

# 第 1 編 概念的なもの、総論的なもの

第 1 章 解 説

木 下 幸次郎 1頁

第 2 章 像解析における問題点

佐 柳 和 男 17

# 第 1 編 概念的なもの、総論的なもの

## 第 1 章 解 説

N H K 放送科学基礎研究所

木下幸次郎

### 1. はしがき

医学用放射線写真等において得られる像の良さを判定するため、像の構成に影響する技術的因子として、従来第一表のように分類されている。これは現象を直接用いて解析し、像の品位の改善のための対策を考えるのに適当であるとされていた。

第 1 表 鮮鋭度とコントラストの要因 (Jermanによる)

大 き さ	— 歪形 . . . . . 画面および被写体に対する主 X 線軸の方向
	— 拡大 . . . . . 焦点—被写体—フィルム間距離
鮮 鋭 度	— 幾何学的不鮮鋭度 . . . . .
	— 運動による不鮮鋭度 . . . . .
	— 写真的不鮮鋭度 . . . . .
対 照 度 (コントラスト)	— X 線対照度 . . . . .
	— 写真的対照度 . . . . .
	— 現像液

$$\text{曝射時間 (秒)} = f \times \frac{\left\{ \text{焦点—フィルム間距離 (cm)} \right\}^2}{\left\{ \text{管電流 (mA)} \right\} \times \left\{ \text{管電圧 (波高値 kV)} \right\}} \times x$$

被写体因子  
 写真因子  
 ブレンデ因子  
 X線装置因子

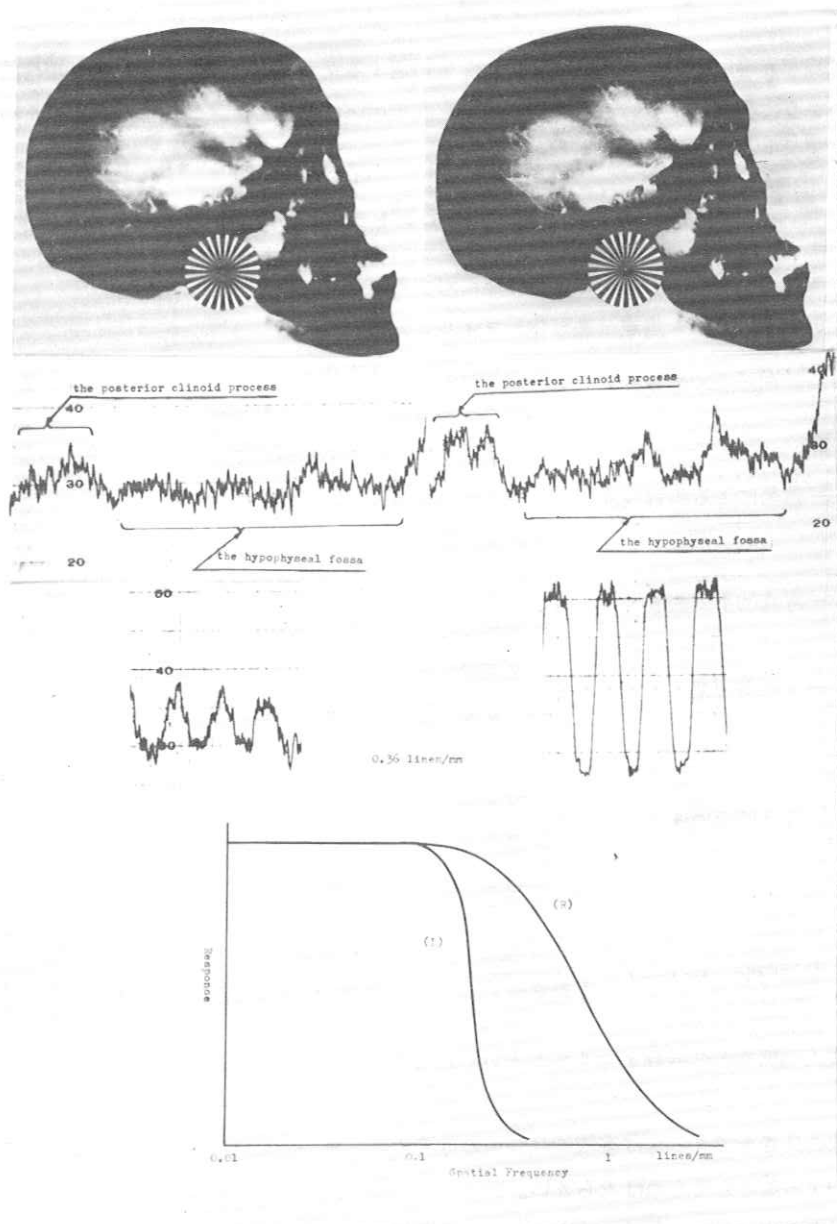
(成人胸部撮影の場合 x=4~5 といわれる)

しかし、像の良さをできるだけ客観的且つ他の像再生系と統一的に判定しようとするためには、この多くの要因を統一することを考えねばならない。

まず第一表中の大分類の項目は、1) 大きさ、2) 鮮鋭度、3) コントラストになっている。要因 3) は通常のコントラストの定義に従えば、規格化されているから問題はないが、まず第一項の大きさを解析する場合には、常に一定の倍率に引き直した後に取扱うものとすれば、第 1 因子は常に一定となる。

第2要因の鮮鋭度は、像面上に再現できる線又は円板の直径の単位区間中に入り得る数で表わす事にすれば、本数又は個数/単位長となるもので被写体をこれで置き換えて取扱えば規格化できる。このような取扱法がレスポンス函数を用いた放射線装置及び放射線像の良さの判定法である。

第 1 図



レスポンス函数を解説する前に具体例をあげて、その像の品位との対応性を示そう。第1図は頭の骨X線像であって、左側の図はいわゆる鮮鋭度の劣化したものであり右側の図は鮮鋭度の極めて良い例である。これを従来の判定法を一步進めて、マイクロフォトメーターで走査し、コントラストを求めたのが第1図中の第2行目の波形であって、posterior clinoid process と hypophyseal fossa の部分を示してある。左側の波形は左側の写真を、右側の波形は右側の写真を同一のマイクロフォトメーターで求めたものであって、その像の細部の再現性をよくあらわしている。しかしこの波形ではとにかく右図は左図より優れている事がわかって、客観的に、どのような品位にあるかは決定できない。

そこで各々の図中に頭部の骨と同時に撮影してある24本の扇形図形で作られたジームススターに注意すれば右図はほぼ中心部迄解像しているが、左図はスターの円の直径に対して約1/3の所までしか解像していない。これを1mm当りの本数に改めると約0.35 lines pair/mmで零になることを示している。しかし、これではこの像の性質を本数/mmで一点しか示していないから、スター上の各点についてマイクロフォトメーターで走査し、出力最大の値で各本対/mmに相当した点の値を割り、その値をプロットしたものが第1図最下部の二つの曲線であって、(L)と名づけたものは左側の写真の曲線、(R)と記したのが右側の写真の曲線である。これから座標軸とそれぞれの曲線とが包む面積の大きい方が写真と比べて、よい事がわかると思う。

## 2. フェーリエ変換

さて第1図の3行目の波形は矩形波と呼ばれる第2図a)のひずんだ第3図b)のようなものに近い。我々はこのような波形を数量的に取扱うためフーリエによって始められたフーリエ積分を考えてみる。

函数 $f(x)$ のフーリエ変換 $F(y)$ は積分

$$F(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-2\pi i x y) dx \quad (1)$$

で定義される。 $F(y)$ が与えられたときは逆に函数 $f(x)$ は逆フーリエ積分

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(y) \exp(2\pi i x y) dy \quad (2)$$

により求められる。但し(1)及び(2)式が実際の波形を表わす函数 $f(x)$ から計算できるためには(1)の右辺の積分が計算できること、つまり一定の有限の値(例えばM)より小さい事が必要である。しかし $\exp(-2\pi i x y)$ は常に1より小さいから

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx < M$$

を満足することが必要である。又は $f(x)$ は $x$ の変域で+、-の値をとる函数の場合には、積分の値が一定にならぬ場合も生じるので、その場合にも安全を見込んで

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)| dx < M$$

又はもっといねいに

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^2 dx < M$$

という条件をつけておけば、(1)と(2)は確実に計算できる。

フーリエ変換の $f(x)$ と $F(y)$ の間の関係を第2表にまとめて示した。

第 2 表 フーリエ変換の性質

	関数	フーリエ変換
1. 定義	$f(x)$	$F(y)$ $= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \exp(-2\pi jxy) dx$
2. 逆変換	$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(y) \exp(2\pi jxy) dy$	$F(y)$
3. 線型	$\alpha f(x)$ $f_1(x) \pm f_2(x)$	$\alpha F(y)$ $F_1(y) \pm F_2(y)$
4. 畳み込み	$h = f * g$ i.e., $h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x-\tau)g(\tau) d\tau$	$H = F \cdot G$
4.A 積	$h = f \cdot g$	$H = F * G$
5. 単位インパルス(ディラック関数)	$\delta(x)$ $\Delta(x) = 1$ (すべての $x$ に対し)	$\Delta(y) = 1$ (すべての $y$ に対し) $\delta(y)$
6. 等しい周期インパルス列	$A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(x - nT)$ ( $n$ は整数)	$\frac{A}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(y - n/T)$
7. 変移定理	$g(x) = f(x - x_0)$ $g(x) = \exp(2\pi j y_0 x) f(x)$	$G(y) = \exp(-2\pi j x_0 y) F(y)$ $G(y) = F(y - y_0)$
8. 導関数	$g(x) = df/dx$ $g(x) = -2\pi j x f(x)$	$G(y) = 2\pi j y F(y)$ $G(y) = dF/dy$
9. 積分	$g(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$ $g(x) = -\int_x^{\infty} f(x) dx$	$G(y) = [1/(2\pi j y)] F(y)$ $G(y) = \int_{-\infty}^y F(y) dy$
10. 単位の変更	$g(x) = f(x/a) \quad a > 0$ $g(x) = b f(bx) \quad b > 0$	$G(y) = a F(ay)$ $G(y) = F(y/b)$
11. 対称	$g(x) = f(-x)$ $f$ 偶関数: $f(x) = f(-x)$ $f$ 奇関数: $f(x) = -f(-x)$	$G(y) = F(-y)$ $F$ 偶関数: $F = 2 \int_0^{\infty} f(x) \cos(2\pi xy) dx$ $F$ 奇関数: $F = -2j \int_0^{\infty} f(x) \sin(2\pi xy) dx$
12. 複素共役	$g(x) = f^*(x)$ 関数 $f$ は実数値をとる	$G(y) = F^*(-y)$ $F(-y) = F^*(y)$

表では  $x$  の 数は小文字で表わされ、それらの変換は対応する大文字で表わされている。

	関 数	フーリエ変換
13. 曲線下の面積	$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = F(0)$	$\int_{-\infty}^{+\infty} F(y) dy = f(0)$
14. parsevalの定理	$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)g(x) dx$	$= \int_{-\infty}^{+\infty} F^*(y)G(y) dy$
14.A 交代形式	$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)g(x) dx$	$= \int_{-\infty}^{+\infty} F(-y)G(y) dy$
	$\int_{-\infty}^{+\infty} f(u)G(u) du$	$= \int_{-\infty}^{+\infty} F(u)g(u) du$
14.B エネルギー関係	$\int_{-\infty}^{+\infty}  f(x) ^2 dx$	$= \int_{-\infty}^{+\infty}  F(y) ^2 dy$

フーリエ変換の一般的性質は第2表につくされているが、レスポンス函数えの応用のため、二・三の性質を追録しておく。

今、 $f(x)$ が

$$f(x) = \sum_1^n a_j e^{i\omega_j x} \tag{3}$$

で与えられたとき

$$f(x+\xi)\overline{f(x)} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_j \overline{a_k} e^{i\omega_j x} e^{i(\omega_j - \omega_k)\xi} \tag{4}$$

を得る。

今、 $\mu \neq 0$ ならば

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T e^{i\mu\xi} d\xi = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sin \mu T}{\mu T} = 0$$

であり

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T e^{i0\xi} d\xi = 1$$

なることを考慮して、(4)を次のように積分して

$$\begin{aligned} \varphi(\omega_j, x) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(x+\xi)\overline{f(x)} d\xi \\ &= \sum_1^n |a_j|^2 e^{i\omega_j x} \end{aligned} \tag{5}$$

を得る。

これは第2表の最後の行からパワーに関係した表示であることがわかり、パワースペクトルと名づける。

### 3. X線像撮影系の伝送理論

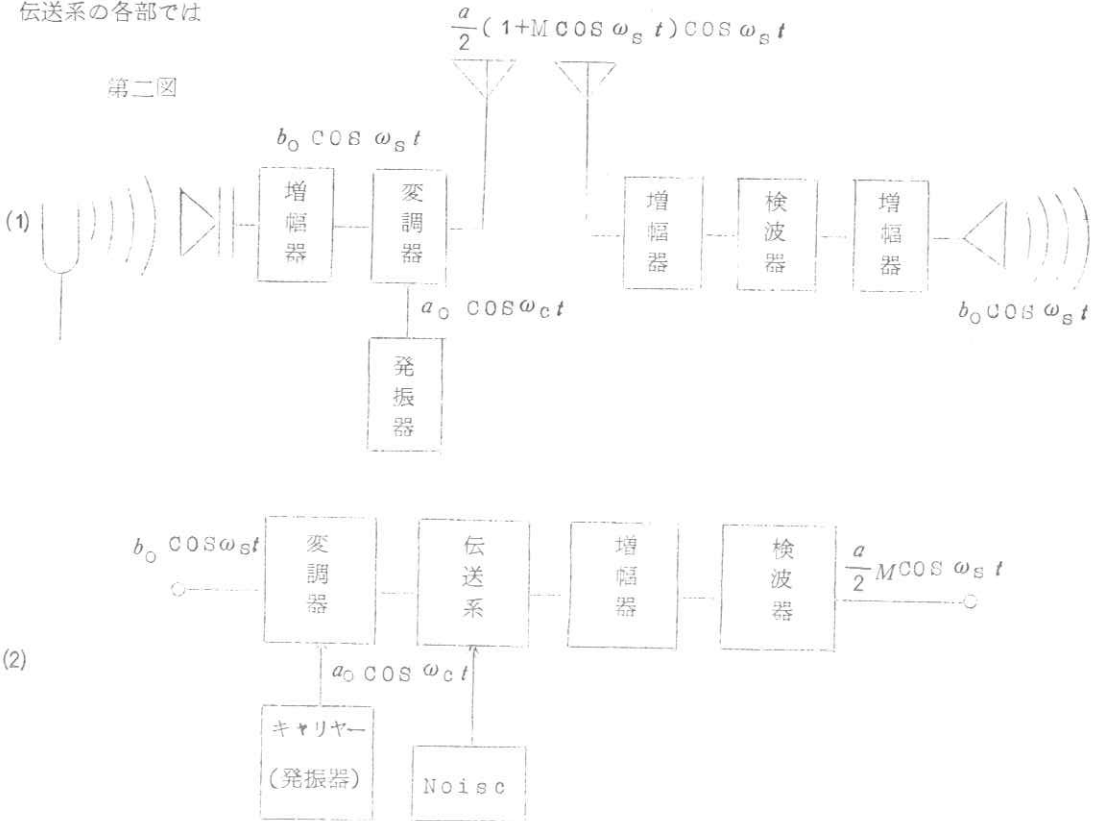
X線像撮影系の像伝送理論をフーリエ解析で取扱い前に、通信工学におけるラジオやテレビ等の信号の伝送系をながめてみる。

ラジオを例とすると第2図(1)のように音源から出た音波がマイク等で電気信号に変えられ、増幅器を通り、これを受信機へ送るため搬送波として用いる波(電磁波)の発振器から出たキャリアを変調器で変調する。変調されたキャリアは空中線又は線路に送り出される。受信器ではこれを受け、増幅後、検波器により信号波のみを取り出し、スピーカー等で音波として出す。

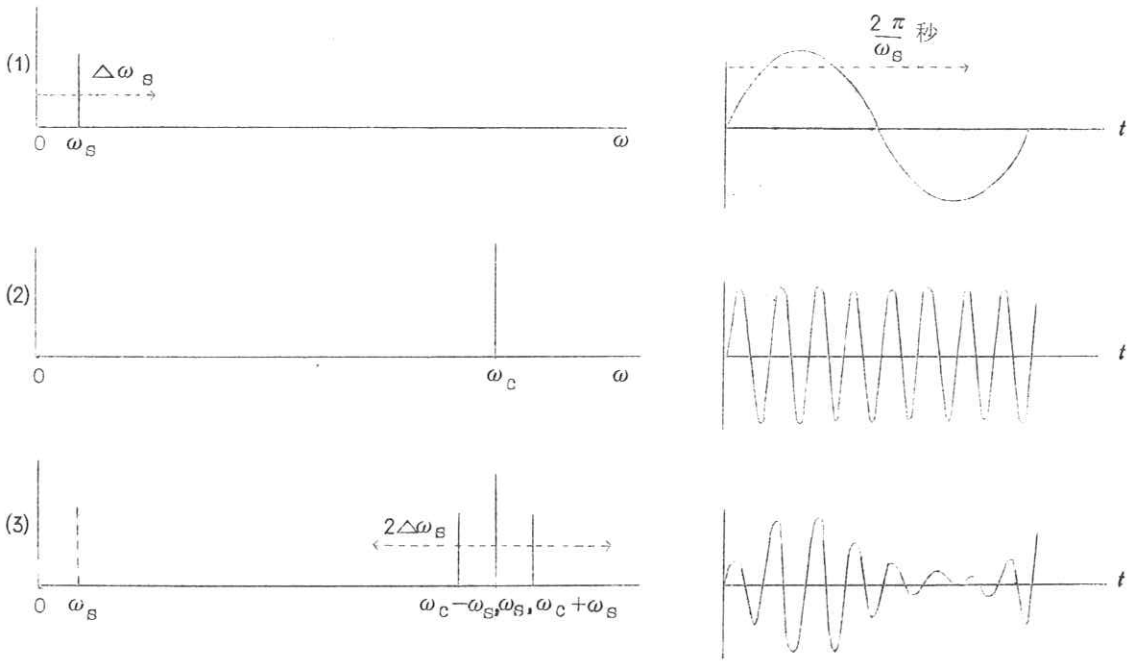
第2図(2)は(1)の電気系のみをブロックダイアグラムで示した。図中に信号として  $b_0 \cos \omega_s t$  なる波を示し、搬送波として  $a_0 \cos \omega_c t$  変調されたキャリアを  $\frac{a}{2}(1 + M \cos \omega_s t) \cos \omega_c t$  で示してある。 $\omega_s, \omega_c$  は夫々信号、キャリアの角周波数( $2\pi \times f$ )で  $M$  は変調度である。

この図で受信された音声の質を左右するものは第一に伝送系の通過し得る周波数帯域( $\Delta \omega_s$ )と振幅に対する直線性である。次は伝送の途中で混する信号以外の波、つまり雑音である。通常は信号との比( $s/N$ )で示すが、ラジオ等では無信号時の雑音も問題になるので雑音の絶対量をも示す。

さて直線性は別として、周波数帯域は、信号が例えば  $10 \text{ c/s}$  から  $7.5 \text{ K c/s}$  までであるとしても、伝送系の各部では



第三図



異ったスペクトル位置にある。この関係を第3図に示してある。第3図は簡単のため第2図(2)を参照して示してある。

第3図(1)で与えられた周波数帯のスペクトラム $\Delta\omega_s$ は、変調器を通った後では、第3図(3)のように、キャリアの周波数 $\omega_c$ (第3図(2))を中心として $\omega_c \pm \omega_s$ 、つまり $2\Delta\omega_s$ の帯域幅を必要とする。したがって、変調器出力から受信機の検波器までは、 $\omega_c$ を中心とし、 $\pm\Delta\omega_s$ の所に波のスペクトルを通過し得る伝送帯が必要になる。(搬送波帯という)。検波器では、この搬送波帯の信号を再び低周波帯に復調し、スピーカーに渡して、音波を発生する。この系の中で、変調器では搬送波の出力を音波の波形に従って、吸収する事を、エレクトロニクス的手段で行なうのである。

さてX線像撮影系とラジオを比較するには、搬送波としては、X線はラジオに比べて非常に高い周波数の電磁波を用いる。変調は被写体がX線を吸収して変調する。さらに光電管や螢光板は検波器だから、ラジオと全く同じ系であると考えられる。

上述の結果によって次のような表が作れる。



第 3 表

X 線系	通 信 系	ス ペ ク ト ル 存 在 域	
		入 力	出 力
X 線 管	搬送波発生器	直 流	搬送波帯
被 写 体	吸収変調器及び 入力信号	信号波帯	搬送波帯
螢光板又は 螢光面	検波器及び 出力変換器	搬送波帯	信号波帯

X線像の伝送系：通信工学の伝送系とX線撮影系の各部の対応が第3表の如くつけられたから、ここでは簡単な例について調べてみよう。通信工学の伝送系と同様にX線撮影系をX線像の伝送系と名づけよう。この系について通信工学の伝送回路と等しい回路を導き出してみよう。これを等価回路という。X線像は二次元的な拡がりをもったものだが、二つの一次元の積と考える事ができるから一次元で話を進める。第4図のように、X線管が $o$ を中心として $u$ 軸上に沿って、

$I(u)$  というX線強度分布をもっているとする。

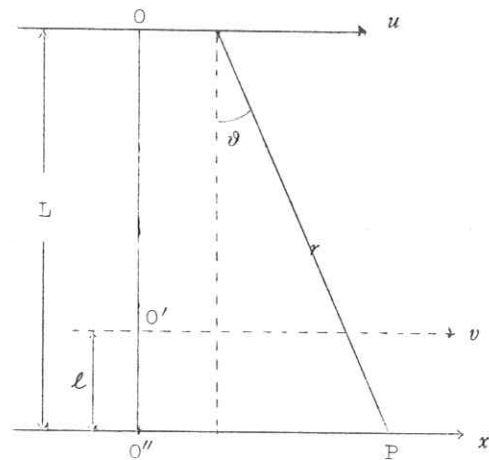
X線検出器（フィルム、螢光面等）は $o''x$ 線上にある。 $ou$  と  $o''x$  との距離を $L$ で表わし、被写体の置かれる $o'v$ 軸と、 $o''x$ 軸の距離を $l$ で表わす。被写体のX線に対する透過率を $T(v)$ とすると、 $o''x$ 軸上の点 $b(x)$ におけるX線の強度 $I_p(x)$ は次の式で与えられる。

$$I_p(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(u) \cos \theta}{r^2} T(v) dv \quad (1)$$

今 $T(v)$ が第5図のような波形をもつとすると、これは次の式で与えられる。

$$T(v, \omega_s) = a/2 \{ 1 + M \cos \omega_s v \} \quad (2)$$

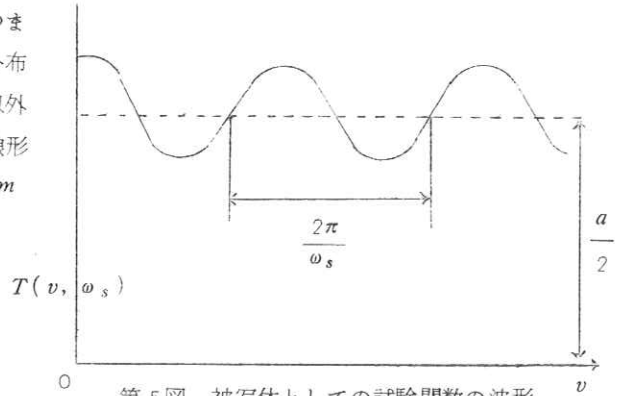
ここに $a/2$ は平均透過率で、 $M$ は変調度、 $\omega_s$ は角空間周波数で空間周波数 $f_s$ と $\omega_s = 2\pi f_s$ の関係がある。この伝送系の空間周波数 $f_s$ に対する伝送特性、即ち空間周波数特性を調べるには、(2)式の $\omega_s$ を変えながら夫々の $\omega_s$ 毎に(1)のFourier変換をし、その関数成分中の倍率 $m$ で低くなった $f_s/m$ の成分



第4図 焦点、被写体と像面の相互関係

がどのようになるか、又入力側になかった成分、つまり  $f_s/m$  以外の成分がどのように周波数について分布しているかを調べればよい。この目的の  $f_s/m$  以外の成分を伝送系の非線形歪による成分と言う。非線形成分の夫々の周波数の振巾を  $a_{ni}$  で表わし、 $f_s/m$  の振巾を  $a_{sm}$  とすると、通常は非線形歪を

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} a_{ni}^2}}{a_{sm}} \times 100\% \quad (3)$$



第5図 被写体としての試験関数の波形

で表わし、通信工学での放送機等では、変調度と周波

数について規定が定められている。例えば 1 kc では、変調度 80% で 5% 以内と定められているのが、実用上は 1% 以内に保守されている。この周波数特性の試験に用いられる (2) 式の  $T(v, \omega_s)$  を試験関数という。(1) 式の  $T(v)$  を  $T(v, \omega_s)$  とかいたのは  $\omega_s$  にも  $T$  の特性が関係するからである。第4図を参照して  $L-l/L=1/m$ ,  $\cos \theta = L/r$ ,  $r^2=L^2+(x-u)^2$  を用いて (2) を (1) に代入すると、

$$I_p(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{a I(u) L}{2 \{L^2 + (x-u)^2\}^{3/2}} \left[ 1 + M \cos \omega_s \left( \frac{x-u}{m} + u \right) \right] du \quad (4)$$

となる。ここで周波数特性を調べ易いように

$$I_p(x) = aL/2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(u)}{\{L^2 + (x-u)^2\}^{3/2}} du + aLM/2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(u)}{\{L^2 + (x-u)^2\}^{3/2}} \cos \omega_s \left( \frac{x-u}{m} + u \right) du \quad (5)$$

とかくと、第一項に  $x$  軸上の平均強度の変化の程度を示し、第二項が角空間周波数  $\omega_s$  の成分を与える事が判る。(5) の Fourier 変換を求め、試験関数(2)の角周波数  $\omega_s$  の  $1/m$  の成分の(2)の  $aM/2$  に対する比を求めれば、伝送系の角空間周波数特性が求められる。非線形歪の性質は  $\omega_s/m$  以外の成分の分布を求めればよい。(5) を変形し、 $\cos$  を  $\sin$  と  $\cos$  に分け、 $u/L=u'$ ,  $x/L=x'$ ,  $\omega_s L=\omega'_s$ ,  $I(u)=I(u', L)$  とおき換えると

$$I_p(x') = a/2L \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(u' L)}{\{1 + (x' - u')^2\}^{3/2}} du' + aM/2L \int_{-\infty}^{\infty} I(u' L) \cos \omega'_s u' \times \frac{\cos \frac{\omega'_s}{m} (x' - u')}{\{1 + (x' - u')^2\}^{3/2}} du' - aM/2L \int_{-\infty}^{\infty} I(u' L) \sin \omega'_s u' \times \frac{\sin \frac{\omega'_s}{m} (x' - u')}{\{1 + (x' - u')^2\}} du' \quad (6)$$

となる。ここで第一項は第2表の4, 相乗の定理の

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x-r) \cdot g(r) dr$$

$$H = F \times G$$

但し、一つの関数  $h$  の Fourier 変換を  $\mathcal{F}\{h\}$  とかくのだが上の相乗定理では  $\mathcal{F}\{h\} = H, \mathcal{F}\{f\} = F, \mathcal{F}\{g\} = G$  としてある。(6)式で  $\mathcal{F}\{(1+x^2)^{-3/2}\}$  は第二項の変形された Bessel 関数,  $K_1(\omega)$  に  $|\omega|$  をかけたものだから、第一項は

$$a/2L \mathcal{F}\{I(u', L); \omega/L\} \times |\omega| K_1(\omega)$$

となる。ここで  $\mathcal{F}\{I(u', L); \omega/L\}$  とかいたのは、 $I(u', L)$  の Fourier 変換の周波数スケールが  $1/L$  になったことを示す。(第2表10: 単位の変更定理) 第二項, 第三項は第2表7, 変換定理を用いるため  $\sin \varphi, \cos \varphi$  は夫々  $e^{j\varphi} - e^{-j\varphi} / 2j, e^{j\varphi} + e^{-j\varphi} / 2$  である事を用いて,  $j = e^{j\pi/2}$  だから位相を無視して次のように書いて, 周波数成分を示しておく, 信号として

$$aM/4L [\mathcal{F}\{I(u' L); \omega'/L \pm \omega'_s\} \times |(\omega' \pm \omega'_s/m)| K_1(\omega' \pm \omega'_s/m)]$$

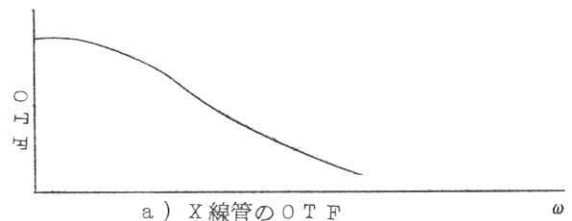
の成分が出る。従って,  $aM/2$  に対する比の形で示すと,

$$M/2L [\mathcal{F}\{I(u' L); \omega'/L \pm \omega'_s\} \times |(\omega' \pm \omega'_s/m)| K_1(\omega' \pm \omega'_s/m)] \quad (7)$$

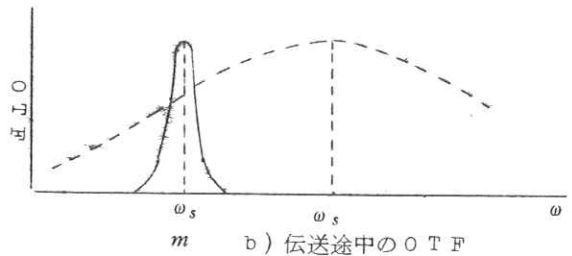
となる。受像面上のゆるやかな強度の変動を別とすると, (7)が入力信号に対する OTF を示すのだが, (7)

の大括弧の中の第一因子は, X線管の焦点の OTF (第6図a)の中心を  $\omega'_s$  だけずらしたもの(第6図b)点線)である。第二因子は  $|\omega| K_1(\omega)$  というX線の角度及び倍率による関数(ここでは角倍率関数とよんでおく)の OTF の中心を,  $\omega_s/m$  だけずらしたもの(第6図b)実線)である。

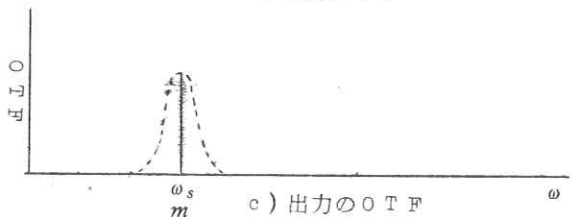
$\omega' = \omega'_s/m$  の点の振巾が信号の強さを示し, その周りの拡がり非線形成分を与える。従って出力は第6図c)の如く, X線管の OTF で中心から見かけ上,  $|1-1/m|$  の周波数の振巾に減衰されて出て来る事になる。この結果から第7図のような等価回路が得られる。入力信号の角空間周波数は  $1/m$  になる。だから, 倍率による周波数変換回路があって, その出力がX線管の OTF の中心周波数を  $\omega_s$  に移した帯域口波器を通して, 減衰されて出力信号として出て来る。これらの結果は, 倍率が1なら信号は常にX線焦点の OTF の原点を通るから, 高い空間周波数まで伝送出来る。倍率が大きくなるにつれてX線管の OTF の影響を強く受けるので,



a) X線管の OTF

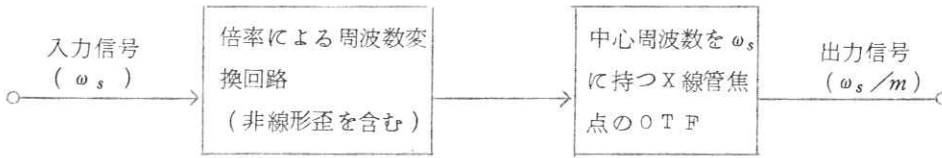


b) 伝送途中の OTF



c) 出力の OTF

第6図 X線撮影系の各部の OTF



第7図 X線撮影系の等価回路

通過帯域が狭くなる。このように OTF を使えば伝送系の特性が明確に各部分毎に分解して調べる事が出来る。しかし(4)式を直接解いて、強度分布が矩形の時、被写体として(2)式中の正弦波頂のみの場合の計算の結果の様子を、第8図に波形で示してあるが、これから任意の焦点の強度分布のときに、OTF に相当した性質を求める事は容易ではない事が判る。しかしこれまでの Fourier 解析の結果を知った上で図をながめると、信号以外の正弦波の発生している様子等がよくわかると思われる。以上のべた結果から、X線撮影系、即ちX線像伝送系は第7図のような等価回路になるので、1) X線管の焦点の OTF、2)角倍率関数の OTF を求め、3)被写体の周波数成分を知っておれば、合理的な伝送系の設計や倍率の限界等も直ちに求められる。

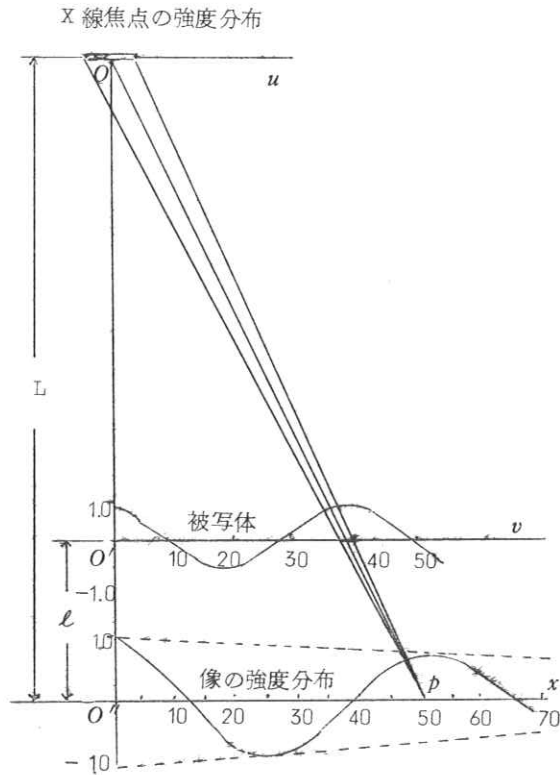
X線管の焦点のOTFの例：焦点の強度分布  $I(u)$  を簡単な形に仮定して計算した例を第4表に示してある。OTFとして

$$G(f_s) = \int_{-\infty}^{\infty} I(u) \exp(-x'2\pi f_s u) du$$
 から導いた  $G(f_s)/G(0)$  の形で図示してある。第4表の第一行は矩形、第二行は二等辺三角形、第三行は  $\cos^2$  形、第四行はガウス形である。それぞれの行の左側が強度分布で右側がその  $G(f_s)$  である。

強度分布の面積は全放射強度に相当する。ガウス形は  $I(u)$  の存在する  $u$  の長さが理論的には無限に長くなるので物理的には実現できない。

矩形、三角形、 $\cos^2$  形の比較をするため

第9図に実線で矩形、破線で三角形、点破線で  $\cos^2$  の OTF を示してある。OTF が零になる周波数は  $u_0$  をすべて等しくしたとき、この三つの内で矩形が一番小さい。又 OTF が 0.7 になる周波数を公称遮断周波数というが、これは矩形：三角： $\cos^2 = 0.9 : 1.4 : 1.45$  である。よって  $\cos^2$  形が最良



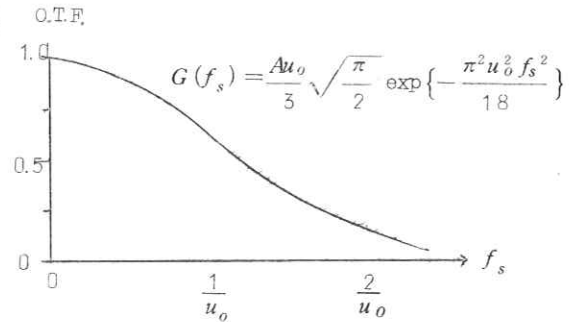
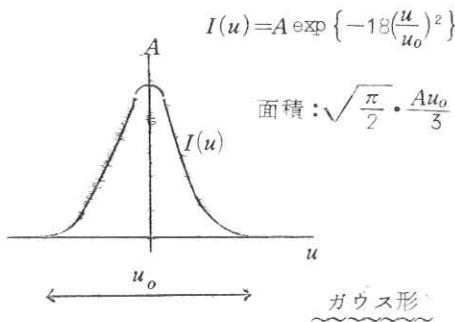
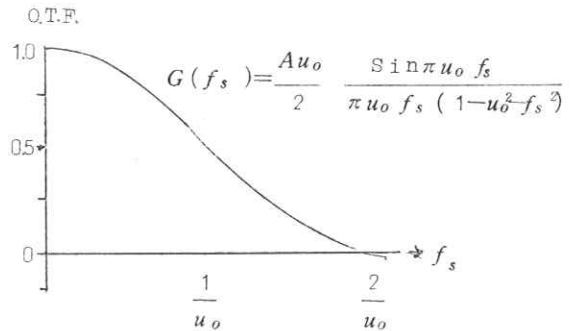
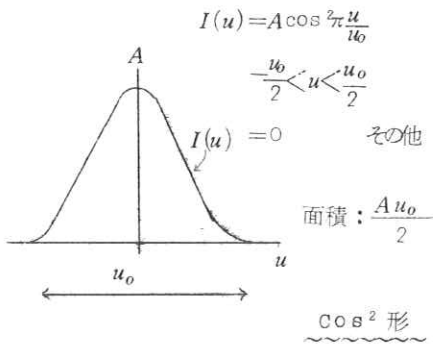
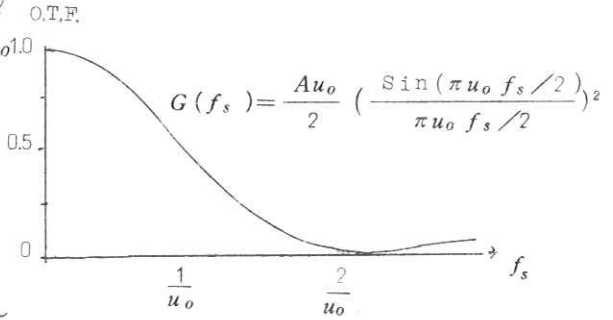
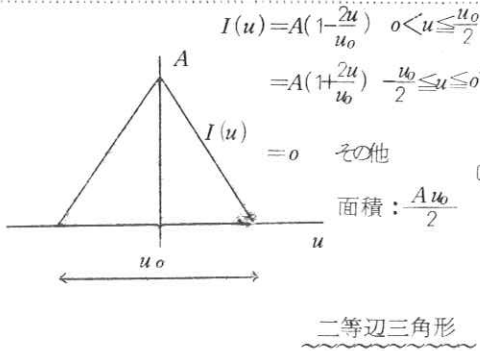
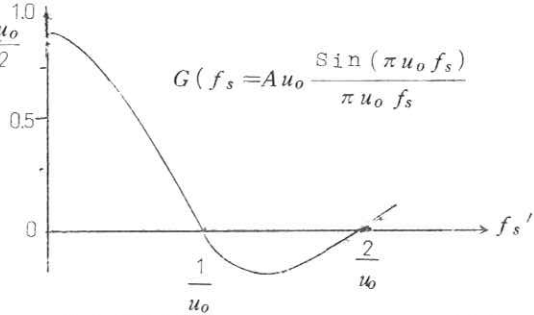
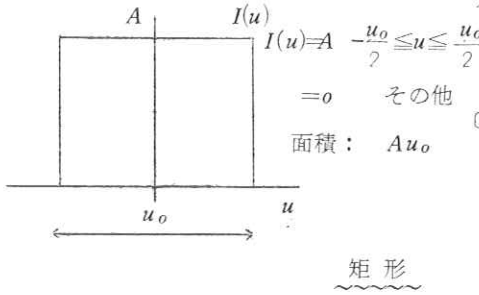
第8図 焦点が矩形分布のときの被写体と像の関係

第 4 表

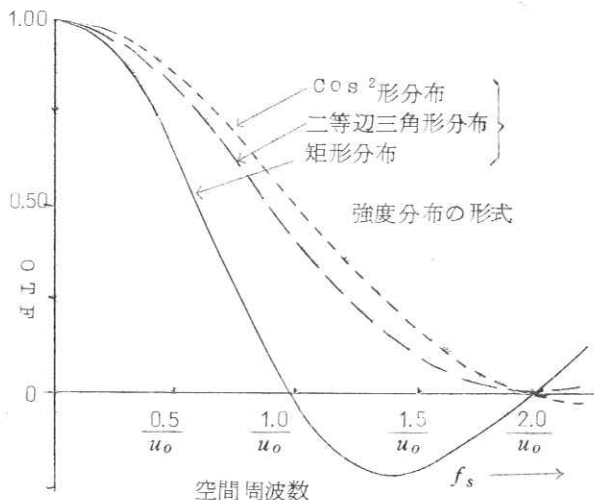
焦点の強度分布の形式

左側の焦点の O.T.F.

$$\text{O.T.F.} = \frac{G(f_s)}{G(0)}$$

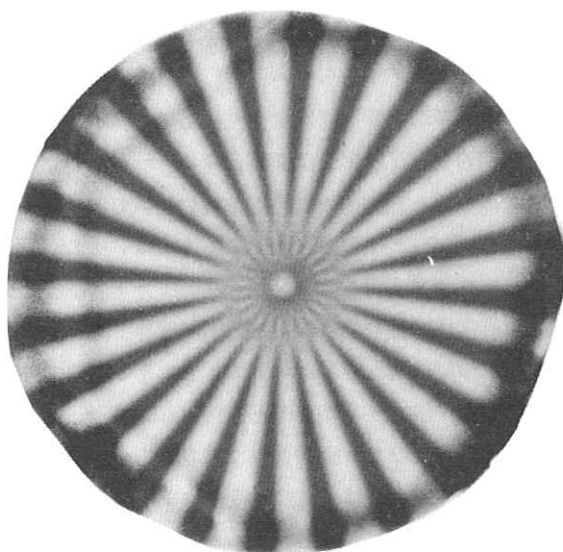


で、次が二等辺三角形、矩形が最も劣る。又、同一の強度分布形の場合には  $1/u_0$  に比例して遮断周波数が変わるから  $u_0$  の小さいほど通過帯域が広がる。更に、矩形の OTF は  $2\pi/u_0$  と  $4\pi/u_0$  の間で負になっている。一般に OTF が負になるような場合には、被写体中のこの周波数成分の正弦波は像面上では白黒が反転するので、このような場合を偽像と言う。実際これはジーメンス・スターを用いて測ると第10図の如く、この領域では白黒が反転する。だからこの周波数帯に観察しようとするものが入らないように X 線管を選ばなくてはならぬ。実用上に生じる複雑な形状の強度分布も、この例で示した OTF の組み合わせで表示する事ができる。



第9図 焦点の強度分布形式の比較

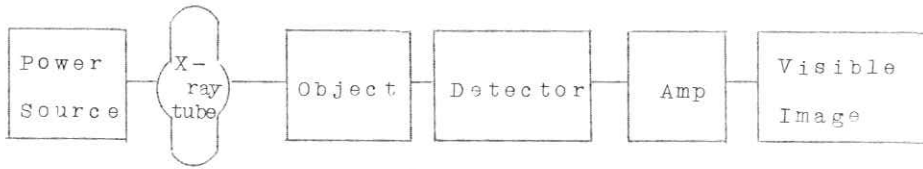
雑音：X線管やその他の系の夫々の OTF の通過帯域が広がるほど、被写体のもつ情報をより多く取り出し得るのであるが、伝送系には目的的被写体以外の各種の情報源からの情報の流れも、通過帯域を広くするほど多くなる。この目的の情報以外の情報をすべて雑音と言う。雑音には周期的な雑音と非周期的な雑音とがある。前者は像面に縦、横、斜めの縞が入る事になり、X線テレビジョンに電波やその他の妨害が入ったとき画面に生じ易い。非周期的な雑音中、画面に点々とする雑音は X-TV の近くで電気火花が飛んだり、自動車やオートバイが通ったりするときの雑音で、これをインパルス性の雑音という。もう一つは、現像済みのフィルムを顕微鏡で見たり、普通の放送用のテレビ受像機が放送局より遠くはなれたときに TV の画面に出る雨降り状の雑音で、これをランダム雑音という。



第10図 シーメンス・スターによる偽像中心部の二つの環内に認められる。

X線撮影系の各部分ごとに、どのような雑音が入りうるかを第5表に示した。

まず、X線管の電源は普通は商用周波数の電力を整流して用いるので 50 c/s 地区では 100 c/s、又、60 c/s 地区では 120 c/s のハムとして出る。X線テレビジョンではテレビジョンのフィールド



Noise Source	Periodic	Random
Power Source	0	
X-ray Scattering		0
Scattering by Object Material		0
Periodic Structure of Object	0	
Fluorescent Screen		0
Film Structure		0
Image Tube		0
Image Orthicon	0	0
Vidicon		0
Amplifier		0

第5表 X線像撮影系の雑音

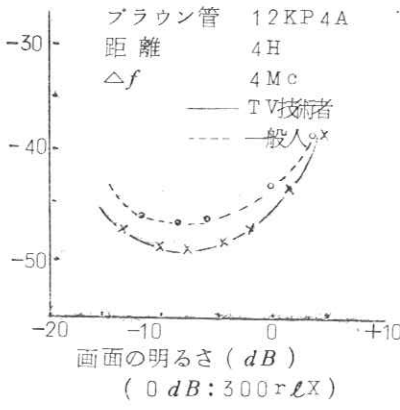
周波数と電力線周波数が結合しない場合には画面上にフリッカーが生じるので少くともハム電圧は信号電圧の  $1/30$  ( $30dB$ ) 以下にする必要があり、フリッカーに気づかなくなるためには  $1/100$  ( $40dB$ ) 以下にしないといけない。<sup>\*</sup> X線撮影系でインパルス性雑音が生じるような事はほとんどないが許容される信号対雑音比は安全を見込んで  $26dB$  あればよい。

周期的な雑音の場合には雑音のパワーとその周期は確定的な測定ができるので、そのパワーや周期と物理的な  $S/N$  と視覚的な限界が前述のハムの例の如く容易に求められるが、ランダム雑音は統計的なものであるから、パワーや周期に相当するものは、その統計的性質と関係してくる。パワーでは統計的な平均値や実効値に相当する量(一次又は二次のモーメント)と分布関数を知る必要がある。X線TVではTV装置のみは雑音は撮像管や増幅器の初段増幅管等で決定され、分布関数は正規分布で、周波数帯域は一定なので雑音の周期の期待値も容易に計算できる。その測定の一例を第11図に示し、画の品位を1.2.3.4.5.6.7の順に数字が大きくなるほど劣化する量で示した例を第12図に示してある。図から判るように意味のある画像と、意味のない画像とでは前者の方が  $S/N$  が悪くても内容がつかめる事を示している。

X線像の場合にはX線の散乱やフィルム、蛍光板の構造によるランダム雑音もあるので、統計的な性質による相違を調べておく必要がある。

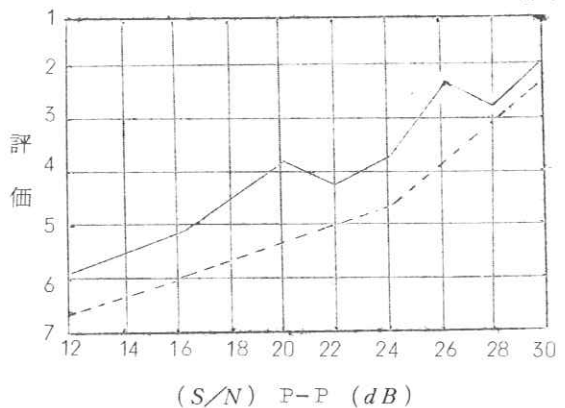
そのために計算して作ったフィルムや蛍光面の粒子に相当するモデルのスライドを作り、このスライドと文章のスライドを重ねて作った像から文章を判読する実験で被験者の80%が判読できる限界の  $S/N$  を測

<sup>\*</sup>註：信号対雑音比は信号のパワー  $P_s$  と雑音のパワー  $P_n$  の比を取り、その常用対数の10倍をデシベル ( $dB$ ) で示す。 $(S/N) = 10 \log_{10} P_s/P_n$ 、但し、電気信号の如く振幅  $e_s$  又は  $e_n$  で表わし得るときは、 $P_s \propto e_s^2$ 、 $P_n \propto e_n^2$  であるから  $(S/N) = 20 \log_{10} e_s/e_n$  となる。



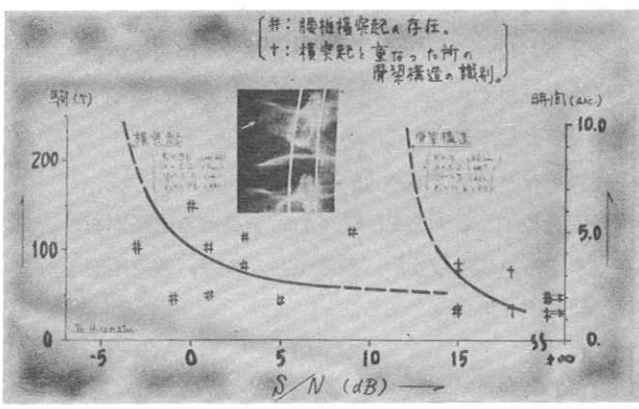
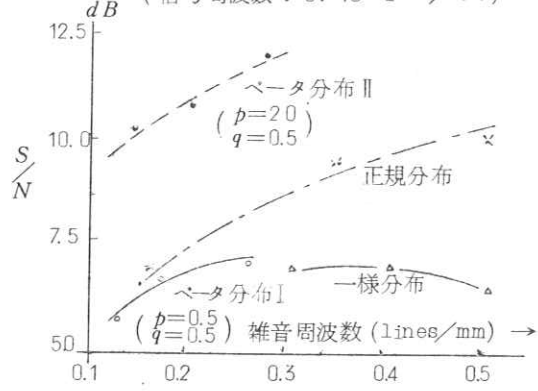
第 11 図 ランダム雑音の識別限界と画面の明るさの関係

き、モデルのもつ分布関数をベータ分布、正規分布、一様分布と変えた例を第 13 図に示してある。用の X 線像についても同様な実験が行なっている。更に判定限界を求めると、腰椎起の存在と、横突起と重なった所の骨染との識別についてアイカメラを用いて、 $t$  と判定所要時間の関係を測定した例が 4 図に示してある。この図から唯存在をめる場合と識別とはデシベルの十数  $t$  12 相違のあることが判るであろう。



第 12 図 画像の評価と (S/N)……評価 2 は、ほとんど雑音が見えない。評価 6 は、かろうじて実用になる。

第 13 図 可読率 80% の可読閾値 (信号周波数: 0.18 lines/mm)



第 14 図 判定所要時間と S/N



むすび

X線撮影系を OTF を用いて調べると、系の各部の OTF の積で全系が表現されるので、全体を見透しながら各部分を改善することができる。従ってある部分のみに過剰な要求をあやまってすることがなく、均整のとれた合理的な設計が可能になると思われる。

しかし、これを実現するには、未解決の部分として、第一に被写体の臓器別の所要周波数帯域中の測定値を集める必要がある。第二には、本稿で述べたように物理的な  $S/N$  と医学的知識を基とした視覚的  $S/N$  の判読上の閾値との関係を調べておく必要がある。

この方面の分野の早急な解決が望ましい。

## 質問討論

宮川：①階調の  $R(u)$  は全部が liner のときは単純に取扱えるか。② liner でもぼけはあるか。

③ Noise の概念。④  $n^m$  の combination について。⑤ 帯域巾について。

佐柳：①単純に扱える、②ある、③粒状性、

④例として

蛍光板の自由度  $m$  は  $1\text{mm}^2$  あたり 2 ケ、従って  $1\text{cm}^2$  あたり 400 ケ、又  $P \rightarrow 2$  で  $\Delta P \rightarrow 0.1$  の場合  
$$n = \frac{P}{\Delta P} = 20 \quad \therefore N = 20^{400}$$

⑤ その様を変化をするのはレンズだけでレンズ系を使わない時は問題がない。最終的にはガウスカープになることは証明されている。

井上：個々の場合の  $R(u)$  が必要である。最終の  $R(u)$  のみで表わすのは逆行ではないか。

村田：レンズの場合色々のパラメーターがあってその組合わせは無限であるので単一評価する必要がある。

井上：自由度の表わしているものはなにか。

佐柳：Nega の Density の所についてとある。

宮川：Object の Material について取扱ってほしい。

竹中：情報源のスペクトル分布が判っておればよいと思うが仲々出来ない。

内田：①情報源の情報量に重点をおく。

②情報源を物理的なものとして出してほしい。

③ Linefoot の濃度が各々独立であるというのはおかしい。

吉村：Material を模型に表わすこと即ち Phantom を決める必要がある。

もっと簡単などころでやらねばならない。濃度範囲、ぼけ、観察距離等。

村田：何を撮影するか。情報源が一番大切である。

## 第2章 像解析における問題点

キャノンカメラ 佐柳和男

### § 1. 序

情報・通信理論をX線像の解析に応用する際、明らかにして置かなければならない事項をまとめてみる。

最終像の評価を目的とする我々の場合、実に多くの要素がからみあっているが、情報・通信理論および近年におけるその光学での応用研究はむしろ個々の要素についての正確な記述、評価そしてその総合評価という筋で進んでおり、我々としてもそこを良く考え導入して行く必要がある。

情報理論で考える場合、そこには2つの問題があると考えられる。

その1つは、標本定理で代表され、周波数特性が中心的技法となる自由度の問題である。像の場合で言えば解像力とかレスポンス関数の平均帯域幅の問題と言いかえられる。

他の1つは、上で定まる1自由度の中で、幾通りの表現が可能であるか、即ち、階調とnoiseとから定まるもので、統計的取扱いが大切な技法になっている。

そして以上の2つのものを総合して、情報の量的な取扱いをする事になり、その段階でも、情報源の情報量、伝送系の情報容量などが夫々の場合に応じて定義されている。

### § 2. 像のぼけの取扱い

レスポンス関数がぼけについての便利な道具である事は、今更説明する必要はないであろう。

こゝで一番の問題は、光学結像系またはX線管の焦点などの取扱いの如く、incoherentな系のレスポンス関数では帯域幅が簡単に定められないと言う事である。多くの計算値、測定値で明らかな様に、高空間周波数領域に行くにつれ、だらだらと減衰し、場合によっては負の値になり、さらに振動する場合があります、標本定理が適用し難い。

これを解結する為に、平均帯域幅に相当する  $Q = \int_{-\infty}^{\infty} R(u) du$  等が考えられていると言える。この場合、その帯域幅の逆数で与えられる標本点間隔をはなれた夫々の点は一応独立と考えて良く、単位面積当りのその数を自由度とする。たゞ、厳密に言うと夫々の標本点は独立とは言えない。

たとえば、Linfoot は Airy disk の半径を標本点間隔としている。我々の場合にはレンズの収差、フィルムのぼけ等の故に、上に述べた様な考え方になっているのである。

### § 3. 階調の取扱い

一般の写真像の研究においては、§ 2 に述べた事が中心課題となり研究され、階調又は非直線性の問題はとりあげはじめた所である。たゞ、次の様な手順で行なうべきであると言う考え方は打ち出されている。

a. 階調とぼけは夫々独立に取扱う。

b. process の順に

ぼけについて linear な領域での原スペクトル

→その領域でのレスポンス関数によるスペクトル

＝その領域での像スペクトル

→次の問題を論ずべき領域への階調変換

のサイクルをくりかえす。

ただし、コントラストの非常に小さな分布についての簡便法等も考えられてはいるが、本質的には上のサイクルが大切である。

実例として

{	写真感材のぼけは光の強さに linear	等々
	現像効果はデンシティーに linear	
	引伸のぼけはフィルム透過光の強さに linear	

のサイクルが実際に考えられている。

X線の場合には、被検物体の construction と透過X線量の関係の所に、また違った意味での階調の問題が入って来て問題は複雑であるが本質的には同じ取扱いで貫けるものとする。

これまで述べた2つの問題だけではまだ情報と言ひ言葉を使えない。その為にはnoiseの問題を考へなくてはならない。

#### § 4 Noise, 粒状の取扱い

これも写真の方で研究が進んでいる。こゝでは上2つの問題との結びつきのあたりを考えてみる。

粒状が情報理論で問題になるのは、上に述べた標本点における情報が無限にあるのではなく、信号の最大パワーと雑音のパワーの比できまる有限の数に制限される為である。信号としては0から最大まで任意の値を連続的にとり得るが、これに雑音を加わると、受信者、写真の場合なら視察者は雑音のパワーより近よった2つの信号を区別出来ない。

今、その様に考へて区別出来る場合の数が  $n$  ケであるとする。そして自由度を  $m$  とすると、 $N = n^m$  だけの組合わせの場合があり得て、これが広義の情報量、さらに2を底とした対数をとる、

$$m \log_2 n$$

がその伝送系の情報容量を与える。この解答は非常に雑なものであるが、情報量のそなえるべき要件を組合わせた実例にして述べた。

さらに原画または被写体のもつ情報量となると、それを情報源と考へ、統計的な取扱いをしなければならぬ事をつけ加えて置く。

#### § 5 結 び

こゝで言いたかった事は情報量を問題にする為には、上の3つの事を夫々別に良く考へて結びつけるべきである事、その研究を今後進めるに当り、各自の分担事項と目標とを会の共通の計画にすべき事の2つである。