■第 1 章　解像度

要約

・解像度（resolution）とはどれだけ細かいものを分解できるかを表している。
・解像度と空間分解能はほとんど同義である。
・空間周波数の定義と単位を覚えよう。

１．１．解像力

解像度（resolution）は、どこまで細かいものが識別できるかを表す指標である。解像力（resolving power）は解像度を表すために使用されており、図 1.1 のように JIS Z4916 にはX線解像力テストチャートの規格が定められている。この規格で解像力（resolution）は、X線写真やX線映像装置などの画像の描写能力を表す量であり、等しい幅を持つ明暗の線対（ラインペア）の像において、分解していると認められる最小線対の幅の逆数で表すとなっている。単位は一般に LP/mm（ラインペア・パー・ミリメートル）を用いる。

$$u = \frac{1}{2d} \tag{1.1}$$

ここに、u：空間周波数（LP/mm）

d：線幅および線間の寸法（mm）

解像度を表すために空間分解能という言葉もよく使用される。空間分解能と解像力との使い分けは一般に次のようである。

・空間分解能：撮像などの入力系。I.I.やガンマカメラなど。
・解像力：画像、取得、記録などの表示・出力系。レンズや CRT モニタなど。

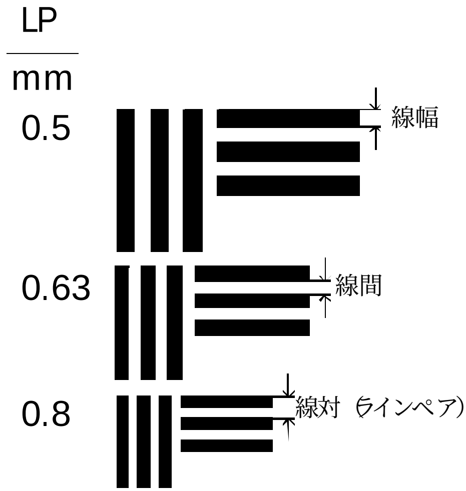

図 1.1　解像力チャートの線パターンの例

1．2．空間周波数

周波数は単位時間当たりの振動数で定義されていて、よく使用されている特別の単位は Hz（ヘルツ）である。たとえば関東では家庭に供給されているコンセントの電力は 50Hz の交流であり、1 秒間に電圧電流とも 50 回プラスとマイナスを繰り返す。その波形は正弦波になっている。

空間周波数は単位長さ当たりの振動数で定義されていて、JIS で規定されている特別な単位は LP/mm である。周波数は正弦波で定義されることから、空間周波数の単位には cycle/mm（サイクル・パー・ミリメートル）が一般的に使用されている。しかし空間的に明暗の正弦波チャートを作ることは難しく解像力チャート

同様、矩形波チャートが利用されている。後述するが矩形波はコルトマンの換算式により正弦波に換算することが可能である。

１．３．解像限界

解像力は線幅と線間の等しい明暗のパターンが画像上で識別できなくなる限界で表現される。これを解像限界（resolving limit）といい、パターンのコントラストや測定者の判断基準などによって多少の差が生じる。解像力の求め方には、この方法の他に、後述する MTF がある値になるときの空間周波数を解像力とする方法や、レイリーが提案した解像限界の指標を用いる方法がある。解像力チャートは並列細線チャートとも呼ばれ、物体のディテール（細部描写）を主観的に評価するために比較的広く用いられている。

デジタル画像の解像度は画素サイズΔx と量子化間隔Δq によって決まる。このときΔxは式(1)の d に相当し、たとえば$\Delta x = 100$ μm ならば $u = 5$ （LP/mm）となる。しかし実際に解像力チャートを撮影して観察すると 3.5 あるいは 4.0（LP/mm）程度の値が得られる。

解像度により画像評価を行う問題点は、得られたチャート像のコントラストや測定者の判断基準により差を生じることである。また解像限界により、物体の識別能が物体の大きさ（小ささ）のみで決まり、物体を解像できる最高の空間周波数で表現されることである。

まとめ

・解像度は解像力により評価される。
・解像力は細線の幅 d に対して次のように定義されている。

$$u = \frac{1}{2d}$$

ここに、u：空間周波数（LP/mm）
　　　d：線幅および線間の寸法（mm）

・空間周波数の単位は LP/mm であったが、cycle/mm が使われるようになってきた。
・解像力法の問題点は、チャート像のコントラストや測定者の判定基準により差が生じることである。

演習問題

1-1　次の設問は、X 線画像の評価において正しいといえるか。

・解像力は$\frac{1}{3\mathrm{d}}$ cycles/mm である（d：分離不能になった細線の幅）。

1-2　次の設問は、X 線画像の評価において正しいといえるか。

・被写体のコントラストが上昇すれば解像力は低下する。

1-3　次の画像の評価法はフーリエ変換を必要とするといえるか。

・並列細線チャート法

1-4　次の設問は、X 線画像の評価において正しいといえるか。

・解像力は$\frac{1}{4\mathrm{d}}$ cycle/mm である（d：分離不能になった細線の幅）。

■第 2 章　鮮鋭度

要約

・鮮鋭度とは画像の明瞭さ（sharpness）を表す指標のひとつである。
・ボケを空間的に表現すと、原画像とインパルス応答との畳み込み積分になる。
・放射線画像では、インパルス応答の代わりに点広がり関数（PSF）や線広がり関数（LSF）が用いられる。
・ボケは空間周波数領域の方が扱いが容易で、レスポンス関数（MTF）は空間周波数の関数としてボケを表している。
・MTF の測定法には、矩形波チャート法、スリット法、エッジ法がある。
・デジタル撮像系の鮮鋭度評価は、2 次元等方性が成り立たないため、アナログで行われる MTF 測定法をそのまま適用することはできない。しかしデジタル系に固有な特性に充分注意して解析すれば MTF による評価が可能である。

鮮鋭度は、画像の明瞭さ（sharpness）を表す指標のひとつである。解像度は解像限界を示す空間周波数で表現されるが、鮮鋭度は基本的にボケを扱っており、鮮鋭であることはボケが少ないことを示している。繰り返しになるが、解像度は、物体がボケて見えなくなる限界点を示しているのに対し、鮮鋭度は、どのようにボケていくか、あるいは物体の大きさ（空間周波数）により、どの程度ボケるのかを表現しているところが大きく異なる。さらに解像度は主観的な評価なのに対して、鮮鋭度は客観的な評価であるという点も異なる。

２．１．広がり関数

放射線画像系に非常に小さく単純な入力を行う。このような入力によってできあがった画像の濃度分布は、システムの応答特性によってボカされ広がりを持った分布となる。これを広がり関数（spread function）という。

１）点広がり関数

非常に小さく単純であり、また 2 次元等方性な分布を示すのが点である。ピンホールにより作られるＸ線像はδ（デルタ）関数とほぼ同様の性質を持ち空間的には広がりを持たない。これがあるシステムに入力されると、その応答特性により空間的に広がりを持った分布となる。これを点広がり関数（point spread function：PSF）あるいは点像強度分布と呼ぶ（図 2.1）。PSF は２次元等方性であり、画像評価のための入力として理想的であるが、空間的には扱いが難しいため、あまり利用されていない。

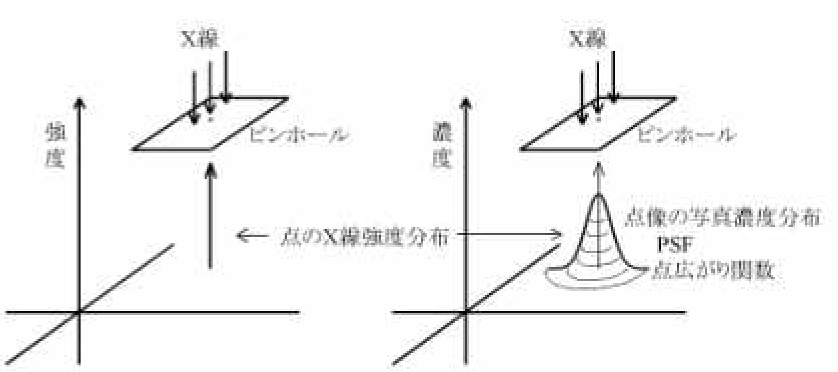

図 2.1　点広がり関数

$$LSF(x) = \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x, y)dy \tag{2.1}$$

2）線広がり関数

スリットを用いた線入力により得られる分布は、線広がり関数（line spread function：LSF）あるいは線像強度分布と呼ばれる（図 2.2）。PSF と比べると LSF は方向性がはっきりしているため空間的な取り扱いが容易で、画像評価によく利用されている。

LSF は PSF を使って次のように表すことができる。

(2.1)式が示しているのは LSF(x)のすその高さは同じ位置(x)の PSF(x,y)の y 方向の積分値（断面積）に等しいということである。すなわち LSF のすそは PSF のすそより高い値であるということを示している。また別の表現をすれば、LSF は PSF の畳み込み積分（convolution）になっているということである。

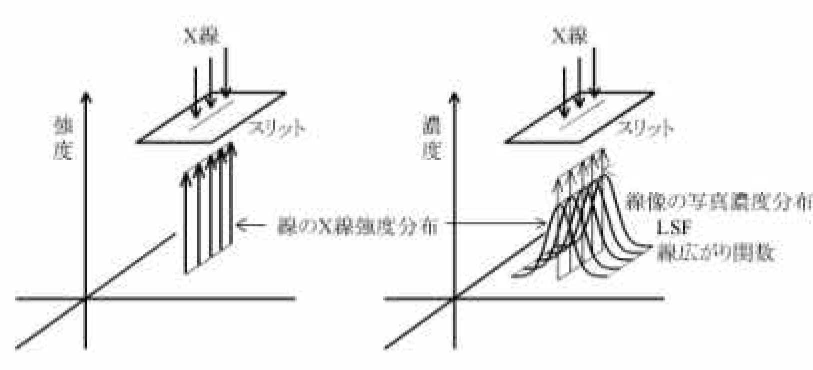

図 2.2　線広がり関数

３）エッジ広がり関数

エッジを用いた入力を行うと、エッジ広がり関数（edge spread function：ESF）が得られる。

エッジは次のような不連続な関数として表される。

$$e(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \tag{2.2}$$

図 2.3 のようなエッジ像 ESF(x')はエッジ e(x)と LSF との畳み込みで与えられる。

$$\begin{aligned} ESF(x') &= \int_{-\infty}^{\infty} LSF(x'-x)e(x)dx \\ &= \int_{0}^{\infty} LSF(x'-x)dx \\ &= \int_{0}^{x'} LSF(x'')dx'' \end{aligned} \tag{2.3}$$

ただし，$x'' = x' - x$

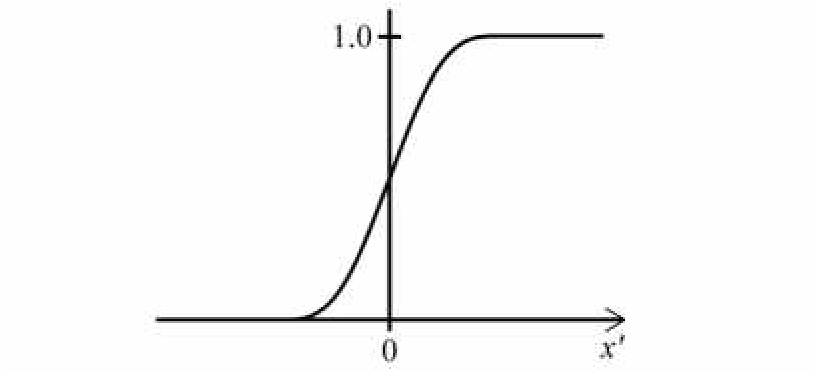

図 2.3　エッジ像

　すなわち線広がり関数の積分でエッジ像が得られることがわかる。反対にエッジ像を微分すれば線広がり関数を得ることができる。

$$LSF(x') = \frac{dESF(x')}{dx'} \tag{2.4}$$

２．２．空間的な鮮鋭度評価法

１）傾斜角度法

　金属エッジを撮影し得られた ＥＳＦ の濃度分布をX線強度分布に変換し、図 2.4 のようにエッジ移行部の傾斜角度によって鮮鋭さを評価する方法である。不鋭領域の大きさ U は傾斜角θを使って、次のように求められる。

$$U = I/\tan\theta \tag{2.5}$$

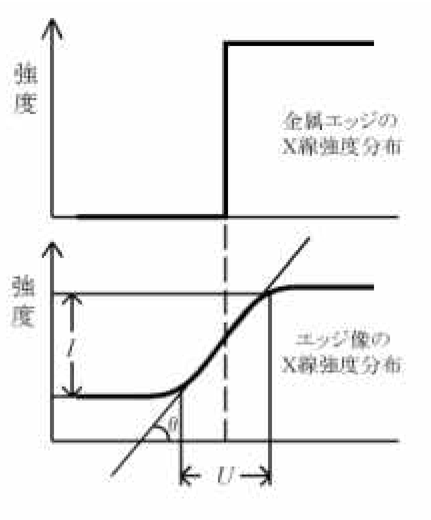

図 2.4　傾斜角度法

2）半値幅法

図 2.5 のように、スリットを撮影して得られた LSF の半値幅（full width at half maximum：FWHM ）で鮮鋭さを評価する方法である。現在でもガンマカメラなどの空間分解能評価の方法として利用されている。

3）Nitka 法

不鋭面積法とも呼ばれ、傾斜角度法ではX線強度分布への変換が必要であるが、濃度分布から評価できる。またエッジ像の肩の部分も含めて不鋭を評価できるという特徴がある。不鋭の大きさ U は N_1 と N_2 の和として次のように求める（図 2.6)。

$$U = N_1 + N_2 \tag{2.6}$$