

シュリンクフィッターを用いたセラミックスと金属の 締めばめの高温結合強度に関する研究*

(第二報, 締め付け圧力分布の計算)

新田 勇^{*1},原 利 昭^{*1}

Study on the Fitting Strength between Ceramic and Metal with the use of a Shrink Fitter
at Elevated Temperatures
(2nd Report, Calculation of the distribution of the contact pressure)

Isami NITTA and Toshiaki HARA

It has been shown experimentally in the previous paper that the fitting strength of the shrink fit between the ceramic shaft and the metal ring with the use of a shrink fitter does not decrease at elevated temperatures. In this paper, the distributions of the contact pressure of the shrink fit assembly were calculated in order to research the effects of the slit number of the shrink fitter and the coefficient of friction on the fitting strength. The shrink fit assembly has two contact interfaces which are between the shaft and the shrink fitter and between the shrink fitter and the outer ring. There are also two interferences at the inner contact interface and at the outer contact interface. The sum of two interferences has been kept constant in the paper. The mean contact pressure at the inner contact interface becomes greater at room temperature as the interference at the inner contact interface increases. This tendency becomes stronger with a larger coefficient of friction. The mean contact pressures at the inner contact interface are, however, equal to each other at elevated temperatures. Under a frictionless condition, the mean contact pressure is approximately equal to that from the simplified formula used in the previous work from room temperature to 100° C.

Key Words: Fixing Element, Ceramic, Shrink Fit, Shrink Fitter, Strength, Elevated Temperature, High Temperature, Slit, Coefficient of Friction

1. 緒言

セラミックスと金属の接合技術を大別すると、機械的接合法、接着剤による方法、ろう付法および固相接合法に分けられる。これらの接合法において重要なことは接合体の強度の信頼性である。

締めばめは、機械的接合法の中の一つであり、室温での強度の信頼性は高い。また、接合界面での相対すべりが可能であるために、残留応力が少なく^{1,2)}、セラミックスの破壊防止という観点からも望ましい接合法である。しかし、高温下で結合強度が低下する欠点があった。そのため、およそ200℃～300℃がこれまでの使用限界温度となっていた³⁾。

前報⁴⁾では、この点を克服するためにシュリンクフィッター(前報まではインサートリングと呼んでいた)を用いた締めばめ法を考案し、実験により600℃の高温下でも結合強度が保てることを示した。今後、シュリンクフィッターを用いた締めばめ法を、機械部品組立に応用するためには、スリット数、締めしろ、摩擦係数等の締結条件が、締め付け圧力分布に与える影響に

ついて検討する必要がある。

しかし、前報で求めた簡易式は、平均締め付け圧力のみを求めるものであり、圧力分布までは求められなかった。

そこで本研究では、二次元平面応力問題を基礎にして締め付け圧力分布の解析を行い、締結条件が締め付け圧力分布に及ぼす影響について検討した。その結果、高温結合強度に及ぼす摩擦係数およびスリット数の影響が明らかになった。

2. 理論

本論文では、図1に示す締結体の接触面上の圧力分布を求めるために、ポイントマッチング法⁵⁾を用いることにする。ポイントマッチング法とは、接触面をm個に分割し、この各部に作用する垂直応力p、せん断応力τを未知数として、これらを接触面上のm個の変位連続条件によって求める方法である。

図1の締結体ではそれぞれシャフト-シュリンクフィッター間、シュリンクフィッター-外側リング間に接触面が存在する。本論文では前者を内側接触面、後者を外側接触面と呼ぶ。この締結体が従来のものと異なる点は、接触面がシュリンクフィッターの両側にあ

* 平成元年9月22日 北陸信越支部信越地方講演会において講演、原稿受付 平成元年2月23日。

^{*1} 正員、新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

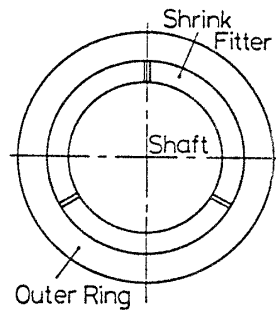


図1 シュリンクフィッターを用いた締めばめ締結体

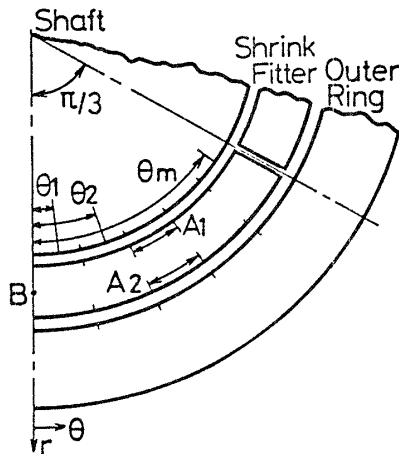


図2 計算のための分割幅についての説明図

ることと、シュリンクフィッターが半径方向に剛体変位をすることである。したがって、ポイントマッチング法を適用するためには、既報⁶⁾に述べた方法に若干の修正を加える必要がある。以下、それについて説明する。

図1に示すスリット数3のシュリンクフィッターを用いた締結体について、接触面に相対すべりが無い場合を考える。これ以降は、このような状態を完全固着と呼ぶ。

変形の対称性より図2のように、全円周の1/6を解析すればよい。内側接触面と外側接触面をそれぞれm個に等分割する。これらの接触面各部の半径方向および円周方向の変位連続条件は、シュリンクフィッターの半径方向の剛体変位も含めて次のように表せる⁶⁾。

$$(M_s - M_i + M_r)P = s - r \quad (1)$$

ここで、

- M_s : シャフトの影響係数マトリックス
- M_i : シュリンクフィッターの影響係数マトリックス
- M_r : 外側リングの影響係数マトリックス

P : 接触圧力ベクトル

s : 半径差による締めしろベクトル

r : シュリンクフィッターの剛体変位ベクトル

$$M_s = \begin{bmatrix} M_{s11} & 0 & M_{s13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{s31} & 0 & M_{s33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} M_{i11} & M_{i12} & M_{i13} & M_{i14} \\ M_{i21} & M_{i22} & M_{i23} & M_{i24} \\ M_{i31} & M_{i32} & M_{i33} & M_{i34} \\ M_{i41} & M_{i42} & M_{i43} & M_{i44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{r22} & 0 & M_{r24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{r42} & 0 & M_{r44} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P = \begin{bmatrix} p^i \\ p^o \\ \tau^i \\ \tau^o \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$s = \begin{bmatrix} s^i \\ -s^o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$r = \begin{bmatrix} r \cos \\ r \cos \\ -r \sin \\ -r \sin \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、式(2),(3),(4)中の M_{s11} 等の

第1番目の英字の添字は、

- S: シャフト
- I: シュリンクフィッター
- R: 外側リング

を表す。

第2番目の数字の添字は、

- 1: 内側接触面の半径方向
- 2: 外側 " の "
- 3: 内側 " の円周方向
- 4: 外側 " の "

を表す。

第3番目の数字の添字は

- 1: p^i による変位
- 2: p^o "
- 3: τ^i "

4: τ° " を表す。
 また、
 p : 内側接触面の垂直応力ベクトル
 p° : 外側 " の " "
 τ^i : 内側 " のせん断応力ベクトル
 τ° : 外側 " の " "
 s^i : 内側 " の締めしろベクトル
 s° : 外側 " の " "
 r : シュリンクフィッターの半径方向への剛体変位 ($\theta=0$ の位置)
 $\cos: \cos \theta_1, \dots, \cos \theta_n$ の成分をもつベクトル
 $\sin: \sin \theta_1, \dots, \sin \theta_n$ の成分をもつベクトル
 (θ については図2参照)

また、内側接触面および外側接触面の1つの分割要素の円弧の長さを A_1, A_2 とすれば、シュリンクフィッターに加わる半径方向の力の釣合いは次のように表せる。

$$A_1(p^i \cos^T - \tau^i \sin^T) - A_2(p^{\circ} \cos^T - \tau^{\circ} \sin^T) = 0 \quad (8)$$

ここで、 T は転置を表す。

式(8)を付帯条件として式(1)に組み入れると次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} M_s - M_i + M_a \\ \vdots \\ A_1 \cos^T & -A_2 \cos^T & -A_1 \sin^T & A_2 \sin^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \\ \cos \\ -\sin \\ -\sin \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^i \\ p^{\circ} \\ \tau^i \\ \tau^{\circ} \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^i \\ -s^{\circ} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

従って式(9)を満足する p, τ を求めれば完全固着の条件で、内側接触面、外側接触面の締め付け圧力分布が求まる。

スリット数1の締結体では、シュリンクフィッターおよび外側リングが、それぞれ独立して剛体変位する。また、内側接触面、外側接触面それぞれについて半径方向の力の釣合い式が成立する。

次に、接触面上の摩擦等を考慮して締め付け圧力を求めるためには、接触面性質を口開き、固着、すべりの3つの状態に分け、 p, τ と接触面性質が同時に収束するようにすればよい。接触面性質に関しては他の文献⁷⁾⁸⁾に詳しく記述されている。

次に、接触面上の摩擦を考慮し、かつ温度が変化す

表1 ヤング率 ポアソン比 平均熱膨張係数

	Young's Modulus (MPa, 20°C)	Poisson's Ratio (20°C)	Coeff. of Thermal Expansion (0~648°C)
Al ₂ O ₃	3.14 × 10 ⁵	0.235	7.6 × 10 ⁻⁶
SUS304	1.93 × 10 ⁵	0.30	18.8 × 10 ⁻⁶
SUS403	2.00 × 10 ⁵	0.30	11.7 × 10 ⁻⁶

表2 各材料の熱膨張係数の近似式

	$\alpha = A_0 + A_1 \times T + A_2 \times T^2 + A_3 \times T^3 + A_4 \times T^4 + A_5 \times T^5 + A_6 \times T^6 + A_7 \times T^7 \quad T(^{\circ}\text{C})$		
	Al ₂ O ₃	SUS304	SUS403
A0	.61962408E-05	.32463783E-05	.86789495E-05
A1	.28998524E-07	.29231341E-06	-.14120606E-07
A2	-.19125834E-09	-.29954092E-08	.51615303E-09
A3	-.29576230E-12	.17022771E-10	-.41691806E-11
A4	.58103942E-14	-.55585741E-13	.16454455E-13
A5	-.18011100E-16	.10392196E-15	-.34731025E-16
A6	.22432583E-19	-.10328195E-18	.37575858E-19
A7	-.10067454E-22	.42267567E-22	-.16377249E-22

る場合について考えるために、式(9)を次式のように書き直す。

$$M^{\Delta} P^{\Delta} = S^{\Delta} \quad (10)$$

室温で式(10)の関係が満足されていたとする。温度が ΔT だけ上昇すると式(10)は次式のようになる。

$$(M^{\Delta} + \Delta M^{\Delta})(P^{\Delta} + \Delta P^{\Delta}) = S^{\Delta} + \Delta S^{\Delta} \quad (11)$$

ここで、 $\Delta M^{\Delta}, \Delta P^{\Delta}, \Delta S^{\Delta}$ は、温度が ΔT 上昇したための変化分である。式(11)を変形すると次式になる。

$$\Delta P^{\Delta} = (M^{\Delta} + \Delta M^{\Delta})^{-1} (\Delta S^{\Delta} - \Delta M^{\Delta} P^{\Delta}) \quad (12)$$

上式よりすべての接触面上の接触面性質を満足する ΔP^{Δ} を求めれば、温度が ΔT 上昇したときの接触圧力は、 $P^{\Delta} + \Delta P^{\Delta}$ となる。もしも、 ΔP^{Δ} が接触面性質を満足しなければ、接触面性質を仮定し直して計算をくり返す。

3. 計算

計算に際して、シャフト外周面および外側リング内周面の分割幅は、円周角で6°または3°とした。M_s, M_iの求め方は既報⁹⁾に示すとおりである。シュリンクフィッターの影響係数マトリックスM₁は四辺形一次要素を用いた有限要素法により求めた。シュリンクフィッターの分割幅は円周方向に円周角で3°または1.5°、半径方向に8等分とした。スリット数3のシュリンクフィッターの分割例を図3に示す。A点からC点までの9つの拘束節点の内、8つが円周方向のみの

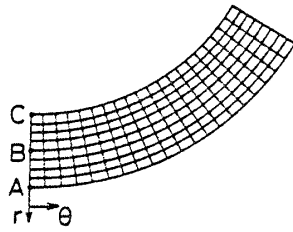
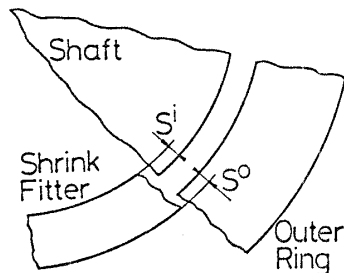


図3 シュリンクフィッターの分割例

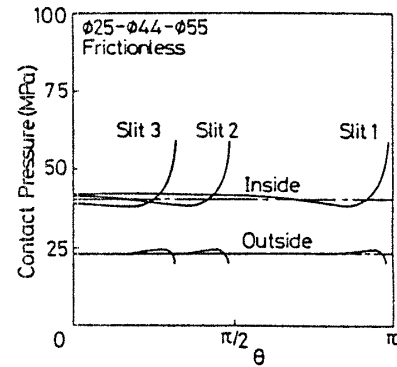
図4 内側接触面の締めしろ s^i と外側接触面の締めしろ s^o の説明

拘束で、残りのB点は円周方向、半径方向の両拘束とした。式(8)を満足する p , τ が作用する場合には、B点に加わる半径方向合力は0になるため、B点を半径方向に拘束したことが、シュリンクフィッターの変形に与える影響はなくなる¹⁾。

計算ではシャフト材料として Al_2O_3 セラミックスを、シュリンクフィッター材料として SUS304 ステンレス鋼を、外側リング材料として SUS403 ステンレス鋼を用いた。各材料の室温でのヤング率、ポアソン比、平均熱膨張係数を表1に示す。前報¹⁾において各材料の熱膨張係数を温度の5次式で近似した。本論文では高温時の近似度を上げるために、これを7次式に近似した。各材料の係数を表2に示す。SUS304, SUS403のヤング率の温度依存性を表す式は前報と同じである。

締めしろは、図4に示すように、スリットを入れる前のシュリンクフィッターと、シャフトおよび外側リングとの重なり部とした。 s^i が内側接触部の締めしろ、 s^o が外側接触部の締めしろである。ここで、負の締めしろは、すきまがあくことを意味する。締めしろは特にことわらない場合は、内側接触面と外側接触面で $7.5\mu m$ ずつ、全体で $30\mu m$ の締めしろとする。

計算に際して寸法は、シャフト半径 $12.5mm$ 一定で、シュリンクフィッター外半径を $14\sim 22mm$ の範囲で変化させた。外側リングの外半径は $17.5\sim 125mm$ の範囲で変化させた。この寸法は前報の試験片とほぼ同じである。このようにしたのは、前報の実験で得られた、スリット数が締め付け圧力に及ぼす影響を計算によりシミュレートするためである。締結体の寸法を表す表記法は、

図5 締め付け圧力と円周方向の位置の関係 (完全すべり, 締めしろ $7.5, 7.5\mu m$, 室温)

前報のものと同様にした。例えば、シャフト直径 $25mm$ 、外側リングの内径と外径がそれぞれ $44mm$ と $55mm$ の場合には、 $\phi 25-\phi 44-\phi 55$ と表す。

温度を室温から $500^\circ C$ まで変化させて Al_2O_3 -SUS304, SUS304-SUS403の組合せの摩擦係数を測定した¹⁰⁾。摩擦係数を測定するための試験片は、締め付けの試験片と同じものを用いた。 Al_2O_3 -SUS304の組合せの摩擦係数は $0.40\sim 0.29$ の値になった。SUS304-SUS403の組合せの摩擦係数は $0.24\sim 0.1$ の値になった。これらを参考にして、 Al_2O_3 -SUS304とSUS304-SUS403の組合せにおいて、摩擦係数の上限値は、それぞれ 0.4 と 0.2 とした。

4. 計算結果

図5は、接触面に摩擦が存在しない完全すべりの条件で、寸法が $\phi 25-\phi 44-\phi 55$ の締結体の締め付け圧力の計算結果を示したものである。スリット数は、1, 2, 3とした。縦軸は締め付け圧力で、横軸は円周方向の位置を表す。横軸の0は、シュリンクフィッター一片の中央部に対応する。たとえば、スリット数3では図2のB部に対応する。図中にInsideとOutsideと示しているのは、それぞれ内側接触面と外側接触面の締め付け圧力という意味である。どのスリット数についても締め付け圧力は、シュリンクフィッター一片の半分について示した。

スリット数1, 2, 3のどの場合でもスリット近傍以外では、内側接触面の接触圧力はほぼ一定であり、スリットに近づくにつれて少し下がってから上昇する傾向を示している。外側接触面の締め付け圧力も、スリット近傍以外では一定でスリット近傍で少し上昇してから下降する傾向を示す。

図中の一点鎖線は、前報で求めた簡易式による計算値である。実線の平均値を求めて一点鎖線のものと比較したところ、両者は約3%以内でよく一致した。し

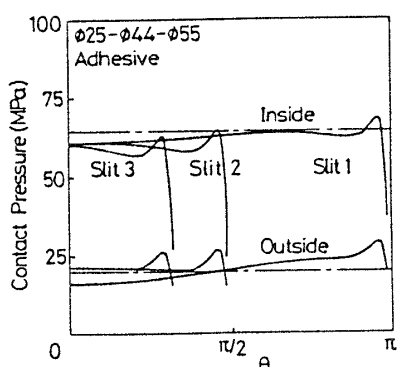


図6 締め付け圧力と円周方向の位置の関係
(完全固着, 締めしろ 7.5, 7.5 μ m, 室温)

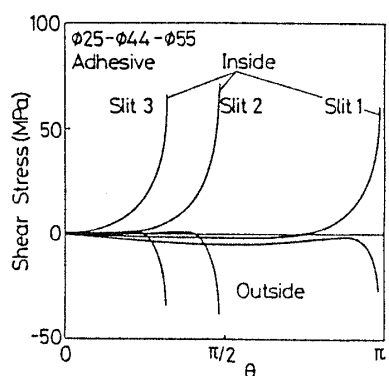


図7 せん断応力と円周方向の位置の関係
(完全固着, 締めしろ 7.5, 7.5 μ m, 室温)

たがって、完全すべりの条件を仮定すれば、前報の簡易式でスリット近傍以外の接触圧力が十分推定できると考えられる。

図6は、完全固着の条件での締め付け圧力の計算値である。他の条件は、図5のものと同じである。内側および外側接触面ともスリットに近づくにつれて締め付け圧力が上昇してから下降する傾向を示している。また、内側接触面の締め付け圧力は、スリット近傍を除けばスリット数1, 2, 3とも、図5の完全すべりのものより高くなっている。

図6の一点鎖線は、スリットの無いシュリンクフィッターを用いて、締め付けを行ったときの計算値である。すなわち、単にセラミックシャフトにリングを2重にはめたときの計算値である。これ以降、2重リングの締め付けと呼ぶ。2重リングの締め付けでは、接触面にすべりが生じないので、完全固着状態ともみなせる。図中の一点鎖線は、実線の平均値と12%以内で一致した。

図7は、図6の条件で計算したせん断応力と円周方向の位置の関係である。どのスリット数でもスリット近傍で、せん断応力は締め付け圧力とほぼ同じ大きさ

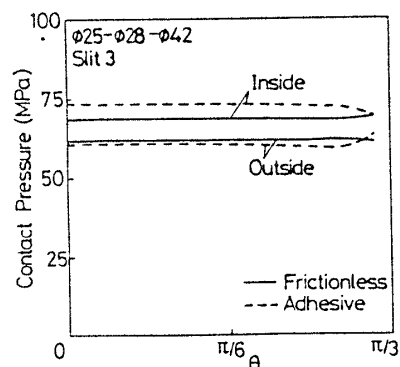


図8 シュリンクフィッターが半径方向に薄い場合の締め付け圧力と円周方向の位置の関係(締めしろ 7.5, 7.5 μ m, スリット数3, 破線: 完全固着, 実線: 完全すべり, 室温)

になるか、それ以上になっている。このことは、その場所での摩擦係数が1程度になることを示すものである。したがって、実際の締め付けにおいて、スリット部分では相対すべりが生じることが予想される。

図8は、シュリンクフィッターが半径方向に薄くなった場合の締め付け圧力分布を示したものである。ここで、スリット数は3とし、締結体の寸法は $\phi 25-\phi 28-\phi 42$ とした。したがって、シュリンクフィッターの厚さは1.5mmである。完全すべりと完全固着の条件の計算値は、それぞれ実線と破線で示した。

完全すべりの条件による計算値には、図5に見られるような内側接触面のスリット近傍での締め付け圧力の上昇はあまりなく、平坦な圧力分布になる。また、内側および外側接触面の締め付け圧力の差も小さくなる。完全固着の条件による計算値についても同様なことが言える。さらに図5, 6の場合と比較すると、完全固着と完全すべりの間の締め付け圧力の差もあまり見られない。

完全すべりの条件での締め付け圧力の平均値と前報の簡易式の計算値は1%以内で一致した。また完全固着の条件での締め付け圧力の平均値と2重リングの締め付けの計算値は2%以内で一致した。

外側リングが半径方向に厚い $\phi 25-\phi 42-\phi 250$ の場合についても、締め付け圧力分布を計算した。図8の場合と同様、締め付け圧力分布は円周方向の位置によらずほぼ一定となった。また、完全すべりと完全固着の場合の計算値もほとんど同じであった。

以上のことより、シュリンクフィッターが薄くなることと、外側リングが厚くなることは、どちらも締め付け圧力分布を平坦化させることが分かる。

内側接触面と外側接触面の締めしろは異なるが、その合計が同じになる場合の締め付け圧力分布を求めた。

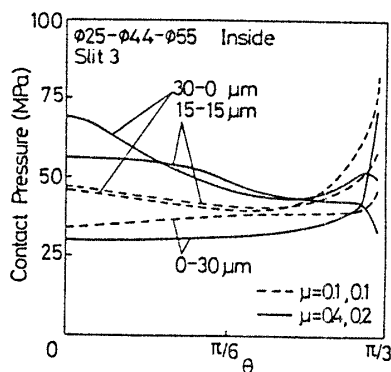


図9 内側接触面と外側接触面の締めしろが異なる場合の内側接触面の締め付け圧力と円周方向の位置の関係 (破線: 内・外側接触面のそれぞれの摩擦係数0.1, 0.1. 実線: 内・外側接触面のそれぞれの摩擦係数0.4, 0.2, 室温)

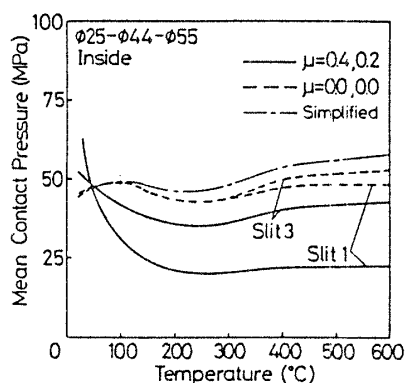


図10 内側接触面の平均締め付け圧力と温度の関係 (締めしろ 7.5, 7.5 μm, 破線: 内・外側接触面のそれぞれの摩擦係数0.0, 0.0. 実線: 内・外側接触面のそれぞれの摩擦係数0.4, 0.2, 一点鎖線: 前報の簡易式)

図9には、内側接触面上の締め付け圧力の計算値のみを示した。締結体の寸法は $\phi 25-\phi 44-\phi 55$ で、スリット数は3である。内側接触面と外側接触面の締めしろは、それぞれ $30\mu\text{m}$ と $0\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ と $15\mu\text{m}$ 、 $0\mu\text{m}$ と $30\mu\text{m}$ の3つとした。これ以降、上記3つの締めしろを $30-0\mu\text{m}$ 、 $15-15\mu\text{m}$ 、 $0-30\mu\text{m}$ と呼ぶ。図中の実線は、内側接触面と外側接触面の摩擦係数が、それぞれ0.4と0.2の場合の計算値である。破線は両接触面共に、摩擦係数が0.1の場合の計算値である。

両接触面とも摩擦係数が0.1の場合は、内側接触面の締めしろが多いほど、スリット近傍の内側接触面の締め付け圧力が大きくなる。この摩擦係数について内側接触面の締め付け圧力の平均値を求めたところ、 $30-0\mu\text{m}$ 、 $15-15\mu\text{m}$ 、 $0-30\mu\text{m}$ の締めしろに対して、 46.1MPa 、 44.4MPa 、 38.0MPa となった。

同様に内側接触面と外側接触面の摩擦係数がそれぞ

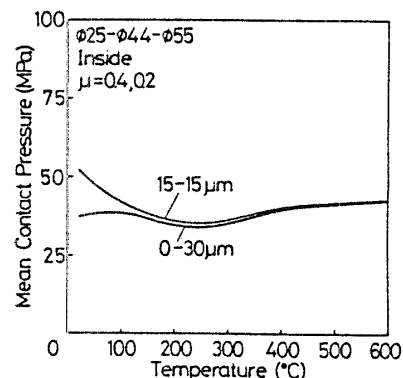


図11 内側接触面と外側接触面の締めしろが異なる場合の内側接触面の平均締め付け圧力と温度の関係

れ0.4と0.2の場合、内側接触面の締め付け圧力の平均値を求めたところ、 $30-0\mu\text{m}$ 、 $15-15\mu\text{m}$ 、 $0-30\mu\text{m}$ の締めしろに対して、 52.1MPa 、 48.8MPa 、 34.8MPa となった。

これらより、いずれの摩擦係数においても外側接触面の締めしろが多いほど、内側接触面の平均締め付け圧力の値が低下することが分かる。この傾向は、摩擦係数が高いほど強くあらわれた。

図10は、スリット数がそれぞれ1と3の締結体の平均締め付け圧力と温度の関係を示したものである。締結体の寸法は、 $\phi 25-\phi 44-\phi 55$ である。摩擦係数が内側接触面と外側接触面でそれぞれ0.4と0.2の計算値は実線で示した。また、両接触面共に摩擦係数が0の計算値は破線で示した。スリット数1の実線は、室温から200°Cの間で温度上昇と共に急激に低下している。約50°C以上の同一温度で実線同士を比較すると、常にスリット数3の計算値の方が高い。これより高温結合強度はスリット数1の締結体より、スリット数3のものの方が高いことが分かる。この傾向は、前報の実験結果と一致する。破線と実線を比較することにより、接触面の摩擦は締め付け圧力を低下させることが分かる。

図中の一点鎖線は、前報の簡易式で計算した値である。約100°Cまでは破線とよく一致している。簡易式では、シュリンクフィッターを半径方向にのみ変形するバネの集合体とモデル化した。100°C以上では、モデル化されたシュリンクフィッターと実際のシュリンクフィッターの変形に差がでて、一点鎖線と破線は一致しなくなったものと考えられる。

図9より、両接触面の摩擦係数がそれぞれ0.4と0.2の場合は、 $15-15\mu\text{m}$ の締めしろの締結体が、 $0-30\mu\text{m}$ の締めしろのものより、室温で平均締め付け圧力が約28%高くなった。そこで、高温においても室温におけるような締め付け圧力の差が生じるのか調べた。

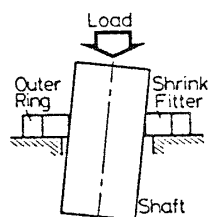


図12 締結体せん断強度試験のモデル図

図11は、上記2つの締めしろの締結体の昇温時における、平均締め付け圧力を示したものである。温度が150℃以上になると、平均締め付け圧力の差はあまり見られなくなる。したがって、内側接触面と外側接触面の締めしろが異なっても、その合計が等しければ高温時の平均締め付け圧力は等しいと見なせる。

5. 考察

図10の内側接触面の平均締め付け圧力の計算値 P を、次式によりせん断強度 τ に換算した。

$$\tau = \mu P \quad (13)$$

ここで、 $\mu = 0.4$ とした。この値は、セラミックスシャフトとシュリンクフィッターの組合せでの摩擦係数の最大値である。

このせん断強度の計算値と、前報⁴⁾の実験値を比較したところ、実験値は計算値より約27%高くなった。内側および外側接触面には表面微小突起が存在し、その変形まで含めて考えれば、実験値と計算値の差はさらに増す。このような結果になったのは、締結体のせん断強度を求める方法に原因があると考えられる。

せん断強度を測定するために、セラミックスシャフトに軸方向荷重を加えると、シャフトは半径方向にポアソン比分だけふくらみ、締めしろが増加すると考えられる。しかし、見横りでは最大でも直径で1μmとわずかな値で、この影響は無視できる。

図12は、せん断強度測定中の締結体をモデル化して示したものである。この締結体は、リングが軸方向に薄く、またシュリンクフィッターにスリットが入っているために剛性が低下している。そのため、せん断強度測定中は、セラミックスシャフトの軸の向きは、荷重の向きと完全には一致していない。したがって、せん断強度測定中にシャフトとシュリンクフィッターは片当りを起こし、せん断強度が高くなったと考えられる。

6. 結言

シュリンクフィッターを用いた締めばめにおいて、締結条件が締め付け圧力分布に及ぼす影響について検討した。その結果得られた主な結論を以下に示す。

- (1) スリット数3の締結体は室温において、外側接触面の締めしろが多いほど、内側接触面の平均締め付け圧力は低下した。この傾向は摩擦係数が大きいほど強く現れた。
- (2) スリット数3の締結体で、内側および外側接触面の締めしろは異なっているが、その和が同じ2つの締結体については、150℃以上になると内側接触面の平均締め付け圧力がほぼ一致した。
- (3) スリット数1と3の締結体の内側の平均締め付け圧力を比較した場合、約50℃以上ではスリット数3のものが高くなった。
- (4) シュリンクフィッターが半径方向に薄くなるか、または、外側リングが半径方向に厚くなると、締め付け圧力分布は平坦になった。さらに、完全すべりを仮定した計算値と完全固着を仮定した計算値の差も少なくなった。
- (5) 完全すべりの条件で求めた平均締め付け圧力は室温から約100℃の間では、前報の簡易式の計算値と一致した。

文献

- (1) M. Langer et al., Ceram Mater Compon Engines, (1986)1109-1114
- (2) Y. Ogawa et al., SAE Tech. Pap. Ser., (1987), No. 870650
- (3) J. Miyauchi et al., SAE Tech. Pap. Ser., (1985), No. 850313
- (4) 新田ら, 機論, 55-510, C(1989), 417
- (5) 尾田ら, 機論, 38-306, (昭47), 241.
- (6) 新田ら, 機論, 54-503, C(昭63), 1564.
- (7) 薫ら, 機誌, 76-651, (昭48), 348.
- (8) 岡本, 機論, 43-374, (昭52), 3716.
- (9) T. D. Sachdeva et al., ASME J. Eng. for Industry Vol. 103, (1981), 456.
- (10) K. Kato et al., ASME J. Vib. stress and Rel. in Design, Vol. 111, (1989), 318.