

石英ガラスとモリブデン箔との封着体中の応力

岸 井 貫

(東京芝浦電気株式会社中央研究所)

Stresses in Molybdenum Foil-to-Silica Glass Seal

By

Toru KISHI

(Central Research Laboratory, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.)

Silica glass, owing to its high thermal endurance, is used for bulbs of high pressure mercury discharge lamps, xenon discharge lamps or incandescent iodine lamps. Thermal expansion of silica glass is so low that metals or alloys with comparably low expansion coefficients to seal with are not found. Sealing with thin molybdenum foils is an usual technique in lamp manufacturing industry. Stresses in such a seal caused by expansion difference between metal and glass are reduced by plastic flow of the foil.

Stresses in experimental seals were studied photoelastically. Foils used were 20μ thick. Severe and mild stress concentrations in glass were observed near the edge and the surface

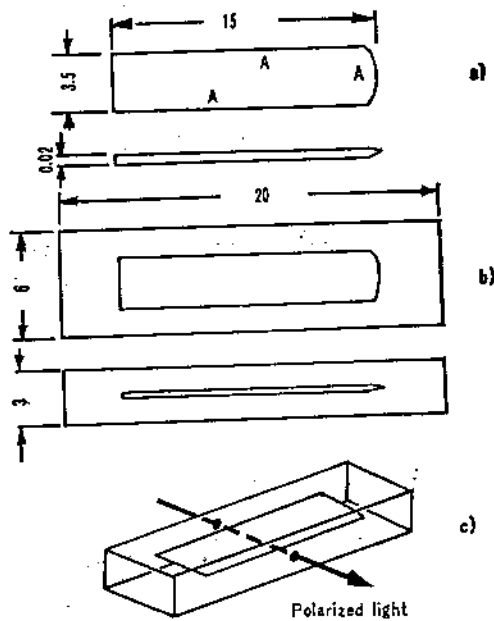
of foil respectively. Change of distribution of stresses with temperature was rather complicated, showing some hysteresis phenomena caused by plastic and elastic deformation of foil and viscous flow of glass. Stresses in glass were evaluated to be less than 1 kg/mm² except near the edge of foil. Effect of plasticity of foil on distribution or reduction of stresses were discussed.
[Received March 16, 1964]

I. はしがき

高圧および超高圧水銀灯, キセノン放電灯, 沃素電球などは, バルブが高温になるので石英ガラスで作られる。石英ガラスの膨脹係数は $6 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ で非常に小さく, これと膨脹特性に近い封入線材料がない。封入の方法には, 順々に膨脹係数が大きくなるいくつかの中間ガラスを段階的に封着し, 最後にタングステン封入用ガラスにつなぐか, またはモリブデン, タンタルなどの薄い箔を石英ガラスに封入するかの2つがある。モリブデンの膨脹係数は $52 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 位で石英ガラスとかなり違うが, モリブデンが薄くかつ展性があるので, 塑性流動をして応力を緩和し, 安全な封着ができる。このような封着体の応力を実測し, 特に塑性の影響を調べるのは興味深いと思われる。

II. 実験方法

厚さ 20 μ, 幅 3.5 mm, 長さ 15 mm のモリブデン箔を石英ガラスに封入し, 図-1 のような直方体の封着体にした。箔は電解研磨されてその3辺が刃形になっていた。石英ガラス管の一端を封じ, たいらに漬してそこに箔を挿入し, 他端から真空ポンプで排気しながら, 箔の部分バーナで先端からゆっくり加熱, 軟化させ, 箔を密封した。密封した封着体を折り取って研磨し, 偏光を



a) Molybdenum foil A: Edges formed by electrolytic etching (unit: mm)
b) Molybdenum foil-silica glass seal
c) Method of photoelastic observation of a seal by polarized light

Fig. 1.

通過させて応力を光弾性で観察した。偏光は箔の短かい縁に平行に通過させた。

III. 応力分布

1350°C で加熱し応力を除き, 炉中で放冷した封着体を, 直交した2枚の偏光板の間に入れ, 箔の先端付近の等傾応力線を観察した結果を 図-2 に示す。これから主応力線をスケッチすると 図-3 のようで, 先端にかなり応力が集中していると見られた。集中の程度を半定量的に見るため, 水晶光楔を付け加えて見ると 図-4a) のよ

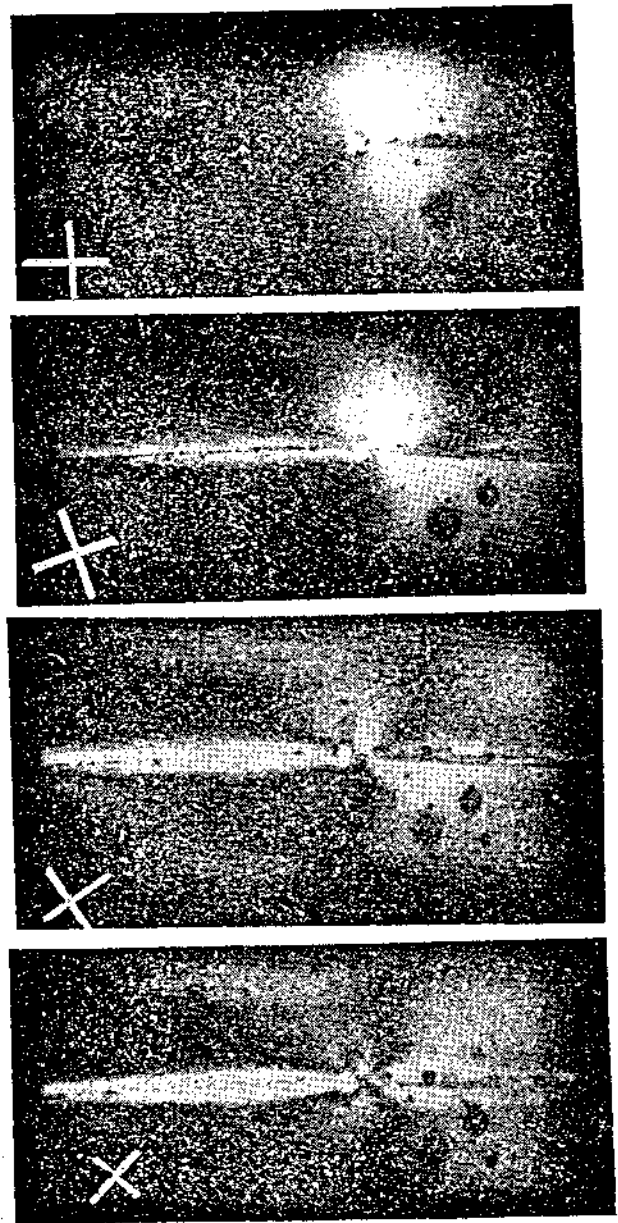


Fig. 2. Isoclinic lines around edge of molybdenum foil. Cross lines: directions of polarization of polarizer and analyzer.

うになった。箔の延長上でだけ応力が大きい。同じ方法で箔の中央部の応力分布を見た結果が 図-4b) で、箔面

付近で応力が急激に増加しているのが認められた。

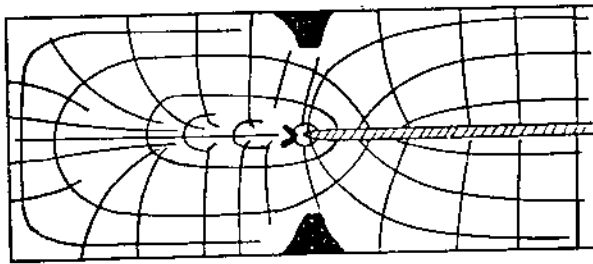


Fig. 3. Simplified sketch of trajectories of principal stresses derived from Fig. 2. In black areas, directions of principal stresses are indefinite.

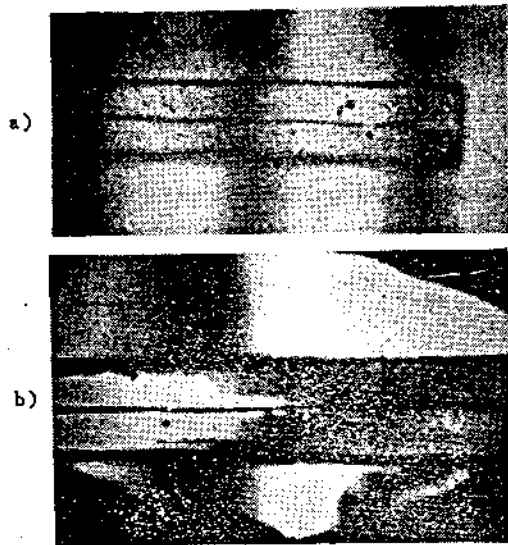


Fig. 4. Photoelastic observation with quartz wedge on areas a) around edge and b) near central portion of molybdenum foil.

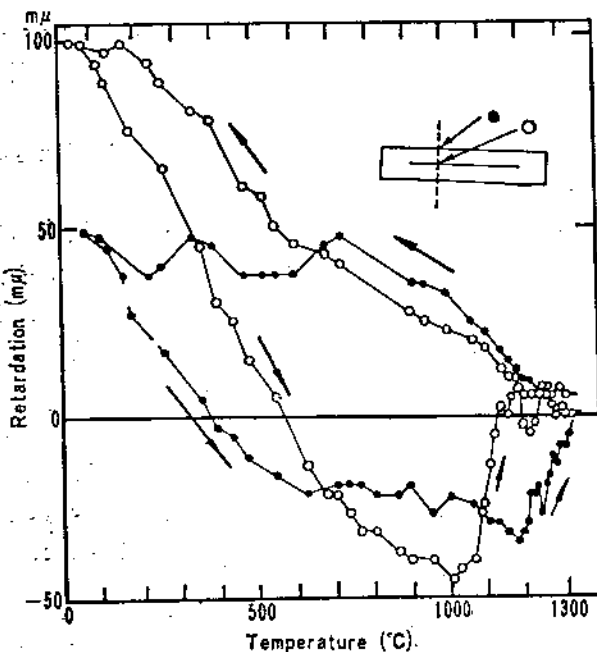


Fig. 5. Change of photoelastic retardation with temperature during cooling-heating cycle. Black and white circles show values in glass at outer surface and at glass-molybdenum interface respectively.

IV. 温度による応力分布の変化

1300°C 以上まで加熱してから、常温まで冷却し、さらに加熱した時の応力分布の変化を測った。加熱は二重らせん形のココランダム発熱体を使った電気炉で行なった。高温域での温度変化速度は約 10°C/min にした。

試料内に応力分布があるので、試料表面と箔表面との光路差を測った。測定箇所は、箔の端から全長の約 1/4 だけ中央に寄った部分に選んだ。応力は箔面付近で急増しているから、箔表面での正確な測定は難しく、半定性的な値しか得られないであろう。測定結果を図-5 に、また応力分布状況のスケッチを図-6 に掲げた。

V. 温度サイクルを与えた場合の応力変化

5.1 高温で応力を除いてから温度 T_1 まで冷却し、

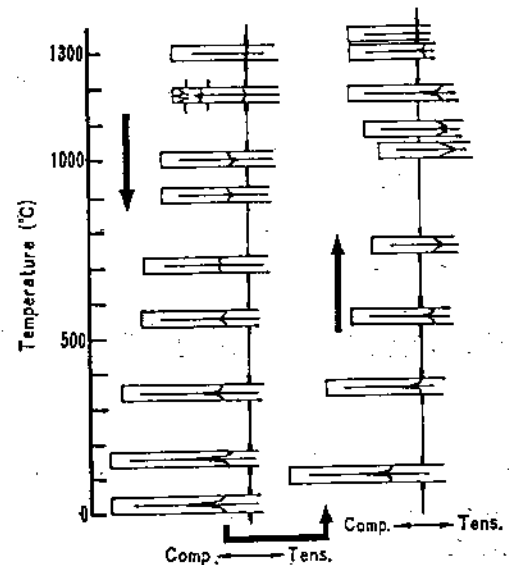


Fig. 6. Schematic sketch of change of stress distribution during cooling-heating cycle.

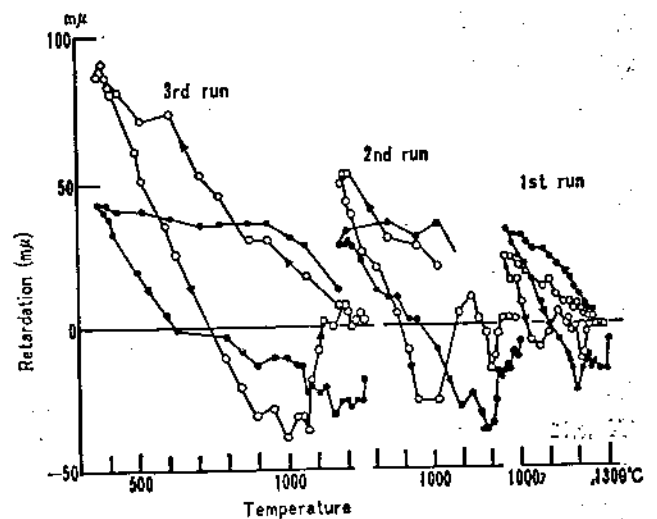


Fig. 7. Change of photoelastic retardation with temperature during successive cooling-heating runs. Black and white circles: same as Fig. 5.

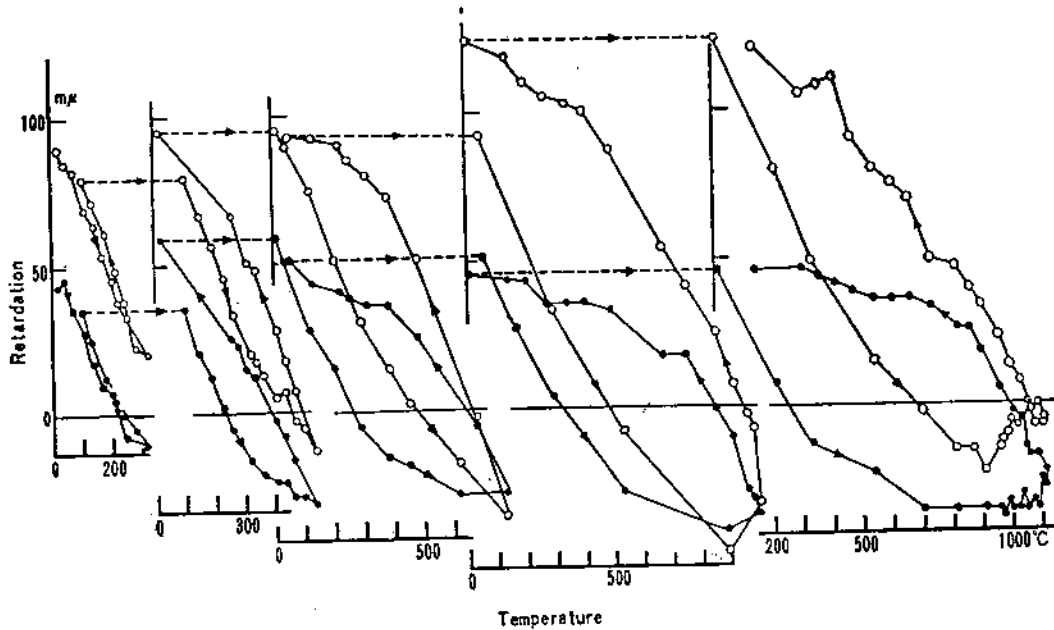


Fig. 8. Change of photoelastic retardation with temperature during successive heating-cooling runs. Black and white circles: same as Fig. 5.

T_1 から加熱して行くサイクルを, T_1 を $950^\circ, 680^\circ, 370^\circ\text{C}$ と順次変えて試料に与えた. この時の光路差変化を 図-7 に示す.

5.2 高温で応力を除いてから常温まで冷却した試料を, 温度 T_2 まで加熱してから冷却するというサイクルを, T_2 を $320^\circ, 540^\circ, 780^\circ, 1000^\circ, 1100^\circ\text{C}$ と順次変えて与えた. この時の光路差変化を 図-8 に示す.

VI. 討 論

封着体内の応力分布とその温度変化がかなり複雑なことがわかった. これらの特性を完全に説明するのは難かしいが, できる範囲で考察を試みる.

6.1 かりに箔が弾性体であるとする. 箔の長さ方向を X 軸, 厚さ方向を Y 軸にとり (図-9), 箔とガラスとはヤング率 E が等しく, 応力分布は無限平面内のそれと似ていると見

なす. 箔とガラスとの間に熱膨脹差 δ が発生した時の応力は計算することができる¹⁾. ガラスの界面に生ずる法線応力 σ_x, σ_y と, ずり応力 τ_{xy} (X 軸に垂直な面に対し Y 軸方向に働らく応力) の分布は 図-9 のようになる. どの応力も箔の端部付近

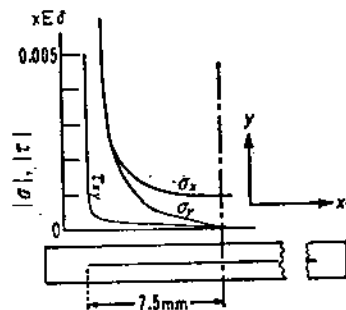


Fig. 9. Distribution of plane stresses in an infinite elastic medium at surface of thin area ($15\text{ mm} \times 0.02\text{ mm}$) when the area contracts or expands by amount of δ . E : Young's modulus of the medium, σ : normal stresses, τ : shear stress.

で急激に増大する. なお Y 軸方向の分布も調べて見ると, 前記の集中応力は箔面から離れると急激に減少することがわかる. たとえば端から $1/100\text{ mm}$ だけ中央へ寄った位置では, σ は箔面から $1/100\text{ mm}$ 離れると半減する.

実際の封着体では, モリブデンの E はガラスの3倍以上あり, Z 軸方向にも弾性変形するから平面応力の仮定も厳密には成立しないが, 応力分布は定性的には前述のものと同じであろう. 箔はその端部でガラスから強い τ を受けて, 全体が X 軸方向に弾性的に伸ばされる. 従って端部以外ではガラスとの膨脹差が打消され, τ を発生する必要がない. 箔の中央部付近のガラスは, 端部の τ と釣合うため σ_x を発生するが, その絶対値は比較的小さく, かつ箔との界面付近に集中することもない.

6.2 箔が塑性変形を起したとする. 端部付近の応力は, ガラス内でも箔内でも当然減少するであろう. そうすると, 中央部付近での膨脹差は弾性変形で十分打消されなくなる. 残った膨脹差は, 界面に新しくずり応力 τ を発生し, さらに τ が十分大きい場合にはその部分の箔内で塑性変形することで補償されなくてはならない. 結局, 塑性変形によって箔の端部の集中応力が箔の全表面に分散されたことになる. 新しく分散された τ も, 表面から離れると急激に減少する性質を持っているであろう. 常温ないし 500°C 以下で認められる箔面付近での集中応力 (図-4b), -5, 7, 8) は, 上記のものに相当するとしてよいと考えられる.

6.3 他の温度域で見られる箔面付近の応力分布については, 今のところ確信ある説明はできない. 考えられる事項を列記する.

a) σ_y の影響, b) σ_y により引き起されたガラス中の曲げモーメント, c) 箔面に応力が集中しているため, この部分で粘性流動が著しく, 応力が 0 になろうとする, d) 封着体の形状.

上記のうち a) による応力は実験結果と逆符号になり, その可能性はないであろう. d) は封着体が軸対称でないから, 従来の固着温度の計算¹¹⁾があてはまらず, 特殊な応力分布を示したのかも知れないという意味である. c), d) が正しいのかどうかは, 厳密な理論を導いて見ないとわからない.

6.4 箔面付近以外での応力の温度変化特性は, つぎのように考えられよう. 図-7, 8 を整理すると, 図-10 になる.

図-11 において, もしもガラスが点 A で固化し, ガラスとモリブデンとが弾性変形をするならば, 両者の膨脹差による応力は AB に沿って変る. モリブデンが降伏強度 0 で塑性変形をするならば, ガラス中の応力は比較的小さく AC で示される. 箔の体積が小さければ, AC と温度軸との傾斜はそれによって小さくなる. 実際には, モリブデンの強度は有限であり, ガラスも粘性流動をするので, 弾性応力のうち A 点付近で発生するものの一部は緩和され, 観察される応力は AD と変り, E 点で応力が降伏強度に達する. E 点以下の温度では, モリブデンは塑性変形を続け, 応力は AC と平行な線 EF に沿って変る.

F 点で温度を上昇させた

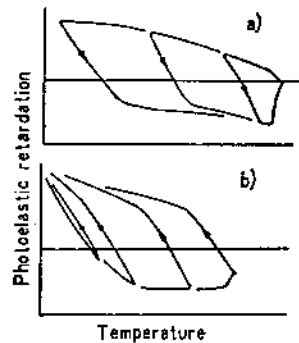


Fig. 10. Schematic representation of change of stress in glass with temperature during successive a) cooling and b) heating runs.

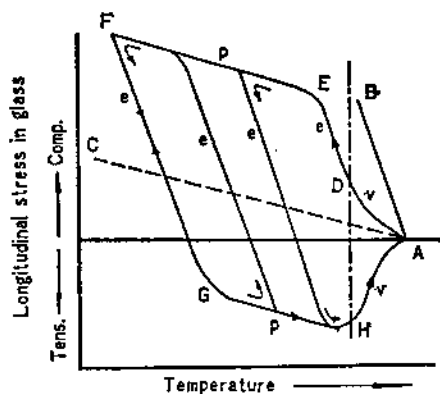


Fig. 11. Schematic explanation of temperature-stress relation in seal. AB, AC: stresses caused by expansion difference between molybdenum and silica glass when molybdenum deforms elastically or plastically (yield strength=0) respectively. v, e, p indicate that viscous flow of glass, elastic deformation of glass and molybdenum and plastic deformation of molybdenum take place, respectively.

とする. モリブデンとガラスとの膨脹差は減少し, 両者内の応力も減る. 従ってモリブデンは弾性変形し, ガラス中の応力は AB に平行に FG と変る. この間に, 両者内の応力は始め減少するが, やがて今までと逆符号の膨脹差と応力とを生じてこれらの絶対値を増し, G で再びモリブデンの降伏強度に達する. FG では, モリブデンの変形は弾性的であり, 応力は可逆的に増減する. G からは応力が AC に平行に GH と変り, H でガラスの粘性流動が始まり, 応力が消えて行く.

DEF または GH 上の点から温度変化の方向を逆にする, AB に平行な傾斜の線に沿い応力が変り, この線と, ADEFGHA 線の一部とで履歴曲線を形成する. これが 図-5, 7, 8 の黒丸で示された曲線に相当すると考えられる.

6.5 上記の説明と実験結果とを比較して見ると, モリブデンが弾性変形をする温度範囲は 300°C 位と評価される. これ以上の温度変化をさせると, 塑性変形に移って行く.

6.6 モリブデンを薄くする意義は次の点にある. 第一に, 図-11 の AC 線と温度軸との傾斜が小さくなる. 第二に, モリブデンを塑性変形させるに必要なガラス中の応力 τ_{xy} , σ_x が小さくなる. すなわち AC 線と EF, GH 線との距離が小さい. この両者とも, ガラスの応力を小さくするのに有効である.

また, モリブデンが塑性変形することの結果として, 箔の端部に集中するはずの応力が, 箔全体にわたって分散し, 応力の最大値が十分小さくなっている.

6.7 モリブデン箔を塑性変形させるに要した応力を評価する. 図-7, 8 によれば, ガラス表面には 50 μ くらい, 箔との界面にはその 2 倍程度の光弾性的光路差がある. これを封着体の厚さ方向について積分すると 150 ~ 200 μ ·mm 程度になろう. 石英ガラスの光弾性常数をかりに $3.5(\mu\text{m}/\text{cm})/(\text{kg}/\text{cm}^2)$ とすると, ガラス中の長さ方向の全応力は 5 kg 前後になる. モリブデン内の応力が降伏強度に等しく, かつその全応力がガラスの全応力と釣り合っていると考えると, モリブデンの降伏強度として 75 kg/mm^2 前後の値が得られる. 加工硬化したもので 80 ~ 180 kg/mm^2 , 焼鈍されたもので 20 ~ 110 kg/mm^2 とされているのと, ほぼ一致している.

6.8 ガラス中の応力を評価すると次のようになる. 箔との界面で見られる光路差 100 μ 前後が, 箔面に平行な長さ方向の応力 σ_x によって引き起されたとする. この σ_x は 0.8 kg/mm^2 程度と計算される. 箔面から離れた部分での σ_x はその 1/2 位である. この値は封着体にとって危険なほど大きくはない. しかし, τ や端部に集中した応力については, 別に調べて見る必要がある.

VII. 結 論

1. 石英ガラスとモリブデン箔との封着体における応力分布を調べた。応力分布には、箔面付近に応力が集中するという特異性がある。

2. 上記の応力集中は、箔が弾性体であればその端部だけに起きるべきものが、箔の塑性変形のため、箔全面に分散された結果生じたと考えられる。

3. 従って、箔の端部に応力が集中しているが、その程度は非常に緩和されているはずである。

4. 封着体にいろいろの加熱、冷却サイクルを与えた時の応力分布の変化を実測し、その特性を箔の弾性、塑性およびガラスの粘性、弾性を仮定して説明することができた。箔の塑性のため、温度-応力図には著しい履歴現象がある。

5. ガラス内の封着応力は、箔の端部をのぞけば 1 kg/mm^2 程度より小さいと評価された。

6. 以上の実験と考察とによって、この封着体がガラスとモリブデン間の大きい膨脹差にもかかわらず安定な理由を実証、確認することができた。

実験に使用した材料について配慮して下さった当社 堀川岡工場 早尾課長、松尾課長代理その他の方々には謝意を表します。

引用文献

- 1) S. Timoshenko, J.N. Goodier. "Theory of Elasticity" 2nd Edition, p. 435 (1951)
- 2) F.W. Martin. *J. Am. Ceram. Soc.*, **33**, 224 (1950)
- 3) 岸井 貫. 東芝レビュー, **13**, 1001 (1958); **16**, 1022 (1961)
- 4) 山本洋一. "金属材料便覧" p. 293 (1951)

(3/16/64 受付)