

2. 技 術 解 説

「ガラスを用いた気密封着」(続き)

GLC. 工博 岸 井 貫

4-2 円筒形の融着体

例を第14図に示す。つまみシステム、ボタンスystemなどがこれで近似できると考えられ、実用例が多い。しかも応力の計算が容易だという利点がある(4-2C)。

実例を挙げる。

第14図 (a) タングステン線、モリブデン線、コパール線の封着

ク (b) 整流用半導体素子、サイリスタ、トライアック等のハーメチック・シール

ク (c) ガラス内張り鋼管

ク (d) ジュメット線の封着、銅芯を持つ複合封入線の封着

4-2 A 応力の分布と性質

ガラスと金属との間に膨張差がある時に発生する応力が圧縮か引張りかを推測するための考え方を説明する(第15図)。ガラスの方が外側にあつて高膨張であり、固化してから常温へ冷えるまでに金属よりは余分に縮むとする。

軸方向応力(第15図b): ガラスは金属より余分に縮もうとするが、金属に妨害される。ガラス中の軸方向応力は引張りである。金属線はガラスから余分に縮むように強制されているから圧縮応力が発生している。

半径方向応力(第15図C): ガラスは半径を金属より小さくしようとするが金属が妨害する。界面ではガラスが金属を押し縮めるような力が働くから、半径方向にはガラス中に圧縮応力がある。金属中にはその反力として半径方向の圧縮応力がある。

周辺方向応力(第15図C): ガラスは円周を小さくしようとするが金属が妨害するので、円周方向に引張り応力が働く。金属はガラスから円周方向の長さを半径方向の長さと同時に縮めようとする力を受けるので、円周方向に圧縮応力が働く。

上記のような応力分布は、茶筒にきつい輪ゴムを巻きつけた場合に似たものとして理解できよう(第16図)。

内外関係や膨張の大小関係が上記と異なる場合にも、上記の考え方を参考にして応力の性質を推定できる。念のため金属の方が内側にあつて高膨張の場合を記す。

軸方向: 金属はガラスより余分に縮もうとするのをガラスに妨害されるから、金属中には引張り応力。ガラスは金属により縮められようとするからガラス中には圧縮応力。

半径方向: 金属はガラスより余分に縮み、界面に剥れを起こそうとするがガラスに妨害され引張り応力。ガラス中にはこの反力として半径を小さくしようとする力が働くから引張り応力。

円周方向: 金属は円周方向に余分に縮もうとするのをガラスに妨害されるから、金属中には引張り応力。ガラスは金属により円周方向の長さを半径方向と同様にさらに縮めようとする力を受けるので、ガラス中では圧縮応力。

応力の値は二つの材料の弾性常数、材料間の膨張差、封着体にした時の二つの材料の半径比、封着体中での中心軸からの距離、という四つの要因で決まる。第15図の場合について、応力を中心軸からの距離の関数として定性的に例示すると第17図のようになる。

応力の絶対値の最大は界面に生ずる。界面でのガラス中の応力最大値が（ガラス／金属）の半径比によりどのように変るかを、第15図の場合について定性的に画くと第18図のようである。ガラスを厚くすると軸方向応力はいくらかでも小さくなるが、半径方向と円周方向の応力は膨張差や弾性常数によって決まる一定値に近づきだけで、小さくはならない。小さくするためには膨張差を小さくしなければならない。

金属線中の応力について第18図に対応する図を作ると第19図になる。ガラスが薄いと応力は小さい。ガラスが厚くなるとそれぞれ一定値に近づく。最終的に漸近して行く先の応力の値は膨張差に比例する。

4-2 B 端部の応力集中

封着体の端部附近には応力集中があり、特に界面に沿い軸方向に働くずり応力が強い（第20図）。応力が発生する機構の説明はバイメタル形封着体の場合（4-1 B および第13図）。

この応力集中に対処するために、設計上は次のような配慮が必要である：

ガラス強度上の安全率を高目の適切な値に決めておく。

応力集中によりガラスにクラックが生じて、気密が保たれ装置の動作が正常であり続けるように形を決める。

このような応力集中が著しい例はジュメット線封着である。ジュメット線は軸方向がガラスよりも相当に低膨張である（後記）ため、端部でガラス中に大きい軸方向応力とずり応力とが発生し、軸に直角な破面を持つクラックが生ずる（第21図）。ガラスを厚めにし、ジュメット線間距離を十分に取り、ジュメット線の直径を必要最小限の値にすることが必要である。ガラス封じダイオードに浸漬法でハンダ付けする操作では、ジュメット線だけが急熱され、膨張差の悪い効果を拡大してしまうので、ガラス部分を含め予熱しておくような配慮が要る。

4-2 C 応力の計算法

円筒形封着体中の応力は、各材料中の応力分布が内圧、外圧を受けた円筒や円柱と同じ形式で表現できると仮定して計算される（第22図）。

材料に内側から I、II、……と番号をつける。材料中の応力分布は次のようである：

$$P_{zi} = C_i \quad : \text{軸方向応力}$$

$$P_{ri} = A_i \frac{B_i}{r^2} \quad : \text{半径方向応力}$$

$$P_{\theta i} = A_i \frac{B_i}{r^2} \quad : \text{円周方向応力}$$

i : 材料の番号、 r : 中心軸からの距離

これらの式が次の条件を満たすとして連立式を作る。

- ・ 軸に垂直な断面にわたっての P_z の積分は零、
- ・ 界面で P_{ri} と $P_r(i-1)$ とは等しい。特に最外面で $P_r = 0$ 、中空封着体ならば最内面で $P_r = 0$ 、中実封着体では $r = 0$ で P_r 、 P_{θ} が有限。
- ・ 応力による変形と熱膨張による変形とを考慮に入れた上での i 番目の材料の内半径と (i-1) 番目

の材料の外半径とは等しい。

以上を実行すると、変数 (A、B、C) も式の数も $3 \times$ (材料の数) だけある一次連立方程式が得られる。すべての A_i 、 B_i 、 C_i が求められて、すべての r 、封着体内のすべての場所での応力が求まる。連立方程式はコンピューターによる求解が特に容易である。

5. 平板形封着体 (第23図)

光半導体のパッケージに実例が多い。軸方向の応力は零と近似することができるので、円筒形封着体よりも半径方向応力、周辺方向応力がやや小さい。応力の計算でも $C_i = 0$ なので方程式の数が少なく、解くのが容易である。応力の性質の推定は円筒形封着体の場合と同じ考え方で良い。

6. 管や板の突き合わせ封着

段つぎ (グレイデッド・シール)、銅円筒やコパル円筒を使う封着、ブラウン管のネック・チューブとファンネルのつなぎ、昔の灯台型真空管などが実例と言える。

ガラス管と金属管とを突き合わせた場合を説明する (第24図)。融着した時には応力がなくつなぎ合っている (同図 a)。冷やすと、もしも自由に熱収縮するならば膨張差により直径に差ができる (同図 b)。ガラスの方が高膨張であるように図を描いてある。)。しかし実際には端部で融着されているから、金属はガラス管により口径を縮められ、ガラスは金属により口径を拡げられ、同じ口径になって連続している (同図 c)。この変形により円周方向にガラスには引張り応力、金属には圧縮応力が発生する。さらにその上に、板厚方向の断面を観察すると (同図 d) に示すように軸方向に曲げモーメントによる応力も発生する。

ここで、円周方向の応力は歪検査器で検出されるが、軸方向応力は検出されないことに注意を要する。

金属円筒の肉を薄くすると、変形は金属の方にしわ寄せされ、ガラス管中の応力は小さくなる。この方法は工業的に実用されている。

金属の板とガラス管とを突き合わせた場合を第25図に示す。ガラスの方が高膨張であるように描いてある。詳細は第24図とほとんど同じなので省略する。

応力計算に使われる境界条件には、応力や曲げモーメントの平衡は当然必要であるほかに、界面部分での各切線間の角度が融着時と変らない (第26図) ということが使われる。従って界面の縁部が応力集中の場になる。界面縁部の融着が不十分で表面が入り込んでいると著しい弱点になる (第27図)。また第28図のような融着体では金属板が曲がらず、板の剛性が見かけ上非常に大きくなり、ガラスに無理のしわ寄せが来る。

7. 塑性材料を利用した封着材料と融着体

塑性材料として実用されているものは、銅、モリブデン、インジウムがある。

7-1 ジュメット線

芯金と呼ばれる鉄ニッケル合金の外部を銅で覆った構造である (第29図)。各材料の熱膨張特性を第30図に示す。ジュメット線の軸方向の膨張係数は芯金とほぼ同じであり、ソーダ石灰ガラスや鉛ガラスよりもかなり小さい。半径方向の膨張係数は、断面での銅の面積/全断面積の比によって決まる。

円筒形融着体を作る時はガラスを厚くして、軸方向の膨張差が大きいにもかかわらずガラス中の軸方向応力を十分小さくできる (第17図と同様)。半径方向、円周方向の応力は、銅の断面積比を調整して線

の半径方向の膨張係数をガラスと合わせることで、小さくできる。

ジュメット線の膨張特性は、鋼の柱に粘土やゴムを巻きつけたものを想像すると理解しやすいと思う。

ジュメット線は単一の合金材料線に比べて電気伝導度も熱伝導度も高く、また膨張が異方的であるのにガラス中の応力が小さいという点ですぐれた導入線である。

7-2 モリブデン箔と石英ガラスとの封着体 (第31図)

モリブデンは薄い箔に圧延されている。石英ガラスとモリブデンとの膨張差は大きいけれども、モリブデンが薄いため膨張差の効果はモリブデンにしわ寄せされるので、箔面に平行な方向の応力はガラス中では小さい。また箔が薄いことで、箔面に直角な方向の応力もガラス中、箔内を問わず小さい。

これに対して箔内の面内方向応力は大きくて、箔は塑性流動を起こす。ガラス中の応力は箔の塑性変形応力と平衡する値より大きくはならない。

箔の周縁では応力集中も界面に沿うずり応力も存在する。これらのガラス中の値も、箔が薄く、箔の見かけ上の強度が塑性変形応力で限られるという理由で小さい。

超高圧水銀灯用として使用量がふえた。

7-3 筒端をナイフエッジにした銅筒とガラスとの封着体 (第32図)

「ハウスキーパー・シール」と呼ばれ、放熱能力の大きい銅の円筒をガラスと封着するのに使われる。筒の端が薄くて剛性が小さいことと、先端が特に薄くてモリブデン箔の項で述べたと同様に銅が塑性流動することとの理由で、ガラス中の応力が小さい。

7-4 インジウムを使った接着体

インジウムは融点が160℃くらいで常温でも軟らかく塑性変形しやすい(塑性変形開始の応力が小さい)。ガラス同士の接着材として使えるが、塑性変形するという性質のために封着体がいくらか特殊な挙動を示す。

同質のガラス板2枚をインジウムで貼り合わせてバイメタル形の接着体を作ったとする(第33図)。インジウムはガラスより高膨張であるが、インジウム層が薄ければ応力はインジウムにしわ寄せされ、ガラス中の応力は小さく、またインジウムの塑性変形応力と平衡する応力以上にはならない。ガラスとインジウムとの界面には、面に平行な方向にガラスを縮めようとするずり応力があるが、絶対値は小さい。また端部に応力集中が認められない。

膨張率が大きいガラスAと小さいガラスBとをインジウムで貼り合わせた場合(第34図)には、また違う状況になる。インジウムの融点以上で貼り合わせ、ガラスA、B、インジウム層が同じ長さであったとする(同図a)。常温まで冷やすと、もしも三つの材料が自由に縮んだ時はそれぞれ違った長さになる(同図b)が、実際は三者が互いに拘束して同じ長さに変形しており、ガラスAに引張り応力、Bに圧縮応力が発生する(同図c)。インジウムがガラスに与える応力は小さくて無視できる。同時に上記の応力による曲げモーメントを打消すために全体がバイメタル形の変形を起こし、応力の分布を変える(同図d)。以上バイメタル形融着体の場合(4-1および第12図)と全く同じである。

ところがさらに、インジウムは層内でのすべりを生じてガラス中の応力を緩和してしまう。その結果、ガラス-インジウム界面でのガラス中の応力は両端で零に近く、中央部へ向けて直線的に増す形の分布をする(第34図e)。

応力の極大は中央部にあり、ガラス板が長ければそれに比例して大きくなる。ただしそれはある長さ以上では恐らく飽和してしまい、その値はインジウムの塑性変形がないと仮定した時の値に近いだろうと予想される。予想の正否は別として、長さ数cmの接着体ではまだ飽和に達しない。またインジウムの塑性変形の結果として、端部附近での応力集中がない。

第34図 e のような応力分布は、鉄道のロングレール中のそれを連想させるし、それと似た理由で生じている。

8. ガラスの粘性と応力との関係

8-1 応力発生経過

今までの説明では、膨張差のある材料を高温度で融着または接着して常温へ冷却した時に発生する応力を弾性変形、塑性変形を仮定して述べた。ところが実際には「膨張差」を計算する温度範囲はどれかという問題が残っており、さらにガラスの粘性流動による応力減少（応力緩和）の影響が全く考えられていなかった。

第35図 a) のような膨張特性のガラスと金属とを融着した場合を考える。ガラスの粘度は同図 b) のようであるとする。融着する温度域ではガラスの粘度が小さい (10^5 ポイズ以下) ので、膨張差による応力はすぐにガラスの粘性流動で消えてしまう。応力が観察できるのは、温度が下がりガラスの粘度が 10^{10} ポイズ以上になった時期以後である。

始めのうちはまだ粘度が小さいため、冷却中に時々刻々に発生する応力のうち大部分が消えるので、応力の値が小さい (同図 C の矢印 1)。つぎに応力の消え方が少なくなって応力値が急に立ち上る (矢印 2)。つぎに矢印 3 より温度が下がると時々刻々に発生する応力が全く消えず、それ以後の各時期に発生する応力が代数的に積み上げられ、ガラスも金属も弾性変形だけをすると見なして差支えない状況になる。

8-2 見かけの固着温度

第35図 C) の矢印の附近の詳細を第36図に示す。矢印 3 以降 (より低温) では応力は弾性変形の仮定で計算される。これよりも高温域へ計算を外挿・延長すると破線が得られ、これが応力零の軸と交わる温度を「見かけの固着温度」とする。見かけの固着温度は次のように表現できる：

ガラスが固化してしまった温度域での融着体中の応力は、見かけの固着温度との間に生ずるガラス/金属間の膨張差により弾性変形を起して生じたと仮定して計算できる。

従って「ガラスと金属との膨張差」を定量的に表わすには、その系の見かけの固着温度を知る必要がある。

8-3 見かけの固着温度の性質

見かけの固着温度の性質を定性的に記す。

冷却速度の効果

冷却速度が速いと固着温度は高くなり、遅いと下がる。速度が N 倍になった時の変化量は、粘度が $(1/N)$ 倍になるための温度の変化量と同じである。

「膨張差」が零に近い系では、冷却速度によって膨張差が正にも負にもなりうる (第37図)。低融点ガラスによるフェライトヘッド製造のように応力を極めて小さくしたい場合にこの効果が明瞭に現われ

る。

封着体の形の効果

ガラスの自由表面が狭いような封着体では固着温度が高い。極端な例としてガラスが密閉容器に封入された形の時は、固着温度は無限に高い。

応力軸方向による差

一つの円筒形封着体の中であっても、方向の応力に対してと半径方向の応力に対してとでは違う。一般には前者の固着温度の方が高い。これも極端な例としてモリブデン線とその封着用ガラス（現在は使われない）で、軸方向と半径方向とでは「膨張差」が逆符号である（第38図）。タングステン線でも程度は小さいが同じ現象がある。

ガラスの粘度との関係

金属線を中心にした円筒形封着体で、冷却速度を3℃/分とした時の計算例では、固着温度でのガラスの粘度は、半径方向応力に対して $10^{13.2-13.5}$ 、軸方向応力に対して $10^{13.5-13.9}$ ポイズであった。これらはガラスの徐冷点（粘度 $=10^{13.0}$ ポイズ）と歪点（粘度 $=10^{14.5}$ ポイズ）の間に含まれる。

ガラスの膨張曲線と粘度との関係

常温から温度を上げながら測定して第39図のような膨張曲線が得られる。膨張係数が大幅に変化する温度としてガラス転移点が決められる。経験則としてガラスの徐冷点、歪点は軟質ガラスはガラス転移点附近の温度であるのに対して、硬質ガラスではガラス転移点より高い温度域にある。「膨張差」の判断にはこの事実を考慮する必要がある。また上に述べた膨張差についての特異現象は第39図に示された硬質ガラスの特性に原因がある。

9. 特殊な封着体中での応力発生の経過

8. で述べた「見かけの固着温度」は、二つの材料間の膨張差と封着体中の応力とを弾性変形の仮定で結びつけるためのものであった。従って三つまたはそれ以上の材料や塑性材料からできる封着体では意味がなくなる。そのような封着体について特性を個々に記す。

9-1 ジュメット線の封着体（第40図）

線軸方向の膨張がガラスと大幅に違っているから、軸方向応力は常温に近づくにつれて増してゆく。半径方向の膨張は銅被覆の厚さによって調節できるので、それに対応して半径方向の応力は同図b)の1, 2, 3のように変えうる。銅の塑性変形の影響で温度-応力曲線には小さなヒステリシスのループが観察される。

このような観察の結果を利用すると、常温または特定の温度で応力を零にしたり希望の値にしたりするようにジュメット線の性質を調整できる。

9-2 モリブデン箔-石英ガラス封着体（第41図）

封着体が融着温度から冷えて1100℃くらいになると、石英ガラスの粘度が高まり応力が発生し始める（同図①）。それ以後の応力はモリブデンの塑性変形強度で決まり、これが温度低下とともに高まるので曲線②のように変化する。

常温から温度を上げてゆくと、始めのうちはモリブデン箔が弾性変形をするので、応力はモリブデンと石英ガラスとの膨張差に対応して温度により大幅に変わる（曲線③）。応力が零を経て逆符号で大き

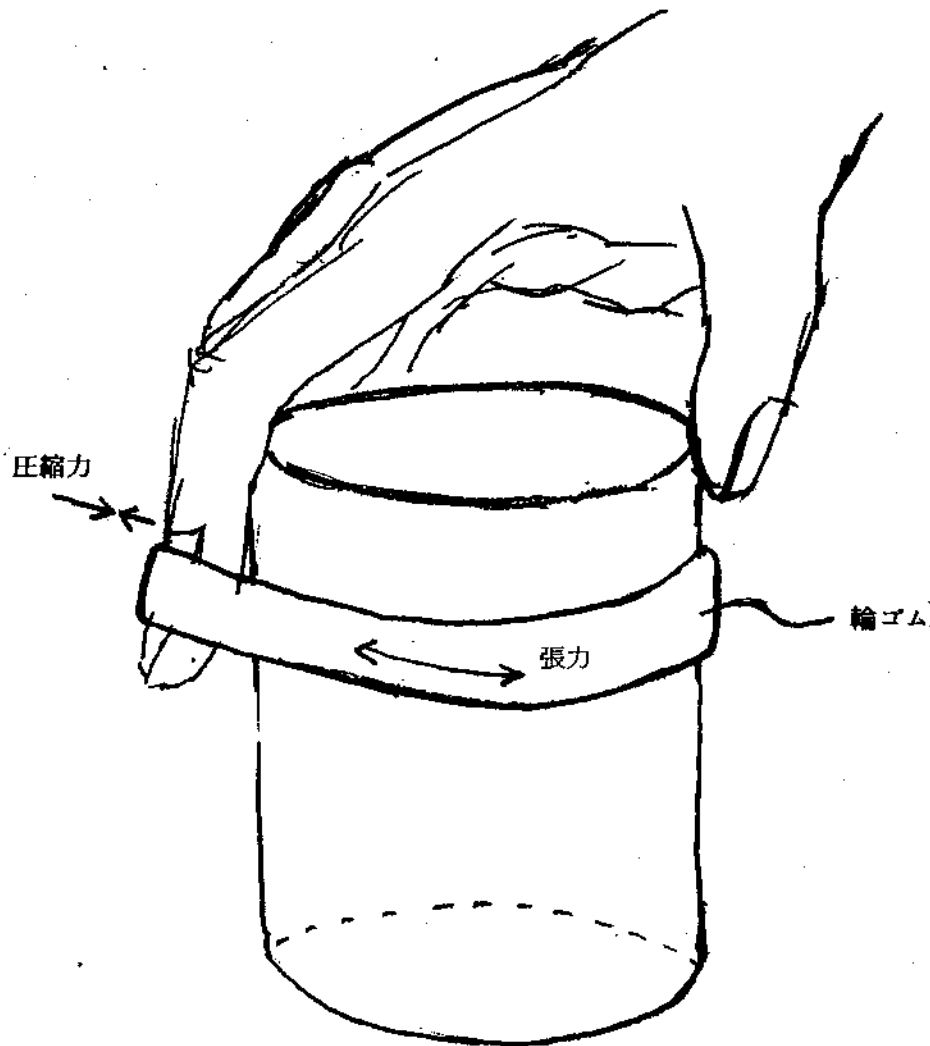
くなるとモリブデン箔の塑性変形が再開し（曲線④）、ついで塑性変形強度の低下（曲線⑤）とガラスの粘度低下（曲線⑥）との効果により応力が零になる。全体の曲線は箔の塑性変形のために大きくて広いヒステリシス・ループを画く。

常温まで冷却されてから温度履歴を与えた場合には、曲線③に対応する温度域内ではほぼ可逆的に応力が変わる（曲線A）。温度変化域が曲線④に対応する温度域に食い込むにつれて、箔の塑性変形によるループが明瞭になる（曲線B、C）。

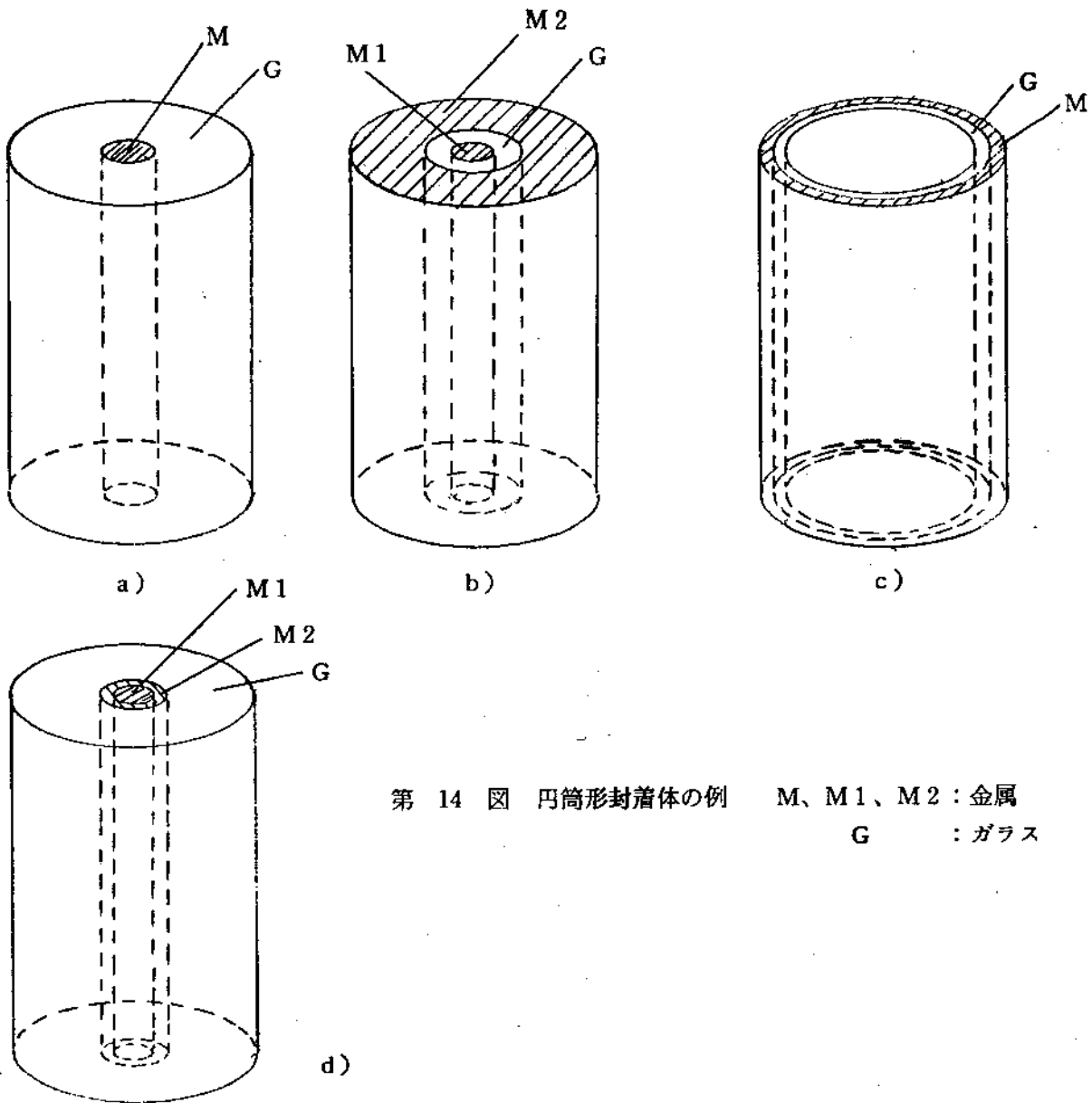
インジウムを用いた接着体

応力変化特性がモリブデン箔封着体のそれと良く似ている。似ている理由は両者とも金属の塑性流動強度の温度による変化が応力の変化の主原因だということである。相異点はインジウムでは融点以下での凝固が応力発生の原因であるのに対して、モリブデン箔の場合は石英ガラスの粘度上昇、固化が原因だということである。

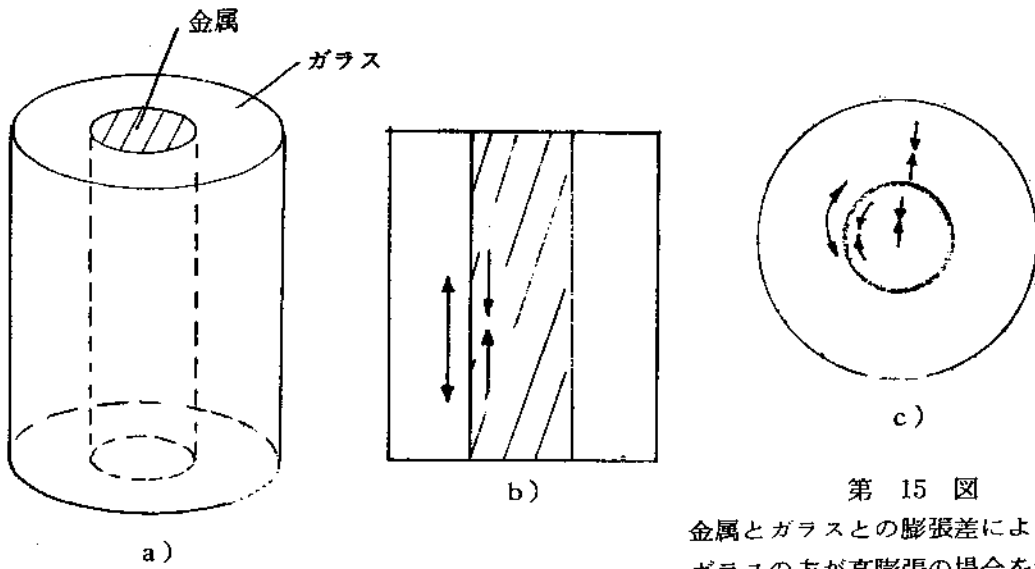
モリブデン箔について示した第41図は、そのまま異種ガラスのインジウムによる接着体にもあてはまる。



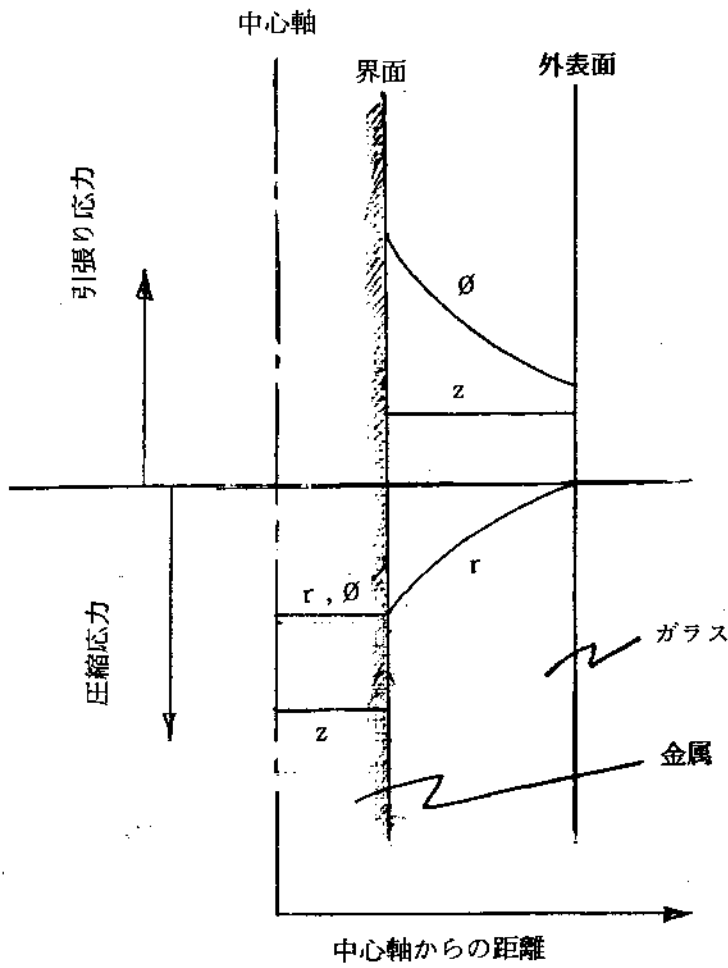
第 16 図 輪ゴムが締めつけている場合の応力



第 14 図 円筒形封着体の例 M、M1、M2 : 金属
G : ガラス



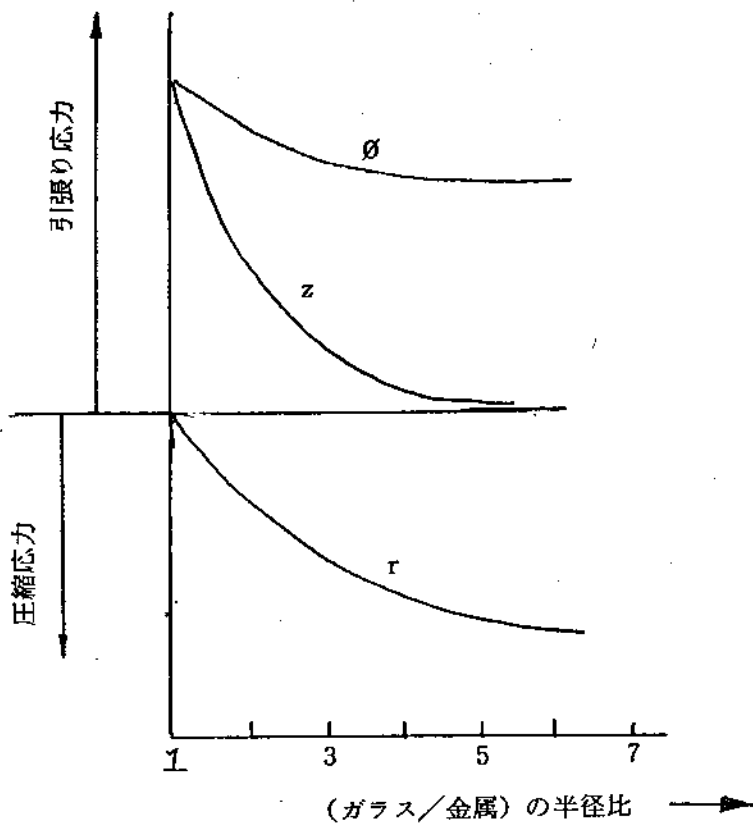
第 15 図
金属とガラスとの膨張差により発生する応力。
ガラスの方が高膨張の場合を示す。
← → : 引張り応力
→ ← : 圧縮応力



第 17 図

z : 軸方向
 r : 半径方向
 θ : 円周方向

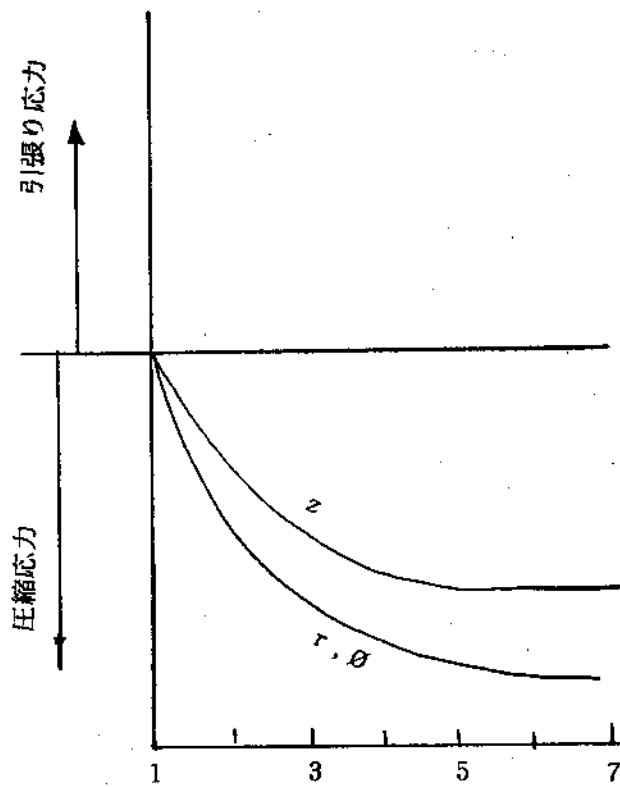
円筒形封着体
 内の応力分布



第 18 図

(ガラス/金属)の半径比と界面
 でのガラス中の応力との関係

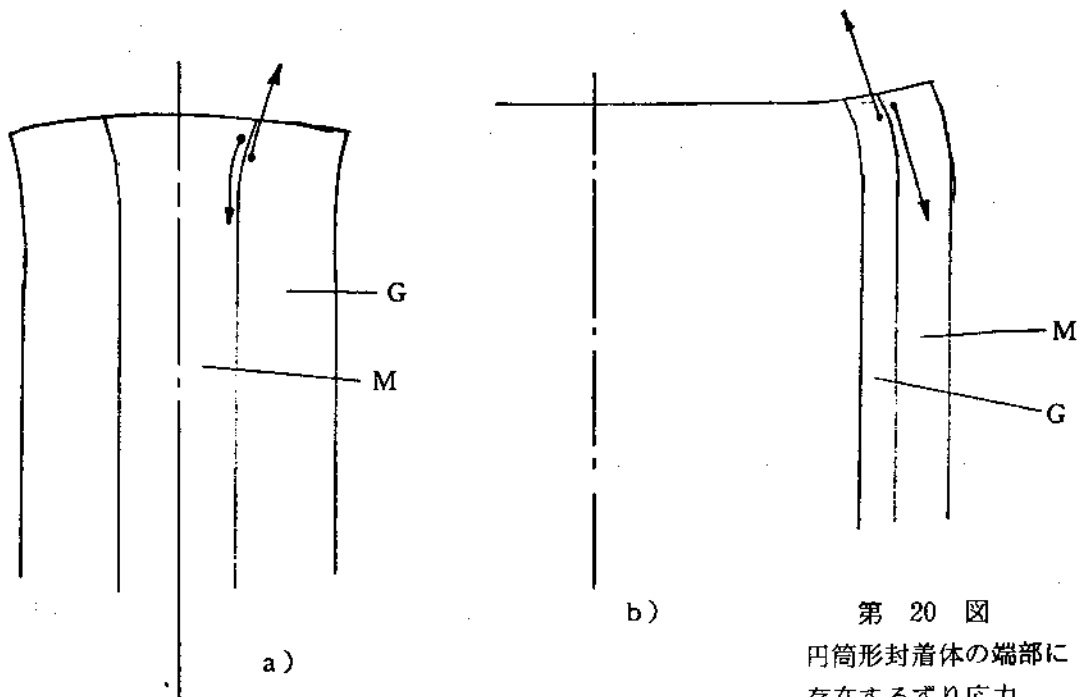
z : 軸方向
 r : 半径方向
 θ : 円周方向



z : 軸方向
 r : 半径方向
 θ : 円周方向

第 19 図
 (ガラス/金属) の半径比と界面
 での金属中の応力との関係

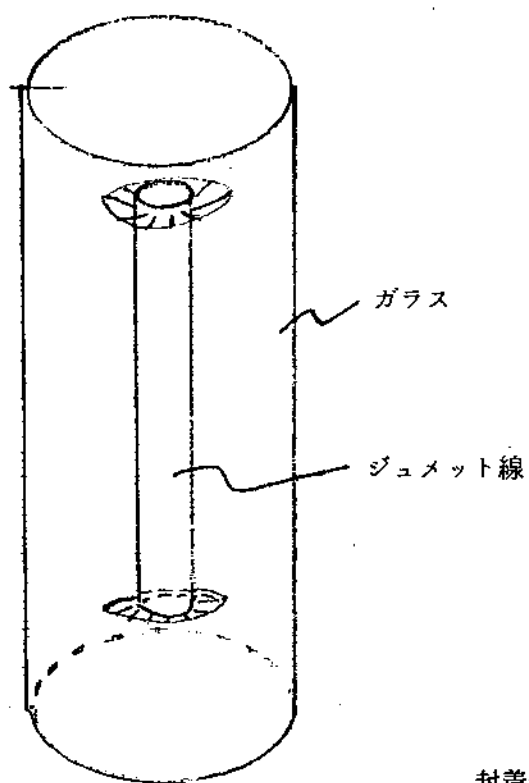
(ガラス/金属) の半径比 →



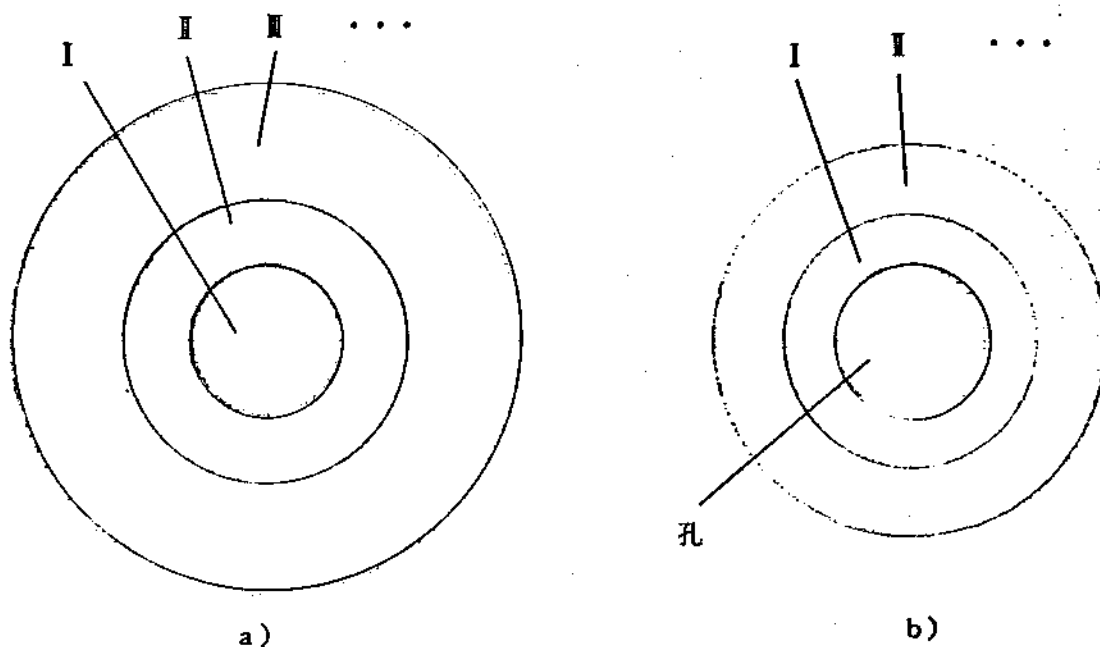
第 20 図
 円筒形封着体の端部に
 存在するずり応力

G : ガラス
 M : 金属

- a) 内側が金属の中実封着体でガラスの方が高膨張の場合
- b) 内側がガラスの中実封着体でガラスの方が高膨張の場合



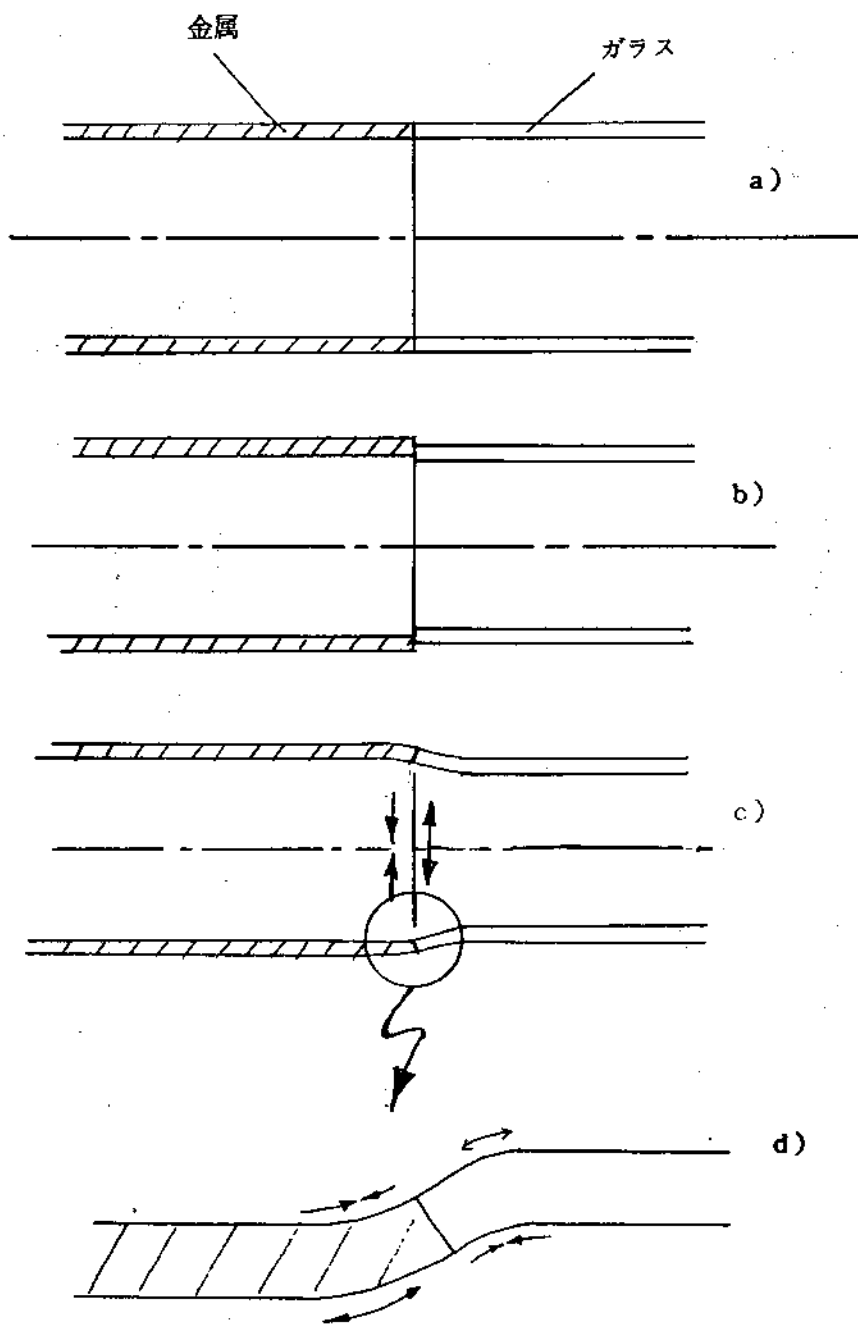
第 21 図
封着体中でのジュメット線の端部附近のクラック



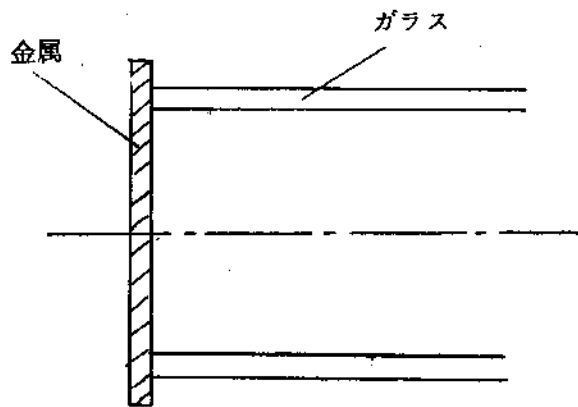
第 22 図
円筒形の中実な封着体 a) と中空な封着体 b)



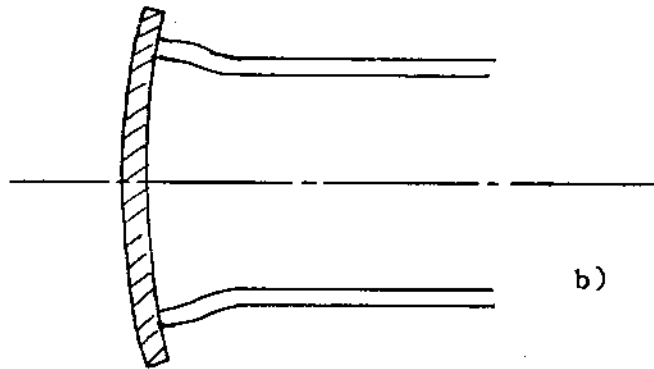
第 23 図 平板形封着体の例



第 24 図 金属管とガラス管との突合わせ封着体



a)



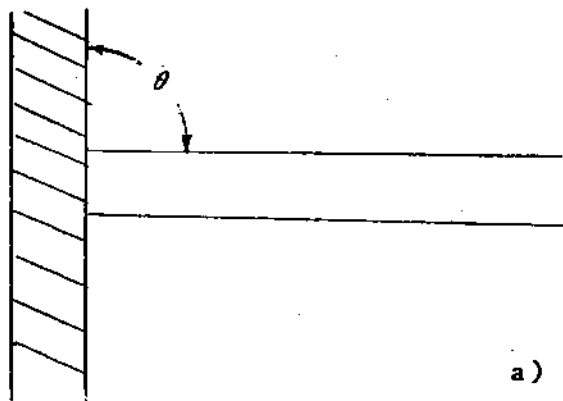
b)

第 25 図

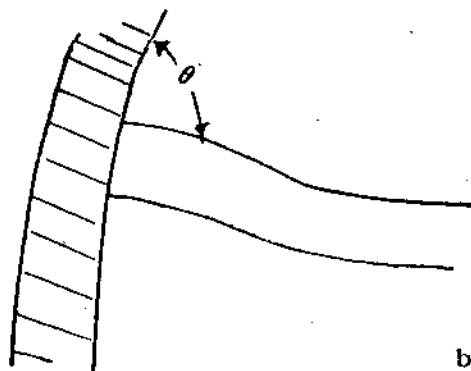
ガラス管と金属板との突合わせ封着体

a) 融着時

b) 冷却時、ガラスの方が高膨張の場合を示す



a)

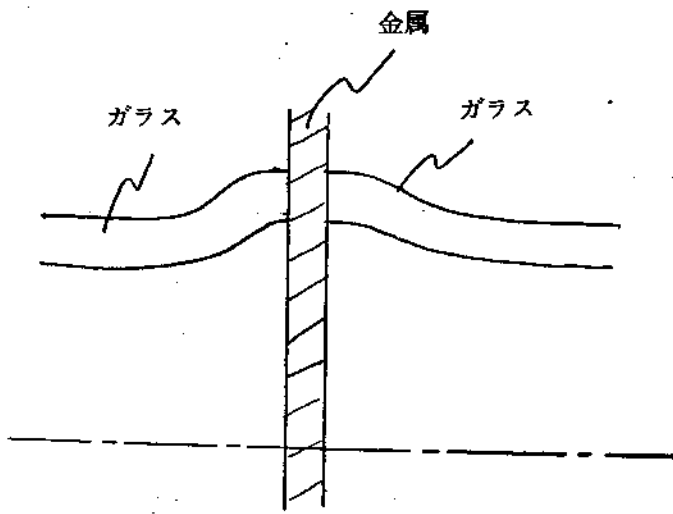


b)

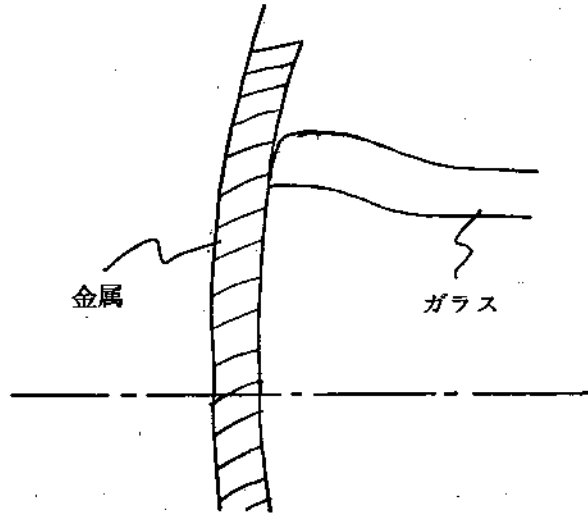
第 26 図

a) 融着時と

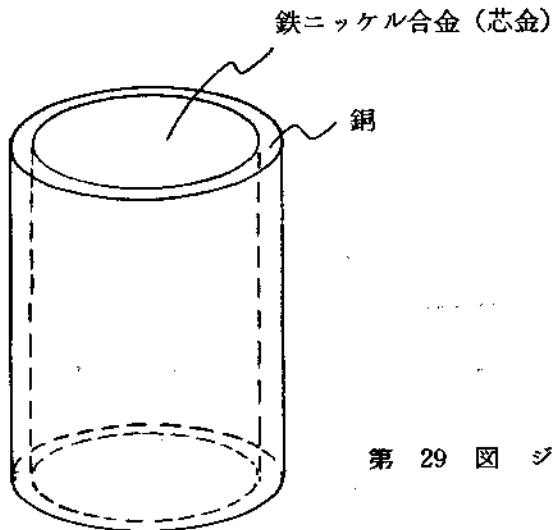
b) 冷却後の接続角度の不変性



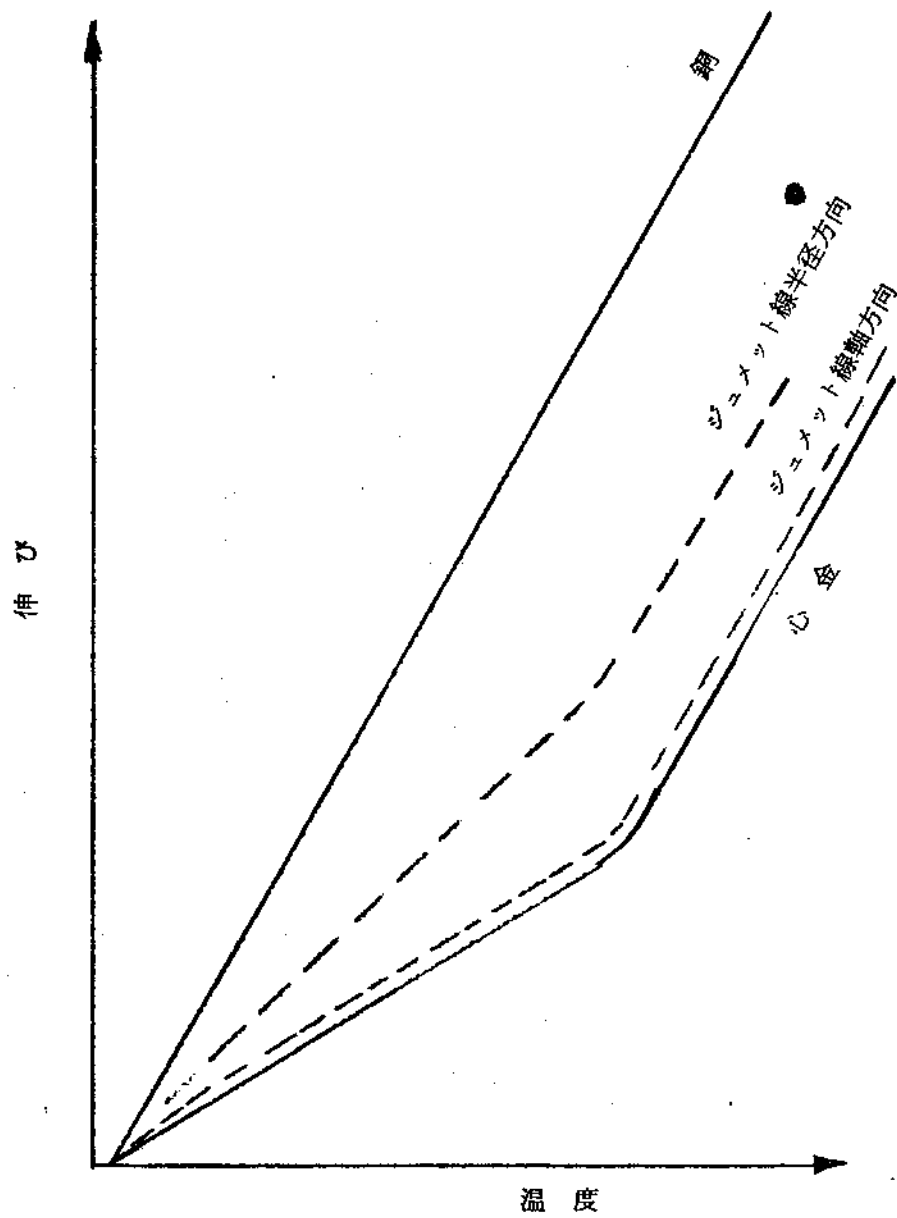
第 28 図
金属変形が小さい
突合わせ封着体



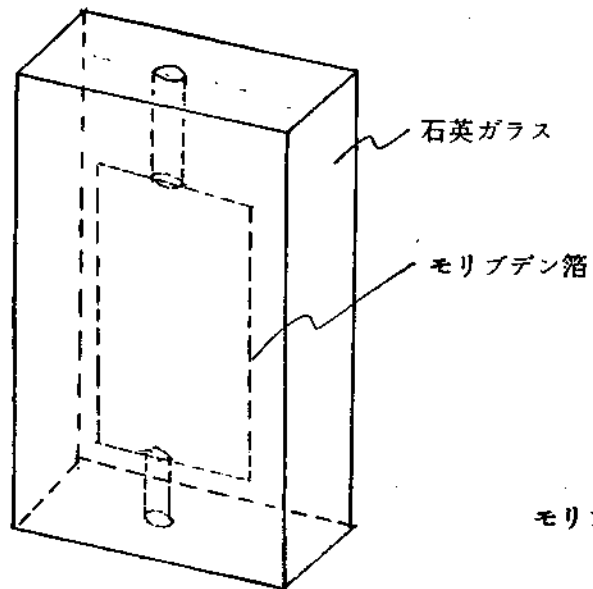
第 27 図
融着不十分な封着体



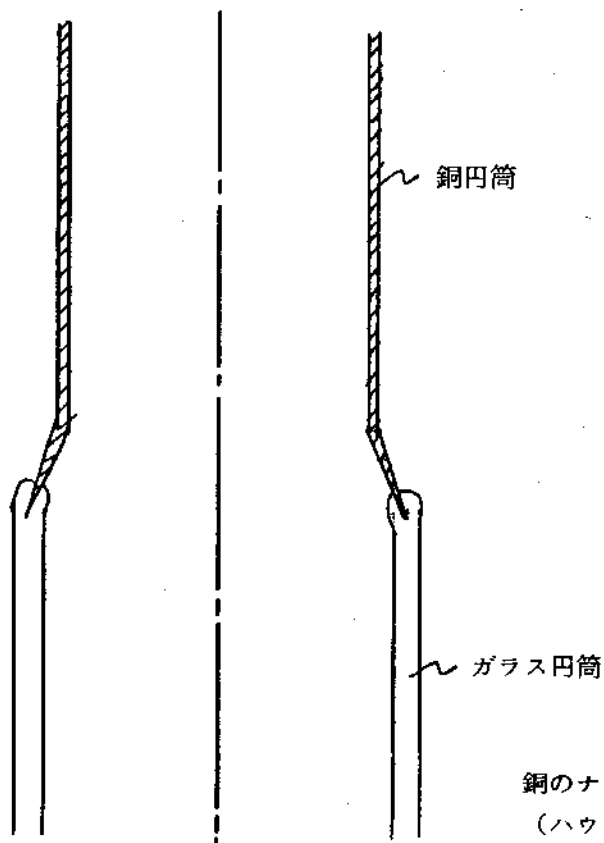
第 29 図 ジュメット線の構造



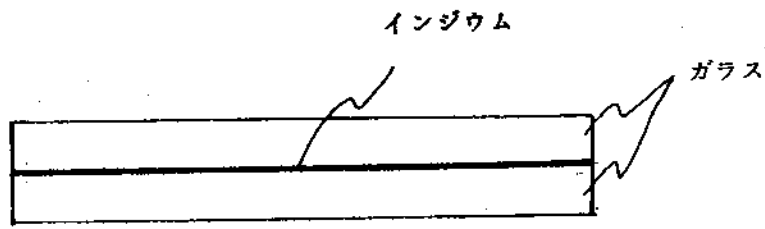
第 30 図
 ジュメット線とその材料の熱膨張特性
 (定性的表現である)



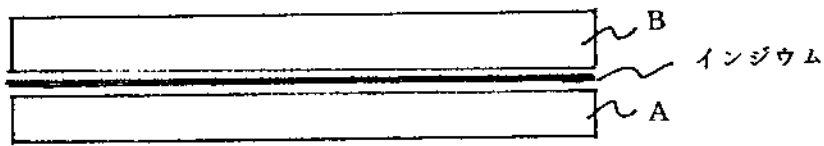
第 31 図
モリブデン箔と石英ガラスとの封着体



第 32 図
銅のナイフエッジを利用した封着体
(ハウスキーパーシール)

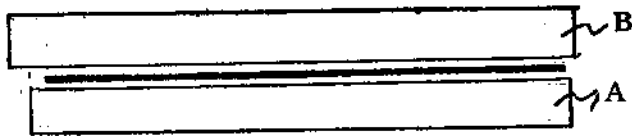


第 33 図
同質のガラス板 2 枚を
インジウムで接着した
封着体

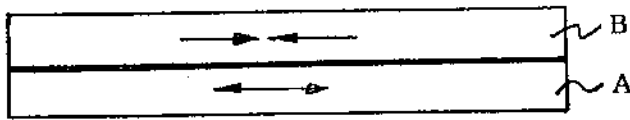


第 34 図
異質のガラス板 2 枚
をインジウムで接着
した封着体

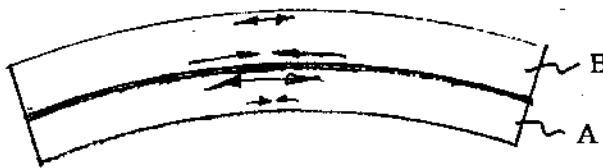
a)



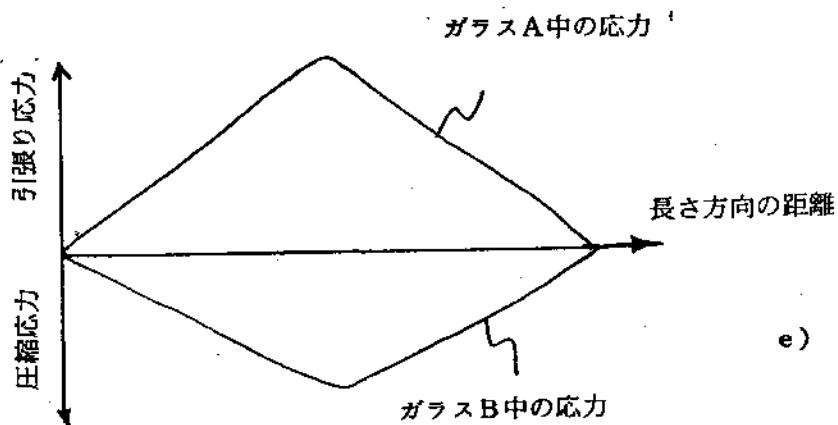
b)



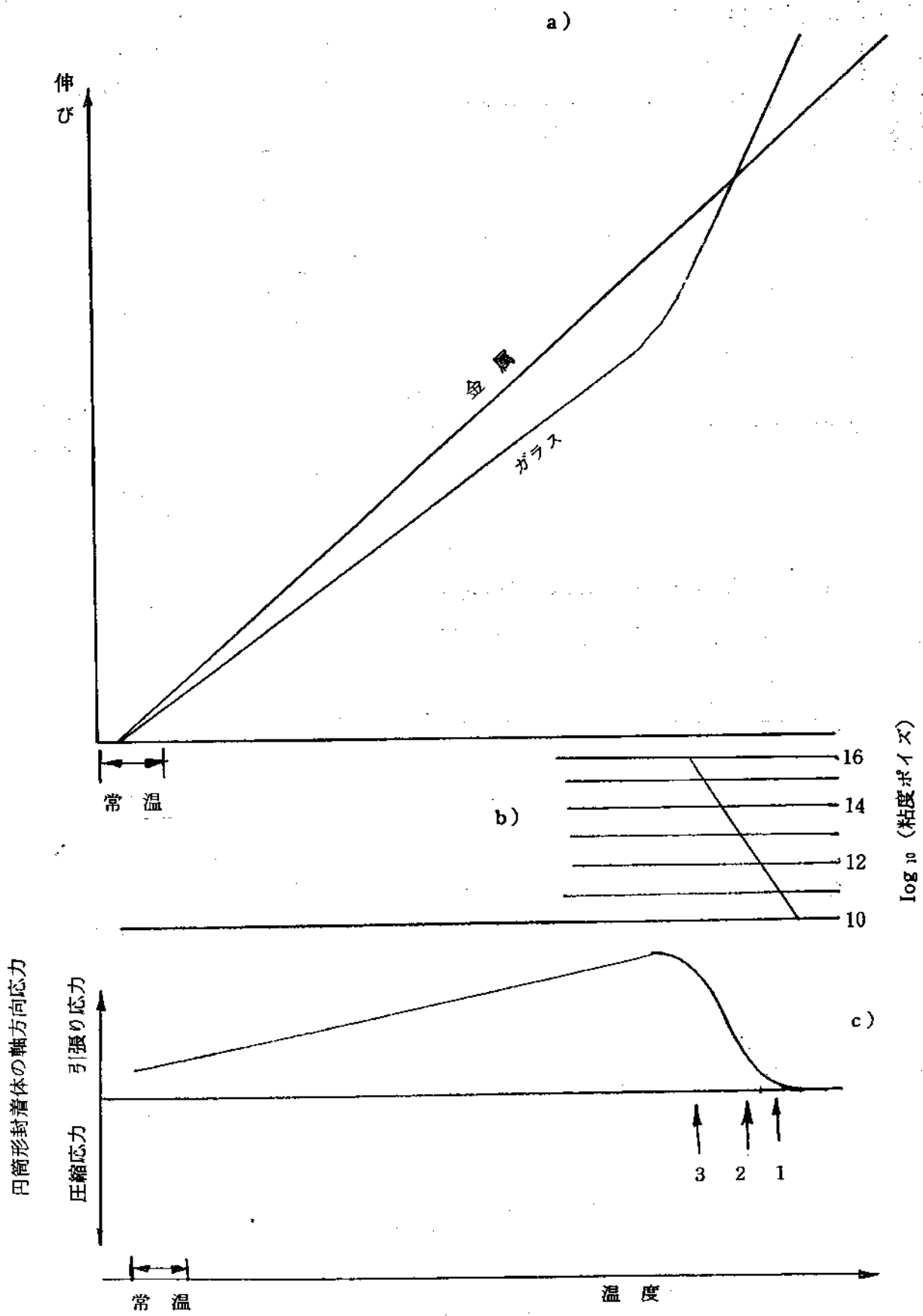
c)



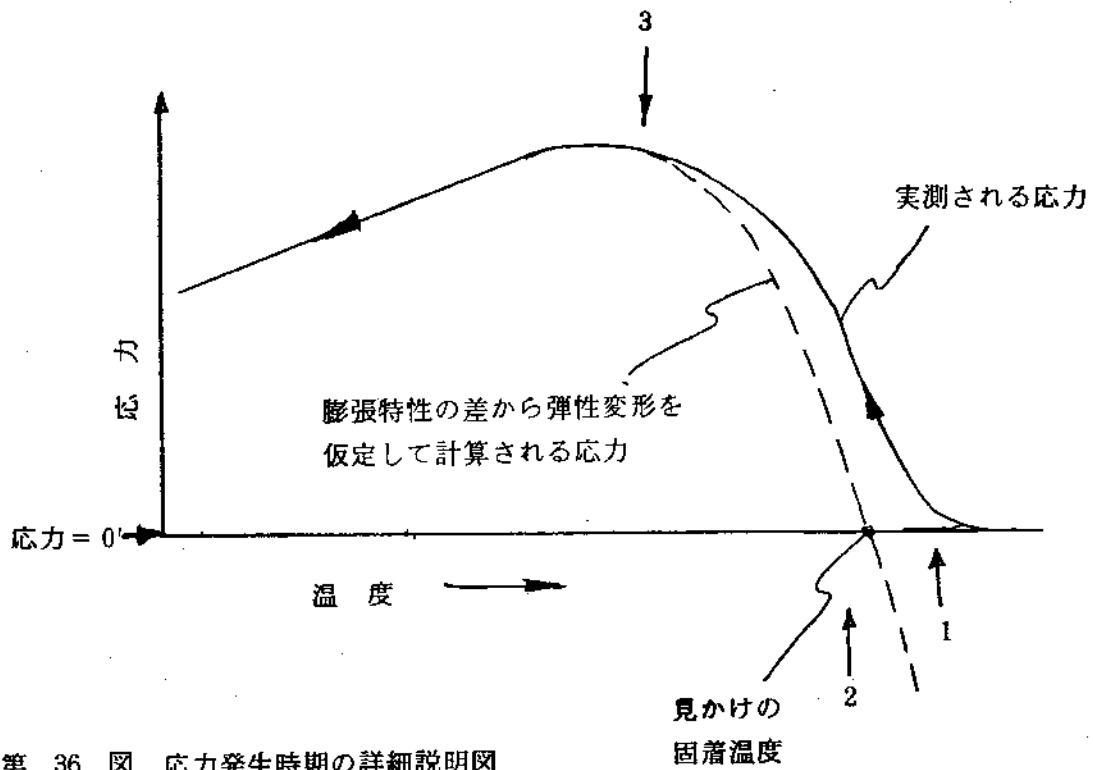
d)



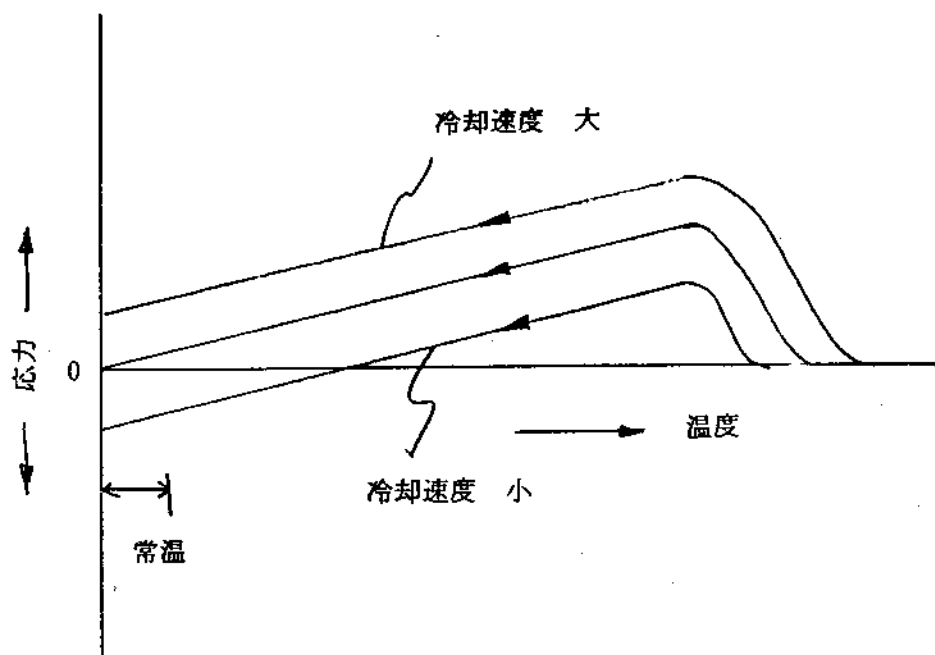
e)



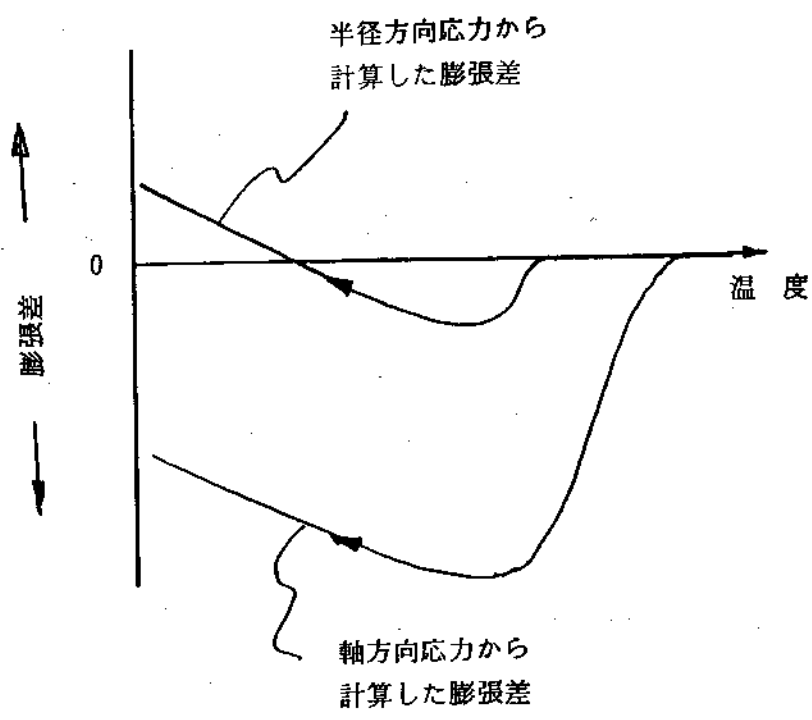
第 35 図 封着体中の応力発生経過の説明図



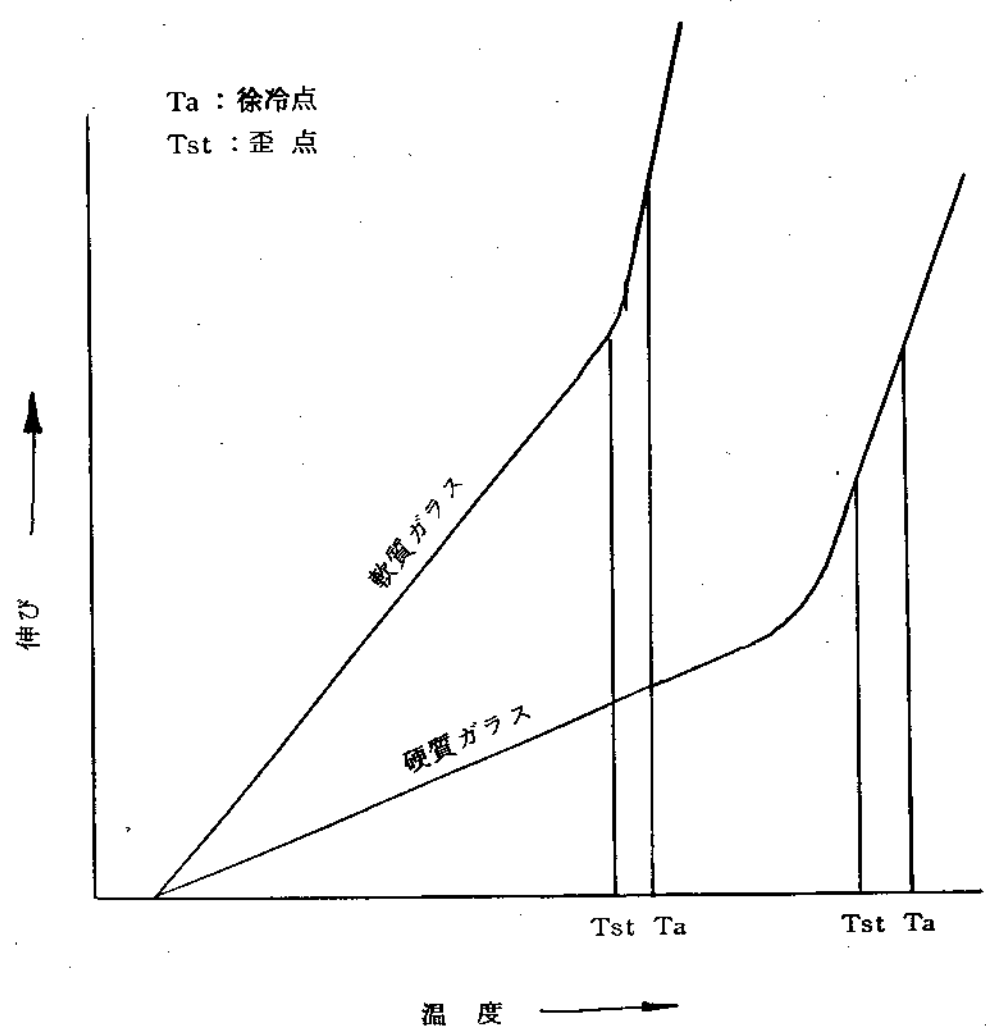
第 36 図 応力発生時期の詳細説明図



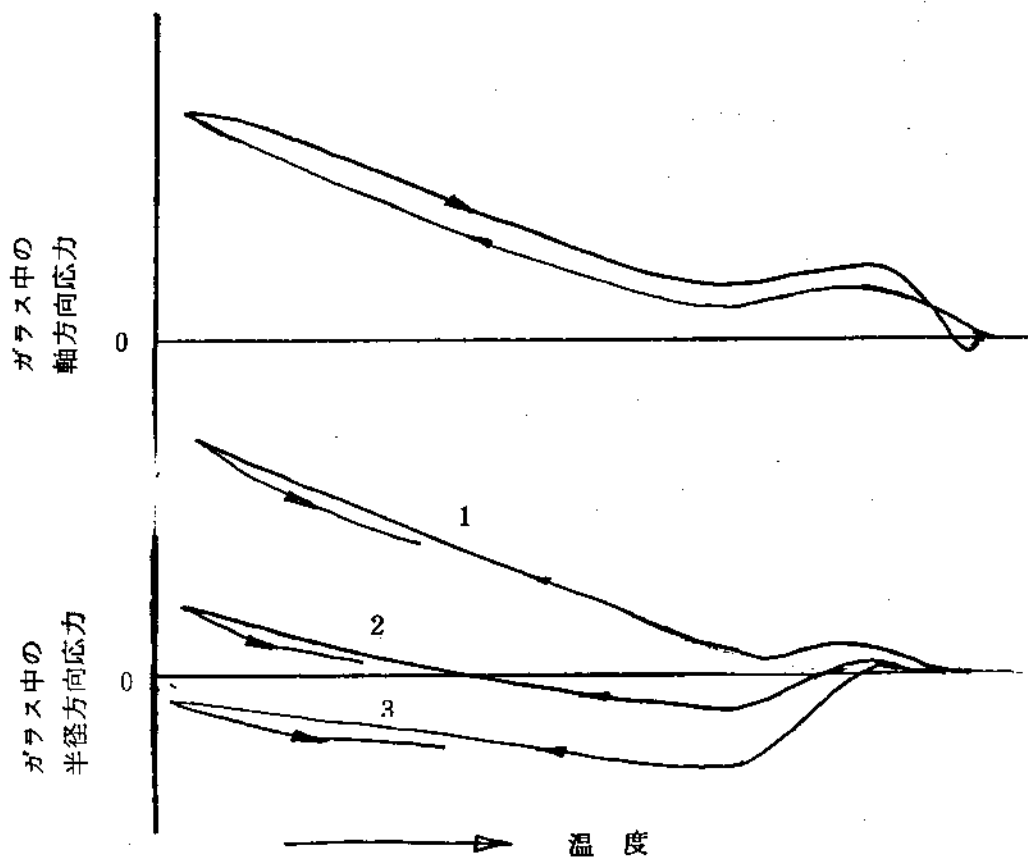
第 37 図 冷却速度と応力発生過程との関係



第 38 図
モリブデン線の円筒形
封着体中の「膨張差」



第 39 図 ガラスの膨張曲線と徐冷点、歪点との関係



第 40 図

ジュメット線—ガラス封着体中の応力
発生経過

1 → 2 → 3 と銅の厚さが増している。

第 41 図
モリブデン箔の封着体中の
応力の発生・変化の経過

