# 第11編　特　殊　撮　影

# 第 11 編　特殊撮影

## 第 1 章　解　説

名大医・放射線科　　佐々木 常 雄

この項に属する特殊撮影には断層撮影，拡大撮影などがある。これらの撮影法において断層撮影ではボケの問題，解像度の改良に関する問題，拡大撮影では鮮鋭度の問題，拡大可能範囲の問題などが論ぜられる。これに関して，レスポンス関数を応用して説明，解析すると，管球焦点，フィルム，増感紙など撮影に関与する色々の因子が同一の尺度で論ぜられ，分析は簡易明瞭となる。

断層撮影は普通のX線写真ではX線が被写体のある厚みを通過し，その重複像からX線像がなりたっている。これを被写体の一定の深さの一平面のみを観察しようとするのが断層撮影である。すなわち物体のある点を撮影する場合，物体を固定しX線管球を最初の点から一定点まで移動する間に，フィルムも管球移動と平行に逆方向に移動する。この間に物体内のある点は常にフィルムの定位置に投影され，X線像として結像する。しかし物体内のある点を含む面内にない点はフィルム上にX線像として結像しないで，線として引き伸ばされ，暈かされてしまう。この管球の移動方式には水平移動方式と，円運動方式とがある。後者がサーカストモグラフィーである。このさい暈けは幾何学的に考えると目的の面以外の点はすべて暈去されることになるのであるが，暈けの範囲が少ない場合はこの暈去は不完全となり点として残り障害陰影となる。X線管球の回転角は通常臨床的には 40〜60° であるので，断層される面は 1〜3mm 程度の厚味となる。暈けは対比度の強い骨，金属では強く暈去されにくいが，軟部組織ではこれに比し暈去され易い。

次に拡大撮影はX線像から体内組織の微細な所見をえようとするものである。今，管球焦点を$F$，被写体$AB$，X線像を$A'B'$とする。管球被写体間距離$a$，被写体フィルム間距離$b$，とすると，$A'B'=a+b/2\times AB=(1+b/a)AB$ なる幾何学的関係がある。$1+\frac{b}{a}=\alpha$ が拡大率となる。一方管球焦点は点ではなく，ある大きさを有するので，その大きさを$F$，半影の大きさを$H$とすると，$H=\frac{b}{a}F=(\alpha-1)F$ なる幾何学的関係がある。半影は拡大率が大きくなると大きくなる。

鮮鋭度は拡大撮影で最も重要なる因子で，暈けを 0.2 mm以下に抑えることが必要である。X線管球焦点の拡大能力以上に拡大撮影を試みても無意味となる。例えば 0.3 mm の焦点を有するX線管球では 2 倍拡大撮影が限度である。50 $\mu$ の焦点を有するX線管球では 4〜6 倍の拡大撮影が可能ということになる。

また拡大撮影で問題となるのは被写体の動揺による暈けである。撮影に当ってはこれを防止するため

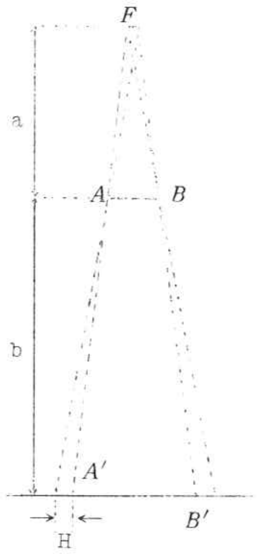
断層撮影の原理


管球移動 $A-B$，
フィルム移動 $A'-B'$。

に固定を十分に行い，心拍連動装置を使用し心臓の休止期にX線撮影を行うなどの配慮が必要である。

（佐々木記）

拡大撮影の原理



# 第２章　レスポンス関数よりみた拡大撮影の至適拡大倍率

名古屋大学医学部放射線医学教室（主任：高橋信次教授）
綾　川　良　雄
佐久間　貞　行
愛知県がんセンター研究所放射線部（主任：北畠隆部長）
奥　村　　　寛

## 緒　言

現在，拡大撮影と言えば，焦点の大いさ２５～５０μの微小焦点回転陽極管球[1)2)]（以下微小焦点管球と略記）による直接４倍拡大撮影[3)～8)]他と焦点の大いさ０.３ｍｍの小焦点回転陽極管球（以下小焦点管球と略記）による直接２倍拡大撮影[9)]他とが臨床に応用され，好結果を得ている。余等はこの２つの焦点管球による拡大撮影の拡大倍率が適正であるか否か，又もし最も適正な拡大倍率があるとすればそれは奈辺にあるかに就いて，この２つの管球にて種々の拡大率の拡大撮影を行い，客観的画像評価の一具としてレスポンス関数の概念を導入して考察せんとする。

## 研究方法及び研究材料

実験に使用したＸ線発生装置は東芝製特型，微小焦点回転陽極管球（焦点の大いさ２５～５０μ，フィルター０.５ｍｍAl 及び東芝製ＫＸＯ－１２型，小焦点回転陽極管球（焦点の大いさ０.３ｍｍ，フィルター０.５ｍｍAl ）である。フィルムは Fuji medical KX，増感紙は極光 FS である。test piece は Optiker-Funk 社製のもので *Pb* 50μ厚の矩形波をなしている。その *Nr*. 5769，*Nr*. 5863，line pairs/mm 0.5～10.1 を用いた。*FFD* を 100 *cm* 一定とし，焦点ーテストピース間距離を可変にして拡大率を定めた。撮影条件は微小焦点管球では２次電圧を110KVP，小焦点管球では 80KVP と一定にし，*mAS* は各々の拡大率に応じて適正濃度即ち特性曲線の直線部分にのる濃度を得る様に選んだ。

拡大率は微小焦点管球に就いては，１倍，２倍，３倍，４倍，５倍，６倍，８倍，１０倍，２０倍である。小焦点管球に就いては，１倍，２倍，４倍，１０倍である。撮影したフィルムは Elema-schönander 社製自働現像装置を使用して，現像定着処理を行った。実験はテストピースを上記種々拡大率にて拡大撮影を行い，フィルムを Densitometer(Narumi 社製２５０型）にかけ，scanning spot の大いさを50μ（操作方向）×300μ，scanning spot の speed を $1\frac{1}{6}$ mm/min. paper の speed を $46\frac{2}{3}$ mm/min にして濃度曲線（図１）を求め，同一時期に同一管電圧で求めた夫々の特性曲線にプロットして，光強度分布をＸ線強度分布に変換して，矩形波レスポンス関数を算出した。[10)11)] 矩形波レスポンス関数から正弦波レスポンス関数への変換には Coltman の式[10)]を用いた。

## 結　果

1. 図２，図３は微小焦点管球を用いた場合のレスポンス関数である。説明を便ならしめるために分けている。図２は，１倍，２倍，３倍，４倍のもので，拡大率を大きくするにつれて全空間周波数領域でレスポンスはよくなり，４倍が最もよい。図３は５倍，６倍，８倍，１０倍，２０倍のもので，低空間周波数領域では拡大率の大きい程レスポンスはよいが，高空間周波数領域では順次逆転して，５倍，６倍，８倍，１０倍，２０倍の順にレスポンスは悪くなる。図２，図３を比較すると，４倍，３倍のレスポンス関数は可成の高空

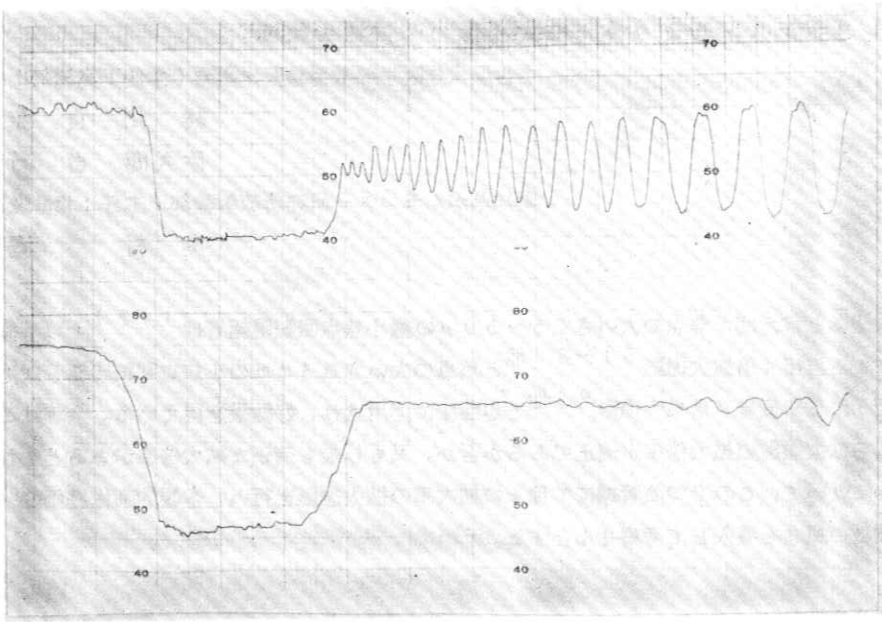


図１　濃度曲線（拡大率　４倍）
上段は微小焦点管球のもので，下段は小焦点管球のものである。

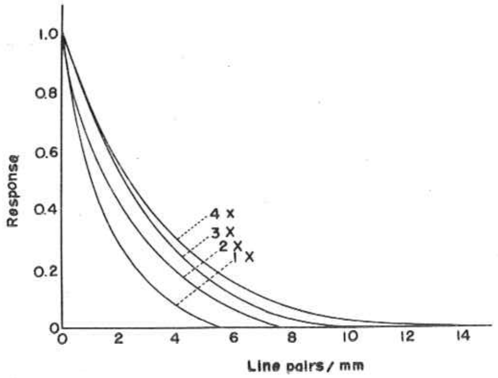



図２　微小焦点管球による拡大撮影の
レスポンス関数

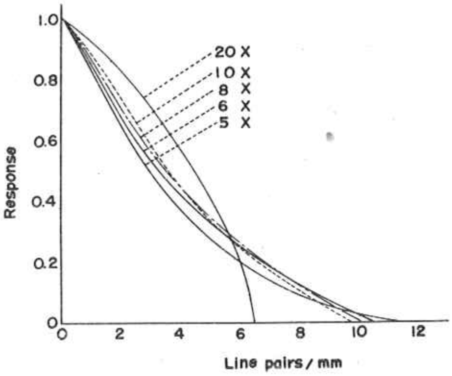



図３　微小焦点管球による拡大撮影の
レスポンス関数

間周波数領域まで伸びており，5倍，6倍，8倍，１０倍の順にこれに続く。２０倍の解像力は2倍と1倍の間にあり，6.3 line pairs/mm である。拡大撮影ではより微細構造の判別がつき，より多くの information を与える拡大率が拡大撮影の至適拡大倍率ということになる。今，図2，図3をみるに4倍が最も高空間周波数への伸びがよい。次いで，3倍，5倍，6倍，8倍，１０倍，２倍，２０倍，1倍の順である。従って微小焦点管球による拡大撮影の至適拡大倍率は4倍であると言える。

2. 図4は小焦点管球を用いた場合のレスポンス関数である。1倍，2倍，4倍，１０倍の順に全空間周波数領域でレスポンスは悪くなる。従って，この実験結果から小焦点管球では1倍が最もよく，2倍以上の拡大撮影を行う意味は少い様に思われる。

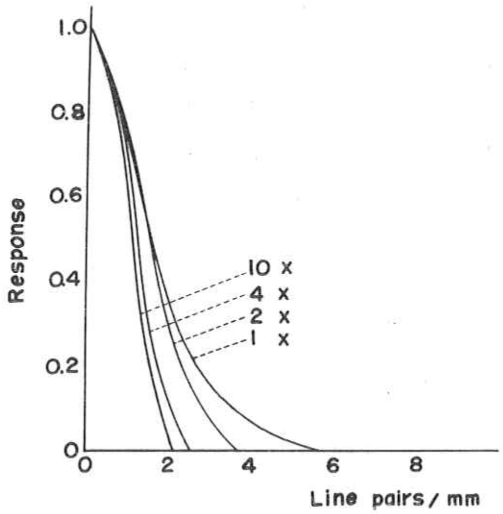



図4　小焦点管球による拡大撮影のレスポンス関数

考　按

拡大撮影の至適拡大倍率について，高橋等[13)15)]は実験的考察から，佐柳[14)]は理論的考察から論じているが，レスポンス関数は全周波数に亘っての定量的評価であるから，在来の方法より優ると考えられるので，この方法で吟味しなおしてみた。小焦点管球による拡大撮影は結果から明らかなように2倍以上の拡大の意味は少いと考えられるが，これは余等の実験では拡大率を整数倍にした為で，もし実数倍を選べば，至適拡大率は1〜2倍の間にあるといってよい。[17)] 同様に，微小焦点管球に就いても3〜5倍の間，就中4倍の近傍にあると考えられよう。これは高橋等[12)13)15)]が実験的考察から拡大率は3〜5倍がよく，精々6倍が限度であるとした結果と可成よく一致している。X線撮影系の総合レスポンス関数はX線管焦点の大いさ，被写体，フィルム，増感紙等種々の因子が定まれば求められる。又個々のレスポンス関数の積として表わされる。[18)他] 拡大撮影の場合，焦点の大いさが大きな因子となり，焦点の大いさが定まれば，拡大撮影の至適拡大倍率は容易に算定可能である。[19)他] 然るに余等の微小焦点管球の焦点の大いさは２５〜５０ $\mu$ と言われている[13)16)]が実際の大いさはどのくらいか不明である。ピンホール法は使えない。[12)] しかし拡大率の異る2つの拡大撮影のレスポンス関数とフィルム一増感紙系のレスポンス関数が判れば，フーリエ逆変換により焦点の大いさの線強度分布を求める事は可能である。これに就いては別報にて述べる。フィルムは現在医療用として臨床に繁用されているものの一つを，増感紙は普通臨床に用いられている中で最も粒状性の少いものを使用した。

臨床的にみて現時点に於いて多用されている組合せの一つと考えられるからである。被写体には５０ $\mu$ 厚の *Pb* のテストピースを用いたから厳密には 50$\mu$ 厚の *Pb* の拡大撮影に就いてレスポンス関数から考察を加えた事になるわけである。勿論，拡大率を除いた他の条件は同一であるから，至適拡大率に就いて云

々する事は妥当である。

## 結　論

現在臨床的応用が為されている余等の微小焦点管球と0.3ｍｍの焦点管球による直接拡大撮影の至適拡大率に就いて，レスポンス関数の概念を導入して考察を行った。実験により行われたレスポンス関数の比較検討により，至適拡大倍率は微小焦点管球による拡大撮影では4倍である。0.3ｍｍの焦点管球では2倍以上の拡大撮影の意味は少い。

## 文　献


1) Takahashi, S. & Yoshida, M., Acta radiol., 48, 280, (1957)
2) Takahashi, S., Watanabe, T., & Shiga, K., Nagoya. J. med. Sci., 20, 231, (1958)
3) Takahashi, S., Sakuma, S. & Sugie, Y., Fortschr. Röntgenstr., 92, 294, (1960)
4) Sakuma, S., Tohoku. J. exp. Med., 82, 242, (1964)
5) 徳永修，日医放誌，19，2315，(1960)
6) 高橋信次，佐久間貞行，診療，15，657，(1962)
7) 佐久間貞行，古賀佑彦，日医放誌，21，627，(1961)
8) 高橋信次，佐久間貞行，古賀佑彦，臨床放射線，9，378，(1964)
9) Biichner, H., Fortschr. Röntgenstr., 80, 71, (1954)
10) Coltman, J., J. Opt. Soc. Amer. 44, 468, (1954)
11) Schade, O., RCA Rev., 9, 246, (1948)
12) 高橋信次，最新医学，12，2046，(1957)
13) 吉田三毅夫，日医放誌，17，32，(1958)
14) 佐柳和男，応用物理，26，134，(1957)
15) 高橋信次，吉田三毅夫，エックス線特殊診断法協議会資料(1957)
16) 高橋信次，渡辺令，日医放誌，17，77，(1957)
17) Büchner, H., Fortschr. Röntgenstr., 80, 502, (1954)
18) Morgan, R., Am. J. Roentgenol., Rad. Therapy & Nuclear Med., 88, 175, (1962)
19) 土井邦雄，応用物理，34，190，(1965)


## 質　問　討　論

竹中：チャートを示してほしい。125KVP では相当透過するだろう。

綾川：オプチーケル・ブンク社製テストチャート。

内田：レスポンスは焦点のものか。

綾川：フィルムのものだ。

内田：フィルムのレスポンスは拡大によって変らないし，スクリーンも変らないから焦点のものでないか。したがって適当な倍率を一つもとめておけば他の倍率は換算出来る。

土井：焦点とともにチャートも倍率がかかるから換算できる。

津田：吸収体を入れたとき当然変って来るが……。

高野：面をそのまま濃度測定したのか。フォトメーターの補正はしたか。倍率は。

綾川：両面測定した。補正していない。５倍。

菊地：資料送りの速度，その他使い方について。

内田：矩形波から正弦波えの換算は。

綾川：コルトマンで０.５から行った。

内田：*O* までの間は外挿だ。

土井：勾配が少ないから補正が楽なはず，黒化度が変ると *RF* は変るか。

綾川：変る。

土井：増感紙の方は。

綾川：やっていない。

佐久間：とくにやっていないが再現性は低い。現像によって特性曲線が変りやすいので同一時期，同一現像を行なっているが，拡大と直接の比較が目的で *OTF* の再現までやっていない。

荒　：Ｘ線量の変化は。

綾川：適正濃度になるようにした。

菊地：フィルムのγは。

佐々木：特性曲線をとってあるからγは測っていない。

土井：散乱線に関して，周波数成分を変えるものと，フレアーの成分とがあるとのことだが図にはフレアーの成分は除外してあるのか。

綾川：除外してある。

土井：どうして除外してあるのか。散乱線を含めたものの方がブッキー・グレーデル効果等がはっきりする

高野：１倍でロイヤルブルーとＫＸの差がなく４倍で差があるのは確実か。

佐久間：現像液にも問題がある。

津田：いろんな *RF* が入っていて相乗したものが出て来ているからそれほど誤差がないのではないか。

土井：いろんなものが入って来るから差が無くなることも言える。最適拡大倍率だが０.３×０.３ｍｍで文献がある。増感紙等で差が出るがそれもやっていただいたらどうか。１９５６年佐柳のもの。

金森：５０μ厚さでエッヂ効果は出たか。

綾川：出た。

内田：直接用のＫＸでエッヂ効果はでたか。出そうとするが出ない。

高野：レンドールにヴィスコースを入れると出やすい。

竹中：ノンスクリーンで片面２～３μで出る。

# 第３章　X線撮影系の画像の解析（Ｖ）
## —拡大率を変化させたときのX線像のレスポンス関数の変化（３−５）

東大医放射線医学教室　　竹　中　栄　一
工業技術院機械試験所　　髙　橋　照　彦

X線直接拡大撮影をしたとき，X線管焦点のレスポンス関数が如何に変るか？　又X線管焦点の強度分布の方向の影響と増感紙のレスポンス関数及び肉眼のレスポンス関数の関係について調べた。

方法(1)

拡大率をかえた場合のレスポンス関数は Cu Edge を増感紙なしで密着撮影し，その黒化度分布を，同時撮影したアルミニウムと銅の階段で之をX線強度分布に変換し，Lagrange の5点微分法で微分し，之を Fouric 変換した。（文献[1]を見よ）

撮影条件

(1)　管電圧 55KVP 管電流 30〜40mA

焦点の大きさ………………………1×1 $mm^2$, 2×2 $mm^2$（公称）

焦点フィルム間距離………………78.8 cm

増感紙なし

両面フィルム（Sakura NY）‥20℃　5分コンドール現像

拡大率………………………………×1.1，×1.2，×1.3，×1.5，×1.7

二峰型焦点の強度分布のピークの方向に対して直角方向と平行方向

(2)　Fig. 9 における拡大率 ×2.21，×3.01，レスポンス関数は Siemens star により測定したものであり，焦点の大きさ 1×1 $mm^2$, X線管電圧 55KVP, X線管電流 40mA,片面フィルム（Sakura NY Type 乳剤と同一乳剤）焦点強度分布ピークの方向と平行な方向のレスポンス関数である。[2]

(3)　Fig. 9 の増感紙のレスポンス関数は *FS*, *MS*, *HS*, について，Edge 法にて測定したものである。*F-F-D* 160 cm, 管電圧 55KVP, 焦点1×1，(1)(2)(3) は何れもカセツラは使用してない。

結果及び考案

(1)　Fig. 1 及び Fig. 2 には焦点1×1，焦点強度分布のピークの方向と直角及び平行な方向に Edge をおいたときのレスポンス関数をスペクトルで示してある。

Fig. 3，4，5，6に焦点1×1，2×2について焦点強度分布のピークの方向と直角及び平行な方向に Edge をおいたときのレスポンス関数の cosine 成分を示してある。Sine 成分は無視し得る程小さい。

(2)　拡大率が大になるにつれ焦点の強度分布のピークの方向と Edge の方向が直角のときと平行のときの

差が明らかである。X線撮影系の画像の解析(Ⅱ,Ⅲ)に述べた様に密着撮影のときより焦点の大きさの影響が明らかとなる。

今撮影倍率$\alpha$,焦点面($u-v$),像面($x$, $y$)とすると $u=\frac{x}{\alpha-1}$, $fuc/(\alpha-1)=fxc$

焦点のフーリエ変換の Cutoff frequency を $fuc$, 拡大撮影したときの Cutoff frequency を $fxc$ とする。

故に后述の如く $\alpha=2$ のときの Cutoff frequency を $f_1$ とすると拡大率 ×1.1,×1.2,×1.5,×1.7,×2.2,×3.01のとき夫々 Cutoff frequency は夫々 $10f_1$, $5f_1$, $2f_1$, $1.4f_1$, $0.84f_1$, $0.5f_1$ となる。

上記拡大率のときの Cutoff frequency $fc(MTF=0)$ は夫々 5.8, 2.8, 0.93, 0.62, 0.42, 0.24 lines/mm (Fig. 9) であるので,2倍拡大に近い×2.2を標準にとると夫々の Cutoff frequency は 11.6, 5.6, 1.9, 1.24, 0.84, 0.48 となり実測値の $fc$ に極めて近い値を与えている。

拡大率3.0,2.2は片面フィルムを使用しているが,その他のは両面フィルムを使用しているので ×1.1,×1.2,×1.5,×1.7のがやや悪くなっているので,片面フィルムで実験すればこれらの関係は理論通りであり,Edge法と Siemens star と極めて良い近似を示している。

(3) First 及び Second cutoff frequency

次に Fig. 7, Fig. 8 には焦点の大きさ 1×1 mm$^2$, 2×2 mm$^2$ のとき,焦点強度分布のピークの方向と直角及び平行な方向に Edge をおいたときのレスポンス関数から,First cutoff frequency $f_1c(MTF=0)$, Second cutoff frequency $f_2c$ ($MTF=0$)を求めて夫々の関係を示してある。$f_1c$の4つの曲線の相互関係は整然としており,之から拡大率1.0のときの値を extrapolate できる。X線像の画像の解析(Ⅱ,Ⅲ)に示した値に近い値が得られる。$f_2c$ではバラツキがやや大きくなる。

(4) 増感紙のレスポンス関数との関係

Edge 法で増感紙($FS$, $MS'$, $HS'$)のレスポンス関数との関係を見ると拡大率×1.2が$MS$ Typeの増感紙のレスポンス関数に略々対応する。

拡大率 1.1 以下なら $FS$, $MS'$, $HS'$ どれでも増感紙のレスポンス関数がフィルム,増感紙組合せ系のレスポンス関数に大きく影響し,拡大率2倍以上なら増感紙の影響が殆んどない事を示す。但し焦点1×1 mm$^2$で2倍拡大撮影では勿論高周波の Cut が大きく,臨床的に用いられていない。最適拡大率については2峰形焦点,3峰型焦点では理論的に出すのは複雑である。

(5) 肉眼のレスポンス関数との関係

5—1 普通写真の倍率

体厚 20 cm,撮影目的臓器が体表から5cm以上の深さにあると仮定する。焦点フィルム間距離を$D$とすると大凡次の様である。

胸部撮影($D=180$ cm) 拡大率 ≒ 1.1〜1.05

消 化 器 （$D=$ 40 cm） 拡大率 ≒ 1.35～1.1

（$D=$ 60 cm） 〃 ≒ 1.2 ～1.07

骨 撮 影 （$D=$100 cm） 〃 ≒ 1.05～1.1

5－2 肉眼のレスポンス関数との関係

拡大率×1.1で$FS'$増感紙を使用したとき，その組合せ系のレスポンス関数は肉眼のレスポンス関数（明視距離 25 cm） とほゞ同一となる。上記普通X線写真の倍率から考えると $FS$ 増感紙を使用しても肉眼のレスポンス関数以下になるときがある。$MS'$ では殆んど凡ての場合肉眼のレスポンス関数以下になる。レスポンス関数の点からのみいえば倍率 ×1.15以上（焦点1×1 $mm^2$），増感紙なしなら（例えば骨撮影－四肢）肉眼のレスポンス関数そのままで知覚される事を示す。

## 結 論

拡大率をいろいろと変化させた場合のレスポンス関数及び Cutoff frequency（$MTF=0$）を求め，拡大率との関係を調べた。更に増感紙のレスポンス関数と拡大率の関係を考察し，普通X線写真の倍率と増感紙と組合わせたときのレスポンス関数と肉眼のレスポンス関数との関係を明らかにした。

## 参 考 文 献


1） 竹中，高橋：RII資料集2－6，3－3。

2） 竹中，木下，高橋，佐藤：第二回応物学会関係講演会，190.

3） 竹中，木下，佐藤：RII資料集5－5.


Fig. 1. Modulation Transfer Function of Radiographic System in Variable Magnifying Ratio

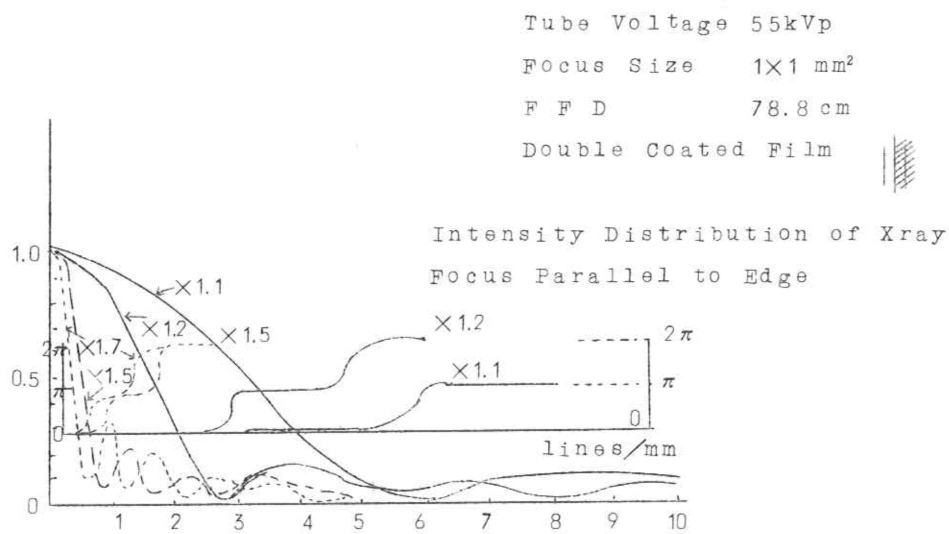


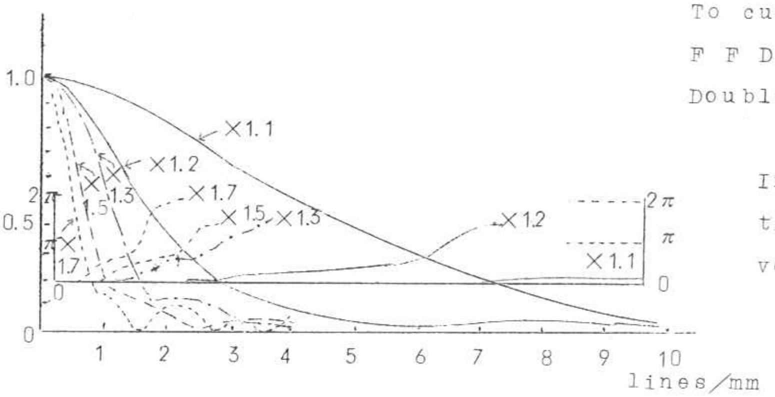
Fig. 2 Modulation Transfer Function of Radiographic System in Variable Magnifying Ratio

Tube Voltage 55kVp

To cus Size 1×1mm²

F F D 78.8cm

Double Coated Film




Intensity Distribution of Xray Focus vertical to Edge

Fig. 3 Modulation Transfer Function of Radiographic System in Variable Magnifying Ratio

Tube Voltage 55kVp

Double Coated Film

Focus Size 1×1mm²

F F D 78.8cm

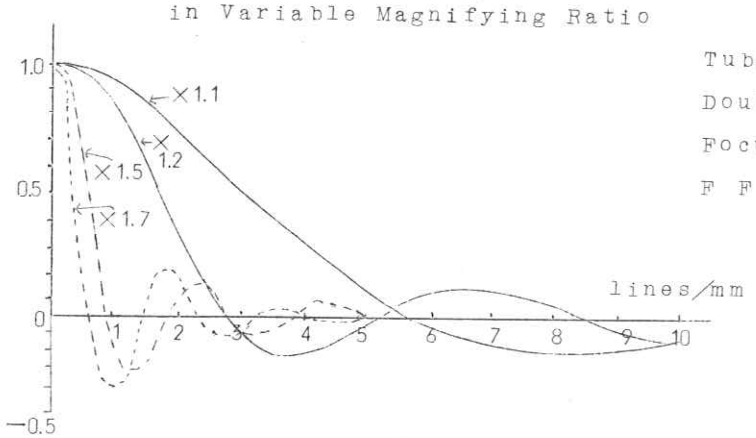



Fig. 4 Modulation Transfer Function of Radiographic System in Variable Magnifying Ratio

Tube Voltage 55kVp

Focus Size 1×1mm²

F F D 78.8cm

Double Coated Film

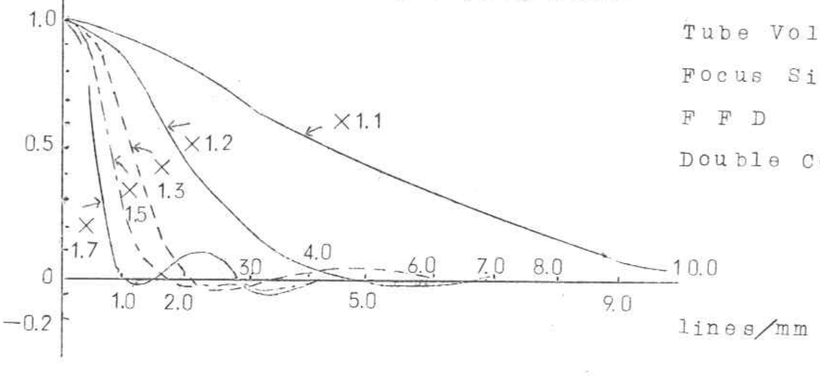


Fig. 5 Modulation Transfer Function of Radiographic System in Variable Magnifying Ratio

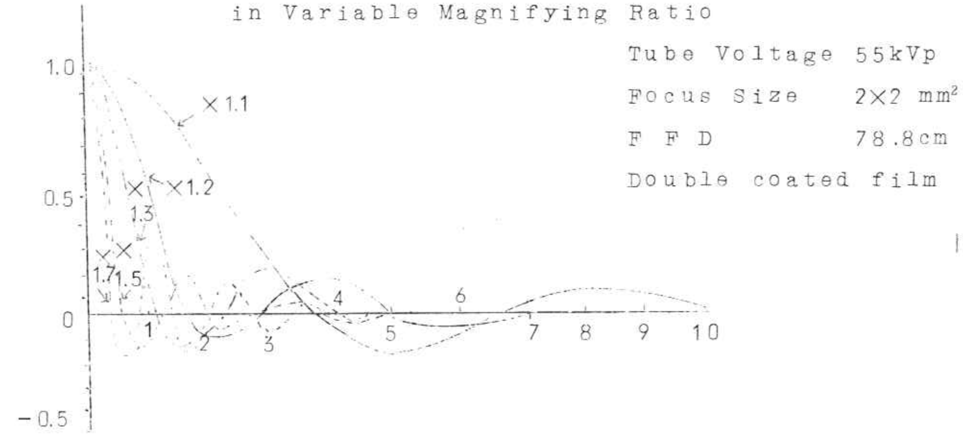



Fig. 6 Modulation Transfer Function of Radiographic System in Variable Magnifying Ratio

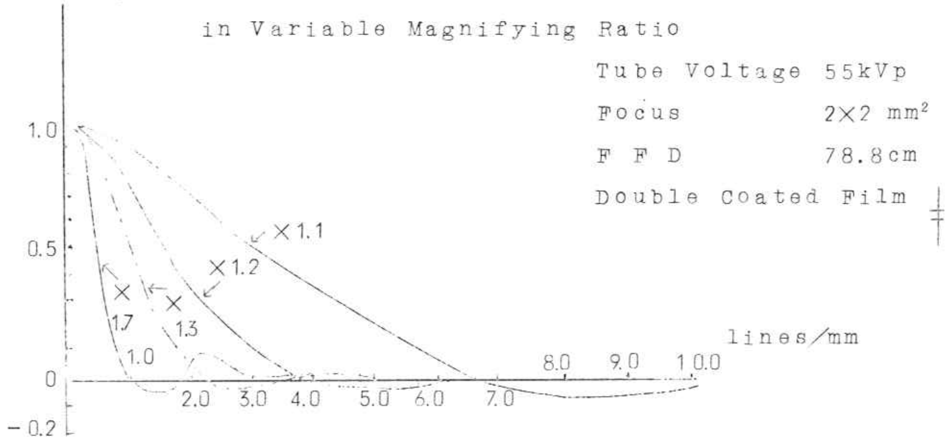



Fig. 7 The First Cutoff Spatial Frequency in Magnifying Radiographic System

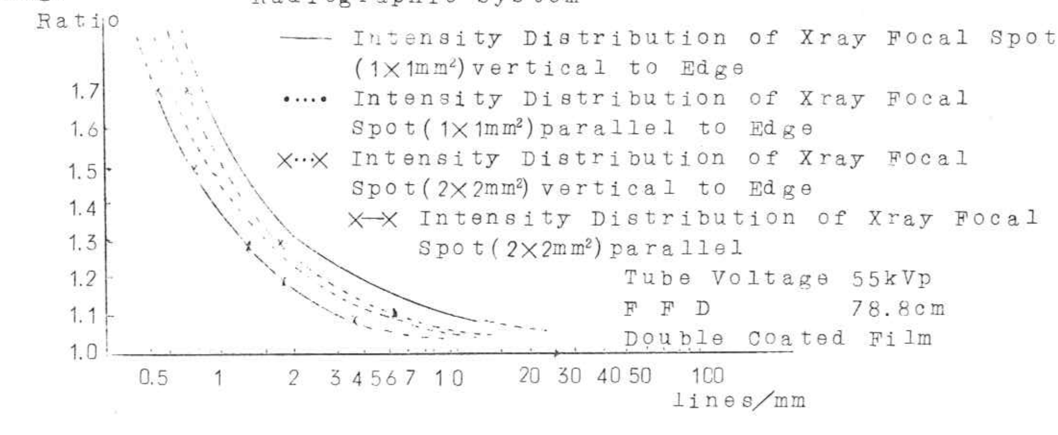


Fig. 8 The Second Cutoff Spatial Frequency in Magnifying Radiographic System

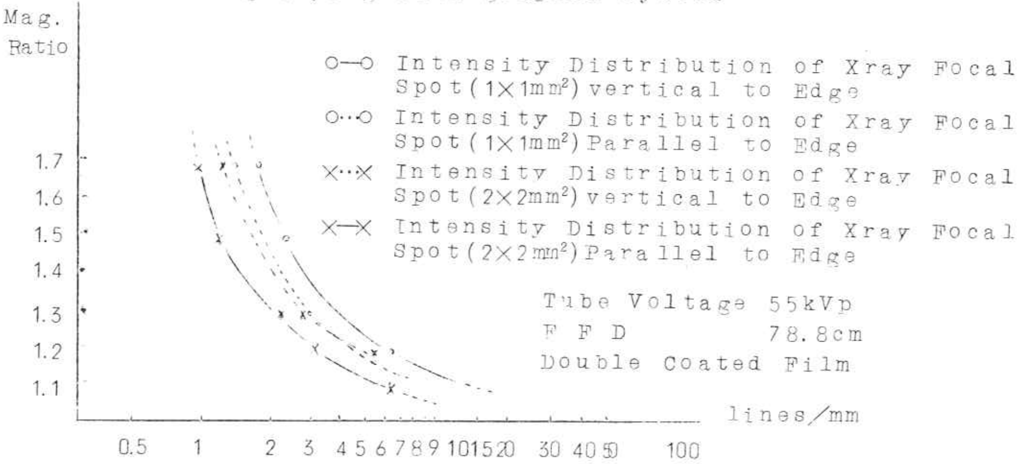



Fig. 10 MTF in Enlargement Radiography, Intensifying Screen and Eyes

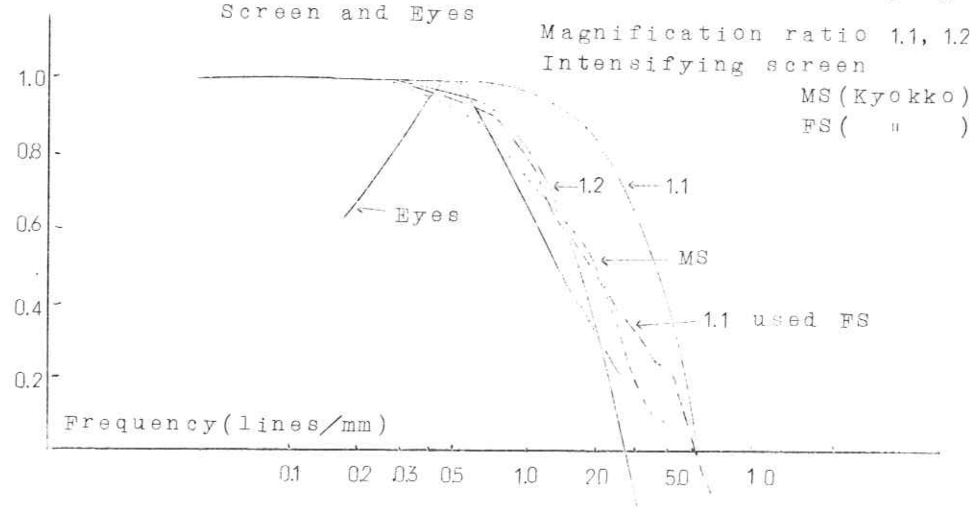
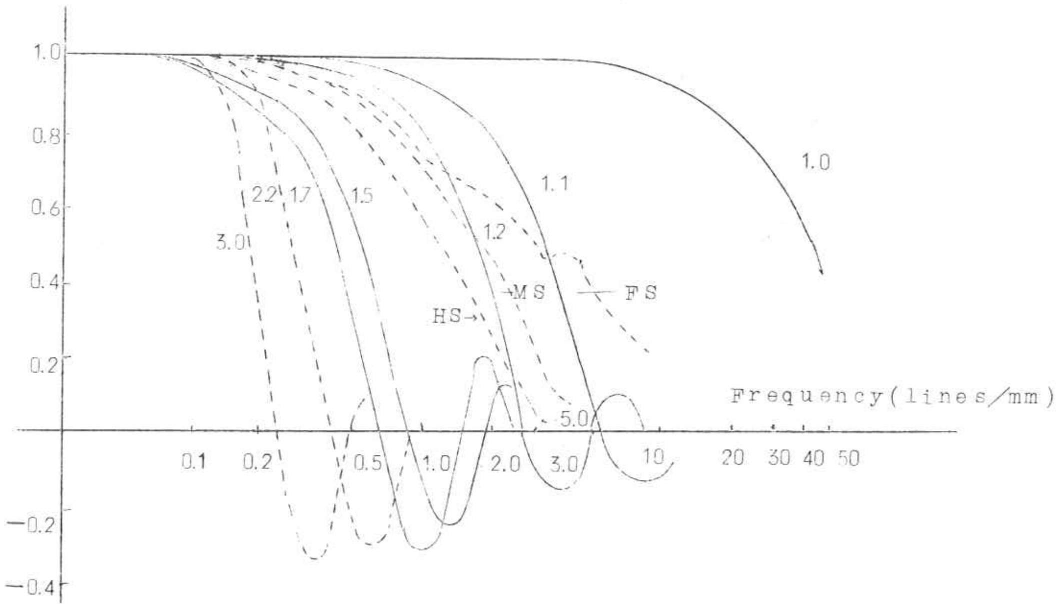


Fig. 9 MTF in Enlargement Radiography

Magnificatio ratio 1.0, 1.1, 1.2, 1.5, 1.7, 2.2, 3.0
X-ray tube voltage 55KVp
X-ray focal spot size 1/1mm
MTF parallel to twin peaked intensity distribution of focal spot
Intensifying screen FS(Kyokko)
MS( 〃 )
HS( 〃 )



# 第 4 章　断層撮影像のボケのフーリエ解析

内　田　勝

大阪大学医学部附属診療X線技師学校　大阪府豊中市柴原 32

## 1. 緒　言

Bocage[1] によつて始められた断層撮影装置はその後，増感紙の発達にともない，Ziedses des Plantes[2] や Manuel de Abreau[3] の考案になる同時多層撮影法とあいまつて，多くの人々によつて詳細な研究が続けられ，近年に至つて医学，工学上欠くことのできない装置となつている．

最近，X線撮影系の諸問題が空間周波数領域で取り扱われるようになり[4]，断層撮影においても運動のレスポンス関数[5,6]が論議されている．

断層撮影のフィルム像は，被写体の必要な断層面の像と，その他の多くの断層面のボケ像が重なる，いわゆる障害陰影とから成り立つている．被写体の厚さと，その透過後のX線強度とは線型にならない．そこで，運動するX線管焦点像の空間周波数特性だけを扱うときは，断層写真の空間周波数特性は，各断面に関して運動する焦点像の空間周波数特性の和として表わされる．

本報告では，この和の構成要素である各断面に関して運動する焦点像の空間周波数特性と，斜入X線による増感紙，フィルムのレスポンス関数とから断層写真像のボケを解析する．運動方式は円弧型，平行型，円軌道型，撮影術式は1枚撮りと多層断層，これらについて計算と実験を行なう．

## 2. 断層撮影系の空間周波数特性

一般に，1方向移動型断層撮影系の空間周波数特性表示はつぎのようになる．ある管電圧のX線源によつて，断層中心に存在する平面被写体を $-\theta_0$ から $\theta_0$ まで断層撮影する．$\theta$ は入射X線とフィルム面上にたてた鉛直線とのなす角である．

いま，被写体の透過率を被写体面での座標で $p(x_3, y_3)$，焦点，増感紙，フィルムの点像強度分布をそれぞれの座標で $h(x_2, y_2, \theta)$，$s(x_1, y_1, \theta)$，$f(x, y, \theta)$ とする．ここで，$x, y$ 各方向を考え $p(x_3)$，$h(x_2, \theta)$，$s(x_1, \theta)$，$f(x, \theta)$ のような1次元の分布をとり扱う．

像面における最終像の強度分布 $z(x)$ はつぎの convolution 積分で与えられる．

$$z(x)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0}\iiint_{-\infty}^{\infty} p(x_3)\, h(x_2-x_3, \theta)\, s(x_1-x_2, \theta)\, f(x-x_1, \theta)\, dx_3 dx_2 dx_1 d\theta \tag{1}$$

これを $x$ についてフーリエ変換すると，

$$\hat{z}(\omega)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0}\int\cdots\int_{-\infty}^{\infty} p(x_3)\, h(x_2-x_3, \theta)\, s(x_1-x_2, \theta)\, f(x-x_1, \theta) \exp(-j2\pi\omega x)\, dx_3 dx_2 dx_1 dx d\theta$$

$$=\int_{-\theta_0}^{\theta_0} \hat{p}(\omega)\, \hat{h}(\omega, \theta)\, \hat{s}(\omega, \theta)\, \hat{f}(\omega, \theta)\, d\theta \tag{2}$$

となる．ここに，$\hat{z}(\omega)$ などの ＾ は $z(x)$ などのフーリエ変換を表わすものとする．

ある入射角 $\theta$ の焦点のレスポンス関数 $\hat{h}_\theta(\omega)$ の表示は次式で示される．

$$\hat{h}_\theta(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} h_\theta(x) \exp(-j2\pi\omega x)\, dx$$
$$=A_1-jA_2$$
$$=|\hat{h}_\theta(\omega)| \exp(-j\delta_\omega) \tag{3}$$

$$A_1=\int_{-\infty}^{\infty} h_\theta(x) \cos 2\pi\omega x\, dx \tag{4}$$

$$A_2=\int_{-\infty}^{\infty} h_\theta(x) \sin 2\pi\omega x\, dx \tag{5}$$

$$|\hat{h}_\theta(\omega)|=\sqrt{A_1{}^2+A_2{}^2} \tag{6}$$

$$\delta_\omega=\tan^{-1}\frac{A_2}{A_1} \tag{7}$$

ただし，$\omega=0$ のとき，$|\hat{h}_\theta(\omega)|=1$，$\delta_\omega=0$ になるように正規化してある．$\hat{h}_\theta(\omega)$ は一般に空間周波数 $\omega$ の複素値関数であるから，これを表示するにはその絶対値 $|\hat{h}_\theta(\omega)|$ と位相 $\delta_\omega$ を明示するのが適当である．

同様に，円軌道型断層撮影においても，$\theta$ をX線管焦点の運動角とすれば，最終像の強度分布 $z(x, y)$ はつぎの convolution 積分で与えられる．

$$z(x, y)=\int_0^{2\pi}\iint\cdots\int_{-\infty}^{\infty} p(x_3, y_3)\, h(x_2-x_3, y_2-y_3, \theta)\, s(x_1-x_2, y_1-y_2, \theta)\, f(x-x_1, y-y_1, \theta)\, dx_3 dx_2 dx_1 dy_3 dy_2 dy_1 d\theta \tag{8}$$

これを $x, y$ についてフーリエ変換すると，

$$\hat{z}(\nu, \tau)=\int_0^{2\pi}\iint\cdots\int_{-\infty}^{\infty} p(x_3, y_3)\, h(x_2-x_3, y_2-y_3, \theta)$$

$$s(x_1-x_2,\ y_1-y_2,\ \theta)$$
$$f(x-x_1, y-y_1, \theta)\exp(-j2\pi(\nu x+\tau y))$$
$$dx_3dx_2dx_1dxdy_3dy_2dy_1dyd\theta$$
$$=\int_0^{2\pi}\widehat{p}(\nu,\tau)\,\widehat{h}(\nu,\tau,\theta)\,\widehat{s}(\nu,\tau,\theta)\,\widehat{f}(\nu,\tau,\theta)\,d\theta \tag{9}$$

となる.

## 3. 運動する焦点の線像および点像強度分布とそのフーリエ変換

### 3.1 円弧型断層撮影

**Fig. 1** において，X 線管焦点の位置は断層中心を原点，$Z$ 軸を鉛直方向，X 線管の運動する平面を $X$–$Z$ 平面とするように $X$ 軸，$Y$ 軸をきめた直角座標系で表示する．また，焦点像のフィルム面での座標は焦点が $Z$ 軸上にあるときの実効焦点像の中心を原点，$x$ 軸，$y$ 軸はそれぞれ $X$ 軸，$Y$ 軸に平行にとる．$\theta$ の正負は $Z$ 軸から $X$ 軸の負の方へはかつた角を正にとる．焦点の中心から原点と $Z$ 軸上の被写体位置を見込む角 $\beta$ は，$\theta$ の正のとき正，負のときは負とする．系全体では距離の逆 2 乗による減弱を考え，部分的には平行X線として近似する．

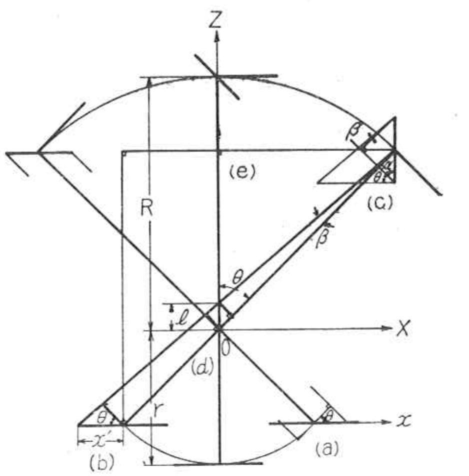



**Fig. 1** Reference diagram for calculations of the line spread intensity distributions, on single layer radiographs, of X-ray tube focus in the case of Tomography.

実効焦点の倍率 $r/R$ の点像強度分布を $f(x, y)$ とすれば，$x$ 軸および $y$ 軸方向の線像強度分布 $f_1(x), f_2(y)$ は

$$f_1(x)=\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\,dy \tag{10}$$

$$f_2(y)=\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\,dx \tag{11}$$

となる．また，焦点が $-\theta_0$ から $\theta_0$ まで動作するときの線像の軌跡の強度分布を $h_1(x)$, $h_2(y)$ とする．

#### 3.1.1 1 枚撮り

##### 3.1.1.1 断層面

断層中心にスリットがあるとき，フイルム位置の $h_1(x)$, $h_2(y)$ は焦点からの距離の逆 2 乗による線量補正関数を $g(x, \theta)$ とすると，

$$h_1(x)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0} f_1(x\cos\theta)\cos\theta\, g(x,\theta)\,d\theta \tag{12}$$

$$g(x,\theta)=\frac{(R+r)^2}{(R+r+x\sin\theta)^2} \quad (\textbf{Fig. 1}\,(a)) \tag{13}$$

$$h_2(y)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0} f_2(y)\,d\theta=2\theta_0 f_2(y) \tag{14}$$

となる．

##### 3.1.1.2 断層面以外の面

$Z$ 軸上で断層中心以外にスリットがあるとき，フィルム位置の $h_1(x)$, $h_2(y)$ は $\theta$ の変化にともなつて作用焦点の点像の中心が原点から移動する距離を $x'(\theta)$，作用焦点がフィルムとある角度をもつためにおこる変化の補正関数を $p(\theta)$，スリットが断層中心から $l$ はなれているためにおこる倍率の変化の補正関数を $q(\theta)$，焦点のX線強度分布の $X-Z$ 面における分布関数を $i'(\beta(\theta))$ とすれば，

$$h_1(x)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0} f_1((x-x'(\theta))\,p(\theta)\,q(\theta))\,p(\theta)\,(q(\theta))^2$$
$$i(\beta(\theta))\,g(x,\theta)\,d\theta \tag{15}$$

ここに，

$$x'(\theta)=\frac{l(R+r)\sin\theta}{R\cos\theta-l} \quad (\textbf{Fig. 1}\,(b)) \tag{16}$$

$$p(\theta)=\frac{\cos\theta}{1-\tan\alpha\tan\beta(\theta)} \quad \alpha>0 \quad (\textbf{Fig. 1}\,(c)) \tag{17}$$

$$q(\theta)=\frac{R-l\cos\theta}{r+l\cos\theta+x'\sin\theta}\times\frac{r}{R} \quad (\textbf{Fig. 1}\,(d)) \tag{18}$$

$$i(\beta(\theta))=\frac{i'(\beta(\theta))}{i'(0)} \tag{19}$$

$$g(x,\theta)=\frac{(R+r+x'\sin\theta)^2}{(R+r+x'\sin\theta+(x-x')\sin(\theta+\beta))^2} \tag{20}$$

$$\beta(\theta)=\tan^{-1}\frac{l\sin\theta}{R-l\cos\theta} \quad (\textbf{Fig. 1}\,(e)) \tag{21}$$

である．また，

$$h_2(y)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0} f_2(yq(\theta))\,(q(\theta))^2 d\theta \tag{22}$$

となる．

### 3.1.2 多層断層

**Fig. 2** において，多層断層の座標は各断層面と対応する各フィルムに関し1枚撮りと同様にとる．ここでは，フィルム取枠の3層フィルムを1枚撮りのフィルム位置に合わせる．

#### 3.1.2.1 断層面

**Fig. 2** (a) で，$Z$ 軸上3にスリットがあるとき，3層フィルム位置の $h_1(x)$, $h_2(y)$ は (12), (13), (14) 式となる．$Z$ 軸上 1, 2, 4, 5 にスリットがあるとき，それぞれ 1,2,4,5 層フィルム位置の $h_1(x)$, $h_2(y)$ は，

$$h_1(x)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0} f_1(x\,p(\theta))\,p(\theta)\,i(\beta(\theta))\,g(x,\theta)\,d\theta \tag{23}$$

ここに，

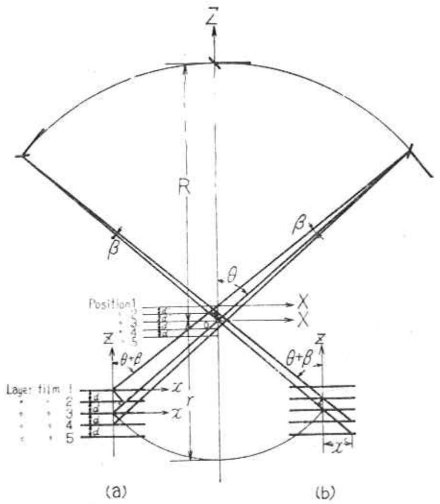



**Fig. 2** Reference diagram for calculations of the line spread intensity distributions, on multi-layer radiographs, of X-ray tube focus in the case of Tomography.

$$g(x,\theta)=\frac{(R+r+nd\cos\theta)^2}{(R+r+nd\cos\theta+x\sin(\theta+\beta))^2} \tag{24}$$

ただし，$d$ はフィルム間の間隔，$nd$ は3層から考えているフィルムまでの距離（3層より上の層は正，下は負とする）である．

$h_2(y)$ は (14) 式となる．$p(\theta)$, $i(\beta(\theta))$ はそれぞれ (17), (19), (21) 式である．

#### 3.1.2.2 断層面以外の面

**Fig. 2** (b) で，$Z$ 軸上にスリットがあるとき，3層以外のフィルム位置の $h_1(x)$, $h_2(y)$ は，

$$h_1(x)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0} f_1((x-x'(\theta))\,(q(\theta))\,q(\theta))^2 g(x,\theta)\,d\theta \tag{25}$$

ここに，

$$x'(\theta)=-nd\tan\theta \tag{26}$$

$$q(\theta)=\frac{r\sin\theta}{r\sin\theta+x'(\theta)} \tag{27}$$

$$g(x,\theta)=\frac{\left(R+r+\dfrac{x'(\theta)}{\sin\theta}\right)^2}{\left(R+r+\dfrac{x'(\theta)}{\sin\theta}+(x-x')\sin\theta\right)^2} \tag{28}$$

である．また，

$$h_2(y)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0} f_2(y\,q(\theta))\,(q(\theta))^2 d\theta \tag{29}$$

$q(\theta)$ は (27) 式である．

$Z$ 軸上 1, 2, 4, 5 のどれかにスリットがあるとき，それに対応する層以外のフィルム位置の $h_1(x)$, $h_2(y)$ は，

$$h_1(x)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0} f_1((x-x'(\theta))\,p(\theta)\,q(\theta))\,(p(\theta)\,(q(\theta))^2\, i(\beta(\theta))\,g(x,\theta)\,d\theta \tag{30}$$

ここに，

$$x'(\theta)=-nd\tan(\theta+\beta) \tag{31}$$

$$q(\theta)=\frac{r-nd'\cos\theta+nd\cos\theta}{r-nd'\cos\theta+nd\cos\theta+\dfrac{x'(\theta)}{\sin(\theta+\beta)}} \fallingdotseq \frac{r\sin(\theta+\beta)}{r\sin(\theta+\beta)+x'(\theta)} \tag{32}$$

ただし，$d'$ は各フィルムに対応する断層面間の距離，$nd'$ はスリットのある断層面から考えている断層面までの距離．

$g(x,\theta)$

$$=\frac{\left(R+r+nd\cos\theta+\dfrac{x'(\theta)}{\sin(\theta+\beta)}\right)^2}{\left(R+r+nd\cos\theta+\dfrac{x'(\theta)}{\sin(\theta+\beta)}+(x-x')\sin(\theta+\beta)\right)^2} \tag{33}$$

$p(\theta)$, $i(\beta(\theta))$ はそれぞれ (17), (19), (21) 式である．また，

$$h_2(y)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0} f_2(y\,q(\theta))\,(q(\theta))^2 d\theta \tag{34}$$

$q(\theta)$ は (32) 式である．

### 3.2 円軌道型断層撮影

**Fig. 3** において，X線管焦点の位置は断層中心を原点，原点とX線管の短軸を含む平面が原点を含む水平面と交わる直線（機械の構造上この直線はX線管の位置に無関係に定まる）を $Y$ 軸，原点を含む水平面上でそれと直角方向に $X$ 軸，右手系に $Z$ 軸をとつた直角座標系で表示する．焦点像のフィルム面での座標は，仮想的に焦点が $Z$ 軸上にあるときの実効焦点像の中心を原点，$x$

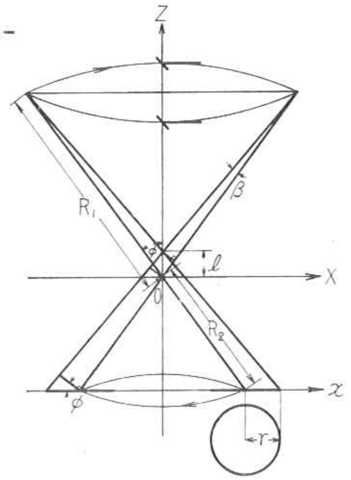



**Fig. 3** Reference diagram for calculations of the point spread intensity distributions, on single layer radiographs, of X-ray tube focus in the case of Circus Tomography.

軸，$y$ 軸はそれぞれ $X$ 軸，$Y$ 軸に平行にとる．

**Fig. 4** で，X線管は $X$–$Z$ 平面から運動をはじめるとして運動角を $\theta$，そのときのX線管長軸に平行なスリットによる線像 $g$ の $X$ 軸となす角度を $\alpha$ とする．焦点位置に考えた実効焦点中心と原点を結ぶ直線を $g_0$，$g_0$ と $Z$ 軸のなす定角を $\phi$ とする．$\theta$ が与えられたときの焦点位置に考えた実効焦点中心の座標を (a, b, c) とする．$g_0$ と $Y$ 軸のなす角を $\gamma_1$，$g_0$ と $g$ のなす角を $\gamma_2$ とする．また，焦点位置に考えた実効焦点面上にある短軸方向，長軸方向の長さ1の線分の平行X線による $X$–$Y$ 平面への投影の長さをそれぞれ $l_1, l_2$ とする．

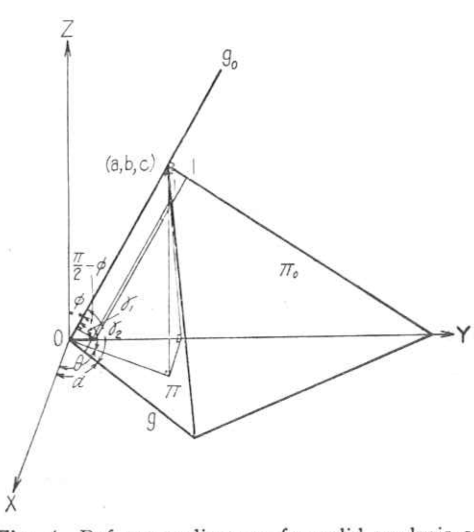



**Fig. 4** Reference diagram for solid analysis of the images of narrow slits attached to X-ray tube in the case of Circus Tomography.

計算によつて $\alpha$ と $\theta$ の間に

$$\tan\alpha=\frac{\cos\theta\,\sin\theta}{\cos^2\theta+\cot^2\phi} \tag{35}$$

の関係が得られる．

ここで，$\alpha$ が極大となる $\theta$ の値は，

$$\theta=\frac{1}{2}\cos^{-1}\frac{-1}{1+2\cot^2\phi} \tag{36}$$

このときの $\alpha$ の極大値は，

$$\alpha=\tan^{-1}\frac{\sin^2\phi}{2\cos\phi} \tag{37}$$

となる．いま，$\phi=\pi/6$ として計算してみると，$\theta\fallingdotseq 49°$，$\alpha\fallingdotseq 8°$ である．

つぎに，$\gamma_1, \gamma_2$ と $\theta$ の関係および $l_1, l_2$ は，

$$\cos\gamma_1=\sin\phi\,\sin\theta \tag{38}$$

$$l_1=\frac{1}{\sqrt{1-\sin^2\phi\,\sin^2\theta}} \tag{39}$$

$$\cos\gamma_2=\frac{|\cos^2\phi\,\sin\phi\,\sin\theta|}{\sqrt{\sin^2\phi\cos^2\theta(1+\cos^2\phi)+\cos^4\phi}} \tag{40}$$

ここで，$\gamma_2$ は鋭角の方をとる．

$$l_2=\sqrt{\frac{\sin^2\phi\cos^2\theta(1+\cos^2\phi)+\cos^4\phi}{\cos^2\theta\sin^2\phi(1+\cos^2\phi+\cos^4\phi)+\cos^6\phi}} \tag{41}$$

となる．

以上の計算から円軌道型では，X線管短軸に平行なスリットによる焦点の線像は $y$ 軸方向に伸縮するだけであるが，長軸に平行なスリットによる焦点の線像はさらに $x$ 軸を中心にある角度だけ振動することがわかる．

焦点が $\theta$ の位置にあるとき，実効焦点の倍率 $R_2/R_1$ の点像強度分布を $h_\theta(x, y)$ とする．焦点が $\theta=0$ から $2\pi$ まで動作するとき，点像の軌跡の強度分布を $h(x, y)$ とする．

**3.2.1 1枚撮り**

**3.2.1.1 断層面**

**Fig. 5** (a) で，断層中心にピンホールがあるとき，フィルム位置の $h(x, y)$ は焦点からの距離の逆2乗による線量補正関数を $g(x, y, \theta)$，点像の $x$ 軸および $y$ 軸方向の伸縮の倍率をそれぞれ $k_x(\theta), k_y(\theta)$ とすると，

$$h(x,y)=\int_0^{2\pi}\frac{1}{k_x(\theta)\,k_y(\theta)}h_\theta\!\left(\frac{x}{k_x(\theta)},\ \frac{1}{k_y(\theta)}(y-x\tan\alpha(\theta))\right)g(x,y,\theta)\,d\theta \tag{42}$$

となる．ここに，

$$k_x(\theta)=\frac{\cos\alpha}{\sin\gamma_2} \tag{43}$$

$$k_y(\theta)=\frac{1}{\sin\gamma_1} \tag{44}$$

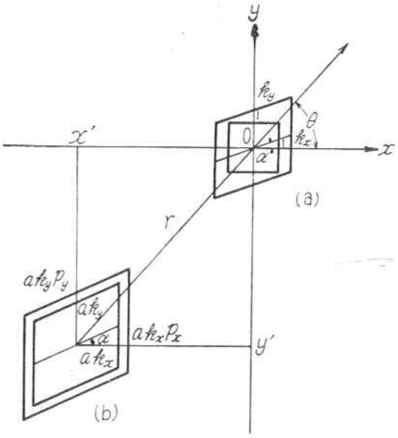



**Fig. 5** Reference diagram for calculations of the point spread intensity distributions, on single layer radiographs, of X-ray tube focus in the case of Circus Tomography.

である．

**3. 2. 1. 2** 断層面以外の面

**Fig. 5** (b) において，$Z$ 軸上で断層中心以外にピンホールがあるとき，フィルム位置の $h(x,y)$ はつぎのように求められる．

焦点が $\theta$ 位置にあるときの作用焦点の点像の中心のフィルム面での座標を $(x'(\theta),\ y'(\theta))$ とし，作用焦点がフィルムとある角度をもつためにおこる変化の倍率を $p_x(\theta), p_y(\theta)$，ピンホールが断層中心から $l$ はなれているためにおこる倍率の変化の補正関数を $a$，焦点のX線強度分布関数を $i(\beta(\theta))$ とすれば，

$$h(x,y)=\int_0^{2\pi}\frac{1}{a^2p_x(\theta)\,p_y(\theta)\,k_x(\theta)\,k_y(\theta)}\,h_\theta\Big(\frac{1}{a\,p_x(\theta)\,k_x(\theta)}(x-x'(\theta)),\ \frac{1}{k_y(\theta)}\Big(\frac{1}{a\,p_y(\theta)}(y-y'(\theta))-\frac{1}{a\,p_x(\theta)}(x-x'(\theta))\tan\alpha(\theta)\Big)\Big)\,i(\beta(\theta))\,g(x,y,\theta)\,d\theta \tag{45}$$

となる．ここに，ボケ像の半径を $|r|$ とすれば，

$$a=\frac{R_2+l\cos\phi-r\sin\phi}{R_1+l\cos\phi}\Big/\frac{R_2}{R_1} \tag{46}$$

$$|r|=\sqrt{(x'(\theta))^2+(y'(\theta))^2} \tag{47}$$

$$x'(\theta)=r\cos\theta=\frac{l(R_1+R_2)\sin\phi}{R_1\cos\phi-l}\cos\theta \tag{48}$$

$$y'(\theta)=r\sin\theta=\frac{l(R_1+R_2)\sin\phi}{R_1\cos\phi-l}\sin\theta \tag{49}$$

ここで，$l>0$ のとき，$r<0$，$l<0$ のとき，$r>0$ にとる．

$k_x(\theta)$，$k_y(\theta)$ は (43)，(44) 式である．また，$p_x(\theta)$，$p_y(\theta)$，$i(\beta(\theta))$，$g(x,y,\theta)$ は複雑な関数となる．

**3. 2. 2** 多層断層

**3. 2. 2. 1** 断層面

$Z$ 軸上3にピンホールがあるとき，3層フィルム位置の $h(x,y)$ は (42) 式となる．また，$Z$ 軸上 1, 2, 4, 5 にピンホールがあるとき，それぞれ 1, 2, 4, 5 層フィルム位置の $h(x,y)$ は (45) 式で $a=1$ とおいた式である．

**3. 2. 2. 2** 断層面以外の面

$Z$ 軸上3にピンホールがあるとき，3層以外のフィルム位置の $h(x,y)$ は，

$$h(x,y)=\int_0^{2\pi}\frac{1}{a^2k_x(\theta)\,k_y(\theta)}h_\theta\Big(\frac{1}{ak_x(\theta)}(x-x'(\theta)),\ \frac{1}{ak_y(\theta)}((y-y'(\theta))-(x-x'(\theta))\tan\alpha(\theta)\Big)\,g(x,y,\theta)\,d\theta \tag{50}$$

ここに，

$$a=\frac{R_2\cos\phi-nd}{R_2\cos\phi} \tag{51}$$

他の関係はすべて 3. 2. 1. 2 と同じである．

つぎに，$Z$ 軸上 1, 2, 4, 5 のどれかにピンホールがあるとき，それに対応する層以外のフィルム位置の $h(x,y)$ は，

$$h(x,y)=\int_0^{2\pi}\frac{1}{a^2p_x(\theta)\,p_y(\theta)\,k_x(\theta)\,k_y(\theta)}\,h_\theta\Big(\frac{1}{a\,p_x(\theta)\,k_x(\theta)}(x-x'(\theta)),\ \frac{1}{k_y(\theta)}\Big(\frac{1}{a\,p_y(\theta)}(y-y'(\theta))-\frac{1}{a\,p_x(\theta)}(x-x'(\theta))\tan\alpha(\theta)\Big)\Big)\,i(\beta(\theta))\,g(x,y,\theta)\,d\theta \tag{52}$$

ここに，

$$a=\frac{R_2\cos(\phi+\beta)-nd}{R_2\cos(\phi+\beta)} \tag{53}$$

となる．他の関数はすべて 3. 2. 1. 2 と同じである．

**3. 3 増感紙，X線フィルムおよび screen-film system**

**Fig. 6** (a), (b), (c) はそれぞれ複増感紙，X線フィルムおよび screen-film system にX線が斜入するときの発光および濃度分布を示す．図示のようにフィルムベースの中心を原点，$x$ 軸，$y$ 軸，$z$ 軸を右手系にとつた直角座標系で考える．

**3. 3. 1** 複増感紙およびX線フィルム

前面および後面増感紙の螢光物質中の発光がフィルムに達するまでにいくつかのボケの要素が考えられる．いま，これらのうち螢光物質の発光によるボケだけ考える．発光強度分布はX線強度分布に換算して考える．

**Fig.** 6 (a) で，X線が複増感紙に垂直に入射するとき，前面および後面増感紙の $x$ 軸方向の線像強度分布をそれぞれ $s_f(x), s_b(x)$ とする．

一般に，斜入X線が複増感紙に入射するとき，前面および後面増感紙で，入射角 $\theta$ によつて線像の中心が原点から離れる距離をそれぞれ $x_1(\theta)$，$x_2(\theta)$，斜入のため線像の幅が $s_f(x), s_b(x)$ に対してひろがる倍率の逆数をそれぞれ $a(\theta), c(\theta)$，また，$s_f(x), s_b(x)$ に対して変化する線像強度の補正関数を $b(x, \theta)$，$d(x, \theta)$ とすれば，斜入X線による複増感紙の線像強度分布 $s(x, \theta)$ は，

$$s(x,\theta)=s_f((x-x_1(\theta))\,a(\theta),\theta)\,b(x,\theta) + s_b((x-x_2(\theta))\,c(\theta),\theta)\,d(x,\theta) \qquad (54)$$

となる．ただし，$\theta>0$ のとき $x_1(\theta)<0$，$x_2(\theta)>0$，$\theta<0$ のとき $x_1(\theta)>0$，$x_2(\theta)<0$ とする．また，$\theta=0$ のとき，

$$s(x)=s_f(x)+s_b(x) \qquad (55)$$

である．

つぎに，X線が複増紙に垂直に入射するとき，前面および後面増感紙の $y$ 軸方向の線像強度分布は増感紙の性質から $s_f(x), s_b(x)$ と同一と考えてよい．したがつて，斜入X線による複増感紙の $y$ 軸方向の線像強度分布 $s(y)$ は，

$$s(y)=s_f(y)+s_b(y) \qquad (56)$$

となる．

X線フィルムについては **Fig.** 6 (b) で，その濃度分布をX線強度分布に換算し，複増感紙の関数 $s$ をフィルムの関数 $f$ におきかえれば，複増感紙と全く同様に解析できる．

### 3.3.2 Screen-film system

X線フィルムは単独で用いられることもあるが，ほとんど複増感紙と組みあわせて使われる．このときフィルムに入射する可視光はX線の入射角に関係なく方向性をもたないと考えられる．したがつて，フィルムの点像強度分布は増感紙とフィルム乳剤との間にピンホールをおき，増感紙の散乱可視光を光源として測定すべきである．

X線の入射によつて前面および後面増感紙の2つの側に光源が発生するので，まず $Z$ 軸上で，前面または後面増感紙側のフィルム乳剤表面にスリットをおき，散乱光源による線像強度分布 $F_{0f}(x)$ または $F_{0b}(x)$ を考える．このとき斜入可視光によるフィルムの線像強度分布

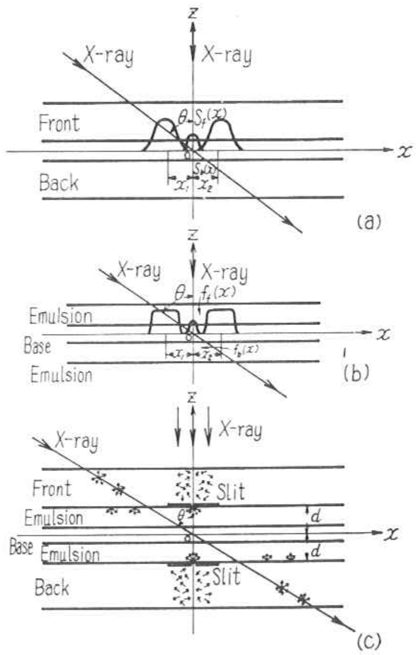



**Fig. 6** Luminescence and the density distributions by X-ray which enters obliquely into intensifying screen and film.
(a): Double intensifying screen
(b): X-ray film
(c): Combination of double intensifying screen and X-ray film

$F(x, \theta)$ は一般に (54) 式を参考にして，

$$F(x,\theta)=f(x-d\tan\theta,\theta) \qquad (57)$$

となる．ここに，$d$ は原点からスリットまでの距離（原点から上を正，下を負）である．

いま，前面または後面増感紙側からの斜入可視光によるフィルムの線像強度分布 $F_f(x,\theta)$ または $F_b(x,\theta)$ をそれぞれ，

$$F_f(x,\theta)=f_f((x-d\tan\theta-x_1(\theta))\,t(\theta),\theta)\,u(x,\theta) + f_b((x-d\tan\theta-x_2(\theta))\,v(\theta),\theta)\,w(x,\theta) \qquad (58)$$

$$F_b(x,\theta)=f_b((x-d\tan\theta-x_1(\theta))\,t(\theta),\theta)\,u(x,\theta) + f_f((x-d\tan\theta-x_2(\theta))\,v(\theta),\theta)\,w(x,\theta) \qquad (59)$$

（ここに，各関数は (54) 式と同様にとつている）

とすると，

$$F_{0f}(x)=\int_{-\pi/2}^{\pi/2}F_f(x,\theta)\,d\theta \qquad (60)$$

$$F_{0b}(x)=\int_{-\pi/2}^{\pi/2}F_b(x,\theta)\,d\theta \qquad (61)$$

である．

したがつてX線が複増感紙とフイルムとの組み合わせ

に入射するとき，フィルムの $x$ 軸方向の線像強度分布 $F_0(x)$ は，

$$F_0(x)=F_{0f}(x)+F_{0b}(x) \tag{62}$$

となる．(58), (59) 式とも第2項は無視し得る量であり，また線光源の側方への強度は前方のものにくらべて弱いと推測される．

Screen-film system におけるフィルムの点像強度分布は対称および等方的であり，$y$ 軸方向の線像強度分布は $x$ 軸方向のものと同じである．

### 3.4 フーリエ変換

断層撮影系のボケをもつ要素おのおのの線像あるいは点像強度分布をX線強度であらわし，系全体を線型としてとり扱う．また，

$$\hat{h}(\nu,\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}h(x,y)\exp\left(-j2\pi(\nu x+\tau y)\right)dxdy \tag{63}$$

とおくと，

$$h(x,y)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\hat{h}(\nu,\tau)\exp\left(j2\pi(\nu x+\tau y)\right)d\nu d\tau \tag{64}$$

が成立する．ただし，

$$\begin{aligned}&\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}|h(x,y)|\,dxdy\\&\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}|\hat{h}(\nu,\tau)|\,d\nu d\tau\end{aligned} \tag{65}$$

の絶対可積分を仮定すれば十分である．

いままでに計算した線像あるいは点像強度分布のフーリエ変換はつぎの数個の類型に分けることができるので，そのおのおのについてフーリエ変換する．

a) $$h(x)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0}f(xm(\theta))\,m(\theta)\,n(x,\theta)\,d\theta \tag{66}$$

この型に属するか，あるいは変形できる式は (12), (23) 式である．$h(x)$ のフーリエ変換をとると，

$$\hat{h}(\omega)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0}\int_{-\infty}^{\infty}f(xm(\theta))\,m(\theta)\,n(x,\theta)\exp(-j2\pi\omega x)\,dxd\theta=\int_{-\theta_0}^{\theta_0}\int_{-\infty}^{\infty}\hat{f}\left(\frac{\omega'}{m(\theta)}\right)\hat{n}(\omega-\omega',\theta)\,d\omega'd\theta \tag{67}$$

となる．

b) $$h(x)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0}f((x-x'(\theta))\,m(\theta))\,m(\theta)\,n(x,\theta)\,d\theta \tag{68}$$

この型に属するか，あるいは変形できる式は (15), (25), (30), (54), (60), (61) 式である．$h(x)$ のフーリエ変換をとると，

$$\begin{aligned}\hat{h}(\omega)&=\int_{-\theta_0}^{\theta_0}\int_{-\infty}^{\infty}f((x-x'(\theta))\,m(\theta))\,m(\theta)\,n(x,\theta)\exp(-j2\pi\omega x)\,dxd\theta\\&=\int_{-\theta_0}^{\theta_0}\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-j2\pi\omega x'(\theta))\,\hat{f}\left(\frac{\omega'}{m(\theta)}\right)\hat{n}(\omega-\omega',\theta)\,d\omega'd\theta\end{aligned} \tag{69}$$

となる．

c) $$h(x)=\int^{\theta_0}f(xm(\theta))\,(m(\theta))^2d\theta \tag{70}$$

この型に属する　あるいは変形できる式は (22), (29), (34) 式である．$h(x)$ のフーリエ変換をとると，

$$\hat{h}(\omega)=\int_{-\theta_0}^{\theta_0}\int_{-\infty}^{\infty}f(xm(\theta))\,(m(\theta))^2\exp(-j2\pi\omega x)\,dxd\theta=\int_{-\theta_0}^{\theta_0}\hat{f}\left(\frac{\omega}{m(\theta)}\right)m(\theta)\,d\theta \tag{71}$$

となる．

d) $$h(x,y)=\int_0^{2\pi}\frac{1}{k_x(\theta)k_y(\theta)}f\left(\frac{x}{k_x(\theta)},\ \frac{1}{k_y(\theta)}(y-x\tan\alpha(\theta))\right)n(x,y,\theta)\,d\theta \tag{72}$$

この型に属する式は (42) 式である．$h(x,y)$ のフーリエ変換をとると，

$$\begin{aligned}\hat{h}(\nu,\tau)&=\int_0^{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}h(x,y)\exp(-j2\pi(\nu x+\tau y))\,dxdyd\theta\\&=\int_0^{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\hat{f}(k_x(\theta)(\nu'+\tau'\tan\alpha(\theta)),\ k_y(\theta)\tau')\,\hat{n}(\nu-\nu',\tau-\tau',\theta)\,d\nu'd\tau'd\theta\end{aligned} \tag{73}$$

となる.

e) $$h(x, y)=\int_0^{2\pi}\frac{1}{p_x(\theta)\,p_y(\theta)\,k_x(\theta)\,k_y(\theta)}f\Big(\frac{1}{p_x(\theta)\,k_x(\theta)}(x-x'(\theta)),$$
$$\frac{1}{k_y(\theta)}\Big(\frac{1}{p_y(\theta)}(y-y'(\theta))-\frac{1}{p_x(\theta)}(x-x'(\theta))\tan\alpha(\theta)\Big)\Big)n(x, y, \theta)\,d\theta \qquad (74)$$

この型に属するか，あるいは変形できる式は (45), (50), (52) 式である. $h(x, y)$ のフーリエ変換をとると，

$$\hat{h}(\nu, \tau)=\int_0^{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}h(x, y)\exp(-j2\pi(\nu x+\tau y))\,dx\,dy\,d\theta$$
$$=\int_0^{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\hat{f}(k_x(\theta)(p_x(\theta)\nu'+p_y(\theta)\tau'\tan\alpha(\theta)),\ k_y(\theta)\,p_y(\theta)\,\tau')\,\hat{n}(\nu-\nu', \tau-\tau', \theta)$$
$$\exp(-j2\pi(\nu x'+\tau y'))\,d\nu'\,d\tau'\,d\theta \qquad (75)$$

となる.

(70) 式を除いた他の類型の $h$ のフーリエ変換は $f$ と $n$ のフーリエ変換の convolution を $\theta$ について積分したものになる.

### 3.5 平行型断層撮影

1 方向移動型には円弧型の外に平行型がある. この方式の円弧型と異なる点は焦点—フィルム間距離による線量の変化があることで，その補正はX線管移動速度の調節によつて行なう.

焦点—フィルム間距離によるフィルム面上の線量変化の割合は，

$$u(\theta)=\cos^2\theta \qquad (76)$$

X線管の $\theta=0$ の速度を $v_0$ とすれば，X 線管速度は $v_0\cos\theta$ となるように設計されている. すなわち，フィルム面上の線量の割合は，

$$v(\theta)=\frac{1}{v_0\cos\theta} \qquad (77)$$

となる. したがつて，その線像強度分布は **3.1** の諸式に $R, r$ のかわりに，

$$R'=R/\cos\theta,\ r'=r/\cos\theta \qquad (78)$$

を入れ，線量補正の項に $u(\theta)\,v(\theta)$ を考慮すればよい.

### 3.6 ガ タ

装置の機械的なガタは断層像に大きな影響を与える.

一般に，ガタは $\theta$ の複雑な関数となる. いまこれを $\boldsymbol{O}(\theta)$ とすれば，

$$\boldsymbol{O}(\theta)=\boldsymbol{i}O_x+\boldsymbol{j}O_y+\boldsymbol{k}O_z \qquad (79)$$

の $X$ 軸，$Y$ 軸，$Z$ 軸方向にわけて考えられる. $O_x$, $O_y$ はそれぞれ $x$ 軸，$y$ 軸方向の線像強度分布に影響を与え，$O_z$ は倍率に関係し $x$ 軸，$y$ 軸両方向の線像強度分布に影響する.

## 4. 実　　験

### 4.1 実験装置および器具

X線発生装置は単相全波整流型，断層の型は円弧型，平行型，円軌道型を使用する. X線管は回転陽極型，その焦点寸法は，円弧型は公称 1×1 mm と 2×2 mm，平行型は 1.5×1.5 mm，円軌道型は 1×1 mm を使用する.

振子棒は **Fig. 7** に示す構造をもちX線管容器と支持台間にとりつけて使用する. 振子棒の支点を $Z$ 軸にそうて上下し距離 $C$ を変えることによつて，被写体位置 1, 2, 3, 4, 5 の任意の点を通る運動する焦点の点像を求めることができる. また，距離Aを変えピンホールを支柱任意の位置に固定することによつて，任意の拡大倍率の運動する焦点の点像を知ることができる.

複増感紙および多層用増感紙は低感度高鮮鋭度用，フィルムは医療用X線フィルム高感度用を使用する. 多層用フィルム取枠内のフィルムの層間隔はそれぞれ 12.3 mm である.

鉛ピンホールの直径は 0.1 mm，鉛スリットの幅は 0.1 mm，高さは 30 mm で，鉛の厚さは 2 mm とする.

ミクロフォトメーターのスリットの幅は $20\mu$～$100\mu$，高さは $100\mu$～$300\mu$ を使用する.

電子計算機は IBM-7090 計算機を使用する.

### 4.2 実験方法

実験は振子棒を用いる 1 枚撮りまたは多層断層によつて行なう. 円弧型以外では振子棒をとりつけられないので，遮光筒にピンホールまたはスリットを固定する方式をとる. したがつて実効焦点の拡大倍率は大きくなり，その等倍点像の $x$ 軸方向の長さは三つの型ともほぼ 2 mm でこれをほぼ 10 mm にして比較するため三つの

型とも5倍拡大とする．円弧型では公称 2×2 mm 焦点の等倍の実験もする．円弧型は1枚撮りと多層断層，平行型と円軌道型は多層断層で実験する．多層断層では3層フィルムを1枚撮りのフィルム位置にあわせて撮影する．方法はフィルム法で複増感紙とフィルムの組み合わせを用いる．また被写体位置 1, 2, 3, 4, 5 の間隔はそれぞれ 10 mm とする．

実験は実効焦点，作用焦点および運動する焦点について，断層中心および $Z$ 軸上で断層中心以外の点を通る点像と線像の写真を撮る．円弧型，平行型ではこの線像の

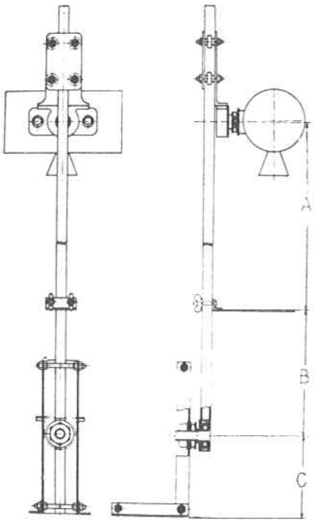



**Fig. 7** Schematic diagram of a pendulum rod.
A: Distance between focus and slit
B: Distance between slit and center of pendulum
C: Distance between center and supporting base

フィルム濃度分布をミクロフォトメーターで測定する．円軌道型では $x$ 軸方向の線像が振動するので，点像のフィルム濃度分布からミクロフォトメーターの光学スリットによつて線像濃度分布を求める．いずれも $x$ 軸，$y$ 軸方向を測定する．また，複増感紙およびフィルムの斜入X線の実験は入射角を任意に選べる振子棒に固定されたスリットによつて，斜入X線による線像濃度分布をそれぞれフィルムから求める．実験した入射角は複増感紙では 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 70°，フィルムでは 0°, 10°, 25° である．実験から得られるフィルム濃度はすべてX線強度に換算し，得られる線像強度分布を電子計算機によつてフーリエ変換する．

つぎに，扇形角が大，中，小のジーメンスチャートを厚さ 1 mm の鉛で作り，被写体位置 1 (5) に大，2 (4) に中，3 に小のチャートをおいてそれぞれ断層撮影してボケの状態を調べる．また，複増感紙，フィルムの斜入X線の実験ではストロボ法によるジーメンスチャート[4]を使う．すなわち，フィルムを入れた複増感紙またはフィルムをのせた水平なターンテーブルを等速度で回転させ，その中心に振子棒に固定されたスリットによる斜入X線を入射させてジーメンスチャートを撮影し，その偽解像などの状態をみる．実験した入射角は増感紙，フィルム共 0°, 30°, 60° である．

撮影条件はいずれの場合も，管電流を一定にしてフィルムに適当な濃度の像が得られるような条件を設定する．

## 5. 実験結果および考察

### 5.1 ピンホール写真

**Fig. 8** (**a**), (**b**), (**c**) はそれぞれ実験に使用した円弧型，平行型，円軌道型装置のX線管焦点のピンホール写真である．円弧型の焦点像だけが歪んだ形を示しているのは，X線管の管容器への取り付け中心が狂つて作用焦点像がでているものと思われる．

(a)　(b)　(c)

**Fig. 8** Images of fixed X-ray tube focus used in layer radiography. $R : r = 1 : 5$
(a): X-ray tube focus used in Tomography
(b): X-ray tube focus used in Planigraphy
(c): X-ray tube focus used in Circus Tomogrphy

**Fig. 9** (**a**), (**b**), (**c**) は円弧型で (**a**), (**c**) は1枚撮り，上図から 1, 2, 3, 4, 5 位置に関して運動する焦点のそれぞれのピンホール写真である．(**a**) は5倍大，(**c**) は等倍大実効焦点像の場合のものである，(**b**) は多層断層，(**d**) は平行型多層断層でいずれも上図からそれぞれ 1, 2, 3, 4, 5 層フィイムに得られた運動する焦点のピンホール写真である．(**a**), (**b**) からわかるように計算上では (15) 式と (25) 式のちがいがあるがフィルム上でその差異は認めがたい．(**d**) で点像両端の線量不足は (76), (77) 式の積からでる $\cos\theta$ の線量分布からくるものである．

**Fig. 10** (**a**), (**b**) は円軌道型多層断層で (**a**) は上図からそれぞれ 1, 2, 3, 4, 5 層フィルムに得られた運動する焦点のピンホール写真である．(**b**) は3層フィルムに得られた運動する焦点のスリット写真で，上図はX線管短軸に，下図は長軸にそれぞれ平行なスリットによるもので

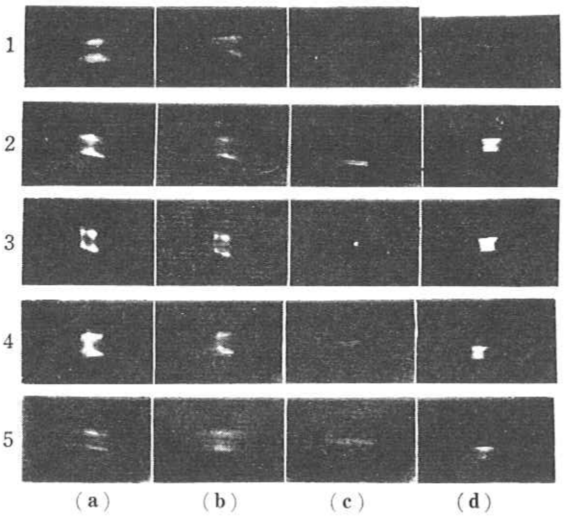



**Fig. 9** (**a**), (**c**) Pinhole images obtained in single layer radiographs from moving X-ray tube focus in the case of Tomography, positions 1, 2, 3, 4 and 5, from top to bottom.
(**a**): $R : r=1:5$ (magnification 5×)
(**c**): $R : r=1:1$
(**b**), (**d**) Pinhole images obtained on each layer film 1, 2, 3, 4 and 5, from top to bottom, from moving X-ray tube focus in the case of multi-layer Tomography (**b**) and Planigraphy (**d**).
$R : r=1:5$

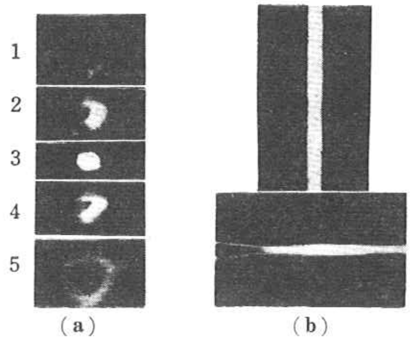



**Fig. 10** (**a**) Pinhole images obtained on each layer film 1, 2, 3, 4 and 5, from top to bottom, from moving X-ray tube focus in the case of multi-layer Circus Tomography.
$R : r=1:5$
(**b**) Slit images obtained on the 3rd layer film from moving X-ray tube focus in the case of Circus Tomography. Upper figure is image obtained from $y$-component slit, lower figure is image obtained from $x$-component slit.

ある. 下図は (35) 式の実験結果を示している.

ピンホール写真1と5, 2と4の像のちがいは像形成の順が反対であることによる. 円軌道型では (35) 式の $\alpha$ による影響も大きい.

### 5.2 空間周波数特性

**Fig. 11** (**a**), (**b**) は円弧型, 平行型, 円軌道型のX線管焦点それぞれの $x$ 軸方向, $y$ 軸方向の線像強度分布 (**a**) およびそれらの空間周波数特性 (b) である. いずれも5倍拡大像である. 平行型, 円軌道型の焦点像の特性は一般によくみられる型[4] であるが, 円弧型のものは特殊な型で $y$ 軸方向の特性がかえつて $x$ 軸方向のものよりわるくなつている.

**Fig. 12** (a), (b) は円弧型1枚撮りで 1, 2 位置に関して運動する焦点の $x$ 軸方向の線像強度分布 (a) と3位置に関して運動する焦点の $x$ 軸, $y$ 軸方向の線像強度分布 (a) およびそれらの空間周波数特性 (b) である. (**a**) は5倍大, (**b**) は等倍大実効焦点像の場合のものである.

1, 2 位置に関して運動する焦点の $x$ 軸方向の線像強度分布は (15) 式の $p(\theta)$ の項がきいて, 左側の立ち上がりは右側のものよりゆるやかである. また, (15) 式と (69) 式で $m(\theta)$ を常数と考え, $n(x,\theta)$ を無視すると,

$$\hat{h}(\omega) \fallingdotseq \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \exp(-j2\pi\omega x'(\theta)) \hat{f}(\omega)\, d\theta \tag{80}$$

となり, ここで, $\theta$ が小さいときは (16) 式から,

$$x'(\theta) \fallingdotseq D(l)\,\theta \tag{81}$$

となるから $\theta_0$ における $x'$ を $x_0'$ とすると,

$$\hat{h}(\omega) \fallingdotseq 2\theta_0 \frac{\sin 2\pi\omega x_0'}{2\pi\omega x_0'} \hat{f}(\omega) = 2\theta_0 \hat{f}(\omega)\, S_a(\omega) \tag{82}$$

$$\left( ここに, \ S_a(\omega) = \frac{\sin 2\pi\omega x_0'}{2\pi\omega x_0'} \right)$$

となる. すなわち, $l$ が大きいときは焦点のレスポンス関数よりも $S_a(\omega)$ の項 (運動のレスポンス関数[5,6] に相当する) がきいて, 焦点の大, 小は全体としてあまり影響していない. しかし, $l$ が小さくなると影響してきて $l=0$ では (15) 式は (12) 式となり, 3位置に関しては (12) 式, (67) 式で $m(\theta)$ を常数と考え, $n(x,\theta)$ を無

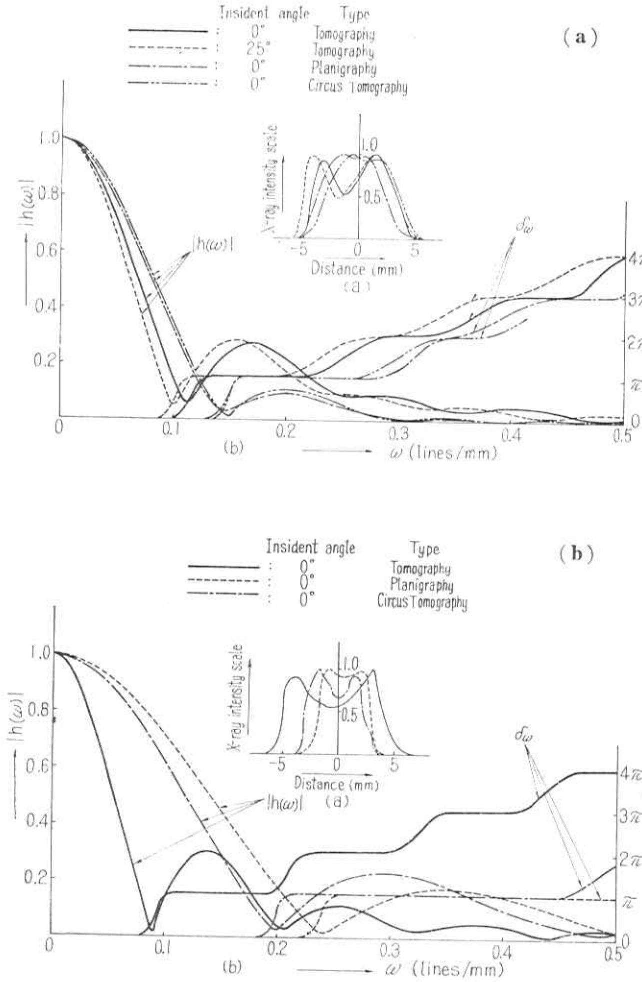



Fig. 11 (a), (b) X-ray intensity distributions and spatial frequency characteristic in $x$-component (a) and $y$-component (b), obtained from five time images, of X-ray tube focuses of Tomography, Planigraphy and Circus Tomography.

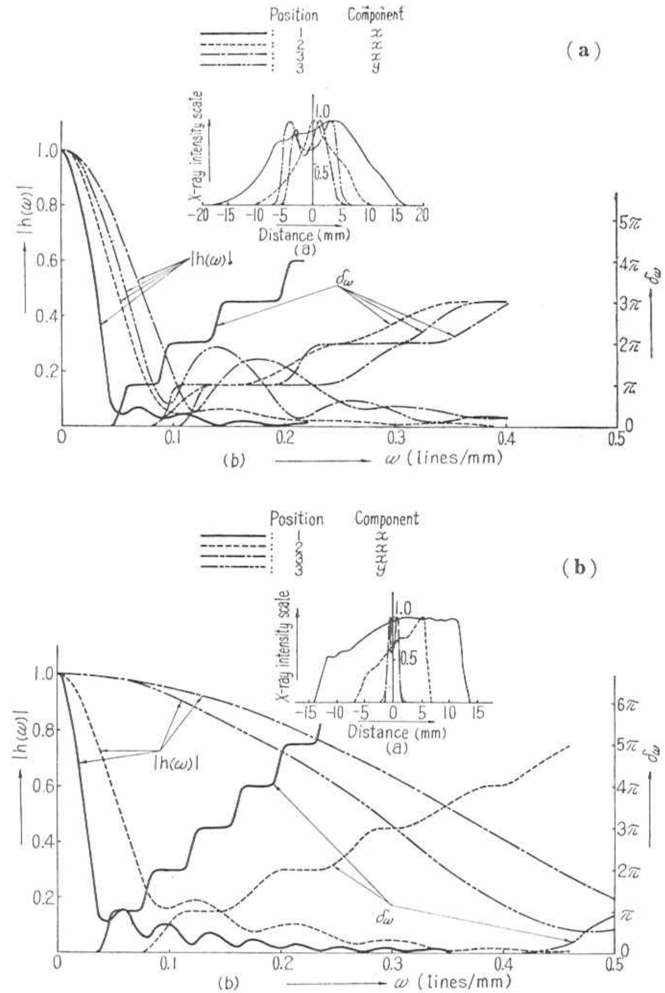



Fig. 12 (a), (b) X-ray intensity distributions and their spatial frequency characteristics, obtained from slit images of moving X-ray tube focus in the case of single layer Tomography. (a): $R:r=1:5$ (b): $R:r=1:1$

視すると，焦点のレスポンス関数となることからもわかるように大焦点と小焦点で大きく異なつている．また，この装置は3位置に関して運動する焦点と静止の焦点の空間周波数特性がほとんど変わらないことから (79) 式の $\boldsymbol{O}(\theta)$ が小さいと考えられる．

$y$ 軸方向の特性は (14) 式，(22) 式で $q(\theta)$ を無視すれば明らかなようにいずれも変わらない．

**Fig. 13** は平行型多層断層で 1, 2 層フィルムにそれぞれ得られた運動する焦点の $x$ 軸方向の線像強度分布 (a) と3層フィルムに得られた運動する焦点の $x$ 軸，$y$ 軸方向の線像強度分布 (a) およびそれらの空間周波数特性 (b) である．いずれも5倍大実効焦点像の場合のものである．

1, 2 位置に関して運動する焦点の $x$ 軸方向の線像強度分布は $\cos\theta$ の線量分布の影響で左右の立ち上がりの不同があらわれていない．また，円弧型と焦点のX線強度分布が異なるにかかわらず，$l$ が大きいときは前記の理由で空間周波数特性は円弧型と大差ない．$l$ が小さくなり3位置に近づくと焦点のレスポンス関数に近づき円弧型の焦点とのちがいがでてきている．また，この装置は3位置に関する特性から $\boldsymbol{O}(\theta)$ が大きいと思われる．

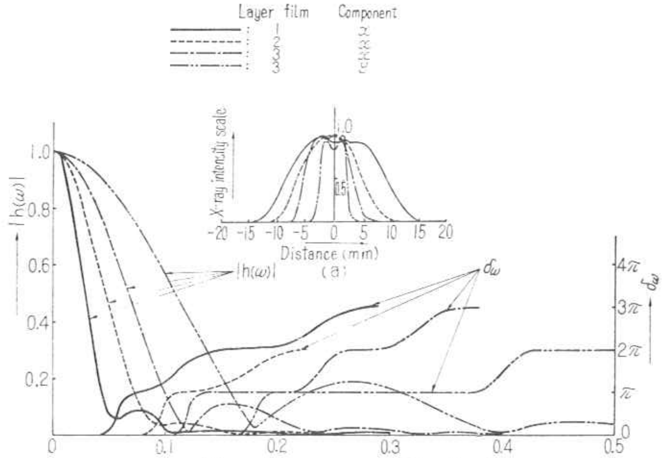



**Fig. 13** X-ray intensity distributions and their spatial frequency characteristics, obtained from slit images of moving X-ray tube focus in the case of multi-layer Planigraphy. $R:r=1:5$

**Fig. 14** (**a**), (**b**) は円軌道型多層断層で 1, 2, 3 層フィルムにそれぞれ得られた運動する焦点の点像強度分布から光学スリットによつて求めた $x$ 軸方向 (**a**)，$y$ 軸方向 (**b**) の線像強度分布 (a) およびそれらの空間周波数特性 (b) である．いずれも5倍大実効焦点像の場合のものである．

1, 2 位置に関して運動する焦点像の $x$ 軸，$y$ 軸方向の空間周波数特性は (45) 式と (74) 式で $p_x(\theta)$, $p_y(\theta)$, $k_x(\theta)$, $k_y(\theta)$ を常数，$\alpha=0$ と考え，$n(x, y, \theta)$ を無視すると，(75) 式から，

$$\hat{h}(\nu, \tau) \fallingdotseq \int_0^{2\pi} \hat{f}(\nu, \tau) \exp(-j2\pi(\nu x'+\tau y'))\, d\theta \qquad (83)$$

となり，ここで，$\nu$ 成分だけを考えて，

$$x'(\theta)=D(l)\cos\theta \qquad (84)$$

とすると，

$$\hat{h}_1(\nu) \fallingdotseq \int_0^{2\pi} \hat{f}_1(\nu) \exp(-j2\pi\nu x'(\theta))\, d\theta$$

$$=2\pi J_0(2\pi\nu D(l))\,\hat{f}_1(\nu) \qquad (85)$$

$\tau$ 成分だけを考えて，

$$y'(\theta)=D(l)\sin\theta \qquad (86)$$

とすると，

$$\hat{h}_2(\tau) \fallingdotseq \int_0^{2\pi} \hat{f}_2(\tau) \exp(-j2\pi\tau y'(\theta))\, d\theta$$

$$=2\pi J_0(2\pi\tau D(l))\,\hat{f}_2(\tau) \qquad (87)$$

(ただし，$J_0$ は第1種 Bessel 関数である)

となる．すなわち，$l$ が大きいときは焦点のレスポンス関数よりも Bessel 関数の項（運動のレスポンス関数に相当する）がきいて，焦点の方向による特性のちがいが全体としてあまりでていない．異なる焦点に対しても同じことがいえる．しかし，$l$ が小さくなると影響がでてきて $l=0$ で (45) 式は (42) 式となり，3位置に関しては (42) 式と (72) 式で $k_x(\theta)$, $k_y(\theta)$ を常数，$\alpha=0$ と考え $n(x, y, \theta)$ を無視すると (73) 式から焦点のレスポンス関数となり，方向による特性のちがいがでてきている．ここで注意することは $\alpha$ が実際は無視できないことで，(42) 式で変数 $y-x\tan\alpha(\theta)$ の項が $\theta$ の変化にともなつて振動しているために，通常みられる二つの山の線像強度分布が一つの山になることである．したがつて，3位置に関して運動する焦点像の $y$ 軸方向の空間周波数特性は，その高周波領域で静止焦点のレスポンス関数より $|h(\omega)|$ が悪くなつている．また，この装置の $\boldsymbol{O}(\theta)$ は小さいと考えられる．

1方向移動型と円軌道型を比較してみると，それらの 1, 2 位置に関して運動する焦点像の空間周波数特性は，$x$ 軸方向では大まかな近似として $S_a(\omega)$ と Bessel 関数の比較となり，$x_0'=r$ についていえば円軌道型の方がボケが大きく観察上有利である．$y$ 軸方向では問題なく円軌道型がよい．3位置に関してガタ $\boldsymbol{O}(\theta)$ を別とすれば，

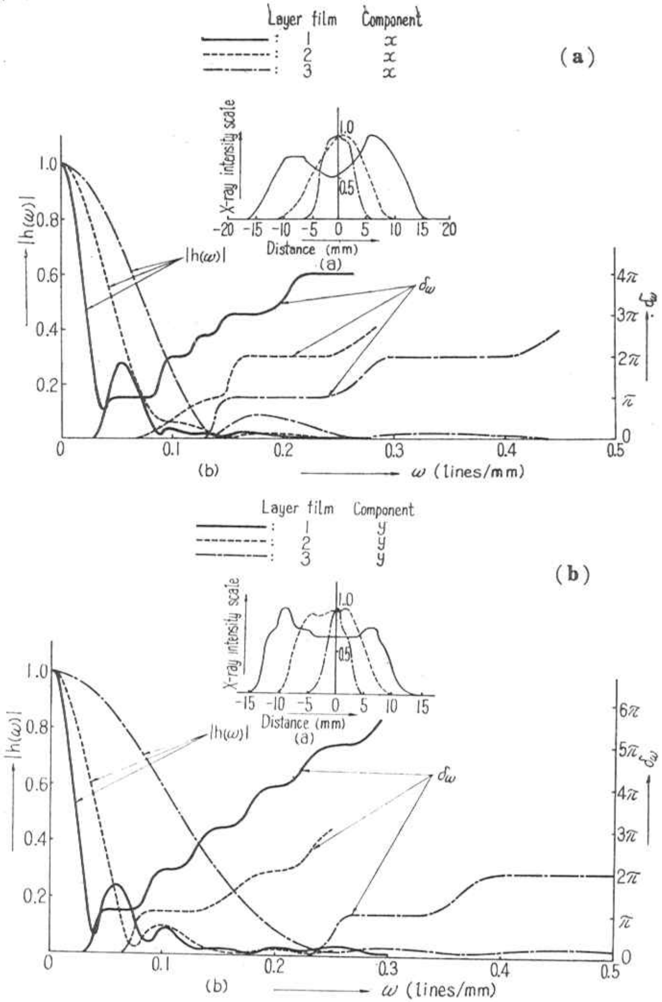



Fig. 14 (a), (b) X-ray intensity distributions and their spatial frequency characteristics in $x$-component (a) and $y$-component (b), obtained from slit images of moving X-ray tube focus in the case of multi-layer Circus Tomography.
$R : r = 1 : 5$

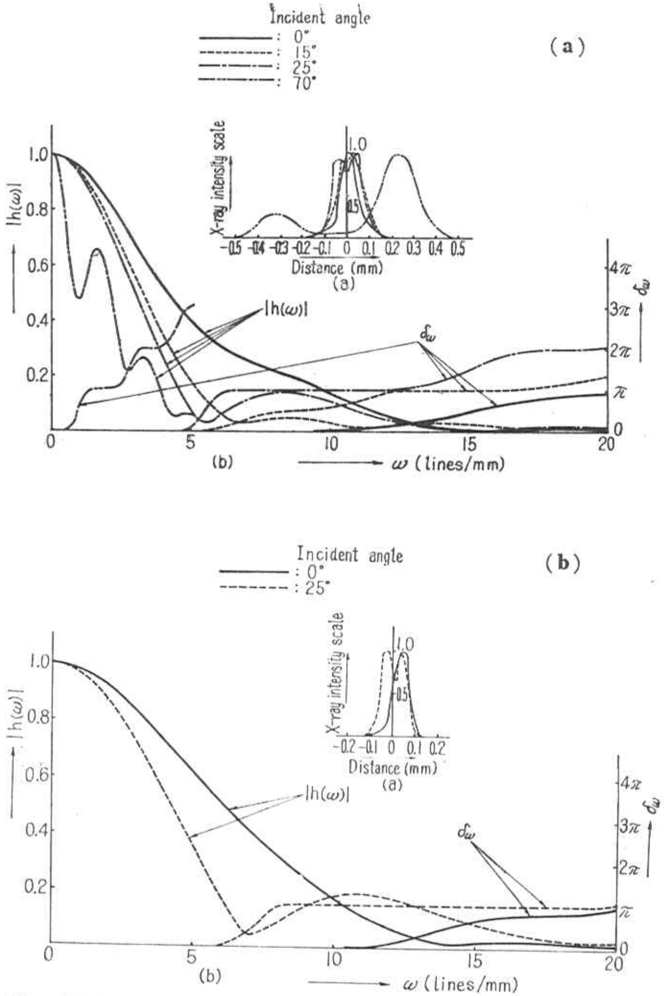
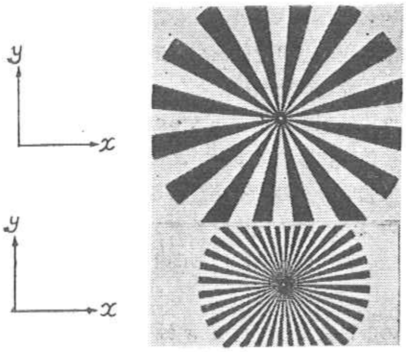
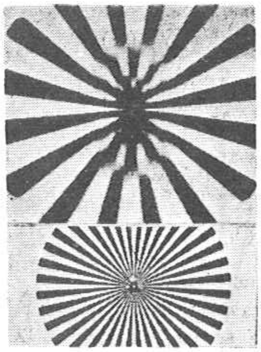



Fig. 15 (a), (b) X-ray intensity distributions and spatial frequency characteristics in $x$-component in the case of X-ray entering obliquely into X-ray film sandwiched by intensifying screens (a) and X-ray film (b).




(a)




(b)

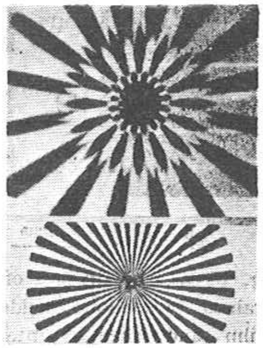


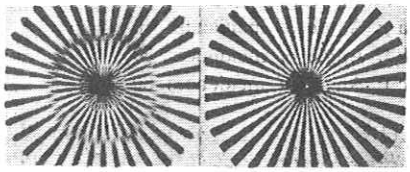

**Fig. 17** (**a**)

**Fig. 16** (**a**) Siemens star charts made of lead plate, 2 mm in thickness, which have different fan-shaped angle.

(**b**) Single layer radiographs by Tomography, of Siemens star charts of different sizes placed at position 2, 3. Focus size: 2×2 mm Center of layer radiography is fixed at position 3.

(a): Image of middle sized chart at position 2

(b): Image of small chart at position 3




(**b**)

**Fig. 17** (**a**) Multi-layer radiographs obtained on 2nd, 3rd films, from top to bottom, by Circus Tomography, of Siemens charts of different sizes placed at position 3. Focus size: 1×1 mm

Center of layer radiography is fixed at position 3.

(a): Image of middle sized chart on 2nd film

(b): Image of small chart on 3rd film

(**b**) Images of small Siemens chart shifted slightly upwards from the position 3 of **Fig. 17** (**a**).

Shifted distances in upper figure is 5 mm, and 1 mm in the lower.

同じ焦点では円軌道型は $y$ 軸方向の高周波特性の $|h(\omega)|$ が1方向移動型より劣る．$x$ 軸方向はいずれもかわらない．1枚撮りと多層は前記の近似で同じ特性となる．

**Fig. 15** (**a**), (**b**) は斜入X線が入射角 0°, 15°, 25°, 70° で複増感紙 (**a**) ならびに 0°, 25° でフィルム (**b**) に入射するとき，それぞれの $x$ 軸方向の線像強度分布 (a) およびそれらの空間周波数特性 (b) である．

(**a**) 図の特性は screen-film system におけるものである．線像強度分布は (54) 式で $x_1, x_2$ が $\theta$ に比例して大きくなると考えられるので，$\theta$ が 15°, 25°, 70° となるにしたがいくぼみが深くなり，ついには分離した山となる．山の高い方が前面増感紙の発光によるものである．高感度になるにつれ，$a(\theta)$, $c(\theta)$ は小さくなつて谷ができにくくなる．空間周波数特性で垂直入射X線の場合にも偽解像[4] がみられるのはスリット幅によるものである．入射角 25°, 空間周波数 0.5 lines/mm までの断層撮影焦点像の実験では，スリット幅によるものも含めて約2% までの誤差におさえることができる．

(**b**) 図はX線フィルムが両面乳剤塗布という構造上の理由で，複増感紙と同様の空間周波数特性を示す．

## 5.3 ジーメンスチャート

**Fig. 16** (**a**) の (a), (b) はそれぞれ扇形角が中，小のジーメンスチャートをX線撮影したものである．各ジーメンスチャートの中心を原点，$x$ 軸，$y$ 軸を図のようにとる．どの型のX線管短軸もこの $y$ 軸に平行である．同図 (**b**) の (a), (b) は円弧型で公称 2×2 mm 焦点によるジーメンスチャートの1枚撮り断層写真である．(**a**) は断層中心から上へ 1 cm, (**b**) は断層中心のそれぞれの面のボケの状態を示している．

**Fig. 17** (**a**) の (a), (b) は円軌道型で公称 1×1 mm 焦点によるジーメンスチャートの多層断層写真である．同図 (**b**) の (a), (b) は円軌道型1枚撮りでジーメンスチャート小を断層中心から上へ 5 mm, 1 mm ずらしてそれぞれ断層撮影した写真である．

**Fig. 18** (**a**), (**b**) の (a), (b), (c) はストロボ法[4]によるジーメンスチャートを斜入X線によつて，複増感紙使用のフィルム (**a**) およびフィルム (**b**) それぞれに撮影したものである．いずれも (a) は入射角 0°, (b) は 30°, (c) は 60° である．

**Fig. 18** (**a**), (**b**) の (b), (c) に明らかに偽解像を認める．(**b**) の (a) では明らかでないが，ネガフィルムでは 14〜15 lines/mm の所に $|h(\omega)|=0$ がみられ **Fig. 15**

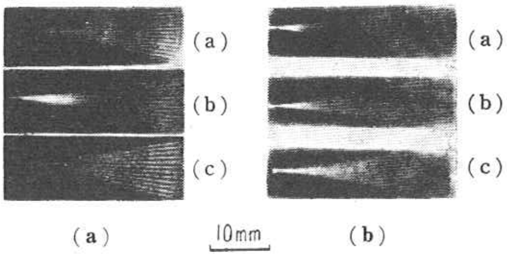



**Fig. 18 (a), (b)** Images of Siemens chart, obtained by oblique incident X-ray on X-ray film sandwiched by intensifying screens (**a**) and X-ray film (**b**), by the use of the principle of stroboscope.[4)]
(a): Angle of incidence: 0°
(b): Angle of incidence: 30°
(c): Angle of incidence: 60°

(**b**) とほぼ一致する．したがつて，0.1 mm 幅の鉛スリットは実効的に約 0.07 mm であると思われる．**Fig. 15** (**a**), (**b**) の $\omega=14\sim15$ lines/mm の所ですべての特性は $|h(\omega)|=0$ になるべきであるが，そうでないのは測定誤差および計算が高周波で精度が落ちるからと思われる．

省略した円弧型小焦点1枚撮り，平行型多層断層の写真も含めて，以上のジーメンスチャートの断層像は計算した空間周波数特性とよい一致を示している．

## 6. 改　　良

以上の計算および実験結果から現在の方式で少しでも断層写真をよくするためにつぎのような改良を提案する．

まず線源部で現方式の $X$ 軸に平行なX線管長軸を $Y$ 軸に平行にあらためる．1方向移動型ではこの改良によつて，焦点像 $x$ 軸方向のよい空間周波数特性のものを引き伸ばして悪くし，$y$ 軸方向の悪い特性のものを残してできるだけ均等なボケを得るようにする．いわゆるボケのひきを少なくしてボケ味をよくすることができる．したがつて，断層面の画質も障害陰影の減少によつて改善される．円軌道型ではこの改良によつて，3位置に関して運動する焦点の線像の振動による像のくずれの影響をできるだけ少なくし，$x$ 軸方向の線像強度分布の二つの山を残し，高周波特性の $|h(\omega)|$ の低下を防いで断層面のより大きな情報（ただし，偽解像を含む）を得ることができる．

つぎに受光部で複増感紙を前面増感紙だけに，フィルムの両面乳剤を片面乳剤塗布にすることである．この改良のために感度の低下とコントラストの減少を補う必要があり，これに伴う特性の低下が考えられるが，斜入X線に対する線像強度分布のすそ幅を大きく減少できるならば，これらの $x, y$ 軸方向のレスポンス関数を均等に近づけ受光系に必要な低周波特性の向上をはかることができる．

以上2部分の改良によつて従来 $x$ 軸方向に悪く $y$ 軸方向に良かつた断層面の不均等な特性を，平均された特性に近づけ断層面の画質の向上が期待できる．これらの改良について目下実験中である．

## 7. 結　　言

断層撮影像のボケに関し，運動する焦点像および増感紙，フィルムなどの空間周波数特性を理論面と実験面から研究し，解析と新しい 2,3 の提案を行なつた．

終わりに，本研究に御理解と御鞭撻を戴いた大阪大学教授立入弘博士，理論面で御懇篤な御指導と御援助を戴いた大阪大学教授佐藤正次博士，助教授小泉澄之博士に深く感謝の意を表する．電子計算機による計算をお願いした東京芝浦電気株式会社中央研究所井上多門博士に厚く感謝する．また，装置の改良は主に大阪大学文部技官遠藤俊夫氏，円弧型の実験は同じく山下一也氏，増感紙，フィルムの実験は同じく巣組一男氏，振子棒の製作は同じく前田真行氏，平行型の実験は同じく山本義憲氏，円軌道型の実験は主にダイハツ保健センター春田修氏にそれぞれ担当御尽力戴いた．ここに厚く感謝する．

## 文　　献

1) A. E. M. Bocage: French patent **No. 536, 464** (1922)
2) Ziedses des Plantes: Fortschr. Röntg. 47 (1933) 407.
3) Manuel de Abreau: Am. J. Roentgenol. 60 (1948) 668.
4) 内田　勝: 応用物理 34 (1965) 97.
5) 村田和美: 放射線イメージインフォーメーション研究会資料 4 (1965) 3.
6) 土井邦雄: 応用物理 34 (1965) 663.

質 問 討 論

高橋：ジーメンスチャートはきれいに出ているが，何度やってもうまく出なかったというのはチャートに厚みがあるので又実験誤差が入っているのではないか。

内田：そうは思っていない。

高橋：ジーメンスチャートは3つのうちどれが一番よく撮れるかということではないのか。

内田：ジーメンスチャートには重きを置かないで線像の方に重点をおいている。

土井：線像のときもセンターを合せるのは同じことではないか。

内田：スリットは管球について動いているから線像の場合は問題ない。ジーメンスチャートは普通の断層と同じ撮り方だ。

高橋：くどい様だがピンホールのときは合っていなかったのではないか。方向性からみてそう思える。

内田：考えられることだが出来るだけ同じ人が同じやり方でやっているから，そうは考えられない。

竹中：厚みの関係で8の字になる。完全に合わせれば円になる。

高橋：眼でみるほどのボケがどうなるか障害陰影がどうなるかが問題だ。実際面でどれだけちがうかを知り度い。

内田：定量的にやるつもりだ。少しでも良くするために管球の方向をかえ増感紙は前面のみでフィルムは塗布むらのない様にして片面にすればよい。

高橋：X線撮影の行き方としてはX線像は役立つ程度でよい。増感紙は感度があればよいという方向に向いている。我々は画質を一寸でも良くしようとしているが，ものによっては少しでもということはないという考え方もある。断層の実際のなりたち上どのあたりまで許されるのかその技術と医学のバランスで話し合うことが必要だろう。円軌道型と平行型の比較でどのような所までボケが許されるのか不明だ。

竹中：X線管焦点の方向についてだが物をみる場合 $x$，$y$ 軸の合成と乙軸の方も入っているからそれ丈ではいえないのではないか。

内田：ボケのバランスを問題にしているので実際の写真を医学者にみてもらいたい。

竹中：上下の物の重なりも問題にしてほしい。

津田：普通 cos で補正してあるが今 $\cos^2$ で効くといわれたが cos でいいのではないか。

内田：図で説明

土井：点線像のひろがりを $OTF$ で比較しておられるが運動のレスポンスを考えるだけでいいのではないか。

内田：振子角 $\theta$ の場合に $\theta$ で積分することが必要になるからこの要素がかかっている。

土井：8度の振れは画角特性としてもいいのではないか。

内田：運動方式によるものである。

金森：線像は円で走査，円像はスリットで走査したのか。

内田：そうだ。