

# インサートリングを用いたセラミックスと金属の 縮りばめの高温結合強度に関する研究\*

(第一報, インサートリングを用いた縮りばめ法の提案と実験結果)

新田 勇\*<sup>1</sup>

木越 健二\*<sup>2</sup>

加藤 康司\*<sup>3</sup>

Study on the Fitting Strength between Ceramic and Metal with the Use of Insert Ring  
at Elevated Temperature  
(1st Report, Proposal of the Method of the Shrink Fit with the Use of  
Insert Ring and Experimental Results)

Isami NITTA, Kenji KIGOSHI, Koji KATO

A new method of shrink fit between a ceramic shaft and an outer metal ring with the use of an insert ring has been developed in this paper. An insert ring, which has a higher coefficient of thermal expansion than that of the outer ring, was inserted between the ceramic shaft and the outer ring where the insert ring was cut in the radial direction into some pieces. The fitting strengths of these shrink fitted assemblies were measured from room temperature up to 600°C. The effect of number of cutting in the insert ring on the fitting strength at elevated temperature was researched. It was revealed that the cutting of the insert ring into over three pieces was requisite to ensure the fitting strength at elevated temperatures. We were able to design the fitting strength-temperature relationship by changing thickness of the insert ring in the radial direction. For example, the fitting strength would increase when the insert ring was thick enough as the temperature was raised. And the fitting strength would decrease when the insert ring was thin enough as the temperature was raised. Expressions which estimate the fitting strengths were also developed in this paper.

Key Words: Machine Element, Fixing Element, Ceramic, Shrink Fit, Insert Ring, Elevated Temperature, High Temperature, Strength, Slit

## 1. 緒言

セラミックスは耐蝕性、耐熱性、耐摩耗性に優れた材料であり、各分野で盛んに研究され実用化も進んでいる。その反面、脆性、難加工性といった欠点も有している。したがって、セラミックスを使用した機械部品においては、必要な部分にだけセラミックスを使用し、他の部分は金属を使用する構造が一般的である。このためにセラミックスと金属の接合技術はセラミックスの利用拡大にとって非常に重要な技術となっている。

セラミックスと金属の接合法を大別すると、機械的接合法、接着剤による方法、ろう付法、固相接合法に分けられる。

接着剤による方法は比較的簡単な方法であるが、耐熱性と接合強度にまだ改善されるべき点がある<sup>1)2)</sup>。

ろう付法、固相接合法も現段階では冷却時の熱応力緩和や接合体の信頼性をいかに向上させるかが問題となっている<sup>3)4)</sup>。

これに対して、機械的接合法の中の縮りばめは室温での締結体の信頼性は高い。結合界面での両母材の相

対すべりが可能であるために、熱応力の緩和も可能である。また、前述の方法に比べ、縮りばめは位置決めが行い易く、大量生産工程に導入することが簡単である。ただし従来の縮りばめでは、締付け圧力が使用温度によって異なり、例えばセラミックスシャフトと金属円筒の組合せの場合は、セラミックスの熱膨張係数が小さいために高温下では結合強度が減少する結果となっていた。しかし、この欠点を克服するための研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、セラミックスシャフトと金属円筒の組合せにおいて、高温下でも結合強度が低下しない縮りばめ法を提案し、実験によりこの新しい縮りばめ法の可能性を示すことを目的とした。実験では、温度範囲を室温から600℃までとし、実験結果と比較することによりこの縮りばめ法に検討を加えた。さらに、この接合法によれば温度上昇に伴い結合強度を上昇させることも減少させることも可能となることを示した。

## 2. 理論

本研究では締結体のモデルを、セラミックスシャフトに軸方向に厚さの小さい金属円筒を縮りばめするものとした(図1)。このような金属リングを用いたのは実験時にテーパの影響を少なくするためである。

\* 昭和63年10月29日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年4月11日。

\*<sup>1</sup> 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8085)。

\*<sup>2</sup> 学生員、新潟大学工学部。

\*<sup>3</sup> 正員、東北大学工学部(〒980 仙台市荒巻字青葉)。

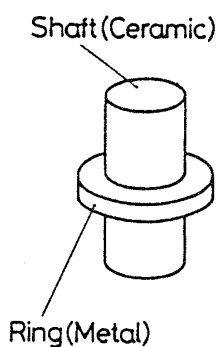


図1 セラミックシャフトと金属リングの締めばめ

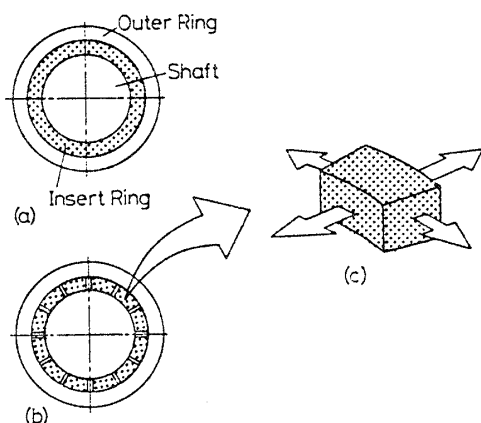


図2 インサートリングを用いた締めばめ

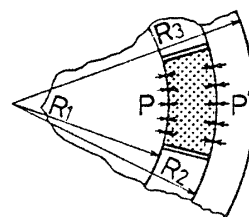


図4 インサートリングの内側と外側に作用する力

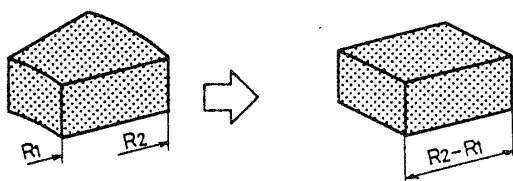


図3 インサートリング一片の直方体へのモデル化

図1において室温での締めばめの締め付け圧力と締めしろの間には、平面応力問題と仮定すれば次の関係が成り立つ。

$$\delta = 2R_1 P \left\{ \frac{1-\nu_s}{E_s} + \frac{1}{E_o} \left( \frac{R_3^2+R_1^2}{R_3^2-R_1^2} + \nu_o \right) \right\} \quad (1)$$

ここで

- $\delta$  : 室温で測定した締めしろ(直径の差)
- $P$  : 締め付け圧力
- $E_s, E_o$  : シャフト, リングのヤング率
- $\nu_s, \nu_o$  : シャフト, リングのポアソン比
- $R_1$  : シャフト半径
- $R_3$  : リング外半径

両材料の熱膨張差のために、締めばめ締結体が高温環境下にさらされると、締めしろは次式で表される量だけ変化する。

$$\Delta \delta = 2R_1 (\alpha_s - \alpha_o) \Delta T \quad (2)$$

ここで

- $\Delta T$  : 室温からの温度の変化量
- $\Delta \delta$  :  $\Delta T$ による締めしろの変化量
- $\alpha_s, \alpha_o$  : シャフト, リングの熱膨張係数

シャフトがセラミックスでリングが金属の場合には、

一般に  $\alpha_o > \alpha_s$  が成立するので、高温になるにしたがって締めしろが減少する。

高温下での締めしろの減少分を補う目的で、セラミックシャフトと金属リングの間に熱膨張係数の大きい金属リング(以下インサートリングと呼ぶ)を挿入することを考えた。しかし単に熱膨張係数の大きいリングを挿入しただけでは、図2(a)に示す二重リングの締めばめとなり、やはりインサートリング-セラミックシャフト界面の結合部は高温下でゆるむこととなる。そこで、インサートリングの半径方向の熱膨張だけを有効に利用するために、インサートリングの半径方向に切れ目(以下スリットと呼ぶ)を入れる方法を考案した(図2(b))。このことにより、図2(c)に示すように締めしろの減少分を補うことが可能となる。これ以降、金属リングをインサートリングと区別するために、外側リングと呼ぶことにする。

この方法による締め付け圧力-締めしろの関係を概略的に表す目的で以下のような近似式を考えた。

まず最初に、ある締め付け圧力が作用する場合のセラミックシャフトと金属リングの半径方向の変形量は(1)式より計算できる。次にインサートリングの半径方向の変形量について考える。インサートリングのスリット数はその数が増えるほどその一片の形状は直方体に近くなる。そこでインサートリングの変形の取り扱いを容易にするために、本研究ではインサートリングの一片の形状を直方体と仮定した。図3のようにインサートリングの外半径を  $R_2$  とすると、この直方体の長さは  $(R_2 - R_1)$  となるので、この直方体の長手方向の単位面積当りバネ常数  $K$  は次式で表される。

$$K = \frac{E_i}{(R_2 - R_1)} \quad (3)$$

ここで

$R_2$  : インサートリングの外半径  
 $E_i$  : インサートリングのヤング率

インサートリングの内側には締付け圧力  $P$  が作用し、外側には  $P'$  が作用する (図4)。インサートリングの内側と外側の力の釣合より、 $P$  と  $P'$  は次のように関係付けられる。

$$2\pi R_1 P = 2\pi R_2 P' \quad (4)$$

またこの直方体には  $(P+P')/2$  の締付け圧力が作用するものと仮定すると、インサートリングの変形量は

$$\frac{(P+P')(R_2-R_1)}{2E_i} \quad (5)$$

となる。

したがって、締付け圧力-締めしろの関係は次のようになる。

$$\delta + \Delta \delta = 2R_1 P \frac{1-\nu_s}{E_s} + 2R_1 P \frac{\frac{R_2^2+R_1^2}{R_2^2-R_1^2} + \nu_o}{E_o} + \frac{(R_2^2-R_1^2)P}{R_2 E_i} \quad (6)$$

インサートリングを用いた締めばめのときには  $\Delta \delta$  は(2)式をもとにして次のように修正される。

$$\Delta \delta = 2\{(R_2-R_1)\alpha_i - (R_2\alpha_o - R_1\alpha_s)\} \Delta T \quad (7)$$

ここで

$\alpha_i$  : インサートリングの熱膨張係数

(6)、(7)式の熱膨張係数、ヤング率、ポアソン比は温度の関数であり、締付け圧力をより正確に求めるときにはこれら材料特性値の温度依存性を考慮しなければならない。

インサートリングを用いた締めばめの結合強度は次のようにして評価した。締結体をインサートリングのみでささえ、シャフトに軸方向の荷重を加える。ある荷重まで達すると、シャフトとインサートリングの間ですべりが生じる。この荷重をインサートリングとシャフトの間の見かけの接触面積で割った値をせん断強度  $\tau$  として締結体の強度を評価した。また、このせん断強度  $\tau$  は(6)式より求まる締付け圧力  $P$  に接触部の摩擦係数  $\mu$  をかけて次式のように求めることができる。

$$\tau = \mu P \quad (8)$$

### 3. 実験

3-1 試験片 試験片材料はシャフトに  $Al_2O_3$  セラミックス、インサートリングに SUS304、外側リングに SUS403 を用いた。セラミックスシャフトの寸法は、直径 25mm、長さ 45mm である。金属リングの軸方向の厚さは 6mm とした。

次に各試験片材料の高温における材料特性値を求めた。室温から 600℃ までの範囲で各材料の熱膨張係数を示差式熱膨張計で測定した。ヤング率、ポアソン比の温度依存性は測定が困難であるために文献の値またはカタログデータを使用した<sup>5)6)</sup>。調査の結果、 $Al_2O_3$  のヤング率と各材料のポアソン比の温度依存性はごくわずかであったので本研究では温度によらず一定とした。また、SUS403 のヤング率の温度依存性を表す式は、合金成分がほとんど同じ SUS410 のものを使用した。

以下に材料特性値の温度依存性を近似した式を示す。

ヤング率  $E$  (MPa)

$$E = 2.00 \times 10^5 \exp(-0.00055T) \quad (\text{SUS304})$$

$$E = 2.15 \times 10^5 \exp(-0.00044T) \quad (\text{SUS403})$$

熱膨張係数

$$\alpha = 0.8223 \times 10^{-5} - 0.1740 \times 10^{-7} \times T + 0.6673 \times 10^{-10} \times T^2 - 0.6453 \times 10^{-13} \times T^3 \quad (Al_2O_3)$$

$$\alpha = 0.1097 \times 10^{-4} + 0.4451 \times 10^{-7} \times T - 0.1031 \times 10^{-9} \times T^2 + 0.8535 \times 10^{-13} \times T^3 \quad (\text{SUS304})$$

$$\alpha = 0.8068 \times 10^{-5} + 0.1840 \times 10^{-7} \times T - 0.3608 \times 10^{-10} \times T^2 + 0.2778 \times 10^{-13} \times T^3 \quad (\text{SUS403})$$

ここで、 $T$  は温度 (°C) である。

また表1には、室温でのヤング率、ポアソン比、0~648℃の範囲の平均熱膨張係数を示す。

インサートリングのスリットの幅は 1mm とした。

表面あらしは、セラミックスが最大高さあらし  $R_{max} = 3\mu\text{m}$ 、金属試験片は  $R_{max} = 5\mu\text{m}$  前後であった。表面あらしが存在すると締付け圧力が低下することが報告されている<sup>7)~9)</sup>。しかし、高温下における表面微小突起の変形に関するデータがほとんどない<sup>10)</sup>ことや、本実験では締付け圧力-温度の定性的な関係を求めることを目的にしているため、今回は表面あらしの変形については考慮しなかった。

表1 ヤング率 ポアソン比 平均熱膨張係数

	Young's Modulus E (MPa, 20°C)	Poisson's Ratio $\nu$ (20°C)	Coeff. of Thermal Expansion $\alpha$ (0~648°C)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$3.14 \times 10^5$	0.235	$7.6 \times 10^{-6}$
SUS304	$1.93 \times 10^5$	0.30	$18.8 \times 10^{-6}$
SUS403	$2.00 \times 10^5$	0.30	$11.7 \times 10^{-6}$

表2 インサートリングと外側リングの寸法

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SUS304 - SUS403						
	Outer Ring		Insert Ring			
	A	B	A	B	t	
	$\phi 38$	$\phi 48$	$\phi 25$	$\phi 38$	6.5	
SUS403	44	55	SUS304	25	44	9.5
	50	62		25	50	12.5

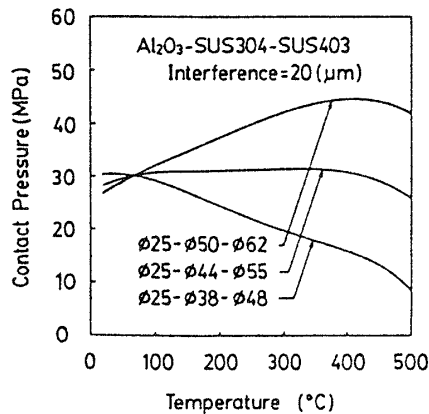


図5 締め付け圧力-温度の関係の計算結果

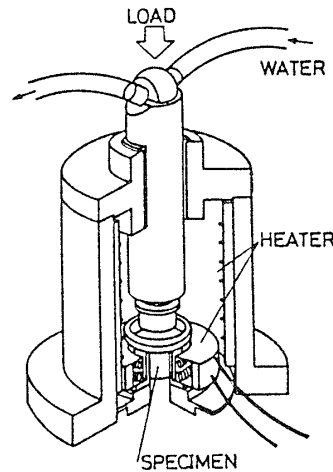


図6 実験装置の概略図

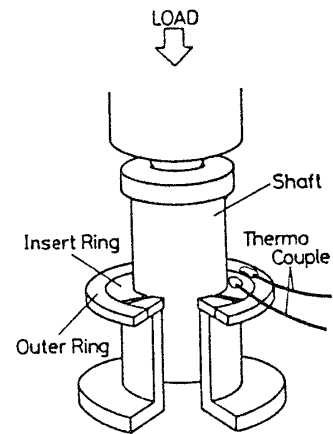


図7 試験片付近の詳細図

本実験でいう締めしろとは、スリットを入れる前のインサートリング、シャフト、外側リングの内径・外径を測定し、それらの直径の差により計算した値である。

(6)、(7)式を使用して、締め付け圧力が温度の上昇と共に減少、一定、増加する試験片寸法の組合せを求めると、表2のようになる。またその時の計算結果を図5に示す。このことから、インサートリングの材質や寸法を変えることにより高温下での締め付け圧力の設計が可能となることが分かる。

3-2 実験装置 実験装置の概略を図6示す。実験装置は加熱装置、加圧装置からなる。荷重は手動式油圧ポンプでロードセル、圧子を介してセラミックシャフトの軸方向に加えられる。圧子はすべり軸受により軸方向のみに移動するようになっている。この圧子の内部には冷却水を流すようにし、加熱によって軸受部が熱膨張しないようにした。加熱は抵抗発熱体を用いた電気炉によって行った。試験片全体の温度が均一になるように大小2つの炉を配置した。試験片付近の詳細を図7に示す。クロメル-アルメル熱電対を用いて、インサートリングと外側リングの2箇所の温度を測定した。またふく射の影響をさけるために熱電対の溶着部はセラミックセメントでコーティングした。せん断強度の測定中もインサートリングとセラミックシャフトが全面にわたって接触を保てるように、締め結体はインサートリングとシャフトとの界面近くのインサ

ートリング部だけで支えるようにした。

3-3 実験方法 試験片をアセトンで超音波洗浄した後、外側リングを炉内で加熱し膨張させる。十分に熱膨張させた後、インサートリングをすばやく外側リングの内側にセットし、インサートリングが膨張しきる前にセラミックシャフトを挿入した。実験に先立ちこの締め結体をいったん室温まで冷却した。試験片を再び実験装置にセットし、所定の温度に加熱して15分間保持した後、セラミックシャフトの軸方向に荷重を加えた。セラミックシャフトとインサートリングにすべりが生じるときの荷重を測定し、これをセラミックシャフトとインサートリングの間の見かけの接触面積で割ってせん断強度とした。

このように設定温度を室温から600°C付近まで約50°Cずつ上昇させてせん断強度を測定した。さらに600°Cからの冷却過程でも温度を50°Cずつ下げ、せん断強度を測定した。

#### 4. 実験結果

##### 4-1 せん断強度に及ぼすスリット数の影響

インサートリングのスリット数が多ければ図3に示したように、その一辺を直方体に仮定することも不合理でなくなる。しかし、スリットの数が少ないほど試験片の作製と実験が行い易くなる。そこで最適なスリット数を求めるために、スリット数1と、円周上に対称

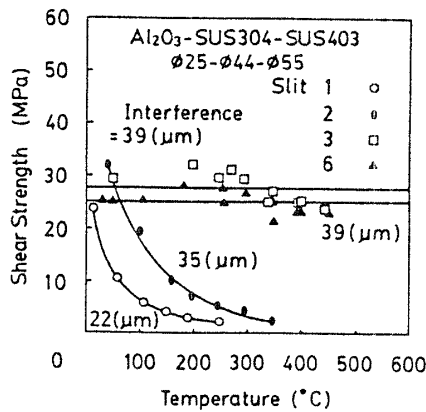


図8 セン断強度-温度の係に及ぼすスリット数の影響

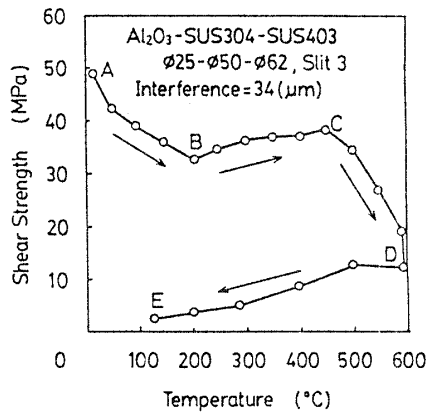


図9 セン断強度-温度の係

に入れたスリット数2,3,6について実験を行った。試験片のサイズはセラミックスシャフトの直径φ25, インサートリングの外径φ44, 外側リングの外径φ55のものを使用した。以下では締め結体の寸法を表すときは, φ25-φ44-φ55と略記することにする。この試験片寸法は, (6), (7)式で締め付け圧力が高温でも一定と予測したものである。

図8は縦軸にセラミックスシャフトとインサートリングの界面のせん断強度を, 横軸に温度をとり, スリット数がせん断強度に及ぼす影響について示したものである。スリット数1,2のものは温度上昇に伴い, せん断強度が低下する傾向にあった。特にスリット数が1の場合で締めしろが大きい時は, せん断強度測定中にセラミックスシャフトが破壊してしまうものもあった。スリット数3または6では温度に無関係にせん断強度が一定となった。またスリット数が3でも6でも締めしろが同じ場合はせん断強度もほぼ同じであることが分かる。したがって, 試験片の作製と実験の行い易さから以後スリット数は3にして実験を行った。

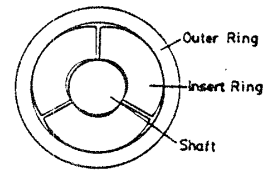


図10 インサートリングを用いて締めばめした状態



図11 実験後のセラミックス表面

4-2 加熱・冷却過程におけるせん断強度の変化

図9に1つの締め結体のせん断強度が温度と共にどのように変化するかを示した。温度は室温から600°Cまで上昇させ, 再び室温まで下げた。試験片のサイズは, φ25-φ50-φ62であり, 締めしろは34 μmである。このサイズの締め結体は(6), (7)式より, 温度の上昇と共にせん断強度が増加すると予測されたものである。図中の曲線はAB部, BC部, CD部, DE部の4つに分けることができる。BC部は実験前に予測した通り, 温度の上昇に伴いせん断強度が増加している。CD部では温度の上昇に伴い急激にせん断強度が低下している。これは高温になって金属の降伏応力が低下したためと考えられる。DE部では温度の下降に伴いせん断強度が低下しているが, この直線の傾きはBC部とほぼ同じである。他の締めしろの実験でCD部が存在しない場合, すなわち金属リングが塑性変形しない時にはDE部はBC部と一致した。このことからCD部の急激なせん断強度の低下の原因は降伏応力の低下による金属の塑性変形であることが分かる。また, 本研究では, この図以外のデータはCD部が見れないものを用いた。

AB部では高いせん断強度を示したが以下これについて考察する。インサートリングの材料中には引き抜き等の加工の際に受けた残留応力が存在している。実際, インサートリングにスリットを入れるとその曲率半径は小さくなった。このようにひずんだインサートリングを用いて締めばめした状態をモデル的に示すと図10のようになる。

これより実際の締めしろは, 測定値より大きくなっているのが分かる。しかし, 温度が高くなるとインサ

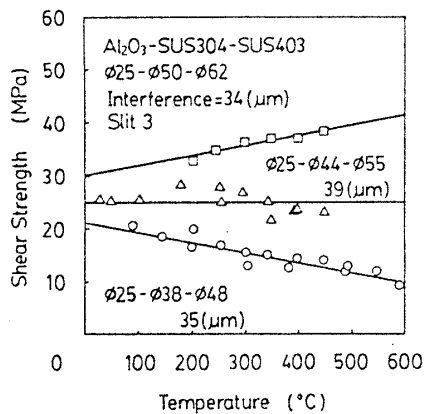


図12 セン断強度-温度の関係

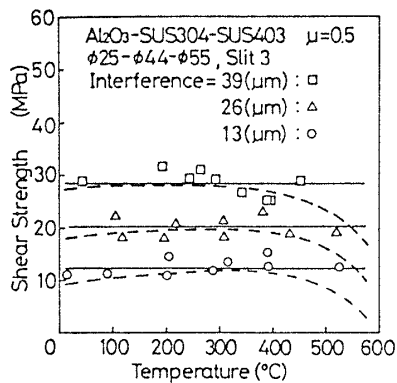


図13 セン断強度-温度の関係(せん断強度一定)

ートリングはシャフト、外側リングより多く熱膨張するため、実際の締めしろは測定値のものに近づくようになる。この過程が図10のAB部になると考えられる。したがって、せん断強度は温度が高くなるにつれて減少する。また、1回実験を終えた締結体を用いて再度実験を行うと、AB部に沿ってではなく、ED部に沿ってせん断強度が上昇する。以上のことにより本研究では、AB部の実験結果は他のグラフ上では削除することにした。

図11はせん断強度測定後のセラミックシャフトの写真である。インサートリングと接触していたところは黒味がかっている。スリット部近くでは、黒味が強く接触圧力が高かったことを示しており、上述の考察を裏付けている。なお、インサートリングとの接触部の中央上部に黒い部分が認められるが、これは熱電対をインサートリングに溶着する際についたスパークのあとである。

4-3 セン断強度に及ぼすインサートリングの厚さの影響 図12は、締結体のせん断強度が温度の上昇と共に上昇、一定、減少と予測される締結体寸法につ

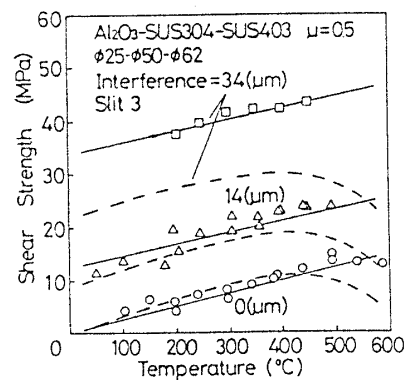


図14 セン断強度-温度の関係(せん断強度上昇)

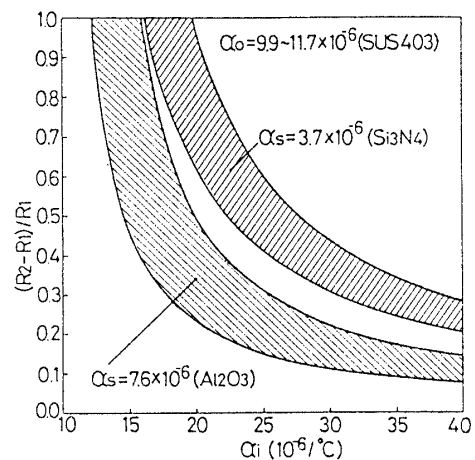


図15 締め付け圧力が温度によらず一定となるためのインサートリングの半径方向の厚さと熱膨張係数の関係

いての実験結果である。実験値は図5に示した予測通りの傾向を示していることが分かる。金属の降伏応力が温度上昇と共に低下することを考えれば、せん断強度すなわち締め付け圧力を高温になるにしたがって低下するように設計することは合理的である。このように設計すれば、常にその使用温度での最大せん断強度を利用できることになる。

図13は、温度上昇に無関係にせん断強度が一定と予測される締結体寸法において、締めしろを変化させたものである。締めしろを大きくすると、せん断強度が高くなるのが分かる。図中の破線は、インサートリングとシャフトの間の摩擦係数 $\mu=0.5$ として(6)、(7)、(8)式より計算した値である。450°C以下では実験値と計算値はよく一致することが分かる。

図14は、温度上昇と共にせん断強度が増加すると予測された締結体において締めしろを変化させたものである。ここでも締めしろを大きくするとせん断強度が

高くなるのが分かる。またどの締めしろでも、温度上昇によるせん断強度の増加率は同じことが分かる。実験値と破線で表される計算値は、締めしろ $34\mu\text{m}$ の場合をのぞいて $450^\circ\text{C}$ 以下ではよく一致することが分かる。締めしろが $34\mu\text{m}$ の実験値が計算値より高くなったのは締結部の接触状態が均一ではなく、片当りの部分があったためと考えられる。しかしこの場合でも、 $450^\circ\text{C}$ 以下では実験値と計算値は定性的に一致していることが分かる。

図13.14に示したように計算値は $450^\circ\text{C}$ 以上の温度でせん断強度の変化の割合が変わること、すなわち急に低下することを示している。しかし、実験結果は必ずしもそのようになっていない。この原因としては、ヤング率の温度依存性を正確に評価できなかつたことや、インサートリングの一片を直方体に仮定したことにあると考えられる。

## 5. 考察

図15は、(7)式を用いて締付け圧力が温度によらず一定となるためのインサートリングの半径方向の厚さと熱膨張係数の関係を示したものである。縦軸はシャフト半径に対するインサートリングの半径方向の厚さの割合であり、横軸はインサートリングの熱膨張係数である。外側リングはマルテンサイト系ステンレスを使用すると仮定して熱膨張係数は $9.9\sim 11.7\times 10^{-6}(1/^\circ\text{C})$ の幅をもたせた。セラミックスシャフトは $\text{Si}_3\text{N}_4$ と $\text{Al}_2\text{O}_3$ の2種類とした。セラミックスシャフトに $\text{Al}_2\text{O}_3$ を、インサートリングにSUS304を用いるならば、SUS304の熱膨張係数は約 $18\times 10^{-6}(1/^\circ\text{C})$ であるので、インサートリングの半径方向の厚さはシャフト半径に対して約3~6割であればよいことが分かる。現在機械的強度があり熱膨張係数が最も高い金属といえばアルミ合金である。その熱膨張係数は約 $23\times 10^{-6}(1/^\circ\text{C})$ である。シャフトに $\text{Al}_2\text{O}_3$ を、インサートリングにアルミ合金を使用した場合、その半径方向の厚さはシャフト半径に対して約1~3割であればよい。また、この組合せに対して、熱膨張係数 $\alpha_1$ が $25\times 10^{-6}(1/^\circ\text{C})$ 以上になると、それ以上 $\alpha_1$ を大きくしてもインサートリングの厚さはあまり小さくならないことが分かる。したがって、さらにインサートリングの厚さを小さくするためには、材料開発を行って熱膨張係数が大きい金属を得るより

はインサートリングをバイメタルにするなどの構造上の改良が有用であると考えられる。

## 6. 結言

セラミックスに金属円筒を締めしろする場合において、高温下でも結合強度が低下しない締めしろ法として、スリットを入れたインサートリングを用いる方法を提案した。そして、この締めしろ法を用いて室温から $600^\circ\text{C}$ までの温度範囲で実験を行い、高温下での結合強度低下が防止できることを示した。具体的には以下の結論が得られた。

- (1)スリットを入れたインサートリングを用いることで高温下でも結合強度が低下しない締めしろ締結体が得られる。さらに、インサートリングの半径方向の厚さを変えることにより、温度上昇に伴い接合強度を上昇させることも減少させることもできる。
- (2)結合強度が低下しないためには、インサートリングのスリット数は3以上必要である。
- (3)締め付け圧力-温度の関係を表す式を求め実験結果と比較したところ、スリット数3以上であれば実験値と計算値は定性的に一致した。

## 謝辞

本研究の実験遂行にあたっては昭和61年度学部4年生の中山真人君に協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

本研究の一部は財団法人山口育英奨学会の昭和61年度研究助成金によることを記し、感謝の意を表します。

## 文献

- (1)扇, 溶接学会誌, 56-2(1987), 91.
- (2)中尾, 溶接学会誌, 56-2(1987), 83.
- (3)河野ほか2名, 日本金属学会誌, 49-10(1985), 876.
- (4)岡村ほか5名, 溶接学会論文集, 4-2(1986), 476.
- (5)村松, 機論, 68-562(昭40), 1623.
- (6)竹内, 熱応力(昭56), 日新出版
- (7)新田ほか3名, 機論, 52-481, C(昭61), 2503.
- (8)新田ほか3名, 機論, 53-487, C(昭62), 908.
- (9)新田ほか2名, 機論, 掲載予定(No. 87-0687A)
- (10)新田ほか2名, 機論, 52-483, C(昭61), 2920.