

バイメタル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りばめの高温結合強度

新 田 勇^{*1},
原 利 昭^{*1}

中 静 勝 己^{*2}

The Fitting Strength between Ceramic and Metal with the use of an Shrink Fitter of Bimetal at Elevated Temperature

Isami NITTA, Katsumi NAKASHIZUKA and Toshiaki HARA

The shrink fit between a ceramic shaft and a metal ring with the use of an shrink fitter of bimetal has been developed in this paper. The fitting strengths of the shrink-fitted assemblies were measured from room temperature to 600°C. The contact pressures between the shafts and the shrink fitters of bimetal were also calculated. The ceramic shaft was Al_2O_3 or Si_3N_4 . The shrink fitter was a bimetal of SUS304 and SUS403. The outer ring was SUS403. It has been shown from calculations that the shrink-fitted assembly using the shrink fitter of bimetal is somewhat weaker than that using the shrink fitter of SUS304 when the thickness of the shrink fitter in the radial direction is over 6mm. The bimetal shrink-fitted assembly was approximately 3MPa stronger than that using the shrink fitter of SUS304 at 600°C when the thickness of the shrink fitter in the radial direction was 4mm. The fitting conditions under which the bimetal shrink-fitted assembly was stronger than that using the shrink fitter of SUS304 have been discussed.

Key Words: Fixing Element, Ceramic, Shrink Fit, Shrink Fitter, Bimetal, Elevated Temperature, High Temperature, Slit, Strength

1. 緒 言

締りばめは、結合部での相対すべりが可能であるために、残留応力が少なく、セラミックスと金属の接合には適していると言われている¹⁾。また、心出し精度がよいことから大量生産システムに組み入れ易い。

しかし、セラミックスと金属の熱膨張係数が大きく異なることから、セラミックスシャフト—金属リングの組合せでは、200～300℃が従来の締りばめの使用限界温度であった²⁾。このことを改善するために、既報³⁾において、半径方向にスリットの入ったシュリンクフィッターを用いた締りばめを考案し、実験により600℃の高温下でも、この締結体の結合強度が低下しないことを示した。

ただし、組合わせる材料により、シュリンクフィッターが半径方向に厚くなり、結果的に締結体の寸法が大きくなってしまったこともあった。したがって、次に挑戦すべき問題は、シュリンクフィッターの半径方向の厚さをいかに小さくするかである。特別に熱膨張係数が大きい材料、または小さい材料を用いることなく、これを解決する方法の一つとして、シュリンクフィッ

ターをバイメタル構造にすることが考えられる。

そこで本研究では、締結体の寸法を低減することを目的に、バイメタル構造のシュリンクフィッターを用いた、セラミックスシャフトと金属リングの締りばめを行った。そして、理論と実験の両面より、どのような場合にバイメタル構造のシュリンクフィッターを用いたら効果があるかについて検討を加えた。

2. バイメタルと締結体

図1に、本研究で用いた締結体の概略を示す。図1において、シャフト—シュリンクフィッター界面を内側接触面と呼び、シュリンクフィッター—外側リング界面を外側接触面と呼ぶことにする。バイメタル構造のシュリンクフィッターにはスリットが入っている。図1では、スリット数は3である。

バイメタルは2種類の金属のクラッド材である。このバイメタルは古くから温度の検知、調節、保護回路等に使われている⁴⁾。しかし、本研究のように強度が要求される機械構造部品に使用する例は、あまり無いようである⁵⁾。

本研究でのバイメタルは、SUS304とSUS403をろう付したものを用いた。SUS304の熱膨張係数は、SUS403のものより大きい。そのため、SUS304を内側、SUS403を

* 平成元年10月28日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 平成元年3月9日。

^{*1} 正員、新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐二の町8050)。

^{*2} 学生員、新潟大学工学部大学院。

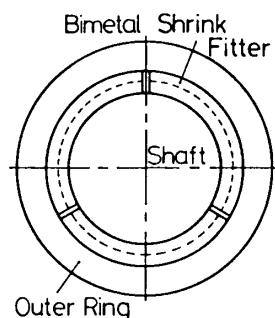


図1 バイメタル構造のシュリンクフィッターを用いた締めばめ締結体

外側にもつバイメタルシュリンクフィッターでは、温度が上昇するとその曲率半径は大きくなる(図2-a)。図2-aは軸方向から見ている図なので、二次元的にのみわん曲している図になっているが、実際のわん曲は三次元的である。これ以降、この組合せのバイメタルをBO(Bending Outward)タイプと呼ぶ。また、逆の組合せのものをBI(Bending Inward)タイプと呼ぶ(図2-b)。

図2-aおよび図2-bの右側には、それぞれBOタイプとBIタイプのシュリンクフィッターを用いた締結体の、高温下での接触状態をモデル的に示した。図中には一片のシュリンクフィッターしか示していない。BOタイプのシュリンクフィッターは、シャフトとは中央部で接触し、外側リングとはスリット端部で接触することが予測される。BIタイプではこの逆になると考えられる。

セラミックスシャフトと金属リングの締めばめでは、高温になると熱膨張係数の違いにより、締めしろが減少する。前報で提案した方法は、シュリンクフィッターの半径方向の熱膨張量を利用して、高温時の締めしろの減少を補うものであった。一方、バイメタル構造のシュリンクフィッターを用いる方法においては、図2-a、図2-bの右側に示すように、主に高温時のわん曲変形を利用して、締めしろを得ようとするものである。

3. 計算

計算では、図1に示すように、締結体を二次元にモデル化した。

締め付け圧力の計算には、ポイントマッチング法を用いた。計算方法については既報¹⁾に述べる通りである。計算条件として、接触面の摩擦係数は0とした。締めしろは、内側接触面、外側接触面共に、半径差で $7.5\mu\text{m}$ ずつ、直径で $30.0\mu\text{m}$ の締めしろとした。スリ

BO type

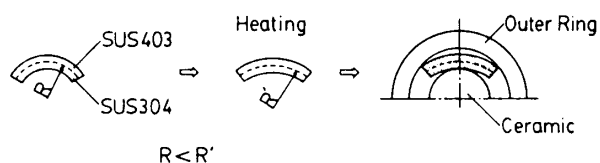


図2-a BOタイプシュリンクフィッターの熱変形

BI type

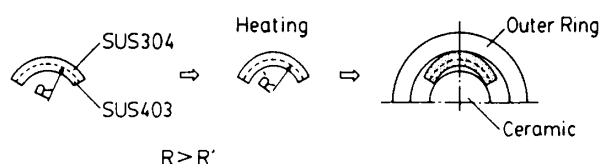


図2-b BIタイプシュリンクフィッターの熱変形

ット幅は 0mm とした。

計算では、シャフトにA1.0、外側リングにはSUS403を用いた。ヤング率、ポアソン比、熱膨張係数などは既報と同じ値とした。シャフト外径 $\phi 25$ 、外側リングの内径および外径が $\phi 33$ と $\phi 41$ の締結体の寸法を表すときは、 $\phi 25$ - $\phi 33$ - $\phi 41$ と示すことにする。実験では、セラミックスシャフトとシュリンクフィッターの間の結合強度を測定しているため、計算結果も内側接触面上の締め付け圧力についてのみ示すことにした。

4. 計算結果

図3は、スリット数3のBOタイプのシュリンクフィッターを用いた場合の、内側接触面の締め付け圧力分布を示したものである。図4は、BIタイプのシュリンクフィッターを用いた場合のものである。ここで横軸は、円周方向の位置であり、 $\theta = \pi/3$ はスリット端部を、 $\theta = 0$ は一片のシュリンクフィッターの中央部に対応する。また、どちらの場合も、シュリンクフィッターの半径方向の厚さ t は 4mm であり、SUS304とSUS403の厚さ比は1:1である。図3のBOタイプの場合は、温度上昇と共にスリット端部から $\theta = 0$ の方向に、締め付け圧力が0になる領域が広がってゆく。これとは逆に、図4のBIタイプでは、温度上昇と共にスリット端部の締め付け圧力が高くなり、 $\theta = 0$ の部分の締め付け圧力は徐々に低下する。図3のBOタイプのシュリンクフィッターでは、高温下でのシャフトとの接触状態は、図2-aに示めたモデルと同じであることが分かる。しかし、図4のBIタイプのシュリンクフィッターでは、高温下において、シュリンクフィッターの中央部とスリット端部でシャフトと接触することになり、図2-bのモデル図よりは複雑な接触状態である

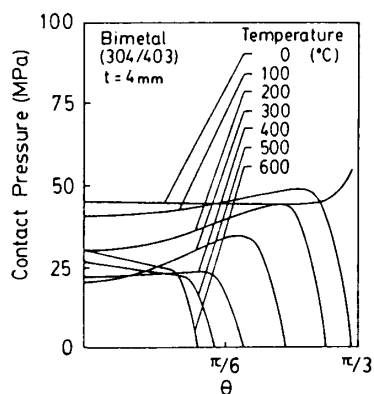


図3 内側接触面の締め付け圧力と円周方向の位置の関係 (B O タイプ, SUS304とSUS403の厚さ比1:1, $\phi 25-\phi 33-\phi 41$, スリット数3, A1_0)

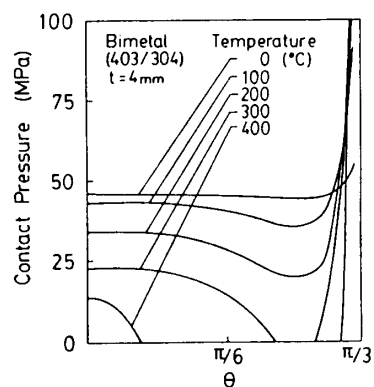


図4 内側接触面の締め付け圧力と円周方向の位置の関係 (B I タイプ, SUS304とSUS403の厚さ比1:1, $\phi 25-\phi 33-\phi 41$, スリット数3, A1_0)

といえる。また、高温下でスリット端部の締め付け圧力が大きくなることより、この部分でセラミックスの割れが発生することもあると考えられる。

図5は、バイメタル構造のシュリンクフィッターの、半径方向の厚さ t に対するSUS304の厚さの比と、内側接触面のせん断強度の関係を示したものである。ここで、 $t=4\text{mm}$ である。また、せん断強度は、平均締め付け圧力に実験で得られた摩擦係数0.4をかけて求めた。横軸の0は、シュリンクフィッターがすべてSUS403であることを、1はすべてSUS304であることを意味する。この図より、温度が400℃までは、SUS304の比率が大きいほどせん断強度が高いことが分かる。このことは、400℃までは、バイメタルのわん曲変形が締めばめの結合強度の低下を補う効果が少ないことを示している。しかし、600℃ではSUS304の比率が50～70%のシュリンクフィッターの強度が高いことが分かる。一方、B I タイプのシュリンクフィッターでも同様なことが言え、600℃では50%の比率のときに強度が最大となった。

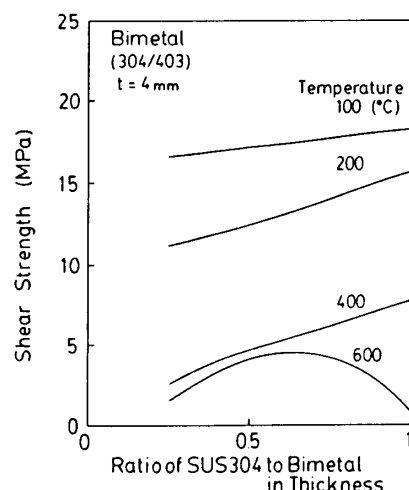


図5 せん断強度とバイメタル中のSUS304の半径方向の厚さ比の関係 (B O タイプ, $\phi 25-\phi 33-\phi 41$, スリット数3, A1_0)

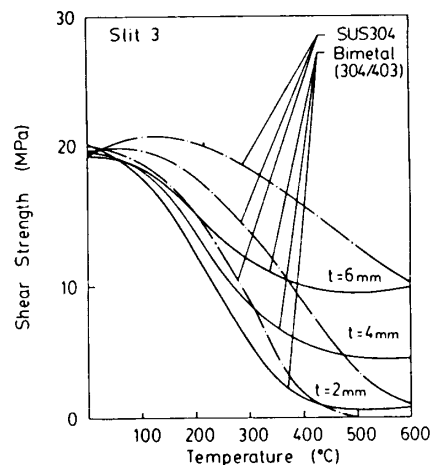


図6 せん断強度と温度の関係 (半径方向の厚さを変えた場合のB O タイプとSUS304単体のシュリンクフィッターの比較, スリット数3, A1_0)

これらの結果より、実験においては、SUS304とSUS403の半径方向の厚さ比が1:1の、バイメタル構造のシュリンクフィッターを用いることにした。

さらに、これ以下の計算においても、SUS304とSUS403の半径方向の厚さ比を1:1とする。

図6は、シュリンクフィッターの半径方向の厚さを2mm, 4mm, 6mmと変えたときの、せん断強度と温度の関係を示したものである。それぞれの厚さに対して、SUS304単体のシュリンクフィッターと、B O タイプのシュリンクフィッターの計算値が示してある。バイメタル構造でもSUS304単体のものでも、シュリンクフィッターが半径方向に薄くなるほど、高温下でのせん断強度が低下する傾向にある。厚さが6mmのときは、全温度域で、SUS304単体のシュリンクフィッターを用いた

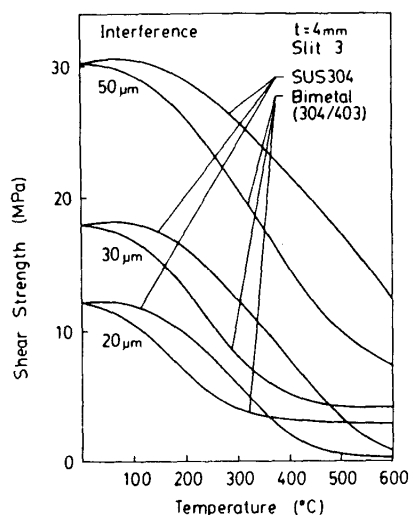


図7 セン断強度と温度の関係(締めしろを変えた場合の B O タイプと SUS304 単体のシュリンクフィッターの比較, $\phi 25$ - $\phi 33$ - $\phi 41$, スリット数 3, A1.0)

方がせん断強度が高い。しかし、厚さが4mmでは、約480℃でB Oタイプのシュリンクフィッターを用いた方が、平均せん断強度が高くなる。厚さ2mmでは、その温度が420℃になっている。したがって、シュリンクフィッターが半径方向に薄くなるほど、せん断強度の大きさが逆転する温度が低くなるが、せん断強度そのものも低下することが分かる。

図7は、締めしろを20 μ m, 30 μ m, 50 μ mと変えたときのせん断強度と温度の関係を示したものである。締めしろが少なくなるほど、より低温でせん断強度が逆転し、B Oタイプのシュリンクフィッターを用いた締結体の、せん断強度が高くなる。

これらの計算結果より、バイメタル構造のシュリンクフィッターを用いた締結体の高温せん断強度が、SUS304単体のシュリンクフィッターを用いた締結体のものより高くなる条件として、次のようにまとめることができる。

- (1)シュリンクフィッターの半径方向の厚さが少ないとき
- (2)締めしろが少ないとき
- (3)バイメタル構造のシュリンクフィッターのSUS304とSUS403の半径方向の厚さ比が1:1のとき

5. 実験

5-1 試験片 試験片材料は、シャフトにAl₂O₃またはSi₃N₄、外側リングにSUS403を用いた。シュリンクフィッターは、SUS304とSUS403をろう付したものをを用いた。ろう付条件は、アルゴンガス中、1100℃で30分間加熱である。その後、大気中で、700℃、1

表1 シュリンクフィッター、外側リングの形状と寸法

ϕB				Bimetal Shrink Fitter				Outer Ring			
A	B	t	l	A	B	t	l	A	B	t	l
25	29	2	10	29	40	55	10	25	33	4	10
25	33	4	10	33	44	55	10	25	33	4	25

表2 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	Coeff. of thermal Expansion (0~648°C)
Al ₂ O ₃	3.14×10^5	0.235	7.6×10^{-6}
Si ₃ N ₄	3.04×10^5	0.27	3.0×10^{-6}
SUS304	1.93×10^5	0.30	18.8×10^{-6}
SUS403	2.00×10^5	0.30	11.7×10^{-6}

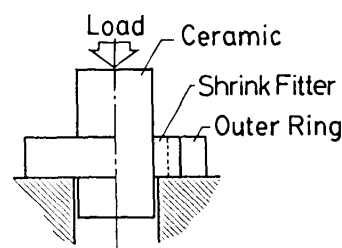


図8 締結体のせん断強度測定の概略図

時間加熱の焼きなましを行った。最後に、旋削にて所定の寸法に仕上げた。ろう材は、日本非晶質金属(株)製のMBF20を用いた。

表1に、シュリンクフィッター、外側リングの形状と呼び寸法を示す。シュリンクフィッターのスリット幅は1mmとした。表2に各材料の室温でのヤング率、ポアソン比、0~648℃の範囲の平均熱膨張係数を示す。表面あらさは、セラミックスシャフトが最大高さあらさR_{max} 3 μ m、金属リングはR_{max} 7 μ m前後であった。本実験でいう締めしろは、スリットを入れる前のシュリンクフィッター、シャフト、外側リングの内径および外径を測定し、それらの直径の差により計算した値である。

5-2 実験方法 試験片をアセトン中で超音波洗浄した後、締めばめを行った。図8は、締結体の強度測定のための概略図である。締結体を所定の温度に10分間保持した後、セラミックスシャフトの軸方向に荷重を加えた。セラミックスシャフトとシュリンクフィッターの間にすべりが生じる時の荷重を測定し、これをシャフトとシュリンクフィッターの見かけの接触面積で割ってせん断強度とした。

温度は室温から600℃の範囲で変化させて実験を行った。室温~600℃~室温のせん断強度測定を1サイクルと呼ぶことにすると、実験は同じ試験片で2サイクル以上行った。1サイクル目はせん断強度がばらつくこ

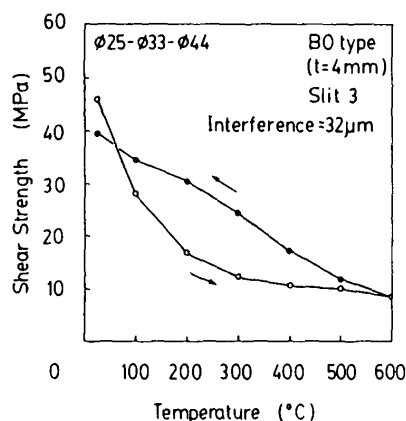


図9 セン断強度と温度の関係(1サイクル中のヒステリシス, 白丸:昇温過程, 黒丸:降温過程, A1.0)

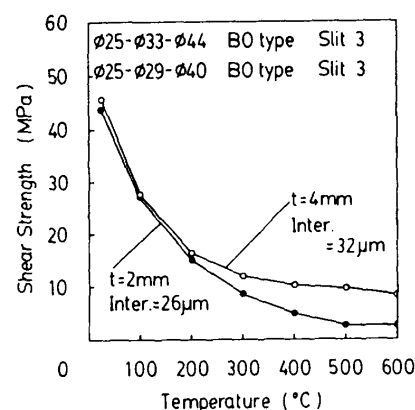


図10 セン断強度と温度の関係(シュリンクフィッターの半径方向の厚さが異なる場合, A1.0)

とがあつたが, 2サイクル目以降はそのばらつきもなくなった。2サイクル目のせん断強度は, 1サイクル目のものに比べて, 同じかあるいは若干低くなつた。しかし, 2サイクル目以降はほとんど同じせん断強度を示した。せん断強度は低い方が安全側の見積りになると考え, 実験結果は2サイクル目のものを用いて示すことにした。

6. 実験結果

6-1 ヒステリシス 図9は, 一つの締結体の1サイクルのせん断強度を示したものである。ここで, スリット数は3, B0タイプのシュリンクフィッターである。白丸は昇温過程を, 黒丸は降温過程を示す。室温から300℃までは, 温度上昇にともない急激にせん断強度が低下した。しかし, 300℃から600℃までは, 温度上昇に伴うせん断強度の低下はわずかであつた。降温過程においては, せん断強度が温度の減少とともに直線的に増加した。このヒステリシス現象は, B0タイプ, B1タイプにかかわらず, すべての実験で観察された。このような明確なヒステリシスは, 前報のSUS304単体のシュリンクフィッターにおいては, 観察されなかつた。そこで, 図9と同じ寸法のSUS304単体のシュリンクフィッターを用いて実験を行ったところ, 同様なヒステリシス現象が現れた。このようなヒステリシスが出たのは, 接触界面の摩擦力が影響したものと考えられる。

これ以降は, 昇温時の結果を用いて, 実験結果を整理することにする。

6-2 シュリンクフィッターの半径方向の厚さ

図10は, シュリンクフィッターの半径方向の厚さ t が, 4mmのものと2mmの締結体の実験結果である。スリット数は3, B0タイプのシュリンクフィッターである。

計算で予測されたように $t=2\text{mm}$ の締結体の高温におけるせん断強度は $t=4\text{mm}$ のものより低くなつた。 $t=2\text{mm}$ のものは $t=4\text{mm}$ のものに比べてバイメタルのわん曲変形量は大きい, 変形抵抗が小さいために高温せん断強度が低下したものと考えられる。このような結果になつたのは, $t=4\text{mm}$ のものが $t=2\text{mm}$ のものに比べて, 締めしろが $6\mu\text{m}$ 多いためとも考えられる。しかし, シャフトと外側リングの内径の寸法差は, 20℃から600℃に上昇すると, $t=4\text{mm}$ のもので約 $110\mu\text{m}$, $t=2\text{mm}$ のもので約 $85\mu\text{m}$ 増加する。すなわち, 外側リングの内径がより多く熱膨張する。このことを考えれば, 室温で $6\mu\text{m}$ の締めしろの差があつたとしても, 600℃でのせん断強度を比較する上ではあまり影響がないことが分かる。

6-3 B0タイプとB1タイプの比較 図11は, B0タイプとB1タイプのシュリンクフィッターを用いた締結体のせん断強度を比較したものである。スリット数は3とし, シュリンクフィッターの半径方向の厚さ t はどちらの場合も4mmとした。この図には最も差が大きくなる場合を示したが, 他の実験結果の比較では, 600℃で約1~2MPa程度B1タイプの方がせん断強度が高くなつた。これより, B1タイプの方が高温下のせん断強度がわずかに高くなることが分かる。 $t=2\text{mm}$ の場合は, B0タイプ, B1タイプのどちらのシュリンクフィッターを用いても高温下でのせん断強度は同じであつた。これは, 6-2節でも述べたように, バイメタルのわん曲変形の変形力が弱いためと考えられる。

図12は, B0タイプのシュリンクフィッターとSUS304単体のシュリンクフィッターを用いた締結体のせん断強度を比較したものである。400℃からB0タイプのシュリンクフィッターを用いた締結体のせん断強度が徐々に大きくなり, 600℃で約3MPaの差となつた。この

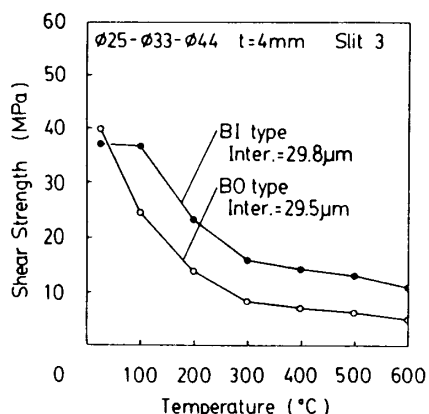


図11 セン断強度と温度の関係(B0タイプとB1タイプの比較, A1.0)

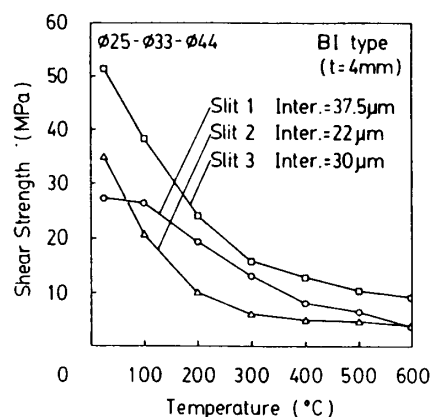


図13 セン断強度と温度の関係(スリット数が異なる場合, A1.0)

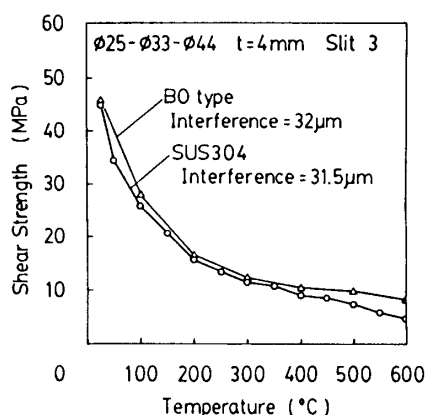
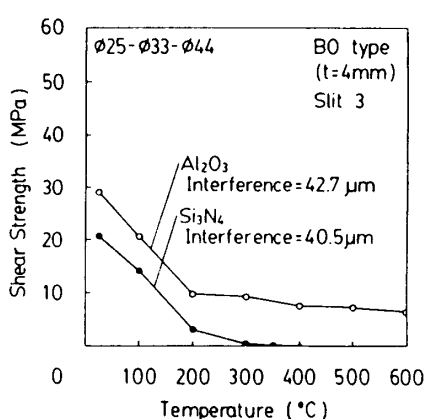


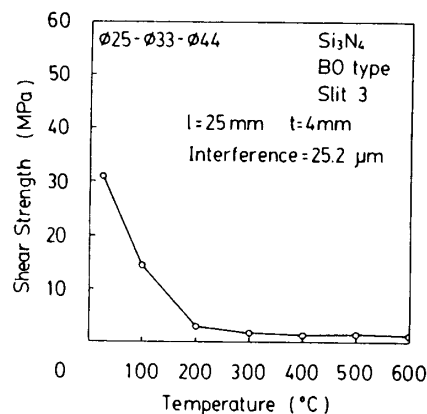
図12 セン断強度と温度の関係(B0タイプとSUS304単体のシュリンクフィッターの比較, A1.0)

図14 セン断強度と温度の関係(Si₃N₄シャフトとAl₂O₃シャフトの比較)

3MPaという値は大きな差ではないが、これにより、シュリンクフィッターをバイメタル構造にすることは、高温下での強度を強くすることが示される。なお、B0タイプではなくB1タイプのシュリンクフィッターと比較すれば、600°Cでのせん断強度の差はさらに大きくなる。

6-4 スリット数 図13は、B1タイプのシュリンクフィッターのスリット数1と3のせん断強度を比較したものである。スリット数2は同程度の締めしろが得られなかったため、参考の意味で示した。この図より、スリット数3のものはスリット数1のものより締めしろが小さいながらせん断強度は高いことが分かる。SUS304単体のシュリンクフィッターの場合、スリット数1は約400°Cでせん断強度が0になった。したがって、バイメタル構造のシュリンクフィッターの締結体は、SUS304単体のシュリンクフィッターのものに比べて、スリット数の影響はあまり強くでないことが分かった。

6-5 Si₃N₄シャフトを用いたときのせん断強度 図14は、シャフトにAl₂O₃とSi₃N₄を用いたときの、

図15 セン断強度と温度の関係(バイメタル構造のシュリンクフィッターの軸方向長さが25mmの場合, Si₃N₄)

せん断強度と温度の関係を示したものである。Si₃N₄を用いた締結体では400°Cでせん断強度が0になった。これは、Si₃N₄の熱膨張係数はAl₂O₃の約半分であることから理解できる。そこで、高温下でのバイメタル構造のシュリンクフィッターのわん曲変形が多くなるように、軸方向の長さを2.5倍の25mmにして再度実験を行っ

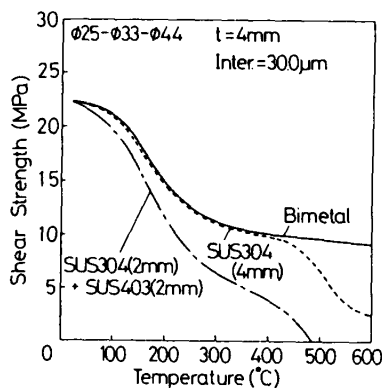


図16 セン断強度と温度の関係
(わん曲変形によるせん断強度)

た、図15はその実験結果である。200℃までは図14と同様に温度上昇と共にせん断強度は急激に低下するが、それ以降は強度一定で、600℃になっても2MPaのせん断強度を得ることができた。

7. 考察

図12の実験結果より、シュリンクフィッターの半径方向の厚みが4mmのものを比較すると、バイメタル構造のシュリンクフィッターを用いた締りばめのせん断強度は、SUS304単体のシュリンクフィッターを用いた締りばめのものより高温下で少し高くなった。ここでは、バイメタルの熱変形がせん断強度に寄与する量について考える。なお、以下の計算では前報の簡易式⁷⁾を用いた。

図16の破線は、SUS304単体のシュリンクフィッターを用いた締りばめのせん断強度と温度の関係である。また、一点鎖線は、ろう付されていないBOタイプのシュリンクフィッターを用いたときの計算値である。すなわち、半径方向の厚さ2mmのSUS304リングおよびSUS403リングにスリットを入れ、単に挿入した締りばめ締結体である。したがって、破線および一点鎖線のどちらの場合も、高温下におけるシュリンクフィッターの半径方向への熱膨張が、セラミックスシャフトと外側リング間の締めしろの低下を防ぐことになる。ここで、一点鎖線の場合、シュリンクフィッターの半分は外側リングの材質と同じSUS403のため、半径方向への熱膨張量は破線の場合に比べて少なくなり、高温下のせん断強度は低くなっている。したがって、バイメタル構造のシュリンクフィッターを用いる方法は、シュリンクフィッターの半径方向の熱膨張だけを考えるならば、SUS304単体のシュリンクフィッターを用いる方法に比べて、高温下でのせん断強度は必ず低下する。しかし、実験結果ではBOタイプのシュリンクフィ

ッターを用いた締結体のせん断強度は、SUS304単体のシュリンクフィッターを用いた締結体のものより少し高い値となった。

図の実線は、図12の実験結果よりBOタイプのシュリンクフィッターを用いた締結体のせん断強度を類推したものである。ここで、実線と破線の差が、バイメタル構造のシュリンクフィッターのわん曲変形が、せん断強度低下を防止した部分と考えられる。したがって、図12からは、600℃においてBOタイプとSUS304単体のシュリンクフィッターを用いた締結体のせん断強度はあまり変わらないように見えるが、このせん断強度を与えている機構は異なっていることが分かる。

また、これらの考察と計算結果、実験結果を合わせて考えれば、バイメタル構造のシュリンクフィッターは600℃以上でもせん断強度が低下しないということが十分予測できる。

8. 結言

本研究では、締りばめ締結体の寸法の低減を目的に、SUS304とSUS403よりなるバイメタル構造のシュリンクフィッターを用いた、セラミックスシャフトと金属リングの締りばめの高温強度試験を行った。セラミックスシャフトとしては外径25mmのAl₂O₃とSi₃N₄を用いた。そして、得られた実験結果と理論計算の両面より、どのような場合にバイメタル構造のシュリンクフィッターを用いたら効果があるかについて検討を加えた。その結果、得られた結論は以下の通りである。

- (1)シュリンクフィッターの半径方向の厚さを4mmとした場合、バイメタル構造のシュリンクフィッターを用いた締結体は、SUS304単体のシュリンクフィッターを用いた締結体のものに比べて、600℃で約3MPaせん断強度が大きくなった。
- (2)BOタイプおよびBIタイプを用いたせん断強度を比較したところ、半径方向の厚さが4mmの場合は、BIタイプを用いた方がわずかにせん断強度が高くなった。半径方向の厚みが2mmの場合は、どちらもほぼ同じせん断強度であった。
- (3)バイメタル構造のシュリンクフィッターの半径方向の厚さが4mmと2mmのせん断強度を比較すると、厚さ4mmの方がせん断強度は高い。
- (4)スリット数が1と3のバイメタル構造のシュリンクフィッターを用いた締結体のせん断強度を比較したところ、スリット数3のものが高温せん断強度が高くなった。しかし、SUS304単体のシュリンクフィッターに比較すると、スリット数が高温せん断強度に与える影響は少ない。

(5)シュリンクフィッターを用いた締結体の高温せん断強度は、昇温過程と降温過程で大きさが異なるヒステリシス現象を示す。

(6)シャフトにSi₃N₄を用いた場合は、シュリンクフィッターの軸方向の長さを25mmにすることで、600℃で2MPaのせん断強度が得られた。

(7)計算結果より、SUS304とSUS403の厚さ比がおおよそ1:1の、バイメタル構造のシュリンクフィッターが、600℃での高温せん断強度が高い。

本研究の全般にわたり、貴重な助言を賜りました東北大学 加藤康司教授に心より感謝申し上げます。

計算と実験の遂行にあたり、本学4年 木村栄紀氏(現 花王)と杉山佳隆氏(現 沖電気)に多大の御協力を頂きました。

本研究は、昭和63年度 文部省 科学研究費補助金 奨励研究(A)の援助を受けたものである。ここに記して、謝意を表します。

文 献

- (1) M. Langer et al., Ceram Mater Compon Engines, (1986), 1109.
- (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) 宮田ら, 機論, 54-505, A(1988), 1700.
- (5) 新田ら, 機論, 55-510, C(1989), 417.
- (6) 菅井ら, 金属, (1985-5), 34.
- (7) 例えば, 特開昭62-119178.
- (8) 新田ら, 機論, 55-520, C(1989), 3062.

討 論

〔質問〕 船橋 鉦一〔名古屋工業大学〕

異質材料の高温環境下での締めばめについて実用上、有益なデータを提供されたことに敬意を表す。結合度の測定は締結部の軸方向負荷の耐せん断強度から評価されているが、実用的には、強度は円周方向(トルク)に対して求められる頻度も多いと思われる。周方向に対する評価の計画の必要性はあるか。貴研究の両試片の表面あらさは比較的大きいので、仕上時の工具通過条線方向の影響が気になる。接触面内でもたらされるあらさ突起の塑性変形進行の程度は、あらさのりょう線方向に対して、加わる接線力の方向の影響があるので^(付1)、本研究における軸方向と周方向とでは締結強度に差異がありそうだ。ご見解を承りたい。

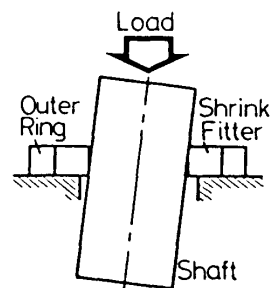
〔回答〕 著者らも、円周方向のせん断強度と軸方向のせん断強度とが完全に一致する可能性は低いと考えている。ただし、ほとんど差がないのか、またある程度の差があるのかは今のところ予測が困難である。

締めばめ締結体の高温強度を改善するために、シュリンクフィッターには3個のスリットが入っている。しかし、スリットを入れることにより、シュリンクフィッターの変形の自由度が増すことになり、例えば軸方向のせん断強度測定の際には、少し誇張して示すと付図1のような接触状態になり、片当たりのためにせん断強度が上昇することになる。また、円周方向のせん

断強度を測定する場合でも、スリット部分で片当たりが予想される。

したがって、円周方向のせん断強度と軸方向のせん断強度に差異があった場合には、その主な原因は巨視的な接触状態の差異によるものだろうと考える。

表面微小突起の垂直変形がセラミックス-金属の締結強度を下げることは、理論的・実験的に明らかになっている^(付2)。質問者のご指摘のとおり表面微小突起にせん断力が組合されれば、突起の垂直方向変形量は



付図 1 セン断強度測定中の締結体

(付1) 船橋・中村・ほか, 潤滑, 33-10, (1988), 783.

(付2) Kato, K., Kayaba, T., Nitta, I. and Shimoda, S., Trans ASME J. Vib. Acoust Stress Reliab Des., 111-3(1989), 318.

さらに大きくなり、より締結強度を下げることも予想される。しかし、せん断強度測定の実験においては片当りの影響のほうが大きいため、表面微小突起の影響は観察されなかった。片当たりの影響を少なくすることができれば、せん断強度測定の際に表面微小突起の影響があらわれてくるものと思う。そのときには、表

面微小突起の変形の影響を考慮するために、質問者のご指摘が参考になると考える。

また、締結体の強度評価に軸方向のせん断強度を用いたのは、比較的簡単に強度が測定できるためである。円周方向のせん断強度は実用的に重要であるため、以前よりこれの測定を行いたいと考えていた。