

ガラス工業に利用される光弾性技術

「各種のガラス製品や、ガラス質のコーティングを持つ工業製品について表面応力を測ることができる条件を考察し、また実際の経験を述べた。」

(Keywords : コーティング・セラミックス・ガラス・表面応力・光弾性効果)

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

4. 各種のガラスの表面伝播光

表面伝播光を使って表面応力を測る方法の前提として、ガラス製品が表面伝播光を伝える性質を持つことが必要である。フロートガラスの錫進入面やカリウムイオンの浸入により作った強化ガラスはその性質が顕著であり、表面応力の測定に好都合であった。その他のガラスについて検討した経験を述べる。

ガラス製品は普通は熔融ガラスに何らかの形で変形・引き伸ばし・吹き上げ・押し上げなどの加工をして作る。延ばされる過程で、熔融状態で存在した成分の不均質さは、製品成形後には表面に平行に配列する不均質性に変換される。これは同時に屈折率の不均質性が表面に平行に配列することであり、屈折率極大が表面に近接していれば、表面に光を入れて屈折率極大を通る光を励起し(図34)、この光を表面応力測定に使える。フロート法によらないで作られた板ガラスはこれに該当する。

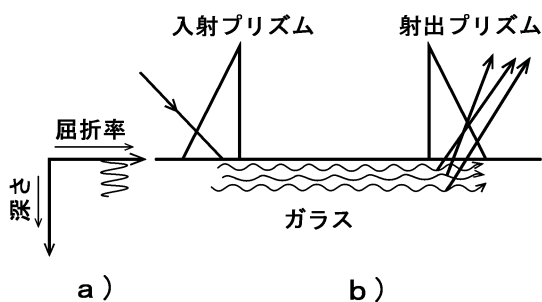


図34 表面に層状の屈折率分布があるガラスの光導波路効果のイメージ
a) ガラスの深さ方向の屈折率分布
b) 表面伝播光の励起・入射・伝播・取り出しの過程

4.1 板ガラス

フロート法によらないで作られた板ガラスで、表面伝播光を観察した例を図35に掲げる。

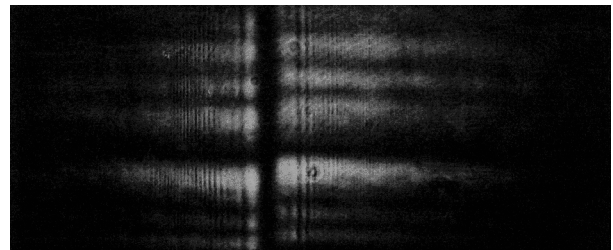


図35 フロート法によらない板ガラスの屈折計像熱強化され、多数の光の條を現した試料の例

図35は熱強化された板ガラスの屈折計像で、複数の光の條が観察された例である。この図の視野の右と左とで偏光面が直交関係にある偏光板を通して観察している。左右の光條の間の位置の喰い違いから、表面応力は400kg/cm²と判断される。

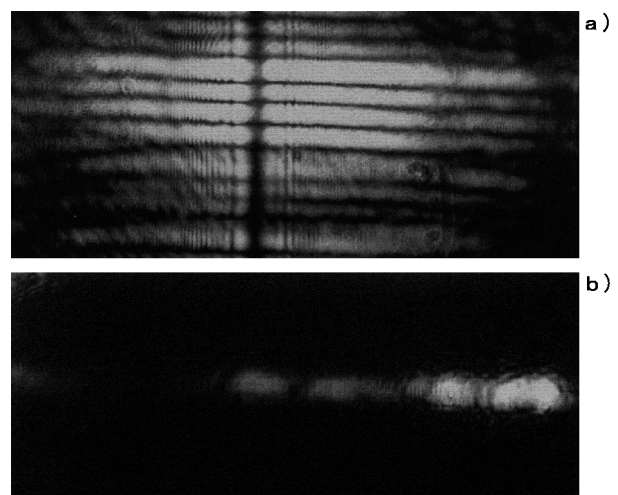


図36 a) フロート法によらない板ガラスの屈折計像 (I) 熱強化されていない、かつ多数の光の條を現した試料の例
b) 同じガラスのバイアスコープ像

図36 a) は強化処理を受けていない板ガラスの屈折計像で、比較的多数の光の筋が観察された例である。表面応力は感度以下と判断される。バイアスコープ像が同図 b) のように観察され、表面応力は45kg/cm²と測定された。

図37は強化処理を受けていない試料で、屈折計像に一本の光條が観察された例である。表面応力は感度以下であった。バイアスコープ像が観察でき、表面応力は50kg/cm²であった。

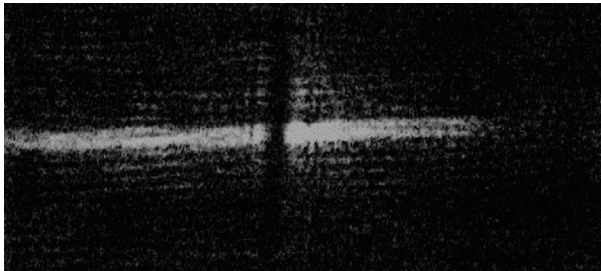


図37 フロート法によらない板ガラスの屈折計像 (II) 熱強化されていない、一本の光の條を現した試料の例

4.2 光学ガラス

光学ガラスは他種のガラス製品に較べて、内部応力・表面応力も、また材質・特性の不均質さも、極端に小さいもの入手することが容易である。このような光学ガラスでは、臨界角での光の入射によってcritical ray (「臨界屈折光」と訳しておく) を励起できて (図38)、表面応力の測定に利用できる。光学ガラスの研磨面で臨界屈折光を観察した例を図44に掲げる。

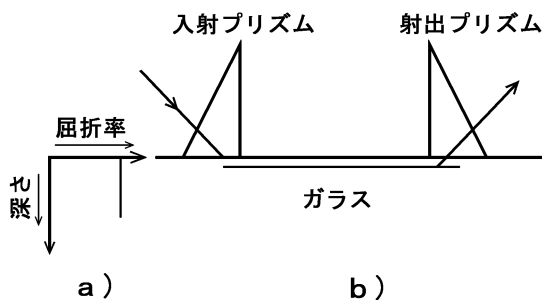


図38 均質なガラスの表面に臨界屈折光を励起し、伝播させる場合のイメージ
a) ガラスの深さ方向の屈折率分布
b) 表面伝播光の励起・入射・伝播・取り出しの過程

図39 a) は屈折計法で観察した状況で、臨界屈折光に対応する一本の光條が見える。表面応力が事実上ゼロであるから、視野の右と左との間で光條の位置の食い違いが認められない。

図39 b) はバイアスコープ法で観察した状況である。表面応力がバイアスコープ法でも検出できないくらいに小さいので、検光子の偏光板を回転すると、或る角度では光條の全体が暗くなる (図39 c)。

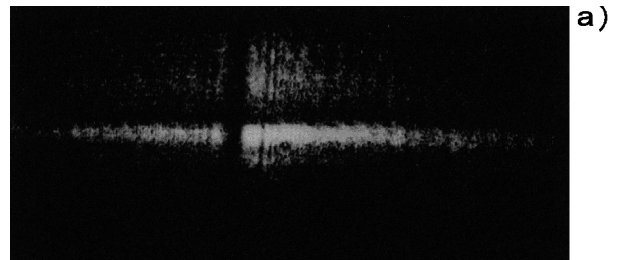


図39 a) 光学ガラス研磨面の臨界屈折光の屈折計像

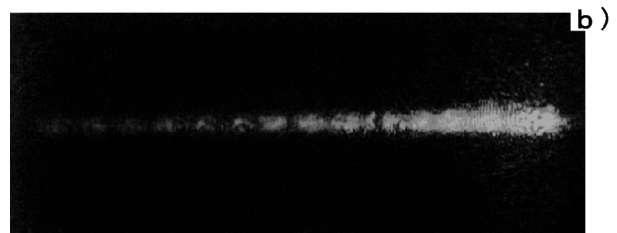
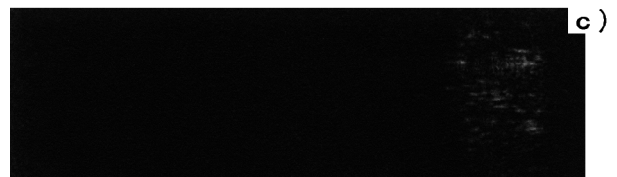


図39 b) 同じガラスのバイアスコープ像



c) 検光子を回転してバイアスコープ像全体を暗くした状況

4.3 測定器と応用範囲について

幸か不幸か、現在ではフロート法によらない板ガラス製品の強化品は少ないし、光学ガラスを熱強化して使う用途も少なく、測定を求める工業的なニーズがない。本章で扱ったような場合には、表面伝播光を励起する効率と取り出す場合の効率の双方が低いので、レーザー光の入射角度を正確に臨界角に合わせる必要があり、コリメーションが微妙である。また正しい入射角を見つけにくい。強力なレーザー光源を使う、臨界角入射を肉眼でなく面状又は線状の感光素子を使って検出する、などの工夫で、或る程度まではコリメーションが容易になるであろう。

陶磁器・セラミック製品・金属製品にガラス質の「うわぐすり (釉薬)」をかける工業製品がある。金属に釉薬を掛けたものは「瑛瑯」と呼ばれる。これらの製品では、釉薬層の熱膨張係数を基体に合わせて内部応力をゼロに近くするか、または釉薬層を低膨張にして適当な圧縮応力を入れて製品を強化するか、などが望まれる。またそのために表面応力の測定の要求もある。

測定には釉薬層が透光性を持つことが前提である。しかし透光性が充分あっても、ガラスの場合に論じたような、表面応力測定を可能にする屈折率分布が実現できているとは限らない。個々の製品について検査する必要がある。

うわぐすりをかけた陶磁器の場合には、製造工程に二つの種類がある。すなわち

①粘土の成形→乾燥→焼成・焼結→釉薬原料がけ→再焼成・釉薬溶融

または

②粘土の成形→乾燥→釉薬原料がけ→焼成・焼結・釉薬溶融

の二つである。

後者の方が釉薬が高い温度にさらされるために表面からの高屈折率成分の蒸発があって、表面応力の測定に都合が悪いのであろう、という意見を業界の方から伺ったことがある。現在は後者の工程による製品が多くなっているかも知れない。

釉薬層が僅かに光散乱性を持つ場合には、層内で発生する散乱光により表面応力を測れる場合がある。

しかし何れの製品であっても、測定器を使って観察しないと表面応力測定の可能・不可能を判断できない。

5. 熱強化ガラスコップの応力分布の測定

5.1 コップの破損と強化

ガラスコップは割れやすいものと言える。しかし割れる過程を詳しく考えてみると、他物の衝撃によって変形し易く、強い応力が発生して全体の破壊の緒となるのは口の部分である。従って此の部分強化してやると、全体を強化したと同じ効果がある。

偏光装置で口部を強化したガラス(図40 a)とそうでない普通のガラスコップ(図40 b)を観察した例を示す。

コップの製造工程の中で、口の部分を加熱してから冷風を吹き付けて急冷するという方法で、強化ガラスコップが作られている。

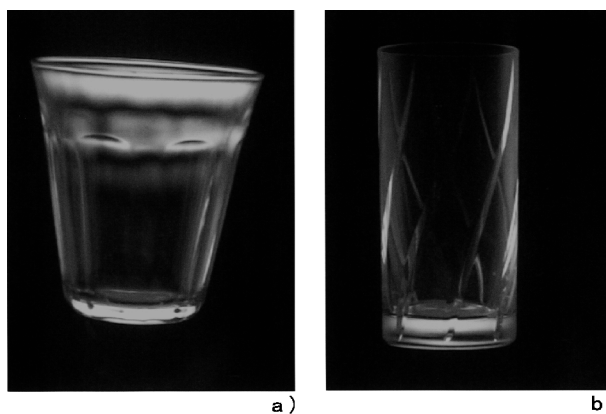


図40 a) 口部を熱強化したガラスコップと
b) 強化されていないガラスコップを偏光系で観察した状況

この製造過程で加熱や冷却の方法が不適當であると、製品の表面に張力が現れている場合がある。

強化工程はコップを軸の周りに回転しながら施されるから、応力分布は近似的には回転対称型であり、張力部も回転対称型であるため、ここが破損が開始し延長する緒になり、口の部分が自発的に、環形のままだに外れ落ちる形で破損する場合がある。

この破損は製造時にも発生するであろうが、時間を置いてその後の在庫中、顧客に届けられる前、或いは顧客が使用しているときにも起きる。従って強化工程の品質管理のためには、口の部分の応力の分布、特に表面に張力部分が露出していないこと、を調べる必要がある。

ここで記す方法はコップ以外でも管形の製品に応用できる。

5.2 水晶楔(バビネの補整器)による 応力分布の観察

このためには、応力の分布を光弾性的に観察する方法と、コンピューターシミュレーションとの組み合わせが有効であった。

口の部分の肉厚方向に張力と圧縮力とが分布しているとする(図41 a)。

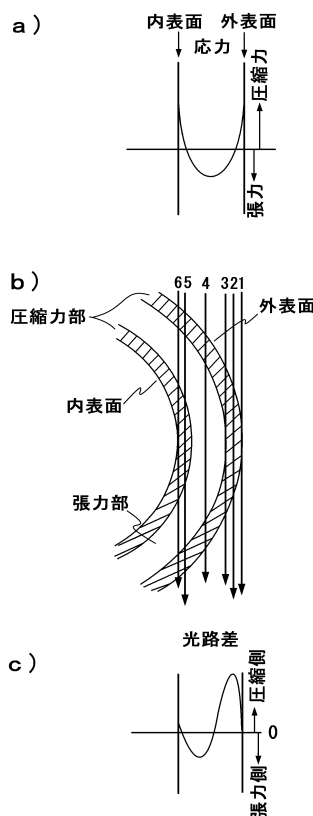


図41 応力分布と光路差曲線との対応の説明図：
内外両表面に圧縮応力がある場合
a) コップの壁の肉厚内で仮定された応力分布
b) 偏光の経路1～6
c) 観察される光路差曲線

コップを、屈折率がコップのガラスの屈折率に合致した液体の中に浸すと、光がコップで屈折されずに直進するようになる (図41 b)。この光は経路上の各点にある軸方向の応力による光路差を積分して持ち出してくる (図41 c)。

望遠鏡でこれらの光を集めて実像とし、水晶楔と重ねると、コップの各部を通過してきた光の光路差を測ることができる。観察される光路差分布を生じるような、コップ中の、円対称形の応力分布を求めればよい。

ガラス管を使ってこのような観察をした例を図42に掲げる。

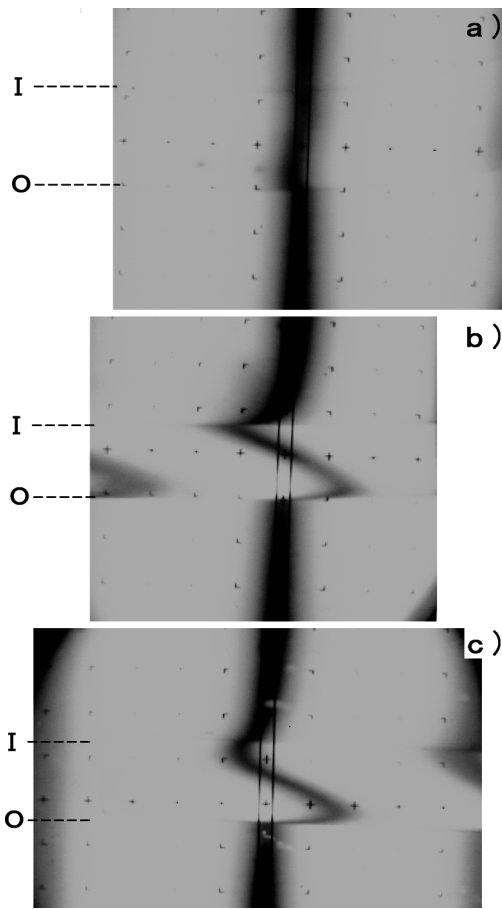


図42 ガラス管を資料として光路差曲線を観察した例
 a) 応力が小さい場合
 b) 外表面に圧縮応力、内表面に引っ張りの応力がある場合
 c) 外表面に圧縮応力があり、内表面では応力ゼロまたは弱い引っ張りの応力がある場合
 O：外表面 I：内表面

5.3 シミュレーションの計算

次の仮定を置く。

- 1、応力分布はコップの軸について対称である。
- 2、コップの肉厚方向の応力はゼロである。大気圧を無視すれば、コップの外表面と内側表面とで肉厚

方向の応力がゼロであるから、ガラス内の肉厚方向の応力は大きい値になり得ない。

- 3、従ってガラス壁内を軸に垂直に通過する光により観察できるのは軸方向の応力による効果だけである。
- 4、コップの軸方向応力の肉厚方向の分布は放物線形である (熱伝導論からの仮定)。放物線の軸は表面に平行である。
- 5、放物線の軸は、外面からの冷却の方が強かった場合には肉厚の中心よりも内表面寄りにあり、内面からの冷却の方が強かったときには外表面寄りにある。

6、軸方向の応力を肉厚方向で積分するとゼロである。

これらの条件を満足する放物線の式

$$(x - B)^2 + C = Y$$

- X：肉厚方向の座標
- Y：肉厚に直交する方向への座標
- B：放物線の軸の位置のX座標
- C：各Bに対応して前記の条件6、を満たすように決められた定数

をつくり、Bを外表面から内表面まで変えて曲線群を作る (図43上半)。

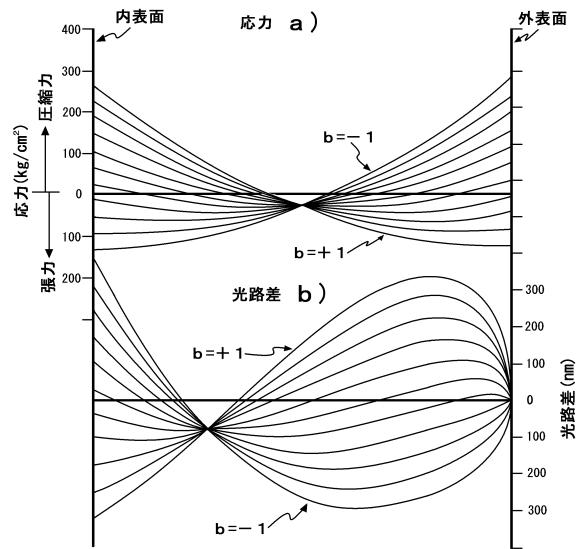


図43 コンピュータシミュレーションのための計算例：外径20mm、肉厚1mmの場合
 a) 仮定された一連の応力分布
 b) 仮定された応力分布に対応して計算から得られる光路差曲線群

次にこれらの曲線のそれぞれについて、この曲線に従う応力分布が存在する中を、Y軸に垂直に、X軸の各点をよぎる光について、その光路に沿って積算した光路差

を求める (図43下半)。

これらの曲線群の中で、応力分布曲線の一つとそれに対応する光路差分布曲線の一对を図44に掲げる。

5.4 計算と観察の一致

この曲線群に属する各曲線の特徴として外表面に近い極値 (図44のK 1) と内表面に、または内表面に近いところでできる極値 (図44のK 2) との比を採ることができる。

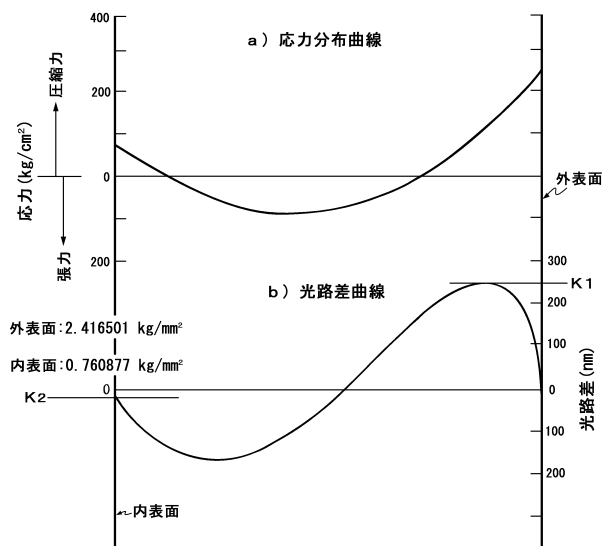


図44 二つの光路差の値K 1、K 2を仮定して得られた応力分布曲線 a) と光路差曲線 b)

実際に観測された曲線から得られるこの比と等しい比を持つ計算曲線を選び、そのB値・C値を採用する。

次に観測曲線と選ばれた計算曲線とが、その極値の絶対値が等しくなるように、次式の中のAを決める：

$$A \{(x - B)^2 + C\} = Y$$

こうしてA、B、Cが決まり、肉厚方向の応力分布が決まる。

これと同時に外表面と内表面の応力も決まる。

計算は複雑・大量であるが、BASICのプログラムとしてまとめられ、コップの外径・肉厚と内外の二つの極値を入力して、応力分布をコンピューターで求めることができる。

5.5 張力部分の確認

また、表面応力が張力でないことだけを確認すれば良い場合には、コンピューター計算を使わずに、次のような観察をするだけで判定できる。

望遠鏡又は観察されるコップのどちらかを上下に平行移動できるように装置を作る。例えばコップを上下して光弾性模様を観察する。

外表面に関しては、外表面から内側へ向けて、曲線が張力側へ立ち上がっていたならば、その部分で外表面の軸方向の表面応力は張力である。

また、内表面に関しては内表面での曲線が、応力ゼロの付近にあれば、内表面の応力はゼロに近いまたは弱い圧縮力である。

内表面で曲線が張力側へかなり入っていると、内表面には強い引っ張りの力がある。

このようにして、自発破壊の怖れのない製品を選択・出荷できる。

(次号へ続く)

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/>