

通信路としての写真感光材料

大 上 進 吾

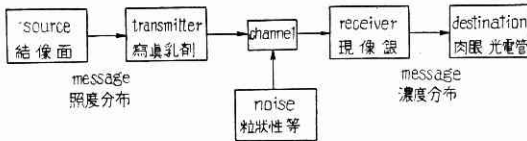
情報理論の光学系への応用をさらに拡張して感光剤面をも含めた時、これをいかに取扱うかについて述べる。これにより写真像までが、一貫して周波数特性と言うようなもので議論できる。

1. ま え が き

通信技術で著しい成果を取めた情報理論 (information theory) を写真感光材料を含めた光学系に導入し、この観点より光学系の諸特性を考察した報告は、近年諸外国で多数発表されている¹⁾。最近わが国でも諸方面より注目を受け、この問題に関する総説²⁾や文献抄録³⁾が報告されている。この通信路として光学系を考察するという思想は、レンズ、感光材料、肉眼の組合せにおける総合特性⁴⁾を取扱う際に最も有効であるが、ここでは写真感光材料のみの諸特性を通信路の面から考察する。

2. 通信路と感光材料の対応

感光材料を通信路として考える場合、信号や雑音が、感光材料では何に対応するかを Shannon の通信路模型⁵⁾において示したのが第1図である。



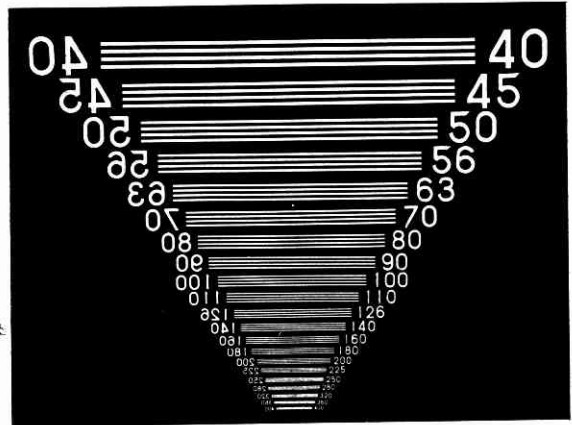
第1図 通信路と感光材料の対応

この際の通信伝達の方式は近似的には粒子をパルスと考へて、パルス位置変調であると考えられる。露光の際に連続的な量である照度のパターンが粒子という不連続な量に変換され、これを現像した後、肉眼で観察すると網膜が連続的な明るさの感覚のパターンに変換して意識に伝え、意識の中に物体の明暗のパターン(像)が再現されるのである。

3. response function と解像力

response function は frequency response function, system function, contrast transmission と呼ばれている関数で、一般の伝達関数における frequency response と同じ内容を持っている。すなわち、正弦波形の照度振幅一定の線パターンを膜面上に作り、これによって生じた現像液によって作られる濃淡のパターンの振幅と、周波数の関係を示す関数が、response function である。感光材料の response function に関係した値としては、従来は解像力が測定されてきた。

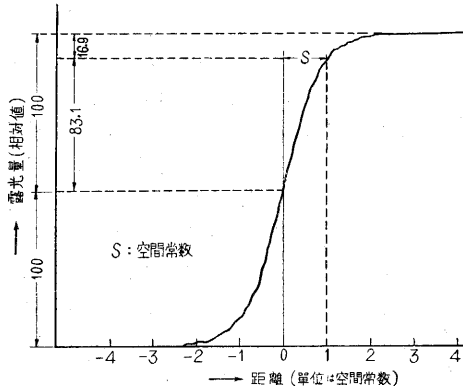
これは、第2図に示すようなテストチャートを縮小撮影し、そのネガを低倍の顕微鏡で観察し、解像を判別できる程度の線パターンの周波数を lines/mm でよみとる



第2図 解像力チャート

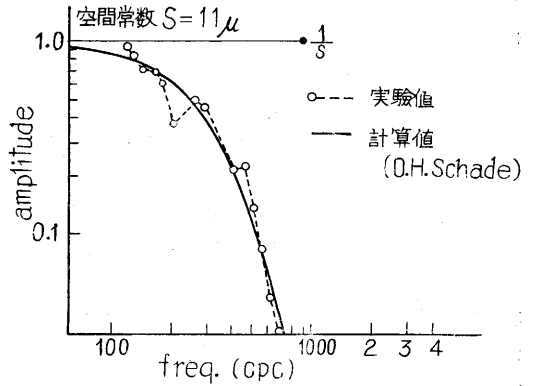
ものである。ここに示したのは東大の小穴教授の作製になるものであるが、テストチャートとしては他に藤沢式⁶⁾がある。この方法で市販の感光材料の種々の現像条件における解像力を測定した結果はすでに報告されている⁷⁾。入力線パターンの空間周波数が高くなると、出力の濃淡のパターンの振幅は減少する。その振幅が雑音のレベルと一定の比(雑音レベルの3~5倍といわれている)になったときに肉眼で解像が判別できなくなる。このときの線パターンの空間周波数の値を lines/mm で表わして、解像力と呼ぶ。だから解像力は response function と雑音のレベルの2つによって定まる。雑音は後に述べるが如く粒状性によって生ずるが、このレベルは、次段の aperture がいかなるものであるかによって異なってくる。例えば、肉眼でみる場合と、microphotometer のスリットを細長くして測定する場合とでは雑音のレベルは異なるから、当然解像力もこの両者について異なってくる。そこで、感光材料の response の性質を記述するには、response function そのものを用いるか、またはそれと同一の内容を持つ、他の関数を用いることが適当であって、解像力の値は不適当である。response function と同一の内容を持つ関数としてはどのようなものが考えられるであろうか。それは、この response function のフーリエ逆変換として空間領域(response function が周波数領域で記述される事に対応してこのように呼ぼう)に与えられる impulse response (ディラックの δ 関数に対する response) と、 impulse response の積分とし

てやはり空間領域に与えられる indicial response (過渡応答) とがある。前者は点光源の像の強度分布に、後者はナイフェッジの像の強度分布に対応している。だからナイフェッジの露光曲線を response function から求めることが可能である。これをフーリエ合成器を用いて計算した結果を第 3 図に示す。従来は impulse response

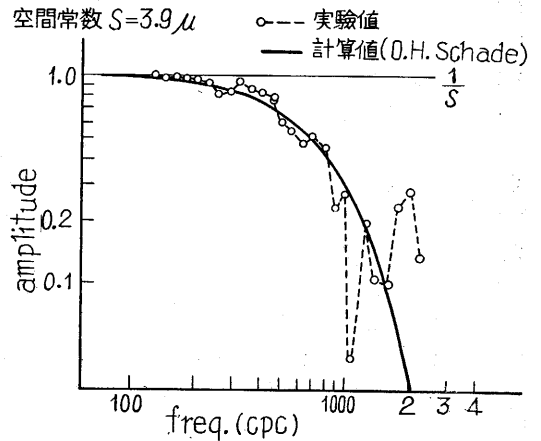


第 3 図 response function から計算したナイフェッジ露光曲線 (フーリエ合成器により求めた)

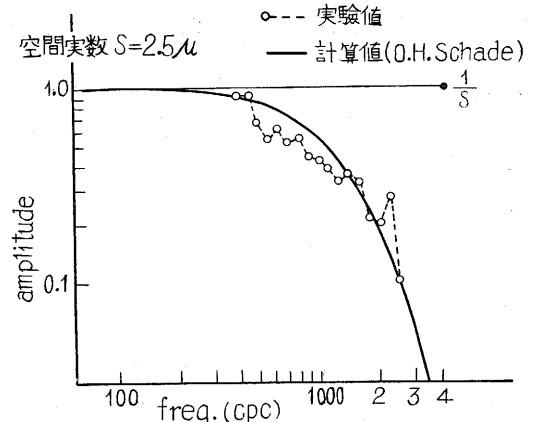
や indicial response に対応する性質として, turbidity, sharpness と名づけられて研究が行われていた。この turbidity は, irradiation, pencil 効果, halation 等にも関係している。結局, 通信路としての response の諸性質を考察することにより, 従来, 解像力, turbidity, sharpness, irradiation, halation と呼ばれて一応別々のものとされていた概念を, response function またはこれと同等の他の関数と雑音としての粒状性を組み合わせると統一して解釈することができる。ところでここに 1 つの問題は感光材料の黒みを透過率で表わしても, 濃度で表わしても, 光量と黒みの関係が非線型の性質を持つことである。線型性が使えないと, フーリエ変換等の一般的諸性質が使えなくなるので, 筆者は光量-透過率の関係が透過率 20%~70% の範囲では比較的直線的であることを利用してこの範囲内で response function を考えている。田村⁹⁾は $L = (T)^{-\frac{1}{\gamma}}$ なる量をとって response blackness と名づけ, この L が光量と比較的良い直線性を示すと報告しているが, このように黒みの表示法を変えることにより非線型性を処理するのとも一方法であろう。筆者等は種々の感光材料の response function を測定した¹⁰⁾。これ等の測定効果の一部を第 4, 5, 6 図に示す。空間周波数の単位としては c.p.c. (cycles per centimeter) を用いた。この response function の測定値は O. H. Schade¹¹⁾ の与えた impulse response $\tau = k \exp(-\frac{r}{S})$ をフーリエ変換して得た結果と良い一致を示している。この線パターンに対する response function は解析的には, $R(f) = \{1 + (2\pi st)^2\}^{-\frac{3}{2}}$ (f : 空間周波数) で与えられると佐柳¹²⁾は述べている。



第 4 図 Neopan SS の response function (FD-122・20°C, 10 分)



第 5 図 minicopy film の response function (コピナル, 20°C, 1:1, 4 分)



第 6 図 Fujilith film の response function (D-85, 20°C, 2 分)

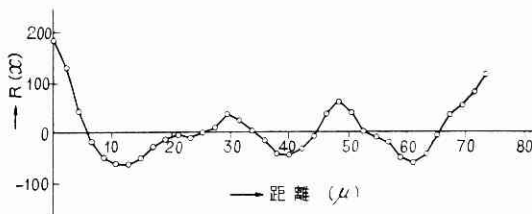
この式から response function はここに示すような両対数のグラフに画けば勾配が 3 であるような漸近線を持つことになるが, これは筆者等の実験結果とほぼ一致する。

この response function は前に述べた impulse response と response function の式の両方に出てくる S を

きめれば、一義的に定まる。そこでこの S をその感光材料の response を与える常数と考え、これを空間常数 (Space const) と名づけた。これを筆者は感光材料の response を示す single figure of merit として提案したい。これは一般の通信路で時間の元で表わされる time const に対応する常数である。第3図は response function から計算したナイフェッジ像の強度分布曲線であることはすでに述べたが、この曲線は長さの単位に S を用いて表わしたので、実際のナイフェッジの像の強度分布曲線を第3図と比較すれば空間常数 S を求めることができる。それには、中央から 83.1% の所の距離をとればよい。この方法はチャートを撮影するときのようにレンズを用いる必要がないので、レンズの response を考慮に入れなくてよい。また、このことは Xray, 電子線の露光, Radiography の際の露光に対する response を求める場合に有利である。

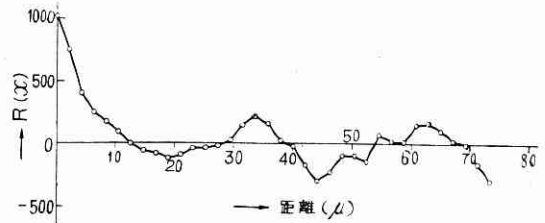
4. 雑音と粒状性

レンズも含めた写真の通信路において普通の雑音と最も似た性質を持つ現象は粒状性である。粒状性は、視覚的な方法で測定したものを graininess といい、物理的な方法で測定した粒状性を granularity という。これは L.A. Jones¹²⁾等の研究により、この2つを結びつけるためには、視覚的な関数 (Fechner fraction の如きもの) を導入しなければならないことがわかってい。以下は granularity についてのみ論じる。さて粒状性は感光材料の粒子によって生ずるものではあるが、粒子そのものが粒状性を示すわけではない。一様に露光し、現像すると、現象銀粒子がところどころに密集して粒子の平均直径の10倍~30倍位の径の塊となる。この塊が透過光により濃淡のパターンを作り粒状性を構成する。このパターンの自己相関関数の測定結果⁹⁾¹⁰⁾の1部を第7,8図



第7図 Neopan S の自己相関関数
(Density=0.24, $10\mu\times 10\mu$ の aperture で走査)
(線スペクトル 周波数: 350 c.p.c, 600 c.p.c)

に示す。自己相関関数から粒状性の周波数スペクトルを求めることができる。この周波数スペクトルが white であるかどうかは問題であるが、筆者は粒状パターンの周波数スペクトルには線スペクトルが存在する、いいかえれば粒状曲線は周期性を有するという結論を得た。 $300\mu\times 400\mu$ の試料面積について測定したところ粒状スペクトルに線スペクトルが表われなかったという報告¹³⁾



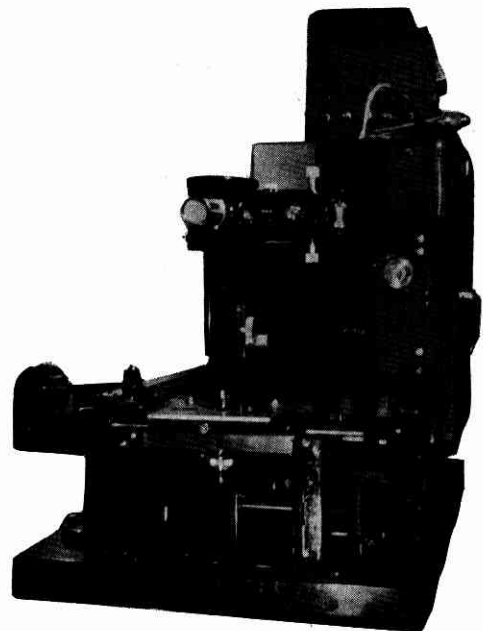
第8図 Neopan S の自己相関関数
(Density=1.04, $10\mu\times 10\mu$ の aperture で走査)
(線スペクトル 周波数: 310 c.p.c)

もあるが、筆者は Selwyn の粒状表示 $S(a)$ が走査面積 a で変化すること、R.C. Jones が、Jones, Higgins のデータを整理して white でないスペクトルを得たこと¹⁴⁾、この2点が、筆者等の結論と一致するので、現在のところ、周波数スペクトルは white でないと考えても差支ないと思う。しかし、この問題は1つの方法によって得た結果から結論を下すのは危険であって、今後なお種々の方法で検討してみる必要がある。

5. 実験方法

5.1 response function

第4, 5, 6図に示した response function は小穴式解像力測定器で線パターンのチャート (第2図) を縮小撮影し、現像、定着、水洗、乾燥の後富士式高解像力マイクロフォトメーターで走査した。このマイクロフォトメーターは試料面で $1\mu\times 1\mu$ の小面積まで走査しうるもので、フォトマルチプライヤー 931A と直流増巾器を用い、この出力を電子管式自動平衡記録計 (島津製) で記録する方式のものである。細部については別の機会に報告することにして外観を第9図に示す。露光量は前にも述べた



第9図 富士式高解像カマイクロフォトメーター

ように、線型性が成立つように透過率 20% 以上になるように与えた。マイクロフォトメーターの走査スリットは $2.6\mu \times 26\mu$ の細長いものを使用して線パターンに対する aperture response を高周波迄伸ばすと共に、雑音に対する aperture response の gain を小さくした。記録計のチャート上に、記録された線パターンの振巾をよみとり、これを種々の空間周波数について測定し、Coltman の式¹⁵⁾によって矩形波に対する response を正弦波のそれに換算し、周波数と振巾の関係を両軸に対数目盛で示したのが第 4, 5, 6 図である。零周波数に対する振巾を単位にとってある。

5・2 雑音

試料を露光する際に、通常のセンシトメトリーに使用されている Optical Wedge を用いると Wedge の粒状がプリントされるので、タイムスケールで露光し、現像処理を行い、種々の濃度を示す試料を得た。これを富士高解像カマイクロフォトメーターで走査し、粒状曲線を得た。第 7, 8 図に示した自己相関関数は 150μ の長さを $10\mu \times 10\mu$ の aperture で走査した粒状曲線より得た。粒状曲線より自己相関関数を求めるために 2μ ごとに測定点を取り、この点における透過率の値を読取り、これを濃度に換算し平均をとる。この平均値よりの差をとり、この値について自己相関関数を計算する。計算には当研究所に設置してあるデジタル型テープ式色計算機¹⁷⁾を使用した。原点における自己相関関数の値は、粒状曲線の振巾についてのバラツキを示している。このバラツキは濃度と共に増大することがわかっているが¹⁸⁾、筆者等が種々の濃度について測定した結果からもこのことは確かめられた。この自己相関関数から線スペクトルの周波数を求めるには、種々の周波数の cosine curve の重畳した波形を作り、その波形と自己相関関数を比較する方法を用いる。理論的にはフーリエ変換すればよいのだが、線スペクトルが存在するため近似計算が困難なのでこの方法をとった。マイクロフォトメーターの scanning aperture はその面積と形と scanning の方向で定まる response を持つから、マイクロフォトメーターを用いて粒状性のスペクトルを求めるには aperture response に関する知識を必要とするが、これに関してはくわしい報告¹⁹⁾があるからここでは省略する。

6. むすび

以上感光材料を通信路として取扱う際の考え方や実験方法について簡単に述べた。このような取扱いは、感光材料の特性評価にかなり有効であることがわかった。今後の研究にまたなくてはならない問題としてはレンズと

感光材料、感光材料と肉眼の組合わせの特性を測定すること、感光材料の information capacity を求めること、粒状性の周波数スペクトルを迅速に求める方法、非線型性の取扱い方法、等が考えられる。また information theory の直接的な応用としては、信号波形がガウス分布をなすように選ぶとき、最大の information capacity を持つという Shannon の定理を感光材料の特性曲線の決定に適用することも考えられる。

終りに当り、種々ご指導いただいた当研究所の藤沢所長、田島主任研究員、文献について非常な便宜をはかって下さった東大生研の久保田教授、フーリエ合成器の使用を快諾して下さった電気試験所の寺尾課長の諸氏に深く感謝する。(1956. 5. 28)

文 献

- 1) 例えば, Schade, O. H., Optical Image Evaluation N.B.S. Circ. 526 (1954)
- 2) 久保田広, 日本物理学会誌 11, 23, (1956); 科学 26, 285 (1956); 斎藤弘義, 応用物理 24, 452 (1955)
- 3) 岡崎文次, 照明学会誌 40, 133 (1956)
- 4) 藤沢信, 写真学会講演会 (1955, 4)
- 5) Shannon, C.E., B.S.T.J. 27, 379 (1948)
- 6) 藤沢信, 浅井幸正, 日本写真学会誌 7, 1, 2, 2~3 (1942)
- 7) 田島又一, 写真学会, 光学懇話会連合講演会 (1955, 2)
- 8) 田村稔, 写真学会講演会 (1956, 5)
- 9) 大上進吾, 応用物理講演会光学シンポジウム (1956, 4)
- 10) 田島又一, 大上進吾, 写真学会講演会 (1956, 5)
- 11) Schade, O.H., J.S.M.P.T.E. 58, 181 (1952)
- 12) Jones, L.A., & Higgins, G.C., J.O.S.A. 37, 217 (1947)
- 13) 木下幸次郎, 樋渡涓二, 岡田多生, 写真学会講演会 (1956, 5)
- 14) Jones, R.C., J.O.S.A. 45, 799 (1955)
- 15) Coltman, J.W., J.O.S.A. 44, 468 (1954)
- 16) Kretzmer, E.R., B.S.T.J. 31, 751 (1952)
Fellget, P., J.O.S.A. 43, 271 (1953)
- 17) 村上永治, 田島又一, 渡辺苞, 大上進吾, 写真学会講演会 (1956, 5)
- 18) Mees, C.E.K., The Theory of the Photographic Process, p. 991 (1954)
- 19) Schade, O.H., J.S.M.T.E. 64, 593 (1955)