

光学表面

Optical Surfaces



レンズのアプリケーションでは、表面平面度と表面品質に対して要求されます。波面の維持が重要な場合、 $\lambda/4$ から $\lambda/8$ までの表面平面度を選択する必要があります。波面よりもコストを優先する場合、 $\lambda/2$ の不規則性を使用できます。表面品質については、スクラッチ・ディグ仕様が厳しくなるほど、散乱光が低減されます。要求仕様が厳しいレーザーシステムやイメージングシステムでは、20-10から40-20のスクラッチ・ディグが最適です。低散乱がコストほど重要でないアプリケーションでは、60-40のスクラッチ・ディグを使用できます。

表面品質と表面平面度は、損傷しきい値、波面および低散乱要件を満たすよう、明確に定義する必要があります。表面品質は、光学部品の表面上の目視で確認できる欠陥の水準を表します。欠陥には、スクラッチ（キズ）、ディグ（くぼみ）、小さなキズ、パブル、端部の欠け、コーティング時の傷などがあります。わずかな欠陥で、システム性能に影響がない場合もあります。このため、通常「Cosmetic surface quality」や「beauty specifications」と呼ばれます。この仕様は部品の仕上がり水準を示すため、性能が変わらない場合でも、お客様の満足度に大きな影響を及ぼします。

さらに厳しい仕様が求められるアプリケーションでは、これらの欠陥は光の散乱、好ましくない回折パターン、対称性の損失、明暗差の原因となるおそれがあります。これらは、システム性能を低下させ、オプティクスを損傷する場合もあります。たとえば、表面が撮像面に位置している場合、欠陥が直接あらわになり、全体の画像品質を低下させます。高エネルギーのレーザー光線を当てた場合、表面の欠陥が光を吸収し、オプティクスを徐々に破壊する可能性があります。反対に、必要以上に表面品質が良いと、製品コストがはね上がります。

お客様は、目的のアプリケーションに適した表面品質レベルを把握する必要があります。表面の欠陥仕様は複雑です。最も普及しており、業界で広く使用されている表面品質の規定は、米国軍用表面品質規格 MIL-PRF-13830B です。Newportのオプティクスはすべて、この規格に従って試験を行っています。

表面の不規則性

表面精度とは、光学部品表面の目標形状と実際の形状との偏差を測定したものです。表面精度の期待値を指定することは、光の収差とシステム性能の劣化をもたらす過剰な波面歪みを防止するために重要です。波面収差はストレール比（イメージ面で観察されたピーク強度に対する理想的な光学システムの理論上の最大ピーク強度の比率）を低下させます。表面精度は試験板または干渉計のいずれかを使用して測定できます。

試験板を使用する場合、試験板と試験対象物表面をぴったり接触させると、ニュートンリングとして知られる円形の干渉縞が発生します。これらの干渉縞の数とその不規則性を調査することで、試験板と比較した場合の試験対象物の表面精度がわかります。ニュートンリングの本数は、2つの表面の間の半径の違いを表します。色が同じ（暗色が明色）縞が分かれているところは、使用した光の半波長での高さの違いを表します。リングから、表面平面度を示す歪みがわかる場合もあります。歪みは小さな領域に局在するか、または開口部全体にわたる円形の干渉縞の形状を取ります。このような平面度はすべて不規則性と考えられます。試験板の精度はその曲率半径を測定するために使用する手段として最高のものでなければなりません。

試験板は、その光学品質がわずかな縞模様の範囲内であれば、平面でも球面でも構いません。試験板の取扱い時には、基準面が損傷しないように十分な注意を払う必要があります。試験板を使用する場合の短所は、試験板とサンプル面を直接接触させるので、どちらもキズや損傷を受けやすいことです。また、干渉計から得られる干渉縞の分析対象の本数があまり多くならないように、2つの表面の曲率半径はほぼ等しくなければなりません。そのため、光学製品を扱う会社で行われる試験は、その会社が所有し、使用できる試験板の種類に基づくこととなりますので、すべての光学面を試験することは難しいかもしれません。

高度なコンピュータ用データ分析ソフトウェアを使用した干渉計（FizeauやTwyman-greenなど）を活用することで、大幅に精度を増した測定が可能になります。このアプローチでは、基準面とサンプル表面を直接接触させません。オプティクスのサイズに関わらず分析できますので、試験板の種類に制限されることもありません。このアプローチの短所は、試験板を使用する方法に比べてコストが高くなることです。

PVエラーとRMSエラー

表面精度を測定するときを使用される一般的な単位は、PV値（peak-to-valley）とRMS値（Root Sum Square value）の2つです。波面での測定値は、表面の測定値の2倍になるため、表面または波面のどちらで測定するかを規定することが重要です。たとえば、ミラーの表面で測定したPV $\lambda/8$ エラーは、波面で測定した場合のPV $\lambda/4$ エラーと同等です。2つの単位系には、PVは最悪状況のエラー統計であるのに対して、RMSは領域補正した統計であるという違いがあります。

光学表面では、基準面と実際の表面を比較したときの高低差が最も大きくなる点と小さくなる点のみを使用します。PV値は表面上の2つの局地点を比較し、オプティクスの曲率面を無視するので、表面形状を正確に表すことは困難です。PVエラーの長所は、干渉計を使用した目視予測が比較的容易であることです。しかし、表面上になんらかの加工が施されている場合、オプティクスの性能に問題がなくてもPV値が非常に大きくなる場合があります。従って、PVエラーが大きい光学システムの方が、PVエラーが小さいシステムより実際には性能が優れている場合があります。残念ながら、これは現在でも最も広く使用されている単位です。

RMSは、干渉計のすべてのデータポイントを使用して、基準面に対する試験対象の表面の高さ（深さ）の標準偏差を用いて計算します。

PVエラーと比較して、RMSエラーは測定対象のサンプルの光学性能を、はるかに高い精度で測定可能です。ほとんどのメーカーはPVエ

ラーでオブティクスを規定していますので、RMSエラーとの違いを簡単に比較できるリストを次の表にまとめています。

数値	コスト	アプリケーション
$\lambda/2$	低い	波面歪みよりもコストが優先される場合に使用される
$\lambda/4$	中間	波面歪みが少ないこととコストのバランスが重視される一般的なレーザーおよびイメージング用途に最適
$\lambda/8$	高い	波面歪みが少ないことが要求されるレーザーおよびイメージング用途向け（特に、複数の素子を使用するシステム）

*特に明記のない限り、Newportのレンズの表面不規則性は表面当たりのPV値で表しています。

表面品質

スクラッチ・ディグ仕様

スクラッチ・ディグ仕様を表すために最も広く使用されている規格は、米国軍用規格であるMIL-REF-13830Bで使用されているものです。この規格を正確に理解している人は限られていますが、米国では小型オブティクスの仕様の基準となっています。スクラッチ・ディグ仕様を分類する幾つかの検査方法があり、その中にはレチクル、スクラッチ・ディグ用パドル、スクラッチ・ディグ用基準を使用するものも含まれます。スクラッチ・ディグの評価は完全に目視で行い、米国軍用規格MIL-O-13830Bに適合した基準セットとの非定量的な比較であることに注意してください。従って、仕様に記載の数値は実際に確認したキズの幅ではなく、基準と比べたときのキズの外観を表しています。

欠陥の度合いは、“20-10”、“60-40”、“80-50”などのように表記されるのが一般的です。最初の数はミクロン単位で測定したキズの最大許容幅であり、次の数はミリメートルの100分の1の単位で測定したくぼみの最大直径を意味します。つまり、スクラッチ・ディグが60-40であるとは、キズの見かけ上の幅が6ミクロンであり、許容可能なくぼみの直径が0.4mmであるという意味です。

スクラッチ（キズ）

スクラッチとは、研磨済み、またはコーティング済みの表面についた模様や裂け目です。照明を制御した場所でスクラッチ基準との外観を比較して得られた測定結果で表記します。各表面上に目視スクラッチが存在する場合（例えば、60-40のレンズで60のスクラッチが複数個ある場合）、それらの長さの総和が、素子の直径の4分の1を超えてはいけません。最大のスクラッチが複数あり、目視で確認できる場合、スクラッチの数の積に、素子の直径に対するそれらの長さの比率を掛けた合計が、スクラッチの最大数の半分を超えてはいけません。スクラッチが存在しない場合、スクラッチの数の積に素子の直径に対するスクラッチの長さの比率を掛けた合計は、最大のスクラッチ数を超えることはありません。

ディグ（へこみ）

ディグとは、研磨済み、またはコーティング済みの表面についた小さなへこみやくぼみであり、原材料の欠陥を由来として、あるいは研削プロセスで発生するものです。ディグは10分の1ミクロン単位、あるいは100分の1ミリメートル単位の実際の直径で定義されます。60-40のオブティクスで40は、0.04mmになります。最大のディグの数は、光学表面上の20mm当たり1つを超えてはいけません。すべてのディグの合計は、直径20mmごとに規定した最大サイズの直径の2倍を超えてはいけません。通常、2.5ミクロン未満のディグは無視されます。ディグ品質が10以下の表面では、各ディグはそれぞれ1ミリメートル以上離れている必要があります。

割れと端部の欠け

レンズの有効径に入らない割れは許容可能としますが、欠けがマウントのレンズ用シーリングに干渉しない場合に限りです。有効径に達する端部の欠けはディグと考えます。0.5mmを超える欠けは研磨を行い、反射光や欠けの拡大が発生する可能性を低減します。0.5mmを超える欠けの幅の合計は、レンズの外周の30%を超えてはいけません。面や端部の割れは研磨してすべてなくす必要があります。研磨領域における研磨済みの欠けや割れの合計は、研磨領域の2%を超えてはいけません。2%を超えたものは、拒絶されます。プリズムの有効径に入らない端部の欠けは、欠けの幅の合計が、欠けが発生した端部の長さの30%を超えない場合に限り、許容可能と見なされます。欠けは、斜めに面取りした端から測定します。0.5mm未満の欠けは無視でき、0.5mm以上の欠けは研ぐか研磨する必要があります。

バブルとインクルージョン

一般的な光学ガラスには、他の工業ガラスに比べてバブルやインクルージョンがありません。これは、バブルを少なくさせるために最適化された高度な製造プロセスによるものです。視覚上のバブルは最終的な画像形状を妨げるものではありませんが、光の一部が散乱するため、画像コントラストや輝度が劣ります。インクルージョンが画像面にある場合、その欠陥は最終画像に直接表われ、最終画像の品質が低下します。インクルージョン品質の確認は、目視検査で行います。ガラスを黒い背景の上に置いて、側面から照射します。上から見ると、バブルやイン

スクラッチ・ディグ	品質	アプリケーション
80-50	非常に低い	許容可能な品質。容易に製造できる
60-40	低い	量産品質。散乱光がコストほど重視されない、重要性のない低パワーレーザーおよびイメージング用途に使用される。
40-20	中程度	わずかな散乱光であれば許容できる、標準的な理化学研究用途の低～中パワーレーザーまたはイメージングに使用される。
20-10	高い	精密品質。レーザーミラーおよび外部共振器用オブティクスの最低基準であり、中～高パワーレーザーに使用される。散乱光を最小限に抑える。
10-5	非常に高い	高精密品質。最も要求が厳しい用途（内部共振器型レーザー用オブティクスや高パワー用途など）に使用される。

クルージョンは明るい点として目に見えるようになります。

ガラス内に含まれるインクルージョン（石や結晶など）はバブルとして扱います。バブルは表面のへこみとして分類する必要があります。不規則な形状のインクルージョンの大きさは、最大の長さと幅を合計し、それを半分に割った値を使います。許容可能な最大のバブルは、光路20 mm当たり1 mm、つまりほん

のわずかな元素ひとつとなります。ガラスに含まれるバブルの量は、ガラスの体積100 cm³当たりの合計断面積（mm²）を、検出したバブルの断面積を合計して求めることで特徴付けられます。お客様は、バブルおよびインクルージョン仕様が、ガラスの加工品に有効なのか、その原料に有効なのかを必ず示す必要があります。

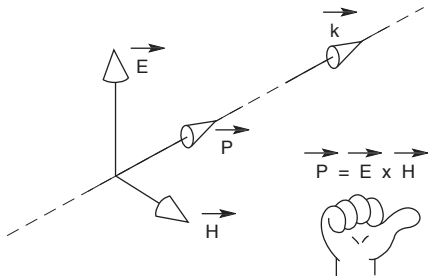
コーティング不具合

キズ、ピンホール、くぼみ、ごみ、染みなどのコーティング不具合にも、同様のスクラッチ・ディグ仕様が適用されます。コーティングのキズ（スクラッチ）やへこみ（ディグ）は、光学部品の基板に規定された値を超えてはいけません。コーティングのスクラッチ・ディグは、基板のスクラッチ・ディグ要件とは別に考える必要があります。

光学公式
Optics Formulas

右手の法則

光とは、横方向に伝わる電磁波です。電界**E**と磁界**M**は互いに垂直で、伝播ベクトル**k**に対しても垂直です。出力密度は、ポインティングベクトル**P**、および**E**と**H**のベクトル積によって与えられます。各要素の方向は、親指を除いて握った右手の指を**E**、手のひらを**H**、伸ばした親指を光の進行方向とすればすぐに覚えられます。



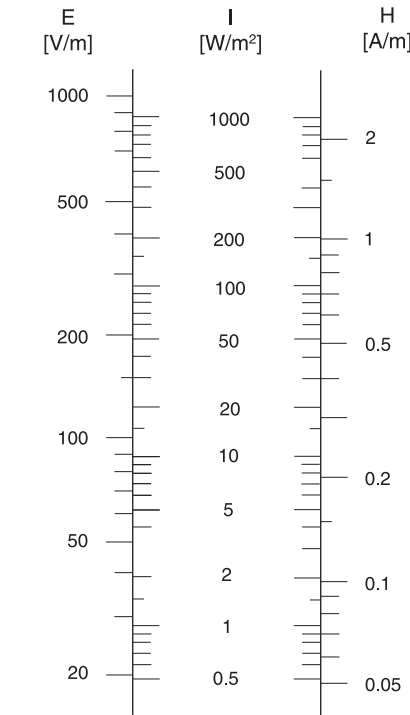
強度のノモグラム

下記のノモグラムは、真空中で**E**、**H**と光度**I**の関連があります。あなたは、これらを他の分野で使うかもしれません。

例 [A/mm]、[W/mm²]、[V/mm]

もし、あなたが電気の単位でこれらを変えるようにすると**E**と**H**によって**I**が変化する事を覚えておいてください。

たとえば [V/m]、[mA/m]、[mW/m²] または [kV/m]、[kA/m]、[MW/m²]。



光の強度

光の強度**I**はW/m²、**E**はV/m、**H**はA/mという単位で表わされます。**I**と**E**および**H**との関係は、オームの法則によく似ています。ピーク値に対するこれらの式を以下に示します。

$$E = \eta H, \quad H = \frac{E}{\eta}, \quad \eta = \frac{E}{H}$$

$$I = \frac{EH}{2}, \quad I = \frac{E^2}{2\eta}, \quad I = \frac{\eta H^2}{2}$$

$$E = \sqrt{2\eta I}, \quad H = \sqrt{\frac{2I}{\eta}}$$

$$\eta_0 = 377 \text{ ohms} \left(\square \right)$$

$$\eta = \frac{\eta_0}{n}$$

η_0 は真空中における光のインピーダンス、 η は屈折率nの媒質中における光のインピーダンスです。

波の数値関係

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi n}{\lambda_0}$$

$$= \frac{2\pi n v}{c} = \frac{n\omega}{c}$$

$$v = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{c}{n\lambda}$$

$$= \frac{kc}{2\pi n} = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$\lambda = \frac{c}{nv} = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$= \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi c}{n\omega}$$

k: 波数ベクトル [ラジアン/m]

v: 周波数 [Hz]

ω : 角周波数 [ラジアン/秒]

λ : 波長 [m]

λ_0 : 真空中での波長 [m]

n: 屈折率