

2. 技 術 解 説

「ガラスを用いた気密封着」

工学博士 岸 井 貫

1. 封着技術の100年

エジソンが白熱電灯を発明してから約110年が過ぎた。ガラスの

- a、可視光を良く透視させる。
- b、ガス類に対しては不透過性である。
- c、電気的には絶縁体である。

という性質は、電灯への利用において好都合であり欠くことができないものであった。これは放電灯類に対しても同じであったし、電子管に対してはbとcの性質が必要であった。最近の撮像用・表示用の電子管や半導体素子にはaの性質が再び不可欠となった。

ところでさらに立入って考えると、bとcの性質を利用するためにはガラスと金属とが気密に封着できなければならない。エジソンは当時理化学用などに使われていたガラスの中からクラウンガラスやフリントガラス（註1）を選び、白金を封入線に使ったと言われる。このようなガラスの選択の影響は最近まで残っていた。

他方で封入線ではジュメット線が発明されて白金を置き換えたほか、各種の照明用・電子技術用管球の開発に伴ない、多種類の金属材料が導入された。

封入・封着に使用されるガラスと金属の組み合わせはすべて、気密封着の耐久性・信頼性を検討された。最近の約40年間に於いても世界全体として見れば研究が絶えず続けられてきた。この種の問題は永久に残るのかも知れない。

ガラスが光を良く透過させるという性質は、封着の研究に光弾性技術を利用できるという点で特に有利であった。最近では複雑な形の封着体中の応力分布を、有限要素法によりコンピュータを使って解くという手法が一般化した。

2. 封着体中の応力と気密の信頼性

ガラスと金属との封着体の気密性が破れるのは、ガラスの亀裂またはガラス/金属界面の破裂が直接原因であることが多い。この原因をさらにさかのぼれば、ガラス/金属間に熱膨張特性の不適合があり、ガラス内または界面に過大な応力が働いたことである。耐久性のある界面の形成は重要なことであるが、本稿ではこれに触れず、封着体中の応力について述べる。

3. ガラスに働く応力

3-1 ガラス棒の伸び・縮み

半径 R mのガラス棒の両端をチャックでつかみ、垂直に吊り下げて下端に W kgの錘を加える（第1図）。チャックにつかまれた部分とチャックに近い部分を除いた長さを L mとする。チャック及びその附近の部分では表面に直角な方向の圧力やチャック/ガラス界面に沿うずりの力が働くけれども、それ以外の部分では棒の軸と平行な方向の張力 W kg f = $9.8 \times W$ Nだけが働く。この張力に対応する引張り応力 p は $p = 9.8 \times W / \pi R^2$ Paである。

引張り応力 p のために、長さ L の部分は $L(1 + \frac{p}{E})$ へと伸び、半径 R は $R(1 - \gamma \frac{p}{E})$ へと縮む。
 (第2図)。ここで E はガラスのヤング率でおよそ $7,000 \text{ kg/mm}^2 \cong 7 \times 10^{10} \text{ Pa}$ であり、 γ はポアソン比で $0.2 \sim 0.25$ くらいである。

ガラスの抗張強度を $5 \text{ kg/mm}^2 \cong 5 \times 10^7 \text{ Pa}$ とすると、長さ 1 m の棒は破断するまでに $1 - \frac{5 \times 10^7}{7 \times 10^{10}}$
 $= 0.7 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.7 \text{ mm}$ だけ伸びる。

引張りのかわりに圧縮力 $W \text{ kg f}$ を加えると、圧縮応力は $9.8 \times W / \pi R^2 \text{ Pa}$ であり、長さは $L(1 - \frac{p}{E})$ へと縮み、半径は $R(1 + \gamma \frac{p}{E})$ へとふえる。

3-2 ガラス柱の曲げ

ガラスの角柱の下端をコンクリートのブロックに挿して固定し、上端に綱をかけて水平方向に $W \text{ kg f}$ の力で引張る(第3図)。

コンクリートブロック内では、柱上端にかけた力と絶対値が等しく方向が反対の力がブロックから柱へと働く。上端および下端の着力点に働く力は偶力となり、そのモーメントは $W \text{ kg f} \times$ 着力点間の距離 $H = 9.8 \times W \times H \text{ N} \cdot \text{m}$ である。

柱は偶力で曲げられ、その一方の側では縮み、他方の側では伸びる(第4図上)。これらの間には伸び縮みのない中性面がある。縮められた側では圧縮応力、伸ばされた側では引張り応力が発生する。応力の絶対値は中性面からの距離に比例する(第4図下)。これらの応力は次の二つの条件を満たすように分布する。

A、応力を柱断面にわたって積分すると零である。

B、応力により断面内に生じたモーメントは、外力によるモーメント $9.8 \times W \times H$ と絶対値が等しい。

(方向は逆である)

厳密に調べると、ポアソン比の影響により柱の断面は扇形に変わる。ポアソン比の測定にはこのような効果が利用される。

棒や柱を二つの支点で支えて中央に荷重をかけたり(第5図上)、両端と中央に指をかけて曲げたり(第5図下)する場合は上記と同様だと見なされる。そうして支点・荷重点・指で触れた部分だけは、表面に垂直に働く力や応力集中がある。その他の部分には長さ方向にだけ応力が働いている。

3-3 ガラス管に働く応力

内半径 R_1 、外半径 R_2 のガラス管の端面に $W \text{ kg f}$ の圧縮力または引張り力が働いたとする(第6図)。管の軸方向に働く応力は、 $9.8 \times W / \pi (R_2^2 - R_1^2) \text{ Pa}$ である。管壁に直角な方向の応力や壁面に沿うずり応力は働かない。

$W = 0$ という特殊例の場合には軸方向の応力も働かない。

管の内表面に p_i という静水圧、外表面に p_o という静水圧、端面に $W \text{ kg f}$ の力が働いているとする(第7図)。このような管内の応力分布は一般に、

$p_z = C$	A、B、C : それぞれ定数	z	: 軸方向を示す添字
$p_r = A + \frac{B}{R^2}$	R	p	: 応力
$p_\theta = A - \frac{B}{R^2}$	r		: 半径方向を示す添字
	θ		: 切線方向を示す添字

という形で表現される。

定数Cは前記の場合と同じく、 $9.8 \times W / \pi (R^2 - R_1^2) \text{ Pa}$ である。AとBとは

$$R = R_1 \quad \text{で} \quad p_r = p_i$$

$$R = R_2 \quad \text{で} \quad p_r = p_o$$

という二つの境界条件式を解いて求めることができる。

3-3-A 特殊例として、 $R_1 = 0$ とすると丸棒になる。 $R = 0$ で p_r 、 p_θ が有限値だという条件からは、 $B = 0$ で、Rに関係なく $p_r = p_\theta = A = p_o$ という応力分布が導かれる。すなわち円柱内では切線方向、半径方向に働く応力は一定であり、たがいに等しく、表面に働く静水圧に等しい。

このことは他の形の断面を持つ柱や棒についても成り立つ。

3-3-B 別の特殊例として $p_i = p_o$ となっていると、やはり $B = 0$ であり、Rに関係なく $p_r = p_\theta = A = p_i = p_o$ が成り立つ。

3-4 端部を封じられたガラス管

両端を封じられた管では、軸方向に加えられる力として、内圧と外圧が端面に及ぼす力の代数和 $W_i - W_o = p_i \times \pi R_1^2 - p_o \times \pi R^2$ がある(第8図)。その他もしも他物により軸方向に押されているならばその力も代数的に加算される。これにより応力分布は、

$$p_z = C = (W_i - W_o) / \pi (R^2 - R_1^2)$$

$$p_r = A + \frac{B}{R^2}$$

$$p_\theta = A - \frac{B}{R^2}$$

A、B、Cはそれぞれ定数

となり、A、B、は前記と同じ方法で求められる。

4. ガラス/金属融着体中の応力

4-1 板の融着体

ガラスと金属の板を融着したと考える。板の形は、長さ≫幅≫厚さの関係を持つ細長い薄板である(第9図)。ガラスが軟化するような高温で融着が起き、常温まで冷やされてきた。この間にガラスと金属との間に膨張差 δ が発生し、さらにそのため応力が働き出した。板の形の条件から応力は長さ方向のものが他の方向の応力により相当に大きい(端部での応力集中はまた別である。後記参照のこと)

4-1-A ガラスの板が金属板よりもかなり薄い場合を先ず考える(第10図)。膨張差の効果はすべてガラスにしわ寄せされて現われる。ガラスは δ だけ伸ばされ(ガラスの方が膨張率が大きく、金属の方が余分に縮む場合)、または縮められ(ガラスの方が低膨張で、金属の方が余分に縮む場合)、ガラス中には長さ方向に $E \delta$ (E:ガラスのヤング率)の引張り応力または圧縮応力が発生する。界面に垂直な方向に働く力は発生しない。金属板中の応力は零に近い。

応力の値の計算例を次に示す。

融着・固化した温度と常温との温度差 : 500 ℃
ガラスと金属との膨張係数の差 : $2 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
ガラスのヤング率 : $7,000 \text{ kg/mm}^2 \cong 7 \times 10^{10} \text{ Pa}$

とすると、膨張差 $\delta = 500 \times 2 \times 10^{-7} = 10^{-4}$ 、

ガラス中の応力は、 $7 \times 10^{10} \times 10^{-4} = 7 \times 10^6 \text{ Pa} \cong 0.7 \text{ kg/mm}^2$ である。

融着体の端部には応力が集中する。その範囲はガラス厚さの数倍程度の長さである(第11図)。長さ方向応力は中央部より小さいが、界面にずり応力が存在し、端に近い程強い。ガラスを縮めまたは伸ばすための力は端部のずり応力から供給される。

4-1-B ガラスと金属の板厚の比が極端に大または小でない時は、膨張差の効果はガラス/金属の双方が分担するようになる(第12図)。金属の方が膨張率が大きく、ガラスより δ だけ余分に縮む場合を例として考える。また計算にもいくらか近似が入ってくる。

融着しないで両者がそれぞれ自由に縮めば δ だけの膨張差があるが、実際は融着されているのでガラスは縮められ金属は伸ばされて δ の差を埋める。差を分担する割合は両者のヤング率×板厚、という量に反比例する。上記の伸び縮みにより金属中に引張り応力、ガラス中に圧縮応力が発生する。この二つは偶力であってモーメントを発生するので、融着体は曲がることにより応力を再分布させモーメントを零に戻す。これがバイメタル作用である。応力再分布は次の二つの条件を満足するようになって終了する。

断面での応力の積分が零、

断面内に働く曲げモーメントが零。

界面に垂直な方向に働く応力と界面に沿って働くずり応力は、端部を除けば零である。

端部には応力が集中する(第13図)。その範囲は板厚ないしその数倍に相当する長さである。界面に沿うずり応力によりガラスを縮め金属を伸ばすような力が供給される。界面に垂直に働く応力によりガラスと金属とはたがいに剥がれないように拘束される。いずれの応力も端に近づくとき急激に大きくなる。

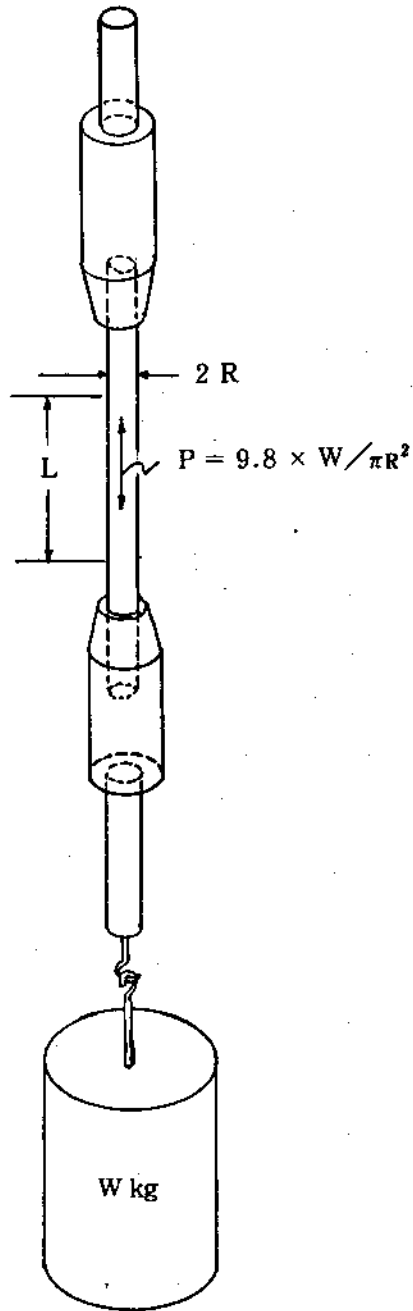
4-1-C 融着される板が円板であったり幅広い板であっても4-1-Bに記したことは定性的に成立つ。違いは応力が二次元的に分布するため、ポアソン比による変形の影響が現われ、応力の絶対値が20~30%大きくなるという点である。

註1.

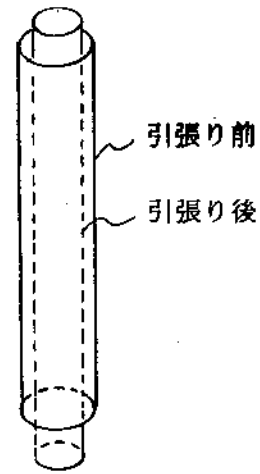
クラウンガラス：名称はクラウン法で板ガラスを作るためのガラスであったことに由来する。ソーダ石灰ガラス組成であり、使用量が比較的多かったため原料に由来する不純物も多かった。

フリントガラス：工芸用などに使うためケイ石（ひうち石、フリント）を原料として鉄分の混入を避けた。屈折率を高めるため酸化鉛を含むことが多かった。

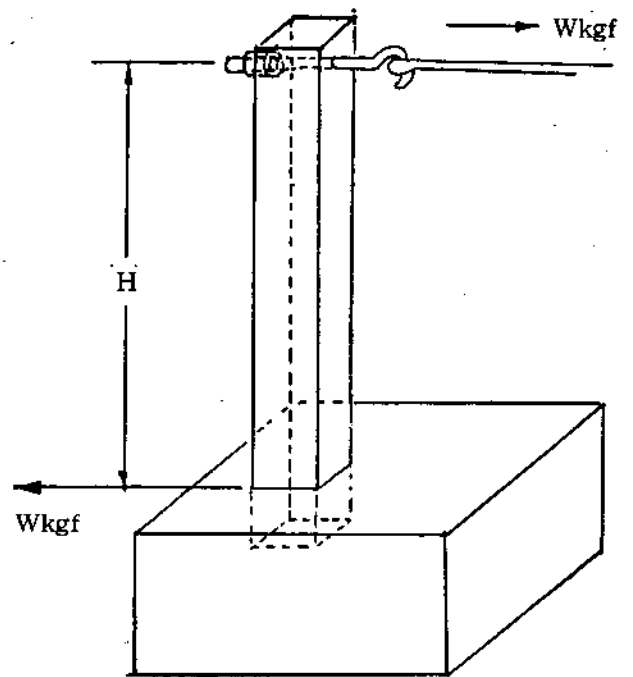
光学ガラスでは屈折率1.50~1.55を境として高屈折のものをフリントガラス、低屈折のものをクラウンガラスと呼ぶ習慣がある。



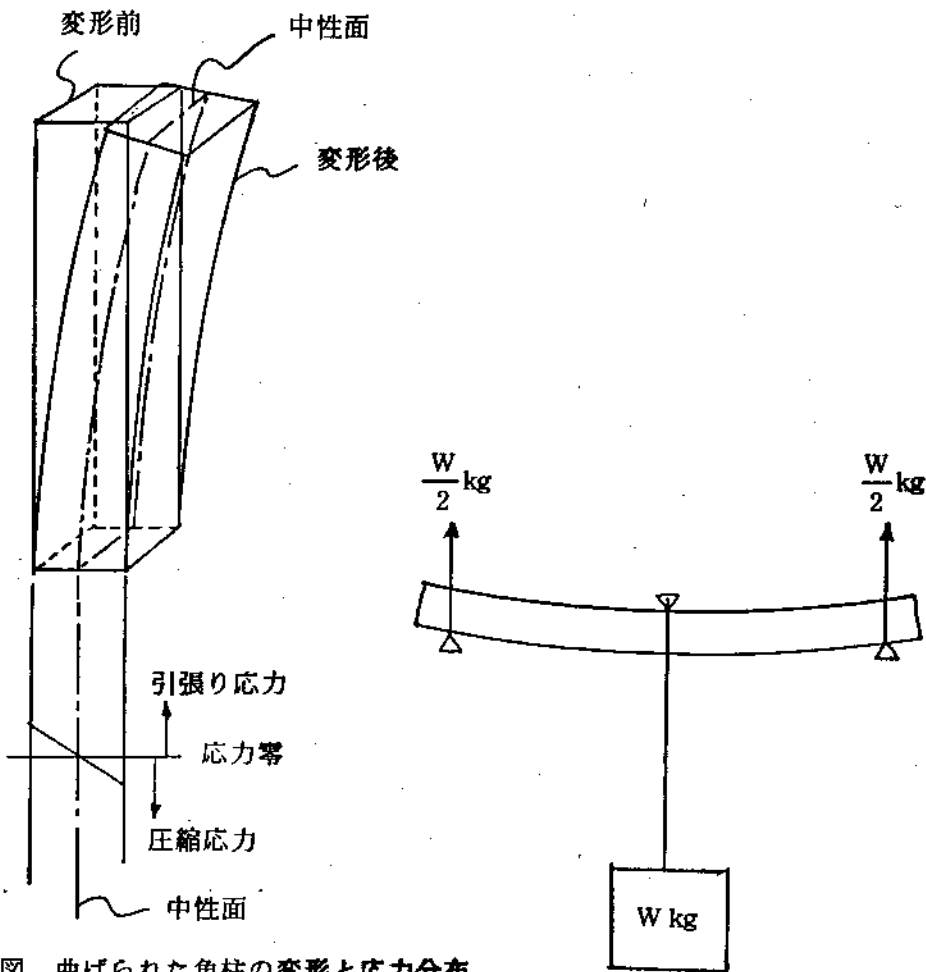
第1図 張力 $W \text{ kgf}$ を加えられたガラス棒



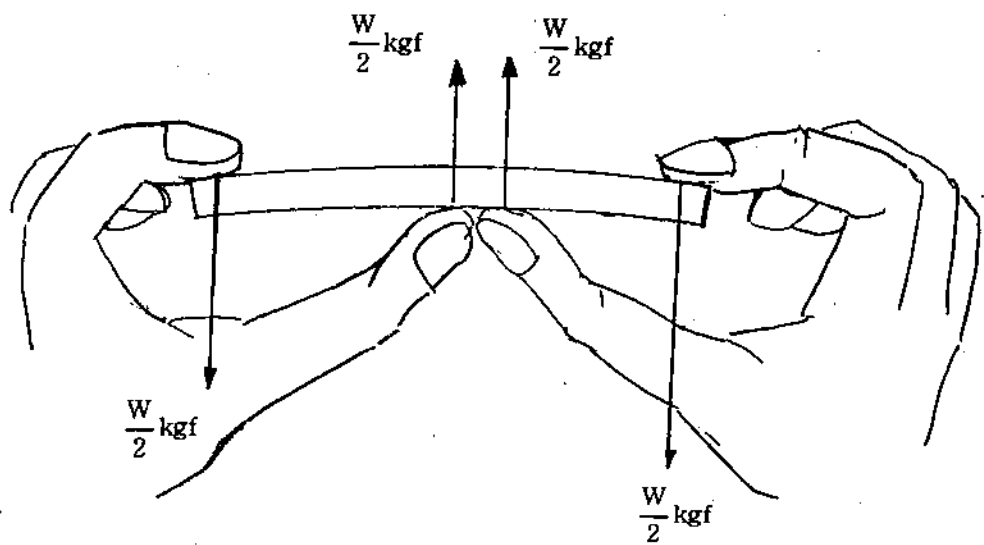
第2図 丸棒の引張りによる変形



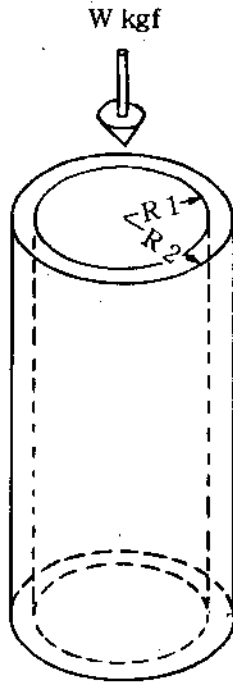
第3図 角柱の曲げ



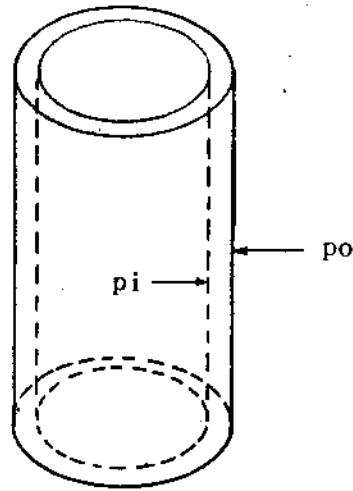
第4図 曲げられた角柱の変形と応力分布



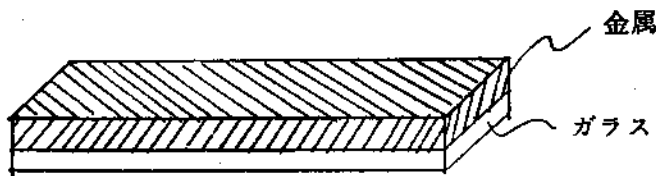
第5図 上：荷重によるガラス棒の曲げ
下：指によるガラス棒の曲げ



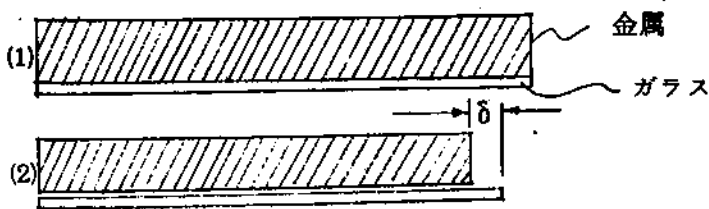
第6図 端面に外力が働くガラス管



第7図 内面と外面にそれぞれ圧力が働くガラス管

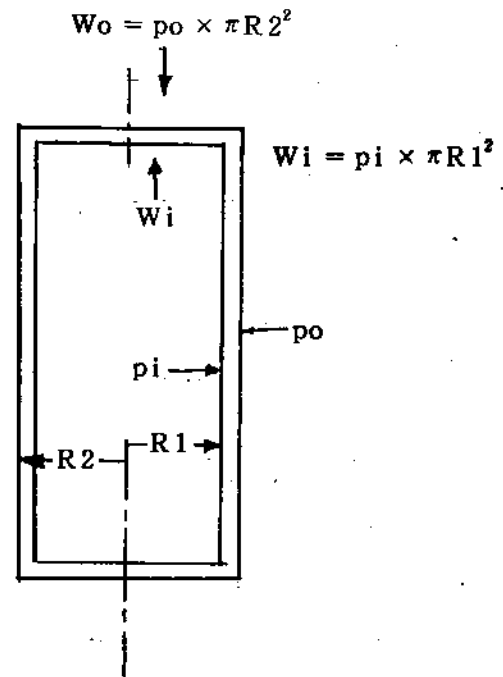


第9図 ガラス板と金属板との融着体

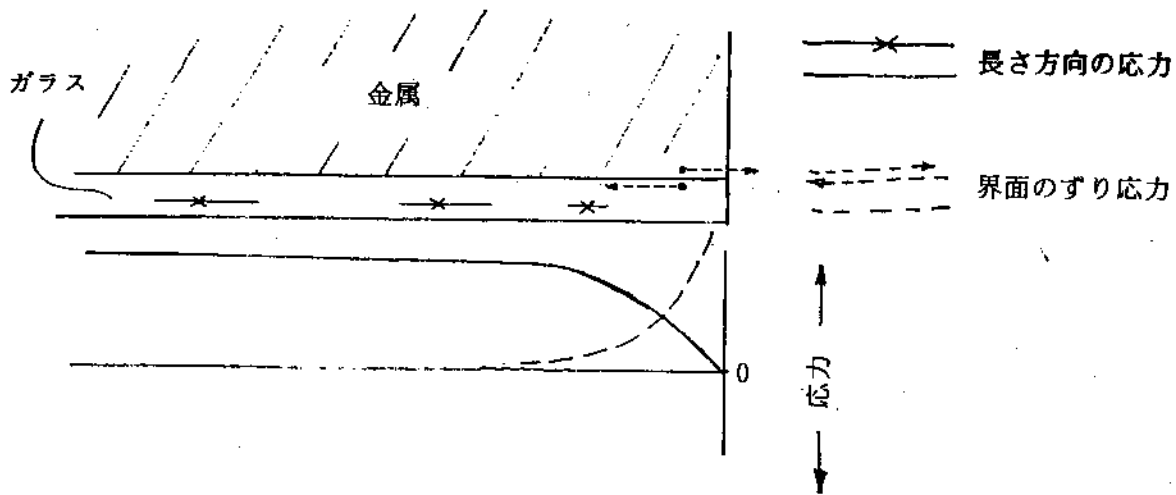


- (1) 高い温度でガラスと金属とが融着される。
- (2) 常温まで冷やすと、仮にガラス、金属が自由に縮んだとすると、金属の方が δ だけ余分に縮む。
- (3) 実際にはガラスが $P = E\delta$ だけの圧縮応力により δ だけ縮められて融着が保たれる。

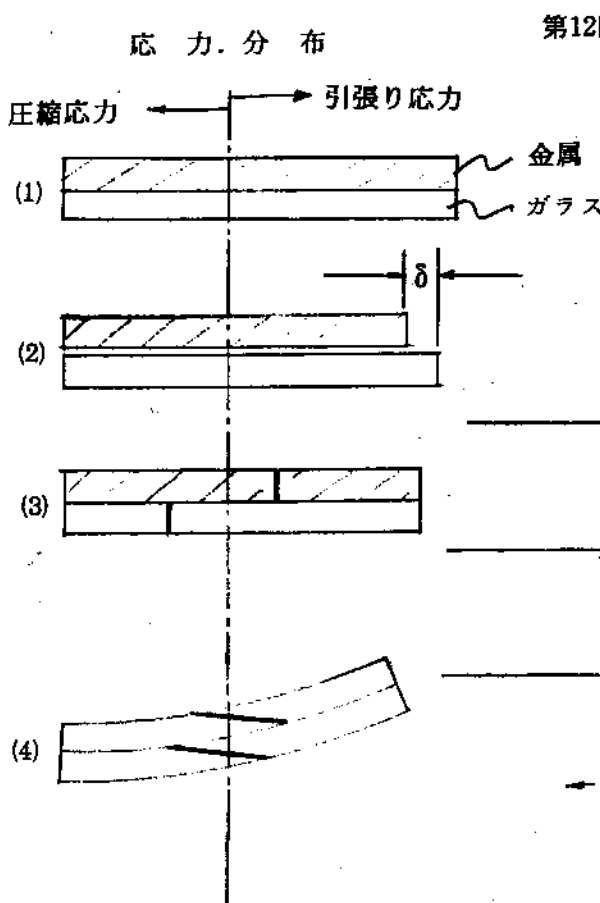
第10図 ガラス板が薄い場合の応力の働き方 (金属の方が高膨張の場合)



第8図 両端を封じられたガラス管



第11図 端部での応力の分布（応力集中）状況



第12図 バイメタル型融着体中の応力の働き方
(金属の方が高膨張の場合)

- (1) 高い温度でガラスと金属とが融着される。
- (2) 常温まで冷やすと、仮にガラス、金属が自由に縮んだとすると、金属の方が余分に縮む。
- (3) 実際には金属がガラスにより伸ばされ、ガラスが金属により縮められ、融着が保たれる。断面内の応力の積分は零になる。
- (4) 全体がバイメタルのように曲がり、断面に働くモーメントを零にする。

第13図 バイメタル型融着体の端部での応力分布（応力集中）