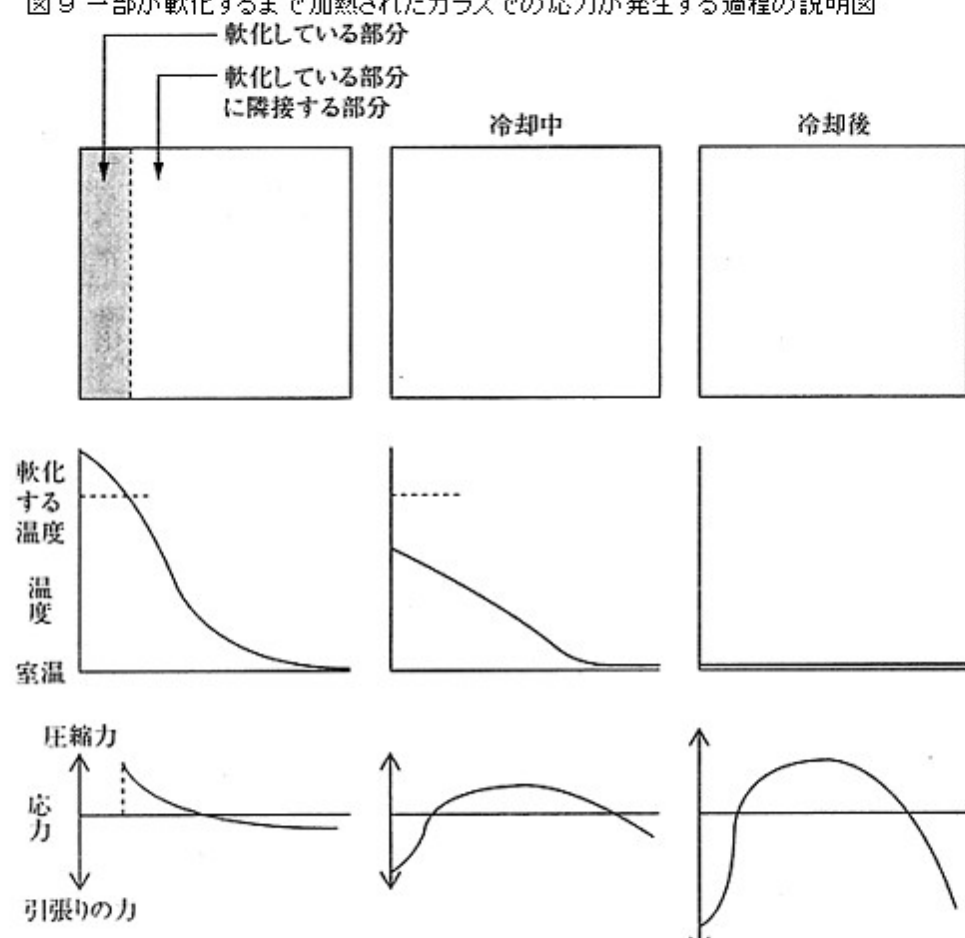


△ガラスが軟化する場合

①一部分が軟化するまで加熱された場合

ガラス板の一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。  
 ガラス器を成形・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ので応力が発生しません(図9)。  
 軟化していない部分には、E1、E2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部的に高温であり、圧縮の力が働くと予想されます(図9左)。  
 加熱された部分がそれから冷却を始めたとして、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防ぐような力が加えられ、引っ張りの力が発生します。  
 これに対して周囲には、中央部の収縮を防げるような力が発生します(図9中央)。冷却が終わり全体が一樣に室温になったとき、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。

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



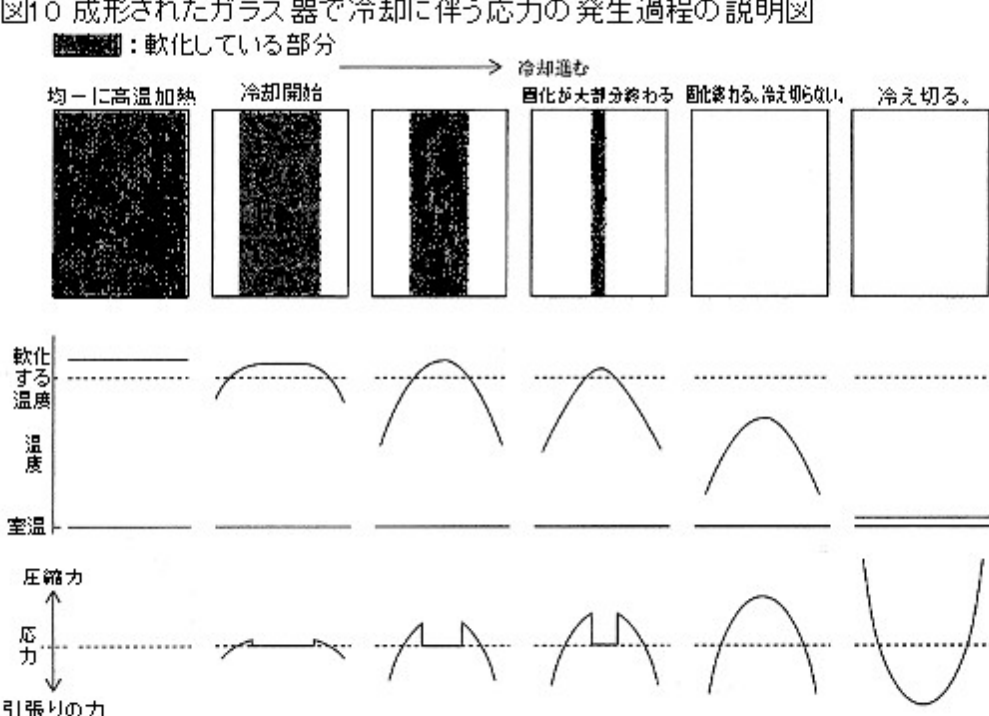
△軟化したガラスが冷却する場合

①ゆっくりと、温度分布が一樣なままで冷却した場合これは「除冷(徐々に冷却する) 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。

②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、内部の熱が表面で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。  
 形成された直後に、全体の温度が高く軟化しているとします。先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、その特定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。  
 金型を使って形成された製品は、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、などの可能性があって、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。

図10 成形されたガラス器で冷却に伴う応力の発生過程の説明図



△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っ張り応力の部分とが必ずあるということです。  
 ガラスは引っ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、表面に引っ張りの力が働く条件で弱いのです。  
 表面に引っ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.表面に圧縮応力だけがあり、引っ張りの応力は内部だけにあるように応力を分布させる(強化ガラス)か、です。  
 もしも表面に引っ張り応力の分布が露出していると、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。

△ガラス器内の応力の除去法

①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ー式に送られる型でも、止め冷まし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。  
 先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を経過しましたから、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。  
 この除冷点の測り方はJISやASTM(米国材料試験学会標準)で決められています。  
 ガラスの粘度が10<sup>13</sup>ポイズ(1ポイズ)は粘度のc.g.s.単位。大きいほどガラスが粘り。になる温度-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、かつなるべく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。

②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一部加工の場合には、加工部付近だけを除冷して、残った応力が広範囲に散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

