また、反応速度常数の温度依存性を検討したところ、Arrhenius 式が $10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で成立し、活性化エネルギーとして 7.87 kcal/mol をえた。さらに、珪酸ソーダ液の珪曹、濃度および珪弗化ソーダの粒度にかかわらず、反応率が 80% 前後になったところで反応は実質上終熄をみるが、この理由は、この段階に達するとゲル体内の珪酸ソーダが、主として反応生成 NaF の塩類効果によって凝析し、溶存できなくなることによると考察した。

附記、本研究に御協力された中央大学、安藤淳平教授および同学生、山村真、石井武両氏に深く謝意を表する。

文 献

- 1) 久保田、稲垣. 日本ゴム協会誌, **26**, 89-104 (1953)
- 2) K. Frank und Dietzel. Ger. Pat., 506,928 (1928); R.C. Merrill. I.E.C., **41**, 337-45 (1949)
- 3) 藤井、石堂. 日本特許, 221,302; 233,471; U.S.P., 2921,357 (1960); Brit. Pat., 786,997 (1957)
- 4) W. Siegel. Z. Angew. Chem., **42**, 856 (1929)
- 5) 藤井、石堂. 東工試報告に投稿中
- 6) J.H. Simons. Fluorin Chemistry, vol. 1, p. 132 (1950), Acad. Press Inc. (New York)
- 7) I.G. Ryss, M.M. Slutskaya. J. Phy. Chem. (U.S.S.R.), **14**, 701-707 (1940); Chem. Abst., **35**, 3880 (1941)
- 8) 浮橋寛. 旭ガラス研究報告, **6**, 88-105 (1956)

(9/22/60 受付)

三重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部に関する研究

山 口 宗 五 郎

(富士電機株式会社研究部)

Stresses in the Glass Cylinders Sealing a Set of Three Concentric Metal Tubes.

Stresses in Cylindrical Glass to Metal Seals.

By Sōgoro YAMAGUCHI

(Research Department, Fuji Electric Co., Kawasaki, near Tokyo)

Abstract

In previous report the author has derived an equation for calculating the principal stresses in a glass seal between two metal tubes, which is available for the design of glass-to-metal seals.

In this paper the theory is extended to the case of the glass sealing between three concentric metal tubes, which covers the wide range of the expansion coefficient of glass and metal.

The experimental background of the theory has been furnished by photoelastic study.

The results have proved that it is desirable to use an external metal cylinder of large thermal expansion in order to give a large compression in glass, although a large difference in the expansion of glass and internal metal cylinder should be avoided because of the shearing stress.

The stress calculated from the thermal expansion of sealing members are large compared with the observed values measured by photoelasticity. This difference may be attributed to the "end effect" of short cylinders, although the theory is practically useful for the design of the seals of this type.

I. 緒 言

前報¹⁾では Unmatched seal による二重中空金属円筒間ガラス封入部の内部応力分布をもとめる理論式を導き、光弾性実験法による応力解析結果と比較、検討を行なったが、電気機器の気密絶縁封入においては機器の大型化に伴い、さらに三重金属円筒間ガラス封入構造が採用されるようになり、ガラス封入部の設計上ガラス中の内部応力を理論的に解析する必要を生じてきた。

そこで本報は三重金属円筒間ガラス封入部に関する応力分布の理論式を導くと同時に、熱膨脹係数の異なるガ

ラスおよび金属を用いてガラス封入部を製作し、これについて光弾性実験法による応力解析を行ない理論式による計算値と比較し検討を行なった。その結果を報告する。

II. 三重金属円筒間ガラス封入部の応力分布式

図—1 に示すガラス-金属封入部の応力分布式は前報¹⁾の二重中空金属円筒間ガラス封入部を拡張したもので、ガラス中に金属線を封入した場合の理論的応力計算式の誘導にあたって H. Poritzky²⁾ が用いたと同様の仮定を

おくことにより導くことができる。

図一で1は内部金属円筒, 2は内部ガラス, 3は中間金属円筒, 4は外部ガラス, 5は外部金属円筒と呼び, suffix 1, 2, 3, 4, 5を内部金属円筒, 内部ガラス, 中間金属円筒, 外部ガラス, 外部金属円筒に関する量を表わすものとする。円筒座標 r, θ, z を用い歪成分を e_r, e_θ, e_z , 内部応力を P_r, P_θ, P_z , ヤング率を E , ポアソン比を σ (金属とガラスは同一とする) とし, H. Poritzky²⁾ と同様の仮定をおけば円筒の内部応力を表わす式より各金属およびガラスに対して次の式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \text{金属 1; } P_{r1} &= A_1(1-f^2/r^2), \\ P_{\theta 1} &= A_1(1+f^2/r^2), P_{z1} = C_1 \\ \text{ガラス 2; } P_{r2} &= A_2-B_2/r^2, \\ P_{\theta 2} &= A_2+B_2/r^2, P_{z2} = C_2 \\ \text{金属 3; } P_{r3} &= A_3-B_3/r^2, \\ P_{\theta 3} &= A_3+B_3/r^2, P_{z3} = C_3 \\ \text{ガラス 4; } P_{r4} &= A_4-B_4/r^2, \\ P_{\theta 4} &= A_4+B_4/r^2, P_{z4} = C_4 \\ \text{金属 5; } P_{r5} &= A_5(1-e^2/r^2), \\ P_{\theta 5} &= A_5(1+e^2/r^2), P_{z5} = C_5 \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで A, B, C は常数である。次にフックの法則

$$\left. \begin{aligned} e_r &= \frac{1}{E} [P_r - \sigma(P_\theta + P_z)] + \delta \\ e_\theta &= \frac{1}{E} [P_\theta - \sigma(P_z + P_r)] + \delta \\ e_z &= \frac{1}{E} [P_z - \sigma(P_r + P_\theta)] + \delta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

を用いてガラスと金属との境界面 $r=a, r=b, r=c, r=d$ で応力が平衡で滑りがないう条件および z 軸に垂直な任意断面での z 成分の応力の和がゼロとする条件

$$\left. \begin{aligned} r=a \text{ で } P_{r1} &= P_{r2} & e_{\theta 1} &= e_{\theta 2} & e_{z1} &= e_{z2} \\ r=b \text{ で } P_{r2} &= P_{r3} & e_{\theta 2} &= e_{\theta 3} & e_{z2} &= e_{z3} \\ r=c \text{ で } P_{r3} &= P_{r4} & e_{\theta 3} &= e_{\theta 4} & e_{z3} &= e_{z4} \\ r=d \text{ で } P_{r4} &= P_{r5} & e_{\theta 4} &= e_{\theta 5} & e_{z4} &= e_{z5} \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\int_f^a P_{z1} \cdot 2\pi r dr + \int_a^b P_{z2} \cdot 2\pi r dr + \int_b^c P_{z3} \cdot 2\pi r dr + \int_c^d P_{z4} \cdot 2\pi r dr + \int_d^e P_{z5} \cdot 2\pi r dr = 0$$

より常数 A, B, C を求める。なおここで δ はガラスおよび金属の与えられる温度変化に対する単位長さあたりの伸長量を表わす。

そこで

$$\begin{aligned} \frac{f^2+a^2(1-2\sigma)}{E_1(a^2-f^2)} - \frac{(1-2\sigma)}{E_2} v &= \\ -\frac{1}{a^2} \left\{ \frac{f^2+a^2(1-2\sigma)}{E_1(a^2-f^2)} + \frac{1}{E_2} \right\} &= w \\ \frac{c^2+b^2(1-2\sigma)}{E_3(c^2-b^2)} + \frac{(1-2\sigma)}{E_2} t &= \\ -\frac{1}{b^2} \left\{ \frac{c^2+b^2(1-2\sigma)}{E_3(c^2-b^2)} - \frac{1}{E_2} \right\} &= s \\ \frac{2(1-\sigma)}{E_3(c^2-b^2)} &= u \\ \frac{b^2+c^2(1-2\sigma)}{E_3(c^2-b^2)} - \frac{(1-2\sigma)}{E_4} h &= \\ -\frac{1}{c^2} \left\{ \frac{b^2+c^2(1-2\sigma)}{E_3(c^2-b^2)} + \frac{1}{E_4} \right\} &= i \\ \frac{e^2+d^2(1-2\sigma)}{E_5(e^2-d^2)} + \frac{(1-2\sigma)}{E_4} j &= \\ -\frac{1}{d^2} \left\{ \frac{e^2+d^2(1-2\sigma)}{E_5(e^2-d^2)} - \frac{1}{E_4} \right\} &= k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_5(e^2-d^2) + E_4(d^2-c^2) + E_3(c^2-b^2) + E_2(b^2-a^2) \\ + E_1(a^2-f^2) &= p \\ E_4 \cdot E_5(e^2-d^2) &= q \\ E_4 \cdot E_3(c^2-b^2) + E_4 \cdot E_2(b^2-a^2) + E_4 \cdot E_1(a^2-f^2) &= l \\ E_4 \cdot E_2(b^2-a^2) + E_4 \cdot E_1(a^2-f^2) &= m \\ E_4 \cdot E_1(a^2-f^2) &= n \end{aligned}$$

とおけばガラス 2, 4 中の半径方向, 円周方向および軸方向の応力 P_r, P_θ, P_z は次の式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} P_{r2} &= \frac{(w+v/r^2)\{u(c^2i+h)(\delta_5-\delta_4)-u(c^2k+j)(\delta_4-\delta_3) \\ &\quad - (hk-ij)(\delta_3-\delta_2) \\ &\quad + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)\}}{(vs-tw)(hk-ij)} \\ &\quad + \frac{\{u^2(j+c^2k)(1-b^2/r^2) + (hk-ij)(s+t/r^2)\}(\delta_2-\delta_1)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \\ P_{\theta 2} &= \frac{(w-v/r^2)\{u(c^2i+h)(\delta_5-\delta_4)-u(c^2k+j)(\delta_4-\delta_3) \\ &\quad - (hk-ij)(\delta_3-\delta_2)\}}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \\ &\quad + \frac{\{u^2(j+c^2k)(1+b^2/r^2) + (hk-ij)(s-t/r^2)\}(\delta_2-\delta_1)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \\ P_{z2} &= \left[\frac{E_2 \cdot q}{E_4 \cdot p} \right. \\ &\quad + \frac{2\sigma uw(h+c^2i)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \left. \right] (\delta_5-\delta_4) \\ &\quad - \left[\frac{E_2 \cdot l}{E_4 \cdot p} - E_2 \right. \\ &\quad + \frac{2\sigma uw(j+c^2k)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \left. \right] (\delta_4-\delta_3) \\ &\quad - \left[\frac{E_2 \cdot m}{E_4 \cdot p} - E_2 \right. \\ &\quad + \frac{2\sigma w(hk-ij)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \left. \right] (\delta_3-\delta_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \left[\frac{E_2}{E_4} \cdot \frac{n}{p} \right. \\
& \quad \left. - \frac{2 \sigma \{u^2(j+c^2k) + s(hk-ij)\}}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \right] (\delta_2 - \delta_1) \\
P_r &= \frac{\{u^2(v+b^2w)(1-c^2/r^2) - (vs-tw)(i+h/r^2)\}(\delta_5 - \delta_4)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \\
& + \frac{(k+j/r^2)\{(vs-tw)(\delta_4 - \delta_3) - u(v+b^2w)(\delta_3 - \delta_2)\}}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \\
& + \frac{u(t+b^2s)(\delta_2 - \delta_1)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \\
P_{\theta} &= \frac{\{u^2(v+b^2w)(1+c^2/r^2) - (vs-tw)(i-h/r^2)\}(\delta_5 - \delta_4)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \\
& + \frac{(k-j/r^2)\{(vs-tw)(\delta_4 - \delta_3) - u(v+b^2w)(\delta_3 - \delta_2)\}}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \\
& + \frac{u(t+b^2s)(\delta_2 - \delta_1)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \\
P_{z_4} &= \left[\frac{q}{p} \right. \\
& + \frac{2 \sigma \{u^2(v+b^2w) - i(vs-tw)\}}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \left. \right] (\delta_5 - \delta_4) \\
& - \left[\frac{l}{p} \right. \\
& \quad \left. - \frac{2 \sigma k(vs-tw)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \right] (\delta_4 - \delta_3) \\
& - \left[\frac{m}{p} \right. \\
& \quad \left. + \frac{2 \sigma ku(v+b^2w)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \right] (\delta_3 - \delta_2) \\
& - \left[\frac{n}{p} \right. \\
& \quad \left. - \frac{2 \sigma ku(t+b^2s)}{(vs-tw)(hk-ij) + u^2(v+b^2w)(j+c^2k)} \right] (\delta_2 - \delta_1) \\
& \quad (4)
\end{aligned}$$

(4) 式で各 P_r , P_{θ} , P_z の符号が正の場合は張力, 負の場合は圧縮力となる。

III. 光弾性実験法による応力の測定

(1) 試料 II で理論的に導いた応力計算式(4)を実験的に検討するための光弾性実験試料を製作するにあたり, まず問題となるのは金属の選択であるが, 著者は文献^{3), 4), 5)} および前報¹⁾ の実験結果を参考にし, ガラス内部に圧縮力を与えることができるような熱膨脹特性を持った外部金属円筒, 中間金属円筒および内部金属円筒を選び, その熱膨脹曲線を図-2に示した。なおここで使用したガラスの熱膨脹曲線も併せ記入した。

図-2に示す熱膨脹曲線のうち M-A は外部金属円筒に, M-B は中間金属円筒及び内部金属円筒に使用し, 金属はかえらないで一定とし, ガラス内部に圧縮力を生じさせるという観点より金属 M-A より小さい熱膨脹率でしかも金属 M-B に比較的近い熱膨脹特性を示すガラス4種類を用いることにより, ガラスと金属の組合わせの異なる試料3種類を製作した。このようにガラスと金属

Fig. 2. Thermal expansion curve.

の組合わせの異なる試料について応力実測値と理論的計算値とを比較することは理論式の検討上有効であると考えられるため表-1に各試料のガラスと金属の組合わせを示す。

Table 1. Combination of glasses and metals.

Notation of Specimen	Sealing members				
	1	2	3	4	5
No. 1	M-B	G 2	M-B	G 1	M-A
No. 2	M-B	G 4	M-B	G 3	M-A
No. 3, No. 4, No. 5	M-B	G 3	M-B	G 2	M-A

次に試料の大きさは光弾性実験の関係より $2f=2.2$ cm, $2a=3.5$ cm, $2b=6.5$ cm, $2c=6.7$ cm, $2d=8.8$ cm, $2e=11.3$ cm, 厚さは 1.5 cm としたが, この場合中間金属円筒の肉厚が 1 mm で薄いためにガラスと金属の熱膨脹率の差に対応して弾性的に歪力を生じないで金属が塑性変形することが考えられる⁶⁾。この点を検討するため中間金属円筒の肉厚を 2 mm および 0.2 mm とした試料 No. 4, No. 5 を製作した。この場合の中間金属の寸法は No. 4 は $2b=6.5$ cm, $2c=6.9$ cm, No. 5 は $2b=6.5$ cm, $2c=6.54$ cm で内部および外部金属円筒の寸法は他の試料と同じで, ガラスと金属の組合わせは表-1に示してある。次に使用したガラスの徐冷点は糸引き法⁷⁾により粘性係数を求め, $10^{13.4}$ ポアズになる温度を徐冷点とし, G 1 では 430°C, G 2 は 460°C, G 3 は 480°C, G 4 は 520°C が徐冷点である。また金属の前処理および試料製作時の徐冷方法は前報¹⁾と同様に行なったので省略する。

(2) 装置と測定結果 試料 No. 1, No. 2, No. 3, No. 4, No. 5 の内部応力の実測には光弾性実験装置を使用した⁸⁾が, 装置と測定方法は前報¹⁾と同様であるので

省略して、測定結果のみを記す。

まず単色縞写真の一例として No. 1 の結果を図-3 に示す。

Fig. 3. Stress pattern of No. 1.

試料 No. 1 の単色縞写真は内部ガラスでは全般的に暗く最大剪断応力は非常に小さいこと、また外部ガラスでは外部金属円筒より中間金属円筒に進むにつれて 3, 4, 5 次までの縞が観察され、最大剪断応力は非常に大きいことがわかる。他の試料についても単色縞写真よりガラス中の応力を大体知ることができるが、光弾性実験に適する試料を製作することが相当困難であって、期待するような結果が得られなかったが、各試料について

Babinet's Compensator を用いて行なった応力解析結果を図-4 に示す。なお後述の実験結果と計算値との比較のため II. で導いた (4) 式による計算値を併せ記入した。

IV. 理論式によるガラス封入部の応力計算

(1) 計算値 本実験で製作した試料 5 種類に関し て理論式 (4) を用いて常温におけるガラス中の応力を計算する。

見掛の固着温度⁹⁾を徐冷点として、ガラス封入部を徐冷点より室温まで冷却した場合、ガラスと金属の熱膨脹率の差に対応する応力を生じるとする。ここで用いた内部ガラスと外部ガラスの徐冷点が異なり、各試料とも外部ガラスの徐冷点は内部ガラスより低いために内部ガラスが弾性変形し、外部ガラスが粘性流動を生じするという温度範囲が存在することになる。従って外部ガラス中の応力を計算する場合の $(\delta_5 - \delta_4)$, $(\delta_4 - \delta_3)$, $(\delta_3 - \delta_2)$, $(\delta_2 - \delta_1)$ の値は外部ガラスの徐冷点を見掛の固着温度として図-2 よりもとめ (4) 式より P_{r1} , $P_{\theta1}$, P_{z1} を計算すればよい。また内部ガラス中の

応力を計算する場合 $(\delta_5 - \delta_4)$, $(\delta_4 - \delta_3)$ の値は外部ガラスの徐冷点を $(\delta_3 - \delta_2)$, $(\delta_2 - \delta_1)$ の値は内部ガラスの徐冷点を、それぞれ見掛の固着温度として P_{r2} , $P_{\theta2}$, P_{z2} を計算すればよい。実際には常温におけるガラス中の応力計算値は図-2 よりわかるように転移点以上の温度範

$|P_{\theta2} - P_{r2}|$ calc.; Calculated stress in internal glass.
 $|P_{\theta4} - P_{r4}|$ calc.; Calculated stress in external glass.
 $|P_{\theta2} - P_{r2}|$ exp.; Experimental stress in internal glass.
 $|P_{\theta4} - P_{r4}|$ exp.; Experimental stress in external glass.

Fig. 4. The distribution curve of principal stress difference in glass sealed.

皿でガラスと金属の熱膨脹曲線はほぼ平行しているため見掛の固着温度が転移点以上の温度範囲で変化しても大きな影響は見られない。

次にガラスのヤング率は各ガラス同一の値を用い、またポアソン比は金属およびガラスは同一として次の値を使用する。

$$E_2, E_4 = 0.6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_1, E_3 = 1.47 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2*$$

$$E_5 = 2.10 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2*$$

$$\sigma = 0.3$$

*Espe, Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik.
p. 223, 347 より引用した。

以上の各数値を用いて各試料について(4)式より常温におけるガラス中の応力を計算して図-5に示す。

(2) 計算値による考察 (4)式による計算値は各試料とも常温においてガラス中に相当大きい圧縮力を生じていることを示している。これは $(\delta_5 - \delta_4)$ の値が大

きく影響していること、また外部金属円筒の肉厚が1.25 cmで厚いことによるものである。試料 No. 1 については $P_{r2}, P_{\theta 2}$ がいずれも圧縮力で接近していて最大剪断応力 $(\tau_{\max} = |P_{\theta} - P_r|/2)$ が非常に小さい。これは図-2より内部ガラスと中間および内部金属円筒との熱膨脹曲線が徐冷点附近で接近していて $(\delta_3 - \delta_2), (\delta_2 - \delta_1)$ の値が小さいためで剪断応力をできるだけ小さくするという観点よりすれば良好な結果を示すものである。また試料 No. 1 では $P_{\theta 4}$ が $r=c$ で480 kg/cm²の圧縮力を示し、他の試料に比較して小さいのは $(\delta_5 - \delta_4)$ の値が小さいことによるもので、ガラス中に大きな圧縮力を与えて機械的強度、耐熱衝撃性を良好にするには $(\delta_5 - \delta_4)$ の値を十分大きくとる必要がある。次に試料 No. 2 は熱膨脹係数の小さいガラスを用いて $(\delta_5 - \delta_4)$ の値を大きくした場合で、主応力は相当大きくなっている。しかしここで問題になるのは $(\delta_2 - \delta_1)$ の値が大きく、内部ガラス中で特に最大剪断応力が大きくなり、これによるガラスの割れを考慮しなければならない。

しかし一般には縁端効果により実測値は計算値より小さいこと、および試料 No. 2 において剪断応力によるガラスの割れは認められなかったことより、一応安全であると考えられるがガラス封入部の設計上十分考慮すべき点である。次に試料 No. 3, No. 4, No. 5 はガラスと金属の組み合わせは同じで中間金属の肉厚を

1 mm, 2 mm, 0.2 mm と変えた場合で、全体に対する肉厚の変化は小さいので計算結果に大きな差はない。そしてこの試料は使用ガラスと中間および内部金属円筒の熱膨脹曲線が接近し、しかも $(\delta_3 - \delta_4)$ の値が大きいいため最大剪断応力は比較的小さく、主応力は大きな圧縮力を示し、計算上では試料 No. 1, No. 2 より良好な結果を示している。

以上、本実験試料のような Unmatched type により気密性、耐熱衝撃性および機械的強度の優れたガラス封入部の設計にあたっては、外部金属円筒には十分大きな熱膨脹係数の金属を使用し、ガラスと中間および内部金属円筒の熱膨脹係数を合致させることにより良好なガラス封入部を得ることができる。

V. 実験結果と計算値との比較

光弾性実験による主応力差の実測値と (4) 式による計算結果を図-4 に示したが、 P_z は今の場合光弾性実験では測定できないし、また実用上電気機器の真空封入における気密漏洩の原因はほとんど Z 軸方向の応力には無関係と考えられるので $P_r, P_\theta, |P_\theta - P_r|$ について検討する。試料 No. 1, No. 2 では実測値は計算値よりやや小さい値を示しているが、応力分布曲線の傾向は一致している。また中間金属円筒の肉厚を変えた試料 No. 3, No. 4, No. 5 については No. 3 の $|P_\theta - P_r|$ の実測値が No. 4, No. 5 とやや異なっているが、試料製作上の技術的困難からみてやむを得ないと判断される程度のもので、全般的にみて中間金属円筒の肉厚が変わっても内部応力はほとんど近似した値を示すということができ、本実験試料のようなガラス封入部にあっては、中間金属円筒が 0.2~2 mm の範囲の肉厚の変化では金属の塑性変形はほとんど考慮する必要はないと考えられる。

以上各試料の応力実測値と計算値を比較した場合、計算値は実測値より相当大きい値を示すが、これは前報¹⁾において述べたように実験試料が光弾性実験の関係上厚さ 1.5 cm で (厚さと直径との比 1:7.5) 理論式を導

くにあたって必要とされた軸方向無限長条件が十分には満たされないためであり、これによる縁端効果はこれまでの各種実験^{1), 9)} の場合においてもいずれも実験値は無限長条件のもとに導いた理論式よりも小さくなっている。そして図-4 に示すような計算値と実測値との偏差があっても著者の目的が安全なガラス封入を行なうことである以上理論式により検討したガラスはよりきびしい条件を満たしているわけであり、理論式の有効性を妨げるものではないと考えてよからう。

VI. 結 論

内部金属円筒、中間金属円筒および外部金属円筒との間にガラスを封入する場合、ガラス中に生じる応力を計算するための理論式を導いた。この式の有効性を確認するためにガラスと金属の組合わせの異なる試料について光弾性実験法による応力解析を行ない、理論式による計算結果と比較した。その結果中間金属円筒の肉厚の変化による金属の塑性変形は本実験試料に関してはほとんど考慮する必要はない。そして実験値は理論的計算値より小さな値を示すが、これは円筒形封入部の縁端効果による偏差と考えられることより、本報で導いた弾性応力計算式は三重金属円筒間ガラス封入部の設計上十分有効である。

附記；本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、御協力に対して深く謝意を表する。

文 献

- 1) 山口宗五郎, 窯協, 69 [3] 87-91 (1961)
- 2) H. Poritzky. *Physics*, 5 [12] 406 (1934)
- 3) J.H. Partridge. "Glass-to-metal seals" p. 3~38 (1949)
- 4) 宮城精吉. "ガラスと金属の熔封" p. 34~45 (1942)
- 5) A.W. Hall, E.E. Burger. *Physics*, 5 [12] 384 (1934)
- 6) 高木通泰. 東芝レビュー, 5 [4-5] 149 (1950)
- 岸井貫. 窯協, 66 [745] 11 (1958)
- 7) H.R. Lillie. *J. Am. Ceram. Soc.*, 37 [3] 111 (1954)
- 8) F.W. Martin. *J. Am. Ceram. Soc.*, 33 [7] 224 (1950)
- 9) 荒川泓. 応用物理, 24 [6] 237 (1955)

(10/5/60 受付)

低温 (900°C 以下) におけるカオリン鉱物 からのムライトの形成

奥田 博・加藤修三・伊賀武推

(名古屋工業技術試験所)

Formation of Mullite from Kaolin Minerals at the Temperatures Lower than 900°C

By Hirōshi OKUDA, Shuzo KATO and Takeo IGA