

## ガラスの歪（ひずみ）

ガラス工業では製品に応力があることを「歪みがある。」、「歪みが残っている。」などと表現する。ここで言う「歪み」は、弾性論、材料力学でのそれと意味が異なるし、一般会話でのそれとも異なるので、注意が必要である。

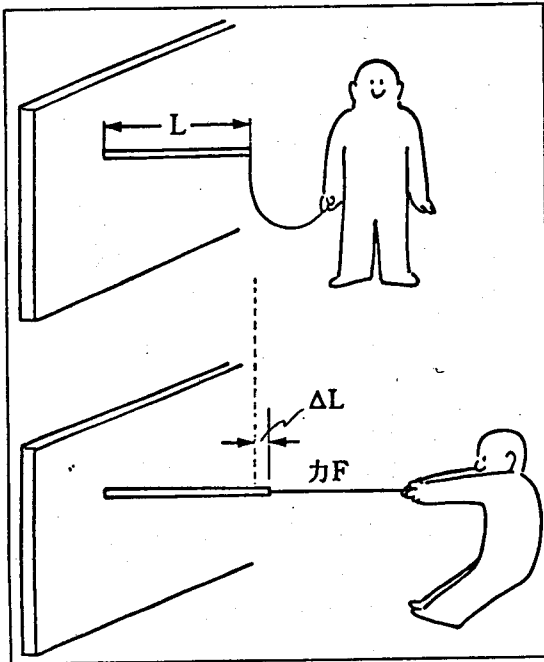
ガラスの歪（ひずみ・stress）・・・ガラス器内で力（外力、内力または双方）が働いている状態  
英語では strained glass という表現がある。

一般の会話では・・・「歪（ゆがみ）」 変形していること  
「歪（ひずみ）」 無理があること

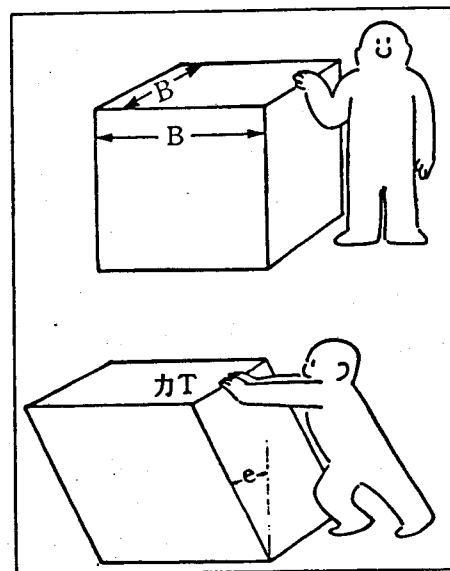
材料力学・弾性論では・・・

「歪（ひずみ）・strain」・・・力・温度変化・流動などが原因で生じた元の形からの 伸縮・湾曲・捻れ

「力・force」, 「応力（または歪力。歪に応じて生ずる力の意味）・stress（単位面積あたりの力で表す習慣）」



引張り歪の発生



ずり歪の発生

金属の加工「歪み」・・・結晶構造・粒界・配向・応力分布などが安定状態・平衡構造でない。

地震について・・・「高いひずみ蓄積率」・「・・・付近は北北西－南南東方向に押し縮められひずみの蓄積率は全国最高・・・」：strainを指している。

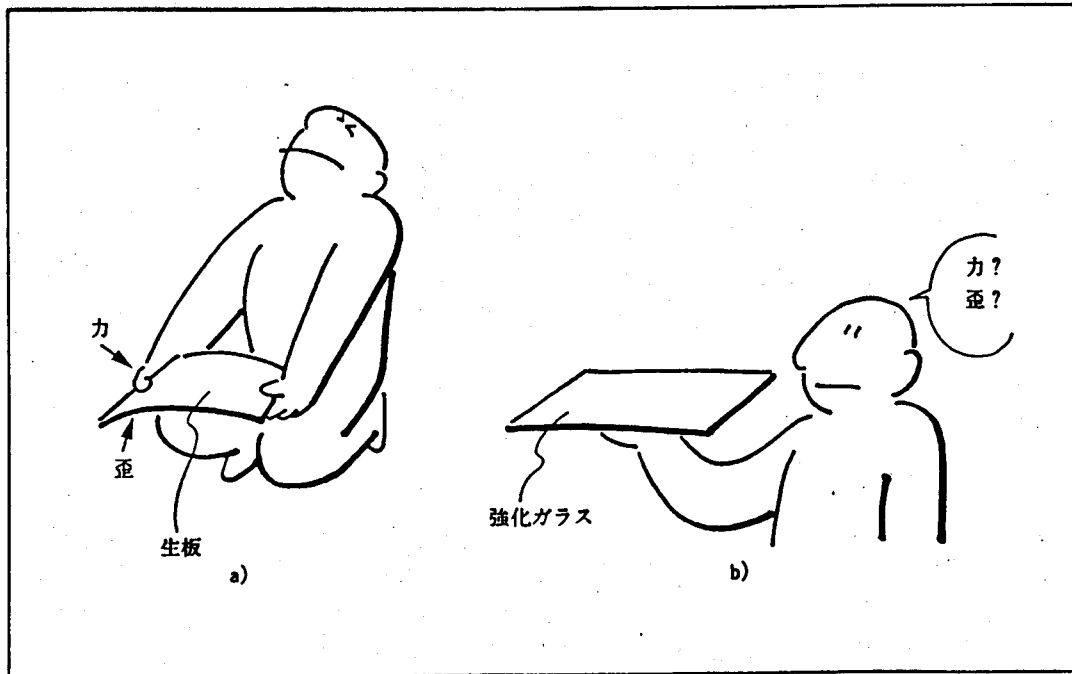
コンサイス辞書では stress・・・圧力・圧迫する  
strain・・・ひずみ・歪ませる・変形・曲げる・狂わせる

他の分野の方と話し合う場合には十分な説明が必要である。  
このような事情は英語、ドイツ語でも同様である。

ガラス器の「ひずみ」は弾性論における元応力（initial stress）に対応すると考えると理解し易い。

元応力の例：プレストレストコンクリート・焼きばめ・自緊砲

ガラスでは、力の有無が簡単に判断できるのに、外力による弾性変形を考える必要が少なく、変形を考えることは稀であった。内力の有無の方が致命的に重要であった。strain・stressの区別を意識させられる機会が無かった。



a) 生板ガラスに力を加えて歪ませる  
b) 外力がなくても弾性力、弾性歪は存在し得る

### ガラスの歪み

一時歪み・・・一時的な加熱・温度不均一に伴う歪み。温度が均一になると消える。

局部的冷却・・・張力が発生し割れ易い。

局部的加熱・・・圧力が発生する。隣接部に張力が発生する。

ガラスの脆さと低い熱伝導性のため、熱歪みは大事な問題である。板ガラスでは100度Cあたり500kg/cm<sup>2</sup>になる。

永久歪み・・・成形時に温度不均一状態で固化したことにより生じた歪み。消去には徐冷点での加熱-徐冷という操作が必要である。

融着による歪み・・・金属・セラミック・他種ガラス等と融着したことによる歪み。熱処理によって消すことはできない。材料の特性の組み合わせを選ぶと変えられる。

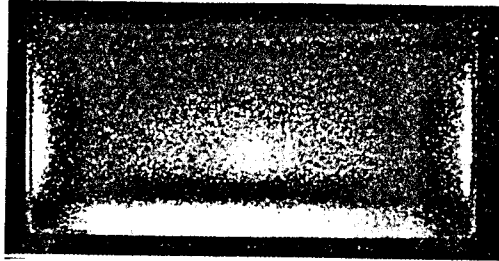
外力による歪み・・・外力を取り去れば消える。

### ガラスの歪みと強度 ガラスの強度

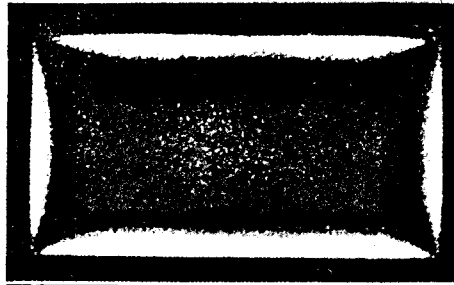
引っ張りの力に弱い。引っ張りの力がある部分は傷が自然に成長する。破壊・遅延破壊を起こす。

歪みが無いと・・・自然遅延破壊の心配は無い。

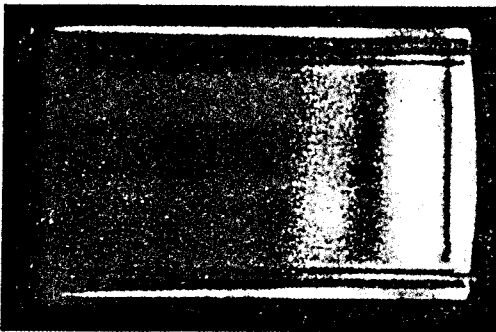
歪みがあると・・・張力の部分と圧力の部分がある。局部に傷ができる  
 と張力の領域を経て全体の破損に到る。切断・研削加工ができない。  
 張力が表面に出ると・・・弱点になる。・・・遅延破壊の恐れがある。  
 張力が内部だけであると・・・一応安心。  
 表面層全面が強い圧力状態であると・・・強化ガラス。外力が圧力  
 をキャンセルするまで破壊しない。



a)



c)



b)



d)



e)

- a) 一つの縁を暖め一時歪を発生させたガラス板
- b) 一端を焼き丸め処理したガラス管
- c) 軟化-急冷処理を加えられたガラス板
- d) 鉛ガラス/板ガラス融着サンプル
- e) 機械的に曲げ歪を加えられたガラス角棒

「歪」のあるガラスを歪検査器で眺めた状況

### 歪みの観察・歪検査器 ・・・・ストレン・ビューワー 光弾性効果を利用する。

光弾性測定の原理の理解には、光波のベクトルとしての時間・空間的挙動と力のテンソル（後記）との相互作用を考える事が必要である。また測定で得られる情報に幾つもの限界がある。

普通の「光弾性」は、プラスチック製模型に外力を加えた時の応力分布を精密に解析する事である。また普通は二次元的な平面歪みだけが扱われる。

ガラス工業では、模型実験は無意味で製品自体を測ることが要求される。力は内力であり、質点の力学ではなく弾性体の力学で扱う力である。また、分布は三次元的、光弾性効果はプラスチックより一ないし二桁小さいという特殊性がある。

ガラス工業特有の光弾性技術が工夫された。

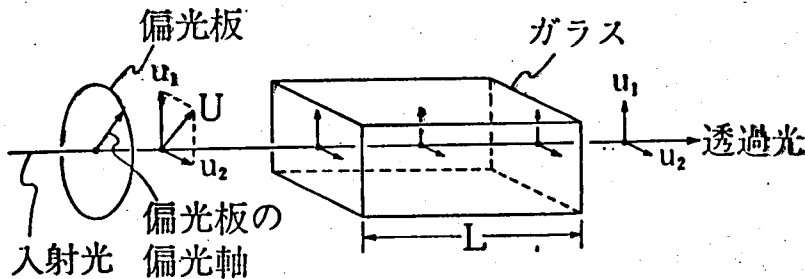
普通の二次元的な「光弾性」では、光弾性図形から応力の値や主応力方向が簡単に解る。ガラス製品についての観察では、あらかじめ応力分布の定性的な仮定を持たないと光弾性図形の正しい解析ができない。

光弾性効果

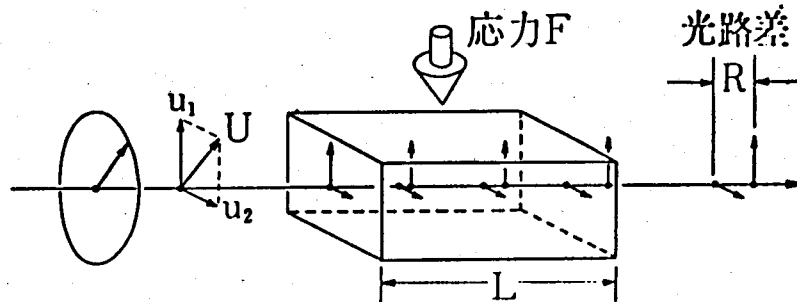
力が働くとガラスが「複屈折性」になる。0.0001 - 0.001の桁。

屈折率 = 真空中の光速度 / 材料中の光速度

「複屈折」・・・光が二つの成分光に分かれて互いに違う速度で進む・・・  
 ・・・二つの屈折率がある。・・・「光路差」が発生する  
 ・・・光路差を偏光の干渉を利用して測る。



a) 応力がない場合  $R=0$



b) 応力Fがある場合  $R=CFL$

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

光路差 = 応力 x 光の経路長さ x ガラスの光弾性常数  
 nm  $\text{kg/cm}^2$  cm

板ガラス・びんガラス:	$2.6 \times 10^{-7}$
ホウケイ酸ガラス:	$3-4 \times 10^{-7}$

複屈折 = 光路差 / 光の経路長さ = 応力 x 光弾性常数

二枚の偏光板を直交させて観察する。

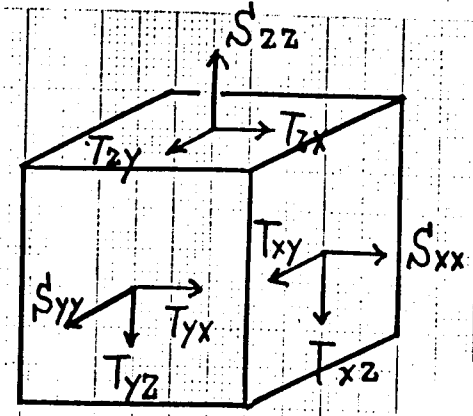
複屈折なし	・・・ 光路差なし	・・・	暗く見える。
複屈折あり	・・・ 光路差あり	・・・	明るく見える。

弾性体中の力の働き方の一般則

体内では力が働いており、それに対応した歪もある。このような力を、歪に応じて存在すると言う意味で「応力」、または「歪力」と呼ぶ。これらは単位面積当たりの力で表現する習慣になっている。一つの面を考えると、面に垂直に働く

力と面に平行に働く力とがある。三つの直交軸を決めてこれらの方向への分力を表すと次のようになる。

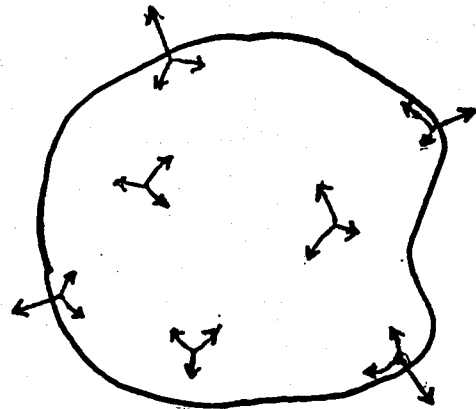
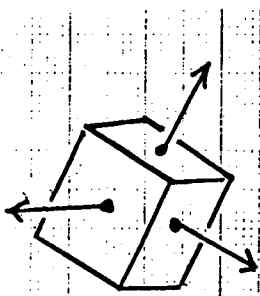
$$\begin{matrix}
 S_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\
 T_{yx} & S_{yy} & T_{yz} \\
 T_{zx} & T_{zy} & S_{zz}
 \end{matrix}$$



このような性質を持つ量のことを数学的にはテンソルと呼ぶ。

Sは引っ張り応力または圧縮応力、Tはずり応力である。

三つの互いに直交する座標軸の方向を適当に選ぶと、軸方向に働く三つのSだけになり、すべてのTは消える。三つのSは引っ張り応力または圧縮応力または引っ張りの力と圧縮の力の組合わせである。この力を「主応力」、三つの軸を「主応力軸」と言う。



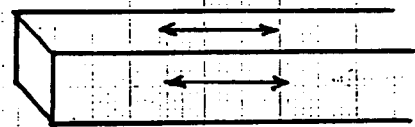
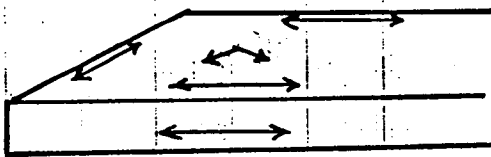
### 応力の働き方の一般則

自由表面に直角に働く力は零である。主応力軸の一つは面に直角、他の二つは面に平行である。

(自由な)縁に直角に働く力は零である。(大気圧を無視する。)

(自由な)板・壁の厚さ方向の力は小さい。

細長いものの中では軸方向以外の力は小さい。主応力軸は軸に平行である。



### 光弾性測定法の特徴

光の経路に平行に働く力は検出されない。

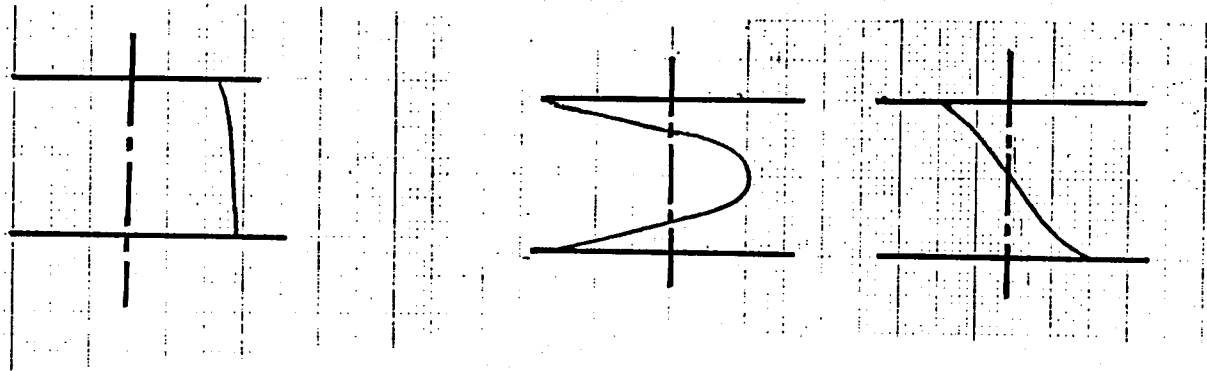
偏光板の偏光軸に平行に働く力は検出されない。

光の経路と直角に、偏光軸と傾いた方向に働く力だけを検出する。定量的測定には力の働く方向を偏光軸と45度にする必要がある(他の角度では見か

け上小さく測られる。) 二つの直交する力がある時はそれらの代数的差が測られる(圧縮力と張力とで力の符号が違うように規約する)。

光の経路に沿う力の代数的積分値が得られる。従って光の経路に沿い力が一定、または大体一定ならば真の値に近い値になる。光の経路の一部で張力、他で圧力なら、真の値より遥かに小さい値になる。

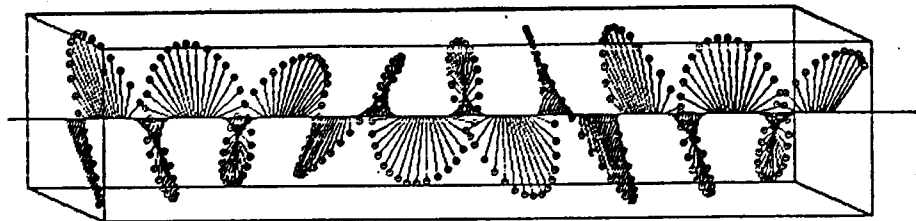
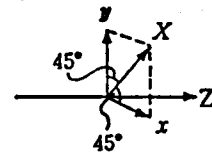
例・強化ガラス、曲げモーメントをかけられたガラス



偏光に及ぼす力の効果

ある瞬間の電場ベクトルの分布

—位相差の1波長相当か”生ず”る距離—



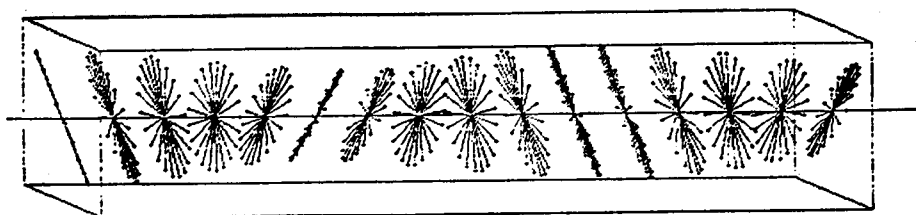
a)



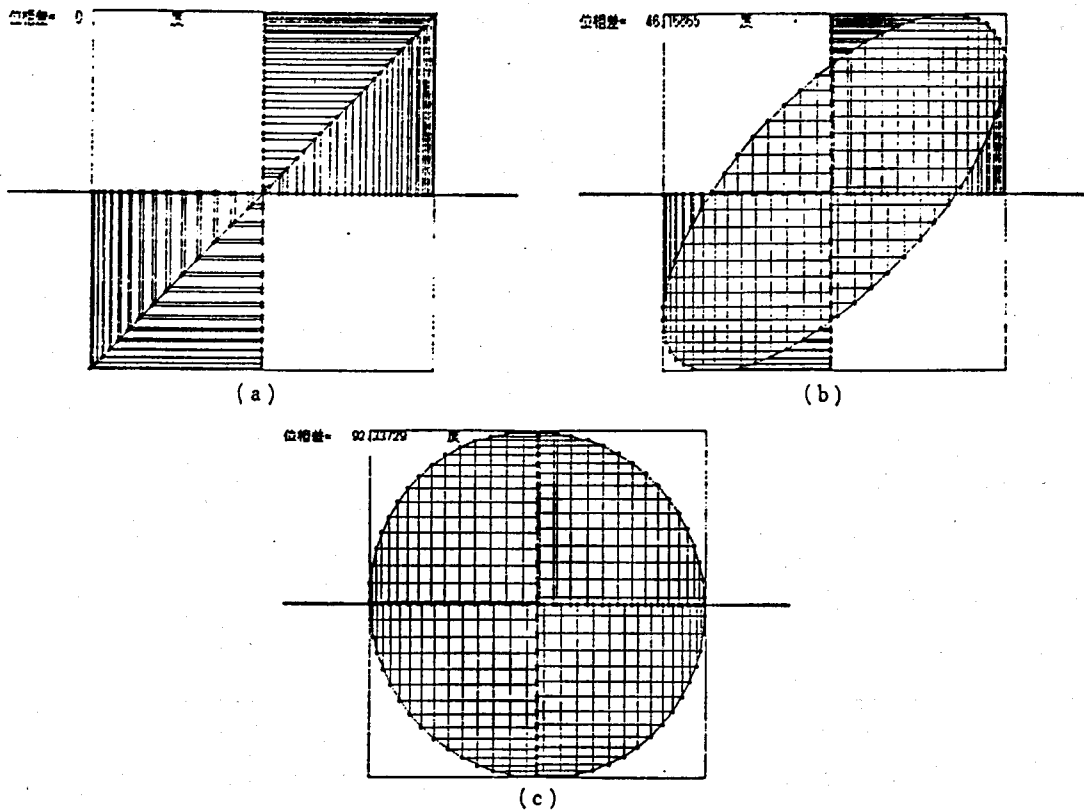
b)

- 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”生ず”る距離—

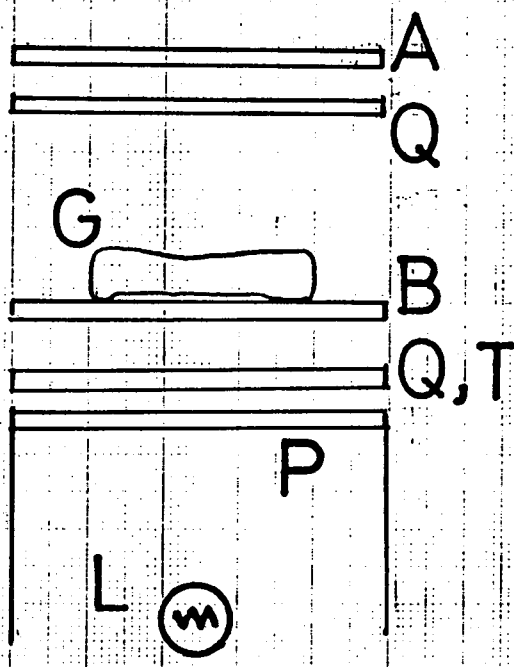


各場所で”の時間の経過にともなう電場方向の変化  
左方から直線偏光が入射した時の歪のあるガラス中の各場所で起こりうる電場を示す図



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)  $0^\circ$ , b) 約  $45^\circ$ , c) 約  $90^\circ$  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

### 光路差の測定方法



- P : 偏光板 (偏光子)
- Q : 四分の一波長板
- T : 鋭敏色板
- B : 載物台
- G : ガラス器
- A : 偏光板 (検光子)
- L : 光源

### 光弾性用光学素子の説明

偏光板 偏光軸に平行に振動する光だけを通過させる。  
 直交ニコル 二枚の偏光板を偏光軸を直交させて配列する。

平行ニコル 二枚の偏光板を偏光軸を平行にして配列する。  
 四分の一波長板 光路差が光源波長の  $1/4$  に等しい複屈折板。白色光源の時は眼に最も明るく感ずる光の波長の  $1/4$  相当。直線偏光を円偏光に変換できる。

二分の一波長板 光路差が光源波長の  $1/2$  相当の複屈折板。直線偏光の偏光面を  $90$  度変える。

鋭敏色板 光路差  $530$  ないし  $560$  nm の複屈折板。直交ニコル・白色光源の時 マゼンタ色を表す。光路差の僅かな変化に伴い赤または紫に敏感に色が変わる。

補整器 光路差を連続にまた既知量だけ変化・実現できる装置。測定されるべき光路差と重ねてキャンセルし、キャンセルに必要な光路差を読む。

補整器の種類：バビネ・バビネ-ソレイユ・セナルモン・ブレイズ（またはブレイズまたはブレイズ-ケーラー）・ベレク・エリングハウス

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	鋭敏色一色標準器法	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。	
偏光子	偏光子の偏光軸方向を $0^\circ$ とする。							
検光子	$90^\circ$	$0^\circ$	$90^\circ$	$90^\circ$	$90^\circ$	回転	$90^\circ$	$0^\circ$
光学素子の角度	な		し		し		$45^\circ$	$45^\circ$
四分の一波長板(I)	な		し		し		$45^\circ$	$45^\circ$
四分の一波長板(II)	な		し		し		$0^\circ$	$-45^\circ$ (四分の一波長板(I)と直交)
鋭敏色板	か	し	$45^\circ$		な	し	な	し
補整器	な		し		$45^\circ$	な	し	し
試料の主応力軸	種々の角度で観察し総合する。		し		$45^\circ$		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

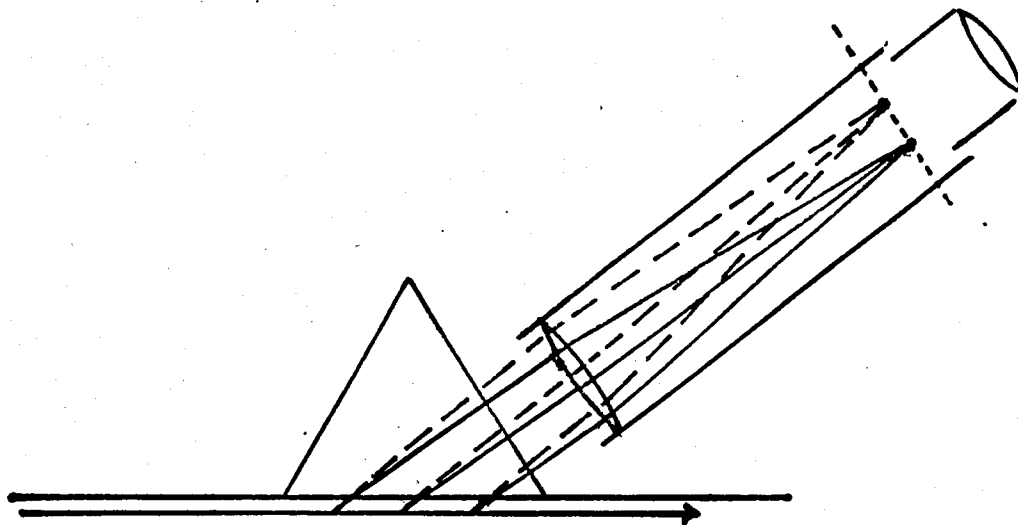
力の性質の判断  
 (実演で見せる予定)

強化ガラスの表面応力測定

強化ガラスでは表面に圧縮、内部に引っ張り応力があり、表面応力の測定が品質管理に重要である。表面に平行に光を通して測ることが必要。

屈折計で複屈折を測定する方法が採られる。





管球用ガラス--封着に関するガラスの物性--ニュー・ガラス・テクノロジー 1巻3号23頁 日本硝子製品工業会

歪検査器の利用技術 2巻2号44頁 (1982) 同上

歪検査器の利用技術 (II) 同上 5巻4号47頁 (1986) 同上

歪検査器の利用技術 (III) 応力の性質の判断 The glass No.15 (1990)15頁  
日本硝子製品工業会

歪検査器の利用技術 (IV) セナルモン法の原理と活用 同上 No.20 (1991)26頁

検査器の利用技術 (V) 歪に関する一考察 同上 No.27 (1993) 14頁

光弾性 セラミックス 昭和51年10月及び11月号 窯業協会(現日本セラミック協会)