

ガラス工業に利用される光弾性技術

「化学強化ガラスの表面が光を伝える性質があることを利用して、光弾性効果で表面の応力を測定する方法を説明した。」

(Keywords : 化学強化・イオン交換・光導波路効果・表面応力・光弾性効果・化学強化ガラス)

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

3 化学強化ガラス

3.1 ガラスの化学強化

ガラスをカリ塩(硝酸カリウム・亜硝酸カリウムなど。融点は400℃弱)の融液に浸すと、ガラスの表層(深さは通常数十 μm である)で



というイオン交換が起き、ガラスの表層に K^+ イオンが浸入する(図25)。両種のイオンは一對一の割合で交換し、 K^+ イオンが Na^+ イオンよりも大型であるから、 K^+ イオンが浸入した表層では体積が膨張しようとする。

しかしこの膨張は、ガラスの体積の大部分を占めるところの K^+ が浸入していない内部によって妨げられるので、表層には強い圧縮応力が発生する。またこれとバランスするために、内部には弱い引っ張りの応力が発生する。表面の圧縮応力のためにガラスは強化される。

このようにして作られた「化学強化ガラス」は、腕時計用カバーガラス、半導体製作用フォトマスクガラス、ハードディスク用基板、航空機用風防ガラスなどに使われる。

これらの製品では、表面の圧縮応力は破壊強度と、また圧縮応力層の深さは外傷による強度低下への耐久性と関連するので、これらの要因を管理する必要がある。

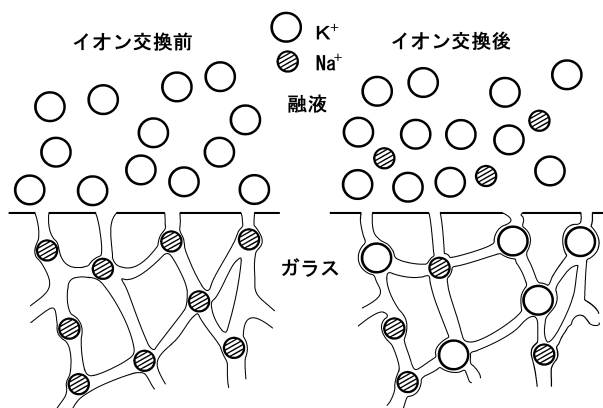


図25 イオン交換のイメージ

3.2 化学強化ガラスの表層の屈折率分布

ガラス表面への K^+ イオンの浸入は、表面応力を発生すると共に表面層の屈折率増加を起こす。この屈折率増加の程度は、応力による光弾性効果のために表面に直角および平行に振動する成分光の間で違いがあり、言い換えれば複屈折性がある。表面に垂直に電場が振動する光に対する屈折率の方が大きい。

さらにこの層は光導波路効果を顕著に示す(図26)ので、2章で述べた方法を適用でき、表面応力測定に好都合である。

この層内に存在する伝播モードの数は、屈折率勾配層が厚いほど、また勾配が急であるほど多い(図26)。

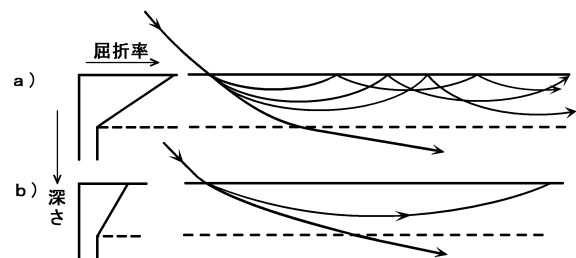


図26 イオン交換層のなかでの光導波路効果の幾何光学的表現：a) 屈折率勾配が大きい場合
b) 屈折率勾配が小さい場合

強化処理が良好に行われるならば、ガラスの屈折率は K^+ 浸入層の底から表面へ向けて単調に増す。また此の層の複屈折も表面へ向けて単調に絶対値を増す。従って、表面に垂直に振動する光と表面に平行に振動する光とのそれぞれに対する二つの深さ対屈折率曲線があって、異なる光導波路効果が生じ、これらによってできた二つの線条図形(図27)をを比較して、強化の内容(表面の圧縮応力と圧縮応力層の深さ)を知る事ができる。

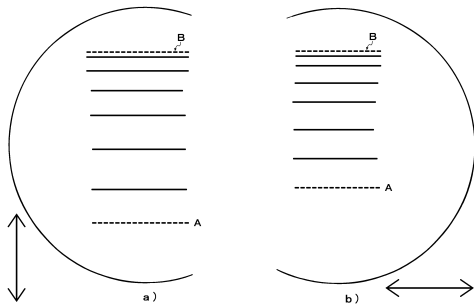


図27 屈折計の視野に現れる光條図形の説明図
矢印：光の電場の振動方向

A：外挿で求めた表面の屈折率に対応する位置

B：イオン交換層の底の屈折率に対応する位置

a) 光の電場の振動方向がガラス表面に垂直の場合

b) 光の電場の振動方向がガラスの表面と平行な場合

3.3 線条図形の例

電場が表面に垂直に振動する場合と表面に平行に振動する場合の線条図形の例を図28に示す。

装置の構成により、伝播し得ない光による明視野の中に、伝播して逃げた光に相当する暗條を示す場合(図28a)と、伝播してきた光だけによる明條を現す場合(図28b)とをそれぞれ表示できる。

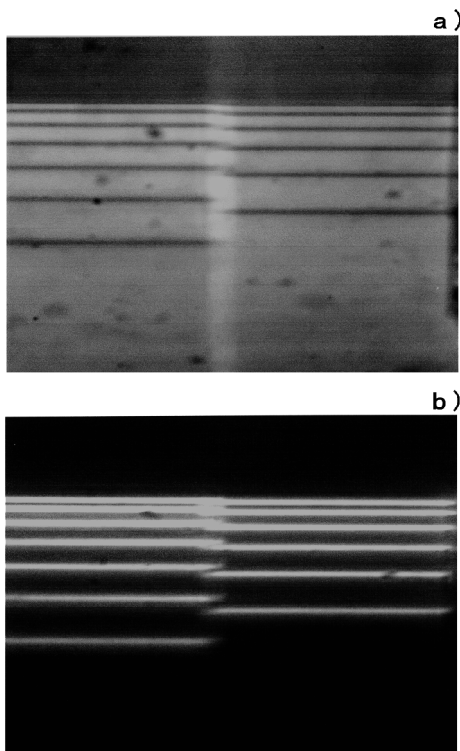


図28 屈折計の視野内の光像の例

a：明視野／暗條像 b：暗視野／明條像

a)、b)とも視野の左半と右半とで電場の振動方向が直交している。

3.4 線条図形の生成条件

線条模様ができるのは、光の波動性による「光導波路効果」のためである。従って縞模様の生成条件は、与えられた境界条件下での電磁波の波動方程式を解いて、電磁波の挙動を知らなければならない。

しかしこれは筆者の能力の及ばないことであったので、次のような幾何光学的な考察から干渉条件を導き、線条図形から、表面の圧縮応力と、圧縮応力層の深さとを導くことにした。

次の仮定を置く(図29)。

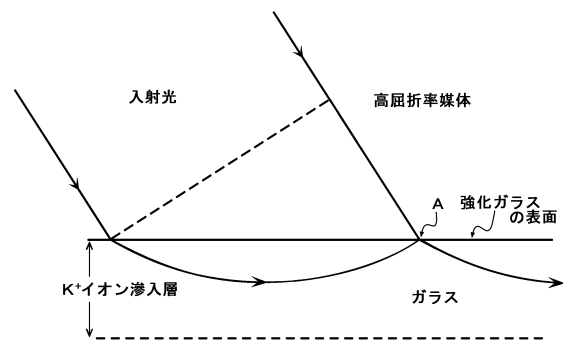


図29 イオン交換層内での伝播モード形成条件の幾何光学的表現

1. K^+ イオンが浸入した部分が表面に圧縮応力が働いている層であり、同時に屈折率勾配がある層である。
2. 屈折率分布は表面と K^+ イオン浸入層の底との間で直線的だと近似する。表面では屈折率が最高、内部へ向けて屈折率が単調に低下し、 K^+ イオン浸入層の底より深い部分では屈折率が一定である(図26参照)。
3. 応力層の中では光は曲率半径 R が

$$R = 1 / (dn/dh),$$

h は表面からの深さであるような円弧に沿って進む(図29)。

4. 高屈折率媒体からガラスへ光束が進入したとき、進入光と、層内を進行してきてガラス内で進入光と同じ経路に進む光とが、互いに強め合う場合(図29のA点での位相差が光の波長の整数倍になる場合)に、 K^+ イオン浸入層内を遠距離まで伝わるモードが形成される。
5. 仮定3.に従う円弧が K^+ イオン浸入層の底に到達すると、そこから光は直線的に K^+ イオンが浸入していない深部へ入り、逃げ去ってしまう(図26参照)。従って伝播モードを作らない。

計算の結果は定性的なものを含めて次のようになった。

1. 表面を伝わる光はなく、僅かに潜る経路が最も低

次のモードである。

2. 作られる伝播モードの数、従って線条図形の線条の数はK+イオン浸入層の厚さ比例し表面にある最高の屈折率と浸入層底部の屈折率との差の平方根に反比例する (図30)。
3. 図27、28で線条の内で線条間の間隔の広い方が表面に近い側を通るモードに、その反対の側が線条が深いところを通過するモードに対応する。
4. 表面の屈折率に対応する位置は、一番浅いモードとその次に深いモードの線条間の距離の約一倍だけ、一番浅いモードの線条から高屈折側に離れた部分に対応する (図27参照。Aで示した條)。

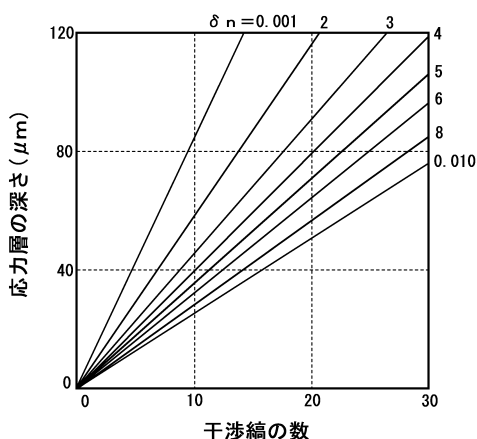


図30 條数とイオン交換層の厚さとの関係図
イオン交換層の底部と表面との屈折率差 δn がパラメーターになる。

3.5 熱処理の条件による線条図形の変化

熱処理が良好に行われると線条は明瞭である。これに対して強化処理の温度が高すぎると、恐らくガラスの粘性流動のためと思うが表面の応力と屈折率増加の双方とも減少する。これに対応して線条図形は高さが減り同時に高屈折率側にある線条が薄れる。これは強化条件の決定には役立つ性質であるが、このような強化ガラスでは、表面応力や応力層の厚さは計算できない。

3.6 コンピューターを用いた計算

表面応力と圧縮応力層の計算は原理的には難しくないが、品質管理のために多数回測定・計算する場合には労力が必要である。次のような工夫でコンピューターに計算を委せるようにできる (図31)。

コンピューターのディスプレイの広い範囲に、ビデオカメラで撮像した線条図形を表示させる。これは「スーパーインポーズ」と呼ばれる操作であり、現在ではウィンドウズOSを使うコンピューター用にボードが供給されている。

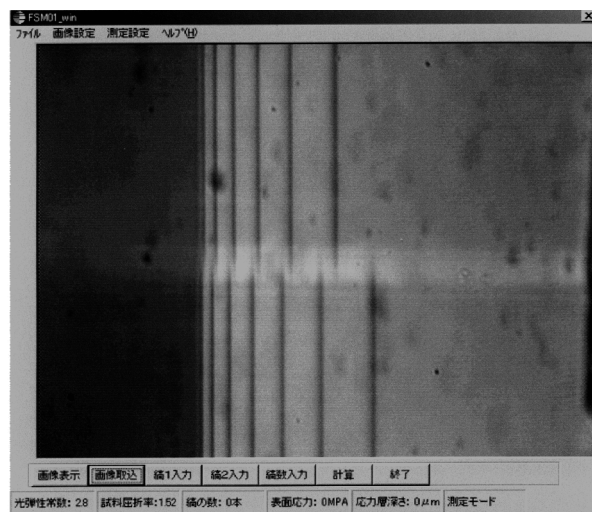


図31 コンピューターディスプレイ上への図形のスーパーインポーズを使った計算の画面

「スーパーインポーズ」機能はMSXコンピューターが標準的に装備していたが、DOSおよびWINDOWSコンピューターではそのためのボードを装着する必要がある。

線条図形のうち表面応力の計算に必要な特徴点は、最も高屈折率側にある線条の位置と、それに次ぐ屈折率の部分にある線条の位置 (この二つから表面の屈折率を外挿によって求める) 及び図形の内の明るい部分と暗い部分との境 (イオン浸入層の底の屈折率に対応する) である。これらは振動の方向を異にする二つの図形のものが必要とされるが、図形内の明るい部分と暗い部分との境は、二つの図形の間で近似的に一致するのが普通である。ただし応力層が深いときには位置の差が目立つ (図32) が、工業的な目的の測定では無視して構わない。

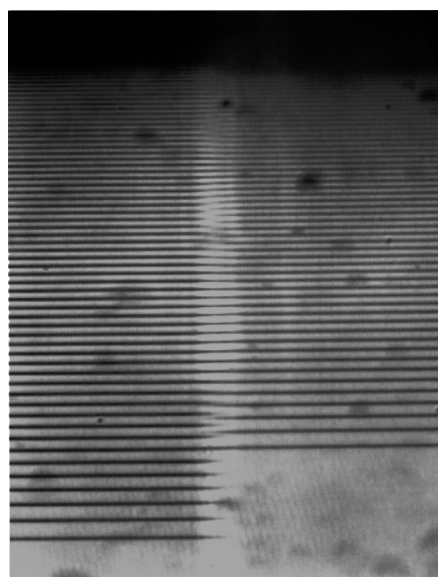


図32 極端にイオン交換層が厚い資料で得られた條図形

これらの位置を、コンピューターソフトでディスプレイ面に作られた矢印のカーソルで指し、「エンターキー」を押すと位置情報が取り込まれる。

更に線條の数を数え（二つの図形の内どちらか一つのものでよい。普通、「屈折率増加の大きい方」と規約している）を数え、キーボードから入力する。

その他、ガラスの光弾性常数・屈折率も入力する。これらを終わって計算をさせると、表面応力と応力層の深さが数値的に表示される。

3.7 曲面ガラスの表面応力測定

此の測定法は表面を伝わる光を利用しているので、2.章で熱強化した曲面ガラスで記したと同じ理由で、曲面ガラスにも適用できる。図33は眼鏡レンズのような小型の資料を測定するための装置であって、光を資料に入れるためのプリズムと光を取り出すためのプリズムとを分けて、曲率に応じてそれぞれが自由に回転できる構造に作られている。

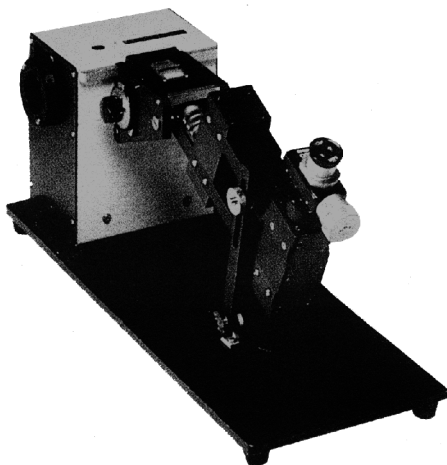
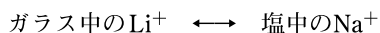


図33 化学強化された眼鏡レンズ用の表面応力計

3.8 特殊な化学強化ガラス

実用になった例を筆者は知らないが、



というイオン交換によっても化学強化ガラスが造られる。しかしナトリウムイオンが浸入した層の屈折率が低下するので、今まで述べた方法では表面応力の測定ができない。

リチウムイオンは他のアルカリ金属イオンに較べてイオン半径が極端に小さく、周囲の電場が強くて、陰イオン（二酸化珪素を主成分にするガラスの場合は酸素イオン）を強く引きつけて全体の比重を高く、屈折率も高くしているのであろうと推測する。ナトリウムイオンとの交換では、リチウムイオンによって作られていた引き締め構造が緩和される効果が、ナトリウムイオンによる屈折率上昇の効果を打ち消しているのであろう。

リチウム含有ガラスをカリウム塩で処理して作ったガラスの場合には、高屈折率層ができて、表面応力を測定できる。

銀化合物の微粒子を含み、外光によって色と光透過率を可逆的に変化させる「フォトクロミックガラス」は眼鏡レンズとして実用例がある。この場合は、カリウム塩とのイオン交換によっては表面に高屈折率層が作られない。恐らく銀イオンも溶出して屈折率が低下する効果が顕著なのであろう。

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/>