

熱強化板ガラスの 「エッジ応力」の観察

千葉工業大学教授 岸井 貫

1 「エッジ応力」

熱強化板ガラスの品質管理の方法に、「表面応力の測定」と「エッジ応力」の測定がある。前者では製品強度と直接に関連したデータが得られるが、測定が一点ごとに実行されるので板の全体的な評価には手間がかかる。後者はこれと対照的で、周辺全部の観察を短時間で終わられるが、データは強度と直接には関係しない。

従ってエッジ応力で管理するためには、あらかじめ製造工程が正常な場合に、板厚さをパラメーターとして「表面応力」と「エッジ応力」との関連を求めておき、管理の規準にする、という方法が実用的であるし、そのように実施されている。

2 エッジ応力の観察

エッジ応力を測る装置を図1に示す。水晶楔を組み込んだバビネ補整器式光弾性装置である。

エッジに水晶楔を重ねて直交ニコルで観察した例を図2に示す。図の右端付近は直交ニコルだけの観察になっている。応力がエッジからの距離の関数として分布する状況を縞の形から一目で観察することができ、製品の

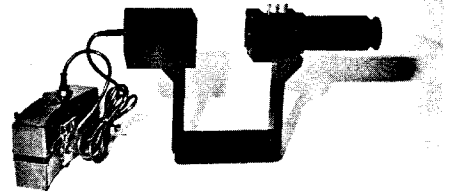


図1-a 装置の外観

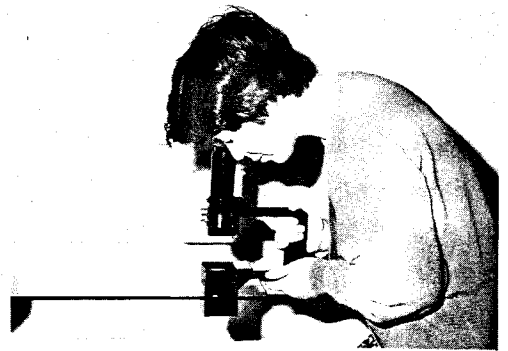


図1-b 使用状況

図1 エッジ応力を測定するための光弾性装置 SVP-30-H

全周の検査にも時間がかからない。

ただし、製品の縁近くでは干涉縞が極めて狭い間隔で並ぶので、定量的測定のためには高倍率ルーベを使う必要がある。図1の装置はそのためのルーベを備えている。

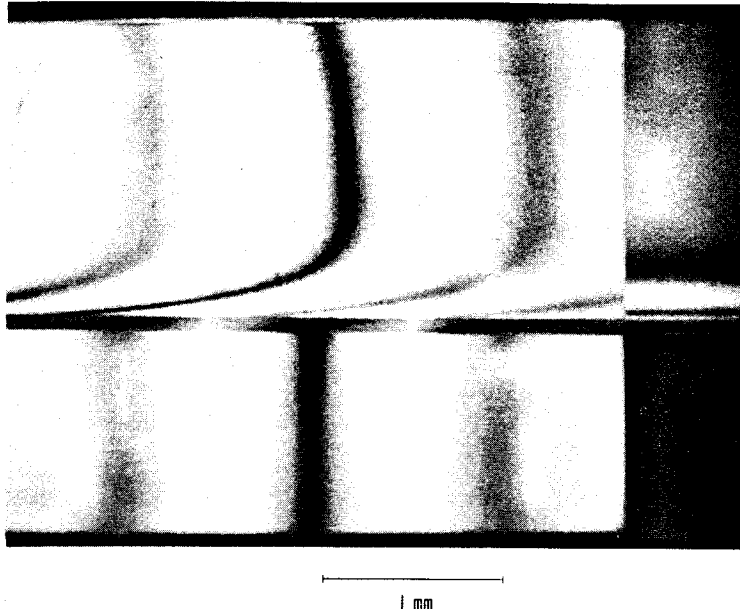


図2 水晶楔を使用してのエッジ応力の観察例

3 エッジ応力の発生過程

エッジ応力が発生する原因は、風冷強化処理時に板中央部に比べてエッジ部が早く冷えることである。その結果、エッジに平行な方向の圧縮力とエッジに直角に働く張力が生ずる(図3)。これらの力とエッジからの距離との関係が水晶楔上の縞の形に関連するし、

また強化時の冷却能率の場所的分布と関係がある。これらいくつかの要因の間の関連性を知ることは興味深いし、品質管理上必要でもあろう。

後に述べる計算の結果によると、エッジの応力は絶対値の点では、エッジに平行に働く圧縮力が、エッジに直角な方向に働く張力よりもはるかに大きい(後出図5参照)。

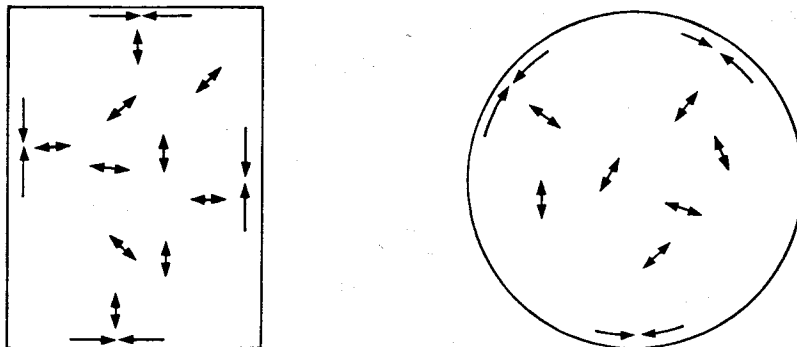


図3 中央部に比べて周辺部が急冷されたガラス板内の応力分布の説明図

次のように考える (図4) :

ガラス円板があり、強化のために粘性流動できるような高い温度に保持された。応力は発生していない (図4-a)。

冷風吹きつけ工程が始まり、固化温度付近まで温度が低下した。温度分布が不均一であり、縁の方が低温であった。まだ応力は発生しない (図4-b)。

さらに温度が低下して全体が固化した。温度分布の形は変化しなかった (T(r)とする) ので応力は発生しない (図4-c)。

全体が0°Cで一様になった。応力が発生した (図4-d)。この時の応力分布は次のものと同じである :

全体が0°Cで応力のない円板に温度分布T(r)を発生させた時の応力と絶対値は同じで、圧縮力⇄張力の読み換えをしたもの。

このように考えると、熱弾性応力の計算法を適用して応力分布を計算できる。また逆に、応力分布の観察から試行錯誤法でT(r)を推定することもできよう。ただしその前提として応力分布を迅速に計算できることが必要である。

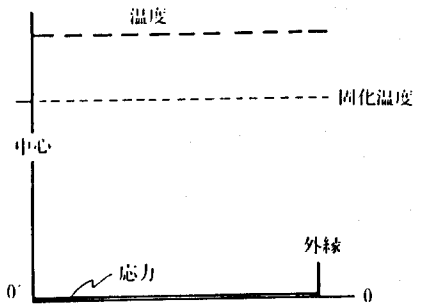
4 エッジ応力の計算

温度が0°Cで一様な円板に温度分布T(r)、r: 中心からの距離が生じた時に発生する応力は比較的容易に計算できる²⁾。中心に孔がない (「中実」) 場合は特に容易であって半径方向 :

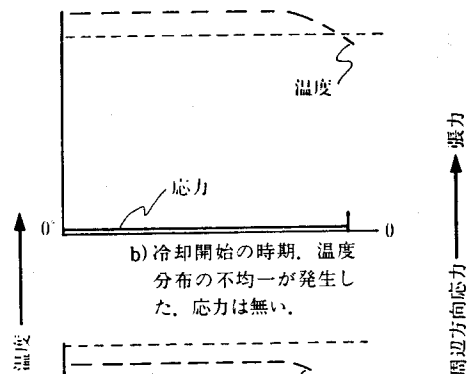
$$p_r = E \cdot k \left(\frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} T(r) \cdot r \, dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) \cdot r \, dr \right)$$

切線方向 :

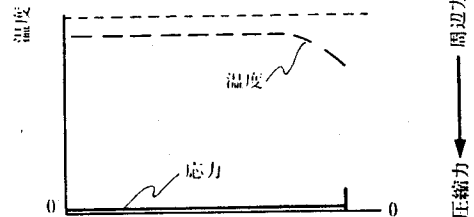
$$p_\theta = E \cdot k \left(\frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} T(r) \cdot r \, dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) \cdot r \, dr - T(r) \right)$$



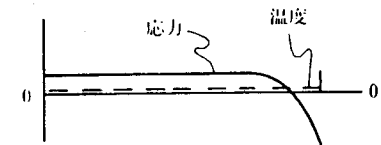
a) ガラスは軟化状態で応力はなし。冷却前で温度分布は均一。



b) 冷却開始の時期。温度分布の不均一が発生した。応力は無い。



c) ガラスは固化し終わる。温度分布の形は変化せず、応力は無い。



d) 温度は常温で分布は均一。応力が発生した。

図4 応力発生過程の説明図

ここでk: 熱膨張係数—約 $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

E: ヤング率—約 7000 kg/mm^2

r₀: 板の外径

次の場合には積分計算が多項式の計算にな

図5 円板内の応力分布の計算例

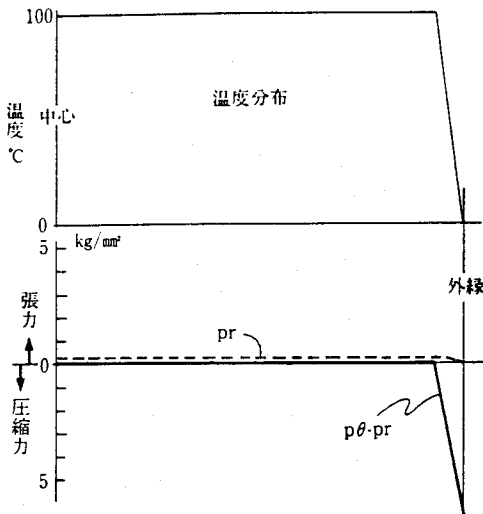


図5-1 温度分布は単調，外縁の温度勾配急

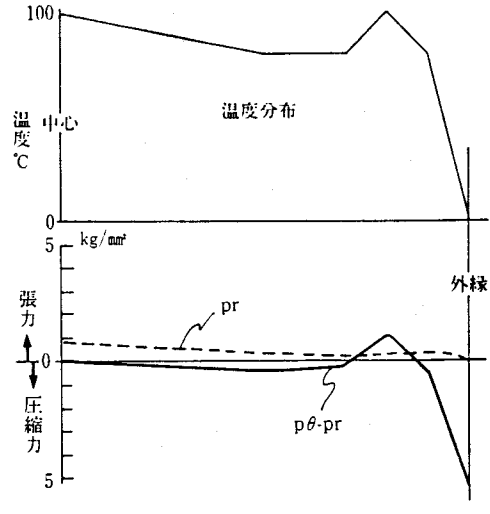


図5-3 外縁の内側に温度の極大がある

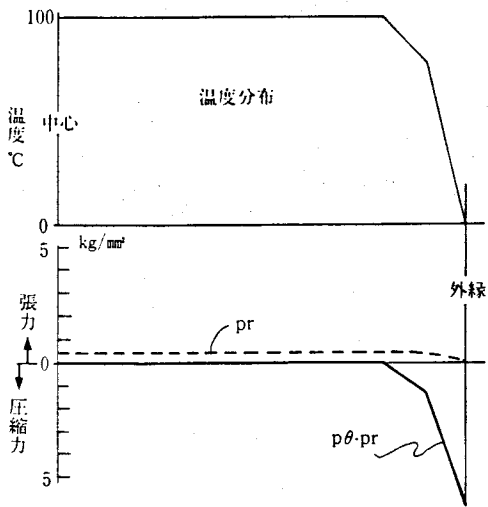


図5-2 温度分布は単調，外縁の温度分配やや緩やか

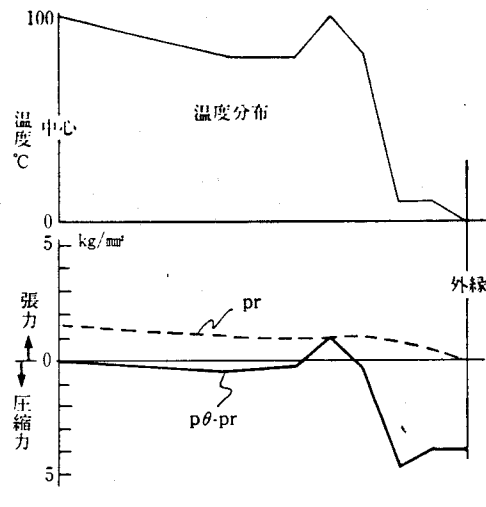


図5-4 外縁の内側に局所的な温度の均一な部分がある

るので、解析的にもコンピュータによっても容易に計算できる：

$T(r)$ が r の整数次多項式（直線的分布を含む）である時、

$T(r)$ が r の多項式の継ぎ合わせ（折線分布を含む）である時、

このようにして計算した結果を、温度分布 $T(r)$ から冷却された後の応力分布に読み換えることができる（図5-1～4 円板内の

応力分布の計算例）。応力分布の性質として、 $T(r)$ の変動幅に比例して応力分布の変動幅が決まり、 $T(r)$ の形により応力分布の形が決まるが、 $T(r)$ の絶対値の高低には無関係、および r の代わりに $(r/\text{外径})$ を変数とする温度分布により $(r/\text{外径})$ を変数とする応力分布が決まるが、この時に外径の大小には無関係、という事情があるので、図5では横軸は $(r/\text{外径})$ だけを示し、単位は記入しない

し、温度の変動幅を100°Cに決めてある。また図を見やすくするために、 pr と $p\theta-pr$ だけを示した。エッジ付近では絶対値の上では $p\theta-pr$ である。 $p\theta-pr$ の形は水晶楔上の縞の形をシミュレーションしている。

計算に使ったガラスの定数 E 、 k は板ガラス、びんガラスなどソーダ石灰ガラスのものに近い。

5 討論

エッジ応力の分布を観察した例を図2に掲げた。強化ガラスの厚さは5.8mmであった。エッジでの光路差は鋭敏色干渉縞（1本当たり光路差約560nm）2本半以上であるから、エッジ応力は光弾性常数を $2.6\text{nm}\cdot\text{Cm}^{-1}\cdot(\text{kg}/\text{cm}^2)$ として $10\text{kg}/\text{mm}^2$ くらいと計算される。これはエッジと内部とで約150°Cの温度差があったことを示す。

この強化ガラスでは、縁から内部へ向かっての干渉縞の位置変化が単調でなく、いったん行き過ぎてからほぼ零に近い値になる。シミュレーションでは、このような縞の形は単調な $T(r)$ では実現しない（図5-1, 2）。エッジの少し内側に冷却のやや緩い部分がある（図5-3）と推測される。冷却風がエッジの外方へ逃げやすく、そのためエッジの少し内側の冷却が緩むというのが一つの解釈である。

エッジの5mm以下の幅の部分に特に強く冷却されるのは、端面が放熱作用を持つことと、冷却風への妨害が少なく風速が大であり、

熱をよく奪うことが原因であろう。エッジ応力が強い領域の幅が板厚さと近い値を示すのは、この事情が反映した結果だと推測する。

6 結び

エッジ応力は日本の板ガラス工業界で品質管理のために実際に測定されている。測定器のアイデアは日本板硝子株式会社の方から教示して頂いたことを記して謝意を表す。さらに広く利用されれば嬉しいことである。

引用文献

- 1) 岸井 New Glass Technol. 2巻2号 p.44 (昭和57)
- 2) S. Timoshenko, J. Goodier Theory of Elasticity p.399 Mc Graw-Hill(1951)

著者紹介



岸井 貫
(きしい とおる)

昭和25年 東京大学理学部物理学科卒業、
3月
同年4月 東芝入社、硝子技術部(現東芝硝子)、
昭和38年 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。
8月
昭和58年 東芝硝子(株)、
～平成元年
昭和46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)、平成元年度科学技術庁長官賞(光弾性)、
～47年
現 在 千葉工業大学大学教授。