芝電気株式会社 木 下 幸 次 郎

1. 画像雑音の種類とその性質

1.1 画像雑音の定義

雑音の基本的性質については、本講座の第 1 回「理論と解析」にくわしい説明がある。ここでは具体的な現象を主として述べる。

広辞苑や岩波の理化学辞典には“さわがしい音、不規則な振動からなり、不快を感じさせる音、電信、ラジオの聴取を妨げる音とか、電気回路で目的とする信号以外の擾乱電流をいう”と説明されている。これは“各種の情報源から、われわれが感覚器官を通じて、その情報を理解しようとするとき、それを妨げるもの”と要約できる。したがって、画像の雑音とは、被写体または情報源から、撮影などの手段を用いて聴視者に提供された平面上の $f(x, y)$ という 2 次元的な明るさの分布を視覚を通して受取るとき、妨害となる明るさの分布 $[R(x, y)]$ である。したがって、平面上に提示された $f(x, y)$ 以外のものがすべて雑音であるとはいえず、これが $R(x, y)$ に属するためには、平均的聴視者によって妨害効果をもつという判定が必要である。

われわれが通常取扱う画像は、その存在平面が有界なので、雑音も静止画像における時間的変数を除き、その領域内に変域が制限される。したがって、平面座標系につき定常な雑音とは、有界な領域内で定常であることが必要になる。

1.2 雑音の種類

テレビでは図 1 に示すように、被写体を適当な光源で照明し、光学系で撮像管の光電面上に光学像を結び、光电変換、電子像の蓄積、分解走査変換などの各系を通り受像機に伝えられ、再び組立走査や電光変換などの各系を通して聴視者に再生光学像を提示する。これらの一連の系のおおのの部分系に入る雑音が再生像中に混入す

図 1 テレビジョンの系統図

る。その混入源ごとに雑音の種類を分けることもできる。

(1) 光量子雑音

入射像は光量子で運ばれるが、その密度が時間的・空間的にゆらぐため発生する雑音を光量子雑音といっている。

可視域の照明で撮像される普通のテレビでは、撮像管の光電面の明るさが 1 mlx、その直径を 3 インチの光電面とすると、波長 550 mμ では、1 絵素あたり 1/30 sec に入る光子数¹⁾ は約 1.6×10^3 個になるので、光量子のゆらぎをポアソン分布に従うとすると、平均値と雑音の比は 40 : 1 (32 dB) になり、画質劣化の上でさして問題はない (波長 550 mμ で 10^4 lx の照度では 4.27×10^{15} 個/sec・cm² である)。しかし、0.1 mlx では 13 : 1 に減少する。また、X 線や γ 線の領域では、1 光子当たりのエネルギーが高くなり、医用の場合には患者や取扱者の安全をも考えると入射線量は強くできないので、光量子雑音が大きくなる。たとえば、1 cm² に受け取るエネルギーが同じ場合に、可視光とその 10^4 倍のエネルギーをもつ X 線とでは、光量子数比は $10^4 : 1$ にもなる。すなわち、同一光電面照度でも X 線テレビの場合には 30 mlx 付近を境界に X 線のほうが著しく S/N が劣化

¹⁾ "Noise (6); Noise of Pictures" by Kojiro Kinoshita (Shiba Electric Co., Ltd., Tokyo)

写真1 シンチグラムの例（心臓）（東大医学部 秋貞博士提供）

する²⁾。特にラジオアイソトープを用いたシンチカメラでは、写真1に示すように、雑音によって像が作られるかたちになってしまう。

ここで光の吸収損失による S/N の低下を量的に調べてみる。入射光子数 n_0 の光が吸収係数 $\alpha \text{ cm}^{-1}$ で厚み $d \text{ cm}$ の物体を通過すると、透過後の光子数 n は $n = n_0 \exp(-\alpha d)$ で与えられるから、初めの $(S/N)_0$ に対して $4.3\alpha d \text{ dB}$ だけ S/N が減少する。

(2) 粒状雑音

フィルムなどのように、画像を主として粒子の集まりで構成するものや、これに類した粒子による雑音は、光子の場合と異なり、時間的に変化しない。このような雑音を粒状雑音という。被写体をフィルムに撮影してテ

レビに与えるときには、フィルムの撮影時の光子雑音の他にフィルムの粒状雑音に加わる。陰画のフィルムでは被写体の明るい所では銀粒子が数多く生じ、暗部では銀粒子が少なく生じるので、この場合も暗部では明部に比べて雑音が多くなる。この傾向は、高感度フィルムになるにつれて、感光銀塩粒子が粗大化するので、低照度になるにつれて強くなる³⁾。また、印画紙にプリントした場合には、印画紙表面の形状により、いろいろな形の雑音が混入する⁴⁾（写真2）。最近では各種の新しい感光材料が開発されているが、これを利用する場合には、雑音の面でも注意しなくてはならない⁵⁾。これらと同一種類の雑音として、FSS 用ブラウン管の蛍光面の雑音がある。これを少なくするために、蛍光面を蒸着膜で作成し、無粒子化するという提案もあるが、蛍光体の粒状雑音自体は無粒子化で除去できるが、境界反射などの問題があるので実用化はむずかしい。

最近、オキシランタン硫化物の蛍光体の製造法が開発され⁶⁾、直径 $5 \mu\text{m}$ 位の均一な粒子が得られるようになり、変換効率も従来より4～5倍良くなったとのことであるから、近い将来、蛍光面の雑音は著しく減少するものと思われる。

(3) 光学系の雑音

夜空に輝く星をみると、またたいて見えることは、よく知られている。これは、光の伝搬する通路の屈折率の時間的変動によるものである。工業用テレビなどで遠距離の被写体を望遠鏡で撮像する場合には、そのために像がぼやけたり、ゆがんだりする⁷⁾⁸⁾。室内競技場でアイススケートリンクなどを撮像する場合にも、氷面から上方に向かって強い温度勾配ができるので、場内の気流の変

写真2 印画紙の表面の顕微鏡写真

(a) 透過率形の例

(b) 偏光縞の例

写真 3 モアレの例

動によってこのようなことが生じる可能性もある。

撮影用レンズ内部での反射やレンズの最終曲面の形状により、この曲面と光電面との間に特別な反射でゴーストが生じる場合もあるが、この現象は、電気回路での線路やケーブルの不整合による反射と同じ性質のものだから、雑音とはいいたくない。

夏の寄席の中継などで、絹の羽織を着た出演者の羽織の部分に出演者の動きにつれて水の波紋状の縞ができるのが見受けられる。これは、モワレ (Moiré) 効果として知られている。最も簡単な場合を取扱うと、写真3のように2つの平行縞を重ねるとビートができる（白黒の縞でなくても偏光面の異なる縞でもよい⁹⁾。これは周期的な縞だからランダム関数ではないが、実在する平行縞は正確に同じ間隔でなくまた平行でもないから、間隔のばらつきと曲りでビートのピッチが変動し、雑音となって現われる。

簡単なテレビ方式の変換のため受像管の画面を別のテレビカメラで撮像するとか、高解像度のX線テレビで、散乱X線を含んだX線像を撮像するときに用いられる散乱X線防止用の格子が、まちがってテレビの走査線と平行に取付けられたときに発生する。

(4) 光電変換系の雑音

光電面や光導電面は半導体の複合体で作られているので、面または各層の不均一による感度むら、または暗電流やそのむらによる雑音が発生する。特にシリコンターゲットビジコンでは、シリコンターゲットの結晶に格子欠陥などが生じると、入射光のあるときに、これによる黒ずじが生じる¹⁰⁾。また、天体望遠鏡による変光星の観測に用いられたイメージオルシコンの光電面の局所的感度の時間的変動により観測が妨げられたという報告があ

写真 4 スターノイズ

る¹¹⁾。赤外線用光電面では、光電面を均一に冷却しないと、光電面の温度分布むらによって電子放出に差異が生じ、これによる雑音、シェーディングなどが発生する。また、高感度撮像管などでは、走査用電子銃の放出する近赤外線によっても同様の雑音が生じる。

医用X線テレビや各種の放射線像をテレビ系を通して撮像する場合には、前にも少し触れたように、入射線強度を強くするには各種の制限がある。制限されたX線量によって得られたX線像は、イメージンテンシファイヤなどで増幅される。イメージンテンシファイヤの入力光電面は、放射線を可視光に変換するための蛍光板と明るい光学系で結合される。この明るい光学系としてフナバーが1より小さいファイバーオプティクスが利用されるようになった。

たとえば RCA 8606 では入力光電面および出力蛍光面の支持板をオプティカルファイバー板で作っており、イメージンシファイヤ1本では利得が不足な場合には、2本以上の管をそれぞれの出力面と入力面とを機械的に接続するだけで所要の利得を得るようにしたものである。しかし、入力光電面と結合する蛍光板が放射線にも感ずるので、ファイバーガラスの構成成分中に放射能をもつ原子が含まれていると（たとえば K⁴⁰）写真4に示すような星のまたたきのような雑音が生じる。

これは特にX線回折像のように目的とする像も点で構成されている場合には、はなはだしく都合の悪い雑音である。これがファイバー付イメージンシファイヤの感度の限界を定めてしまう¹²⁾。

(5) 偏向系の雑音

電子ビームや増幅器の雑音については、前回に電子部品の方で述べられている。しかし現在のテレビでは、直列走査方式だから入力像と出力像の存在するそれぞれの座標系を1対1に結ぶためには偏向系が必要である。現在の標準方式ではあまり問題はないが、高精細度のテレビになると偏向系の雑音によって分解能の限界が定まってしまう¹³⁾¹⁴⁾。垂直走査波形が通常ののこぎり波の場

合、走査面上で n 本分走査するために EV の入力が必要であるとき、走査波形に実質的に ΔE の変動を生じたとすれば、走査面上の走査線数の変動量を Δn とかけば、

$$\Delta E/E \times n = \Delta n$$

$\Delta n=1$ として、 $\Delta E/E$ を dB で表わすと、

$$20 \log \frac{\Delta E}{E} = 20 \log \frac{1}{n} = -20 \log n$$

たとえば $n=4000$ (本) として、 $S/N=72$ dB に相当する。この程度の雑音は、同期信号に混入する電氣的な雑音と偏向用電子光学系に入る磁場の変動などによって生じうる。

(6) 立体テレビの雑音

現在の標準方式のテレビを立体化する最も簡単な方法は、カメラ側では光学系を立体用に変え、飛越走査の $1/60$ sec を、たとえば左眼用の画を作る時間とし、次の $1/60$ を右眼用の画を作る時間とすれば、 $1/30$ sec で立体像を送ることができる。受像機側では、左眼用と右眼用との信号を2つの受像管に出し、それぞれの受像管に偏波面が直交するようにフィルターを設け、聴視者は立体偏光メガネを掛けて視ればよい¹⁵⁾。

この系に入る雑音は前に述べた雑音であるが、立体的には、左右の眼に入る雑音に相関がある場合と無相関の場合とに分けられる。

前者は撮像管の光電面のむらなどであるが、後者は一般の雑音である。聴視者に与える影響を測ると、前者は後者にくらべて妨害の影響がはるかに少ない。また、立体テレビをカラー化すると、雑音に対してきわめて強くなるという結果が報告されている¹⁶⁾。

以上、テレビ系の各部分に混入する雑音の代表的な例を述べたが、これらは大別して次のようになる。

A. 乗法性雑音

1 絵素当たりの情報を搬ぶキャリア (たとえば、光子またはフィルムの現像された銀粒子など) の変動によるものは雑音が情報で変調されるので (変調作用は積の形になるから) 乗法性雑音という。

B. 加法性雑音

増幅系の雑音のように、1 絵素当たりの雑音とは別に、信号があってもなくても入るもの、つまり信号に加わるものである。

以上述べた各種の雑音を、この2種類について表を作ると表1のようになる。

1.3 画像雑音の性質

前に述べられた雑音の一般的性質中、電気回路では、雑音の分布関数と、それから与えられる平均値、実効値を測り、信号の強さと比較して、信号対雑音比 (S/N)

表1 雑音の分類

乗法性雑音	
○	光量子雑音
○	粒状雑音
○	光学系の雑音
○	偏向系の雑音
加法性雑音	
○	スターノイズ
○	増幅器の雑音

を用いて物理的・心理的な妨害の目安としている。

画像中に出現する雑音は、これを目で視るのだから、 S/N の他に、その形状などをも問題にしなければならない。雑音の2次的な形状を論ずるのは大変困難があるので、雑音の平均値が0の場合、毎秒あたり0となる回数の期待値 (n_{exp} 個/sec) を求める¹⁷⁾。雑音のパワースペクトルを $\omega(f)$, f を周波数、相関関数を $\Psi(\tau)$ として、

$$\Psi(0) = \int_0^\infty \omega(f) df, \quad \Psi''(0) = \left. \frac{d^2 \Psi(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0}$$

であるとしたとき、

$$n_{\text{exp}} = \frac{1}{\pi} \left[-\frac{\Psi''(0)}{\Psi(0)} \right]^{1/2} = 2 \left(\frac{\int_0^\infty f^2 \omega(f) df}{\int_0^\infty \omega(f) df} \right)^{1/2}$$

で与えられる。

$\omega(f)$ が f_a から f_b まで一様なとき、

$$n_{\text{exp}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{f_b^3 - f_a^3}{f_b - f_a}}$$

であり、 $f_a=0$ のとき、

$$n_{\text{exp}} = 1.15 f_b$$

である。テレビの場合、画面の水平走査線の長さを L_h 、水平走査線の周波数を f_h 、走査線有効率を η とすると、水平走査線の輝度が平均値から上下する長さを雑音の細かさ F_h とすると、

$$F_h = \frac{L_h f_h}{\eta n_{\text{exp}}}$$

となる。パワースペクトルが0から f_b まで一様とすると、

$$F_h = \frac{L_h f_h}{\eta f_b} \times 0.866$$

となり、われわれが、雑音が長いから、どこか増幅系の帯域が狭くなっていると判断する経験的事実と一致する。

三角形雑音で0から f_b までの場合は、

$$n_{\text{exp}} = 1.414 f_b, \quad F_h = \frac{L_h f_h}{\eta f_b} \times 0.707$$

だから、一様な雑音にくらべて雑音が細くなる。雑音が細くなると、われわれの眼の分解能には制限があるから、生理光学的な視覚のフィルター作用により、見かけの S/N を向上させることもできる。

フーリエスペクトルの上下に高次に伸びているのはスキャン間隔スペクトル、中心の矩形、上下左右のうすい矩形スペクトルは打点 (1×2 mm) スペクトル、量子雑音スペクトルと RI 像スペクトルがそれらの上にのっている。帯域制限は中心の 0 次近傍のみで再生した (竹中博士による)。

写真 5 腎 RI シンチグラムのフーリエスペクトル再生像および帯域制限像

2. 雑音の除去と低減法

2.1 空間的整合法

放送用のテレビでは、放送局の設置計画が、 S/N に対しても最適になるようにできているので、ほとんど問題はない。工業用テレビや医用の分野では、テレビ系の最適条件を基準として設計するというわけにはいかないので、テレビ系のほうで工業用計測、または医用画像処理の条件を満足させるようなシステムの開発が行なわれる。その際、雑音の除去とか低減が行なわれる。この場合、テレビ以外の系の空間的な情報密度とテレビ系のそれとに過不足があるときを、情報量の不整合と名づけると、

- ① 空間周波数的不整合
- ② 時間周波数的不整合
- ③ 空間的な不整合

に大別できる。

①の場合は、シンチ像のようなものをテレビで記録、再生する場合で、放射線像は写真 5 に示すように空間周波数帯域がきわめて狭いので、レンズの伝送帯域幅を狭くしたり、適当なメモリーに入れ、高速度計算機で補正を行なって写真 5 の filtered image のようにして伝送するという方法がとられている¹⁸⁾。

2.2 時間周波数的不整合

画面上での被写体の時間的变化がゆるやかな場合、たとえば、X線回折像とか結晶のディスロケーションのX

線顕微鏡像とか、電子顕微鏡と結合したテレビの場合などには、被写体としては、毎 min または数 sec に 1 画面が完成すれば足りる。テレビモニター像を眼で見て判断する実用上の方法として、入射X線像を撮像管のターゲットに電子像として蓄積し、間欠的に読出して 525 本あるいは適当な走査線数で画面を作り、それをディスクメモリーとか蓄積管に蓄積して所要のモニターで連続的に観察する方法がある。

この際、信号は蓄積時間に比例して増大するが、雑音は $\sqrt{t}$ に比例して増加するから S/N は $\sqrt{t}$ に比例して改善される。X線回折像とか、X線顕微鏡用テレビでは、 t として 10 sec の範囲まで実用になっている¹⁹⁾。

2.3 空間的な不整合

画像の作られた平面上で、多くの被写体の 2 次元的スペクトルを調べると、平面上では方向について一様ではなく、特に文字では特定の方向にスペクトル分布が少なくなっている。したがって、2次元の空間周波数スペクトル面上に空間的なフィルターを挿入すれば、 S/N の改善が可能である²⁰⁾。

3. 画像雑音の作り方

雑音の測定器に及ぼす影響とか、画像読取りに対する雑音の心理的効果を調べるとか、雑音による系の安定度の測定を行なうとか、いろいろの面で雑音発生器が必要である。発生の方法は大別して次の 2 通りがある。

- (1) 物理現象を利用するもの
- (2) 数学的に発生するもの

3.1 物理現象による発生法

放電管の放電流、2 極管の電流または抵抗中の雑音を増幅して発生する方法で、電気通信系の発生法としてよく知られている。単位時間当たりの発生回数の少ない場合には、放射性元素からの光子などの検出器中に発生するパルスを増幅して利用する場合もある。画像雑音とするためには、必要とする受像機に映像信号分としてこれらの発生器の出力を与えることによって得られる。しかし、そのままでは、時間的に流れていってしまうので、VTR やフィルムなどにこれを記録して用いる場合もある。また、写真フィルムを一樣に露光し現象処理したものを必要に応じ、引伸器で拡大して利用する場合もある。

しかし、これらの発生方法で発生された雑音は、分布関数が一定であるという保証はない。VTR やフィルム上に記録されて再生する場合以外は、再現性にも保証が

写真 6 ランダムチャートの例

ないという欠点がある。しかしその反面、各分野で自然に発生する雑音をそのまま利用するので、現存する雑音で各種の試験や測定が行なえる特徴があるうに、発生速度が数学的発生法よりもはるかに速く、同じ速さで数学的に発生する場合より低価格で作れるという利点もある。

3.2 数学的発生法

統計の分野では、調べようとする対象の数が非常に多くて全部が調べられないときは、標本を抜き出して調べる。このとき、個々の事象に番号をつけておき、なるべく公平に抜き出すために、サイコロ（使用するサイコロには必要に応じて各種の複雑なものがある）をふって出た目の数に従って抜き出したものを調べて、もとの対象の統計とする。このような方法が無作為抜き出しという。そのとき出たサイコロの目の数を、ふった順にならべると、1つの数表ができる。実際は、このような方法で作られた数表で統計的な検定に合格したものをを用いればよい。このような数表を乱数表²¹⁾、数を乱数という。この数表に従って電圧なり電流を順次流せば、乱数表はひとつの確率過程であるから、その電圧なり電流は「理論と解析」で述べられているように、雑音である。

また、画像雑音とするためには、1つの平面を必要な絵素数に分け、各絵素ごとに順次数表に従って透過率または偏波面の方向などを与えれば、1つの雑音画像がで

きる。こうして得られた絵柄をランダムチェッカーボードまたは単にランダムチャート²²⁾という。この場合、1つの絵素の形状が正方形だと、ランダムチャートの2次元空間スペクトルは $\sin x/x$ を含んだ形をとり、平面上で方向によりスペクトル分布が異なってくる。円形にすれば、ベッセル関数を含んだ形となり、2次元スペクトル面の方向については一様なスペクトルが得られる。

写真 6 に 2, 3 のランダムチャートを示す。図中、一様分布とは、密度関数が定数、 β 分布とは密度関数が、変数を x としたとき $x^{p-1}(1-x)^{q-1}/B(p, q)$ で与えられるものである。ただし、 $B(p, q)$ はベータ関数である。正規分布ではガウス雑音である。図はこれらの乱数表から得られた値を、一様分布は 2 bit に変換、他は 4 個の格子点を一組として変換して作られたものである。

確率過程では分布関数の種類がその特性を定めるので、数学的方法は物理的方法にくらべて確率過程が明確に規定されるという利点がある。

最も簡単な算術乱数（算術乱数というのは、算術的演算で発生するという意味である）の発生法は、必要とする乱数の桁数を n とするとき $2n$ 桁の数を取り、それを 2 乗し、中央の n 桁をとる方法である。たとえば 324578 を 2 乗し、

$$(324578)^2 = 10513508781084$$

中央 6 桁を取り、350877 を得る。これを 2 乗して再び中央 6 桁をとると 115370 を得る。

この方法は簡単であるが、再びもとの数が現われる、つまり周期があるので、乱数ではなくなってしまふ。

そこでフィボナッチ (Fibonacci) 法という方法が良いとされている。この方法は、 n 番目の数 x_n と $n-1$ 番目の数 x_{n-1} から $n+1$ 番目の数 x_{n+1} を得るとき、 $x_{n+1} = x_n + x_{n-1} \pmod{p}$ で発生する方法である。また別の方法として、 $x_{n+1} = \lambda_1 x_n \pmod{p}$ 、 $x_{n+k} = \lambda_k x_n \pmod{p}$ 、 $\lambda_k = \lambda_1^k$ という、いわゆる乗積合同法もよい方法とされている。ここに $\pmod{p}$ とは、簡単にいえば計算機の桁を p としたとき、桁あふれの部分を捨てるということである²³⁾。

ここに例として述べた算術乱数は一様分布であるが、必要な分布にするためには、これから分布関数の変換を行なって利用する²⁴⁾。

4. 画像雑音の測定

画像雑音の測定には、物理的な性質の測定と、視覚的・心理的な測定とがある。前者は雑音の数学的理論から与えられる諸量の測定であり、後者は主として応用上から必要な雑音の見え方とか、その画像を見えにくくする程度と物理的量との関係を求めるのに必要である。

図2 ミクロフォトメーターの系統図

4.1 物理的測定

加法性雑音については、通信工学での測定法と大差はない。

乗法性雑音の場合には、フィルムの粒子群とか、光量子の数による雑音であるから、粒子雑音の項で述べたように、入力信号の各レベルに相当した点についての測定を行なわなければならない。

フィルム上に光を記録したものと、フィルム自身の雑音とかは、図2に示すような方法で測定される。被測定フィルムの上にスリットまたは矩形の像を作り、フィルムを透過した光を顕微鏡の対物レンズに取り込み、光電変換器で電流に変え増幅した後、記録計にフィルム上の座標に対して記録する。この測定器をミクロフォトメーターと呼ぶ。増幅器からの出力をコンピュータに入れ、平均透過率、分散などを求めたり、スペクトルアナライザー用プログラムで雑音のパワースペクトルが求められる。

高速度で走査したいときには、FSS方式で走査される。写真フィルムの場合には、同一フィルムに必要なとする数個のレベルの濃度の部分を作っておくことにより、フィルムの特性曲線上の各点の雑音を測定することができる。図2ではフィルムの移動を x, y の2方向にテレビと同様に順次走査するように示してあるが、これを円形に走査することにより増幅器やスペクトルアナライザーが簡単になる。反面、円走査の周期の影響が生じるが、工場などにおける品質管理用としては便利である。

スペクトルを測定するには、図3に示すように、レー

図3 光学的スペクトル測定の系統図

ザー光をレンズ L_1 で必要な測定面積に拡げ、焦点距離 f cmのレンズの光源側に被測定フィルムをおくと、フィルム面上の座標 x に対して、焦点面上には $\omega = \frac{u}{\lambda f}$ c/cmの波長座標でスペクトルが得られる。このとき被測定フィルムの面上の透過率 $T(x, y)$ とフィルム透過光の振幅 $E(x, y)$ との関係は $\sqrt{T} \propto E$ の関係があるから、測定フィルムは、その仕上り γ を調整する必要がある。また図3の u 平面上の中心 S をできるだけ小さくマスクし、 L_2 と同じ形式のレンズで z 軸方向に再結像すると、その像の光強度分布はもとの x 平面上の像から平均

値を引いた値の2乗を振幅とする画像となるから、光強度測定用受光器の受光面の大きさを変えることにより、画像面上の所要の点の近傍で分散の変動と近傍（受光面）の大きさとの関係を求めることができるという利点がある²⁵⁾。

テレビ系では、ミクロフォトメーターを使用しなくても、テレビラインセクター付オシロスコープを用い、オシロスコープの像をフィルムに記録したうえで、その記録像を解析すれば、画像内の任意の点で雑音の性質を知るとい、次に述べる方法がある²⁶⁾。

図4に示すように、写真機の絞りを一定とし、露光時間 T で撮影したとする。オシロスコープ上の被測定電圧の振幅を x 、その時間微分を y とすると、

$$x = f(\alpha, t), \quad y = \frac{\partial f}{\partial t}$$

（ただし、 t は時間、 α は確率係数である）とおけば、 t が $t + \Delta t$ 、振幅が x で、 y が $y + \Delta y$ 内にある確率は、 $P(x, y, t) dy dt$ であるとする。次に t_1 で振幅が x_1 、 y が y_1 であるとする、 x が x_1 と $x_1 + \Delta x$ 内にある時間は、

$$\left| \frac{1}{y_1} \right| dx$$

となる。よって $t=0$ から T までの間に振幅が x_1 と $x + dx$ との間にある時間の平均値は、

$$dx \int_0^T dt \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1}{y} \right| P(x, y, t) dy$$

となり、ここで現象は定常だとすると、

図4 写真法による雑音振幅分布の測定法

$$dx T \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1}{y} \right| P(x, y) dy$$

となり、 T 時間露光したときの濃度を $D(x)$ とすれば、

$$F\{D(x)\} = T \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1}{y} \right| P(x, y) dy$$

となる。ここに F は乾板またはフィルムの特性によって定まる関数である。ここで、

$$P(x, y) = P(x)P(y)$$

と書けるとすると、

$$F\{D(x)\} = TP(x) \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1}{y} \right| P(y) dy = TP(x)K$$

$$K = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1}{y} \right| P(y) dy = \text{const.}$$

となる。これから、

$$P(x) = \frac{F\{D(x)\}}{TK}$$

を得る。

これは露光時間 T を変えて撮影し、濃度 $D(x)$ が一定となる振幅を測定すれば、 $P(x)$ が求まることを示している。この場合、同一ロールフィルム上に撮影し、タンク現像をするという注意が必要である。また、フィルムの示性曲線がわかっているか、1回のおシロスコープの撮影したフィルムの次のコマに階段状に露光量を変えた部分を作り、これをマイクロフotメーターで測定すれば $P(x)$ が求まる。

一般のガウス雑音の場合には、

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

だから、露光量を T_1, T_2 で測った x の値をそれぞれ x_1, x_2 とすると、

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{x_2^2 - x_1^2}{2 \ln(T_2/T_1)}} \\ &= 0.466 \sqrt{\frac{x_2^2 - x_1^2}{\log(T_2/T_1)}} \end{aligned}$$

で、雑音の実効値を求めることができる。

平均粒径、細かさの測定

パワースペクトルが求まれば、前出の式で計算すれば求まるが、光学的なランダムチャートや引伸したフィルムの粒子などは、次に説明する回転相関法で調べると簡単に求められる。同一のランダムチャート、または引伸したフィルムを2枚作る。図5のように完全に一致させた状態にし、中心を軸として相対的に θ だけ回転すると、中心からある距離をへだてた所に環状の縞ができる。この縞の半

図5 ランダムチャート (左上), 回転相関図 (右上) およびその説明図 (下)

径を r とすると平均粒径は $r\theta$ で求められる。

4.2 視覚心理的測定

視覚的な雑音の妨害度の測定法には、大別して2つがある。ひとつは比較品位法 (画質級別法) であり、他は反応時間法である。

比較品位法は聴視者に S/N の異なった多くの画面 (印画紙またはスライドなど) を用意して、級分けに要する時間に制限を付けず、その画面の順位を決定する場合である。測定例としては、航空写真を判定するとき、加法的な雑音としてガウス分布の雑音と、乗法的な雑音としてポアソン分布の雑音を入れて比較検討した例があ

図6 ランダムチャートを用いた文章の可読率に対する S/N 閾値の測定系統図

図7 80%の被験者の可読閾値と雑音の細かさ
(信号周波数 0.18 lines/mm)

図8 アイカメラを用いた S/N と可読時間との関係
(A: 英字 N, B: 英字 H, C: 英字 K.)

る²⁷⁾。

反応時間法は、分布関数の明確な雑音をもち、 S/N をも測定した一群の画像を、一群の被験者達に一定の時間次々と提示し、画像内の情報を受け取ることができた被験者数の全人数に対する百分率で雑音の性質を検討する方法である。

図6のように2個のスライドプロジェクターを用いて、透過形スクリーン上の文章を4種類の分布関数をもつそれぞれの雑音でおおい、被験者の80%が理解できたときの S/N の閾値と雑音の細かさの逆数で与えられる空間周波数との関係を図7に示してある²⁸⁾。この図でわかるように、同一の細かさをもった雑音でも、その分布関数が異なると S/N の閾値には大差が生じる。簡単な英字を理解するのに要する時間と S/N との関係の測定例を図8に示す。 S/N の低下につれて解読時間が長くなるという現象を、被験者の了解信号だけでなく、被験者の画面上における注視点の運動形態と関連づける実験の手段としてアイカメラを用いることができる²⁹⁾³⁰⁾。

図9 注視点と帯留時間 (アルファベット)

画像を被験者に提示してから解読したと被験者が合図を出した時点とを境として、その前後の注視点の運動の形態が異なる。簡単な英字 (図8) の場合に字上には注視点の帯留点の集りがみられる。この集合が何個か生じる (図9にはその集合に番号がつけられている)。注視点の運動は解読前は探索的であるが、解読後は各集合間を周期的に運動する。また探索運動時間は S/N が悪くなると長くなる傾向がある。

X線像のように複雑な像についての測定結果を図10に示した。

以上は、静止画像についての測定例であるが、運動する簡単な被写体についての測定が航空観測などの迅速な測定のために研究されている³¹⁾。この場合には、テレビモニター上に矩形の標的を出し、帯域幅 5 MHz のホワイトノイズを混入し、運動角速度が 13.3 deg/sec で画面の縦方向が 20°、横方向が 27° の場合に得られた結果は、標的の寸法がある大きさ以下では非常に識別が困難になるが、速度の影響は、標的の寸法がある大きさ以上では少なくなる。この場合ビデオ信号の $(S/N)_V$ より受像面上の視覚的な $(S/N)_D$ (ディスプレイ S/N と書く) は改善される。両者の間には、

図10 アイカメラを用いた測定器によるX線像の判定所要時間の例
(竹中博士による)

$$(S/N)_D = \sqrt{\frac{a}{A}} T_e \Delta f (S/N)_V$$

なる関係があるといわれている。ただし、 Δf は映像雑音の帯域幅、 a は標的の大きさ、 A は走査面の大きさ、 T_e は眼の積分時間である。

5. 画像雑音の応用

“画像雑音に応用があるとは…”と異様に感じられる読者もあろう。しかし、雑音の数学的発生法の節で述べた乱数ということばから、戦時中または現在でも暗号を作ったり、暗号から内容を翻訳するのに乱数表を用いることを考えれば、画像雑音に応用があっても不思議ではない。

まず、他人に読まれたくない手紙や封書を送るときには、嚴重に封印をすれればよいが、しかし封を開かなくとも、強烈な光をあてて、透過光からフィルムに撮影したりして読まれるおそれがある。この場合、封書は封筒という空間に手紙という空間を重ねた通信方式と考えられる。空間の分離は開封という手段で機械的に行なわれるのだから、空間を共有している形式のとき、封書の封筒の内側にランダムチャートを印刷し、手紙上の文章が解読できないような S/N を視覚測定の結果定めて具体化すればよい。

手紙と封筒の場合、文中でなく、レターペーパーの表面に文章を書き裏面にランダムチャートを印刷して紙を折りたたんで送っても、同様な秘匿効果が実現できる。念を入れるなら、文章とランダムチャートのインクを同じ吸収スペクトルをもったものにしておけばよいわけである。^[1]

しかし、封を破られるおそれがある場合には、受信人側に使用するランダムチャートを送っておき、種類と使い方を連絡しておく。送る方では、ランダムチャートの上に文章を重ねて書き、受信人側で解読するときは重ねて解読するという方法もとられているようである。

封筒の内側にランダムチャートを印刷しておく方法は、銀行などで預金者に残高などを通知する場合に利用されている。白黒のランダムチャートの代りに、書体を適当にした意味のある文章を斜めに印刷しても同様な効果が得られる場合もある。

同じく、情報をかくすのでも、利用者によるこぼれる場合もある。その一例は、印画紙の表面の雑音を利用する方法である。前出の写真2の微粒面印画紙を用いると、ある空間周波数領域以上の波を再現できないので、ポートレートなどを引伸して作画すると、被写体のしわとか、ソバカスなどを消し得るので、よく用いられる。

次に、白い雑音で画像伝送系の空間周波数的な通過帯

域を測ることが小瀬教授らによって提案された。雑音の細かさによってテレビ系の帯域幅を推定していることに相当するが、この場合は光学的な空間周波数スペクトルを測定することである。

最後に、光学的に画像情報を伝達する系を設計して、いくつかの案ができたとき、系の通信速度の速さを、聴視者の理解する速さをも含んで計量する必要が生じる。こんなときは画像雑音をわざと混入し、 S/N と了解速度とをそれぞれの系につき測定することによって比較することもできる。

〔参 考 文 献〕

- 1) 石黒：光学，共立全書（1953）269
- 2) 矢仲ほか：イメージオルシコン管を使用したX線テレビジョン装置の二、三の特性，放射線像の研究，2，RII 研究会（1968）39
- 3) J. F. Hamilton: The Photographic Grain, Applied Optics, **11**, 1 (1972) 81
- 4) 菊地ほか編：科学写真便覧，中巻，丸善（1959）193
- 5) J. P. Kirk: Hologram Photoresist Noise, Applied Optics, **11** 6 (1972) 1429
- 6) 日本公開特許，47-14083
- 7) V. I. Tatarski: Wave Propagation in a Turbulent Medium, Dover (1967)
- 8) 千葉：大気屈折率の変動による光学像の解像度劣化，テレビ全大予（1972）15
- 9) O. Bryndahl: Polarization-Grating Moiré, JOSA, **62**, 7 (1972) 839
- 10) 市川ほか：シリコンターゲットビディコンの黒スジ状欠陥，テレビ全大予（1970）47
- 11) J. Burns & W. T. Powers: Detailed Photocathode Stability in the Image Orthicon, Applied Optics, **9**, 7 (1970) 1719
- 12) 山口ほか：イメージンテンシファイヤーの雑音，RII 研究会記事，第28回（1971）39
- 13) O. H. Sade Jr: Stable Solid-state Vertical Deflection for High-definition Television Systems, RCA Rev. **31**, 1 (1970) 120
- 14) ibid, 145-170
- 15) 野田ほか：医用立体X線テレビジョン，テレビ誌，**25**, 5 (1971) 408
- 16) 木下ほか：立体視における S/N 閾値，第17回応用物理講演予稿集1（1970）22
- 17) S. O. Rice: Mathematical Analysis of Random Noise, BSTJ, **23**, 24 (1948) または N. Wax: Selected Papers on Noise and Stochastic Processes, Dover (1954)
- 18) 竹中：放射線像の空間周波数スペクトルと像処理，日本医学放射線学会誌，**31**, 6 (1971) 29
- 19) H. Hashizume, et al: Application of an Image Orthicon Camera Tube to X-ray Diffraction Topography Utilizing the Double-Crystal Arrangement, Applied Physics Letters, **18**, 6 (1971) 213
- 20) 木下：広義の写真系における像伝送キャリアと像スペクトル，応用物理，**33**, 1 (1964) 8
- 21) 北川ほか編：新編統計数値表，河出書房（1952）
- 22) K. Kinoshita: Some Properties of Random Charts, JJAP, **4**, Supplement I. (1965) 215
- 23) 津田：モンテカルロ法とシミュレーション，培風館（1969）
- 24) クラメル（大石訳），確率論入門，東洋経済新報社（1966）
- 25) E. Garcia, et al: Variance Measurements by a Coherent Optical Method, with Application to Image Processings, Applied Optics, **11**, 7 (1972) 1480
- 26) 萩原ほか：雑音電圧の振幅分布の一測定法，NHK 技術研究，**6** (1954) 27
- 27) J. V. Gaven, et al: Relative Effects of Gaussian and Poisson Noise on Subjective Image Quality, Applied Optics, **10**, 9 (1971) 2171
- 28) 中島ほか：粒状性の分布関数と可読閾値，日本写真学会誌，**32**, 2 (1969) 57
- 29) 竹中：私信
- 30) 渡部：テレビ画像の注視点，テレビ誌，**18**, 10 (1964) 10-14
- 31) C. E. Thomas, et al: Detection of TV Imagery by Humans vs Machines, Applied Optics, **11**, 5 (1972) 1047