

OTF 測定 の デ ィ ジ タ ル 化

Recent Study on the OTF Measurement Using Digital Fourier Transform Method

小 瀬 輝 次*・武 田 光 夫*

Teruji OSE and Mitsuo TAKEDA

レンズの性能を表示する空間周波数特性 (OTF) の測定が、最近のデジタル計算機の発展にともない、アナログ測定からデジタル測定へと移行しつつある現状を紹介する。

1. ま え が き

レンズの空間周波数特性 (Optical Transfer Function) は一般に複素関数で絶対値を MTF (Modulation Transfer Function), 位相を PTF (Phase Transfer Function) という。これはレンズの瞳の複素振幅透過率の自己相関で定義されるが、またレンズの点像の強度分布のフーリエ変換でもある。

測定の場合には自己相関はシャリング干渉計を利用し横ずらした瞳を二つくり互に干渉させて相関を測っている。また点像のフーリエ変換は一次元 OTF の場合は線像のフーリエ変換となるから線像に透過率が正弦波的に変わる格子を重ね全光量を測定する。これらアナログな方法による OTF 測定は 1950 年代初期の H. H. Hopkins¹⁾, や Lindberg²⁾ などの測定からすでに 20 年近く経過し、今ではほぼ確立された測定技術になっている。現在、写真レンズの OTF 測定機は世界各国ともこのアナログ方式が主流であるが、数年前からの国際的な精度比較試験がようやくみどり、何処の国のどの測定機を用いても数パーセントの誤差で測定されるようになっている。

アナログフーリエ変換を計算機を用いてデジタルに処理しようという試みは 1960 年代ロチェスター大学のグループや、Itek 社の研究グループが試みたが、当時は計算機の使用そのものがかなり高価であったし、また測定対象となる特殊レンズも少なかったので金持の道楽ではないかという見方もされていた。OTF の測定は一ケのレンズについて、絞を変えたり、像面位置をかえたり、画角をかえたりして行なうのでデータ量は莫大なものになる。また種々の補正も行なわねばならぬから計算機によるデータ処理はかなり魅力ではあったがわが国ではしょせん高嶺の花であった。

しかしレンズの性能は設計法の進歩、レンズ製作技術の向上にともない、ここ 10 年来、着実に進歩して来ている。現在では解像力 1000 line/mm というようなレンズはそう特殊ではなくなって来ている。このことは OTF 測定にも反映されて、高周波領域での OTF 値の測定が

要求されるようになって来た。次節で述べるようにアナログ方式ではこの要求に答えられず、デジタル方式に頼らざるを得なくなって来ている。幸い計算機も一昔前にくらべると大衆化し、とくに次元の高速フーリエ変換はミニコンでも十分行えるのでこの数年来デジタル方式は再び真剣に検討されるようになって来ている。

OTF 測定機の精度検定は、設計通りに製作されたと認められるレンズについて、計算で求めた OTF と、測定で求めた OTF を比較する方法をとっている。高周波領域となると計算の方も誤差が増してくるので、真の精度というはまだ仲々問題があり、低周波領域でよしとする写真レンズの OTF 測定機のように精度が確定するまでにはまだ時間がかかることと思われる。

ここではデジタル方式の問題点を中心に現状を解説して見ようと思う。

2. アナログ方式の限界

線像の強度分布を $h(x)$ とすると OTF の実部 $R(u)$ は

$$R(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \cos(2\pi ux) dx \quad (1)$$

と与えられる。

この積分をアナログに行なうためには空間周波数 u の正弦波格子

$$M(x) = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\pi ux)$$

を線像に重ね、透過光量を測定することになる。

正弦波格子は製作がむずかしいので矩形格子が用いられている。

レンズの空間周波数 u は像面で 1 mm あたり何本と数えるから、物体として空間周波数 u_0 の格子をレンズで M 倍に結像すると $u = u_0/M$ で与えられるから、 u_0 は一定であっても M を変えることである程度空間周波数を変えることができる。現在用いられている OTF 測定機の格子の周波数 u_0 は最低 0.1 line/mm, 最高 8~10 line/mm 程度のものである。低周波の方はいくらでも小さくできそうに思えるが、それには非常に大きな格子を用いることになり実用的でなくなる。また最高周波数は

* 東京大学生産技術研究所 第 1 部

もっと高周波のものも製作は可能で、解像力テストなどには用いられているが、OTF 測定には用いられていない。それは 35mm 用写真レンズで通常用いられる写真フィルムの遮断周波数は 70~100 line/mm 程度であり、もし測定倍率 M を 1/20 とすると上記の 10 line/mm の格子でも測定される周波数は 200 line/mm となって十分写真フィルムの遮断周波数以上まで測定できるからである。

しかし等倍、あるいはごく低倍で使用する特殊レンズの場合は、測定のためだけに大きな倍率を用いるわけにはいかないから格子そのものを細かくせねばならぬ。したがってこの方式では高周波の測定はできない。

以上述べた光学的フーリエ変換の代りに電気的フーリエ変換の方式もある³⁾。すなわち線像をスリットで繰返し走査して、線像の強度に比例する電気的なパルス列にしてしまい、周波数分析器で分析するという方法である。これでも高周波になるとフィルター回路の安定性が問題となり測定は困難になる。

一方瞳の自己相関をアナログで行なう場合は上記のような格子を用いないから、また瞳の横ずらし量が周波数に比例するから、理論的には高周波まで測定可能ということになる。しかしレンズの瞳を照明するコリメイトされた光の空間的コヒーレンスがコリメーターの光源の大きさに依存するから瞳の周辺ではコヒーレンスが悪くなり、瞳を大きくずらすと重ねても干渉が起らず、複素振幅の相関を取るはずも強度の相関をとることになってしまう。この点に関してはレーザー光の利用が考えられるが未だ実験されていない。

3. デジタル法

前節で述べたアナログ法の行きずまりから登場したのがデジタル法である。

レンズ像のスペクトルは物体のスペクトル $O(u)$ と OTF $R(u)$ の積である。 $R(u)$ を高周波まで測るためには物体も高周波成分をもっていなければならない。この点から理論的に無限の高周波成分をもつ点物体、あるいは、線物体、およびナイフエッジが選ばれている。

これらをスリット (点物体の時はピンホール) で走査し、点像、線像あるいはエッジ像を得ている。エッジ像の場合はさらに微分して線像を得ている。測定値は後で計算機でデジタルフーリエ変換を行なうのであるから、一定間隔のサンプリング点について夫々強度を知ればよく、走査スリットは一定歩度で移動させて各サンプリング点の値を記録してゆく。

点物体、線物体としてはピンホールやスリットが用いられるが開口が余り小さいと光は通らなくなるからある大きさを許さねばならぬ。例えば 1 ミクロン幅のスリットでは高周波成分は 1000 line/mm で零となる。しかし

これ以上狭いと光はほとんど通らない。いずれにしても物体としているスリットの周波数特性は後で補正する必要がある。一方エッジはスリットよりも製作は容易であり、高周波成分の利得は少くなるとはいえ零にはならぬ。このため後で微分するというノイズのある時は好ましくない処理を必要とするのであるがスリットよりもよいとして現在多く用いられている。

さらに、線像と単一スリットで走査する代わりに、アダマール行列を用いる多重スリット走査も試みられている⁴⁾。デジタル法では線像の値を幅 Δx の N 個のサンプリング点について決定すればよいから、今基準のスリット幅 Δx とし、これの整数倍の幅のスリットをある特定の規則性を持たしてならべた多重スリット N 個を用意し、線像にこれら N 個の多重スリットを順次重ねて N 回の測定を行なう。もし N 個の多重スリットが互に独立であれば、 N 個のサンプリング点について N 個の連立方程式が得られ、各サンプリング点の強度はこの方程式を解いて求めることができる⁵⁾。 N 個の多重スリットはサイクリックにつくることができ、 Δx ずつ N 回移動してもよい。図 1 はサイクリックな多重スリットの一例⁴⁾である。

この多重スリットの透過は N 個ともそう大きな差はないから変化は少くなく、図 2 に線像をこれで走査した例を示すが、光電管のダイナミックレンジの僅かな範囲を利用することになり、光電変換の直線性の上からも望ましいことになる。

図 3 (a) のように線像をサンプリング間隔 Δx で幅 L の間を測定したとするとサンプリング定理から得られる空間周波数特性は $1/L$ に相当する周波数 Δu の間隔で $1/2\Delta x$ に相当する最高周波数 u_{\max} までである。これをナイキスト周波数という。もしレンズの空間周波数が図 (b) の点線のように u_{\max} を越えている時は、 u_{\max} で折り返えされてくるから高周波での測定誤差となる。

OTF の遮断周波数 u_c はレンズの口径 D 、焦点距離 f とし、 $f/D=F$ を F ナンバーとすると、波長 0.5



図 1 多重スリット

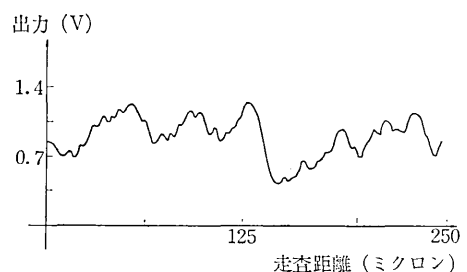
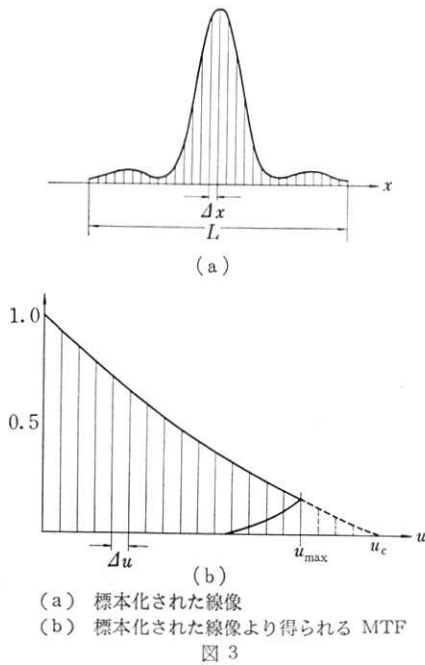


図 2 多重スリットの走査出力



ミクロンとして

$$u_c = \frac{2000}{F} \quad (\text{line/mm})$$

で与えられる.

したがって上記の折り返しがないためには

$$u_{\max} = \frac{1}{2\Delta x} \geq u_c = \frac{2000}{F}$$

より

$$\Delta x \leq \frac{F}{4000} \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

としなければならない. $F=2$ として $\Delta x=0.5$ ミクロンとなり走査の送り精度は非常に精密であることが要求される.

光学工業技術研究組合測定センターで試作された装置⁶⁾では, モアレ測長機の送り装置を利用し 1 ミクロンおきにデータを取得している. またキャノンの試作装置⁷⁾ではダイナミックスピーカ-の振動部を利用し, 直流駆動で 0.25 ミクロンの送りで走査長 200 ミクロンを実現している. 唯一の市販品となっているトローペル社の製品はギャダウンで 1 回転 10 ミクロンの送りを実現している. 測定データはミニコンで処理され, XY レコーダ, あるいはメモリスコープ上に結果が表示される. 図 4 はメモリスコープ上に表示された例で横軸の右端は 1800 line/mm (1 スポット間隔は約 30 line/mm) である. 図 5 (a)(b) はキャノンで最近製作されたスリット走査方式のもので, 一定速度で走査しながら時間的に 256 点のサンプル点を順次取り出し, ミニコンでフーリエ変換するものである. S/N を良くするために 1 サンプル点の測定回数は $2^N (N=0\sim 9)$ とすることができる.

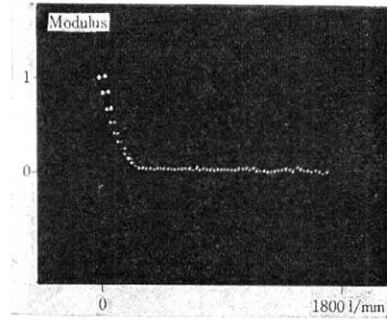
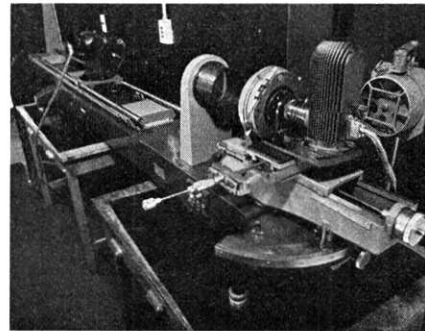


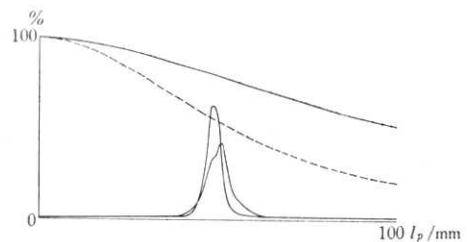
図 4 トローペル社の装置による測定例



(a) 光学系



(b) 表示装置



(c) 測定例

図 5 キャノンで試作した測定装置 (朝枝氏の御好意による)

スリット幅は 2 ミクロン, 基本周波数は 0.5~8 line/mm でこれの 64 倍が最高周波数となるようにしている. こ

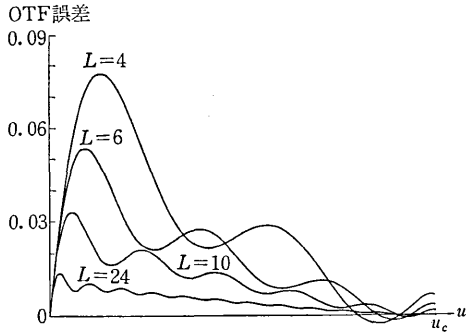


図 6 無収差レンズのトランケイト誤差

れはデータ処理、補正、すべてミニコンで処理される。図 5 (c) は MTF および線像の強度分布の測定例である。

図 3 でも分かるように、測定範囲を幅 L で限ると、これは線像と、幅 L の矩形マスクの積と考えられるから、スペクトルでは L を無限にまで上げた時の OTF $R(u)$ と幅 L の矩形マスクのスペクトル

$$M(u) \sim \frac{\sin \pi u L}{\pi u L}$$

との接合積となる。したがって L が小さい程、低周波で誤差は大きくなる。この誤差をトランケイト誤差という。図 6 の横軸は周波数を示しており、無収差レンズの遮断周波数を 1 としている。またパラメータの数字 L はエアリーディスク (点像の中心円盤) の半径を 1.22 とするような尺度で計ったものである。図から L を大きくすればするほど、トランケイト誤差は小さくできることがわかる⁸⁾。

4. デジタル法におけるノイズの影響

以上述べたデジタル法の誤差の内サンプリングの送り誤差も規則性があれば補正可能であるし、またトランケイト誤差も補正⁹⁾ 可能である。しかし光電変換の際に生じるノイズ、また電気回路から生じるノイズ、送り装置のガタからくるランダムな性質を持つ誤差は補正ができないばかりでなく、前記のシステムマテックな誤差の補正をも困難にしてしまう。ここでは電氣的、機械的な原因で測定の際に線像に加わるランダムな誤差を以下ノイズと総称する。

このようなノイズはもちろんアナログ法でも問題になるのであるが、例えば線像に正弦波マスクを重ねる光学的フーリエ変換法の場合では全積分値に対してノイズを考えるから高周波で $R(u)$ が小さい時のみ問題となる。しかしデジタル法では一つ一つのサンプル点でノイズの影響が入り、しかもエッジの場合には微分計算も行なわれるから、ノイズの影響は無視できなくなる。

例えば、図 6 に示したトランケイト誤差の場合もノイズがあると L を大きくすると捨うノイズも大きくなる

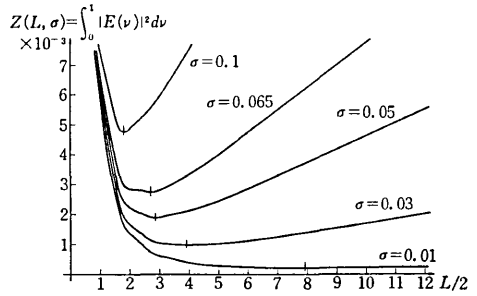


図 7 ノイズのある線像をトランケイトした時の誤差

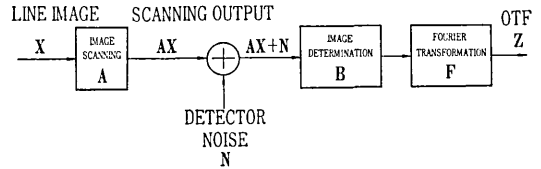


図 8 デジタル方式による OTF の測定過程

から単純に誤差が減少するとはいえなくなる。図 7 はノイズを考慮した場合でノイズパワーによってちがうが、 L を大きくするとある処から逆に誤差が増加し、最適の L があることを示している¹⁰⁾。

デジタルな OTF 測定法は一般的に考えると、図 8 に示すように、線像の強度を表わすベクトル X に走査方式で決まる行列 A をかけた走査出力 AX に光電変換、その他回路から入るノイズベクトル N が加わった $AX+N$ が測定値となる。これに走査方式 A できまる逆行列 B をかけて、線像にもどし、これにフーリエ変換行列 F をかけて OTF Z を得るのである。これから測定過程は

$$Z = FB(AX + N) \tag{3}$$

で表わされる。

上式でノイズによる OTF の誤差の項は $R = FB N$ で、ベクトル R の各成分 r_j の rms 値が j 番目の周波数に対する誤差の期待値をあらわす。各測定で加わるノイズの成分 n_i が互に独立で、その rms 値が σ であるとする $G = FB$ とおいて

$$R = FB N = G N \tag{4-a}$$

より

$$\langle |r_j|^2 \rangle^{1/2} = \sigma \left[\sum_{k=1}^N |g_{jk}|^2 \right]^{1/2} \tag{4-b}$$

の関係が得られる。ここで N はサンプル数、 $\langle \rangle$ はアンサンプル平均、 g_{jk} は (4-a) 式の行列 G の j, k 成分である。これから行列 G の行成分の絶対値の和の大小を見ると j 番目の周波数に対する OTF 誤差の期待値 R の大小を知ることができる。そこでこの G をここで誤差行列と呼ぶことにする。

走査方式が決まると B がきまるから誤差行列は走査方式によって決まることがわかる。これによって前節で述べた三つの走査方式のノイズに対する評価を与えるこ

とができる。

まず、単一スリット走査の場合を考えて見ると、走査行列 A は単位行列 I に等しいから、その逆行列の B もまた I に等しくなる。したがってこの場合の誤差行列 G は

$$G = FB = FI = F \quad (5)$$

となりフーリエ変換行列 F となる。

したがって

$$\begin{aligned} |g_{jk}|^2 &= |f_{jk}|^2 = \left| \frac{1}{N} \exp \left[\frac{2\pi i(j-1)(k-1)}{N} \right] \right|^2 \\ &= \frac{1}{N^2} \end{aligned} \quad (6)$$

これから j 番目の周波数における OTF の誤差 E_s は

$$E_s(j) = \{ \langle |r_j|^2 \rangle \}^{1/2} = \frac{\sigma}{N^{1/2}} \quad (7)$$

これは周波数に依存せず、サンプル数 N の平方根に比例し誤差が減少することを示している。

エッジ走査の場合は線像をディスクリットに走査するときの出力はエッジで遮蔽されない部分の線像の強度の和であるから走査行列 A は三角行列となり、また逆行列 B は次のような形となる。

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 1 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ B &= \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 1 & -1 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

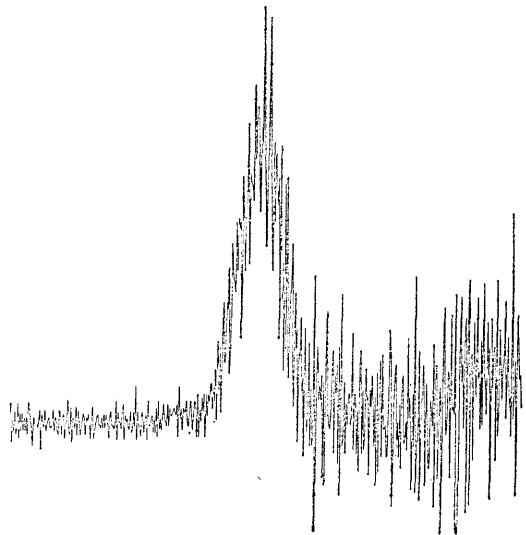
したがって誤差行列の成分 g_{jk} は

$$\begin{aligned} |g_{jk}|^2 &= 4 \sin^2 \left[\frac{\pi(j-1)}{N} \right] / N^2; \quad k \geq 2 \\ &= 1/N^2; \quad k = 1 \end{aligned} \quad (9)$$

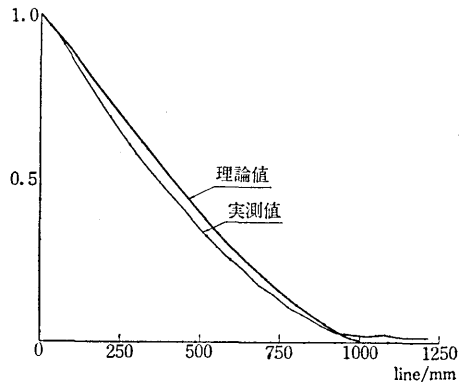
これを(4-b)に代入すると OTF の誤差 $E_s(j)$ は

$$E_s(j) = \sigma \left[\frac{1 + 4(N-1) \sin^2 \left[\frac{\pi(j-1)}{N} \right]}{N^2} \right]^{1/2} \quad (10)$$

となる。 $j = N/2 = j_c$ とおくと j_c はこのサンプリング間隔におけるナイキスト周波数となるので $E_s(j)$ は j に関して単調増加関数となり、空間周波数が高くなるほど、ノイズによる OTF 誤差が増加することになる。図 10 は $N=128$ 点について計算した $E_s(j)$ と $E_e(j)$ を示す。縦軸は $\sigma/N^{1/2}$ 、横軸は $j_c = N/2$ で目盛っている。図から $j < j_c/3$ の低周波領域ではエッジ走査の方がスリット走査よりノイズ誤差は少くないが $j > j_c/3$ の高周波領域ではエッジ走査の方が誤差は大きくなる。これはエッジ走査では線像を得るのに微分操作（この場合



(a) 微分して得られる線像



(b) (a) の線像から得られる MTF と理論値
図 9 山口、仲本の装置による測定例

はマトリックス B による差分)を行なうためである。図 9 (a), (b) は前記山口のエッジ走査装置の測定例の一つであるが(a)はエッジ像を微分して得た線像の強度分布力示し、(b)はこれをフーリエ変換して得た MTF である。(a)には大きなノイズが認められるが(b)ではほとんどその影響が見られない。これは一見不思議に思われるかもしれないが、この走査では $\Delta x = 0.02$ ミクロン、 $N=1000$ としている。したがってナイキスト周波数は 25000 line/mm である。一方測定した MTF は 1200 line/mm までであるからナイキスト周波数のはるかに低いところであり、上記の理論でノイズ誤差の少ない範囲内で測定していることになる。したがって線像には大きなノイズがあっても MTF にはノイズが少なくなったわけで、 N を増すことによりノイズ誤差を減少せしめるという上手な手法を用いているということが出来る。

最後に多重スリット法を考えて見よう。図 1 のような多重スリットに対応する逆行列 B は $N+1$ 次のアダマ

ール行列 H と次の関係で結ばれている。

$$\frac{2}{N+1} H = \begin{pmatrix} \frac{-2}{N+1} & \frac{-2}{N+1} & \dots & \frac{-2}{N+1} \\ \frac{-2}{N+1} & & & \\ \vdots & & & \\ \frac{-2}{N+1} & & & \end{pmatrix} B \quad (11)$$

そこで、アダマール行列の行が互に直交していることと、 B 行列はその第 1 行の行ベクトルの周期的なシフトにより構成されているという二つの性質から誤差行列 G の成分 g_{jk} は

$$\left. \begin{aligned} |g_{jk}|^2 &= \frac{4}{N^2(N+1)} ; j \geq 2 \\ &= \left[\frac{2}{N(N+1)} \right]^2 ; j = 1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

となり、 j 番目の周波数における OTF 誤差 $E_m(j)$ は

$$\left. \begin{aligned} E_m(j) &= \frac{2\sigma}{N} \left[\frac{N}{N+1} \right]^{1/2} \approx 2\sigma/N ; j \geq 2 \\ &= \frac{2\sigma}{N^{1/2}(N+1)} \approx 2\sigma/N^{3/2} ; j = 1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

となる。 \approx は $N \gg 1$ とした時の近似値を示す。

上式と単一スリットの場合の (7) 式とを比較すると $j=1$ の周波数 (ゼロ周波数) では多重スリット方式は単一スリット方式の $2/N$ に、 $j \geq 2$ の周波数では $2/N^{1/2}$ まで減少させることができることがわかる。

ゼロ周波数の OTF 値は線像の全光量であり、これは OTF の正規化に用いるからこの誤差の少ないことは多重スリット方式の大きな利点といえる。

図 10 に単一スリット方式を基準にしてエッジ法、多重スリット法のノイズ誤差を周波数 (ナイキスト周波数を 1 としてある) を横軸にとり、各走査方式の誤差の周波数依存性を示した。エッジ法は図の実線で示すようにナイキスト周波数の $1/3$ 周波数から次第に誤差を大きくしてゆく。多重スリット法は図の一点鎖線で示すように

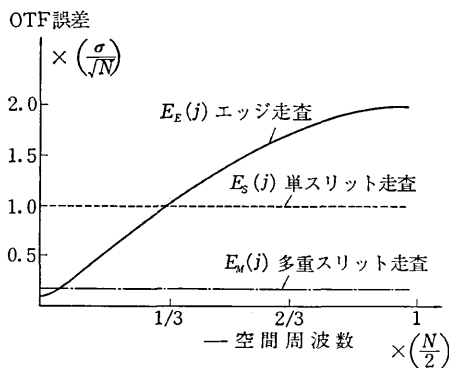


図 10 OTF 誤差の空間周波数特性
 — エッジ走査
 単一スリット走査
 - · - · 多重スリット走査

最も誤差は少ない。

図 11, 図 12 は、エッジ法と多重スリット法の比較実験¹¹⁾の一例で、図 11 はノイズの少ない場合で両方式ともに同じような線像と MTF を与えるが、図 12 は光源を暗くしてノイズを増加せしめた場合で、エッジ法は

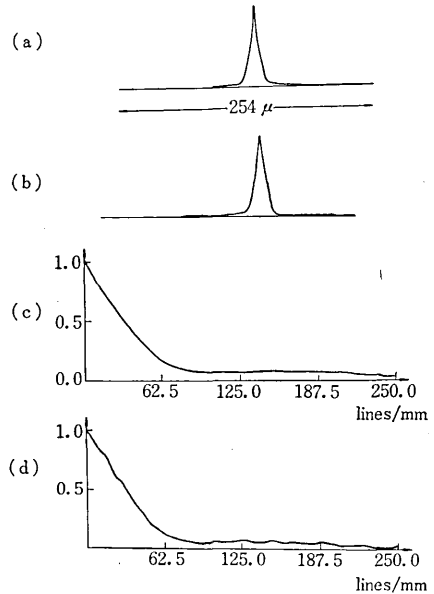


図 11 ノイズが少ない場合の線像と MTF

- (a) エッジ走査による線像
- (b) 多重スリット走査による線像
- (c) エッジ走査による MTF
- (d) 多重スリット走査による MTF

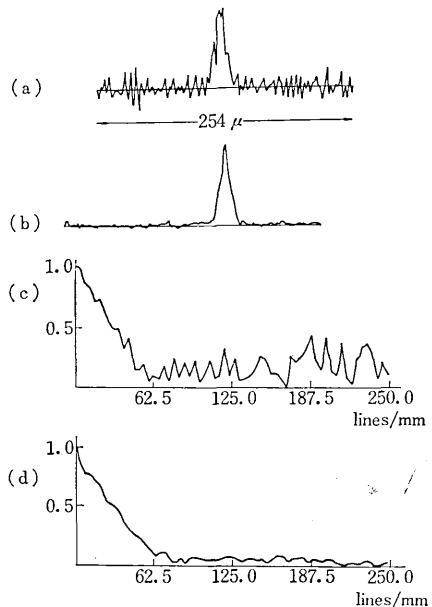


図 12 ノイズが多い場合の線像と MTF

- (a) エッジ走査による線像
- (b) 多重スリット走査による線像
- (c) エッジ走査による MTF
- (d) 多重スリット走査による MTF

線像のノイズも多く、また MTF は高周波に行くほどノイズ誤差が大きくなり理論の予測通りの結果を示している。多重スリット法では、ノイズはかなり軽減され、ノイズ減少に効果のあることを示している。

結 語

OTF 測定のアナログ方式からデジタル方式への変遷の経緯を紹介した。ノイズを考慮に入れるとデジタル方式で行なわれている 3 つの走査方式の評価ができ、多重スリット方式が有望であることがわかるが、これはスリットの製作のむずかしさ、また送り精度が一段と厳しく要求されるので実用化には今一步という感がある。しかしいずれにしても、デジタル方式による実時間測

定が近い将来実用化されるようになるであろう。

(1973 年 7 月 2 日受理)

参 考 文 献

- 1) H. H. Hopkins: *Optica Acta* 2 (1955) 23.
- 2) P. Lindberg: *Optica Acta* 1 (1954) 80.
- 3) H. D. Polster: *Eng. Rep. Perkin-Elmer* (1955)
- 4) 武田光夫, 小瀬輝次: *光学* 1 (1972) 85.
- 5) E. D. Nelson and M. L. Fredman: *J. Opt. Soc. Amer.* 60 (1970) 1664.
- 6) 村田和美: *Proc. SPIE. Vol. 22* (1971) 15.
- 7) 山口意胤男, 仲本正紀: *光学* 1 (1972) 70.
- 8) M. E. Rebedeau: *J. Opt. Soc. Amer.* 59 (1969) 1309.
- 9) B. Tatian: *J. Opt. Soc. Amer.* 61 (1971) 1214.
- 10) M. Takeda and T. Ose: to be published.
- 11) 武田光夫, 朝枝 剛, 山口意胤男, 小瀬輝次: 第 33 回応用物理学会予稿集 (1972) p. 30.



東京大学生産技術研究所報告 刊行予告

第 23 卷 3 号 (英文)

藤 平 正 道・早 野 茂 夫 著

THE PROTONATION OF AROMATIC HYDROCARBON RADICAL ANIONS

芳香族炭化水素のプロトン化の研究

芳香族炭化水素は電気化学的還元により 1 電子を受け入れ、比較的安定なあざやかな青色のラジカルアニオンを生成する。還元条件を強くするとさらに 1 電子を受け取りジアニオンに変化する。これらの物質の化学的研究の歴史は浅く、化学的にも物理化学的にも興味のある対象とされている。本研究はまずラジカルアニオン濃度を測定するために、ポーラログラフ法、UD法、ESR法の同時計測を実施し、前二者の間には良好な直線的関係があることを見出した。

ラジカルアニオンはいわゆる非プロトン溶媒中では安定であるが、これに水、フェノールあるいは酸のようなプロトン化剤が加えられるとプロトン化され、急激に退色する。この場合、プロトン化の速度は溶媒効果を受け、また母体である芳香族炭化水素の構造因子に関連があることを単純分子軌道理論に立脚して論じた。つぎに芳香族炭化水素をプロトン化剤の共存下で電気化学的還元を行うときのプロトン化機構を論じた。ストップ・フロー法によって実測した速度定数は著者らが提案している再生機構を支持するものと考えられる。

さらに本論文は、異なる溶媒中での電極電位の比較、ジメチルホルムアミド-水系での芳香族炭化水素の還元電位に及ぼす水の効果、ラジカルアニオンならびにジアニオンの可視吸収スペクトルに及ぼす溶媒効果などの諸問題に言及し、考察した。

(1973 年 9 月下旬発刊予定)