



Title	X線撮影系の画像の解析(I) X線減弱曲線, ナイフェツ チ像のX線強度分布及び黒化度分布関数の近似
Author(s)	竹中, 榮一; 高橋, 照彦
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1967, 27(4), p. 445-452
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/16002
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

X線撮影系の画像の解析 (I)

—X線減弱曲線, ナイフェッジ像のX線強度分布
及び黒化度分布関数の近似—

東京大学医学部放射線医学教室 (主任 宮川 正教授)

講師 竹 中 榮 一

工業技術院機械試験所

故 高 橋 照 彦

(昭和41年10月31日受付)

Analysis of Radiographic Image Quality (1)

—Approximation of X-ray absorption curves and X-ray intensity and film
density distributions of knife edge—

Eiichi Takenak, M.D.

Department of Radiology (Prof. Dr. T. Miyakawa)

Faculty of Medicine, University of Tokyo, Tokyo, Japan

Deceased Teruhiko Takahashi, B. Eng.

The Government Mechanical Laboratory, Agency of Industrial Science Technology,
Ministry of International Trade and Industry, Tokyo, Japan.

As a base of quantitative radiographic diagnosis, the X-ray intensity and the film intensity distribution of copper knife edge are calculated by the use of electronic computer, and moreover the X-ray absorption curves for copper and aluminum are as follows:

$$\Psi(x) = \text{const} \int_{-l}^{+l} \int_0^{\infty} I_0(\lambda) \cdot \exp \left\{ -\mu_{Al}(\lambda) d_0 - \mu_{Cu}(\lambda) \cdot y(x) \right\} d\lambda \cdot du$$

where I_0 is an intensity of X-ray, μ_{Al} or μ_{Cu} is an absorption coefficient which is a function of wavelength, d_0 is a fixed filter's thickness of X-ray tube, y_b is an oblique path in copper edge and u' is a point on the focus $(+l, -l)$. The more concrete form in copper edge of 1 mm is as follows:

$$\Psi(x) = \text{const} \int_{+0.225}^{1.4} \int_{-l}^{+l} \frac{55\lambda - 12.4}{12.4\lambda^3} \exp \left\{ -0.14 \times 37.93\lambda^{2.87} - 1187.69 \times 0.1\lambda^{2.85} \times y(x) \right\} d\lambda du$$

where X-ray focal size is $2 \times 2 \text{ mm}^2$, d_0 is 1.4 mm, a tension of X-ray tube is 55 kvp. Absorption curves are simply obtained, and there is no difference between the measured and calculated at 55 kvp. The higher tension of X-ray tube, however, has the greater gap between them, which is corrected by a change of integration interval. Film density curve is multiplied by wave-length versus sensitivity function, that is, $\exp(2.05\lambda - 0.598)$. Its intensity and film density distribution curves have almost no difference from the measured.

(高橋氏は大動脈弁症のため1965. 1. 25急逝されました。此の論文を御霊前に捧げ、御冥福を祈ります。)

§1 序 言

X線撮影系ではX線管焦点、増感紙、フィルム又はImage AmplifierやXTVでもPenetrimeter, Edge, Burger チャートなどによる鮮鋭度、コントラスト、解像力などで取扱われて来たが、1つの系として理論に取扱いえなかつた。数年来X線像の伝達について情報理論的な取扱いが漸くなされる様になって来た²⁶⁾。X線像の最大情報量の伝達にはその系の周波数特性や信号対雑音比(S/N)が大きな影響を与える²⁷⁾。情報伝達理論で取扱うとその系の構成要素間のバランスや被写体の空間周波数特性との関係を数学的に取扱いうる利点がある。その基礎として単純な物体のX線による強度分布や黒化度分布の解析が必要である。本論文ではKnife edge について理論的解析を行った。

§2 理論的考察

光学系では任意の形状の物体の像面における強度分布はその系における Impulsive Response の Fourier 変換と物体の強度分布の Fourier 変換との積を Fourier 逆変換したものに等しい。またX線撮影系において最終像は必ず可視像として判別されねばならない。さらにX線写真は物体のコントラストを忠実に再現している必要はなく、多くの場合コントラストの薄いものが多いから最終の可視像ではむしろコントラストの強調された像がのぞましく、像のコントラストの勾配がX線撮影系の画像の解析上有効な物理量になると考へられる。最終的な可視像はX線像の強度分布と直接結びつくものである。光学系の Impulsive response は Impulse の絞りによる回折像であるが、X線撮影系では波長が非常に短いため、殆んど回折現象を考へに入れる必要はない。従つて今散乱を無視しうるとすれば、吸収を考へに入れて幾何学的関係からX線の像面における強度分布を計算により求めることができる。

今 sharp cut なTest piece を物体とするときの物体の透過率と位置関係から求めたフィルム面の強度分布と黒化度分布の計算値と実験値を比較した。

§3 理論的計算式

3-1 X線強度分布及び黒化度分布の一般式

X線波長強度分布には Kulenkampff⁸⁾, Kramer⁹⁾があり、減弱曲線の仮定式から¹⁴⁾⁵⁾⁶⁾²⁾²¹⁾⁷⁾, その分解から²⁵⁾¹²⁾, 又Scintillation spectrometer¹⁷⁾²⁵⁾などで求められているが、連続X線の複雑性から確定的な式はない。又 Edge 像の分布¹¹⁾¹³⁾や黒化能率³⁾¹⁶⁾²³⁾¹⁸⁾についても計算値や測定値がある。我々はX線撮影系の画像の解析を行う上に必要な情報を得るためにこれを総合した式を導いた。

今現象を一次元で取扱うとしてX線管焦点の強度分布を $f(u)$, 物体の強度分布を $F(x')$, 像面における強度分布を $\phi(x)$ 及び黒化度分布を $K(x)$ とすると次の式が成立する。

$$\phi(x) = \int_u \int_{\lambda} I(\lambda, \theta) f(u) F(x') du d\lambda d\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K(x) = \int_u \int_{\lambda} I(\lambda, \theta) f(u) F(x') S(\lambda, V_s) du d\lambda d\theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

但し $I(\lambda, \theta)$ は波長及びX線束が主線軸となす角との関数である。 θ を一定とすれば λ のみの関数と考へてよい。 $S(\lambda, V_s)$ は黒化能率の波長と式圧 V_s の関係を示す関数である。計算を簡便に行うために焦点を単峰性単位高短形波分布 $(-1, 1)$ を考へ、Knife edge の被写体のときは $F(x')$ として $e^{-\mu(\lambda)t(x')}$ を考へれば良い。

但し μ は線吸収係数でX線の波長 λ の関数であり、 t は Edge をX線束の通過する長さである。

(1) (2) を書きかえると

$$\phi(x) = \int_{-1}^1 \int_0^{\infty} I(\lambda) \exp\{-\mu(\lambda)t(x')\} du d\lambda \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$K(x) = \int_{-1}^1 \int_0^{\infty} I(\lambda) \exp\{-\mu(\lambda)t(x')\} S(\lambda, V_s) du d\lambda \quad \dots\dots\dots (4)$$

3-2 X線強度分布とアルミ及び銅の減弱係数

焦点からのX線強度分布を $I_0(\lambda, \theta)$ そのうち波長 λ から $\lambda + d\lambda$ の間のX線強度を $d\lambda I$ が十分小さくとして $I_0(\lambda, \theta) d\lambda$, 厚さ d の吸収層を通過した後の減弱された強度を $I_d(\lambda, \theta)$ とする。我々の実験では厚さ 1.4mm のアルミニウムの固定フィルターがあり、被写体として銅板厚さ 1mm が挿入されている。減弱の程度を表はす全減弱係数は光電効果

による吸収と散乱に基因する（本実験の範囲で）。この係数を μ とすると μ は物体に固有な量で波長と原子番号 Z の関数であり、いろいろの関係式が出されている¹⁹⁾¹⁰⁾。アルミでは $0.25\text{\AA}$ より短い短波長側では両対数グラフの直線にのらず、これは散乱による効果が大きいことを示す。 $0.25\text{\AA} \sim 4\text{\AA}$ の範囲では完全に直線にのり¹⁰⁾、 $\mu/\rho = 14.1\lambda^{2.87}$ となる。

本実験では使用X線の限界波長が $0.225\text{\AA}$ であり $0.225\text{\AA} \sim 0.25\text{\AA}$ の間の非直線性の効果は問題にならない。銅では $0.15\text{\AA}$ 以下では散乱の効果が目立ち始めるが、限界波長以下で問題とならない。又銅では $1.29\text{\AA} \sim 1.5\text{\AA}$ の間に選択吸収があるが¹⁰⁾、 $1.4\text{\AA}$ 以上の長波長を除けば、 $\mu/\rho = 133\lambda^{2.85}$ の関係が成立する。AlとCuについて μ を波長 λ の関数として表はすと、(Fig. 1, Fig. 2)

$$\left. \begin{aligned} \mu_{\text{Al}} &= 37.93\lambda^{2.87} \quad (\rho=2.69) \\ \mu_{\text{Cu}} &= 1187.69\lambda^{2.85} \quad (\rho=8.93) \end{aligned} \right\} \dots\dots(5)$$

又 $I_0(\lambda)$ については Kulenkampff⁸⁾の与えた式が本実験の電圧の範囲内でも該当するとすれば

Fig. 1 X-ray Wave-length versus Mass Absorption Coefficient for Copper

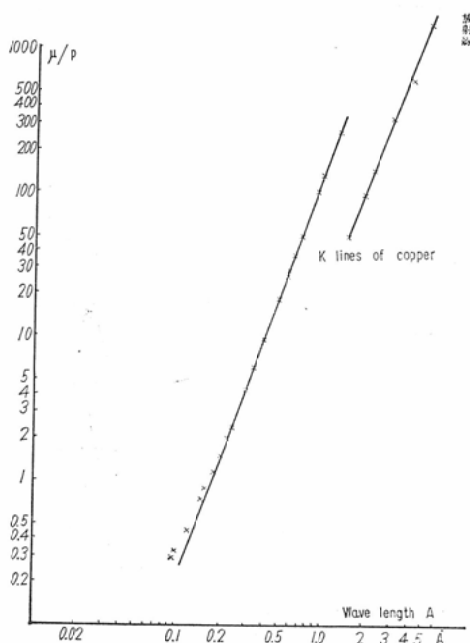
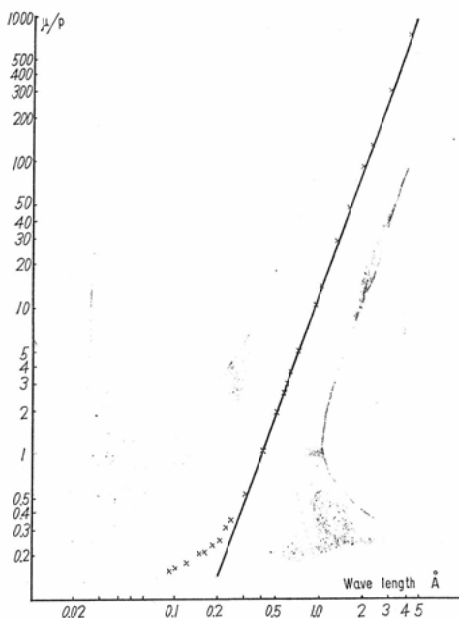


Fig. 2 X-ray Wave-length versus Mass Absorption Coefficient for Alminum



$$I_\lambda = kC^2Z \left[\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0 \lambda^3} + aZ \right] \dots\dots(6')$$

$$\doteq kC^2Z \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0 \lambda^3} \dots\dots(6)$$

Z :原子番号, λ_0 :限界波長, k :常数, C :光速である。

又 Duane-Hunt の実験式⁴⁾から限界波長 λ_0 と使用電圧の波高値 V_s (単位KV)の間には

$$\lambda_0 = \frac{12.4}{V_s} \dots\dots(7)$$

の関係がある。

3-3) X線の黒化能率

(2)(4)式における $S(\lambda, V_s)$ についてはX線フィルムでは感光乳剤としてはAgBrが大部分で数%のAgIを含んでいるといはれるが、AgとBrの原子の吸収端が $0.4845\text{\AA}$ と $0.9181\text{\AA}$ にあつて選択吸収の飛躍がおり、波長と電圧の関係については多くの測定結果がある。高橋の値²³⁾を対数グラフにプロットして見ると (Fig. 3)

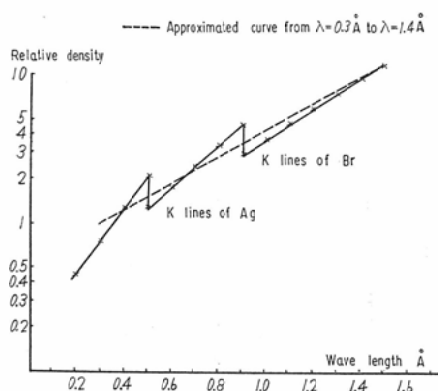
$$0.4845\text{\AA} > \lambda > 0.2\text{\AA} \quad S(\lambda) \doteq 0.17 \times 10^{2.14\lambda}$$

$$0.9181\text{\AA} > \lambda > 0.4845 \quad S(\lambda) \doteq 0.25 \times 10^{1.89\lambda}$$

$$\lambda > 0.9181\text{\AA} \quad S(\lambda) \doteq 0.34 \times 10^{1.03\lambda}$$

これらの式から今 $V_s=55\text{kvp}$ の場合を考えると

Fig. 3 Relative Sensitivity Curve of Photographic Emulsion for Monoenergetic X-ray



限界波長 $\lambda_0 = 0.225\text{\AA}$ であり、またこの範囲の電圧では有効波長はたかだか $1.4\text{\AA}$ 程度迄考へればよい。Ag と Br の吸収飛躍の起るのは $0.4845\text{\AA}$ と $0.9181\text{\AA}$ であるから $0.3\text{\AA}$ と $1.4\text{\AA}$ の範囲を有効にカバーする様な近似曲線として

$$S(\lambda) = 0.55 \times 10^{0.59\lambda} \quad 1.4\text{\AA} > \lambda > 0.3\text{\AA}$$

$$\text{即ち} \quad = \exp(2.05\lambda - 0.598) \quad \dots\dots\dots (8)$$

をとる。

3-4 被写体—焦点—フィルムの幾何学的関係

これらの関係を第4図の様に次の如くとする。

V_0 : 焦点より物体迄のX線主軸上の距離、

t : テストピースの厚さ、

Y_0 : 物体からフィルム (像面) 迄の距離

L : 焦点から主X線軸上フィルム迄の距離

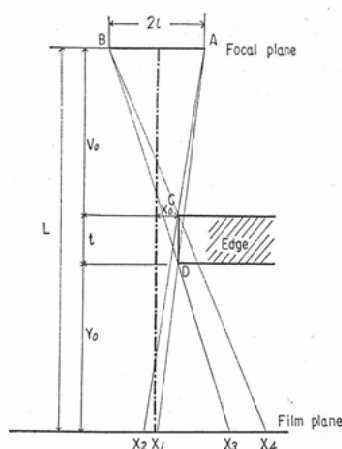
x_0 : X線主軸上から物体迄の距離

更に焦点A B点 ($2l$)、テスト板の一端の前後をCDとし、AD、AC、BD、BCが夫々フィルム面と交る点を X_1, X_2, X_3, X_4 とするとこれらは次の様になる (Fig. 4)

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= (Lx_0 - Y_0)/(V_0 + t), \\ X_2 &= \{Lx_0 - (Y_0 + t)l\}/V_0, \\ X_3 &= (Lx_0 + Y_0)/(V_0 + t), \\ X_4 &= \{Lx_0 + (Y_0 + t)l\}/V_0, \\ L &= Y_0 + t + V_0. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

(9)式から Knife edge の影の作るフィルム上の黒化度の変化を次の様にする。1) $x_0 \geq l$ なら

Fig. 4 Geometric Relations between Focus, Object and Film Plane



ば X_1 から X_4 間で、2) $l \geq x_0 \geq -l$ ならば X_2 から X_4 の間で、3) $x_0 \leq -l$ ならば X_2 から X_3 の間にかけてフィルム上の黒化度が夫々の始めの点から段々減少する。1)2)3)のとき黒化度の減少し始める $X_1X_2X_3$ を夫々に α とする。

3-5 a ($X \leq a$) Edge の影にないとき、又はフィルターのときの減弱曲線及び黒化度分布

焦点A BからのX線は遮ぎられることなくフィルムに到達する。その強度は

$$I(\alpha) = \int_0^\infty \int_{\theta(u=l)}^{\theta(u=-l)} I(\theta, \lambda) d\theta d\lambda, \\ \theta = \tan^{-1} \frac{X_0 - u}{V_0 + t} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$I(\theta, \lambda)$ は主X線軸とX線の照射方向とのなす角 θ の関数であり、 $I(\theta)$ についてはデータがある²⁰⁾。

(3) 式から銅及びアルミによる減弱は固定フィルターアルミ $d_0\text{cm}$ 、銅又はアルミの厚さを $d\text{cm}$ とすると

$$\text{Cu: } \phi(x) = \int_{-l}^l \int_0^\infty I(\lambda) \exp\{-\mu_{Al}(\lambda) d_0 - \mu_{Cu}(\lambda) d\} d\lambda du \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{Al: } \phi(x) = \int_{-l}^l \int_0^\infty I(\lambda) \exp\{-\mu_{Al}(\lambda) d_0 - \mu_{Al}(\lambda) d\} d\lambda du \quad \dots\dots\dots (12)$$

黒化度分布のときは (11), (12) = (8)式の $\exp\{2.05\lambda - 0.598\}$ をかければ良い。

$x_0 \approx 0$ の範囲で $V_s = 55\text{kvp}$, $l = 1\text{mm}$, Alの厚

さ 1.4mm, $\lambda = 0.225\text{\AA} \sim 1.4\text{\AA}$ について黒化度分布を求めると (11) に (5) (6) (7) (8) を代入して

$$K(x) = 2\text{const} \int_{x=\alpha}^{1.4} \frac{55\lambda - 12.4}{12.4\lambda^3} \exp\{-0.14 \times 37.93\lambda^{2.87} + 2.05\lambda - 0.598\} d\lambda \quad \dots\dots\dots (13)$$

厚さ 1 mm の Cu 板が入ると

$$K(x) = 2\text{const} \int_{x=\alpha}^{1.4} \frac{55\lambda - 12.4}{12.4\lambda^3} \exp\{-0.14 \times 37.93\lambda^{2.87} - 1187.69 \times 0.1 \times \lambda^{2.85} + 2.05 - \lambda - 0.598\} d\lambda \quad \dots\dots\dots (14)$$

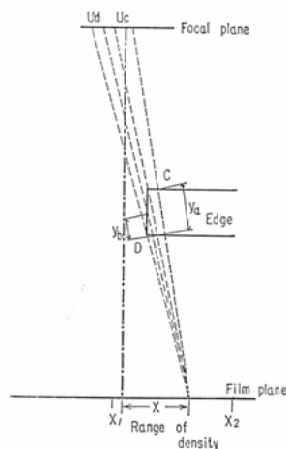
銅及びアルミの厚さをかえて $\exp\{2.05\lambda - 0.598\}$ を除けば、即ち (11) (12) 式から銅及びアルミの減弱曲線を容易に得る。

波長強度分布で Wang¹⁷⁾ 0.6Å 以下 (5kvp), 金森²²⁾ 0.6Å 以下 (80~120kvp), Bell²⁾ 0.5Å 以下 (100kvp), Greening⁵⁾ 0.9Å 以下 (90kvp), 松沢²⁵⁾ 1Å 以下 (50kvp) Jenning⁷⁾ 2Å 以下といろいろあるが、1.4Å 迄とすれば十分である。

3-5-b $X > a$ のとき

X線束の一部分は物体巾を斜めに横切り吸収をうけて減弱する、物体中の光路長を Fig. 5 の如く、 y_a, y_b とし、これとフィルム上の X と焦点 u との関係は (Fig. 2)

Fig. 5 Geometric Relations between Focus and Absorption Path in Copper-Edge



$$\left. \begin{aligned} y_a &\doteq t \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{X-u}{L} \right)^2 \right] \\ X > x_c \quad y_b &\doteq \left[\left(\frac{X-x_o}{X-u} \right) L - Y_o \right] \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{X-u}{L} \right)^2 \right) \\ X \leq x_o \quad y_b &\doteq \left[\left(\frac{u-x_o}{u-X} \right) L - V_o \right] \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{X-u}{L} \right)^2 \right) \\ \text{又は} \quad y_b &\doteq \left[\left(\frac{x_o-u}{X-u} \right) L + Y_o + t \right] \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{X-u}{L} \right)^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

また X と c, X と D を連ねる直線が u 軸を t 切る点を u_c, u_o とすれば

$$\left. \begin{aligned} u_c &= X - \frac{L}{Y_o + t} (X - x_o) \\ &= \frac{Lx_o - VX}{Y_o + t} \\ u_D &= X - \frac{L}{Y_o} (X - x_o) \\ &= \frac{Lx_o - (V_o + t)X}{Y_o} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

となる。そのときのフィルム上の強度分布は次の様になる。

$$1) \quad X \geq x_o, \quad l \geq u_c \leq u_D$$

$$\begin{aligned} I(X) &= \int_{u_c}^l \int_{x_o}^{x_1} I_o(\lambda) \exp\{-\mu_{Al}(\lambda) d_o \\ &\quad - \mu_{Cu}(\lambda) y_a(X)\} d\lambda \, du \\ &\quad + \int_{u_D}^{u_c} \int_{x_o}^{x_1} I_o(\lambda) \exp\{-\mu_{Al}(\lambda) d_o \\ &\quad - \mu_{Cu}(\lambda) y_b(X)\} d\lambda \, du \\ &\quad + \int_{-l}^{u_D} \int_{x_o}^{x_1} I_o(\lambda) \exp\{-\mu_{Al}(\lambda) d_o\} d\lambda \, du \quad \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

$$2) \quad X \leq x_o, \quad l \geq u_D \leq u_c$$

$$\begin{aligned} I(X) &= \int_{u_D}^l \int_{x_o}^{x_1} I_o(\lambda) \exp\{-\mu_{Al}(\lambda) d_o \\ &\quad - \mu_{Cu}(\lambda) y_a(X)\} d\lambda \, du \\ &\quad + \int_{u_c}^{u_D} \int_{x_o}^{x_1} I_o(\lambda) \exp\{-\mu_{Al}(\lambda) d_o \\ &\quad - \mu_{Cu}(\lambda) y_b(X)\} d\lambda \, du \\ &\quad + \int_{-l}^{u_c} \int_{x_o}^{x_1} I_o(\lambda) \exp\{-\mu_{Al}(\lambda) d_o\} d\lambda \, du \quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

アルミは焦点に近く且、 $V_o = 80\text{cm} \sim 160\text{cm}$ 故 $d_o = \text{一定}$ と考へてよい。フィルム上の黒化度分布 (ベース濃度を引いた) は $\exp\{2.05\lambda - 0.598\}$ をかければよい。

§4 計算結果及び考察

1) 減弱曲線について (Fig. 6, 7, 8, 9)

Fig. 6 Absorption Curves of Aluminum for X-ray at 55 kvp

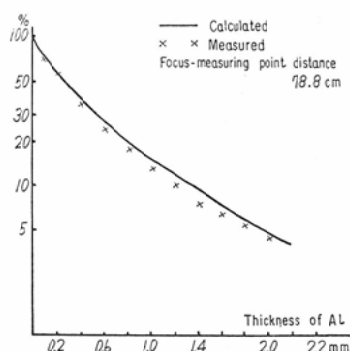


Fig. 7 Absorption Curves of Aluminum for X-ray at 110 kvp

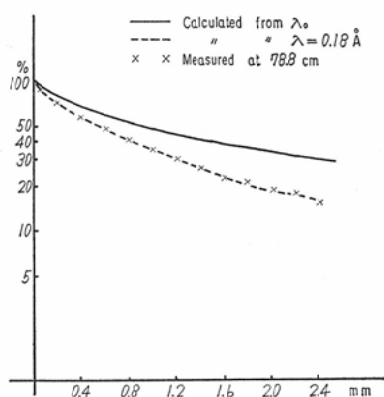


Fig. 8 Absorption Curves of Copper for X-ray at 55 kvp

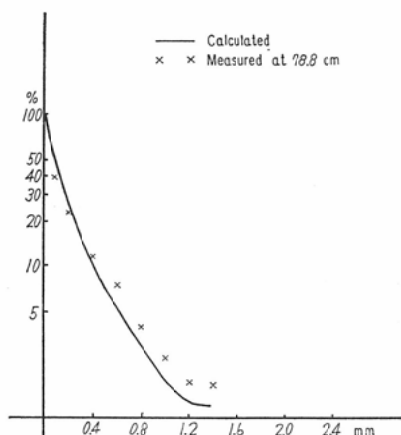
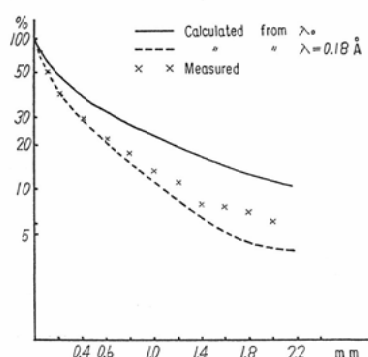


Fig. 9 Absorption Curves of Copper for X-ray at 110 kvp



銅及びアルミニウムの減弱曲線を診断領域の電圧55kvp, 85kvp, 110kvp について計算した。管電圧55kvp では非常に良く一致する。10%減弱で2%位差がある。85kvp, 110kvp では計算値が高くでてくる。散乱を考慮に入れてないためであろう。何れも限界波長から計算したがアルミニウムのとき85kvp で0.22Å, 110kvp のとき0.18Å, 銅のとき85kvp 0.21Å, 110kvp のとき0.21Åから積分すると良く一致する。

積分範囲の一定値変更という操作で実測値と近似する事ができる。連続X線の波長強度分布とし

Fig. 10 Film Density and X-ray Intensity Distribution of Knife Edge

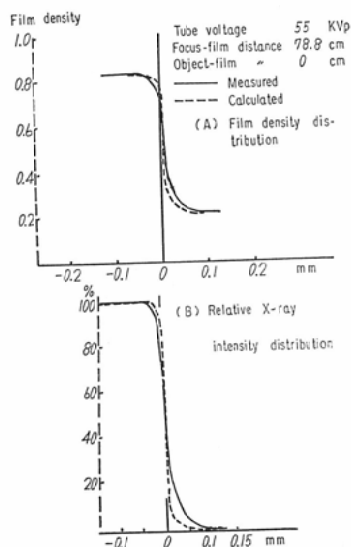


Fig. 11 Film Density and X-ray Intensity Distribution of Knife Edge

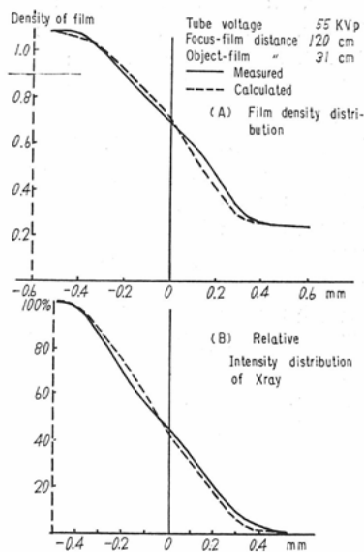
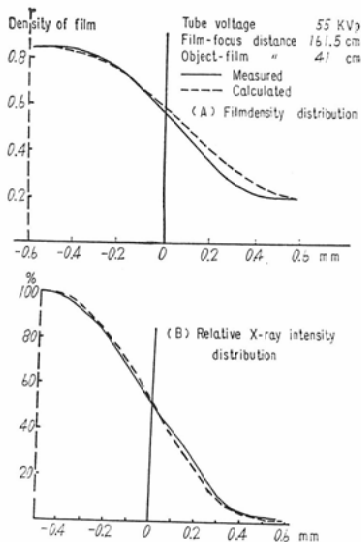
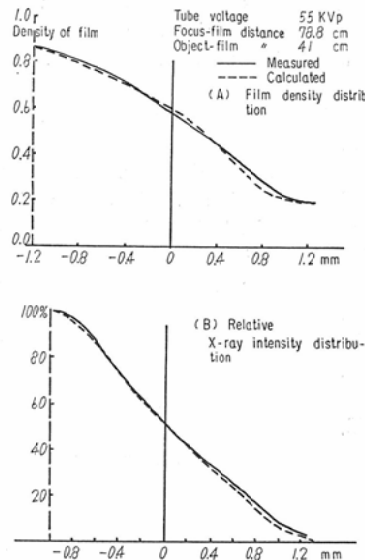


Fig. 12 Film Density and X-ray Intensity Distribution of Knife Edge



て Kulenkampff の式を使つたが、減弱曲線の実測値から計算したり (松沢ら), Greening や Jones や江藤らの求めた方法 などあるが、我々は減弱式を用い、更に Cu-Edge の強度分布や黒化度分布を求めるために前者の式を使用した。減弱曲線に標準といはれるもの¹⁵⁾もあるが、我々の装置に

Fig. 13 Film Density and X-ray Intensity Distribution of Knife Edge



関する実測値と比較した。

2) Edge 像の場合の黒化度分布及び強度分布
電圧55kvp, 焦点 2×2 , 拡大率 $\times 1$, $\times 1.35$, $\times 2$ の場合の計算値と実測値を示す, 密着しないときはほぼ一致する。黒化度分布は relative なものである。密着のときの実測は両面フィルムによるものであり, 計算の方が sharp になっている。

§5 結 論

銅のKnife edgeのフィルム面の強度分布及び黒化度分布を計算により求めて実測値と比較したがよい一致を得た。又銅及びアルミニウムの減弱曲線も55kvp で実測とよく一致し、高圧では積分範囲の変更でよい一致を得た。

(註) 本論文の一部は第11回応用物理学関係連合講演会 (1964. 3. 31) 及び第23回日本医学放射線学会総会 (1964. 5. 15) に発表した。御校閲下さった宮川正教授, NHK基礎研木下幸次郎博士, 機械試験所辻内順平博士に深く感謝します。

文 献

- 1) Cormack, D.V., et al.: Brit. J. Radol. 28 : 605, 1955.
- 2) Bell, G.E.: Brit. J. Radiol. 9 : 680, 1936.
- 3) Bouwers, A.: Acta Radiol. 4 : 368, 1933.

- 4) Duane, W., and Hunt, F.L.: Phys. Rev. 6 : 166, 1915.
- 5) Greening, J.R.: Brit. J. Radiol. 20 : 71, 1947.
- 6) Jones, D.E.A.: Brit. J. Radiol. 13 : 95, 1940.
- 7) Jennings, W.A.: Brit. J. Radiol. 26 : 193, 1953.
- 8) Kulenkampff, H.: Ann. der Phys. 69 : 548, 1922.
- 9) Kramer, H.A.: Phil. Mag. 46 : 836, 1923.
- 10) Landolt-Börnstein : Zahlenwerte und Funktionen 1 Band 1 Teil Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1950.
- 11) Morgan, R.H.: Am. J. Roentgenol. 62 : 870, 1949.
- 12) Neboschew, A.F.: Strahlentherapie 92 : 449, 1953.
- 13) Rossmann, K.: Am. J. Roentgenol. 87 : 387, 1962.
- 14) Silberstein, L.: Phil. Mag. 15 : 401, 1918.
- 15) Taylor, L.S., and Singer, G.: Radiology 22 : 445, 1934.
- 16) Wagner, E.: Ann. der Phys. 46 : 863, 1915.
- 17) Wang, P.K.S.: Brit. J. Radiol. 30 : 70, 1957.
- 18) Hine, G.J., and Brownell, G.L.: Radiation Dosimetry. Academic Press Inc. New York, 1956.
- 19) 江藤秀雄ら編集. 放射線医学, 医学書院, 1959.
- 20) 江藤秀雄, 土屋武彦. 日医放誌, 14 : 460, 1953.
- 21) 江藤秀雄 : 15 : 617, 1955.
- 22) 金森仁志 : 23 : 565, 1963.
- 23) 高橋喜久雄. X線物理実験法. 丸善, Co, 1931.
- 24) 竹井力. 日医放誌, 19 : 1266, 1959.
- 25) 松沢秀夫 : 13 : 492, 1953.
- 26) 宮川正, 田坂皓, 竹中栄一, X線機能診断文部省科学研究費班会議資料, 37— 2—2, 1962.
- 27) 竹中栄一, 高橋照彦, 木下幸次郎, 佐藤英久, 第12回応用物理連合講演会予稿集 p. 276, 1965.