二重中空金属円筒間ガラス封入部の応力

円筒形金属間ガラス封入の研究

山口 宗 五 郎

(富士電機製造株式会社研究部)

Stresses in a Glass Cylinder Sealing Two Concentric Metal Tubes.

Studies on Glass to Metal Seal Between Metal Hollow Cylinders.

By Sogoro YAMAGUCHI

(Research Department, Fuji Electric Company, Tokyo)

Abstract

H. Poritzky has derived the equations which enable us to calculate the stresses in glass with a sealed metal wire of circular cross section, and Arakawa has presented new formula representing the stresses in a glass cylinder sealing two different metals and has proved that the formula are practically useful.

Extending these previous works the author has presented the equations, (4) in the text, which can be used for computing the internal stresses in a glass seal between two metal tubes under the same assumptions as those in Poritzky's paper.

In order to compare the experimental values with those calculated by the equation (4) photoelastic study has been carried out using two kinds of glass whose expansion coefficients are given as G-1 and G-2 in the text.

The principal stress difference of the two samples were measured by photoelastic method and the internal stresses were calculated in terms of the difference of the expansions of the glass and metal from annealing point to room temperature.

From the results it has been proved that the experimental results and those calculated by eq. (4) showed the satisfactory agreement in the radial and tangential stress.

The agreement between the theory and the experimental results of the axial stress was not so good, probably due to the end effect. However, the eq. (4) is may be regarded as being useful for the determination of sealing glasses and metals.

緒 言

ガラス封入の技術は真空管、電球及び電気機器等の気密絶縁として重要な役割を演じている。これに関する研究としては金属線をガラスに封入した場合の H. Poritzky¹⁾ の理論的応力計算及び A.W. Hull と E.E. Burger²⁾ の光弾性実験法によるガラス中の応力実測値と計算値との比較検討を始めとして菅野³⁾ の導入線封入部に電流を通じ、ガラス中に温度差を生じた場合の研究、及び銅の可塑性を考慮した Dumet 線封入部に関する研究等⁴⁾がある。

荒川ら⁵⁾は2種異金属間をガラス封入する場合の応力計算式を H. Poritzky¹⁾が行なったと同様の仮定のもとに理論的に導いた。そして光弾性実験法による応力実測値と計算値との比較検討を行なったが、著者はさらにこれを拡張して電気機器の気密絶縁封入に関する研究の一環として、まず中空金属円筒とそれと異なった金属からなる外部金属円筒との間をガラス封入する場合について、ガラス封入部内部応力分布に関する理論式を誘導し、ついでそれを光弾性法による測定結果と比較検討を行なった。その結果について報告する。

I. 二重中空金属円筒間ガラス封入部の応力計算式

図—1 に示したようなガラス封入部の応力計算式は導

1: Inner metal 2: Glass
3: Outer metal

Fig. 1. Glass-to-metal seals.

入線をガラスに封入した場合の H. Poritzky¹⁾の計算と同様の仮定のもとに、2種異金属間ガラス封入部に関して荒川ら⁵⁾が導いた応力計算式を発展させたものである。

円筒座標 r, θ, z をとり、 r, θ, z 方向の歪を e_r, e_θ, e_z 又応力を P_r, P_θ, P_z として、ポアソン比 (金属とガラスは同一とする) を σ , ヤング率 E , 温度変化による金属及びガラスの単位伸長量を δ とし以下の計算におい

て、H. Poritzky¹⁾ が金属線をガラス中に封入した場合の応力計算式を導く際に行なったと同様の仮定をおく。

フックの法則より

$$\left. \begin{aligned} e_r &= \frac{1}{E} \{P_r - \sigma(P_\theta + P_z)\} + \delta \\ e_\theta &= \frac{1}{E} \{P_\theta - \sigma(P_r + P_z)\} + \delta \\ e_z &= \frac{1}{E} \{P_z - \sigma(P_r + P_\theta)\} + \delta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

次に円筒の内部応力を表わす式

$$P_r = A - B/r^2, P_\theta = A + B/r^2, P_z = C \dots\dots (2)$$

A, B, C; 常数

より金属及びガラス 1, 2, 3 に関して次の式が成立する。ここで suffix 1, 2, 3 は内部金属円筒, 中間ガラス, 外部金属円筒に関するものとする。

$$\left. \begin{aligned} P_{r1} &= A_1(1 - d^2/r^2), P_{\theta1} = A_1(1 + d^2/r^2), \\ P_{r2} &= A_2 - B_2/r^2, P_{\theta2} = A_2 + B_2/r^2, \\ P_{r3} &= A_3(1 - c^2/r^2), P_{\theta3} = A_3(1 + c^2/r^2), \\ P_{z1} &= C_1 \\ P_{z2} &= C_2 \\ P_{z3} &= C_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式の常数 A, B, C が決定すればガラス封入部の応力を計算することができる。それには金属とガラスの境界 $r=a$, $r=b$ での応力平衡条件及び Z 軸に垂直な任意断面での応力 Z 成分の和がゼロであるという条件

$$A) \quad r=a \quad P_{r1} = P_{r2}, e_{\theta1} = e_{\theta2}, e_{z1} = e_{z2}$$

$$B) \quad r=b \quad P_{r2} = P_{r3}, e_{\theta2} = e_{\theta3}, e_{z2} = e_{z3}$$

$$C) \quad \int_a^b P_{z1} \cdot 2\pi r dr + \int_a^b P_{z2} \cdot 2\pi r dr + \int_b^c P_{z3} \cdot 2\pi r dr = 0$$

より常数 A, B, C を決定し (3) 式に代入すればガラス中の応力を表わす式が求まる。すなわち半径方向の応力 P_{r2} , 円周方向の応力 $P_{\theta2}$, 軸方向の応力 P_{z2} は次の式で表わされる。

$$\begin{aligned} P_{r2} &= \frac{(s/a^2 - t/r^2)(\delta_2 - \delta_1) - \{w/a^2 - (1-2\sigma)v/r^2\}(\delta_3 - \delta_2)}{(1-2\sigma)sv - tw} \\ P_{\theta2} &= \frac{(s/a^2 + t/r^2)(\delta_2 - \delta_1) - \{w/a^2 + (1-2\sigma)v/r^2\}(\delta_3 - \delta_2)}{(1-2\sigma)sv - tw} \\ P_{z2} &= \left[-\frac{a^2 - d^2}{p(c^2 - b^2)} \cdot \frac{E_1}{E_3} + \frac{2\sigma s}{a^2 \{ (1-2\sigma)sv - tw \}} \right] (\delta_2 - \delta_1) \\ &\quad + \left[\frac{1}{p} - \frac{2\sigma w}{a^2 \{ (1-2\sigma)sv - tw \}} \right] (\delta_3 - \delta_2) \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

ただし

$$\begin{aligned} (1+\sigma)(1-2\sigma)a^2v &= \frac{1}{E_1} \left\{ \frac{a^2 + d^2}{a^2 - d^2} - 2\sigma \left(\frac{a^2}{a^2 - d^2} - \frac{E_1}{E_2} \right) - \sigma \right\} - \frac{(1-\sigma)}{E_2} \\ -(1+\sigma)w &= \frac{1}{E_1} \left\{ -\frac{a^2 + d^2}{a^2(a^2 - d^2)} + \frac{2\sigma^2}{a^2 - d^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sigma}{a^2} \right\} - \frac{1}{E_2} \cdot \frac{1+\sigma}{a^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{a^2} \left\{ \frac{c^2 + b^2(1-2\sigma)}{(c^2 - b^2)E_3} + \frac{(1-2\sigma)}{E_2} \right\} \\ s &= \frac{1}{b^2} \left\{ \frac{c^2 + b^2(1-2\sigma)}{(c^2 - b^2)E_3} - \frac{1}{E_2} \right\} \\ p &= \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3} \left(\frac{b^2 - a^2}{c^2 - b^2} + \frac{a^2 - d^2}{c^2 - b^2} \cdot \frac{E_1}{E_2} \right) \end{aligned}$$

(4) 式において, 正は張力, 負は圧縮力でガラスは完全なる弾性体とした計算式である。

II. 光弾性法によるガラス封入部の応力測定

1) 試料 本実験で理論的応力計算値と後述する光弾性法による応力実測値との比較検討を行なうための試料は次の観点よりガラス及び金属を決定した。なおガラス-金属封入部材料等については J.H. Partridge²⁾ が詳細に記述しているのでこれを参考にした。ガラス封入部の気密不良の原因は主としてガラスの割れによるものであり, ガラスが抗張力に弱く, 圧縮力に強いという事実より, 本実験試料のような封入部 (図-1) においては unmatched seal によりガラス中に圧縮力を生じることが耐熱衝撃性, 機械的強度等の点で好ましいものである。そこで定性的に外部金属円筒, 中間ガラス, 内部金属円筒の順に熱膨脹係数を小さくすることによりガラス中に圧縮力を生じると考えられることより図-2 に示すような熱膨脹率のガラス及び金属を選び, 外部金属円筒に M_A を, 中間ガラスに G-1, G-2 を, 内部金属円筒に M_B を使用した 2 種類の試料を製作した。なお試料の寸法は光弾性実験装置の関係で $2d=2.2$ cm, $2a=3.5$ cm, $2b=6.5$ cm, $2c=7.5$ cm 厚さは 1.5 cm とした。

Fig. 2. Thermal expansion curve.

a) 封入ガラス G-1, G-2 封入ガラスの徐冷点は封入部の応力計算を行う場合, ガラスの徐冷点で内部応力はゼロとし, 徐冷点以下の温度で金属とガラスの収縮

差に対応して弾性的に応力を生じるとすることより、正確に徐冷点を知る必要がある。そこでガラス G-1, G-2, の徐冷点は H.R. Lillie⁷⁾ の報告を参考にして 400~600°C の温度範囲の粘度を測定し、その結果より $10^{13.4}$ ポアズの点を徐冷点とした。従って図-3 よりガラス G-1 は 430°C, ガラス G-2 は 470°C が徐冷点となる。次に図-2 に示した G-1, G-2 の熱膨脹曲線は長さ 80 mm, 直径 5 mm の試料を示差熱膨脹計で 1°C/min の速度で冷却した場合の収縮曲線である。

Fig. 3. Change in log viscosity of glass G-1 and G-2.

b) 金属の前処理 試料の製作に用いた金属 M_A , M_B は材料の加工歪を除去するため、また金属表面の脱炭を行ない封入時における金属表面の発泡を防ぐため水素雰囲気中で 1150°C で 2 時間焼鈍を行なった。

c) ガラス封入部の徐冷 ガラスの軟化点以上の高温で熔着したガラス-金属封入部の徐冷は円筒状ニクロム線電気炉中で徐冷点よりやや高い温度より室温まで電位差計式温度調節計を用いて、熱膨脹係数測定時の冷却速度と同じく 1°C/min で徐冷した。

2) 装置及び測定 ガラス封入部の応力の実測には光弾性実験装置を使用した。一般に光弾性法による応力の実測は高感度材料では単色フリンジ法によって Retardation を測定する方法が用いられているが、ガラスの場合は縞が比較的少ないことより Babinet's Compensator を使用して Retardation を測定し主応力差を求めた。図-4 に使用した光弾性装置の光学系を示す。光源はマツダ超高压水銀灯を使用し、Wratten 77 フィルタの併用で 5461 Å の波長の光で試料の軸方向に偏光を通し、Babinet's Compensator の主軸方向が偏光板 P_1 , P_2 と 45° をなすように光学系に挿入し Retardation を試料の

Fig. 4. Arrangement for photo-elastic measurement of stresses in seals.

半径方向に沿って測定した。

一般に Retardation R は次式によって表わされる。

$$R = ct(p - q)$$

c : 光弾性常数

t : 光路の長さ

p, q : 主応力 (正は張力, 負は圧力)

なお実験方法の詳細についてはテキスト⁸⁾に譲り、以下実験結果のみを記す。まず単色縞写真を図-5 に示す。写真で判定困難かと思われるが G-1 を使用した封

(a)

(b)

(a) G-1 glass seals (b) G-2 glass seals

Fig. 5. Stress pattern.

入部は外部金属円筒に接近した位置に 1 次の縞が見られ、内部金属に進むにつれて同心円状に 2, 3, 4 次までの縞が見られ、主応力差は大きいことがわかる。また G-2 を使用した封入部は縞は見られず主応力差は小さいことを示している。次にガラス G-1, G-2 を使用した 2 種類の試料について主応力差の分布曲線を図-6 に示す。なお次節における実験と理論との比較検討のため (4) 式による計算値を併わせ記入した。

III. 結果の検討

1) 計算によるガラス封入部応力の検討 ここで (4) 式を用いて 2 種類の試料の内部応力を計算する。

図-2 において徐冷点より室温までのガラスと金属の単位伸長差は次のようになる。

(G-1) cal. (G-2) cal.; Calculated stress in G-1, G-2 seals.
(G-1) exp. (G-2) exp.; Experimental stress in G-1, G-2 seals.

Fig. 6. The distribution curve of principal stress difference.

$$\begin{aligned} \text{G-1 の場合} & \begin{cases} \delta_3 - \delta_2 = -16 \times 10^{-4} \\ \delta_2 - \delta_1 = -10 \times 10^{-4} \end{cases} \\ \text{G-2 の場合} & \begin{cases} \delta_3 - \delta_2 = -22 \times 10^{-4} \\ \delta_2 - \delta_1 = -3 \times 10^{-4} \end{cases} \end{aligned}$$

次にガラス及び金属のヤング率，ポアソン比は次の値を用いる．

$$E_1 (M_B) = 1.47 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2*$$

$$E_3 (M_A) = 2.10 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2*$$

$$E_2 (\text{ガラス}) = 0.6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma = 0.3$$

*E spe, Werkstoffkunde Der Hochvacuum-technik p. 223, p. 347 記載値を用いる．

以上の各数値を (4) 式に代入し，常温におけるガラス中の応力を求め図-7 に示す．

ガラス G-1, G-2 を使用した場合，いずれもガラス中の主応力は圧縮力となりガラスが張力に弱く圧縮力に強いという事実より，本実験で製作したガラス封入部は良好な結果を示すものである．ここで注目すべきことは G-2 を使用した場合は P_{r2} と $P_{\theta 2}$ が接近しているが，G-1 を使用した場合は $|P_{\theta 2} - P_{r2}|$ が大きくなっていると同時に $P_{\theta 2}$ が内部金属円筒とガラスとの接触面で 150 kg/cm^2 程度の圧縮力を示し，非常に小さくなっている．これについては荒川⁹⁾ が行ったと同様に内部金属円筒とガラスとの境界 $r=a$ で $P_{\theta 2}$ がゼロとなるようなガラス

Fig. 7. The distribution curve of internal stresses in seals.

の熱膨脹曲線を求め，それより小さい熱膨脹率のガラスを使用する必要がある．またガラスの割れは主応力のみによるものではなく剪断応力によっても割れを生じることが著者は金属-ガラス封入試験で経験したことより，ガラス中の最大剪断応力 ($\tau_{\max} = |P_0 - P_r|/2$) はできるだけ小さくすることが好ましい．この観点よりすれば G-1 を使用した場合より G-2 を使用した封入部の方が最大剪断応力は小さく良好な結果を示すことが図-7 よりわかる．そしてまた G-2 の場合には (4) 式の $P_{\theta 2}$ の式からみて $(\delta_2 - \delta_1)$, $(\delta_3 - \delta_2)$ はいずれも負で，その絶対値の差が非常に大きいこと，すなわち図-2 でいえば熱膨脹曲線が外部金属円筒と大きくはなれ，内部金属円筒に極めて接近していることが強くきき $P_{\theta 2}$ を圧縮力にしているといえる．

2) 実験結果と計算値との比較 図-6 の主応力差分布曲線より光弾性実測値は計算値よりガラス内部全域にわたってやや小さい値を示しているが，大きな偏差は認められない．従って (3) 式の半径方向及び円周方向の応力計算式は大体において正しいといえることができる．ここで計算値が実測値より一般に大きくなるのは，荒川⁹⁾ が指摘しているように計算式を導くにあたって Z 軸方向での無限長条件を仮定していること，及び徐冷温度範囲でのガラスの粘性流動による応力緩和現象⁹⁾ を無視して徐冷点よりガラスと金属の収縮率の差に対応して弾性的に歪力を生じるとして計算しているためである．

次に Z 軸方向の応力は実測することができなかったが，G-1 を使用した試料では内部金属円筒の近傍で軸方向の応力によるガラスの割れが認められた．このこと

Fig. 8. Change of axial stress with temperature in G-1 and G-2 seals.

は(4)式より計算した P_{z2} が常温で 670 kg/cm^2 の圧縮力であることと矛盾するものである。しかし室温においては圧縮力であっても封入部の熱処理、すなわち徐冷中にガラス中に張力が働き割れを生じることが考えられるので、この点を検討するために徐冷点より室温までの軸方向の応力分布曲線を(4)式より計算し、図-8に示した。G-1、G-2を使用した試料はいずれも転移点附近で張力を示しているが、いずれもガラスの抗張力の範囲内で、これにより割れを生じるとは考えられない。G-1を使用した場合の割れがZ軸方向に垂直に生じ内部金属円筒の近傍のみでとどまって、それ以上r方向に進展しないということは P_{z2} がrに依存することを示すものであろう。著者の式では P_{z2} はrに無関係に一定である。これは軸方向に無限長であるという条件よりきている。しかし実験試料は光弾性実験の関係であり軸方向に長くすることはできないので15mmとした。このことがG-1を使用した試料に関して計算上では P_{z2} は圧縮力で一定であるにもかかわらず実際には割れを生じ、

上記のrに関する依存性が予想される矛盾を生じた最大の原因であると考えられる。なお、またG-2を使用した試料には割れがなく封入ガラスとして適当であるということは常温でG-1を使用した試料より大きい圧縮力を示していることと対応し、計算上の圧縮力が大きければ有限長でも割れを生じないことを示すものであるが、実用上封入部の軸方向の長さを或る程度大きくすることにより問題のなくなること示すものと考えらるべきであろう。

結 論

内部中空金属円筒とそれと異なった種類の金属からなる外部金属円筒との間をガラス封入する場合についてガラス部における内部応力分布を求める式を導いた。一方、光弾性法による応力測定実験を行ない、その実験値と理論式による計算結果と比較したところ、半径方向及び円周方向の応力に関してはよい一致を示し、軸方向の応力に関しては一部不一致な点もあるが、大体においてその傾向は一致した。従って理論式はガラスと金属の組合わせを決定する上に実用上の目的においては十分有効であることがわかった。

なおこの研究を行なうにあたり静岡大学工学部、荒川泓助教授及び当社研究部、太田、渥美両氏の御助言、御協力に対し深く謝意を表する。

附記：本報で行なった光弾性法によるガラス封入部の応力解析はZ軸方向に垂直な平面の二次元解析であるから、ガラスG-1を使用した試料の内部金属円筒の近傍でZ軸に垂直にガラスの割れを生じたけれども応力解析には影響はない。

文 献

- 1) H. Poritzky. *Physics*, 5[12] 406 (1934)
- 2) A.W. Hull and E.E. Burger. *Physics*, 5 [12] 384 (1934)
- 3) 菅野正雄. 応用物理, 10 [1] 15 (1941); 電気学会誌, 60 [6] 252 (1941)
- 4) 高木通泰. 東芝レビュー, 5 [4-5] (1950); 岸井 貴. 窯協, 66 [1] 11 (1958)
- 5) 荒川 泓. 応用物理 24 [6] 237 (1955); 山口宗五郎, 荒川 泓. 昭和29年電気三学会連合大会講演集 電気機器 p. 248
- 6) H.R. Lillie. *J. Am. Ceram. Soc.*, 37 [3] 111 (1954)
- 7) J.H. Partridge, "Glass-to-Metal Seals" p. 3~38 (1949)
- 8) M.M. Frocht, "Photoelasticity" vol. 1, vol. 2; 辻二郎, 河田幸三, "光弾性実験法"
- 9) F.W. Martin. *J. Am. Ceram. Soc.*, 33[7] 224 (1950)

(8/25/60 受付)