

フロート法板ガラスの 製造工程中での応力測定

千葉工業大学 岸井 貫

1 工程内での歪み測定

板ガラスの工業的生産では、ガラスが板状に成形され、徐冷・洗浄などの工程を通過してから連続的に引き出される。この時に連続したガラス板が破損すると全工程が乱れ、回復するまでに多くの損失を発生する。破損の主な原因は、徐冷工程で消去し残された永久歪み・温度分布の不均一で発生した熱歪み・引き出し工程で機械から受ける弾性的歪みによる亀裂発生だと考えられる。

弾性的歪みだけでなく、永久歪み・熱歪みも応力を伴っており¹⁾、この応力が大きいと亀裂が発生する。

従って、工程中で応力を観察・測定して管理することが歩留まり向上に必要である。

板ガラスの歪み（応力の存在）を光弾性的に検出・測定しようとする、板の狭い面積内では応力がほぼ一定であるために、測定器の視野全体が応力の有無にかかわらず一様に見える。そのため歪みの有無を直観的に判断して納得することができない。この事情のため、人手による測定が不便であるだけでなく、自動測定法を設計するにも複雑な測定手順を必要とする。

引き出し工程での応力測定は以前から実行されていた。装置の一例では、ガラスの下方に偏光光源を置き、ガラスを通過した光を上方で光弾性の原理により解析するものであった。解析装置は、直交鋭敏色板²⁾とセナルモン法³⁾とを組み合わせたものであり（図1）、応力がある場合の鋭敏色板の変色を検光子を回転して補償し、そのために必要な検光子の回転角がガラスにより発生した光路差に比例するとして応力を計算する方法であった。

光路差からガラスの応力が次の式で求めら

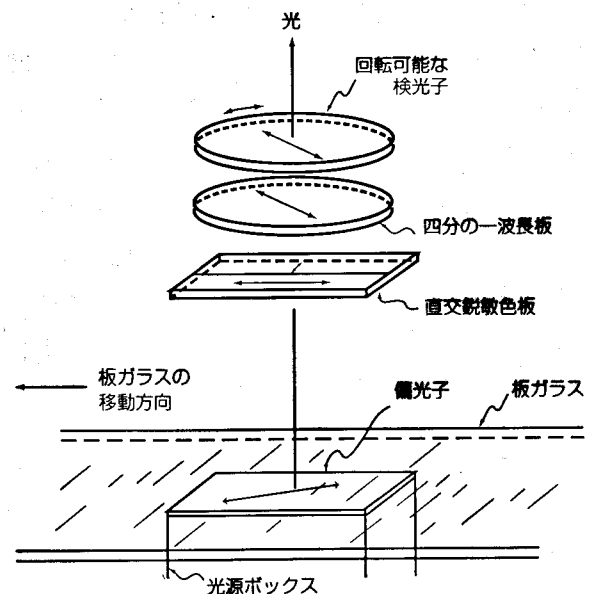


図1 直交鋭敏色板—セナルモン法の原理を使った歪み検査器

れる：

$$\text{応力} = \text{光路差} / (\text{板の厚さ} \times \text{ガラスの光弾性常数})$$

.....式 (1)

この方法は原理的には正しいが、セナルモン法自体の原理が理解され難い³⁾ことと、前記の理由で測定に不便さがあることが原因であろうが、活用されていなかった。

別の原理（水晶楔—バビネ補整器を使う方法）⁴⁾を使い、コンピュータで画像処理をして、工程中で自動的に測定する方法を工夫した。この方法は工業的に実用化されているので、実際の測定例の提示は除いて、原理・画像処理過程・データの数値処理過程を記す。

この方法は引き出し法（フロート法・コルバーン法・フルコール法）による板ガラス製造工程すべてに適用できると思うが、現実にはフロート法で実用されている。

2 測定の原理法

2. 1 光弾性測定法

原理は白色光源・直交偏光板と水晶楔（バビネ補整器）との組み合わせである。水晶楔は装置の視野の中で、中央に黒い干涉縞、その両側に色づいた干涉縞を現す⁴⁾（図2 a）。

装置の中にガラスを導入すると、ガラスに歪みがない場合には縞の位置が変化しない。歪みがある（応力がある）と、応力で誘起された光路差に従い縞の位置がずれる（図2 b）。ずれの大きさは光路差に比例する。光路差から式（1）によりガラス中の応力が求められる。

2. 2 干涉縞の位置ずれの測定

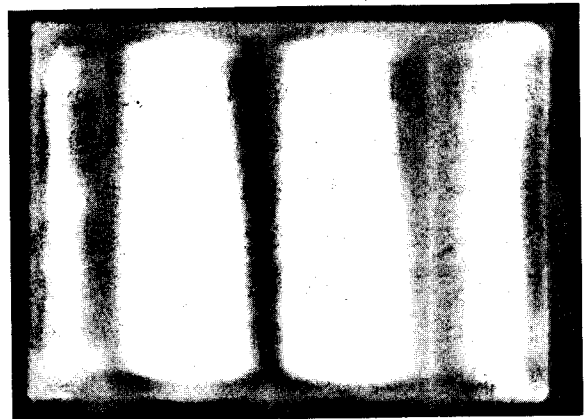
水晶楔の実像を光ダイオードアレイ（浜松ホトニクス製、小さい光ダイオードを数十個

直線的に配列したもの、アレイ＝配列）の上
に投影して（図3）、各ダイオードの出力を
それぞれ読み出す（図4）。読み出しにはA
—Dコンバーターとパソコンを使う。

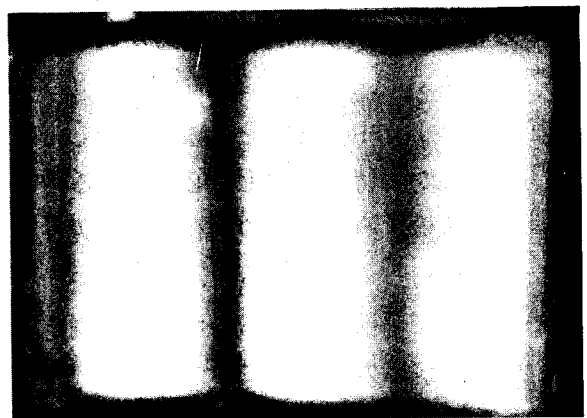
ダイオードの番号を横軸に取り、出力を縦
軸にとる。楔中央付近の黒い縞がダイオード
出力最小に対応する。その両側の二つの縞で
は、ダイオード出力は極小であるけれども、
最小ではない。

ダイオード出力が最小である位置を次のよ
うにして詳しく求める（図5）：

データ上で出力最低のダイオードとその両



a



b

図2 直交偏光板法で観察した水晶楔（バビネ補整器）
a:水晶楔だけの場合
b:光路差約90nmの複屈折性の板を重ねた場合

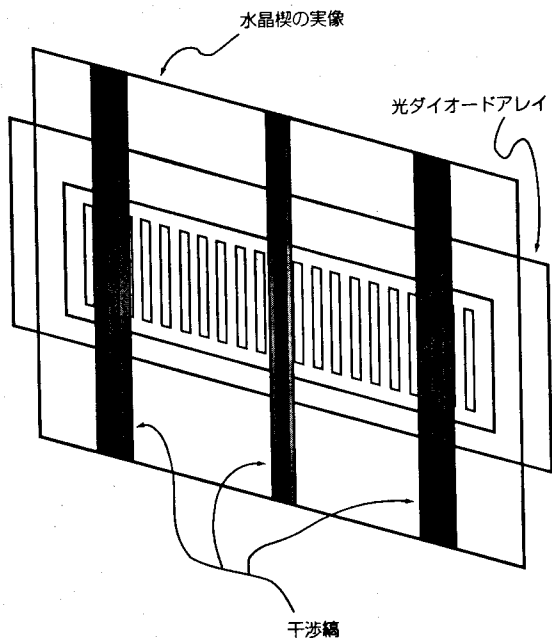


図3 光ダイオードアレイによる干渉縞の位置の測定

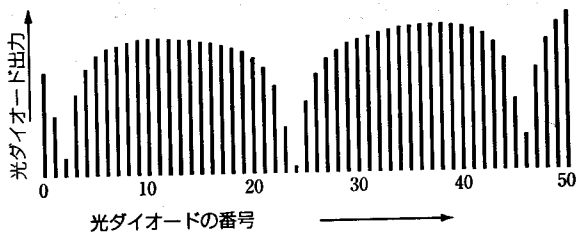


図4 光ダイオードアレイからのダイオード出力の結果 (仮定の値)

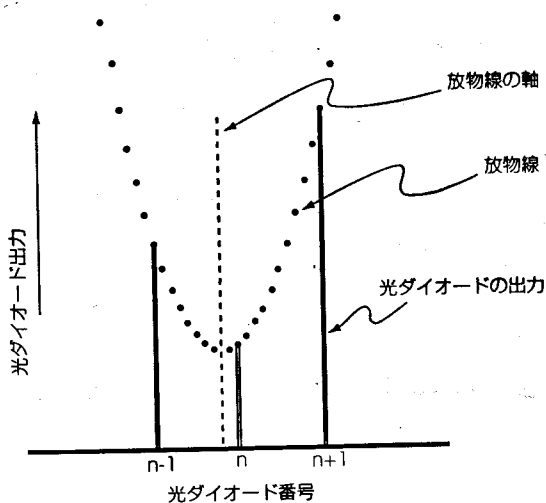


図5 ダイオード出力が最低値である位置の内挿による推定

隣のもの出力とを結び、縦軸に平行な軸を持ち、これら3点を結ぶ放物線を探す。放物線の軸の位置を横軸に対照して求める。この位置がダイオード出力の最小の位置であり、黒い干渉縞の中央線に対応する。

ガラスが挿入されていない時の出力最小点とガラスが挿入されたときの出力最小点との距離がガラスの光路差に比例する。この距離は光ダイオードアレイと投影レンズの関係位置が固定されていれば、他の部分の光学系には無関係である。

光路差の標準化には、スペクトル用ナトリウムランプを光源として干渉縞間の距離を求め、これが光源の波長(593nm)に等しい光路差に対応することを利用する。

2.3 応力の計算

長く薄い形で引き出されるガラス中の応力は、引き出しの方向に働くものだけと近似できるので、測定装置をこれに対応して取り付けた。しかし、引き出し方向に直交する方向の力も偶発的に存在し得ると考えて、この前提で計算をした(図6)。

応力は前記の式で計算し、応力が圧縮力であるか張力であるかは干渉縞の移動の方向から判断する。

光路差はまず応力に換算される。この応力

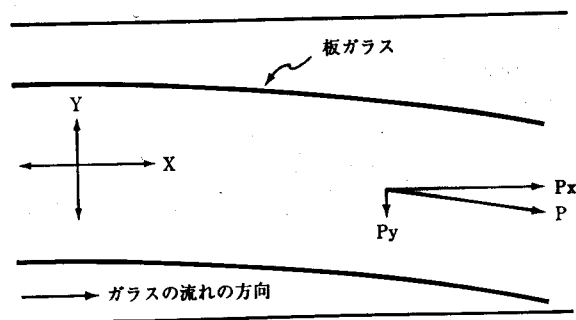


図6 ガラス板の引き出し機構で働く力の想定

分布に対して、後記のように計算・処理を加える。便宜上、張力を正号、圧力を負号で表わす。

3 自動測定装置

光弾性光学系とガラスの温度を測る放射温度計とを一緒に組み合わせ、ガラスの流れに直角の方向に移動・走査させて温度と光ダイオードアレイの出力分布とを同時に測定する。測定が行われた位置は駆動機構からの信号によってコンピュータに取り込まれる。

光ダイオードアレイの出力分布はすぐに光路差・応力に換算される。

4 測定値の処理

観測された応力は次のものの代数的な重なりであるとする：

1. 徐冷により取りきれなかった応力 (永久歪み)
2. ガラス板の温度分布が幅方向に不均一であることにより発生した応力 (一時的熱歪み)

3. 板ガラスを引き出す機構が及ぼす力Pの引き出し方向の成分 (図6のPx)により発生した応力

4. 板ガラス引き出し機構により、たまたま曲げるように力 (図6のPy)を加えられたことによる曲げ応力

これらの応力の方向はガラスの流れの方向と同じであると仮定する。また3.と4.は機械的な外力であるし、板が切断されれば消える。

板ガラスが先に進んでいって温度が均一になると、一時歪みが消えるとともにそれに対応して応力が再分布する。次に切断されると、応力3と4が消えて、応力がまた再分布する。

この過程で応力の絶対値は減少していき、最終的には応力1の効果だけが残る。観測された応力分布から応力の影響を2-3-4の順序で補整する。実用上必要なデータは、測定したまま (補整以前) のものと2・3・4を補整して除いたものとであろう。

補整に使う熱弾性論的仮定が正しければ、最終結果は補整の順序にはよらない。

仮定された応力測定 (図7a) と温度分布 (図7b) を例にして、補整の経過を説明する。

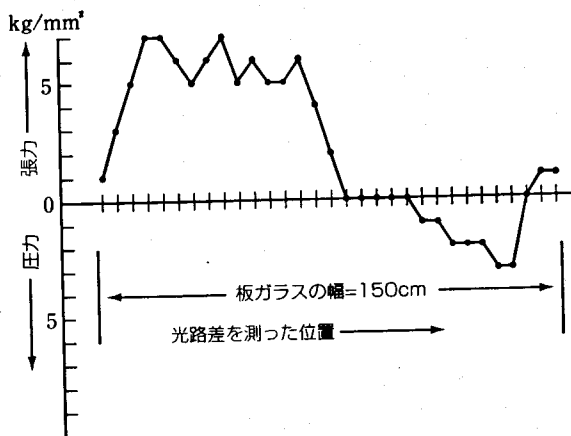


図7a) 板ガラスの幅方向の応力分布。測定されたままのもの。(仮定の値)

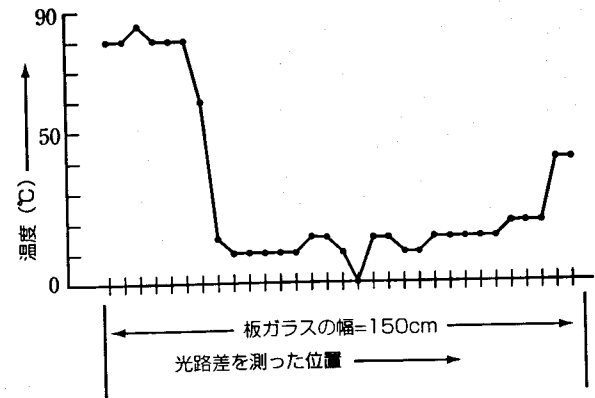


図7b) 板ガラスの幅方向の温度分布。測定されたままのもの。(仮定の値)

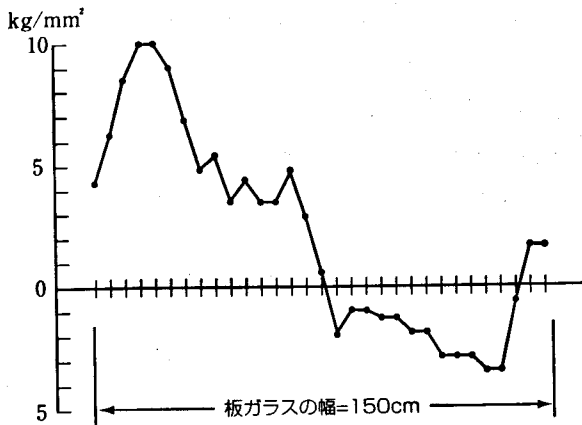


図8 温度分布不均一の影響を補整した後の応力分布

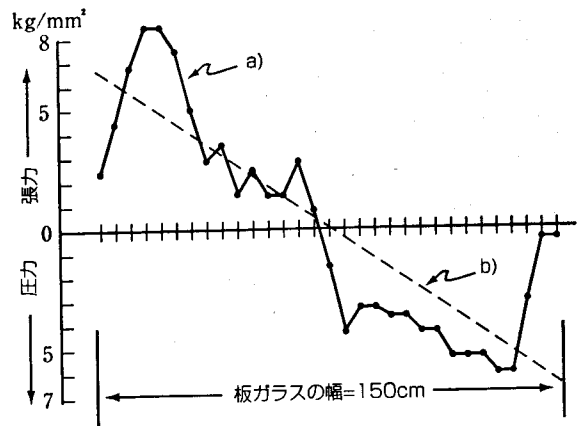


図9 a) 板ガラスの流れ方向に働く力が零になるように補整した後の応力分布
 b) 曲げモーメントを零にするために必要な曲げ応力の分布

4.1 温度の効果の補整

板の幅方向の平均温度を計算する。温度が平均温度より高ければ、板の曲がり変形がそのまま長さが熱的に伸縮するだけと仮想すれば、全体の温度が一様になった時に張力になる。同様に、平均温度より低かった部分は圧縮力になる。符号を含めての張力・圧縮力の値を考慮して、応力の測定値に対して、

(温度-平均温度) × 膨張係数 × ヤング率
 を代数的に加える。これで温度の効果2が補整される(第1次の補整値、図8)。

第1次の補整値には、外力の影響は補整されずに残っており(外力による板の伸縮はなく、曲がり方も変化しないと仮想している)、これに一時歪みが無くなったことに伴う応力分布の変化が新しく重なっている。

4.2 機械的引き出し力の影響の補整

第1次の補正値から、板に働いている全引っ張り(または全圧縮)力を計算する。これは図6の力 P_x が原因で発生する。全引っ張り力を精算し、平均の応力に換算して第1次補整値から引く。応力3の効果は補整されて全引っ張り力が零になる(第2次の補整、図

9a)。この時、板の長さは弾性的に伸縮するが、曲げ変形は拘束されていて変わらないと仮想している。

4.3 機械的引き出しの曲げの力の補整

もしも、引き出し機構が図6の P_y で表された力を発生していると、ガラス板には曲げモーメントがあり曲げ変形が生じている。板が切断されて曲げ変形の拘束が解かれると、曲げモーメントが零になるように弾的に曲げ変形をする。

第2次補整の結果を使って板に残っている曲げモーメントを求める。板幅の中央では零であり、幅方向に直線的に分布するような応力で、曲げモーメントが上記の曲げモーメントに等しいものを計算し(図9b)、第2次補整値から引く(図10)。応力4の効果は補整される。全引っ張り力は零のままである。

この時の力は、板が切断されて引き出し機構からの引っ張り力も曲げの力も消え、温度分布が均一になった時の応力分布である(最終的補整値)。

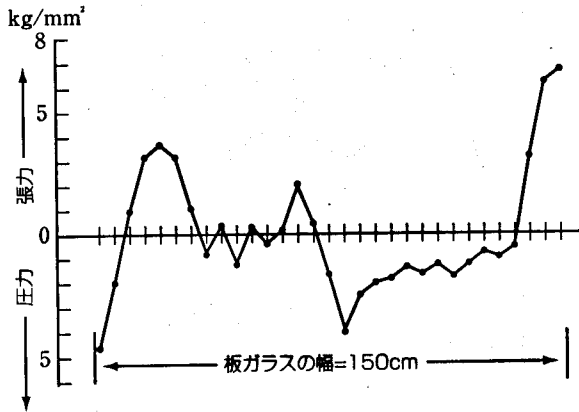


図10 板ガラスに働く曲げモーメントが零になるように補正した後の応力分布

が成り立たない場合（温度差が極端に大きい、など）にも改良の余地がある。

〈謝辞〉

この装置のアイデアを頂いたセントラル硝子株式会社の方々に謝意を表す。

〈参考文献〉

- [1] The Glass No.27 p.14(1993)
- [2] New Glass Technology 5 [4] p.47(1986)
- [3] The Glass No.20 p.26(1991)
- [4] New Glass Technology 2 [2] p.44(1982)

5 装置の働き

実測された光路差・補正前の応力分布・第1次補正值・第2次補正值・最終結果が随時ディスプレイに図示されるので、結果を直観的に理解しやすい。光路差の測定範囲は1波長（大体550nm）で十分のようである。

6 残された問題点

もっと光路差が大きい場合には水晶楔の設計を変え、画像処理のアルゴリズムに手を加える必要があるかも知れない。また応力の方が一定という仮定も近似であるから、近似

著者紹介



岸井 貫
(きしい とおる)

昭和25年3月 東京大学理学部物理学科卒業。
昭和25年4月 東芝入社、硝子技術部（現東芝硝子）、
昭和38年8月 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、
昭和58年8月 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、
～47年 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）、現千葉工業大学教授。