下するが、これは液相生成温度と関係があるようである。

⑤ 荷重軟化点の測定法として現在の標準法には問題があり、特に高荷重値（たとえば 5 kg/cm^2 ）の採用について検討する余地がある。

文 献

- 1) E. Cramer, *Tonind.-Ztg.*, **25**, 706 (1901).
- 2) J.W. Mellor, B.F. Moove, *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, **15**, 117 (1916).
- 3) K. Endell, *Ber. deut. keram. Ges.*, **3**, 4 (1922).
- 4) K. Konopicky, W. Lohre, *Stahl u. Eisen*, **76** [12] 749-56 (1956).
- 5) 田所, 須賀, 窯協, **49** [587] 655-67 (1941).
- 6) W. Heiligenstaedt, *Stahl u. Eisen*, **74** [7] 402-406 (1954).
- 7) R. Rasch, *Ber. deut. keram. Ges.*, **41** [1] 21-26 (1964).
- 8) S. Solacolu, *ibid.*, **37** [6] 266-76 (1960).
- 9) 測定誤差および補正については多数の報文がある。

たとえば,

F.M. Clews et al., *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, **39**, 217-24 (1937)

J. Baron, *Bull. Soc. Franc. Ceram.*, No. 14, 2-14 (1952)

和田, 大庭, 耐火物, 76 集, 6-8 (1964)

K. Konopicky, *Ber. deut. keram. Ges.*, **41** [1] 27-37 (1964).

10) たとえば

大庭, 杉田, 島田, 耐火物, 76 集, 8-13 (1964)

W.F. Ford et al., *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, **66** [8] 581 (1961).

11) J.R. Rait, *Basic Refractories*, p. 266-91 (1950).

12) R.E. Birch, *J. Am. Ceram. Soc.*, **24** [9] 271-80 (1941).

13) E.B. Allison et al., *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, **58** [9] 495-531 (1959).

謝辞: 本研究に当り御指導御支援を頂いた八幡製鉄所技術研究所副所長工学博士太宰三郎氏に深甚の謝意を表する。

(1/16/65 受付)

圧縮応力を持つハーメチックシール中の応力分布

鮫 島 幸 治・西 山 雅 男

(新日本電気株式会社)

Stress Distributions in Hermetic Compression Seals

By

Yukiharu SAMESHIMA and Masao NISHIYAMA

(New Nippon Electric Co., Ltd.)

The three component compressed glass-to-metal seal is one of typical hermetic seals. Generally, the outer rings have considerably greater thermal expansion than the glass, so that compression is produced in the glass. The thermal expansion of the central rod usually matches with that of the glass, but this is not always necessary under certain conditions. In many cases, such seals have considerably shorter axial length than diameter.

This study was carried out to find means of stress analysis suitable for such seals and to ascertain the agreement between the calculation and the observation. Radial and circumferential stresses were calculated assuming the axial stress is unrestrictedly relaxed to the both end of the seals, then compared with the result of photoelastic measurements on several kinds of seals. This analysis was proved to be applicable to the stress analysis of hermetic seals with considerably short axial length except special cases.

[Received Feb. 1, 1965]

I. ま え が き

ハーメチックシールはトランジスター, ダイオード, 光導電セルなどのステムとして, また各種計器類および冷凍圧縮機などの電気導入端子として, 広く用いられている。本来, ハーメチックシールの語意は気密封止という意味であるが, ここでは慣用的に用いられているように, このような端子体に限定して用いることにする。これらはいずれも容器内部と外部の雰囲気気を完全に遮断し, しかも, 電気的には完全な接続を行なうためのものである。従って, 技術的には気体の洩れを生じないよう

にし, かつ充分な機械的強度を持たせることが最大の問題である。ハーメチックシールには, 管球工業におけると同様に, 各種の材料を使用することが可能であるが, これらは, 金属とガラスの熱膨脹率の差によって生ずるトラブルを如何にして避けるかという点で, 2つのタイプに分類できる。すなわち, マッチングシールとコンプレッションシールである。前者は熱膨脹率の差の小さい材料の組み合わせによるものである。後者は, ガラスは張力には弱いが圧力には相当強いという性質を利用して, 一番外側の金属部品によってガラスに均一な圧力を加え

て、本来ならば膨脹差、機械的衝撃、熱衝撃などによって生ずる張力を打消し、強度を向上させ、気密の確実さを高めたものである。

コンプレッションシールは一般に三重円筒構造が基本的な形であり、金属製外環によってガラスとその中心にある導入線（芯棒）とを締めつけて、充分な圧力がガラス部分に加えられるように、材料の熱膨脹率と形状を考慮して設計されている。三重円筒構造封止体の応力解析については、すでにいくつかの報告^{1),2)}がみられるが、これらはいずれも試料が軸方向に無限に長いと仮定していた。実際に用いられるハーメチックシールは軸方向に非常に短い偏平なものが多く、このような試料の応力分布の計算法、あるいは計算値と実測値がどの程度一致するかという点に関しては、いまだ明らかにされていない。本実験はこれらの点を明らかにし、コンプレッションシールの設計に関する資料を得るために行なったものである。

II. 応力分布の計算

1. 記号

a, b, c はそれぞれ芯棒の半径、ガラスの外半径および外環の外半径とする。 E, ν, α はそれぞれヤング率、ポアソン比および熱膨脹率とし、芯棒、ガラス、外環の順に 1, 2, 3 の添字をつける。 P は界面の接触圧力とし、 P_{12} は芯棒とガラスの接触圧力を、 P_{23} はガラスと外環の接触圧力を表わす。 δ は熱膨脹率の差によって接触部に生ずる異種材料間の半径の差を示し、添字は上と同様に使いわけ。 T_{set} はガラスの固着温度、 T_{room} は室温を表わす。 σ_r, σ_θ はそれぞれ半径方向、円周方向の主応力を、 $\tau_{r\theta}$ はこれらに平行な平面内の最大剪断応力を、 σ_z は軸方向の主応力を表わす。

2. 応力分布の計算

有限の長さの三重円筒構造封止体のガラス部分の応力の三次元的な正確な解析は、非常に困難と考えられるが、軸方向の応力、ひずみ、ないしは変形について次の三通りの単純化された仮定のうち、いずれかをを用いれば、二次元的に解くことができる。

(1) 軸に垂直な面は常に平面を保ち、外環の締めつけを受けたガラスは、軸方向応力 σ_z が 0 になるまで、自由に両端面に向いて変形できる。

(2) ガラスは、外環の締めつけを受けても軸方向には全く変形することができない。

(3) 試料は軸方向に無限に長いと考え、軸に垂直な面は応力の有無にかかわらず常に平面を保ち、外環、ガラスおよび芯棒内の軸方向応力 σ_z は、これらを軸に垂直な面内で積分したとき 0 になるような釣り合い状態にあり、ガラス部分の軸方向応力およびひずみは任意の点で一定である³⁾。従来行なわれた解析^{1),2)}はこの場合に相

当する。

本報では軸方向に短い場合を問題にしているので、ガラスの軸方向応力は、融着部近傍以外では比較的自由に両端面に逃げられると考えてよいと思う。あるいは両端面では軸方向応力が 0 であり、端面間の距離が短いから内部の軸方向応力も十分小さく、0 で近似されうると考えてよい。そこで、一応 (1) の仮定に従って計算してみる。図-1 はこの仮定をわかりやすく図示したものである。すなわち、ガラスの固着温度では 3 つの部品の軸方向の長さ(高さ)はそろっており、熱膨脹率は外環、ガラス、芯棒の順に小さくなっているとすれば、室温における軸方向のガラスの変形は、おそらく、図-1(a) のようになっていると考えられる。これを図-1(b) のように近似して、半径方向および円周方向の応力を求めようとするものである。ガラスと芯棒の熱膨脹率の相対的大小関係が逆になっている場合は、これから容易に類推できるから省略する。

Fig. 1. Schematic representations showing axial strain.

(a) strain supposed to be real.

(b) strain assumed in calculation.

Axial lengths of three components are assumed to be equal at high temperature.

このように仮定すれば、ガラス部分の応力分布は、内外圧の働らく厚肉円筒⁴⁾と同じ形になると考えられるから、半径方向主応力、円周方向主応力およびこの両者に平行な平面内の最大剪断応力は

$$\sigma_r = \frac{a^2 P_{12} - b^2 P_{23}}{b^2 - a^2} - \frac{(P_{12} - P_{23}) a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 P_{12} - b^2 P_{23}}{b^2 - a^2} + \frac{(P_{12} - P_{23}) a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2} (\sigma_\theta - \sigma_r) \quad (3)$$

ここで、 r は中心からの距離を表わす。また、 P_{12} および P_{23} は、内外圧を受ける厚肉円筒の取扱いの場合の慣習に従って、圧力を正（一般に流体圧を考える場合が多いから）にとる。また、物体内の応力は張力を正に、圧縮力を負にとるのが普通であるから、 σ_r と σ_θ は、これ

に従うことにする。従って、内圧（正）を受ける厚肉円筒の内側の表面では、 σ_r は圧縮力であるから負に、 σ_θ は張力であるから正になり、 $r=a$ で $\sigma_r = -P_{12}$ となる。外圧（正）を受ける場合には、厚肉円筒の外側表面では、 σ_r および σ_θ とも圧縮力であるから、いずれも負となり、 $r=b$ で $\sigma_r = -P_{23}$ となる。便宜上、このような規約に従って計算を進めることにする。

軸方向主応力 $\sigma_z=0$ すなわち、平面応力状態にある場合には、ガラス部分の任意の点の半径方向の変位 u と、内外接触圧力との関係⁴⁾は、

$$u_2 = \frac{\nu_2}{E_2} \left[\frac{\left(\frac{1}{\nu_2} - 1\right)(a^2 P_{12} - b^2 P_{23}) r}{b^2 - a^2} + \frac{\left(\frac{1}{\nu_2} + 1\right) b^2 a^2 (P_{12} - P_{23})}{(b^2 - a^2) r} \right] \dots\dots\dots (4)$$

$r=c$ で $\sigma_r=0$, $r=0$ で応力は有限であると仮定すれば、

$$P_{23} = \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)(T_{\text{set}} - T_{\text{room}}) + \frac{2a}{E_2(b^2 - a^2)} \cdot \frac{a(\alpha_2 - \alpha_1)(T_{\text{set}} - T_{\text{room}})}{\frac{1}{E_2} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \nu_2 \right) + \frac{1 - \nu_1}{E_1}}}{\frac{1}{E_3} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_3 \right) + \frac{1}{E_2} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \nu_2 \right) - \frac{4a^2 b^2}{\{E_2(b^2 - a^2)\}^2 \left\{ \frac{1}{E_2} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \nu_2 \right) + \frac{1 - \nu_1}{E_1} \right\}}} \dots\dots\dots (10)$$

(9), (10) を (1), (2) に代入すると、 σ_r , σ_θ および $\tau_{r\theta}$ が得られる。

III. 光弾性による応力測定

1. 試料

外環には炭素鋼を、芯棒には Fe/Ni, Fe/Cr, コパールまたは炭素鋼のいずれかを使用し、ガラスにはソーダライム系の軟質ガラスを使用した。これらの性質は表-1に示すとおりである。芯棒の材質を使いわけた理由は、封止体構成材料の熱膨脹率の関係が

- (1) 外環>ガラス≈芯棒
- (2) 外環>ガラス>芯棒
- (3) 外環>ガラス<芯棒

の3つの場合について調べるためである。本実験の場合、Fe/Ni と Fe/Cr は (1) のタイプ、コパールは (2) のタイプ、炭素鋼は (3) のタイプになる。最も広く実用されているのは (1) のタイプである。封止は中性雰囲気

Table 1. Properties of Materials used

	Glass	Carbon steel	Fe/Ni (50%)	Fe/Cr (28%)	Kovar
Thermal exp. (cm/cm/°C)	95×10^{-7} (30~500)	130×10^{-7} (30~500)	95×10^{-7} (30~500)	108×10^{-7} (30~500)	61.5×10^{-7} (30~500)
Inflection Pt. (°C)	530	—	—	—	435
Yielding Pt. (°C)	670	—	—	—	—
Young's modulus (kg/mm ²)	6500	20000	16800	20500	14000
	Nippon Electric Glass Co., Ltd. Code No. SK	IIS. S25C	Sumi-tomo Electric Mfg. Ltd.	Sumi-tomo Special Metal Co., Ltd.	Sumi-tomo Special Metal Co., Ltd.

芯棒と外環については

$$u_1 = \frac{\nu_1}{E_1} \left\{ \frac{\left(\frac{1}{\nu_1} - 1\right)(-a^2 P_{12}) r}{a^2} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$u_3 = \frac{\nu_3}{E_3} \left\{ \frac{\left(\frac{1}{\nu_3} - 1\right) b^2 P_{23} r}{c^2 - b^2} + \frac{\left(\frac{1}{\nu_3} + 1\right) c^2 b^2 P_{23}}{(c^2 - b^2) r} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $r=a, b$ において、 σ_r および (4), (5), (6) 式の u にそれぞれ熱膨脹分を加えたものが連続であるという境界条件を用いれば、

$$a(\alpha_2 - \alpha_1)(T_{\text{set}} - T_{\text{room}}) = u_{2,r=a} - u_{1,r=a} \dots\dots\dots (7)$$

$$b(\alpha_3 - \alpha_2)(T_{\text{set}} - T_{\text{room}}) = u_{3,r=b} - u_{2,r=b} \dots\dots\dots (8)$$

であるから

$$P_{12} = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)(T_{\text{set}} - T_{\text{room}}) + \frac{2b^2}{E_2(b^2 - a^2)} P_{23}}{\frac{1}{E_2} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \nu_2 \right) + \frac{1 - \nu_1}{E_1}} \dots\dots\dots (9)$$

で行なつて、金属部品の酸化物がガラス中に溶解するのをできるだけ防止した。試料は充分アニールした後、両端面をきれいに研摩して使用した。ガラス部分の外径に対する軸方向の長さの比率は、大体 16~70% の範囲で試料を造ったが、これらの寸法は、個々のデータに記入する。

2. 応力測定法

光弾性では、主応力 σ_r , σ_θ を独立に測定することはむずかしいが、剪断応力 $\tau_{r\theta}$ は容易に測定できる。これらの間には $\tau_{r\theta} = (\sigma_\theta - \sigma_r)/2$ の関係があるから、本実験では $\tau_{r\theta}$ について計算値と実測値を比較した。測定は主としてバビネ補正器によつたが、円周方向の応力分布の対称性と整数縞次數の位置を確認する目的で、等色線の観測も行なった。同じ材質のガラスで成形した試験片に荷重を加えて検定した結果、ガラスの光弾性感度 (5461 Å) は 0.042 mm/kg であった。この値にもとづいて縞次數を応力に換算した。測定に際しては試料を光学系で充分拡大し、これにバビネ補正器を重ねて一点一点測定した。測定器の光学系および試料の配列は通常的光弾性技術に従っているから、説明は省略する。図-2 に応力の分布状態を示す光弾性写真の一例を示す。

IV. 計算値と実測値の比較結果

1. 剪断応力 $\tau_{r\theta}$ の比較結果

充分アニールされた試料について、計算値と実測値を比較した結果を図-3に示す。実線は II-2 に記述した式による計算値、×印は光弾性による実測値を示す。破

Fig. 2. Birefringence pattern showing stress distribution from outer ring (right side) to central rod (left side). (a) Fe/Ni central rod (b) carbon steel central rod.

線は試料が無限の長さを持っていると仮定した計算値で、比較のために記入したが、この計算法は文献^{1),2)}に記述されているので、ここでは特に説明しない。ガラスの固着温度の決定は、厳密に考えるとむずかしい問題であるが、ここでは一応転移点で近似できるものとした。ポアソン比はいずれも $0.3^{1),2),3)}$ として計算した。

2. 芯棒に穿孔した場合の応力変化

芯棒の部分までガラスが詰った二重円筒封止体は、通常“ウインドウシール”と呼ばれている。この場合には $\sigma_r = \sigma_\theta$ となり、従って光弾性的には応力が観測されなくなり、あたかも無歪のような状態を示す。ここで、三重円筒封止体の芯棒の中心にきり孔を貫通させ、この直径を少しずつ拡げてゆく場合を考えてみる。この際、外側から締めつけられている芯棒の中心に孔をあけていくと、中空円筒状の芯棒の圧縮に対する弾性変形による抵抗は減少していくから、これと同寸法の中実ガラス円筒

Fig. 3. Comparison of the calculated and the observed value of shearing stress. Full lines show the stress calculated assuming axial stress is equal zero, broken lines show the stress calculated assuming axial length of seal is indefinite and cross marks show the observed stress.

のそれが等しくなれば、“ウインドウシール”の場合と同様に、光弾性的に応力が観測されなくなる状態が得られるはずである。そこで、芯棒に Fe/Ni を使用した試

中実ガラス円筒に、
(4) 式を先と同様に
適用して、外側の変位と圧力が両式について等しいと置
けば、容易に求められる。すなわち、芯棒の中央に穿孔
することは、中実芯棒のヤング率が見掛け上、減少するの
と同じ効果になり、接触部圧力と変位は、一定の穿孔径
で、中空芯棒と中実ガラス円筒について、同時に等しく
なるはずである。この際、接触部より外側では“ウインド
ウシール”と全く同じ応力分布になるはずであるから、
この状態を解いたことになる。

3. 応力分布とクラックの形態の関係

本実験の試料のように、幾何学的に簡単な形態の場合
には、クラックの形態と、その原因となった応力との関
係は、かなり明確につかめるのではないかと考えられる
ので、応力の計算および実測を行なった試料に、熱サイ
クルを加えてクラックを発生させ、その形態を観察し
た。熱サイクルは、特にことわらない限り、室温から転
移点近くまで、約1時間程度の加熱と冷却をくりかえし
た。比較的ゆるやかな熱サイクルを加えた理由は、局部
的温度差をできるだけ避けるためである。実験の結果得
られた代表的形態のクラックを図-5に示す。

(1) 図-5(a) は $|\sigma_r| > |\sigma_\theta|$ で、共に圧力の場合であ
り、 σ_r と σ_θ に平行な平面内の最大剪断応力は両軸に
45° 傾くはずである。写真のクラックは、平面的には大
体この状態に近い。すなわち、比較的短かいクラックの
状態から推定して、クラックは、芯棒にかなり近い位置
から発達したものと思われるが、ここでは、クラックは
 σ_r と σ_θ に大体 45° 傾いている。つぎに、軸方向応力
を考えてみる。 $\sigma_z=0$ とすれば、三次元的にみた最大剪
断応力は、 σ_θ に平行で σ_r と σ_z に 45° 傾いた面に生
じ、その大きさは $\sigma_r/2$ となる。この場合、クラックの
面と芯棒との傾きからみて、三次元的にも大体最大剪断

Fig. 5. Typical cracks of seals. (a) Fan blade type crack, central rod is Fe/Ni. (b) Spiral crack with V shaped cross section, central rod is steel. (c) Circular disk type crack caused by sudden heating of central rod, central rod is Fe/Ni. (d) Radial crack caused by sudden heating of central rod. (e) Circular crack along outer ring, this type is frequently found in seals with thin walled outer rings.

応力面にクラックが発生していると考えてよさそうである。
なお、剪断応力は芯棒の位置で最も大きくなるはず
であるが、クラックは逆にここで消失している。この理
由は、 $\sigma_z=0$ と仮定すれば、三次元の最大剪断応力は
 $(\sigma_r - \sigma_z)/2 = \sigma_r/2$ であるが、実際には、 σ_z は界面近傍で
は、ある程度大きな圧力になっているため、この部分で
は、 $(\sigma_r - \sigma_z)/2$ の値が界面からはなれた部分より小さく
なっているためと思われる。

(2) 図-5(b) は $|\sigma_\theta| > |\sigma_r|$ で、共に圧力の場合であ
り、 σ_r と σ_θ に平行な平面内の最大剪断応力は両軸に
45° 傾く筈である。 $\sigma_z=0$ とすれば、三次元の最大剪断
応力は σ_r に平行で、他の2軸に 45° 傾く。この芯棒は
炭素鋼であり、ガラスよりかなり大きな熱膨脹率を持
っているから、融着部近傍では σ_z はかなり大きな圧力
になっており、 $|\sigma_\theta| > |\sigma_z| > |\sigma_r|$ と仮定すれば、最大剪断
応力は σ_z に平行で、他の2軸に 45° 傾き、 $|\sigma_z| > |\sigma_\theta| > |\sigma_r|$
と仮定すれば、最大剪断応力は σ_θ に平行で、他の2軸
に 45° 傾く、写真のクラックの状態からみて、この場合
は、後の場合になっていると推定される。クラックの断
面はV字形溝状になっているが、これは直交する共軛な
剪断応力によると考えられる。

(3) 図-5(c), (d) は、特に芯棒だけを急熱した場
合のクラックである。これらはそれぞれ、軸方向および
円周方向の張力によると考えられる。(c)に見られる同

心円状の模様は、クラックによる干渉縞で、この円板状クラックは表面と交っていない。

(4) 図-5(e)は外環の肉厚の薄い試料にしばしばみられるクラックの典型的なものである。この特徴は、外環の内周近くに環状また円弧状に発生し、内部に進行せず表面層にとどまる場合が多く、芯棒材質の影響もほとんど受けない。この写真の場合、半径および円周方向とも圧力であるが、融着部近傍のガラスは σ_z 方向に強く圧縮され、このため、図-6の矢印の部分に半径方向の張力が作用することによって考えられる。外環が厚い場合には、締めつけの力が大きく、従って、ガラスの中心部に向かって縮められる変位が大きくなることと、図に示したような外環のそりがなくなり、この種の張力が緩和されるために、このようなクラックが発生し難いと考えられる。われわれの経験では、この種のクラックは外環の外径と内径との比が大体1.2以下になると急に増加するように思われる。

Fig. 6. Explanation of causes for cracks shown in Fig. 5 (e)

V. 考察・結論

試料が軸方向に無限に長いと仮定した場合の三重円筒構造封止体の応力解析法は、すでに文献^{1),2)}に詳述されているが、われわれが実際に生産しているハーメチックシールは、非常に偏平なものが多い。試料が偏平な場合の応力分布は、極言すれば、試料が非常に長い場合の端面効果だけから成り立っているようなものである。これらの封止体の応力を計算で求めることは、設計上あるいは事故対策上有意義であることは言うまでもない。われわれは、このような場合に果して、実際の応力分布は比較的簡単な仮定で計算できるような性質のものか否か、あるいは、どの程度正確に計算で予測できるかという点を確かめる必要にせまられたが、この問題に対して十分な回答を与える文献は見出せなかった。そこで本実験を試みた次第である。計算に際しては、偏平な試料では、おそらく融着部近傍以外では軸方向主応力は、比較的自由に両端面に逃げられると想像される。それゆえさらに簡単化して、ガラスは融着部においても軸方向の変形が拘束されないと仮定しても、円周方向および半径方向主応力は、実測値にかなり近い値が求められるのではないかと考えた。このような観点から行なった本実験の結果は、次のように要約できよう。

1. 実測値と計算値を比較してみると、このような偏平なコンプレッションシールの応力分布は、軸方向主応力は別として、それほど厄介な性質のものではないと考えてよさそうである。芯棒の熱膨脹率が、ガラスのそれより著しく大きい場合を除けば、実測値と計算値はかな

りよく一致した。

2. ガラスの軸方向の変形が拘束されないと仮定した計算値と、試料は軸方向に無限に長いと仮定した計算値は、半径方向および円周方向主応力ではかなりの差がある。しかし、これらの方向に平行な平面内の剪断応力では、2つの仮定の間の差はかなり小さい。ここで、軸方向の変形が拘束されないと仮定した場合の方が絶対値が小さく算出されるが、上記の一致しない場合の実測値は、これよりさらに小さな値を示している。平面光弾性では、一般に剪断応力しか測定できないから、定量的な論議はできないが、一応、本実験に使用したような偏平な試料では、半径方向および円周方向主応力については、上に述べた特別な場合を除いて、本報の計算で実用的に充分有意義な数値を提供し得ると解釈してよいと思われる。おそらく、非常に精度の高い実験ができるとすれば、試料が短い程本報の計算値に近く、試料が長くなるに従って試料を無限長と仮定した計算値に近い実測値が観測されると考えてよいのではないと思われる。実際問題として、非常に長い試料は製作と測定がむずかしいので、この点を確認することはできなかった。

3. 図-5に示したクラックの状態から推定すると、既に説明したように、融着部近傍では軸方向主応力は決して小さくないと思われる。しかし、これは試料が偏平な場合には局部的なものであるため、本報の仮定で計算した半径方向および円周方向主応力が実測値とよく一致したものと推定される。ただし例外として、芯棒の熱膨脹率がガラスのそれより著しく大きい場合(図-3(e), (f))には、外環側と芯棒側とでガラスは軸方向に非常に強く圧縮されるため、おそらく簡単な仮定では近似できない状態になっているものと想像される。しかし、この組み合わせはほとんど実用されていないようである。

4. このような解析においては、厳密にはガラスの粘性流動や金属のクリープの効果も考慮すべきであるが、一般にはこの取扱いは非常に困難であるから、本報ではこれらの点については無視した。ポアソン比は、一般的に用いられているように、いずれも0.3^{1),5),6)}として計算した。また、平面光弾性による応力測定値は、半径および円周方向に垂直な軸方向に、片側の端面から反対側の端面までの間の平均値を意味するものである。実際の封止体では、端面の金属—ガラス界面に近い部分には、かなりの応力集中が生じているはずであり、これも實際上重要な問題と思われるが、軸方向についての平均値を知ることができたという意味で、本実験は有益な結論を提供し得たものと思う。

文 献

- 1) 荒川泓, 応用物理, **24** [6] 237-40 (1955).
- 2) 岸井貫, 東芝レビュー, **14** [8] 851-56 (1959).
- 3) H. Poritsky, *Physics*, **5** [12] 406-11 (1934).
- 4) “強度設計データブック”, 同編集委員会編, 裳華房, 昭和 37 年発行, p. 978-89.
- 5) 岸井貫, 東芝レビュー, **13** [8] 826-31 (1958).
- 6) 菅野正雄, 応用物理, **10** [1] 15-18 (1941).

(2/1/65 受付)