

## 強化ガラスの表面応力測定

北野一郎\*・都甲英俊\*\*

(\*日本板硝子(株)舞鶴工場, \*\*日本板硝子(株)高品技術部)

## Measurement of Residual Surface Stress on Tempered Glass Plate.

By

Ichiro KITANO\* and Hidetoshi TOGO\*\*

\* Nippon Sheet Glass Co., Ltd., Maizuru Plant, Maizuru,

(\*\* Nippon Sheet Glass Co., Ltd., Products &amp; Engineering Department, Itami)

Following methods are usually adopted for measuring the residual surface compression present on tempered glass, (1) Observation of relative retardation of light passing through the cross-section of the plate parallel to its surface by photoelastic techniques. (2) Calculation of the stress by measuring the resultant curvature of the plane when a certain amount of thickness was etched-off by hydrofluoric acid from one side of the sample.

However, these methods are inadequate for the non-destructive measurement of surface stress on commercial glass plates of large dimensions.

The method described here is pertaining to the surface stress-induced birefringence of glass with the result that the angle of total reflection obtained by contacting an optical prism on the sample surface is different between two polarized components. Namely, the refractive indices of the compressed surface for the ordinary ray polarized in plane perpendicular to the surface is greater than that for the extraordinary ray polarized in plane parallel to the surface, thus the critical angle of total reflection of the ordinary ray is greater than that of the extraordinary ray. Since this difference is directly related to the magnitude of the surface stress and is detected in the field view of telescope as two regions of different brightness separated by a sharp boundary, it is possible to measure the surface stress in a rapid and non-destructive manner by calibrating the scale division of the eyepiece field. Calibration was done by giving a known degree of cancellation to the surface compression with the tension caused by bending the central portion of the sample supported freely at both ends.

The constructed instrument provided very sharp boundary lines in the field of eyepiece and made it possible to determine the surface compressive stress on tempered glass with the accuracy of  $\pm 0.6 \text{ kg/mm}^2$ .

[Received August 12, 1971]

## 1. 緒 言

強化ガラスの表面に残留する圧縮応力は試料が小さい場合には断面歪を光弾性実験により複屈折を観察して求めることができるし、また試料の一方の表面層を弗酸で一定の厚みだけ除層し、このときに生ずる面の撓みを測定することによって算出することもできる。しかし大板強化ガラスにたいしてはこれらの方法の適用は困難であり、かつ実際の製造現場においては非破壊で簡単に表面残留応力が測定できることが望ましい。このためには全反射応力測定法が有効であろう。

全反射応力測定法は古くは Orowan, Argon<sup>1)</sup> らによって試みられ、近くは PPG 社により DSR<sup>2)</sup> として開発されたと聞くが、文献に見られる全反射臨界線の写真

は、はなはだ不鮮明であり、また彼の地において該装置を見学した人々の話を総合してもその評価は必ずしも高くないようである。最近、わが国においても全反射法による応力測定が 1, 2 発表されているが<sup>3)</sup>、ここに報告する装置は、岡村<sup>4)</sup>の理論にもとづいて設計、製作したものである。

## 2. 測定原理

ガラスは元来、等方等質透明体であるが、歪を受けると光学的異方性を示す。すなわち引張応力をうけるガラスはその応力方向を光軸とする一軸性正結晶、たとえば水晶と同じような光学的ふるまいを示し、逆に圧縮応力を受けるとその応力方向を結晶軸とする一軸性負結晶、

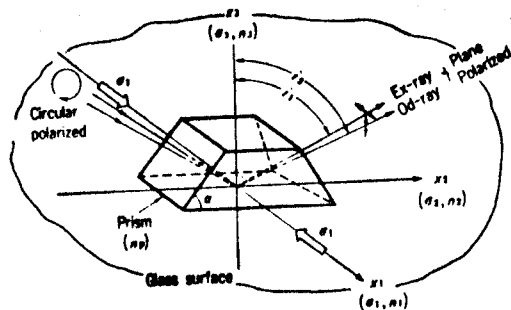


Fig. 1. Schematic presentation of difference of total reflecting angle for ordinary and extraordinary rays obtained by a refractive prism on the glass surface under compressive stress.

たとえば方解石と同じ光学的異方性を示す。いま、圧縮応力が残留する強化ガラスの表面について考えてみると負結晶としての光軸は表面に平行な平面内に存在する。したがって光軸と光の進行方向とを含む平面内において進行方向に直角に振動する異常光線と、上述の平面に直角に、かつ進行方向に垂直に振動する常光線とでは、光軸以外の方向では進行速度を異にし、異常光線の速度は常光線の速度より大、したがって異常光線にたいする屈折率は常光線にたいする屈折率よりも小さい。いま、図-1 に示すような圧縮応力が残留するガラス表面において、その主応力を  $\sigma_1, \sigma_2$  (いずれも表面に平行な平面に存在し、たがいに直交する) および  $\sigma_3$  (表面に直角) とし、それぞれの方向を光学的主軸  $x_1, x_2$  および  $x_3$  であらわし、これらの方向に振動する光の屈折率を  $n_1, n_2$  および  $n_3$  とすると、これら主応力と主屈折率の間にはよく知られた次の関係式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1 \sigma_1 + C_2 (\sigma_2 + \sigma_3) \\ n_2 - n_0 &= C_1 \sigma_2 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_3) \\ n_3 - n_0 &= C_1 \sigma_3 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $n_0$  はガラスの無応力時の屈折率、 $C_1$  は直接光弾性定数、 $C_2$  は横光弾性定数であってこれらは使用する波長によって定まるガラス固有なものである。光弾性実験に用いられている光弾性定数は  $C = C_1 - C_2$  である。

いま、測定に使用する光学プリズムの屈折率を  $n_p (> n_0)$ 、プリズムの角度を  $\alpha$  とし、 $\alpha$  は次の (2) 式で求められる無歪ガラスとプリズムとの全反射角  $i_0$  に等しいように製作する。

$$n_p = n_0 \sin i_0 \dots\dots\dots (2)$$

このようなプリズムを強化ガラス表面に置き、図-1 に示すようにレンズからの収斂光束を角度  $\alpha$  のプリズム面にほぼ直角に入射せしめると各主軸方向に振動する偏光にたいする全反射臨界角  $i_s (s=1, 2, 3)$  は、

$$n_s = n_p \sin i_s \quad (s=1, 2, 3) \dots\dots\dots (3)$$

2/5

となるから各主軸にたいする屈折率の差は (2) 式および (3) 式より

$$\begin{aligned} n_s - n_0 &= n_p (\sin i_s - \sin i_0) \\ &= 2 n_p \cos \left( \frac{i_s + i_0}{2} \right) \sin \left( \frac{i_s - i_0}{2} \right) \end{aligned}$$

となるが、 $i_s (s=1, 2, 3)$  と  $i_0$  はそれぞれたがいに極めて近い値であるから

$$n_s - n_0 = n_p (i_s - i_0) \cos i_0 \dots\dots\dots (4)$$

図-1 において光束の方向を主応力の1つ、たとえば  $x_1$  方向に直角とすれば光束に平行な  $x_2$  方向には光の分解はないから (4) 式で  $s=1, 3$  のみを考えて、次式が得られる。

$$i_1 - i_3 = \frac{n_1 - n_3}{n_p \cos i_0}$$

光はプリズムから空気中に出ると角度は  $n_p/1$  倍になるから

$$i_1 - i_3 = \frac{n_1 - n_3}{\cos i_0} \dots\dots\dots (5)$$

一方、(1) 式より

$$n_1 - n_3 = C (\sigma_1 - \sigma_3) \dots\dots\dots (6)$$

実際には  $x_3$  方向の応力  $\sigma_3 \approx 0$  とみなしてよいため (5) 式および (6) 式から

$$\sigma_1 = \frac{\cos i_0}{C} (i_1 - i_3) \dots\dots\dots (7)$$

$i_0$  および  $C$  は一定であるからガラス表面上の主応力は異常光線および常光線に対する全反射臨界角の差  $(i_1 - i_3)$  に比例することがわかる。 $(i_1 - i_3)$  はオートコリメータによって直接読みとることが可能であるから (7) 式によって残留応力値を知ることができる。

### 3. 測定装置

図-2 は製作した表面応力測定器の外観を示す写真、図-3 はその概略図である。図-3 において①はナトリウムランプ、②~⑥は光学レンズ系で、これらは筐体⑦に収容される。⑦は円偏光板、⑧はコリメータレンズで反射鏡⑨によりほぼ全反射角でプリズム⑩の面に直角に、ガラス表面上のスポットに投射される。⑪および⑫はプリズムの微動調整装置である。反射光は反射鏡⑬に

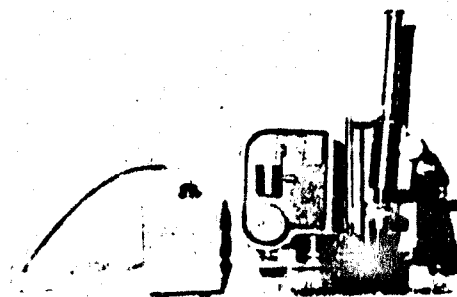


Fig. 2. Side view of the instrument.

より射り、接し、常全反射目盛で光板を動かせる。とする挿入し = 1.53 81°40'

視野ラスのから試する表面力を

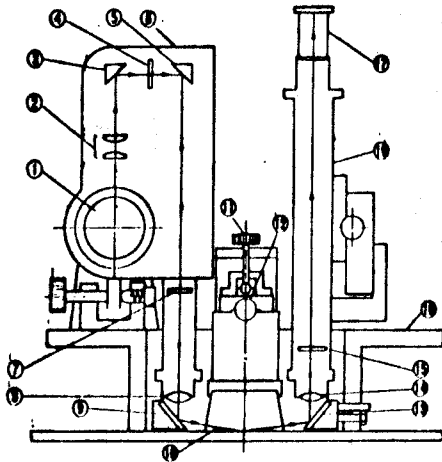


Fig. 3. Cross sectional view of the instrument.

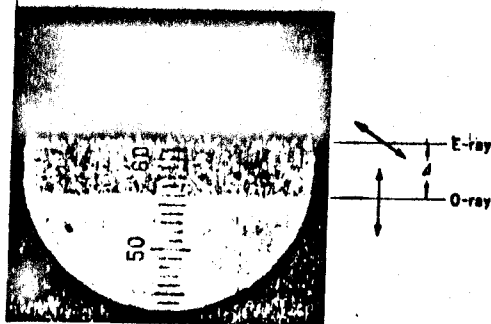


Fig. 4. An example of eyepiece field in which two boundary-lines appear corresponding to the different critical angle of total reflection for ordinary and extraordinary rays respectively.

より対物レンズ④および偏光板⑤を通して鏡筒⑥に入り、接眼鏡⑦の視野に図-4の写真の例に見られるように、常光線と異常光線の屈折率の差によるそれぞれの全反射臨界線を明瞭に現わし、両境界線の差  $\Delta$  を視野の目盛で正確に読取ることができる。偏光板⑤は2枚の偏光板を中央で直交、2分割しているの、これを左右に動かせば視野中のいずれか一方の境界線を消すことができる。プリズムと試料ガラス表面の間には、光学的接触とするために両者の中間に屈折率値をもつクローブ油を挿入した。プリズムの材質には光学ガラス LLF6 ( $n_p = 1.5371$ ) を選び、その角度  $\alpha$  は (2) 式より  $\alpha \approx i_1 = 81^\circ 40'$  に製作した。

4. 実験結果と考察

視野の目盛に対する応力値を知るため、短冊状強化ガラスの両端を自由支持し、中央にプリズムを置き、下方から試料中央部に一定量の変形を与えることによって生ずる表面の引張応力により、強化ガラスの表面残留圧縮応力を逐次消去せしめ、対応する視野の目盛を読んだ。

曲げによって生ずる引張応力は次式から求めた。

$$\sigma_s = \frac{6 E h}{l^2} \delta \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $\sigma_s$ : 表面引張応力  $\text{kg/mm}^2$ ,  $E$ : 強化ガラスのヤング率  $7500 \text{ kg/mm}^2$ ,  $h$ : 厚み  $\text{mm}$ ,  $l$ : スパンの長さ  $\text{mm}$ ,  $\delta$ : 曲げ量  $\text{mm}$

得られた結果を図-5に示す。この応力値だけ減少して表面に残存する圧縮応力と視野目盛との関係が必要な校正曲線であってこれを図-6に示す。一方、強化度の異なる試料4種につき図-7~図-10に見られるような常光線と異常光線との間の微小な全反射臨界角の差 ( $i_1 - i_2$ ) を直接オートコリメータで実測し、視野の目盛  $\Delta$  と ( $i_1 - i_2$ ) との関係求めたところ、図-6のような結果と

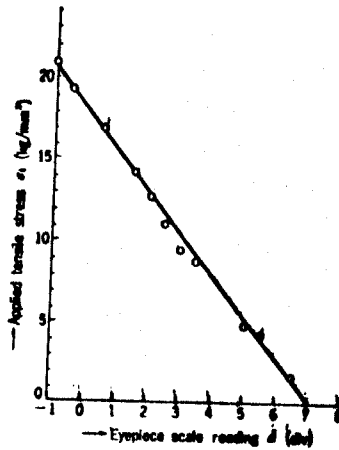


Fig. 5. Cancellation of residual compressive stress by applying tensile stress caused by bending the sample.

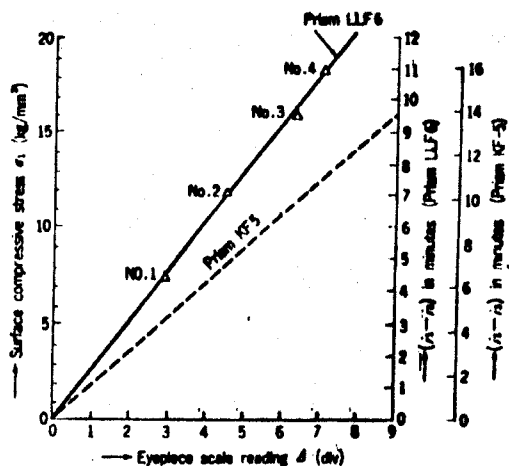


Fig. 6. Calibration curve of eyepiece scale reading  $\Delta$  of the instrument. The curve is checked by measuring directly the difference of total reflecting angle ( $i_1 - i_2$ ) by autocollimator for samples No. 1~4 shown in photographa from Fig. 7 to 10.

4/5

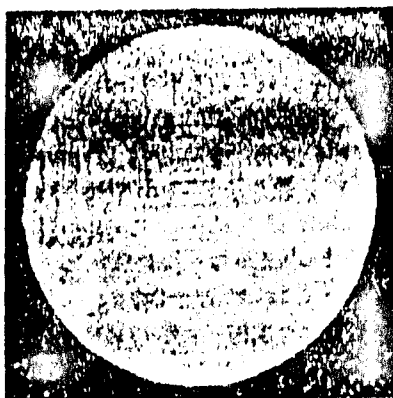


Fig. 7. Sample No. 1.

4-3



Fig. 8. Sample No. 2.

4-4.5

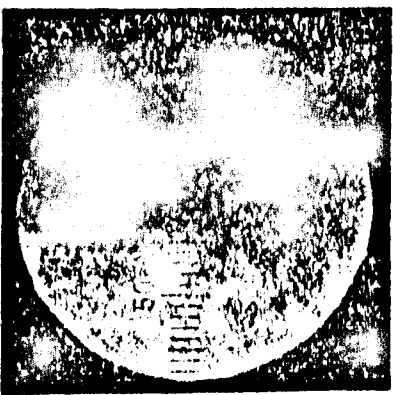


Fig. 9. Sample No. 3.

4-6

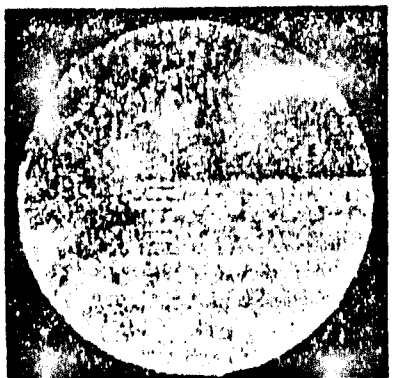


Fig. 10. Sample No. 4.

4-7

なった。図-7~図-10の写真で常光線および異常光線の境界が、いずれか一方で消えているのは、前述の直交偏光板を視野中央において撮影したからである。

さて、(7)式において  $C=2.5 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{kg}$ ,  $\sin i_1 = n_0/n_p = 1.5157/1.5317 = 0.989$  を用いると、

$$\sigma_1 = 5.76 \times 10^3 (i_1 - i_2) \dots\dots\dots (9)$$

ここで  $\sigma_1$ :  $\text{kg}/\text{mm}^2$ ,  $i_1 - i_2$ : rad.

したがって、全反射臨界角差 ( $i_1 - i_2$ ) と応力値は比例関係にあり 図-6 の左右の縦軸で対応せしめることができる。この図の直線は前述のように曲げ実験によって得られたものであって、この直線上に、強化度を異にする種々の試料の応力値がほぼのることから、図-6 を本装置の校正曲線として使用できることを確認し得たわけである。

視野に現われる境界線の目盛上での読取精度は視野の写真(図-4 および 図-7~10) から容易にわかるように  $\Delta = 0.5$ , すなわち応力値にして 図-6 から  $1.2 \text{ kg}/\text{mm}^2$  は充分判別できるから応力測定精度としては、おおよそ  $\pm 0.6 \text{ kg}/\text{mm}^2$  であるといえる。

実際に大板強化ガラスの表面応力測定に当っては、被測定点を通る主応力方向はほぼ放射状に對称であるため、(1)式において  $\sigma_1 \approx \sigma_2$  となり、したがってプリズムを試料表面上でどの方向に向けても視野の目盛差の読み  $\Delta$  はほとんど同じであった。

本器ではプリズムとして屈折率  $n_p = 1.5317$  の光学ガラス LLF-6 を使用したが、一般に  $n_p$  を試料の屈折率に近づけると測定精度が上がる。たとえば  $n_p = 1.5231$  の光学ガラス KF-5 で、(2)式の角度  $\alpha = 84^\circ 20'$  のプリズムを使用すると(9)式に相当する式は、

$$\sigma_1 = 3.96 \times 10^3 (i_1 - i_2) \dots\dots\dots (10)$$

(ただし  $\sigma_1$ :  $\text{kg}/\text{mm}^2$ , ( $i_1 - i_2$ ): rad.) となり、かつ視野の読み  $\Delta$  は ( $i_1 - i_2$ ) に比例するので、応力対視野目盛差の関係は 図-6 の直線に示すようになり、 $\Delta$  の読取精度 0.5 にたいする応力値は  $0.8 \text{ kg}/\text{mm}^2$ 、すなわち応力測定精度として  $\pm 0.4 \text{ kg}/\text{mm}^2$  と良くなる。しかし余り  $n_p$  を  $n_0$  に近づけるとかえって視野の境界線にボケを生ずるから、実用的には普通の板ガラス組成の強化ガラス用としては本器に使用したプリズムで充分であると考えられる。

5. 結 語

圧縮応力が残留する強化板ガラス表面上に、これより屈折率の僅かに大きいプリズムを置き、被測定点に収斂する円偏光光束を全反射臨界角にほぼ等しい角度で入射せしめると、試料表面上で入射面に垂直な主応力方向に振動する異常光線の屈折率は、入射面内で試料表面に垂直な方向に振動する常光線の屈折率より小さいために、反射臨界角は常光線のほうが大で、したがって望遠鏡の視

47 北野一郎ほか

野に現われる明暗の全反射境界線の間には両者間でずれを生ずる。この差違は表面に存在する応力に比例するので、視野の目盛を既知応力であらかじめ校正しておけば表面応力を非破壊で知ることができる。この原理に基づき現場で使い易くコンパクトな光学装置を製作したが、視野に見られる常、異常両光線にたいする明暗の全反射境界線の差は極めて明瞭であり、強化ガラスの表面応力を  $\pm 0.6 \text{ kg/cm}^2$  の測定精度で測定することができた。

本研究は著者らが研究所在任中に行なったものであり、御指導、討論をいただいた東大工学部岡村弘之助教授、当社音研

究所長および中谷商品技術部長の諸氏、また実際に本器を使用し有益な助言をいただいた鈴木主任技師らに厚く感謝の意を表す次第である。

文 献

- 1) A.S. Argon, "MIT Masters Thesis in Mechanical Engineering" (1953).
- 2) R.W. Ansevin, *ISA Transactions* 4 [4] 339-43 (1965).
- 3) 原 守久, 第9回ガラス部会討論会講演要旨集, p. 39-44 (1971).
- 4) 岡村弘之, 機械学会論文集 30 [215] 745-55 (1964). [8/12/1971 受付]

1. 46

光線の直交偏

sin  $\theta$

(9)

値は比  
ことが  
よって  
異にす  
6を本  
たわけ

視野の  
ように  
mm<sup>2</sup>  
おおよ

は、被  
あるた  
プリズ  
差の説

光学ガ  
屈折率  
231の  
のプリ

(10)

かつ  
対視野  
の鏡  
はわら  
しか  
界線に  
組成の  
充分で

より屈  
収散す  
入射せ  
向に振  
に垂直  
に、反  
鏡の視