

ガラス工業に利用される光弾性技術

「電球・電子管・電子工業でガラスと金属とで気密封着を作ることは重要な技術である。ガラスを金属に溶かしつけて安定な気密封着を作るにはガラス中の応力を小さくするような材料の選定が前提になる。此の応力を観察・測定する方法を述べた。」

(Keywords : Glass, Stress, Strain, Quality control, Photoelasticity, Polarized light, Thermal expansion, Hermetic seals, Vacuum-tight seals, Strain viewers)

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

9. 封着体の「歪み」

ガラスの一つの重要な用途として「気密封着」がある。白熱灯や放電管では、ガラス容器の中の真空または決まった雰囲気（ガス成分とその気圧・分圧）のなかで、電氣的に加熱したり放電させたりして発光現象を起こさせ、発生した光を照明・照射などに利用している。これにはガラスが透明であることを利用しているが、また電氣的に絶縁体であり、金属とともに気密封着ができることも絶対に必要な条件であった。

使用目的が発光でなくとも、電子技術用真空管類では、ガラスが電氣的に絶縁体であり金属と共に気密封着を作れることを利用している。

また半導体素子の内にも、導入線をガラスで絶縁した気密封入によって、湿気や有害雰囲気の影響を避けようとしている製品がある。

いずれの用途でも、金属導線がガラス容器の壁を貫通する形になるので、貫通部分で気密が保たれる必要がある。

気密封着の方法には、用途・形・大きさにより、また要求されるコスト制限により、非常に多種類の形と材料の組み合わせがある。此の組み合わせに要求されることは

1. 金属にガラスを溶かしつけて、ガラスと金属が化学的・物理的に安定に結合していること、
2. 溶かし附けてから室温まで冷却したとき、その全温度範囲で、ガラスが固化しても破損・剥離せずに気密が保たれること、
3. 使用・使用停止や発光・消灯の繰り返しで温度変化を繰り返しても、気密が保たれていること、である。

このために必要なことは、ガラスと金属との熱膨張特性の差により発生するガラス中の応力が小さく、ガラスの割れ・破損と、金属との接着面の剥がれが起きないことである。

ガラスと金属では多くの場合熱膨張特性が違う。ガラスの膨張曲線には「ガラス転移温度域」が現れ、その上下での膨張係数が大幅に違う。ガラス転移域から高温になるにつれてガラスが軟化する。ガラスは加熱しながら測るか冷却しながら測るかで膨張曲線が違う（図63）。気密封着に関係するのは金属と融着してからの冷却時の熱膨張特性であるが、此の測定値は、ガラスの品質管理のための通常の熱膨張測定では与えられていない。

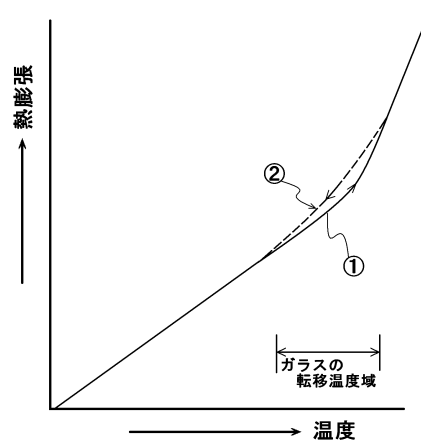


図63 ガラスの熱膨張特性の測定に現れる履歴効果

- ① 加熱しながら測定した場合
- ② 冷却しながら測定した場合

また製品の稼働温度に対応して、ガラス・金属にそれぞれ長時間に亘る耐熱性が要求される。電球・真空管類の製造時条件では金属の耐熱温度はガラスの軟化温度より高くなければならない。

ガラスと金属とは、このような条件を満たした上に、使用時の多数回の加熱・冷却と急熱・急冷に耐えて気密性を保つように、個々の材料だけでなくその組み合わせも選ぶことが重要である。

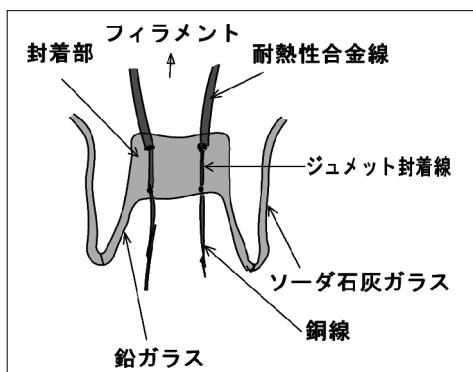


図64 普通小型電球の気密封入部の構造 (概念図)

普通電球の導線封入部の概略の構造を図64に示す。

気密封着に使われる金属材料には、導線を兼ねて線状の形で使われるものにはジュメット線（銅と鉄・ニッケル合金との複合材料線）、モリブデン線、タンゲステン線があり、板状など他の形で使われるものにはコバル合金、鉄・ニッケル合金、モリブデン箔などがある。

融着後に金属とガラスとが同じ割合で収縮して行くなれば、融着体の中に応力は発生しない。併し前記のようにガラスには転移温度域があるので、常温付近の温度だけでガラスと金属の膨張係数が等しくても、応力が小さいとは限らない。軟化・熔融温度域—転移温度域—固化温度域を通じて応力が総合的に小さいことが必要である。

9.1 応力の条件とその発生状況

ガラスは高温では粘度の低い融液状である。此の状態では加工されるが、ガラス中に応力は発生しない。温度が低くなると粘度が高まり、応力が発生したときにその緩和に、人間のスケールでみて有限の時間が必要になる。

また更に低温になると、応力緩和時間が指数関数的に伸び、応力を除くことが実際上できなくなる。このような条件のもとで気密性が安定に保たれる封着体を作る必要がある。

第二次大戦直後の時期に、「真空管材料規格」が制定されており、ガラスと金属との封着体を作って、ガラスの中に発生する応力を光弾性的に観察する方法が規定されていた。

9.2 ガラスの粘度と応力の緩和

ガラスの粘度は「粘性係数」で定量的に表現されており、その単位はポイズ (pois) である。温度の関数としてのガラスの粘性係数の変化を図65に示す。

粘性係数はガラスの熱履歴により変わりうる。それにしても軟質ガラス（板ガラス・瓶ガラス・クリスタルガラスなどは「軟質ガラス」に分類される。「硬質ガラス（ホウケイ酸ガラス・高アルミナガラスなど）」に比べて、熱加工するときに粘性係数が小さく、軟らかく感ずるか

ら名付けられた。）は定温保持により比較的速く粘性係数が定常値に達するが、ホウケイ酸ガラスは測定中に原子構造を変え、粘性係数が初期値に比べて非常に高い値、時には一桁以上にまでも変わる例がある。

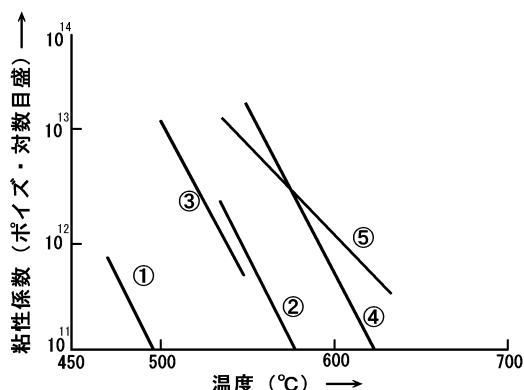


図65 気密封入用ガラスの温度—粘性係数特性

- ① 鉛ガラス ② ソーダ石灰ガラス
③ 硬質ガラス1 ④ 硬質ガラス2
⑤ 硬質ガラス3

応力の発生・残留・減衰が観察されるのは粘性係数が 10^{13} ないし 10^{15} ポイズの範囲である。

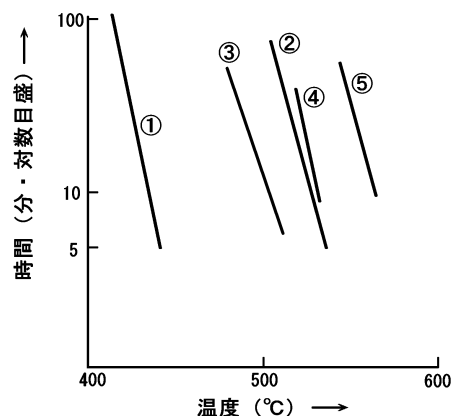


図66 気密封入用ガラスの歪みを除く為に必要な時間と温度との関係

- ①ないし⑤は図65と同じである。

直径 5 mm 位のガラス丸棒を定温保持して棒の中の応力が消えるまでの時間を測った結果の例を図66に示す。応力を実用的な時間内に消すためには、適切な狭い温度範囲内にガラスを置かなければならない。それより高温ではガラスが軟化・変形するし、低い温度では応力が消えない。

9.3 ガラス／金属封着体中の応力

ガラスは十分高い温度では粘度の低い熔融体であり、この時にはガラス中に応力が存在しない。温度を下げると共に体積は収縮し、粘性係数が高くなる。さらに温度を下げると熱膨張係数が小さい値になる温度範囲（転移

温度域)があり、その温度域を通過する頃に応力の消失に有限の時間を要するようになるので、応力の発生が観察できるようになる。(図67①)。

さらに冷えるとガラスが固化し、弾性体としての挙動を示す。応力消失の効果はなくなり、冷えるのと共にガラスと金属との膨張差による応力が代数的に加算されて行く(図67②)。

このように封着体中の応力の発生は、ガラスと金属の熱膨張特性、ガラスの温度対粘度特性、冷却の速度など多くの因子が関連するので、理論的予測は難しく、実測が必要になる。また材料特性の僅かな変化によって、応力が圧縮力 $\leftrightarrow$ 張力と変わり、製品の不良が多発することがある。

この様な事態に対処するために、使われる材料で試験体を作り応力を実測するのは実用的に有効である。さらに材料のどの特性が影響しているかを知るには、封着体を作り応力のない高温域から冷やしながら、応力変化を観察・実測するのが良い。

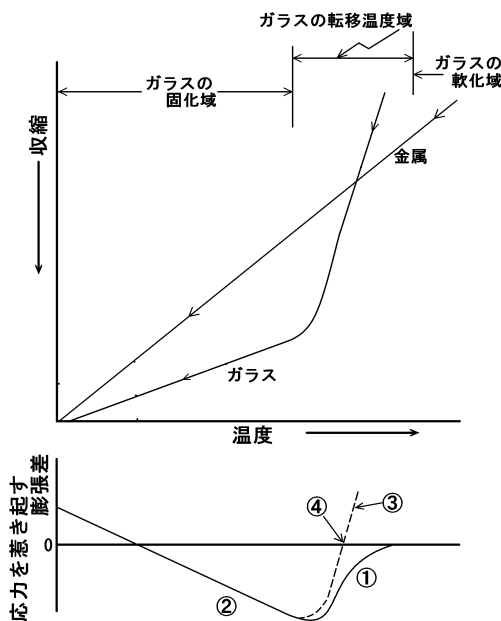


図67 ガラスの温度—粘度特性、熱膨張特性と封着時の応力発生との関係

- ① 冷却しながら測定した応力から換算した膨張差
- ② 曲線①の低温の部分
- ③ ガラスと金属の熱膨張特性から得られた膨張差に基づく曲線②の高温部への外挿
- ④ 「実効固着温度」

9.4 「実効固着温度」

封着体の温度変化に伴う応力の発生と変化は、1. ガラスの粘性係数が小さくて實際上応力が発生しない軟化温度域、2. 応力の発生とガラスの粘性による緩和との重

なった「転移温度域」、および3. ガラスの粘性係数が高くて応力が實際上緩和しない「固化温度域」を順々に経る過程である(図67)。ここで次のような「実効固着温度」を考える。それは「応力は実効固着温度より高温では発生せず、実効固着温度より低温では、ガラスと金属との熱膨張差だけに比例した弾性応力がある」と見なせる様な温度(図67④)である。

実効固着温度④はガラスの固化域で実測されるガラスと金属との間の膨張差をガラスの転移温度域まで外挿したとき(図67③)、曲線③が膨張差ゼロの基線と交わる点の温度④である。

実効固着温度は封着体の形や冷却速度により変わる。冷却速度への依存性は「冷却速度がN倍になると、実効固着温度は粘性係数が $1/N$ になる温度へ変わる」と表現できる。

また応力の働く方向への依存性の一例として、後で述べる円筒形封着体では、「軸方向の応力から求めた固着温度は、半径一切線方向の応力から求めた固着温度より高い」ということが、実測・計算の双方から導かれる(図68)。このことは後で掲げる図74ないし76と図80、81に示される。

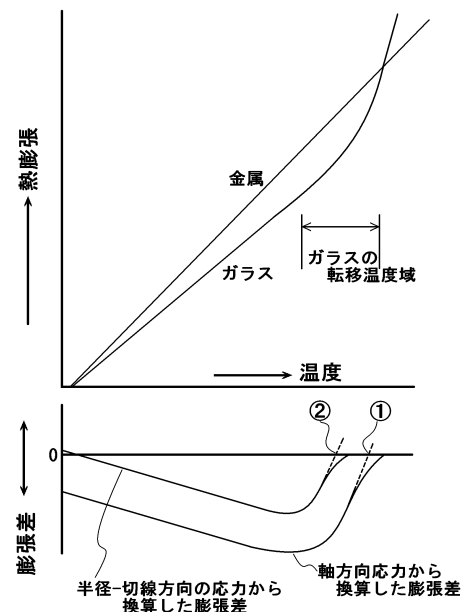


図68 円筒形封着体を例にした、複数の実効固着温度がある例

- ① 軸方向の応力から求まる実効固着温度
- ② 半径一切線方向の応力から求まる実効固着温度

9.5 塑性の効果

金属材料には銅・モリブデンのように外力により塑性変形しやすいものがある。これに弾性限界以上のズリ応力が働くと塑性変形をするので、封着体中の応力は弾性論で計算されたものとずれてきて、加熱・冷却の温度サ

イクルを与えたときに、温度－応力曲線に履歴現象が現れる。これは後で記すようにジュメット線の封着体で観察される（図80、81）。

封着体の応力を計算し、又は考察するとき、塑性材料の中では応力が等方的に近い、また応力間の差は塑性降伏強度を超えない、という条件が成り立つとして計算しなければならない。

9.6 封着試験の方法

ガラスと金属とを組み合わせる封着体を作るとき、封着体中の応力が大きくなりすぎないことを実験的に確かめることが望ましい。ガラスと金属を融着し、ガラス中を通過する光で光弾性測定をする。

ガラスと金属とを融着した試験片を作る。ガラスの部分に偏光をまっすぐに入射・通過・射出させるための研磨面を作る。

光弾性観察をしながら電気炉内で試験体を加熱し、ガラスの転移温度域で応力がゼロになったら冷却に換える。光弾性観察をしながら常温まで冷やす。必要があれば冷却速度を制御しなければならない。

光路差を応力に換算する。さらに弾性論などを適用できるときは、応力をガラスと金属との間の熱膨張差に換算する。

固化域にまで温度が下がれば、それ以後は冷却の速い・遅いは結果に影響しない。

9.7 簡単な場合の応力計算の概略

9.7.1 バイメタル形融着体

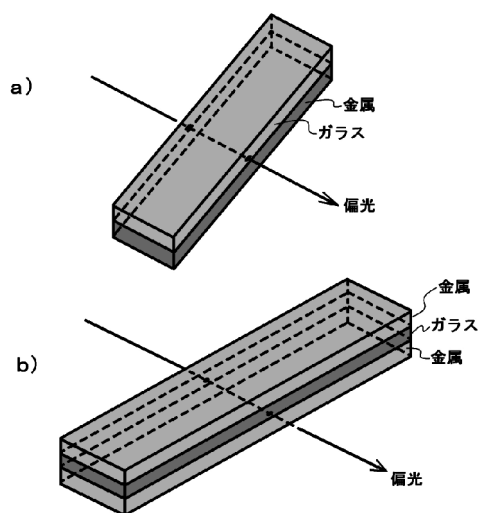


図69 ガラスと金属との封着試験のための試料

- a) バイメタル形の試料
- b) サンドイッチ形の試料

計算の筋道を説明するために、次のように単純化した場合を記す（図69 a）。短辺方向と厚さ方向の応力は無

視する。簡単のために二つの材料の弾性的性質が同じ（例えば二つともガラスの場合）、厚さも同じとする。また厚さも湾曲の曲率半径に比べて小さいとして無視する。

高温で融着した（図70 a）のち常温まで冷やしたとする。膨張係数が違うために、材料同士が融着していないならば、それぞれが自由に縮んで違う長さになる（図70 b）。この時応力は発生しない。

しかし実際には融着しているためにガラス1はガラス2押し縮められ、他方でガラス2はガラス1に延ばされて両者が同じ長さになる（図70 c）。ガラス1には圧縮応力、ガラス2には張力が働く。これらの力を断面にわたり代数的に積分すればゼロである。

此の状態では曲げモーメントが残っているの、これをゼロにするために全体が撓む。そのために応力分布が変わり、断面にわたり応力の代数的積分がゼロ、また曲げモーメントもゼロという二つの条件が満たされる（図70 d）。

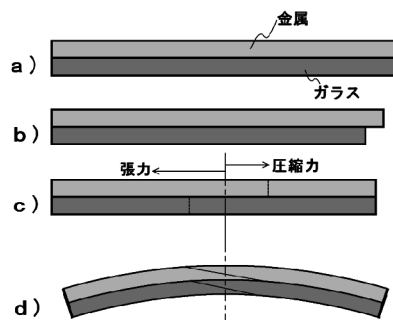


図70 バイメタル形封着体中の応力の計算のための手順

- a) 高温で固着した状態
- b) 常温まで各材料が自由に収縮したと仮定した場合
- c) 両材料を同じ長さに揃えたと仮定した場合の応力分布
- d) 曲げモーメントを打ち消すように湾曲した後の応力分布

9.7.2 サンドイッチ形封着体

ガラス板を封着用金属の二枚の板で挟んだ形である（図69 b および図71 a）。二枚の金属板の厚さは同じにする。拘束がなければガラスと金属がそれぞれ自由に縮む（図71 b）。併し実際は拘束のために全部が同じ長さでなければならない。仮にガラスが金属の長さまで縮められたとすると、ガラスには長手方向の圧縮力が生ずる（図71 c）。これでは応力の平衡状態ではないので、図71 c）に較べてガラスも金属も伸びて、ガラスの圧縮力は減り、金属に張力が発生し、圧縮力と張力の代数和がゼロになって平衡状態になる（図71 d）。

この場合には曲げモーメントを考慮する必要はない。

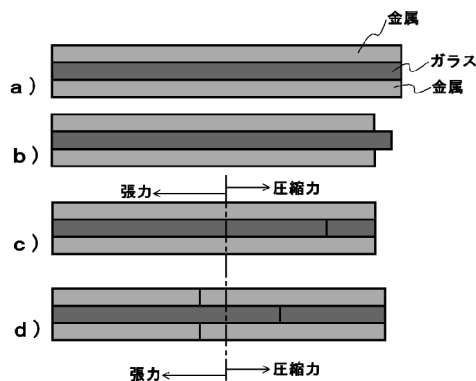


図71 サンドイッチ形封着体中の応力の計算のための手順

- a) 高温で固着した状態
- b) 常温まで各材料が自由に収縮したと仮定した場合
- c) 中央の材料の長さを両端のものに揃えたと仮定した場合の応力分布
- d) 全体を通じての応力の代数的積分がゼロになるように変形と応力再分布をした場合

9.7.3 二重同心円筒形封着体

同心円筒形封着体中では次の境界条件が成立する (図72)。応力を P 、中心軸からの距離を r 、軸方向の距離を z で表し、添え字 $z \cdot r \cdot \theta$ でそれぞれ軸方向・半径方向・切線方向を表す。

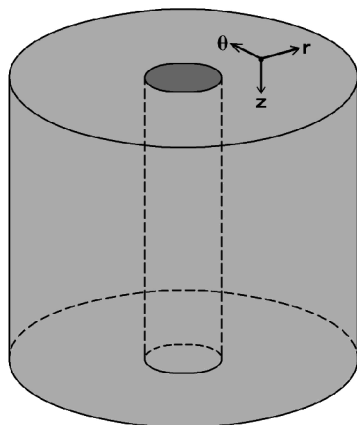


図72 同心円筒形封着体中の応力を矢印で示す。

添え字は r : 半径方向、 θ : 切線方向、 z : 軸方向 を示す。

構成材料を内外両面から圧力 (張力のこともある) を受けている円筒・円管と見做すと、応力 P は次の形に書ける：

$A \cdot B \cdot C$ は常数である。内部金属に関する量を添え字 1 で、ガラスのものを添え字 2 で区別する。金属の半径を a 、ガラスの半径を b とする。

内部の金属で

$$P_{r1} = P_{\theta 1} = A_1, \quad P_{z1} = C_1$$

外側のガラスで

$$P_{r2} = A_2 - \frac{B_2}{r^2}, \quad P_{\theta 2} = A_2 + \frac{B_2}{r^2}$$

$$P_{z2} = C_2$$

$r = b$ で $P_{r2} = 0$ という条件を入れると

$$P_{r2} = A_2 \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right), \quad P_{\theta 2} = A_2 \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

である。 A_2 、 C_2 は金属とガラスとの膨張差に比例する。

9.7.4 応力測定

応力の実測のために、線形で使われる金属線を軸とした円筒形封着体を作って試料にする。光を通過させるために必要な窓を、ガラスを部分的に磨いて作る (図73 a, b)。

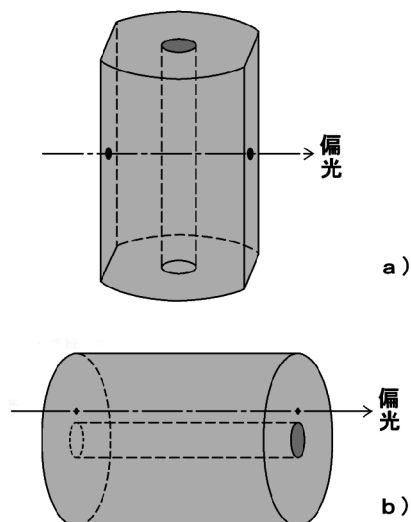


図73 円筒形封着体中の応力を測定するための試料

- a) 軸方向の応力を測るための試料
- b) 半径一切線方向の応力を測定するための試料

試料を電気炉中に入れて、光路差を観察できるように保持する。

軸方向の応力を測定するためには、光を軸に垂直に通過させる。光路差を光路長とガラスの光弾性係数とで割ると、単位面積当たりのガラス中の軸方向応力 ($P_z = C_2$) の近似値になる。これにガラスの断面積を掛けて金属の断面積で割ると金属中の軸方向応力になる。ただし力の性質、圧縮／引っ張りはガラスと金属では逆になっている。

半径・切線方向応力を測るには、線に平行に光を通過させる。この時、観察できるのは

$$P_{r2} - P_{\theta 2} = 2 \times A_2 \times \left(\frac{b^2}{r^2} \right)$$

であるから、応力計算のためには r が必要であり、これは測定時に決めておく必要がある。歪み計をカセットメーターに載せた形にすると便利である。

9.8 測定例

9.8.1 タングステン線とガラスとの円筒形封着体

タングステン線と硬質ガラスとの円筒形封着体で、軸方向応力と半径一切線方向応力とを測定し、ガラスとタングステンの間の膨張差に換算したものを図74に掲げる。軸方向応力①から観察される実効固着温度が半径一切線方向応力②からのそれよりも高いことが明瞭に解る。

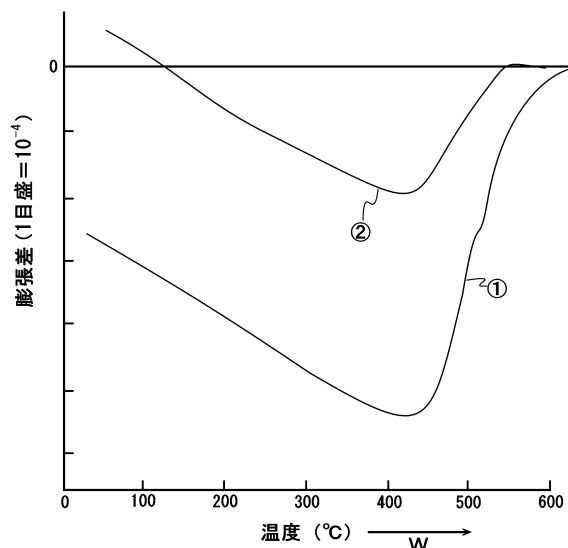


図74 タングステン線／硬質ガラス封着体中の力から換算した膨張差

- ① 軸方向応力から換算した膨張差
- ② 半径一切線方向応力から換算した膨張差

9.8.2 モリブデン線とガラスの円筒形封着体

モリブデン線と硬質ガラスとの円筒形封着体の場合の膨張差を図76に掲げる。

この場合には軸方向と半径一切線方向とで実効固着温度の差が広いし、また実効固着温度とガラスの転移温度域との差も大きい。

これらの特性は、モリブデンの性質とは関係なく、この場合の硬質ガラスが熱処理、熱履歴によって粘度特性を大きく変えるようなものであったからだ、と筆者は解釈している。

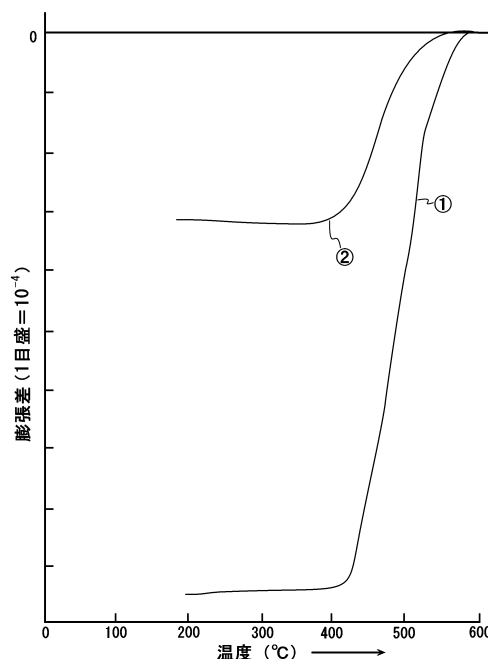


図75 モリブデン線／硬質ガラス封着体中の力から換算した膨張差

- ① 軸方向応力から換算した膨張差
- ② 半径一切線方向応力から換算した膨張差

9.8.3 鉛ガラスと金属線との円筒形封着体

鉛ガラス（軟質ガラスに属する）と鉄系合金線との封着体での観察結果を図76に掲げる。この場合には、応力方向による実効固着温度の違いも、実効固着温度とガラスの転移温度との差も、硬質ガラスの場合に比べて小さいと言える。

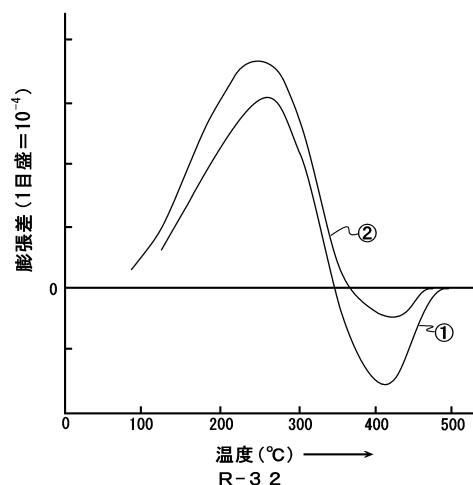
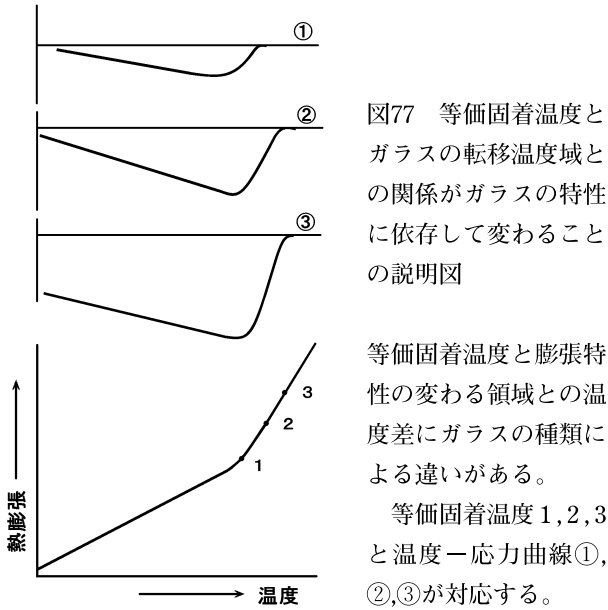


図76 鉛ガラス／鉄合金線封着体中の力から換算した膨張差

- ① 軸方向応力から換算した膨張差
- ② 半径一切線方向応力から換算した膨張差

以上の三例から、ガラスの熱膨張曲線とそのガラスを使った封着体の固着温度との関係には、図77のようにいろいろな場合がありうる事が解った。



9.8.4 ジュメット線の封着

塑性材料を含む例としてジュメット線-ガラス封着体を挙げる (図78)。

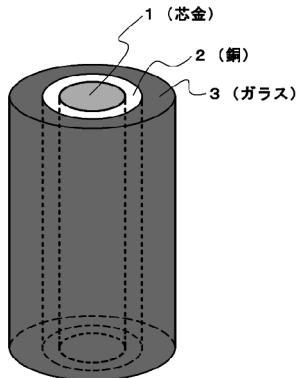


図78 ジュメット線/ガラス円筒形封着体の概念図

ジュメット線は一般用電球・蛍光灯・電子管などに多量に使われる材料で、鉄・ニッケル合金の「芯金 (しんがね)」を中心として同心円的に銅を被覆した導線である。銅は断面積比で20ないし30%を占める。

合金線は軟質ガラスより相当に膨張係数が低いが、膨張係数が遥かに高い銅被覆のために、結果としてジュメット線はガラスと膨張係数が合致し、気密封着を作れる、と考えられてきた。

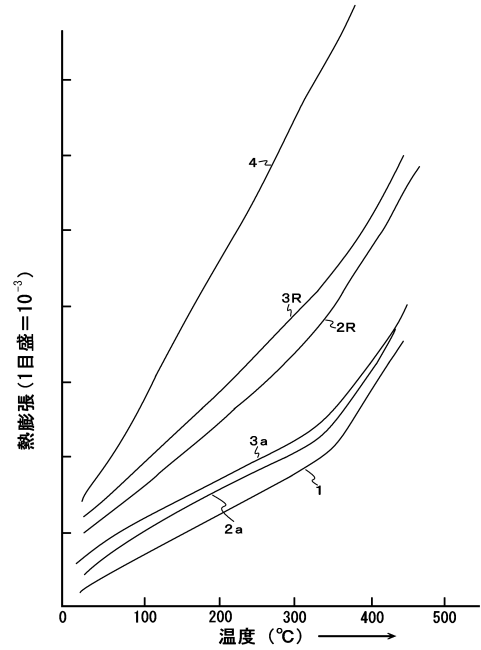


図79 ジュメット線・芯金・銅の熱膨張特性

- 1 : 芯金
- 2 a : 銅比率22%のジュメット線-軸方向
- 2 R : 銅比率22%のジュメット線-半径方向
- 3 a : 銅比率31%のジュメット線-軸方向
- 3 R : 銅比率31%のジュメット線-半径方向

実際に測定すると、ジュメット線の軸方向の熱膨張係数は芯金のものに近くて、ガラスより相当に膨張係数が小さい (図79)。従ってガラスで厚く挟むことでガラス中の軸方向応力を小さく抑え、銅の断面積比を調整して半径一切線方向の膨張係数をガラスの膨張係数に合致させることで、半径一切線方向応力を小さくして、信頼性ある気密封着を作るのだということが解った。

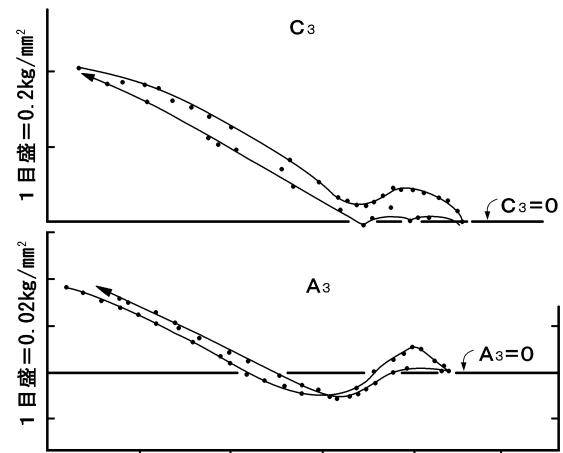


図80 ジュメット線 (銅比率22%) と鉛ガラスとの封着体の応力係数 A3とC3
ジュメット線の銅断面積比22%、線径1.0mm、ガラス径6.5mmの場合

実測例を図80と81に掲げる。図80は銅の断面積比22%のジュメット線と鉛がラスとの封着体、図81は銅の断面積比31%のジュメット線と鉛がラスとの封着体である。

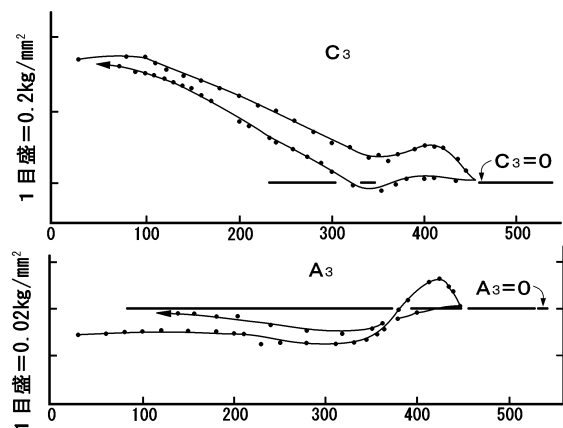


図81 ジュメット線（銅比率31%）と鉛ガラスとの封着体の応力係数 A_3 と C_3
ジュメット線の銅断面積比31%、
線径1.0mm、ガラス径6.5mmの場合

どちらのジュメット線も軸方向応力から算出されるガラスとの膨張差は大きい（ジュメット線の方が膨張率が小さい）が、半径一切線方向の応力から計算される膨張差からは、銅の断面積比率22%のものはジュメット線の方がガラスより低膨張で、銅の比率31%のものは膨張率がガラスにほぼ等しいかまたは僅かに高膨張であると言える。

どの場合でも温度の上昇 $\leftrightarrow$ 下降のサイクルを与えると、銅の塑性流動の影響で応力が非可逆的に変化する。

軸方向の膨張差が大きいことの効果は、ガラスを厚くすることでガラス中の軸方向応力を小さくすることが出来るので、あまり考慮する必要がない。

10. 結び

本稿で述べた光弾性技術は、ガラス工業界では普及したものと言えるが、ガラスを利用する周辺の工業ではまだ利用が少なく、そのために無用な損害を繰り返していた例がある。また一般の光学関連領域では、単なる模型実験用の技術と見なされていると思う。本誌に執筆したことで、工業的な利用範囲が広がることがあれば幸いである。

（おわり）

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 社長
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/>