

スポット・ダイアグラムを用いた解像力の計算

高 島 松 雄

写真レンズの結像性能の表示尺度である“解像力”は種々のチャートを用いて古くから測定されている。しかしレンズの結像理論から導く研究は A. Cox による計算法の提案以外には行なわれていない。ここでは光線追跡によって計算され、点像強度分布を点の密度で表わすスポット・ダイアグラムを用いた解像力の自動計算の試みを解説する。

1. 緒 言

写真レンズが被写体の周期的微細構造をどこまで再現できるかを表わす解像力は、現在レンズの結像性能表示の標準的な尺度として採用されており、JIS B7174-1962として定められ、製作されたレンズの検査にこれが適用されている。この検査法の1例は図・1に示すような黒の背景部分と、幅と間隔が等しい白の部分とからなる図形を一単位として、この大きさを変えたいくつかの図形をならべたテスト・チャートを被検レンズによってフィルム上に撮影して、そのうちどの間隔のものまで解像しているかを調べ、間隔の2倍の逆数(本/mm)をもって解像力とする方法である。

この検査法は Foucault のテスト・チャートに端を発し¹⁾、以来多くの人々によって種々のチャートを用いた検査法が行なわれ現在に至っているが、代表的な実験として Sandvik^{2),3)}によるチャート間隔と、コントラストを変えた場合のフィルムの解像力の測定、Selwyn and Tearle⁴⁾による航空写真レンズについての広範囲な測定と解像力を求める実験式、R. E. Hopkins^{5),6)}の単色光と白色光での実験がある。

しかし解像力検査は Foucault test や Ronchi test に おいて長年の実験または測定が理論より先行したのと同

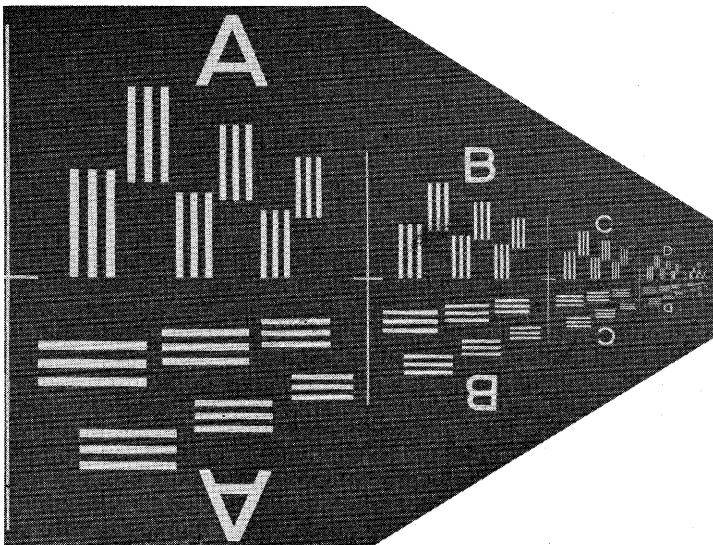
様に、近年通信理論が光学へ導入されて物体とその像の空間的スペクトルおよび光学的レスポンス関数という概念を用いて解釈されるまでは、理論的説明ができず、測定された解像力も被検レンズの使用条件下での解像性能を示すとしても、レンズのもつ収差との明確な結びつきをもたないのでレンズ設計の資料としては十分でない測定量であった。

一方新たに導かれたレスポンス関数は電気系における周波数特性に相当するもので、物体の強度分布によらない一般的な結像性能を表わすことができる。解像限界のみでなく伝送可能なすべての周波数帯域の特性を表わすこと、収差との理論的結びつきをもち、感光乳剤等の受光系との結び合わせて直線性が成り立てば、光学系と受光系の総合特性が単におのおのレスポンス関数の積から求められるという利点をもっている。このことが解像力が現象、照明、解像判定法等の測定条件によって変わりやすいことと合わせてレスポンス関数によって結像性能が表わされるようになった理由をなしている。

このようにレスポンス関数は写真レンズの結像理論の基礎となるものであるが、性能を表示または評価する上で解像力はレスポンス関数に比較して次のような長所をもっている。

単一数値による性能表示 写真レンズによってつくられる像は口径比、画角、照明光(単色光、白色光)、焦点位置、空間周波数によって変化する。したがってこれらすべてを考慮して性能を評価しなければならないが、その場合空間周波数を変数としたレスポンス関数による表示に代り、ただ一つの空間周波数または数値によって性能を表示できれば便利である。主として高解像力を目的とする航空写真レンズ、製版用レンズではこの意味から解像力で表示できる可能性がある。

チャート製作法 レスポンス関数は正弦波状の強度分布をもつ物体の像のコントラストがどのように変化するかを示すもので、物体として正弦波状のチャートが必要である。これに対し解像力検査では矩形強



図・1 解像力測定用テスト・チャート

度分布のチャートであればよいから製作がしやすい。

性能表示と直感的イメージ 像のボケをレスポンス関数によって表わされた各空間周波数成分のコントラストの和として考えるより、矩形強度分布のくずれとして考えるほうが直感的に考えやすい。ことに航空写真レンズでは被写体の強度分布が矩形やエッジに近い場合が多い。

測定の簡易さと使用条件 解像力検査はレンズの実際の使用条件下で検査を行なえるため使用に即した検査法であると同時に簡単でもある。

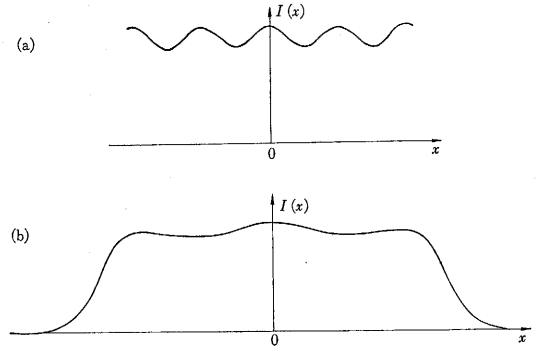
解像限界 これはチャートが異なるために生ずるもので正弦波チャートの解像限界以上の周波数でも矩形チャートの場合解像しうることになる⁷⁾。

これらの点からレスポンス関数の測定とあわせて解像力検査が結像性能の簡易検査法として使用できることが再認識されてきている^{7),8)}。

この意味から検査法の理論的裏付けとして解像力がレンズの収差、チャート本数とコントラスト、フィルムの turbidity によってどう変化するかを調べておかねばならず、また試作を行なうことなしにレンズ設計の段階で解像力を求められるよう、レンズの設計データ（曲率、屈折率、分散、間隔等）から計算する方法を開発することも必要となる。ここではレンズ・データから光線追跡によって得られる点像強度分布を近似するスポット・ダイアグラムを入力データとして、電子計算機によって試みた解像力の計算法と結果について述べてみよう。なお解像力測定用テスト・チャートについては辻内⁹⁾による詳しい解説がある。

2. 解像力の計算

解像力を計算によって求める研究はすでにいくつか試みられている。この説明の前にまず解像力の定義について述べねばならない。それはこれらの研究で取り扱われた解像力の定義がそれぞれ異なるため、大別して次の2種類になる。第1の種類は解像力というよりむしろ空間的遮断周波数に相当するもので、このうちの1つは正弦波チャートに対する遮断周波数（レスポンス関数が零または解像限界の判定の最小検知可能コントラストになる周波数）で表わされる。他の1つは矩形強度分布をもつチャートの遮断周波数（矩形チャートのピッチの逆数＝物体の基本周波数が上記の正弦波遮断周波数に一致する



図・2 解像限界での像強度分布

かまたは基本周波数成分の像のコントラストが最小検知可能なコントラストになるときのチャート・ピッチの逆数）で表わすものである。このいずれの場合でも解像限界では像強度分布は図・2 (a) のようにひろがった正弦波強度分布をもつ（レスポンス関数零の遮断周波数ではコントラスト零）。Françon¹⁰⁾はこの解像力を理想レンズについて、チャート・コントラストと最小検知可能コントラストを考慮して導いている。この種の解像力もしくは解像限界の定義は、レスポンス関係から導かれるから理論的な定義であるといえる。これに対して第2の種類に属する解像力は、工業量的な意味をもっており、前節で説明した写真レンズの検査で普通測定されるものである。この場合解像限界付近では強度分布は図・2 (b) に示すようになる。ここで判定のさい谷と山の強度の比をどのようにとるかによって解像力の値が変わってくる。しかしこの厳密な判定基準は JIS においても定められておらず、したがって判定者の個人差によって解像力が変わり、また同一レンズでも A 社の判定基準と B 社のそれとが異なるためちがう値をもつことも起こりうる。

さて以上の分類に対して従来なされた研究を併記すれば表・1 のようになる。R. E. Hopkins はスポット・ダイアグラムを用いて主光線と像面との交点を中心とする像面上の円内に入る強度(encircled energy)を計算して、高コントラスト・チャートのとき全光量の 30% を含む直径 d_h 、低コントラストでは 50% を含む直径 d_e を用いて解像限界を与える実験式、

$$RP_{HC} = \frac{605}{\sqrt{d_h^2 + 10^2}}, \quad RP_{LC} = \frac{871}{\sqrt{d_e^2 + 35^2}}$$

表・1 解像力*の計算

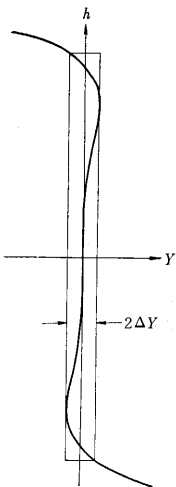
解像限界の定義	レンズ	チャート	フィルム
遮断周波数から	収 差	高低コントラスト	Turbidity
矩形チャート像のくずれから	収 差	任意コントラスト 任意チャート本数	
	収 差	任意コントラスト 任意チャート本数	

* ここで解像力は解像限界を示す空間周波数の意味として拡張解釈している。普通の意味では第2のものが解像力といわれる。

表・2 R.E. Hopkins による解像力測定値と計算値 (高コントラスト)

	0°	8°	12°	15° (画角)
測定値	57	38	27	22.5
計算値	実験式	57	35	26.5
	レスポンス関数(4%)	57	33.5	28.5

を求め、これとレスポンス関数が 0.04 になる周波数の計算値および測定値との比較を行ない、三つの値が良い一致を示すことをたしかめている(表・2). Franke は



図・3 収差曲線から解像力を計算する方法 (G. Franke)

図・3のようにレンズの収差が存在する場合、横収差曲線を矩形でかこみ、収差軸方向の辺 $2\Delta Y$ の逆数がほぼ遮断周波数を与えることを述べている。Kubota and Miyamoto による研究はスポット・ダイアグラムで光線が集中するコア一部分の直径の逆数と、スポット・ダイアグラムから計算した encircled energy の変曲点を与える直径の逆数が測定値に良く一致することを報告している(図・4)。しかしこれらの方法は

いづれも便宜的計算法であり、結像理論から、解像力を求めるものではない。このためには像面の強度分布の計算を行なう必要がある。A. Cox はスポット・ダイアグラムを用いて

矩形チャート像の強度分布を計算

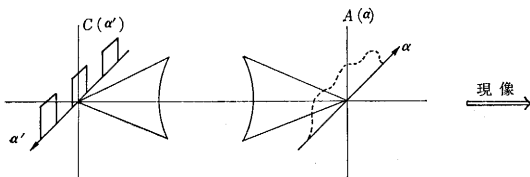
し、解像力を求める方法を提案している(3. (1)に詳述)。このような像強度分布から解像力を計算する方法が行なわれなかった理由としては、

(1) 種々の収差の組合せを与えた仮想レンズまたは設計データのあるレンズの像強度分布を計算することがむずかしかったこと。

(2) 強度計算式があっても計算量が多いため簡単には実行できなかったこと。

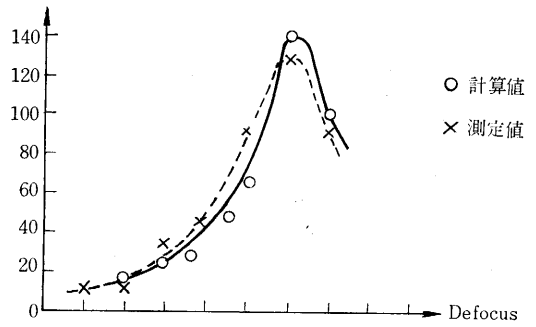
(3) 矩形のくずれで表わす解像力の定義が数学的に複雑であり、強度が計算可能でもこの値を捜すことが困難であったこと。

が考えられる。しかし収差量大きいレンズについてはスポット・ダイアグラムから計算できる幾何光学的レスポンス関数でレスポンス関数を近似可能であることが Miyamoto¹⁵⁾によって証明され、これにより(1)、(2)が、



図・5 光 学 系

Resolving power



図・4 コア直径から解像力を計算する方法 (H. Kubota and K. Miyamoto)

また電子計算機の使用により(2)、(3)が解決されるわけで、現在ではかなりの計算時間を要するとしても解像力の計算が可能になったわけである。

3. 自動計算法

(1) チャート像の強度分布

チャートは黒地に白の3本または4本の等間隔チャートとし、幅に対して長さは十分に長く、フィルムはガンマ1で現像すると仮定して前節の第2の種類に属する解像力を計算する。

図・5の1次元の光学系で物体面の座標を α' 、像面の座標を α とする。この像面座標としては実寸法座標を a とするとき $\alpha = a/M$ の座標をとり (M は光学系の倍率) 常に倍率1で考える。いまチャート強度分布を $C(\alpha')$ 、光学系によって結像される点像強度分布を $L(\alpha)$ とすれば、この光学系によるチャートの空中像強度分布 $A(\alpha)$ は

$$A(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} L(\alpha') C(\alpha - \alpha') d\alpha' \quad (1)$$

となる。この像を撮影し現像したとすると、フィルムに点の露光を与えたとき現像されたネガに生ずるボケの強度分布 (turbidity) を $T(x)$ とし、ネガに与えられた強度 $I(x)$ は空中像と turbidity のたたき込み積分により、

$$I(x) = \iint_{-\infty}^{\infty} T(x - \alpha) L(\alpha') C(\alpha - \alpha') d\alpha' d\alpha \quad (2)$$

となる。この式で x を与えて計算を行なえばチャート像の強度分布を求めることができるが、この場合数値計算の実行方法としては、次の組合せを考えることができる。いま空間周波数を ω としチャート強度分布と、

turbidity のフーリエ変換をおのこの $c(\omega)$ 、 $t(\omega)$ 、光学系による点像強度分布のフーリエ変換すなわちレスポンス関数を $l(\omega)$ で表わすと、フーリエ変換のたたき込み積分に関する定理を用いて、

$$I(x) = C(x') * (L(\alpha) * T(x)) \\ = L(\alpha) * (T(x) * C(x'))$$

$$\begin{aligned}
 &= T(x) * (C(x') * L(\alpha)) \\
 &= IFT(c(\omega) \cdot l(\omega) \cdot t(\omega)) \\
 &= IFT(c(\omega) \cdot l(\omega)) * T(x) \\
 &= C(\alpha') * IFT(l(\omega) \cdot t(\omega)) \\
 &= L(\alpha) * IFT(t(\omega) \cdot c(\omega)) \quad (3)
 \end{aligned}$$

ここで IFT は逆フーリエ変換を、* はたたき込み積分を表す。これらの組合せのうちどの式を用いて計算を実行するかはチャートの構造を十分再現できる計算精度が得られ、しかも計算量が少ないことを考慮してきめなければならない。上記の式で逆フーリエ変換を行なう方法は数値積分を必要とし、空間周波数の数によって計算精度が上がるが、計算量は比例して増加し、また Gibbs の現象が生ずる¹⁾ことから、ここではたたき込み積分を直接計算する方法を採用した。このうち (3) 式は点像強度分布が点の密度によって示されるスポット・ダイアグラムを用いて、しかも同様に不連続な強度分布をもつ矩形チャートを物体とするときの強度計算に適しており、電子計算機を使用する場合は判断命令のみで $C(x') * L(\alpha)$ の計算を行なうことができる。

写真レンズのようにその収差が大きいときにはレスポンス関数 $l(\omega)$ は幾何光学的レスポンス関数 $l_g(\omega)$ で十分近似でき、スポット・ダイアグラムの座標 α_k (像面内で測った主光線からの距離) から

$$l_g(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \exp(i\omega\alpha_k) \quad (4)$$

で表わされる。ここで N はスポットの総数である。

(1)より、

$$A(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} L_g(\alpha') C(\alpha - \alpha') d\alpha' = \int_{-\infty}^{\infty} l_g(\omega) c(\omega) e^{i\omega\alpha} d\omega$$

(4)を代入して、

$$= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C(\alpha + \alpha_k) \quad (5)$$

となる。turbidity は 1 次元の式

$$T(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \quad \sigma > 0 \quad (6)$$

により表わせば (5), (6) より

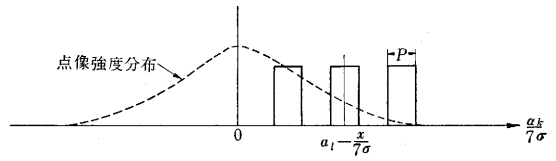
$$I(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2 N} \int_{-\infty}^{\infty} C(x - \alpha + \alpha_k) e^{-\frac{|\alpha|}{\sigma}} d\alpha$$

α についての積分は $e^{-\frac{|\alpha|}{\sigma}}$ が $\alpha = 7\sigma$ のとき $0(10^{-3})$ になるため $\alpha \leq |7\sigma|$ の範囲の積分を行なえばよく、この積分を Gauss の積分法で計算すると定数項を除き強度は

$$I(x) = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^N C\left(\frac{x + \alpha_k}{7\sigma} - a_i\right) \right] H_i e^{-7|a_i|} \quad (7)$$

となる。 H_i, a_i は重みと座標である。

ここで (7) 式のカッコの部分は図・6 のように 3 本チャートの場合チャート幅を P としてスポットの座標 α_k が



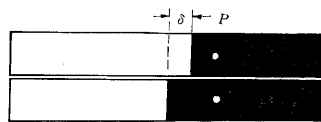
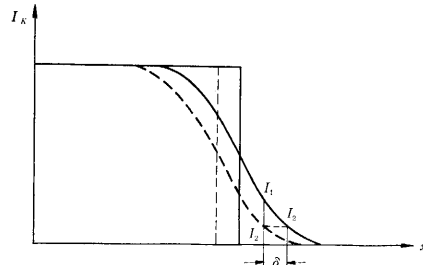
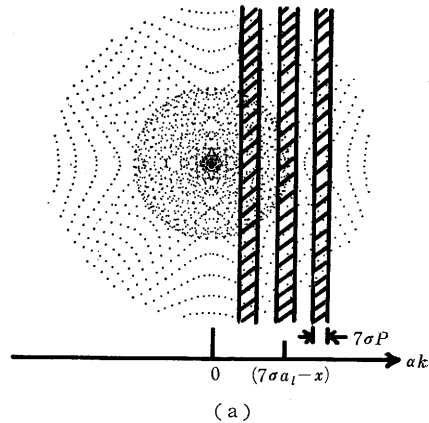
図・6 点像とチャートのたたき込み積分計算法 (1)

$$\left(a_i - \frac{x}{7\sigma}\right) - \frac{P}{2} \leq \frac{\alpha_k}{7\sigma} \leq \left(a_i - \frac{x}{7\sigma}\right) + \frac{P}{2}$$

$$\left(a_i - \frac{x}{7\sigma}\right) + \frac{3P}{2} \leq \frac{\alpha_k}{7\sigma} \leq \left(a_i - \frac{x}{7\sigma}\right) + \frac{5P}{2}$$

$$\left(a_i - \frac{x}{7\sigma}\right) - \frac{5P}{2} \leq \frac{\alpha_k}{7\sigma} \leq \left(a_i - \frac{x}{7\sigma}\right) - \frac{3P}{2}$$

で与えられる領域内に入る個数になる。したがってスポットすべてについてこの判定を行なえばよいが、計算の便宜を考えるとこの数は図・7 (a) に示す領域



(b)

図・7 点像とチャートのたたき込み積分計算法 (2)

$$(7\sigma a_i - x) - \frac{7\sigma P}{2} \leq \alpha_k \leq (7\sigma a_i - x) + \frac{7\sigma P}{2}$$

$$(7\sigma a_i - x) + \frac{21\sigma P}{2} \leq \alpha_k \leq (7\sigma a_i - x) + \frac{35\sigma P}{2}$$

$$(7\sigma a_i - x) - \frac{35\sigma P}{2} \leq \alpha_k \leq (7\sigma a_i - x) - \frac{21\sigma P}{2}$$

の内に入る個数に比例することがわかる。これから定数項を除いてチャート像強度分布の計算式は

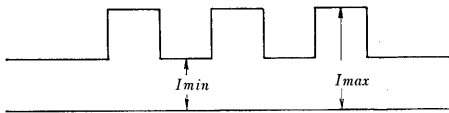
$$I(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N C(\alpha_k - 7\sigma a_i + x) H_l e^{-7|a_i|} \quad (8)$$

となる。

Cox はこれと同様にスポット・ダイアグラムを用いて解像力を計算する方法を提案している。Cox の方法では図・7 (b) のように、スポット・ダイアグラムとエッジのたたき込み積分により、エッジ像強度分布を計算する。いま幅 δ をもつチャートによる像点 P での強度を求めるにはまずエッジ像 (実線) 上で I_1 を求め、次にエッジが δ だけ移動したときの像 (点線) 上の点 P での強度 I_2 を減ずればよい。これは $I_2 = I_2'$ から一つのエッジ像強度分布が計算されておればよく、チャート本数が増加したときには同様の手続きでチャート像強度分布を計算する。この方法ではあらかじめ像面座標 x についてエッジ像を計算しておく必要がある。しかし(8)式を用いれば強度を求める座標について計算を行なえばよいことになる。

(2) チャート・コントラスト

(8) 式を導いたときのチャートは、黒地の強度が零のものであった。実際に解像力を測定するときのチャートは図・8 のようなものである。チャート・コントラストは JIS において濃度差



図・8 テスト・チャートの強度分布

$$A = \log_{10} \left(\frac{1}{R} \right), \quad R = I_{\min}/I_{\max}$$

によって指定される。上式から

$$I_{\max} = e^{\frac{A}{M}} \cdot I_{\min}, \quad M = \log_{10} e$$

となりコントラスト ∞ のチャート強度分布 $C(x)$ を用いて、コントラスト A の強度分布 $C'(x)$ は

$$C'(x) = 1 + (e^{\frac{A}{M}} - 1)C(x)$$

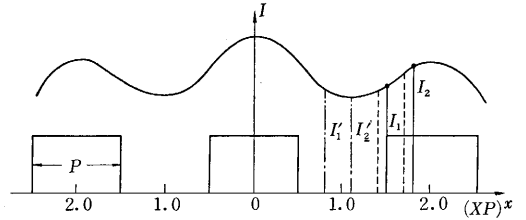
(8)式より、このチャートの像は

$$I(x) = \sum_{i=1}^n \left[N + (e^{\frac{A}{M}} - 1) \sum_{k=1}^N C(\alpha_k - 7\sigma a_i + x) \right] H_l e^{-7|a_i|} \quad (9)$$

となる。

(3) 解像限界の判定

解像限界を見出すにはかなり複雑な手続きが必要である。まず矩形チャートの像強度分布を計算し極大、極小値を求める。次に極大値と極小値の比をとり、これが解像限界の定義の値に



$$V = \frac{I_2 - I_1}{I_2} VM, PM$$

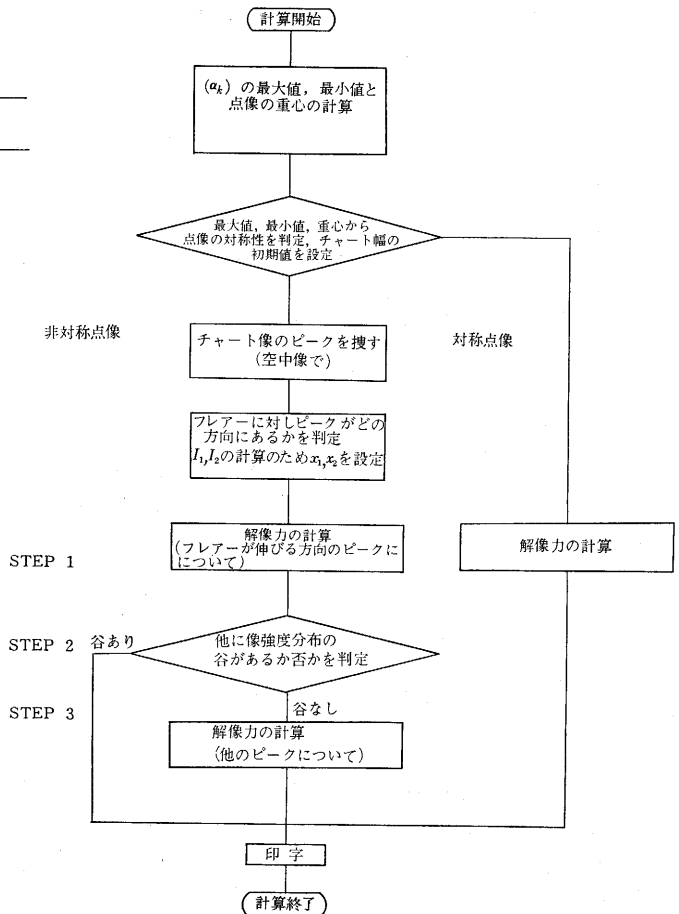
$$V > 0.02 \quad P = \frac{PM}{1 + 6 \times \sqrt{VM}} \quad (P \rightarrow \text{小})$$

$$V < 0 \quad V = VM/2 \quad (P \rightarrow \text{大})$$

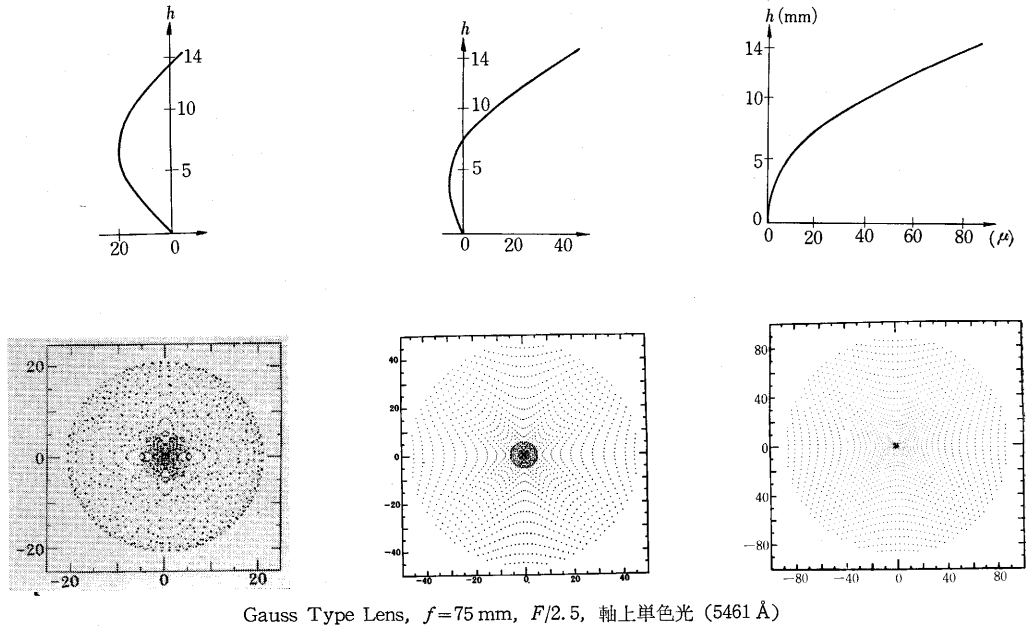
0.02 > V > 0 x座標を移動してVを計算
このとき V < 0 であれば計算終了

図・9

一致するか否かを (定義がこの比の範囲で与えられていればその内に入るか否かを) 調べ、一致しないときにはチャート間隔を変えてこれを繰り返さねばならない。これは対称点像の場合で、非対称ではさらに面倒になる。



図・10 解像力計算フロー・チャート



図・11 被検レンズの横収差, スポットダイアグラムとレスポンス関数
(H. Kubota and K. Miyamoto)

3本チャートが十分解像されていればその像に強度の山が三つ谷が二つあるが、解像限界はこれが二つと一つに変わる境界である。したがって二つの強度の谷のうちどちらが先に消失するかを調べ早く消失する谷とその後でも残る山との強度比で判定をしなければならない。解像力の測定では人間が間隔のちがう多数のチャート撮影像を調べ一瞬のうちにこの判断を行なっているわけである。電子計算機によって解像限界の判定を行なうとき以上の手続きをそのまま行なってもよいが計算量は膨大になる。このため図・9に示す方法で解像限界の判定を行なう。

はじめに十分解像しうるチャート幅 P を与え I_2 と I_1 を計算する。ここで I_2 は外側の山よりわずか谷側の座標 ($x=1.8P$) で、 I_1 はスポット・ダイアグラムが点の密度で点像を表わすことから生ずる強度計算の誤差を考慮して $0.3P$ だけ谷側によった座標 ($x=1.5P$) での像強度である。これからコントラスト V を求め、図・

9に示す判定を行なう。途中で計算されたコントラストとチャート幅は VM , PM として記憶しておく。

いま V が 0.02 より大きいとき強度のこう配は急であるから、計算されたコントラストを自動修正式に代入し新たにより狭いチャート幅を設定して I_2 , I_1 , V の計算を繰り返す。この繰返しによりチャート幅がだいに狭くなり、解像限界をすぎると偽解像が生じて V は負になる。このときにはチャート幅を大きくするためコントラスト V を半分にして自動修正式に代入しさらに計算と判定を行なう。繰返し計算の結果 $0.02 > V > 0$ となれば像強度分布の傾斜はなだらかになっている。したがってこのチャート幅 P は解像限界を与える値に近いはずで像面座標を $0.1P$ 原点方向に移動して計算を繰り返す。ここで座標移動後ただちに $V < 0$ となれば I_2' , I_1' で示すように強度の谷を通過したことになり、このときの $1/2P$ を解像力として計算を終了する。図・10がこの計算法のフロー・チャートである。

非対称点像の場合は以上の計算を step 1 とし, step 2 でもう一方の谷があるかどうかをたしかめる. このため求められた P を用いて先と同様に二つの像点のコントラストを計算し, 座標を移動しながらその変化を調べると, 移動量 $2P$ までの範囲で逆符号になれば谷があり, 変化がなければ P より大きなチャート幅ですでにこの谷が消失していることがわかる. 谷がない場合は step 3 として step 1 で計算した像点と原点に対して反対側で step 1 の計算を行なえば解像限界を見出すことができる.

点像が対称か否かの判別はスポットの座標 α_k の最大, 最小値の比較と重心の計算によって判別している.

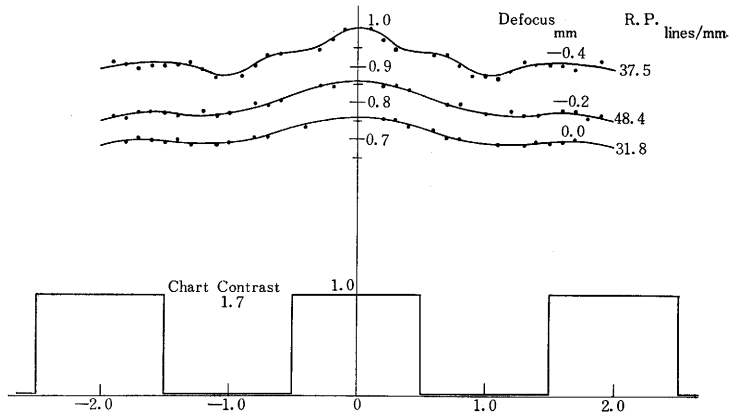
(4) 計算例

解像力の計算は OKITAC 5090C によって行なった. 写真レンズは Gauss 型 $F/2.5$, 焦点距離 75mm で, 絞り開放, 軸上像点, 照明光は水銀 e 線 5461 Å とした.

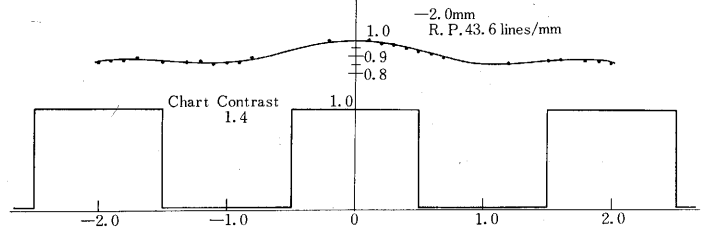
スポット・ダイアグラムは Kubota and Miyamoto¹³⁾ によって計算されたものを計算に利用させていただいたもので, レンズの入射瞳の 1/4 について光線追跡された 494 点を 2 倍し, 瞳の 1/2 によるスポット・ダイアグラム, 総数 988 点として計算した. Gauss 積分法の quadrature points は 20 点とした. 像面位置は Gauss 像面と, これを基準としてレンズ方向に 0.2mm おきに二つの像面をとった. -0.2 mm の像面は visual best focus である. 図・11 は各像面位置での横収差, スポット・ダイアグラム (ほぼ同一尺度) とレスポンス関数である.

図・12 にチャート・コントラスト 1.7, turbidity $\sigma = 6.8\mu$ の場合の各像面について計算した解像力の値と, これから計算した像強度分布を示す. 下は高コントラスト 1.7 のチャート強度分布であり, 横軸はともに同じ尺度で示してある. -0.4 mm の像面では点像のコア部分の影響が顕著であるが, Gauss 像面では点像のなだらかなひろがりのためチャート縁もなだらかになることがわかる.

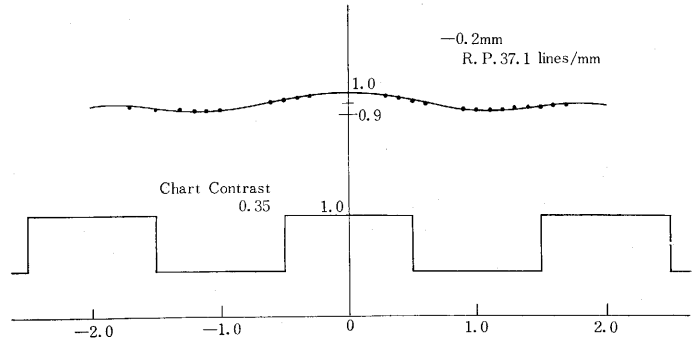
図・13 (a) はチャート・コントラスト 1.4, $\sigma = 6.8\mu$, (b) は同一像面で低コントラスト 0.35 の解像力と像強度分布である. このように低コントラストの場合にはチャート強度分布に含まれる一様な成分の増加により像はなだらかとなり, また計算値のばらつきも減少することになる.



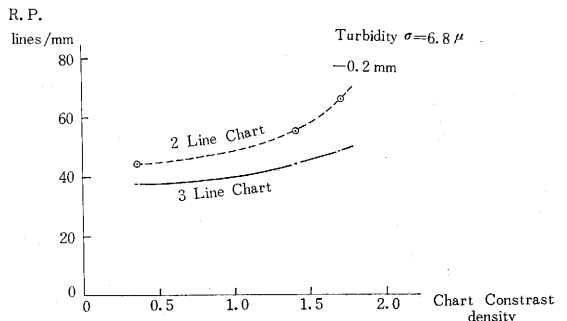
図・12 計算例 (1)



図・13 (a) 計算例 (2)



図・13 (b) 計算例 (3)



図・14 2本チャートと3本チャートの解像力

以上は3本チャートの計算結果であり, 2本チャートの解像力の計算値と比較すれば図・14になる. これから3本チャートではチャートの end effect¹⁷⁾ によって解像力が低下していることがわかり, 4本チャートでは低下量はこれより小さいがさらに低下することが予想でき

る。

図・15 は同一レンズの測定値との比較を示す。測定は高コントラストジューメンス・スターチャート、 σ が1~2 μ の解像力測定用乾板を用い、現像はガンマ1で行なわれたものである。計算値としては $\sigma=3.4\mu$ のときの値が一つあるが、かなり測定値と差があることがわかる。

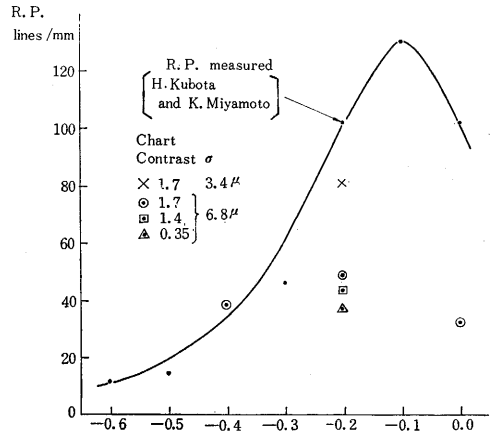
次に空中像の解像力の計算例を図・16 に示す。これは turbidity のたたき込み積分を行わないため強度のばらつきが生じ、自動計算法が限界をうまくとらえることができなかった例である。したがって空中像の計算ではスポットの点数を増すかまたは強度分布をスムーズにする何らかの方法をとらなければ、解像力は計算できないことがわかる。しかし低コントラスト・チャートか、図・17 に示す Gauss 像面の点像のようにひろがった分布をしている場合には解像力にはほぼ近い値を算出することが可能である。

4. 考 察

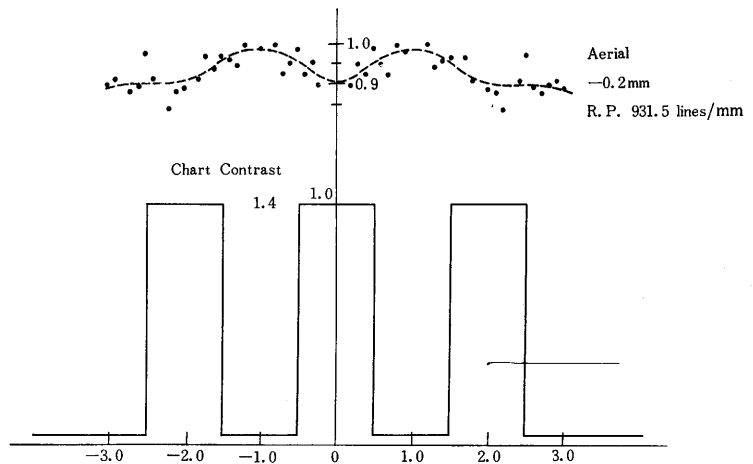
ここで試みた解像限界の判定法はチャート像の山と谷の強度比が与えられた値に一致するか否かを判定するものではなく、このため解像力の計算値もかなりの誤差を含むが、像強度分布の計算例からわかるように解像限界をとらえており、強度比も $I_{min}/I_{max} > 0.85$ であることからこの判定法は有効と考えられる。一般に山と谷の座標は点像の形によって変化し、かならずしもチャートによって決まるとはかぎらず、このため上記の判定法を行なったが、厳密に強度比で、判定を行なうときには、この判定を第1段階とし、強度比の判定を行ないながら繰り返し計算すれば、山と谷の移動量が少ないため厳密な、解像力を求めることが可能である。またチャート照明光を単色光として計算を行なったが、別の波長で光線追跡しスポット・ダイアグラムを計算すれば、白色光レスポンス関係の計算¹⁸⁾と同様の取扱いでスポットの総数は多くなるが白色光での解像力を計算することができる。

5. む す び

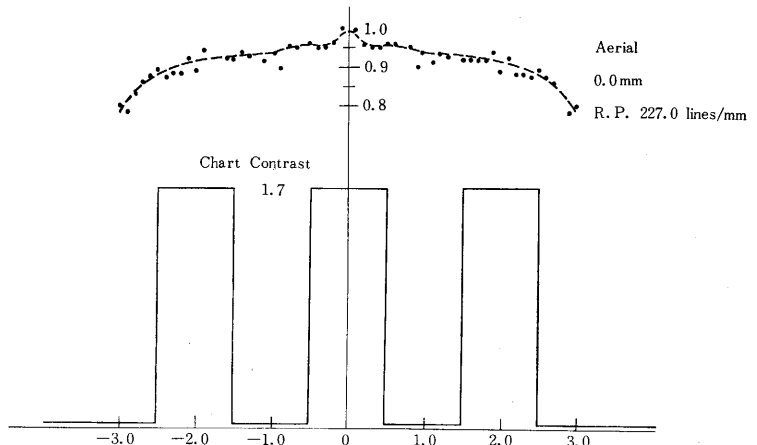
本研究はかなり理想化されたレンズ・受光系の解像力を計算する試みであるといえる。それは解像力の計算にはここで考慮しなかった多くの因子が残されているためである。その第1は肉眼による識別の問題で、肉眼のレ



図・15 計算値と測定値の比較



図・16 空中像での解像力計算例 (1)



図・17 空中像での解像力計算例 (2)

スポンズ関数を考えねばならない。フィルムについては1次元の turbidity を与えたがこれは計算量を少なくするため実際には2次元の turbidity を与えなければならず、さらに粒状性を何らかの方法で考慮することも必要である。写真レンズの場合フィルムの現像条件はガン

expressing the true character of the tradition. The essence of buildings, generally, depends on the coincidence between structures and finishing of buildings.

If we are allowed to say again, we would like to say, "Essential and beautiful architectures have to provide aesthetic or artistic elements, which differ from pictures or sculptures according to the characters of buildings for use, rational structures using proper construction materials—interantional materials as concrete or steel, including sand stone or lime stone in your kingdom and political or economical background, etc."

In other words, architectures mean summarized industrial products having aesthetic and traditional natures.

Sports stadiums are very important buildings in all

the countries. Therefore, the completion of sports centres depends merely upon the responsibilities of the selected architects and engineers.

Nowadays, it becomes common sense among plenty of countries that, concerning important buildings, they require the responsible cooperation of the highlevel architects and engineers in all the world.

We do hope that these stadiums under planning will be successfully completed for the use of young people's physical training and inspiring the strong spirits into the peoples of younger ages, by means of the nice circumstances given by the excellently designed stadiums, swimming pools, gymnasiums, etc.

(8 ページよりつづく)

マが1でない場合が普通である。このとき非直線性の問題が生じ、この取扱いが最も困難であると考えられる。しかし自動計算法でコントラストを求めるときの I_2, I_1 について特性曲線を用いて補正計算を行なえば、この場合でも解像力を計算することは可能である。

解像力を計算により求めるというテーマは、泰成光学設計課丸山貞夫氏とのレンズ設計と検査の諸問題の討論のさいに生れたもので、ここに厚く同氏に感謝するとともに、本研究のデータとしてスポット・ダイアグラムの計算値を快くお貸しくださり、同時にご指導をいただいた本研究所久保田広教授に厚く感謝申し上げます。研究を行なうに際し、また本論文の作成について有益なる助言とご指導とをいただいた小瀬輝次助教授に、自動計算プログラムの作成についてご指導くださった電子計算機室の諸氏に厚くお礼を申し上げます。

(1965 年 12 月 17 日受理)

参 考 文 献

1) R. Barakat and A. Houston, J. Opt. Soc. Amer., 53, 1371 (1963)
 2) O. Sandvik, J. Opt. Soc. Amer., 14, 169 (1927)
 3) O. Sandvik, J. Opt. Soc. Amer., 16, 244 (1928)

4) E.W.H. Selwyn and J. L. Tearle Proc. Phys. Soc., 58, 493 (1946)
 5) R.E. Hopkins, H. Kerr, T. Lauroesch and V. Carpenter, NBS Circular 526 P. 138 (1954)
 6) R.E. Hopkins, S. Oxley and J. Eyer, J. Opt. Soc. Amer. 44, 692 (1954)
 7) D.H. Kelly, Applied Optics. 4, 435 (1965)
 8) W.N. Charman, Photo. Sci. and Eng. 8, 253(1964)
 9) 辻内順平 “解像力とテスト・チャード” 光学技術コンタクト 3, No. 7, P.8 (1965)
 10) M. Françon, Modern Applications of Physical Optics P.65, Interscience Publishers 1963
 " Handbuch der Physik XXIV p. 342, Springer-verlag 1956
 11) R.E. Hopkins, Seminar on Optical Design, Rochester Univ. 1957
 12) G. Franke, Optica Acta. 6, 308 (1959)
 13) H. Kubota and K. Miyamoto, Report of the Institute of Industrial Science, The University of Tokyo 13, No. 2 (1963)
 14) A. Cox, NBS Circular 526, p. 267 (1954)
 15) K. Miyamoto, J. Opt. Soc. Amer. 48, 567 (1958)
 K. Miyamoto J. Opt. Soc. Amer. 49, 35 (1959)
 16) 小瀬輝次 東京大学生産技術研究所報告 11, No. 4 (1961)
 17) 高島松雄 “白色光源を用いたときのレスポンス関数” 第 11 回応用物理関係連合講演会予稿集 p. 115(1964)



次 号 予 告 (3月号)

研 究 解 説

遠心バレル研磨法.....	松 永 正 久
クロマトリーの液体クロマトグラフへの応用.....	武 藤 義 一 高 田 芳 矩

研 究 速 報

シアニン系写真増感色素の励起エネルギーの計算.....	谷 菊 池 忠 昭 越 正 毅
信号系の最適オフセットパタンの近似解.....	