

ガラス工業に利用される光弾性技術

「強化ガラスのエッジに現われる見かけの応力により品質管理する方法と、ガラス中を進むレーザー光の散乱によって応力分布を知る方法とを述べる。」

(Keywords : 強化ガラス・応力・光弾性・散乱光)

千葉工業大学 岸 井 貫
折原製作所 折原 芳 男
株式会社ルケオ 吉 村 泰 信

6. エッジ (縁) の応力

強化ガラスでは、第1章ないし第4章で述べた方法による表面応力測定が、強度と関連した重要な管理項目である。しかし第4章で述べたように、表面応力が測定できない試料がいくらかある。また製造現場で特に迅速に管理したい場合もある。6.7章はこのような目的のために実行されてきた工夫について記す。

6.1 エッジの強化と応力

風冷強化は、僅かに軟化する温度に保たれたガラス板の両面に、冷風を吹き付けて急冷する操作で行われる。この時に板の縁の部分は、板の表面・裏面からだけでなく、縁の面からも冷却される。そのため板の表面・裏面方向だけでなく、縁付近と内部の間にも温度勾配ができた状態で、激しく冷却される。そのために縁が急速に冷やされ、内側がそれより遅れて冷える、という状況になる。冷えた後には縁に縁に平行に働く圧縮応力が残る。この応力を「エッジ応力」と呼んで置く。

縁の見かけの応力は、経験からは表面応力とほぼ等しい、という意見が表明されたことがある。縁の応力は次に述べるように簡単に観察・概算できるので、風冷操作が十分な強さであったかどうかの指標になる。ASTM C 1279-00 Standard test method for non-destructive photoelastic measurement of edge and surface stresses in annealed, heat-strengthened, and fully tempered flat glasses の「B法」は、エッジ応力の測定法を規定している。

縁の見かけの応力は、普通の光弾性技術で素早く測れるので、製造現場での測定は実用性が高い。

6.2 測定法

水晶楔 (バビネの補整器) を使って観察した状況の判断の方法を図45で説明する。

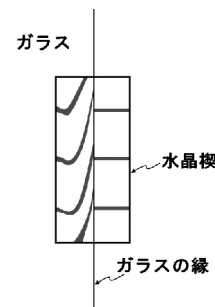


図46 強化ガラス板の縁を水晶楔を使い光弾性で観察した状況の説明図

二つの偏光板を直角の関係に置き、その間に板ガラスの縁と水晶楔を重ねて入れる。ガラスの縁は偏光板の偏光軸と45度の角度に、また水晶楔の光路差変化の方向も同じ向きにする。水晶楔の面の半分は板ガラスの縁の部分に重なり、他の半分は板ガラスと重ならない、という状態にする。

図46は白色光源を使って観察した状況である。水晶楔の板ガラスと重ならない部分にある光路差ゼロに対応する縞 (図46のA図とB図のs印) と、板ガラスと重なる部分にある光路差ゼロに対応する縞 (同s'印) に注目する。

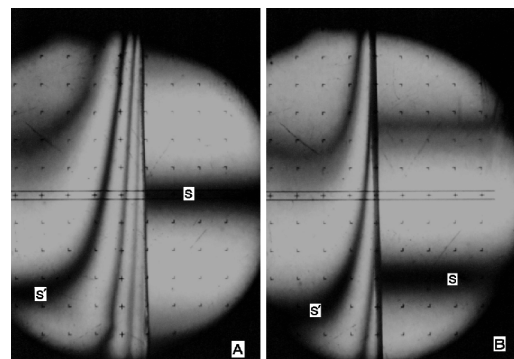


図46 強化板ガラスの縁を水晶楔を使って観察した状況

ガラス板の縁部では見かけの応力のためにsとs'との位置が食い違う。たとえば図46Aでは、食い違いは干渉縞間距離

の2倍よりは大きく、3倍よりは小さいと半定量的に判断できる。同図Bではこの食い違いは干渉縞間距離の1倍強である。この場合の干渉縞間距離は光路差にして約550nmに相当し、ガラス板の厚さとガラスの光弾性常数とが既知であれば、見かけの応力を半定量的に計算できる：

$$\text{見かけの応力} = \frac{550\text{nm} \times \text{干渉縞のずれ (縞間隔単位)}}{\text{ガラスの光弾性常数} \times \text{ガラスの厚さ}}$$

もっと定量的に求めたいときには、単色光源 (たとえばスペクトル用低圧ナトリウム放電燈が便利である。) を使うことが必要である。ただしこの場合でも、初めに白色光源を使って、光路差ゼロに対応する縞 s 、 s' を決めておく必要がある。

厳密にエッジでの光路差を決めることは難しい。隅取りのために面が粗摺りされている場合が多い。ASTMではこの場合の計算処理の方法も規定している。

一例として板ガラスで厚さ5mm、干渉縞の食い違いが縞間隔の2.0倍、光源波長579nm、ガラスの光弾性常数を2.5 (nm/cm²) / (kg/cm²) とすると、エッジの見かけの応力は9.4kg/mm²である。

7. 散乱光光弾性

7.1 散乱光光弾性技術

散乱光光弾性は、比較的によく知られた光弾性技術である。模型に力を掛けて歪み状態にし、直線偏光の光束を入射させる。光は進むにつれて偏光状態を変えながら、一部を散乱光として周囲に発散する。

散乱光は散乱される位置での原光束の偏光特性に対応した強度の立体角分布を持つ (図47)。

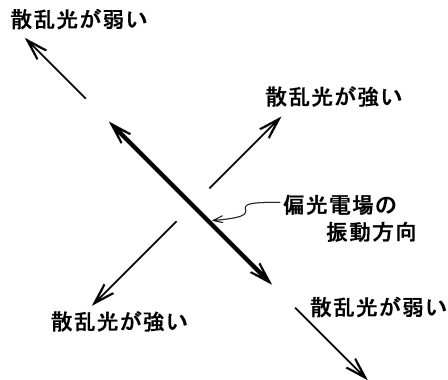


図47 偏光で励起された散乱光の強度の角度分布

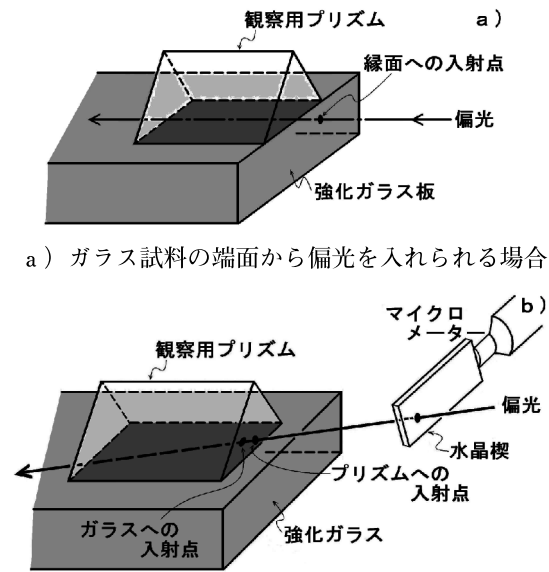
例えば原光束が直線偏光であるとき、電場の振動方向から眺めると、散乱光は弱い。電場の振動方向に直角な方向から眺めると散乱光は強い。

従って一定の方向から光束の経路を眺めると、経路からの散乱光の強度変化によって原光束の偏光特性変化、光路差変化を推定できる (図48)。光路の長さ当たりの光路差の変化が、光路に働いている応力と関連している。

即ち

$$\text{光路に働く応力} = \frac{\text{光路上の間隔} \Delta L \text{の両端間の光路差}}{\text{ガラスの光弾性常数} \times \Delta L}$$

模型の材料は適度の光散乱性を持つことが必要である。ガラス製品では、模型ではなく、製品自体に対して散乱光光弾性測定を適用できる。



a) ガラス試料の端面から偏光を入れられる場合

b) ガラス試料の表面から偏光を入れる場合

図48 散乱光を観察するための工夫

7.2 ガラス板内部の観察

強化ガラス板の厚さ方向の応力分が厚さの中央に対して対称的で、放物線型であるとする、中央にある張力は表面圧縮応力の約四割の絶対値を持つ。従って内部の応力を測って表面応力の管理に利用することは可能である。

実用ガラスでは普通散乱光は大変弱い。単色光源に水銀灯が使われた例があるが、観察は非常に難しかったと察せられる。

著者の経験では一桁のミリワット出力のヘリウムネオンガスレーザーでも観察が難しかった。しかしそれでも或る光学ガラスの角形研磨塊で非常に明るく散乱光を観察できたことがある。散乱光の強弱はガラスの組成や均質度によって大きく違うらしい。また短波長の光であるほど散乱光が強いことは理論的に予想されることである。

現在では高出力・短波長の可視光を発する固体レーザーが使えるようになり、散乱光光弾性技術のガラス製造工程への利用が可能になったと感ずる。レーザー類は直線偏光を発することが多いから、光弾性実験用に特に適している。ただし短波長の光にするとガラスが蛍光を出すようになるので、その場合は干渉フィルターを使って原波長の光だけを観察に使うようにする必要がある。

このような散乱光光弾性装置を最近導入した事業場がある。

7.3 実験装置

光を試料ガラス製品に入れ、望む方向に光を進めるため、また望む方向から観察するために、試料ガラスと屈折率が近い光学ガラスで光入射用プリズムを作り、試料に載せる

とガラス表面の斜め反射を防ぎ、見易くなる場合が多い(図48)。これはまた斜め入射により散乱光の偏光状態が変わり、観察結果に影響があるのを防ぐためにも必要である。プリズムと試料ガラスとの間隙には、ガラスと屈折率の近い浸液を挿入しておく。

図48Aは、試料ガラスの端面から光を入れ、光経路に直角の方向から散乱光を観察するためのプリズムを示す。また偏光を表面から表面に低い角度で入れる場合には入射のためにもプリズムは必須である(図48B)。

次に、散乱光の強弱を観察しただけでは、光路差が光路長と共に単調に増又は減をしているのか、或いは増と減とを組み合わせているのかの判断ができない。この判断をするために入射する偏光に予め光路差を与え、この光路差を変化させようようにした(図48B及び図50、後節)。

7.4 測定法

7.4.1 光路差変化が単調な場合

光路差が単調に増大又は減少することが予め解っているときは、散乱光の強度の極小部を探し、隣り合う極小間の距離を求める。光の経路に垂直に働く応力は

$$\text{光の波長} / (\text{ガラスの光弾性常数} \times \text{強度極小間の距離})$$

で求められる。

計算例として、光の波長500nm、散乱光強度極小の部分の間隔1cm、ガラスの光弾性常数(2.5nm/cm)/(kg/cm²)とすると、応力は2.0kg/m²の張力である。表面の圧縮応力は約5kg/m²だと推測できる。

熱強化板ガラスの厚さの中央部に端面から偏光を入れて観察する例を図49に示す。

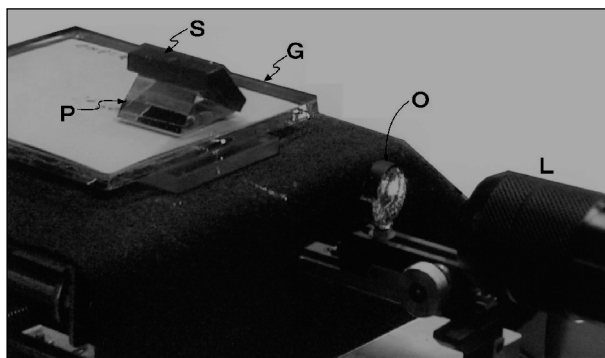


図49 熱強化ガラス板の端面から偏光を入れて散乱光を観察する状況

- G : ガラス板 P : プリズム
- S : 遮光体 L : レーザー装置
- O : 光学系

図50でAは、観察用プリズムを経て散乱光の強度分布が見えているもの、Bはプリズム内面と板ガラスの下面との2回の反射を経て見えているものである。この二つの光像

は互いに約90度違う視点から観察したことになっており、散乱光強度の分布が逆になっている。

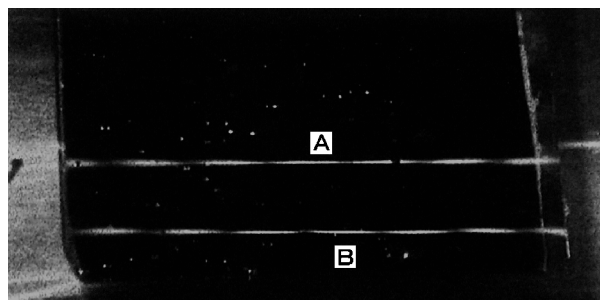


図50 散乱光を観察した状況

- A : 直接に観察された散乱光
- B : プリズム内面などに反射して観察された散乱光

7.4.2 光路差変化が単調でないとき

強化ガラス製品では光が圧縮応力が働いている部分から引っ張りの応力が働いている部分へ進むことが多い。(図51A) 圧縮応力の部分と引っ張り応力の部分との境を決めることは、圧縮応力層の厚さを決めることに繋がるから、実用上で大切である。

圧縮応力層と引っ張りの応力層の境界では、応力はゼロであり、光路差は光路に沿って極大または極小を示す(図51B)。

直線偏光を予め水晶楔(バビネの補正器)に通し、始めに光路差を与えた(図48B)とする。水晶楔を動かして、与える光路差を変えることができる。

始めに与える光路差を増すと、散乱光強度極小は光路差が減る方向へ動く。始めに与える光路差を減らすと散乱光強度極小は光路差が増す方向へ動く。光路差が極大又は極小の位置では、始めに与える光路差を変えると、散乱光強度極小が両側から集まり、または両側へ別れるように見える(図51C)。この様な位置は、圧縮応力部と引っ張り応力部との境界であり、また応力ゼロの場所であり、圧縮応力層の底である。

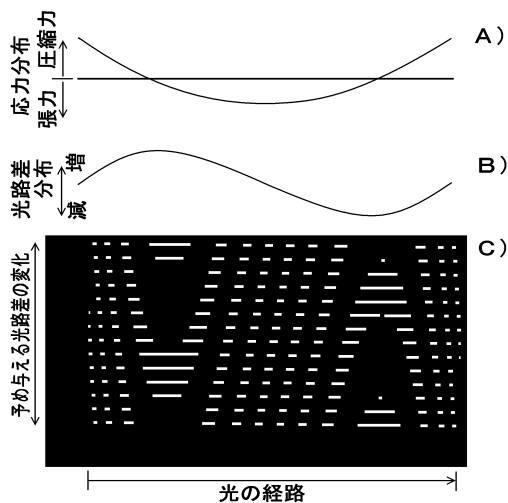


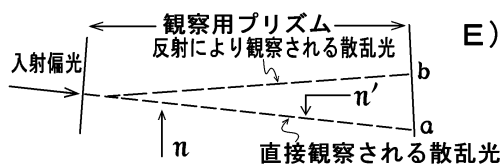
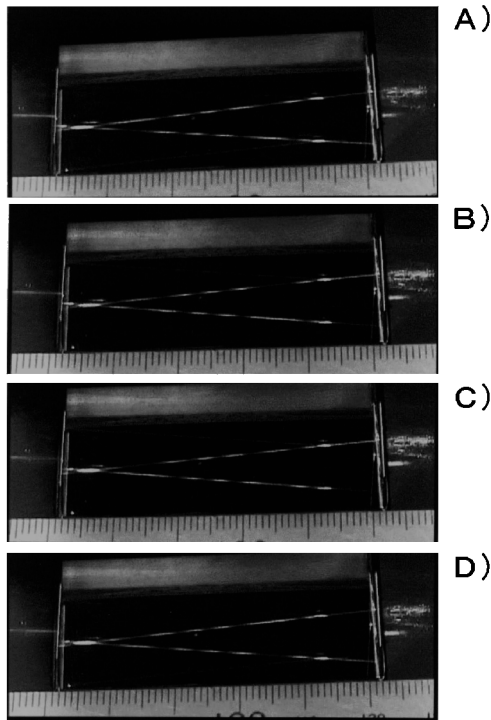
図51 水晶楔を使つての散乱光観察状況の説明図
A) 光経路に沿つての応力分布

- B) 光の経路に沿っての光路差の分布
- C) 水晶楔で与える光路差の変化に伴う散乱光の強度分布変化の説明図

また、隣り合う散乱光光度極小の間隔が狭い部分は応力の絶対値が大きい。逆に応力がゼロに近い部分では、明るい部分や暗い部分が永く伸びる。

これらの観察結果を総合して、ガラス製品中の応力分布を必要に応じて測定することができる。

ブロック型の強化ボイラーゲージ用ガラスでの観察例を図52に掲げる。



表面から光を入れるため、また側方から散乱光を観察するために光学ガラス製プリズムを使用した。

この場合も直接に観察した散乱光の強度分布 a と、プリズムと2回反射後に見える強度分布 b とがある。水晶楔を少しずつ動かして観察した状況を並べている。 n, n' が圧縮力と引っ張りの力との分布の境界だと判断できる。

筆者紹介

岸 井 貫
 千葉工業大学 教授
 (自宅) 東京都杉並区高井戸東3-14-11
 TEL 03-3329-3537
 FAX 03-3329-3890
 E-mail: toruki@ma2.justnet.ne.jp

折 原 芳 男
 有限会社折原製作所 専務
 東京都豊島区東池袋5-47-15
 TEL 03-3985-9531
 FAX 03-3985-9532

吉 村 泰 信
 株式会社ルケオ 取締役社長
 本社 東京都板橋区大山金井町30-9
 TEL 03-3956-4111
 FAX 03-3956-2335
 URL <http://www.luceo.co.jp/>