

歪検査器の利用技術(II)

東芝硝子株式会社 岸 井 貫

1. はじめに

ガラス製品の製造、使用、加工の場合に歪(ひずみ)の管理、測定が重要である。歪の観察、測定は光弾性技術を適用して行なわれる。光弾性技術、歪検査器について前稿¹⁾、前々稿²⁾に記した。本稿ではそれ以後に著者が調査、実験、試作などを行った結果を述べる。前稿、前々稿に記した事項は本稿では説明を省いて引用させて頂きたい。

2. 複屈折

ガラスの歪は、歪によりガラスが複屈折性になることを利用して検出、測定している。複屈折とは透明物体中を光が進む場合に、光波の電

磁的振動の方向により光の進行速度が異なることである(図1)。歪のない均質なガラスは複屈折を示さず、光の速度は進行方向と振動方向によらず一定である。

透明物体の屈折率は(真空中の光速) $\div$ (物体中の光速)で決まる。物体中に速度の違う光があることは、物体の屈折率が複数個あることだと言える。複屈折とはこのことを指す。

複屈折体中を一つの方向へ進む光に対しては、屈折率は一般には2個(特殊な方向に対しては1個)あるので、「二つの屈折 Birefringence」という表現がある。

3. 結晶の複屈折

立方晶系(等軸晶系)に属さない結晶は複屈折を示す。複屈折が著しいことで有名なものは

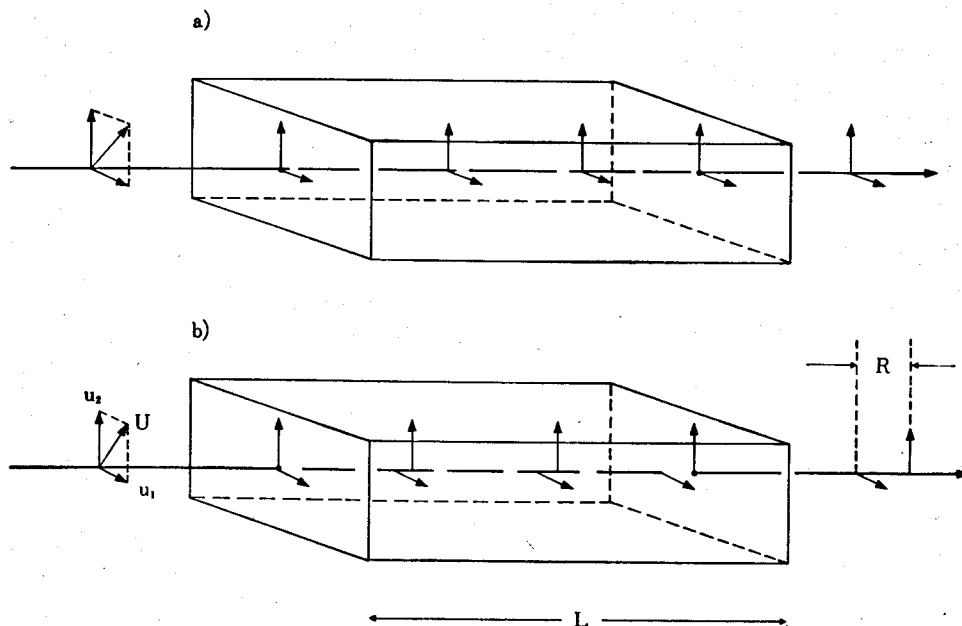


図1 a) 歪のないガラスおよびb) 歪のあるガラス中での偏光 U の成分波 u_1, u_2 の伝播
R: 光路差

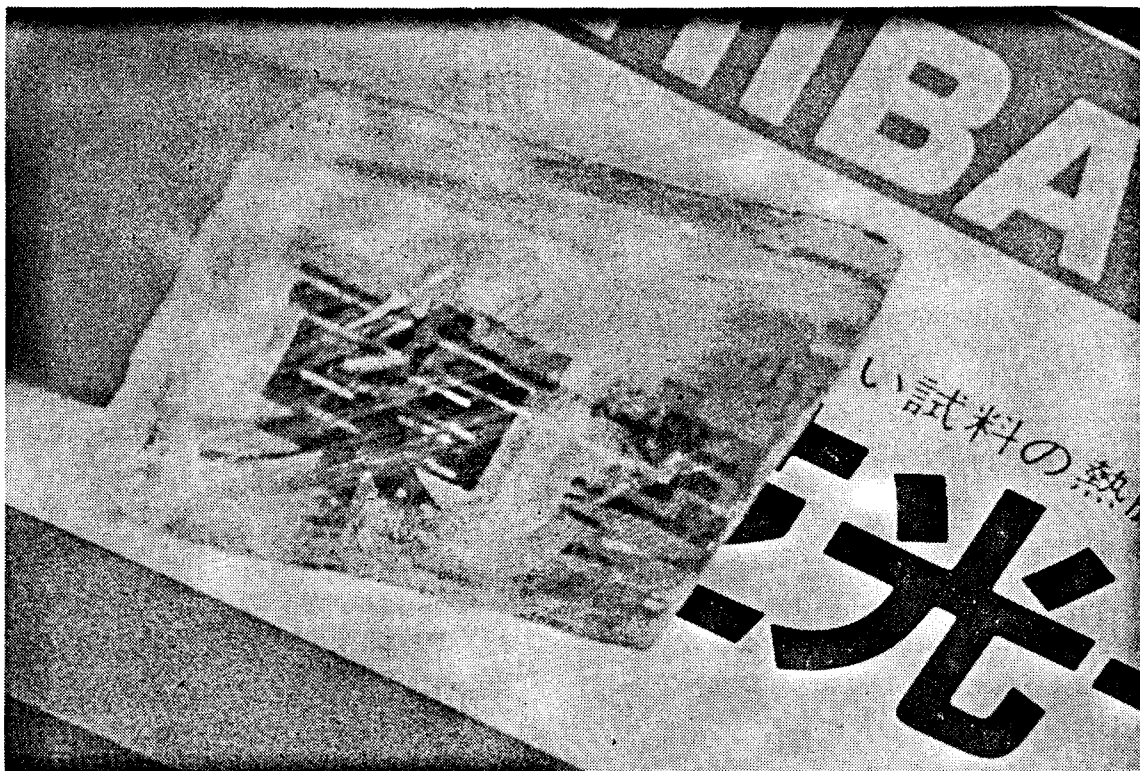


図 2 方解石板を通して見える二重像

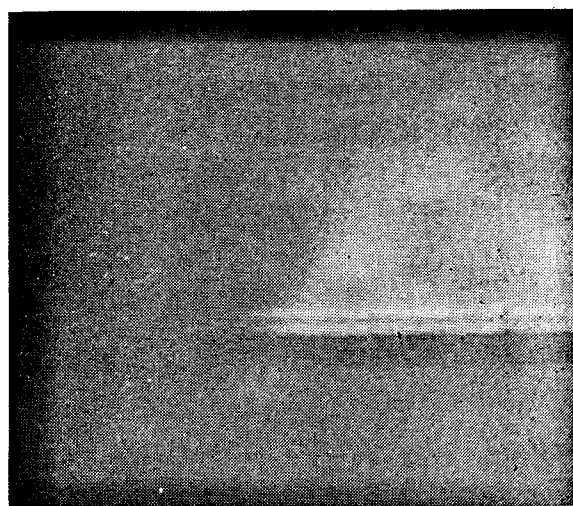


図 3 人工水晶でルーペにより見られる稜の二重像

方解石であり、これを透過した光で眺めると像が二重に見える。屈折率の最大値と最小値との差は 0.17 に達する (図 2)。

水晶の複屈折はこれに比べて遥かに小さく 0.009 である。二重像はプリズムを作るとか、大形結晶を使ってルーペで眺めるとかの工夫をすれば認められる (図 3)。

表 1 ガラスの応力複屈折 ($C=3$ として計算した)

ガラスの種類	応力の概略値	複屈折
化学強化ガラス	100 kg/mm ²	0.003
熱強化ガラス	20 kg/mm ²	0.0006
	5 kg/mm ²	0.00015
安全率を含めたガラスの抗張強度	1 kg/mm ²	0.00003
フロートガラスの徐冷品の表面	10 kg/cm ²	0.000003

立方晶系に属する複屈折のない透光性結晶には蛍石、ダイヤモンド、スピネル類、多くのハロゲン化アルカリがある。赤外線に透明なものとしてシリコン、ゲルマニウムがある。

4. ガラスの応力複屈折

応力によって生じたガラスの複屈折は水晶よりもかなり小さい (図 4, 表 1)。

ガラスの複屈折 Δn は

$\Delta n = \text{ガラスの光弾性常数 } C \times \text{応力 } F$ で表わされる。ここで

C : 単位 $(\text{nm}/\text{cm})/(\text{kg}/\text{cm}^2)$. ただしこの計算では (nm/cm) を 10^{-7} と読み換える.

F : 単位 kg/cm^2

ガラスの光弾性常数はふつう $1 \sim 4 (\text{nm}/\text{cm})/(\text{kg}/\text{cm}^2)$ の間にある.

5. 応力, 応力複屈折, 光路差の間の関係

長さ L のガラスに応力 F が働いて複屈折が生じたとする (図 1b). U のように振動する直線偏光がガラスに入り, U の成分波 u_1 と u_2 に対するガラスの屈折率をそれぞれ n_1, n_2 とすると $\Delta n = n_1 - n_2$ である.

たとえば $n_1 > n_2$ であれば u_1 は u_2 より遅れ, ガラス中を L だけ走って空气中へ出た後には R だけの光路差が生ずる. $\Delta n \ll 1$ の仮定が成立てば次の関係が容易に導かれる.

$$R = \Delta n \cdot L \quad (1)$$

また先に記したように

$$\Delta n = C \cdot F \quad (2)$$

したがって

$$R = C \cdot F \cdot L \quad (3)$$

これらに応力を定量化するために使われる関係式である.

通常の光弾性技術では光路差 R を測定して式(3)から応力を計算する. また表面応力を測

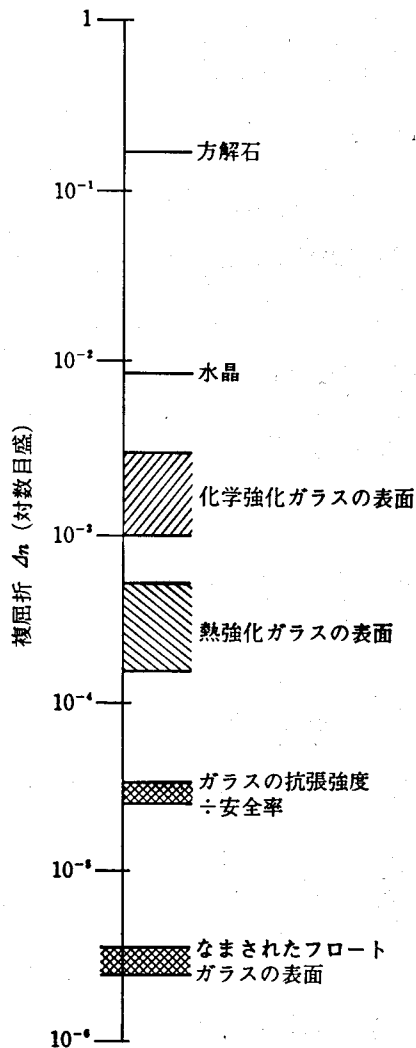
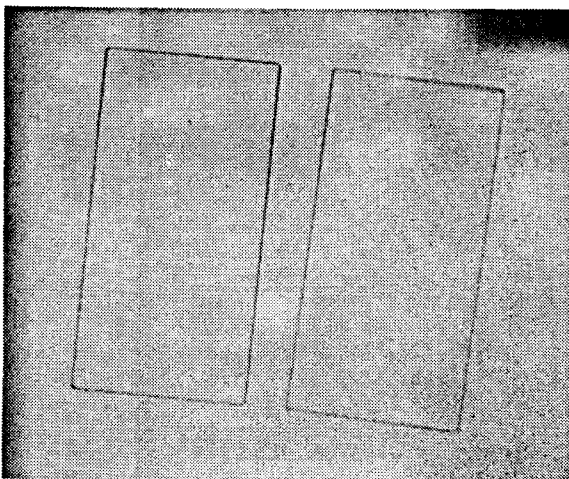
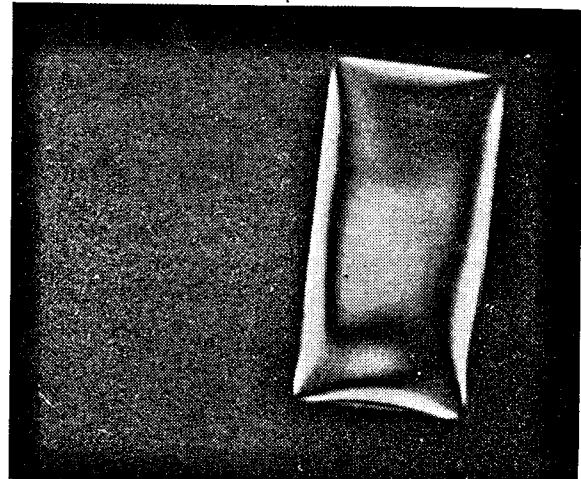


図 4 結晶とガラスの複屈折の比較



(a)



(b)

図 5 歪のないガラス (左側) と歪のあるガラス (右側) とを通常光 (a) および直交ニコル (b) で観察した状況

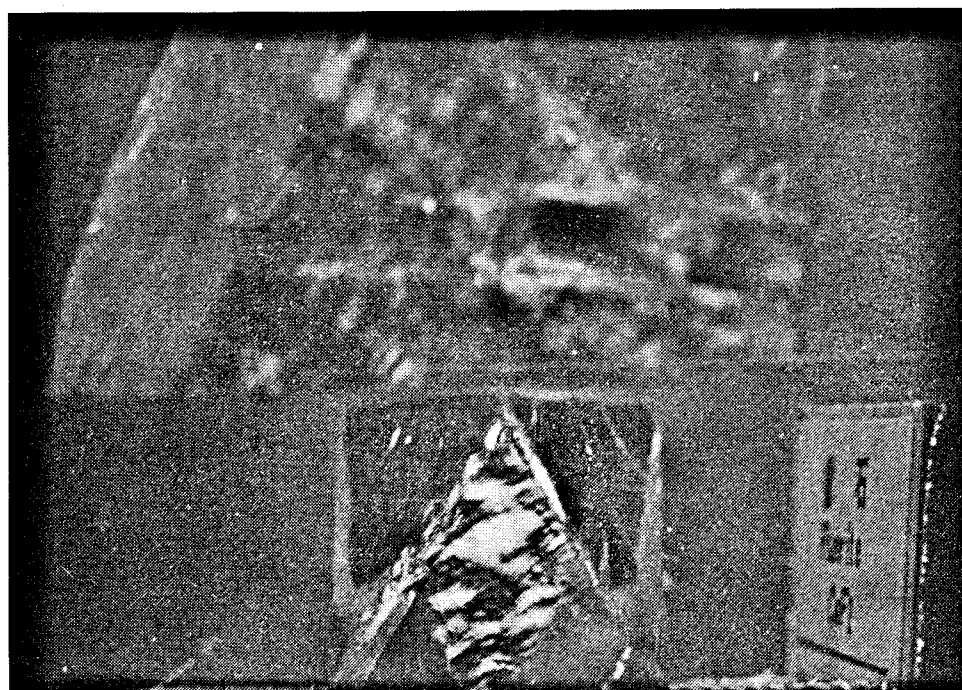
定するための屈折計方式の光弾性技術では Δn を測って式(2)を使用する。

ガラス工業では光弾性測定は模型にではなく製品に適用しなければならない。多くの場合、

光の経路に沿っては応力は一様でないから式(1)~(3)はそのままでは応力 F の算出に使えない。応力の分布形式などの関連した知識が必要である。



(a)



(b)

図 6 蛍石片と蛍石結晶を通常光(a)と直交ニコル(b)で観察した状況

6. 偏光を用いた観察

複屈折の有無は偏光で観察して知ることができる。偏光顕微鏡（鉱物鏡微鏡）は鉱物の複屈折を調べるために設計された顕微鏡である。

2枚の偏光板を直交ニコルの関係に配置して視野を暗黒にし、間に透明物体を挿入する。

挿入したものが複屈折性ならば明るく見え、複屈折がなければ暗い。ガラスの場合を図5に示した。

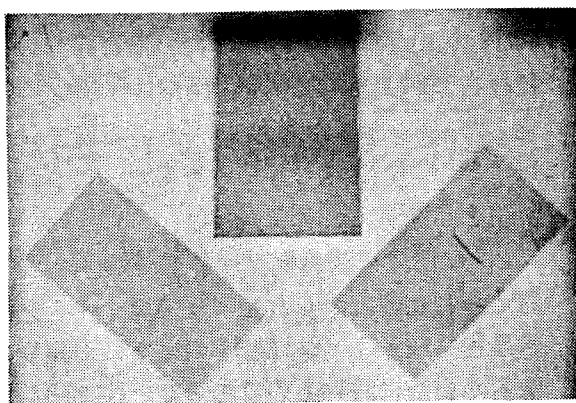
立方晶系に属して複屈折のない蛍石を図6に示す。直交ニコルでかなり暗く見えるが、結晶の不完全さのために部分的に弱く複屈折性を帯

びていて、その部分は薄明るく見える。

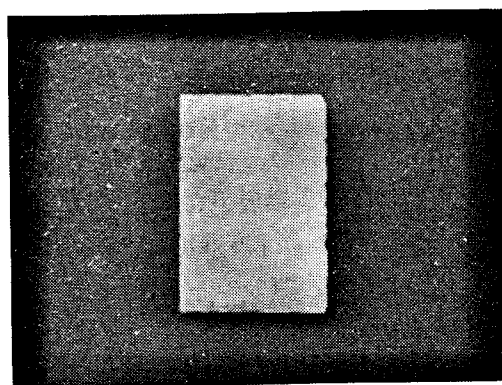
複屈折性の水晶の板の場合を図7に示す。特殊な方角に置かれた場合を除いて直交ニコルで明るく見える。人工水晶の双晶の有無を検査するのに利用された例がある（図8）。

7. 光路差の基準設定と校正

光路差の基準は市販品がなく基準的な測定法も確定していない。バビネ補整器は組み込まれた水晶楔を校正した後でないとの確信の持てる測定ができないし、セナルモン法では使用する四分の一波長板の光路差が正しくないと、測定値が信用できない。このように光路差を校正しよ



(a)



(b)

図7 いろいろの角度に置いた水晶板を通常光(a)と直交ニコル(b)で観察した状況

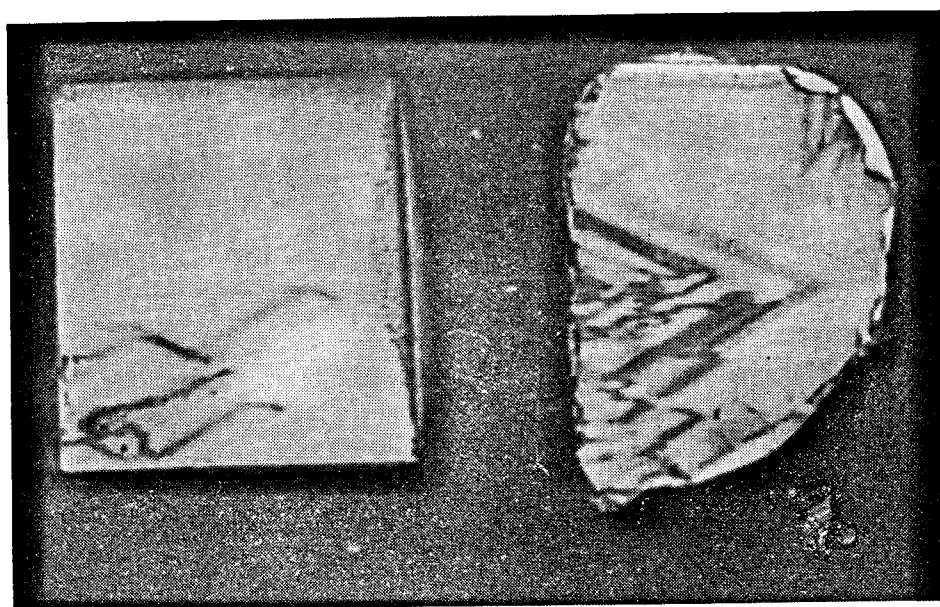


図8 天然水晶の双晶を直交ニコルで観察した状況

うとすると測定器内の光学素子の光路差を校正する必要が出て来て、堂々巡りになってしまう。

このような状況に対して、次のような逃げ道がある。すなわち、単色光源を使ってセナルモン法を実行すると、四分の一波長板の光路差に誤差があっても、それに基因する測定誤差が非常に小さい、という事実を利用する。

この事実に基づき次のような手順で基準設定または校正する：

1. バビネ補整器の水晶楔をカドミウム放電灯の赤線、緑線、ナトリウム灯の黄線、水銀放電灯の緑線、黄線などを使い零次と一次の暗条の位置を校正する。これによって 0 nm と 509 nm (Cd 緑) ないし 644 nm (Cd 赤) の範囲で水晶楔を校正できる。
2. 水晶楔の上記の範囲を使って四分の一波長板の光路差を測り、誤差が 7.5 nm 以下のものを選び出す。四分の一波長板の望ましい光路差は、たとえば 3 項以下で水銀緑線 (546 nm) を使うとすれば 136.5 nm である。
3. このように選んだ四分の一波長板を使いセナルモン法により測定して基準を設定する。

4. また水晶楔の光路差 0 nm～550 nm の範囲をセナルモン法を使い校正する。

このようにして光路差の基準設定ができた。

四分の一波長板の誤差の効果を計算すると図 9 のようである。水銀緑線を光源にした時、四分の一波長板の誤差が 7.5 nm あっても、これに基因する測定誤差は 0.3 nm 以下であって、他の誤差（たとえば消光角確認の不確かさ）に比べて無視できる。

著者が実行した結果を記す。水晶光楔を持つバビネ補整器として昭和 30 年代に製作された東芝精密歪計を使った。四分の一波長板は鉾物顕微鏡のアタッチメントとして市販されたもの 3 個を準備した。

単色光で 509～644 nm の範囲を校正すると図 10 の打点のようであった。次に四分の一波長板を Cd 緑線で調べて、図中 1G, 2G, 3G と記した読みを得た。また Cd の赤線で調べて 1R, 2R, 3R と記した読みを得た。これから光路差を計算して表 2 を得た。

#3 の四分一波長板では誤差 7.5 nm 以下と考えられたので、これを使ってセナルモン法で水晶楔を校正した。図 11 のように水晶楔の直線性が相当に良いものであることが判明した。

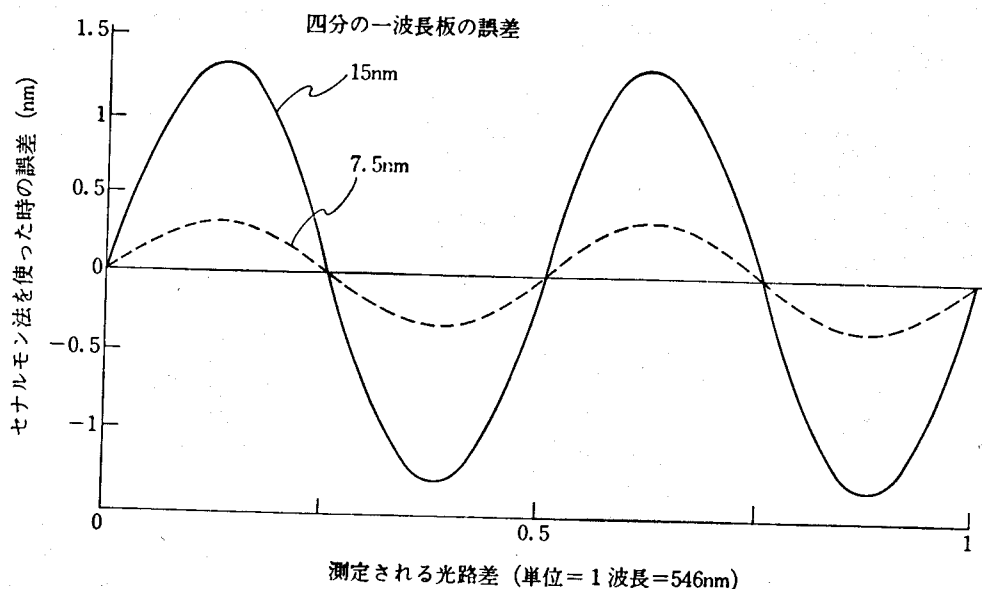


図 9 四分の一波長板の誤差に原因するセナルモン法の測定誤差

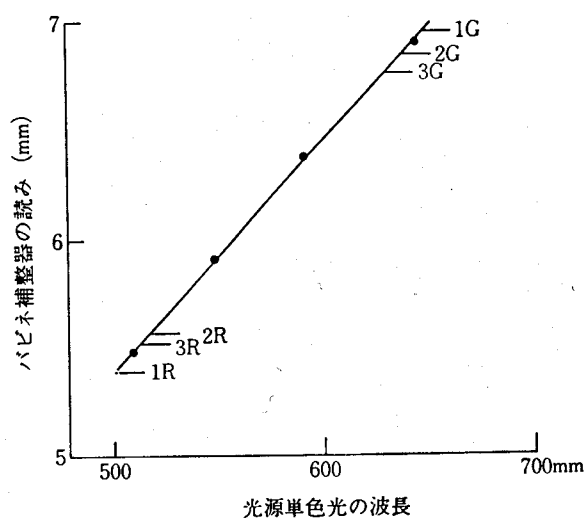


図 10 光路差 500~650 nm の範囲でのバビネ補整器の校正と四分の一波長板の光路差の測定

表 2 四分の一波長板の光路差 (nm)

波長板番号	Cd 赤線による測定	Cd 緑線による測定
# 1	143	140
# 2	126	119
# 3	131	128

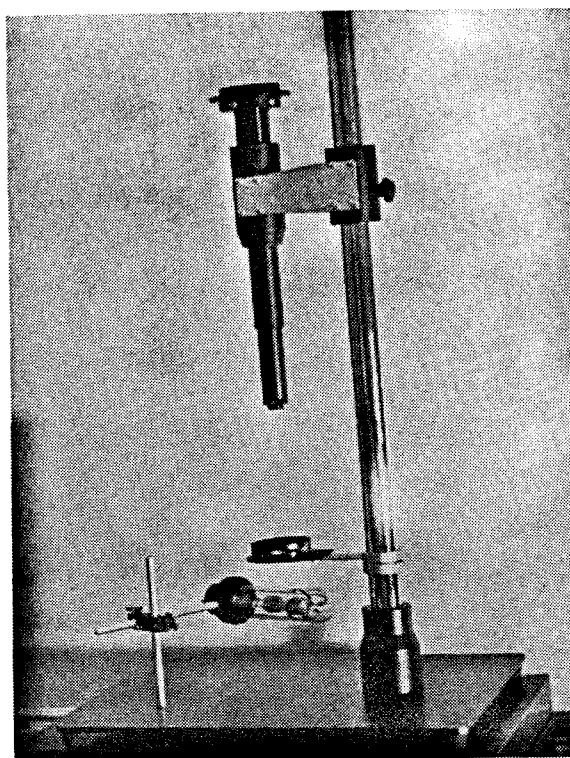


図 12 単色光源を使うセナルモン補整器 (試作品)

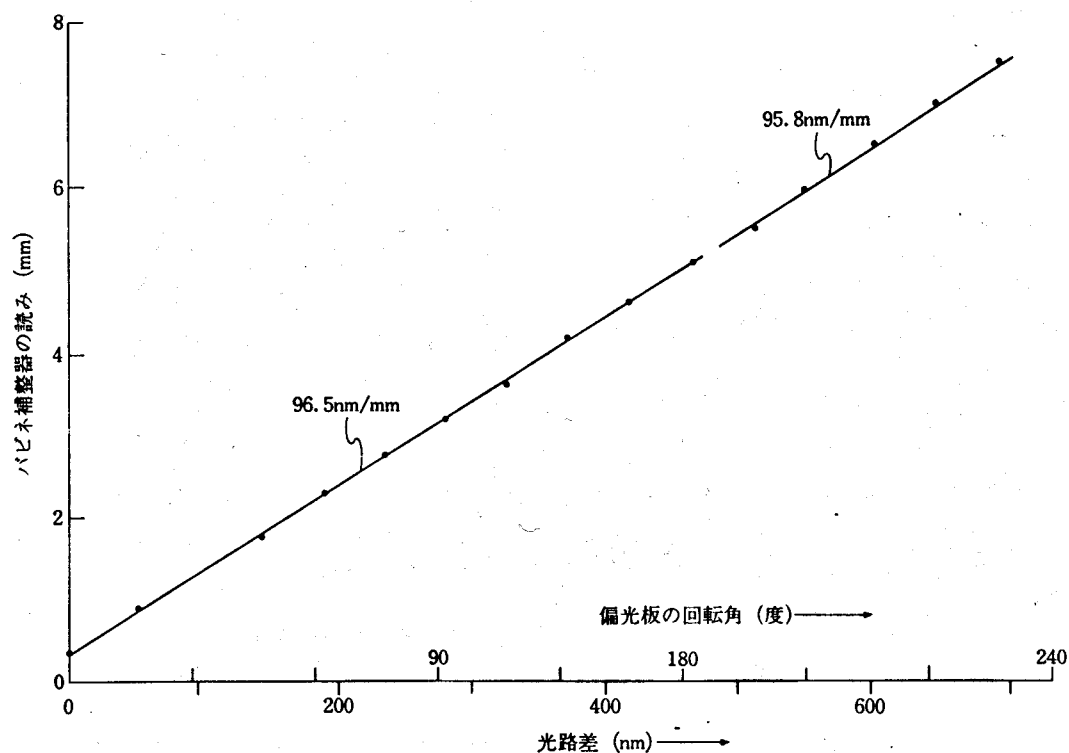


図 11 セナルモン法によるバビネ補整器の校正

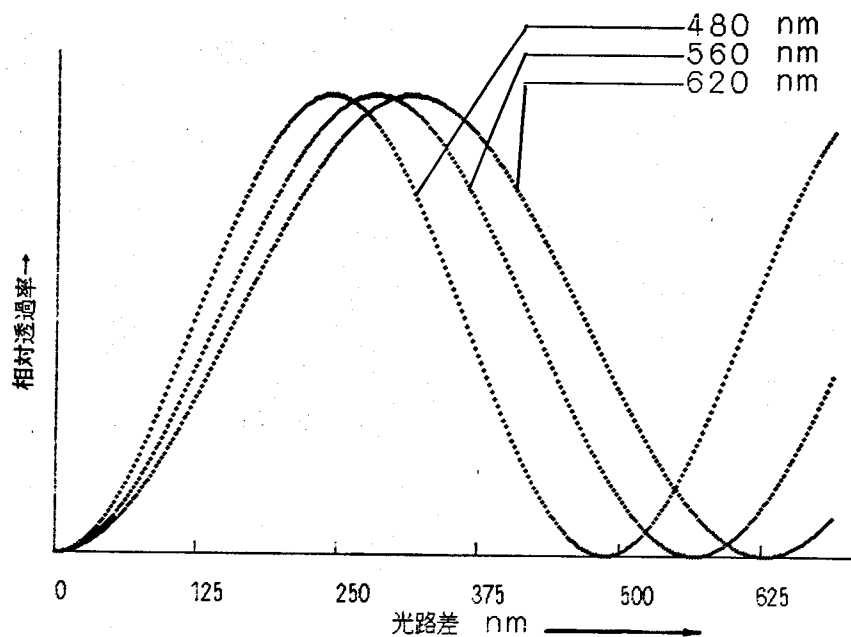
セナルモン補整器の試作品を図 12 に示す。

8. 二分の一波長鋭敏色板

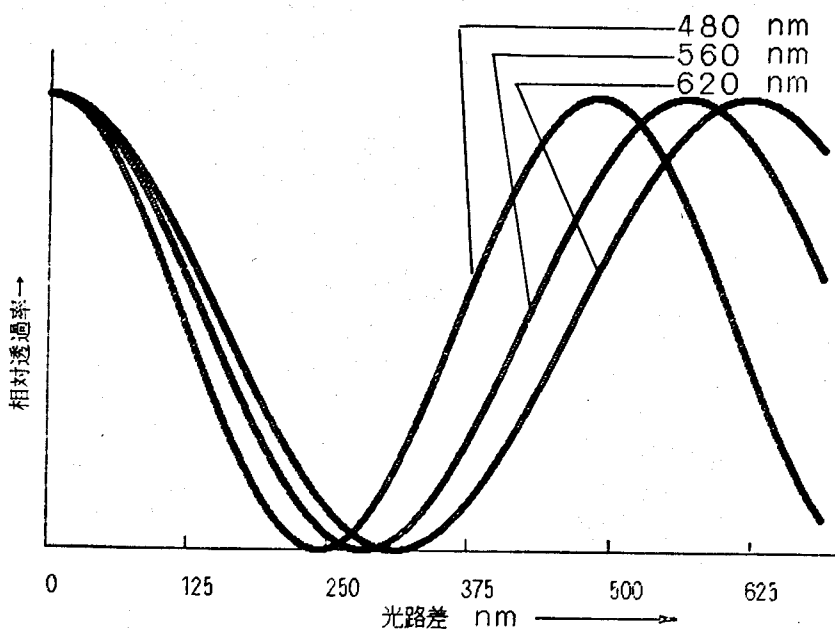
歪検査器は二枚の偏光板を直交ニコルの関係に置く。鋭敏色板法を使う時は 560 nm くらいの光路差を示す複屈折板を挿入して視野を赤紫

色にする。さらに歪のあるガラスを挿入すると赤紫色が赤または藍色に向かい敏感に変化する。

これに対して、平行ニコルの関係にある 2 枚の偏光板の間に 280 nm くらいの光路差の複屈折板を入れても、鋭敏色が現われる。このような歪検査器も実際に市販されている。



(a)



(b)

図 13 (a) 一波長鋭敏色板の鋭敏色 (光路差 560 nm 付近) および (b) 二分の一波長鋭敏色板の鋭敏色 (光路差 280 nm 付近) での赤 (620 nm), 緑 (560 nm), 藍 (480 nm) 色光の相対強度を示す図

図 13 は a) 直交ニコルおよび b) 平行ニコルの間に複屈折板を入れた時、その光路差に伴い赤、緑、藍色光の透過率がどう変わるかを示したものである。直交ニコル、平行ニコルとも緑色光が消えるような光路差の複屈折板が鋭敏色板になる。その付近では光路差の変化による色調の変化が顕著である。

両者の場合の鋭敏色を比べると、図 13 から平行ニコルの場合の明るさは直交ニコルの場合の $1/3$ くらいであり、暗い。

また平行ニコルでは同じような色調変化を引き起こす光路差変化は直交ニコルの場合の $1/2$ である。平行ニコルの方が 2 倍敏感である。

次にさらに詳しく調べると鋭敏色での緑色光/赤色、藍色光の比は平行ニコルの方がやや小さい。その結果、平行ニコルの鋭敏色は赤と藍の加色であり、直交ニコルのそれは平行ニコルに比べやや白っぽい感じがする。

結論として、平行ニコル-鋭敏色板法は暗い室内で落着いて観察し、小さい光路差を検出するのに適している。

9. 歪標準器

鋭敏色板法を利用する時に、歪ガラスによる鋭敏色の変色から光路差を定量的に知れると、品質や工程の管理に役立つ。著者らは二種類の歪標準器を考案、市販して利用して頂いている。

回転円板型歪標準器 (図 14)

次の原理を利用したものである。

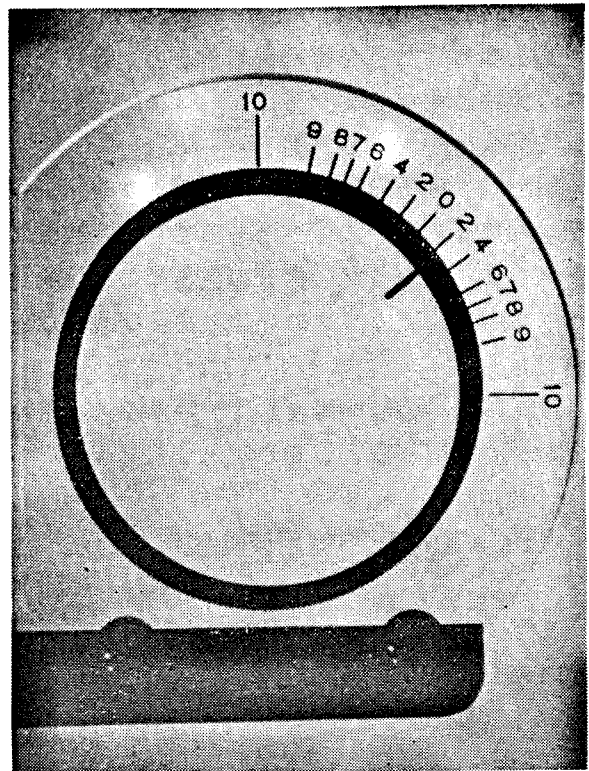


図 14 回転円板型歪標準器

光路差 R の複屈折板があったとする。 R は比較的小さい (130 nm 以下) とする。これを直交ニコル間に挿入した時を考える。複屈折板の光学軸が偏光子や検光子の偏光軸となす角を θ とする。この板は近似的には、 $\theta = 45^\circ$ で光路差 $R \cdot f(\theta)$ を示す板と同等である。 $f(\theta)$ は

$$\theta = 0^\circ \text{ で } f(\theta) = 0, \theta = 45^\circ \text{ で } f(\theta) = 1$$

の単調な関数である。

複屈折板を枠に回転可能に保持し、被験ガラスの測りたい部分と色を合致させる。板には $R/10$ を定数として割当て、枠には $f(\theta) = 0, 0.1, \dots, 0.9, 1.0$ に相当する角度に $0, 1, \dots, 9$,

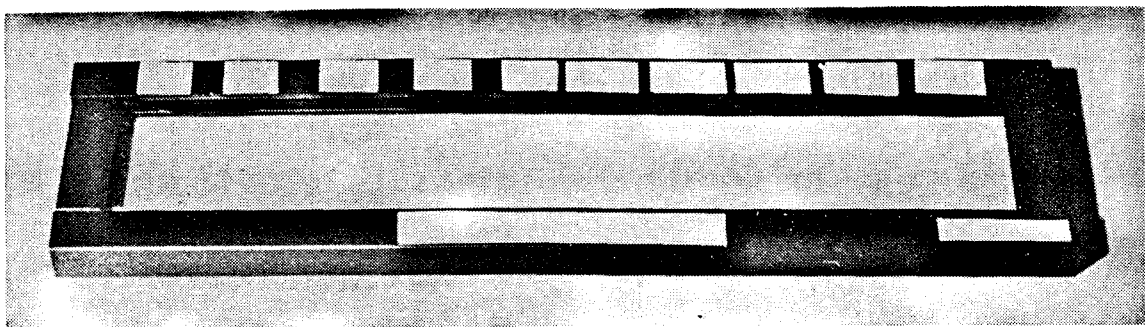


図 15 並列膜型歪標準器

10 と目盛る。色合わせした時の回転板が指す目盛と板の定数とを掛け合わせると、被験ガラスの光路差になる。

並列膜型歪標準器 (図 15)

適当な間隔で光路差を持つ複数の複屈折膜を、光路差の順序に並べたものである。被験ガラスと並べ、測りたい部分の色と膜の色とを比べて半定量的にガラスの光路差を評価することができる。

上記の二つの標準器とも、被験ガラスと重ね合わせての補整器としての使用法もできる。

10. 微小光路差用直交鋭敏色板法

光学ガラスの歪除去の研究のために、小さい光路差を精度良く測る方法が大阪工業試験所で考案された。著者らはこの方法を装置化し市販している(東芝精密歪計 SVP-30)ので、説明をする。

この方法では直交鋭敏色板を使う。これは鋭敏色板を二分し、一方を 90° 回転させてまた双

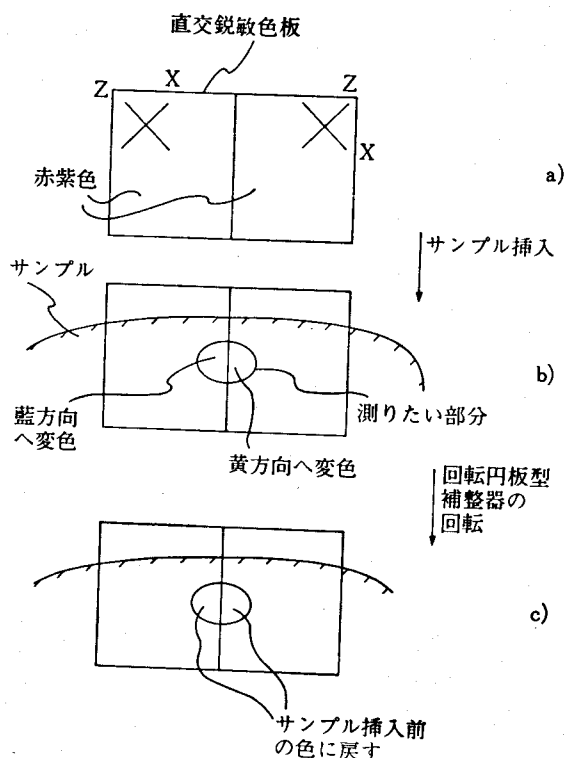


図 16 直交鋭敏色板を用いた小さい光路差の敏感な定量測定法

方をつないだものである(図 16 a)。これを直交ニコル間に挿入すると、双方は互に同じ鋭敏色を現わす。これに歪ガラスを重ねると一方は藍色へ他方は黄色へ向けて変色するので、歪の有無を高い感度で判断できる(b)。この状況に対してさらに $0 \sim 20 \text{ nm}$ の範囲をカバーする回転円板型歪標準器を重ねて、歪ガラスによる変色を打消してもとに戻す(c)。この時の歪標準器の値は歪ガラスの光路差と絶対値が等しい。このようにして 20 nm 以下の光路差を 1 nm の精度で測定できる。

平行ニコルと二分の一波長鋭敏色板とを使えば、原理的には感度を 2 倍にできる。実用上は正確な様な光路差を持つ鋭敏色板を作ることが一波長鋭敏色板に比べ難かしくなる。

11. 光の斜め入射の効果

歪検査器を使う場合、光の入射面や射出面が光の進路に直交することが望ましい。直交ニコルで斜め入射すると、その部分が明るくなり、歪があるのと区別ができず、誤認しやすい。こ

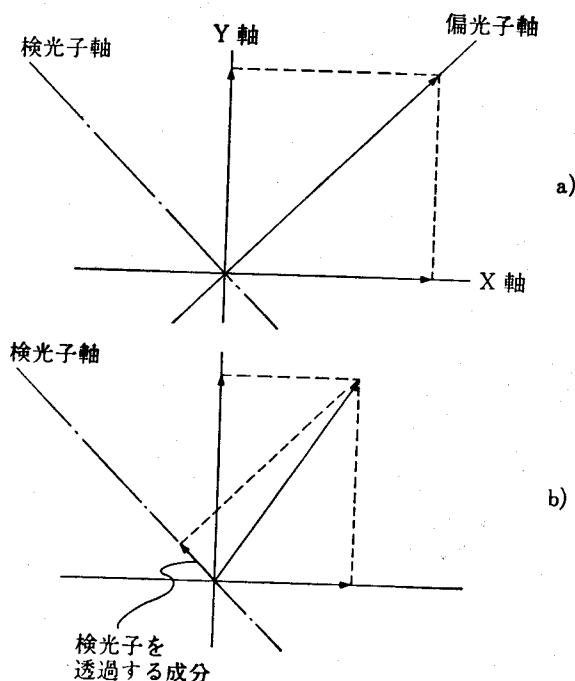


図 17 直線偏光の斜め入射、透過による振動方向の回転の説明図 a) 入射前、b) 透過後

れは入射，射出時に直線偏光の二つの成分偏光の間で透過率が違い，直線偏光の振動方向が回転し，検光子を通過する光成分が生ずるからである（図 17）。

このような場合は鋭敏色板法で難点をいくらか避けることができる。すなわち歪に原因した光の検光子通過率は，波長依存性があるために鋭敏色の色調を変える。これに対して斜め入射，斜め射出に原因した検光子通過には波長依存性がないため，鋭敏色は白色が重なってやや明るくまた白っぽくなるだけである。

斜め入射の悪影響は，ガラスを屈折率の近い液に浸すことで除かれる。水（屈折率=1.33）に浸すこともかなり有効である。

12. 反射型歪検査器

時計のカバーガラスのように，ガラスの背後に遮光体があると普通の歪検査器は使えない。しかし図 18 のように反射光を解析する型のものが使える。

直線偏光をガラス面に垂直に近く投射し，検光板は直交ニコルの関係に置く。ガラスの表面からの反射光は直線偏光のままであり，検光板で吸収される。ガラスの裏面からの反射光はガラスの厚みを 2 回通過しており，ガラスに歪があれば検光板を通過する成分が生ずる。裏面反射光の光路差は単なる透過の場合に比べて 2 倍になる。光路差が 100 nm 以下ならば，検光部をセナルモン補整器にして定量できる。ただしセナルモン法を適用する時には，表面反射光は一樣な明るさの背景光となり，測定精度はいくら悪くなる。また似た理由で鋭敏色板を使えない。

反射型歪検査器の試作品と観察例を図 19, 20 に掲げる。

図 20 で，反射型では透過型に比べて光路差がみかけ上 2 倍になっていることがよくわかる。

被験ガラスの裏面は鏡面か鏡面反射をするかでない，反射光による歪検査はできない。

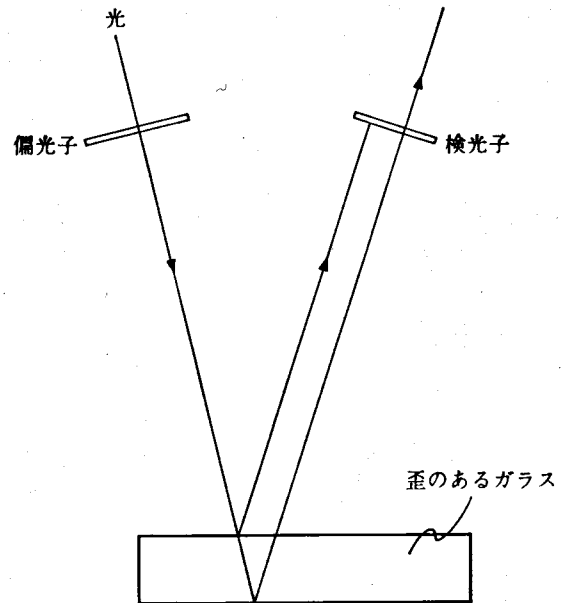


図 18 反射型歪検査器の原理

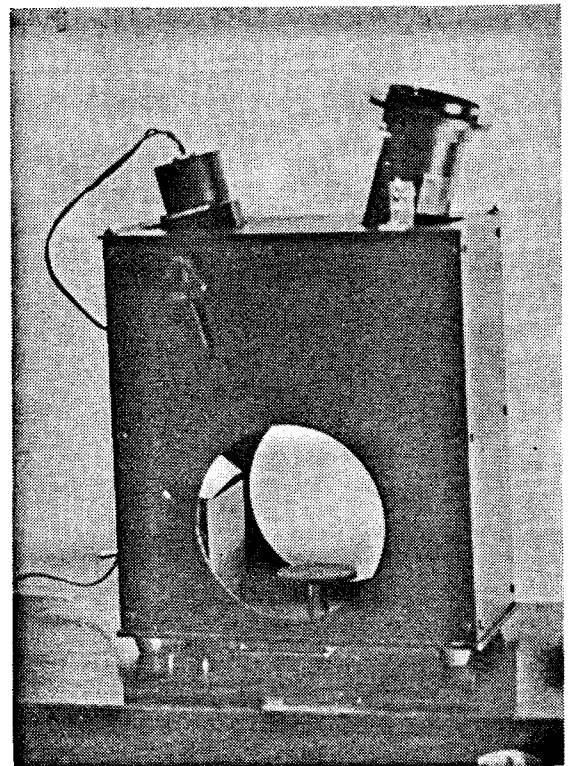


図 19 反射型歪検査器（試作品）

13. 東芝歪検査器

歪や光路差の測定法は，表 3（前報から再録した。）のように多種類ある。これらのうちのいくつかの方法を実行できる歪検査器 SVP-10

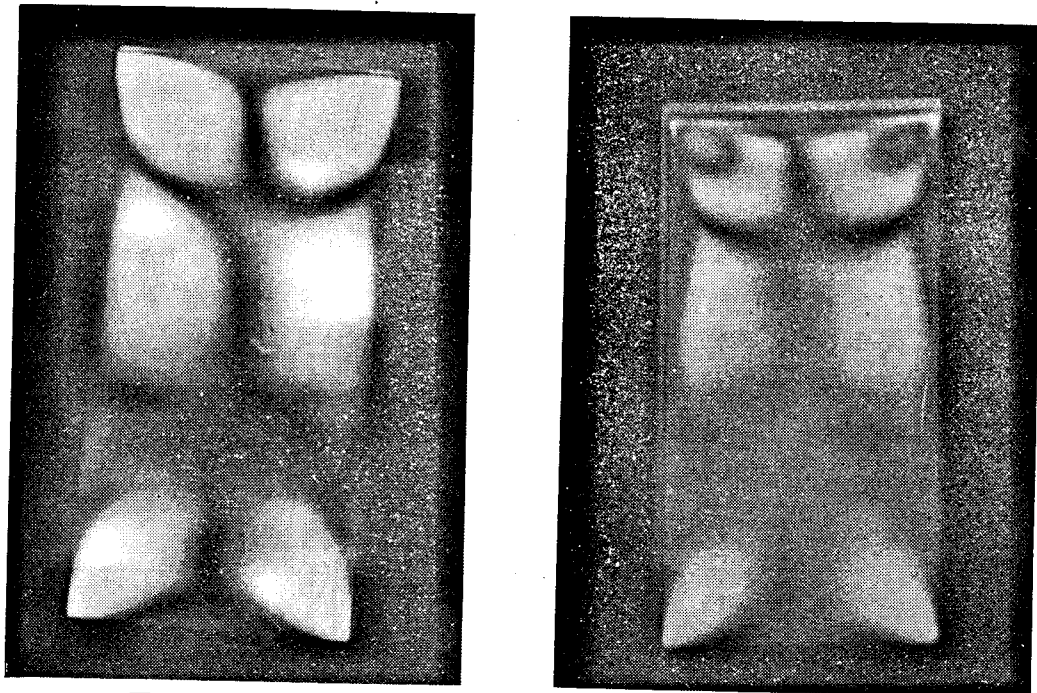


図 20 透過（左側）および反射型歪検査器による歪入りガラスの観察

表 3 各種の光弾性測定法と歪検査器の適用

		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	バビネ補整器法	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	か	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	
歪検査器	SVP-10	○		○	○					
	SVP-10-P	○	○	○	○		○	○	○	



図 21 東芝歪検査器

および SVP-10-P を販売している (図 21). それぞれの適用範囲も表 3 に記されている. 幸いに多くの方々に利用されるようになった.

14. 歪の強さの表現, 等級づけ

歪の強さを慣用として度, 等級などで表現することが多い. 著者の知っている範囲のものを記す.

「度」

セナルモン法を実行できるポーリメーター

型の歪検査器を使い, 検光板の回転角度 (単位度) で表わすことがある. 検光板の固転角は測定される光路差に比例する. 比例定数は, 組み込まれている四分の一波長板の光路差 (単位 nm) を 45° で割って得られる.

肉眼で可視光で測るから, 波長は 520~620 nm, 四分の一波長板の光路差は大部分が 130~155 nm であり, したがって比例定数は角度 1° 当り 2.9~3.4 nm の範囲にあり, 歪検査器ごとに一定値を持っている.

「ひずみ番号」

JIS S 2305 では炭酸飲料用ガラス瓶の底面に見られる光路差により等級づけている. 測定にはセナルモン法が「直接法」として説明されている. 等級を光路差に換算してみると図 22 のような関係になる.

ひずみ番号は光路差 22.8 nm ごとに区別されている. 22.8 nm という値は英国ガラス工業研究組合が配布する歪標準器に起因したと考えられる.

15. 偏光, 光弾性に関連したコンピュータグラフィックス

偏光現象の理解には立体的図像を描きまたは思い浮かべる必要があり, 説明することにも理解することにも苦労がある.

しかし偏光現象を表現する式は下記のように比較的簡単であるから, 簡単なプログラムでコンピュータグラフィックスを実行でき, 必要な図像を描くことができる.

X 軸方向に振動する直線偏光波は

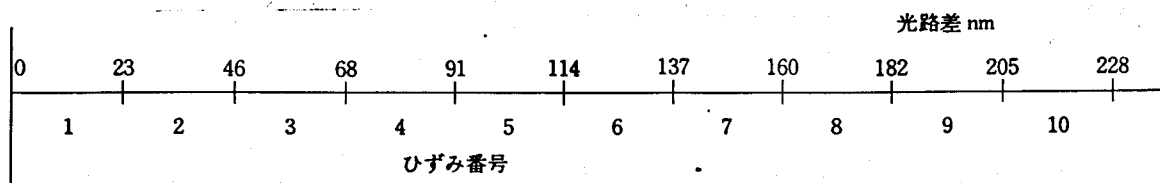


図 22 ひずみ番号と光路差との関係

$$X = \sqrt{2} A \sin\left\{2\pi\nu\left(t - \frac{z}{c}\right)\right\}$$

$\sqrt{2} A$: 振幅

ν : 振動数

z : 距離

X 軸と 45° で交わる x, y 軸方向の成分は

$$x = A \sin\left\{2\pi\nu\left(t - \frac{z}{c}\right)\right\}$$

$$y = A \sin\left\{2\pi\nu\left(t - \frac{z}{c}\right)\right\}$$

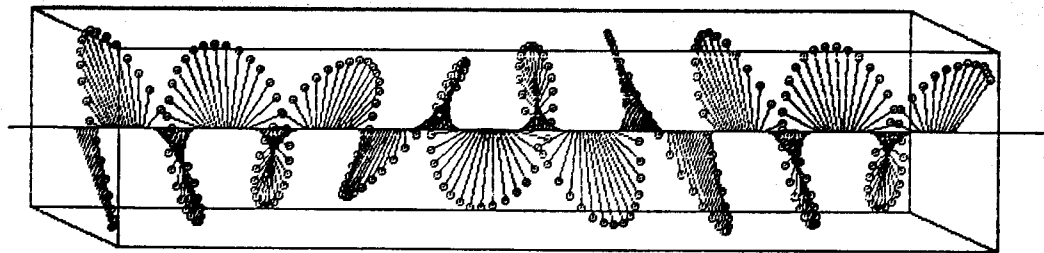
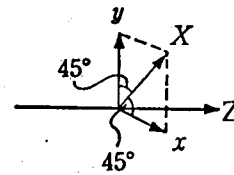
歪のあるガラスを通過して光路差 R が発生したとすると

$$x = A \sin\left\{2\pi\nu\left(t - \frac{z}{c}\right)\right\}$$

$$y = A \sin\left\{2\pi\nu\left(t - \frac{(z-R)}{c}\right)\right\}$$

ある瞬間の電場ベクトルの分布

——位相差の1波長相当かゝ生ずる距離——



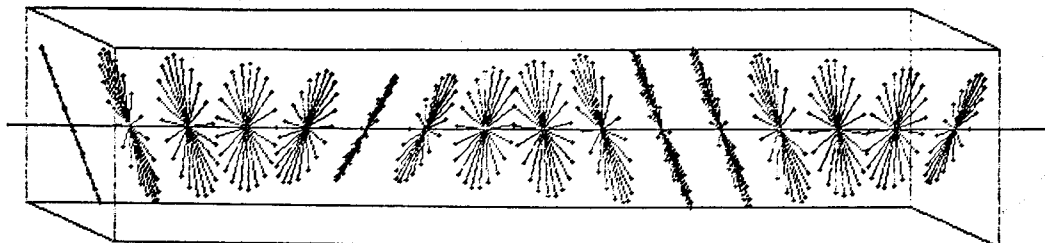
a)



b)

図 23 a) 左方から直線偏光が入射した時の歪のあるガラス中での電場分布
b) $x-y$ および $x-z$ 平面内の電場成分の分布

——位相差の1波長相当かゝ生ずる距離——



各場所での時間の経過にともなう電場方向の変化

図 24 左方から直線偏光が入射した時の歪のあるガラス中の各場所できりうる電場を示す図

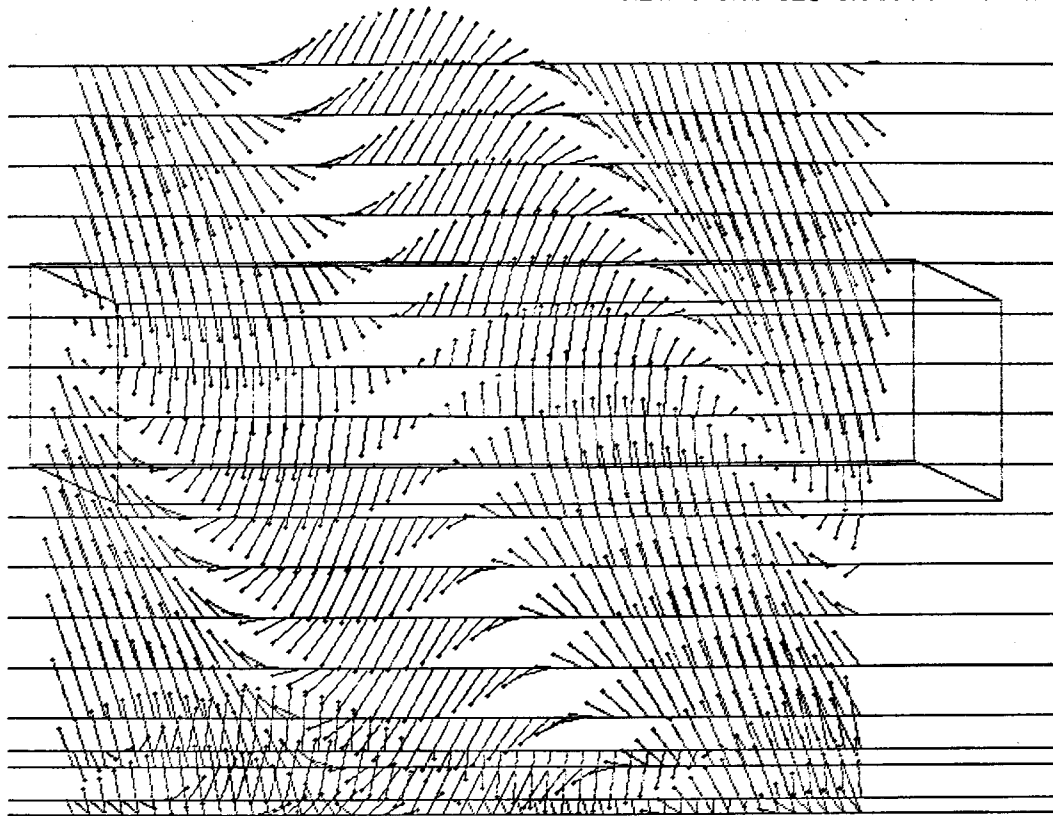


図 25 左方から直線偏光が入射した時の歪のあるガラス中での電場分布が時間とともに変わる状況を上から下へ順々に示す図

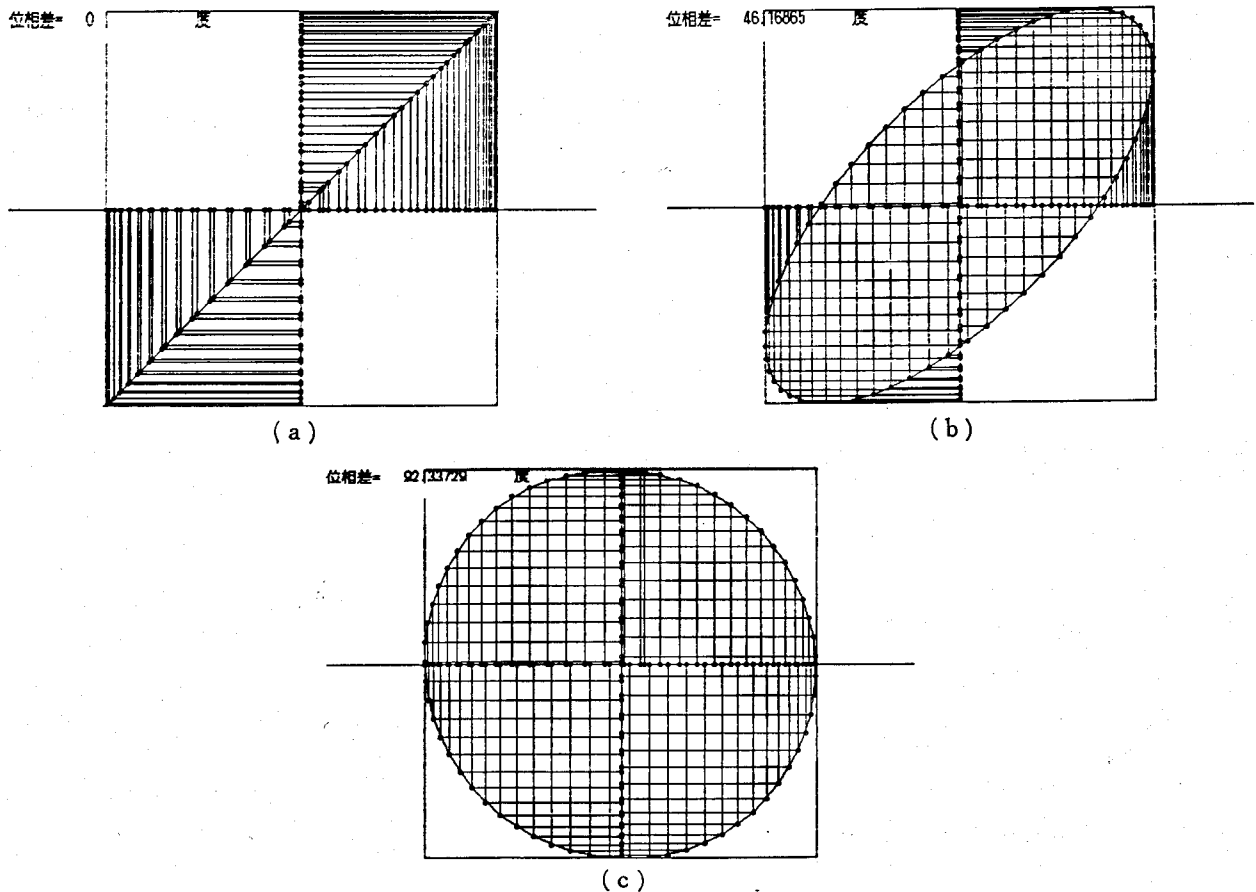


図 26 左右および上下方向の成分波の合成波が、成分波間の位相差が a) 0° , b) 約 45° , c) 約 90° である時それぞれ直線偏光, 楕円偏光, 円偏光になることを示す図

と書ける。グラフィックスの例を二、三示す。

光弾性では色光の挙動を利用していることが多いので、シミュレーションをするのにカラーディスプレイを持つコンピューターは都合がよい。また時間の経過に伴う変化もわかりやすく表示できる。

〔参 考 文 献〕

- 1) 歪検査器の利用技術 ニュー・グラス・テクノロジー 2 [2] 44 (昭57)
- 2) 光弾性 セラミックス 昭和51年10月号および11月号

〔著 者 紹 介〕



岸井 貫 (きしいとおる)

昭和25年3月東京大学理学部物理学科卒業、同年4月東芝入社、硝子技術部(現東芝硝子)、昭和38年8月東芝中央研究所。同総合研究所を経て計測器の販売と開発に従事。昭和58年10月東芝硝子(株)入社。昭和46年～47年カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員、工学博士(東京工業大学)