

東京芝浦電気株式会社 総合研究所 金属セラミック研究所 岸井 貫

I. 緒言 ガラスを熔融加塩に浸すと、ガラス中からNa⁺イオンが溶出し、入れ替わりにK⁺イオンがガラス中へ進入する。K⁺イオンはNa⁺イオンより大きいので、ガラスの表面には数十kg/mm²程度の圧縮応力が表面に平行に発生する。その結果、ガラスの強度が数倍上昇する(イオン交換強化、または化学強化)。表面附近の応力とその分布は、ガラスの強度に直接に影響する。

強化ガラスの表面附近では、屈折率 n が内部より高い ($\Delta n = 6 \sim 10 \times 10^{-3}$) と同時に、光弾性的複屈折 ($\Delta n \approx 1.5 \times 10^{-3}$) も生じている(第1図)。光は屈折率効果によって表面層内に捕えられ、有限個の離散的なモードとして表面を伝播する。複屈折は、光の振動方向によるモードの立ちかたの差をおこす。これを利用すると表面応力を非破壊的に測定できると予想された。

II. モードの計算 一般には、マクスウェルの方程式を所与の屈折率分布のもとで解いて、モードの立ちかたが求められる。しかしこれでは応力との関係が見易くないので、波動光学的に考察した(第2図)。

屈折率は $0 < x < x_1$ で $n = n_0 - \alpha x$ と分布し、 $x > x_1$ では一定とする。光は表面とほぼ平行に進行すると見なすと、経路は曲率半径 $R \approx n_0/\alpha$ の弧のつながりである。第1図から計算すると $R \approx 10 \text{ mm}$ である。モードが立つための条件として、次のようなものを採る: G_1, F_1, G_2 を経て G_2 で全反射した後の光波は、 G_1 を経し G_1, J と進む仮想的な光の波面が G_1, H_1, G_2 を伝播した後に、 G_2, F_2 と進む光波と合致した時、両光波は同じ位相を示す。

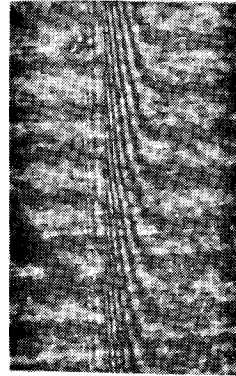
④が小さいと予想されるから、全反射に伴う位相の飛びが半波長に近い(後で確認する)とすると、 θ を変数として

$$2x \int_0^{\theta} n R d\theta - n_0 R \sin 2\theta \approx \frac{2}{3} n_0 R \theta^3$$

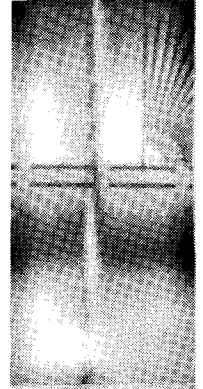
$$= (2N - 1) \frac{\lambda}{2} \quad \lambda: \text{光波長}, N = 1, 2, 3, \dots \quad \dots (1)$$

によって存在しうるモードが決まる。 N が大きいと光は深く進入する。光の経路の一部が深さ x を超えると多重全反射がなく、モードが存在しえない。すなわちモード数は有限である。 $R = 10 \text{ mm}$, $n_0 = 1.6$, $N = 1$ とすると、進入深さは約 5μ , $\theta_1 \approx 1.8^\circ$ であり、他のモードは $\theta_2 \approx \sqrt{3} \theta_1$, $\theta_3 \approx \sqrt{5} \theta_1$, ... となる。 θ_1 に対して全反射に伴う位相の飛び δ を計算すると、入射面に平行に振動する光に対して $\delta_{||} \approx 177.5^\circ$, 直角に振動する光に対して $\delta_{\perp} \approx 174^\circ$ となる。 $\delta_{||} - \delta_{\perp}$ は $1/100$ 波長相当以下、 $180^\circ - \delta$ は $1/50$ 波長相当以下で、いずれも十分小さい。

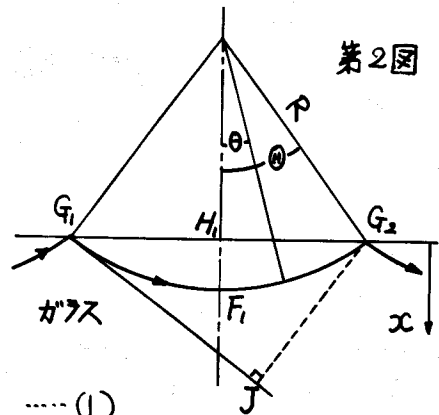
III. モードの観察 第3図の装置を使った。プリズム下では全反射が起きなくなり、モードを形成していた光が洩れて出る。洩れて出る方向は、第4図により $\sin \psi / \sin(90^\circ - \theta) = 1.55/1.75$,



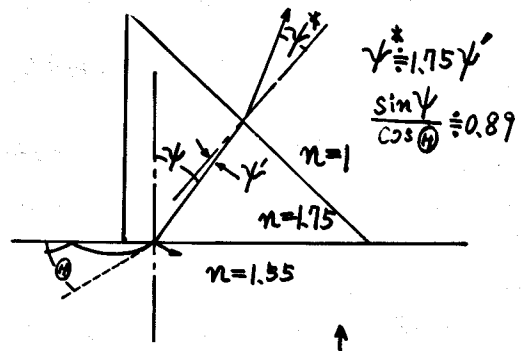
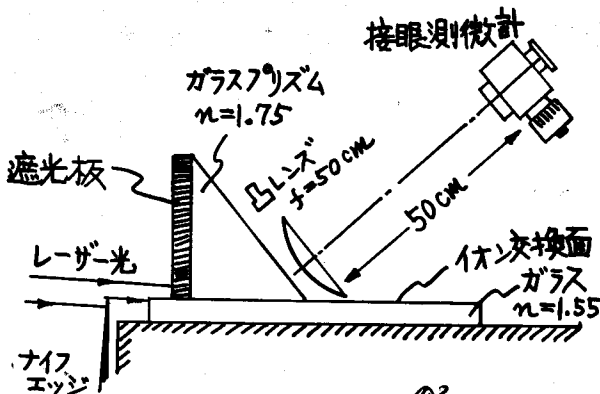
a) 干渉顕微鏡による屈折率分布の観察



b) 水晶光楔を用いた光弾性観察



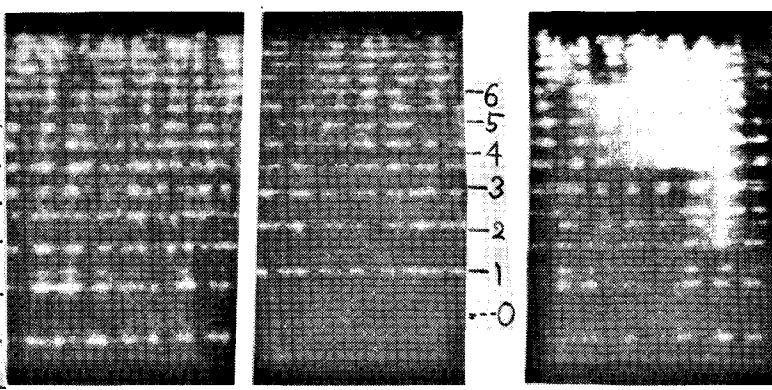
第2図



$$\sin \psi \doteq 0.886 \cos \theta \doteq 0.886 \left(1 - \frac{\theta^2}{2}\right)$$

したがって、モードによる $\sin \psi$ の変動部分は $0.443 \theta^2$ に $1/3, 3/3, 5/3, \dots$ を乗じたものであり、プリズムを

出たあとの $\sin \psi^*$ には、 $\sin \psi$ の変動が 1.75 倍されて表われる。これは接眼測微計内に輝線の列を作る(第5図)。輝線の位置が光の振動方向によって違うのは光弾性的複屈折のためと考えられる。



第5図
知印は
の振動方
向を示す

これらの輝線列が、 $M=1/3, 3/3, 5/3, \dots$ なる数列を示すとして、 $M=1, 2, 3, \dots$ に対応する位置を第5図に記した。 $M=0$ の位置が

容易に外挿で求められる。これは装置をアッペの屈折計と見なした場合の表面屈折率に対応する位置である。

IV. 結論 以上の考察が正しいとすると、次のように結論できる。

1. $M=0$ に対応する位置の差は表面応力による複屈折効果に対応する。
2. 輝線列の粗と密とは、 R の小と大、 α の大と小にそれぞれ対応する。
3. 輝線の数は存在するモードの数であり、 R または α が知られていれば、屈折率勾配が存在する層の厚さ(深さ)と関係がある。

この種の光伝播モードは、第3図の装置に入射用のプリズムを付け加えると、非破壊的に励振できる。したがって表面応力を非破壊的に測定することができる。しかし一方では、次の点に注意を要する。すなわち、モードの立ち方は屈折率分布の局所的(数 M 以下くらい)な異常によってはあまり影響されないし、また本報の解析はその前提である屈折率分布が著しく変わっていない場合にだけ成立するという点である。表面の薄い層での応力緩和(しばしば製品の強度不足を起す)や、表面付近での屈折率分布の平坦化などは、モードの観察からは察知し難い。