

ガラス製品の表面応力測定法

—薄片法・DSR®・バイアスコープ・光学的切断法—

東芝総合研究所兼東芝硝子株式会社 岸 井 貫

はじめに

本稿の中では光弾性の基本的な事項についての説明を省略してあるので、これらについては前稿（本誌2[2]44（昭57））を参照して頂きたい。

表面応力測定法（第1表参考）のうち、表面伝播光を使う屈折計法については最近の発表例が多いので記述をしなかった。

1. ガラス製品の表面応力

ガラス製品で表面応力が問題になるのは次のような場合である。

1.) 強化ガラス

強化ガラスは表面に圧縮応力を生じさせて機

械的強度を上げるものであり、表面応力は強度と関連する。強化法には熱的（または急冷）と化学的との2種類がある。

2.) 複合ガラス

2層またはそれ以上に異種ガラスを重ねて成形した製品では、ガラス間の膨張特性の差により発生した表面応力が小さいことが望ましい。また接着材で貼り合わせた製品でも同様である。

3.) 封着製品・管球製品

異種材料の封着に伴う応力は小さくすることが望ましいが、製品を破壊しないで測るためには表面応力測定が適する。また内部排気や外圧に対する安全性・信頼性の評価にも表面応力の値が必要である。

以上のいずれの場合でも、ガラス製品の破壊の直接の原因になるのは表面の微小破壊である

第1表 表面応力の光弾性的測定法の分類

方 法	非 破 壊 法				
	破 壊 法	薄 片 法	光学的切断法	散乱光光弾性法	屈 折 計 法
商 標 名			バイアスコープ	DSR®	東芝方式
使用される光	透 過 光		表面伝播光	反 射 光	表面伝播光
測定される量	光 路 差 R		光路差の微分 dR/dl	複 屈 折 Δn	
感 度	高	い	中ぐらい	低い（強化ガラス用に適する）	
開発した企業		コーニング・ガラス・ワークス（米）	サン・ゴバン社（仏）	ピッツバーク・プレート・グラス社（米、現 PPG インダストリー社）	東芝総合研究所 東芝硝子（株）
文 献	1)	2)	3), 4), 9 f)	5), 6), 7), 8)	9)
註		凸面ガラスだけに適用できる。	化学強化ガラスに適用できない。		本稿では述べない。

DSR：示差表面屈折計 Differential Surface Refractometer の略

から、これに直接に関連する表面応力が重要な
のだ、と考えられる。

2. 測定法の分類

筆者もガラス製品の表面応力測定法を開発して
きたが、本稿ではそれ以前に知られていた方
法を述べる。測定法の分類を第1表に掲げる。
筆者の方法は「東芝方式」として表中に記入さ
れている。

これらはいずれも光弾性の原理にもとづいて
いる。ガラスは光弾性測定を直接適用できると
いう点で特異な材料であり、また適用される測
定技術もしばしば特殊なものである。さらに光
弾性的研究では普通に行なわれる模型実験はガ
ラス製品では全く無意味であり、ぜひとも製品
で直接に測定したいという要求が強い。

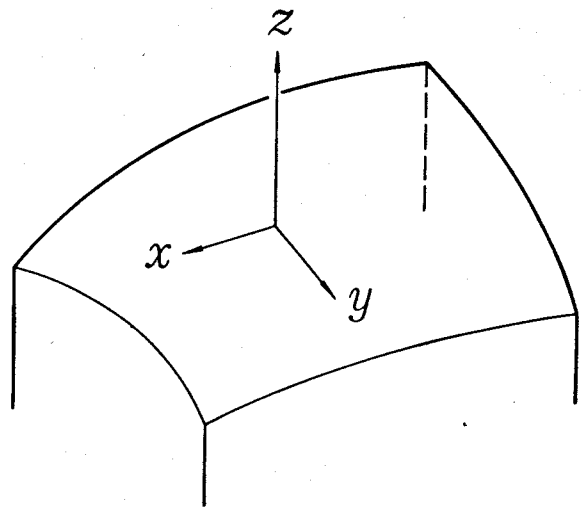
ガラスの表面応力は表面に垂直に光を通す通
常の光弾性では求められず、また応力自体も製
品の切断や研削で緩和してしまうので、測定は
非破壊的に、表面に平行に光を通して行なうよ
うな方法が望ましい。

3. 製品の表面での応力分布

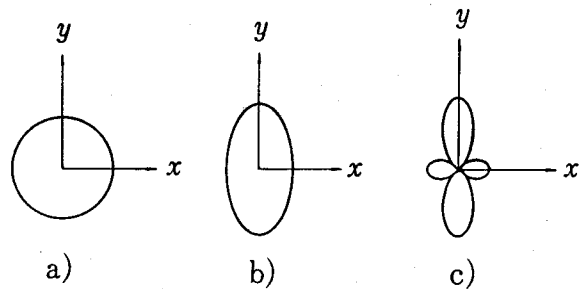
大気圧を無視できるならば、製品の表面は他
の物質に接していない限り自由表面であるから、
表面に垂直な方向に働く応力は零である。従っ
て応力は表面に平行な方向にしか存在し得ない。
このような応力分布に対応して、3つの主力軸の
うちの1つは表面に垂直であり、他の2つは表面
内にある(第1図)。

表面内での応力の分布としては、応力の性質
(圧縮力か張力かの別)も絶対値も一定(第2
図 a), 応力の性質は一定だが絶対値は方向に
より違う(第2図 b), 応力の性質が方向により
違う(第2図 c), の3つの場合がある。2つの
直交する主応力軸があるため、応力の方向分
布を表わす曲線は2回対称軸を持つ点対称の形
をしている。

ガラスの抗張強度は数 kg/mm^2 であり、表面



第1図 ガラス表面での主応力軸 z 軸が表面に
垂直である。



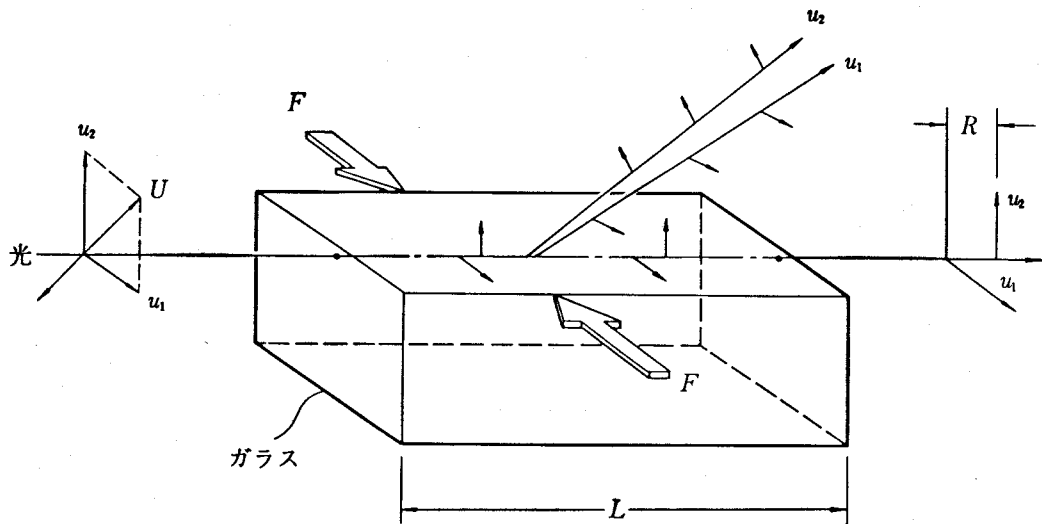
第2図 ガラス表面での応力分布：3種類の角
度依存性

- a) すべての方向に一樣
- b) すべての方向に圧縮応力、またはすべての
方向に引張り応力
- c) 方向により圧縮応力・引張り応力の双方
を示す。

の微小強度はこれよりもさらに低いと考えられ
るので、実際のガラス製品では数 kg/mm^2 以上
の表面引張り応力は安定には存在し得ない。ま
た、すべての方向に圧縮応力であっても最大値
と最小値との差が数 kg/mm^2 以上ある場合及
び、圧縮応力と引張り応力が共存してそれぞ
れの最大絶対値の和が数 kg/mm^2 以上ある場合
も安定とは言えない。

4. 光弾性の原理(第3図)

ガラスの表面付近を表面に平行に直線偏光 U
を通したと考える。 U の成分波のうち表面に平
行に振動するもの u_1 と表面に直角に振動する



第3図 表面伝播光に現われる光弾性効果

U : 直線偏光, u_1, u_2 : U の2つの成分波, F : 表面応力, R : 光路差, L : 光の伝播経路長

もの u_2 とは, ガラスに応力がない場合には同じ速度でガラス中を伝わる. ガラスの屈折率 n は,

$$n = \frac{\text{真空中の光速度}(3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1})}{\text{ガラス中の光速度}}$$

に相当する.

光の進行方向に直角に働く表面応力 F があると u_1 と u_2 の間に速度の差ができ, ガラスを通過した後には一方は他方より R だけ遅れる. またガラスの屈折率も u_1 に対する n_1 と u_2 に対する n_2 とに分裂する. R を光路差またはレターデーション, 2つの屈折率の間の差 $\Delta n \equiv |n_1 - n_2|$ を複屈折という.

光路差 R は複屈折に比例し, 次の簡単な式で表わされる:

$$R = L \cdot \Delta n, \quad L: \text{ガラス中の伝播距離}$$

一方 R はガラスの光弾性常数 C の定義から

$$R = CFL$$

C の単位は $(\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1})/(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}) \equiv 10^{-7}(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}$ である.

これらの式から

$$F = \frac{R}{LC} = \frac{\Delta n}{C}$$

という簡単な関係が得られる.

計算例 1

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

$$= 2.5 \times 10^{-7} (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}$$

$$F = 3 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2} \equiv 300 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$L = 4 \text{ cm}$$

の時,

$$\Delta n = C \cdot F = 2.5 \times 300 \times 10^{-7} (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1} \times (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}) = 7.5 \times 10^{-5}$$

$$R = CFL = 2.5 \times 300 \times 4 \times 10^{-7} (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}$$

$$\times (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}) \times \text{cm}$$

$$= 3,000 \times 10^{-7} \text{ cm}$$

$$= 3,000 \text{ nm} \equiv 3.0 \mu\text{m}$$

計算例 2

$$\Delta n = 0.0012 \equiv 12 \times 10^{-4}$$

$$C = 3.0 (\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1})/(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$$

$$\equiv 3.0 \times 10^{-7} (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}$$

の時

$$F = 0.0012 \div (3 \times 10^{-7}) \times (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$$

$$= 4 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} \equiv 40 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$$

光路差は, 光が試料を通過し終ってから測る方法の他に, ガラスを通過中の各点で散乱光光弾性法により求める方法がある. 後者の場合には

$$\Delta n = dR/dL$$

と書かれる. L は光の伝播経路に沿っての長さである.

Δn はまたアッペの屈折計と同じ原理で, ガラスからの2つの偏光の射出角の差を測って直

接に算出することができる。

表面応力測定法は、 $R \cdot dR/dL \cdot \Delta n$ のいずれを実測するかにより第1表のように分類できる。

5. 薄片法

この方法は化学強化ガラスに広く適用されて来た。化学強化された表面に垂直かつたがい平行な2つの断面に挟まれた薄片を作り、断面に垂直に偏光を透過させ断面内の応力分布を観察する。この観察から表面の応力と応力層厚さが測定される。薄片の作り方は鉱物学のそれに準ずる。

5.1 適用範囲

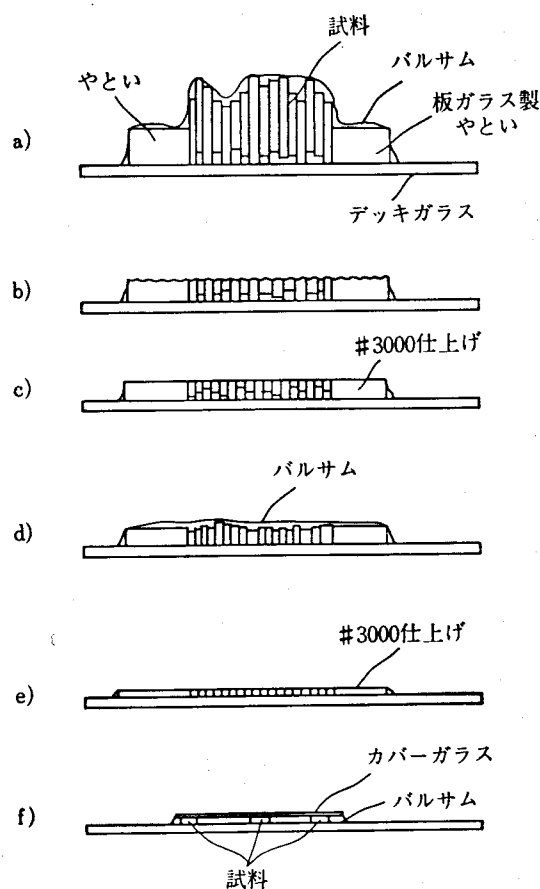
薄片法は表面応力を測定するためのもっとも正統的な方法と考えられるが、実際には精度と工業的な実用性との面で欠点が多い。すなわち

- A. 破壊的測定法である。
- B. 切断・研削の工程が必要なので、熱的強化ガラスは砕けてしまい測定できない。
- C. 切断により表面応力が緩和し、測定値は真値よりも系統的に小さい。
- D. 試料製作に時間・手間がかかる。
- E. 個人誤差が入りやすい。

誤差について最近では立ち入って研究されるようになった(5.4参照)。

このような欠点があるにもかかわらず、一方ではこの方法がぜひ必要な化学強化ガラスがある。これらは表面層内で深い屈折率が高まっており、表面伝播光が存在しない(励起しようとしても深部へ潜り発散してしまう。)ので、屈折計法も散乱光弾性法も適用できないからである。その例は次の2つである。

- A. (ガラス中の Li^+) \leftrightarrow (塩中の Na^+) のイオン交換による化学強化ガラス
- B. 化学強化された光可変色(ホトクロミック)ガラス: (ガラス中の Ag^+) \leftrightarrow (塩中の K^+) のイオン交換で表面層の屈折率が小さくなる。



第4図 化学強化ガラス薄片の製作法
c)とd)との間で試料は裏返すが、やといは裏返さない。

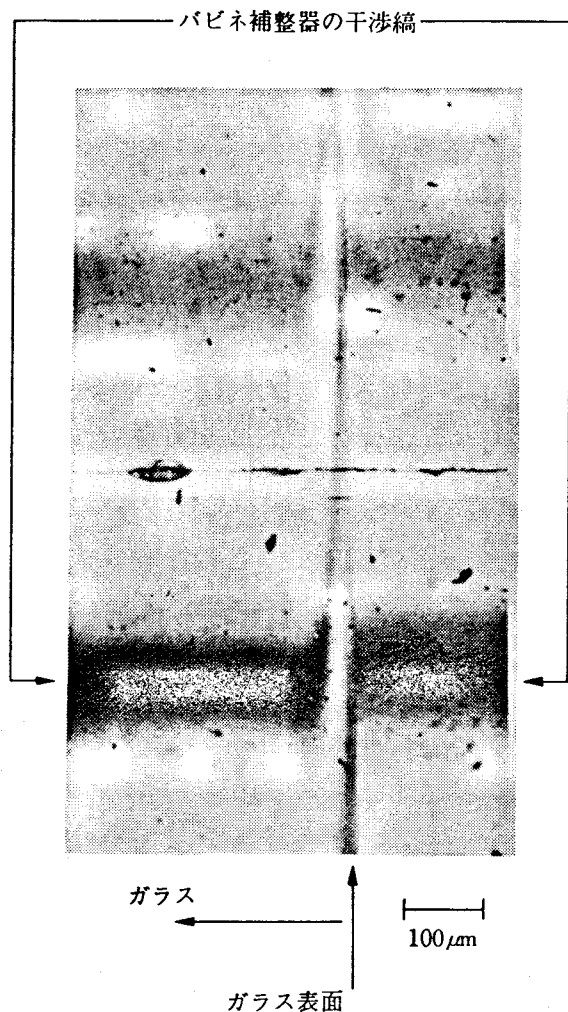
5.2 薄片の作り方

薄片にしてから観察する時に、偏光が切断前の表面に平行に通過するようでない誤差が大きい。薄片化の工程に工夫が必要である。「やとい」を使う方法が良く(第4図)、一度に多数個の試料の研削もできる。研削面は縁まで一様に削られていることが必要だから、研削粉の粒度は順々にこまかくしてゆき、最終的には#3000を使う。さらにつや出しができればそれに越したことはない。

一面を削り終えたら裏返えて同じことを繰り返えし、最終的な厚さを0.3~0.4mmにする。やといを除き、多数個をまとめて作っている時は一つ一つばらばらにし、カバーガラスをかけてバルサム中に封入する。

5.3 観察法

偏光顕微鏡または光弾性装置に入れ、パビネ



第5図 パビネ補整器を用いた薄片の光弾性観察

補整器（前稿参照）を使って観察する。顕微鏡の場合、光路に余分なプリズムや光学素子があると偏光状態が崩れるから直筒式鏡筒でないと困る。対物レンズは10~20倍が適当と思う。ユニバーサルステージの使用は便利である。

観察例を第5図に示す。表面での干渉縞のずれ量を読む。これは外挿しなければ読めないことが多く個人誤差が入りやすい。表面での光路差 R から表面応力 F は

$$F = \frac{R}{CL}$$

L : 薄片の厚さ

C : ガラスの光弾性常数

によって求められる。

5.4 誤差の原因

この方法の原理的で重大な問題点は、薄片化

第2表 化学強化されたガラスの表面応力: 測定法による違い. 文献1)による.

試料番号	材質	屈折率	光弾性常数 ⁽¹⁾	薄片法による表面応力 ⁽²⁾	屈折計法による表面応力 ⁽²⁾
1	クラウン	1.52	2.7	222	489
2	クラウン	1.52	3.2	231	594
3	クラウン	1.52	2.7	—	622
4	クラウン	1.52	3.0	—	367
5	板ガラス	1.52	2.6	250	535
6	重フリント	1.71	2.83	205	530
7	フリント	1.66	—	0	0

(1) 単位 $10^{-6} \text{mm}^2 \text{N}^{-1}$

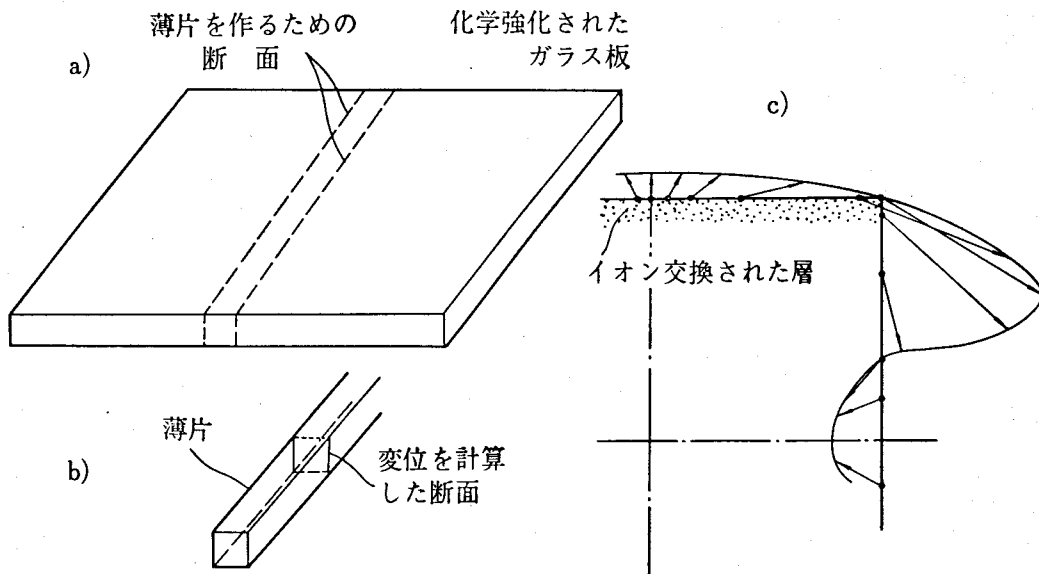
(2) 単位 $\text{Nmm}^{-2} \equiv 0.102 \text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$

に伴う応力緩和である。薄片の厚さは0.4mm位まで下げないと表面応力を定量的に測れないが、この厚さでは数10%の応力減少を避けられない。

薄片化されて薄片の各部分が薄片の厚さ方向へ自由に変位できるとすれば、表面応力の薄片厚さ方向の成分は零になり、それに伴ない切断前の試料表面に平行な方向の成分は薄片化前の真の値の $(1-\nu)$ 倍に下がる。 ν はガラスのポアソン比で0.25くらいである。実験的には厚さ2.8mmの化学強化ガラスから厚さ2mm、表面に沿っての長さ10mmの大きさの試片を切出した段階で、すでに $(1-\nu)$ 倍に応力が下ってしまう¹⁾。従って厚さ0.4mmでは0.5倍くらいに下る可能性がある。薄片法による値が屈折計法による値の半分くらいだという報告例があるのは当然である(第2表)。

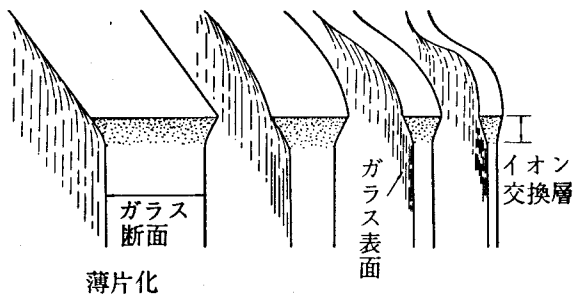
薄片化に伴う試料の変形を弾性論的に計算した例もある(第6図)¹⁰⁾。化学強化されたガラス板から板厚に等しい厚さの薄片を切り取る。化学強化層の厚さは板厚の0.04倍と仮定した。強化層がガラス板表面に平行に伸びようとする変形が明瞭である。変形に伴って新しく応力が発生する部分もあり、一見特異な応力分布を示す場合がある。

応力測定に使う薄片は第6図よりももっと薄いから、イオン交換層のたわみも起きてさらに表面応力が緩和する。定性的に図化すれば第



第6図 薄片化に伴うガラスの変形 (文献 10) による)

- a) 化学強化されたガラス板
- b) 板から切出された薄片
- c) 薄片厚さが板厚に等しい場合の薄片化に伴う断面の変位
矢印は方向と相対的変位長とを示し、変位の実長は示していない。



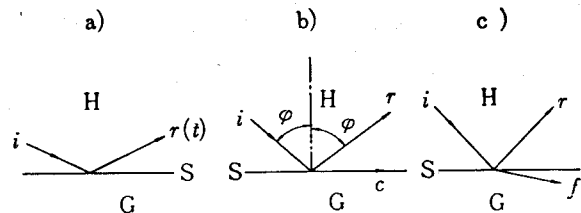
第7図 薄片を薄くするのに伴う薄片の弾性的たわみ変形の説明図

7図のようになるだろう。

次の問題点は表面層の光弾性常数にある。これを実測で精度良く決める方法は現状では無い。従って未強化ガラスの光弾性常数を流用するのが普通であり、また品質管理の目的にはこれで十分である。

6. DSR®

DSR は「示差表面屈折計」の略で、ガラス表面の複屈折 Δn を測ることを意味する。ピッツバーグ・プレート・ガラス社 (現 PPG・インダストリー社) の Ansevin が開発した⁵⁾。日本では若狭光学製のものが使われており、日本



第8図 ガラスの表面Sでの光反射現象

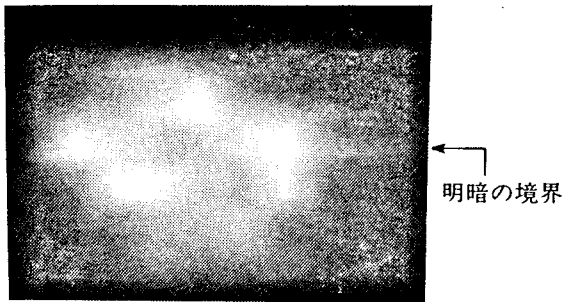
- H: 高屈折率媒質, i: 入射光, $r(t)$: 全反射光, r: 反射光, c: 臨界屈折角, f: 屈折角
a) 入射角が臨界角より大, b) 臨界角 φ で入射, c) 入射角が臨界角より小, の場合

板硝子社の北野氏等による改良も報告された⁶⁾。旭硝子社の原氏は化学強化ガラスへの適用を報告した⁷⁾。

Ansevin は DSR を平面ガラス・曲面ガラスともに適用できると予想したが、曲面用に実施された例は見当たらない。また PPG 社は現在では DSR を販売していない。

6.1 原理 (第8図)

ガラスGの表面Sにガラスよりも屈折率の高い媒質 (液体・ガラスプリズムなど) Hを接触させ、H側からSへ光を入射させる。臨界屈折角 φ は



第9図 光学ガラス研磨面の DSR 像

$$\sin \varphi = \frac{\text{ガラス}G\text{の屈折率}}{\text{高屈折率媒質}H\text{の屈折率}}$$

で決まるが、入射角が φ より大きい(第8図a)時は、入射光 i は全反射されすべてのエネルギーは反射光 r に移ってしまう。入射角が φ に等しいと、入射光のエネルギーは反射光 r と S に沿って伝わる臨界屈折光 c とに分配される(第8図b)。入射角が φ より小さいと、入射光のエネルギーは反射光 r と屈折光 f とに分配される(第8図c)。

この時に反射光を観察すると反射角が φ より小さいものは弱く、 φ より大きい反射光は強く感じられる。屈折率計と同じように望遠鏡で反射光を眺めると、視野中で φ に対応する位置を境にして、高反射角側で明るく低反射角側で暗く見える(第9図)。表面応力 F があると2つの偏光の間で境界の位置が違う。境界の位置の差を Δn に換算し F を算出する。

DSRは原理的にはアッペの屈折計であるから、DSRでの観察は、小形の試料であればアッペの屈折計でも再現できる。6.3で述べることにしてもそうである。

6.2 適用範囲

第8図に適したような幾何光学的な説明によれば、DSRはすべてのガラス製品に適用できるはずである。しかし実際はガラス表面の性質によっては各種の波動光学的効果が反射光に現われるし、特にその結果明暗の境界が不明瞭になる場合にはDSRが役に立たない。

境界が不明瞭になるもっとも著しい例は、ガラスの表面層で深くなるほど屈折率が増している試料で、その実例は次のとおりである。

- A. (ガラス中の Li^+) \longleftrightarrow (塩中の Na^+) のイオン交換による化学強化ガラス
- B. 化学強化された光可変色ガラス
- C. フロート法板ガラスの「ガス面」: 成形工程中に表面から Na^+ が蒸散し表面層の屈折率が下がる。

上記のうちA, Bについては5.1でも述べた。逆に表面の屈折率が上る場合には明暗の境界が明瞭になる。さらに屈折率が高まり高屈折率層の厚みが増すと、この層が導光効果を持ち始めその影響が反射光像に現われる(6.3.2, 6.3.3参照)。このような場合には導光効果を積極的に利用して、表面応力を測ることができる。

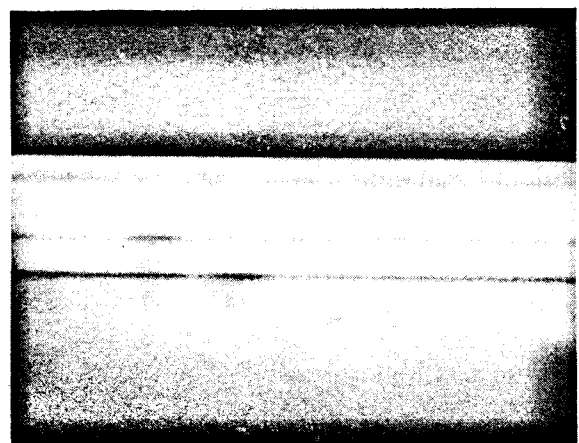
DSRの感度は6.1で述べた方針に従いがい幾何光学的な計算で決めることができる。またガラス板試料に既知の弾性ひずみを与えたものを使い、校正実験で決めることができる⁶⁾。

試料表面が内部と異なっている場合、たとえば化学強化ガラス(後出6.3.3)、フロートガラス(後出6.3.2)では、幾何光学的な感度の計算決定に5.4の最後に述べたと同じ問題が残る。

6.3 観察例

6.3.1 光学ガラスの研磨面

反射光像を第9図に示す。もしもガラスが熱的に強化されていると、2つの偏光によって明暗の境界の位置が違う。この差はガラス表面の Δn に比例する。



第10図 フロートガラスの錫進入面の DSR 像

6.3.2 フロートガラスの錫進入面

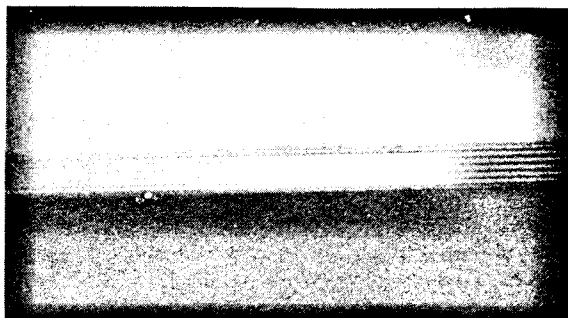
フロートガラスは錫合金浴上に浮かべられて成形されている時期に

ガラス中の $\text{Na}^+ \leftrightarrow$ 錫浴からの $\text{Sn}^{2+} \cdot \text{Sn}^{4+}$ というイオン交換を起し、錫と接触した面の屈折率が高くなる。この層は導光効果を示すので、DSRの反射光像には層を伝わって逃散した光の屈折率の部分が欠けて暗い線が現われる。反射光像の明暗の境界は明瞭で、これは高屈折率層の底での屈折率に対応する(第10図)。

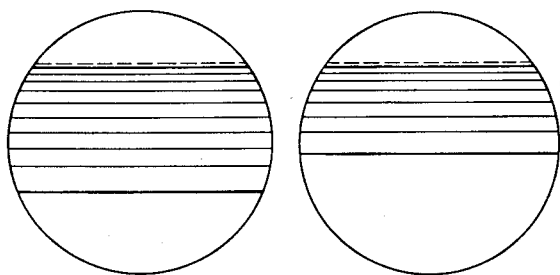
表面応力がない試料では、2つの偏光が作る反射光像は全く同じであり同じ位置にできる。風冷強化された試料では、2つの像の形は全く同じであるが、位置的には一方が他方に対して平行移動している。この移動量は表面の Δn に比例するので、表面応力の計算ができる。

6.3.3 化学強化ガラス^{7), 8)}

通常の(ガラス中の $\text{Na}^+ \leftrightarrow$ (塩中の K^+) のイオン交換による化学強化ガラスは、表面層の屈折率の上昇とこの層の光ウェーブガイド効果が顕著である。反射光像には逃散した光に対応する暗線が多数現われる(第11図)。



第11図 化学強化ガラスの DSR 像



第12図 2つの直線偏光で眺めた化学強化ガラスの DSR 像
.....: 明暗の境界
——: 暗条

フロートガラスの場合と違い、2つの偏光による反射光像は同じではない(第12図)。

明暗の境界は明瞭で、これは応力層底部の屈折率に対応する。ここに暗線が重なることもある。

最下方にある暗線がそれぞれ表面の屈折率に対応し、これらの位置の差が Δn に比例する、という考え方⁹⁾と、暗線の配列を下方へ外挿して始めて表面の屈折率に対応する位置が求まる、という考え方⁷⁾とがある。

暗線の数から応力層の厚さが求められるがこの計算は簡単でない。

化学強化ガラス表面の光学的効果は、その後の光集積回路に関連した理論を取り入れて解釈されるようになった。この考え方をを使うと応力の測定と応力層厚さの算定が簡単であり^{9a)}、理論的なあいまいさも少ない。

7. バイアスコープ

バイアスコープはフランスのサン・ゴバン社の Acloque と Guillemet によって発明され、年に米国特許が登録された。日本には特許権・商標権はない。また日本での実用報告例もない。

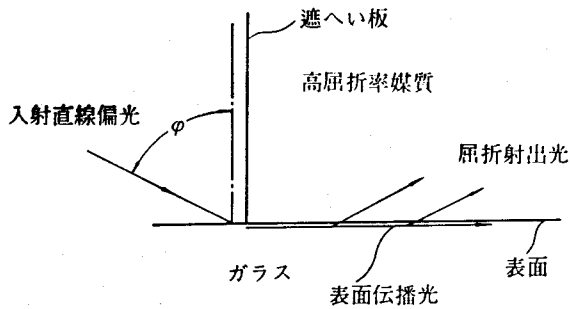
ガラス表面に表面伝播光を励起して表面応力を測定する装置であるが、表面伝播光は弱いので測定が難しいと言われた。しかしフロートガラスの錫進入面は光を良く伝えるので、例外的に測定に好都合であり、ヨーロッパの板ガラス工業界では実用されたようである¹¹⁾。

ガスレーザーを光源にして強い単色光束を使うと測定が非常に楽になる⁹⁾。

化学強化ガラスの表面は光を良く伝えるけれども、後記の理由でバイアスコープは適用できないと考えられる。また表面伝播光の存在が測定的前提であるから、5.1, 6.2節でA・B・Cとして挙げたものに適用できない。

7.1 原理(第13図)

ガラスGの表面Sを高屈折率の媒質(液・ガ



第13図 バイアスコープの原理
φ: 臨界屈折角

ラスプリズムなど) でおおい、高屈折率媒質側から臨界角φで直線偏光を入射させる。その偏光面は入射面と45°の角度にする。入射光の一部は表面伝播光に変換されて伝わる。表面伝播光は経路の各点でその一部を高屈折率媒質側へ屈折により送り返す。この屈折射出光を使い、経路の各点における表面伝播光の光路差を測る。一般に入射光と反射光が表面伝播光に比べて非常に強いので、遮へい板により有害な反射光・散乱光を遮ぎる。

7.2 測定操作

7.2.1 応力が大きい場合 (第14図a)

入射した直線偏光は、伝播するに従がい2つの成分波間の光路差が増し、直線偏光→楕円偏光→円偏光→入射光と偏光面が直交する直線偏光→楕円偏光→円偏光→楕円偏光→入射光と平行な偏光面を持つ直線偏光という変化をし、伝播距離のそれ以上の増加とともにこのような変化を繰り返す。この変化は屈折射出光にそのまま反影するので、射出光を偏光フィルターを通して観察すると表面伝播光の経路が明暗の繰り返えしに見える。明暗の1週期は

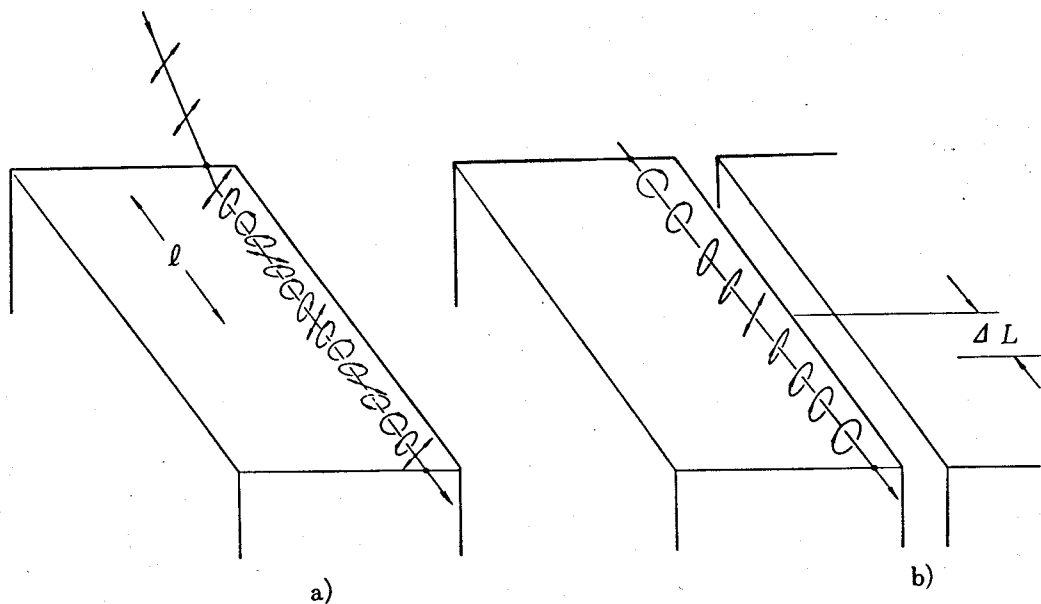
1波長相当の光路差に対応する。明暗の1週期の長さを*l*とすると

$$\frac{R}{L} = \Delta n = \frac{\text{波長 } \lambda}{\text{明暗の1週期の長さ } l}$$

となり、表面応力 $F = \Delta n / C$ を求めることができる。

7.2.2 応力が小さい場合 (第14図b)

応力が小さいと明暗の週期を全部見通すこと



第14図 バイアスコープでの観察と測定

a) 表面応力が大きい場合, b) 表面応力が小さい場合

l: 明暗の週期, ΔL : セナルモン補整器の操作に伴う暗部の移動

ができない。この場合には屈折射出光を光弾性用の補整器（バビネ補整器・セナルモン補整器など）を通して観察する。

表面伝播光の経路のうち、光路差が補整器により補償された部分が暗く見える。補整器の設定値を変えると暗い部分が別の所へ移る。設定値の変化 ΔR に対応して暗い部分が ΔL だけ移ったとすると、

$$\Delta n = \frac{\Delta R}{\Delta L}$$

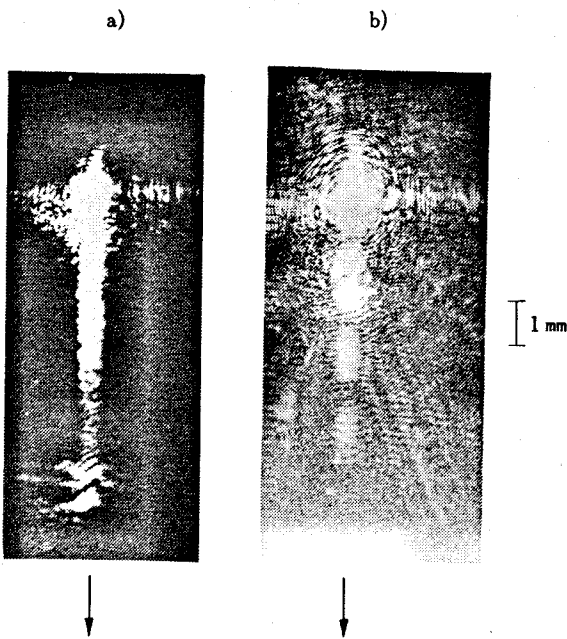
により、光の経路上の各点ごとに Δn が求められ、 $F = \Delta n / C$ によって応力が計算される。

この観察・測定はバイアスコープの光像をビデオ表示すると正確・容易に実行できる。

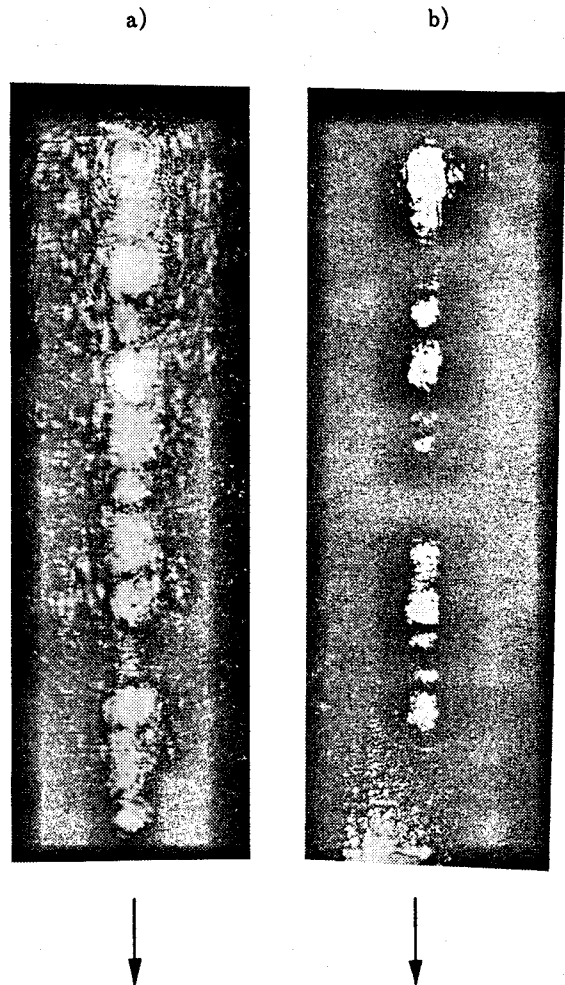
7.3 観察例

7.3.1 光学ガラスの研磨面

表面応力がないガラスでは、表面に注入・励起された直線偏光はそのまま表面を伝わって行くので、バイアスコープ像は単調な明るさ分布の光条である（第15図a）。熱的強化されたガラスでは、光の伝播に伴って偏光特性が頻繁



第15図 光学ガラス研磨面のバイアスコープ像
a) ひずみのないガラス, b) 熱強化されたガラス
矢印は光の進行方向を示す。



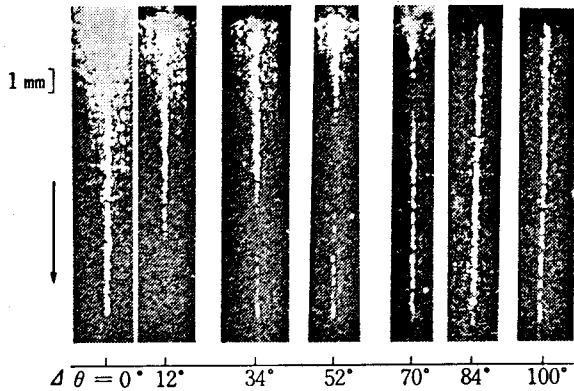
第16図 フロートガラスの錫進入面のバイアスコープ像
a) 普通品, b) 熱強化品
矢印は光の進行方向を示す。

に変化するので、光条には明暗の分布が現われる（第15図b）。明暗の1週期を生ずる光路の長さが l である。

7.3.2 フロートガラスの錫進入面

フロートガラスの錫進入面は導光効果を示す6.3.2が、第10図に暗線がいくつも出ていることからわかる通り、光はいくつかの光波となって表面を伝わる。これらの光の間の干渉のために、バイアスコープ像は短い週期の明暗分布を持つ光条である（第16図a）。この周期は表面応力とは関連しない。

熱的強化されたガラスでは、短い週期の明暗分布が長い週期の明暗分布で変調されたよう



第17図 フロートガラスの錫進入面をセナルモン補整器組み込みのバイアスコープで眺めた状況

下方の数字は補整器の操作角度を示す。光条上の暗部が移動する。
矢印は光の進行方向を示す。

な光条になる(第16図b)。後者が表面応力に関連したもので、これから表面応力を算出できる。

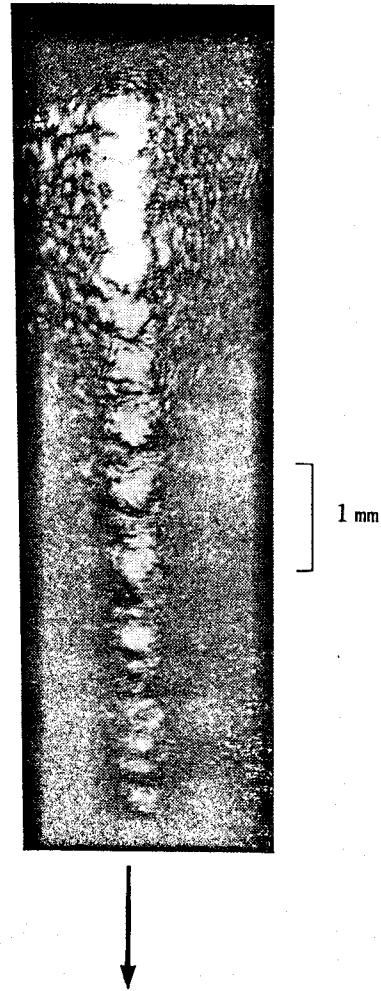
強化されていないフロートガラス面の光条(第16図aに例示してある)は、セナルモン補整器を付け加えて観察すると暗部を生じ、補整器の操作に伴ない暗部が移動する(第17図)。この操作により表面の残留応力を測ることができる。

7.3.3 化学強化ガラス

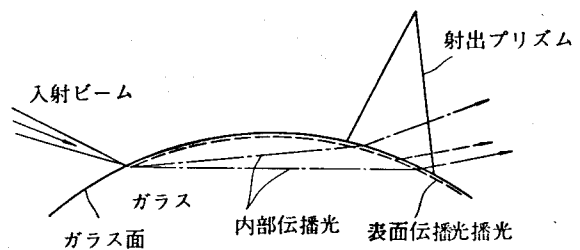
化学強化ガラスの表面導光層は第11図でわかる通り種類の光波を伝えるので、これらの間の干渉によりバイアスコープ像は短かい週期の明暗分布を持つ光条になる(第18図)。この光条から表面応力に対応する明暗の週期を判断抽出するのは実際上不可能である。従ってバイアスコープ法は化学強化ガラスには適用できない。

7.5 擬バイアスコープ法(第19図)

ガラス表面が凸面であると、表面伝播光の他にガラス内部を伝わってから再び表面に達する光もある。光の入射点と射出点との距離を短くすると両光線は近似的に同じバイアスコープ像を与え、また内部波は幾何光学的に許容される光線であるために強度が強く、平面ガラスの場合よりも観察しやすいという利点がある。



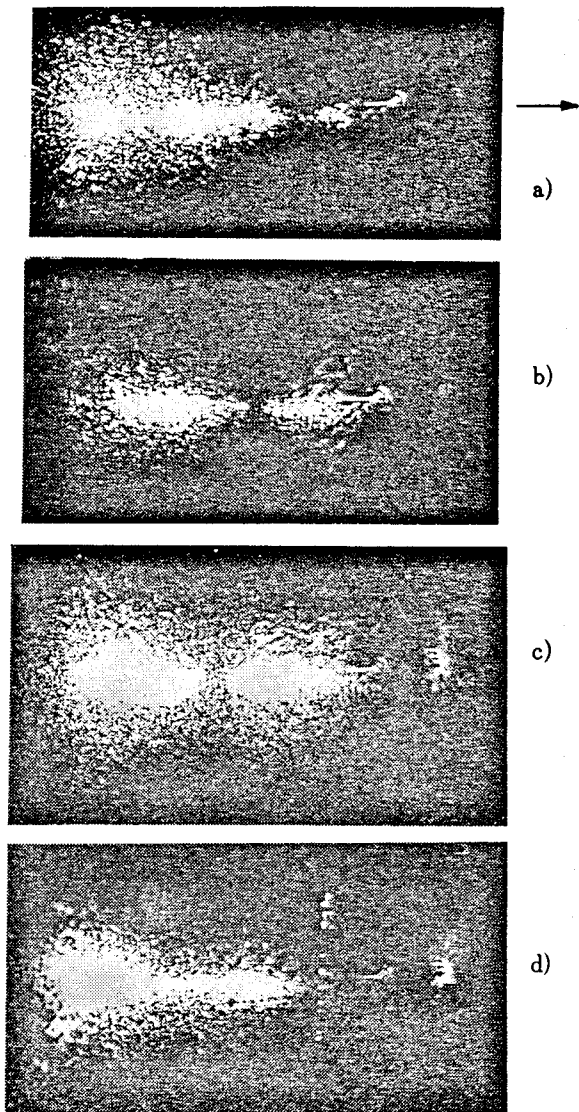
第18図 化学強化ガラスのバイアスコープ像
矢印は光の進行方向を示す。



第19図 凸面ガラスに適用するバイアスコープ法

この方法での応力計算はバイアスコープ法のそれと全く同じである。化学強化ガラスに適用できないことも同様である。

ガラスが材質の面で不均質で光散乱が多いと測定は特に容易になる。この特徴は陶磁器のガラス質うわぐすりの応力測定に適する(第20図)。



第20図 セナルモン補整器組み込みの擬バイアスコープ法で観察した陶磁器のうわぐすり層

a) → d)と補整器を操作すると、光条上の暗部が移動する。

矢印は光の進行方向を示す。

8. 光学的切断法

この方法は米国のコーニング・グラス・ワークス社で開発された。凸面ガラス、円筒形ガラスに適用できる。

被験ガラスを同じ屈折率の浸液に入れる。直線偏光の平行光束をガラスの接線付近へ投射し透過させる(第21図a)。透過後の光束をバビネ補整器で観察し、光束内での位置の関数としての光路差を求める(第21図b)。この関数に

は、ガラス器の半径方向の座標 r の関数としての応力を光の経路に沿う長さ x によってたたみ込んだものである。応力は r の二次関数であると仮定してたたみ込みをほぐし、 r の関数としての応力を求め、これから表面応力を計算することができる。

数学的過程の簡易化、従って測定の迅速化について我国の研究者の寄与があった。

むすび

著者は近年ガラス製品の表面応力測定法の開発と測定器の販売に従事した。著者の方法は第1表からもわかる通り、屈折計法に属するという点でDSRと、表面伝播光を使うという点でバイアスコープと共通点があるので、開発の途上でこれらを追試・改良をする機会があり、また一方でこれらの発明・研究の跡を文献的に追った。さらにこれらの装置を使われる方々の経験・御意見を多く伺えた。他方で自身の実験では、多種類のガラスが各種測定器内で現わす多彩な光学的挙動に驚かされた。

これらによって著者が感じたのは、

従来方法・装置はそれぞれ優れた着想や長期の実験的努力の積み重ねで発明・開発されたものであり、

まだまだ広い発展・拡張の余地があるが装置の上では能力を十分に引き出しておらず、光学的現象の解明が不十分なために数学的定式化がかえって複雑で、工程管理用としての実用性をみすみす捨てている例があり、

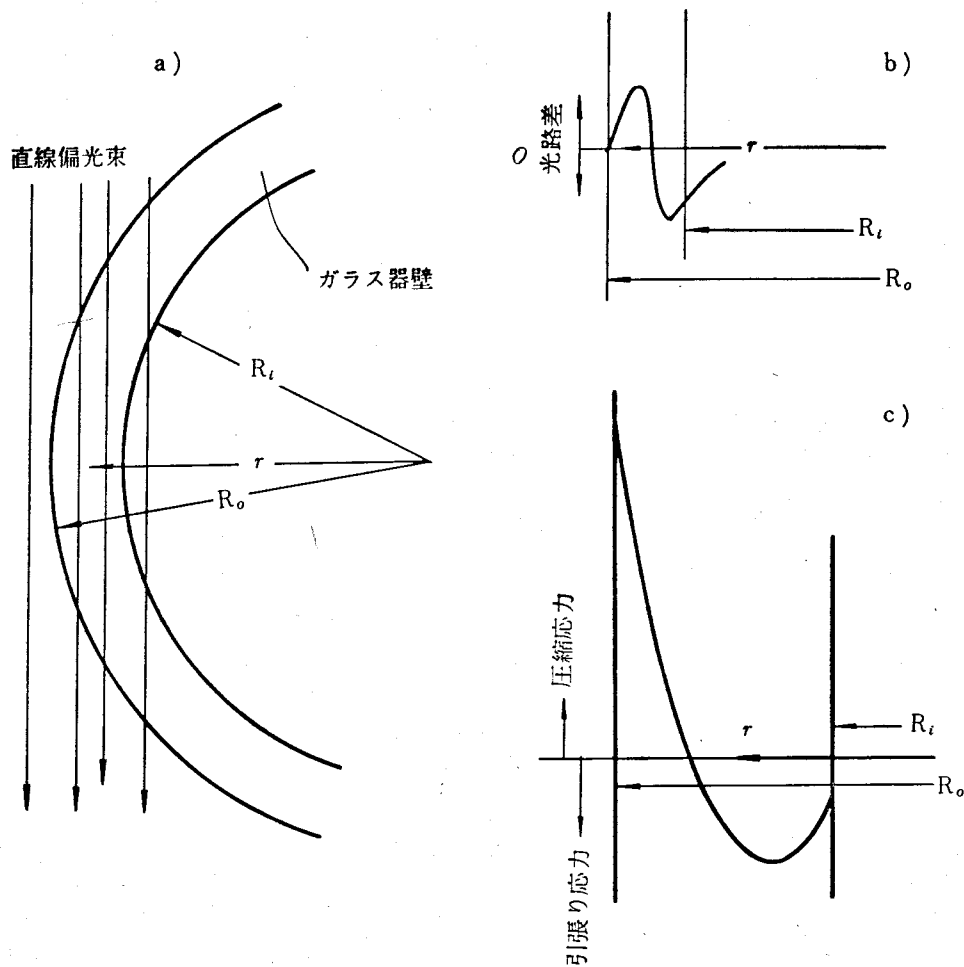
熟練した研究者が実験室で使うのでなければ測れないとの誤解を受けている、

ということであった。

本稿にはこのような感想が下敷きになっている。表面応力の測定に関心を持つ方々の御参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) U. Soltész, *Glastech. Ber.*, **54**, 12 (1981)
- 2) H. N. Ritland, *J. Amer. Ceram. Soc.*, **40**, 153 (1957)



第21図 光学的切断法

a) 光学的配置, b) 透過光束内での光路差の分布, c) 光路差分布からたたみ込みをほどこいて求めた器壁内の応力分布
 R_i : 器壁の内半径, R_o : 器壁の外半径, r : 器壁の曲率中心からの距離

3) P. Acloque, C. Guillemet, Compt. Rend., 250, 4328 (1960); Compt. Rendu du colloque sur la nature des surfaces vitreuses polies, p. 121 (1959); 米国特許 3, 286, 581 (1966); Glass Ind., Aug. (1960)
 4) 岸井, Opt. Laser Technol., 13 261 (1981); 14 Oct. (1982)
 5) R. W. Ansevin, Instr. Soc. Am. Trans., 4 339 (1965)
 6) 北野, 都甲, 窯業協会誌 80 173 (1972);
 7) 原, 旭硝子研究報告 21 19 (1971)
 8) B. Gänswein, Glastech. Ber., 53 220 (1980)
 9) 岸井,
 9a) 窯業協会誌 87 119 (昭54)
 9b) 同上 86 336 (昭53)
 9c) Opt. Laser Technol., 11 259 (1979)
 9d) 同上 11 197 (1979)

9e) 同上 12 99 (1980)
 9f) 窯業協会誌 89 363 (昭56)
 9g) 同上 90 337 (昭57)
 9h) 同上 90 11月号 (昭57)
 9i) 東芝レビュー 36 591 (昭56)
 10) A. Y. Sane, A. R. Cooper, J. Am. Ceram. Soc., 61 359 (1978)
 11) D. Blank, Glastech. Ber., 59 1 (1979)

〔筆者紹介〕



岸井 貫(きしい とおる)
 昭和25年 東芝硝子技術部
 (現在東芝硝子(株)が継承)
 昭和38年 東芝中央研究所
 現在 東芝総合研究所材料応
 用技術センター・研究主幹東
 芝硝子(株)兼務