第3編 被　写　体

第1章	解　説	津田元久	1頁
第2章	第1節 モンテカルロ法によるラジオグラフィーの解析　(5—1)	畑中　勇	2
	第2節 最大情報量撮影第9報　(4—5′(d))	内田　勝 村田和美	8
	第3節 散乱線のレスポンス関数の測定　(6—5)	津田元久	13
	第4節 イメジアンプリファイア透視およびX線テレビジョン透視におけるX線像について	津田元久	18
第3章	X線撮影系のレスポンス関数(Ⅳ) 被写体および運動　(6—2)	土井邦雄	23

第３編　被写体

第１章　解説

Ｘ線像は被写体を透過してくるＸ線によって作られるものである。この点，一般の光学像の場合の被写体と異なっている。透過Ｘ線によって作られるということから，いろいろの面倒な問題が派生してくる。

まず，Ｘ線が透過するときに発生する散乱Ｘ線のために，像に“かぶり”を生じ，さらに“ボケ”が増してくる。

つぎに，被写体を透過したＸ線の強度分布を求めようとすると，被写体の厚サと透過Ｘ線強度の関係がリニアでなく，指数関数的に変化するので，取扱いがやっかいになる。実際問題としては，このような場合にも散乱線が関与して来るであろう。

このように被写体のＸ線に対する吸収や散乱がＸ線像に大きく影響するわけであるが，この吸収や散乱の程度はＸ線のエネルギーによっても変化するので，問題はさらに複雑になる。

Ｘ線検査の目的は，得られた像から被写体の内部（直接眼で見ることはできない）の有様を推測することにあるわけで，この点であらかじめ知られた形の被写体が，Ｘ線像としてどのように表現されるかを知っておくことが必要になる。

いいかえれば，このような知識の集積のうえに立ってはじめて，診断が可能になるわけである。したがって被写体についてのＸ線像の問題は非常に重要である。

うえに述べたような状況から，なにか適当な標準被写体を決めようという試みは当然の成行きであろう。従来，このような標準被写体としては，間接撮影に用いられて来た平行銅線群解像度試験片や Burger ファントムなどがある。しかしながら，それぞれ一長一短があり，すべての点で満足なものはない。

ＲＩＩ 研究会でも佐柳[*1]らによって直観的にＸ線像の質が判定でき，しかも物理的な像評価（レスポンス関数的な評価）もできるというようなファントムを目標に提案がなされ，さらに検討が進められている現状である。

本編では，第２章に散乱Ｘ線に関する問題が採り上げられている。第１節ではひとつひとつのＸ線量子が吸収体内に入射したときの振舞いを，モンテカルロ法を用いて，模形的計算的に調べている。この結果からＸ線が吸収体を通過したとき，散乱線を出すありさまが定性的によくわかる。

第２章，第２節ではＸ線撮影系で被写体として吸収体をＸ線撮影したとき，撮影系の綜合レスポンス関数を，いろいろの場合について求めている。

第２章，第３節では被写体を透過したＸ線（直接Ｘ線および散乱Ｘ線を含めて）のレスポンス関数を求めて系の中で散乱線が画質に与える効果を論じている。

第２章，第４節では像の識別度が像の雑音，像の運動，散乱Ｘ線などでどのように変化するかを，実験的に求めている。

第３章では被写体を通過したＸ線の強度分布を新しいモデルを導入して求める方法を述べ，実験と比較し，その妥当性を検討するとともに，このようなモデルの応用についても述べている。　（津田記）

＊1．佐柳ほか“試作ファントムについて”
　第３，４回ＲＩＩ 研究会例会において口頭で発表された。

第2章

第1節　モンテカルロ法によるラジオグラフィーの解析

富士フィルム研　　　　畑中　　勇

1. 要　旨

ラジオグラフィーにおける散乱線の画質におよぼす影響に関しては，定量的に明らかな議論は行われていない。これは，くわしい実験が難しく又それには莫大な経費を要するからである。実験に代って計算機を用いたシミュレーションを行ったので報告する。

人体に相当する水ファントームの結果は日頃の経験と良く合っているがくわしい実験はまだ行っていない。

2. 序

モンテカルロ法とは，乱数あるいはダイスを使って計算し，問題をとく方法をいっているが，我々の場合対象となるX線は，量子であり，それが管球からランダムにとび出して被写体を通りぬけ，増感紙或は，Xレイフィルムを感光させる。つまりラジオグラフィーのX線過程が物理的にみてダイスを振って起っている事を考えればモンテカルロ法の適用はいとも自然である。

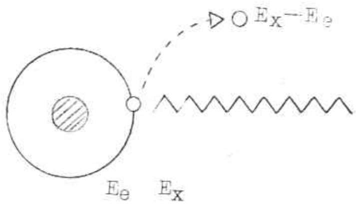
ラジオグラフィーでは光電効果，コンプトン効果，電子対創生，或いは，それによって生ずる電子のふるまいに関する法則等が問題となるのでこれらの法則に適合する様に乱数をコントロールして計算を行わせなければいけない。しかし本報告では，光電効果，コンプトン効果のみに適合する様にプログラミングを行った。

3. 理　論

3.1. 光電効果（X線の吸収）

X線が原子のそばにやってくると軌道電子は外にとび出す。これを光電効果という。

計算を行うに当ってはまず σ の値を物理表[1]よりよみとり，密度 ρ をかけて吸数係数としこれをもとにしてプログラムを作成する。



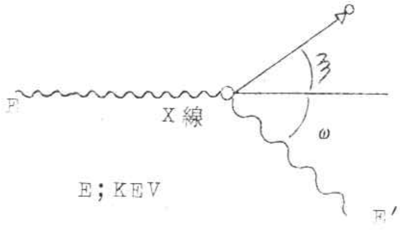
$$\alpha = \sigma \times \rho \ \left(cm^{-1} = \frac{cm^2}{gm} \times \frac{gm}{cm^3} \right)$$

σ の電圧依存性としては逆4乗則を用いる。（Fig. 1 参照）

3.2 コンプトン効果（X線の吸収をともなった散乱）

X線が電子と衝突を起すと，玉突きのように電子をはじき，それ自体もはじかれる。

X線自体のはじかれる角度とエネルギーとには次の如き関係がある。



$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{511} \quad (1 - \cos \omega)$$

物質のコンプトン効果を起す特性は２つで示す事が出来る。１つはトータルクロスセクションであり，これは，光電効果の吸収係数と同様であり，物理表[1] から数値を得る。（ Fig. 1. 参照 ）
もう１つは微分断面積と言い散乱の角度分布或いはＸ線のエネルギーのおち方を記述するものである。[2]
$\frac{\partial\sigma}{\partial E}$ を微分断面積とすると次の様に表わす事ができる。

$$\frac{\partial\sigma}{\partial E} = 2 \times 0.511\left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E'}\right) + (0.511)^2\cdot\left(\frac{1}{E} - \frac{1}{E'}\right)^2 + \left(\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

これらの式をもとにしてプログラムを作成する。

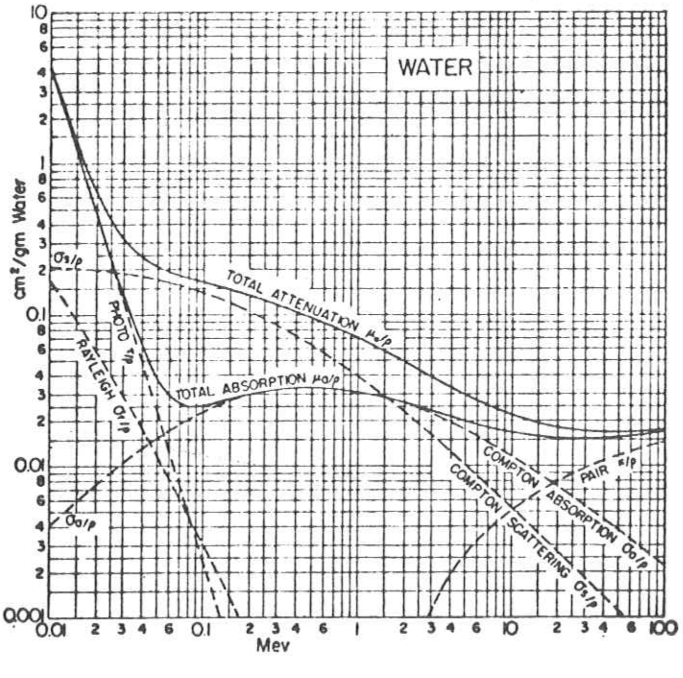


Fig. 1　コンプトン散乱と光電効果のグラフ
（ 水の場合 ）

4. 計 算 結 果

Fig. 2

水と空気が混入した様なファントームに５０ＫＥＶのエネルギーのＸ線を入射させた場合のファントームの中のＸ線のトレースであり，折れ曲ったところでコンプトン散乱が起っている。コンプトン散乱が起るとその部分にエネルギーをのこし，Ｘ線自体はエネルギーを減少する事になるがのこしたエネルギー(ＫＥＶ)を折り曲げた部位に記入した。

ファントーム中に終端のあるものは光電効果を示す。これによりＸ線のエネルギーは全て失われる。図中

47 KEV と記入したのはこの1例である。

ファントームの上，あるいは下の面にプロットした点は反射あるいは透過のX線を示す。それを集めると正確ではないが，たとえば破線の如くなる。

Fig. 3.

Fig. 2の統計である。200個のX線量子を入射させた場合の反射，透過X線およびファントーム中に光電効果，コンプトン散乱でトラップされたものを示す。

左端の数値はその個数（コンプトン散乱の場合は散乱回数）中央の数値は総エネルギー，右はしの数値は平均エネルギーを示す。

一番下の矢印の付近に付した数値は，透過したもののうち一度も散乱をうけずに透過した直接線の数を示す。

Fig. 4.

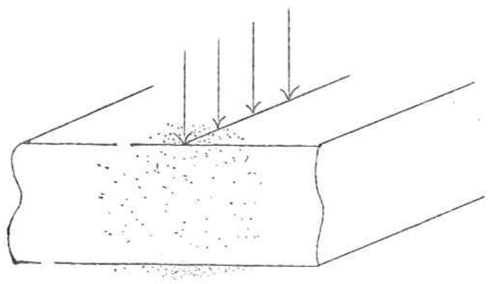
水100%のファントーム，つまり腹部に相当したファントームに70 KEVの高エネルギーのX線を入射させた場合の統計でこの場合透過するX線より反射するX線の方がはるかに大きく，透過するものも散乱線がほとんどで，200個中4個のみが直接線である。

又，ファントーム中に蓄積されるX線のエネルギーも Fig. 3. の場合の2倍程度となっている。

Fig. 5

透過X線の特性としてはエネルギー（電圧），ファントームからの射出位置および射出角とがある。射出角は，はぶくとして前2者をグラフに記入するために横軸に射出X線の広がりを，又縦軸にそのエネルギー（電圧）をとる。 Fig. 6. Fig. 7はこの様にしてプロットしたものである。

又特にことわりのないときは，ラインスプレッドつまり無限に細く長いスリットを通して入射したX線の横方向への広がりを示す。さらに断面の左半分を右半分に折りたたんである。



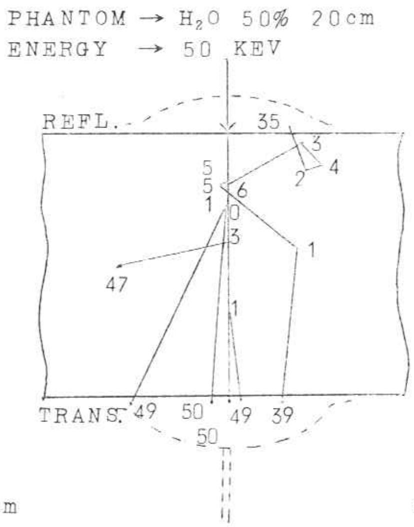


Fig. 2
X線トレースの例

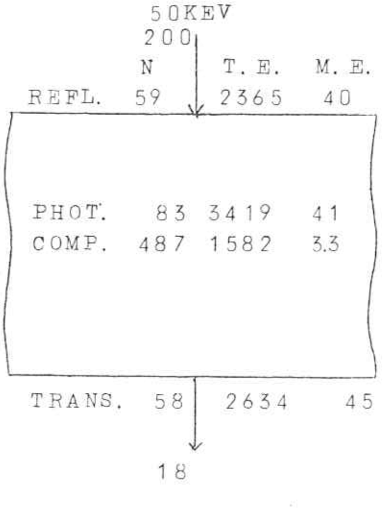


Fig. 3
水，空気
(50:50)
ファントーム の
統計

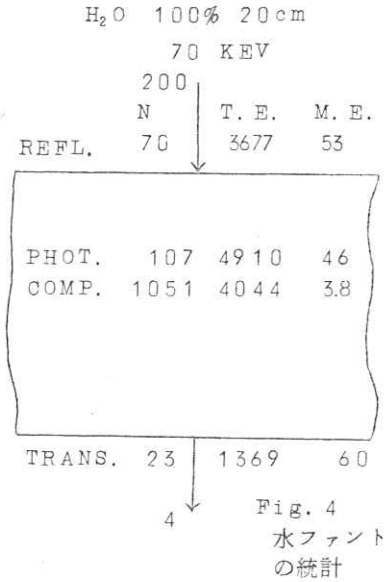


Fig. 4
水ファントーム
の統計

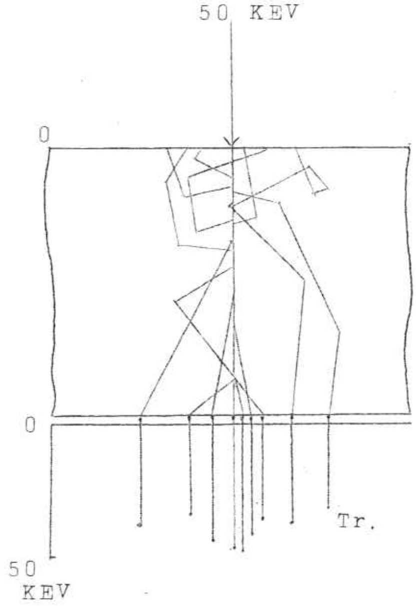


Fig. 5
透過，X線の広がりと
エネルギーをプロット
する方法

水空気ファントーム（胸部に相当）のラインスプレッド

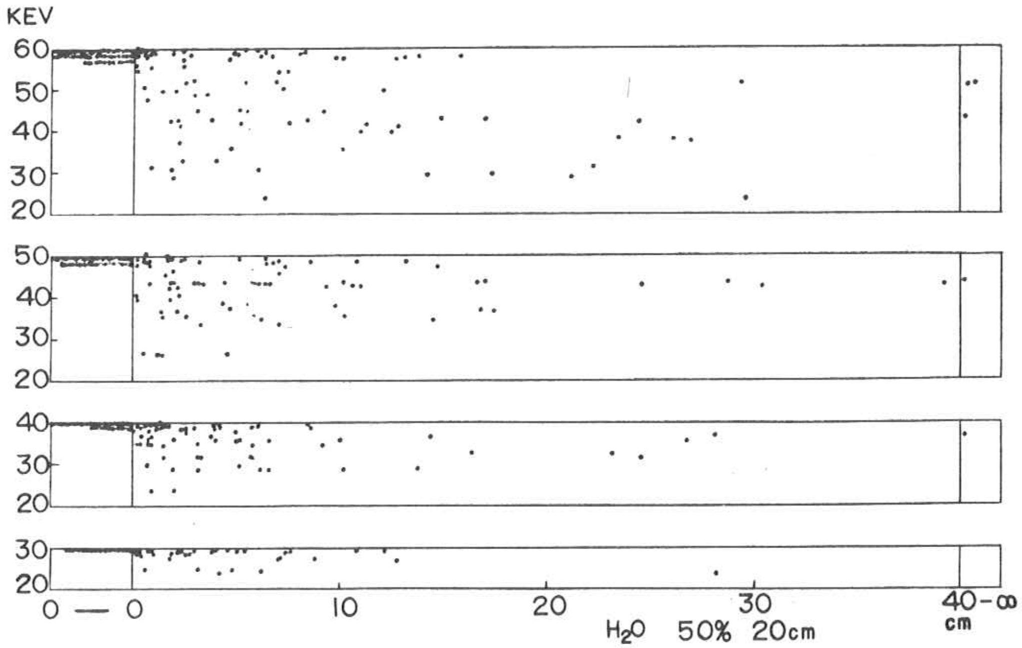


Fig. 6 透過Ｘ線のエネルギーと拡がり，水空気（５０：５０）ファントーム

Fig. 6

散乱戦のエネルギー差は，エネルギーが高いほど大きく，横方向への広がりもエネルギーの高い方がやゝ大きい。

散乱をうけずに直接透過するものの数は，左端の欄に一列に並べて記入した。１列は２０点である。この直接線は真の意味の画質形成に役立っている。

尚入射Ｘ線量子の数は，この場合400点とっているが，散乱線が有る場合無い場合の露出レベルの変化をこの図から計算する事が出来る。

Ｘ線によるラジオグラフィーでは，エネルギーの表示にＫＥＶでなくＫＶＰを用いるが，これは，例えば６０ＫＶＰの場合は，６０ＫＥＶをピークにして，それ以下の50. 40. 30. 20. ＫＥＶのエネルギーのＸ線を含んだものを考えれば良い。

水ファントーム（腹部に相当）のラインスプレッド

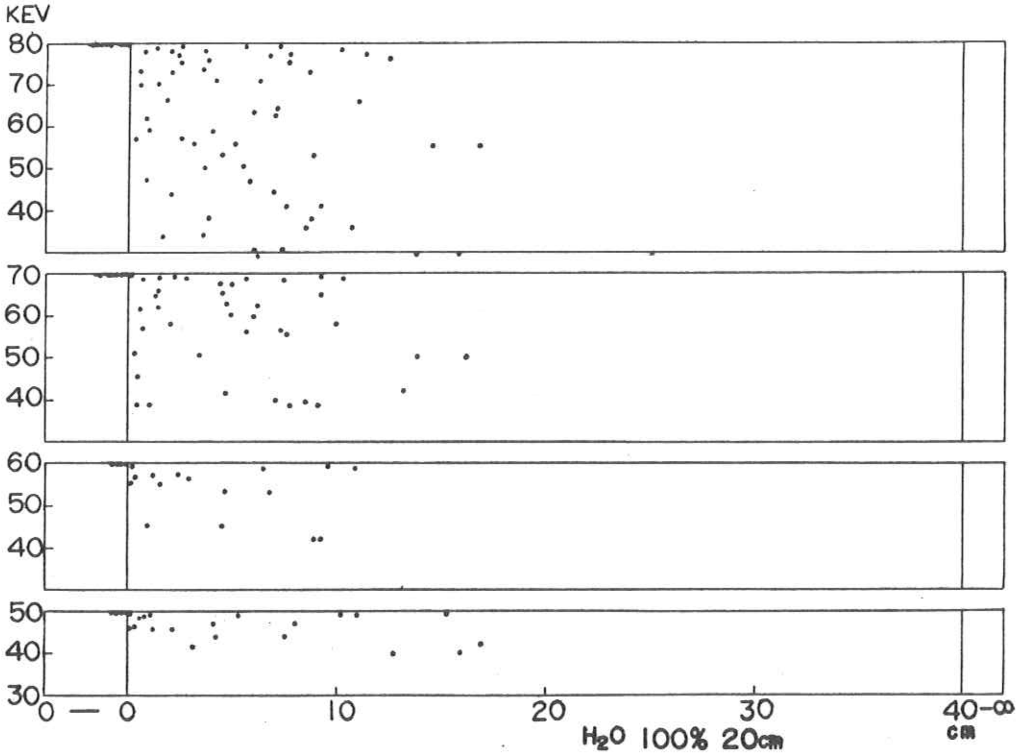


Fig. 7　透過X線エネルギーと拡がり，水ファントーム

Fig. 7

腹部の場合は，コンプトン散乱を多くうけるのでエネルギーのドロップは胸部の場合より大きい。左の欄の直接線の数は，胸部に比しはるかに少い。

しかし散乱線の横方向への広がりは胸部に比し近傍には，広がっているが遠方には，余り広がっていない。

5. 結 び

今回は事務用計算機．I．B．M．1440 を用いたので計算速度，コンパイラーの面で不利であり，能率が悪かった。次回は技術用計算機をフルに使って，より複雑なファントームにつきより高精度の計算を行いたい。

文 献

1. American Institute of Physics handbook
;2nd Edition(8–94)〔Mc Graw–Hill〕
2. Graphs of the Compton Euergy–Angle Relationship and the Klein–Nishina Formula from 10 KeV to 500 MeV
;By Ann T. Nelms N. B. S. Circular 542(1953)

質 問 討 論

奥村：200ケでは少ないのではないか。万のオーダーが必要と思われるが。

畑中：その通りだが数が多いと計算の時間がかかる。

野田：H_2O 50% 20㎝とH_2O 100% 20㎝ とは入射X線のひろがりは。

畑中：H_2O 50% 20㎝は 100% 10㎝である。幾何学的なひろがりのことである。

井上：レンジの決め方に疑点がある。

畑中：X線のレンジの決め方はむつかしい。

第2節 最大情報量撮影第9報
ファントームによるX線写真像の解析(I)

大工試 村 田 和 美
阪大医 内 田 勝

1. 目 的

X線によって物体または人体内部にある異物を写真撮影しその像を観察する場合，X線が異物の周囲の均一な媒質を通過するときに生ずる散乱の影響を考慮にいれなければならない。本研究では人体のファントームを用いてスリット状の異物の像がその周囲の媒質により，どのように変形されるかを実験によりもとめた。

2. 実 験

Fig. 1にしめすごとく医療用X線撮影装置によりファントームの上部に鉛板エッヂをおいて撮影した。管電圧（60 KVPおよび90 KVP），ファントームの媒質（水およびアクリル樹脂），ファントームの厚さ（0，5，10および15㎝）などの条件をいろいろ変えて撮影を行った。また散乱線の影響を減少させるためのBucky blendeも試みた。

3. 結 果

フィルム像をミクロフオトメーターで測定し露光線量に変換してからエッヂ像を微分し線像の強度分布を得た。さらにこれを数値積分によりフーリエ変換しこの撮影系のレスポンス関数を求めた。その一例を

Fig. 2にしめす。d. はX線管焦点とフィルムによるレスポンスをあらわすのでこれとa. b. c. とを比較すればファントーム内における散乱による影響の大きいことがわかる。散乱線には線像のボケを与えるものと，かなりの広範囲（1～2 cm）に拡がる微弱なフレアを与えるものとに区別され前者は一次的な散乱線，後者は二次的な散乱線によるものと推察される。ファントームの厚さを増すとフレアは増大するが線像のボケはあまり低下しない。Bucky blende によりフレアをかなり取除くことができるが線像のボケはよくならない。多くの実験の結果を解析しX線撮影像におよぼす散乱の影響を検討する。

Fig. 1　実験装置

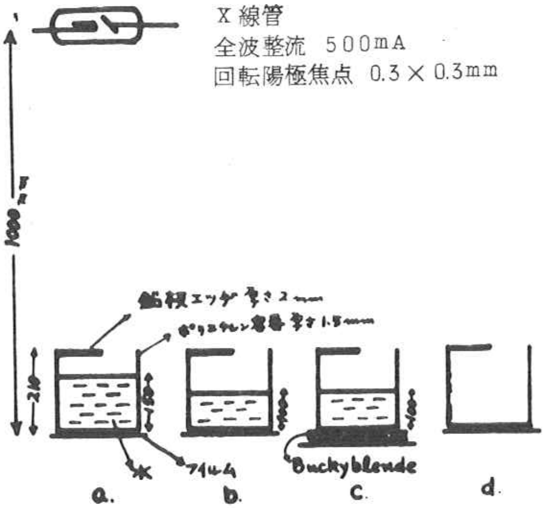
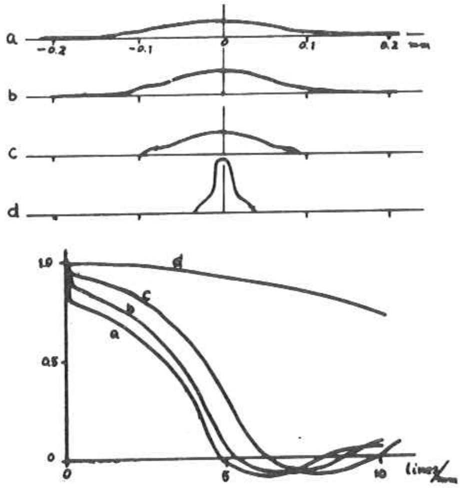


Fig. 2　Line spread function と O. T. F.



散乱 σ

（a） Thomson散乱

$$\frac{d_e\sigma_0}{d\Omega} = \frac{e^4}{2m_0^2c^4}(1+\cos^2\varphi)$$

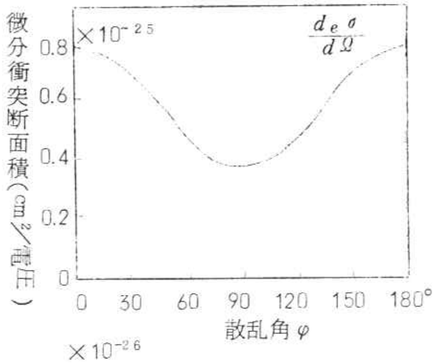
（b） Compton 散乱

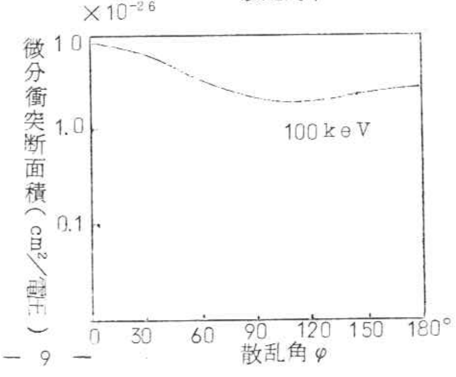
$$\frac{d_e\sigma_t}{d\Omega} = \frac{e^4}{2m_0^2c^4}(1+\cos^2\varphi)$$

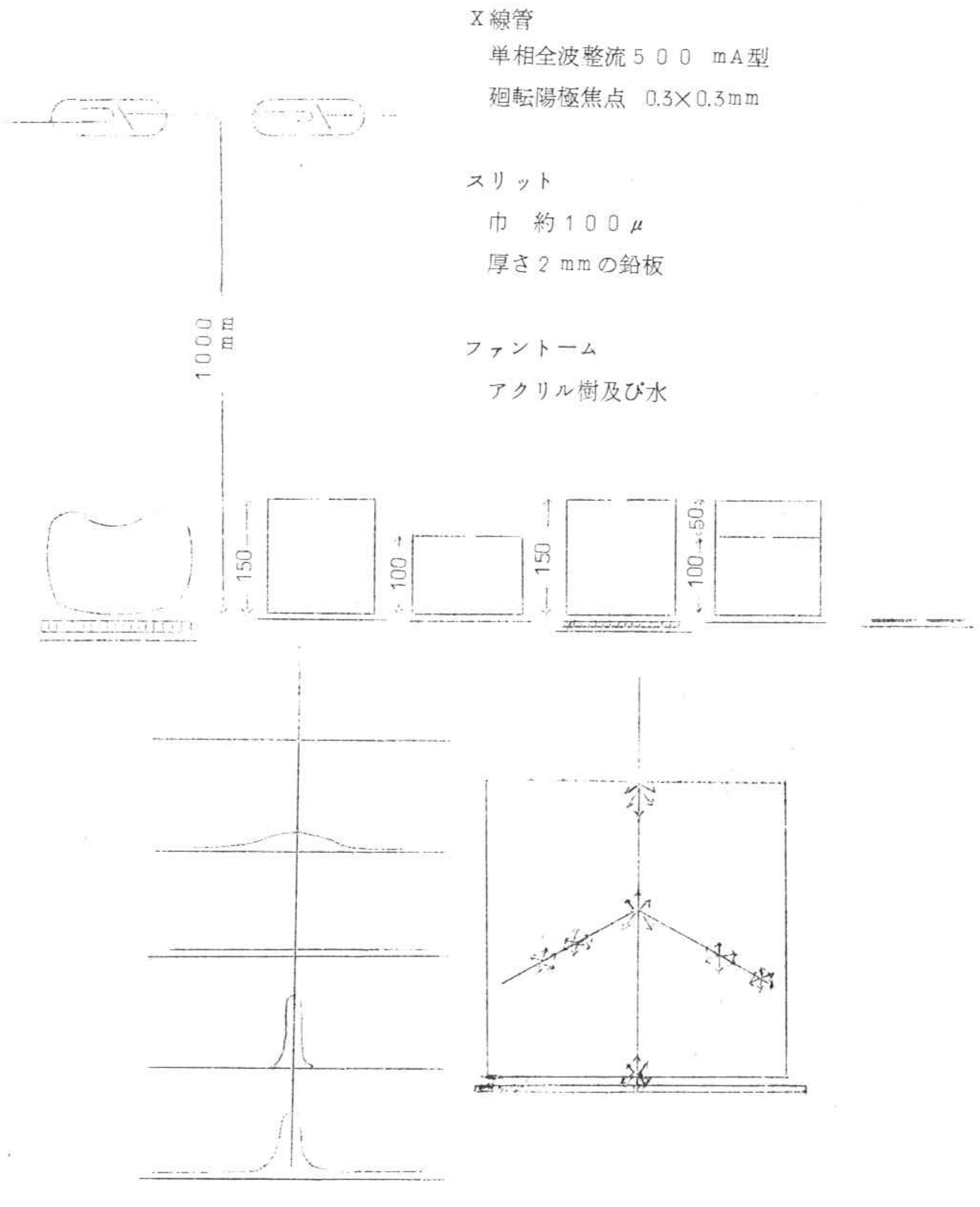
$$\times\frac{1}{[1+\alpha(1-\cos\varphi)]^2}$$

$$\times\left\{1+\frac{\alpha^2(1-\cos\varphi)^2}{(1+\cos^2\varphi)[1+\alpha(1-\cos\varphi)]}\right\}$$

ここに　$\alpha = \dfrac{h\nu}{m_0c^2}$

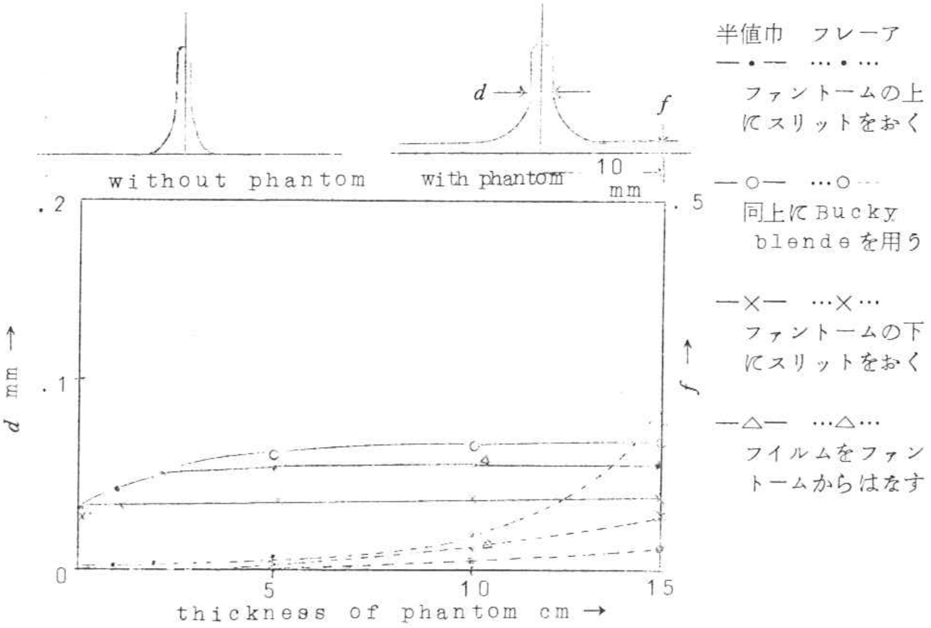




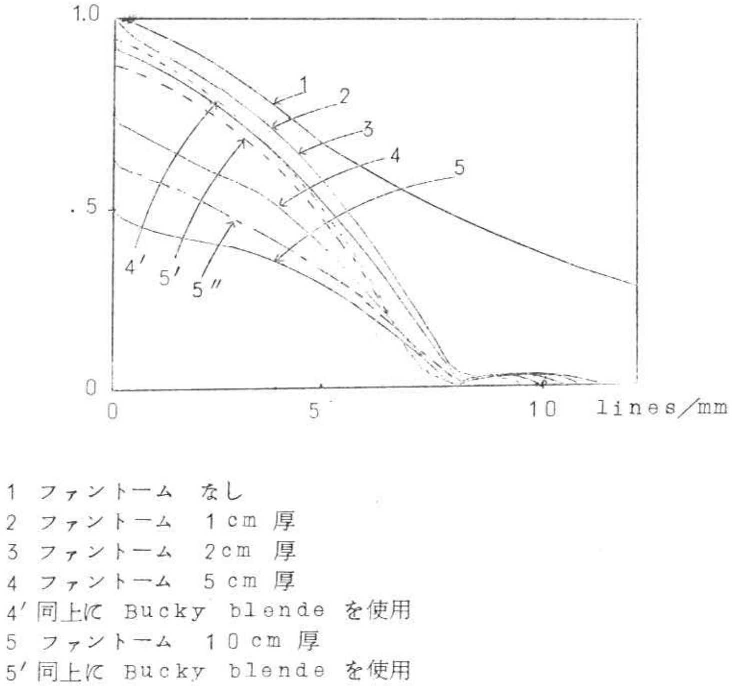


	半　値　巾	フレアー
1．ファントームの厚さを増すと	増	増
2．同上に Bucky blende を使用すると	わずか増	減
3．スリットの上にファントームをおくと	ほとんど不変	増
4．フイルムをファントームからはなすと	ほとんど不変	減

LINE SPREAD FUNCTION



OPTICAL TRANSFER FUNCTION



1 ファントーム　なし
2 ファントーム　1cm 厚
3 ファントーム　2cm 厚
4 ファントーム　5cm 厚
4′ 同上に Bucky blende を使用
5 ファントーム　10cm 厚
5′ 同上に Bucky blende を使用
5″ ファントーム　10 cm 厚をスリットの上におく

質　問　討　論

土井：被写体とフィルム間の距離は？

内田：約 0.3 *mm*

第3節　散乱線のレスポンス関数の測定

津　田　元　久

X線吸収体内で発生する散乱X線がX線像の質を低下させることはよく知られており，リスホルムグリッドなどその対策も講じられている。しかしその量的な扱いは写真法などで散乱線の分布を知るにとどまっている。

散乱線がX線像に与える影響をみるために次のような実験を行なってみた。図1のような配置で，平行銅線群解像度試験片をアクリライトの吸収板に重ねたものを，イメジアンプリファイアで透視したとき，アクリライト板の厚サと解像度との関係を図2に示す。このときアクリライト板の厚サが変ってもイメジアンプリファイアへ入射するX線量率は一定値にした。解像度は試験片の銅線の直径で示されている。図2によれば，アクリライト板が厚くなるほど解像度が低下する。このような解像度低下は，散乱X線の拡がりによるボケの増大，および吸収体中で軟X線成分が選択的に吸収されることによって銅線のコントラストが低下することに起因するものと考えなければなるまい。（図1，図2）

ここでは散乱X線がX線像の質を低下させている程度をレスポンス関数を測定することによって調べてみた。X線吸収体としては人体組織に近いアクリライト板を用いた。

〔測　定〕

図3のような配置で測定を行なった。光検出器としては輝度計（Photo research Corporation製）を用い，X線装置は大出力工業用X線装置 WI−150L（島津製作所製）を用いた。

アクリライト板がなければケイ光板上の輝度分布は図4aのような形であるものが，ア

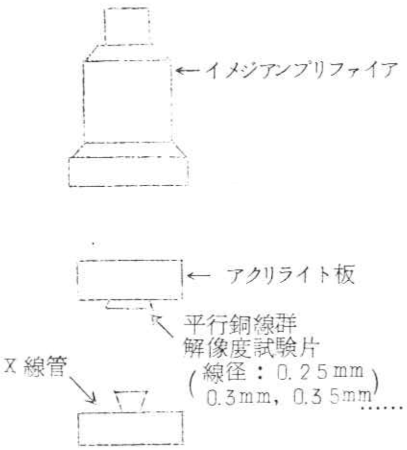


図1.　解像度試験片の透視

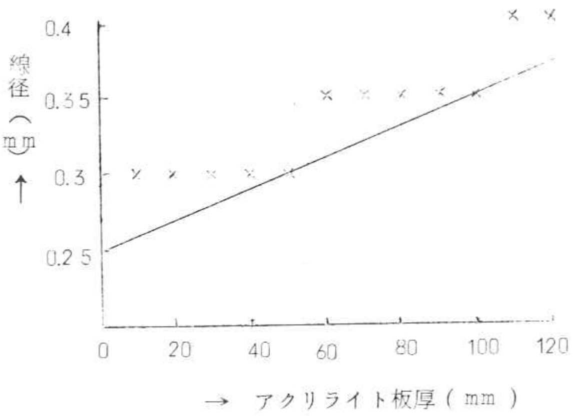


図2　吸収体の厚サと解像度

クリライト板を入れることによって図4bのように，より偏平な分布になる。これは常識的には「ボケが大きくなる」ということで理解されるわけであるが，ここではこの強度分布をフーリエ変換してレスポンス関数を測定した。フーリエ変換は，面積形正弦波チャートをケイ光板の上で走査させて光量の変化を測定する方法によった。（図3，図4a，b）

正弦波チャートは輝度計の視野内におさまるように小さいものを作って使用した。X線条件としては検出器の感度の関係から，人体透視の条件よりかなり高く 80KV 12MA を選んだ。鉛スリットの巾は 0.05㎜のものを用い，X線焦点は 2.5㎜× 2.5㎜を用いた。

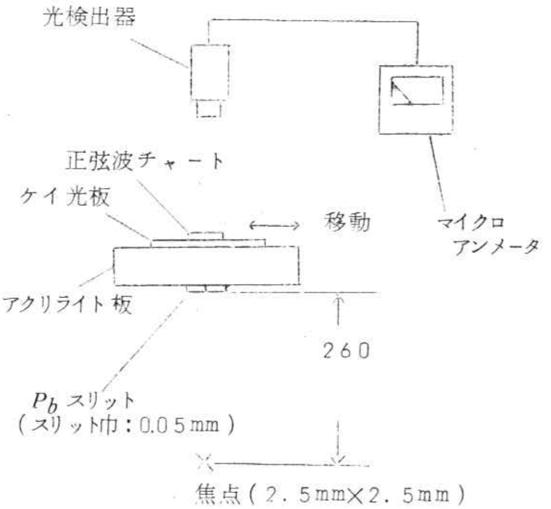


図3　散乱線のレスポンス関数の測定

〔測 定 結 果〕

吸収体なしのときのケイ光板のレスポンス関数を図5に，吸収体を入れたときのレスポンス関数を図6に示す。図6の関数を図5の関数で割算したものが散乱線のレスポンス関数で，それを図7に示す。（図5，図6，図7）

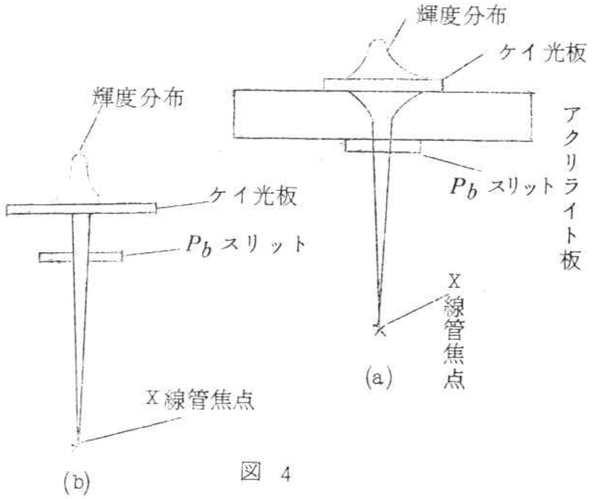


図 4

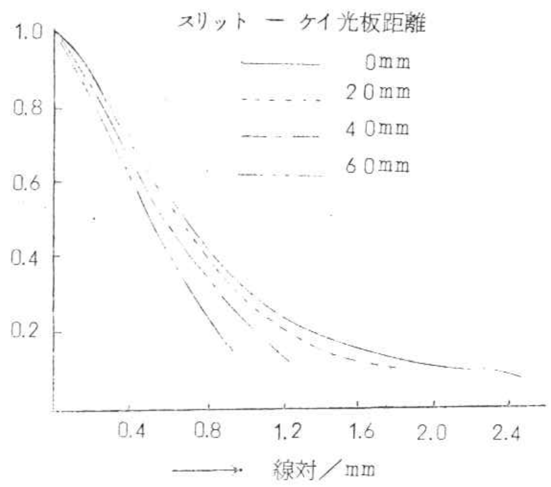


図5　ケイ光板とX線焦点の総合レスポンス関数

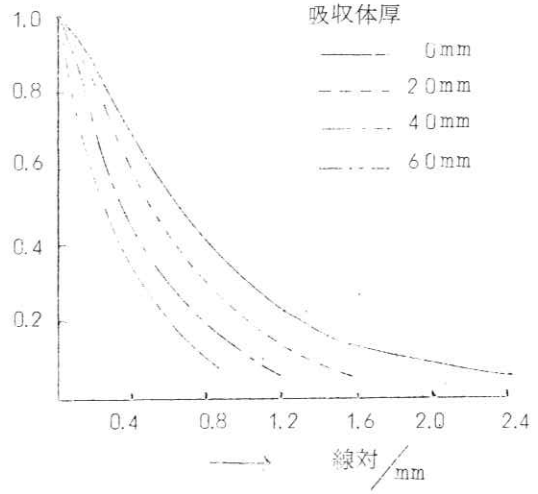


図6　ケイ光板，X線焦点，吸収体の総合レスポンス関数

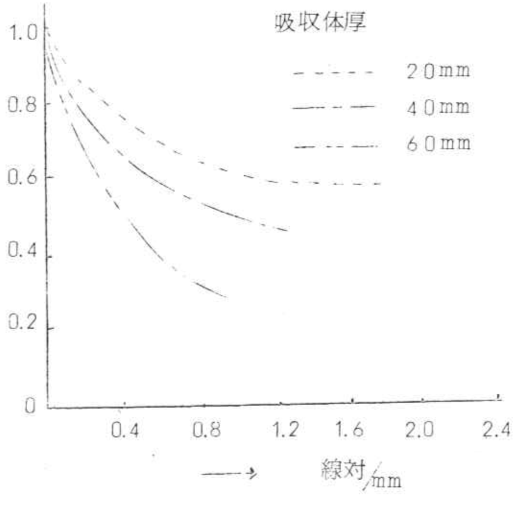


図7　散乱線のレスポンス関数

〔考　察〕

X線吸収体は図8に示すように，一般光学系に類似を求めるならば拡散ガラス板と相似である。図3のような配置でX線焦点および鉛スリットの巾が充分に小さい場合，ケイ光板に到着するX線は図9のような強度分布を持つはずで中央部のピークは直接透過X線に相当し，その他の部分は散乱X線に相当する。

（図8，図9，図10）

このような強度分布をフーリエ変換したものが図7の散乱線のレスポンス関数である。

強度分布を上に述べたふたつの部分に分けて考え，図10 のように $f(x)=f_1(x)+f_2(x)$ とし，両者の面積の割合をそれぞれ a，b（a＋b＝1）とする。直接透過X線 $f_1(x)$ は本来ユニットインパルス関数であるから $f_2(x)$ のレスポンス関数を $F_2(\omega)$ とすれば，$f(x)$ に対するレスポンス関数は次式のようになる。

$$F(\omega)=a+bF_2(\omega)$$

したがって，図７の曲線はωの大きな値である一定値に近付くはずであり，その一定値はアクリライト板を透過して出て来るＸ線のうちに占める直接透過Ｘ線（散乱Ｘ線でない部分）の割合を示すことになる。これから見れば，散乱線の含有率は非常に大きいものと考えられる。また図７のレスポンス関数の形はほとんど $F_2(\omega)$ の形で決まっていると言うことができる。

散乱線がバックグランドの増加をもたらし，画全体のコントラストを低下させていることは日常経験されることであるが，このことは図７のレスポンス関数の曲線が低周波域で急激に低下していることと一致し，（吸収体が厚いときほど著しい），平行銅線群の解像度が吸収体の厚みを増すとともに低下する事実も図７から説明することができる。

一方，散乱Ｘ線と直接Ｘ線ではそのエネルギーが違うため，アクリライトを透過したＸ線を更に次の吸収体を通過させると $f(x)$ の形は大きく変ってしまう。また図３でケイ光板をアクリライト板からはなすと，散乱Ｘ線は急激に減衰するが直接Ｘ線はさほど減衰しない。（散乱Ｘ線に対しては吸収体が線源であり，吸収体からの距離の自乗に反比例して強度が変化する。）このためにやはり $f(x)$ の形は吸収体からの距離で変って来る。

生体ではこの実験のように吸収体の構造が単純ではないから，直接にこの結果を適用することはできないが，散乱Ｘ線による像の質の低下の程度を推定するうえに役立つのではないかと考える。

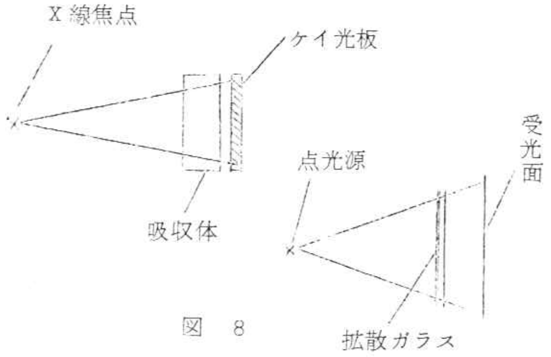


図　８

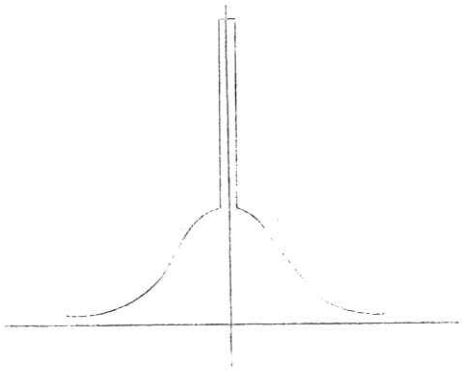


図９　ケイ光板に到達するＸ線の強度分布

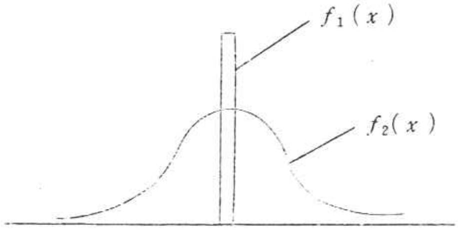
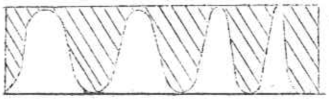


図１０　直接Ｘ線と散乱Ｘ線の分離

質 問 討 論

竹中：チャートの種類。



津田：サインウエーブのチャート。

土井：スポットメーターを使われたとき拡散板を使われたか。

津田：使っていない。

内田：春の応物への報告では１～１０㎜迄位でレスポンスが大きく変ってわるくなり，１０*cm*，２０*cm*となるとわるくなり方がたいしてかわらなかった。スリットの上のファントムによってフレアーがふえるだけとなった。フレアーは考えてないのか。

津田：考えていない。

光田：内田のは散乱線か。

内田：そうだ。

光田：フレアーはｎ次散乱によるものだから当然考えるべきだ。

津田：フレアーがあってもレスポンス関数の形自体はかわらない。

土井：正弦波チャートと螢光板は一緒に動かしたか。密着か。

津田：螢光板は固定，チャートを動かした。密着をねらった。

土井：焦点の　O．T．F．の所で拡大率を１に合わせるとどうなるか。

津田：一点で行って縮少しただけ。

第４節　イメジアンプリファイア透視およびＸ線テレビジョン透視における　Ｘ線像について

津　田　元　久

Ｘ線像を感度の高い結像系 — ここではイメジアンプリファイア（以下 ＩＡ と呼ぶ）およびＸ線テレビジョン（以下 ＸＴＶと呼ぶ）— で透視するとき，透視条件を変えると像の識別度がどのように変化するかを調べてみた。

変化させる条件としては，焦点の大キサおよびＸ線拡大などについてはすでに多くの報告があるので，ここではＸ線量率，被写体の運動，散乱線の量を選んだ。

高感度結像系を使った透視ではＸ線量子雑音がめだつようになり，これがＸ線像の識別度を低下させる。この効果をみるためにＸ線量率を変化させてみた。

われわれが透視を行なう被検体は多くの場合運動しているので，運動の効果も興味があった。

最後に散乱線が像の質を低下させることはよく知られているが，ここでは一般の場合とはやや違った方法でその影響をしらべてみた。なお ＩＡ は島津製作所製の９インチ形を，ＸＴＶ はこの９インチ形 ＩＡ にビジコン式の ＩＴＶ を組合わせたものを 使用した。

図１

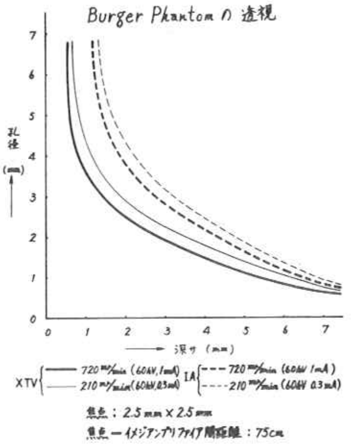
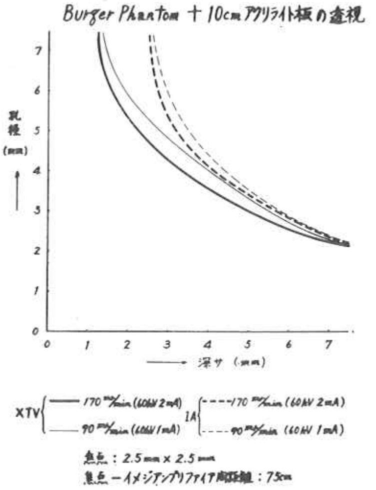


図２



〔１〕　Ｘ線量率と識別度

ＩＡ や ＸＴＶ などの試験によく使われている Ｂｕｒｇｅｒ ファントムを図３に示す。

この Ｂｕｒｇｅｒ ファントムを ＩＡ および ＸＴＶ で透視するとき，Ｘ線量率を変えてみると，図１，図２のような結果が得られた。この場合Ｘ線管電圧は ６０KVP一定にして線質による識別度の違いが出ないように配慮した。図からもわかるように，線量率を増すと識別度がよくなる。この識別度の向上は，Ｘ線量子雑音のＳＮ比が線量率の平方根に比例して上昇することに起因していると考えられる。

すなわち，低線量率のときは雑音が相対的に大きく像の微細構造が雑音にうずもれて見えなくなるのに対し，線量率が大きいときは，雑音が少なく細かい部分が見易くなる。

図３ Ｂｕｒｇｅｒ ファントム

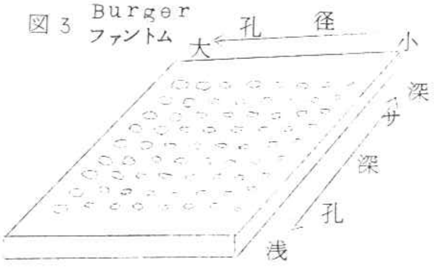


図１，図２をみると，ＩＡ と ＸＴＶ では ＸＴＶ の方が識別度がすぐれている。単に解像度だけを比較すれば ＩＡ の方がすぐ

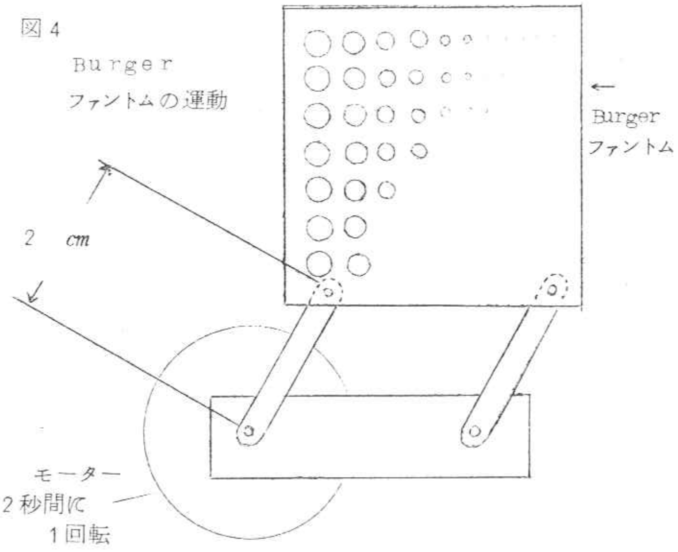
れている。XTV の場合には TV系 の解像度が XTV としての解像度を決めてしまうために，IA より悪くなる。

Burger ファントムを透視するときの識別度は TV系 によるコントラストの強調効果があるために XTVの方がよくなるようである。

IA, XTV いずれの場合も，吸収体を入れると IAの入力ケイ光面に到達するX線量率が減少して，SN比が悪くなること，および散乱線の影響のために識別度が低下することがわかる。

（図1，図2参照）

図4



〔2〕 被検体の運動と識別度

Burger ファントムに図4に示すような，2秒間で1回転する直径4 *cm* の円運動をさせたときの識別度を図5，図6に示す。

IA の場合は運動を与えたときの方が，静止状態よりも識別度が上昇する。一方XTV の場合は撮像管（この場合はビジコン）の残像が利いて来るためか，静止の場合の方が運動状態よりも識別度がよい。

次に平行銅線群解像度試験片を同様に円運動させてみると，やはり IA では運動させた方が見易く，XTV では静止の方が見易い。（表7参照）しかし，コントラストの高いとき（吸収体が入っていなくて，散乱線が少ないとき）はXTVでも運動しているときの方が見易い。このことは運動速度に関係があり。上述の運動より速くなれば，ビジコンの残像のためにやはり識別度は低下する。

円運動とは別に，平行銅線群に等速直線運動をさせて IAで透視したときの解

図5

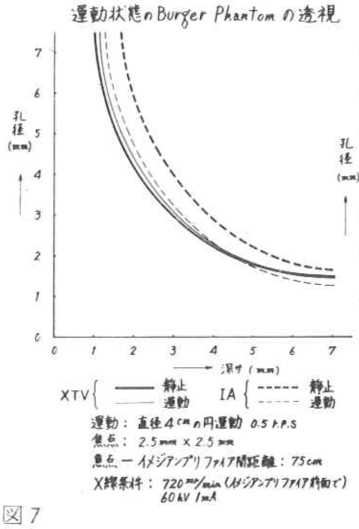


図6

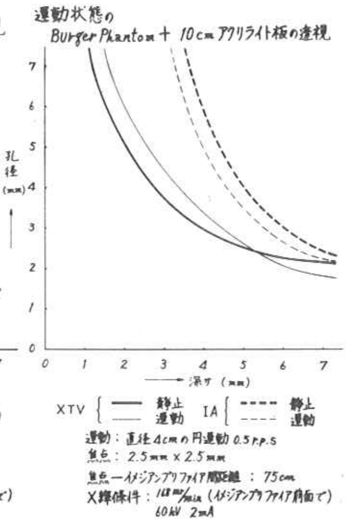


図7

XTVおよびIAの平行銅線群に対する解像度

吸収体の有無	運動の有無	IA	XTV
吸収体なし	静止	0.3 mm	0.5 mm
	運動	0.3 mm 静止より見易い	0.5 mm 静止よりやや見易い
アクリライト板 10 cm	静止	0.7 mm	0.6 mm
	運動	0.6 mm 静止より見易い	0.7 mm 残像のためにぼける

像度をしらべると図8のようになる。参考までに IA の残像特性を図9に示す。

図8

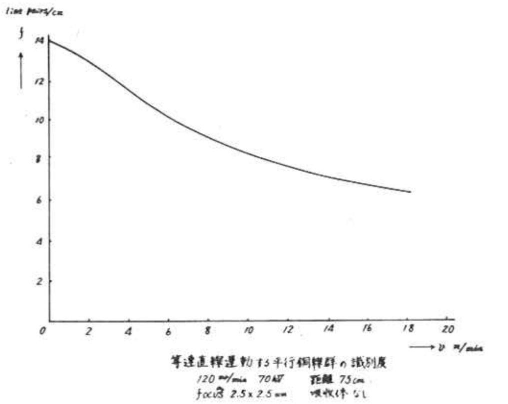
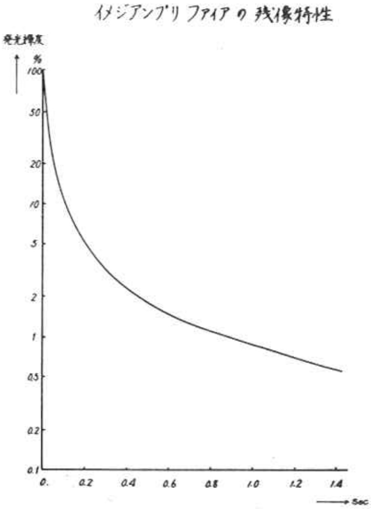


図9



〔3〕 散乱線と識別度

散乱線の影響を調べるために，アクリライトのX線吸収曲線を図10， 図11 のような2通りの配置で測定してみると図12 のようになる。アクリライトを選んだのは，その吸収特性が人体組織に近いといわれているためである。

図10
吸収測定の配置

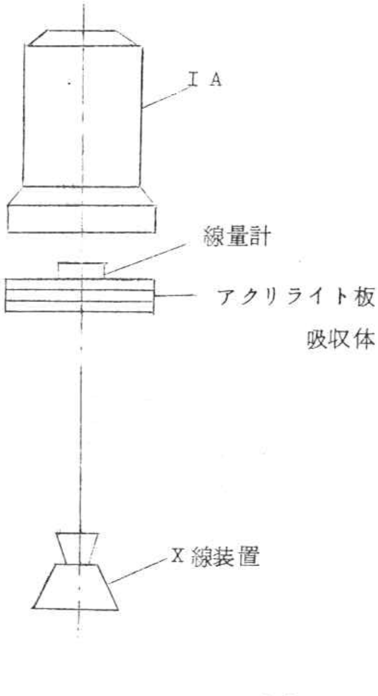


図11
吸収測定の配置

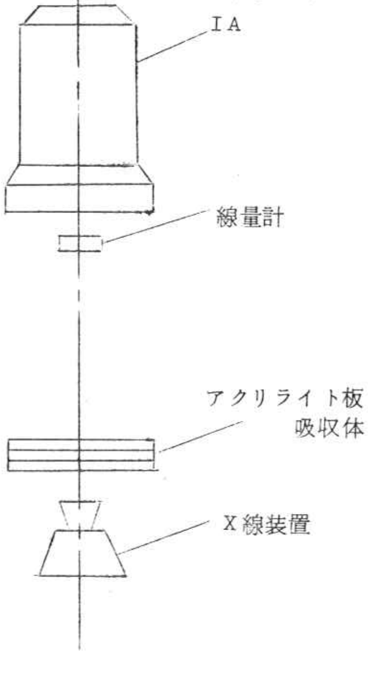


図10では散乱線もすべて線量測定器に入ってくるが，図11では吸収体が測定器からはなれているために，かなり減衰して測定器に到達する。一方直接X線は両者の場合で違いはないはずである。したがって両吸収曲線の差は散乱線であると考えてよい。（この差よりも，もっと大きな値になるはずである）図12からわかるようにX線のアクリライトによる吸収は指数関数に従うものではなく，散乱X線の寄与は非常に大きいものがある。

いま IA 前面に密着して，うすいアクリライト板の端を置いたとき，このアクリライト板の存在が識別できる限界状態でのX線コントラストを，コントラスト閾値と呼ぶことにする。このコントラスト閾値はアクリライトの吸収体を，図10の位置に入れた場合と，図11の位置に入れた場合とで大きく変化し，図13のようになる。

この場合コントラストはアクリライトの薄板の厚サから図12の吸収曲線によって求めた。すなわち図10のように，吸収体を IA に密着した状態でのコントラスと閾値は，吸収体の厚サと共に大きくなって行くが，図11のように吸収体をはなしておけばコントラスト閾値は，吸収体の厚サに関係なくほぼ一定の値をとる。したがって，このことがらから考えられることは，図10の状態では吸収体からの散乱線がコントラストを低下させるため，それを補なうために更に薄板を追加してコントラストを大きくしてやらなければ識別できない。このために，コントラスト閾値が吸収体の厚サと共に増して行く。

そこで，つぎに散乱線を除去して Burger ファントムを透視してみた。従来から行なわれている散乱線除去グリッドを使う方法を試みたが，グリッドと IA の入力ケイ光面の距離がはなれていること，および入力ケイ光面が球面であり，グリッドが平面であるためなどのためかあまり大きな効果が得られなかった。

いま一つの方法として，図10の配置で測定器の代りに Burger ファントムをおいた場合と，図11の配置で測定器の代りに Burger ファントムをおいた場合とを比較してみた。この場合吸収体厚が変っても，X

図12

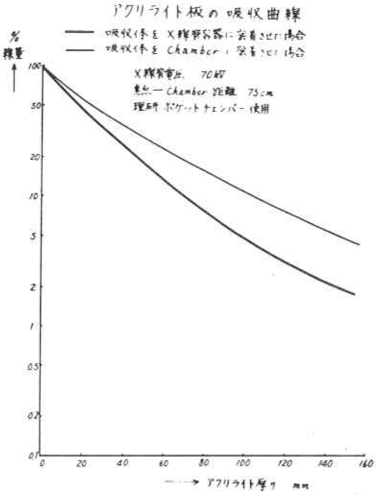
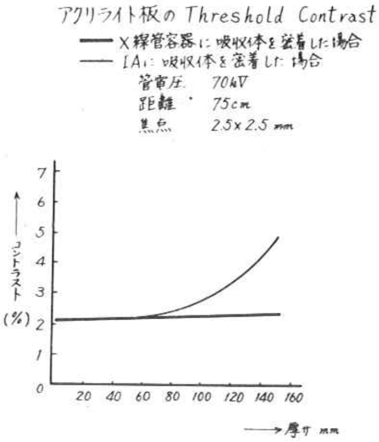


図13



線管電圧および IA入射X線量率を一定に保って行なった。その結果を図14，図15に示す。

この結果からわかるように，散乱線効果の少ない図15 の場合の方が吸収体の厚サに関係なく，図14 よりも識別度が高く出ている。また吸収体の厚サが変ったとき，識別度曲線のバラツキは図15 の方が少なく図 14 の方が大きい。これらの結果からも散乱線の影響が大きいことがよくわかる。

質 問 討 論

宮川：① 量子数nとは。

②grid の格子比と，何故コントラストはよくならないか。

津田：①穴のあいていない所を通り抜けるのがn，あいている所がn+△n，nについて必らず$\sqrt{n}$ のnoise がついてくる。それよりも△nが大でなければならない。②比6：1。よくわからない。

佐柳：米のシエードの論文に眼のレスポンス函数の測定において低周波の振動を与えた方がよいとある。

金森：X線写真で淡いものは動かした方が見易いと昔からいわれている。

宮川：視細胞が一定光量に対して反応せず dl/dt のものに対して反応するのではないか。

佐柳：眼の視細胞の微少振動はわづかであるが目的物の振動を助ける。

須藤：視神経の構造について。

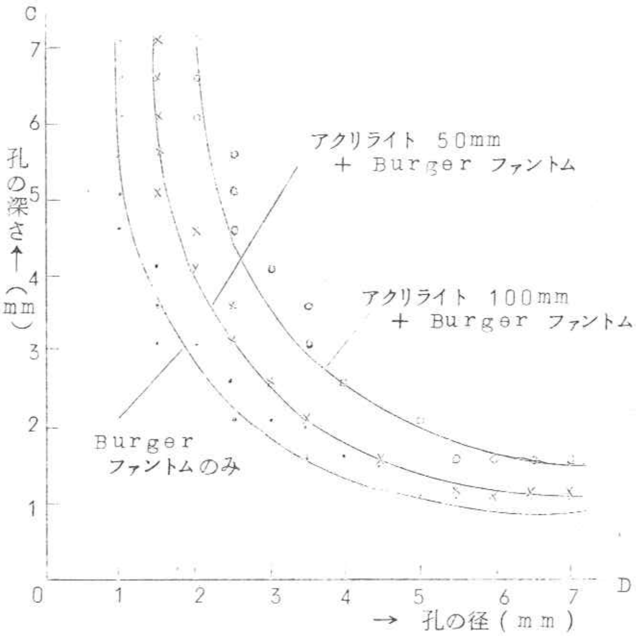


図14 Burger ファントム を図10の配置で透視したときの結果(散乱線が多い)

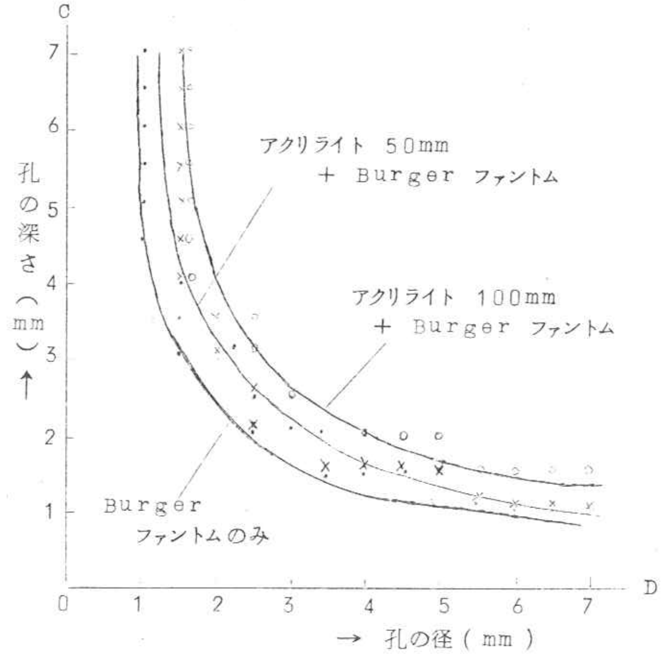


図15 Burger ファントム を図11の配置で透視したときの結果(散乱線が少ない。拡大の効果もある)

第3章

X線撮影系のレスポンス関数(Ⅲ)被写体および運動

土 井 邦 雄

1. 諸 言

X線写真の画像に関する問題が，最近空間周波数領域で多くとり扱かわれるようになってきた。[1] レスポンス関数について一般写真光学系の場合と比べてみると，X線写真系の場合でも線型にとり扱えるものが多いので，形式的には全く同じことになるが，後者の場合には，空間周波数フィルターとして考えられる異質の要素が多数含まれていることが特徴である。[2] したがって，X線写真系の第1の問題点は，含まれる多数のボケの要素を明確に空間周波数領域で定義し，それをおのおの求めることである。しかる後に全系におけるおのおのの要素の最終画像への寄与が明確にされると，撮影技術の向上また撮影の自動化および新撮影法などの開発に有力な手段となることが考えられる。

従来，X線撮影における三次元空間の被写体からX線曝射によって生ずる二次元X線強度分布への変換は，被写体中を透過するX線の path を計算することによってなされていた。[3) 4)] この方法は被写体のX線吸収係数の考慮がされ，計算が容易である等の利点があるが，一方X線撮影系で重要な因子であるX線管焦点[5)] の影響および他のボケの因子との結合を考慮するのは困難である。このため absorption unsharpness[3, 4)] で代表される三次元被写体から二次元への変換，つまり effective object を求める方法は，かなり大きな被写体について適用されるべきと考えられる。

この研究では前報[6, 7)]に引き続いてX線撮影系の画像の問題を空間周波数特性として記述するが，被写体のスペクトルおよび像の運動によるレスポンス関数を求めて，断層撮影の像伝達の解析を行なう。Effective object のスペクトルは，像形成を空間周波数領域で考えるために，三次元の被写体に対して不連続層モデルを導入し，X線管焦点のレスポンス関数を考慮して計算を行ない，これを実験と比較する。また，断層撮影では，人工的に加えられる運動によるレスポンス関数を用いて像スペクトルの変化を考察し，運動方式の検討を行なう。

2. 被写体のスペクトル

X線撮影系で三次元の分布をもつ被写体が，X線曝射によって二次元のX線強度分布に変換されるとき，この二次元のX線強度分布を effective object とすると，この像形成に影響を与える因子は，X線管焦点および撮影系の幾何学的配置である。Effective object以後の像伝達に関しては，通常の二次元の問題になるが，effective object の形成は，三次元から二次元への変換となる。そこで，effective object の像形成を空間周波数領域でとり扱かうことができれば，X線撮影系での情報源である被写体から最終画像までの情報伝達をすべて空間周波数領域でとり扱うことが可能になる。

三次元の被写体について Fig. 1 のごとく像面に平行な薄い成分を考え，被写体がk個の層にわけられたとする。この薄い層の被写体についてn番目の1個の層だけを考える時，これがX線管焦点面上の原点$x'=0$, $y'=0$における単位インパルス入力によって作られる像面上のX線強度分布を$o_n(x, y)$とす

る。* つぎにこの n 番目の層に作用するX線管焦点の分布を拡大効果も含めて $f_n(x'y')$ とすれば，effective object $i_e(x, y)$ の n 番目の成分 $i_n(x, y)$ は，以下の convolu - tion 積分で与えられる。

$$i_n(x, y)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} o_n(x-x', y-y')\cdot f_n(x', y')\,dx'\,dy' \qquad (1)$$

1番目から k 番目の層について同様に考え，$o_1(x, y)$, $o_2(x, y)$……$o_k(x, y)$ および $f_1(x'y')$, $f_2(x'y')$……$f_k(x', y')$ を用いれば，effective object $i_e(x, y)$ は(1)を拡張して以下の式で与えられる。

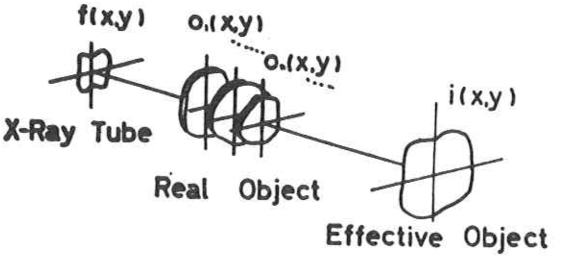


Fig. 1 Illustration of the discrete strata model for the object. The real object is composed of thin descrete strata which form the elements of the effective object in image plane under X-ray exposure.

$$i_e(x, y)=\frac{1}{k}\sum_{n=1}^{k}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} o_n(x-x', y-y') \times f_n(x', y')\,dx'\,dy' \qquad (2)$$

これを空間周波数領域で考え，$o_n(x, y)$ および $f_n(x'y')$ についてそれぞれのフーリエ変換 $O_n(\nu, \tau)$ および $F_n(\nu, \tau)$ を用いて，$i_e(x, y)$ のフーリエ変換 $I_e(\nu, \tau)$ を書きなおすと

$$I_e(\nu, \tau)=\frac{1}{k}\sum_{n=1}^{k} O_n(\nu, \tau)\cdot F_n(\nu, \tau) \qquad (3)$$

が得られる。これから，X線撮影系の最終像のスペクトル $I(\nu, \tau)$ は，effective object のスペクトル $I_e(\nu, \tau)$ に作用する全レスポンス関数 $T(\nu, \tau)$ を用いて

$$I(\nu, \tau)=I_e(\nu, \tau)\cdot T(\nu, \tau)$$

と書ける。

(2) および (3) 式が成立するには，つまり不連続層の各単位層が effective object を形成するのに additive であるためには，被写体の厚さ t と変換されるX線強度 I とは線型でなければならない。厳密にはこの条件は成立しないが，この変換過程に対して $I=I_0\exp\{-\mu t\}$ の関係を用いると，$I \fallingdotseq I_0(1-\mu t)$ の成立する領域を考えることができる。両者の比をとって，0.944 つまり 5.6% の誤差を許して線型な領域にもちこむと，$\mu t \leqq 0.3$ まで成立する。Linear absorption coefficient μ [3, 4] を， tissue 0.0104 mm^{-1}, bone 0.0174 mm^{-1} および aluminum 0.061 mm^{-1} とすると，おのおのの t の上限は，約30mm, 17mm および5mm となる。一方 $\mu t=0.3$ が，黒化度差 ΔD に変換される時，$\gamma=2.7$ ならば $\Delta D \fallingdotseq 0.35$ となる。

したがって，これらの状態の適用される範囲は，比較的小さい被写体，つまり大きな被写体中に散在する欠陥像や病巣部等に限られ，大きな被写体の形状等については適用は困難である。

* 厳密には，X線像は，回折像と吸収による影絵の成分とを考え得るが，ここでは回折像の影響は小さいとして，後者による macroscopic な像形成をとり扱う。前者については文献(2)の discussion 参照。

2.1　不連続層モデルによる被写体のスペクトルの計算

Effective object のスペクトルを実際的な被写体について計算する。簡単のため，(3) 式を一次元の空間周波数領域の問題にするので，円柱または角柱等の柱状の被写体を用いる。円柱状の被写体について Fig. 2 のごとくX線管焦点および像面を配置する。

被写体の単位層厚を a とし，被写体が k 個の層に別けられたとすると，n 番目の層の断面の長さは，上面と下面の中央の長さ $2l_n$ をもって代表させると，

$$l_n = a\left\{\left(n-\frac{1}{2}\right)\cdot\left(k-n+\frac{1}{2}\right)\right\}^{1/2}$$

を用いることができる。X線管焦点から被写体の中心までを R，被写体の中心から像面までを r とすると，n 番目の層に作用するX線管焦点の像面への拡大倍率 g_n は

$$g_n = \frac{r+\left(\frac{k}{2}-n+\frac{1}{2}\right)a}{R-\left(\frac{k}{2}-n+\frac{1}{2}\right)a}$$

となるが，一方この n 番目の層の像面への拡大倍率は，$(1+g_n)$ で与えられる。1個の単位層によって作られるX線像は，層数を充分大きくとれば矩形状分布と考えられるから，これのフーリエ変換である像のスペクトル $O_n(\nu)$ は，以下のサンプリング関数の形で与えられる。

$$O_n(\nu) = \frac{\sin 2\pi l_n \nu}{2\pi l_n \nu}$$

X線管焦点については，[5] 近似的に

$$F_n(\nu) = \exp\{-m\nu^2\}$$

で与えられるとして，effective object のスペクトル $I(\nu)$ は，以上を用いて (3) 式から

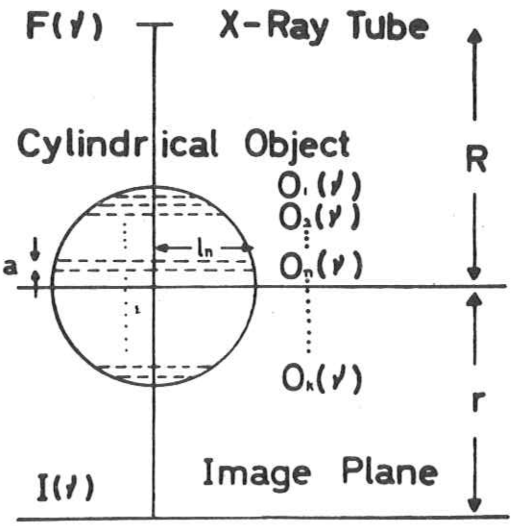


Fig. 2　The discrete strata model for the cylindrical object.

$$I(\nu) = \frac{1}{k}\sum_{n=1}^{k} O_n\{(1+g_n)\nu\}\cdot F_n\{g_n\nu\} \tag{4}$$

となる。

角柱の場合には，これの径を l_0 とすると $l_n = l_0/2$ とおけば，その他は円筒の場合と同様にスペクトルは求めることができる。

不連続層モデルによって (4) 式から計算される effective object のスペクトルは，単位層数 k を大きくすると，より近似度を進めることができるが，実際的には k をある程度以上大きくすると $I(\nu)$ はほとんど一定になるので，そのような有限な厚さを単位層と考えることができる。この単位層厚は，被写体の形状および撮影系の空間的な配置によって異なる。

40mmϕ の円柱について，$R=1000$ mm，$r=500$mm としてkを変えて(4) 式から$I(\nu)$を数値計算すると，Fig. 3が得られる。ただし，X線管焦点については$m=10.0$を用いたが，これは前報[5] のFig. 6に示される2×2 mm^2 の焦点のレスポンス関数をガウス分布で近似したものである。$I(\nu)$は，この場合$k=50$ 以上ではほとんど一定となるが，$k=1$ および 5では，相当異なったものが得られる。したがって単位層厚は0.8 mm 以下にとれば充分である。一方4×4 mm^2 の角柱の場合は，$k=1$から200 まで変えてもほとんど一定のスペクトルが得られるが，このような場合には不連続層にわけて考える必要のないことを示している。Fig. 4は，$k=50$の時の 4mmϕ，2mmϕ および1mmϕ の円柱について求めたスペクトルである。径が小さくなるにしたがってX線管焦点の影響が大きくなり，スペクトルの振動成分が減少してゆくことを示している。

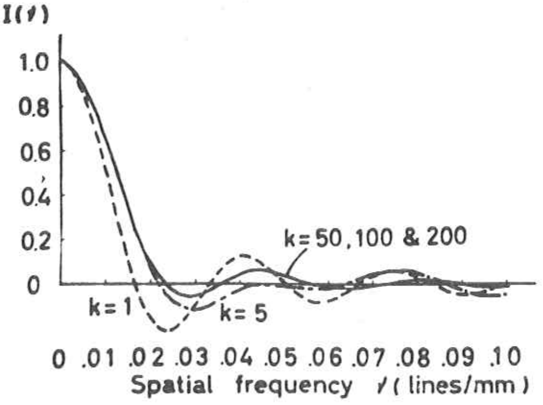


Fig. 3 Fourier spectra of the cylindrical object depending on the numbers of the strata.
Diameter: 40 mmϕ, r: 500 mm, R: 1000 mm, k (strata numbers): 1, 5, 50, 100 and 200.

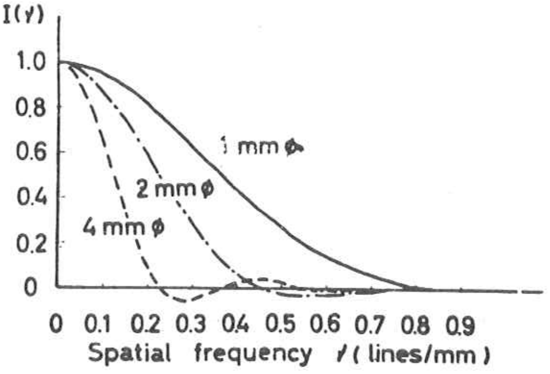


Fig. 4 Fourier spectra of the cylindrical object depending on the diameter.
Diameters: 1 mmϕ, 2 mmϕ and 4 mmϕ, r: 500 mm, R: 1000 mm, k: 50

2.2 像の計算と実験との比較

不連続層モデルで計算された結果を実験と比較するために，effective object $i_e(x)$を，そのスペクトル $I(\nu)$ からフーリエ逆変換によって求める。

Fig. 5(a)は，1mmϕ の円柱をRとrの組み合わせから拡大倍率を種々変えたものの像を示す。拡大倍率が大きくなるとしだいにX線管焦点が影響を与えだし，$R=500$mm，$r=500$mm のものでは，像はガウス分布にかなり近づく，Fig. 5(b)は，$R=1000$mm，$r=500$mmの時1×1 mm^2，2×2 mm^{2}および4×4 mm^{2}と角柱の径を変化させたものを示す。径が小さくなると，焦点が像を支配し急激にカドの部分がとれて原形をとどめなくなる。このような像の変化を absorption unsharpness の方法によって求めることはほとんど不可能に近い。

つぎに，計算された像の分布と実験との比較を行なう。X線装置は，大阪レントゲン(株)製 Sirius 910Tを70kVPで用い 1mm Al をフィルターとして使用した。Al の半価層は，この状態で約2mm である。被写体としては，アルミニウム製の円柱および角柱を用いた。増感紙は極光 FS を用い，また写真

フィルムはフジ KX を用いた。フィルムに記録された像は，現像後マイクロデンシトメーターで黒化度を測定したあと，フィルムの特性曲線を用いてX線強度分布に変換した。測定される effective object のスペクトルに対して，この実験条件下では，screen-film combination のレスポンス関数[8]は negligible とした。

Fig. 6(a)は，2mmφ および 1mmφの円柱の像の不連続層モデルによる計算結果と実験結果との比較を示す。

Fig. 6(b) は，4×4 mm² および 2×2 mm² の角柱の像に対する計算結果と実験との比較を示す。ここに示されるものは，いずれもよい一致が得られ，厚さをもった被写体からX線像への変換は，不連続層モデルによって計算できることを示している。

不連続層モデルによる effective object の計算は，空間周波数領域で厚さ方向に総和をとるだけなので，他のボケの elements との結合は，レスポンス関数を用いて容易に行なわれる。また，この方法は，4項に後述されるごとく断層撮影でのX線像の形成を論ずるのに有力であるが，被写体の厚さについて適用の範囲が限られること，計算が大変なこと，および被写体のX線吸収係数が入らずに，得られるものは正規化された分布であること等の欠点がある。

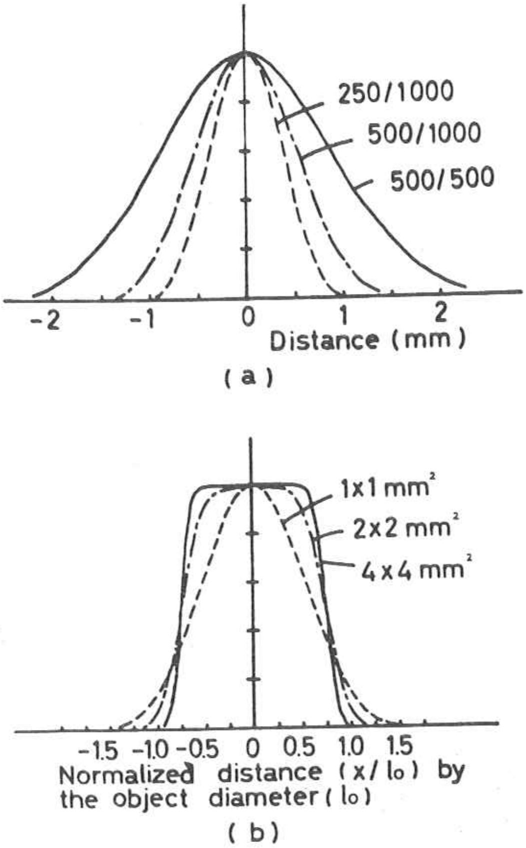


Fig. 5 Effective objects calculated from Fourier spectra by inverse Fourier transforms.

(**a**) shows the effective objects depending on the magnification ratios of the geometry. Diameter: 1 mmφ, Magnification ratio (r/R): 500/500, 500/1000 and 250/1000

(**b**) shows the effective objects of three different diameters at the same magnification. Diameters: 1×1 mm², 2×2 mm² and 4×4 mm², Magnification ratio (r/R): 500/1000.

3. 像の運動によるレスポンス関数

Shutter operation[9]や image motion[10]は，空間周波数領域でレスポンス関数によって記述されるが，X線撮影系でX線源を移動させながらX線曝射を行ない三次元の被写体の断面を観察する断層撮影の問題もレスポンス関数によって取り扱うことができる。この場合にはX線源の運動を，像面における像の運動におきかえてレスポンス関数で記述すると，像の伝達は空間周波数領域で求められる。ここでは，像の運動の軌跡からレスポンス関数を求める。

3.1 等速運動によるレスポンス関数

点像が，等速運動によって x，y 平面上で Fig. 7 のごとくに軌跡 $y=f(x)$ を描くと，これの x 方向および y 方向の速度成分をおのおの v_x および v_y とすると

$$\left.\begin{aligned} v_x^2 + v_y^2 = v_0^2 = \text{const.} \\ \frac{v_y}{v_x} = \frac{dy/dt}{dx/dt} = f'(x) \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

が得られる。つぎに，この運動による x 方向の像の分布，すなわち x 方向の線像強度分布 $m(x)$ は，v_x に逆比例するから，

$$m(x) = A/v_x \qquad A: \text{const.}$$

と表わされる。したがって(5)を用いれば

$$m(x) = \frac{A}{v_0}\{1+f'(x)^2\}^{1/2} \qquad (6)$$

が得られる。これから，x 方向のレスポンス関数 $M(\nu)$ は

$$M(\nu) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} m(x)\, e^{-2\pi i \nu x}\, dx}{\int_{-\infty}^{\infty} m(x)\, dx} \qquad (7)$$

で定義できる。

等方的な運動でない時は，x 軸および y 軸と θ の角度をなす ξ，η 軸系を考えると，これらの軸の間の変換

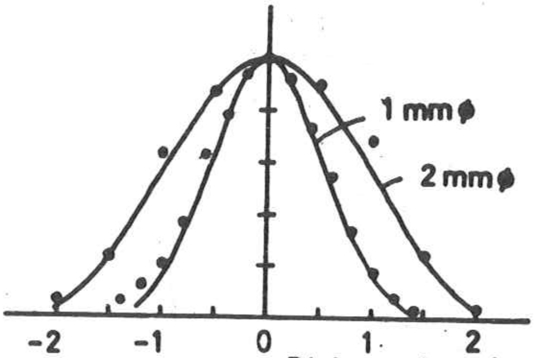
$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

を行なえば，$y=f(x)$ のかわりに $\eta=g(\xi, \theta)$ を用いて，同様に任意の θ 方向のレスポンス関数は求められる。したがって，運動によるボケの効果は，(6) および (7) 式から得られるレスポンス関数によって合理的に評価される。

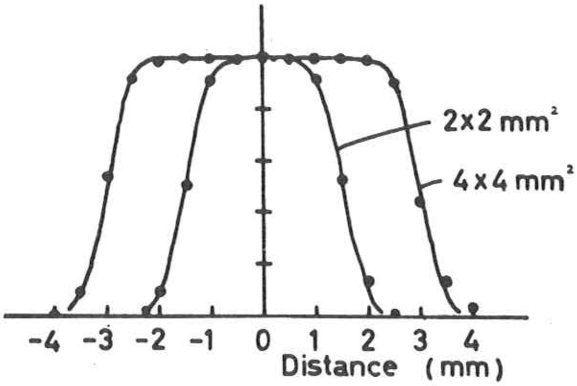
3.2 点像および線像強度分布とレスポンス関数

像の運動による軌跡および (6)，(7) 式から得られる線像強度分布とレスポンス関数についての4つの例を Fig. 8 に示す。

(a)は，$-l \leq x \leq l$ の範囲での直線運動を示すが，大低の断層撮影系では，この運



(a)



(b)

Fig. 6 Comparisons of the effective objects between calculations and experiments.

(**a**) shows the cylindrical objects. Diameters: 1 mmφ and 2 mm, Magnification ratio (r/R): 500/1000,

(**b**) shows the square objects. Diameters: 2×2 mm² and 4×4 mm², Magnification ratio (r/R): 500/1000.

動方式がとられている。(b)は，$-l \leqq x \leqq l$ の範囲で抛物線を描く時を示すが，レスポンス関数は，数値積分によって求めた。(c)は，半径 l の円運動を示し，レスポンス関数は第1種ベッセル関数で与えられる。この運動方式は，circus tomography として実際に用いられている。得られた各運動方式のレスポンス関数の第1反転部の空間周波数は，(a)，(b)，(c)の順で低空間周波数へと移っているが，この変化を線像強度分布と対応させると，順次矩形状分布の中央部のとれたものになっている。これをさらに極限までもっていけば，(d)に示される2つのデルタ関数によって与えられる運動になり，これのレスポンス関数は，余弦関数で与えられる。

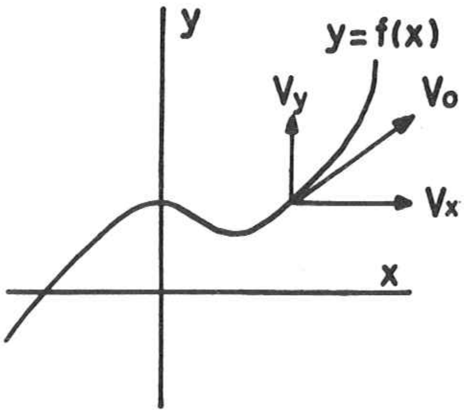


Fig. 7 Illustration of the locus of the point image moving with constant velocity.

(a)，(c)および(d)を，Fig.9に示す。これらの像の運動を，断層撮影の場合に応用すると，次項に示されるごとく合理的なX線源の移動方式を検討することができる。なお，被写体の歳差運動を行なって得られるような複雑な軌跡の場合には，一般に，レスポンス関数は数値計算を行なって求めなければならない。

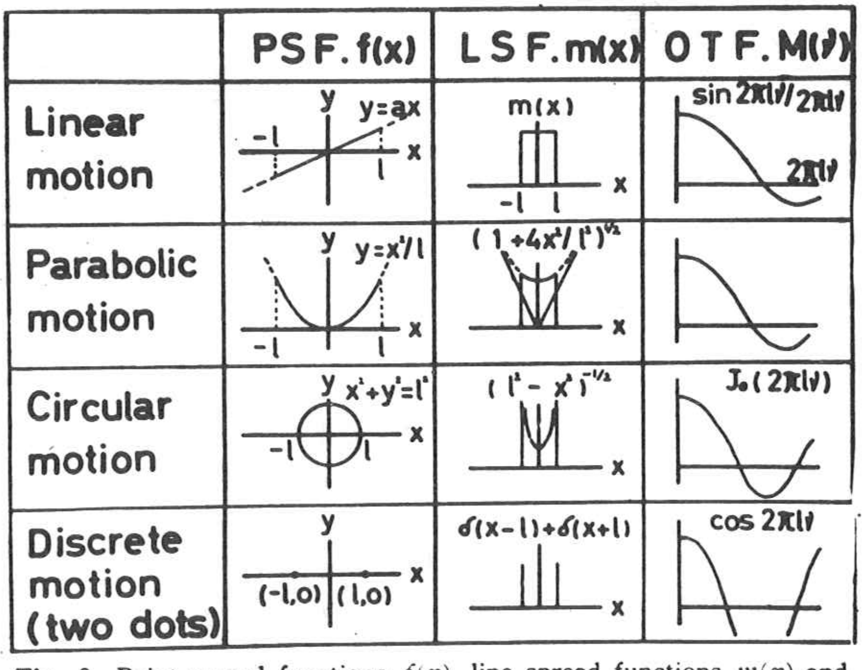


Fig. 8 Point spread functions $f(x)$, line spread functions $m(x)$ and optical transfer functions $M(\nu)$ for four kinds of image motions. $m(x)$ are obtained from eq. (6) and $M(\nu)$ are calculated from $m(x)$ by using eq. (7).

4. 断層撮影の像伝達

不連続層モデルから(3)式によって与えられる被写体と(7)式に示される運動のレスポンス関数を用いると，断層面の像のスペクトルが計算できる。

一次元の空間周波数領域で，Fig. 10 のごとくに，被写体がk層にわけられ，そのおのおののスペクトルを $O_1(\nu)$, $O_2(\nu)$……$O_k(\nu)$ とし，n番目の層に作用するX線管焦点および運動のレスポンス関数を，それぞれ $F_n(\nu)$ および $M_n(\nu)$ とする。像面におかれる像変換系のレスポンス関数 $T(\nu)$ を用いると，記録される像のスペクトル$I(\nu)$は

$$I(\nu)=\frac{1}{k}\sum_{n=1}^{k} F_n(\nu)\cdot O_n(\nu)\cdot M_n(\nu)\cdot T(\nu) \tag{8}$$

となる。

断層撮影の目的は，(8)式によって与えられる像のスペクトルで，目的の断層面以外の像を消してしまう。すなわちボカしてしまうことである。これには，目的のt番目の層に対しては $M_t(\nu)=1$ であり，他の$n\neq t$の層については $M_n(\nu)=0$ であれば

$$I_t(\nu)=F_t(\nu)\cdot O_t(\nu)\cdot T(\nu)$$

となり，t以外の層のスペクトルは入りこまずに理想的であるが，実際には$M_n(\nu)$は3項に示されるレスポンス関数を有し，必ず目的外の層のスペクトルも$M_n(\nu)$で減衰してから

$$I(\nu)=\frac{1}{k}I_t(\nu)+\frac{k-1}{k}\sum_{\substack{n=1\\ n\neq t}}^{k} F_n(\nu)\cdot O_n(\nu)\cdot M_n(\nu)\cdot T(\nu)$$

となって像を形成する。したがって，運動によるボケの効果は，像のスペクトルの変化と，それの心理物理量の程度によって評価される。

4.1 運動によるボケの効果の評価

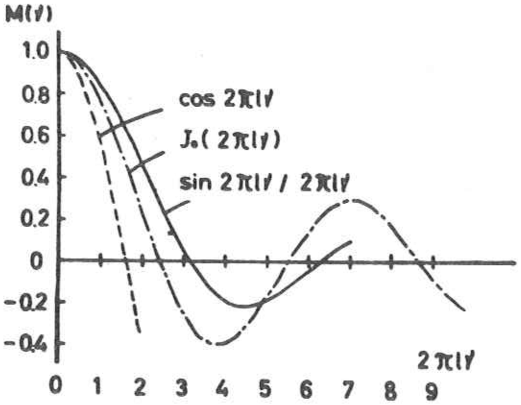


Fig. 9 Comarisons of optical transfer functions for three kinds of image motions.

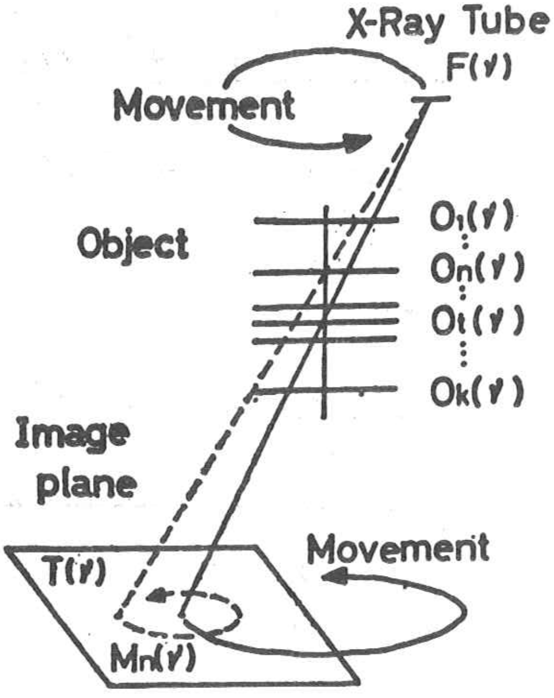


Fig. 10 X-ray image formation in tomography by the discrete strata model.

Fig. 8 および Fig. 9に示される(a), (c)および(d)の運動方式からボケの効果の検討を行なう。まず，$M(\nu_0)=0$ となる第１反転部の空間周波数を単一評価尺度としてとると，(d), (c), (a)の順に $2\pi l \nu_0$ は，1.57，2.40および3.14となり，明らかに(d)は最も効果的であるが，これは各種運動方式が同一運動範囲に限られた場合の低空間周波数領域のボケについてのみいえる。一方，高空間周波数については，いずれも相当な振動成分を有しており，この成分は，(d), (c), (a)の順に減少してゆき，ボケの効果は第１反転部を考慮したものと逆になる。そこで，レスポンス関数曲線から心理物理量に対応する単一評価尺度[11]として

$$Q=\frac{\int_0^\infty O(\nu)\cdot M(\nu)\,d\nu}{\int_0^\infty O(\nu)\,d\nu} \qquad (9)$$

を用いる。

ここで，$O(\nu)=\exp(-p\nu)$, $p>0$として(a), (c)および(d)についてQを求めると，

$$Q_a=p\int_0^\infty \exp(-p\nu)\cdot\frac{\sin 2\pi l\nu}{2\pi l\nu}\,d\nu$$

$$=\frac{p}{2\pi l}\ \arc\tan\frac{2\pi l}{p}$$

$$Q_c=p\int_0^\infty \exp(-p\nu)\cdot J_0(2\pi l\nu)\,d\nu$$

$$=\frac{p}{\{p^2+(2\pi l)^2\}^{1/2}}$$

$$Q_d=p\int_0^\infty \exp(-p\nu)\cdot\cos 2\pi l\nu\,d\nu$$

$$=\frac{p^2}{p^2+(2\pi l)^2}$$

となる。

そこでQを$p/\pi l$ の関数として表わすと，Fig. 11が得られる。すべての p について Q_d は最小となり，(d)の運動方式による断層撮影法が，ボケを与える効果において，最も有効である。しかし，ここで行なった比較は単純化された被写体についてのものであり，実際的な場合に問題になる障害陰影があるような時には，像の異方性等が重要になってくる。

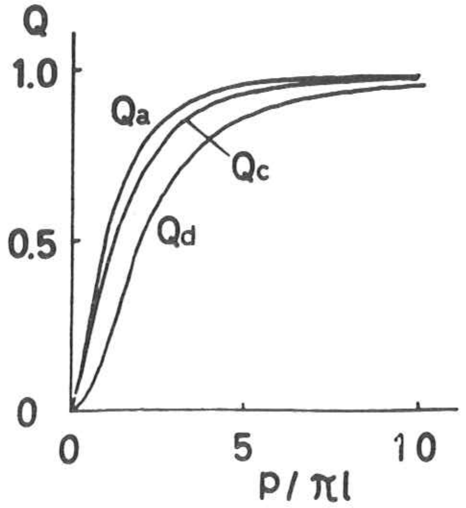


Fig. 11 Evaluation of the blurred effect for three image motions by using the single figure of merit Q defined in eq. (9).

4.2　不連続曝射断層撮影法

Fig. 8(d) の方式を具体化すると，Fig. 12に示される新しい断層撮影法が得られる。これを不連続曝射断層撮影法と仮称する。はじめに，X線管球を(1)およびフィルムをf_Lに

に位置させ通常の約半分のX線露出を行ない，その後，X線管球を(II) およびフィルムを f_R に移動させて再びX線を曝射する。ただし，X線管球とフィルムの移動は，被写体中の(A) 層に照準して行なう。すると，(A) 層よりも x だけ上の(B) 層の点像は，Fig. 8 (d) と同じに $2l$ だけ離れた2つの点像になる。移動前後のX線管球の距離を $2b$，この中央の位置から(A) 層までを R，(A) 層からフィルムまでを r とすると，l は

$$l = bx(R+r)/R(R-x)$$

$$\fallingdotseq kx \qquad (R \gg x) \qquad k: \text{const.}$$

となり，照準面から離れるにつれて，点像の広がりが大きくなる。

不連続曝射断層撮影法は，点像などの単純な被写体の場合には，極めて明瞭に特定の層の中に含まれる像を見わけるが，一般の複雑な被写体の場合には，障害陰影のため像の判別には若干困難さがともなうかも知れない。2回の不連続曝射中，フィルムを移動させずに，f_Rと f_L の位置に2枚のフィルムを置いて，2つの像を別々のフィルムに記録すると，(A)層以外の層についての像が得られる。2枚のフィルムの観察は，Fig. 12 (b) に示すごとく，(A) 層については f_R と f_L の中心を合わせて観察し，(B) 層の場合は，f_R を左へ l および f_L を右へ l だけずらして観察する。

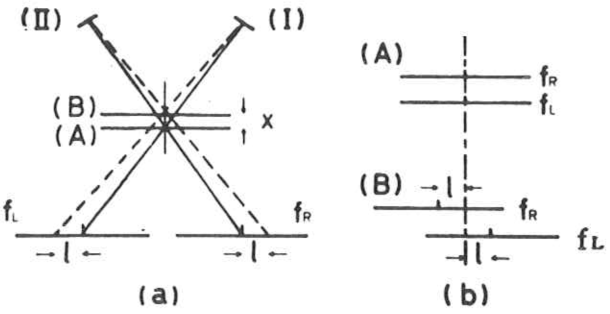


Fig. 12 New tomographic system with the discrete motion for X-ray tube and films.
(**a**) shows the exposure system.
(**b**) shows the viewing method for two films.

不連続曝射断層撮影法は，このように2枚のフィルムから層間隔を連続的にとり得るので，通常の断層撮影の場合のように数枚の撮影を必要とせず，病巣部を見落すこともないし，さらに被曝量の大巾な低減をはかれるという利点がある。

5. 結　言

X線撮影系の三次元の被写体から二次元のX線強度分布への変換を，不連続層モデルを用いて求めた。円柱および角柱に対する計算結果と実験との比較は，良い対応が得られ，effective object は，空間周波数領域でX線管焦点のレスポンス関数を考慮に入れて求められることが示された。

等速運動をしている像の線像強度分布およびレスポンス関数が，運動の軌跡から求められることを示し，断層撮影で行なわれる方式について4種の例が示された。

断層撮影の像形成が，運動のレスポンス関数を用いて不連続層モデルから求められることを示し，直線運動，円形運動および不連続曝射による撮影の場合の像に与えるボケの効果を検討し，不連続曝射断層撮影法が最も効果的であることが示された。

最後に，御討議下さった早稲田大学大頭仁助教授，久村富持講師およびキャノンカメラ㈱ 佐柳和男博士

および当社研究部鳥生敬郎博士，坂本延氏，成田欽一郎氏に深く感謝致します。

文　献

1） 佐柳和男：光学ニュース No. 76(1964)

2） K. Doi *et al*: Proc. of ICO, Tokyo meeting, (1965), J. J. A. P. 4, Suppl. 1, 183(1965)

3） K. Rossmann and H. E. Seemann: Am. J. Roentgenology 85, (1961)366.

4） K. Rossmann: ibid 87, (1962)387.

5） K. Doi: ibid, 94, (1965)712.

6） 土井邦雄，佐柳和男：応用物理 33, (1964)721.

7） 土井邦雄：ibid 34, (1965)190.

8） 土井邦雄：ibid 33, (1964)50.

9） 朝倉利光：ibid 30., (1961)797.

10） R. V. Shack: Applied Optics 3, (1964)1171.

11） 佐柳和男：応用物理 25, (1956)189, 193, 443, 449.

質　問　討　論

竹中：管球の動きはX方向のみか，物体はXY平面だが

土井：単純化された被写体でY方向は駄目，又X方向でも周期的構造があれば駄目

内田：線像と点像の説明を

土井：説明，円は線像と考える。

金[illegible]：焦点をガウス分布で近似しているがそうなるか。

土井：そうだ。

高野：うずもれている情報をピックアップするようなことが医学ではどのようなものがあるか，重ねてみることは光学でよくやるが。

土井：ロゲトロニクスの例，サブトラクションの例，ハーモナイゼーションの例。

光田：2点の方が粒状性が小さいと言うことはどう言うことか。

土井：螢光材料を作る側からと量子動揺を考えると，この量子動ようが小さくなることから言える。

藤野：写真は密度の相異をみている丈のことだ。