

展 望 台

管球用ガラスの光弾性測定 歪検査器，精密歪計の適用

総研 材料応用技術センター

岸井 貫，Tel, 総研 2653

1. はじめに

著者は約20年前に、管球用ガラスと封着用金属との組合わせについて封着応力特性を調べて発表した^{1)~15)}。これらの結果の大部分は今でも有用であるが、一方では管球製品の改廃，材料の統廃合があり，現在は古い測定結果の見直しの時期に入ったと思う。

最近，歪検査器，精密歪計が設計と性能を新しくして販売されるようになった。これらは管球用に有用であるが，またそれを使いこなすには光弾性を原理的に理解する必要がある，特に封着の研究，実験方法にはいろいろの周辺知識と工夫が要る。

このような考え方で本編を記しまとめた。

2. 光弾性の原理

ガラスのような透明等方体へ光を入射させる時，その光の伝播速度は，進行方向や波の振動方向に関係なく一定である。

$$\frac{\text{真空中の光速度}(c = 3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1})}{\text{ガラス中の光速度}} = \text{ガラスの屈折率}$$

管球用ガラスの屈折率は1.4～3.5の範囲にある。

ガラスに応力Fがかかると(図1)，光は応力に平行に振動する成分と，応力に垂直に振動する成分とに分か

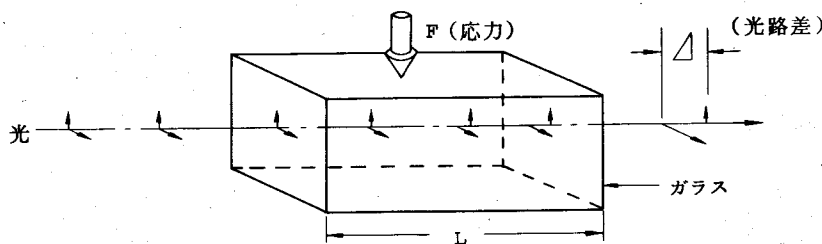


図1 応力が働くガラス中の光の伝播

れて進行する。そうしてこれら二つの成分の間に速度差(屈折率差とも言い換えられる)が生ずる。そのために，一方の波は他方の波よりもΔだけ遅れる。Δは応力Fとガラス中の通過距離Lに比例し，

$$\Delta = C \times F \times L$$

(nm) $\left(\frac{\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1}}{\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}} \right) (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}) (\text{cm})$

である。比例常数Cはガラスによって決まるので，ガラスの光弾性常数と呼ばれる。透明プラスチックについても同じである(表1)。

この現象は，応力によりガラスの屈折率が二つできることであり，応力複屈折と呼ばれる。

Δを測り，Lを知り，Cが既知であれば応力Fが知れる。通常の教科書に解説される光弾性技術は，このよう

表1 ガラス、プラスチックの光弾性常数の代表値

単位：(nm・cm⁻¹)/(kg・cm⁻²)

ソーダ石灰ガラス	2.4	合成樹脂	
鉛ガラス (PbO 20%)	2.6	メチルメタクリレート	3.8
(PbO 30%)	2.9	ポリスチレン	1.1
ホウケイ酸ガラス	3.6 ~ 3.9	セルロイド	1.5
石英ガラス	3.5	フェノール	5.6
光学ガラス		ポリカーボネート	5.5
ホウケイクラウン	2.7	アラルダイト	5.5
軽フリント	3.2	エポキシ	7.6
重フリント	2.7	グリブタル	3.7
超重フリント	1.4	アリルダイグリコール	
軽バリウムクラウン	2.8	カーボネート	3.5
重バリウムクラウン	2.2		

な場合を扱っている。

管球技術においては、 F が場所的に変動していることが多く、また模型実験が意味のない場合がほとんどで、実物について測定、解析をしなければならない点にむずかしさがある。また肉厚 (L) が小さいので小さい d を測る必要もある。

二つの波のどちらが伝播速度が大きいかについては、非常に特別の組成のガラスを除けば、次のようになる。

引張り応力の時：応力と直角方向に振動する光の方が速い。

圧縮応力の時：応力と平行に振動する光の方が速い。

この性質は、加成性がある。すなわち、2種の力が同一場所で働いている場合や、光の経路に沿い各種、各方向の応力が分布している時には、最終的な光路差は、上記二つの効果の代数和ないし積分値になる。

例1. 圧縮応力 F_1 と、これに直角な方向の圧縮応力 F_1 とが同時に働いている時：光路差は生じない。

例2. 圧縮応力 F_1 と、これに直角な方向の圧縮応力 F_2 とが同時に働いている時。ただし $F_1 > F_2$ とする：

$F_1 - F_2$ の大きさの圧縮応力が、 F_1 と同じ方向に働いているのと同じ効果がある。

例3. 圧縮応力 F_1 と、これに直角な方向の引張り応力 F_2 とが働いている時： $F_1 + F_2$ の圧縮応力が F_1 と同

じ方向に働いている時、および $F_1 + F_2$ の引張り応力が F_2 の方向に働いている時と同じ効果がある。

以上の中で、「圧縮応力」と「引張り応力」とを交換したのもも真である。

例4. 圧縮応力 F_1 が働いている時は、引張り応力 F_1 が圧縮応力と直角な方向に働いている時と同じ効果がある。

光弾性では、応力分布の総合効果だけが測定されるのであり、それに寄与した個々の応力の大小、符号、分布を同定することは、原理的にできない。このような同定のためには、別の根拠や実験結果が必要である。光の進行方向に働く応力は光弾性で検出できない。

3. 結晶の場合

結晶体では、等方晶系に属するものはガラスと同じ取り扱いができる。

例. ダイヤモンドダイスの応力

シリコンウェハーの欠陥や成長不規則による応力 (赤外線使用)

ガーネットウェハーの応力

他種の結晶では、応力の測定はむずかしいが、成長不規則による応力、双晶の有無などの検出はできる。ただし単色光源を使う必要がある。

例. 合成水晶, タンタル酸リチウムウェハー

4. 測定法

位相が揃い, 互いに直角な方向に振動する二つの波を得るために, 偏光現象を利用する(図2)。

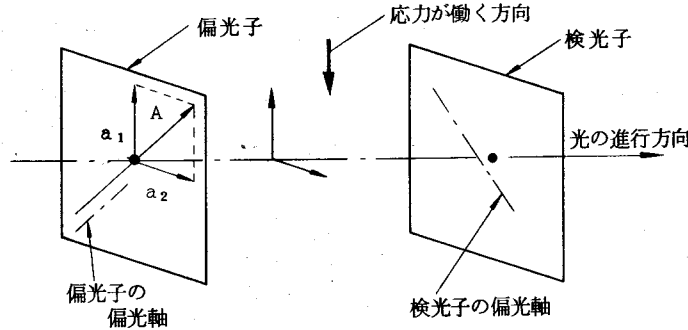


図2 偏光とその成分

光源からの光を偏光板1(偏光子)へ当てる。偏光子は, その偏光軸と平行な方向に振動する波, または任意の方向に振動する波の偏光軸に平行に振動する成分波だけを透過させる。

偏光軸に平行に振動する波の電場ベクトルAは, 偏光軸と45°の角度の方向に振動する二つのベクトル a_1 と a_2 とに分解でき, a_1 と a_2 は互に直角な方向に振動する同じ振幅の波として, 被験ガラス中を進行する。

a_1 と a_2 との間の光路差を次項5.~10.の各種方法で測定する。

5. 直線偏光法

図2において, 光源が単色光であり偏光子と検光子との間で偏光軸が直交しているとする。応力が零であればAの成分波間に光路差は生じない。応力がAと平行または直角であっても, a_1 , a_2 のうちいずれかが零であり, Aは二つに分かれないう, 検光子を光が通過しない。また, 光路差が光源の光の波長に等しくなった時は, a_1 , a_2 の間の相互関係が光路差零の時と同じに戻ってしまい, 検光子を光が通過しない。従ってこのような配置の装置で観察すると, 光路差が零の部分, 光路差が波長の整数倍の部分, および応力の働く方向が偏光軸と平行な部分, が暗く見え, 応力の働く方向を解析することができる。最後の理由によって暗く見える部分を等傾線と言う。応力の働く方向角が一定の部分をつなぐ線になるからである。

図3は円板および角板形ガラスを風冷強化し, 直線偏光法で見た状況である。円板の場合, 十字形模様が等傾線である。角板では中央の黒い領域以外はすべて等傾線である。

光路差を定量するには, 応力の働く方向を偏光軸と45°に向ける必要がある。これには等傾線を観察したり, 検光子を通して試料の測りたい部分が最も明るく見える角度を探したりする方法をとる。

6. 鋭敏色法

光路差は検光子を通過する光の明るさで定性的に判断できるが, 定量化には歪標準器, 精密歪計を使うか, セナルモン法(JIS S 2305 直接法)を使う必要がある。これらは後に詳記するが, その前に鋭敏色板を使い半定量化する方法について述べる。

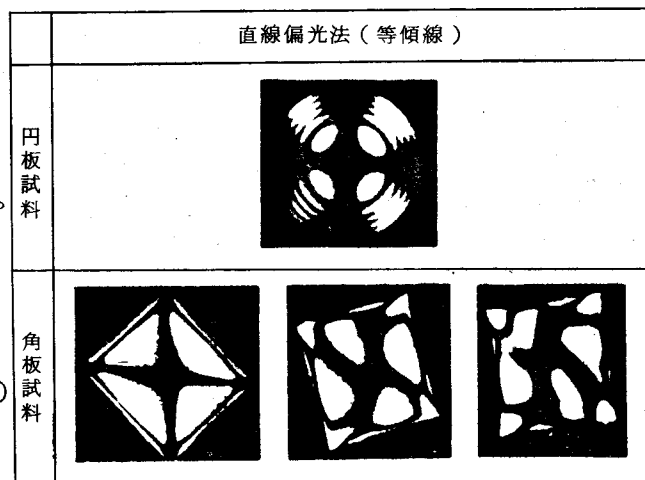


図3 円板および角板形強化ガラスの直線偏光法による観察

図2の配置で、光源を白色光にし、偏光板間に挿入される光路差 Δ が変化してゆく時の状況を考える。 $\Delta = 0$ で暗黒である。 Δ が増すと明るくなってゆくが、さらに増して光の波長に近づくと暗くなる。白色光を赤、緑、ブルーの三つの単色光の混合で近似する。 Δ が増してブルーの光の波長に近づくとブルーがまず暗くなり、他の色による黄色になる。さらに増して緑色光の波長に近づくと、赤を経由して赤とブルーの光により紫色になる。さらに増すと赤が消え、緑とブルーによりシアン色になる(図4)。このように、緑色光波長に等しい Δ の付近

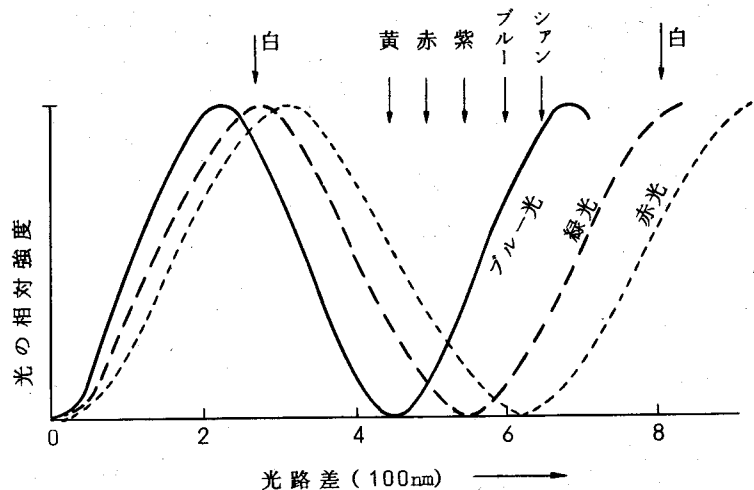


図4 光路差の変化にともなう検光子透過光の色の変化

で、検光子を透過する光の色が黄赤→紫→シアンと急変する。この色を鋭敏色(ティントカラー)と呼ぶ。色の変化がもっとも急激なのは $\Delta = 565 \text{ nm}$ である。

偏光子と検光子の間に $\Delta = 565 \text{ nm}$ の板(鋭敏色板)を予め入れておく。検光子を通して見た視野は鋭敏色を現わしている。さらに試片を重ねて挿入すると、試片の Δ が鋭敏色板の Δ に代数的に加算されるので、試片内の Δ が零でない部分が変色する。この変色により試片の小さい Δ を検出できるし、変色の顕著さにより試片の Δ の大小を判断できる。

7. 歪標準器

鋭敏色の変化で Δ の大小の判断はできる。しかし色と Δ の値との関連は一義的でない。なぜならば、鋭敏色の変化は 3 nm の Δ を検出できるくらい敏感であるが、鋭敏色として使う Δ は歪検査器の製作者や使用者の好みにより 30 nm くらいの範囲で一つ一つ違っているからである。

このような困難を避けて Δ を定量化する手段の一つが歪標準器である。これは既知、既定の Δ を実現しうるもので、これを試片と並べて鋭敏色を示す視野に挿入し、色を比べて試片の Δ を決める、という過程をとる。歪標準器としては各種のものが提案されているが、東芝歪検査器も独特の構成のものを備えている。

東芝の歪標準器は次の実験的知見にもとづいている：

光路差 Δ を持つ複屈折性板を直交した偏光子、検光子の間に入れ、板の軸と偏光軸との角度を θ° とすると、 Δ が小さい場合、板が与える光学的効果は、 45° の角度に入れられた $\Delta \times \sin 2\theta^\circ$ の光路差板の効果と実効的に同じである。

この近似は $\Delta < 130 \text{ nm}$ で成り立つ。図5は歪標準器である。回転しうる複屈折板が、角度目盛を持つ枠内にはまっている。角度目盛の $0, 1, 2, \dots, 10$ は $\sin 2\theta^\circ = 0.0, 0.1, 0.2, \dots, 1.0$ にそれぞれ対応する。板を回転して試片の変色部に色を合わせ、その時の目盛に(板の光路差/10)を掛けると試片の Δ になる。

東芝歪検査器、ポーラリメータ型歪検査器はいずれもこの測定ができる。

8. セナルモン法

鋭敏色板や歪標準器を使う方法は着色ガラスには適用できない。この時はセナルモン法を使う。JIS S 2305 炭酸飲料用ガラス瓶の歪測定法では、直接法としてこの方法を採用している。

配置は図6のようになる。四分の一波長板とは、使用する光の波長の1/4に相当する λ を持つ複屈折板のことである。まず偏光子と検光子とを直交させておく。次に四分の一波長板を挿入し、その軸を偏光軸に合わせる。視野は暗いままである。試片を挿入し、測りたい部分がもっとも明るくなるような角度に置く。これによって応力の方向は偏光軸と 45° の角度になる。検光板を回転し、黒い縞を測りたい部分に重

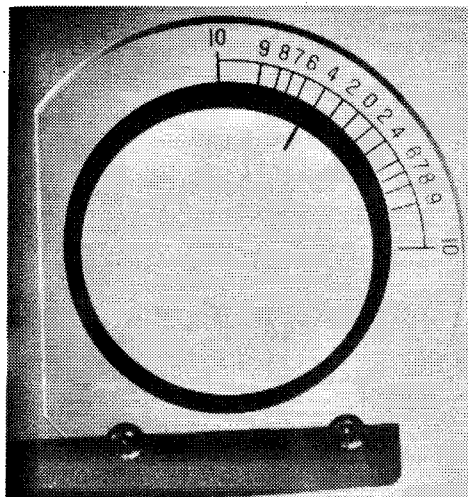


図5 東芝歪標準器

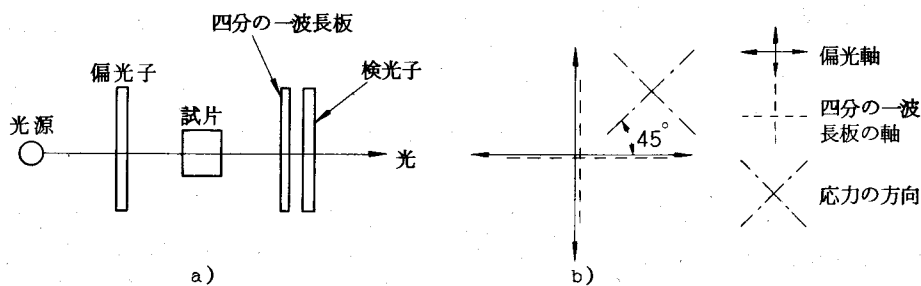


図6 a) セナルモン法の配置, b) 光学軸の方向

ねる。この時の検光子の回転角を θ° とする。試片の測りたい部分の Δ は、

$$\Delta = (\text{四分の一波長板の光路差}) \times \frac{\theta^\circ}{45^\circ}$$

である。四分の一波長板の光路差を140nm前後に選べば、白色光源でも実用上十分な精度で測定できる。

東芝ポーラリメータ型歪検査器ではこの測定ができる。なおJIS S 2305では四分の一波長板の軸の方向に誤りがあり、そのままでは測定を実行できない。

前記のように読みかえて測る必要がある。また鉋物顕微鏡では鉋物の複屈折の強さの定量にこの方法を使い、セナルモン補整器が付属する。

9. 円偏光法

これは光弾性実験で非常にしばしば使われる方法である。試片内の Δ の分布が、応力の働く方向に無関係に一望のうちに観察できる。

配置は図7のようになる。偏光子と検光子の偏光軸は直交、二つの四分の一波長板は直交し、四分の一波長板の軸と偏光軸とは 45° の角度にする。応力集中部の観察に有効であろう。

円偏光法はポーラリメータ型歪検査器で実行できる。図8はその観察例である。直線偏光法(図3)と違い、円偏光法では試料を回転しても模様は変わらない。この時に出る縞を等色線という。白色光源を使った場合、光路差が鋭敏色相当、またはその2倍、3倍、……のところの同一色調の部分をつなげる線になるからである。

10. バビネの補整器

光路差が一端から他端へ距離の一次関数で変化している水晶楔を組み込んだ接眼鏡である。単色光源を使い、

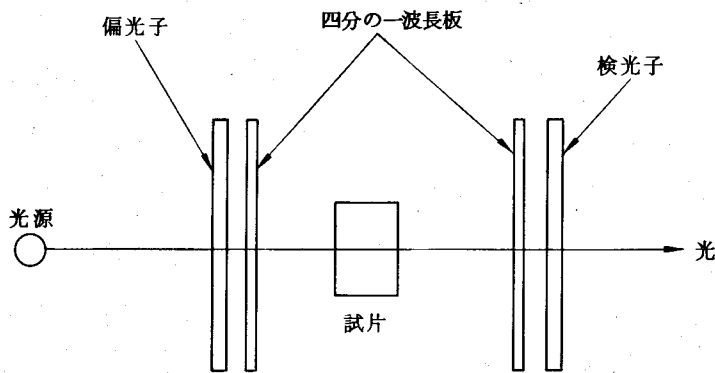


図7 円偏光法の配置



図8 円偏光法による強化ガラスの観察例

偏光子と検光子を直交させて見ると、 $d=0, \pm\lambda, \pm2\lambda, \dots$ (λ : 光の波長) の部分が黒い縞になる。白色光源では $d=0$ の部分が黒い縞、 $d=565\text{nm}$ の部分が鋭敏色の縞、 $d=\pm 1,030, \pm 1,600\text{nm}$ の部分が鮮かさを減った鋭敏色の縞になる。

対物レンズによって試片の実像を水晶楔上に投影すると、黒い縞は試片の d と楔の d との代数和が零の部分へ移動する。

測定操作は次の順序による (図9)。視野内の二重線で黒い縞を挟む。試片の実像を楔に投影し、測りたい部分を二重線の間に入れる。測りたい部分に光路差があれば黒い縞はずれる。水晶楔をマイクロメータで移動し、測りたい部分に黒い縞を重ねる。この移動量を光路差に換算する。これが測りたい部分の光路差に (絶対値が) 等しい。

補整器には、バビネのほかバビネーソレイユ、セナルモン、ベレク、ホームズなど多種のものが考案されている。試料の光路差を補償して打消し、補償に要した光路差が試料の光路差と符号が反対で絶対値が等しい、として試料の光路差を求める点ですべて共通である。セナルモン、ベレクなどの補整器は顕物顕微鏡の付属品として普及している。

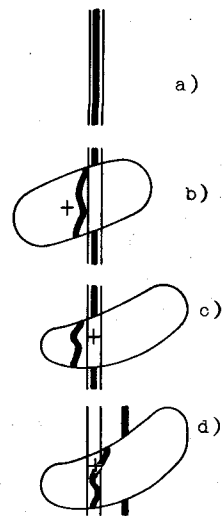


図9 バビネ補整器による測定法の説明図

11. 封着試験

ガラスと金属との封着特性を調べるには、封着体を作り、ガラス部分の応力を光弾性で観察する。これを常温だけでなく、ガラスの徐冷点よりもやや高い温度から封着体を冷やしながら測定すると、封着後の応力発生の過程、原因がわかるし、製造時の一時ひずみと直接に関連した重要な知見が得られる。

封着体の形は素材の入手が容易で測定と解析に都合の良いものを選ぶ必要がある。著者は円筒形封着体とバイメタル封着体を採用することが多かった (図10)。常温での測定ならば封着体をガラスに屈折率の近い液体に入れると測りやすい。高温で測定する時には、光が進入、射出される部分を光の進行方向に垂直にバフでつや出し研磨しておく必要がある。

12. バイメタル形封着体中の応力計算

二つの材料間に生ずる膨張差により発生するバイメタル内の応力分布の計算は、弾性論で周知のことなので⁹⁾ ここには記さない。ただし、式の導き方により、式の結果には20%くらいの差がある。これは封着試験の目的には重要な問題ではないので、適当にどちらかを選べば良い。

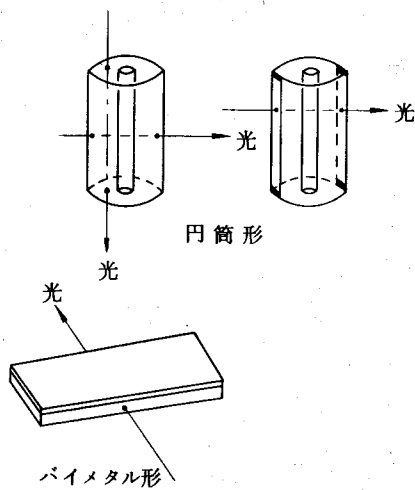


図10 封着試験に使う試料の形

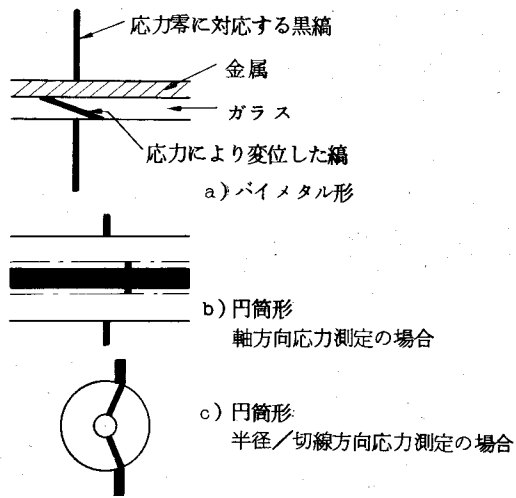


図11 封着試験におけるバビネ補整器視野内の像

封着試験では、精密歪計のバビネ補整器内に図11 a) のように見える像から、ガラスの界面側の応力を求め、これからガラス/金属間の膨張差を算出する。ガラス外表面での応力から膨張差を求めることもできる。

ガラスの界面側に圧縮応力が発生していれば、金属の方がガラスより高収縮（膨張係数大）でバイメタルはガラス側に凸に変形している。ガラスの界面側の応力が張力ではその逆になる。バイメタル内の界面に垂直な方向の応力は端部を除けば無視できる。

ガラス材料の弾性定数の代表値は次の通りだが、より正確な値がわかっているならばそれらを使う。

ガラスのヤング率 $7,000 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$, ポアソン比 0.25

13. 円筒形封着体内の応力分布

この計算は、各材料が内外面および端面から外圧力を受けている円筒、丸棒の場合と同じ形の式で表現される応力分布を持っているとし、この式中の定数を境界条件、ひずみの連続条件などを考慮して決める、という過程で行なわれる。この形は、二層封着体の場合（図12）,

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 \text{半径方向応力} \quad P_r = A_2 \left(1 - \frac{r^2}{b^2} \right) \\
 \text{切線方向応力} \quad P_\theta = A_2 \left(1 + \frac{r^2}{b^2} \right) \\
 \text{軸方向応力} \quad P_z = C_2
 \end{array} \right\} \text{外側の材料} \\
 \\
 \left. \begin{array}{l}
 \text{半径方向応力} \quad P_r = A_1 = P_\theta \\
 \text{切線方向応力} \quad P_\theta = A_1 = P_r \\
 \text{軸方向応力} \quad P_z = C_1
 \end{array} \right\} \text{内側の材料}
 \end{array}$$

定数 A_1, C_1, A_2, C_2 の間には,

$$A_1 = A_2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right), \quad C_1 a^2 = C_2 (b^2 - a^2)$$

などの関係がある。

図11 b) のような観察をすると、 $C_2 \times (2b)$ が近似的に求まり、これから二つの材料間の膨張差が求まる。また図11 c) のような観察を封着体の中心から r の距離の所に光を通して行なうと $A_2 \times 2 \times \left(\frac{r^2}{b^2} \right)$ が求まり、これからも二つの材料間の膨張差が求まる。

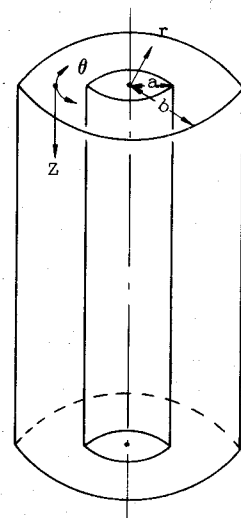


図12 2層円筒形封着体

上記の二つの膨張差は必ずしも一致しない。冷却中に応力が発生し始める温度が普通は違うからである。

これらの測定には、精密歪計のバビネ補整器を遊動顕微鏡の接眼レンズとして使うと、仕事がやりやすい。

14. 磁器などの封着体

金属-磁器封着体などでは光弾性測定ができない。この時は応力のかわりに応力による変形(ひずみ)を測る必要がある。バイメタル形の試料が都合が良いし、個々の板の厚さを小さくすると変形が大きく測り易い(図13)。

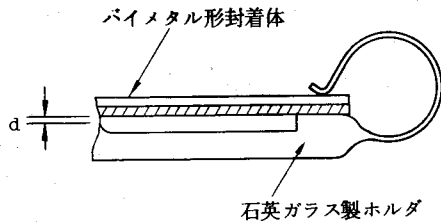


図13

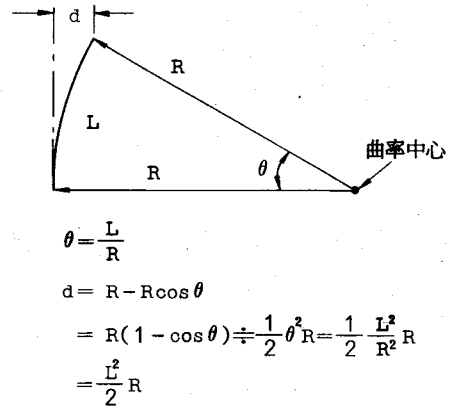


図14

石英ガラスでホルダを作り、封着体の位置はホルダから伸びた腕の弾性で固定する。全体を炉内に入れ、応力が零になる温度まで上げる。応力零になる温度は、材料の軟化特性や接着材の熔融温度などを考慮して判断する。封着体の自由端の動きを、ホルダの指標との距離dを測って観察する。dの測定には、リレーレンズで試料部の実像を炉外に作り顕微鏡で測る方法、dを直接に作動距離の長い対物レンズを持つ顕微鏡で測る方法、などがある。

長さLのバイメタルが変形して曲率半径Rの円弧になったとすると、

$$d = \frac{L^2}{2} R$$

なので(図14)、dはRと直線関係にある。dの変化をRの変化に換算し、さらにバイメタルの理論により二つの材料間の膨張差に換算することができる。

〔文献〕

- 1) ジュメット線の熱膨張, 東芝レビュー, 12〔3〕265 (昭32)
- 2) ジュメット線の封着, 東芝レビュー, 13〔8〕827 (昭33)
- 3) ジュメット線-ガラス封着体中の応力, 窯業協会誌, 66〔1〕73 (昭33)
- 4) ガラスと金属との封着体における固着温度, 東芝レビュー, 13〔10〕1001 (昭33)
- 5) 同上 第2報 同上 16〔8〕1022 (昭36)
- 6) 石英ガラスとモリブデン箔との封着体中の応力, 窯協誌, 72〔8〕136 (1964)
- 7) 銅を心金とした複合封入線の封着特性, 同上, 72〔12-1〕88 (1964)
- 8) インジウムを用いたガラス接着体中の応力, 同上, 74〔1〕30 (1966)
- 9) 金属-磁器封着体の固着温度, 同上, 70〔12〕330 (1962)
- 10) ガラスと金属との封着体に生ずる応力, 東芝レビュー, 14〔8〕851 (昭34)
- 11) ガラスと金属との封着, 工業材料, 10〔12〕77
- 12) 理化学用ガラス, 真空, 8〔8〕245
- 13) 光弾性, セラミックス, 11〔11〕1032;〔12〕1114
- 14) 封着用ガラス「特殊ガラス」中の1編, 金原出版
- 15) 材料関係学卒者教育テキスト「管球用ガラス」(昭和54~56年度)

(終わり)