

ガラス表面の残留応力を非破壊測定

フォトマスクやほうろうの品質管理に威力

①東京芝浦電気総合研究所は、ガラス表面の残留圧縮応力を非破壊で測定する光学式の表面応力測定器を開発した。

②同装置は、光がガラス表面の応力層を進行する際に受ける光弾性効果を使って、高い精度で敏速に応力を定量測定できる。

③用途は、自動車用風防ガラスや時計用カバーガラスの強度測定のほか、LSI製造用フォトマスクやほうろう製品などの品質・工程管理にも威力を発揮する。

ガラス表面に化学処理や風冷処理をした「強化ガラス」は、ガラス瓶、時計用ガラス、自動車用風防ガラス、レンズ——など広い範囲で使用されている。この強化ガラスの品質を決定的に左右するのが、表面に形成されている厚さ数十 μm の薄い残留応力層。この層の厚さと応力値が製品の強度を支配しているからだ (p.65の別掲記事参照)。

東京芝浦電気総合研究所はこのほど、ガラス表面の応力を非破壊で測定する表面応力測定器を開発した。同装置は、光弾性の原理を使って応力値を定量測定するもので、従来法に比べて作業能率を1桁向上させた。昨年春には、東芝硝子によって製品をシリーズ化、ガラス製造・加工、ほうろう業界などに広く浸透し始めている。以下、同装置の原理、応用例を紹介しよう。

応力と応力層の厚さを同時に計測

同装置の測定原理は光弾性(「ことば」参照)の利用。ガラス表面に沿って進行する光の水平成分と垂直成分の速度差を検出・測定し、応力値に換算する。

例として、化学強化ガラス(p.65の別掲記事参照)の表面応力を測定する場合を考えよう。化学強化ガラスの表面には残留圧縮応力層があるため、図1のよう

な屈折率分布を持っている。表面に近いほど屈折率が高く、ガラス内部に入るほど屈折率が低くなっている。

このようなガラス表面に光を入射させると、いったん内部に入った光は屈折率の高い方向に曲がり込む性質があるため、再び表面に戻ってきてしまう。これは、地表から上空に向かった光が、空気密度の高い方向に曲がり続け、ついには地表に戻ってくる「しん気楼」と同じ現象で、ウェーブガイド効果と呼ばれる。ガラス

表面まで戻った光は全反射されるので、同じ現象を繰り返しながら表面に沿って進行していくことになる(図2)。

ところで、こうして進む光は、光弾性によって垂直成分と水平成分の速度が異なるから、経路は図2の破線と実線のように2本に分離する。この光を、別の場所でプリズムを使って取り出して2本の偏光の出射角の差を検出すれば、応力が分かるわけだ。

表面応力計は、光源(ナトリウムラン

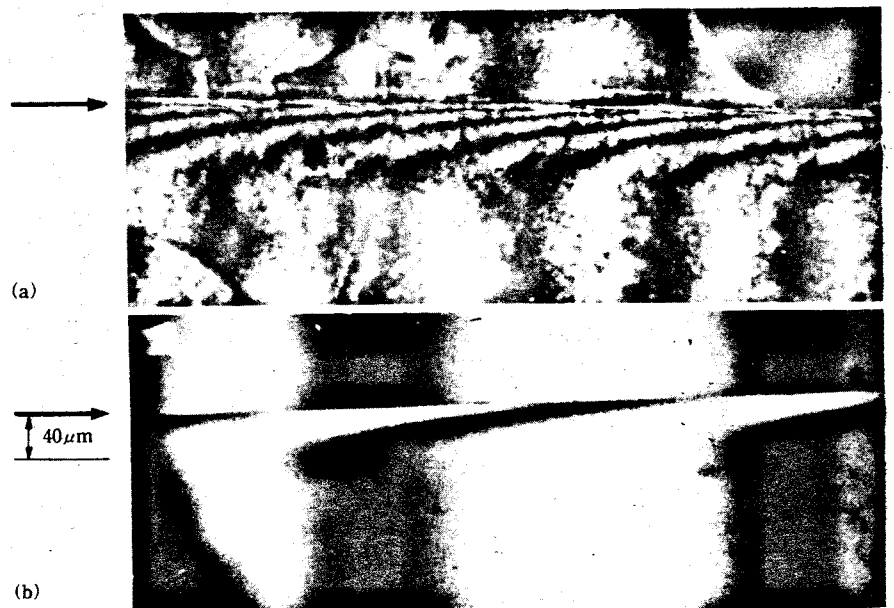


図1 ●(a)化学強化ガラス表面の顕微鏡写真。表面に近いほど屈折率が高くなっていることを示す。(b)化学強化ガラス表面付近の応力状態を示す光弾性写真。矢印の部分がガラス表面、それより下側がガラス。応力層の厚さは約 $40\mu\text{m}$

●ことば

光弾性 1816年、英国の T. Brewster が発見。透明な弾性体に外力を加えると、弾性体が一時的に結晶体のような性質を帯び、光に対して2重屈折性を示す性質のこと。弾性体であれば応力分布に相似則が成り立つので、セルロイドやフェノール樹脂で作ったモデルを使って構造物などの内部の応力状態を知ることができる。光弾性は、歯車の応力、はりや柱の接合点の応力、ボルト・弁の応力——などの研究に広く利用されている。

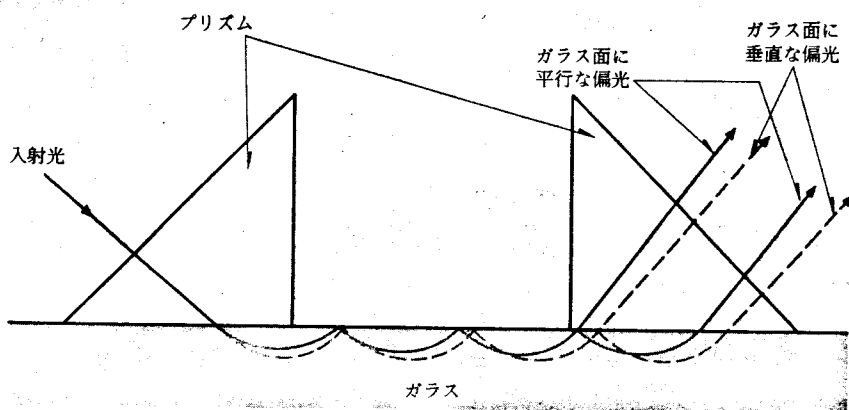


図2 ●ウェーブガイド効果による光の伝播と光弾性効果による出射光の分離

プ)、プリズム、光学系、偏光板、接眼測微計をコンパクトに組み合わせ、2本の偏光の角度差 (= 結像位置の差) を簡易に読み取れるようにしたもので、図3のような構成になっている。

図4は同装置で観察したときに見える像の例。左右の最も明るい輝線同士の差から応力値が、干渉縞の数から応力層の厚さが求められる。測定可能な範囲は、屈折率が1.45~1.60、応力層の厚さは3.6

~100 μm (1.5 μm 以下は検出不可能) などとなっている。

作業能率が1桁向上

石塚硝子は、この表面応力計を昨年導

密接な関係をもつ表面応力と破壊強度

ガラス表面に存在する圧縮応力層は、厚さが数~数十 μm 程度しかないにもかかわらず、材料の破壊強度を大きく左右する。材料の破壊が表面から始まることが多いためだ。

図Aのように、ガラスの平行平板に曲げ荷重を加えたケースを想定しよう。この場合、ガラス内部に特別大きな欠陥がない限り、破壊はC点の近傍で発生する。C点の近傍では表面に引っ張り応力が作用するため、ごくわずかの傷やクラックがあっても応力集中が発生してクラックを拡大し破壊に至る(図B)。

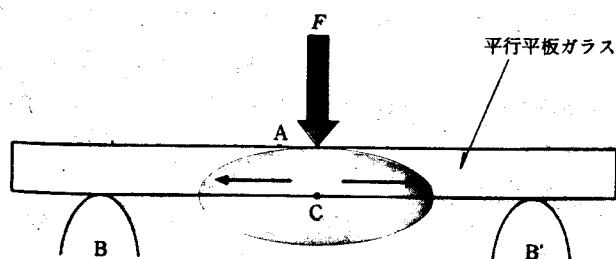
このように、材料が表面の引っ張り応力に弱いのは、ガラスに限ったことではなく、金属、プラスチックなどでも同様である。したがって、表面に引っ張り応力を残すような製造法で作られた材料は一般に「弱い」材料となる。

逆に、圧縮残留応力を残すように材料を加工してやると、傷が周囲から押し付けられた格好になるので、圧縮応力を打ち消すほどの強い引っ張り応力が働かない限り破壊は起こらず、「強い」材料が得られる(ショットピーニングがその例)。

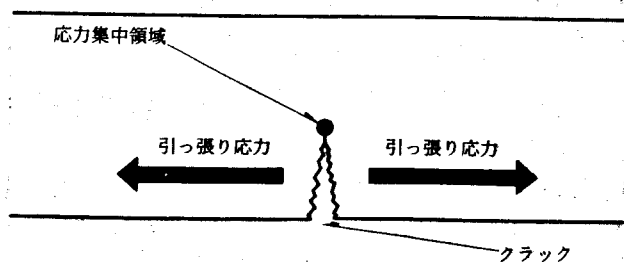
化学的強化ガラスを作るには、ガラス

の表面を400 $^{\circ}\text{C}$ くらいの硝酸カリウム(KNO_3)溶液で処理する。この処理により、表面層内のナトリウムイオン(Na^+)はカリウムイオン(K^+)と入れ替わる。 K^+ は Na^+ よりイオン半径が大きいため、表面層の体積はごくわずかに膨張しようとするが、周囲のガラスは通常成分のままなので、圧縮応力として残るわけだ。

圧縮応力が強過ぎると、ガラスコーティング材料などでははく離が起りやすくなったり、製品歩留まりが低下したりするので、適当な応力範囲に管理することが望まれる。応力層は厚いほど高強度になるが、いたずらに厚くしても、コストアップにつながるだけである。



図A ●ガラス板に荷重をかけるとC点に引っ張り応力が生じる



図B ●C点近傍の拡大図

入、時計用カバーガラスの強化条件の管理や新製品の開発試験に適用して効果を上げている。

時計用カバーガラスは、10年ほど前から始まった時計の薄型化競争に伴って年々薄型化。当初、「クリスタルカット」などの名称で呼ばれた板厚3mm程度のカバーガラスが主流であったのに対し、現在では、9割近くが板厚1.5mm以下に薄型化している。このため、ガラス自体に強度を持たせ、構造材として使用しなければならないようになってきている。

同社では従来、カバーガラスの応力測定を偏光顕微鏡を使った抜き取り検査で行っていた。ところが、偏光顕微鏡にかけるには、ガラスを1mm以下の厚さにカットした後、両端面を平行に研磨、さらに接着剤などで固定して試料としなければならない。したがって、この方法は破壊試験であるうえ、薄片を作るのに熟練が必要で、手間と時間がかかる。また、①薄片化に伴う応力緩和②厚さのムラ③測定者の個人差——など誤差要因も多く、応力値が100%程度変動することもあるほどだった。

これに対し、光学式の表面応力計は、試料を全く破壊せずに済み、作業性も良い(図5)。同社デビトロン事業室の梅津理和室長は、「この装置によって作業能率が1桁向上した。検査が手軽になったため、加工工程で発生しやすい傷の検出や、ワークのハンドリングの不具合なども早期に発見できる。現在は主として開発試験に多用しているが、応力層の深さと応力値が再現性良く定量測定できるので、強化条件の精密な解析が可能になった」と語っている。

レーザーでほうろうの表面応力測定

東芝総研は、神鋼ファウダーと共同で同装置を改良、光源にレーザー光(He-Neレーザー)を用いて、ほうろうの表面応力を測定する装置も開発している。

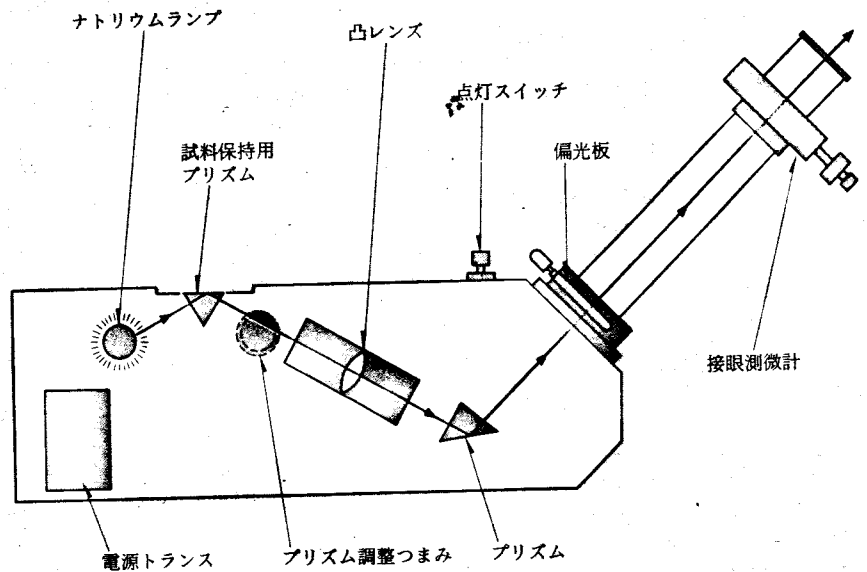


図3 ●表面応力計の構成図

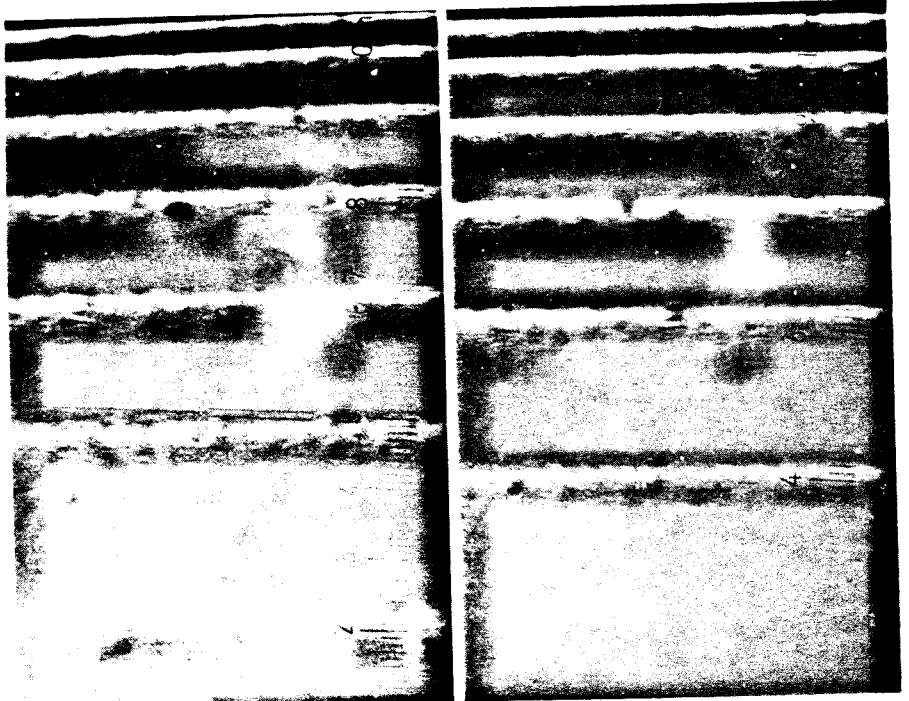


図4 ●表面応力計による化学強化ガラスの測定例。左側がガラス面に垂直な偏光、右側がガラス面に水平な偏光で得られる像

ほうろうの表面では、化学強化ガラスのようなウェーブガイド効果がないので、ガラス用の応力計をそのまま適用することができない。そこで、ほうろう表面のガラス質を通過するレーザー光の取り出し方を工夫している。

ほうろう表面のガラス質にレーザー光を入射させると、さまざまな方向に散乱光

が生じる。ガラス質表面に浸液を介してプリズムを置き、散乱光を外に取り出して望遠レンズで捕らえる。このとき、望遠レンズの軸をガラスとプリズムの屈折率で決まる臨界角に設定しておくのがミソ。こうしておくと、臨界角と等しいかそれより小さい角度を持つ出射光が、望遠レンズでのぞいた視野の上半分に集

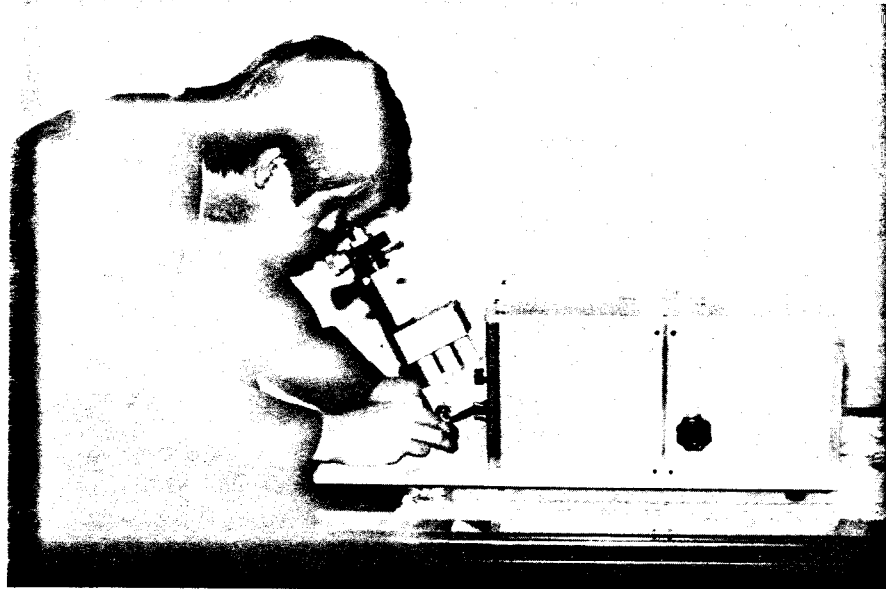


図5 ●表面応力計による測定作業

まっけて明るくなり、下半分は暗くなる。明暗のコントラストは、ガラス質がある程度不均一な方が良好なので、ほうろうの測定にはうってつけなわけだ。

応力値の測定は、化学強化ガラスのときと同じように偏光板を操作し、明と暗の境界線の移動量を測微計で検出すればいい。ただし、この方法では応力層の厚さを測ることはできない。

神鋼ファウドラー化工機事業部製品開発室の堀辻剛氏は、「ほうろう製品は、圧縮応力をかけ過ぎると下地とはく離しやすいという特徴があるため、製造歩留まりを向上させるうえで表面応力の管理が不可欠。ところが表面応力を非破壊的に測定する方法はなく、模型による間接推定法や破壊試験に頼らざるを得なかった。この装置によって、はく離の起こりやすい部位の応力解析が可能になり、品質管理や工程管理に大きな効果を上げることができた」としている。

フォトマスクの寿命延長に威力発揮

東芝硝子は昨年12月、同装置の用途拡大を狙って、化学強化フォトマスクガラス用表面応力計を開発・発売した。

フォトマスクガラスは、IC、LSIを製

造する際、ウエハに回路パターンを露光させるネガフィルムに相当するもので、ごくわずかな傷があっても製品の歩留まりに直接影響を与える。このため、フォトマスクには化学強化処理を施すが、強化処理の度合いを多数のマスクについて管理しなければならない。

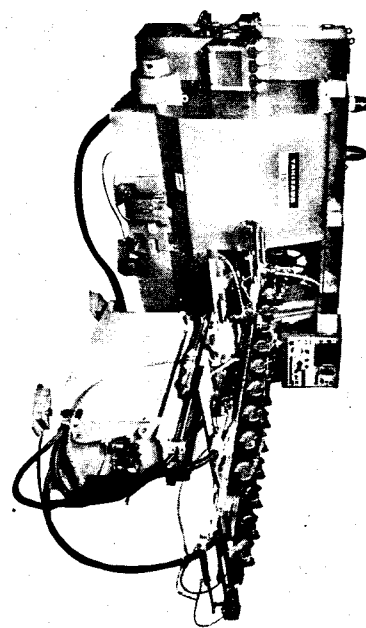
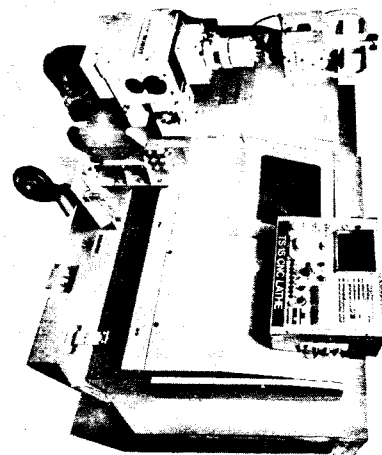
新しい装置 (FSM-60型) は、試料の大きさが最小で50×50mm、最大でφ400mmのものまで測定できるようにしたほか、青板、白板、光学、低膨張——など各種のガラスの屈折率に応じて光源位置を微調整できるようにしている。精度は±0.5kgf/mm² (4.9MPa)。

東芝硝子は1号機を保谷電子に納入したほか、フォトマスクユーザーからも引き合いを受けている。同社では、表面応力の数値管理によって、フォトマスクの使用寿命を大幅に延長できるとしている。(横田 建文)

参考文献

- (1) 岸井「窯業協会誌」, vol.87, no.3, p.119, 1979年。
- (2) 岸井ほか, 同上, vol.89, no.2, p.59, 1981年。
- (3) Kishii, T., *Optics and Laser Technology*, Aug. 1979, p.259.
- (4) *Idem, ibid.*, Apr. 1980, p.99. ◀

ロボット 旋盤の



ロボットNC旋盤の時代がやってきます。旋削工程の無人化をご検討下さい。FMSまたはロボットNC旋削加工セルを。
VTRフィルム、16mmフィルムがあります。

TAKISAWA®

株式会社 滝澤精工所 — 総合NC旋削メーカー
本社及工場 〒701-01 岡山県瀬川1883 営業本部 TEL (0862) 3-1800

〈資料請求番号67〉