の回転角の差が最小偏角の2倍（2δ_0）となる。

3）測定

まず練習のためKF−4，KF−5，BaLF−5の3種の光学ガラスプリズムのうちから一つを選択し、頂角とF線，C線，d線に対する最小偏角を測定しn_F，n_C，n_d を求める。これ等の値を標準値と比較し、0．001程度の誤差で一致することを確認する。次に、自作のプリズムについて同様に頂角と3種の波長に対する最小偏角を測定してn_F，n_C，n_d を求めν_d を計算する。

7． 残留応力の測定

3．1．3で作製した未研磨の無色ガラス板の残留応力を歪検査器で測定する。

1） 測定原理および装置概要（図−9，図−4参照）

測定装置は主に光源，偏光子，検光子で構成されている。偏光子，検光子はともに偏光板で通常直交ニコルの状態で使用する。直交ニコルの状態で応力の働いているガラスをその間に置くと、U_1，U_2 の間に、$D=2\pi/\lambda\cdot C\cdot|\sigma_1-\sigma_2|\cdot L$ なる位相差が生じるため、入射光を$U=\sin\omega t$ で表すとU_1，U_2 それぞれの光波は

$U_1=A\cos\phi\sin\omega t$，$U_2=A\sin\phi\sin(\omega t-D)$ と書ける。（図−10参照）ここで、ϕは入射光の偏波面と応力の働いている方向（$O\sigma_2$）の成す角である。さらに、検光子を通過した後の合成波は

$U_1\sin\phi-U_2\cos\phi=A\sin2\phi\sin(D/2)\cos(\omega t-D/2)$となり、したがって合成波の強度Iは

$I=A^2\sin^2 2\phi\sin^2(D/2)$ で表される。ここで、$\phi=\pi/4$ とすると $I=A^2\sin^2(D/2)$であり、Iは$D=2i\pi$（i＝整数）で0、$D=(2i+1)\pi$で最大となる。したがって、応力が働いている場合応力の大きさ、即ち光路差D（＝R）に応じて明暗の縞が繰り返し現われこのときの縞の次数を読めば主応力差$|\sigma_1-\sigma_2|$が求められる。さらに、$\phi=\pi/4$のときに縞の明るい部分の明るさが最大となるので、誤差の少ない応力測定を行うには、主応力の方向を$\phi=\pi/4$の角度に設定する必要がある。

また、位相差Dは光の波長λに依存するので白色光を照射した場合、応力の大きさに応じて特定の波長の光に対して$I=0$の条件が成り立つことになる。これは特定の波長の光が吸収されたのと同じ効果となるので、検光子を通過してくる光は応力の大きさに応じて色が変化する。この色の変化を効果的に利用したものが鋭敏色板を用いた応力測定で、通常のガラス製品の残留応力測定に広

く利用されている。

（鋭敏色板法）

一般に光路差が約５６０ｎｍの鋭敏色板が用いられており、この場合応力のない所が赤紫色で光路差がわずかに増すと青色へ、またわずかに減少すると黄色へと鋭敏に変化する。実験に用いる装置では鋭敏色板と歪標準器を使って光路差を測定する。即ち歪標準器を回して標準器の色を応力を測定したい場所の色に合わせ、そのときの標準器の目盛を読み、その値を１３倍するとｎｍ単位での光路差が直接求められる。

（セナルモン法）（図－１１参照）

セナルモン法の光学系統図を図－１１に示す。偏光子，検光子は直交状態にする。鋭敏色板は取り除き検光子の前に１／４λ板を入れかつ１／４λ板を回して視野全体が最も暗くなるようにする。（１／４λ板は光の波長の１／４だけの複屈折を有するもので、通過した光の一方が他方より$\pi/2=90^\circ$だけ位相がずれる）したがって、視野が最も暗くなるように配置するところから、１／４λ板の２つの主軸は偏光子，検光子の主軸にそれぞれ平行となる。この光路に複屈折を示す試料を置いたときの光波を解析すると次のようになる。

入射波を　$A_1=A\sin\omega t$　とする。この方法では試料の測定部分が最も明るくなるような角度に置く。従って、試料の応力主軸は$\phi=\pi/4$、即ち偏光子の主軸に対して４５°傾いた状態に置くことになる。よって試料透過後の光波　A_2，A_3 は

$A_2=A/\sqrt{2}\cdot\sin(\omega t+\delta)$，$A_3=A/\sqrt{2}\cdot\sin\omega t$　となる。

ここで、δは試料で生じた位相差（$\delta=D$）である。A_2，A_3 が１／４λ板に入射するとA_2，A_3 各々がA_4，A_5 ２つの成分に分解されかつ合成されるので、

$A_4=1/\sqrt{2}\cdot A_2-1/\sqrt{2}\cdot A_3=A\sin(\delta/2)\cos(\omega t+\delta/2)$，　$A_5=1/\sqrt{2}\cdot A_2+1/\sqrt{2}\cdot A_3=A\cos(\delta/2)\cdot\sin(\omega t+\delta/2)$　となる。また、１／４λ板通過後　A_4とA_5に$\pi/2$だけの位相差が生じるので通過後の光波　A_6，A_7 は

$$A_6=A\sin(\delta/2)\cos(\omega t+\delta/2+\pi/2)$$
$$=-A\sin(\delta/2)\sin(\omega t+\delta/2)$$
$$A_7=A\cos(\delta/2)\sin(\omega t+\delta/2)$$

と書ける。

A_6，A_7 には位相差がないためA_6，A_7 を合成した光波A_8 は１つの平面偏光　$A_8=A\sin(\omega t+\delta/2)$　となり、その偏波面は偏光子の主軸に対して$\delta/2$だけ傾いたものとなる。従って、検光子を回転させて試料の測定したい部分を最も暗くするような角度は検光子の主軸とA_8 が直交するとき

であり、その回転角はδ／２に等しい。このときの回転角をβとすれば試料で生じた光路差Ｒを位相角に換算して、

$\beta=(\delta/2)=1/2\cdot(2\pi/\lambda)\cdot R=\pi R/\lambda \quad \therefore R=\lambda\beta/\pi$

この装置では１／４λ板がλ＝５２０ｎｍに対して設計されているので

$R=520\cdot\beta/\pi$　（ｎｍ）、角度βを度で測定すれば

$R=520\beta/180$　となる。

測定では、直交ニコルの状態で鋭敏色板を除き１／４λ板（Ｉ）を光路に入れかつ回転して暗視野となる角度に固定する。次に、試料を置き検光子を回して測定する部分が最も暗くなるようにする。このときの回転角度βを読みとり光路差Ｒを計算する。光弾性定数の測定では試料の応力主軸が$\phi=\pi/4$となるようになっているが、これ以外の試料では試料を置くときに、測定部分が最も明るくなるように置く。

２）　測定

ａ）　光弾性定数の測定

３．１．５で作製したガラス棒を用いて光弾性定数を測定する。ガラス棒を図－１２のように２本のステンレス製丸棒に渡し、その中央に重りＷをつるした丸棒をのせ、Ｘ点での光路差Ｒｘを鋭敏色板法およびセナルモン法で測定する。図のように荷重Ｗを掛けたときＸ点には最大の引張り応力Ｆｍが働く。このＦｍは　$Fm=3Wl/2ab^2$ で与えられ、従って、ガラスの光弾性定数Ｃは　$Rx=C\cdot Fm\cdot a$　なる関係から求められる。Ｗは５０～５００ｇ位の間の適当な２点を選ぶ。散弾を所定の重さ秤り取り荷重とする。このとき、散弾の入れもの、針金、荷重用の丸棒の重さも含めること。

ｂ）　試料ガラスの残留応力測定

未研磨の無色ガラスを歪測定器の光路中に置き、応力が最大の所を捜して鋭敏色板法およびセナルモン法で光路差を測定する。最大応力の働いている場所は、セナルモン法で検光子を回転して暗線が集まる所であるが、左右の回転に対してそれぞれ１箇所、場合によってはそれ以上ある。（引張りと圧縮に対応するが、左右どちらが引張り応力に対応するかは、これだけではわからない）セナルモン法で検光子を回転して測定箇所の目安をつけ、検光子を０度にもどしてその部分が最も明るくなるように試料を置き、鋭敏色板法とセナルモン法で光路差を測定する。測定した部分の厚みをノギスやマイクロメータで測り、ａ）より求めた光弾性定数を用いて残留応力を計算する。試料ガラスのだいたいの形をスケッチし、測定した場所と応力値を記録しておく。

8．　表面応力の測定

フロート板ガラス、風冷強化ガラス、化学強化ガラスの表面応力を測定する。

1）　装置概要および測定原理

測定には表面応力計を用いる。表面応力計は（図－１３参照）主に、Ｈｅ－Ｎｅレーザー，第１，第２反射プリズム，測定プリズム（入射プリズムと出射プリズムを遮光板をはさんで接合したもの），および偏光板のついた望遠鏡より構成されている。第２反射プリズムは本体右側のハンドルを回すことにより角度が変えられるようになっている。光源のＨｅ－Ｎｅレーザーは直線偏光しており、偏波面は入射面に対して４５°に傾くように調整されている。
表面応力の測定はガラス表面に入射プリズム（ガラス試料より屈折率が高い，本装置では入射，出射プリズムとも屈折率は１．７３）を通して臨界角（ψ_0）でレーザー光を入射し、表面伝播光を励起して行う。（図－１４参照）表面に光軸と直交する方向（光の進行方向と直交）に応力が存在する場合は、その応力によって複屈折が生じる。即ち、ガラス表面内の光軸と直交する方向（ｐ方向とする，応力軸）と、これに直交する方向（ｓ方向とする，ガラス面に垂直）の光波間に光路差が生じる。この光路差を測定すれば表面応力が求められるのであるが、表面応力測定の場合光の通過距離Ｌが不明であるので、光路差ではなく屈折率差を求める。複屈折とは１つの物体が２つ以上の屈折率を有することを意味するもので、光路差は屈折率差により生じる。また、光学での光路長は（屈折率）ｘ（幾何学的距離）で与えられる。いま、ｐ方向の屈折率をn_1　ｓ方向の屈折率をn_2とすると

$$R = |n_1 L - n_2 L| = L|n_1 - n_2| = L\Delta n = FCL$$

従って、応力Ｆは　$F = \Delta n / C$　で計算される。但し、このときの光弾性定数Ｃは（ｎｍ／ｃｍ）を10^{-7}と読みかえた値を用いる。また、Ｆは２つの軸間の最大応力の差であり、ｓ方向には応力が存在しないので表面の光軸と直交するｐ方向の応力が求められる。屈折率差Δｎは表面伝播光の出射角度の違いを利用して求められる。（図－１５参照）出射プリズムにより表面伝播光を取り出すとき、ｐ方向、ｓ方向に偏波面を持つ光はそれぞれn_1，n_2の異なる屈折率の媒体から出射することになるので、その出射臨界角も異なる。即ち、n_1，n_2に応じてその出射角をそれぞれψ_{01}，ψ_{02}とすると

$\sin\psi_{01} = n_1 / N$　，　$\sin\psi_{02} = n_2 / N$　である。（Ｎ：プリズムの屈折率）これらの光は望遠鏡の焦点面にスポットや縞状に結像するわけであるが、その結像位置（光軸よりの距離）は$\sin\psi_{01}$，$\sin\psi_{02}$に比例するため、この結像位置の差は$\Delta n = |n_1 - n_2|$に比例することに

なる。望遠鏡に付属している偏光板を９０゜回すことによりｐ方向，ｓ方向に振動面を持つ光の像をそれぞれ独立に観察することができ、回転前後の結像位置の差から屈折率差が測定できる。また、結像位置のずれと屈折率差の関係は、予め屈折率差が既知の干渉縞を用いて較正する。本装置の場合は、視野内スケールの１ｍｍ（大きい目盛）が屈折率差　０．０００８０　に対応する。従って、偏光板の９０゜回転前後の結像位置の差（ｍｍ）に０．０００８０を掛けることによりΔｎを求めることができる。

２）　測定

本実験に用いるガラスはいずれも屈折率が内部より高い表面層のあるもので、表面伝播光はこの層中をguided wave として伝播する。望遠鏡で観察すると、暗視野中に光ウェーブガイド効果のモード数に対応する本数の輝線が現れる。表面に応力のあるものは偏光板の９０゜の回転前後でこの輝線が移動する。（図－１６参照）この移動距離が複屈折の大きさに対応する。

測定手順は以下に示すとうりである。

ａ）試料ガラス板の上に屈折計を置く。大きいガラス板の場合はガラス板の上に置いて良い。

ｂ）試料ガラス板にヨウ化メチレン（CH_2I_2）を一滴たらし、この上に測定プリズムを置く。ヨウ化メチレンは光の入射，出射効率を上げるために用いる。プリズムを置く位置は、望遠鏡の先端と第２反射プリズムの中間位いの所が良い。

ｃ）本体右側のハンドルにより第２反射プリズムを回して入射角を調節し、臨界角で光が試料表面に入るようにする。臨界角で入射した場合、ガラス表面を光が走るので、ガラス試料の端を見ているとレーザースポットが表面近くにくることからわかる。

ｄ）望遠鏡の支持高さを調節ネジを回して変え、視野内に図－１６のような像が見えるところを捜す。プリズムの前後位置やネジレなどで見えないことがあるので、見つからない場合はプリズムの位置も調整する。輝線が見つかったら右側のハンドルを微調して輝線が明瞭に見えるようにする。

ｅ）望遠鏡付属の偏光板を回して輝線の移動量を読む。このとき最下方の輝線がより表面に近いモード光に対応するので、最下方の輝線の移動量を読む。

ｆ）ｅ）で読みとった移動量よりΔｎを計算し、さらに応力値を求める。光弾性定数には全て　$2.6 \times 10^{-7} (kg/cm^2)^{-1}$　を用いる。
但し、化学強化ガラスについては、表面に一番近いモードが観測できないため、視野内最下方の２本の輝線Ａ，ＢおよびＡ´，Ｂ´の位置を読みとり、ＡＢ間，Ａ´Ｂ´間の距離の０．９倍に相当する長さをそれぞれＡ，

A′の下方にとり、その位置をY，Y′としてY，Y′の移動量（計算値）より表面の複屈折を決定する。（図－17参照）

9．　レポート

実験結果は測定項目ごとにグラフを用いてわかり易くまとめること。また、以下の項目について考えて報告せよ。

1）　分光透過率の測定

a）空気を参照にした透過率測定の結果を反射率R_λを用いて反射補正してみよ。R_λの計算にはガラスの屈折率と空気の屈折率が必要である。空気の屈折率は1．0とせよ。また、任意の波長λでのガラスの屈折率n（λ）は、屈折率測定から得られたn_F，n_C，n_dの値をもとに、分散式を $n(\lambda)=a+b\lambda+c\lambda^2$ と仮定して係数a，b，cを求めn（λ）を計算せよ。

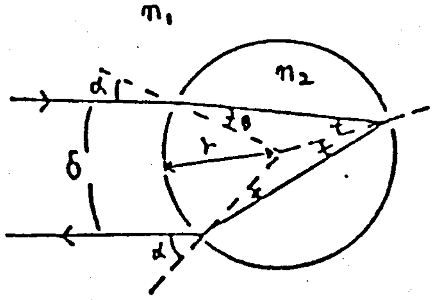
b）4つの反射補正法について勉強したわけであるが、自分の実験結果をもとにしてそれぞれの方法の利点，欠点を簡単にまとめてみよ。

2）　反射率の測定

5），6）式を用いて反射率を計算し実測の反射率と比較してみよ。なお、スライドガラスの屈折率は1．52とし、各自のガラスの屈折率は1）－a）の分散式よりλ＝633nmとして求めよ。但し、スライドガラスでは裏面での反射も考慮すること。また、このときガラス中での光吸収および光波の干渉は無視して良い。

3）　屈折率と分散の測定

三角形プリズムと同様に右図のような円盤でも、偏角δを測定しこれが最小になる時を利用して円盤の屈折率n_2が求められる。この時のn_2の計算式を導いてみよ。



4）　残留応力の測定

応力軸に対して45°の角度で直線偏光の光を入射した場合、光路差（U_1とU_2の間の）が1波長となるまでの間で、光の偏波状態（直線偏光，円偏光，楕円偏光）がどのように変化して行くか考えてみよ。

5）　表面応力の測定

風冷強化ガラスおよび化学強化ガラスの作製法とその特徴を簡単にまとめてみよ。

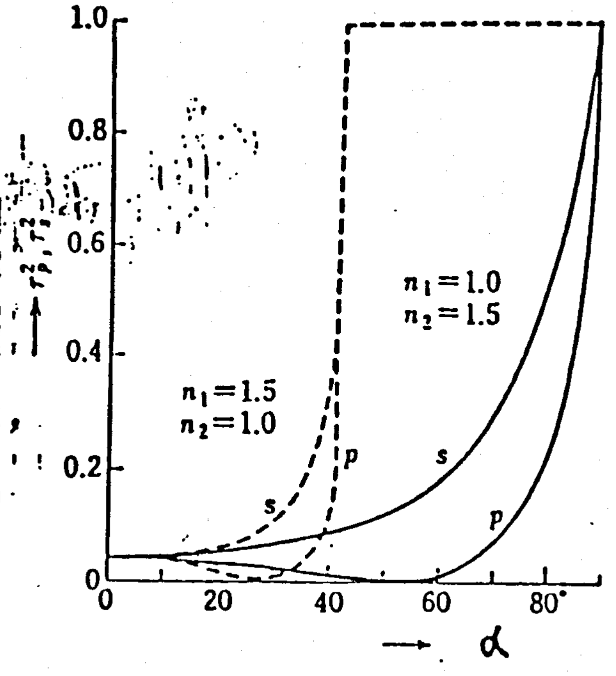


図-3 反射率の計算値

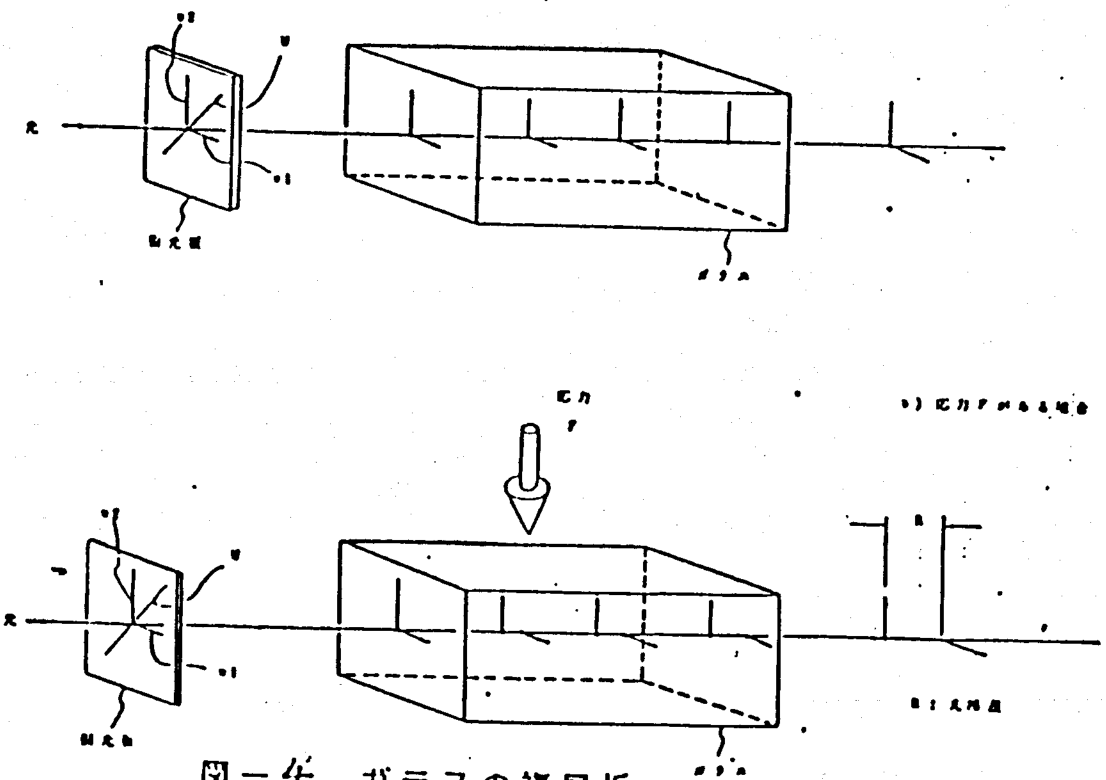
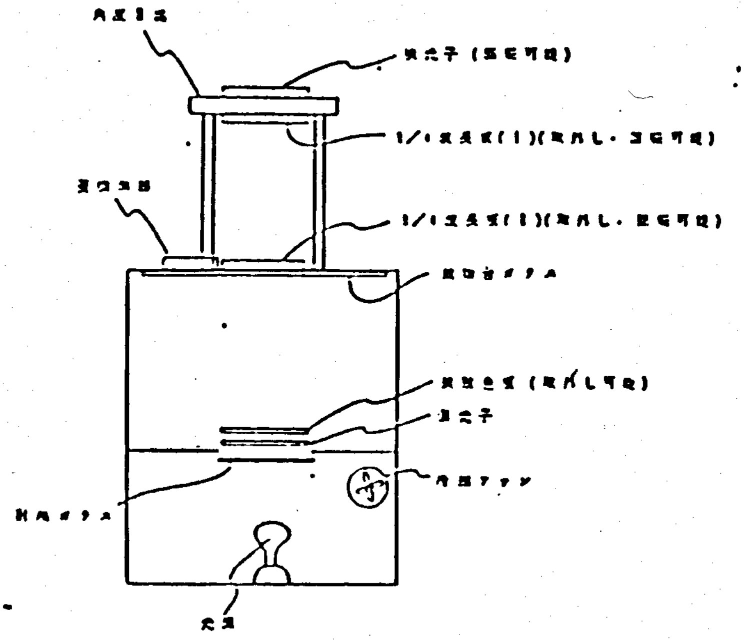
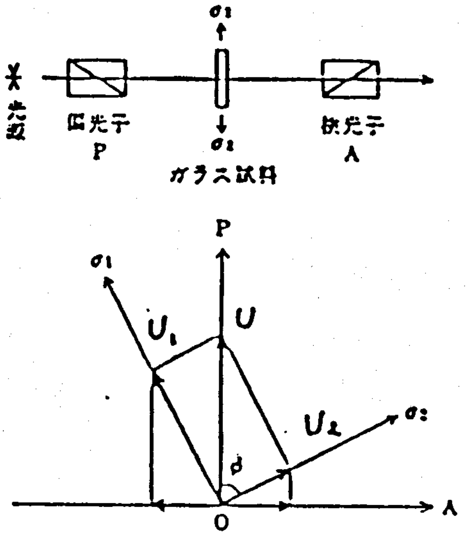


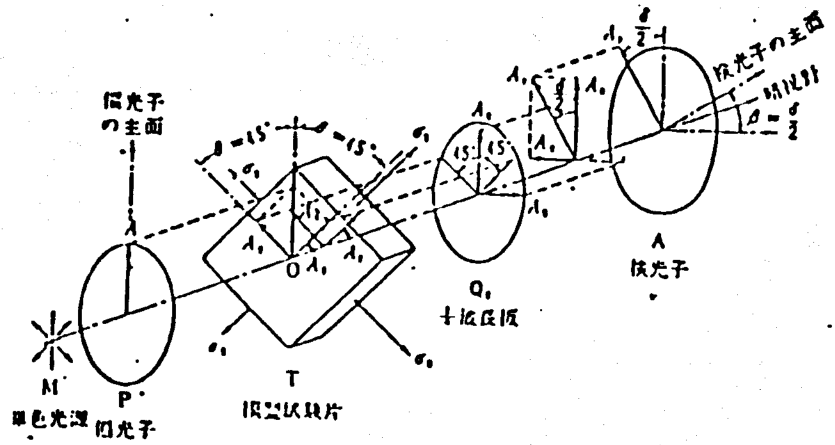
図-4 ガラスの複屈折



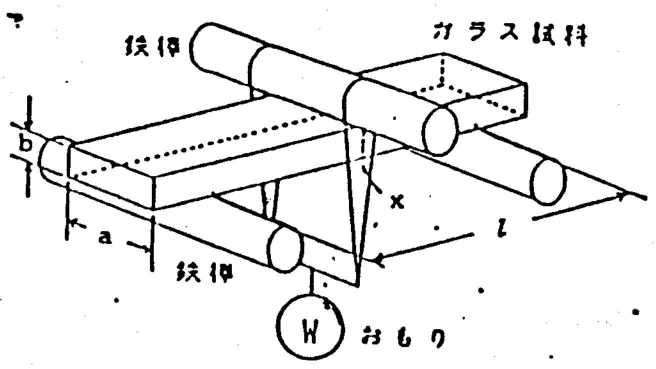


図－10

図－9　歪測定器の模式図



図－11 セナルモン法光学系統図



図－12　光弾性測定

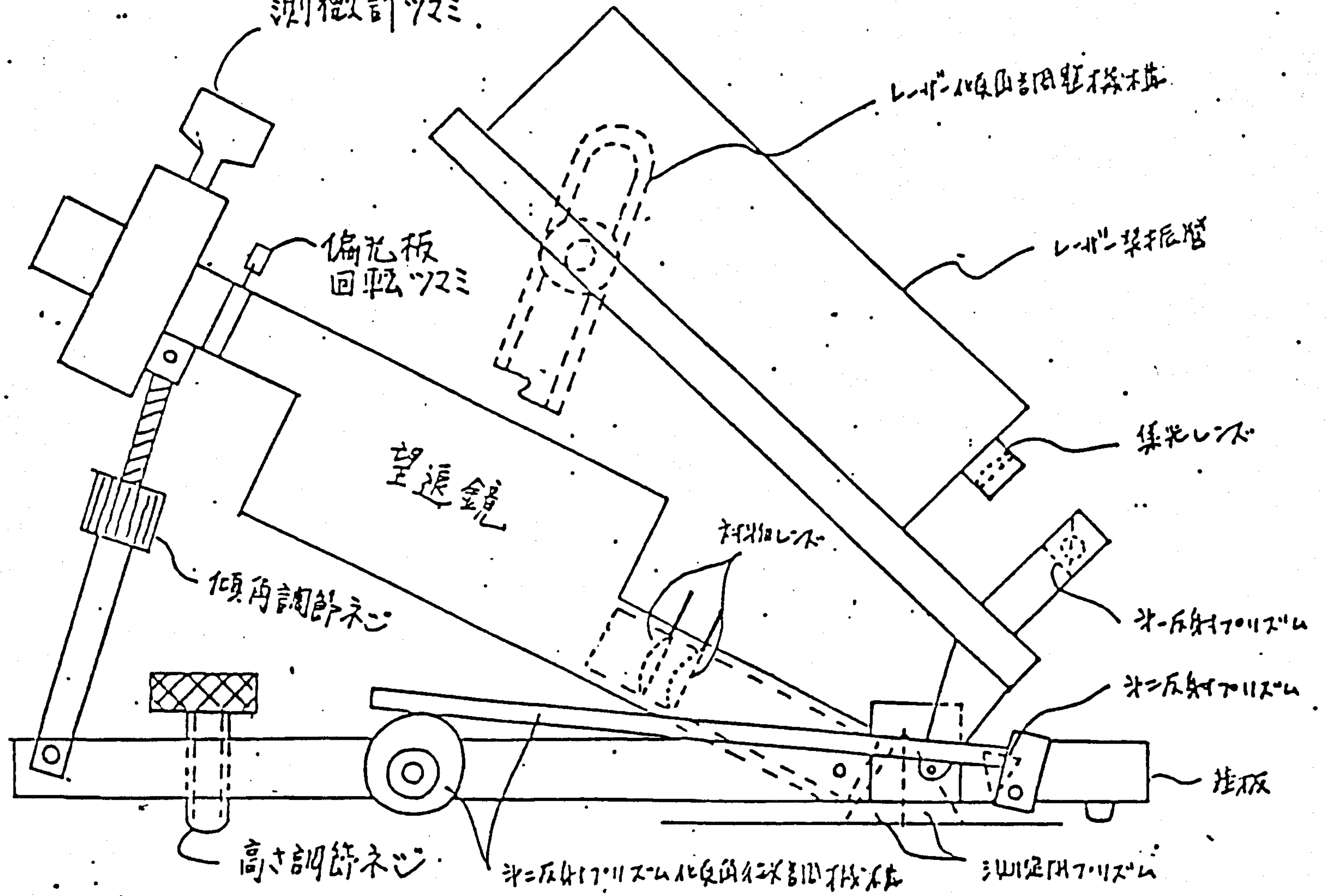


図-13　表面応力計の模式図

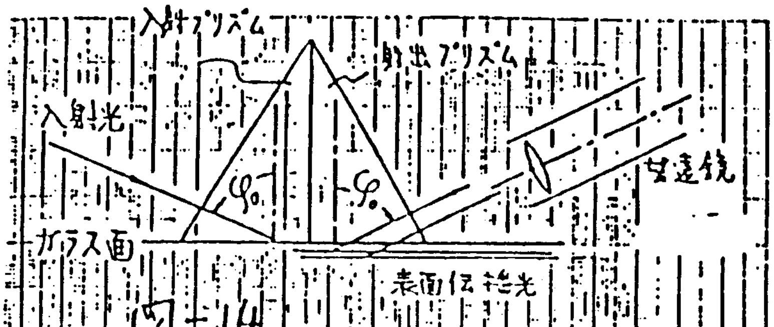


図-14

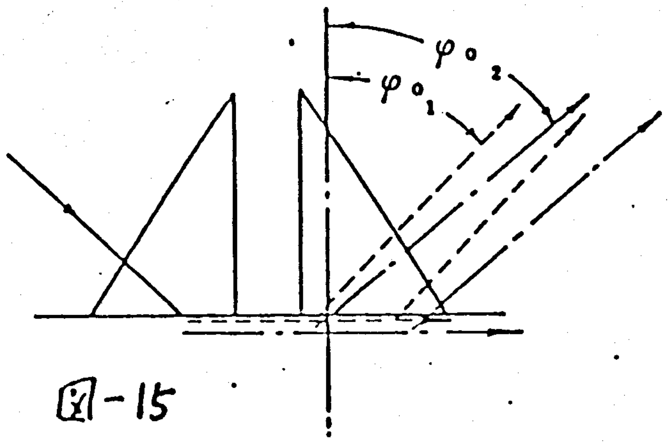


図-15

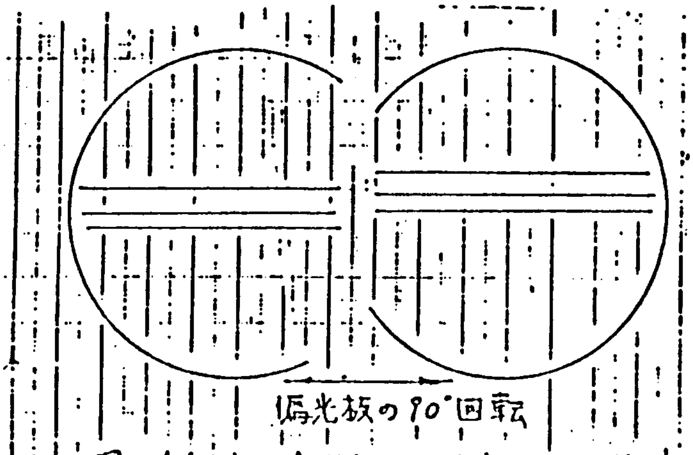


図-16 風冷強化フロートガラスの干渉縞の一例

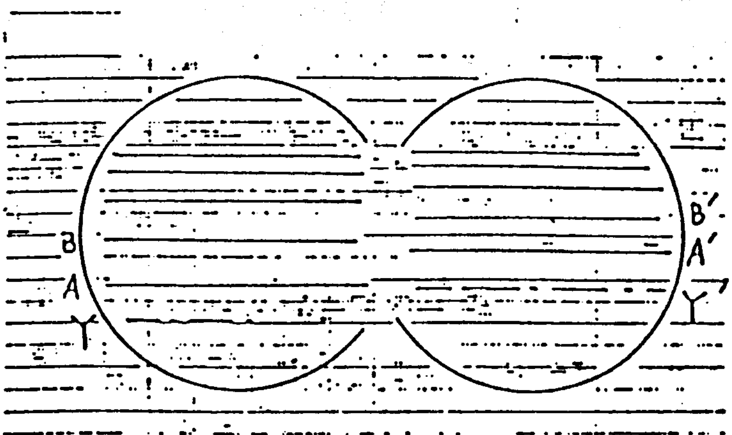


図-17 化学強化ガラスの干渉縞の一例