

ガラスの歪みと歪みの測定法 (その一)

千葉工業大学 付属研究所

教授 岸井貫

ガラスの歪み「ひずみ」

ガラス製品に「歪み」があると、製品の強度低下や自然破壊の原因になるために、歪みを除く、十分小さい値にする、製品内での分布をコントロールする、等の注意が必要とされます。事業所によっては「歪み」のかわりに「ストレン」とも呼ばれます。

では「歪み」とは何でしょうか？

「歪み」は材料力学でも扱います。しかし、ガラス工業界と材料工学とは「歪み」の内容が違ったため、誤解を招いたり、訳のわからない、不可解なものともみなされたりすること

があります。

まず材料工学の「歪み」を見ましょう。

外から力がかかっている棒状の材料を考えます。

材料は木でも石でも金属でもガラスでも構いません(図1)。

地球上の材料である限り、重力と大気圧を受けています。これらは外から受ける力(外力)ですが、

実用上は無視して良いものとして、棒を長さ方向に引けば伸びます

(図2)。図の「は」は「伸びの歪み」です。押せば縮みます(図3)。ま

た一端を固定して他端を軸に直角の方向に押せば曲がります(図4)。また他端にハンドルを付けて回せば捻れます(図5)。この伸び・縮み・

曲がり・捻れが材料工学で謂う「歪み」です。

ガラス工業界ではこのような「歪み」が問題になることは比較的少ないようです。その代わりに、外力の有無に関係無しに、製品の内部にある力(引張りの力・圧縮の力・捻りの力など)が問題になります。ガラス製品内にこのような力が働いている状態を「歪みがある・歪みが残っている」と表現します。

ガラス工業で「歪み」が問題になるのは、ガラス器の強度・破壊と関係があるからです。ガラスは引張りの力に対しては弱く、圧縮の力に対しては比較的強いものです。特に外表面に引張りの力が働くと、

特に割れやすいものです。また外表面に引張りの力が残っていると、外見上は外力が働いていないのに自爆する可能性があります。

逆に外表面に圧縮の力が残って

いると、外力でこの力が打ち消されるまでは破壊しません。見かけ上は強度が何倍にも高まったように見えます。

「強化ガラス」はそのようなガラス器です。

このようなガラス製品の場合、力はガラス器全体ではたがいに打ち消しあっているのです。外見からは「歪み」があるかどうかの判断もできません(図5a)し、まして、外力が加わっているように見えません。

歪みが入っていないガラス板(板)に力を加えて曲げます(図5b)。この場合には外力が働いていて、板の外形が(弾性論で言う意味で)歪んでいることが明白です。

「応力」

ここで「応力」という言葉を説明しておきましょう。

図1 弾性歪みがない棒

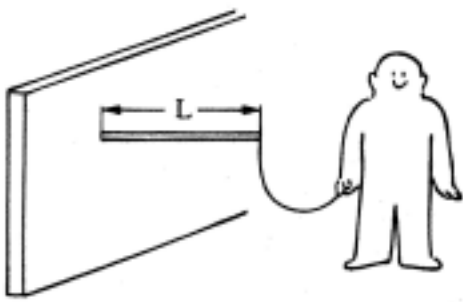


図2 棒に引っ張り歪み ΔL が生じている

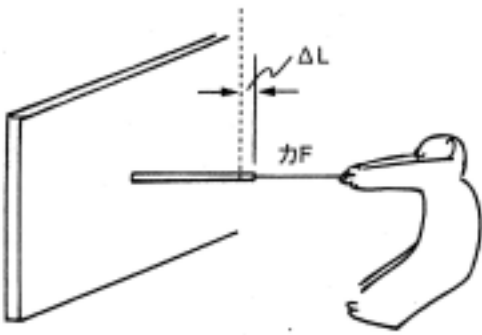


図3 押し歪みが生ずる場合

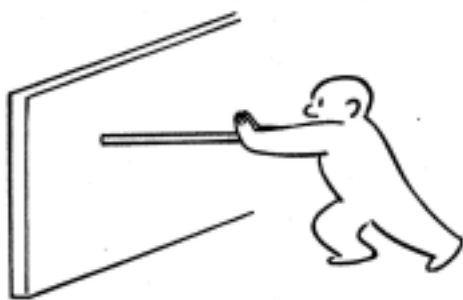


図4 曲げ歪みが生ずる場合

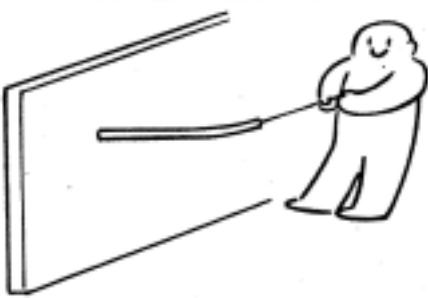
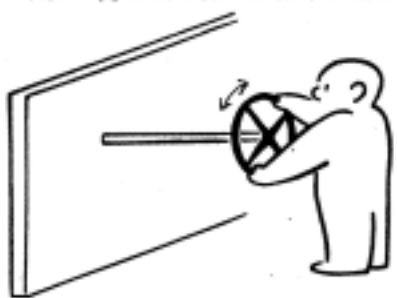


図5 捻れ曲げ歪みが生ずる場合



材料工学では、外力が加わって材料が歪み、この時に「歪みに応じて発生する力」が「応力」です。しかしガラス器の場合にこのような機構で発生する力を問題にすることは少ないのです。

従って「応力」は材料内に存在する力を単位面積当たりの値で表したものと考えておき、また使います。

このように言葉の意味を約束すると、ガラス工業界でいう「歪み」とは、ガラス器内に応力が「存在している・残っている」ことを表現したことになります。

外力がなくても、強化ガラスには強い「歪み」があります。(図6a)

歪みの発生
今、歪みのない(応力が存在しない)ガラス板を考えましょう。

歪みは次のような場合に発生します。

図6a 「歪み」が入っている強化ガラス
外見上は力も弾性歪みもない



図6b 「歪み」が入っていない生板ガラスに力を加えて弾性歪みを生じさせる



外力がかかった場合

これは材料力学・弾性論的にいうと、外力によって「歪み」が発生し、それに応じて「応力」が発生した場合です。外力を無くすると歪みも応力も無くなります。

加熱されて温度が不均一に分布した場合、色々な場合があるので、二、三の例を挙げましょう。

a・四角い板の一つの辺部分が他の部分より高くなった場合熱せられた部分の温度が、ガラスが軟化する温度よりは低いとします(図7)。

熱せられた部分が伸びようとして、他の部分はこの伸びを妨げようとして、

その結果熱せられた部分は辺に平行に圧縮の力、この部分に近接した部分は引っ張りの力が発生します(図7a)。

図7 ガラス板の一边を加熱した場合に発生する力と変形の説明図

図7a 力の発生説明図

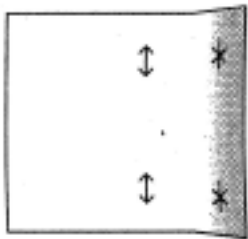


図7b 力のモーメントまで考慮したときの力の分布

↔:引っ張り応力 ✖:圧縮応力

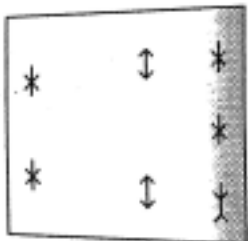
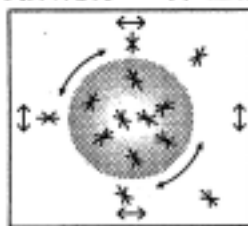


図8 ガラス板の中央部を加熱した場合の力の分布の説明図

↔:引っ張り応力 ✖:圧縮応力



は、板を回転する様なトルクが残り、板はいつまでも回転を続けま

す。このよつなことは物理的に不可能です。実際は他の部分にも応力が誘起されて、回転トルクを打ち消すよつに変形が起こります。最終的な変形と応力分布は図8のよつになります。

加熱が終わわり、長い時間が経つて板の温度が均一になると応力は消え始めのよつに「歪みのない」状態に戻ります。温度不均一にともなう「歪み」と応力は一時的なものです。これらは「一時歪み」と呼ばれます。

b・ガラス板の中央部が加熱された場合、熱せられた部分の温度が、ガラスが軟化する温度よりは低いとします。

中央部は膨張しますが、周辺は自分の大きさを変えないで保

ちたいという傾向になります。その結果、中央部には一様な(方向によらないで)一圧縮の力が発生します(図8)。

周囲の部分には、放射方向には圧縮の力、周縁方向には引っ張りの力が働きます。放射方向の力は、板の縁(へり)では零です。緑は自由表面で、緑に直交な方向の力は零でなければならぬ、という一般的な境界条件が成り立っている筈だからです。

ここに記したよつな力は、板が冷えて温度が一樣になれば無くなりますから、「一時歪み」

ガラスの歪みと歪みの測定法

(その2)

千葉工業大学 付属研究所
教授 岸井貫

ガラスが軟化する場合

一部分が軟化するまで加熱された場合、ガラス板の二つの辺部が加熱されましたが、今度は温度が高くて加熱された部分ではガラスが軟化する、とします。

ガラス板を成形・焼き鈍し・冷却して歪みのない製品にしてから、二次的に局部加熱して加工を施す場合に相当します。加熱された部分は軟化しているため、応力が発生しません(図9)。

軟化していない部分には、Br, B2などで述べたような応力があります。特に軟化した部分に接する所は、軟化していない部分の中で局所的に高温であり、圧縮の力が働くと予想され(図9左)。

加熱された部分から冷却を始めたとき、次に固化し、更に冷却して行くのに伴って収縮します。収縮を始めた部分は隣接部分から縮まるのを妨げるような力が加えられ、引張りの力が発生します。これに対して周囲には、中央部の収縮を妨げるような力が発生します(図9中央)。

冷却が終わるまで全体が一樣に室温になつたとき、これらの力は残ります。またガラス器全体では応力の総和が零、回転モーメントも零になるように全体が変形し、力が再配分されます(図9右)。

このようにして残った力は、焼き鈍しを施されない限り応力・歪みは消えませ

ん。このような「歪み」を「永久歪み」と呼びます。軟化したガラスが冷却する場合

ゆつくりと、温度分布が一樣なまま冷却した場合これは「除冷却徐に冷却する やきなまし」の場合に当たります。

始めに温度が軟化する温度より高い場合にも、冷えて固化した後でも、ガラス器内部に温度の不均一がなく、固化した温度域でも応力が発生しません。

温度の分布が常に全く均一であれば理屈上は応力が残りません。固化が始まる時期に温度不均一が大きければ、大きい応力が残ります。

速く冷却して温度分布が不均一だったとき(図10) 冷却中のガラスでは、内部の熱が表面へ伝わり外部へ放散することで冷えています。従って、外部が内部よりは温度が低い、という分布になります。

成形された直後に、全体の温度が高く軟化しているとき、まず表面が内部より温度が低くなり、やがて表面に近い部分から固化を始めます。

固化した部分には応力が発生しますが、冷却中の特定の時点での応力は、固化したときの温度分布の傾きと、その時点での温度分布の傾きとの差によるので、冷却・固化終了の最終的な時点での応力よりは小さいと予想されます。最終的に固化すると、大きな応力が現れます。

金型を使って成形された製品は、型から出された時点で表面が固化していること、内部からの熱で固化した表面が軟化状態に戻ること、などの可能性があつてもっと複雑な経過を辿るかもしれませんが、大筋としては先に述べた経過と似た

経過を辿るでしょう。

歪みの除去の必要性

ガラス器内の応力は、ガラス器全体で積分すれば零になる、という条件を満たすように分布します。

従って、ガラス器全体にわたって応力を小さくしない限り、圧縮応力の部分と引張り応力の部分とが必ずあるということです。

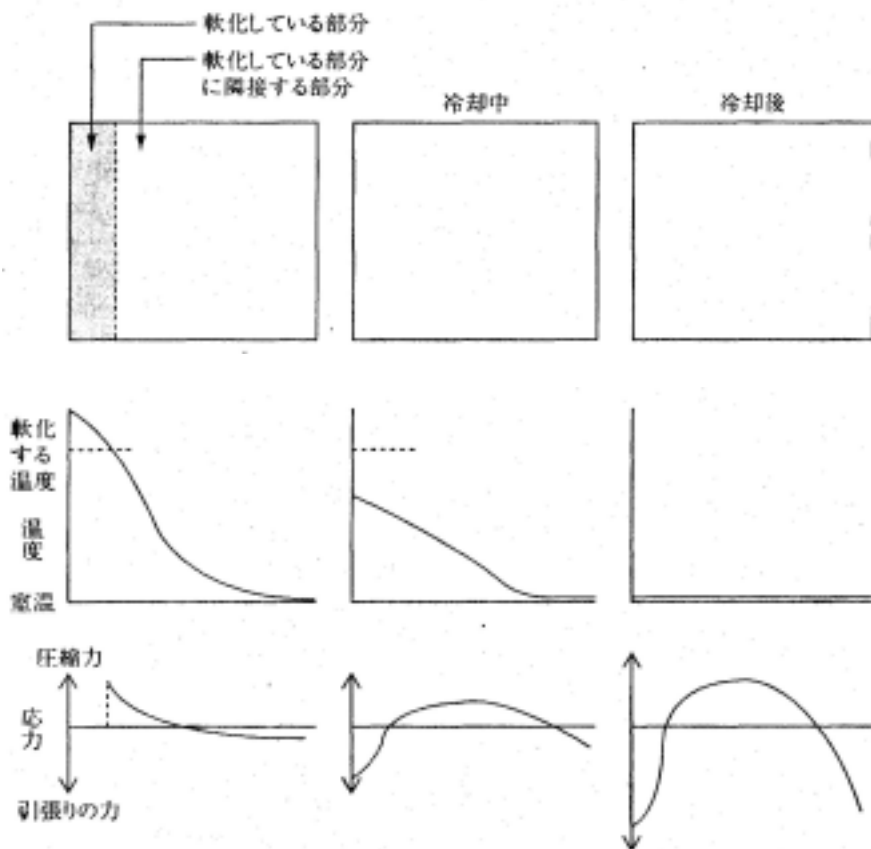
ガラスは引張りの力に対して弱いということは知られています。詳しくいえば

表面に引張りの力が働くと弱いのです。

表面に引張りの力が無いようにするには、a全体に応力がない状態にする良くなされたガラス)か、b表面には圧縮力だけが有り、引張りの応力は内部だけに有るように応力を分布させる(強化ガラス)か、です。

もしも表面に引張り応力の部分が露出していると、ガラス器が自然に傷口を開き破損する可能性があります。

図9 一部分が軟化するまで加熱されたガラスでの応力が発生する過程の説明図



ガラス器内の応力の除去法

成形後の「除冷」

高温で軟らかいガラスを成形して目的の器の形にします。その後「除冷炉」に入れます。この炉は製品がコンベア一式に送られる型でも、止め冷まし型の型でも良いのですが、要はガラス器が目的とする時間・温度曲線に従って冷えて行くようなものであることが必要です。

まず始めにガラスが軟らかいが、自重による変形が認められないような温度に保ち、ガラス器内の温度を均一にします。それからガラス器の温度をゆっくりと下げ、温度の不均一が十分小さいような状態を保ちながら冷やします。ガラス器は固化しますが、一貫して温度不均一の小さい状態で経過しましたから、発生する応力は小さいのです。

全体が固化したら、その後の冷却は速くできます。冷却が速いことでガラス器内には応力が発生しますが、この応力がガラス器を破損しない様な値であれば良いのです。

全体が室温になったときに残った応力は、固化する段階での温度不均一に原因するものです。目的に従って固化する温度域での保持時間や冷却速度を決める事が大切です。

これは実験的に決まる必要がある場合も多いと思いますが、一つの目安はガラスの「除冷点」です。

JISの除冷点の測り方はJIS K 5421(米国家試験学会標準)で決められています。ガラスの粘度が10^{12.5}ポイズ(「ポイズ」は粘度のc.g.s.単位、大きいほどガラスが粘い。)になる温度として、ガラスの温度・粘度特性の測定をして決

めます(図11)。

定性的にいえば、除冷点を超えない範囲で、かつなるだけ全体が均一な温度になるように保持してからゆっくり冷やします。ガラス器の肉が厚い程、長時間保持とゆっくり冷やすことが必要で、時間・温度曲線を慎重に決める必要があります。

後加工後の除冷

成形後の熱加工ではガラス器の一部が軟化します。

加工後に急に冷やすと加工部に「歪み」が残り、破損します。

このようなときには全体を除冷温度まで加熱し、定温保持・除冷の操作を加えて応力の残らない製品にする必要があります。

ただし長尺の製品の二部加工の場合には、加工部付近だけを除令して、残った応力が広範囲に渡って応力値が小さいようにすれば十分だという場合もあるでしょう。

図11 ガラスの温度-粘度曲線とガラスの除冷点・軟化点との関係の説明図

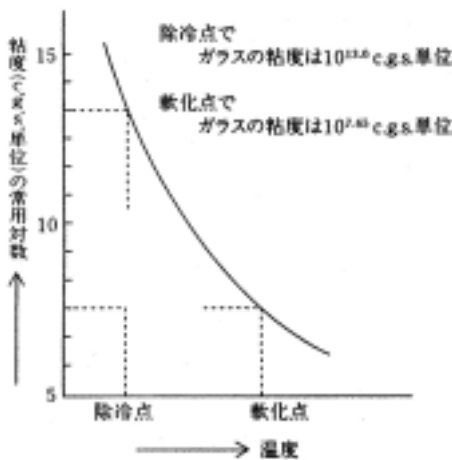
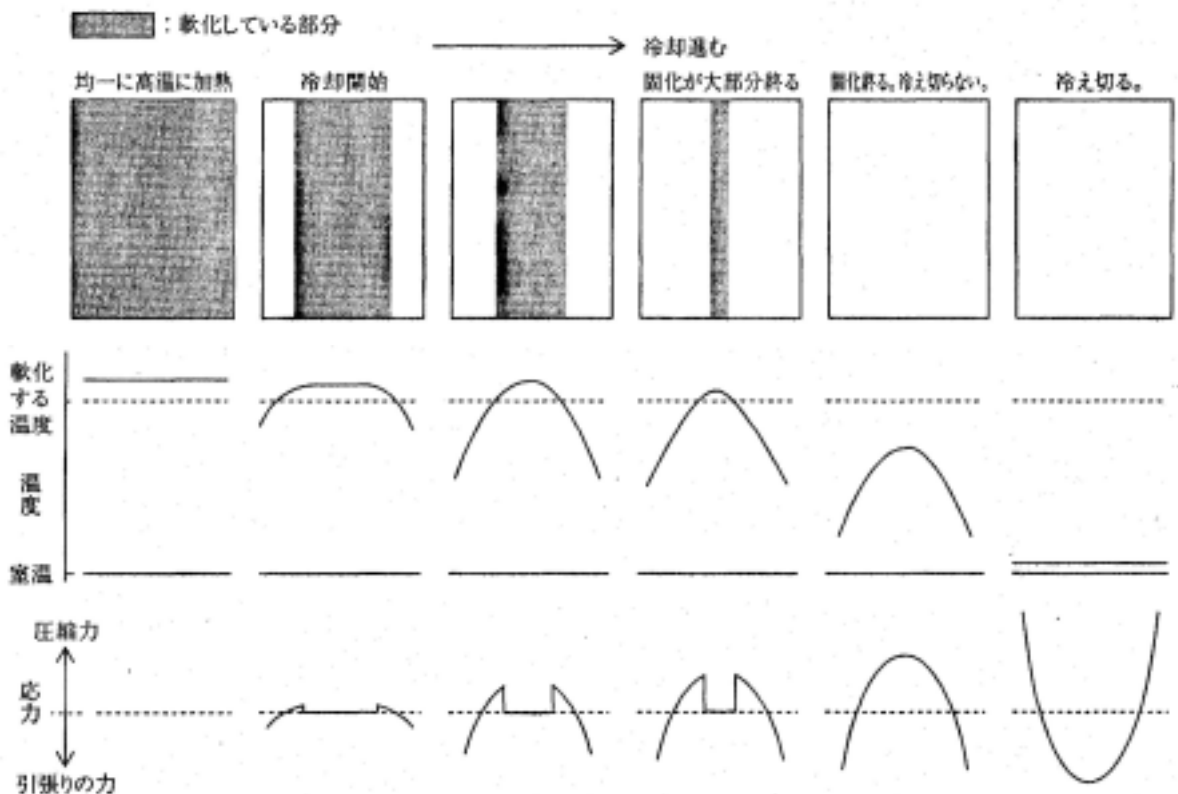


図10 成形されたガラス器での冷却に伴う応力の発生過程の説明図



ガラスの歪みと歪みの測定法

(その3)

千葉工業大学 付属研究所

教授 岸井貫

徐冷点

JIS ISO規格による測定法 徐冷点の目安は、鉛ガラスで四〇〇ないし四五〇、ソーダ石灰ガラスで五二〇ないし五五〇、硬質ガラス五五〇以上です。測定にはJISに従った測定器を作るか購入するかして測ればよいのです。

ただし現時点で、JIS規格の内容をISO規格のそれに統合するための作業が行われています。測定器メーカーと綿密に打ち合わせることが必要です。

この方法は、ガラス細工で細い棒状の試料を作り、荷重を掛けながら加熱してガラスが粘性により伸びて行くのを測定

図12 ガラス棒の側面をつや出し磨きして、光を通過させるような形にする。Pはつや出し磨きした面
a) 見取図、b) 棒に直角に切った断面図

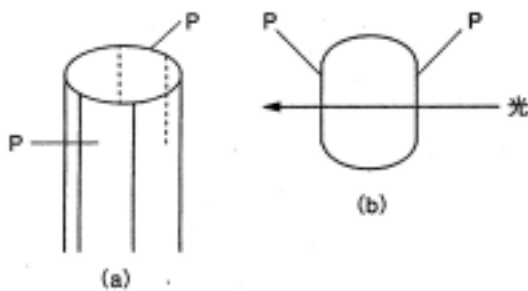


図13 偏光板Pと偏光軸HとガラスGの配置関係の説明図

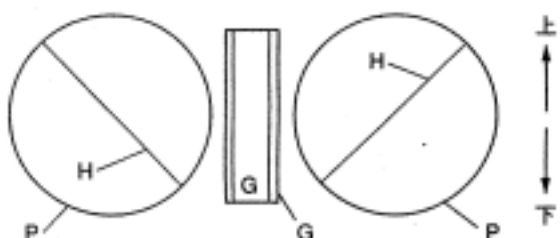


図14 ガラス棒試料のひずみの削減を観察する装置
Pol:偏光板、W:石英ガラス製窓

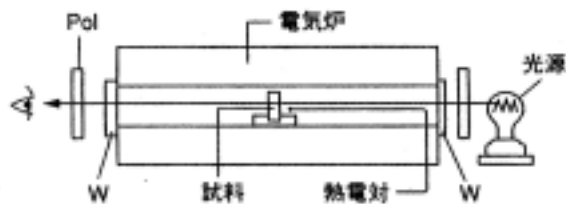
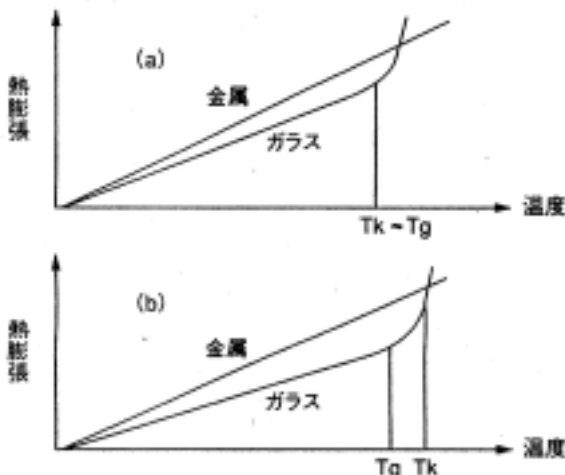


図15 融着するガラスと金属の熱膨張特性の組み合わせの例

a) ガラス転移点 T_g とガラスの固化温度 T_k とがほぼ等しい場合、b) ガラスの固化温度 T_k がガラス転移点 T_g よりかなり高い場合



して粘度を求めます。歪みの直接観察による方法 学史的には、徐冷点は加熱時のガラスの歪みの消失を直接観察して求めていました。この方法を説明します。

ガラス製品から、またはガラス溶解炉から数十グラムの試料を採取し、ガスバーナーで加熱して溶かしたものを石英ガラス棒の先に付けます。炎の中でガラスを加熱し、温度が均一に近い丸い溶けたガラスの珠を作ります。もう一つの石英ガラス棒を使って直径数ミリメートルの丸棒にし、冷却します。ガラス棒の中には「ひずみ」が残ります。

棒を長さ二ないし三センチくらいに切り、その側面に互いに対向しかつ平行な二面ができるように削り、削った面を艶出し磨きし、光がこの二面を通過できるようにします(図12)。

管形の電気炉を使い、一定温度に保ちます。電気炉は光を通過させることができそうな構造にします。ガラス棒の保持具を作ります。これはガラス棒を炉中に立てて保持し、棒の磨いた面を光が通過して炉外で観察できるように構造にします。

電気炉の両側に偏光板を立てます。偏光板には「偏光軸」があります。ふたつの偏光板の軸が互いに直交するように置くと光が通過しなくなります(図8)。

しかしガラス棒を通過した光は、ガラス棒の歪みのために性質を変えて、二枚の偏光板を通過するようになります。二枚の偏光板を面内で回転させ、二つの偏光軸は互いに直交する状態であり、かつガラス棒を通過する光は一番明るく見える、という角度で固定します(図14)。

を差し入れて固定します。温度が高過ぎれば、ガラス棒を通過する光は短時間でなくなり、ガラス棒が暗くなります。温度が低過ぎれば、長時間経ってもガラスは明るく見えています。

温度をいろいろ変えて、歪みが消えるガラスが暗く見える(までの時間が十五分である)ような温度を探します。この温度が「徐冷点」です。

ガラスの「徐冷」

ガラス器を成形してから、徐冷点で定温保持し、それからゆっくり冷やす(徐冷する)ならば実用上歪みを小さくできるはずですが、冷やす速度はガラス器の大きさと肉の厚さによります。冷却中にガラス器内の温度の不均一が小さいことが必要です。このような速度で五〇ないし一〇〇度の低い温度まで冷やします。ここまで冷やすと、ガラスは固加して、弾性

体と見なせません。それ以後の冷却速度は温度不均一によって生じた弾性的な歪みでガラスが壊れないような限度で、速くすることが出来ます。

ガラスと金属・セラミックスとの融着体

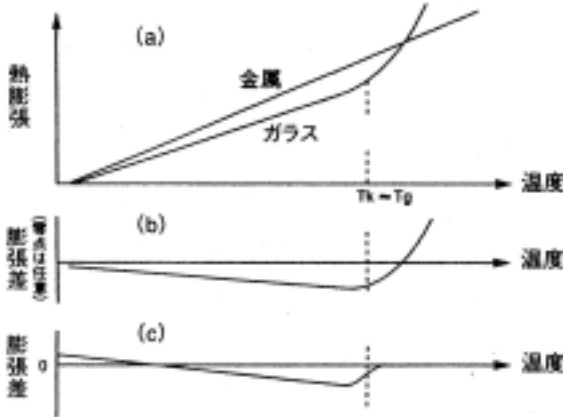
応力の発生過程に関連する要因

金属やセラミックスはガラスが軟化するよつな温度でも硬いと考えられます。従つて普通は温度変化による熱膨張・収縮と弾性的変形だけによつて形を変えます。

金属内の応力が極端に大きくなると塑性流動をする場合があつて、この現象を積極的に利用して融着体を作る場合があります。これについてはあとで述べます。

簡単に説明するために、ガラスと金属とでハイメタル型の融着体を作る場合を考えます。

図16 金属とガラスの融着時の膨張差。ガラスの固化温度 T_k とガラス転移点 T_g とがほぼ等しい場合
a) 金属とガラスの熱膨張曲線、b) 金属とガラスとの膨張差。零点は任意である、c) 融着により発生する応力の原因になる膨張差



ガラスと金属の熱膨張曲線が図15の(またはb)のよつてであつたとします。

ガラスは高温で「ガラス転移」を起こし、それより高温では膨張係数が大きくなります。図の「 T_g 」が「ガラス転移点」です。

ガラスの見かけ上の固化温度は、徐冷点の前後です。徐冷点はガラス転移点とほぼ同じ場合(ソーダ石灰ガラス、鉛ガラスなど)と、ガラス転移点よりも少し高い温度にある場合(ホウ酸の多い硬質ガラス)とがあります。図では固化温度を「 T_k 」としてあります。

応力の発生過程

ここでは理解しやすくするために金属の熱膨張曲線は直線に近いものとします。また始めにガラス転移点と固化温度が近い(図15a)に対応する場合を説明します(図16)。

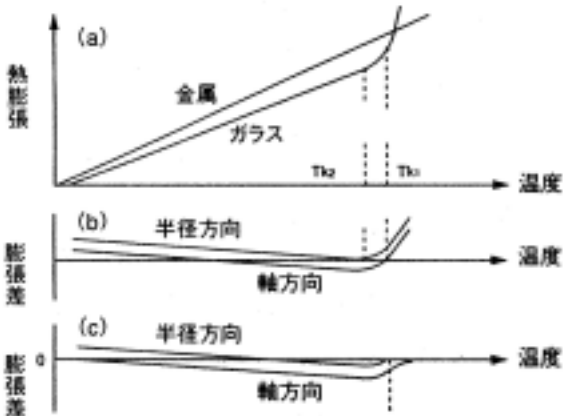
ガラスが固化する温度よりも高い温度にして、ガラスと金属とを融着します。

ガラスにも金属にも応力は発生しません。次にゆっくり冷やし始めます。ガラスと金属との間に膨張係数の差があるために膨張差(図16b)と応力が発生するはずですが、温度が T_g より十分高くしてガラスが軟らかい(粘性係数が小さい)間は、応力がすぐに消えてしまい、応力が認められません。

さらに冷えてガラスの固化温度に近づくと、膨張差の一部は消え残り、応力の発生が認められます。さらに温度が下がりガラスの粘性が高くなると、応力の消え残る部分が増え、更に冷えると新しく発生した膨張差が全く消えず、温度変化に伴つて(代数的に)精算されて行きます(図16c)。

応力も残存・精算された膨張差に比例

図17 融着体の形が異方的で、応力が方向によって複数ある場合の膨張差の説明図
a) 金属とガラスの膨張曲線、b) 金属とガラスとの膨張差。零点は任意である、c) 融着により発生する応力に関連する膨張差。複数ある



(T_{k1} :軸方向の応力に関するガラスの固化温度、 T_{k2} :半径方向の応力に関するガラスの固化温度)

して融着体の中に発生・存在します。

融着体の形が特に異方的である場合、例えば金属線をガラスで巻いた形の融着体では、応力の発生状況も異方的です。

この場合には軸方向の膨張差と応力は、固化温度が図17の「 T_{k1} 」であるかのよつに発生し、半径方向の膨張差応力は T_{k1} よりも低い温度 T_{k2} が固化温度であるかのよつに発生します。従つて、冷却に伴つた温度-応力曲線は図17のよつになり、軸方向の応力と半径方向の応力とは正比例しません。

ガラスの徐冷点がガラス転移点よりもや高い場合は、図18のよつになり、応力の発生した後に応力が強くなります。

冷却速度の影響

ガラスが固化して応力が発生し始める温度は、融着体を冷やす速度の影響も受けます。速く冷やすと高い温度から膨張

差・応力が発生し始めます。また、ゆっくり冷やすと膨張差・応力の発生し始める温度が低くなります。冷却速度が一桁違つくと、応力が発生し始める温度が数十度違つと言つ程度の変化があります。

金属の塑性変形の効果

金属やセラミックスはガラスが軟化するような温度でも硬いと考えられます。従つて普通は温度変化による熱的な膨張・収縮と弾性的変形だけによつて形を変えます。

金属内の応力が極端に大きくなると塑性流動をする場合があつて、この現象を積極的に利用して融着体を作る場合があります。蛍光灯や小電力電球、受信用真空管に億われるジュメット封入線がその例です。

ジュメット線は、低膨張の鉄・ニッケル合金線

図18 金属とガラスとの融着時の膨張差。ガラスの固化温度 T_k がガラス転移点 T_g よりかなり高い場合
a) 金属とガラスの熱膨張曲線、b) 金属との間の膨張差。零点は任意である、c) 融着により発生する応力の原因になる膨張差

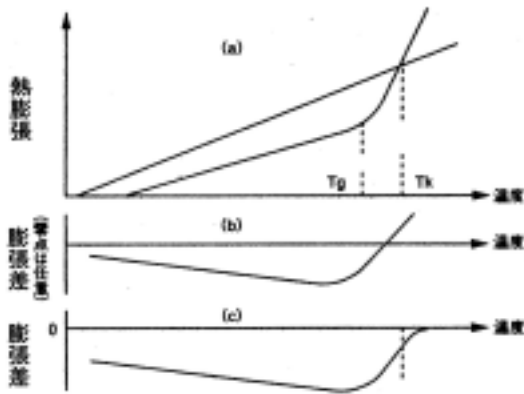


図19 ジュメット線、銅、鉄-ニッケル合金、ジュメット封着用ガラスの熱膨張特性の定性的比較

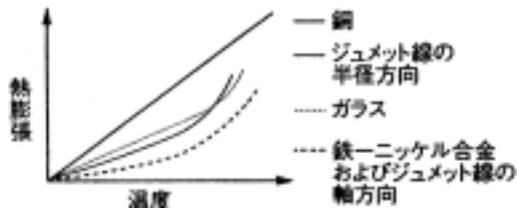
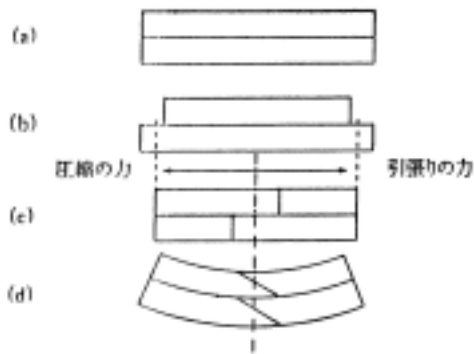
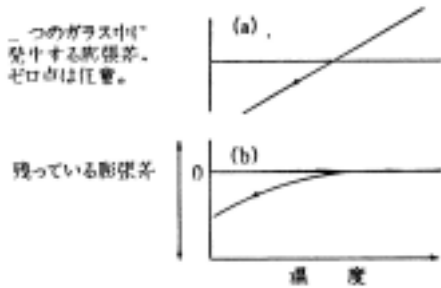


図20 ハイメタル形融着体中の応力の発生・分布



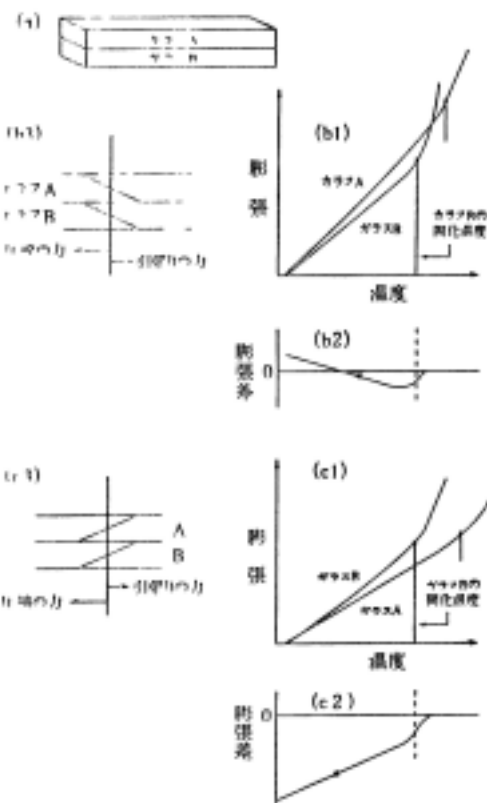
ガラスの歪みと歪みの測定法 (その4)
 千葉工業大学 付属研究所 教授 岸井貫
 融着体の中の応力
 角柱形融着体
 温度 熱膨張特性 温度 粘性
 係数特性が違う二つのガラスを融着させた時にどのように力が発生するかを説明します(図20)。
 簡単のために二つのガラスが角柱形でありこれらがバイメタル形に張り合わせられた形の融着体を考えます。
 また一方のガラスが他方よりも徐冷点がかなり高いとします。融着してから冷却すると始めに徐冷点が高い方のガラスが固化しそれからもう一方のガラスが固化します。

図21 融着体中の応力の発生過程



双方のガラスともに固化した時から応力が発生し始めます。
 応力発生の原因は二つのガラスの間の熱膨張特性の違いかえれば固化してからの収縮量が違っていることです。
 このような場合の応力の発生状況を定性的ですが次のように説明します。
 二つのガラスの間でまた収縮量の差が出ていないとします(図20a)。
 次に収縮量の差ができたときを考えます。一方が他方よりも余計に収縮しています。
 融着していないでそれぞれが自由に収縮したと仮定すると図20bのように二つのガラスの間に長さの差が出ます。
 しかし実際は融着していますか

図22 異種ガラスの粗み合わせと応力の発生・分布



ら双方の長さは等しい事が必要で二つのガラスの長さの中間の値になります(20c)。
 つまり収縮の少ないガラスはさらに縮められ収縮の大きいガラスは引き延ばされます。
 これに対して前者の中には長さ方向に圧縮するような力後者の中には引く張るような力が働きます。
 このように仮定したときの応力の分布は、応力の断面にわたっての積分値が零であるとの条件が満たされるようなものです。
 しかしこのままでは曲げモーメントが零でありませんから融着体はいつまでも自然に回転を続けます。こういうことは物理的にあり得ません。
 実際にはバイメタル作用で全体が曲がり曲げモーメントが零にな

るような形で落ち着きます(図20d)。
 このあたりの事情は金属とガラスまたはセラミックスとガラスの融着の場合でも同じです。この種の融着体ではその形と応力分布とは次の条件を満足しなければなりません。
 長さ方向の応力を断面内で積分すると零である。
 曲げモーメントが零である。
 ということです。
 このように膨張差と応力が冷却中に発生する過程を詳しく見ていきます(図21)。
 融着体が冷却されて行くと膨張係数の差があるので膨張差が生じます(図21a)。
 しかし少なくとも一方のガラスが柔らかい(粘度が小さい)時期

には応力が発生してもすぐに緩和されてしまいます(図21bの右の方)。

次に固化温度の低い方のガラスも固化して応力が発生し始めます(図21bの中頃)。

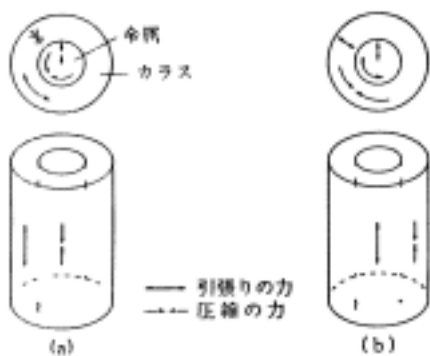
しかしこのガラスがまだ十分固くない時期には膨張差と応力が発生しても一部は消えます。

固化が更に進むと応力の消失が少なくなり完全に固化するとそれ以後に発生したに力が既にあつた応力に代数的に加算された形で残ります(図21bの左方)。

実際のガラスの組み合わせでどうなるかを図22に示します。

図22aのような融着体で、ガラスBの方がガラスAよりも固化温度が低いのです。図22bではガラスAの方が高膨張、図22cではガラスAの方が高膨張、図22cでは

図23 円筒形融着体中の応力の性質



ではガラスAの方が低膨張です。Bは例えばソーダ石灰ガラスと鉛ガラスとの組み合わせ。

Cの方は低アルカリのソーダ石灰ガラスと高アルカリのソーダ石灰ガラスとの組み合わせに相当します。α₁ - α₂は熱膨張曲線の組み合わせ、β₁、β₂は冷却中の膨張差の発生状況、β₃、β₄は冷却後の

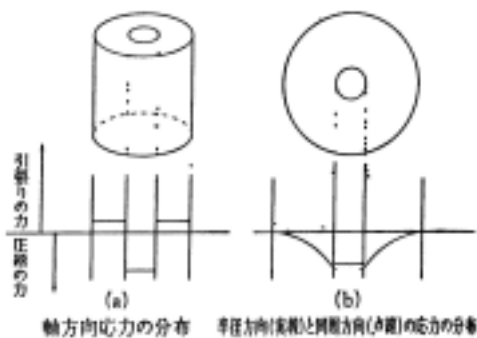
応力の分布を示します。

円筒形融着体金属とガラスとが同じ円形に融着された場合の応力分布を説明します。

例として金属が中にありガラスがこれを取り巻く形であるとしてガラスの方が金属より膨張係数が大きい(余計に縮む)とします(図23a)。

ガラスが金属より余計に縮もうとするのを金属が妨げていると考えます。軸方向と円周方向の縮み

図24 円筒形融着体中の応力分布外側の材料が高膨張の場合



が妨げられているのでガラスの中のこれらの方向の力は引っ張りの力です。

また半径方向の縮も金属で妨げられているのでガラスの半径方向の力は圧縮の力になります。

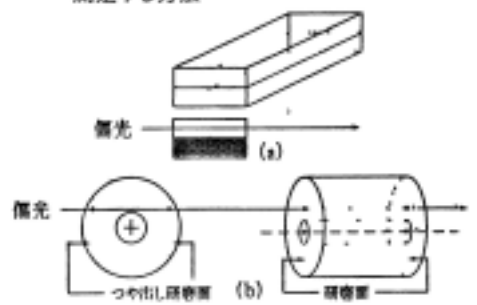
金属の方で考えると長さ方向円周方向半径方向ともガラスから締めようとする力を受けますからこれらの方向の力は皆圧縮

の力になります。このような力の分布は喩えれば茶筒にゴム輪を巻き付けた場合を想像すれば理解しやすいと思います。

金属の方が余計に縮む場合は圧縮の力と引っ張りの力とが交代したような分布になります(図23b)。

形が軸対称なので軸を曲げるような応力や曲げモーメントを考慮する必要がありません。円筒形融着

図25 融着試験体中の応力を偏光を使って観察・測定する方法



体ではもう一つ複雑な事情があります。軸方向の応力は半径、円周方向の力し較べて消失しにくいのです。

そのために、融着後に冷却するとき軸方向の応力が先に立ち上がり始めそれに少し遅れて半径、円周方向に力が立ち上がります。

応力の性質

円筒形の融着体の中で働いている力には次のような性質があります。応力の計算にはこの性質を利用します。

軸方向の力を軸に垂直な断面について積分するとゼロです。金属とガラスとの界面では半径方向の力は連続的に変化します。

特に外表面の半径方向の応力はゼロです。これらの応力によりガラス

金属が変形してガラスの内孔の形と金属の外形とが同じになります(割れ目がありません)。

応力の分布(図24)を定量的に計算するときはこのような性質を利用します。

応力の観察法ガラスとガラス金属セラミックなどを融着したときの応力の計算は面倒なことですしそれぞれの材料の特性が総て判っているとは限りません。

このような場合ガラスが透明であればガラスの中に働いている応力を直接に観察することができま

す。

角柱形バイメタル形では融着した後でガラスの側面を艶出し研磨して光が通過できるようにします（図 25a）。

円形融着体では側面と端面とを平面に艶出し研磨します（図 25b）

偏光を通過させて応力を測りまたは計算します（測定と計算の方法は後の章で記します）。

ガラスの歪みと歪みの測定法
(その5)

千葉工業大学 付属研究所

教授 岸井貫

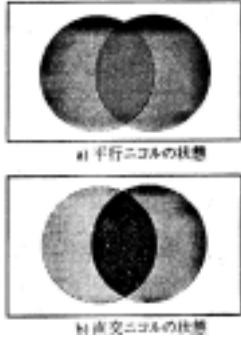
偏光を使った力の観察法 「偏光」と偏光板多くの場合、ガラスは光を通します。ガラスを通過した光はガラス表面で屈折すること、ガラス中でごく僅か、ないしは特別な場合にはかなり大きな吸収を受けることを除けば、光の性質は見かけ上変わりません。

ところがガラスに入る光を「偏光」にすると、ガラス内に働いている力の状況を観察できるようになります。

図25は二枚の偏光板を重ね合わせた状況です。偏光板は、写真用の偏光板でも観察できるように、薄黒い色をしています。これは光のうちの一部を吸収し、残りだけを透過させているからです。

二枚の偏光板を重ね合わせたとき、組み合わせの角度によっては暗くはなりますがとにかく光が透

図25 二枚の偏光板の組み合わせ



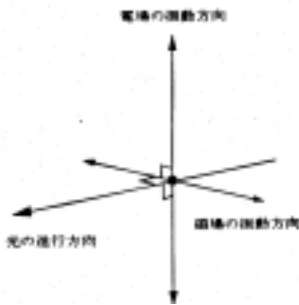
過する場合(図25a)と、光がほとんど透過しない場合(図25b)とがあります。

このような現象は、偏光板が透過する光の性質を変える、すなわち自然光 - 偏光と変える性質があるからです。

光は「電磁波」です。光とは電場や磁場が振動し、その振動する状態が速い速度(光の速度)で伝わって行くものです。電場と磁場の振動する方向は、光が進む方向と直交します。また電場と磁場とは互いに直交する方向に振動しています(図26)。今の話の場合、磁場や、磁場の振動は関係がないので、これからは電場のことだけを考えます。

偏光板は、一つの方向に振動する電場を持つ光だけを透過させます。これに対して、日光や電灯・蛍光灯・放電灯等からの光はあらゆる方向に振動する光が混合しています。これらの光は「自然光」です。自然光を偏光板に当てると、

図26 光の振動方向、電場の振動方向、磁場の振動方向が互いに直交することを示す説明図



特定の方向に振動する電場成分だけが透過してきます。このように自然光でなくなった光を「偏光」といいます。

また偏光板を透過した光の電場は一方方向だけに振動しています。このような性質の偏光を「直線偏光」といいます。各種のレーザーから出る光は直線偏光であることが多いのです。

二枚の偏光板を組み合わせるときに、透過する光の(電場の)振動方向が平行であるように組み合わせると、ある程度の光が通り抜けます。このような偏光板の組み合わせを「平行ニコル」状態だといえます(図25a)。

振動方向が直交するように組み合わせると、一方の偏光板によって透過する光が他方の偏光板で全部吸収されてしまいます。これは「直交ニコル状態」です(図25b)。「ニコル」は偏光板の発明以前に偏光を作るために使われた「ニコルのプリズム」に由来します。ニコルはニコルの

図27



プリズムの発明者です。
力と偏光

二枚の偏光板を直交ニコル状態に組み合わせ、間にひずみがないガラスを入れます。視野が暗いままです(図27a)。

熱処理して歪みを入れたガラスを入れると明暗の横様が現れます(図27b)。

機械的な加圧器にガラスを入れて力を加えます。この場合も明暗の模様が現れます。加圧器との接触部は力が集中するところですが、その部分の明暗が特にはつきり現れます(図28)。

ガラスの中に力が働くと、ガラスの光学的性質に変化が起きて、ガラスの中を通過する光の性質を変えるのです。これをガラスの「光弾性効果」と呼びます。

光弾性効果 ベクトルの考え光の本体である「電場」は「ベクトル」です。ベクトルは大きさだけでなく方向も含まれる量です。大きさと方向とを記さないと完全

図28 直交する偏光板の間に加圧したガラスを入れた場合



に定義できません。他のベクトルの例は重力の場、質点に働く力、速度などです。

ガラスのような弾性固体中に働く力はベクトルよりも一段と複雑な「テンソル」ですが、このことについては本稿では必要がないので触れません。

ベクトルはその大きさに対応した長さの矢印で表現できます。矢印の方向がベクトルの方向です。このように約束すると、ベクトルは複数（本稿では二つの場合しか考えません）のベクトル（成分ベクトル）の和（合成）として表現することができません。成分ベクトルへの分解方法は一義的には決まりません。考えるために都合のよいように決めて良いのです。図28では、一つのベクトルがいろいろの方法で成分ベクトルに分解できることを示しています。

図28では電場ベクトルとの方向と、ガラス中に働く力の方向とが四五度の角度をしていて、電場ベクトルを力の方向に平行な成分と、力に直角の方向の成分とに分解した場合を描いています。

光弾性効果「複屈折」力が働いているガラスの中では、力の方向に振動する電場成分と、力に直角な方向に振動する電場成分とは、伝播速度が違います。

すなわち光の速度が二つあります。物質の屈折率は、真空中の光の

速度を物質中の光の速度で割ったものです。ですから力が働いているガラスでは屈折率が二つあることになります。これを「複屈折性」といいます。

別のいい方をすれば、力が働くとガラスが複屈折性になる、ということなのです。また、力によりこのような性質になるといいますが、ガラスの「光弾性効果」です。

図29 一つのベクトルでもいろいろな方法で成分ベクトルに分解できることを示す説明図

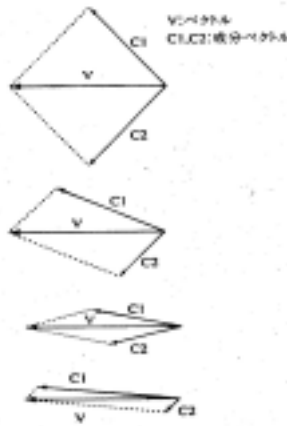
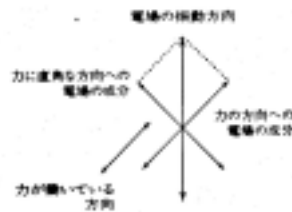


図30 光弾性効果の説明図



偏光板・複屈折板の働き

偏光板は先に述べたとおり、光のうちの特定の方向に振動する成分だけを通過させます。水面・ガラス面も多かれ少なかれこのような働きがあります。次にガラス面についてこのことを実験してみます。

図31aでは、紙に印刷された絵の上にガラス板を乗せました。このガラス板は向こう側の蛍光灯の光を反射しています(図32a)。絵には蛍光灯の反射像が重なって目障りです。蛍光灯の反射光はガラス面で偏光に変えられています。図31bのように偏光板を通して

図31 ガラスの表面反射と偏光板の効果

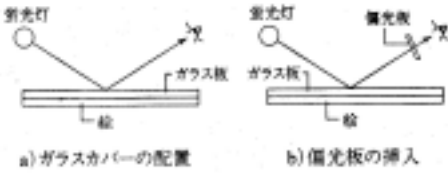


図32 観察例

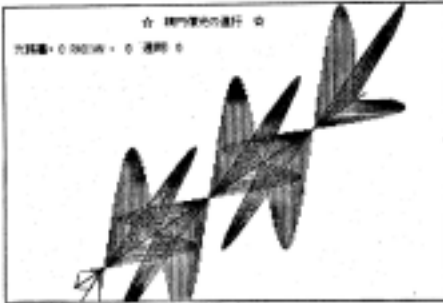


a) 偏光板無しの場合

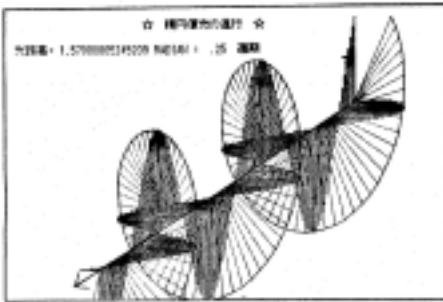


b) 偏光板を挿入した場合

図33 偏光に生ずる光路差の効果

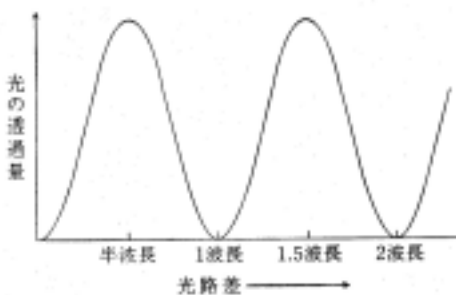


a) 光路差ゼロの場合



b) 光路差が四分の一波長の場合

図34 光路差が偏光板系を通過する光の透過率に及ぼす影響(概念図)



絵を見ます。これに村して絵からの光の吸収は少ないので、絵がはつきり見えます(図32b)。

写真用の偏光板はこのように水面・ガラスからの反射光をカットするのに使われます。池の中の鯉やシヨウウインドウのなかの衣装がはつきり撮れます。

次に複屈折がある偏光板を通してどのように見えるのでしょうか? 前回の図30(今回の図33aでもほぼ同じです)では、二つの成分光(垂直方向に振動する成分と水平方向に振動する成分)の間で足並みが揃っていません。すなわち一方がゼロなら他方もゼロ、一方が極大のときには他方も極大です。この二つの光は「位相が合っている」、または「光路の差(光路差)がゼロ」だと表現されます。このような成分光を合成したものと考える光は、常に一つの平面上で振動しています。図では斜め方向に振動しながら進む光がそれです。この光の進路に偏光板を置いて、その透過軸方向が合成光の振動方向に直角に向くようにすると、合成光は全部吸収されます。

これに村して図33bでは、一方が他方とは足並みが違う場合を示しています。この場合では、二つの成分光を合成したものは、その先端が図の螺旋形曲線の上にあるような光となつて進行します。その結果、どのような方向に偏光板の軸を向けても、常に偏光板を通過する成分があり、全く暗くなることはありません。

光路差

光路差の表現には色々な方法があります。先ず光路差を直接に長さで表します。光路差は光の波長程度の小さい長さですから、光の波長と同

じくナノメートル (nm) で表すことができます。

次に光の波長が単一である(単色光である)場合には、光路差が波長の何倍かで表せます。例えば「半波長」・「四分の一波長」等です。また波長をギリシャ文字の(ラムダ)で表して、 $1/2 \cdot 1/4 \cdot 0 \cdot 75 \cdot 3$ などのように表現もできます。

さらに三番目の方法として、光の進路に沿っての彼の形をサインカーブ(正弦曲線)で「波の振幅 = $\text{Sin}(1 \times L)$ 」進路に沿っての長さとして、 L が、括弧の中は角度に相当しますが、ここで光路差が長さでしかあつたとすると、これを角度で表現すると、 $2 \times 1/4 \times L$ 度となり。また、 $360 \times L / \lambda$ 度となります。光の波の形がサイン

カーブであるため、光路差が波長の整数倍になることは、光路差ゼロの状態と全く同じ状況に戻るこ
とになります。

二つの偏光板を直交関係に置いてその間に光に対して光路差を与えるもの（例えば歪みのあるガラス）を入れたとします。光路差ゼロでは通過する光はゼロです。

光路差が増えて行くと通過する光の強さも増します。

しかし更に増やして行くと、光の強さが極大の状態を経て光路差一波長の時にまたゼロに戻ります（図34）。

光路差が波長の整数倍の時に通過する光はゼロ、整数 $\times 0.5$ 倍のときに通過する光の量が極大です。

光が単色光でなくて赤・緑・青の光が混じった白色光であった場合は次のようになります（図35）。

光路差ゼロでは全部の光が通過しませんから暗く黒く見えます。

光路差が増すとどの光の透過率も増えるので明るくなって行きます。三〇〇nmを過ぎると通過する光は減りますが、波長の短い青色の光が始めに一波長相当になり暗くなりますから、この場合の色としては茶色から黄色系の色です。

次に光路差が緑の光の一波長相当になると、全体としては暗いのですが、青・赤の光の混合ですから赤紫色です。

次に光路差が赤色の光の波長相当になると、緑・青の光の混合で青緑色（シアン色）になります。

光路差がこれより増えると、明るさの変化はこの繰り返しになります。その明暗の変化も色の変化もだんだんぼんやりになります。

光路差が緑の光の波長相当であれば赤紫色ですが、光路差がこれより増えれば青っぽく、減れば赤っぽく敏感に変わりますから、この赤紫色を鋭敏色（ティントカラー）と呼びます。

力と偏光との関係

次に光の振動方向と力の方向との間の角度の効果を述べます（図36）。

図36で α は力の方向、 β は力の方向に直角な方向、 γ は偏光板を通過して偏光になった光の振動方向です。

(a)ではAとPとの間の角度が四五度、(b)、(c)、(d)と角度が小さくなり、(d)では0度です。

P方向の振幅をAとBとの方向の成分に分けるとそれぞれA'、B'となります。

PとAとの間の角度が小さくなるにつれてB成分が小さくなって、P、A間の角度が0度になるとB成分がゼロになります。A'成分はAそのもので、B成分の影響がありませんから、光路差・複屈折・応力の影響は現れません。

従って力の影響をよく調べようとするときには、力の方向が偏光の振動方向と四五度になるように試料を置く必要があります。

また逆に複屈折の影響が見えない場合は、光路差がゼロであるか、光路差が光の波長の整数倍である

か、または力の方向が偏光の移動方向と同じであるか、だと判断されます。

さらに、試料の角度をどのように変えても光路差がないように見える部分は、光路差がゼロまたは波長の整数倍である場所と判断できます。

図35 光路差と偏光板系への赤・緑・青の光の透過率との関係(概念図)

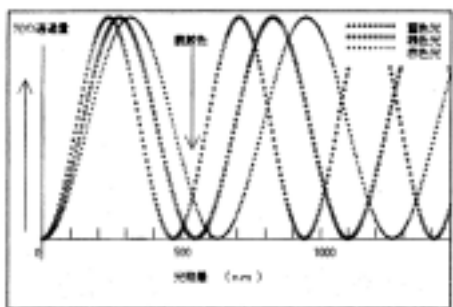
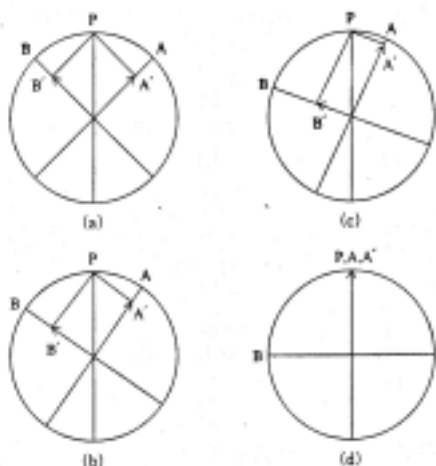


図36 偏光の振動方向と力の働く方向との関係が偏光に及ぼす影響の説明図



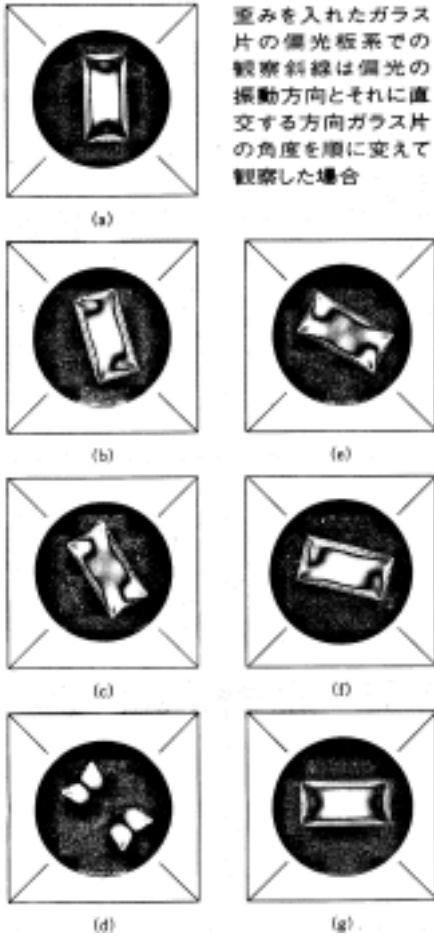
P:偏光の振動方向、A:力の働く方向、B:力が働く方向に直交する方向、A':A方向への偏光の成分、B':B方向への偏光の成分

観察例

図 37 は長方形の厚ガラス片を過熱してから急冷して強い歪みがある試料としたものの観察例です。光波の振動方向とそれに直角の方向とが周囲の斜線で示してあります。

試料の角度を変えての観察を総合して、また縁に垂直な方向の力はゼロである（厳密には大気圧だけである）という弾性論の一般原則を考慮して、次のようなことが簡単に結論できます。（a）周辺の力は周辺に平行の方向には働いている、（b）また周辺では力が集中している、（c）ただし四隅はその例外で、力の集中がないが、力の方向幅所により相当に変化する。

図 37



ガラスの歪みと歪みの測定法
(その7)

千葉工業大学 付属研究所
教授 岸井貫

【歪みの測定とひずみ検査器】

応力が働いているガラスに直線偏光が入射し、さらにガラス中を通過する場合を考えます。ガラスの中の応力が光の通路に沿っては様であり、また応力の軸方向が入射する直線偏光の偏光軸と四五度の角度をなしているという簡単な場合です。

光路差 = 光弾性常数 × 応力 × 光が通過した距離

ですから、光弾性常数が知られ、光が通過した距離はガラスの厚さとして測られるならば、光路差を測って応力を計算できます。また、応力が知られていれば光路差を測

図38

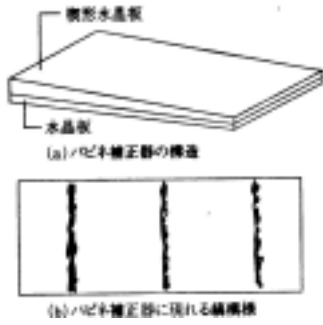
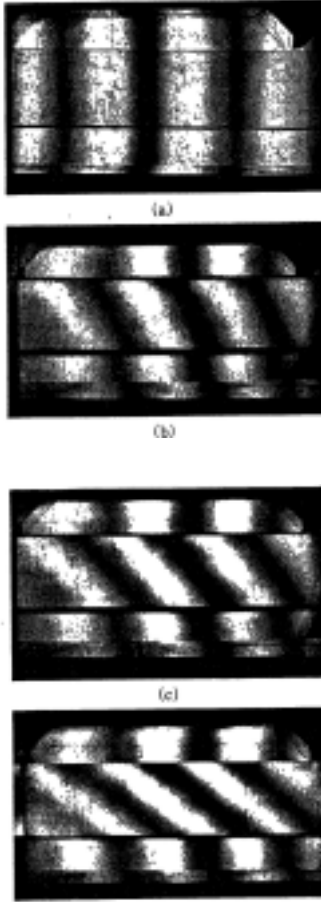


図39



(a)パビネ補正器にガラス角柱を重ねて観察した状況。(b)~(d)ガラス角柱に歪みを次々に強く与えて行った時の状況

つてガラスの光弾性常数を計算できます。

角柱形のガラスを外からの曲げの力で変形させると、上に仮定したような簡単な前提が成り立つと考えられます。

しかし、一般にはガラス中の応力の分布は外表面に平行な圧縮力、内部では張力になつていたり、多いので、表面の応力を測ったり、光の経路に沿つての応力の分布を測つたりするには、別の工夫が必要です(後記)。

パビネ補正器法

「パビネ補正器」は楔形に磨いた水晶板でできています(図38)。ですから「水晶楔」と呼ばれることもあります。器面に沿つての長さ比例して光路差の値が変化しています。

単色光源を使用した歪み検査機にパビネ補正器を挿入すると、光

路差がゼロ、一波長相当。二波長相当、...の部分が見え

ます(図38c)。

光路差を測りたいガラスを補正器に重ねますと、ガラスの光路差と補正器の光路差との代数的和がゼロ、または波長の整数倍の所へ黒い縞が移動します。移動量がガラスの光路差に比例します。その割合は例えば一センチ当たり五五〇ナノメートルです。

角柱形のガラスに曲げの力を加えて観察した例を図39に示します。曲げ変形を与えないときには、ガラスを補正器に重ねても、縞模様が変化しません(図39a)。

曲げ変形を与えると、曲げの内側が圧縮力、外側が張力で、厚さ方向に直線的に応力の値が変化していることが解ります。曲げが強いとその応力変化の勾配が強くなります(図39b,c)。

白色光源を使ったひずみ検査機では、光路差ゼロの部分が見え、光路差が波長の二倍、四倍、...のところ着色した縞になります。

光路差が一波長相当以上の値を持つ試料の場合に、光路差の絶対値を確実に求めるためには白色光源を使う必要があります。

並列膜型光路差標準板法 予め光路差の解つた何種かの透明複屈折板を作つておき、複屈折の大きさの順に並べます(図40上側)。

歪み検査機には鋭敏色を現しておきます。ここに光路差のあるガラス試料を挿入すると、鋭敏色が赤っぽく、又は紫っぽく変化します。ガラス試料(図40の下側)の傍らに並列標準板を置きます(図40)。測りたい部分の色に近い複屈折板を選び、その光路差の値を読み取ります。これは試料の光路差の近似値に相当します。

図40



並列膜型光路差標準板(上方)と歪みが入っているガラス片(下方)とを並べて置いた状況。光路差標準板の上側の数字は光路差をナノメートル単位で表している

ブレイス・ケーラー補正器法
 複屈折板を偏光装置に挿入します。
 この複屈折板は通過する光に光路差を与えますが、光路差は一五〇ナノメートル以下の比較的小さい値であるとします。

この板の複屈折性の軸が偏光板の軸と平行であると、見かけ上は光路差がゼロです。四五度の角度に置かれると本来の光路差を与える働きをします。この間では見かけの光路差が

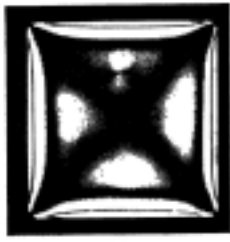
見かけの光路差 = 本来の光路差 $\times \sin(\theta)$ (θ : 軸の間の角度) で表されます。

ガラス試料とこの複屈折板とを並べて、鋭敏色を現している歪み検査機に入れます。複屈折板を回転し、ガラス試料の測りたいところと同じ色にします。このときの回転角を目盛りから読みとれば、前記の式の複屈折板の見かけの光路差がガラス試料の光路差になります。

セナルモン法

偏光装置（歪み検査機）にガラスを挿入します。ガラスの光路差

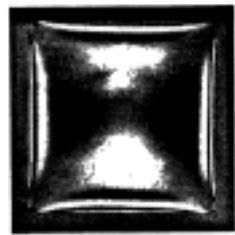
図41
 歪みが入っているガラス片をセナルモン法で観察し、偏光板の角度を変えていったときの構模様の変化



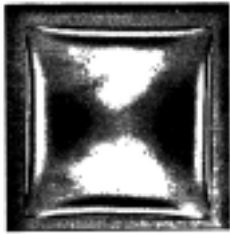
(a)



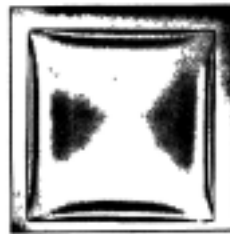
(b)



(c)



(d)



(e)

を測りたい部分の主応力軸の方向が、装置の特定の方向に一致するように置きます。装置の偏光板を回転します。黒い模様を測りたい場所を被うようにします。このときの偏光板の回転角から

光路差 = 定数 \times 回転角
 で計算できます。定数は装置の構造により決まりますが、おおよそ一度あたり三ナノメートルです。

この方法で熱処理で歪みを入れたガラス角片を観察した例を図42に示します。

この試料の場合、表面付近と裏面付近には圧縮力が働き、中央部の層には引張り力の力が働いていますから、光の経路に沿って応力が一様という過程が成り立っていないことに注意して下さい。

従って光路差を測っても、それは応力の値には結びつけられません。応力の強さの定性的判断に利用します。

偏光板の回転に伴い、黒い縞、暗い部分が移動したり、現れたり消えたりして、模様が変わります。光路差を測りたい部分に暗い模様

を重ねます。

以上の各種の測定ができる歪み検査機は次の所で購入できます。

- 株式会社ルケオ（東京都板橋区・
- 〇三 三九五六 四一一一）

【強化ガラスの表面応力測定】 ガラス製品の中に「強化ガラス」があつて、時計のカバーガラスや一部の建築用ガラス・自動車用ガラス・ガラス食器を始めとして、特に機械的強度・耐熱衝撃強度を必要とするガラス製品・部品がこれに属する。

ガラス製品が普通は壊れやすいものと考えられている。その原因は、ガラスが引張りの力に対して特に弱いことである。しかしガラスは圧縮の力に対しては予想以上に強く、圧縮強度と引張強度との比は数十倍にもなる。

引張りの力に対して弱い原因は、他物との機械的な接触や大気中の水蒸気による浸食で、製品の表面に微細な傷がでやすく、ここに引張りの力がかかると傷の先端に応力集中が起き、傷が伸び、さらに応力集中がひどくなり、この悪循環が生ずるからであり、(図42)、金属の場合と違ってこの悪循環が応力集中部の塑性変形で妨げられることがない。

圧縮の力によつてはこのような過程が進まないで、ガラスは圧縮の力に対しては強いが、引張りの力に対しては特に弱いという性質を示す。

強化ガラスは、ガラス製品の表面に予め圧縮の力を作り込んでおくものである。外力で表面に引張りの力が掛かつても、それが表面の圧縮力を打ち消して引張りの力に変えるまではガラス製品が破損しないので、ガラスは見かけ上強くなつたように振る舞う。

実用化されている強化ガラスは三種類ある。
熱強化ガラス
ガラスを僅かに軟化するような温度にまで加熱する。この時に表面に冷たい空気を強く吹き付けて急冷する。表面が早く冷却・固化し、次いで内部が冷えて収縮するため、表面に圧縮応力、内部にはこれとバランスするための引張りの力が発生する。力の絶対値としては、表面の力に較べて内部の力はせいぜい半分、またはそれ以下である。

カリ塩浴による化学強化ガラス
ガラスを溶融したリチウム塩の浴に浸して熱処理する。表面層でガラス中のナトリウムイオンと塩浴中のリチウムイオンというイオン交換が起きる。表面層の膨張係数が内部より小さくなるため、ガラスの冷却に伴つて表面層に圧縮応力が発生する。現在では、前述の三番目の強化

ガラスの表面にある傷と傷の先端での応力集中の説明図
ガラスの表面
表面の引張りの力
応力集中部

図42 ガラス表面にある傷と傷の先端での応力集中の説明図

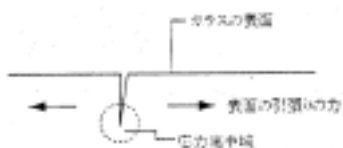


図43 ガラス器の表面を伝わる光 A: 光の経路に直角な方向に向く表面応力



図44 ガラス器の表面を伝わる光を生かせる方法の説明図

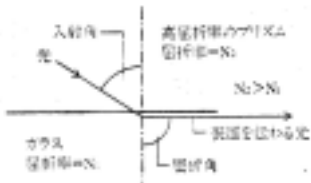
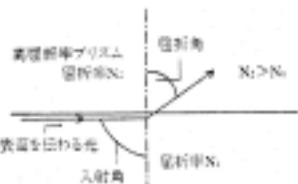


図45 ガラス器の表面を伝わる光を取り出す方法の説明図



リチウム塩浴による化学強化ガラス
ガラスを溶融したリチウム塩の浴に浸して熱処理する。表面層でガラス中のナトリウムイオンと塩浴中のリチウムイオンというイオン交換が起きる。表面層の膨張係数が内部より小さくなるため、ガラスの冷却に伴つて表面層に圧縮応力が発生する。現在では、前述の三番目の強化

カリ塩浴による化学強化ガラス
ガラスを溶融したカリ塩(硝酸カリウム、亜硝酸カリウムなど)の浴に浸して熱処理をする。ガラスの表面層でガラス中のナトリウムイオンとカリウムイオン交換が起きる。カリウムイオンはナトリウムイオンより大型であるため、ガラスの表面層は体積を増そうとするが、内層によつて膨張を阻止されるため、表面層内に表面に沿う方向の圧縮応力が残る。

ガラスの実用例は比較的少ない。強化ガラスの強度は表面に作り込まれた圧縮応力によつて決まる。その品質管理のためには、表面で、表面に平行な方向に働いている力を測る必要がある。これら強化ガラスを歪み検査機で観察すると、外表面層の圧縮応力は内部の引張りの力で打ち消され、またどちらの応力も等方的であるために、応力による光路差の発生が互いに打ち消されるので、見かけ上の歪みは表面応力による光弾性効果よりも桁違いに小さく、ガラス器の強度に関係する表面応力とは全く関係がない。従つて透過光を使う歪み検査機はこの目的には役立たない。品質管理のためには、表面応力を直接に測る測定器を工夫することが必要である。

【表面応力の測定法】
このように目的に合う光は、ガラス表面に沿つて伝わる光である

(図43)。

ガラス表面では、応力はガラス表面に平行に働くものだけが存在しており、表面に垂直な方向の力は大気圧によるものだけであるから無視できる。

表面に沿って伝わる光を使えば、表面に平行に働く力のうち、光の進行方向に直角に働いている成分を直接に測定できる。

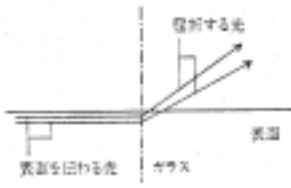
このような光を使つての表面応力測定法には二つの種類がある。一つは「屈折計法」であり、大きい力の測定に適する。もう一つは「バイアスコープ法」であり、比較的小さい力の測定に適する。

【屈折計法】

強化ガラスの表面に光を入れ、表面に沿って伝わる光を発生させる(図44)。

この光を表面から屈折によって取り出すと、屈折の角度は(図45)

図46 複屈折性の表面を伝わる光を屈折させて取り出す状況の説明図



$\text{Sin}(\text{屈折角}) = \text{ガラスの屈折率}$

$\text{Sin}(\text{入射角}) = \text{外部の媒体の屈折率}$

の関係で決まる。

ここで「外部の媒体」は屈折計に組み込まれた高屈折率のガラスプリズムである。また「入射角」は九〇度であり、

$$\text{Sin}(\text{入射角}) = 1$$

である。

ガラス表面に応力があると、表面に平行に振動する光と、表面に直角に振動する光との間に屈折率の差があり、二つの光の屈折角の間に差ができる(図46)。

この差から屈折率差(応力で引き起こされた複屈折)を計算すると、

$$\text{複屈折} = \text{ガラスの光弾性係数} \times \text{応力}$$

という関係から、光の経路に直交する方向に働く表面応力を計算できる。

一、熱強化ガラスの表面応力測定

均質なガラスの熱強化品フロート法板ガラスは、製造時に溶融錫に接していた面に屈折率が高い層ができていたので、「均質」とはいえない。

従つてここで「均質なガラス」というのは、例えばフロート法以外の方法で作られた板ガラスや、それを素材として作った磨き板ガラス、フロート法板ガラスの高屈折率層を除去した磨き板ガラス、光学ガラスを研磨して作ったガラス部品や製品、等々を指す。

強化ガラスの表面に屈折率の高い光学ガラスで作った光入射用プリズムを置く。

プリズムと強化ガラスとの間にはプリズムと屈折率が似ている液体を入れて、プリズムと強化ガラスとを光学的に接触させる。

プリズム側から光りビームを入れて、その入射角度を調節すると、

$$\text{Sin}(\text{屈折角}) = \text{プリズムの屈折率} N_2$$

$$\text{Sin}(\text{入射角}) = \text{ガラスの屈折率} N_1$$

という関係が成り立つが、ここで屈折角=九〇度という関係を満足するように光を入射させると、屈折した光は強化ガラスの表面を伝わって進むようになる(図47前)

出)。

またこのように進む光は随所でその一部分をプリズム側へ返すが、この時には

$$\text{Sin}(\text{屈折角}) = \text{プリズムの屈折率} N_2$$

$$\text{Sin}(\text{入射角}) = \text{ガラスの屈折率} N_1$$

という関係において入射角=九〇度という関係が成り立つ(図45前出)。

ガラスの表面に沿って進む光は強化ガラス表面の圧縮応力の影響を受けているので、光弾性効果により、表面に平行に振動する光と、表面に垂直に振動する光とでは、ガラスの屈折率 N_2 が違つ(二つある)。

従つて入射プリズム側に戻ってくる光の屈折の角度が違つ。これらの光を望遠鏡で受けると、二つの光は望遠鏡の対物レンズの焦点面上で違つ屈折角に対応する位置にそれぞれ集まる。この状況を図47に示す。

この二つの位置の間の距離から、二つの光の間での屈折率差がまとも、表面応力に換算できる。

二つの偏光板をその軸が直交するように並べて貼り合わせたものを使うと、このことが明瞭に解る。

フロート法板ガラスの場合

フロート法板ガラスでは、製造時に錫浴に接していた面が高屈折率層になっている。この層は厚さが数ミクロンないし十数ミクロンであるが、光通信ファイバーの場合と同じ理由で、光を閉じ込めて巨視的な距離の間を伝える、という働きがある(図48)。

この場合に、光はやはり光通信ファイバーの場合と同じく、離散的な「モード」(光波の振動・伝播の形態)を作って伝わる。高屈折率の層が比較的薄ければモードの数は一であり、高屈折率層の厚さ

図48 フロートガラスの表面層内を光がモードを作って伝わる状況の説明図



図49 フロートガラスの表面層内の屈折率分布
(a)表面応力がない場合、(b)表面に応力があり複屈折性である場合



図50 フロートガラスの用表面応力計の視野内の状況の説明図
(a)観察に偏光板を使わない場合、(b)偏光板を使って二つの偏光による光像を分離・並列した場合

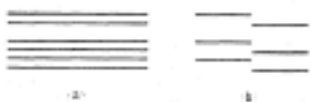
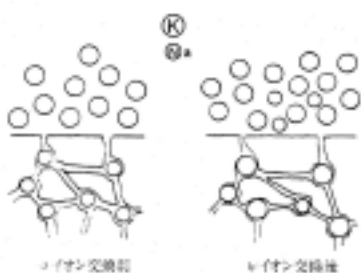


図51 表面層内に層状の屈折率不均一を持つガラスでの光の伝播
(a)深さ-屈折率分布曲線、(b)表面層内の光の伝播状況の説明図



図52 ガラスのイオン交換による強化の説明図
(a)イオン交換前、(b)イオン交換後



とともにモードの数は増える。フロートガラスが強化されていて表面が複屈折性になっていると、表面を伝わる光のうち、表面に平行に振動する成分と、表面に垂直に振動する成分とに対して、表面層内の深さ、屈折率関係が違い、互いに平行移動した関係にある(図49)。

表面層内を伝わる光は高屈折率のプリズムを表面に置くことで取り出すことができ、表面層内を伝わる光のモードはそれぞれ望遠鏡の対物レンズの焦点面に集められてモードの数だけの光の像を作る。

このような現象が、表面に平行に振動する光と、表面に垂直に振動する光とで、それぞれ独立に起こる。偏光板を使うことで、それぞれの波が作る光像群を互いに分離できる(図50)。

このようなガラス製品の例は、瓶ガラス、型押しで作られたガラス、手吹き法で作られたガラス、フロート法以外の方法で作られた

ガラス中に屈折率の不均一があると、成形作業中に表面に平行な薄い層の重なりとなって配列する。普通は不均一の程度が小さいので、不均一による応力は小さく無視できる。

このような屈折率の不均一の配列があると、屈折率の極大の部分が、光通信ファイバーと同じ理由で、光を極大に沿って伝える性質がある(図引)。

この方法は「S規格 R3222」倍強度ガラス」に採用されている。表面に導光効果があるガラス製品

多くのガラス製品は溶けたガラスの塊を引き延ばしたり、吹き上げたり、押し延ばしたりして作られる。ガラス中に屈折率の不均一があると、成形作業中に表面に平行な薄い層の重なりとなって配列する。普通は不均一の程度が小さいので、不均一による応力は小さく無視できる。

板ガラス、など、多種類ある。これらのガラス器の表面には、光を表面層内に入れ、屈折率極大に沿って走らせることができ、また表面に高屈折率プリズムを当てることに取り出すことができる。

取り出された光を望遠鏡で観察すると、対物レンズの焦点面には、表面層内にある屈折率の極大に对应して一つまたは複数現れる。

もしもガラス器が強化されていると、前述のような光像が二つ現れ、これらの間の位置の差が表面応力に対応する。

このような製品の表面が光を伝える性質は、フロート法板ガラスや次節で述べる化学強化ガラスに較べると弱い。測定する光はレーザー光のように強く集中したビームである必要がある。

二、化学強化ガラスの表面応力測定

ガラス中のナトリウムイオン塩浴中のカリウムイオンの交換

によつて作られた強化ガラスは、(図52)表面層に強い圧縮力が作り込まれるが、この層は同時に高屈折率層であり、フロートガラスの場合と同じく光を閉じこめて伝える。

これら二つのガラスの間の違いは、表面付近の深さ、屈折率関係は、熱強化フロートガラスでは二つの光の間では近似的に平行移動の関係にあるが、化学強化ガラスでは表面層だけに強い応力が集中しているため、二つの光の間で平行移動の関係がないということである(図53)。

これに対応して、化学強化ガラスでは二つの光(表面に垂直に振動する光と表面に平行に振動する光)がそれぞれ作る光像群の間に相似関係がない(図54)。

図54(a)は二つの光により作られた光の像が重なつて見えている状況を示し、(b)は偏光板を使つて二つの光像を分離し並列させ

図53 イオン交換強化ガラス(a)と熱強化フロート法板ガラス(b)の応力分布(1)と屈折率分布(2)の比較

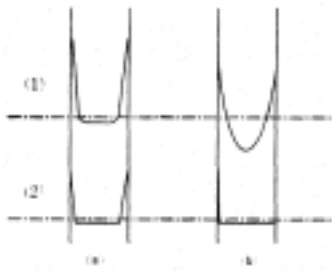


図54 化学強化ガラスが示す光像の例 (a)偏光板を使用しないで観察したもの、(b)偏光板で二つの光像を分離し並列したもの

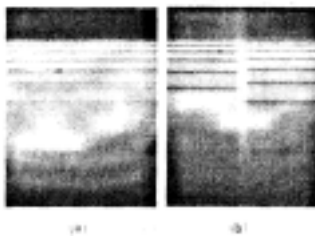
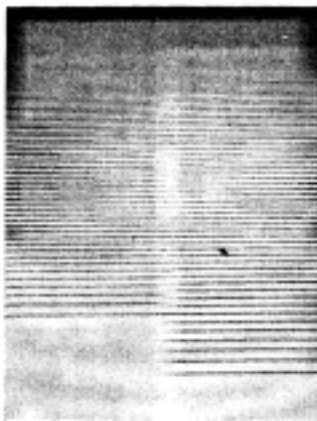


図55 光像から表面応力と圧縮応力層厚さを求める手順の説明図



図56 圧縮応力層が特に厚い化学強化ガラスが示す光像の例



た状況を示す。

それぞれの光像の中の暗い縞の配列から、表面層内のそれぞれの光の屈折率分布を推定することができる(図55)。

二つの光の間の表面の屈折率の差は表面の応力による複屈折であるから、表面の応力を計算できる。

また、屈折率が高まっている部分はカリウムイオンが進入して圧縮応力を発生させている部分で、「圧縮応力層」に他ならないから、圧縮応力層の厚さも同時に計算できる。

化学強化ガラスでは、強化層の厚さも傷つきによる強度低下に対する抵抗性を表すとして品質管理で重要視されるが、これは光像群の中の光像の数に比例することが計算で知られているから、表面応力・応力層厚さの双方が求められる、大変好都合である。

圧縮応力層の厚さが特に厚いガラスの光像の一例を図56に掲げる。

ラスの光像の一例を図56に掲げる。

光路差は歪検査器・各種補整器(コンペンセイター類・光弾性装置を使って観察できる。

水晶楔を組み込んだバビネ補整器を使って鉛ガラス管(強化されていない)の残留ひずみを観察すると、図2に例示したように見える。また光路差を管壁の厚さの中で場所の関数として測り、グラフに描くことができるので、これを「光路差曲線」と呼んでおく。

図2に例示したようなバビネ補整器の視野の曲線は、光路差曲線のおおよその形を表している。

光路差曲線には応力分布と光の経路長さとのたまたみ込まれている。たまたみ込みをほどこいて応力分布だけを取り出すことが最終目的であるが、これは一般には解析的に行えない。

光路差曲線の定性的解釈

偏光の経路が図3(b)の経路1のような管壁外側から経路6のように内表面側へ移るのに伴い、光路差が次のように変わる。

経路1はガラス壁中での長さが零、光路差も零。

経路1 経路2の変化では、圧縮応力が強い部分で経路長さが急増し、光路差も圧縮側へ急激に立

ち上がる。

経路3 経路4の変化では圧縮力層内の長さ変化は少ないが、他方で張力層内の長さが急増するから、光路差は張力側へ向け変化する。

同様な理由で、経路5 経路6の変化では光路差は圧縮力側へ向かう。

光路差曲線のシミュレーション
計算の前提 観察結果をシミュレーションするための計算に次の仮定を置く。

(a)観察される光弾性効果は軸方向応力によるものである(半径方向・切線方向の応力が及ぼす効果は、光の経路に沿って積分されると零になる。これは軸方向に長い弾性体で一般に成立する事である。また壁の中では半径方向応力の絶対値が小さい)。

(b)管壁内の軸方向応力の分布は、管軸に平行な軸を持つ放物線形である(熱伝導論から導かれる近似則)。

(c)前記の放物線の軸は管壁の厚さ内にある。内外壁のうち冷却が弱かった方の近くにある(軸が管壁外へ出るのは一方の面から加熱、他方から冷却された場合であるから、本稿では考えない)。

(d)壁の厚さ方向に軸方向応力を積分すると零である(近似的な仮定である。零でない部分は実際にはひずみ検査器で応力がある場所

として検出される)。

これらの前提のうちのいくつかは、口の上端では成立しない。以下の議論ではこの部分を除外する。

定式化と計算(図4) ガラス器壁の厚さを $2 \cdot a$ とする。器壁中央の曲率半径を R とする。器壁の中央から Z の距離の経路を通る光について考える。

放物線の軸が器壁中央から $b \cdot a$ の距離にある($1/b > 1$)とする。

器壁厚さの中央から測った厚さ方向座標を X とすると、応力の分布は、
応力 = $A1 \cdot (X \cdot b \cdot a)^2 + C \dots$

式(1)
 $A1, C$ は定数
厚さ方向の応力の積分が零という条件から

$C = (-1) \cdot (1/3 + b^2) \cdot A1 \cdot a^2$
式(2)
光の経路が外周と交わる二点が曲率中心に張る角を $2 \cdot \gamma$ とする

$$\text{COS } \gamma = (R + Z) / (R + a)$$

$$= 1 - (a - Z) / (R + a)$$

$$\left\{ 2 \cdot (a - Z) / (R + a) \right\}^2$$

光の経路上で角座標が γ である点の座標 Z は

$$Z = \left\{ (R + Z) \text{COS } \gamma - R \right\} (1/2) \cdot 2 \cdot (Z + R) + Z$$

この点の応力は

$$A1 \cdot (Z \cdot b \cdot a)^2 + C \dots \quad (3)$$

光の経路に沿う長さを S として

$$ds = R \cdot$$

と近似する。式(3)をほどこいて応力を Z との関数として表現し、
について積分する。すなわち、

$$\int \dots = \dots$$

$$\cdot d = KRS(Z) \cdot R$$

を求める。

関数 $KRS(Z)$ に光弾性常数を掛けると光路差曲線になる。

三角関数を多項式で近似したため、積分計算は多項式の計算であり、容易にプログラムできる。

放物線の軸が内表面にある場合($b = -1$)から外表面にある場合($b = +1$)まで b をパラメーターとして、 $R = 20\text{mm}, a = 1\text{mm}$ として計算した応力分布と光路差曲線の群を図5に掲げよう。

観察と推論

定性的結論

計算結果(図5)を検討すると、光路差曲線の形の観察からすぐに次の結論が得られることがわかる。

(a)器壁の外表面から内部への曲線の立ち上る方向は、外表面の力の性質と対応する。圧縮側へ立ち上るなら外表面の応力は圧縮力である。張力側へ立ち上るなら外表

面に張力が露出している。

(b)内表面付近から内表面へ向けての曲線の変化の向きについても同じことがいえる。

(c)従って内表面付近に光路差曲線の極値がない時は、内表面の応力が零に近いが張力であるかであり、強化処理時に内表面の冷却が効かなかったことを示す。

以上の結論を利用すると、内外表面での張力部露出の有無を迅速に判断できる。

一例として図2と図5中の光路差曲線とを対照して、この鉛ガラス管では σ_1 が σ_2 に近くて外面に圧縮力、内表面に張力が現れていたことが判明する。

定量的判断

応力分布を定量的に求めるのは次の手順による。

(a)外表面近くの光路差曲線の極値 K_1 と、内表面の値 K_2 を測りそれらの間の比を計算する。

(b)前記のこれを図5の光路差曲線群のそれと比べ、該当 σ を決める。

(c) $A_1 = 1\text{kg/mm}^2$ と σ_1 と b を式(1)、(2)に代入し、光路差曲線を計算する。外表面近くの極値 K_1 を求め σ_0 。

(d) K_1 が実測された K_1 に等しくなる σ_0 に A_1 を補整する。

(e) b と最終的に得た A_1 と σ_0 の壁厚さ方向の応力分布(内外表面

での応力値も含まれる)を計算する。

内表面付近に光路差曲線の極値 K_3 がある場合には、 K_1 と K_3 とを測ってほぼ同じ手順に従っても応力分布が得られる。

以上の手続きをすべてコンピュータで実行することができる(図6)。

$R = 20\text{mm}, a = 1\text{mm}$ の場合を例にした、 K_1 と K_2 をキーボードから入力すると、応力分布と光路差曲線とが描かれ、念のために K_1 と K_2 の値も光路差曲線に記入される。

むすび

本稿で述べた計算法を使うと、応力分布を仮定して簡単に光路差曲線を計算することができる。

これを実測と比較して少しの試行錯誤的計算をすれば応力分布を推定できる。

また、光路差曲線からの定性的判断だけでも実用上有用な場合が多い。

この方法の開発と装置の製作は石塚硝子の示唆によったことを記して謝意を表す。

文献

- H.N.Ritland J.Amer.Ceram.Soc 40 153(1957)
- 岸井貫 New Glass Technol. 2 No.2 44 (昭和57)

図2 鉛ガラス管の残留応力の観察例
外表面に圧縮力部、内表面に張力部がある

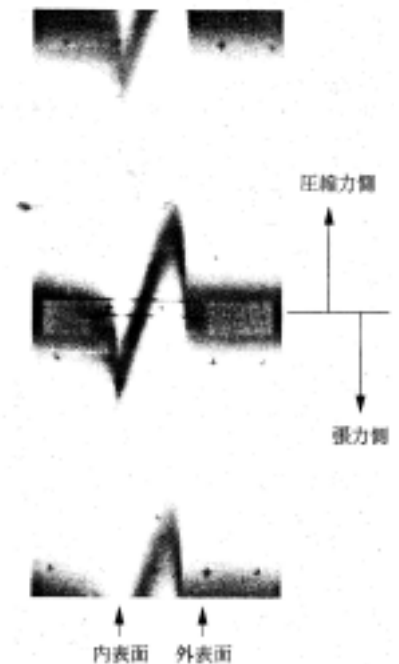


図3 応力分布と光路差曲線の対応の説明
図。内外両表面に圧縮力部がある場合
a)壁厚さ内の応力分布、b)偏光の経路、c)光路差曲線

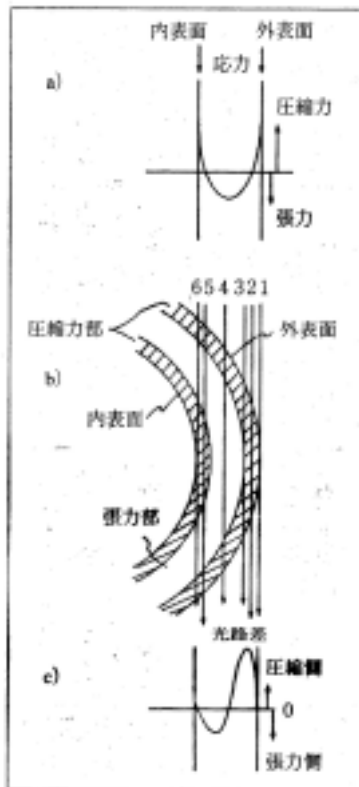


図4 シミュレーションのための定式化過程の説明図(コップ壁の横断面)

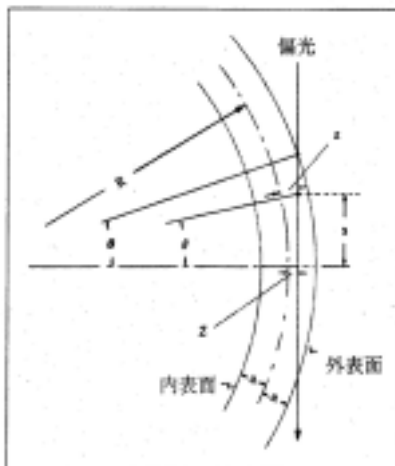


図6 二つの光路差の値K1,K2を選んで得られた応力分布曲線と光路差曲線

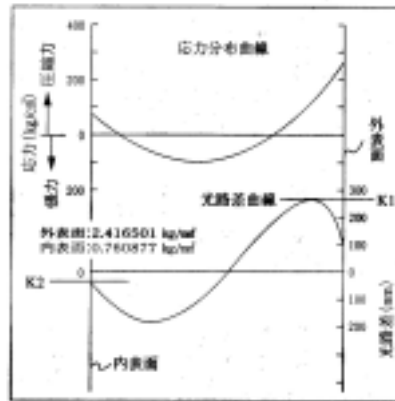


図5 コンピュータ・シミュレーションの例 (R=20mm,a=1mmの場合) a) 壁厚内の応力分布曲線のシリーズ、b) 応力分布から計算された光路差曲線群

