

静的に使用される圧縮形成形パッキンの研究

Statical Uses of Compression-type Molded Packings

限 彰 二*
Shōji Kuma

要 旨

静的に使用される圧縮形成形パッキンについて、その形状とシール特性および温度特性などを実験的、理論的に検討した。その結果、パッキンは充満形と非充満形に大別でき、充満形はエネルギー弾性として、非充満形はエントロピー弾性として取り扱うことにより理論と実験はよく一致した。また、非充満形パッキンは充満形パッキンに比べて種々の特性がすぐれていることがわかった。

1. 緒 言

液体、気体などを使用する機器において、パッキンのしめる役割は大きい。機器運転中のパッキンの事故はその交換に大きな労力を費やし、小さな1個のパッキンとはいえ軽視することはできない。フランジ・ガスケットのような単純圧縮形シール、ピストン軸受におけるOリングのような動的に使用される圧縮形成形パッキンなどの取り扱いについては数多くの研究が報告されている⁽¹⁾。このほかに軸受と同様な構造で軸が静止しているという使用例がある（たとえば、OFケーブル終端箱頭部に使用される油漏えい防止用パッキンなど）。このような静的に使用される圧縮形成形パッキン^{*}についての研究はきわめて少なく、動的な場合の考え方で代用しているのが現状である。しかし、動的な場合は摩擦を小さくするためにパッキンの表面を流体でぬらしながら使用する⁽¹⁾のに対して、静的な場合は一滴の漏れも許されることが多いなど両者の扱いはまったく異なっていなければならない。そこで静的に使用される圧縮形成形パッキンについて形状と温度の影響を実験および理論的に検討した。実験に使用したパッキンはソロバン玉パッキン、ラミネート・パッキン、Oリングの3種類である。それらの形状を図1に示す。

2. パッキンのシール機構

ゴムはほかの弾性体に比べて特異な弾性を示す。一般の弾性体はその体積変化によるエネルギー弾性であるが、ゴムはポアソン比が0.5に近くほとんど体積変化がない。それにもかかわらず大きな弾性を示すのはゴムがエントロピー弾性体であるからにほかならない。しかし、Oリングのように容器との間に空げきがある場合（非充満形とよぶ）は体積一定で変形できるが、ソロバン玉パッキン、ラミネート・パッキンなどは空げきがない（充満形とよぶ）ので体積変化がありエネルギー弾性と考えられる。

2.1 充満形パッキンのシール機構

図2のような充満形パッキンについて考えてみる。このパッキンは内径 r_1 、外径 r_2 、厚さ z_0 で、均質であるとし、これが図2(b)のように空げきなく詰め込まれたとする。これを z 方向に Δz だけ圧縮したとき（以下、 Δz を締付距離とよぶ）、軸がうける圧縮応力 σ_r （以下、緊迫力とよぶ）を求める。まず、円柱座標 (r, θ, z) によってパッキン内に作用する半径、円周、厚さ方向の圧縮ひずみおよび圧縮応力をそれぞれ $(\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z)$ および $(\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z)$ で示すと、次の関係がある。

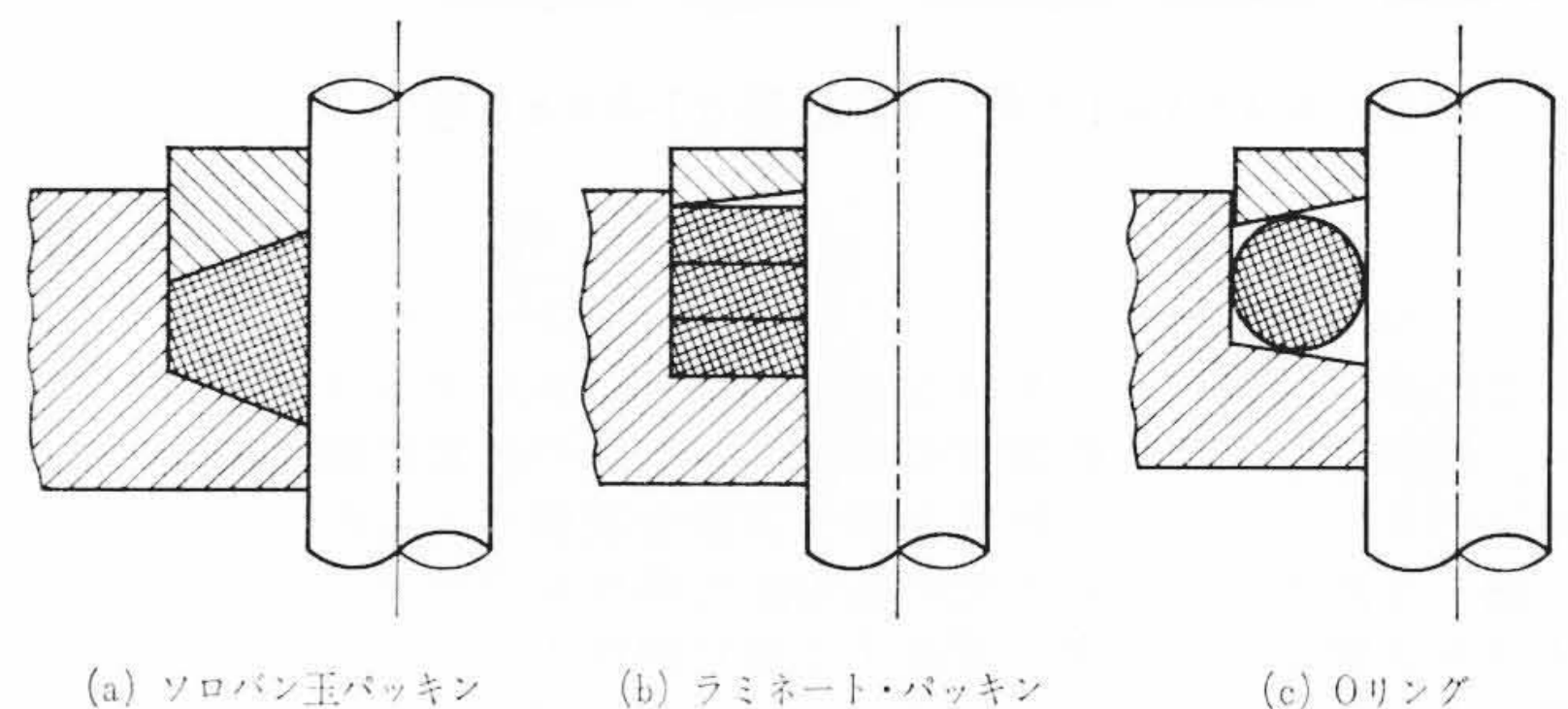


図1 各種パッキン

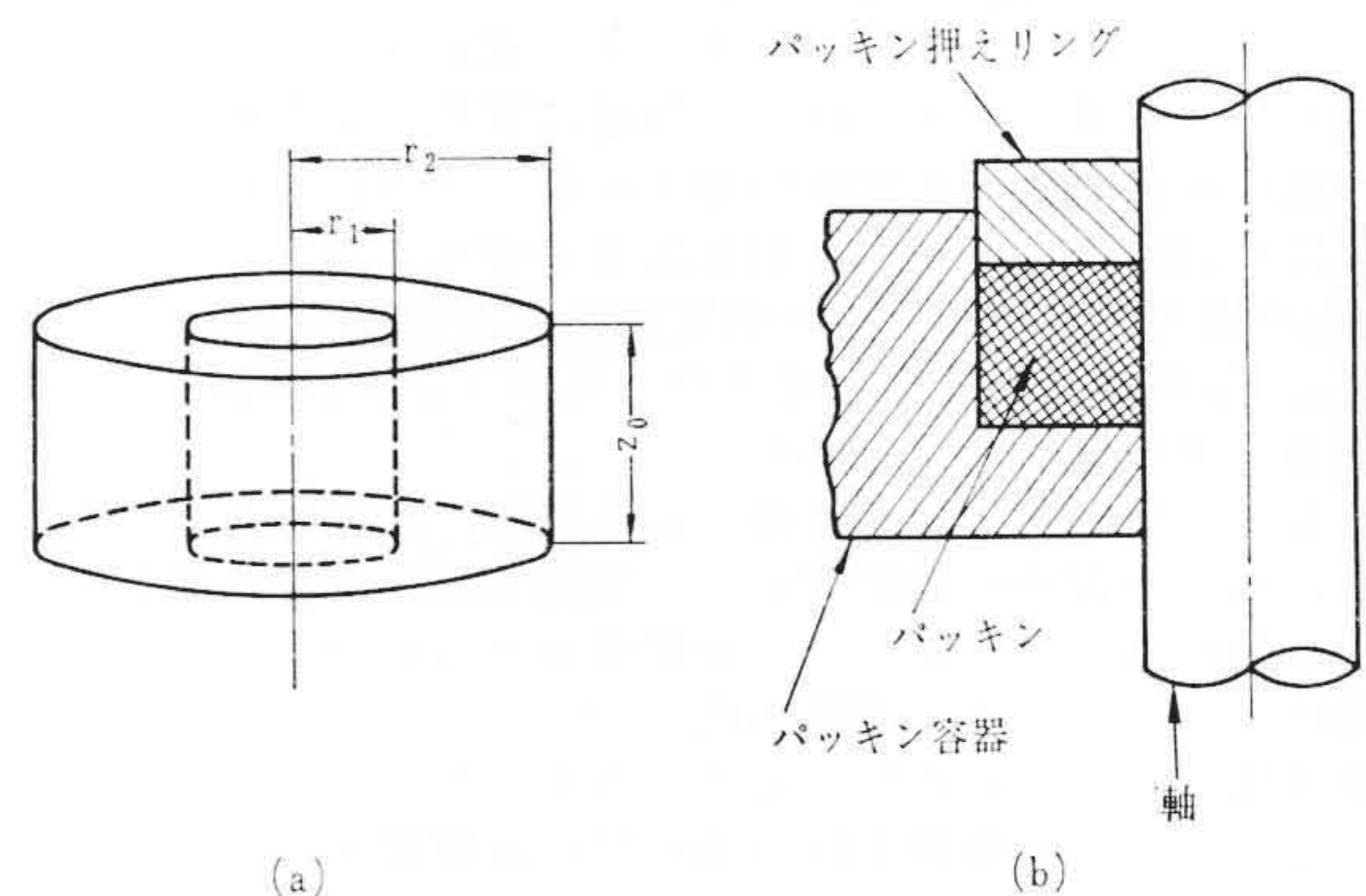


図2 代表的充満形パッキン

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} \{ \sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z) \} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} \{ \sigma_\theta - \nu(\sigma_z + \sigma_r) \} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ν はポアソン比、 E は弾性係数である。

パッキンは z 方向に Δz 圧縮され、 r および θ 方向は拘束されていることから次の条件が得られる。

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = 0, \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta z}{z_0} \dots\dots\dots (2)$$

また、締付距離 Δz を与えるに要する圧縮荷重（以下、締付荷重とよぶ）を F_z とし、圧縮面の面積を S とすると、(3)式の関係がある。

$$\sigma_z = \frac{F_z}{S} \dots\dots\dots (3)$$

(1), (2), (3)式から、締付荷重と緊迫力の関係、締付距離と緊迫力の関係が求められ、それぞれ(4), (5)式となる。

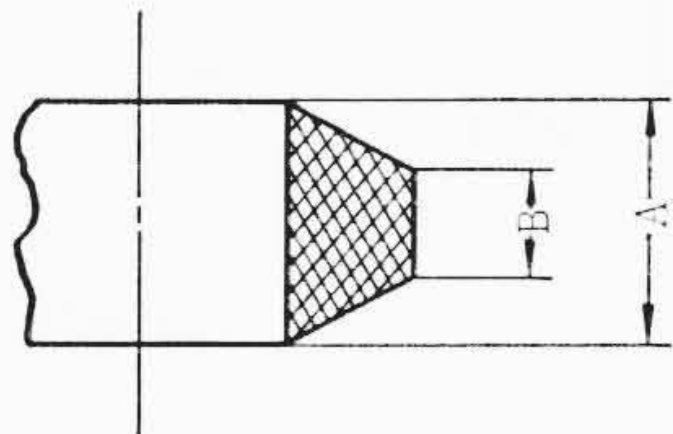
$$\sigma_r = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \frac{1}{S} \cdot F_z \dots\dots\dots (4)$$

* 日立電線株式会社日高工場

× パッキンは動的シールというわけであるが、この場合形状など動的なものとまったく同一なので、慣習にしたがいパッキンとよぶ。

表1 パッキンの寸法(測定値)

種類	ソロバン玉	ラミネート	Oリング
内径(mmφ)	31.70	29.17	28.77
外径(mmφ)	47.80	60.79	60.12
厚さ(mm)	A 18.52 B 9.52	(3枚) 19.15	15.70



$$\sigma_r = \frac{\nu}{1-\nu-2\nu^2} \cdot \frac{E}{z_0} \cdot \Delta z \dots\dots\dots (5)$$

2.2 非充填形パッキンのシール機構

非充填形パッキンは体積一定で変形できるから、その弾性はエントロピー変化によると考えられる。したがって、パッキンのあらゆる方向の応力は等しく、その応力は(6)式で表わされる⁽²⁾⁽³⁾。

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = -cnkT_A \left[\frac{z_0 - \Delta z}{z_0} - \left(\frac{z_0 - \Delta z}{z_0} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 c : ゴム中のカーボン量に依存する常数で約15

n : 単位体積中のゴム網鎖数 約 10^{20} cm^{-3}

k : ボルツマン定数, $1.41 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{cm} / ^\circ\text{K}$

T_A : 絶対温度

である。

(6)式から、締付荷重と緊迫力の関係、締付距離と緊迫力の関係が簡単に求められ、それぞれ(7)、(8)式となる。

$$\sigma_r = \frac{1}{S} \cdot F_z \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -cnkT_A \left[\frac{z_0 - \Delta z}{z_0} - \left(\frac{z_0 - \Delta z}{z_0} \right)^2 \right] \\ &\doteq 3cnkT_A \left(\frac{\Delta z}{z_0} \right) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

(8)式は常温($T_A=300^\circ\text{K}$)では、(9)式となる。

$$\sigma_r \doteq 190 \frac{\Delta z}{z_0} \dots\dots\dots (9)$$

3. 実験および実験結果

3.1 試料および実験方法

実験に使用したパッキンの実測寸法を表1に示す。かたさはすべてショアA70である。また、材質はニトリル・ゴムである。

実験は次の2項について行なった。

実験I: 緊迫力-締付荷重-締付距離の間の関係の測定。

実験II: 温度による緊迫力の変化の測定。

実験Iには、テンシロン万能引張試験機を用いた(図3)。締付荷重の測定はテンシロン・ロードセルにより、緊迫力の測定は中空シリンドラの内側にひずみゲージをはりつけて緊迫力測定用ロードセルをつくり、それを軸としてそう入することにより行なった。締付距離の測定はダイヤル・ゲージ(精度1/1,000mm)を図3のように取り付けて行なった。

実験IIは図4に示す治具を用いて恒温槽内で行なわれた。恒温槽内 20°C でパッキンを締め付け、任意の緊迫力($25, 50 \text{ kg/cm}^2$)を作る。その後、温度を変化させる($+60^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$)。実際には恒温槽の都合で高温側(20°C 以上)と低温側に分けて実験した。緊迫力測定用ロードセルとしては温度保障されたひずみゲージを用いた。

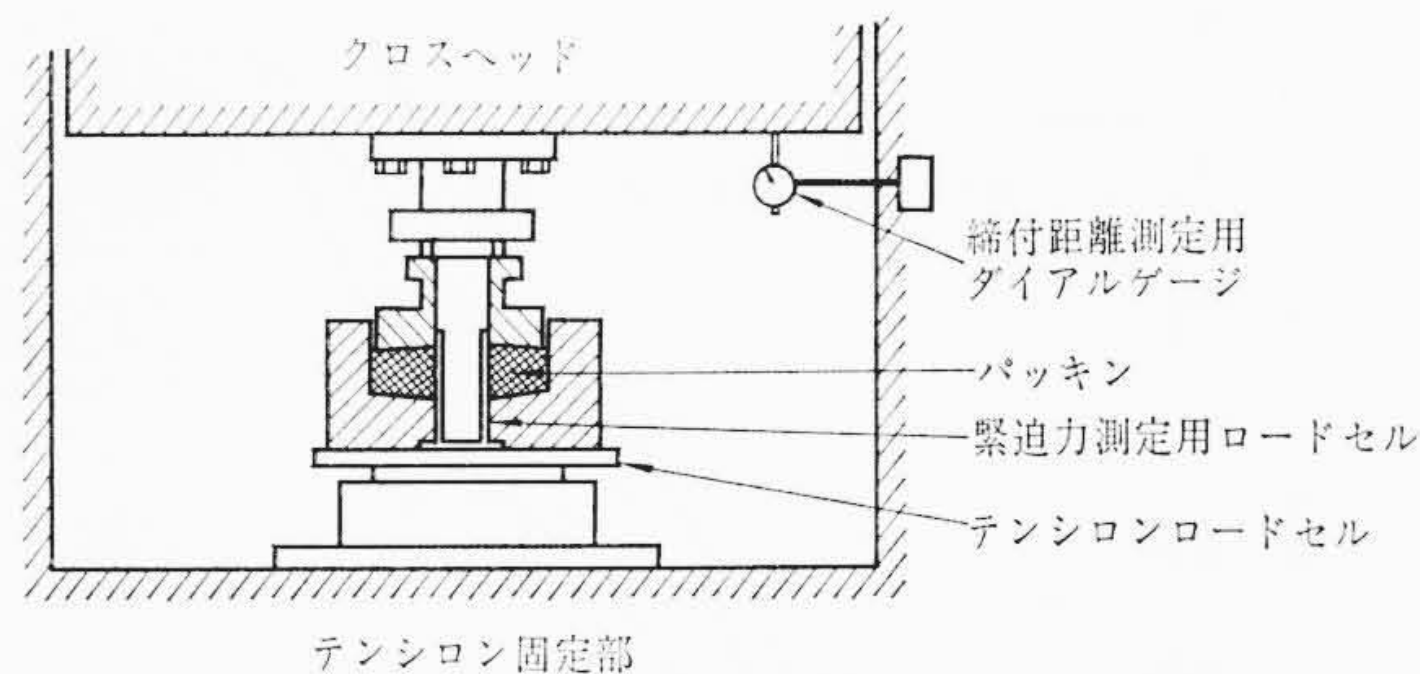


図3 緊迫力-締付荷重-締付距離の測定

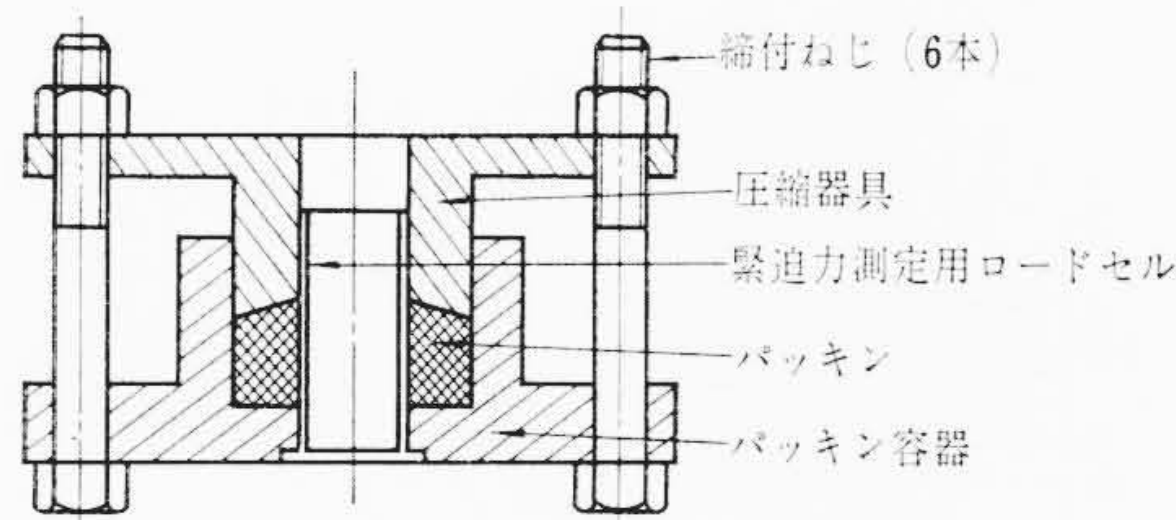


図4 温度特性測定用パッキン容器

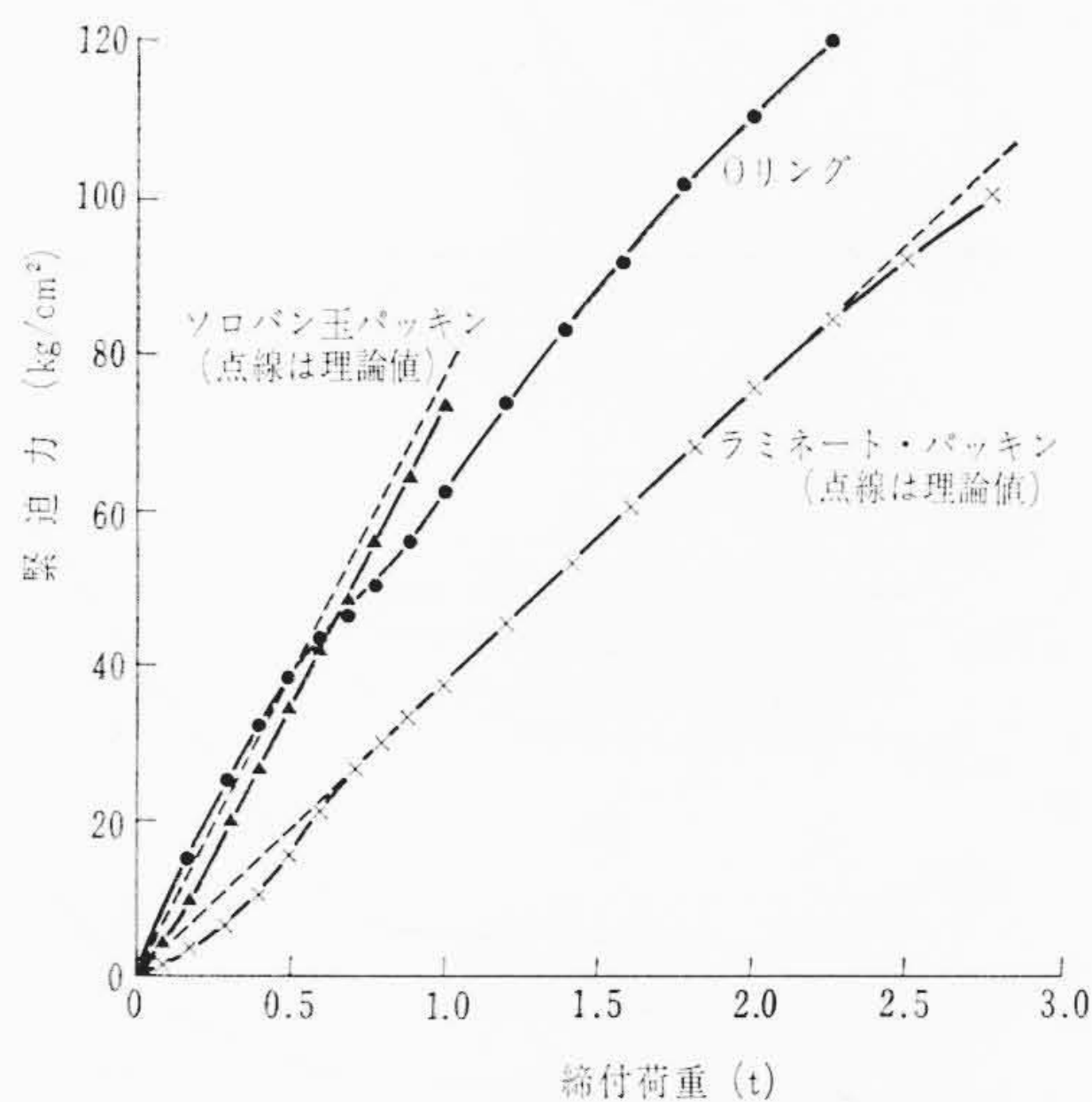


図5 締付荷重と緊迫力の関係

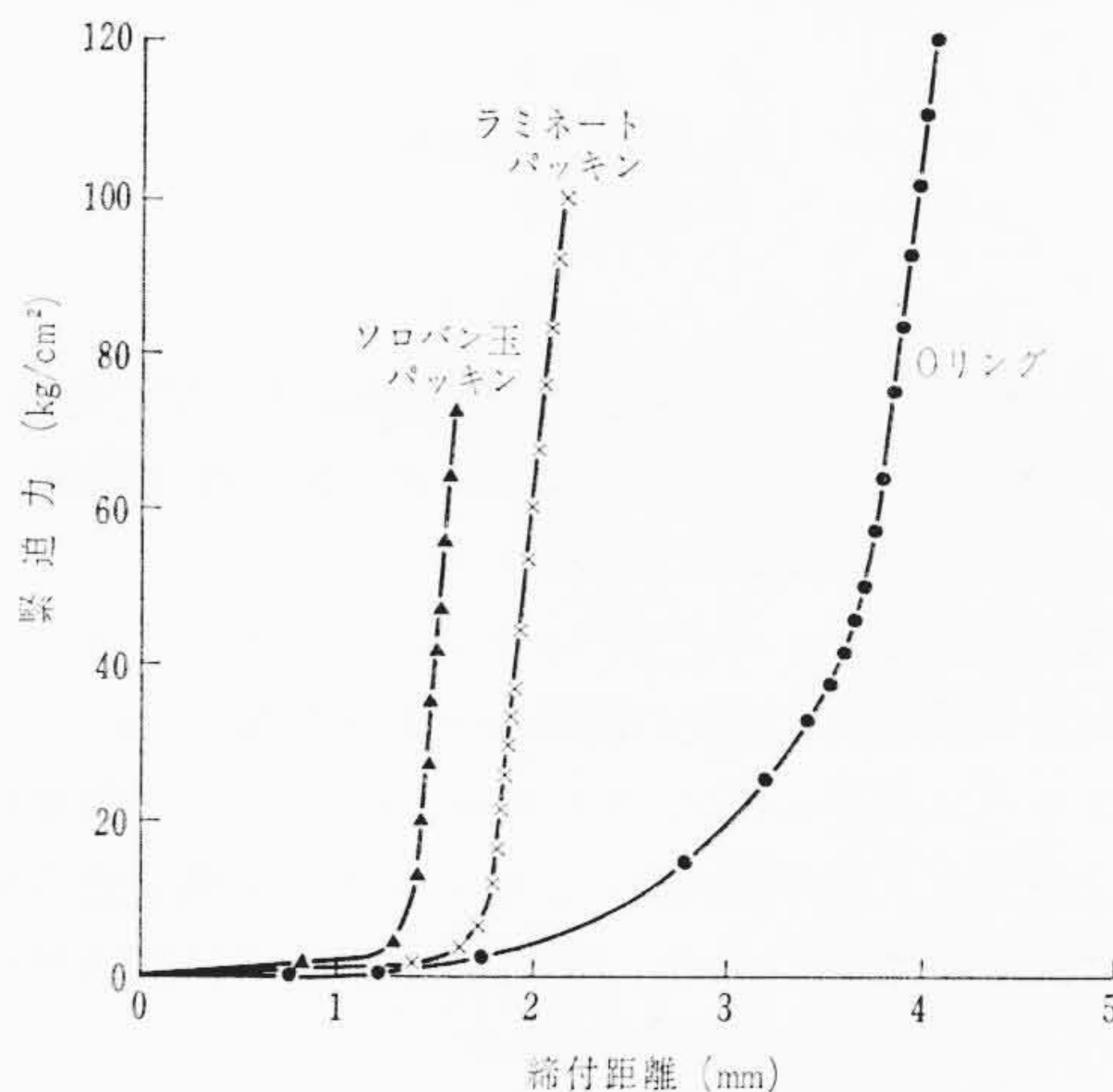
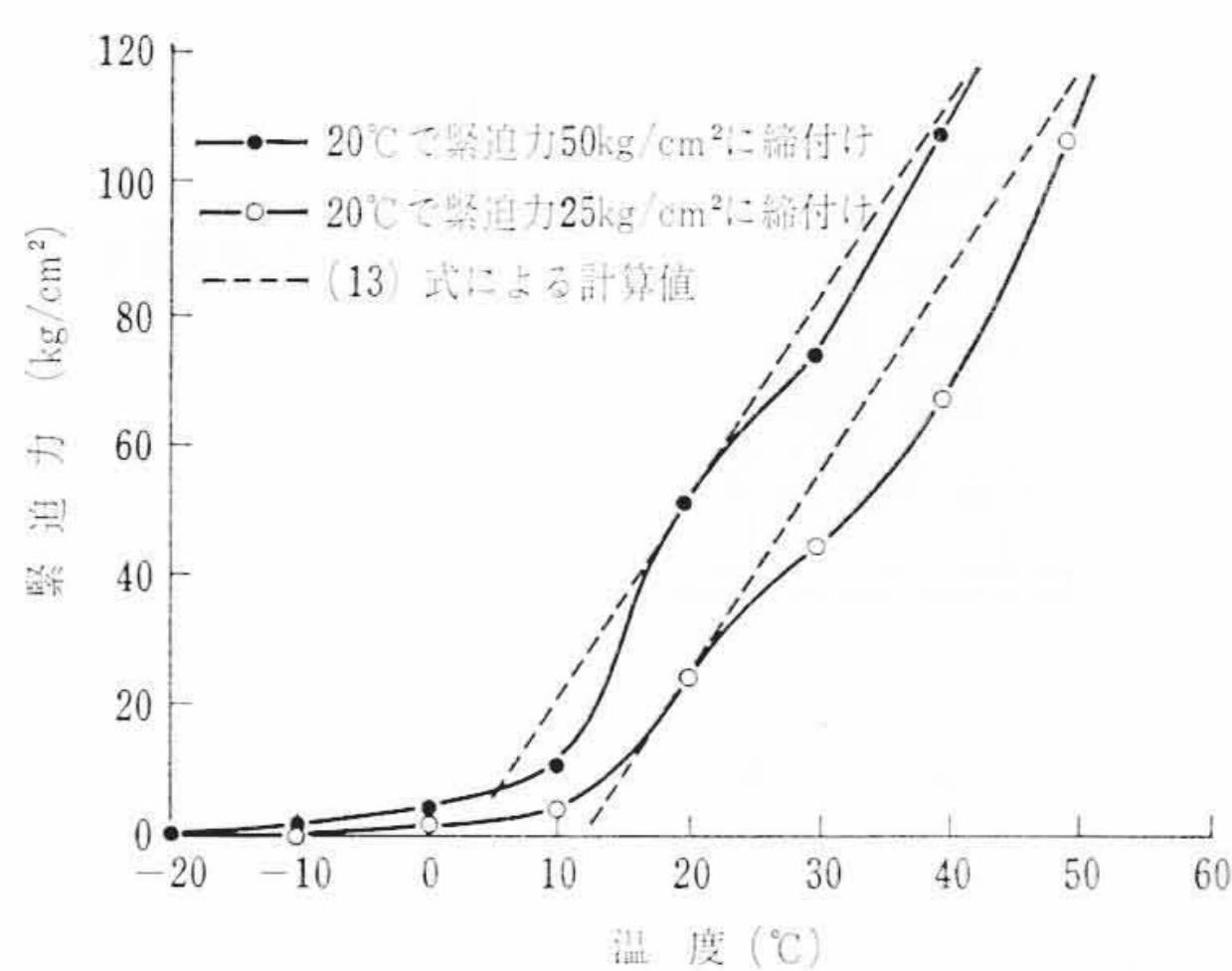


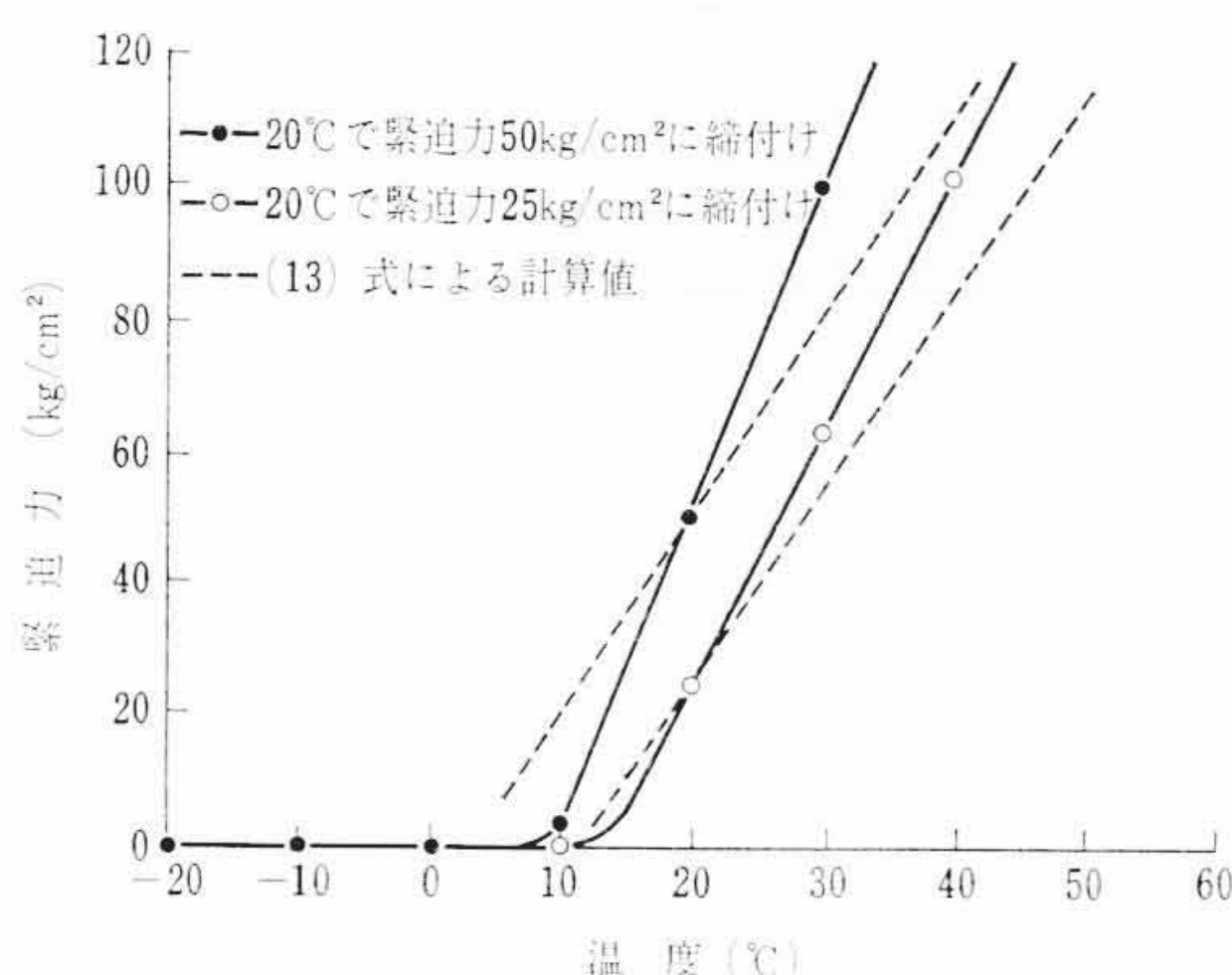
図6 締付距離と緊迫力の関係

3.2 実験結果

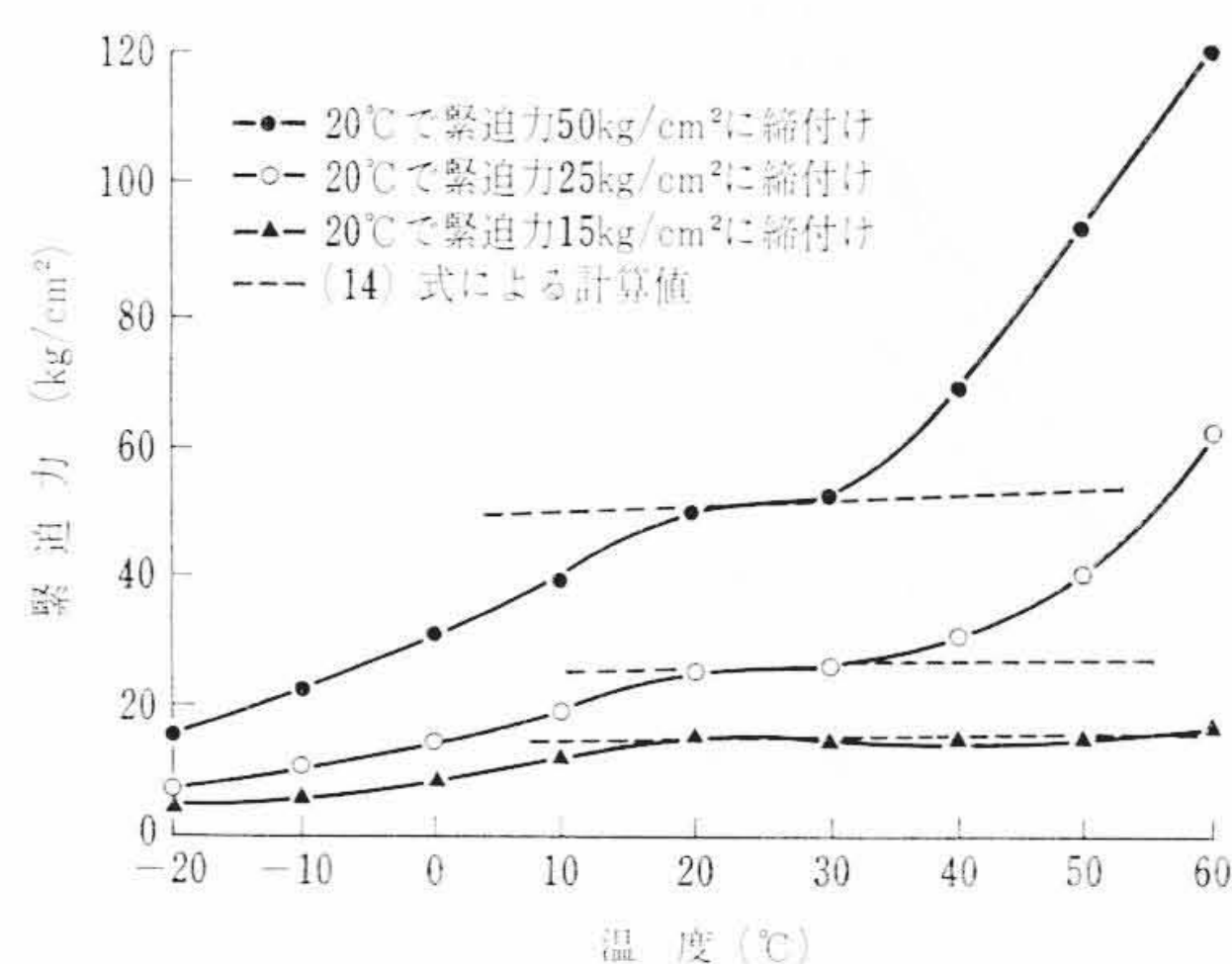
実験Iにより得た締付荷重と緊迫力の関係を図5に実線で示す。ソロバン玉パッキンおよびラミネート・パッキンに添う点線は、それぞれのパッキンの寸法を使用し、ポアソン比 $\nu=0.45$ として、(4)式により計算した理論値である。同じく実験Iにより得た締付距離と緊迫力の関係を示したのが図6である。ソロバン玉パッキンおよ



(a) ソロバン玉パッキンの温度特性



(b) ラミネート・パッキンの温度特性



(c) Oリングの温度特性

図 7

びラミネート・パッキンは容器との間の微少なすき間を埋めた後は、(5)式に示すとおり直線となる。Oリングもある締付距離(3.8mm)以上では充満形になっていると推定できる。

実験Ⅱにより得たソロバン玉パッキン、ラミネート・パッキンおよびOリングの緊迫力と温度の関係をそれぞれ図7(a)、(b)、(c)に示す。ソロバン玉パッキン、ラミネート・パッキンの温度特性は非常に悪く、Oリングは非常に良い。Oリングでも緊迫力 50kg/cm²に締め付けたものは30°Cから、また 25 kg/cm²に締め付けたものは50°Cから充満形となることがわかる。

4. 考 察

4.1 パッキンのシール機構

充満形パッキンの緊迫力-締付荷重-締付距離の関係は、理論と実験が完全に一致した。しかし、非充満形パッキンの緊迫力と締付距離の関係は、理論(8)式が直線関係であるのに対して実験値は曲線となっている。これは次の理由によると思われる。Oリングが締め付けられると図8(a)のように変形する。このとき、Oリング

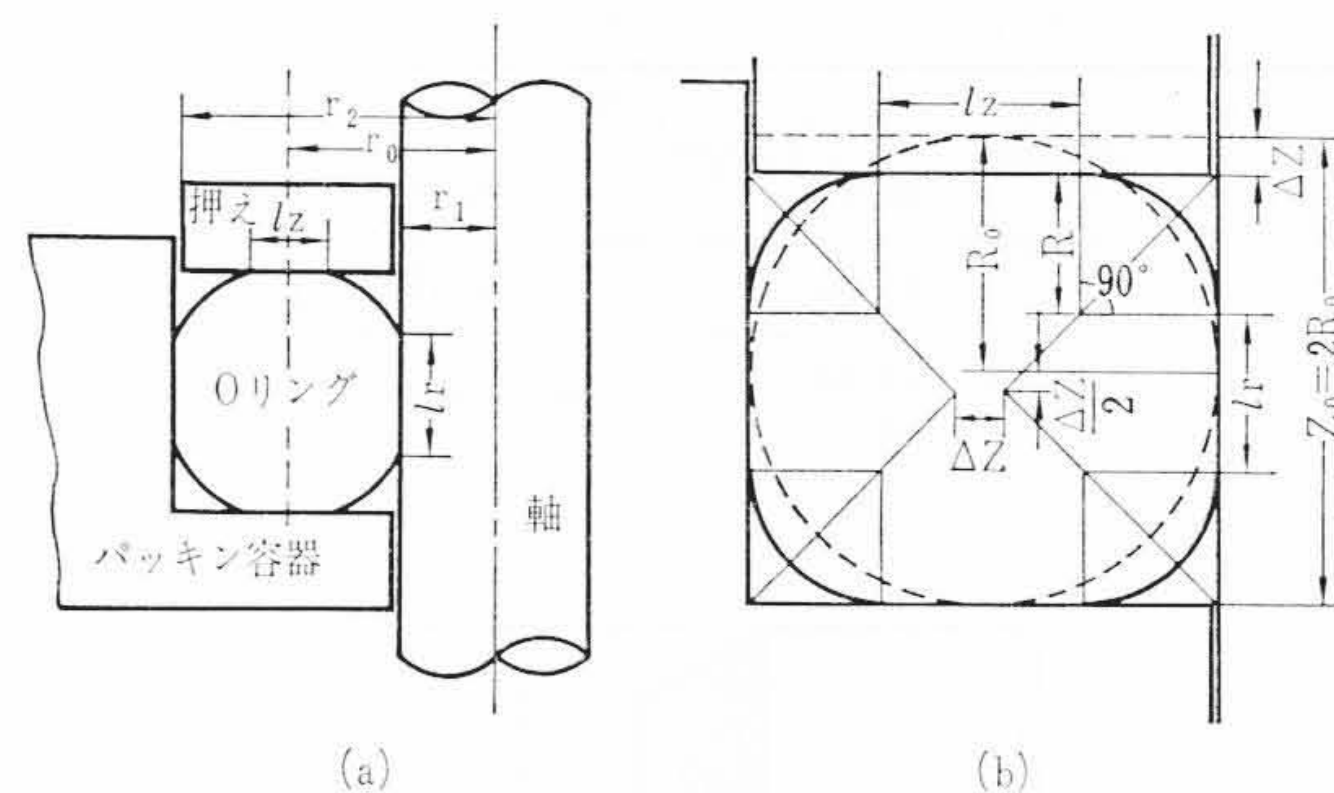


図 8 Oリングの変形

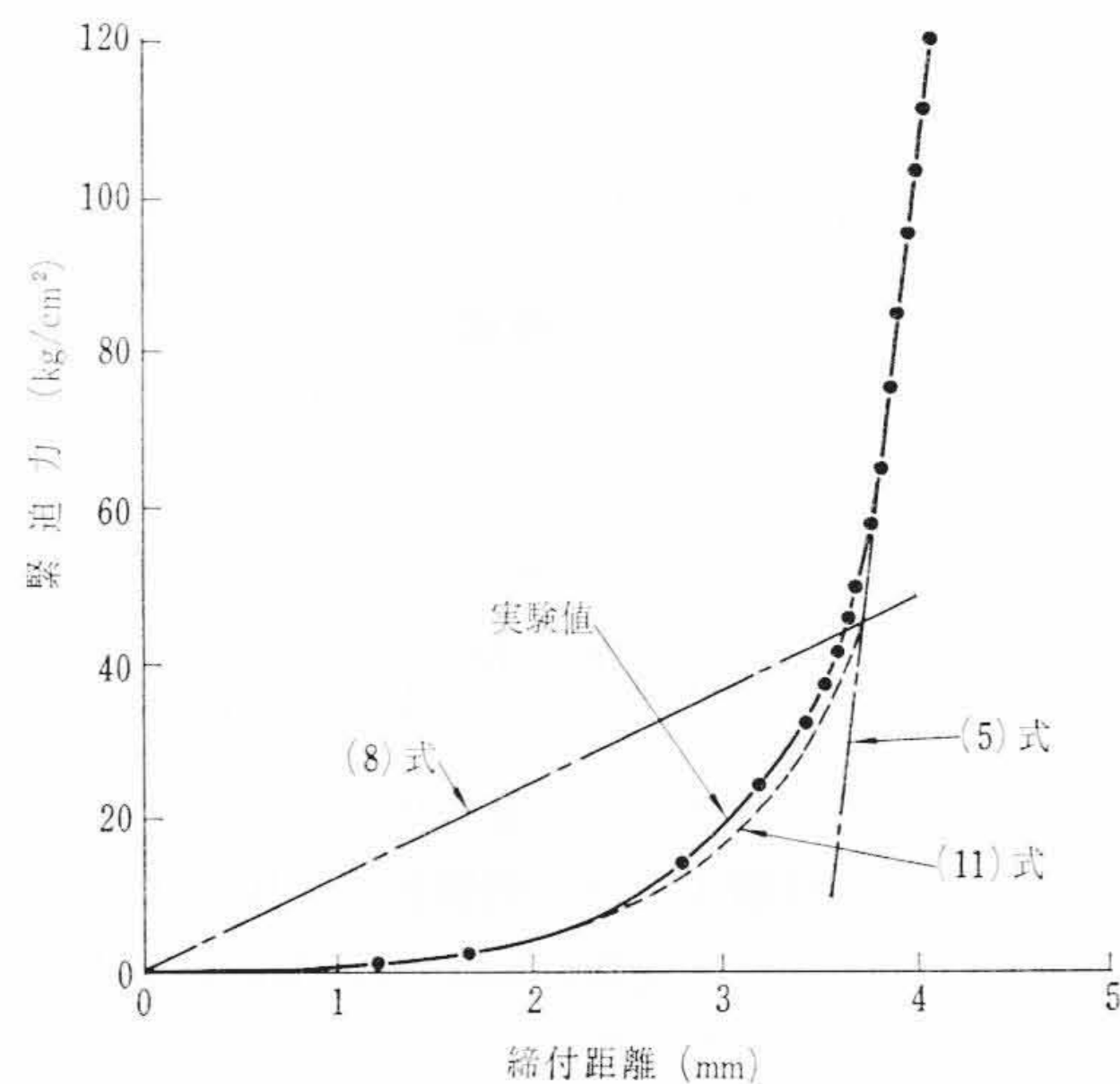


図 9 緊迫力と締付距離の関係 (理論と実験)

の真の緊迫面積は $2\pi r_1 l_r$ 、真の締付面積は $2\pi r_0 l_z$ である。しかし、実験ではこれらの面積は測定できないので緊迫面積を $2\pi r_1 z_0$ として緊迫力測定用シリンダを校正している。そのため、理論と実験では緊迫力の定義が異なっており、これが理論と実験の差となってしまったものと思われる。理論を実験と比較するために(7)、(8)式に補正をすると、

$$\sigma_r' = \frac{F_z}{2\pi r_0 l_z} \cdot \frac{l_r}{z_0} \dots\dots\dots (7)'$$

$$\sigma_r' = 3cnkT_A \frac{\Delta z}{z_0} \cdot \frac{l_r}{z_0} \dots\dots\dots (8)'$$

となる。ここに σ_r' は実験の場合の定義による緊迫力である。

Oリングについて、 l_r 、 l_z と Δz の関係を求めてみる。図8(b)のようにOリングが変形すると仮定すれば次の関係がある。

$$l_z = l_r + \Delta z$$

変形前後の体積が変わらないことから、

$$\frac{\pi}{4} \left(\frac{z_0}{2} \right)^2 = \frac{l_1}{2} \cdot \frac{z_0}{2} + \frac{l_r + \Delta z}{2} \cdot \frac{z_0 - l_r - \Delta z}{2} + \frac{\pi}{4} \left(\frac{z_0 - l_r - \Delta z}{2} \right)^2$$

となり、二つの関係式から l_r を求めると、

$$l_r = z_0 - \Delta z - \sqrt{z_0^2 - \frac{4}{4-\pi} z_0 \Delta z}$$

となる。したがって、(7)'、(8)'式はそれぞれ

$$\sigma_r = \frac{F_z}{2\pi r_0 z_0} \cdot \frac{z_0 - \Delta z - \sqrt{z_0^2 - \frac{4}{4-\pi} z_0 \Delta z}}{z_0 - \sqrt{z_0^2 - \frac{4}{4-\pi} z_0 \Delta z}} \dots\dots\dots (10)$$

$$\sigma_r = 3cnkT_A \frac{\Delta z}{z_0} \left(1 - \frac{\Delta z}{z_0} - \sqrt{1 - \frac{4}{4-\pi} \frac{\Delta z}{z_0}} \right) \dots\dots\dots (11)$$

となる。

実験により得た O リングの緊迫力と締付距離の関係を(8)式, (11)式による計算値と比較して, これを図 9 に示す。(11)式は実験とよく一致していることがわかる。したがって, 非充満形パッキンのシール機構は 2.2 にのべたエントロピ弾性としての取り扱いが正しい。

4.2 緊迫力の温度依存性

充満形パッキンの緊迫力は温度に大きく影響される(図 7 参照)が, これはパッキンの熱膨張のためと考えられる。(1)式は熱膨張によるひずみを考慮すると,

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} \{ \sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z) \} - \alpha \Delta T \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} \{ \sigma_\theta - \nu(\sigma_z + \sigma_r) \} - \alpha \Delta T \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \{ \sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \} - \alpha \Delta T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)'$$

となる。ここに, α はゴムの線膨張係数, ΔT は締付時の温度からの温度上昇分である。(2)式の条件を使うと緊迫力と締付距離の関係は, 次のようになる。

$$\sigma_r = \frac{\nu E}{1-\nu-2\nu^2} \cdot \frac{\Delta z}{z_0} + \frac{E}{1-2\nu} \alpha \Delta T \dots\dots\dots (12)$$

ゴムの線膨張係数 $\div 2 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ であり⁽²⁾, また, ソロバン玉パッキン, ラミネート・パッキンの緊迫力と締付距離の関係(図 6)から, $E \div 1.5 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ であるから, 熱膨張による緊迫力の変化は

$$\frac{d\sigma_r}{d\Delta T} = \frac{E\alpha}{1-2\nu} \div 3 \text{ kg/cm}^2/^\circ\text{C} \dots\dots\dots (13)$$

となる。緊迫力の温度変化の測定結果図 7 (a), (b) に理論(13)式を点線で示し比較すると, 両者の傾向は一致している。

非充満形の場合は良い温度特性を示す(図 7 (c))。(11)式を使って, 温度特性を検討してみる。 $z_0 - \Delta z = \text{一定}$, すなわち, 締め付けられたパッキンの厚さが一定という条件で, (11)式から $d\sigma_r/d\Delta T$ を求める。

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_r}{d\Delta T} &= \frac{\sigma_r}{T_A} + 3cnkT_A \alpha \left(1 - \frac{\Delta z}{z_0} \right) \\ &\quad \times \left(\frac{1}{2} + \frac{\Delta z}{2z_0} + \frac{1 - \frac{6}{4-\pi} \frac{\Delta z}{z_0}}{\sqrt{1 - \frac{4}{4-\pi} \frac{\Delta z}{z_0}}} \right) \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

常温で, $\sigma_r = 25 \text{ kg/cm}^2$ に締め付けると, 図 6 から $\Delta z/z_0 \div 3.2/15.7$ であり,

$$\frac{d\sigma_r}{d\Delta T} = 2.55 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2/^\circ\text{C}$$

となる。(14)式による計算値を図 7 (c) に点線で示す。常温付近では理論と実験はだいたい一致する。緊迫力 50 kg/cm^2 , 25 kg/cm^2 の高温での急増は熱膨張により充満形へ移行したためと考えられる。緊迫力 15 kg/cm^2 のものは 60°C まで完全にエントロピ弾性を保つ。このようにエントロピ弾性範囲では, 温度による緊迫力の変化はない。

4.3 パッキン形状

充満形パッキンは, ソロバン玉パッキンのように特異な形状でも, 図 2 のもっとも簡単な充満形パッキンとその特性はまったく変わらない。また, ラミネート・パッキンの締付面に傾斜をつけて実験したが, その効果はみられなかった。充満形パッキンの特性は, その材質と厚さだけで決定される。

非充満形パッキンは, その形状によって緊迫面積の変化の様子が変わるので, 形状により特性は異なるが, それも本質的な違いではない。

以上から, 圧縮形成形パッキンについては, それを充満形として使っているか, 非充満形で使っているかを区別するだけでその特性を推察できる。

5. 結 言

圧縮形成形パッキンの諸特性を実験および理論面から検討してきたが, それらの結果を要約すると次のようになる。

- (1) 圧縮形成形パッキンは充満形と非充満形に大別できる。
- (2) 充満形のシールはエネルギー弾性を利用しており, 非充満形はエントロピ弾性を利用していることがわかった。
- (3) O リングなどの非充満形パッキンは, 充満形パッキンに比べて, 温度特性が著しくすぐれている。

終わりにあたり, ご指導いただいた日立電線株式会社日高工場福田主任研究員, 井出主任, 実験にご協力いただいた小松, 佐藤両氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 岩浪, 近森: パッキン技術便覧 (1962, 産業図書)
- (2) L. R. G. Treloar: "The Physics of Rubber Elasticity" (1949, Oxford Univ. Press)
- (3) F. Bueche: "Physical Properties of Polymers" (1962, Interscience Publishers)