



光学ガラスの屈折率の光波干渉測定

清野 昭一*・大門 昌彦**

* (財)機械電子検査検定協会 〒140 東京都品川区東大井 1-8-12

** (株)オハラ 〒229 相模原市小山 1-15-30

(1989年10月20日受理)

Interferometric Measurement of Refractive Indices of Optical Glasses

Shoichi SEINO* and Masahiko DAIMON**

* JMI Institute, 1-8-12, Higashiohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140

**OHARA Inc., 1-15-30, Oyama, Sagamihara 229

Refractive indices of optical glasses were precisely measured by using Twyman type interferometer. Absolute thickness of a sample and optical path difference passing through a sample glass were measured by coincidence method and by excess fraction method respectively. Accuracy of the measurements in visible range using several kind of samples can be estimated within 1×10^{-6} .

1. はじめに

最近の光関連産業の発展に伴い、高性能のレンズやプリズム用の光学ガラスの屈折率を、従来よりも1桁高い 1×10^{-6} 以上の精度で測定することが要求されている。

分光計を用いて試料プリズムの最小偏角を測定し、その結果から屈折率を決定する方法が高精度測定法として知られているが、 10^{-6} の精度を得ることは困難とされている¹⁾。また、基準となるVブロックプリズムと試料との屈折率の差を求める示差屈折率計は、 10^{-7} のオーダーの測定の分解能と再現性が得られるが²⁾、あくまでも比較測定法であり、基準Vブロックの屈折率の決定精度を上回ることは不可能である。さらに高精度の測定法として、試料を通過した光と周囲の空気中を通過した光の位相差から、絶対屈折率を求める光波干渉法が提唱されているが³⁾、試料の作成や測定が容易ではなく、実際の測定例は報告されていないようである。

われわれは Twyman 型の 2 光束干渉計を用いて、光学ガラスの絶対屈折率を 1×10^{-6} 前後の精度で測定するための実験を試み、一応の成果と実用化の見通しを得ることができたのでその概略について報告する。

2. 測定法の原理

Fig. 1 に示すように Twyman 型の 2 光束干渉計に単色光の平行光束を入射させる。ビームスプリッタで二つに分かれた光束の一方は参照鏡で反射して元に戻り、他方の光束は、厚さが t で屈折率が n の試料およびその周囲の空気（屈折率： n_a ）中を通ったのち鏡で反射して逆の光路をたどる。光軸に対し参照鏡を垂直になるように固定し、測定光路の反射鏡の傾きを微細に調節すると Fig. 1 左のような干渉パターンを観測することができる。

試料を通って往復した光と、空気中を往復した光との干渉次数（光路長/真空波長）の差は次式で表される。

$$N + \varepsilon = 2t(n - n_a)/\lambda_v \quad (1)$$

したがって

$$n - n_a = (N + \varepsilon)\lambda_v/2t \quad (2)$$

ここで N は干渉次数の整数部分、 ε は端数部分、 n_a は周囲の空気の屈折率、 λ_v は光の真空中の波長である。 t と λ_v は既知の量であり、 n_a は Edlén の式³⁾ を用いて求めることができる。 N は一般にきわめて大きな値で直ちに求めることはできないが、端数値 ε は Fig. 1 に

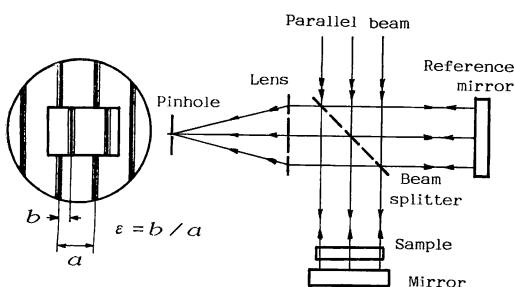


Fig. 1 Principle of the interference refractometer.

示すパターンの縞幅 a と縞のずれ量 b から $\varepsilon = b/a$ で与えられる。また n の概略値がかなりの精度で既知の場合には、次のような手順で N を決定し屈折率の絶対値を求めることができる。

従来の最高の手段で求めた屈折率の値を n_0 、標準状態（気温 20°C、気圧 1013.25 mbar、水蒸気圧 13.33 mbar、CO₂ 含有量 0.03%）における空気の屈折率を n_{as} 、そのときの干渉次数差を $N_0 + \varepsilon_0$ とするとき

$$N_0 + \varepsilon_0 = 2t(n_0 - n_{as})/\lambda_v \quad (3)$$

で表され、左辺の値は計算で求めることができる。（1）式と（3）の差をとり整理すると次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta n &= n - n_0 \\ &= (\Delta N + \Delta \varepsilon) \lambda_v / 2t + (n_a - n_{as}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $\Delta N = N - N_0$ 、 $\Delta \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0$ である。

（4）式の右辺において、 ΔN 以外の項はいずれも既知か実測可能な量である。 ΔN を比較的容易に決定するためには、 $|\Delta N + \Delta \varepsilon|$ が 0.5 未満である条件の下で予備測定を行えばよい。

たとえば可視域における屈折率測定で $|\Delta n| < 1 \times 10^{-5}$ 、 n_a が n_{as} に対し $\pm 5 \times 10^{-6}$ の変動幅（気温 1°C と気圧 15 mbar の変化に対応する最大変動幅）に収まるときは試料の厚さが 7 mm 未満であればその条件を満足するので、 ΔN が確定し Δn の近似値を求めることができる。さらに高精度の値を求めるためにより厚い試料で再測定を行う必要があるが、この場合の ΔN は、得られた Δn が薄い試料での Δn と誤差範囲で一致するような値を採用すれば良い。

n の要求精度が 1×10^{-6} のとき、（2）式の左辺の相対精度は $1 \times 10^{-6}/(n-1)$ で表される。 $n=1.5$ の光学ガラスに例を取ると、右辺の総合精度は 2.0 ppm 以内に収める必要がある。 λ_v は 0.1 ppm よりよい精度をもつので $(N + \varepsilon)$ および t の測定精度がそれぞれ 1 ppm 以内であれば目的を達することができる。これは不可能な

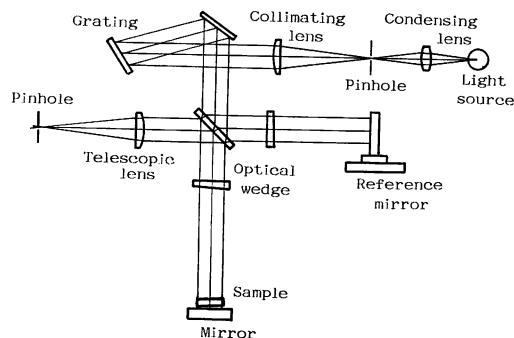


Fig. 2 Optical system of the gauge block interferometer.

値ではなく詳細については後述する。

3. 測 定 実 験

実際に用いた干渉計は 9 個までのブロックゲージの寸法を連続的に絶対測定するための装置⁴⁾で ¹⁹⁸Hg ランプおよび Cd ランプにより、435 nm から 644 nm の範囲で 8 種類のスペクトル線の単色光を選択して用いることができる。主要光学系は Fig. 2 のとおりである。

実験用の試料は、屈折率の値が 5 行目まで既知の数種類の光学ガラスから、それぞれ 2 個 1 組の角柱形のものを製作して用いた。1 個は n の概略値を知るためのもので厚さ約 5.8 mm、他は本測定用の厚さ約 15.6 mm のものである。試料の透過波面精度と両端面の平面度はいずれも 30 nm 程度の精度で加工されている。各試料の厚さは ¹⁹⁸Hg ランプの 4 種類のスペクトル線を用いて、ブロックゲージの寸法測定と同じ方法（合致法⁵⁾）により ± 20 nm の精度で測定された。

試料はスペーサを介して干渉計の測定光路側のミラーの上に置く。この場合、試料面とミラー面とは平行ではなくわずかに傾けてセットし、不要な干渉縞の混在による読み誤差を避ける必要がある。この傾きによる光路長の変化の影響は無視できないので、計算により補正した。

前章で述べた手順で Fig. 1 に示すような干渉縞を作り端部 ε を測定する。まず薄い試料について、8 種類のスペクトル線ごとに $\Delta \varepsilon$ の値を求める。前章で述べたように、厚さが 7 mm 以下の場合は ΔN の値は既知であるので、各波長ごとの $\Delta \varepsilon$ の値からそれぞれの Δn を定めることができる。

こうして n の近似値が得られるので、さらに高精度の測定を厚い試料を用いて行い、最終値を決定する。

測定された屈折率は 20°C における値を示すように必要な補正を加えたほか、試料の傾斜、入射光のピンホー

Table 1 Measured values and their uncertainties of refractive indices* of BK 7 sample using the interferometric method.

λ (nm)	644	579	577	546	509	480	468	435
$n_0 - 1$	514930	517374	517466	548933	521068	523040	523992	526896
$n - n_0$	+8.42	+4.88	+5.69	+5.44	+6.83	+5.77	+6.24	+6.39
3σ	0.84	0.42	0.90	1.02	0.99	1.14	1.44	0.87

* Values are to be multiplied by 10^{-6} . n : Measured value, n_0 : Nominal value.

ル⁶⁾の大きさなどの影響に関する補正を行った。

8種類のスペクトル線による測定結果の一例として、BK 7 (n : 1.52, t : 15.6 mm) の試料の各波長ごとの($n - n_0$)の5回測定の平均値と、 3σ で表したばらつきを Table 1 に示す。測定値の偏りが少なければ、測定精度はほぼ 1×10^{-6} のオーダーに達しているということができる。薄い試料 (t : 5.8 mm) の測定結果は厚いほうの試料の値に対し、($n - n_0$)の差は 1×10^{-6} 以下、ばらつきは倍以上の値であった。

他の5種類の光学ガラスの試料についても同様の測定を行ったが、測定のばらつき (3σ) は、 1.5×10^{-6} 以下であった。

4. 考 察

2章で本法による屈折率測定の精度は、おもに試料の厚さ t と干渉次数 ($N + \varepsilon$) の測定精度に依存することを述べた。

光波干渉による厚さ測定の精度は、試料とベースプレートとの密着の良否や干渉縞の端数の読み取りの精度などの影響を受け、寸法に無関係に少なくとも ± 20 nm ほどの誤差を免れることはできない。したがって、干渉性と波長の再現性のよいスペクトル線(たとえば ^{198}Hg の4本の線)を使用すれば、試料は厚いほど測長精度は良くなり、100 mm では 0.3 ppm 程度の精度を得ることも可能である。

しかしながら屈折率を広い波長範囲にわたり、なるべく多くのスペクトル線で測りたい場合には、光源の性能に基づく試料長さの制約がある。今回の実験で併用した Cd ランプの場合、644 nm を除くスペクトル線は形が非対象のため、試料厚さが 20 mm を超えると干渉縞の位置が不正確になるおそれがあり、厚さ測定の精度は 1 ppm が限度であった。

干渉次数 ($N + \varepsilon$) の測定の場合にも試料長さの制約による精度の限界があり、厚さ測定と同様に 1 ppm の不確かさを免れることは困難である。

その他、試料の温度、空気の屈折率、試料の傾斜、入

射ピンホール口径などの影響による屈折率の補正を正確に行う必要がある。これらの詳細については省略するが、不確かさはいずれも 0.1 ppm 程度である。補正の不確かさと t および ($N + \varepsilon$) の測定の不確かさの自乗和のルートを総合精度と仮定すると 1.43 ppm となり、2章で述べた目標精度に近い値、すなわち n の値で 1×10^{-6} の精度が得られたこととなる。さらに高い精度を得るためにには次のような項目が挙げられる。

- (1) 干渉性や波長再現性のよい同位元素光源 (^{86}Kr や ^{114}Cd など) を用い、より厚い試料を測定して相対精度を上げる。
- (2) 干渉縞端数の読み取法の改善(画像処理の導入)
- (3) 各種補正精度の向上
- (4) 試料の加工精度(屈折率分布、平面度、平行度)の向上

5. ま と め

光波干渉法を用い、試料を透過した光と周囲の空気中を通った光の位相差から、光学ガラスの絶対屈折率を測定する方法について実験を行い、従来よりも 1 衍高い 1×10^{-6} の精度での測定が可能であることがわかった。

さらに高い精度を得るためにの条件についても検討を加えた。

終わりに本研究を進めるにあたり、有益な助言と協力を賜った機械電子検査検定協会常勤顧問毛内健氏、(株)オハラ品質管理部測定課長増村明氏に深く感謝の意を表す。

文 献

- 1) A. J. Werner: "Method in high precision refractometry," Appl. Opt., 7 (1968) 837-843.
- 2) 大門昌彦、増村 明: "折返し反射光学系を用いた示差屈折計の開発と光学ガラスの屈折率精密測定", 光学, 18 (1989) 215-220.
- 3) B. Edlén: "The refractive index of air," Metrologia, 2 (1968) 71-80.
- 4) 桜井好正、清野昭一: "連続測定用ブロックゲージ干渉計", 精密機械, 31 (1965) 714-720.
- 5) 久保田広: 波動光学(岩波書店、東京、1975) pp. 126-128.
- 6) 久保田広: 波動光学(岩波書店、東京、1975) pp. 131-132.