

## 2. 技 術 解 説

### ガラスの歪み (ひずみ) について

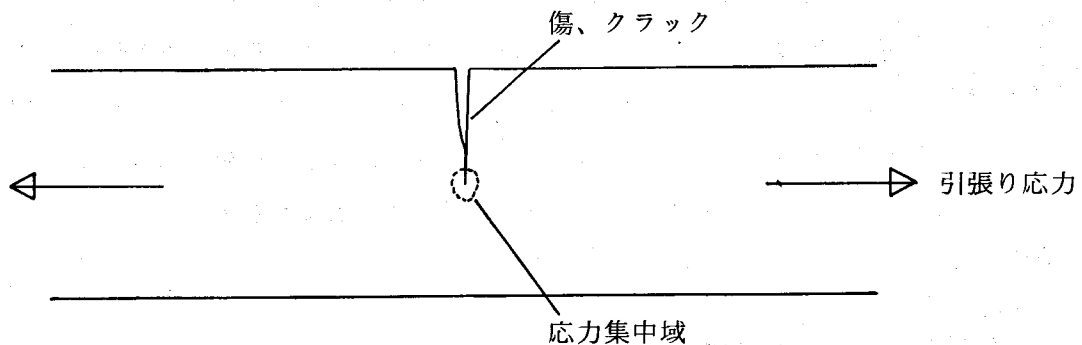
技術専門主幹 岸 井 貫

#### 1. 歪 み (ひずみ)

東芝グループでは、ガラス内に応力が働いている状態を「歪みがある」、「歪みが残っている」などと表現し、また「歪み」を「応力」または「応力により無理が生じている」というニュアンスで使っている。歪みを光弾性の原理で観察、測定する器具も「東芝歪検査器」、「東芝精密歪計」と名付けられ、使用および販売されている。

歪みはガラス製品の強度や破壊と関係があるので関心が払われてきた。

ガラスは脆性材料であって引張り応力や応力集中に弱い。歪みのあるガラスにはほとんどの場合引張り応力の領域がある。ここは製品のアキレス腱であり、加熱や研削を伴う後加工工程で破壊起点になる。また傷をつけられても破壊を始める。顕微鏡的な傷がこの領域にあればじわじわ伸びて時限的破壊を起こす。引張り応力の領域にある傷の先端には応力が集中し、傷がさらに伸びるといふ悪循環が繰り返えされる。(第1図)



第1図 引張り応力領域にある傷先端での応力集中

これらの悪い効果無くすには製品の歪みを消しておかなくてはならない。

「歪み」の呼び方や表現には企業ごとに特有の習慣があるので、社外の人達との話し合いの時には注意が要る。特に弾性論では「歪み」は弾性変形、塑性変形、粘性流動などの結果生じた変形の大きさを指し、我々の習慣とははっきり違う。従って他の材料分野の人に誤解され易いので、ていねいに説明する必要がある。弾性論の術語でも、日本語、英語とも、

歪 み (ひずみ) ←→ strain  
応 力 ←→ stress

と区別されている。

これと反対に Morey の「Properties of Glass」中では「strain」が我々の「歪み」と同じニュアンスで使われている。

## 2. 歪みの許容限界

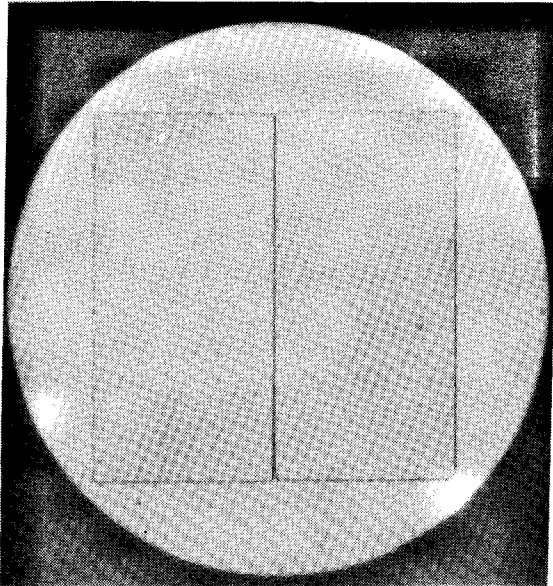
ガラスの抗張強度は数 $\text{kg}/\text{mm}^2$ から十数 $\text{kg}/\text{mm}^2$ であるから、数倍の安全係数を見込んで歪みの許容限界は $1\text{kg}/\text{mm}^2$ と見なすのが良いと思う。安全係数の内容には傷による局所的な弱化や、形状的な特異点での応力集中も考慮されることが必要である。

## 3. 歪みの種類と発生する原因

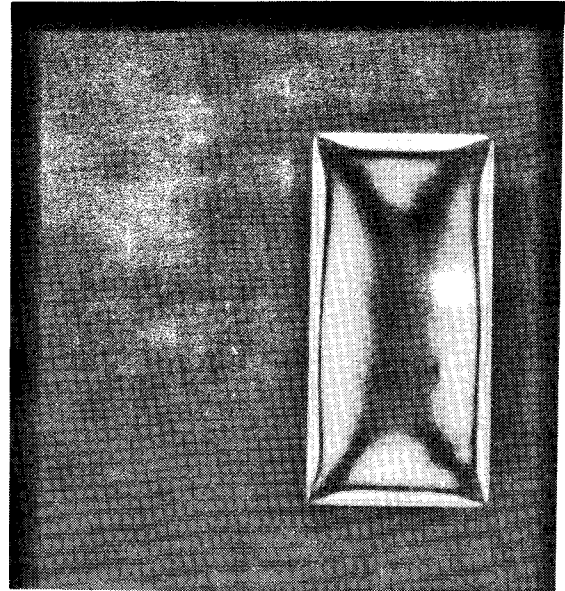
東芝歪み検査器で観察しながら記していこう。2枚の偏光板を視野が暗くなるように組み合わせている。ガラス製品を挿入すると歪みのある部分が明暗模様を現わす。

### 3.1 歪みのないガラスと歪みのあるガラス

偏光板なしで透明に見えるガラス(第2図a)は、歪みがなければ(第2図a左側)偏光板の間に入れると真黒になり、視野に溶け込んで見えなくなる(第2図b左側)。これに対して歪みのあるガラス(第2図a右側)は、偏光板なしでは歪みのないガラスと区別ができないが、偏光板の間では明暗(および色づき)の模様を現わす(第2図b右側)。



a) 偏光板なしの観察



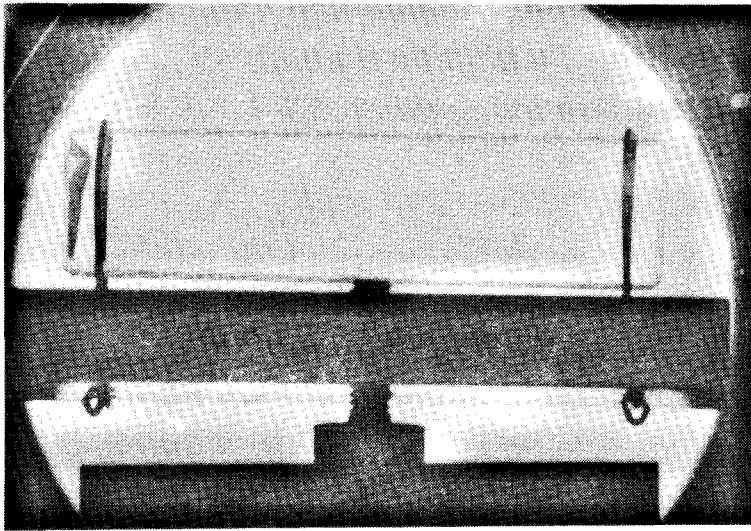
b) 偏光板を使用した観察

第2図 歪みのないガラス(左)と歪みがあるガラス(右)

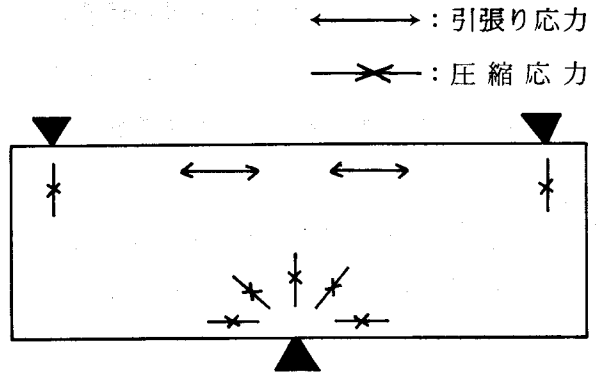
### 3.2 外力による歪み

歪みのないガラスを加圧用治具にかける(第3図a)。力を加えなければ偏光板間でガラスは見えない。力を加えるとガラスが歪み、明暗の模様が現われる(第3図b)。このような場合のガラス内での応力分布を第3図cに示す。

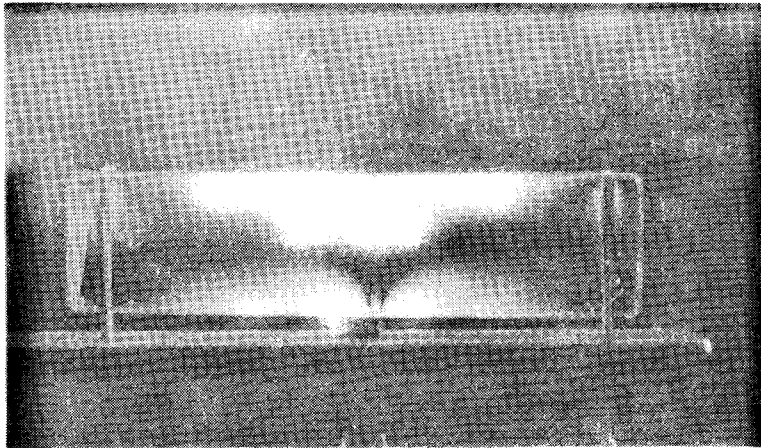
ガラスが外力で歪んだまま放置されていると、引張り応力の部分にある傷が伸びて遅延破壊を起こすことがある。引張り応力が十分小さい条件で使う必要がある。



a) ガラスを加圧する状況 (偏光板なし)



c) ガラス内の応力分布

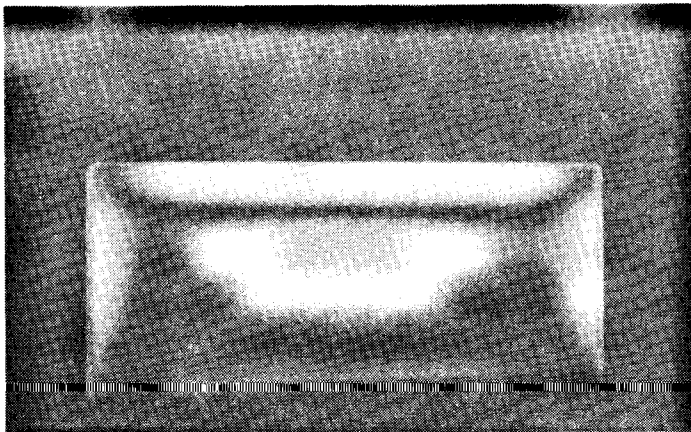


b) 偏光板間に置いての観察

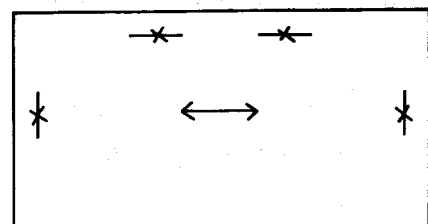
第 3 図

3.3 熱衝撃による歪み (一時歪み)

歪みのないガラスの一部分をバーナで加熱した。偏光板の間に入れると第4図 a のように見える。ガラスが冷えてしまうと歪みは消える。



a) 偏光板間に置いての観察



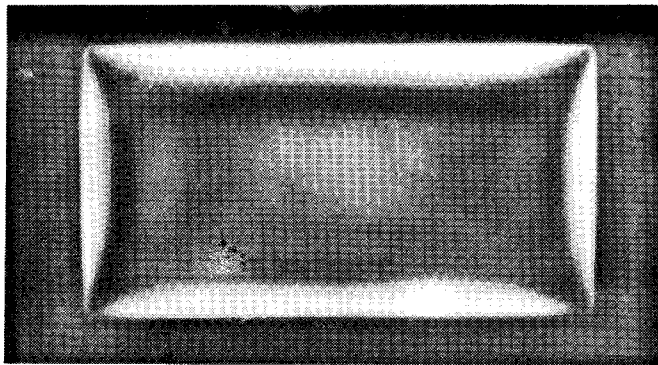
b) 応力分布

第4図 一辺を加熱されたガラス

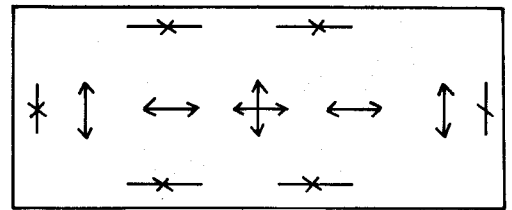
この歪みは、加熱された部分の熱膨張を他の部分が押さえようとするので生ずる。ガラス内の応力分布は第4図bのようになっている。歪みは温度が不均一の時だけ一時的に存在するので「一時歪み」と呼ばれる。熱いガラスの一部分だけが冷やされた時も一時歪みが生じ、冷やされた部分に引張り応力が生ずるので、割れやすい。

### 3.4 永久歪み

ガラス板を電気炉内で高い温度まで加熱してから速めに冷やしたところ、冷却後に第5図aのような歪み模様が現われた。この歪みは、ガラスが粘性流動を起こす温度以上に加熱され、かつ温度の不均一がある条件で固化した時に生ずる。



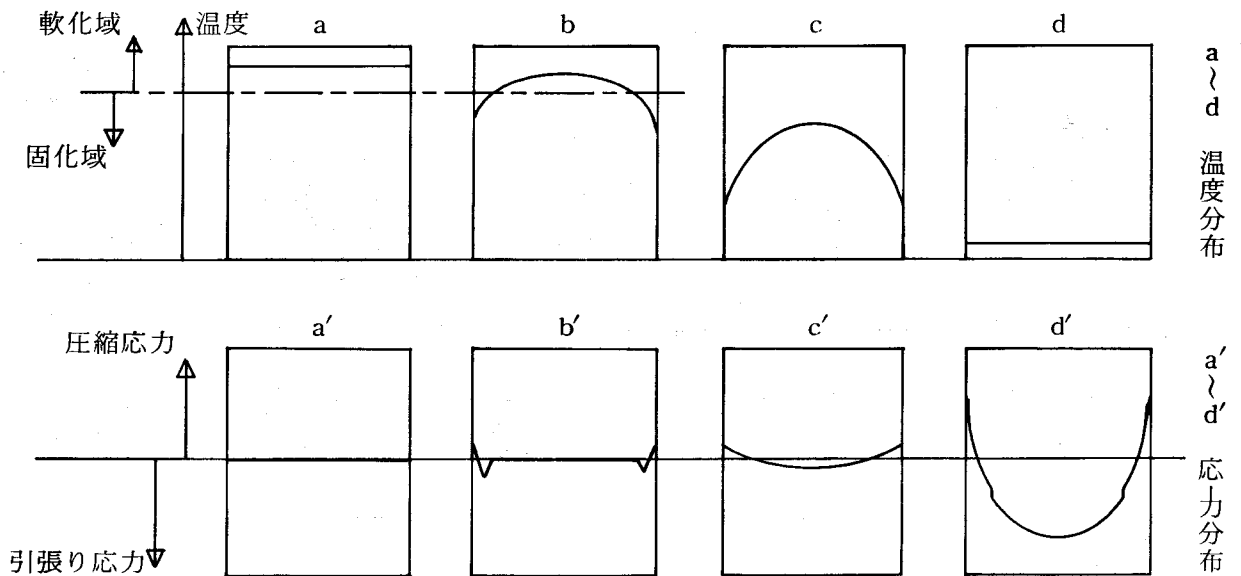
a) 偏光板間での観察



b) 応力分布

第5図 永久歪みを生じたガラス

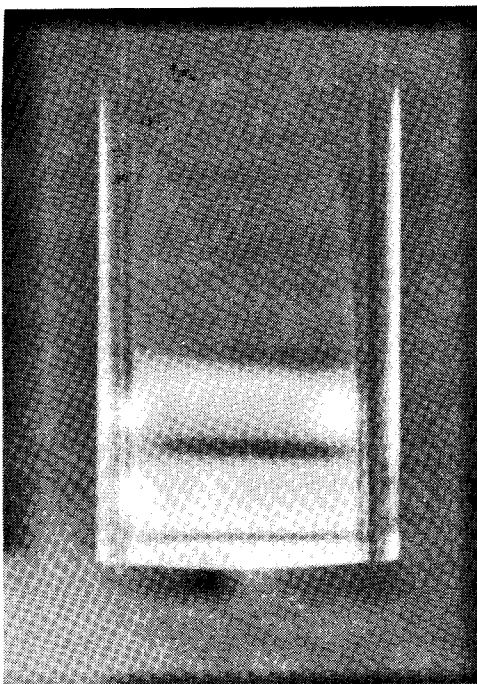
ガラスが加熱され軟化したと考える(第6図a、a')。軟化しているのでガラス内に歪みはない。冷却を始めたところ、縁が中央部よりも低温になり始めに固化した(第6図b、b')。次に冷却が進み中央部も固化した(第6図c、c')。常温になってしばらくすると全体の温度は均一になった(第6図d、d')。第6図cからdの状態になる間に、中央部は縁よりも温度低下量が大きく、余分に縮もうとする。しかしこのような収縮の一部は周辺によって妨害され、中央部は引張り応力、周辺部はその反力として圧縮応力が発生して全体が平衡する(第5図b)。



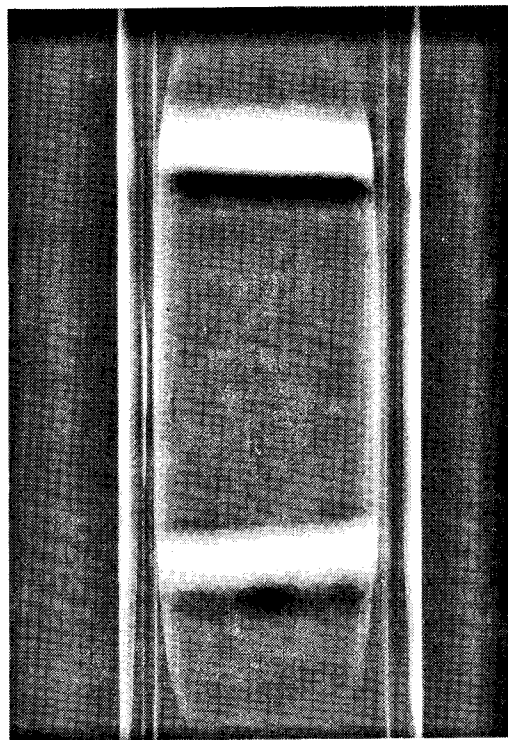
第6図 永久歪み発生過程の説明図

このような歪みは常温では永久に消えないので「永久歪み」と呼ばれる。永久歪みを消すにはガラス全体を加熱して粘性流動をさせてから、温度不均一が十分小さいような条件でゆっくり冷却する。この操作を「徐冷」、「なまし」、「焼鈍」などと呼ぶ(4. 参照)。

ガラス製品の一部だけを加熱、軟化させ、あるいは熱加工してから速く冷却しても、似たような理由で永久歪が生ずる。第7図aは鉛ガラス管の端部を、bは管の中央部だけを軟化させてから冷却したサンプルである。軟化した部分と軟化しなかった部分との境に歪みが特に強く見える。歪みを除くには、温度勾配がゆるやかでかつ最高温度がガラスの粘性流動が始まる温度であるような炉に入れ、歪みの部分を最高温度部に置いた後にゆっくりガラスを冷却する。



a) 鉛ガラス管の一端



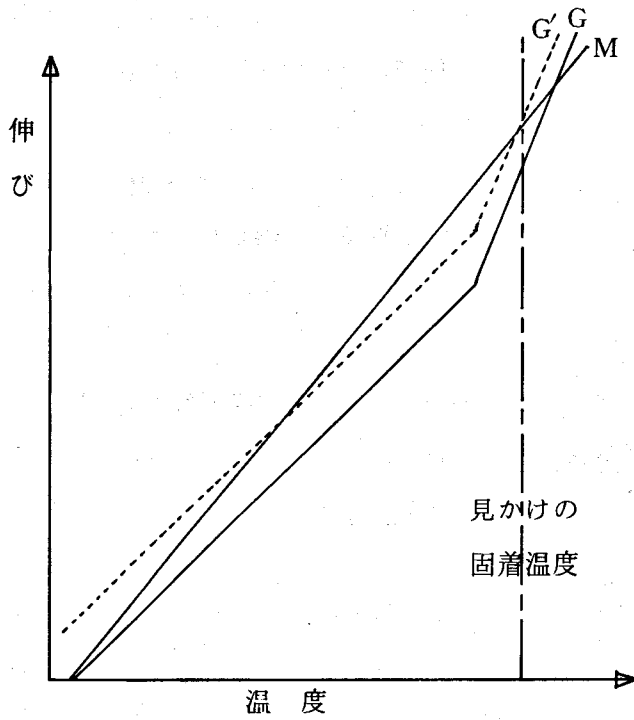
b) 鉛ガラス管の中央部を軟化させて  
作り込んだ永久歪み

第 7 図

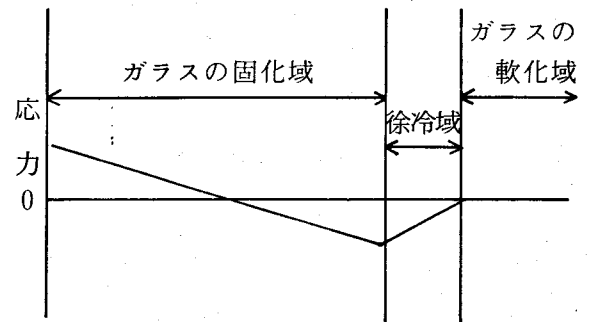
### 3.5 封着による歪み

ガラスが金属、セラミック、または自分よりも軟化温度の高いガラスと溶着された気密封着を作ると、ガラスと相手材料との熱膨張特性の差に原因する歪みが発生する。

ガラスと相手の金属の熱膨張曲線が第8図aのGおよびMであるとする。この二つを高い温度で溶着してから冷やす。ガラスが軟化している温度域では応力がない。「徐冷域」という温度域ではガラスが固まり出し応力も発生し始める。ガラスが固化した温度域では両材料間の伸びの差に比例した応力が時々刻々に発生し積み重なって行く(第8図b)。



a) 膨張曲線

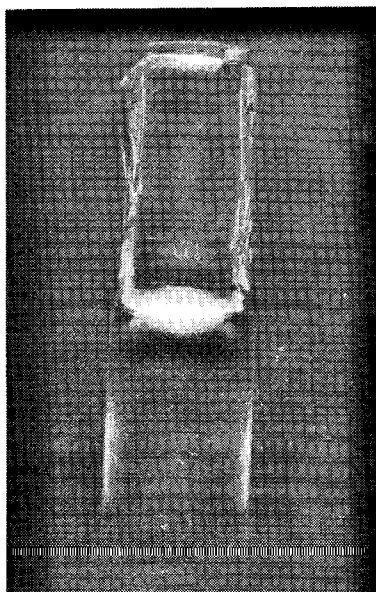


b) 応力

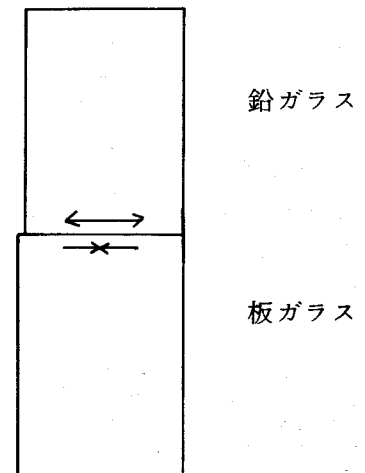
第8図 ガラスと金属との封着体での応力発生の説明図

従って溶着体中の応力は、G 曲線を伸び軸に平行に移動し、徐冷域内のある温度（見かけの固着温度）でM 曲線と合致させ（曲線G'）た時、曲線MとG'との間の開きに対応して現われる。

「徐冷域」とはガラスの粘度が $10^{13} \sim 10^{14.5}$  ポイズであるような温度域である。 $10^{13}$  ポイズに対応する温度を徐冷点（アニーリング・ポイント）、 $10^{14.5}$  ポイズに対応する温度を歪み点（ストレイン・ポイント）と呼ぶ。これらはJISでもASTMでも測定法が規定されており、これらが特性表に記されているガラスも多い。



a) 偏光板を使ったの観察



b) 応力分布

第9図 板ガラスと鉛ガラスの溶着体

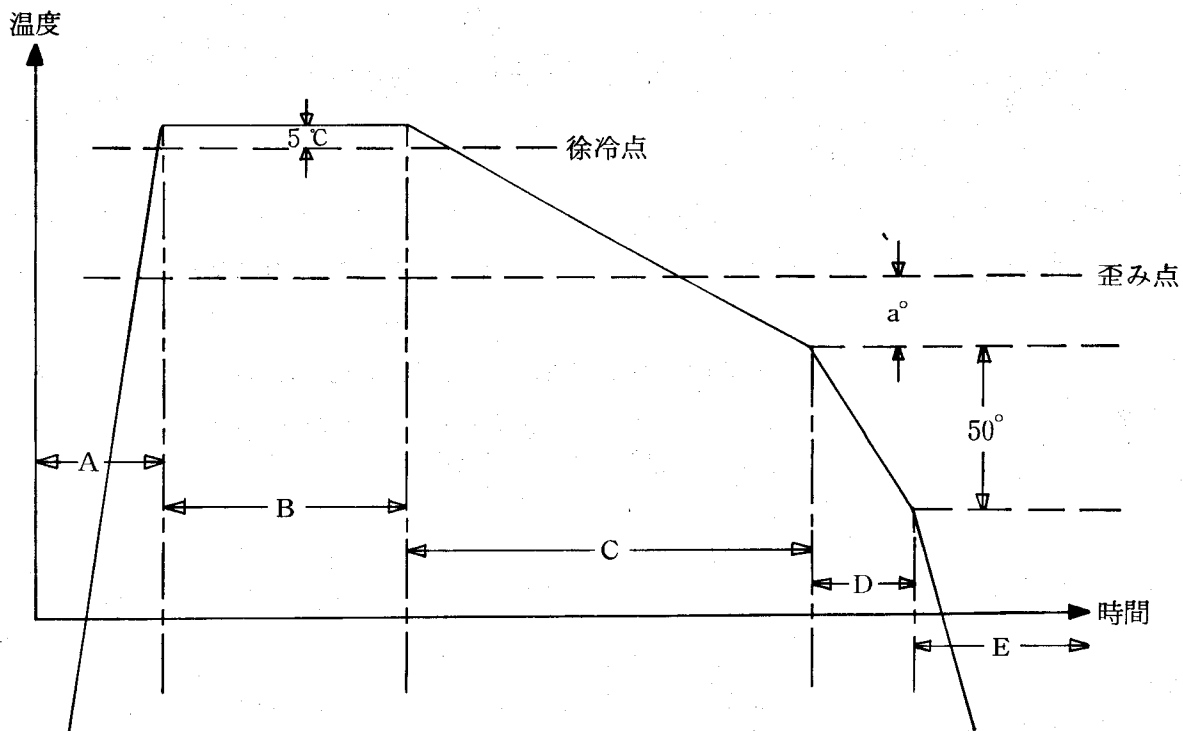
第9図は板ガラスと鉛ガラスとを溶着した試料である。板ガラスの方が低膨張であり、第9図bに記したような応力分布があった。鉛ガラスは収縮を板ガラスに妨害されて引張り応力を生じ、板ガラスにはその反力として圧縮応力が発生している。

#### 4. 歪みの除去法

外力による歪みは外力を除けば消える。一時歪みは温度の不均一が無くなるのを待てば消える。しかし永久歪みは時間をかけただけでは消えない。ガラスを加熱し、その粘性流動で歪みを消す必要がある。

ガラスの粘度が $10^{13}$ ポイズであると歪みが緩和して消える過程の時定数は分の程度である。 $10^{14-15}$ ポイズでは時間の程度である。従って永久歪みのある製品をなますには、徐冷点で一様に加熱してから、温度不均一が十分小さいような条件でゆっくりと歪み点以下まで冷やし、それから一時歪みが小さいような条件で常温まで冷やすことが必要である。

ガラスの熱伝導率はセラミックに比べ1桁、金属に比べて3桁低いから、温度不均一を生じさせないための冷却または加熱速度がかなり小さいし、しかもガラスの肉厚の2乗と膨張係数とに反比例させて小さく決める必要がある。温度スケジュールの例を第10図と第1表に記す。



第10図 ガラス製品のなましのスケジュール  
(パラメーターは第1表を参照のこと)

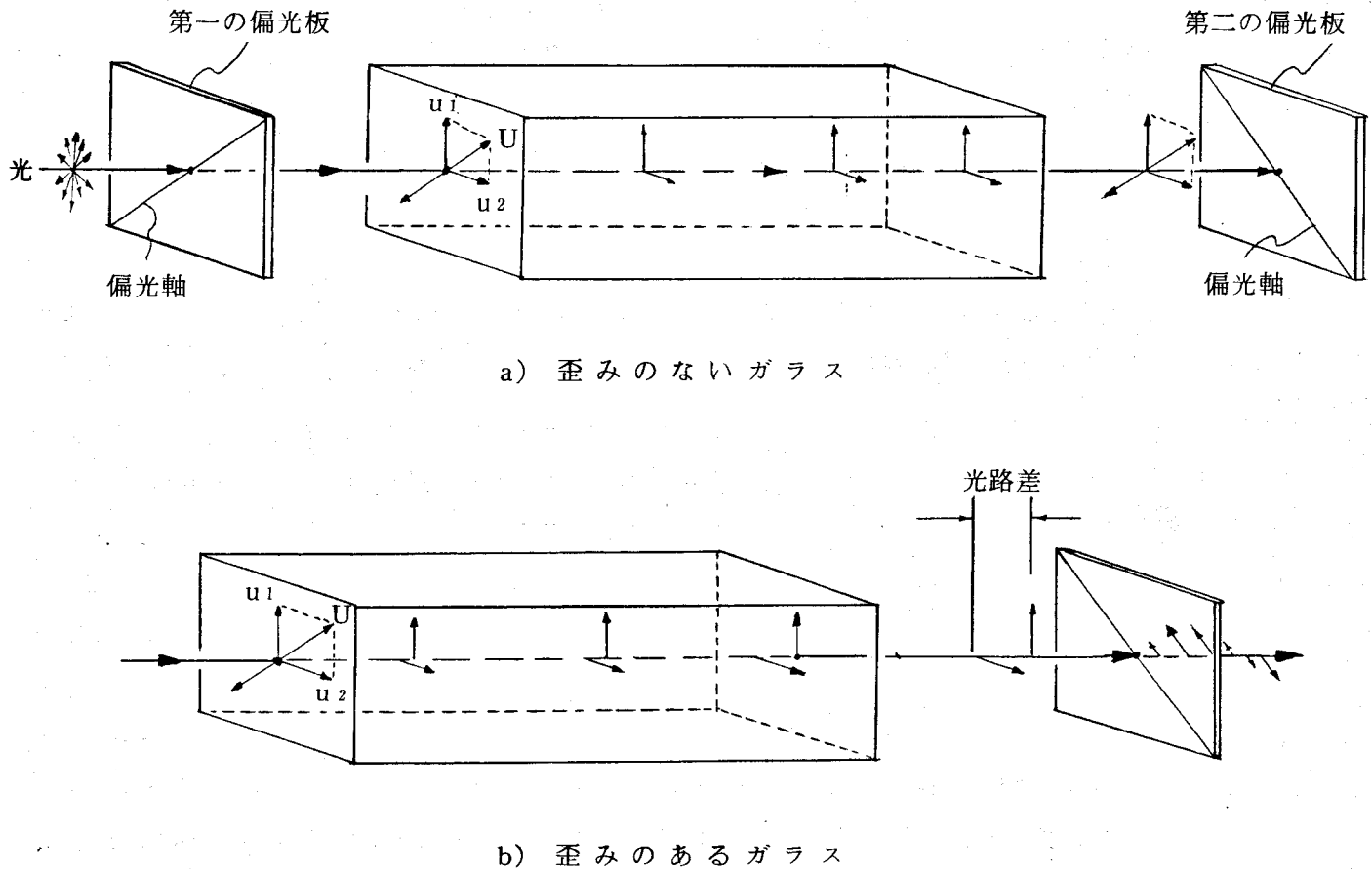
ガラスの膨張係数 ( $10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	肉厚 (mm)	A 加熱速度 ( $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ )	B 保持時間 (min)	C		D 冷却速度 ( $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ )	E 冷却速度 ( $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ )
				温度差 a ( $^\circ\text{C}$ )	冷却速度 ( $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ )		
33	3	400	5	5	39	78	400
	6	130	15	10	12	24	130
90	3	140	5	5	14	28	140
	13	11	30	20	1	2	11

第1表 なましのスケジュール (Shand, Glass Engineering Handbook)  
(第10図を参照のこと)

溶着体の場合にも永久歪みを除くためのなまし操作は必要である。しかしガラスと相手材料との膨張特性の違いによる歪みはなましでは除けない。従ってこの歪みを小さくするためにはガラスと相手の材料との組み合わせを選ぶしか方法がない。

### 5. 歪みの観察法

ガラスの歪みは偏光を使って検出、観察、側定することができる(第11図)。



第11図 歪検査器の原理の説明図

光源からの光を第一の偏光板を通して直線偏光Uとする。Uは互に直交する直線偏光成分  $u_1$  と  $u_2$  とをベクトル合成したものと見なすことができる。歪みのないガラス中では  $u_1$  と  $u_2$  とは同じ速さで進み、ガラスから出た後に  $u_1$  と  $u_2$  を合成すればUと同じ直線偏光になる。第二の偏光板が、その偏光軸を第一の偏光板と直交させて置かれていると、光はすべて第二の偏光板で吸収される(第11図a)。観察者には視野もガラスも暗く見えない。

歪みのあるガラス中では  $u_1$ 、 $u_2$  の一方は他方より遅れる。この性質を「応力で引き起こされた複屈折性」という。そのためガラスから出た後に  $u_1$  と  $u_2$  とを合成して生じた光は、Uとは性質が違って第二の偏光板を透過できる(第11図b)。観察者にはガラス内の歪みのある部分が明るく見える。

$u_1$  と  $u_2$  との間に生じた遅れは「光路差」と呼ばれ、ガラス中の応力に比例する。

光路差、応力、複屈折の間には次の関係がある。

$$\text{光路差} = (\text{応力}) \times (\text{偏光が通過した距離}) \times (\text{ガラスの光弾性常数})$$



光路差 = (偏光が通過した距離) × (複屈折)

応力 = (複屈折) ÷ (ガラスの光弾性常数)

従って光路差を測定できると応力や複屈折を計算できる。東芝歪検査器、東芝精密歪計にはそのような機能がある(第12図)。



第12図 東芝歪検査器

光エレクトロニクス技術ではプラスチック材料の「歪み」や光学材料の光路差、複屈折に関心が強くて、東芝歪検査器や精密歪計が多く使われている。定量測定ができる特徴が喜ばれている。

## 6. 関連資料

最近発行されたものを列記する。

東芝歪検査器 (SVP-10、SVP-10-P) 取扱説明書 東芝硝子

東芝精密歪計 (SVP-30) 取扱説明書 東芝硝子

管球用ガラスの光弾性測定 歪検査器、精密歪計の適用 材料情報 昭和57年7月

東芝総研図書館

管球用ガラス — 封着に関するガラスの物性 — ニュー・グラス・テクノロジー

1 [3] 23 (昭57) 日本硝子製品工業会

歪検査器の利用技術 同上 2 [2] 44 (昭57)

歪検査器の利用技術(Ⅱ) 同上 5 [4] 47 (昭61)

光弾性 セラミックス 昭和51年10月号および11月号 窯業協会

ガラスと金属との封着 「特殊ガラス」第2章 新しい工業材料の科学シリーズ 金原出版

東芝教育訓練用光弾性装置 (ビデオテープおよびテキストを含む) 東芝硝子 (装置販売)