一，北山 彰，他：低エネルギーX線領域におけるセンシトメトリー．放射線医学物理，18(3)，272-278，(1998)．
- 4) Bednarek DR and Rudin S: Comparison of modified bootstrap and conventional sensitometry in medical radiology. Proc SPIE, 233, 2-6, (1980)．
- 5) Vyborny CJ: H and D curves of screen-film systems: factor affecting their dependence on x-ray energy. Med Phys, 6(1), 39-44, (1979)．
- 6) 乳房撮影ガイドライン・精度管理普及班：乳房撮影精度管理マニュアル．pp.56-59，日放技学会放射線撮影分科会，(1996)．
- 7) 増感紙・蛍光板．pp. 19-26，化成オプトニクス株式会社，(1996)．
- 8) 天野貴司，末森慎治，荒尾信一，他：Bednarekの手法を応用した強度スケール法．医用画像情報学会，15(2)，84-91，(1998)．
- 9) 土井邦雄：増感紙フィルム系のMTFとウィナーズスペクトル．pp. 4-6，日本放射線技術学会，京都，(1988)．
- 10) Ter-Pogossian M M：放射線診断の物理．pp. 177-231，朝倉書店，東京，(1970)．

図表の説明

- Fig. 1 照射線量と写真濃度との関係．
Fig. 2 実効エネルギーと増感係数との関係．
Fig. 3 X線センシトメトリーの幾何学的配置の概念図．
Fig. 4 Bednarekの手法を用いた特性曲線の作図法．
Fig. 5 管電圧とフィルタの違いによる相対的な感度の変化．
Fig. 6 フィルタの違いによる特性曲線の比較図．
Fig. 7 フィルタの違いによる階調度曲線の比較図．
Fig. 8 80kVと28kVにおける特性曲線の比較図．
Fig. 9 80kVと28kVにおける階調度曲線の比較図．

- Table 1 各管電圧における実効エネルギー，増感係数，X線寄与率の関係．
Table 2 80kVと28kVにおけるフィルタと増感係数(X線寄与率)の関係．
Table 3 80kVと28kVを対象とした各比露光量(対数)における写真濃度と変動係数の関係．
Table 4 80kVと28kVを対象とした各写真濃度における階調度とt検定の関係．