

歪検査器の利用技術

東芝総合研究所兼東芝硝子株式会社 岸 井 貫

I. 歪 検 査

ガラス製品の製造工程では歪の検査が大切である。歪が残ると遅延破損の原因になり、また機械的・熱的な衝撃に弱い。

歪の検出・測定のために多くの歪検査器が考案され使われている。これらは光弾性装置である。

光弾性測定法には多種類あり、歪検査器はそれらからいくつかを選んで採用し、それぞれの特徴を出している。従って測定法や測定の前提条件を理解し、正しく使用することが必要である。

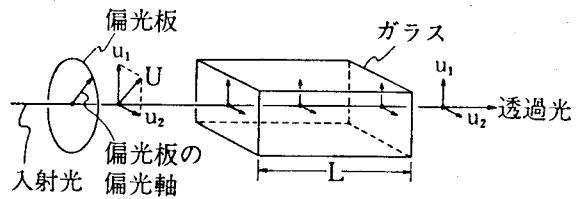
II. 歪と光路差

歪とはガラス体の内部に応力が存在し働いている状態であり、歪の検査とは応力の検出・測定のことである。応力は光弾性装置内での光路差で検出される。光路差は応力により発生する(第1図)。

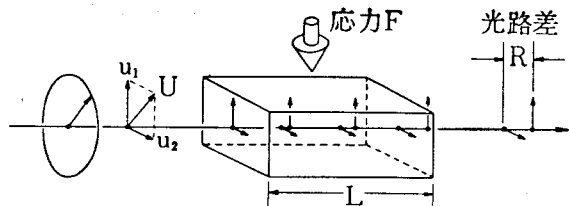
入射光は偏光板によってその偏光軸方向に振動する直線偏光 U になる。 U は2つの互に直角な方向に振動する成分 $u_1 \cdot u_2$ の合成とみなされる。

応力がない場合(第1図a)には、 u_1 と u_2 はガラス中を同じ速さで通過する。応力 F が働く場合(第1図b)には、ガラス中での u_1 と u_2 との速度が違い、通過後には一方が他方より距離 R だけ遅れる。 R を光路差と呼ぶ。

R は応力 F とガラス中での光の通過距離 L とに比例するので、比例常数を C とすると



a) 応力がない場合 $R=0$



b) 応力 F がある場合 $R=CFL$

第1図 ガラス中を直線偏光が通る時の光路差 R の発生

U : 直線偏光, u_1, u_2 : 直線偏光 U の2つの成分, C : ガラスの光弾性常数

$$R = CFL$$

である。 C はガラスによって決まるからガラスの光弾性常数という。その代表値を第1表に掲げる。

計算例

$$F = 1 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2} = 100 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$L = 1.0 \text{ mm} = 0.1 \text{ cm}$$

$$C = 2.5 (\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1}) / (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}) \text{ の時,}$$

$$R = 2.5 \times 100 \times 0.1$$

$$\times (\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1}) \cdot (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{cm} \\ = 25 \text{ nm}$$

この逆の過程で光路差を測って応力を計算することは当然である。

通常のガラスでは、電場の振動方向が圧縮応力に平行である成分波の方がそれに直角な方向

第1表 ガラスの光弾性常数の代表値単位
(nm/cm)/(kg/cm²)

ソーダ石灰ガラス	2.4
鉛ガラス (PbO 20%)	2.6
鉛ガラス (PbO 30%)	2.9
板ガラス	2.5~2.6
硼硅酸ガラス	3.6~3.9
石英ガラス	3.5
光学ガラス	
硼硅クラウン	2.7
軽フリント	3.2
重フリント	2.7
超重フリント	1.4
軽バリウムクラウン	2.8
重バリウムクラウン	2.2

に振動する成分波より速い。

光弾性測定とは多くの場合に光路差 R の測定に帰着する。ガラス製品の R は合成樹脂を使った模型実験の場合に比べ 1~2 桁小さいという特殊性がある。

光路差 R の測定は、偏光板・四分の一波長板・鋭敏色板・各種の補整器などを適宜に組み合わせで行なわれる。

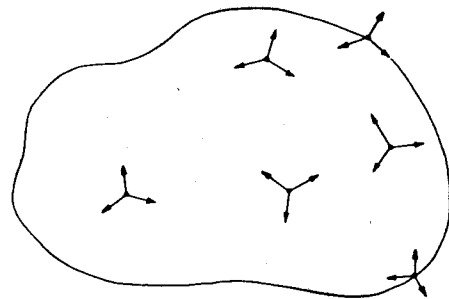
III. 応力の分布状態

物体中の応力の分布にはいくつかの一般的法則がある。これらを知ることは応力の解析のために必要である。

3.1 主応力と主応力軸

応力にはいろいろの方向、いろいろの働き方をする圧縮応力・引張り応力・ずり応力・ねじり応力などがあり、これらが同時に同一の点に働きうる。しかし一見どんなに複雑な応力の組み合わせでも、その働き点において適当な方向の3つの直交座標軸を撰ぶと、これらの方向に働く単純圧縮応力・単純引張り応力の組み合わせに還元されてしまう。これらの応力を主応力、直交座標の軸を主応力軸と呼ぶ(第2図)。

応力がない所では主応力軸方向は不定である。



第2図 物体内の各点において、3つの互に直交する主応力軸があることを示す。自由表面では軸のうちの1つは表面に垂直である。

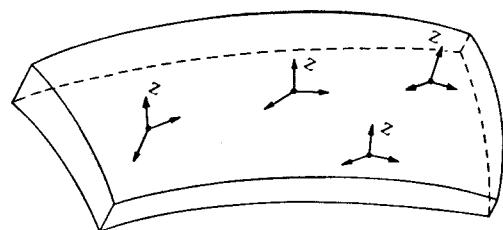
3.2 表面での応力分布

大気圧を無視すれば何物にも接触していない物体表面は自由表面であり、従って表面に垂直な方向の応力は零であり、応力は表面に平行な方向にしか存在しえない。これに対応して3つの主応力軸のうちの1つは表面に垂直に立ち、他の2つは表面に平行な方向に横たわる(第3図)。

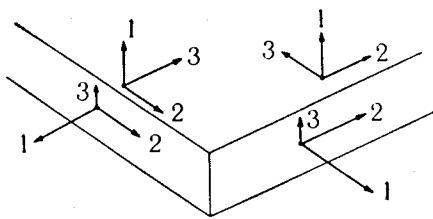
表面が静止した流体(ガス、高圧ガス、水、油、高圧液体、……)と接している場合にも、主応力軸の1つは面に垂直である。しかし表面はもはや自由表面でなく、面に垂直な方向の主応力は零でない。

3.3 板・壁・殻内の応力分布(第3図)

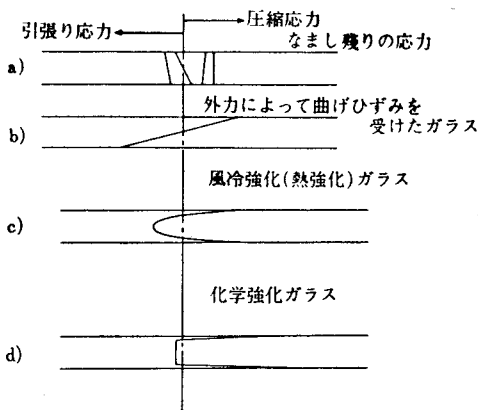
全体としての大きさに比べて厚さが薄い板状



第3図 板、壁などの表面での主応力軸そのうちの1つ(z)は表面に垂直、他の2つは表面に平行である。 z 軸方向の主応力は零である。



第4図 板、壁などの縁附近での主応力軸
1つは表面に垂直(1), 他の1つ(2)は広い面に平行, 他の1つ(3)は軸1, 2に垂直である。2軸方向の応力だけが大きくなりうる。



第5図 板、壁などの厚さ方向の応力分布
a) なまし残りにより存在する応力の分布の数例
b) 外力によって曲げひずみを受けたガラス
c) 風冷(熱的)強化ガラス
d) 化学強化ガラス

体の中では、内外両面での主応力の1つは表面に垂直だから、壁の厚みの中でも同じことが近似的に成り立つ。同じ理由で、内外面とも自由表面ならば壁内で表面に垂直な方向の主応力は零または零に近い。

板の縁の面は自由表面だから縁面に垂直な方向の応力は零であり(第4図)、同時に大きい表面に垂直な方向の応力も零に近い。従って応力は縁面と大きい表面との双方に平行なものだけが大きくなりうる。縁面付近でもこれと同じことが近似的に成り立つ。縁面付近に応力が残っている時は、ここでの主応力軸の1つは縁にほぼ平行である。

次に板・壁内での表面に平行な方向の応力分布について考えると、いろいろの場合がある

(第5図):

- ① 応力の大きさと主応力方向とが一樣,
- ② 応力の大きさが表面からの深さにより多少変わる,
- ③ 深さにより圧縮応力の部分と引張り応力の部分とがある。

ガラス製品・部品になまし不足のため残存するひずみは①または②に相当する。強化のため意図的に急冷されたものや外力により曲げひずみを受けたものは③に相当する。

①・②の場合には板表面に垂直に偏光を通して応力または応力の平均値を求めることができる。③の場合にはこの方法で得た応力値は実際の応力値よりはるかに小さくて意味がない。③の場合には表面に平行に偏光を通して測るような工夫が必要である。

本稿では以後 ① または ② の場合だけを扱おう。また偏光の経路に沿っては主応力軸方向が一定であるとする。この仮定は薄い板では成り立つが厚い板では成り立たないことがある。

3.4 軸対称形製品の応力

管、棒、長いバルブ、長い瓶のように長い対称軸を持つものは、主応力軸の1つは対称軸に平行である場合が比較的多い。このような場合には他の1つは軸に直角、残りの1つは円周方向に向く。急冷または強化品ではこのことは必ずしも成立たない。

IV. 合成(複合)応力の効果

第1図で説明したのは応力が1つの方向だけに働いている場合であった。実際には1点ごとに互に直交する主応力が3つまで同時に働かうる。

比較的簡単な場合として、1つの主応力軸は偏光の経路に平行、他の2つの主応力軸の方向は一定、という条件が満たされた応力分布を考える。これらの応力の効果は:

1. 偏光の経路に平行な応力は光路差を発生させないし、光弾性的には検出され得ない。

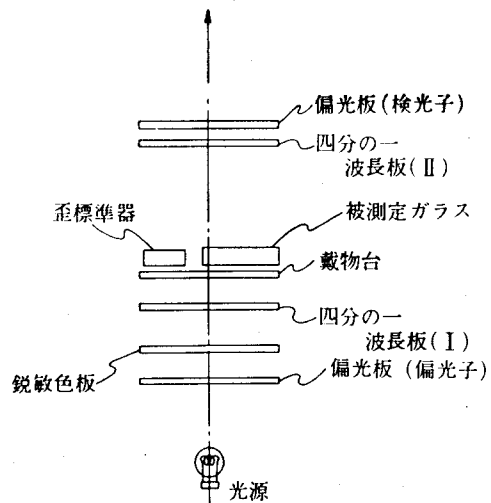
他の2つの方向の主応力に関しては

2. 2つの主応力がともに張力または圧縮力の時は、絶対値が大きい方の主応力の方向に絶対値の差だけの大きさの張力または圧縮力が働いているのと同様である。
3. 2つの主応力の一方が圧縮力で他方が張力の時は、絶対値の和だけの圧縮力が圧縮力の方向に働いているのと同様であり、また同時に絶対値の和だけの張力が張力の方向に働いているのと同様である。
4. 1つの主応力の効果は、それと直角の方向に働く同じ絶対値の反対の（圧縮力に対しては張力、張力に対しては圧縮力）応力の効果と同様である。
5. 上で「同様」と形容された2つの場合を区別することは光弾性技術では不可能である。区別するためには他の実験的証拠が必要である。他の実験的証拠としてⅢで述べたことが役に立つことがある。
6. 偏光の経路に沿い（主応力軸方向は一定のまま）応力の種類や絶対値が変化している場合には、透過後の全光路差は経路要素上で発生する光路差の代数的和（または積分）に相当する。
7. 前記2.～4.項で複合応力の合成効果を求めた時に応力零になる場合は、主応力軸方向は不定とみなされる。その例は、静水圧的な応力、2つの主応力が絶対値が等しくともに圧縮力またはともに張力である場合、などである。

V. 歪の測定

歪を定性的に判断するために歪検査器が使われている。歪検査器は原理的には光路差と主応力軸方向とが測定・観察される。しかし今までの使い方では主応力軸方向には注意が払われていない。光路差や応力を定量的に測定するためには主応力軸方向を決めることが前提になる。

第6図のような構造を持つ歪検査器を想定する。これに使われる光学素子は次のようなものである。



第6図 想定された歪検査器の光学素子の配置
多くの要素は必要に応じて取外し、挿入可能、および回転可能である。

光源 白色光源としては白熱電球または白色蛍光灯、単色光源としては水銀放電灯に緑色フィルタを組み合わせたもの、ナトリウム放電灯が実用される。

偏光板 自然光を直線偏光に変えるフィルターであり、2枚のうち光源側を偏光子、他を検光子と呼ぶ。偏光軸を持っており、偏光軸に平行に振動する光だけを通過させる。

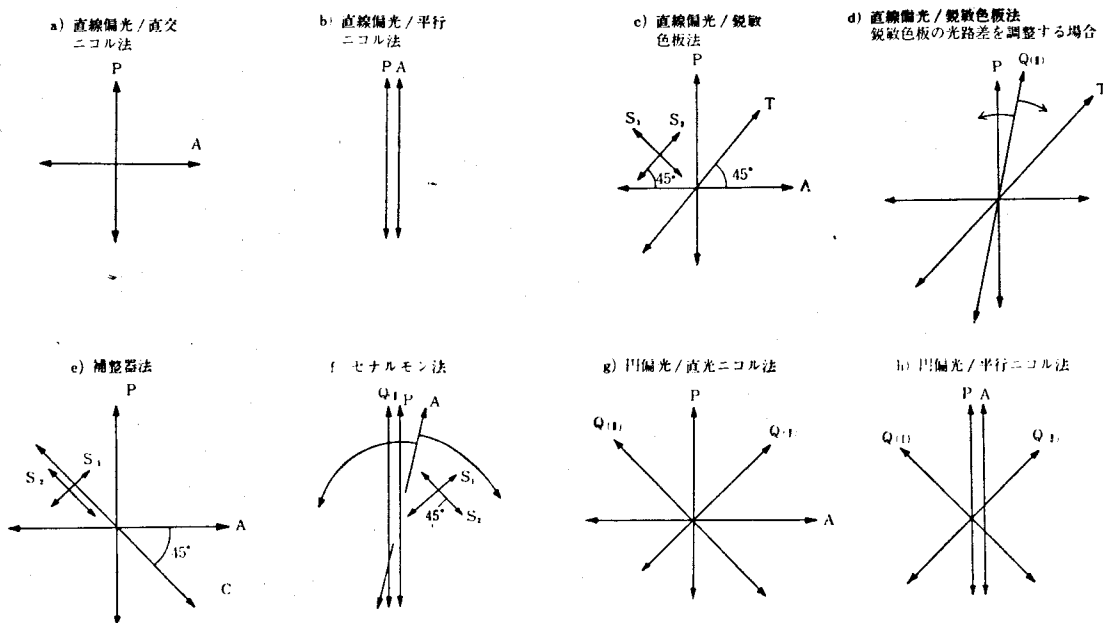
偏光子と検光子とを偏光軸が直交するように組み合わせると光を遮断する。この配置を直交ニコルと呼ぶ。偏光軸が互に平行の場合は直線偏光が透過し、平行ニコルと呼ばれる。「ニコル」は偏光を作るのに使われたニコルのプリズムに由来する。

偏光板の偏光軸は次のようにして決める。板ガラスにより明るい景色の反射像を作る。入射角、反射角は約 60° にする。眼の直前に偏光板を入れて回転し、反射像が最も暗くなる角度に止める。この時の偏光軸は入射面に平行（また同時に当然のことながら偏光板面にも平行）な方向に向いている。

鋭敏色板 2つの直交する光学的な軸を持っており、各軸に平行に振動する光波成分間に565nm前後の光路差を与える。外見的には透明板であるが、直交ニコル間に光学軸と偏光軸とが 45° で交わるように入れると、白色光源で

第2表 各種の光弾性測定法

		直線偏光法						円偏光法		
		直交ニコル法	平行ニコル法	鋭敏色法	鋭敏色一歪標準器法	補整器法	セナルモン補整器法	直交ニコル法	平行ニコル法	
観察の目的		主応力軸方向の分布(等傾線)の観察. 応力の大きさ分布の定性観察.		小さい応力の検出. 応力の大きさの定性観察.	比色による応力の定量.	応力の精密な定量.	応力の精密な定量.	応力の大きさ分布(等色線)の観察.		
光学素子の角度	偏光子	偏光子の偏光軸方向を 0° とする.								
	検光子	90°	0°	90°	90°	90°	回転	90°	0°	
	四分の一波長板(I)	な				し		45°	45°	
	四分の一波長板(II)	な				し		0°	-45° (四分の一波長板(I)と直交)	
	鋭敏色板	な	し	45°		な	し	な	し	
	補整器	な		し		45°	な	し	な	し
	試料の主応力軸	種々の角度で観察し総合する.			45°			任意		
光源		単色または白色		白色		単色または白色	単色または単色に近い色光	単色または白色		
着色ガラスへの適用		可	可	否	否	可	可	可	可	



第7図 光学素子の軸方向の組み合わせ

P: 偏光子の偏光軸, A: 検光子の偏光軸, T: 鋭敏色板の軸, S₁, S₂: 被測定ガラスの主応力軸, C: 補整器(バビネ・バビネーソレイユ・ベレクなど)の軸, Q: 四分の一波長板の軸

X' , Z' 軸の区別には、予じめ別の方法で X' , Z' 軸が判明している他の四分の一波長板、鋭敏色板が必要である。

VI. 各種の測定・観察法

第6図の歪検査器を使い第2表と第7図に従って光学素子を配置して、次のような測定法・観察法を実行できる。

6.1 直線偏光法

6.1.1 直交ニコル法 (第8図)

光路差が零の部分と主応力方向が不定の部分は暗く見える。

主応力軸が偏光子・検光子の偏光軸と直角・平行の部分は暗い。この性質から主応力軸方向の分布を知りうる。このような原因で暗く見える縞を等傾線という。

主応力軸が偏光子軸と約 45° をなす部分は、単色光源の時光路差が波長の整数倍の時暗い縞になり、白色光源の時には光路差 565nm 前後で赤と紫の組み合わせさせた鋭敏色、その倍数の部分で鮮かさが減った鋭敏色の縞になる。

等傾線の形は被験ガラスの角度を変えた時に変わる。この状況を観察・総合して主応力軸方向とその場所的分布を決め、光路差の定量測定に役立てる。

6.1.2 平行ニコル法 (第9図)

光路差が零の部分は明るい。

主応力軸が偏光子・検光子の偏光軸と直角・平行の部分は明るい。

主応力軸が偏光子軸と約 45° をなす部分は次のようになる：

- 単色光源の時は光路差が波長の半整数倍の部分が暗い縞になる。
- 白色光源の時は光路差 280nm 前後の部分が暗褐色の縞、その奇数倍の部分が薄暗い縞になる。

平行ニコル法の縞は直交ニコル法の縞の補間の役割をするから、両者の並用で光路差分布をさらに詳しく決めることができる。

6.1.3 鋭敏色板法

この方法は直交ニコル法に鋭敏色板を挿入したものに相当する。視野は赤紫の鋭敏色になっている。直交ニコル法で暗い縞に見える部分は鋭敏色のままで見える。

主応力軸が偏光軸と平行・直角でない部分は変色し、変色は両軸間の角度が 45° の時に最も顕著である。光路差の $0 \rightarrow 300\text{nm}$ の増加に伴ない色は、

鋭敏色 \rightarrow 赤藍色 \rightarrow シアン \rightarrow 空色 \rightarrow 淡緑 \rightarrow 淡黄緑 \rightarrow 白色、または

鋭敏色 \rightarrow 赤色 \rightarrow 赤褐色 \rightarrow 黄褐色 \rightarrow 淡黄 \rightarrow 白色の順序で変化する。このように色調で光路差の大小を判断できる。

光路差が 300nm を超えて増大する時は

白色 \rightarrow 紅色 \rightarrow 鮮かさが減じた鋭敏色 \rightarrow うすい空色 \rightarrow 白色、または

白色 \rightarrow 暗灰色 \rightarrow 黒色 \rightarrow 暗灰色 \rightarrow 白色 \rightarrow 鋭敏色と変わり、それ以上は光路差約 565nm の倍数ごとに鮮かさが減った鋭敏色が出現する。

鋭敏色を現わすために使われる鋭敏色板の光路差は 565nm 前後であるが、その値は歪検査器ごとに異なり、これに従って鋭敏色の色調も変わる。光路差が小さい程赤色が強まり、光路差が大きい程藍色が強まる。最適の色調は観察者の好みや各事業所の習慣があるため、一義的には決められない。

四分の一波長板を1枚追加挿入して(第7図 a) その軸方向を偏光子軸とほぼ平行にした上で角度を微調整すると、鋭敏色の光路差を $\pm 20\text{nm}$ くらいの範囲に変えられ観察者が最も好ましいと思う色調を撰ぶことができる。

鉋物顕微鏡には検板の一つとして鋭敏色検板が附属する。その光路差に 530nm 前後が撰ばれることがあり、赤味の強い鋭敏色を現わす。

6.1.4 鋭敏色一歪標準器法

鋭敏色法では、色と光路差の間の関係を一義的に決めることはできない。その理由は、鋭敏色の変色は $1 \sim 3\text{nm}$ の光路差を検出できるくらい敏感であるにもかかわらず、鋭敏色自体の光路差は歪検査器ごとに違い、その差異は 30nm ぐ

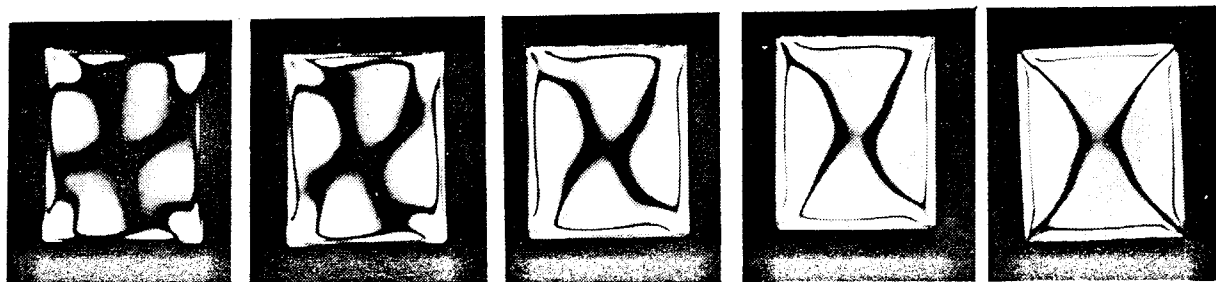
鮮やかな赤紫色（鋭敏色）を示す。

四分の一波長板 2つの直交する光学軸を持ち、各軸に平行に振動する光波成分間に、単色光源を使う場合は光波長の 1/4、白色光源を使う場合は 130~150nm の光路差を与える。外見的には透明板である。直交ニコル間に光学軸と偏光軸とが 45° で交わるように入れると、薄明るく見える。白色光源では曇り空のような印象を与える。

歪標準器と補整器については 6-1-4, 6-1

-5 で述べる。

鋭敏色板、四分の一波長板が鉱物顕微鏡の検板として使われている場合、2つの光学軸は X' , Z' で表わされる。これらの方向は、直交ニコル間に入れて光が透過しないような角度に置いた時に、偏光子、検光子の偏光軸の方向と一致するので容易に判明する。しかし X' , Z' 軸の区別は簡単ではないし、また光弾性では区別の必要はほとんどない。本稿では、VII章にその関連事項が出て来るだけである。



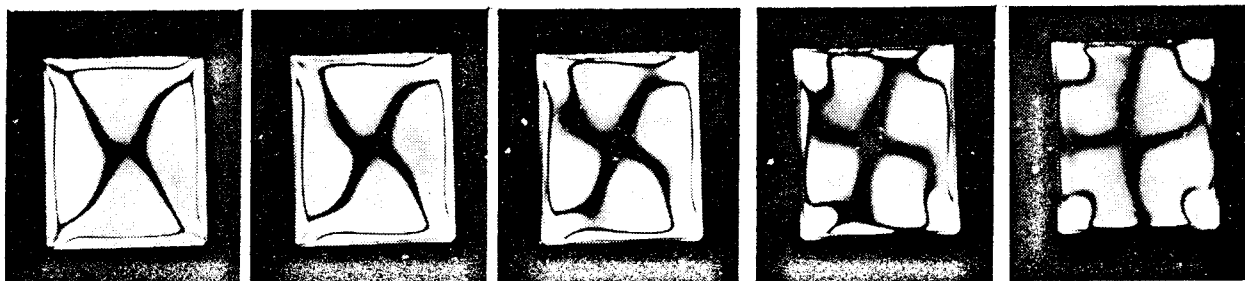
1. +

2. ×

3. ×

4. ×

5. ×



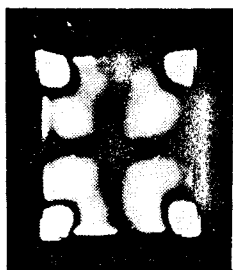
6. ×

7. ×

8. ×

9. ×

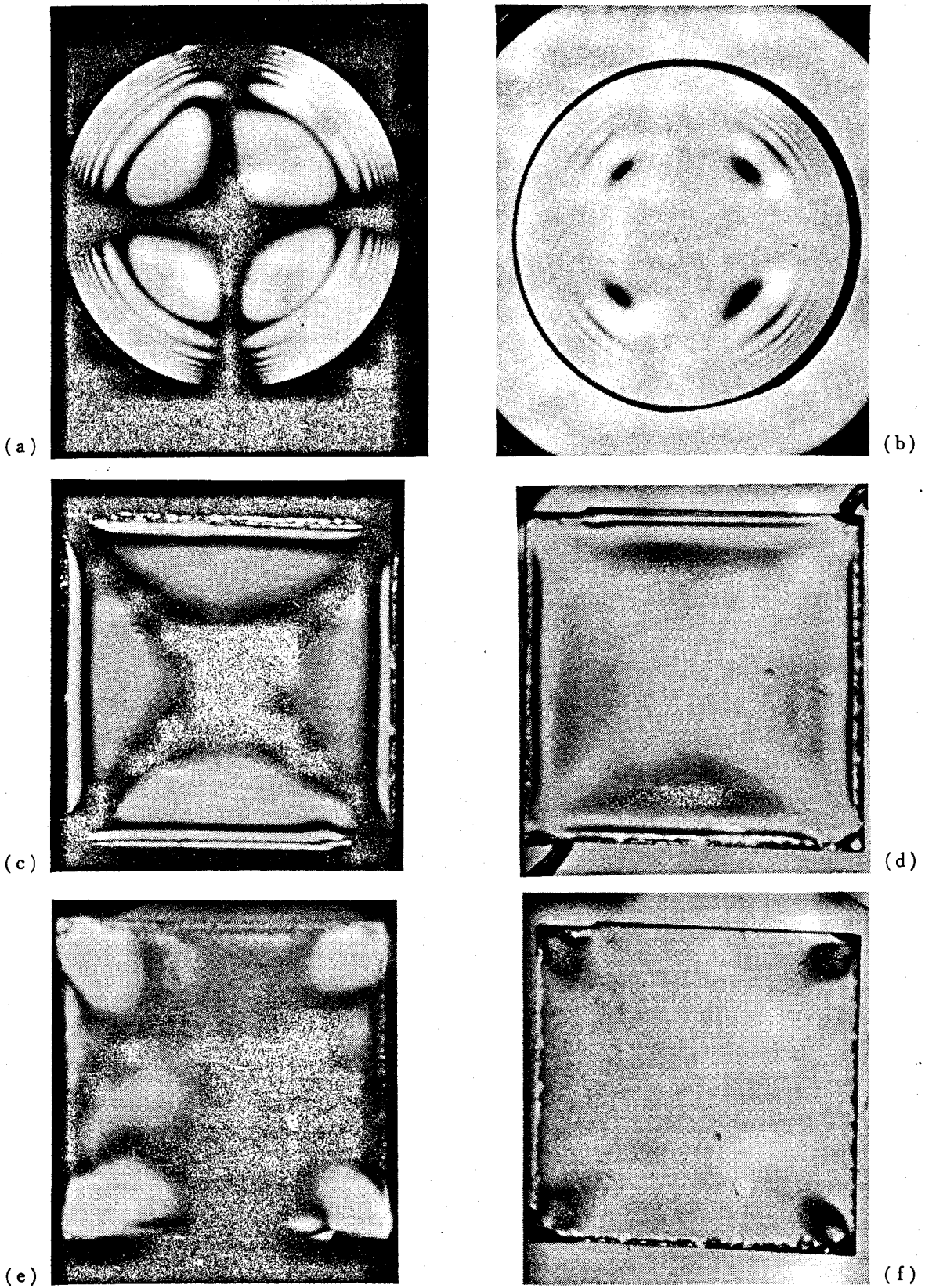
10. +



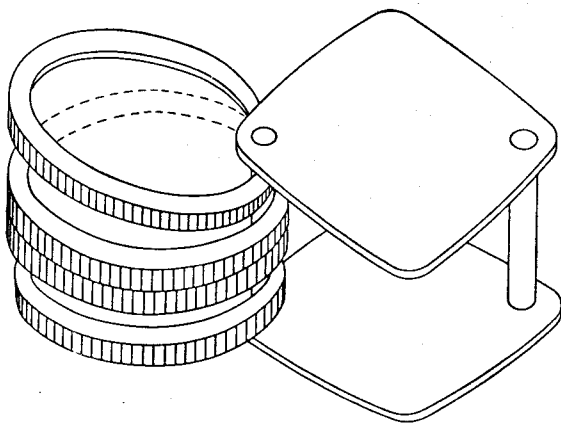
11. +

第8図 風冷で歪を入れた角形ガラスの直線偏光—直交ニコル法での観察。

1.→11.の順に偏光子・検光子軸が回転し、11.で 90° に達する。図の下の+または×印は軸の大よその方向を示す。この例では試料の中央部は主応力軸方向が不定である。中央を通る十字形・×字形の黒い縞が等傾線である。



第9図 風冷強化された円形ガラス (a, b), 角形ガラス (c~f) での直線偏光一直交ニコル法 (a, c, e) と平行ニコル法 (b, d, f) による観察
 a↔b, c↔d, e↔f の間で明暗が反転している. a) の十字形, b) の×字形の模様は等傾線である.



第10図 英国ガラス工業技術組合 (BGIRA) 型歪標準器 (概略スケッチ)

らに達しているからである。変色により光路差を定量的に測ろうとするには、鋭敏色法に基づく歪検査器に歪標準器を併用する必要がある。

歪標準器は、既知の光路差を持つかあるいは実現しうる装置をいう。各種のものが工夫されている。

A. 英国ガラス工業技術組合 (BGIRA) 型 (第10図)

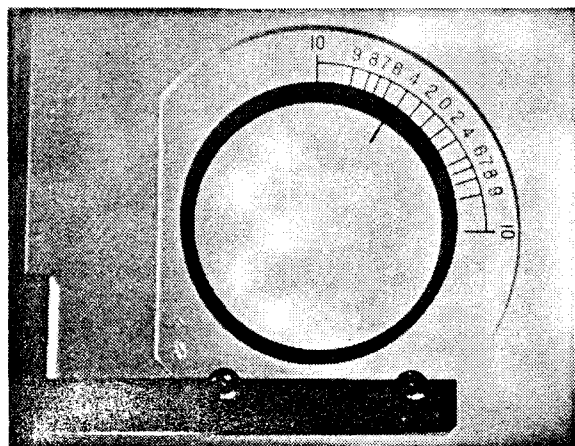
ガラス円板を数枚組み合わせたものである。各円板は円対称な歪分布を持ち、周辺に 22.8 nm の光路差を現出している。円板の重ね合わせで $22.8\text{nm} \times N$ ($N=1, 2, 3, 4, 5, \dots$) の光路差を実現できる。この標準器を被験ガラスと並べ、測定したい部分の変色と比較してその光路差を概測する。

測定したい部分の主応力軸を偏光軸と 45° の角度に置き、標準器の円板の最も変色の顕著な部分 (円周が偏光軸と 45° の角度をなす部分) と比較することが重要である。そうでないと誤りの結果を与える。

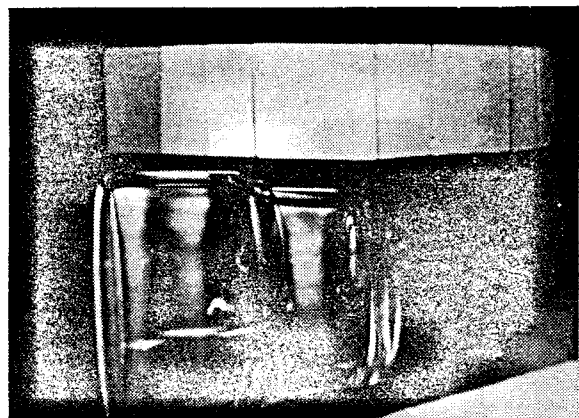
JIS-S 2305 では炭酸飲料用ガラス瓶の歪みを等級づけて表現するよう求めているが、等級の限界を約 22.8 nm の整数倍に決めている。

B. 回転円板型 (第11図)

歪検査器に固定された枠内で円板が回転する。枠には 0~10 の目盛があり、円板には倍数 (たとえば $\times 6.0\text{nm}$) が決められている。円板に刻まれた目盛線を目盛に合わせると、(目盛



第11図 回転円板型歪標準器



第12図 並列膜型歪標準器を風冷強化ガラスコップと並べて置いた状況

\times 倍数) が円板の現わす光路差になる。

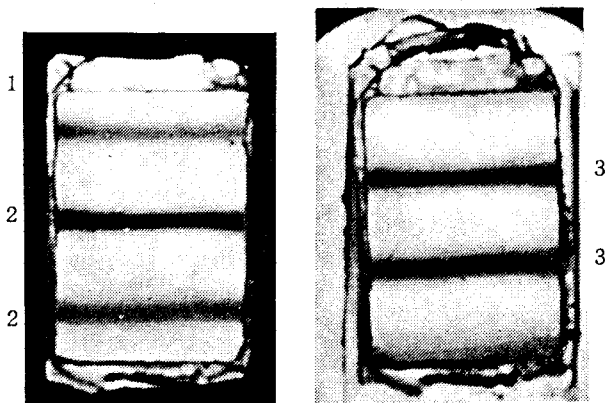
被験ガラスを歪検査器上に標準器と並べて置く。測りたい部分の主応力軸を偏光子軸と 45° の角度にする。円板を回転しその色調を測りたい部分の色調と合わせ、円板の指す目盛を読み、光路差を算出する。

C. 並列膜型 (第12図)

適宜の光路差 (たとえば 22.8 nm) 間隔で、その 0, 1, 2, ... 倍の光路差を持つ膜を並べたものである。各膜の光学軸方向は揃っている。被験ガラスの測りたい部分の主応力軸を偏光子軸と 45° の角度に置く。膜の光学軸も同じ角度にしてガラスと並べる。色調を比べ、膜の既知光路差と参照してガラスの光路差の概略を知り、あるいは等級づけする。

6.1.5 補整器法

補整器とは、任意の既知光路差を実現しうる装置を言う。従って回転円板型歪標準器も補整



第13図 水晶楔を a) 直交ニコル, b) 平行ニコル下で白色光源で観察した状況

1: 黒い縞, 2: 鋭敏色の縞, 3: 暗褐色の縞

器と言えるし、BGIRA 型、膜並列型歪標準器は飛び飛びの光路差だけを実現するという点を除けば、補整器に近い役割をする。補整器にはバビネ、バビネーソレイユ、セナルモン、ベレクなど多種のものがある。

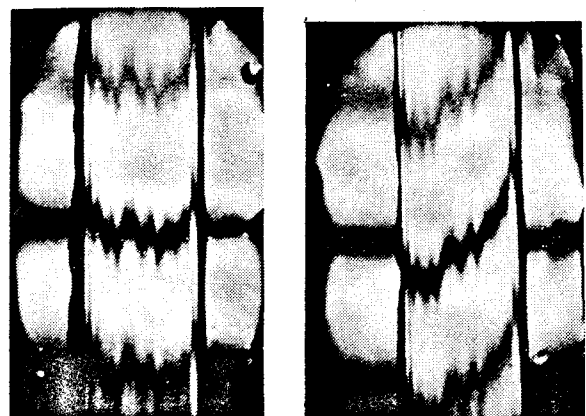
補整器は直交ニコル装置内に、被験ガラスと重ねて入れる。被験ガラスの光路差を補整器の光路差で打ち消して零にする。そうすると両者の光路差は絶対値が同じで符号だけが反対であるから、補整器の光路差を読んで被測定ガラスの光路差を知ることができる。

A. バビネ補整器

水晶楔を組み込んだ補整器である。視野内で一端から他端へ光路差が距離の一次関数として変化する。マイクロメーターで水晶楔を動かし視野全体の光路差を斎一に変えることもできる。マイクロメーターの動きと光路差変化との関係も一次関数である(第13図)。

2枚の直交ニコル関係にある偏光板の間に、偏光軸と補整器軸とを 45° の角にして補整器を挿入する。視野中光路差零の部分は黒い縞になる。白色光源では光路差 565nm の所が鋭敏色の縞、その倍数の所では鮮かきの減った鋭敏色の縞になる。単色光源では光路差が波長の整数倍の所が黒い縞になる。マイクロメーターを回わずと縞図形が一斎に平行移動する。

水晶楔に被測定ガラスまたはその凸レンズによる実像を重ねると、黒い縞は、水晶楔の光路



第14図 水晶楔に板ガラスの断面を重ねて観察した状況

b) ではガラスに曲げひずみを与えている。

差と被測定ガラスの光路差との代数和が零(白色光源の場合)、または波長の整数倍(単色光源の場合)に等しくなった部分へ移動する(第14図)。

補整器としては次のように使用する:

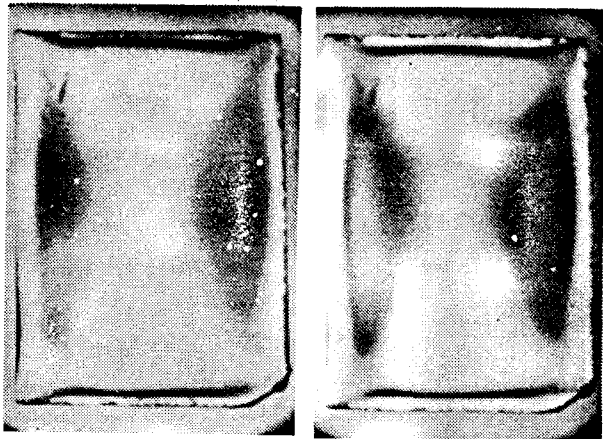
始めに黒い縞を目盛板の二重線で挟んで置く。被測定ガラスを補整器に重ねて挿入し、測りたい部分が二重線で挟まれ主応力軸は補整器軸と平行・直角(偏光軸とは 45° の角)になるように置く。

測りたい部分に光路差があると黒い縞は二重線の中央からはずれる。マイクロメーターを回転して黒い縞を二重線の中央へ戻す。マイクロメーターの回転量は測りたい光路差を補償するに要した光路差に対応するから、マイクロメーターの回転量から被測定ガラスの光路差が求められる。

B. バビネーソレイユ補整器

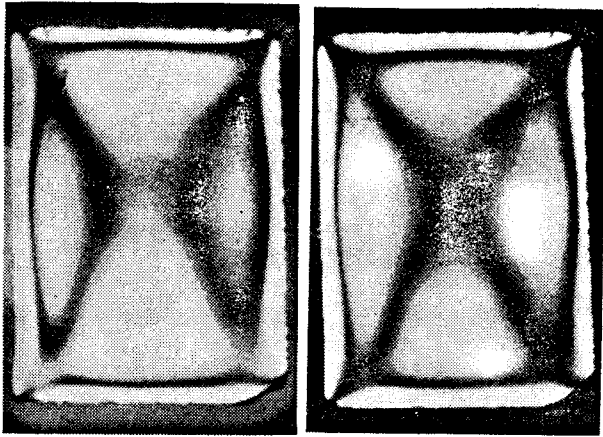
これは水晶楔で構成されている点ではバビネ補整器に似ている。視野内には全面にわたり一様な光路差が現われる。マイクロメーターで水晶楔を動かすと光路差は変化し、マイクロメーターの回転と光路差変化との間には一次関数の関係がある。

直交した2枚の偏光板の間に入れて光路差を零にすると視野が暗くなる。被測定ガラスを補整器に重ねて挿入し、測りたい部分の主応力軸



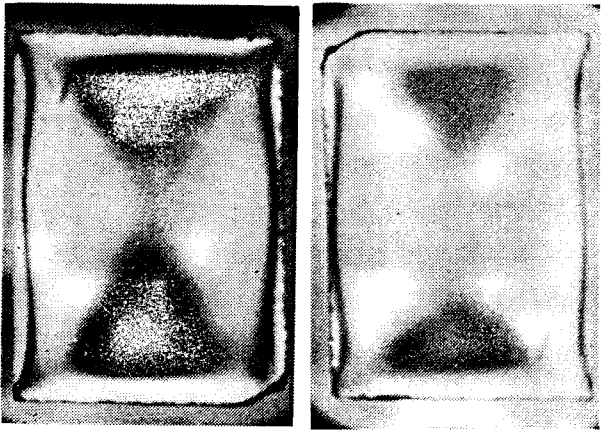
(a)

(b)



(c)

(d)



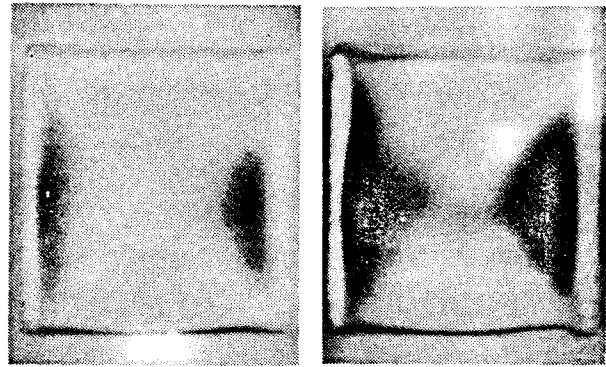
(e)

(f)

第15図 セナルモン補整器法において a)→f)へ検光子を 180° 回転し、急冷ガラス試料面上で黒い縞を移動させた状況 d) が検光子角度零で直交ニコル下の等傾線とほぼ同じ縞模様になっている。

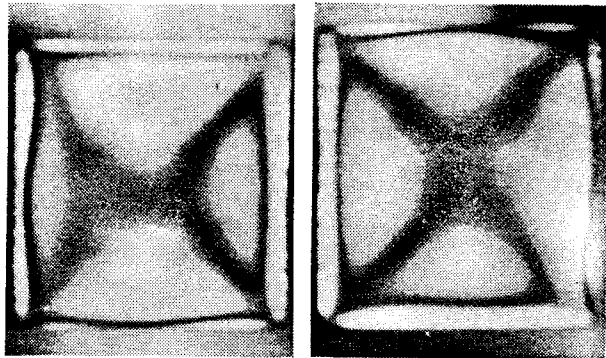
を補整器軸と直角・平行(偏光軸とは 45° の角)になるように置く(第15図)。

測りたい部分に光路差があるとそこは明るくなる。マイクロメーターを回わしてここを黒に



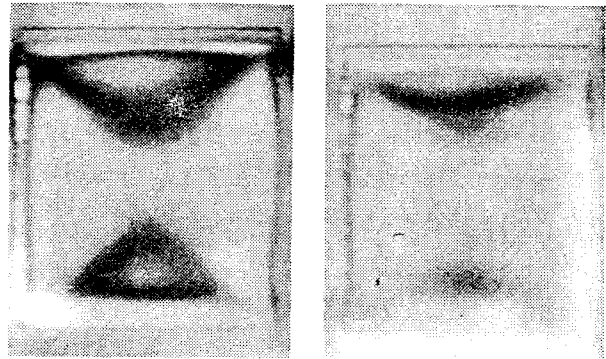
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

第16図 バビネーソレイユ補整器法において a)→f)へ視野の光路差を1波長相当だけ動かした時の縞の移動状況 d) がほぼ光路差零で直交ニコル下の等傾線と同じ縞模様になっている。全体としてセナルモン補整器法と類似した経過である。

戻す。この回転量に対応する光路差が測りたい部分の光路差と絶対値が等しい。

C. セナルモン補整器(第7図f)

セナルモン補整器は構造・測定法が簡単な補整器であり、JIS S 2305 に直接法として採用されている。

厳密には単色光源を使う必要があるが、白色光源を使いガラスフィルター、干渉フィルター

で狭い波長範囲の光だけ取り出して単色光の代わりに使ったり、あるいはフィルターなしで人間の眼の最高感度の波長(540~580nm)の光に等しいと見なして実行したりする便法も有効である。

四分の一波長板の光路差は、単色光源では光波長の1/4、フィルター使用の時には透過帯中心波長の1/4、白色光源をそのまま使う時は130~150nmに撰ぶ。

偏光子と検光子とを直交させると視野は暗黒である。被測定ガラスを入れ測りたい部分の主応力軸を偏光軸に対し45°の角に置く。測りたい部分に光路差があるとそこは明るくなる(第16図)。

検光子を回転して測りたい部分を暗黒に戻す。この時の回転角は測りたい光路差と次のような比例関係がある。

$$\text{光路差} = \text{光波長} \times \frac{\text{回転角}}{180^\circ}$$

ここで白色光源の場合には光波長の代わりに四分の一波長板の光路差の4倍を使う。

波長が長めまたは短かめの光を使うように設計されている装置の場合、視野が暗くて測定しづらく、念を入れるつもりで過大な値を得やすい。ルーペを使い測定したい部分が最も暗くなる時の検光子角度を求めることに注意すると、この欠点はかなり軽減される。

6.2 円偏光法

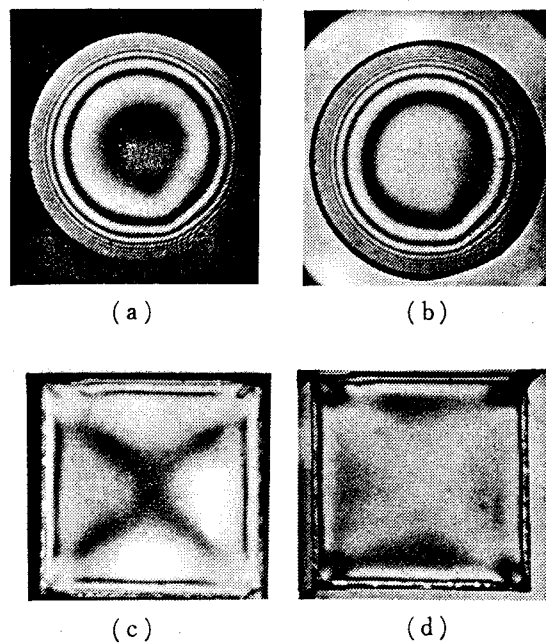
6.2.1 直交ニコル法

直交した偏光子と検光子との間に四分の一波長板を2枚入れる。四分の一波長板の軸は偏光軸と45°の角をなし、四分の一波長板相互間では軸が直交して視野が暗いようにする。

被測定ガラスを四分の一波長板の間に入れる。円偏光法では主応力軸方向は任意で構わない。現れる干涉縞図形は次のようになる：

単色光源の時には、光路差が波長の0, 1, 2, ... 倍の部分が黒い縞でおおわれる。これらの中間は明るくなる(第17図 a, c)。

白色光源の時には、光路差零の部分が黒い



第17図 円形 a), b) および角形 c), d) の急冷ガラス試料の円偏光法による観察

a), c) は直交ニコル, b), d) は平行ニコルによる。円形試料の直線偏光法による観察は第9図 a), b) に示される。角形試料の直線偏光法による観察は第9図 c)~f) に示される。

縞, 565nm 前後の部分が鋭敏色の縞, 565nm の2, 3, ... 倍の部分が鮮かさを減った鋭敏色の縞, これらの中間は白色で明るい。

この方法で現われる縞は光路差の等高線の表現になっており、縞に沿ったのは明るさと色が一定である。この縞を等色線と呼ぶ。

プラスチックの模型を使った光弾性実験では直交ニコル式の円偏光法で等色線を見ることが多い。ガラスでは光路差が1波長に達しないことが多く、このような場合は図形の明るさ部分を良く観察して光路差分布を知る必要がある。

装置内で被測定ガラスを回転しても、等色線はガラスに固定してガラスとともに回転するだけで形は変わらない。

6.2.2 平行ニコル法

偏光子と検光子を平行ニコルの関係に置く点が違うが、その他は直交ニコル法と同じである。現われる縞は直交ニコル法で現われる縞の中間に相当するので、直交ニコル法を補間して光路差分布を詳しく知ることができる(第17図 b, d)。

VII. 応力の性質の区別

前記 IV 節で述べたように、光弾性による観察、測定だけでは、応力が 1 方向だけに働いているか 2 方向に働いているか、また圧縮応力か引張り応力か、という判断はできない。しかし次の方法でいくらか立入った判断をすることができる。

直交ニコル—鋭敏色板法を使う。始めに鋭敏色板の X' 、 Z' 軸が判っている場合を述べる。

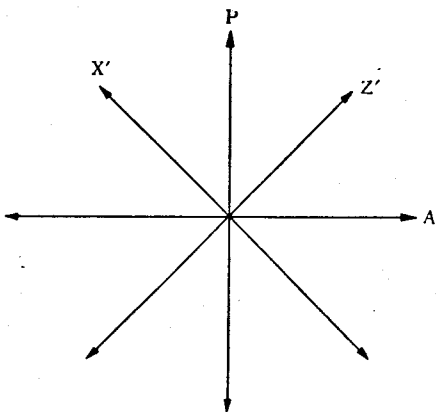
第 18 図のように配置する。

応力を知りたい部分の主応力軸を X' 、 Z' 軸と平行に置く。この部分の光路差は 300nm 以下であるとする。

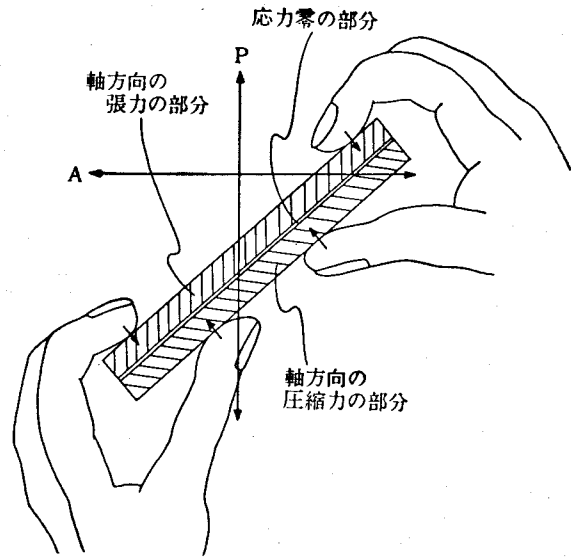
鋭敏色が黄色の方向に変化するならば、応力は、 X' 軸方向の張力または Z' 軸方向の圧縮力あるいはこれらと同等な複合応力である。

鋭敏色が藍色ないし緑色の方向に変化するならば応力は、 X' 方向の圧縮力または Z' 軸方向の張力あるいはこれらと同等な複合応力である。

鋭敏色板の X' 、 Z' 軸が判明していない時には、ガラス棒、できれば角棒をとり、偏光軸と 45° の角度に置いて曲げひずみを与える (第 19



第 18 図 鉱物顕微鏡における偏光子軸 P 、検光子軸 A 、鋭敏色検板軸 X' 、 Z' の配置の規約



第 19 図 ガラス棒に指で曲げひずみを与えた時の応力の分布

図)。この場合の応力の分布は図のような単純な応力の組み合わせである。たとえば圧縮応力部の変色が黄色方向であったとすれば、他のガラス試料を入れた時に黄色になる部分は、ガラス棒の軸方向の圧縮応力またはこれに直角な引張り応力あるいはこれらと同等な複合応力だと判断できる。

VIII. むすび

ガラス製品とその用途の多様化、さらに品質向上への要求が顕著になって、歪検査は従来の定性的判断だけでなく定量測定が必要になる場合が多い。定量測定には原理の理解と測定の前提条件の厳守が大切である。本稿はこれらに注意しながら記した。そのためになりにくどく読みづらくなったとは思うけれども、ガラス工業界のお役に立てば嬉しいことである。

(関連文献)

岸井貫 光弾性 セラミックス 昭和 51 年 10 月号及び 11 月号

注、筆者の略歴及び顔写真は Vol. 1 No. 3 参照